

일반연구

2023-02

AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구(II) - 우리나라 주요 항만을 중심으로

A Study on the AIS-based Analysis of Global Vessel Emissions(II)

: Focused on Major Ports in South Korea

강무홍 · 이연경 · 서정용 · 김아름 · 정인희



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구(II) - 우리나라 주요 항만을 중심으로

A Study on the AIS-based Analysis of Global Vessel Emissions (II)
: Focused on Major Ports in South Korea

강무홍 · 이연경 · 서정용 · 김아롬 · 정인희



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	강무홍, 이연경, 서정용, 김아름, 정인희			
내부연구진	연구책임자	강무홍	한국해양수산개발원	물류·해사산업연구본부 부연구위원
	공동연구원	이연경	한국해양수산개발원	물류·해사산업연구본부 연구위원
	공동연구원	서정용	한국해양수산개발원	물류·해사산업연구본부 부연구위원
	공동연구원	김아름	한국해양수산개발원	물류·해사산업연구본부 전문연구원
	공동연구원	정인희	한국해양수산개발원	물류·해사산업연구본부 연구원
연구기간	2023. 1. 1. ~ 2023. 10. 31.			
보고서 집필내역				
연구책임자	강무홍 연구총괄, 제1장 제1절, 제2절, 제4장 제1절 일부, 제2절 일부, 제3장, 제4장 제2절, 제3절, 제4절, 제5장			
내부연구진	이연경 제5장 일부			
	서정용 제3장 제2절 일부			
	김아름 제1장 제3절 일부, 제2장 일부, 제3장 제2절 일부, 제4장 제1절 일부			
	정인희 제1장 제3절 일부, 제2장 일부, 제3장 제2절 일부, 제4장 제1절 일부			
산·학·연·정 연구자문위원	이건우 한양대학교 교수			
	정주철 부산대학교 교수			
	추윤식 해양수산부 사무관			

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

최근 우리나라는 한여름의 폭염, 한겨울의 폭설, 건조한 기후로 인한 대형 산불, 폭우로 인한 산사태 등 심각한 자연재해로 고통을 겪고 있다. 이러한 자연재해는 지구온난화에 따른 기후변화가 원인으로 밝혀져 있으며, 이산화탄소 등 6대 온실가스가 주범으로 알려져 있다.

세계 각국은 기후변화의 심각성을 인식하고 해결하기 위해 선진국만을 대상으로 하는 교토의정서(1997)에 이어 개도국도 참여하는 파리협정(2015)을 채택하였으며, 지구 평균온도 상승을 2℃보다 아래인 1.5℃로 억제하기 위해 노력하고 있다. 우리나라 정부에서도 파리협정에 대응하기 위해 ‘2050 탄소중립 추진 전략(2020.12.7.)’을 발표하였고, 2020년 12월 15일 ‘2050 장기저탄소발전전략(LEDs)’과 ‘2030 국가온실가스감축목표(NDC)’를 확정하였다.

전 세계적으로 온실가스는 운항하고 있는 선박으로부터 많이 발생하고 있다. 글로벌 무역산업에서 화물 대부분을 운송하는 선박들은 아직까지 BFO(Bunker Fuel Oil)와 MDO(Marine Diesel Oil) 등 화석연료를 사용하고 있으며, 이로 인해 이산화탄소를 비롯한 많은 배기가스를 배출하고 있다. 국제해사기구인 IMO에서는 선박의 배기가스 배출량을 줄이기 위해 배출규제해역(ECA: Emission Control Area)을 지정하여 운영하고 있다. 특히 최근에는 선박에너지효율설계지수(EEXI: Energy Efficiency Existing Ship Index)와 탄소집약도지수(CII: Carbon Intensity Indicator) 규제를 시행하였으며, 기준에 부합하지 않는 선박들의 운행을 제한하는 강력한 규제를 발표하였다.

우리나라도 ‘항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법’을 시행함에 따라 부산항, 인천항, 여수·광양항, 울산항, 평택·당진항 등 5개 항만을 ECA로 지정하였으며, 이 중 부산항, 인천항, 여수·광양항, 울산항 등 4개 항만은 선종별에 따라 10~12노트 이하로 운항하는 ‘선박저속운항 해역 및 대상 선종 등 기준 고시’를 시행하였다.

하지만, 이와 같은 정책이 추진되었을 때 예상되는 저감 효과, 배출 현황 등 정책적 기초자료가 미비하여 추진 동력이 저하되고 있기 때문에 이를 지원할 수 있는 방법론 개발 및 고도화가 필요했다. 이러한 측면에서 본 연구는 선박의 동선을 파악할 수 있는

AIS(Automated Identification System) 데이터를 기반으로 연료소모량을 추정하는 K-SEEA(Korea Ship Emission Estimation Approach) 모형을 만들었는데, 매우 시의적절하다 판단한다. 특히 2020년 개발된 1차 모형을 추가적으로 검증하고 보정하여 신뢰도 높은 모형을 만들었다는 측면에서 매우 큰 의미를 가지고 있다고 생각한다.

본 『AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구(II) - 우리나라 주요 항만을 중심으로』는 우리 원의 강무홍 부연구위원이 연구책임을 맡아 이연경 연구위원, 서정용 부연구위원, 김아름 전문연구원, 정인희 연구원이 함께 집필하였다. 이에 먼저 연구진들의 노고에 깊은 감사를 표한다. 아울러 동 연구의 자문 및 외부평가위원으로 참여해 주신 한양대학교 이건우 교수님과 부산대학교 정주철 교수님, 해양수산부 추윤식 사무관님께도 깊은 감사를 드린다. 또한, 본 보고서의 심사와 감리를 맡아 적절한 지적과 조언으로 완성도를 높여 주신 우리 원의 최상희 연구부원장, 박광서 기획조정본부장을 비롯하여 출판되기까지 도움 주신 모든 분께 깊은 사의를 표하고 싶다.

아울러 본 연구의 상위 사업인 미래물류기술 고도화 연구사업을 비롯한 다양한 물류 관련 연구와 활동이 향후 우리나라와 기업의 물류산업 발전에 기여하고, 세계 속으로 나아갈 수 있는 명실상부한 기반이 되기를 기대한다.

끝으로 본 연구보고서의 내용은 전적으로 필자들의 개인적인 견해이며, 본 연구원의 공식적인 견해가 아님을 밝혀둔다.

2023년 12월
한국해양수산개발원
원장 김 중 덕

목차

정책제안 _ i

요약 _ iii

Executive Summary _ ix

01	서론 _1	
	제1절 연구 배경 및 목적	1
	1. 연구 배경	1
	2. 연구 목적	8
	제2절 연구 내용과 방법	8
	1. 연구 내용	8
	2. 연구 방법	10
	제3절 선행연구와 본 연구의 차별성 검토	11
	1. 선행연구 검토	11
	2. 기존 연구의 한계점 및 해결방안	13
	3. 연구의 차별성	13

02	우리나라 친환경 항만정책 추진 현황 _17	
	제1절 개요	17
	제2절 ECA 지정 현황	21
	제3절 선박저속운항 해역 지정 현황	23
	제4절 기타 친환경 항만정책 추진 현황	30
	1. 선박연료유 변경	30
	2. 육상전원공급시설 설치	36
	제5절 소결	39

03 AIS 및 실제 선박 연료사용량 데이터 분석_43

제1절 AIS 데이터 구조 및 특징 분석	44
1. AIS 데이터 구조	44
2. AIS 데이터 특징 및 한계점 분석	48
제2절 실제 선박 연료사용량 조사 및 분석	49
1. 연료사용량 조사	49
2. 연료사용량 분석	52
제3절 소결	53

04 선박 연료사용량 추정 모형 개발_55

제1절 기존 연구 내 연료사용량 추정 모형 분석	55
1. Top-down 방식 및 Bottom-up 방식	56
2. STEEM	59
3. STEAM	62
4. 기타 모형	71
제2절 선박 연료사용량 추정 모형 검증 및 보정	80
1. 신규 선박 연료량 추정 모형 개발	80
2. 실제 선박 연료사용량과의 결과 비교 및 검증	87
3. 선박 연료사용량 추정 모형 보정 및 개선효과 분석	92
제3절 우리나라 친환경 항만정책 추진 효과	94
1. ECA 지정 효과 분석	94
2. 선박저속운항 해역 지정 효과 분석	98
3. 육상전원공급시설 설치 효과 분석	100
제4절 소결	101

05

결론 및 연구활용 _103

제1절 결론	103
제2절 연구활용 및 기대효과	105
1. 정책적 기대효과	105
2. 학술적·기술적 기대효과	108
제3절 연구의 한계점 및 향후 연구 방향	109
1. 벌크선 및 유조선 추가 검증	109
2. 인근 도시 환경 개선 효과 분석	110

참고문헌 _113

부록 _121

표 목차

〈표 1-1〉 IMO의 이산화탄소 배출량 조사 결과(단위: 백만 톤)	3
〈표 1-2〉 IMO의 이산화탄소 배출량 추정 결과(단위: 백만 톤)	4
〈표 1-3〉 저속운항 대상 선종 및 권고 속도	6
〈표 1-4〉 선행연구와의 차별성	14
〈표 2-1〉 배출규제해역 대상 선박 및 운용 시점	22
〈표 2-2〉 대상 선종 및 권고 속도	25
〈표 2-3〉 배출규제해역 대상 선박 및 운용 시점	30
〈표 2-4〉 선박에서의 오염방지에 관한 규칙	31
〈표 2-5〉 황산화물 배출규제	32
〈표 2-6〉 AMP 설치에 따른 미세먼지 감축 효과	38
〈표 2-7〉 우리나라 주요 친환경 항만정책 요약	40
〈표 3-1〉 선박용 AIS의 종류	45
〈표 3-2〉 본 연구에서 사용한 AIS 동적 정보	46
〈표 3-3〉 본 연구에서 사용한 AIS 정적 정보	47
〈표 3-4〉 본 연구에서 사용한 AIS 항해 정보	48
〈표 3-5〉 AIS 데이터 특징(VesslesValue 2022년 기준)	49
〈표 4-1〉 주 엔진 및 보조엔진 배출계수	73
〈표 4-2〉 선행연구 요약 및 본 연구의 차별성	77
〈표 4-3〉 Auxiliary Engine Load Factor Assumptions	84
〈표 4-4〉 만재배수량 대비 화물적재율 계산 예	86
〈표 4-5〉 실제 사용량과 연료소모량 추정 결과 비교(2020년 수령 데이터 기준)	86
〈표 4-6〉 연간 사용량 비교 결과(2023년 수령 데이터 기준)	87
〈표 4-7〉 일별 사용량 비교 결과(예)	90
〈표 4-8〉 일별 사용량 비교 결과(2023년 수령 데이터 기준)	90
〈표 4-9〉 연료소모량 회귀분석 결과	93
〈표 4-10〉 독립변수별 회귀모형 적용 결과 비교	94
〈표 4-11〉 ECA 지정 해역별 SOx 감축량 추정	97
〈표 4-12〉 선박 저속운항 권고 속도 준수 및 미준수 결과 비교	99
〈표 4-13〉 육상전원공급시설 설치 후 연료사용량 및 이산화탄소 저감 효과	101
〈표 4-14〉 우리나라 주요 친환경 항만정책별 효과 추정(2022년 기준)	102

그림 목차

〈그림 1-1〉 IMO의 항차 기반 연료사용량 추정 결과(단위: 천 톤)	4
〈그림 1-2〉 본 연구의 흐름도	9
〈그림 1-3〉 LogMS 발표 자료	11
〈그림 2-1〉 육상전원공급설비 및 해상풍력지원 전용 항만 인프라	18
〈그림 2-2〉 대기질 개선 종합계획의 비전 및 목표	19
〈그림 2-3〉 배출규제해역 위치	22
〈그림 2-4〉 저속운항해역 위치	24
〈그림 2-5〉 해양안전종합정보시스템 구성	26
〈그림 2-6〉 선박저속운항 프로그램 증빙자료	27
〈그림 2-7〉 저속운항프로그램 도입 초기 VMS에서 저속운항 증빙	28
〈그림 2-8〉 저속운항프로그램 도입 초기 ECDIS에서 저속운항 증빙	29
〈그림 2-9〉 저속운항 프로그램 운영 프로세스	29
〈그림 2-10〉 선박의 질소산화물 배출허용기준 강화	31
〈그림 2-11〉 선박의 황산화물 배출허용기준 강화	32
〈그림 2-12〉 선박 연료유 황함유량 규제	33
〈그림 2-13〉 친환경 선대 전환	34
〈그림 2-14〉 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵	35
〈그림 2-15〉 육상전원공급설비 개념도	37
〈그림 3-1〉 전 세계 컨테이너 선박 규모	46
〈그림 3-2〉 A 선사 A선박 데이터 샘플	50
〈그림 3-3〉 B 선사 데이터 샘플	51
〈그림 3-4〉 시스템 오일(좌) 및 실린더 오일(우)	51
〈그림 3-5〉 A 선사 A선박 추진기관별 합계	52
〈그림 4-1〉 STEEM 프로세스	61
〈그림 4-2〉 STEAM2 주요 구성 요소와 상호관계에 관한 개략도	65
〈그림 4-3〉 전장과 수선간장	66
〈그림 4-4〉 STEAM1, STEAM2 비교	70
〈그림 4-5〉 STEAM1, STEAM2 비교(전체 연료 소비, 엔진 및 보일러 연료 소비) ·	71
〈그림 4-6〉 선박 배출로 인한 대기 오염 시뮬레이션 결과	74
〈그림 4-7〉 기존 모형 적용의 한계1(두 지점 사이 배출량 미적용)	81

〈그림 4-8〉 기존 모형 적용의 한계2(중간지점 누락 시 다음 지점 과대 추정)	81
〈그림 4-9〉 연료소모량 지역 배분 방식(위경도 1도)	82
〈그림 4-10〉 연료소모량 지역 배분 예	83
〈그림 4-11〉 ECA 적용 전후 SOx 배출량 비교(2022년 부산항 컨테이너선 기준) ..	95
〈그림 4-12〉 ECA 적용 전후 SOx 배출량 비교 (2022년 인천항/평택·당진항 컨테이너선 기준)	96
〈그림 4-13〉 ECA 적용 전후 SOx 배출량 비교(2022년 여수·광양항 유조선 기준) ..	96
〈그림 4-14〉 ECA 적용 전후 SOx 배출량 비교(2022년 울산항 유조선 기준)	96
〈그림 4-15〉 선박 저속운항 적용 전후 연료사용량 비교(2022년 부산항 컨테이너선 기준)	99
〈그림 5-1〉 전 세계 컨테이너선 연료사용량 분포(2022년 기준)	107
〈그림 5-2〉 AMP 설치 전후 부산항 대기확산분석 결과(2019년 7월)	111

약어 목록

- ADS(자동종속감시): Automatic Dependent Surveillance
- AIS(선박자동식별장치): Automated Identification System
- AMP(육상전원공급장치): Alternative Maritime Power
- BFO: Bunker Fuel Oil
- CAPSS(대기정책지원시스템) : Clean Air Policy Support System
- CII(탄소집약도지수): Carbon Intensity Indicator
- CMAQ(커뮤니티 멀티스케일 대기질 모델) : the Community Multi-scale Air Quality model
- ECA(배출규제해역): Emission Control Area
- ECDIS(전자해도정보시스템): Electronic Chart Display and Information System
- ESI(선박환경지수) : Environmental Ship Index
- EEXI(선박에너지효율설계지수): Energy Efficiency Existing Ship Index
- GPS(Global Positioning System)
- GICOMS(해양안전종합정보시스템): General Information Center on Maritime Safety and Security
- K-SEEA: Korea Ship Emission Estimation Approach
- ICAO(국제민간항공기구): International Civil Aviation Organization
- IMO(국제해사기구): International Maritime Organization
- IPCC(기후 변화에 관한 정부간 협의체): Intergovernmental Panel on Climate Change
- LED(발광다이오드) : Light Emitting Diode
- LEDS(장기저탄소발전전략): Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies
- LSFO: Low Sulphur Fuel Oil
- MDO: Marine Diesel Oil
- MMSI(해상이동업무 식별부호): Maritime Mobile Service Identify

-
- NDC(국가온실가스감축목표): Nationally Determined Contribution
 - NMVOC(비메탄계 휘발성 유기화합물): Non-methane Volatile Organic Compounds
 - NOx(질소산화물) : Nitrogen Oxide
 - Port-MIS(해운항만물류정보시스템) : Port Management Information System
 - PM(미세먼지): Particulate Matter
 - RTGC(타이어형 야드크레인) : Rubber Tire Gantry Crane
 - SENEM(선박 에너지 효율성 모델) : Ship's Energy Efficiency Model
 - SOLAS(국제해상인명안전협약): Safety of Life at Sea
 - SOx(황산화물) : Sulfur Oxide
 - STEEM(선박 통행량, 에너지 및 환경 모델) : Ship Traffic, Energy and Environmental Model
 - VMS(선박모니터링시스템): Vessel Monitoring System
 - WRF(기상 연구 및 예측 모델) : Weather Research and Forecasting model

정책제안

■ 분석 내용 및 방법

1. 문헌조사 및 전문가 인터뷰를 통한 관련 연구 및 방법론 분석
2. 선사 전문가 업무협의 개최를 통한 실제 연료사용량 데이터 확보
3. 선박 흘수 기반의 화물적재율 추정을 통한 주엔진 부하계수 보정
4. 실제 연료사용량과의 비료를 통한 검증 및 회귀분석을 통한 추가 보정 모형 제시

■ 정책제안

1. 선박 배기가스 배출량 상시 모니터링 체계 구축
 - 현재 GICOMS나 ECDIS를 통해 항적 조회 및 캡처하여 제출하는 방식을 개선하여 자동으로 점검할 수 있는 시스템 구축
 - 환경부 온실가스종합정보센터 등과 같은 배기가스 배출량 모니터링 시스템과의 협업을 통해 배출량 검증 및 예측 모형 개발
2. 녹색해운항로 시범사업 확대 추진
 - 부산항-시애틀·타코마항에 한정되어 있는 한-미간 녹색해운항로 시범사업을 LA항, LB항, NY항 등 대형 항만으로 확대 필요

요 약

AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구(II)

- 우리나라 주요 항만을 중심으로

강무홍 · 이연경 · 서정용 · 김아름 · 정인회

1. 연구의 배경 및 목적

1) 연구의 배경

- 전 세계적으로 기후변화의 심각성을 인식하고 다양한 부분에서 친환경 정책을 추진하고 있으나 이를 정량적으로 뒷받침할 수 있는 정책적 기초자료 미비
- 특히 IMO에서 추진 중인 탄소집약도지수(CII: Carbon Intensity Indicator) 규제는 부여되는 등급에 따라 선박 운항이 어려울 수 있으므로 이를 사전에 판단할 수 있는 방법론 필요
- 이에 2020년 선박들이 사용하고 있는 연료량과 이로 인해 배출되는 배기가스량을 추정할 수 있는 모형을 개발하였으나 정밀한 수준(일별/시간별)의 검증이 이루어지지 않았고 엔진 부하가 상수로 정해져 있어 정확성이 떨어진다는 한계 존재

2) 국정과제 연계성

- 본 연구는 친환경 항만 구축과 관련된 연구로 국정과제 ‘40. 세계를 선도하는 해상교통물류 구축’과 ‘41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리’와 연계성이 있음
- 또한 정량적인 수치로 항만의 탄소중립 목표를 설정하는 측면에서는 ‘86. 과학적인 탄소중립 이행방안 마련으로 녹색경제 전환’과 밀접하게 연관되어 있음
- 이러한 목표 설정을 통해 친환경 항만을 구현할 수 있도록 하는 것이 목표이기 때문에 ‘88. 미세먼지 걱정 없는 푸른 하늘’과도 관련 있음

3) 연구의 목적

- 본 연구에서는 2020년에 개발된 선박 연료사용량 추정 모형의 고도화를 통해 개선된 배기가스 배출량 현황 분석 및 우리나라 주요 친환경 항만정책 효과를 분석하는 것을 주요 목적으로 함

2. 연구의 방법과 특징

1) 학술적 방법

- 저유황유 사용, 저속운항 해역 지정, 선박 도착시간 준수 등 우리나라에서 추진하고 있거나 추진 예정인 친환경 항만정책에 관해 조사
- AIS 데이터의 구조 및 특징을 분석하고 중장기 실제 선박 연료사용량을 조사·분석

- 기존 연료사용량 추정모형을 분석하고, 2020년 연구의 모형을 선박
홀수를 기반으로 화물적재율을 계산하여 주엔진의 부하계수로 활용
하는 모형을 개발
- 기존 연구 및 실제 선박 연료사용량과 비교하여 개선 효과를 분석
- 마지막으로 우리나라의 친환경 항만정책의 추진 효과를 분석하여 배
기가스 배출량 감소 효과를 분석

2) 정책화 방법

- 연료사용량 추정 결과를 검증, 모형 보정을 위한 데이터 확보를 위해
선사 전문가 업무협의 개최
- 국제학술대회 발표를 통한 연구 내용 검증 및 의견 수렴

3) 연구의 특징

- 기존 연구들은 대부분 실제 선박 연료사용량과 비교가 이루어지지 않
았고, 외부 환경조건이 반영되지 않아 부하율과 같은 값들을 상수로
사용하여 정확성 저하
- 기존 연구의 한계를 극복하기 위해 ① 정밀한 수준의 선박 연료사용량
데이터와 비교 및 검증, ② 화물 적재량과 같은 외부 환경조건을 반영함으
로써 모형 개선 추진
- 기존 연구들은 선박 배기가스 배출량 관리 및 체계의 필요성 확보,
선박 배기가스 배출량 및 추정 방법론 개발, 배출량 관리 효과 분석
등을 개별적으로 연구했지만, 본 연구에서는 이를 모두 고려하여 선박
배기가스 배출량 추정 방법론을 기반으로 AMP 설치, 감속운항, ECA
지정 등 우리나라 친환경 항만정책 효과를 종합적으로 분석

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- 우리나라 친환경 항만정책의 저감 효과를 제시할 수 있는 방법론 개발
 - 2020년 AIS 데이터를 기반으로 선박 연료사용량 및 배기가스 배출량을 분석할 수 있는 1차 모형을 개발하였으며, 2023년 2차 연구를 수행함으로써 결과를 바탕으로 개선한 신규 모형 K-SEEA를 개발
 - 2차 연구에서는 선박의 홀수를 기반으로 엔진 부하를 계산하여 적용하였으며, 정밀한 수준의 선박 연료사용량과 비교하여 검증 및 보정 모형을 적용하는 등 보다 정확한 결과를 도출할 수 있는 모형을 제안
 - 실제 연료사용량 데이터와 비교하여 95.36%의 결과를 도출하였고 분산 또한 5.52%로 감소한 결과를 도출하였으며, 2020년에 수령하여 비교했던 결과도 기존 12.8% 과대 추정되었던 결과를 6.2%p 개선된 6.4% 과대 추정으로 감소
 - 이는 실제 연료사용량과 비교해 큰 차이가 없는 결과로, 그 우수성이 확인되었다고 판단
- 개발된 신규 모형을 기반으로 ECA 지정, 선박저속운항 해역 지정, 육상전원공급시설 설치 등 우리나라 주요 친환경 항만정책의 효과에 대해 분석
 - 종합적으로 2022년 기준 황산화물 발생은 265톤(96%) 감축한 것으로 분석
 - 이산화탄소는 429,822톤을 추가적으로 감축할 수 있었던 것으로 분석되었으며, 이는 2023년 할당배출권(KAU23) 기준으로 톤당 8,000원 정도¹⁾에 거래되고 있으므로 약 34억 원 정도 경제적 효과가 있을 것으로 추정

1) 한국거래소(검색일: 2023.8.29.)

2) 정책화 방안

- 선박저속운항 활성화를 위한 모니터링 체계 구축 필요
 - 선박저속운항과 관련하여 105,607톤의 연료를 줄일 수 있는 것으로 분석하였으며, 이는 아직까지 권고 속도인 10~12노트를 넘는 선박들이 존재함을 의미
 - 이를 위해 선박저속운항 여부를 상시 모니터링할 수 있는 체계 구축 마련이 필요하며, 기존 GICOMS나 ECDIS를 통해 항적을 조회하고 이를 캡처하여 제출하는 기존 방식 개선 필요
 - 이에 GICOMS나 ECDIS의 기능을 확장하거나 두 시스템을 활용하여 실시간으로 선박저속운항 여부를 확인하고 자동으로 관련 서류나 데이터를 전송할 수 있는 시스템을 구축, 운영한다면 선박들의 저속운항 참여율이 크게 높아질 것으로 예상
- 녹색해운항로 시범사업 확대 추진 필요
 - 최근 미국은 해운 선박 탄소 배출량이 적거나 없는 연료를 사용하고 항만에서는 온실가스저감 기술을 사용하는 운항로를 지칭하는 녹색해운항로 (Green Shipping Corridor) 개설을 제안
 - 실제 미국에서는 LA/LB항-상하이항을 녹색해운항로를 개설하기로 합의하였으며, 제27차 기후당사국총회에서는 부산항-타코마항 간 녹색해운항로를 후보로 제안
 - 윤석열 대통령은 2023년 9월 9일 인도에서 열린 G20 정상회의에서 “대한민국이 주도할 친환경 해운 솔루션은 지구 각지의 항구를 녹색 항로로 연결하는데 기여할 것”이라며 녹색해운항로 구축 비전을 제시
 - 다만 부산항과 시애틀-타코마항만을 대상으로 하는 시범사업의 한계를 극복하기 위해 LA, LB, NY 등 대상 항만을 확대하는 것이 필요

4. 기대효과

1) 학술적 기대효과

- 외부 환경요인 반영 및 검증을 통해 보다 현실적인 추정 모형 제공
- 기존 연구 대부분 상수로 두었던 엔진 부하율을 상황별 변수로 두어 더 정확한 추정 가능
- 항만 서비스 수준 분석(재항/대기시간 등), 통항 위험지역 분석 등 AIS를 기반으로 하는 다양한 연구 기반 마련

2) 정책적 기대효과

- ECA 지정, AMP 설치, 감속운항 등 친환경 항만정책의 정량적 효과를 제시함으로써 국내외 친환경 관련 정책 추진 가속화 지원
- 현재 진행 중인 「탄소중립 항만구축 기본계획 수립 용역」 등 다양한 탄소중립 관련 연구에 적용함으로써 기술적, 정책적 탄소중립 효과 분석 지원

EXECUTIVE SUMMARY

A Study on the AIS-based Analysis of Global Vessel Emissions (II)

: Focusing on Major Ports in South Korea

Moo-Hong Kang · Eon-Kyung Lee · Jung-Yong Seo · A-Rom Kim ·
In-Hoe Jung

1. Background and Purpose

1) Background

- Globally, there's an awareness of the seriousness of climate change, and various environmental policies are being pursued, but there remains a lack of quantitative policy data to support these measures.
- Particularly, the Carbon Intensity Indicator (CII) regulation being pursued by the IMO could potentially restrict ship operations based on assigned grades, making it necessary to have a method to anticipate this beforehand.
- Therefore, a model was developed to estimate the amount of fuel used by ships in 2020 and the resulting exhaust gas emissions. However, this model lacked precise validation at

a detailed level (daily/hourly), and the engine load was set as a constant, leading to limitations in accuracy.

2) National Project Relevance

- This research is linked to studies related to establishing eco-friendly ports, aligning with national projects such as 'No. 40 Constructing Maritime Logistics Leading the World' and 'No. 41 Defending Maritime Territory and Sustainable Marine Management.'
- Additionally, it closely relates to 'No. 86 Developing Scientific Carbon Neutrality Implementation Strategies for a Green Economy' by setting a quantitative objective for port carbon neutrality.
- Through these goal settings, the aim is to achieve eco-friendly ports, which is also related to 'No. 88. Achieving a Blue Sky without Fine Dust Concerns.'

3) Purpose

- The primary aim of this research is to analyze the improved status of exhaust gas emissions through the enhancement of the ship fuel consumption estimation model developed in 2020. It also aims to analyze the effects of major eco-friendly port policies in South Korea.

2. Methodology and Features

1) Academic Methodology

- Investigate eco-friendly port policies being pursued or planned in South Korea, such as low-sulfur fuel use, designation of low-speed sailing zones, and adherence to ship arrival times.
- Analyze the structure and characteristics of AIS data and study and analyze the actual medium- to long-term fuel usage of ships.
- Analyze the existing fuel consumption estimation model and develop a model using cargo loading rates calculated based on ship drafts to utilize as the main engine's load factor.
- Analyze the improvement effects by comparing existing research with actual ship fuel usage.
- Lastly, analyze the effectiveness of South Korea's eco-friendly port policy implementation to examine the reduction in exhaust gas emissions.

2) Policy-making Methods

- Organizing expert discussions with shipping professionals to secure data for the verification of estimated fuel usage and model adjustments.

-
- Validation of research content and gathering of opinions through presentations at international academic conferences.

3) Features

- Most previous studies did not compare their results with actual ship fuel consumption, and they used constants for values like load factor, not accounting for external environmental conditions, which resulted in reduced accuracy.
- To overcome the limitations of previous studies, this research aims to ❶ compare and validate with precise ship fuel consumption data, and ❷ improve the model by considering external environmental conditions such as cargo loading.
- While previous studies focused on individual aspects such as managing ship exhaust gas emissions and developing estimation methodologies, this research comprehensively analyzes the effects of South Korea's eco-friendly port policies, including AMP installation, reduced-speed navigation, and ECA designation, based on the ship exhaust gas emission estimation methodology.

3. Result

1) Summary

- Development of methodology to present the reduction effects of South Korea's eco-friendly port policies
 - An initial model was developed based on 2020 AIS data for analyzing ship fuel consumption and exhaust gas emissions. Subsequently, a secondary study was conducted in 2023, leading to the development of an improved model, K-SEEA.
 - The secondary research applied engine load calculations based on ship drafts, proposing a more accurate model by validating and adjusting against precise ship fuel usage data.
 - The comparison with actual fuel usage data resulted in a 95.36% match, reducing the variance to 5.52%. Moreover, compared to the 2020 findings, the previous overestimation of 12.8% decreased to an improved overestimation of 6.4%.
 - This close alignment of the model's results with actual fuel usage data validates the model's excellence.
- Analyzing the effects of South Korea's major eco-friendly port policies such as ECA designations, slow steaming zones, and onshore power supply facilities, based on the developed new model.
 - Overall, it has been analyzed that sulfur oxide emissions reduced by 265 tons (96%) as of 2022.
 - Additionally, it has been determined that an additional reduction of 429,822 tons of carbon dioxide was achievable. Considering

the trading rate of approximately 8,000 KRW²⁾ per ton based on the 2023 allocated emission rights (KAU23), an estimated economic impact of around 3.4 billion KRW can be expected.

2) Policy recommendations

- **Establishment of a Monitoring System to Promote Slow Steaming of Ships**
 - The analysis suggests the potential for a further reduction of 105,607 tons of fuel associated with slow steaming. This indicates that there are still ships exceeding the recommended speed of 10-12 knots.
 - To facilitate continuous monitoring of slow steaming, it is essential to improve the existing method of tracking ship routes using systems like GICOMS or ECDIS and submitting captured data.
 - Expanding the functionalities of GICOMS or ECDIS or establishing a system that can verify slow steaming status in real-time based on the ship's draft and automatically transmit related documents and data could potentially increase the participation rate in slow steaming.
- **Necessity to Expand Green Shipping Corridor Pilot Projects**
 - Recently, the U.S. proposed establishing Green Shipping Corridors, referring to routes where maritime vessels use low or zero carbon-emission fuels and ports employ greenhouse gas reduction technologies.

2) Korea Exchange (Search date: August 29, 2023)

- In the United States, an agreement was made to designate the LA/LB - Shanghai route as a Green Shipping Corridor, while the 27th Conference of the Parties suggested the Busan - Tacoma route as a candidate.
- President Yoon Suk-yeol presented a vision for constructing Green Shipping Corridors, stating at the G20 Summit in India on September 9, 2023, "Korea's leadership in eco-friendly maritime solutions will contribute to connecting ports worldwide through green corridors."
- However, to overcome the limitations of pilot projects focusing solely on Busan, Seattle, and Tacoma, expansion to include ports such as LA, LB, NY is essential.

4. Expected Outcomes

1) Academic effects

- Provision of a more realistic estimation model by incorporating and validating external environmental factors.
- By replacing the constant engine load factor, which was commonly used in previous studies, with variable factors based on situations, a more accurate estimation is achievable.
- Establishment of various research bases using AIS for analyzing port service levels (re-berthing/waiting times, etc.) and identifying high-risk navigation areas.

2) Policy effects

- Acceleration and support for the implementation of domestic and international eco-friendly policies by presenting the quantitative effects of ECA designations, AMP installations, slow steaming, and other eco-friendly port policies.
- Facilitation of technological and policy-related carbon-neutral impact analysis by applying these outcomes to various ongoing studies related to carbon-neutral port development, such as the "Basic Plan for Carbon-Neutral Port Establishment."

01

서론

제1절 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경

최근 우리나라는 한여름의 폭염, 한겨울의 폭설, 건조한 기후로 인한 대형 산불, 폭우로 인한 산사태 등 심각한 자연재해로 고통을 겪고 있다. 이러한 자연재해는 지구온난화에 따른 기후변화가 원인으로 밝혀져 있으며, 이산화탄소(CO₂)를 비롯한 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)이 지구온난화의 원인인 6대 온실가스이다. 특히 지구온난화의 주범으로 꼽히는 이산화탄소를 줄이기 위해 세계 각국은 다양한 부분의 탄소중립 정책을 펼치고 있다.

국제사회는 기후변화의 심각성을 인식하고 이를 해결하기 위해 선진국만을 대상으로 하는 「교토의정서(1997)」에 이어 개발도상국도 참여하는 「파리협정(2015)」을 채택하였다. 파리협정의 주요 목표는 지구 평균온도 상승을 2℃보다 아래인 1.5℃³⁾로 억제해야 한다는 것이며, 이에 따라 모든 당사국은

3) IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2018년 10월 인천 송도에서 개최된 제48차 총회를 통해 「지구온난화 1.5℃ 특별보고서」를 승인함으로써 1.5℃ 목표의 과학적 근거 마련(기상청(2019), p. 44)

2020년까지 「장기저탄소발전전략(LEDs: Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies)」과 「국가온실가스감축목표(NDC: Nationally Determined Contribution, 5년 주기 제출)」를 제출하기로 합의했다.⁴⁾

우리 정부에서도 파리협정에 대응하기 위해 「2050 탄소중립 추진 전략(2020.12.7.)」을 확정·발표했고, 2020년 12월 15일 「2050 장기저탄소발전전략(LEDs)」과 「2030 국가온실가스감축목표(NDC)」 정부안을 확정하여 발표했다. 동 추진 전략에는 ① 경제구조의 저탄소화, ② 신유망 저탄소 산업 생태계 조성, ③ 탄소중립 사회로의 공정전환 등 3대 정책방향과 ④ 탄소중립 제도적 기반 강화라는 지원 전략을 포함하는 3+1 전략을 포함하고 있다.⁵⁾ 2050 LEDs에는 탄소중립 5대 기본방향이 포함되어 있으며, 이 중 내연기관을 전기, 수소 등 친환경 연료로 전환하는 방향과 지능형 교통 시스템, 자율주행차 활용, 그리고 건물 내 LED 조명 사용 등의 방향이 항만과 관련된 정책이다.

또한 2050년 탄소중립 목표를 담은 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(탄소중립기본법)⁶⁾」이 2021년 8월 31일 국회 본회의를 통과해 9월 1일 국무회의에서 의결됐으며, 2021년 10월에는 ‘2050 탄소중립 시나리오’ 및 ‘2030년 온실가스 감축목표’를 발표했다.

특히 전 세계적으로 선박이 배기가스 배출의 상당 부분을 차지하는 것으로 알려져 있다. 글로벌 무역산업에서 화물 대부분을 운송하는 선박들은 아직까지 BFO(Bunker Fuel Oil)와 MDO(Marine Diesel Oil) 등 화석연료를 사용하고 있으며, 이로 인해 황산화물(Sulfur Oxides, 이하 SOx), 질소산화물(Nitrogen Oxides, 이하 NOx), 미세먼지(Particulate Matter,

4) 관계부처 합동(2020), 「2050 탄소중립」 추진전략, p. 22.

5) 관계부처 합동(2020), 위의 책, p. 4.

6) 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(법률 제19430호, 2023.6.9.)

이하 PM), 비메탄계 휘발성 유기화합물(Non-methane Volatile Organic Compounds, 이하 NMVOC), 일산화탄소(Carbon Monoxide, 이하 CO), 이산화탄소(Carbon Dioxide, 이하 CO₂) 등 많은 배기가스를 배출하고 있다.⁷⁾

IMO(2021)의 연구에 따르면, 2018년 기준 이산화탄소 배출량은 1,056백만 톤으로 조사되었으며, 2012년 962백만 톤에 비해 약 10% 증가한 것으로 조사되었다.⁸⁾ 특히 전 세계 이산화탄소 대비 비중이 2.76%에서 2.89%로 증가한 것으로 조사되어 선박 기인 탄소배출이 증가하고 있음을 알 수 있었다.

〈표 1-1〉 IMO의 이산화탄소 배출량 조사 결과(단위: 백만 톤)

연도	전 세계 배출량	선박 배출량	선박 배출 비중
2012	34,793	962	2.76%
2013	34,959	957	2.74%
2014	35,225	964	2.74%
2015	35,239	991	2.81%
2016	35,380	1,026	2.90%
2017	35,810	1,064	2.97%
2018	36,573	1,056	2.89%

자료: IMO(2021), p. 2.

IMO에서 개발한 항차 기반(Voyage-based) 선박 배출량 계산법으로 추정했을 경우 〈표 1-2〉와 같이 2012년 701백만 톤에서 2018년 740백만 톤으로 5.6% 증가, 선박 기반(Vessel-based) 배출량 계산법으로는 2012년 848백만 톤에서 2018년 919백만 톤으로 8.4% 증가한 것으로 조사되었다.

7) 강무홍 외(2020), pp. 1-2.

8) IMO(2021), p.1.

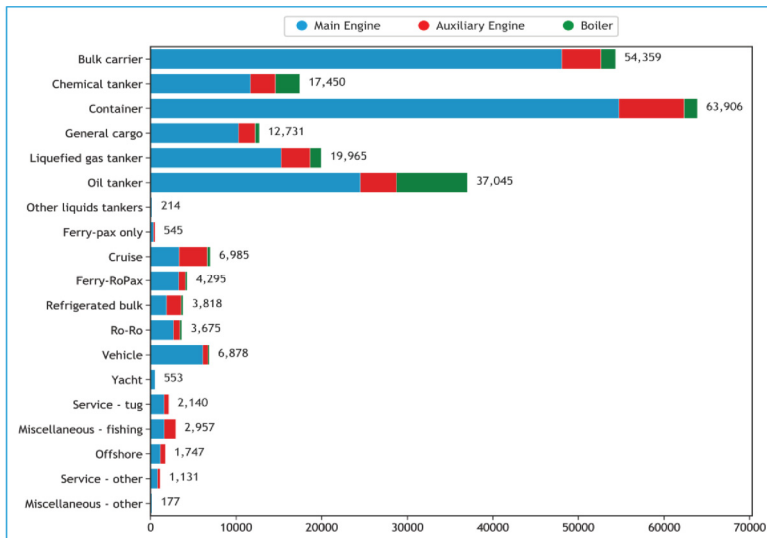
〈표 1-2〉 IMO의 이산화탄소 배출량 추정 결과(단위: 백만 톤)

연도	전 세계 배출량	항차 기반(Voyage-based)		선박 기반(Vessel-based)	
		선박 배출량	선박 배출 비중	선박 배출량	선박 배출 비중
2012	34,793	701	2.01%	848	2.44%
2013	34,959	684	1.96%	837	2.395
2014	35,225	681	1.93%	846	2.37%
2015	35,239	700	1.99%	859	2.44%
2016	35,380	727	2.05%	894	2.53%
2017	35,810	746	2.08%	929	2.59%
2018	36,573	740	2.02%	919	2.51%

자료: IMO(2021), p. 2.

항차 기반으로 선박 연료사용량을 추정한 결과는 〈그림 1-1〉과 같으며, 벌크선은 약 54백만 톤, 컨테이너선은 64백만 톤, 탱커선은 57백만 톤 사용한 것으로 추정, 본 연구의 결과와 유사한 것으로 조사되었다.

〈그림 1-1〉 IMO의 항차 기반 연료사용량 추정 결과(단위: 천 톤)



자료: IMO(2021), p. 8.

IMO는 이렇게 주기적으로 선박에서 배출되는 온실가스를 조사하고 있으며, 선박 기인 대기오염 문제에 대해 인지하고 이를 방지하기 위한 관련 규제를 시행하고 있다. 또한, IMO는 비준을 통해 발트해, 북해, 북미연안, 카리브해 등을 배출규제해역(Emission Control Area, 이하 ECA)으로 지정하여 선박의 대기 오염물질 배출량을 규제하고 있다.⁹⁾ 최근 우리나라, 중국을 비롯한 동북아 일부 국가들도 ECA를 지정하여 운영 중에 있으며, 2020년 1월 1일부터는 황합유량 0.5% 이하인 LSFO(Low Sulphur Fuel Oil) 사용을 의무화하고 있다.

특히 IMO는 온실가스 배출 억제를 위해 2023년 1월 1일부터 선박에너지효율설계지수(EEXI: Energy Efficiency Existing Ship Index)와 탄소집약도지수(CII: Carbon Intensity Indicator) 규제를 시행했다. IMO에서는 선박의 1년간 연료사용량, 화물 운송량 등 운항 정보를 토대로 연비를 조사해 A, B, C, D, E의 5개의 등급으로 CII를 평가한다. 최저등급인 E등급으로 평가되거나 3년 연속하여 D등급으로 평가받으면, 선주는 CII 등급을 개선하기 위해 선박에너지효율개선계획(SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan)을 제출하고, 1년 이내 개선 조치가 이뤄져야 한다.¹⁰⁾

우리나라도 항만 지역 내 대기질 개선을 위해 지난 2020년 9월 1일 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」을 시행함에 따라 2020년 9월 1일부터 부산항, 인천항, 여수·광양항, 울산항, 평택·당진항 등 5개 항만을 배출규제해역으로 지정하는 「황산화물 배출규제해역 지정 고시」가 시행되었다.¹¹⁾ 이들 5개 항만에서는 2020년부터 시행된 황합유량 기준인 0.5%보다 더 강화된 0.1%가 적용되며, 이 해역을 항해하는 선박 모두 이 기준을

9) 이기열 외(2019), p. 2.

10) 박한선 외(2023), p. 64.

11) 해양수산부(2020.8.19.) (검색일: 2023.8.17.)

따라야 한다. 또한 동 법 11조에 따라 2020년 1월 1일부터 부산항, 인천항, 여수·광양항, 울산항 등 4개 항만에서는 선종별에 따라 10~12노트 이하로 운항하는 「선박저속운항 해역 및 대상 선종 등 기준 고시」가 시행되었다.¹²⁾

〈표 1-3〉 저속운항 대상 선종 및 권고 속도

인천항		여수항, 광양항		부산항		울산항	
선종 (Code)	권고 속도	선종 (Code)	권고 속도	선종 (Code)	권고 속도	선종 (Code)	권고 속도
컨테이너선 (41)	12	컨테이너선 (41)	12	컨테이너선 (41)	12	컨테이너선 (41)	12
자동차 운반선 (27)	12	자동차 운반선 (27)	12	자동차 운반선 (27)	12	자동차 운반선 (27)	12
세미(혼재) 컨테이너선 (42)	10	세미(혼재) 컨테이너선 (42)	10	세미(혼재) 컨테이너선 (42)	12	세미(혼재) 컨테이너선(42)	10
LNG운반선 (56)	10	LNG운반선 (56)	10			원유운반선 (51)	10
						케미컬 및 석유제품운반선 (52, 53)	10

자료: 선박저속운항 해역 및 대상 선종 등 기준 고시(해양수산부고시 제2021-200호, 2021.11.25.)

하지만, 이러한 정책들이 추진되었을 때 예상되는 저감 효과, 배출 현황 등 정책적 기초자료가 미비¹³⁾하여 추진 동력이 저하되고 있기 때문에 이를 지원할 수 있는 방법론 개발 및 고도화가 필요하다. 최근 친환경 정책의 추진 필요성이 증대되고 있으나 실제 효과가 어느 정도인지 제시할 수 없어 관련 정책 추진 동력이 저하되고 있다. 이에 정책 추진 전과 후를 비교하여 정량적인 데이터를 제시함으로써 정책 입안자들의 이해도 향상과 함께 해운항만산업 및 국가적 친환경 정책 동력을 확보가 필요하다.

12) 선박저속운항 해역 및 대상 선종 등 기준 고시(해양수산부고시 제2021-200호, 2021.11.25.)

13) 안용성 외(2019), pp. 129-130.

이에 2020년 정밀한 AIS 데이터 확보의 한계점¹⁴⁾을 극복하여 보다 정확한 선박 배기가스 배출량을 분석할 수 있는 방법론을 개발하였다.¹⁵⁾ 하지만 ① 정밀한 수준(일별/시간별)의 선박 연료사용량¹⁶⁾과 비교가 이루어지지 않았고, ② 엔진 부하(LF: Load Factor)에도 고정된 상수¹⁷⁾를 적용했다는 한계점을 가지고 있다. 이는 대부분의 연구가 가지고 있는 한계점으로 세밀한 실제 데이터와의 비교·검증, 그리고 보정을 통해 추정 모형을 고도화하는 연구가 필요하였다.

특히 최근 탄소중립과 관련하여 「탄소중립 항만구축 기본계획 수립 용역」 등 다양한 연구에서 선박 기인 탄소배출량 추정을 요구하고 있으므로 기존 방법론검증 및 고도화를 통해 분석 결과와 추진 정책에 대한 신뢰성 향상이 필요하여 2차 연구를 추진하게 되었다.

동 연구는 국정과제와도 연계성을 가지고 있다. 먼저 친환경 항만 구축과 관련된 연구로 국정과제 ‘40. 세계를 선도하는 해상교통물류 구축’과 ‘41. 해양영토 수호 및 지속가능한 해양 관리’와 연계성이 있다고 볼 수 있다. 또한 정량적인 수치로 항만의 탄소중립 목표를 설정하는 측면에서는 ‘86. 과학적인 탄소중립 이행방안 마련으로 녹색경제 전환’과 밀접하게 연관되어 있으며, 이러한 목표 설정을 통해 친환경 항만을 구현할 수 있도록 하는 것이 목표이기 때문에 ‘88. 미세먼지 걱정 없는 푸른 하늘’과도 관련 있다.

14) 2020년 연구에서 분석한 IHS Markit의 AIS 데이터 평균 수신주기는 약 57분

15) 강무홍 외(2020), p. 5.

16) 1차년도에서는 A 선사 29척의 연간 사용량과 비교했으나 IMO GISIS 시스템, 선사 요청 등을 통해 일별(또는 시간별) 사용량 데이터를 확보해 비교 필요

17) 메인엔진은 0.8, 보조엔진은 EPA 기준 적용

2. 연구 목적

본 연구에서는 2020년에 개발한 선박 연료사용량 추정 모형의 고도화를 통해 개선된 배기가스 배출량 현황 분석 및 우리나라 주요 친환경 항만정책 효과를 분석하는 것을 주요 목적으로 하고 있다.

이를 위해 먼저 다양한 정보원으로부터 실제 연료사용량 데이터를 확보하여 결과 검증 및 모형을 보정한다.

다음으로 우리나라 전체 영해 내에서 배출되고 있는 선박 기인 배기가스 배출량을 분석하고 이를 통해 저유황유사용, 감속운항 등 ECA 지정 효과를 분석한다.

마지막으로 ‘탄소중립 항만구축 기본계획 수립 용역’ 등 탄소중립 관련 정책에 본 연구방법론의 활용방안을 제시함으로써 다양한 정책 연구에 활용될 수 있도록 기반을 마련하고자 한다.

제2절 연구 내용과 방법

1. 연구 내용

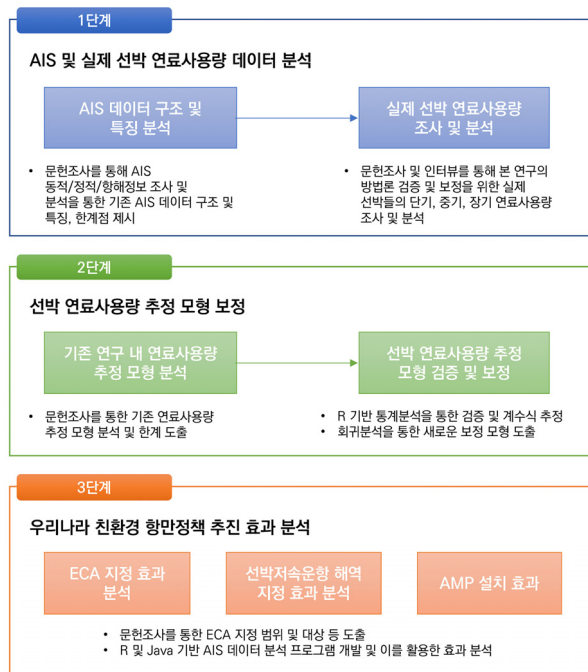
본 연구는 총 5개의 장으로 구성되어 있으며, 1장 서론과 5장 결론 및 정책제언을 제외한 주요 연구 내용과 방법은 다음과 같다.

먼저 2장에서는 본 연구의 시급성 및 타당성 등을 검토하기 위해 저유황 유 사용, 저속운항 해역 지정, 선박 도착시간 준수 등 우리나라에서 추진하고 있거나 추진 예정인 친환경 항만정책에 관해 조사하였다.

다음으로 3장에서는 본 연구에 필요한 AIS 데이터를 확보하기 위해 AIS 데이터의 구조 및 특징을 분석하고 중장기 실제 선박 연료사용량을 조사·분석하였다. 또한 기존 AIS 데이터의 한계점을 제시하고 이를 보완하여 본 연구의 방법론 검증과 보정을 수행하였다.

4장에서는 개선된 모형을 개발하기 위해 먼저 기존 연료사용량 추정 모형을 분석하였고 2020년 연구의 모형을 선박 흘수를 기반으로 화물적재율을 계산하여 주엔진의 부하계수로 활용하는 모형을 개발하였다. 다음으로 기존 연구 및 실제 선박 연료사용량과 비교하여 개선 효과를 분석하였고, 마지막으로 우리나라의 친환경 항만정책의 추진 효과를 분석하여 배기 가스 배출량 감소 효과를 분석하였다.

〈그림 1-2〉 본 연구의 흐름도



자료: 저자 작성

2. 연구 방법

1) 선사 전문가 업무협의 개최

연구진은 선사와 실제 운항데이터 제공 관련 협의를 진행하였다. 논의 진행 당시 A 선사는 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC: International Panel on Climate Change)의 공식적인 계수를 기반으로 작성된 IMO 보고서를 활용해 자체적으로 연료 소모량을 산출하고 있음을 설명하였다. 자체 산출과 관련하여 최신화 작업이 필요하며, A 선사뿐만 아니라 글로벌 선사들은 선박 기인 배출량 정보를 대중에게 공개할 수 있을 정도로 자료를 준비하고 있음을 언급하였다.

선사에서는 정보 제공의 대가로 일반화된 계수와 예측 정확성이 높은 모형 제시를 요청하였다. 특히 본 연구를 통해 개발되는 정확한 배기가스 배출 추정 모형에 대해 관심이 많았고 과업 완료 후 이를 공유할 것을 요청하였다. 이에 본 연구진은 과제 보고서 작성 완료 후 이를 제공하기로 했으며, 선사는 이를 활용해 각 선사가 보유한 선박의 연료사용량을 추정하는 방안을 고려하기로 했다.

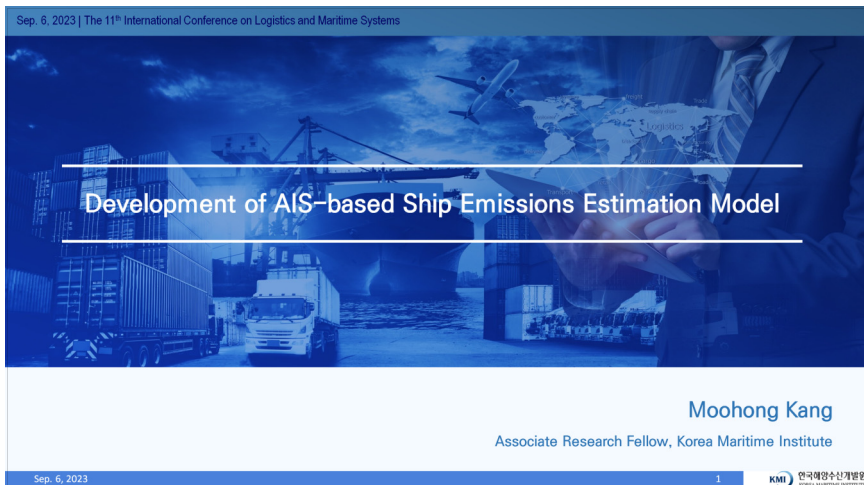
2) 국제학술대회 발표

본 연구에서는 개발된 연료사용량 및 배기가스 배출량 추정 모형을 검증받기 위해 세계적인 항만·물류 국제학술대회인 LogMS 2023(Logistics and Maritime Systems 2023)에 본 내용을 발표하였다. 11회째를 맞는 LogMS는 100여 편의 논문이 발표되었으며, 본 연구는 ‘Green Logistics’ 세션에서 발표되었다.

발표 후 이루어진 질의응답 시간에는 여러 명의 전문가로부터 질의와 코

멘트를 받았으며, 특히 네덜란드 에라스무스 대학교의 Rommert Dekker 교수는 파도와 바람, 해류 등을 고려하여 모형을 개선한다면 더 좋은 결과가 나올 것이라고 제안하였다.

〈그림 1-3〉 LogMS 발표 자료



자료: 저자 작성

제3절 선행연구와 본 연구의 차별성 검토

1. 선행연구 검토

전 세계적으로 AIS 기반 선박 배기가스 배출량 연구를 많이 추진하고 있으나 실제 연료사용량과 비교를 거쳐 모형 검증 과정이 없거나 연간 사용 통계와 비교하는 등 완벽히 검증되지 않은 연구가 대부분인 것으로 조사되었다. Corbett and Koelher(2003, 연료 사용통계와 비교), Corbett et

al.(2009, Top-down 분석 결과와 비교), Chang and Wang(2012, 기존 배출량 통계와 비교), Chen et al.(2016, 기존 연구 결과 비교), Johansson et al.(2017, 기존 연구 결과 비교) 등 본 연구와 유사한 연구에서도 기존 연료 사용 통계 또는 연구 결과와 비교하는 내용이 대부분이었다.

강무홍 외(2020)의 연구에서는 국내 A 선사 29척의 연료소모량과 비교했으나 연간 사용량과 비교했다는 한계가 있어 일별 또는 시간별 사용량 등 정교한 데이터와의 비교·검증 필요하며, 해양수산부에서 발주하여 KMI와 인천대학교가 수행한 「주요항만 대기오염물질 배출 현황 및 배출규제해역(ECA) 지정 타당성 조사 연구」에는 부산항과 인천항의 선박 배기가스 배출량을 추정했으나 선박 3척의 연간 사용량과 비교하여 한계점이 존재하였다.¹⁸⁾

또한 선박의 화물 적재 현황이나 조류의 영향과 같은 외부 환경조건이 반영되지 않아 이에 대한 보완이 필요하다.¹⁹⁾ Propeller Law²⁰⁾를 기반으로 하는 Corbett et al.(2009)의 연구뿐만 아니라 대부분의 연구에서 메인 및 보조엔진에 대한 부하율(Load Factor)을 상수로 두고 있었다. Corbett et al.(2009)의 연구에서는 메인엔진 부하율은 0.8, 보조엔진 부하율은 0.5로 했으며, 타 연구에서도 이를 적용하거나 보조엔진의 경우 EPA에서 발표한 운항형태별 부하율을 적용하였다. 하지만 화물 적재량, 조류/조타 영향 등의 외부 환경조건에 따라 특히 메인엔진에 대한 부하율이 상이하며, 이에 따라 전체 연료소모량에도 차이²¹⁾가 발생하였다.

18) 박한선 외(2018), p. 58.

19) 박한선 외(2018), 위의 책, p. 59.

20) 출력은 회전수(속도)의 3승에 비례

21) 만선 및 공선 시 20% 이상 연료소모량 차이 발생(K 기업 000 대표이사 인터뷰, 2023.4.3.)

2. 기존 연구의 한계점 및 해결방안

기존의 연구 대부분은 실제 선박 연료사용량 비교가 이루어지지 않았고, 외부 환경조건이 반영되지 않고 부하율과 같은 값들을 상수로 사용하여 정확성이 저하되고 있었다.

기존 연구의 한계를 극복하기 위해서는 첫 번째로 정밀한 수준의 선박 연료 사용량 데이터와 비교 및 검증이 필요하며, 두 번째로 화물 적재량과 같은 외부 환경조건을 반영한 보정 등에 개선이 필요하다.

먼저 정밀한 수준의 데이터와 비교 및 검증과 관련하여 선사의 연료사용량을 조사·비교·검증할 수 있다. 다만 선사 관점에서 연료사용량은 매우 중요한 영업비밀이므로 자료 제공이 어려울 수 있다. 따라서, 선사와 업무협약 또는 해양수산부의 도움을 받아 해당 데이터의 제공을 요청해야 하며, 수령한 데이터는 절대 외부로 유출되지 않도록 관리해야 할 것이다.

둘째, 외부 환경조건을 반영한 보정과 관련하여 이를 추정할 수 있는 데이터를 확보하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 AIS 데이터 항차 정보에 있는 선박의 홀수를 통해 화물 적재량을 추정하였으며, 이를 통해 엔진 부하를 적용함으로써 보다 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

3. 연구의 차별성

선행연구 검토를 바탕으로 본 연구의 차별성을 네 가지로 정리하였다.

첫째, 목표와 관련해서 정밀한 수준의 선박 연료사용량 데이터를 일별 또는 시간대별로 확보하여 비교·분석하고 화물 적재량과 같은 외부 환경조건을 반영하여 보정된 부하율 제시함으로써 보다 정확한 배출량을 추정한

다는 점에서 차별성을 확보하였다.

둘째, 대상과 관련해서는 타 연구들이 전 세계 또는 일부 항만을 대상으로 분석하였다면 본 연구에서는 전 세계 항만과 일부 주요 항만 모두를 대상으로 분석했다는 차이가 있다.

셋째, 연구 범위와 관련해서는 기존 연구들이 선박 배기가스 배출량 관리 및 체계의 필요성 확보, 선박 배기가스 배출량 및 추정 방법론 개발, 배출량 관리 효과 분석 등을 개별적으로 연구했지만, 본 연구에서는 이를 모두 고려하여 선박 배기가스 배출량 추정 방법론을 기반으로 AMP 설치, 감속운항, ECA 지정 등 우리나라 친환경 항만정책의 효과를 분석하는 것을 범위로 한다.

마지막으로 연구 방법과 관련해서는 선박 배기가스 배출량 분석을 위한 Bottom-Up 방법론을 적용했으며, 특히 여러 선사로부터 실제 연료사용량 데이터를 확보하여 검증하였다. 또한 회귀분석을 통해 화물 적재량, 홀수 등 외부 환경요인 변수를 적용하여 더 정확한 결과를 도출할 수 있었다.

〈표 1-4〉 선행연구와의 차별성

구분	주요 선행연구		본 연구
	요약	문헌(부록 번호)	
목표	• 선박 배기가스 배출량 관리체계 또는 추정 방법론 소개 - Top-Down 방식의 배출량 분석으로 인한 정확성 저하 - Bottom-Up 방식의 연구에서도 실제 사용량과의 비교·검증 부족 및 부하율과 같은 값들을 외부 환경조건이 반영되지 않은 상수로 사용	• 1, 13, 21, 22, 23, 25, 34 • 2, 14 • 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35	• 정밀한 수준의 선박 연료 사용량 데이터를 일별 또는 시간대별로 확보하여 비교 분석 • 화물 적재량과 같은 외부 환경조건을 반영하여 보정된 부하율 제시함으로써 보다 정확한 배출량 추정
대상	• 전 세계 항만 • 일부 주요 항만	• 2, 3, 4, 5, 15, 24, 32, 33, • 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19,	• 전 세계 항만 및 일부 주요 항만

구분	주요 선행연구		본 연구
	요약	문헌(부록 번호)	
	• 항만 외 타 분야	20, 26, 27, 29, 30, 35 • 14	
범위	• (필요성) 선박 배기가스 배출량 관리 및 체계의 필요성 확보 연구 • (방법론) 선박 배기가스 배출량 및 추정 방법론 연구 • (효과 분석) 배출량 관리 효과 분석 연구	• 1, 13, 21, 22, 23, 25 • 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 20, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35 • 8, 17, 34	• 선박 배기가스 배출량 추정 방법론을 기반으로 AMP 설치, 감속운항 등 ECA 지정 효과 분석
방법	• 관련 분야 전문가 대상 인터뷰 · 설문 수행 • Top-Down 기반 배출량 분석 • Bottom-Up 기반 배출량 분석 • 회귀분석을 통한 배출량 분석 • 기타 방법론을 이용한 배출량 분석	• 1, 13, 21, 22, 23, 25 • 2, 14, 33 • 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 20, 24, 26, 27, 30, 32, 33, 35 • 6, 31, 32, 34 • 10, 19, 28, 29	• 선박 배기가스 배출량 분석을 위한 Bottom-Up 방법론 적용 및 검증 - 다양한 정보원(IMO, HMM 등)으로부터 실제 연료사용량 데이터 확보를 통한 검증 • 회귀분석을 통해 화물 적재량, 흘수 등 외부 환경요인 변수 적용 • 관련 분야 전문가 인터뷰를 통한 결과의 신뢰성 및 활용 방안 논의

자료: 저자 작성

02

우리나라 친환경 항만정책 추진 현황

본 장에서는 선박 배기가스 배출량 분석의 중요성과 효과를 평가하기 위해 해양수산부의「제4차(‘21~’30) 전국 항만기본계획」 등 주요 정책을 바탕으로 저유황유 사용, 저속운항 해역 지정, 선박 도착시간 준수 등 우리나라에서 추진하고 있거나 추진 예정인 친환경 항만정책에 대해 조사하였다. 이를 통해 4장에서 각 정책의 추진으로 배기가스 배출이 얼마나 감소하였는지 분석하고자 한다.

제1절 개요

해양수산부의「제4차(‘21~’30) 전국 항만기본계획」에서는 항만 대기질, 수질, 해양생태계 등 항만환경 개선을 통한 항만품격 제고를 위해 항만의 비산먼지 저감대책 강화, 하역 장비 전원 친환경화 전환, 대기질 모니터링 시스템 확대 등 항만의 대기 환경을 개선하고 지역 주민의 삶의 질 제고, 육상전원공급장치(AMP)의 확대 설치, LNG 벙커링 인프라 구축 등을 추진

하고자 한다. 이를 통해 해양수산부는 친환경 선박의 입항 여건을 개선하고 환경영향평가, 주기적 점검 등을 수행하고, 신항만 개발 및 운영으로 인한 수질 오염을 최소화하고 해양 생태계 보전을 강화할 것임을 명시하고 있다. 또한 신재생에너지 생산지원시설 확충 추진계획의 일환으로 “분산형 에너지전환시스템 구축”을 통한 친환경 에너지 항만을 건설하는 정책을 마련하였다.²²⁾

〈그림 2-1〉 육상전원공급설비 및 해상풍력지원 전용 항만 인프라



자료: 해양수산부(2020.12.30.)(검색일: 2023.4.20.), p. 58.

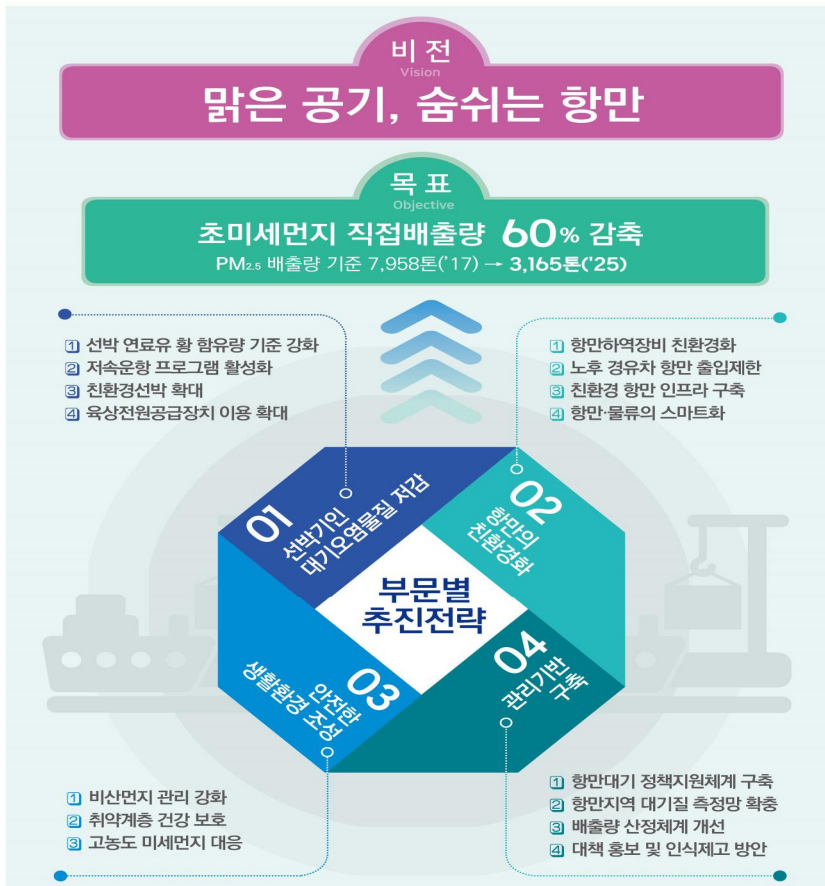
최근 미세먼지 등 대기오염물질이 사회적 문제로 대두되면서 항만지역의 대기오염물질 발생 및 대기오염에 관한 관심이 증가하며 대안 마련의 필요성이 높아지고 있다. 이에 정부는 선박 연료유의 황 함유량 기준을 강화(3.5% → 0.5%)하여 2020년 외항선박에, 2021년 내항 선박에 단계적으로 의무 적용함에 따라 선박 배출규제해역, 저속운항프로그램 등 미세먼지 저감정책의 제도적 기반 마련을 위해 「항만대기질법」을 제정하였다. 또한 하역장비, 선박 및 트럭 등과 같은 항만 내 대기오염물질 배출원을 대상으로 LNG 전환, 연료유 기준 강화 등 오염 저감대책을 제시하였다.²³⁾ 2021년

22) 해양수산부(2020.12.30.)(검색일: 2023.4.20.)

23) 해양수산부(2021.01.19.)(검색일: 2023.4.20.)

해양수산부는 항만으로부터의 대기오염을 줄이기 위해 「제1차 항만지역 등 대기질 개선 종합계획(2021~2025)」을 수립하였다. 이 계획에서는 항만 내 초미세먼지 직접배출량 60% 감축을 위해 선박에 기인하는 대기오염물질 줄을 저감하고, 항만을 친환경화하는 등 네가지 부문별 추진전략을 제시하고 있다.²⁴⁾

〈그림 2-2〉 대기질 개선 종합계획의 비전 및 목표



자료: 해양수산부(2021.01.19.)(검색일: 2023.4.20.), p. 23.

24) 해양수산부(2021.10.19.)(검색일: 2023.4.20.)

또한 해양수산부에서는 국가 탄소중립 실현을 위한 수소경제 활성화 등 에너지 패러다임 전환에 따른 항만의 역할과 기능 조정을 위해 「탄소중립 항만 구축 기본계획 수립용역」을 수행하고 있다. 특히 항만별 탄소 배출량 추정을 위해 항만 내에 있는 장비 및 건물 내에서 사용하고 있는 에너지뿐만 아니라 선박들이 사용하고 있는 연료량 분석하고 있으며, 이를 위해 본 연구의 1차 연구에서 개발된 모형을 활용하고 있다. 동 과제는 2024년까지 진행할 예정이며, 2차 연구 모형 개발 이후 보다 정확한 선박 기인 탄소 배출량을 추정할 예정이다.

부산항은 온실가스 저감을 위해 「부산항 Green port 구축 종합계획」을 수립하였으며 2020년까지 온실가스 배출량을 30% 감축하겠다고 발표하였다. 이에 부산항은 온실가스 배출 감축을 위해 환경선박지수(ESI)와 E-RTGC 도입, 육상전원공급장치(AMP), LED 조명 설치, LNG 야드 트랙터로 전환, 신재생에너지 사용 등 배출 저감을 위한 다양한 정책을 추진하였다.²⁵⁾ 또한 2023년에는 「부산항 2050년 탄소중립 계획」을 발표하였다. 부산항의 온실가스 배출을 2030년까지 40% 줄이고, 2050년에는 완전 탄소중립을 달성한다는 목표로 하역 장비 저탄소화, 건물 에너지 절감, 신재생 에너지 도입, 온실가스 흡수·포집, 자발적 온실 감축 활동 등 부산항의 발전을 위해 탄소중립 세부 실행과제를 포함하였다.²⁶⁾

울산항만공사는 4대 전략목표 중 하나인 ‘미래 성장 동력 확보’라는 전략과제로 ‘녹색항만’ 조성을 채택하여 국가 녹색항만 구축정책에 따라 친환경 항만정책을 추진하고 있다. 이에 따라 울산항은 2013년부터 친환경 호퍼 도입, ESI 도입, AMP 설치, LED 조명 설치 등을 친환경 정책을 시행하고 있다.²⁷⁾

25) 부산항만공사(2010.10.20.)(검색일: 2023.4.20.)

26) 연합뉴스(2023.2.8.)(검색일: 2023.4.20.)

27) 조진행(2019), pp. 194-195.

인천항은 수도권 권역과 가장 인접한 항만으로 친환경 항만으로 도약하기 위해 「Green port 종합계획」을 수립, 단계별로 추진하고 있다. 주요 정책으로는 AMP 설치, LNG 연료추진선박, LED 조명 설치, 신재생에너지 사용, 에코 호퍼 도입, E-RTGC 도입 등을 시행 중이다.²⁸⁾

여수·광양항은 묘도를 중심으로 하여 남쪽은 여수항구, 북쪽은 광양항구로 구분하고 있으며, 여수·광양항 역시 Green Port로 만들기 위한 프로젝트를 시행 중이다. 주요 정책으로는 AMP 설치, LED 조명 설치, E-RTGC 도입, 신재생에너지 사용 등을 시행 중이다.²⁹⁾

제2절 ECA 지정 현황

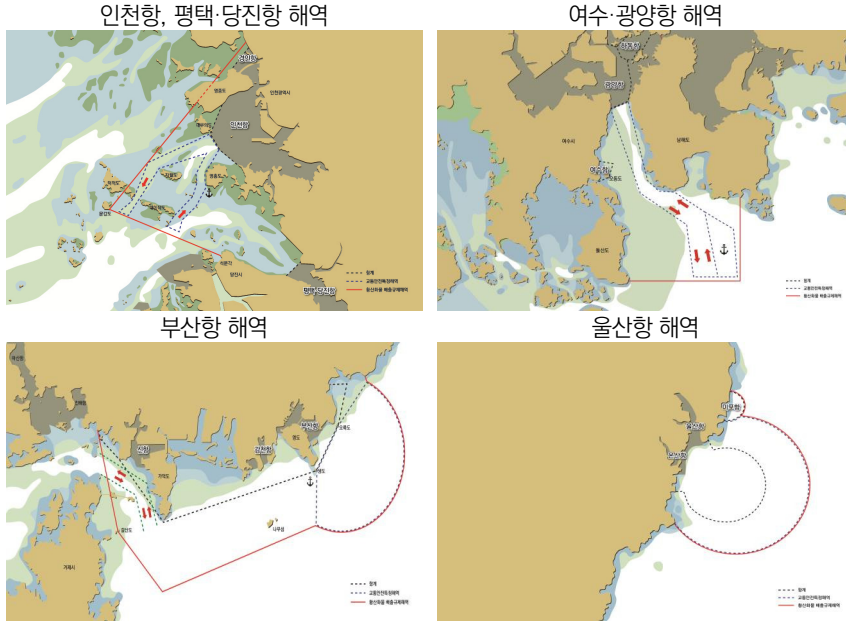
「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법(약칭: 항만대기질법)」이 제정됨에 따라 배출규제해역(ECA: Emission Control Area)이 시행되었다. 배출규제해역은 항만배출원 관리를 통해 항만지역 등의 대기질을 개선하고, 항만 및 인근 지역 주민의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 조성하기 위한 목적으로 지정되었다.³⁰⁾ 배출규제해역은 인천항, 평택·당진항, 여수·광양항, 부산항, 울산항 등으로 다음과 같다(그림 2-3 참고).

28) 이현정·이정욱·이향숙(2020), p. 123.

29) 이현정·이정욱·이향숙(2020), p. 123.

30) 항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법(법률 제19141호, 2022. 12. 27.)

〈그림 2-3〉 배출규제해역 위치



자료: 해양수산부(2020.8.19.)(검색일: 2023.8.17.), pp. 4-5.

2020년 9월 1일부터 배출규제해역 항만 정박지에 닻을 내리거나 부두에 계류하는 선박에 우선 적용되었고, 2022년 1월 1일부터 항해하는 선박까지 적용 대상을 확대하였다. 대상 선박 및 운용 시점³¹⁾은 다음과 같다(〈표 2-1〉 참고).

〈표 2-1〉 배출규제해역 대상 선박 및 운용 시점

대상선박	운용 시점	시행일
정박, 접안선박	• 투묘(投錨) 또는 계류(繫留) 완료 1시간 후부터 양묘(揚錨) 또는 이안(離岸)작업 시작 1시간 전까지	2020.9.1.~2021.12.31.
전 선박	• 배출규제해역에 들어온 때부터 나갈 때까지	2022.1.1. 이후

자료: 황산화물 배출규제해역 지정 고시(해양수산부고시 제2019-202호, 2019. 12. 26.)

31) 황산화물 배출규제해역 지정 고시(해양수산부고시 제2019-202호, 2019. 12. 26.)

황산화물 배출규제해역의 준수사항은 다음과 같다. 배출규제해역에서 황 함유량 기준(0.1% 이하)을 초과하는 연료유는 사용할 수 없으며, 배기가스 정화장치를 설치하여 황산화물 배출 제한기준량(기준량 4.3 이하) 이하로 황산화물 배출량을 감축하는 경우는 예외로 한다. 해당 선박이 배출규제해역을 항해할 때는 연료유 교환 등에 관한 사항을 기관일지에 기재해야 하며, 기관일지는 연료유를 공급받았을 때부터 1년간 선박에 보관해야 한다.

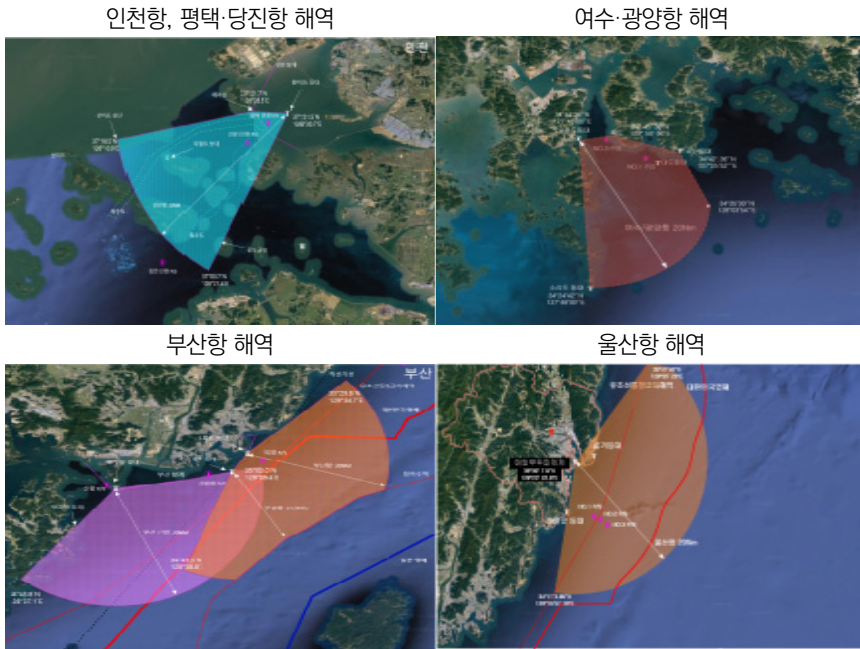
항만대기질법에 따라 해양수산부는 2021년 1월 19일, '제1차 항만지역 등 대기질 개선 종합계획(2021~2025)'를 발표하였다. 종합계획은 중장기(5년)적으로 항만지역 등의 대기질을 개선하기 위한 법정계획으로, 법 제정 이후 처음 시행되었다. '맑은 공기, 숨 쉬는 항만'이라는 비전 아래 2025년까지 항만 배출 초미세먼지(PM2.5) 배출량을 60% 감축('17년 대비)하는 것을 목표로 한다.³²⁾

제3절 선박저속운항 해역 지정 현황

저속운항해역은 「항만대기질법」 제11조(저속운항해역 지정 등) 및 같은 법 시행규칙 제5조에 따라 지정되었으며, 「선박저속운항 해역 및 대상 선종 등 기준 고시」를 통해 범위, 대상 선박 및 권고 속도, 운용시점, 운용방법 등을 규정하였다. 저속운항해역은 다음과 같다(〈그림 2-4〉 참고).

32) 해양수산부(2021.10.19.)(검색일: 2023.4.20.)

〈그림 2-4〉 저속운항해역 위치



자료: 선박저속운항 해역 및 대상 선종 등 기준 고시(해양수산부고시 제2021-200호, 2021. 11. 25.) 별표 1

저속운항해역은 2020년 1월 1일 이후 입항하는 선박에 적용됐으며, 대상 선박은 총톤수 3천 톤 이상의 외항선으로 항로 등을 통해 정상 운항한 선박으로 한정한다. 해역 운항 중 일시 정지했던 선박, 해역 내 5분 단위 평균속도가 권고 속도의 110%를 2차례 이상 초과한 선박(인천항은 권고속도의 130%를 2차례 이상 초과), 정박지 또는 도선점의 도착시간을 지연 신청한 선박은 제외한다. 대상 선종은 컨테이너선, 자동차 운반선, 세미(혼재) 컨테이너선, LNG 운반선, 원유 운반선, 케미컬 및 석유 제품 운반선으로 속도저감에 따른 저감효과가 큰 선종이다.³³⁾ 선종에 따른 항만 별 권고 속도는 다음과 같다(〈표 2-2〉 참고).

33) 인천항만공사(2020.2.3.)(검색일: 2023.8.17.)

〈표 2-2〉 대상 선종 및 권고 속도

인천항		여수광양항		부산항		울산항	
선종	권고 속도	선종	권고 속도	선종	권고 속도	선종	권고 속도
컨테이너선 (41)	12	컨테이너선 (41)	12	컨테이너선 (41)	12	컨테이너선 (41)	12
자동차 운반선 (27)	12	자동차 운반선 (27)	12	자동차 운반선 (27)	12	자동차 운반선 (27)	12
세미(혼재) 컨테이너선 (42)	10	세미(혼재) 컨테이너선 (42)	10	세미(혼재) 컨테이너선 (42)	12	세미(혼재) 컨테이너선 (42)	10
LNG 운반선 (56)	10	LNG 운반선 (56)	10			원유 운반선 (51)	10
						케미컬 및 석유제품 운반선 (52, 53)	10

주: 선종 (괄호)의 숫자는 Port-MIS 코드

자료: 선박저속운행 해역 및 대상 선종 등 기준 고시(해양수산부고시 제2021-200호, 2021. 11. 25.) 별표 2

저속운행에 참여한 선박은 항비감면 인센티브를 받을 수 있다. 선박의 스케줄 민감성 등을 고려하여 컨테이너선은 선박입출항료 30%, 기타 선박은 15%를 감면받는다. 그러나 항만공사의 급격한 경영 여건 악화를 방지하기 위해 항만공사별 상한액 내에서 항비 감면을 지원한다.³⁴⁾ 예를 들어, 저속운행프로그램 도입 초기에는 해양안전종합정보시스템(GICOMS: General Information Center on Maritime Safety and Security)의 선박모니터링시스템(VMS: Vessel Monitoring System)에서 선박 정보 입력 후 항적조회를 캡처 또는 저장하여 이를 증빙자료로 제출하였다(〈그림 2-5〉 참고).

34) 해양수산부(2021.8.2.)(검색일: 2023.8.17.)

〈그림 2-5〉 해양안전종합정보시스템 구성



자료: GICOMS(검색일: 2023.4.13.)

GICOMS를 이용하기 전에는 전자해도정보시스템(ECDIS: Electronic Chart Display and Information System)에서 전자해도의 항적을 조회하고, 해당 항만 기준점으로부터 20해리가 떨어진 항적의 지점(시작지점)과 도착 지점을 찾아 지정한 후 캡처하여 증빙자료로 사용할 수 있었다. 선사에서 저속운항을 신청하면 해양수산부와 항만공사는 캡처 증빙자료로 저속운항 준수 여부를 확인한 후 선사에 통보하는 시스템이었다. 하지만, 저속운항프로그램을 활성화하기 위해 2021년 8월부터 해양항만물류정보시스템(Port-MIS)을 통해 자동검증이 가능해졌다.

〈그림 2-6〉 선박저속운항 프로그램 증빙자료

선박저속운항 프로그램 증빙자료

Vessel Speed Reduction(VSR) program Application

VESSEL	CALL SIGN		ARRIVAL DATE	
	VESSEL NAME		NATIONALITY	
	TYPE		GROSS TONNAGE	

DETAILS	VSR POINT	START	N ()° ()' ()", E ()° ()' ()"	END	N ()° ()' ()", E ()° ()' ()"
	TIME		2020.00.00 00:00		2020.00.00 00:00
	AVG SPEED	() knots			

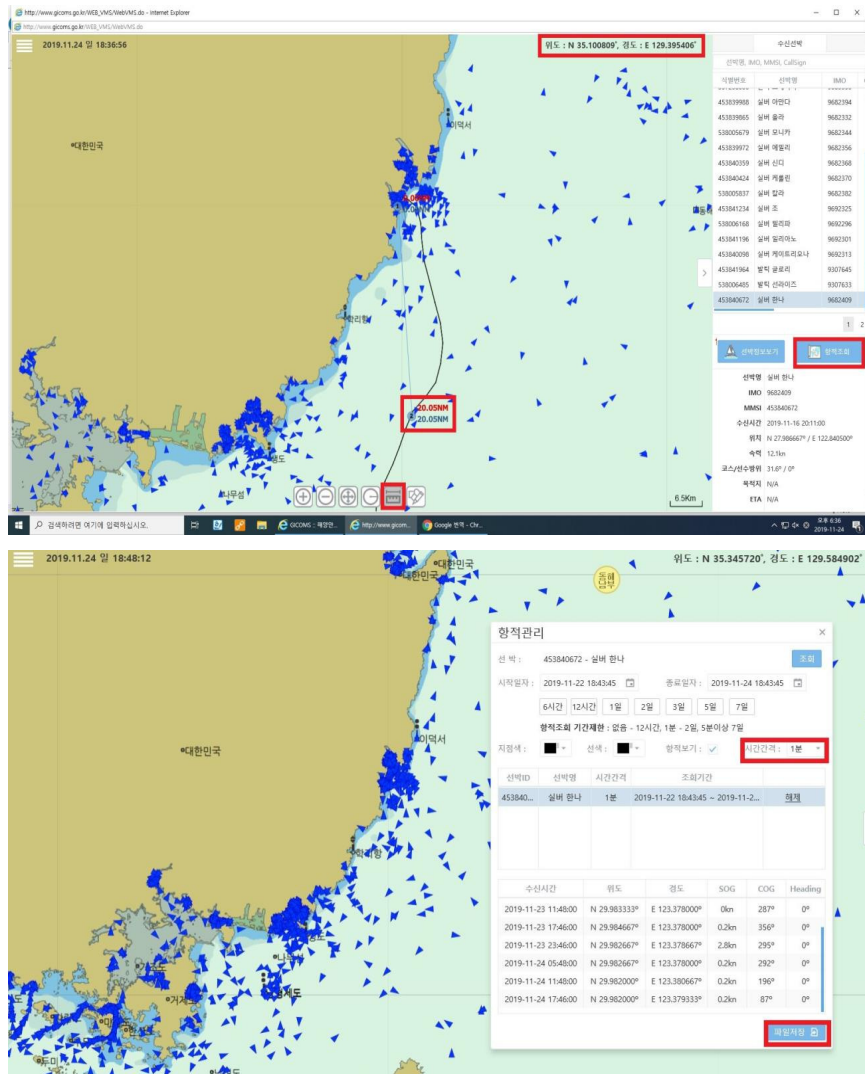
VSR Area Entry	
GICOMS or ECDIS Picture 1	GICOMS or ECDIS Picture 2

VSR Area Exit	
GICOMS or ECDIS Picture 3	GICOMS or ECDIS Picture 4

자료: 인천항만공사(2023.2.20.) (검색일: 2023.8.17.)

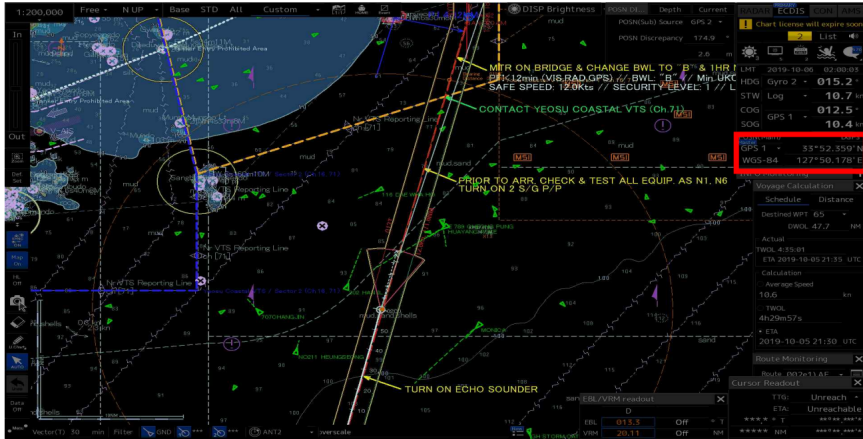
저속운항 도입 초기에는 GICOMS 또는 ECDIS에서 선박저속운항을 증명할 수 있는 화면을 캡처하여 아래 양식을 활용하여 증빙했었다.

〈그림 2-7〉 저속운항프로그램 도입 초기 VMS에서 저속운항 증빙



자료: 인천항만공사(2023.2.20.)(검색일: 2023.8.17.)

〈그림 2-8〉 저속운항프로그램 도입 초기 ECDIS에서 저속운항 증빙



자료: 인천항만공사(2023.2.20.)(검색일: 2023.8.17.)

현재 PORT-MIS를 활용하고 있는 저속운항 프로그램의 프로세스는 다음과 같다(〈그림 2-9〉 참고).

〈그림 2-9〉 저속운항 프로그램 운영 프로세스

- 1 (선박) 선박 저속 입항
저속운항해역에서 12노트 또는 10노트 이하 운항
- 2 (선사, 대리점) 저속운항 신청
PORT-MIS를 통한 신청서 제출(별도의 증빙자료 제출 필요 없음)
- 3 (해양수산부) 저속운항 검증
AIS 데이터로 저속운항 검증
- 4 (항만공사) 저속운항에 따른 감면액 환급(인센티브)
연간 결산을 통해 환급

자료: 기존 프로세스를 바탕으로 저자 작성

인천항만공사에 따르면 저속운항프로그램 도입 이후 참여율이 매년 높아지고 있으며, 2023년 참여율 목표는 75%이다(〈표 2-3〉 참고).

〈표 2-3〉 배출규제해역 대상 선박 및 운용 시점

연도	기간	대상선박(척)	참여선박(척)	참여율
1차년도	2019.12~2020.12	4,688	1,450	31%
2차년도	2021.01~2021.12	3,145	1,995	63%
3차년도*	2022.01~2022.12	3,135	2,097	67%
4차년도	2023.01~2023.12	-	-	75%(목표)

주: * 3차년도 실적의 경우 '23.1.4 기준 미확정 자료로 해수부의 검증결과에 따라 수치가 변경될 수 있음
자료: 인천항만공사(2023.1.25.)(검색일: 2023.8.17.)

제4절 기타 친환경 항만정책 추진 현황

1. 선박연료유 변경

해양수산부는 2021년부터 IMO2020에 대응하기 위해 선박의 대기오염 물질 배출규제를 강화하여 질소산화물에 대한 배출, 선박연료유 황함유량, 황산화물 배출규제해역 등 규제를 발표하였다.³⁵⁾

질소산화물에 대한 배출규제는 2013년 1월 1일 이전에 건조된 국내항해 선박이 2013년 1월 1일 이전에 제작된 디젤기관으로 교체할 경우, 「선박에서의 오염방지에 관한 규칙」 제32조 및 질소산화물 배출규제 적용시기 및 적용방법(개정 '20.11.19)에 따라 2021년 5월부터 규제 대상에 적용되었다.³⁶⁾ 다른 선박이나 선박 이외의 용도로 사용하던 중고 디젤기관으로

35) 해양수산부(2021.4.23.)(검색일: 2023.4.10.)

36) 선박에서의 오염방지에 관한 규칙(해양수산부령 제612호, 2023. 7. 6.)

교체할 경우, 「선박에서의 오염방지에 관한 규칙」 제32조, [별표 21의2] 및 부칙 <해양수산부령 제612호, 2023. 7. 6.>에 따라 적용된다. 즉, 2013년 1월 1일 이전에 건조된 국내 항해선박의 기관교체 시 기관의 제작연도와 관계없이 모든 기준을 2로 규정하여 선박의 질소산화물 배출허용기준을 강화함으로써 1,000rpm 디젤기관 기준 배출량 약 20.5% 저감을 도모하고 있다.

〈표 2-4〉 선박에서의 오염방지에 관한 규칙

조항	내용
제32조 (질소산화물의 배출규제)	② 법 제43조제3항에 따른 디젤기관의 질소산화물 배출허용기준의 적용 시기 및 적용 방법은 별표 21의2와 같다.
[별표21의2] 질소산화물의 배출규제 적용시기 및 적용방법	2. 법 제3호제1항제1호 및 제2호에 따른 해역 안에서만 항해하는 선박(내항선박) 마. 교체하거나 추가로 설치하는 디젤기관(동일한 형식 및 출력의 디젤기관으로 교체하는 경우는 제외한다)에 해당하는 경우에는 교체되거나 추가로 설치될 당시의 배출허용기준을 초과하지 아니할 것. 다만, 2013년 1월 1일 전에 건조된 선박에 2013년 1월 1일 전에 제작된 디젤기관으로 해양수산부령 제444호 선박에서의 오염방지에 관한 규칙 일부개정규칙의 시행일부터 6개월이 경과하기 전에 교체한 경우에는 기준 1을 적용할 수 있다.

자료: 「선박에서의 오염방지에 관한 규칙」(해양수산부령 제612호, 2023.07.06.)

〈그림 2-10〉 선박의 질소산화물 배출허용기준 강화

기관 출력	정격 기관속도 (n: 크랭크샤프트의 분당 속도)	질소산화물 배출기준(g/kWh)	
		기준 1	기준 2
130kW 초과	n이 130rpm 미만	17 이하	14.4 이하
	n이 130rpm ~ 2,000rpm	$45.0 \times n(-0.2)$ 이하	$44.0 \times n(-0.23)$ 이하
	n이 2,000rpm 이상	9.8 이하	7.7 이하

*1,000rpm 디젤기관의 경우 기준 2는 기준1에 비교하여 질소산화물 배출량이 약 20.5% 저감 (대기환경보전법 시행규칙 별표35)

자료: 해양수산부(2021.04.23.)(검색일: 2023.04.10.)

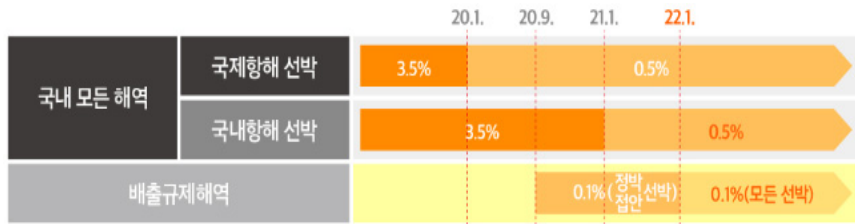
또한, 2022년부터 부산항, 인천항, 여수광양항, 울산항, 평택당진항 등 국내 황산화물 배출규제해역에 진입하는 모든 선박은 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」 제10조 및 「황산화물 배출규제해역 지정·고시」(시행 '20.9.1)에 따라 0.1% 연료유 황함유량 규제를 적용하기로 하였다³⁷⁾.

〈표 2-5〉 황산화물 배출규제

조항	내용
항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법 제10조 (선박배출 규제해역의 지정 등)	① 해양수산부장관은 제7조제2항제1호에 따른 항만지역등 대기질 개선의 기본목표를 달성하기 위하여 해양수산부령으로 정하는 바에 따라 항만대기질관리구역 내에 별도로 황산화물 배출규제해역을 정하여 고시할 수 있다.
황산화물 배출규제해역 지정·고시 제3조 (운용시점)	2. 법 제3호제1항제1호 및 제2호에 따른 해역 안에서만 항해하는 선박(내항선박) 마. 교체하거나 추가로 설치하는 디젤기관(동일한 형식 및 출력의 디젤기관으로 교체하는 경우는 제외한다)에 해당하는 경우에는 교체되거나 추가로 설치될 당시의 배출허용기준을 초과하지 아니할 것. 다만, 2013년 1월 1일 전에 건조된 선박에 2013년 1월 1일 전에 제작된 디젤기관으로 해양수산부령 제444호 선박에서의 오염방지에 관한 규칙 일부개정규칙의 시행일부터 6개월이 경과하기 전에 교체한 경우에는 기준 1을 적용할 수 있다.

자료: 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」(법률 제19141호, 2022. 12. 27.), 「황산화물 배출규제해역 지정·고시」(해양수산부고시 제2019-202호, 2019. 12. 26.)

〈그림 2-11〉 선박의 황산화물 배출허용기준 강화



*배출규제해역(5개항만): 부산항, 인천항, 여수·광양항, 울산항, 평택·당진항

자료: 해양수산부(2021.4.23.)(검색일: 2023. 4.10.)

37) 국내항해에만 종사하는 선박의 경우, 경유의 황함유량 0.05% 이하(해양수산부(2021.4.23.)(검색일: 2023. 4.10.))

〈그림 2-12〉 선박 연료유 황함유량 규제

선박 연료유 황 함유량 기준			
항해구역	적용시기	경유	중유
국내항해 선박	2020.12.31.까지	0.05% 이하	B-A 2.0, B-B 3.0, B-C 3.5% 이하
	2021.1.1.이후 ¹⁾	0.05% 이하	0.5% 이하
국제항해 선박	2020.1.1.	0.5% 이하	0.5% 이하

¹⁾ 2021.1.1. 이후 선박 정기검사, 중간검사를 신청하는 날 또는 2021.12.31. 중 먼저 도래하는 날 단, 황산화물 배출가스정화장치(스크러버) 설치 선박은 예외

선박 준수사항

- 선박 주기관 및 발전기, 보일러의 연료유는 **황 함유량 기준 이하 사용 및 적재 금지(화물 제외)**
- 총톤수 400톤 이상 선박, 합계출력 130kW 이상 부선은 연료유 공급서 사본 및 견본 보관**
* 공급서 사본 : 3년, 견본 : 1년 (단, 국내운항 선박은 6개월)

선박연료공급업자 준수사항

- 연료유 공급서를 3년간 사무실에 보관
- 선박에 대해 연료유 공급서 사본 및 견본 제공
* 총 톤수 400톤 미만 선박 및 합계출력 130kW 미만 부선은 제외

자료: 해양수산부, 해양경찰청(2020.12.15.)(검색일: 2023. 4.10.), p. 2.

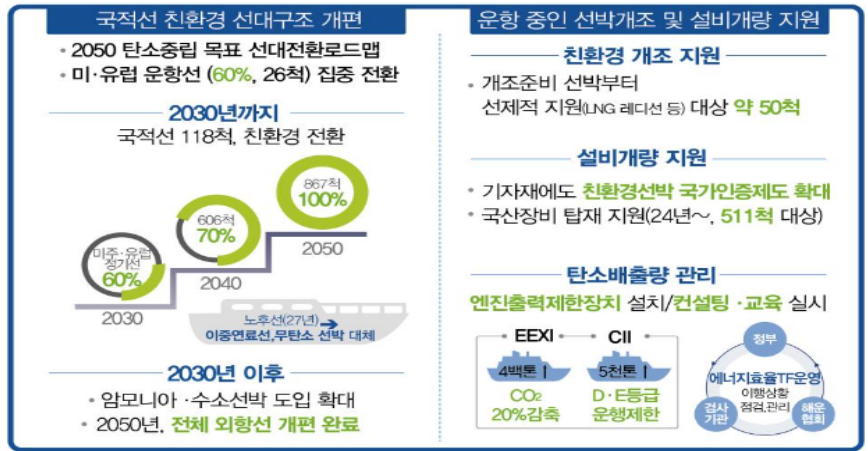
강화되는 탈탄소 규제 대응 등을 위해 친환경 선박 및 연료 전환이 불가피한 상황이 되었고 이에 따라 2023년 해수부 및 관계부처는 합동으로 「국제해운 탈탄소화 추진전략」을 발표하였다.³⁸⁾ 이 전략은 크게 국적선사의 친환경 선대 전환, 해운산업 투자여건 개선, 친환경 기술 및 미래 연료 인프라 확충, 무탄소항로 구축 및 국제협력 추진으로 이루어져 있다. 해당 전략을 통해 우리나라 선사가 보유하고 있는 선박을 환경친화적인 저탄소·무탄소 선박으로 전환하고, 국제법에 따라 5,000톤 이상 외항선 867척 중 노후선 대체 건조 시 친환경선박으로의 전환을 추진할 예정이다. 아울러, 2023년 상반기 자체적으로 탄소세를 도입한 유럽연합의 규제에 대응하기 위해 유럽·미주 정기노선 60% 우선 전환 등 2030년까지 118척의 선박에 대한 친환경화를 추진할 예정이다. 노후 선박을 2050년까지 친환경 선박으로 교체하는 것을 목표로 친환경 선대 전환을 위한 중장기 전략을 추진할 예정이다. 또한, 2030년까지 신조선을 LNG, e메탄올 등의 친환경 연료

38) 해양수산부(2023.02.14.)(검색일: 2023.4.10.)

를 사용하는 이중 연료선박으로 전환하고, 향후 기술 개발 상황에 따라 암모니아, 수소 선박 도입을 추진할 예정이다. 이외에도 주기적인 컨설팅과 교육을 통해 선박의 탄소배출 규제 대응 상황을 점검하고 관리하는 한편, 선령 10년 미만 선박에 대해서는 친환경 선박으로 개조를 지원하고, 개조가 불가능한 선박은 친환경 기자재를 탑재함으로써 선박의 에너지 효율을 높이기로 하였다.³⁹⁾

더불어 친환경선박 도입을 위한 정부보조금 확대 및 지원, 인수를 위한 금융지원, 녹색·장기 해운계약 투자 등을 검토·추진한다. 이 밖에도 선박 건조 지원을 위해 선박 금융 핀테크 기술 도입, 녹색채권 등 '민간 선박 투자 활성화 방안'을 조속히 마련할 계획이다. 미래 선박연료공급망 및 인프라 구축을 위해 암모니아, 수소, e-메탄올 등 연료 전환과 항만 시설 확대를 항만계획에 동시 반영하여 수요분석을 통한 연료의 공급 및 저장 시설을 구축할 예정이다.⁴⁰⁾

〈그림 2-13〉 친환경 선대 전환



자료: 해양수산부(2023.2.14.)(검색일: 2023.4.10.), p.8

39) 해양수산부(2023.02.14.)(검색일: 2023.4.10.)

40) 해양수산부(2023.02.14.)(검색일: 2023.4.10.)

이에 앞서 2022년 해수부는 기후위기의 심각성, 국제사회 탄소중립 추세, 증가하는 우리나라 온실가스 배출량 등을 고려하여 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵을 발표하고 2050년까지 총 324만 톤의 온실가스 배출 저감을 목표로 한다. 특히 해운분야에서는 2018년 대비 배출량 70% 저감을 목표로 저탄소 및 무탄소 선박 기술을 상용화하고, 관공선의 친환경 전환 등을 추진 중이다. 이를 위해 온실가스 저감을 위한 연료원별 선박 기술개발 및 실증을 통해 친환경 선박 기술을 개발하고, 친환경선박 인증제 운영, 친환경 연료 병커링 기술 개발·실증 및 친환경 선박 종사자 교육·훈련 등 보급 기반 구축 등을 추진함으로써 친환경 선박을 보급할 계획이다.⁴¹⁾

〈그림 2-14〉 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵



자료: 해양수산부 공식 블로그(2021.12.16.)(검색일: 2023.4.10.)

또한 환경부는 2022년 제4차 미세먼지 계절관리제 시행계획을 발표하고 황산화물 배출규제해역 내 선박의 황 함유량 기준 준수 여부를 집중적

41) 해양수산부(2022.01.17.)(검색일: 2023.4.20.)

으로 단속하여 선박 연료유를 점검하기로 하였다. 이를 통해 배출규제 해역을 통항하는 선박 및 예인선 등 연료유 혼합 사용 우려 선박⁴²⁾을 대상으로 휴대용 분석기를 활용하여 점검함으로써 선박으로부터의 오염물질 배출을 줄여나가고 있다.⁴³⁾

2023년에는 제3차(2023~2032년) 대기환경개선 종합계획을 발표하여 NO_x 및 연료유 SO_x 배출허용기준을 단계적 강화하고⁴⁴⁾, 항만 저속운행 프로그램 실시('19.12)⁴⁵⁾, 항만 육상전원공급시설 확충('21년 말 기준 21개 선석) 등을 추진함으로써 선박으로부터의 오염물질 배출을 줄여나갈 계획이다. 해수부 계획과 마찬가지로, '30년까지 선박 총 528척(공공 388, 민간 140)의 전환율 15% 달성 및 저감 기술 개발·실증 등 선박 친환경화⁴⁶⁾, 선박 배출규제해역 운영 및 저속운행 프로그램의 대상 확대 등의 내용이 포함되어 있다.⁴⁷⁾

2. 육상전원공급시설 설치

선박 기인 배출가스가 항만도시 내 미세먼지 발생의 주요인으로 지적됨에 따라, 해양수산부는 2018년 육상전원공급설비(AMP) 시범사업을 시작하여, 부산항, 인천항, 광양항 등 총 14개 선석에서 육상전원공급설비 설치 사업에 착수하였으며, 2020년 운영을 시작하였다.⁴⁸⁾

42) 총 630척(내항선 320척, 외항선 310척)

43) 환경부(2022)(검색일: 2023.8.29.)

44) 「선박에서의 오염방지에 관한 규칙」(해양수산부령 제612호, 2023. 7. 6.) 및 「해양환경관리법 시행령」 제42조 (대통령령 제22858호, 2023.11.16.)

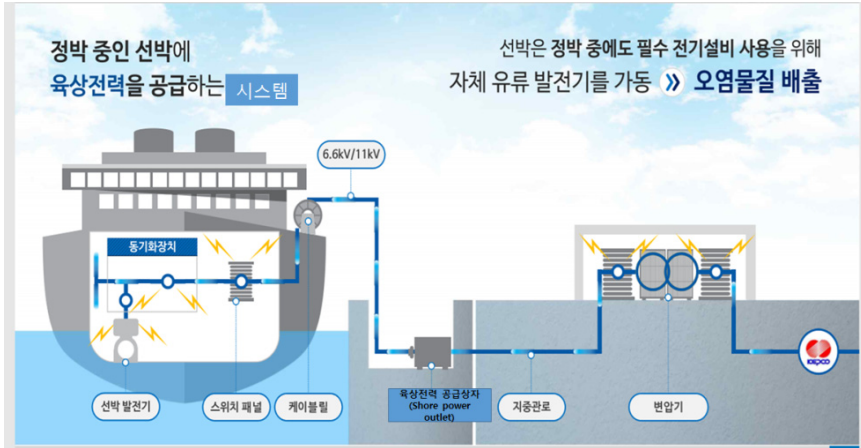
45) 「선박저속운행 해역 및 대상 선종 등 기준 고시」(해양수산부고시 제2021-200호, 2021. 11. 25.)

46) 친환경 연안선박 기술 개발 지원(~'25년, LNG-NH3 혼소엔진 및 친환경 연료 추진 실증선박 개발 등)

47) 환경부(2023)(검색일: 2023.8.29.)

48) 환경일보(2022.10.15.)(검색일: 2023.8.29.)

〈그림 2-15〉 육상전원공급설비 개념도



자료: 해양수산부(2019.12.04.)(검색일: 2023.4.20.), p.5

2019년 해양수산부는 항만 미세먼지를 줄이기 위해 2030년까지 부산항, 인천항, 광양항 등 전국 13개 주요 항만의 248개 선석에 육상전원공급설비(AMP)를 구축하는 중기투자계획을 수립하였다. 이에 따라 정박한 선박에서 발생하는 미세먼지량(PM2.5 기준)은 5,994톤 감축이 가능하여 35.7%를 감축하는 효과가 있을 것으로 추산한다.⁴⁹⁾

49) 해양수산부(2019.12.04.)(검색일: 2023.4.20.)

〈표 2-6〉 AMP 설치에 따른 미세먼지 감축 효과

항만	미세먼지 발생량(톤)	미세먼지 감축량(톤)	감축률(%)
부산	4,930	3,185	64.6
인천	1,740	412	23.7
평택	1,071	417	38.9
동해	336	139	41.2
대산	680	21	3.1
목포	613	191	31.2
여수	592	4	0.8
광양	2,658	399	15
군산	405	184	45.5
포항	601	315	52.3
마산	608	241	39.6
울산	2,239	316	14.1
제주	324	170	52.5
총계	16,798	5,994	35.7

자료: 해양수산부(2019.12.04.)(검색일: 2023.4.20.), p.2

2021년 기준 7개 항만 21개 선석에 AMP 설치를 완료하여 시범운영 중이며, 2021년까지 설치되는 AMP 시설을 우선 시범운영하면서 문제점을 보완하고 선박의 수전장치 설치 상황과 AMP 이용 상황을 모니터링하여 AMP 설치를 단계적으로 확대할 계획이다. 아울러, 국적선사를 대상으로 AMP 수전장치 설치를 위한 대출금 이자 일부 지원, AMP 이용 시 항만시설사용료 일부 감면 등의 인센티브를 제공하고 있으며, 추가적인 지원방안을 지속적으로 강구하여 AMP 이용을 활성화할 계획이다.⁵⁰⁾

50) 해양수산부(2021.10.20.)(검색일: 2023.4.20.)

제5절 소결

우리나라는 「제4차(21~30) 전국 항만기본계획」⁵¹⁾을 중심으로 「제1차 항만지역 등 대기질 개선 종합계획(2021~2025)」⁵²⁾ 등을 수립하여 친환경 항만정책을 시행하고 있으며, 항만공사 역시 각 항만에 자체 친환경 항만 계획을 수립하였다. 주요 내용으로는 ECA 지정, 선박저속운항 해역 지정 등을 통한 미세먼지 저감, 선박연료유 변경을 통한 연료 소모량 저감, 육상전원공급시설 설치를 통한 선박기인 미세먼지 감축 등이 있다.

하지만 대부분의 정책이 항만의 대기질 개선 및 배출량 감축에 초점을 맞추고 있고, 대기오염물질 배출량 현황 및 향후 전망 산출 등과 관련된 내용은 포함되지 않았다. 환경부의 “국가 대기오염물질 배출량 통계(CAPSS)”를 통해 전국 단위의 공식적인 배출량은 확인이 가능하나, 통계 발표까지 약 3년(31개월)이 소요되기 때문에 현재 상황을 객관적으로 분석하기 어렵다. 또한 선박의 경우 해운항만물류정보시스템(Port-MIS) 상 선박 입출항 정보를 기반으로 화물선 배출량을 산출하기 때문에 정확한 배출량을 산정하기 어려운 실정이다.

전 세계적으로 항만의 대기오염물질 배출 심각성과 관련한 인식이 고조되고 있으며, 선진 항만들은 항만에 기인한 대기오염을 줄이기 위해 다양한 정책을 도입하고 있다. 우리나라 항만 역시 친환경 관련 관심도가 높아짐에 따라 항만은 육상전원공급장치(AMP), 선박저속운항, 친환경에너지 사용, 노후 트럭의 운행제한 등의 정책을 중심으로 대기오염물질 배출 저감을 위한 중장기적인 대책을 주기적으로 수립하고 있다. 앞으로 현행 친환경 항만정책의 영향을 분석하고 이를 보완하여 친환경 정책의 중요성을

51) 해양수산부(2020.12.30.)(검색일: 2023.4.20.)

52) 해양수산부(2021.10.20.)(검색일: 2023.4.20.)

인식하고, 이해관계자들 간의 협의 및 사례 벤치마킹 등을 통해 항만 대기질 모니터링과 오염물질 관리 등을 추진할 필요가 있다. 또한 항만 친환경화를 위한 다양한 정책을 개발하고 정책을 정기적으로 평가, 보완할 수 있는 시스템을 구축해야 한다.

〈표 2-7〉 우리나라 주요 친환경 항만정책 요약

정책명	주요 목표	주요 내용
제4차 항만기본계획	• 친환경·신산업이 조화된 지속가능한 에너지 항만구축	• 항만 대기질 등 항만환경 개선 • 신재생에너지 생산·지원시설 확대를 통한 분산형 에너지 전환 체계 구축
항만·선박 미세먼지 종합대책	• 미세먼지 정책의 패러다임 전환	• 선박·항만에 대한 획기적인 미세먼지 저감 대책 추진 • 선박 및 항만 배출관리 강화
항만·선박 분야 미세먼지 저감 강화 방안	• 항만 미세먼지 감축	• 선박배출가스 기준 강화 및 친환경선박 관련 기술 개발 추진 • 친환경 선박 도입 • 배출규제해역과 저속운항해역 도입 • 항만전용 하역장비에 대한 배출가스 허용기준 마련 • 육상전원공급설비 추가 설치
제1차 항만지역 등 대기질 개선 종합계획	• 초미세먼지 직접배출 감축	• 선박기인 대기오염물질 저감 • 항만의 친환경화 • 안전한 생활환경 조성
부산항 Green port 구축 종합계획	• 부산항 온실가스 배출 감축	• 환경선박지수도입 • 친환경 장비 도입 및 전환 • 신재생에너지 사용
울산항만공사 친환경 항만정책	• 녹색항만 조성	• 환경선박지수도입 • 친환경 장비 도입 및 전환
인천항 Green port 종합계획	• 친환경 항만으로의 도약	• 친환경 장비 도입 및 전환
여수·광양항 Green Port 프로젝트	• Green Port 구축	• 친환경 장비 도입 및 전환 • 신재생에너지 사용
ECA 지정	• 주요 항만 대기질 개선	• 황산화물 배출규제

정책명	주요 목표	주요 내용
선박저속운항 해역 지정	• 주요 항만 대기질 개선	• 선박 저속운항을 통한 배출 저감
선박연료유 변경	• IMO2020 등 강화되는 탈탄소 규제 대응 • 주요 항만 대기질 개선	• 황산화물 및 질소산화물 배출규제 • 친환경 선대로의 전환
선박 도착시간 준수	• 주체 간 물류 정보 연계를 통한 물류정보 생태계 기반 조성 • 불필요한 연료 소모 및 배출량 저감	• 선박 도착 예상 시간 공유 체계 효율화
육상전원공급시설 설치	• 주요 항만 미세먼지 저감	• 육상전원공급시설 설치 및 시범운영 • 육상전원공급시설 활성화
한계점	• 배출저감에 초점을 맞추므로써 배출량 산정에 관한 내용 부재 • 정확한 선박으로부터의 배출량 산정 어려움 • 기존 정책의 효과 검증·분석을 통한 보완 필요	

자료 : 각 정책을 바탕으로 저자 재작성

03

AIS 및 실제 선박 연료사용량 데이터 분석

최근 탄소중립과 관련한 국내외 정책 및 규제들이 발효됨에 따라 해운·항만 분야에서도 다양한 연구들이 추진되고 있다. 특히 해운·항만 분야에서 탄소 배출량이 가장 많은 선박에 관해 관심이 집중되고 있으며, 관련 규제에 강력한 제재를 가하는 추세이다. 이에 따라 전 세계 선박이 얼마나 많은 연료를 사용하고 있는지 분석하는 연구가 진행되기 시작하였고, 특히 최근에는 지역별로, 선박별로도 세분화하여 분석하고자 하는 연구가 많아지고 있다. 이와 같은 세밀한 분석을 위해서는 선박에 센서를 부착하여 연료사용량을 측정하고 GPS(Global Positioning System)를 통해 위치와 시간을 계산하여 수집할 수 있다. 하지만 아직 완전한 시스템이 구축되지 않았기 때문에 다른 방법을 사용하여 연료사용량을 측정 또는 추정해야만 했다. 이를 위해 최근 AIS를 통해 선박 위치와 이동 시간을 파악하고 있으며, 이를 이용하여 연료사용량을 추정할 수 있다.

하지만 추정 데이터로 정확한 연료사용량을 확인할 수 없어 검증이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 선사들로부터 실제 선박들의 연료사용량을 확보하여 비교·분석함으로써 검증뿐만 아니라 모형의 보정까지 수행하였다.

제1절 AIS 데이터 구조 및 특징 분석

1. AIS 데이터 구조⁵³⁾

1) 개요

그동안 항로 주변의 물표 식별을 위해 주로 전파의 특성을 사용하는 레이더를 사용해 왔으나, 음영지역 또는 소형 물표의 위치식별이 어렵고 물표의 명칭 등 세부 정보 확인이 어렵다는 문제점으로 인해 AIS로 불리는 선박자동식별장치를 개발하였다.⁵⁴⁾ AIS는 항공교통관리를 위한 항공용 ADS(Automatic Dependent Surveillance, 자동종속감시) 트랜스폰더를 개발한 ICAO(International Civil Aviation Organization, 국제민간항공기구)의 경험을 토대로 추진되었으며, 1997년 AIS 성능기준 초안이 완성되었고, 1998년 IMO 해사안전위원회에서 관련 표준이 채택됨으로써 총톤수 300톤 이상 신조선의 AIS 장착이 2002년 7월부터 의무화되었다.⁵⁵⁾ 이렇게 수집한 AIS 데이터를 기반으로 선박 이동 상태를 분석함으로써 항만관제 업무 및 충돌과 같은 사고를 방지에 활용하고 있다.

선박용 AIS는 <표 3-1>과 같이 크게 SOLAS(Safety of Life at Sea, 국제해상인명안전협약) 선박용인 Class-A 타입과 비 SOLAS 선박용인 Class-B 타입 등 두 가지 종류로 구분할 수 있으며, 둘의 차이는 경도 및 위도, 속력, 선수 방향, 시간 등을 포함하는 동적 정보를 전송하는 주기가 다르다는 것이다.⁵⁶⁾ 아래 <표 3-1>를 보면, Class-A 타입의 경우 항해 중에는 2~10초 주기로 동적 정보를 전송하며 정박 중에도 속도에 따라 10

53) 강무홍 외(2020), pp. 19-24를 기반으로 저자 정리

54) 김병욱 외(2016), p. 3.

55) 위의 책, p. 3.

56) 김병욱 외, 위의 책, p. 4.

초~3분 주기로 전송하는 것으로 규정되어 있어 Class-B 타입보다 전송 주기가 짧은 것을 알 수 있다.

〈표 3-1〉 선박용 AIS의 종류

구분	Class-A AIS	Class-B AIS	
적용 선박	SOLAS 선박용	Non-SOLAS 선박용	
통신 프로토콜	SOTDMA	CSTDMA	SOTDMA
최대 송신 출력	12.5W	2W	5W
동적 정보 전송 주기	• 항해 중: 2~10초 • 정박 중 - 3분(~3kn) - 10초(3kn~)	• 30초(2kn~) • 3분(~2kn)	• 5~30초(2kn~) • 3분(~2kn)

자료: 김병욱 외(2016. 9), p. 4.

AIS 데이터는 크게 정적·동적·항해 정보 등 3가지 정보로 구분할 수 있다. 정적 정보는 거의 변경이 없는 선명, 해상이동업무 식별부호(MMSI: Maritime Mobile Service Identity), 호출부호, IMO 번호, 선박제원 등을 포함하고 있으며, 항해 정보는 목적지, 도착예정시간, 흘수 등 운용자가 필요시마다 입력해야 하는 정보를 포함하고 있다.⁵⁷⁾ 동적 정보는 선박 운용 중 주기적으로 전송되어야 하는 데이터로, 선박의 현재 위치 및 상태를 나타내는 위·경도, 속도, 방향, 전송시간, 운항상태⁵⁸⁾ 등을 포함하고 있다.

본 연구에서는 VesselsValue의 AIS 데이터를 구매하여 사용했으며, 2022년 기준 총 4,973척의 컨테이너 전용선 데이터를 포함하고 있는 것으로 분석됐다. Alphaliner에 따르면, 현재 전 세계적으로 운항 중인 컨테이너 전용선이 5,746척⁵⁹⁾으로 본 연구에서 활용한 AIS 데이터 대부분이 컨테이너 전용선을 포함하고 있는 것으로 조사되었다. 이를 바탕으로 본 연구에서

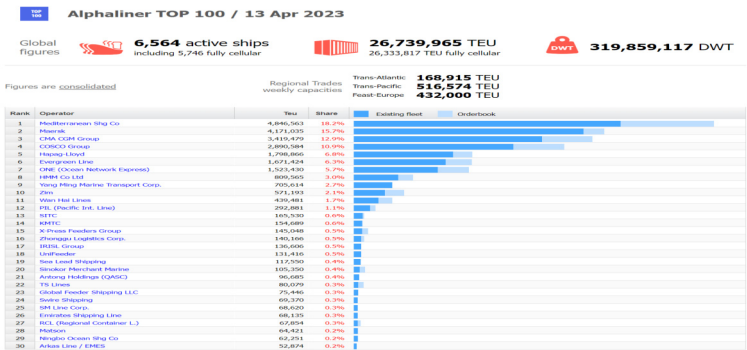
57) 김병욱 외, 앞의 책, p. 4.

58) 운항 중, 정박 중, 묘박 중, 표류 중 등과 같은 선박의 현재 운항상태 정보.

59) Alphaliner(검색일: 2023.4.13.)

는 기존 1차 연구에서 다루지 않았던 벌크선과 탱커선 각각 11,520척, 10,942척을 대상으로 분석하였다.

〈그림 3-1〉 전 세계 컨테이너 선박 규모



자료: Alphaliner(검색일: 2023. 4. 13.)

2) 동적 정보

AIS 동적 정보는 VesselsValue 데이터 기준으로 18개의 필드를 가지고 있으며, 본 연구에서는 〈표 3-2〉와 같이 선박식별 번호, 현재 위도·경도·시간·속도·운항상태 등 6개의 필드를 사용했다.

〈표 3-2〉 본 연구에서 사용한 AIS 동적 정보

동적 정보명	설명	예
IMO Number	선박식별 번호	5112833
Latitude	현재 위도	22.977802° (22°58'40.1"N)
Longitude	현재 경도	113.454967° (113°27'17.9"E)
Movement Date & Time	현재 시간 (GMT 기준)	2019-06-08 12:14:00
Speed	현재 속도	13.5kn
Move Status	현재 운항상태	Moored, Anchored 등

자료: VesselsValue 동적 정보를 기반 저자 작성

3) 정적 정보

AIS 데이터 중 정적 정보는 IHS Markit 데이터 기준으로 291개의 필드를 가지고 있으며, 본 연구에서는 <표 3-3>과 같이 선박식별 번호, 선박 유형, 속도, 연료소모량, 연료 종류, 엔진별 동력 등 연료소모량 및 배기가스 배출량을 계산하기 위해 필요한 정보만을 추출하여 사용했다.

<표 3-3> 본 연구에서 사용한 AIS 정적 정보

정적 정보명	설명	예
IMO Number	선박식별 번호	5112833
Ship Type	선박 유형	Dry Bulk Cargo / Cellular Container
Year Of Build	건조일	1988
Speed	최대 속도	22kn
Consumption Speed	연료소모량 측정 기준 속도	21.25kn
Consumption Value	기준 속도로 운항 시 1일 사용하는 연료량	128 tonnes
Deadweight	선박의 재화중량 (화물, 연료, 승객 등)	38,656 tonnes
Fuel Type	연료 종류	Residual Fuel / Distillate Fuel / LNG
Main Engine Type	메인엔진 종류	Oil / Turbine
Main Engine RPM	메인엔진 분당회전수	102 RPM
Power of Main Engines	메인엔진 동력	6,877 KW
Power Of Auxiliary Engines	보조엔진 동력	987 KW

자료: IHS Markit AIS 정적 정보 설명서 기반 저자 작성

4) 항해 정보

AIS 데이터 중 항해 정보는 VesselsValue 데이터 기준으로 12개의 필드를 가지고 있으며, 본 연구에서는 <표 3-4>와 같이 선박식별 번호, 수신 시간, 홀수 등 선박의 화물 적재량을 추정하기 위해 필요한 정보만을 추출하여 사용했다.

〈표 3-4〉 본 연구에서 사용한 AIS 항해 정보

항해 정보명	설명	예
IMO Number	선박식별 번호	5112833
Date & Time	수신 시간 (GMT 기준)	2019-06-08 12:14:00
Draft	흘수	8.8m

자료: VesselsValue 동적 정보를 기반 저자 작성

2. AIS 데이터 특징 및 한계점 분석

본 연구를 통해 확보한 전체 AIS 데이터 수는 2022년 컨테이너선 기준으로 약 46백만 건, 선박들의 평균 이동속도는 12.61노트인 것으로 조사되었다. 평균 수신 주기는 약 54분인 것으로 조사되었는데, 이는 AIS 미수신율⁶⁰⁾ 및 데이터 한계⁶¹⁾로 인해 앞서 조사한 AIS 수신 주기인 2초~3분과는 큰 차이를 보이고 있었다. 필요시 더 짧은 주기의 데이터도 확보할 수 있지만 비용적인 측면에서 큰 차이가 발생하고, 특히 데이터 증가에 따른 연산시간 증가 문제가 발생할 수도 있어 동 데이터를 그대로 사용하였다.⁶²⁾

만약 10노트로 운항하는 선박이 54분 주기로 AIS 데이터를 송신하고 있다면 약 17.6km⁶³⁾마다 송신하는 것으로, 이렇게 긴 주기를 가지고 있는 데이터를 그대로 사용한다면 두 수신지점 사이의 배기가스 배출량 배분이 되지 않아 정확한 분석 결과를 얻을 수 없다. 2020년에 수행한 1차 연구에서는 AIS 데이터의 한계점을 보완하여 보다 정확한 연료소모량 및 배기가스 배출량 추정이 가능한 모형 개발을 추진하였다. 이와 관련한 자세한 내

60) 부산 및 인천의 경우 AIS 미수신율이 30~60%인 것으로 조사(김병욱 외, 앞의 책, p. 4).

61) 담당자의 인터뷰를 통해 원인을 확인한 결과, 원양에서의 미수신, AIS 데이터 벤더의 오류 데이터 자체 필터링 등으로 인해 수신주기가 길어진다고 함

62) 일부 연구에서는 연산시간 문제를 해결하기 위해 데이터 수를 줄여 분석

63) $17.6\text{km} = 10\text{kn} \times 1.852\text{km/h} \times (57 / 60)$

용은 3장에서 소개하고자 한다.

〈표 3-5〉 AIS 데이터 특징(VesselsValue 2022년 기준)

구분	컨테이너선	벌크선	탱커선
데이터 수(건)	45,649,924	177,682,548	106,834,658
선박 평균 이동속도(kn)	12.61	10.05	9.04
평균 수신 주기(분)	53.94	53.99	52.22

자료: VesselsValue AIS 정보(2022년) 기반 저자 작성

제2절 실제 선박 연료사용량 조사 및 분석

1. 연료사용량 조사

본 연구에서는 인터뷰를 통해 A 선사 및 B 선사로부터 2022년 1월 1일부터 12월 31일까지의 실제 선박 연료사용량 데이터를 제공받았다. A 선사에서는 컨테이너선(Container ship), 벌크선(Bulk carrier), 유조선(Oil tanker), 다목적선(General cargo ship)을 B 선사에서는 유조선 등의 데이터를 확보하였다. 각 선사에서 제공받은 데이터 중 기록이 2022년 1월 1일부터 존재하지 않은 선박이 있었는데, 이는 신조선 또는 중고선에 해당하였다.

각 선사로부터 제공받은 데이터는 Noon report, Noon report(within port), Anchoring start(outside port limit), Anchoring end(outside port limit), COSP(Command of ship passage), EOSP(End of ship passage), Departure, Arrival 등으로 구분되었다. 주로 Noon report로 작성되어 있었는데 Noon report는 선박이 항해를 시작하면 육상에서는

선박 내부 사정을 확인할 수 없기 때문에 항해 중 매일 정오에 선박의 각종 중요 장비 및 운항 관련 사항들을 기록하여 보고하는 문서를 말한다.⁶⁴⁾

A 선사에서 제공한 데이터에는 선박별 항해, 입항, 출항 정보와 사용 연료, 기기 정보가 포함되었다. 데이터 상세 내용으로는 첫째, 사용 연료로 중질연료유(HFO: Heavy fuel oil)와 경질연료유(LFO: Light fuel oil), 경유(MGO: Marine gas oil)이며, 둘째, 대상 엔진은 추진엔진(M/E: Main engine), 보조엔진(A/E: Auxiliary engine), 보일러(BO: Boiler) 정보가 포함되었다. A 선사로부터 제공받은 선박 데이터 샘플은 다음과 같다(〈그림 3-2〉 참고). 2022년 한 해 동안 A 선사가 운항한 전체 선박에서 동일하게 설계한 선박과 동시에 건조한 자매선(sister-ship)⁶⁵⁾을 제외한 52척의 선종 별 실제 연료사용량을 확보하였다.

〈그림 3-2〉 A 선사 A선박 데이터 샘플

GMTDATE	GMTTIME	FPORT	TPORT	SEDESC	MEHFO	MELFO	MEMGO	AEHFO	AELFO	AEMGO	BOHFO	BOLFO	BOMGO
2022-01-01	06:42	PKGHI	INKAT	Departure	0	0.6	0	0	7.1	0	0	4.6	0

자료: 기초자료를 바탕으로 저자 작성

64) 양재군 외(2011), p. 767의 자료를 바탕으로 저자 작성

65) 이투데이(2020.10.27.)(검색일: 2023.8.17.)

B 선사가 제공한 데이터에도 항해, 입항, 출항과 같은 기본적인 정보와 더불어 추진엔진(M/E), 발전기 엔진(G/E: Generator engine) 정보 등이 포함되었다. B 선사로부터 제공받은 선박 데이터 샘플은 다음과 같다.

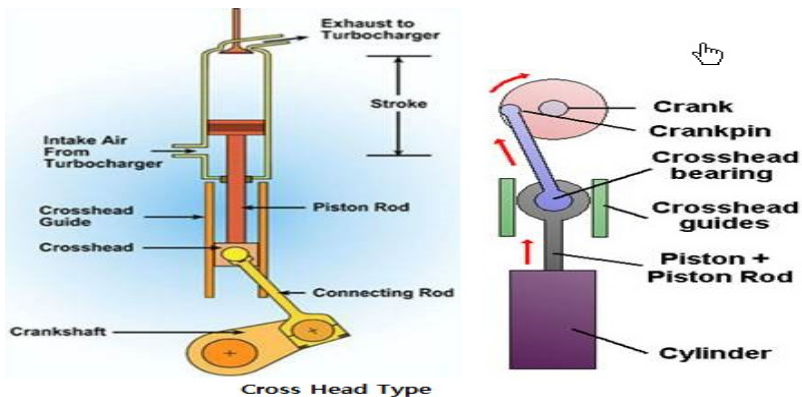
〈그림 3-3〉 B 선사 데이터 샘플

Vessel Type	Vessel Name	Date	Name & Date	Date Value	Reporting Type	Voyage No.	L/B/D
LNGC	SAU	2022-07-11 12:00	SAU, 2022-07-11	2023-07-11	Noon	V040	8

자료: 기초자료를 바탕으로 저자 작성

데이터 상세 내용으로 ME의 경우 실린더 라이너에 급유하는 실린더 오일(Cylinder Oil)과 크랭크 케이스 각부에 급유하는 시스템 오일(System Oil)로 구분⁶⁶⁾되어 있었다(그림 3-4 참고).

〈그림 3-4〉 시스템 오일(좌) 및 실린더 오일(우)



자료: 에쓰-오일 세븐 홈페이지(검색일: 2023.6.26.)

66) 에쓰-오일 세븐 홈페이지(검색일: 2023.6.26.)

2. 연료사용량 분석

A 선사와 B 선사로부터 제공받은 데이터는 양식은 다르지만 추진엔진(M/E), 보조엔진(A/E), 보일러(BO), 발전기엔진(G/E) 등으로 구분되어 있었다. 본 연구는 각 선사로부터 제공받은 데이터의 연료사용량을 분석하고 모든 엔진이 사용한 연료 종류(경유, 경질연료유, 중질연료유 등)의 합계를 사용하였다(〈그림 3-5〉 참고).

〈그림 3-5〉 A 선사 A선박 추진기관별 합계

[illegible]

자료: 기초자료를 바탕으로 저자 작성

선사에게 연료사용량 분석은 더욱 중요해지고 있다. IMO는 온실가스 배출 억제에 대해 2023년 1월 1일부터 선박에너지효율설계지수 EEXI와 탄소집약도지수 CII 규제를 시행했다. CII 규제는 선박을 5개의 등급으로 나누어 최저등급인 E등급이나 3년 연속 D등급으로 평가된 선박은 운항이 제한되는 것은 선사들에게는 가혹한 규제일 것이다. 따라서 선사들은 자사의 선박 연료사용량 모니터링과 함께 예측이 가능한 알고리즘이나 시스템이 필요하며, 이에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다.

제3절 소결

본 연구에서는 선박 연료사용량을 추정하기 위해 최근 활용도가 높은 AIS 데이터를 사용하였다. 하지만 KMI에서 확보한 AIS 데이터는 수신 주기가 1시간 정도로 누락과 같은 문제가 발생할 수 있다. 이에 1차년도(2020년)에는 문제를 해결하기 위해 격자무늬(Raster, Grid) 형태의 구역을 설정하고 기간에 비례하여 연료사용량을 배분하는 방식을 개발하였다. 하지만 1차년도 연구에서는 1년 치 연료사용량 데이터와 비교했다는 한계가 발생하여, 이를 해결하기 위해 2차년도(2023년) 연구를 진행했다.

이에 본 연구진은 보다 정확한 검증과 함께 모형을 보정하기 위해 선박의 실제 운항데이터를 확보하고자 여러 선사와 논의를 진행하였다. 회사명, 선박 IMO Number 등과 같은 민감 정보는 보고서에 직접적으로 기재하지 않고, 연구모형과 실제 운항데이터를 비교하는 목적으로만 사용한다는 동의서를 작성한 후에 선사로부터 데이터를 제공받았다.

각 선사는 회사 내규에 맞춰 운항데이터를 관리하고 있으며, 기록에 있어 양식의 차이가 있을 뿐 내용상에 큰 차이는 없었다. 또한, 각 선사는 여러 환경 규제에 대응하고자 시뮬레이션 및 모니터링 시스템을 개발하여 운영 중인 상황이라 운항데이터가 잘 관리되는 것으로 조사되었다.⁶⁷⁾

종합적으로 데이터를 분석해 본 결과 1일 1~2회 수신된 AIS 데이터를 확보할 수 있었다. 이는 기대했던 시간 데이터는 아니었으나 본 연구의 모형을 검증하는데 큰 문제가 없는 것으로 판단되었고, 이에 본 연구에서는 동 데이터를 이용하여 실시간 추정 결과 비교에 활용하였다.

67) A 선사 ○○○매니저(2023.4.6., 대한민국 부산).

04

선박 연료 사용량 추정 모형 개발

본 장에서는 2020년 개발된 선박 연료사용량 추정 모형 보정을 위해 기존 연구의 추정 모형을 분석하고 2023년에 새롭게 개발한 K-SEEA (Korea Ship Emission Estimation Approach) 모형과 결과를 비교·보정함으로써 보다 현실적이고 정확한 모형을 도출하였다. 먼저 1절에서는 기존 연구에서 주로 사용하고 있는 Top-down 방식 및 STEEM, STEAM 등 Bottom-up 방식을 분석하였고, 2절에서는 선박 흘수 및 실제 연료사용량과 회귀분석을 통해 K-SEEA 모형을 개발하여 기존 모형 결과와 비교하였다. 마지막으로 3절에서는 신규 모형을 기반으로 우리나라 주요 친환경 항만정책의 적용 효과에 대해 추정하였다.

제1절 기존 연구 내 연료사용량 추정 모형 분석

본 절에서는 기존 연구에서 사용한 연료사용량 추정 모형을 분석하였다. 이는 본 연구모형의 차별성을 부각하기 위해서이기도 하지만 AIS 활용의 당위성을 확보하기 위함이다. 결론적으로 실제 데이터와 비교·보정, 실시간 흘수를 기반으로 화물 적재량을 적용하였다는 측면에서 기존 모형과 차

별성이 있으며 대부분의 최근 연구가 AIS를 활용하여 연료사용량을 추정하고 있음을 확인함으로써 이에 대한 논리를 확보하였다.

이러한 측면에서 기존 연구를 요약하자면, 운영자가 개별 선박과 관련한 연료소비 데이터를 바탕으로 분석하는 방법(Top-down)과 선박활동(AIS 또는 noon report)과 각 선박의 기술적 특성을 설명하는 데이터 소스를 기반으로 분석하는 방법(Bottom-up)으로 구분할 수 있다. 최근의 연구들은 주로 Wang, Corbett, & Firestone(2007)이 제시한 STEEM 모형과 Jalkanen et al.(2009)이 제안한 STEAM 모형을 이용하여 연료사용량을 추정하고 있다. 이에 따라 본 절에서는 선박 연료량 추정의 새로운 보정 모형을 도출하기 위해 Top-down 방식과 STEEM, STEAM을 포함한 Bottom-up 방식 및 기타 연구를 분석하였다.

1. Top-down 방식 및 Bottom-up 방식

Corbett and Fischbeck(1997)의 연구는 Top-down 방식 연구의 대표적인 예로 황과 질소의 연료 기반 배출량을 보고하는 해양 배기가스 배출 테스트 데이터, 국제 해상 연료 사용 정보, 총톤수 100톤 이상의 전 세계 등록 상선 및 해군 선박의 엔진 특성 등 세 가지 주요 데이터를 바탕으로 아래와 같은 [식 4-1]을 활용하여 전 세계 선박 배출량을 평가하였다.

$$P_P = \sum_{i=1}^n E_{P,i} \times (F \times A_i) \quad [\text{식 4-1}]$$

즉, 엔진 유형(질소) 또는 연료 유형(황)에 따른 연료 기반 오염물질 배출 계수($E_{P,i}$)의 합과 연간 사용된 해상 연료(F) 및 엔진유형의 비율(A_i)의 곱으로 배출량을 계산하며, 엔진유형을 저속, 중속, 증기선으로 구분하고, 연

료유형을 잔여 벙커유, 기타벙커유로 구분하였다. 하지만 이 연구는 질소와 황의 배출량만을 평가하였다는 한계점이 있다.

Top-down 방식의 연구에서 각 엔진의 에너지(연료) 소비는 일반적으로 소비된 연료의 on-board 데이터(연료 탱크 레벨 게이지 또는 연료 유량계)를 활용하여 계산할 수 있다. 즉, 대부분의 Top-down 방식의 연구는 아래 [식 4-2]와 같이 연료소비량(FC)과 배출계수(EF)의 곱으로 계산되며, 해양 연료 판매 데이터를 기반으로 전 세계 배출량을 산정한다. 적용되는 배출 계수값은 (오염물질 kg/연료 kg)로 표현되는 Top-down 방식과 동일한 국제적으로 허용되는 배출계수이다. 이 방법은 연료 소비량의 계산식에 따라 배출계수가 달라지고 각 선박 운항의 에너지 소비량 및 배출량 예측이 유효하지 않기 때문에 불확실성이 많다.

$$Emissions(kg\ of\ pollutant) = FC \times EF \quad [식\ 4-2]$$

이에 반해 Bottom-up 방식은 실제 선박의 운항정보를 이용하여 연료소모량을 분석하여 배기가스 배출량을 계산하는 연구로 최근에 증가하고 있는 연구 방법이다.

Corbett and Koehler(2003)는 선박 연료소모량 계산을 통해 배기가스 배출량 분석을 적용하여 전 세계 배기가스 배출량을 분석하였다. 이를 위해 선박의 엔진출력(P), 엔진부하계수(F), 평균엔진가동시간(t), 배출계수(E)를 통해 배출량을 계산하였다. 하지만 선박 개별 데이터가 아닌 선박 그룹별 데이터를 통해 분석하였다는 한계점이 있다.

$$Emissions = \sum_{i=1}^n P_{MW} \times F_{\%MW} \times t_{hrs/yr} \times E_{g/kWh} \times \frac{1}{1000} \quad [식\ 4-3]$$

Eyring et al.(2005)은 1950년부터 2001년 사이의 2,001개 선단의 선박을 11개의 주요 선박 등급으로 구분하고 117,500개의 엔진 그룹으로 나

누어, 132개의 하위 엔진 그룹으로 연료 소비량을 계산하였다. 이를 위해 각 엔진 하위 그룹에 대한 연료 소비량 FC_i (연간 톤)은 누적 설치된 엔진출력 P_i (MW)에 duty cycle profiles에 기반한 엔진의 평균 부하 $F_{MCR,i}$ (%), 연간 평균 엔진 가동 시간 τ_i (hr/year) 및 출력 기반 특정 연료 소비율 $SFOC_i$ (kg/kWh)를 곱하여 계산하였고, 이를 132개 하위 그룹의 합산을 통한 한해의 총 연료소비량(FC)을 추정하였다.

$$FC = \sum_{i=1}^{132} FC_i = \sum_{i=1}^{132} P_i \times F_{MCR,i} \times \tau_i \times SFOC_i \quad [\text{식 4-4}]$$

Endresen et al.(2007)의 연구에서는 1970년부터 2000년까지 100GT 이상의 모든 선박의 운항 기반 연료 소비량 추정치를 제시하였다. 이를 위해 평균 선박 크기 접근법으로 전 세계 원양 민간 선박의 총 규모가 100GT 이상이라고 가정하고, 총 톤수를 총 선박 수로 나누어 선박의 평균 크기를 계산하였다. 평균 선박의 연료 소비량은 설치된 주 엔진 출력, 주 엔진 부하, 동력 단위(kW) 당 소비되는 벙커 연료(추진 및 연료 유형에 따라 다름), 해상운송 수요에 따른 해상운항 일수 등의 평균 특성을 기준으로 추정하였다. 연료 소비량은 증기선의 연료 소비량이 훨씬 높기 때문에 디젤 선박과 증기선에 대해 별도로 계산하였다. 사용된 추정식은 아래 [식 4-5]와 같다.

$$F_{i,s} = (b_{i,s} \times t \times p \times m)_{per\ ship} \times (n_{i,s} \times N)_{umber\ of\ ships} \quad [\text{식 4-5}]$$

이때, $F_{i,s}$ 는 주엔진 유형 i 및 연료 s 를 사용하는 평균 선박의 총 연료 소비량(kg/kWh), $b_{i,s}$ 는 주 엔진 유형 i 및 연료 s 를 사용하는 평균 선박의 평균 특정 연료 소비량(kg/kWh), t 는 평균 선박의 연간 평균 해상운항 시간(hr/year), p 는 평균 선박의 평균 설치된 주 엔진 출력(kW), m 은 선박의 평균 주 엔진 부하, $n_{i,s}$ 는 주 엔진 유형 i 및 연료 s 를 사용하는 선단

내 평균 선박의 비율, N은 선단 내 운항하는 평균 선박의 총수로 표현된다.

Corbett, Wang, & Winebrake(2009)는 2003년 선박 그룹별 연료소모량을 계산한 연구의 한계를 보완하여 실제 선박별 연료소모량을 계산하였다. 동 연구에서는 k선박이 i항만에서 j항만으로 이동한 거리(d)를 운항 속도(S_{1k})로 이동할 때 사용한 연료량을 계산한 후 CO₂ 배출계수를 곱해 배출량을 추정하였다. 또한 기존의 데이터 부족 문제를 보완하기 위해 미국 내 항만의 선박 입출항 90,000건 이상을 활용하여 분석하였으나, 항만 간 세부 이동 사항이 아닌 항만에서 항만까지의 End-to-End 데이터로만 분석했다는 한계가 있다.

$$F_{ijk} = [MF_k (\frac{S_{1k}}{S_{0k}} + AF_k)] \times \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \quad [\text{식 4-6}]$$

2. STEEM

STEEM은 앞의 STEAM과 마찬가지로 글로벌 선박 활동뿐만 아니라 등록된 각 선박의 기술적 특성을 설명하는 데이터 소스를 기반기반으로 분석한다. AIS 데이터에는 주어진 타임스탬프에서 각 선박의 식별 정보, 위치, 속도 및 흘수를 포함한다. 이러한 데이터는 선박의 기술 사양과 함께 예상 연료 소비 및 배출량의 시간 이력 계산에 사용되며 이 경우 g/kWh로 표시되는 배출계수를 사용한다. 이와 같은 데이터는 선박에서도 획득 가능하며 선박의 noon report로 매일 편집 및 보고된다.

Wang, Corbett, & Firestone(2007)은 운항하는 선박이 대기질과 인체에 어떤 영향을 미치는지 평가하기 위해 항로거리를 기반으로 연료소모량 및 배기가스 배출량을 공간적으로 보여줄 수 있는 방법론인 STEEM을 개

발하였다⁶⁸⁾. 이를 위해서 선박 개별 운항 시 연료 사용량과 대기 배출량을 항로 거리, 선박 특성, 선박 운항 프로필을 기반으로 한 실제 사례 모델을 사용하여 추정하였다. t_n 번의 운항이 있었던 한 기간의 항로(n)에서의 총 배출량(e_n)과 연료 사용량(f_n)은 아래 [식 4-7]과 같이 추정이 가능하다.

$$e_n = \sum_{i=1}^{t_n} f(d_n, s_i, m_i, a_i, l_m, l_a, e_p \dots) \quad [\text{식 4-7}]$$

$$f_n = \sum_{i=1}^{t_n} f(d_n, s_i, m_i, a_i, l_m, l_a, sfoc_f \dots)$$

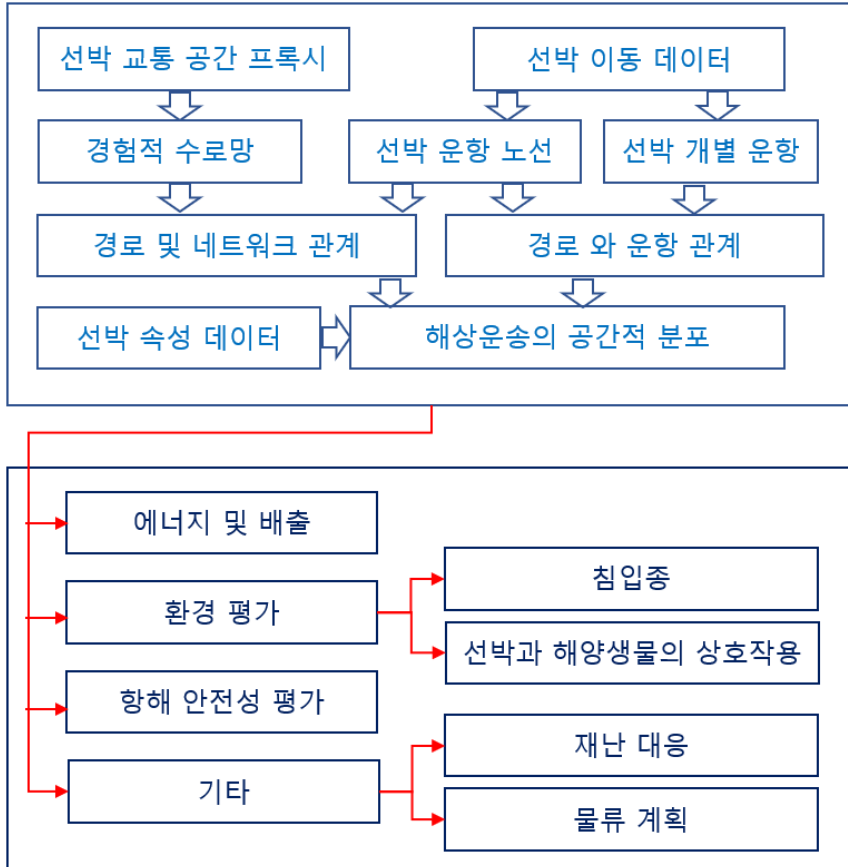
이때, d_n 은 항로 n의 길이, s 는 선박 속도, m 은 주 엔진출력, a 는 보조 엔진 출력, l_m 및 l_a 는 주 엔진 및 보조 엔진의 부하계수, e_p 는 오염물질 p에 대한 배출계수, $sfoc$ 는 연료 유형 f에 대한 특정 연료유 소비량(에너지 비율 계수)을 의미한다.

분석 결과, 미국 해안 지역에서 200해리 이내의 선박에 대해 STEEM으로 추정한 배출량은 1차 연구에서 추정한 배출량의 약 5배로 나타났으며 구축된 모델은 선박의 항로, 흘수, 이력 운항 데이터 등의 정보를 고려하여 지역별 배출량 산정에 우수한 정확도를 보였다.

STEEM은 Top down 및 Bottom up 방식의 장점을 모두 채택하여 선박의 배출량 계산법을 개선한 모델이다. 해당 모델은 과거 선박의 운송 경로를 기반으로 경험적 항로 네트워크를 구축한다. 또한 과거 선박 이동, 속성 및 항로의 거리를 사용하여 연료 사용량과 배출량을 추정하기 때문에 Top down 방식에 비해 정확하다는 장점이 있다. 하지만, 엔진출력, 엔진 부하, 해상운항 시간 등 계산에 영향을 미치는 핵심 변수가 추정치로 계산된다는 한계점이 존재한다.

68) Wang, Corbett, & Firestone(2007), p. 3226.

〈그림 4-1〉 STEEM 프로세스



자료: Wang, Corbett, & Firestone(2007), p. 3227를 바탕으로 저자 재작성

3. STEAM⁶⁹⁾

1) STEAM1

STEAM은 Jalkanen et al.(2009)이 제안한 AIS를 통해 선박의 배출량을 추정하는 방법론이므로 AIS에서 제공하는 메시지를 기반으로 선박의 배기가스 배출량을 평가하는 방법을 제시하였다. AIS 데이터를 사용할 경우 위성위치확인시스템(GPS: Global Positioning System)을 비교적 정확하게 선박 배출원의 위치를 파악할 수 있다는 이점이 있기 때문이다. STEAM의 선박 배출량은 선박의 순간 속도(Instantaneous Speed)와 설계 속도(Design Speed)의 관계 및 선박 엔진의 세부 기술 정보를 기반으로 계산한다. 이들은 파도와 연료 소비가 대기 중 배출에 미치는 영향을 조사하고, 선주로부터 받은 실제 데이터와 예측한 연료 소비량을 비교하였다.

구체적인 가정 및 방법은 다음과 같다. AIS 메시지에서 IMO 번호를 확인하고, IMO 번호를 확인할 수 없을 때는 로이드 선박 등록부에서 세부 정보를 파악한다. 이 방법으로도 선박을 식별할 수 없을 때에는 소형 선박으로 가정한 후 예인선의 평균값(620GT, 메인엔진 2,380kW)을 사용한다. 그리고 엔진 데이터를 구할 수 없는 경우 500rpm 중속(Medium Speed) 디젤 엔진을 사용한다고 가정하였다. 이들은 엔진 부하에 따른 배출계수의 변화는 고려하지 않았다.

순간 동력(Instantaneous Power)은 마찰 저항계수(CF: Coefficient Frictional), 잔류 저항계수(CR: Coefficient Residual), 부가물 저항계수(CA: Coefficient Appendage), 공기 저항계수(CAA: Air Resistance Coefficient), 선박 속도(V: velocity of the ship), 추진 계수(ϵ_0), 선박의 젖은 표면(S)을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

69) Jalkanen et al.(2009), pp. 9209–9223.

$$P_{transient} = (CF + CR + CA + CAA) \left(\frac{1}{2} V^3 S \right) \frac{1}{\varepsilon_0} \quad [\text{식 4-8}]$$

CF, CR, CA, CAA, S 및 ε_0 이 선박별 상수라고 가정하여 위 [식 4-8]을 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$P_{transient} = \frac{k V_{transient}^3}{0.514^3} \quad [\text{식 4-9}]$$

선박 별 매개변수 k 는 메인 엔진의 설치 동력, ε_p 는 메인 엔진의 부하, 설계속도, 안전 여유 속도를 통해 구할 수 있다.

$$k = 0.514^3 * \frac{\varepsilon_p^* P_{\infty stalled}}{(V_{design} + V_{safety})^3} \quad [\text{식 4-10}]$$

BN(Beaufort Number)은 해상정보이며 $BN = 4.21794 * Hs^{0.31}$ 이다. r 은 배제된 선박의 부피(Displacement Volume of the Vessel, m³), C 는 무차원 매개변수(Dimensionless Parameter)이며, 유조선은 0.5, 기타 선박은 0.7이다.

$$\frac{\Delta V}{V} 100\% = C^* BN + \frac{BN^{6.5}}{2.7 \nabla^{2/3}} \quad [\text{식 4-11}]$$

는 유조선에 적용되며,

$$\frac{\Delta V}{V} 100\% = C^* BN + \frac{BN^{6.5}}{23 \nabla^{2/3}} \quad [\text{식 4-12}]$$

는 기타 선박에 적용한다.

μ 는 속도의 페널티와 방향성을 뜻하며, 순간속도(Instantaneous Velocity)는 두 개의 연속적인 GPS 관측으로부터 도출할 수 있다. 그리고 파도의 영향은 V_{inst} 에 μ 를 계산하여 고려한다.

$$V_{effective} = (1 + \mu^* \frac{\Delta V}{V})^* V_{inst} \quad [\text{식 4-13}]$$

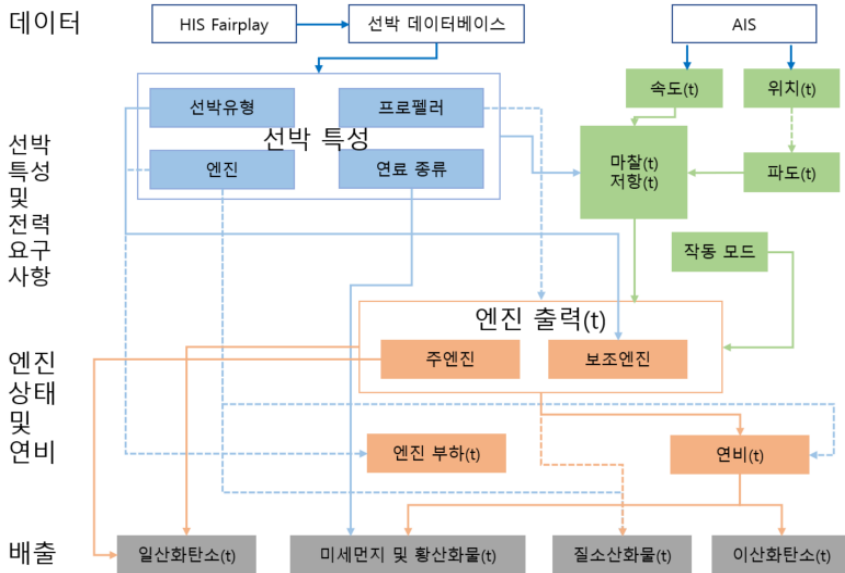
로팍스(Ro-Pax: Roll-on Roll off Passenger)의 경우 오차범위 6% 범위 내에서 일치하였다. 데이터 분석 및 모델 계산에 따르면 2007년 한 해 발트해에서 선박이 배출한 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 이산화탄소(CO₂) 배출량은 각각 400kt, 138kt, 19Mt이었다. 즉, STEAM은 AIS 데이터를 이용할 수 있다면 모든 해역에 적용할 수 있다는 이점이 있다. 다만, 선박별 실제 연료사용 계수가 아닌 CF, CR, CA, CAA, S, ε0 등의 선박 제원만을 적용했다는 한계가 드러났으며 선박의 NO_x, SO_x, CO₂만을 분석했다는 한계가 있다.

2) STEAM2⁷⁰⁾

Jalkanen et al.(2012)이 처음 제안했던 STEAM1이 선박의 NO_x, SO_x, CO₂ 배출량을 평가하는데 적용되었다면, STEAM2는 미세먼지(PM: Particulate matter)와 일산화탄소(CO: Carbon Monoxide)의 배출량도 평가할 수 있다.

70) Jalkanen et al.(2012), pp. 2641-2659.

〈그림 4-2〉 STEAM2 주요 구성 요소와 상호관계에 관한 개략도



자료: Jalkanen et al.(2012)를 바탕으로 저자 재작성

STEAM1은 설계속도(design speed)가 모델 성능에 중요한 매개변수였으며, 설계속도를 사용할 수 없을 때 각 선박 유형에 맞는 평균 속도를 적용하였다. 이동하는 선박의 총 저항(R_{Total})은 다음과 같이 추정할 수 있다. RF는 선박의 젖은 표면에 작용하는 마찰저항(Friction Resistance)이며, R_R (Residual Resistance)은 잔류 저항으로 파동과 난류를 형성하는 저항으로 설명할 수 있다. 마찰저항계수(CF: Frictional resistance coefficient)는 $C_F = 0.075(\log Rn - 2)^2$, Rn 은 레이놀즈수, 해수밀도(seawater density, kmm^{-3}), v 는 선박속도(ms^{-1}), S 는 젖은 표면(wet surface)이다.

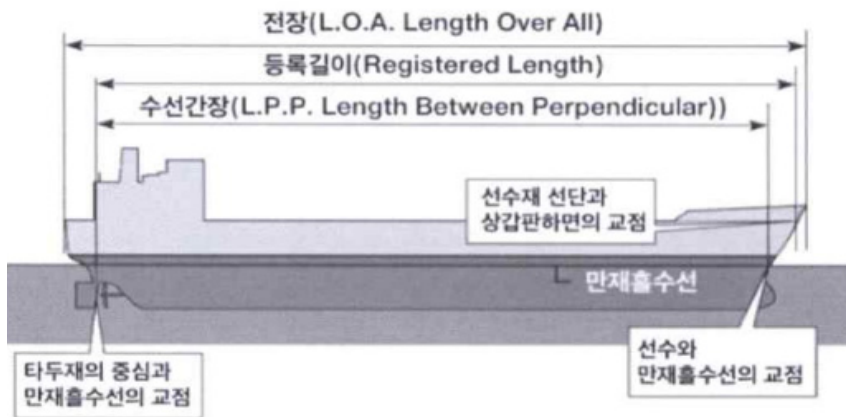
$$R_F = C_F \frac{\rho}{2} v^2 S \quad [\text{식 4-14}]$$

C_b 는 선체의 형태를 설명하는 계수 중 하나이며, 다음과 같이 쓸 수 있다. F_n 은 프루드수(F_n : Froude Number)이며, 선박 속도/(중력 상수*수선 길이)로 계산한다.

$$C_b = 0.7 + \frac{1}{8} \tan\left(\frac{23 - 100F_n}{4}\right) \quad [\text{식 4-15}]$$

선박에서 수선길이(waterline length)나 수면 위 길이(length over surface)를 구하기 어려울 때가 있다. 이러한 경우에는 전장 길이(LOA: Length Overall)와 수선간장(L.B.P: Length Between Perpendicular)⁷¹⁾ 사이의 평균값을 사용한다. 전장과 수선간장을 그림으로 살펴보면 다음과 같다(그림 4-3 참고).

〈그림 4-3〉 전장과 수선간장



자료: 글로벌 공급망 인사이트(검색일: 2023.12.08.)

71) 수선간장: 계획만재흘수선상에서 선수재의 전면으로부터 키가 있는 선박에 있어서는 타두재의 중심선(타두가 있는 선박은 그 후면)까지의 거리를 말하고, 키가 없는 선박은 선미외판 후면까지의 거리를 말한다(선박톤수의 측정에 관한 규칙(해양수산부령 제486호, 2021. 6. 30.)).

프로펠러 직경(d)을 알 수 없는 경우 아래 [식 4-16]과 같이 추정해야 한다. P_s 는 IHS Fairplay(2010)에서 제공하는 메인 엔진의 서비스 출력(최대 연속 출력의 80%)을 킬로와트 단위로 N 은 프로펠러의 각속도(angular velocity)를 분당회전수(rpm: revolutions per minute)로 표시한 값이다. 프로펠러의 수를 알 수 없는 경우 단일 프로펠러로 작동하는 것으로 가정하며, 다중 프로펠러 선박의 경우 프로펠러 rpm과 직경을 모두 알 수 없을 경우에는 선박 흘수를 기준으로 추정값을 사용한다.

$$d = 16.2 \frac{P_s^{0.2}}{N^{0.6}} \quad [\text{식 4-16}]$$

총 저항(total resistance, kN)에서 프로펠러 추진력(propelling power, kW)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{\text{Propel}} = R \quad [\text{식 4-17}]$$

v 는 선박의 순간 속도이다. 그러나 메인 엔진 출력을 선박의 실제 추진력으로 완벽하게 변환할 수 없다. η_{qpc} 는 무차원 준추진 상수(dimensionless quasi propulsive constant)로 변속기(transmission), 선체(hull), 샤프트(shaft), 프로펠러 자체에서 발생하는 손실을 고려하여 메인 엔진 출력을 실제 추진력으로 변환하는 효과를 설명하는데 사용한다.

$$\eta_{qpc} = 0.84 - \frac{N\sqrt{LBP}}{10000} \quad [\text{식 4-18}]$$

N 은 프로펠러 rpm이며, LBP 는 수직선 사이의 길이(m)이다. 프로펠러 동력 전달 효율을 고려한 총 필요 엔진출력(P_{Total})은 다음과 같이 설명한다.

$$P \quad [\text{식 4-19}]$$

파도로 인한 저항은 STEAM1과 동일하게 적용한다. 획득한 데이터 중에는 프로펠러 rpm과 선박 설계속도가 모두 누락된 경우가 있는데 이런 경

우에는 특정 평균값을 대체해서 사용해야 하므로 정확도가 상대적으로 떨어진다.

모든 다중 엔진(multi-engine) 설정은 모든 엔진이 동일한 것으로 가정한다. 따라서 작동 엔진 수(nOE)는 다음과 같이 계산할 수 있다. P_{Total} 은 엔진의 총 순간 동력, PE 는 설치된 단일 엔진의 연속최대출력(maximum continuous rating), nOE 는 정수로 반내림한다.

$$nOE = P \quad [\text{식 4-20}]$$

모든 설정에 대한 엔진 부하(EL : engine load)는 다음과 같다.

$$EL = P \quad [\text{식 4-21}]$$

nE 는 설치된 엔진의 수이다. 이 같은 접근 방식의 한계는 모델이 모든 주요 엔진을 동일하게 취급한다.

STEAM2 모델은 모든 엔진에 대한 포물선 함수(parabolic function)를 가정했으며, 포괄적인 특정 연료소비량($SFOC$: Specific fuel oil consumption)의 회귀분석을 사용하여 2차 다항식을 도출한다. 엔진부하(EL)은 0과 1사이의 숫자이다.

$$SFOC_{Relative} = 0.455EL^2 - 0.71EL + 1.28 \quad [\text{식 4-22}]$$

절대 연료 소비량은 다음과 같이 추정한다. $SFOC$ 값을 사용할 수 없는 경우 IMO GHG 2 보고서에 따라 값을 정하는데 터빈 기계의 경우 260 gkWh-1의 $SFOC$ base, 보조엔진 $SFOC$ base가 220gkWh-1로 설정하였다. 디젤 전기 엔진의 경우 일반적으로 보조엔진을 사용하여 생성되는 전력이 메인엔진 출력에 추가하고, 그에 따라 엔진 부하가 결정한다.

$$SFOC = SFOC_{Relative} SFOC_{base} \quad [\text{식 4-23}]$$

STEAM2는 미세먼지(PM), 기본탄소(EC: Elementary Carbon), 유기탄소(OC: Organic Carbon), 회분(Ash), 황산염(SO₄: Sulphate) 및 일산화탄소(Carbon monoxide) 배출량을 추정할 수 있다. PM, CO, CO₂ 배출량을 정확하게 설명하기 위해서는 엔진 부하의 영향을 평가해야 하므로 엔진 부하 영향이 적은 NOX를 제외한 모든 배출량은 엔진의 부하에 따라 달라지는 것으로 가정한다.

S는 선박 연료에서 황의 함량(%)이며, EC, OC 및 회분의 배출계수는 황 함량과 독립적인 것으로 가정했지만 OC의 경우 엔진 부하를 따로 계산한다. 엔진 부하에서 15%의 절사값을 적용하여 매우 낮은 엔진 부하 OC 배출계수를 일정한 값으로 제한했다. 회분의 양은 연료 등급에 따라 달라질 수 있지만 이 효과는 무시하는 것으로 한다. 총 PM 배출계수는 배출계수의 합으로 가정한다.

$$EF_{PM} = SFOC_{Relative} (EF_{SO_4} + EF_{H_2O} + EF_{OC}OC'_{EL} + EF_{EC} + EF_{Ash}) \quad [\text{식 4-24}]$$

엔진 부하(EL)의 급격한 변화는 일산화탄소 배출량을 증가시키는 것으로 관찰되었다. 일반적으로 선박이 가속하거나 감속(제동)할 때 발생한다. 가속도 기반 구성 요소(ABC: Acceleration Based Component)인 스케일링 계수(scaling factor)를 사용하면 CO 배출량은 다음과 같다.

$$EF_{CO} = CO_{base}ABC \quad [\text{식 4-25}]$$

$$ABC = \max \left\{ \alpha \frac{|\Delta v|}{\Delta t}, 1 \right\} \quad [\text{식 4-26}]$$

엔진 정지(engine stop)에 해당하는 자연 감속(natural acceleration)과 엔진을 사용하여 감속하는 활성 감속(active braking)은 엄밀히 구분할 수 없으므로 자연 감속의 경우 CO 배출량이 과도하게 예측될 수 있다.

실제 데이터를 활용하여 729회를 관찰한 후 STEAM1과 STEAM2를 비교하면 <그림 4-4>와 같다. 평균 절대 오차(mean absolute error) 측면에서 STEAM2가 기존의 STEAM1 보다 우수하며, 평균 오차 측면에서는 STEAM2는 엔진 출력을 과소 추정한 것으로 확인되었다. STEAM2는 총 연료소비량은 상당히 정확히 예측하고, 보조 엔진과 보일러의 연료 소비량을 다소 과대 예측하는 것으로 확인되었다.

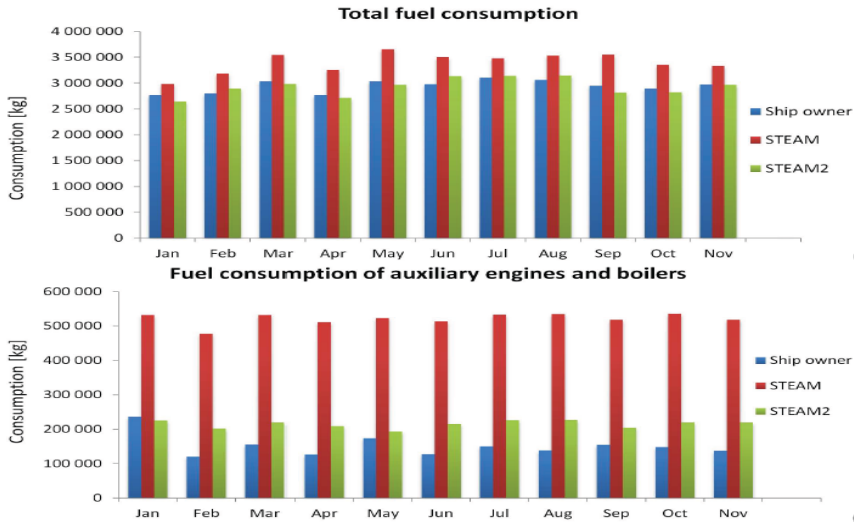
<그림 4-4> STEAM1, STEAM2 비교

	Formula	STEAM2	STEAM	Measured (M)
Mean value	$\frac{1}{n} \sum P$	11 190 kW	12 130 kW	12 338 kW
Mean Error	$\frac{1}{n} (P - P_M)$	-1148 kW (-9.3 %)	-206 kW (-1.7 %)	-
Mean Absolute Error	$\frac{1}{n} (P - P_M)$	1845 kW (15 %)	2267 kW (18.4 %)	-

자료: Jalkanen et al.(2012), p. 2651.

STEAM1과 STEAM2를 그래프로 비교한 것은 다음과 같으며(그림 4-5 참고), 전체 연료 소비량과, 보조 엔진 및 보일러의 연료 소비량을 비교하였다.

〈그림 4-5〉 STEAM1, STEAM2 비교(전체 연료 소비, 엔진 및 보일러 연료 소비)



자료: Jalkanen et al.(2012), p. 2651.

특히 STEAM2도 복잡한 선박 제원 정보가 필요하고 선박 운송 중에만 배기가스 배출량을 분석했다는 점에서 한계가 드러났다. 이에 비해 Corbett(2009)의 연구나 강무홍 외(2022)의 연구는 설계속도에서 연료사용량을 기반으로 Propeller Law를 적용하고 연료사용량을 계산하여 배기가스 배출량을 추정한다는 점에서 차별성이 있으며, 본 연구에는 동 모형의 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 보정 모형을 추가하였다.

4. 기타 모형

중국의 연구자들은 주로 AIS 데이터를 기반으로 한 선박 배출량 추정 연구를 수행하고 있으며 대표적으로 Chen et al.(2016)은 중국 뱃길 AIS 데이터를 기반으로 배기가스(SO₂, NO_x, PM 등) 배출량을 추정하였다. 이

연구에서는 엔진에 설치된 전력(P_j), 엔진 부하계수($LF_{j,l}$), 엔진 작동시간($T_{j,k,l}$), 배출계수($EF_{i,j,k}$) 등을 활용하여 배출량을 추정하였으며, 추정식은 아래 [식 4-34]와 같다. 이를 위해 선박의 운항상태를 운항, 접근, 접안 등 세 가지로 구분하여 각 상태별 엔진 부하를 대입함으로써 기존 연구의 한계점을 보완하였다.

$$E_{i,j,k,l} = \frac{P_j \times LF_{j,l} \times T_{j,k,l} \times EF_{i,j,k}}{10^6} \quad [\text{식 4-27}]$$

Chen et al.(2018)은 기존 Chen et al.(2016)의 추정식을 활용하여 중국 발해만 지역 선박의 PM₂₅ 배출량을 추정하였다. 연구에 활용한 추정식과 기존 Chen et al.(2016)의 연구는 동일하다. 주엔진의 부하계수 추정식 역시 선박의 실제 속도(AS)와 최대 속도(MS)를 통해 계산하였다. 이 연구에서 개별 선박의 최대 속도는 Lloyd의 데이터베이스와 CCS 데이터베이스에서 추출되었다. 선박의 실제 속도는 연속적으로 보고된 위치 사이의 거리를 해당 시간 간격으로 나누어 AIS 데이터에서 계산하였으나, 계산된 값이 100%보다 큰 경우 부하율을 1.0으로 제한하였다.

$$LF = \left(\frac{AS}{MS} \right)^3 \quad [\text{식 4-28}]$$

또한 Fan et al.(2016)은 중국 장강 삼각주와 동중국해 선박 배기가스 배출량 산정을 위해 AIS에 기반한 새로운 모델을 구축하였다. 총 선박 배출량을 위한 주 엔진 부하계수(LF_m)는 선박 실제 속도(ActSpeed)와 선박 설계 최대 속도(MaxSpeed)로 계산되며, 총 선박 배출량은 주 엔진의 배출량(E_m), 보조 엔진의 배출량(E_a), 보조 보일러의 배출계수(E_b)의 합으로 추정하였다. 상세히 살펴보면, 엔진 배출량은 주 엔진 설치 전력(P_m), 주엔진의 저부하 조정배수(LLAM), 작동시간(T), 주 엔진 배출계수(EF_m), 연료 보정계수(FCF_m), 주 엔진 제어계수(CF_m)를 각각 곱하여 계산하고, 보조

엔진의 배출량 역시 같은 방식으로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 LF_m &= \left(\frac{ActSpeed}{MaxSpeed} \right)^3 \\
 E_m &= P_m \times LF_m \times LLAM \times T \times EF_m \times FCF_m \times CF_m \\
 E_a &= P_a \times LF_a \times T \times EF_a \times CF_a \\
 E_b &= P_b \times LF_b \times T \times EF_b \times CF_b \\
 E &= E_m + E_a + E_b
 \end{aligned}
 \quad [식 4-29]$$

이를 위해 SO₂, NO_x, CO 등 13가지 배출가스의 배출계수를 사용하였다. 자세한 내용은 아래 <표 4-1>과 같다.

<표 4-1> 주 엔진 및 보조엔진 배출계수

유형	연료 유형	엔진 유형	SO ₂	NO _x	CO	NM VOC
주 엔진	RO	SSD	10.30	18.1	0.5	0.3
주 엔진	RO	MSD	11.31	14.0	1.1	0.2
주 엔진	RO	HSD	11.31	12.7	1.1	0.2
보조 엔진	MD	MSD	2.12	13.9	1.1	0.2

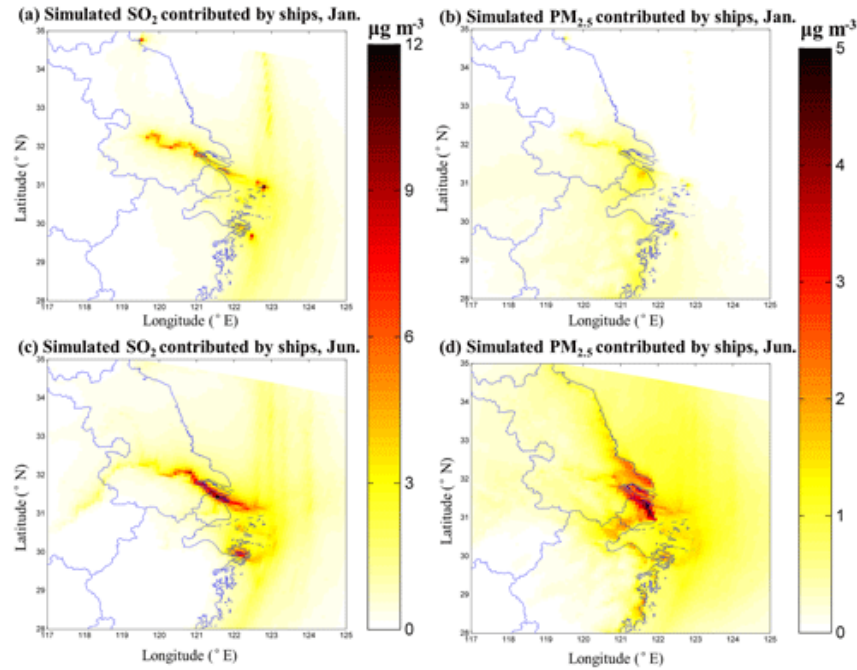
자료: Fan et al., 2016, p.S7.

본 연구에서는 단순히 계산한 엔진의 배출량을 세분화하여 계산함으로써 기존 연구의 한계점을 보완하고 장강 삼각주 및 주강 삼각주 지역의 배출 비중과 다르게 발해만 지역의 벌크선과 컨테이너선 배출량이 약 28~32%를 차지함을 밝혔다.

Feng et al.(2019)의 연구는 Fan et al.(2016)의 연구에 이어 같은 추정식으로 장강 삼각주 및 상하이의 선박 배출량을 추정하고, WRF-CMAQ (the Weather Research and Forecasting model and the Community Multi-scale Air Quality model) 모델을 사용하여 선박 배출의 영향을 평가하였다. 이를 위해 선박 속도와 가동 시간은 AIS 데이터를 활용하였고, 엔진, 보조보일러의 탑재 동력 등 기타 데이터는 IHS-Fairplay(구 Lloyd's

register) 및 중국 선급협회(CCS) 데이터를 활용하였다. 해당 연구에서는 연료 유형, 항 함량, 엔진 유형, 배출 계수, 저부하 조정배수 및 제어 계수 등을 활용하여, 오염물질을 SO₂, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NH₃(암모니아) 등으로 세분화하고 이를 오염원별로 구분·적용하여 선박 종류, 트럭 및 항만 장비별 대기에 미치는 영향을 추정하였다.

〈그림 4-6〉 선박 배출로 인한 대기 오염 시뮬레이션 결과



자료: Feng et al., 2019, p.6175.

Chang, & Wang(2012)은 선박 감속운항, AMP 설치 등 친환경 항만 정책이 카오슝 항만에 미치는 영향 분석을 위해 Corbett, Wang, & Winebrake(2009) 연구의 추정식을 기반으로 ECA 또는 RSZ에서 오염물질(CO₂, NO_x, SO₂, PM, HC 포함)의 배출량(TE_p)을 추정하였다. 이를

위해 활용된 데이터는 선박 주 엔진의 일일소비량(MF_{kz}), 운항속도(S_m), 설계속도(S_d), 운항거리(d_m), 배출계수(EF_{pmz}), 엔진 부하계수($(\frac{S_m}{S_d})^3$) 등을 활용함으로써, 기존 모형을 더욱 세분화하였다.

$$TE_p = \sum E_{kp} = \sum [MF_{kz} \times (\frac{S_m}{S_d})^3 \times (\frac{d_m}{24S_d}) \times EF_{pmz} \times D + (nAF_{kz} \times (\frac{t_m}{24}) \times EF_{pmz})] \quad [\text{식 4-30}]$$

Chang, Song, & Roh(2013)는 인천항의 선박 활동별 온실가스(CO_2) 배출량을 측정하기 위해 Corbett, Wang, & Winebrake(2009)의 추정식을 적용하여 선종별, 활동별 연료소모량을 추정하였다. 이를 위해 기존 추정식에 기존 해상 병커유 중 CO_2 함유 비율 3.17을 적용하여 온실가스 배출량을 계산하였다.

$$CO_2 = 3.17 \times [MF_k \times (\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + AF_k] \times \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \quad [\text{식 4-31}]$$

Goldsworthy, & Goldsworthy(2015)는 호주의 AIS 데이터를 기반으로 선박유형, 크기, 작동 모드 및 기계 유형별로 분류하여 항만 및 광범위한 연안 해역에서의 선박 엔진 배기가스를 계산하였다. 즉, 각 선박 상태별 엔진에 따라 배출량($E_{i,j,k,l}$)은 엔진의 전력(P_j), 엔진의 부분 부하계수($LF_{j,l}$), 엔진 작동시간($A_{j,k,l}$), 배출계수($EF_{i,j,k}$)를 통해 계산하였고, 선박 상태별 연료 소모량($F_{j,k,l}$)은 엔진의 전력(P_j), 엔진의 부분 부하계수($LF_{j,l}$), 엔진 작동시간($A_{j,k,l}$)과 제동시 연료 소모량($BSFC_{j,k}$)으로 추정하였다. 이를 위해 엔진 유형을 주 엔진 - 저속, 주 엔진 - 중속, 주 엔진 - 가스 터빈, 주 엔진 - 증기 터빈, 보조 엔진 - 중속, 보조 엔진 - 고속 또는 보조 보일러로 구분하고, 연료 유형을 RO 또는 MD로, 선박 상태를 이동, 접안, 정박 등으로 구분하여 각기 다른 배출계수를 사용하였다.

$$E_{i,j,k,l} = \frac{P_j \times LF_{j,l} \times A_{j,k,l} \times EF_{i,j,k}}{1000} \quad [\text{식 4-32}]$$

$$F_{j,k,l} = \frac{P_j \times LF_{j,l} \times A_{j,k,l} \times BSFC_{j,k}}{1000}$$

또한 Moreno-Gutierrez, & Duran-Grados(2021)는 기존의 STEAM 및 STEEM 모델을 발전시켜 SENEM(Ship's Energy Efficiency Model)이라는 새로운 모델을 제안하였다. 이 모델은 STEAM 및 STEEM 모델보다 많은 요소를 고려함으로써 SENEM 모델을 사용하여 실시간으로 전달되는 전력을 계산하면 STEAM 및 STEEM 모델보다 더 현실적인 결과를 얻을 수 있다. 예를 들어, SENEM 모델은 대기 및 해상 기상 조건, 선체 및 프로펠러의 유지 관리 상태, 추진 시스템의 성능과 관련된 모든 변수를 고려하고 정량화한다. 제안한 모델은 주 엔진 출력을 계산하여, 이 데이터를 기반으로 연료 소비량과 배출량을 즉시 계산할 수 있다. 이를 위해 항해 중에 주 엔진에서 실시간으로 전달하는 동력을 기반으로 하여 (kg pollutants/kg)으로 표시되는 배출계수를 사용하거나, (g/kWh)로 표시되는 배출계수를 사용하였다.

선박 주 엔진의 에너지 출력(kWh)은 엔진 부하계수에 따라 달라진다. 이것은 매우 중요한 매개변수로서 계산하기 어렵기 때문에 다른 모델에서 고려하지 않고 부하계수 값에 큰 영향을 미치는 많은 요소(예: 바람, 해류, 파도, 선체 및 프로펠러 유지 관리 및 추진 시스템의 효율성)를 고려하는 것이 SENEM 모델의 주목적이다. 이 모델에서는 waterjet 선박을 포함한 모든 선박을 대상으로 하여 바람 및 파도($\Delta V_{wind\ and\ waves}$), 해류($\Delta V_{current}$), 선체 및 프로펠러의 유지 보수 상태, 추진 시스템의 성능 또는 효율성(η_j)과 관련된 모든 변수를 고려하여 아래 [식 4-40]을 제안하였다.

$$P_{transient} = \frac{P_{ref} \left(\frac{t_{transient}}{t_{ref}} \right)^{2/3} \left[\left(\frac{V_{transient} + \Delta V_{wind\ and\ waves} + \Delta V_{fouling} \pm \Delta V_{current}}{V_{ref}} \right)^\eta \right]}{\eta_j} \quad [\text{식 4-33}]$$

모형 검증을 위해 4척의 Ro-Pax 선박 데이터를 기존 모형인 STEEM 및 STEAM과 비교하였고, 그 결과 최대 40% 이상의 차이를 보였다. 결론적으로 SENEM은 STEAM과 STEEM이 가진 불확실성 규모를 줄이고, 선박 배출량에 대한 신뢰성을 제고하였다. 하지만 SENEM은 역시, 배출계수가 에너지 출력 및 배출량의 연료를 기반으로 한 계산에서 불확실한 결과를 발생시킬 수 있다는 한계가 있다.

기존 연구를 종합하여 본 연구의 차별성과 특징은 <표 4-2>와 같으며, 실제 연료사용량 데이터와 비교·검증, 화물 적재량, 흘수 등 외부 환경요인 변수 및 회귀분석을 통한 보정된 부하율 적용 등에 차이가 있다.

〈표 4-2〉 선행연구 요약 및 본 연구의 차별성

선행연구 현황			
구분	연구자	주요 연구내용	한계점
Top-down	• Corbett and Fischbeck (1997)	• 전 세계 선박 배출량 평가 • 해양배기가스 배출테스트 데이터, 국제해상연료사용정보, 등록상선 및 해군선박 엔진 특성 활용 • 엔진 및 연료 유형에 따른 연료 기반 오염물질 배출량 평가	• 질소와 황의 배출량만을 평가함
	• 기타 Top-down 연구	• 해양연료판매데이터 기반 배출량 산정 • 연료소비량과 배출계수의 곱으로 계산	• 에너지 소모량 계산에 있어 절차에 따라 결과값이 달라짐 • 선박 운항마다 에너지 소비량 및 배출량 예측이 유효하지 않아 불확실성이 큼
Bottom-up	• Corbett and Koehler(2003)	• 선박 연료 소모량 계산을 통해 배기가스 배출량 분석 적용 • 엔진출력, 엔진부하계수, 평균 엔진가동시간, 배출계수 활용	• 선박 개별 데이터가 아닌 선박 그룹별 데이터를 통해 분석
	• Eyring et al.(2005)	• 엔진그룹별 연료 소비량 계산 • 연료 소비량, 엔진출력, 평균 엔진 부하, 평균 엔진 가동 시간, 특정 연료 보시율 활용	• 선박 개별 데이터가 아닌 선박 그룹별 데이터를 통해 분석

선행연구 현황			
구분	연구자	주요 연구내용	한계점
	• Endresen et al.(2007)	• 평균 선박크기 사용법을 사용하여 평균 선박 크기 계산 • 주엔진출력, 주엔진부하, 동력단위당 소비되는 연료량, 운항일수 등 평균특성 활용	• 추정된 선박 크기를 적용함에 따른 불확실성 존재
	• Corbett, Wang, & Winebrake (2009)	• 실제 선박별 연료소모량 계산 • 실제 선박의 이동거리, 운항 속도, CO₂ 배출계수 활용	• 항만 내 세부 이동에 관한 연료소비는 고려하지 않음
STEEM	• Wang, Corbett, & Firestone(2007)	• 항로거리, 선박특성, 선박운항 프로빌 기반 실제 사례 모델 적용 • 과거의 선박 이동, 속성 및 항로거리 사용을 통한 연료 사용량 및 배출량 추정	• 엔진출력, 엔진부하, 해상운항 시간 등 계산에 영향을 미치는 핵심변수가 추정치로 계산
STEAM1	• Jalkanen et al.(2009)	• AIS 기반 선박배출량 추정 • 선박별 매개변수(주엔진동력, 엔진부하, 설계속도, 안전영유속도 등), 선박별 해상정보 활용	• 선박별 실제연료사용계수가 아닌 특정 선박제원만을 적용함 • NOx, SOx, CO₂ 배출만을 고려함
STEAM2	• Jalkanen et al.(2012)	• 기존 STEAM1 모델에 PM, CO 배출량도 평가 • 기존 모델에 마찰저항계수, 프로펠러 추진력, 선박 순간속도 등 활용	• 복잡한 선박제원정보 필요 • 선박운송 중에만 배기가스 배출량을 분석가능함
기타 모형	• Chen et al.(2016), Chen et al.(2018)	• 엔진전력, 엔진부하계수, 엔진작동시간, 배출계수 등 활용 • 선박의 운항상태를 운항, 접근, 접안 등으로 구분하여 상태별 엔진부하 적용	• 연료, 선박 엔진 및 보일러에 대한 상세정보 부족으로 인한 불확실성 발생 • 배출계수의 불확실성, AIS가 없는 소형 선박은 계산에서 제외 • 해류, 파도, 바람, 화물 하중의 영향 미고려 • 최대 ±50% 불확실성 예상
	• Fan et al.(2016), Feng et	• 새로운 엔진부하계수 계산법을 통한 신 모델 개발	• 배출량 추정보다 선박 배기가스가 지역에 미치는 환경영향에 집중함

선행연구 현황			
구분	연구자	주요 연구내용	한계점
	al.(2019)	• 선박 실제속도와 선박설계최대속도를 통한 엔진부하계수 계산 • 주엔진배출량, 보조엔진배출량, 보조보일러 배출계수 등 활용 • SO₂, NO_x, CO 등 13가지 배출가스의 배출계수 활용	
	• Chang, & Wang(2012), Chang, Song, & Roh(2013)	• Corbett et al.(2009) 연구의 추정식을 기반으로 ECA 또는 RSZ에서 오염물질(CO₂, NO_x, SO₂, PM, HC 포함)의 배출량 추정 • 주엔진의 일일연료소비량, 운항속도, 설계속도, 운항거리, 배출계수, 엔진부하계수 등 활용을 통한 기존모형의 세분화	• 누락된 선박 정보 존재 • 입항후 선박속도는 추정을 통해 계산함으로써 불확실성 존재
	• Moreno-Gutierrez & Duran-Grados(2021)	• 기존모형 발전을 통한 신규 모델 제안(SENEM) • 기상조건 선체 및 프로펠러 유지관리상태, 추진시스템 성능 관련 변수 정량화 • 엔진부하계수의 불확실성 저감을 위한 모형 보정	• 배출계수가 에너지 출력 및 배출량의 연료를 기반으로 계산됨으로써 불확실성이 여전히 존재
본연구		• 정밀한 수준의 선박 연료사용량 데이터 활용 • 다양한 정보원으로부터 실제 연료사용량 데이터 확보를 통한 검증 • 화물 적재량, 흘수 등 외부 환경요인 변수 및 회귀분석을 통한 보정된 부하율 적용 • 선박 배기가스 배출량 추정 방법론을 기반으로 AMP 설치, 감속운항 등 ECA 지정 효과 분석 수행 • 관련 분야 전문가 인터뷰를 통한 결과의 신뢰성 및 실제 활용 방안 논의	

자료: 저자 작성

제2절 선박 연료사용량 추정 모형 검증 및 보정

1. 신규 선박 연료량 추정 모형 개발

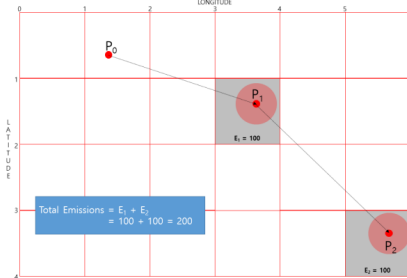
1) 2020년 선박 연료량 추정 모형 및 한계⁷²⁾

본 연구에서 확보한 2022년 VesselsValue의 AIS 데이터는 50~60분 간격인 동적정보를 포함하고 있다. 이는 IMO에서 규정하고 있는 2초~3분 간격과는 크게 차이가 나는 것으로 이렇게 간격이 넓은 데이터를 활용할 경우 <그림 4-7>과 같이 각 지점 사이에는 배출량이 계산되지 않는다. 기존의 다른 연구는 해당 국가별로 주기가 짧은 데이터를 확보했기 때문에 이러한 문제를 고려하지 않아도 됐지만, 본 연구에서는 전 세계 항만을 대상으로 배기가스 배출량을 분석하고 있기 때문에 VesselsValue와 같은 AIS 판매자의 글로벌 데이터를 구매하여 사용할 수밖에 없었다. 또한 중간 지점이 누락될 경우 <그림 4-8>과 같이 누락된 지점 다음 지점에 모든 값이 할당되는 문제가 발생하였다.

따라서 동 연구에서는 한계점을 해결하기 위해 계산한 연료소모량을 선박이 지나는 격자무늬(Grid, Raster) 형태의 지역을 지나는 거리 비율만큼 배분하는 새로운 모형을 개발, 적용하였다.

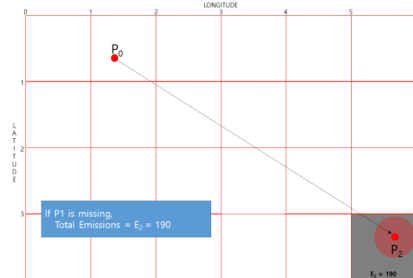
72) 강무홍 외(2020)를 바탕으로 저자 정리

〈그림 4-7〉 기존 모형 적용의 한계 1
(두 지점 사이 배출량 미적용)



자료: 강무홍 외(2020), p. 31.

〈그림 4-8〉 기존 모형 적용의 한계 2
(중간지점 누락 시 다음 지점 과대 추정)



자료: 강무홍 외(2020), p. 31.

동 연구는 정확한 배기가스 배출량 추정을 위해 먼저 선박의 이동속도를 고려하는 Corbett et al.(2009) 등이 사용한 식을 사용해 연료소모량을 추정했다. 동 식은 지점 i 부터 j 까지 k 선박이 이동하면서 사용한 연료량을 계산하는 식으로, k 선박의 주 엔진 하루 연료사용량(MF_k)과 보조 엔진 하루 연료사용량(AF_k)에 실제 이동거리(D_{ij})를 이동속도(S_{1k})로 나눈 값을 곱하여 계산한다. 주 엔진 하루 연료사용량에는 엔진부하를 계산하여 적용하기 위해 이동속도(S_{1k})를 설계속도(S_{0k})로 나눈 값의 세제곱 값을 곱하는 식이다.⁷³⁾

$$F_{ijk} = [MF_k (\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + AF_k] \frac{D_{ij}}{24 S_{1k}} \quad [\text{식 4-34}]$$

동 연구에서는 AIS 동적정보를 통해 순차적으로 파악할 수 있는 선박별 지점 간 이동거리와 이동속도를 계산하여 동 식에 적용함으로써 연료소모량을 계산했다. 다만, IMO의 2015년도 보고서와 마찬가지로 이동속도가 설계속도보다 1.5배⁷⁴⁾ 이상 계산되는 지점은 제외하고 연료소모량을 계산했으며, 이는 GPS의 수신 오류로 인해 발생하는 문제로 연료소모량 계산

73) 강무홍 외(2020), p. 33.

74) IMO(2021), op. cit., p. 166.

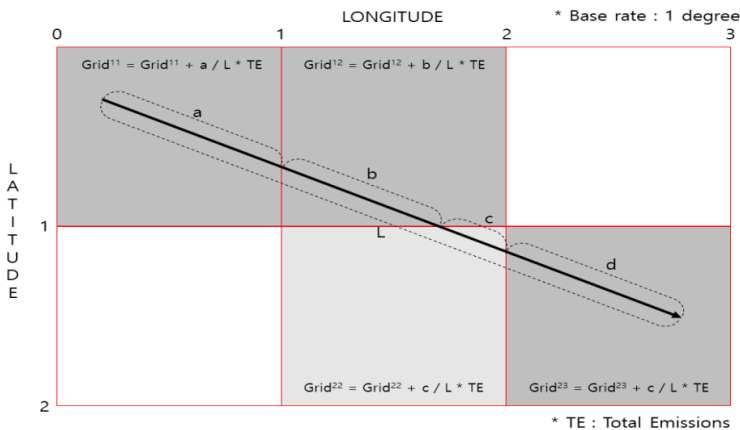
에 큰 영향을 줄 수 있어 제외하고 계산하였다.

AIS 정적정보는 설계속도(S_{0k})에서 주 엔진 하루 연료사용량(MF_k)을 대부분 제공하여 이를 적용했으며, 없는 경우는 주 엔진 출력을 이용해 연료사용량을 계산하는 다음 [식 4-35]⁷⁵⁾를 사용했다. 동 식은 시간당 엔진출력(kWh)에 증기터빈은 계수 0.2를 디젤엔진은 0.18을 곱해 연료사용량을 계산하며, 단순한 계수만을 사용하기 때문에 정확성은 떨어질 수 밖에 없다. 또한 보조엔진 하루 연료사용량(AF_k)은 AIS 정적정보에 포함되어 있지 않아 주 엔진과 마찬가지로 동 식을 함께 사용했다.

0.200kg/kWh for Steam Turbine or 0.180kg/kWh for Diesel [식 4-34]

계산된 연료소모량은 아래 <그림 4-9>와 같이 두 지점을 연결하고 두 지점 간 이동 시 사용한 연료량을 계산하여 이를 설정된 위경도 크기의 격자 무늬 형태 지역에 지나간 거리 비율만큼 배분하는 개념을 바탕으로 한 모형을 개발하였다.

<그림 4-9> 연료소모량 지역 배분 방식(위경도 1도)

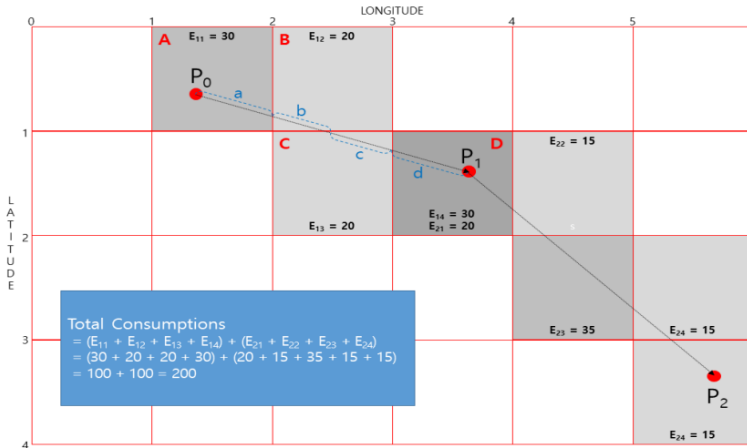


자료: 강무홍 외(2020), p. 35.

75) Barras(2004), p. 133.

〈그림 4-10〉을 예로 들어 배분 방법을 설명하면, P_0 부터 P_1 지점까지 총 100톤의 연료를 사용했다고 계산하였을 때 a, b, c, d 각 이동 거리가 3, 2, 2, 3이라고 한다면 지역 A, B, C, D를 지날 때 각각 30, 20, 20, 30톤씩 사용한 것으로 나타난다.

〈그림 4-10〉 연료소모량 지역 배분 예



자료: 강무홍 외(2020), p. 36.

본 연구에서는 지역을 위경도 0.005도로 설정하여 연료소모량을 추정했으며, 이는 부산을 기점으로 동서로는 약 0.445km, 남북으로는 약 0.55km 길이의 지역을 설정하였다.

동 연구에서는 Corbett et al.(2009)의 연구와 마찬가지로 주 엔진 부하를 0.8로 적용하였다. 보조 엔진 부하의 경우는 〈표 4-3〉과 같이 미국 EPA에서 발표한 ICF Consulting(2009) 연구⁷⁶⁾의 보조 엔진 부하를 사용하였다. 또한 정박 중은 AIS 동적정보의 선박 운항상태를 통해 구분했으며, 항해 중과 접근 중은 별도의 구분자가 없어 Ng et al.(2013)⁷⁷⁾, Chen et

76) ICF Consulting(2009), pp. 2-12.

77) Ng et al.(2013), p. 104.

al.(2016)⁷⁸⁾의 연구처럼 1노트 미만은 정박 중으로, 8노트 미만은 접근 중으로 가정해 계산했다.

〈표 4-3〉 Auxiliary Engine Load Factor Assumptions

Ship-Type	Cruise	RSZ	Maneuver	Hotel
Auto Carrier	0.15	0.30	0.45	0.26
Bulk Carrier	0.17	0.27	0.45	0.10
Container Ship	0.13	0.25	0.48	0.19
Cruise Ship	0.80	0.80	0.80	0.64
General Cargo	0.17	0.27	0.45	0.22
Miscellaneous	0.17	0.27	0.45	0.22
OG Tug	0.17	0.27	0.45	0.22
RORO	0.15	0.30	0.45	0.26
Reefer	0.20	0.34	0.67	0.32
Tanker	0.24	0.28	0.33	0.26

자료: ICF Consulting(2009), pp. 2-12.

동 연구에서는 상수로 된 부하계수를 사용함에 따라 정확성 관련 한계가 있었다. 따라서, 이러한 주 엔진 및 보조 엔진 부하계수를 변수화하여 특정 상황에 따라 적용값을 달리함으로써 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단하고 본 2차 연구를 수행하게 되었다.

2) K-SEEA 모형 개발

2020년 연구에서는 Corbett et al.(2009)의 연구와 마찬가지로 주 엔진 부하를 0.8로 적용해 사용했다. 이는 화물이 평균적으로 80% 정도씩 적재되어 있기 때문에 연료소모량도 같은 비율로 사용되리라는 것을 전제로 한다. 하지만, 이는 상황에 따라 큰 차이를 가져올 수 있기 때문에 동남아 노

78) Chen et al.(2016), op. cit., p. 12.

선과 미주 노선의 예를 살펴보았다. 먼저 동남아 노선의 경우, 우리나라는 원자재를 수입하고 완제품을 수출하기 때문에 부하를 80%로 하는 것이 맞는 것으로 볼 수 있다. 하지만 미주 노선의 경우 주로 완제품을 수출하고 반대로 수입은 거의 없어 빈 컨테이너만을 주로 실어 오고 있다. 따라서 수출 시에는 80% 부하가 맞을 수 있으나 수입 시에는 이보다 더 적은 부하를 적용해야 할 것이다. 실제 2020년 A 선사의 검증 결과를 살펴보면, 미주 노선에 주로 투입되고 있는 8,600TEU급 선박의 연료사용량 추정이 43.2% 과대 추정되었는데 부하계수를 0.8이 아닌 실제 선박 화물적재량 비율을 적용했다면, 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있었을 것이다.

이에 본 연구에서는 만재배수량(DIS: Displacement), 재화중량(DT: Dead Weight Tonnage), 만재흘수(FD: Full Draft), TPC(TC: Ton Per Centimeter) 및 현재 흘수(CD: Current Draft) 등 선박 제원을 기반으로 선박 총무게를 추정하고 이를 기반으로 만재배수량 대비 화물적재율을 추정하여 주 엔진 부하계수로 적용하였다.

$$LF = \frac{DIS - [(FD - CD) \times TC \times 100]}{DIS} \quad [\text{식 4-35}]$$

[식 4-36]을 사용하면 다음 표와 같이 만재배수량 대비 화물적재율을 추정할 수 있으며, 이를 주 엔진의 부하계수로 사용함으로써 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

〈표 4-4〉 만재배수량 대비 화물적재율 계산 예

선박제원				현재 상태			㉞ 만재배수량 대비 화물적재율 (㉞/㉠)
㉠ 만재 배수량	㉡ 재화 중량	㉢ 만재 흘수	㉣ TPC	㉤ 흘수	㉦ 적재 가능 중량 ((㉢-㉤)*㉣ *100)	㉧ 선박 총무게 (㉠-㉦)	
39,114	28,897	10.97	55.4	6.4	25,317.8	13,796.2	0.352718
				9.8	6,481.8	32,632.2	0.834284

자료: 저자 작성

실제 2020년에 수집한 A 선사의 29척 연료사용량과 비교하였을 때 기존 12.8% 과대 추정되었던 결과에 대비하여 6.4%로 개선된 것을 알 수 있었다. 특히 미주 노선에 투입되는 8,600TEU 선박의 경우는 기존 43.2% 과대 추정되었으나 적재율을 부하계수로 사용한 후 26.5%로 개선된 것으로 분석하였다.

〈표 4-5〉 실제 사용량과 연료소모량 추정 결과 비교(2020년 수령 데이터 기준)

선형(TEU)	선박수(척)	실제 사용량(톤)	2020년 모형		K-SEEA 모형	
			추정값(톤)	비교(%)	추정값(톤)	비교(%)
4,600	6	98,500	102,321	103.9	98,500	101.6
5,500	6	82,500	82,330	99.8	82,500	89.2
6,800	4	103,000	93,738	91.0	103,000	101.4
8,600	6	136,000	194,782	143.2	136,000	126.5
13,100	7	125,000	141,601	113.3	125,000	103.6
합계(평균)	22	420,000	614,772	112.8	545,000	106.4

자료: 저자 작성

2. 실제 선박 연료사용량과 결과 비교 및 검증

본 연구에서는 국내 A선사에서 수령한 48척⁷⁹⁾의 선박들이 2022년 사용한 실제 연료사용량과 본 연구에서 추정한 연료 사용량을 비교하였다. 첫 번째로는 2020년 연구와 같이 연간 사용량을 비교했다. 두 번째 세밀한 비교 및 검증을 위해 일별 사용량과 비교하였으며, 일별이라고는 하지만 실제 1일 2회⁸⁰⁾ 정도 수신된 데이터와 비교하였다.

1) 연간 사용량 비교 결과

먼저 연간 사용량과 비교하였다. 비교는 48척의 선박별로 실제 사용한, 즉 A선사로부터 받은 연료사용량과 본 연구의 기존 2020년 추정 방식, 홀수를 기반으로 주 엔진 부하를 계산하여 적용한 신규 추정 방식을 비교하여 근접률⁸¹⁾을 계산하였다. 그 결과 다음 <표 4-6>에서 볼 수 있듯이 2020년 추정 방식은 114% 근접하는 결과를 나타냈고 K-SEEA 모형은 107%로 7%p 정도 개선된 것으로 분석하였다. 분산 또한 10.69%에서 10.44%로 개선되어 기존 2020년 추정 방식도 어느 정도 개선된 추정 결과를 도출했으나 본 연구에서 제시한 신규 방식이 더 나은 결과를 도출하였음을 확인하였다.

<표 4-6> 연간 사용량 비교 결과(2023년 수령 데이터 기준)

선박	실제 사용량	기존 방식(2020년)	근접률	신규 방식(2023년)	근접률
1	20,727.68	22,376.81	107.96%	21,499.99	103.73%
2	17,837.63	18,784.76	105.31%	17,329.59	97.15%
3	19,224.85	23,681.45	123.18%	21,948.88	114.17%
4	14,176.09	12,324.82	86.94%	12,316.03	86.88%

79) 컨테이너선 38척, 탱커선 7척, 벌크선 3척

80) 선박별 평균 631회 수신

81) 근접률 = 추정 연료사용량 / 실제 연료사용량

선박	실제 사용량	기존 방식(2020년)	근접률	신규 방식(2023년)	근접률
5	14,217.38	14,732.01	103.62%	14,512.06	102.07%
6	14,916.39	13,471.06	90.31%	13,430.66	90.04%
7	15,176.17	18,077.15	119.12%	18,668.14	123.01%
8	19,210.00	22,379.40	116.50%	22,435.66	116.79%
9	23,649.80	24,578.40	103.93%	22,660.22	95.82%
10	23,680.66	23,617.29	99.73%	21,151.02	89.32%
11	16,437.59	9,097.59	55.35%	8,610.80	52.38%
12	14,209.25	7,234.47	50.91%	7,179.73	50.53%
13	16,605.60	16,443.26	99.02%	16,368.61	98.57%
14	18,094.43	18,348.62	101.40%	18,080.31	99.92%
15	15,380.40	8,877.51	57.72%	8,875.00	57.70%
16	18,677.27	18,626.59	99.73%	18,828.84	100.81%
17	19,225.78	15,540.17	80.83%	15,161.79	78.86%
18	5,547.48	6,144.90	110.77%	5,588.29	100.74%
19	6,606.89	7,730.06	117.00%	7,003.72	106.01%
20	16,346.16	18,612.98	113.87%	14,979.42	91.64%
21	20,798.00	23,773.29	114.31%	23,531.97	113.15%
22	1,787.90	1,665.93	93.18%	958.97	53.64%
23	2,770.60	4,058.37	146.48%	3,270.17	118.03%
24	21,193.80	34,224.11	161.48%	29,562.40	139.49%
25	19,725.94	32,444.60	164.48%	29,175.78	147.91%
26	22,501.60	37,464.79	166.50%	32,751.00	145.55%
27	18,456.98	31,079.35	168.39%	28,595.82	154.93%
28	4,581.45	3,590.58	78.37%	3,662.63	79.94%
29	4,868.48	2,653.59	54.51%	2,734.69	56.17%
30	16,098.20	25,100.34	155.92%	23,704.27	147.25%
31	25,426.78	30,507.89	119.98%	30,507.89	119.98%
32	13,385.21	9,660.06	72.17%	7,613.27	56.88%
33	16,761.12	15,211.09	90.75%	12,671.74	75.60%
34	13,729.20	11,676.51	85.05%	10,466.61	76.24%
35	13,886.10	11,320.51	81.52%	9,748.98	70.21%
36	13,277.24	11,848.79	89.24%	9,007.10	67.84%
37	22,503.03	29,354.05	130.44%	27,292.53	121.28%
38	22,418.49	28,787.49	128.41%	28,757.86	128.28%
39	21,904.42	28,463.59	129.94%	27,557.99	125.81%

선박	실제 사용량	기존 방식(2020년)	근접률	신규 방식(2023년)	근접률
40	25,379.45	32,677.07	128.75%	32,520.98	128.14%
41	24,246.28	30,115.37	124.21%	29,795.48	122.89%
42	23,184.20	28,144.31	121.39%	27,976.56	120.67%
43	21,366.31	26,846.25	125.65%	26,846.25	125.65%
44	20,237.80	26,699.65	131.93%	26,487.82	130.88%
45	19,020.00	30,688.59	161.35%	30,688.59	161.35%
46	17,161.49	29,166.91	169.96%	27,779.82	161.87%
47	16,791.53	27,276.14	162.44%	27,228.91	162.16%
48	17,875.92	30,707.16	171.78%	30,161.26	168.73%
평균	16,901.77	19,914.28	114.00%	18,910.13	107.01%
합계	811,285.00	955,885.65	117.82%*	907,686.13	111.88%*
분산	-	-	10.69%	-	10.44%

주: * 합계값의 차이로 근접률 계산

자료: 저자 작성

2) 일별 사용량 비교 결과

다음으로 일별 사용량과 비교하였다. 일별 사용량은 <표 4-7>과 같이 실제 선박들이 주요 시간대별로 사용한 연료량과 그 시간대에 추정한 결과를 비교하였으며, 도출된 근접률의 평균을 이용하여 전체 근접률을 추정하였다. 다만, 결과가 편향되는 것을 방지하기 위하여 실제 사용된 데이터에서 1톤 미만으로 사용한 레코드는 비교 대상에서 제외하였고, 비교 결과 500% 이상 차이 나는 레코드 또한 제외하였다.

<표 4-8>은 일별 사용량 비교 결과의 한 예로 수신일시를 기준으로 실제 사용량과 추정된 사용량을 비교하여 근접률을 계산하였으며, 이들의 평균을 내어 각 선박 별로 근접률을 계산하였다.

〈표 4-7〉 일별 사용량 비교 결과(예)

수신일시	실제 사용량(톤)	추정 사용량(톤)	근접률(%)
2022-01-03 08:12:00	5.8	0	0.00
2022-01-04 04:00:00	23.3	0	0.00
2022-01-05 04:00:00	31.7	27.7	87.68
2022-01-06 04:00:00	32.2	19.2	59.86
2022-01-06 23:42:00	27	78.9	292.37
2022-01-07 03:00:00	3.5	6.7	193.50
2022-01-07 04:00:00	0.1	1.2	-
2022-01-08 01:12:00	10.9	25.8	236.77
2022-01-08 03:24:00	6.7	4.3	65.53
2022-01-08 04:00:00	0.5	1.9	-
2022-01-11 04:00:00	42.2	0	0.00
2022-01-12 04:00:00	44.5	0	0.00
2022-01-12 23:42:00	36.6	9.3	25.51
2022-01-13 03:30:00	2.7	5.7	212.48
2022-01-13 17:36:00	7	17.6	251.70
평균	-	-	95.03

자료: 저자 작성

〈표 4-8〉 일별 사용량 비교 결과(2023년 수령 데이터 기준)

선박	실제 사용량	기존 방식(2020년)	근접률	신규 방식(2023년)	근접률
1	20,727.68	22,376.81	118.38%	21,499.99	114.99%
2	17,837.63	18,784.76	113.06%	17,329.59	108.58%
3	19,224.85	23,681.45	135.59%	21,948.88	129.89%
4	14,176.09	12,324.82	102.17%	12,316.03	102.17%
5	14,217.38	14,732.01	113.91%	14,512.06	111.54%
6	14,916.39	13,471.06	78.75%	13,430.66	78.00%
7	15,176.17	18,077.15	132.77%	18,668.14	133.28%
8	19,210.00	22,379.40	128.26%	22,435.66	125.82%
9	23,649.80	24,578.40	105.18%	22,660.22	99.82%
10	23,680.66	23,617.29	116.70%	21,151.02	109.73%
11	16,437.59	9,097.59	51.27%	8,610.80	50.36%

선박	실제 사용량	기존 방식(2020년)	근접률	신규 방식(2023년)	근접률
12	14,209.25	7,234.47	44.27%	7,179.73	43.99%
13	16,605.60	16,443.26	84.22%	16,368.61	83.17%
14	18,094.43	18,348.62	83.85%	18,080.31	83.08%
15	15,380.40	8,877.51	68.68%	8,875.00	68.68%
16	18,677.27	18,626.59	91.43%	18,828.84	90.71%
17	19,225.78	15,540.17	95.81%	15,161.79	95.81%
18	5,547.48	6,144.90	101.87%	5,588.29	96.05%
19	6,606.89	7,730.06	105.35%	7,003.72	97.93%
20	16,346.16	18,612.98	100.82%	14,979.42	82.96%
21	20,798.00	23,773.29	105.41%	23,531.97	104.17%
22	1,787.90	1,665.93	76.35%	958.97	50.68%
23	2,770.60	4,058.37	104.08%	3,270.17	87.18%
24	21,193.80	34,224.11	180.61%	29,562.40	169.33%
25	19,725.94	32,444.60	184.08%	29,175.78	175.17%
26	22,501.60	37,464.79	200.16%	32,751.00	189.86%
27	18,456.98	31,079.35	181.30%	28,595.82	174.38%
28	4,581.45	3,590.58	114.05%	3,662.63	114.94%
29	4,868.48	2,653.59	79.78%	2,734.69	81.25%
30	16,098.20	25,100.34	158.13%	23,704.27	151.85%
31	25,426.78	30,507.89	149.43%	30,507.89	149.43%
32	13,385.21	9,660.06	77.91%	7,613.27	63.29%
33	16,761.12	15,211.09	84.91%	12,671.74	73.08%
34	13,729.20	11,676.51	95.58%	10,466.61	83.17%
35	13,886.10	11,320.51	93.62%	9,748.98	84.59%
36	13,277.24	11,848.79	99.68%	9,007.10	79.89%
37	22,503.03	29,354.05	171.17%	27,292.53	166.59%
38	22,418.49	28,787.49	173.15%	28,757.86	172.10%
39	21,904.42	28,463.59	160.46%	27,557.99	158.23%
40	25,379.45	32,677.07	167.89%	32,520.98	167.42%
41	24,246.28	30,115.37	141.38%	29,795.48	139.90%
42	23,184.20	28,144.31	144.96%	27,976.56	143.13%
43	21,366.31	26,846.25	146.83%	26,846.25	146.83%

선박	실제 사용량	기존 방식(2020년)	근접률	신규 방식(2023년)	근접률
44	20,237.80	26,699.65	158.68%	26,487.82	158.40%
45	19,020.00	30,688.59	140.28%	30,688.59	140.28%
46	17,161.49	29,166.91	145.01%	27,779.82	139.47%
47	16,791.53	27,276.14	136.42%	27,228.91	136.22%
48	17,875.92	30,707.16	116.35%	30,161.26	114.70%
평균	16,901.77	19,914.28	120.00%	18,910.13	115.04%

자료: 저자 작성

〈표 4-8〉은 선박별 일별 사용량 비교 결과로, 기존 방식으로 추정했을 때는 120%, 신규 방식으로 했을 때는 115% 근접하는 결과를 도출하여 신규 방식이 더 좋은 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 다만 연간 사용량과 비교 결과 대비 과대 추정되는 부분을 알 수 있었다. 이는 약 12시간마다 연료사용량을 비교함에 따라 편차가 커진 결과로, 일 단위 비교에서 15% 정도 과대 추정되는 것을 보정하기 위해 본 연구에서 한 단계 과정을 더 거치고자 한다.

3. 선박 연료사용량 추정 모형 보정 및 개선효과 분석

본 연구에서 신규로 제안한 추정 모형은 기존 대비 7% 과대 추정되는 결과를 나타내어 성능이 개선된 것을 알 수 있었다. 다만 편차가 10% 정도이며 일 단위 비교 시 15% 과대 추정되는 결과를 보여 이에 대한 보정이 필요함을 확인하였다.

이에 본 3항에서는 회귀분석을 통해 추정 모형에 대한 추가적인 부하율(ALF: Additional Load Factor)을 도출하여 결과를 개선하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 선박 크기가 연료사용량에 영향을 미친다는 가설을 세우고 회귀분석을 실시하였다. 다만 유조선과 벌크선의 경우 표본이 작아

제외하고 38척의 컨테이너선만을 대상으로 분석하였다.

선박 크기를 가늠할 수 있는 항목으로는 TEU, 선평(Breadth), 선장(Length)이 있으며, 이를 독립변수로 설정하고 근접률을 종속변수로 하여 다중회귀분석을 실시하였다.

그 결과 회귀모형의 유의확률이 0.05보다 작아 회귀식으로는 의미가 있었으나 다음 <표 4-9>와 같이 독립변수별 P값이 0.05보다 모두 크기 때문에 채택할 수 없었다.

<표 4-9> 연료소모량 회귀분석 결과

독립변수	Coef.	Std. Err.	t	P> t
상수	-0.71049246	0.494365	-1.437181938	0.159806076
TEU(x1)	-3.14455E-05	2.07E-05	-1.516223676	0.138706072
선평(x2)	0.028917888	0.015475	1.868644493	0.070308257
선장(x3)	0.002714653	0.001659	1.63623809	0.111014769

자료: 저자 작성

다음으로 TEU와 선평, TEU와 선장, 선평과 선장 등 각각 2개의 독립변수를 가지는 회귀분석을 실시하였으나 회귀모형의 유의확률은 0.05보다 작으나 독립변수별 P값이 모두 0.05보다 커 회귀모형을 채택할 수 없었다.

따라서, 본 연구에서는 3개의 독립변수에 따라 회귀분석을 실시하였으며, 이를 모두 적용하여 개선된 정도를 비교하였다. 결과적으로 실제 사용량과 비교하여 95.36%의 결과를 도출하였고 분산 또한 5.52%로 감소한 TEU를 독립변수로 하여 추가적인 부하계수(ALF) 회귀식을 채택하였으며, 최종적으로 연료사용량을 다음 [식 4-38]로 변형하여 적용하였다. 또한 TEU를 독립변수로 설정하였을 때 더빈왓슨(Durbin Watson) 통계량이 0.996으로 1에 가까워 매우 약한 양의 상관관계가 있다고 분석되었고, 분산분석 결과 회귀모형의 유의확률 또한 0.05보다 작아 회귀식으로 의미가

있음을 확인하였다.

$$ALF = 0.00002636929 \cdot x_1 + 0.827670629 \quad [\text{식 4-36}]$$

$$F_{ijk} = [LF \cdot MF_k (\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + AF_k] \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \cdot ALF \quad [\text{식 4-37}]$$

〈표 4-10〉 독립변수별 회귀모형 적용 결과 비교

독립변수	연간 비교 근접률 평균(분산)	일별 비교 근접률 평균(분산)
TEU(x1)	95.36%(5.52%)	105.39%(9.27%)
선폭(x2)	92.03%(7.09%)	106.23%(6.10%)
선장(x3)	94.40%(4.11%)	106.11%(5.83%)

자료: 저자 작성

제3절 우리나라 친환경 항만정책 추진 효과

본 절에서는 보정을 거친 새로운 추정식을 기반으로 우리나라 친환경 항만정책 추진 효과를 2020년에 이어 분석하고자 한다. 특히 2장에서 살펴본 ECA 지정, 선박저속운항 해역 지정, AMP 설치 등의 세 가지 친환경 항만 정책효과를 시나리오별로 분석하였다.

1. ECA 지정 효과 분석

1) 분석 시나리오

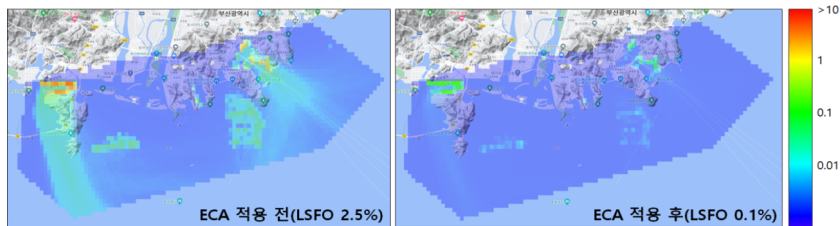
우리나라는 2020년 9월 1일부터 ECA를 지정하고 있으며, 2021년까지

ECA로 지정된 항만의 정박지에 닻을 내리거나 부두에 계류하는 선박에만 우선 적용하였으나 2022년 1월 1일부터는 ECA를 지나가는 선박에도 모두 적용하였다. ECA가 적용됨에 따라 선박들은 황함유량 기준 0.1% 이하의 연료만을 사용할 수 있게 되었다. 2017년 ICCT(The International Council of Clean Transportation)의 보고서에 따르면, 평균 2.5%⁸²⁾ 황함유량의 황함유량 연료를 사용하고 있어 본 연구에서는 이를 0.1%로 적용했을 경우와 비교하여 ECA 지정 효과를 분석하였다.

2) 분석 결과

본 연구에서는 개발한 모형을 통해 다음 <표 4-11>과 같이 우리나라 네 개 ECA 지역의 연료사용량과 SO_x 배출량을 분석해 보았다. 전체적으로 553,739톤의 연료를 사용하고 있고, LSFO를 미사용 시에는 276톤, LSFO를 사용했을 경우에는 11톤의 SO_x가 배출된 것으로 분석되어 ECA 적용 후 96% 감축 효과가 있는 것으로 추정되었다. 특히 부산항의 경우 108톤 감축된 것으로 추정되어 가장 큰 효과가 있음을 확인하였다.

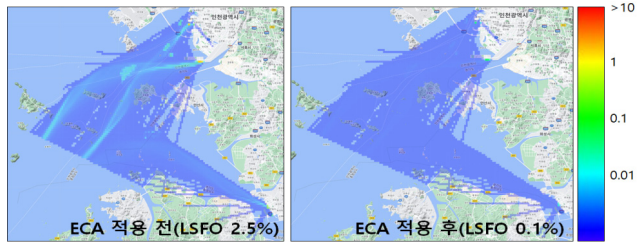
<그림 4-11> ECA 적용 전후 SO_x 배출량 비교(2022년 부산항 컨테이너선 기준)



자료: 저자 작성

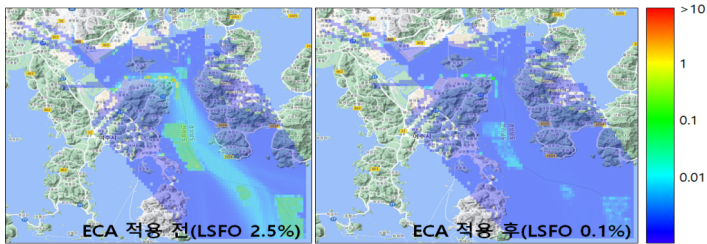
82) ICCT(2017), p. 2.

〈그림 4-12〉 ECA 적용 전후 SO_x 배출량 비교
(2022년 인천항/평택·당진항 컨테이너선 기준)



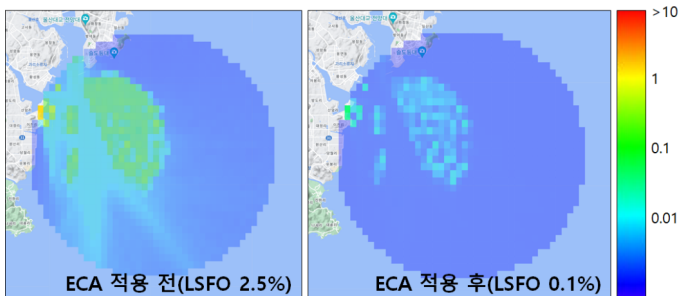
자료: 저자 작성

〈그림 4-13〉 ECA 적용 전후 SO_x 배출량 비교(2022년 여수·광양항 유조선 기준)



자료: 저자 작성

〈그림 4-14〉 ECA 적용 전후 SO_x 배출량 비교(2022년 울산항 유조선 기준)



자료: 저자 작성

전 세계적으로 모든 선박에 ECA와 같은 기준인 0.1% LSFO 사용 의무화를 추진할 경우 컨테이너선 36,075톤, 벌크선 27,991톤, 유조선 24,367톤의 SO_x 발생 감축이 예상되며, 선박 기인 SO_x 배출량이 5천 톤 이하로 감소하여 깨끗하고 건강한 대기질 확보가 가능할 것으로 보인다.

〈표 4-11〉 ECA 지정 해역별 SO_x 감축량 추정

(단위: 톤)

항만	구분	연료사용량	SO _x 배출량		SO _x 감축량
			LSFO 미사용 (2.5%)	LSFO 사용 (0.1%)	
인천항/ 평택· 당진항	컨테이너선	31,925.36	15.96	0.64	15.32
	벌크선	25,227.03	12.61	0.50	12.11
	유조선	20,481.83	10.24	0.41	9.83
	소계	77,634.22	38.81	1.55	37.26
여수· 광양항	컨테이너선	39,668.27	19.83	0.79	19.04
	벌크선	31,183.54	15.59	0.62	14.97
	유조선	101,438.05	50.72	2.03	48.69
	소계	172,289.86	86.14	3.44	82.7
부산항	컨테이너선	199,822.01	99.91	4.00	95.91
	벌크선	7,963.94	3.98	0.16	3.82
	유조선	17,936.16	8.97	0.36	8.61
	소계	225,722.11	112.86	4.52	108.34
울산항	컨테이너선	2,121.27	1.06	0.04	1.02
	벌크선	4,750.16	2.38	0.10	2.28
	유조선	70,221.56	35.11	1.40	33.71
	소계	77,092.99	38.55	1.54	37.01
국내 합계		552,739.18	276.36	11.05	265.31
전 세계	컨테이너선	75,156,917.80	37,578.46	1,503.11	36,075.34
	벌크선	58,314,833.76	29,157.42	1,166.22	27,991.20
	유조선	50,722,058.98	25,361.03	1,014.37	24,346.65

자료: 저자 작성

2. 선박저속운항 해역 지정 효과 분석

1) 개요

우리나라는 인천·평택·당진항 해역, 여수·광양항 해역, 부산항 해역, 울산항 해역 등 네 곳의 선박저속운항해역을 지정, 운영하고 있다. 각 해역별, 선종별 10~12노트로 권고 속도를 정하고 있으며, 컨테이너선은 12노트, 벌크 및 유조선은 10노트(부산항은 12노트)로 구분하고 있다.

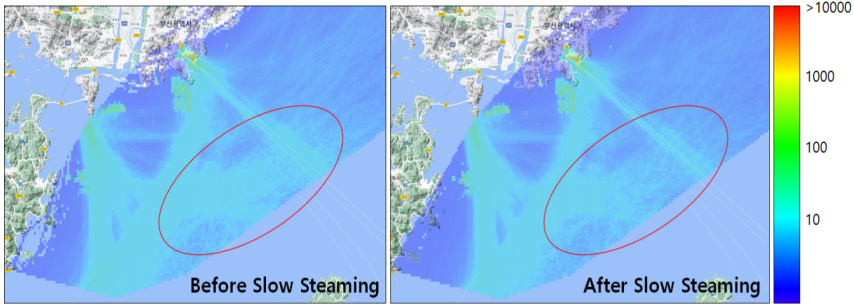
본 연구에서는 네 개 해역별로 운항하는 컨테이너선, 벌크선, 유조선의 권고 속도 준수여부를 확인한 후에 두 경우의 연료사용량 및 이산화탄소 배출량을 비교하였다.

2) 분석 결과

본 연구에서는 다음 <표 4-12>와 같이 권고 속도를 지켰을 때와 지키지 않았을 때의 결과를 비교하였다. 권고 속도를 지켰다는 가정에서는 권고 속도 10노트 또는 12노트 이상 선박의 속도를 10노트 또는 12노트로 변경하여 계산하였다. 예를 들어 특정 구간에서 컨테이너 선박이 15노트로 이동했을 경우 실제 연료사용량은 12노트로 계산하여 적용하였다.

분석 결과 <표 4-12>와 같이 네 개 해역에서 106천 톤의 이산화탄소 배출을 감축시킬 수 있을 것으로 분석하였다. 특히 부산항 해역 컨테이너선의 경우 39천 톤의 연료를 추가적으로 감축시킬 수 있어 선박 저속운항 해역 효과가 클 것으로 예상된다. 하지만 이와 같은 결과는 아직까지 선박 저속운항이 잘 지켜지지 않고 있다는 것을 방증하는 것으로 이에 대한 모니터링 및 관리가 필요하다.

〈그림 4-15〉 선박 저속운항 적용 전후 연료사용량 비교(2022년 부산항 컨테이너선 기준)



자료: 저자 작성

〈표 4-12〉 선박 저속운항 권고 속도 준수 및 미준수 결과 비교

(단위: 톤)

항만	구분	권고 속도 (노트)	권고 속도 미준수		권고 속도 준수		CO ₂ 감축량
			연료사용량	CO ₂ 배출량	연료사용량	CO ₂ 배출량	
인천항/ 평택· 당진항	컨테이너선	12	8,670	27,483	8,064	25,564	1,919
	벌크선	10	6,470	20,509	5,934	18,810	1,699
	유조선	10	4,485	14,219	3,918	12,420	1,799
여수· 광양항	컨테이너선	12	16,070	50,942	15,217	48,237	2,706
	벌크선	10	16,362	51,869	15,573	49,368	2,501
	유조선	10	57,544	182,414	56,371	178,697	3,717
부산항	컨테이너선	12	165,808	525,612	153,358	486,144	39,468
	벌크선	12	55,977	177,447	51,986	164,797	12,650
	유조선	12	86,068	272,837	83,506	264,713	8,124
울산항	컨테이너선	12	17,873	56,658	16,308	51,698	4,960
	벌크선	10	30,885	97,904	25,071	79,475	18,429
	유조선	10	135,948	430,957	133,540	423,322	7,635
합계			602,160	1,908,851	568,846	1,803,245	105,607

자료: 저자 작성

3. 육상전원공급시설 설치 효과 분석

1) 개요

해양수산부는 2018년 AMP 시범사업을 시작으로, 부산항, 인천항, 광양항 등 총 14개 선석에 AMP를 설치한 것으로 조사됐으며, 향후 2030년까지 248개의 선석으로 확대할 계획까지 수립하였다. 하지만 선박의 수전 시설 미설치 등으로 인해 2022년 14개 선석 중 10개의 운영 실적이 없어⁸³⁾ 아직 AMP가 적극 활용되고 있지 못하고 있다.

이에 본 연구에서는 2022년을 기준으로 부산항, 인천항, 여수·광양항, 울산항 등 네 개의 항만에서 AMP를 사용했을 경우 감축 가능한 연료사용량 및 이산화탄소 배출량을 분석하였다. 본 연구에서는 모든 입항 선박이 AMP를 사용한다면 정박 중 사용되는 보조엔진의 연료사용량을 100% 감축할 수 있다고 가정하고, 예상 감축량으로 설정하였다.

2) 분석 결과

추정 결과 네 개 항만의 전체 연료사용량은 553천 톤이며, 이 중 정박 시 사용한 연료사용량은 102천 톤인 것으로 분석하였다. 또한 이산화탄소 배출량은 각각 1,752천 톤, 324천 톤인 것으로 추정되었다. 정박 시 사용한 연료는 AMP 설치를 통해 이를 100% 사용하지 않는다고 가정하였을 경우 네 개 항만에서는 18.5%의 연료와 이산화탄소 배출을 저감할 수 있는 것으로 확인하였다. 특히 인천항/평택·당진항의 벌크선과 부산항 컨테이너선의 경우는 각각 22.57%, 28.54% 감축이 가능하기 때문에 우선 적용하는 방안을 검토해야 할 것이다.

83) 환경일보(2022.10.15.)(검색일: 2023.8.29.)

〈표 4-13〉 육상전원공급시설 설치 후 연료사용량 및 이산화탄소 저감 효과

(단위: 톤)

항만	구분	전체		정박 시(감축 대상)*		CO ₂ 감축률
		연료사용량	CO ₂ 배출량	연료사용량	CO ₂ 배출량	
인천항/ 평택· 당진항	컨테이너선	31,925.36	101,203.38	4,993.90	15,830.65	15.64%
	벌크선	25,227.03	79,969.67	5,694.63	18,051.97	22.57%
	유조선	20,481.83	64,927.40	2,095.16	6,641.67	10.23%
여수· 광양항	컨테이너선	39,668.27	125,748.42	6,947.06	22,022.18	17.51%
	벌크선	31,183.54	98,851.81	4,966.93	15,745.16	15.93%
	유조선	101,438.05	321,558.61	10,441.24	33,098.72	10.29%
부산항	컨테이너선	199,822.01	633,435.76	57,027.17	180,776.12	28.54%
	벌크선	7,963.94	25,245.68	922.86	2,925.47	11.59%
	유조선	17,936.16	56,857.63	2,821.81	8,945.14	15.73%
울산항	컨테이너선	2,121.27	6,724.41	15.52	49.20	0.73%
	벌크선	4,750.16	15,058.00	386.57	1,225.44	8.14%
	유조선	70,221.56	222,602.33	5,963.15	18,903.19	8.49%
합계		552,739.15	1,752,183.10	102,276.00	324,214.91	18.50%

주: * AMP 사용으로 감축 가능

자료: 저자 작성

제4절 소결

본 장에서는 기존 연구에서 사용했던 Top-down 방식과 STEEM, STEAM 등 Bottom-up 방식을 분석하였으며, 방식별 한계점을 개선하기 위해 선박 hull을 기반으로 화물적재율을 추정하여 주 엔진 부하계수로 적용하는 새로운 방식의 추정식을 제안하였다. 또한 실제 연료사용량과 회귀 분석으로 추가 보정을 거쳐 TEU를 독립변수로 하는 개선된 K-SEEA 모형을 최종 제시하였다. 결과적으로 실제 연료사용량 데이터와 비교하여

95.36%의 결과를 도출하였고, 분산 또한 5.52%로 감소한 결과를 도출하였다. 2020년에 수령하여 비교했던 결과도 기존 12.8% 과대 추정한 결과를 6.2%p 개선된 6.4% 과대 추정으로 줄어들었음을 알 수 있었다. 이는 실제 연료사용량과 비교해 큰 차이가 없어 그 우수성을 확인하였다.

또한 본 장에서는 개발된 신규 모형으로 우리나라에서 추진하고 있는 친환경 항만정책 효과를 추정하였다. 먼저 인천항/평택·당진항, 여수·광양항, 부산항, 울산항 등 4개 주요 항만의 ECA 지정 효과를 분석하였다. 그 결과 2022년 기준 96%에 해당하는 265톤의 SOx 발생이 감소하였다.

다음으로는 선박 저속운항 해역 지정 효과를 분석하였으며, 아직도 권고 속도를 넘기는 선박이 있어 105,607톤의 이산화탄소 배출을 추가적으로 감축시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

마지막으로 육상전원공급시설 설치에 따른 정박 시 연료사용량과 이산화탄소 배출 감축 효과를 분석하였으며, 네 개 해역에서 전체의 18.5%에 해당하는 약 324,215톤의 이산화탄소 배출을 줄일 것으로 분석되었다.

종합하면, 다음 <표 4-14>와 같이 2022년 기준으로 황산화물 발생이 265톤 감축하였으며, 이산화탄소 429,822톤을 추가 감축할 수 있을 것이다.

<표 4-14> 우리나라 주요 친환경 항만정책별 효과 추정(2022년 기준)

(단위: 톤)

구분	SOx 감축량(감축률)	CO ₂ 감축량(감축률)
ECA 지정	265(96.00%)	-
선박 저속운항	-	105,607(5.53%)
AMP 설치	-	324,215(18.50%)
합계	265	429,822

자료: 저자 작성

05

결론 및 연구활용

제1절 결론

전 세계적으로 지구온난화로 인한 기후변화가 가속화되고 있다. 이에 국제사회는 파리협정을 채택하고 추후 평균온도 상승을 2℃보다 아래인 1.5℃⁸⁴⁾로 억제하기 위해 장기저탄소발전전략(LEDs) 및 국가온실가스감축 목표(NDC)를 제출하기로 합의했다.

정부도 파리협정에 대응하기 위해 2020년 12월 7일 ‘2050 탄소중립 추진 전략’⁸⁵⁾을 확정·발표했고, 같은 해 12월 15일에는 2050 LEDs와 2030 NDC의 정부안을 확정하여 발표하였다. 또한 2050년 탄소중립 목표를 담은 ‘기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법’⁸⁶⁾이 2021년 8월 31일 국회 본회의를 통과, 9월 1일 국무회의에서 의결되었다. 항만과 관련해서도 2020년 9월 1일 ‘항만등 대기질 개선에 관한 특별법’⁸⁷⁾을 시행함에 따라 부산항, 인천항/평택·당진항, 여수·광양항, 울산항 등 4개의 해역이 배출규제해역으로 지정되었으며, 또한 선종별로 10~12노트 이하로 운항

84) 기상청(2019), p. 44.

85) 관계부처 합동(2020)

86) 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(법률 제19430호, 2023.6.9.)

87) 항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법(법률 제19141호, 2022.12.27.)

하는 선박저속운항 해역 또한 지정되었다.

하지만 관련된 정책을 추진했을 때 예상되는 효과를 제시할 수 있는 기초자료가 미비하여 추진 동력이 저하되고 있었기 때문에 이를 분석할 수 있는 방법론 개발이 필요했다. 이에 2020년 AIS 데이터를 기반으로 선박 연료사용량 및 배기가스 배출량을 분석할 수 있는 1차 모형을 개발하였으며, 2023년 2차 연구를 수행하여 개선된 신규 모형을 개발하였다. 2차 연구에서는 선박의 홀수를 기반으로 엔진 부하를 계산하여 적용하였으며, 정밀한 수준의 선박 연료사용량과 비교하여 검증 및 보정 모형을 제시하는 등 개선된 결과를 도출할 수 있는 모형을 제안하였다.

또한 개발한 신규 모형을 기반으로 ECA 지정, 선박저속운항 해역 지정, 육상전원공급시설 설치 등 우리나라 주요 친환경 항만정책의 효과를 분석하였다. 종합적으로 2022년 기준 황산화물 발생은 265톤 감축한 것으로 분석하였으며, 이산화탄소는 429,822톤을 추가 감축이 가능했을 것으로 분석하였다. 이산화탄소의 경우 2023년 할당배출권(KAU23) 기준으로 톤당 8,000원 정도⁸⁸⁾에 거래되고 있으므로 약 34억 원 정도 경제적 효과가 있을 것으로 추정된다.

88) 한국거래소(검색일: 2023.8.29.)

제2절 연구활용 및 기대효과

1. 정책적 기대효과

1) 선박 배기가스 배출량 모니터링 체계 구축 기반 마련

4장에서는 ECA 지정, AMP 설치, 선박저속운항 해역 지정 등 우리나라에서 직접 추진하고 있는 친환경 해운·항만정책의 효과를 추정해 보았다. 그 결과 이산화탄소 429,822톤을 추가 감축할 수 있는 것으로 분석하였다. 특히 우리나라 4개의 해역을 선박저속운항 해역으로 지정하며 탄소 배출 저감에 큰 효과가 있었을 것이다. 다만 앞의 결과에서 확인할 수 있듯이 105,607톤의 연료를 줄일 수 있는 것으로 분석되었는데 이는 아직까지 원고 속도인 10~12노트를 넘는 선박이 존재한다는 의미한다.

따라서, 본 연구는 선박 저속운항 여부를 상시 모니터링할 수 있는 체계를 구축하는 것을 제안하고자 한다. 현재 저속운항에 대해 증빙한 선박은 15~30%의 선박입항료를 감면받을 수 있다. 하지만 GICOMS나 ECDIS를 통해 항적을 조회하고, 캡처하여 제출했을 때 감면이 가능한 상황이라 번거롭다는 문제가 있었다.

이에 GICOMS나 ECDIS의 기능을 확장하거나 두 시스템을 기반으로 실시간 선박 저속운항 여부를 확인하고 자동으로 관련 서류나 데이터를 전송할 수 있는 시스템을 구축하여 운영한다면 선박들의 저속운항 참여율이 더 높아질 것으로 예상된다.

또한 우리나라 환경부 온실가스종합정보센터 등과 같은 배기가스 배출량 모니터링 시스템 협업을 통해 모형의 개선과 배출량 예측 시에 적용함으로써 정책적인 활용도가 높아질 것으로 기대한다.

2) 녹색해운항로 시범사업 확대 추진 시 활용

IMO의 보고서(2021)에 따르면, 선박이 배출하고 있는 온실가스 배출량은 2018년 기준 전 세계 배출량의 2.89%를 차지한다.⁸⁹⁾ 우리나라 수출입 물량의 99% 이상이 선박을 통해 운송되고 있다는 것을 감안한다면 국내 선박 배기가스 배출량 비중 또한 상당히 높을 것이다.

우리나라는 이러한 문제를 해결하기 위해 2050년 탄소중립 선언에 근거하여 세부적인 로드맵을 수립하였다. 특히 ECA 지정, AMP 설치, 선박저속운항해역 지정 등을 통해 선박 배기가스 배출량을 줄여가고 있으며, 본 연구의 실험을 통해 효과를 일부 확인하였다. 하지만 이는 선박이 배출하고 있는 배기가스의 일부만을 줄일 수 있는 방안으로 2050 넷제로를 달성하기에 매우 부족하다.

현재 IMO는 2050년까지 50%의 감축목표를 가지고 있으나 미국과 EU는 2050년까지 넷제로를 달성하기로 약속하였다. 특히 미국은 해운 선박 탄소 배출량이 적거나 없는 연료를 사용하고 항만에서는 온실가스저감 기술을 사용하는 운항로를 지칭하는 녹색해운항로(Green Shipping Corridor) 개설을 제안한 바 있다.⁹⁰⁾

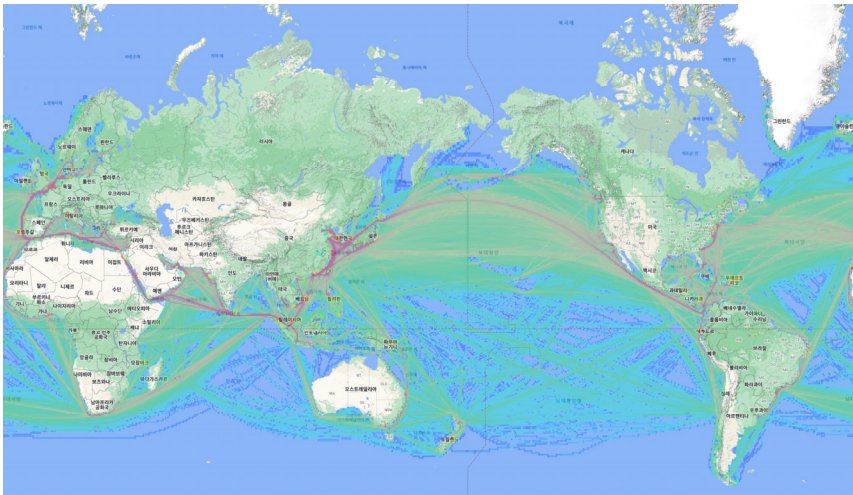
실제 미국에서는 LA/LB항-상하이항을 녹색해운항로 개설에 합의하였으며, 제27차 기후당사국총회는 부산항-타코마항 간 녹색해운항로를 후보로 제안하였다. 이에 양국은 부산항-타코마항 간 녹색해운항로 시범사업의 추진을 위해 노력하고 있으며, 특히 윤석열 대통령은 2023년 9월 9일 인도에서 열린 G20 정상회의에서 “대한민국이 주도할 친환경 해운 솔루션은 지구 각지의 항구를 녹색 항로로 연결하는데 기여할 것”이라며 녹색해운항로 구축 비전을 제시하였다.⁹¹⁾

89) IMO(2021), p. 1.

90) 엄정훈(2022), p. 7.

다만 부산항과 시애틀·타코마항만을 대상으로 하는 시범사업의 한계를 극복하기 위해 대상 항만을 확대하는 것이 우선돼야 할 것이다. 시애틀·타코마항은 연간 약 300만 TEU의 컨테이너 처리하는 항만으로 다음 <그림 5-1>에서 볼 수 있듯이 부산항과 교역하는 화물량이 적을 것으로 예상된다. 따라서 녹색해운항로 구축의 확실한 효과를 거두기 위해 많은 선박이 입출항하는 미국 내 대형 항만인 LA항, NY항, LB항 등과 녹색해운항로 구축이 필요하다.

<그림 5-1> 전 세계 컨테이너선 연료사용량 분포(2022년 기준)



자료: 저자 작성

3) IMO 탄소집약도지수 대비 지원

IMO에서는 온실가스 배출 억제에 위해 선박에 탄소집약도지수 CII 규제를 시행했다. 1년의 실제 운항 데이터를 조사하기 때문에 2024년에 첫 검증이 이루어지며 CII 등급을 부여한다. 또한, E등급이나 3년 연속 D등급으로

91) 부산일보(2023.9.9.)(검색일: 2023.9.11.)

평가되는 선박은 운항할 수 없기 때문에 선사에 큰 부담으로 작용한다.

이를 위해 가장 좋은 방법은 연료 종류를 변경하는 것이다. 하지만 기존 선박들의 경우는 연료를 변경하는 데 한계가 있다. 따라서 CII 등급을 향상시킬 수 있는 방안을 고려해야 하는데 선박 저속 운항, 화물적재율 감소와 같은 방법을 들 수 있다. 실제 연료는 속도의 3배수로 사용량이 증가하므로 감속 시 크게 사용량이 줄어들고 이에 따라 배기가스 배출량 또한 감소할 것이다.

본 연구에서 개발한 K-SEEA 모형은 이와 같은 효과를 추정하는데 활용이 가능하다. 만약 CII 등급이 낮을 것으로 예상되는 선박들에 K-SEEA 모형을 활용한다면, A, B, C등급을 맞추기 위한 적정 속도를 추정할 수 있을 것이다. 또한 화물적재율 감소에 따른 등급 조정 여부도 확인할 수 있으므로 K-SEEA 모형의 활용도가 높아질 것으로 기대한다.

2. 학술적·기술적 기대효과

본 연구에서는 AIS 기반 선박 배기가스 배출량 추정 모형인 K-SEEA를 개발하였다. 2020년 1차 연구를 통해 개발된 기존 모형에 선박 흘수를 기반으로 화물적재량을 추정함으로써 0.8이라는 부하계수를 동적인 변수로 사용함으로써 그 정확성을 높였다. 또한 실제 선박들의 연료사용량과 비교함으로써 성능에 대해 검증하였으며, 한발 더 나아가 회귀분석을 통해 보정 모형을 제시함으로써 실제 연료사용량과 5% 정도 차이 나는 획기적인 추정 모형인 K-SEEA를 개발하였다.

이는 기존 연구들과 차별성뿐만 아니라 성능의 우수성을 나타내는 것으로 학술적으로도 큰 의미를 지니고 있다. 기존 연구에는 흘수를 활용하여

화물적재량을 도출하여 부하계수로 사용하는 연구가 없으며, 회귀분석을 통해 보정한 연구 역시 이루어지지 않은 것으로 나타났다. 따라서 K-SEEA 방법은 추후 유사 연구에서 많이 활용할 것으로 예상된다.

또한 관련 시스템 구축 시 기술이전과 사업화 추진이 가능하며 기술적으로도 효과가 클 것으로 기대한다. 우리나라에서도 선박 배기가스 배출량 추정 모형을 많이 연구하였으나 성능에 대한 검증 및 보정 사례가 없기 때문에 기술이전 가능성이 높다 판단하며, 특히 우리나라 선사에서 동 연구의 결과에 대해 많은 관심을 보이고 있어 사업화 추진 또한 가능할 것으로 예상된다.

제3절 연구의 한계점 및 향후 연구방향

1. 벌크선 및 유조선 추가 검증

본 연구는 2020년 개발한 선박 연료소모량 추정 모형을 개선한 모형을 제시하였다. 이를 위해 선박 흘수를 기반으로 선박에 적재된 화물량을 추정하여 주 엔진의 부하계수로 사용함으로써 개선된 효과를 보였다. 또한 실제 선박의 연료사용량과 비교하여 검증 및 보정 모형을 도출하였다.

하지만 보정 모형 도출 대상이 컨테이너선만으로 한정했다는 한계점이 있었다. 이는 30척 이상 확보되었던 컨테이너선과 달리 벌크선과 유조선의 경우는 10척이 되지 않아 표본이 적다는 문제로 인해 적용이 어려웠다.

따라서, 향후 연구에서는 벌크선과 유조선의 실제 연료사용량 데이터 표본을 추가적으로 확보하여 비교 및 보정 모형을 도출해야 할 것이다. 이를

위해서는 SM상선, 고려해운, HMM, SK해운, 장금상선 등 국내 선사뿐만 아니라 머스크, MSC, CMA CGM 등 글로벌 선사와 논의가 필요하다. 특히 연료사용량 추이 데이터 제공, 주요 구간별 경제 속도 제공 등 각 선사들이 필요로 하는 정보를 제공해야 하며, 이를 통해 과거 데이터를 확보하는 등 상호 협력 방안과 관련한 논의를 이루어져야 할 것이다.

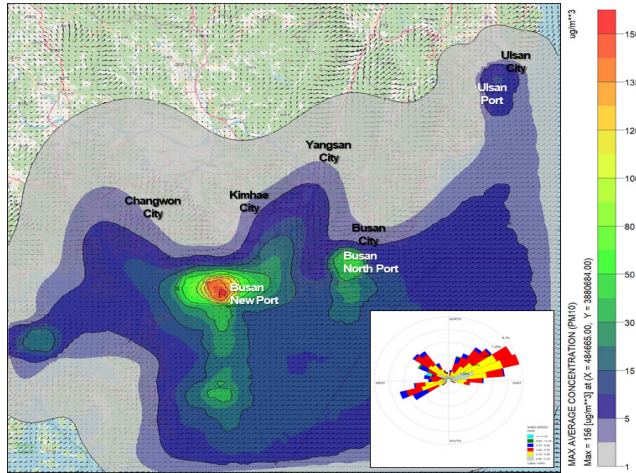
2. 인근 도시 환경 개선 효과 분석

본 연구에서는 우리나라 친환경 항만정책과 관련한 황산화물과 이산화탄소만을 대상으로 하여 감축효과를 분석하였다. 황산화물은 인근 도시민들의 건강과 직접적인 관련이 있으며, 이산화탄소는 기후온난화와 관련 주요 요인이다. 하지만 이 외에 질소산화물, 미세먼지 등도 대기 환경과 관련성이 높은 요인이어서, 이에 대한 분석이 필요하다.

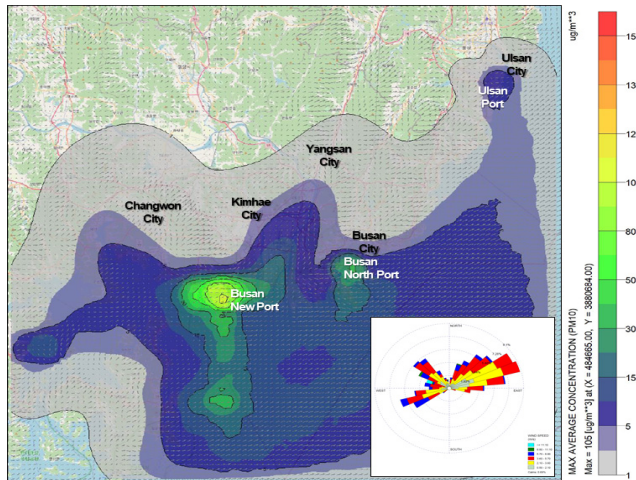
특히 이들 배기가스가 인근 도시에 어떻게 영향을 미치는지 분석이 필요하다. 이를 위해서 대기확산분석이 필요하며, 추후 연구에서 4개의 주요 항만별 인근 도시 영향에 대한 연구가 필요할 것이다. 이연경 외(2020)의 연구⁹²⁾는 대기확산분석으로 AMP 설치가 인근 도시에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였으며, 분석 결과 다음 <그림 5-2>와 같이 2019년 7월 기준, 미세먼지 발생집중도가 $156\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $105\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하는 것으로 분석하였다. 특히 항만에서 발생하는 미세먼지가 AMP 설치 이후 인근 양산시와 창원시 등에 영향이 감소함을 확인하였다.

92) 이연경 외(2020), pp. 202~206.

〈그림 5-2〉 AMP 설치 전후 부산항 대기확산분석 결과(2019년 7월)



〈AMP 적용 전〉



〈AMP 적용 후〉

자료: 이연경 외(2020), p. 205.

참고문헌

국내 문헌

- 강무홍 외(2020), AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구, 한국해양수산개발원.
- 관계부처 합동(2020), 「2050 탄소중립」 추진전략.
- 기상청(2019), 제48차 IPCC 총회 개최 백서.
- 김병옥 외(2016), 선박자동식별시스템 수신율 향상을 위한 개선방안 마련 연구, 해양수산부.
- 박한선 외(2018), 주요항만 대기오염물질 배출 현황 및 배출규제해역(ECA) 지정 타당성 조사 연구, 해양수산부.
- 박한선 외(2023), 국제해운 탈탄소화 추진 전략 연구, 한국해양수산개발원.
- 안용성 외(2019), 선박 대기오염물질 배출저감 기술의 평가·인증체계 구축 및 활용방안 연구, 한국해양수산개발원.
- 양재균 외(2011), 웹기반 선박 통합 모니터링 시스템 개발, 한국정보처리학회 춘계학술대회 논문집, 18(1), pp. 767-770.
- 염정훈(2022), 탈탄소 해운산업을 위해 대한민국이 나아갈 길: 국내 해운산업 현황 및 해운업 경쟁력 제고를 위한 정책 제언, 기후솔루션.
- 이기열 외(2019), 동북아 공동배출규제해역 지정 필요성 및 추진방안 연구, 한국해양수산개발원.
- 이언경 외(2020), 『스마트항만과 스마트도시 연계 발전 방안 연구』, 한국해양수산개발원.

-
- 이현정·이정욱·이항숙(2020), AHP기법을 활용한 친환경 항만정책의 도입 중요도 순위에 대한 연구, *물류학회지*, 97(6), pp. 121-131.
- 조진행(2019), 울산항의 녹색물류체계 구축 방안, *한국항만경제학회지*, 35(4), pp. 187-205.
- 해양수산부(2021), 항만지역 등 대기질 개선 종합계획.

국외 문헌

- Barras, C.B.(2004), *Ship Design and Performance for Masters and Mates*, Elsevier.
- Chang, C. -C., & Wang, C. -M.(2012), Evaluating the effects of green port policy: Case study of Kaohsiung harbor in Taiwan, *Transportation Research Part D*, 17(3), pp. 185-189.
- Chang, Y. -T., Song, Y., & Roh, Y.(2013), Assessing greenhouse gas emissions from port vessel operations at the Port of Incheon, *Transportation Research Part D*, 25, pp. 1-4.
- Chen, Dongsheng et al.(2016), Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China, *Atmospheric Environment*, 145, pp. 10-18.
- Chen, Dongsheng et al.(2018), Contribution of ship emissions to the concentration of PM_{2.5}: A comprehensive study using AIS data and WRF/Chem model in Bohai Rim Region, China, *Science of The Total Environment*, 610-611(1), pp. 1476-1486.
- Corbett, J. J., & Fischbeck, P.(1997), Emissions from Ships, *Science*, 278(5339), 823-824.
- Corbett, J. J., & Koehler, H. W.(2003), Updated emissions from ocean shipping, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108(D20), pp. 9-1-9-13.
- Corbett, J. J., Wang, H., & Winebrake, J. J.(2009), The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping, *Transportation Research Part D*, 14(8), pp. 593-598.
- Eyring, V. et al.(2005), Emissions from international shipping: 1. The last 50 years, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 110(D17), p. D17305.

- Endresen, Oyvind et al.(2007), A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(D11), p. D12301.
- Fan, Qianzhu et al.(2016), Spatial and Seasonal Dynamics of Ship Emissions over the Yangtze River Delta and East China Sea and Their Potential Environmental Influence, *Environmental Science & Technology*, 50(3), pp. 1322-1329.
- Feng, Junlan et al.(2019), The influence of spatiality on shipping emissions, air quality and potential human exposure in the Yangtze River Delta/Shanghai, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, pp. 6167-6183.
- Goldsworthy, L., & Goldsworthy, B.(2015), Modelling of ship engine exhaust emissions in ports and extensive coastal waters based on terrestrial AIS data – An Australian case study, *Environmental Modelling & Software*, 63, pp. 45-60.
- ICCT(2017.5), Prevalence of heavy fuel oil and black carbon in Arctic shipping, 2015 to 2025.
- ICF Consulting(2009), Current Methodologies and Best Practices in Preparing Port Emission Inventories – Final Report, Environmental Protection Agency.
- IMO(2021), Fourth IMO Greenhouse Gas Study.
- Jalkanen et al.(2009), A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(23), pp. 9209-9223.
- Jalkanen et al.(2012), Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(5), pp. 2641-2659.
- Johansson, L., Jalkanen, J.P., & Kukkonen, J.(2017), Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution, *Atmospheric Environment*, 167, pp. 403-415.
- Moreno-Gutierrez, J., & Duran-Grados, V.(2021), Calculating ships' real emissions of pollutants and greenhouse gases: Towards zero uncertainties, *Science of The Total Environment*, 750(1), pp. 1-9.
- Ng, S.K.W. et al.(2013), Policy change driven by an AIS-assisted marine emission

inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta, Atmospheric Environment, 76.

Wang, C., Corbett, J. J., & Firestone, J. (2007), Modeling Energy Use and Emissions from North American Shipping: Application of the Ship Traffic, Energy, and Environment Model, Environmental Science & Technology, 41(9), pp. 3226-3232.

보도자료

인천항만공사(2020.2.3.), IPA, 「인천항 선박 저속운항 프로그램」 시행으로 미세먼지 저감 나서, <https://icpa.or.kr/article/view.do?articleKey=15923&boardKey=217&menuKey=400¤tPageNo=1>(검색일: 2023.8.17.)

인천항만공사(2023.1.25.), IPA, 4차년도 인천항 선박저속운항 프로그램(VSR) 시행, <https://smart.icpa.or.kr/icpa/QuickPath.eps?mi=NT&smi=NT04&mt=press>(검색일: 2023.8.17.)

해양수산부(2019.12.04.), 2030년까지 248개 선석에 육상전원공급설비(AMP) 구축, <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?menuSeq=971&bbsSeq=10&docSeq=28066>(검색일: 2023.4.20.)

해양수산부(2020.08.19.), 부산항 등 5개 항만, 황산화물 배출규제해역으로 지정, <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=35176&searchDeptName=&menuSeq=971&searchEndDate=&searchEtc1=&searchEtc2=&searchEtc3=&searchEtc4=&searchEtc5=¤tPageNo=41&searchSelect=title&searchStartDate=&recordCountPerPage=&bbsSeq=10&searchValue=%EB%B0%B0%EC%B6%9C%EA%B7%9C%EC%A0%9C%ED%95%B4%EC%97%AD>(검색일: 2023.08.17.)

해양수산부(2021.08.02.), 선박 저속운항 여부, 이제 자동으로 확인하세요, <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=42550&searchDeptName=&menuSeq=971&searchEndDate=2023-08-17&searchEtc1=&searchEtc2=&searchEtc3=&searchEtc4=&searchEtc5=¤tPageNo=1&searchSelect=content&searchStartDate=2021-07-30&recordCountPerPage=&bbsSeq=10&searchValue=%EC%A0%80%EC%86%8D%EC%9A%B4%ED%95%AD>(검색일: 2023.08.17.)

해양수산부(2023.02.14.), 대한민국 해운산업, 바다위 무탄소 운송 이끈다, <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=49155&menuSeq=971&bbsSeq=10>(검색일: 2023.4.10.)

인터넷 자료

부산일보(2023.9.9.), 尹, G20에서 '녹색해운항로' 제시…부산~시애틀 첫 도입, <https://www.busan.com/view/busan/view.php?code=2023090916492506794> (검색일: 2023.9.11.)

부산항만공사(2010.10.20.), 부산항 Green port 구축 종합계획, <https://www.busanpa.com/kor/Board.do?mode=view&idx=5035&mCode=MN0793>(검색일: 2023.4.20.)

연합뉴스(2023.2.8.), 부산항만공사, 부산항 2050년 탄소중립 계획 수립, <https://n.news.naver.com/article/001/0013745775?sid=101>(검색일: 2023.4.20.)

에쓰-오일 세븐 홈페이지, 선박유-실린더 오일 & 시스템 오일, <https://www.s-oil7.com/knowledge/expert/view.jsp?seq=102>(검색일: 2023.06.26.)

이투데이(2020.10.27.), 우리기술·씨지오, 국내 최초 초대형 1만 톤 해상풍력 설치선 2척 건조, <https://www.etoday.co.kr/news/view/1955141>(검색일: 2023.8.17.)

인천항만공사(2023.2.20), 인천항 선박저속운항 프로그램(VSR) 운영계획, <https://icpa.or.kr/article/view.do?menuKey=397&boardKey=213&articleKey=23922>(검색일: 2023.8.17.)

한국무역협회, 글로벌 공급망 인사이트, https://www.kita.net/researchTrade/globalSupplyChain/globalSupplyChainDetail.do?JSESSIONID_KITA=1FA913EA8D14B9A852E8845A8017B45E.Hyper?no=2335(검색일: 2023.12.08.)

해양수산부(2019), 선박저속운항 해역 및 대상 선종 등 기준 고시, https://www.mof.go.kr/jfile/readDownloadFile.do?fileType=MOF_ARTICLE&fileTypeSeq=43838&fileNum=2(검색일: 2023.4.10.)

해양수산부(2020.12.30.), 제4차(21~30) 전국 항만기본계획, https://www.mof.go.kr/jfile/readDownloadFile.do?fileType=MOF_ARTICLE&fileTypeSeq=43953&fileNum=1(검색일: 2023.4.20.)

해양수산부(2021.4.23.), 선박 대기오염물질 규제 단계적 강화, <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?menuSeq=851&bbsSeq=22&docSeq=38698> (검색일: 2023.4.10.)

해양수산부(2021.10.20.), 제 1차 항만지역 등 대기질 개선 종합계획(2021~2025), <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=37207&menuSeq=1009&bbsSeq=22>(검색일: 2023.4.20.)

해양수산부 공식 블로그(2021.12.16.), ‘해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵’을 수립 하였습니다!, <https://blog.naver.com/koreamof/222596933252>(검색일: 2023.4.10.)

해양수산부(2021.01.19.), 제1차 항만지역 등 대기질 개선 종합계획(2021~2025), <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=37207&menuSeq=1009&bbsSeq=22>(검색일: 2023.4.20.)

해양수산부(2021.10.20.), 해양수산부는 항만미세먼지를 2025년까지 60% 이상 줄이는 등 적극 노력하겠습니다, <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?menuSeq=972&bbsSeq=11&docSeq=43496>(검색일: 2023.4.20.)

해양수산부-해양경찰청(2020.12.15.), 항만 대기질법 시행 안내서, <https://www.kcg.go.kr/common/nttFileDownload.do?fileKey=08fca93387114624fb50432e63037b8b>(검색일: 2023.4.10.)

환경부(2022.12.28.), 제4차 미세먼지 계절관리제 시행계획, https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=7992(검색일: 2023.8.29.)

환경부(2023.02.07.), 제3차 대기환경개선 종합계획('23~'32), https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=8025(검색일: 2023.8.29.)

환경일보(2022.10.15.), 국내 항만공사, AMP 국비만 ‘꿀꺽’ 미세먼지 저감은 ‘모르쇠’, <http://www.hkbs.co.kr/news/articleView.html?idxno=695761>(검색일: 2023.8.29.)

한국거래소, 배출권시장 정보플랫폼, <https://ets.krx.co.kr/contents/ETS/03/03010000/ETS03010000.jsp>(검색일: 2023.8.29.)

Alphaliner, <https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100>(검색일: 2023.4.13.)

GICOMS, 시스템구성, <https://www.gicoms.go.kr/about/about.do?page=16>(검색일: 2023.4.13.)

법령 자료

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(법률 제19430호, 2023. 6. 9.)
 선박에서의 오염방지에 관한 규칙(해양수산부령 제612호, 2023. 7. 6.)
 선박의 에너지효율검사 등에 관한 기준(해양수산부고시 제2020-53호, 2020. 4. 23.)
 선박저속운행 해역 및 대상 선종 등 기준 고시(해양수산부고시 제2021-200호, 2021. 11. 25.)
 항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법(법률 제19141호, 2022. 12. 27.)
 황산화물 배출규제해역 지정 고시(해양수산부고시 제2019-202호, 2019. 12. 26.)

인터뷰 자료

A 선사 ○○○ 매니저(2023.4.6., 대한민국 부산).
 K 기업 ○○○ 대표이사(2023.4.3., 대한민국 부산).

부 록

선행연구 현황

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
1	• 우리나라 선박 배출 대기오염물질의 체계적 관리 방안 연구 • 이호준 외(2016) • 선박 배기가스를 효율적으로 관리하기 위한 기술적, 제도적 관리 방안 수립	• 문헌조사 • 전문가 자문 • 해외 인터뷰 • 설문조사 (컨조인트 분석)	• 선박 배기가스의 글로벌 관리 동향 • 우리나라 선박 배기가스 관리 현황 및 개선 방향 • 선박 배기가스 감소에 따른 경제적 효과 분석 • 선박 배기가스 배출량 산정방법론 조사 (Tier 1/2/3) - 실제 배출량 분석 사례 없음
2	• Emissions from Ships • J.J. Corbett, P. Fischbeck(1997) • 주요 대기오염원인 선박들의 배출량 분석 및 정책 이슈 도출	• 문헌조사 • Top-down 분석	• 배기가스 분석을 위한 기초자료 조사 - 해양 배기가스 테스트 자료 조사(SOx, NOx) - 글로벌 선박유 사용량 조사 - 선박별 엔진 특징 조사 • 글로벌 배기가스 배출량 분석(Top-Down) $P_F = \sum_{i=1}^n E_{F,i} \cdot (F \cdot A_i)$ ⇒ Top-Down 분석으로 인해 부정확
3	• Updated Emissions from Ocean Shipping • J.J. Corbett, H.W. Koehler(2003) • 선박 연료소모량 계산을	• 문헌조사 • Bottom-up 분석(선박그룹별) • 연료사용통계	• 엔진출력(P), 엔진부하계수(F), 평균엔진가동시간(t), 연료소모량(SFOC)을 고려한 선박 연료소모량 추정 및 배출계수(E)를 적용한 글로벌 배기가스 배출량 분석(Bottom-Up)

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
	통한 배기가스 배출량 분석 방법론(Bottom-Up)을 적용하여 전 세계 배기가스 배출량 분석	비교분석	$Emissions = \sum_{i=1}^n P_{MW} \cdot E_{G/MW} \cdot t_{hrs/yr} \cdot E_{2/kWh} \cdot \frac{1}{1000}$ - 선박별 데이터가 아닌 선박 그룹별 데이터 적용
4	• Estimation, Validation, and Forecasts of Regional Commercial Marine Vessel Inventories • J.J. Corbet(2007) • 운항하는 선박이 대기질과 인체에 어떤 영향을 미치는지 평가하기 위해 연료소모량 및 배기가스 배출량을 공간적으로 보여줄 수 있는 방법론 개발 및 결과 분석	• 문헌조사 • Bottom-up 분석(선박 입출항 기반) • GIS를 통한 주요 항로 분석 • STEEM 모형 개발 • Top-down 분석 결과와 비교 · 검증	• 선박 입출항 기반의 STEEM(Ship Traffic, Energy and Environment Model) 모형 개발 - 선박 속도, 엔진출력 등의 정보를 기반으로 연료소모량 및 배기가스 배출량 추정 모형 개발 $e_n = \sum_{i=1}^{t_n} f(d_n, s_i, m_i, a_i, l_m, l_a, e_p, \dots)$ $f_n = \sum_{i=1}^{t_n} f(d_n, s_i, m_i, a_i, l_m, l_a, sfoc_f, \dots)$ • 2002년 연료소모량 및 배기가스 배출량 비교 분석(Top-down 결과와 비교를 통한 검증) - 2009년 논문 Cubic 모형의 선행 연구
5	• The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping • J.J. Corbett et al.(2009) • 선박의 속도 감소가 미국 항만을 출입하는 선박의 CO₂ 배출에 어떤 영향을 미치는지 평가	• 문헌조사 • Bottom-up 분석(항차별)	• 속도(S1k, S0k), 이동 거리(d), 엔진출력(MF, AF)을 고려한 선박 연료소모량 추정 방법론 개발(Bottom-Up) $F_{ijk} = [MF_k (\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + AF_k] \frac{D_{ij}}{24S_{1k}}$ • 감속운항에 따른 CO₂ 배출량 변화 및 효과 분석 - 단순 입출항 정보, STEEM을 통한 이동 거리 추정 등에 따른 정확도 감소
6	• 항만물류시설, 선박, 컨테이너 수송차량 등에 대한 온실가스 감축방안 연구 • 양진우 외(2010) • 부산항 및 관련 부문의 온실가스 배출량을 산정하고 감축방안 연구	• 문헌조사 • 회귀분석	• 부산항 시설 현황 및 국내외 주요 정책동향 고찰 • 온실가스 배출량 산정방법 설정 및 산정결과 분석 - Port-MIS를 통해 선박의 입출항 현황 파악 후 평균운항거리를 적용하여 운항시 배출량 추정 - 정박시 배출량은 국립환경과학원(2007)의 선박 평균 정박시간(0.79일/회)와 Port-MIS의 '체류시간-운항시간'을 적용하여 추정 • 회귀분석을 통한 온실가스 배출량 전망

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
7	• Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide • J.P. Jalkanen et al.(2012) • 선박 배출 평가 모형인 STEAM2를 기반으로 발트해의 PM 및 CO 배출량 분석	• Bottom-up 분석(AIS 기반STEAM2)	• 선박 속도, 엔진 부하, 연료 황 함량, 다중 엔진 설정 등을 기반으로 STEAM2 모형을 사용하여 발트해의 PM 및 CO 배출량 분석 - 특히 연간 평균 배출량 값을 해당되는 지역의 EMEP 인벤토리 값과 비교
8	• Evaluating the effects of green port policy: Case study of Kaohsiung harbor in Taiwan • C. Chang, C. Wang(2012) • 선박 감속운항, AMP 설치 등 친환경 항만 정책이 카오슝항만에 미치는 영향 분석	• Bottom-up 분석(항차별) • 기존 배출량 통계와 비교	• Corbett et al.(2009) 연구의 추정식을 기반으로 선박 항차별 배출량 추정 모형 설계 • 배출규제해역 내 LSFO 전환에 따른 비용 분석 • 선박 감속운항 및 AMP 설치에 따른 배기가스 배출 저감 분석
9	• Assessing greenhouse gas emissions from port vessel operations at the Port of Incheon • 장영태 외(2013) • 인천항의 선박 활동별 온실가스(CO₂) 배출량 측정	• 문헌조사 • Bottom-up 분석(거점통과별) • 기존 연구결과 비교분석	• Corbett et al.(2009)에서 사용한 식을 적용해 인천항 내의 선종별/활동별* 연료소모량 추정(Bottom-Up) * Anchorage, Maneuvering to Lock Gate, Passing Lock Gate, Approaching to Dock, Docking • 연료소모량에 배출계수 적용하여 CO₂ 배출량 추정 - 인천 내항의 주요 거점 통과 정보로 활동별 연료소모량 추정
10	• Estimation of air pollution from the OGVs and its dispersion in a coastal area • R. Pokhrel et al.(2015) • 선박으로부터 기인한 인천	• 문헌조사 • 전산유체역학 분석	• 현장 데이터, AIS 데이터, 활동 데이터 등을 활용하여 선박의 대기오염 추정 • 대기확산 분석을 위한 라그랑지안 기반 전산유체역학 분석을 통해 공기 중 오염물질 확산 분석 실시

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
	지역의 대기오염 추정을 위한 PAQman 시스템 개발		
11	- 선박 배기가스 배출량 및 환경비용 산출에 관한 연구 - 부산항을 중심으로 - 이민우, 이향숙(2016) - 부산항 입출항 선박 활동 분석을 통해 선박 정박 시 보조엔진으로부터 발생되는 배기가스 배출량 및 연간 환경비용 추정	- 문헌조사 - 선박 입출항 분석 - 배기가스별 환경비용 원단위 적용	- 선종별 부산항 입항 현황 조사 - 보조엔진 평균 출력(P), 정박시간(T), 보조엔진 부하율(LF), 배기가스별 보조엔진 Emission Factor(EF)를 곱해 선종별 배출량 추정 $E = P_j \times \sum_j T_j \times LF_j \times EF_i$ - 환경비용 원단위 적용을 통한 배기가스별 환경비용 산출
12	- Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China D. Chen et al.(2016) - AIS 데이터를 기반으로 배기가스(SO₂, NOx, PM 등) 추정	- 문헌조사 - Bottom-up 분석(AIS 기반) - 기존 연구결과 비교분석	8,690척의 AIS 데이터(2014년)를 기반으로 중국 텐진항 주변의 배기가스 추정(Bottom-Up) - 엔진출력(P), 엔진유형별 부하 계수(LF) 및 운항시간(T), 배출 계수(EF) 적용 $E_{ijk,l} = P_j \times LF_{j,l} \times T_{j,k,l} \times EF_{i,j,k} / 10^6$ - AIS 수신 지점별 계산으로 인한 누락 지점 발생
13	- 선박에 의한 대기오염물질 배출량 산정체계 개선 방안 - 안용성 외(2017) - 기존 환경부 및 해양수산부의 배출량 산정체계를 살펴보고 실제 적용 가능한 해양수산부 차원의 선박 대기오염물질 배출량 산정체계 마련을 위한 개선사항 및 대안 도출	- 문헌조사 - 인터뷰 및 자문회의 개최	- 국내 선박 대기오염물질 배출량 산정체계 현황(환경부, 해양수산부) - 기존 체계의 한계점 분석 및 개선 대안 도출 - 선박 대기오염물질 배출량 산정체계 개선방안 도출 - 배출원 분류체계 구축, 선박 연료유 공급 및 사용 정보체계 구축, AIS 활용, 배출계수 개발 및 고도화 등 - 산정체계 개선을 위한 법제도 정비방안 제안
14	- 지자체 온실가스 배출량 산정지침 - 신동석 외(2017) - 지자체별 온실가스 배출량 인벤토리 구축을 위한 산정방법 개정	- 문헌조사 - 배출계수 적용	- 에너지 분야, 산업공정 분야, AFOLU 분야, 폐기물 분야, 간접배출 분야 등 온실가스 배출량 산정 방법 제시 - 해당 분야별 배출량 산정에 필요한 활동자료 및 배출계수 확보 방안 제시 - 수상의 경우 연료 종류 i의 에너지 양(TJ)에 2006 IPCC의

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
			배출계수(CO₂는 국가고유 배출계수 사용)를 적용하여 계산 $Emissions = \sum_i (Fuel_i \times EF_i)$
15	• Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution • L. Johansson et al.(2017) • 기존 배기가스 배출량 추정 모형의 한계점을 개선한 모형 개발을 통해 글로벌 배기가스 배출 관련 고해상도 공간 분포 제시	• 문헌조사 • Bottom-up 분석(AIS 기반) • 기존 연구결과 비교분석	• 데이터 동화 기술을 기반으로 누락된 선박 정보 보완 • 주요 선박 노선을 기반으로 경로 생성 모형을 개발하여 분포가 넓은 AIS 데이터의 한계 보완 • 기존 연구결과(IEA, IMO 등)에서 추정된 연료사용량과의 비교
16	• AIS를 활용한 인천항 선박의 온실가스 배출량 추정 • S. Khan et al.(2018) • AIS 데이터를 기반으로 인천항에서 사용된 연료량 및 CO₂ 배출량 추정	• 문헌조사 • Bottom-up 분석(AIS 기반)	• Corbett et al.(2009)의 연구에서 사용된 3승모형을 기반으로 연료사용량 추정 • 추정된 연료사용량에 CO₂ 배출계수인 3.17을 곱해 인천항의 CO₂ 배출량 추정 - 총 330척 선박의 연료사용량 및 CO₂ 배출량 추정
17	• 주요 항만 대기오염물질 배출 현황 및 배출규제해역(ECA) 지정 타당성 조사 연구 • 박한선 외(2018) • 항만 지역 대기 관리를 위해 선박에서 배출되는 오염물질 배출량 산정 및 대기질 개선에 따른 편익분석 방법론 제시	• Bottom-up 분석(AIS 기반) • 실제 사용량과 비교 · 검증(연간)	• 선박 및 항만 활동에 의한 대기오염물질 배출량 산정 - AIS 기반 선박 활동분석을 통한 해상부문 대기오염물질 배출량 산정 - 화물취급장비, 항만시설, 화물자동차 등을 포함하는 항만부문 대기오염물질 배출량 산정 • 배출규제해역 지정에 따른 경제적 타당성 분석
18	• Contribution of ship emissions to the concentration of PM2.5: A comprehensive study using AIS data and WRF/Chem model in Bohai Rim Region,	• 문헌조사 • Bottom-up 분석(AIS 기반) • WRF/Chem 분석⁹³⁾	• 2016년 연구에서 중국 보하이림 지역으로 범위를 확장 • WRF/Chem 모델을 적용함으로써 선박으로 인해 배출된 PM2.5가 항만도시에 어떻게 영향을 미치는지를 분석

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
	China • D. Chen et al.(2018) • AIS 기반 선박 배출 PM2.5 항만도시 영향 분석		
19	• Impact on air quality of cruise ship emissions in Naples • F. Murena et al.(2018) • 크루즈선이 배출하는 대기 오염물질의 양과 나폴리 대기오염에 미치는 영향을 평가하는 Bottom-up 모형 개발	• 행위기반모형 분석 • CALPUFF 분석	• 2016년 크루즈선 입항 활동분석을 통한 NOx 및 SOx 배기가스 배출량 분석 • CALPUFF 분석을 통한 나폴리 인근 대기확산 영향 분석 실시 - CALPUFF 분석 결과와 관측소 · 실측테스트 결과 비교
20	• Model for Estimation of Fuel Consumption of Cruise Ships • M. Simonsen et al.(2018) • 노르웨이 해역을 항해하는 크루즈선의 에너지 사용 및 연료사용량 추정 모형 제시	• 문헌조사 • Bottom-up 분석(AIS 기반) • 실제 사용량과 비교 · 검증 (월)	• AIS 데이터를 기반으로 노르웨이 해역을 항행하는 크루즈선의 연료사용량 추정 모형 개발 • 소형 및 중대형 크루즈 선박 3척의 데이터를 이용하여 결과 검증
21	• 동북아 공동배출규제해역 지정 필요성 및 추진방안 연구 • 이기열 외(2019) • 동북아 해역에서의 선박배출량을 규제하기 위한 공동배출규제해역 지정 필요성 및 추진방안 제시	• 문헌조사 • 전문가 인터뷰 • AIS를 통한 선박 활동량 분석 • 해외 전문가 자문	• ECA 지정 절차 분석 • 한중일 국가별 선박 배출량 감축 정책 검토 • 동북아 공동 ECA 지정 필요성 및 세부 추진방안 제시 - AIS를 통한 동북아 지역 선박 활동량 분석 • 국가별 검토사항 및 공동연구 등 IMO 승인을 통한 ECA 지정 로드맵 제시
22	• 선박 대기오염물질 배출저감 기술의 평가 · 인증체계 구축 및 활용방안 연구 • 안용성 외(2019) • 선박 대기오염물질 배출저감 기술에 대한 국가	• FGI • 설문조사 • 실무자-이해 관계자 확대 세미나	• 선박 대기오염물질 배출 저감기술의 개념 및 유형 분류 • 국내외 관련 기술 동향 분석 및 시장 전망 • 관련 기술의 국내 도입 여건 분석 • 국내 선박 대기오염물질 배출 저감기술 평가 · 인증체계 구축방안 수립

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
	차원의 평가 · 인증체계 도입 · 운용의 타당성을 검토하고 이를 구축 · 활용하기 위한 정책방안 발굴		
23	• 국내 항만의 대기오염물질 관리정책 및 제도 개선방안 • 안용성 외(2019) • 국내 항만의 대기오염물질 오염방지 · 배출 저감을 위한 기존 정책 및 제도 문제점을 도출하고 이를 극복하기 위한 정책 대안 개발 및 상대적 중요도 분석	• 문헌조사 • 현장조사 • FGI • AHP 분석 • 전문가 세미나 및 확대 자문회의	• 국내 기존 정책 및 제도, 운영상의 문제점 도출 - 감독 · 관리의 법적 근거 미비, 예산 및 자원 부족, 정책 기초자료 미비(배출 실태, 영향 등), 검증된 저감 조치 도입 부진 등 • 문제점 개선 · 보완을 위한 정책적 대안 도출 및 상대적 중요도 분석
24	• A Study on the Verification Method of Ships's Fuel Oil Consumption by using AIS • 양진영(2019) • IMO에서 요구하는 5,000톤 이상 선박의 연료사용량 데이터의 검증을 위한 방법 개발	• 문헌조사 • Bottom-up 분석(AIS 기반) • 실제 사용량과 비교 · 검증(연간)	• IMO에서는 2016년 개정된 MARPOL에 의거, 5,000톤 이상의 선박에 대한 연료사용량을 검증하여 제출 요구 • 이를 위해 AIS 데이터를 기반으로 선박의 연료사용량을 검증하기 위한 방법을 개발했으며, 국내 화물선 5척의 데이터와 비교하여 이를 검증
25	• 항만 대기환경 관리 표준 및 평가모형 연구 • 안용성 외(2020) • 국내 항만의 현실에 부합하는 항만 대기환경 분야 관리활동의 표준(안) 및 이에 대한 최적 평가모형 개발	• 문헌조사 • FGI • 퍼지 다기준의사결정법	• 국내외 관련 법령 및 정책 분석 • 국내 항만 대기환경 관리 표준안 분석 • 항만 대기환경 관리 평가모형 개발 및 평가 - Fuzzy AHP 기반 평가모형 개발 및 상대적 중요도 평가 • 항만 대기환경 관리 평가모형 도입 및 활용 방안, 법제도 개선 방안 수립
26	• Development of an integrated modelling-measurement system for near-real-time estimates of harbour activity impact to	• Bottom-up 분석(AIS 기반) • ADMS-5 기반 대기확산분석 • 시스템 개발	• AIS 및 운영 데이터 분석을 통한 배기가스 배출량 분석 - AIS 기반 선박 배기가스 배출량 분석 - 운영 데이터 분석을 통한 트럭 및 크레인 배기가스 배출량 분석 • ADMS-5 기반 대기확산분석을 통한 Bari항 대기영향 평가

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
	- atmospheric pollution in coastal cities E. Merico et al.(2019) - 로컬스케일분산모형 기반 저비용 온라인 센서를 사용하는 대기오염 평가 시스템 개발 및 Bari항 대기영향 평가		
27	- The influence of spatiality on shipping emissions, air quality and potential human exposure in the Yangtze River Delta/Shanghai, China J. Feng et al.(2019) - 선박 배기가스로 인한 양쯔강 삼각주 및 상하이 지역 대기영향 분석	- Bottom-up 분석(AIS 기반) - WRF-CMAQ Q 기반 대기확산분석 - 주요 지역 대기측정값과 비교(53개)	- 양쯔강 삼각주 인근 배기가스 배출량 분석 - AIS 분석을 통한 선박 배기가스 배출량 분석 - 중국 배기가스 배출량 데이터베이스 분석을 통한 비선박 배기가스 배출량 분석 - WRF-CMAQ 모형 분석을 통한 대기확산분석
28	- Estimating fuel consumption in maritime transport E. Isikli et al.(2020) - 속도, 엔진 RPM, 흘수, 거리 등 요인들이 연료소모량에 미치는 영향 분석	- 문헌조사 - 반응표면방법론(RSM, Response Surface Methodology)	선장 190m, 선폭 35m 규모 벌크선의 선장으로부터 정오마다 수신한 Noon Report의 데이터를 기반으로 속도, 엔진 RPM, 흘수, 거리 등의 외부 요인들이 연료소모량에 어떤 영향을 미치는지 분석
29	- Shipping emissions in the Iberian Peninsula and the impacts on air quality - R.A.O. Nunes et al.(2020) - EMEP/MSC-W 모형 기반 이베리아 반도 주변 PM2.5 및 PM10 등 주요 오염원 농도 분석	EMEP/MSC-W 대기화학수송 모형 분석	- 오픈소스인 EMEP/MSC-W 대기화학수송모형을 기반으로 선박으로 인한 NO₂, SO₂, PM2.5, PM10, 황산염, O₃의 농도 분석 - 항만 인근 O₃, 황산염, PM 농도가 높은 것으로 분석되었으며, 연안으로 떨어진 지역에서도 WHO의 PM2.5 대기질 기준을 초과하는 것 또한 선박으로 인한 것을 제언
30	Ship emission study based on Automatic	Bottom-up 분석(AIS)	기존 연료소모량 추정 방법인 STEAM과 EMEP 방법을 통합하여 새로운 AIS

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
	Identification System (AIS) data • X.C. Suria et al.(2020) • AIS 데이터를 기반으로 지중해를 운항하는 일반적인 선박들이 배출하는 배기가스 계산하기 위한 SIMROUTE 소프트웨어 개발	기반)	기반 추정 방법 개발 • 개발된 모형을 기반으로 개발된 SIMROUTE를 이용하여 배기가스 배출량 분석 - Matlab 기반 코드 및 분석 결과 공유
31	• Voyage-based statistical fuel consumption models of ocean-going container ships in Korea • L.T. Le et al.(2020) • 연료소모량 계산 시 필요한 자료 확보의 어려움을 해결하기 위해 회귀분석을 통한 계수 추정	• 문헌조사 • 회귀분석 • k-Fold Cross-Validation을 통한 검증	• 자료* 확보의 어려움을 해결하기 위해 기존 Corbett et al.(2009)의 식을 변형한 연료소모량 추정 모델 개발 * 선박별 이동 거리, 운항 속도, 시간, 엔진출력 등 $F_{ijk} = \alpha T_{ijk} S_{1k}^3 + \beta T_{ijk} + \epsilon$ - 국내 선사 데이터(2012~2016년, 38,687항차)로 회귀분석을 통해 연료소모량 계수(α , β) 추정 및 검증
32	• AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구 • 강무홍 외(2020) • 기존 배기가스 배출량 분석 모형의 한계를 보완한 Bottom-Up 방식의 모형 개발 및 전 세계 배출량 분석	• 문헌조사 • 전문가 인터뷰 • Bottom-up 분석(AIS 기반) • 회귀분석 • 실제 사용량과 비교 · 검증 (연간)	• AIS 기반 선박별 실제 동선 분석을 통한 배기가스 배출량 분석 모형 개발 - 선박 이동 구간(선)을 고려하여 계산함으로써 누락 배출량 최소화 및 구간 내 배출량 배분 가능 • 항만별/연도별/월별/시간대별 배출량 분석 및 회귀분석을 통한 주요 저감 요인* 분석 * 선박크기 변화, 속도, 엔진타입 등 - 연간 사용량과의 비교, 엔진부하 상수 사용 등 한계점
33	• Fourth IMO Greenhouse Gas Study • IMO(2021) • 5년마다 선박 기인 온실가스 배출량을 추정하여 이를 저감하기 위한 기반 자료 제공	• IPCC 가이드 기반 배출량 분석 • Top-down, Bottom-up 방식 분석	• 연안, 국제 선박 운송으로 구분하여 온실가스 배출량 추정 및 전망 - 2012년부터 2018까지 탄소 집약도 분석 - 2018년부터 2050까지 탄소 배출량 전망

No.	연구명/저자/연구 목적	연구방법	주요 연구내용
34	- 선박 기술진보를 고려한 탄소배출량 추정 연구 - 최건우 외(2021) - 컨테이너 해운산업에서 선박 연료 소모에 대한 기술진보 추이를 계량적으로 분석하여 IMO가 제시한 2050년까지 탄소배출 저감 목표 달성여부를 검증	- 문헌조사 - 회귀분석 - 규제선형모델 (라쏘, 릿지, 엘라스 틱넷) - 분위회귀모형 - 시뮬레이션	- 규제선형모델을 통한 컨테이너선 기술진보계수 개발 - 기술 진보, 신조 선박 발주량 등을 고려한 시나리오별 2050년까지의 탄소 배출량 전망 - IMO에서 제시한 2050 탄소배출 저감 목표의 달성 가능성 검토
35	- 항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안 연구 - 안승현 외(2022) - 항만 분야에서 발생 가능한 장래 탄소배출량을 전망하고, 전망 결과를 바탕으로 저감목표를 설정. 또한 국내 항만의 탄소중립 관리체계의 문제점을 분석하고 대안을 제시	- 문헌조사 - 기초자료 수집 - Bottom-up 분석(실측, AIS 기반)	- 항만 하역사들의 실제 연료사용량 수집 및 원단위 도출을 통한 항만 탄소배출량 추정 - AIS 기반 항만별 운항 선박 연료사용량 및 탄소배출량 추정 - 항만분야 탄소배출 저감목표 설정 및 탄소중립 관리체계 마련

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 2023

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

| 2022년

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

수시연구보고서 발간목록

2023년

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

2022년

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

일반연구보고서 발간목록

Ⅰ 2023년

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

| 2022년

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

일반연구 2023-02

**AIS 기반 글로벌 선박 배기가스
배출량 분석 연구(II)**
- 우리나라 주요 항만을 중심으로

인 쇄 2023년 12월 29일

발 행 2023년 12월 31일

발 행 인 김 종 덕

발 행 처 한국해양수산개발원

주 소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연 락 처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등 록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 더크리P&B (주) (02-737-5377)

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

AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구(II)

- 우리나라 주요 항만을 중심으로

A Study on the AIS-based Analysis of Global Vessel Emissions(II)
: Focused on Major Ports in South Korea