

일반연구

2023-05

대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 절감 편익 산정 연구

Evaluating the Benefits of Ship Waiting Times Reduction
Using Queueing Models

조아현·이화섭·조성현



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 절감 편익 산정 연구

Evaluating the Benefits of Ship Waiting Times Reduction
Using Queueing Models

조아현 · 이화섭 · 조성현



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	조아현, 이화섭, 조성현
내부연구진	연구책임자 조아현 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원 공동연구원 이화섭 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원 공동연구원 조성현 한국해양수산개발원 항만연구본부 연구원

연구기간	2023. 1. 1. ~ 2023. 10. 31.
------	-----------------------------

보고서 집필내역

연구책임자	조아현 연구총괄, 제1장, 제3장 일부, 제4장, 제5장
내부연구진	이화섭 제2장 일부, 제3장 일부 조성현 제2장 일부, 제3장 일부

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

항만부문 예비타당성조사 표준지침(이하 ‘표준지침’)은 항만부문 건설사업의 시행 여부를 결정하는 기준이다. 표준지침 중 경제성분석은 국가 재정의 효율적 집행을 위한 핵심적인 척도로 사용된다. 표준지침의 경제성분석에서 항만 사업 가결 여부에 가장 큰 비중을 차지하는 것이 선박대기비용 절감 편익이다. 본 연구는 표준지침의 선박 대기비용 절감 편익 산정 방법론의 혁신을 목적으로 수행되었다.

2000년, 표준지침의 초판이 발간되면서 선박대기비용 절감 편익을 산정하기 위해 부선하역 가정에 기반한 방법론을 도입하였다. 그러나, 부선하역 가정에 기반한 편익 산정 방법론은 비과학적이고 우리나라 항만 상황에 맞지 않는 등 비현실적인 측면이 존재한다는 이유로 많은 비판을 받아왔다. 이후 2001년에 표준지침 개정판, 2014년에 표준지침(제3판)이 발간되면서 부선하역 기반 방법론과 관련된 몇 가지 비현실적인 가정을 개선했으나, 여전히 편익 산정 방법론의 근본적인 문제점이 제기되고 있다. 이에 따라 표준지침에 의거한 경제성 분석의 정확도와 신뢰도가 의심되는 상황이다.

본 연구는 부선하역 가정에 기반한 기존 선박대기비용 산정 방법론의 이론적, 현실적 한계를 극복하고 보다 과학적이고 합리적인 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론을 개발하는 것에 중점을 두었다. 이를 위해 본 연구는 Port-MIS 데이터를 활용하여 실제 선박 도착률과 서비스율에 대한 통계적 검정을 수행하고, 항만 시스템에 적합한 대기행렬모형을 개발하여 항만 내 선박의 대기 방식을 현실적으로 반영할 수 있도록 하였다.

또한, 본 연구에서 제안한 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론의 예비타당성조사 활용 가능성을 검증하기 위해 진해신항(1단계) 및 부산 제2신항 건설사업을 대상으로 사례 연구를 수행했다. 사례 연구 결과, 본 연구에서 제안한 방법론은 기존 부선하역 가정 방법론보다 항만 내 선박의 대기 방식을 현실적으로 반영하였으며, 더 높은 편익을 도출하였다.

본 연구는 항만 부문 예비타당성조사에서 선박대기비용 절감 편익 산정을 위한 과학적이고 현실적인 방법론을 제시했다는 점에서 큰 의미를 지닌다. 이 점에서, 이 연구는 학술적으로 선도적이며 정부 정책에 실질적으로 활용될 수 있는 연구이다. 과학

적이고 합리적인 경제성분석 방법론을 통해서 항만 시설의 필요성과 시기를 보다 정확하게 평가하고, 국가 재정의 효율적인 집행을 바탕으로 국가 및 지역경제 발전에 기여할 수 있는 근거를 마련하였다.

본 연구를 진행한 조아현 박사와 연구진의 노고에 깊이 감사드리며, 본 연구에 조언과 지원을 아끼지 않은 많은 전문가에게도 진심으로 감사드린다. 또한, 본 보고서의 출판에 도움을 주신 모든 분께 깊은 감사를 드린다. 마지막으로, 본 연구보고서가 우리나라 항만 부문의 예비타당성조사에 새로운 패러다임을 제시하고, 우리나라 항만 건설 사업 타당성 평가에 있어 새로운 기준이 되기를 바란다.

2023년 12월
한국해양수산개발원
원장 김 종 덕

목차

요약 _ i

Executive Summary _ ix

01

서론 _1

제1절 연구 배경 및 목적	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적	8
제2절 연구 범위 및 방법	9
1. 연구 범위	9
2. 연구 방법	10

02

이론적 배경 및 선행연구 검토 _13

제1절 대기행렬모형 이론 검토	13
1. 대기행렬모형의 개념 및 적용	13
2. 대기행렬모형 개선: M/G/c	19
제2절 항만 이론분포 검정 방법론 검토	21
1. 이론분포 검정 방법론 검토	21
2. 항만 입출항 자료 분포 검정 연구	27
제3절 항만 부문 대기비용 산정 연구	30
1. 항만 부문 선박대기시간 및 대기비용 산정연구	30
2. 항만 부문 대기행렬이론 적용 연구	30
제4절 도로 및 철도 등 타 SOC 부문 문헌 검토	31
1. 대기시간 산정 방법	31
2. 시간가치 편익 및 원단위	38
제5절 시사점 및 연구 차별점 도출	44

03

선박대기시간 추정 방법론 _47

제1절 선박대기시간 추정을 위한 기초자료 검토	47
1. Port-MIS 선박 입출항 데이터	47
2. 선박 입출항 데이터 전처리	50
3. 선박 도착률과 서비스율 산정	56
제2절 이론분포 검정	66
1. 이론분포 검정 절차	66
2. 부두별 선박 대기행렬표	71
제3절 대기행렬모형 가정 개선 및 현실화	75
1. 초과 물동량 배분 방안 검토	75
2. 컨테이너 선박 평균 적재율 산정	78
3. 선박 대기에 따른 환경비용 원단위 개발	81
4. 입항 선박 표준 선형 설정	84
5. 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소를 고려한 대기시간 산정	85
제4절 소결	88

04

선박대기비용 절감 편익 산정 사례분석 _91

제1절 사례1: 부산항 진해신항(1단계) 건설사업(2022)	91
1. 부산하역 가정 편익 산정	91
2. 대기행렬이론 적용 편익 산정	98
제2절 사례2: 부산항 제2신항 건설사업(2021)	109
제3절 소결	115

05

결론 및 활용 _119

제1절 요약 및 결론	119
제2절 연구 활용 및 정책 제언	121

1. 정책적 효과 및 활용	121
2. 학술적 효과 및 활용	123
제3절 한계점 및 후속연구	125

참고문헌_129

부록_137

1. 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소를 고려한 대기시간 산정	137
2. 국내 컨테이너 부두별 대기행렬표	150

표 목차

〈표 1-1〉 항만개발사업의 경제적 편익 항목	2
〈표 1-2〉 항만개발에 따른 경제적 편익 항목(표준지침 제3판)	5
〈표 2-1〉 항만 입출항 자료 분포 검정 사례 연구 정리	29
〈표 2-2〉 공항 부문 예비타당성조사 편익 항목 및 측정 단위	32
〈표 2-3〉 항공 여객 1인당 시간가치(2011년 기준)	33
〈표 2-4〉 항공화물 1톤당 시간가치(2011년 기준)	33
〈표 2-5〉 업무통행 시간가치(2016년 기준)	35
〈표 2-6〉 도로 및 철도 부분 업무통행 시간가치 원자료	36
〈표 2-7〉 지역 간 목적별 통행의 승용차 업무통행 시간가치 대비 비율	37
〈표 2-8〉 수단별 평균 통행 시간가치(전국권)	37
〈표 2-9〉 화물 시간가치의 대표적 산정 방법 및 장단점	38
〈표 2-10〉 운송화물 품목별 시간가치	39
〈표 2-11〉 철도화물 운송 품목별 시간가치	40
〈표 2-12〉 벌크화물 시간가치 산정 사례 비교	40
〈표 2-13〉 선행 연구 정리	41
〈표 3-1〉 부두별관제현황 상세 데이터 예시	48
〈표 3-2〉 시설사용허가현황 상세 데이터 예시	50
〈표 3-3〉 항만 입출항 데이터 상세	51
〈표 3-4〉 분석 대상 컨테이너 부두	51
〈표 3-5〉 선박 입출항 데이터 요약(2022년)	59
〈표 3-6〉 부두별 연도별 선박 입항 횟수	60
〈표 3-7〉 부두별 연도별 선박 도착률(λ)	61
〈표 3-8〉 부두별 5년 평균 접안소요시간	63
〈표 3-9〉 부두별 연도별 서비스율(μ)	64
〈표 3-10〉 대상 부두의 선박 도착률 및 서비스율 산정 결과(최근 5년 평균)	65
〈표 3-11〉 귀무가설/대립가설 설정	67
〈표 3-12〉 부두별 도착 시간 간격 적합도 검정 결과	68
〈표 3-13〉 부두별 서비스시간 적합도 검정 결과	70
〈표 3-14〉 주요 항만 하역시간 평균 및 표준편차(5년 평균, 2018~2022)	72
〈표 3-15〉 부산신항 1부두 (M/G/3): (FCFS/ ∞ / ∞) 성능척도	73

〈표 3-16〉 부산신항 1부두 평균 대기시간(W_q) 산출표 예시	74
〈표 3-17〉 부산신항 5개 부두 적정하역능력	76
〈표 3-18〉 부산신항 5개 부두 서비스율(2018~2022, 5년 평균)	78
〈표 3-19〉 아시아-북미/유럽 노선 컨테이너 선박 평균 적재율	81
〈표 3-20〉 전국 컨테이너 물동량 처리실적(해외지역별)	81
〈표 3-21〉 컨테이너 선박 묘박/정박 시 대기오염물질 배출계수	84
〈표 3-22〉 컨테이너 선박 묘박/정박 시 시간당 연료 사용량 및 대기오염물질 배출량	84
〈표 3-23〉 직전 항만별 부산항 도착 선박 운항 소요 시간 및 지연 시간	87
〈표 4-1〉 기존 예비타당성조사 '외항에서 부선히역'의 경우 적용 편익 및 비용 항목	92
〈표 4-2〉 컨테이너선 1일 용선료 추이	94
〈표 4-3〉 부산의 컨테이너 처리능력 산정	95
〈표 4-4〉 컨테이너 화물의 접안하역과 부선히역 비용 차이(풀컨테이너 기준)	96
〈표 4-5〉 부산항 진해신항(1단계) 단계별 예상 물동량	96
〈표 4-6〉 부산항 진해신항(1단계) 단계별 부선히역 절감 편익	97
〈표 4-7〉 대기행렬이론 적용 선박대기비용 산정 범위	99
〈표 4-8〉 대기행렬 파라미터(2018~2022, 5년 평균)	100
〈표 4-9〉 부산항(신항, 북항) 입항 컨테이너 선박 평균 크기	101
〈표 4-10〉 부산항 권역별 항로 개수 기준	102
〈표 4-11〉 부산항 항로별 정기노선 주당 기항 횟수	103
〈표 4-12〉 사업 시행(with case) 시 대기행렬 모형 결과	103
〈표 4-13〉 사업 미시행(without case) 시 대기행렬 모형 결과	105
〈표 4-14〉 대기오염물질 사회적비용 원단위	106
〈표 4-15〉 부산항 진해신항(1단계) 단계별 선박대기비용 절감 편익 차이	108
〈표 4-16〉 부산항 제2신항 단계별 예상 물동량	110
〈표 4-17〉 부산항 제2신항 단계별 부선히역 절감 편익	111
〈표 4-18〉 사업 미시행(without case) 시 대기행렬 모형 결과	113
〈표 4-19〉 사업 시행(with case) 시 대기행렬 모형 결과	114
〈표 4-20〉 부산항 제2신항 건설사업 단계별 선박대기비용 절감 편익 차이	115

그림 목차

〈그림 1-1〉 글로벌 컨테이너 항만 혼잡도 지수	3
〈그림 1-2〉 전형적인 항만 대기행렬 시스템	6
〈그림 1-3〉 연구 흐름도	11
〈그림 2-1〉 항만 선박 서비스 모델링	14
〈그림 2-2〉 일반적인 이론분포 검정 방법론	22
〈그림 3-1〉 데이터 전처리 과정	53
〈그림 3-2〉 IQR 이상치 제거의 개념	54
〈그림 3-3〉 선박 입출항 시스템 정의	56
〈그림 3-4〉 이론분포 검정 과정	66
〈그림 3-5〉 부산신항 1부두 도착 시간 간격 분포 히스토그램	67
〈그림 3-6〉 부산신항 1부두 서비스시간 분포 히스토그램	69
〈그림 3-7〉 아시아-북미/유럽 노선 컨테이너 선박 평균 적재율(%)	80
〈그림 3-8〉 롱비치항-부산항 선박 운항 시간 분포	88
〈그림 4-1〉 부산항(신항, 북항) 입항 선박 평균 크기(TEU)	101
〈그림 4-2〉 초과 물동량 증가에 따른 선박대기시간(대기비용) 증가 추세	117

약어 목록

- A-D(앤더슨-달링 검정): Anderson-Darling
- AIC(아카이케 정보 기준): Akaike Information Criterion
- AIS(선박자동식별장치): Automatic Identification System
- BIC(베이지안 정보 기준): Bayesian Information Criterion
- CDF(누적 분포 함수): Cumulative Distribution Function
- EDF(경험적 분포 함수): Empirical Distribution Function
- EEA(유럽 환경청): European Environment Agency
- ETB(접안예정시간): Estimated Time of Berthing
- ETD(출항예정시간): Estimated Time of Departure
- FCFS(선입선출): First Come First Served
- GT(총톤수): Gross Tonnage
- IQR outlier(사분위수 이상치 제거): Inter-Quartile Range Outlier
- K-S(콜모고로프-스미노프 검정): Kolmogorov-Smirnov
- MLE(최대우도법): Maximum Likelihood Estimation
- PDF(확률밀도함수): Probability Density Function
- PORT-MIS(해운항만물류정보시스템): Port Management Information System
- SOC(사회간접자본): Social Overhead Capital
- TOS(터미널 운영 시스템): Terminal Operation System
- VOT(시간가치): Value of Time

요 약

대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 절감 편익 산정 연구

조아현 · 이화섭 · 조성현

1. 연구 배경 및 목적

1) 연구 배경

- 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론은 항만 건설 사업 착수 가결 여부에 막대한 영향을 미침
- 선박대기비용 절감 편익은 항만 부문 예비타당성조사 경제성분석의 모든 편익 항목 중에서 가장 큰 비중을 차지함
- 부산항 진해신항(1단계) 건설사업(KDI, 2022a) 예비타당성조사의 경우 시나리오별 총편익 중 부선회역비용 절감 편익은 약 54~56%를 차지
- 광양항 항만자동화 테스트베드 구축(KDI, 2022b) 예비타당성조사 시 총 편익 2,563,296백만 원 중 부선회역비용 절감 편익은 2,144,356백만 원으로 약 83%를 차지
- 선박대기비용은 직접 계산하여 산정하는 것이 바람직하나, 제한된 데이터와 방법론 개발의 어려움으로 인해 그러하지 못하였음

-
- KDI(2014a)에서 제안한 것처럼 선박대기비용은 선박대기시간과 대기비용 원단위를 산출하여 직접 계산하는 방법론이 논리적 타당성 및 현실 부합성 관점에서 바람직함
 - 그러나 선박대기시간과 대기비용 원단위 계산을 위한 통계 자료 확보와 항만 내 선박의 운영 행태를 설명하기 위한 합리적인 방법론의 개발이 어렵다는 한계점이 존재함
 - 기존 예비타당성조사에서는 차선택으로 대기 선박의 부선하역을 가정하고, 선박대기비용을 재항비용과 하역비용으로 대체하여 산정함
 - 그러나, 부선하역은 과거 국내 항만 시설이 부족한 경우 일부 시행된 예가 있을 뿐, 현재에는 거의 시행되지 않고 앞으로도 수행될 가능성은 매우 희박함
 - 2014년, 표준지침(3판)은 다소 비현실적인 부선하역 가정의 한계점 보완을 위해 목적 및 비목적 화물 구분 등 일부 가정을 개선했으나, 여전히 국내 항만 실정과 큰 괴리가 존재하는 실정임
 - 「항만분야 예비타당성조사의 경제성 평가 기준 개선 연구」(KMI, 2016)는 선박대기비용의 직접 산정 가능성을 제기함
 - 데이터 확보 및 수집의 한계, 통일된 방법론 개발의 어려움으로 그동안 시도가 없었던 선박대기비용 절감 편익의 산정 가능성을 분석하여 직접 산정의 필요성 및 가능성을 제기함
 - PORT-MIS를 통해 부두별 대기시간과 대기율, 선석점유율을 도출할 때, 시계열로 구성된 입출항 실적 자료를 활용하여 평균 대기시간 절감 효과를 산정할 수 있음을 확인하였음
 - 이에 따라 선박 도착 간 시간과 서비스시간 분포의 변화, 신규 항만 시설 개발에 따른 선박 대기 감축 효과를 추정할 수 있을 것으로 분석하였음
 - 장기적으로는 대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 산정이 바람직하

다는 공감대가 형성됨

- 대기행렬이론이 적용된 항만 시스템의 주요 요소는 선박(customer), 선석(server) 등이며 항만 내 선박의 대기를 현실적으로 반영하기 위해서는 선석 수, 항만 내 입항 선박 수 및 시스템 제한 등 설정값이 필요함
- KMI(2023)는 처음으로 대기행렬모형의 예비타당성조사 활용 가능성을 검토하였으나 방법론 내 한계점이 존재
 - 구체적으로, 선박 간 도착 시간 간격 및 선석 내 서비스시간의 분포가 데이터를 통한 통계적인 검증 없이 선행연구를 통해 가정됨
 - 또한, 초과 물동량 할당 방안, 대기 선박의 적재율, 적정 선형 크기, 선박 대기로 인한 환경비용 원단위가 부정확한 한계점이 존재함

2) 연구 목적

- 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론의 고도화
 - 선박 입출항 실적을 통해 도출한 선박 도착 시간 간격 및 서비스시간 확률 분포의 실제 분포를 확인하여 이론적 확률분포와 비교·검토
 - 실증 분석을 통한 대기행렬모형 적용 확률분포 도출 및 항만 내 선박 대기 방식을 반영할 수 있는 대기행렬시스템 구축
- Port-MIS의 선박 입출항 데이터를 바탕으로 산정한 각 부두의 선박 도착률과 서비스율에 대해 엄밀한 통계적 이론분포 검정을 실시
 - 대기행렬모형을 적용한 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론을 예비타당성조사에 활용하기 위해서는 각 부두의 선박 도착률과 서비스율의 이론분포에 대한 통계적인 검증이 반드시 선행되어야 함
 - 또한, 최신 문헌을 조사하여 지수분포 또는 일랑분포 외 이론분포에 대해서도 대기행렬지표를 근사하는 수식을 모색

-
- KMI(2023)의 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론을 개선하고 환경비용의 원단위를 현실화
 - 대기비용 산정 대상이 되는 초과 물동량을 사업 시행 인접 부두의 하역능력에 따라 배분하거나 대기가 적은 부두에 우선 배분하는 방안을 검토
 - 통계에 근거하여 우리나라 항만에 기항하는 컨테이너 선박의 평균 적재율을 도출하고 예비타당성조사의 파라미터값으로 활용
 - 선박 입출항 통계에 근거하여 컨테이너 선박의 평균 크기를 도출하고 현실적인 표준 선형을 설정
 - 선박 대기에 따른 환경비용에 대해 해외 문헌과 전문가 인터뷰를 통해 신뢰도가 높은 원단위 개발

2. 연구 범위 및 방법

1) 연구 범위

- 공간적 범위는 6개 주요 무역항의 컨테이너 부두 21개로 설정
 - 컨테이너선 출입이 빈번한 주요 무역항인 부산, 광양, 인천, 울산, 평택·당진, 대산항을 분석 대상으로 함
 - 각 항만 내 위치한 컨테이너 부두 21개 및 선박이 대기하는 정박지, 묘박지 또한 분석 대상으로 포함됨
- 시간적 범위는 최근 5개년(2018~2022년)으로 설정
 - 부두 내 선석 개수, 평균 선박대기시간, 입항 척수, 부두별 물동량 항목 등에 대해 월간 데이터를 활용
- 내용적 범위는 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론 개선 및 사례

연구로 설정

- 항만 내 선박 간 도착 시간 간격과 서비스시간 분포를 Port-MIS 데이터와 통계적 방법론을 사용하여 검정
- KMI(2023)가 제안한 대기행렬모형 기반 선박대기시간을 추정 방법론의 한계점을 개선
- 본 연구에서 개발한 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론을 예비타당성조사 사례에 적용하여 방법론의 활용 가능성을 검토하고 개선 방안을 도출

2) 연구 방법

- 항만 부분 예비타당성조사 관련 선행연구 검토
 - 항만 분야에 적용된 예비타당성조사 중 선박대기비용 산정 사례와 선행연구 분석을 통해 연구의 차별점 및 개선방안 도출
 - 국내 타 SOC 및 해외 항만의 대기비용 산정 방법론과의 비교
- 데이터 분석 및 통계적 검정
 - 항만의 선박 대기시간 및 서비스시간 분석을 위한 기초자료로 행정 데이터인 Port-MIS를 채택하고, Port-MIS 데이터 중 부두별관제현황과 시설사용허가현황 데이터를 결합하여 활용
 - 콜모고로프-스미노프 검정 방법론을 이용하여 항만 내 선박 간 도착 시간 간격과 서비스시간의 이론 분포를 검정
- 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론 적용 사례 연구
 - 기존 예비타당성조사 사례에 본 연구에서 제안한 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론을 적용하여 선박대기시간 및 대기비용 절감 편익을 산정하고, 한계점 및 개선 방안을 도출

3. 연구 결과

1) 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론 개선

- 국내 21개 컨테이너 부두의 선박 도착 시간 간격과 서비스시간 분포를 검정한 결과, 대체적으로 도착 시간 간격은 지수분포를 따르고, 서비스 분포는 감마분포 또는 로그정규 분포 등을 따르는 것으로 나타남
- 따라서, 모형의 수월성 때문에 널리 쓰이고 있는 M/M/c 모형이 아닌, M/G/c 모형을 사용하여 모형의 정확도와 신뢰도를 높임
- 대기비용 산정의 대상이 되는 초과 물동량을 사업 시행 인접 부두의 하역 능력 또는 서비스율을 기준으로 배분하는 방안을 제안
- 우리나라 항만에 기항하는 컨테이너 선박의 평균 적재율은 약 53%로 나타남
- 선박 입출항 통계에 근거하여 설정한 컨테이너 선박의 현실적인 표준 선형은 6,300TEU로 나타남

2) 방법론 사례 적용 연구 결과

- 진해신항(1단계) 건설사업 사례 연구를 통해 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론의 예비타당성조사 활용 가능성을 검토
- 방법론 간 비교는 편익 산정 대상 물동량 및 하역능력이 동일한 2032년부터 2058년까지의 기간을 대상으로 함
- 기존 부선하역 가정 편익은 10,320,901백만 원으로 나타났으며, 재항비용 절감 편익은 그중 약 23%를 차지, 하역비용 절감 편익은 약 77%를 차지함
- 대기행렬모형을 적용한 선박대기비용 절감 편익은 12,755,448백만 원으로 산정되었으며, 이는 기존 편익과 비교했을 때 124% 수준임

- 선박대기비용 절감 편익 중 체선, 체화, 환경비용의 비중은 각각 51%, 23%, 26%으로 나타남
- 부산 제2신항 건설사업 사례 연구를 통해 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론의 예비타당성조사 활용 가능성을 검토
- 방법론 간 비교는 편익 산정 대상 물동량과 하역능력이 동일한 2041년부터 2056년까지의 기간을 대상으로 함
- 기존 부산하역 가정 편익은 8,773,152백만 원으로 나타났으며, 재항비용 절감 편익은 그중 약 23%를 차지, 하역비용 절감 편익은 약 77%를 차지함
- 대기행렬모형을 적용한 선박대기비용 절감 편익은 91,287,072백만 원으로 산정되었으며, 이는 기존 편익과 비교했을 때 1,041% 수준임
- 이 중 체선비용, 체화비용, 환경비용이 차지하는 비중은 각각 약 51%, 23%, 26%로 나타남

3) 결론

- 본 연구에서 제안한 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 방법론이 기존 부산하역 가정 방법론보다 과학적, 합리적임
- 대기행렬모형 기반 방법론은 항만 혼잡 또는 선석점유율이 증가함에 따라 선박의 대기시간과 대기비용이 기하급수적으로 증가하는 현실을 반영
- 반면, 기존 부산하역 가정 방법론은 항만 혼잡 또는 선석점유율과 관계없이 물동량 증가에 따라 선형적으로 대기시간 및 비용이 증가
- 또한, 적정하역능력은 사회경제적 비용을 최소화하는 수준의 하역능력임에도 불구하고, 기존 방법론은 적정하역능력을 초과하는 물동량에 대해서 부산하역을 가정하는 방식으로 고유(최대)하역능력과 개념을 혼동하여 사용

EXECUTIVE SUMMARY

Evaluating the Benefits of Ship Waiting Times Reduction Using Queueing Models

Ah-Hyun Jo · HwaSeop Lee · Seong-Hyun Cho

1. Research Background and Objectives

1) Research Background

- The methodology for estimating the benefits of reducing ship waiting costs has a significant impact on the decision to launch a new project.
- The benefits of reducing ship waiting costs constitute the largest portion among all benefit items in the economic analysis of preliminary feasibility test in the port sector.
- In the preliminary feasibility test for the construction of the Jinhae New Port(Phase 1) project(KDI, 2022a), the benefit of reducing mid-stream operations cost account for approximately 54-56% of the total benefits across scenarios.
- In the preliminary feasibility test for the construction of a port automation test bed in Gwangyang Port (KDI, 2022b), out of the

total benefit of 2,563,296 million won, the benefit of reducing mid-stream operations cost was estimated to be 2,144,356 million won, representing approximately 83%.

- It is desirable to directly calculate ship waiting costs; however, this has not been possible due to difficulties in data collection and methodological development.
- As proposed by KDI (2014a), it is logical and realistic to directly calculate ship waiting costs by determining ship waiting time and unit waiting cost.
- However, limitations exist in obtaining statistical data for calculating unit waiting time costs and in developing a rational methodology to describe ship operations within ports.
- In existing feasibility tests, as an alternative, the ship waiting cost is calculated by assuming mid-stream operations, substituting the waiting cost with berthing and handling costs.
- However, there have been no executed instances of mid-stream operations domestically, and its practical feasibility remains unlikely.
- KDI (2014a) improved this assumption of mid-stream operations by distinguishing between purpose and non-purpose cargo, but there is still a significant gap between this assumption and the actual conditions in domestic ports.
- ‘A Study on the Improvement of Standards for Evaluating the Economic Efficiency of Pre-feasibility Study on Ports(KMI,

2016)' raises the possibility of directly estimating ship waiting costs.

- By analyzing the possibility of directly calculating the benefits of reducing ship waiting costs, which had not been attempted due to limitations in data acquisition, and the difficulty in developing a unified methodology, it highlights the necessity and potential for direct calculation.
- Utilizing PORT-MIS to derive waiting times, waiting rates, and berth occupancy rates, it was identified that the average waiting time reduction effect could be calculated using time-series arrival and departure data.
- Consequently, it was analyzed that it would be possible to estimate the benefit of reducing ship waiting time coming from changes in arrival intervals, service time distribution, and the development of new port facilities.
- There is a growing consensus that, in the long run, utilizing queueing models for estimating ship waiting costs is desirable.
- The components of the queueing model applied to the port system consist of ship(customer) and berth(server), etc., requiring realistic settings reflecting ship operations within the port system, such as berth numbers, arrivals of ship, and system constraints.
- KMI (2023) first examined the possibility of using the queueing model in preliminary feasibility tests, but there are limitations within the methodology.

-
- Specifically, the distributions of inter-arrival time and service times of ship in the port were simply assumed through previous studies without statistical verification through data.
 - Moreover, there are still limitations concerning inaccurate allocations of over-allocated cargo volume, load factor of waiting ships, standard of ship size, and unit cost of environmental costs due to ship waiting.

2) Research Objectives

- Development of the ship waiting cost estimation methodology based on queueing models for the rational and practical establishment of port construction feasibility test.
- We compare and verify the actual distribution of inter-arrival time and service time of ship derived from empirical data with theoretical probability distributions.
- Methodological improvements through empirical analysis by establishing a queueing system that reflects ship operations within the port and deriving probability distributions applicable to queueing models.
- Conducting rigorous statistical tests on the inter-arrival time and service time of ship, calculated from Port-MIS ship arrival and departure data, to validate against theoretical distributions.
- For utilizing the queueing model-based ship waiting cost reduction benefits estimation methodology in preliminary

feasibility tests, statistical validation of theoretical distributions for the inter-arrival time and service time of ship is a prerequisite.

- Additionally, exploring equations for approximating queueing indicators for theoretical distributions beyond exponential or Erlang distributions by examining recent literature.
- Improvement of the methodology of preliminary feasibility tests conducted by KMI(2023) and rationalizing environmental costs.
- Examine alternatives for allocating excess cargo volume based on the proper cargo handling capacity of adjacent berths in the project or preferentially distributing to berths with less waiting time.
- Derive the average load factor of container ships calling at Korean ports based on statistics and employ this value as a parameter in the preliminary feasibility test.
- Determine the average size of container ships based on empirical statistics data and set a realistic standard ship size.
- Develop a reliable unit environmental costs due to ship waiting based on literature or expert interviews.

2. Research Scope and Methodology

1) Research Scope

- The spatial scope of this study is 21 container berths of 6

trade ports.

- Analysis focuses on major trading ports with frequent container ship traffic: Busan, Gwangyang, Incheon, Ulsan, Pyeongtaek-Dangjin, and Daesan port.
- It includes an analysis of the 21 container berths of 6 trade ports, as well as the anchorage and mooring areas where ships wait
 - The time scope is set to the most recent five years (2018-2022).
- Monthly data is utilized for metrics such as berth capacities, average ship waiting times, the number of arrivals, and cargo volumes, etc.
 - The content scope is set to the improvement of the methodology for estimating the benefits of reducing ship waiting costs and case studies applying this method to previous preliminary feasibility tests in port sector.
- Verifying the distribution of inter-arrival time and service times of ship within ports using Port-MIS data and statistical methodologies.
- Improving upon the limitations of the ship waiting time estimation methodology based on queueing models proposed by KMI (2023).
- The benefit calculation methodology based on the developed queueing model is applied to a case study of preliminary feasibility tests in port sector to examine its applicability and derive improvement measures.

2) Research Methodology

- Review of literature related to preliminary feasibility test in port sector.
 - The contributions of this research are derived by analyzing previous studies of ship waiting time and cost estimations within preliminary feasibility tests applied in the port sector.
 - Comparison of the methodology with other SOC in Korea and methodologies for estimating the benefits of reducing ship waiting costs.
- Data analysis and statistical test
 - Port-MIS, an administrative data source, is adopted as the primary data for analyzing ship waiting times and service times in ports. Data on 'berth control status' and 'facility usage permissions' in Port-MIS are combined and utilized.
 - Statistical methodologies are used to verify the theoretical distribution of inter-arrival and service time of ship in the port.
- Case study applying the queuing model-based benefit estimation methodology.
 - The queuing model-based methodology proposed in this study is applied to previous preliminary feasibility test to calculate ship waiting times and the benefits of reducing waiting costs. The study identifies limitations and future research topics.

3. Research Result

1) Queuing Model-Based Benefit Estimation Methodology

- The examination of inter-arrival time and service time distributions at 21 domestic container terminals showed that, generally, the distributions of inter-arrival time follow an exponential distribution, while service time follow gamma or log-normal distributions.
- Consequently, to improve the accuracy and reliability of the model, the M/G/c model has been adopted instead of the commonly utilized M/M/c model, despite the latter's ease of use.
- A method was proposed for allocating the excess cargo volume, which is the subject of estimating benefits of reducing ship waiting costs, based on the proper cargo handling capacity or service rate of the adjacent cargo berth.
- The average load factor of container ships calling at Korean ports is approximately 53%.
- Based on ship arrival and departure statistics, the average size of container ships was derived and realistic standard ship sizes were set.

2) Results from Case Studies of Applied Methodology

- The feasibility of applying the queuing model-based benefit calculation methodology was examined through a case study of the Jinhae New Port (Phase 1) construction project.

- Comparative analysis was carried out between methodologies focused on the period from 2032 to 2058, assuming identical cargo forecast volumes and proper cargo handling capacities.
- Under the existing mid-stream operations assumption, the benefit was 10,320,901 million won, with approximately 23% attributed to reduced waiting costs and around 77% to reduced handling costs.
- The ship waiting cost reduction benefit calculated using the queuing model was 12,755,448 million won, representing 124% of the original benefit.
- Among the ship waiting cost reduction benefits, delay in ships, delay in cargoes, and environmental costs accounted for 51%, 23%, and 26% respectively.
- The feasibility of applying the queuing model-based benefit calculation methodology was examined through a case study of the Busan New Port(Phase 2) construction project.
- Comparative analysis was conducted focusing on the period from 2041 to 2056, assuming identical cargo forecast volumes and proper cargo handling capacities.
- Under the existing mid-stream operations assumption, the benefit was 8,773,152 million won, with around 23% attributed to reduced waiting costs and about 77% to reduced handling costs.
- The ship waiting cost reduction benefit calculated using the queuing model was 91,287,072 million won, representing 1,041% of the original benefit. Delay in ships, delay in cargoes,

and environmental costs accounted for approximately 51%, 23%, and 26% respectively.

3) Conclusions

- The methodology for estimating the benefits of reducing ship waiting costs based on the queuing model proposed in this study is more scientific and rational than the existing mid-stream operations assumption methodology.
- The queuing model-based methodology reflects the reality that ship waiting times and costs increase exponentially with port congestion or berth occupancy rates.
- In contrast, the existing mid-stream assumption methodology linearly increases waiting times and costs with cargo volume increases, regardless of port congestion or berth occupancy rates.
- Additionally, despite the proper cargo handling capacity being the level that minimizes socio-economic costs, the existing methodology assumes mid-stream assumption for cargo volumes exceeding this capacity, confusing the concept with maximum handling capacity.

01

서론

제1절 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경

우리나라 예비타당성조사 제도는 대규모 재정사업을 시행하기 전에 사업의 경제적 타당성을 객관적·중립적인 조사를 통해 판단하여 합리적으로 재정이 집행되도록 하기 위한 제도이다. 예비타당성조사 도입 초기에는 재정 운영의 효율성 제고를 위한 경제성 분석만이 실시되었으나, 이후 정책성 분석과 지역균형발전 분석 등이 예비타당성조사에 포함되어 총괄적인 분석이 수행된다. 대체적으로 세 항목 중 경제성 분석의 비중이 가장 크기 때문에 비용/편익 분석 결과가 사업 시행 여부에 많은 영향을 미치는 편이지만, 사업 성격에 따라 각 항목의 비중 및 중요도는 다르게 설정된다(KMI, 2023).

항만 분야 예비타당성조사는 1999년 제주외항 개발사업을 시작으로 2022년 부산항 진해신항(1단계) 건설사업까지 약 50건 이상 이루어져 왔다(KDI, 2021a). 항만 분야의 특수성을 반영한 예비타당성조사 방법론의 표준화를 위해 2000년에 처음으로 「항만 부문 사업의 예비타당성조사 표

준지침 연구」(KDI, 2000)가 발간되었고, 2001년에는 이를 일부 개정한 「항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제2판)」(KDI, 2001)이 발간되었다. 2014년에는 이를 한 차례 더 개정한 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판)」(KDI, 2014a)이 발간되어 현재까지 항만 부문 예비타당성조사의 표준화된 지침으로 활용되고 있다.

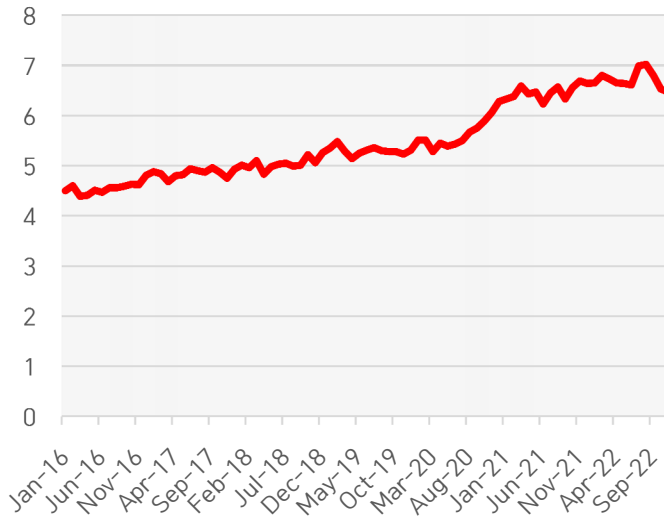
〈표 1-1〉 항만개발사업의 경제적 편익 항목

표준지침 제1판(2000)	표준지침 제2판(2001)	표준지침 제3판(2014)
• 선박대기비용 절감효과 • 선박재항비용 절감효과 • 하역비용 절감효과 • 내륙운송비용 절감효과	• 선박대기비용 절감효과 • 선박재항비용 절감효과 • 하역비용 절감효과 • 내륙운송비용 절감효과 • 화물운송시간 절감효과 • 토지조성효과	• 선박대기비용 절감 • 선박재항비용 절감 • 하역비용 절감효과 • 선박운항비용 절감효과 • 내륙운송비용 절감효과 • 화물운송시간 절감효과 • 환적화물 수입증대효과 • 토지조성효과

자료: KMI(2022), 항만 부문 경제적 편익 항목의 개선방안 연구

항만 개발 사업 경제성분석의 모든 편익 항목 중 가장 큰 비중을 차지하는 것이 선박대기비용 절감 편익이기 때문에 선박대기비용 산정 방법론은 예비타당성조사 결과에 큰 영향을 미치며, 사업의 가결 여부를 결정하는 주요한 요소이다. 예를 들어, 2022년 실시된 「광양항 항만자동화 테스트베드 구축」(KDI, 2022b) 예비타당성조사의 총편익 2,563,296 백만 원 중 선박 대기과 관련된 편익은 2,144,356 백만 원으로 약 83%를 차지했으며, 2022년 「부산항 진해신항(1단계) 건설사업」(KDI, 2022a) 예비타당성조사의 경우 시나리오별 총편익 중 약 54~56%를 차지했다. 〈그림 1-1〉에서 확인할 수 있듯 글로벌 항만 혼잡도의 증가추세를 고려하면, 항만 부문 예비타당성조사에서 선박대기비용 절감 편익의 중요도는 더욱 증가할 것으로 예상된다(KMI, 2023).

〈그림 1-1〉 글로벌 컨테이너 항만 혼잡도 지수



자료: Clarksons Research(검색일: 2023.04.17.)을 바탕으로 KMI 재구성

위에서 언급한 두 사례를 포함한 대부분의 국내 예비타당성조사에서 선박대기비용 절감 편익은 부선하역비용의 절감 편익으로 대체하여 계산되어 왔다. 부선하역이란 부두에 선박을 직접 접안시킬 수 없을 때 주로 시행하는 방식으로, 선박에서 부선으로 먼저 화물을 하역하고 이후 부두에 여유가 생기면 부선을 부두에 접안시켜 화물을 하역하는 방식을 말한다. 부선하역은 항만시설이 부족하거나 혼잡 등으로 선박대기시간이 매우 긴 항만에서 활용될 수 있지만, 우리나라에서는 현실적인 이유로 시행되지 않는 하역 방식이다.

부선하역에 따라 발생하는 비용은 선박재항비용과 하역비용으로 구분할 수 있다. 선박재항비용은 선석에 접안한 선박이 하역하는 시간 동안 발생하는 비용이다. 부선에 화물을 하역하는 방식은 부두에 직접 하역하는 방식 대비 생산성이 떨어진다. 이에 따라 하역을 위한 선박 재항시간이 길어

지고, 선박재항비용은 증가한다. 다음으로, 하역비용은 부선후역에 의해 하역 횟수가 증가함에 따라 발생하는 추가 비용을 의미한다. 선석에 여유가 없을 때 활용하는 부선후역은 일반적으로 선박에서 선석으로 하역(1회)하는 것보다 선박에서 부선, 부선에서 선석(2회)하기 때문에 추가 비용이 발생한다.

기존 항만 부문 예비타당성조사의 경제성 평가에서는 선박대기비용 절감 편익을 산정하기 위해 부선후역을 가정하였고, 부선후역의 대상이 되는 물동량은 부두의 수요 예측값에서 적정하역능력을 제외하여 계산하였다. 즉, 적정하역능력을 초과하는 물동량은 부선으로 하역한다고 가정한 것이다. 그러나, 이는 적정하역능력의 정의를 고려한다면 매우 비합리적인 가정이다. 적정하역능력은 항만의 최대하역능력이 아니라, 선박 및 화주의 대기비용과 항만의 서비스 제공 비용의 합, 즉 사회적비용을 최소화하는 항만의 하역능력이다. 항만에 따라 조금씩 다르지만 부산신항의 적정하역능력은 선석점유율 55~70%를 목표로 하여 산정된다. 이는 적정하역능력을 초과한 물동량에 대해서도 충분히 해당 선석에서 하역할 수 있다는 의미이다. 따라서, 기존 예비타당성조사의 부선후역 가정 방법론은 실제로 쓰이지도 않을 뿐만 아니라, 가정을 적용하는 과정에서도 잘못된 개념이 쓰이고 있으므로 매우 비합리적인 가정이라고 할 수 있다.

또한, 부선후역은 접안하역에 비해 생산성이 16%에 불과하여 하역시간이 접안하역에 비해 6배 이상 소요되기 때문에 정시성 및 빠른 배송을 요구하는 컨테이너선 특성상 부선후역을 위해 대형선이 대기한다는 것은 상식에 부합하지 않는다는 지적이 끊임없이 제기되고 있다(KMI, 2022). 해상에서 대형 컨테이너선에서 부선으로 컨테이너를 하역하는 것은 기술적으로 쉽지 않은 일이고, 위험도도 매우 높다. 전 세계적으로 부선후역이 실제로 행해지는 경우도 거의 없다. 긴급을 요구하는 외국 환적화물의 경우에도 위험하고 비효율적인 부선후역을 감수할 만큼 반드시 우리나라에 환적

화물을 처리할 이유가 없다는 점도 부산하역 가정의 비현실적인 측면으로 지적되고 있다.

이처럼 선박대기비용은 그동안 대기 선박의 부산하역 가정을 통해 선박 재항비용과 하역비용으로 산정되어 왔으나 이는 현실과 맞지 않는 가정이다. 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(3판)」(KDI, 2014a)에서 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(2판)」(KDI, 2001)의 부산하역 가정을 최소화했지만, 목적/비목적 화물의 불분명한 구분, 화물 인접 항 설정의 임의성, 육상교통비용 절감 편익 산정의 어려움 등 비현실적 가정이 여전히 존재하여 현실과 추정 방법론 간 괴리가 큰 실정이다.

선박대기비용은 선박의 실제 대기시간을 산출하여 직접 계산하는 것이 논리적 타당성 및 현실 부합성 면에서 바람직하다. 그러나 대기시간과 단위 시간 비용(원단위)을 도출하기 위해 필요한 데이터 입수가 어렵고, 항만 내 선박 대기 방식을 정확하게 설명할 수 있는 과학적인 방법론이 부재하여 선박대기비용을 직접 산정하지 못했다. 이로 인해 국내 예비타당성조사에서 선박대기시간이 직접 추정된 사례는 현재까지 존재하지 않으며, 앞서 언급한 부산하역 가정이 예비타당성조사에 적용된다.

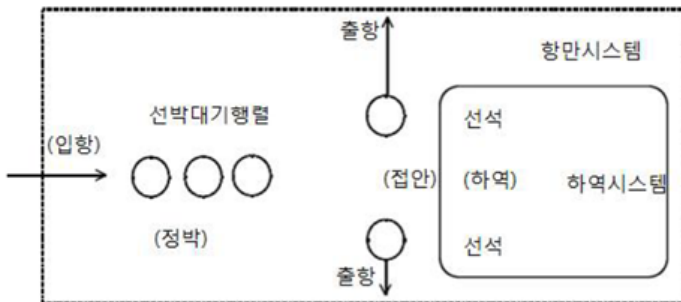
〈표 1-2〉 항만개발에 따른 경제적 편익 항목(표준지침 제3판)

편익 항목	미시행 시	비'컨'화물	컨테이너화물	
			수출입화물	환적화물
선박재항비용 절감효과	해당 항만 이용 (부산하역)	목적 화물	인접 항에 여유가 없는 경우	-
하역비용 절감효과				-
선박운항거리 절감효과	인접 항만 이용	비목적 화물	인접 항에 여유가 있는 경우	-
내륙운송비용 절감효과				-
환적화물 유지효과	-	-	-	○

자료: KDI(2014a), 항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판).

한편, KMI(2016)는 데이터 확보 및 방법론 개발의 어려움으로 수행되지 못했던 선박대기비용 절감 편익의 직접 산정이 충분히 가능하다고 판단하였다. 더불어, 중장기적 관점에서 대기행렬이론을 활용한 선박대기비용 산정 방법을 적용하는 것이 바람직하다고 주장하였다. 항만 내 선박이 운영되는 방식은 대기행렬 시스템으로 표현할 수 있다. <그림 1-2>와 같이 선박(Customer)은 선석(Server)에서 서비스를 받기 위해 대기하며, 선석 개수, 항만 내 입항이 가능한 선박 척수와 같이 항만 내 선박 운영방식을 현실적으로 반영할 수 있는 파라미터값을 지정하면 항만 내 선박대기비용을 더 정확하게 추정할 수 있다.

〈그림 1-2〉 전형적인 항만 대기행렬 시스템



자료: 신승식(2015), 항만건설 예비타당성조사의 편익 산정 개선에 대한 연구

선박대기비용 절감 편익의 직접 산정에 대한 수요에 따라 KMI(2023)는 해운항만물류정보시스템(Port-MIS: Port Management Information System) 데이터와 대기행렬모형을 활용하여 선박대기비용을 산정하는 방법론을 제안하였다. 사업 시행/미시행에 따른 선박의 이론적 대기시간 차이를 계산하고 체선, 체화, 환경비용의 원단위를 적용하여 사업 시행 시 선박대기시간 절감 편익을 산정하였다. 부산항 진해신항(1단계) 건설사업을 바탕으로 사례 적용 연구를 수행한 결과, 대기행렬모형 기반 방법론을 적

용하여 산정한 선박대기비용 절감 편익은 9,611,865백만 원으로 산정되었으며, 총 비용 중 체선비용, 체화비용, 환경비용이 차지하는 비중은 각각 15%, 68%, 17%로 나타났다(KMI, 2023).

그러나, KMI(2023)가 제안한 대기행렬모형 방법론에는 적용된 가정 및 대기비용 원단위에 한계점이 존재하여 예비타당성조사에 당장 활용하기에는 무리가 있다. 첫째, 선박 도착 시간 간격과 선석에서의 서비스시간이 데이터를 통한 통계적 검증 없이 지수분포를 따른다고 가정되었다. 각 부두의 도착률과 서비스율이 실제로 가정된 이론분포를 따르는지 검정하였으나 부두마다 서로 다른 이론분포 형태를 지닌 것으로 나타났다. 또한, 대부분 부두의 도착률과 서비스율이 대기행렬모형에 적용하기 어려운 베타분포 등의 형태로 나타났다. 따라서, KMI(2023) 연구는 선박의 도착 시간 간격과 서비스시간이 지수분포를 따른다고 임의로 가정하고 분석을 수행했다.

둘째, 부산항 진해신항(1단계) 건설사업 사례 연구에서 다소 비현실적인 가정을 적용하였다. 위 연구에서는 대기비용 산정의 대상이 되는 초과 물동량을 사업 시행 인접 부두에 균일하게 배분하는 것으로 가정하였으나 하역능력이 상이한 부산신항 터미널에 균일하게 물동량이 배분되는 것은 비현실적인 가정이다. 또한, 대기 중인 선박의 화물 적재율을 100%로 임의 가정하고, 컨테이너 선박의 표준 선형으로 기존 예비타당성조사의 4,400TEU를 준용하였다. 그러나 접안을 위해 대기 중인 선박의 화물 적재율이 모두 100%라는 것은 현실적으로 맞지 않는 가정이며, 표준 선형을 4,400TEU로 선정한 것 역시 최근 선박의 대형화 추세를 고려하면 다소 비현실적인 가정이다. 마지막으로, 환경비용 절감 편익을 산정하기 위해 적용된 환경비용 원단위가 내부 자료에 근거하여 산정되는 등 신뢰도가 매우 낮다.

한편, KMI(2023)는 선박의 대기시간 산정에 표류(Drifting), 감속 운항(Slow steaming), 기항 취소(Skipping)로 인한 대기시간이 고려되어야 한

다고 주장하였다. 그러나, 감속운항, 표류, 기항 취소를 추정하기 위한 데이터와 방법론이 부재하여 구체적으로 추정하지 못하였다. 선박의 항만 대기시간이 길어질 때 발생하는 정박료와 항만 혼잡으로 인한 안전 문제 등 위험 증가로 손실이 발생하여 선박은 항만의 정박지 이용을 기피하게 된다. 이에 따라, 선박이 실질적으로 대기하는 시간은 Port-MIS 등 시스템에 기록된 시간보다 길다.

2. 연구 목적

본 연구의 목적은 합리적이고 현실적인 항만 건설 타당성 확립을 위해 대기행렬모형 기반 선박대기비용 산정 방법론을 고도화하는 것이며 구체적으로는 다음과 같이 4개로 구분할 수 있다. 첫째, Port-MIS 선박 입출항 데이터를 바탕으로 산정한 각 부두의 선박 도착률과 서비스율에 대해 엄밀한 통계적 이론분포 검정을 실시한다. 대기행렬모형을 적용한 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론을 예비타당성조사에 활용하기 위해서는 각 부두의 선박 도착률과 서비스율의 이론분포에 대한 통계적인 검증이 반드시 선행되어야 한다. 또한, 최신 문헌을 조사하여 지수분포 또는 일랑분포 외의 이론분포에 대해서도 대기행렬지표를 근사하는 수식을 적용한다.

둘째, KMI(2023)의 예비타당성조사 사례 연구에서 적용된 편익산정 방법론의 가정을 검토하고 환경비용의 원단위를 현실화한다. 대기비용 산정의 대상이 되는 초과 물동량을 사업 시행 인접 부두의 하역능력에 따라 배분하거나 대기가 적은 부두에 우선 배분하는 방안을 검토한다. 또한, 통계자료에 근거하여 우리나라 항만에 기항하는 컨테이너 선박의 평균 적재율을 도출하고 예비타당성조사의 파라미터값으로 활용한다. 마찬가지로 선박 입출항 통계에 근거하여 컨테이너 선박의 평균 크기를 도출하고 현실적인

표준 선형을 설정한다. 선박 대기로 인한 환경비용은 해외 문헌과 전문가 인터뷰 등을 통해 신뢰도가 높은 원단위를 개발한다.

셋째, 본 연구에서 제안한 편익 산정 방법론을 실제 예비타당성조사 사례에 대입하여 기존 편익 산정 방법론의 편익 결핍값과 비교한다. 기존 편익 산정 방법론에서 적용한 부선회역 가정은 이용 가능한 선석이 없을 경우 선박이 부선에 먼저 하역하는 것을 가정하며, 선박대기시간 증가에 따른 비용은 고려되지 않는다. 그러나 대기행렬 이론을 통해 선박 대기비용을 직접 추정하면 선박대기시간 증가에 따라 비례하여 증가하는 비용을 고려할 수 있다. 예를 들어, 체선비용, 체화비용, 대기오염비용, 생산지연비용 등이 도출된다. 본 연구에서는 부산항 진해신항(1단계) 건설사업(2022)과 부산항 제2신항 건설사업(KDI, 2021b)에 대해 사례 분석을 진행하였다.

제2절 연구 범위 및 방법

1. 연구 범위

본 연구는 컨테이너선 출입이 잦은 주요 6개 무역항의 컨테이너 부두를 공간적 범위로 설정했다. 구체적으로는 부산, 광양, 인천, 울산, 평택·당진, 대산항이 대상 항만에 포함되며, 선박의 하역 작업이 발생하는 부두 시설과 선박이 대기하는 정박지 및 묘박지에 대한 정보를 활용하였다. 이 중, 4장의 사례 연구는 부산항 신항을 대상으로 수행된 최근 2개의 예비타당성 조사인 「부산항 진해신항(1단계) 건설사업(2022)」과 「부산항 제2신항 건설사업(2021)」를 대상으로 설정하였다.

컨테이너 부두는 양곡부두, 석탄부두와 같이 전용률이 매우 높은 부두로, 이러한 부두에서는 항만 내 선박의 운항 메커니즘이 비교적 단순하여 대기시간 및 서비스시간을 관측·모형화하기에 편리하다. 또한 컨테이너 화물은 단위 중량당 부가가치가 높고 국내 항만에서 Port-MIS 화물 분류상 금액 기준 가장 많은 물동량이 발생하는 화물이다. 또한, 항만 개발 사업 중 컨테이너 부두의 예비타당성조사가 가장 빈번하게 다뤄지므로 중요도가 높다. 본 연구의 데이터 수집 범위는 2018년 부터 2022년까지 최근 5개년으로 설정했다.

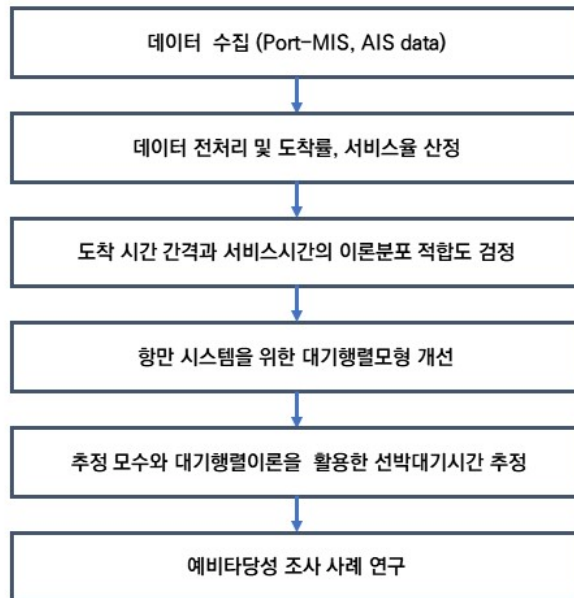
2. 연구 방법

본 연구에서 제안한 대기행렬모형에 활용되는 기초자료는 Port-MIS 데이터로부터 얻었다. 구체적으로, Port-MIS의 자료 중 ‘부두별관제현황’과 ‘시설사용허가현황’ 데이터를 결합하여 활용했다. Port-MIS 데이터는 접근이 용이한 공공 데이터이며, 국가 기관에 의해 지속적으로 관리되기 때문에 높은 신뢰도를 지닌다. 먼저, 부두별관제현황은 선박의 최초 입항부터 출항까지 접안 및 이안을 위해 사용한 항만 시설 정보와 각 시간 데이터가 모두 포함되며, 이를 통해 선박대기시간 및 서비스시간 산정에 필요한 정보를 얻을 수 있다. 그러나 부두별관제현황 데이터는 선박의 항만 시설 활용 목적에 대한 정보를 담고 있지 않다는 한계점이 있다. 시설사용허가현황 데이터는 이를 보완할 수 있는 선박의 시설 사용 목적에 대한 정보를 포함하고 있어, 본 연구에서는 두 데이터셋을 결합하여 선박대기시간 및 서비스시간 산정에 활용하였다.

「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구 (제3판)」(KDI, 2014a)은 선박대기비용을 산정하는 방법으로 3가지를 제시하였다. 첫째, 선박 입

출항 실적과 회귀모형을 통해 평균 대기시간을 산출하는 방법; 둘째, 대기행렬이론(Queueing theory)을 활용하여 이론적 확률분포와 실제분포를 통계검정(Goodness-of-fit test)함으로써 추정하는 방법; 셋째, 실제 분포나 이론분포에 시뮬레이션 모형을 적용하는 방법이다(KDI, 2014a). 본 연구에서는 이 중 두 번째 방법인 대기행렬이론을 이용하여 선박대기시간을 추정하는 방법을 적용한다. 첫 번째 회귀분석 방법론은 선석이 1개에서 2개로 증가할 때와 4개에서 5개로 증가할 때 동일하게 1개 선석 증가에 따른 대기시간 감소 효과가 적용되므로 한계점이 존재한다. 또한, 세 번째 시뮬레이션 추정 방법은 연구자마다 모형 설정 및 모수 값이 상이하여 예비타당성조사에 적용하기에 한계점이 존재한다. <그림 1-3>은 본 연구의 흐름도를 나타낸다.

〈그림 1-3〉 연구 흐름도



자료: 저자 작성

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제2장은 대기행렬모형의 이론적 배경과 이를 활용한 선행연구를 검토한다. 또한, 항만의 대기시간 추정과 관련된 국내·외 주요 선행연구와 항만 및 타 SOC 부문 예비타당성조사 사례를 조사하고, 기존 연구와의 차별성을 강조한다. 제3장은 선박 도착률과 서비스율의 분포에 대한 통계적 검증을 실시한다. 또한, KMI(2023)의 대기행렬모형을 활용한 선박대기시간 절감 편익 방법론에 적용된 가정을 개선하고 선박 대형화에 따른 편익 항목을 발굴 및 추정한다. 제4장에서는 기존 예비타당성조사 사례를 대상으로 본 연구에서 개선한 대기행렬모형 기반 선박 대기시간 절감 편익 방법론을 적용하고, 기존 연구 방법론과 비교한다. 마지막으로, 제5장은 분석 결과를 요약하고 연구의 활용 방안 및 연구의 한계점을 살펴본다.

02

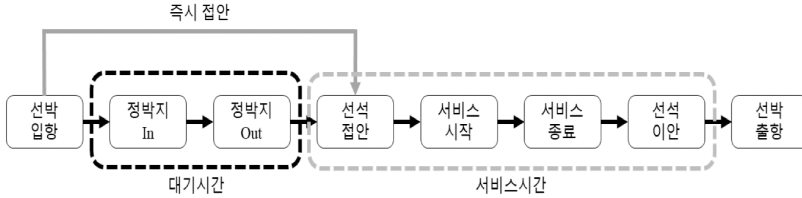
이론적 배경 및 선행연구 검토

제1절 대기행렬모형 이론 검토

1. 대기행렬모형의 개념 및 적용

선박의 대기시간과 서비스시간을 추정하기 위해서는 선박의 입항, 부두 접안 및 이안, 정박지 투묘 및 양묘시각이 필요하다. <그림 2-1>과 같이 선박은 일반적으로 항만구역에 진입한 후 선석에 즉시 접안하거나 선석 유희공간이 없을 경우 정박지에서 대기한다. 선석에 접안하면 하역 작업을 시작하며 작업을 마친 후 선석에서 이안, 항만을 이탈한다. 이때 선박이 정박지에서 대기한 시간은 정박지 투묘 및 양묘시각의 차이를 통해 계산할 수 있다. 또한 선박이 선석에 접안한 후 이안할 때까지의 시간을 서비스시간으로 유추할 수 있다. 또한, 대기행렬모형은 도착 시간 간격(Inter-arrival time)을 주요 확률변수로 활용하는데, 이는 항만 내 순차적으로 입항하는 선박의 입항시각 간 차이를 조사하여 구할 수 있다.

〈그림 2-1〉 항만 선박 서비스 모델링



자료: 이정훈·박남규(2018)

대기시간 분포 추정에 필요한 대표적인 두 확률변수는 도착 시간 간격과 서비스시간이다. 선박 입출항 데이터를 통해 도출한 두 확률변수 값을 활용하여 선박의 대기시간 추정을 위한 대기행렬모형이나 시뮬레이션 모형을 적용하기 위해서는 먼저 확률분포의 검정이 필요하다. 도착 시간 간격과 서비스시간은 지수분포, 일랑분포, 감마분포, 베타분포 등 다양한 분포를 따를 수 있다. 가장 근접한 분포를 지정함에 따라 보다 정확한 대기시간 추정이 가능하다. 본 장에서는 이러한 분포 검정을 위한 방법론에 대해 서술한다.

1) 선박 입출항 분포의 통계적 모수 추정

항만 대기행렬모형의 주요 모수인 선박 도착 시간 간격과 서비스시간의 확률분포를 추정하기 위해서는 먼저 분포의 모수 추정이 필요하다. 선박 입출항 실적 자료를 통해 산정한 변수 값을 통해 도착 시간 간격과 서비스시간의 평균 및 표준편차를 각각 계산한다. 선박 도착 시간 간격 및 서비스시간을 나타내는 일반적인 분포는 감마분포이다(장영태, 1991). 아래 식은 감마분포의 확률밀도함수를 나타낸다.

$$f(X) = a^{\beta} X^{\beta-1} \frac{e^{-aX}}{(\beta-1)!} \quad (\text{식 -1})$$

위 식에서 X 는 시간, α 는 척도모수(Scale parameter), 그리고 β 는 형태모수(Shape parameter)를 나타낸다.

감마분포는 척도 모수인 $\alpha(\alpha > 0)$ 와 형태 모수인 $\beta(\beta > 0)$ 를 가지는 연속확률분포이다. 감마분포는 β 가 정수 형태를 취하면 일랑분포(Erlang distribution), $\beta = 1$ 이면 지수분포를 따르는 특성이 있다. 도착 시간 간격과 서비스시간의 기댓값과 분산을 도출한 뒤, 식 (2)와 (3)을 통해 척도 모수 α 와 형태 모수 β 를 계산할 수 있다.

$$\alpha = \frac{E(X)}{Var(X)} \quad (\text{식 -2})$$

$$\beta = \alpha \times E(X) \quad (\text{식 -3})$$

2) 추정 모수의 통계적 검정

확률밀도함수를 구성하는 모수를 계산한 이후에는 산정된 모수 값을 기반으로 구성된 이론분포와 데이터를 통해 실증적으로 얻어진 실제 분포가 통계적으로 동일한 분포인지를 검정해야 한다. 두 분포가 통계적으로 일치하는지 확인하는 동질성 검정(Test of Homogeneity)에는 다양한 방법론이 존재하며, 이 중 대표적인 카이제곱 검정(Chi-Square test, χ^2 test)을 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (\text{식 -4})$$

단, O : 각 계급 구간 내 실측치의 수
 E : 각 계급 구간 내 이론분포 자료 수
 k : 계급 구간의 수

χ^2 은 통계치인 카이제곱값을 의미하며, i 는 각 관측치, k 는 계급 구간의 수, O 는 각 계급 구간 내 실측치 수, E 는 각 계급 구간 내 이론분포 자료 수를 나타낸다. 위 수식과 항만 부문 데이터를 통해 도출된 도착 시간 간격의 분포와 서비스시간의 분포가 각각 모수를 통해 구성된 이론분포와 동질적인지의 여부를 통계적으로 판별할 수 있다.

이와 같은 동질성 검정을 통해 항만의 도착 시간 간격 분포와 서비스시간 분포가 이론분포와 통계적으로 동일하다고 분석되면, 해당 이론분포를 선박의 대기시간 추정에 활용할 수 있다. 예를 들어, 카이제곱 검정 결과에 의해 선박의 도착 시간 간격 분포가 지수분포, 서비스시간 분포가 일랑분포로 근사한다고 분석된다면, 실증 분포를 대체하여 적합한 모수를 가지는 지수분포와 일랑분포를 항만 내 선박대기시간 추정에 적용할 수 있다. 카이제곱 검정 외 다양한 이론분포 검정 방법론에 대한 설명은 2절에 자세히 기술하였다.

3) 대기행렬모형을 활용한 선박대기시간 추정

모수를 추정 및 검정한 뒤, 이를 대기행렬모형에 적용하기 위해서는 항만의 선박 대기행렬시스템의 특성을 정의 및 가정해야 한다. 예를 들어, 항만 시스템에서는 다음 입출항하는 선박의 선형, 도착 시간, 하역시간에 대한 정보를 사전에 확실히 알 수 없으므로 선박대기시간의 추정은 확률적 모형을 통해 이루어져야 한다. 또한, 선박 이동의 흐름 또한 연속적이지 않고 이산적으로 이루어지기 때문에 확률적 대기행렬모형의 적용이 적절하다. 일반적인 대기행렬시스템의 특성은 다음과 같은 6가지 요소로 구분된다.

- ① 도착 시간 간격(선박 입항시간 간 시간 간격)의 확률분포
- ② 서비스시간(선석에서 하역작업에 소요되는 시간)의 확률분포

- ③ 서비스시설 수(항만의 경우 선석 수)
- ④ 서비스를 제공하는 규칙
- ⑤ 시스템이 허용하는 최대고객 수
- ⑥ 고객의 모집단 크기

먼저, ④ 서비스를 제공하는 규칙의 경우, 항만 특성상 먼저 온 선박이 먼저 서비스를 받는 선입선출(FCFS: First Come First Served) 방식을 적용한다. 실제로는 터미널의 운영 방식에 따라 대형 선박을 우선 처리하거나, 선사와 터미널 간 계약에 의해 하역 작업 우선권을 가질 수 있지만 선박이 임의로 도착하는 것이 아니라 도착예정시간(ETA: Estimated time of arrival)에 인접하여 도착한다는 점을 감안했을 때 선입선출 방식을 적용하는 것이 적절하다. 항만 내 ⑤ 시스템이 허용하는 최대 고객의 수와 ⑥ 고객의 모집단 크기는 일반적으로 무제한으로 가정한다. 한편, ①, ②, ③번 항목은 항만 내 선박의 입항 횟수, 선박의 서비스시간, 선석의 수로 표현할 수 있다.

예를 들어, (M/E/4)으로 표기되는 대기행렬시스템은 다음을 의미한다. 먼저 첫 번째 알파벳은 도착 시간 간격 분포를 나타내는데, M은 마르코프(Markov) 특성을 갖는 분포인 지수분포를 의미한다. 두번째 알파벳은 서비스시간의 분포를 나타내며, E는 일랑분포를 의미한다. 즉, 대기행렬시스템 (M/E/4)은 고객의 도착 시간 간격은 지수분포를 따르고, 서비스시간은 일랑분포를 따름을 의미한다. 마지막으로, 세번째 숫자는 서비스시설의 수를 나타낸다. 이를 항만에 적용하면 위 항만은 4개의 선석을 갖춘 대기행렬 시스템을 의미한다. 한편, 대기행렬 이론에서 주로 사용되는 모수는 아래와 같다(KMI, 2023).

-
- L : 대기행렬 내 평균 고객 수(항만 내에 존재하고 있는 선박의 평균 척수)
 L_q : 서비스를 받기 위해 대기하고 있는 평균 고객 수(대기 중인 선박의 평균 척수)
 W : 각 고객이 시스템에서 보내는 평균시간(선박당 평균 재항시간)
 W_q : 고객당 서비스를 받기 위한 평균 대기시간(선박당 평균 대기시간)
 λ : 단위 시간당 평균 도착 고객 수(평균 도착 척수)
 μ : 단위 시간당 서비스를 끝마치는 평균 고객 수(하역을 마치는 평균 척수)
 ρ : 시설 이용률(선적점유율)

또한, 각 모수 간에는 다음과 같은 관계가 성립됨이 수학적으로 증명되어 있다.

$$L = \lambda W \quad (\text{식 -5})$$

$$L_q = \lambda W_q \quad (\text{식 -6})$$

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (\text{식 -7})$$

도착 시간 간격과 서비스시간의 분포가 결정되면, 식 (5), (6), (7)를 활용하여 선박의 평균 대기 척수, 평균 대기시간, 평균 재항시간 등이 계산된다. 또한, 식 (2), (3)을 통해 항만 시스템 내 평균 도착 척수와 하역을 마치는 평균 척수를 산출할 수 있다.

가장 일반적인 대기행렬시스템(M/M/c) 모형에 대해, L_q 와 W_q 를 추정하는 수식은 식 (8), (9)와 같이 나타난다. 이 모형은 도착 시간 간격 분포와 서비스시간이 모두 지수분포에 따라 무작위적(Random)으로 정해지는 것을 나타낸다. 선박의 도착 시간 간격 분포가 지수 분포를 따른다면, 단위 시간당 선박 도착 수는 포아송 분포를 따른다. 아래 식에서 c 는 선석의 수를 나타낸다.

$$L_q = \frac{\rho(c\rho)^c}{c!(1-\rho)^2} \cdot P_0 \quad (\text{식 -8})$$

$$W_q = \frac{\rho(c\rho)^c}{\mu c!(1-\rho)^2} \cdot P_0 \quad (\text{식 -9})$$

이때, P_0 는 대기행렬 시스템 내에 존재하는 고객의 수가 0일 확률을 의미하며 다음과 같이 계산된다.

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{c-1} \frac{(c\rho)^n}{n!} + \frac{\rho(c\rho)^c}{c!(1-\rho)^2}} \quad (\text{식 -10})$$

2. 대기행렬모형 개선: M/G/c

위에서 서술한 M/M/c 모형의 경우, 시스템 내 예상되는 대기자 수, 예상되는 대기시간 등을 수식 (8)~(9)와 같은 수식으로 간편하게 풀이할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, KMI(2023) 등 항만에서의 서비스시간 분포를 검정한 다수의 연구에 따르면, 선박의 하역시간은 지수분포를 따르지 않는다. 따라서, 선박의 대기시간을 예측하기 위해 일반적으로 활용되는 M/M/c 모형을 사용할 수 없다. 대기행렬 시스템 내 도착 시간 간격 또는 서비스시간이 지수분포를 따르지 않는 경우에는 시스템 내 예상되는 대기자 수, 예상되는 대기시간 등 시스템에 대한 지표를 수식으로 간편하게 근사하는 것이 어렵다. 최근에는 서비스시간이 지수분포를 따르지 않는 경우에도 시스템을 근사하기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다. 예를 들어, Liu & Ge(2018)는 도착률, 서비스시간의 분산, 선석점유율 등을 이용하여 주요 분포 유형별로 아래 수식 (11)~(14)와 같은 관계를 나타낸다고 가정하였다.

$$L = \rho + \frac{\rho^2 + \lambda^2 \cdot Var[t]}{2(1-\rho)^2} \quad (\text{식 -11})$$

$$L = \rho + \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} \quad (\text{식 -12})$$

$$L = \rho + \frac{(1+k)\rho^2}{2k(1-\rho)} \quad (\text{식 -13})$$

$$Var[t] = \frac{a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc}{18}, \quad \text{with } E[t] = \frac{1}{\mu} = \quad (\text{식 -14})$$

즉, 이들은 선석 서비스시간이 지수분포, 열랑분포, 삼각분포 등 다양한 분산형태로 변경될 경우 선박대기시간이 어떻게 추정될 수 있는가에 대한 관계를 가정하고 컨테이너 터미널에서 작업하는 겐트리크레인의 할당문제를 연구하였다.

한편, Lee, A. M., & Longton, P. A.(1959)는 서비스시간의 분포가 감마분포, 베타분포, 로그정규분포 등 일반적인 분포(General distribution)를 따를 때, M/G/c 시스템의 대기시간을 근사하기 위한 수식을 아래와 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} \text{Expected Waiting time of } M/G/c &= \\ \text{Expected Waiting time of } M/M/c &\times \frac{1 + C_s^2}{2} \end{aligned} \quad (\text{식 -15})$$

여기서 C_s^2 는 서비스시간의 변동계수(coefficient of variation)이며 표준편차를 평균으로 나누어($\frac{\sigma}{\mu}$) 계산한다. 위 수식 (15)을 더 풀어서 서술하면 아래 수식과 같다.

$$E(W_q) \text{ of } M/G/c = P_0 \times \frac{\rho(c\rho)^c}{\lambda(1-\rho)^2 c!} \times \frac{1 + C_s^2}{2} \quad (\text{식 -16})$$

Gans et al.(2003)와 Whitt, W(1993)에 따르면 수식 (16)는 훌륭하게 M/G/c 모형의 대기시간을 근사할 수 있으며, 이 근사 방법은 또한 ‘Kingman's law of congestion’이라는 명칭으로 알려져 있다. 본 연구에 따르면, 선박의 도착 시간 간격은 지수분포를 따르지만, 서비스시간은 감마 분포를 따르는 것으로 확인되었다. 따라서, 본 연구에서는 M/M/c 모형이 아닌 M/G/c 모형을 사용하여 선박대기시간을 추정하고 항만별로 대기행렬표를 제시하였다.

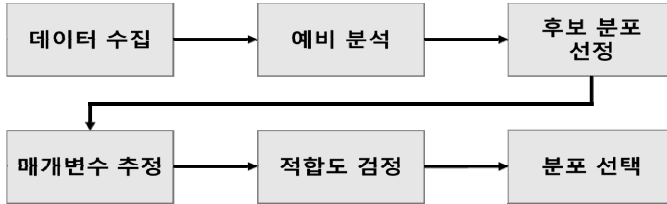
제2절 항만 이론분포 검정 방법론 검토

1. 이론분포 검정 방법론 검토

대기행렬모형을 활용하여 선박대기비용을 산출하기 위해서는 항만 입출항 자료에서 도착 시간 간격과 서비스시간에 대한 실제분포(Empirical distribution)를 정의하고 이론분포(Theoretical distribution)와 적합한지 검정하는 것이 필수적이다. 일반적인 이론분포 검정 방법론은 <그림 2-2>에 나타나 있는 것처럼, 데이터 수집, 예비 분석, 후보 분포 선정, 매개변수 추정, 적합도검정(Goodness-of-fit tests), 분포 선택으로 진행된다.

데이터 수집은 실제 항만에 선박이 입항, 접안, 이안 및 출항 시간뿐만 아니라 정박지 출입 시간에 대해 조사하고 도착 시간 간격 및 서비스시간을 계산하기 위해 기준을 수립하고 분석을 위한 충분한 데이터를 확보하는 단계이다.

〈그림 2-2〉 일반적인 이론분포 검정 방법론



자료: 저자 작성

예비 분석 단계는 수집된 데이터를 히스토그램으로 시각화하여 데이터의 형태를 파악하고 요약 통계(평균, 분산 등)를 분석하여 데이터에 대한 기본 분포를 파악하는 단계이다. 후보 분포 선정은 예비 분석을 기반으로 데이터에 적합한 이론분포 후보를 선정한다.

매개변수 추정 단계는 선정된 후보 분포에 가장 적합한 매개변수를 찾아내고 실제 데이터에 가장 유사한 이론분포를 찾아내는 단계이다. 이 단계에서는 주로 최대우도법(MLE: Maximum likelihood estimation)과 모멘트 방법(Method of moments)이 사용된다. 적합도 검정은 실제 분포와 이론분포 사이의 적합성을 평가해 이론분포가 실제 데이터를 나타내는데 적합한 모형인지 평가하는 통계 테스트이다. 대표적인 적합도 검정 방법론은 카이제곱(χ^2) 검정, 콜모고로프-스미노프(K-S: Kolmogorov-Smirnov) 검정, 앤더슨-달링(A-D: Anderson-Darling) 검정 등이 있다.

마지막으로 테스트 결과를 비교하여 가장 적합한 분포를 결정하기 위해 통계적 측정값인 아카이케 정보 기준(AIC: Akaike information criterion) 혹은 베이저안 정보 기준(BIC: Bayesian information criterion)으로 최종 분포를 선택한다. 그림 〈2-2〉에 나타난 이론분포 검정 방법론의 절차는 데이터의 특성이나 분포에 따라 달라질 수 있다. 본 장에서는 대기행렬모형에 적용하기 위한 이론분포 검정 방법론에서 매개변수 추정, 적합도 검정 및 분포 선택에 대한 이론적 배경을 소개하고자 한다.

1) 매개변수 추정

(1) 최대우도법(MLE: Maximum likelihood estimation)

매개변수를 추정하기 위해서 가장 보편적으로 사용되는 방법은 최대우도법이다(Myung, 2003). 최대우도법은 모수적(Parametric) 데이터의 밀도 추정 방법으로 매개변수 θ 로 구성된 확률밀도함수 $P(x|\theta)$ 에서 데이터가 관측될 확률을 최대화하는 매개변수 θ 값을 찾는 것을 의미한다. 관측된 데이터에 대한 결합확률밀도함수(Joint probability density function)를 식 (17)에 나타나 있는 우도함수(Likelihood function)라고 하며 주로 자연로그를 이용해 식 (18)과 같이 로그우도함수(Log-likelihood function)를 이용한다. MLE는 $L(\theta|x)$ 을 최대로 하는 θ 값을 찾는 것으로 우도값이 클수록 후보분포에서 데이터가 관측될 확률이 높다는 것을 의미하며 이는 실제분포가 후보분포와 유사할 확률이 높다는 의미로 해석할 수 있다.

$$P(x|\theta) = \prod_{k=1}^n P(x_k|\theta) \quad (\text{식-17})$$

$$L(\theta|x) = \log P(x|\theta) = \sum_{i=1}^n \log P(x_i|\theta) \quad (\text{식-18})$$

(2) 모멘트 방법(Method of moments)

모멘트 방법은 관측된 데이터의 모멘트(평균, 분산)와 이론분포의 모멘트가 동일하다고 가정하고 매개변수를 추정하는 방법이다(Wooldridge, 2001). 간단하고 구현이 쉽다는 장점이 있으며 크기가 작은 표본에 적용하기 적합한 방법론이지만 편향된 추정을 할 가능성이 있으며 최대우도법과 비교해 분산이 더 크게 나올 수 있다. 예를 들어, 모멘트 방법으로 지수분포의 매개변수 λ 에 대한 모멘트 추정치를 계산하기 위해서는 식 (19)와 같

이 실제 데이터의 모멘트를 계산한다. 수식 (20)에 나타나 있는 지수분포의 확률밀도함수(PDF: Probability density function)와 이론적 평균이 동일하다고 가정하고 지수분포의 평균값($1/\lambda$)과 실제 데이터의 평균값($\bar{x}$)의 방정식으로 매개변수 λ 를 추정하는 방법이다(식 (19) 참고).

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{식-19})$$

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (\text{식-20})$$

$$\lambda = \frac{1}{\bar{x}} \quad (\text{식-21})$$

2) 적합도 검정(Goodness-of-fit tests)

(1) 카이제곱(χ^2) 검정

카이제곱 검정은 특정 확률 분포를 가정하여 실제 데이터와 예상 데이터 간의 불일치 여부를 측정할 수 있는 모수적 적합도 검정 방법이다 (McHugh, 2013). 카이제곱 검정은 이산형 분산 검정에 적합하지만 연속형 데이터의 구간을 그룹화(bin)하여 적용할 수 있다. 카이제곱 검정은 실제 데이터를 k 개의 상호 배타적 범주로 구분하여 각 범주에 대한 관측치 빈도(O_i)를 계산한다. 그리고 MLE나 모멘트 방법으로 이론분포의 매개변수를 추정하고 각 구간에 대한 기대 빈도(E_i)를 계산한 다음 수식 (22)에 나타나 있는 카이제곱 검정 통계량을 도출한다. 일반적으로 검정 통계량이 유의수준 0.05보다 크면 실제 데이터가 이론분포를 따른다는 귀무가설을 기각할 수 없으므로 실제 데이터가 이론분포를 따르지 않는다고 할 수 없다. 반대로 검정 통계량 값이 유의수준보다 작거나 같으면 귀무가설이 기각되고 대립가설이 채택되어 실제 데이터가 이론분포를 따르지 않는다고 할 수 있다.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (\text{식-22})$$

여기서 i 는 개체, k 는 계급수, O 는 각 계급 구간의 관측치 수, E 는 각 계급 구간의 이론분포의 기대 빈도수임

(2) 콜모고로프-스미르노프(K-S) 검정

콜모고로프-스미르노프(K-S: Kolmogorov-Smirnov) 검정은 데이터의 경험적 분포 함수(EDF: Empirical distribution function)와 이론분포의 누적 분포 함수(CDF: Cumulative distribution function)의 불일치를 측정하는 비모수적(Non-parametric) 적합도 검정 방법이다(Massey, 1951). 카이제곱 검정과 비교하면 K-S 검정은 데이터를 범주화할 필요가 없어 그룹 크기에 민감하지 않으며 EDF와 CDF를 직접 비교하기 때문에 연속형 분포를 검정하는데 더 적합하다. CDF는 이론분포에 따라 달라지는데 지수분포를 가정했을 때 CDF는 식 (23)으로 정의된다.

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [X_i \leq x] \quad (\text{식-23})$$

여기서 i 는 개체, n 은 표본수, x 는 관측치, X_i 는 총관측치 수임

K-S 검정 통계량 D 는 식 (24)로 정의된다. 계산된 검정 통계량은 유의 수준과의 비교를 통해 귀무가설 기각 여부를 결정한다.

$$D = \max |F_n(x) - F_m(x)| \quad (\text{식-24})$$

여기서 $F_n(x)$ 는 관측치의 누적 분포 함수값, $F_m(x)$ 는 이론분포의 누적 분포 값이다.

(3) 앤더슨-달링(A-D) 검정

앤더슨-달링(A-D: Anderson-Darling) 검정은 K-S 검정을 수정한 방법론이며 카이제곱과 K-S 검정과 비교해 분포의 꼬리(tails of distribution)에 더 많은 가중치를 두어 꼬리 영역의 편차에 더 민감하게 반응하는 검정 방법이다(Scholz, 1987). 꼬리 영역의 편차에 더 민감하게 반응하는 것은 분포의 이상치 혹은 극단값의 식별을 정확하게 할 수 있게 한다. 예를 들어 소득 차이나 빈부격차를 나타내는 데이터에서 나타나는 두꺼운 꼬리 분포(heavy-tailed distribution)와 같은 극단적인 형태의 분포를 분석하는데 적절한 방법론이다. A-D 검정은 K-S 검정과 동일한 검정 절차를 따르며 검정 통계량은 식 (25)로 정의된다. A-D 검정은 꼬리 영역에 더 큰 가중치가 할당된 EDF와 CDF를 비교함으로써 두 누적 분포 차이에 제곱 가중치 합을 사용하는 것이 특징이다.

$$A^2 = -n - \sum_{i=1}^n \frac{2i-1}{n} [\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n+1-i}))] \quad (\text{식-25})$$

여기서 i 는 개체, n 은 표본 수, x 는 관측치, $F(x_i)$ 는 관측치의 누적 분포 함수값이다.

(4) 우도비(Likelihood ratio) 기반 검정

우도비 기반 검정은 Zhang(2002)이 제안한 모수적 검정 방법이다. 우도비 기반 검정은 기존 K-S, A-D와 Carmer-von Mises 모형이 기반하고 있는 카이제곱 검정 통계량 식 (22) 대신 우도비 기반 검정 통계량을 적용한 것이다. 이 검정 방법은 실제분포와 이론분포 사이의 편차를 감지하고 무거운 꼬리 분포와 다양한 혼합 분포를 효과적으로 검정하기 위해 제안되었다. Zhang(2002)는 기존 K-S, A-D와 Carmer-von Mises 모형에 우도비를 적용한 검정 통계량 Z_K , Z_A , 과 Z_C 를 제안했으며 식 (26), (27),

(28)에 나타나 있다.

$$Z_K = \max \left(\left(i - \frac{1}{2} \right) \log \frac{i - 1/2}{nF(x_i)} + \left(n - i + \frac{1}{2} \right) \log \left[\frac{n - i + 1/2}{n1 - F(x_i)} \right] \right) \quad (\text{식-26})$$

$$Z_A = - \sum_{i=1}^n \left[\frac{\log F(x_i)}{n - i + 1/2} + \frac{\log 1 - F(x_i)}{i - 1/2} \right] \quad (\text{식-27})$$

$$Z_C = \sum_{i=1}^n \left[\log \frac{F(x_i)^{-1} - 1}{(n - 1/2)/(i - 3/4) - 1} \right]^2 \quad (\text{식-28})$$

여기서 i 는 개체, n 은 표본 수, x 는 관측치, $F(x_i)$ 는 관측치의 누적 분포 함수값이다.

2. 항만 입출항 자료 분포 검정 연구

1) 국내 항만 사례 연구

장영태(1991)는 항만에서의 선박대기시간 추정 방법론의 적용 가능성에 대해 시사했다. 본 연구에서는 선박의 입항, 출항, 하역 및 대기시간 등을 조사하여 도착 시간 간격과 서비스시간에 대한 분포 형태를 추정하고 이론 분포와의 적합도 검정을 위한 카이제곱 검정의 적용, 검증 및 민감도 분석 방법에 대한 일반적인 절차에 대해 소개했다. 장영태(1994)는 인천, 울산, 포항항의 도착 시간 간격 및 서비스시간에 대한 분포를 추정하고 카이제곱 검정을 실시했으며 도착 시간 간격의 경우 지수분포, 서비스시간의 경우 일부 부두 기능에 따라 열랑분포를 따르는 것으로 판단했다.

백인흠(1998)은 인천 내항의 선박 도착 시간 간격을 최소자승법으로 매개변수를 추정했으며 그 결과 지수분포가 가장 유사한 것으로 판명됐다.

하지만 본 연구는 적합도 평가를 진행하지 않아 지수분포가 도착 시간 간격을 대표할 수 있는지는 확인되지 않았다. 박병인(1998)은 부산항 자성대 부두의 도착 시간 간격 및 서비스시간의 분포가 각각 지수분포와 열랑분포를 따른다고 검증했으며 이민규·김근섭(2010)은 베이지안 혼합 정규 분포를 이용해 선박 재항시간 분포에 대해 추정했다. 이정훈·박남규(2018)는 2014년부터 2016년까지 3개년의 부산신항 입출항 자료를 분석하여 도착 시간 간격은 지수분포, 서비스시간은 베타분포로 검증했으나 대기모형 적용을 위해 서비스시간을 지수분포로 가정했다.

2) 국외 항만 사례 연구

Dragovic, Park & Radmilovic(2006)은 K-S와 A-D 검정을 통해 부산항 컨테이너 터미널 도착 시간 간격 및 서비스시간을 지수분포 및 열랑분포로 정의하고 시뮬레이션에 활용했다. Kuo et al.(2006)은 대만 카오슝항을 대상으로 선사별, 선석별, 터미널 및 전체 항만 등으로 분석 대상을 세분화하여 카이제곱 및 K-S 검정을 실시했다. 검정 결과에서 선박 도착 시간 간격은 주로 열랑분포를 따르는 것으로 나타났다. 분석 대상에 따라 매개변수가 얼마나 달라지는지에 대한 분석을 실시했으며 선사별 분석을 통해 노선에 따른 도착 시간 간격은 무작위성이 영향을 받는 것으로 나타났다. 해석하자면 정기선의 경우 무작위성을 따르는 지수분포의 특성이 잘 나타나지 않은 것으로 분석됐다.

Esmer, Yildiz & Tuna(2013)은 터키 이즈미르항의 도착 시간 간격 및 서비스시간을 감마와 열랑 및 베타분포로 나타났다. Özkan, Koçer & Nas(2020)은 선박 크기별 터미널별로 구분해 도착 시간 간격 및 서비스시간을 추정했다. K-S와 A-D 검정을 통해 도착 시간 간격은 감마분포, 서비스시간은 선박 크기별로 로그 정규(Log-normal) 혹은 로그-로지스틱

(Log-logistic)분포로 정의했다. Ansorena & Valdecantos(2021)은 스페인의 발렌시아항의 실제 데이터를 활용해 모먼트 방법으로 도착 시간 간격 및 서비스시간을 정의하고 항만 운영의 효율성을 분석하기 위해 시뮬레이션 모형에 적용했다.

본 사례 연구에 언급된 연구는 항만 입출항 정보를 대기모형에 적용하기 위해 통계적 방법론으로 분포를 검정한 연구를 위주로 분석했으며 통계적 방법론을 포함하여 시뮬레이션 등을 통해 선박 도착 시간 간격 및 서비스 시간 도출한 연구와 그 결과에 대한 요약은 <표 2-1>에 나타나 있다.

<표 2-1> 항만 입출항 자료 분포 검정 사례 연구 정리

저자	검정법	도착 시간 간격	서비스시간
Lai & Shih(1992)	• 카이제곱	• 지수분포	-
장영태(1994)	• 카이제곱	• 지수분포	• 열량분포
백인흠(1998)	• 최소자승법	• 지수분포	-
박병인(1998)	-	• 지수분포	• 열량분포
이정훈·박남규(1998)	• 카이제곱	• 지수분포	• 베타분포
Kia, Shayan & Ghotb (2002)	• 시뮬레이션	• 지수분포	• 열량분포
Lee, Park & Lee (2003)	• 시뮬레이션	• 열량분포	• 베타분포
Dragovic, Park & Radmilovic(2006)	• K-S • A-D	• 지수분포	• 열량분포
Esmer, Yildiz & Tuna(2013)	-	• 감마분포	• 열량분포
Layaa & Dullaert(2014)	• 카이제곱	• 감마분포	• 로그 정규분포
Tang et al.(2014)	• 시뮬레이션	• 지수분포	• 지수분포
Tang et al.(2016)	• 시뮬레이션	• 지수분포	• 열량분포
Özkan, Koçer & Nas(2020)	• K-S • A-D	• 로그 정규분포	• 로그 로지스틱분포

자료: 저자 작성

제3절 항만 부문 대기비용 산정 연구

1. 항만 부문 선박대기시간 및 대기비용 산정연구

1970년대, 선박 대기에 따른 비용을 산정하기 위한 연구로 Goss & Mann(1977)는 장기적기회비용(Long-term opportunity cost) 개념을 제안하고 선박 대기비용 산정 연구의 방법론적 기틀을 확립하였다. 위 연구에서 제안한 회귀식을 통해, 박병인·배종욱·박상준(2009)은 국내 무역항의 선박대기비용을 추정하고, 이를 바탕으로 항만의 서비스 수준을 평가하기 위한 방법을 제안했다. Goss & Mann(1977)의 방법론을 응용하여 Chang et al. (2012)은 선박 적재 화물에 대한 시간가치(VOT: Value of time)를 기회비용 관점에서 산정하였다. 화물의 시간가치를 기반으로 한 화물의 대기비용과 항만시설의 건설 비용 간 상충(trade-off) 관계를 고려한 시뮬레이션 모형을 통해 경제적 관점에서 최적 하역능력을 도출하였다.

한편, 이기열 외(2015)는 선박의 운항 정보를 담고 있는 선박자동식별장치(AIS: Automatic Identification System) 데이터를 활용하여 국내 주요 항만에 입항한 선박의 선석 점유율과 대기율을 산정했다. 김은수·김근섭(2016)은 항만의 서비스지표 중 하나로 사용되는 체선율의 한계점을 극복하기 위해 지난 10년간 국내 주요 항만의 부두·선종별 대기율을 계산했다. 항만의 대기율은 항만의 서비스 수준과 밀접한 관련이 있으므로, 항만 이용자 입장에서 유용한 서비스 지표로 활용될 수 있음을 밝혔다.

2. 항만 부문 대기행렬이론 적용 연구

Laing & Hecker(1989)는 항만 부문에 적용된 대기행렬모형에서, 항만

의 부두 수에 따라 비용을 최소화하는 대기시간과 서비스시간의 최적 비율이 변함을 분석했다. 특히, 선박의 대기비용은 부두 수가 감소함에 따라 지속적으로 증가하는 것을 확인했다. Oyatoye et al. (2011)은 항만 부문 대기행렬모형 적용을 통해, 항만 혼잡의 발생 이유는 항만 시설의 부족뿐 아니라 항만 시스템의 비효율적인 운영에 기인한다고 주장했다. Liu & Ge(2018)는 서비스시간과 선박 도착 시간 간격이 모두 지수분포를 따른다고 가정하고 안벽 크레인 개수 등 파라미터값을 변화시키면서 이산화탄소 배출량의 변화 추세를 연구하였다.

De la Peña-Zarzuelo, Freire-Seoane, & López- Bermúdez(2020)는 컨테이너 정기선의 취항 빈도가 낮고 벌크선이 주로 출입하는 항만은 선박의 동질적인 특성에 따라 서비스시간이 일정할 것이라는 가정에 따라, 일정한 서비스시간을 가진 대기행렬모형(M/D/n)을 도입했다. 항만 선석 수에 따른 평균 대기시간을 산정하고, 기존 대기행렬모형(M/M/n)과 그 결과를 비교, 분석하였다. 또한, Özkan, Koçer, & Nas(2020)도 항만 내 대기행렬모형의 핵심 확률변수인 선박의 도착 시간 간격 및 안벽 서비스시간의 통계적 분포를 선행연구와의 비교를 통해 검증했다.

제4절 도로 및 철도 등 타 SOC 부문 문헌 검토

1. 대기시간 산정 방법

1) 공항 부문

「공항부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구」(KDI, 2014b)에 따르

면 공항 시설의 확장 및 신설 사업에 따른 가장 큰 편익은 지연 완화 편익이다. 공항 내 지체가 없는 상황이라도 여객과 화물의 이동시간이 감소할 수 있다면 편익은 발생한다. 또한, 지체 감소에 따른 편익을 산정하기 위해서 대기행렬모형을 적용하여 항공 지체시간을 추정한다(KDI, 2014b). 대기행렬모형은 결정적 대기모형과 확률적 대기모형의 두 가지로 구분할 수 있으며, 공항부문 사업 예비타당성조사 표준지침은 이 중 결정적 대기모형을 적용한다. 해당 모형은 승객의 도착 시간 간격과 서비스시간이 일정하다고 가정하는 반면, 확률적 대기모형에서는 도착 간격 및 서비스 소요 시간이 특정 확률분포를 따른다고 가정한다(KDI, 2014b).

그러나, 실제로 공항에서 승객의 도착 간 시간 간격과 서비스시간은 균일하지 않다. 따라서, 결정적 대기모형을 활용하여 현상을 설명하는 것은 한계점이 존재하며, 확률적 대기모형을 적용하여 지체시간을 추정하는 것이 이론적으로는 더 합리적이다. 그러나 공항에서의 승객 도착은 특정 시점에 밀집된 분포를 보이며, 해당 시간대에 일반적인 확률적 대기모형을 적용하는 경우 대기행렬의 길이가 무한대까지 증가하는 등 정확한 분석이 어려워진다(KDI, 2014b). 이와 같은 이유로 기존 공항 부문 예비타당성조사 연구에서는 결정적 대기모형을 적용하여 지체 감소에 따른 편익을 산정하고 있다.

〈표 2-2〉 공항 부문 예비타당성조사 편익 항목 및 측정 단위

구분		측정 단위
항공기 운항비용 절감 편익	항공기 운항비용 절감	항공기 종류별 운항비용 절감분을 '항공기·시간'으로 측정
	항공기/탑승객/화물 통행시간 절감	항공기 탑승객 및 화물의 통행시간 절감분을 '인·시간', '톤·시간'으로 측정
청사 내 여객 통행시간 절감 편익		여객청사 내 여객통행시간 절감분을 '인·시간'으로 측정
청사 내 화물 통행시간 절감 편익		화물청사 내 화물통행시간 절감분을 '톤·시간'으로 측정
전환수요의 통행시간/운항비용 절감		전환수요의 통행시간 절감분을 '인·시간'으로 측정 전환수요의 운항비용 절감분을 '원'으로 측정
초과수요의 통행시간/운항비용 절감		초과수요의 통행시간 절감분을 '인·시간'으로 측정 초과수요의 운항비용 절감분을 '원'으로 측정

자료: KDI(2014b), 공항부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판)

공항 부문 예비타당성조사 편익 항목 중 ‘항공기 운항비용 절감편익’은 공항 시설을 확장함에 따라 절감된 운항시간에 발생한 편익을 의미한다(KDI, 2014b). 항공기 운항비용 절감 편익은 크게 항공기 운항에 따라 발생하는 인건비, 유류비 등의 운영비와, 적재화물 및 탑승여객에 대한 지체비용의 절감 편익으로 분류된다. 이 중 화물 및 여객의 지체감소편익은 화물과 여객의 시간가치 산정을 통해 추정된다. 먼저, 여객의 시간가치는 통행 목적에 따라 업무목적과 비업무목적으로 구분되며, 탑승 여객의 임금률(wage rate)을 근거로 산정된다. 한편, 화물의 시간가치는 화주가 화물의 운항시간을 줄이기 위해 지불할 용의가 있는 금액으로 정의된다(국토교통부, 2018). 화물의 이동시간 감소로 발생하는 기대효과로는 부패 방지, 재고비용 절감 등이 존재하며, 교통투자사업에 대한 경제 타당성 분석에서는 해당 효과들을 편익 항목으로 지정하고 있다(KDI, 2014b).

〈표 2-3〉 항공 여객 1인당 시간가치(2011년 기준)

단위: 원/인·시간, %

구분	국내선(내륙노선)		국내선(제주-내륙 노선)		국제선	
	업무	비업무	업무	비업무	업무	비업무
시간가치	26,792	10,965	26,792	10,965	26,792	10,965
통행목적 비율	17.4	82.6	13.2	86.8	26.0	74.0
1인당 시간가치	13,719		13,054		15,084	

자료: KDI(2014b), 공항부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판)

〈표 2-4〉 항공화물 1톤당 시간가치(2011년 기준)

단위 원/톤·시간

구분	2011년 기준
항공화물 시간가치	80,353

자료: KDI(2014b), 공항부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판)

주: (국토해양부, 2011), 교통시설투자평가지침(제4차 개정)의 2009년 기준을 소비자물가지수(한국은행)를 이용하여 2011년 기준으로 환산함.

KDI(2014b)는 절감한 항공기 운항비용의 금전적 가치를 추정하기 위해 항공기 운항시간 감소분과 시간당 항공기 운항비용을 곱하였다. 항공기 탑승객 통행시간 절감분은 여객 통행시간 감소분에 시간가치를 곱해 편익을 화폐단위로 변환했다. 여객 시간가치는 국내선 내륙노선, 제주노선과 국제선 탑승 승객에 따라 다르므로, 이를 구별하여 편익을 추정했다. 항공기 적재 화물 통행시간 절감분에 대해서는 통행시간 감소분에 화물 시간가치를 곱해 편익을 화폐단위로 변환하였다. 화물의 시간가치는 여객과 달리 노선 별로 구분되어 않아 동일한 화물 시간가치가 반영되었다. 항공기 운항비용 절감 편익 중 탑승객의 지체감소 편익과 화물 지체감소 편익은 각각 다음 수식을 이용하여 산정되었다(KDI, 2014b).

$$\begin{aligned} (\text{연간여객지체시간감소분}) &= (\text{연간운항지체시간감소분}) \times (\text{식-29}) \\ &(\text{항공기당평균재차인원}) \times (\text{항공여객의시간가치}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{연간화물지체시간감소분}) &= (\text{연간운항지체시간감소분}) \times (\text{식-30}) \\ &(\text{항공기당평균적재량}) \times (\text{항공화물의시간가치}) \end{aligned}$$

2) 도로 및 철도부문

도로 및 철도부문 예비타당성조사 표준지침의 공통적인 편익 항목은 ‘차량운행비용 절감 편익’, ‘통행시간 절감 편익’, ‘교통사고비용 절감 편익’, ‘환경비용 절감 편익’이다(KDI, 2021c). 교통시설사업이 시행되면 통행자의 교통수단, 통행경로, 통행속도 등 여러 교통 패턴의 변화가 생기며, 이는 교통시설의 이용자와 더불어 인근 교통 네트워크를 사용하는 통행자의 통행시간에도 영향을 준다. 차량의 운전자뿐 아니라 동승객의 통행시간 또한 변화한다. 즉, 교통시설사업을 통해 차량 이동속도가 향상되면, 차량의 운전자 및 동승객의 통행시간이 감소하며, 각 통행자는 절약된 시간을 다른 용도로 활용할 수 있다. 통행시간의 절감 편익은 이와 같은 통행시간가치를 고려하여 산정한다(KDI, 2021c).

$$VOTS = VOT_{\text{사업 미시행}} - VOT_{\text{사업 시행}} \quad (\text{식-31})$$

$$\text{여기서, } VOT = \sum_l \sum_{k=1}^4 (T_{kl} \times P_k \times Q_{kl} \times 365)$$

T_{kl} = 링크 l 의 차종별, 인별 통행시간

P_k = 차종별, 인별 시간가치

Q_{kl} = 링크 l 의 차종별, 인별 통행량

k = 차종(1: 승용차, 2: 버스, 3: 화물차, 4: 철도)

KDI(2021c)는 통행 배정 결과에 따른 교통 변화 영향권 내 링크 교통량과 통행시간을 곱하여 통행시간 절감 편익을 산정한다. 즉, 사업 시행/미시행(with/without)에 대해 통행자의 이용 교통수단별 총통행시간 및 차종별 통행시간가치를 곱하여 총통행시간 비용을 산출하고, 시나리오별로 도출된 비용을 비교하여, 그 차액이 통행시간 절감 편익으로 산정된다(KDI, 2021c).

〈표 2-5〉 업무통행 시간가치(2016년 기준)

구분	승용차 운전자	버스 운전자	화물차 운전자
1인당 월평균급여(원/월)	3,199,000	2,365,487	2,294,567
근로시간(시간/월)	179.8	177.9	
시간당 임금(원/인-시간)	17,792	13,297	12,898
임금에 대한 오버헤드 비율(%)	26.47%	26.44%	31.81%
시간가치(원/인-시간)(2016년 기준)	22,502	16,812	17,001

- 주: 1) 승용차 운전자의 월평균급여는 비농전산업의 평균값임.
 2) 버스 운전자의 월평균급여는 시내+마을+시외+고속+전세 버스운송업을 가중평균한 값임.
 3) 화물차 운전자의 월평균급여는 일반화물자동차운송업의 평균값임.
 4) 버스 및 화물차 운전자의 급여는 2016년 기준값을 적용함.
 5) 근로시간은 사업체노동력조사의 전체 근로자 및 운수업 기준임.

자료: 1) 고용노동부(2017), 2016년 사업체노동력조사 통계자료
 2) 통계청(2017), 2016년 운수업통계조사
 3) KDI(2019), 국가교통DB 검토 및 교통부문 쟁점 연구
 4) KDI(2021c)에서 재인용

KDI(2021c)는 통행시간가치를 통행시간 1단위를 단축하기 위해 통행자가 기꺼이 지불할 수 있는 의사(Willingness to pay)의 금전적 가치로 정의한다. KDI(2021c)는 통행시간 가치 추정을 위해, 업무통행과 비업무통행의 통행목적에 구분하고 각 목적에 따른 시간가치를 개별적으로 추정했다. 업무통행의 통행시간 절감은 해당 시간만큼 업무시간 및 생산활동을 위한 시간 증대, 비업무통행에서의 통행시간 절감은 여가활동 시간 증대를 가져온다는 의미에 근거하여 각 시간가치가 추정된다.

업무통행의 시간가치는 통행하는 근로자의 고용주 입장에서 발생하는 비용으로 가정할 수 있으며, 임금률법에 따라 도출된 수치를 적용한다. 반면, 비업무통행 시간가치는 절감된 통행시간이 노동 공급 증가에 따른 근로소득 증가로 이어지지 않아, 통행시간과 통행비용의 한계대체 관계를 이용하여, 한계대체율법에 따라 산출된 업무통행 시간가치 비율을 고려한다.

〈표 2-6〉 도로 및 철도 부분 업무통행 시간가치 원자료

급여 자료	• 승용차: 2016년 사업체노동력조사(고용노동부) • 버스, 화물차: 2016년 기준 운수업조사보고서(통계청)
근로시간 자료	• 2016년 사업체노동력조사 자료(고용노동부)
오버헤드	• 기업경영분석 자료(한국은행)

주: 버스, 화물차 운전자의 급여는 「2016년 KLI 노동통계」에서 제공하는 명목임금상승률로 보정함.
자료: KDI(2019), 국가교통DB 검토 및 교통부문 쟁점 연구

비업무통행의 경우, 통행시간이 절감되더라도 노동 투입을 늘려 추가적인 근로소득을 얻지 않으므로, 비업무통행의 시간가치는 통행시간과 통행비용의 한계대체율 관계를 이용하여 산정하며 한계대체율법에 의하여 산출된 업무통행 시간가치와의 비율을 고려하여 산정한다.

한편, KDI(2021c)는 교통부문 사업이 환경에 미치는 효과를 대기오염, 수질오염, 소음, 진동, 지반침하, 생태계 영향, 경관 변화, 지구온난화 등으로 분류한다. 그러나 분류된 모든 환경영향을 금전적 가치로 환산하는 것은 환경영향의 범위 및 크기 파악에 따른 경제적 가치 환산의 어려움과 산정 과정에서 발생하는 높은 불확실성 때문에 매우 어렵다. KDI(2021c)는 해당 분류 중 영향 정도가 비교적 크며, 환경영향평가와 가치 환산이 상대적으로 용이한 대기오염 및 소음에 대해 환경비용을 추정했다.

〈표 2-7〉 지역 간 목적별 통행의 승용차 업무통행 시간가치 대비 비율

구분	승용차	버스	철도
업무	1	-	-
비업무	0.449	0.262	0.257

자료: KDI(2019), 국가교통DB 검토 및 교통부문 쟁점 연구

〈표 2-8〉 수단별 평균 통행 시간가치(전국권)

구분	승용차		버스		화물차		철도(1인당)	
	업무	비업무	업무	비업무	업무	비업무	업무	비업무
재차인원(인)	0.32	1.08	0.43	10.35	1	-	0.21	0.79
시간가치(원)	22,502	10,103	16,812 (1인) 22,502 (0.43인)	5,893	17,001	-	22,502	5,788
시간가치(원/대·시)	7,201	10,911	26,488	60,993	17,001	-	4,725	4,573
2016년 기준 평균 시간가치(원/대)	18,112		87,481		17,001		9,298	
2019년 기준 평균 시간가치(원/대)	18,800		90,805		17,647		9,651	

자료: KDI(2019), 국가교통DB 검토 및 교통부문 쟁점 연구

주: 1) 재차인원은 한국교통연구원에서 2020년에 배포한 국가교통DB에 부합하는 재차인원을 적용함.

2) 2019년 기준 가치는 2016년 가치에 편익보정지수(소비자물가지수) 103.8%를 적용한 값임.

2. 시간가치 편익 및 원단위

공급사슬 내에서 운송 중인 화물은 그 자체로 재화의 성격을 가지고 있으므로 운송 시간에 따른 기회비용을 일부 인정할 필요가 있다(Blauwens & Voorde, 1988). 또한, 여객교통 및 화물운송에서 적용되는 시간가치는 이동시간을 1단위 줄이기 위해 지불할 용의가 있는 금전적 가치로 정의될 수 있다(이재길, 1992).

〈표 2-9〉 화물 시간가치의 대표적 산정 방법 및 장단점

구분		임금률 법	한계대체율 법
평가기준		시간당 소득	선택 효용
주요 활용분야		SOC 투자사업 경제성 평가	학술적 연구
장단점	장점	계산과정이 쉽고 적용이 편리, 공감대 형성	설문조사에 근간을 두어 조사비용과 분석 시간이 소요
	단점	화물 자체의 시간가치는 반영 불가, 추가로 반영과정 필요	설문환경에 따라 값이 변화, 일관성과 객관성 확보 부족
국내 적용현황		SOC투자평가 관련 지침에 반영	학술연구 단계로 제한적 적용 사례

자료: 최창호(2019), 벌크화물의 시간가치 반영을 위한 기초환경 구축 방안 연구

화물의 시간가치는 화주가 화물 운송시간을 줄임으로써 얻을 수 있는 편익에 해당한다(최창호, 2019). 이 같은 관점에 국토교통부(2017)는 화물의 시간가치를 계산하기 위해 화물의 톤당 금전적 가치를 활용한 아래의 식을 적용했다.

$$VOT_{\text{화물}} = (\text{톤당 화물의 금전적 가치} \times 0.0632) / (365 \times 24) \quad (\text{식-32})$$

자료: 국토교통부(2017), 교통시설투자평가지침 6차개정

위 식에서, 화물의 금전적 가치에 곱하는 0.0632는 기업의 일반자금 대출 금리(6.32%)를 의미한다. 위 식은 화물가격의 변동성을 반영하지 못한다는 한계점을 포함하고 있다. 화물의 기회비용을 의미하는 시간가치는 화물의 가격과 밀접하게 연동되기 때문에 시간 경과에 따라 변화하는 화물 금액을 추정하는 것이 필요하다. 이를 위해, KDI는 예비타당성조사에서 기준금리 및 이자율을 주기적으로 반영하여 할인율을 조정한다. 그리고 국토교통부 등 공공기관에서 적용하는 사회기반시설 부문 투자평가지침 또한 이를 반영하고 있다. 이러한 배경을 감안할 때, 화물시간가치에 적용하는 금리는 KDI 예비타당성조사 할인율과 일치하도록 하는 것이 적절한 것으로 판단되며, 이는 수시로 변화하는 이자율을 타당성조사에서 탄력적으로 적용하는데 있어 부담을 줄이고 사회기반시설 부문 투자평가지침의 취지와 일관성을 확보하기 위함이다(최창호, 2019).

〈표 2-10〉 운송화물 품목별 시간가치

구분	33개 품목구분 (코드)	톤당 가격 (만원)			톤당 시간가치 (원/시·톤)
		입하	출하	평균	
양곡	농산물 (1)	850.57	1324.95	1087.76	78.48
양회	석회석광물 (6)	1421.70	3033.88	706.15	50.95
비료	기타 (33)	856.70	954.56	905.63	65.34
무연탄	석탄광물 (5)	278.26	181.70	229.98	16.59
광석	금속광물 (8)	873.68	1182.83	1028.26	74.18
유류	원유 및 천연가스 채취물 (7)	535.14	474.65	504.90	36.43
잡화	기타 (33)	856.70	954.56	905.63	65.34

자료: 한국철도공사 · 한국철도시설공단(2007), 2006 철도통계연보

〈표 2-11〉 철도화물 운송 품목별 시간가치

구분		톤당 시간가치 (원/시·톤)		비고 ('06년 철도화물 수송실적, 톤)
		화차 감가상각비 포함 시	화차 감가상각비 미포함시	
컨테이너		590.12		11,253
비컨테이너	양곡	90.33	78.48	57
	양회	58.53	50.95	15,823
	비료	77.19	65.34	181
	무연탄	24.58	16.59	7,368
	광석	82.17	74.18	1,758
	유류	44.01	36.43	2,202
	잡화	77.19	65.34	3,685
	소계 (가중평균)	53.17	44.93	

주) 2007년 기준가격이며, (예비)타당성조사에서 화차의 구입비용을 별도로 계산하는 경우에는 화차의 시간당 감가상각비를 포함하지 않은 시간가치를 적용하여야 함

자료: 한국철도공사 · 한국철도시설공단(2007), 2006 철도통계연보

〈표 2-12〉 벌크화물 시간가치 산정 사례 비교

구분	운송 수단	연구자	연도	평균 화물 시간가치(원) (괄호 안은 특정품목 연구 사례)	SP 조사 대상국가
국내 사례	트럭/ 철도 화차	대한교통학회	2006	455원/톤·시간	대한민국
		한국철도시설공단	2010	229원/톤·시간(양회) 243원/톤·시간(철강)	
		최창호 외	2008	5,643원/대·시간(양회) 5,969원/대·시간(철강)	
		김찬성 외	2008	313원/톤·시간	
		정성봉 최창호	2011 2016	309원/톤·시간(양회) 294원/톤·시간	
국외 사례	트럭	Transek	1990	3,059원/대·시간	스웨덴
		Fowkes et al.	1991	122~1,773원/톤·시간	영국
		Widlent & Bradely	1992	10,708원/대·시간	스웨덴
		Small	1999	26,615~40,842원/대·시간	미국
		Kurri et al.	2000	2,340원/톤·시간	핀란드
		Wigan et al.	2000	2,142원/파렛트·시간	호주

구분	운송 수단	연구자	연도	평균 화물 시간가치(원) (괄호 안은 특정품목 연구 사례)	SP 조사 대상국가
국외 사례	트럭	Inregia	2001	0~48,949원/대·시간	스웨덴
		Rand Europe et al.	2004	7,250원/톤·시간	네덜란드
		Smalkoski & Levinson	2005	61,877원/대·시간	미국
		Significance et al.	2012	51,819원/대·시간	네덜란드
		De Jong et al.	2014	56,136원/대·시간	네덜란드
	철도 화차	Transek	1990	1,529원/화차·시간	스웨덴
		Fowkes et al.	1991	122~1,851원/톤·시간	영국
		Vieira	1992	994원/톤·시간	미국
		Widlent & Bradely	1992	46원/톤·시간	스웨덴
		Kurri et al.	2000	138원/톤·시간	핀란드
		Inregia	2001	0원/화차·시간	스웨덴
		Rand Europe et al.	2004	1,468원/톤·시간	네덜란드
		Significance et al.	2012	1,900,018원/편성·시간	네덜란드
		De Jong et al.	2014	1,820,652원/편성·시간	네덜란드
	선박	Blauwens & Voorde	1998	138원/톤·시간	벨기에
		Rand Europe et al.	2004	764원/톤·시간	네덜란드
		Significance et al.	2012	115,728~518,186원/척·시간	네덜란드
		De Jong et al.	2014	1,259,284원/척·시간	네덜란드
국외 사례	화물 전용 기	Inregia	2001	19,885원/출하건·시간	스웨덴
		Rand Europe et al.	2004	12,138,045원/대·시간	네덜란드
		Significance et al.	2012	22,454,759원/대·시간	네덜란드
		De Jong et al.	2014	19,723,730원/대·시간	네덜란드

주: 연구자별로 시간가치의 크기를 조사연도 및 해당 국가별 화폐단위로 제시하여 이해의 편의상 환율 및 화폐가치 변화를 반영한 2017년 기준 원화로 환산하여 제시함.

자료: 최창호(2019), 벌크화물의 시간가치 반영을 위한 기초환경 구축 방안 연구

〈표 2-13〉 선행 연구 정리

선행연구 현황		
연구 분야	연구 제목	주요 연구 내용
1) 항만 분야 대기행렬 이론 적용 연구	Laing & Hecker.(1989)	인천항 개발 3단계(1985)를 예로 들어, 항만의 크기(berth)에 따라 최적의 'W(대기시간)/S(서비스시간)' 비율은 변할 수 있음을 지적하였음. 이는 대형 항만에서 선박대기에 따른 비용이 지수적으로(exponentially) 증가하기 때문

선행연구 현황		
연구 분야	연구 제목	주요 연구 내용
1) 항만 분야 대기행렬 이론 적용 연구	Oyatoye et al.(2011)	대기행렬모형의 적용 결과, 항만의 혼잡은 안벽 등 시설의 부족이 아니라 비효율적인 항만의 운영시스템 때문에 발생한다는 결론을 내기도 하였음
	Liu & Ge (2018)	항만에 대기행렬모형을 적용, 선박의 도착 시간 간격과 서비스시간에 대해 모두 지수분포를 가정하고 안벽 크레인의 수 등 파라미터 값 변화에 따른 이산화탄소 배출량을 비교한 연구도 존재
	De la Peña-Zarzuelo, Freire-Seoane, & López-Bermúdez (2020)	- 정기선이 기항하지 않거나 건화물선이 주로 출항하는 항만은 출입하는 선박 크기의 유사성 등으로 인해 안벽에서의 서비스시간이 일정함을 지적하며 서비스시간이 일정한 항만 시스템(M/D/n)에 대해 연구하였음 - 위 대기행렬모형에서 도출된 결과를 바탕으로 선석 수에 따른 평균 대기시간 식을 도출하고 기존 대기행렬모형과 결과를 비교
	Özkan, Koçer, & Nas (2020)	- 대기행렬모형 등 항만 내 선박의 운항을 모델링하기 위해 사용되는 선박 도착 시간 간격, 안벽의 서비스시간 등 통계적 분포를 과거 연구와 비교하여 재검증하였음 - 과거 대부분의 연구에 따르면 지수 분포가 선박의 도착 시간 간격에 가장 적합. 그러나, 본 연구에 사용된 항만 데이터에 따르면 감마 분포가 도착 시간 간격에 적합한 것으로 나타났음
2) 항만분야 선박대기 시간 및 비용 산정 연구	Goss & Mann (1977)	장기기회비용(long-term opportunity cost) 개념을 활용하여 선박의 항만 대기 관련 연구의 방법론적 기반을 마련하였음
	장영태 (1991)	- 체선·체화가 문제 되는 항만의 개선을 위하여 선박의 체항시간을 단축시켜 경제적 기회비용을 높여야 함을 주장하였음 - 또한, 도착 시간 간격 분포와 서비스시간 분포가 열량 분포를 나타낼 때 대기추정식을 이용할 수 있다고 주장
	박병인·배종욱·박상준(2009)	Goss & Mann(1977)의 회귀식을 활용하여 우리나라 무역항의 대기비용을 장기기회비용관점에서 산정하고 이를 활용하여 항만의 서비스 수준을 평가하는 방법 제시
	Chang et al.(2012)	- Goss & Mann(1977)을 활용, 화물의 시간가치를 기회비용 관점에서 산정하였음 - 시뮬레이션 모형을 활용하여 화물의 시간가치와 선석 건설비용 사이의 상충(trade-off) 효과를 고려하여 항만의 최적 하역능력을 경제적 관점에서 산정

선행연구 현황		
연구 분야	연구 제목	주요 연구 내용
2) 항만분야 선박대기 시간 및 비용 산정 연구	이기열 외(2015)	• 선박자동식별시스템 (AIS, Auto Identification System) 정보를 활용하여 국내 주요 항만의 서비스 지표인 선석점유율 및 선종별 대기율을 분석하였음
	김은수·김근섭 (2016)(2016)	• 우리나라 항만의 현행 서비스 지표인 체선율의 한계를 지적하고 지난 10년간의 부두별, 선종별 대기율을 산정하였음 • 이는 항만 고객의 관점에서 서비스 수준을 평가할 수 있는 유용한 지표, 또한, 항만 투자사결정이나 운영 정책 수립에 중요한 지표로 활용될 것으로 기대
	KDI(2014a)	• 표준지침 2판(2001)의 부선하역 가정을 최소화했지만, 여전히 ① 목적/비목적 화물의 구분, ② 선박의 인접 항으로 임의 이동 ② 육상교통비용 절감 등 비현실적인 가정이 존재
	KMI(2016)	• 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판)」(KDI, 2014a)을 검토하여 개선이 필요한 부분을 제시하였음 그간 방대한 정보 확보의 한계, 과학적 노력이 필요한 이유로 산정 시도가 없었던 선박대기비용 절감 편익은 충분히 산정 가능한 것으로 판단
	이정훈·박남규 (2018)	• TOS와 Port-MIS 항만 시설사용 실적자료를 활용하여 실제 대기시간 및 평균대기율을 산정하였음 • 또한, 행렬이론상의 대기율과 실제 터미널의 대기율을 비교, 일반적 대기행렬이론상으로 계산된 대기율과 실제 측정된 대기율 사이에는 차이가 존재함을 확인하였음
3) 타 SOC 대기시간 절감편익 및 원단위 연구	• 김찬성·이정윤·정경훈 (2008); 노병국·김용배·진학기. (2011); 정성봉. (2011); 최창호 외(2008); 최창호. (2016); 최창호(2019); 한국철도시설공단 (2010); KDI (2008); KDI (2014b); KDI (2021c);	
	• Blauwens & Van (1988); De Jong et al.(2014); Fowkes, Nash, & Tweddle(1991); Konishi et al.(2014); Kouwenhoven et al.(2014); Kurri, Sirkia & Mikola(2000); Smalkoski & Levinson (2005); Small(1999); Vieira(1992); Widlert & Bradley(1992); Wigan et al.(2000)	

자료: KMI(2023)에서 분석된 선행연구 기반 재정리

제5절 시사점 및 연구 차별점 도출

선행연구를 검토한 결과, 본 연구의 차별성은 다음과 같다. 먼저, 선박의 대기시간을 추정하기 위해 대기행렬이론을 항만에 적용한 연구는 매우 드물다. 이는, 항만의 운영 구조가 대기행렬이론에서 정의하는 시스템과 표면상으로는 유사성을 지니고 있지만, 동시에 상당한 차이점이 존재하기 때문이다. 예를 들어 대표적인 대기행렬모형 적용 분야인 콜센터와 항만의 선석을 비교하면, 콜센터는 근로자(server)의 생산성이 거의 동일하지만, 항만의 경우 선석(server)마다 생산성이 명확하게 다르다. 또한, 콜센터 고객(customer)과 다르게 항만의 선박(customer)은 크기와 하역 물량이 각각 다르다. 이러한 어려움 때문에 항만에는 대기행렬모형을 이용하여 선박의 대기시간을 추정하고자 하는 연구는 매우 적다. 항만 분야 대기행렬이론을 활용한 연구는 주로 적정 투자 규모를 산정하기 위해 최적의 선석 개수를 결정하기 위한 연구가 대부분이었다.

본 연구는 선박대기비용 절감 편익 산정을 위한 방법론으로 대기행렬이론을 제안하고 기존 연구의 한계점을 개선하였다. 선행연구 결과, 항만에 대기행렬시스템을 적용한 대부분의 연구에서 선박 도착 시간 간격과 서비스시간에 대한 엄밀한 통계적 분포 검정을 수행하지 않았다. 임의로 분포를 가정하였거나, 소수 분포 검정을 수행한 연구조차도 분포에 적합한 대기행렬모형을 적용하지 않았다. KMI(2023)는 처음으로 대기행렬모형을 적용하여 선박대기비용 절감 편익을 산정하였으나 앞서 서술하였듯이 엄밀한 통계적 검정 없이 지수분포를 임의 가정했다는 한계점이 존재한다. 대기행렬모형을 적용하기 위해서는 도착 간격 시간과 서비스시간의 분포를 검정하는 것이 선행되어야 할 절차이다. 본 연구는 항만정보시스템인 Port-MIS의 실제 데이터를 바탕으로 매우 상세한 전처리 과정을 거친 뒤,

엄밀한 이론분포 검정 방법론을 활용하여 선박의 도착 시간 간격 및 서비스시간에 대한 이론분포를 검정한다. 이를 통해, 선박대기시간을 추정하기 위한 대기행렬모형의 이론적 근거를 마련할 수 있다.

본 연구는 항만 시스템을 분석하기 위해 M/G/c 모형을 도입한 최초의 연구이다. 선박 도착 시간 간격과 서비스시간에 대한 통계적 이론분포 검정을 바탕으로, 기존에 항만 시스템을 묘사하기 위해 널리 쓰였던 M/M/c 모형이 적합하지 않다는 것을 밝힌다. 많은 기존 문헌에서는 M/M/c 모형의 편의성 때문에 선박의 도착 시간 간격 및 서비스시간이 지수분포를 따름을 임의로 가정하였다. 하지만, 본 연구에서는 지금까지 정확한 통계 자료 분석의 미흡함과 이론 연구의 한계 때문에 항만 부문에 도입되지 못했던 M/G/c 모형을 적용하여, 보다 정확하게 항만 내 선박의 대기시간을 추정한다.

다음으로, 본 연구는 기존 연구의 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론의 한계점을 파악하고 이를 개선하여 방법론의 신뢰도를 높인다. KMI(2023)는 사례 연구를 통해 대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 절감 편익을 산정하고자 했으나, 방법론을 적용하는 과정에서 일부 문제점을 포함하고 있다. 본 연구는 이 중에서 초과 물동량 할당 방안, 대기 선박의 적재율, 적정 선형 크기, 선박 대기로 인한 환경비용 원단위 등 기존 연구에서 상세하게 다루어지지 않은 가정을 데이터를 통해 분석하고 보다 현실적인 가정을 제안한다. 이를 통해, 대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

한편, 본 연구에서는 AIS 데이터와 대기행렬모형 고도화를 통해 선박의 감속 운항, 기항 취소, 정박지 밖 대기 및 표류 등 드러나지 않은 대기비용을 추정하기 위한 방법을 제안한다. 선사는 항만 혼잡으로 인한 과도한 정박지 사용료와 잠재적인 위험을 방지하고, 더 효율적으로 선박을 운용하기

위해 감속 운항, 기항 취소, 외항 표류 대기 등의 전략을 활용한다. Port-MIS 등 행정 데이터로 대기시간을 추정할 경우에는 해당 선박의 행태를 확인할 수 없기 때문에 본 연구에서는 AIS 데이터를 활용하여 이 문제를 해결할 수 있는 방안을 제시하였다. 향후에는 제안한 방법론을 보다 발전시켜 부두 확장으로 인한 항만 체선의 해소 시 발생하는 선박대기비용 절감 편익을 계산할 수 있을 것으로 기대된다.

03

선박대기시간 추정 방법론

제1절 선박대기시간 추정을 위한 기초자료 검토

1. Port-MIS 선박 입출항 데이터

Port-MIS는 전국 28개 무역항에 대한 선박의 입항신고, 항만 내 시설사용, 관제사항, 화물반출입, 세입징수 및 출항신고 등 항만운영업무와 관련된 데이터를 처리하는 시스템이다. 항만 내 선박의 입출항 분석을 위해서 Port-MIS 데이터 중 '부두별관제현황' 및 '시설사용허가현황' 데이터를 사용하였다. 기초적인 선박 입출항 현황 데이터는 선박의 최초 입항 시간 및 최종 출항 시간이 확인 가능하지만, 입항 후 시설 사용시간, 정박시간, 하역시간 등에 대한 상세 활동 정보는 알 수가 없다. 부두별관제현황은 선박 입출항 현황에서 알 수 없는 입항, 출항, 접안, 이안 및 정박지 사용 등에 대한 자세한 정보를 알 수 있다. 하지만 부두별관제현황 데이터에는 선박의 입항 및 시설사용에 대한 목적을 알 수가 없어 급유, 계선 및 수리 등을 목적으로 입항한 선박을 구분할 수 없다는 단점이 있다. 반면, 시설사용허가현황은 선박이 이용하고자 하는 시설과 시설사용의 목적에 대한 정보를 포함하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 선박 입출항 시간, 부두시설 사용

현황 및 부두 사용 목적을 명확하게 구분하기 위해서 부두별관제현황과 시설사용허가현황 데이터를 결합하여 사용했다.

1) 부두별관제현황

부두별관제현황은 선박의 입항에서부터 출항까지의 관제, 접안 부두 및 관제 시간에 대한 기록이다. 부두별관제현황 상세 데이터 예시는 <표 3-1>에 나타나 있다. <표 3-1>에서 알 수 있듯이 부두별관제현황은 선박의 교신일시, 호출부호, 총톤수, 선종, 외·내항 구분, 입항 횟수, 관제 구분, 시설 및 선사/대리점으로 구성되어 있다. 교신일시는 선박의 관제 허가를 위해 교신한 시간으로 '연-월-일 시:분' 형태로 구성되어 있다. 호출부호는 선박에 부여된 고유 식별코드이며 총톤수는 선박의 총무게를 나타낸다. 선종은 선박의 종류를 나타내며 풀컨테이너선, 세미(혼재)컨테이너선, 냉동·냉장선 및 일반화물선 등 52개로 구분된다. 외·내항 구분은 전·차항지가 국내일 경우 내항, 국외일 경우 외항, 그리고 항내 타부두 혹은 정박지로 이동할 시에는 항내운항으로 정의된다. 입항 횟수는 선박의 입항 연도와 항차로 구분되며 선박의 해당 연도에 입항한 횟수에 대한 정보이다. 관제 구분은 선박 관제의 특성에 따라 입항, 출항, 접안, 이안, 투묘, 양묘로 구분된다. 시설은 선박이 사용한 부두 코드, 선석 번호 및 선석 명을 나타내며 선사/대리점은 선사 명을 의미한다. 이처럼, 부두별관제현황은 선박이 입항하고 출항할 때까지의 항내 활동에 대한 시간과 그 시설에 대한 정보를 담고 있다.

<표 3-1> 부두별관제현황 상세 데이터 예시

자료 변수명	설명	예시
교신일시	• 선박의 관제 허가를 위해 교신한 시간	• 2022-01-01 09:30
호출부호	• 선박에 부여된 고유 식별코드와 선박명	• 0603** **호
총톤수	• 선박 총무게	• 부산항 기준 1.25~236,583톤

자료 변수명	설명	예시
선종	• 선박의 종류	• 풀컨테이너선/세미(혼재)컨테이너선/ 냉동·냉장선 등
외·내항 구분	• 전·차항지 국내·외 위치 여부	• 외항/내항/항내운항
입항 횟수	• 선박 입항 연도 및 항차	• 2022 001
관제 구분	• 선박의 관제 특성	• 입항/출항/접안/이안/투묘/양묘
시설	• 부두 코드, 선석 번호 및 부두 명	• MBS 02 신선대부두 2선석
선사/대리점	• 선사 명	• **선사/**해운

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

2) 시설사용허가현황

시설사용허가현황은 선박이 사용하고자 하는 시설과 사용기간에 대한 터미널 운영사의 허가 유무를 기록한 데이터이다. 이 데이터셋은 선박이 사용하고자 한 시설(신청시설)과 예상 사용기간, 터미널 운영사가 사용을 허가한 시설(지정시설)과 예상 사용기간을 알 수 있다. 또한 시설사용 신청을 위해서는 사용목적명을 명시해야 하기 때문에 사용목적명을 알 수 있다. 시설사용허가현황의 상세 데이터 예시는 <표 3-2>에 나타나 있다. 부두별관제현황 데이터와 동일한 특성의 데이터는 호출부호, 입항 횟수, 신고 톤수, 선박명, 선사/대리점이 있으며 신청시설 및 지정시설은 부두별관제현황의 시설 데이터와 특성이 같다. 사용목적명, 예보일시 및 허가 유무는 부두별관제현황과 상이한 특성을 가지고 있다. 사용목적명은 선박의 부두사용 목적을 의미하며 양하, 적하, 양적하, 수리, 급유 등 20개로 구분된다. 예보일시는 선박이 부두 등 항만 시설을 사용하고자 할 때 사용을 예보한 일자이다. 허가 유무는 선박의 시설사용 신청에 대한 터미널 운영사의 허가 유무로 미허가와 허가 완료로 구분된다.

〈표 3-2〉 시설사용허가현황 상세 데이터 예시

자료 변수명	설명	예시
호출부호	• 선박에 부여된 고유 식별코드	• 0603**/V2*** 등
입항 횟수	• 선박 입항 연도 및 항차	• 2022 001
신고 톤수	• 선박 총무게	• 부산항 기준 1.25~236,583톤
선박명	• 선박명	• **호 등
선사/대리점	• 선사 명	• **선사/**해운 등
신청시설	• 선박이 사용하고자 하는 시설의 부두 코드, 선석 번호 및 부두 명	• MBS 02 신선대부두 2선석
신청일시 (FROM-TO)	• 신청시설에 대한 사용기간	• FROM: 2022-01-01 09:30 • TO: 2022-01-01 18:00
지정시설	• 터미널 운영사가 지정한 시설의 부두 코드, 선석 번호 및 부두 명	• MBS 02 신선대부두 2선석
지정일시 (FROM-TO)	• 지정시설에 대한 사용기간	• FROM: 2022-01-01 09:30 • TO: 2022-01-01 18:00
사용목적명	• 선박이 시설을 사용하고자 하는 목적	• 양하/적하/양적하/급유 등
예보일시	• 지정시설 사용에 대한 예보일시	• 2022-01-01
허가 유무	• 선박 지정시설 이용에 대한 허가	• 미허가/허가 완료

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

2. 선박 입출항 데이터 전처리

데이터의 수집 범위 및 상세 정보는 〈표 3-3〉에 나타나 있다. 본 연구에서는 선박의 시설사용목적, 사용시설명, 시설사용시간 등을 상세하게 파악하기 위해 부두별관제현황과 시설사용허가현황의 데이터를 결합하여 사용하였다. 데이터 수집 기간은 분석 결과 일반화와 정책연구의 활용성을 위해 2018년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 최근 5년으로 설정하였다. 대상 항만은 부산, 인천, 광양, 울산, 평택 및 대산항이며 21개 컨테이너 부두를 대상으로 한다. 분석 대상인 21개 컨테이너 부두는 컨테이너 전용성이 높은 국내 주요 21개 컨테이너 부두이며 〈표 3-4〉에 나타나 있다.

포항항과 동해·묵호항은 컨테이너 처리량과 전용성이 낮아 분석 대상에서 제외했다. 또한, 2022년 6월에 개장한 부산신항 6부두는 충분한 데이터 확보가 어렵기 때문에 분석 대상에 포함하지 않았다. 대상 선종은 풀컨테이선과 세미(혼재)컨테이너선으로 한정했다.

〈표 3-3〉 항만 입출항 데이터 상세

비고	상세
수집 대상	• 부두별관제현황/시설사용허가현황
수집 기간	• 2018년 1월 1일 - 2022년 12월 31일(5년)
대상 항만	• 부산/광양/인천/울산/평택·당진/대산항
대상 선종	• 풀컨테이너선/세미(혼재)컨테이너선

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

〈표 3-4〉 분석 대상 컨테이너 부두

기간	구분	선석 수
부산	신항 1부두	3
	신항 2부두	6
	신항 3부두	4
	신항 4부두	4
	신항 5부두	4
	감만	4
	신감만	3
	자성대	5
	신선대	5
광양	2단계 1차	4
	2단계 2차	4
	3단계 1차	4
인천	남항 ICT	2
	남항 E1	1
	신항 선광	3
	신항 한진	3

기간	구분	선석 수
울산	신항	4
	정일	4
평택·당진	PCTC	4
	PNCT	6
대산	4부두	1

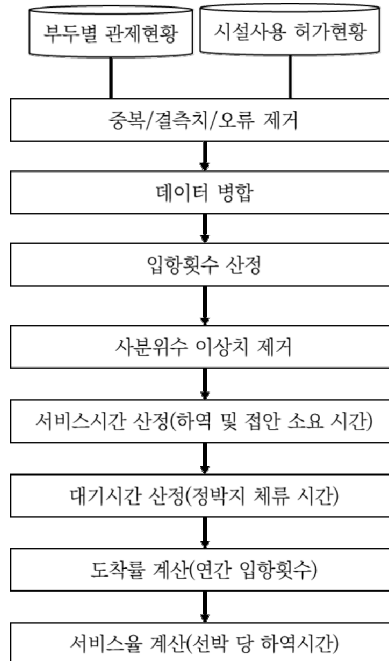
자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

〈그림 3-1〉은 선박 도착률 및 서비스율을 산정하기 위한 선박 입출항 데이터 전처리 과정이다. 먼저 대상 기간, 대상 부두 및 선종에 대한 부두별관 제현황과 시설사용허가현황 데이터를 수집한다. 수집된 데이터는 중복, 결측치 및 오류를 제거한다. 중복은 동일한 데이터가 2개 이상 기록된 경우를 말하며 결측치란 기록되어야 할 데이터가 누락된 것을 의미한다. 예를 들어 한 항차는 최소 입항과 출항 두 개의 관제는 기록되어야 하나 입항 혹은 출항만 기록된 경우 결측치 데이터로 간주하고 제거한다. 오류란 정합성에 문제가 있는 데이터로 입항 연도와 교신 연도가 다르게 기록되거나 입항 연도가 2100년으로 기록되는 등 현실과 상이한 값으로 기록된 경우에는 이를 오류 데이터로 판단하고 제거한다. 중복, 결측치 및 오류를 제거한 부두별관제현황과 시설사용허가현황 데이터는 호출부호, 입항 연도, 항차 및 시설정보를 기반으로 병합된다. 병합한 데이터를 바탕으로 선박이 어떤 부두로 접안했는지, 접안 시간은 얼마나 되는지, 접안 목적은 무엇인지 파악할 수 있다.

데이터 병합이 완료된 데이터를 바탕으로 대기행렬모형의 주요 파라미터인 입항 횟수와 서비스시간을 산정한다. 또한, 대기행렬모형에 의한 대기시간을 검증하기 위해 실제 대기시간을 산정한다. 이때 주의해야 할 점은 일반적인 대기행렬모형과 다르게 항만은 하나의 고객(선박)이 다수의 서비스(하역)를 다수 서버(선석)에서 수행할 수 있다는 점이다. 일반적인 대기행렬모형에서는 하나의 고객은 하나의 서비스를 하나의 서버로부터 제공받은 후 시스템을 이탈한다. 하지만, 항만의 경우에는 하나의 고객이 다수 서버

로부터 다수 서비스를 제공받을 수 있기 때문에 일반적인 대기행렬모형의 수식을 적용하면 추정값에 편의(bias)가 발생할 수 있다.

〈그림 3-1〉 데이터 전처리 과정



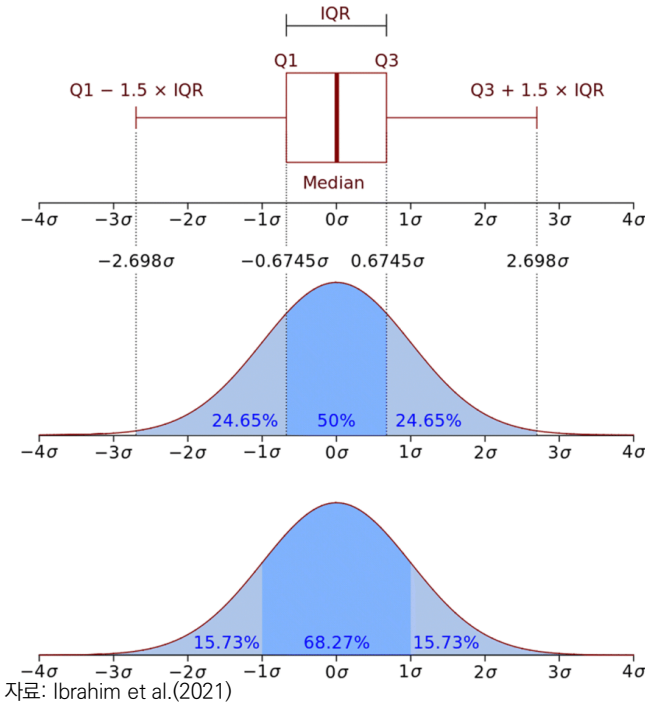
자료: 저자 작성

다수의 선석을 가진 부두를 하나의 대기행렬 시스템으로 정의할 경우, 해당 부두를 이용하기 위해 입항한 선박 수가 시스템의 입항 횟수이다. 하지만, 개별 선석을 하나의 대기행렬 시스템으로 정의할 경우, 해당 선석에 접안한 선박 수가 시스템의 입항 횟수이다. 예를 들어, 항만의 대기행렬 시스템을 부두 단위로 정의한다면, 하나의 선박이 A부두에 입항한 후 B부두로 이선하여도 입항 횟수는 1회(A부두)로 산정된다. 하지만, 시스템을 선석 단위로 정의하면 입항 횟수는 2회(A부두의 선석과 B부두의 선석)로 산정된다. 이처럼, 대기행렬 시스템 정의에 따라 입항 횟수, 서비스시간 및 대기

시간이 달라질 수 있기 때문에 분석 목적에 맞는 명확한 시스템 정의가 매우 중요하다. 본 연구에서는 위에서 서술한 대기행렬모형 분석의 편의를 제거하기 위해 선박 입항 횟수가 아닌, 선석 접안 횟수를 바탕으로 시스템의 도착률을 계산하였다.

병합이 완료되면 입항 및 접안의 관제 횟수를 계산한다. 시설사용 목적 및 정확성을 위해 시설사용허가현황 데이터를 활용하여 대상 선박에 대한 선석 및 부두에 대한 허가가 완료된 데이터만을 사용한다. 입항 및 접안 횟수 산정 이후 서비스시간, 대기시간, 도착률 및 서비스를 계산하기 위해서 사분위수 이상치 제거(IQR outlier: Inter-quartile rage outlier) 방법을 적용한다. IQR 이상치 제거 방법의 개념은 <그림 3-2>에 나타나 있다.

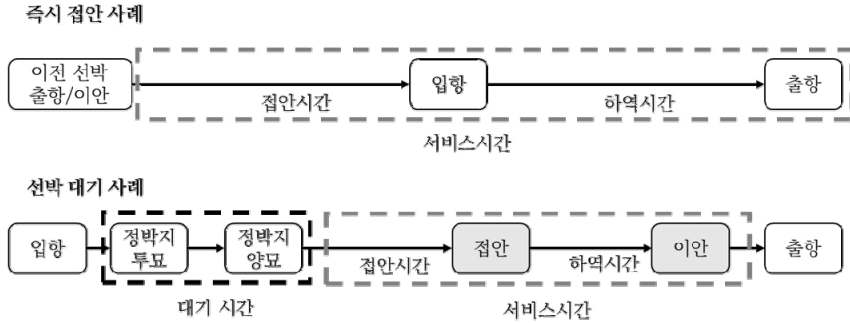
<그림 3-2> IQR 이상치 제거의 개념



IQR 이상치 제거는 데이터의 확률밀도함수에서 하위 사분위수(Q1)와 상위 사분위수(Q3)의 범위, 즉 중앙값(Median)을 기준으로 50%의 범위(Q3-Q1)를 IQR로 정의하고 상·하위 사분위수를 기준으로 통상적 계수 1.5배의 IQR의 범위를 벗어난 데이터는 이상치로 간주하는 방법이다. 이 상치가 제거되면 서비스시간과 대기시간을 산정한다.

정확한 서비스시간 산정을 위해 본 연구에서는 서비스시간을 ‘하역시간’과 ‘접안소요시간’으로 구분한다. ‘하역시간’이란 선박이 양·적하 작업을 위해 부두를 점유하고 있는 시간이며 ‘접안소요시간’은 이전 선박이 하역을 완료한 후 다음 선박이 하역을 위해 부두로 접안하기 위해 소요된 시간이다. 본 연구에서 정의한 선박 입출항 시스템의 정의는 <그림 3-3>에 나타나 있다. 선박 입출항 데이터 관점에서 시스템은 두 가지 사례가 있다. 첫 번째는 즉시 접안 사례이며 두 번째는 대기 후 접안하는 사례이다. 즉시 접안 사례의 경우 선박이 입항한 후 대기 없이 부두에서 하역작업을 한 경우이며, 이때 하역시간은 입항에서 출항까지 소요된 시간이며, 접안소요시간은 이전 선박의 출항 및 이안 이후 다음 선박의 입항까지 소요된 시간이다. 대기 후 접안 사례의 경우는 선박이 입항할 당시 부두에서 이전 선박에 대한 하역작업이 진행 중인 경우이다. 이 경우는 선박이 이전 선박의 하역작업이 끝날 때까지 정박지에 표류하게 되는데 이때 시간을 대기시간으로 정의한다. 대기 후 접안 사례의 접안소요시간은 정박지에서 양모한 이후부터 접안까지 소요된 시간, 하역시간은 접안 이후 이안까지 소요된 시간으로 정의하며 접안소요시간과 하역시간을 서비스시간으로 정의한다. 입항 횟수 및 서비스시간이 계산되면 도착률과 서비스율을 산정할 수 있다. 도착률과 서비스율의 산정은 다음 항에서 더욱 자세하게 다룬다.

〈그림 3-3〉 선박 입출항 시스템 정의



자료: 저자 작성

3. 선박 도착률과 서비스율 산정

1) 선박 도착률과 서비스율 특성

선박 도착률(λ)과 서비스율(μ)은 항만의 효율성과 생산성에 큰 영향을 미칠 수 있는 항만 운영 및 관리의 핵심 요소 중 하나이다. 항만에서 선박 도착률과 서비스율을 정의하기 위해서는 항만에서 선박 입항 횟수 및 하역 시간을 산정해야 한다. 본 연구에서는 〈그림 3-3〉의 선박 입출항 시스템에 따라 선박 도착률과 서비스율을 산정한다.

선박 도착률은 무기역성, 계절성 및 시스템 형태 등이 영향을 받는다. 무기역성이란 이전에 발생한 이벤트가 추후 발생할 이벤트에 아무런 영향을 주지 않는 확률분포의 특성이다. 선박의 도착은 무기역성을 따르며 이는 지수분포가 가진 특성으로 선행연구에서 다양한 연구자들의 선박 도착 시간 간격에 대한 분포 추정 결과가 주로 지수분포로 검정된 것으로 증명된다 (Tang et al., 2014, 2016; Dragovic, Park and Radimilovic, 2006).

한편, 선박의 도착률은 계절성을 나타낼 수 있다. 글로벌 공급망의 위기, 특정품목에 대한 경제 활동 활성화, 날씨 패턴과 같은 요인으로 인해 도착률의 변화가 발생할 수 있다. 또한, 선박 도착률은 시스템의 형태에 따라 달라질 수 있다. Kuo et al.(2006)은 선사별로 구분하여 도착 시간 간격을 분석하게 되면 무작위성에 변화가 발생할 가능성이 있어 시스템 내 정기선사 개수 및 공용부두의 활용 등과 같은 특성을 고려해야 한다고 지적했다. 선박 도착률은 시스템의 세분화 정도(항만 전체, 터미널, 또는 선석)에 의해 달라질 수 있다. 예를 들어, 항만 전체를 하나의 시스템으로 정의하는 경우 모든 터미널 및 선석에 도착하는 선박이 분석 대상이 되며 하나의 터미널이 하나의 서버(server)가 된다.

선박 서비스율은 고객 변동성 및 자원 의존성의 영향을 받는다. 고객 변동성이란 선박의 크기, 화물 유형에 따라 서비스율이 달라질 수 있음을 의미한다. 즉, 선박의 크기가 클수록 양·적하하는 물동량이 많아질 것이고, 이에 따라 하역시간이 길어지면서 서비스율이 낮아질 수 있다. 화물의 유형에 따라서도 하역 방식과 장치장의 적재 방식이 다르다. 예를 들어 수출입 화물의 경우 양하 혹은 적하시간으로 서비스율이 측정되지만, 환적화물의 경우 양하 및 적하가 동시에 이루어지기 때문에 서비스율이 달라질 수 있다. 자원 의존성은 하역장비 및 항만 운영에 따라 서비스율이 달라지는 것을 의미한다.

Dragovic, Park and Radimilovic (2006)은 선박의 서비스율이 선석 개수 및 할당된 안벽 크레인 숫자에 따라 달라질 수 있음을 강조했다. 예를 들어, 다수의 안벽 크레인을 보유한 부두일 경우 선박 크기에 따라 다수의 안벽 크레인을 집중하여 선박을 처리하게 할 수 있으며 두 개 이상의 선석을 보유한 부두의 경우 접안하는 선박 크기에 따라 안벽 크레인을 분산하여 배치할 수 있다. 이때, 같은 크기의 부두라도 선석 개수 및 안벽 크레인 투입 숫자에 따라 서비스율이 달라질 수 있다. 또한 장치율 및 트럭 개수

등과 같은 지원 능력에 따라 서비스율이 달라질 수 있다.

2) 선박 도착률과 서비스율 산정

선박 도착률(λ)과 서비스율(μ)을 산정하기 위해서는 부두별 선박 입항 횟수와 서비스시간을 산출해야 한다. 관련 데이터 수집 및 분석 대상 부두는 <표 3-3>과 <표 3-4>를 따르며 <그림 3-1>에 나타나 있는 전처리 과정을 거친 데이터를 활용한다. 부두별 선박 도착률과 서비스율을 산정하기 위한 데이터 중 2022년 데이터에 대한 요약은 <표 3-5>에 나타나 있다. 한편, 1절에서 서술했듯이 선박이 항만에 1회 입항하여 여러 개의 부두 또는 선석을 이용하는 상황 때문에 발생하는 대기행렬모형 분석의 편의를 제거하기 위해 본 연구에서는 선박의 항계 내 입항 횟수가 아닌, 부두 접안 횟수를 기준으로 시스템의 도착률을 계산하였다. 즉, 아래 도착률 산정 과정에서 선박의 입항 횟수는 선박이 1회 기항하여 다수의 선석을 이용하는 경우를 반영하고 있다.

2022년 부산신항에서 가장 입항 횟수가 많은 부두는 부산신항 2부두로 1,803회를 기록했다. 입항 선박 척수도 456척으로 부산신항 2부두가 가장 많았으며 최대 톤수는 236,618톤, 평균 톤수는 약 69,400톤으로 나타났다. 부산항을 신항과 구항으로 구분하면, 입항 횟수는 신항이 구항보다 다소 적게 나타났다. 하지만, 최대 톤수 및 평균 톤수는 신항이 구항보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 광양항 2단계 1차 부두는 2021년 기능변경으로 급격하게 입항 횟수가 줄어들었으나 연구의 필요성에 의해 2018~2020년까지 3개년을 대상으로 분석했다. 광양항 2단계 1차부두를 제외한 다른 부두는 5개년 데이터를 사용하여 분석했다.

〈표 3-5〉 선박 입출항 데이터 요약(2022년)

단위: 건, 척, 항차, 톤

비고	입항 횟수	입항선박척수	최다 입항차	최대 크기	평균 크기
부산신항 1부두	767	247	79	176,490	80,076
부산신항 2부두	1,803	456	95	232,618	69,400
부산신항 3부두	884	214	92	232,311	65,974
부산신항 4부두	727	208	61	232,311	64,316
부산신항 5부두	911	247	39	236,583	85,563
부산 감만	1,374	220	67	72,884	13,146
부산 신감만	767	155	62	109,712	24,412
부산 자성대	1,684	153	97	75,308	13,120
부산 신선대	2,120	224	96	72,884	11,927
광양 2단계 1차	6	6	1	140,096	46,740
광양 2단계 2차	948	157	44	150,783	23,016
광양 3단계 1차	1,182	231	41	214,286	33,188
인천 남항 ICT	378	101	22	66,278	23,182
인천 남항 E1	215	16	44	17,515	8,209
인천 신항 선광	963	121	150	114,023	18,384
인천 신항 한진	973	131	126	66,462	15,610
울산 신항	606	105	50	54,214	15,605
울산 정일	294	52	34	20,920	13,403
평택·당진 PCTC	454	59	76	27,114	11,847
평택·당진 PNCT	118	4	50	7,360	6,585
대산 4부두	103	27	40	18,848	13,699

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

선박 도착률 계산을 위한 부두별 선박 입항 횟수는 〈표 3-6〉에 나타나 있다. 입항 선박은 풀컨테이너선과 세미컨테이너선을 대상으로 한다. 부산신항 1부두에는 5년 평균 872회 컨테이너선이 입항했으며 부산신항 2부두는 1,746회 입항했다. 광양항 2단계 1차 부두는 2020년까지 입항 횟수를 산정했으며 2018년부터 2020년까지 3년 평균 입항 횟수는 829회로 나타났다. 입항 횟수가 가장 많은 부두는 부산항 신선대부두로 평균 2,354회를

기록했고, 입항 횟수가 가장 적은 부두는 평택·당진항의 PNCT부두로 평균 110회를 기록했다.

〈표 3-6〉 부두별 연도별 선박 입항 횟수

단위: 회

비고	2018	2019	2020	2021	2022	5년 평균
부산신항 1부두	1,004	915	913	765	767	872
부산신항 2부두	1,851	1,884	1,615	1,579	1,803	1,746
부산신항 3부두	1,252	1,194	1,070	972	884	1,074
부산신항 4부두	1,087	933	963	724	727	886
부산신항 5부두	971	886	799	817	911	876
부산 감만	1,528	1,607	1,650	1,459	1,374	1,523
부산 신감만	1,021	1,024	1,097	855	767	952
부산 자성대	1,834	2,068	2,081	2,070	1,684	1,947
부산 신선대	2,476	2,413	2,467	2,295	2,120	2,354
광양 2단계 1차	897	860	731	-	-	829*
광양 2단계 2차	1,297	1,140	1,068	1,272	948	1,145
광양 3단계 1차	755	993	1,317	1,699	1,182	1,189
인천 남항 ICT	510	521	477	423	378	461
인천 남항 E1	294	281	291	272	215	270
인천 신항 선광	915	981	1,003	931	963	958
인천 신항 한진	630	714	866	964	973	829
울산 신항	878	990	1,050	879	606	880
울산 정일	463	428	423	331	294	387
평택·당진 PCTC	534	482	442	456	454	473
평택·당진 PNCT	148	109	103	73	118	110
대산 4부두	141	155	146	105	103	130

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

*광양항 2단계 1차는 3년 평균

도착률은 시간당 선박 입항 횟수의 역수로 산정할 수 있다. 부두별, 연도별 선박 입항 횟수에 따른 도착률은 〈표 3-7〉에 나타나 있다. 최근 5년간

부산신항 1부두의 선박 도착률은 시간당 0.0996척으로 하루 2.39척의 풀 컨테이너선 또는 세미컨테이너선이 입항하는 것으로 추정할 수 있다. 대상 부두 중 도착률이 가장 높은 부두는 부산항 신선대부두로 0.2687로 나타났다. 부산항 신선대부두의 경우 하루 6.45척의 컨테이너선이 입항하는 것으로 추정할 수 있다.

〈표 3-7〉 부두별 연도별 선박 도착률(λ)

단위: 시간당 척수

비고	2018	2019	2020	2021	2022	5년 평균
부산신항 1부두	0.1146	0.1045	0.1042	0.0873	0.0876	0.0996
부산신항 2부두	0.2113	0.2151	0.1844	0.1803	0.2058	0.1994
부산신항 3부두	0.1429	0.1363	0.1221	0.1110	0.1009	0.1226
부산신항 4부두	0.1241	0.1065	0.1099	0.0826	0.0830	0.1012
부산신항 5부두	0.1108	0.1011	0.0912	0.0933	0.1040	0.1001
부산 감만	0.1744	0.1834	0.1884	0.1666	0.1568	0.1739
부산 신감만	0.1166	0.1169	0.1252	0.0976	0.0876	0.1088
부산 자성대	0.2094	0.2361	0.2376	0.2363	0.1922	0.2223
부산 신선대	0.2826	0.2755	0.2816	0.2620	0.2420	0.2687
광양 2단계 1차	0.1024	0.0982	0.0834	-	-	0.0947
광양 2단계 2차	0.1481	0.1301	0.1219	0.1452	0.1082	0.1307
광양 3단계 1차	0.0862	0.1134	0.1503	0.1939	0.1349	0.1358
인천 남항 ICT	0.0582	0.0595	0.0545	0.0483	0.0432	0.0527
인천 남항 E1	0.0336	0.0321	0.0332	0.0311	0.0245	0.0309
인천 신항 선광	0.1045	0.1120	0.1145	0.1063	0.1099	0.1094
인천 신항 한진	0.0719	0.0815	0.0989	0.1100	0.1111	0.0947
울산 신항	0.1002	0.1130	0.1199	0.1003	0.0692	0.1005
울산 정일	0.0529	0.0489	0.0483	0.0378	0.0336	0.0443
평택·당진 PCTC	0.0610	0.0550	0.0505	0.0521	0.0518	0.0541
평택·당진 PNCT	0.0169	0.0124	0.0118	0.0083	0.0135	0.0126
대산 4부두	0.0161	0.0177	0.0167	0.0120	0.0118	0.0148

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

*광양항 2단계 1차는 3년 평균

부두별 서비스율을 계산하기 위해서는 먼저 부두별 서비스시간을 산출해야 한다. 서비스시간 산정은 양하, 적하 및 양·적하를 목적으로 부두 시설에 접안한 풀컨테이너 및 세미컨테이너선을 대상으로 한다. 서비스시간 산정은 마찬가지로 <그림 3-1>의 전처리를 거친 뒤, <그림 3-3>에 나타나 있는 선박 입출항 시스템을 기반으로 이루어진다. 서비스시간은 하역시간과 접안소요시간으로 구성된다. 본 연구에서 의미하는 접안소요시간이란 선석별로 서비스가 완료된 선박이 이안 및 출항한 뒤, 다음 선박이 하역을 위해 접안에 소요되는 시간으로 정의된다. 이는 선박별 입항시점과 접안시점의 차로 계산한다.

<표 3-8>은 최근 5년간 주요 항만의 부두별 평균 접안소요시간 산정 결과이다. 접안소요시간이 0 이하인 값을 제외하고 이상치 제거를 위해 IQR 방식을 적용했다. 부산항의 평균 접안소요시간은 최소 1.27시간(신선대부두)에서 최대 2.14시간(부산신항 1부두)로 산정됐다. 광양항은 최소 2.43시간에서 최대 3.37시간으로 산정됐으며 평균 접안소요시간이 가장 긴 부두는 평택·당진항의 PCNT이며 43.85시간으로 산정됐다.

부산항과 같이 컨테이너 선박이 지속적으로 입항하는 경우에는 측정된 접안소요시간을 순수 접안을 위해 필요한 시간으로 추정할 수 있으나, 타 항만(평택·당진항과 대산항)의 경우에는 산정된 접안소요시간이 접안을 위해 필요한 시간과 입항 선박이 없을 경우 생기는 유휴 시간도 포함한다. 따라서 본 연구에서 확보한 데이터로 측정된 접안소요시간은 실제 접안소요시간을 정확히 대변할 수 없다. 따라서, 전문가 인터뷰를 통해 대략적인 선박 접안소요시간이 선박별 약 1시간이 소요될 것으로 판단하여 하역시간에 1시간의 접안소요시간을 더하여 서비스시간 및 서비스율을 산출했다.

〈표 3-8〉 부두별 5년 평균 접안소요시간

단위: 시간

비고	평균 접안소요시간	접안소요시간 편차
부산신항 1부두	2.14	1.28
부산신항 2부두	1.44	0.84
부산신항 3부두	1.72	0.93
부산신항 4부두	2.10	1.20
부산신항 5부두	2.10	1.35
부산 감만	1.40	0.86
부산 신감만	2.01	1.20
부산 자성대	1.40	0.90
부산 신선대	1.27	0.84
광양 2단계 1차	3.37	2.16
광양 2단계 2차	2.67	2.03
광양 3단계 1차	2.43	1.74
인천 남항 ICT	10.04	8.85
인천 남항 E1	5.28	5.64
인천 신항 선광	3.73	2.88
인천 신항 한진	4.05	3.17
울산 신항	3.71	2.83
울산 정일	4.10	4.26
평택·당진 PCTC	6.54	5.04
평택·당진 PNCT	43.85	30.30
대산 4부두	21.53	16.50

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

*광양항 2단계 1차는 3년 평균

부두별 서비스율은 선박 1척당 평균 서비스시간의 역수로 정의할 수 있으며, 아래 〈표 3-9〉에 나타나 있다. 부산신항 1부두의 최근 5년 평균 서비스율은 0.048이며 부산항에서 서비스율이 가장 높은 부두는 감만부두로 0.0632를 기록했다. 대상 부두 중 울산 정일부두가 서비스율이 가장 높게 나타났으며 부산신항 5부두의 서비스율이 0.0442로 가장 낮게 나타났다.

〈표 3-9〉 부두별 연도별 서비스율(μ)

단위: 시간당 척수

비고	2018	2019	2020	2021	2022	5년 평균
부산신항 1부두	0.0621	0.0592	0.0475	0.0354	0.0349	0.0480
부산신항 2부두	0.0608	0.0592	0.0481	0.0432	0.0502	0.0529
부산신항 3부두	0.0729	0.0687	0.0567	0.0445	0.0476	0.0590
부산신항 4부두	0.0764	0.0609	0.0552	0.0371	0.0415	0.0550
부산신항 5부두	0.0592	0.053	0.0417	0.0373	0.0363	0.0442
부산 감만	0.0737	0.0705	0.0657	0.0539	0.0534	0.0632
부산 신감만	0.075	0.0712	0.0642	0.0419	0.0475	0.0607
부산 자성대	0.0622	0.0628	0.0626	0.0525	0.0520	0.0585
부산 신선대	0.0668	0.0627	0.0655	0.0531	0.0491	0.0591
광양 2단계 1차	0.1187	0.1025	0.1036	-	-	0.1079
광양 2단계 2차	0.1301	0.1217	0.1117	0.1068	0.1047	0.1152
광양 3단계 1차	0.0881	0.0953	0.0926	0.1052	0.1052	0.0989
인천 남항 ICT	0.0687	0.0714	0.0699	0.0644	0.0592	0.0670
인천 남항 E1	0.0693	0.0723	0.081	0.0747	0.0685	0.0732
인천 신항 선광	0.0721	0.0742	0.0709	0.0679	0.0735	0.0719
인천 신항 한진	0.0781	0.0763	0.0763	0.0683	0.0717	0.0735
울산 신항	0.1379	0.1242	0.1142	0.1138	0.1335	0.0834
울산 정일	0.1024	0.0955	0.0805	0.0714	0.0689	0.1241
평택·당진 PCTC	0.0610	0.0696	0.0598	0.0595	0.0575	0.0615
평택·당진 PNCT	0.0608	0.0603	0.0549	0.0496	0.0534	0.0566
대산 4부두	0.0626	0.0771	0.0548	0.0665	0.0733	0.0654

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

*광양항 2단계 1차는 3년 평균

〈표 3-10〉은 부두별 선박 도착률과 서비스율을 요약한 표이다. 부산신항 1부두는 연평균 872회 선박이 입항했으며, 총 17,255시간 동안 하역작업을 실시했으며 총 324시간 대기가 발생했다. 또한, 시간당 약 0.0996척의 선박이 입항했으며, 하나의 선석에서 시간당 0.048척이 서비스를 받았다. 이는 하루평균 2.39척(0.0996×24 시간)의 선박이 입항하고 한 척당 평균

하역시간은 20.82시간(1/0.0480)이 소요되는 것으로 해석할 수 있다.

〈표 3-10〉 대상 부두의 선박 도착률 및 서비스율 산정 결과(최근 5년 평균)

단위: 건, 시간, 시간당 척수

항만	부두	입항 횟수	하역시간	대기시간	도착률	서비스율
부산	신항 1부두	872	17,255	324	0.0996	0.0480
	신항 2부두	1,746	31,464	2,568	0.1994	0.0529
	신항 3부두	1,074	17,335	909	0.1226	0.0590
	신항 4부두	886	15,185	745	0.1012	0.0550
	신항 5부두	876	19,142	1,193	0.1001	0.0442
	감만	1,523	21,364	2,188	0.1739	0.0632
	신감만	952	14,750	574	0.1088	0.0607
	자성대	1,947	30,939	2,307	0.2223	0.0585
	신선대	2,354	35,745	5,541	0.2687	0.0591
광양	2단계 1차	829	4,485	158	0.0947	0.1079
	2단계 2차	1,145	9,428	327	0.1307	0.1152
	3단계 1차	1,189	11,161	1,045	0.1358	0.0989
인천	남항 ICT	461	6,285	343	0.0527	0.0670
	남항 E1	270	3,130	25	0.0309	0.0732
	신항 선광	958	11,583	317	0.1094	0.0719
	신항 한진	829	9,816	629	0.0947	0.0735
울산	신항	880	10,137	92	0.1005	0.0834
	정일	387	3,032	95	0.0443	0.1241
평택·당진	PCTC	473	7,393	3	0.0541	0.0615
	PNCT	110	1,826	50	0.0126	0.0566
대산	4부두	130	1,923	12	0.0148	0.0654

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

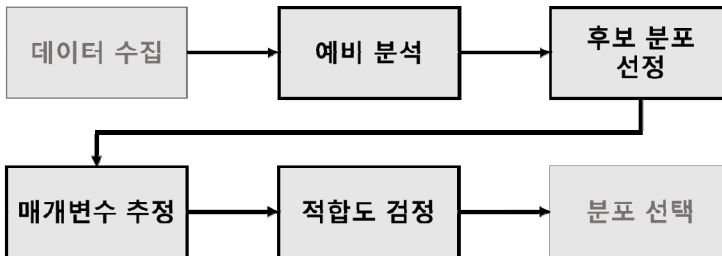
*광양항 2단계 1차는 3년 평균

제2절 이론분포 검정

1. 이론분포 검정 절차

본 장에서는 선박대기모형 적용을 위해 부두별 도착 시간 간격 및 서비스시간에 대한 이론분포를 검정한다. 이론분포 검정과정은 <그림 3-4>에 보이는 것과 같다. 첫 번째 단계는 예비분석으로 도착 시간 간격과 서비스 시간이 어떠한 분포를 띄고 있는지 데이터를 시각화하여 분석한다. 두 번째는 데이터가 따를 것이라고 기대되는 후보 이론분포를 선정하고, 적합도를 검정하기 위해 데이터의 매개변수(평균, 표준편차 및 도착률 등)를 추정한다. 마지막으로 적합도 검정을 실시하여 데이터와 이론분포 간 검정통계량을 계산해 데이터가 이론분포를 따르는지 판단한다. 적합도 검정 방법은 K-S 방법을 사용했으며 파이썬 SciPy 라이브러리의 Stats 패키지를 분석에 사용했다.

<그림 3-4> 이론분포 검정 과정



이론분포 검정을 위한 귀무가설(H_0) 및 대립가설(H_1) 설정은 <표 3-11>에 나타나 있다. 본 검정의 귀무가설은 관측된 데이터가 예상된 분포 또는 패턴을 따르는 것이며 따라서 관측된 데이터와 이론분포 간의 유의미한 차이가 없음을 뜻한다. 대립가설은 관측된 데이터가 예상 분포 또는 패턴을

따르지 않으며 관측된 데이터가 이론분포 간 유의미한 차이가 있음을 뜻한다. 예를 들어 도착 시간 분포를 검정할 시 귀무가설이 기각되면 지수분포를 따르지 않는다고 판단하는 것을 의미한다.

〈표 3-11〉 귀무가설/대립가설 설정

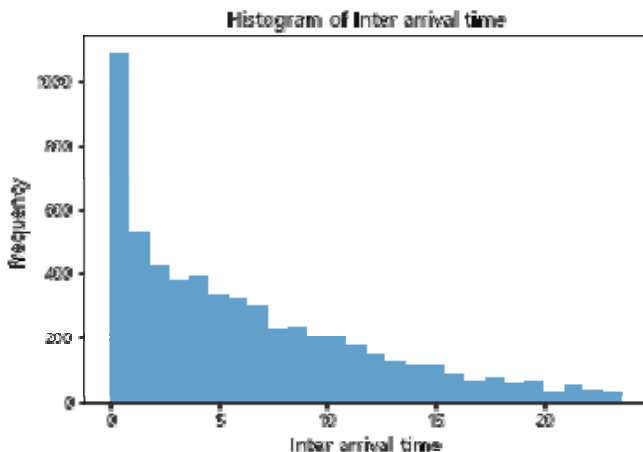
구분	가설 모형
귀무가설(H_0)	관측된 데이터는 예상된 분포 또는 패턴을 따름, 즉, 관측된 데이터와 이론분포 간 유의미한 차이가 없음
대립가설(H_1)	관측된 데이터가 예상 분포 또는 패턴을 따르지 않음, 관측된 데이터와 이론분포 간 유의미한 차이가 있음

자료: 저자 작성

1) 도착 시간 간격 분포 검정

먼저 선박 도착 시간 간격의 분포를 검정하기 위해 도착 시간 간격의 분포를 시각화한다. 〈그림 3-5〉는 부산신항 1부두의 도착 시간 간격 분포에 대한 히스토그램이다.

〈그림 3-5〉 부산신항 1부두 도착 시간 간격 분포 히스토그램



자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

히스토그램을 위한 그룹(bin)의 크기는 30개로 설정했다. 부산항 도착 시간 간격 분포는 양수의 왜도(Skewness)를 띄는 전형적인 긴 꼬리 분포(Long-tailed distribution)로 판단된다. 후보분포는 사례연구 검토 결과에 따라 선행연구에서 도출되었던 도착 시간 간격 분포인 지수, 감마, 로그 정규 및 정규분포를 선정한다.

최근 5년간의 부두별 도착 시간 간격의 K-S 검정 결과는 <표 3-12>에 나타나 있다. 유의수준은 0.05로 설정했으며 K-S 검정은 p-value가 클수록 분포 적합도가 높다. 반면, p-value가 유의수준인 0.05 이하일 경우 귀무가설을 기각한다. K-S 검정 결과에 따르면 부산항 신감만부두, 평택·당진항의 PNCT 부두와 대산항 4부두를 제외하고는 모든 부두의 도착 시간 간격 분포는 지수분포가 가장 적합도가 높은 것으로 나타났다. 한편, 부산항 신감만부두의 경우, 감마분포의 적합도가 0.9829로 나타났지만 지수분포의 적합도 또한 0.9702로 높게 나타났다.

<표 3-12> 부두별 도착 시간 간격 적합도 검정 결과

비고	K-S	
	최적 분포	p-value
부산신항 1부두	지수	0.7723
부산신항 2부두	지수	0.8375
부산신항 3부두	지수	0.9935
부산신항 4부두	지수	0.9688
부산신항 5부두	지수	0.6828
부산 감만	지수	0.8163
부산 신감만	감마	0.9829
부산 자성대	지수	0.7193
부산 신선대	지수	0.7087
광양 2단계 1차	지수	0.5716
광양 2단계 2차	지수	0.8303
광양 3단계 1차	지수	0.6683

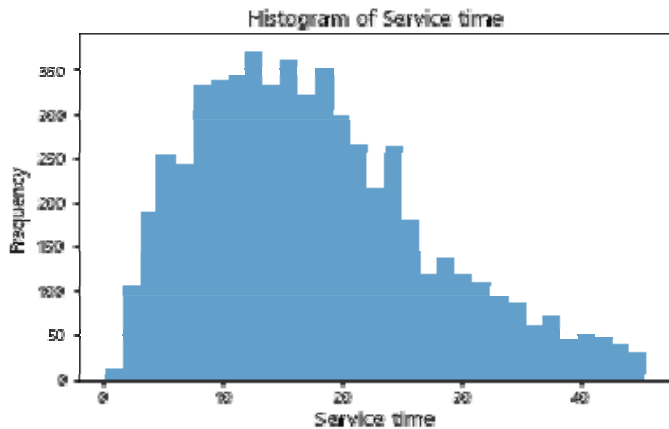
비고	K-S	
	최적 분포	p-value
인천 남항 ICT	지수	0.9144
인천 남항 E1	지수	0.9998
인천 신항 선광	지수	0.9968
인천 신항 한진	지수	0.9093
울산 신항	지수	0.7877
울산 정일	지수	0.4703
평택·당진 PCTC	지수	0.9078
평택·당진 PNCT	정규	0.7724
대산 4부두	로그정규	0.5564

자료: 저자 작성

2) 서비스시간 분포 검정

서비스시간 분포 검정은 도착 시간 간격 분포 검정과 동일한 절차로 이루어진다. <그림 3-6>는 부산신항 1부두의 서비스시간 분포에 대한 히스토그램이다.

<그림 3-6> 부산신항 1부두 서비스시간 분포 히스토그램



자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

도착 시간 간격과 유사한 긴 꼬리 분포를 띄고 있으나 왜도는 도착 시간 간격과 비교해 중앙으로 치우친 형태이다. 본 연구에서는 서비스시간 분포 검정을 위한 후보 분포로 사례연구를 통해 제시된 지수, 감마, 로그 정규 및 정규분포를 선정한다.

최근 5년간 부두별 서비스시간의 K-S 검정 결과는 <표 3-13>에 나타나 있다. K-S 검정 결과에 따르면, 부산항은 신선대부두를 제외한 모든 부두에서 서비스시간에 대해 감마분포가 가장 적합한 분포이며 통계적으로 모두 유의한 것으로 나타났다. 또한, 이외의 부두에서는 감마, 지수 및 정규로 나타났다. 이를 통해, 국내 컨테이너 부두의 서비스시간은 지수분포를 포함한 다양한 분포를 따르는 것을 확인할 수 있으며, 감마분포 또는 정규분포와 같은 등 일반분포(General distribution)를 따름을 알 수 있다.

<표 3-13> 부두별 서비스시간 적합도 검정 결과

비고	K-S	
	최적 분포	p-value
부산신항 1부두	감마	0.1214
부산신항 2부두	감마	0.5722
부산신항 3부두	감마	0.3719
부산신항 4부두	감마	0.7526
부산신항 5부두	감마	0.1788
부산 감만	감마	0.2421
부산 신감만	감마	0.2828
부산 자성대	감마	0.3266
부산 신선대	지수	0.3013
광양 2단계 1차	정규	0.5340
광양 2단계 2차	감마	0.4920
광양 3단계 1차	지수	0.6707
인천 남항 ICT	지수	0.7000
인천 남항 E1	정규	0.3030

비고	K-S	
	최적 분포	p-value
인천 신항 선광	지수	0.1998
인천 신항 한진	감마	0.3369
울산 신항	감마	0.4450
울산 정일	감마	0.4371
평택·당진 PCTC	지수	0.2265
평택·당진 PNCT	지수	0.2357
대산 4부두	지수	0.1403

자료: 저자 작성

3) 대기행렬모형 시스템 형태 결정

이론분포 검정 결과를 요약하면, 부두별 도착 시간 간격은 부산항 신감만, 평택항 PNCT 및 대산항 4부두를 제외하면 대부분 지수분포가 최적분포이며 통계적으로도 유의한 것으로 나타났다. 서비스시간의 경우, 부산항에서는 신선대부두만 제외하고는 모든 부두의 서비스시간이 감마분포를 따르는 것으로 나타났으며, 이외의 국내 부두에서는 감마분포, 정규분포, 지수분포가 고르게 나타났다. 위와 같은 분포 검정 결과를 바탕으로, 국내 컨테이너 부두를 대기행렬모형으로 분석하기 위해서는 2장 1절에서 다룬 M/G/c 모형을 적용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

2. 부두별 선박 대기행렬표

본 연구에서는 국내 컨테이너 부두의 도착 시간 간격과 서비스시간이 각각 지수분포와 일반분포를 따른다는 것을 통계적으로 검정하였다. 서비스방식은 FCFS를 따른다는 가정을 적용했으며, 시스템 규모, 모집단 크기는 무한한 것으로 가정했다. 따라서, 본 연구에서 적용한 선박대기모형은

(M/G/c):(FCFS/ ∞ / ∞)로 나타낼 수 있다. 국내 주요 컨테이너 부두의 선박 대기행렬표 작성을 위해 부두별 변수를 산정한다.

〈표 3-10〉과 〈표 3-14〉은 주요 컨테이너 항만의 대기행렬표를 작성하기 위한 변수를 나타낸다. 예를 들어, 부산신항 1부두의 최근 5년 평균 입항 횟수는 872건, 총하역시간은 17,255시간이다. 총대기시간은 324시간이며 도착률과 서비스율은 각각 0.0996과 0.0480이다. 부산신항 1부두의 하역시간 평균은 20.82시간이며 표준편차는 9.95시간이다. 위 변수와 2장 1절에서 서술한 M/G/c 모형의 수식 (15)~(16)을 활용하여 국내 21개 컨테이너 부두의 대기행렬표를 작성하였다. 21개 컨테이너 부두별 대기행렬표는 부록에 기재되어 있다.

〈표 3-14〉 주요 항만 하역시간 평균 및 표준편차(5년 평균, 2018~2022)

단위: 시간

항만	구분	평균	표준편차
부산	신항 1부두	20.82	9.95
	신항 2부두	18.90	8.23
	신항 3부두	16.96	7.41
	신항 4부두	18.18	8.37
	신항 5부두	22.62	9.05
	감만	15.82	5.53
	신감만	16.47	7.00
	자성대	17.09	5.99
	신선대	16.91	6.04
광양	2단계 1차	9.27	3.90
	2단계 2차	8.68	3.14
	3단계 1차	10.11	4.33
인천	남항 ICT	16.94	4.66
	남항 E1	13.67	6.05
	신항 선광	13.92	4.91
	신항 한진	13.60	5.27

단위: 시간

항만	구분	평균	표준편차
울산	신항	11.98	6.42
	정일	8.06	3.18
평택·당진	PCTC	16.26	6.21
	PNCT	17.67	6.01
대산	4부두	15.29	7.34

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

〈표 3-15〉은 부산 신항 1부두에 적용된 대기모형의 성능척도이다. 대기 모형에서 활용되는 성능척도를 항만과 선박에 적용하면, λ 는 평균 선박 도착 척수(선석 접안), μ 는 터미널의 평균 작업(양적하) 척수, ρ 는 터미널의 선석 점유율, L 은 평균 재항 척수(항계 내), L_q 는 평균 선박 대기 척수, W 는 평균 재항(대기 및 작업 포함) 시간, W_q 는 평균 작업 대기 시간으로 해석할 수 있다(KMI, 2023). 〈표 3-15〉에 따르면 부산 신항 1부두는 시간당 0.0996대의 선박이 입항하고, 시간당 0.144(0.048*3선석)대의 작업을 완료한다. 평균 선석 점유율은 0.691이며 항계 내에 평균 3.148척이 재항 중인 것으로 확인된다. 대기 선박은 약 1.074대로 나타나며, 선박 1척 당 항만 내 재항시간은 평균 31.597시간으로 나타난다. 또한, 선박 1척 당 평균 대기시간은 6.622시간이다.

〈표 3-15〉 부산신항 1부두 (M/G/3): (FCFS/ ∞/∞) 성능척도

성능척도	산정값
평균 선박 도착 척수(λ)	0.0996
평균 작업 척수(μ)	0.0480
선석 점유율(ρ)	0.691
평균 재항 척수(L)	3.148
평균 선박 대기 척수(L_q)	1.074
평균 재항시간(W)	31.597
평균 대기시간(W_q)	6.622

자료: 저자 작성, 전체 터미널에 대한 결과는 부록에 기술

〈표 3-16〉 부산신항 1부두 평균 대기시간(W_q) 산출표 예시

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5
0.05	0.673	0.032	0.002	0.000	0.000
0.15	2.256	0.294	0.057	0.013	0.003
0.25	4.262	0.852	0.251	0.087	0.033
0.35	6.885	1.785	0.672	0.297	0.143
0.45	10.461	3.246	1.442	0.747	0.422
0.55	15.627	5.545	2.777	1.611	1.016
0.65	23.745	9.354	5.129	3.237	2.210
0.75	38.357	16.439	9.679	6.513	4.723
0.85	72.452	33.289	20.752	14.689	11.157
0.95	242.926	118.349	77.311	56.987	44.893

자료: 저자 작성, 전체 결과는 부록 참조

〈표 3-16〉은 〈표 3-10〉, 〈표 3-14〉과 M/G/c 모형의 수식 (15)~(16)을 활용하여 산출한 부산신항 1부두의 선석 점유율(ρ)에 따른 이론적 평균 선박대기시간(W_q)표이다. 과거 Port-MIS 데이터를 분석하여 산정한 부산신항 1부두 3개 선석의 선석 점유율은 0.691이다. 〈표 3-16〉에 따르면 평균대기시간이 5.129~9.679시간 사이의 값 중 5.129에 비교적 가까운 값을 가질 것으로 예상할 수 있다. 〈표 3-15〉에서 계산된 평균 대기시간(W_q)이 6.622인 것을 통해 이를 확인할 수 있다. 또한, 현재 선석 점유율(0.691)보다 점유율이 약 6% 높아져서 75%가 되면, 이론적인 평균 대기시간은 약 9.679시간이 되어 1척당 평균 대기시간이 3.057(9.679-6.622)시간 증가한다. 만약, 어떠한 이유로 선석 1개가 마비 또는 감소하여 선석이 2개가 되면 이론적인 평균 대기시간은 약 9.354시간으로 산정되며, 이론적인 평균 대기시간은 약 2.732(8.571-6.622)시간 증가한다. 이처럼, 본 연구에서 도출된 부두별 평균 대기시간 산출표를 활용하면 선석점유율(ρ)과 선석 수(c) 증감에 따른 이론적 대기시간의 변화를 확인할 수 있다.

제3절 대기행렬모형 가정 개선 및 현실화

1. 초과 물동량 배분 방안 검토

KMI(2023)는 대기행렬모형을 이용하여 선박의 대기시간 및 대기비용을 산정하는 편익 산정 방법론을 제안하였다. 위 연구에서는 신설 부두 사업 미시행 시, 신설 부두의 적정하역능력에 해당하는 물동량을 인접한 부두에서 처리하는 것으로 가정하였다. 즉, 사업이 시행된 경우에는 신설된 선석에서 처리될 예정이었던 물동량을 사업이 시행되지 않은 경우에는 인접한 기존 부두에서 나누어 부담하는 것이다. 이에 따라, 기존 인접 부두의 선박 도착률은 상승하고, 선박 도착률이 상승함에 따라 대기행렬모형에 의해 산정된 각 부두의 평균 선박대기시간은 증가한다. 이때, KMI(2023)는 대기비용 산정의 대상이 되는 초과 물동량을 인접한 기존 부두에서 균일하게 분담하는 것으로 가정하였다. 하지만, 인접한 기존 부두의 특성을 고려하지 않고 초과 물동량을 균일하게 배분하는 것은 적용하기 어려운 가정이다. 본 연구에서는 보다 현실적인 방안으로서 적정하역능력과 서비스율을 기준으로 물동량을 배분하는 방안을 제안한다.

1) 적정하역능력 기준 배분

부두의 하역능력은 고유하역능력과 적정하역능력으로 구분할 수 있다. 고유하역능력은 부두의 최대 하역능력으로, 부두의 화물처리능력이 휴지 없이 지속한다는 가정에 따라 산출된다. 반면, 적정하역능력은 보다 현실성 있는 하역능력으로 사회경제적 비용을 최소화하는 서비스 수준에서 결정된다. 적정하역능력에서 고려하는 사회경제적 비용은 부두 운영사의 서비스 제공 비용과 선사 및 화주의 대기비용이며, 이 두 가지 비용의 합이 최소가

될 때 부두는 경쟁력을 갖춘 최적의 하역 서비스를 제공할 수 있다.¹⁾

반면, 적정하역능력에 비례하여 화물을 배분하면 이러한 문제를 효율적으로 대응할 수 있다. 또한, 적정하역능력에 따른 배분은 각 부두에 불균형한 부하를 주는 것을 방지하고, 모든 부두가 비슷한 서비스 수준에서 화물을 처리하도록 할 수 있다. 이는 항만의 전체적인 작업 부하를 균형있게 분산시키는 데 이바지하여 항만의 전체적인 작업 효율성과 생산성을 향상시키는데 도움이 될 수 있다.

컨테이너 부두의 적정하역능력이 높다는 것은 해당 부두에서 같은 시간 내 상대적으로 더 많은 화물 하역작업을 수행할 수 있음을 의미한다. 이에 따라 대기비용 산정의 대상이 되는 초과 물동량은 사업 시행 인접 부두에 동일하게 배분되기보다는 각 부두의 적정하역능력과 비례하여 배분된다고 보는 것이 타당하다. 컨테이너 부두의 적정하역능력은 선석 수, 선석 점유율, 시간당 컨테이너 화물 처리능력, 연간 터미널 운영 시간 등 변수에 의해 산정되며, 컨테이너 터미널 장치장의 이용률도 고려하여 계산된다. 본 연구에서는 해양수산부(2020)에서 수행한 항만 적정하역능력 재산정 보고서에 수록된 적정하역능력을 초과 물동량 배분에 활용하였다. 예를 들어, 「부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2022a)와 「부산항 제2신항 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2021b)의 사업 미시행에 따른 인접 기존 부두는 부산신항 5개 부두로 설정할 수 있으며, 각 부두의 적정하역능력은 아래 <표 3-17>와 같다.

<표 3-17> 부산신항 5개 부두 적정하역능력

신항 1부두	신항 2부두	신항 3부두	신항 4부두	신항 5부두
270만TEU	379만TEU	231만TEU	198만TEU	300만TEU

자료: 항만 적정하역능력 재산정 (해양수산부, 2020)

1) 해양수산부(2020), 항만 적정하역능력 재산정(1권), p.11-15

2) 서비스율 기준 배분

한편, 컨테이너 부두의 이론적인 적정하역능력보다는 실제 처리능력을 기준으로 물동량을 분배할 수 있다. 컨테이너 부두의 적정하역능력은 부두의 선석 수, 선석 점유율, 시간당 컨테이너 화물 처리능력 등을 바탕으로 이론적으로 산정된 처리능력이다. 하지만, 실제 컨테이너 부두의 선박 하역 시간 및 처리 선박 수는 이론적으로 산정된 적정하역능력과 다르다. 실제로, 부산신항의 터미널은 산정된 적정하역능력보다 20~30% 이상 더 많은 물동량을 처리하고 있다. 적정하역능력이 높은 부두가 반드시 더 많은 선박을 처리한다는 보장은 없다. 따라서, 이론적으로 산정된 적정하역능력 대신에 각 부두의 선박 한 척당 평균 하역시간의 역수와 선석 수를 곱한 숫자를 기준으로 초과 물동량을 할당할 수 있다. 즉, 각 부두의 실제 선박 처리능력을 데이터로 분석하여, 더 많은 선박을 처리하는 부두에 더 많은 물동량을 할당하는 것이다.

예를 들어, 부산신항 5개 부두의 지난 5년간 평균 서비스율(선박 처리시간의 역수), 선석 수는 아래와 같다. ‘서비스율×선석 수’는 해당 부두에서 시간당 평균적으로 처리하는 선박 수를 나타낸다. <표 3-17>과 <표 3-18>을 비교하면, 컨테이너 부두의 이론적인 적정하역능력과 실제 처리능력이 반드시 일치하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 신항 5부두가 신항 4부두보다 적정하역능력이 높지만, 실제 데이터로는 신항 4부두의 처리 선박 수가 많은 것을 확인할 수 있다.

적정하역능력 기준과 서비스율 기준 사이의 차이는 두 기준이 중점적으로 고려하는 것이 다르기 때문에 발생한다. 적정하역능력은 처리하는 선박 수와 관계없이, 화물을 얼마만큼 처리할 수 있는지를 나타내는 지표이다. 반면, 서비스율은 화물량과 관계없이 처리하는 선박의 수를 나타내는 지표이다. 두 지표 중 어느 것을 기준으로 초과 물동량을 배분하는 것이 바람직

한지는 항만의 특성에 따라 다를 수 있으며, 기준 선정에 대한 추가적인 논의가 필요하다.

KMI(2023)가 제안한 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론에서는 초과 물동량을 표준선형과 적재율로 나누어 추가적인 선박 도착률로 환산하여 대기시간을 계산한다. 이러한 점에서 처리하는 선박 수를 나타내는 지표인 서비스율을 기준으로 초과 물동량을 배분하는 것이 방법론적으로 통일성이 있으나, 이 역시 각 선박의 하역 화물량이 모두 다르다는 점을 반영하지 못하는 한계점이 존재한다.

본 연구의 5장 사례연구에서는 「부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2022a)와 「부산항 제2신항 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2021b)에서 서비스율을 기준으로 초과 물동량을 배분하였다.

〈표 3-18〉 부산신항 5개 부두 서비스율(2018~2022, 5년 평균)

구분	신항 1부두	신항 2부두	신항 3부두	신항 4부두	신항 5부두
서비스율	0.0480	0.0529	0.0590	0.0550	0.0442
선석 수	3	6	4	4	4
서비스율×선석수	0.1440	0.3174	0.2360	0.2200	0.1768

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

2. 컨테이너 선박 평균 적재율 산정

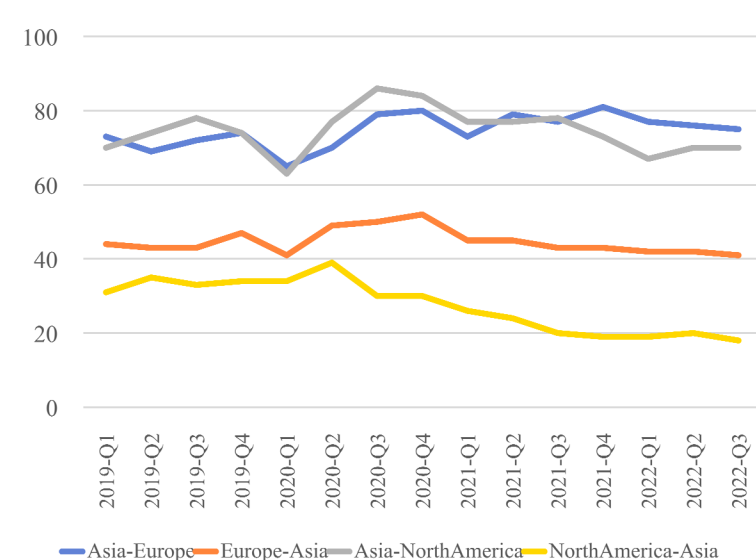
KMI(2023)는 대기행렬모형을 적용한 편익 산정 사례연구에서 국내 항만에 입항하기 위해 대기하고 있는 컨테이너 선박의 적재율을 모두 100%로 가정하였다. 예를 들어, 5,000TEU급 컨테이너 선박이 입항을 위해 정박지에서 대기 중이라면, 해당 선박에 5,000TEU만큼 화물이 적재되어 있으며, 5,000TEU 화물에 대해 체화비용이 발생하는 것으로 가정했다. 하지

만, 국내 컨테이너 항만에 입항하기 위해 대기하고 있는 선박의 실제 적재율은 100%보다 낮으므로 현실을 반영하여 개선할 필요가 있다.

선박의 적재율은 선박 적재능력에 대비하여 실제로 화물이 적재된 비율을 의미한다. 다시 말해, 선박의 활용 가능한 총 공간 중 얼마나 많은 공간이 실제로 화물로 채워져 있는지를 나타내는 지표이다. 예를 들어, 선박이 1,000TEU의 최대 적재능력을 가지고 있지만 실제로는 800TEU의 화물만 운반하고 있다면, 그 선박의 적재율은 80%이다. 이는 선박이 가진 총 공간 중 80%가 화물로 차지되고 있다는 것을 의미한다. 적재율이 높을수록 선박은 자신의 최대 운반 능력에 가까운 화물을 수송하고 있다는 것을 나타내며, 이는 운송 효율성 측면에서 중요한 요소이다. 반대로 적재율이 낮으면 선박의 운반 능력이 비효율적으로 사용되고 있다는 것을 의미한다.

선박의 적재율은 화물의 수요와 공급에 크게 영향을 받는다. 예를 들어, 화물 수요가 높은 성수기에는 선박의 적재율이 증가하며, 반대로 화물 수요가 줄어드는 비수기에는 적재율이 감소한다. 또한, 선박의 노선 역시 적재율에 영향을 미친다. 아래 <그림 3-7>에서 볼 수 있듯이 아시아에서 북미, 유럽으로 향하는 노선의 경우, 컨테이너 선박의 평균 적재율이 약 74%에 달한다. 반면, 반대로 유럽 또는 북미에서 아시아로 향하는 노선의 선박 평균 적재율은 이보다 낮은 30~40% 수준인 것을 확인할 수 있다. 이러한 적재율 차이는 아시아와 북미/유럽 간 무역 추세에 따른 결과이다. 노선의 컨테이너 선박 적재율에서 알 수 있듯이, 아시아와 북미/유럽 간 무역은 북미/유럽이 아시아에서 주로 수입을 하는 형태로 이루어진다.

〈그림 3-7〉 아시아-북미/유럽 노선 컨테이너 선박 평균 적재율(%)



자료: Lloyd's List Containers Data Hub(검색일: 2023.08.17.)

선박대기비용을 산정하기 위한 적재율은 해당 항만에 실제로 대기하는 선박의 적재율을 조사하여 사용하는 것이 가장 정확한 방법일 것이다. 하지만, 현실적으로는 특정 항만에 입항하기 위해 대기 중인 선박의 적재율을 조사하는 것은 데이터를 구할 수 없기 때문에 매우 어렵다. 우리나라 항만운영업무와 관련된 데이터를 처리하는 시스템인 Port-MIS에도 선박의 적재율 데이터는 제공되지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 현실적으로 수집 가능한 선박 적재율 데이터인 대륙별 선박 적재율 데이터를 바탕으로 우리나라 항만에 입항하는 선박의 적재율을 추정하고자 한다.

〈표 3-19〉는 2019년 1분기부터 2022년 3분기까지 ‘아시아-유럽’, ‘유럽-아시아’, ‘아시아-북미’, ‘북미-아시아’ 노선의 컨테이너 선박 평균 적재율을 나타낸다. 약 4년간 위 4개 노선의 컨테이너 선박 평균 적재율은 각각 74.7%, 44.7%, 74.5%, 27.5%로 나타났다. 〈표 3-19〉에 나타난 적재율

데이터를 바탕으로, 우리나라 항만의 컨테이너 처리실적(해외지역별), 항만 권역별 항로 개수, 항만 정기노선 기항 횟수 등으로 가중평균하여 해당 항만의 평균 적재율을 추정할 수 있다.

〈표 3-19〉 아시아-북미/유럽 노선 컨테이너 선박 평균 적재율

단위: %

노선	2019-Q1	2019-Q2	2019-Q3	2019-Q4	2020-Q1	2020-Q2	2020-Q3	2020-Q4
Asia-EU	73	69	72	74	65	70	79	80
EU-Asia	44	43	43	47	41	49	50	52
Asia-NA	70	74	78	74	63	77	86	84
NA-Asia	31	35	33	34	34	39	30	30
노선	2021-Q1	2021-Q2	2021-Q3	2021-Q4	2022-Q1	2022-Q2	2022-Q3	Average
Asia-EU	73	79	77	81	77	76	75	74.7
EU-Asia	45	45	43	43	42	42	41	44.7
Asia-NA	77	77	78	73	67	70	70	74.5
NA-Asia	26	24	20	19	19	20	18	27.5

자료: Lloyd's List Containers Data Hub(검색일: 2023.08.17.)

〈표 3-20〉 전국 컨테이너 물동량 처리실적(해외지역별)

단위: TEU

지역		2018	2019	2020	2021	2022	평균
북미	출항	2,332,005	2,251,938	2,398,161	2,521,237	2,517,031	2,404,074
	입항	2,155,052	2,086,746	1,854,140	1,862,381	1,844,667	1,960,597
유럽	출항	936,267	913,889	781,577	831,549	625,136	817,684
	입항	836,331	890,134	844,192	922,757	813,787	861,440

자료: Port-MIS를 참조하여 저자 작성

3. 선박 대기에 따른 환경비용 원단위 개발

선박 항해 시 연료가 연소되어 발생하는 대기오염물질으로는 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 미세먼지(PM), 비메탄계 휘발성

유기화합물(NMVOC) 등이 있다. 이와 같은 대기오염물질은 항만 인근 주민의 호흡기 질환, 암 질환 등을 일으키며 지역 사회에 심각한 사회적비용을 발생시킨다. 특히, 도시에 인접한 항만에서 선박의 체류 시간이 길어진다면 그 심각성은 더욱 증가하므로 컨테이너 선박 대기에 따른 환경비용을 산정하는 것은 매우 중요하다. 따라서, 컨테이너 선박 대기에 따른 환경비용을 산정하기에 앞서, 컨테이너 선박에서 배출되는 시간당 평균 대기오염물질 배출량을 계산하여 컨테이너 선박 대기에 따른 환경비용 원단위를 도출한다.

본 연구에서는 컨테이너 선박 대기에 따른 환경비용의 원단위를 도출하기 위해 유럽 환경청(EEA: European Environment Agency)에서 발간한 대기오염물질 배출량 산정 가이드북 ‘EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019’를 참고하였다. 특히, 이 가이드북 중 International maritime navigation(1.A.3.d.i)에 서술된 내용을 활용하였다. 해당 가이드북의 소개된 선박으로 인한 대기오염물질 산정 방법 중 가장 상세하고 정확한 대기오염물질 추정 모형은 tier 3 방법론으로, 개별 선박 운항 시간, 운항 상태, 연료 종류, 엔진 종류, 엔진 출력, 엔진 부하율 등에 따라 대기오염물질별 발생량을 추정한다. tier 3 방법론을 본 연구의 목적에 맞게 수정한 식은 아래와 같다.

$$E_{Hotel, i, j, m} = T \times \sum_e (P_e \times LF_{Hotel, e} \times EF_{Hotel, e, i, j, m}) \quad (\text{식-33})$$

여기서,

E_{Hotel} = 선박의 묘박/정박(Hotelling) 시 배출량(톤)

EF_{Hotel} = 선박의 묘박/정박 시 배출계수(g/kWh)

LF_{Hotel} = 선박의 묘박/정박 시 엔진 부하율(%)

P = 엔진 출력(kW)

T = 운항 시간(hours)

e = 엔진 분류(메인, 보조)

i = 배출원(CO, NO_x, SO_x, PM, NMVOC)

j = 엔진 종류(저속·중속·고속 디젤, 가스터빈, 스팀터빈)

m = 연료 종류(병커유, 디젤유(Marine Diesel/Gas Oil), LNG, 가솔린)

원단위 산정을 위한 기준 시간은 1시간으로 설정하였다. 또한, 선박 정박 시 엔진 부하율은 가이드북 중 선박의 정박 상태를 나타내는 ‘Hotelling(유조선 제외)’ 값인 40%를 적용하였다. 울산항 도선사회와의 인터뷰에 따르면 국내 항만에 정박하는 컨테이너선은 대부분 고정 피치 프로펠러(Fixed Pitch Propeller)를 사용하며, 모박/정박 시 메인엔진을 종료하고 보조엔진만을 사용하므로 보조엔진에 의해 발생하는 대기오염물질만을 고려하였다. 보조엔진의 종류는 컨테이너선에 일반적인 중속 디젤 엔진을 적용했으며, 출력은 부산항에 취항하는 컨테이너선의 제원 정보를 활용해 선박 분류별 평균값을 도출했다. 연료는 디젤유로 가정하였다. 대기오염물질별 배출계수는 tier 3 계수를 적용하였다. 가정에 따라 적용한 배출계수는 <표 3-21>에서 확인할 수 있다. 위와 같은 절차를 거쳐 도출된 컨테이너 선박 대기에 따른 환경비용의 원단위 값은 아래 <표 3-22>에 나타나 있다.

여기서 SO_x의 경우 선박 운항 상태와 직접적인 관련 없이 연료 종류와 소모한 총 연료 소모량에 배출량이 비례하므로, tier 3 방법을 통해 연료 사용량을 추정, tier 1 배출계수를 곱해 계산하였다. 최종적으로 도출된 원단위는 <표 3-22>와 같다.

〈표 3-21〉 컨테이너 선박 묘박/정박 시 대기오염물질 배출계수

단위: g/kWh

엔진 분류	운항 상태	엔진 종류	연료 종류	CO	NOx	NMVOC	PM
보조엔진	Hotelling	중속 디젤	디젤유	0.974	10.8	0.397	0.215

주: SOx의 경우 tier 3 방법으로 연료 사용량(194g/kWh)을 계산하여 tier 1 배출계수인 1.82kg/톤을 적용하여 산정함

자료: EEA(2019), pp. 16-30 바탕으로 저자 재정리

〈표 3-22〉 컨테이너 선박 묘박/정박 시 시간당 연료 사용량 및 대기오염물질 배출량

컨테이너선박 크기	연료 사용량	CO	NOx	SOx	PM	NMVOC
	ton	kg				
Mega Container	1.59	7.99	88.62	2.90	1.76	3.26
ULCS	1.30	6.53	72.42	2.37	1.44	2.66
New Panamax	1.24	6.25	69.25	2.26	1.38	2.55
Post-Panamax	1.00	5.02	55.68	1.82	1.11	2.05
Panamax	0.65	3.26	36.14	1.18	0.72	1.33
Feedermax	0.48	2.40	26.62	0.87	0.53	0.98
Regional Feeder	0.29	1.44	15.99	0.52	0.32	0.59

자료: EEA(2019) 바탕으로 저자 분석

4. 입항 선박 표준 선형 설정

「부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2022a)에서 설정한 부산항 신항의 평균 선형은 63,705GT(4천~5천TEU급)이었다. 이는 지난 5년간(2016~2020년) 부산항 신항에 입출항한 선박의 크기를 선형별 입출항 척수로 가중평균한 값이다. KDI(2022a)는 위에서 산정한 부산항 신항의 평균 선형 63,705GT를 근거로 하여 컨테이너 선박의 표준 선형을 4,400TEU로 설정하고, 표준 선형에 해당하는 용선료를 편익 산정 수식에 적용하였다.

한편, 본 연구에서는 Port-MIS의 선박 입출항 데이터와 선박 제원 데이터를 바탕으로 2016년부터 2022년까지 부산항에 입항한 선박 크기를 분석하였다. KDI(2022a)는 가중평균을 통해 선박 크기(총톤수, GT)를 계산하고, 계산된 GT 단위의 선박 크기를 환산계수를 활용해 TEU로 환산했다. 이는 Port-MIS의 선박 입출항 정보에 선박의 크기가 TEU 단위가 아닌 GT 단위로 제공되기 때문으로 보인다. 하지만, 위 방법은 계산된 선박의 실제 TEU 단위 크기를 사용하지 않고, GT 단위 크기를 환산계수를 활용해 TEU 단위로 변환하기 때문에 정확한 TEU 단위 크기와 표준 선형을 추정하기 어렵다.

반면, 본 연구에서는 선박 실제 TEU 단위 크기를 직접 활용하여 표준 선형을 추정하였다. 구체적으로, Port-MIS를 활용하여 부산항에 입항하는 선박 정보를 추출하고, 해당 선박의 식별자인 호출부호를 활용해 IHS Markit의 선박 제원 데이터와 결합하여 개별 선박의 크기(TEU)를 모두 표준 선형 계산에 활용하였다. 본 연구진이 보유 중인 선박 제원 데이터는 2022년 8월을 기준으로 업데이트된 선박 제원 데이터이다. 부산항을 예로 들면, 입출항 선박 중 선박 제원 데이터를 통해 크기(TEU)를 확인이 가능한 컨테이너 선박은 전체 중 2018년 63.4%, 2019년 69.4%, 2020년 75.4%, 2021년 82.2%, 2022년 90.1%에 해당하는 것으로 나타났다. 부산항 신항으로 범위를 좁히면, 같은 기간 각각 64.6%, 71.9%, 78.5%, 85.3%, 93.4%의 더 높은 매칭률이 확인되었다. 본 연구에서는 위 방법론을 활용하여 4장 사례연구에서 부산항 신항의 표준선형을 재산정하였다.

5. 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소를 고려한 대기시간 산정

선박의 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소는 선박의 대기시간과 깊은 연관

이 있다. 먼저, 선박이 항만 혼잡도에 대한 정보를 사전 입수하여 선박 운항 속도 저감을 통해 정박지 대기시간을 줄인다면, 이는 본질적으로 항만의 체선에 따라 지연된 시간이므로 숨겨진 대기시간으로 볼 수 있다. 항만 내 정박지 사용료를 줄이기 위해 항계 밖에서 투묘하거나 엔진을 최소화하여 표류하는 외항 표류 대기는 실제 대기시간에 포함되어야 하나 반영되지 못하고 있다. 항만 혼잡에 따라 기항을 포기하고 스케줄을 변경하는 선박에 대해서도 이에 따른 기회비용이 발생하므로, 대기시간 저감에 따른 비용 절감 편익에 반영되는 것이 합리적이다.

〈표 3-23〉는 2022년, 부산항 취항 직전 항만 9곳에서 출항해 부산항 컨테이너 부두에 접안하는 데까지 걸린 선박 운항 소요 시간 분포의 기술통계량을 나타낸다. 부산항으로 가장 자주 선박이 취항하는 항만은 칭다오항으로, 1년 동안 총 1,196번 부산항으로의 항차가 발생하였다. 칭다오항 다음으로는 기타큐슈항, 상하이항, 울산항이 뒤를 이었다. 부산항 도착 ‘평균 선박 소요 시간’을 산정할 때는 상·하위 5%를 제거한 평균값을 사용하였다. 지리상 가까운 울산항의 경우 부산항 부두 접안까지 평균 0.4일의 가장 낮은 소요 시간을 나타냈다. 부산항 도착 ‘표준 소요 시간’은 통상적인 수준의 항만 지연 상황에서 선박이 감속 운항을 시행하지 않았을 때의 운항 소요 시간이며, 본 절에서는 항만별 운항 시간 분포의 3사분위(상위 75%) 값으로 지정하였다.

본 연구에서는 3사분위 값을 초과하는 선박 운항의 경우 ‘지연’으로 정의했으며, 이에 따라 지연 시간에는 통상적인 시간보다 더 오래 소요된 정박지 대기시간과 외항 표류 대기시간, 감속 운항 시간이 포함된다. ‘총 지연 시간 비율’은 상·하위 5%를 제거한 데이터 기준, 선박 운항 총 소요 시간 중 총 지연 시간의 비중을 나타낸다. 평균 지연율이 가장 높았던 항만은 하카타항과 상하이항으로 나타났으며, 칭다오항, 울산항, 기타큐슈항이 차례로 다음 순위를 기록했다. 한편, 〈그림 3-8〉은 롱비치항에서 출발하여

부산항에 도착한 선박 운항 소요 시간 분포를 히스토그램으로 나타낸 것으로, 오른쪽 꼬리가 긴 분포 형태를 보였다.

위 데이터 분석을 통해 부산항에 입항하는 선박에는 감속 운항과 표류 대기 등으로 인한 지연이 발생하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 선박의 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소를 반영할 수 있는 대기행렬모형의 도입 가능성을 분석하였다. 본 연구의 사례연구에서 선박의 감속 운항, 표류, 기항 취소 등을 대기행렬모형에 적용한 방법론을 사용하지는 않았으나, 향후에는 사용될 수 있을 것으로 기대하고 적용 가능성을 검토하였다. 이와 관련된 보다 자세한 내용은 본 연구의 부록에 기재되어 있다.

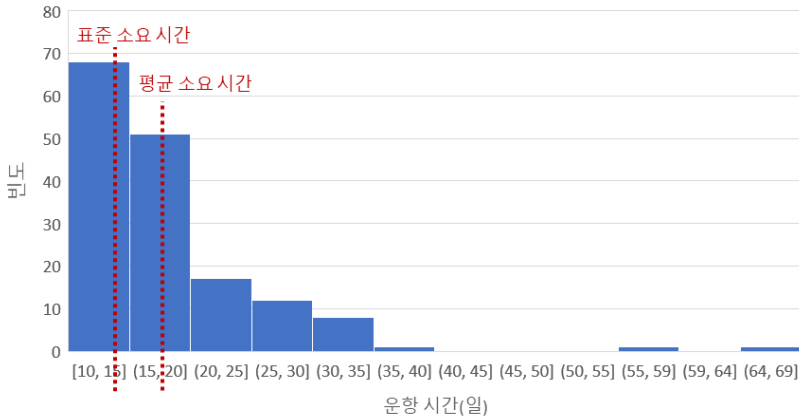
〈표 3-23〉 직전 항만별 부산항 도착 선박 운항 소요 시간 및 지연 시간

단위: 회, 일

항만	부산항 취항 빈도	부산항 도착 평균 소요 시간	부산항 도착 표준 소요 시간	지연 발생 빈도	평균 지연 시간	총 지연 시간 비율
Qingdao	1,196	2.8	1.6	837	1.6	43.2%
Shanghai	541	3.4	1.7	377	2.2	51.1%
Xiamen	301	6.4	4.5	209	2.8	34.0%
Kitakyushu	596	0.8	0.5	417	0.4	40.6%
Hakata	334	1.0	0.5	233	0.7	51.2%
Incheon	219	1.7	1.4	153	0.3	16.4%
Ulsan	461	0.4	0.2	321	0.2	42.2%
Vladivostok	238	2.6	1.8	166	1.0	29.4%
Long Beach	159	17.7	14.3	111	4.7	20.4%

자료: AIS 데이터를 활용하여 저자 분석

〈그림 3-8〉 롱비치항-부산항 선박 운항 시간 분포



자료: AIS 데이터를 활용하여 저자 분석

제4절 소결

3장에서는 항만 시스템에 대기행렬모형을 적용하기 위한 방법론을 소개했다. 가장 먼저, 선박의 도착 간격 시간과 서비스시간을 추정하기 위해 데이터를 수집하고, 이를 전처리하는 과정을 소개했다. 본 연구에서는 선박의 입출항 시간, 부두시설 사용 현황 및 부두 사용 목적을 명확하게 구분하고 적합한 데이터만을 활용하기 위해서 Port-MIS 자료 중 부두별관제현황 데이터와 시설사용허가현황 데이터를 결합하여 사용했다.

다음으로, 수집된 데이터를 전처리하는 과정을 소개했다. 우선, 수집된 데이터 중 중복, 결측치 및 오류를 제거했다. 중복은 동일한 데이터가 2개 이상 기록된 경우를 말하며 결측치란 기록되어야 할 데이터가 누락된 것을 의미한다. 또한, 이상치 제거를 위해서 선박의 서비스시간, 대기시간, 도착률 및 서

비스에 대해서 사분위수 이상치제거(IQR)방법을 적용했다.

데이터 수집 및 전처리 이후에는 선박의 도착 간격 시간과 서비스시간의 이론분포 검정을 수행했다. 2절에서 소개한 적합도 검정 방법 중 K-S 검정 방법론을 이용한 검정 결과, 선박의 도착 간격 시간은 지수분포, 서비스시간은 감마분포나 지수분포 등 일반분포를 각각 따르는 것으로 나타났다. 이론분포 검정 결과를 바탕으로 본 연구에서는 항만 시스템을 대기행렬모형 중 M/G/c 모형을 적용하는 것이 적합하다고 판단하였다.

또한, KMI(2023)에서 제안한 기존의 대기행렬모형 기반 선박 대기비용 절감 편익 산정 방법론의 한계점을 파악하고, 이를 개선하였다. 먼저, 선박 대기시간 산정의 기반이 되는 초과 물동량의 배분 방안을 검토하였다. 기존 연구에서는 초과 물동량을 인접한 항만의 특성을 고려하지 않고 균일하게 배분하였다. 본 연구에서는 컨테이너 부두의 이론적인 물동량 처리 기준인 적정하역능력과 실제 처리능력을 나타내는 서비스율을 기준으로 물동량을 분배하는 방안을 제시하였다.

다음으로, 항만에 입항하기 위해 대기 중인 컨테이너 선박의 평균 적재율을 산정 방식을 제안하였다. 일반적으로, 우리나라 항만에 입항하기 위한 선박의 적재율 통계를 얻는 것은 거의 불가능하다. 본 연구는 국제 해운 통계 플랫폼의 시스템의 아시아-북미/유럽 노선 컨테이너 선박 평균 적재율 데이터를 바탕으로, 우리나라 항만의 컨테이너 처리실적(해외지역별), 항만 권역별 항로 개수, 항만 정기노선 기항 횟수 등으로 가중평균하여 해당 항만의 평균 적재율을 추정하는 방안을 제시하였다.

또한, 선박 대기에 따른 환경비용 원단위를 제안하였다. 본 연구에서는 컨테이너 선박 대기에 따른 환경비용의 원단위 도출을 위해 EEA에서 발간한 ‘EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2019)’을 참고하였다. 해당 가이드북의 소개된 선박으로 인한 대기오염물질 산정

방법 중 가장 상세하고 정확한 모형인 tier 3 방법론을 사용했다. 이를 통해 개별 컨테이너 선박이 정박 중인 상태의 시간당 대기오염물질별 발생량을 추정했다.

마지막으로, 특정 항만에 입항하는 선박의 표준 선형 설정 방법을 제안하였다. 기존 예비타당성조사에서는 Port-MIS의 선박 입출항 정보에 선박의 크기가 TEU 단위가 아닌 GT 단위로 제공되기 때문에 환산계수를 활용하여 TEU 단위의 선박 크기를 산정했다(KDI, 2022a). 하지만, 위 방법은 계산된 선박의 실제 TEU 단위 크기를 사용하지 않고, GT 단위 크기를 환산계수를 활용해 TEU 단위로 변환하기 때문에 정확한 TEU 단위 크기와 표준 선형을 추정하기 어렵다. 본 연구에서는 선박 실제 TEU 단위 크기를 직접 활용하여 표준 선형을 추정하였다. 구체적으로, Port-MIS를 활용하여 부산항에 입항하는 선박의 정보를 추출하고, 해당 선박의 식별자인 호출부호를 활용해 IHS Markit의 선박 제원 데이터와 결합하여 개별 선박 크기(TEU)를 표준 선형 계산에 활용하였다.

04

선박대기비용 절감 편익 산정 사례분석

제1절 사례1: 부산항 진해신항(1단계) 건설사업(2022) —

1. 부산하역 가정 편익 산정

본 장에서는 대기행렬모형을 적용한 선박대기비용 절감 편익 산정의 가능성을 검토하기 위해 「부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2022a)에서 산정하였던 편익 항목을 바탕으로 사례 연구를 실시했다. 위 예비타당성조사에서는 중국 카보타지의 조건에 따라 여러 시나리오를 가정하였지만, 본 사례 연구에서는 편익 산정 방법 간 비교에 집중하기 위해 하나의 시나리오(시나리오 1)에 한정하여 사례 연구를 수행하였다. 또한, 비교의 간편성을 위해 물동량의 수요 예측값과 건설된 선석의 적정하역능력이 일정한 기간(2032~2058, 27년)을 비교 기간으로 설정하여 편익을 산정 및 비교했다. 부산항 진해신항(1단계) 건설사업은 2029년에 8,000TEU급 3선석(1-1단계), 2032년에는 8,000TEU급 6선석(1-2단계) 등 총 9개의 8,000TEU급 선석 건설 계획이 포함되어 있다. 본 연구의 대상인 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론을 비교하기 위해 선박 대기과 관련된 부산하역 절감 편익만 비교 대상으로 선정하였다. 항만부문 예비타

당성조사 표준지침에 따르면, 부선힐역비용 절감 편익은 선박재항비용 절감 편익과 하역비용 절감 편익으로 분류된다.

〈표 4-1〉 기존 예비타당성조사 ‘외항에서 부선힐역’의 경우 적용 편익 및 비용 항목

구분	시행(A)	미시행(B)	차이(A-B)	비고
항만 운영	선내 하역료 항만 시설 사용료 입출항 관련 비용 하역 관련 비용	부선힐양적 하역료 예부선힐 운송작업료 선박재항비용 증가 선내 하역료 항만 시설사용료 입출항 관련 비용 하역 관련 비용	부선힐 하역 비용 절감 예부선힐 운송작업 절감 선박재항비용 절감	편익 편익 편익
항만 건설	하부시설 신축 상부시설 신축 신축항만 유지운영비	※인근 물양장 또는 기존 부두 이용	하부시설 건설비 상부시설 건설비 신축항만 유지운영비	비용 비용 비용

주: 1) 입출항 관련 비용은 선박의 입항과 출항 시 발생하는 도선료, 예인선비용, 줄잡이비용, 고박료, 검수비 등 정부와 하역사 이외의 항만운송사업자에 지불하는 비용을 의미함.

2) 상부시설 건설비에는 장비비가 포함됨.

자료: KDI(2014a), 항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판), KMI(2022)에서 재인용

선박재항비용은 선박의 하역시간이 증가함에 따라 발생하는 비용을 의미한다. 접안한 선박의 하역 생산성이 증가하면 선박의 재항시간이 단축되어 비용절감효과가 발생한다. 항만개발 사업의 시행(with case) 시에는 기존 선박의 적정하역능력을 초과하는 물동량을 새로 건설되는 선박에서 처리하기 때문에 선박재항시간이 크게 증가하지 않는다. 반면, 항만개발 사업 미시행(without case)의 경우에는 기존 부두 또는 선박의 처리능력(적정하역능력)을 초과하는 물동량을 해상에서 부선힐역을 통해 처리하는 것으로 가정하였다. 부선힐역은 일반적인 선박에서의 하역 대비 생산성이 매우 낮기 때문에 화물처리시간, 즉 선박의 재항시간이 증가한다. 선박재항비용은 적정하역능력을 초과하는 물동량을 부선힐역을 통해 처리함으로써 선박 재항시간과 이에 따른 재항비용이 증가하는 것이다. 선박재항비용의 절감 편

익은 항만개발 사업 시행/미시행 간 선석과 부선의 하역생산성 차이로 인한 선박재항시간의 차이와 이로 인한 선박재항비용의 차이를 산정한 것이다. 구체적인 산정 방식은 아래 식 (34)에 나타나 있다. 이 식에서 표준선박의 1일 재항비용은 기회비용 관점에서 해당 선박의 1일 용선료를 적용한다 (KDI, 2014a).

$$BC_t = PC\left(\frac{P'_{1t}}{TPD'_{1t}} + \frac{P'_{2t}}{TPD'_{2t}}\right) - PC\left(\frac{P_{1t}}{TPD_{1t}} + \frac{P_{2t}}{TPD_{2t}}\right)$$

(식 -34)

여기서

BC_t : 선박재항비용 절감효과

PC : 표준선박의 1일 재항비용

$P_{1t}(P'_{1t})$: with case(without case)의 t년도 선석에서의 처리 물동량

$P_{2t}(P'_{2t})$: with case(without case)의 t년도 부선에 의한 처리 물동량

$TPD_{1t}(TPD'_{1t})$: with case(without case)의 선석당 1일 하역생산성

$TPD_{2t}(TPD'_{2t})$: with case(without case)의 부선 1일 하역생산성

위 수식 (34)에서 볼 수 있듯이, 선박재항비용 절감 편익을 계산하기 위해서 먼저 선석(부선)의 처리 물동량을 선석당(부선) 1일 하역생산성으로 나누어 선박재항시간을 계산한다. 다음으로 항만개발 사업의 시행/미시행 간 선박재항시간의 차이를 계산하고, 이 차이에 표준선박의 1일 재항비용(용선료)을 곱하여 선박재항비용 절감 편익을 계산한다.

한편, 「부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2022a)에 따르면, 부산항 신항의 경우 지난 5년간(2016~2020년) 입출항 선박의 선형별 입출항 척수로 가중평균한 평균 선형이 63,705톤(4천~5천TEU급)이었다. 따라서, 컨테이너선의 표준선형을 4,400TEU급으로 설정하고,

4,400TEU급 컨테이너 선박의 1일 용선료를 표준선형의 1일 재항비용으로 설정하였다. 2020년의 평균 환율을 적용하여 도출한 4,400TEU급 컨테이너선의 용선료는 원화로 1일 1,138만 원이었다.

하지만, 본 연구에서는 4장 4절에서 분석한 것처럼, 최근 5년간(2018~2022년) 입출항 선박의 크기를 분석하여 6,800TEU를 표준 선형으로 설정하였다. 또한, 2022년 평균 환율을 적용하여 도출한 6,800TEU급 컨테이너선의 용선료는 원화로 1일 6,387만 원이었다. 참고로, <표 4-2>에 나타난 것처럼 5년 평균 4,400TEU급 선박의 1일 용선료는 5,045만 원으로 나타났다. 이처럼 용선료에 차이가 크게 나는 이유는 최근 2년간(2021~2022) 용선료가 급격하게 증가했기 때문이다.

〈표 4-2〉 컨테이너선 1일 용선료 추이

단위: 달러/day

연도	1000TEU	1700TEU	2750TEU	4400TEU	6800TEU
2016	6,550	6,804	6,000	4,979	-
2017	6,142	7,242	8,800	7,692	13,171
2018	7,467	9,675	10,813	11,096	14,542
2019	6,158	8,139	9,600	11,175	20,410
2020	6,079	8,116	10,819	14,012	21,328
2021	24,244	33,847	48,525	67,123	78,542
2022	29,205	44,591	63,010	91,601	112,014
5년 평균	-		-	39,001	49,367

주: 풀컨테이너선 6~12개월 정기용선료 기준.

자료: Clarksons Research(2016~2022), Container Intelligence Monthly

다음으로, 하역비용 절감 편익은 항만개발 사업이 시행되지 않은 경우(without case)와 시행될 경우(with case)에 부선하역 가정에 의해 접안 하역의 비용과 해상하역의 비용 차이로 발생하는 편익을 의미한다. 사업이 시행될 경우, 선박이 선석에 접안하여 육상으로 직접 하역이 가능하므로 하역작업이 1회 발생한다. 반면, 사업이 시행되지 않을 경우, 부선이 출동

하여 선박은 해상에서 부선에 화물을 하역한 뒤, 나중에 선석에 여유가 있을 때 부선이 접안하여 다시 육상으로 하역한다. 따라서, 사업이 시행되지 않는 경우, 부선하역 가정에 의한 해상하역은 일반적인 접안하역에 비해 부선운송요금과 부선양적요금이 추가적으로 발생한다. 현재의 적정하역능력을 초과하는 물동량 예측값을 대상으로 부선하역을 가정하고, 이를 바탕으로 하역비용 절감 편익을 산정하는 구체적인 식은 아래 식 (35)에 나타나 있다.

$$BH_t = (P'_{1t} \times H'_{1t} + P'_{2t} \times H'_{2t}) - (P_{1t} \times H_{1t} + P_{2t} \times H_{2t})$$

(식 -35)

여기서

BH_t : 하역비용 절감효과

$P_{1t}(P'_{1t})$: with case(without case) t년도 선석에서의 처리 물동량

$P_{2t}(P'_{2t})$: with case(without case) t년도 부선에 의한 처리 물동량

$H_{1t}(H'_{1t})$: with case(without case) 접안하역 시 톤당 하역비용

$H_{2t}(H'_{2t})$: with case(without case) 부선하역 시 톤당 하역비용

위 수식 (35)의 '접안하역 시 톤당 하역비용'과 '부선하역 시 톤당 하역비용'은 해양수산부에서 「항만하역요금표」를 통해 매년 고시하고 있다.

〈표 4-3〉 부선의 컨테이너 처리능력 산정

구분	지표	평가요인
컨테이너 크레인 대수	기	15
연간작업기간	연간작업일수	365
	1일 작업시간	24
크레인 작업시간율	선석점유율	0.46
	선박이동계수	0.85
	크레인 작업계수	0.85
	실작업시간율	0.72

구분	지표	평가요인
크레인 작업효율	설계능력(Box)	25
	손실조정계수	0.7
	간섭계수	0.85
단위환산계수	TEU/Box 비율	1.36
Overstow 계수	계수	0.97
선석당 연간 하역능력	천TEU	62(1일 169TEU)
선석당 보정 하역능력	천TEU	141(1일 385TEU)

자료: 해양수산부(2021.08.30.), 항만하역요금표(검색일: 2023.04.17.)

〈표 4-4〉 컨테이너 화물의 접안하역과 부선하역 비용 차이(풀컨테이너 기준)

단위: 원/TEU

구분		접안하역	부선하역				차이
		선내	선내	부선양적	예부선	계	(부선-접안)
20형	요율	47,148	47,148	39,630	58,089	144,867	97,719
	원가	42,433	42,433	35,667	52,280	130,380	87,947
40형	요율	84,866	84,866	71,334	116,178	272,378	187,512
	원가	76,380	76,380	64,201	104,560	245,141	168,761

자료: 해양수산부(2020.05.22.), 항만하역요금표(검색일: 2022.04.17.)

〈표 4-5〉 부산항 진해신항(1단계) 단계별 예상 물동량

단위: 1000TEU

연도	항만공급능력 (A)	물동량 (B)	과부족 (A-B)	부산항 진해신항 단계별 물동량(9선석)		
				1-1단계	1-2단계	계
2029	22,908	29,580	-6,672	2,670	0	2,670
2030	22,908	30,228	-7,320	2,670	0	2,670
2031	22,908	30,851	-7,943	2,670	0	2,670
2032	22,908	31,459	-8,551	2,670	5,340	8,010
2033	22,908	32,044	-9,136	2,670	5,340	8,010
2034	22,908	32,601	-9,693	2,670	5,340	8,010
2035	22,908	33,136	-10,228	2,670	5,340	8,010
2036	22,908	33,652	-10,744	2,670	5,340	8,010
2037	22,908	34,159	-11,251	2,670	5,340	8,010
2038	22,908	34,643	-11,735	2,670	5,340	8,010
2039	22,908	35,110	-12,202	2,670	5,340	8,010
2040	22,908	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010

연도	항만공급능력 (A)	물동량 (B)	과부족 (A-B)	부산항 진해신항 단계별 물동량(9선석)		
				1-1단계	1-2단계	계
2041	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2042	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2043	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2044	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2045	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2046	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2047	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2048	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2049	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2050	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2051	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2052	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2053	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2054	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2055	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2056	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2057	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2058	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2059	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2060	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010
2061	22,909	35,561	-12,653	2,670	5,340	8,010

자료: KDI (2022a). 부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성보고서, KMI(2023)에서 재인용

〈표 4-6〉 부산항 진해신항(1단계) 단계별 부산하역 절감 편익

단위: 1000TEU, 백만 원

연도	편익 대상 물동량		부산하역 절감액		
	수출입화물	전체화물	재항비용	하역비용	계
2029	1,239	2,670	30,777	100,050	130,827
2030	1,235	2,670	30,689	99,765	130,454
2031	1,232	2,670	30,594	99,456	130,051
2032	3,684	8,010	91,521	297,515	389,035
2033	3,674	8,010	91,252	296,641	387,893
2034	3,662	8,010	90,966	295,710	386,676
2035	3,651	8,010	90,690	294,815	385,506
2036	3,641	8,010	90,435	293,987	384,422
2037	3,632	8,010	90,227	293,311	383,538
2038	3,624	8,010	90,017	292,628	382,645
2039	3,616	8,010	89,820	291,986	381,806

연도	편익 대상 물동량		부선하역 절감액		
	수출입화물	전체화물	재항비용	하역비용	계
2040	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2041	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2042	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2043	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2044	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2045	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2046	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2047	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2048	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2049	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2050	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2051	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2052	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2053	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2054	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2055	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2056	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2057	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2058	3,609	8,010	89,635	291,385	381,020
2059	2,406	5,340	59,757	194,257	254,013
2060	2,406	5,340	59,757	194,257	254,013
2061	2,406	5,340	59,757	194,257	254,013
계			2,427,993	7,892,908	10,320,901

자료: KDI (2022a). 부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성보고서, KMI(2023)에서 재인용

2. 대기행렬이론 적용 편익 산정

기존 예비타당성조사의 부선하역 가정 방법론과 본 연구에서 제안한 대기행렬모형 기반 방법론은 적용한 가정과 사용한 데이터 등에서 차이가 존재한다. 따라서, 사례에 적용하여 계산된 최종 편익 값만으로 두 방법론을 비교하는 것은 무리가 있다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서 제안한 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 방법론의 시사점과 항만 부문 예비타당성조사의 경제성 분석 방법론으로 활용될 가능성 및 한계점을 살펴보

기 위해 사례 연구를 수행했다.

〈표 4-7〉 대기행렬이론 적용 선박대기비용 산정 범위

구분	사업 시행 (A)	사업 미시행 (B)	편익 산정(B-A)
신설 선석 (진해신항 9개 선석)	• 신설 선석의 하역능력만큼 물동량을 원활하게 처리하여 신설 선석에는 선박의 대기시간이 발생하지 않음	• 신설 선석 하역능력만큼의 물동량을 인접 부두로 전이	• 해당 없음
인접 부두 (부산신항 5개 부두)	• 최근 5년간 선박 입출항 데이터를 기반으로 도착률과 서비스율 산정 • 대기행렬모형을 적용하여 선박대기시간과 대기시간비용 산정	• 최근 5년간 선박 입출항 실적 + 신설 선석의 하역능력만큼 전이된 물동량을 기반으로 도착률과 서비스율 산정 • 사업 시행(A) 대비 증가한 도착률과 서비스율을 바탕으로 선박대기시간과 대기시간비용 산정	• 사업 시행과 미시행 시의 대기비용 차이를 사업 시행 시 선박대기비용 절감 편익으로 산정

자료: KMI(2023) 바탕으로 저자 작성

한편, 예비타당성조사 표준지침의 편익 산정 방법론은 다른 사업의 예비타당성조사에서도 같은 기준과 방식으로 적용될 수 있어야 하기 때문에 편익 산정 과정이 명확하고 복잡하지 않아야 한다. 따라서, 적절한 가정을 설정하여 계산 과정을 단순화하는 것은 예비타당성조사의 편익 산정 방법론으로서 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 아래와 같은 몇 가지 가정을 설정하여 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 산정 과정을 단순화하였다.

먼저, 부산항 진해신항(1단계) 건설사업의 인접 부두는 부산신항 5개 부두로 가정하였다. 사업이 시행되어 선석이 신설되는 경우(with case)에는, 적정하역능력을 초과하는 물동량을 새로 건설하는 선석에서 처리하기 때문에, 기존 인접 부두의 선박의 도착률, 서비스율, 대기시간은 사업 이전과 달라지지 않는다. 즉, 진해신항에 새로운 9개 선석이 건설될 경우, 인근 부산신항의 5개 부두의 선박 도착률과 서비스율은 최근 5년 동안의 평균 선박 입항 횟수와 하역 시간을 기반으로 계산되었다. Port-MIS 데이터를 기

반으로 산정된 각 부두의 도착률 및 서비스율과 대기행렬모형을 활용하여, 사업이 시행되는 경우의 인접한 부두의 평균 선박대기시간을 산정한다. 대기행렬이론을 적용하여 산정하는 선박대기비용의 범위는 <표 4-7>에 정리되어 있다. 과거 5년간 Port-MIS 데이터를 바탕으로 산정한 부산신항 5개 부두의 도착률과 서비스율은 <표 4-8>에 나타나 있다.

〈표 4-8〉 대기행렬 파라미터(2018~2022, 5년 평균)

단위: 시간

부두	선석 수	총 하역시간	서비스율	총 입항횟수 (with)	총 입항횟수 (without)	도착률 (with)	도착률 (without)
신항 1부두	3	17,256	0.0480	873	1,166	0.0996	0.1331
신항 2부두	6	31,464	0.0529	1,746	2,391	0.1994	0.2729
신항 3부두	4	17,335	0.0590	1,074	1,553	0.1226	0.1773
신항 4부두	4	15,185	0.0550	887	1,334	0.1012	0.1523
신항 5부두	4	19,143	0.0442	877	1,236	0.1001	0.1411

자료: Port-MIS 데이터 기반 저자 작성

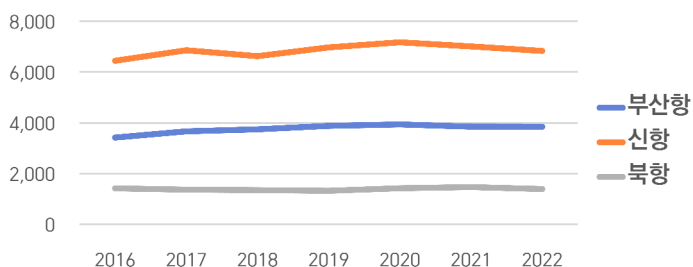
「부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2022a)에 따르면, 해당 사업으로 인해 새롭게 건설되는 9개 선석의 연간 적정하역능력 은 8,010,000TEU다. 위 사업의 예비타당성조사는 부산하역비용 절감 편익을 산정하기 위한 기준 물동량을 새롭게 건설되는 9개 선석의 적정하역 능력과 동일한 8,010,000TEU로 설정하였으므로, 본 연구에서도 같은 기준에서 비교를 하기 위해 동일한 물동량을 편익 산정 대상으로 설정하였다.

한편, 기존 예비타당성조사에서는 지난 5년간(2018~2022년) 부산신항에 입항하는 컨테이너선의 크기를 선형별 입출항 척수로 가중평균하여 표준선형을 4,400TEU로 설정했다(KDI, 2022a). 반면에, 본 연구에서는 3절에서 제시한 것처럼, Port-MIS 선박 입출항 데이터와 선박 제원 데이터를 바탕으로 2016년부터 2022년까지 부산항에 입항한 선박 크기를 다시 설정하였다. 본 연구에서는 선박 표준 선형을 설정 방법을 개선하기 위해 GT에서 TEU 단위로 환산하기 위한 계수를 활용하지 않고, 선박의 실제

TEU 단위 크기를 활용하였다. 이러한 방법을 활용하여 계산한 최근 5년(2018~2022년)간 부산항 신항에 입항한 선박의 평균 크기는 71,213GT(6,924TEU), 부산항 북항에 입항한 선박의 평균 크기는 14,037GT(1,390TEU)로 나타났다. <그림 4-1>, <표 4-9>와 같이 부산항 신항에 입항하는 선박의 평균 크기는 약 6,400TEU에서 7,000TEU까지 소폭 증가하는 추세를 나타냈지만, 부산항 북항에 입항하는 선박의 크기는 약 1,400TEU에서 약간 감소하거나 유지되는 추세를 보였다.

Port-MIS 선박 입출항 데이터와 선박 제원 데이터를 바탕으로 2018~2022년까지 부산항 신항에 입항한 선박의 평균 크기가 최소 6,627TEU에서 최대 7,174TEU로 도출되었으므로, 본 사례연구에서 부산항 신항 입항 선박의 표준 선형 설정은 Clarksons Research 컨테이너선 1일 용선료 기준에서 가장 가까운 6,800TEU로 선정하였다. 선박 크기별 용선료는 <표 4-2>에 정리되어 있다.

<그림 4-1> 부산항(신항, 북항) 입항 선박 평균 크기(TEU)



자료: Port-MIS 데이터 기반 저자 작성

<표 4-9> 부산항(신항, 북항) 입항 컨테이너 선박 평균 크기

구분		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	단위: TEU 5년 평균
		GT	GT	GT	GT	GT	GT	GT	
부산항 전체	GT	34,171	35,342	37,319	38,599	39,050	39,055	39,156	38,636
	TEU	3,419	3,664	3,744	3,880	3,937	3,850	3,846	3,852

구분		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	5년 평균
부산 신항	GT	60,096	63,336	66,927	70,979	73,395	73,276	71,486	71,213
	TEU	6,446	6,860	6,627	6,973	7,174	7,012	6,834	6,924
부산 북항	GT	14,019	13,627	13,501	13,428	14,162	14,834	14,262	14,037
	TEU	1,418	1,367	1,348	1,323	1,423	1,468	1,392	1,390

자료: Port-MIS 데이터 기반 저자 작성

다음으로, 부산항 신항에 입항하는 선박의 적재율을 추정하기 위해서 본 연구에서는 본보고서 <표 3-19>에 나타난 2019년 1분기부터 2022년 3분기까지 ‘아시아-유럽’, ‘유럽-아시아’, ‘아시아-북미’, ‘북미-아시아’ 노선의 컨테이너 선박 평균 적재율을 이용하였다. 약 4년간 위 4개 노선의 적재율은 순서대로 74.7%, 44.7%, 74.5%, 27.5%이다. <표 3-19>에 나타난 적재율 데이터를 바탕으로, 부산항 컨테이너 처리실적(해외지역별), 부산항의 권역별 항로 개수, 부산항 정기노선 기항 횟수 등으로 가중평균하여 해당 항만의 평균 적재율을 추정할 수 있다.

<표 3-19>에 나타난 대륙 간 노선별 컨테이너 선박 적재율을 <표 4-10>과 <표 4-11>에 나타난 부산항 권역별 항로 개수와 부산항 항로별 정기노선 주당 기항 횟수를 기반으로 가중평균 부산항의 컨테이너 선박 적재율 추정값은 약 53%로 나타났다. 즉, 10,000TEU급 컨테이너 선박이 국내 컨테이너 부두에 입항하기 위해 정박지에서 대기 중이라면, 5,300TEU의 화물에 대해 체화가 발생하는 것으로 가정했다.

<표 4-10> 부산항 권역별 항로 개수 기준

							단위: 개
권역	2018	2019	2020	2021	2022	평균	
북미 동안	13	13	17	14	14	14.2	
북미 동안	30	28	25	28	23	26.8	
유럽	5	5	6	4	4	4.8	

자료: 부산항만공사(2023), p.43

〈표 4-11〉 부산항 항로별 정기노선 주당 기항 횟수

단위: 항차/주

권역	전체	부산	광양	인천
미주	55	49	5	1
구주	16	15	1	0

자료: 부산항만공사(2023), p. 59

위에서 설정한 표준선형과 적재율을 바탕으로 물동량 증가에 따른 선박 입항 횟수 증가분을 산정하면 연간 약 2,223척($=8,010,000/6,800/0.53$)이다. 이때, 0.53은 위에서 계산한 부산항에 입항 대기 중인 컨테이너 선박의 평균 적재율 53%를 의미한다. 한편, 계산된 선박 입항 횟수 증가분 2,223척을 부산신항 5개 부두의 적정하역능력에 비례하여 분배하면, 부산신항 1부두의 도착률이 서비스율보다 높아져, 선석점유율이 100%를 초과하는 문제가 발생한다. 즉, 모형 내에서 대기행렬 및 대기시간이 무한히 늘어나는 오류가 발생하기 때문에, 본 사례 연구에서는 3장 3절에서 다룬 초과 물동량 배분 방법 중 서비스율을 기준으로 배분하는 방법을 채택했다. 〈표 3-18〉의 서비스율 산정 방식에 따라 더 많은 선박을 처리하는 부두에 더 많은 초과 물동량을 배분하였다. ‘서비스율×선석 수’를 기준으로 부산신항 5개 부두의 최근 5개년 평균 입항 횟수에 각각 293, 645, 479, 447, 359척을 더하면 사업이 시행되지 않는 경우(without-case)의 선박 도착률을 계산할 수 있다.

〈표 4-12〉 사업 시행(with case) 시 대기행렬 모형 결과

단위:척, 시간, 백만 원(연간)

부두	선석 수	입항 수	도착률	선석 점유율	선박 평균 대기 시간	총 대기 시간	총 체선 비용	총 체화 비용	총 환경 비용	총비용
신항 1부두	3	873	0.0996	69%	6.61	5,774	15,364	6,981	7,902	30,247

부두	선석 수	입항 수	도착률	선석 점유율	선박 평균 대기 시간	총 대기 시간	총 체선 비용	총 체화 비용	총 환경 비용	총비용
신항 2부두	6	1,746	0.1994	63%	1.16	2,034	5,412	2,459	2,783	10,654
신항 3부두	4	1,074	0.1226	52%	1.02	1,095	2,913	1,324	1,498	5,735
신항 4부두	4	887	0.1012	46%	0.70	619	1,648	749	848	3,245
신항 5부두	4	877	0.1001	57%	1.85	1,626	4,327	1,966	2,225	8,519
합계			-				29,664	13,479	15,256	58,400

자료: 저자 작성

항만개발 사업의 시행/미시행에 따른 인접 부두의 선박 입항 수, 도착률, 선석점유율, 평균 대기시간 총 대기비용이 <표 4-12>와 <표 4-13>에 각각 나타나 있다. 앞서 서술했듯이 항만개발 사업이 시행될 경우 기존 인접 부두의 선박 도착률과 평균 대기시간은 Port-MIS의 과거 5개년 평균 데이터를 근거로 산정되었다. 사업 시행/미시행의 대기행렬모형 결과값을 비교하면, 각 인접 부두의 선박 평균 대기시간에 유의미한 차이가 존재함을 확인할 수 있다. 선박 평균 대기시간의 차이가 가장 큰 부두는 신항 1부두로, 사업이 시행되어 9개 선석이 신설되면 입항 선박의 평균 대기시간이 41.27(47.88→6.61)시간 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 사업 시행/미시행 간 선박 평균 대기시간의 차이가 가장 적은 부두는 신항 4부두로, 사업이 시행되는 경우 입항 선박의 평균 대기시간은 3.03(3.73-0.70)시간 감소하는 것으로 나타났다.

〈표 4-13〉 사업 미시행(without case) 시 대기행렬 모형 결과

단위:척, 시간, 백만 원(연간)

부두	선석 수	입항 수	도착률	선석 점유율	선박 평균 대기 시간	총 대기 시간	총 체선 비용	총 체화 비용	총 환경 비용	총비용
신항 1부두	3	1,166	0.1331	92%	47.88	55,815	148,526	67,490	76,385	292,401
신항 2부두	6	2,391	0.2729	86%	8.60	20,567	54,731	24,870	28,147	107,748
신항 3부두	4	1,553	0.1773	75%	5.21	8,086	21,517	9,777	11,066	42,360
신항 4부두	4	1,334	0.1523	69%	3.73	4,971	13,227	6,011	6,803	26,041
신항 5부두	4	1,236	0.1411	80%	9.62	11,887	31,633	14,374	16,268	62,275
합계	-						269,634	122,522	138,669	530,825

자료: 저자 작성

위와 같이 각 부두의 선박 평균 대기시간을 사업 시행 여부에 따라 계산하고, 이를 시간당 대기비용의 원단위와 곱하여 선박 대기시간의 감소로 인한 경제적 이익, 즉 선박대기시간 절감 편익을 계산할 수 있다. 이를 계산하는 구체적인 수식은 아래와 같다.

$$BH_t = (V'_t \times W'_t - V_t \times W_t) \times (WC + FC + EC) \quad (\text{식-36})$$

여기서

 BH_t : t년도 선박대기비용 절감효과 $V_t(V'_t)$: with case(without case) t년도 선석에서의 선박 입항 수 $W_t(W'_t)$: with case(without case) t년도 선석의 선박당 평균 대기시간 WC : 표준선형의 시간당 평균 체선비용 FC : 표준선형의 시간당 평균 체화비용 EC : 표준선형의 시간당 평균 환경비용

각 부두의 선박 입항 횟수와 선박 평균 대기시간을 곱하여 해당 부두에 입항한 선박의 총 대기시간을 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 총 대기시간에 시간당 체선 및 체화비용의 원단위를 곱하여 총 체선 및 체화비용을 도출할 수 있다. 또한, 선박 대기에 따른 환경비용은 컨테이너 선박의 정박 시간당 대기오염물질 배출량과 대기오염물질의 사회적비용 원단위를 곱하여 산정했다. 요약하자면, 사업 시행 여부에 따른 선박 대기시간의 차이를 계산하고, 이를 시간당 발생하는 체선, 체화, 환경비용의 원단위와 곱하여 선박대기시간 절감 편익을 산정한다.

본 연구가 적용한 컨테이너 선박의 대기에 따른 체선, 체화비용의 원단위는 KMI(2023)에서 차용했다. 체선비용의 원단위는 표준선형의 5년간 평균 용선료를 사용했다. 체선비용의 원단위는 화물 금액 가치에 대한 기회비용 관점에서 추정하였다. 체화비용은 한국무역통계정보포털(Trass)²⁾의 수출입 화물액 데이터와 Port-MIS 물동량 데이터를 바탕으로 1TEU당 65,312,500원으로 산정되었다. 이에, 예비타당성조사 경제성분석의 사회적 할인율 4.5%를 이자율로 채택하여 컨테이너 화물의 시간가치는 336원(1TEU/시간)으로 산정하였다. 본 사례조사에서 사용한 컨테이너 선박의 정박 중 시간당 대기오염물질 배출량 원단위는 <표 3-22>에 나타나 있다. 배출량의 사회적비용 원단위는 아래 <표 4-14>에 나타나 있다.

<표 4-14> 대기오염물질 사회적비용 원단위

구분	NOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
대기오염비용 (천 원/톤) ^{a)}	15,835	2,330	41,831	158	44

자료: a) KDI(2021c), 예비타당성조사 수행을 위한 세부지침 도로,철도부문 연구

2) 한국무역통계 정보포털(검색일: 2023.04.17.)

두 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론 간 비교는 계산의 편의를 위해 물동량의 수요 예측값과 건설된 선석의 적정하역능력이 일정한 기간(2032~2058, 27년)을 대상으로 하였다. 「부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2022a)에서 기존 부산하역 가정을 적용하여 산정한 27년간 선박대기와 관련된 부산하역절감 편익은 총 10,320,901백만 원으로 산정되었다. 이 중에서 재항비용 절감 편익은 전체 편익의 약 23%를 차지했고, 하역비용 절감 편익은 약 77%를 차지했다. 반면, 대기행렬모형을 적용하여 산정한 총 선박대기비용 절감 편익은 12,755,448백만 원으로 산정되었다. 이는 기존 편익과 비교했을 때 124% 수준이며 체선, 체화, 환경비용이 차지하는 비중은 각각 51%, 23%, 26%이다.

본 사례조사에서 대기행렬모형 기반 방법론을 적용하여 산정한 선박대기비용 절감 편익은 기존 예비타당성조사의 부산하역비용 절감 편익의 약 124% 수준인 것으로 나타났다. 그러나, 위에서도 언급하였듯이 두 방법론을 계산된 선박대기비용 절감 편익값만으로 단순 비교하는 것은 무리가 있다. 가장 큰 이유는 기존 부산하역 가정 방법론은 선박대기비용을 추정하기 위해 선박대기시간 및 대기에 따른 비용을 직접적으로 추정하지 않고, 부산하역을 가정한 뒤, 선박대기비용을 재항비용과 하역비용으로 구분, 대체하여 간접적으로 추정하였기 때문이다. 그리고 편익 산정을 위해 적용된 원단위도 서로 다르다. 예를 들어, 기존 방법론의 선박재항비용과 대기행렬모형 기반 방법론의 체선비용을 산정하기 위해서는 공통적으로 용선료의 원단위가 필요하다. 하지만, 2021년과 2022년에 용선료가 급증하면서 본 사례조사에서 사용된 최근 5년 평균 용선료는 다소 높은 값이 적용되었다. 또한, 본 연구는 기존 항만 부문 예비타당성조사에서 반영하지 못했던 체화비용과 환경비용을 고려하고 이를 편익 항목으로 반영하였기 때문이다.

〈표 4-15〉 부산항 진해신항(1단계) 단계별 선박대기비용 절감 편익 차이

단위: 1,000TEU, 백만 원

연도	부산하역가정			대기행렬모형적용			
	재항 비용	하역 비용	계	체선 비용	체화 비용	환경 비용	계
2032	91,521	297,515	389,035	239,970	109,042	123,413	472,424
2033	91,252	296,641	387,893	239,970	109,042	123,413	472,424
2034	90,966	295,710	386,676	239,970	109,042	123,413	472,424
2035	90,690	294,815	385,506	239,970	109,042	123,413	472,424
2036	90,435	293,987	384,422	239,970	109,042	123,413	472,424
2037	90,227	293,311	383,538	239,970	109,042	123,413	472,424
2038	90,017	292,628	382,645	239,970	109,042	123,413	472,424
2039	89,820	291,986	381,806	239,970	109,042	123,413	472,424
2040	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2041	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2042	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2043	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2044	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2045	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2046	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2047	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2048	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2049	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2050	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2051	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2052	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2053	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2054	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2055	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2056	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2057	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
2058	89,635	291,385	381,020	239,970	109,042	123,413	472,424
계	2,427,993	7,892,908	10,320,901	6,479,190	2,944,134	3,332,151	12,755,448

자료: 저자 작성

제2절 사례2: 부산항 제2신항 건설사업(2021) —————

본 절에서는 1절과 마찬가지로 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론의 활용 가능성 및 한계점을 살펴보기 위해 「부산항 제2신항 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2021b)를 대상으로 사례 연구를 실시했다. 1절과 마찬가지로 위 예비타당성조사에서도 중국 카보타지 조건에 따라 다양한 시나리오를 구분 및 가정하였지만 편익 산정 방법 간 비교에 집중하기 위해 하나의 시나리오(시나리오 1)로 한정하여 사례 연구를 수행하였다. 또한, 계산 편의성을 위해 물동량 수요 예측값과 신설 선석의 적정 하역능력이 일정한 기간(2041~2056, 16개년)을 대상으로 선박대기비용 절감 편익을 산정 및 비교했다.

위 사업에는 2026년에 개장하는 8,000TEU급 3선석(1단계), 2031년 개장하는 8,000TEU급 6선석(2단계), 2036년에 개장하는 8,000TEU급 5선석과 2,000TEU급 1선석(3단계) 등 8,000TEU급 선석 14개와 2,000TEU급 선석 1개, 총 15개 선석의 건설이 계획되어 있다. 본 절에서 수행하는 사례 연구의 구체적인 절차는 1절의 사례 연구와 거의 동일하므로 사례 연구 절차에 대한 자세한 설명은 생략한다.

〈표 4-16〉 부산항 제2신항 단계별 예상 물동량

단위: 1,000TEU

연도	항만공급능력 (A)	물동량 (B)	과부족 (A·B)	부산항 제2신항 단계별 물동량(15선석)			
				1단계	2단계	3단계	계
2027	22,609	27,816	-5,207	2,640			2,640
2028	22,609	28,495	-5,886	2,640			2,640
2029	22,609	29,157	-6,548	2,640			2,640
2030	22,609	29,797	-7,188	2,640			2,640
2031	22,609	30,411	-7,802	2,640	5,162		7,802
2032	22,609	31,012	-8,403	2,640	5,280		7,920
2033	22,609	31,590	-8,981	2,640	5,280		7,920
2034	22,609	32,139	-9,530	2,640	5,280		7,920
2035	22,609	32,668	-10,059	2,640	5,280		7,920
2036	22,609	33,178	-10,569	2,640	5,280	2,649	10,569
2037	22,609	33,678	-11,069	2,640	5,280	3,149	11,069
2038	22,609	34,157	-11,548	2,640	5,280	3,628	11,548
2039	22,609	34,618	-12,009	2,640	5,280	4,089	12,009
2040	22,609	35,063	-12,454	2,640	5,280	4,534	12,454
2041	22,609	35,495	-12,886	2,640	5,280	4,690	12,610
2042	22,609	35,911	-13,302	2,640	5,280	4,690	12,610
2043	22,609	36,311	-13,702	2,640	5,280	4,690	12,610
2044	22,609	36,691	-14,082	2,640	5,280	4,690	12,610
2045	22,609	37,063	-14,454	2,640	5,280	4,690	12,610
2046	22,609	37,422	-14,813	2,640	5,280	4,690	12,610
2047	22,609	37,775	-15,166	2,640	5,280	4,690	12,610
2048	22,609	38,130	-15,521	2,640	5,280	4,690	12,610
2049	22,609	38,489	-15,880	2,640	5,280	4,690	12,610
2050	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2051	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2052	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2053	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2054	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2055	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2056	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2057	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2058	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2059	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2060	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2061	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2062	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2063	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2064	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610
2065	22,609	38,848	-16,239	2,640	5,280	4,690	12,610

주: 음영 부분은 적정하역능력을 확보하지 못하는 기간을 의미함.

자료: KDI (2021b), 부산항 제2신항 건설사업 예비타당성보고서.

〈표 4-17〉 부산항 제2신항 단계별 부산하역 절감 편익

단위: 1,000TEU, 백만 원

연도	편익 대상 물동량		부산하역 절감액		
	수출입 화물	전체화물	재항비용	하역비용	계
2027	1,218	2,640	27,266	94,834	122,100
2028	1,215	2,640	27,194	94,584	121,778
2029	1,212	2,640	27,123	94,339	121,462
2030	1,208	2,640	27,046	94,071	121,117
2031	2,849	7,802	63,768	221,794	285,562
2032	3,532	7,920	79,047	274,936	353,982
2033	3,593	7,920	80,419	279,710	360,129
2034	3,582	7,920	80,166	278,831	358,997
2035	3,571	7,920	79,923	277,985	357,908
2036	4,699	10,569	106,609	365,807	472,416
2037	4,913	11,069	111,400	382,470	493,871
2038	5,116	11,548	115,937	398,249	514,185
2039	5,311	12,009	120,297	413,414	533,710
2040	5,498	12,454	124,498	428,026	552,524
2041	5,557	12,610	125,819	432,621	558,440
2042	5,547	12,610	125,593	431,835	557,428
2043	5,537	12,610	125,361	431,027	556,388
2044	5,525	12,610	125,105	430,138	555,243
2045	5,514	12,610	124,859	429,281	554,139
2046	5,503	12,610	124,594	428,361	552,955
2047	5,490	12,610	124,323	427,418	551,740
2048	5,479	12,610	124,066	426,525	550,591
2049	5,468	12,610	123,818	425,662	549,480
2050	5,456	12,610	123,559	424,762	548,322
2051	5,456	12,610	123,559	424,762	548,322
2052	5,456	12,610	123,559	424,762	548,322
2053	5,456	12,610	123,559	424,762	548,322
2054	5,456	12,610	123,559	424,762	548,322
2055	5,456	12,610	123,559	424,762	548,322
2056	5,456	12,610	123,559	424,762	548,322
2057	4,304	9,970	97,763	335,039	432,802
2058	4,304	9,970	97,763	335,039	432,802
2059	4,304	9,970	97,763	335,039	432,802
2060	4,304	9,970	97,763	335,039	432,802
2061	1,999	4,690	46,171	155,593	201,764
2062	1,999	4,690	46,171	155,593	201,764
2063	1,999	4,690	46,171	155,593	201,764
2064	1,999	4,690	46,171	155,593	201,764
2065	1,999	4,690	46,171	155,593	201,764
계			3,681,054	12,653,375	16,334,429

자료: KDI (2021b). 부산항 부산항 제2신항 건설사업 예비타당성보고서.

제1절의 사례 연구와 마찬가지로 부산항 제2신항 건설사업이 시행되어 새로운 선석(제2신항 15개 선석)이 건설되는 경우(with case)에는 인접 부두의 선박 도착률에 영향을 미치지 않는다고 가정했다. 따라서, 이 경우에는 인접 부두(부산신항 5개 부두)의 도착률과 서비스율은 각 부두의 최근 5개년 간 평균 선박 입항 횟수와 하역시간을 바탕으로 산정하며, 이는 이전 사례의 <표 4-8>에 나타난 것과 동일하다.

부산항 제2신항 건설사업의 예비타당성조사는 부산하역비용 절감 편익을 산정하기 위한 기준 물동량을 새롭게 건설되는 15개 선석의 적정하역능력과 동일한 12,610,000TEU로 설정하였으므로, 본 연구에서도 같은 기준에서 비교를 하기 위해 동일한 물동량을 편익 산정 대상으로 설정하였다. 또한, 본 사례 연구에서도 3장 4절에서 분석한 것처럼, 최근 5년간(2018~2022년) 입출항 선박의 크기를 분석하여 6,800TEU를 표준 선형으로 설정하였다. 2022년 평균 환율을 적용하여 도출한 6,800TEU급 컨테이너선의 용선료는 원화로 1일 6,387만 원이다. 선박 입항 횟수 증가분을 물동량 예측값과 가정한 표준선형을 이용해 계산하면 연간 약 3,499척($=12,610,000/6,800/0.53$)이다. 이때, 0.53은 4장 2절에서 계산한 선박의 평균 적재율 53%를 의미한다.

한편, 계산된 선박 입항 횟수 증가분 3,499척을 부산신항 5개 부두의 적정하역능력 또는 서비스율을 기준으로 배분하면, 1절의 사례 연구와 마찬가지로 부산신항 1부두의 도착률이 서비스율보다 높아져, 선석점유율이 100%를 초과하는 문제가 발생한다. 따라서, 본 사례 연구에서는 ‘서비스율 × 선석 수’를 기준으로 선박 입항 횟수 증가분을 배분하되, 부산신항 1부두의 선석점유율이 100%를 초과하지 않도록 일부 선박을 비교적 선석점유율이 낮은 4부두로 임의 전가하였다. 이러한 기준으로 5개 부두의 최근 5개년 평균 입항 횟수에 각각 367, 1,015, 754, 805, 565척을 더하면 사업이 시행되지 않는 경우(without-case)의 선박 도착률을 계산할 수 있다.

항만개발 사업의 시행/미시행에 따른 인접 부두의 선박 입항 수, 도착률, 선석점유율, 평균 대기시간 총 대기비용이 <표 4-18>과 <표 4-19>에 각각 나타나 있다. <표 4-19>는 사업 시행에 따른 부산신항 5개 부두의 도착률과 서비스율을 각 부두의 최근 5개년 간 평균 선박 입항 횟수와 하역시간을 바탕으로 산정했기 때문에 1절의 <표 4-12>와 동일하다. 사업 시행/미시행의 대기행렬모형 결과값을 비교하면, 각 인접 부두의 선박 평균 대기시간에 유의미한 차이가 존재함을 확인할 수 있다. 이 중 대기시간에 가장 차이가 크게 발생한 부두는 신항 2부두로, 15개 선석이 건설되는 경우 평균 선박대기시간이 250.19(251.22→1.02)시간 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 선박당 평균 대기시간에 차이가 가장 적게 발생한 부두는 신항 4부두로, 사업이 시행되는 경우 평균 선박대기시간이 14.56(15.18→0.70)시간 감소하는 것으로 나타났다.

<표 4-18> 사업 미시행(without case) 시 대기행렬 모형 결과

단위:척, 시간, 백만 원(연간)

부두	선석 수	입항 수	도착률	선석 점유율	선박 평균 대기 시간	총 대기 시간	총 체선 비용	총 체화 비용	총 환경 비용	총비용
신항 1부두	3	1,240	0.1416	98%	235.74	292,411	778,120	353,577	400,176	1,531,873
신항 2부두	6	2,761	0.3152	99%	251.22	693,652	1,845,839	838,747	949,288	3,633,874
신항 3부두	4	1,828	0.2087	88%	16.59	30,326	80,699	36,669	41,502	158,870
신항 4부두	4	1,692	0.1931	88%	15.18	25,686	68,351	31,058	35,152	134,561
신항 5부두	4	1,442	0.1646	93%	40.32	58,156	154,755	70,321	79,588	304,664
합계				-			2,927,764	1,330,372	1,505,706	5,763,842

자료: 저자 작성

〈표 4-19〉 사업 시행(with case) 시 대기행렬 모형 결과

단위:척, 시간, 백만 원(연간)

부두	선석 수	입항 수	도착률	선석 점유율	선박 평균 대기 시간	총 대기 시간	총 체선 비용	총 체화 비용	총 환경 비용	총비용
신항 1부두	3	873	0.0996	69%	6.61	5,774	15,364	6,981	7,902	30,247
신항 2부두	6	1,746	0.1994	63%	1.16	2,034	5,412	2,459	2,783	10,654
신항 3부두	4	1,074	0.1226	52%	1.02	1,095	2,913	1,324	1,498	5,735
신항 4부두	4	887	0.1012	46%	0.70	619	1,648	749	848	3,245
신항 5부두	4	877	0.1001	57%	1.85	1,626	4,327	1,966	2,225	8,519
합계	-						29,664	13,479	15,256	58,400

자료: 저자 작성

이후 선박대기비용 편익 산정 방식은 제1절 부산항 진해신항(1단계) 건설 사업(2022)의 사례 연구와 동일하다. 두 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론 간 비교는 계산 편의성을 위해 물동량 수요 예측값과 신설 선석의 적정하역능력이 일정한 기간(2041~2056, 16개년)만을 대상으로 하였다. 「부산항 제2 신항 건설사업 예비타당성조사」(KDI, 2021b)의 기존 부산하역가정을 적용한 경우, 16년간 선박대기와 관련된 부산하역절감 편익은 총 8,773,152백만 원으로 산정되었다. 이 중에서 재항비용 절감 편익은 전체 편익의 약 23%를 차지했고, 하역비용 절감 편익은 약 77%를 차지했다. 반면, 대기행렬모형을 적용하여 산정한 총 선박대기비용 절감 편익은 91,287,072백만 원으로 산정되었다. 이는 기존 편익과 비교했을 때 1,041% 수준이며 체선, 체화, 환경비용의 비중은 각각 51%, 23%, 26%이다.

〈표 4-20〉 부산항 제2신항 건설사업 단계별 선박대기비용 절감 편익 차이

연도	부선하역가정			대기행렬모형적용			
	재항 비용	하역 비용	계	체선 비용	체화 비용	환경 비용	계
2041	125,819	432,621	558,440	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2042	125,593	431,835	557,428	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2043	125,361	431,027	556,388	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2044	125,105	430,138	555,243	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2045	124,859	429,281	554,139	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2046	124,594	428,361	552,955	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2047	124,323	427,418	551,740	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2048	124,066	426,525	550,591	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2049	123,818	425,662	549,480	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2050	123,559	424,762	548,322	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2051	123,559	424,762	548,322	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2052	123,559	424,762	548,322	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2053	123,559	424,762	548,322	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2054	123,559	424,762	548,322	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2055	123,559	424,762	548,322	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
2056	123,559	424,762	548,322	2,898,100	1,316,893	1,490,450	5,705,442
계	1,988,451	6,836,202	8,824,658	46,369,600	21,070,288	23,847,200	91,287,072

자료: 저자 작성

제3절 소결

본 연구에서 제안한 대기행렬모형 기반 방법론으로 재산정한 제1절 부산항 진해신항(1단계) 건설사업(2022) 사례 연구의 선박대기비용 절감 편익은 기존 방법론에 의해 산정된 부선하역비용 절감 편익의 124% 수준이며 체선, 체화, 환경비용의 비중은 각각 51%, 23%, 26%으로 나타났다. 반면, 제2절의 부산항 제2신항 건설사업(2021) 사례연구에서는 재산정한 선박대

기비용 절감 편익은 기존 절감 편익의 약 1,041% 수준인 것으로 나타났다. 제1절 부산항 진해신항(1단계) 건설사업(2022)의 사례 연구와 비교했을 때, 제2절 사례연구에서는 재산정한 편익과 기존 편익 사이에 아주 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

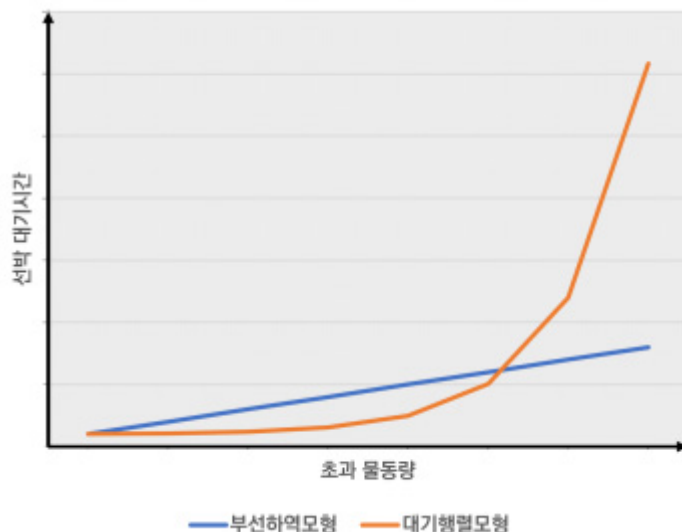
이는 사례연구에서 편익 산정의 대상인 초과 물동량을 신설 부두의 적정 하역능력으로 가정했기 때문이다. 제2절의 부산항 제2신항 건설사업(2021)은 12,610,000TEU로 제1절 부산항 진해신항(1단계) 건설사업(2022)의 적정하역능력인 8,010,000TEU보다 1.5배 이상 크다. 부두가 신설되지 않을 시(without case) 기존 부두에 전가되는 물동량 부담이 크게 증가하고, 이에 따라 대기행렬모형에 따른 대기시간이 기하급수적으로 증가함에 따른 결과이다. 향후 연구에서는 적정하역능력과 관련없이 현재의 선박 도착률과 미래의 수요 예측값을 기반으로 사업 시행/미시행 간 선박의 도착률 및 평균대기시간의 차이를 추정하는 대기행렬모형 적용 방법론이 구축되어야 한다.

기존 부산하역 가정의 편익 산정은 편익 산정 대상이 되는 물동량이 증가함에 따라 선박대기비용 절감 편익 역시 선형으로 증가한다. 반면에, 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론에서는 편익 산정 대상이 되는 초과 물동량이 증가함에 따라 선박대기비용 절감 편익이 기하급수적으로 증가한다. 이러한 현상은 이미 시스템 내에 일정 수준 이상의 혼잡이 존재하는 상황에서는 일정량의 부하가 더해짐에 따라, 즉 도착률이 증가함에 따라 대기시간이 매우 크게 증가하는 대기행렬모형의 특성에서 기인한다.

〈그림 4-2〉는 물동량 증가에 따른 기존 부산하역 가정의 방법론과 대기행렬모형 기반한 방법론의 대기시간 차이를 보여준다. 이 그림은 대기행렬모형 기반한 방법론이 실제 항만에서 혼잡도가 높을 때, 즉 장치율이나 선석점유율이 매우 높을 때는 아주 적은 화물이나 선박 도착률이 더해져도

선박대기시간이 크게 증가하는 현실을 반영하고 있음을 보여준다. 반면, 혼잡도가 아주 적을 때는 같은 정도의 부하가 주어진다고 하더라도 혼잡도가 증가하는 정도가 작을 수 있다. 이 경우에는 오히려 부선하역 가정처럼 물동량이 증가함에 따라 절감 편익 역시 선형으로 증가하는 방법론에서 더 큰 절감 편익이 발생할 수 있다. 하지만, 일반적으로 항만의 물동량과 하역능력이 같아지는 상황, 또는 항만의 혼잡도가 높은 상황에서 항만 개발 사업의 경제성을 평가하기 때문에 대기행렬모형 기반 편익이 기존 부선하역 가정 편익보다 크게 산출될 가능성이 높다. 즉, 대기행렬모형에 기반한 선박대기비용 절감 편익 방법론은 수요예측량(또는 초과 물동량) 증가에 따른 시설투자자의 편익의 증가를 잘 나타내고 있으므로 부선하역 가정 방법론보다 현실적, 합리적이라고 할 수 있다.

〈그림 4-2〉 초과 물동량 증가에 따른 선박대기시간(대기비용) 증가 추세



자료: 저자 작성

이처럼, 부선하역 가정은 초과 물동량 증가에 따른 항만 내 선박대기시간의 기하급수적 증가 현상을 반영하지 못하기에 현실성이 부족하다. 또한, 서론에서 서술했듯이 적정하역능력을 초과하는 물동량을 부선하역으로 처리한다는 가정 역시 매우 비합리적이다. 이는 부선하역이 실제로 일어나지 않는 작업이기 때문만이 아니라, 적정하역능력을 초과하여도 일반적으로 선석에 여유가 있기 때문에 선석에서의 하역이 가능하기 때문이다. 적정하역능력은 항만의 최대하역능력이 아니라 선박의 대기비용과 항만의 서비스비용의 합, 즉 사회적비용을 최소화하는 항만의 하역능력이다.

또한, 대기행렬모형은 3장 3절과 부록에서 다루고 있는 선박의 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소를 모형내에 반영하여 편익을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 연구의 범위를 벗어나기 때문에 구체적인 방안을 다루지는 못했지만, 대기행렬모형을 일부 개선하여 위와 같은 선박의 잠재 대기시간을 추정할 수 있다는 점이 대기행렬모형 기반의 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론의 장점이다.

한편, 본 연구는 KMI(2023)에서 제안한 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론을 예비타당성조사의 경제성분석에 적용하기 위해 방법론의 적용 가능성을 검토한 기초 연구이다. KMI(2023)의 방법론에서 미처 다루지 못한 일부 이론적 한계점을 개선하였지만, 여전히 많은 한계점과 비현실적인 가정을 내포하고 있다. 대기행렬모형을 활용한 대기비용 절감 편익 방법이 부선하역 방법론을 완전히 대체하기 위해서는 추가적인 검증 절차 및 방법론 개선 연구가 필요하며, 이를 통해 보다 정확한 편익 산정이 가능해질 것으로 기대된다.

05

결론 및 활용

제1절 요약 및 결론

선박대기비용 절감 편익은 항만 부문 예비타당성조사의 모든 편익 항목 중에서 가장 큰 비중을 차지하기 때문에 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론은 사업 착수 가결 여부에 막대한 영향을 미친다. 선박대기비용은 선박대기시간과 대기에 따른 비용을 직접 계산하여 산정하는 것이 바람직하나, 데이터 수집 및 확보, 방법론 개발의 어려움으로 인해 그러하지 못하였다. KMI(2023)은 처음으로 대기행렬모형을 이용하여 선박대기시간 및 대기비용을 직접 추정했고, 이를 예비타당성조사 사례에 적용하여 대기비용 절감 편익을 산정했다. 하지만, 위 사례연구에 적용된 편익 산정 방법론은 몇 가지 개선할 사안이 여전히 남아있다. 본 연구는 KMI(2023)에서 미처 다루지 못한 방법론의 한계점을 검토 및 개선하여, 선박대기비용 절감 편익을 산정하기 위한 대기행렬모형 기반 방법론의 정확도와 신뢰도를 향상시켰다. 또한 사례연구를 통해 예비타당성조사 시 새로운 방법론의 활용 가능성을 살펴보았다.

먼저, 국내 21개 컨테이너 부두의 도착 시간 간격과 서비스시간에 대한

분포를 통계적 검정 방법론을 이용하여 검정하였다. 검정 결과, 도착 시간 간격은 지수분포를 따르는 반면에, 서비스시간은 감마분포 또는 지수분포 등 일반 분포를 따르는 것을 확인하였다. 따라서, 항만 내 선박의 대기 시스템에는 방법론의 편의성 때문에 널리 쓰이는 M/M/c 모형의 적용이 불가능하다. 대신에, 본 연구에서는 M/G/c 모형의 근사 방법을 이용하여 선박의 대기시간을 추정하였다.

다음으로, KMI(2023)가 제안한 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론 중 개선이 필요한 사안을 조사하고 이를 현실화하였다. 먼저, 대기비용 산정 대상이 되는 초과 물동량을 사업 시행 인접 부두에 배분하기 위한 합리적인 방안을 제안하였다. KMI(2023)는 인근 부두에 균일하게 배분하였지만, 각 부두의 특성이 다를 것을 고려했을 때 이는 현실성이 다소 떨어진다. 대신에, 인근 부두의 적정하역능력 또는 서비스율을 기준으로 물동량을 배분하는 방안을 고안하고, 사례연구에 적용하였다. 다음으로, 입항 대기 중인 선박의 적재율을 산정하였다. KMI(2023)는 선박 적재율을 100%로 설정하여 선박에 화물이 가득 적재된 것으로 가정했다. 본 연구에서는 통계자료를 바탕으로 특정 항만에 입항 대기 중인 선박 적재율의 추정 방법을 제시했다. 사례연구에서 부산항 입항 선박의 적재율을 추정한 결과, 약 53%가 적절한 적재율값으로 산정되었다. 다음으로는 선박의 적정 표준 선형을 정확하게 추정하였다. Port-MIS 데이터와 선박 제원 데이터를 결합하여 최근 5개년(2018~2022) 평균 선박 크기(TEU)를 조사하니, 부산항 신항에 입항하는 선박의 평균적인 크기는 약 6,800TEU인 것으로 나타났다. 2022년 수행된 부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사에서 부산신항의 표준 선형으로 4,400TEU를 설정했으나, 이는 선박 크기 추정에 환산계수를 활용한 것으로 정확한 값과는 거리가 있다.

KMI(2023)의 대기행렬모형 기반 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론의 여러 한계점을 개선하고 방법론의 활용 가능성 및 한계점을 살펴보기

위해 부산항 진해신항(1단계) 건설사업(2022)과 부산항 제2신항 건설사업(2021)을 바탕으로 사례연구를 수행했다. 부산항 진해신항(1단계) 건설사업(2022)의 경우, 대기행렬모형을 적용하여 산정한 선박대기비용 절감 편익은 12,755,448백만 원으로 산정되었으며, 이는 예비타당성조사 보고서의 기존 편익 10,320,901백만 원과 비교했을 때 약 124% 수준이다. 또한, 대기행렬모형을 적용하여 산정한 편익 항목을 살펴보면 체선, 체화, 환경비용의 비중이 각각 51%, 23%, 26%으로 나타났다.

다음으로, 부산항 제2신항 건설사업(2021) 예비타당성조사 사례에도 본 방법론을 적용하였다. 부산하역 가정 방법론으로 산정한 선박대기비용 절감 편익은 8,773,152백만 원이었고, 이 중에서 재항비용 절감 편익은 약 23%, 하역비용 절감 편익은 약 77%를 차지했다. 한편, 대기행렬모형을 적용한 선박대기비용 절감 편익은 91,287,072백만 원으로 산정되었으며 이는 기존 편익 대비 약 1,041%에 해당한다. 이는 대기행렬모형의 특성이 반영된 것으로, 항만의 물동량 또는 혼잡도가 높아짐에 따라 대기시간이 기하급수적으로 증가하는 양상을 나타낸다. 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론은 기존 부산하역가정 방법론보다 과학적일 뿐만 아니라, 선박대기시간이 단순히 선형으로 증가하는 부산하역가정보다 현실적이다.

제2절 연구 활용 및 정책 제언

1. 정책적 효과 및 활용

본 연구는 기획재정의 항만 부문 예비타당성조사 평가 시에 활용될 수

있는 기초연구로서, 기존의 부선허역가정 편익 산정 방법론보다 과학적이고 현실적인 대기행렬모형 기반의 방법론을 검토 및 개선하였다. 이 방법론을 적용함으로써, 항만 투자의 경제적 타당성에 대한 신뢰도와 객관성을 제고할 것으로 기대된다. 투자 타당성을 보다 정확히 평가하여 재정 예산을 더욱 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 항만개발 사업 예비타당성조사의 경제적 편익을 보다 과학적이고 합리적으로 산출할 수 있는 명확한 기준을 설정함으로써, 사업 진행 과정에서 경제적 분석에서 발생할 수 있는 불필요한 논란을 미연에 방지하고 행정적 비용의 낭비를 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 국가 차원에서 적절한 항만 시설 수준을 유지하기 위해서는 과도한 개발 요구를 효과적으로 조절하는 것이 중요하며, 본 연구는 객관적이고 공정한 항만투자사업의 경제적 평가 기준 및 방법론의 정립 및 표준화에 기여할 것으로 기대된다.

우리나라 항만 개발 사업을 평가하기 위해 본 연구에서 제안한 방법론을 활용하기 위해서는, 이를 항만 부문 예비타당성조사 표준 지침에 반영해야 한다. 이를 위해서는 KDI 공공투자관리센터와 긴밀하게 협의하여 대기행렬모형 기반 선박 대기비용절감 편익 산정 방법론에 대한 신뢰성과 객관성을 확보할 필요가 있다. 한편, 유엔연합무역개발협의회(UNCTAD: United Nations Conference on Trade and Development)는 1978년에 「Port Development: A HandBook for Planners in Developing Countries (초판)」를 발간하여, 항만 개발 사업의 경제성 평가를 포함하여 항만 개발 사업을 평가하기 위한 전반적인 가이드라인을 제시했다. 이후 1985년에 2판을 발간하여 이를 일부 개정하였다. 이처럼, 국내 기관 뿐만 아니라, UNCTAD 또는 아시아개발은행(ADB: Asia Development Bank) 등 국제기관과 협업하여 본 연구에서 제시하는 선박 대기비용절감 편익 산정 방법론에 대한 신뢰성과 객관성을 확보하고, 항만 개발 사업에 대한 새로운 가이드라인을 제시할 수 있기를 기대한다.

2. 학술적 효과 및 활용

본 연구는 선박대기비용 절감 편익 산정을 위한 방법론으로 대기행렬이론을 제안하고 기존 연구의 한계점을 개선하였다. KMI(2023)는 처음으로 대기행렬모형을 적용하여 선박대기비용 절감 편익을 산정하였으나, 제안한 방법론을 예비타당성조사에 활용하기에는 여전히 미흡한 점이 몇 가지 존재했다. 먼저, 선박 도착 시간 간격과 선박의 서비스시간이 특정 이론분포를 따른다는 것을 통계적으로 검증하지 못하였다. 본 연구는 항만정보시스템인 Port-MIS 실제 데이터를 바탕으로 매우 상세한 전처리를 수행하고, 엄밀한 이론분포 검정 방법론을 활용하여 선박의 도착 시간 간격 및 서비스시간에 대한 이론분포를 검정했다. 이를 통해, 선박대기시간을 추정하기 위한 대기행렬모형의 이론적 근거를 마련했다.

위 이론분포 검정을 바탕으로, 본 연구는 항만 시스템을 분석하기 위해 M/G/c 모형을 도입한 최초의 연구이다. 선박 도착 시간 간격과 선박 서비스시간에 대한 이론분포 검정 결과, 기존에 항만 시스템을 묘사하기 위해 일반적으로 쓰였던 M/M/c 모형이 적합하지 않다는 것을 밝혔다. 많은 기존 문헌에서는 M/M/c 모형의 편의성 때문에 선박의 도착 시간 간격 및 서비스시간이 지수분포를 따름을 임의로 가정하였다. 하지만, 본 연구에서는 지금까지 정확한 통계 자료 분석의 미흡함과 이론 연구의 한계 때문에 항만 부문에 도입되지 못했던 M/G/c 모형을 적용하여, 보다 정확하게 항만 내 선박의 대기시간을 추정했다.

다음으로, 본 연구는 KMI(2023)의 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론의 한계점을 파악하고, 이를 개선하였다. 본 연구는 이 중에서 초과 물동량 할당 방안, 대기 선박의 적재율, 적정 선형 크기, 선박 대기로 인한 환경비용 원단위 등 기존 연구에서 상세하게 다루어지지 않은 가정을 실증 데이터를 통해 분석하고, 보다 현실적인 가정을 제안했다. 이를 통해, 대기행렬모

형을 활용한 선박대기비용 절감 편익 산정 방법론의 신뢰도를 개선하였다.

한편, 본 연구는 선박의 감속 운항, 외항 대기, 기항 포기 또는 취소를 대기행렬모형에 적용할 수 있는 방안을 살펴보았다. Port-MIS 등 행정 데이터를 사용하여 선박의 대기시간을 추정하면 정박지 밖에서 대기하는 선박의 대기시간은 분석에 반영되지 못하는 한계점이 존재한다. 본 연구는 AIS 데이터를 활용하여 부산항에 입항하는 선박에는 감속 운항과 표류 대기 등으로 인한 지연이 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 선박의 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소를 반영할 수 있는 대기행렬모형의 도입 가능성을 분석하였다. 이와 관련된 보다 자세한 내용은 본 연구의 부록에 기재되어 있다. 본 연구 사례연구에서 선박의 감속 운항, 표류, 기항 취소 등을 대기행렬모형에 적용한 방법론을 사용하지는 않았으나, 향후에는 이를 반영할 수 있는 모형이 개발되어 보다 정확하게 항만투자사업의 기회비용을 산정할 수 있을 것으로 기대한다.

요약하면, 본 연구에서는 기존 연구에서 이루어지지 않은 선박 도착 시간 간격과 선박 서비스시간에 대한 이론분포를 엄밀하게 검정하고, 검정 결과를 바탕으로 항만 시스템을 분석하기 위한 M/G/c 모형을 최초로 도입했다. 또한, 선박의 감속 운항, 외항 대기, 기항 포기 또는 취소를 데이터를 통해 검증하고, 이를 대기행렬모형에 적용하여 보다 정확하게 항만투자사업의 가치를 평가할 수 있는 방법을 고민하였다. 본 연구가 대기행렬모형을 이용하여 선박의 대기비용을 직접 산정하기 위한 연구의 초석이 될 수 있기를 기대한다.

제3절 한계점 및 후속연구

기존 항만부문 예비타당성조사의 경제성 평가에서는 선박대기비용 절감 편익을 산정하기 위해 부선히역을 가정하였고, 부선히역의 대상이 되는 물동량은 부두의 수요 예측값에서 적정하역능력을 제외하여 계산하였다. 즉, 적정하역능력을 초과하는 물동량은 부선으로 하역한다고 가정한 것이다. 그러나, 이는 적정하역능력의 정의를 고려한다면 매우 비합리적인 가정이다. 적정하역능력은 항만의 최대하역능력이 아니라, 선박의 대기비용과 항만의 서비스비용의 합, 즉 사회적비용을 최소화하는 항만의 하역능력이다. 항만에 따라 다르지만 부산신항의 경우 적정하역능력은 선석점유율 55~70%를 목표로 산정된다. 적정하역능력을 초과한 물동량에 대해서도 충분히 해당 선석에서 하역할 수 있다는 의미이다.

위의 방식으로 선박대기비용 절감 편익 대상이 되는 물동량을 선정하는 것이 매우 비합리적인 가정에도 불구하고, 본 연구의 4장 사례연구에서도 기존 예비타당성조사 사례와 동일한 조건에서 편익 산정값을 비교하기 위해서 유사한 가정을 적용했다. 즉, 대기행렬모형을 적용하는 과정에서 사업을 시행할 경우에는 인접 항만의 선박 도착률이 현재와 동일하고, 사업을 시행하지 않을 경우에는 인접 항만의 선박 도착률이 부두의 적정하역능력을 초과하는 물동량만큼 증가한다고 가정한 것이다. 후속 연구에서는 적정하역능력과 관계없이 현재의 선박 도착률과 미래의 수요 예측값을 기반으로 사업 시행/미시행 간 선박의 도착률 및 평균대기시간의 차이를 추정하는 방법론이 고민되어야 한다.

한편, 본 연구는 실증 데이터와 대기행렬모형을 이용하여 추정한 이론적인 선박대기시간과 실제 선박대기시간 사이에는 다소 차이가 존재한다는 한계점이 있다. 본 연구의 목적이 선박대기시간을 정확하게 추정하는 것이

아니라, 초과 물동량 증가에 따른 선박대기시간의 증감과 이로 인한 대기 비용절감효과의 산정임을 고려했을 때, 선박대기시간을 정확하게 추정하는 것은 본 연구의 주요 목적과는 다소 거리가 있다. 그러나, 본 연구에서 사용한 대기행렬모형 방법론을 개선하여 이론적으로 추정된 대기시간과 실제 대기시간 사이에 차이를 좁힌다면, 본 연구에서 제안한 편익 산정 방법론의 정당성과 신뢰도 확보에 도움이 될 것으로 기대한다.

예를 들어, <표 3-10>의 자료를 바탕으로 산정한 최근 5개년 부산신항 2부두와 3부두의 실제 대기시간은 각각 선박당 평균 1.47시간과 0.85시간으로 나타났다. 반면, 대기행렬이론을 적용하여 산정한 대기시간은 <표 4-10>에 나타나 있듯이 각각 1.16시간과 1.02 시간으로 계산되었다. 즉, 부산신항 2부두와 3부두의 경우, 이론적인 대기시간이 실제 대기시간보다 각각 약 21% 낮게, 20% 높게 추정되었다.

따라서, 향후 연구에서는 대기행렬모형 기반 편익 산정 방법론의 신뢰도와 정당성을 확보하기 위해서 실제 대기시간과 이론적인 대기시간의 차이를 좁히는 연구가 수행되어야 한다. 예를 들면, 본 연구에서 소개한 선박 정박지의 용량 한계가 존재하는 모형을 고려해 볼 수 있다. 즉, 정박지에 일정 숫자 이상의 선박이 대기하고 있는 경우에는 이후 도착한 선박이 대기하지 않고 해당 항만에 기항을 취소하는 가정을 적용하는 것이다. 또는, 항만의 선박 입항 횟수가 요일별, 또는 월별로 달라지는 추세를 고려하여 시간의존적(time-dependent) 모형의 도입을 고려할 수 있다.

마지막으로, 같은 부두에 속한 선석이라도, 선석의 특성에 따라 시스템을 다르게 분류하는 방안을 고려할 수 있다. 예를 들어, 최근 5개년의 Port-MIS 데이터에 따르면, 부산항 신항 1부두 1선석은 입항하는 선박의 평균 크기는 약 30,000GT, 평균 도착 시간 간격은 20.32시간, 평균 서비스시간은 15.05시간으로 나타났다. 반면, 같은 부산항 신항 1부두의 5선석

은 선박의 평균 크기는 약 130,000GT, 평균 도착 시간 간격은 32.18시간, 평균 서비스시간은 24.48시간으로 나타났다. 즉, 5선석은 1선석보다 입항하는 선박이 확실히 더 크고, 평균 서비스시간도 더 길다. 이처럼 같은 부두에서도 선석에 따라 특성이 차이가 나므로, 하나의 부두를 하나의 시스템으로 정의하기보다 비슷한 선석을 합치어 별개의 시스템으로 정의하는 것이 바람직할 수 있다.

참고문헌

국내 문헌

- 고용노동부(2017), 2016년 사업체노동력조사 통계자료.
- 국토교통부(2017), 교통시설투자평가지침 6차개정.
- 국토교통부(2018), 도로 건설사업의 편익분석 개선연구.
- 김은수·김근섭(2016), 국내 항만의 선박 대기율 실증 분석 연구, 한국항해항만학회지, 40(1), pp. 35-41.
- 김찬성·이정윤·정경훈(2008), 화물특성에 따른 국내 운송수단 선택모형 구축 연구, 한국교통연구원 연구총서.
- 노병국·김용배·진학기(2011), 철도투자평가체계 개선방안의 고찰, 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp. 2192-2204.
- 대한교통학회(2006), 철도투자평가체계 개선방안 연구 용역, 한국철도시설공단 용역과제, 2006. 6.
- 박병인(1998), 異質的 複數서버를 갖는 混雜 컨테이너터미널의 船舶關聯 時間分布 推定, 해양정책연구, 13(1), pp. 171-184.
- 박병인·배종욱·박상준(2009), 선박당 평균대기비용에 의한 항만의 서비스 수준 평가, 한국항만경제학회지, 25(4), pp. 185-205.
- 백인흠(1998), 선박재항시간에 대한 분석연구: 인천항의 경우, 수산해양교육연구, 10(1), pp. 1-14.
- 부산항만공사(2023), 2022 부산항 컨테이너화물 처리 및 수송 통계, 부산항 통계책자.
- 신승식(2015), 항만건설 예비타당성조사의 편익 산정 개선에 대한 연구, 한국항만경

-
- 제학회지, 31(4), pp. 17-38.
- 이기열 외(2015), 국내 항만의 서비스 지표개발을 위한 항만 대기율 산정, 한국경영과학회, 학술대회 논문집, pp. 111-115.
- 이민규·김근섭(2010), 베이징안 혼합 정규 분포를 이용한 선박 재항시간 분포의 추정, 해양정책연구, 25(2), pp. 25-49.
- 이인애(2011), 테마기획 : 고유가 시대 : 외항해운업계의 대응 : 감속운항, 서차지, 공동운항, 연료수급지 조정... 대처, 해양한국, 2011(6), pp. 42-45.
- 이재길(1992), 일본에서의 시간가치 측정방법, 교통정보, 제74호, pp. 41-49.
- 이정훈·박남규(2018), 컨테이너 터미널의 이론적 대기율과 실제 대기율 비교에 관한 연구: 부산항 신항 A 터미널을 대상으로. 한국항만경제학회지, 34(2), pp. 69-82.
- 장영태(1991), 항만에서의 선박대기시간 추정 방법론, 한국해양과학기술원, 제13권, 제2호, pp. 57-67.
- 장영태(1994), 우리나라 주요 수출입 항만에서의 선박 입출항시간 분포 추정에 관한 연구, 한국해운학회지, 19, pp. 123-163.
- 정성봉(2011), 철도화물수송의 환적효과분석 연구, 로지스틱스연구, 19(1), pp. 159-168.
- 최창호(2016), 벌크화물운송의 환적저항요인 평가 및 모형 개발, 한국 ITS 학회 논문지, 15(3), pp. 1-11.
- 최창호(2019), 벌크화물의 시간가치 반영을 위한 기초환경 구축 방안 연구, 한국항만경제학회지, 35(1), pp. 1-17.
- 최창호 외(2008), 철도 화물 수송수단 선택 특성 연구, 한국철도학회 논문집, 11(6), pp. 588-595.
- 통계청(2017), 2016년 운수업통계조사.
- 한국철도공사·한국철도시설공단(2007), 2006 철도통계연보.
- 한국철도시설공단(2010), 효율적인 철도시설 인프라 활용을 위한 선로용량 산정 및 관리 연구, 한국철도기술연구원 연구과제.
- 해양수산부(2020), 항만 적정하역능력 재산정(1권).
- KDI(2000), 항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제1판).

- KDI(2001), 항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제2판).
- KDI(2008), 도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제 5판).
- KDI(2014a), 항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판).
- KDI(2014b), 공항부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판).
- KDI(2019), 국가교통DB 검토 및 교통부문 쟁점 연구
- KDI(2021a), 2020년도 KDI 공공투자관리센터 연차보고서.
- KDI(2021b), 부산항 제2신항 건설사업 예비타당성조사 보고서.
- KDI(2021c), 예비타당성조사 수행을 위한 세부지침 도로·철도부문 연구.
- KDI(2022a), 부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사 보고서.
- KDI(2022b), 항만자동화 테스트베드 구축(광양항) 예비타당성조사 보고서.
- KMI(2016), 항만분야 예비타당성조사의 경제성 평가 기준 개선 연구.
- KMI(2022), 항만 부문 경제적 편익 항목의 개선방안 연구.
- KMI(2023), 선박대기시간 예측모형 개발을 위한 방법론 연구.

국외 문헌

- Ansorena, I. L., & Valdecantos, V. N.(2021). A simulation model of container terminals. The Port of Valencia case study. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 37(1), pp. 15-26.
- Blauwens, G., & Van de Voorde, E.(1988), The valuation of time savings in commodity transport, *International Journal of Transport Economics/Rivista internazionale di economia dei trasporti*, pp. 77-87.
- Cerdeiro, D. A. et al.(2020), World seaborne trade in real time: A proof of concept for building AIS-based nowcasts from scratch, *IMF Working Paper*.
- Chang, Y. T. et al.(2012), Estimation of optimal handling capacity of a container port: an economic approach. *Transport Reviews*, 32(2), pp. 241-258.
- De Jong, G. et al.(2014), New SP-values of time and reliability for freight transport

-
- in the Netherlands, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 64, pp. 71-87.
- De la Peña-Zarzuelo, I., Freire-Seoane, M. J., & López-Bermúdez, B.(2020), New Queuing Theory Applied to Port Terminals and Proposal for Practical Application in Container and Bulk Terminals, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 146(1), 04019031.
- Dragovic, B., Park, N.K. & Radmilovic, Z.(2006), ShipBerthLink Performance Evaluation: Simulation and Analytical Approaches, *Maritime Policy & Management* 33(3), pp. 281-299.
- EEA(2019), EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories, EEA Report.
- Esmer, S., Yildiz, G. & Tuna, O.(2013), A New Simulation Modelling Approach to Continuous Berth Allocation, *International Journal of Logistics Research and Applications* 16(5), pp. 398-409.
- Fowkes, A. S., Nash, C. A., & Tweddle, G.(1991), Investigating the market for inter-modal freight technologies, *Transportation Research Part A: General*, 25(4), pp. 161-172.
- Gans, N., Koole, G., & Mandelbaum, A.(2003). Telephone call centers: Tutorial, review, and research prospects. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(2), 79-141.
- Goss, R. O. & M. C. Mann(1977), *The Cost of Ship's Time*, Advances in Maritime Economics, Cambridge University Press, 1977.
- Ibrahim, E. et al.(2021), Handling missing and outliers values by enhanced algorithms for an accurate diabetic classification system, *Multimedia Tools and Applications*, 80, 20125-20147.
- Inregia(2001), *Tidsvärden och Transportkvalitet*, Inregia's Studie av Tidsvärden och Transportkvalitet för Godstransporter 1999, Background report of SAMPLA N 2001:1, Stockholm.
- Kia, M., Shayan, E. & Ghotb, F.(2002), Investigation of Port Capacity Under A New Approach by Computer Simulation, *Computers & Industrial Engineering* 42 (2-4), pp. 533-540.

- Konishi, Y. et al.(2014), Measuring the value of time in freight transportation, The Research Institute of Economy, Trade and Industry, Tokyo.
- Kouwenhoven, M. et al.(2014), New values of time and reliability in passenger transport in The Netherlands, *Research in Transportation Economics*, 47, pp. 37-49.
- Kuo, T. C., Huang, W. C., Wu, S. C., & Cheng, P. L. (2006). A case study of inter-arrival time distributions of container ships. *Journal of Marine science and technology*, 14(3), p. 4.
- Kurri, J., Sirkiä, A., & Mikola, J.(2000), Value of time in freight transport in Finland, *Transportation Research Record*, 1725(1), pp. 26-30.
- Lai, K.K. & Shih, K.(1992), A Study of Container Berth Allocation, *Journal of Advanced Transportation* 26(1), pp. 45-60.
- Laing, E. T., & Hecker, G.(1989), A note on optimal waiting-to-service-time ratios in large ports. *Maritime Policy and Management*, 16(1), pp. 83-86.
- Layaa, J. & Dullaert, W.(2014), Measuring and Analysing Terminal Capacity in East Africa: The Case of the Seaport of Dar es Salaam, *Maritime Economics & Logistics* 16(2), pp. 141-164.
- Lee, A. M., & Longton, P. A.(1959). Queueing processes associated with airline passenger check-in. *Journal of the Operational Research Society*, 10(1), pp. 56-71.
- Lee, T.W., Park, N.K. & Lee, D.W.(2003), A Simulation Study for the Logistics Planning of A Container Terminal in view of SCM, *Maritime Policy & Management* 30(3), pp. 243-254.
- Liu, D., & Ge, Y. E.(2018), Modeling assignment of quay cranes using queueing theory for minimizing CO2 emission at a container terminal, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, pp. 140-151.
- Massey Jr, F. J.(1951), The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit, *Journal of the American statistical Association*, 46(253), pp. 68-78.
- McHugh, M. L.(2013),The chi-square test of independence, *Biochemia medica*, 23(2), pp. 143-149.
- Metcalf, K. et al.(2018), Using satellite AIS to improve our understanding of shipping

-
- g and fill gaps in ocean observation data to support marine spatial planning, *Journal of Applied Ecology*, 55(4), pp. 1834-1845.
- Millefiori, L. M. et al.(2021), COVID-19 impact on global maritime mobility, *Scientific reports*, 11(1), p. 18039.
- Myung, I. J.(2003), Tutorial on maximum likelihood estimation, *Journal of mathematical Psychology*, 47(1), pp. 90-100.
- Oyatoye E.O, Adebisi S.O, Okoye J. C & Amole B.B (2011). Application of Queuing theory to port congestion problem in Nigeria, *European Journal of Business and Management*, 3(8), 24-36.
- Özkan, E. D., Koçer, U. U., & Nas, S.(2020), Statistical analysis for modeling ship operation processes in ports, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*.
- Rand Europe, SEO & Veldkamp/NIPO(2004), Hoofdonderzoek naar de Reistijdwaarderend in het Goederenvervoer, Report for AVV; RAND Europe, Leiden.
- Scholz, F. W., & Stephens, M. A.(1987), K-sample Anderson-Darling tests. *Journal of the American Statistical Association*, 82(399), pp. 918-924.
- Significance, VU University Amsterdam & John Bate Service(2012), Value of Time and Reliability in Passenger and Freight Transport in the Netherlands, Project 08064 Final Version.
- Smalkoski, B., & Levinson, D. M.(2005), Value of time for commercial vehicle operators in Minnesota, In *Journal of the Transportation Research Forum*, 44(1), pp. 89-102.
- Small, K. A.(1999), Valuation of travel-time savings and predictability in congested conditions for highway user-cost estimation (Vol. 431), *Transportation Research Board*.
- Tang, G. et al.(2014), SPAC to Improve Port Performance for Seaports with Very Long One-Way Entrance Channels, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 140(4), 04014011.
- Tang, G. et al.(2016), Effect of Entrance Channel Dimensions on Berth Occupancy of Container Terminals, *Ocean Engineering* 117, pp. 174-187.

- Transek(1990), Godskunders Värderingar, Banverker Rapport 1990:2, Transek, Solna.
- UNCTAD(1978), Port Development: A Handbook for Planners in Developing Countries. United Nations Publication
- Vieira, L. F. M.(1992), The value of service in freight transportation (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Whitt, W. (1993). Approximations for the GI/G/m queue. Production and Operations Management, 2(2), 114-161.
- Widlert, S., & Bradley, M.(1992), Preferences for freight services in Sweden. In Sixth World Conference in Transport Research, Lyon, France.
- Wigan, M., Rockcliffe, N., Thoresen, T., & Tsolakis, D.(2000), Valuing long-haul and metropolitan freight travel time and reliability.
- Wooldridge, J. M.(2001), Applications of generalized method of moments estimation, Journal of Economic perspectives, 15(4), pp. 87-100.
- Zhang, J.(2002), Powerful goodness-of-fit tests based on the likelihood ratio, Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), 64(2), pp. 281-294.

인터넷 자료

- 한국무역통계 정보포탈, <https://www.bandtrass.or.kr/>(검색일: 2023.04.17.)
- 해양수산부(2021.08.30.), 항만하역요금 현황, <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?menuSeq=427&bbsSeq=2&docSeq=42889>(검색일: 2023.04.17.)
- Alphaliner.(2012), Weekly Newsletter, Vol. 2012, Issue 1-50(검색일: 2023.04.17.)
- Clarksons Research(2016-2022), <https://sin.clarksons.net/#!/login>(검색일: 2023.04.17.)
- KDI 공공투자관리센터, 예비타당성조사, <https://pimac.kdi.re.kr/about/validity.jsp>(검색일: 2023.11.29.)

Lloyd's List Containers Data Hub, <https://lloydslist.com/markets/containers/data-hub/data-hub-load-factors>(검색일: 2023.08.17.)

NTIS(2022.4.13.), 항만 건설의 사회적 가치평가 연구 용역. <https://www.ntis.go.kr/ndgate/eg/un/ra/view.do?roRndUid=1081912>(검색일: 2023.11.23.)

Port-MIS. <https://new.portmis.go.kr/>(검색일:2023.11.23.)

The Maritime Executive(2022.12.13.), Savannah Expects to Clear Containership Backlog in Coming Weeks, <https://maritime-executive.com/article/savannah-expects-to-clear-containership-backlog-in-coming-weeks#:~:text=In%20October%202021%2C%20more%20than,du%20to%20the%20large%20backlog.> (검색일: 2023.08.23.)

Western Overseas Corporation(2022.1.3.), Weekly Vessels Anchored and at Terminals as of 1/3/2022, <https://www.westernoverseas.com/port-congestion-update-1-3-22/>(검색일: 2023.04.17.)

부 록

1. 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소를 고려한 대기시간 산정

1) AIS 데이터 소개

AIS(Automatic Identification System)는 선박의 실시간 운항 정보를 송수신하는 무선 통신 기술로 선박 추적을 통해 해상 안전성을 확보하기 위한 목적으로 개발되었다. IMO는 2004년부터 총톤수 300톤 이상의 국제 화물선, 500톤 이상의 국내 화물선, 모든 여객선이 AIS를 의무적으로 탑재하도록 규제하고 있으며, 설치된 AIS 장비를 통해 선박의 식별번호, 위치, 속도, 방향, 항해 상태 등이 수 초 단위로 기록된다. 최근에는 축적된 데이터를 바탕으로 선박의 안전 외에 다양한 분야에서 활용하려는 시도가 이어지고 있다. 예를 들어, Cerdeiro & Komaromi(2020)는 물동량 흐름을 분석하기 위해 AIS를 활용하였으며, Millefiori et al.(2021)는 코로나 19 확산이 해운 공급망에 미친 영향을 파악하기 위해 AIS를 활용하였다. Metcalfe et al.(2018)은 선박 배출량 추정에 AIS를 도입하였다.

항만 대기시간을 추정하는 데 있어서 AIS를 활용하는 것은 많은 장점이 있다. PORT-MIS 등 기존 항만 통계 시스템은 선박의 신고에 따라 입출항 데이터가 작성되기 때문에 데이터의 시점 기록과 관련한 인적 오류가 발생할 수 있다. 그러나 AIS의 경우 선박의 위치가 장비에 의해 자동으로 기록

되기에 대기시간을 보다 명확히 산정할 수 있다. 또한 기존 항만 통계 시스템은 일반적으로 항계 내에 들어온 선박만을 대상으로 하여, 선박이 항계 바깥에서 대기하는 경우를 파악할 수 없다. AIS 데이터의 경우 공간적 범위를 항계 바깥까지 확장할 수 있어 해당 대기시간을 파악하는 데 유리하다. 항만 내 정박 시간을 최소한으로 하며 연료를 절약하기 위해 최근 많은 선박이 도입하고 있는 감속 운항, 항만의 혼잡이 예상되거나 화물을 선박에 충분히 적재했을 때 예약된 항만에 취항하지 않는 기항 취소 등도 대상 항만의 통계 시스템에서는 파악이 어려우나, AIS 데이터로는 추적할 수 있다. 본 절에서는 AIS를 활용하여 선박의 외항 대기, 감속 운항, 기항 취소 문제를 해결하고, 이를 대기시간으로 반영하는 방법에 대해 서술한다.

2) 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소 분석

Port-MIS 데이터만을 활용하여 추정한 선박대기시간은 정박지 밖 또는 항계 밖에서 발생한 선박대기시간을 고려하지 못한다는 한계점이 있다. 대부분의 연구가 선박대기시간은 선박이 정박지 또는 묘박지에서 머무른 시간으로만 대기시간으로 정의, 추정하고 있기 때문에, 선박의 감속 운항(slow steaming), 표류(drifting), 기항 취소(balking) 등 표면적으로 드러나지 않는 선박 대기시간은 고려되지 못하고 있다.

일반적으로 정기선 컨테이너 선사는 선박을 운영할 때, 먼저 선박이 모항을 기점으로 하여 다수의 항만을 기항하도록 하는 순환 항로를 구축한다. 이후 순환 항로 내 항만의 기항 순서가 결정되면, 각 항만, 선석의 입항 일정을 조율한다. 항만의 기항 순서와 입항 일정이 확정되면, 컨테이너 선사는 확정된 일정에 따라 선박을 운용한다. 선박이 예정된 순서와 일정대로만 운용이 되는 경우에는 기항 항만에서 선박이 대기할 가능성은 매우 낮다. 그러나, 기항 예정인 항만에서 체선이 발생하면 사전에 조율된 일정에 차질이

생긴다. 체선 발생의 원인은 항만 시설의 장애, 노조 파업, 주요 해상 운하의 운행 중단, 그리고 예기치 않은 공급 증가 등으로 매우 다양하다.

다음 기항 항만에서의 지체가 심하지 않아 접안 일정이 약간 지연될 경우, 이전 기항지를 출발한 선박은 운항 속도를 줄여 지연된 선석 접안 일정에 맞추어 도착할 수 있다. 즉, 보통의 속도로 운항하면 접안 일정보다 일찍 목적지에 도착하여 대기시간이 발생하는데, 감속 운항을 통해 이러한 대기시간을 상쇄하는 것이다. 이처럼 선박이 감속 운항하여 선석 접안 일정에 맞추어 항만에 도착하면, 표면적으로는 해당 선박은 대기시간이 없는 것처럼 나타나고, Port-MIS에도 대기가 없는 것으로 기록된다. 그러나 선박이 감속 운항을 통해 상쇄한 대기시간은 본질적으로 항만 체선으로 인해 지연된 시간이기 때문에 숨겨진 대기시간이라고 할 수 있다. 그리고 Port-MIS 데이터를 활용한 대기시간 추정은 감속 운항으로 인한 선박의 지연시간을 파악할 수 없다.

한편, 2021년 11월 16일 미국 LA/LB항의 심한 체선으로 인한 선박의 장기 대기과 그로 인해 발생하는 안전 및 대기오염 문제를 예방하기 위한 정책 시행으로, 상당수의 선박이 항만으로부터 150해리 바깥에서 감속 운항하거나 대기했다. 그 결과 2021년 12월 27일 기준 총 100척의 대기 선박 중 23척만이 정박지에 대기했고 77척의 선박이 150해리 밖에서 감속 운항하거나 대기한 것으로 나타났다.³⁾ 이와 같은 경우, 선박의 도착률과 서비스율을 추정할 때 정박지 대기시간만을 고려하면 분석 결과에 치명적인 오류가 발생할 수 있다. 컨테이너 터미널의 경우 일반적으로 취항 예정 선박에 대해 계획을 수립하여 운영하기 때문에 기존 항만 통계하에서는 표면적인 대기시간이 거의 없는 것으로 나타난다. 그러나 외항 표류 대기(drifting)를 고려할 때 정박지 대기시간은 실제 대기시간보다 상당 부분 과소 추정된다.

3) Western Overseas Corporation(2022.1.3.)

또한, 한 국내 선사와의 인터뷰에 따르면 해당 선사의 2021년 아시아-미국 노선의 순환 항차 52회 중 약 17번의 기항 취소가 발생했다고 한다. 이렇듯 항만 대기 예상으로 인한 기항 취소(balking)가 빈번하게 발생하고 있음에도 기존 접근법으로는 이를 반영할 수 없다. 기항 취소를 고려하지 않은 선박 대기비용 분석에서는 선박의 도착률과 대기시간 추정 결과에 왜곡이 발생하게 된다. 따라서 정확한 선박의 대기시간 추정을 위해서는 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소의 세 가지 선박 행태를 고려하는 것이 필요하다.

(1) 감속 운항, 외항 표류 대기

감속 운항은 주로 정기선 선사가 선박을 운항 스케줄에 맞춰 낮은 속도로 운항하는 것을 말한다. 선사는 유류 가격이 높을 때, 운임이 낮을 때, 항만 적체가 예상될 때 감속 운항을 통해 유류비와 항만 시설 사용료 등 비용을 절감하고 계선율을 낮출 수 있다. 컨테이너선의 경우 운항 속도를 25노트에서 17노트로 30% 줄였을 때 최대 15%의 연료를 절약할 수 있는 등 선사는 선박을 감속하여 운항할 때 상당한 비용의 연료 사용량을 절감할 수 있다(이인애, 2011). 또한 감속 운항은 선박의 대기오염물질 및 온실가스 배출량을 감소시키는 효과가 있어, 최근 국제 해운시장에서 가중되고 있는 친환경 규제 강화에 대한 압박도 선박 감속 운항의 주요 원인으로 지목된다(Yin et al. 2013; Alphaliner, 2012).

선박의 외항 표류 대기는 항만의 정박지 사용료 부과를 피하는 방법으로 자주 활용된다. 항만 시설사용료 및 요율이 타 국가 항만에 비해 낮은 편에 속하는 국내 항만도 총톤수 150톤 이상의 외항선에 대해 첫 12시간은 10톤당 187원, 이후 초과 1시간마다 10톤당 15.7원을 부과하고 있다⁴⁾. 이에 따라 총톤수가 5만 톤인 컨테이너선이 정박지를 이용할 경우, 93.5만 원의

4) 무역항 등의 항만시설 사용 및 사용료에 관한 규정[시행 2023.1.1]

정박료가 발생한 후 시간당 약 8만 원의 추가 요금이 발생한다. 비싼 정박료로 인해 일부 선박은 항계 밖 인근 해역에서 투묘하여 계선하거나 메인 엔진을 최소화하여 표류하는 등 외항 대기를 선택한다. 또한 항만 혼잡도가 높고 정박지를 사용하고 있는 선박이 많을 때 선박 간 충돌 사고를 방지하고자 정박지 밖에서 대기하기도 한다.

〈그림 부록 1-1〉은 부산항에서 발생한 감속 운항과 외항 표류 대기를 나타낸다. 왼쪽 그림은 감속 운항의 예시로, 그림의 노란색 점(*)은 1시간 간격으로 표시한 한 선박의 좌표이다. 해당 선박은 부산항 북항에 취항하기 전 인근 해역에서 속도를 줄여 약 60km의 거리를 17시간 동안 운항한 것으로 분석된다. 그러나 해당 선박은 지정된 정박지에서 계류하지 않았기에 기존 통계에서는 대기시간이 없는 것으로 나타난다. 외항 표류 대기의 예시는 〈그림 부록 1-1〉 오른쪽 그림에서 찾아볼 수 있다. 노란색 점은 부산항에 하역한 선박 중 5노트 이하의 속도를 기록한 관측치이다. 왼쪽 아래 빨간색 육각형으로 표시된 지역은 부산신항을 이용하는 다수의 선박이 지정된 정박지가 아닌 거제도 우편 해역에서 표류하고 있음을 나타낸다. 마찬가지로 해당 지역에서 표류한 선박의 경우 부산항 정박지를 사용하지 않았기에 기존 통계에서는 대기시간이 없었던 것처럼 조사된다.

〈그림 부록 1-1〉 부산항 인근 감속 운항, 외항 표류 대기 예시



자료: AIS 데이터를 활용하여 저자 분석

위와 같은 감속 운항과 외항 표류 대기시간을 실제로 추정하기 위해 본 절에서는 AIS 데이터를 활용하였다. 2019년부터 2022년까지 부산항에 취항한 선박을 대상으로 감속 운항과 외항 표류 대기가 발생하는 빈도와 이로 인해 지연된 시간을 분석했다. 먼저, 부산항 컨테이너 정기노선 현황을 통해 컨테이너 선박이 부산항에 취항하기 직전 방문하는 항만 후보를 도출했다. 다음으로, 각 항만에서 출항하여 다른 항만에 기항하지 않고 부산항 부두로 직접 이동한 모든 선박의 이동시간을 확인하였다. 이를 통해 직전 항만에서 나와 부산항 컨테이너 부두에 도착하기까지 걸린 소요 시간을 분포화하였다. 항만별로 도출된 각 분포를 통해 선박이 감속 운항하지 않을 때 부산항에 도착하기까지 걸리는 ‘표준 소요 시간’을 확인할 수 있다. 또한, 실제 소요 시간에서 표준 소요 시간을 제거한 시간은 감속 운항과 외항 표류 대기로 인해 지연된 선박 운항 소요 지연 시간을 의미한다.

〈표 부록 1-1〉은 2022년, 부산항 취항 직전 항만 9곳에서 출항해 부산항 컨테이너 부두에 접안하는 데까지 걸린 선박 운항 소요 시간 분포의 기술통계량이다. 부산항으로 가장 자주 선박이 취항하는 항만은 청다오항으로, 1년 동안 총 1,196번 부산항으로의 항차가 발생하였다. 청다오항 다음으로는 키타큐슈항, 상하이항, 울산항이 뒤를 이었다. 부산항 도착 ‘평균 선박 소요 시간’을 산정할 때는 상·하위 5%를 제거한 평균값을 사용하였다. 지리상 가까운 울산항의 경우 부산항 부두 접안까지 평균 0.4일의 가장 낮은 소요 시간을 나타냈다. 부산항 도착 ‘표준 소요 시간’은 통상적인 수준의 항만 지연 상황에서 선박이 감속 운항을 시행하지 않았을 때의 운항 소요 시간이며, 본 절에서는 항만별 운항 시간 분포의 3사분위(상위 75%) 값으로 지정하였다. 이를 초과하는 선박 운항의 경우 ‘지연’으로 보았으며, 이에 따라 ‘지연 시간’에는 통상적인 시간보다 더 오래 소요된 정박지 대기 시간과 외항 표류 대기시간, 감속 운항 시간이 포함된다. ‘총 지연 시간 비율’은 상·하위 5%를 제거한 데이터 기준, 선박 운항 총 소요 시간 중 총

지연 시간의 비중을 나타낸다. 평균 지연율이 가장 높았던 항만은 하카타항과 상하이항으로 나타났으며, 칭다오항, 울산항, 기타큐슈항이 차례로 다음 순위를 기록했다. 한편, 〈그림 부록 1-2〉은 롱비치항에서 출발하여 부산항에 도착한 선박 운항 소요 시간 분포를 히스토그램으로 나타낸 것으로, 오른쪽 꼬리가 긴 분포 형태를 보였다.

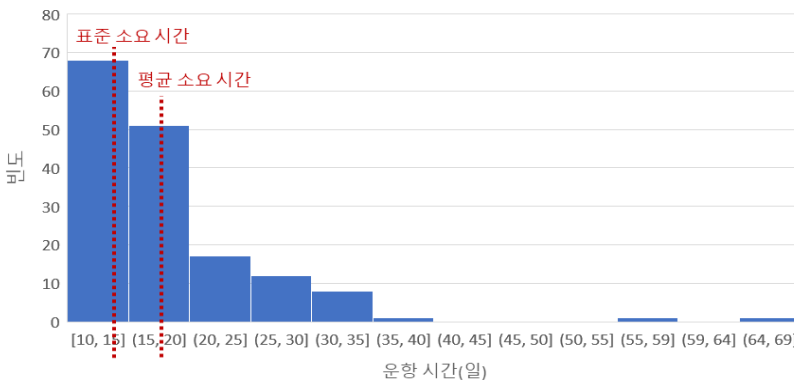
〈표 부록 1-1〉 2022년 직전 항만별 부산항 도착 선박 운항 소요 시간 및 지연 시간

단위: 회, 일

항만	부산항 취항 빈도	부산항 도착 평균 소요 시간	부산항 도착 표준 소요 시간	지연 발생 빈도	평균 지연 시간	총 지연 시간 비율
Qingdao	1,196	2.8	1.6	837	1.6	43.2%
Shanghai	541	3.4	1.7	377	2.2	51.1%
Xiamen	301	6.4	4.5	209	2.8	34.0%
Kitakyushu	596	0.8	0.5	417	0.4	40.6%
Hakata	334	1.0	0.5	233	0.7	51.2%
Incheon	219	1.7	1.4	153	0.3	16.4%
Ulsan	461	0.4	0.2	321	0.2	42.2%
Vladivostok	238	2.6	1.8	166	1.0	29.4%
Long Beach	159	17.7	14.3	111	4.7	20.4%

자료: AIS 데이터 기반 저자 작성

〈그림 부록 1-2〉 롱비치항-부산항 선박 운항 시간



자료: AIS 데이터 기반 저자 작성

〈표 부록 1-2〉는 2019~2022년 직전 항만별 부산항 도착 선박 운항의 평균 지연 시간과 총 지연 시간 비율을 나타낸다. 분석 결과, 칭다오항, 상하이항, 샤먼항, 키타큐슈항, 하카타항, 울산항, 블라디보스톡항, 롱비치항 등 대부분의 항만에서 부산항에 도착할 때 소요된 총 지연 시간의 비율이 2019~2020년보다 2021~2022년에 더 증가한 것으로 나타났다. 부산항에 도착한 선박 중 인천항에서 출발한 선박은 4년 동안 총 지연 시간 비율의 큰 변화 추이가 없었던 반면, 상하이항에서 출발한 선박의 경우 2022년 총 지연 시간 비율이 2019년 대비 14.9%p 증가했다. 롱비치항에서 출발한 선박의 경우 2019년과 2020년에는 전체 운항 소요 시간 대비 지연 시간의 비중이 10% 미만에 불과했으나, 2021년에는 19.0%까지 급격히 증가했다.

〈표 부록 1-2〉 직전 항만별 부산항 도착 선박 운항 지연 시간

단위: 일, %

국가	항만	평균 지연 시간				총 지연 시간 비율			
		2019	2020	2021	2022	2019	2020	2021	2022
중국	Qingdao	1.3	1.6	2.3	1.6	40.5	44.1	51.3	43.2
중국	Shanghai	1.1	1.7	1.8	2.2	36.2	45.7	46.4	51.1
중국	Xiamen	2.2	2.5	4.6	2.8	38.0	40.4	52.2	34.0
일본	Kitakyushu	0.2	0.4	0.4	0.4	29.5	37.3	39.7	40.6
일본	Hakata	0.3	0.4	0.5	0.7	30.2	37.3	45.7	51.2
한국	Incheon	0.4	0.3	0.5	0.3	17.7	15.9	21.2	16.4
한국	Ulsan	0.1	0.2	0.4	0.2	39.0	41.7	56.4	42.2
러시아	Vladivostok	0.8	0.8	0.9	1.0	25.8	25.8	30.6	29.4
미국	Long Beach	1.2	2.2	4.1	4.7	5.4	9.6	19.0	20.4

자료: AIS 데이터 기반 저자 작성

(2) 기항 취소

기항 취소(balking)는 항만 혼잡으로 인해 발생한다. 심각한 항만 혼잡은 항만의 효율성을 떨어트려, 정박지 대기시간뿐 아니라 하역시간, 접안

소요 시간 등 전체적인 항만 내 체류 시간을 증가시킨다. 이에 따라 해당 항만을 이용할 시 선사에는 상당한 수준의 체화·체선 비용이 발생할 수 있으며, 안전사고 위험, 추후 기항 일정 지연 등의 불확실성 또한 추가된다. 이에 따라 일부 선사는 전체적인 기항 일정의 지연이 예상되는 경우 선사는 비용을 절약하기 위해 기항 취소를 고려하게 된다. 일부 선사는 상대적으로 중요도가 낮은 항만의 기항을 취소하여 일정을 최대한 맞추는 전략을 선택하고, 혼잡한 항만을 피해 대체 항만을 찾기도 한다.

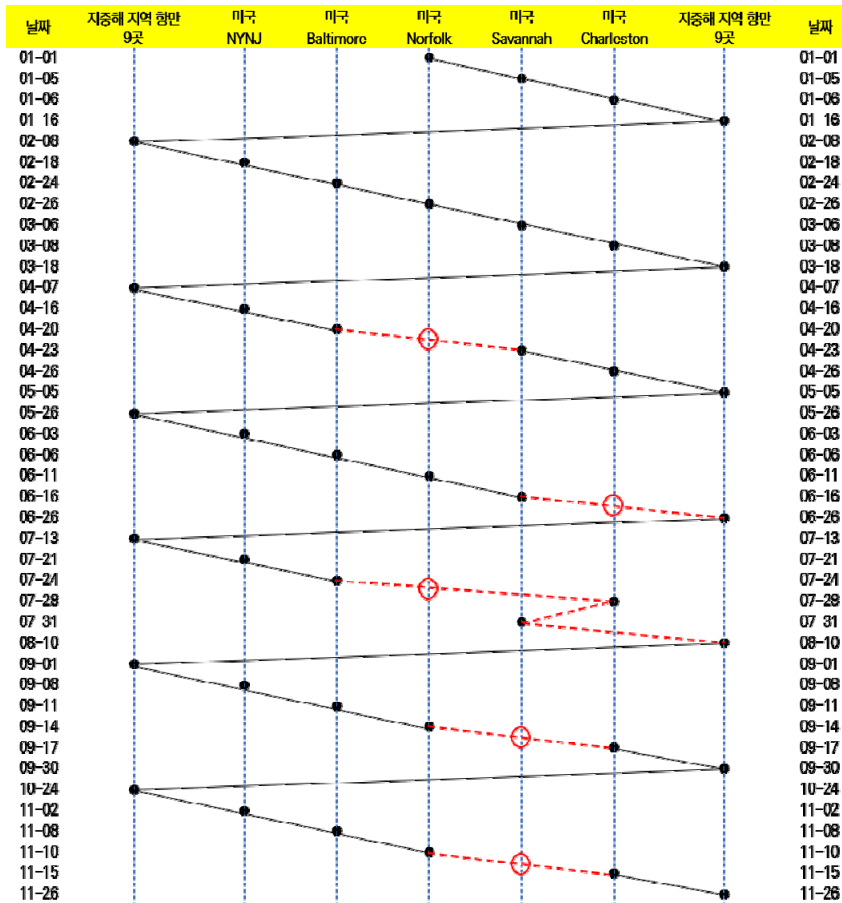
기항 취소 비용을 파악하는 프로세스는 다음과 같다. 먼저, 터미널/항만별 취항 정기선사를 파악하고 해당 선사의 공시된 1년 치 노선 계획을 확인한다. 정기선사는 주로 연초에 당해 노선 계획을 발표하며 해당 계획은 선사 홈페이지에서 확인할 수 있다. 다음으로 각 노선을 취항한 선박을 식별한다. 선사 중 일부는 노선 투입 선박에 대한 정보를 함께 공시하지만, 그 외의 경우엔 AIS 데이터를 통해 노선에 해당하는 항만을 모두 취항한 선박을 역추적하는 방식으로 투입 선박을 탐색한다. 다음으로는 각 선박이 노선 순서에 따라 일 년 동안 규칙적으로 취항했는지를 파악한다. 이때, 선박이 특정 항만을 취항하지 않거나 취항 계획을 변경하여 운영했으며 해당 항만에 혼잡으로 인한 선박 대기가 발생하고 있는 상황이라면 기항 취소가 발생한 것으로 가정한다.

기항 취소의 예시는 <그림 부록 1-3>에서 확인할 수 있다. 미국 동부 주요 항만 중 하나인 사바나항은 2021년 하반기 20척이 넘는 컨테이너선이 정박지에서 대기하는 등 심한 적체가 발생한 바 있다. 이때 다수의 선주는 인접한 소형 항만인 찰스턴항에서 화물을 하역한 후, 육상 이동을 통해 사바나 지역으로 운송했다.⁵⁾ <그림 부록 1-3>은 2021년 지중해 지역 항만과 미국 동부 항만을 잇는 순환노선 항로를 취항하는 한 컨테이너 선박의 항

5) The Maritime Executive(2022.12.13.)

만 취항 기록이다. 매년 6~7번의 순환이 이루어지는 이 노선에서, 해당 선박은 노퍽항에서 2번, 사바나항에서 2번, 찰스턴항에서 2번의 기항을 취소한 것으로 나타난다. 특히, 7월 28일에는 사바나항에 앞서 찰스턴항에 먼저 취항하는 등 상황에 따라 기항 계획을 변경하며 유연하게 대처하는 선사의 대응을 확인할 수 있다.

〈그림 부록 1-3〉 미국 동부 항만 기항 취소 사례



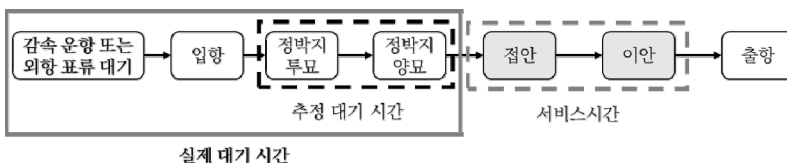
자료: AIS 데이터를 활용하여 저자 분석

3) 감속 운항, 표류 대기, 기항 취소 고려한 편익 산정 방법

앞서 살펴본 것과 같이 감속 운항, 표류, 기항 취소는 선박이 항만에서 발생하는 지체를 상쇄하기 위해 사용하는 선사의 보편적인 해결 방법이다. 선박의 대기시간이 길어지면 화물 운송에 대한 기회비용, 정박료, 혼잡도로 인한 위험도, 운항 스케줄의 지체 누적 증가로 인해 큰 손실이 발생한다. 일반적으로, 선사는 최대한 효율적으로 선박을 운영하여 많은 화물을 낮은 비용으로 수송함으로써 이익을 최대화하고자 한다. 항만에서의 지체는 선사 이익 최대화의 가장 큰 적이며, 이를 적절하게 대처하기 위해 선사는 선박의 감속 운항, 표류, 기항 취소를 적극적으로 활용하고 있다. 기존 데이터로 명확하게 드러나지 않았던 해당 행태들은 이미 항만과 선사 운영에 영향을 미치고 있으므로, 이에 따른 기회비용이 계산되어야 한다.

먼저, 대기시간 산정에 있어 감속 운항과 외항 표류 대기 발생을 고려하지 않으면 선박의 실제 대기시간이 과소 추정되는 결과를 가져온다. <그림 부록 1-4>와 같이, 기존 분석에서는 선박의 정박지에 머무른 시간만을 대기시간으로 가정하지만, 감속 운항과 외항 표류 대기는 선박의 입항 시점 이전에 발생한다. 이 또한 선박이 부두 접안을 위해 기다리며 저속으로 운항하거나 메인엔진을 끄고 표류한 시간이기 때문에 기존 대기시간에 추가하여 고려할 필요가 있다.

<그림 부록 1-4> 감속 운항, 외항 표류 대기 발생



자료: 저자 작성

한편, 선박 기항 취소를 분석에 고려하지 않는 경우 선박의 실제 도착률이 왜곡된다. 항만 적체 등에 의해 선박이 입항을 포기하는 경우, 기존 항만 통계에서는 해당 선박이 항계 내에 들어오거나 서비스를 받지 않기 때문에 입출항 선박으로 포함시키지 않는다. 이에 따라 기항 취소가 발생하는 시점의 데이터를 통해 선박 대기행렬을 분석할 경우, 연간 선박 입출항 횟수는 선박이 기항을 취소하지 않을 때보다 더 작게 나타나며 선박 간 도착 시간은 실제보다 높게 나타나게 된다. 그러나, 항만의 효율성이 증가하거나 적체가 해소되는 등 항만 여건이 개선되었다면 해당 선박은 기항을 취소하지 않고 입항했을 잠재적인 고객이라고 할 수 있다. 이때 선석을 추가하게 된다면 항만의 효율성이 개선됨에 따라 기존 기항을 취소했던 선박이 입항하게 되는 효과를 기대할 수 있다.

또한, 선박 기항 취소를 고려하지 않는다면 기항 취소로 인해 발생한 물동량 손실과 추가 물류비 발생을 반영할 수 없다. 지정된 항만에서 처리되지 못해 이동한 화물 중 환적화물은 타 환적항에서 처리될 가능성이 높으며, 수출입 화물의 경우 인근 항만에서 처리되기 위해 부차적인 연안이나 육상 이동을 거치게 된다. 따라서 항만의 기항 취소율이 감소하여 타 환적항으로의 화물 이동이 방지된다면 이에 따른 편익은 환적화물 항만수익 증대효과 편익 항목에 반영할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 기항 취소로 인근 항만으로 화물이 이동하며 불필요한 육상·해상 물류비가 발생하는 것을 방지함에 따라 생기는 편익은 내륙운송비용 절감효과 편익과 선박운항비용 절감효과 편익에 포함할 수 있을 것으로 예상된다. 이처럼 선석 추가에 따른 선박 대기비용 절감 편익을 계산할 때, 기항 취소를 고려한 대기행렬모형을 추정함에 따라 더 정확한 편익을 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

〈표 부록 1-3〉 환적화물 항만수익 증대효과 편익 산정 원단위 예시

단위: 원

선형(GT)	1만 톤 이하	1~3만 톤	3~5만 톤	5~6만 톤	6~7.5만 톤	7.5~10만 톤	10만 톤 이상
TEU당 환적수익	51,817	55,491	56,841	58,523	57,884	58,285	59,629

주: 입출항 선박의 선형별 TEU당 환적 편익(2012년 기준 부산항 신항 사례)

자료: KDI(2014a), 항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판), p. 291

〈표 부록 1-4〉 내륙운송비용 절감효과 편익 산정 원단위 예시(철도운송)

구분	운임단가	수송거리	요율산출방식	최저운임
컨테이너 화물	1개당 1km 기준 20ft: 516원 40ft: 800원 45ft: 946원	1km 단위 (1km 미만 반올림)	운임 단가×수송 거리×컨테이너 개수	컨테이너 규격별 100km 해당 운임

주: 운임계산거리는 철도노선의 운송 가능한 최단경로 거리 적용, 공컨테이너는 단가의 74% 적용

자료: 1) KDI(2014a), 항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판), p. 287

〈표 부록 1-5〉 내륙운송비용 절감효과 편익 산정 원단위 예시

단위: 원/km

차종	속도	유류비	엔진 오일비	타이어 마모비	유지 관리비	감가 상각비	합계
대형트럭	80	268.48	3.33	29.43	27.95	104.04	433.23

자료: 1) 한국철도시설공단·한국교통연구원(2010), 철도투자평가편람 전면개정 연구

2) KDI(2014a), 항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판), p. 288

〈표 부록 1-6〉 선박운항비용 절감효과 편익 산정 원단위 예시

단위: km, 톤, 달러, 백만 원

구분	항차	단축거리	항차당 운항횟수	유류소모량	유가	유류소비 절감 편익
제1터미널	16	2.1	2	0.063211125	390	80.1
제2터미널	10	5.6	2	0.086393089	390	182.5
소계						262.6

주: 유류소비 절감 편익 = 항차×단축거리×항차당 운항횟수×유류소모량×유가×환율(955.51원)

자료: 1) KDI(2014a), 항만 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판), p. 295

2. 국내 컨테이너 부두별 대기행렬표

〈표 부록 2-1〉 국내 주요 컨테이너 부두 대기행렬모형 분석 결과 (2018~2022)

성능척도	C	λ	μ	ρ	L	L_q	W	W_q	L_{qq}	W_{qq}	P_0
BS_NP1	3	0.100	0.048	0.691	3.148	1.074	31.597	6.622	3.239	22.477	0.100
BS_NP2	6	0.199	0.053	0.628	4.157	0.390	20.854	1.164	2.687	8.464	0.022
BS_NP3	4	0.123	0.059	0.520	2.290	0.210	18.674	1.021	2.083	8.833	0.120
BS_NP4	4	0.101	0.055	0.460	1.957	0.117	19.331	0.699	1.852	8.416	0.155
BS_NP5	4	0.100	0.044	0.566	2.584	0.320	25.819	1.855	2.304	13.033	0.097
BS_G	4	0.174	0.063	0.688	3.656	0.904	21.018	2.917	3.204	12.673	0.054
BS_NG	3	0.109	0.061	0.597	2.311	0.520	21.244	2.821	2.481	13.619	0.148
BS_JSD	5	0.222	0.059	0.760	5.314	1.515	23.904	3.827	4.162	14.225	0.017
BS_SSD	5	0.269	0.059	0.909	12.344	7.800	45.933	16.366	10.970	37.098	0.004
KW_2-1	4	0.057	0.108	0.132	0.530	0.000	9.273	0.003	1.153	2.670	0.589
KW_2-2	4	0.131	0.115	0.284	1.147	0.012	8.777	0.053	1.396	3.031	0.321
KW_3-1	4	0.136	0.099	0.343	1.402	0.030	10.326	0.129	1.522	3.846	0.252
IC-ICT	2	0.005	0.059	0.038	0.077	0.000	16.961	0.014	1.040	8.807	0.926
IC-E1	1	0.031	0.073	0.422	0.731	0.309	23.657	5.971	1.731	23.657	0.578
IC-SG	3	0.109	0.072	0.508	1.775	0.253	16.224	1.298	2.031	9.420	0.205
IC-HJ	3	0.095	0.074	0.429	1.413	0.125	14.924	0.761	1.752	7.942	0.267
US_NP	4	0.101	0.083	0.301	1.221	0.016	12.144	0.103	1.431	4.287	0.299
US_JI	1	0.044	0.124	0.357	0.554	0.198	12.525	2.582	1.554	12.525	0.643
PT_E-69	4	0.054	0.061	0.220	0.883	0.004	16.334	0.040	1.282	5.212	0.415
PT_E-1416	3	0.013	0.057	0.074	0.222	0.000	17.676	0.006	1.080	6.360	0.801
DS-4	1	0.015	0.065	0.227	0.294	0.067	19.784	2.762	1.294	19.784	0.773

* C : 선석 수, λ : 평균선박도착척수, μ : 평균작업척수, ρ : 선석점유율, L : 평균재향척수, L_q : 평균대기척수, W : 평균재향시간, W_q : 평균대기시간, L_{qq} : 대기발생시평균대기척수, W_{qq} : 대기발생시평균대기시간, P_0 : 항만유휴율 (항만내선박이없을확률)

* BS: 부산, NP: 신항, G: 감만, JSD: 자성대, NG: 신감만, DS: 대산, IC: 인천, E1: E1, HJ: 한진, ICT: ICT, SG: 선광, KW: 광양, PT: 평택, E: 동부두, US: 울산, JI: 정일

〈표 부록 2-2〉 부산신항 1부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.328	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.673	0.032	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	1.037	0.072	0.008	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.421	0.129	0.018	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.827	0.203	0.034	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	2.256	0.294	0.057	0.013	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	2.712	0.404	0.089	0.023	0.007	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.2	3.196	0.533	0.131	0.038	0.012	0.004	0.001	0.001	0.000	0.000
0.225	3.712	0.682	0.185	0.059	0.021	0.008	0.003	0.001	0.000	0.000
0.25	4.262	0.852	0.251	0.087	0.033	0.013	0.006	0.002	0.001	0.000
0.275	4.850	1.046	0.331	0.123	0.050	0.022	0.010	0.005	0.002	0.001
0.3	5.480	1.265	0.426	0.169	0.074	0.034	0.016	0.008	0.004	0.002
0.325	6.156	1.510	0.539	0.226	0.104	0.051	0.026	0.013	0.007	0.004
0.35	6.885	1.785	0.672	0.297	0.143	0.073	0.039	0.022	0.012	0.007
0.375	7.671	2.092	0.825	0.381	0.193	0.103	0.058	0.033	0.019	0.012
0.4	8.524	2.435	1.003	0.483	0.254	0.142	0.082	0.049	0.030	0.019
0.425	9.450	2.818	1.207	0.604	0.330	0.191	0.115	0.071	0.045	0.029
0.45	10.461	3.246	1.442	0.747	0.422	0.252	0.157	0.101	0.066	0.044
0.475	11.568	3.725	1.711	0.915	0.533	0.329	0.211	0.139	0.094	0.064
0.5	12.786	4.262	2.019	1.112	0.667	0.423	0.278	0.189	0.131	0.092
0.525	14.131	4.865	2.372	1.342	0.826	0.537	0.363	0.252	0.179	0.129
0.55	15.627	5.545	2.777	1.611	1.016	0.676	0.467	0.332	0.241	0.178
0.575	17.298	6.315	3.242	1.925	1.241	0.844	0.596	0.432	0.321	0.242
0.6	19.178	7.192	3.780	2.294	1.510	1.047	0.754	0.558	0.421	0.324
0.625	21.309	8.196	4.403	2.726	1.829	1.292	0.947	0.713	0.548	0.428
0.65	23.745	9.354	5.129	3.237	2.210	1.589	1.183	0.905	0.707	0.562
0.675	26.555	10.701	5.983	3.843	2.668	1.948	1.474	1.144	0.907	0.730
0.7	29.833	12.284	6.994	4.567	3.221	2.386	1.831	1.442	1.158	0.945
0.725	33.707	14.167	8.206	5.443	3.894	2.925	2.274	1.813	1.475	1.218
0.75	38.357	16.439	9.679	6.513	4.723	3.594	2.828	2.282	1.877	1.568
0.775	44.039	19.228	11.497	7.844	5.761	4.436	3.531	2.880	2.395	2.021
0.8	51.142	22.730	13.791	9.532	7.085	5.517	4.438	3.657	3.070	2.616
0.825	60.275	27.248	16.763	11.729	8.816	6.937	5.636	4.688	3.972	3.414
0.85	72.452	33.289	20.752	14.689	11.157	8.865	7.269	6.101	5.212	4.516
0.875	89.499	41.766	26.365	18.868	14.474	11.607	9.600	8.123	6.994	6.107
0.9	115.070	54.507	34.822	25.180	19.498	15.772	13.150	11.212	9.725	8.550
0.925	157.689	75.773	48.963	35.755	27.933	22.779	19.137	16.433	14.350	12.699
0.95	242.926	118.349	77.311	56.987	44.893	36.890	31.213	26.983	23.713	21.111
0.975	498.638	246.163	162.485	120.838	95.949	79.416	67.645	58.844	52.018	46.572

* C :선석 수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-3〉 부산신항 2부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.288	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.592	0.028	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.911	0.064	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.249	0.114	0.015	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.606	0.178	0.030	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.984	0.259	0.050	0.012	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	2.384	0.355	0.078	0.021	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.2	2.810	0.468	0.115	0.034	0.011	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	3.263	0.599	0.162	0.052	0.018	0.007	0.003	0.001	0.000	0.000
0.25	3.747	0.749	0.220	0.076	0.029	0.012	0.005	0.002	0.001	0.000
0.275	4.264	0.920	0.291	0.108	0.044	0.019	0.009	0.004	0.002	0.001
0.3	4.818	1.112	0.375	0.149	0.065	0.030	0.014	0.007	0.004	0.002
0.325	5.412	1.328	0.474	0.199	0.092	0.045	0.023	0.012	0.006	0.003
0.35	6.053	1.569	0.590	0.261	0.126	0.065	0.034	0.019	0.011	0.006
0.375	6.745	1.839	0.726	0.335	0.170	0.091	0.051	0.029	0.017	0.010
0.4	7.494	2.141	0.882	0.425	0.224	0.125	0.072	0.043	0.027	0.017
0.425	8.308	2.478	1.061	0.531	0.290	0.168	0.101	0.063	0.040	0.026
0.45	9.197	2.854	1.268	0.657	0.371	0.222	0.138	0.088	0.058	0.039
0.475	10.170	3.275	1.504	0.804	0.469	0.289	0.185	0.122	0.083	0.057
0.5	11.241	3.747	1.775	0.977	0.586	0.371	0.245	0.166	0.115	0.081
0.525	12.424	4.277	2.085	1.180	0.726	0.472	0.319	0.222	0.157	0.114
0.55	13.739	4.875	2.441	1.416	0.893	0.594	0.411	0.292	0.212	0.157
0.575	15.208	5.552	2.851	1.693	1.091	0.742	0.524	0.380	0.282	0.213
0.6	16.861	6.323	3.323	2.017	1.327	0.921	0.663	0.490	0.370	0.285
0.625	18.735	7.206	3.871	2.397	1.608	1.136	0.833	0.627	0.482	0.377
0.65	20.876	8.224	4.510	2.846	1.943	1.397	1.040	0.796	0.622	0.494
0.675	23.346	9.408	5.260	3.378	2.346	1.713	1.296	1.006	0.797	0.642
0.7	26.229	10.800	6.149	4.015	2.831	2.098	1.610	1.267	1.018	0.831
0.725	29.635	12.455	7.215	4.785	3.423	2.572	1.999	1.594	1.296	1.071
0.75	33.723	14.453	8.509	5.726	4.153	3.160	2.487	2.006	1.650	1.379
0.775	38.718	16.905	10.108	6.897	5.065	3.900	3.105	2.532	2.105	1.777
0.8	44.963	19.984	12.125	8.381	6.229	4.850	3.902	3.215	2.699	2.300
0.825	52.993	23.956	14.738	10.312	7.751	6.099	4.955	4.122	3.492	3.001
0.85	63.698	29.267	18.245	12.914	9.809	7.794	6.391	5.363	4.582	3.971
0.875	78.686	36.720	23.180	16.588	12.725	10.205	8.440	7.141	6.149	5.369
0.9	101.168	47.922	30.615	22.138	17.142	13.866	11.561	9.857	8.550	7.517
0.925	138.637	66.618	43.047	31.435	24.558	20.026	16.825	14.448	12.617	11.165
0.95	213.576	104.050	67.970	50.102	39.469	32.433	27.442	23.723	20.848	18.561
0.975	438.393	216.422	142.854	106.239	84.357	69.821	59.472	51.734	45.733	40.945

* C:선석 수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-4〉 부산신항 3부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.259	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.531	0.025	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.819	0.057	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.122	0.102	0.014	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.443	0.160	0.027	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.782	0.232	0.045	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	2.142	0.319	0.070	0.018	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.2	2.525	0.421	0.104	0.030	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.932	0.538	0.146	0.047	0.016	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	3.366	0.673	0.198	0.069	0.026	0.011	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.830	0.826	0.261	0.097	0.040	0.017	0.008	0.004	0.002	0.001
0.3	4.328	0.999	0.337	0.134	0.058	0.027	0.013	0.006	0.003	0.002
0.325	4.862	1.193	0.426	0.179	0.082	0.040	0.020	0.011	0.006	0.003
0.35	5.438	1.410	0.530	0.234	0.113	0.058	0.031	0.017	0.010	0.005
0.375	6.059	1.652	0.652	0.301	0.152	0.082	0.046	0.026	0.015	0.009
0.4	6.732	1.923	0.792	0.382	0.201	0.112	0.065	0.039	0.024	0.015
0.425	7.464	2.226	0.953	0.477	0.261	0.151	0.091	0.056	0.036	0.023
0.45	8.262	2.564	1.139	0.590	0.333	0.199	0.124	0.079	0.052	0.035
0.475	9.137	2.942	1.351	0.723	0.421	0.260	0.166	0.110	0.074	0.051
0.5	10.098	3.366	1.594	0.878	0.527	0.334	0.220	0.149	0.103	0.073
0.525	11.161	3.842	1.873	1.060	0.652	0.424	0.286	0.199	0.141	0.102
0.55	12.342	4.380	2.193	1.272	0.802	0.534	0.369	0.262	0.191	0.141
0.575	13.662	4.988	2.561	1.521	0.980	0.667	0.471	0.342	0.253	0.191
0.6	15.147	5.680	2.985	1.812	1.192	0.827	0.595	0.440	0.333	0.256
0.625	16.830	6.473	3.477	2.153	1.445	1.021	0.748	0.563	0.433	0.338
0.65	18.754	7.388	4.051	2.556	1.746	1.255	0.935	0.715	0.559	0.444
0.675	20.973	8.452	4.725	3.035	2.107	1.539	1.164	0.904	0.716	0.577
0.7	23.563	9.702	5.524	3.607	2.544	1.885	1.446	1.139	0.915	0.746
0.725	26.623	11.189	6.482	4.299	3.075	2.310	1.796	1.432	1.165	0.962
0.75	30.295	12.984	7.644	5.144	3.731	2.839	2.234	1.802	1.483	1.238
0.775	34.783	15.187	9.081	6.196	4.550	3.504	2.789	2.275	1.891	1.596
0.8	40.393	17.952	10.893	7.529	5.596	4.357	3.505	2.888	2.425	2.066
0.825	47.606	21.521	13.240	9.264	6.963	5.479	4.451	3.703	3.137	2.696
0.85	57.224	26.292	16.390	11.602	8.812	7.002	5.741	4.818	4.116	3.567
0.875	70.688	32.988	20.824	14.902	11.432	9.168	7.582	6.416	5.524	4.823
0.9	90.885	43.051	27.503	19.887	15.400	12.457	10.386	8.855	7.681	6.753
0.925	124.545	59.847	38.672	28.240	22.062	17.991	15.115	12.979	11.334	10.030
0.95	191.867	93.474	61.062	45.009	35.457	29.137	24.653	21.312	18.729	16.674
0.975	393.833	194.424	128.334	95.440	75.782	62.724	53.427	46.476	41.085	36.783

* C : 선석수, ρ : 선석점유율

〈표 부록 2-5〉 부산신항 4부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.282	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.580	0.028	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.893	0.062	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.224	0.111	0.015	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.574	0.175	0.029	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.944	0.254	0.049	0.011	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	2.337	0.348	0.077	0.020	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.2	2.754	0.459	0.113	0.033	0.011	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	3.198	0.587	0.159	0.051	0.018	0.007	0.003	0.001	0.000	0.000
0.25	3.672	0.734	0.216	0.075	0.029	0.012	0.005	0.002	0.001	0.000
0.275	4.178	0.901	0.285	0.106	0.043	0.019	0.008	0.004	0.002	0.001
0.3	4.721	1.089	0.367	0.146	0.063	0.029	0.014	0.007	0.004	0.002
0.325	5.304	1.301	0.465	0.195	0.090	0.044	0.022	0.012	0.006	0.003
0.35	5.932	1.538	0.579	0.256	0.123	0.063	0.034	0.019	0.010	0.006
0.375	6.610	1.803	0.711	0.329	0.166	0.089	0.050	0.029	0.017	0.010
0.4	7.344	2.098	0.864	0.416	0.219	0.122	0.071	0.042	0.026	0.016
0.425	8.142	2.428	1.040	0.521	0.284	0.165	0.099	0.061	0.039	0.025
0.45	9.013	2.797	1.242	0.644	0.364	0.218	0.135	0.087	0.057	0.038
0.475	9.967	3.210	1.474	0.788	0.460	0.283	0.182	0.120	0.081	0.056
0.5	11.016	3.672	1.739	0.958	0.574	0.364	0.240	0.163	0.113	0.080
0.525	12.176	4.192	2.043	1.156	0.712	0.463	0.313	0.217	0.154	0.112
0.55	13.464	4.778	2.392	1.388	0.875	0.582	0.403	0.286	0.208	0.154
0.575	14.904	5.441	2.793	1.659	1.070	0.727	0.513	0.373	0.276	0.208
0.6	16.524	6.196	3.257	1.976	1.301	0.902	0.649	0.480	0.363	0.279
0.625	18.360	7.061	3.793	2.349	1.576	1.113	0.816	0.614	0.472	0.369
0.65	20.458	8.059	4.419	2.789	1.905	1.369	1.020	0.780	0.609	0.484
0.675	22.879	9.220	5.155	3.311	2.299	1.678	1.270	0.986	0.781	0.629
0.7	25.704	10.584	6.026	3.935	2.775	2.056	1.578	1.242	0.998	0.814
0.725	29.042	12.206	7.071	4.689	3.355	2.520	1.959	1.562	1.271	1.050
0.75	33.048	14.163	8.339	5.612	4.070	3.097	2.437	1.966	1.617	1.351
0.775	37.944	16.567	9.906	6.759	4.964	3.822	3.042	2.482	2.063	1.741
0.8	44.064	19.584	11.882	8.213	6.104	4.753	3.824	3.151	2.645	2.254
0.825	51.932	23.476	14.443	10.106	7.595	5.977	4.856	4.039	3.422	2.941
0.85	62.424	28.681	17.880	12.656	9.613	7.638	6.263	5.256	4.491	3.891
0.875	77.112	35.985	22.716	16.256	12.471	10.001	8.271	6.999	6.026	5.261
0.9	99.143	46.963	30.002	21.695	16.799	13.589	11.330	9.660	8.379	7.367
0.925	135.863	65.285	42.186	30.806	24.066	19.626	16.488	14.159	12.364	10.942
0.95	209.303	101.968	66.610	49.099	38.679	31.784	26.893	23.248	20.430	18.189
0.975	429.622	212.092	139.996	104.113	82.669	68.424	58.282	50.699	44.818	40.126

* C :선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-6〉 부산신항 5부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.336	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.691	0.033	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	1.064	0.074	0.008	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.458	0.133	0.018	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.874	0.208	0.034	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	2.315	0.302	0.059	0.013	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	2.783	0.414	0.092	0.024	0.007	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.2	3.280	0.547	0.135	0.039	0.013	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000
0.225	3.809	0.700	0.190	0.061	0.021	0.008	0.003	0.001	0.001	0.000
0.25	4.373	0.875	0.257	0.089	0.034	0.014	0.006	0.003	0.001	0.001
0.275	4.976	1.073	0.339	0.126	0.052	0.022	0.010	0.005	0.002	0.001
0.3	5.623	1.298	0.437	0.174	0.075	0.035	0.017	0.008	0.004	0.002
0.325	6.317	1.549	0.553	0.232	0.107	0.052	0.026	0.014	0.007	0.004
0.35	7.064	1.832	0.689	0.304	0.147	0.075	0.040	0.022	0.012	0.007
0.375	7.872	2.147	0.847	0.391	0.198	0.106	0.059	0.034	0.020	0.012
0.4	8.746	2.499	1.029	0.496	0.261	0.146	0.085	0.051	0.031	0.019
0.425	9.697	2.892	1.239	0.620	0.339	0.196	0.118	0.073	0.046	0.030
0.45	10.734	3.331	1.480	0.767	0.433	0.259	0.161	0.103	0.068	0.045
0.475	11.870	3.823	1.755	0.939	0.547	0.337	0.216	0.143	0.096	0.066
0.5	13.120	4.373	2.072	1.141	0.684	0.434	0.286	0.194	0.134	0.095
0.525	14.501	4.992	2.434	1.377	0.848	0.551	0.372	0.259	0.184	0.133
0.55	16.035	5.690	2.849	1.653	1.042	0.694	0.479	0.341	0.248	0.183
0.575	17.750	6.480	3.327	1.976	1.274	0.866	0.611	0.444	0.329	0.248
0.6	19.679	7.380	3.878	2.354	1.549	1.075	0.773	0.572	0.432	0.332
0.625	21.866	8.410	4.518	2.798	1.877	1.326	0.972	0.731	0.562	0.440
0.65	24.365	9.598	5.263	3.321	2.268	1.630	1.214	0.929	0.726	0.576
0.675	27.248	10.981	6.139	3.943	2.738	1.999	1.512	1.174	0.931	0.750
0.7	30.612	12.605	7.177	4.686	3.305	2.449	1.879	1.479	1.188	0.970
0.725	34.588	14.537	8.421	5.585	3.995	3.002	2.333	1.861	1.513	1.250
0.75	39.359	16.868	9.932	6.684	4.847	3.688	2.902	2.342	1.926	1.609
0.775	45.190	19.731	11.798	8.049	5.912	4.552	3.623	2.956	2.457	2.074
0.8	52.478	23.324	14.151	9.781	7.270	5.661	4.554	3.753	3.150	2.684
0.825	61.849	27.959	17.201	12.036	9.046	7.118	5.783	4.811	4.075	3.503
0.85	74.344	34.158	21.294	15.073	11.448	9.097	7.459	6.260	5.348	4.634
0.875	91.837	42.857	27.054	19.361	14.852	11.911	9.851	8.335	7.177	6.266
0.9	118.076	55.931	35.732	25.837	20.007	16.184	13.494	11.505	9.979	8.773
0.925	161.808	77.752	50.242	36.689	28.662	23.374	19.637	16.862	14.725	13.031
0.95	249.272	121.440	79.330	58.475	46.065	37.854	32.029	27.688	24.332	21.663
0.975	511.663	252.593	166.730	123.995	98.456	81.490	69.412	60.381	53.377	47.788

* C:선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-7〉 부산항 감만부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.228	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.467	0.022	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.720	0.050	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.986	0.090	0.012	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.268	0.141	0.023	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.567	0.204	0.040	0.009	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.883	0.280	0.062	0.016	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	2.220	0.370	0.091	0.027	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.578	0.473	0.128	0.041	0.014	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	2.959	0.592	0.174	0.060	0.023	0.009	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.368	0.726	0.230	0.086	0.035	0.015	0.007	0.003	0.002	0.001
0.3	3.805	0.878	0.296	0.117	0.051	0.024	0.011	0.006	0.003	0.001
0.325	4.275	1.049	0.375	0.157	0.072	0.035	0.018	0.009	0.005	0.003
0.35	4.781	1.239	0.466	0.206	0.100	0.051	0.027	0.015	0.008	0.005
0.375	5.327	1.453	0.573	0.265	0.134	0.072	0.040	0.023	0.014	0.008
0.4	5.919	1.691	0.696	0.336	0.177	0.099	0.057	0.034	0.021	0.013
0.425	6.562	1.957	0.838	0.420	0.229	0.133	0.080	0.049	0.031	0.020
0.45	7.264	2.254	1.001	0.519	0.293	0.175	0.109	0.070	0.046	0.031
0.475	8.033	2.587	1.188	0.635	0.370	0.228	0.146	0.097	0.065	0.045
0.5	8.878	2.959	1.402	0.772	0.463	0.293	0.193	0.131	0.091	0.064
0.525	9.813	3.378	1.647	0.932	0.574	0.373	0.252	0.175	0.124	0.090
0.55	10.851	3.850	1.928	1.119	0.705	0.469	0.324	0.231	0.168	0.124
0.575	12.012	4.385	2.251	1.337	0.862	0.586	0.414	0.300	0.223	0.168
0.6	13.317	4.994	2.625	1.593	1.048	0.727	0.523	0.387	0.293	0.225
0.625	14.797	5.691	3.057	1.893	1.270	0.897	0.658	0.495	0.381	0.297
0.65	16.488	6.495	3.562	2.248	1.535	1.103	0.822	0.629	0.491	0.390
0.675	18.439	7.431	4.154	2.668	1.853	1.353	1.023	0.795	0.630	0.507
0.7	20.716	8.530	4.857	3.171	2.236	1.657	1.271	1.001	0.804	0.656
0.725	23.406	9.837	5.699	3.779	2.704	2.031	1.579	1.259	1.024	0.846
0.75	26.635	11.415	6.721	4.523	3.280	2.496	1.964	1.585	1.304	1.089
0.775	30.581	13.352	7.984	5.447	4.001	3.081	2.452	2.000	1.663	1.403
0.8	35.513	15.784	9.577	6.619	4.920	3.831	3.082	2.539	2.132	1.816
0.825	41.855	18.921	11.640	8.145	6.122	4.817	3.913	3.255	2.758	2.370
0.85	50.310	23.115	14.410	10.200	7.747	6.156	5.048	4.236	3.619	3.136
0.875	62.148	29.002	18.308	13.102	10.051	8.060	6.666	5.640	4.857	4.240
0.9	79.904	37.849	24.180	17.485	13.539	10.952	9.131	7.785	6.753	5.937
0.925	109.498	52.616	33.999	24.828	19.396	15.817	13.288	11.411	9.965	8.818
0.95	168.686	82.181	53.684	39.571	31.173	25.616	21.674	18.737	16.466	14.659
0.975	346.251	170.934	112.829	83.909	66.627	55.146	46.972	40.861	36.121	32.339

* C :선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-8〉 부산항 신감만부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.249	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.512	0.024	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.788	0.055	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.080	0.098	0.013	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.389	0.154	0.026	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.715	0.224	0.043	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	2.062	0.307	0.068	0.018	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	2.430	0.405	0.100	0.029	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.822	0.518	0.140	0.045	0.016	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	3.240	0.648	0.191	0.066	0.025	0.010	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.687	0.795	0.251	0.094	0.038	0.017	0.007	0.003	0.002	0.001
0.3	4.166	0.961	0.324	0.129	0.056	0.026	0.012	0.006	0.003	0.002
0.325	4.680	1.148	0.410	0.172	0.079	0.039	0.020	0.010	0.005	0.003
0.35	5.234	1.357	0.511	0.225	0.109	0.056	0.030	0.016	0.009	0.005
0.375	5.832	1.591	0.627	0.290	0.147	0.079	0.044	0.025	0.015	0.009
0.4	6.480	1.851	0.762	0.367	0.193	0.108	0.063	0.037	0.023	0.014
0.425	7.184	2.143	0.918	0.459	0.251	0.145	0.087	0.054	0.034	0.022
0.45	7.953	2.468	1.096	0.568	0.321	0.192	0.119	0.076	0.050	0.033
0.475	8.794	2.832	1.301	0.696	0.405	0.250	0.160	0.106	0.071	0.049
0.5	9.720	3.240	1.535	0.845	0.507	0.321	0.212	0.143	0.099	0.070
0.525	10.743	3.698	1.803	1.020	0.628	0.408	0.276	0.192	0.136	0.098
0.55	11.880	4.215	2.111	1.225	0.772	0.514	0.355	0.252	0.183	0.136
0.575	13.150	4.801	2.465	1.464	0.944	0.642	0.453	0.329	0.244	0.184
0.6	14.580	5.467	2.873	1.744	1.148	0.796	0.573	0.424	0.320	0.246
0.625	16.200	6.231	3.347	2.073	1.390	0.982	0.720	0.542	0.417	0.326
0.65	18.051	7.111	3.899	2.461	1.680	1.208	0.900	0.688	0.538	0.427
0.675	20.187	8.135	4.548	2.921	2.028	1.481	1.120	0.870	0.689	0.555
0.7	22.679	9.339	5.317	3.472	2.448	1.814	1.392	1.096	0.880	0.718
0.725	25.625	10.770	6.239	4.137	2.960	2.224	1.729	1.379	1.121	0.926
0.75	29.159	12.497	7.358	4.952	3.591	2.732	2.150	1.735	1.427	1.192
0.775	33.479	14.618	8.740	5.963	4.380	3.373	2.684	2.190	1.820	1.536
0.8	38.879	17.280	10.484	7.246	5.386	4.194	3.374	2.780	2.334	1.989
0.825	45.822	20.714	12.744	8.917	6.702	5.273	4.284	3.564	3.019	2.595
0.85	55.079	25.306	15.776	11.167	8.482	6.740	5.526	4.638	3.962	3.433
0.875	68.038	31.751	20.043	14.344	11.004	8.824	7.298	6.175	5.317	4.642
0.9	87.478	41.437	26.472	19.142	14.823	11.990	9.997	8.523	7.393	6.500
0.925	119.877	57.603	37.222	27.181	21.235	17.317	14.548	12.493	10.909	9.654
0.95	184.676	89.970	58.773	43.322	34.128	28.044	23.729	20.513	18.027	16.049
0.975	379.071	187.136	123.524	91.863	72.942	60.373	51.425	44.734	39.545	35.405

* C:선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-9〉 부산항 자성대부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.246	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.505	0.024	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.778	0.054	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.066	0.097	0.013	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.371	0.152	0.025	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.693	0.221	0.043	0.010	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	2.035	0.303	0.067	0.018	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	2.398	0.400	0.099	0.029	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.785	0.512	0.139	0.044	0.016	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	3.198	0.640	0.188	0.065	0.025	0.010	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.639	0.785	0.248	0.092	0.038	0.016	0.007	0.003	0.002	0.001
0.3	4.112	0.949	0.320	0.127	0.055	0.025	0.012	0.006	0.003	0.002
0.325	4.619	1.133	0.405	0.170	0.078	0.038	0.019	0.010	0.005	0.003
0.35	5.166	1.339	0.504	0.223	0.108	0.055	0.029	0.016	0.009	0.005
0.375	5.756	1.570	0.619	0.286	0.145	0.078	0.043	0.025	0.015	0.009
0.4	6.396	1.827	0.752	0.363	0.191	0.106	0.062	0.037	0.023	0.014
0.425	7.091	2.115	0.906	0.453	0.248	0.143	0.086	0.053	0.034	0.022
0.45	7.850	2.436	1.082	0.561	0.317	0.189	0.118	0.075	0.049	0.033
0.475	8.680	2.795	1.284	0.687	0.400	0.247	0.158	0.104	0.070	0.048
0.5	9.594	3.198	1.515	0.834	0.500	0.317	0.209	0.142	0.098	0.069
0.525	10.604	3.650	1.780	1.007	0.620	0.403	0.272	0.189	0.134	0.097
0.55	11.726	4.161	2.083	1.209	0.762	0.507	0.351	0.249	0.181	0.134
0.575	12.980	4.739	2.433	1.445	0.932	0.633	0.447	0.325	0.241	0.182
0.6	14.391	5.397	2.836	1.721	1.133	0.786	0.566	0.418	0.316	0.243
0.625	15.990	6.150	3.304	2.046	1.372	0.970	0.711	0.535	0.411	0.321
0.65	17.817	7.019	3.849	2.429	1.659	1.192	0.888	0.679	0.531	0.421
0.675	19.926	8.030	4.489	2.883	2.002	1.462	1.106	0.859	0.681	0.548
0.7	22.386	9.218	5.248	3.427	2.417	1.791	1.374	1.082	0.869	0.709
0.725	25.293	10.630	6.158	4.084	2.922	2.195	1.706	1.361	1.107	0.914
0.75	28.782	12.335	7.263	4.887	3.544	2.697	2.122	1.712	1.409	1.177
0.775	33.046	14.428	8.627	5.886	4.323	3.329	2.650	2.161	1.797	1.516
0.8	38.376	17.056	10.349	7.153	5.316	4.140	3.330	2.744	2.304	1.963
0.825	45.229	20.446	12.579	8.801	6.615	5.205	4.229	3.518	2.980	2.562
0.85	54.366	24.979	15.572	11.022	8.372	6.652	5.455	4.578	3.911	3.389
0.875	67.157	31.340	19.784	14.158	10.861	8.710	7.204	6.095	5.248	4.582
0.9	86.345	40.900	26.129	18.894	14.631	11.835	9.867	8.413	7.297	6.416
0.925	118.325	56.858	36.740	26.829	20.960	17.092	14.360	12.331	10.768	9.529
0.95	182.285	88.805	58.012	42.761	33.686	27.681	23.422	20.247	17.793	15.841
0.975	374.163	184.713	121.924	90.674	71.998	59.591	50.759	44.155	39.033	34.946

* C :선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-10〉 부산항 신선대부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.244	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.502	0.024	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.773	0.054	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.059	0.096	0.013	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.362	0.151	0.025	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.683	0.219	0.043	0.010	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	2.022	0.301	0.067	0.017	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	2.384	0.397	0.098	0.029	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.768	0.508	0.138	0.044	0.015	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	3.178	0.636	0.187	0.065	0.025	0.010	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.617	0.780	0.247	0.092	0.038	0.016	0.007	0.003	0.002	0.001
0.3	4.086	0.943	0.318	0.126	0.055	0.025	0.012	0.006	0.003	0.002
0.325	4.591	1.126	0.402	0.169	0.078	0.038	0.019	0.010	0.005	0.003
0.35	5.134	1.331	0.501	0.221	0.107	0.055	0.029	0.016	0.009	0.005
0.375	5.721	1.560	0.615	0.284	0.144	0.077	0.043	0.025	0.015	0.009
0.4	6.356	1.816	0.748	0.360	0.190	0.106	0.061	0.037	0.022	0.014
0.425	7.047	2.102	0.900	0.451	0.246	0.142	0.086	0.053	0.034	0.022
0.45	7.801	2.421	1.075	0.557	0.315	0.188	0.117	0.075	0.049	0.033
0.475	8.626	2.778	1.276	0.682	0.398	0.245	0.157	0.104	0.070	0.048
0.5	9.534	3.178	1.505	0.829	0.497	0.315	0.208	0.141	0.098	0.069
0.525	10.538	3.628	1.769	1.001	0.616	0.400	0.270	0.188	0.134	0.097
0.55	11.653	4.135	2.071	1.201	0.758	0.504	0.348	0.248	0.180	0.133
0.575	12.900	4.709	2.418	1.436	0.926	0.629	0.444	0.323	0.239	0.180
0.6	14.302	5.363	2.819	1.711	1.126	0.781	0.562	0.416	0.314	0.241
0.625	15.891	6.112	3.283	2.033	1.364	0.964	0.706	0.532	0.409	0.319
0.65	17.707	6.975	3.825	2.414	1.648	1.185	0.883	0.675	0.527	0.419
0.675	19.802	7.980	4.462	2.865	1.990	1.453	1.099	0.853	0.676	0.545
0.7	22.247	9.161	5.216	3.406	2.402	1.780	1.365	1.075	0.863	0.705
0.725	25.136	10.565	6.120	4.059	2.904	2.181	1.696	1.352	1.100	0.908
0.75	28.603	12.259	7.218	4.857	3.522	2.680	2.109	1.702	1.400	1.169
0.775	32.841	14.339	8.574	5.850	4.296	3.308	2.633	2.148	1.786	1.507
0.8	38.138	16.950	10.284	7.108	5.283	4.114	3.309	2.727	2.289	1.951
0.825	44.948	20.319	12.501	8.747	6.574	5.173	4.203	3.496	2.962	2.546
0.85	54.029	24.824	15.475	10.954	8.320	6.611	5.421	4.549	3.887	3.368
0.875	66.741	31.146	19.661	14.070	10.794	8.656	7.159	6.057	5.216	4.554
0.9	85.810	40.647	25.968	18.777	14.540	11.761	9.806	8.361	7.252	6.376
0.925	117.592	56.505	36.512	26.663	20.830	16.986	14.271	12.255	10.701	9.470
0.95	181.155	88.255	57.652	42.496	33.477	27.510	23.276	20.122	17.683	15.743
0.975	371.845	183.569	121.169	90.112	71.552	59.222	50.444	43.881	38.791	34.730

* C : 선석수, ρ : 선석점유율

〈표 부록 2-11〉 광양항 2단계 1차 부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.140	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.287	0.014	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.442	0.031	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.606	0.055	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	0.779	0.087	0.014	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	0.962	0.126	0.024	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.157	0.172	0.038	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	1.363	0.227	0.056	0.016	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	1.583	0.291	0.079	0.025	0.009	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000
0.25	1.818	0.364	0.107	0.037	0.014	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
0.275	2.068	0.446	0.141	0.053	0.021	0.009	0.004	0.002	0.001	0.000
0.3	2.337	0.539	0.182	0.072	0.031	0.014	0.007	0.003	0.002	0.001
0.325	2.625	0.644	0.230	0.097	0.044	0.022	0.011	0.006	0.003	0.002
0.35	2.936	0.761	0.286	0.126	0.061	0.031	0.017	0.009	0.005	0.003
0.375	3.272	0.892	0.352	0.163	0.082	0.044	0.025	0.014	0.008	0.005
0.4	3.635	1.039	0.428	0.206	0.109	0.061	0.035	0.021	0.013	0.008
0.425	4.030	1.202	0.515	0.258	0.141	0.081	0.049	0.030	0.019	0.012
0.45	4.461	1.385	0.615	0.319	0.180	0.108	0.067	0.043	0.028	0.019
0.475	4.933	1.589	0.730	0.390	0.227	0.140	0.090	0.059	0.040	0.027
0.5	5.453	1.818	0.861	0.474	0.284	0.180	0.119	0.080	0.056	0.039
0.525	6.027	2.075	1.011	0.572	0.352	0.229	0.155	0.108	0.076	0.055
0.55	6.664	2.365	1.184	0.687	0.433	0.288	0.199	0.142	0.103	0.076
0.575	7.377	2.693	1.383	0.821	0.529	0.360	0.254	0.184	0.137	0.103
0.6	8.179	3.067	1.612	0.978	0.644	0.447	0.321	0.238	0.180	0.138
0.625	9.088	3.495	1.878	1.163	0.780	0.551	0.404	0.304	0.234	0.183
0.65	10.126	3.989	2.188	1.380	0.943	0.678	0.505	0.386	0.302	0.239
0.675	11.325	4.564	2.551	1.639	1.138	0.831	0.628	0.488	0.387	0.312
0.7	12.723	5.239	2.983	1.948	1.373	1.018	0.781	0.615	0.494	0.403
0.725	14.375	6.042	3.500	2.321	1.661	1.247	0.970	0.773	0.629	0.519
0.75	16.358	7.011	4.128	2.778	2.014	1.533	1.206	0.973	0.801	0.669
0.775	18.781	8.200	4.903	3.345	2.457	1.892	1.506	1.228	1.021	0.862
0.8	21.811	9.694	5.882	4.065	3.021	2.353	1.893	1.560	1.309	1.116
0.825	25.705	11.620	7.149	5.002	3.760	2.958	2.403	1.999	1.694	1.456
0.85	30.899	14.197	8.850	6.264	4.758	3.781	3.100	2.602	2.223	1.926
0.875	38.169	17.812	11.244	8.047	6.173	4.950	4.094	3.464	2.983	2.604
0.9	49.074	23.246	14.851	10.738	8.315	6.726	5.608	4.782	4.147	3.646
0.925	67.250	32.315	20.881	15.248	11.912	9.714	8.161	7.008	6.120	5.416
0.95	103.601	50.472	32.971	24.303	19.145	15.733	13.312	11.507	10.113	9.003
0.975	212.654	104.981	69.295	51.534	40.920	33.869	28.849	25.095	22.184	19.862

* C :선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-12〉 광양항 2단계 2차 부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.126	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.258	0.012	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.398	0.028	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.545	0.050	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	0.701	0.078	0.013	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	0.866	0.113	0.022	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.041	0.155	0.034	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	1.227	0.205	0.050	0.015	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	1.425	0.262	0.071	0.023	0.008	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.25	1.636	0.327	0.096	0.033	0.013	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000
0.275	1.862	0.402	0.127	0.047	0.019	0.008	0.004	0.002	0.001	0.000
0.3	2.104	0.485	0.164	0.065	0.028	0.013	0.006	0.003	0.002	0.001
0.325	2.363	0.580	0.207	0.087	0.040	0.019	0.010	0.005	0.003	0.002
0.35	2.643	0.685	0.258	0.114	0.055	0.028	0.015	0.008	0.005	0.003
0.375	2.945	0.803	0.317	0.146	0.074	0.040	0.022	0.013	0.007	0.004
0.4	3.272	0.935	0.385	0.186	0.098	0.054	0.032	0.019	0.012	0.007
0.425	3.628	1.082	0.463	0.232	0.127	0.073	0.044	0.027	0.017	0.011
0.45	4.016	1.246	0.554	0.287	0.162	0.097	0.060	0.039	0.025	0.017
0.475	4.441	1.430	0.657	0.351	0.205	0.126	0.081	0.053	0.036	0.025
0.5	4.909	1.636	0.775	0.427	0.256	0.162	0.107	0.072	0.050	0.035
0.525	5.425	1.868	0.911	0.515	0.317	0.206	0.139	0.097	0.069	0.050
0.55	6.000	2.129	1.066	0.618	0.390	0.260	0.179	0.128	0.093	0.068
0.575	6.641	2.425	1.245	0.739	0.477	0.324	0.229	0.166	0.123	0.093
0.6	7.363	2.761	1.451	0.881	0.580	0.402	0.289	0.214	0.162	0.124
0.625	8.181	3.147	1.690	1.047	0.702	0.496	0.364	0.274	0.210	0.164
0.65	9.116	3.591	1.969	1.243	0.849	0.610	0.454	0.348	0.272	0.216
0.675	10.195	4.108	2.297	1.475	1.024	0.748	0.566	0.439	0.348	0.280
0.7	11.454	4.716	2.685	1.753	1.236	0.916	0.703	0.553	0.445	0.363
0.725	12.941	5.439	3.151	2.090	1.495	1.123	0.873	0.696	0.566	0.468
0.75	14.726	6.311	3.716	2.501	1.813	1.380	1.086	0.876	0.721	0.602
0.775	16.908	7.382	4.414	3.012	2.212	1.703	1.356	1.106	0.919	0.776
0.8	19.635	8.727	5.295	3.660	2.720	2.118	1.704	1.404	1.179	1.004
0.825	23.141	10.461	6.436	4.503	3.385	2.663	2.164	1.800	1.525	1.311
0.85	27.816	12.780	7.967	5.639	4.283	3.404	2.791	2.342	2.001	1.734
0.875	34.361	16.035	10.122	7.244	5.557	4.456	3.686	3.119	2.685	2.345
0.9	44.178	20.927	13.369	9.667	7.486	6.055	5.049	4.305	3.734	3.283
0.925	60.541	29.091	18.798	13.727	10.724	8.745	7.347	6.309	5.509	4.876
0.95	93.265	45.437	29.682	21.879	17.235	14.163	11.984	10.359	9.104	8.105
0.975	191.440	94.508	62.382	46.393	36.837	30.490	25.971	22.592	19.971	17.880

* C:선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-13〉 광양항 3단계 1차 부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.153	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.315	0.015	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.485	0.034	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.665	0.060	0.008	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	0.854	0.095	0.016	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.056	0.138	0.027	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.269	0.189	0.042	0.011	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	1.495	0.249	0.061	0.018	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	1.737	0.319	0.086	0.028	0.010	0.004	0.001	0.001	0.000	0.000
0.25	1.994	0.399	0.117	0.041	0.015	0.006	0.003	0.001	0.001	0.000
0.275	2.269	0.489	0.155	0.058	0.024	0.010	0.005	0.002	0.001	0.000
0.3	2.563	0.592	0.199	0.079	0.034	0.016	0.008	0.004	0.002	0.001
0.325	2.880	0.706	0.252	0.106	0.049	0.024	0.012	0.006	0.003	0.002
0.35	3.221	0.835	0.314	0.139	0.067	0.034	0.018	0.010	0.006	0.003
0.375	3.589	0.979	0.386	0.178	0.090	0.048	0.027	0.015	0.009	0.005
0.4	3.988	1.139	0.469	0.226	0.119	0.066	0.039	0.023	0.014	0.009
0.425	4.421	1.319	0.565	0.283	0.154	0.089	0.054	0.033	0.021	0.014
0.45	4.894	1.519	0.675	0.349	0.198	0.118	0.073	0.047	0.031	0.021
0.475	5.412	1.743	0.800	0.428	0.250	0.154	0.099	0.065	0.044	0.030
0.5	5.981	1.994	0.944	0.520	0.312	0.198	0.130	0.088	0.061	0.043
0.525	6.611	2.276	1.110	0.628	0.386	0.251	0.170	0.118	0.084	0.061
0.55	7.311	2.594	1.299	0.754	0.475	0.316	0.219	0.155	0.113	0.083
0.575	8.093	2.954	1.517	0.901	0.581	0.395	0.279	0.202	0.150	0.113
0.6	8.972	3.365	1.768	1.073	0.706	0.490	0.353	0.261	0.197	0.151
0.625	9.969	3.834	2.060	1.275	0.856	0.605	0.443	0.334	0.256	0.200
0.65	11.108	4.376	2.400	1.514	1.034	0.743	0.554	0.424	0.331	0.263
0.675	12.423	5.006	2.799	1.798	1.248	0.911	0.689	0.535	0.424	0.342
0.7	13.957	5.747	3.272	2.137	1.507	1.116	0.857	0.674	0.542	0.442
0.725	15.769	6.628	3.839	2.546	1.822	1.368	1.064	0.848	0.690	0.570
0.75	17.944	7.690	4.528	3.047	2.210	1.681	1.323	1.068	0.878	0.734
0.775	20.603	8.996	5.379	3.670	2.695	2.075	1.652	1.348	1.120	0.945
0.8	23.926	10.634	6.452	4.459	3.314	2.581	2.076	1.711	1.436	1.224
0.825	28.198	12.747	7.842	5.487	4.124	3.245	2.636	2.193	1.858	1.597
0.85	33.895	15.573	9.708	6.872	5.220	4.148	3.401	2.854	2.438	2.113
0.875	41.870	19.540	12.335	8.827	6.772	5.430	4.491	3.800	3.272	2.857
0.9	53.833	25.500	16.291	11.780	9.122	7.378	6.152	5.245	4.549	4.000
0.925	73.772	35.449	22.906	16.727	13.068	10.657	8.953	7.688	6.714	5.941
0.95	113.648	55.367	36.168	26.660	21.002	17.258	14.603	12.623	11.093	9.876
0.975	233.278	115.163	76.016	56.532	44.888	37.153	31.646	27.529	24.336	21.788

* C:선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-14〉 인천 남항 ICT부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.234	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.479	0.023	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.739	0.052	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.012	0.092	0.012	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.301	0.145	0.024	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.607	0.210	0.041	0.009	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.932	0.288	0.064	0.017	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	2.277	0.380	0.094	0.027	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.644	0.486	0.132	0.042	0.015	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	3.036	0.607	0.179	0.062	0.024	0.010	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.455	0.745	0.236	0.088	0.036	0.016	0.007	0.003	0.002	0.001
0.3	3.904	0.901	0.304	0.121	0.052	0.024	0.012	0.006	0.003	0.002
0.325	4.386	1.076	0.384	0.161	0.074	0.036	0.018	0.010	0.005	0.003
0.35	4.905	1.272	0.478	0.211	0.102	0.052	0.028	0.015	0.009	0.005
0.375	5.465	1.490	0.588	0.272	0.137	0.074	0.041	0.024	0.014	0.008
0.4	6.072	1.735	0.714	0.344	0.181	0.101	0.059	0.035	0.021	0.013
0.425	6.732	2.008	0.860	0.430	0.235	0.136	0.082	0.051	0.032	0.021
0.45	7.452	2.313	1.027	0.532	0.301	0.180	0.112	0.072	0.047	0.031
0.475	8.241	2.654	1.219	0.652	0.380	0.234	0.150	0.099	0.067	0.046
0.5	9.108	3.036	1.438	0.792	0.475	0.301	0.198	0.134	0.093	0.066
0.525	10.067	3.466	1.690	0.956	0.588	0.383	0.258	0.180	0.128	0.092
0.55	11.132	3.950	1.978	1.148	0.724	0.482	0.333	0.237	0.172	0.127
0.575	12.323	4.499	2.310	1.372	0.884	0.601	0.424	0.308	0.228	0.172
0.6	13.663	5.123	2.693	1.634	1.075	0.746	0.537	0.397	0.300	0.231
0.625	15.181	5.839	3.136	1.942	1.303	0.921	0.675	0.508	0.390	0.305
0.65	16.916	6.664	3.654	2.306	1.575	1.132	0.843	0.645	0.504	0.400
0.675	18.917	7.623	4.262	2.737	1.901	1.388	1.050	0.815	0.646	0.520
0.7	21.253	8.751	4.983	3.254	2.294	1.700	1.304	1.027	0.825	0.673
0.725	24.013	10.092	5.846	3.877	2.774	2.084	1.620	1.292	1.051	0.868
0.75	27.325	11.711	6.895	4.640	3.365	2.560	2.015	1.626	1.337	1.117
0.775	31.373	13.698	8.191	5.588	4.104	3.160	2.516	2.052	1.706	1.440
0.8	36.434	16.193	9.825	6.791	5.047	3.930	3.162	2.605	2.187	1.863
0.825	42.939	19.411	11.942	8.356	6.280	4.942	4.015	3.340	2.829	2.432
0.85	51.614	23.715	14.783	10.464	7.948	6.316	5.179	4.346	3.713	3.217
0.875	63.759	29.754	18.783	13.441	10.311	8.269	6.839	5.787	4.983	4.350
0.9	81.975	38.830	24.807	17.938	13.890	11.236	9.368	7.987	6.928	6.091
0.925	112.337	53.980	34.881	25.472	19.899	16.227	13.633	11.707	10.223	9.047
0.95	173.059	84.311	55.076	40.597	31.981	26.280	22.236	19.223	16.893	15.039
0.975	355.227	175.365	115.754	86.085	68.354	56.575	48.190	41.920	37.057	33.177

* C:선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-15〉 인천 남항 E1부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.210	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.430	0.020	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.663	0.046	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.908	0.083	0.011	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.167	0.130	0.021	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.442	0.188	0.036	0.008	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.733	0.258	0.057	0.015	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	2.043	0.340	0.084	0.024	0.008	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.372	0.436	0.118	0.038	0.013	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	2.724	0.545	0.160	0.056	0.021	0.009	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.100	0.669	0.211	0.079	0.032	0.014	0.006	0.003	0.001	0.001
0.3	3.502	0.808	0.272	0.108	0.047	0.022	0.010	0.005	0.003	0.001
0.325	3.934	0.965	0.345	0.145	0.067	0.032	0.016	0.009	0.005	0.003
0.35	4.400	1.141	0.429	0.190	0.092	0.047	0.025	0.014	0.008	0.004
0.375	4.903	1.337	0.527	0.244	0.123	0.066	0.037	0.021	0.012	0.007
0.4	5.448	1.556	0.641	0.309	0.163	0.091	0.053	0.031	0.019	0.012
0.425	6.040	1.801	0.772	0.386	0.211	0.122	0.073	0.046	0.029	0.019
0.45	6.686	2.075	0.922	0.477	0.270	0.161	0.100	0.064	0.042	0.028
0.475	7.393	2.381	1.093	0.585	0.341	0.210	0.135	0.089	0.060	0.041
0.5	8.171	2.724	1.290	0.711	0.426	0.270	0.178	0.121	0.084	0.059
0.525	9.032	3.109	1.516	0.858	0.528	0.343	0.232	0.161	0.114	0.083
0.55	9.987	3.544	1.775	1.030	0.649	0.432	0.299	0.212	0.154	0.114
0.575	11.055	4.036	2.072	1.231	0.793	0.539	0.381	0.276	0.205	0.155
0.6	12.257	4.596	2.416	1.466	0.965	0.669	0.482	0.356	0.269	0.207
0.625	13.619	5.238	2.814	1.742	1.169	0.826	0.605	0.456	0.350	0.274
0.65	15.176	5.978	3.278	2.069	1.413	1.015	0.756	0.579	0.452	0.359
0.675	16.971	6.839	3.824	2.456	1.705	1.245	0.942	0.731	0.580	0.467
0.7	19.067	7.851	4.470	2.919	2.058	1.525	1.170	0.921	0.740	0.604
0.725	21.543	9.054	5.245	3.478	2.489	1.870	1.453	1.159	0.942	0.779
0.75	24.514	10.506	6.186	4.163	3.019	2.297	1.808	1.459	1.200	1.002
0.775	28.146	12.289	7.348	5.013	3.682	2.835	2.257	1.841	1.530	1.292
0.8	32.686	14.527	8.814	6.092	4.528	3.526	2.836	2.337	1.962	1.672
0.825	38.523	17.414	10.714	7.496	5.634	4.433	3.602	2.996	2.538	2.182
0.85	46.305	21.275	13.263	9.388	7.131	5.666	4.646	3.899	3.331	2.886
0.875	57.200	26.693	16.851	12.059	9.251	7.418	6.136	5.191	4.470	3.903
0.9	73.543	34.836	22.255	16.093	12.461	10.080	8.404	7.166	6.215	5.465
0.925	100.781	48.427	31.293	22.852	17.852	14.558	12.231	10.503	9.171	8.116
0.95	155.258	75.638	49.411	36.421	28.692	23.577	19.949	17.245	15.155	13.492
0.975	318.687	157.326	103.847	77.230	61.323	50.756	43.233	37.608	33.245	29.765

* C :선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-16〉 인천 신항 선광부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.201	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.412	0.020	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.634	0.044	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.869	0.079	0.011	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.118	0.124	0.021	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.381	0.180	0.035	0.008	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.660	0.247	0.055	0.014	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	1.956	0.326	0.080	0.023	0.007	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.272	0.417	0.113	0.036	0.013	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	2.608	0.522	0.153	0.053	0.020	0.008	0.003	0.001	0.001	0.000
0.275	2.968	0.640	0.202	0.075	0.031	0.013	0.006	0.003	0.001	0.001
0.3	3.353	0.774	0.261	0.104	0.045	0.021	0.010	0.005	0.003	0.001
0.325	3.767	0.924	0.330	0.139	0.064	0.031	0.016	0.008	0.004	0.002
0.35	4.213	1.092	0.411	0.181	0.088	0.045	0.024	0.013	0.007	0.004
0.375	4.695	1.280	0.505	0.233	0.118	0.063	0.035	0.020	0.012	0.007
0.4	5.216	1.490	0.614	0.296	0.156	0.087	0.050	0.030	0.018	0.011
0.425	5.783	1.725	0.739	0.370	0.202	0.117	0.070	0.044	0.028	0.018
0.45	6.402	1.987	0.882	0.457	0.258	0.155	0.096	0.062	0.040	0.027
0.475	7.079	2.280	1.047	0.560	0.326	0.201	0.129	0.085	0.057	0.039
0.5	7.824	2.608	1.235	0.680	0.408	0.259	0.170	0.115	0.080	0.057
0.525	8.648	2.977	1.451	0.821	0.506	0.329	0.222	0.154	0.110	0.079
0.55	9.563	3.393	1.699	0.986	0.622	0.414	0.286	0.203	0.148	0.109
0.575	10.586	3.865	1.984	1.178	0.760	0.517	0.365	0.265	0.196	0.148
0.6	11.737	4.401	2.313	1.404	0.924	0.641	0.461	0.341	0.258	0.198
0.625	13.041	5.016	2.694	1.668	1.119	0.791	0.579	0.436	0.335	0.262
0.65	14.531	5.724	3.139	1.981	1.353	0.972	0.724	0.554	0.433	0.344
0.675	16.251	6.549	3.661	2.352	1.633	1.192	0.902	0.700	0.555	0.447
0.7	18.257	7.518	4.280	2.795	1.971	1.460	1.121	0.882	0.709	0.578
0.725	20.628	8.670	5.022	3.331	2.383	1.790	1.392	1.110	0.902	0.745
0.75	23.473	10.060	5.923	3.986	2.891	2.199	1.731	1.397	1.149	0.960
0.775	26.951	11.767	7.036	4.800	3.526	2.715	2.161	1.763	1.465	1.237
0.8	31.297	13.910	8.440	5.833	4.336	3.376	2.716	2.238	1.879	1.601
0.825	36.886	16.675	10.259	7.178	5.395	4.245	3.449	2.869	2.430	2.089
0.85	44.338	20.372	12.699	8.989	6.828	5.425	4.449	3.733	3.190	2.764
0.875	54.771	25.560	16.135	11.547	8.858	7.103	5.875	4.971	4.280	3.737
0.9	70.419	33.357	21.310	15.409	11.932	9.652	8.047	6.861	5.951	5.232
0.925	96.501	46.370	29.964	21.881	17.094	13.940	11.711	10.057	8.782	7.772
0.95	148.663	72.426	47.312	34.874	27.473	22.576	19.102	16.513	14.511	12.919
0.975	305.151	150.644	99.436	73.949	58.718	48.600	41.397	36.010	31.833	28.500

* C:선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-17〉 인천 신항 한진부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.201	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.412	0.020	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.634	0.044	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.869	0.079	0.011	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.117	0.124	0.021	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.380	0.180	0.035	0.008	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.659	0.247	0.055	0.014	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	1.955	0.326	0.080	0.023	0.007	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.271	0.417	0.113	0.036	0.013	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	2.607	0.521	0.153	0.053	0.020	0.008	0.003	0.001	0.001	0.000
0.275	2.967	0.640	0.202	0.075	0.031	0.013	0.006	0.003	0.001	0.001
0.3	3.352	0.774	0.261	0.103	0.045	0.021	0.010	0.005	0.003	0.001
0.325	3.766	0.924	0.330	0.139	0.064	0.031	0.016	0.008	0.004	0.002
0.35	4.212	1.092	0.411	0.181	0.088	0.045	0.024	0.013	0.007	0.004
0.375	4.693	1.280	0.505	0.233	0.118	0.063	0.035	0.020	0.012	0.007
0.4	5.214	1.490	0.613	0.296	0.156	0.087	0.050	0.030	0.018	0.011
0.425	5.781	1.724	0.738	0.370	0.202	0.117	0.070	0.044	0.028	0.018
0.45	6.399	1.986	0.882	0.457	0.258	0.154	0.096	0.062	0.040	0.027
0.475	7.077	2.279	1.047	0.560	0.326	0.201	0.129	0.085	0.057	0.039
0.5	7.821	2.607	1.235	0.680	0.408	0.258	0.170	0.115	0.080	0.056
0.525	8.645	2.976	1.451	0.821	0.505	0.329	0.222	0.154	0.110	0.079
0.55	9.560	3.392	1.699	0.985	0.621	0.414	0.286	0.203	0.148	0.109
0.575	10.582	3.863	1.983	1.178	0.759	0.516	0.365	0.265	0.196	0.148
0.6	11.732	4.400	2.312	1.403	0.924	0.641	0.461	0.341	0.258	0.198
0.625	13.036	5.014	2.693	1.668	1.119	0.791	0.579	0.436	0.335	0.262
0.65	14.526	5.722	3.138	1.980	1.352	0.972	0.724	0.554	0.433	0.344
0.675	16.245	6.546	3.660	2.351	1.632	1.192	0.901	0.700	0.555	0.447
0.7	18.250	7.515	4.279	2.794	1.970	1.460	1.120	0.882	0.708	0.578
0.725	20.620	8.666	5.020	3.329	2.382	1.789	1.391	1.109	0.902	0.745
0.75	23.464	10.056	5.921	3.985	2.889	2.199	1.730	1.396	1.148	0.959
0.775	26.941	11.763	7.033	4.799	3.524	2.714	2.160	1.762	1.465	1.236
0.8	31.286	13.905	8.437	5.831	4.334	3.375	2.715	2.237	1.878	1.600
0.825	36.873	16.668	10.255	7.175	5.393	4.243	3.447	2.868	2.430	2.088
0.85	44.322	20.364	12.695	8.986	6.825	5.423	4.447	3.732	3.188	2.763
0.875	54.750	25.550	16.129	11.542	8.854	7.101	5.873	4.969	4.279	3.736
0.9	70.393	33.344	21.302	15.403	11.928	9.648	8.044	6.859	5.949	5.230
0.925	96.465	46.353	29.952	21.873	17.087	13.935	11.707	10.053	8.779	7.769
0.95	148.608	72.399	47.294	34.861	27.463	22.567	19.094	16.507	14.506	12.915
0.975	305.037	150.588	99.399	73.922	58.696	48.582	41.381	35.997	31.821	28.490

* C :선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-18〉 울산 신항부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.198	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.406	0.019	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.625	0.044	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.857	0.078	0.011	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.102	0.122	0.020	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.361	0.178	0.034	0.008	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.636	0.244	0.054	0.014	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	1.928	0.321	0.079	0.023	0.007	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.239	0.411	0.111	0.036	0.013	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	2.571	0.514	0.151	0.052	0.020	0.008	0.003	0.001	0.001	0.000
0.275	2.926	0.631	0.200	0.074	0.030	0.013	0.006	0.003	0.001	0.001
0.3	3.306	0.763	0.257	0.102	0.044	0.020	0.010	0.005	0.002	0.001
0.325	3.714	0.911	0.325	0.137	0.063	0.031	0.016	0.008	0.004	0.002
0.35	4.153	1.077	0.405	0.179	0.086	0.044	0.024	0.013	0.007	0.004
0.375	4.628	1.262	0.498	0.230	0.116	0.062	0.035	0.020	0.012	0.007
0.4	5.142	1.469	0.605	0.291	0.153	0.086	0.050	0.030	0.018	0.011
0.425	5.701	1.700	0.728	0.364	0.199	0.115	0.069	0.043	0.027	0.018
0.45	6.311	1.958	0.870	0.451	0.255	0.152	0.095	0.061	0.040	0.027
0.475	6.978	2.247	1.032	0.552	0.322	0.198	0.127	0.084	0.057	0.039
0.5	7.713	2.571	1.218	0.671	0.402	0.255	0.168	0.114	0.079	0.056
0.525	8.525	2.935	1.431	0.810	0.498	0.324	0.219	0.152	0.108	0.078
0.55	9.427	3.345	1.675	0.972	0.613	0.408	0.282	0.200	0.146	0.108
0.575	10.435	3.810	1.956	1.162	0.749	0.509	0.359	0.261	0.193	0.146
0.6	11.569	4.339	2.280	1.384	0.911	0.632	0.455	0.336	0.254	0.195
0.625	12.855	4.944	2.656	1.645	1.103	0.780	0.571	0.430	0.331	0.258
0.65	14.324	5.643	3.094	1.953	1.333	0.958	0.714	0.546	0.427	0.339
0.675	16.019	6.455	3.609	2.318	1.609	1.175	0.889	0.690	0.547	0.441
0.7	17.997	7.410	4.219	2.755	1.943	1.440	1.105	0.870	0.699	0.570
0.725	20.334	8.546	4.951	3.283	2.349	1.765	1.372	1.094	0.890	0.735
0.75	23.139	9.917	5.839	3.929	2.849	2.168	1.706	1.377	1.132	0.946
0.775	26.567	11.600	6.936	4.732	3.475	2.676	2.130	1.738	1.445	1.219
0.8	30.852	13.712	8.320	5.750	4.274	3.328	2.677	2.206	1.852	1.578
0.825	36.361	16.437	10.112	7.076	5.318	4.185	3.400	2.828	2.396	2.059
0.85	43.707	20.081	12.519	8.861	6.731	5.348	4.385	3.680	3.144	2.725
0.875	53.991	25.196	15.905	11.382	8.732	7.002	5.791	4.900	4.219	3.684
0.9	69.416	32.881	21.006	15.190	11.762	9.514	7.933	6.764	5.866	5.158
0.925	95.126	45.710	29.537	21.569	16.850	13.741	11.544	9.913	8.657	7.661
0.95	146.546	71.394	46.638	34.377	27.082	22.254	18.830	16.278	14.305	12.735
0.975	300.805	148.499	98.020	72.896	57.882	47.908	40.807	35.498	31.380	28.095

* C:선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-19〉 울산 정일부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.119	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.245	0.012	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.378	0.026	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.517	0.047	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	0.665	0.074	0.012	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	0.822	0.107	0.021	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	0.988	0.147	0.033	0.008	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	1.164	0.194	0.048	0.014	0.004	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	1.352	0.248	0.067	0.022	0.008	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.25	1.552	0.310	0.091	0.032	0.012	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000
0.275	1.766	0.381	0.120	0.045	0.018	0.008	0.004	0.002	0.001	0.000
0.3	1.996	0.461	0.155	0.062	0.027	0.012	0.006	0.003	0.001	0.001
0.325	2.242	0.550	0.196	0.082	0.038	0.018	0.009	0.005	0.003	0.001
0.35	2.508	0.650	0.245	0.108	0.052	0.027	0.014	0.008	0.004	0.003
0.375	2.794	0.762	0.301	0.139	0.070	0.038	0.021	0.012	0.007	0.004
0.4	3.105	0.887	0.365	0.176	0.093	0.052	0.030	0.018	0.011	0.007
0.425	3.442	1.027	0.440	0.220	0.120	0.070	0.042	0.026	0.016	0.011
0.45	3.810	1.183	0.525	0.272	0.154	0.092	0.057	0.037	0.024	0.016
0.475	4.213	1.357	0.623	0.333	0.194	0.120	0.077	0.051	0.034	0.023
0.5	4.657	1.552	0.735	0.405	0.243	0.154	0.101	0.069	0.048	0.034
0.525	5.147	1.772	0.864	0.489	0.301	0.196	0.132	0.092	0.065	0.047
0.55	5.692	2.020	1.011	0.587	0.370	0.246	0.170	0.121	0.088	0.065
0.575	6.301	2.300	1.181	0.701	0.452	0.307	0.217	0.158	0.117	0.088
0.6	6.986	2.620	1.377	0.835	0.550	0.381	0.275	0.203	0.153	0.118
0.625	7.762	2.985	1.604	0.993	0.666	0.471	0.345	0.260	0.200	0.156
0.65	8.649	3.407	1.868	1.179	0.805	0.579	0.431	0.330	0.258	0.205
0.675	9.672	3.898	2.179	1.400	0.972	0.710	0.537	0.417	0.330	0.266
0.7	10.866	4.474	2.548	1.664	1.173	0.869	0.667	0.525	0.422	0.344
0.725	12.278	5.160	2.989	1.982	1.418	1.065	0.828	0.660	0.537	0.444
0.75	13.971	5.988	3.525	2.372	1.720	1.309	1.030	0.831	0.684	0.571
0.775	16.041	7.004	4.188	2.857	2.098	1.616	1.286	1.049	0.872	0.736
0.8	18.628	8.279	5.023	3.472	2.581	2.009	1.616	1.332	1.118	0.953
0.825	21.954	9.925	6.106	4.272	3.211	2.527	2.053	1.708	1.447	1.243
0.85	26.390	12.125	7.559	5.350	4.064	3.229	2.648	2.222	1.898	1.645
0.875	32.599	15.213	9.603	6.872	5.272	4.228	3.497	2.959	2.548	2.224
0.9	41.913	19.854	12.684	9.171	7.102	5.745	4.790	4.084	3.542	3.114
0.925	57.436	27.599	17.834	13.023	10.174	8.297	6.970	5.986	5.227	4.626
0.95	88.483	43.107	28.160	20.757	16.352	13.437	11.369	9.828	8.637	7.690
0.975	181.624	89.662	59.184	44.014	34.949	28.926	24.639	21.433	18.947	16.963

* C :선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-20〉 평택 동부두 6-9선석 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.239	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.490	0.023	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.756	0.053	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.035	0.094	0.013	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.331	0.148	0.025	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.644	0.214	0.042	0.010	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.977	0.294	0.065	0.017	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	2.330	0.388	0.096	0.028	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.705	0.497	0.135	0.043	0.015	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	3.106	0.621	0.183	0.063	0.024	0.010	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.535	0.762	0.241	0.090	0.037	0.016	0.007	0.003	0.002	0.001
0.3	3.994	0.922	0.311	0.123	0.054	0.025	0.012	0.006	0.003	0.002
0.325	4.487	1.100	0.393	0.165	0.076	0.037	0.019	0.010	0.005	0.003
0.35	5.018	1.301	0.489	0.216	0.104	0.054	0.029	0.016	0.009	0.005
0.375	5.591	1.525	0.601	0.278	0.141	0.075	0.042	0.024	0.014	0.008
0.4	6.212	1.775	0.731	0.352	0.185	0.103	0.060	0.036	0.022	0.014
0.425	6.888	2.054	0.880	0.440	0.241	0.139	0.084	0.052	0.033	0.021
0.45	7.624	2.366	1.051	0.544	0.308	0.184	0.114	0.073	0.048	0.032
0.475	8.431	2.715	1.247	0.667	0.389	0.240	0.154	0.101	0.068	0.047
0.5	9.318	3.106	1.471	0.810	0.486	0.308	0.203	0.138	0.095	0.067
0.525	10.299	3.546	1.729	0.978	0.602	0.391	0.264	0.184	0.131	0.094
0.55	11.389	4.041	2.024	1.174	0.740	0.493	0.341	0.242	0.176	0.130
0.575	12.607	4.603	2.363	1.403	0.905	0.615	0.434	0.315	0.234	0.176
0.6	13.978	5.242	2.755	1.672	1.100	0.763	0.549	0.406	0.307	0.236
0.625	15.531	5.973	3.209	1.987	1.333	0.942	0.690	0.520	0.399	0.312
0.65	17.306	6.817	3.738	2.359	1.611	1.158	0.863	0.660	0.515	0.409
0.675	19.354	7.799	4.360	2.801	1.945	1.420	1.074	0.834	0.661	0.532
0.7	21.743	8.953	5.098	3.329	2.347	1.739	1.334	1.051	0.844	0.689
0.725	24.567	10.325	5.981	3.967	2.838	2.132	1.657	1.322	1.075	0.888
0.75	27.955	11.981	7.054	4.747	3.443	2.619	2.061	1.663	1.368	1.143
0.775	32.097	14.014	8.380	5.717	4.199	3.233	2.574	2.099	1.745	1.473
0.8	37.274	16.566	10.051	6.947	5.163	4.021	3.234	2.665	2.238	1.906
0.825	43.930	19.859	12.217	8.548	6.425	5.056	4.107	3.417	2.895	2.488
0.85	52.804	24.261	15.124	10.706	8.131	6.461	5.298	4.446	3.799	3.292
0.875	65.229	30.440	19.216	13.751	10.549	8.460	6.997	5.920	5.098	4.451
0.9	83.866	39.726	25.379	18.352	14.210	11.495	9.584	8.171	7.088	6.232
0.925	114.927	55.225	35.685	26.059	20.358	16.601	13.947	11.977	10.459	9.255
0.95	177.050	86.255	56.346	41.533	32.719	26.886	22.749	19.666	17.282	15.386
0.975	363.418	179.409	118.423	88.070	69.930	57.880	49.301	42.886	37.912	33.943

* C:선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-21〉 평택 동부두 14-16선석 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.253	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.519	0.025	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.799	0.056	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.095	0.100	0.014	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.408	0.156	0.026	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.739	0.227	0.044	0.010	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	2.090	0.311	0.069	0.018	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	2.464	0.411	0.101	0.030	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.861	0.525	0.142	0.046	0.016	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	3.285	0.657	0.193	0.067	0.026	0.010	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.738	0.806	0.255	0.095	0.039	0.017	0.008	0.004	0.002	0.001
0.3	4.223	0.975	0.329	0.130	0.057	0.026	0.013	0.006	0.003	0.002
0.325	4.745	1.164	0.416	0.174	0.080	0.039	0.020	0.010	0.006	0.003
0.35	5.306	1.376	0.518	0.229	0.110	0.057	0.030	0.017	0.009	0.005
0.375	5.913	1.613	0.636	0.294	0.149	0.080	0.044	0.026	0.015	0.009
0.4	6.570	1.877	0.773	0.372	0.196	0.109	0.063	0.038	0.023	0.014
0.425	7.284	2.172	0.930	0.466	0.254	0.147	0.089	0.055	0.035	0.022
0.45	8.063	2.502	1.111	0.576	0.325	0.195	0.121	0.078	0.051	0.034
0.475	8.916	2.871	1.319	0.705	0.411	0.253	0.162	0.107	0.072	0.050
0.5	9.854	3.285	1.556	0.857	0.514	0.326	0.215	0.145	0.101	0.071
0.525	10.892	3.750	1.828	1.034	0.637	0.414	0.280	0.194	0.138	0.100
0.55	12.044	4.274	2.140	1.242	0.783	0.521	0.360	0.256	0.186	0.137
0.575	13.332	4.867	2.499	1.484	0.957	0.651	0.459	0.333	0.247	0.186
0.6	14.782	5.543	2.913	1.768	1.164	0.807	0.581	0.430	0.325	0.250
0.625	16.424	6.317	3.393	2.101	1.410	0.996	0.730	0.549	0.422	0.330
0.65	18.301	7.209	3.953	2.495	1.704	1.224	0.912	0.698	0.545	0.433
0.675	20.467	8.248	4.611	2.962	2.056	1.502	1.136	0.882	0.699	0.563
0.7	22.994	9.468	5.391	3.520	2.482	1.839	1.411	1.111	0.892	0.728
0.725	25.980	10.919	6.325	4.195	3.001	2.255	1.753	1.398	1.137	0.939
0.75	29.563	12.670	7.460	5.020	3.641	2.770	2.180	1.759	1.447	1.209
0.775	33.943	14.820	8.861	6.046	4.440	3.419	2.722	2.220	1.846	1.558
0.8	39.417	17.519	10.629	7.347	5.460	4.252	3.420	2.819	2.366	2.016
0.825	46.456	21.001	12.920	9.040	6.795	5.346	4.344	3.613	3.061	2.631
0.85	55.841	25.657	15.994	11.321	8.599	6.833	5.603	4.702	4.017	3.481
0.875	68.981	32.191	20.321	14.542	11.156	8.946	7.399	6.261	5.391	4.707
0.9	88.689	42.011	26.839	19.407	15.028	12.156	10.135	8.641	7.495	6.590
0.925	121.537	58.401	37.737	27.558	21.529	17.556	14.749	12.666	11.060	9.788
0.95	187.233	91.216	59.587	43.922	34.601	28.433	24.057	20.797	18.276	16.271
0.975	384.320	189.728	125.234	93.135	73.952	61.209	52.137	45.353	40.092	35.895

* C :선석수, ρ :선석점유율

〈표 부록 2-22〉 대산항 4부두 평균 대기시간(W_q) 산출표

$\rho \backslash C$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025	0.241	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.495	0.024	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.075	0.763	0.053	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	1.045	0.095	0.013	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.125	1.344	0.149	0.025	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.15	1.660	0.217	0.042	0.010	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
0.175	1.996	0.297	0.066	0.017	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
0.2	2.352	0.392	0.097	0.028	0.009	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
0.225	2.732	0.502	0.136	0.043	0.015	0.006	0.002	0.001	0.000	0.000
0.25	3.136	0.627	0.184	0.064	0.024	0.010	0.004	0.002	0.001	0.000
0.275	3.569	0.770	0.243	0.091	0.037	0.016	0.007	0.003	0.002	0.001
0.3	4.032	0.931	0.314	0.125	0.054	0.025	0.012	0.006	0.003	0.002
0.325	4.530	1.111	0.397	0.167	0.077	0.037	0.019	0.010	0.005	0.003
0.35	5.066	1.314	0.494	0.218	0.105	0.054	0.029	0.016	0.009	0.005
0.375	5.645	1.540	0.607	0.281	0.142	0.076	0.042	0.024	0.014	0.009
0.4	6.273	1.792	0.738	0.356	0.187	0.104	0.061	0.036	0.022	0.014
0.425	6.955	2.074	0.888	0.445	0.243	0.141	0.085	0.052	0.033	0.021
0.45	7.698	2.389	1.061	0.550	0.311	0.186	0.116	0.074	0.049	0.032
0.475	8.513	2.741	1.259	0.673	0.393	0.242	0.155	0.102	0.069	0.047
0.5	9.409	3.136	1.486	0.818	0.491	0.311	0.205	0.139	0.096	0.068
0.525	10.400	3.580	1.745	0.988	0.608	0.395	0.267	0.186	0.132	0.095
0.55	11.500	4.081	2.043	1.186	0.748	0.497	0.344	0.244	0.178	0.131
0.575	12.730	4.647	2.386	1.417	0.914	0.621	0.439	0.318	0.236	0.178
0.6	14.114	5.293	2.782	1.688	1.111	0.771	0.555	0.410	0.310	0.238
0.625	15.682	6.031	3.240	2.006	1.346	0.951	0.697	0.525	0.403	0.315
0.65	17.474	6.884	3.775	2.382	1.627	1.169	0.871	0.666	0.520	0.413
0.675	19.542	7.875	4.403	2.828	1.963	1.434	1.084	0.842	0.667	0.538
0.7	21.955	9.040	5.147	3.361	2.370	1.756	1.347	1.061	0.852	0.695
0.725	24.806	10.426	6.039	4.005	2.865	2.153	1.673	1.334	1.085	0.896
0.75	28.227	12.097	7.123	4.793	3.476	2.645	2.081	1.679	1.381	1.154
0.775	32.409	14.151	8.461	5.773	4.240	3.265	2.599	2.120	1.762	1.487
0.8	37.637	16.727	10.149	7.015	5.214	4.060	3.266	2.691	2.259	1.925
0.825	44.357	20.052	12.336	8.632	6.488	5.105	4.147	3.450	2.923	2.512
0.85	53.318	24.498	15.272	10.810	8.211	6.524	5.350	4.489	3.836	3.324
0.875	65.864	30.737	19.403	13.885	10.652	8.542	7.065	5.978	5.147	4.494
0.9	84.682	40.113	25.626	18.530	14.349	11.607	9.677	8.251	7.157	6.292
0.925	116.046	55.762	36.032	26.313	20.556	16.763	14.083	12.093	10.561	9.346
0.95	178.774	87.095	56.894	41.937	33.037	27.148	22.970	19.857	17.450	15.536
0.975	366.956	181.156	119.576	88.927	70.611	58.444	49.781	43.304	38.281	34.273

* C:선석수, ρ :선석점유율

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 2023

01	자율운행선박 운항을 위한 해상교통관제 대응방안 연구	박상원
02	인공지능(AI)을 활용한 무역규범의 해양수산분야 영향 분석 연구	임병호
03	공급망 안정화를 위한 항만의 대응방안 연구	이나영
04	연안재해 정보 활용 개선 방안 연구	김찬웅
05	항만의 생활물류 기능 활성화 방안 연구	최석우
06	마을여장 이용·관리 개선방안 연구	마창모
07	해양생태계 복원정책 개선방안 연구 - 사회·생태복원 중심으로 -	최석문
08	주민행태기반 해양정책 수용성 제고 설계 방안 연구	이슬기
09	항만연관산업 고도화 방안 연구	김세원
10	탄소배출권 거래제가 해운선사에 미치는 영향 분석 연구	조아현
11	물류 연계 효율화를 위한 스마트항만 구축방안 연구 - 항만물류 데이터 공유 플랫폼을 중심으로 -	서정용
12	어업분야 중대재해처벌법 대응방안 연구	고동훈
13	수산물의 디지털 수출 활성화 방안 연구	이상건
14	항만개발사업의 정책영향평가 연구	이수영
15	해운산업의 미래 변화 예측과 국내 대응 전략 연구	이호춘
16	어선현대화 추진을 위한 금융제도 개선방안 연구	엄선희
17	연안도시의 쇠퇴와 대응방안 연구	강창우
18	해양범죄 실태 진단을 통한 대응체계 개선방안 연구	민영훈
19	민간기업의 해양환경 분야 ESG 활성화 방안 연구	김지윤
20	식량안보를 고려한 수산물 수급관리 방안 연구	허수진
21	지방분권시대의 수산업·어촌분야 대응전략 연구	이호림
22	해운산업 고도화를 위한 선박투자 활성화 방안 연구	김한나
23	글로벌 공급망 리스크 대응 물류망 최적화 방안 연구 : 한국·북미 물류공급망 중심	이성우

2022년

01	선박투자 가치평가 및 위험관리 모형 연구	박성화
02	항만 컨테이너 반출입 예약시스템 가격결정 모형 연구	서정용
03	연안재해 대응을 위한 그린인프라 구축방안 연구	정지호
04	탄소중립이 해양수산업에 미치는 경제적 영향분석 연구	권장한
05	수산물 안전성 관리체계 개선방안 연구	조현주
06	준해양사고 통보제도 개선방안 연구	박상원
07	MZ세대 소비트렌드를 반영한 해양관광 추진방안 연구	최일선
08	연근해 어종별 어획쿼터제도 도입방안 연구	심성현
09	행위자기반 해양공간계획 시뮬레이션 개발 연구	조성진
10	항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안 연구	안승현
11	탄소중립 시대 양식산업 대응전략 연구 - 육상 어류양식을 중심으로 -	마창모
12	수산식품산업의 탄소중립 대응방안 연구 - 가공업을 중심으로 -	김지연
13	해양환경보전정책 도입방안 연구	박수진
14	포스트 코로나 시대의 컨테이너 해운산업 대응방안 연구 - 디지털 플랫폼을 중심으로 -	최건우
15	항만분야 공공갈등 관리방안 연구	김세원
16	글로벌 가치사슬 변화와 국제물류 분야 대응방안 연구 - 전기자동차 산업을 중심으로 -	권보배
17	항만개발제도 개선방안 연구	이수영
18	클러스터 혁신을 통한 선박관리업 발전방안 연구	허성례
19	수입수산물 예방적 관리체계 도입방안 연구 - IUU 수산물을 중심으로 -	안지은
20	양식수산물 유통 빅데이터 구축방안 연구	이기영
21	글로벌 혁신성장을 위한 신남방·신북방 정책 연구 - 신남방 지역 ICT산업 가치사슬 변화에 따른 물류 공급사슬 대응방안	최나영환

수시연구보고서 발간목록

Ⅰ 2023년

01	양식어업 비과세 합리화 방안 연구	이정필
02	복합해양레저관광도시 개념정립 및 추진방안에 관한 연구	최일선
03	항만기술산업 육성을 위한 법제도 마련 연구	안승현
04	블루푸드테크 전문기관의 도입 필요성에 대한 연구	이동림
05	지방자치단체의 해양관할구역 설정 요인 연구	이혜영
06	양식장 내 어류 복지 기준 마련을 위한 연구	오서연
07	해양플라스틱 재활용산업 공급사슬 기반 조성 연구	이윤정
08	중소·중견 물류기업의 ESG경영 가이드라인 구축 연구	이재호
09	신항만건설사업의 민간투자 확대를 위한 제도개선 연구	김보경
10	해수욕장 이용객 집계·관리체계 개선방안 연구	이정아
11	유엔 플라스틱 협약의 주요쟁점 분석 및 대응방향 연구	박수진
12	어촌 활력 제고를 위한 제도 개선방안 연구	문지원
13	어선의 친환경에너지 전환방안 연구	고동훈

Ⅰ 2022년

01	항만의 탄소중립 이행·관리 표준안 연구	안용성
02	매립지 소유권 분리 제도화의 이해관계 분석과 관리방안	윤성순
03	글로벌 공급망 리스크별 영향분석 및 대응방안 연구 - 에너지·곡물을 중심으로	조지성
04	대북제재 강화와 코로나 팬데믹 이후 북한 해양수산 이슈와 대응 방안	윤인주
05	남극환경보호의정서 제6부속서의 국내 이행을 위한 법제 정비방안 연구	박예나
06	해양바이오산업 육성을 위한 해양생명자원법 정비 방안 연구	좌미라
07	우리나라 수산종자 관리체계 개선방안 연구	조현주
08	2050 신해양강국 미래비전 수립 연구	김민수

일반연구보고서 발간목록

Ⅰ 2023년

01	해양수산업 조기경보지수 개발 - 컨테이너 해운시장을 중심으로	권장한
02	AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구(II) - 우리나라 주요 항만을 중심으로	강무홍
03	우리나라 수산식품 소비 활성화 방안 마련 연구	한기욱
04	비컨테이너 항만물동량 예측모형 고도화 방안 연구(II) - 유류, 철재, 모래, 목재, 양곡을 중심으로	이화섭
05	대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 절감 편익 산정 연구	조아현
06	항만개발사업 정책효과 세부항목별 효과산정 방법 연구	이종필
07	해양 지속가능성 평가체계 구축 연구	최희정
08	국내 해운기업의 ESG 경영 확산 방안 연구	황진희
09	해운 경기순환 분석 및 예측 연구	황수진
10	수산물 공급 안정을 위한 수입수산물 전략품목 관리 방안 연구	박혜진
11	항만산업 여성인력 확대방안 연구	이지원
12	선사공동행위의 규제 및 행동 변화에 따른 영향 분석과 정책방안 연구	류희영

Ⅰ 2022년

01	건화물선 시장 비용분석을 통한 해운시장 위험관리지표체계 구축	류희영
02	해상운임 예측모형 고도화 연구(Ⅰ)	황수진
03	IMO 시장기반조치 도입이 국내 해운기업에 미치는 영향	김한나
04	연안지역발전지수(CoDI) 개발 연구	황재희
05	CGE 기반 국제통상환경 변화의 해양수산부문 파급효과 분석	임병호
06	글로벌 수산부문 이머징 이슈 분석 모델 개발 연구	한기욱
07	양식 수산물 중장기 수급전망모형 구축 연구 - 굴을 중심으로 -	김철현
08	Network DEA를 이용한 물류기업 경쟁력 비교 분석 연구	황선일
09	해양수산 사업체 성과 및 효율성 분석 연구	김주현
10	베이지안 방법을 이용한 양식 명계 단수 추정방안 연구	천성훈
11	수입수산물과 국산 간의 대체관계 분석 연구 - 활·신선냉장품을 중심으로 -	박혜진
12	국내 컨테이너 해운기업의 디지털 전환 활성화 방안 연구	전서연
13	비컨테이너 항만물동량 예측모형 고도화 방안 연구(Ⅰ) - 자동차, 석탄, 고철, 시멘트를 중심으로 -	최석우
14	해양수산 분야 미래 리스크 발굴 및 파급효과 분석 연구(Ⅱ)	김찬호
15	항만개발사업의 정책효과 적용방안 연구	이종필
16	국가 해양전략 기본구상 연구	정현욱
17	선박대기시간 예측모형 개발을 위한 방법론 연구	조아현
18	안전항만 구축을 위한 비용 산정 및 지원체계 마련을 위한 연구	최상균

일반연구 2023-05

대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 절감 편익 산정 연구

인 쇄 2023년 12월 29일

발 행 2023년 12월 31일

발 행 인 김 종 덕

발 행 처 한국해양수산개발원

주 소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연 락 처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등 록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 애드원플러스 (070-4390-3850)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 6,000원

대기행렬모형을 활용한 선박대기비용 절감 편익 산정 연구

Evaluating the Benefits of Ship Waiting Times Reduction
Using Queueing Models