

선박 기술진보를 고려한 탄소 배출량 추정 연구

A Study on the Estimation of Carbon Emissions
Considering Ship Technological Progress

최건우 · 이호준 · 윤재웅 · 황수진 · 류희영 · 김병주



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자 최건우, 이호춘, 윤재웅, 황수진, 류희영, 김병주

내부연구진 연구책임자 최건우 한국해양수산개발원 해운·물류연구본부 전문연구원
공동연구원 이호춘 한국해양수산개발원 해운·물류연구본부 부연구위원
공동연구원 윤재웅 한국해양수산개발원 해운·물류연구본부 전문연구원
공동연구원 황수진 한국해양수산개발원 해운·물류연구본부 전문연구원
공동연구원 류희영 한국해양수산개발원 해운·물류연구본부 연구원
공동연구원 김병주 한국해양수산개발원 해운·물류연구본부 연구원

연구기간 2021. 3. 30. ~ 2021. 10. 31.

보고서 집필내역

연구책임자 최건우 연구총괄, 제1장, 제2장, 제3장, 제4장, 제5장, 제6장

내부연구진 이호춘 제1장 제2절
윤재웅 제6장 제2절
황수진 제2장 제1절
류희영 제2장 제2절
김병주 제2장 제2절

발간사

온실가스 배출 감축을 위한 전 지구적인 노력이 지속되고 있다. 최근 개최된 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26)에서는 세계 기후위기에 대응하기 위해 탄소배출 산업에 대한 조정 등 다양한 노력을 통해 2030년까지 지구 온도의 상승을 1.5도 이내로 달성하기로 합의했다.

해운분야에서도 국제해사기구(IMO)를 중심으로 1973년 해양오염방지협약을 시작해 대기오염 물질에 대한 감축 논의를 시작했으며 2018년 개최된 해양환경보호위원회(MEPC)에서 온실가스 배출 초기전략이 채택되었다. 이 전략에 따라 2030년까지 운송 단위당 평균 탄소 배출량인 탄소집약도(CII: Carbon Intensity Indicator)를 2030년까지 2008년 대비 최소 40%, 2050년까지 70% 감축을 목표로 한다. 당장 2022년 말부터 현재 운항하는 선박에 대한 탄소배출 규제인 현존선에너지효율지수(Energy Efficiency Existing ship Index)가 실시될 예정으로 해운분야에서 탄소배출 감축에 대한 노력은 이미 시작되었다.

2020년 우리나라에서는 「한국형 친환경선박 추진전략」이 발표되었지만, 이는 상선대가 아닌 관공선에 초점을 맞춰 설계된 로드맵이었다. 이와는 달리 본 연구는 수출입 경제를 담당하는 컨테이너 해운분야에 대해 진행되었기 때문에 더욱더 의미를 가질 수 있다. 동 연구에서는 2050년까지 세계 컨테이너 물동량과 선대를 전망하였을 뿐만 아니라 기존에 수행된 선박의 탄소배출 추정 연구에서 나아가 기술의 진보까지 고려했다. 또한 다양한 시나리오를 통해 신조와 해체 비중에 따른 탄소 배출량을 계산하여 2050년까지 친환경선대 도입을 위한 장기 로드맵을 수립하는 데 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

끝으로 이 연구의 책임을 맡은 해운·물류연구본부의 최건우 전문연구원과 연구진의 노고에 깊은 감사를 표한다. 아울러 이 연구에 자문과 조언을 아끼지 않은 이경우 한양대학교 교수와 해양수산부 김한울 서기관께 깊은 감사를 드린다. 끝으로 이 보고서의 심사와 감리를 맡아 적절한 지적과 조언으로 완성도를 높여 주신 우리 원의 김태일 본부장을 비롯하여 이 보고서가 출판되기까지 도움을 주신 모든 분들께 이 자리를 빌려 감사를 드린다.

2021년 12월
한국해양수산개발원
원장 김 중 덕

목차

요약_i

Executive Summary_vii

01	서론_1	
	제1절 연구 배경 및 필요성	1
	제2절 연구 목적	3
	제3절 연구 내용 및 추진 방법	5
	1. 연구 범위 및 주요 내용	5
	2. 연구 방법	6
02	해운산업의 탄소배출 규제_9	
	제1절 IMO의 온실가스 배출 규제	9
	1. IMO의 온실가스 배출 규제 계획	9
	2. IMO의 온실가스 배출 연구	11
	제2절 해운의 탄소배출에 관한 선행연구	15
	1. 연료소모량 추정에 관한 선행연구	15
	2. 탄소배출 규제에 관한 선행연구	22
03	컨테이너 선대 현황 및 전망_29	
	제1절 컨테이너 물동량 전망(~2050년)	30
	제2절 컨테이너 운영 선대 및 전망(~2050년)	35
	제3절 소결	43
04	기술진보를 고려한 연료소모량 추정_47	

제1절 컨테이너 선대의 기술진보계수 추정	47
1. 기술진보 적용 사례	47
2. 기술진보계수 추정	52
제2절 컨테이너선 연료소모량 추정	65
1. 컨테이너선 연료소모량 산정 프로세스	65
2. 컨테이너선 연료소모량 추정 시 가정	66
3. 컨테이너선 연료소모량 추정	67
4. 선행연구와 연료소모량 비교	70
제3절 소결	72

05 시나리오에 따른 탄소 배출량 추정_75

제1절 신기술 적용에 따른 시나리오	75
1. 연료별 탄소 배출량	75
2. 미래 연료 수요 전망 시나리오	80
제2절 시나리오에 따른 탄소 배출량	85
1. 시나리오1(선속 5% 감속)	86
2. 시나리오2(선속 10% 감속)	88
3. 시나리오3(친환경선박 발주 비중 2050년 20%)	89
4. 시나리오4(친환경선박 발주 비중 2050년 100%)	90
5. 시나리오5(선속 감속+친환경선박 발주 비중 2050년 100%)	91
제3절 소결	92

06 결론 및 제언_95

제1절 결론	95
1. 컨테이너선의 연식에 따른 기술진보는 0.57%로 추정	95
2. 현재의 기술진보로 IMO 온실가스 배출 규제는 충족시키기 어려워	96
3. 에너지효율설계지수(EEDI) 규제는 지켜지고 있어	96

4. 감속을 통한 탄소배출 감축은 단기적 대안으로 가능	97
5. 탄소배출 추정 모형의 고도화 필요	97
제2절 제언	98
1. ‘얼마나’보다 ‘어떻게’ 운송하는지가 중요	98
2. 친환경 연료 공급 체계 마련	98
3. 과감한 규제 도입 필요	99
4. 규제에 대한 구체성, 관련 연구 필요	100
5. 친환경선박 로드맵 필요	101
6. 항만과의 협력 필요	101
7. 해체시장 포화에 대한 준비 필요	102

표 목차

〈표 2-1〉 IMO 2020에서 제시한 시나리오	13
〈표 2-2〉 선박 속도에 따른 연료소모량	18
〈표 2-3〉 선박 연료소모량에 대한 추가 선행연구	21
〈표 2-4〉 해운부문 탄소배출 규제에 관한 추가 선행연구	27
〈표 3-1〉 DNV의 2050년까지 컨테이너 물동량 예측	33
〈표 3-2〉 기간별 세계 교역과 GDP 간의 탄력성	33
〈표 3-3〉 세계 총생산(GDP)과 컨테이너 물동량과의 탄력성	34
〈표 3-4〉 동 연구와 DNV 컨테이너 물동량 예측 비교	35
〈표 3-5〉 2050년 선대 비중 전망	39
〈표 3-6〉 컨테이너선 선대 전망(8.5TEU/slot 기준)	40
〈표 3-7〉 컨테이너선 선대 전망(8.0TEU/slot 기준)	41
〈표 3-8〉 선형별 평균 컨테이너선 크기	42
〈표 3-9〉 컨테이너 수요 예측 프로세스(~2050)	43
〈표 3-10〉 컨테이너 선대 예측 프로세스(~2050)	44
〈표 3-11〉 컨테이너선 선대 전망	45
〈표 4-1〉 EEDI 적용에 따른 연료소모량 감소율	48
〈표 4-2〉 기술 적용률(Penetration rates)	49
〈표 4-3〉 신기술 적용에 따른 CO2 감소율(2050년 기준)	51
〈표 4-4〉 변수별 기초통계량	54
〈표 4-5〉 변수 간 상관관계	54
〈표 4-6〉 선형회귀분석 결과	56
〈표 4-7〉 다중공선성 검증 결과(VIF)	56
〈표 4-8〉 규제선형모델의 장단점	58
〈표 4-9〉 라쏘와 릿지 회귀분석 결과	58
〈표 4-10〉 라쏘 회귀분석 결과	59
〈표 4-11〉 릿지 회귀분석 결과	60
〈표 4-12〉 엘라스틱넷 회귀분석 결과	61
〈표 4-13〉 분위회귀분석 결과	63
〈표 4-14〉 연도별 신조 인도량(폐선+수요 증가)(8.0TEU/slot 기준)	68
〈표 4-15〉 연도별 신조 인도량(폐선+수요 증가)(8.5TEU/slot 기준)	68

〈표 4-16〉 선형별 연료소모량 전망	69
〈표 4-17〉 컨테이너 선대 연도별 연료소모량	70
〈표 4-18〉 컨테이너선 연료소모량 추정(2019년 선대 기준)	72
〈표 4-19〉 컨테이너선 기술진보도 추정(~2050)	72
〈표 4-20〉 컨테이너 선대 연료소모량 추정 시 가정	73
〈표 5-1〉 연료별 탄소배출계수	75
〈표 5-2〉 연료 유형별 열량	76
〈표 5-3〉 대체연료의 주요 특성과 이점 및 과제	77
〈표 5-4〉 생산 방식에 따른 탄소 배출량 차이	79
〈표 5-5〉 LNG 추진선 발주 현황	83
〈표 5-6〉 선박연료별 신조발주 시나리오(~2050)	84
〈표 5-7〉 시나리오 종합	85
〈표 5-8〉 시나리오 설정	86
〈표 5-9〉 선속 변화에 따른 연료소모량(시나리오1)	87
〈표 5-10〉 선속 변화에 따른 연료소모량(시나리오2)	88
〈표 5-11〉 시나리오3에 따른 탄소 배출량 추정치	90
〈표 5-12〉 시나리오4에 따른 탄소 배출량 추정치	91
〈표 5-13〉 시나리오5에 따른 탄소 배출량 추정치	92
〈표 5-14〉 시나리오 설정	93
〈표 5-15〉 시나리오에 따른 탄소 배출량 추정치	94

그림 목차

〈그림 1-1〉 국적 선박 EEXI 규제 만족 여부	2
〈그림 1-2〉 온실가스 배출에서 유형별 오염물질 비중	5
〈그림 1-3〉 본 연구에서 탄소배출 추정 프로세스	6
〈그림 2-1〉 IMO 온실가스 규제 연혁	10
〈그림 2-2〉 IMO 온실가스 감축 목표	11
〈그림 2-3〉 IMO 온실가스 추정 프로세스(상향식)	12
〈그림 2-4〉 IMO 온실가스 추정 프로세스(하향식)	14
〈그림 2-5〉 시나리오에 따른 온실가스 배출량 전망	15
〈그림 2-6〉 라소를 활용한 연료소모량 추정 프로세스	16
〈그림 2-7〉 Uyanik의 연료소모량 추정 프로세스	17
〈그림 2-8〉 Meng의 연료소모량 추정 프로세스	19
〈그림 2-9〉 컨테이너선 저유황유 사용에 따른 오염물질 배출도	22
〈그림 2-10〉 22개 분야의 CO2 배출 감소 잠재도	24
〈그림 2-11〉 선종별 이산화탄소 배출량	25
〈그림 2-12〉 최적운항속도 도출	26
〈그림 3-1〉 컨테이너 선대 온실가스 배출량 추정 프로세스	29
〈그림 3-2〉 시나리오에 따르는 교역량	31
〈그림 3-3〉 교통수단별 화물 수요 전망	32
〈그림 3-4〉 원(log-log) 추정과 탄력성을 이용한 예측	34
〈그림 3-5〉 컨테이너 선대 전망 프로세스	36
〈그림 3-6〉 컨테이너 시장의 수요와 공급에 따른 운임 변화	36
〈그림 3-7〉 컨테이너 물동량과 선대량, 슬롯 회전을	37
〈그림 3-8〉 컨테이너 평균 선속 추이	38
〈그림 3-9〉 컨테이너 크기별 비중 전망(2050년)	39
〈그림 3-10〉 새로운 표준선형 개발	42
〈그림 3-11〉 컨테이너 물동량 예측 결과	44
〈그림 3-12〉 선형별 규모 및 평균 선대 크기	45
〈그림 4-1〉 선박 효율성 개선 방안	47
〈그림 4-2〉 탄소 배출량 감축 기여	52
〈그림 4-3〉 패네티(람다)에 따른 변수별 영향도 변화(라쏘)	59

〈그림 4-4〉 패널티(람다)에 따른 변수별 영향도 변화(릿지)	60
〈그림 4-5〉 패널티(람다)에 따른 변수별 영향도 변화(엘라스틱넷)	61
〈그림 4-6〉 분위 변화에 따른 계수 변화	64
〈그림 4-7〉 컨테이너선 연료소모량 추정 프로세스	65
〈그림 4-8〉 컨테이너선 해체 추이	66
〈그림 4-9〉 EEDI 적용에 따른 탄소배출 감축도	67
〈그림 4-10〉 선종별 항해 상태에 따른 연료소모량 비중	71
〈그림 4-11〉 연도별 컨테이너선 연료소모량 전망	74
〈그림 5-1〉 국제 해운시장의 에너지 소비 및 탄소 배출량(지속가능한 시나리오)	81
〈그림 5-2〉 IMO 규제에 따른 연료별 수요 전망	82
〈그림 5-3〉 선속 5% 감축에 따른 탄소 배출량	87
〈그림 5-4〉 선속 10% 감축에 따른 탄소 배출량	88
〈그림 5-5〉 신조 선박 발주 비중 시나리오3	89
〈그림 5-6〉 신조 선박 발주 비중 시나리오4	90

약어 목록

- AIS: 선박자동식별장치(Automatic Identification System)
- CII: 탄소집약도(Carbon Intensity Indicator)
- EEDI: 선박에너지효율설계지수(Energy Efficiency Design Index)
- EEOI: 선박에너지효율운항지수(Energy Efficiency Operational Indicator)
- EEXI: 현존선에너지효율지수(Energy Efficiency Existing ship Index)
- HFO: 중유/고유황유(Heavy Fuel Oil)
- IEA: 국제에너지기구(International Energy Agency)
- IMO: 국제해사기구(International Maritime Organization)
- IHS: Information Handling Services
- LSFO: 저유황유(Low Sulfur Fuel Oil)
- MEPC: 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee)
- MGO 선박용 경유(Marine Gas Oil)
- SEEMP: 선박에너지효율관리계획서(Ship Energy Efficiency Management Plan)
- OECD: 경제협력개발기구(Organisation for Economic Co-operation and Development)

요약

1. 연구의 목적

- 컨테이너 해운산업에서 선박 연료 소모에 대한 기술진보 추이를 계량적으로 분석하여 IMO가 제시한 2050년까지 탄소배출 저감 목표 달성 여부를 검증하는 것이 가장 큰 목적임
- 친환경 연료, 저속 운항, 선박 대형화를 고려한 탄소 배출량을 계산하여 탄소배출 규제를 만족시킬 수 있는 다양한 시나리오를 설계하여 검증
- 해운부문의 탄소 배출량 전망에 대한 연구의 상당수는 IMO나 DNV와 같은 일부 기관에서 진행되고 있어 독자적인 예측 모델 확보도 본 연구의 의의임
- 이를 위해 추정 모델의 단순화, 전망 프로세스의 간편화를 통해 상시적으로 분석할 수 있는 모형을 개발함
- 향후 벌크, 탱커, 연안여객선 등 다양한 선종으로 전망모형을 확대하여 2050년까지 국적 선대의 탄소 배출량 추정 및 전망을 가능하게 해 친환경 선박 전환 로드맵 수립에 기초 자료로 활용 가능

2. 연구특징 및 방법

- IMO(2014), IMO(2020)의 연구에서는 연료 효율성 향상도를 기술별로 적용 또는 임의의 추정치로 일괄 적용하였으나 본 연구에서는 컨테이너 선대 자료를 이용해 기술진보도를 추정하여 적용함
- 선형회귀분석과 분위회귀분석을 통한 분석 외에도 인공지능을 활용한 방법론인 라쏘(Lasso), 릿지(Lidge), 엘라스틱넷(Elastic net)을 통해 추정의 강건성을 확보함
- 기술진보도를 비롯하여 선속 감소, 친환경 연료 사용 등의 다양한 시나리오를 통해 IMO 규제 충족을 위한 사례 제시

〈요약 표〉 연구의 프로세스 및 가정

연구 흐름	세부 내용	연구 방법
⇓	↓	↓
서론	• 연구 개요, 내용 및 연구 차별성	-
⇓	↓	↓
선행연구	• 선박 연료소모량 선행연구 • 선박의 탄소배출에 관한 선행연구 • 선박의 기술진보	• 문헌조사 • 선행연구 검토
⇓	↓	↓
컨테이너 선대 전망	• 컨테이너 물동량 예측(~2050) • 컨테이너 운영 선대 및 전망(~2050)	• 회귀분석 • 문헌조사
⇓	↓	↓
기술진보도 추정	• 컨테이너선 기술진보계수 추정 • 모델성능 비교	• 규제선행모델(라쏘, 릿지, 엘라스틱넷) • 분위회귀모형
⇓	↓	↓

연구 흐름	세부 내용	연구 방법
탄소 배출량 추정	• 연료별 탄소배출계수 • 시나리오 설정(선속 감소, 친환경 연료 사용, 해체율 상승, 기술진보에 따른 효율성 향상) • 시나리오에 따른 탄소 배출량 추정	• 시뮬레이션
↓	↓	↓
결론 및 제언	• 결론 • 제언	-

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- 2050년 세계 컨테이너 해상 물동량은 약 4억 TEU(2020년 약 1.9억 TEU), 선대는 4,705만~4,999만 TEU(2020년 약 2,300만 TEU))를 기록할 것으로 예상됨
- 컨테이너 평균 선박 크기는 2020년 4,349만 TEU에서 2050년 5,800TEU로 증가 전망
- 현재의 기술진보만으로 IMO 규제를 충족시키기 힘들
- 컨테이너선의 연식에 따른 기술진보도는 0.5%로 추정되나 선대증가량은 연평균 1.5%(척수 기준) 이상으로 예상됨
- 2019년 기준 컨테이너 선대의 총 연료소모량은 8,220만 톤으로 추정됨
- 2008년 연료소모량은 7,403만 톤으로 추정되며 현재 사용되는 고유황유, 저유황유가 계속 사용될 경우 2050년 예상되는 연료소모량은 1억 톤 이상임
- 해체량이 최근 10년 평균 대비 2배, 선속 감소, 친환경선박 조기 도입으로 탄소배출 규제 만족 가능

-
- 감속을 통한 탄소배출 감축은 단기적인 대안으로 가능
 - 선속을 10% 감축하면 단기적으로 탄소배출 규제는 충족시킬 수 있으나 장기적으로는 힘들
 - 기존 선박의 폐선과 친환경선박을 조기 도입해야만 탄소배출 규제 충족이 가능함

2) 제언

- 과감한 규제일수록 선사는 적극적으로 대응
 - 2022년 현존선에 대한 탄소배출 규제(EEXI)가 실시될 예정이나 선사별로 대응은 상이함
 - Gilbert(2014)는 근시안적이고 강도가 약한 규제는 선사들에게 다양한 대안을 줄 수 있어 실행력이 약해질 수 있다고 경고함. 따라서 과감한 규제일수록 선사는 적극적으로 대응할 것으로 예상됨
 - 실제로 선박에너지효율설계지수(EEDI) 적용 선대의 연료 효율성을 분석한 결과 규제 이전에 건조된 선박에 비해 연료 효율성이 크게 향상됨
- 친환경 연료 수급에 대한 준비 필요
 - 2018년 약 1.7억 톤의 암모니아가 생산되었으나 세계 모든 선박에 사용될 경우 약 6억 톤이 필요해 공급 부족을 겪을 가능성이 높음
 - 또한 생산에서부터 화석연료가 아닌 친환경기술(태양열, 풍력)을 활용하는 방안이 검토되어야 함
- 규제에 대한 구체성, 관련 연구 필요
 - MEPC 회의를 통해 환경 규제들이 제정되고 이를 수행하기 위한 방안이 논의되고 있지만 구체적이지 않거나 모호한 규정으로 인해 해석에 어려움을 겪고 있어 명확하고 구체적인 규정과 함께 관련 연구 필요함

- 국적 선사들의 친환경선박 로드맵 필요

- IMO의 규제를 만족시키기 위해서는 기존 선박의 친환경선 교체 불가피하기 때문에 국적 선사도 선박 건조 수요가 발생함
- 최근 10년간 해체량의 2배 이상의 폐선이 발생해야 IMO의 규제 충족이 가능하기 때문에 국적 선사의 전략적인 접근이 필요함
- 2020년 「한국형 친환경선박 추진전략」이 발표되었지만 조선부문에 대한 지원과 관공선의 친환경선 교체에 대한 내용이 주를 이루어 국적 선대의 친환경선 발주에 대한 장기 로드맵 수립이 필요

- 항만과의 협력 필요

- 정박/묘박 중일 때의 연료소모량은 총 연료소모량의 3.6~5.7%를 차지하기 때문에 육상전원공급설비만으로도 연료소모량을 줄일 수 있어 항만과의 협력이 필요함

- 해체시장 포화에 대한 준비 필요

- 현존선에 대한 규제가 실시되면 노후선에 대한 교체 수요가 크게 증가할 것으로 예상됨
- IMO의 규제를 맞추기 위해서는 매년 총 컨테이너 선대의 2~3%가 해체될 것으로 예상되나 환경 규제로 인해 선박 해체를 허용하는 국가는 갈수록 적어지기 때문에 국적 선사들은 이에 대한 준비가 필요함

EXECUTIVE SUMMARY

1. Purpose

- The primary purpose of this study is to verify whether the target set out by the IMO for cutting carbon emissions from ships can be achieved by 2050 by quantitatively analyzing the trends of technological advances of fuel oil consumption in the container shipping market.
- To achieve this purpose, a variety of scenarios were designed to fulfill regulations by calculating carbon emissions while taking into consideration eco-friendly fuels, low-speed operation and the growth in ship size.
- Most of the preceding studies on forecasting carbon emissions in the shipping sector have been carried out by solely a few organizations such as the IMO and DVN. In this regard, this study bears its significance by securing an independent forecasting model.
- Therefore, this study developed a model capable of conducting regular analysis through the simplification of estimated models

as well as forecasting processes.

- With its forecasting model being expanded to a variety of types of ships such as bulk carriers, tankers, and passenger ships, this study contributes to estimating and forecasting carbon emissions from the fleet of national flag carriers by 2050. Therefore, this study can be utilized as a basic foundation for establishing a roadmap for transitioning into eco-friendly vessels.

2. Methodology and Features

- Studies carried out by the IMO (2014, 2020) focused on the improvement of fuel efficiency either by type of technology or by random estimated value collectively. However, this study first estimated technological advancements and then applied them based on data from containership fleets.
- In addition to the analysis carried out by linear regression analysis and quantile regression analysis, this study utilized AI-based methodologies such as Lasso, Ridge, and Elastic net, to secure the robustness of the estimation.
- In addition to technological advancements, a variety of other scenarios were reviewed such as the reduced speed of ships and the use of eco-friendly fuels, presenting cases that meet the requirements of IMO regulations.

〈Summary Table〉 Process and assumptions of this study

Study flow	Specific contents	Methods
⇓	↓	↓
Introduction	• Outline, contents and differentiation of the study	
⇓	↓	↓
Preceding studies	• Preceding studies of ship fuel consumption • Preceding studies regarding carbon emission from ships • Technological advancements of ships	• Literature review • Review of preceding studies
⇓	↓	↓
Grand outlook of containerships	• Forecasting container traffic volume (~2050) • Operation of containership fleets and outlook (~2050)	• Regression analysis • Literature review
⇓	↓	↓
Estimation of technological advancements	• Estimation of technological advancement coefficient • Comparison of model performances	• Regularization linear models (Lasso, Ridge, Elastic net) • Quantile regression analysis
⇓	↓	↓
Estimation of carbon emissions	• Carbon emission factor by fuel • Selecting scenarios (speed reduction of ships, use of eco-friendly fuels, increase of ship dismantling and increase of efficiency resulting from technological advances) • Estimating carbon emissions in accordance with scenarios	• Simulation
⇓	↓	↓
Conclusion and suggestions	• Conclusion • Suggestions	

3. Results

1) Summary

- By 2050, world container trade volume is expected to be approximately 400 million TEU, with the capacity of the global container fleet reaching 470.5 million ~ 499.0 million TEU (about 230 million TEU in 2020).
- The average size of containerships is expected to grow from 434.9 million TEU in 2020 to 580 million TEU in 2050.
- The current level of technological progress is hardly suffice enough to satisfy IMO regulations.
- While the technology progress rate is estimated to be about 0.5% in accordance with the age of containerships, the growth rate of containership fleets is expected to be an annual average of 1.5% (based on the number of vessels)
- As of 2019, the total amount of containership fuel consumption is estimated to stand at 822 million tons.
- The amount of fuel consumption in 2008 was estimated to record 740.3 million tons. If currently using high-Sulphur fuel oil (HSFO) and low sulfur fuel oil (LSFO) continue to be utilized, the amount of fuel consumption will reach more than 100 million tons by 2050.
- IMO regulations on carbon emissions can be met if the rate of shipbreaking increases twice the average rate of the

recent 10 years together with the introduction of reduction of ship speed and early adoption of eco-friendly ships.

- Reduction of carbon emissions through lower speed can be suggested as a short-term solution.
- A 10% reduction in ship speed will be able to fulfill the regulations of carbon emissions in the short term, however, it may be hard to do so in the long term.
- Regulations on carbon emissions will only be met when the breaking of existing ships is accelerated and eco-friendly ships are adopted sooner.

2) Policy suggestions

- Faced with more drastic regulations, shipping companies are likely to take a more proactive approach
- Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) regulation will be applied to existing ships in 2022. However, responses conducted by ships often vary.
- Gilbert (2014) gave a warning that a short-sighted and low-intensity regulation may present a variety of alternatives, weakening the enforcement power. Therefore, the more drastic a measure is, the more proactive the response shipping companies will take.
- Indeed, according to the analysis of container fleets to which EEDI was applied, their energy efficiency has been significantly

improved compared to ships constructed prior to the regulation.

- Preparation for the demand and supply of eco-friendly fuels is necessary.
 - In 2018, approximately 170 million tons of ammonia were produced. If such an amount is used by all the ships in the world, a shortage of supply is evident while requiring about 6 million tons of ammonia.
 - Furthermore, it is important to review measures for utilizing eco-friendly technologies (solar, wind-power), instead of fossil fuels from the stage of production.
- Studies to promote the concreteness of regulations are required.
 - While a number of environmental regulations have been enacted through MEPC meetings and implemented, the lack of concreteness as well as vagueness surrounding statements from the MPEC has posed a difficulty in interpretation of regulations. Therefore, relevant studies are required along with more concretely stipulated regulations.
- National flag carriers need to prepare a roadmap for eco-friendly ships
 - In order to meet IMO regulations, replacing existing ships with eco-friendly ones is inevitable. Therefore, national flag carriers will have the demand for ship construction.
 - National flag carriers in particular need a more strategic approach as IMO regulations can only be met when the number

of scrapped ships is more than twice as high as the average dismantling volume over the last 10 years

- Although the Korean government announced the ‘Korean Green Ships (Greenship-K) Promotion Strategy’ in 2020, this strategy primarily covers support for the shipbuilding sector and the replacement of eco-friendly ships by government vessels. Therefore, it is necessary to establish a long-term roadmap with regards to the order of eco-friendly ships placed by national flag carriers.
- **Cooperation with ports is necessary**
 - Since fuel consumption of ships while anchoring/at berth accounts for 3.6~5.7% of total fuel consumption, alternative maritime power (AMP) alone will be able to reduce fuel consumption, which calls for cooperation with ports.
- **Preparation is required for saturation of the ship-breaking market**
 - When regulations on existing ships begin, the demand for replacing old ships is expected to grow rapidly.
 - It is estimated that 2~3% of total containership fleets are expected to be dismantled to meet the regulations by the IMO. Due to environmental regulations, however, the number of nations allowing ship breaking becomes lower, hence, preparation by national flag carriers is necessary.

01

서론

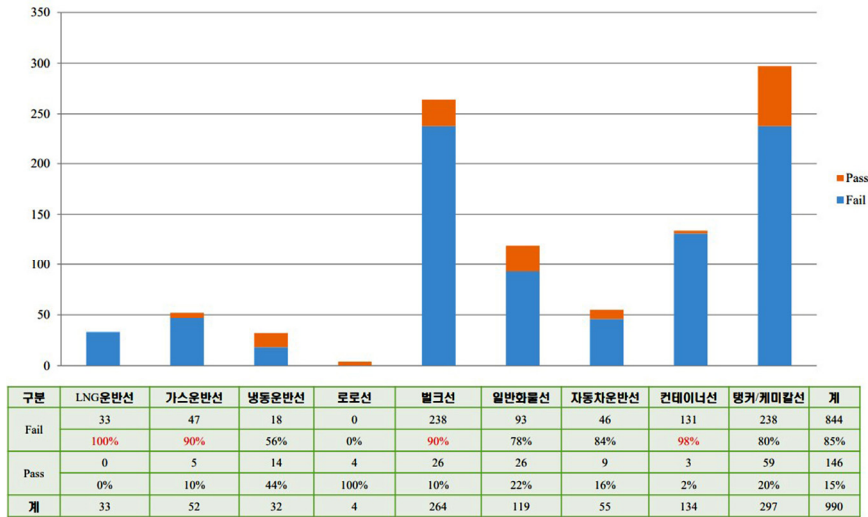
제1절 연구 배경 및 필요성

국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)는 1973년 해양오염방지협약(MARPOL: Marine Pollution treaty)을 시작으로 대기오염 물질 감축을 논의하였으며 다양한 환경보호 규정을 제시하였다. 2018년에 개최된 해양환경보호위원회(MEPC: Marine Environmental Protection Committee) 제72차 회의에서는 온실가스 배출 감축 초기전략(Initial strategy)을 채택하였다. 이 전략은 해운분야에서 배출하는 온실가스를 줄이기 위해 운송 단위당 평균 배출량인 탄소집약도(CII: Carbon Intensity Indicator)를 2030년까지 2008년 대비 최소 40%, 2050년까지 70% 감축하는 것을 목표로 한다. 이와 같은 장기 계획을 통해 2050년까지 선박에서 발생하는 총 온실가스 배출량을 2008년 대비 50% 절감할 계획이다.

2013년부터 신조 선박에 대한 에너지효율설계지수(EEDI: Energy Efficiency Design Index)를 적용하였으며, 현존선은 2022년 11월부터 탄소배출에 대한 규제를 실시할 예정이다(MEPC 76). 이 규제가 실시될 경

우 현존선은 2019년 기준으로 CII를 2024-2026년 동안 매년 2%씩 낮춰야 한다. EEDI 규제가 실시되기 이전인 2012년 기준 세계 총 선대 척수는 8만 6,082척으로, 2020년의 9만 9,430척의 86.6%에 달하는 것으로 나타나 현존선에 대한 규제가 2012년 이전에 발주된 선박에 요구되는 등급에 못 미칠 가능성이 높다.¹⁾ 실제로 해양수산부의 조사에 따르면 국적 선대 990척 중 현존선에너지효율지수(EEXI: Energy Efficiency Existing ship Index) 규제를 만족하는 선박은 총 선대의 약 15%(146척)에 불과한 것으로 나타났다.²⁾

〈그림 1-1〉 국적 선박 EEXI 규제 만족 여부



자료: 해양수산부(2021), p. 18

1) 클락슨(2021)(검색일: 2021. 8. 31)

2) 해양수산부(2021), p. 18.

본 연구의 대상인 컨테이너 선대는 2020년 기준 5,400척으로 세계 총 선대 척수의 약 5.4%에 불과하나 이동 거리로 볼 때 전 세계 선박의 17%, 총 선박 연료소모량의 25%를 차지하여 타 선종에 비해 연료소모 비중이 높다.³⁾ 또한 컨테이너는 중간재와 최종재의 운송을 담당하여 다양한 해상 교역 중 화물 가치가 높을 뿐만 아니라 실물경제와 연관성이 깊다. 예를 들어 유럽연합에서 추진하는 탄소국경세를 부과할 경우 연료소모량이 높은 해상 컨테이너 교역에서 선화주의 부담이 증가할 수밖에 없으므로 환경 규제에 따른 영향도가 큰 선종이다. 또한 컨테이너 해운 시장은 진입 장벽이 높아 소수 선사들의 시장 점유 비중이 높은 과점시장에 가깝고 선사의 영향력이 커져 환경 규제에 따른 시장의 영향을 전망하고 이에 맞는 장기적인 대응전략 수립이 필요하다.

제2절 연구 목적

해운분야에서 탄소중립으로 가기 위한 방안은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 법·규제와 같은 정책적인 노력이다. IMO 탄소배출 규제 외에도 유럽연합(EU)의 탄소국경세 도입이 2021년 7월에 확정되었으며, 우리나라에서는 탄소중립법을 추진하고 있을 뿐만 아니라 민간에서도 RE100⁴⁾을 통한 자발적인 참여가 일어나고 있다. 둘째, 선사의 선박 운영/운항 방식의 변화를 통한 탄소배출 감소이다. 2008년 컨테이너 평균 운항 속도는 19노트 이상이었으나 최근에는 14노트 내외로 낮아져 연료 효율이 향상되었다. 또한 선사들은 선박 대형화를 통해 CII를 낮추고 있을

3) Ernest *et al.*, p. 2

4) 기업이 사용하는 전력의 100%를 재생에너지로 충당하려는 계획

뿐만 아니라 항로 최적화를 통해 연료 효율을 향상시키고 있다. 셋째, 기술진보를 통해 선박 배출량을 최소화하는 방안이다. 선박 엔진과 선형 디자인 설계를 통한 효율성 향상 외에도 태양광과 바람을 이용하는 장비들을 탑재하여 연료소모량을 절감할 수 있다. 나아가 완전한 탄소중립을 위해서는 수소, 암모니아를 연료로 하는 친환경선박 도입이 필요하며 이러한 연료를 추출할 때도 친환경 에너지를 사용하는 계획이 추진되고 있다.

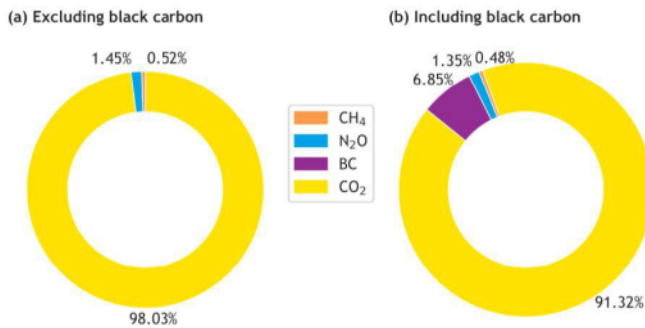
본 연구에서는 컨테이너 해운산업에서 과거부터 진행된 선박 연료 소모에 대한 기술진보 추이를 계량적으로 분석하여, IMO가 제시한 2050년까지 탄소배출 절감 목표 달성 여부를 검증하는 것이 가장 큰 목적이다. 대부분의 선박 연료소모량, 탄소 배출량 추정 연구가 현재의 운영 선대를 기준으로 측정하는 데 반해 동 연구는 과거부터 진행된 연료 효율 향상을 위한 기술진보계수를 추정하여 이를 미래에 적용한다. 비록 모든 선종이 아닌 컨테이너선에 한정되지만, 탄소 배출량 전망에 대한 연구의 상당수는 IMO나 DNV와 같은 일부 기관에서 진행되고 있기에 독자적인 예측 모델을 확보하는 것도 본 연구의 새로운 의의이다. IMO는 AIS를 비롯한 다양한 자료를 이용하여 정밀하게 추정하고 있지만 본 연구는 추정 모델의 단순화, 전망 프로세스의 간편화를 통해 상시적으로 분석할 수 있는 모델을 설계한다. 또한 친환경 연료, 저속 운항, 선박 대형화를 고려한 탄소 배출량을 계산하여 탄소배출 규제를 만족시킬 수 있는 다양한 시나리오를 설계하여 검증하는 것도 본 연구의 목적 중 하나이다.

제3절 연구 내용 및 추진 방법

1. 연구 범위 및 주요 내용

본 연구는 컨테이너선의 탄소 배출량을 2050년까지 전망하기 위해 컨테이너 수요와 이를 처리하는 공급(선대)을 추정한다. 선박 운영에 따른 연료소모량을 통해 탄소 배출량을 추정하기 위해 기존 연구에서는 고려하지 않았던 기술진보계수를 적용한다. 또한 본 연구의 범위는 온실가스 중 대부분을 차지하는 이산화탄소에 한정한다.

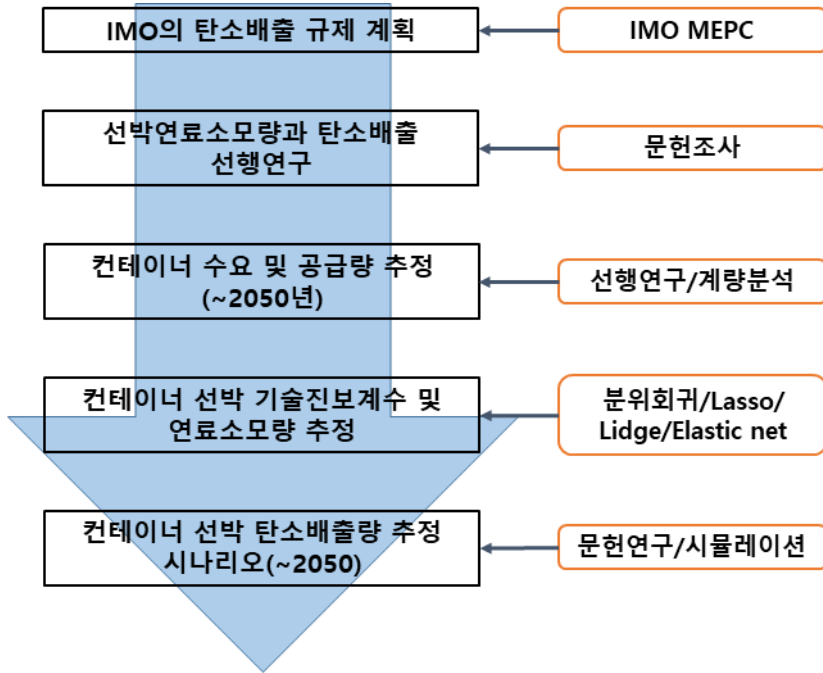
〈그림 1-2〉 온실가스 배출에서 유형별 오염물질 비중



자료: IMO(2020), p. 135

주요 연구 내용을 살펴보면 제2장에서는 선박 연료소모량과 탄소배출에 관련된 선행연구를 살펴보고, 제3장에서는 컨테이너 수요와 공급량을 추정한다. 제4장에서는 기술진보도를 산정해 2050년까지 컨테이너 선대의 연료소모량을 추정한다. 제5장에서는 저속 운항, LNG 추진선, 친환경 연료 사용 등의 시나리오를 설정하고 이에 맞는 연료소모량을 추정하여 친환경 규제 달성 여부를 검토한다. 제6장에서는 본 연구의 결론과 시사점을 도출한다.

〈그림 1-3〉 본 연구에서 탄소배출 추정 프로세스



자료: 저자 작성

2. 연구 방법

본 연구에서는 국내외 문헌조사를 중심으로 연구를 수행한다. IMO의 탄소배출 계획과 관련 연구를 통해 탄소배출에 영향을 미치는 요인을 찾아보았다. 또한 2050년 컨테이너 수요와 공급량 전망을 위해서도 관련 선행연구를 기반으로 실시하였다. 본 연구에서는 선형회귀분석과 분위회귀분석을 통한 분석 외에도 인공지능을 활용한 방법론인 라쏘(Lasso: Least Absolute Shrinkage And Selection Operator regularization), 릿지(Lidge), 엘라스틱넷(Elastic net)을 통해 추정의 강건성을 확보하였다. 아

올러 2050년까지 컨테이너 선박의 탄소 배출량을 추정하기 위해 IMO에서 제시한 시나리오 외에 기술진보, 해체율 변화, 선속 변화 등 다양한 시나리오를 가정하였다. 시나리오별로 2050년까지 탄소 배출량을 추정하여 탄소 배출 규제를 만족시킬 수 있는 다양한 방안을 모색하였다.

02

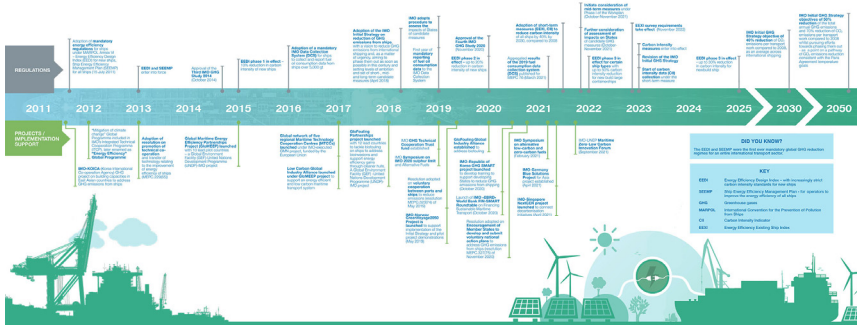
해운산업의 탄소배출 규제

제1절 IMO의 온실가스 배출 규제

1. IMO의 온실가스 배출 규제 계획

IMO의 온실가스 배출 규제는 2003년 12월에 실시된 총회결의에서 시작되었으며 2011년 7월에 개최된 MEPC 제62차 회의에서부터 구체화되기 시작했다. MEPC 제62차 회의에서 MARPOL Annex VI에 기초해 선박 에너지 효율 규정을 채택하여 신규 선박에 대한 EEDI와 선박에너지효율관리계획서(SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan)을 도입하였다. 2013년 MEPC 제65차 회의에서는 선박 에너지 효율 향상을 위한 기술협력 촉진 및 관련 기술 이전 결의안이 채택되었다. 이후 MEPC 제70차 회의에서는 선박의 연료소모량에 대한 데이터 수집을 위한 결의안이 채택되었으며, 2018년 MEPC 제72차 회의에서는 현재 우리에게 알려진 온실가스 배출 축소를 위한 장기 로드맵이 발표되었다.

〈그림 2-1〉 IMO 온실가스 규제 연혁

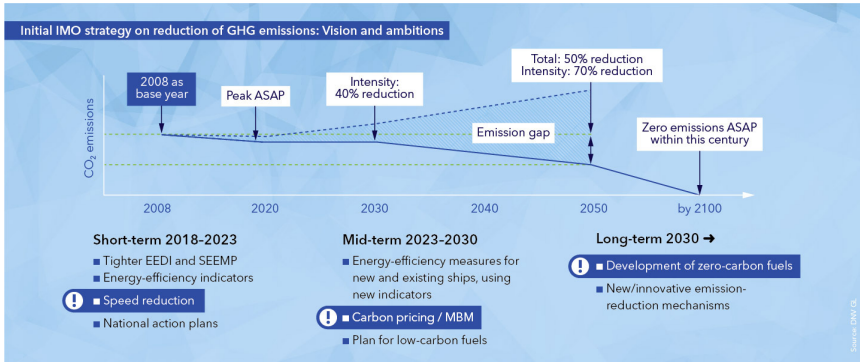


자료: IMO(검색일: 2021. 8. 30)

MEPC 제72차 회의에서 발표된 내용은 2008년 대비 2030년까지 해운 분야의 연료 효율성 지표인 CII를 40% 이상 향상시키며 2050년까지 온실가스 배출량의 50%를 감축한다. 나아가 2100년까지 온실가스 배출을 0으로 하는 것이 최종 목표이다. 이를 위해 MEPC 제76차 회의에서는 2022년 말부터 현존선에 대한 연비 효율성 규제를 확정하고 구체화했다. 현재 운항하는 5,000톤(GT) 이상 선박은 2023년부터 연비실적(CII) 계산 방법 및 보고를 2022년 말까지 SEEMP에 기재해야 한다. 매년 연료소비 실적 보고제도(DCS)에 근거한 연료소모량을 통해 attained CII를 계산하여 A-E 등급으로 구분하며, 3년 연속 E를 받은 때에는 에너지 효율 향상 계획을 제출해야 한다.⁵⁾ 이러한 선박은 출력 제한이나 에너지 저감 장치를 추가적으로 장착해야만 운항할 수 있다. CII 기준은 매년 강화되어 2023년 선박은 2019년 대비 5%의 온실가스를 감축해야 하고 2026년까지 매년 2%씩 추가 감축해야 한다. 2027년 이후 감축률은 미정이다.

5) ClassNK(검색일: 2021. 8. 30)

〈그림 2-2〉 IMO 온실가스 감축 목표



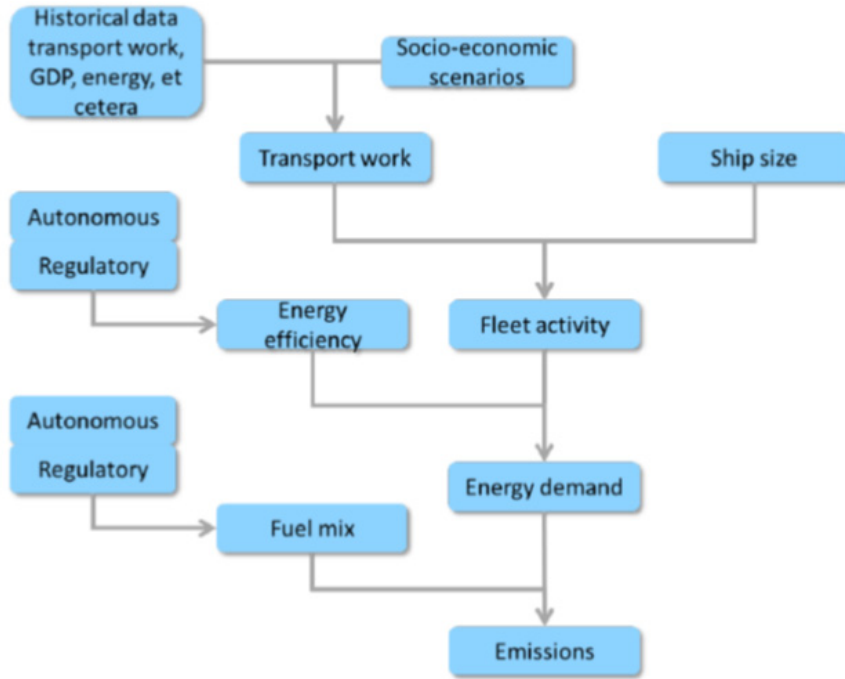
자료: DNV(검색일: 2021. 8. 30)

2. IMO의 온실가스 배출 연구

IMO의 온실가스 배출에 관한 연구는 2000년부터 실시되었으며 가장 최근에 발표된 연구는 2020년 제4차 IMO 온실가스 연구(Greenhouse Gas Study)이다. 제4차 연구는 제3차 연구에 비해 몇 가지 방법론을 개선했는데, 첫째, 온실가스 배출량을 국내와 국제 항해로 구분하였으며, 이를 위해 AIS 자료를 활용하였다. 둘째, 탄소 배출량 감축을 위한 새로운 한계저감 비용곡선을 추정하여 적용하였다. 셋째, 선박 중유 사용에 따른 블랙 카본 배출량을 추가하여 전망하였다. 넷째, 기존 제3차 연구까지는 선박에서 발생하는 온실가스 배출량 추정에 집중했으나 제4차 연구에는 AIS 자료를 이용해 운항 기반 온실가스 배출량 추정 연구를 추가하였다.

본 연구는 제3차와 동일하게 상향식(Bottom-up)과 하향식(Top-down) 방식으로 온실가스 배출량을 추정했다. 상향식 방식은 GDP와 인구 성장률 그리고 사회-경제 시나리오를 활용하여 운송 수요를 추정한다. 이후 선박 크기를 통해 선대를 예측하며 연료 효율성을 이용해 선박 연료소모량을 추정하여 온실가스 배출량을 산정하는 방식이다.

〈그림 2-3〉 IMO 온실가스 추정 프로세스(상향식)



자료: IMO(2020), p. 26

이 방식에서 GDP, 인구, 도시화 등 다양한 요인을 이용했을 뿐만 아니라 시나리오를 통해 다양한 가능성을 고려했다. Van Vuuren, Detlef P *et al.*(2011), Riahi *et al.*(2017)의 연구에서 제시된 사회경제 경로를 이용해 총 다섯 개의 에너지 시나리오로 구분하여 전망하였다. 공통사회경제경로(SSP: Shared Socioeconomic Pathways)는 Riahi *et al.*(2017)의 연구를 기반으로 기후변화에 대한 노력으로 미래 사회경제 구조가 어떻게 바뀔지를 전망한 시나리오이다.⁶⁾

6) Riahi *et al.*(2017), p. 153-168.

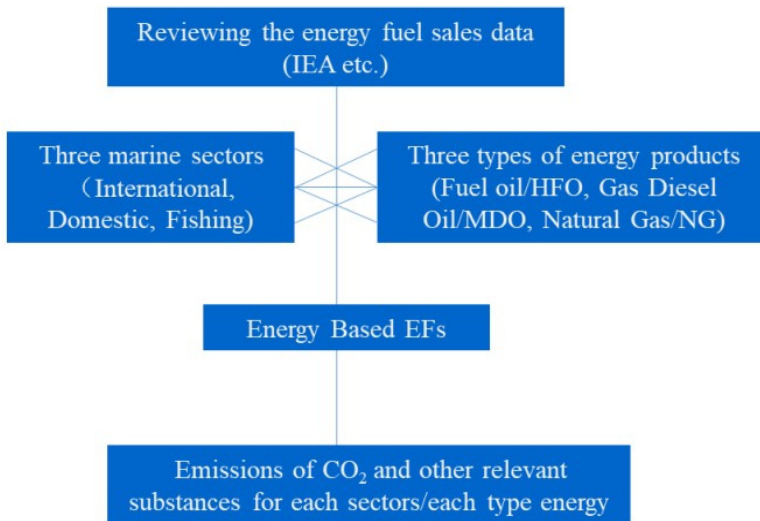
〈표 2-1〉 IMO 2020에서 제시한 시나리오

컨테이너, 드라이벌크(석탄 제외), 화공품 등	석탄, 탱커, 가스 등
SSP1(지속가능성 - 완화와 적응 모두 낮음; Taking the Green Road)	RCP1.9 (1.5°C) in combination with SSP1, SSP2 and SSP5
SSP2(완화와 적응 모두 중간; Middle of the Road)	RCP2.6 (2°C, very low GHG emissions) in combination with SSP1, SSP2, SSP4 and SSP5
SSP3(지역 경쟁 - 완화와 적응 모두 높음; A Rocky Road)	RCP3.4 (extensive carbon removal) in combination with SSP1, SS2, SSP3, SSP4 and SSP5
SSP4(불균등 - 완화는 낮고 적응은 높음; A Road Divided)	RCP4.5 (2.4°C, medium-low mitigation or very low baseline) in combination with SSP1, SS2, SSP3, SSP4 and SSP5
SSP5(완화는 높고 적응은 낮음; Taking the Highway)	RCP6.0 (2.8°C, medium baseline, high mitigation in combination with SSP1, SS2, SSP3, SSP4 and SSP5
OECD 장기 기준 전망	

자료: Van Vuuren, Detlef P *et al.*(2011), p. 12; Riahi *et al.*(2017), p. 156, IMO(2020), p. 27

하향식 방식은 선박에 사용되는 온실가스 배출계수를 이용해 연료 사용에 따른 온실가스 배출량을 추정하는 방식으로 다음과 같다. 해운분야 사용되는 총 연료소모량은 국가별 선박 연료유 판매량을 이용해 추정한다. 동 방식에서 사용되는 방법론과 가정은 국제에너지기구(IEA: International Energy Agency)에서 사용하는 방법을 준용한다.

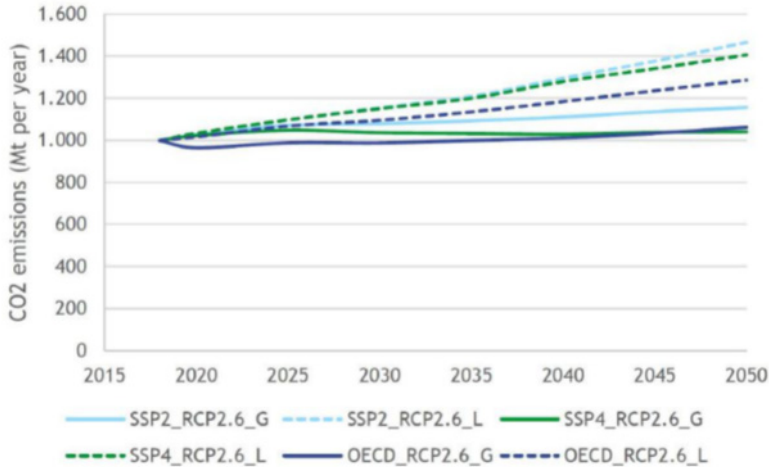
〈그림 2-4〉 IMO 온실가스 추정 프로세스(하향식)



자료: IMO(2020), p. 99

온실가스 배출량은 2018년 10억 톤에서 2050년 최대 15억 톤까지 증가할 것으로 전망했다. 이는 2018년 배출량 대비 0-50% 증가한 수치이며 2008년 대비 90~130% 수준이다. 아울러 IMO(2020)의 연구에서는 시나리오 설정을 위해 Van Vuuren, Detlef P *et al.*(2011), Riahi *et al.*(2017)의 연구를 활용했다. 동 연구는 인구, 도시화, GDP 등에 대한 2100년까지의 시나리오를 통해 전망하였다.

〈그림 2-5〉 시나리오에 따른 온실가스 배출량 전망



자료: IMO(2020), p. 37

제2절 해운의 탄소배출에 관한 선행연구

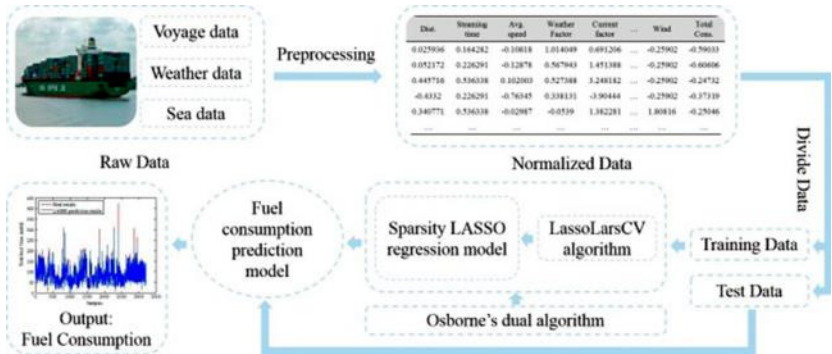
1. 연료소모량 추정에 관한 선행연구

선박 연료 추정에 대한 연구는 과거부터 진행되었는데 최근에는 머신러닝을 이용한 연구가 진행되고 있다. Wang *et al.*(2018)은 연료소모량을 추정하기 위해 항해 및 기상자료 등을 활용하여 라쏘를 활용해 선박의 연료소모량 모델을 추정하였다.⁷⁾ 주요 변수로 선박 길이, 폭, 화물중량, 바람, 파고 등 총 20개의 변수를 활용해 학습을 시켰다. 라쏘모델 외에 ANN, SVR(Support Vector Regression), GP(Gaussian Processes)를 비교하

7) Wang *et al.*(2018), pp. 817-824.

였으며 RMSE(root mean square error) 결과 라쏘모델의 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

〈그림 2-6〉 라쏘를 활용한 연료소모량 추정 프로세스

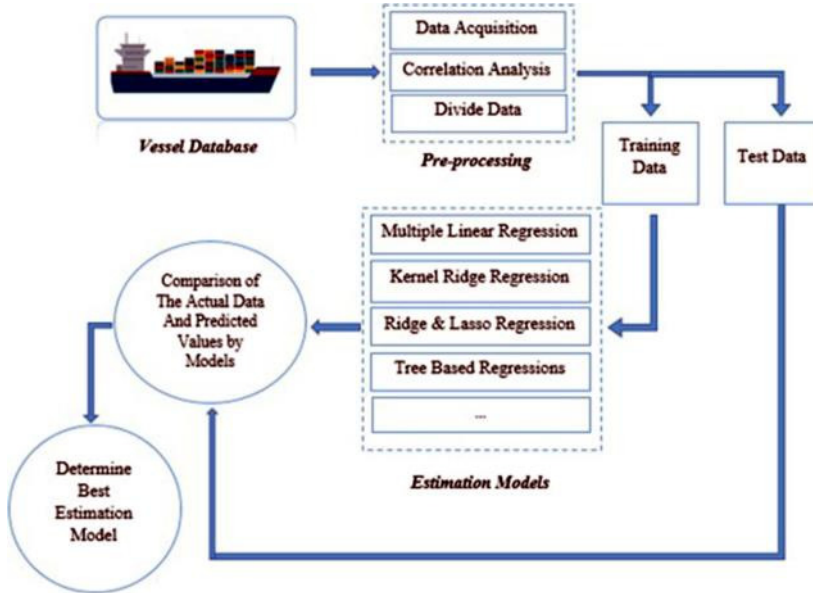


자료: Wang *et al.*(2018), p. 819

Uyanik, Karatuğ, and Arslanoğlu(2020)은 다양한 머신러닝 방법론을 활용해 컨테이너 연료소모량 추정하였다.⁸⁾ 다중회귀, 릿지(Ridge) & 라쏘 회귀, SVM, 의사결정모형 등 총 15개의 모델이 활용되었다. 다만 연구에 활용된 자료가 1척의 컨테이너선에 불과하여 선박 크기에 따른 연료소모량 추정은 불가능하다는 점이 연구의 한계로 남았다.

8) Uyanik, Karatuğ, and Arslanoğlu(2020), pp. 1-14.

〈그림 2-7〉 Uyanik의 연료소모량 추정 프로세스



자료: Uyanik, Karatuğ, and Arslanoğlu(2020), p. 3

Moreira, Vettor, and Guedes Soares(2021)의 엔진출력, 파고, 선박 속도 등을 활용하여 선박의 연료소모량을 추정하였는데, 인공지능(ANN)을 활용하여 추정한 결과 유의미한 결과를 얻었다.⁹⁾ 이에 해상 상황과 선박의 속도를 이용하여 연료소모량 추정이 가능할 것으로 예상하였다.

Le *et al.*(2019)의 논문에서는 2012~2016년 동안 운항한 100~143척의 컨테이너선에 대한 운항자료를 활용하여 연료소모량 추정 모형을 개발하였다.¹⁰⁾ 컨테이너선을 총 다섯 개 선형으로 구분하여 각기 다른 추정 모형을 도출하였는데, 속도와 운항 시간을 통해 연료소모량을 산정하는 방식으로 결과는 다음과 같다.

9) Moreira, Vettor, and Guedes Soares(2021), pp. 1-14.

10) Le *et al.*(2019), pp. 1-28.

〈표 2-2〉 선박 속도에 따른 연료소모량

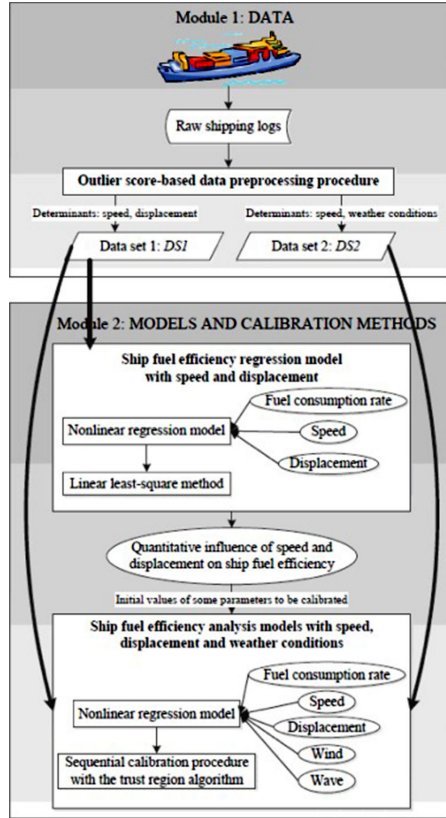
선박 크기	추정식
3,000TEU 미만	$F1 = 0.0072 T_{ijk} S_{1k}^3 + 10.8592 T_{ijk} + \varepsilon$
3,000-5,999	$F1 = 0.0101 T_{ijk} S_{1k}^3 + 20.2406 T_{ijk} + \varepsilon$
6,000-7,999	$F1 = 0.0120 T_{ijk} S_{1k}^3 + 31.938 T_{ijk} + \varepsilon$
8,000-11,999	$F1 = 0.0141 T_{ijk} S_{1k}^3 + 32.1584 T_{ijk} + \varepsilon$
12,000-14,999	$F1 = 0.0180 T_{ijk} S_{1k}^3 + 32.2535 T_{ijk} + \varepsilon$

자료: Le *et al.*(2019), p. 19

Meng, Du, and Wang(2016)은 4척의 컨테이너선(1.3만 TEU×2, 5천 TEU×2)에 대한 속도, 배수량, 파도 방향/높이, 바람의 크기를 이용해 연료소비율을 추정했다.¹¹⁾ 연구 결과 선박 연료 효율에 대한 상기 변수들이 영향을 미쳤으며 이에 대한 영향도를 분석하였다.

11) Meng, Du, and Wang(2016), pp. 207-229.

〈그림 2-8〉 Meng의 연료소모량 추정 프로세스



자료: Meng, Du, and Wang(2016), p. 214

LU, Turan, and Boulougouris(2013)는 운항 최적화를 통해 에너지 효율성을 향상시키면 온실가스 배출이 감소할 것으로 예상했다.¹²⁾ 이에 수에즈막스급 탱커선을 대상으로 Kwon(2008)이 제시한 모델링을 기반으로 한 연료소모량 추정식을 새롭게 도출하였다.¹³⁾ 또한 실제 운항자료와 추정식을 통해 추정된 자료를 통해 검증한 결과 에너지효율성지표(EEO:

12) LU, Turan, and Boulougouris(2013), pp. 1-11.

13) Kwon(2008), pp. 14-16.

Energy Efficiency of Operation) 기준 오차가 크게 감소하였다.

전미연(2019)의 연구에서는 벌크선박에 대한 연료소모량을 추정하기 위해 세 가지 기계학습모델(GLM, GBR, MARS)을 결합한 메타모델을 이용하였다.¹⁴⁾ 이를 위해 총 41개 변수(축 회전수, 엔진 기관 데이터, 기상정보 등)를 이용하였으며 주성분 분석을 이용하여 변수를 축소하고 군집분석을 활용하여 자료를 군집·분리화했다.

오민석·양경욱(2019)은 선박의 연료소모량을 산정하기 위해 선속, 외부 부하력, 정적상태 등을 고려하여 추정식을 유도하였다.¹⁵⁾ 동 연구에서는 국내 선박에서 사용되는 엔진의 사용 비중을 가중 평균하여 일반화하였다.

유은섭·박개명·문두환(2018)은 오픈소스플랫폼인 하둡(hadoop)을 이용해 1척의 선박운항자료를 분석해 에너지 효율을 예측했다.¹⁶⁾ 인공신경망 모델을 적용하였으며 비교를 위해 커브 피팅을 이용한 회귀분석을 수행한 결과 RMSE에서는 차이가 없었으나 풍랑 관련 변수인 BFS(beaufort force scale) 그래프에서는 인공신경망이 커브 피팅을 이용한 회귀분석 결과보다 우위에 있는 것으로 연구되었다.

14) 전미연(2019), pp. 1~64.

15) 오민석·양경욱(2019), pp. 108~114.

16) 유은섭·박개명·문두환(2018), pp. 275~284.

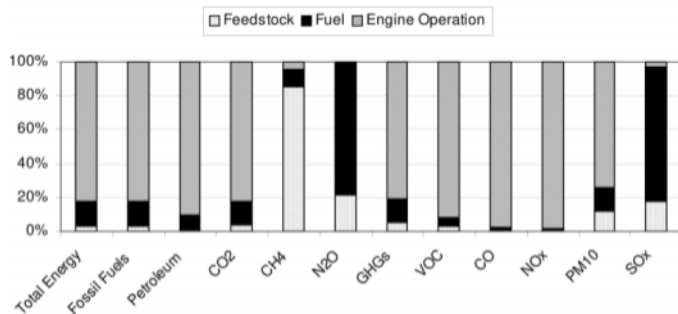
〈표 2-3〉 선박 연료소모량에 대한 추가 선행연구

선행연구명	연구 목적/방법론	주요 연구 내용
- Cullinane, K. & Khanna, M. (1999) - Economies of Scale in Large Container Ships	(목적) 선박운항원가 추정 (방법론) Cobb-Douglas 함수를 이용한 비용분석	선박 크기, 운항 거리에 따른 연료소모량을 추정하여 대형화에 따른 효과 분석
- Tokuşlu(2020) - Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Performance of a Container Ship	(목적) EEDI에 대한 효과 측정 (방법론) 컨테이너선 실적 자료	1,000TEU급 컨테이너 선박의 실적자료를 활용하여 EEDI를 계산한 결과 요구 사항을 충족하는 것으로 나타남
- 최종문, 노명일(2011) - 유전적 프로그래밍을 이용한 선박의 연료소모량 추정식 개발	(목적) 연료소모량 추정식 개발 (방법론) 유전적 프로그래밍	- 선속 저하량과 마력 증가량을 추정한 연료소모량 계산 - 유전적 프로그래밍을 통한 연료소모량에 대한 추정식 생성 - 유전적 프로그래밍 기반 연료소모량 추정 방법 적용
- JP Petersen, O Winther, DJ Jacobsen(2012) - A machine-learning approach to predict main energy consumption under realistic operational conditions	(목적) 연료소모량 추정식 개발 (방법론) 인공지능(NN: Neural Network)	- 여객선(ferry) 1척의 2달간 데이터 수집·분석 - 선박의 온실가스 배출량을 최소화하기 위한 선박 엔진 출력 도출
- 김주영, 최종문, 서연미, 노명일(2011) - 실시간 해상 정보 취득과 연료소모량 추정을 기반으로 한 선박 경제 운항 경로 결정 방법	(목적) 선박 경제 운항 경로 결정 방법 제시 (방법론) 최적경제운항경로 결정 알고리즘 - 제안된 방법 효용성 검토 및 적용	- 선속 저하량과 마력 추가량 추정 - 연료소모량과 운항시간 추정 - 최적운항 결정 알고리즘에 적용한 최적운항경로 도출

2. 탄소배출 규제에 관한 선행연구

Winebrake, Corbett, and Meyer(2007)는 선박 연료주기 배출 모델인 TEAMS(Total Energy & Emissions Analysis for Marine Systems)를 개발하였다.¹⁷⁾ 동 모델은 여섯 가지 연료 경로(석유 → 잔유, 석유 → 디젤, 석유 → 저황유, 천연가스 → 압축천연가스(CNG), 천연가스 → FTD(Fischer-Tropsch diesel), 대두 → 바이오디젤)에서 발생하는 세 개의 온실가스(이산화탄소, 아산화질소, 메탄)와 다섯 가지 오염물질(일산화탄소, 황산화물, 질소산화물, 휘발성 유기화합물, 미세먼지)을 측정하였다. 동 연구에서는 세 가지 선종(페리, 탱커, 컨테이너)에 대한 여섯 가지 연료에 따른 오염물질 배출의 변화를 살펴보았으며 선종별로 운항 패턴을 분석하였다.

〈그림 2-9〉 컨테이너선 저유황유 사용에 따른 오염물질 배출도



자료: Winebrake, Corbett, and Meyer(2007), p. 109

17) Winebrake, Corbett, and Meyer(2007), pp. 102-110.

Lindstad, Asbjørnslett, and Strømman(2011)은 저속 운항으로 인한 온실가스 배출량 감축과 해상운송비용의 감소에 대해 연구했다.¹⁸⁾ 온실가스 배출을 최소화하기 위해서는 컨테이너선의 속도(설계속도 대비)를 67% 감속할 경우 배출되는 온실가스량은 62% 감축이 가능한 것으로 연구되었다.

Gilbert(2014)의 연구는 IMO 2020 규제로 황산화물의 감축이 필요한 상황에서 이산화탄소에 대한 규제가 동반되어야 하며, 매우 급진적인 변화가 필요하다고 강조하였다.¹⁹⁾ 근시안적인 규제는 선사들에게 다양한 옵션을 줄 수 있어 영향도가 감소할 수 있다고 판단했다. 급진적인 변화를 위해서는 풍력, 연료전지, 바이오가스와 같은 새로운 기술과 연료가 도입되어야 한다고 설명했다.

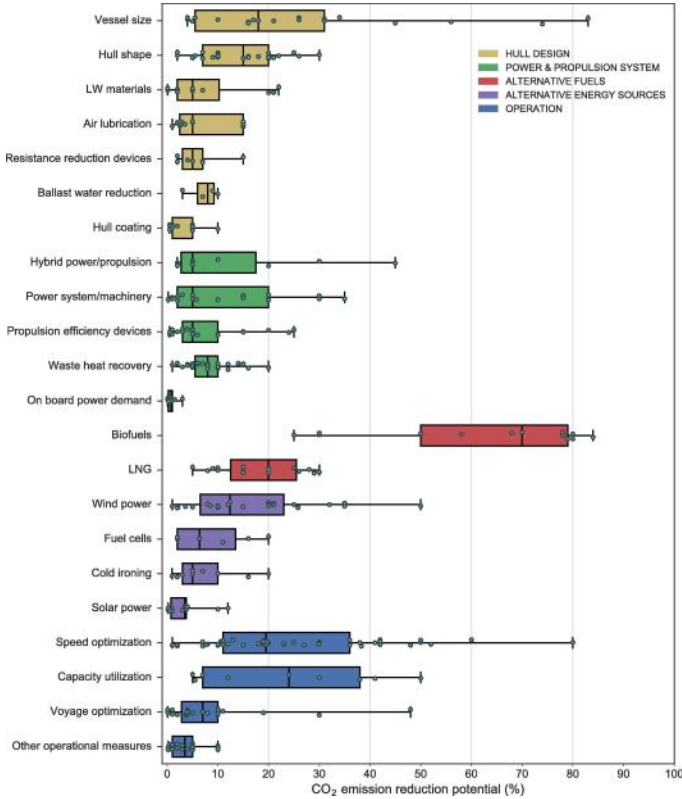
Bouman *et al.*(2017)의 연구는 약 150개의 관련 문헌을 검토하여 해운분야에서 온실가스 배출을 최소화할 수 있는 기술을 소개하고 이를 계량화하였다.²⁰⁾ 온실가스 배출은 최소화할 수 있는 여섯 개 대분야(선체 설계, 선박 대형화, 전력 및 추진, 속도, 연료, 날씨 및 스케줄)와 22개 소분야로 구분하여 절감도를 추정하였다. 결론적으로 수소, 암모니아와 같은 친환경 연료를 제외하고는 온실가스 배출을 큰 폭으로 줄이는 것은 불가능하며 다양한 분야를 통한 감축이 필요하다고 기술하였다.

18) Lindstad, Asbjørnslett, and Strømman(2011), pp. 3456-3464.

19) Gilbert(2014), pp. 376-378.

20) Bouman *et al.*(2017), pp. 408-421.

〈그림 2-10〉 22개 분야의 CO2 배출 감소 잠재도



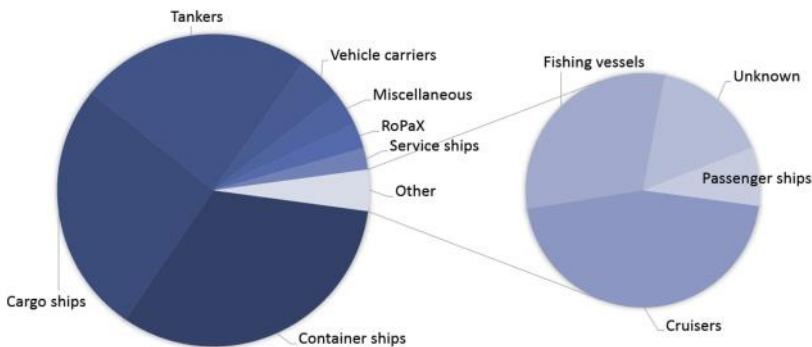
자료: Bouman *et al.*(2017), p. 416

Johansson, Jalkanen, and Kukkonen(2017)의 연구는 2015년 기준 9만 척 이상, 약 80억 개의 AIS 자료를 분석하여 대륙별, 크기별 오염물질(질소산화물/미세먼지/온실가스) 배출량을 추정하였다.²¹⁾ 이를 위해 AIS를 통해 다양한 오염물질 배출량을 추정할 수 있는 STEAM(Ship Traffic Emission Assessment Model)을 개발하였다. 연구 결과 벌크화물과 유조

21) Johansson, Jalkanen, and Kukkonen(2017), pp. 403-415, Johansson 연구에서는 별도의 모델을 통해 약 30만 척에 대한 탄소 배출량을 추정함

선은 톤당 1km를 운송할 때 탄소 배출량이 각각 4.7g, 6.1g이며, 컨테이너는 9.7g을 배출하는 것으로 나타났다.

〈그림 2-11〉 선종별 이산화탄소 배출량



자료: Johansson, Jalkanen, and Kukkonen(2017), p. 410

Psaraftis and Kontovas(2009)는 로이즈-페어플레이의 선박 자료를 활용해 세계 상선대(벌크, 탱커, 컨테이너, LNG/LPG, Ro-Ro선 등)의 온실가스 배출량 추정했다.²²⁾ 연간 운항 일수를 320일로 가정하여 추정한 결과, 2007년 기준 8억 4천만 톤의 온실가스를 배출한 것으로 추정되었다.

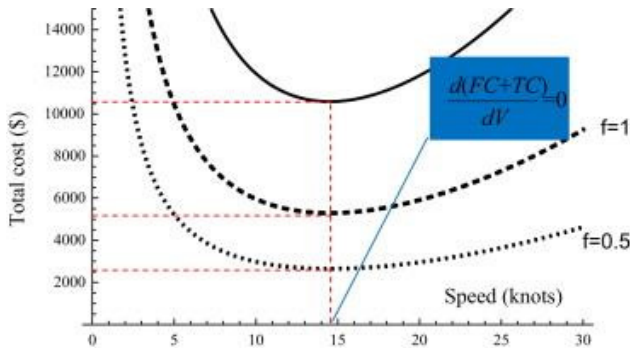
Chang and Chang(2013)은 벌크선박(케이프/파나막스/수프라/핸디)에 대해 속도 감속 시 탄소 배출량의 변화를 살펴보았다.²³⁾ 기준 평균 선속은 14.4노트였으며 10/20/30% 감속 시 탄소 배출량의 변화를 측정한 결과 19/36/56% 감소하는 것으로 나타났다. 다만 속도 감소에 따른 추가 선대 투입이 필요하므로 총비용 관점에서 선속을 조정해야 한다고 밝혔다. 동 연구에서는 선박 속도에 따른 비용함수를 도출하여 최적운항속도를 계

22) Psaraftis and Kontovas(2009), pp. 1-25.

23) Chang and Chang(2013), pp. 710-715.

산한 결과 14.53노트로 나타났다. Cariou(2011)의 연구에서도 Chang and Chang(2013)의 연구와 유사한 결과가 나왔는데 저속 운항으로 온실 가스 배출량이 11% 감소한 것으로 연구되었다.²⁴⁾

〈그림 2-12〉 최적운항속도 도출



자료: Chang and Chang(2013), p. 715

최상진 외(2010)의 연구에서는 기후변화 정부 간 패널(IPCC)에서 제시된 온실가스 상정 가이드라인에 따라서 국적선의 탄소 배출량을 추정하였다.²⁵⁾ 동 연구에서는 국적선의 국내 및 국제 배출량을 탄소 배출량을 구분하여 추정한 결과 2009년 기준 국내 탄소 배출량은 539만 8천 톤, 국외는 763만 톤으로 추정되었다.

24) Cariou(2011), pp. 260-264.

25) 최상진 외(2010), pp. 33-42.

〈표 2-4〉 해운부문 탄소배출 규제에 관한 추가 선행연구

선행연구명	연구 목적/방법론	주요 연구 내용
- IMO(2014) - Third IMO GHG Study	(목적) 국제 해운의 온실가스 감축을 위한 탄소 배출량 추정 (방법론) 배출량 시나리오	2007년부터 2012년까지 국제 해운 온실가스 배출량 추정 - 선박 유형별 연료사용량 구분 2012년~2050년의 온실가스 배출 시나리오 개발
- IMO(2020) - Fourth IMO GHG Study	(목적) 국제 해운의 온실가스 감축을 위한 탄소 배출량 추정 (방법론) 배출량 시나리오	2012년부터 2018년 동안의 국제 해운 온실가스 배출량 추정 - 선박 유형별 연료사용량 구분 2050년까지 온실가스 배출 시나리오 개발
- Balcombe <i>et al.</i>(2019) - How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies	(목적) 선박운항원가 추정 (방법론) 해운부문에 대한 기술 선행연구를 통해 탈탄소화 방향성 예측	- 대체연료(LNG, 바이오, 핵 등) 이용에 따른 장단점 - 효율성 향상(바람, 선속 조절, 폐열회수 등)을 위한 방안 제시 - 탈탄소화를 위한 정책 대안(환경세, 탄소배출거래, 보조금 등)
- KunWang, Xiaowen Fu and Meifeng Luo(2015) - Modeling the impacts of alternative emission trading schemes on international shipping	(목적) IMO 규제에 대한 대응 방안 마련 (방법론) 문헌 연구	온실가스 배출 규제에 대응하기 위해 i) 기술 및 운영 방안, ii) 시장 방안(ETS 등), iii) 정책 방안으로 구분하여 대안 제시
- Michael Traut <i>et al.</i>(2018) - CO2 abatement goals for international shipping	(목적) 선박운항자료를 활용한 컨테이너 선박 크기별 연료소모량 추정 (방법론) 문헌 연구	해운산업에서 연평균 8.0%의 해운집약도를 감축해야만 IMO 규제 달성 가능
- Cariou(2011) - Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping?	(목적) 선박 이산화탄소 배출량 저감을 위한 선속의 효과 검토 (방법론) IMO 제안식 활용/배출량 시나리오	- 저속 운항에 따른 컨테이너 선박의 이산화탄소 배출량 저감 효과 입증 - 선속 10% 감속 시, 이산화탄소 배출량이 10~15% 감소함 증명

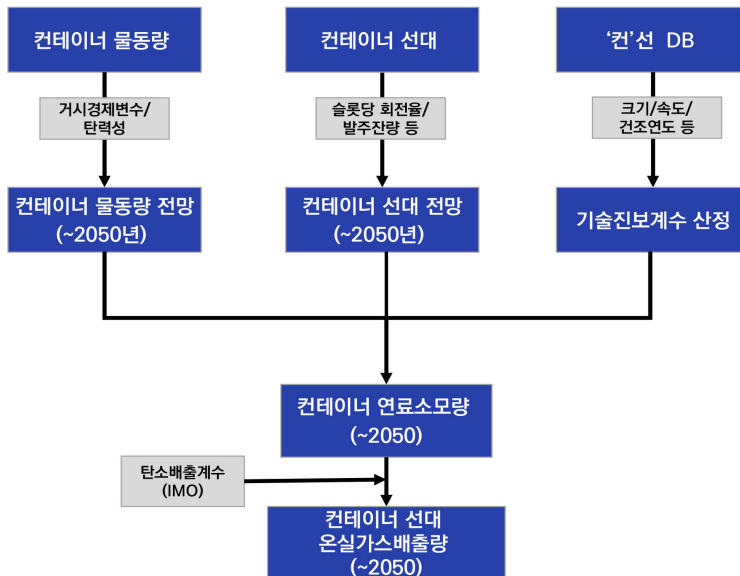
선행연구명	연구 목적/방법론	주요 연구 내용
• Psaraftis and Kontovas(2009) • CO2 emission statistics for the world commercial fleet	• (목적) 전 세계 상선의 온실가스 배출량 분석 • (방법론) 로이즈리스트의 선박 데이터 활용	• 데이터에 근거한 조건(선박의 선종별, 크기별 등)에 따른 온실가스 배출량 추정 • 선박 운항 거리, 연료소모량과 탄소배출계수를 활용해 전 세계 선박의 이산화탄소 배출량 추정
• ICCT(International Council on Clean Transportation)(2020) • Potential CO2 reductions under the Energy Efficiency Existing Ship Index	• (목적) IMO의 온실가스 배출량 감축 목표 달성을 위한 전략 검토 • (방법론) IMO 제안식 활용	• EEXI 기준 IMO의 2030년 온실가스 배출량 목표치 달성 가능 여부 검토
• Heiu-Jou Shaw, Fu-Ming Tzu(2019) • The Strategy of Energy Saving for Smart Shipping	• (목적) IMO의 온실가스 배출량 감축 목표 달성을 위한 전략 검토 • (방법론) IoT 장비를 활용한 선박 데이터 수집 및 활용	• 특정 컨테이너 선박 1척의 AIS, 엔진 등의 데이터를 6개월 동안 수집 • AIS 데이터는 위성, 선박 엔진 등의 데이터는 IoT 기술을 활용해 실시간에 근접한 수준으로 수집 • 수집한 데이터에 근거해 EEOI 산출

03

컨테이너 선대 현황 및 전망

2050년까지 컨테이너 시장에서 발생하는 온실가스를 추정하기 위해 수요(화물량)와 공급(선대)을 전망하고 이를 기반으로 온실가스 배출량을 추정한다.

〈그림 3-1〉 컨테이너 선대 온실가스 배출량 추정 프로세스



자료: 저자 작성

제1절 컨테이너 물동량 전망(~2050년)

2050년까지 컨테이너 시장의 수요와 공급을 전망하기 위해서 관련 수요를 예측한다. 컨테이너 수요 예측을 위해서는 Box-Jenkins와 같은 시계열 모형을 이용하거나 Meersman, Moglia, Van de Voorde(2002), 고병욱(2018) 등의 연구와 같이 관련 변수를 찾아 예측하는 방법이 있다.²⁶⁾²⁷⁾ 본 연구에서는 2050년까지 장기 예측을 실시해야 하므로 안정성을 확보하며 시나리오를 통한 다양한 가정이 가능하도록 관련 변수를 활용하여 예측한다.

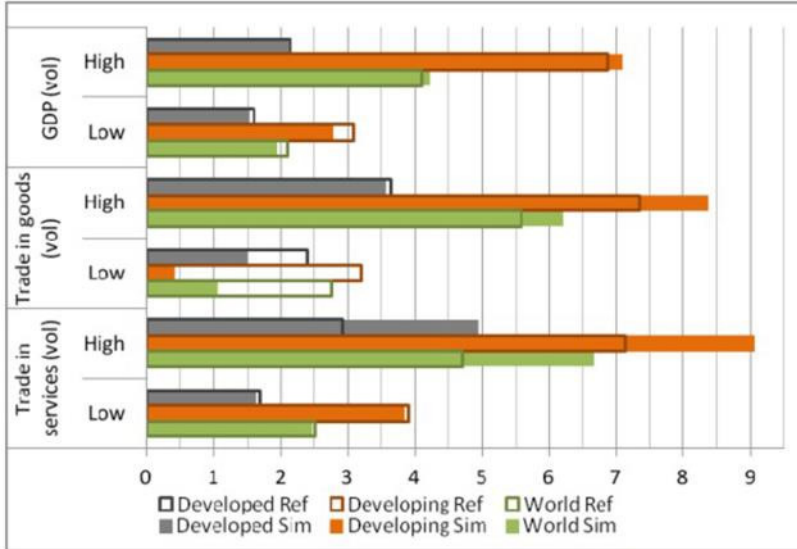
변수를 이용한 컨테이너 물동량을 예측하는 연구는 대부분 인구, GDP와 같은 거시지표의 전망치를 이용한다. Fontagné and Fouré(2013)은 2035년까지 세계 교역구조가 어떻게 변동할지 예상하기 위해 동적 CGE(Computable General Equilibrium) 모형을 이용하였다.²⁸⁾ 이를 위해 첫째, 생산요소 효율성, 교육성취도를 기반으로 국가 수준을 예상하였으며, 둘째, GDP, 인구, 저축률 등 거시경제요인을 CGE 모델에 적용시켰다. 셋째, 무역정책 시나리오와 무역 패턴을 전망하여 2035년 교역구조를 전망하였다. 동 모델에서 주요 국가의 GDP 성장률을 두 가지 시나리오를 통해 구분하였다.

26) Meersman, Moglia and Van de Voorde(2002), pp. 29-39.

27) 고병욱(2018), pp. 1-216.

28) Fontagné and Fouré(2013), pp. 1-60.

〈그림 3-2〉 시나리오에 따른 교역량



자료: Fontagné and Fouré(2013), p. 45

De Langen(2003)는 해상 컨테이너 수요를 예측하기 위해 일곱 개의 변수를 활용해 2023년까지 컨테이너 물동량을 예측하였다.²⁹⁾ 이 중 네 개 변수는 국제 운송량에 관련 있는 GDP, 수출 여건, 무역 방향, 무역 가치이며, 세 개 변수는 컨테이너화에 영향이 있는 총 물동량 중 컨테이너 비중, 컨테이너 운임, 복합운송 비중이 사용되었다.

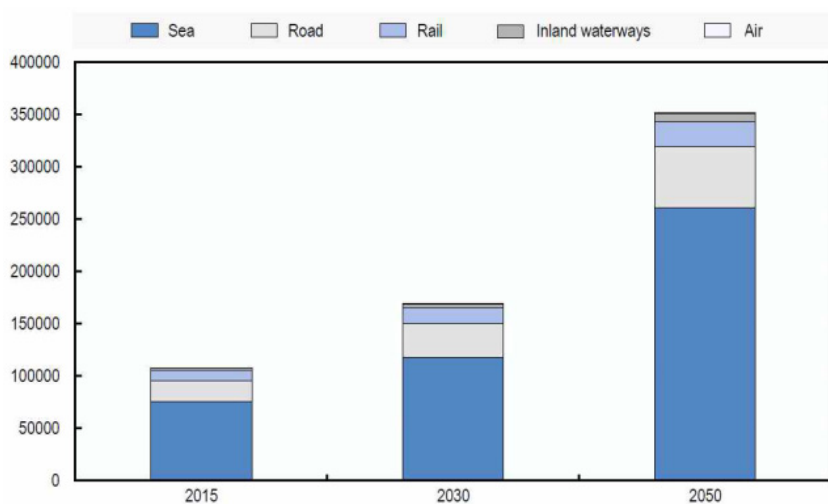
컨테이너 장기 물동량을 예측한 연구 중 대표적인 연구로는 OECD 국제 교통포럼(ITF: International Transport Forum)에서 발표하는 「Transport Outlook」이 있다. 동 연구는 해상운송을 비롯한 항공, 육상 등 모든 교통 수요에 대한 예측을 실시하고 있다. 2019년에 발표한 동 연구에서는 2050년 총 화물 수요가 연평균 3.6%씩 증가하여 2015년 대비

29) De Langen(2003), pp. 29-39.

3배 증가할 것으로 예상했다. 또한 총 화물 수요의 75%를 담당하는 해상 화물량의 비중은 2050년에도 유지될 것으로 전망하였다.

〈그림 3-3〉 교통수단별 화물 수요 전망

단위: 십억 톤km



자료: Tran.infor(검색일: 2021. 6. 25), 이익진(2019), p. 2. 재인용

DNV에서 2050년까지 예측한 자료에 따르면 컨테이너 물동량은 2015년 16억 6천만 톤에서 2050년 40억 4천만 톤으로 전망했다. 과거 컨테이너화(containerization)가 진행되어 물동량 증가세가 높았으나 앞으로는 둔화할 것으로 예상했다. 16.6억 톤을 TEU당 평균 톤수(9.5톤/TEU)를 이용해 TEU로 산정할 경우 1억 6,781만 TEU로 집계되었다. 최근 5년간 평균 톤수가 일정하게 유지되어 향후 TEU당 평균 톤수도 9.5톤으로 적용하여 계산하였다. DNV의 2019년 보고서에서는 컨테이너 물동량 증가율을 2030년까지 연평균 3.6%, 2030~2050년은 연평균 1.5% 증가해 2050년에는 약 4억 TEU를 기록할 것으로 전망했다.

〈표 3-1〉 DNV의 2050년까지 컨테이너 물동량 예측

구분	2015	2030	2040	2050	증가율		
					'15-'30	'30-'40	'40-'50
백만 톤	1,660	2,660	3,390	4,040	3.2	2.5	1.8
백만 톤 마일	8,290	13,290	16,910	20,100	3.2	2.4	1.7
TEU기준 (만 TEU)	16,781	27,296	34,941	41,765	3.2	2.5	1.8

주: TEU당 평균 톤수 적용

자료: DNV,(2019), p. 38 저자 수정

본 연구에서는 Teurelinx, Verbeke, and Declerq(1998), P.W. de Langen(2003) 외에도 수많은 선행연구에서 사용된 GDP를 활용해 컨테이너 물동량을 예측했다.³⁰⁾³¹⁾ 다만 시간의 흐름에 따라 컨테이너 물동량과 GDP 간의 탄력성이 계속 하락함에 따라 이를 반영하기 위해 탄력성을 조정하였다.

〈표 3-2〉 기간별 세계 교역과 GDP 간의 탄력성

1950- 1959	1960- 1969	1970- 1979	1980- 1989	1990- 1999	1900- 2009	1950- 2009
1.62	1.54	1.31	1.19	2.82	1.42	1.64

자료: Fontagné and Fouré(2013), p. 13

2000년 이후 세계 총생산(GDP)과 컨테이너 물동량 간의 탄력성을 계산해보면 시간이 지날수록 탄력성은 지속적으로 하락하는 것으로 나타났다. 이는 중국을 중심으로 하는 화물 창출 효과가 큰 국가들의 성장세가 과거에 비해 낮아졌으며, Fontagné and Fouré(2013)의 연구에서 제시된 컨테이너화의 진행이 성숙기에 접어들었기 때문으로 추정된다.

30) Teurelinx, Verbeke, and Declerq(1998), pp. 1-285.

31) P.W. de Langen(2003), pp. 29-39.

〈표 3-3〉 세계 총생산(GDP)과 컨테이너 물동량과의 탄력성

'00-'05	'05-'10	'10-'15	'15-'20
2.45	1.47	1.30	1.26

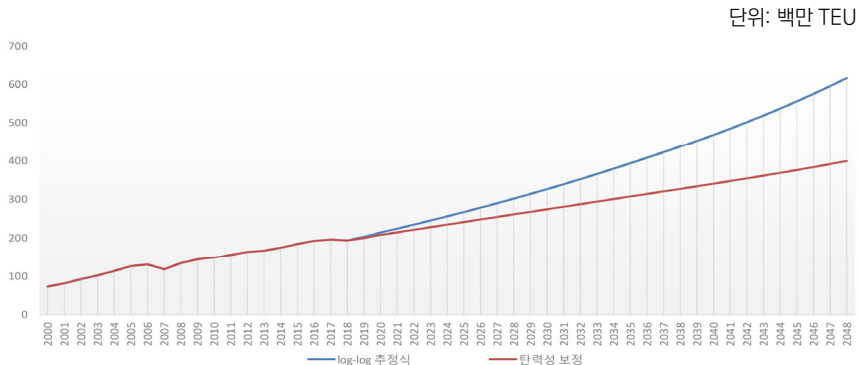
주: 2020년 팬데믹 효과를 제외하고 탄력성을 계산할 경우 1.22로 계산됨
 자료: IHS(세계 GDP)(검색일: 2021.7.8), 클락슨(검색일: 2021.7.8)(컨테이너 물동량), 저자 계산

세계 총생산(GDP)과 컨테이너 물동량 간의 탄력성은 2005~2010년에서 2015~2020년으로 진행되면서 연평균 탄력성은 1.5%씩 감소하는 것으로 나타나 이를 2050년까지 적용한다. 양변에 로그(log)를 적용해 세계 총생산을 이용해 컨테이너 물동량을 추정한 식은 다음과 같다. 컨테이너 물동량은 클락슨에서 제공하는 세계 총 해상 컨테이너 물동량을 사용했으며 세계 총생산(GDP)자료와 2050년까지 전망치는 IHS에서 제공하는 자료를 이용했다.

$$\log(container_volume) = -9.6364 + 1.2649 \cdot \log(world_GDP) \text{ [수식 3-1]}$$

동 방식으로 컨테이너 물동량을 추정하면 2050년 6억 2천만 TEU이나, 연평균 탄력성을 이용해 보정하면 약 4억 TEU로 예상된다.

〈그림 3-4〉 원(log-log) 추정과 탄력성을 이용한 예측



자료: 저자 작성

DNV에서 발표한 예측치와 비교할 때 2040년까지는 DNV의 증가율이 높으나, 2040년 이후에는 본 연구에서 예측한 증가세가 더 높은 것으로 나타났다.

〈표 3-4〉 동 연구와 DNV 컨테이너 물동량 예측 비교

단위: 백만 TEU

구분	2020	2030	2040	2050	증가율		
					'15-'30	'30-'40	'40-'50
동 연구	194.4	261.8	327.7	399.9	3.0	2.3	2.0
DNV		273.0	349.4	417.7	3.2	2.5	1.8

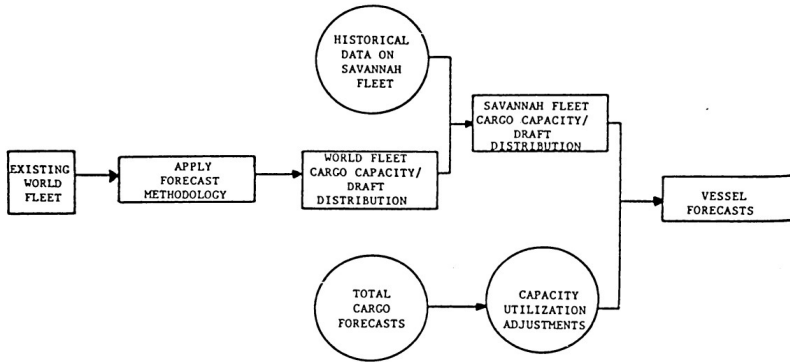
자료: DNV(2019), p. 38 저자 수정

제2절 컨테이너 운영 선대 현황 및 전망(~2050년) ———

컨테이너 선대 전망에 대한 연구는 그 수요에 비해서는 활발하게 이루어지지 않았다. Crew(1986)의 연구에서는 하향식(Top-down) 방식으로 남대서양 컨테이너 선대에 대해 예측하였다.³²⁾

32) Crew(1986), pp. 43-51.

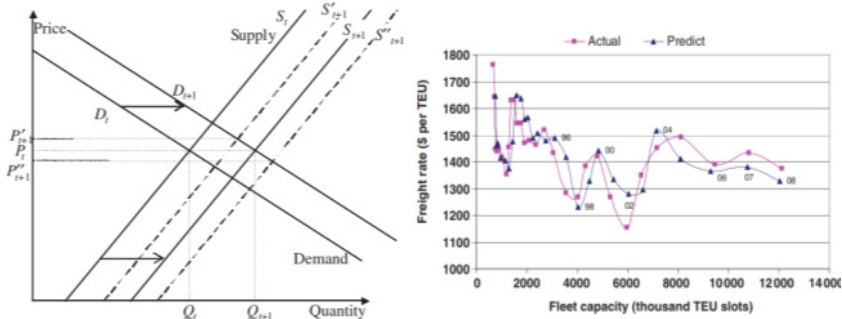
〈그림 3-5〉 컨테이너 선대 전망 프로세스



자료: Crew(1986), p. 48

Luo, Fan, and Liu(2009)의 연구에서는 컨테이너 운임이 수급에 의해 결정되는 것으로 분석했으며 이를 기반으로 2013년까지의 운임을 예측하였다.³³⁾ 이를 위해 1980년부터 2008년까지 세계 컨테이너 해운시장의 자료를 이용해 3단계 최소제곱법을 적용하여 추정하였다.

〈그림 3-6〉 컨테이너 시장의 수요와 공급에 따른 운임 변화

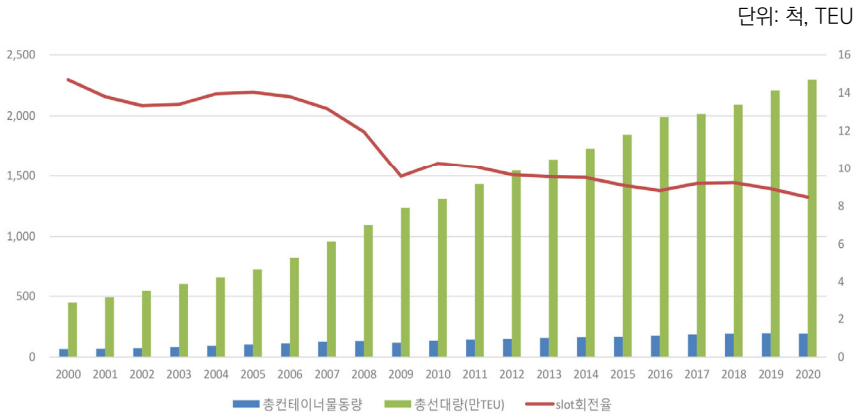


자료: Luo, Fan, and Liu(2009), p. 513, p. 520

33) Luo, Fan, and Liu(2009), pp. 507-523.

컨테이너 수요를 고려한 선대를 전망하기 위해서는 슬롯(slot)당 처리량을 이용한다. 슬롯당 회전율은 컨테이너 선박 한 개의 슬롯이 연간 운반하는 컨테이너 물동량으로 2000년에 한 개의 슬롯은 14.7TEU를 운반하였지만, 2020년에는 8.5TEU로 운송량이 크게 하락하였다. 2021년 슬롯당 처리량은 전년 대비 소폭 증가하여 8.6~8.7TEU를 기록할 것으로 잠정 추산되지만 장기적으로 하락할 것으로 예상된다.

〈그림 3-7〉 컨테이너 물동량과 선대량, 슬롯 회전율



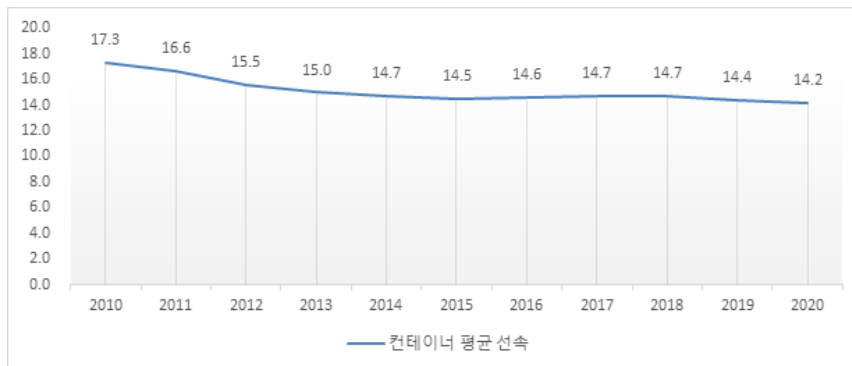
자료: 저자 작성

컨테이너 슬롯당 처리량의 하락은 몇 가지 원인으로 발생하는데, 첫째 원인은 컨테이너선에 대한 공급 과잉이다. 2000년 이후 컨테이너 물동량 연평균 증가율은 5.6%였으나 선대는 8.5%씩 증가하여 수요에 비해 공급량이 크게 증가하였다. 특히 원양항로의 경우 2000년대 7,000~8,000TEU 급이 아시아-유럽항로에 투입되었으나 최근에는 24,000TEU급이 투입되어 공급이 크게 증가하였다. 둘째는 선속의 하락이다. 첫째 원인인 공급 과잉으로 인해 선사들은 과거에 비해 동일한 서비스에서 추가 선대를 투입하여 공급을 조절하였다. 예로 과거 아시아-유럽항로의 서비스에서 한 개

루프(loop)에 소요되는 기간은 9~10주였으나, 최근에는 12주 내외로 2주 이상 길어졌다. 주간 서비스이기 때문에 늘어나는 주 단위만큼 투입되는 선박의 수는 증가한다. 동일한 항로에서 투입되는 선박이 늘어나면서 평균 선속은 과거에 비해서 감소했는데, 클락슨 자료에 따르면 2010년 17.3노트에서 2020년 14.2노트로 20% 가까이 감소하였다.

〈그림 3-8〉 컨테이너 평균 선속 추이

단위: 노트



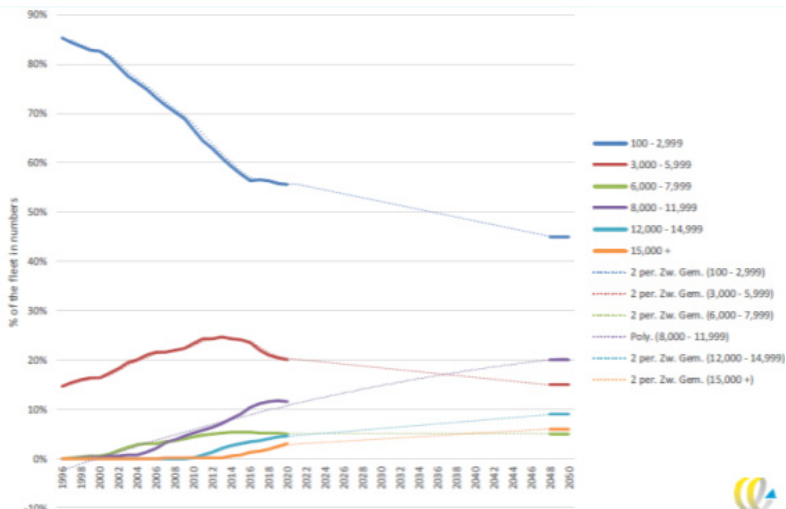
자료: 클락슨(검색일 2021. 7. 15)

Ge *et al.*(2019)³⁴⁾의 연구에서와 같이 컨테이너선의 대형화가 진행되었지만, 항만의 수용능력(capacity)과 환경 규제에 영향을 받으며 최근의 대형화 진행은 기술적인 제약보다는 운하(canal)의 확장이나 선사의 전략으로 인한 영향이 더 큰 것으로 나타났다.³⁵⁾ 2020년에 발표된 IMO 온실가스 제4차 연구에서는 향후 컨테이너 선대 추정에서 대형선의 숫자는 증가하지만, 현재 운행하는 선박을 크게 상회하는 선박의 출현에 대해서는 논쟁의 여지가 있다고 기술하였다. 다만 선박 크기별로 볼 때 8,000TEU급 이상의 비중(TEU 기준)은 증가할 것으로 예상하였다.

34) Ge *et al.*(2019), pp. 587-614.

35) PierNext(검색일: 2021. 9. 13)

〈그림 3-9〉 컨테이너 크기별 비중 전망(2050년)



IMO는 2050년 5,000TEU급 이하의 선박 비중은 선박 대형화로 인해 2018년 대비 축소될 것으로 예상했으며, 8,000TEU급 이상 선대 비중은 증가할 것으로 예상하였다.

〈표 3-5〉 2050년 선대 비중 전망

단위: %

선박 크기(TEU)	2018	2050
0~999	17	13
1,000~1,999	25	20
2,000~2,999	13	10
3,000~4,999	16	11
5,000~7,999	11	11
8,000~11,999	12	20
12,000~14,499	4	9
14,500~19,999	2	4
20,000+	1	2

자료: 클락슨(검색일: 2021. 7. 15) 저자 추정

IMO의 환경 규제와 선박공급의 과잉으로 현재 1슬롯당 처리량 수준인 8.5TEU를 넘기기는 어려울 것으로 판단된다. 오히려 2022년 말에 EEXI 규제가 실시될 경우 연료출력제한 등을 통해 저속 운항을 할 가능성이 더 높다. 동 연구에서는 예측된 수요를 토대로 슬롯당 처리량을 이용해 컨테이너 선대를 전망한다. 다만 슬롯당 처리량에 대한 시나리오는 현재 수준인 8.5TEU와 8.0TEU으로 구분하여 실시한다.

컨테이너 크기에 따른 분류는 IMO에서 제시된 기준을 적용하였다. 다만 계산의 단순화를 위해 IMO에서 아홉 개 크기로 분류한 데 반해 본 연구에서는 네 개로 분류했다. 현재 슬롯당 처리실적 기준을 8.5TEU 기준으로 할 경우 2050년 총 선대 규모는 8,112척으로 예상된다. 2020년에 비해 선대 척수는 50.8% 증가한 데 반해, 선대 규모는 4,705만 TEU로 104.8% 증가한다. 선박 대형화가 진행됨에 따라 척수에 비해 선복량 증가세가 더 클 것으로 예상된다.

〈표 3-6〉 컨테이너선 선대 전망(8.5TEU/slot 기준)

단위: 척수, 천 TEU

구분		3,000TEU 이하	3,000~7,999TEU	8,000~15,000TEU	15,000TEU 이상	합계
척수	2020	2,998	1,346	873	161	5,378
	2030	3,153	1,479	1,215	233	6,512
	2040	3,316	1,624	1,690	337	7,361
	2050	3,488	1,785	2,352	487	8,112
TEU	2020	4,127	6,600	9,196	3,053	22,975
	2030	4,642	7,755	13,686	4,721	30,804
	2040	4,793	8,364	18,699	6,702	38,558
	2050	4,750	8,657	24,513	9,129	47,047

주: 2020년은 실적자료임

자료: 클락슨(검색일: 2021. 7. 15) 저자 추정

현재 슬롯당 처리실적 기준을 8.0TEU 기준으로 할 경우 2050년 총 선대 규모는 8,619척으로 예상된다. 2020년에 비해 선대 척수는 60.3% 증가한 데 반해 선대 규모는 4,999만 TEU로 117.6% 증가한다.

〈표 3-7〉 컨테이너선 선대 전망(8.0TEU/slot 기준)

단위: 척수, 천 TEU

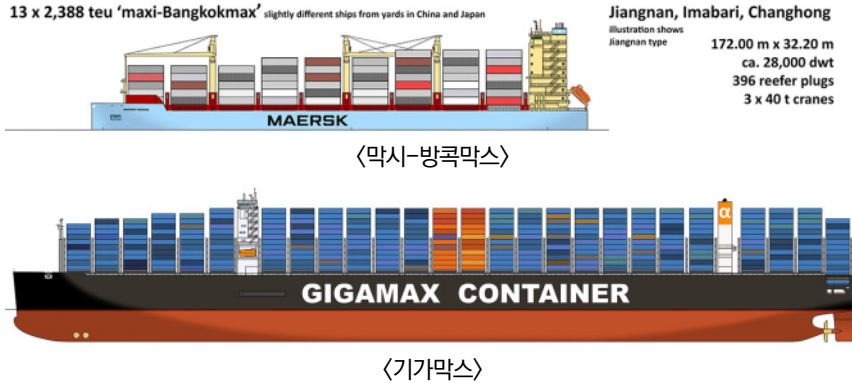
구분		3,000TEU 이하	3,000~7,999TEU	8,000~15,000TEU	15,000TEU 이상	합계
척수	2020	2,998	1,346	873	161	5,378
	2030	3,218	1,509	1,240	238	6,919
	2040	3,453	1,691	1,760	350	7,821
	2050	3,706	1,896	2,499	517	8,619
TEU	2020	4,127	6,600	9,196	3,053	22,975
	2030	4,932	8,239	14,542	5,016	32,729
	2040	5,093	8,887	19,867	7,120	40,968
	2050	5,046	9,198	26,045	9,699	49,988

주: 2020년은 실적자료임

자료: 클락슨(검색일: 2021. 7. 15) 저자 추정

컨테이너선의 대형화가 어떻게 진행될지 정확한 추정은 알 수 없으나 선사들의 움직임으로 흐름은 읽을 수 있다. 1,800~1,900TEU급 방콕막스(Bangkokmax)는 최근 선사들이 2,400TEU급 내외로 선박 크기를 증가시킨 막시-방콕막스를 새로운 표준으로 삼고 있다. 또한 현재 최대 선형은 24,000TEU급이나 최근 28,000TEU급 선박을 개발하고 있다. 기존 24,000TEU급은 메가막스(megamax)로 총길이 400미터였으나, 중간에 2열을 추가한 기가막스(gigamax)는 총길이 425m로 개발 중이다. 친환경 규제로 인해 선사들의 선박 대형화는 가속화될 것으로 예상되는데, 3,000TEU급 미만의 선박에 대해서는 기존 선박 대비 30%, 2만 TEU급 이상의 초대형선박은 10% 이상의 선박 증대를 추진하고 있다.

〈그림 3-10〉 새로운 표준선형 개발



자료: Alphaliner(2021b), p.1

선형별로 살펴보아도 2030년 네 개의 그룹에서 평균 선형을 최대치를 기록하지만, 이후 소폭 하락할 것으로 예상된다. 이는 선박 크기의 축소가 아닌 그룹화된 선형을 벗어난 그룹에서 발주되기 때문으로 풀이된다. 예를 들어 15,000TEU급 이상의 컨테이너선의 평균 크기의 하락은 8,000-15,000TEU급 선박이 대형화되면서 15,000TEU급 선박의 발주량이 늘어나면서 자연스럽게 낮아진 것으로 추정된다. 실제로 평균 선박 크기는 2020년 4,349TEU에서 2050년 5,800TEU로 지속적인 증가가 예상된다.

〈표 3-8〉 선형별 평균 컨테이너선 크기

단위: 천 TEU

구분	3,000TEU 이하	3,000- 7,999TEU	8,000- 15,000TEU	15,000TEU 이상
2020	1,369	4,909	10,463	18,671
2030	1,533	5,461	11,731	21,115
2040	1,475	5,254	11,287	20,316
2050	1,362	4,851	10,420	18,756

주: 2020년은 실적자료임

자료: 2020년은 클락스 자료(검색일: 2021. 7. 15), 2030/2040/2050은 저자 추정

제3절 소결

이번 장에서는 2050년까지 컨테이너 시장의 수요와 공급을 전망하였다. 컨테이너 수요는 선행연구에서 사용된 거시경제변수(GDP)를 이용해 추정하였으며 탄력성을 이용해 보정하였다.

〈표 3-9〉 컨테이너 수요 예측 프로세스(~2050)

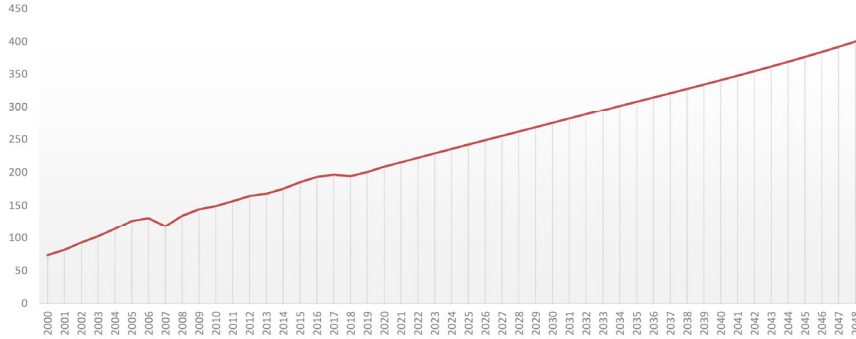
연구 흐름	세부 내용	비고
↓	↓	↓
변수 선정	• 선행연구(GDP 선정)	• IHS의 GDP 예측치 사용
↓	↓	↓
컨테이너 물동량 예측	• 회귀분석&탄력성을 이용해 보정	• DNV와 비교

자료: 저자 작성

예측 결과 2030년 2억 6천만 TEU, 2040년 3억 3천만 TEU, 2050년 약 4억 TEU를 기록할 것으로 전망되었다. 동 연구 결과는 2030년 이후 증가세가 DNV 예측보다 둔화할 것으로 나타나 2050년 기준 DNV에서 발표한 약 4억 2천만 TEU에 비해 낮을 것으로 연구되었다.

〈그림 3-11〉 컨테이너 물동량 예측 결과

단위: 백만 TEU



자료: 저자 작성

컨테이너 선대에 대한 예측은 관련된 선행연구가 부족해 새로운 방법론을 도입했다. 본 연구에서는 2050년까지 예측된 해상 컨테이너 물동량을 기반으로 공급 선대를 추정하는 방식으로 적용했다. 2020년 기준 컨테이너선 슬롯당 회전율은 약 8.5TEU로 계산되어 이를 가정하였으며 회전을 8.0TEU를 추가했다. 슬롯당 회전율의 하락은 공급 과잉, 선박 대형화, 환경 규제 등의 이유로 2010년 이후로 지속적으로 진행되고 있어, 이러한 트렌드를 반영하기 위해 추가적인 시나리오를 설정했다. 다만 슬롯당 처리량을 8.0TEU로 설정한 명확한 근거는 없어 이를 뒷받침할 향후 연구가 필요하다.

〈표 3-10〉 컨테이너 선대 예측 프로세스(~2050)

연구 흐름	세부 내용	가정
↓	↓	↓
컨테이너 선대 전망	슬롯(slot)당 회전율을 이용	- 시나리오로 선대 추정 (8.0TEU/slot), (8.5TEU/slot) 2050년 선대 비중은 IMO(2020)의 전망치 사용

자료: 저자 작성

컨테이너 선대 예측 결과 2020년 5,378척의 컨테이너 선박은 2030년 6,512~6,919척, 2040년 7,361~7,821척, 2050년 8,112~8,619척으로 전망된다. 총 선복량은 2020 2,298만 TEU에서 2030년 3,080~3,273만 TEU에서 2050년 4,705만~ 4,999만 TEU로 예상된다.

〈표 3-11〉 컨테이너선 선대 전망

단위: 척수, 천 TEU

구분		슬롯당 처리당 8.5TEU 기준	슬롯당 처리당 8.0TEU 기준
척수	2020	5,378	
	2030	6,512	6,919
	2040	7,361	7,821
	2050	8,112	8,619
TEU	2020	22,975	
	2030	30,804	32,729
	2040	38,558	40,968
	2050	47,047	49,988

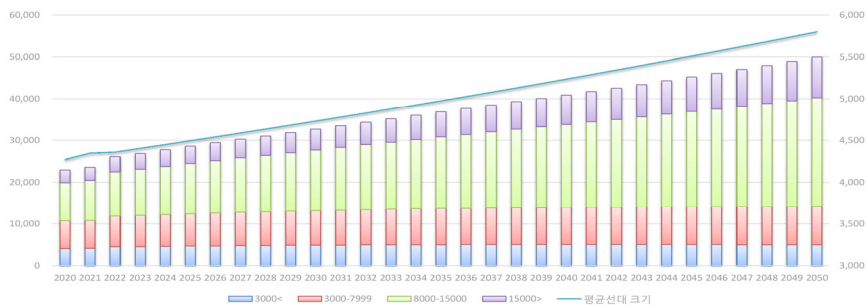
주: 2020년은 실적자료임

자료: 클락슨(검색일 2021. 7. 15), 저자 추정

컨테이너 선대의 평균 선박 크기도 지속적으로 증가해 2020년 4,349TEU에서 2050년 5,800TEU까지 증가할 것으로 예상된다.

〈그림 3-12〉 선형별 규모 및 평균 선대 크기

단위: 천 TEU, TEU



자료: 클락슨(검색일 2021. 7. 15), 저자 추정

04

기술진보를 고려한 연료소모량 추정

제1절 컨테이너 선대의 기술진보계수 추정

1. 기술진보 적용 사례

선박의 연료 효율성 개선은 운항 효율성, 선체 저항, 기관부 효율, 대체 연료 등을 통해 향상시킬 수 있다. 운항 효율성 개선은 기상, 조류 여건에 따른 연료소모량의 최적화를 통해 가능하며, 대체연료는 폐열회수를 비롯하여 육상전원공급설비 등을 활용할 수 있다.

〈그림 4-1〉 선박 효율성 개선 방안



자료: 류수영(2021), p. 24

IMO에서 2014년, 2020년에 발행한 제3차, 제4차 온실가스 연구에서도 기술진보에 대해 고려했다. 2014년에 발표된 제3차 IMO 온실가스 연구에서는 Phase 0부터 Phase 3까지 EEDI 적용에 따른 효과를 일괄적으로 적용했다. 2013년부터 신조된 선박에 EEDI가 적용되기 때문에 이에 관련된 정보가 부족한 상황에서 연료소모량 감소에 대해 가정을 통해 적용하였다.

〈표 4-1〉 EEDI 적용에 따른 연료소모량 감소율

Reduction relative to original baseline	Reduction relative to baseline, taking SFC into account
0%	-7.5%
10%	2.5%
20%	12.5%
30%	22.5%

주: SFC는 Specific Fuel Consumption으로 연료소모량임
 자료: IMO(2014), p. 280

2020년에 발표된 제4차 IMO 온실가스 연구에서는 기술진보에 따른 시나리오를 두 가지 방안으로 적용하였다. 시나리오1은 2019년 이후에 신규 건조된 모든 선박에 새로운 기술이 적용되는 시나리오로, 2030년 기준 총 54%의 선박(45%는 폐선에 따른 교체, 9%는 추가 선대 증가)에 신기술이 적용되는 것으로 가정하였다. 시나리오2는 시나리오1에 비해 신기술 적용을 보수적으로 산정한 것으로, 자세한 내용은 〈표 4-2〉와 같다. 신기술 적용률(penetration rates)을 보면 2050년 기준 시나리오1에서는 모든 선박에 적용된 데 반해 시나리오2에서는 20~40%로 적용률이 보수적으로 산정되었다.

운항 효율성을 제외한 대부분의 선박 연료 효율성 개선 방안은 선박 내·외부 장치에 대한 추가 및 개선을 통해 가능하다. IMO는 총 16개의 그룹으로 분류하였으며, 적용률을 달리하여 시나리오를 구분하였다.

〈표 4-2〉 기술 적용률(Penetration rates)

Group		Penetration rates (% of ships applying a technology)				
		2018	Scenario 1		Scenario 2	
			2030	2050	2030	2050
Group 1 주 엔진 개선	주 엔진 튜닝	75.0%	100%	100%	80.0%	100%
	커먼 레일	2.0%	56.0%		7.0%	32.0%
	전자 엔진 제어	1.0%	55.0%		6.0%	31.0%
Group 2 보조 시스템	주파수 변환기	12.5%	66.5%	100%	17.5%	42.5%
	펌프 및 팬 속도 조절	50.0%	100%		55.0%	80.0%
Group 3 화력 발전체계 개선	화력 발전체계 운영 개선	(75.0%)	(100%)	(100%)	(80.0%)	(100%)
Group 4 폐열회수	폐열회수	12.5%	66.5%	100%	17.5%	42.5%
	보조 엔진의 배기가스 보일러	12.5%	66.5%	100%	17.5%	42.5%
Group 5 프로펠러 개선	프로펠러 키 개선	12.5%	66.5%	100%	17.5%	42.5%
	프로펠러 개선(노즐, 틱 왕렛)				15.0%	40.0%
	프로펠러 보스 캡 핀					
	이중반전 프로펠러				17.5%	42.5%
Group 6 프로펠러 유지보수	프로펠러 성능 모니터링	12.5%	66.5%	100%	17.5%	42.5%
	프로펠러 폴리싱	75.0%	100%		80.0%	100%
Group 7 공기 유회	공기 유회	(0.0%)	(100%)	(100%)	(5.0%)	(30%)
Group 8 선체 코팅	저마찰 선체 코팅	12.5%	66.5%	100%	17.5%	42.5%
Group 9 선체 유지보수	선체 성능 모니터링	12.5%	66.5%	100%	55.0%	80.0%
	선체 브러싱					
	선체 하이드로블라스팅					
	드라이독 전(全) 가동(구형 선박)	50.0%	100%	100%	55.0%	80.0%
Group 10 선체 개구의 유수량 최적화	선체 개구의 유수량 최적화	12.5%	66.5%	100%	17.5%	42.5%

Group		Penetration rates (% of ships applying a technology)				
		2018	Scenario 1		Scenario 2	
			2030	2050	2030	2050
Group 11 초경량 선박	초경량 선박	(0.0%)	(100%)	(100%)	(5.0%)	(30%)
Group 12 보조 출력 요구량 감축	보조 출력 요구량 감축(저전 력 전구 등)	50.0%	100%	100%	55.0%	80%
Group 13 풍력	토잉 카이트(Towing kite)	(0.0%)	(100%)	(100%)	(5.0%)	(30%)
	풍력(고정 돛이나 날개)					
	풍력 엔진(플레트너 로터)					
Group 14 태양 전지 패널	태양 전지 패널	(0.0%)	(100%)	(100%)	(5.0%)	(30%)
Group 15A 탄소를 포함한 대체연료 사용	LNG+ICE	1.0%	55.0%	0.0%	1.5%	20.0%
	LNG+FC, Methanol + ICE, Ethanol + ICE	0.0%	54.0%		0.05%	
Group 15B 탄소를 포함하지 않은 대체연료 사용	대체연료 사용: 수소, 암모니아 등	0.0%	0.1%	100%	0.05%	20.0%
Group 16 감속	속력 10% 감소	(0.0%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)

주: 괄호 안의 숫자는 해당 선박에 대한 보급률을 의미함
 자료: IMO(2020), pp. 274-275

분류된 16개의 그룹의 시나리오에 따라 탄소 배출량 절감 효과를 달리 적용했다. 대부분의 기술이 10% 이하의 감축률을 기록한 데 반해 대체연료 사용은 20.0~64.0%의 감축이 가능한 것으로 예상했다.

〈표 4-3〉 신기술 적용에 따른 CO2 감소율(2050년 기준)

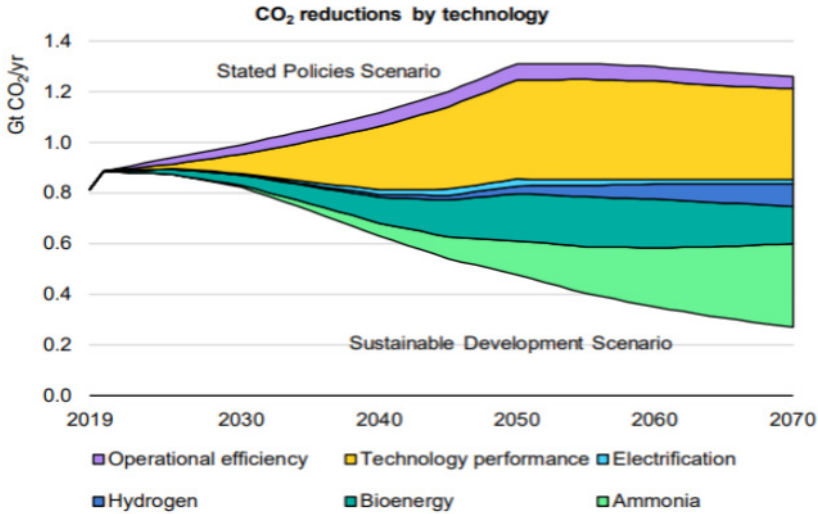
Code	Technology group	Scenario 1	Scenario 2
		CO2 abatement potential(%)	CO2 abatement potential(%)
Group 10	선체 개구의 유수량 최적화	3.00%	0.90%
Group 3	화력 발전소 개선	2.13%	0.64%
Group 6	프로펠러 유지보수	3.95%	1.22%
Group 9	선체 유지보수	3.90%	0.21%
Group 12	보조 전력	0.71%	0.83%
Group 8	선체 코팅	2.55%	0.48%
Group 2	보조 시스템	1.59%	0.14%
Group 1	주 엔진 개선	0.45%	0.50%
Group 13	풍력	1.66%	8.18%
Group 16	감속	7.54%	0.80%
Group 5	프로펠러 개선	1.40%	0.12%
Group 11	초경량 선박	2.40%	0.12%
Group 4	폐열회수	0.39%	0.93%
Group 7	공기 유회	2.26%	0.77%
Group 15A	탄소를 포함한 대체연료 사용	-	2.03%
Group 15B	탄소를 포함하지 않은 대체연료 사용	64.08%	20.00%
Group 14	태양 전지 패널	0.30%	0.09%

자료: IMO(2020), p. 279

IEA(2020)의 연구에서는 현재 상용화되지 않은 기술(친환경 연료 포함)을 이용해 탄소 배출량 60% 이상을 감축할 것으로 전망하였다.³⁶⁾ 상대적으로 탄소배출 감축 기여도를 보면 선대 최적화, 저속 운항 등 운항 효율을 통한 감축 효과보다는 기술 향상과 친환경 연료에 따른 감축 효과가 큰 것으로 나타났다.

36) IEA(2020), p. 25.

〈그림 4-2〉 탄소 배출량 감축 기여



자료: IEA(2020), p. 277

2. 기술진보계수 추정

온실가스 배출량에 관한 연구는 일반적으로 선박 크기, 속도에 따른 연료소모량을 추정하며, 실제 운항자료를 이용해 연료소모량을 추정하는 경우 바람, 파고 등 기상자료를 이용하기도 하였다. Wang *et al.*(2018), Le *et al.*(2020)의 연구에서는 선박의 크기, 속도 등의 변수를 이용해 연료소비량을 추정하였으며,³⁷⁾³⁸⁾ Moreira, Vettor, and Guedes Soares (2021), Uyanik, Karatuğ, and Arslanoğlu(2020)은 머신러닝을 이용해 추정의 정확도를 향상시켰다.³⁹⁾⁴⁰⁾

37) Wang *et al.*, *op. cit.*, pp. 817–824.

38) Le *et al.*(2020), pp. 615–632.

39) Moreira, Vettor, and Guedes Soares, *op. cit.*, pp. 1–14.

40) Uyanik, Karatuğ, and Arslanoğlu, *op. cit.*, pp. 1–14.

사용되는 자료는 IHS에서 구매한 컨테이너 선박 DB 자료로 2019년 기준 컨테이너 총 선대에 대한 자료로 IMO 번호, 선박 크기(길이 등), 적재가능 컨테이너 수, 건조국가, 조선소, 연료소모량, 설계속도, 엔진타입 등 다양한 자료가 포함되어 있다. 2019년 기준 5,300여 척의 컨테이너선이 운항 중이며 동 자료는 5,260척에 대한 정보가 기재되어 있다. 다만 선박 연료소모량에 대한 결측치가 존재해 연료소모량에 사용되는 자료는 4,744척이다.

본 연구에서는 선행연구의 변수를 바탕으로 선박 속도, 선박 크기를 이용하여 추가적으로 선박 연식에 대한 연료소모량을 추정한다. 선박 연식에 따른 연료소모량의 절감은 새로운 기술이 적용될 가능성이 높다는 것으로 해석할 수 있으며 기존에 적용된 기술진보에 대한 계수를 현재 운영되고 있는 컨테이너 선대를 기반으로 추정하는 데 의의가 있다.

연료소모량(톤/일), 적재가능 컨테이너 수(TEU), 선박운항가능설계속도(노트), 건조 연도에 대한 기초통계량은 <표 4-4>와 같다. EEDI 변수는 2015년 이후에 건조된 선박을 표시하기 위해 더미(dummy)변수로 분석에 사용되어 기초통계량은 별도로 표시하지 않았다. 일일 연료소모량의 평균은 약 113톤이며 크기를 나타내는 적재가능 평균 컨테이너 수는 4,391TEU, 평균 운항가능 설계속도는 21.2노트, 건조 연도는 약 2007년으로 나타났다. 선박 대형화로 인해 적재가능 컨테이너 수의 표준편차는 3,971.5로 매우 큰 것으로 나타났다.

〈표 4-4〉 변수별 기초통계량

변수	평균	최대	최소	표준편차
선박 연료소모량 (톤)	112.9	326.1	4.3	78.4
적재가능 컨테이너 수 (TEU)	4,391.1	21,237.0	95.0	3,971.5
선박운항가능설계속도 (노트)	21.2	10	27.5	3.04
건조 연도	2006.9	2019	1971	6.49

자료: 저자 작성

선박 연료소모량과 가장 상관관계가 높은 변수는 선박운항가능설계속도(0.8554)이며 다음으로 적재가능 컨테이너 수(0.8146), 건조 연도(0.2213) 순으로 나타났다.

〈표 4-5〉 변수 간 상관관계

변수	연료소모량	적재가능 컨테이너 수	선박운항가능 설계속도	건조 연도
연료소모량	1			
적재가능 컨테이너 수	0.8146882	1		
선박운항가능설계속도	0.8554680	0.5594346	1	
건조 연도	0.2213875	0.4084864	0.1585453	1

자료: 저자 작성

기술계수를 추정할 때에는 변수 선택의 신뢰도를 향상시키기 위해 규제 선형모델인 라쏘, 릿지가 결합된 엘라스틱넷을 활용한다. 연료소모량 추정식은 선속, 선박 크기, 건조 연도(진보계수), EEDI 더미변수로 구성된다. 선속과 선박 크기의 변수는 선행연구에서 사용된 변수이며 본 연구에서 선박기술진보도를 계산하기 위한 건조 연도와 2013년부터 실시되는 EEDI를 추가하였다.

$$\begin{aligned} \log(fuel_consumption) = & \beta_1 + \beta_2 \cdot \log(ship_speed) + \beta_3 \cdot \log(ship_size) \\ & + \beta_4 \cdot built_year + \beta_5 \cdot dm_EEDI + \epsilon \end{aligned}$$

[수식 4-1]

fuel_consumption: 선박 연료소모량

ship_speed: 선박 운항가능 설계 속도

ship_size: 적재가능 컨테이너 수(TEU)

built_year: 건조 연도

EEDI: EEDI 규제 선박(phase 1: 2015년 이후 건조 선박)

선형회귀분석에서는 EEDI 적용 전후 변수별 차이가 어떻게 발생하는지 알아보기 위해 두 가지 모델을 적용했다. 추정 결과 선박의 건조 연도의 효과에서 차이가 나타났다. EEDI 변수가 제외된 모델1에서는 건조 연도에 따른 연료소모량이 0.80%, 모델2에서는 0.57%로 나타났다. 2015년 이후 건조된 선박에 적용된 EEDI 변수는 추정 결과 10.8%로 나타나 EEDI 규제 1단계 연료소모량 감축 비율인 10.0%를 준수하는 것으로 나타났다.

본 연구의 주요 대상은 선박의 연료소모량에 대한 기술진보도를 추정하는 것이므로 모델2에서 추정된 건조 연도에 따른 연료소모량 감축계수 값인 0.57%를 이용해 향후 컨테이너 선박이 발생하는 온실가스 배출량 추정 시에 적용한다. 연구 결과의 강건성을 위해 실시하는 규제선형모델에서도 선형회귀분석 결과와 유사한 0.57~0.60%로 도출되었다.

〈표 4-6〉 선형회귀분석 결과

변수	모델1	모델2
상수항	8.696912*** (11.76717)	4.292152*** (05.279854)
ship_speed	2.553202*** (116.4059)	2.492840*** (112.4754)
ship_size	0.501157*** (128.8189)	0.505501*** (131.3665)
built year	-0.00799*** (-21.7976)	-0.005712*** (-14.05790)
dm_EEDI		-0.108156*** (-12.16762)
$\bar{R}^2$	0.96659	0.967595

주: ***는 각 1% 수준에서 계수가 유의함을 의미
자료: 저자 작성

선형회귀분석에서는 변수 간의 독립성이 확보되어야 하는데 상관관계가 높으면 분석결과에 대한 신뢰성이 하락하게 된다. 이에 모형에 포함된 변수 간 다중공선성을 검증해야 하며, 대표적으로 사용되는 방법이 분산팽창요인(VIF: Variance inflation Factor) 분석이다. 본 연구에서도 다중공선성 검증결과 모든 변수의 분산팽창요인 값이 3 이하로 나타나 문제가 없는 것으로 나타났다(10 이상일 경우 다중공선성 관계가 있는 것으로 판단한다).

〈표 4-7〉 다중공선성 검증 결과(VIF)

변수	VIF 값
상수항	-
ship_speed	2.612742
ship_size	2.920620
built year	1.613745
dm_EEDI	1.415801

자료: 저자 작성

선형회귀모델은 회귀식에서 RSS(Residual sum of squares)를 최소화하는 것만 고려하기 때문에 회귀계수가 쉽게 커질 수 있다. 이럴 경우 변동폭이 더 커져 예측성능이 저하될 수 있기 때문에 회귀계수의 크기를 제어해서 과적합을 개선하기 위해 규제선형모형에서는 다음과 같은 목표로 변경된다.⁴¹⁾

$$\text{비용함수 목표} = \text{Min}(RSS(W) + \alpha \|W\|_2^2) \quad [\text{식 4-2}]$$

여기에서 알파(alpha)가 0이면 일반적인 회귀식과 동일하나 알파가 매우 커지게 되면 W를 최소화해서 비용함수의 목표인 최소화를 달성해야 한다. 따라서 알파와 W의 균형을 통해 최소화를 달성하기 위한 방식을 규제(Regulation)라고 하며, L1과 L2로 구분된다. L1은 라쏘 회귀에서 사용되는데 W의 절댓값에 패널티를 부여하며, L2는 릿지 회귀로 W의 제곱에 패널티를 부여한다. 마지막 엘라스틱넷은 L1과 L2를 결합한 방식으로 다음과 같다.

$$\text{비용함수목표} = \text{Min}(RSS(W) + \alpha \|W\|_1 + \alpha \|W\|_2^2) \quad [\text{식 4-3}]$$

규제선형모델 중 릿지모델의 장점은 상관관계가 높은 변수가 포함되어 있어도 성능이 좋다는 것인데 반해 크기가 큰 변수의 영향도가 우선적으로 축소되는 경향이 있다.⁴²⁾

41) 권철민(2020), p. 320.

42) github(검색일: 2021. 8. 10)

〈표 4-8〉 규제선형모델의 장단점

변수	라쏘	릿지	엘라스틱넷
제약식	L1	L2	L1+L2
변수 선택	가능	불가능	가능
솔루션	명시해 없음	closed form	명시해 없음
장점	변수 간 상관관계가 높으면 성능 ↓	변수 간 상관관계가 높아도 좋은 성능	변수 간 상관관계를 반영한 정규화
단점	비중요 변수를 우선적으로 줄임	크기가 큰 변수를 우선적으로 줄임	상관관계가 큰 변수를 동시에 선택/배제

자료: github(검색일: 2021. 8. 10)

라쏘와 릿지 회귀분석 결과 선박의 속도가 연료소모량에 가장 큰 영향을 미쳤으며 선박 크기, EEDI, 건조 연도순으로 추정되었다. 다만 영향도가 가장 높은 선박 속도의 경우 라쏘와 릿지모델 간에 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 릿지 모델이 라쏘에 비해 상대적으로 선박 속도에 대한 영향도가 낮은 것으로 나타났다. 이는 상기에 명시된 모델 특성에 따른 결과로 풀이된다.

〈표 4-9〉 라쏘와 릿지 회귀분석 결과

변수	라쏘	릿지
상수항	4.370214	6.114401
ship_speed	2.489529	2.180977
ship_size	0.505802	0.545921
built year	-0.00575	-0.00631
dm_EEDI	-0.10646	-0.13356
$\bar{R}^2$	0.967622	0.966268

주: 라쏘는 알파 값이 1, 릿지는 0인 경우
자료: 저자 작성

라쏘 회귀분석에서는 패널티 값을 결정하는 람다의 변화에 따른 영향도를 분석한 결과, 모든 변수가 영향을 미치는 것으로 나타났다. 람다 값이

변화할수록 선박 속도에 대한 영향도는 감소하는 데 반해 선박 크기와 건조 연도에 따른 영향도는 증가하였다.

〈표 4-10〉 라쏘 회귀분석 결과

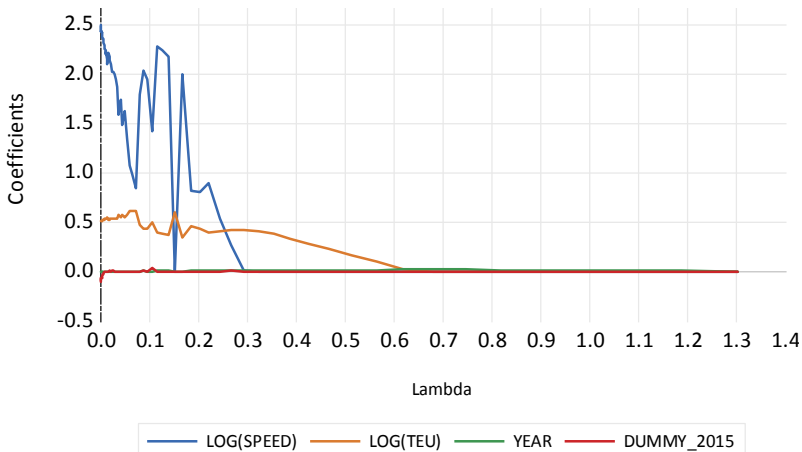
변수	람다(0.0001305)	람다(0.005391)	람다(0.007822)
상수항	4.370214	7.517667	8.971821
ship_speed	2.489529	2.356014	2.294329
ship_size	0.505802	0.517933	0.523537
built year	-0.00575	-0.00716	-0.00782
dm_EEDI	-0.10646	-0.03788	-0.0062
$\overline{R}^2$	0.967622	0.966655	0.965585

주: 람다 값이 0.0001305일 때 최적모형으로 나타남

자료: 저자 작성

라쏘 회귀분석은 변수의 선별이 가능하기 때문에 패널티에 따라 변수의 영향도를 측정할 수 있으며, 이 값이 커질수록 변수가 미치는 영향도는 0에 수렴하는 것으로 나타났다.

〈그림 4-3〉 패널티(람다)에 따른 변수별 영향도 변화(라쏘)



자료: 저자 작성

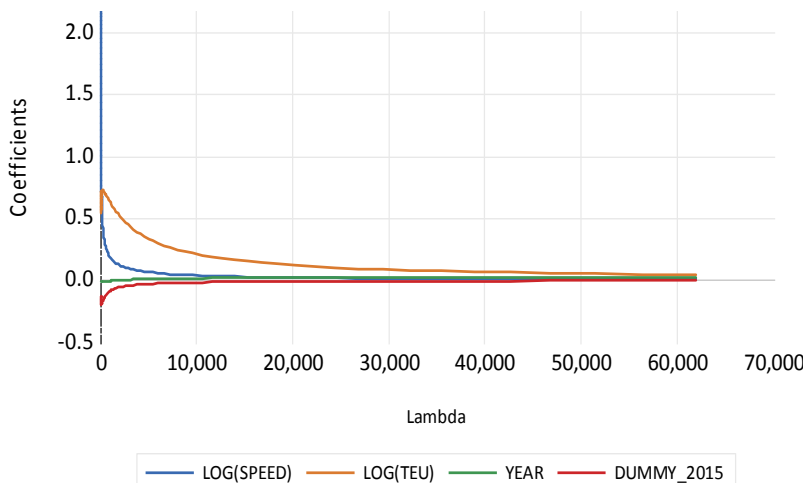
릿지 회귀분석에서도 람다 값의 변화에 따라서도 계수 간에 큰 차이는 발생하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 상기 변수들이 실질적으로 영향을 미치는 변수로 추정된다.

〈표 4-11〉 릿지 회귀분석 결과

변수	람다(6.19)	람다(8.98)	람다(11.87)
상수항	6.114401	6.796537	7.432045
ship_speed	2.180977	2.065827	1.959426
ship_size	0.545921	0.560741	0.574369
built year	-0.00631	-0.00653	-0.00674
dm_EEDI	-0.13356	-0.14246	-0.15038
$\overline{R}^2$	0.966268	0.965083	0.963658

릿지 회귀분석에서는 모형 특성상 람다 값의 변화에 따라 변수별 영향도가 점차 감소하지만 0이 되지는 않는다. 다만 0에 점차 수렴하는 것으로 나타났다.

〈그림 4-4〉 패널티(람다)에 따른 변수별 영향도 변화(릿지)



라쏘와 릿지가 혼합되어 있는 엘라스틱넷 회귀분석에서 알파 값이 0인 경우를 제외하고는 알파 값의 변화에 따라 계수 간에 큰 차이가 발생하지 않은 것으로 나타났다.

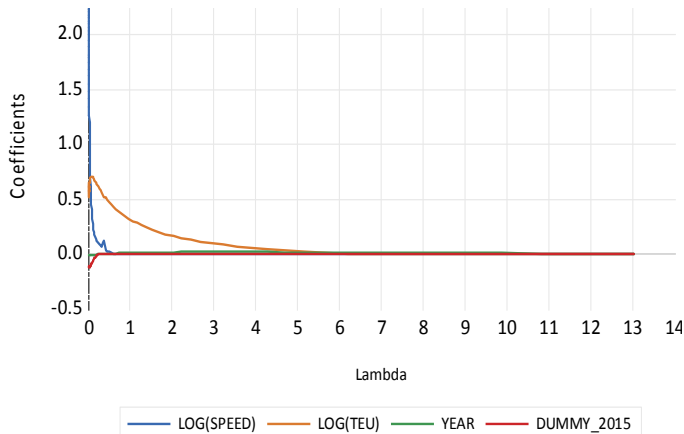
〈표 4-12〉 엘라스틱넷 회귀분석 결과

변수	Alpha:0	Alpha:0.1	Alpha:0.5	Alpha:1
상수항	-41.685	4.977277	4.449884	4.370214
ship_speed	0.015633	2.404851	2.478384	2.489529
ship_size	0.087983	0.515957	0.507136	0.505802
built year	0.022612	-0.00596	-0.00578	-0.00575
dm_EEDI	-0.00562	-0.10961	-0.10671	-0.10646
$\overline{R}^2$	0.227643	0.967509	0.967619	0.967622

자료: 저자 작성

알파 값이 0.1일 때 람다 값의 변화에 따른 변수별 영향도를 측정한 결과, 엘라스틱넷 회귀분석에서는 릿지와 유사하나 0으로 근접하는 기울기가 가파른 것으로 나타났다.

〈그림 4-5〉 패널티(람다)에 따른 변수별 영향도 변화(엘라스틱넷)



주: 알파 값 0.1일 때
자료: 저자 작성

모든 선형을 대상으로 추정한 규제/선형회귀분석에서 나아가 크기가 작은 선박에서 큰 선박까지 상기 연구된 변수가 미치는 요인이 어떻게 달라지는지 분석하기 위해 분위회귀분석 결과를 적용하였다.

분위회귀분석은 평균을 이용한 선형회귀분석과 다르게 중위값을 이용한다. 선형회귀분석에서 예측오차(e_i)는 최소제곱법(OLS)을 이용해 $\sum_i e_i^2$ 를 최소화하는데, 중위수를 이용하는 회귀법은 $\sum_i |e_i|$ 를 최소화한다. 동 분석 방법은 최소제곱법이나 최우추정법과 동일하게 최적화를 위해서 선형회귀법을 사용한다. q 번째 분위회귀 추정량 $\hat{\beta}_q$ 는 다음의 목적함수 β_q 에 대해 최소화한다.⁴³⁾

$$Q(\beta_q) = \sum_{i: y_i \geq x'_i \beta_q} q |y_i - x'_i \beta_q| + \sum_{i: y_i < x'_i \beta_q} (1-q) |y_i - x'_i \beta_q|$$

동 분석 방법은 몇 가지 장점을 가지고 있는데 첫째, 선형회귀모형은 이상치(outlier)에 크게 반응하고 종속변수가 정규분포가 아닐 경우 비효율적이지만, 분위회귀분석 추정치들은 선형회귀에 비해 강건한 추정치를 도출할 수 있다. 둘째, 변수 속성에 영향을 미치는 다양한 특성을 구할 수 있다. 본 연구에서는 연료소모량의 분위수에 따라 변수별 영향도가 차이가 발생할 것으로 예상되므로 이에 대한 특성을 파악할 수 있다. 셋째, 최소제곱법과는 달리 분위회귀 추정량의 일치성은 조건부 평균의 존재 여부에 의존하지 않는다. 넷째, 분위회귀는 단조 변환(monotonic transformation)의 영향을 받지 않아 역변환을 사용해 결과를 해석할 수 있다.⁴⁴⁾

분위회귀분석의 결과 연료소모량에 가장 영향도가 큰 선박 속도는 연료

43) Cameron and Trivedi(2010), p. 274.

44) Cameron, A. C. & P. K. Trivedi(2010), 강창희·박상곤 번역(2017), p. 275.

소모량이 낮은 1분위에서 많은 9분위로 갈수록 영향도는 점차 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 선박 크기의 영향도는 분위수가 올라갈수록 커지는 것으로 나타났다. 선박 건조 연도(기술계수)에 따른 영향도는 연료소모량이 높은 대형 선박일수록 기술진보 효과가 커지는 것으로 나타났다. 기술진보도는 1분위에서 0.44%에 불과했으나 9분위까지 올라가면 0.86%로 두 배 가까이 증가했다.

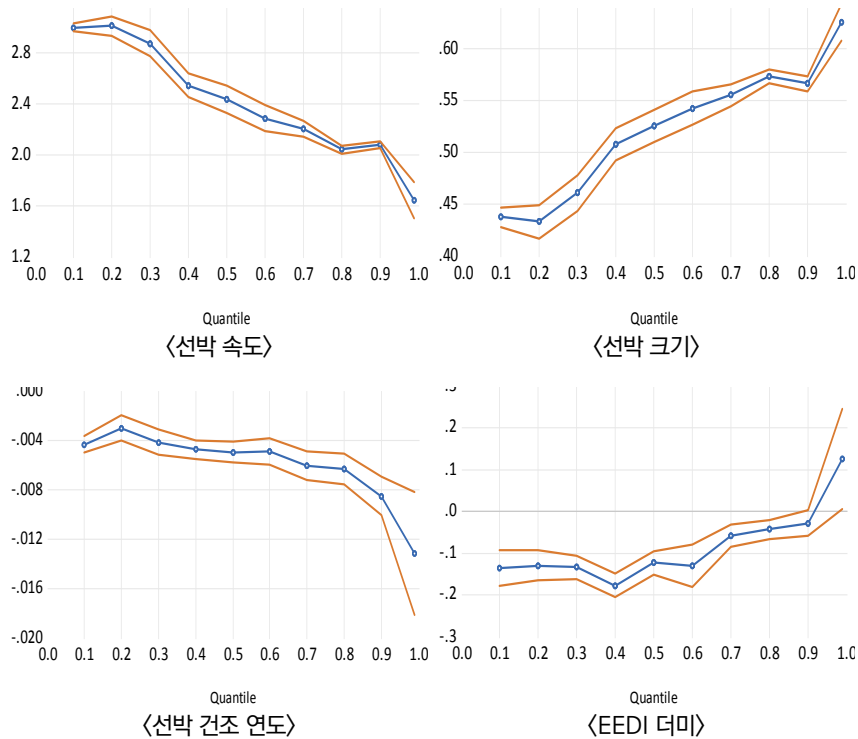
〈표 4-13〉 분위회귀분석 결과

선박 크기	1분위	2분위	3분위
상수항	0.444922	-2.19143**	0.425707
ship_speed	2.991615***	3.006738***	2.867138***
ship_size	0.4369***	0.432543***	0.460277***
built_year	-0.00436***	-0.00303***	-0.00421***
dm_EEDI	-0.1361***	-0.1294***	-0.1346***
$\bar{R}^2$	0.822464	0.832568	0.843287
선박 크기	4분위	5분위	6분위
상수항	2.242242***	2.869113***	3.094442***
ship_speed	2.541143***	2.430732***	2.283524***
ship_size	0.506917***	0.524525***	0.542092***
built_year	-0.00478***	-0.00498***	-0.00492***
dm_EEDI	-0.17756***	-0.12333***	-0.12911***
$\bar{R}^2$	0.848418	0.847616	0.845609
선박 크기	7분위	8분위	9분위
상수항	5.640926***	6.564444***	10.95583***
ship_speed	2.200705***	2.037928***	2.07712***
ship_size	0.554463***	0.572928***	0.565929***
built_year	-0.0061***	-0.00637***	-0.00857***
dm_EEDI	-0.05812***	-0.04288***	-0.02882**
$\bar{R}^2$	0.836597	0.823849	0.793028

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 수준에서 계수가 유의함을 의미
자료: 저자 작성

분위수별 계수 값의 변화를 그래프로 살펴보면 연료소모량에 따라 변수의 변화를 명확하게 확인할 수 있다. 선박 속도와 건조 연도는 분위수 증가에 따라 계수 값이 하락하나, 선박 크기와 EEDI 변수의 계수 값은 분위수가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다.

〈그림 4-6〉 분위 변화에 따른 계수 변화



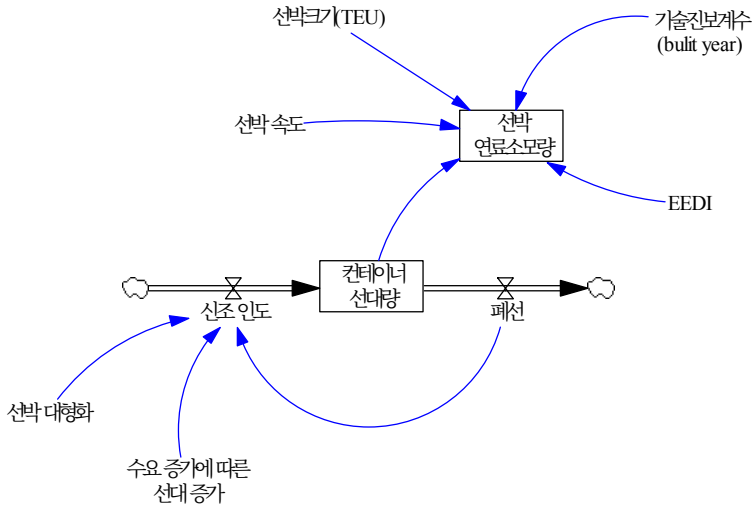
자료: 저자 작성

제2절 컨테이너선 연료소모량 추정

1. 컨테이너선 연료소모량 산정 프로세스

2050년까지 컨테이너선의 연료소모량을 산정하기 위해 상기에서 추정된 컨테이너 선대량과 연료소모량에 영향을 미치는 선박 크기, 속도, 건조 연도(기술진보 계수), EEDI를 이용한다. EEDI는 제1절에서 계량적으로 분석한 결과 설계 시 반영되는 것으로 나타나 앞으로 건조되는 선박에도 적용한다. 컨테이너 선대는 제3장에서 추정한 값을 사용하며, 수요에 따른 회전율(TEU/slot)은 8.0/8.5TEU를 이용해 시나리오로 추정한다.

〈그림 4-7〉 컨테이너선 연료소모량 추정 프로세스

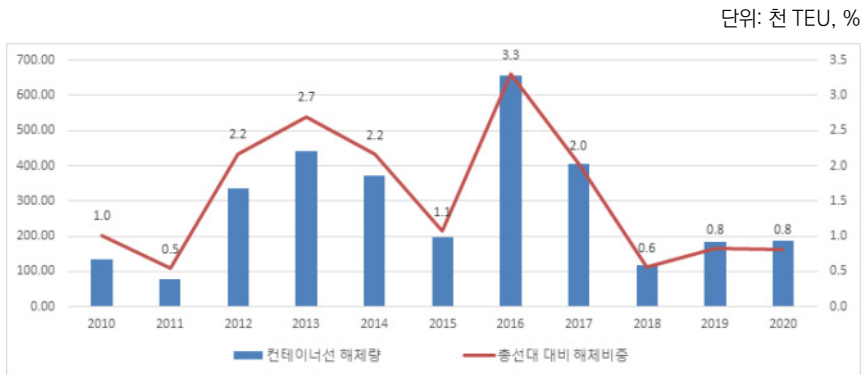


자료: 저자 작성

2. 컨테이너선 연료소모량 추정 시 가정

연료소모량 추정 프로세스에서 몇 가지 가정을 통해 계산을 단순화한다. 첫째, 신조 발주량은 기존 선박의 해체량과 수요 증가에 따른 증가량으로 구분한다. 해체량은 최근 10년간(2010~2020년) 총 컨테이너 선대 대비 해체 비중(1.56%)을 적용한다. 선형별 선대 추이에서 전년과의 차이(t 시점 - (t-1) 시점)는 수요 증가에 따른 선대 증가로 가정한다.

〈그림 4-8〉 컨테이너선 해체 추이

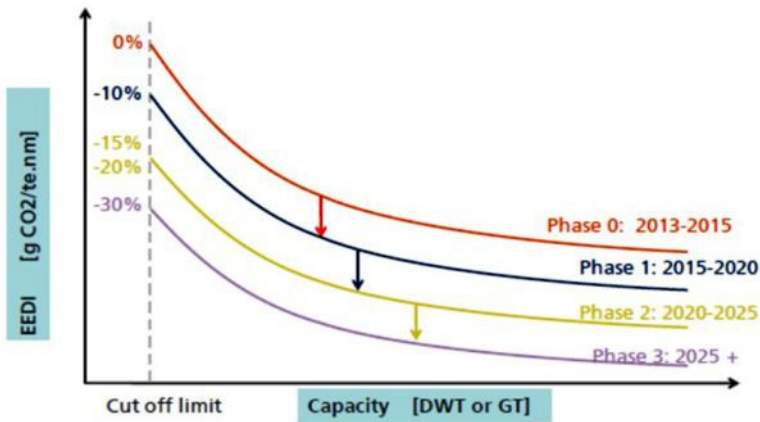


자료: 클락슨(검색일: 2021. 8. 9) 저자 작성

둘째, 해체된 선박은 동일한 수만큼 신조 발주하며 인도될 시점에 네 개 평균 선형(3000TEU 이하, 3,000~8,000TEU, 8,000~15,000TEU, 15,000TEU 이상)으로 인도된다. 셋째, 15,000TEU급 이상 선박의 해체는 2030년 이후에 발생한다(15,000TEU급 선박은 2006년도에 처음 인도되었으나 2013년 이전까지 인도 척수는 8척에 불과하며 2013년 이후부터 인도량이 증가하였다). 넷째, 연료소모량 추정 시 신조 인도되는 선박은 EEDI가 적용되어 연비 효율성이 향상되는 것으로 적용한다.⁴⁵⁾

45) 컨테이너선의 경우 EEDI 적용 기준은 크기에 따라 상이하나 동 연구에서는 일괄 적용함

〈그림 4-9〉 EEDI 적용에 따른 탄소배출 감축도



자료: Pusa(2015), p. 67

3. 컨테이너선 연료소모량 추정

상기 가정을 통해 연도별 폐선과 수요 증가에 따른 신조 인도량은 다음과 같을 것으로 예상된다. 슬롯당 처리량이 8.0TEU일 경우 2030년 총 인도되는 선박은 197척, 2040년 231척, 2050년에는 288척에 이를 것으로 예상된다. 3,000~7,999TEU급 선형에 대한 수요는 감소하기 때문에 인도되는 선박의 척수와 선대량(TEU)의 증가세가 다른 선형에 비해 크지 않을 것으로 나타났다. 동급 선박에 대해서는 최근 5년간 신조 발주가 다른 선형에 비해 낮은 수준을 유지하고 있어 향후에도 총 컨테이너 선대에서 차지하는 비중은 감소할 것으로 예상된다.

〈표 4-14〉 연도별 신조 인도량(폐선+수요 증가)(8.0TEU/slot 기준)

단위: 척수, TEU

구분		3,000TEU 이하	3,000- 7,999TEU	8,000- 15,000TEU	15,000TEU 이상	합계
척수	2030	82	41	62	13	197
	2040	78	46	88	19	231
	2050	84	51	125	28	288
	연평균 증가율	0.1	1.1	3.6	3.9	1.9
TEU	2030	125,626	222,151	727,946	269,610	1,345,333
	2040	115,341	239,611	994,549	382,746	1,732,246
	2050	114,284	247,982	1,303,791	521,362	2,187,419
	연평균 증가율	-0.5	0.6	3.0	3.4	2.5

자료: 저자 추정

슬롯당 처리량이 8.5TEU일 경우 2030년 총 인도되는 선박은 181척, 2040년 208척, 2050년에는 255척에 이를 것으로 예상된다. 슬롯당 처리량이 8.0TEU인 경우와 비교해 인도량에서 약 7% 내외의 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

〈표 4-15〉 연도별 신조 인도량(폐선+수요 증가)(8.5TEU/slot 기준)

단위: 척수, TEU

구분		3,000TEU 이하	3,000- 7,999TEU	8,000- 15,000TEU	15,000TEU 이상	합계
척수	2030	74	37	58	12	181
	2040	68	41	81	17	208
	2050	72	45	113	25	255
	연평균 증가율	-0.1	1.0	3.4	3.7	1.7

구분		3,000TEU 이하	3,000- 7,999TEU	8,000- 15,000TEU	15,000TEU 이상	합계
TEU	2030	108,912	193,574	658,394	244,566	1,205,447
	2040	98,928	208,788	899,524	347,192	1,554,433
	2050	98,021	216,082	1,179,220	472,932	1,966,256
	연평균 증가율	-0.5	0.6	3.0	3.4	2.5

자료: 저자 추정

선박 인도 시점이 늦어질수록 EEDI 적용과 기술의 진보로 인해 선박 연료 소모에 대한 효율성은 향상될 것으로 예상된다. 2007년 건조된 파나막스급 선박의 연료소모량은 일일 65.8톤으로 추정되나 2030년 건조된 선박의 일일 연료소모량은 45.1톤으로 크게 감소할 것으로 예상된다. 모든 선형에서 선박의 연료 효율성은 개선되어 2050년에 건조된 선박은 2020년 대비 약 30%의 연비 효율성 향상 효과가 있을 것으로 예상된다.

〈표 4-16〉 선형별 연료소모량 전망

단위: 톤/일, %

구분	3,000TEU 이하	3,000- 7,999TEU	8,000- 15,000TEU	15,000TEU 이상
2019기준 운항선대 평균	35.0	65.8	94.6	123.8
2020	28.8	54.9	80.4	107.8
2030	23.7	45.1	66.4	89.4
2040	22.1	41.9	61.7	83.1
2050	20.0	38.1	56.0	75.4

주: 17노트 운항 가정, 각 선형별 연료소모량은 평균 크기를 기준으로 계산됨

자료: 저자 추정

연간 컨테이너선의 연료소모량을 추정하기 위한 가정은 Czermański *et al.*(2021)에서 실시한 가정과 동일하게 운항속도 17노트, 운항 일수 250일로 가정했다.⁴⁶⁾

46) Czermański *et al.*(2021), pp. 1-18.

컨테이너 선대의 연도별 연료소모량을 추정한 결과, 과거에 비해서 연료소모량의 증가세는 낮으나 IMO의 규제를 맞추기는 힘들 것으로 전망된다. 2008년 연료소모량은 약 7,403만 톤으로 잠정 추산되는데, 현재의 기술진보의 수준과 선대 추이를 고려할 때 2050년 컨테이너 선대의 연료소모량은 연간 1억 톤을 넘길 것으로 예상된다.

〈표 4-17〉 컨테이너 선대 연도별 연료소모량

단위: 천 톤

구분	슬롯당 처리당 8.5TEU 기준	슬롯당 처리당 8.0TEU 기준
2030	89,668	92,406
2040	94,798	102,279
2050	100,108	113,280

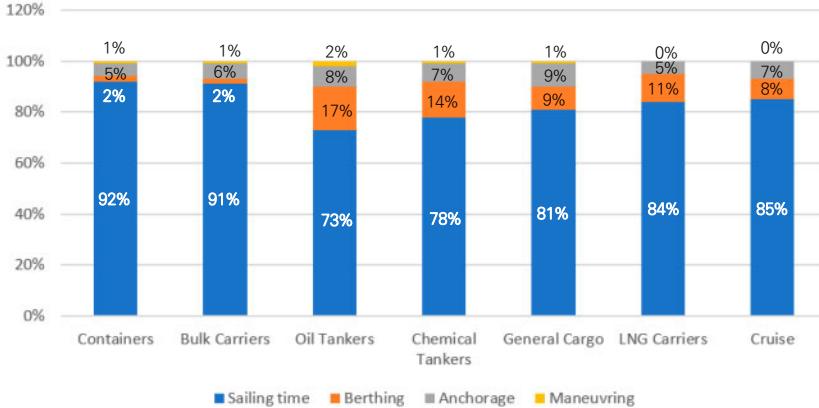
자료: 저자 추정

4. 선행연구와 연료소모량 비교

본 연구와 강무홍 외(2020)의 연구를 비교한 결과 2019년 컨테이너 선대를 기준으로 연료소모량은 약 250만 톤의 차이가 발생하였다. 강무홍 외(2020)의 연구에서는 AIS를 활용해 이동 거리와 운항 시간과 속도를 기준으로 정밀하게 추정한 데 반해, 본 연구에서는 2019년 총 선대를 기준으로 추정된 연료소모량 산식을 기준으로 잠정 추산하였다. 다만 보조 엔진 소모량은 IMO(2014)의 연구에서 제시한 주 엔진 소모량의 5%로 적용하였다. 정박/묘박 중일 때의 연료소모량은 Comer *et al.*(2017)에서 연구된 결과인 운항 중 연료소모량의 6.0%로 적용하였다.⁴⁷⁾

47) Comer *et al.*(2017), pp. 1-107.

〈그림 4-10〉 선종별 항해 상태에 따른 연료소모량 비중



자료: Czermański *et al.*(2021), p. 8

강무홍 외(2020)의 연구와 본 연구의 연료소모량 차이는 약 3.0%로 나타났다으며, 주 엔진 연료소모량의 차이가 큰 것으로 나타났다. 연료소모량의 차이 원인 중 하나로 강무홍 외(2020)의 연구에서는 2019년 선대의 기준을 AIS 자료가 있는 5,015척으로 한정된 데 반해 본 연구에서는 2019년 말 자료인 5,300여 척의 선대를 대상으로 해서 약 5%의 선대가 더 포함되었다. 이 밖에 추정에 사용된 평균 선속과 실제 컨테이너선의 속도와의 차이가 있고, 강무홍 외(2020)의 연구에서는 이동 거리를 고려했으나 본 연구에서는 운항 일수 가정을 통해 추정했기 때문에 상대적으로 추정치의 오차가 발생할 수 있다. 강무홍 외(2020)의 연구 외에 IMO의 연구에서는 2015년 기준 컨테이너 선대의 연료소모량을 약 8,000만 톤, Czermański *et al.*(2021)의 연구에서는 1억 1,780만 톤으로 추정하였다.

〈표 4-18〉 컨테이너선 연료소모량 추정(2019년 선대 기준)

단위: 톤/연

구분	운항 중		정박 중	묘박 중	합계
	주 엔진	보조 엔진	보조 엔진	보조 엔진	
동 연구	73,857,688	3,692,884	4,653,034		82,203,606
강무홍 외(2020)	60,418,580	14,349,915	2,059,887	753,743	77,582,125

주: 동 연구는 17노트, 운항 일수 250일 가정
자료: 강무홍 외(2020), p. 50

제3절 소결

제4장에서는 시간에 따른 기술진보도를 계산하기 위해 선행연구를 살펴 보았다. IMO(2014)의 연구에서 2013년 이후 건조되는 선박이 EEDI 규제를 받기 때문에 일괄적으로 적용한 사례는 있었으나, 연식에 따른 기술진보도를 적용한 사례는 없는 것으로 조사되었다. 이에 선박의 연료소모량을 추정하는 선행연구에서 사용되는 변수에 연식에 따른 효율성 향상도를 추정해 기술진보도로 적용했다.

〈표 4-19〉 컨테이너선 기술진보도 추정(~2050)

연구 흐름	세부 내용	비고
↓	↓	↓
변수 선정	• 선행연구(연료소모량 추정)	• 선박 크기, 속도, 건조국가, 엔진타입 등
↓	↓	↓
모형설정	• 선박 속도/크기/건조 연도(기술진보계수)/EEDI 규제(더미변수)	• 선형회귀분석 • 규제회귀(라쏘, 릿지, 엘라스틱넷) • 분위회귀

자료: 저자 작성

선형회귀분석으로 기술진보도 추정 결과 연평균 0.57%로 추정되었다. 규제회귀분석 결과에서도 선형회귀분석과 유사한 0.57~0.60%로 도출되어 선형회귀분석 결과를 뒷받침했다. 아울러 모형의 설명력 또한 높았으며 다중공선성 문제도 없는 것으로 나타났다. 분위회귀분석 결과 연료소모량에 가장 영향을 많이 미치는 요인은 선박 속도이지만, 연료소모량이 적은 1분위에서 많은 9분위로 갈수록 영향도는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 기술진보계수도 9분위로 갈수록 크기가 커지는 것으로 분석되었다.

다음으로 추정된 기술진보도를 이용해 컨테이너 선대의 연료소모량을 추정하였다. 다만 추정모델의 단순화를 위해 선대 발주 및 해체에 대한 가정을 실시하였다. 선형은 네 개 그룹으로 구분했으며, 신조 발주는 해체에 따른 대체 발주와 수요 증가에 따른 발주로 나뉘었다.

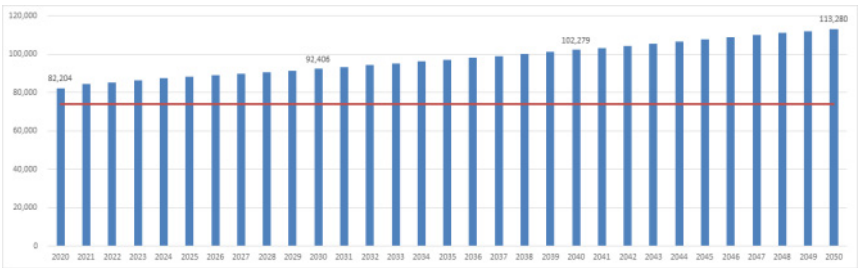
〈표 4-20〉 컨테이너 선대 연료소모량 추정 시 가정

구분	대분류 가정	소분류 가정
선형 구분	• 네 개 선형으로 구분	• 1그룹(3,000TEU급 이하) • 2그룹(3,000-8,000TEU) • 3그룹(8,000-15,000TEU) • 4그룹(15,000TEU 이상)
↓	↓	↓
신조 발주	• 해체에 따른 대체 발주	• 해체에 따른 발주량은 최근 10년 평균인 1.56%를 적용함 • 해체된 선박과 같은 수만큼 인도됨 • 1.5TEU 이상은 2030년 이후부터 폐선 발생
	• 수요 증가에 따른 발주	• 전년과의 차이($t-(t-1)$) • 신조 선박 발주 시 EEDI 적용(해체에 따른 발주에도 적용)

자료: 저자 작성

제3장에서 계산된 선대 전망치와 이번 장에서 추정한 기술진보도를 이용해 선형(크기)별 연료소모량을 도출하여 2050년까지 연료소모량을 추정한 결과, 2050년 기준 약 1억 톤을 넘을 것으로 예상되었다. 이러한 결과는 EEDI 규제와 연도별 기술진보도를 적용한 것으로, 현재의 규제와 기술진보수준만으로는 IMO 규제를 만족시킬 수 없을 것으로 예상된다.

〈그림 4-11〉 연도별 컨테이너선 연료소모량 전망



주: 컨테이너선 슬롯당 회전율 8.0TEU 일 때 가정
자료: 저자 작성

05

시나리오에 따른 탄소 배출량 추정

제1절 신기술 적용에 따른 시나리오

1. 연료별 탄소 배출량

IMO(2020)의 연구에서는 현재 보편적으로 선박에 사용되는 HFO, MDO 외에 LNG, 메탄올에 대한 탄소 함량 및 배출량에 대한 연구가 진행되어 제시되었다. 단위(g)당 탄소 함량과 배출량 모두 MDO가 가장 높으며 고유황유(HFO), 저유황유(LSHFO) 순으로 나타났다. 탄소 배출량은 메탄올, LNG가 현재 사용되는 연료에 비해 적은 것으로 나타나 에너지 열량을 고려한 정확한 배출량 산출이 필요하다.

〈표 5-1〉 연료별 탄소배출계수

연료 유형	탄소 함량	탄소 배출량(Co_2/g)	밀도(톤/ m^3)
HFO	0.8493	3.114	1.001
MDO	0.8744	3.206	0.895
LNG	0.7500	2.750	0.450
메탄올	0.3750	1.375	0.790
LSHFO 1.0%	0.8493	3.114	-

자료: IMO(2020), p. 92

탄소배출을 감축하기 위해 거론되는 연료는 현재 사용되는 고유황유(HFO)의 부피열량에 못 미치기 때문에 필요한 탱커의 크기는 커질 수밖에 없다. 실제로 수소는 현재 고유황유에서 사용되는 탱커 용량의 4배가 필요하며 암모니아, 메탄올도 기존 대비 1.8~2.8배 넘는 용량이 필요하다.

〈표 5-2〉 연료 유형별 열량

연료 유형	중량열량(MJ/kg)	부피열량(MJ/L)	탱커 볼륨(m ³)
HFO	40.5	35	1,000
LNG	50	22	1,590
LPG	42	26	1,346
메탄올	19.9	15	2,333
에탄올	26	21	1,750
암모니아	18.6	12.7	2,755
수소	120	8.5	4,117

주: 탱커 볼륨은 HFO 1,000m³의 부피열량을 기준으로 산정된 수치임

자료: Ammonia Energy Association(검색일: 2021. 8. 30)

일본 국토교통성(2020)의 자료에 따르면 선박 연료의 열량당 탄소 배출량을 고려할 경우 메탄올의 탄소배출 감축 효과는 현재 사용되는 고유황유(HFO), 선박용경유(MGO) 등의 연료에 비해 10.0%의 절감 효과에 그칠 것으로 예상된다. 사실상 LNG에 비해 연료 감축 효과가 크지 않을 것으로 예상되는데, 최근에 친환경 연료로 주목받는 몇 가지 이유가 있다. 첫째, 높은 압력과 낮은 온도가 필요한 LNG에 비해 메탄올은 상온에서 저장할 수 있어 보관 및 운송에 용이하다. 이에 현재 사용되는 벙커링 시설과 호환성이 높아 인프라 구축에 유리하다. 둘째, 물에 녹는 성질 때문에 사고 시 분해되어 해양오염을 일으키지 않는다. 셋째, 기존연료와 혼합해서 사용할 수 있다. 이 때문에 기존 선박에서 사용할 수 있으며 글로벌 선사들은 이미 이에 대한 테스트를 완료했거나 진행 중이다.

〈표 5-3〉 대체연료의 주요 특성과 이점 및 과제

연료 유형	열량당 탄소 배출량	열량당 연료체적	장점	단점
수소 (연료전지포함)	0	4.46	• 선상 탄소배출 0 • 소형 수소연료, 혼합연료선, 연료전지선은 실적 있음 • 육상보일러는 가스터빈 실적 있음	• 연료부피가 큼(중유의 약 4.5배) • 저장 안정성(액화시 -253℃) • 공급인프라 미정비 • 병커링 기술 미성숙 • 연소제어 등 기술과제
암모니아	0	2.72	• 선상 탄소배출 0 • 가스터빈연소는 실적 있음	• 연료부피가 큼(중유의 약 2.7배) • Nox 발생 • N_2O 발생(온실효과 CO_2 300배) • 독성이 있음 • 전소에서의 연소성, 대출력화 등의 기술과제
LNG	0.74	1.65	• 실용화 완료 • 수소 등과 비교 시 에너지체적밀도 높음 • 합성/바이오메탄용 인프라 전용 가능 • 현행 IGH 코드로 규칙 정비 완료	• CO_2 감축 효과 제한적 • 메탄슬립 • 화석연료 사용에 대한 국제적 역풍 가능성
메탄	0.71	1.8	• 바이오메탄 IPCC 가이드라인 탄소중립 취급 • 실용화된 LNG와 동등하게 사용 가능 • LNG 인프라 전용 가능	• 현재 IPCC 가이드라인에서 카본 사이클 메탄을 탄소중립으로 한다는 명시적 기재는 없음
바이오디젤	0	~1.2	• 바이오메탄 IPCC 가이드라인 탄소중립 취급 • 육상부문의 혼반연소는 상업화 수준	• 저장안정성 기술과제 • 다른 부문 소비를 위해 해운으로 공급이 어려움

연료 유형	열량당 탄소 배출량	열량당 연료체적	장점	단점
메탄올	0.9	2.39	• 바이오메탄 IPCC 가이드라인 탄소중립 취급	• 현재 IPCC 가이드라인에서 카본 사이클 메탄을 탄소중립으로 한다는 명시적 기재는 없음 • 연료부피가 큼 • 착화성, 대출력화의 기술이 과제
에탄올	0.93	1.79	• 바이오메탄 IPCC 가이드라인 탄소중립 취급	• 현재 IPCC 가이드라인에서 카본 사이클 메탄을 탄소중립으로 한다는 명시적 기재는 없음 • 착화성, 대출력화의 기술이 과제

주: 1) 열량당 탄소 배출량 및 연료부피(액화 시)는 저위발열량 40.4MJ/kg, CO₂ 배출계수 CF=3.114-CO₂/t-fuel, 비중 0.94의 선박용 중유를 기준으로 함. 열량당 CO₂ 배출량은 유엔 산하 기후변화법정부 간 협의체인 IPCC(The Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인 및 IMO의 EEDI 계산 가이드라인 7의 저위발열량을 바탕으로 산출함
 2) 탄소 재활용 연료(CO₂를 분리·회수해 재이용하는 기술에 의해 인공적으로 제조되는 연료)와 바이오 연료의 경우 0이 됨
 3) 각 연료를 사용할 때 설계상 필요한 공간에 대해서는 연료부피 이외의 요소도 고려할 필요가 있음
 자료: 일본 국토교통성(2020), p. 11, 한능호 외(2020), p.155. 재인용

〈표 5-3〉에서 알 수 있듯이 메탄올의 열량당 탄소 배출량은 LNG, 메탄보다도 높은 것으로 나타나 실효성이 낮다. 하지만 메탄올 생산 방식에 따라 탄소 배출량은 크게 차이가 난다. 일반적으로 메탄올은 천연가스를 이용해 생산하며 이 경우 생산에서부터 사용까지(Well-to-Propeller)는 KWh당 766g의 탄소를 배출한다. 하지만 팜유와 같이 자연에서 생산되는 식물성 원재료를 이용해서 생산하는 경우 배출되는 탄소 배출량은 KWh당 338g으로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 바이오매스를 이용해 생산된 메탄올은 선박에서 사용될 때 배출되는 탄소 배출량이 0인 것으로 나타났다.

〈표 5-4〉 생산 방식에 따른 탄소 배출량 차이

연료 유형	탄소 배출량 (g/MJ)	탄소 배출량 (g/KWh)	
	Well-to-Tank (에너지생산 단계)	Tank-to-Propeller (선박운항 단계)	Well-to-Propeller (생산부터 사용까지)
LNG (fossil)	18.5	488-549	630-691
LNG (biogas)	55.4	107	531
Methanol (natural gas)	27	550	766
Methanol (biomass)	42.2	0	338

자료: Nanyang Technological University(2021), p. 6

IMO의 탄소배출 규제에 관한 선사들의 대응에 차이가 있다. 적극적으로 대응하는 선사는 머스크(Maersk)로 2030년까지 탄소중립선박을 상업 운항할 예정으로, 올해 메탄올 선박을 국내 조선소에 발주했다. 머스크는 해운기업의 탄소배출에 관련된 징별적인 세금부과에 찬성하고 있을 뿐만 아니라 혁신적인 기술 도입을 통해 탄소중립을 실현할 계획이다. 올해 발주한 메탄올 추진 선박의 연료는 덴마크 신재생 에너지 기업인 European Energy와 계약을 체결해 연간 1만 톤을 공급받을 예정이다. 이번에 공급 계약을 체결한 메탄올은 태양광과 바이오메스를 활용해 생산되어 탄소배출을 최소화하였다. 하지만 올해 발주된 메탄올 선박 8척은 16,000TEU급으로, 연간 30~40만 톤의 메탄올이 필요해 현재의 공급으로는 제한적으로 운항할 수밖에 없다.⁴⁸⁾ 이에 머스크는 신재생 에너지 생산기업에 대한 적극적인 M&A를 추진하고 있다.

CMA CGM, 하판로이드는 머스크와 같이 혁신적인 기술 도입보다는 점진적인 기술 혁신을 통해 대응하고 있다. 그 중심에 있는 기술이 LNG 선박

48) Lloyd's List(검색일: 2021. 9. 8)

으로, CMA CGM은 2015년 대비 2025년까지 컨테이너 탄소 배출량을 30% 절감할 계획으로 2022년까지 LNG 추진 컨테이너선 22척을 확보하였으며 일부는 아시아-유럽항로에 투입하여 운영 중이다. 하판로이드는 올해 1만 5천 TEU급 선박을 LNG 추진선으로 개조하였으며, 지난해 발주된 선박은 LNG-ready 선박으로 탄소배출 규제에 대응하기 위한 과도기적 선대 구성에 LNG 추진선이 포함되어 있다. CMA CGM, 하판로이드 모두 LNG 추진선박이 탄소중립의 완벽한 대안은 될 수 없다고 판단하기 때문에 수소, 바이오매스 연료에도 관심이 있다. 그러나 완전한 탄소중립으로 가기 전에 LNG 추진선이 필요하다는 입장이다.

글로벌 컨테이너 선사들은 탄소규제에 대응하기 위해 친환경 연료, 탄소중립선박 등 다양한 시도를 하고 있지만, 중소형 선사들은 대부분 탄소 규제에 소극적으로 대응하고 있다. 2022년 말에 실시되는 EEXI 규제에 대비해 선사 대부분은 출력제한장치를 통한 탄소 배출량 감축 방안을 선택할 것으로 예상된다. IMO 2020 규제에도 원양항로에 선대를 투입하는 대형 선사들과 중소형 선사들의 대응 전략은 차이가 있었다.

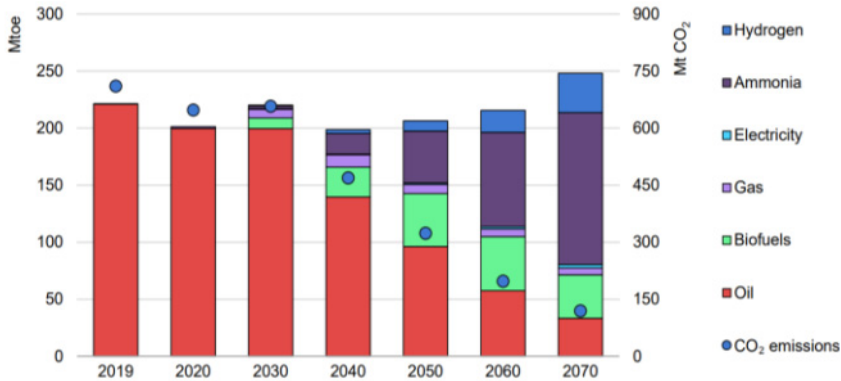
2. 미래 연료 수요 전망 시나리오

IMO(2020)의 연구에서는 친환경 연료의 비중 시나리오가 기술진보에 따른 효과에 포함되어 있으며, 두 가지로 구분되어 있다. 첫째 시나리오에서는 2050년까지 수소, 암모니아와 같은 탄소를 배출하지 않는 연료 사용이 64.08%에 달할 것으로 예상했다. 둘째 시나리오에서는 메탄올과 같은 탄소를 포함한 대체연료는 2.03%, 탄소를 포함하지 않는 연료 사용은 20.0%에 그칠 것으로 예상했다.

IEA(2020)의 연구에서는 2070년까지 연료별 사용량을 예측하였는데,

2040년 이후 암모니아에 대한 수요가 크게 증가할 것으로 전망했다. 동 연구에서는 LNG 연료의 사용은 지속되나 그 비중이 크지 않고 2040년부터는 바이오, 암모니아와 같은 친환경 연료가 증가할 것으로 예상했다. 바이오 연료는 2040년까지 2,500만 톤, 2050년에는 총 해운 연료소모량의 20%인 5천만 톤까지 증가할 것으로 예상하였다. 2050년 이후에는 암모니아와 수소의 비중이 크게 증가하며, 화석연료를 사용하는 선박은 2050년 이후 사라질 것으로 예상했다. 2070년 암모니아의 사용량은 1억 3천만 톤, 수소는 1,200만 톤에 이를 것으로 전망했다.

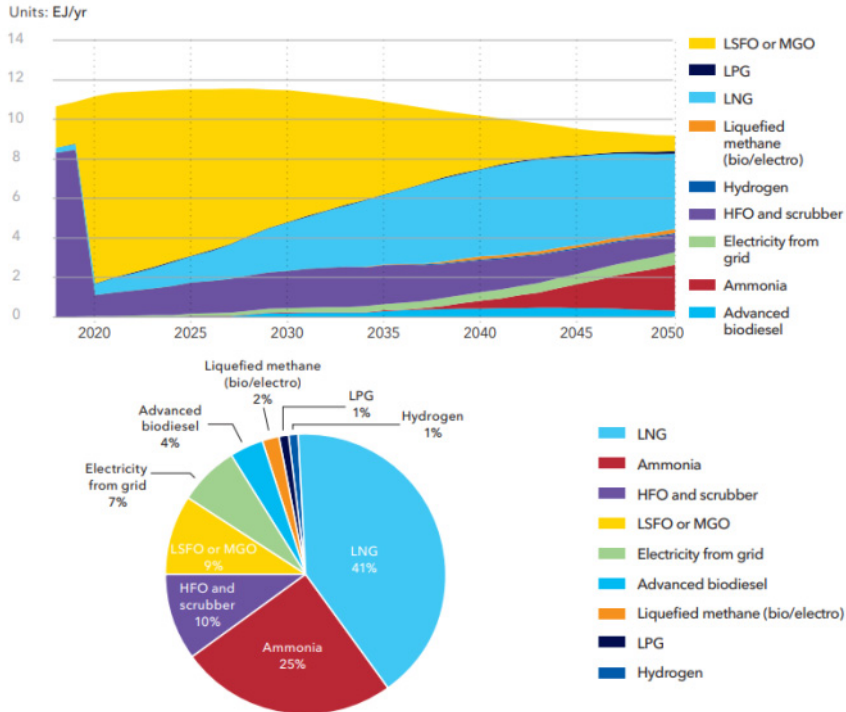
〈그림 5-1〉 국제 해운시장의 에너지 소비 및 탄소 배출량(지속가능한 시나리오)



자료: IEA(2020), p. 278

DNV(2019)의 연구에서는 화석연료에서 탄소중립 연료로 이행하는 과정에서 LNG의 사용량 비중이 높아질 것으로 예상했다. 암모니아는 2025년부터 본격적으로 사용되며, 화석연료의 비중은 지속적으로 감소할 것으로 전망했다. 2050년 기준 LNG는 41%, 암모니아 25%, HFO 10%, 저유황유 9%의 비중을 차지할 것으로 예상했으며 수소, 메탄올, 바이오디젤 등의 사용도 보편화될 것으로 예상했다.

〈그림 5-2〉 IMO 규제에 따른 연료별 수요 전망



자료: IEA(2020), p. 278

본 연구의 시나리오는 선행연구를 바탕으로 작성된다. IEA(2020), IMO(2020)의 연구에서 제시되었듯이 선박 운영, 기술, 연료에 따른 구분으로 시나리오를 작성한다. 이미 제4장에서 기술진보계수를 산정하여 연료소모량을 적용했기 때문에 기술에 대한 부문은 동일하게 진행되는 것으로 가정하며, EEDI 규제에 맞춰 향후 신조되는 선박의 연료 효율성도 반영한다. 선박 운영 측면은 선속 감속에 따른 효과를 측정한다. 현재 컨테이너 선속은 Czermański *et al.*(2021)의 연구에서 제시된 17노트를 사용했으나 10%, 20% 절감 시 연료소모량의 차이를 산정한다.⁴⁹⁾

49) Czermański *et al.*, *op cit.*, pp. 1-18.

현재의 HFO, LSFO와 같은 화석연료 기반의 선박 연료는 점진적으로 LNG, 메탄올 등을 사용하는 선박으로 전환될 가능성이 높다. 2021년 9월 컨테이너선 기준 총 281척(약 535만 TEU)이 발주잔량(orderbook)으로 남아있으며, 이 중 80척이 LNG 추진선인 것으로 나타났다.⁵⁰⁾

〈표 5-5〉 LNG 추진선 발주 현황

선박 크기(TEU)	컨테이너 발주잔량 (척)	발주된 컨테이너선 중 LNG 추진선 발주잔량 (척)	비중(%)
>10,000	265	66	24.9
5,100-10,000	54	10	18.5
3,000-5,100	63	-	-
<3,000	231	4	1.7
총합	613	80	13.1

자료: Alphaliner(2021a), 저자 계산

선박 연료에 대한 시나리오의 설정을 위해서 현재 LNG 추진선 발주 비중과 IMO(2020)에서 제시된 2030년, 2050년 LNG 추진선 보급률, 탄소 중립연료 사용 선박의 보급률을 이용한다. IMO(2020)의 연구에서는 두 가지 시나리오를 통해 구분했으며, 첫째 시나리오에서는 LNG를 포함한 내연기관을 이용한 비중이 2030년 55%, 메탄올·에탄올·연료전지를 사용하는 선박이 54%를 차지하며, 2050년까지 탄소중립 연료인 수소나 암모니아로 100% 전환될 것으로 예상했다. 둘째 시나리오에서는 2030년까지 LNG를 포함한 내연기관을 이용하는 선박의 비중이 1.5%에 불과하며, 2050년까지 LNG를 포함한 내연기관 및 탄소중립 연료의 비중이 각각 20%를 차지할 것으로 전망했다.

50) Alphaliner(2021a), p. 37.

〈표 5-6〉 선박연료별 신조발주 시나리오(~2050)

연료		2021년 현재	2030년	2050년
화석연료		86.9%	-	-
LNG+메탄올 등	시나리오1	13.1%	1.55%	20%
	시나리오2		54%	0%
탄소중립연료 (수소, 암모니아)	시나리오1	-	1.5%	20%
	시나리오2		0.1%	100%

주: 2021년 현재는 발주잔량 기준
자료: Alphaliner(2021a), 저자 계산

본 연구에서 제시된 시나리오는 컨테이너선에서 2050년까지 진행 가능한 시나리오를 세 가지 부문(기술/선박 운영/선박 연료보급률)으로 구분하였다. 기술부문은 본 연구에서 추정된 기술진보계수를 2050년까지 적용할 뿐만아니라 설계 시 적용되는 EEDI 수치도 동시에 고려하여 연료소모량을 추정했다. 다만 2025년(컨테이너선은 2023년) 이후 적용될 EEDI 수치는 IMO가 제시하지 않아 3단계 이후에는 기존 설계 효율이 이어지는 것으로 가정했다. 선박 운영 측면에서는 현재의 운항 속도에서 10%, 20% 저속 운항을 가정한다.

마지막 친환경 선박 보급률은 IMO(2020)의 자료를 참고하여 2050년 탄소중립 연료사용률이 20%, 100%이며 2030년까지 기존 화석연료에 비해 탄소배출이 저감되는 LNG, 메탄올 선박의 사용률은 1.55%, 54%로 가정한다. IMO의 보고서에서는 탄소를 포함하는 연료를 두 가지로 구분하였는데, 화석연료와 LNG 그리고 그 외(LNG+연료전지, 메탄올/에탄올+화석연료)로 구분하였다. 현재 발주된 LNG 추진선은 대부분 LNG와 화석연료를 사용하는 방식이며, 올해 최초로 머스크는 화석연료를 동시에 사용할 수 있는 메탄올 선박(16,000TEU급) 8척을 발주했다.

〈표 5-7〉 시나리오 종합

기술	선박 운영	신조 선박 발주량(%)			
		2030		2050	
		LNG+메탄올 등	탄소중립(수소 등)	LNG+메탄올	탄소중립(수소 등)
연간 0.5%씩 연료 효율성 향상 + EEDI 규제 적용	평균 5% 속도 감축	54.0	1.5	80.0	20.0
	평균 10% 속도 감축	54.0	0	0.0	100.0

자료: 저자 작성

제2절 시나리오에 따른 탄소 배출량

제2절에서는 총 다섯 가지의 시나리오를 이용해 2050년까지 탄소 배출량을 추정한다. 시나리오1과 시나리오2는 평균 컨테이너선 속도를 5%, 10% 줄이는 시나리오이다. 시나리오3은 IMO에서 제시된 보급률을 사용해 2030년까지 LNG 추진선 보급률이 54%, 2050년까지 무탄소 배출 선박의 발주량이 20%에 이를 것으로 예상해 탄소 배출량을 추정한다. 2021년 기준 전체 컨테이너선 중 LNG 추진선 발주량은 13.1%로, 2030년까지 매년 동일 비율씩 증가하는 것으로 가정한다. 시나리오4는 2030년까지 LNG 추진선 발주 비중이 54%까지 증가하며, 수소·암모니아 등 탄소중립 연료의 발주 비중이 2050년 100%에 이를 것으로 가정하였다. 마지막 시나리오5는 선박 속도 감축과 시나리오4의 가정을 함께 묶어서 탄소 배출량을 추정한다. 모든 시나리오는 본 연구에서 추정된 연간 0.5%씩 연료 효율성 향상과 함께 신조 선박에 대해서는 EEDI 규제를 적용한다.

〈표 5-8〉 시나리오 설정

구분	기술	선박 운영	신조 선박 발주량(선박 연료보급률)
시나리오1	연간 0.57%씩 연료 효율성 향상 + EEDI 규제 적용	평균 선속 5% 감속	-
시나리오2		평균 선속 10% 감속	-
시나리오3		-	• 2030년까지 LNG선 신조선 발주량 54% • 2050년까지 탄소중립선박 20% • 해체율 1.6/2.5/3.5
시나리오4		-	• 2030년까지 LNG선 신조선 발주량 54% • 2050년까지 탄소중립선박 100% • 해체율 1.6/2.5/3.5
시나리오5		평균 선속 10% 감속	• 2030년까지 LNG선 신조선 발주량 54% • 2050년까지 탄소중립선박 100% • 해체율 1.6/2.5/3.5

자료: 저자 작성

1. 시나리오1(선속 5% 감속)

시나리오1은 평균 선속을 17노트에서 5% 감속한 16.15노트일 때 연료 소모량의 변화를 추정했다. 선속의 감소는 선사 입장에서는 공급량을 축소하는 효과를 가져오기 때문에 시장 수급 상황을 검토해서 결정해야 한다. 또한 선속의 감소는 추가 선대 투입으로 이어질 수 있어 기존에 예상했던 선대보다 더 증가할 수 있다. 따라서 시나리오1에서 사용되는 자료는 슬롯당 컨테이너 처리량이 8.0TEU를 기준으로 한다.

선속이 5% 하락할 경우 선형별로 약 12.0%의 연료소모량 감소가 일어나는 것으로 나타났다. 3,000TEU급 이하의 평균 선박의 크기는 1,369TEU, 3,000~7,999TEU는 4,909TEU, 8,000~15,000TEU는 10,463TEU, 15,000TEU 이상은 18,671TEU로 조사되었다. 2000년 기

준 선박 크기별 평균 선령자료를 활용해 선박 연도에 따른 연료소모량을 고려했다.

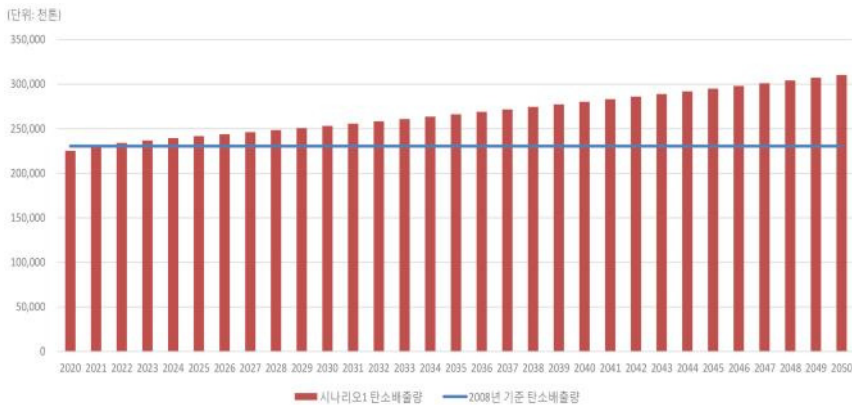
〈표 5-9〉 선속 변화에 따른 연료소모량(시나리오1)

구분		3,000<	3,000~7,999	8,000~15,000	15,000>
17노트	연료소모량	34.9	65.8	94.3	122.9
16.15 노트	연료소모량	30.7	57.9	83.0	108.1

주: 1) 건조 연도는 3,000TEU급 이상은 2005년, 3,000~7,999TEU는 2007년, 8,000~15,000TEU는 2011년 15,000TEU 이상은 2016년 기준임
2) 선박 크기별 평균 선형의 연료소모량 추정치임
자료: 저자 작성

2008년 컨테이너선의 연료소모량은 약 7,403만 톤으로 추정되는데 평균 선속이 5% 감소하는 시나리오1로 연료소모량을 추정한 결과 2050년 기준 9,968만 톤으로 예상되어 IMO의 규제를 만족시킬 수 없다. 탄소 배출량은 IMO(2020)에서 제시한 HFO와 LSHFO의 탄소 배출량인 3.114g을 적용했다.

〈그림 5-3〉 선속 5% 감축에 따른 탄소 배출량



자료: 저자 작성

2. 시나리오2(선속 10% 감속)

시나리오2는 평균 선속을 17노트에서 10% 감속한 15.3노트일 때 연료 소모량을 추정했다. 시나리오2에서도 시나리오1과 마찬가지로 슬롯당 컨테이너 처리량은 8.0TEU로 가정하였다.

〈표 5-10〉 선속 변화에 따른 연료소모량(시나리오2)

단위: %

구분		3,000<	3,000-7,999	8,000-15,000	15,000>
17노트	연료소모량	34.9	65.8	94.3	122.9
15.3 노트	연료소모량	26.9	50.6	72.5	94.5

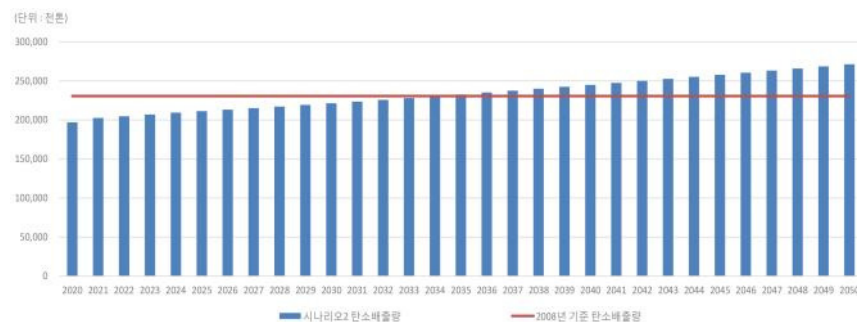
주: 1) 건조 연도는 3,000TEU급 이상은 2005년, 3,000-7,999TEU는 2007년, 8,000-15,000TEU는 2011년, 15,000TEU 이상은 2016년 기준임

2) 선박 크기별 평균 선형의 연료소모량 추정치임

자료: 저자 작성

2008년 컨테이너 선대의 탄소 배출량은 연간 약 2억 3천만 톤으로 추정되는데 시나리오2의 가정으로 추정된 탄소 배출량은 2억 7천만 톤(2050년 기준)으로 오히려 증가한다. 다시 말해 선속의 감소만으로는 IMO의 규제를 충족시키기는 어려운 것으로 판단된다.

〈그림 5-4〉 선속 10% 감속에 따른 탄소 배출량

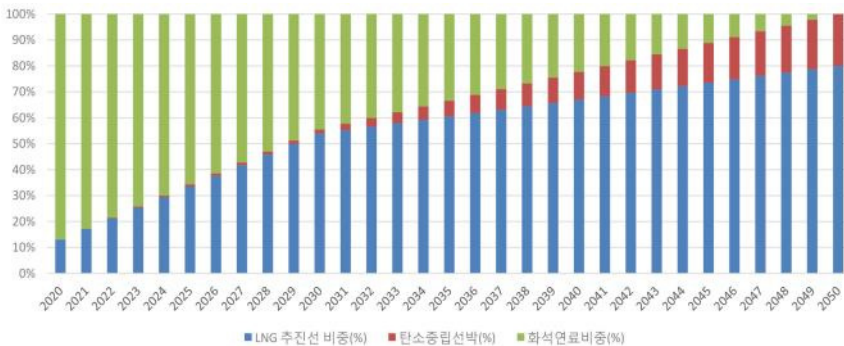


자료: 저자 작성

3. 시나리오3(친환경선박 발주 비중 2050년 20%)

시나리오3의 LNG선, 탄소중립선박(수소, 암모니아), 화석연료(HFO, LSFO)의 신조선 발주 비중은 다음과 같다. IMO(2020)에서 제시된 2030년 기준 LNG 추진선 발주 비중이 54%, 탄소중립선박이 1.5%에 달하며 2050년 탄소중립선박의 비중은 20%까지 확대될 것으로 가정했다.⁵¹⁾ 또한 해체율은 기존의 해체율인 약 1.6%, 2.5%, 3.5%를 통해 변화도를 추정했다.

〈그림 5-5〉 신조 선박 발주 비중 시나리오3



자료: 저자 작성

시나리오3의 가정을 통해 탄소 배출량을 추정한 결과 2050년 탄소 배출량은 약 3억 톤에 달해 2008년보다 늘어나는 것으로 예상된다. 해체율을 높여 친환경선박의 선대를 증가시켜도 2050년 탄소 배출량은 약 2억 톤으로 IMO의 규제를 만족시키지는 못할 것으로 예상된다.

51) IMO(2020)의 보고서에서는 보급률 개념으로 접근했지만, 본 연구에서는 신조 발주 비중으로 설정함

〈표 5-11〉 시나리오3에 따른 탄소 배출량 추정치

단위: 천 톤

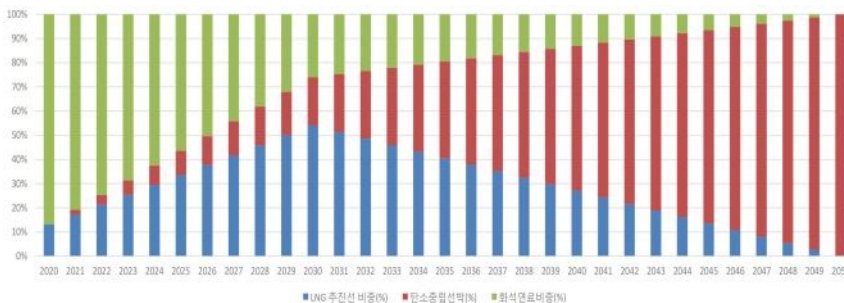
구분		2020	2030	2040	2050
2008년 탄소 배출량		230,523			
탄소 배출량	해체율 1.6%	255,982	282,176	295,778	296,644
	해체율 2.5%		272,939	271,301	248,248
	해체율 3.5%		263,107	245,249	196,736

자료: 저자 작성

4. 시나리오4(친환경선박 발주 비중 2050년 100%)

시나리오4의 LNG선, 탄소중립선박(수소, 암모니아), 화석연료(HFO, LSFO)의 신조선 발주 비중은 다음과 같다. 2030년 기준 LNG 추진선 발주 비중이 54%이며 이후 감소하며, 친환경선박은 2030년 신조 발주 비중이 20%에 달하며 2050년까지 100%까지 확대될 것으로 가정했다. 이러한 가정은 보수적인 가정으로 해체율은 기존의 해체율인 약 1.6%, 2.5%, 3.5%를 통해 변화도를 추정했다.

〈그림 5-6〉 신조 선박 발주 비중 시나리오4



자료: 저자 작성

시나리오4의 가정을 통해 탄소 배출량을 추정한 결과 2050년 탄소 배출량은 약 2억 2천만 톤에 달해 2008년보다 감소하지만 IMO 규제를 만족시키지는 못한다. 단, 해체율을 높여 친환경선박의 선대를 증가시키면 2050년 탄소 배출량은 약 8,419만 톤까지 감소할 것으로 예상된다.

〈표 5-12〉 시나리오4에 따른 탄소 배출량 추정치

단위: 천 톤

구분		2020	2030	2040	2050
2008년 탄소 배출량		230,523			
탄소 배출량	해체율 1.6%	255,982	277,154	268,686	222,413
	해체율 2.5%		266,535	237,178	155,456
	해체율 3.5%		255,233	203,641	84,188

자료: 저자 작성

5. 시나리오5(선속 감속+친환경선박 발주 비중 2050년 100%)

시나리오5는 시나리오2의 가정인 선속 10% 감속과 시나리오4를 결합한 형태이다. 2022년부터 실시될 현존선에 대한 탄소배출 규제로 인해 노후 선박은 출력제한장비를 장착하거나 저속 운항을 통해 연료소모량을 감축할 것으로 예상되어 선속 감소는 불가피할 것으로 예상된다. 또 2050년까지 IMO 규제를 만족시키기 위해서는 탄소배출이 없는 수소, 암모니아 추진선박 도입이 불가피하므로 시나리오4를 포함하였다.

〈표 5-13〉 시나리오5에 따른 탄소 배출량 추정치

단위: 천 톤

구분		2020	2030	2040	2050
2008년 탄소 배출량		230,523			
탄소 배출량	해체율 1.6%	255,982	214,737	208,226	172,641
	해체율 2.5%		205,059	182,482	119,637
	해체율 3.5%		194,757	155,082	63,221

자료: 저자 작성

제3절 소결

제5장에서는 2050년까지 연료소모량에 영향을 미칠 다양한 시나리오를 가정하고, 이에 따른 컨테이너선 탄소 배출량을 추정·전망하였다. 시나리오는 탄소 배출량 절감이 가능한 기술(친환경 연료 포함), 선대 운영에 집중했다. 정책을 통한 탄소 배출량 절감은 구체적이지 않고 변수가 너무 많아 본 연구에서는 제외했다. 선행연구에서 제시된 탄소배출 절감을 위한 주요 적용 사례들을 바탕으로 선속 감소, 기술진보, 친환경 연료 선대 확대를 가정했다. 기술진보에 대한 효과는 제4장에서 추정된 기술진보계수와 함께 EEDI 규제가 신조 선박 발주 시 적용되는 것으로 가정했다.

〈표 5-14〉 시나리오 설정

구분	기술	선박 운영	신조 선박 발주량(선박 연료보급률)
시나리오1	연간 0.57%씩 연료 효율성 향상 + EEDI 규제 적용	평균 선속 5% 감속	-
시나리오2		평균 선속 10% 감속	-
시나리오3		-	• 2030년까지 LNG선 신조선 발주량 54% • 2050년까지 탄소중립선박 20% • 해체율 1.6/2.5/3.5
시나리오4		-	• 2030년까지 LNG선 신조선 발주량 54% • 2050년까지 탄소중립선박 100% • 해체율 1.6/2.5/3.5
시나리오5		평균 선속 10% 감속	• 2030년까지 LNG선 신조선 발주량 54% • 2050년까지 탄소중립선박 100% • 해체율 1.6/2.5/3.5

자료: 저자 작성

총 다섯 개의 시나리오를 가정했으며, 각각의 시나리오에서 컨테이너 선대 대비 해체율을 1.6%, 2.5%, 3.5%로 구분하여 탄소 배출량을 추정하였다. 추정 결과 친환경선대 신조 발주 비중이 2050년 100%이고, 선속이 10% 감소하는 경우에 2008년 대비 탄소 배출량이 50%에 근접하는 것으로 나타났다.

최근 아마존, 이케아 등 대형 화주들은 2040년부터 탄소제로 선박을 이용해 화물을 운송하겠다고 발표했다.⁵²⁾ IMO의 규제보다 더욱 엄격한 기준을 화주들이 원하고 있어 선사들은 본 연구에서 제시된 시나리오보다 더욱 엄격한 규제에 대비해야 할 것이다.

52) Lloyd's List(검색일: 2021. 10. 22)

〈표 5-15〉 시나리오에 따른 탄소 배출량 추정치

단위: 천 톤

구분	2020	2030	2040	2050
2008년 탄소 배출량	230,523			
시나리오1 (선속 5% 감속)	255,982	253,212	280,267	310,412
시나리오2 (선속 10% 감속)		221,284	244,927	271,271
시나리오3 (2050년까지 친환경선박 신조 발주 비중 20%)		272,939	271,301	248,248
시나리오4 (2050년까지 친환경선박 신조 발주 비중 100%)		266,535	237,178	155,456
시나리오5 (선속 10% 감속+2050년까지 친환경 선박 신조 발주 비중 100%)		205,059	182,482	119,637

주: 시나리오3~5는 해체율이 총 컨테이너 선대 대비 2.5%인 경우
자료: 저자 작성

06

결론 및 제언

제1절 결론

1. 컨테이너선의 연식에 따른 기술진보는 0.57%로 추정

2019년 기준 컨테이너 운영 선대를 대상으로 분석한 결과, 연식에 따라 연료 효율성이 0.57%씩 향상되는 것으로 나타났다. 선형회귀분석 외에 규제선형모델인 라쏘, 릿지, 엘라스틱넷을 활용하여 검증한 결과 0.5~0.6%의 연료 효율성이 향상되어 강건한 결과가 나타났다. 또한 연료소모량이 적은 선박에서부터 많은 선박 모두에서 기술진보의 차이를 구별하기 위해 분위회귀를 활용하여 분석한 결과, 연료소모량이 높은 선박일수록 연료 효율성 향상도가 높은 것으로 나타나 선박 대형화가 진행될수록 CII의 상승분은 더 클 것으로 예상되었다.

2. 현재의 기술진보로 IMO 온실가스 배출 규제는 충족시키기 어려워

현재의 기술진보도가 향후에도 동일하게 적용한다고 가정한 결과 2050년 탄소 배출량은 2008년 대비 증가할 것으로 나타나 IMO의 온실가스 규제를 만족시키기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 기술진보 외에 선박 운항 최적화, 저속 운항과 함께 탄소중립이 가능한 연료 사용이 필요하다. 머스크가 신조 발주하여 2024년부터 운항하는 메탄올 선박, 청정연료로 사용 가능성이 높은 암모니아, 수소와 같은 연료가 보편화되어야만 탄소규제에 대응할 수 있다.

3. 에너지효율설계지수(EEDI) 규제는 지켜지고 있어

본 연구에서 컨테이너선의 연료소모량을 추정하기 위한 다양한 변수를 사용했는데 이 중 EEDI의 효과를 측정했다. EEDI가 실제로 적용된 2015~2019년 선박을 대상으로 연료 효율성 향상 효과를 추정한 결과 원래 목표치인 10%를 웃도는 것으로 나타났다. 다만 연료 소모가 큰 대형 선박일수록 EEDI 효과보다는 기술진보에 따른 효과가 더 크게 작용하는 것으로 분석되었다.

본 연구는 컨테이너 선대 전체에 대한 EEDI 분석을 실시했다는 점에서 컨테이너선 1척에 대해 검토한 Uyanik, Karatuğ, and Arslanoğlu (2020)의 연구 결과에 비해 포괄적으로 적용할 수 있다는 의의를 가진다.

4. 감속을 통한 탄소배출 감축은 단기적 대안으로 가능

5%의 평균 속도 감축으로 연료소모량은 10% 이상 감소하는 것으로 나타나 선박의 속도를 제한한 연료소모량 감축은 단기적인 대안이 될 수 있다. 하지만 속도를 줄이면 컨테이너 정기서비스의 회전을 하락으로 공급량이 하락하게 된다. 기존 아시아-북미 서부 서비스의 1루프 서비스 기간은 일반적으로 6주이나 속도를 줄인다면 7주로 증가할 수 있다. 이에 기존 6척의 컨테이너선이 투입된 서비스에서 7척이 투입되어야 하거나 기항 항만수를 조정해야 하기 때문에 선사 입장에서는 추가 선박의 건조 또는 용선에 대한 비용이 발생할 수 있다. 따라서 감속을 통한 IMO 규제 대응은 단기적으로만 가능하다.

5. 탄소배출 추정 모형의 고도화 필요

본 연구에서는 선박의 재원을 이용해 탄소 배출량을 추정했지만 선박 이동 거리, 속도에 따라 차이가 발생할 수 있는 부분은 반영하지 못했다. 향후 연구에서는 AIS를 활용해 컨테이너 선박의 이동 거리에 따른 연료소모량을 계산한 톤-마일(ton-mile)을 이용해 연료소모량을 추정하는 방안을 제안한다. 아울러 본 연구에서는 기술진보에 대한 계수를 과거의 평균 개념으로 적용했지만 시기별 진보속도를 고려하여 달리 적용하는 방안도 고려해볼 수 있다.

제2절 제언

1. ‘얼마나’보다 ‘어떻게’ 운송하는지가 중요

과거에는 얼마나 많은 선대를 보유하고 화물을 얼마나 많이 운송했는지가 선사 평가의 중요한 잣대였다. 하지만 최근에는 보유선대나 운송량도 중요하지만 어떤 연료를 사용하며 사회적으로 긍정적인 영향력을 행사하는지가 중요한 평가 기준이 되고 있다. 최근에는 화주뿐만 아니라 대형 포워더의 선사 선택 기준에 친환경선박인증 보유선대를 운영하거나 온실가스 배출을 위해 노력하는지가 포함되었다.

따라서 국적 대형 선사들은 친환경 연료 개발에 노력하고 있으나, 상대적으로 규모가 작은 중소형 선사는 대응에 어려움을 겪을 가능성이 높아 이에 대한 지원 사업이 필요하다. 이미 한국해양진흥공사에서는 친환경선박 전환 지원 사업을 진행하고 있어 규모를 확대하는 방안에 대한 검토가 필요하다.

2. 친환경 연료 수급 체계 마련

DNV은 2018년 약 1억 7천만 톤의 암모니아가 생산되었으며 세계 모든 선박에 사용될 경우 약 6억 톤이 필요한 것으로 추정하였다.⁵³⁾ 환경보호기금(Environmental Defense Fund)은 2050년까지 국제 해운부문에서 약 40%의 탈탄소화를 위해서는 최대 6조 달러가 투입되어 암모니아 생산 공장이 건설되어야 할 것으로 전망했다.⁵⁴⁾ 또한 생산 단가에서 천연가스를

53) Lloyd's List(검색일: 2021. 3. 31), KMI 재인용

54) Lloyd's List(검색일: 2021. 3. 31), KMI 재인용

이용해 암모니아를 생산할 경우 톤당 860달러이지만, 친환경기술(태양열, 풍력 등)을 이용할 경우 톤당 2,200~3,500달러가 소요될 것으로 예상되어 친환경 연료 사용에 많은 비용이 소요될 것으로 예상된다.⁵⁵⁾

사실상 해운분야에서 암모니아, 수소와 같이 친환경 연료 수급을 위해서 상당한 비용과 시간이 필요하기 때문에 준비가 없을 경우 어려움을 겪을 가능성이 높다. 특히 높은 조선 기술력을 가진 우리나라의 경우 친환경선대에 대한 건조량이 증가할 것으로 예상되기 때문에 전후방으로 연결되는 산업의 육성이 이루어진다면 시너지가 날 것으로 예상된다.

3. 과감한 규제 도입 필요

Gilbert(2014)는 근시안적이고 강도가 약한 규제는 선사들에게 다양한 대안을 줄 수 있어 실행력이 약해질 수 있다고 경고했다. 당장 내년부터 EEXI가 실시될 예정이지만 선사들의 대응은 현저히 다르다. 친환경선박 건조에 적극적으로 대응하는 선사가 있는 반면, 화석연료 사용을 고수하는 선사도 있어 시장에 혼란이 있다. 머스크는 친환경 연료 사용을 적극적으로 도입하기 위해 화석연료 사용에 대해 1톤당 450달러의 탄소배출부담금을 부과하자고 주장하지만, 중소형 선사들은 상당수 이에 대해 반대하고 있다.⁵⁶⁾

55) Lloyd's List(검색일: 2021. 3. 31), KMI 재인용

56) Lloyd's List(검색일: 2021. 9. 10)

하지만 규제가 강력하고 급진적일수록 규제를 받아들이는 선사들은 적극적으로 움직이기 때문에 탄소중립을 조기에 달성하기 위해서는 급진적이고 과감한 규제가 필요하다. 물론 이에 대응하지 못하는 개도국, 중소형 선사에 대해서는 IMO도 인지하고 있어 MEPC 제65차 회의에서 기술협력 촉진 및 관련 기술 이전에 대한 결의안이 채택되었으나 한계는 여전히 존재한다.

4. 규제에 대한 구체성, 관련 연구 필요

MEPC 회의를 통해 환경 규제가 제정되고 이를 수행하기 위한 방안이 논의되고 있지만, 규정이 구체적이지 않거나 모호해 해석에 어려움을 겪은 사례가 있다. IMO 2020에서도 비슷한 사례가 발생하였는데, 병커링 하는 항만에 저유황유가 없을 경우 어떻게 조치해야 하는가에 대한 논의 등 예상하지 못한 사례가 생길 수 있다. 그러므로 규제가 실시될 경우 이행 과정에서 발생할 수 있는 다양한 문제점이 검토되어야 한다. EEXI 규제도 2022년 말에 실시될 예정이나 2021년에도 계속 논의 중인 사안들이 있어 시장 참여자들은 혼란을 겪을 수 있다.

따라서 규제에 대한 심도 있는 연구가 필요한데, IMO는 온실가스 규제에 대해 주기적으로 관련 연구를 진행하고 배포하고 있으나 타 기관과 차이가 있는 자료들은 오히려 혼선을 줄 수 있다. 일례로 메탄올에 대한 탄소배출량은 IMO, MAN, DNV 등 연구기관마다 차이가 있어 정확한 기준이 필요하다.

5. 친환경선박 로드맵 필요

IMO의 규제를 충족시키기 위해서는 2030년 이전 탄소배출이 제로(0)인 친환경선박이 발주되어야 하며 해체량도 최근 10년간 평균보다 많을 것으로 예상된다. 따라서 이를 대체하려는 신조 발주는 자연스럽게 이루어질 것으로 예상된다. 국적 선사들도 친환경선박에 대한 수요가 발생할 것으로 예상되어 장기적인 관점에서 로드맵을 수립해야 한다. 현재는 IMO 규제에 대응하기 위해 친환경선박을 발주하려는 선사와 LNG를 통해 대응하려는 선사가 나뉘기 때문에 국적 선사들은 신조 발주에 대한 전략을 수립해야 한다.

조선소 입장에서도 향후 친환경선박 수요는 늘어날 수밖에 없다고 인지하고 있으나 일시적으로 수요가 집중될 경우 신조선가가 상승할 것으로 예상된다. 2020년 「한국형 친환경선박 추진전략」이 발표되었지만 조선부문의 준비와 관공선에 대한 친환경선 교체에 대한 내용이 주를 이루어 국적 선대의 친환경선 발주에 대한 장기 로드맵 수립이 필요하다.

6. 항만과의 협력 필요

Comer *et al.*(2017), 강무홍 외(2020)의 연구에서 제시되었듯이 정박/묘박 중일 때의 연료소모량은 총 연료소모량의 3.6~5.7%를 차지하는 것으로 나타났다. 묘박지에 있을 때는 불가능하지만 항만 내에 접안해 있을 때 육상전원공급설비(AMP: Alternative Maritime Power)를 이용할 경우 선박 연료소모량을 크게 줄일 수 있기 때문에 선사와 항만의 협력은 반드시 필요하다.

7. 해체시장 포화에 대한 준비 필요

현존선에 대한 규제가 실시되면 기존에 운항된 노후선에 대한 활용도의 축소는 불가피하다. 에너지저장장치를 장착해 운항은 가능하더라도 출력제한으로 인해 경쟁 선박에 비해 낮은 속도로 운항할 수밖에 없다. 따라서 노후선의 교체 수요는 2023년부터 크게 증가할 수 있으며, IMO의 규제에 맞추기 위해서라도 컨테이너 총 선대의 2~3% 정도 선박이 매년 해체될 것으로 예상된다. 하지만 각국의 환경 규제로 인해 해체시장을 찾기가 쉽지 않다. 과거 세계 4위의 선박 해체가 이루어졌던 중국은 폐기물 수입금지 정책을 실시해 2019년부터 외국 선박의 폐선 해체를 금지했으며, 현재는 방글라데시, 파키스탄, 인도 등에서 선박 해체가 이루어지고 있다.

2023년 컨테이너선 인도 물량은 230만 TEU 이상이며, 현존선에 대한 탄소배출 규제로 인해 기존 노후선에 대한 해체 수요가 크게 증가할 가능성이 높다. 향후 국적 선사들이 해체를 원해도 대기 물량으로 인해 지연되거나 스크랩(선박 고철)에 대한 단가가 낮아질 수 있기 때문에 이와 관련한 장기적인 전략이 필요하다.

참고문헌

국내 문헌

- 강무홍 외(2020), 「AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구」, 한국해양수산개발원, pp. 1~113.
- 고병욱(2018), 「컨테이너 해상물동량 예측 모형 연구」, 한국해양수산개발원, pp. 1~216.
- 권철민(2020), 「파이썬 머신러닝 완벽 가이드」, 위키북스, pp. 1~644.
- 김주영 외(2011), 실시간 해상 정보 취득과 연료소모량 추정을 기반으로 한 선박 경제 운항 경로 결정 방법, 한국CDE학회 학술발표회 논문집, 1, pp. 1140-1146.
- 류수영(2021), 「IMO GHG 단기 규제조치에 따른 해운선사의 대응 방안」, MACNET 발표자료, pp. 1~51.
- 오민석·양경욱(2019), 「선박의 선형을 고려한 연료소모량 산정방법」, 『유공압건설기계학회 학술대회논문집』, pp. 108~114.
- 유은섭·박개명·문두환(2018), 「오픈소스 기반 빅데이터 플랫폼을 활용한 선박 운항 효율 예측 연구」, 『한국CDE학회 논문집』, 23(3), pp. 275~284.
- 전미연(2019), 「기계 학습 기법을 활용한 선박 연료소모량 예측 모델 개발」, 부산대학교 대학원 석사학위 논문, pp. 1~64.
- 최상진 외(2010), 「선박부문 온실가스 배출량 산정에 관한 연구」, 『대한교통학회지』, 28(6), pp. 33~42.
- 최종문·노명일(2011), 유전적 프로그래밍을 이용한 선박의 연료소모량 추정식 개발, 한국CDE학회 학술발표회 논문집, 1, pp. 887~894

해양수산부(2021), 「현존선 에너지효율 규제 강화에 따른 우리나라 외항선박 EEXI 추산 결과」, MACNET 발표자료, pp. 1~33.

Cameron, A. C. & P. K. Trivedi(2010), 「Stata를 활용한 미시계량경제학」, 강창희, 박상곤 역(2017), 지필미디어, pp. 1~917.

국외 문헌

Alphaliner(2021a), monthly monitor, no.9, p.1-42

_____(2021b), weekly newsletter, no.8, p.1-23

Balcombe, P. *et al.*(2019), “How to decarbonise international shipping: Options for fuels”, *technologies and policies, Energy Conversion and Management*, 182, pp. 72-88.

Bouman, E. A. *et al.*(2017), “State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping”, *Transportation Research Part D*, 52, pp. 408-421.

Cameron, A. C. & P. K. Trivedi(2010), 『Microeconometrics Using Stata』, pp. 1-706.

Cariou, P.(2011), “Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping?”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(3), pp. 260-264.

Chang, C. C. & C. H. Chang(2013), “Energy conservation for international dry bulk carriers via vessel speed reduction”, *Energy Policy*, 59, pp. 710-715.

Comer, B. *et al.*(2017), 「Black Carbon Emissions and Fuel Use in Global Shipping 2015」, *International Council on Clean Transportation*, pp. 1-107.

Crew, J. G.(1986), “South Atlantic Container Fleet Vessel Forecasts”, *TRANSPORTATION RESEARCH FORUM*, XXVII(1), pp. 43-51.

Cullinane, K. & Khanna, M.(1999). “Economies of scale in large container ships”, *Journal of transport economics and policy*, 33(2), pp.185-207.

Czermański, E. *et al.*(2021), “An Energy Consumption Approach to Estimate Air Emis

- sion Reductions in Container Shipping”, *Energies* 2021, 14, 278, pp. 1-18.
- De Langen, P. W.(2003), “Forecasting Container Throughput”, *JOURNAL OF INTERNATIONAL LOGISTICS AND TRADE*, 1(1), pp. 29-39.
- Van Vuuren, Detlef P et al.(2011), “The representative concentration pathways: an overview”, *Climatic Change*,109:5, pp. 5-31
- DNV(2019), 「Energy Transition Outlook」, pp. 1-118.
- Ernest Czermański *et al.*(2021), “An Energy Consumption Approach to Estimate Air Emission Reductions in Container Shipping”, *Energies*, 14, 278. pp.1-18
- Fontagné, L. & J. Fouré(2013), “Opening a Pandora’s Box: Modelling World Trade Patterns at the 2035 Horizon”, CEPII Working Paper 2013-22, pp. 1~60.
- Ge, J. *et al.*(2019), “Towards 25,000 TEU vessels? A comparative economic analysis of ultra-large containership sizes under different market and operational conditions”. *Maritime Economics & Logistics, Issue Online*, 23, pp. 587-614.
- Gilbert, P.(2014), “From reductionism to systems thinking: How the shipping sector can address sulphur regulation and tackle climate change”, *Marine Policy*, 43, pp. 376-378.
- Heiu-Jou Shaw & Fu-Ming Tzu(2019), “The Strategy of Energy Saving for SmartShipping”, *Taiwan Association of Engineering and Technology Innovation*, 4(3),pp.165-176
- ICCT(International council on clean transportatin)(2020), “Potential CO2 reductions under the Energy Efficiency Existing Ship Index”, *WORKING PAPER 2020-27*, pp. 1-18
- IEA(2020), 「Energy Technology Perspectives」, pp. 1-400.
- IMO(2014), 「Third IMO GHG Study 2014」, pp. 1-296.
- _____(2020), 「Fourth IMO GHG Study 2020」, pp. 1-578.
- James J. Winebrake , James J. Corbett & Patrick E. Meyer(2007), “Energy Use and Emissions from Marine Vessels: A Total Fuel Life Cycle Approach”, *Journal of the Air & WasteManagement Association*, 57:1, pp.102-110
- Joan P. Petersen, O Winther & DJ Jacobsen(2012), “A machine-learning approach to predict main energy consumption under realistic operational conditions”,

Ship Technology Research , Volume 59, pp.64-72

- Johansson, L., J. P. Jalkanen, & J. Kukkonen(2017), "Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution", *Atmospheric Environment*, 167, pp. 403-415.
- Kun Wang, Xiaowen Fu and Meifeng Luo(2015), "Modeling the impacts of alternative emission trading schemes on international shipping", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 77, pp. 35-49
- Kwon, Y. J.(2008), "Speed Loss Due To Added Resistance in Wind and Waves", *the Naval Architect*, 3, pp. 14-16.
- Le, L.T. *et al.*(2019), "Voyage-based statistical fuel consumption models of ocean-going container ships in Korea", *MARITIME POLICY & MANAGEMENT*, pp. 1-28.
- Le, L.T. *et al.*(2020), "Neural network-based fuel consumption estimation for container ships in Korea", *Maritime Policy & Management*, 47(6), pp. 615-632.
- Lindstad, H., B. E. Asbjørnslett, and A. H. Strømman(2011), "Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds", *Energy Policy*, 39, pp. 3456-3464.
- LU, R., O. Turan, & E. Boulougouris(2013), "Voyage optimisation: prediction of ship specific fuel consumption for energy efficient shipping", Low Carbon Shipping Conference, *Naval Architecture, Ocean And Marine Engineering*, pp. 1-11.
- Luo, M., L. Fan, & L. Liu(2009), "An econometric analysis for container shipping market", *Maritime Policy & Management*, 36(6), pp. 507-523.
- Meersman, H., F. Moglia, & E. Van de Voorde(2002), "Forecasting potential throughput", *JOURNAL OF INTERNATIONAL LOGISTICS AND TRADE*, 1, pp. 29-39.
- Meng, Q., Y. Du, and Y. Wang(2016), "Shipping log data based container ship fuel efficiency modeling", *Transportation Research Part B: Methodological*, 83, pp. 207-229.
- Michael Traut, Alice Larkin & Kevin Anderson, Christophe McGlade, Maria Sharmin a &Tristan Smith(2018), "CO2 abatement goals for international shipping",

- Climate Policy*, Volume 18, 8, pp. 1066-1075
- Moreira, L., R. Vettor, and C. Guedes Soares(2021), "Neural Network Approach for Predicting Ship Speed and Fuel Consumption", *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 119, pp. 1-14.
- Nanyang Technological University(2021), 「METHANOL AS A MARINE FUEL」, pp. 1-22.
- P.W. de Langen(2003), Forecasting Container Throughput: A Method and Implications for Port Planning, *JOURNAL OF INTERNATIONAL LOGISTICS AND TRADE*, Vol.1(1), pp. 29-39
- Psaraftis, H. N. and C. A. Kontovas(2009), "CO2 emission statistics for the world commercial fleet", *WMU Journal of Maritime Affairs*, 8, pp. 1-25.
- Puisa, R.(2015), 「Uncertainty in design and operational parameters: Application of Real Options for valuation of ship design alternatives」, FAROS Consortium, 65., pp. 1-67.
- Riahi, K. *et al.*(2017), "The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview", *Global Environmental Change*, 42, pp. 153-168.
- Teurelinx, D., A. Verbeke, and E. Declercq(1998), 「De economische betekenis van zeehavenprojecten」, VUB Press, pp. 1-285.
- Tokuşlu, A.(2020), "Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) performance of a container ship", *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 7(2), pp. 114-119.
- Uyanik, T., Ç. Karatug, and Y. Arslanoğlu(2020), "Machine learning approach to ship fuel consumption: A case of container vessel", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 84, pp. 1-14.
- Wang, S. *et al.*(2018), "Predicting ship fuel consumption based on LASSO regression", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, pp. 817-824.
- Winebrake, J. J., J. J. Corbett, and P. E. Meyer(2007), "Energy Use and Emissions from Marine Vessels: A Total Fuel Life Cycle Approach", *Journal of the Air & Waste*

Management Association, 57(1), pp. 102-110.

일본 국토교통성(2020), 「국제 해양 배출 제로를 향한 로드맵」, pp. 1~24, 재인용: 한
능호 외(2020), 「글로벌 해운의 탈탄소화 전략에 관한 연구」, 『해양비즈니스』,
47, pp. 143~163.

인터넷 자료

클락슨, <https://sin.clarksons.net/Timeseries> (검색일: 2021.7.8.; 2021.7.15.; 2021.
8.31.)

Ammonia Energy Association, <https://www.ammoniaenergy.org/articles/man-ammonia-engine-update/> (검색일: 2021. 8. 30.)

ClassNK, IMO MEPC 76 차 심의속보, https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/info_service/imo_and_iacs/MEPC75_sumK_rev0.pdf (검색일: 2021.8.30.)

DNV, <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/How-newbuilds-can-comply-with-IMOs-2030-CO2-reduction-targets.html> (검색일: 2021. 8. 30.)

Github, <https://ratsgo.github.io/machine%20learning/2017/05/22/RLR/> (검색일: 2021. 8. 10; 2021. 9. 13; 2021. 10. 25.)

IHS, <https://ihsmarkit.com/index.html> (검색일: 2021.7.8.)

IMO, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx> (검색일: 2021. 8. 30.)

Lloyd's List(2021. 3. 31.), 「Ammonia: The trillion-dollar question」, <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1136320/Ammonia-The-trillion-dollar-question>(검색일:2021. 3. 31) 재인용: KMI(2021), 「주간해운시장포커스」, 515, pp. 1-32

_____(2021. 9. 8.), 「Maersk invests in bio-methanol start-up to build global supply chain」, <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1138126/Maersk-invests-in-bio-methanol-start-up-to-build-global-supply-chain> (검색일: 2021. 9. 8.)

- _____(2021. 9. 10.), 「Maersk chief says IMO should ban ships using fossil fuels」, <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1138163/Maersk-chief-says-IMO-should-ban-ships-using-fossil-fuels> (검색일: 2021. 9. 10.)
- _____(2021. 10. 22.), 「Nobody ever won an argument with a customer. Especially not when he's Jeff Bezos」, <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1138591/Nobody-ever-won-an-argument-with-a-customer-Especially-not-when-hes-Jeff-Bezos> (검색일: 2021. 10. 22.)
- PierNext(2019. 11. 28.), 「Container-ship size: What dimensions can we expect to see?」, <https://piernext.portdebarcelona.cat/en/mobility/container-ship-size/> (검색일: 2021. 9. 13.)
- Trans. info, <https://trans.info/en/what-will-be-the-structure-of-freight-transport-in-2050-road-transport-will-continue-to-grow-137607> (검색일: 2021. 6. 25.)

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 2021년

01	시민참여형 해안돌봄 정책 도입방안 연구	정지호
02	해양 플라스틱 쓰레기가 선박 운항에 미치는 영향분석 연구	김보람
03	여성어업인 노동정책 방향 연구	홍혜수
04	순환경제 시스템을 활용한 어업폐기물의 자원화 방안 연구	고동훈
05	1conomy 시대, HMR 시장 확대에 따른 수산부문 대응전략 수립 연구	마창모
06	AIS 데이터 기반 해상교통 안전 평가모델 개발 연구	황선일
07	항만 에너지 관리시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구 - 부산항 신항 전기에너지 소비를 중심으로 -	김근섭
08	해양분야 리빙랩 활성화 방안 연구	좌미라
09	빅데이터의 연계·활용을 통한 선박의 배출량 산정체계 고도화 방안 연구	안용성
10	해양공간계획 집행체계 고도화 방안 연구	최희정
11	수산물산업 푸드테크 환경분석 및 적용전략 연구	이상건
12	AIS데이터기반 해상물동량 추정 연구	황수진
13	항만부문 정책의사결정 지원 빅데이터 플랫폼 구축 방안 연구	이기열
14	항만 컨테이너 물류 프로세스 디지털화 모형 연구	서정용
15	해양수산 분야 국제산업연관표 구축기반 연구	정수빈
16	해양수산 과학기술 정책평가모형 연구 - 해양수산 R&D를 중심으로 -	전형모
17	글로벌 경제위기와 해운산업 대응체계 연구	박성화
18	항만산업 경기진단체계 구축 연구 - 경기동행지수 개발을 중심으로 -	김성아
19	전국 무역항 부두 분류 체계 개선방안 연구	이수영
20	IMO 규제기반 해사산업의 글로벌 지속발전방안 연구 - 新해사산업의 육성 및 지원을 위한 법제화 연구(5차년도) -	박한선
21	수소에너지 거점 구축을 위한 항만의 대응방안 연구	신수용

| 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 재원체계 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	수산식품 품질·안전관리 제도 개선방안 연구	이헌동
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 해산산업의 글로벌 지속발전방안 연구 - 新해산산업의경제적파급효과분석연구(4차년도) -	박한선
23	국내 항만연계 산업의 가치사슬 및 공급사슬 연계성 강화방안 - 자동차 산업을 중심으로	신수용

수시연구보고서 발간목록

Ⅰ 2021년

01	해양환경산업 육성 방안 연구	한기원
02	선원의 인권 및 근로조건 향상을 위한 선원근로감독관 제도 개선 방안 연구	허성례
03	포스트 코로나 시대를 대비하는 지역 해양축제 활성화 연구	최일선
04	회복탄력성 개념을 적용한 항만 위기관리 시스템 구축 연구	김성기
05	중대재해처벌법 시행에 따른 항만에서의 대응방안 연구	최상균
06	크루즈산업 COVID-19 방역체계 구축방안 연구	황진희
07	한국형 선주사의 최적 운영방안 연구	고병욱
08	어촌형 생활서비스 전달체계 개선 연구	이호림
09	원양산업의 ESG 도입 기초 연구	윤미경
10	수상레저활동 관리체계 개선방안 연구	홍장원
11	연안지역 자연성 회복을 위한 정책 방향_간척지·담수호 중심으로	정지호
12	스마트항만 구축에 따른 탄소저감 효과 연구 - 동력전환을 중심으로 -	김가현

Ⅰ 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

일반연구보고서 발간목록

Ⅰ 2021년

01	해양수산 정책영향평가를 위한 기초 연구	김주현
02	해양교육의 사회·경제적 가치 평가 연구	이슬기
03	해양수산업 경기진단체계 기초연구 - 해운업을 중심으로	권장한
04	선박 기술진보를 고려한 탄소 배출량 추정 연구	최건우
05	서포트벡터머신(SVM) 기법을 활용한 해운시황 예측 연구	김병주
06	크루즈 여객 수요 전망 모형 구축 연구	안승현
07	디지털 공급사슬 물류정보통합 구축전략 연구(Ⅲ)	서정용
08	수출용 전복의 유통경로 분석 연구	이정필
09	인공지능기반 해상운임 예측 연구(3차년도)	황수진
10	인공신경망모형을 이용한 양식수산물 단수 전망에 관한 연구 - 김 양식을 중심으로 -	천성훈
11	해양수산분야 미래 리스크 발굴 및 파급효과 분석 연구	박광서

Ⅰ 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

일반연구 2021-04

선박 기술진보를 고려한 탄소 배출량 추정 연구

인쇄 2021년 12월 29일

발행 2021년 12월 31일

발행인 김 종 덕

발행처 한국해양수산개발원

주 소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연락처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 영진피앤피 (02-734-3713)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 6,000원