

AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구

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

강무홍 • 최상희 • 이연경 • 이기열

2020. 12.



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	강무홍, 최상희, 이연경, 이기열
연구진	연구책임자 강무홍 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원 공동연구원 최상희 한국해양수산개발원 항만연구본부 선임연구원 공동연구원 이연경 한국해양수산개발원 항만연구본부 연구위원 공동연구원 이기열 한국해양수산개발원 항만연구본부 부연구위원
연구기간	2020. 4. 6. ~ 2020. 10. 5.
보고서 집필 내역	
연구책임자	강무홍 연구총괄, 제1장, 제2장, 제3장, 제4장, 제5장
내부연구진	최상희 제1장 제1절 제2절 이연경 제4장 제1절 일부, 제5장 제2절 이기열 제2장 제1절
산·학·연·정 연구자문위원	문상영 한경대학교 법경영학부 교수 이건우 한양대학교 교통·물류공학과 교수 정주철 부산대학교 도시공학과 교수 김영권 해양수산부 해사산업기술과 주무관

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

최근 지구온난화에 따른 기후변화로 인해 세계 각국은 폭우, 태풍, 폭염, 산불, 해빙 등 유례없는 자연재해를 겪고 있다. 선진국들은 지구 온난화의 주범인 온실가스 배출 저감을 목표로 기존 화석연료 사용을 줄이기 위한 다양한 친환경 정책들을 추진하고 있다. 국제해사기구인 IMO(International Maritime Organization)에서도 이러한 대기오염 문제를 인지하고 방지하기 위해 선박이 배출하고 있는 오염원과 관련된 규제들을 시행하고 있다. 대표적인 규제 중 하나로 배출규제해역(ECA: Emission Control Area) 지정이 있으며, ECA로 지정된 해역 내에서의 선박 배기가스 배출량을 규제하고 있다.

우리나라에서도 ECA 지정을 준비하고 있으며, 이를 위한 관련 연구를 추진하고 있다. 이외에도 선박이 배출하는 오염원을 줄이기 위해 정박 시 필요한 동력을 전기로 공급하는 AMP(Alternative Maritime Power) 설치, 항만 인근 감속운항(Slow Steaming)과 같은 방안들을 추진 중에 있으나, 이러한 정책들이 추진될 경우 실효성이 있는지 분석된 자료가 없어 정책 추진의 동력이 저하되고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 선박의 동선을 파악할 수 있는 AIS(Automated Identification System) 데이터를 기반으로 연료소모량을 추정하고, 이를 통해 배기가스 배출량을 추정하는 기본 모형을 개발

하였다. 이를 위해 기존 연구된 문헌들을 심층 분석했으며, 실제 선사가 사용한 연료량 정보와 비교해 검증함으로써 모형에 대한 신뢰성을 높이려고 노력했다. 다음으로 개발된 모형을 통해 전 세계 주요 항만인 부산항, 싱가포르항, 로테르담항, LA/LB항, 상하이항 등 5개 항만 내에서 사용되고 있는 연료량과 이로 인해 배출되고 있는 주요 오염원들에 대해 비교·분석했다. 마지막으로 부산항의 사례를 들어 ECA 지정, AMP 설치, 감속운항 등 우리나라가 추진하고 있는 선박 배기가스 배출 저감 정책들이 시행되었을 때 기존과 어느 정도 차이가 있는지 분석했으며, 이를 통해 동 정책들의 도입 효과를 비롯한 정책적 추진 필요성을 마련함으로써 학문적, 실용적 두 가지 연구 목적을 모두 달성한 것으로 판단하였다.

본 『AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구』는 우리 원의 강무홍 전문연구원이 연구책임을 맡아 이언경 스마트항만연구실장, 이기열 부연구위원이 함께 집필하였다. 이에 먼저 연구진들의 노고에 깊은 감사를 표한다. 아울러 동 연구의 자문 및 외부평가위원으로 참여해 주신 한양대학교 이건우 교수님과 환경대학교 문상영 교수님, 부산대학교 정주철 교수님, 해양수산부 김영권 주무관님께도 깊은 감사를 드린다. 또한, 본 보고서의 심사와 감리를 맡아 적절한 지적과 조언으로 완성도를 높여 주신 우리 원의 최상희 항만연구본부장과 출판되기까지 도움주신 모든 분들께 깊은 사의를 표하고 싶다.

아울러 본 연구의 상위 사업인 미래물류기술 고도화 연구사업을 비롯
한 다양한 물류 관련 연구 및 활동이 향후 우리나라와 기업의 물류산
업 발전에 기여하고, 세계 속으로 나아갈 수 있는 명실상부한 기반이
되기를 기대한다.

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

2020년 12월
한국해양수산개발원
원장 장 영 태

목차

요 약	i
-----	---

Executive Summary	ix
-------------------	----

제 1장 서론	1
---------	---

제1절 연구배경 및 필요성	1
제2절 연구의 목적 및 범위	5
제3절 연구의 내용 및 방법	6
제4절 선행연구 검토 및 차별성	8
1. 선박 입출항 정보 기반 분석 연구	8
2. AIS 기반 분석 연구	10
3. 종합	12

제 2장 AIS 기반 선박 연료소모량 추정 모형 개발	19
-------------------------------	----

제1절 AIS 데이터 개요 및 구조 분석	19
1. AIS 데이터 개요	19
2. AIS 데이터 구조 및 한계점 분석	20
3. AIS 데이터 전처리	25
제2절 AIS 기반 선박 연료소모량 추정 모형 개발	28
1. 현황 및 문제점 분석	29
2. 모형 개발 및 검증	32
3. 연료소모량 추정	37

제 3장 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석	57
-------------------------	----

제1절 배기가스별 배출계수 분석	58
제2절 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 결과	60

1. 부산항	60
2. 싱가포르항	61
3. 로테르담항	62
4. LA/LB항	62
5. 상하이항	63
6. 종합	64

제 4장 선박 배기가스 주요 저감 요인 및 주요 정책별 항만 영향 분석 — 67

제1절 선박 배기가스 주요 저감 요인 분석	67
제2절 주요 정책별 항만 영향 분석	73
1. 선박 감속운항 효과 분석	73
2. AMP 설치 효과	77
3. 배출규제해역 지정 효과 분석	80

제 5장 결론 및 정책제언 — 83

제1절 결론	83
1. 연구 결과 및 시사점	83
2. 연구의 한계점 및 향후 연구방향	89
제2절 정책제언	92
1. 항만 내 배기가스 배출 모니터링 시스템 및 조직 운영	92
2. 항만 내 감속운항 촉진을 위한 법제도 개선	95
3. 항만 내 배기가스 배출 저감을 위한 기술개발 추진	97

참고문헌 — 99

부 록 — 105

표 목차

〈표 1-1〉 비도로이동오염원 대기오염 물질 배출 비중	4
〈표 1-2〉 선행연구 비교(분석방법, 대상, 지역, 데이터 등)	13
〈표 1-3〉 선행연구 검토 및 차별성	14
〈표 2-1〉 선박용 AIS의 종류	20
〈표 2-2〉 본 연구에서 사용한 AIS 정적정보	22
〈표 2-3〉 본 연구에서 사용한 AIS 동적정보	23
〈표 2-4〉 컨테이너 전용선 크기별 척수	23
〈표 2-5〉 AIS 데이터 특징(IHS Markit 2019년도 기준)	24
〈표 2-6〉 선박 운항상태(MoveStatus) 전처리 방안 및 결과	26
〈표 2-7〉 Auxiliary Engine Load Factor Assumptions	34
〈표 2-8〉 실제 사용량과 연료소모량 추정 결과 비교	37
〈표 2-9〉 부산항 지역별 연료소모량 추정 결과	39
〈표 2-10〉 싱가포르항 지역별 연료소모량 추정 결과	41
〈표 2-11〉 로테르담항 지역별 연료소모량 추정 결과	43
〈표 2-12〉 LA/LB항 지역별 연료소모량 추정 결과	45
〈표 2-13〉 상하이항 지역별 연료소모량 추정 결과	47
〈표 2-14〉 주요 항만별 연료소모량 추정 결과 종합(2018년)	50
〈표 2-15〉 주요 항만별 연료소모량 추정 결과 종합(2019년)	51
〈표 2-16〉 월별 연료소모량 추정 결과	52
〈표 2-17〉 시간대별 연료소모량 추정 결과	54
〈표 3-1〉 배기가스 배출계수	59
〈표 3-2〉 부산항 선박 배기가스 배출량 추정 결과	61
〈표 3-3〉 싱가포르항 선박 배기가스 배출량 추정 결과	61
〈표 3-4〉 로테르담항 선박 배기가스 배출량 추정 결과	62
〈표 3-5〉 LA/LB항 선박 배기가스 배출량 추정 결과	63
〈표 3-6〉 상하이항 선박 배기가스 배출량 추정 결과	63
〈표 3-7〉 주요 항만별 선박 배기가스 배출량 추정 결과 종합(2018년)	64
〈표 3-8〉 주요 항만별 선박 배기가스 배출량 추정 결과 종합(2019년)	65
〈표 4-1〉 주요 항만별 연료소모량 대비 배기가스 배출 비중 분석(2018년)	68
〈표 4-2〉 주요 항만별 연료소모량 대비 배기가스 배출 비중 분석(2019년)	68

〈표 4-3〉 주요 항만별 입출항 통계	69
〈표 4-4〉 연료소모량 회귀분석 결과	71
〈표 4-5〉 NO _x 회귀분석 결과	72
〈표 4-6〉 선박 가·감속운항 효과 추정(전 세계)	74
〈표 4-7〉 선박 가·감속운항 효과 추정(부산항)	76
〈표 4-8〉 AMP 설치 전후 연료소모량 및 배기가스 배출량 추정(2019년 부산항 기준) ..	78
〈표 4-9〉 ECA 지정 전후 연료소모량 및 배기가스 배출량 추정(2019년 부산항 BFO 기준) ..	81
〈표 5-1〉 부산항 및 전 세계 연료소모량 추정 결과(2019년)	85
〈표 5-2〉 5개 항만별 선박 배기가스 배출량 추정 결과	86
〈표 5-3〉 연료소모량 및 NO _x 회귀분석 결과	87
〈표 5-4〉 AMP 및 배출규제해역 지정 후 배기가스 예상 감축량(부산항 2019년 기준) ..	89
〈표 5-5〉 대상선종 및 권고속도	95

그림 목차

〈그림 1-1〉 전 세계 선종별 CO ₂ 배출량(2012년 기준)	2
〈그림 1-2〉 The Dirty Ten	3
〈그림 1-3〉 연구흐름도	7
〈그림 1-4〉 선행연구 비교(분석대상 배기가스)	12
〈그림 2-1〉 전 세계 컨테이너 선박 규모	21
〈그림 2-2〉 연료소모량 분석 결과 예	27
〈그림 2-3〉 전 세계 컨테이너 무역량	28
〈그림 2-4〉 우리나라 측정소 운영 현황(좌) 및 부산 신평 운영 현황(우)	30
〈그림 2-5〉 기존 모형 적용의 한계 1	31
〈그림 2-6〉 기존 모형 적용의 한계 2	31
〈그림 2-7〉 연료소모량 지역 배분 방식(위경도 1도)	35
〈그림 2-8〉 연료소모량 지역 배분 방식(위경도 0.1도)	35
〈그림 2-9〉 연료소모량 지역 배분 예	36
〈그림 2-10〉 부산항 대상 항만구역	38
〈그림 2-11〉 싱가포르항 대상 항만구역	38
〈그림 2-12〉 로테르담항 대상 항만구역	38
〈그림 2-13〉 LA/LB항 대상 항만구역	38
〈그림 2-14〉 상하이항 대상 항만구역	38
〈그림 2-15〉 부산항 지역별 연료소모량 추정 결과	40
〈그림 2-16〉 싱가포르항 지역별 연료소모량 추정 결과	42
〈그림 2-17〉 로테르담항 지역별 연료소모량 추정 결과	44
〈그림 2-18〉 LA/LB항 지역별 연료소모량 추정 결과	46
〈그림 2-19〉 상하이항 지역별 연료소모량 추정 결과	48
〈그림 2-20〉 전 세계 연료소모량 추정 결과(2019년, 위경도 1도 기준)	50
〈그림 2-21〉 월별 연료소모량 추이(부산항)	53
〈그림 2-22〉 월별 연료소모량 추이(전 세계)	53
〈그림 2-23〉 시간대별 연료소모량 추이(부산항)	55
〈그림 2-24〉 시간대별 연료소모량 추이(전 세계)	55
〈그림 4-1〉 선박 가·감속운항 효과 추정(부산항)	75
〈그림 4-2〉 부산항 지역별 연료소모량 비교(가속운항 전후)	77

〈그림 4-3〉 AMP 설치 전후 부산항 대기확산분석 결과(2019년 7월)	79
〈그림 4-4〉 Sulfur Limits Timeline	80
〈그림 4-5〉 ECA 지정 전후 배기가스 배출량 변화 추정(2019년 부산항 BFO 기준) ...	81
〈그림 5-1〉 부산항 및 전 세계 연료소모량 추정 결과(2019년)	85
〈그림 5-2〉 전 세계 선종별 연료사용량(2012년 기준)	91
〈그림 5-3〉 LA항 대기질 모니터링 스테이션	92
〈그림 5-4〉 AMP	98
〈그림 5-5〉 AMECS	98

약어 목록

※ 알파벳 순

ADS: Automated Dependant Surveillance

AIS (선박자동식별장치): Auto Identification System

AMECS : Advanced Maritime Emission Control System

AMP (육상전원공급설비): Alternative Maritime Power

APL: American President Lines

APM: A.P.Moller-Maersk

BFO: Bunker Fuel Oil

CAAP: Clean Air Action Plan

CAI (통합대기환경지수): Comprehensive Air-quality Index

CO (일산화탄소): Carbon Monoxide

CO₂ (이산화탄소): Carbon Dioxide

CSIC (중국선박공업집단): China Shipbuilding Industry Corporation

CSTDMA: Carrier Sense Time Division Multiple Access

ECA (배출규제해역): Emission Control Area

ECDIS (전자해도표시시스템): Electronic Chart Display and Information System

ECT: Europe Container Terminal

EEA (유럽환경청): European Environment Agency

EPA (미국 환경보호청): Environmental Protection Agency

GICOMS (해양안전종합정보시스템): General Information Center on Maritime
Safety and Security

GIS (지리정보시스템): Geographic Information System

HC (탄화수소): Hydrocarbon

HPNT (에이치엠엠피에스에이신항만) : HMM PSA New-port Terminal

ICAO (국제민간항공기구): International Civil Aviation Organization

ICCT: International Council of Clean Transportation

IMO (국제해사기구): International Maritime Organization

LF (부하): Load Factor

LNG: Liquefied Natural Gas

LSFO (저유황유): Low Sulfur Fuel Oil

MDO: Marine Diesel Oil

MEPC (해양환경보호위원회): Marine Environment Protection Committee

MMSI (해상이동업무 식별부호): Maritime Mobile Service Identity

NMVOC (비메탄계 휘발성 유기화합물): Non-Methane Volatile Organic Compound

NO_x (질소산화물): Nitrogen Oxide

PAHs (다환방향족탄화수소): Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

PM (미세먼지): Particular Matter

PNIT (부산신항국제터미널): Pusan Newport International Terminal

Port-MIS (해운항만물류정보시스템): Port Management Information System

R&D (연구개발): Research and Development

RWG: Rotterdam World Gateway

SOLAS (국제해상인명안전협약): Safety of Life at Sea

SOTDMA: Self Organized Time Division Multiple Access

SO_x (황산화물): Sulfur Oxide

TEU: Twenty-foot Equivalent Unit

TTI: Total Terminals International

WRF/Chem: Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry

요약

AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구

1. 연구의 목적

- ▶ 본 연구는 기존 배기가스 배출량 분석 모형의 한계를 보완한 Bottom-Up 방식의 모형을 개발하고 선박 배기가스 배출량 분석을 주요 목표로 하고 있으며, 이를 통해 우리나라가 현재 추진 중인 AMP 설치, 감속운항, ECA 지정 시 효과를 제시함으로써 정부의 친환경 정책 의사결정에 기여하고자 함
 - 이를 위해 컨테이너 선박의 2018년과 2019년도 AIS 데이터를 확보하여 분석함
 - 분석대상 지역으로는 세계 주요 항만인 부산항, 싱가포르항, 로테르담항, LA/LB항, 상하이항 등 5개 항만을 대상으로 선정함
 - 분석대상 배기가스로는 기존 연구를 통해 연료소모량별 배출계수를 확인할 수 있는 NO_x, SO_x, PM, NMVOC, CO, CO₂ 등 6가지를 선정함

2. 연구의 방법 및 특징

1) 연구의 방법

- ▶ 본 연구는 총 5개의 장으로 구성되어 있으며, 먼저 2장에서는 선박들의 이동 분석을 위한 AIS 데이터를 확보해 연료소모량을 추정함
 - IHS Markit에서 구입한 AIS 데이터를 본 연구에 필요한 형태로 전처리함으로써 분석시간 및 효율을 높임
 - 설계속도 대비 운항속도 비율을 세제곱한 값을 주엔진 부하계수로 계산하는 Corbett *et al.*(2009)의 식을 사용하여 연료소모량을 추정했으며, 검증을 위해 A선사의 29척 선박 사용량과 비교함
- ▶ 3장에서는 앞의 2장에서 추정된 연료소모량에 NO_x, SO_x, NMVOC, PM, CO, CO₂ 등 타 연구에서 제시한 배출계수를 적용해 배기가스 배출량을 추정함
- ▶ 4장에서는 추정된 배기가스 배출량을 기반으로 항만 영향을 분석하고 이를 감축할 수 있는 요인에 대해 분석함
 - 운항속도, 재항시간, 선박크기, 입출항 선박수 등의 독립변수가 연료소모량 및 배기가스 배출에 어느 정도 영향을 미치는지 분석하기 위한 회귀분석을 실시함
 - AMP 설치, 감속운항, 배출규제해역 지정 등 선박 기인 배기가스 배출과 관련된 주요 정책별 항만 적용 효과에 대해 분석함

2) 연구의 특징

- ▶ 기존 연구들은 대부분 선박유 판매량을 기초로 하는 Top-down 분

석이거나 운항정보를 기초로 하는 Bottom-up 분석 연구라도 엔진 출력, 이동거리, 운항시간 등 핵심변수가 추정된 연구가 대부분임
- 최근 AIS를 이용한 연구가 추진되고 있으나 확보 가능한 자국 데이터만 활용함으로써 주요 항만 간 비교·분석이 불가능함

- ▶ 본 연구에서는 글로벌 AIS를 확보하여 이를 기반으로 주요 5개 항만을 비교·분석하였고, 신뢰성 확보를 위해 실제 연료사용 정보와 비교함으로써 검증 절차를 추진함

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- ▶ 본 연구에서는 IHS Markit의 AIS 정적/동적 데이터를 확보하여 전처리 및 분석했으며, 평균 수신주기가 약 57분으로 IMO 요구 수신주기인 2초~3분을 만족하지 못해 이를 보정하는 모형을 개발함

〈표 요약-1〉 AIS 데이터 특징(IHS Markit 2019년도 기준)

구분	값
데이터 수(건)	41,476,760
선박 평균 이동속도(kn)	12.92
평균 수신주기(분)	56.9111

자료: IHS Markit AIS 정보(2019년) / 저자 분석

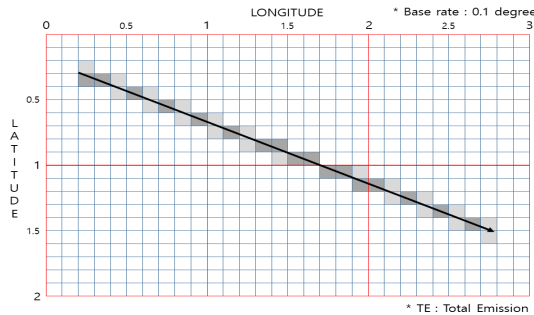
- 모형 개발의 전체 과정은 ① AIS 데이터 전처리, ② 연료소모량 추정 모형 개발 및 검증, ③ 주요 항만 연료소모량 추정, ④ 배기가스 배출량 분석 순으로 진행함

- ① AIS 데이터 전처리: R과 Java를 연동하여 필요한 AIS 데이터만 선택, 정렬, 취합 등 전처리함으로써 대용량 데이터 분석 시 작업시간 단축

② 연료소모량 추정 모형 개발 및 검증

- 기존 모형의 한계(지점 간 배출량 미적용, 지점 누락 등)를 극복하기 위해 계산된 연료소모량을 선박이 지나는 격자무늬(Grid) 형태의 지역에 이동 거리 비율만큼 배분하는 새로운 모형을 개발함

〈그림 요약-1〉 연료소모량 지역 배분 방식(위경도 0.1도)



- 연료소모량 계산은 아래의 Corbett *et al.*(2009)의 큐빅 모형을 사용하였으며, 주엔진 부하는 0.8, 보조엔진 부하는 미국 EPA에서 발표한 컨테이너선 박 보조엔진 부하인 항해 중 0.13, 접근 중 0.48, 정박 중 0.19를 적용함

$$F_{ijk} = [MF_k (\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + AF_k] \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \dots\dots\dots (1)$$

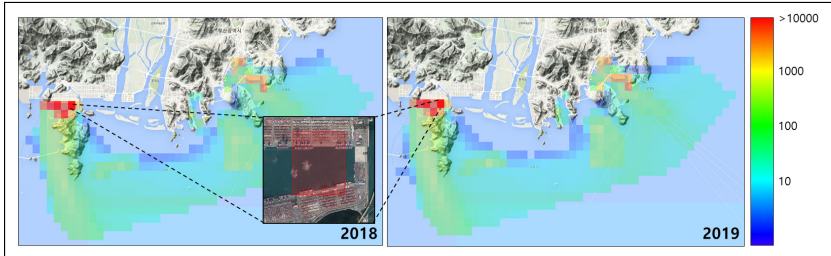
- 개발된 모형의 검증을 위해 실제 A선사 29척 선박의 2019년도 연료사용량과 비교했으며, 12.8% 높게 추정되어 보정하려 했으나 대상 선사가 1개이고 8,600TEU급에서만 큰 차이를 보이고 있어 보정 없이 사용함

③ 주요 항만 연료소모량 추정

- 부산항, 싱가포르항, 로테르담항, LA/LB항, 상하이항 등 전 세계 주요항만 5개를 대상으로 연료소모량을 먼저 추정해 항만별 사용 패턴을 분석함
- 전 세계적으로 2019년 기준 73,647천 톤의 연료를 사용한 것으로 분석되었으며, 이 중 약 96%가 운항 중 사용된 것으로 분석됨
- 보조엔진이 사용한 연료량은 전체의 24%인 것으로 분석되었으나 5개 항만에서 사용한 비율은 83%로 높게 분석되어 항만 내 보조엔진 사용을 줄일 수 있는 기술적, 정책적 지원의 필요성을 확인할 수 있었음

〈그림 요약-2〉 부산항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤



〈표 요약-2〉 주요 항만별 연료소모량 추정 결과 종합(2019년)

단위: 톤

항만	운항 중		정박 중		합계	가장 많은 지역 소모량
	주엔진	보조엔진	보조엔진	보조엔진		
부산항	16,435 (9.0%)	116,791 (63.8%)	45,752 (25.0%)	4,009 (2.2%)	182,987 (100.0%)	24,452
싱가포르항	53,290 (13.7%)	237,522 (61.2%)	81,756 (21.1%)	15,302 (3.9%)	387,870 (100.0%)	25,376
로테르담항	16,865 (9.5%)	111,310 (62.5%)	49,089 (27.5%)	932 (0.5%)	178,196 (100.0%)	16,469
LA/LB항	12,752 (7.6%)	104,828 (62.3%)	48,282 (28.7%)	2,339 (1.4%)	168,200 (100.0%)	24,046
상하이항	168,992 (27.1%)	326,813 (52.5%)	86,269 (13.9%)	40,506 (6.5%)	622,579 (100.0%)	28,134
5개 항 합계	268,334 (17.4%)	897,264 (58.3%)	311,148 (20.2%)	63,088 (4.1%)	1,539,832 (100.0%)	28,134 (상하이항)
전 세계	56,155,083 (76.2%)	14,621,714 (19.9%)	2,114,573 (2.9%)	755,346 (1.0%)	73,646,716 (100.0%)	-

주: 각 항만별 대상지역 크기가 상이하기 때문에 이를 통해 각 항만들의 절대 순위 비교는 불가
자료: 저자 분석

④ 배기가스 배출량 분석

- 배출계수는 유럽환경청 EEA에서 제공하는 계수를 사용했으며, CO₂는 Corbett *et al.*(2009) 및 Chang *et al.*(2013)의 연구에서 사용한 것처럼 86.45%로 정의된 연료의 탄소 배출계수와 탄소-이산화탄소 변환 계수인 44/12를 곱해 계산함
- 전 세계 1위 물동량 처리 항만인 상하이항이 총 배출량 기준으로 가장 많은 배기가스를 배출하고 있는 것으로 분석되었으나, 분석대상 지역 크기가 상이하어 절대적 순위로는 볼 수 없음

〈표 요약-3〉 주요 항만별 선박 배기가스 배출량 추정 결과 종합(2019년)

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NM VOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	182,987	10,362	91	330	710	1,354	580,070
	MDO	(0.25%)	10,235	18	350	259		
싱가포르항	BFO	387,870	22,493	194	722	1,587	2,870	1,229,547
	MDO	(0.53%)	22,236	39	765	553		
로테르담항	BFO	178,196	10,078	89	322	690	1,319	564,883
	MDO	(0.24%)	9,955	18	341	252		
LA/LB항	BFO	168,200	9,390	84	298	637	1,245	533,193
	MDO	(0.23%)	9,272	17	316	236		
상하이항	BFO	622,579	38,370	311	1,256	2,904	4,607	1,973,577
	MDO	(0.85%)	38,009	62	1,332	902		
5개 항 합계	BFO	1,539,832	90,693	769	2,928	6,528	11,395	4,881,270
	MDO	(2.09%)	89,707	154	3,104	2,202		
전 세계	BFO	73,646,716	5,546,037	36,823	190,829	500,385	544,986	233,460,080
	MDO	(100%)	5,526,041	7,365	202,797	113,123		

자료: 저자 분석

- ▶ 개발된 모형을 기반으로 선박 배기가스 감축을 위한 주요 정책인 선박 감속운항, AMP 설치, 배출규제해역 지정 시 효과에 대해 분석함
 - 10%, 20% 선박 감속운항 시 전 세계적으로는 11.79%, 20.92% 연료를 절감할 수 있는 것으로 분석되었으나 부산항만 분석했을 때는 오히려 증가하는 것으로 분석되었으며, 이는 본 연구에서 사용한 연료소모량 계산식에서 속도가 분모에 있고 항내 접근 시 보조엔진 부하가 0.48로 높아 감속 시 보조엔진 사용량이 증가하기 때문임
 - AMP 설치 시 정박 중 사용하는 연료를 줄일 수 있어 25% 감소하는 효과가 있는 것으로 분석됨
 - 배출규제해역 지정 시 북미지역 수준으로 적용하면 NOx 23%, SOx 86%, PM 74% 감축할 수 있을 것으로 분석되었고, LSFO 사용만을 고려했을 때도 기존 91톤에서 4톤으로 약 96% 감축할 수 있을 것으로 분석됨

2) 정책대안 제시내용 및 정책화 활동

- ▶ 선박 감속운항을 통한 항만 대기질 개선 법(「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」) 실효성을 위해서는 AIS 기반 경제속도 도출이 필요함
- ▶ 항만 배기가스의 영향을 분석하기 위해서는 측정치의 실제값 반영 여부에 대한 지속적인 검증 모니터링이 필요하고, 이 결과를 토대로 최적 위치에 대기 모니터링 시스템 설치가 필요함
- ▶ 선박 접안 후 항만 내 미세먼지 배출을 제로화하기 위해서는 우리나라에 적합하고 운영이 용이한 AMP 및 AMECS 기술 개발이 시급함
 - 관련 정책 수립, 기술 전문가 및 정부관계자 면담회의 개최 필요

3) 정책적 기여 등 기대효과

- ▶ 본 연구를 통해 선박 배기가스 감축을 위해 우리나라가 추진하고 있는 항만 내 감속운항, AMP 설치, 배출규제해역 지정 등 관련 정책적 타당성 확보를 위한 데이터 분석 기반을 마련함
- ▶ 또한 선박으로부터 기인하고 있는 지역별 배기가스 배출량 정보를 제공할 수 있는 일종의 ‘전 세계 선박 배기가스 배출지도’의 데이터 분석 모형을 개발함
 - 향후 GIS 소프트웨어와의 연동을 통해 완벽한 지도 서비스로 제공될 수 있으며, 이를 통해 전 세계 연구자들을 대상으로 관련 연구 확대 및 심화할 수 있는 장으로 활용 가능함

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

Moo-Hong Kang · Sang-Hei Choi · Eon-Kyung Lee · Ki-Yeol Lee

1. Purpose

- ▶ The primary purpose of this study is to develop a bottom-up based emissions model capable of overcoming and surpassing the limitations of existing emissions analysis models, as well as to analyze the amount of emissions originating from ships. Through these efforts, this study intends to present the effects of Korea's policy regarding emissions including AMP installation, slow steaming and the designation of ECA, ultimately contributing to the government's decision-making process.
- For these purposes, this study secured and analyzed the AIS data of 2018 and 2019 for containerships.
- The world's 5 major global ports were selected as the subject for analysis including Busan Port, the Port of Singapore, the Port of Rotterdam, LA/LB Ports and the Port of Shanghai.

- The study selected 6 specific types of emissions for analysis including NO_x, SO_x, PM, NMVOC, CO, CO₂, with which existing studies are able to confirm emission factors by fuel consumption.

2. Methodology and Feature

1) Methodology

- ▶ This study consists of 5 chapters. Chapter 2 estimates fuel consumption after securing the AIS data for the analysis of ship movements.
 - Pre-processing the data purchased from IHS Markit and changing them into the form of what this study needs have reduced the time for the analysis while increasing its efficiency.
 - The fuel consumption is estimated by the function of Corbett et al. (2009) where the load factor is calculated from the cube of instantaneous speed relative to design speed. The result was compared with the fuel consumption of 29 ships manufacture by Company A for verification.
- ▶ Chapter 3 estimated the amount of emissions by applying the emission factor presented in other studies such as NO_x, SO_x, NMVOC, PM, CO, CO₂ to the fuel consumption calculated in Chapter 2.
- ▶ Chapter 4 analyzed the impact of ship emissions on ports based on estimated emissions, presenting factors to reduce them.
 - A regression analysis was carried out to verify how much impact

of independent variables such as operating speed, ship's time in port and the number of entering and exiting vessels having on to the fuel consumption and pollutant emissions.

- This chapter also analyzed the potential impact of major policy concerning ship-originated emissions on ports such as AMP installation, slow steaming and the designation of ECAs.

2) Feature

- ▶ Existing studies have demonstrated a top-down analysis based on the sales of fuel oil. Even though being calculated using a bottom-up analysis based on a ship's operational information, most studies have assumed core variables including engine power, distance and operating time etc.
- With the AIS-based research steadily increasing, these studies only utilize obtainable domestic data, which makes impossible to compare and analyze between major global ports.
- ▶ This study secured global AIS data with which it compared and analyzed global 5 major ports. For securing the reliability, the verification process was carried out by comparing the result with the actual fuel consumption information.

3. Results

1) Summary

- ▶ After securing AIS static/dynamic data from IHS Markit, this

study carried out pre-processing and analysis. Since the reception cycle was approximately 57 minutes, which failed to meet the IMO requirements of 2~3 seconds, a new model was developed following modification.

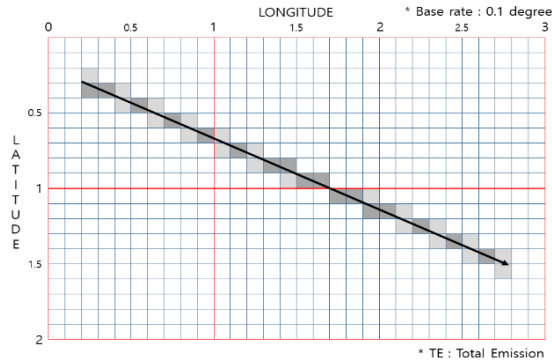
〈Table summary〉 Features of the AIS data (IHS Markit as of 2019)

Category	Value
Number of data (case)	41,476,760
Ship's average speed (kn)	12.92
Average reception cycle (min)	56.9111

Source: IHS Markit AIS information (2019) / KMI analysis

- The overall process of model development follows the order of ①preprocessing of AIS data, ② development of a model for estimating fuel consumption and its verification, ③ estimation of major ports' fuel consumption and ④ analysis of gas emissions.
 - ① Preprocessing of AIS data: Preprocessing such as selecting sorting and aggregating the AIS data that this study finds it necessary allows for a reduction in time it takes to analyze large amounts of data by connecting R to Java
 - ② Development of a model for estimating fuel consumption and its verification
 - To overcome limitations of existing models (non-application of emissions between points, missing points) the study developed a new model. This model distributes the fuel consumption calculated for a vessel to areas passed in the form of grid squares in proportion to distance.

〈Picture summary〉 Method of geographical distribution of fuel consumption (latitude/longitude 0.1°)



- Fuel consumption is calculated using the Cubic Model of Corbett et al. (2009) as shown below. The load for an auxiliary engine is calculated by applying the auxiliary engine load for containerships published by the EPA (Environmental Protection Agency): 0.13 for cruising, 0.48 for maneuvering and 0.19 for hoteling.

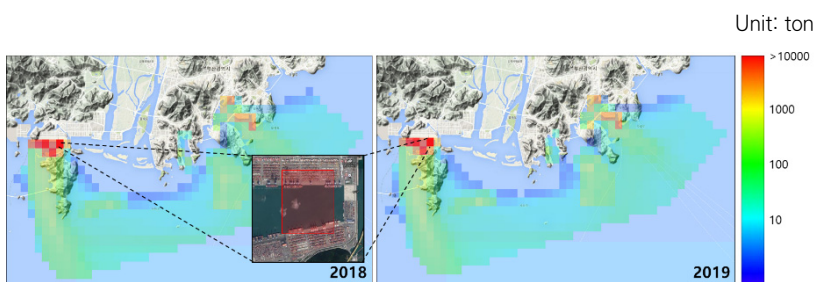
$$F_{ijk} = [MF_k(\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + AF_k] \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \dots\dots\dots (1)$$

- Verification of the developed model was conducted by comparing the result with the 2019 actual fuel consumption data of 29 ships by Company A. The result was estimated to be 12.8% higher, which signified the need for modification. However, the data without modification was used since the target shipping company was only one, only possessing significant difference in 8,600 TEU containerships

③ Estimation of fuel consumption in major ports

- Targeting 5 global major ports including Busan Port, the Port of Singapore, LA/LB ports, and the Port of Shanghai, this study estimated fuel consumption first, while analyzing the usage pattern by ports.
- Global ports were analyzed to use a total of 73.6 million tons of fuel as of 2019, with 96% of that used during cruising.
- The fuel consumption used by auxiliary engines accounted for 24% of the total fuel consumption. However, the ratio in 5 major global ports was estimated to be 83%, a relatively high figure, with this result confirming the necessity for technological and policy support in order to reduce the use of auxiliary engines within ports.

〈Picture summary-2〉 Estimation of fuel consumption by areas in Busan Port



〈Table summary-2〉 Summarized results of the estimation of fuel consumption by major ports (2019)

Unit: ton

Port	Cruising		Maneuvering	Hoteling		Total	The highest fuel consumption amount in area
	Main engine	Auxiliary engine	Auxiliary engine	Auxiliary engine	Auxiliary engine		
Busan Port	16,435 (9.0%)	116,791 (63.8%)	45,752 (25.0%)	4,009 (2.2%)	182,987 (100.0%)	24,452	
Port of Singapore	53,290 (13.7%)	237,522 (61.2%)	81,756 (21.1%)	15,302 (3.9%)	387,870 (100.0%)	25,376	
Port of Rotterdam	16,865 (9.5%)	111,310 (62.5%)	49,089 (27.5%)	932 (0.5%)	178,196 (100.0%)	16,469	
LA/LB Ports	12,752 (7.6%)	104,828 (62.3%)	48,282 (28.7%)	2,339 (1.4%)	168,200 (100.0%)	24,046	
Port of Shanghai	168,992 (27.1%)	326,813 (52.5%)	86,269 (13.9%)	40,506 (6.5%)	622,579 (100.0%)	28,134	
Sum of 5 ports	268,334 (17.4%)	897,264 (58.3%)	311,148 (20.2%)	63,088 (4.1%)	1,539,832 (100.0%)	28,134 (Port of Shanghai)	
The world	56,155,083 (76.2%)	14,621,714 (19.9%)	2,114,573 (2.9%)	755,346 (1.0%)	73,646,716 (100.0%)	-	

Note: Comparing absolute rankings of ports are not feasible due to varying sizes of target areas by ports

Data: KMI analysis

④ Analysis of gas emissions

- This study utilized emission factors provided by the European Environment Agency (EEA). As utilized in research including Corbett et al. (2009) and Chang et al. (2013), CO₂ was calculated by multiplying the carbon coefficient of fuel defined as 86.45% by the ratio of the molecular weight of carbon dioxide to that of carbon (44/12).
- Being the busiest port in the world in terms of cargo tonnage, the Port of Shanghai was analyzed to discharge

the largest amount of emissions in the world. However, this ranking is not absolute due to difference size of targeting ports.

〈Table summary-3〉 Summarized results of the estimation of ship emissions by major ports (2019)

Unit: ton

Port	Category	Fuel consumption	NOx	SOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
Busan Port	BFO	182,987	10,362	91	330	710	1,354	580,070
	MDO	(0.25%)	10,235	18	350	259		
Port of Singapore	BFO	387,870	22,493	194	722	1,587	2,870	1,229,547
	MDO	(0.53%)	22,236	39	765	553		
Port of Rotterdam	BFO	178,196	10,078	89	322	690	1,319	564,883
	MDO	(0.24%)	9,955	18	341	252		
LA/LB Ports	BFO	168,200	9,390	84	298	637	1,245	533,193
	MDO	(0.23%)	9,272	17	316	236		
Port of Shanghai	BFO	622,579	38,370	311	1,256	2,904	4,607	1,973,577
	MDO	(0.85%)	38,009	62	1,332	902		
Sum of 5 ports	BFO	1,539,832	90,693	769	2,928	6,528	11,395	4,881,270
	MDO	(2.09%)	89,707	154	3,104	2,202		
The world	BFO	73,646,716	5,546,037	36,823	190,829	500,385	544,986	233,460,090
	MDO	(100%)	5,526,041	7,365	202,797	113,123		

Source: KMI analysis

► Based on the developed model, this study analyzed the impact of the government's major policy for reducing emissions from ships including slow steaming, installation of AMP and the designation of ECAs.

- The analysis found that a 10 ~ 20% reduction in fleet average speed results in an 11.79% and 20.92% reduction in fuel consumption across the world. However, the analysis only targeting Busan port showed an increase in fuel consumption.

- This is because speed was placed as a denominator in the formula utilized in this study. In addition, the load of auxiliary engines was quite high, reaching 0.48 when approaching the port, which requires increasing the use of auxiliary engines for deceleration.
- This study found that installing AMP will allow for a reduction in fuel consumption while mooring at ports, which lead to a 25% reduction in fuel consumption.
- Designating ECAs, in the case of applying them to the level of North America, will lead to a NO_x reduction of 23%, a Sox reduction of 86% and a PM decrease of 74%. Using only LSFO (Low Sulfur Fuel Oil) in a ship will be conducive to a decrease of 96% in fuel consumption from existing 91 tons to 4 tons.

2) Policy suggestions and relevant activities

- ▶ It is necessary to extract the AIS-based economical speed of a vessel in order to secure the effectiveness of the Port Air Quality Improvement Act (the Special Act on the Improvement of Air Quality in Port and Other Areas) through ship steaming.
- ▶ For analyzing the impact of ship emission in ports, a continuous monitoring is required to verify whether the estimation applies to actual values. Based on results from this study, an atmospheric monitoring system should be established at the most optimal location.
- ▶ It is urgent to develop AMP and AMECS technologies befitting to Korea's port conditions with easy operation to achieve zero

port emissions after a vessel moors at ports.

- Establishing relevant policies and holding face-to-face meetings with technical experts and government officials are necessary.

3) Expected benefits including policy contribution

- ▶ This study has laid the foundation for data analysis to secure the feasibility of the Korean government's policy in regards to reducing shipping emissions, including slow steaming within ports, AMP installation and the designation of ECAs.
- ▶ The research conducted in this study has led to the development of a data analysis model for a 'Global Map of Ship Exhaust Emissions', providing information on ship-originated emissions by region.
- This map service can be enhanced by connecting it with GIS software. Through this connection, the map service may be utilized as a venue to expand and deepen relevant research across the world.

제 1 장

서론

제1절 연구배경 및 필요성

2020년 7월과 8월, 우리나라는 기록적인 폭우와 태풍으로 인해 홍수, 산사태 등 심각한 자연재해를 겪었다. 이는 지구온난화로 인한 기후변화로 우리나라뿐만 아니라 미국의 산불, 유럽 폭염, 북극 해빙 등 최근 일어나고 있는 자연변화 현상에 기인하고 있다.

세계 각국은 지구온난화의 주범인 온실가스 배출을 줄이기 위해 기술적, 정책적으로 많은 노력을 하고 있다. 대표적인 예로 화석연료 사용을 줄이려는 움직임이 있는데, 친환경 자동차, 재생에너지 활용 등을 이러한 사례로 볼 수 있다.

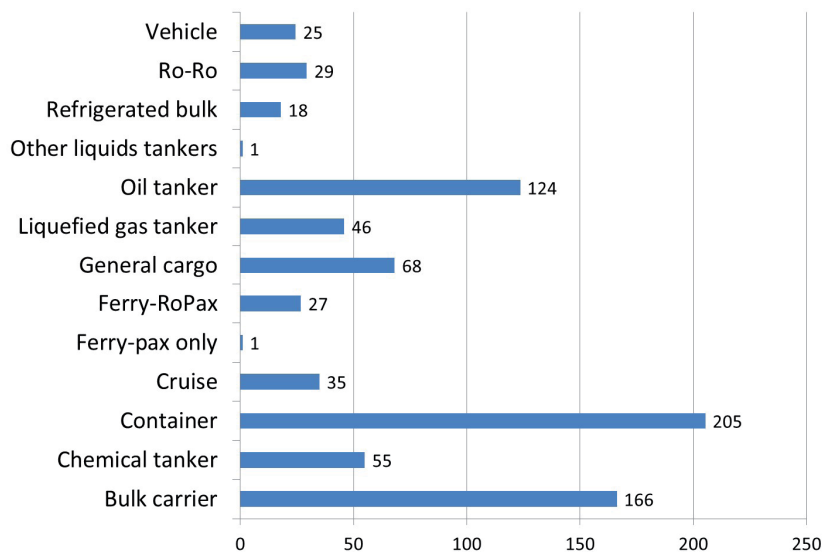
하지만 글로벌 무역에서 대부분의 화물을 운송하는 선박들은 아직까지 BFO(Bunker Fuel Oil)와 MDO(Marine Diesel Oil) 등 화석연료를 사용하고 있으며, 이로 인해 황산화물(Sulfur Oxides, 이하 SOx), 질소산화물(Nitrogen Oxides, 이하 NOx), 미세먼지(Particulate Matter,

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.

IMO(2015)의 연구에 따르면, 2012년 기준으로 이산화탄소는 800만 톤 발생, 연료는 300.5백만 톤 사용한 것으로 조사되었다.¹⁾ 특히 이 중 25.63%, 21.96% 이상을 컨테이너 선박이 발생 및 사용하고 있는 것으로 조사되어 배기가스의 많은 부분이 컨테이너 선박으로부터 기인하고 있는 것으로 조사되었다.

〈그림 1-1〉 전 세계 선종별 CO₂ 배출량(2012년 기준)

단위: 백만 톤

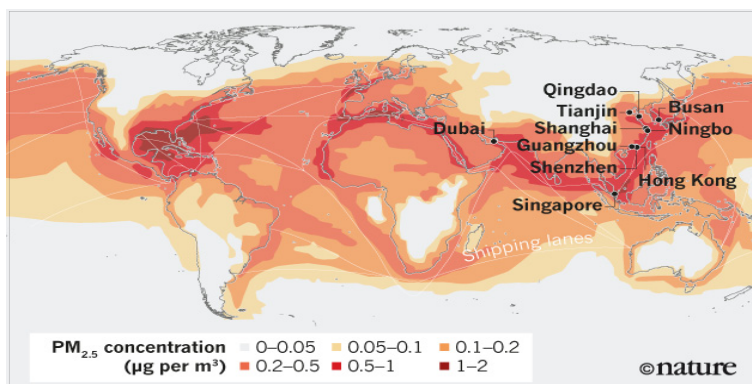


자료: IMO(2015), p. 6

1) IMO(2015), pp. 6-7.

세계적인 학술지인 네이처(Nature)지에 게재된 Wang *et al.*(2016)의 연구에서는 부산항을 포함하여 전 세계 10대 항만에서 배출하는 질소산화물과 황산화물의 비중이 20%에 이른다고 분석²⁾했으며, 국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 IMO)는 이러한 선박 기인 대기오염 문제에 대해 인지하고 방지하기 위한 관련 규제들을 시행해 오고 있다. IMO는 비준을 통해 발트해, 북해, 북미연안, 카리브해 등을 배출규제해역(Emission Control Area, 이하 ECA)으로 지정하여 선박의 대기 오염물질 배출량을 규제하고 있다.³⁾ 최근 중국 등 동북아 일부 국가들도 자체적 ECA를 지정해 운영 중이며, 우리나라도 ECA 지정 필요성에 관한 연구를 추진하고 있다.

〈그림 1-2〉 The Dirty Ten



자료: Wang *et al.*(2016), p. 277

우리나라 국가미세먼지정보센터에 따르면, 항만을 보유하고 있는 부산과 인천이 선박을 포함하는 비도로이동오염원으로부터 배출되는 대기오염 물질 비중이 전국 평균보다 월등히 높은 것으로 조사되

2) Wang *et al.*(2016), p. 276.

3) 이기열 외(2019), p. 2.

었다. 아래의 표를 보면 항만이 있는 부산과 인천의 비도이동오염원 배출 비중이 전국 대비 높은 것을 알 수 있고, 특히 부산의 경우 NO_x와 SO_x 비중이 50%를 넘어 비도로이동오염원으로부터 기인하는 대기오염이 심각한 것을 알 수 있다.

〈표 1-1〉 비도로이동오염원 대기오염 물질 배출 비중

단위: %

구분	CO	NO _x	SO _x	TSP	PM10	PM2.5	VOC	NH3
전국	21.59	26.00	11.32	2.73	7.41	16.35	5.67	0.04
부산	35.67	51.86	68.13	8.60	20.60	50.19	7.28	0.28
인천	37.18	37.65	20.73	4.48	11.79	33.80	9.11	0.07

자료: 국가미세먼지정보센터(검색일: 2020. 8. 6) 기반 저자 정리

우리나라에서는 항만 지역 내 대기질 개선을 위해 지난 2020년 1월 1일 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」을 시행했으며, 동법에는 항만지역 대기질 개선 종합계획의 수립, 선박배출 규제해역 지정, 저속운항해역 지정, 하역장비 배출가스허용기준, 육상전원공급 설비 설치 등 항만지역 내 대기질 개선을 위한 내용을 포함하고 있다. 또한 문재인 정부에서는 국정과제인 ‘미세먼지 걱정없는 쾌적한 대기환경 조성’을 위한 민관합동위원회인 미세먼지특별대책위원회를 운영하고 있으며, 2019년 11월 1일 개최된 제3차 미세먼지특별대책 위원회에서는 2024년까지 미세먼지 농도를 전국 평균 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 35% 이상 저감하겠다고 발표했고, 특히 선박연료유 품질 기준 변경(3.5%에서 0.5%로), 저속운항해역 지정, 육상전원공급설비 구축 계획을 발표했다.⁴⁾

최근 선박으로 기인한 대기오염이 어느 정도인지 분석하기 위한 연구들이 많이 진행되고 있다. 정확한 선박 배기가스 배출량을 확인

4) 미세먼지특별대책위원회 보도자료(2019. 11. 1)

하기 위해서는 선박이나 항만에 배기가스 측정 센서를 설치하여 실시간으로 측정해야 하지만 전 세계 모든 선박이나 항만에 적용하기에는 비용적, 시간적 한계로 인해 적용하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 확보할 수 있는 데이터를 활용해 대기오염 정도를 파악하는 연구가 우선 추진되고 있으나, 정밀한 데이터 확보의 어려움으로 인해 관련 연구의 확대가 잘 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 글로벌 데이터 확보의 한계를 극복함으로써 보다 정확한 연료소모량 및 배기가스 배출량을 추정할 수 있는 모형을 개발하고자 하였다.

제2절 연구의 목적 및 범위

본 연구는 기존 배기가스 배출량 분석 모형의 한계를 보완한 Bottom-Up 방식의 모형을 개발하고 선박 배기가스 배출량을 분석하는 것을 주요 목표로 하고 있다. 이를 통해 항만 환경 영향 및 주요 저감 요인을 분석하고자 하며, 우리나라가 현재 추진 중인 AMP 설치, 감속운항, ECA 지정 시 효과를 제시함으로써 정부의 친환경 정책 의사결정에 기여하고자 한다.

이를 위해서는 AIS 데이터의 확보가 필수적이며, 본 연구에서는 컨테이너 선박의 2018년과 2019년 AIS 활동 데이터를 확보해 분석했다.

분석대상 지역으로는 세계 주요 항만인 부산항, 싱가포르항, 로테르담항, LA/LB항, 상하이항 등 5개 항만을 대상으로 선정했으며, 또한 전 세계 배출량도 함께 분석했다.

분석대상 배기가스로는 기존 연구를 통해 연료소모량별 배출계수를 확인할 수 있는 NO_x, SO_x, PM, NMVOC, CO, CO₂ 등 6가지의 배기가스를 분석했다.

제3절 연구의 내용 및 방법

본 연구는 총 4개의 장으로 구성되어 있다.

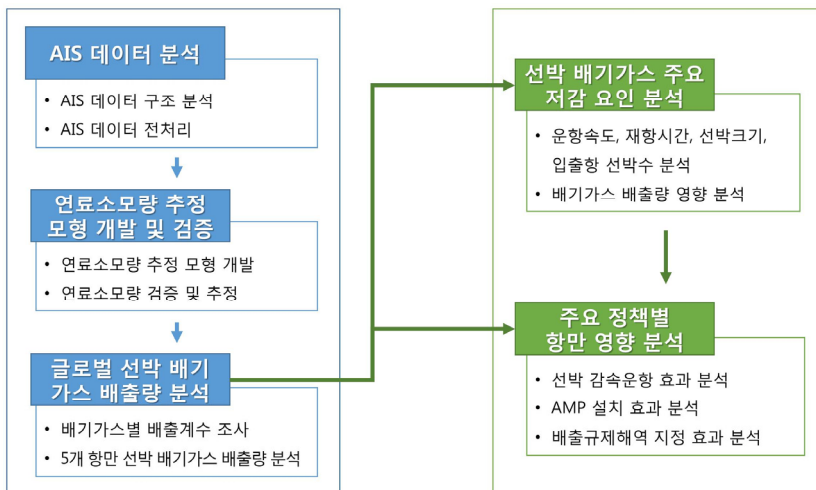
먼저 2장 1절에서는 선박들의 이동 분석을 위한 AIS 데이터를 확보해 이를 분석했다. AIS 데이터는 선박 제원과 같은 고정된 정보를 포함하고 있는 정적 데이터와 실제 선박이 이동하면서 전송하는 위치, 시간, 방향, 상태 등의 데이터를 포함하는 동적 데이터로 구분되며, 본 연구에서는 IHS Markit으로부터 자료를 구입해 분석했다.

다음으로 2절에서는 선박 이동 시 사용한 연료소모량을 추정하기 위한 모형을 개발하였으며, 연료소모량 추정식은 설계속도 대비 운항속도 비율을 세제곱한 값을 주엔진 부하계수로 계산하는 Corbett *et al.*(2009)의 식을 사용했다. 보조엔진 부하계수는 미국 EPA (Environmental Protection Agency, 환경보호청)에서 발표한 ICF Consulting(2009) 연구의 항해 중, 접근 중, 정박 중 사용부하를 사용했다. 또한 개발된 모형의 검증을 위해 A선사 29척의 2019년도 실제 사용연료량과 비교했다.

3장 선박 배기가스 배출량 추정에서는 계산된 연료소모량에 NO_x, SO_x, PM, CO, CO₂ 등 타 연구에서 제시한 배기가스 배출계수를 적용해 계산했으며, 부산항을 비롯한 싱가포르항, 로테르담항, LA/LB항, 상하이항 등 5개 항만의 배기가스 배출량을 추정해 비교했다.

마지막으로 4장에서는 선박 배기가스가 항만에 미치는 영향을 분석하고 이를 감축할 수 있는 요인에 대해 분석했다. 먼저 운항속도, 재항시간, 선박크기, 입출항 선박수 등이 배출량에 어느 정도 영향을 미치는지 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 다음으로 AMP 설치, 감속운항, 배출규제해역 지정 등 주요 정책별 항만 영향에 대해 분석했다.

〈그림 1-3〉 연구흐름도



제4절 선행연구 검토 및 차별성

1. 선박 입출항 정보 기반 분석 연구

앞서 언급하였다시피 선박으로부터 얼마나 많은 배기가스가 배출되고 있는지 분석하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. 크게 선박유 판매량 기반 Top-Down 방식, 선박 운항정보 기반 Bottom-Up 방식으로 두 가지 형태의 연구가 진행되고 있다.

먼저 전 세계 선박유 판매량을 기준으로 배기가스 배출량을 추정하는 Top-Down 방식의 연구가 수행되었으며, Corbett and Fischbeck(1997)의 연구⁵⁾가 대표적이라 할 수 있다. 하지만 Top-Down 방식은 선박의 운항거리나 속도 등의 실제 선박 운송정보를 이용하지 않고 계산한 것이라 정확성이 떨어진다는 문제점이 있어 보완이 필요했다.

이를 보완한 방법이 Bottom-Up 방식이며, 실제 선박 운항정보를 이용하여 연료소모량을 분석해 배기가스 배출량을 계산하는 연구로 최근 증가하는 추세이다.⁶⁾

먼저 Corbett and Koehler(2003)의 연구⁷⁾에서는 선박 연료소모량 계산을 통한 배기가스 배출량 분석을 적용해 전 세계 배기가스 배출량을 분석했다. 동 연구에서는 아래 식과 같이 선박의 엔진출력(P), 엔진부하계수(F), 평균엔진가동시간(t), 배출계수(E)를 곱해 배기가스 배출량을 분석했으나 선박 개별로 분석한 것이 아닌 벌크선, 유조선,

5) Corbett and Fischbeck(1997), pp. 823-824.

6) Le *et al.*(2020), p. 304.

7) Corbett and Koehler(2003), pp. 1-13.

대형·소형 컨테이너선, RoRo선 등 선박 그룹별(i)로 데이터를 확보해 적용했다는 한계가 있었다.

$$Emissions = \sum_{i=1}^n P_{MW} \cdot F_{\%MW} \cdot t_{hrs/yr} \cdot E_{g/kWh} \cdot \frac{1}{1000} \dots\dots\dots [\text{식 1}]$$

Corbett *et al.*(2009)의 연구⁸⁾에서는 2003년 연구의 한계를 보완하기 위해 실제 선박별로 연료소모량을 계산하는 식을 사용했다. 동 연구에서는 아래 식과 같이 k 선박이 i 항만에서 j 항만으로 이동거리(d)를 운영속도(S_{1k})로 이동 시 사용한 연료량을 다음의 식으로 계산한 후 CO₂ 배출계수인 3.17을 곱해 배출량을 추정했다. 또한 수익 최대화를 목적함수로 하는 방정식을 적용하여 주요 경로별로 경제적이고 효율적인 속도를 추정함으로써 CO₂ 배출량에 대한 유류세와 감속 운항에 대한 정책적 영향을 연구했다. 동 연구에서는 미국 내 항만을 입출항한 90,000개 이상의 정보를 사용해 분석했으나 항만 간 세부적인 이동이 아닌 Port-to-Port 정보로 분석함으로써 이동 중 지역별 배출량은 계산할 수 없었다.

$$F_{ijk} = [MF_k (\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + AF_k] \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \dots\dots\dots [\text{식 2}]$$

Chang *et al.*(2013)의 연구⁹⁾에서는 Corbett *et al.*(2009)의 연료소모량 계산식을 사용하여 인천항의 선박 유형별 온실가스(CO₂) 배출량을 분석했다. 분석을 위해 인천항만공사으로부터 2012년 1월부터 10월까지 입출항한 13,784척의 선박 데이터를 제공받았으며, 특히 묘박, 수문 접근·통과, 안벽 접근·접안 등 5가지 선박 활동별로 구분하여 온실가스 배출량을 측정했다. 이를 위해 수문, 안벽 등 주요 거

8) Corbett, Wang, and Winebrake(2009), pp. 593-598.

9) Chang, Song, and Roh(2013), pp. 1-4.

점별 통과정보를 이용해 이동거리 및 속도를 계산하여 사용했다.

앞의 연구들은 주엔진·보조엔진 출력, 설계속도 등 선박 제원정보를 수집하여 연료소모량 및 배기가스 배출량을 계산했다. 하지만 이러한 정보들을 확보하기에는 비용, 시간 등 현실적인 어려움이 많이 따른다. Le *et al.*(2020)의 연구¹⁰⁾에서는 이러한 자료 확보의 어려움을 해결하기 위해 선박별 이동시간(T_{ijk})과 운항속도(S_{1k})만으로 연료소모량을 계산할 수 있는 회귀모형을 개발했다. 2012년부터 2016년까지 매년 100에서 143척, 총 38,687 항차의 컨테이너선을 대상으로 분석했으며, 선박 크기별로 회귀계수 α , β 를 계산했다.

$$F_{ijk} = \alpha T_{ijk} S_{1k}^3 + \beta T_{ijk} + \epsilon \dots\dots\dots [\text{식 3}]$$

2. AIS 기반 분석 연구

앞의 5가지 연구들은 선박의 입출항 정보를 기반으로 연료소모량 및 배기가스 배출량을 계산한 대표적인 연구들이다. 다만 데이터 수집의 한계로 인해 선박의 입출항 정보만을 사용함으로써 어떤 지역에서 더 많은 배기가스를 배출하는지와 같은 세부적인 분석은 불가능하였다. 특히 지도상에 분석 결과를 표시해 가시성을 높임으로써 지역별로 비교·분석하기 위한 연구의 필요성이 대두되었다.

최근 이를 위해 선박자동식별장치(Automated Identification System, 이하 AIS) 데이터를 활용해 선박의 배기가스 배출량을 추정하는 연구를 많이 진행하고 있다.

Chen *et al.*(2016)의 연구¹¹⁾가 대표적이며, AIS 데이터를 기반으로

10) Le *et al.*, *op. cit.*, pp. 304–331.

텐진항 주변의 배기가스 배출량을 추정했다. 2014년 텐진항을 입출항한 8,690척의 선박 데이터를 이용해 분석했으며, 추정식은 Corbett and Koehler(2003)가 사용한 것과 같은 식을 사용했으나 동 연구에서는 선박별로 분석했다는 점에서 큰 차이를 보이고 있다. 또한 운항 중, 접근 중, 접안 중과 같은 운항상태별로 엔진부하(Load Factor, LF)를 상이하게 적용함으로써 좀 더 정확한 결과를 도출하기 위해 기존 방법론을 개선했다.

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

Chen *et al.*(2018)의 연구¹²⁾는 앞 연구에서 중국 보하이림 지역으로 범위를 확장한 연구로 WRF/Chem 모델을 적용함으로써 선박으로 인해 배출된 PM_{2.5}가 항만도시에 어떻게 영향을 미치는지를 분석했다.

이렇게 몇몇 연구를 통해 AIS 데이터를 이용함으로써 가시성을 높이고 보다 정확한 결과를 도출할 수 있다는 점을 알 수 있었다. 다만 AIS의 경우, 3분 내외 주기로 데이터를 수신하고 있다고 하나 전 세계 데이터를 이 정도 정밀한 수준으로 확보하고 분석하는 것은 어렵기에 데이터 확보의 한계를 극복하는 모형 개발이 필요했다. 아울러 실제 연료사용량이나 배기가스 배출량과 비교를 통한 검증이 이루어지지 않았다는 한계 또한 포함하고 있다.

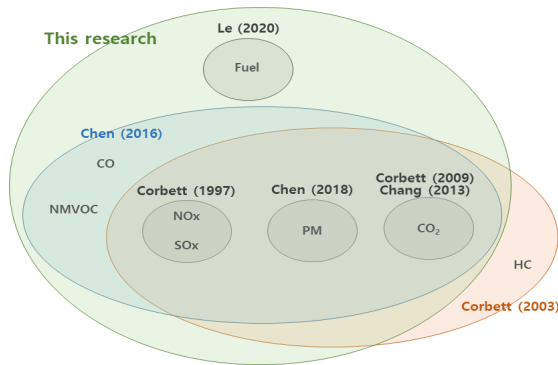
11) Chen *et al.*(2016), pp. 10-18.

12) Chen *et al.*(2018), pp. 1476-1486.

3. 종합

앞의 연구들을 종합하면, 분석방법, 대상, 지역, 데이터로 구분하여 차이점이 있었다. 특히 이 중 분석대상은 연료소모량을 비롯하여 주요 배기가스인 NO_x, SO_x, NMVOC, PM, HC, CO, CO₂ 등이었으며, 다음 <그림 1-4>는 각 연구에서 분석한 대상을 종합한 그림이다. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 본 연구에서는 기존 연구들이 분석한 대상 중 탄화수소(Hydrocarbon, HC)를 제외한 대부분의 오염원을 분석함으로써 분석대상에서 차별성을 두고자 하였다. 또한 분석지역, 데이터, 검증 측면에서도 타 연구대비 차별성이 있으며, 이러한 차별성을 통해 학문적, 정책적으로 기여할 수 있도록 본 연구를 수행하게 되었다.

<그림 1-4> 선행연구 비교(분석대상 배기가스)



다음 <표 1-2>는 앞의 분석방법론 관련 선행연구들을 종합한 표로, 본 연구에서는 이러한 기존 연구들의 한계를 극복하기 위해 정밀하지 않은 AIS 데이터를 보정해 전 세계 항만을 대상으로 연료소모량 및 배기가스 배출량을 추정하는 모형을 개발했으며, 실제 선사의 연료사용량과 추정된 사용량을 비교함으로써 검증을 진행했다.

〈표 1-2〉 선택연구 비교(분석방법, 대상, 지역, 데이터 등)

연구	분석방법	분석대상	분석지역	분석데이터	검증
Corbett and Fischbeck(1997)	Top-Down	NOx, SOx	전 세계	선박유 사용량	-
Corbett and Koehler(2003)	Bottom-Up	NOx, SOx, CO ₂ , HC, PM	전 세계	주요 선박 그룹별 데이터	O
Corbett <i>et al.</i> (2009)	Bottom-Up	CO ₂	전 세계 (미국 입출항 선박)	선박별 입출항 데이터	-
Chang <i>et al.</i> (2013)	Bottom-Up	CO ₂	인천항	선박별 입출항 데이터	-
Le <i>et al.</i> (2020)	Bottom-Up	연료소모량	전 세계 (A 선사)	선박별 입출항 데이터	O
Chen <i>et al.</i> (2016)	Bottom-Up	SO ₂ , NOx, PM ₁₀ , PM _{2.5} , NMVOC, CO	토펙항	AIS 데이터	-
Chen <i>et al.</i> (2018)	Bottom-Up	PM _{2.5}	중국 보하이리밍 지역	AIS 데이터	-
본 연구	Bottom-Up	연료소모량, NOx, SOx, NMVOC, PM, CO, CO ₂	5대 주요항만 및 전 세계	AIS 데이터	O

자료: 저자 작성

다음 <표 1-3>은 선박 배기가스 배출량 분석과 관련된 기존 문헌들을 분석·종합한 표이다. 아직까지 국내에는 체계적인 선박 배기가스 배출량 분석 틀에 관한 연구는 없는 것으로 조사되었고, 다만 이를 위한 기존 방법론 및 효과에 대해 분석한 연구가 있는 것으로 조사되었다. 해외에서는 앞의 분석방법론 관련 선행연구 조사에서 설명했듯이 지역별로 배기가스 배출량을 추정하기 위한 다양한 연구들이 수행된 것으로 조사되었다. 하지만 AIS 규정에서 요구하고 있는 3분 내외의 주기로 수집된 데이터는 확보하기가 어려워 정밀한 수준의 배기가스 배출량 분석이 어려웠다. 본 연구에서는 이러한 데이터로도 누락되는 배출량 계산을 최소화할 수 있도록 새로운 모형을 개발했으며, 검증을 통해 모형에 대한 신뢰성을 확보하고자 했다. 또한 이를 기반으로 주요 항만별, 연도별, 월별, 시간대별로 배출량을 추정하고 주요 저감 요인에 대해 분석함으로써 우리나라 선박 배기가스 배출량 관련 정책 추진을 위한 기초자료 제공 기반을 마련하고자 하였다.

<표 1-3> 선행연구 검토 및 차별성

구 분	선행연구와의 차별성		
	연구목적	연구방법	주요연구내용
국내연구			
주요 선행 연구	1. 과제명: 우리나라 선박 배출 대기오염물질의 체계적 관리 방안 연구 2. 연구자(연도): 이호춘 외 (2016) 3. 연구목적: 선박 배기가스를 효율적으로 관리하기 위한 기술적, 제도적 관리 방안 수립	4. 문헌조사 5. 전문가 자문 6. 해외 인터뷰 7. 설문조사 (컨조인트 분석)	8. 선박 배기가스의 글로벌 관리 동향 9. 우리나라 선박 배기가스 관리 현황 및 개선 방향 10. 선박 배기가스 감소에 따른 경제적 효과 분석 11. 선박 배기가스 배출량 산정방법론 조사(Tier 1/2/3) ⇒ 실제 배출량 분석 사례 없음

구 분	선형연구와의 차별성		
	연구목적	연구방법	주요연구내용
국외연구			
2	• 과제명: Emissions from Ships • 연구자(연도): J.J. Corbett, P. Fischbeck(1997) • 연구목적: 주요 대기오염원인 선박들의 배출량 분석 및 정책 이슈 도출	• 문헌조사 • 데이터 분석	• 배기가스 분석을 위한 기초자료 조사 - 해양 배기가스 테스트 자료 조사(SO_x, NO_x) - 글로벌 선박유 사용량 조사 - 선박별 엔진 특징 조사 • 글로벌 배기가스 배출량 분석 (Top-Down) $P_P = \sum_{i=1}^n E_{P,i} \cdot (F \cdot A_i)$ ⇒ Top-Down 분석으로 인해 부정확
3	• 과제명: Updated Emissions from Ocean Shipping • 연구자(연도): J.J. Corbett, H.W. Koehler(2003) • 연구목적: 선박 연료소모량 계산을 통한 배기가스 배출량 분석 방법론(Bottom-Up)을 적용하여 전 세계 배기가스 배출량 분석	• 문헌조사 • 데이터 분석	• 엔진출력(P), 엔진부하계수(F), 평균엔진가동시간(t), 연료소모량(SFOC)을 고려한 선박 연료소모량 추정 및 배출계수(E)를 적용한 글로벌 배기가스 배출량 분석 (Bottom-Up) $\text{Emissions} = \sum_{\text{Subgroup } i=1}^n P_{\text{MW}} \cdot F_{\% \text{MW}} \cdot t_{\text{hrs/yr}} \cdot E_{\text{g/kWh}} \cdot \frac{1}{1000}$ ⇒ 선박별 데이터가 아닌 선박 그룹별 데이터 적용
4	• 과제명: The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping • 연구자(연도): J.J. Corbett et al.(2009) • 연구목적: 선박의 속도 감소가 미국 항만을 출입하는 선박의 CO₂ 배출에 어떤 영향을 미치는지 평가	• 문헌조사 • 데이터 분석	• 속도(S_{1k}, S_{0k}), 이동거리(d), 엔진 출력(MF, AF)을 고려한 선박 연료소모량 추정 방법론 개발 (Bottom-Up) $F_{ijk} = \left[MF_k \cdot \left(\frac{S_{1k}}{S_{0k}} \right)^3 + AF_k \right] \cdot \frac{d_{ij}}{24S_{1k}}$ • 선박의 속도 감소에 따른 CO₂ 배출량 변화 분석 ⇒ 단순 입출항 정보, STEEM을 통한 이동거리 추정 등에 따른 정확도 감소

구 분	선행연구와의 차별성		
	연구목적	연구방법	주요연구내용
5	- 과제명: Assessing greenhouse gas emissions from port vessel operations at the Port of Incheon - 연구자(연도): 장영태 외 (2013) - 연구목적: 인천항의 선박 활동별 온실가스(CO₂) 배출량 측정	- 문헌조사 - 데이터 분석	- Corbett <i>et al.</i>(2009)에서 사용한 식을 적용해 인천항 내의 선박 유형별/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
6	- 과제명: Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China - 연구자(연도): D. Chen <i>et al.</i>(2016) - 연구목적: AIS 데이터를 기반으로 배기가스(SO₂, NOx, PM 등) 추정	- 문헌조사 - AIS 데이터 분석	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 $E_{i,j,k,l} = P_j \times LF_{j,l} \times T_{j,k,l} \times EF_{i,j,k} / 10^6$ ⇒ AIS 수신 지점별 계산으로 인한 누락 지점 발생
7	- 과제명: 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 - 연구자(연도): D. Chen <i>et al.</i>(2018) - 연구목적: AIS 기반 선박 배출 PM_{2.5} 항만도시 영향 분석	- 문헌조사 - AIS 데이터 분석 - WRF/Chem 분석¹³⁾	2016년 연구에서 중국 보하이림 지역으로 범위를 확장 - WRF/Chem 모델을 적용함으로써 선박으로 인해 배출된 PM_{2.5}가 항만도시에 어떻게 영향을 미치는지를 분석 ⇒ 중국 대상 분석
7	- 과제명: Voyage-based statistical fuel consumption models of ocean-going container ships in Korea - 연구자(연도): Luan T. Le <i>et al.</i>	- 문헌조사 - 회귀분석	- 자료* 확보의 어려움을 해결하기 위해 기존 Corbett <i>et al.</i>(2009)의 식을 변형한 연료소모량 추정 모델 개발 * 선박별 이동거리, 운항속도, 시간,

구 분	선행연구와의 차별성		
	연구목적	연구방법	주요연구내용
	<i>a.l.(2020)</i> • 연구목적: 연료소모량 계산 시 필요한 자료* 확보의 어려움을 해결하기 위해 회귀분석을 통한 계수 추정		엔진출력 등 $F_{ijk} = \alpha T_{ijk} S_{lk}^3 + \beta T_{ijk} + \varepsilon$ - 국내 선사 데이터(2012~2016년, 38,687항차)로 회귀분석을 통해 연료소모량 계수 (α, β) 추정 및 검증 ⇒ 추정된 회귀식으로 계산되어 정확도 감소
본 연구	• 과제명: AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구 • 연구자(연도): 강무홍 외 (2020) • 연구목적: 기존 배기가스 배출량 분석 모형의 한계를 보완한 Bottom-Up 방식의 모형 개발 및 전 세계 배출량 분석	• 문헌조사 • 전문가 인터뷰 • AIS 데이터 분석(구간) • 회귀분석	• AIS 기반 선박별 실제 동선 분석을 통한 배기가스 배출량 분석 모형 개발 - 선박 이동 구간(선)을 고려하여 계산하므로 누락 배출량 미발생 및 구간 내 배출량 배분 가능 - 항만별/연도별/월별/시간대별 배출량 분석 및 주요 저감 요인* 분석 * 선박크기 변화, 속도, 엔진타입 등

자료: 저자 작성

제 2 장

AIS 기반 선박 연료소모량 추정 모형 개발

제1절 AIS 데이터 개요 및 구조 분석

1. AIS 데이터 개요

그동안 항로 주변의 물표 식별을 위해 전파의 특성을 사용하는 레이더를 주로 사용해 왔으나, 음영지역 또는 소형 물표의 위치식별이 어렵고 물표의 명칭 등 세부 정보 확인이 어렵다는 문제점이 있어 이러한 문제점을 해결하기 위해 AIS로 불리는 선박자동식별장치가 개발되었다.¹⁴⁾ AIS는 항공교통관리를 위한 항공용 ADS(Automated Dependant Surveillance) 트랜스폰더를 개발한 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, 이하 ICAO)의 경험을 토대로 추진되었으며, 1997년 AIS 성능기준 초안이 완성되었고, 1998년 IMO 해사안전위원회에서 관련 표준이 채택됨으로써 총톤수 300

14) 김병욱 외(2016. 9), p. 3.

톤 이상의 신조선의 AIS 장착이 2002년 7월부터 의무화되었다.¹⁵⁾ 이렇게 수집되는 AIS 데이터를 기반으로 선박 이동 상태를 분석함으로써 항만관제 업무 및 충돌과 같은 사고를 방지하는 데 활용하고 있다.

선박용 AIS는 <표 2-1>과 같이 크게 SOLAS 선박용인 Class-A 타입과 비 SOLAS 선박용인 Class-B 타입 등 두 가지 종류로 구분될 수 있으며, 두 가지 종류의 차이점은 경도 및 위도, 속도, 선수방향, 시간 등을 포함하는 동적정보를 전송하는 주기가 다르다는 것이다.¹⁶⁾ 아래 표를 보면, Class-A 타입의 경우 항해 중에는 2~10초 주기로 동적정보를 전송하고 정박 중에도 속도에 따라 10초~3분 주기로 전송하는 것으로 규정되어 있어 Class-B 타입보다 전송주기가 짧은 것을 알 수 있다.

<표 2-1> 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
동적정보 전송주기	• 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

2. AIS 데이터 구조 및 한계점 분석

1) AIS 데이터 구조

AIS 데이터는 크게 정적·동적·항해정보 등 3가지 정보로 구분할

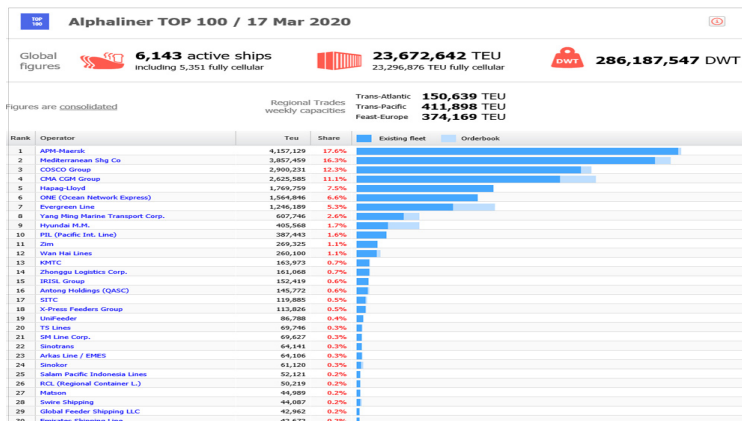
15) 김병욱 외, 위의 책, p. 3.

16) 김병욱 외, 위의 책, p. 4.

수 있다. 정적정보는 거의 변경이 없는 선명, 해상이동업무 식별부호(MMSI: Maritime Mobile Service Identity), 호출부호, IMO 번호, 선박제원 등을 포함하고 있으며, 항해정보는 목적지, 도착예정시간, 흘수 등 운용자가 필요시마다 입력해야 하는 정보를 포함하고 있다.¹⁷⁾ 동적정보는 선박 운용 중 주기적으로 전송되어야 하는 데이터로, 선박의 현재 위치 및 상태를 나타내는 위·경도, 속도, 방향, 전송시간, 운항상태¹⁸⁾ 등을 포함하고 있다.

본 연구에서는 IHS Markit의 AIS 데이터를 구매하여 사용했으며, 2019년 기준으로 총 5,019척의 컨테이너 전용선 데이터를 포함하고 있는 것으로 분석되었다. Alphaliner에 따르면, 현재 전 세계적으로 운항 중인 컨테이너 전용선이 5,351척¹⁹⁾인 것으로 조사되어 본 연구에서 활용한 AIS 데이터가 거의 대부분의 컨테이너 전용선을 포함하고 있는 것으로 조사되었다.

〈그림 2-1〉 전 세계 컨테이너 선박 규모



자료: Alphaliner(검색일: 2020. 3. 17)

17) 김병욱 외, 위의 책, p. 4.

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

19) Alphaliner(검색일: 2020. 3. 17)

AIS 데이터 중 정적정보는 IHS Markit 데이터 기준으로 291개의 필드를 가지고 있으며, 본 연구에서는 <표 2-2>와 같이 선박식별번호, 선박 유형, 속도, 연료소모량, 연료 종류, 엔진별 동력 등 연료소모량 및 배기가스 배출량을 계산하기 위해 필요한 정보만을 추출하여 사용했다.

<표 2-2> 본 연구에서 사용한 AIS 정적정보

정적정보명	설명	예
IMO Number	선박식별번호	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 정적정보 설명서 기반 저자 작성

AIS 동적정보는 IHS Markit 데이터 기준으로 18개의 필드를 가지고 있으며, 본 연구에서는 <표 2-3>과 같이 선박식별번호, 현재 위도·경도·시간·속도·운항상태 등 6개의 필드를 사용했다.

〈표 2-3〉 본 연구에서 사용한 AIS 동적정보

정적정보명	설명	예
IMO Number	선박식별번호	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, Under way using engine 등

자료: IHS Markit AIS 동적정보 설명서 기반 저자 작성

2) AIS 데이터 특징 및 한계점

본 연구에서 사용한 2019년도 AIS 데이터를 분석해 본 결과, 다음 〈표 2-4〉와 같이 총 5,015척의 컨테이너 전용선 중 6,000TEU 미만의 선박이 3,700척 이상인 것으로 조사되어 대부분을 차지하는 것으로 분석되었다.

〈표 2-4〉 컨테이너 전용선 크기별 척수

단위: TEU, 척

선박 크기	척수
0*	4
3,000 미만	2,667
3,000 이상 6,000 미만	1,083
6,000 이상 8,000 미만	271
8,000 이상 12,000 미만	623
12,000 이상 15,000 미만	234
15,000 이상	133
합계	5,015

주: * AIS 정적정보에 선박크기가 없는 데이터

자료: IHS Markit AIS 정보(2019년) 기반 저자 분석

또한 전체 데이터 수는 약 41백만 건, 선박들의 평균 이동속도는 12.92노트인 것으로 조사되었다. 평균 수신주기는 약 57분인 것으로 조사되었는데, 이는 AIS 미수신율²⁰⁾ 및 데이터 한계²¹⁾로 인해 앞서 조사한 AIS 수신주기인 2초~3분과는 많은 차이를 보이고 있었다. 만약 10노트로 운항하는 선박이 57분 주기로 AIS 데이터를 송신하고 있다면 약 17.6km²²⁾마다 송신하는 것으로, 이렇게 긴 주기를 가지고 있는 데이터를 그대로 사용한다면 두 수신 지점 사이의 배기가스 배출량 배분이 되지 않아 정확한 분석 결과를 얻을 수 없다.

본 연구는 이러한 AIS 데이터의 한계점을 보완함으로써 보다 정확한 연료소모량 및 배기가스 배출량 추정이 가능한 모형 개발의 필요성에 의해 추진되었으며, 모형에 대한 자세한 내용은 다음 절부터 소개하고자 한다.

〈표 2-5〉 AIS 데이터 특징(IHS Markit 2019년도 기준)

구분	값
데이터 수(건)	41,476,760
선박 평균 이동속도(kn)	12.92
평균 수신주기(분)	56.9111

자료: IHS Markit AIS 정보(2019년) 기반 저자 분석

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

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

22) $17.6\text{km} = 10\text{kn} \times 1.852\text{km/h} \times (57 / 60)$

3. AIS 데이터 전처리

본 연구에서 사용한 IHS Markit에서는 이동과 관련된 동적정보로 LRIMOShipNo, ShipName, ShipType 등 총 18개의 값을 월별로 제공하고 있다. 2019년 기준(컨테이너, 벌크 포함)으로 총 12개의 텍스트 파일을 수령했으며, 그 용량은 약 21.0GB에 달했다. 앞의 항에서 설명했다시피 본 연구에서는 6개의 필드만이 필요해 나머지 12개 값을 제거하여 용량을 9.8GB까지 줄여 추후 모형 연산 시 불필요한 시간 발생을 줄였다. 또한 12개 파일로 선박 구분 없이 등록시간 순서대로 등록되어 있는 동적정보를 선박별 등록시간 순서로 정렬하여 1개의 파일로 취합함으로써 모형 연산 시 별도의 처리 없이 순차적으로 읽어 연산할 수 있도록 하였다.

다음으로 선박 운항상태(MoveStatus) 필드에 대한 전처리 과정을 수행했다. 선박 운항상태는 다음의 표와 같이 Aground, Moored, Anchored, Engaged in fishing 등 총 10개의 상태가 있었으며, 이 중 Aground, Engaged in fishing, N/A, Not under command, Restricted maneuverability 등 특별한 상황을 나타내는 5개의 값은 잘못 입력되었을 가능성이 높기 때문에 속도가 1노트 이상이면 Under way using engine으로 변경하고 아니면 바로 앞의 상태로 변경했다. 또한 Constrained by draught, Under way sailing은 운항 중인 상태이기 때문에 Under way using engine으로 통일했다.

Chen *et al.*(2016)의 연구에 따르면, 이러한 선박 운항상태는 선박의 담당자가 매뉴얼로 업데이트하기 때문에 정확하지 않을 수도 있다²³⁾하고, 또한 선박 운항상태가 어떠한든 연료를 소모하고 있는 것

23) Chen, *et al.*, *op. cit.*, p. 12.

이기 때문에 본 연구에서는 이러한 불확실한 상태정보를 연료소모량을 계산하기 위해 <표 2-6>과 같이 필요한 값인 Moored(MO), Anchored(AN), Under way using engine(UU) 등 세 가지 값으로 모두 변경해 사용했다.

<표 2-6> 선박 운항상태(MoveStatus) 전처리 방안 및 결과

선박 운항상태	전처리 전 코드	전처리 방안	전처리 후 코드
Moored	MO	-	MO
Anchored	AN	-	AN
Aground	AG	(속도 $\geq$ 1노트) 이상이면 UU로 변경 (속도 < 1노트) 바로 앞 코드(MO 또는 AN)로 변경	UU/MO/AN
Engaged in fishing	EN		
N/A	NA		
Not under command	NO		
Restricted maneuverability	RE	UU로 변경	UU
Constrained by draught	CO		
Under way sailing	US	-	
Under way using engine	UU	-	

자료: IHS Markit AIS 정보(2019년) 기반 저자 분석

Chen *et al.*(2016) 등의 연구에서는 이러한 운항상태를 구분하기 위해 8노트 이상은 운항 중, 1노트에서 8노트 사이는 정박 또는 묘박을 위해 낮은 속도로 운항 중, 1노트 미만은 정박 또는 묘박 중으로 구분해 배출량을 분석했다. 이렇게 구분하는 것도 의미가 있다고 판단되나 본 연구에서는 추후 실제 컨테이너터미널에 접안한 선박들이 배출한 배기가스 배출량을 분석하고 AMP(Alternative Maritime Power)와 같은 친환경 접안시설의 효과를 확인할 수 있도록 속도로 구분하지 않고 AIS 동적정보에 포함된 선박 운항상태 정보를 최대한 활용하고자 했다. 본 연구를 통해 분석된 연료소모량을 보면, 다음 그림과 같이 정박(파란색 원)과 묘박(녹색 원)이 구분될 수 있어 정박

시에만 사용될 수 있는 AMP의 효과를 보다 정확히 확인할 수 있다.

〈그림 2-2〉 연료소모량 분석 결과 예



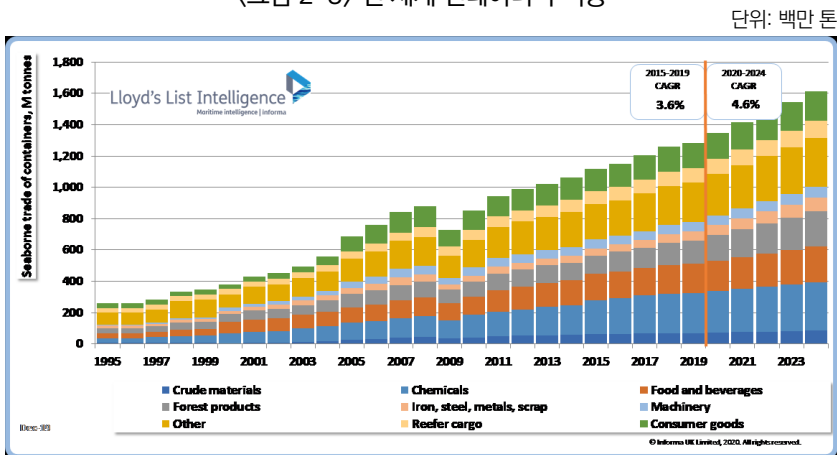
자료: Google 지도를 바탕으로 저자 작성

앞의 데이터 전처리 과정을 정리하자면, 동적정보 필드를 18개에서 필요한 6개로 줄였고, 선박별 등록시간 순으로 정렬했으며, 마지막으로 선박 운항상태를 10개에서 필요한 3개로 통일했다. 이러한 전처리 작업들은 대용량 데이터를 다루는 것이기 때문에 최근 데이터 처리를 위해 많이 사용되고 있는 R과 프로그래밍 언어인 Java를 연동하여 처리했다.

제2절 AIS 기반 선박 연료소모량 추정 모형 개발

IMO(2015)의 보고서에 따르면, 2012년 기준으로 전 세계 컨테이너 선들이 약 66,000천 톤²⁴⁾의 연료를 사용한 것으로 분석되었다. 또한 전 세계 컨테이너 무역량은 <그림 2-3>에서 볼 수 있듯이 2012년 약 1,000백만 톤에서 2019년 1,300백만 톤으로 30%²⁵⁾ 증가한 것으로 조사되었다. 연료사용량이 컨테이너 무역량과 비례하여 증가한다고 가정한다면 2019년도 연료사용량은 85,800천 톤으로 계산되어 컨테이너 선박이 많은 연료를 사용하고 있다는 것을 알 수 있다.

<그림 2-3> 전 세계 컨테이너 무역량



자료: Lloyd's List(검색일: 2020. 8. 23)

선박 배기가스 배출량을 분석하기 위해서는 기본적으로 연료사용량이 필요하다. 사용된 연료량에 NO_x, SO_x, PM 등 배기가스 배출계수를 곱함으로써 배기가스 배출량을 계산할 수 있다. 따라서 본 연구

24) IMO, *op. cit.*, p. 7.

25) Lloyd's List(검색일: 2020. 8. 23)

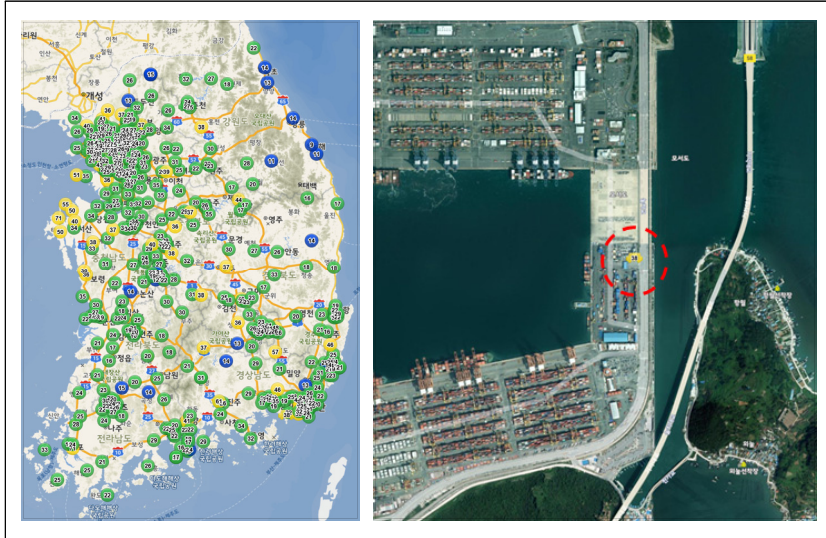
에서는 먼저 선박 연료소모량 추정 모형을 개발하였으며, 모형의 검증을 위해서 A선사가 실제 사용한 연료소모량과 추정된 연료량을 비교한다.

1. 현황 및 문제점 분석

1) 국내 항만 배기가스 배출량 분석 체계 부재

우리나라에서는 2020년 1월 1일 발표된 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」을 통해 선박배출 규제해역 지정, 저속운항해역 지정, 친환경 선박 및 하역장비 전환 촉진 등 친환경 항만 구축을 위한 관련 제도를 운영 중에 있다. 특히 동 법 제9조(실태조사 등) 제1항을 통해 항만지역 대기질 측정소를 58개 설치함으로써 항만 대기질 현황을 측정하기 위한 기반도 마련했다. 하지만 무역항 15개소, 도시지역 8개소, 해경선박 35척에만 설치가 되어 있어 전체 항만의 세부 지역별 배기가스 배출 현황을 모니터링하기에는 어려움이 따랐다. 이는 측정소 설치 시 많은 비용과 시간이 필요하고 세밀한 측정을 위해 수백, 수천 곳에 설치하는 것은 현실적으로 어렵기 때문일 것이다. 현재 에어코리아의 ‘대기오염 관련정보 통합지도’를 통해 확인한 바에 따르면 부산 신항에는 다목적 부두에 1개, 부산 북항에는 허치슨 터미널에 1개 등 적은 수의 측정소가 운영되고 있는 것으로 조사되어 항만 전 지역의 대기오염 상태를 세밀하게 파악하는 데는 한계가 있는 것으로 분석되었다.

〈그림 2-4〉 우리나라 측정소 운영 현황(좌) 및 부산 신항 운영 현황(우)



자료: 에어코리아(검색일: 2020. 12. 21)

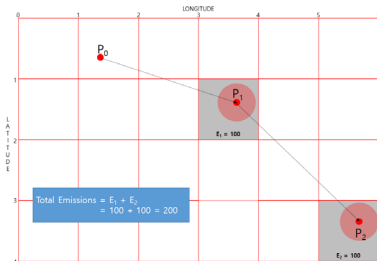
이러한 비용적, 시간적 한계를 해결하기 위해 최근 주요 배출원인 선박의 배기가스 발생량을 모니터링함으로써 항만별 배출 현황을 분석하는 연구들이 추진되고 있다. 해외에서는 이미 1990년대부터 관련 연구를 수행해 오고 있으나 국내에서는 최근 연구가 시작되고 있어 가까운 중국보다도 늦었다는 지적을 받고 있다. 이러한 연구들의 부재로 인해 우리나라는 국내 항만에서 선박들이 배출하는 배출량을 추정할 수 없었고, 특히 정량적인 효과를 제시하지 못함으로써 친환경 항만 관련 정책 추진을 뒷받침할 수 있는 자료 제시가 어려운 상황이었다.

2) 기존 모형 적용의 한계

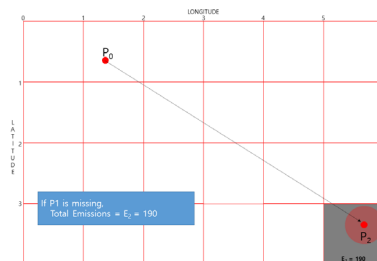
앞의 1절에서 언급했듯이 본 연구에서 확보한 IHS Markit의 AIS 데이터는 평균 57분 간격으로 선박들의 이동 동선이 기록된 동적정보를 포함하고 있다. 이는 IMO에서 규정하고 있는 2초~3분 간격과는 크게 차이가 나는 것으로 이렇게 간격이 넓은 데이터를 활용할 경우 다음 <그림 2-5>와 같이 각 지점 사이에는 배출량이 계산되지 않는다는 문제점이 있다. 기존 타 연구들은 해당 국가별로 주기가 짧은 데이터를 확보했기 때문에 이러한 문제를 고려하지 않아도 됐지만, 본 연구에서는 전 세계 항만을 대상으로 배기가스 배출량을 분석하고 있기 때문에 IHS Markit과 같은 AIS 판매자의 글로벌 데이터를 구매하여 사용할 수밖에 없어 이러한 한계점을 해결해야 했다. 또한 중간 지점이 누락될 경우 <그림 2-6>과 같이 누락된 지점 다음 지점에 값이 모두 할당되는 문제가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 한계점들을 해결하기 위해 계산된 연료소모량을 선박이 지나는 격자무늬(Grid) 형태의 지역에 지나는 거리 비율만큼 배분하는 새로운 모형을 개발해 적용했다.

<그림 2-5> 기존 모형 적용의 한계 1
(두 지점 사이 배출량 미적용)



<그림 2-6> 기존 모형 적용의 한계 2
(중간지점 누락 시 다음 지점 과대 추정)



2. 모형 개발 및 검증

1장에서 언급했다시피 기존 연구들은 선박유 판매량을 기준으로 배기가스 배출량을 추정하는 Top-Down 방식의 연구가 대부분이었다. Top-Down 방식은 선박의 이동거리나 속도 등 실제 선박 운항정보를 이용하지 않고 계산한 것이기 때문에 정확성이 떨어질 수밖에 없었다. 이러한 Top-Down 방식의 한계를 보완한 것이 Bottom-Up 방식이며, 이는 실제 선박 운항정보를 이용하여 연료소모량을 분석해 배기가스 배출량을 계산하는 연구로 최근 관련 연구가 증가하고 있는 추세다.²⁶⁾ 다만 Bottom-Up 방식으로 배출량을 추정하기 위해서는 이동거리, 시간, 속도, 선박 제원 등 상세한 정보가 필요해 자료 수집에 많은 어려움이 있었으나 본 연구에서는 AIS 데이터를 구입함으로써 필요한 정보를 확보했다.

1) 연료소모량 추정 모형 개발

(1) 연료소모량 계산식

본 연구는 앞의 1장에서 설명했다시피 보다 정확한 배기가스 배출량 추정을 위해 먼저 선박의 이동속도도 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 주엔진 하루 연료사용량(MF_k)과 보조엔진 하루 연료사용량(AF_k)에 실제 이동거리(D_{ij})를 이동속도(S_{1k})로 나눈 값을 곱하여 계산한다. 주엔진 하루 연료사용량에는 엔진부하를 계산하여 적용하기 위해 이동속도(S_{1k})를 설계속도(S_{0k})로 나눈 값의 세

26) Le *et al.*, *op. cit.*, p. 4.

제공 값을 곱하는 식이다.

$$F_{ijk} = [MF_k (\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + AF_k] \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \dots\dots\dots [\text{식 } 5]$$

본 연구에서는 AIS 동적정보를 통해 순차적으로 파악되는 선박별 지점 간 이동거리와 이동속도를 계산하여 동 식에 적용함으로써 연료소모량을 계산했다. 다만, IMO의 2015년도 보고서와 마찬가지로 이동속도가 설계속도보다 1.5배²⁷⁾ 이상 계산되는 지점은 제외하고 연료소모량을 계산했으며, 이는 GPS의 수신 오류로 인해 발생하는 문제로 연료소모량 계산에 큰 영향을 줄 수 있으므로 제외하고 계산하였다.

AIS 정적정보에는 설계속도(S_{0k})에서 주엔진 하루 연료사용량(MF_k)을 대부분 제공하고 있어 이를 적용했으며, 없는 경우는 주엔진 출력을 이용해 연료사용량을 계산하는 다음 식²⁸⁾을 사용²⁹⁾했다. 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 주엔진과 마찬가지로 동 식을 함께 사용했다.

$$0.200\text{kg/kWh for Steam Turbine or } 0.180\text{kg/kWh for Diesel} \dots\dots\dots [\text{식 } 6]$$

Corbett *et al.*(2009)의 연구에서는 주엔진 하루 연료사용량 계산 시 주엔진 부하를 0.8, 보조엔진 부하를 0.5로 적용해 사용했으며, 본 연구에서도 이를 적용하여 계산했다. 다만 보조엔진 부하의 경우는

27) IMO, *op. cit.*, p. 166.

28) Barras(2004), p. 133.

29) 주엔진 하루 연료사용량이 있는 선박은 4,636척, 없는 선박은 379척(2019년 기준).

〈표 2-7〉과 같이 미국 EPA에서 발표한 ICF Consulting(2009) 연구³⁰⁾의 보조엔진 부하인 항해 중 0.13, 접근 중 0.48, 정박 중 0.19를 사용하였다. 앞 절에서 설명했듯이 정박 중은 AIS 동적정보의 선박 운항상태를 통해 구분했으며, 항해 중과 접근 중은 별도의 구분자가 없어 Ng *et al.*(2013)³¹⁾, Chen *et al.*(2016)³²⁾의 연구에서처럼 1노트 미만은 정박 중으로, 8노트 미만은 접근 중으로 가정해 계산했다.

〈표 2-7〉 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), p. 2·12

(2) 연료소모량 지역 배분 방법

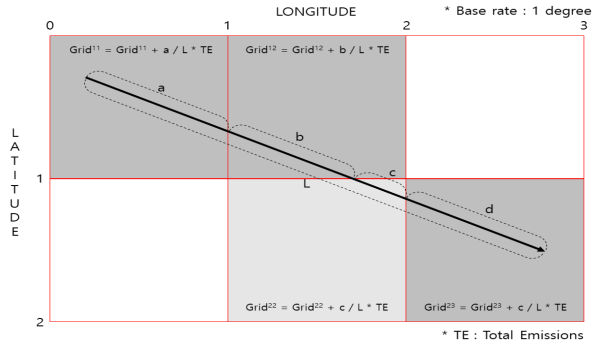
앞서 말했듯이 본 연구에서는 아래 〈그림 2-7〉과 같이 두 지점을 연결하고 두 지점 간 이동 시 사용한 연료량을 계산하여 이를 설정된 위경도 크기의 격자무늬 형태 지역에 지나간 거리 비율만큼 배분하는 개념을 기본으로 하는 모형을 개발하였다.

30) ICF Consulting(2009), p.2·12.

31) Ng *et al.*(2013), p. 104.

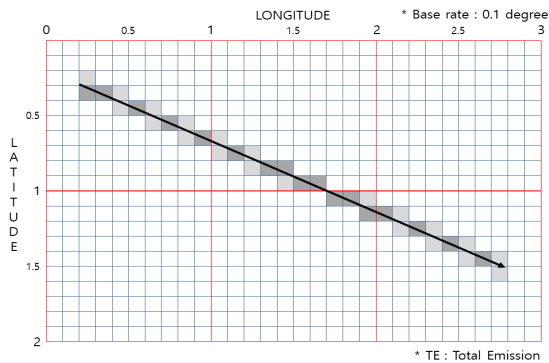
32) Chen *et al.*(2016), *op. cit.*, p. 12.

〈그림 2-7〉 연료소모량 지역 배분 방식(위경도 1도)



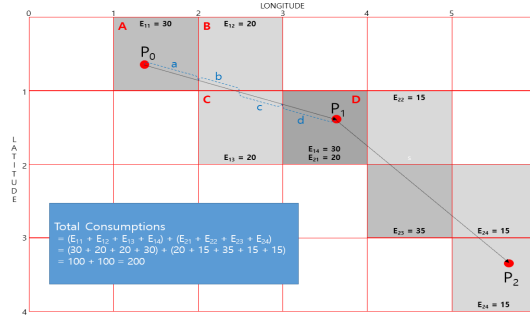
이런 개념을 기반으로 모형을 개발함으로써 원하는 위경도 배율로 격자무늬 지역을 설정해 계산이 가능하므로 〈그림 2-8〉과 같이 지역이 세분화된 고해상도의 결과도 얻을 수 있었다.

〈그림 2-8〉 연료소모량 지역 배분 방식(위경도 0.1도)



다음 〈그림 2-9〉를 예로 들어 배분 방법에 대해 설명하자면, P_0 부터 P_1 지점까지 총 100톤의 연료를 사용했다고 계산되었을 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 계산된다.

〈그림 2-9〉 연료소모량 지역 배분 예



본 연구에서는 지역을 위경도 0.01도로 설정하여 연료소모량을 추정했으며, 이는 부산을 기점으로 동서로는 약 0.889km, 남북으로는 약 1.11km 길이의 지역이 하나의 격자무늬 지역 크기로 설정되었다.

2) 연료소모량 검증

본 연구에서는 개발된 연료소모량 추정 모형의 검증을 위해 실제 A선사의 2019년도 연료사용량과 추정된 소모량을 비교했다. 선형별 비교 대상 선박으로 4,600TEU급 6척, 5,500TEU급 6척, 6,800TEU급 4척, 8,600TEU급 6척, 13,100TEU급 7척 등 총 29척의 선박과 비교했으며, 총 545,000톤을 사용한 것으로 조사되었다. 본 연구의 모형은 총 614,772톤 소모한 것으로 추정했으며, 이는 실제 사용량보다 약 12.8% 많이 추정된 것이었다.

선형별로 차이를 비교해 보면 〈표 2-8〉과 같이 4,600TEU급에서는 3.9%, 5,500TEU급에서는 -0.2%, 6,800TEU급에서는 -9.0%, 8,600TEU급에서는 43.2%, 그리고 13,100TEU급에서는 13.3% 높게 추정된 것으로 분석되어, 8,600TEU급이 타 선형보다 많이 추정된 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 이렇게 약 13% 정도 높게 추정된 결과를 확인하고

이를 보정하여 배기가스 배출량을 분석하려 했으나, 대상 선사가 1개였고 특정 선형에서만 과대 추정되는 것을 감안하여 본 모형을 그대로 사용해 분석을 진행했다.

〈표 2-8〉 실제 사용량과 연료소모량 추정 결과 비교

선형(TEU)	선박수(척)	실제 사용량(톤)	추정값(톤)	비교(%)
4,600	6	98,500	102,321	103.9%
5,500	6	82,500	82,330	99.8%
6,800	4	103,000	93,738	91.0%
8,600	6	136,000	194,782	143.2%
13,100	7	125,000	141,601	113.3%
합계(평균)	29	545,000	614,772	112.8%

자료: 저자 분석

3. 연료소모량 추정

1) 주요 항만별 연료소모량 추정

(1) 추정 결과

본 연구에서는 전 세계 주요항만을 대상으로 개발된 모형을 이용해 연료소모량을 추정·비교하였다. 대상 항만으로는 부산항, 싱가포르항, 로테르담항, LA/LB항, 상하이항 등 5개 항만을 선정하였으며, 운항 중, 정박 중, 묘박 중일 때 연료소모량을 각각 추정하였다. 운항 중일 때는 주엔진과 보조엔진이 사용하는 연료량을 구분하여 각 엔진별로 사용 비율도 분석하였다.

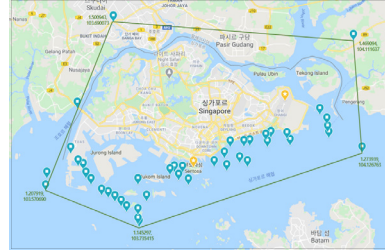
부산항 항만구역은 항만공사 자료를 조사하여 구분했으며, 자료가 없는 해외 항만구역은 IHS Global의 'Ports & Terminals Guide 2019'의 항계 정보를 참고하여 아래 그림들과 같이 설정했다.

〈그림 2-10〉 부산항 대상 항만구역



자료: 부산항만공사, 부산항 관제구역도 참고;
Google 지도를 바탕으로 저자 작성

〈그림 2-11〉 싱가포르항 대상 항만구역



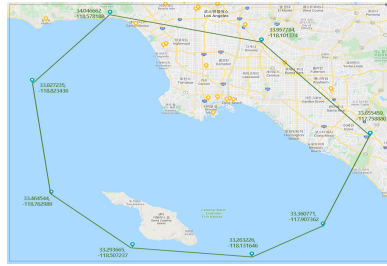
자료: Ports & Terminals Guide 2019 참고;
Google 지도를 바탕으로 저자 작성

〈그림 2-12〉 로테르담항 대상 항만구역



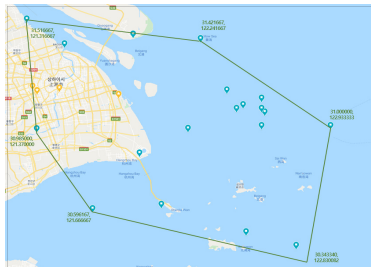
자료: Ports & Terminals Guide 2019 참고;
Google 지도를 바탕으로 저자 작성

〈그림 2-13〉 LA/LB항 대상 항만구역



자료: Ports & Terminals Guide 2019 참고;
Google 지도를 바탕으로 저자 작성

〈그림 2-14〉 상하이항 대상 항만구역



자료: Ports & Terminals Guide 2019 참고; Google 지도를 바탕으로 저자 작성

먼저 대한민국의 대표항만인 부산항 내에서의 연료소모량을 추정했다. 다음 표에서 볼 수 있듯이, 부산항 내에서는 매년 18만 톤 이상의 연료를 사용하고 있는 것으로 분석되었다. 운항 중 70% 이상의 연료가 사용되고 있으며, 정박 중에는 25%, 묘박 중에는 2% 이상 사

용되고 있는 것으로 조사되었다. 특히 보조엔진만 봤을 때 전체 중 90% 이상 사용되고 있어 항만 내에서는 주엔진보다 보조엔진으로 인한 연료소모 및 배기가스 배출이 많은 것으로 분석되었다.

〈표 2-9〉 부산항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤

연도	운항 중		정박 중	요박 중	합계	가장 많은 지역 소모량
	주엔진	보조엔진	보조엔진	보조엔진		
2018년	17,286 (9.3%)	117,916 (63.5%)	46,415 (25.0%)	4,038 (2.2%)	185,656 (100.0%)	24,432
2019년	16,435 (9.0%)	116,791 (63.8%)	45,752 (25.0%)	4,009 (2.2%)	182,987 (100.0%)	24,452

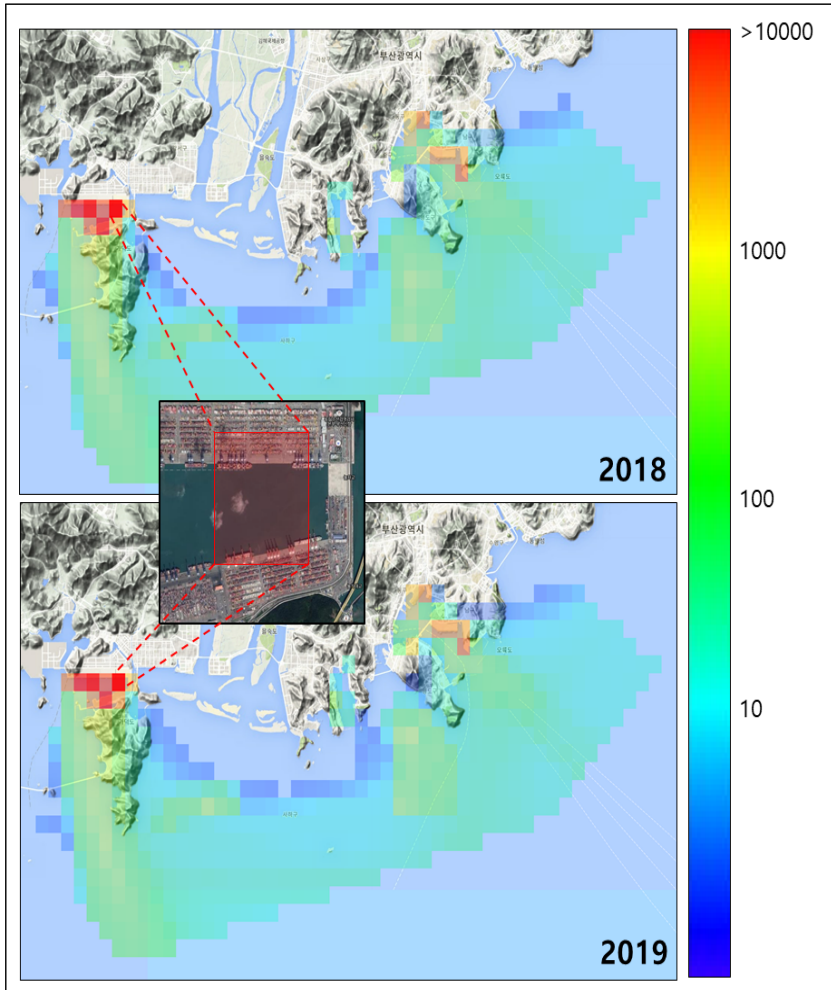
자료: 저자 분석

다음 그림에서 볼 수 있듯이, 대부분의 연료는 부산 신항과 부산항 북항에서 많이 사용되고 있는 것을 볼 수 있다. 그 중 가장 많은 연료를 사용하고 있는 지역은 부산신항국제터미널(PNIT)과 에이치엠엠피 에스에이신항만(HPNT)이 위치하고 있는 지역³³⁾으로 단위 면적당 매년 24,400톤 이상 사용하고 있는 지역으로 분석되어 부산항 내에서는 가장 많은 연료소모 지역으로 조사되었다.

33) {35°04'48.0"N(35.08°), 128°49'12.0"E(128.82°)} ~ {35°04'12.0"N(35.07°), 128°49'48.0"E(128.83°)}

〈그림 2-15〉 부산항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤



자료: Google 지도를 바탕으로 저자 작성

다음으로 세계 환적 1위 항만인 싱가포르항 내에서의 연료소모량을 추정했다. 다음 표에서 볼 수 있듯이, 싱가포르항 내에서는 매년 38만 톤 정도의 연료를 사용하고 있는 것으로 분석되었다. 운항 중

약 75%의 연료가 사용되고 있으며, 정박 중에는 약 21%, 묘박 중에는 3~4% 사용되고 있는 것으로 조사되었다. 보조엔진만 봤을 때 전체 중 85% 이상 사용되고 있어 부산항과 마찬가지로 항만 내에서 주엔진보다 보조엔진으로 인한 연료소모 및 배기가스 배출이 많은 것으로 분석되었다.

〈표 2-10〉 싱가포르항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤

연도	운항 중		정박 중	묘박 중	합계	가장 많은 지역 소모량
	주엔진	보조엔진	보조엔진	보조엔진		
2018년	57,122 (14.9%)	232,558 (60.6%)	81,076 (21.1%)	13,030 (3.4%)	383,787 (100.0%)	24,787
2019년	53,290 (13.7%)	237,522 (61.2%)	81,756 (21.1%)	15,302 (3.9%)	387,870 (100.0%)	25,376

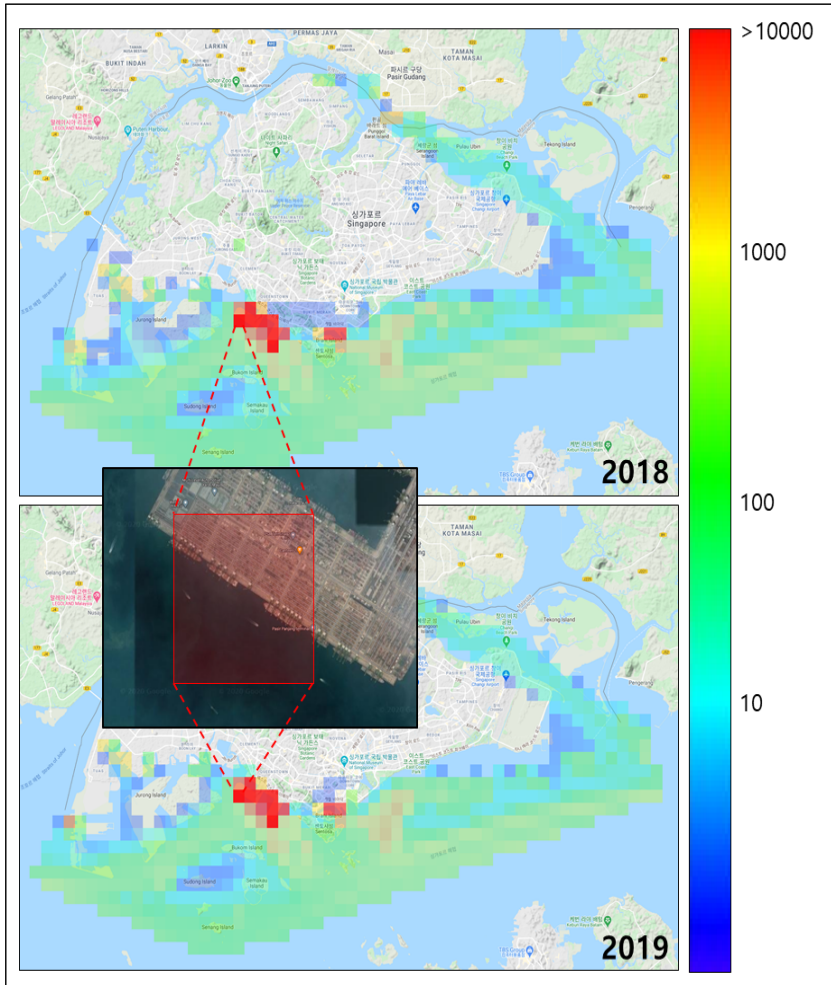
자료: 저자 분석

대부분의 연료는 Pasir Panjang 터미널이 있는 지역에서 사용되고 있는 것을 볼 수 있으며, Keppel, Brani 터미널이 있는 지역에서도 많은 연료가 사용되고 있는 것을 볼 수 있다. 그 중 가장 많은 연료를 사용하고 있는 지역은 Pasir Panjang 터미널 3단계가 위치하고 있는 지역³⁴⁾으로 단위 면적당 매년 24,000톤 이상 사용하고 있는 지역으로 분석되어 싱가포르항 내에서도 가장 많은 연료소모 지역으로 조사되었다.

34) {1°16'48.0"N(1.28°), 103°45'00.0"E(103.75°)} ~ {1°16'12.0"N(1.27°), 103°45'36.0"E(103.76°)}

〈그림 2-16〉 싱가포르항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤



자료: Google 지도를 바탕으로 저자 작성

유럽 내 대표항만인 로테르담항은 다음 표에서 볼 수 있듯이 매년 약 18만 톤 정도의 연료를 사용하고 있는 것으로 분석되었다. 앞의 두 항만과 마찬가지로 운항 중 약 70%의 연료가 사용되고 있으며,

정박 중에는 약 28%, 묘박 중에는 1% 미만 사용되고 있는 것으로 조사되었다. 보조엔진만 봤을 때 전체 중 90% 이상 사용되고 있어 앞의 두 항만과 마찬가지로 항만 내에서 주엔진보다 보조엔진으로 인한 연료소모 및 배기가스 배출이 많은 것으로 분석되었다.

〈표 2-11〉 로테르담항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤

연도	운항 중		정박 중	묘박 중	합계	가장 많은 지역 소모량
	주엔진	보조엔진	보조엔진	보조엔진		
2018년	17,479 (9.3%)	117,488 (62.2%)	52,419 (27.8%)	1,358 (0.7%)	188,743 (100.0%)	17,117
2019년	16,865 (9.5%)	111,310 (62.5%)	49,089 (27.5%)	932 (0.5%)	178,196 (100.0%)	16,469

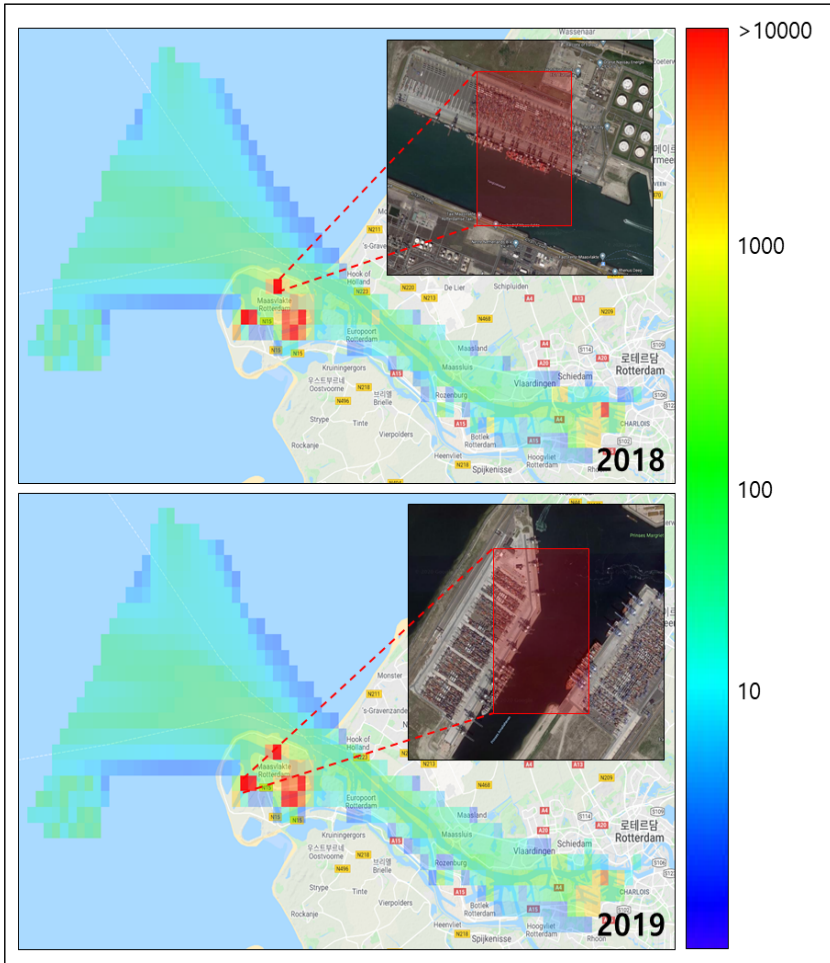
자료: 저자 분석

다음 그림에서 볼 수 있듯이, 대부분의 연료는 로테르담항 Maasvlakte 지역에서 사용되고 있었으며, 2018년에는 ECT(Europe Container Terminal)가 있는 지역³⁵⁾에서, 2019년에는 새로 개장한 RWG(Rotterdam World Gateway)가 있는 지역³⁶⁾에서 각각 17,117 톤, 16,469톤을 사용한 것으로 분석되어 로테르담항 내에서도 가장 많은 연료소모 지역으로 조사되었다.

35) {51°58'48.0"N(51.98°), 4°01'48.0"E(4.03°)} ~ {51°58'12.0"N(51.97°), 4°02'24.0"E(4.04°)}
 36) {51°57'36.0"N(51.96°), 3°59'24.0"E(3.99°)} ~ {51°57'00.0"N(51.95°), 4°00'00.0"E(4.00°)}

〈그림 2-17〉 로테르담항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤



자료: Google 지도를 바탕으로 저자 작성

미국 내 가장 많은 컨테이너를 처리하고 있는 LA/LB항은 다음 표에서 볼 수 있듯이 매년 약 17만 톤의 연료를 사용하고 있는 것으로 분석되었다. 운항 중 약 70%의 연료가 사용되고 있어 앞의 항만들과

비슷했으며, 정박 중에는 약 30%, 묘박 중에는 1% 전후로 사용되고 있는 것으로 조사되었다. 보조엔진만 봤을 때 전체 중 약 92% 사용되고 있어 5개 항만 중 가장 높은 비중으로 사용되고 있는 것으로 분석되었다. LA/LB항은 이렇게 보조엔진 사용 연료를 통해 발생하는 배기가스 배출을 줄이기 위해 AMP, AMECS 등의 친환경 장비를 사용하고 있다.

〈표 2-12〉 LA/LB항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤

연도	운항 중		정박 중	묘박 중	합계	가장 많은 지역 소모량
	주엔진	보조엔진	보조엔진	보조엔진		
2018년	13,848 (8.3%)	103,317 (61.8%)	48,998 (29.3%)	1,067 (0.6%)	167,230 (100.0%)	24,521
2019년	12,752 (7.6%)	104,828 (62.3%)	48,282 (28.7%)	2,339 (1.4%)	168,200 (100.0%)	24,046

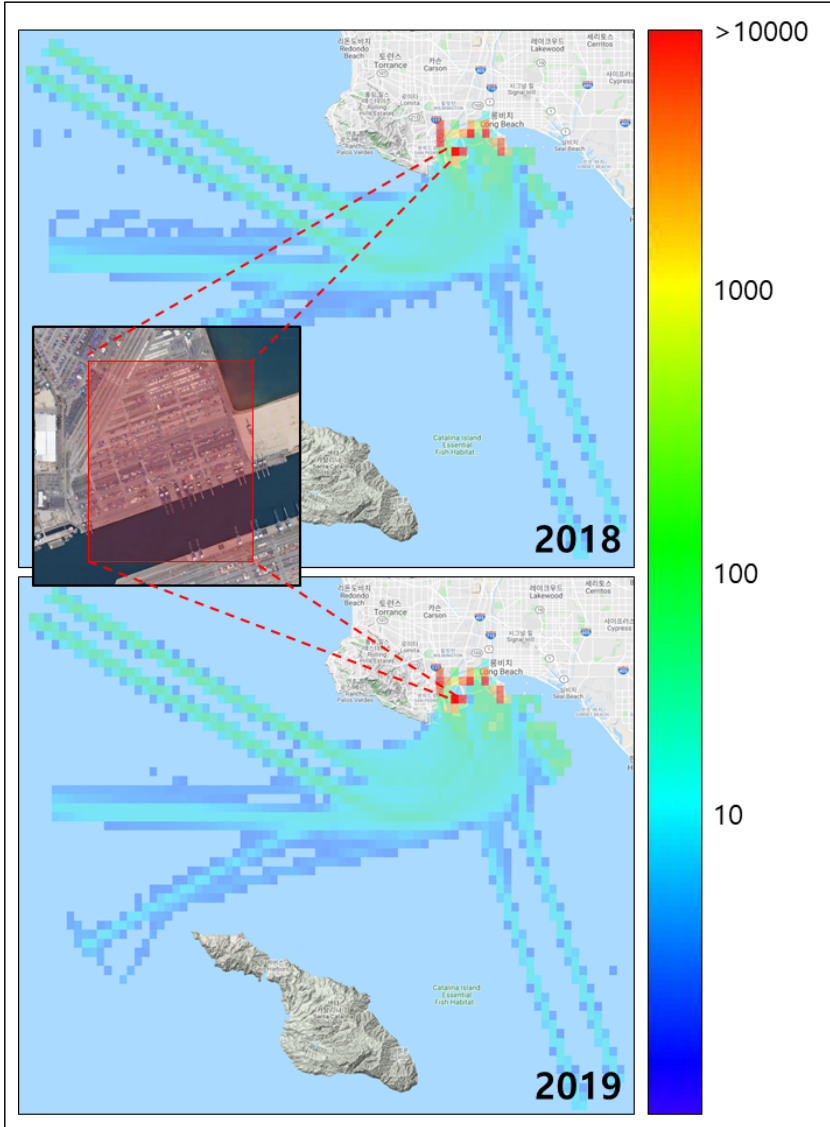
자료: 저자 분석

다음 그림에서 볼 수 있듯이 APM 터미널, APL 터미널, TTI 터미널, LBCT에 집중되어 연료가 사용되고 있는 것으로 분석되었으며, 그 중 가장 많은 연료를 사용하고 있는 지역은 APM 터미널과 APL 터미널이 있는 지역³⁷⁾으로 단위 면적당 매년 24,000톤 이상 사용하고 있는 것으로 분석되었다.

37) {33°44'24.0"N(33.74°), 118°15'36.0"W(-118.26°)}~{33°43'48.0"N(33.73°), 118°15'00.0"W(-118.25°)}

〈그림 2-18〉 LA/LB항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤



자료: Google 지도를 바탕으로 저자 작성

전 세계에서 가장 많은 컨테이너를 처리하고 있는 상하이항은 다음 표에서 볼 수 있듯이 매년 약 60~70만 톤의 연료를 사용하고 있는 것으로 분석되었다. 이는 다른 4개 항만보다 많이 사용하는 것으로 타 항만들보다 더 많은 선박이 입출항하기 때문이기도 하지만 더 넓은 구역을 대상으로 분석했기 때문이다. 따라서 타 항만보다 운항하는 구간이 더 많이 포함되어 있어 운항 중 사용하는 연료사용량이 약 80%로 타 항만들에 비해 높은 것으로 분석되었으며, 반대로 정박 중에는 타 항만들이 20~30% 사용한 것에 비해 상하이항에서는 약 10% 사용한 것으로 분석되었다.

〈표 2-13〉 상하이항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤

연도	운항 중		정박 중	묘박 중	합계	가장 많은 지역 소모량
	주엔진	보조엔진	보조엔진	보조엔진		
2018년	177,104 (25.4%)	371,589 (53.4%)	79,569 (11.4%)	67,691 (9.7%)	695,953 (100.0%)	23,906
2019년	168,992 (27.1%)	326,813 (52.5%)	86,269 (13.9%)	40,506 (6.5%)	622,579 (100.0%)	28,134

자료: 저자 분석

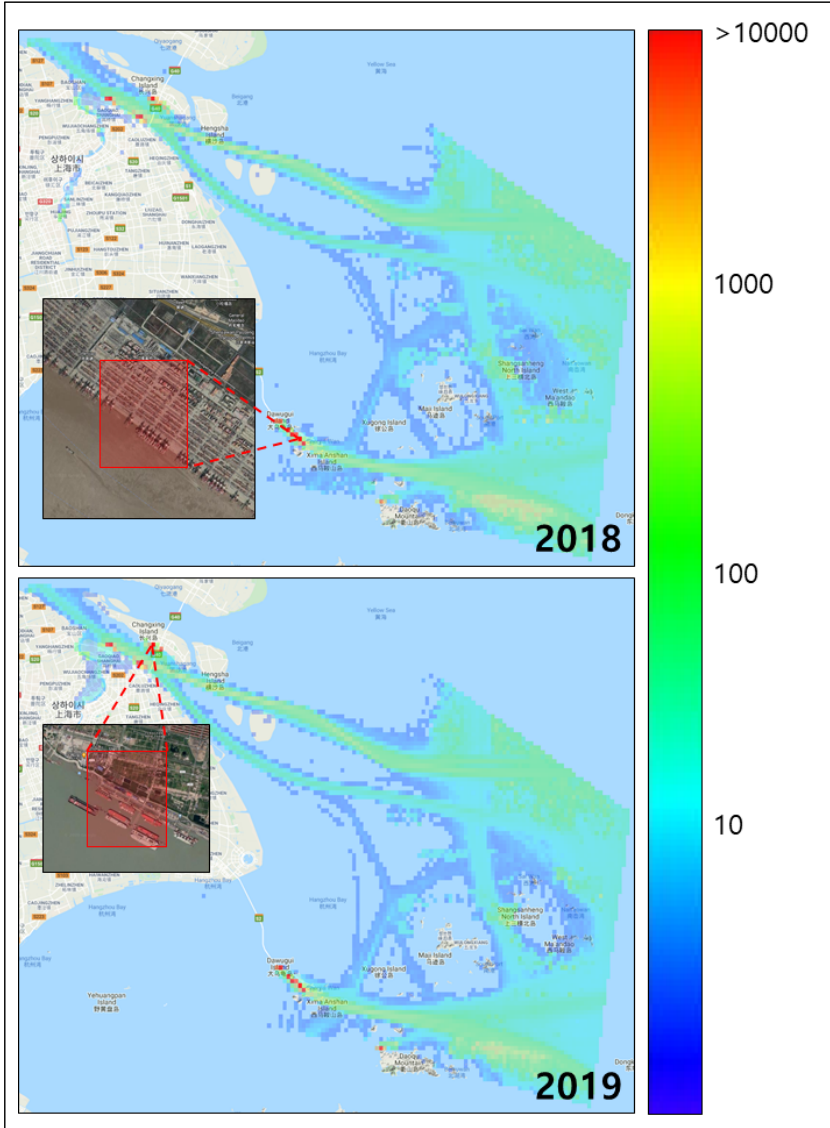
다음 그림에서 볼 수 있듯이, 대부분의 연료는 양산항이 있는 지역에서 사용되고 있었으며, 2018년에는 양산항 2단계가 있는 지역³⁸⁾에서, 2019년에는 특이하게 중국선박공업집단(China Shipbuilding Industry Corporation, CSIC)의 상하이강남조선소가 있는 창신도가 있는 지역³⁹⁾에서 각각 23,906톤, 28,134톤을 사용한 것으로 분석되었다. 창신도 지역에서는 2018년도 19,788톤을 사용한 것으로 보아 이는 중국선박중공업집단에서 건조하거나 수리한 선박들의 통항 및 대기에 따른 영향인 것으로 판단된다.

38) {30°37'12.0"N(30.62°), 122°04'12.0"E(122.07°)} ~ {30°36'36.0"N(30.61°), 122°04'48.0"E(122.08°)}

39) {31°22'48.0"N(31.38°), 121°41'24.0"E(121.69°)} ~ {31°22'12.0"N(31.37°), 121°42'00.0"E(121.7°)}

〈그림 2-19〉 상하이항 지역별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤



자료: Google 지도를 바탕으로 저자 작성

(2) 종합 및 특징 분석

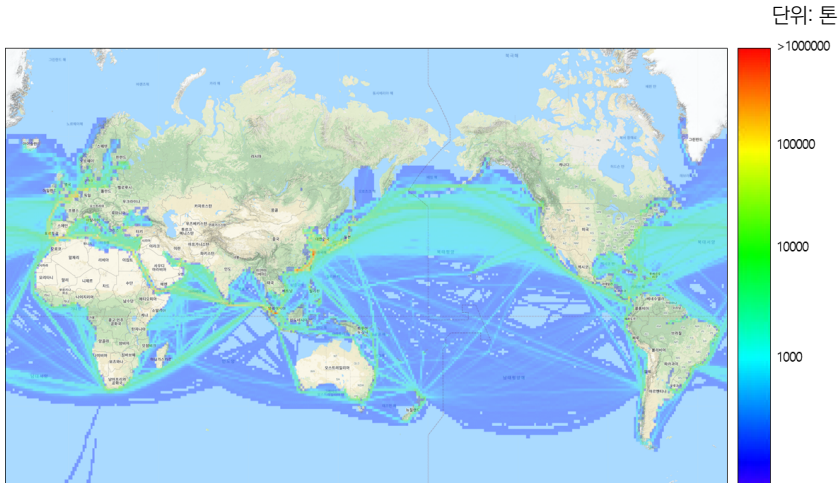
앞의 5개 항만에 대해 연료소모량을 추정한 결과를 정리하면 다음 <표 2-14> 및 <표 2-15>와 같으며, 상하이항이 비교한 5개 항만 중 가장 많은 연료를 사용하고 있는 것으로 분석되었다. 다만 이는 상하이항이 타 항만들에 비해 더 많은 선박들이 입출항하는 이유도 있지만, 더 넓은 구역을 대상으로 분석했기 때문에 상하이항이 타 항만들에 비해 절대적으로 많은 연료를 소모하고 있다고 단정할 수는 없다.⁴⁰⁾

전 세계적으로는 2019년 기준 73,647천 톤의 연료를 사용한 것으로 분석되었으며, 이 중 약 96%가 운항 중 사용된 것으로 분석되었다. 보조엔진이 사용한 연료량은 전체의 24%인 것으로 분석되었는데, 5개 항만에서 약 83%가 보조엔진으로부터 기인된 결과와 비교해 본다면, 항만 내 보조엔진으로부터 발생하는 배기가스 배출이 많은 것을 추정할 수 있다. 따라서 항만 내에서 보조엔진 사용을 줄일 수 있는 기술적, 정책적 지원 마련도 필요할 것이다.

2018년과 2019년 가장 많은 단위지역에서 소모되는 연료량은 로테르담항을 제외하고 대부분 24,000톤 전후로 사용되고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 항만의 혼잡도 및 접안시간과 관련되어 있는 것으로 보이며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 2018년 및 2019년 통틀어 가장 많은 연료가 사용된 지역은 상하이항 창신도로 28,314톤을 사용했으며, 이는 선박 건조 및 수리와 관련해서인 것으로 보여 이 또한 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다.

40) 단위 면적당, 물동량 대비 등 추가적인 분석을 통해서는 순위 도출 가능.

〈그림 2-20〉 전 세계 연료소모량 추정 결과(2019년, 위경도 1도 기준)



자료: Google 지도를 바탕으로 저자 작성

〈표 2-14〉 주요 항만별 연료소모량 추정 결과 종합(2018년)

단위: 톤

항만	운항 중		정박 중	묘박 중	합계	가장 많은 지역 소모량
	주엔진	보조엔진	보조엔진	보조엔진		
부산항	17,286 (9.3%)	117,916 (63.5%)	46,415 (25.0%)	4,038 (2.2%)	185,656 (100.0%)	24,432
싱가포르항	57,122 (14.9%)	232,558 (60.6%)	81,076 (21.1%)	13,030 (3.4%)	383,787 (100.0%)	24,787
로테르담항	17,479 (9.3%)	117,488 (62.2%)	52,419 (27.8%)	1,358 (0.7%)	188,743 (100.0%)	17,117
LA/LB항	13,848 (8.3%)	103,317 (61.8%)	48,998 (29.3%)	1,067 (0.6%)	167,230 (100.0%)	24,521
상하이항	177,104 (25.4%)	371,589 (53.4%)	79,569 (11.4%)	67,691 (9.7%)	695,953 (100.0%)	23,906
5개 항 합계	282,839 (17.4%)	942,868 (58.2%)	308,477 (19.0%)	87,184 (5.4%)	1,621,369 (100.0%)	24,787 (싱가포르항)
전 세계	60,418,580 (77.9%)	14,349,915 (18.4%)	2,059,887 (2.7%)	753,743 (1.0%)	77,582,125 (100%)	-

주: 각 항만별 대상지역 크기가 상이하기 때문에 이를 통해 각 항만들의 절대 순위 비교는 불가

자료: 저자 분석

〈표 2-15〉 주요 항만별 연료소모량 추정 결과 종합(2019년)

단위: 톤

항만	운항 중		정박 중	묘박 중	합계	가장 많은 지역 소모량
	주엔진	보조엔진	보조엔진	보조엔진		
부산항	16,435 (9.0%)	116,791 (63.8%)	45,752 (25.0%)	4,009 (2.2%)	182,987 (100.0%)	24,452
싱가포르항	53,290 (13.7%)	237,522 (61.2%)	81,756 (21.1%)	15,302 (3.9%)	387,870 (100.0%)	25,376
로테르담항	16,865 (9.5%)	111,310 (62.5%)	49,089 (27.5%)	932 (0.5%)	178,196 (100.0%)	16,469
LA/LB항	12,752 (7.6%)	104,828 (62.3%)	48,282 (28.7%)	2,339 (1.4%)	168,200 (100.0%)	24,046
상하이항	168,992 (27.1%)	326,813 (52.5%)	86,269 (13.9%)	40,506 (6.5%)	622,579 (100.0%)	28,134
5개 항 합계	268,334 (17.4%)	897,264 (58.3%)	311,148 (20.2%)	63,088 (4.1%)	1,539,832 (100.0%)	28,134 (상하이항)
전 세계	56,155,083 (76.2%)	14,621,714 (19.9%)	2,114,573 (2.9%)	755,346 (1.0%)	73,646,716 (100.0%)	-

주: 각 항만별 대상지역 크기가 상이하기 때문에 이를 통해 각 항만들의 절대 순위 비교는 불가
자료: 저자 분석

2) 월별·시간대별 연료소모량 추정

선박의 연료사용과 관련해 시기나 시간별로 특이점이 있는지 분석하기 위해 월별, 시간대별로 연료소모량을 분석했다. 2018년도와 2019년도를 기준으로 분석했으며, 전 세계 사용량과 부산항의 사용량을 비교했다.

먼저 월별 연료소모량을 분석해 보면, 전 세계적으로는 2018년과 2019년 매월 6,465천 톤, 6,137천 톤을, 부산은 15.5천 톤, 15.2천 톤을 사용한 것으로 분석되었다. 2018년이 2019년보다 많은 연료를 사용한 것은 전 세계 무역의 영향인 것으로 보이며, 2018년 시작된 미-중 무역분쟁의 영향으로 인한 전 세계 무역 감소에 따른 영향일 것으

로 예측된다.

전 세계 월별 연료소모량 추이를 보면 2018년, 2019년 모두 비슷한 추이를 보이고 있으며, 특히 2월과 11월에 연료사용량이 줄어드는 경향이 있음을 볼 수 있다. 이에 비해 부산항은 2019년 월별 연료사용량의 변동이 2018년에 비해 심한 것을 볼 수 있었으며, 특히 2019년 12월에는 급감했는데 물동량이 11월 1,825천 톤에서 12월 1,867천 톤으로 증가⁴¹⁾한 것과 반대의 결과로 향후 추가적인 연구를 통해 원인 확인이 필요할 것으로 보인다.

〈표 2-16〉 월별 연료소모량 추정 결과

단위: 톤

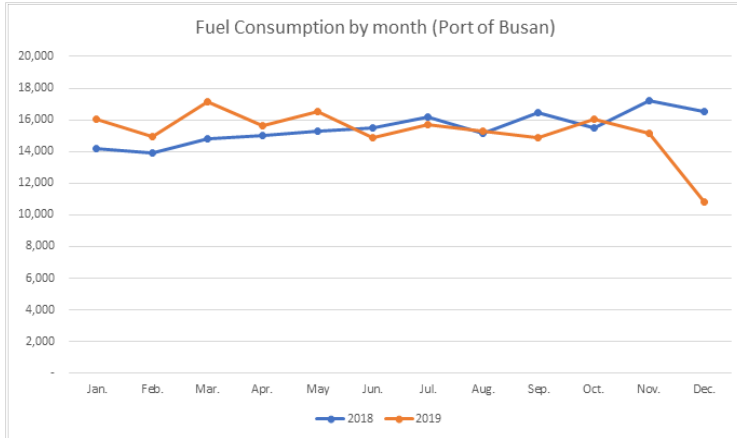
구분	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월
부산항	2018	14,180	13,922	14,828	15,025	15,258	15,467
	2019	16,028	14,960	17,152	15,621	16,548	14,907
전 세계	2018	6,390,954	5,906,044	6,394,728	6,510,554	6,833,016	6,593,759
	2019	6,224,211	5,677,724	6,339,960	6,211,924	6,436,818	6,226,549
구분	연도	7월	8월	9월	10월	11월	12월
부산항	2018	16,155	15,144	16,430	15,518	17,181	16,548
	2019	15,694	15,261	14,899	16,023	15,114	10,781
전 세계	2018	6,831,403	6,702,920	6,417,775	6,457,425	6,219,189	6,323,970
	2019	6,373,760	6,415,687	6,091,630	6,000,050	5,529,967	6,117,861

자료: 저자 분석

41) PORT-MIS(검색일: 2020. 9. 7)

〈그림 2-21〉 월별 연료소모량 추이(부산항)

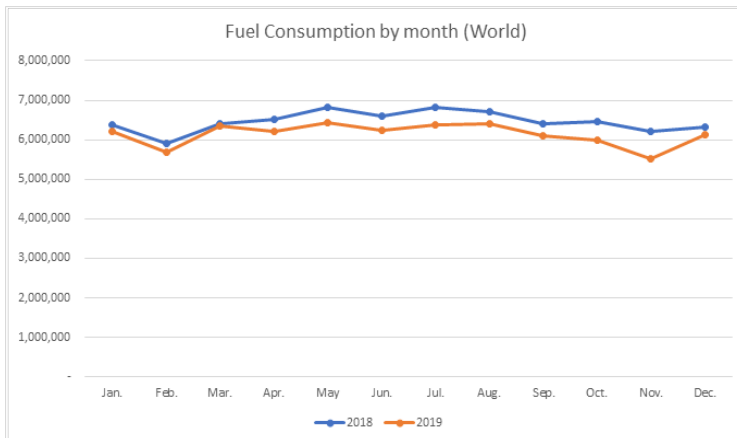
단위: 톤



자료: 저자 분석

〈그림 2-22〉 월별 연료소모량 추이(전 세계)

단위: 톤



자료: 저자 분석

다음으로 시간대별 연료소모량을 분석했다. 세계 시간대별 연료소모량은 2018년과 2019년 유사한 패턴을 보였는데, GMT 시간 기준

으로 1시부터 3시까지, 13시부터 15시까지 사용량이 많았고 반대로 5시부터 7시까지, 11시부터 12시까지, 18시부터 19시까지 사용량이 적은 것으로 분석되었다. 부산항은 전 세계보다는 아니지만 2018년과 2019년 유사한 패턴을 보였으며, 특히 한국시간(GMT+9) 기준으로 17시부터 18시에 집중되는 것으로 분석되었다.

〈표 2-17〉 시간대별 연료소모량 추정 결과

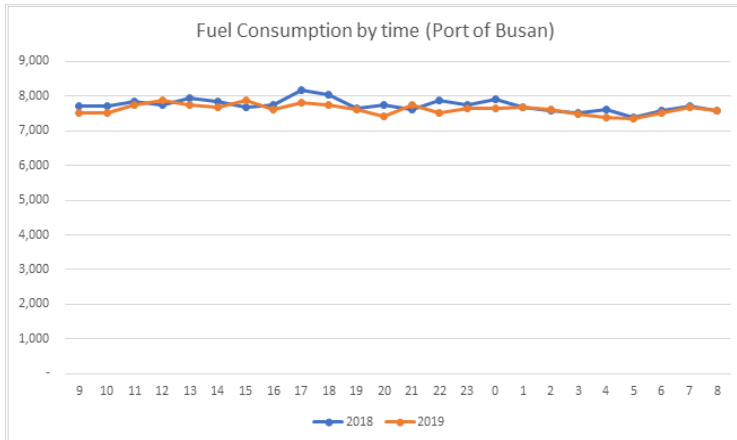
단위: 톤

구분	GMT (한국시간)	00-01 (09-10)	01-02 (10-11)	02-03 (11-12)	03-04 (12-13)	04-05 (13-14)	05-06 (14-15)
부산항	2018	7,724	7,702	7,836	7,737	7,940	7,843
	2019	7,534	7,514	7,761	7,878	7,732	7,688
전 세계	2018	3,211,023	3,296,790	3,399,122	3,339,776	3,190,552	3,118,374
	2019	3,131,270	3,209,040	3,161,684	3,054,284	3,006,354	2,947,339
구분	GMT (한국시간)	06-07 (15-16)	07-08 (16-17)	08-09 (17-18)	09-10 (18-19)	10-11 (19-20)	11-12 (20-21)
부산항	2018	7,673	7,744	8,178	8,031	7,660	7,741
	2019	7,868	7,608	7,823	7,746	7,607	7,413
전 세계	2018	3,064,877	3,093,830	3,188,822	3,219,716	3,261,857	3,209,284
	2019	2,952,725	3,010,152	3,045,081	3,047,612	3,018,450	2,985,195
구분	GMT (한국시간)	12-13 (21-22)	13-14 (22-23)	14-15 (23-24)	15-16 (00-01)	16-17 (01-02)	17-18 (02-03)
부산항	2018	7,618	7,871	7,752	7,899	7,684	7,583
	2019	7,735	7,506	7,635	7,641	7,685	7,625
전 세계	2018	3,185,654	3,309,900	3,423,218	3,355,598	3,245,215	3,189,128
	2019	3,103,519	3,194,948	3,157,788	3,085,878	3,117,993	3,051,725
구분	GMT (한국시간)	18-19 (03-04)	19-20 (04-05)	20-21 (05-06)	21-22 (06-07)	22-23 (07-08)	23-24 (08-09)
부산항	2018	7,521	7,614	7,401	7,593	7,727	7,584
	2019	7,486	7,380	7,352	7,524	7,676	7,569
전 세계	2018	3,140,476	3,155,231	3,199,897	3,285,207	3,286,889	3,211,301
	2019	2,972,249	3,034,468	3,079,789	3,119,117	3,113,845	3,045,636

자료: 저자 분석

〈그림 2-23〉 시간대별 연료소모량 추이(부산항)

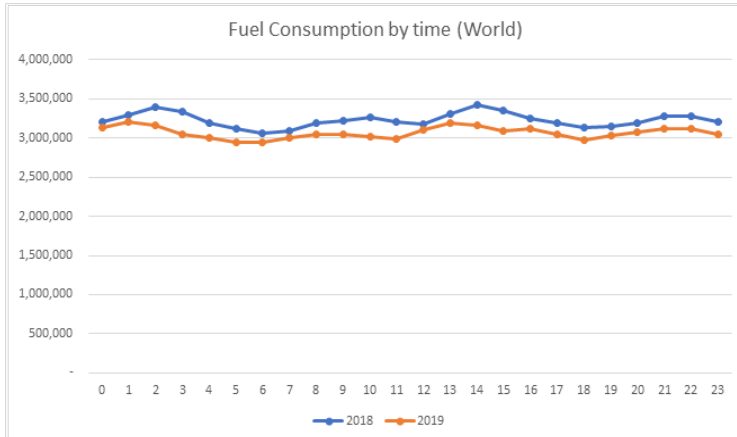
단위: 톤



자료: 저자 분석

〈그림 2-24〉 시간대별 연료소모량 추이(전 세계)

단위: 톤



자료: 저자 분석

제 3 장

글로벌 선박 배기가스 배출량 분석

본 장에서는 앞의 2장에서 개발된 연료소모량 추정모형을 기반으로 전 세계 및 주요 항만별로 사용되는 연료소모량을 계산하고 연료단위별 NO_x, SO_x, NMVOC, PM 등의 배출계수를 적용해 배기가스 배출량을 분석한다. Chen *et al.*(2016) 등의 연구에서는 아래의 식과 같이 연료소모량을 계산하지 않고 엔진출력(P)에 엔진부하(LF)와 운항시간(T), 배출계수(EF)를 곱하여 NO_x, SO_x, PM 등을 추정하였으나 본 연구에서는 보다 정확한 추정을 위해 연료소모량을 먼저 계산한 후 이를 A선사 선박들의 실제 연료사용량과 비교하는 검증하는 절차를 거쳤다.

$$E_{i,j,k,l} = \sum_1^n P_j \times LF_{j,l} \times T_{j,l} \times EF_{i,j,k} \dots\dots\dots [\text{식 7}]$$

제1절 배기가스별 배출계수 분석

배기가스별 배출계수는 유럽환경청(EEA: European Environment Agency)에서 제공하는 계수를 사용했다. EEA에서는 연료종류별 소비량에 따라 배기가스를 계산할 수 있는 Tier 1 알고리즘과 선박들의 엔진제원(저속, 중속, 고속엔진)을 고려한 Tier 2 알고리즘, 그리고 마지막으로 선박의 운항활동(항해, 정박, 접근)별, 엔진종류(주, 보조 엔진)별로 계산하기 위한 Tier 3 알고리즘을 제공하고 있으며, 특히 각 알고리즘별로 배기가스를 계산하기 위해 필요한 배기가스별 배출계수를 함께 정리해서 제공하고 있다.

본 연구에서는 EEA에서 제공하는 계수 중 Tier 1의 SO_x, CO 배출계수⁴²⁾와 Tier 3의 NO_x, NMVOC, PM 배출계수⁴³⁾를 다음 표와 같이 정리해 사용했으며, 특히 SO_x의 경우 유종별 황함유량(S)을 적용해 산출했다. 이 중 선박이 사용하고 있는 BFO의 황함유량은 ICCT(The International Council of Clean Transportation)의 2017년 보고서에서 언급한 2.5%⁴⁴⁾를 적용했으며, MDO/MGO의 황함유량은 EEA에서 제시한 0.5%⁴⁵⁾를 적용해서 계산했다.

42) EEA(2019. 11. 13), pp. 14-15.

43) *ibid.*, pp. 23-24.

44) ICCT(2017. 5), p. 2.

45) EEA, *op. cit.*, p. 15.

〈표 3-1〉 배기가스 배출계수

단위: kg/tonne fuel

엔진 종류	운항 활동	엔진 제원	연료 종류	NOx 2000	NOx 2005	NOx 2010	NM VOC	PM	SOx	CO
Main engine	Cruise	Gas turbine	BFO	20	19.3	18.6	0.3	0.3	20S*	7.4
			MDO/MGO	19.7	19	18.3	0.3	0		
		High-speed diesel	BFO	59.6	57.7	55.6	0.9	3.8		
			MDO/MGO	59.1	57.1	55.1	1	1.5		
		Medium-speed diesel	BFO	65.7	63.4	61.3	2.3	3.8		
			MDO/MGO	65	63.1	60.6	2.4	1.5		
		Slow-speed diesel	BFO	92.8	89.7	86.5	3	8.7		
			MDO/MGO	91.9	88.6	86.5	3.2	1.6		
	Steam turbine	BFO	6.9	6.6	6.4	0.3	2.6			
		MDO/MGO	6.9	6.6	6.4	0.3	1			
	Manoeuvring & Hotelling	Gas turbine	BFO	9.2	8.9	8.6	1.5	4.5		
			MDO/MGO	9.1	8.8	8.5	1.5	1.6		
		High-speed diesel	BFO	43.6	42.3	40.6	2.5	10.3		
			MDO/MGO	43	41.7	40.1	2.6	4		
		Medium-speed diesel	BFO	47.9	46.2	44.6	6.3	10.3		
			MDO/MGO	47.5	45.7	44.3	6.6	4		
		Slow-speed diesel	BFO	67.4	65.1	62.9	8.2	11.2		
			MDO/MGO	66.7	64.2	62.1	8.6	4.4		
		Steam turbine	BFO	5.1	4.8	4.7	0.9	7.1		
			MDO/MGO	5	5	4.7	0.9	2.8		
Auxiliary engine		Cruise & Manoeuvring & Hotelling	High-speed diesel	BFO	51.1	49.4	47.6	1.7	3.5	
				MDO/MGO	50.2	48.6	46.8	1.8	1.4	
	Medium-speed diesel		BFO	64.8	62.5	60.4	1.7	3.5		
			MDO/MGO	64.1	62	59.7	1.8	1.4		

주: S는 황함유량 (BFO 기준 평균 2.5%, MDO/MGO 기준 평균 0.5%)

자료: EEA(2019. 11. 13), pp. 14-24 기반 저자 정리

앞의 표에서 NO_x의 경우 배출계수가 2000, 2005, 2010으로 구분되어 있는데, 이는 NO_x 배출계수 보고된 시기에 따른 것으로 IMO NO_x Technical Code가 적용된 2005년과 2010년의 새로운 엔진에 비해 이전의 NO_x 배출계수가 약 3.4%, 6.8% 감소된 것을 알 수 있

다.⁴⁶⁾ 본 연구에서는 이 중 최신 배출계수인 NO_x 2010을 사용하여 NO_x 배출량에 대해 분석했다.

CO₂의 경우는 Corbett *et al.*(2009) 및 Chang *et al.*(2013)의 연구에서 사용한 것처럼 86.45%로 정의된 연료의 탄소 배출계수와 탄소-이산화탄소 변환 계수인 44/12를 곱해 계산했다.

보조엔진은 운항, 접근, 정박 모두 같은 배출 계수를 사용하나 보조엔진 종류에 따라 다른 계수를 사용하고 있다. 다만 본 연구에서 사용한 AIS 데이터에서는 보조엔진의 종류에 대해 판단할 수 있는 값이 없어 고속 및 중속 엔진 계수의 평균을 계산하여 사용했다.

제2절 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 결과

1. 부산항

부산항 내에서는 평균 184,322톤의 연료가 소모되는 것으로 분석되었으며, 이를 통해 배출되는 배기가스량은 대부분의 선박이 사용하고 있는 BFO를 기준으로 NO_x 10,444톤, SO_x 92톤, NMVOC 333톤, PM 716톤, CO는 1,364톤, CO₂는 584,300톤 배출되는 것으로 분석되었다. 선박 연료를 모두 MDO로 사용한다고 가정할 경우 특히 SO_x, PM의 배출량이 각각 19톤, 261톤으로 줄어 큰 효과가 있을 것으로 예상된다.

46) 이호춘 외(2016. 12), pp. 167~168, 재인용: EEA, *op. cit.*, p. 17.

〈표 3-2〉 부산항 선박 배기가스 배출량 추정 결과

단위: 톤

연도	종류	연료소모량	NOx	SOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
2018년	BFO	185,656	10,526	93	335	722	1,374	588,529
	MDO		10,398	19	355	263		
2019년	BFO	182,987	10,362	91	330	710	1,354	580,070
	MDO		10,235	18	350	259		
평균	BFO	184,322	10,444	92	333	716	1,364	584,300
	MDO		10,317	19	353	261		

자료: 저자 분석

2. 싱가포르항

싱가포르항 내에서는 평균 385,829톤 정도의 연료가 소모되는 것으로 분석되었으며, 이를 통해 배출되는 배기가스량은 BFO를 기준으로 NOx 22,427톤, SOx 193톤, NMVOC 721톤, PM 1,585톤, CO는 2,855톤, CO₂는 1,233,075톤 배출되는 것으로 분석되었다. 선박 연료를 모두 MDO로 사용한다고 가정할 경우 SOx, PM의 배출량이 각각 39톤, 551톤으로 줄어 큰 효과가 있을 것으로 예상된다.

〈표 3-3〉 싱가포르항 선박 배기가스 배출량 추정 결과

단위: 톤

연도	종류	연료소모량	NOx	SOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
2018년	BFO	383,787	22,360	192	719	1,583	2,840	1,216,603
	MDO		22,108	38	761	548		
2019년	BFO	387,870	22,493	194	722	1,587	2,870	1,229,547
	MDO		22,236	39	765	553		
평균	BFO	385,829	22,427	193	721	1,585	2,855	1,223,075
	MDO		22,172	39	763	551		

자료: 저자 분석

3. 로테르담항

로테르담항 내에서는 평균 183,470톤의 연료가 소모되는 것으로 분석되었으며, 이를 통해 배출되는 배기가스량은 BFO를 기준으로 NO_x 10,373톤, SO_x 92톤, NMVOC 331톤, PM 710톤, CO는 1,358톤, CO₂는 581,600톤 배출되는 것으로 분석되었다. 선박 연료를 모두 MDO로 사용한다고 가정할 경우 SO_x, PM의 배출량이 각각 19톤, 260톤으로 크게 감소하는 것으로 분석되었다.

〈표 3-4〉 로테르담항 선박 배기가스 배출량 추정 결과

단위: 톤

연도	종류	연료소모량	NO _x	SO _x	NMVOC	PM	CO	CO ₂
2018년	BFO	188,743	10,667	94	340	729	1,397	598,316
	MDO		10,536	19	361	267		
2019년	BFO	178,196	10,078	89	322	690	1,319	564,883
	MDO		9,955	18	341	252		
평균	BFO	183,470	10,373	92	331	710	1,358	581,600
	MDO		10,246	19	351	260		

자료: 저자 분석

4. LA/LB항

LA/LB항 내에서는 평균 167,715톤의 연료가 소모되는 것으로 분석되었으며, 이를 통해 배출되는 배기가스량은 BFO를 기준으로 NO_x 9,378톤, SO_x 84톤, NMVOC 298톤, PM 637톤, CO는 1,242톤, CO₂는 531,656톤 배출되는 것으로 분석되었다. 선박 연료를 모두 MDO로 사용한다고 가정할 경우 SO_x, PM의 배출량이 각각 17톤, 236톤으로 크게 감소하는 것으로 분석되었다.

〈표 3-5〉 LA/LB항 선박 배기가스 배출량 추정 결과

단위: 톤

연도	종류	연료소모량	NOx	SOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
2018년	BFO	167,230	9,366	84	298	637	1,238	530,118
	MDO		9,249	17	315	235		
2019년	BFO	168,200	9,390	84	298	637	1,245	533,193
	MDO		9,272	17	316	236		
평균	BFO	167,715	9,378	84	298	637	1,242	531,656
	MDO		9,261	17	316	236		

자료: 저자 분석

5. 상하이항

상하이항 내에서는 평균 659,266톤의 연료가 소모되는 것으로 분석되었으며, 이를 통해 배출되는 배기가스량은 BFO를 기준으로 NOx 40,463톤, SOx 330톤, NMVOC 1,323톤, PM 3,048톤, CO는 4,879톤, CO₂는 2,089,875톤 배출되는 것으로 분석되었다.

〈표 3-6〉 상하이항 선박 배기가스 배출량 추정 결과

단위: 톤

연도	종류	연료소모량	NOx	SOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
2018년	BFO	695,953	42,555	348	1,390	3,192	5,150	2,206,172
	MDO		42,144	70	1,473	1,006		
2019년	BFO	622,579	38,370	311	1,256	2,904	4,607	1,973,577
	MDO		38,009	62	1,332	902		
평균	BFO	659,266	40,463	330	1,323	3,048	4,879	2,089,875
	MDO		40,077	66	1,403	954		

자료: 저자 분석

6. 종합

항만별 배기가스 배출량 분석 결과를 정리하면 다음의 표와 같으며, 전 세계 1위 물동량 처리 항만인 상하이항이 총 배출량 기준으로 가장 많은 배기가스를 배출하고 있는 것으로 분석되었다. 다음으로 세계 최대 환적항인 싱가포르항, 로테르담항, 부산항, LA/LB항 순이었으며, 부산항은 이 중 네 번째로 많은 배기가스를 배출하고 있는 것으로 분석되었다. 다만 이는 앞의 연료소모량 분석에서도 언급했다시피 분석대상 지역 크기가 5개 항만 모두 상이하기 때문에 도출된 결과로 절대적인 순위로는 볼 수 없다.

〈표 3-7〉 주요 항만별 선박 배기가스 배출량 추정 결과 종합(2018년)

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NM VOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	185,656	10,526	93	335	722	1,374	588,529
	MDO	(0.24%)	10,398	19	355	263		
싱가포르항	BFO	383,787	22,360	192	719	1,583	2,840	1,216,603
	MDO	(0.49%)	22,108	38	761	548		
로테르담항	BFO	188,743	10,667	94	340	729	1,397	598,316
	MDO	(0.24%)	10,536	19	361	267		
LA/LB항	BFO	167,230	9,366	84	298	637	1,238	530,118
	MDO	(0.22%)	9,249	17	315	235		
상하이항	BFO	695,953	42,555	348	1,390	3,192	5,150	2,206,172
	MDO	(0.90%)	42,144	70	1,473	1,006		
5개 항 합계	BFO	1,621,369	95,474	811	3,082	6,863	11,999	5,139,738
	MDO	(2.09%)	94,435	163	3,265	2,319		
전 세계	BFO	77,582,125	5,865,437	38,791	202,138	530,367	574,108	245,935,336
	MDO	(100%)	5,844,874	7,758	214,803	119,303		

주: 운항 상태(운항 중, 정박 중, 묘박 중)별 추정 결과는 별첨 참고

자료: 저자 분석

〈표 3-8〉 주요 항만별 선박 배기가스 배출량 추정 결과 종합(2019년)

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NM VOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	182,987	10,362	91	330	710	1,354	580,070
	MDO	(0.25%)	10,235	18	350	259		
싱가포르항	BFO	387,870	22,493	194	722	1,587	2,870	1,229,547
	MDO	(0.53%)	22,236	39	765	553		
로테르담항	BFO	178,196	10,078	89	322	690	1,319	564,883
	MDO	(0.24%)	9,955	18	341	252		
LA/LB항	BFO	168,200	9,390	84	298	637	1,245	533,193
	MDO	(0.23%)	9,272	17	316	236		
상하이항	BFO	622,579	38,370	311	1,256	2,904	4,607	1,973,577
	MDO	(0.85%)	38,009	62	1,332	902		
5개 항 합계	BFO	1,539,832	90,693	769	2,928	6,528	11,395	4,881,270
	MDO	(2.09%)	89,707	154	3,104	2,202		
전 세계	BFO	73,646,716	5,546,037	36,823	190,829	500,385	544,986	233,460,090
	MDO	(100%)	5,526,041	7,365	202,797	113,123		

주: 운항 상태(운항 중, 정박 중, 묘박 중)별 추정 결과는 별첨 참고

자료: 저자 분석

제 4 장

선박 배기가스 주요 저감 요인 및
주요 정책별 항만 영향 분석

제1절 선박 배기가스 주요 저감 요인 분석

본 장에서는 선박 배기가스가 항만에 어떻게 영향을 미치는지 분석했다. 이를 위해 먼저 연료소모량 대비 배기가스 배출 비중이 어떤지를 비교했으며, 비교 결과 SO_x와 CO, CO₂를 제외한 NO_x, NMVOC, PM 등 3개의 배기가스는 같은 연료를 사용했음에도 항만별로 상이한 결과를 나타냈다. 이는 3개의 배기가스 배출계수가 운항유형과 엔진유형에 따라 다르기 때문으로 정박 또는 묘박보다 운항 중인 시간이 많거나, 엔진타입이 Slow-speed diesel, 즉 대형 선박의 입출항이 많기 때문이다. 또한 운항속도 및 재항시간 또한 영향을 미치는 것으로 추정되어 이에 대한 분석을 추가로 실시하였다.

〈표 4-1〉 주요 항만별 연료소모량 대비 배기가스 배출 비중 분석(2018년)

단위: %

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	100.00%	5.67%	0.05%	0.18%	0.39%	0.74%	317.00%
	MDO		5.60%	0.01%	0.19%	0.14%		
싱가포르항	BFO	100.00%	5.83%	0.05%	0.19%	0.41%	0.74%	317.00%
	MDO		5.76%	0.01%	0.20%	0.14%		
로테르담항	BFO	100.00%	5.65%	0.05%	0.18%	0.39%	0.74%	317.00%
	MDO		5.58%	0.01%	0.19%	0.14%		
LA/LB항	BFO	100.00%	5.60%	0.05%	0.18%	0.38%	0.74%	317.00%
	MDO		5.53%	0.01%	0.19%	0.14%		
상하이항	BFO	100.00%	6.11%	0.05%	0.20%	0.46%	0.74%	317.00%
	MDO		6.06%	0.01%	0.21%	0.14%		

자료: 저자 분석

〈표 4-2〉 주요 항만별 연료소모량 대비 배기가스 배출 비중 분석(2019년)

단위: %

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	100.00%	5.66%	0.05%	0.18%	0.39%	0.74%	317.00%
	MDO		5.59%	0.01%	0.19%	0.14%		
싱가포르항	BFO	100.00%	5.80%	0.05%	0.19%	0.41%	0.74%	317.00%
	MDO		5.73%	0.01%	0.20%	0.14%		
로테르담항	BFO	100.00%	5.66%	0.05%	0.18%	0.39%	0.74%	317.00%
	MDO		5.59%	0.01%	0.19%	0.14%		
LA/LB항	BFO	100.00%	5.58%	0.05%	0.18%	0.38%	0.74%	317.00%
	MDO		5.51%	0.01%	0.19%	0.14%		
상하이항	BFO	100.00%	6.16%	0.05%	0.20%	0.47%	0.74%	317.00%
	MDO		6.11%	0.01%	0.21%	0.14%		

자료: 저자 분석

본 연구에서는 평균 운항속도⁴⁷⁾를 비롯한 재항시간, 선박크기, 입출항수 등 각 항만별 운영 특성이 배기가스 배출량에 미치는 영향을 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 운항속도를 포함하는 모든 독립

47) 정박 중, 묘박 중인 AIS 데이터는 제외하고 운항 중인 데이터만으로 평균 운항속도 계산.

변수 값들은 연료소모량과 NO_x 배출량과 마찬가지로 AIS 데이터를 기반으로 분석했으며, 이를 종합하면 다음 표와 같다.

〈표 4-3〉 주요 항만별 입출항 통계

단위: tonne, kn, 시간, DWT, 회

연도	항만	분기	연료소모량	NO _x 배출량	평균 운항속도	평균 재항시간	평균 선박크기	입항횟수
2017	부산항	1	51,343	2,891	6.77	26.53	39,787	3,919
		2	47,510	2,681	6.50	23.28	39,938	3,989
		3	43,933	2,488	5.84	21.47	39,320	3,984
		4	42,802	2,423	6.05	21.23	40,498	3,842
	싱가포르항	1	84,084	4,912	7.34	23.54	55,587	5,849
		2	96,467	5,589	6.88	23.65	56,083	6,136
		3	101,153	5,997	7.04	20.19	57,902	6,903
		4	107,117	6,360	7.13	18.29	56,989	7,163
	로테르담항	1	42,701	2,417	6.98	34.56	41,513	2,216
		2	40,238	2,289	7.01	34.37	41,297	2,204
		3	35,066	2,012	6.81	35.31	41,656	2,263
		4	45,342	2,570	6.87	34.17	42,230	2,231
	LA/LB항	1	33,737	1,902	8.45	63.83	76,717	546
		2	35,532	2,001	8.53	68.71	79,596	532
		3	38,779	2,180	8.52	66.66	80,910	584
		4	40,092	2,252	8.53	70.40	80,849	555
	상하이항	1	199,269	11,940	9.61	43.80	50,742	5,039
		2	177,215	10,747	8.13	36.97	52,013	4,773
		3	159,309	10,065	9.30	32.81	51,930	4,821
		4	197,167	12,312	9.44	37.16	52,902	4,877
2018	부산항	1	42,835	2,417	6.04	21.50	41,005	3,746
		2	45,700	2,592	6.66	19.62	41,425	4,049
		3	47,610	2,689	6.50	21.76	41,525	3,968
		4	49,811	2,803	6.37	22.60	42,555	3,892
	싱가포르항	1	96,329	5,592	7.18	22.74	57,807	6,210
		2	98,121	5,701	7.31	21.77	59,141	6,127
		3	95,385	5,568	7.26	21.11	58,158	6,341
		4	94,881	5,509	7.22	20.60	58,061	6,294

연도	항만	분기	연료 소모량	NOx 배출량	평균 운항속도	평균 재항시간	평균 선박크기	입항횟수
2019	로테르 담항	1	45,961	2,596	6.75	37.80	43,223	2,207
		2	47,253	2,670	6.93	39.56	43,531	2,210
		3	48,023	2,706	6.87	38.94	45,232	2,211
		4	47,156	2,658	6.84	35.77	47,385	2,185
	LA/LB 항	1	36,967	2,076	8.65	65.07	82,782	555
		2	38,452	2,162	8.72	65.83	83,730	569
		3	41,779	2,340	8.55	69.30	84,090	584
		4	50,022	2,786	8.34	72.83	86,127	623
	상하이 항	1	178,151	10,838	9.21	44.57	52,738	4,605
		2	199,353	12,190	8.44	38.04	53,445	5,165
		3	193,350	11,941	9.06	39.27	55,658	5,133
		4	167,678	10,416	8.82	31.72	53,446	4,938
	부산항	1	48,301	2,735	6.63	22.89	42,121	3,886
		2	46,999	2,649	6.56	20.65	42,433	3,924
		3	45,657	2,571	6.49	21.19	42,713	3,788
		4	41,256	2,327	5.18	21.13	41,824	3,761
	싱가포 르항	1	93,005	5,395	7.27	22.11	58,744	6,267
		2	96,665	5,622	7.41	20.81	60,139	6,340
		3	97,123	5,622	7.21	20.10	59,822	6,140
		4	101,783	5,845	7.12	22.00	58,422	5,974
	로테르 담항	1	48,195	2,714	6.73	39.06	45,241	2,150
		2	44,568	2,521	6.83	35.44	46,519	2,247
		3	42,943	2,427	6.86	35.18	43,856	2,219
		4	42,283	2,390	6.79	37.55	43,467	2,056
	LA/LB 항	1	46,157	2,575	8.49	82.50	84,683	538
		2	40,010	2,236	8.44	69.94	84,633	521
		3	42,979	2,398	8.26	76.27	84,718	525
		4	39,136	2,187	8.23	71.89	84,314	496
	상하이 항	1	159,211	9,940	9.21	34.26	53,873	4,976
		2	163,246	10,086	8.89	31.67	53,610	4,993
		3	165,738	10,204	8.94	30.85	52,467	4,974
		4	168,029	10,358	8.90	31.91	52,777	4,896

자료: 저자 분석

배기가스 배출량을 나타내는 연료소모량을 y 값으로 하고, 영향을 주는 운항속도, 재항시간, 선박크기, 입항횟수 등 4개의 x 값을 독립 변수로 설정한 후 회귀분석을 실시했다. 그 결과 더빈왓슨(Durbin Watson) 통계량이 2.029로 2에 수렴하여 잔차 독립성이 확보되었고 분산분석 결과 회귀모형의 유의확률이 0.05보다 작아 회귀식으로 의미가 있다. 즉 연료소모량에 대한 회귀분석 결과 모든 독립변수인 운항속도, 재항시간, 선박크기, 입항횟수 등은 통계적으로 유의하게 연료소모량에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이를 회귀식으로 표현하면 아래 식과 같다.

$$\text{Fuel Consumption} = 32,601.289 \cdot x_1 + 2,452.585 \cdot x_2 - 2.402 \cdot x_3 + 28.297 \cdot x_4 - 224,322.083 \quad \cdots [\text{식 } 8]$$

분석결과 운항속도가 빠를수록, 재항시간이 길수록, 그리고 입항횟수가 많을수록 연료소모량이 늘어나는 정(+)의 관계를 나타내고 있는 것으로 분석되었다. 반대로 선박크기는 연료소모량과 부(-)의 관계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 연료소모량을 줄이기 위해서는 항만 내 선박 운항속도를 낮추고 재항시간을 짧게 하며, 선박의 입항횟수를 줄이는 동시에 선박을 대형화하는 것이 필요하다.

〈표 4-4〉 연료소모량 회귀분석 결과

독립변수	Coef.	Std. Err.	Beta	t	P> t
상수	-224,322.083	13,586.460		-16.511	0.000
평균 운항속도(x1)	32,601.289	3,238.419	0.645	10.067	0.000
평균 재항시간(x2)	2,452.585	513.958	0.835	4.772	0.000
평균 선박크기(x3)	-2.402	0.284	-0.675	-8.458	0.000
입항횟수(x4)	28.297	2.970	1.084	9.528	0.000

자료: 저자 분석

다음으로 항만대기질과 관련성이 높은 NO_x 배출량을 y값으로 하고 평균 운항속도, 평균 재항시간, 평균 선박크기, 입항횟수를 독립변수(x값)의 영향을 회귀분석한 결과 앞의 연료소모량을 y값으로 한 것과 유사한 결과를 나타냈으며, 도출된 통계값은 다음 표와 같다. 더빈 왓슨 통계량이 2.021로 2에 수렴하여 잔차 독립성이 확보되고 분산분석 결과 유의확률이 0.05보다 작아 회귀식이 의미가 있는 것으로 나타났다. 그리고 각 독립변수들의 유의확률도 0.05보다 작아 회귀식의 변수값(Coef.)이 의미를 가지게 된다. 선박의 운항속도가 빠르고 재항시간이 길고, 선박의 입항횟수가 많을수록 NO_x 배출량이 많아지고, 선박크기가 커질수록 NO_x 배출량이 작아지는 것으로 나타났으며, 이를 회귀식으로 표현하면 다음의 식과 같다.

$$NO_x \text{ Emission} = 2,165.552 \cdot x_1 + 143.289 \cdot x_2 - 0.151 \cdot x_3 + 1.689 \cdot x_4 - 14,563,360 \quad \dots\dots\dots [\text{식 9}]$$

〈표 4-5〉 NO_x 회귀분석 결과

독립변수	Coef.	Std. Err.	Beta	t	P> t
상수	-14,563.360	867.635		-16.785	0.000
평균 운항속도(x1)	2,165.552	206.806	0.681	10.471	0.000
평균 재항시간(x2)	143.289	32.822	0.775	4.366	0.000
평균 선박크기(x3)	-0.151	0.018	-0.674	-8.318	0.000
입항횟수(x4)	1.689	0.190	1.027	8.904	0.000

자료: 저자 분석

앞의 두 가지 회귀분석 결과를 종합해 보면, 항만 내 선박이 배출하는 배기가스를 줄이기 위해서는 항만 생산성 향상을 통한 재항시간을 단축시키고, 선박 대형화를 통한 선박의 입항횟수를 감소시킬 뿐만 아니라 감속운항(Slow Steaming)과 같은 노력이 필요한 것으로 보인다.

제2절 주요 정책별 항만 영향 분석

1. 선박 감속운항 효과 분석

선박 감속운항은 고유가 및 세계적인 경제 침체 등의 압력에 의해 2007년 선사들에 의해 시작되었으며, 선박 운항속도를 설계속도의 60~70%로 감속할 경우, 2007년부터 2012년까지 컨테이너선박은 70%, 대형유조선은 50% 매일 사용하는 연료량이 감소했던 것으로 조사되었다.⁴⁸⁾ 본 연구에서는 이러한 기존 연구결과와의 비교를 목적으로 AIS 데이터를 이용해 선박들의 평균 이동속도가 10%, 20% 줄었다고 가정했을 때 얼마만큼 연료소모가 감소하는지 분석했다. 이를 위해 기존 Corbett *et al.*(2009)의 연료소모량 계산 모형에서 아래 식과 같이 실제 운항속도(S_{1k})에 속도비율(R)을 곱해 그 효과를 추정했다.

$$F_{ijk} = [MF_k \left(\frac{S_{1k} \cdot R}{S_{0k}} \right)^3 + AF_k] \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \dots\dots\dots [\text{식 10}]$$

분석 결과로 아래의 <표 4-6>과 같은 결과를 얻었으며, 10%, 20% 감속운항 시 각각 11.79%, 20.92%의 연료를 절감할 수 있는 것으로 분석되었다. 반대로 가속운항 시는 13.99%, 29.91% 연료를 더 사용하는 것으로 분석되었다.

48) Mander(2017), p. 213.

〈표 4-6〉 선박 가·감속운항 효과 추정(전 세계)

평균속도 대비 비율	연료소모량(톤)	속도 100% 대비 비율
120%	95,675,799	129.91%
110%	83,947,996	113.99%
100% (평균 12.92노트)	73,646,716	100.00%
90%	64,960,440	88.21%
80%	58,239,338	79.08%

자료: 저자 분석

다음으로 부산항 내에서 감속운항 시 연료 절감 효과에 대해 분석했다. 현재 부산항에는 안전상의 문제로 인해 항만 내에서 수심이 18m 이상인 곳에서는 10노트, 그보다 얇은 곳에서는 5노트 이하로 운항하도록 제한하고 있으며,⁴⁹⁾ LA/LB항 또한 항내에서는 6~7노트⁵⁰⁾로 속도를 제한하고 있어 이미 항내에서는 감속운항을 하고 있는 것으로 조사되었다.

2019년 기준 부산항의 선박 운항 평균속도는 6.18노트, 연료소모량은 182,215톤으로 분석되었으며, 선박의 감속운항 분석결과 속도를 줄일 경우 오히려 연료사용량이 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 본 연구에서 사용한 Corbett *et al.*(2009)의 연료소모량 계산식 중 다음의 보조엔진에 해당되는 아래의 식에서 같은 거리(D_{ij})를 느린 속도(S_{1k})로 운항할 경우 분모가 작아지고 또한 8노트 이하에서는 보조엔진 부하가 0.48로 증가해 연료소모량이 급격히 증가하는 것으로 계산되기 때문이다.

$$F_{ijk} = AF_k \cdot \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \dots\dots\dots [\text{식 11}]$$

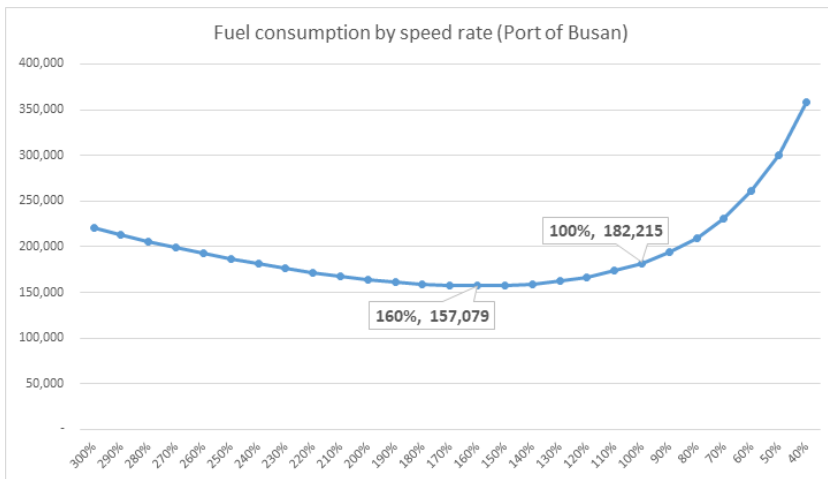
49) IHS(2016), Vol. 2, p. 1307.

50) *ibid.*, Vol. 4, p. 760.

따라서 항내에서는 속도를 줄인다고 무조건 연료소모량이 감소하는 것이 아니라 적절한 속도로 운항해야 연료소모를 줄일 수 있다. 이러한 경제 운항속도는 메인엔진과 보조엔진의 출력에 따라 다르겠지만 부산항의 경우 지금보다 60% 속도를 높이면 연료소모를 최소화할 수 있을 것으로 분석되어 안전상의 문제가 없다면 오히려 지금보다 속도를 높이는 것이 대기오염을 줄이는 데 도움을 줄 수 있을 것이다.

〈그림 4-1〉 선박 가·감속운항 효과 추정(부산항)

단위: 톤



자료: 저자 분석

〈표 4-7〉 선박 가·감속운항 효과 추정(부산항)

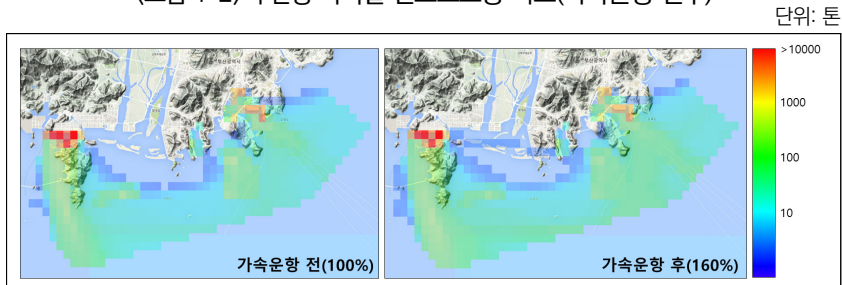
평균속도 대비 비율	연료소모량(톤)	속도 100% 대비 비율
300%	221,131	121.36%
290%	213,329	117.08%
280%	206,057	113.08%
270%	199,189	109.32%
260%	192,742	105.78%
250%	186,742	102.48%
240%	181,174	99.43%
230%	176,063	96.62%
220%	171,449	94.09%
210%	167,373	91.85%
200%	163,887	89.94%
190%	161,043	88.38%
180%	158,921	87.22%
170%	157,552	86.46%
160%	157,079	86.21%
150%	157,630	86.51%
140%	159,284	87.42%
130%	162,310	89.08%
120%	166,976	91.64%
110%	173,481	95.21%
100% (평균 6.18노트)*	182,215	100.00%
90%	194,093	106.52%
80%	209,832	115.16%
70%	231,375	126.98%
60%	260,501	142.96%
50%	300,022	164.65%
40%	357,819	196.37%

주: * 두 지점 모두 항계 내에 있는 구간만 계산했기 때문에 앞의 182,987톤보다 작음

자료: 저자 분석

아래 <그림 4-2>는 부산항 내 선박 가속운항 전후를 비교한 것으로 가속운항 시 주요 경로에서는 연료소모가 증가한 것을 알 수 있으나 반대로 부산 신항 및 부산항 북항 컨테이너 터미널 인근에서의 연료소모는 감소한 것을 알 수 있다.

<그림 4-2> 부산항 지역별 연료소모량 비교(가속운항 전후)



자료: Google 지도를 바탕으로 저자 작성

2. AMP 설치 효과

컨테이너 선박은 냉동·냉장 컨테이너, 선박 전기시설 등에 전력을 공급하기 위해 보조엔진을 사용하고 있으며, 움직이지 않는 정박 중에도 보조엔진을 사용하고 있으므로 배기가스를 지속 배출하고 있다. 이를 줄이기 위해 정박 중 필요한 전력을 육상에서 직접 공급하는 시설이 AMP이며, 사용 시 정박 중 보조엔진이 쓰고 있던 연료를 모두 줄일 수 있다.

따라서 부산항을 입항하는 모든 선박이 수전 시설을 설치해 정박 중 필요한 전력을 AMP를 통해 모두 공급받는다 가정한다면, 아래 표와 같이 연료소모량은 25% 감소하고 이에 따라 배기가스 배출량도 22%에서 25% 정도 감축되는 것으로 분석되었다.

〈표 4-8〉 AMP 설치 전후 연료소모량 및 배기가스 배출량 추정(2019년 부산항 기준)

단위: 톤

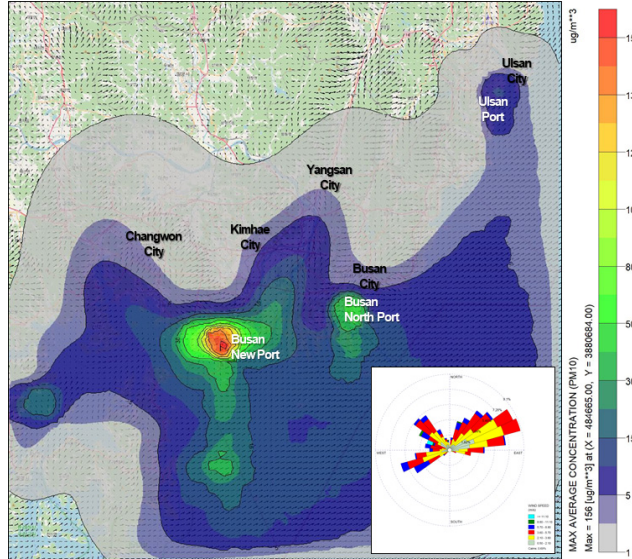
구분	종류	연료소모량	NO _x	SO _x	NM ₁₀ VOC	PM	CO	CO ₂
설치 전	BFO	182,987 (100.0%)	10,362 (100.0%)	91 (100.0%)	330 (100.0%)	710 (100.0%)	1,354 (100.0%)	580,070 (100.0%)
	MDO		10,235 (100.0%)	18 (100.0%)	350 (100.0%)	259 (100.0%)		
설치 후	BFO	137,235 (75.0%)	7,867 (75.9%)	69 (75.8%)	252 (76.4%)	550 (77.5%)	1,016 (75.0%)	435,035 (75.0%)
	MDO		7,774 (76.0%)	14 (77.8%)	267 (76.3%)	195 (75.3%)		
예상 감축량	BFO	45,752 (25.0%)	2,495 (24.1%)	22 (24.2%)	78 (23.6%)	160 (22.5%)	338 (25.0%)	145,035 (25.0%)
	MDO		2,461 (24.0%)	4 (22.2%)	83 (23.7%)	64 (24.7%)		

자료: 저자 분석

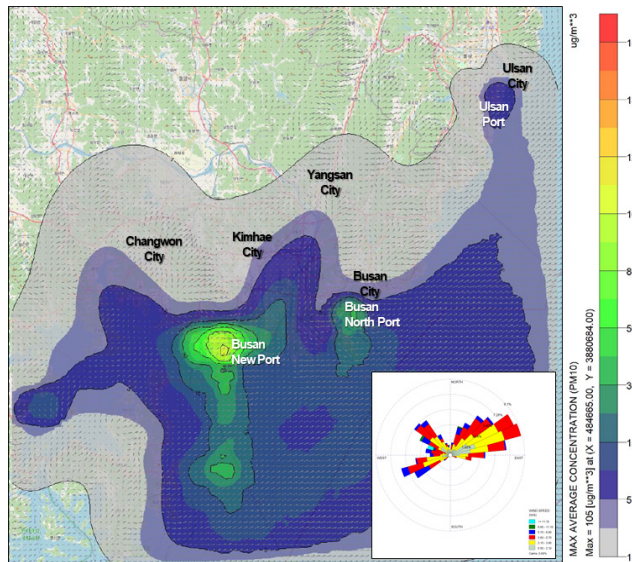
이언경 외(2020)의 연구⁵¹⁾에서는 AMP 설치 시 부산 도심에 어떤 영향을 미치는지 비교·분석하기 위해 대기확산분석을 실시하였으며, 분석 결과 다음 〈그림 4-3〉과 같이 1월 기준으로 최대 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 7월 기준으로는 156 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 미세먼지가 발생 및 확산이 감소하는 것으로 분석되어 AMP 설치 시 대기환경에도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

51) 이언경 외(2020), pp. 202~206.

〈그림 4-3〉 AMP 설치 전후 부산항 대기확산분석 결과(2019년 7월)



〈AMP 적용 전〉



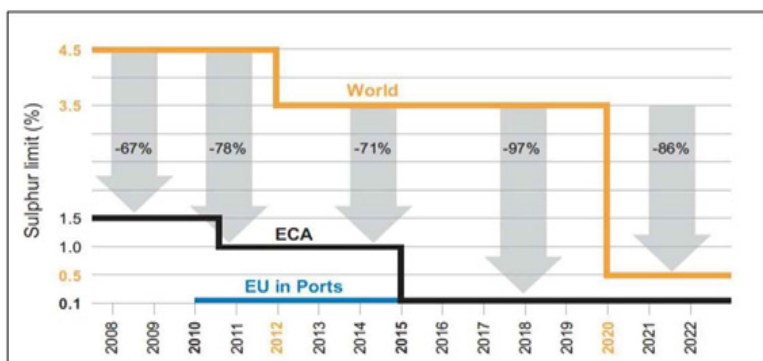
〈AMP 적용 후〉

자료: 이언경 외(2020), p. 205

3. 배출규제해역 지정 효과 분석

해운업의 대표적인 환경규제인 선박 배출가스 중 황함유량 규제가 2020년부터 대폭 강화되며, 이에 선사들은 규제에 대응하기 위해 스크러버 장착, 저유황유 사용, LNG 연료 사용 중 반드시 1가지 대안을 선택해야 한다.⁵²⁾ 이러한 선박연료유에 대한 사용 규정은 2005년 발효된 이후 해양환경보호위원회(MEPC: Marine Environment Protection Committee) 회의를 통해 배출규제를 강화하도록 협의하고 있으며, 2016년 열린 제70차 회의에서는 해운 역사상 가장 강력한 환경규제로 언급되는 황함유량이 3.5%에서 0.5%로 강화된 선박 연료유를 2020년 1월 1일부터 사용하기로 했다.⁵³⁾

〈그림 4-4〉 Sulfur Limits Timeline



자료: Mannan(검색일: 2020. 9. 18), 재인용: IMO, MARPOL Annex VI

또한 IMO는 선박연료유 사용과 관련해서 배출규제해역(ECA)을 지정해 통제하고 있다. 황함유량과 관련해선 앞의 규정보다 강화된 0.1% 이하 조건을 2015년 1월 1일부터 충족할 것을 요구하고 있으며, 질소

52) 마지황(2018. 9. 3), p. 10.

53) 이기열 외, 앞의 책, pp. 13~14.

산화물과 미세먼지 또한 ECA 지역별로 규정을 적용하고 있다. 특히 북미지역에 대해서는 NO_x, SO_x, PM 배출을 모두 규제하고 있으며, 미국환경보호청 EPA의 2009년 보고서에 따르면, ECA 지정을 통해 NO_x, SO_x, PM 각각 23%, 86%, 74% 감축될 것으로 예상했었다.⁵⁴⁾ 우리나라도 ECA 지역을 지정하기 위해 준비 중에 있으며, 북미지역과 같은 수준으로 배출규제 시 EPA가 예상한 수준으로 배출 감축이 예상되어 NO_x, SO_x, PM 각각 2,383톤, 78톤, 525톤 감축할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 LSFO 사용 측면에서 황함유량이 기존 2.5%에서 0.1%로 감소한다고 가정할 경우 SO_x는 87톤 감축할 수 있을 것으로도 예상된다.

〈표 4-9〉 ECA 지정 전후 연료소모량 및 배기가스 배출량 추정(2019년 부산항 BFO 기준)

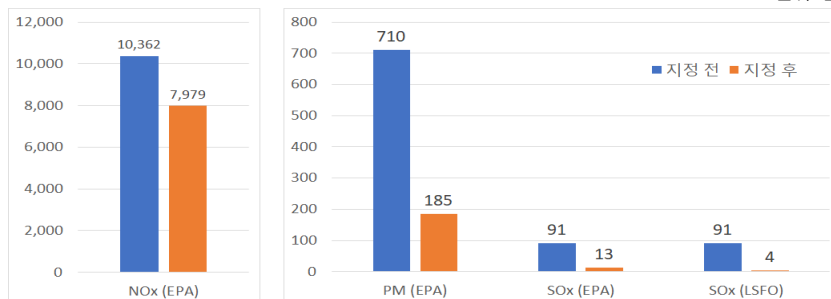
단위: 톤

구분	연료소모량	EPA 기준			LSFO 기준
		NO _x	PM	SO _x	SO _x
지정 전	182,987	10,362	710	91	91
지정 후		7,979	185	13	4
예상 감축량	-	2,383 (23%)	525 (74%)	78 (86%)	87 (96%)

자료: 저자 분석

〈그림 4-5〉 ECA 지정 전후 배기가스 배출량 변화 추정(2019년 부산항 BFO 기준)

단위: 톤



자료: 저자 분석

54) 이기열 외, 앞의 책, p. 28.

제 5 장

결론 및 정책제언

제1절 결론

1. 연구 결과 및 시사점

본 연구는 선박이 부산항, 싱가포르항, 로테르담항 등 전 세계 주요 항만에 얼마나 많은 양의 배기가스를 배출하는지를 추정해 보고 이를 저감할 수 있는 방안 및 효과에 대해 연구했다. 이를 위해 먼저 AIS 정적 및 동적 데이터를 분석하고 이를 이용한 선박 연료소모량 추정 모델을 개발하여 지역별로 얼마나 많은 연료가 사용되고 있는지를 추정하였다. 다음으로 추정된 연료소모량에 NO_x, SO_x, PM 등 배기가스 배출계수를 적용함으로써 선박으로 인한 배기가스 배출량을 분석했으며, 마지막으로 선박 기인 배기가스가 항만에 미치는 영향과 이를 감축할 수 있는 요인에 대해 분석했다.

결론적으로 본 연구에서는 선박으로부터 기인하고 있는 지역별 배

기가스 배출량을 분석한 일종의 ‘전 세계 선박 기인 배기가스 배출지도’를 제공하기 위한 데이터 분석 모형을 개발했다는 데 그 의의를 둘 수 있다. 향후 GIS 소프트웨어와의 연동을 통한 완벽한 지도 서비스로도 제공할 수 있을 것이라 생각되며, 본 서비스를 전 세계 연구자들이 해운·항만 환경 관련 연구의 장으로 활용할 경우 관련 연구의 확대 및 심화 또한 가능할 것으로 기대된다.

1) 선박 연료소모량 추정 결과

본 연구에서는 확보할 수 있는 AIS 데이터의 손실, 특정 지점 과대 추정 등의 한계를 보완하기 위해 Corbett *et al.*(2009)의 연료소모량 계산식에 의해 추정된 소모량을 선박이 지나가는 격자무늬 형태의 지역별로 지나는 거리 비율만큼 배분하는 새로운 모형을 개발하여 적용했다. 개발된 모형의 검증을 위해서 A선사 29척의 선박들이 2019년에 실제 각각 사용한 연료량과 비교했으며, 약 12.8% 높게 추정되는 결과를 얻었으나 대상 선사가 1개였고 특정 선형에서만 과대 추정되는 것을 감안하여 본 모형을 그대로 사용했다.

선박 연료소모량은 부산항, 싱가포르항, 로테르담항, LA/LB항, 상하이항 등 5개 항만을 대상으로 추정했으며, 항만 구역은 각 항만공사나 정부기관의 자료 또는 IHS Global의 ‘Ports & Terminals Guide 2019’의 항계 정보를 참고하여 설정했다.

추정 결과 전 세계적으로 2019년 기준 73,647천 톤의 연료를 사용한 것으로 분석되었고, 분석대상이었던 5개 항만에서만 1,540천 톤의 연료를 사용한 것으로 분석되었다. 사용된 연료의 대부분인 96%는 운항 중 사용한 것으로 분석되었고, 보조엔진이 사용한 연료량이 약 전 세계적 24%, 5개 항만에서는 83%인 것으로 분석되어 항만 내

보조엔진 기인 배기가스 배출량이 많다는 것을 알 수 있어 이를 줄일 수 있는 기술적, 정책적 지원의 필요성을 강조하였다.

〈표 5-1〉 부산항 및 전 세계 연료소모량 추정 결과(2019년)

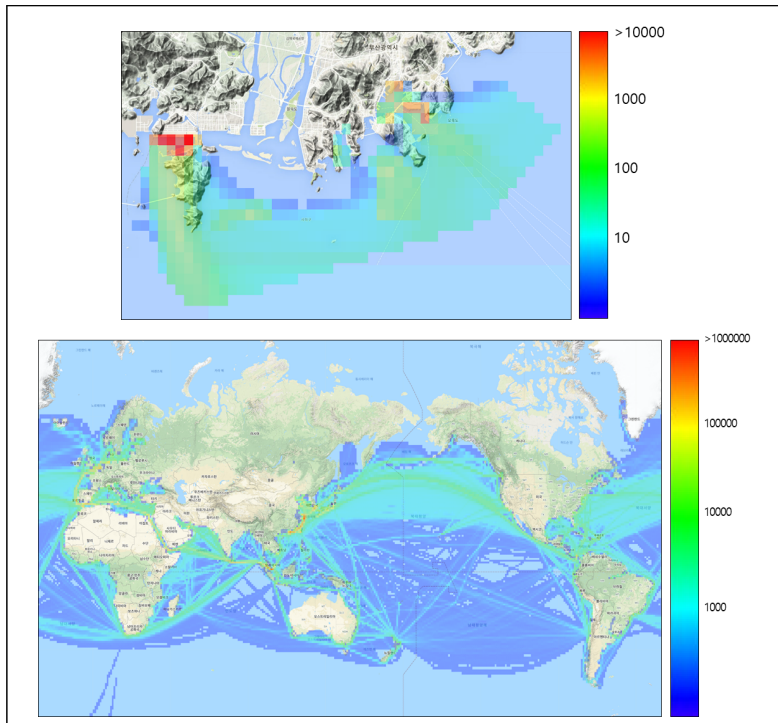
단위: 톤

항만	운항 중		정박 중	요박 중	합계 (비율)	가장 많은 지역 소모량
	(주엔진)	(보조엔진)	(보조엔진)	(보조엔진)		
부산항	16,435 (9.0%)	116,791 (63.8%)	45,752 (25.0%)	4,009 (2.2%)	182,987 (100.0%)	24,452
전 세계	56,155,083 (76.2%)	14,621,714 (19.9%)	2,114,573 (2.9%)	755,346 (1.0%)	73,646,716 (100.0%)	-

주: 각 항만별 대상지역 크기가 상이하기 때문에 이를 통해 각 항만들의 절대 순위 비교는 불가
자료: 저자 분석

〈그림 5-1〉 부산항 및 전 세계 연료소모량 추정 결과(2019년)

단위: 톤



자료: Google 지도를 바탕으로 저자 작성

2) 선박 배기가스 배출량 분석 결과

본 연구 3장에서는 2장에서 추정된 연료소모량을 기준으로 전 세계 및 주요 항만별 배기가스 배출량을 분석했다. 연료 단위별 NO_x, SO_x, PM 등 배기가스별 배출계수는 유럽환경청 EEA에서 제공하는 계수를 사용했으며, Tier 1의 SO_x, CO 배출계수⁵⁵⁾와 Tier 3의 NO_x, NMVOC, PM 배출계수⁵⁶⁾를 사용했다. CO₂ 배출계수는 Corbett *et al.*(2009) 및 Chang *et al.*(2013)의 연구에서 사용한 것처럼 86.45%로 정의된 연료의 탄소 배출계수와 탄소-이산화탄소 변환 계수인 44/12를 곱해 계산했다.

분석 결과, 전 세계 1위 물동량 처리 항만인 상하이항이 총 배출량 기준으로 가장 많은 배기가스를 배출하고 있는 것으로 분석되었다. 부산항은 이 중 네 번째로 많은 배기가스를 배출하고 있는 것으로 분석되었으나 다만 이는 앞에서도 얘기했듯이 분석대상 항만별 지역 크기가 5개 항만 모두 상이해 도출된 결과로 절대적인 순위로는 볼 수 없다.

〈표 5-2〉 5개 항만별 선박 배기가스 배출량 추정 결과

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NO _x	SO _x	NMVOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	182,987	10,362	91	330	710	1,354	580,070
	MDO		10,235	18	350	259		
싱가포르항	BFO	387,870	22,493	194	722	1,587	2,870	1,229,547
	MDO		22,236	39	765	553		
로테르담항	BFO	178,196	10,078	89	322	690	1,319	564,883
	MDO		9,955	18	341	252		
LA/LB항	BFO	168,200	9,390	84	298	637	1,245	533,193
	MDO		9,272	17	316	236		
상하이항	BFO	622,579	38,370	311	1,256	2,904	4,607	1,973,577
	MDO		38,009	62	1,332	902		

자료: 저자 분석

55) EEA, *op. cit.*, pp. 14-15.

56) EEA, *op. cit.*, pp. 23-24.

3) 선박 배기가스 저감 요인 및 항만 영향 분석 결과

3장에서는 선박 배기가스 저감 요인 및 관련 정책별 효과를 분석했으며, 이를 위해 먼저 선박 배기가스 저감 요인에 대해 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 분석 대상인 5개 항만(부산, 싱가포르, 로테르담, LA/LB, 상하이)의 2017년부터 2019년 3개년도의 분기별 데이터 총 60개의 기초 데이터를 이용해 회귀분석을 실시했다. 운항 속도, 재항시간, 선박크기, 입출항수 등 각 항만별 운영 특성을 x값으로 두고 배기가스 배출량에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였다. 그리고 배기가스 배출량을 대표할 수 있는 연료소모량과 NO_x 배출량을 y값으로 두고 분석하였다.

분석결과 연료소모량은 평균 운항속도가 높고, 평균 재항시간이 길고, 입항횟수가 많을수록 증가하고, 선박크기가 클수록 감소하는 것으로 나타났다. NO_x 배출량도 연료소모량과 유사한 패턴을 보여 NO_x를 줄이기 위해서는 저속운항을 하고, 재항시간을 줄이고, 선박 크기를 크게 하여 입항횟수를 줄이는 것이 필요하다.

〈표 5-3〉 연료소모량 및 NO_x 회귀분석 결과

구분	독립변수	Coef.	Std. Err.	Beta	t	P> t
연료소모량	상수	-224,322.083	13,586.460		-16.511	0.000
	평균 운항속도	32,601.289	3,238.419	0.645	10.067	0.000
	평균 재항시간	2,452.585	513.958	0.835	4.772	0.000
	평균 선박크기	-2.402	0.284	-0.675	-8.458	0.000
	입항횟수	28.297	2.970	1.084	9.528	0.000
NO _x	상수	-14,563.360	867.635		-16.785	0.000
	평균 운항속도	2,165.552	206.806	0.681	10.471	0.000
	평균 재항시간	143.289	32.822	0.775	4.366	0.000
	평균 선박크기	-0.151	0.018	-0.674	-8.318	0.000
	입항횟수	1.689	0.190	1.027	8.904	0.000

자료: 저자 분석

다음으로 선박 감속운항, AMP 설치, 배출규제해역 지정 등 선박 배기가스 저감을 위한 주요 정책별 적용 효과에 대해서 분석하였다.

먼저 전 세계 선박 감속운항 효과를 분석했으며, 연료소모량 추정식의 실제 운항속도(S_{ik})에 속도비율(R)을 곱해 효과를 분석했다. 분석결과로 10%, 20% 감속운항 시 11.79%, 20.92% 연료 절감 효과가 있는 것으로 분석되었고 반대로 10%, 20% 가속운항 시는 13.99%, 29.91% 연료를 더 사용하는 것으로 분석되었다.

다음으로 부산항 내에서의 감속운항 시 효과도 분석했으며, 분석결과 전 세계 감속운항 효과와는 반대로 속도를 지금보다 줄일 경우 오히려 연료사용량이 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 본 연구에서 사용한 Corbett *et al.*(2009)의 식 중 보조엔진에 해당되는 식이 같은 거리(D_{ij})를 느린 속도(S_{ik})로 운항할 경우 분모가 작아지고 또한 8노트 이하로 운항 시 보조엔진 부하가 0.48로 급격히 커져 연료소모량이 증가하기 때문으로 분석되었다. 본 연구에서는 분석결과로 부산항 내에서 지금보다 60% 속도를 높이는 것이 더 연료를 줄일 수 있다는 결과를 도출했다. 따라서 항내에서는 적정 속도로 신속히 이동하고 빨리 하역해 선박들의 재항시간을 줄임으로써 항내 배기가스 배출을 감소할 수 있을 것으로 분석되었다.

다음으로 국내 항만의 AMP 설치 효과에 대해 분석했다. 본 연구를 통해 추정된 부산항 입항 선박들이 사용한 연료량은 182,987톤이며, 이 중 정박 중 사용하고 있는 연료는 45,752톤으로 분석되었다. 모든 선박들이 AMP를 통해 전력을 공급한다고 가정할 경우 정박 중 사용하고 있는 연료를 모두 줄일 수 있어 NO_x 2,495톤, SO_x 23톤, PM 160톤 등 22%에서 25% 감축할 수 있는 것으로 분석되었다.

배출규제해역 지정 시에도 연료 및 엔진 변경에 의해 NO_x, SO_x,

PM 등 배기가스 배출 감소가 예상되며, 부산항도 북미지역 수준의 배출규제 시 NO_x, SO_x, PM 각각 2,383톤, 78톤, 525톤을 감축할 수 있을 것으로 추정되었다. 또한 LSFO 사용만을 고려했을 때도 기존 91톤에서 4톤으로 약 96% 감축할 수 있을 것으로 예상된다.

〈표 5-4〉 AMP 및 배출규제해역 지정 후 배기가스 예상 감축량(부산항 2019년 기준)

단위: 톤

구분	NO _x	PM	SO _x	
AMP 설치 후 예상 감축량	2,495	160	22	
배출규제해역 지정 후 예상 감축량	2,383	525	78 (EPA 기준)	87 (LSFO 기준)

자료: 저자 분석

2. 연구의 한계점 및 향후 연구방향

1) 연료소모량 추정 결과 추가 검증 및 보정 필요

본 연구에서는 Corbett *et al.*(2009) 등이 사용한 속도의 세제곱식을 주엔진부하로 사용하는 연료소모량 계산식을 사용해 추정했다. 보조엔진의 경우는 ICF Consulting(2009) 연구⁵⁷⁾의 부하계수를 적용해 더 정확한 추정이 가능하게 했다. 추정된 결과의 검증을 위해서는 A선사 29척의 선박이 2019년도 사용한 실제 연료량과 비교하여 약 12.8% 과대추정되는 결과를 얻었다. 하지만 본 검증은 29척이라는 비교적 적은 표본을 대상으로 한 결과이기 때문에 완벽히 검증됐다고 할 수 없으며, 특히 보다 정확한 결과를 도출하기 위한 보정계수를 도출할 수는 없었다.

따라서 이번 연구에서 비교한 A선사 외에 타 선사들에 대한 실제

57) ICF Consulting, *op. cit.*, p. 2·12.

연료사용량 자료를 수집해 추가로 비교 및 검증한다면 본 연구를 통해 개발된 모형의 신뢰성을 더 높일 수 있을 것으로 판단된다. 특히 회귀분석을 통해 선형별(l) 보정계수를 산출하고 나아가 주요 항로별(m)로도 보정계수를 계산하여 다음과 같은 모형을 개발한다면, 더 정확한 연료소모량 추정 및 배기가스 배출량 분석이 가능할 것으로 사료된다.

$$F_{ijk} = [\alpha_{lm} \cdot MF_k (\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + \beta_{lm} \cdot AF_k] \frac{D_{ij}}{24S_{1k}} \dots\dots\dots [\text{식 12}]$$

2) 컨테이너선 외 타 선형 적용 필요

본 연구에서는 연료소모량 추정 모형을 개발하여 컨테이너 선박에 대해서만 결과를 도출하고 검증했다.

IMO(2015)의 연구⁵⁸⁾에 따르면, 다음 <그림 5-2>와 같이 컨테이너 선박이 2012년 기준 66,000천 톤을 연료로 사용한 것으로 조사되어 가장 많은 배기가스를 배출한 것으로 추정된다. 이는 전체 선박이 사용하는 연료 중 20% 이상을 차지하는 것이지만, 이를 통해서도 선박이 야기하는 전체 배기가스 배출량을 분석한 결과라 하기에는 부족하다.

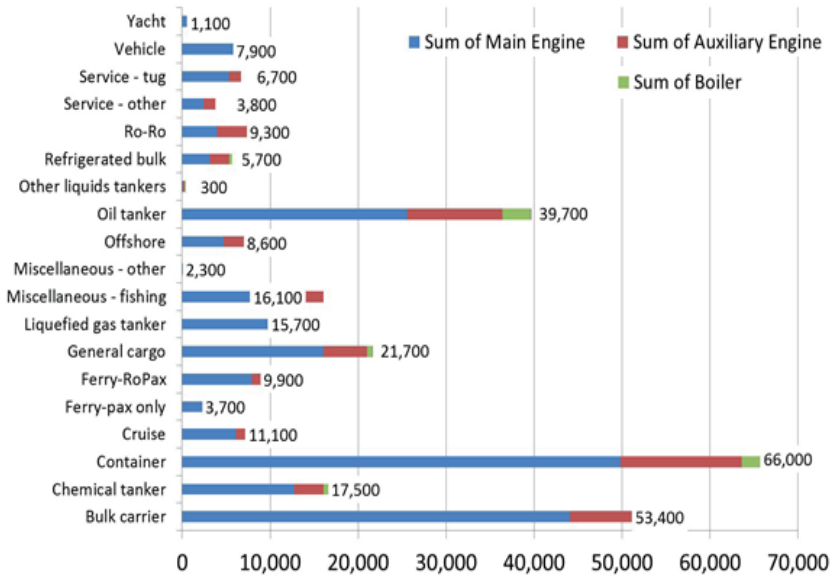
따라서 컨테이너선 다음으로 많은 연료를 사용하고 있는 벌크(일반, 벌크 캐리어), 탱커(오일/화학/가스), 크루즈 선박 등에 대한 연료소모량 및 배기가스 배출량 추정이 필요하며, 이를 위해 필요한 AIS 데이터 확보가 선행되어야 할 것으로 보인다. 이를 통해 전 세계 대부분의 선박에 대해 추정이 가능하다면, 앞 항의 연구 결과에서 언급했

58) IMO(2015), *op. cit.*, pp. 6-7.

던 것처럼 ‘전 세계 배기가스 배출지도’를 제작하고 이를 기반으로 다양한 파생연구를 추진하는 데 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

〈그림 5-2〉 전 세계 선종별 연료사용량(2012년 기준)

단위: 천 톤



자료: IMO(2015), *op. cit.*, p. 7

제2절 정책제언

1. 항만 내 배기가스 배출 모니터링 시스템 및 조직 운영

LA항은 지난 2005년부터 대기질 모니터링 프로그램을 실시하고 있다. 이는 항만의 대기질 개선을 위한 노력의 일환으로 CAAP(Clean Air Action Plan)의 지원에 의해 수행되고 있다.⁵⁹⁾

〈그림 5-3〉 LA항 대기질 모니터링 스테이션



자료: Port of LA(검색일: 2020. 9. 18)

⁵⁹⁾ Port of LA(검색일: 2020. 9. 18)

LA항의 모니터링 프로그램에는 4개의 대기질 모니터링 스테이션이 포함되어 있는데 이 스테이션은 LA항 부근의 대기오염 수준을 측정한다. 이 프로그램에는 오존, 황산화물질, 이산화질소, 일산화탄소, 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}), 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 및 초미세 입자의 실시간 대기질을 측정한다. 또한 실시간으로 모니터링할 수 없는 상세한 화학 분석은 24시간 통합된 미립자 샘플을 필터에서 3일마다 채취해 실시한다.

또한 LA항의 각 대기질 모니터링 스테이션은 풍속, 풍향, 온도 데이터를 수집하고, 그 중 하나의 스테이션은 태양 복사, 상대 습도 및 기압 데이터를 모은다. 두 개의 커뮤니티 스테이션의 위치는 지역 사회 내의 주변 조건을 대표할 수 있는 지 여부를 검증한 연구를 통해 선택되었다.

우리나라는 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」 제9조(실태조사 등) 제1항에서 항만지역 대기질 측정소를 설치하여 항만지역 등의 대기질 현황 및 변화를 측정하고, 조사결과는 해양수산부의 해양환경통합정보망에 반영해야 한다고 명시되어 있다. 현재 환경부가 설치한 항만지역 대기질 측정을 위한 측정소는 58개소⁶⁰⁾가 설치되어 있다.

하지만 아직 항만지역 대기질 측정정보가 해양수질 자동측정결과와 달리 해양환경정보포털에 표시되지는 않고 있다. 다만 현재 도시 등의 대기질을 나타내는 에어코리아(AirKorea)에서는 부산항, 광양항, 인천항 등 13개 항만의 통합대기환경지수(CAI: Comprehensive air-quality index)⁶¹⁾와 초미세먼지(PM_{2.5}), 미세먼지(PM₁₀), 오존(O₃),

60) 국가관리무역항 15개소, 도시지역 8개소, 해경선박 35척.

61) 통합대기환경지수는 대기오염도 측정치를 국민이 쉽게 알 수 있도록 하고 대기오염으로부터 피해를 예방하기 위한 행동지침을 국민에게 제시하기 위하여 대기오염도에 따른 인체 영향 및 체감오염도를

이산화질소(NO_2), 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO_2) 등의 값을 표현하고 있다.

하지만 현재 측정위치선정 시 LA항과 달리 검증연구를 통해 이뤄진 것이 아니기 때문에 항만지역 대기질 측정치의 정확성을 보장하기 어려우며, 즉 측정위치, 측정방법에 따라 결과가 다를 수 있다.

이에 정확한 항만 대기질 측정을 위해서는 수집·측정 장비를 설정한 후 대기흐름을 고려하여 최적 측정위치를 선정하고, 미세먼지 등 측정 대상 오염물질을 정한 후, 측정주기 및 측정방법, 검증방법을 설정해야 한다.

또한 환경부와 해양수산부가 진행하는 항만지역 대기질 측정소 결과값과 함께 선박 배기가스가 도시지역으로 확산하는 정도 등을 지속적으로 측정 및 시뮬레이션하여 결과가 실증값에 가깝도록 수정, 검증하는 모니터링 체계 구축이 필요하다.

특히 본 연구를 통해 개발된 방법론을 활용하여 ‘우리나라 항만 대기질 모니터링 및 예측 시스템(가칭)’과 전담조직을 운영한다면 단기적으로는 주변 지역의 대기질 예보가 가능하여 국민들의 건강증진에 도움이 될 것으로 보인다. 또한 매 5년마다 실시하는 ‘항만지역등 대기질 개선 종합계획’ 수립 시 대기질 개선 목표 수립 및 실태조사에 활용함으로써 중장기적인 친환경 정책 수립 및 관리에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

고려하여 개발된 대기오염도 표현방식(에어코리아(검색일: 2020. 10. 10)).

2. 항만 내 감속운항 촉진을 위한 법제도 개선

저속운항은 연료소모 및 배기가스 배출을 감소시킨다. 여러 문헌들에 의하면 엔진출력은 속도의 3승 함수를 따르기 때문에 10% 감속 운항 시 엔진 출력을 27% 줄일 수 있다고 하며, 이는 낮은 속도로 항해함에 따라 시간이 더 오래 걸리는 것을 고려하더라도 항해에 필요한 에너지를 19% 감소시킨다는 연구도 있다.⁶²⁾

미국 LA/LB항은 저속운항해역의 범위를 항만으로부터 각각 20해리, 40해리 반경으로 지정하고 있으며, 1년간 12노트 이하의 속도로 입항하는 비율이 90% 이상인 선사에 한해 접안료를 15% 또는 30%를 감면해주고 있다.⁶³⁾

우리나라에서도 항만 지역 미세먼지 감축에 선사를 적극적으로 참여시키기 위해 선박 저속운항 프로그램을 2019년 12월에 정부주도로 시행했다. 2020년 1월 1일부로 발표된 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」 제11조(저속운항해역지정 등) 제2항이 대표적이며, 선박 저속운항 해역을 선종별 권고속도 이하로 연간 60% 이상 저속 입항 시 인센티브로 항만시설 사용료를 감면해주고 있다.

〈표 5-5〉 대상선종 및 권고속도

부산항		인천항		여수·광양항		울산항	
선종	권고속도	선종	권고속도	선종	권고속도	선종	권고속도
컨테이너선	12	컨테이너선	12	컨테이너선	12	컨테이너선	12
일반화물선	10	일반화물선	10	일반화물선	10	원유운반선	10
자동차 운반선	12	LNG 운반선	10	LNG운반선	10	케미컬 및 석유제품 운반선	10

자료: 「선박저속운항 해역 및 대상 선종 등 기준 고시」(해양수산부고시 제2019-227호)

62) OECD·International Transport Forum(2018), p. 29.

63) 해양수산부 보도자료(2019. 11. 28)

본 연구에서 항 내에서 선박 운항속도를 줄인다고 무조건 연료소모량이 감소하는 것이 아니라 적절한 속도로 운항해야 연료소모를 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 그러므로 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」 제11조 제2항에 따른 대상 선종 및 권고 속도를 본 연구에서 제안한 항만별 AIS 분석을 통한 경제속도를 계산하여 수정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

또한 선박 저속운항 프로그램에 참여하는 선박에는 항만별 감면액의 상한액⁶⁴⁾ 내에서 항만시설 사용료 중 가장 비중이 높은 선박 입출항료(톤당 111원) 감면 혜택을 부여하며, 입항 속도가 빠르고 미세먼지 저감 효과가 큰 컨테이너선은 최대 30%, 기타 선박은 최대 15%의 감면율을 적용한다.⁶⁵⁾ 항만시설 감면액도 AIS 분석을 통한 연료소모량 감축에 따라 차등 혜택을 부여하는 방법이 타당할 것으로 판단된다.

현재 선사는 선박 저속운항 신청서와 관련 증빙자료를 해양안전종합정보시스템(GICOMS)이나 전자해도표시시스템(ECDIS)에서 위치와 시간 정보를 추출해 해운항만물류정보시스템(Port-MIS)을 통해 신청서와 증빙자료를 제출해야 하는 번거로움이 있었으며, 이에 정부는 향후 Port-MIS와 선박 위치정보 시스템을 연계해 별도 증빙자료 제출 없이도 선박 저속운항 프로그램에 참여할 수 있도록 개선해 나갈 방침을 밝혔다.⁶⁶⁾ 그러므로 본 연구에서 제안한 선박별 연료소모량 추적 방법을 이용하는 방법도 고려해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

64) 항만별 상한액(부산 15억 원, 여수광양 7.5억 원, 인천 5억 원, 울산 5억 원) 초과 시 전체 선박에 대한 감면율(15% 또는 30%)을 조정하여 감면 혜택 부여함.

65) 해양수산부 보도자료(2019. 11. 28)

66) 해양수산부 보도자료(2019. 11. 28)

최근 2020년 7월 9일 유럽의회 환경위원회가 온실가스 배출권 거래제에 예외업종인 해운·조선업을 이산화탄소 등 온실가스 배출권 거래제에 참여시키는 입법 추진 계획을 발표했고, 동 위원회는 2030년까지 모든 선박의 연간 이산화탄소 배출량을 최소 40%까지 줄일 수 있도록 강제화하는 제도적 장치를 마련하기로 했다.⁶⁷⁾ 이에 AIS 기반으로 해운선사의 연료소모량 및 이산화탄소 배출량 감축 수준을 정확하게 파악하는 등의 준비가 필요할 것으로 판단된다.

3. 항만 내 배기가스 배출 저감을 위한 기술개발 추진

항만 내에서 사용하고 있는 연료의 75% 이상이 보조엔진으로부터 기인한 것으로, 이를 줄일 수 있는 AMP 등의 기술개발, 항만 내 바지선 기반 스크러버 사용, LSFO 사용 등 정책적 지원이 필요하다.

특히 선박 접안 시 보조엔진 사용에 따른 배기가스 배출 방지를 위한 한국형 스마트 육상전원공급설비(AMP) 개발이 필요하다. 2020년 1월 1일 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」이 시행됨에 따라 항만 내 AMP 설치가 가속화될 것으로 예상되고 있으나 해외 제품이 대부분인 AMP의 국산화 기술개발 R&D 및 관련 정책 추진을 통해 동 사업의 한국기업 진출을 가속화해야 할 것이다. 이를 위해서는 기존 해외 제품과의 차별화를 위해 4차 산업혁명 신기술 기반 자동 무선급전 기술이 포함된 스마트 AMP 제품 개발 추진이 필요하다.

또한 AMP 급전시설이 없는 선박들의 배기가스 배출을 방지하기 위한 한국형 AMECS(Advanced Maritime Emission Control System) 개발도 필요하다. 대부분의 선박은 AMP 급전시설이 없어 AMP가 설

67) 경향신문(검색일: 2020. 9. 1)

치되어 있는 항만에 접안하더라도 필요한 전력을 공급받을 수 없기 때문에 기존과 같이 보조엔진을 사용하고 있다. 보조엔진 사용 시 배출되는 배기가스를 포집하는 장비로 AMECS가 사용되고 있으며, 이를 국산화하기 위한 R&D 추진 또한 필요하다.

이러한 기술의 상용화 및 국산화를 위해서는 AMP, AMECS 등 항만 친환경 장비 도입 관련 국가적 재정 지원이 필요하다. 항만 친환경 장비는 운전자 입장에서는 추가적인 비용으로 간주하고 있으며, 따라서 이를 도입할 경우 발생하는 비용이나 세제 혜택 등 재정적 지원책 마련되어야 초기 도입이 원활할 것으로 보인다.

아울러 항만 친환경 장비 운영을 위한 전문 인력 양성 교육기관 및 예산 마련이 필요하다. AMP, AMECS 등 항만 친환경 장비는 아직까지 우리나라에서는 운영되고 있지 않은 장비로 이와 관련된 전문 인력들을 양성하기 위한 교육기관 및 예산 마련이 필요하며, 이러한 장비를 직접 운영하고 있는 미국, 유럽과 같은 선진국과의 협력방안을 모색하는 노력이 필요할 것으로 보인다.

〈그림 5-4〉 AMP



자료: Port of Hamburg(검색일: 2020. 8. 6)

〈그림 5-5〉 AMECS



자료: 저자 촬영

참고문헌

〈국내 문헌〉

- 김병옥·이덕수·신길재·박상일, 『선박자동식별시스템 수신율 향상을 위한 개선방안 마련 연구』, 해양수산부, 2016. 9.
- 마지황, 「환경규제에 따른 선박 개조시장 확대」, 『금융경영브리프』, 하나금융경영연구소, 2018. 9. 3.
- 「선박저속운항 해역 및 대상 선종 등 기준 고시」(해양수산부고시 제2019-227호)
- 미세먼지특별대책위원회 보도자료, 「이낙연 국무총리, 제3차 미세먼지특별대책위원회 주재」, 2019. 11. 1.
- 이기열·김은우·최나영·한김보경·Peng Chuansheng, 『동북아 공동배출규제해역 지정 필요성 및 추진방안 연구』, 한국해양수산개발원, 2019. 12.
- 이연경·이기열·강무홍·서정용·김효재·이성우, 『스마트항만과 스마트도시 연계 발전 방안 연구』, 한국해양수산개발원, 2020. 12.
- 이호춘·황진희·박한선·류희영, 『우리나라 선박 배출 대기오염물질의 체계적 관리방안』, 한국해양수산개발원, 2016. 12.
- 해양수산부 보도자료, 「올해 12월부터 선박 저속운항 프로그램 시행한다」, 2019. 11. 28.

〈국외 문헌〉

- Barras, C.B., *Ship Design and Performance for Masters and Mates*, Elsevier, 2004.
- Chang, Y.T., Y. Song, and Y. Roh, "Assessing greenhouse gas emissions from port vessel operations at the Port of Incheon", *Transportation Research Part D*, 25, 2013.
- Chen, D., Y. Zhao, P. Nelson, Y. Li, X. Wang, Y. Zhou, J. Lang, and X. Guo, "Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China", *Atmospheric Environment*, 145, 2016.

- Chen, D., N. Zhao, J. Lang, Y. Zhou, X. Wang, Y. Li, Y. Zhao, and X. Guo, "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, 2018.
- Corbett, J.J., and P. Fischbeck, "Emissions from Ships", *Science*, 278(5339), 1997.
- Corbett, J.J., and H.W. Koehler, "Updated emissions from ocean shipping", *Journal of Geophysical Research*, 108(4650), 2003.
- Corbett, J.J., H. Wang, and J.J. Winebrake, "The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping", *Transportation Research Part D*, 14, 2009.
- EEA, *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019*, 2019. 11. 13.
- ICCT, *Prevalence of heavy fuel oil and black carbon in Arctic shipping, 2015 to 2025*, 2017. 5.
- ICF Consulting, *Current Methodologies and Best Practices in Preparing Port Emission Inventories - Final Report*, Environmental Protection Agency, 2009.
- IHS, *Maritime Ports & Terminals Guide 2017-2018*, 2, 2016.
- _____, *Maritime Ports & Terminals Guide 2017-2018*, 4, 2016.
- IMO, *MARPOL Annex VI*
- _____, *Third IMO GHG Study 2014 - Executive Summary and Final Report*, 2015.
- Le, L.T., G. Lee, H. Kim, and S. Woo, "Voyage-based statistical fuel consumption models of ocean-going container ships in Korea", *Maritime Policy & Management*, 47(3), 2020.
- Mander, S., "Slow steaming and a new dawn for wind propulsion: A multi-level analysis of two low carbon shipping transitions", *Marine Policy*, 75, 2017.
- Ng, S.K.W., C. Loh, C. Lin, V. Booth, J.W.M. Chan, A.C.K. Yip, Y. Li, and A.K.H. Lau, "Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta", *Atmospheric Environment*, 76, 2013.

OECD·International Transport Forum, *Decarbonising Maritime Transport – Pathways to zero-carbon shipping by 2035*, 2018.

Wang, Z., M. Zhu, S. Chen, and D. Sperling, “Pollution: Three steps to a green shipping industry”, *Nature*, 530, 2016.

〈인터넷 자료〉

경향신문, 「유럽의 ‘온실가스 배출권 거래제’ 해운·조선업도 포함되나」, http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?art_id=202007091650001
(검색일: 2020. 9. 1)

국가미세먼지정보센터, 「배출량 통합검색」, <http://airemiss.nier.go.kr>
(검색일: 2020. 8. 6)

에어코리아, https://www.airkorea.or.kr/web/khaiInfo?pMENU_NO=129
(검색일: 2020. 10. 10)

_____, <http://www.airkorea.or.kr/map> (검색일: 2020. 12. 21)

PORT-MIS, 「항만물류통계-컨테이너수송실적(총괄)」, <https://new.portmis.go.kr>
(검색일: 2020. 9. 7)

Alphaliner, 「Alphaliner TOP 100」, <https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100> (검색일: 2020. 3. 17)

Lloyd's List, 「The Container Outlook」, <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1130450/The-Container-Outlook> (검색일: 2020. 8. 23)

Mannan, M.S., 「A Report on Ship Emissions Sulfur Cap-2020」, https://www.researchgate.net/publication/341232503_A_Report_on_Ship_Emissions_Sulfur_Cap-2020 (검색일: 2020. 9. 18)

Port of Hamburg, 「Shore Power Station at the Cruise Centre Altona in full Operation for one Year – Ship Calls soar」, <https://www.hafen-hamburg.de/en/news/shore-power-station-at-the-cruise-centre-altona-in-full-operation>

on-for-one-year-ship-calls-soar---35749 (검색일: 2020. 8. 6)

Port of LA, 「AIR QUALITY MONITORING」, <https://www.portoflosangeles.org/environment/air-quality/air-quality-monitoring> (검색일: 2020. 9. 18)

부록

〈부록 1〉 선박 운항 중 배기가스 배출량 추정 결과

〈표 부록-1〉 선박 운항 중 배기가스 배출량 추정 결과(2018년)

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NM VOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	135,202	7,770	2,704	250	545	1,000	428,591
	MDO		7,679		265	192		
싱가포르항	BFO	289,680	17,205	5,794	559	1,254	2,144	918,286
	MDO		17,023		592	416		
로테르담항	BFO	134,966	7,742	2,699	249	541	999	427,844
	MDO		7,651		264	192		
LA/LB항	BFO	117,165	6,645	2,343	213	462	867	371,413
	MDO		6,565		225	165		
상하이항	BFO	548,693	34,533	10,974	1,139	2,676	4,060	1,739,356
	MDO		34,231		1,208	800		
5개 항 합계	BFO	1,225,706	73,895	24,514	2,410	5,478	9,070	3,885,490
	MDO		73,149		2,554	1,765		
전 세계	BFO	74,768,494	5,711,411	1,495,370	197,354	520,519	553,287	237,016,128
	MDO		5,692,925		209,738	115,364		

〈표 부록-2〉 선박 운항 중 배기가스 배출량 추정 결과(2019년)

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NM VOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	133,226	7,646	2,665	246	536	986	422,328
	MDO		7,556		260	189		
싱가포르항	BFO	290,812	17,189	5,816	557	1,247	2,152	921,873
	MDO		17,004		590	417		
로테르담항	BFO	128,175	7,359	2,564	237	515	948	406,315
	MDO		7,273		251	182		
LA/LB항	BFO	117,579	6,642	2,352	212	459	870	372,726
	MDO		6,562		225	165		
상하이항	BFO	495,804	31,474	9,916	1,040	2,461	3,669	1,571,699
	MDO		31,207		1,103	725		
5개 항 합계	BFO	1,165,596	70,310	23,313	2,292	5,218	8,625	3,694,941
	MDO		69,602		2,429	1,678		
전 세계	BFO	70,776,797	5,389,036	1,415,536	185,950	490,340	523,748	224,362,447
	MDO		5,371,159		197,631	109,105		

〈부록 2〉 선박 정박 중 배기가스 배출량 추정 결과

〈표 부록-3〉 선박 정박 중 배기가스 배출량 추정 결과(2018년)

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NM VOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	46,415	2,533	928	79	162	343	147,136
	MDO		2,498		84	65		
싱가포르항	BFO	81,076	4,437	1,622	138	284	600	257,011
	MDO		4,377		146	114		
로테르담항	BFO	52,419	2,851	1,048	89	183	388	166,168
	MDO		2,813		94	73		
LA/LB항	BFO	48,998	2,663	980	83	171	363	155,324
	MDO		2,627		88	69		
상하이항	BFO	79,569	4,332	1,591	135	278	589	252,234
	MDO		4,273		143	111		
5개 항 합계	BFO	308,477	16,816	6,169	524	1,078	2,283	977,873
	MDO		16,588		555	432		
전 세계	BFO	2,059,887	112,707	41,198	3,502	7,210	15,243	6,529,843
	MDO		111,185		3,708	2,884		

〈표 부록-4〉 선박 정박 중 배기가스 배출량 추정 결과(2019년)

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NM VOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	45,752	2,494	915	78	160	339	145,035
	MDO		2,461		82	64		
싱가포르항	BFO	81,756	4,463	1,635	139	286	605	259,165
	MDO		4,403		147	114		
로테르담항	BFO	49,089	2,669	982	83	172	363	155,613
	MDO		2,632		88	69		
LA/LB항	BFO	48,282	2,621	966	82	169	357	153,053
	MDO		2,585		87	68		
상하이항	BFO	86,269	4,688	1,725	147	302	638	273,474
	MDO		4,624		155	121		
5개 항 합계	BFO	311,148	16,935	6,223	529	1,089	2,302	986,340
	MDO		16,705		559	436		
전 세계	BFO	2,114,573	115,615	42,291	3,595	7,401	15,648	6,703,195
	MDO		114,053		3,806	2,960		

〈부록 3〉 선박 묘박 중 배기가스 배출량 추정 결과

〈표 부록-5〉 선박 묘박 중 배기가스 배출량 추정 결과(2018년)

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	4,038	223	81	7	14	30	12,802
	MDO		220		7	6		
싱가포르항	BFO	13,030	718	261	22	46	96	41,306
	MDO		708		23	18		
로테르담항	BFO	1,358	74	27	2	5	10	4,304
	MDO		73		2	2		
LA/LB항	BFO	1,067	58	21	2	4	8	3,382
	MDO		57		2	1		
상하이항	BFO	67,691	3,690	1,354	115	237	501	214,581
	MDO		3,640		122	95		
5개 항 합계	BFO	87,184	4,763	1,744	148	306	645	276,375
	MDO		4,698		156	122		
전 세계	BFO	753,743	41,319	15,075	1,281	2,638	5,578	2,389,364
	MDO		40,764		1,357	1,055		

〈표 부록-6〉 선박 묘박 중 배기가스 배출량 추정 결과(2019년)

단위: 톤

항만	종류	연료소모량	NOx	SOx	NMVOC	PM	CO	CO ₂
부산항	BFO	4,009	221	80	7	14	30	12,707
	MDO		218		7	6		
싱가포르항	BFO	15,302	841	306	26	54	113	48,509
	MDO		829		28	21		
로테르담항	BFO	932	51	19	2	3	7	2,955
	MDO		50		2	1		
LA/LB항	BFO	2,339	128	47	4	8	17	7,414
	MDO		126		4	3		
상하이항	BFO	40,506	2,208	810	69	142	300	128,403
	MDO		2,178		73	57		
5개 항 합계	BFO	63,088	3,449	1,262	108	221	467	199,988
	MDO		3,401		114	88		
전 세계	BFO	755,346	41,386	15,107	1,284	2,644	5,590	2,394,448
	MDO		40,829		1,360	1,057		

기본연구보고서 발간목록

2020년

01	해양수산업의 지역 간 연관구조 분석	장정인
02	해양수산 분야 기술 대외의존도 분석연구 - 스마트항만을 중심으로 -	전형모
03	지역 해양수산 오픈 플랫폼 구축방안 연구	최지연
04	갯벌 거버넌스 개선방안에 관한 연구	육근형
05	해양환경정책의 능동적 추진을 위한 자원체계 개선 방안 연구	박수진
06	항만 대기환경 관리 표준 및 평가모형 연구	안용성
07	해양수산분야 사회문제해결형 R&D 기반 구축 연구	좌미라
08	해양 유입 하천쓰레기 관리체계 개선방안	이윤정
09	수산물 품질·안전관리 제도 개선방안 연구	이현동
10	국제법 변화에 대응한 어선원 안전 및 권리 제고방안 연구	한덕훈
11	스마트 양식 클러스터 추진 방안 수립 연구	이상철
12	해양포유류 보호에 관한 수산업 대응 방안 연구	정명화
13	수산물 수급통계 개선 방안 연구	김수현
14	IMO 온실가스 규제 대응 정책방향 연구	박한선
15	퇴직전문가 활용을 통한 해운업 경쟁력 강화방안 연구	안영균
16	글로벌 선사들의 물류통합화 전략에 대한 국적선사의 대응방안	전형진
17	내항여객운송항로 정책 발전방안 연구	김태일
18	블록체인 기술기반 식품콜드체인 체계 구축 연구	조지성
19	항만자동화 도입 관련 노무 갈등 해소 방안 연구	김찬호
20	스마트항만과 스마트도시 연계 발전 방안 연구	이연경
21	항만의 회복탄력성 측정 모형 구축에 관한 연구	김성기
22	IMO 규제기반 해사산업의 글로벌 지속발전방안 연구 -新해사산업의경제적파급효과분석연구(4차년도)-	박한선
23	국내 항만연계 산업의 가치사슬 및 공급사슬 연계성 강화방안 - 자동차 산업을 중심으로	신수용

2019년

01	한반도 평화 체제 수립 대비 접경수역 연구	최지현
02	수산부문 전망모형 「KMI-FOSiM」 구축 연구(2차년도)	이현동
03	4차 산업혁명 시대의 스마트 어촌 구축방안 연구	박상우
04	해양수산분야 예견적 위험분석 기반구축 연구	최석우
05	재해대응 및 환경보전을 위한 연안토지 매수 이행방안 연구	윤성순
06	선박 대기오염물질 배출저감 기술의 평가·인증체계 구축 및 활용방안 연구	안용성
07	해양레저관광서비스 산업 육성방안 연구	최일선
08	주요국의 나고야의정서 이행체계 강화에 대응한 해양유전자원정책 개선 연구	박수진
09	하천·해양 수질의 연계·통합 관리 체계 연구	장원근
10	총허용어획량(TAC) 기반 수산자원관리 강화 방안 연구	이정삼
11	우리나라 수산업·어촌의 공익적 기능에 관한 연구	류정곤
12	우리나라 원양산업의 사회적 책임 실천 강화를 위한 정책연구	정명화
13	수산업 노동시장 구조 분석과 노동정책 변화에 따른 대응 연구	한광석
14	우리나라 정기선 해운정책 개선 방안 연구	김태일
15	국내외 해운금융 비교를 통한 국내 해운금융 역량강화 방안 연구	전형진
16	해상 사이버 보안체계 강화방안 연구	박한선
17	해운 기업 비즈니스 모델과 경쟁우위 분석 연구	윤희성
18	국내 항만산업이 지역경제에 미치는 영향 분석	하태영
19	동북아 공동배출규제해역 지정 필요성 및 추진방안 연구	이기열
20	수출기업의 글로벌 공급사슬협력 수준 분석과 물류정책 방안 연구 - 화주~물류기업 협력을 중심으로 -	김은수
21	신선식품 수출입 증대를 위한 우리나라 항만물류 개선 방안	신수용
22	환동해권 물류 및 지역개발 비즈니스 모델 제안과 협력방안	박한선
23	IMO 규제기반 해사산업의 글로벌 지속발전방안 연구 - 우리나라 新해사산업의 경쟁력 분석에 관한 연구 -	최나영환

수시연구보고서 발간목록

2020년

01	포스트 코로나 19 해양수산 분야 정책방안	박광서
02	생분해성 어구 사용 활성화 방안 연구	심성현
03	해양법 전문인력 양성 방안 연구	박영길
04	무인도서 해양주권 강화와 이용 활성화를 위한 제도 개선방안	정지호
05	지역 해양수산 재정분권 대응방향	황재희
06	데이터 3법 개정에 따른 항만·물류 데이터 활용도 제고 방안	이기열
07	양식 활어 유통 효율화 방안 연구	마창모
08	해양레저관광사업 추진을 위한 제도정비 방안	홍장원
09	해양바이오기업의 규제 정비 방안 연구	최석문
10	비상체제 시 선원의 안전을 위한 선박-항만-항공 이동경로 구축방안	이혜진

2019년

01	일본의 수산물 수입 구조 분석과 對일본 수출 전략 연구	임경희
02	선박부착생물에 대한 선제적 대응을 위한 정책방향 연구	박수진
03	수산물 위생안전을 위한 저온유통체계 구축방안 연구	장홍석
04	전국 사업체조사 마이크로데이터를 활용한 어촌지역 고용통계 (2016, 2017)	한광석

일반연구보고서 발간목록

2020년

01	지역 해양관광 경쟁력 지수 체계화 연구	최일선
02	AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구	강무홍
03	김 중기 수급전망모형 「Gim-MFoS」 구축 연구	허수진

04	중앙 북극 공해 비규제어업방지협정 이행방안 연구	김민수
05	동해 평화관광구역 조성 방안 연구	윤인주
06	디지털 공급사슬 물류정보통합 구축전략 연구(II) - 일반 수출입 컨테이너 정보교환방식 중심 -	이연경
07	스트레스 테스트를 통한 우리나라 해운·조선 기업의 안정성 분석	박성화
08	인공지능기반 해상운임예측 연구	황수진
09	국제물류주산업 실태분석 및 경쟁력 제고 방향 연구	최나영환
10	디지털화에 따른 개별 직업의 대체 가능성 추정 연구	박희대
11	시계열 분석을 통한 해운시장 분석 및 예측 연구	고병욱
12	해양수산분야 글로벌 경제효과 분석모형(KMI-GEM) 시범 구축 연구	임병호
13	해운항만물류 인력양성사업 관리운영 제도 개선 방안 연구	이자연

2019년

01	양식수산물의 경영비 조사체계 구축에 관한 연구	백은영
02	딥러닝 기반의 건화물선 시황예측 연구	윤희성
03	해운-조선산업 관계분석 연구 - 컨테이너 신조발주량 예측 -	최건우
04	디지털 공급사슬 물류정보통합 구축전략 연구(I) - 디지털 공급사슬 생태계 정보통합지도 구축 중심 -	최상희
05	시민 건강증진을 위한 해안관리 방향	정지호
06	우리나라 주요 국제여객항 운영체계 개선방안 연구 : 운영, 시설, 제도를 중심으로	이경한
07	북한 서해 해양관광 활성화 방안	윤인주
08	EU의 수산물 소비 특성 및 수출 전략(프랑스, 스페인을 중심으로)	김지연
09	해양수산 위성계정 기초연구(I)	장정인
10	우리나라 해운·물류기업의 중국 자유무역시범구 활용방안 연구	김형근
11	지역 해양수산 혁신성장체계 구축 연구	최지연
12	도미니카공화국 뱀장어 양식사업 타당성 조사	마창모
13	강원도 어촌 신활력 제고방안(2차년도) - 어촌 활성화 거버넌스 구축과 신활력 사업구상 -	박상우

일반연구 2020-02

AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구

2020년 12월 29일 인쇄

2020년 12월 31일 발행

발 행 인 | 장 영 태

발 행 처 | 한국해양수산개발원

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 | 세븐스가든

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel : 02-394-0337

정가 6,000원