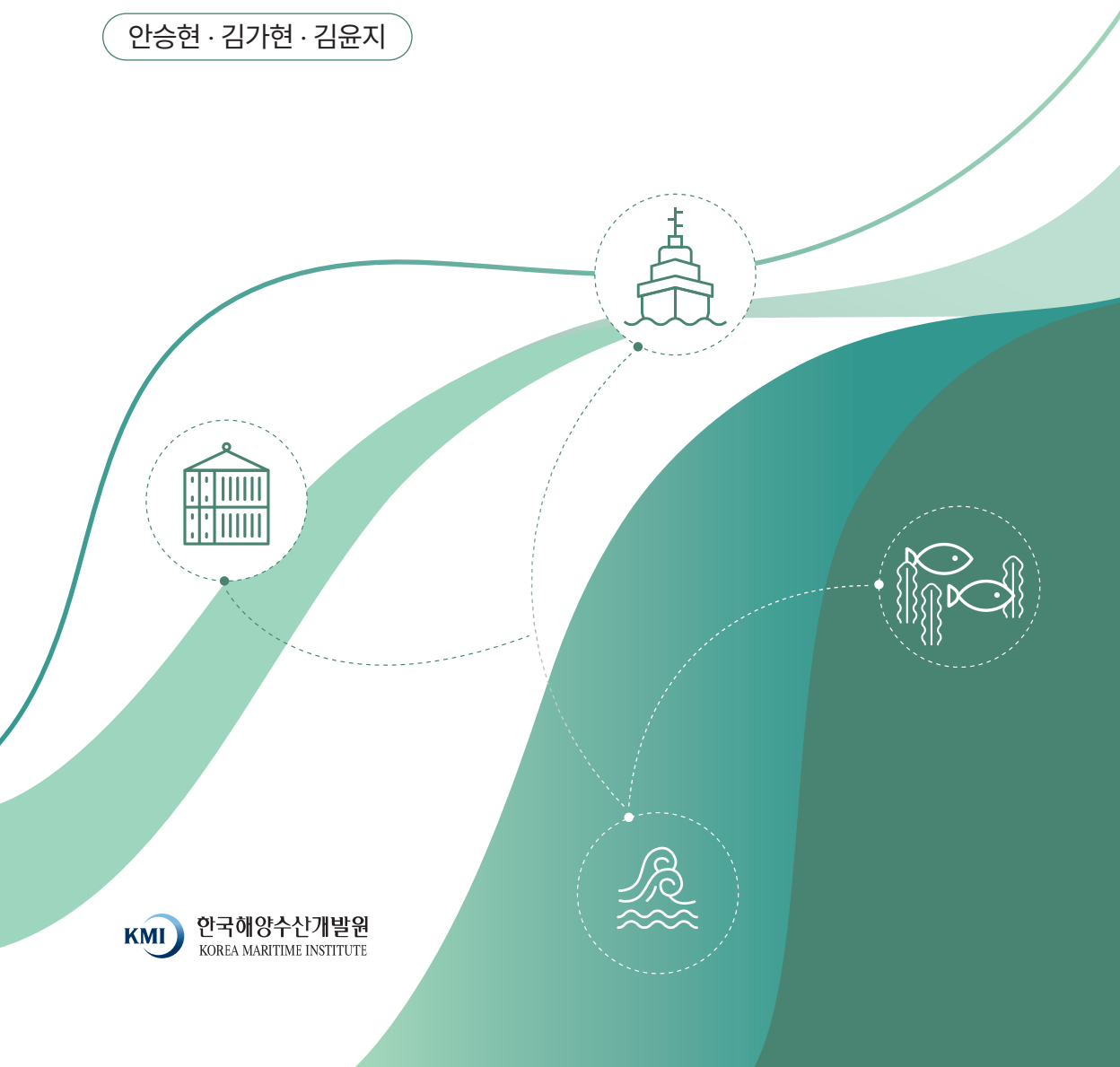
일반연구 2025-08

스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구

A Study on the Methodology for Evaluating the Effects of Smart Port Development

안승현 · 김가현 · 김윤지



KMI 한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

일반연구 2025-08

스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구

A Study on the Methodology for Evaluating the Effects of Smart Port Development

안승현 · 김가현 · 김윤지

KMI 한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	**안승현, 김가현, 김윤지**
내부연구진	연구책임자 안승현 한국해양수산개발원 항만연구본부 부연구위원 공동연구원 김가현 한국해양수산개발원 항만연구본부 부연구위원 공동연구원 김윤지 한국해양수산개발원 항만연구본부 연구원

연구기간	2025. 1. 1. ~ 2025. 10. 31.

보고서 집필내역

연구책임자	안승현 연구총괄, 제1장 일부, 제2장 일부, 제3장 일부, 제4장 일부, 제5장
내부연구진	김가현 제1장 일부, 제2장 일부, 제3장 일부, 제4장 일부 김윤지 제1장 일부, 제2장 일부, 제3장 일부

발간사

우리나라 항만 개발사업의 타당성 평가 체계는 역설적인 문제를 안고 있다. 스마트 항만을 개발할수록 사업비는 25% 이상 증가하지만, 그에 따른 편익은 제대로 평가받지 못해 오히려 사업 추진 타당성이 낮아지는 것이다. 이는 마치 미래를 위한 투자를 비용 낭비로 평가하는 것과 같다.

세계 항만 산업은 이미 스마트화 경쟁 시대에 돌입했다. 코로나19 팬데믹은 자동화된 스마트항만만이 위기 상황에서도 안정적 운영이 가능함을 명확히 보여주었다. 중국, 싱가포르 등 주변국들도 대규모 스마트항만 개발에 적극 투자하고 있다. 그러나 현행 평가 체계로는 우리나라가 이 경쟁에서 뒤처질 수밖에 없다.

스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구는 이 문제를 정면으로 다룬다. 스마트항만이 창출하는 하역 생산성 향상, 환경 개선, 안전성 제고의 가치를 구체적으로 정량화하였다. 가상 터미널 시범 적용을 통해 기존 평가 체계에서 누락되었던 신규 편익을 도출하고, 이를 반영할 경우 경제적 타당성이 크게 개선됨을 확인하였다.

실무 적용 가능성 측면에서도 학술적 논의를 넘어 예비타당성조사에 즉시 활용할 수 있는 구체적 산정 공식, 데이터 기반 원단위, 적용 절차를 체계적으로 제시하였다. 이는 국내외 최초의 포괄적 정량화 방법론이다.

본 연구 결과가 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」 및 「교통시설 투자평가지침」에 신속히 반영되어, 스마트항만 투자가 정당한 평가를 받고, 우리 항만이 국제 경쟁력을 확보하며, 탄소중립 등 국가 목표 달성에 기여할 수 있는 제도적 기반이 마련되기를 기대한다.

끝으로 연구에 귀중한 의견을 주신 터미널 운영사 실무자 여러분과 연구진의 노고에 깊은 감사를 드린다.

2025년 12월
한국해양수산개발원
원장 조 정 희

목차

요약 _i

Executive Summary _xi

01 서론 _1

제1절 연구의 배경 및 목적 1
1. 연구의 배경 1
2. 연구의 목적 4

제2절 연구 내용과 방법 5
1. 연구 내용 5
2. 연구 방법 7

제3절 선행연구와 본 연구의 차별성 9
1. 선행연구 검토 9
2. 본 연구의 차별성 20

02 스마트항만 개발 편익 발굴 필요성 검토 _23

제1절 경제성 평가 관점의 영향 분석 23
1. 항만 개발사업의 편익 구조 분석 23
2. 항만의 스마트화에 따른 사업비 증가 규모 추정 29
3. 경제적 타당성 관점의 사업비 증가 영향 검토 32
4. 영향 분석 결과 34

제2절 국내외 유사 지침 분석 35
1. 해외 SOC 개발사업 타당성 평가 지침 분석 35
2. 국내 SOC 개발사업 타당성 평가 지침 분석 41

제3절 시사점 47

03 스마트항만 개발 편익 산정 방법론 개발 _49

제1절 스마트항만 개발 편익 도출 49
1. 스마트항만 개발 편익 도출 개요 49
2. 스마트항만 개발 편익 관련 연구 사례 검토 50
3. 스마트항만 개발 편익 도출 결과 55

제2절 스마트항만 개발 편익 산정 방법론 57
1. 전문가 의견 수렴 57
2. 하역 생산성 향상 효과 58
3. 운영비용 절감 효과 61
4. 안전사고 절감 효과 63
5. 환경비용 절감 효과 64
6. 종합 66

04 스마트항만 개발 편익 산정 및 제도 개선방안 _69

제1절 스마트항만 개발 편익 산정 69
1. 하역 생산성 향상 편익 산정 69
2. 환경비용 절감 편익 산정 83
3. 안전사고 감소 편익 산정 91
4. 편익 산정 결과 검증을 위한 전문가 의견 조사 104

제2절 제도 개선방안 105
1. 선박 재항 비용 절감 편익 산정 범위의 확대 및 현실화 105
2. 환경비용 절감 편익 신설 및 표준화 108
3. 안전사고 감소 편익 평가 체계 도입 109

05 결론 및 정책 제언 _111

제1절 결론 및 한계점 111
1. 요약 및 핵심 결론 111

2. 연구의 한계점 및 후속 연구과제 116

제2절 정책 제언 121

1. 예비타당성조사 표준지침 등 관련 제도의 개정 121

2. 데이터 수집 및 관리 체계 구축 122

3. 항만 특화 편익 원단위 개발 및 주기적 갱신 체계 구축 123

4. 평가 방법론 제도화를 위한 협의체 구축 124

참고문헌 _125

부록 _133

표 목차

〈표 1-1〉 타 분야 스마트화 편익 관련 연구 ····· 11
〈표 1-2〉 항만 자동화 및 스마트화 효과 관련 연구 ····· 14
〈표 1-3〉 스마트항만의 환경 및 지속가능성 효과 관련 연구 ····· 18
〈표 1-4〉 스마트항만 성과 평가 및 종합적 검토 관련 연구 ····· 20
〈표 1-5〉 선행연구와 비교 및 본 연구의 차별성 ····· 22
〈표 2-1〉 운영효율성 관련 편익의 주요 내용 및 산정 방법 ····· 24
〈표 2-2〉 물류비용 관련 편익의 주요 내용 및 산정 방법 ····· 26
〈표 2-3〉 수익 증대 관련 편익의 주요 내용 및 산정 방법 ····· 27
〈표 2-4〉 기타 특수 편익의 주요 내용 및 산정 방법 ····· 28
〈표 2-5〉 사업비 비용항목 ····· 30
〈표 2-6〉 총 사업비 집계표 ····· 31
〈표 2-7〉 항만자동화 테스트베드 구축 사업의 경제성 평가 결과 ····· 33
〈표 2-8〉 사업비 변화에 따른 항만자동화 테스트베드 구축 사업의 경제성 평가 결과 ···· 33
〈표 2-9〉 진해신항(1단계) 건설사업의 경제성 평가 결과 ····· 34
〈표 2-10〉 EU 경제성 평가 지침 비교: CBA Guide vs EAV ····· 36
〈표 2-11〉 EU 지침 기반 교통 분야 편익 항목 ····· 36
〈표 2-12〉 EU 지침 기반 편익 항목별 산정 방식 및 적용 기준 ····· 37
〈표 2-13〉 미국교통부 BCA 지침 기반 편익 항목 ····· 38
〈표 2-14〉 미국교통부 BCA 지침 기반 편익 항목별 산정 방식 및 적용 기준 ····· 38
〈표 2-15〉 일본 국토교통성 지침 기반 편익 항목 ····· 39
〈표 2-16〉 일본 국토교통성 지침 기반 편익 항목별 산정 방식 및 적용 기준 ····· 40
〈표 2-17〉 도로시설 투자사업의 편익 항목 개요 ····· 42
〈표 2-18〉 철도시설 투자사업의 편익 항목 개요 ····· 43
〈표 2-19〉 공항시설 투자사업의 편익 항목 개요 ····· 44
〈표 2-20〉 친환경 및 신교통시스템 투자사업의 편익 항목 개요 ····· 45
〈표 2-21〉 국내 교통·물류시설 개발사업의 편익 비교 ····· 46
〈표 3-1〉 자동화의 실현편익과 도입 동인 차이 ····· 51
〈표 3-2〉 자동화 하역장비 시나리오별 총운영비 vs 단위비용 ····· 52
〈표 3-3〉 50% 전기화 시 연간 배출변화 및 톤당 순비용 ····· 53
〈표 3-4〉 컨테이너 터미널 자동화로 인한 효과(ITF) ····· 54

〈표 3-5〉 스마트항만 개발 편익 후보군 도출 결과 ····· 56
〈표 3-6〉 편익 항목별 산정 방식 및 데이터 ····· 57
〈표 3-7〉 QC당 AGV 필요대수(설계 가정, 운영사 제시) ····· 58
〈표 3-8〉 자동화 터미널과 반자동화 터미널의 생산성 차이 요약 ····· 60
〈표 3-9〉 생산성 향상 편익 산정 방식 ····· 61
〈표 3-10〉 부산항 신항 터미널별 장비별 인력 구조 ····· 61
〈표 3-11〉 자동화에 따른 운영비용 구조 변화(정성 비교) ····· 62
〈표 3-12〉 운영비용 절감 효과 산정 방식 ····· 63
〈표 3-13〉 안전사고 절감 편익 산정 방식 ····· 64
〈표 3-14〉 대기오염물질 저감 편익 산정 방식 ····· 65
〈표 3-15〉 온실가스 감축 편익 산정 방식 ····· 66
〈표 3-16〉 스마트항만 개발 편익(안) ····· 67
〈표 4-1〉 부산항 컨테이너 입출항 컨테이너 선박 현황(최근 3개년) ····· 71
〈표 4-2〉 선급별 컨테이너 선박의 1일 용선료 ····· 72
〈표 4-3〉 선급별 컨테이너선 선박운항비용 중 고정비 부문 세부 비용 ····· 73
〈표 4-4〉 선급별 상태별 연료 소모량 ····· 74
〈표 4-5〉 선급별 접안 시간 및 항차수 ····· 74
〈표 4-6〉 주요 항만별 선박유 공급 가격(2025년 9월 기준) ····· 75
〈표 4-7〉 선급별 상태별 CO_2 배출량 ····· 76
〈표 4-8〉 선급별 상태별 SOx 배출량 ····· 76
〈표 4-9〉 선급별 상태별 NOx 배출량 ····· 76
〈표 4-10〉 선급별 상태별 PM 배출량 ····· 77
〈표 4-11〉 선급별 정박시 오염물질 배출 원단위 ····· 77
〈표 4-12〉 오염물질별 사회적 비용 원단위 ····· 77
〈표 4-13〉 온실가스 사회적 비용 원단위 ····· 78
〈표 4-14〉 부산항 신항의 평균 접안 시간과 평균 하역량(최근 3개년 평균) ····· 79
〈표 4-15〉 without case 하역 생산성 ····· 79
〈표 4-16〉 with case 하역 생산성 ····· 80
〈표 4-17〉 하역 시간 절감 효과 ····· 80
〈표 4-18〉 용선료 절감 효과 ····· 80

〈표 4-19〉 선박 운영비용 중 고정비 절감 효과 ····· 81
〈표 4-20〉 선박 운영비용 중 유류비 절감 효과 ····· 81
〈표 4-21〉 선박 재항 시간 절감 편익 ····· 81
〈표 4-22〉 NOx 배출 저감 편익 ····· 82
〈표 4-23〉 SOx 배출 저감 편익 ····· 82
〈표 4-24〉 PM 배출 저감 편익 ····· 82
〈표 4-25〉 CO_2 배출 저감 편익 ····· 83
〈표 4-26〉 선박 배출 대기오염 저감 편익 ····· 83
〈표 4-27〉 환경비용 절감 편익 도출 프로세스 ····· 84
〈표 4-28〉 환경비용 절감 편익의 기본 산정식 ····· 85
〈표 4-29〉 오염물질별 사회적 비용 원단위 ····· 85
〈표 4-30〉 온실가스 사회적 비용 원단위 ····· 86
〈표 4-31〉 무인자동화 탄소배출량 ····· 87
〈표 4-32〉 안벽크레인 제원 및 운영조건 ····· 88
〈표 4-33〉 환경부 EPA 배출계수(디젤 구동 기준) ····· 89
〈표 4-34〉 온실가스 감축 편익 산정 ····· 89
〈표 4-35〉 대기오염물질 저감 편익 산정 ····· 90
〈표 4-36〉 배출량 변화 및 환경편익 산정 ····· 90
〈표 4-37〉 TEU당 환경편익 ····· 91
〈표 4-38〉 안전사고 감소 편익 도출 프로세스 ····· 92
〈표 4-39〉 연도별 항만하역 재해발생 추이 ····· 92
〈표 4-40〉 안전사고 감소 편익 기본 산정식 ····· 93
〈표 4-41〉 컨테이너부두 사고현황(2001~2023) ····· 94
〈표 4-42〉 안벽 스마트화에 따른 도수율 계산 ····· 96
〈표 4-43〉 산업재해 비용 구성 ····· 97
〈표 4-44〉 사망사고 비용 ····· 98
〈표 4-45〉 중상사고 비용 ····· 99
〈표 4-46〉 경상사고 비용 ····· 100
〈표 4-47〉 연평균 근로시간 계산 ····· 101
〈표 4-48〉 스마트화에 따른 근로자 1인당 연간 사고 절감 건수 ····· 101

〈표 4-49〉 사고 유형별 절감 건수 ····· 102
〈표 4-50〉 근로자 1명당 연간 사망사고 및 중경상사고 절감 편익 ····· 102
〈표 4-51〉 근로자 1명당 총 안전편익 ····· 102
〈표 4-52〉 반자동화 대비 완전자동화 현장 인력 감소 ····· 103
〈표 4-53〉 완전자동화에 따른 안전편익 ····· 104

그림 목차

〈그림 1-1〉 본 연구의 흐름도 ····· 8
〈그림 3-1〉 컨테이너터미널 화물처리 프로세스 ····· 59

요 약

스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구

안승현 · 김가현 · 김윤지

1. 연구의 배경 및 목적

1) 연구의 배경

- **세계 해운·항만 시장의 급격한 변화(선박 대형화, 해운동맹 재편, 글로벌 공급망 재구성 등)에 따라 스마트항만이 경쟁력의 핵심 요소로 부상**
  - 스마트항만은 단순한 하역 처리 능력이 아닌 AI, IoT, 빅데이터, 자동화 설비 등 첨단기술을 활용하는 항만
  - 특히 코로나19 팬데믹 기간에 스마트항만은 안정적 운영을 유지하고 회복탄력성의 우수성을 보여준 바 있음
- **그러나 현행 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」과 「교통시설 투자평가지침」은 스마트항만의 혁신적 특성과 다양한 편익을 적절히 반영하지 못함**
  - 기존 지침은 물동량 증가, 체선 감소, 운송비용 절감 등 전통적 편익에 한정, 데이터 기반 의사결정, 실시간 모니터링, 예측 기반 운영 최적화, 무인 자동화 운영 등의 가치는 제대로 평가되지 못함

- 더욱이 스마트항만은 초기 투자 비용이 높은 특성으로 인해 증가한 사업비는 비용에 반영되나 장기적·다차원적 편익은 측정되지 않아 첨단 장비와 새로운 기술을 도입하는 효과는 평가할 수 없는 문제 발생

▪ **해외 주요국에서는 스마트항만 도입의 정량적 편익 분석 사례가 축적되고 있으나 국내에는 부재**

- 국내의 경우, 스마트항만 개발로 기대되는 운영비 절감, 효율화, 안전사고 감소, 탄소 배출 저감 등의 편익 도출 및 정량화를 위한 연구 또한 부재

2) 연구의 목적

▪ **본 연구는 스마트항만 개발에 따른 효과를 체계적으로 분석하고 경제적 가치로 환산할 수 있는 방법론을 개발하여, 향후 예비타당성조사 및 투자 의사결정에 활용할 수 있는 기반을 마련하는 것이 목적**

- 세부적으로 ① 국내외 타당성 평가 지침의 한계점 도출 및 개선 방향 제시, ② 스마트화에 따른 사업비 상승이 경제적 타당성에 미치는 영향 분석, ③ 스마트항만 개발 편익의 체계적 도출 및 정량화 방법론 개발, ④ 가상 사례 적용을 통한 효과 검증, ⑤ 관련 지침 개선방안 제시 등을 수행

2. 스마트항만 개발 편익 발굴 필요성 검토

1) 현행 타당성 평가 체계의 한계

▪ **현행 항만 개발사업의 편익 체계는 주로 물리적 시설 확충에 따른 하역능력(capacity) 증대 효과에 초점을 맞추고 있으며, 스마트 기술 도입에 따른 운영 효율성(efficiency) 증대 효과는 반영하지 못함**

- 현행 편익은 운영효율성(선박대기·재항비용 절감), 물류비용(내륙운송비·화물운송시간가치 절감), 수익증대(항만수익·물류시설 부가가치), 기타 특수편익(토지조성, 외해투기비용 절감 등)으로 구분

▪ **스마트화에 따른 사업비 증가(25.3%)는 비용으로만 반영되고 편익은 미반영되어 경제적 타당성이 왜곡됨**

- 4,000TEU급 3선석 가상 터미널 분석 결과, 완전 자동화 시 총사업비 약 2,137억 원 증가
- 선행 예비타당성조사 사례에서 사업비만 25.3% 감액 시 B/C가 0.97→1.12, 0.89→1.09로 상승

▪ **국내 교통시설 평가 지침(도로, 철도, 공항, 친환경·신교통시스템 등) 상 스마트화·자동화 기술 도입에 따른 별도 편익 항목이 부재**

- 특히 항만 부문은 다른 교통 부문 대비 스마트화·자동화의 필요성과 도입 효과가 명확함에도 현행 편익 체계는 이를 전혀 반영하지 못함

2) 해외 SOC 타당성 평가 지침 분석

▪ **EU는 경제·환경·사회 부문에서 10개 편익 항목(여객 시간, 화물 운송 시간, 운영비, 환경오염, 기후변화, 안전 등)을 제시하나, 스마트화 효과는 정성적 평가 수준**

- 정량 항목은 시간가치, 오염물질 단가, 사고비용 등의 원단위를 적용하여 화폐화하나, 운영 신뢰성, 에너지 효율성 등 스마트화 고유 효과는 미반영

▪ **미국은 구체적 원단위(사망사고 $13.2M/인, $PM_{2.5}$ 배출 $928,000/ton 등)를 제시하나, 항만 스마트 기술의 다차원적 가치 반영 체계는 부재**

- 항만 전기화 프로그램에서 대형 프로젝트의 경우 BCA 제출을 요구하고 있으나, 스마트 기술 도입 효과는 별도로 다루지 않음

- **일본은 운송비용 절감, 안전성 향상, 영업이익 증가 편익을 명시하나, 스마트 기술 고유 편익은 별도로 다루지 않음**
  - 배출저감 효과는 육상 및 해상 운송거리 단축, 선박 운영 효율화에 따른 배출량 감소량에 단가를 적용하여 산정하나, 스마트 기술 고유의 편익은 별도로 다루지 않음
- **주요 선진국에서조차 스마트항만 개발 효과를 평가 지침에 반영하지 못하고 있어, 본 연구를 통한 체계적 정량화 방법론 개발이 국내외 평가 체계 개선에 기여할 필요**

3. 스마트항만 개발 편익 산정 방법론 개발

1) 스마트항만 개발 편익 도출

- **해외 연구들은 스마트항만의 다양한 효과를 제시하였으나, 타당성 평가에 적용 가능한 구체적 정량 산정 방법론과 원단위는 제시하지 못함**
  - Knatz, Notteboom, & Pallis(2024)은 32개 터미널 설문을 통해 안전 향상, 비용 절감, 환경개선 등을 도출
  - Schenk et al.(2020)은 미국 4개 항만 전력화 분석을 통해 NOx·CO_2e 감소 등 환경·경제적 편익을 정량화
  - International Transport Forum(2021)은 53개 터미널 분석을 통해 4개 범주의 효과를 제시하나, 구체적 산정 방법론은 부재
- **국내 컨테이너 터미널 운영사(DGT, BCT 등) 실무자 대상 자문회의를 통해 ①생산성 향상, ②운영비용 절감, ③안전사고 절감, ④환경비용 절감 등을 스마트항만 개발 편익 후보군으로 도출**

▪ **해외 사례 및 전문가 자문을 통해 ①하역 생산성 향상, ②환경비용 절감, ③안전사고 절감을 스마트항만 개발의 핵심 편익으로 도출**

- 하역 생산성 향상 편익은 DTQC 도입 및 피닝스테이션 작업 시간 단축으로 화물 처리 속도가 증가하여 선박 대기비용 및 선박 배출 대기오염물질이 저감되는 효과
- 환경비용 절감 편익은 하역장비 전기 동력화를 통한 CO_2, SOx, NOx, PM 등 오염물질 저감에 따른 사회적 비용 절감을 의미
- 안전사고 절감 편익은 무인화·자동화를 통한 고위험 작업 환경 개선으로 안전사고 감소에 따른 사고 처리 비용 절감을 포함
- 운영비용 절감의 경우, 인건비, 에너지 비용 등 절감 효과가 있으나 현행 평가 체계의 비용(Cost) 항목에 이미 반영되므로 편익(Benefit)으로는 중복 계상하지 않음

2) 편익별 산정 방법론 개발

▪ **하역 생산성 향상 편익**

- 산정 개념: 하역생산성 향상 편익은 자동화 장비 도입으로 컨테이너 처리 사이클타임이 단축되어 선박 재항 시간이 감소하는 효과
- 산정 방식은 다음과 같음

> 선박 재항 비용 절감(용선료+운영비용×하역시간 절감) + 선박 배출 대기오염물질 저감(오염원별 배출량×사회적 비용 원단위×하역시간 절감)

- 생산성 향상률: DTQC 도입(3% 향상) + 피닝스테이션 작업시간 단축(105초 절약) = 약 4.3% 향상
- 산정 결과: 가상 터미널(연 267만TEU) 기준 선박 재항 비용 절감 33.2억 원, 선박 배출 저감 5.3억 원

▪ **환경비용 절감 편익**

- 산정 개념: 디젤 구동 안벽크레인을 재생에너지 기반 전기구동 무인 안벽 크레인으로 전환하여 대기오염물질 및 온실가스 배출을 저감하는 효과
- 산정 방식은 다음과 같음

> 대기오염물질 저감 편익(오염물질별 배출량 변화×사회적 비용 원단위) + 온실가스 감축 편익(CO_2 배출량 차이×탄소 사회적비용 원단위)

- 원단위: NOx 15,000원/kg, SOx 35,000원/kg, PM 73,500원/kg, CO_2 202,000원/ton
- 산정 결과: TEU당 1,580원, 연간 약 42.2억 원(온실가스 감축 99.7%, 대기오염물질 저감 0.3%)

▪ **안전사고 절감 편익**

- 산정 개념: 안벽 스마트화를 통해 작업자를 위험 구역에서 물리적으로 분리하여 사고 발생 가능성을 원천적으로 감소시키는 효과
- 산정 방식은 다음과 같음

> 근로자 수 × [(도수율 감소폭÷1,000,000) × 연간 근로시간 × 사고당 가중평균 비용]

- 사고 감소율: 22년간 컨테이너 부두 사고 11건 중 안벽 스마트화로 예방 가능한 사고 4건(36.4%)
- 산정 결과: 근로자 1명당 연간 148,832원, 가상 터미널(현장 인력 108.4명 감소) 기준 연간 약 1,613만 원

4. 스마트항만 개발 편익 산정 및 제도 개선방안

1) 가상 터미널 적용 결과

▪ 부산항 진해신항 1-1단계를 모델로 3선석(8,000TEU×3선석), 연 267만TEU 처리 규모의 가상 터미널을 대상으로 편익 산정

편익항목	연간편익(억 원)	비중(%)
하역 생산성 향상	38.5	47.6
환경비용 절감	42.2	52.2
안전사고 절감	0.2	0.2
합계	80.9	100

자료: 저자 작성

▪ 선행 예비타당성조사 사례에 본 연구 편익 반영 시 B/C가 0.97에서 1.15 수준으로 상승하여 경제적 타당성 확보 가능성 제고

2) 제도 개선방안

▪ 선박 재항 비용 절감 편익 산정 범위의 확대 및 현실화

- 자동화 장비 도입에 따른 하역 생산성 향상 편익을 신규 독립 항목으로 신설
- 선박 재항 비용 산정 범위를 용선료 + 선박 운영비용(고정비, 유류비) + 선박 배출 대기오염물질 사회적 비용으로 확대
- 컨테이너 사이클타임 등 필수 통계자료 수집·관리를 위한 법적 근거 마련

▪ 환경비용 절감 편익 신설 및 표준화

- '항만 장비 동력 전환에 따른 환경비용 절감 편익'을 정량 평가 항목으로 신설

- QC뿐만 아니라 TC, AGV, SC 등 주요 하역장비의 전동화·자동화 전환 효과 포함
- 대기오염물질 및 온실가스의 사회적 비용 원단위를 국내외 공인 연구 결과 기반으로 표준화

▪ **안전사고 감소 편익 평가 체계 도입**

- 안전사고 감소 편익을 정량적 평가 항목으로 도입
- 「중대재해처벌법」에 따른 처벌 등 화폐가치 평가 어려운 요인은 정성 평가에 반영

▪ **평가 방법론 제도화를 위한 추진 체계**

- 해양수산부, 기획재정부, 국토교통부, 한국개발연구원, 한국해양수산개발원 등이 참여하는 '스마트항만 타당성 평가 제도개선 협의체' 구성 및 정례 운영

5. 결론 및 정책제언

1) 연구의 핵심 결론

▪ **현행 타당성 평가 체계는 물리적 인프라 확충 중심으로 설계되어 스마트 기술의 혁신적 가치를 평가하지 못하며, 국내외 모두 스마트항만 개발 효과를 체계적으로 평가하는 방법론이 부재**

▪ **본 연구는 기존 평가 체계에서 누락된 ①하역 생산성 향상, ②환경비용 절감, ③안전사고 절감 편익을 발굴하고, 실무 활용 가능한 구체적 산정 공식·원단위·적용 절차를 제시**

▪ **가상 터미널 적용 결과 연간 약 80.9억 원의 신규 편익 도출, B/C**

개선 효과를 확인하여 스마트항만 투자의 사회경제적 가치를 정량적으로 입증

2) 정책 제언

- **예비타당성조사 표준지침 등 관련 제도의 개정**
  - 신규 편익 항목(하역 생산성 향상, 환경비용 절감, 안전사고 감소 편익 등)을 독립된 정량 평가 항목으로 신설
  - 편익 산정 범위를 확대(선박 재항 비용에 운영비용 및 환경비용까지 포함)
- **데이터 수집 및 관리 체계 구축**
  - 「항만운송사업법」, 「항만법」 개정을 통해 터미널 운영사가 통계자료(사이클타임, 에너지 소비량, 사고 발생 빈도 등)를 의무적으로 제출할 수 있는 체계 구축
  - 국가 항만물류 통합 데이터 플랫폼 구축을 통한 공동 활용 체계 마련
- **항만 특화 편익 원단위를 과학적으로 산출하는 정부 주도 연구과제를 정기화하고, 개발된 원단위를 물가·기술 변화 등을 반영하여 3~5년 주기로 갱신 및 공식 고시**
  - 항만 특화 편익 원단위(스마트 기술 도입 효과, 대기오염물질·온실가스 사회적 비용, 사고 비용, 화물 시간가치 등) 개발
  - 물가상승률, 기술 변화, 정책 환경 변화 등을 반영한 주기적 갱신(3-5년) 및 공식 고시
- **해양수산부, 기획재정부, 국토교통부, 한국개발연구원, 한국해양수산개발원 등이 참여하는 '스마트항만 타당성 평가 제도개선 협의체'를 구성하여 방법론 검토·시범 적용·지침 개정 등을 협의**
  - 본 연구 방법론의 타당성 검토 및 보완

- 실제 예비타당성조사 시범 적용 및 결과 분석
- 지침 개정안의 세부 문구 조율 및 제도 변경에 따른 현장 혼란 최소화 방안 논의

▪ **후속 연구 및 시범사업 추진**

- 자동화 터미널 운영 데이터 확보 후 본 연구 방법론을 실증 검증하고, 실제 예비타당성조사 1~2건에 시범 적용하여 현장 적합성을 검증한 후 전면 확대 적용

EXECUTIVE SUMMARY

A Study on Methodologies for Estimating the Effects of Smart Port Development

Seung-Hyun An · Ga-Hyun Kim · Yoon-Ji Kim

1. Background and Purpose

1) Background

- With rapid changes in the global shipping and port market (vessel upsizing, shipping alliance restructuring, global supply chain reconfiguration, etc.), smart ports have emerged as a core element of competitiveness.
  - Smart ports extend beyond mere cargo handling capacity but utilize advanced technologies such as AI, IoT, big data, and automated equipment.
  - Particularly during the COVID-19 pandemic, smart ports maintained stable operations and demonstrated excellence in resilience.

- However, the current “Standard Guidelines for Preliminary Feasibility Studies of Port Sector Projects” and “Investment Evaluation Guidelines for Transport Facilities” fail to adequately reflect the innovative characteristics and diverse benefits of smart ports.
  - Existing guidelines are limited to traditional benefits such as increased cargo volume, reduced vessel delays, and lowered transportation costs, while the value of data-driven decision-making, real-time monitoring, prediction-based operational optimization, and unmanned automated operations is not properly assessed
  - Moreover, due to the high initial investment costs characteristic of smart ports, increased project costs are reflected in the cost side while long-term, multidimensional benefits remain unmeasured, making it impossible to evaluate the effects of introducing advanced equipment and new technologies.
- While major countries abroad have accumulated empirical evidence on quantitative benefit assessments of smart port implementation, Korea lacks comparable analytical frameworks for such assessments.
  - Korea also lacks research on identifying and quantifying the expected benefits of smart port development, including reduced operational costs, improved efficiency, fewer safety incidents, and lower carbon emissions.

2) Purpose

- This study aims to systematically analyze the impacts of smart port development and develop a methodology for converting them into economic values, thereby establishing a foundation for preliminary feasibility studies and investment decisions.
  - Specific objectives include: 1) identifying limitations of domestic and international feasibility assessment guidelines and proposing improvement directions; 2) analyzing how cost increases from smart transformation affect economic feasibility; 3) developing a methodology for systematic derivation and quantification of smart port development benefits; 4) verifying effectiveness through application to virtual case studies; and 5) recommending improvements to existing assessment guidelines.

2. Examining the Necessity of Identifying Smart Port Development Benefits

1) Limitations of the Current Feasibility Evaluation System

- The current benefit systemfor port development projects focuses primarily on cargo handling capacity increases from physical facility expansion, failing to reflect operational efficiency improvements from smart technology introduction.
  - Existing benefits are classified into operational efficiency

(reductions in vessel waiting time and port stay costs), logistics costs (reductions in inland transportation costs and cargo transit time value), revenue increases (port revenues and value added from logistics facilities), and other special benefits (land development, offshore dumping cost savings, etc.).

- Cost increases of 25.3% from smart transformation are reflected only as costs without corresponding benefits, distorting economic feasibility.
  - Analysis of a hypothetical three-berth terminal for 4,000 TEU vessels indicates that full automation leads to an increase of approximately 213.7 billion KRW in total project costs.
  - Previous preliminary feasibility studies demonstrate that reducing project costs by 25.3% alone raises B/C ratios from 0.97 to 1.12 and from 0.89 to 1.09.
- Current domestic guidelines for evaluating transportation infrastructure (roads, railways, airports, sustainable and emerging transportation systems) lack specific benefit assessment categories for smart and automated technologies.
  - While ports demonstrate greater necessity and more substantial implementation outcomes for smart and automated technologies compared to other transportation sectors, current benefit assessment frameworks do not incorporate these considerations.

2) Analysis of Overseas SOC Feasibility Evaluation Guidelines

- The EU guidelines identify 10 benefit categories across

economic, environmental, and social dimensions (including passenger time, freight transit time, operating costs, environmental pollution, climate change, and safety), but assesses smart transformation effects only qualitatively.

- Quantitative items are monetized by applying unit values for time value, pollutant unit costs, accident costs, etc., but do not reflect intrinsic smart transformation effects such as operational reliability and energy efficiency.

▪ The U.S. provides specific unit values ($13.2M per fatality, $928,000 per ton of PM2.5 emissions, etc.), but lacks a framework for reflecting the multidimensional value of port smart technologies.

- Although the Port Electrification Program requires BCA submission for large projects, the effects of smart technology adoption are not addressed separately.

▪ Japan specifies benefits including transportation cost reduction, safety improvement, and operating profit increase, but does not separately address benefits specific to smart technologies.

- Current methodologies estimate emission reduction benefits by applying unit costs to emissions saved through reduced transport distances and enhanced vessel operational efficiency, yet fail to capture the direct benefits from smart technologies.

▪ Given that even major advanced countries have not incorporated smart port development effects into their

evaluation guidelines, the development of a systematic quantification methodology through this study can contribute to improving domestic and international assessment frameworks.

3. Development of Methodology for Estimating Smart Port Development Benefits

1) Deriving Smart Port Development Benefits

- Although international studies have demonstrated diverse effects of smart ports, they have not provided concrete quantitative estimation methodologies and unit values that can be applied to feasibility assessments.
  - Knatz, Notteboom, & Pallis(2024) identified safety improvement, cost reduction, and environmental enhancement through surveys of 32 terminals.
  - Schenk et al.(2020) quantified environmental and economic benefits including NOx and CO_2e reductions through electrification analysis of four U.S. ports.
  - International Transport Forum(2021) identified effects across four categories by analyzing 53 terminals, yet does not offer specific calculation methodologies.
- Consultation meetings with domestic container terminal operators (DGT, BCT, etc.) identified: 1) productivity improvement, 2) operating cost reduction, 3) safety accident

reduction, and 4) environmental cost reduction as candidate smart port development benefits.

- Drawing on international cases and expert consultations, three core benefits of smart port development were identified: 1) improved cargo handling productivity, 2) reduced environmental costs, and 3) reduced safety accidents.

- Cargo handling productivity improvement benefits result from increased cargo processing speed through DTQC introduction and reduced pinning station operation time, leading to decreased vessel waiting costs and vessel emissions.
- Environmental cost reduction benefits represent social cost savings from reduced pollutants (CO_2, SOx, NOx, PM) through cargo handling equipment electrification.
- Safety accident reduction benefits include accident processing cost savings from fewer accidents due to improved high-risk work environments through unmanned and automated operations.
- While operating cost reductions include labor and energy cost savings, these are already reflected in the Cost component of the current evaluation framework and are not counted separately as benefits to avoid double counting.

2) Development of Estimation Methodology by Benefit Category

- Benefits from Improved Cargo Handling Productivity

- Estimation concept: Cargo handling productivity improvement

benefits represent the effect of reduced vessel port stay time resulting from shortened container handling cycle times through the introduction of automated equipment.

- The estimation method is as follows:

> Reduced vessel port stay costs (charter rate + operating costs × cargo handling time savings) + Reduced air pollutant emissions from vessels (emissions by pollutant × social cost unit value × cargo handling time savings)

- Productivity improvement rate: DTQC introduction (3% improvement) + pinning station operation time reduction (105 seconds saved) = approximately 4.3% improvement
- Estimation results: For a hypothetical terminal (2.67 million TEU annually), vessel port stay cost savings of 3.32 billion KRW and vessel emission reduction savings of 530 million KRW

▪ Benefits from Reduced Environmental Costs

- Estimation concept: The effect of reduced air pollutant and greenhouse gas emissions achieved through the conversion from diesel-powered quay cranes to electric unmanned quay cranes powered by renewable energy
- The estimation method is as follows:

> Air pollutant reduction benefits (change in emissions by pollutant × social cost unit value) + Greenhouse gas reduction benefits (CO_2 emission difference × carbon social cost unit value)

- Unit values: NOx 15,000 KRW/kg, SOx 35,000 KRW/kg, PM 73,500 KRW/kg, CO_2 202,000 KRW/ton
- Estimation results: 1,580 KRW per TEU, approximately 4.22

billion KRW annually (greenhouse gas reduction 99.7%, air pollutant reduction 0.3%)

▪ Benefits from Reduced Safety Accidents

- Estimation concept: The effect of fundamentally reducing accident occurrence probability by physically separating workers from hazardous zones through quay smart transformation
- The estimation method is as follows:

Number of workers × [(frequency rate reduction ÷ 1,000,000) × annual working hours × weighted average cost per accident]

- Accident reduction rate: Of 11 container terminal accidents recorded over 22 years, 4 accidents (36.4%) could be prevented through quay smart transformation
- Estimation results: 148,832 KRW annually per worker, with a hypothetical terminal (reduction of 108.4 on-site workers) yielding approximately 16.13 million KRW annually

4. Estimating Smart Port Development Benefits and Proposing Institutional Improvements

1) Results from Hypothetical Terminal Application

▪ Benefits were estimated for a hypothetical terminal with three berths (8,000 TEU × 3 berths) and an annual throughput of 2.67 million TEU, modeled on Busan Port Jinhae New Port Phase 1-1.

Benefit Item	Annual Benefits (100 million KRW)	Share (%)
Improved Cargo Handling Productivity	38.5	47.6
Reduced Environmental Costs	42.2	52.2
Reduced Safety Accidents	0.2	0.2
Total	80.9	100

Source: Prepared by author

- Incorporating the benefits identified in this study into previous preliminary feasibility study cases raises the B/C ratio from 0.97 to approximately 1.15, substantially improving the prospects for achieving economic feasibility.

2) Measures for Institutional Improvement

- Expanding and Updating the Estimation Scope for Vessel Port Stay Cost Reduction Benefits

- Establish cargo handling productivity improvement benefits from automated equipment introduction as a new independent benefit category
- Expand the vessel port stay cost estimation scope to include charter rates + vessel operating costs (fixed costs, fuel costs) + social costs of vessel air pollutant emissions
- Establish legal grounds for collecting and managing essential statistical data such as container cycle times

- Establishing and Standardizing Environmental Cost Reduction Benefits

- Establish ‘environmental cost reduction benefits from port equipment power conversion’ as a quantitative evaluation item
- Include the effects of electrification and automation conversion of major cargo handling equipment such as TCs, AGVs, and SCs, as well as QCs.
- Standardize social cost unit values for air pollutants and greenhouse gases based on domestic and international authoritative research findings

▪ Introducing a Safety Accident Reduction Benefit Assessment System

- Introduce safety accident reduction benefits as a quantitative evaluation item
- Incorporate factors that are difficult to monetize, such as penalties under the Serious Accidents Punishment Act, into qualitative assessments

▪ Implementation Structure for Institutionalizing the Evaluation Methodology

- Establish and regularly operate a ‘Smart Port Feasibility Evaluation System Improvement Council’ with participation from the Ministry of Oceans and Fisheries, Ministry of Economy and Finance, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Development Institute, and Korea Maritime Institute

5. Conclusions and Policy Recommendations

1) Key Findings

- The current feasibility assessment framework is designed around physical infrastructure expansion and thus cannot evaluate the transformative value of smart technologies. Furthermore, methodologies for systematically assessing smart port development effects are lacking both domestically and internationally.
- This study identified three benefit categories omitted from existing evaluation frameworks: 1) improved cargo handling productivity, 2) reduced environmental costs, and 3) reduced safety accidents and developed specific calculation formulas, unit values, and implementation procedures for practical application.
- Applying the methodology to a hypothetical terminal yielded approximately 8.09 billion KRW in new annual benefits and demonstrated B/C ratio improvements, providing quantitative evidence of the socioeconomic value of smart port investments

2) Policy Recommendations

- Revising Related Regulations Including Standard Guidelines for Preliminary Feasibility Studies

- Establish new benefit categories (cargo handling productivity improvement, environmental cost reduction, safety accident reduction, etc.) as independent quantitative evaluation items
- Expand benefit estimation scope to include operating costs and environmental costs in vessel port stay costs

▪ Building Data Collection and Management Infrastructure

- Establish a mandatory reporting system for terminal operators to submit statistical data (cycle times, energy consumption, accident occurrence rates, etc.) through amendments to the Port Transportation Business Act and the Port Act
- Develop a collaborative data utilization framework through the establishment of a national integrated port logistics data platform

▪ Institutionalizing government-led research projects to scientifically develop port-specific benefit unit values, with regular updates and official announcements every 3-5 years to reflect changes in inflation and technology.

- Develop port-specific benefit unit values (smart technology adoption effects, social costs of air pollutants and greenhouse gases, accident costs, cargo time value, etc.)
- Periodic updates (every 3-5 years) and official announcements reflecting inflation rates, technological changes, and policy environment changes

▪ Establishinga ‘Smart Port Feasibility Assessment System Improvement Consultative Body’ comprising the Ministry of

Oceans and Fisheries, Ministry of Economy and Finance, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Development Institute, and Korea Maritime Institute to coordinate methodology reviews, pilot implementations, and guideline revisions

- Validate and enhance the methodology developed in this study
- Conduct pilot application in actual preliminary feasibility studies and analyze results
- Refine detailed wording in the guideline amendments and discuss measures to minimize operational disruptions resulting from institutional changes.

▪ Advancing Follow-up Research and Pilot Project Implementation

- After securing operational data from automated terminals, empirically validate this study's methodology, conduct pilot applications in 1-2 actual preliminary feasibility studies to verify field applicability, and then proceed with full-scale implementation

01
서론

제1절 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경

세계 해운·항만 시장은 선박의 대형화, 해운동맹의 재편, 글로벌 공급망의 재구성 등으로 급격한 변화를 겪고 있다. 이러한 환경 변화 속에서 단순한 하역 처리 능력이 아닌 스마트 기술을 활용한 운영 효율성과 서비스 품질이 항만 경쟁력의 핵심 요소로 부상하고 있다. 스마트항만은 AI, IoT, 빅데이터, 5G급 이상 초고속 통신, 자동화·친환경 설비 등 첨단기술을 활용하여 항만 운영의 효율성, 안전성, 환경친화성을 획기적으로 향상시킬 수 있다.

특히, 코로나19 팬데믹은 항만의 운영 안정성 확보 차원에서 자동화, 스마트화에 따른 효과를 명확하게 확인한 계기가 되었다. 팬데믹 상황에서 인력 중심의 전통적 재래식 터미널들은 작업자 감염, 격리, 인력 부족 등으로 운영에 심각한 차질을 빚었으나, 자동화 설비를 갖춘 스마트항만들은 상대적으로 안정적인 운영을 유지하며 그 우수성을 입증했다.[1)]

이렇게 항만의 패러다임은 전통적 물리적 인프라 중심에서 디지털 기술 기반의 지능형 인프라로 전환되는 추세이다. 따라서 세계 주요 항만들은 스마트항만 구축을 위한 대규모 투자를 적극적으로 추진하고 있다. 이에 따라, 전 세계 스마트항만 시장은 2024년 기준 22억 3천만 달러 규모에서 연평균 25.8% 성장하여 2030년 79억 5천만 달러로 성장할 것으로 전망되고 있다. 특히, 아시아 태평양 지역 시장의 점유율은 2024년 기준 전 세계 대비 55.5%에서 2030년 58.0%까지 점유율이 증가할 것으로 예상되는 등 스마트항만 시장을 주도할 것으로 전망된다.[2] 우리나라 또한 국정과제 56,[3] 「항만기본계획」 등 정부 정책에서 스마트항만 구축을 핵심 과제로 설정하고, 부산항 등 주요 항만의 스마트화를 추진하고 있다.

한편, 현행 우리나라 항만 개발사업의 추진 여부를 판단하는 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」, 「교통시설 투자평가지침」 등 타당성 평가 관련 지침에서 검토하는 편익은 전통적인 항만 인프라에 초점이 맞춰져 있어, 스마트항만의 혁신적 특성과 다양한 편익을 적절히 반영하지 못하고 있다. 기존 지침들은 주로 물리적 시설 확충에 따른 직접적인 물동량 증가, 체선 감소, 운송비용 절감 등의 전통적 편익 항목에 한정되어 있으며, 스마트 기술이 창출하는 데이터 기반 의사결정, 실시간 모니터링, 예측 기반 운영 최적화, 에너지 효율화, 무인 자동화 운영 등의 혁신적 가치는 제대로 평가되지 못하고 있다. 특히 앞서 언급한 것처럼 팬데믹과 같은 위기 상황에서 입증된 운영 안정성과 회복탄력성의 가치는 현행 경제성 평가 체계에서 전혀 고려되지 않는 실정이다.

더욱이 스마트항만 개발은 기존 항만 개발에 비해 초기 투자 비용이 상대적으로 높은 특성이 있다. 첨단 자동화 설비, 디지털 인프라, 통합 플랫

1) 김보경·김근섭·강무홍(2022) 내용을 바탕으로 작성함
2) MARKETS AND MARKETS(2025) 내용을 바탕으로 작성함
3) 국정과제 56의 핵심 추진 과제인 “거점항만 조성”에서는 부산항 등을 친환경·스마트항만으로 조성하여 글로벌 물류허브화를 추진함

폼 구축 등에 상당한 초기 투자가 필요하지만 이에 따른 효과와 편익은 장기적이고 다차원적으로 발생한다. 그러나 현행 타당성조사 체계에서는 이러한 장기적, 다차원적 편익이 적절히 측정되고 반영되지 못하고 있다. 광양항, 부산항 진해신항 등 기존 항만 개발사업의 경제적 타당성 평가 결과를 살펴보면 스마트항만 개발에 따라 사업비는 증가하는데, 스마트항만 개발 편익은 고려되지 못하고 있는 실정이다. 즉, 현재 항만 개발사업의 타당성 평가 체계에서는 진보된 장비와 새로운 기술을 도입하는 효과를 반영할 수 없다. 따라서, 장래 북극항로 대응, 자율운항선박 대응 등을 위해 필요한 다양한 기술과 장비를 도입하기 어렵게 되고, 이는 곧 우리나라 항만의 경쟁력 약화를 초래할 수 있다.

현재의 문제는 국내에서 스마트항만 개발로 기대되는 운영비 절감, 운영 효율화, 안전사고 감소, 탄소배출저감 등 기대되는 편익을 도출하고, 정량화하는 연구 등이 부재한 것에 기인한다. 반면, 해외 주요국에서는 스마트항만 도입으로 인한 정량적 편익 분석 사례가 점차 축적되고 있다. 대표적으로, Chu et al.(2018)는 전 세계 주요 항만 운영사, 선사, 자동화 장비·소프트웨어 공급업체, 학계 전문가 등을 대상으로 설문조사를 통해 자동화 항만 도입의 효과를 정량적으로 측정하였다. 최근 미국, 유럽 등에서는 교통시설에 대한 투자 타당성 평가 지침에 스마트 기술·인프라 도입에 따른 편익을 고려하는 추세이다. 반면, 우리나라는 항만 분야를 비롯하여 도로, 철도, 교량 등 대부분의 SOC 개발사업의 타당성 평가 지침에 스마트 기술·인프라 도입에 따른 편익을 반영한 사례는 없다. 일부 연구에서 단편적으로 다루어진 것에 불과하며, 타당성 제도개선 등에 대한 연구는 거의 이루어지지 못하였다.

전 세계 항만산업은 지속적으로 경쟁이 심화하고 있고, 중국, 싱가포르 등 주변 국가에서도 대규모 스마트항만 개발을 추진하고 있다. 국제적인 경쟁에서 뒤처지지 않기 위해서는 우리나라도 스마트항만 개발에 지속적인

투자가 필요하다. 하지만, 현재 예비타당성조사 등 타당성 평가 제도에서는 스마트항만이 재래식 항만 대비 타당성이 부족하게 평가될 수밖에 없다. 따라서, 스마트항만 개발에 지속적으로 투자하기 위해서는 스마트항만 개발로 기대되는 다양한 가치와 편익을 체계적으로 발굴하고, 이를 경제적 가치로 환산할 수 있는 표준화된 방법론을 개발하고 타당성 평가 체계에 반영하는 것이 시급하다.

2. 연구의 목적

본 연구의 목적은 스마트항만 개발에 따른 효과를 체계적으로 분석하고, 이를 경제적 가치로 환산할 수 있는 방법론을 개발하여 향후 스마트항만 개발 사업의 예비타당성조사 및 투자 의사결정에 활용할 수 있는 기반을 마련하는 데 있다. 세부적인 연구의 목적은 다음과 같다.

첫째, 국내외 항만 등 교통시설 개발사업 타당성 평가 지침을 분석하여 현행 지침의 한계점을 도출하고, 스마트항만 개발 효과를 반영할 수 있는 개선 방향을 제시한다. 해외 주요 국가의 SOC 타당성 평가 지침에서 스마트 인프라 관련 편익을 어떻게 다루고 있는지 조사하고, 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」, 「교통시설 투자평가지침」 등 항만 개발 사업 관련 타당성 평가 지침 등의 현황과 한계점을 분석한다.

둘째, 항만의 스마트화에 따른 사업비 상승이 경제적 타당성에 미치는 영향을 분석한다. 기존 항만 대비 스마트항만 개발 시 추가되는 사업비 요소를 식별하고 그 규모를 추정하며, 사업비 증가에 따른 비용편익분석 결과 변화를 개략적으로 검토하여 스마트항만 개발의 경제성 확보를 위한 임계점을 도출한다.

셋째, 스마트항만 개발에 따른 다양한 편익 항목을 체계적으로 도출한다. 문헌 조사, 전문가 자문, 국내외 사례 분석 등을 통해 스마트항만 기술 도입에 따른 편익을 발굴하고 분류하여 스마트항만 개발 편익을 도출한다.

넷째, 스마트항만 개발 편익을 정량적으로 측정하고 화폐 가치로 환산할 수 있는 방법론을 개발한다. 각 편익 항목별 측정 지표와 산정식을 개발하고, 예상 편익에 적용할 수 있는 원단위를 도출한다. 또한, 이를 진해신항 등을 참고로 설정한 가상 사례에 대입하여 그 효과를 검토한다. 이를 통해 스마트항만 개발의 경제적 가치를 정량적으로 평가할 수 있는 실용적인 방법론을 개발한다.

다섯째, 스마트항만 개발 편익 산정 방법론의 제도화를 위한 관련 지침 개선방안을 제시한다. 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」, 「교통시설 투자평가지침」 등에 본 연구에서 개발한 방법론을 반영할 수 있는 개정 방안을 마련한다.

제2절 연구 내용과 방법

1. 연구 내용

본 연구의 주요 목적은 스마트항만 개발에 따른 다양한 효과를 체계적으로 분석하고, 이를 경제적 가치로 환산할 수 있는 방법론을 개발하여 타당성 평가 및 투자 의사결정에 활용할 수 있는 기반을 마련하는 것이다. 이러한 연구 목적 달성을 위해서 본 연구에서 검토되는 주요 내용은 다음과 같다.

제1장에서는 연구 배경과 목적, 연구 내용과 방법, 선행 연구와의 차별

성 등을 제시한다. 특히, 본 연구의 핵심 목표인 스마트항만 개발 편익 분석 방법론 개발을 위하여, 항만분야 및 유사 SOC 분야에서 수행된 국내외 주요 연구를 중심으로 검토한다. 이를 통하여 관련 연구의 한계점 등 시사점을 도출하고, 개선방안을 제시하는 등 선행연구와 본 연구의 차별성을 확보한다.

제2장에서는 스마트항만 개발 효과 평가 방법론 개발의 필요성을 살펴본다. 먼저 미국, EU 등 해외 주요 국가의 항만 개발사업 관련 타당성 평가 지침을 분석하여 경제성 평가 체계, 편익 구조 등을 살펴본다. 또한, 국내 항만 개발사업 타당성 평가 지침을 살펴보고, 국내 제도의 한계점과 개선 필요 사항을 도출한다. 또한, 스마트항만 개발에 따른 사업비 상승 규모 등 경제적 타당성에 미치는 영향을 분석한다. 이를 통하여, 스마트항만 개발사업 효과 평가를 위한 방법론 개발의 필요성을 제시한다.

제3장에서는 스마트항만 개발 편익을 도출하고, 편익을 정량화하는 방법론을 개발한다. 편익 항목 도출을 위한 방법론을 설계하고, 문헌 조사, 전문가 자문, 사례 분석 등 다각적 접근법을 활용한다. 도출된 편익을 전문가 자문 등을 통하여 검증하고, 각 편익 항목별로 측정 지표와 산정식을 개발하고, 관련 원단위를 도출하여 적용 방안을 제시한다.

제4장에서는 개발된 방법론을 가상의 터미널에 적용하여 평가하고, 본 연구에서 개발된 방법론을 관련 지침 등에 반영하기 위한 제도 개선방안을 검토한다. 진해신항 등의 사례를 참고하여 가상의 터미널을 설정하고, 본 연구에서 제안하는 방법론을 적용하여 항목별 편익을 산정하고, 비용·편익 분석 결과에 미치는 영향을 검토한다.

제5장에서는 본 연구의 결과를 종합적으로 정리하고 항만 개발사업을 추진하는 정부의 정책입안자와 항만공사 등 유관기관 등에서 활용할 수 있는 정책을 제언한다.

2. 연구 방법

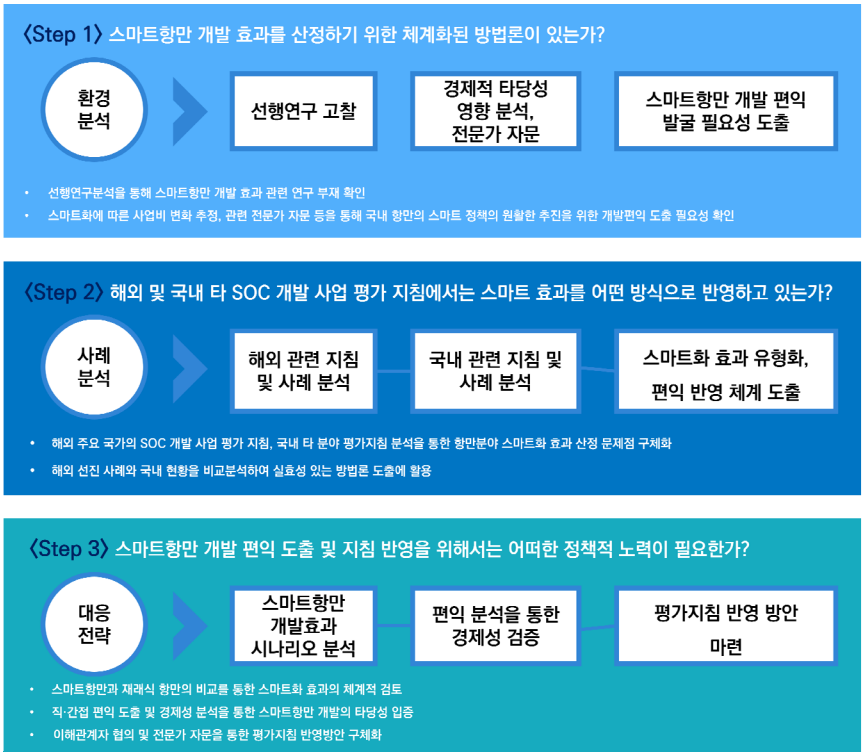
본 연구에서는 스마트항만 개발 효과 분석과 관련된 국내외 선행연구 및 항만개발사업 타당성 평가 지침, 평가 사례 등을 중점적으로 검토하였다.

먼저, 국내외 선행연구 및 관련 평가 지침 등을 분석하여 시사점을 도출하고, 국내 항만 개발사업 관련 타당성 평가 지침의 한계점과 개선 필요성을 제시한다. 특히, 실제 선행 예비타당성조사 사례 분석, 설계 전문가 자문 등을 통해 스마트항만 개발사업에서 하부 구조물, 상부 시설, 평면배치 차이 등으로 기인하는 사업비 변화를 분석한다.

다음으로는 사례분석 결과, 문헌조사, 연구진 브레인스토밍 등을 통하여 스마트항만 개발 효과를 유형화하고, 전문가 인터뷰 등을 통하여 스마트항만 개발 편익을 도출한다. 또한, 도출된 편익을 화폐가치로 환산하기 위한 원단위를 발굴하고, 편익의 크기를 평가할 수 있는 방법론을 제시한다.

도출된 방법론은 전문가 자문 등을 통하여 검증한다. 검증된 방법론을 선행 예비타당성조사 사업 등에 적용하여 도출된 신규 편익별 크기, 총편익의 규모 등을 산정하고, 경제적 타당성 분석 결과에 미치는 영향을 검토한다. 더불어, 본 연구를 통해서 개발된 편익 추정 방법론, 원단위 등을 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」, 「교통시설 투자평가지침」 등 관련 지침에 반영하기 위한 방안을 제안한다.

〈그림 1-1〉 본 연구의 흐름도



자료: 저자 작성

제3절 선행연구와 본 연구의 차별성

1. 선행연구 검토

1) 타 분야 스마트화 편익 관련 연구

전통적인 인프라 투자 평가는 명확하고 측정 가능한 효과에 집중해왔다. 건물을 짓는 데 드는 비용, 운영 과정에서 절약되는 인건비, 처리 시간 단축으로 인한 생산성 향상 등이 그 대표적인 예이다. 그런데 스마트 기술의 등장은 이러한 단순한 비용 편익 구조에 근본적인 변화를 가져오고 있다.

가장 먼저 주목해야 할 변화는 편익의 이중 구조화이다. 정태형 외(2012)가 BIM 기반 스마트 유지관리기술을 분석하면서 발견한 핵심은 스마트 기술이 두 가지 서로 다른 성격의 편익을 동시에 창출한다는 점이다. 업무 활용 편익은 당장 점검진단이나 결과평가 업무의 효율성을 높이는 즉시적 효과이지만, 데이터 활용 편익은 축적된 정보를 통해 향후 보수보강이나 교육훈련의 질을 높이는 장기적 효과이다. 이는 스마트 기술이 단순한 도구가 아니라 지속적으로 가치를 축적하는 자산의 성격을 갖는다는 것을 의미한다.

이러한 관점에서 보면 박성희 외(2013)의 열차 분리결합 자동화 기술 분석은 또 다른 중요한 통찰을 제공한다. 자동화 기술의 편익이 운영 주체에게만 귀속되는 것이 아니라 이용자에게도 확산된다는 양방향 편익 효과를 실증했기 때문이다. 운영 주체는 가변편성을 통한 운영비 절감이라는 직접 편익을 얻지만, 동시에 이용자들은 대기시간 단축이라는 서비스 개선 편익을 경험한다. 이는 스마트 기술이 단일 주체의 효율성 향상에 그치지 않고 생태계 전체의 가치를 높인다는 점을 보여준다.

더 나아가 현성식 외(2015)의 스마트 그리드 연구에서는 '건설 회피 편익'이라는 혁신적 개념이 등장한다. 전통적으로는 수요 증가에 대응하기 위해 새로운 발전소나 송배전 설비를 건설하는 것이 당연했다면, 스마트 그리드는 기존 인프라의 효율성을 극대화하여 신규 투자 자체를 불필요하게 만든다. 편익이 '무엇을 얻는가'에서 '무엇을 하지 않아도 되는가'로 개념이 확장된 것이다.

이러한 개념적 진화는 Zhang 외(2018)의 V2V 통신 연구에서 더욱 구체화된다. 가상 교통신호등 시스템이 20% 이상의 통행시간을 절약한 것은 단순히 신호등을 개선한 결과가 아니다. 개별 차량들이 네트워크로 연결되어 전체 시스템이 스스로 최적화를 이루어낸 결과이다. 이는 스마트 기술의 핵심인 네트워크 효과가 개별 요소의 성능 향상을 넘어서는 시너지를 창출한다는 점을 실증한다.

하지만 이러한 기술적 가능성이 곧 현실적 편익으로 직결되는 것은 아니다. 전호철(2019)의 전기자동차 환경편익 분석은 이론과 현실 사이의 간극을 보여주는 중요한 사례이다. 전기자동차의 환경편익이 이론적으로는 상당할 것으로 기대되지만, 실제 국내 전원구성을 반영하면 -0.41~10.83원/km 수준에 머물러 일반적인 예상보다 낮다는 결과가 나타났다. 이는 스마트 기술의 편익 분석에서 현실적 조건의 반영이 얼마나 중요한지를 보여주는 사례이다.

마지막으로 신승진 외(2022)의 자율주행차 선박하역 시스템 연구는 스마트 기술 편익의 동적 특성을 명확히 드러낸다. 2025년 120억 원에서 2035년 8조 7천억 원으로의 급격한 증가는 단순한 물량 확대가 아니라 기술 성숙도, 네트워크 효과, 학습 곡선이 복합적으로 작용한 결과이다. 이는 스마트 기술의 편익이 시간에 따라 비선형적으로 증가할 수 있다는 점을 시사한다.

결국 타 분야의 스마트화 경험이 전하는 핵심 메시지는 명확하다. 스마트 기술은 데이터 자산 축적, 네트워크 효과, 예측 능력이라는 기존 기술과는 질적으로 다른 편익을 창출하며, 이러한 편익은 직접-간접, 단기-장기, 공급자-사용자라는 다차원적 성격을 갖는다. 따라서 스마트항만의 편익 분석에서도 이러한 새로운 가치 창출 메커니즘을 체계적으로 포착할 수 있는 평가 틀이 필요하다.

〈표 1-1〉 타 분야 스마트화 편익 관련 연구

NO.	연구명(년도)	저자	선행연구 현황		
			연구목적	연구방법	주요연구내용
1	BIM 기반 스마트 유지관리기술 도입의 경제적 타당성 검토(2012)	정태형·김정환·서종원	BIM 기술 도입에 따른 업무 효율성 향상과 데이터 활용 가치를 정량화하여 투자 타당성 평가	• 편익 추정 요소 분석 • 원단위 산정	• 업무 활용 편익과 데이터 활용 편익으로 구분하여 BIM 기술의 경제적 타당성 분석
2	열차 분리결합 자동화 기술 도입에 따른 편익 추정(2013)	박성희 외	수요 맞춤형 가변편성 기술의 운영비 절감과 이용자 편익을 정량화하여 자동화 기술 도입 근거 제시	• 사례분석 (신안 산선) • 편익 산출	• 운영비 절감과 운행시간 단축을 통한 편익을 정량화하여 자동화 기술의 효과 입증
3	서울시 스마트 조명 관리 사업의 생활환경 개선 편익(2014)	최효연·유승훈	스마트 LED 조명 도입이 시민 생활환경에 미치는 편익을 화폐가치로 측정하여 사업 타당성 평가	• 조건부가치측정법 (CVM) • 스파이크 모형	• 스마트 조명의 생활환경 개선 편익을 가구당 연간 5,096.1원으로 산정
4	스마트 그리드 확산사업 편익 분석 연구(2015)	현성식 외	스마트그리드 구축에 따른 전력공급 안정성 향상과 환경개선 효과를 정량화하여 정책 효과성 입증	• 편익별 산정식 도출 • 사례 분석	• 전력 공급 편익과 환경편익으로 구분하여 스마트그리드의 다면적 효과 분석

NO.	연구명(년도)	저자	선행연구 현황		
			연구목적	연구방법	주요연구내용
5	Virtual Traffic Lights: System Design and Implementation(2018)	Zhang et al.	V2V 통신 기반 무인 교차로 관리시스템의 기술적 실현가능성과 교통 효율성 개선 효과 검증	• 프로토타입 구축 • 현장실험	• V2V 통신 기반 가상신호 등으로 기존 정지신호 대비 20% 이상 통행시간 절약
6	에너지 전환정책에 따른 전기자동차의 환경편익 추정(2019)	전호철	국내 전원구성을 반영한 전기자동차의 실제 환경편익 산정을 통한 적정 보조금 수준 도출	• 한계배출 분석 • 편익 이전법	• 발전원별·시간대별 배출계수를 적용한 현실적 환경편익 산정
7	Economic Analysis of Smart Roadside Infrastructure Sensors for Connected and Automated Mobility (2023)	Kloeker, Joeken, & Eckstein	선석 규모·할인율에 따른 적정 처리능력·NPV 산정	• LCCA • Monte Carlo • AHP	• 퀼른 기준 15년 LCC 5.8억~13.7억 €, CapEx 23% vs OPEX·업그레이드 77%. 카메라+레이더 조합이 비용 대비 효과 최적, 라이다 포함 시 리스크 증가
8	Intelligent Transportation Systems: Benefits Related to Traffic Congestion and Safety Can Be Limited by Various Factors(2023)	미국 연방정부 회계 감사원 (GAO)	미국 주 및 지방정부의 지능형교통시스템(ITS) 배치 현황과 교통혼잡 및 안전 편익의 제약요인 분석	• 설문조사 • 인터뷰 • 문헌검토	• ITS 기술별로 배치율의 큰 차이 존재(75% 이상 vs 30% 미만), 안전사고 5% 감소·통행시간 2~15% 단축 등 편익 확인되나 예산·리더십·상호운용성 등이 제약요인
9	수출입 자율주행차 선박하역 지원시스템 도입 편익 분석(2022)	신승진·노홍승·계동민	자율주행차 기반 항만하역 자동화 시스템의 사회경제적 편익을 산정하여 공공투자 근거 마련	• 수요예측 • 편익 항목별 산정	• 2035년 기준 연간 700~8,700백만 원의 편익 창출 전망

자료: 선행연구를 바탕으로 저자 작성

2) 항만 자동화 및 스마트화 효과 연구

항만 스마트화 연구는 자동화 단계에서 시작되어 점차 지능화, 통합화 단계로 진화하고 있으며, 각 단계별로 서로 다른 편익 창출 메커니즘이 작동하고 있다.

초기 자동화 연구들은 기술적 우위를 입증하는 데 집중하였다. 조성우 외(2014)는 AS/RS, OSS, Sky Rail 등 자동화 시스템의 B/C 비율이 모두 1.0을 초과한다고 분석하였으나, 선박 대기 비용 절감, 하역비용 절감 등 기존 편익 항목의 재구성에 머물러 자동화 고유의 새로운 편익 발굴에는 한계를 보였다. 이는 자동화를 단순한 기계적 대체재로 인식했기 때문으로, 자동화가 가져오는 운영 패러다임의 변화나 데이터 생성 능력 등은 간과되었다.

연구 관점의 중요한 전환은 An & Park(2021)의 공공부문 시각 도입이다. 이 연구에서는 '최대 처리능력'이 아닌 '적정 처리능력' 개념을 제시하며, 사회적 할인율 적용 시 9선석 기준 544천 TEU, 2선석 기준 600천 TEU의 손익분기점을 도출하여 규모의 경제 효과를 입증하였다. 이는 무분별한 대형화보다는 경제적 타당성을 확보할 수 있는 최적 규모를 찾는 것이 중요하다는 관점 전환을 보여준다.

그러나 OECD(경제협력개발기구) 산하 국제교통포럼(International Transport Forum)(2021)은 53개 자동화 터미널 분석을 통해 기존 통념을 뒤흔드는 결과를 제시했다. 자동화된 터미널이 기존 터미널보다 생산성이 7~15% 낮다는 '자동화의 역설'을 통해 자동화의 편익이 노동비용이 높은 지역에서만 유효한 조건부 효과임을 입증하였다. 이는 기술 결정론적 관점의 한계를 드러내며, 지역의 경제사회적 맥락을 고려한 평가가 필요함을 시사한다. 자동화 도입 시 사회적 비용(실업률 증가, 세수 감소)까지 고려한 순편익 개념의 중요성도 강조되었다.

Schenk et al.(2020)의 미국 4개 항만 전력화 연구는 항만 변화를 지역 경제 시스템의 구조적 변화로 접근한 의미 있는 시도이다. 투입산출분석 결과 2020~2050년 동안 경제활동과 고용이 2.1~4.8배 증가할 것으로 전망되어, 항만의 변화가 조선, 해운, 물류, 제조업 등 연관 산업으로 파급되는 효과를 정량화하였다. 이는 스마트항만의 편익이 항만 경계를 넘어 지역 전체로 확산됨을 보여준다.

최근 연구들에서는 스마트 기술 고유의 새로운 편익 영역이 부상하고 있다. 실시간 데이터 수집·분석을 통한 시스템 최적화, IoT와 AI를 활용한 예측정비를 통한 가동률 향상, 디지털 트윈을 활용한 시뮬레이션 기반 계획 수립, 무인화를 통한 24시간 연속 운영 능력 등이 그것이다. 이러한 편익들은 기존의 물리적 효율성 중심 평가로는 포착하기 어려운 질적으로 다른 가치를 나타낸다. 특히 데이터 자산의 축적과 활용, 네트워크 효과를 통한 전체 최적화, 예측 능력을 통한 위험 관리 등은 자동화 단계에서는 경험할 수 없었던 새로운 차원의 편익이다.

〈표 1-2〉 항만 자동화 및 스마트화 효과 관련 연구

NO.	연구명(년도)	저자	선행연구 현황		
			연구목적	연구방법	주요연구내용
1	자동화 컨테이너 터미널의 하역시스템에 따른 경제성 비교(2014)	조성우·원승환·최상희	다양한 자동화 하역시스템의 투자비용과 운영편익을 비교분석하여 최적 대안 도출	• B/C 분석 • 민감도 분석	• AS/RS, OSS, Sky Rail 세 대안 모두 B/C 〉 1.0으로 경제적 타당성 확인
2	Economic Analysis for Investment of Public Sector's Automated Container Terminal: Korean Case Study (2021)	An & Park	선석 규모·할인율에 따른 적정 처리능력·NPV 산정	• 비용편익 분석 (CBA) • NPV/민감도 분석	• 2.96% 기준 손익분기 처리량/선석: 9선석 544k TEU → 2선석 600k TEU. 양(+) NPV 범위: 530k~640k TEU. 직접편익(임대료·시설사용료)+간접편익(대기·연료·재고 절감, 도선·예선·라싱 등) – 총사업비. 규모의 경제 확인

NO.	연구명(년도)	저자	선행연구 현황		
			연구목적	연구방법	주요연구내용
3	Macroeconomic and Environmental Impacts of Port Electrification: Four Port Case Studies (2020)	Schenk et al.	미국 4개 항만의 전력화가 지역 거시경제와 환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 정책 의사결정 지원	• 투입산출 분석 (Input-Output Analysis) • eGRID 배출 모델링	• 항만 전력화로 2020~2050년 간 경제활동 2.1~4.8배 증가, 고용 2.1~4.8배 증가, NOx·GHG 대폭 감소하지만 SOx는 소폭 증가
4	Container Terminal Automation: Assessment of Drivers and Benefits (2024)	Knatz, Notteboom & Pallis	컨테이너 터미널 자동화 도입의 주요 동인과 실현 편익을 비교·분석하여 운영자 예상과 실제 효과의 차이를 규명	• 설문조사 • 통계분석 • 회귀분석	• 자동화 추진 동인: 안전, 단위처리비용 절감, 일관성 제고, 인건비 절감 • 실현 편익: 안전 향상, 비용 절감, 일관성 제고, 인건비 절감 등
5	Container Port Automation: Impacts and Implications (2021)	International Transport Forum	전 세계 자동화 터미널의 실제 성과를 실증분석하여 자동화 정책의 효과성과 한계 규명	• 53개 터미널 실증분석 • 정책분석	• 자동화 터미널이 기존 터미널 대비 7~15% 낮은 생산성을 보이는 역설적 결과 제시
6	Perspectives for ports development, based on automated container handling technologies (2023)	Gattuso & Pellicanò	전통적 하역장비와 자동화 장비의 전 생애주기 비용을 비교하여 자동화 도입의 경제적 타당성 평가	• 비용분석 • 사례연구	• 자동화 기술의 초기투자비는 높지만 운영비와 안전성에서 장기적 이점 확인
7	Operational productivity and financial performance of pure transhipment hubs versus gateway terminals (2023)	Notteboom et al.	터미널 운영 유형에 따른 자동화 효과의 차이를 규명하여 터미널별 맞춤형 자동화 전략 수립	• OLS 회귀분석 • 실증분석	• 환적 중심 터미널이 게이트웨이 터미널보다 수익성이 낮다는 역설적 결과 도출

NO.	연구명(년도)	저자	선행연구 현황		
			연구목적	연구방법	주요연구내용
8	Shore power for reduction of shipping emission in port: A bibliometric analysis (2024)	Wang et al.	항만 내 선박배출 저감을 위한 육상전력 기술의 연구 동향과 발전방향을 서지계량학적 방법으로 종합 분석	• 문헌검토 • 서지계량학 분석 • VOS viewer 네트워크 분석	• 육상전력 연구가 4개 영역(기술특성, 배출인벤토리, 실제적용, 에너지관리)으로 분화되어 발전하고 있으며, 규제와 인센티브가 주요 도입동력이나 경제적 타당성과 이해관계자 간 협력이 핵심 과제
9	Collaborative Optimization of Shore Power and Berth Allocation Based on Economic, Environmental, and Operational Efficiency (2025)	Zhang et al.	선박 접안 중 육상전력과 선석 배정의 협력적 최적화를 통한 경제적·환경적·운영적 효율성 동시 달성	• NSGA-III 알고리즘 • TOPSIS 방법	• 육상전력 연결 수를 선석 수의 80%로 설정 시 최적 균형점 도출, 연결 속도 50% 개선으로 대기시간 16.39% 단축
10	From investment to net benefits: A review of guidelines and methodologies for cost-benefit analysis in the electricity sector(2025)	Leiva Vilaplana, Yang & Ackom	전력 인프라 투자 프로젝트의 비용편익분석 가이드라인과 방법론을 체계적으로 검토하여 항만 등 인프라 분야에 적용 가능한 평가 프레임워크 제시	• 문헌검토 • PRISMA 가이드라인 분석	• 비용편익분석의 6단계 프로세스(범위정의, 영향정량화, 화폐화, 할인, 지표계산, 불확실성 처리) 제시 및 방법론적·규제적·영역별 장벽 분류를 통한 정책 권고안 도출

자료: 선행연구를 바탕으로 저자 작성

3) 스마트항만의 환경 및 지속가능성 효과 연구

스마트항만의 환경편익은 단순한 에너지 절약을 넘어 지역 환경 개선, 공중보건 향상, 탄소중립 기여 등 다차원적 가치를 창출하고 있다. 이러한 편익의 정량화와 체계화가 주요 연구 과제로 대두되고 있다.

김가현 외(2022)는 스마트항만 기술을 자동화 장비, 신재생에너지, IoT/ICT 시스템으로 분류하고 각 기술별 탄소 저감 효과를 정량화하였다. 부산신항 사례 분석에서 연간 약 15,000톤의 이산화탄소 저감 효과를 구체적으로 제시하여 스마트 기술의 환경기여도를 한번 더 확인했다.

가장 주목할 만한 연구는 Meng & Comer(2023)의 시애틀항과 뉴욕/뉴저지항 전면 전기화 분석이다. $PM_{2.5}$ 배출이 69~75% 감소하고 지역 대기질이 0.3~0.82$\mu g/m^3$ 개선되어, 연간 3~16명의 조기사망을 예방하고 2,700만~1억 5천만 달러의 건강 편익을 창출할 것으로 분석하였다. 이는 항만 스마트화의 편익이 운영 효율성을 넘어 지역사회 삶의 질 향상으로 확장될 수 있음을 보여준다.

Zhang 외(2024)는 중국 39개 항만 대상 실증분석에서 스마트항만 정책이 탄소배출효율성을 유의하게 개선했으며, 특히 연안 지역, 대도시, 중간 경제발전 수준 도시에서 효과가 크다는 결과를 제시하였다. 이는 스마트항만의 환경효과가 지역 특성에 따라 차별적으로 나타날 수 있음을 의미한다.

이들 연구에서 도출되는 새로운 환경편익 영역은 시스템 차원의 탄소관리, 예측 기반 환경관리, 순환경제 기여, 생태계 서비스 보전 편익 등이다. 이는 기존의 단순한 에너지 절약 중심 편익 체계로는 포착하기 어려운 스마트 기술 고유의 환경 가치를 나타낸다.

〈표 1-3〉 스마트항만의 환경 및 지속가능성 효과 관련 연구

NO.	연구명(년도)	저자	선행연구 현황		
			연구목적	연구방법	주요연구내용
1	스마트항만 구축에 따른 탄소저감효과 연구(2022)	김가현 외 (2022)	탄소저감 효과 정량화	• 기술별 탄소저감량 산정 • 사례분석	• 부산신항 사례로 연간 약 15,000톤 CO2 저감 효과 도출
2	Electrifying ports to reduce diesel pollution from ships and trucks and benefit public health: Case studies of the Port of Seattle and the Port of New York and New Jersey (2023)	Meng & Comer	시애틀항과 뉴욕/뉴저지항의 전면 전력화 시 대기오염물질 배출저감과 건강편익을 정량적으로 분석	• goPEIT, SAVE • InMAP 모델 활용한 배출량 추정 및 건강영향 평가	• $PM_{2.5}$ 75%(시애틀)·69%(뉴욕/뉴저지) 감축, 지역 대기질 0.3~0.82 $\mu g/m^3$ 개선. 조기사망 연 3명(시애틀)·16명(뉴욕/뉴저지) 예방 → 건강편익 27백만 달러(시애틀), 150백만 달러(뉴욕/뉴저지)
3	The Impact of Digitalization on Smart Ports: Enhancing Efficiency, Sustainability, and Competitiveness in the Maritime Industry (2024)	Koritarov & Dimitrakiev	AI, IoT, 빅데이터 등 디지털 기술이 스마트항만 운영에 미치는 영향과 그 효과(효율성, 지속가능성, 경쟁력)를 분석	• 문헌검토 • 사례 분석	• 디지털화는 자동화·실시간 데이터 관리·예측 유지보수를 통해 항만 운영 효율성을 제고 • 에너지 관리·배출 저감 등 지속가능성 강화와 안전·보안 향상에 기여 • 이해관계자 간 협력 생태계 구축으로 경쟁력 제고, 글로벌 무역에서 스마트항만의 전략적 중요성 확대
4	Port governance and sustainable development: The impact of port smartization on port carbon emission efficiency (2024)	Zhang, Yang & Wang	스마트화 정책의 탄소효율성 영향 평가	• Super-efficiency SBM • 일반화 DID	• 중국 39개 항만 대상으로 스마트화 정책의 탄소 배출 효율성 개선 효과 실증

자료: 선행연구를 바탕으로 저자 작성

4) 스마트항만 성과 평가 및 종합적 검토 연구

스마트항만의 복합적 성과를 체계적으로 평가하려는 시도들이 나타나고 있으나, 여전히 성과지표와 편익의 연결고리 구축, 다차원 편익의 통합적 가치 산정 등에서 방법론적 한계를 보이고 있다.

Makkawan & Muangpan(2021)는 태국 동부경제회랑(EEC) 항만을 대상으로 운영, 환경·에너지, 안전·보안의 3개 영역과 29개 성과지표(SPIs)를 제시하였다. 그러나 연구는 지표 도출과 개념적 모형 제시에 중점을 두고 있어, 성과지표와 편익의 연결고리가 명확하지 않아 투자 의사결정 지원에는 제약이 있다.

Al-Fatlawi & Motlak(2023)는 문헌분석과 사례 비교를 통해 스마트항만 기술(스마트 선박, 자동화 장비, 스마트 컨테이너, 에너지 효율화 등)이 운영 효율성, 생산성, 환경성 제고에 기여한다는 결론을 도출하였다. 다만 이 연구는 정성적 분석에 기반하여 스마트 기술 도입 효과를 개념적으로 설명하는 연구로 생산성 증대의 경제적 가치 환산 과정은 수행되지 않았다.

Alzate 외(2024)는 콜롬비아 항만 분석에서 운영효율성과 환경성과 간 0.84의 강한 양의 상관관계를 확인하여 효율성과 지속가능성이 상호 보완적 관계임을 입증하였다. 이는 스마트항만에서 경제적 목표와 환경적 목표가 시너지를 창출할 수 있음을 시사한다.

기존 연구에서는 다차원적 성과의 통합적 가치 산정, 성과지표와 편익의 연결고리 구축, 시너지 효과의 정량화, 동적 편익 모델 구축 등의 방법론적 과제가 반영되지 않았다.

〈표 1-4〉 스마트항만 성과 평가 및 종합적 검토 관련 연구

NO.	연구명(년도)	저자	선행연구 현황		
			연구목적	연구방법	주요연구내용
1	A Conceptual Model of Smart Port Performance and Smart Port Indicators in Thailand (2021)	Makkawan & Muangpan	성과지표 개발 및 평가체계 구축	• 문헌분석 • 인터뷰 • 지표 개발	• 스마트항만 성과 측정을 위한 3대 영역(운영, 환경·에너지, 안전·보안)과 29개 세부지표 도출 • 지표별 측정변수와 적용 방안을 제시하여 항만 관리·운영 성과평가의 기초 틀 마련
2	Smart Ports: towards a High Performance, Increased Productivity, and a Better Environment (2023)	Al-Fatlawi & Motlak	스마트항만 기술이 효율성 및 생산성 등에 미치는 효과를 규명	• 문헌분석 • 사례비교	• 스마트선박, 자동화 장비, 스마트 컨테이너, 에너지 효율화 등 스마트항만 핵심 기술영역 도출 • 유럽-아시아 항만 사례 비교를 통해 자동화 장비와 스마트 컨테이너 도입의 생산성 증대와 비용 절감 효과 확인
3	Operational Efficiency and Sustainability in Smart Ports: a Comprehensive review (2024)	Alzate et al.	효율성과 지속가능성의 관계 분석	• 데이터포락분석 (DEA) • 상관관계 분석	• 운영효율성과 환경성과 간 0.84의 강한 양의 상관관계 확인

자료: 선행연구를 바탕으로 저자 작성

2. 본 연구의 차별성

기존 선행연구들을 종합적으로 검토한 결과, 스마트항만 편익 분석 분야에는 여러 한계점과 제도적 공백이 존재함을 확인할 수 있다. 첫째, 타 분야 스마트화 연구들은 개별 기술의 직접적 효과 규명에는 성과를 거두었으나 기술 간 상호작용이나 시스템 통합 효과는 간과하였으며, 항만 분야 연

구들도 자동화 장비의 직접적 비용 절감이나 단일 차원의 성과 평가에 머물러 스마트항만의 복합적 특성을 반영한 포괄적 편익 분석은 부족한 상황이다.

둘째, 현행 국내 항만 개발사업 타당성 평가 체계의 구조적 한계가 존재한다. 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」과 「교통시설 투자평가지침」은 물리적 시설 확충에 따른 전통적 편익에 집중되어 있어, 데이터 기반 의사결정 개선, 예측정비를 통한 가동률 향상, 시스템 통합을 통한 최적화 효과 등 스마트 기술 고유의 편익들이 평가에서 누락되고 있다. 이로 인해 스마트항만 개발의 초기 투자비 증가는 비용으로 계상되는 반면, 그에 따른 편익은 제대로 인정받지 못하는 구조적 불균형이 발생하고 있다.

셋째, 분야 간 편익 평가의 형평성 문제가 두드러진다. 안전편익의 경우 도로·철도 분야에서는 교통사고 감소 편익이 주요 평가 항목으로 정착되어 있으나 항만 분야에서는 스마트항만의 안전성 향상 효과가 정량적으로 평가되지 않고 있다. 환경편익 측면에서도 항만 분야는 준설토 외해투기 관련 편익에 국한되어 있는 반면, 타 교통시설에서는 대기오염물질 및 온실가스 감축 편익이 표준화된 원단위를 적용하여 체계적으로 평가되고 있어 분야 간 격차가 명확하다.

따라서 본 연구는 이러한 한계들을 극복하기 위해 기존 교통시설 평가 체계와의 정합성을 확보하는 접근을 시도한다. 도로·철도 분야에서 검증된 편익 산정 방법론을 항만 특성에 맞게 적용하고, 스마트항만 고유의 편익 영역들을 체계적으로 분류하여 정량화 방안을 제시한다. 또한 연구 결과를 기존 타당성 평가 지침에 반영할 수 있는 구체적 개선방안을 제시하여 실제 정책 제도 개선에 기여하고자 한다.

〈표 1-5〉 선행연구와 비교 및 본 연구의 차별성

구분	선행연구	본 연구
연구목표	• 개별 스마트 기술의 직접적 효과 규명 • 자동화 장비의 비용 절감 효과 분석 • 단일 차원의 성과 평가(운영 효율성 또는 환경성과) • 개념적 모형 및 지표 제시	• 스마트항만 개발 편익의 도출 및 정량화 • 기존 교통시설 평가 체계와의 정합성 확보 • 화폐 가치 환산 방법론 개발 • 타당성 평가 지침 개선방안 제시
연구대상	• 개별 스마트 기술(BIM, 자동화 장비, IoT 등) • 특정 항만의 자동화 시스템 • 단일 기술 영역의 효과	• 스마트항만 개발사업 전반 • 현행 체계에서 누락된 스마트항만이 가질 수 있는 고유 편익(하역생산성, 환경비용 절감, 안전사고절감)
연구범위	• 직접적 비용 절감(인건비, 운영비 등) • 물리적 효율성 중심 평가 • 개별 기술의 단기적 효과 • 정성적 또는 개념적 분석 수준	• 스마트항만 개발 편익 전반
연구방법	• 문헌연구, 사례분석 • B/C 분석, CBA, NPV 분석 • 설문조사 • 통계분석(회귀분석, DEA, DID 등)	• 문헌조사, 전문가 자문, 사례분석 • 편익별 측정지표·산정식·원단위 개발 • 가상 사례(진해신항 등) 적용 검증 • 예비타당성조사 표준지침 개정안 제시

자료: 선행연구를 바탕으로 저자 작성

02
스마트항만 개발 편익 발굴 필요성 검토

본 장에서는 스마트항만 개발 편익을 왜 발굴해야 하는지를 검토한다. 먼저, 현재의 항만 개발사업의 경제적 타당성 평가 지침을 분석하여, 스마트화를 평가할 수 있는 체계인지를 검토한다. 또한, 기존 예비타당성조사 사례를 분석하여 스마트화에 따라 사업 비용은 증가하고, 편익을 반영하지 못함에 따라 경제성 평가에 어떠한 영향을 미쳤는지 살펴본다. 그리고, 유럽, 미국, 일본 등 해외 주요 국가 SOC 개발 타당성 평가 지침을 검토하여 스마트항만 개발 편익 발굴의 필요성을 제시한다.

제1절 경제성 평가 관점의 영향 분석

1. 항만 개발사업의 편익 구조 분석

항만투자사업의 경제적 편익은 항만별 특성에 따라 차이가 있으며, 항만은 여러 시설이 상호 연계되어 복합적인 기능을 수행하는 구조적 특성을

갖는다. 항만부문의 주요 편익 항목은 운영 효율성 관련 편익, 물류 비용 관련 편익, 수익증대 관련 편익, 기타 특수편익으로 구분할 수 있다.

1) 운영효율성 관련 편익

선박대기비용 절감 효과는 항만 여건 미비로 인해 입출항 선박이 불필요하게 대기하는 시간이 줄어들면서 발생하는 편익을 말한다. 일반적으로 선박이 도착했을 때 선석이 다른 선박에 의해 사용 중인 경우, 정박지에서 선행 선박의 하역작업이 끝날 때까지 대기하는 시간을 의미하며, 이를 선석 혼잡으로 인한 체선비용이라고 한다. 이러한 비용은 대기행렬이론을 활용하여 이론적 확률분포와 실제 분포 간의 통계검정을 통해 추정하거나, 시뮬레이션 모형을 이용하여 산정할 수 있다.

선박재항비용 절감 효과는 선박의 선석 접안 및 하역 중 발생하는 비용으로, 하역시간에 따라 좌우된다. 항만하역시설 도입으로 하역 효율성이 향상되면 선박재항시간과 비용이 감소하며, 이는 항만개발 유무에 따른 재항시간 차이로 산정한다.

하역비용 절감 효과는 항만시설 부재 시 부선하역 방식으로 인해 발생하는 이중 비용, 즉 선박-부선 간 부선요금과 부선-육상 간 양적요금의 절감을 의미한다. 항만 건설을 통해 이러한 추가 하역비용이 제거되는 효과를 말한다.

〈표 2-1〉 운영효율성 관련 편익의 주요 내용 및 산정 방법

구분	편익항목	주요내용	산정 방법	비고
운영효율성 관련 편익	선박대기비용 절감 효과	입출항 선박의 불필요한 대기시간 감소로 인한 체선비용 절감	대기행렬이론을 이용한 이론적 확률분포와 실제분포 통계검정 또는 시뮬레이션모형 적용	선석 혼잡으로 인한 정박지 대기시간

구분	편익항목	주요내용	산정 방법	비고
운영효율성 관련 편익	선박재항비용 절감 효과	선박이 선석에 접안하여 하역서비스를 받는 동안 발생하는 비용 절감	(항만개발 미시행시 – 시행시) 선박재항시간 차이 × 선박재항비용 원단위	하역효율성 제고로 인한 재항시간 단축
	하역비용 절감 효과	부선하역 대비 직접하역으로 인한 이중 하역비용 절감	부선하역비용(부선요금 + 부선양적요금) – 직접하역비용	항만시설 미건설시 부선하역 가정

자료: KDI(2022c), 예비타당성조사 수행을 위한 세부지침 항만부문 연구, pp.256-268을 바탕으로 저자 재작성

2) 물류비용 관련 편익

내륙운송비용 절감 효과는 크게 두 가지 측면에서 발생한다. 하나는 기존 항만시설의 용량 부족으로 인해 타 항만으로 전환되었을 물동량이 신규 항만에서 처리되면서 화물의 출발지나 도착지까지의 내륙운송거리가 단축되어 나타나는 운송비 절감 효과이고, 다른 하나는 이러한 운송거리 감소로 인한 교통혼잡 완화에 따른 혼잡비용 절감 효과이다.

화물운송시간가치 절감 효과는 항만건설로 조기 접안하역이 가능해지면 선박대기시간이 감소되고 동시에 하역생산성이 개선되어 선박재항시간이 절감되면서 화물운송이 적기에 이루어지게 되는 효과이다. 항만 체증 시 양하 또는 선적 대기 화물에 대한 시간비용은 적기운송 지연으로 인해 발생하는 자본비용, 생산계획 차질비용, 고객이탈비용, 클레임비용 등을 모두 포함한다.

물류비 절감 효과는 항만 배후단지 건설을 통해 수송비, 상하역비, 셔틀비용 등이 감소하는 것을 의미한다. 배후물류단지 건설 전과 건설 후의 수송비와 상하역비의 차이로 산정되며, 화물차량의 대형화가 가능하게 되어 운행효율이 높아지는 효과도 포함한다.

〈표 2-2〉 물류비용 관련 편익의 주요 내용 및 산정 방법

구분	편익항목	주요내용	산정 방법	비고
물류비용 관련 편익	내륙운송비용 절감 효과	화물의 수요지/발생지까지의 내륙수송비 절감과 교통혼잡비용 감소	초과물동량 × (타 항만 이용시 – 신설 항만 이용시) 내륙운송비용 차이	국가교통DB 해상화물 내륙 기종점 활용
	화물운송 시간가치 절감 효과	적기수송 실현으로 인한 화물의 시간비용 절약	화물운송시간 단축분 × 화물 시간가치 원단위	자본비용, 생산계획 차질비용, 고객이탈비용, 클레임비용 포함
	물류비 절감 효과	항만 배후단지 건설로 인한 수송비, 상하역비, 셔틀비용 절감	(배후단지 건설 전 – 건설 후) 수송비 및 상하역비 차이	화물차량 대형화로 인한 운행효율 향상 포함

자료: KDI(2022c), 예비타당성조사 수행을 위한 세부지침 항만부문 연구, p.246, pp.270-281을 바탕으로 저자 재작성

3) 수익증대 관련 편익

항만수익 증대 효과는 환적화물을 유치할 경우 외국화물에 부과되는 선박입출항료, 화물입출항료 등을 통해 해외 자본이 유입되고 이에 따라 국가 차원의 부가가치가 증가하는 효과를 의미한다. 이는 정부의 항만사용료와 터미널운영사의 하역료와 마샬링료 및 부대수입 등으로 분배되며, 환적화물 관리료 명목으로 대리점료가 발생하고 타 부두 환적화물일 경우 TEU당 일정한 셔틀료 수입도 징수할 수 있다.

물류시설별 부가가치 발생 효과는 항만 배후단지 개발사업에 있어 장기보관창고, 배송센터, 조립가공단지 등 물류시설의 용도에 따른 부가가치 창출 규모를 편익으로 산정하는 것이다. 통계청에서 발표하는 물류시설별 부가가치를 적용하여 편익을 산정한다.

〈표 2-3〉 수익 증대 관련 편익의 주요 내용 및 산정 방법

구분	편익항목	주요내용	산정 방법	비고
수익증대 관련 편익	항만수익 증대효과	환적화물 유치를 통한 외화 수입 및 부가가치 창출	환적화물량 × TEU당 수익 원단위	선박입출항료, 화물입출항료, 하역료, 마샬링료, 대리점료, 셔틀료 포함
	물류시설별 부가가치 발생효과	배후단지 내 물류시설의 용도별 부가가치 창출	물류시설별 면적 × 통계청 발표 물류시설별 부가가치 원단위	장기보관창고, 배송센터, 조립가공단지 구분

자료: KDI(2022c), 예비타당성조사 수행을 위한 세부지침 항만부문 연구, pp.279-282을 바탕으로 저자 재작성

4) 기타 특수편익

토지조성효과는 항만시설 건설 과정에서 전면해상을 매립하여 조성된 매립부지 중 항만시설 외의 도시용지로 활용되는 경우의 경제적 편익이다. 조성토지 단가는 인근 지역의 공시지가를 기준으로 하는 방법과 건설에 투입된 조성원가를 기준으로 하는 방법으로 나뉜다. 보수적 접근에서는 공시지가와 조성원가 중 더 낮은 값을 채택하는 정책이 일반적이다.

이용객 지체감소효과는 여객터미널의 낙후 또는 부재로 인해 발생하는 여객의 CIQ 대기시간과 셔틀선박 이동시간의 손실에 대한 보상 개념으로, CIQ 처리시간 절감 편익, 겹침지체 절감 편익, 셔틀선박 이동시간 절감 편익으로 구분된다.

선박 대형화 효과는 미래 여객수요 증가에 대응하기 위해 현재 운항 중인 여객선의 대형화 또는 신규 여객선의 추가 투입으로 인한 편익으로, 2차선 투입비용 절감 효과와 대형선 내항이전비용의 절감 효과로 구분된다.

국제여객 유치효과는 크루즈 선박을 대상으로 하는 편익으로, 승객 대부분이 외국인으로서 기항지에 하선하여 소비지출을 하게 될 때 승객과 승무원이 관광활동을 하면서 지출하는 비용을 편익으로 산정한다.

외해투기비용 절감 효과는 준설토 투기장을 건설하지 않을 경우에 투기 가능한 지정해역까지의 투기비용과 개발 예정인 준설토 투기장에 투기하는 비용을 비교하여 산출하는 편익이다.

〈표 2-4〉 기타 특수 편익의 주요 내용 및 산정 방법

구분	편익항목	주요내용	산정 방법	비고
기타 특수 편익	토지조성 효과	매립을 통한 유휴부지 조성의 경제적 가치	min(인근지역 공시지가, 조성원가) × 활용 가능 부지면적	보수적 관점에서 낮은 값 채택
	이용객 지체감소 효과	여객터미널의 CIQ 대기시간 및 셔틀선박 이동시간 절감	(기존터미널 – 신축터미널) CIQ 소요시간 × 이용객 수 × 시간가치	CIQ 처리시간, 겹침지체, 셔틀선박 이동시간 절감으로 구분
	선박 대형화 효과	선박 대형화로 인한 운영비 절감 및 효율성 향상	2차선 투입비용 절감 + 대형선 내항이전비용 절감	여객수요 증가 대응용
	선박운항 거리 절감 효과	신규 위치 서비스로 인한 선박운항거리 단축	(기존 서비스 위치 – 신규 서비스 위치) 운항거리 × 유류비용 원단위	새로운 위치에서 항만서비스 제공시
	국제여객 유치효과	크루즈 승객의 관광소비 지출을 통한 지역경제 활성화	크루즈 하선 외국인 수 × 인당 지출비용	승객과 승무원의 관광활동 소비지출
	외해투기 비용 절감 효과	준설토 투기장 건설로 인한 투기비용 절감	지정해역 투기비용 – 준설토 투기장 투기비용	런던협약 96의정서에 따른 환경규제 고려

자료: KDI(2022c), 예비타당성조사 수행을 위한 세부지침 항만부문 연구, pp.244-249를 바탕으로 저자 재작성

5) 편익 구조 분석 결과

국내 항만개발 사업의 타당성 평가 지침에서 제시하고 있는 주요 편익 항목은 운영효율성 관련 편익, 물류비용관련 편익, 수익증대 관련 편익, 기타 특수편익 등이다. 현재 지침상의 편익은 재래식 항만 또는 반자동화 항

만의 개발 타당성을 평가하는 데는 적절하나, 스마트항만의 개발 타당성을 평가할 수 있는 편익은 부재한 것으로 판단된다.

따라서, 현재의 지침을 기준으로 평가한 광양항 테스트베드 사업, 진해신항 개발사업 등 최근의 완전 자동화 항만 개발사업의 예비타당성조사에서는 자동화 장비 도입에 따른 사업비 증가 영향은 반영되었으나, 개발 편익은 반영되지 못하였다.

2. 항만의 스마트화에 따른 사업비 증가 규모 추정

1) 사업비 증가 규모 검토 개요

앞서 강조한 것처럼 스마트화에 따른 사업비 증가가 타당성 평가에 어느 정도 영향을 주었는지 평가하기 위하여 기존 사례 분석을 통해 개략 사업비 증가분을 추정하였다.

(1) 기본 조건

항만의 스마트화에 따른 사업비 증가 규모를 추정하기 위하여 임의의 항만을 가정하고, 반자동화 터미널 및 자동화 터미널로 구분하여 사업비를 산정하고 비교하였다.

가상의 비교 검토 항만의 규모는 4천TEU 3선석(1,015m×600m)이다. 하부공, 호안공 등 공사비는 동일한 규모의 인천항만공사(2021)의 주요 공종을 참고하여 산정하였으며, 상부공 공사비 또한 동일한 규모의 여수광양항만공사(2023)을 기준으로 검토하였다. 장비비는 KDI(2022b)과 여수광양항만공사(2023) 등 공신력있는 공표자료를 참조하여 산정하였다.

(2) 항만사업의 비용 항목

사업의 비용은 건설기간 중 발생하는 공사비와 운영에 필요한 장비비로 구분되며, 각각의 항목은 아래 〈표 2-5〉와 같다.

〈표 2-5〉 사업비 비용항목

비용 항목			내 용
A.공사비	A-1 하부공	구체공	• 케이슨 제작 및 거치, 상치
		기초공	• 기초굴착, 사석투하 및 고르기 등 공사비
		지반개량공	• CY 등 부지조성구간 지반개량 공사비
		준설 및 매립공	• 안벽 기초 등 준설 및 배면 매립 공사비
		부대공	• 오탁방지막 등부표 등
	A-2 상부공	포장공	• Apron, CY 등 포장 공사비
		트렌스폰더	• 이송장비의 센서설치 공사비
		크레인 기초공	• ARMGC 기초공사비
		공급시설	• 급·배·오수 및 전기·통신 등
		부대공	• 펜스설치 및 차선도색 등
	A-3 호안공		• 안벽 측면 호안의 제체 및 기초공 공사비
B.장비비			• 자동화 단계별 안벽크레인, 야드크레인, 이송장비 등

자료: 저자 작성

2) 사업비 추정 결과

앞서 설정한 가상 항만 규모의 반자동화 터미널을 건설하는 데 필요한 총사업비는 845,712백만 원으로 추정되었다. 반면, 완전 자동화 터미널 개발에 필요한 총사업비는 반자동화 터미널 대비 25.3% 증가한 1,059,381백만 원으로 검토되었다. 하부공, 상부공, 호안공, 장비비 등 사업비의 구체적인 추정 결과는 부록에 수록하였다.

반자동화 터미널 대비 완전 자동화 터미널의 공사비 증가는 QC 대형화 및 DTQC 적용에 따른 광폭 케이슨 적용이 하부공 공사비 주요 증가 원인

이다. 상부 공사비 주요 증가 원인은 중하중 자동화 이송장비 적용에 따른 포장비용의 증가 및 트랜스폰더의 설치비용 등으로 검토되었다.

장비비는 안벽크레인, 이송장비의 구성에 따라 결정되며, STQC와 YT로 구성된 재래식 터미널 대비 DTQC와 AGV로 구성된 자동화 터미널이 상대적으로 높은 투자비가 요구되었다. 또한, 수평형, 수직형 등 터미널 평면 배치계획상 ARMGC의 소요 대수에 따라 장비비가 차이가 있었다.

〈표 2-6〉 총 사업비 집계표

단위: 백만 원, VAT포함

구 분			반자동화터미널	자동화터미널	비 고
A.공사비	A-1 하부공	구체공	108,618	129,751	
		기초공	33,457	36,667	
		기타 하부공	52,072	52,072	
		합 계	194,147	218,490	
	A-2 상부공	포장공	48,412	54,062	
		트렌스폰더	-	891	
		크레인 기초공	15,404	22,445	
		공급시설	57,063	57,063	
		부대공	4,096	4,096	
		합 계	124,975	138,557	
	A-3 호안공		7,380	7,380	-
	직접공사비		326,502	364,427	
	제경비		81,626	91,107	25%
	부가가치세		40,813	45,553	10%
	소 계		448,940	501,087	△52,147(△11.6%)
B.장비비	장비비		360,702	507,540	
	부가가치세		36,070	50,754	10%
	소 계		396,772	558,294	△161,522(△40.7%)
합 계			845,712	1,059,381	△213,669(△25.3%)

자료: 저자 작성

3. 경제적 타당성 관점의 사업비 증가 영향 검토

1) 영향 검토 개요

앞서 살펴본 것처럼 자동화 설비 도입 등 항만의 스마트화에 따라 사업비 증가 규모는 4천TEU급 3선석 기준으로 213,699백만 원 25.3%에 달한다. 이러한 총사업비의 증가가 경제적 타당성 평가에 미치는 영향을 검토하기 위하여 선행 예비타당성조사 사례에서 총사업비만 감액하여 B/C의 변화를 개략적으로 검토해 보았다.

본 연구에서 검토하는 사례는 KDI(2022a),[4] KDI(2022b)[5]이다. 두 사업을 검토 대상으로 선정한 사유는 국내 항만 개발 예비타당성조사 대상 사업 중에 AGV 도입을 전제로 검토한 대표적인 사례이기 때문이다.

2) 항만자동화 테스트베드 구축(광양항) 사례

KDI(2022a)는 국내 최초의 완전 자동화 항만 개발 및 항만자동화 테스트베드 구축 사업의 타당성을 평가하기 위하여 수행된 2022년도 예비타당성조사 사업이다. 장비 구성은 완전 자동화 터미널 운영을 위하여 이송 영역에 AGV를 도입하는 것으로 검토되었다. 경제성 평가 결과 총비용은 현재가치 기준으로 954,774백만 원, 편익은 현재가치 기준으로 924,157백만 원으로 분석되어, B/C는 0.97 수준으로 분석되었다.

4) KDI(2022a), 항만자동화 테스트베드 구축(광양항) 예비타당성조사
5) KDI(2022b), 부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사

〈표 2-7〉 항만자동화 테스트베드 구축 사업의 경제성 평가 결과

구 분	예비타당성조사
편익의 현재가치(백만 원)	924,157
비용의 현재가치(백만 원)	954,775
B/C ratio	0.97
NPV(백만 원)	-30,618
내부수익률(IRR)(%)	4.17

주: 할인율 4.5% 기준 분석 결과임.
자료: KDI(2022a), p.311.

KDI(2022a)에서 분석한 연차별 사업비에 앞서 분석한 반자동화터미널 대비 자동화터미널의 사업비 증가율 25.3%를 적용하고, 편익은 동일하다고 가정하여 B/C의 변화를 개략적으로 평가하였다. 다만, 상부 시설 공사비의 2%와 운영설비 교체 비용이 포함되는 운영비도 원칙적으로는 감액이 필요하나, 계산의 편의상 운영비는 KDI(2022a)의 값을 준용하였다. 결과적으로 사업비 감소에 따라서 B/C는 1.12로 증가하였다.

〈표 2-8〉 사업비 변화에 따른 항만자동화 테스트베드 구축 사업의 경제성 평가 결과

구 분	예비타당성조사	본 검토
편익의 현재가치(백만 원)	924,157	924,157
비용의 현재가치(백만 원)	954,775	828,279
B/C ratio	0.97	1.12

주: 할인율 4.5% 기준 분석 결과임
자료: 저자 작성

3) 부산항 진해신항(1단계) 건설사업 사례

KDI(2022b)는 국내 최초로 8,000TEU급 대형 선석으로 구성된 컨테이너 터미널 개발사업의 타당성을 평가하기 위하여 수행된 2022년도 예비타당성조사 사업이다. 장비 구성은 이전 광양항 사업과 동일하게 완전 자동화

터미널 운영을 위하여 이송 영역에 AGV 도입하는 것으로 검토되었다. 카보타지 유지, 부분 확대, 완전 확대 등 세 가지 시나리오에 따라 분석하였다. 경제성 평가 결과 시나리오별로 B/C는 0.89부터 1.01 수준으로 나타났다.

〈표 2-9〉 진해신항(1단계) 건설사업의 경제성 평가 결과

구 분	시나리오1 (카보타지 유지)	시나리오2 (카보타지 부분확대)	시나리오3 (카보타지 완전확대)
NPV(백만 원)	40,844	-195,967	-732,142
B/C	1.01	0.97	0.89
IRR(%)	4.56	4.24	3.52

주: 할인율 4.5% 기준 분석 결과임.
자료: KDI(2022b), p.434.

앞선 사례와 동일하게 진해신항(1단계) 사업에 대해서도 연차별 사업비에 앞서 분석한 반자동화터미널 대비 자동화터미널의 사업비 증가율 25.3%를 적용하고, 편익은 동일하다고 가정하여 B/C의 변화를 개략적으로 평가하였다. 가장 경제적 타당성이 부족한 것으로 분석된 시나리오 3에서도 B/C는 1.09로 나타났다.

4. 영향 분석 결과

앞서 살펴본 것처럼, 현재 항만 개발사업의 타당성 평가 체계에서는 자동화 장비 도입 등 스마트화에 따른 비용 증가분은 반영되고, 그에 반하여 기대되는 편익은 전혀 고려되지 못하고 있다. 이에, 항만의 운영을 효율화하고, 운영 안정성을 향상하기 위하여 자동화 설비를 도입하고, 첨단 기술을 적용할수록 경제적 타당성은 부족하게 나타나게 된다. 따라서, 현재의 평가체계로는 신규 스마트항만을 개발하고, 기존 항만을 스마트화하는 현대화 사업의 추진 동력과 근거를 확보하기 어렵다.

더욱이 본 연구에서는 자동화 장비 도입에 따른 증가분만 검토하였고, 5G급 이상 초고속 통신망 구축 비용, 친환경 설비, TOS, FMS 등의 도입 비용은 검토 자료의 부족으로 사업비 증가 분석에 포함하지 못한 점을 감안할 때, 총사업비 증가 규모는 조금 더 늘어날 것이고 이는 곧 경제적 타당성 감소로 이어지는 결과를 초래할 것이다. 따라서, 국내 항만 산업의 경쟁력 강화 등을 위한 지속적인 스마트항만 개발을 추진하기 위해서는 기대되는 편익을 발굴하고, 화폐 가치화하는 방법론을 개발해야 한다.

제2절 국내외 유사 지침 분석

1. 해외 SOC 개발사업 타당성 평가 지침 분석

1) 유럽[6)]

유럽연합 집행위원회(EC)는 EU 공동재원 사업의 일반 경제성평가 원칙과 부문별 적용 지침을 제공하는 「Economic Appraisal Vademecum 2021-2027」(이하 EAV)[7)]를 제정하였다.

이는 기존의 「Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects 2014-2020」(이하 CBA Guide)[8)]를 보완하는 지침으로, 평가 지침의 적용 유연성을 높이고, 편익 항목의 활용 범위 및 프로젝트 및 국가별 자율성, 환경·디지털 전환 등 정책 요소의 반영 가능성을 확대한 것이 특징이다. 다

6) European Commission(2014), European Commission(2021)의 자료를 바탕으로 저자 작성
7) European Commission(2014)
8) European Commission(2021)

만, 환경오염 저감과 스마트화에 따른 운영 신뢰성, 에너지 효율성 등의 효과는 정성적으로 평가하고 있다. CBA Guide(2014-2020)와 EAV(2021-2027)의 대표적인 차이점은 〈표 2-10〉과 같다.

〈표 2-10〉 EU 경제성 평가 지침 비교: CBA Guide vs EAV

구분	CBA Guide (2014-2020)	EAV (2021-2027)
지침 성격	규범적, 법적 의무 지침	유연한 권고형 참조 지침
편익 항목	분야별 정형화된 기준 제시	프로젝트·국가별 자율적 설정 가능
평가 방법	정량 중심의 CBA	CBA 외 CEA, MCA 등 병행 가능
할인율	Cohesion 국가 5%, 그 외 3%	국가 자율 설정, 미설정시 3% 권장
탄소 배출 단가	EUR 25-36/tCO_2	EUR 80/tCO_2 이상(연차별 증가)
신규 항목 반영	-	유지관리비(O&M costs) 신설, 배출단가 강화 등 정량 항목 확장
원단위 기준	EU 평균값 중심	국가별·JASPERS[9] 기준 병행 가능

자료: European Commission(2014), European Commission(2021)의 자료를 바탕으로 저자 작성

EAV에서는 도로, 철도, 항만 등 교통 인프라 분야에 대해 경제 영역, 환경 영역, 사회 영역으로 구분하여 총 10개의 편익과 산정 방식을 다음과 같이 제시하고 있다.

〈표 2-11〉 EU 지침 기반 교통 분야 편익 항목

영역	편익 항목	평가 방식	주요 내용
경제	여객 체감시간	정량	여객 이동시간 단축, 대기시간 최소화
	화물 운송시간	정량	화물 처리·운송 시간 단축 및 회전율 향상
	차량 운영비	정량	장비·차량 운영비 및 에너지 소비 절감
	광의 경제편익	정성	서비스 신뢰성, 연계성, 만족도 향상 등
	유지관리비	정량	운영·유지관리 비용 절감

9) JASPERS(Joint Assistance to Support Projects in European Regions)는 EU 및 EIB 등이 공동 운영하는 인프라 사업 지원 기구로, CBA 방법론 및 원단위 기준 등을 자문함

영역	편익 항목	평가 방식	주요 내용
환경	환경오염 및 지역 건강	정량	미세먼지, 질소산화물 등 유해물질 배출 저감
	기후변화	정량	CO2 배출 저감, 에너지 효율화 연계
	소음	정량	소음 발생 저감, 인근 거주자 및 이용자 영향 최소화
	기타 환경영향	정성	녹지·공간환경 개선 등 정량화 어려운 항목
사회	안전	정량	하역 및 운송 과정 안전성 향상, 사고 위험 저감

자료: European Commission(2021), pp.54-63의 자료를 바탕으로 저자 재작성

〈표 2-12〉 EU 지침 기반 편익 항목별 산정 방식 및 적용 기준

구분	편익 항목	산정 방식	적용 기준
경제	여객 체감시간	절감시간 × 시간가치(VOT)	단위: 시간 절감량
	화물 운송시간	절감시간 × 시간가치(VOT)	단위: 시간 절감량
	차량 운영비	단위 당 운영비 절감 × 물동량	단위: 거리 또는 중량
	광의 경제편익	정성적 평가(신뢰성, 예측성 등)	사례, 인터뷰, 만족도 등
	유지관리비	운영비 Before-After 차이	단위: 연간 운영비 차이
환경	환경오염 및 지역 건강	배출량 감축 × 오염물질 단가	단위: 배출량(kg, ton 등)
	기후변화	온실가스(GHG) 감축량 × 단가	단위: tCO_2e (단가: EUR 80+/tCO_2e)
	소음	노출 인구 또는 교통량 기반	단위: €/person, €/vehicle-km
	기타 환경영향	정성적 평가(전문가 판단 등)	사례 기반 판단
사회	안전	감소된 사고 건수 × 피해 단가	단위: 사고 유형별 피해 단가

자료: European Commission(2021) 및 European Commission(2014)을 바탕으로 저자 작성

정량 항목은 시간가치(VOT), 오염물질 단가, 사고비용 등의 원단위를 적용하여 화폐화하며, 정성 항목은 사례조사, 전문가 의견 등을 활용하여 평가하고 있다.

2) 미국[10)]

미국 교통부(U. S. Department of Transportation, USDOT)는 PIDP[11)]

10) U.S. Department of Transportation(2025)의 자료를 바탕으로 저자 작성

등 연방 보조금 사업 신청 시 대형 프로젝트의 경우 BCA(Benefit-Cost Analysis) 제출을 요구하고 있다. 이에, 「Benefit-Cost Analysis Guidance for Discretionary Grant Programs」[12]를 통해 교통 인프라 전반의 비용 편익분석 원칙과 편익·비용 산정 방법을 제시하고 있다.

〈표 2-13〉 미국교통부 BCA 지침 기반 편익 항목

편익 항목	평가 방식	주요 내용
안전 향상	정량	사고로 인한 사망, 부상, 재산 피해 감소
운송 시간 절감	정량	차량·화물의 대기시간 또는 운송시간 단축
운영비 절감	정량	연료, 인건비, 유지관리 등 차량 운영비 및 터미널 운영비 절감
배출저감 효과	정량	SOx, NOx, $PM_{2.5}$ 등 대기오염물질 배출 감소
편의성 개선	정성	대중교통 정류장 접근성 향상, 교통약자 이동 편의
건강 편익	정성	비자동차 통행자(보행자, 자전거 등)의 건강 개선 효과
기타 편익	정성	소음 저감, 재난 대응능력 및 복원력 강화, 자산 가치 상승 등

주: 위 항목 중 '편의성 개선' 및 '건강 편익'은 주로 도시 교통 및 대중교통 인프라에 적합한 항목으로, 항만 프로젝트에서는 직접적인 적용성이 낮음.
자료: U.S. Department of Transportation(2025), pp.15-31의 자료를 바탕으로 저자 작성

이들 항목 중 일부는 화폐 가치로 계량할 수 있는 정량적 항목으로 직접 B/C 분석에 활용하며, 일부는 정성적 편익 또는 보조 지표로 설명적 분석에 반영하는 것을 권장하고 있다. 다음 〈표 2-14〉는 정량 평가 대상 항목을 중심으로 각 편익의 산정 방식과 원단위를 정리한 것이다.

〈표 2-14〉 미국교통부 BCA 지침 기반 편익 항목별 산정 방식 및 적용 기준

편익 항목	산정 방식	원단위(2023 기준)
안전 향상	사고 건수 × 단가	사망: $13.2M/인 Fatal Crash: $14.8M/건
운송 시간 절감	절감 시간 × 사용자 수 × 단가	업무 목적: $33.50/hr 트럭 운전자: $35.70/hr

11) Port Infrastructure Development Program으로 항만 인프라 전용 연방 보조금 프로그램
12) U.S. Department of Transportation(2025)

편익 항목	산정 방식	원단위(2023 기준)
운영비 절감	거리 × 단위당 운영비 절감액	경형차: $0.56/mile 트럭: $1.27/mile
배출저감 효과	배출량 × 단가	$PM_{2.5}$: $928,000/ton NO_X: $19,000/ton SO_X: $51,900/ton
기타 편익	정성적 효과 또는 지표 기반 활용	–

자료: U.S. Department of Transportation(2025), pp.15-31, pp.37-50의 자료를 바탕으로 저자 작성

3) 일본[13)]

일본 국토교통성 항만국은 「항만정비사업의 비용편익분석 지침(港湾整備事業の費用対効果分析マニュアル)」을 1999년 제정하였으며, 이후 네 차례의 개정을 거쳐 2024년 6월에 최신 개정판을 발표하였다. 지침은 항만 투자사업의 신규 채택 및 재평가 시 적용되며, 사업 목적과 시설 기능에 따라 프로젝트 유형을 구분하여 항목과 산정 절차를 제공하고 있다. 본 연구는 물류터미널을 기준으로 편익 항목을 검토하였다.

〈표 2-15〉 일본 국토교통성 지침 기반 편익 항목

편익 대상	편익 분류	주요 편익 항목	평가 방법
이용자	운송/이동	• 운송비용 절감 • 시간 절약, 운송 정시성 등 신뢰성 향상	편익 측정
	환경	• 고용환경 개선	정량·정성
	안전	• 항만 안전성 향상	편익 측정
공급자	수익	• 영업이익 증가	편익 측정
지역사회	운송/이동	• 기존 시설 혼잡완화 • 도로 혼잡 완화	정량·정성
	환경	• 배출가스 저감 • 소음 저감	정량·정성
	안전	• 대규모 재해 시 대체항 기능	정량·정성

13) 国土交通省港湾局(2024)의 자료를 바탕으로 저자 작성

편익 대상	편익 분류	주요 편익 항목	평가 방법
	지역경제	• 고용 창출 • 지역 경제 활성화 • 산업 입지 유도	정량·정성
공공부문	조세	• 지방세, 국세 증가	정량·정성
	공공 비용	• 공공 비용 절감	정량·정성

자료: 国土交通省港湾局(2024), pp.III-1-3-III-1-8의 자료를 바탕으로 저자 작성

지침에서 실제 비용편익분석에서 정량적 편익으로 계량화되어 산정 대상이 되는 항목은 다음 세 가지이다. 첫째, 운송비용 절감 편익은 운송 경로 변경, 선박 대형화로 인한 비용 절감, 체선 해소, 하역 작업 효율화, 운항 안정성 확보 등으로 육상·해상 운송비와 운송시간 비용이 절감되는 경우 이를 계량화하여 산정한다. 둘째, 항만 안전성 향상에 따른 손실 회피 편익은 해상사고 감소로 인한 피해액 절감으로 평가된다. 셋째, 영업이익 증가는 환적 화물 유치 등으로 인한 물동량 증가가 수반될 경우 항만 운영 수익 증분으로 정량화된다.

이 세 항목은 지침상 편익의 계측 대상으로 명시되어 있으며, 그 밖의 항목은 정성적 설명 또는 참고자료 기반 보조 평가로 활용된다. 다음은 위 세 항목을 중심으로, 실제 지침에서 명시된 편익 항목별 산정 방식 및 원단위 적용 기준을 정리한 것이다.

〈표 2-16〉 일본 국토교통성 지침 기반 편익 항목별 산정 방식 및 적용 기준

편익 항목	산정 방식	원단위 및 수치
육상 운송비용 절감	단위 운송비용 차이 × 육상 운송 거리 × 물동량	km 구간별 운송비용 적용 고속도로 이용 비용 적용
해상 운송비용 절감	단위 해상 운송비용 차이 × 컨테이너 수량	컨테이너 크기별 운송비용 적용
계류시간 감소에 따른 체선비용 절감	체선비용 단가 × 체선시간 절감 × 척수 및 화물량	10,000TEU 컨테이너선 기준: 614천 엔/시간·척(체선 비용)
환적 유치로 인한 공급자 영업이익 향상	수입 컨테이너 수 증가량 × TEU당 수익 단가 (정책별 설정)	개별 항만별 단가 필요. 정량 산정 시 조건부 반영 가능

편익 항목	산정 방식	원단위 및 수치
환경편익	육상 및 해상 운송거리 단축 및 선박 운영 효율화에 따른 배출량 감소량 × 단가	(자동차 배출가스 원단위) 일반화물, 40km/h 기준 - CO_2: 136.42 g-C/km·대 - NO_X: 1.19 g/km·대 (선박 배출가스 원단위) 150,000DWT 선박 기준 - CO_2: 2.74 톤-C/척·시간 - NO_X: 0.246 톤/척·시간

주: 안전 편익은 통계·피해단가 확보 여부에 따라 정성 또는 보조 지표로 취급함
자료: 国土交通省港湾局(2024), pp.III-1-25-III-1-49의 자료를 바탕으로 저자 작성

2. 국내 SOC 개발사업 타당성 평가 지침 분석[14)]

1) 도로

제7차 교통시설 투자평가지침(국토교통부, 2022)에서는 도로시설 투자사업의 타당성 평가에 반영되는 편익을 크게 공통 편익과 사업 특수 편익으로 구분하여 제시하고 있다.

공통 편익은 모든 도로시설 투자사업에서 공통으로 발생하는 편익으로 통행시간 절감 편익, 차량운행비용 절감 편익, 교통사고비용 절감 편익, 환경비용 절감 편익 등이 있다. 사업 특수 편익으로는 통행시간 신뢰성 향상 편익, 유휴부지 활용 편익, 나들목 신설에 따른 지역산업 활성화 편익, 공사 중 교통혼잡으로 인한 부(-)의 편익 등이 있다.

또한, 국토교통부(2022)에서는 다양한 연구를 통해 개발 중인 추가 편익을 소개하고, 앞으로 지침 반영 가능성을 열어두고 있다. 대표적으로 통행쾌적성 향상 편익, 건강비용 절감 편익, 선택 및 비사용가치 편익 등이다.

14) 본 연구에서 국내 SOC 개발사업의 타당성 평가 지침상의 편익은 국토교통부(2022)에 기반하여 정리함 (검색일: 2025.4.10.)

〈표 2-17〉 도로시설 투자사업의 편익 항목 개요

구분	편익항목	주요내용	산정 방법
공통 편익	통행시간 절감 편익	도로 개선으로 절약되는 통행시간의 가치	통행량 × 통행시간 절감분 × 시간가치
	차량운행비용 절감 편익	연료비, 엔진오일비, 타이어 마모비, 유지관리비 등 절감	차종별 주행거리 × 운행비용 원단위
	교통사고비용 절감 편익	사고 감소로 인한 인적·물적 피해 비용 절감	사고발생비율 × 사고비용 원단위
	환경비용 절감 편익	대기오염, 온실가스, 소음 감소 효과	오염물질·온실가스 배출량 변화 × 환경피해비용
사업 특수 편익	통행시간 신뢰성 향상 편익	계획된 시간에 도착할 확률 향상	통행시간 표준편차 × 신뢰성 가치
	유휴부지 활용 편익	도로 입체화로 인한 상부 부지 활용 가치	토지가치 × 활용 가능 면적
	지역산업 활성화 편익	나들목 신설로 인한 관광지·산업단지 활성화	관광지 활성화 및 산업단지 수익 증대 효과
	공사 중 교통혼잡 부(-)의 편익	공사 중 교통혼잡으로 인한 부정적 영향	통행시간 증가, 차량운행비용 증가 등 계산
연구 중인 편익	통행 쾌적성 향상 편익	스트레스 감소, 운전 피로 감소 효과	차량 간격, 차로 폭 등 요인별 원단위 적용
	건강비용 절감 편익	대기오염 감소로 인한 건강 개선 효과	미세먼지 감소량 × 건강비용 원단위
	선택 및 비사용가치 편익	직접 이용 외 발생하는 다양한 가치	지불의사액 조사 결과 기반 원단위 적용

자료: 국토교통부(2022)를 바탕으로 저자 재작성

2) 철도

국토교통부(2022)에서는 철도시설 투자사업에 따라 기대되는 편익도 앞서 도로시설 투자사업처럼 공통 편익과 사업특수 편익으로 구분하여 제시하고 있다. 공통 편익은 모든 철도시설 투자사업에서 공통으로 발생하는 편익이며, 사업특수 편익은 특정 사업에 한정적으로 발생하는 편익이다. 구체적인 편익의 주요 내용과 산정 방법은 아래 〈표 2-18〉과 같다.

〈표 2-18〉 철도시설 투자사업의 편익 항목 개요

구분	편익항목	주요내용	산정 방법
공통 편익	통행시간 절감 편익	철도 속도 향상이나 통행거리 단축으로 절약되는 시간의 가치	통행량 × 통행시간 절감분 × 통행목적별/철도등급별 시간가치
	차량운행비용 절감 편익	도로 교통량 감소로 인한 차량운행비용 절감	차종별 주행거리 감소분 × 운행비용 원단위
	교통사고비용 절감 편익	도로 및 철도 교통사고 감소에 따른 비용 절감	사고유형별 발생비율 × 사고비용 원단위 × 교통량 변화
	환경비용 절감 편익	대기오염, 온실가스, 소음 등 환경영향 감소	오염물질 배출량 변화 × 환경오염 비용 원단위
	주차비용 절감 편익	철도 이용 증가로 인한 주차수요 감소 효과	자동차→철도 전환 통행량 × 주차비용(용지비, 건설비, 운영비)
	통행시간 신뢰성 향상 편익	계획한 시간에 도착할 확률 향상 가치	지연시간 표준편차 변화 × 통행시간 신뢰성 가치
	선택/비사용가치 편익	비상 시 대체 교통수단으로서의 철도 가치	교통수단별 이용자의 선택가치 원단위 × 선택사용자 비율 × 교통수요
사업 특수 편익	여객 쾌적성 향상 편익	혼잡도 완화로 인한 승객의 편안함 개선	혼잡도 변화에 따른 편익 원단위 × 통행량 × 통행시간
	전철화 사업에 따른 환경비용 절감 편익	디젤기관차에서 전기기관차로 전환 시 환경개선 효과	(전기열차 – 디젤기관차) 연간 오염배출량 × 대기오염 원단위
	유휴부지 활용 편익	폐선 부지 등 철도부지의 다른 용도 활용 가치	활용 가능 부지면적 × 토지용도별 가치
	역 신설에 따른 접근성 향상 편익	철도역 접근시간 단축으로 인한 편익	(미시행 시 – 시행 시) 출발/도착지↔철도역 통행시간비용
	철도화물의 통행시간 절감 편익	화물 운송시간 단축으로 인한 가치	품목별 화물량 × 통행시간 절감분 × 품목별 화물 시간가치
	용량증대사업의 통행시간 신뢰성 향상 편익	선로용량 포화 해소로 인한 신뢰성 개선	선로용량 포화/확보 상태의 지연시간 표준편차 차이 × 신뢰성 가치
	공사 중 교통혼잡으로 인한 부(–)의 편익	공사로 인한 기존 도로 차로 축소 및 교통혼잡	공사 중 도로 Network 변화에 따른 통행시간, 운행비용 증가분
	도로공간 축소에 따른 부(–)의 편익	경전철 등으로 인한 도로 폭원 축소 및 용량 감소	도로 구조/운영체계 변경에 따른 소통능력 감소분

자료: 국토교통부(2022)를 바탕으로 저자 재작성

3) 공항

모든 공항투자사업에서 모든 편익 항목이 발생하는 것은 아니므로, 투자사업 유형에 따라 발생할 수 있는 편익 항목을 신중하게 선별한다. 신공항 개발사업에서는 기본적으로 전환수요의 통행시간 및 운행비용 절감 편익이 주요하게 나타나나, 기존 공항의 기능을 대체하는 경우에는 확장사업의 편익 항목도 함께 고려할 수 있다.

활주로 용량 증대사업에서는 항공기 운항비용 절감 편익과 초과수요의 통행시간·운행비용 절감 편익이 핵심적이다. 유도로 용량 증대 및 계류장 확장사업에서는 항공기 운항비용 절감 편익이 주된 편익으로 나타난다. 승객청사 용량 증대사업은 청사 내 승객 통행시간 절감 편익을, 화물청사 용량 증대사업은 청사 내 화물 통행시간 절감 편익을 주요 편익으로 한다.

〈표 2-19〉 공항시설 투자사업의 편익 항목 개요

구분	편익항목	주요내용	산정 방법
에어사이드	항공기 운항비용 절감 편익	항공기 지체 완화 및 이동시간 단축으로 인한 운항비용 절감	결정적 대기모형을 통한 지체시간 산정 × 항공기 종류별 운항비용 원단위
	항공기 탑승객/화물 통행시간 절감 편익	항공기 운항시간 단축으로 인한 탑승객 및 화물의 통행시간 절감	항공기 운항시간 절감분 × 평균 탑승객 수(적재량) × 시간가치(화물시간가치)
청사지역	청사 내 여객 통행시간 절감 편익	여객터미널 내 지체 완화 및 이동시간 단축	결정적 대기모형을 통한 지체시간 산정 × 여객 시간가치
	청사 내 화물 통행시간 절감 편익	화물터미널 내 지체 완화 및 이동시간 단축	결정적 대기모형을 통한 지체시간 산정 × 화물 시간가치
전환/초과수요	전환수요의 통행시간/운행비용 절감 편익	타 교통수단 또는 타 공항에서 신공항으로 전환 시 절감되는 시간과 비용	(기존 수단 – 항공수단) 통행시간 × 시간가치 + (기존 수단 – 항공수단) 운행비용
	초과수요의 통행시간/운행비용 절감 편익	공항 용량 부족으로 타 수단/공항 이용하던 수요가 해당 공항 이용 시 절감되는 시간과 비용	(대체 수단/공항 – 해당 공항) 통행시간 × 시간가치 + (대체 수단/공항 – 해당 공항) 운행비용

자료: 국토교통부(2022)를 바탕으로 저자 재작성

4) 친환경 및 신교통시스템

친환경 및 신교통시스템의 편익 산정은 기존 교통시설의 편익 산정 방법을 기본으로 하되,[15] 해당 시스템의 고유한 특성을 반영한 신규편익항목을 추가로 고려함으로써 보다 정확하고 포괄적인 경제성 평가가 가능하다. 특히 환경친화적 특성으로 인한 수질오염피해 절감 편익과 대중교통 서비스 개선으로 인한 환승통행시간 절감 편익 등은 이러한 시스템들의 고유한 가치를 반영하는 중요한 편익 항목이라고 할 수 있다.

〈표 2-20〉 친환경 및 신교통시스템 투자사업의 편익 항목 개요

	편익항목	주요내용	산정 방법
기본편익	통행시간 절감 편익	일반적인 도로 및 철도에 준한 기본적인 통행시간 절감	기존 교통시설과 동일한 방법 적용
	운행비용 절감 편익	차량 운행비용 절감으로 인한 편익	기존 교통시설과 동일한 방법 적용
신규편익	수질오염피해 절감 편익	자동차 통행량 감소로 인한 도로비점오염 감소	수질오염물질 배출원단위 (582.87 kg/㎢/일) × 수질오염피해 비용원단위 (5,300원/kg, 2010년 기준) × 총 도로면적 × 도로교통량 변화비율
	환승통행시간 절감 편익 (BRT만 해당)	환승시설 건설로 인한 환승시간 단축	환승시설 이용객 × 환승비율(50%) × 평균 환승이동시간(첨두시 0.74분, 비첨두시 1.6분) × 차외시간가치

자료: 국토교통부(2022)를 바탕으로 저자 재작성

15) 통행시간 절감 편익, 차량운행비용 절감 편익, 교통사고비용 절감 편익, 환경비용 절감 편익 (대기오염, 온실가스, 소음 등)

5) 항만부문과 비교

현행 교통시설 투자평가지침을 분석한 결과, 도로, 철도, 공항, 친환경·신교통시스템 모든 부문에서 스마트화나 자동화 기술 도입에 따른 별도의 편익 항목이 존재하지 않는 것으로 확인된다. 각 부문의 편익 체계는 기존 물리적 인프라 확충에 따른 전통적 편익(통행시간 절감, 운행비용 절감, 사고비용 절감 등)에만 국한되어 있으며, 4차 산업혁명 시대의 디지털 전환과 스마트 기술 적용 효과를 반영하지 못하고 있다.

특히, 항만부문은 다른 교통부문 대비 스마트화·자동화의 필요성과 도입 효과가 명확한 분야임에도 불구하고, 현행 편익 체계는 이를 전혀 반영하지 못하고 있다. 세계 주요 항만들이 무인자동화 크레인, 자율주행 야드 트럭터, AI 기반 선석 배정 시스템, IoT 기반 실시간 모니터링 등을 통해 획기적인 운영 효율성 향상을 달성하고 있음에도, 국내 항만투자사업의 타당성 평가에서는 이러한 스마트 기술의 경제적 효과가 정량적으로 평가되지 않고 있다.

〈표 2-21〉 국내 교통·물류시설 개발사업의 편익 비교

편익항목	도로	철도	공항	친환경·신교통	항만	비고
통행/운송 시간 절감	◎	◎	◎	◎	◎	모든 부문 공통 핵심 편익
운행/운항 비용 절감	◎	◎	◎	◎	×	항만만 별도 체계
교통사고비용 절감	◎	◎	×	◎	×	공항·항만 미적용
환경비용 절감	◎	◎	×	◎	△	항만은 제한적 적용
총 편익항목 수	11	14	5	6	14	

편익항목	도로	철도	공항	친환경·신교통	항만	비고
고유 편익항목 수	7	11	5	2	14	
특징	개인 통행 중심, 신뢰성·쾌적성 강조	대중교통 특성, 다양한 파급효과	특수 운영환경, 제한적 편익 범위	환경친화성, 기존 체계 준용	물류 중심, 복합적 기능 반영	

자료: 국토교통부(2022) 및 KDI(2022c)을 바탕으로 저자 재작성

제3절 시사점

앞서 살펴본 것처럼 자동화 장비 도입 등에 따라 재래식 항만 대비 총사입비는 25.3% 수준으로 증가하는 데 반하여, 스마트항만 개발 편익은 반영되지 못하여 경제성 평가에 미치는 영향이 크다. 이에 따라, 스마트항만 개발 사업의 경제적 타당성이 부족해지는 문제가 반복될 가능성이 매우 높다. 한편, 정성적 평가를 통해서 스마트화의 효과를 반영하는 경우를 고려할 수도 있으나, 우리나라의 예비타당성조사 제도에서는 경제성 평가의 중요성이 매우 높아 아무리 정성적 요인을 강조하여도 사업 추진 타당성을 인정받기는 쉽지 않다. 결과적으로 이러한 상황이 지속된다면, 정부에서 정책적으로 추진하는 스마트항만 개발은 요원하게 되고 우리 항만도 국제 경쟁력을 점차 잃을 수 있다.

이에, 스마트항만 개발 효과를 발굴하여 타당성 평가에서 활용가능한 편익화하고, 평가 방법을 개발하여 「예비타당성조사 운용지침」, 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」, 「교통시설 투자평가지침」 등 관련 지침에 반영해야 한다.

따라서, 국내외 교통·물류 SOC 개발사업의 타당성 평가 지침을 참고하기 위하여 살펴보았으나, 국내의 경우 항만분야를 비롯하여 도로·철도·공항·친환경신교통 등 모든 교통 SOC 부문에서 스마트화·자동화 기술 도입에 대한 평가 항목이 부재한 상황이다. 한편, 유럽, 미국, 일본 등 해외 국가의 SOC 개발사업의 타당성 평가 지침에서도 스마트항만 개발 편익을 반영한 사례는 찾아볼 수 없었다. 미국의 경우 혁신 기술의 적용 가능성을 언급하고 있으나, 편익 산정은 기존 범주 내에서 산정하는 것이 원칙이다.

이렇듯 국내뿐 아니라 주요 항만 산업 선진국에서조차 스마트항만 개발 효과를 평가지침에 반영하지 못하고 있다. 이에, 다음 장에서는 주요 선행연구검토와 터미널 운영사 등 전문가 의견 수렴을 통해 스마트항만 개발 편익을 발굴하고, 산정 방법론도 제안하고자 한다.

03
스마트항만 개발 편익 산정 방법론 개발

2장에서 살펴본 것처럼, 국내 항만 개발사업의 타당성 평가 지침은 화물의 처리를 중심으로 평가하고 있어, 스마트항만과 재래식항만을 구분하여 평가할 수 없는 체계이다. 또한, 도로, 철도, 공항, 친환경·신교통 등 유사 SOC 개발사업의 타당성 평가 지침에도 스마트 기술 도입의 효과를 반영하고 있지 않다. 또한, 유럽, 미국, 일본 등 주요 해외 국가의 SOC 투자 타당성 평가 지침에서도 스마트항만 개발 편익이 반영되지 못한 상황이다. 이에 본 장에서는 OECD 등 스마트항만 개발의 효과를 제안한 선행 연구 사례 분석, 전문가 의견 수렴 등을 통해 스마트항만 개발 편익을 도출하고, 편익 산정 방법론을 제안한다.

제1절 스마트항만 개발 편익 도출

1. 스마트항만 개발 편익 도출 개요

앞선 1장의 선행 연구 검토에서 언급한 것처럼 스마트항만 개발 효과를

정량적으로 분석한 연구는 거의 없다. 다만, 일부 연구에서는 스마트항만 도입 효과를 설문조사 기반으로 제시하거나(Knatz, Notteboom, & Pallis, 2024), 하역장비 조합에 따른 생산성 증가 효과(Gattuso & Pellicano, 2023), 전기화에 따른 배출량 저감 효과(Schenk et al., 2020) 등 일부 영역에 대한 제한적인 평가를 수행한 연구는 있다. 또한 International Transport Forum(2021)에서는 문헌 고찰, 전문가 및 운영사 의견 수렴 등을 통해 스마트항만 개발로 예상되는 다양한 기대 편익을 제시하였으나, 편익 추정 방법론, 원단위 등은 제시하지 못하였다.

본 절에서는 스마트항만 개발 편익을 발굴하기 위하여 앞서 언급된 대표적인 연구를 살펴보고, 편익의 후보군을 도출한다. 그리고 정량화 가능성 등을 검토하고, 컨테이너 터미널 운영사, 항만공사 관계자 등을 대상으로 의견을 수렴하여 스마트항만의 개발 편익을 제시한다.

2. 스마트항만 개발 편익 관련 연구 사례 검토

1) 운영사 설문 기반 편익 분석 연구[16)]

Knatz, Notteboom, & Pallis(2024)는 전 세계 완전자동화·반자동화 터미널 32개의 운영자 설문을 기반으로 도입 동인(기대 편익)과 실현 편익을 비교 분석하였다. 주요 도입 동인은 ①안전 향상, ②단위처리비용 절감, ③운영성과 변동성 축소(일관성 제고), ④인건비 절감으로 나타났고, 실현 편익 역시 ①안전 향상, ②단위처리비용 절감, ③인적요인 제거, ④운영성과 변동성 축소(일관성 제고), ⑤인건비 절감 순이다.

전반적으로 예상한 편익은 대체로 실현되었으나 항목별 격차가 존재하였

16) Knatz, Notteboom, & Pallis(2024), pp.1252-1276.

다. 특히, 단위처리비용 절감, 24시간(24/7) 운영, 대형선박 처리효율 개선 등은 과대평가(기대>실현)되었고, 반대로 트럭 턴타임 개선, 토지생산성(야드 집적도), 운영·기술 혁신은 과소평가(기대<실현)되었다.

설문조사 기반으로 평가하여 화폐가치로 비교할 수는 없으나, 제시한 효과는 스마트항만 개발 편익으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다.

〈표 3-1〉 자동화의 실현편익과 도입 동인 차이

효과	실현 편익(순위)	도입 동인(순위)	⊿(실현-기대)
운영·기술 혁신(테스트베드 등)	4.34(11)	3.19(12)	1.25
토지생산성(야드 집적도)	4.59(10)	3.63(11)	0.96
인적요인 제거(질병, 노사 리스크)	5.59(3)	5.06(6)	0.59
대기오염/온실가스 감축	5.38(6)	4.94(8)	0.44
트럭 턴타임 개선	5.03(7)	4.66(9)	0.37
인건비 절감	5.44(5)	5.38(4)	0.06
안전 향상	6.28(1)	6.28(1)	-
고객 KPI 충족	3.75(12)	3.84(10)	-0.09
운영성과 변동성 축소(일관성 제고)	5.47(4)	5.63(3)	-0.16
대형선박 처리 효율 개선	4.72(9)	4.97(7)	-0.25
24시간(24/7) 운영	4.88(8)	5.16(5)	-0.28
단위처리비용 절감	5.63(2)	5.94(2)	-0.31

주: 척도는 1-7점 Likert(1=낮음, 7=매우 높음), 표본 n=32. 편익은 평균값에 따름
자료: Knatz, Notteboom, & Pallis(2024), pp.1252-1276의 자료를 바탕으로 저자 작성

2) 자동화 하역장비 관점의 생산성 및 비용 분석 연구[17]

Gattuso & Pellicano(2023)는 기존 대비 자동화 하역장비 조합을 4개의 시나리오를 설계하여 연간 총운영비와 단위비용(€/move)을 분석하였다. 기본 가정은 연 80% 가동, 3교대, 비용항목은 감가상각, 취급비, 유지

17) Gattuso & Pellicano(2023), pp.360-367.

보수이며 자본비용은 제외된다. 기존 장비는 운전자 3명과 현장 1명, 자동화 장비는 원격감시 1명 기준이다. 분석 결과, 자동화 도입 시 운영 인건비는 감소하지만, 하역 장비의 시간당 move가 증가하여 연료 소비 및 총운영비가 증가하였다. 다만 총운영비/연간 처리량인 단위비용을 기준으로 보면 일부 자동화 장비의 조합에서 기존 장비 대비 낮다. 즉, 총액과 단위비용의 방향이 달라질 수 있어 대안 비교 시 두 지표를 함께 해석해야 한다.

결국, 자동화 장비 도입에 따라 하역 장비 운용비용은 커지나, 인건비 등 운영비용은 절감되어 터미널 운영사 관점에서는 실익이 더 클 수 있다. 즉, 운영비용 관점의 편익으로 자동화 하역 장비 도입에 따른 생산성의 변화를 정량적으로 평가했다고 보기는 어렵다.

특히, Gattuso & Pellicano(2023)에서는 안벽 영역의 자동화 효과가 명확하게 고려된 것인지 불분명하다. AGC가 DTQC인지 STQC인지에 따라서 갱[18]당 하역 생산성에 미치는 영향이 다르나, 구체적인 QC 타입이 제시되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 DTQC 도입 효과를 반영하여 하역 생산성 향상 효과를 편익 항목으로 고려하겠다.

〈표 3-2〉 자동화 하역장비 시나리오별 총운영비 vs 단위비용

단위: €, moves/년, €/move

시나리오	장비조합	총운영비	연간 처리량	단위비용
0	기존 장비	116,664,429	50,457,600	2.31
1	SC→ASC 대체	128,663,844	58,867,200	2.19
2	AGC+ASC	154,883,323	58,867,200	2.63
3	AGC+AGV+ARTG	128,372,325	58,026,240	2.21

주: 단위비용(€/move) = 총운영비(€) ÷ 연간처리량(moves/년)
자료: Gattuso & Pellicano(2023), pp.360-367의 자료를 바탕으로 저자 작성

18) 갱(Gang)은 컨테이너 터미널에서 하역 작업을 수행하는 하나의 그룹(예, 안벽크레인 1기, 이송장비 4기, 야드크레인 2기 조합 등)을 의미함.

3) 항만 전기화 효과 분석 연구[19)]

Schenk et al.(2020)는 미국 4개 항만을 대상으로 하역장비 전기화와 육상전원 도입 시나리오(0/50/100%)를 비교하여 연간 배출변화와 순에너지 지출을 정량 평가하였다. 비용은 반복되는 에너지 지출만을 고려하고 설비투자(CAPEX)는 제외하였다. 전반적으로 NOx와 CO_2e는 감소하고, SOx는 전력믹스에 따라 소폭 증가하였다. 또한, 지역의 전기요금과 연료가격에 따라 톤당 저감비용($/톤)과 순편익 규모가 달라졌다. 항만 전기화의 환경 및 에너지 편익은 연간 배출가스 감소량(톤)과 톤당 저감비용을 핵심 지표로 산정하고 제시할 수 있음을 보여준다.

따라서, 본 연구에서도 장비의 에너지 전환은 스마트항만 개발의 편익으로 고려하여 평가한다. 다만, 장비의 전동화는 화석연료 대비 발생 효과이므로 장기적인 편익으로 고려하기는 어려울 수 있다.

〈표 3-3〉 50% 전기화 시 연간 배출변화 및 톤당 순비용

항만	NOx(톤/년)	SOx(톤/년)	CO_2e(톤/년)	NOx 톤당 순비용($/톤)	CO_2e 톤당 순비용($/톤)
Baltimore	-143.0	+3.57	-9,030	16,270	260
Everglades	-70.9	+1.38	-6,100	25,300	290
Houston	-1,040	+40.6	-42,100	3,800	90
Seattle	-80.6	+1.47	-5,640	-1,110	-20

주: 배출의 음수값은 감소 의미, 비용의 음수 값은 저감과 동시에 비용 절감 의미
자료: Schenk et al.(2020), pp.65-68의 내용을 바탕으로 저자 작성

19) Schenk et al.(2020)

4) 컨테이너 터미널 자동화 영향 분석[20)]

International Transport Forum(2021)은 전 세계 컨테이너 터미널 자동화의 현황을 정리하고, ①생산성, ②운영비용, ③안전, ④외부효과(환경 등)의 네 범주로 영향을 평가하였다. 분석은 이해관계자 인터뷰와 항만 당국으로부터 수집한 데이터를 함께 활용해 수행되었다. 또한 자동화의 효과는 터미널 여건에 따라 달라지는 조건부로 제시하고 있다.

〈표 3-4〉 컨테이너 터미널 자동화로 인한 효과(ITF)

효과	주요 내용
생산성	• 중단 없이 연속 운영 가능, 신뢰성 향상 • 생산성 보장은 어려움, 유연성 저하(수요 급증 및 감소 등) 이슈 발생
운영비용	• 인건비 감소 및 자본비 증가 형태이나, 현지 노동 비용에 의존 • 자동화의 설계·감독·관리 등 추가 인력 및 채용 비용 발생 가능
안전	• 위험 노출 공정의 자동화에 따른 개선 가능성이 있으나 실증 데이터의 부재 • 자동화 장비 관련 사고, 신유형의 인적 오류 발생 우려
외부효과	• 자동화 장비의 전기 구동으로 터미널 배출 저감 가능 • 공간효율 및 토지생산성은 비교 기준에 따라 결과 상이

자료: International Transport Forum(2021), pp.20-23의 내용을 바탕으로 저자 작성

특히, ITF(2021)에서는 항만 자동화 사업의 타당성 평가를 위해서는 비용·편익 분석 등이 필요하나, 자료의 부족 등으로 정량적인 분석은 쉽지 않다는 점을 지적하고 있다. 따라서, 자동화 사업 제안 단계에서 비용·편익, 주요 가정, 산정 근거를 포함한 타당성 분석이 가능한 체계를 만들어야 한다고 권고하고 있다.

반면, ITF는 항만 자동화 사업에서 비용과 편익이 명확히 제시되지 않는 점을 가장 주요한 문제로 지적한다. 자동화 사업 제안 단계에서 비용·편익,

20) International Transport Forum(2021)의 자료를 바탕으로 저자 작성

주요 가정, 산정 근거를 포함한 분석을 마련하고, 이를 운영사를 포함한 이해관계자에게 투명하게 공개해야 한다고 주장한다.

또한, 자동화에 따른 효과를 체계적으로 검증하기 어렵게 만드는 주요 원인으로 공개적으로 접근할 수 있는 통계 등 기초자료가 제한적이고, 사후평가 체계의 부재를 지적하고 있다. 이러한 문제를 해소하기 위해서는 데이터 접근성 확대, 평가 과정 및 결과의 투명한 공개 등이 필요하며, 이를 통해 정책입안자가 항만 자동화의 효과와 대안을 식별하는 근거를 제시해야 한다고 권고하고 있다.

3. 스마트항만 개발 편익 도출 결과

앞서 살펴본 연구에서 제시된 자동화 효과, 친환경화 효과 등은 스마트항만 개발의 범주로 포함될 수 있다. 따라서, 제시된 효과 중에 실제 스마트항만 개발 편익으로 간주할 수 있는지, 그리고 정량적으로 분석할 수 있는지, 정량화 가능성이 있다면 기초 통계를 확보할 수 있는지 등을 판단의 근거로 삼아 스마트항만 개발 편익의 후보군을 도출하였다.

후보군 도출의 적정성을 확보하기 위하여 자동화 터미널 개발사업 발주자(3인), 항만설계 전문가(2인) 터미널 운영사 장비·시스템 실무자(4인), 운영시스템 개발 업체(2인), 경제성 평가 전문가(2인) 등 13인의 전문가를 대상으로 대면 회의, 서면 의견 등을 통하여 의견을 수렴하였다.

〈표 3-5〉 스마트항만 개발 편익 후보군 도출 결과

구분	스마트화 효과 여부	편익 반영 가능성	정량화 가능성	스마트화 개발 편익으로 포함
생산성 향상	◉	◉	◉	O
운영·기술 혁신	◉	◉	△	X
토지생산성 (야드 집적도)	○	△	△	X
인적요인 제거 (질병, 노사 리스크)	◉	○	△	X
대기오염/온실가스 감축	◉	◉	◉	O
트럭 턴타임 개선	◉	◉	△	X
인건비 절감	◉	◉	◉	O
안전 향상	◉	◉	◉	O
고객 KPI 충족	△	△	△	X
운영성과 변동성 축소 (일관성 제고)	◉	△	△	X
대형선박 처리 효율 개선	◉	◉	◉	O
단위처리비용 절감	◉	◉	◉	O

주: 안전 편익은 중요 항목으로 인식되지만 관련 문헌에서 정량 산정식이 제시되지 않음
자료: 저자 작성

〈표 3-5〉와 같이 스마트화 개발 편익으로 반영할 수 있을 것으로 판단되는 후보들은 생산성 향상 효과, 대기오염/온실가스 감축 효과, 인건비 절감 효과, 안전 향상 효과, 대형선박 처리 효율 개선 효과, 단위처리비용 절감 효과 등이다. 다만, 생산성 향상 효과는 하역 생산성이 증가되는 효과로 한정하는 것이 타당하고, 대형선박 처리효율 개선은 생산성 향상에 따라 발현되는 후행 효과로 생산성 향상 편익으로 포함될 수 있다. 그리고 단위처리비용 절감 효과와 인건비 절감 효과는 운영비용 절감 편익으로 묶을 수 있다. 또한, 대기오염/온실가스 감축 효과는 환경비용 절감 편익으로 평가할 수 있다. 결과적으로 스마트항만 개발 편익은 〈표 3-6〉와 같다.

〈표 3-6〉 편익 항목별 산정 방식 및 데이터

스마트항만 개발 편익	기대 효과
하역 생산성 향상 편익	• 화물 처리 속도 증가에 따른 선박 대기 비용 절감 등
운영비용 절감 편익	• 인건비, 에너지 비용 등 운영비용 절감 효과
안전사고 절감 편익	• 안전사고 감소에 따른 사고 처리 비용 절감 효과
환경비용 절감 편익	• CO_2, SOx, NOx 등 오염물질 저감에 따른 사회적 비용 절감 효과

자료: 저자 작성

제2절 스마트항만 개발 편익 산정 방법론

1. 전문가 의견 수렴

앞선 1절에서 해외 사례 분석, 전문가 자문 등을 통해 도출한 4개 편익 항목의 타당성을 현장 관점에서 점검하고 보완하기 위해 부산항 신항 컨테이너 터미널 운영사 대상 전문가 자문회의 등을 통하여 의견을 수렴하였다. 자문회의는 부산항 신항 7부두(DGT)에서 수행되었고, 7부두와 6부두(BCT)의 장비 및 운영 담당 실무자 5명이 참석하였다.[21)]

연구진이 제1절에서 제시된 생산성 향상 효과, 운영 비용 절감 효과, 안전사고 저감 효과, 환경비용 저감 효과 등 스마트항만 개발 편익에 대한 정의를 설명한 후, 개략적인 정량화 방법론과 정량화 과정에서 필요한 자료 등을 설명하였다. 그 후, 전문가가 그에 대하여 다양한 의견을 제시하고, 토의를 거쳐 합의된 의견을 제시하는 형태로 진행되었다.

21) 신항 7부두는 국내 최초 완전자동화부두('24년 개장), 6부두는 반자동화부두 중 가장 최신('22년 개장)

2. 하역 생산성 향상 효과

자문회의에 참석한 전문가들은 자동화 터미널 초기에는 유인 대비 생산성이 정체되거나 낮을 수 있으며, 안정화 이후 유사하거나 개선될 수 있다고 보았다. 또한, 생산성 평가는 선석 단위 지표보다 장비(특히 QC) 단위 지표가 타당하다고 제시하였다. 선석 지표는 투입 장비 수에 좌우되어 실제 효율 개선 여부를 구분하기 어렵기 때문이다. 따라서, 동일 목표 생산성 달성을 위해 필요한 장비 투입량을 비교하는 접근 방식과 장비 조합에 따른 화물 처리 속도를 비교하는 방식이 제안되었다.

장비 투입량을 비교하는 방식은 동일 생산성을 확보하기 위하여 투입되는 자산의 감소를 평가하는 방식으로 결국은 투자 비용 절감, 운영비용 절감 등 비용 절감의 측면이다.

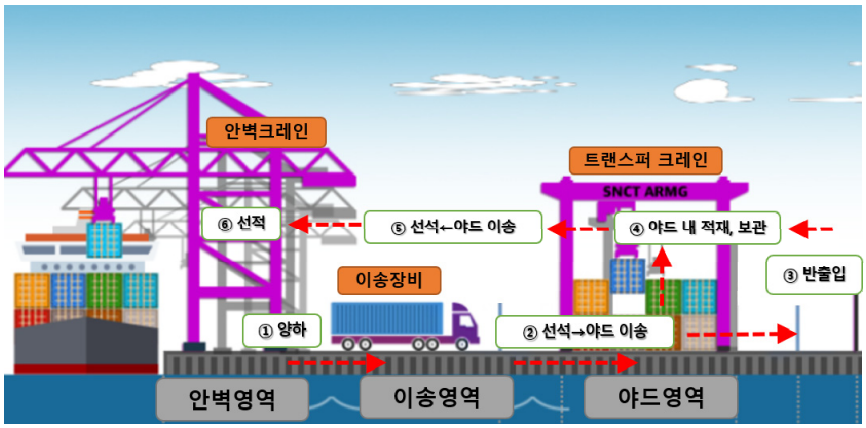
〈표 3-7〉 QC당 AGV 필요대수(설계 가정, 운영사 제시)

구분	QC당 AGV 필요 대수	비고
싱글트롤리(STQC)	8.3~9대	운영 조건에 따라 변동 가능
더블트롤리(DTQC)	5대	피닝스테이션(Pinning station) 유무, 피더/본선 구성 영향

자료: 부산항 신항 운영사(2025.7.2., 대한민국 부산) 자문을 바탕으로 저자 작성

컨테이너 터미널의 수입 화물은 “양하 ⇒ 야드 이송 ⇒ 반출” 절차를 거치고, 수출 화물은 “반입 ⇒ 야드 내 적재·보관 ⇒ 선석이송 ⇒ 선적”의 절차를 거친다. 환적 화물은 “양하 ⇒ 야드 이송 ⇒ 야드 내 적재·보관 ⇒ 선석이송 ⇒ 선적”의 절차를 거친다. 하역 생산성 향상은 이러한 화물 처리 절차에 소요되는 시간이 줄어드는 효과를 의미한다. 따라서, 반자동화 터미널의 장비 조합과 완전 자동화 터미널의 장비 조합에 따라 1개의 컨테이너를 처리하는 데 필요한 시간이 줄어드는 효과가 실제 하역 생산성 향상의 효과로 볼 수 있다.

〈그림 3-1〉 컨테이너터미널 화물처리 프로세스



자료: 안승현 외(2022), p.54.

컨테이너 터미널 장비 및 운영시스템 담당 전문가들의 의견을 종합하면 TC의 생산성은 예나 지금이나 크게 차이가 없고, 이송 영역에서의 AGV, YT 등 장비 성능 차이로 발생하는 생산성은 장비 투입 대수를 늘려서 맞출 수 있다. 하지만 DTQC와 STQC 등 QC 형식에 따라 세컨 트롤리의 완전 자동화에 따른 생산성 차이와 피닝스테이션(Pinning Station) 유무[22]에 따라 컨테이너 고정장치인 트위스트락(Twistlock) 제거 시간이 줄어드는 등의 분명한 생산성 차이가 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 완전 자동화 터미널과 반자동화 터미널의 생산성을 정량적으로 비교하기 위해서 이송 장비와 TC의 생산성은 동일하다고 가정하여 산정 방식을 간편화했다.

이에, 컨테이너 1개를 처리할 때 필요한 사이클 타임의 차이를 계산하기

22) 반자동화 또는 재래식 터미널에서는 STQC에서 컨테이너를 하역한 후 YT 등 이송 장비로 옮겨 싣기 전에 피닝스테이션에서 트위스트락을 제거하는 작업이 필요하지만, DTQC 기반의 완전 자동화 터미널에서는 라싱플랫폼에서 트위스트락을 제거하고 세컨트롤리가 컨테이너를 이송 장비에 직접 내려주는 방식으로 트위스트락 제거 시간이 감소함.

위해서는 QC 생산성 차이와 피닝스테이션 작업 시간을 알아야 한다. 실제 통계에 기반하여 계산하는 것이 필요하나, 현재 부산항 신항 터미널 운영사들은 컨테이너 사이클 타임에 대한 통계를 수집하는 곳이 없다. 따라서, 경험에 의존해야 하는 상황으로 응답자마다 조금씩 차이가 있었으나, 대체적으로 90~120초 정도인 점을 고려하여 평균인 105초로 설정하였다.

QC 생산성도 실제 작업 시간 통계에 기반하여 추정해야 하나, 통계를 확보할 수 없어 이론적인 속도인 컨테이너 크레인 제작사에서 제공하는 장비 스펙상 처리 속도의 차이를 비교하였다. 부산항 신항의 완전 자동화 터미널과 가장 최근에 개장한 반자동화 터미널의 QC 생산성(moves/hr)의 제조사 스펙상 차이는 3%[23]이다.

〈표 3-8〉 자동화 터미널과 반자동화 터미널의 생산성 차이 요약

구분	QC 생산성 (move/hr)	이송장비 및 TC 생산성	피닝스테이션 유뮤
반자동화 터미널 대비 자동화 터미널 생산성 우위	3% 우위	동일	105초 절약

자료: 터미널 운영자 관계자 자문의견과 내부 자료를 활용하여 저자 작성

컨테이너 사이클 타임의 차이로 분석한 완전 자동화 터미널의 생산성 향상 효과는 반자동화 터미널 대비 약 4.3% 정도로 분석되었다. 이러한 터미널 생산성 향상으로 선박의 접안 시간 감소에 따라 기대되는 편익은 선박 재항 비용 절감 편익과 환경 오염물질 배출 저감 편익이며, 다음과 같은 산정 방식으로 추정이 가능하다.

23) 비공개 자료라는 점을 고려하여 절대적인 수치 차이를 공개하지는 못하고 상대적인 차이(%)로 제시함.

〈표 3-9〉 생산성 향상 편익 산정 방식

생산성 향상 편익 = (표준 선박의 1일 재항 비용 × 선박 재항 시간 감소) + (표준 선박의 오염물질 배출 저감량 × 오염물질별 원단위)

자료: 저자 작성

3. 운영비용 절감 효과

자동화의 핵심 편익은 인건비 절감으로 인식되며, 특히 이송장비 영역에서 효과가 가장 크다. 자동이송장비(AGV)는 기존 야드트럭(YT) 운전인력을 대체하고, 야드크레인 무인화는 관련 인력을 대폭 축소한다. 반면 QC 자동화만으로는 인력 감축 폭이 제한적이다.

〈표 3-10〉 부산항 신항 터미널별 장비별 인력 구조

구분		DGT	PNIT	PNC	HJNC	HPNT	BNCT	BCT
QC	장비수	9	12	22	12	12	12	11
	인력	39	66	114	66	63	63	36
	장비당 인력	4	6	5	6	5	5	3
이송장비	장비수	60	76	154	96	85	36	28
	인력	0	295	530	322	289	151	108
	장비당 인력	0	4	3	3	3	4	4

자료: 부산항 신항 터미널 운영사 내부자료를 바탕으로 저자 재작성

인력 절감은 이송장비 운전 인원 산정으로 단순 계산이 가능하다. 산정 예시로, YT 1대는 1교대 1.5명, 3교대 환산 시 4.5명/대이며, 60대를 유인으로 운영하면 약 270명(=1.5×3×60)이 필요하다.[24] AGV 전환 시 해당 운전 인원과 일부 관리 인력이 축소된다.

24) 1.5명/교대(→4.5명/대) 는 자문 기반의 산정 예시이며, 터미널별 교대·근무형태에 따라 달라질 수 있음.

임금은 직무별·지역별로 격차가 존재한다. 북항과 신항의 단가 차이를 활용하면 자동화 전환에 따른 인건비 절감 범위를 제시할 수 있다. 정량화는 장비 대수, 교대체계, 직무별 임금 테이블과 결합하여 연차별 인건비 절감액으로 환산하는 방식이 현실적이라는 의견이 지배적이었다.

한편, 운영비 구조는 인건비 중심에서 에너지·정비·시스템 유지관리 비중이 커지는 방향으로 전환된다. 연료 사용은 전력 사용으로 대체되며, 장비 전기화·자동화에 따른 유지보수와 소프트웨어 업데이트 비용이 상시 발생한다. 순효과는 장비 구성과 가동률, 전력·연료 단가에 따라 달라진다. 아래 표는 터미널 운영사의 현장 경험을 바탕으로 정리한 운영비용 구조의 정성 비교이다.

〈표 3-11〉 자동화에 따른 운영비용 구조 변화(정성 비교)

비용 항목	유인/반자동화	자동화 전환	비고
인건비 (운전·현장)	높음	감소	AGV 도입, 야드무인화
에너지비 (연료/전력)	연료 비중 큼	연료 감소 전력 증가	에너지원 전환, 순효과는 단가·가동률에 좌우
정비·부품비	중간	증가 가능	자동화 장비, 센서 추가, 예방정비, 부품 교체 주기 반영
시스템 유지관리 (TOS·SW)	낮음~중간	증가	업그레이드, 통신·인프라
안전관리비	중간	감소 가능	무인구역 확대 시 일부 항목 축소

주: 안전관리비의 계량화는 '다. 안전'에서 다룬다.
자료: 부산항 신항 운영사(2025.7.2., 대한민국 부산) 자문을 바탕으로 저자 작성

앞서 살펴보면 해외 사례에서도 스마트항만으로의 전환에 따라 운영비용 절감 효과는 뚜렷한 것으로 평가되어, 스마트항만 개발 편익으로 반영할 수 있으며, 다음과 같은 간단한 산정 방식으로 추정이 가능하다.

〈표 3-12〉 운영비용 절감 효과 산정 방식

운영비용 절감 효과 = 재래식 터미널 운영비용 – 자동화 터미널 운영비용

자료: 저자 작성

다만, 국내 항만분야 개발 타당성 평가 지침에서는 비용·편익 분석에서 비용(Cost)에 인건비, 에너지비용, 장비 비용, 운영 시스템 도입 비용 등이 포함된다. 즉, 이미 자동화에 따른 인건비 감소는 비용 부분에 반영되어 있어 편익(Benefit)에 적용하면 이중 계상되어 반영할 수 없다.

다만, 비용으로 반영되는 인건비 등 운영비용에 대한 원단위는 실증 분석을 통한 개선이 필요할 수 있다. 직무의 차이로 예전에는 높은 연봉의 근로자가 필요했던 영역이 상대적으로 낮은 연봉의 근로자로 대체되고 있기 때문이다. 가장 대표적인 영역이 야드 영역이다. 부산항 북항처럼 인력으로 운용되는 야드크레인은 거대한 크레인을 직접 운전하고, 컨테이너의 양·적하를 직접 수행해야 하는 만큼 숙련된 인력이 필요하다. 반면, 부산항 신항처럼 원격제어 방식의 야드크레인은 운영 소프트웨어가 대부분 자동으로 크레인을 제어하고, 일부 상황에서만 사람이 개입하기 때문에 비교적 숙련도가 낮은 인력으로도 충분히 운영할 수 있다. 따라서, 인건비 등 운영비용에 대해서는 원가 분석 등을 통해 원단위 현실화 등 개선이 필요하다.

4. 안전사고 절감 효과

항만 내 무인화 구역 확대는 인명사고 위험을 감소시킬 수 있다. 다만 항만 전반의 사망사고 건수는 연간 빈도가 낮고, 사고 발생 시 전체 작업 중단이 아니라, 해당 장비와 작업의 일시 중지와 안전 절차 강화가 이루어진다. 이 과정에서 일정 기간 생산성 저하가 나타난 뒤, 점차 회복되는 경

향이 있다. 따라서, 안전에 대한 영향 평가는 터미널 단위가 아니라 장비·작업 단위의 시간 손실로 보는 것이 타당할 수 있다는 의견이 제시되었다.

전문가 의견을 종합하면 안전사고 절감 편익을 정량화할 수 있는 방식은 크게 세 가지 정도이다. 첫째, 사고비용 회피로서 연간 사고 건수와 평균 보상·처리비를 곱해 산출한다. 둘째, 작업중단 손실 회피로서 사고당 중단 시간과 시간당 손실액을 곱해 계산한다. 셋째, 안전관리 지출의 축소분으로서 센서·웨어러블·교육 등 항목을 TEU당 또는 장비당으로 환산해 유인 대비 자동화에서 줄어드는 금액을 비교한다. 세 가지 방식 중에 안전사고의 절감 효과를 명확하게 산출할 수 있는 방식은 안전사고 발생 시 운영 중단 시간까지 포함하는 두 번째 방식으로 판단된다. 다만, 얼마나 운영 시간이 줄어드는지에 대한 실제 자료를 확보하기는 어렵다. 세 번째 방식은 일종의 대리 변수를 활용하는 것으로 터미널별 상황이 너무 다양하여 활용하기 쉽지 않다. 따라서, 본 연구에서는 사고 처리 비용의 절감만을 고려하는 첫 번째 방식을 적용하고자 한다.

〈표 3-13〉 안전사고 절감 편익 산정 방식

안전사고 절감 편익 = 사고 절감 건수(율) × 사고 처리 비용

자료: 저자 작성

5. 환경비용 절감 효과

항만에 대한 탄소중립 요구가 확대되는 상황에서 항만의 환경적 성과 또한 중요해지고 있다. 항만의 스마트화는 전기화와 운영 최적화를 통해 탄소배출량을 감소시키는데 기여할 수 있다는 의견이 제시되었다. 환경 항목은 다른 편익에 비해 정량적 수치로 제시하기가 상대적으로 용이하다는 의견도 공유되었다. 다만 구체적인 산정 방식이나 원단위에 대해서는 자문

단계에서 별도 합의나 수치 제시는 없었다. 따라서 본 항목의 정량화는 운영 데이터를 기반으로 접근하고, 터미널별 운영·장비 구성 차이로 결과에 편차가 발생할 수 있음을 전제한다.

1) 대기오염물질 저감 편익

스마트항만의 전기 구동 크레인, 자동화 야드장비, 최적화된 운영시스템은 기존 디젤 구동 장비 대비 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 미세먼지(PM_{10}, $PM_{2.5}$) 등 대기오염물질 배출을 크게 감소시킨다.[25] 국내 교통시설 투자평가지침에서는 대기오염물질 감소량에 오염물질별 사회적 비용 원단위를 적용하여 편익을 산정하도록 규정하고 있다.

다만, 배출계수의 경우 교통 및 건설부문 배출계수는 존재하나 항만에 특화된 배출계수는 체계적으로 정립되어있지 않은 상황이다. 따라서 스마트항만의 환경비용 절감 편익 정교화를 위해서는 장비별 또는 운영모드별 배출계수 개발 또한 필요하다.

〈표 3-14〉 대기오염물질 저감 편익 산정 방식

대기오염물질 저감 편익 = 대기오염비용 원단위 × 항만 장비별 대기오염 배출계수 × 배출량 변화

주: 배출량 변화는 기존 재래식 항만의 대기오염물질 배출량에서 재동화 항만의 대기오염물질 배출량을 뺀 값을 의미
자료: 「교통시설 투자평가지침(국토교통부고시 제2022-500호)」 중 환경비용 절감편익 산정 방식을 바탕으로 저자 작성

2) 온실가스 감축 편익

항만의 자동화 장비 도입과 에너지 효율 개선은 연료 소비량의 감소와

25) 김가현 외(2021) p.70.

그에 따른 이산화탄소(CO_2) 배출량 절감 효과를 가져온다. 또한 재생에너지 연계 운영 시 추가적인 탄소 감축 효과도 기대할 수 있다.

현재 국내 교통시설 투자평가지침에서도 온실가스 배출 감소를 주요 환경편익으로 인정하고 있다. 온실가스 감축 편익의 경우 「교통시설 투자평가지침(국토교통부고시 제2022-500호)」상 환경비용절감 편익 산정식에서는 CO_2 감축량에 사회적 비용을 적용하여 산정하고 있으며[26] CO_2 배출량 변화에 탄소 가격을 적용해서도 편익을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

〈표 3-15〉 온실가스 감축 편익 산정 방식

온실가스 감축 편익 = 연간 CO_2 감축량(tCO_2) × 탄소 배출권 가격(원/tCO_2)(또는 탄소 사회적비용 원단위(원/tCO_2))

주 1: 탄소 배출권 가격은 한국거래소 배출권시장(K-ETS) 연평균 가격 또는 환경부에서 제시하는 기준가격 적용
주 2: 탄소 사회적비용 원단위는 정부 최신지침 또는 관련 부처 고시 값을 적용하며, 관련 지침이 없는 경우 최신 연구결과를 참조
자료: 「교통시설 투자평가지침(국토교통부고시 제2022-500호)」 중 환경비용 절감편익 산정 방식을 바탕으로 저자 작성

6. 종합

앞서 언급한 것처럼 스마트항만 개발로 기대되는 효과는 다양하다. 다만, 경제적 타당성 평가에 적용하기 위해서는 무엇보다 쉬운 방법론을 활용하여 정량적으로 계산할 수 있어야 하고, 계산에 활용되는 원단위도 명확한 근거를 갖춰야 한다.

다양한 국내 외 선행연구와 항만분야 타당성 평가 지침, 전문가 의견 수렴 등을 통하여 현재 시점을 기준으로 제시할 수 있는 스마트항만의 개발편익은 크게 생산성 향상 편익, 안전사고 절감 편익, 환경비용 절감 편익으

26) 국토교통부(2022), p.227.

로 판단된다.

〈표 3-16〉 스마트항만 개발 편익(안)

구분	산정 방식
생산성 향상	선박 재항 비용 절감 원단위 × 하역 시간 절감
	선박 오염물 배출 저감량 × 선박 접안 시간 절감
운영비용 절감 편익	사업비용으로 반영되어 편익으로는 미반영
안전사고 절감 편익	감소된 사고 건수 × 원단위
환경비용 절감 편익	배출량 감축 × 오염물질별 원단위
	온실가스(GHG) 감축량 × 원단위

자료: 저자 작성

04
스마트항만 개발 편익 산정 및 제도 개선방안

제3장에서는 해외 사례 분석, 전문가 의견 수렴을 통해 스마트항만 개발 편익을 발굴하였다. 또한, 국내 컨테이너 터미널 운영사의 장비·운영시스템 분야의 실무자들과 자문회의를 통해 선정된 편익의 타당성과 정량화에 필요한 의견 수렴을 통해 편익의 산정 방식도 제안하였다. 본 장에서는 제3장에서 제안한 방법론을 활용하여 편익의 규모를 산정해보고자 한다. 더불어, 본 연구에서 제안하는 스마트항만 편익을 항만 개발사업의 타당성 평가 지침에 반영하는 등 제도적 개선방안도 제안하고자 한다.

제1절 스마트항만 개발 편익 산정

1. 하역 생산성 향상 편익 산정

1) 편익 산정 개요

KDI(2014), KDI(2022c) 등 항만 개발사업의 예비타당성조사 지침, 국

토교통부(2022) 등 교통투자시설의 타당성평가 지침 등에서는 신규 화물 부두 건설에 따라서 확보되는 화물 처리 능력에 따라서 선박 대기 비용이 줄어드는 효과를 선박 재항 비용 절감 편익으로 반영하고 있다. 선박재항 비용은 선박이 선석에 접안하여 서비스를 받는 동안 발생하는 비용으로서 하역생산성을 제고시킬 때 비용 절감 효과가 발생한다.[27)]

KDI(2022c) 등에서는 신규 화물 부두가 건설되지 않는 경우 기존 화물 부두의 처리능력을 초과하는 화물이 해상에서 부선 하역으로 처리되는 경우를 without case로 설정하고, 신규 화물 부두가 건설되는 경우를 with case로 설정한다. 그리고, with case 대비 하역 생산성이 저하되는 without case에서 선박 재항 시간이 길어짐에 따라 발생하는 차이를 편익으로 간주하고, 표준선박의 1일 용선료를 기회비용으로 적용하여 산정하고 있다.[28)]

본 연구에서는 신규 화물 부두가 건설되는 with case에서 예상되는 선박재항비용 절감 편익에 더하여 자동화 하역장비 도입에 따른 하역 생산성 향상으로 기대되는 선박 재항 비용 절감 편익을 추가로 산정한다. 즉, 하역 생산성이 증가하여 화물 처리 시간이 감소함에 따른 선박 재항 비용 절감을 기대할 수 있다. 효과의 크기는 KDI(2014), KDI(2022c)의 방법론을 준용하여 산정한다. 다만, KDI 등에서는 선박 재항 비용 절감 편익을 단순 용선료만으로 구하였으나, 선박 재항 시간이 줄어들면 유류비 등의 선박 운용비용도 절감되기 때문에 본 연구의 선박 재항 비용 절감 편익은 용선료 절감 효과와 선박 운용비용 절감 효과를 모두 반영한다.

반면, KDI 등에서는 선박에서 배출되는 CO_2, SOx, NOx, PM 등 대기오염 물질로 인한 사회적 비용은 편익으로 간주하지 않고 있으나, 본 연구에서는 하역 생산성 향상에 따라 감소되는 대기오염물질의 사회적 비용을 편익으로 고려한다.

27) KDI(2022c) p.262.
28) KDI(2022c) p.262 내용을 참고하여 저자 재작성

2) 편익 산정

(1) 가상의 컨테이너 터미널 설정

하역 생산성 향상에 따른 편익을 실제 항만을 대상으로 평가하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 가상의 컨테이너 터미널을 상정하여 계산하고, 추가 편익 반영에 따른 비용·편익 분석 영향을 검토한다. 가상 터미널은 부산항 진해신항 1-1단계를 모델로 삼아 3선석(8,000TEU×3선석)으로 구성하고, 1선석당 표준하역능력은 해양수산부(2021)를 준용하여 890,000TEU로 설정하였다.

또한, 부산항의 최근 3개년 선박 입출항 자료를 활용하여 표준 선박의 크기를 4,000TEU(1,059,063천 톤/26,743회×0.1[29]) 설정하였다.

〈표 4-1〉 부산항 컨테이너 입출항 컨테이너 선박 현황(최근 3개년)

구분		2022	2023	2024	평균
톤수	풀컨테이너선박(천 톤)	948,833	1,130,296	1,098,060	1,059,063
	세미컨테이너선(천 톤)	12,306	11,159	9,405	10,957
합계		961,139	1,141,456	1,107,465	1,070,020
입출항 횟수	풀컨테이너선박(회)	24,225	27,374	25,823	25,807
	세미컨테이너선(회)	1,040	934	834	936
합계		25,265	28,308	26,657	26,743
평균 선형(GT)					40,011
평균 선형(TEU)					4,001

주: 평균 선형(GT)은 총톤수를 입출항 횟수로 나눈 값이며, 평균 선형(TEU)는 GT를 환산한 값임
자료: Port-MIS 자료를 활용하여 저자 재작성

(2) 선박 재항 비용 절감 원단위 산정

앞서 설명한 것처럼 국내 항만 개발사업의 타당성평가에서 선박 재항 비

29) 0.1은 GT를 TEU로 환산하기 위한 계수임.

용 절감 비용은 표준선박의 용선료를 기회비용으로 적용하고 있다. 하지만, 조아현 외(2022)에서는 선박 대기 비용 절감 효과를 추정함에 있어서 용선료 외에 유류비, 고정비 등 선박 운항 비용을 포함해야 한다고 주장하고 있다. 선박 대기 비용이 줄어들면 용선료와 같은 직접비용도 줄어들지만 선박 운항 비용과 같은 간접비용도 줄어드는 게 타당한 가정이라고 판단되어 본 연구에서는 용선료와 선박 운항 비용을 포함하여 원단위를 산정하고 한다.

가. 용선료

KDI에서 수행하는 예비타당성조사에서는 Clarkson에서 발표하는 Container Intelligence의 선형별 컨테이너 1일 용선료에 환율을 적용하여 평가하고 있다. 다만, Clarkson 자료에는 4,000TEU 선박에 대한 용선료가 없으므로 4,250TEU 선박과 3,500TEU 선박의 용선료를 기준으로 보간한 55,417달러를 1일 용선료로 설정하였다.

〈표 4-2〉 선급별 컨테이너 선박의 1일 용선료

단위: USD/day

구분	2,000TEU	2,500TEU	3,500TEU	4,250TEU
2021	39,809	45,233	58,172	67,123
2022	46,707	58,469	79,774	91,601
2023	13,523	15,637	19,126	21,272
2024	19,061	25,526	33,553	40,452
2025	27,324	34,041	43,526	54,980
평균	29,285	35,781	46,830	55,086

주 1: 풀(full)컨테이너선 6~12개월 정기용선료 기준임
주 2: 2025년 용선료는 2025년 9월 기준임
자료: Clarkson, Container Intelligence Annual, 각 년호를 바탕으로 저자 재작성

나. 선박 운항 비용

조아현 외(2022)에서는 유류비, 인건비, 선박보험료, 선박용품비, 예비

부품비, 윤활유비, 수리·유지보수비, 운용·관리비, 점검비, 드라이도킹비 등 선박 운항 비용을 다음과 같이 제시하고 있다.

〈표 4-3〉 선급별 컨테이너선 선박운항비용 중 고정비 부문 세부 비용

단위: USD, USD/day

구분	〈1,000 TEU	1~2,999 TEU	3~4,999 TEU	5~7,999 TEU	8~9,999 TEU
인건비	886,830	1,037,109	1,071,570	981,210	1,091,070
선박보험료	79,150	82,020	93,240	107,370	284,470
선박용품비	82,140	90,630	90,900	135,530	171,600
예비부품비	70,030	64,640	84,780	111,910	159,870
윤활유 비용	93,800	82,940	122,030	129,560	192,670
수리 및 유지 보수비	85,150	91,230	118,060	125,650	188,470
운영 및 관리비	145,940	287,700	406,200	441,110	534,900
연간 선박운항비	1,735,680	2,061,639	2,365,050	2,543,800	2,894,050
1일 선박운항비용	4,760	5,650	6,480	6,970	8,180

자료: 조아현 외(2022), p.123의 〈표 부록-2〉를 활용하여 재작성

본 연구에서는 3~4,999TEU급 선박의 1일 선박 운항 비용인 6,480달러를 선박 운항 비용 절감의 원단위로 적용한다.

다. 유류비

선박은 항계 내로 진입하여 운항하여 묘박지에서 일정 시간을 대기한 후에 선석에 접안한다. 그리고 화물의 양·적하가 끝나면 이안하여 출항한다. 이러한 과정에서 선박은 연료를 소모하게 된다. 하역 생산성이 향상되면 선박의 접안 시간이 줄어들게 되고, 접안 중에 사용하던 연료 소모량이 줄어들게 된다.

VesselsValue에서 제공하는 AIS Dynamic Data에 따르면 2024년 부산항을 기항한 선박의 수는 1,686척이다. 이중 본 연구에서 표준 선형으로

설정하고 있는 4,000TEU급(3~5,999TEU) 선박은 약 270척이며, 동 선박의 시간당 연료 소모량인 0.3톤[30]을 유류비 절감 원단위로 적용한다.

〈표 4-4〉 선급별 상태별 연료 소모량

단위: 톤

구분	부산항 전체	〈3,000 TEU	3~5,999 TEU	6~7,999 TEU	8~11,999 TEU	12~14,999TEU	〉15,000TEU
운항 중	119,054	39,004	13,591	7,420	25,915	18,824	14,301
접안 중	59,009	14,040	5,807	3,502	13,948	11,164	10,547
묘박 중	2,596	2,089	280	64	52	34	79
선박수	1,686	545	270	135	320	217	199

자료: VesselsValue(검색일: 2025.9.20.)

〈표 4-5〉 선급별 접안 시간 및 항차수

단위: 톤

구분	부산항 전체	〈3,000 TEU	3~5,999 TEU	6~7,999 TEU	8~11,999 TEU	12~14,999TEU	〉15,000TEU
접안시간	223,018	134,677	19,533	10,117	23,652	17,755	17,286
대기시간	8,002	7,935	0	0	57	10	0
이동시간	15,008	10,825	1,023	904	867	397	992
항차수	11,332	7,968	1,002	453	847	582	480
평균 접안 시간	19.7	16.9	19.5	22.3	27.9	30.5	36.0
평균 대기시간	0.7	1.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
평균 이동시간	1.3	1.4	1.0	2.0	1.0	0.7	2.1

자료: VesselsValue(검색일: 2025.9.20.)

선박 연료 가격은 편의상 2025년 9월 기준의 싱가포르, 로테르담, 푸자이라, LA/LB, 홍콩, NY/NJ 등 주요 벙커링 항만의 VLSFO(저유황유), HSFO(고유황유) 가격을 평균한 453.3 달러를 적용한다.

30) 3~5,999TEU급 선박의 접안 중 연료소비량 5,807톤을 접안 시간 19,533으로 나눈 값임

〈표 4-6〉 주요 항만별 선박유 공급 가격(2025년 9월 기준)

단위: USD/MT

구분	VLSFO	HSFO	평균
싱가포르	485.0	410.5	447.8
로테르담	459.0	398.0	428.5
푸자이라	482.0	388.0	435.0
LA/LB	524.5	430.5	477.5
홍콩	507.5	425.5	466.5
NY/NJ	508.0	423.0	465.5
평균	494.3	412.6	453.5

자료: Ship & Bunker, World Bunker Prices(검색일: 2025.9.10.)

(3) 선박 배출 대기오염물질 저감 원단위 산정

최근 선박 배출 대기오염물질을 감축하기 위해 국내외 규제가 강화되고 있다. 이에 따라, 선박에서 얼마나 많은 연료를 사용하고, 사용한 연료에 따라 CO_2, SOx, NOx, PM 등 대기오염 물질이 어느 정도 배출되는지를 추정하는 연구가 활발하게 진행 중이다.

앞서도 설명한 것처럼 하역 생산성 향상에 따라 선박의 접안시간이 줄어들면 선박에서 배출되는 오염물질의 양도 줄어든다. 따라서, 본 연구에서는 안승현 외(2022)와 Kim et al.(2022)의 연구를 참고하여 AIS 자료를 기반으로 2024년 부산항을 기항한 선박이 배출한 대기오염물질의 양을 추정하고, 오염원별 사회적 비용을 적용하여 대기오염물질 저감 편익을 산정한다.

앞서 〈표 4-4〉에서 제시한 표준 선박의 상태별 연료 사용으로 배출되는 CO_2, SOx, PM, NOx는 각 62,378톤, 10톤, 71톤, 1,078톤이다. 이를 〈표 4-11〉처럼 접안 시간으로 나눠서 배출원별 저감량 원단위로 활용한다. 또한, 배출원별 사회적 비용 원단위는 〈표 4-12〉과 〈표 4-13〉와 같으며, 해당 원단위를 활용한 근거 등은 이후 환경비용 절감 편익 부분에서 자세하게 설명한다.

〈표 4-7〉 선급별 상태별 CO_2 배출량

단위: 톤

구분	부산항 전체	〈3,000 TEU	3~5,999 TEU	6~7,999 TEU	8~11,999 TEU	12~14,999TEU	〉15,000TEU
운항 중	377,402	123,641	43,083	23,521	82,149	59,673	45,334
접안 중	187,057	44,507	18,408	11,101	44,215	35,391	33,435
묘박 중	8,231	6,621	886	202	164	107	250
합계	572,689	174,769	62,378	34,824	126,528	95,171	79,019

자료: 안승현 외(2022)와 Kim et al.(2022)의 연구를 참고하여 AIS 자료를 기반으로 2024년 부산항을 기항한 선박이 배출한 대기오염물질의 양을 추정

〈표 4-8〉 선급별 상태별 SOx 배출량

단위: 톤

구분	부산항 전체	〈3,000 TEU	3~5,999 TEU	6~7,999 TEU	8~11,999 TEU	12~14,999TEU	〉15,000TEU
운항 중	60	20	7	4	13	9	7
접안 중	30	7	3	2	7	6	5
묘박 중	1	1	0	0	0	0	0
합계	90	28	10	5	20	15	12

자료: 안승현 외(2022)와 Kim et al.(2022)의 연구를 참고하여 AIS 자료를 기반으로 2024년 부산항을 기항한 선박이 배출한 대기오염물질의 양을 추정

〈표 4-9〉 선급별 상태별 NOx 배출량

단위: 톤

구분	부산항 전체	〈3,000 TEU	3~5,999 TEU	6~7,999 TEU	8~11,999 TEU	12~14,999TEU	〉15,000TEU
운항 중	6,509	2,141	745	408	1,410	1,026	779
접안 중	3,206	767	317	192	758	603	570
묘박 중	143	115	15	4	3	2	4
합계	9,858	3,023	1,078	603	2,171	1,630	1,353

자료: 안승현 외(2022)와 Kim et al.(2022)의 연구를 참고하여 AIS 자료를 기반으로 2024년 부산항을 기항한 선박이 배출한 대기오염물질의 양을 추정

〈표 4-10〉 선급별 상태별 PM 배출량

단위: 톤

구분	부산항 전체	〈3,000 TEU	3~5,999 TEU	6~7,999 TEU	8~11,999 TEU	12~14,999TEU	〉15,000TEU
운항 중	429	142	49	27	92	67	51
접안 중	207	49	20	12	49	39	37
묘박 중	9	7	1	0	0	0	0
합계	645	198	71	40	141	107	88

자료: 안승현 외(2022)와 Kim et al.(2022)의 연구를 참고하여 AIS 자료를 기반으로 2024년 부산항을 기항한 선박이 배출한 대기오염물질의 양을 추정

〈표 4-11〉 선급별 정박시 오염물질 배출 원단위

단위: kg/시간

구분	〈3,000 TEU	3~5,999 TEU	6~7,999 TEU	8~11,999 TEU	12~14,999TEU	〉15,000TEU
CO_2	330.5	942.4	1,097.3	1,869.4	1,993.3	1,934.2
SOx	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3
NOx	5.7	16.3	18.9	32.0	34.0	32.9
PM	0.4	1.0	1.2	2.1	2.2	2.1

자료: 〈표 4-4〉 선급별 상태별 연료 소모량을 바탕으로 저자 작성

〈표 4-12〉 오염물질별 사회적 비용 원단위

오염물질	사회적 비용 원단위	주요 피해 항목
NOx	15,000원/kg	호흡기 질환, 오존 생성, 농작물 손상
SOx	35,000원/kg	산성비, 조기사망, 생태계 피해
PM_{10}	27,000원/kg	호흡기 질환, 사망 위험 증가
$PM_{2.5}$	120,000원/kg	조기사망, 심혈관 질환, 미세먼지 장기 노출 피해

자료: European Commission(2021), p.23을 바탕으로 저자 작성

〈표 4-13〉 온실가스 사회적 비용 원단위

년도	사회적 비용 원단위	비고
2025	202,000원/tCO_2	165 EUR/tCO_2, 2016년 유로 기준
2030	306,000원/tCO_2	250 EUR/tCO_2, 2016년 유로 기준
2040	643,000원/tCO_2	525 EUR/tCO_2, 2016년 유로 기준

자료:European Commission(2021), p.23.

(4) 하역 생산성 향상 편익 산정

가. 선박 재항 비용 절감 편익

KDI에서는 선박 재항 비용 절감 편익을 계산할 때, 부선하역의 비현실적 측면을 고려하여 해당 항만에서 처리가 불가피한 목적 화물이나, 인접 항만에 여유 하역능력이 없는 경우에 한해 한정적으로 적용하도록 하고 있다.[31] 반면, 본 연구에서 제안하는 하역 생산성 향상 효과는 하역능력과는 관련이 없는 서비스 향상의 성격으로 환적 화물까지 포함하여 계산하는 것이 타당하다.

하역 생산성 향상에 따라 with case[32]에서는 화물 처리 시간이 단축되어 without case[33] 대비 선박의 접안 시간이 줄어든다. 따라서, 선박 재항 비용에도 차이가 발생하며, 차이의 크기는 다음의 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$BC_t = PC(T_t' \times P_t - T_t \times P_t) + OC(T_t' \times P_t - T_t \times P_t) + FP(F_t \times B_t' - F_t \times B_t) \quad \text{(식-1)}$$

여기서,

BC_t : t년도의 선박 재항 비용 절감 효과

31) KDI(2022c), p.241.
32) DTQC가 도입된 완전자동화 터미널을 의미함
33) DTQC가 도입되지 않은 반자동화 터미널 또는 재래식 터미널을 의미함

PC : 표준선박의 1일 용선료

OC : 표준선박의 1일 선박 운영비용 중 고정비용

P_t : t년도의 처리 물동량

$T_t(T_t')$: with case(without case)의 t년도의 하역 생산성

FP : 표준선박의 1일 선박 운영비용 중 연료비용

F_t : with case(without case)의 t년도의 연료 소모량

$B_t(B_t')$: with case(without case)의 t년도의 선박 접안 시간

without case의 하역 생산성은 Port-MIS의 최근 3개년 부산항 신항 5개 터미널의 평균 접안시간과 평균 하역량을 구하고, 평균하여 적용한다. 또한, with case의 하역 생산성은 without case의 하역 생산성에 자동화 장비 도입으로 생산성이 높아지는 비율(4.3%)을 적용하여 계산하였다.

〈표 4-14〉 부산항 신항의 평균 접안 시간과 평균 하역량(최근 3개년 평균)

단위: 시간, TEU

구분	PNIT	PNC	HJNC	HPNT	BCT	평균
평균 접안시간	28.1	23.3	23.6	25.2	13.4	22.7
평균 하역량	3,497.0	2,759.8	2,921.8	2,836.0	618.8	2,526.7

자료: Port-MIS 자료를 활용하여 저자 작성

〈표 4-15〉 without case 하역 생산성

단위: 시간, TEU, 초/TEU

구분	평균 접안시간(a)	평균 하역량(b)	하역 생산성 (c=a/b×3600)
without case	22.7	2,526.7	32.4

자료: Port-MIS 자료를 활용하여 저자 작성

〈표 4-16〉 with case 하역 생산성

단위: 시간, TEU, 초/TEU

구분	witout case의 하역 생산성(a)	하역 생산성 증가율(b)	하역 생산성 (c=a×(1-c))
with case	32.4	4.3	31.0

자료: Port-MIS 자료를 활용하여 저자 작성

하역 생산성 향상에 따라 가상 터미널의 연간 처리 물동량 2,670천TEU를 처리하는 데 소요되는 선박 재항 시간은 약 43.1일 감소한다.

〈표 4-17〉 하역 시간 절감 효과

단위: TEU, 초/TEU, 일

총물동량(a)	하역 생산성		하역시간 절감 (d=a(b-c)/3600/24)
	without case(b)	with case(c)	
2,670,000	32.4	31.0	43.1

자료: 저자 작성

따라서, 용선료 절감 편익은 연간 2,790백만 원이 발생하고, 선박 운영비용 절감 편익은 고정비용 절감 352백만 원, 유류비 176백만 원 등 연간 527백만 원이 발생하는 것으로 산정되었다. 총 선박 재항 시간 절감 편익은 연간 3,317백만 원이다.

〈표 4-18〉 용선료 절감 효과

단위: 일, USD/일, 원/USD, 백만 원

구분	하역시간 절감(a)	표준선박 용선료(b)	환율(c)	용선료 절감 (d=a×b×c)
용선료	43.1	51,417	1,260	2,790

자료: 저자 작성

〈표 4-19〉 선박 운영비용 중 고정비 절감 효과

단위: 일, USD/일, 원/USD, 백만 원

구분	하역시간 절감(a)	표준선박 운영비용 (b)	환율(c)	고정비용 절감 (d=a×b×c)
고정비용	43.1	51,417	1,260	352

자료: 저자 작성

〈표 4-20〉 선박 운영비용 중 유류비 절감 효과

단위: 일, 톤/일, USD/톤 원/USD, 백만 원

구분	하역시간 절감(a)	연료소비량 감소(b)	유류비(c)	환율(d)	유류비 절감 (e=a×b×c×d)
유류비	43.1	7.1	453	1,260	352

주: (식-1)의 선박 접안 시간 절감 효과는 결과적으로 하역 시간 절감 효과와 동일함
자료: 저자 작성

〈표 4-21〉 선박 재항 시간 절감 편익

단위: 백만 원

구분	용선료 절감	선박 운영 비용 절감			합계
		고정비	유류비	소계	
선박 재항 시간 절감 편익	2,790	352	176	527	3,317

자료: 저자 작성

나. 선박 배출 대기오염 저감 편익

앞서 선박 재항 시간 절감 편익 산정 과정에서 설명한 것처럼 하역 생산성이 높아짐에 따라 선박 접안 시간이 줄어든다. 따라서, 정박한 선박에서 발생하는 오염물질이 감소하면서 기대되는 사회적 비용 저감 효과는 다음의 식 (2)와 같이 산정할 수 있다.

$$BE_t = EC(BT_t^{'} \times E_t - BT_t \times E_t) \quad \text{(식-2)}$$

여기서,

BE_t : t년도의 선박 배출 대기오염 저감 편익

EC : 오염원별(CO_2, SOx, NOx, PM 등) 사회적 비용 원단위

E_t : 오염원별(CO_2, SOx, NOx, PM 등) 단위 시간당 배출량 원단위

$BT_t(BT_t^{'})$: with case(without case)의 t년도의 선박 접안 시간

특히, $BT_t(BT_t^{'})$는 하역 생산성 향상에 따른 하역시간 절감 효과와 동일하다. 위 산정식에 따라 계산한 선박 배출 대기오염 절감 편익은 연간 533백만 원으로 추정되었다.

〈표 4-22〉 NOx 배출 저감 편익

단위: 일, kg/시간, 원/kg, 백만 원

구분	하역시간 절감(a)	배출량 원단위(b)	사회적 비용 원단위(c)	NOx 배출 저감 편익 (d=a×24×b×c)
NOx	43.1	16.3	15,000	252

자료: 저자 작성

〈표 4-23〉 SOx 배출 저감 편익

단위: 일, kg/시간, 원/kg, 백만 원

구분	하역시간 절감(a)	배출량 원단위(b)	사회적 비용 원단위(c)	NOx 배출 저감 편익 (d=a×24×b×c)
SOx	43.1	0.1	35,000	5

자료: 저자 작성

〈표 4-24〉 PM 배출 저감 편익

단위: 일, kg/시간, 원/kg, 백만 원

구분	하역시간 절감(a)	배출량 원단위(b)	사회적 비용 원단위(c)	NOx 배출 저감 편익 (d=a×24×b×c)
PM	43.1	1.0	73,500	79

주: 사회적 비용 원단위는 PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 의 사회적비용을 평균하여 적용함
자료: 저자 작성

〈표 4-25〉 CO_2 배출 저감 편익

단위: 일, 톤/시간, 원/톤, 백만 원

구분	하역시간 절감(a)	배출량 원단위(b)	사회적 비용 원단위 (c)	NOx 배출 저감 편익 (d=a×24×b×c)
CO_2	43.1	0.94	202,000	197

주: 사회적비용 원단위는 2025년 기준 원단위임
자료: 저자 작성

〈표 4-26〉 선박 배출 대기오염 저감 편익

단위: 백만 원

구분	NOx	SOx	PM	CO_2	합계
선박 배출 대기오염 저감 편익	252	5	79	197	533

자료: 저자 작성

2. 환경비용 절감 편익 산정

1) 개요

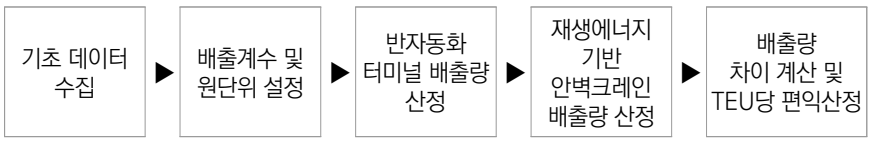
앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서의 안벽 스마트화는 신규 건설되는 화물 부두에 기존 재래식 또는 반자동 터미널에서 사용되던 디젤구동 안벽 크레인 대신 재생에너지 기반 전기구동 무인 안벽크레인을 도입하는 것으로 가정한다. 이는 현재 전력믹스를 사용하는 것보다 한 단계 더 발전된 개념으로, 현재 전력믹스는 간접배출이 높아 환경편익이 제한적이므로 향후 재생에너지 확대를 전제로 한 접근방법이다.

이를 통해 직접적인 대기오염물질 배출을 원천 차단하고 운영 중 온실가스 직접 배출을 완전히 제거하며, 회생제동 등을 통한 에너지 효율 개선이 가능하다. 본 연구에서는 재생에너지 전력 사용 시 운영 단계에서의 직접 배출을 0으로 가정하여 최대 환경편익을 산정한다.

현재 국내 항만부문 환경편익은 주로 준설토 외해투기 관련 편익에 국한되어 제한적으로 적용되고 있다.[34] 반면 도로·철도·친환경신교통 등 타 교통시설에서는 환경비용 절감 편익을 주요 정량 평가 항목으로 적용하고 있어, 국내 항만분야에서도 스마트항만 개발 편익 산정 시 환경편익 체계 도입이 필요하다.

본 연구에서는 기존 터미널의 안벽 자동화에 따른 환경비용 절감 편익을 대기오염물질(NOx, SOx, PM)과 온실가스(CO_2)로 구분하여 산정한다. 편익 산정의 기준이 되는 환경오염물질 배출계수 및 사회적 비용 원단위는 유럽 위원회(European Commission)의 「Economic Appraisal Vademecum 2021-2027」 및 「교통시설 투자평가지침(국토교통부 고시 제2022-500호)」 등을 준용하였다.

〈표 4-27〉 환경비용 절감 편익 도출 프로세스



자료: 저자 작성

2) 산정 방법

환경비용 절감 편익의 산정은 유럽위원회의 경제성 평가 가이드라인에서 제시하는 기본 원리에 기반하여 수행한다. 기본 산정 방식은 오염물질별 배출량 변화와 사회적 비용 원단위의 곱으로 편익을 산정한다.

34) 본문의 〈표 2-4〉 기타 특수 편익의 주요 내용 및 산정 방법 참조

〈표 4-28〉 환경비용 절감 편익의 기본 산정식

편익항목	산정식
터미널 당 환경편익	대기오염물질 저감 편익 + 온실가스 감축 편익
대기오염물질 저감 편익	Σ(오염물질별 배출량 변화 × 사회적 비용 원단위)
온실가스 감축 편익	(디젤크레인 CO_2배출량 − 재생에너지크레인 전과정CO_2배출량) × 탄소 사회적비용 원단위

주: 재생에너지 기반 전기크레인의 경우 운영 중 직접 배출은 0을 가정
자료: European Commission(2021), p.20, p.23, pp.52-53에서 언급하고 있는 방법론을 바탕으로 저자 작성

3) 원단위 산정

(1) 대기오염물질의 사회적 비용 원단위

유럽연합 가이드라인의 「Handbook on the External Costs of Transport」에서 제시하는 대기오염물질별 사회적 비용 원단위를 적용한다. 국내에는 항만장비 대기오염물질의 사회적 비용에 대한 공식적인 원단위가 부재한 상황이며, 국토교통부의 「교통시설 투자평가지침」에서도 유럽 기준을 준용하고 있어 일관성을 확보할 수 있다고 판단된다.

〈표 4-29〉 오염물질별 사회적 비용 원단위

오염물질	사회적 비용 원단위	주요 피해 항목
NOx	15,000원/kg	호흡기 질환, 오존 생성, 농작물 손상
SOx	35,000원/kg	산성비, 조기사망, 생태계 피해
PM_{10}	27,000원/kg	호흡기 질환, 사망 위험 증가
$PM_{2.5}$	120,000원/kg	조기사망, 심혈관 질환, 미세먼지 장기 노출 피해

자료: European Commission(2021), p.23을 바탕으로 저자 작성

(2) 온실가스 사회적 비용 원단위

온실가스 감축 편익 산정을 위한 탄소 사회적 비용은 유럽위원회의 자료

에서 제시하는 탄소 사회적 비용을 적용한다. 이는 파리협정의 1.5℃ 목표 달성을 위한 한계 감축 비용에 기반한 것으로, 다음과 같다.

〈표 4-30〉 온실가스 사회적 비용 원단위

년도	사회적 비용 원단위	비고
2025	202,000원/tCO_2	165 EUR/tCO_2, 2016년 유로 기준
2030	306,000원/tCO_2	250 EUR/tCO_2, 2016년 유로 기준
2040	643,000원/tCO_2	525 EUR/tCO_2, 2016년 유로 기준

자료:European Commission(2021), p.23.

본 연구에서는 보수적 접근을 위해 현 시점인 2025년 기준인 202원/kg CO_2를 적용했다. 향후 탄소의 사회적 비용이 상승할 것으로 예상되지만, 확실성을 높이기 위해 현재 시점의 가장 낮은 값을 사용했다.

4) 산정 결과

(1) 기본 가정

본 연구의 환경편익 산정은 앞서 설정한 부산항 진해신항 1-1단계를 모델로 삼아 3선석(8,000TEU×3선석)으로 구성하고, 1선석당 표준하역능력은 해양수산부(2021)를 준용하여 890,000TEU로 설정한다.

3선석 터미널에는 선석당 3대씩 총 9대의 안벽크레인이 설치되는 것으로 가정하였다. 안벽 자동화를 통해 기존 디젤 안벽크레인에서 발생하는 모든 직접 환경오염물질 배출량이 재생에너지 전력 사용으로 완전히 제거되며, 이러한 배출량 저감이 환경편익이 된다.

(2) 배출량 산정 기준

환경편익 산정은 온실가스와 대기오염물질을 구분하여 서로 다른 출처의

데이터를 활용하였다. 온실가스(CO_2)의 경우 기존 터미널과 자동화 터미널의 실제 배출량 데이터를 비교하고, 대기오염물질(NOx, SOx, PM)의 경우 기존 이론적 계산방법을 적용하였다.

가. 온실가스 배출량 기준

기존 터미널 배출량은 안승현 외(2022)[35]의 선행연구 결과를 적용하였다. 해당 연구에서는 IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체)의 2006년 국가 온실가스 인벤토리 가이드라인 Tier 3 방식을 적용하여 2012년부터 2021년까지 10년간 전국 주요 항만의 부두별 실제 운영 데이터를 기반으로 컨테이너 터미널의 탄소 배출량을 산정하였다. 컨테이너 터미널 전체 평균 배출량은 7.793kg CO_2/TEU로 산정되었으며, 본 연구에서는 7.8kg CO_2/TEU를 기존 반자동화 터미널의 배출량 기준으로 적용하고자 한다.

안벽자동화 터미널의 배출량은 재생에너지 전력 사용을 가정하여 운영 중 직접 배출을 0으로 설정하였다. 김가현 외(2021)의 더블트롤리 무인 안벽크레인 에너지 사용량 데이터는 참조하되, 재생에너지 사용으로 인한 온실가스 배출량은 0tCO_2/TEU로 적용하였다.

〈표 4-31〉 무인자동화 탄소배출량

영역	장비	연료	에너지 사용량 (/TEU)	배출계수 (2024국가탄소 배출계수)	배출량 (tCO2 /TEU)
안벽 (더블)	RCQC (더블트롤리; 해측원격/육측 자동)	재생 에너지 전기	12kwh	0	0
이송	AGV		4.16 kwh		
장치	ARMGC (라멘)		7.6kwh		

자료: 김가현 외(2022), p.69를 바탕으로 저자 재작성

35) 안승현 외(2022)

나. 대기오염물질 배출량 기준

대기오염물질의 경우 안승현 외(2022)의 안벽크레인 운영 특성 데이터와 환경부의 「대기오염물질 발생량 계산방법」을 활용하여 산정하였다. 안벽크레인의 출력 338kW, 연간 가동시간 2,641시간, 부하율 43%를 적용하여 실제 운전시간을 1,136시간으로 설정하였다.

〈표 4-32〉 안벽크레인 제원 및 운영조건

구분	항목	내용
기본 제원	출력	453 HP(338kW)
	대수	9(선석당 3대)
운영조건	연간 가동 시간	2,641
	부하율	43%
	실제 운전 시간	1,136시간/년(2,641×0.43)

자료: 한국해양수산개발원(2022), pp.70-71을 바탕으로 저자 재작성

연료소모율은 미국전력연구원(Electric Power Research Institute)(2009)의 안벽크레인 연구를 참조하여 산정하였다.[36] 해당 연구에서는 1,500HP 안벽크레인이 연간 3,800시간 운전 시 69,000갤런의 디젤을 소모하는 것으로 제시하였으며, 이를 kW당 연료소모율로 환산하면 약 61g/kWh에 해당한다.

배출계수는 환경부의 「대기오염물질 발생량 계산방법」에 따라 미국환경청(EPA) 배출계수를 적용하여 대기오염물질별 배출량을 계산하였다. 다만, 본 연구에서는 PM의 구체적인 입경 분포 데이터가 없어 PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 중간값인 73,500원/kg을 적용하고자 한다.

36) Electric Power Research Institute(2009)에 따르면, 1,500HP(1,119kW) 안벽크레인이 연간 3,800시간 운전 시 69,000갤런(약 261㎥)의 디젤을 소모하며, 이는 약 61g/kWh의 연료소모율에 해당함. 해당 연구는 EPA NONROAD 모델을 기반으로 하며, 21% 부하율을 적용함

재생에너지 기반 자동화 방식에서는 현장에서의 직접적인 대기오염물질 배출이 완전히 제거되므로, 디젤 배출량 전체가 저감 편익이 된다.

〈표 4-33〉 환경부 EPA 배출계수(디젤 구동 기준)

항목	배출계수(단위)	근거
NOx	2.4kg/kℓ	EPA 배출계수
SOx	0.017kg/kℓ	EPA 배출계수 × 경유황함량 0.001%
PM	0.24kg/kℓ	EPA 배출계수

자료: 환경부, 「대기오염물질 발생량 계산방법」

(3) 환경편익 산출 과정

가. 온실가스 감축 편익 산정

기존 반자동화 터미널과 재생에너지 기반 자동화 터미널의 안벽크레인 배출량 차이를 통해 온실가스 감축 편익을 산정하였다.

〈표 4-34〉 온실가스 감축 편익 산정

TEU당 온실가스 감축량 = 기존 터미널 배출량 – 재생에너지 기반 자동화 터미널 배출량
= 7.8kg CO_2/TEU – 0kg CO_2/TEU
= 7.8kg CO_2/TEU

자료: 저자 작성

나. 대기오염물질 저감 편익 산정

대기오염물질 저감 편익은 기존 디젤구동 안벽크레인의 배출량을 기준으로 산정하였다. 자동화 방식에서는 현장에서의 직접적인 대기오염물질 배출이 발생하지 않으므로, 디젤 배출량 전체가 저감 편익이 된다.

각 오염물질별 연간 저감 편익을 계산하면 총 13,550원의 대기오염물질 저감 편익이 발생한다.

〈표 4-35〉 대기오염물질 저감 편익 산정

연간 디젤 소모량 = 338kW × 1,136시간 × 61g/kWh × 9대 × 10^{-3} ÷ 840kg/kℓ = 0.25kℓ
오염물질별 연간 배출량 • NOx: 0.25kℓ × 2.4kg/kℓ = 0.60kg • SOx: 0.25kℓ × 0.017kg/kℓ = 0.004kg • PM: 0.25kℓ × 0.24kg/kℓ = 0.06kg
오염물질별 연간 저감 편익 • NOx: 0.60kg × 15,000원/kg = 9,000원 • SOx: 0.004kg × 35,000원/kg = 140원 • PM: 0.06kg × 73,500원/kg = 4,410원

자료: 저자 작성

(4) 환경편익 산출 결과

가. 배출량 변화 및 환경편익 종합

디젤 안벽크레인은 연간 20,826kg의 CO_2를 배출하는 것으로 산정되었다. 즉, 이는 앞서 가정한 바와 같이 재생에너지 기반 전기 안벽크레인 구동시의 CO_2감축량이 된다. 여기에 사회적 비용 원단위(202원/kg)를 적용하면 연간 4,206,852원의 온실가스 감축 편익이 발생한다.

〈표 4-36〉 배출량 변화 및 환경편익 산정

구분	오염물질	디젤 안벽 크레인(A)	재생에너지 전기구동 안벽크레인(B)	배출량 차이 (A-B)	사회적 비용 원단위	연간 편익(원)
온실가스	CO_2(kg)	20,826[1)]	0[2)]	20,826	202원/kg	4,206,852
대기오염	NOx(kg)	0.60	0	0.60	15,000원/kg	9,000
	SOx(kg)	0.004	0	0.004	35,000원/kg	140
	PM(kg)[3)]	0.06	0	0.06	73,500원/kg	4,410
	소계					13,550
총 환경편익						4,220,402

주 1: 디젤 안벽크레인 CO_2 배출량 = 7.8kg/TEU × 2,670,000 TEU = 20,826kg
주 2: 재생에너지 기반 전기크레인 CO_2 배출량 = 0kg(운영 중 직접 배출 없음)
주 3: PM 사회적 비용 원단위는 PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 중간값으로 설정
자료: 환경부, 「대기오염물질 발생량 계산방법」 및 European Commission(2021), 김가현 외(2022), 안승현 외(2022)를 바탕으로 저자 작성

나. TEU당 환경편익

기존 반자동화 터미널에서 재생에너지 기반 자동화 터미널로의 전환을 통해 TEU당 1,580원의 환경편익이 창출되며, 267만 TEU 터미널 기준 연간 약 42억 원의 환경적 가치에 해당한다.

〈표 4-37〉 TEU당 환경편익

구분	산정항목	내용
온실가스	TEU당 CO_2 감축량	7.8kg − 0kg = 7.8kg CO_2/TEU
	TEU당 감축 편익	7.8kg × 202원/kg = 1,575.6원/TEU
	267만 TEU당 감축 편익	1,575.6원/TEU × 2,670,000 TEU = 4,206,852,000원
대기오염물질	267만 TEU당 감축 편익	NOx(9,000원) + SOx(140원) + PM(4,410원)=13,550원
TEU당 총 편익		1,575.6원/TEU + 0.005원/TEU = 1,575.605원/TEU
267만 TEU당 총 감축 편익		4,206,865,550원

자료: 저자 작성

3. 안전사고 감소 편익 산정

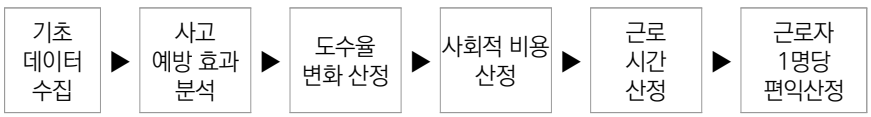
1) 편익산정 개요

본 연구는 기존의 재래식 및 반자동 컨테이너 터미널에서 안벽영역을 스마트화했을 경우 얻을 수 있는 안전편익을 정량화한다.

안전사고 감소 편익 도출에 활용된 자료는 컨테이너 부두의 제한적 사고 발생 특성상 충분한 사례 확보를 위해 2001년부터 2023년까지 22년간의 자료를 수집하였으며, 편익 산정의 기준이 되는 항만하역업 전체 통계는 데이터 품질이 안정화된 2014년부터 2024년까지의 자료를 활용하였다.

안전사고 감소 편익 도출 프로세스는 다음과 같다.

〈표 4-38〉 안전사고 감소 편익 도출 프로세스



자료: 저자 작성

2) 안전사고 현황

한국항만물류협회(2025) 통계에 따르면 11년간 총 1,249건의 사고가 발생했으며, 이 중 27명이 사망하고 1,222명이 중상해를 입었다. 항만하역업 도수율은 평균 2.98 수준이다.

〈표 4-39〉 연도별 항만하역 재해발생 추이

구분	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
사망	4	4	1	1	5	3	1	4	2	2	-
중경상	126	91	79	96	94	96	115	124	126	140	135
계	130	95	80	97	99	99	116	128	128	142	135
근로자수	17,912	17,756	18,325	18,161	19,494	19,596	19,302	19,032	19,542	19,865	19,268
도수율	3.4	2.58	2.09	2.58	2.51	2.43	2.88	3.52	3.41	3.71	3.64

주: 도수율=재해자수/(근로자수×연평균근로시간)×1,000,000
자료: 한국항만물류협회(2025)의 자료를 바탕으로 저자 재작성

본 연구에서는 스마트화의 범위를 더블트롤리 크레인 도입과 라싱플랫폼 설치를 포함한 컨테이너 터미널의 안벽 스마트화로 정의한다. 이는 크레인 원격 조종과 더불어 콘 작업과 검수 작업을 안벽 크레인 작업 구역과 물리적으로 분리된 안전한 공간에서 수행하는 종합적 시스템 개선을 의미한다. 그리고 이러한 안벽 스마트화를 통해 안전사고 감소 편익을 정량적으로 도출하고자 한다.

3) 산정 방법론

(1) 기본 산정식

안전사고 감소 편익의 산정은 경제학의 기본 편익 측정 원리에 기반하여 수행된다. 후생경제학에서 제시하는 총 편익이 단위 편익과 수량의 곱으로 구성된다는 기본 원리를 적용하되, 근로자 수를 기준으로 편익을 산정한다.

〈표 4-40〉 안전사고 감소 편익 기본 산정식

편익항목	산정식
터미널 당 안전편익	근로자 수 × 근로자 1명당 연간 안전편익
근로자 1명당 안전편익	(도수율 감소폭 ÷ 1,000,000) × 연간 근로시간 × 사고당 가중평균 비용

자료: 한국항만물류협회(2025) 「항만하역재해통계 및 사례」를 바탕으로 저자 작성

이러한 방법론은 선형성[37]을 가정하며, 실제로는 기술 도입 초기의 학습 효과나 사고 유형 간 상호작용 등 복잡한 요인들이 존재할 수 있다. 그러나 정책 의사결정을 위한 초기 추정치로서는 충분한 타당성을 확보한다고 판단된다.

가. 비자동화 항만의 사고 발생률

컨테이너 부두는 하역작업 시 선석 또는 본선마다 포맨 및 신호수, 안전관리자를 배치하여 작업 관리 감독이 체계적으로 이루어지고 있어 비컨테이너 부두보다 상대적으로 안전한 작업환경이 조성되어 있다.

2001년부터 2023년까지 22년간의 사고 사례 분석 결과, 총 75건의 분석 대상 사고 중 컨테이너 부두에서 발생한 사고는 11건(15%)에 불과한 반

37) 사고 1건을 예방하든 100건을 예방하든 단위당 편익이 동일, 각 사고는 독립적이고 서로 영향을 주지 않으며 시간이 지나도 효과가 일정하다는 것을 의미함. 그러나 초기에는 상대적으로 높은 비용 (시스템 구축, 학습 비용)이 소요되나 대량의 사고를 예방함으로써 단위당 비용이 감소할 수 있음

면, 비컨테이너 부두에서는 64건(85%)의 사고가 발생하여 비컨테이너 부두의 사고 발생률이 컨테이너 부두의 5.8배에 달하는 것으로 나타났다.[38]

〈표 4-41〉 컨테이너부두 사고 현황(2001~2023)

NO	발생 연월	항만	사고 유형	기인물	작업 단계	재해내용	발생원인	비고
1	’03. 07.	부산	전도	화물	미상	화물 사이 공간으로 빠지면서 컨테이너 사이드 패널에 충돌	위험요소 사전감지 부족 안전지대 미확보	사망
2	’03. 09.	목포	전도	화물	선측 작업	컨테이너 위에서 내려오다 전도	안전지대 미확보	중 상해
3	’03. 12.	인천	협착	화물	직상 차	컨테이너 콘과 운반차량 적재함 사이에 손가락 협착	위험요소 사전감지 부족	중 상해
4	’06. 09.	부산	충돌	중장비	선측 작업	컨테이너 상차 유도 및 콘제거 작업 중 과속 후진 트레일러 충돌	위험요소 사전감지 부족	사망
5	’07. 12.	부산	충돌	차량	직상 차	제한속도 위반 화물상차트럭과 육상작업자충돌	안전수칙 미준수 안전지대 미확보	사망
6	’08. 02.	부산	추락	화물	선내 작업	본선작업 중 추락	작업자 부주의	사망
7	’14. 04.	부산	협착	하역 장비	선내 작업	검수작업 중 Y/T기사 졸음 운전으로 협착	안전수칙 미준수	사망
8	’14. 11.	인천	추락	화물	선내 작업	컨테이너적 하역작업 중 중심 잃고 선내로 추락	위험요소 사전감지 부족	사망
9	’18. 10.	인천	협착	적재물	선측 작업	돌풍에 적재된 공컨테이너 추락에 따른 협착	위험요소 사전감지 부족	사망
10	’19. 10.	부산	충돌	이송 장비	기타 (교대)	근무교대 후 이동중 Y/T와 충돌	안전지대 미확보	사망
11	’22. 2.	인천	충돌	이송 장비	이동중	라싱맨 이동중 Y/T와 충돌	위험장소 접근, 운전부주의	사망

자료: 「항만하역재해통계 및 사례」 각 년 호(2001~2025)를 바탕으로 저자 재정리

38) 최상균 외(2023), 안전항만 구축을 위한 비용산정 및 지원체계 마련을 위한 연구, p.17 및 한국항만물류협회(2025) 「항만하역재해통계 및 사례」

컨테이너부두의 작업 단계별 사고 발생 현황을 살펴보면 선내작업 30%, 선측작업 30%, 직상차 관련 20%, 기타 20%로 각 단계별 사고 비중에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

나. 안벽 자동화로 인한 사고감소 효과

안벽 스마트화로 인한 사고감소 효과는 22년간(2001~2023) 국내 컨테이너 부두에서 발생한 실제 사고 사례를 분석하여 도출했다. 이를 위해 총 75건의 항만 사고 사례 중 컨테이너 부두에서 발생한 11건을 대상으로 안벽 스마트화 적용 시 예방 가능성을 판단했다.

안벽 스마트화는 다음과 같은 구성요소로 이루어진다. 첫째, 더블트롤리 크레인 시스템으로 기존의 단일 트롤리 대비 정밀한 제어가 가능하고 작업 효율성이 향상된다. 둘째, 라싱플랫폼 설치로 콘 작업과 검수 작업을 안벽 크레인 작업 구역과 물리적으로 분리된 안전한 공간에서 수행할 수 있다. 셋째, 원격 조종 시스템으로 기존의 승무식 크레인의 인력이 위험한 현장을 떠나 안전한 조종실에서 작업할 수 있다. 넷째, 자동화 이송 장비 도입으로 무인 운반차량을 통해 인력과 장비 간 충돌 위험을 최소화할 수 있다.

안벽 스마트화로 직접 예방 가능한 사고는 다음과 같다. 첫째, 콘 작업 관련 사고로 라싱플랫폼에서 안전하게 작업할 수 있어 크레인과의 접촉 위험이 완전히 제거된다. 둘째, 검수 작업 관련 사고로 마찬가지로 라싱플랫폼에서 안전하게 수행하여 야드 장비와의 충돌 위험을 방지할 수 있다. 셋째, 이송장비 관련 사고로 자동화 이송장비 도입을 통해 인력과 장비 간 충돌 위험을 완전히 제거할 수 있다.

22년간 11건의 사고 사례 중 콘 작업 중 협착 사고 1건, 검수 작업 중 협착 사고 1건, 그리고 이송장비와의 충돌 사고 2건이 이에 해당하여, 총 4건이 완전히 예방 가능한 것으로 판단된다.

이는 분석기간 내 집계된 전체 사고의 36.4%에 해당한다. 본 연구에서는 보수적 접근을 위해 물리적으로 완전히 차단 가능한 사고만을 편익 산정 대상으로 하여 과대추정을 방지하였다.

(2) 사고발생률

이에 따라 스마트항만 기술 도입으로 인한 사고 감소율은 36.4%로 설정하였으며, 이를 바탕으로 도수율 변화를 산정하였다. 재래식 컨테이너 터미널의 기준 도수율 2.98에서 36.4% 감소 시 스마트 터미널의 도수율은 1.90이 되며, 감소폭은 1.08이다.

〈표 4-42〉 안벽 스마트화에 따른 도수율 계산

안벽 스마트화에 따른 도수율 = 2.98 × (1 − 0.364) = 2.98 × 0.636 = 1.90

자료: 저자 작성

4) 원단위 산정

(1) 비용 구성체계

산업재해로 인한 사회적 비용은 크게 직접비용과 간접비용으로 구분된다. 직접비용은 「산업재해보상보험법」에 따라 피해자에게 직접 지급되는 보험급여를 의미하며, 요양급여, 휴업급여, 장해급여, 유족급여 등이 포함된다. 간접비용은 법정 보험급여 외에 사회 전반에 파급되는 비용으로 생산손실, 재산손실, 행정비용, 교육훈련비용 등이 해당될 수 있다.[39]

직접비용의 산정은 「산업재해보상보험법」에 따른 실제 지급 기준을 적용하였다. 요양급여는 치료비와 재활비를 포함하며 실제 지출 비용을 기준으로 산정한다(동법 제40조). 휴업급여는 요양으로 취업하지 못한 기간에 대

39) 박경욱 외(2025), pp.19-24, 119-120.

하여 평균임금의 70%를 지급한다(동법 제52조). 장해급여는 장해등급에 따라 장해보상연금 또는 장해보상일시금으로 지급되며(동법 제57조), 유족급여는 유족보상연금 또는 유족보상일시금으로 지급된다(동법 제62조).

〈표 4-43〉 산업재해 비용 구성

구분	내용	세부 내용	비고
직접비용	요양급여	진찰·검사, 약제·보조기 지급, 처치·수술·치료, 재활치료, 입원, 간호·간병, 이송 등	• 보상비용법(실제 지출 비용) • 「산업재해보상보험법」제40조
	휴업급여	요양으로 취업하지 못한 기간의 소득 손실 보전	• 보상비용법(평균임금의 70%) • 「산업재해보상보험법」제52조
	장해급여	치유 후 신체 등에 장해가 남은 경우 장해등급에 따른 보상	• 보상비용법 (장해등급별 보상 기준) • 「산업재해보상보험법」제57조, 별표2
	유족급여	업무상 사망 시 유족에 대한 보상	• 보상비용법(유족보상연금 또는일시금) • 「산업재해보상보험법」제62조, 별표3
간접비용	생산손실	작업 중단, 생산량 감소, 납기 지연 등	• 인적자본법 (상실 소득 기준) • 법정 급여 외사회적 비용 추정 항목
	재산손실	설비 파손, 제품 손상 등	• 보상비용법 (복구 비용 기준) • 법정 급여 외사회적 비용 추정 항목
	행정비용	사고 조사, 보고서 작성, 법적 처리 비용 등	• 보상비용법 (실제 행정처리 비용 기준) • 법정 급여 외사회적 비용 추정 항목
	교육훈련비용	대체 인력 충원 및 훈련	• 보상비용법 (신규채용·훈련 비용 기준) • 법정 급여 외사회적 비용 추정 항목

주 1: 직접비용은 「산업재해보상보험법」에 명시된 법정 보험급여를 의미함
주 2: 간접비용은 법정 급여 외에 사회 전반에 발생하는 비용으로, 교통사고비용 추정 방법론(박경욱·박보미, 2024)을 참고하여 구성함
주 3: 상병보상연금(제66조), 장례비(제71조), 간병급여(제61조), 직업재활급여(제72조) 등 기타 법정 급여는 표에서 생략함
자료: 「산업재해보상보험법」, 박경욱·박보미(2024); 박경욱 외 (2025)를 바탕으로 저자 작성

간접비용은 법정 보험급여 외에 산업재해로 인해 사회에 발생하는 비용을 추정하기 위한 항목이다. 생산손실은 인적자본법에 따라 상실 소득을 기준으로 계산하며, 재산손실, 행정비용, 교육훈련비용은 보상비용법에 따

라 실제 소요 비용을 기준으로 산정한다. 이러한 간접비용 항목은 교통사고비용 추정과 관련된 최신연구(박경욱·박보미, 2024; 박경욱 외, 2025)의 방법론을 참고하여 산업재해의 사회적 비용을 포괄적으로 측정하기 위해 포함되었다.

(2) 사고 유형별 원단위 산정

본 연구에서는 박경욱 외(2025) 등 선행연구에서 제시된 사람의 생명가치를 고려한 교통사고비용 산정 결과를 항만 안전사고에 준용하여 사회적 가치를 보다 적절히 반영하고자 한다. 다만 이는 교통사고 분야의 연구 결과로서 항만 특성을 완전히 반영하지는 못하므로 향후 항만 특성을 반영한 별도 연구가 필요함을 미리 밝힌다.

가. 사망사고

직접비용으로 유족급여 6,500만 원과 장의비 600만 원을 포함하여 총 7,100만 원이 소요된다. 간접비용으로는 생산손실 8,000만 원, 대체인력 및 훈련비용 1,500만 원, 행정비용 1,000만 원, 설비복구 및 작업중단비용 2,000만 원 등 총 1억 2,500만 원이 산정된다. 여기에 최신 교통사고 연구의 고통비용 9,800만 원(2024년 기준)을 추가하면 사망사고 1건당 총 2억 9,400만 원의 사회적 비용이 발생한다.

〈표 4-44〉 사망사고 비용

구분	항목	합계(만 원)
직접비용	• 유족급여 6,500만 원 + 장의비 600만 원	7,100
간접비용	• 생산손실 8,000만 원 + 대체인력 및 훈련비용 1,500만 원 + 행정비용 1,000만 원 + 설비복구 및 작업중단비용 2,000만 원	12,500
총비용	• 직접비용 7,100만 원 + 간접비용 12,500만 원 + 고통비용 9,800만 원	29,400

자료: 박경욱 외(2025)

나. 중상사고

직접비용으로 요양급여 1,500만 원, 휴업급여 1,800만 원, 장해급여 2,000만 원을 포함하여 총 5,300만 원이 소요된다. 간접비용으로는 생산손실 2,500만 원, 대체인력비용 800만 원, 행정비용 300만 원, 설비복구비용 500만 원 등 총 4,100만 원이 산정된다. 여기에 최신 교통사고 연구의 고통비용 2,300만 원을 추가하면 중상사고 1건당 총 1억 1,700만 원의 사회적 비용이 발생한다.

〈표 4-45〉 중상사고 비용

구분	항목	합계(만 원)
직접비용	• 요양급여 1,500만 원 + 휴업급여 1,800만 원 + 장해급여 2,000만 원	5,300
간접비용	• 생산손실 2,500만 원 + 대체인력비용 800만 원 + 행정비용 300만 원 + 설비복구비용 500만 원	4,100
총비용	• 직접비용 5,300만 원 + 간접비용 4,100만 원 + 고통비용 2,300만 원	11,700

자료: 박경욱 외(2025)

다. 경상사고

직접비용으로 요양급여 300만 원과 휴업급여 300만 원을 포함하여 총 600만 원이 소요된다. 간접비용으로는 생산손실 300만 원과 행정비용 100만 원 등 총 400만 원이 산정된다. 여기에 최신 교통사고 연구의 고통비용 610만 원을 추가하면 경상사고 1건당 총 1,610만 원의 사회적 비용이 발생한다.

〈표 4-46〉 경상사고 비용

구분	항목	합계(만 원)
직접비용	• 요양급여 300만 원 + 휴업급여 300만 원	600
간접비용	• 생산손실 300만 원 + 행정비용 100만 원	400
총비용	• 직접비용 600만 원 + 간접비용 400만 원 + 고통비용 610만 원	1,610

자료: 박경욱 외(2025)

(3) 사고 유형별 구성비

최근 11년간 국내 항만하역업에서 발생한 사고 분석 결과를 바탕으로 사고 유형별 구성비를 도출하였다. 전체 1,249건의 사고 중 사망사고는 27건으로 2%를 차지하며, 나머지는 중상 및 경상사고로 분류된다.

다만, '항만하역재해통계 및 사례'에서는 중상사고와 경상사고를 구분하지 않고 있어 정확한 개별 비용 산정이 어렵다. 따라서 중경상사고의 경우, 중상사고와 경상사고의 평균 비용(6,655만 원/건)을 일괄 적용하고자 한다.[40]

5) 산정 결과

(1) 기본 산정

본 연구의 안전편익 산정은 한국항만물류협회(2025)에서 제공하는 2024년 기준 실제 통계 데이터를 기반으로 수행되었다. 항만하역업 전체 근로자는 19,268명이며, 연간 재해자 수는 135명으로 도수율은 3.64다.

안전편익 산출을 위해서는 근로시간 정보가 필수적이나, 항만 분야의 세분화된 근로시간 데이터는 공개되지 않고 있다. 이에 따라 기존 통계 데이

40) 중상사고 비용(1억 1,700만 원)과 경상사고 비용(1,610만 원)의 단순 평균을 적용

터를 활용하여 도수율 공식을 역산하는 방법으로 근로시간을 추정하였다. 도수율 공식은 다음과 같다.

$$도수율 = 재해자수 \div (근로자수 \times 연평균근로시간) \times 1,000,000$$

이 공식을 연평균근로시간에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$연평균근로시간 = 재해자수 \div (근로자수 \times 도수율) \times 1,000,000$$

이를 실제 통계값에 대입하면 다음과 같이 계산된다.

〈표 4-47〉 연평균 근로시간 계산

연평균근로시간 = 135 ÷ (19,268 × 3.64) × 1,000,000 = 1,926시간

자료: 저자 작성

앞서 도출된 안벽 스마트화에 따른 도수율 감소폭 1.08을 활용하여 근로자 1명당 연간 사고 절감 건수를 계산하였다.

〈표 4-48〉 스마트화에 따른 근로자 1인당 연간 사고 절감 건수

근로자 1명당 연간 사고 절감 건수 = (도수율 감소폭 ÷ 1,000,000) × 연평균 근로시간 = (1.08 ÷ 1,000,000) × 1,926시간 = 0.00208건

자료: 저자 작성

다만, 산정된 근로시간(1,926시간)은 전체 항만하역업 평균이므로 컨테이너터미널에 직접 적용하기에는 한계가 있다. 컨테이너 터미널은 상대적으로 안전한 작업환경을 가지고 있어 전체 평균과 차이가 있을 수 있으며, 터미널별 작업 강도와 근로형태도 상이하다. 그러나 현재 이용 가능한 통계 범위에서는 이러한 추정 방법이 가장 현실적인 접근법이라 판단된다.

(2) 사고 유형별 편익 산정

전체 사고 중 사망사고가 2.2%, 중경상사고가 97.8%를 차지하는 실제 통계를 반영하여 사고 유형별 편익을 산정하였다.

사고 유형별 절감 건수는 다음과 같다.

〈표 4-49〉 사고 유형별 절감 건수

근로자 1명당 연간 사망사고 절감 건수 = 0.00208건 × 0.022 = 0.0000458건
근로자 1명당 연간 중경상사고 절감 건수 = 0.00208건 × 0.978 = 0.00203건

자료: 저자 작성

사망사고의 사회적 비용은 고통비용을 포함하여 2억 9,400만원으로 산정되었으며, 중경상사고는 중상사고(1억 1,700만 원)와 경상사고(1,610만 원)의 평균인 6,655만 원으로 계산되었다.

〈표 4-50〉 근로자 1명당 연간 사망사고 및 중경상사고 절감 편익

근로자 1명당 연간 사망사고 절감 편익 = 0.0000458건 × 29,400만원 = 13,453원
근로자 1명당 연간 중경상사고 절감 편익 = 0.00203건 × 6,655만원 = 135,379원

자료: 저자 작성

이에 따라 근로자 1명당 총 안전편익은 148,832원으로 최종 도출되었다.

〈표 4-51〉 근로자 1명당 총 안전편익

근로자 1명당 총 안전편익 = 사망사고 편익 13,453원 + 중경상사고 편익 135,379원 = 148,832원

자료: 저자 작성

(3) 완전자동화에 따른 인력 감소를 반영한 총 안전편익

가상의 컨테이너 터미널(3선석 규모)에서 반자동화에서 완전자동화로 전환할 때의 인력 감소 현황과 이에 따른 안전편익을 분석한 결과는 다음과 같다.

가. 영역별 인력 감소 예상

완전자동화 전환 시 안전사고 위험에 노출되는 현장 인력이 제거되며, 안벽 영역에서 17.7명(승무식 QC기사), 이송 영역에서 90.7명(YT기사)으로 총 108.4명의 현장 인력 중 사고에 노출되는 인력은 완전히 감소하는 것으로 가정한다.[41]

〈표 4-52〉 반자동화 대비 완전자동화 현장 인력 감소

구분	반자동화 인력	완전자동화 인력	인력 감소	감소율
안벽 영역	17.7명	0명	17.7명	100%
이송 영역	90.7명	0명	90.7명	100%
전체	108.4명	0명	108.4명	100%

주: 안벽영역의 승무식인력이 원격조정인력으로 대체, 사무실 근무 인력은 유지되며 라싱플랫폼 설치로 검수원 및 라싱 인력은 유지되나 사고에서는 안전한 것으로 가정함
자료: 해양수산부(2021), p.135를 바탕으로 저자 작성

나. 안전편익 산정 결과

3선석 규모의 컨테이너 터미널에서 반자동화에서 완전자동화로 전환할 경우, 연간 약 1,613만 원의 안전편익이 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 108.4명의 현장 인력을 완전히 제거함으로써 달성되는 것으로, 이송 영역에서의 안전성 향상이 전체 편익의 83.7%를 차지하는 것으로 나타났다.

41) QC 기사는 승무식 운전에서 완전 원격조종으로 전환하여 고소작업 위험 완전 제거. 이송 영역은 무인이송장비(AGV) 도입으로 YT기사와 이송장비 간 충돌사고 위험 완전 차단하여 완전 무인화를 통해 인력과 야드장비 간 모든 접촉 위험 원천 차단

〈표 4-53〉 완전자동화에 따른 안전편익

구분	현장 인력 감소분	1명당 안전편익	연간 안전 편익	비중
안벽 영역	17.7명	148,832원	2,634,326원	16.3%
이송영역	90.7명		13,494,862원	83.7%
전체	108.4명		16,129,188원	100%

자료: 저자 작성

4. 편익 산정 결과 검증을 위한 전문가 의견 조사

본 절의 스마트항만 개발 편익의 적정성, 편익 산정 절차, 효과의 크기 등을 검증하기 위하여 항만 분야 타당성 분석 전문가를 대상으로 의견을 수렴하였다.

전문가들은 편익 도출 과정과 산정 방법에 대해서는 전반적으로 동의하였다. 특히, 기존 예비타당성조사 방법론을 준용하여 추정한 자동화 장비 도입에 따른 생산성 향상 편익은 적절하게 도출되었다는 의견이었으며, 예비타당성조사지침 등 관련 지침 반영 필요성을 강조하였다.

환경비용 절감 편익과 안전사고 감소 편익의 경우 산정 필요성과 현재 가용한 자료를 활용하여 원단위 등을 도출하여 적용한 부분에 대해서도 적절하다는 의견이었다. 다만, 예비타당성조사 등 항만 개발 사업의 타당성조사 과정에서 활용되기에는 원단위의 신뢰성 확보를 위한 추가적인 검토가 필요하다는 의견이 많았다. 통계 자료에 기반하여 원단위의 신뢰성을 확보하고, 편익 산정 절차 등 개선을 위한 후속 연구의 필요성을 강조하였다.

더불어, 신기술 도입, 정보 연계 등을 통한 터미널 운영 효율성 향상 편익도 예상되는 만큼 후속 연구를 통해 운영 효율화 향상 효과에 대해서도 검토가 필요하다는 의견도 있었다.

제2절 제도 개선방안

제1절에서는 기존 항만 개발사업의 타당성 평가 체계에서 간과되어 온 스마트항만의 핵심적인 편익들을 발굴하고, 이를 실증적인 데이터에 기반하여 정량화하는 방법론을 제시하고, 가상의 컨테이너 터미널을 대상으로 효과의 크기를 추정하였다.

하지만 「교통시설 투자평가지침」, 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」 등은 본 연구에서 제안하는 새로운 가치를 온전히 반영할 수 없다. 이는 스마트항만 기술 도입의 사회·경제적인 타당성을 과소평가하게 만들어 미래지향적인 항만 인프라 투자에 대한 합리적인 의사결정을 저해할 수 있다.

따라서, 본 절에서는 제1절의 연구 결과를 바탕으로 스마트항만의 다차원적 가치가 국가 항만 정책 수립 및 투자 평가 과정에 실질적으로 반영될 수 있도록 하는 구체적인 제도 개선방안을 심도 있게 제안하고자 한다.

1. 선박 재항 비용 절감 편익 산정 범위의 확대 및 현실화

1) 현황 및 문제점

「교통시설 투자평가지침」, 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」 등 현재의 항만 개발사업의 타당성 평가 지침에서 다루는 선박 재항 비용 절감 편익은 신규 부두를 건설하여 항만의 하역능력(capacity)을 늘림으로써, 선박 재항 비용을 줄이는 효과를 평가하는 데 중점을 두고 있다. 이는 물리적인 인프라 공급 확대에 따른 거시적 편익에 해당한다.

반면, 본 연구에서 제안하는 하역 생산성 향상 효과는 하역능력과는 성격이 다른 서비스 향상의 개념이며, 이는 자동화 장비 도입을 통해 선박의

출항까지의 소요 시간을 단축하는 운영 효율성(efficiency)의 증대를 의미한다. 현행 평가 체계는 이와 같은 기술 도입을 통한 운영 효율성 증대 효과를 측정·반영하는 별도 항목이 부재하여, 스마트항만 투자의 핵심 가치를 평가에서 반영할 수 없다.

또한, 현재의 타당성 평가 지침은 하역능력 향상에 다른 효과를 대상 시설을 이용하는 표준선박의 1일 용선료 절감분으로 한정하여 선박 재항 비용 절감 편익을 산정하고 있다. 이는 선박이 항만에 머무는 시간이 줄어들 때 발생하는 경제적 이익의 일부만을 반영하는 것이다. 현재의 평가 방식은 이러한 중요한 비용 절감 효과들을 누락하고 있다.

2) 개선방안

(1) 신규 편익 반영 및 통계 수집 절차 마련

앞서 지적한 것처럼 현재의 타당성 평가 지침을 개정하여 자동화 장비 도입에 따른 하역 생산성 향상 편익을 신규로 반영해야 한다. 이는 기존의 '신규 부두 건설에 따른 선박 대기 비용 절감 편익'과는 별개로, 자동화 기술 투자의 효과를 직접적으로 평가하는 기준이 될 것이다.

또한, 본 연구에서는 국내 완전 자동화 컨테이너 터미널의 실제 운영 데이터를 활용하지 못하였다. 이는 국내 완전 자동화 컨테이너 터미널이 아직 운영적으로 안정화되지 못하여 기대하는 생산성과 운영 효율화를 달성하지 못하였기 때문이다. 또한, 반자동화 및 재래식 컨테이너 터미널에서 컨테이너 사이클타임 등 통계자료를 축적하고 있지 않는 점도 어려운 요인이었다. 따라서, 「항만운송사업법」, 「항만법」, 「항만기술산업 육성법」 등 관련 법률을 정비하여 컨테이너 터미널의 사이클타임 등 통계자료를 수집하고 관리하도록 제도를 정비할 필요가 있다.

또한, 접안 중인 선박의 보조엔진 가동으로 배출되는 대기오염물질은 항만 지역의 환경과 주민 건강에 영향을 미치는 사회적 비용을 유발한다. 현재의 평가 방식은 이러한 중요한 비용 절감 효과들을 누락하고 있다. 따라서, 하역 생산성 향상으로 기대되는 선박 배출 대기오염물질 저감에 따른 사회적 비용도 평가 지침에 반영하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

(2) 선박 재항 시간 절감 편익 산정 범위 확대

현재 항만 개발사업의 타당성 평가 지침의 선박 재항 시간 절감 편익은 표준선박의 1일 용선료 절감분만 반영하고 있다. 하지만, 본 연구의 분석에 따르면, 선박은 접안 중에도 유류, 인건비, 보험료 등 상당한 운영비용을 지속적으로 소모한다. 따라서, 선박 재항 시간 절감 편익을 산정할 때, 본 연구에서 제안하는 선박 운영비용의 절감 부분도 포함하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

3) 기대효과

본 연구에서 제안하는 하역 생산성 향상 효과 등을 평가 지침에 반영하는 등 개선을 통해, 항만 개발사업의 평가 체계는 인프라 확충과 운영 효율화라는 두 가지 측면의 가치를 모두 균형 있게 평가할 수 있게 될 것이다. 이는 스마트항만과 같이 기술 중심의 고부가가치 투자 사업의 타당성을 보다 정확하고 합리적으로 분석하는 기반을 마련하여, 미래지향적인 항만 정책 수립에 기여할 것이다.

2. 환경비용 절감 편익 신설 및 표준화

1) 현황 및 문제점

현재 도로, 철도 등 타 교통 부문에서는 사업 시행에 따른 대기오염 및 온실가스 감축 효과를 환경비용 절감 편익이라는 독립된 항목으로 평가하여 사업 타당성에 적극 반영하고 있다. 그러나 항만 부문에서는 이러한 체계가 부재하여, 안벽크레인과 같은 핵심 하역장비를 디젤에서 전기로 전환하는 스마트화 사업의 친환경적 가치가 평가에서 완전히 배제되고 있다. 이는 국가 탄소중립 목표 달성을 위한 항만 부문의 노력을 정책적으로 인정하지 못하는 불균형을 초래한다.

2) 개선방안

항만 부문의 친환경 전환을 촉진하고 타 SOC 사업과의 평가 형평성을 확보하기 위해, 다음과 같은 제도 개선을 제안한다.

첫째, 항만 개발사업 타당성 평가 지침에 '항만 장비 동력 전환에 따른 환경비용 절감 편익'을 정량 평가 항목으로 신설한다. 둘째, 편익 산정 대상을 QC뿐만 아니라 TC, AGV, SC 등 터미널 내 주요 하역장 비의 전동화·자동화 전환의 효과를 포함한다. 셋째, 편익 산정의 기준이 되는 대기오염물질(NOx, SOx, PM)과 온실가스(CO_2)의 사회적 비용 원단위는 본 연구에서 준용한 해외 가이드라인 또는 국내외 공인된 연구 결과를 바탕으로 표준화하여 지침에 포함할 필요가 있다.

3) 기대효과

이러한 개선은 스마트항만 프로젝트가 지역 대기질 개선과 국가 온실가스

감축 목표에 기여하는 바를 경제적 가치로 환산하여 보여준다. 이는 친환경 항만 기술 도입에 대한 투자의 경제적 명분을 강화하고, 민간 부문의 자발적인 친환경 장비 투자를 유도하는 중요한 정책적 신호로 작용할 것이다.

3. 안전사고 감소 편익 평가 체계 도입

1) 현황 및 문제점

항만은 중장비와 인력이 혼재된 고위험 작업 공간으로, 안전사고 예방은 스마트항만 구축의 최우선 목표 중 하나이다. 안벽 자동화, 원격 조종 시스템 도입 등은 작업자를 위험 구역으로부터 물리적으로 분리하여 사고 발생 가능성을 원천적으로 줄이는 효과가 있다. 그럼에도 불구하고 현행 평가 체계에서는 이러한 안전성 향상 효과를 정성적인 검토 대상으로만 다룰 뿐, 이를 편익으로 정량화하여 반영하지 않는다. 이는 인명 보호라는 사회적 가치를 경제성 분석에서 누락하는 중대한 한계를 갖는다.

2) 개선방안

항만 근로자의 생명과 안전의 가치를 타당성 평가에 내재화하기 위해, 안전사고 감소 편익을 정량적·정성적 평가 항목으로 도입할 것을 제안한다. 타당성 평가 지침에 안전사고 감소 편익의 신설을 검토해야 한다. 본 연구에서는 컨테이너 터미널을 한정적으로 평가하여 편익의 크기가 그다지 크지 않았으나, 비컨테이너 터미널까지 확장하면 편익의 크기는 확대될 것이다. 또한, 「중대재해처벌법」에 따른 처벌 등 화폐가치로 평가하기 어려운 요인은 정성 평가에 반영하여야 한다.

3) 기대효과

안전 편익의 정량화는 스마트항만 투자가 단순한 비용 지출이 아니라, 인명 손실과 그에 따르는 막대한 사회적 비용을 줄이는 효과적인 사회적 투자임을 입증할 수 있는 좋은 방안이다. 이는 안전 관련 기술 및 설비 도입에 대한 정책적 우선순위를 높이고, 궁극적으로 사고 없는 안전한 항만이라는 사회적 목표 달성에 기여할 것이다.

05
결론 및 정책 제언

본 연구는 스마트항만 개발사업의 타당성 평가 체계에서 간과되어 온 핵심 편익들을 발굴하고, 이를 정량화하는 표준 방법론을 개발하여 합리적인 의사결정의 기반을 마련하고자 수행되었다. 국내외 타당성 평가 지침 및 선행 연구 분석을 통해 현행 제도의 한계점을 진단하고, 이를 극복하기 위한 새로운 편익 항목과 산정 방법론을 도출하였다. 또한, 개발된 방법론을 기반으로 구체적인 제도 개선방안과 정책 방향을 제안하고자 한다.

제1절 결론 및 한계점

1. 요약 및 핵심 결론

1) 현행 타당성 평가 체계 개선 필요

현행 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」과 「교통시설 투자평가지침」으로 대표되는 우리나라의 항만 개발사업 평가 체계는 전통적인 물

리적 인프라 확충에 따른 편익을 중심으로 설계되어 있다. 이는 주로 선석을 추가 건설하여 항만 전체의 처리 능력을 높임으로써 발생하는 체선 감소 효과나, 배후단지 조성을 통한 내륙운송비 절감 등과 같은 직접적이고 가시적인 경제적 편익에 국한된다.

이러한 평가 체계는 4차 산업혁명 기술이 접목되는 스마트항만의 본질적인 가치를 평가하는 데 있어 명백한 한계를 드러낸다. 스마트항만은 단순히 하역 처리 용량을 늘리는 것을 넘어, AI, 빅데이터, 자동화 설비 등 첨단 기술을 활용하여 항만 운영의 패러다임 자체를 전환시키는 데 그 핵심이 있다. 그러나 현재의 지침으로는 다음과 같은 스마트 기술 고유의 혁신적 가치들이 평가 과정에서 제대로 고려되지 못하고 있다.

첫 번째, AI 기반의 최적화된 선석 배정, 무인 자동화 장비를 통한 24시간 중단 없는 운영, 예측 정비를 통한 가동률 향상 등은 항만의 생산성과 효율을 극대화한다. 특히 코로나19 팬데믹과 같은 위기 상황에서 인력 중심의 재래식 터미널이 운영에 심각한 차질을 빚었던 반면, 자동화 항만은 안정적인 운영을 유지하며 그 회복탄력성의 가치를 입증했지만, 현행 평가 체계에서는 이러한 운영 안정성의 가치를 계량화하여 반영할 방법이 전무하다.

두 번째, 무인화를 통한 고위험 작업 환경 개선은 인명사고의 가능성을 원천적으로 줄이는 효과가 있다. 또한, 하역장비의 전기 동력 전환은 항만 지역의 미세먼지와 온실가스 배출을 저감하여 사회적·환경적 비용을 감소시킨다. 도로·철도 등 타 교통 부문에서는 이러한 안전 및 환경편익이 주요 평가 항목으로 정착되어 있으나, 항만 부문에서는 여전히 정성적 검토에 그치거나 제한적으로만 적용되고 있다.

세 번째, 스마트항만은 첨단 설비와 디지털 인프라 구축으로 인해 재래식 항만 대비 초기 투자 비용이 상대적으로 높은 특성이 있다. 현행 평가

체계는 이렇게 증가한 비용(Cost)은 사업비에 그대로 반영하면서, 그로 인해 발생하는 장기적이고 다차원적인 편익(Benefit)은 제대로 측정하지 못하는 구조적 불균형을 낳는다. 결과적으로 스마트 기술을 적용할수록 경제적 타당성(B/C)이 낮게 평가되는 역설적인 상황이 발생하여, 미래지향적인 스마트항만 구축 사업의 추진 동력을 약화하는 심각한 문제로 작용할 가능성이 높다.

2) 스마트항만 개발 편익 산정 방법론 제시

본 연구의 가장 핵심적인 결과는 이전까지 단편적인 기술 효과 분석이나 정성적 논의에 머물러 있던 스마트항만의 편익을, 국가의 공식적인 투자 평가 체계에 통합할 수 있도록 국내외 최초로 포괄적인 정량화 방법론을 개발하고 제시했다는 데에 있다. 현행 국내외 타당성 평가지침 어디에도 스마트 기술 도입의 다차원적 가치를 반영하는 체계가 부재한 상황에서, 본 연구는 이를 극복하기 위한 구체적이고 실증적인 대안을 마련했다.

이를 위해 문헌 연구, 해외 사례 분석, 그리고 국내 터미널 운영사 실무자 등 전문가 의견 수렴을 통해 기존 평가 체계에서 누락되었던 핵심 편익들을 체계적으로 발굴하였다. 그 결과, 타당성 평가에 새롭게 반영해야 할 핵심 편익으로 “하역 생산성 향상 편익”, “환경비용 절감 편익”, “안전사고 절감 편익” 등을 도출하였다. 각 항목에 대한 정량적 산정 방법론을 다음과 같이 구체화했다.

첫 번째, 하역 생산성 향상 편익을 재정의하고 정량화하였다. 본 연구는 생산성 향상의 효과를 기존처럼 단순히 ‘선박 용선료 절감’으로 한정하지 않았다. 선박의 재항 시간 단축이 선박 운항 비용(고정비, 유류비) 절감과 정박 중 배출되는 대기오염물질의 사회적 비용 감소까지 포함한다는 점을 명확히 하고, 이를 모두 편익에 포함하는 확장된 산정 방식을 제안했다. 또

한, 생산성 향상률을 막연한 추정이 아닌, DTQC(더블트롤리 안벽크레인) 도입과 피닝스테이션 작업 시간 단축 효과 등을 근거로 구체적인 수치(4.3%)로 계량화하여 제시했다.

두 번째, 스마트항만의 핵심인 하역장비의 전기 동력화에 따른 친환경 가치를 경제적으로 평가하는 표준화된 방법을 제시했다. 도로·철도 부문 지침과 유럽연합(EU)의 방법론을 준용하여, 기존 디젤 장비 대비 전기 장비 도입 시 감축되는 대기오염물질(NOx, SOx, PM)과 온실가스(CO_2)의 양을 추산하고, 여기에 사회적 비용 원단위를 적용하여 편익을 산출하는 구체적인 절차를 마련했다. 이는 항만 분야에서 환경편익을 체계적으로 정량화한 최초의 시도라 할 수 있다.

세 번째, 이전까지 정성적 평가에 머물렀던 '안전'의 가치를 정량적 편익으로 전환했다. 국내 항만에서 22년간 발생한 실제 사고 데이터를 분석하여, 안벽 자동화 도입 시 사고 발생률이 18.2% 감소한다는 실증적 근거를 도출했다. 여기에 교통 분야에서 최근에 제안된 사고 유형별 사회적 비용 원단위를 적용하여, 사고 감소 효과를 구체적인 화폐가치로 환산하는 방법론을 제시함으로써, 안전성 향상 효과를 타당성 평가에 객관적으로 반영할 수 있는 길을 열었다.

이처럼 본 연구는 스마트항만 개발의 편익을 '발굴'하는 데 그치지 않고, 각 편익을 실제 타당성조사에 즉시 활용할 수 있도록 구체적인 산정 공식과 데이터 기반의 원단위까지 제시했다는 점에서 기존 연구들과 명확한 차별성을 가진다. 이는 스마트항만 투자의 사회경제적 가치를 정당하게 평가하고 합리적인 정책 결정을 지원하는 실질적인 도구를 제공했다는 데 큰 의의가 있다.

3) 합리적 정책 결정을 위한 근거 제시

본 연구에서 제시한 새로운 편익 평가 방법론의 도입은 단순히 기술적인 회계 방식을 개선하는 차원을 넘어, 미래 항만 정책의 방향성을 결정하고 투자의 합리성을 담보하는 핵심적인 정책 과제라 할 수 있다. 글로벌 항만 경쟁이 물리적 규모의 경쟁에서 기술 기반의 효율성과 서비스 경쟁으로 전환되는 패러다임의 변화 속에서, 낡은 평가 잣대로는 미래를 제대로 준비할 수 없다.

(1) 스마트항만 투자의 경제적 왜곡 현상 수정

현재의 평가 체계는 스마트항만 개발에 필요한 추가 투자비를 비용으로만 인식할 뿐, 그로 인해 창출되는 편익은 간과하는 '비용-편익 분석의 구조적 불균형'을 야기한다. 이는 혁신적인 스마트항만 사업일수록 오히려 경제적 타당성(B/C)이 낮게 평가되는 역설적인 결과를 초래하여, 정책 결정자들이 미래를 위한 올바른 투자를 주저하게 만드는 심각한 왜곡을 초래할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 새로운 방법론은 이러한 왜곡을 바로잡고, 스마트항만의 진정한 사회경제적 가치를 평가에 온전히 반영함으로써 기술 투자가 정당한 평가를 받을 수 있는 합리적인 의사결정 환경을 조성할 수 있도록 한다.

(2) 국가 정책 목표와 정합성 확보

정부가 추진하는 '글로벌 허브 항만 조성', '탄소중립 목표 달성', 그리고 '항만기술산업 육성' 등 주요 국가 정책 목표들은 스마트항만 구축과 유기적으로 연결되어 있다. 새로운 평가 방법론은 생산성 향상, 환경 개선, 안전 확보라는 스마트항만의 편익을 정량적으로 입증함으로써, 이러한 국가적 목표 달성에 항만 투자가 어떻게 기여하는지를 명확하게 보여줄 수 있

다. 이는 개별 사업의 타당성을 넘어, 항만 정책이 국가 전체의 발전 전략과 어떻게 연계되는지를 설명하는 거시적 정책 정당성을 확보하는 데 결정적인 역할을 할 수 있을 것이다.

⑶ 재정 투자의 효율성 및 투명성 제고

대규모 공공 투자가 수반되는 항만 개발사업은 재정의 효율적 사용과 투명한 의사결정 과정이 요구된다. 본 연구에서 제안하는 표준화된 편익 산정 방법론은 사업의 기대효과를 객관적이고 일관된 기준에 따라 수치로 제시하게 함으로써, 정책 결정의 투명성과 책임성을 한 단계 높일 수 있다. 이를 통해 한정된 국가 재원을 보다 가치가 높은 사업에 우선적으로 배분하고, 국민에게 항만 투자의 필요성과 기대효과를 명확하게 설명할 수 있는 근거를 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구의 한계점 및 후속 연구과제

본 연구는 스마트항만 편익 산정 방법론의 기틀을 마련했다는 점에서 의의가 있으나, 다음과 같은 한계점을 가지며 이를 보완하기 위한 후속 연구가 필요하다.

1) 하역 생산성 향상 편익 산정의 한계

하역 생산성 향상 효과를 실증 데이터가 아닌 이론적 수치에 기반하여 추정했다는 점이다. 본 연구의 핵심 편익 중 하나인 하역 생산성 향상률(4.3%)을 도출하는 과정에서, 국내 완전 자동화 터미널의 실제 운영 데이터를 확보하는 데 근본적인 제약이 있었다. 이는 국내 완전 자동화 터미널이 아직 운영 안정화 단계에 이르지 못했을 뿐만 아니라, 기존 반자동화

터미널에서조차 편익 산정에 필수적인 컨테이너 사이클타임과 같은 세부적인 운영 통계를 체계적으로 수집·관리하고 있지 않기 때문이다.

이러한 데이터 제약을 극복하기 위해, 본 연구에서는 차선책으로 이론적 접근법을 채택하였다. 즉, 실제 현장에서 측정된 데이터 대신, 자동화 터미널과 반자동화 터미널에 도입되는 QC 제조사가 제공하는 장비의 기술 사양을 비교하고, DTQC 도입에 따른 작업 프로세스 변화(피닝스테이션 작업 시간 단축 등)를 분석하여 생산성 향상 효과를 이론적으로 추산하였다. 이 방식은 논리적 추론을 통해 편익을 정량화하는 유일한 대안이었으나, 이렇게 도출된 수치는 실제 운영 환경에서 발생할 수 있는 다양한 변수(시스템 안정성, 운영 숙련도, 예외 상황 처리 등)가 반영되지 않은 이상적 효과라는 한계를 가진다.

따라서 가장 시급한 후속 연구과제는 이론적으로 도출된 생산성 향상 편익을 실증적으로 검증하고 정교화하는 작업이다. 향후 부산항 진해신항 및 광양항 자동화 테스트베드가 본격적으로 운영되고 의미 있는 운영 데이터가 축적되면, 이를 활용하여 실제 환경에서의 생산성 향상 효과를 면밀히 분석해야 한다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 방법론의 현실 적합성을 높이고, 보다 신뢰성 있는 편익 원단위를 도출하는 연구가 반드시 이어져야 한다.

2) 환경비용 절감 편익 산정의 한계

본 연구에서는 미래지향적 관점에서 재생에너지 기반 전력 사용을 가정하여 환경편익을 산정하였으나, 이는 현재 전력믹스 상황과는 상당한 차이가 있다. 현재 한국의 전력 배출계수(0.4541 tCO_2eq/MWh) 하에서는 전기구동 장비의 간접배출이 디젤구동 장비의 직접배출보다 클 수 있어, 자

동화에 따른 온실가스 감축 편익이 제한적이거나 심지어 부정적일 가능성이 존재한다.

실제로 현재 전력믹스를 적용한 완전자동화 터미널의 전체 시스템(전기구동 더블트롤리 안벽크레인 + AGV + ARMGC)을 고려하면 약 10.9kg CO_2/TEU의 배출량이 산정되어, 반자동화 터미널 대비 오히려 배출량이 증가하는 역설적 상황이 발생한다. 이는 현재의 화석연료 중심 전력 시스템 하에서는 항만 자동화의 환경편익이 매우 제한적임을 의미한다.

그러나 본 연구는 탄소중립 정책과 에너지 전환 정책의 흐름을 고려하여, 향후 불가피하게 도래할 재생에너지 중심 전력 시스템을 전제로 한 선제적 분석이라는 점에서 의의를 갖는다. 국내외 탄소중립관련 추진 전략들은 모두 재생에너지 비중 확대를 핵심 전략으로 제시하고 있다. 특히 항만 분야는 대규모 전력 소비시설로서 재생에너지 전력구매계약(PPA) 도입이나 항만 내 재생에너지 발전시설 구축 등을 통해 선제적으로 청정 전력 시스템을 구축할 가능성이 높다.

재생에너지 기반 가정 하에서 TEU당 1,580원, 연간 42억 원 규모의 환경편익은 현재가 아닌 미래의 스마트항만 투자 타당성을 뒷받침하는 근거로서 의미를 갖는다. 특히 온실가스 감축 편익이 전체의 99.7%를 차지하는 것은 탄소중립 정책 목표와 직접적으로 연결되는 성과이다. 이는 스마트항만 개발 시 단순히 현재의 전력믹스만을 고려할 것이 아니라, 장기적인 에너지 전환 시나리오를 반영한 의사결정이 필요함을 시사한다.

결국 현재의 전력믹스 하에서는 항만 자동화의 환경편익이 제한적이지만, 재생에너지로의 전환이 가속화되면서 전기구동 장비의 환경편익은 기하급수적으로 증대될 것이다. 따라서 스마트항만 정책은 현재의 제약조건이 아닌 미래의 에너지 시스템을 고려한 장기적 관점에서 추진되어야 하며, 이를 위해서는 항만과 재생에너지 정책의 연계 강화가 필수적이다.

무엇보다 항만분야에도 미래 에너지 시스템 전환을 반영한 환경편익 평가 지침이 체계적으로 마련되어야 한다. 현재 도로·철도 부문에서 활용되고 있는 환경편익 평가체계를 항만분야에 적용하되, 재생에너지 전환 시나리오와 항만장비의 특성을 제대로 반영할 수 있는 항만 특화 평가 지침이 필요하다. 또한 전력 배출계수 변화에 따른 환경편익의 동적 변화를 정확히 추적할 수 있는 실시간 모니터링 시스템이 구축되어야 한다.

3) 안전사고 감소 편익 산정 방법론 개발의 한계

본 연구에서는 보수적 접근을 통해 신뢰성 있는 안전사고 감소 편익을 산정하였으나 항만 분야의 구조적 데이터 부족으로 인한 여러 한계점을 가지고 있다. 특히 산정된 안전사고 감소 편익은 실제보다 상당히 과소 추정되었을 가능성이 크다.

첫째, 기초 데이터의 구조적 부족이다. 22년간 11건의 사고 사례로 인해 일반화에 한계가 있으며, 항만 분야의 사고비용, 운영중단시간에 따른 비용, 선석별 세분화된 운영 데이터 등에 대한 체계적인 공개 데이터베이스가 구축되지 않은 상황이다. 이에 따라 확보 가능한 시계열 통계자료를 최대한 활용하여 분석을 수행하였으나, 정밀한 편익 산정을 위해서는 항만 특화된 안전 데이터 수집 및 공개 체계 구축이 선행되어야 한다.

둘째, 항만 특화 비용 산정 기준의 부재로 교통사고 고통비용을 준용할 수밖에 없었다. 항만 작업환경의 특수성을 반영한 독립적인 사고비용 산정 기준과 가이드라인 개발이 필요하다.

셋째, 「중대재해처벌법」에 따른 추가 비용이 미반영되었다. 2022년 시행된 「중대재해처벌법」에 따라 산업재해 발생 시 기업이 부담해야 하는 형사처벌 비용, 과징금, 영업정지 등의 간접비용이 급격히 증가하였으나, 이러한 법적 리스크 비용은 본 연구에 포함되지 않았다.

넷째, 사고 발생 시 터미널 운영 중단에 따른 막대한 손실비용이 제외되었다. 항만에서 중대사고 발생 시 해당 선석 또는 터미널 전체의 운영이 중단되어 발생하는 하역 손실, 선박 대기비용, 물류 지연비용 등의 간접 손실이 반영되지 않았다.

다섯째, 스마트 기술 도입 효과에 대한 실증 데이터 부족으로 학습효과나 새로운 위험 요소 등을 충분히 고려하지 못하였다. 스마트항만 운영 사례의 안전 성과 데이터 축적과 공유 체계가 구축되어야 한다.

여섯째, 근로자 범위 및 작업별 위험도 분류 기준의 미비로 직접 작업 인력과 간접 인력을 구분하지 못하였다. 항만 내 직종별·작업별 세분화된 안전 통계 구축이 요구된다.

따라서 본 연구에서 제시한 연간 1,613만원의 안전편익은 실제 안전편익의 하한선으로 이해되어야 하며, 「중대재해처벌법」 시행, 터미널 운영 중단비용, 기업 평판 손실 등을 고려할 경우 실제 안전사고 절감 편익은 이보다 수배에서 수십배 클 것으로 추정된다.

향후에는 항만 분야 안전사고 절감 편익 산정을 위한 표준화된 데이터 수집·공개 체계 구축이 우선되어야 하며, 이를 통해 스마트항만 투자의 사회적 가치를 보다 정확하게 평가할 수 있는 기반이 마련되어야 한다.

4) 후속 연구 제안

앞서 설명한 것처럼 본 연구에서 제안하는 하역 생산성 증가 편익은 원단위 추정에 활용되는 자료를 공개할 수 있다면 충분히 비용 편익 분석에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 반면, 환경비용 절감 편익, 안전사고 절감 편익은 통계 부족에 따른 원단위 신뢰성 문제 등으로 비용 편익 분석에서 즉시 활용하기는 현실적으로 쉽지 않다.

반면, 정책성 분석 과정에서는 활용은 가능할 것으로 판단된다. 다만, 후속 연구를 통하여 구체적인 예시 또는 적용 방안을 마련한다면 스마트항만 개발 사업성 제고에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

제2절 정책 제언

본 연구에서 도출된 스마트항만 개발 편익 산정 방법론이 학술적 논의에 그치지 않고, 국가의 공식적인 투자 평가 체계에 실질적으로 반영되어 합리적인 정책 결정의 기틀로 작용하기 위해 다음과 같은 정책 과제를 제언한다.

1. 예비타당성조사 표준지침 등 관련 제도의 개정

가장 시급하고 핵심적인 과제는 본 연구에서 제시한 새로운 편익 항목들을 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」 및 「교통시설 투자평가지침」에 공식적으로 반영하는 것이다. 현행 지침의 구조적 한계로 인해 스마트항만 투자의 타당성이 왜곡되는 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는, 다음의 내용을 포함하는 구체적인 지침 개정이 반드시 이루어져야 한다.

첫 번째, '자동화에 따른 하역 생산성 향상 편익' 신설이 필요하다. 기존의 '선박 재항 비용 절감 편익'이 신규 부두 건설에 따른 하역능력(Capacity) 증대 효과에 국한된 점을 명확히 하고, 이와는 별개로 자동화·지능화 기술 도입에 따른 운영 효율성(Efficiency) 증대 효과를 평가하는 항목을 독립적으로 신설해야 한다.

두 번째, 편익 산정 범위의 구체화 및 확대가 필요하다. 신설되는 생산성 향상 편익과 기존 편익 항목 모두, 그 산정 범위를 단순 용선료 절감에서 나아가 선박 운항 비용(고정비, 유류비) 및 선박 배출 대기오염물질 저감에 따른 사회적 비용까지 포함하도록 명시해야 한다.

세 번째, 환경 및 안전 편익의 독립 항목화가 필요하다. 항만 장비 동력 전환에 따른 환경비용 절감 편익과 안전사고 감소 편익을 타당성 평가의 독립된 정량 평가 항목으로 신설하여, 타 교통 부문과의 평가 형평성을 맞추고 스마트항만의 사회적 가치를 온전히 평가해야 한다.

이러한 지침 개정은 스마트항만 투자의 경제적 명분을 강화하고, 정책 결정의 합리성과 일관성을 확보하는 가장 직접적이고 효과적인 수단이 될 것이다. 따라서, 해양수산부, 항만공사 등 사업 추진 주체는 「항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침」, 「교통시설 투자평가지침」 등 항만 분야 타당성평가지침의 개선을 기획재정부, 국토교통부 등 관련 부처에 건의하여야 한다.

2. 데이터 수집 및 관리 체계 구축

새로운 편익 산정 방법론이 현장에서 효과적으로 작동하기 위해서는 신뢰할 수 있는 기초 데이터의 확보가 전제되어야 한다. 본 연구 과정에서도 확인되었듯이, 현재 국내 터미널에서는 편익 산정에 필수적인 컨테이너 처리 사이클타임, 장비별·작업별 에너지 소비량, 사고 유형별 발생 빈도 및 피해 규모 등 핵심 데이터가 체계적으로 수집·관리되지 않고 있다. 데이터 기반의 합리적 정책 결정을 위해서는 다음과 같은 제도적 보완이 시급하다.

첫 번째, 데이터 수집을 위한 법적 근거를 마련해야 한다. 「항만운송사업

법」, 「항만법」 등 관련 법령을 개정하여, 컨테이너 터미널 운영사가 스마트 항만 편익 산정에 필요한 핵심 운영 데이터를 표준화된 양식에 따라 의무적으로 수집하고, 이를 정부 또는 지정된 공공기관에 제출하도록 하는 법적 근거를 마련해야 한다.

두 번째, 수집된 데이터를 통합적 관리하기 위한 국가 항만물류 통합 데이터 플랫폼 등을 구축하여야 한다. 수집된 데이터를 통합적으로 관리하고 분석하여 정책 수립, 타당성 평가, 학술 연구 등에 공동으로 활용할 수 있는 국가 차원의 데이터 플랫폼을 구축할 필요가 있다. 이는 편익 산정의 신뢰도를 높일 뿐만 아니라, 국내 항만 운영의 효율성을 진단하고 개선하는 데에도 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

3. 항만 특화 편익 원단위 개발 및 주기적 갱신 체계 구축

편익 산정의 정확성을 극대화하기 위해서는 항만이라는 특수한 환경을 반영한 한국형 표준 원단위 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 자료의 제약으로 인해 일부 사회·환경적 비용을 산정하는 데 있어 해외 지침이나 국내 타 교통 부문의 원단위를 준용하였다. 그러나 항만 지역의 대기오염물질이 지역사회 보건에 미치는 영향, 항만 내에서 발생하는 안전사고의 사회경제적 손실 규모 등은 일반적인 도로·철도 환경과는 상이할 수 있다.

따라서, 정부 주도로 항만 특화 편익 원단위를 개발하기 위한 연구개발 사업의 정기화를 추진해야 한다. 이를 통해 스마트 기술 도입에 따른 효과, 항만 유형 및 주변 환경을 고려한 대기오염물질·온실가스 배출의 사회적 비용, 항만 내 사고 유형(충돌, 협착, 추락 등)과 심각도(사망, 중상 등)를 반영한 사고 비용, 해상물류 공급망에서의 화물 시간가치 등을 과학적으로 산출해야 한다. 또한, 개발된 원단위는 물가상승률, 기술 변화 등을 반영하

여 주기적으로 갱신하고 고시함으로써 편익 산정의 현실성과 시의성을 지속적으로 확보해야 한다.

4. 평가 방법론 제도화를 위한 협의체 구축

새로운 평가 방법론이 성공적으로 제도에 안착하기 위해서는 연구 개발을 넘어, 실제 평가를 수행하는 주체들과의 긴밀한 협력과 공감대 형성이 무엇보다 중요하다. 항만 개발사업의 예비타당성조사는 해양수산부(사업부처), 기획재정부(총괄 부처), 한국개발연구원(조사기관), 한국해양수산개발원(지원·조사기관) 등 여러 기관의 협업을 통해 이루어진다.

따라서 관련 부처 및 기관이 모두 참여하는 '스마트항만 타당성 평가 제도개선 협의체'를 구성하고 정례적으로 운영할 것을 제언한다. 이 협의체는 본 연구에서 개발한 방법론의 타당성 검토 및 보완, 실제 예비타당성조사 시범 적용 및 결과 분석, 지침 개정안의 세부 문구 조율, 제도 변경에 따른 현장의 혼란 최소화 방안 등을 논의하는 공식적인 소통 창구의 역할을 수행해야 한다. 이러한 과정을 통해 연구 결과가 단순한 제언에 머무르지 않고, 모든 이해관계자가 수용하는 실효성 있는 제도로 발전할 수 있을 것이다.

참고문헌

국내 문헌

김가현 외(2021), 스마트항만 구축에 따른 탄소저감효과 연구, 한국해양수산개발원.

김보경·김근섭·강무홍(2022), 완전자동화터미널, 글로벌 공급망 대란에서 그 안정성을 증명하다, 한국해양수산개발원 동향분석 Vol. 179.

박경욱·박보미(2024), 2024 국가 교통정책 평가지표 조사사업 - 제2권 교통사고비용(2022), 한국교통연구원

박경욱 외(2025), 사람의 생명가치를 고려한 교통사고비용 추정방법론 개선 연구, 한국교통연구원.

박성희 외(2013), 열차 분리결합 자동화 기술 도입에 따른 편익 추정에 관한 연구, 한국철도학회 추계학술대회 논문집.

신승진·노홍승·계동민(2022), 수출입 자율주행차 선박하역 지원시스템 도입을 위한 사회적 편익 분석, 교통연구, 29(3), pp. 29-43.

안승현 외(2022), 항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안 연구, 한국해양수산개발원.

여수광양항만공사(2023), 광양항 자동화부두 구축사업 기초자료조사 및 타당성평가 용역.

인천항만공사(2021), 인천신항 1-2단계 컨테이너부두 하부공 축조공사 실시 설계 보고서.

전호철(2019), 에너지 전환정책에 따른 전기자동차의 환경편익 추정연구, 자원·환경경제연구, 28(2), pp. 307-326.

정태형·김정환·서종원(2012), BIM 기반 스마트 유지관리기술 도입의 경제적 타당성 검토를 위한 편익에 대한 연구, 대한토목학회 정기학술대회.

조성우·원승환·최상희(2014), 자동화 컨테이너 터미널의 하역 시스템에 따른 경제성 비교, 한국항만경제학회지, 30(3), pp. 121-140.

조아현 외(2022), 선박대기시간 예측모형 개발을 위한 방법론 연구, 한국해양수산개발원.

최상균 외(2023), 안전항만 구축을 위한 비용 산정 및 지원체계 마련을 위한 연구, 한국해양수산개발원.

최효연·유승훈(2014), 서울시 스마트 조명관리사업의 생활환경개선 편익, 서울도시연구, 15(4), pp. 17-33.

한국항만물류협회(2001), 항만하역재해통계 및 사례, 제15권.

_____(2002), 항만하역재해통계 및 사례, 제16권.

_____(2003), 항만하역재해통계 및 사례, 제17권.

_____(2004), 항만하역재해통계 및 사례, 제18권.

_____(2005), 항만하역재해통계 및 사례, 제19권.

_____(2006), 항만하역재해통계 및 사례, 제20권.

_____(2007), 항만하역재해통계 및 사례, 제21권.

_____(2008), 항만하역재해통계 및 사례, 제22권.

_____(2009), 항만하역재해통계 및 사례, 제23권.

_____(2010), 항만하역재해통계 및 사례, 제24권.

_____(2011), 항만하역재해통계 및 사례, 제25권.

_____(2012), 항만하역재해통계 및 사례, 제26권.

_____(2013), 항만하역재해통계 및 사례, 제27권.

_____(2014), 항만하역재해통계 및 사례, 제28권.

_____(2015), 항만하역재해통계 및 사례, 제29권.

_____(2016), 항만하역재해통계 및 사례, 제30권.

_____(2017), 항만하역재해통계 및 사례, 제31권.

_____(2018), 항만하역재해통계 및 사례, 제32권.
_____(2019), 항만하역재해통계 및 사례, 제33권.
_____(2020), 항만하역재해통계 및 사례, 제34권.
_____(2021), 항만하역재해통계 및 사례, 제35권.
_____(2022), 항만하역재해통계 및 사례, 제36권.
_____(2023), 항만하역재해통계 및 사례, 제37권.
_____(2024), 항만하역재해통계 및 사례, 제38권.
_____(2025), 항만하역재해통계 및 사례, 제39권.

환경부(2005), 대기오염물질발생량 계산방법

해양수산부(2021), 제4차(2021~2030) 전국 무역항 기본계획 보고서(부산항).

현성식 외(2015), 스마트 그리드 확산사업 편익분석 연구, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 467-468.

KDI(2014), 항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판).

KDI(2022a), 항만자동화 테스트베드 구축(광양항) 예비타당성조사. 부산항 진해신항(1단계) 건설사 업 예비타당성조사.

KDI(2022b), 부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사.

KDI(2022c), 예비타당성조사 수행을 위한 세부지침 항만부문 연구.

Kim, B., Kim, G., & Kang, M.(2022), Study on Comparing the Performance of Fully Automated Container Terminals during the COVID-19 Pandemic, Sustainability, 14, 9415.

국외 문헌

An, Yohan, and Namkyu Park. 2021. Economic Analysis for Investment of Public Sector's Automated Container Terminal: Korean Case Study, Journal of Marine Science and Engineering 9, no. 5: 459.

Alzate et al.(2024), Operational efficiency and sustainability in smart ports: a

comprehensive review, Marine Systems & Ocean Technology, 19, pp. 120-131.

Al-Fatlawi, H. A., & Motlak, H. J.(2023). Smart ports: towards a high performance, increased productivity, and a better environment. International Journal of Electrical & Computer Engineering, 13(2), pp. 1472-1482.

Chu, F. et al.(2018), The future of automated ports, McKinsey & Company.

Clarkson(2021), Container Intelligence Annual 2021.

_____(2022), Container Intelligence Annual 2022.

_____(2023), Container Intelligence Annual 2023.

_____(2024), Container Intelligence Annual 2024.

_____(2025), Container Intelligence Annual 2025.

Electric Power Research Institute(2009), Electric Ship to Shore Cranes: Costs and Benefits.

European Commission(2014), Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects: Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020.

European Commission(2021), Economic Appraisal Vademecum 2021-2027: General Principles and Sector Applications.

Gattuso, D., & Pellicanò, D. S.(2023), Perspectives for ports development, based on automated container handling technologies, Transportation Research Procedia, 69, 360-367.

International Transport Forum(2021), Container Port Automation: Impacts and Implications, OECD.

Kloeker, L., Joeken, G., & Eckstein, L.(2023), Economic Analysis of Smart Roadside Infrastructure Sensors for Connected and Automated Mobility, 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), IEEE.

Knatz, G., Notteboom, T., & Pallis, A. A.(2024), Container terminal automation: assessment of drivers and benefits, Maritime Policy & Management, 51(6), 1252-1276.

Koritarov, T. & Dimitrakiev, D.(2024), The Impact of Digitalization on Smart Ports: Enhancing Efficiency, Sustainability, and Competitiveness in the Maritime Industry, The scientific heritage, 152, pp. 28-33.

Leiva Vilaplana, J. A., Yang, G., & Ackom, E.(2025), From investment to net benefits: A review of guidelines and methodologies for cost-benefit analysis in the electricity sector, Energy Research & Social Science, 124, https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104052.

Makkawan, K., & Muangpan, T. (2021). A conceptual model of smart port performance and smart port indicators in Thailand. Journal of International Logistics and Trade, 19(3), pp. 133-146.

Meng, Z., & Comer, B.(2023), Electrifying ports to reduce diesel pollution from ships and trucks and benefit public health: Case studies of the Port of Seattle and the Port of New York and New Jersey, International Council on Clean Transportation (ICCT) Working Paper 2023-05.

Notteboom T. et al.(2023), Operational productivity and financial performance of pure transhipment hubs versus gateway terminals: An empirical investigation on Italian container ports, Research in Transportation Business & Management, 47, 100967.

Schenk, E. et al.(2020), Macroeconomic and Environmental Impacts of Port Electrification: Four Port Case Studies, Maritime Administration, US Department of Transportation.

United States Government Accountability Office(2023.9), Intelligent Transportation Systems: Benefits Related to Traffic Congestion and Safety Can Be Limited by Various Factors, Report to Congressional Committees.

U.S. Department of Transportation(2025), Benefit-Cost Analysis Guidance for Discretionary Grant Programs.

Wang, J. et al.(2024), Shore power for reduction of shipping emission in port: A bibliometric analysis, Transportation Research Part E, 188, 103639.

Zhang, R. et al.(2018), Virtual Traffic Lights: System Design and Implementation, 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), IEEE.

Zhang, C., Yang, Y., & Wang, N.(2024), Port governance and sustainable develop-

ment: The impact of port smartization on port carbon emission efficiency, Ocean & Coastal Management, 259, 107485.

Zhang, Z. et al.(2025), Collaborative Optimization of Shore Power and Berth Allocation Based on Economic, Environmental, and Operational Efficiency, Journal of Marine Science and Engineering, 13(4), 776.

国土交通省港湾局(2024), 港湾整備事業の費用対効果分析マニュアル(令和6年6月).

인터넷 자료

KOSIS 국가통계포털, 국내총생산에 대한 지출 디플레이터, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=301&tblId=DT_200Y112&conn_path=I3(검색일: 2025.4.10.)

Ship & Bunker, World Bunker Prices, https://shipandbunker.com/prices(검색일: 2025.9.10.)

VesselsValue, AIS Dynamic Data, https://www.vesselsvalue.com/(검색일: 2025.9.20.)

해양수산부 해운항만물류정보시스템 Port-MIS, https://new.portmis.go.kr/portmis/websquare/websquare.jsp?w2xPath=/portmis/w2/main/intro.xml(검색일: 2025.8.10.)

법령·고시

국토교통부(2022), 교통시설 투자평가지침(국토교통부고시 제2022-500호).

산업재해보상보험법(법률 제20523호, 2024.10.22)

항만기술산업의 육성 및 지원에 관한 법률(법률 제20135호, 2024.1.23.).

항만운송사업법(법률 제19501호, 2023.6.20.).

항만법(법률 제 20231호, 2024.2.6.).

자문회의

부산항 신항 운영사(2025.7.2., 대한민국 부산).

부 록

1. 항만의 스마트화에 따른 사업비 증가 규모 추정

1) 사업비 증가 규모 검토 개요

(1) 기본 조건

항만의 스마트화에 따른 사업비 증가 규모를 추정하기 위하여 임의의 항만을 가정하고, 반자동화 터미널 및 자동화 터미널로 구분하여 사업비를 산정하고 비교하였다.

가상의 비교 검토 항만의 규모는 4천TEU 3선석(1,015m × 600m)이다. 하부공, 호안공 등 공사비는 동일한 규모의 「인천신항 1-2단계 컨테이너부두 하부공 축조공사 실시설계용역(인천항만공사, 2021)」의 주요 공종을 참고하여 산정하였으며, 상부공 공사비 또한 동일한 규모의 「광양항 자동화부두 구축사업 기초자료조사 및 타당성평가용역(여수광양항만공사, 2023)」을 기준으로 검토하였다.

장비비는 「부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사(KDI, 2022b)」 및 「광양항 자동화부두 구축사업 기초자료조사 및 타당성평가용역(여수광양항만공사, 2023)」 등 공신력있는 공표자료를 참조하여 산정하였다.

(2) 항만사업의 비용 항목

사업의 비용은 건설기간 중 발생하는 공사비와 운영에 필요한 장비비로 구분되며, 각각의 항목은 아래 〈부록 표-1〉과 같다.

〈부록 표-1〉 사업비 비용항목

비용 항목			내 용
A.공사비	A-1 하부공	구체공	• 케이슨 제작 및 거치, 상치
		기초공	• 기초굴착, 사석투하 및 고르기 등 공사비
		지반개량공	• CY 등 부지조성구간 지반개량 공사비
		준설 및 매립공	• 안벽 기초 등 준설 및 배면 매립 공사비
		부대공	• 오탁방지막 등부표 등
	A-2 상부공	포장공	• Apron, CY 등 포장 공사비
		트렌스폰더	• 이송장비의 센서설치 공사비
		크레인 기초공	• ARMGC 기초공사비
		공급시설	• 급·배·오수 및 전기·통신 등
		부대공	• 펜스설치 및 차선도색 등
	A-3 호안공		• 안벽 측면 호안의 제체 및 기초공 공사비
B.장비비			• 자동화 단계별 안벽크레인, 야드크레인, 이송장비 등

자료: 저자 작성

2) 공사비 단가 검토기준

공사비의 단가자료는 유사 사업의 공사비 산출내역 및 개략공사비 단가와 공신력있는 공표자료(인천항만공사, 2021; 여수광양항만공사, 2023)를 참조하였으며, 사업비 추정을 위해 적용된 단가는 기존 단가자료를 보정지수(건설투자 GDP Deflator)[42]를 적용하여 2023년 4분기를 기준으로 산정하여 적용하였다.

42) KOSIS 국가통계포털, 국내총생산에 대한 지출 디플레이터(검색일:2025.4.10.)를 활용하여 보정함.

〈부록 표-2〉 비용 보정지수(건설투자)

연도	상승률	건설투자 GDP Deflator													
2010		100					90.764								
2011			100				96.298								
2012				100			98.338								
2013					100		98.472								
2014						100	99.846								
2015							100								
2016	0.334						100.334	100							
2017	3.365						103.699	103.365	100						
2018	3.236						106.935	106.601	103.236	100					
2019	2.913						109.848	109.514	106.149	102.913	100				
2020	1.269						111.117	110.783	107.418	104.182	101.269	100			
2021	9.543						120.660	120.326	116.961	113.725	110.812	109.543	100		
2022	9.398						130.058	129.724	126.359	123.123	120.210	118.941	109.398	100	
2023	3.736						133.794	133.460	130.095	126.859	123.946	122.677	113.134	103.736	100

자료: KOSIS 국가통계포털, 국내총생산에 대한 지출 디플레이터 (검색일:2025.4.10.)

〈부록 표-3〉 비용 보정지수(설비투자)

연도	상승률	설비투자 GDP Deflator													
2010		100					100.828								
2011			100				100.928								
2012				100			101.961								
2013					100		99.762								
2014						100	98.256								
2015							100								
2016	2.077						102.077	100							
2017	-0.494						101.583	99.506	100						
2018	-0.381						101.202	99.125	99.619	100					
2019	2.758						103.960	101.883	102.377	102.758	100				
2020	0.733						104.693	102.616	103.110	103.491	100.733	100			
2021	0.309						105.002	102.925	103.419	103.800	101.042	100.309	100		
2022	5.799						110.801	108.724	109.218	109.599	106.841	106.108	105.799	100	
2023	0.611						111.412	109.335	109.829	110.210	107.452	106.719	106.410	100.611	100

자료: KOSIS 국가통계포털, 국내총생산에 대한 지출 디플레이터(검색일:2025.4.10.)

3) 하부공 공사비 산정

하부공 공사비는 케이슨 등 구조물 공사비 산정을 위한 구체공, 케이슨 하부의 골재 포설 및 다짐 공사비 산정을 위한 기초공, 케이슨 하부 지반개량 및 준설 매립 등 기타 하부공으로 구분하여 산정하였다.

(1) 구체공

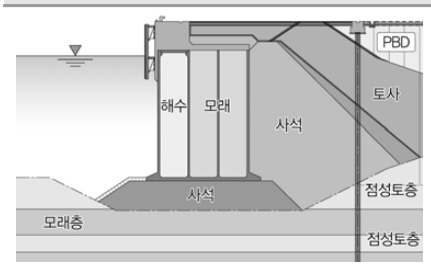
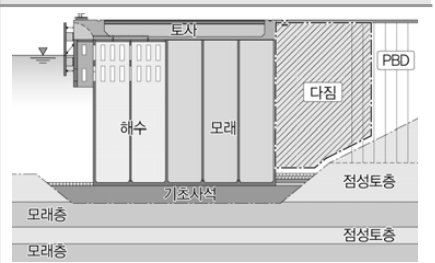
안벽 구체공은 케이슨 설치 및 상치콘크리트 타설로 구분되며, 반자동화터미널 및 자동화터미널의 QC형식을 고려하여 케이슨 규모를 검토하였다.

반자동화터미널의 경우 STQC를 고려한 “일반케이슨 + 육측크레인 기초”를 적용하였고, 자동화터미널의 경우 DTQC를 고려한 “광폭케이슨”을 적용하였다. 따라서, 자동화터미널의 경우 육측크레인 기초는 미반영하였다.

반자동화터미널의 경우 자동화터미널의 케이슨 대비 폭이 감소하고 연장이 길어져 제작 및 거치함수 감소를 반영하였다.

〈부록 표-4〉 케이슨 구조형식(예시)

단위: 원, VAT 제외

반자동화터미널 (일반케이슨 + 육측크레인 기초)	자동화터미널 (광폭케이슨)
	

자료: 저자 작성

〈부록 표-5〉 구체공 공사비

단위: 원, VAT 제외

구 분		단위	당초 공사비	물가상승율(%)	공사비	비 고
반자동화 터미널	케이슨제작	식	39,665,603,781	13.134	44,875,284,182	30함
	케이슨거치	식	3,739,869,870	13.134	4,231,064,379	30함
	상치콘크리트	식	19,661,093,675	13.134	22,243,381,718	
	육측크레인기초	식	13,535,149,274	13.134	15,312,855,780	
	기타 구체공	식	19,406,927,194	13.134	21,955,833,012	
	합계		96,008,643,794		108,618,419,071	
자동화 터미널	케이슨제작	식	68,474,057,643	13.134	77,467,440,374	42함
	케이슨거치	식	5,235,817,818	13.134	5,923,490,130	42함
	상치콘크리트	식	21,553,760,703	13.134	24,384,631,634	
	육측크레인기초	식	-	13.134	-	
	기타 구체공	식	19,424,548,978	13.134	21,975,769,241	
	합계		114,688,185,142		129,751,331,379	

자료: 저자 작성

(2) 기초공

기초공은 안벽 기초사석, 피복석 등 공사비로 구분되며, 반동화터미널의 경우 케이슨폭 감소에 따라 기초사석, 기초굴착 등 수량이 감소되었다.

〈부록 표-6〉 기초공 공사비

단위: 원, VAT 제외

구 분		단위	당초 공사비	물가상승율(%)	공사비	비고
반자동화 터미널	기초굴착	식	2,543,557,079	13.134	2,877,627,866	
	기초사석	식	3,511,653,219	13.134	3,972,873,753	
	뒷채움사석	식	8,217,223,560	13.134	9,296,473,702	
	기타 기초공	식	15,300,668,039	13.134	17,310,257,779	
	합 계		29,573,101,897		33,457,233,100	
자동화 터미널	기초굴착	식	3,707,962,706	13.134	4,194,966,528	
	기초사석	식	5,183,996,488	13.134	5,864,862,587	
	뒷채움사석	식	8,217,223,560	13.134	9,296,473,702	
	기타 기초공	식	15,300,668,039	13.134	17,310,257,779	
	합 계		32,409,850,793		36,666,560,596	

자료: 저자 작성

(3) 기타 하부공

구체공, 기초공 외 지반개량공, 준설 및 매립공, 부대공은 반동화터미널 및 자동화터미널을 동일하게 반영하였다.

〈부록 표-7〉 기타 하부공 공사비

단위: 원, VAT 제외

구 분	단위	당초 공사비	물가상승율(%)	공사비	비 고
지반개량공	식	29,284,247,425	13.134	33,130,440,482	
준설 및 매립공	식	14,895,880,413	13.134	16,852,305,346	
부대공	식	1,846,469,321	13.134	2,088,984,602	
합 계		46,026,597,159		52,071,730,430	

자료: 저자 작성

(4) 하부공 공사비 집계표

하부공 직접공사비는 반자동화터미널 194,147백만 원, 자동화터미널 218,490백만 원으로 반자동화터미널 대비 자동화터미널이 243억 원(12.5%) 더 소요되는 것으로 검토되었다.

〈부록 표-8〉 하부공 공사비 집계표

단위: 백만 원, VAT 제외

구 분	반자동화터미널	자동화터미널	비 고
구체공	108,618	129,751	
기초공	33,457	36,667	
기타 하부공	52,072	52,072	
합 계	194,147	218,490	△24,343(△12.5%)

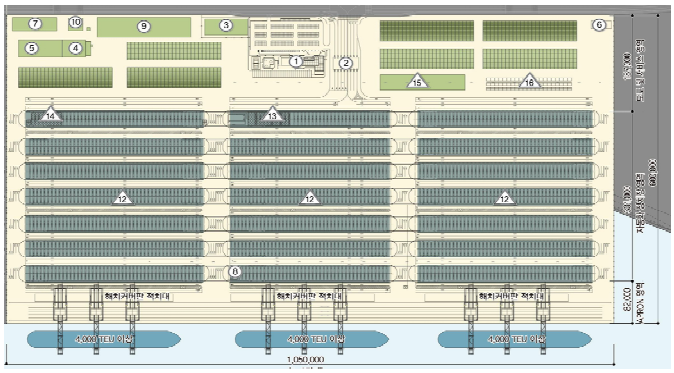
자료: 저자 작성

4) 상부공 공사비 산정

상부공 공사비는 포장, 야드크레인 기초, 공급시설(급·배·오수, 전기·통신), 건축 및 부대공으로 구분하여 산정하였다.

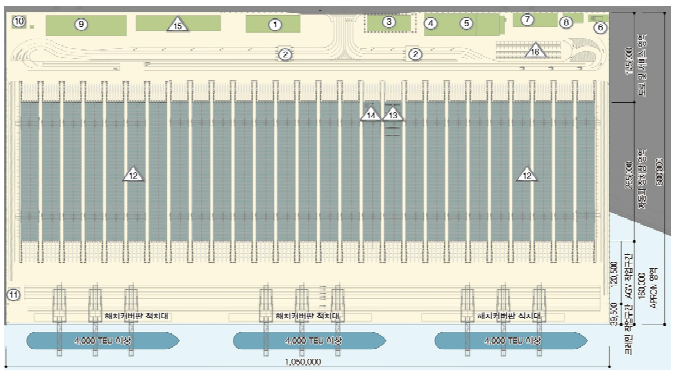
상부공 공사비 산정시 반영한 반자동화터미널 및 자동화터미널 개략 평면배치는 아래 〈부록 그림-1〉, 〈부록 그림-2〉와 같다.

〈부록 그림-1〉 반자동화터미널 평면배치(예시)



자료: 저자 작성

〈부록 그림-2〉 자동화터미널 평면배치(예시)



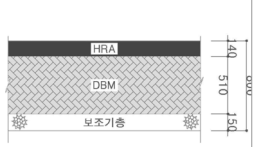
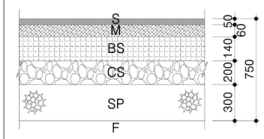
자료: 저자 작성

(1) 포장공

포장 공사비는 자동화 단계별 Apron과 일반주행영역, CY를 구분하여 자동화터미널의 경우 이송영역의 중하중 이송장비의 운영을 고려하여 개질아스팔트를 적용한 포장을 고려하였으며, 트랜스폰더의 공사비를 추가 반영하였다.

구역별 포장 단면은 아래 〈부록 표-9〉 같으며, 포장 단면별 산정된 포장공사비는 〈부록 표-10〉과 같다.

〈부록 표-9〉 포장 형식별 적용단가

구 분	Apron	CY	일반주행영역
포장 단면도			
포장 형식	개질 아스팔트 포장 (175,441원/㎡)	쇄석포장 (12,735원/㎡)	아스팔트 포장 (88,353원/㎡)

자료: 저자 작성

〈부록 표-10〉 포장공 공사비

단위: 원, VAT 제외

구 분		단위	수량	단가(원/㎡)	공 사 비
반자동화 터미널	Apron	㎡	80,850	175,441	14,184,404,850
	CY	㎡	189,000	12,735	2,406,915,000
	일반주행영역	㎡	360,150	88,353	31,820,332,950
	합 계				48,411,652,800
자동화 터미널	Apron	㎡	168,000	175,441	29,474,088,000
	CY	㎡	214,650	12,735	2,733,567,750
	일반주행영역	㎡	247,350	88,353	21,854,114,550
	합 계				54,061,770,300

자료: 저자 작성

트랜스폰더는 자동화이송영역에 8㎡당 1개를 적용하였으며, 산정된 공사비는 아래 〈부록 표-11〉과 같다.

〈부록 표-11〉 트랜스폰더 공사비

단위: 원, VAT 제외

구 분	단가(원/개)	수량(개)	공 사 비	비 고
반자동화터미널	42,400	-	-	
자동화터미널	42,400	21,000	890,400,000	8㎡당 1개 적용

자료: 저자 작성

(2) 크레인 기초공(ARMGC 기초)

야드크레인 기초 공사비는 자동화단계별 개략 평면배치결과를 반영하여 레일기초 연장을 고려하여 산정하였다.

〈부록 표-12〉 크레인 기초 공사비

단위: 원, VAT 제외

구 분	단가(원/m)	수량(m)	공 사 비	비 고
반자동화터미널	1,222,516	12,600	15,403,701,600	600m x 21블록
자동화터미널	1,222,516	18,360	22,445,393,760	680m x 27블록

자료: 저자 작성

(3) 공급시설

공급시설 공사비는 급수, 배수, 오수, 전기·통신 공사비로 구분되며, 반동화터미널 및 자동화터미널을 동일하게 반영하였다.

〈부록 표-13〉 공급시설 공사비

단위: 원, VAT 제외

구 분	단가(원/㎡)	수량(㎡)	공 사 비	비 고
급수공	1,471	630,000	926,730,000	
배수공	26,150	630,000	16,474,500,000	

구 분	단가(원/㎡)	수량(㎡)	공 사 비	비 고
오수공	618	630,000	389,340,000	
전기·통신	62,337	630,000	39,272,310,000	
합 계			57,062,880,000	

자료: 저자 작성

(4) 부대공

부대공 공사비는 펜스, 차선도색 및 기타 부대공 공사비로 구분되며, 반동화터미널 및 자동화터미널을 동일하게 반영하였다.

〈부록 표-14〉 부대공 공사비

단위: 원, VAT 제외

구 분	단가(원/㎡)	수량(㎡)	공 사 비	비 고
펜스	4,783	630,000	3,013,290,000	
차선도색	291	630,000	183,330,000	
기타 부대공	1,428	630,000	899,640,000	
합 계			4,096,260,000	

자료: 저자 작성

(5) 상부공 공사비 집계표

상부공 직접공사비는 반자동화터미널 124,975백만 원, 자동화터미널 138,557백만 원으로 반자동화터미널 대비 자동화터미널이 135.8억 원(10.9%) 더 소요되는 것으로 검토되었다.

〈부록 표-15〉 상부공 공사비 집계표

단위: 백만 원, VAT 제외

구 분	반자동화터미널	자동화터미널	비 고
포장공	48,412	54,062	
트렌스폰더	-	891	
크레인 기초공	15,404	22,445	

구 분	반자동화터미널	자동화터미널	비 고
공급시설	57,063	57,063	
부대공	4,096	4,096	
합 계	124,975	138,557	△13,582(△10.9%)

자료: 저자 작성

5) 호안공 공사비 산정

호안공 공사비는 반자동화터미널 및 자동화터미널을 동일하게 반영하였으며, 「인천신항 1-2단계 컨테이너부두 하부공 축조공사 실시설계용역(2021)」의 호안공 공사비에 물가상승율을 고려하여 산정하였다.

〈부록 표-16〉 호안공 공사비

단위: 원, VAT 제외

구 분	단위	당초 공사비	물가상승율(%)	공사비	비 고
기초처리공	식	2,750,994,960	13.134	3,112,310,638	DCM
기초공	식	2,945,951,180	13.134	3,332,872,408	
구체공	식	605,894,010	13.134	685,472,129	
상부공	식	220,307,875	13.134	249,243,111	
합 계		6,523,148,025		7,379,898,287	

자료: 저자 작성

6) 장비비 산정

(1) 장비 소요규모 산정

안벽크레인(QC)는 인천신항 1-2단계와 동일한 4,000TEU 1선석당 3기를 적용하였으며, 야드크레인(ARMGC)는 CY 블록당 2기를 적용하였다.

이송장비의 규모는 다음 터미널 사례를 참조하여 QC당 5기를 적용하였으며, 기타 장비로 리치스테커 3기, 엠티핸들러 3기를 적용하였다.

〈부록 표-17〉 터미널별 장비 적용사례

단위: 대

구 분	QC	이송장비	RS	EH	비 고
PSA	5	25	2	3	
E1CT	2	10	3	1	
SNCT	7	40	3	3	
HJIT	7	41	3	-	
적 용	9	45	3	3	

자료: 저자 작성

(2) 장비비 산정

QC, ARMGC 및 AGV의 가격은 「광양항 자동화부두 구축사업 기초자료조사 및 타당성평가용역(2023)」을 인용하여 적용하였으며, 기타 장비는 「부산항 진해신항(1단계) 건설사업 예비타당성조사(2022)」에서 제시된 비용에 물가상승율을 고려하여 산정하였다.

〈부록 표-18〉 장비비

단위: 백만 원, VAT 제외

구 분		수량(대)	당초 장비비	물가상승율(%)	장비비	비 고
반자동화 터미널	STQC	9	15,515	-	139,635	
	ARMGC	42	5,075	-	213,150	21블록
	YT	45	103	6.719	4,946	
	RS	3	522	6.719	1,671	
	EH	3	406	6.719	1,300	
	합 계				360,702	
자동화 터미널	DTQC	9	21,750	-	195,750	
	ARMGC	54	5,075	-	274,050	27블록
	AGV	45	724	-	34,769	
	RS	3	522	6.719	1,671	
	EH	3	406	6.719	1,300	
	합 계				507,540	

자료: 저자 작성

7) 사업비 추정결과

총 사업비는 반자동화터미널 845,712백만 원, 자동화터미널 1,059,381백만 원으로 반자동화터미널 대비 자동화터미널이 213,669백만 원(25.3%) 더 소요되는 것으로 검토되었다

반자동화터미널 대비 자동화터미널의 공사비 증가는 QC 대형화 및 DTQC 적용에 따른 광폭케이슨 적용이 하부공 공사비 주요 증가 원인으로 검토되었으며, 중하중 자동화 이송장비 적용에 따른 포장비용의 증가 및 트랜스폰더의 설치비용의 증가가 상부공 공사비 주요 증가 원인으로 검토되었다.

장비비는 자동화 단계별 안벽크레인(STQC, DTQC)의 적용 및 이송장비(YT, AGV) 적용 여부에 따라 증감이 반영되었고, 평면배치계획에 따른 CY 계획상 ARMGC의 소요대수에 따라 장비비의 증감액이 발생하였다.

〈부록 표-19〉 총 사업비 집계표

단위: 백만 원, VAT포함

구 분			반자동화터미널	자동화터미널	비 고
A.공사비	A-1 하부공	구체공	108,618	129,751	
		기초공	33,457	36,667	
		기타 하부공	52,072	52,072	
		합 계	194,147	218,490	
	A-2 상부공	포장공	48,412	54,062	
		트렌스폰더	-	891	
		크레인 기초공	15,404	22,445	
		공급시설	57,063	57,063	
		부대공	4,096	4,096	
		합 계	124,975	138,557	
	A-3 호안공		7,380	7,380	-
	직접공사비		326,502	364,427	
	제경비		81,626	91,107	25%

구 분		반자동화터미널	자동화터미널	비 고
	부가가치세	40,813	45,553	10%
	소 계	448,940	501,087	△52,147(△11.6%)
B.장비비	장비비	360,702	507,540	
	부가가치세	36,070	50,754	10%
	소 계	396,772	558,294	△161,522(△40.7%)
합 계		845,712	1,059,381	△213,669(△25.3%)

자료: 저자 작성

기본연구보고서 발간목록

2025년

01	청색경제 이행지표 개발 및 투자효과 분석	김주현
02	해양문화산업의 지역 경쟁력 진단과 발전전략 연구	이슬기
03	유해·교란 해양생물 지정 제도 개선방안 연구	정여진
04	해양보호구역의 효과적 관리 방안 연구	김미주
05	해양 복합위협의 실효적 대응 방안 연구	민영훈
06	해양 위성정보 활용 방안 연구	조성진
07	수산업 정책 전주기 연계성 강화 방안 연구	안지은
08	소비자 맞춤형 식품시장 성장에 따른 수산식품산업 대응 방안 연구	임경희
09	외국인 어선원 확보를 위한 제도 개선 연구	정명화
10	수산식품 물가 안정화 방안 연구	박혜진
11	수산물 업사이클링 생태계 조성 방안 연구	이남수
12	어촌과 연안의 통합적 발전을 위한 바다생활권 도입방안 연구	박상우
13	해운 얼라이언스 재편에 따른 영향분석과 대응방안 연구	김병주
14	연안대중교통의 운영 효율성 제고를 위한 정책 연구	류희영
15	그린 암모니아 선박 연료 전환 대응 방안 연구	전서연
16	스마트항만 기술 수용성 제고를 위한 법·제도 개선 방안 연구	이다예
17	탄소중립항만 전환을 위한 항만하역장비 관리체계 개선 방안 연구	이혜령
18	부산항 중장기 발전전략 연구	김근섭
19	재난 · 재해 대비 항만 위험물 컨테이너 물류공급망 대응 방안 연구	최나영환
20	국제물류시장 공정경쟁질서 확립 방안 연구	김동환

2024년

01	섬·바다·강 연계 관광 네트워크 구축방안 연구	최일선
02	해양 스타트업 실패 자산화 방안 연구	좌미라
03	시민친화적 바닷가 공간 조성에 관한 연구	정지호
04	연안이용 관리 법제 정비방안 연구	최석문
05	특별관리해역 관리제도 재편 방안 연구	최수빈
06	해양관할구역 과세권한의 체계적 배분방안 연구	이혜영
07	어업인의 디지털 전환 수용성 제고방안 연구	오서연
08	수산물 무역(수출입) 단기 전망모형 구축 연구	한기욱
09	어촌소멸에 따른 사회경제적 영향분석과 대응전략 연구	이상규
10	어촌다움에 기반한 어촌공간관리 방안 연구	이승혜
11	파생상품을 이용한 해운선사의 위험관리에 관한 연구 - 운임선도거래(FFA)를 중심으로 -	김한나
12	내항상선 해양사고 경감방안 연구	허성례
13	항만재개발사업 공공성 강화 방안 연구	김세원
14	해외 항만터미널 확보 전략 연구	김근섭
15	항만 하역능력의 서비스 수준 개선 연구	이화섭
16	국내 무역항 거버넌스 체계 개편방안 연구	김근섭
17	선박의 원격운항을 위한 제도 개선방안 연구	박혜리
18	국제물류기업 육성을 위한 법제 개선방안 연구	최나영환
19	글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발 연구	강무홍
20	한-북미 무역구조 분석 및 물류공급망 변화 대응방안 연구	이성우

수시연구보고서 발간목록

2025년

01	해양치유시설 조성·운영 제도 개선 연구	이정아
02	국제 해양질서 전환 대응 해양대외전략 기반 연구	박수진
03	유기수산식품 국제 동등성 확보 방안	오서연
04	선원 복지 개선방안 연구 - 선내 급식을 중심으로	허성례
05	항만재개발사업 추진 체계 재정립 연구 - 항만재개발사업 업무 매뉴얼 개선을 중심으로	김세원
06	군소도서국 해양수산 국제협력 방안 수립	전혜은
07	어촌발전특구 도입을 위한 법·제도 연구	박상우
08	해양생태계서비스 활용 방안 연구	정세미
09	해양에너지 산업 활성화 방안 연구	육근형
10	비관리청항만개발사업 정보화 정책 방향 연구	이종필
11	해양안보 위협지수 개발 및 활용방안 연구 - 선박 이상 행위를 중심으로	민영훈
12	지방관리무역항 보안관리체계 재정립 연구	김가현
13	부산항 터미널 위험물 컨테이너 장치 효율 개선 방안 연구 - 법·제도 측면 -	김우선
14	새만금호 수질관리 강화 방안 연구	장원근
15	미 상호주의 대응 수산분야 비관세장벽 영향 연구	이정미
16	수중레저 안전관리 체계 정비를 위한 제도개선 연구	이정아

2024년

01	해양정보산업 진흥을 위한 제도 개선 방안 연구	김찬웅
02	한-아프리카 국제수산협력 체계 개선 연구	이채령
03	해양안보 MDA 체계 구축 · 활용 방안 연구	민영훈
04	인천항 자유무역지역의 효과적 운영을 위한 전략 방안	한장협
05	해양문화자원을 활용한 연안도시활력 증진 방안 연구	이슬기
06	부산항 물동량 유치방안 연구	김은우
07	국제사회의 대북제재 동향과 우리의 대응:해양수산분야를 중심으로	채수란
08	국내 연안여객선 관광·이용 활성화 방안 연구	이정아
09	내수면어업 허가·신고 제도 개선방안 연구	최순
10	어업선진화를 위한 어업관리체계 개편방안	심성현
11	글로벌 공급망 변동에 따른 해운물류 지원방안	황수진
12	연안 중소선사의 탄소중립 달성을 위한 친환경정책 지원방안	류희영
13	항만기술산업 활성화를 위한 법제도 정비 방안 연구	김보경
14	해양모태펀드 투자활성화 방안 연구	한기원
15	특별관리해역 내 공공하수처리시설의 방류수 수질기준 강화방안	장원근
16	중대재해처벌법 대응 양식장 안전성 개선 방안 연구	윤미경
17	국가관리연안항 발전전략 수립체계 연구	신정훈
18	글로벌 공급망 대응 해운항만물류 전문인력 양성 발전방안 연구	권보배
19	해양수산 국제개발협력 중장기 전략 연구	전혜은

일반연구보고서 발간목록

2025년

01	해양수산 공공데이터 플랫폼 활용 제고 방안 연구	김성은
02	동아시아 해양플라스틱 오염 대응 재원 조성 방안	이윤정
03	한-아세안 해양협력 전략적 강화방안 연구	최지연
04	수산업 강제노동 규범화 대응체계 구축연구	박찬엽
05	해조류 활용 신산업 생태계 조성 방안 연구	조헌주
06	미국 무역환경 변화와 해운·조선산업의 영향 분석 연구	김한나
07	해상운임에 대한 지정학적 리스크의 전이효과 분석	최영재
08	스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구	안승현
09	항만 수급분석 체계화 및 지침 마련 연구	신정훈
10	비컨테이너 부두 하역능력 산정을 위한 적정 점유율 기준 연구	이화섭
11	국가 스마트 콜드체인 물류거점센터 구축연구	조지성
12	해운항만물류 전문인력 중개 플랫폼 모델 개발	권보배
13	미국 이력 추적 의무화에 따른 수산물 수출기업 대응실태 분석 연구	박혜진
14	AI 활용 글로벌 수산이슈 및 무역전망체계 고도화 연구	한기욱
15	섬어촌 디지털 정보격차 해소를 위한 정책연구	이상규

2024년

01	한-북극권 청색경제 협력사업 추진 방안	김엄지
02	전환기 글로벌 해양환경규범의 대응력 강화 연구	박수진
03	해양 지속가능성 시범 평가 연구	최희정
04	Scope 3 기준 원양산업 탄소배출추정 및 대응방안 연구 - 원양저연승어업을중심으로	조헌주
05	수산물 공급망 관리 개선방안 연구(한태 무역을 중심으로)	한기욱
06	신통상규범 확대에 따른 수산분야 영향 및 대응방안	박혜진
07	탄소배출 규제 대응을 위한 컨테이너 선대 교체 수요 추정 연구	최건우
08	연안항개발사업의 경제적 편익에 관한 연구	김성아
09	한국과 미동부 항만 간 녹색해운항로 구축방안 연구	김가현
10	비컨테이너 항만물동량 예측모형 고도화 방안 연구(Ⅲ) - 철광석,화학공업생산품,기타광석,잡화를중심으로	이나영
11	접안 대기시간 감소에 따른 탄소집약도지수(CII) 변화 분석	김보람

일반연구 2025-08

스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구

인 쇄 2025년 12월 29일
발 행 2025년 12월 31일

발 행 인 조 정 희
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 크리커뮤니케이션 (02-2273-1775)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337
정가 6,000원

스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구

A Study on the Methodology for Evaluating the Effects of Smart Port Development

KMI 한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

49111 부산광역시 영도구 해양로301번길 26 (동삼동)
TEL. 051-797-4800 FAX. 051-797-4810

값 6000 원
93300
9 791168 663183
ISBN 979-11-6866-318-3