

기본연구

2023-10

탄소배출권 거래제가 해운선사에 미치는 영향 분석 연구

A Study on the Impact of the Emission
Trading Scheme on Shipping Companies

조아현 · 이해령 · 박효수



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

탄소배출권 거래제가 해운선사에 미치는 영향 분석 연구

A Study on the Impact of the Emission
Trading Scheme on Shipping Companies

조아현 · 이해령 · 박효수



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	조아현, 이해령, 박효수
내부연구진	연구책임자 조아현 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원 공동연구원 이해령 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
외부연구진	공동연구원 박효수 University of Dayton 조교수

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

보고서 집필내역

연구책임자	조아현 연구총괄, 제1장, 제4장, 제5장, 제3장 일부
내부연구진	이해령 제2장, 제3장 일부
외부연구진	박효수 제3장 일부

발간사

2020년 9월 EU 의회에서 EU-ETS에 해운 부분을 포함하는 법안이 통과되었다. 이는 탄소중립이 전 세계적인 의제로 떠오르면서 해운 분야의 온실가스 감축 노력에 대한 필요성이 증가한 결과이다. 그러나 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입 방식 및 절차에 대한 국제 해운선사의 완강한 반대로 인해 제도의 구체적인 적용 방안에 대한 재검토가 요구되고 있다. 해운 부문은 탄소배출권 거래제를 비롯한 환경규제가 타 산업 부문에 비해서 다소 늦은 시점에 도입되고 있는 만큼 규제의 강화 속도가 매우 빠르다. 또한, 해운 부문 환경규제는 국제해사기구에 의해 전 세계 해운선사를 대상으로 강제적으로 시행되기 때문에 우리나라 해운선사와 항만 산업에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

본 연구는 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입이 해운선사와 해운 시장에 미치는 영향을 분석하고, 분석 결과를 바탕으로 우리나라 해운선사의 대응 전략을 구축하기 위한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위해, 꾸르노 모형(Cournot Model)을 기반으로 한 분석 방법론을 구축하여 해운 시장과 탄소배출권 거래제 시장에서 해운선사의 수익 극대화를 위한 최적 공급량 결정 과정과 시장 균형의 변화를 해석적 방법으로 분석하였다. 또한, 실증 데이터를 활용하여 해운 부문 탄소배출권 거래제가 해운선사와 해운 시장에 미치는 영향을 다양한 관점에서 수치적으로 검토하였다.

연구 결과에 따르면 탄소배출권 거래제의 도입은 해운산업의 온실가스 총배출량을 줄이는 것으로 나타났고, 해운 시장의 수익성에 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나, 친환경선대를 보유한 해운선사는 상대적으로 환경규제로 인한 수익의 감소 폭이 작거나 시나리오에 따라 오히려 수익이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 환경규제의 강화가 친환경선박으로의 전환에 촉진 효과가 있음을 시사한다. 특히, 정부의 지원 정책이 탄소배출권 거래제의 규제 강화와 결합될 때 국적선사의 친환경선대 전환을 더욱 촉진시킬 수 있음을 발견하였다.

이 연구는 해운선사가 퍼스트 무버(first mover)로서 적극적으로 탄소배출권 거래제에 대응해야 함을 촉구하는 중요한 근거 자료를 제공한다. 또한, 정부가 친환경선대 전환을 위한 지원책을 펼치는 경우, 선사가 자구적으로 운영비용을 절감하기 위해 노력

한다면 해운 부문 탄소배출권 거래제 하에서 시장 점유율을 높이고 이익을 창출하는 등 환경규제를 기회로 활용할 수 있음을 보여준다.

본 연구는 우리 연구원의 조아현 전문연구원이 연구 책임을 맡았으며, 이해령 전문연구원이 공동으로 연구를 수행하였다. 또한, 외부 연구진으로서 연구의 깊이를 더해 주신 데이턴 대학교(University of Dayton)의 박효수 교수님의 노고에 깊은 감사를 드린다. 이 외에도 본 연구를 위해 아낌없는 조언과 지원을 해주신 길광수 명예연구위원 및 여러 전문가들의 노고에 진심으로 감사드린다.

마지막으로, 이 연구보고서가 우리나라 해운기업이 국제 환경규제에 적절히 대응하고, 글로벌 해운 시장을 선도하는 경쟁력을 갖추는 데 기여할 수 있기를 바란다. 또한, 정부 정책 방향 설정을 위한 학술적, 실무적, 정책적 참고 자료로 널리 활용되기를 기대한다.

2024년 1월
한국해양수산개발원
원장 김 종 덕

목차

요약_i

Executive Summary_vii

01 서론_1

제1절 연구 배경 및 목적	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적	6
제2절 연구 범위 및 방법	8
1. 연구 범위	8
2. 연구 방법	9
제3절 선행연구 검토	12
1. 선행연구	12
1) 해운 부문 탄소배출권 거래제 관련 연구	12
2) 해운 외 부문 탄소배출권 거래제 관련 연구	14
3) 탄소배출권 거래제에 대한 게임이론적 접근 관련 연구	14
2. 선행연구와의 차별점	15

02 해운 부문 환경규제 동향_19

제1절 국제 환경규제 동향	19
1. EU-ETS('24~)	19
2. EEDI(Energy Efficiency Design Index)('13~)	23
3. EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index)('23~)	24
4. CII(Carbon Intensity Indicator)('23~)	24
5. FuelEU Maritime('25~)	25
제2절 국가별 환경규제 대응 동향	27
1. 한국	27

1) 제도·정책적 대응 동향	27
2) 기술개발 및 보급 지원	29
2. 유럽연합(EU)	29
1) 제도·정책적 대응 동향	29
2) 기술개발 및 보급 지원	29
3. 미국	30
1) 제도·정책적 대응 동향	30
2) 기술개발 및 보급 지원	31
제3절 국내외 해운선사 환경규제 대응 동향	33
1. 온실가스 감축 로드맵 수립	33
2. 선박 개조 및 설비 개량	33
3. 친환경선박 건조	34
4. 친환경 연료 개발 및 생산지원	36
5. 에너지 효율 개선(소프트웨어 측면)	37
제4절 시사점	38

03 탄소배출권 거래제 분석 모형 _ 41

제1절 탄소배출권 거래제 분석을 위한 모형 선정	42
1. 컨테이너 해운 시장의 특성	42
2. 분석 모형 검토 및 선정	43
1) 슈타켈버그 모형(Stackelberg Model)	43
2) 베르트랑 모형(Bertrand Model)	44
3) 쿠르노 모형(Cournot Model)	44
제2절 쿠르노 모형	46
1. 모형의 구성 요소 및 가정	46
1) 해운선사 수익 및 비용 함수	47
2) 해상 운임 및 배출권 시장 가격 함수	49
2. 쿠르노-내쉬 균형의 도출	51
3. 탄소배출권 거래제 내 무상할당 폐지 가정	52

제3절 분석 데이터	54
1. 기초데이터 수집	54
2. 해운선사 및 파라미터 설정	56
3. 해상운임 및 배출권 가격 함수 설정	57

04 탄소배출권 거래제 모형 분석 결과 _ 61

제1절 탄소배출권 거래제 영향 분석	62
1. 탄소배출권 거래제 이해관계자	62
2. 탄소배출권 거래제 모형 해석적 분석	63
1) 선사 간 대칭성 가정	63
2) 선사 간 비대칭성 가정	66
3. 탄소배출권 거래제 모형 실증적 분석	67
1) 탄소배출권 거래제 도입 시 해운선사에 미치는 영향	68
2) 무상할당량 감소 시 해운 시장 균형	70
3) 탄소배출권 가격 상승 시 해운 시장 균형	74
4) 무상할당량 감소 및 탄소배출권 가격 상승 시 해운 시장 균형	77
제2절 정부 정책의 효과	81
1. 친환경선박 선대 전환 지원 효과	81
2. 운영비용 절감 효과	84
3. 친환경선박 선대 전환 및 운영비용 지원 효과	88
제3절 환경규제 강화 시 정부 정책 효과	93
1. 무상할당량 감소 시 정부 정책 효과	93
2. 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과	96
3. 무상할당량 감소 및 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과	98
제4절 소결	104

05

결론 및 정책 제언 _ 109

제1절 연구요약 및 결론	109
제2절 학술적 기여도	114
제3절 정책·산업적 제언	116
1. 정책적 제언 및 연구 활용 방안	116
2. 산업적 제언 및 연구 활용 방안	118
제4절 연구 한계점 및 후속 연구	121

참고문헌 _ 123

부록 _ 133

표 목차

〈표 1-1〉 EU-MRV, EU-ETS 및 본 연구의 온실가스 배출량 산정 범위	8
〈표 1-2〉 선행연구와 본 연구의 차별성	17
〈표 2-1〉 EU-ETS의 단계별 주요 내용	20
〈표 2-2〉 2030 한국형 친환경선박(Greenship-K) 추진전략의 주요 내용	27
〈표 2-3〉 국제해운 탈탄소화 추진전략의 주요 내용	28
〈표 2-4〉 국내외 글로벌 '컨' 선사의 선박 온실가스 감축 로드맵	33
〈표 2-5〉 친환경 기술 탑재 추이	34
〈표 2-6〉 국내외 글로벌 '컨' 선사의 친환경선박 발주 현황	35
〈표 2-7〉 탄소중립 선박 대안연료 개발 현황 및 문제점	35
〈표 2-8〉 국내외 글로벌 '컨' 선사의 에너지 효율 개선(소프트웨어 측면) 추진 현황 ..	37
〈표 3-1〉 3대 얼라이언스의 시장점유율	43
〈표 3-2〉 가상의 4개 선사별 파라미터값	57
〈표 4-1〉 탄소배출권 거래제 도입 이후 해운 시장 균형	69
〈표 4-2〉 무상할당량 감소 시 해운 시장 균형	71
〈표 4-3〉 탄소배출권 가격 상승 시 해운 시장 균형	75
〈표 4-4〉 무상할당량 감소 및 탄소배출권 가격 상승 시 해운 시장 균형	78
〈표 4-5〉 배출계수 개선 시 해운 시장 균형(S3)	82
〈표 4-6〉 운영비용 절감 시 해운 시장 균형(S3)	86
〈표 4-7〉 배출계수 향상 및 운영비용 절감 시 해운 시장 균형(S3)	89
〈표 4-8〉 무상할당량 폐지 시 정부 정책 효과(S3)	94
〈표 4-9〉 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과(S3)	96
〈표 4-10〉 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과(S3)	98
〈표 4-11〉 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시 친환경선대 전환 효과(S3) ..	101

그림 목차

〈그림 1-1〉 해운 부문 온실가스 배출 전망 Index(2008=100)	2
〈그림 1-2〉 연구 흐름도	11
〈그림 2-1〉 EU-ETS 운영 메커니즘	21
〈그림 2-2〉 해운 부문 EU-ETS 도입 타임라인	22
〈그림 2-3〉 EU-ETS 대상 선박 운항의 범위	23
〈그림 2-4〉 2050년까지의 선박의 온실가스 집약도 제한 목표(2020년 대비)	25
〈그림 3-1〉 무상할당을 포함한 탄소배출권 거래제 모형	50
〈그림 3-2〉 무상할당을 폐지한 탄소배출권 거래제 모형	53
〈그림 3-3〉 컨테이너 운임 함수	59
〈그림 3-4〉 탄소배출권 가격 함수	59
〈그림 4-1〉 무상할당량 감소(%) 시 해운 시장 균형 변화	73
〈그림 4-2〉 탄소배출권 가격(%) 상승 시 해운 시장 균형 변화	76
〈그림 4-3〉 무상할당량 감소(%) 및 탄소배출권 가격(%) 상승 시 해운 시장 균형 변화	79
〈그림 4-4〉 배출계수(tonne/tonne) 향상 시 해운 시장 균형 변화	83
〈그림 4-5〉 운영비용(USD/tonne) 지원 시 해운 시장 균형 변화	87
〈그림 4-6〉 배출계수 향상 및 운영비용(USD/tonne) 지원 시 해운 시장 균형 변화	90
〈그림 4-7〉 무상할당량 폐지 시 정부 정책 효과(USD/tonne)	95
〈그림 4-8〉 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과(USD/tonne)	97
〈그림 4-9〉 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과(USD/tonne)	100
〈그림 4-10〉 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시 배출계수(tonne/tonne) 개선 효과	103
〈그림 4-11〉 시나리오에 따른 해운 시장 배출량 및 총이익	106

약어 목록

- BAU: Business As Usual
- CCFI(중국 컨테이너 운임 지수): China Container Freight Index
- CCUS(탄소 포집·활용·저장 기술): Carbon Capture Utilization and Storage
- CII(선박탄소집약도지수): Carbon Intensity Indicator
- DERA: Diesel Emissions Reduction Act
- ECOS: Energy Consumption Optimization System
- EEDI(에너지효율설계지수): Energy Efficiency Design Index
- EEOI(에너지효율운항지수): Energy Efficiency Operational Indicator
- EEX: European Energy Exchange
- EEXI(기존 선박 에너지 효율 지수): Energy Efficiency Existing Ship Index
- EIB(유럽투자은행): European Investment Bank
- EIV: Estimated Index Value
- EPA(환경보호국): Environmental Protection Agency
- ESD(에너지 절감장치): Energy Saving Device
- ESTs(에너지 저감을 위한 기술): Energy Saving Technologies
- EU(유럽연합): European Union
- EUA(EU 탄소배출권): EU Allowance
- EU-ETS(유럽연합 탄소배출권 거래제): European Union Emissions Trading Scheme
- EU-MRV: European Monitoring, Reporting and Verification
- IEA(국제에너지기구): International Energy Agency
- IEEC(국제에너지효율증서): International Energy Efficiency Certificate
- IMO(국제해사기구): International Maritime Organization
- MBM(시장기반조치): Market Based Measures
- META Program(해양환경 및 기술지원 프로그램): Maritime Environmental and Technical Assistance Program

-
- M-ETS(해운 부문 탄소배출권 거래제): Maritime Emission Trading Scheme
 - MTCC(해양기술협력센터): Maritime Technology Cooperation Centres
 - SEEMP(선박 에너지 효율 관리 계획): Ship Energy Efficiency Management Plan
 - TFMS: Total Fleet Management System
 - WFP: World Fleet Register

요 약

탄소배출권 거래제가 해운선사에 미치는 영향 분석 연구

조아현 · 이해령 · 박효수

1. 연구 배경 및 목적

1) 연구 배경

- 2020년 9월, EU 의회에서 2022년부터 해운 부문을 EU-ETS에 포함하는 법안이 통과되었음
- 최근 들어 탄소중립이 전 세계적인 의제로 떠오르면서 해운 분야의 온실가스 감축 노력에 대한 필요성이 증가하였음
- 이에 따라 EU와 IMO가 해운 부문 탄소배출권 거래제의 구체적인 도입 방안을 논의 중임
- 그러나, 제도의 시행 방식에 대한 국제 해운선사의 완강한 반대로 인해 구체적인 적용 방안을 재검토 중인 상황임
- IMO 해운 부문 환경규제는 전 세계에 강제적으로 적용되기 때문에 우리나라 해운선사 및 항만 산업에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상됨

-
- 해운 부문 탄소배출권 거래제의 도입이 임박하였으나, 우리나라는 아직 관련 연구나 정책적 대응이 부족한 상황임
 - 지난 2020년, IMO에 의해 시행된 선박 연료유 내 황산화물 규제에서 볼 수 있듯이, 해운 부문 환경규제는 적용되는 공간적 범위가 넓고 강제성을 가지기 때문에 영향력이 매우 큼
 - 우리나라 경제에서 항만, 해운, 조선업 등 해양 산업의 역할이 중요하고, 기여하는 비중이 크다는 점을 고려했을 때 선제적인 대응 정책 연구는 우리나라 산업의 생존을 위해 필수적
 - 국제 환경규제에 선제 대응하여 유리한 고지를 점하기 위해서는 해운 부문 탄소배출권 거래제의 도입이 미치는 영향을 분석하고 이에 근거한 정책 연구가 필요함
 - 우리나라는 아직 항만과 해운선사 모두 탄소배출권 거래제에 대한 인식 수준이 낮고 대응 단계가 미흡한 상황임

2) 연구 목적

- 본 연구의 첫 번째 목적은 해운 부문 탄소배출권 거래제 영향을 분석할 수 있는 이론 모형을 구축하는 것임
- 꾸르노 모형은 과점 상황에서 게임 참가자의 전략적 의사결정을 분석하기 위해 가장 널리 사용되는 모형임
- 제안 모형은 해운 시장과 탄소배출권 거래제 시장에서 선사의 수익 극대화를 위한 최적 공급량을 결정하고 이에 따른 시장 균형을 분석하는 모형임
- 두 번째 목적은 해운 부문 탄소배출권 거래제와 친환경선박의 도입이 해운선사와 해운 시장에 미치는 영향을 분석하는 것임
- 해운선사 관점에서는 운영비용, 배출계수 등 개별 선사의 특성에 따른 선사의 이익과 배출량 변화를 분석함

- 해운 시장 관점에서는 개별 선사의 수익 최대화를 위한 의사결정에 따른 시장 균형 상태의 총수송량, 총이익, 총배출량의 변화 등을 분석함
- 또한, 실제 데이터를 활용하여 탄소배출권 거래제의 규제 수준 강화와 정부의 국적선사 지원 정책이 선사 및 해운 시장에 미치는 영향을 수치적으로 검토함
- 마지막으로, 분석 결과를 근거로 하여 해운선사 및 정부 관점에서 환경 규제에 효과적으로 대응하기 위한 시사점을 제시함
- 이를 통해, 보다 효율·효과적으로 정부 정책을 시행하고 국내 해운선사의 경쟁력 향상 및 국제적 환경규제 대응 역량 강화가 기대됨

2. 연구 범위 및 방법

- 본 연구의 공간적 범위는 EU-MRV에 기록된 선박의 운항으로 제한
 - EU-MRV 데이터는 EU 항만(노르웨이 및 아이슬란드 포함)을 기항하는 5,000GT 초과 상선을 대상으로 수집되고 있음
 - 모형을 단순화하고 위에서 언급한 연구 목적에 집중하기 위해 컨테이너 해운 시장으로 연구의 범위를 한정하였음
- 본 연구는 꾸르노 모형을 기반으로 하여 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입에 따른 해운선사의 최적 의사결정과 그에 따른 시장 균형 상태를 분석하였음
 - 해운 부문 탄소배출권 거래제의 도입 시 배출권 무상할당이 폐지된 경우와 탄소배출권의 가격이 상승한 경우를 모형화하였음
 - 환경규제 강화 조치와 해운선사 특성에 따른 탄소배출권 거래제의 영향을 해석적 방법으로 분석하여 일반적인 시사점을 도출하였음
 - 실증 데이터를 이용하여 해석적 방법의 분석을 보완하고 각 환경규제 강화 조치와 해운선사 특성에 따른 영향을 수치적으로 분석하였음

3. 연구 결과

1) 탄소배출권 거래제가 해운선사에 미치는 영향

- 탄소배출권 거래제 도입 시 배출권의 무상할당량의 감소와 배출권 가격의 상승은 해운 시장의 총배출량을 줄임
 - 무상할당량을 전량 폐지하면 7%, 배출권 가격을 현재의 3배 수준인 USD 272까지 올리면 9%의 총배출량이 각각 감소하며, 두 조치를 함께 시행하면 총 24%의 배출량이 감소함
- 탄소배출권 거래제가 도입되고 규제 수준이 강화됨에 따라 해운 시장 전체의 이익은 크게 감소함
 - 친환경선박을 보유한 선사는 상대적으로 수익의 감소 정도가 적게 나타나, 환경규제의 강화가 친환경선대로의 전환을 촉진하는 효과가 있음
 - 다만, 선사 간 배출계수 차이에 따른 이익 증가 효과는 운영비용 저감에 따른 이익 증가 효과에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타남

2) 국적선사에 대한 정부 정책 효과

- 정부 정책에 의한 국적선사의 친환경선대 전환을 가정하면 국적선사의 배출량은 크게 감소하고 이익은 증가하는 것으로 나타남
 - 구체적으로, 국적선사의 배출계수를 현 수준 대비 25% 수준으로 낮추면, 국적선사의 배출량은 약 75% 감소하고, 이익은 약 30% 증가함
 - 국적선사의 친환경선대 전환으로 인해, 해운 시장의 총배출량도 약 16% 감소하나, 경쟁 선사의 배출량에는 큰 영향을 미치지 않음
 - 국적선사의 총이익은 약 30% 증가하지만, 경쟁 선사와 비교했을 때 배출계수 경쟁 우위에 따른 극적인 수익 상승은 나타나지 않음

- 한편, 정부 지원으로 국적선사의 운영비용이 저감되면, 해당 선사의 수송량, 배출량, 이익은 크게 증가함
 - 국적선사의 운영비용이 현 수준 대비 약 30% 감소하면, 국적선사의 수송량과 배출량은 모두 약 300% 증가하며, 수익은 약 500% 증가함
 - 또한, 국적선사의 운영비용 감축으로 인한 경쟁 우위로 인해 다른 경쟁 선사의 생산량, 배출량, 총이익이 상당히 감소하는 경향을 보임
- 정부의 친환경선대 전환 지원 정책과 함께 선사의 자구적인 노력으로 운영비용이 감소될 경우, 친환경선대의 수익 증대 효과가 더욱 강조됨
 - 배출계수 개선과 동시에 운영비용을 낮추면, 국적선사의 배출량은 약 33% 감소하고, 수익은 무려 약 600% 증가함
 - 이에 따라, 전체 해운 시장의 총배출량은 약 35% 감소하고, 총수익은 약 35% 증가하는 등 시장에 매우 큰 영향을 미침
 - 이는 정부가 친환경선대 전환 지원 정책을 시행할 시, 선사가 자구적인 운영비용 절감 노력을 통해 큰 이익을 창출할 수 있음을 의미함

3) 환경규제 강화 시 정부 정책 지원 효과

- 탄소배출권 거래제의 무상할당량이 폐지되면 정부 정책의 효과가 더욱 강화되는 것으로 나타남
 - 정부 정책의 효과는 선사에 대한 친환경선대 전환 지원과 운영비용 절감 지원이 함께 이루어지는 경우를 전제함
 - 무상할당량이 폐지되었을 때 정부 정책 시행으로 인한 해운 시장의 총배출량이 더욱 감소하는 것으로 나타남
 - 해운 시장 전체의 총이익은 다소 감소했지만, 친환경선사의 이익은 오히려 약간 증가하였음

-
- 탄소배출권 거래제의 무상할당량이 감소하는 경우 정부의 지원 정책이 국적선사의 친환경선대 전환을 더욱 촉진할 수 있음을 시사함
 - 탄소배출권의 가격 상승 역시 정부 정책의 효과를 더욱 강화
 - 정부 정책만 시행했을 때보다 탄소배출권 가격이 함께 상승하는 경우 해운 시장의 총배출량이 더욱 감소하고 친환경선사의 이익이 크게 증가함
 - 이 또한, 탄소배출권의 가격이 상승하는 상황에서 정부의 지원 정책이 국적선사의 친환경선대 전환을 더욱 촉진할 수 있음을 시사함
 - 마지막으로, 탄소배출권 거래제의 규제 수준이 강화되고 친환경선대 전환을 위한 정부 정책 및 국적선사의 운영비용 절감 노력이 합해지면 수익 증가 및 배출량 감소 효과가 가장 극대화되는 것으로 나타남
 - 정부 정책 없이 환경규제만 강화된 상황과 비교하면, 해운 시장의 전체 총배출량이 약 60% 감소하는데, 이는 주로 국적선사의 경쟁 우위로 인해 타 선사가 수송량을 줄이면서 배출량이 감소했기 때문임
 - 국적선사는 배출계수 및 운영비용의 경쟁 우위에 따라 수송량을 늘리면서 배출량이 증가하였고, 수익도 크게 증가하였음
 - 이 연구 결과는 해운선사가 퍼스트 무버(First mover)가 되어 보다 적극적으로 탄소배출권 거래제에 대응할 것을 촉구하는 근거가 됨
 - 반면, 모든 시나리오에서 정부가 친환경선대 전환을 위한 지원책을 펼치더라도 선사의 운영비용 절감 노력이 없으면 정책 효과는 반감됨
 - 분석 결과에 따르면, 환경규제가 강화되고 배출계수를 경쟁 선사 대비 75% 줄였다고 하더라도, 운영비용이 경쟁 선사 대비 약 15% 정도 높은 경우, 총이익은 경쟁 선사와 거의 비슷한 수준으로 도출되었음
 - 향후 해운선사 특성 및 컨테이너 운임 함수와 환경규제 강화에 따른 배출권 가격 함수가 변화할 경우에는 배출계수의 효과가 더욱 강조될 가능성이 높음

EXECUTIVE SUMMARY

A Study on the Impact of the Emission Trading Scheme on Shipping Companies

Ah-Hyun Jo · Hyeryeong Lee · Hyosoo (Kevin) Park

1. Research Background and Purpose

1) Research Background

- In September 2020, the European Parliament passed a bill to include the maritime sector in the EU Emissions Trading Scheme (EU-ETS) starting from 2022.
- As carbon neutrality becomes a global agenda, the need for greenhouse gas reduction in the maritime industry has increased.
- Consequently, the EU and IMO are discussing specific implementation plans for a carbon emission trading system in the maritime sector.
- However, due to strong opposition from international shipping companies regarding the method of implementation, the specific application plans are currently being reconsidered.

-
- Since IMO's environmental regulations for the maritime sector apply globally, it is expected that the ETS will significantly impact Korean shipping companies and port industries.
 - Despite the imminent introduction of ETS in the maritime sector, South Korea lacks related research and policy responses regarding this matter.
 - As seen in the fuel oil sulfur regulation introduced in 2020 by the IMO, environmental regulations in the maritime sector, being widely applicable and mandatory, have significant impacts.
 - Considering the significant contribution and essential role of the maritime industries such as ports, shipping, and shipbuilding in the South Korean economy, proactive policy research is essential for the survival of related industries.
 - To gain a strategic advantage in coping with maritime environmental regulations, it is necessary to analyze the impact of the maritime ETS and conduct policy research based on the result of research.
 - South Korea's understanding and preparedness levels regarding carbon emissions trading schemes in both ports and shipping companies are still insufficient.

2) Research Purpose

- The primary purpose of this study is to develop a theoretical model capable of analyzing the impact of maritime ETS.

- The Cournot model is the most widely used model to analyze strategic decision-making process among participants in an oligopoly market.
- The proposed model aims to determine the optimal supply quantity for shipping companies in both the maritime market and the carbon emissions trading market, maximizing their profits and analyzing the resulting market equilibrium.
- The second purpose is to analyze the impact of the introduction of maritime ETS and eco-friendly vessels on shipping companies and the shipping market.
- From the perspective of shipping companies, the study analyzes changes in profits and emissions based on individual company characteristics such as operating costs and emission factors.
- From the perspective of the shipping market, the study analyzes changes in total transportation volume, total profit, and total emissions resulting from decision-making aimed at maximizing individual shipping companies' profits.
- Furthermore, this study empirically examines the impact of intensified regulation of the maritime ETS and government policies supporting national shipping companies using actual data.
- Lastly, based on the analysis results, the study aims to provide implications for effective responses to maritime environmental regulations from the perspectives of both shipping companies and the government.

-
- This effort is expected to contribute to the more efficient implementation of government policies, enhance the competitiveness of South Korean shipping companies, and strengthen their capacity to respond to international environmental regulations.

2. Research Scope and Methods

- The spatial scope of this study is limited to ship operations recorded in EU-MRV.
- EU-MRV data are collected on merchant ships over 5,000GT calling at EU ports (including Norway and Iceland).
- To simplify the model and focus on the aforementioned research objectives, the study's scope has been confined to the container shipping market.
- Based on the Cournot model, this study analyzed the optimal decision-making process of shipping companies and resulting market equilibrium concerning the introduction of maritime ETS.
- The model is structured to simulate scenarios where free allocation of emission permits was abolished upon the implementation of carbon emissions trading and where carbon prices increased.
- Analytical methods are employed to interpret the effects of maritime ETS based on strengthened environmental regulations and shipping company characteristics, deriving general implications.

- Empirical data are used to complement the analytical approach and numerically assess the impacts of each strengthened environmental regulation and shipping company characteristic.

3. Research Results

1) The Impact of maritime ETS on Shipping Companies

- The introduction of the maritime ETS, with reduced free allocation and increased permit prices, reduces total emissions in the shipping market.
- Completely abolishing free allocation reduces emissions by 7%, and tripling the current allowance price to USD 272 reduces emissions by 9%. Implementing both measures together reduces emissions by 24%.
- As the maritime ETS is introduced and regulatory standards are strengthened, the total profits in the shipping market decline significantly.
- Shipping companies with eco-friendly vessel fleets show relatively smaller decreases in profits, indicating that stronger environmental regulations promote the transition to environmentally friendly ships.
- However, the profit increase due to the difference in environmental coefficients among shipping companies appears relatively smaller compared to the profit increase in operational costs reduction.

2) Effectiveness of Government Policies for National Shipping Companies

- Assuming national shipping companies transition to eco-friendly vessel fleets due to government support, these companies demonstrate a significant reduction in emissions and increased profits.
 - Specifically, reducing the emission coefficient of national shipping companies by 25% from current levels results in approximately a 75% decrease in emissions and a 30% increase in profits.
 - While the transition to eco-friendly fleets by national shipping companies reduces the total emissions of the shipping market by about 16%, it does not significantly affect the emissions of competing shipping companies.
 - Although the total profit of national shipping companies increases by approximately 30%, there is no dramatic profit increase due to the competitive advantage in emission coefficients compared to competing companies.
- On the other hand, if the operational costs of national shipping companies are reduced with government support, it leads to a substantial increase in their transportation volume, emissions, and profits.
 - If the operational costs of national shipping companies decrease by approximately 30% compared to current levels, their transportation volume and emissions both increase by around 300%, and profits surge by about 500%.

- Furthermore, the reduction in operational costs for national shipping companies creates a competitive advantage, causing a considerable decrease in production volume, emissions, and total profits of other competitive companies.
- When government support for the transition to eco-friendly fleets is combined with the company's own efforts to reduce operational costs, the profitability increase from eco-friendly fleets is further emphasized.
- A simultaneous improvement in emission coefficients and reduced operational costs results in a roughly 33% decrease in emissions for national shipping companies and an astounding approximately 600% profit increase.
- Consequently, the entire shipping market experiences a roughly 35% decrease in total emissions and approximately a 35% increase in total profits, showcasing a significant impact on the market.
- This implies that with the implementation of government-supported policies for eco-friendly fleets, shipping companies can generate substantial profits through their own efforts to reduce operational costs.

3) The Effect of Government Policy Support under Strengthened Environmental Regulations

- When the free allocation of carbon emission permits in maritime ETS is abolished, it is evident that the effects of government policies is further enhanced.

-
- The effect of government policies refers to their joint impact with the transition to eco-friendly fleets and reduction of operational costs.
 - The abolishment of free allocations results in a more substantial decrease in the total emissions within the shipping market compared to when solely government policies are implemented.
 - While the overall profit of the shipping market slightly decreases, the profits of eco-friendly carriers actually increase.
 - This indicates that government policies could further drive the transition to eco-friendly fleet among national carriers if free allocations in maritime ETS were removed.
 - Likewise, an increase in emission permit prices would amplify the effects of government policies.
 - When the emission permit price rises, along with the implementation of government policies, the total emissions of the shipping market decrease even more, and the profits of eco-friendly shipping companies increase significantly.
 - This also suggests that the government policy could strongly promote the transition to eco-friendly operations among national carriers when carbon credit prices are on the rise.
 - Lastly, when the maritime ETS's regulatory standards strengthen in conjunction with government policies supporting the transition to eco-friendly fleet and cost reduction efforts by national carriers, it maximizes the policy's effects.

- Compared to scenarios without regulatory reinforcement and government policies, the total emissions in the shipping market decrease by approximately 60%, mainly due to the competitive advantage of national shipping companies leading other companies to reduce transport volume and emissions.
- National shipping companies witness increased emissions and substantial profits, predominantly due to their competitive advantages in emission coefficients and operational costs.
- These research findings urge shipping companies to more actively embrace strategies in response to the maritime ETS as a first mover, based on the evidence presented.
- Conversely, even if the government extensively supports the transition to eco-friendly fleet, the policy's effectiveness diminishes without shipping company's own efforts to reduce operational costs in all scenarios.
- Research results indicate that despite a 75% reduction in emission coefficients compared to competitors, if operational costs are approximately 15% higher than competing companies, the total profit is almost similar to that of competing companies.
- In the future, as the characteristics of shipping companies and container freight functions change along with strengthened environmental regulations and changes in the price function of emission permits, the effect of emission factors is likely to be further emphasized.

01

서론

제1절 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경

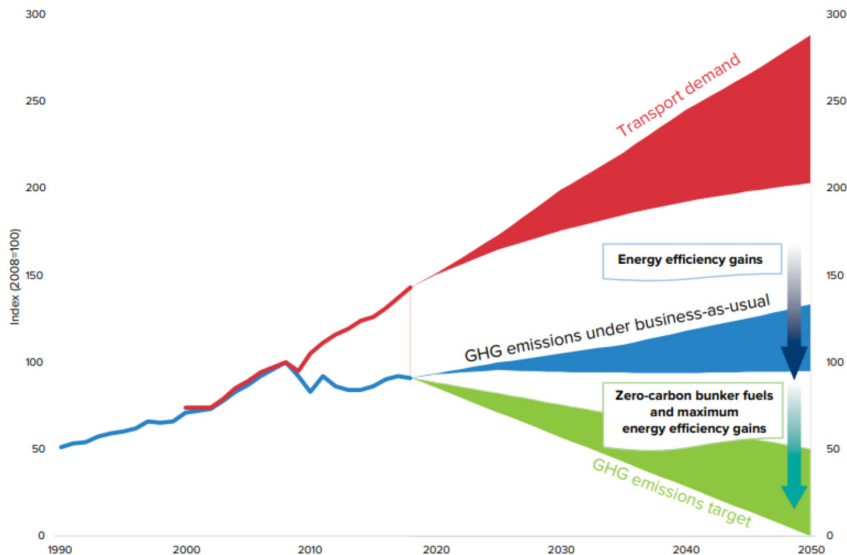
2016년, 신 기후체제인 파리협정은 기존 교토의정서 기반의 탄소배출량 저감 대책의 한계를 극복하기 위해 체결되었다. 이에 따라 선진국과 개발도상국 모두가 온실가스 감축에 참여하는 보편적 기후 체제가 수립되었다. 파리협정 발효 이후, 우리나라를 포함하여 유럽연합(EU: European Union), 중국, 일본, 미국 등 세계의 많은 국가가 탄소중립을 선언하였으며 탈탄소 사회 전환을 위해 온실가스 배출규제를 강화하고 있다. 이러한 상황 속에서 해운 부문 역시 환경규제로부터 자유롭지 않은 실정이다.

국제사회가 탈탄소화를 추진 중인 것에 비해 해운 부문의 이산화탄소 배출량은 좀처럼 줄지 않고 있다. 또한, 해운 부문이 타 산업 대비 온실가스 배출량 저감을 위한 대책 마련도 늦은 것이 사실이다. 2018년 기준, 해운 부문은 총 10.6억톤의 이산화탄소를 배출했으며, 이는 전 세계 인위적 이산화탄소 총배출량(Global Anthropogenic Emissions)의 2.89%를 차지한다(국제해사기구(IMO: International Maritime Organization),

2021). 또한, 해운 부문의 이산화탄소 배출량은 2012년부터 2018년까지 배출량의 연평균 증가율이 1.57%로 전 세계 이산화탄소 총배출량의 증가율 대비(0.84%) 높은 증가세를 보였다(IMO, 2021). 뿐만 아니라 국제 에너지기구(IEA: International Energy Agency)에 따르면, 국제해운 부문은 2019년과 2020년, 이산화탄소 배출량이 일시적으로 감소세를 보였으나 2021년부터 다시 반등하여 2022년에는 2017년~2018년 수준으로 복구한 것으로 나타났다.¹⁾ 따라서 해운 부문의 탈탄소화 노력이 시급한 상황이며, 해운 부문 환경규제는 더욱 강화될 것으로 전망된다.

현재 해운 부문 온실가스 감축을 위한 환경규제는 IMO와 EU가 앞장 서서 주도하고 있다. 일례로 2023년 7월, IMO는 ‘2023 온실가스 감축

〈그림 1-1〉 해운 부문 온실가스 배출 전망 Index(2008=100)



자료: Brown et al.(2022.5.12.)(검색일: 2023.10.24.)

1) IEA(검색일: 2023.8.14.)

전략'을 통해 2008년 총배출량 대비, 2030년까지 최소 20%, 2040년까지 최소 70%, 2050년경에는 Net-Zero를 달성하겠다는 목표를 설정하며 해운 부문 온실가스 감축 의지를 확신했다(해양수산부·한국해사협력센터, 2023). EU는 2024년부터 해운 부문의 유럽연합 탄소배출권 거래제(EU-ETS: EU-Emission Trading Scheme) 편입을 확정하는 등 선박을 대상으로 하는 배출량 규제를 본격화할 것임을 밝혔다. 이처럼 탄소 배출은 기업과 산업에게 더 이상 단순한 도덕적 의무나 우려가 아닌 고객과 이해관계자들에 의한 실질적인 압력으로 작용하고 있다.

한편, 2024년부터 해운 부문에도 확대 적용될 예정인 EU-ETS는 오염자 지불(polluter pays) 원칙에 기반한 탄소 배출 저감 방안 중 하나로, 정부가 배출권 거래 대상 기업에게 연간 배출허용총량(Emission Cap)을 할당하고, 이후 대상 기업들이 각자 부여받은 배출량에 대하여 잉여 또는 부족분이 발생할 경우 배출권을 시장 거래를 통해 확보하도록 하는 규제방식이다. 배출권거래제도는 시장 원리를 기반으로 개별 기업이 효율적으로 온실가스 감축 목표를 달성할 수 있도록 하는 방안으로, 정보 비용의 감소, 높은 경제적 유인, 배출권 총량으로 인한 구체적 배출량 감소 효과 등의 이점이 존재하여 탄소부담금이나 벌금과 같은 규제보다 효과·효율적인 제도라 할 수 있다(Stern, 2008; Keohane, 2009; Aldy et al., 2010; Zhang et al., 2016; Ding et al., 2020).

해운 부문 탄소배출권 거래제가 본격적으로 시행되면 이는 해운선사에게 직접적인 부담으로 작용할 것이다. 관련 선행연구를 살펴보면, 김진형(2022)은 해운 부문 EU-ETS 시행시 EU 역외 50% 및 역내 100% 범위를 기준으로 연간 61.8억 유로, EU 역내외 모두 100% 기준으로는 연간 93.4억 유로의 추가 비용이 발생할 것으로 추정하였다. 김한나 외(2022)는 IMO에서 탄소배출권 거래제를 도입할 경우 국내 해운선사의 전체 비용부담액은 연평균 최대 8,307억 원, 최소 2,163억 원이 발생할 것이라 추산하였다.

또한, 환경규제에 따른 해운기업의 부담 증가 및 물류비용 증가는 우리나라의 무역 경쟁력 악화로 이어질 우려가 있다. 우리나라 수출입 물동량의 99.7%²⁾가 해상운송으로 처리되고, 2022년 상반기 우리나라가 선박 수주실적 세계 1위를 기록³⁾하는 등 해양 산업의 국내 경제 기여도는 상당히 높다. 이러한 점을 고려했을 때 배출권 거래제에 대한 선제적 대응방안에 관한 연구는 우리나라 해운산업의 생존을 위해 필수적이라 할 수 있다.

위와 같은 해운 부문 탈탄소화 규제 강화에 대응하기 위해 해양수산부는 관계부처와 함께 2023년 2월 14일, 「국제해운 탈탄소화 추진전략」을 발표하였다. 이를 통해 해양수산부는 국제해운 부문의 2050년 탄소중립 실현 의지를 표명하고 국제해운 탈탄소화를 위한 선제적 대응방안을 제시하였다. 다만, EU의 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입이 임박했음에도 불구하고, 제시된 추진과제들은 친환경선박·연료 전환과 관련된 내용이 주를 이루고 있다. 반면, 탄소부담금, 탄소배출권 거래제 등 시장기반·지역기반 규제 시행에 대한 전략적 대응 방안은 다소 미흡한 실정이다. 뿐만 아니라 Maersk, MSC 등 주요 국제 해운선사들은 친환경선박 전환과 함께 친환경 연료 개발·생산 등에 대한 투자도 함께 진행 중인 반면, 국내 해운선사들의 경우 국제 해운선사에 비해 대응책이 미흡한 편이다.

우리나라는 친환경선대로 전환하기 위한 로드맵 구축, 친환경연료 공급망 확보, 탄소배출권 거래제 등 시장기반조치에 대한 제도적인 이해, 시장기반조치에 따른 영향력 분석 등의 측면에서 상대적으로 대응이 미흡하다. 국내 선사가 보유한 친환경선박은 약 18척으로, 전 세계 선진 해운국이 보유한 친환경선박이 LNG 추진선 311척, 메탄올 추진선이 19척인 것에 비하면 친환경선대로의 전환은 초기단계 수준이다(해양수산부, 2023). 일부 대형선사는 LNG 추진 탱커선, 벌크선 등을 도입하여 운영 중이지만, 대다수

2) 2021년, 중량기준. 통계청(검색일: 2023.1.3.)

3) 산업통상자원부 보도자료(2022.7.6.)(검색일: 2023.1.3.)

중소형선사는 환경규제에 대한 이해 및 자본의 부족으로 인해 친환경선박의 도입을 미루고 있는 상황이다. EU-ETS 등 선제적으로 독자적인 제재 조치를 시행하고 있는 유럽지역에 운항 중인 국내 해운선사의 선박에 대해서도 아직 친환경선박으로의 전환은 시작되지 않았다. 해운선사는 최근 운임하락, 미래 연료의 불확실성 등으로 투자를 주저하고 있는 실정이다.

또한, 해운 부문 탈탄소화 관련 정책 실무자, 해운선사, 한국선급 등 관계자 인터뷰에 따르면 현재 국내에서 시행 중이거나 시행 예정인 정책에 대해서 이해당사자 간 일부 입장 차이가 존재하는 것으로 보인다. 관계 부처에서는 해운 부문 환경규제에 대응하기 위해 관계 기관 협의체를 주관하고 의견을 수렴하고자 하여도 국내 선사 측에서 적극적으로 협력하지 않는다고 어려움을 토로한다. 반면, 해운선사 입장에서는 현재 시행 중인 정책 및 지원안은 일부 선사에게만 해당하는 조건을 포함하고 있기 때문에 대다수인 중소형선사에게는 적절하지 않다는 의견을 내고 있다. 즉, 중소형선사는 환경규제 대응과 관련한 논의에서 소외되고 있다는 것이다. 이러한 논쟁은 환경규제에 대한 이해 정도가 각 주체마다 다르고, 문제를 바라보는 관점도 다르기 때문에 발생하는 것으로 보인다. 따라서, 해운 부문 환경규제에 대한 정확한 이해가 선행되어야 하며, 환경규제의 영향에 대한 분석과 이에 대한 합의가 명확하게 이루어져야 다음 단계인 합리적인 대응방안에 대한 건설적인 논의가 가능할 것으로 생각된다.

해운 부문 탄소배출권 거래제 도입에 대응하기 위한 실효성 있는 방안을 도출하기 위해서는 먼저 탄소배출권 거래제 도입 상황에서 선사 및 시장이 받게 될 영향을 검토해볼 필요가 있다. 탄소배출권 거래 시장은 시장 참여자, 즉, 선사 간 잉여 및 부족분에 대한 거래가 가능한 구조이다. 따라서 탄소배출권 거래제 도입 시 선사들은 기존의 물동량 경쟁 외 탄소배출권 거래를 함께 고려하여 각자의 수익 극대화를 추구하게 되며, 이 과정에서 각 선사는 전략적 상호작용을 하게 된다. 이와 같은 해운 부문 탄소배출권

거래 시장을 모사하기 위해서는 수학적 모형 기반의 이론 모형 구축이 필요하다. 또한 실제 데이터 기반의 수치적 분석을 바탕으로 해운선사 및 정부 관점에서 해운 부문 환경규제에 신속하고 적극적으로 대응할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다.

2. 연구 목적

본 연구의 목적은 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입에 따른 해운선사 및 해운 시장에 미치는 영향의 정량적 분석을 위한 이론 모형을 구축하고, 실제 데이터를 활용한 분석을 바탕으로 탄소배출권 거래제가 해운선사 및 시장에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 또한, 분석 결과를 바탕으로 선사 및 정부 차원에서 탄소배출권 거래제 도입에 효과적으로 대응하기 위한 시사점을 제시하고자 한다. 본 연구의 세부적인 목적은 다음과 같다.

첫째, 꾸르노 모형을 기반으로 하는 해운 부문 탄소배출권 거래제 영향 분석 모형을 구축한다. 해운 부문 탄소배출권 거래제의 도입 형태가 아직 구체적으로 결정되지 않았으므로, IMO와 EU에서 논의되고 있는 탄소배출권 거래제 도입 계획을 고려하여 탄소배출권 무상할당량 폐지와 탄소배출권 가격 상승에 따른 영향을 분석할 수 있는 모형을 구축한다.

둘째, EU-MRV(Monitoring, Reporting and Verification)의 실제 데이터를 활용하여 해운 부문 탄소배출권 거래제와 친환경선박의 도입이 해운선사와 해운 시장에 미치는 영향을 분석한다. 구체적으로, 해운선사 관점에서는 운영비용, 배출계수 등 개별 선사의 특성에 따른 선사의 이익과 배출량 변화를 분석한다. 해운 시장 관점에서는 개별 선사의 수익 최대화 목적의 의사결정에 따른 시장 균형 상태의 총수송량, 총이익, 총배출량의 변화 등을 분석한다. 또한, 탄소배출권 거래제의 규제 수준 강화와 정부의 국적선사 지원 정책에 따른 선사 및 해운 시장의 영향을 살펴본다.

셋째, 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입에 따른 영향 분석 결과를 근거로 하여 선사 및 정부 관점에서 환경규제에 효과적으로 대응하기 위한 시사점을 제시한다. 이를 통해, 본 연구가 보다 효율·효과적으로 정부 정책을 시행하고 국내 해운선사의 경쟁력 향상 및 국제적 환경규제 대응 역량 강화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

제2절 연구 범위 및 방법

1. 연구 범위

본 연구는 EU-MRV 데이터를 활용하여 탄소배출권 거래제 도입이 해운 선사 및 시장에 미치는 영향을 분석하고, 실제 데이터를 바탕으로 한 시사점을 제공한다. EU-MRV 데이터는 EU 항만(노르웨이 및 아이슬란드 포함)을 기항하는 5,000GT 초과 상선을 대상으로 온실가스 배출과 관계된 정보들을 포함하고 있다. 따라서 본 연구의 공간적 범위는 EU-MRV에 기록된 선박의 항해로 제한한다. 다만, EU-MRV는 EU 권역 내 선박 운항과 EU 외 항만으로부터 또는 EU 외 항만으로의 운항 모두 100%를 기록하고 있다. 반면 해운 부문 EU-ETS의 경우 EU 권역 내 선박 운항으로 발생한 온실가스의 100%, EU 외 항만으로부터 또는 EU 외 항만으로의 운항에 대해서는 50%만 배출권 구매 대상으로 한다. 하지만 현 시점에서 EU-MRV에 기록된 선박의 운항 범위를 구분하여 추적하기는 어려우므로, 본 연구는 EU-MRV에 기록된 모든 배출량을 기준으로 분석을 수행했다.

〈표 1-1〉 EU-MRV, EU-ETS 및 본 연구의 온실가스 배출량 산정 범위

적용 범위	EU-MRV	EU-ETS	본 연구
EU/EEA 권역 내 운항에 의해 발생하는 온실가스	100%	100%	100%
EU/EEA 권역 바깥으로부터 또는 바깥으로 향하는 운항에 의해 발생하는 온실가스	100%	50%	100%

자료: DNV(2023.1.23.), (검색일: 2023.4.19.)

또한 해운산업은 컨테이너, 액체화물, 건화물, 일반화물 등 화물의 성격에 따라 해운선사의 특성과 시장의 특성이 매우 상이하기 때문에 모든

선종을 포괄하는 모형을 구축하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 모형을 단순화하고 위에서 언급한 연구 목적에 집중하기 위해 컨테이너 해운 시장으로 연구의 범위를 한정했다.

2. 연구 방법

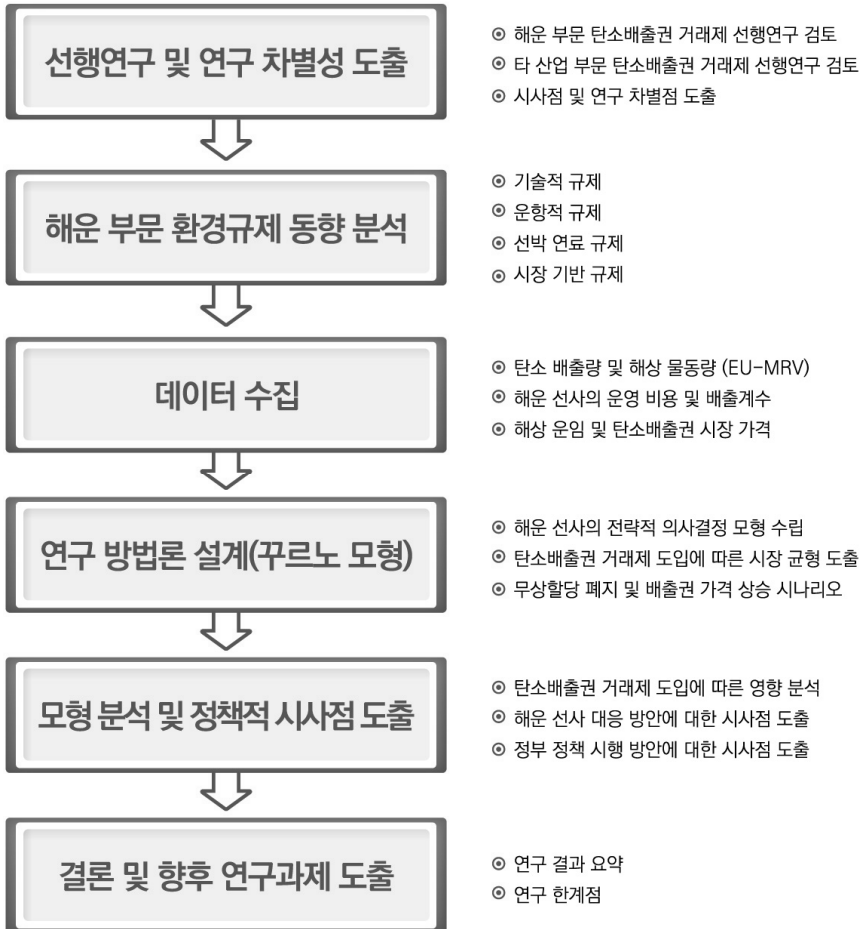
해운 부문 탄소배출권의 도입에 따른 해운선사의 최적 의사결정과 그에 따른 시장 균형 상태를 분석하기 위해 본 연구는 꾸르노 모형을 기반으로 하여 해운선사가 화물의 수송량과 탄소배출권의 거래량을 결정하는 분석 모형을 고안했다. 꾸르노 모형은 시스템 내에서 각 기업이 생산량에 대한 의사결정을 바탕으로 시장에서 경쟁하는 것을 가정한 모형이다. 분석 결과는 탄소배출권 거래제에 대한 해운선사의 대응 방안과 시장 관리자의 환경 규제 대응 정책 수립에 대한 시사점을 제공할 것으로 기대된다. 문헌에 따르면 실증 데이터와 꾸르노 모형을 결합하여 도출한 내쉬 균형은 실제 시장을 매우 근사하게 묘사할 수 있다(Bushnell et al., 2008; Tanaka and Chen, 2012). 본 연구에서 해운선사는 운송 시장 및 배출권 거래 시장에서 얻는 이익을 극대화하기 위해 할당받은 배출권을 활용하여 생산량(수송량) 및 배출권 거래량을 결정한다. 위와 같은 해운선사의 전략적 의사결정으로 인한 시장 균형 상태에서 운임과 배출권 가격이 결정된다.

한편, 해운 부문 EU-ETS는 설정된 배출허용량 하에서 1톤 CO₂ eq당 EU 탄소배출권(EUA: EU Allowance)을 구매하여야 하며, 초기 무상할당을 부여하였던 타 분야와 달리, 해운 부문은 무상할당 없이 전량 경매 방식으로 도입되는 것으로 설정되었다. 대신, 2024년부터 3년에 걸쳐 단계적으로 도입될 예정이다. 다만, 본 연구는 환경규제 강화에 따른 해운선사 및 시장의 영향을 살펴보기 위해 배출권 무상할당이 있는 경우와 무상 할당이 폐지된 경우, 탄소배출권 가격이 상승한 경우를 모형화하고 그에 따른 영향을 분석한다.

또한, IMO가 수립한 2050년 배출량 감소 목표를 달성하기 위해서는 대체 연료를 사용하는 선박의 도입이 불가피하다. LNG, 메탄올, 바이오디젤, 수소 등 다양한 대체 연료 중에서, LNG는 바이오-LNG 및 수소 또는 암모니아와 같은 다른 가스 연료와의 인프라 연계성을 고려할 때 향후 친환경선박으로 전환하기 위한 징검다리 역할을 수행할 것으로 예상된다. 화석 연료에 비해 바이오-LNG는 최대 80%의 온실가스 배출량을 감축할 수 있을 것으로 기대된다(Thepsithar et al., 2020). 따라서, 현재 해운선사들은 더욱 엄격해지는 환경규제에 대응하고 친환경선박의 혜택을 선점하기 위해 기존 선박을 LNG 추진선으로 전환하고 있다. 또한 규제 기관이나 정부는 IMO의 배출량 감소 목표를 달성하기 위해 해운선사가 기존 선대를 LNG 추진선 등 친환경선대로 전환할 수 있도록 장려할 필요가 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구는 LNG 추진선 등 친환경선박의 도입을 촉진하기 위한 정책적 시사점을 제시하기 위해 정부지원정책 시행에 따른 해운선사의 전략적 의사결정과 그에 따른 해운 시장의 균형 결과를 분석한다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 이후 1장 제3절에서는 관련 선행 연구를 간략하게 요약하고 본 연구의 차별성을 도출한다. 2장에서는 해운 분야 환경규제 및 대응 동향을 살펴본다. 3장에서는 꾸르노 모형을 기반으로 해운 부문 탄소배출권 거래제를 분석하기 위한 방법론을 구축하고 EU-MRV를 포함한 실증 데이터를 소개한다. 4장에서는 연구 방법론을 바탕으로 분석 결과를 제시한다. 마지막으로, 5장에서는 연구의 결론 및 정책적 제언을 제시한다.

〈그림 1-2〉 연구 흐름도



자료: 저자 작성

제3절 선행연구 검토

1. 선행연구

1) 해운 부문 탄소배출권 거래제 관련 연구

해운 부문 탄소배출권 거래제에 대한 연구는 제도 도입 효과에 대한 검토 또는 탄소배출권 거래제 도입이 탄소배출량과 선박·선사의 비용부담에 미치는 영향 분석이 주를 이루고 있다. 탄소배출권 거래제 도입에 따른 해운선사 간 경쟁 전략과 효과에 대해 분석한 연구는 매우 희소하다.

선행연구에 의하면, 탄소배출권 거래제와 같은 시장기반조치(MBM: Market Based Measure)는 전통적인 형태의 환경규제보다 더 효과적으로 온실가스 배출량을 감축할 수 있다. 시장기반조치는 장기적으로 해운선사들이 친환경 기술에 더 많이 투자하도록 하여 기술의 효율성을 높이고, 기술 발전에 대한 강한 동기를 부여할 수 있다(Aldy et al., 2010; Zhang et al., 2016; Ding et al., 2020). 탄소배출권 거래제 도입은 적절한 배출비용과 배출 총량의 결정을 바탕으로 선박의 온실가스 배출량을 크게 줄이는 것에 기여할 수 있다(Gu et al., 2019). 또한 탄소배출권 거래제는 정보 및 행정 비용 절감, 친환경 기술에 대한 인센티브 확대, 효과적인 배출 감소 효과 및 국제적 수준의 배출량 통제가 가능하다는 장점이 있다(Stern, 2008; Keohane, 2009). 다만, Gu et al.(2019)은 해운 부문 탄소배출권 거래제가 단기간에 온실가스 배출량 감소를 보장할 수는 없으며, 지역적으로는 총배출량을 증가시킬 수 있다고 주장했다. Wang et al.(2015)은 개방형 또는 폐쇄형 탄소배출권 거래제가 선박의 연료 소모와 물동량을 모두 줄일 수 있음을 시사하기도 했다.

해운 부문 탄소배출권 거래제 도입이 해운산업에 미치는 영향을 평가한

연구로는 Koesler et al.(2015), Christodoulou et al.(2021), 조아현(2021), 김한나 외(2022)가 대표적이다. Koesler et al.(2015)은 전문가 인터뷰 등 정성적 분석을 수행하여 해운 부문 탄소배출권 거래제가 해운산업에 미치는 영향을 평가하였다. 설문 결과를 바탕으로 해운 부문 탄소배출권 거래제가 온실가스 배출량 저감에 효과적일 것으로 예상되며 시급히 도입되어야 한다고 결론지었다. Christodoulou et al.(2021)은 EU-MRV 데이터를 활용하여 해운 부문 EU-ETS 편입이 해운 부문별(선종)로 미치는 경제적 영향을 최초로 실증 분석을 통해 평가하였다. Christodoulou et al.(2021)은 배출권 할당 시 해운 부문별로 차등화가 필요함을 확인하였다.

해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 영향을 검토한 국내 연구로는 조아현(2021)과 김한나 외(2022)의 연구가 있다. 조아현(2021)은 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입이 해운산업에 미치는 영향을 게임이론적 접근 방법을 활용하여 분석하였다. 연구 결과, 해운 선사의 특성에 따라 탄소배출권 거래제가 긍정 또는 부정적인 영향을 줄 수 있음을 밝혔다. 또한, LNG 추진선 등 친환경 선박의 도입이 해운산업의 온실가스 배출량을 상당히 저감할 수 있음을 밝혔다. 김한나 외(2022)는 탄소배출량 산정 자료로 Clarksons WFP(World Fleet Register) 통계 자료와 IMO 표준자료를 활용하여 IMO가 탄소세와 탄소배출권 거래제를 각각 도입할 경우 국내 해운선사에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과, 국내 해운선사 입장에서 탄소세보다 탄소배출권 거래제 도입이 더 유리한 것으로 나타났으며, 국적 선대의 경쟁력 강화를 위해 친환경선박 및 환경규제 비용에 대한 정부 차원의 지원이 필요함을 제언하였다.

해운 부문 탄소배출권 거래제는 해운업에 막대한 영향을 미칠 것이라는 점에서 배출권 가격이 선사의 비용 및 운영 전략에 미치는 영향을 조사하는 것은 매우 중요하다(Zhu et al., 2018). 탄소배출권 거래 시장에서는 배출권 가격에 변동성이 존재하며 기업 간 배출권 거래를 통해 수익을 창출할 수 있으므로 선사의 전략적 선택은 중요하다. 그러나 아직까지

선사의 전략적 선택을 모형화하고 실증적으로 분석한 선행연구는 확인되지 않았다.

2) 해운 외 부문 탄소배출권 거래제 관련 연구

2005년 EU-ETS의 도입 이후 많은 관련 연구가 수행됐으나, 대부분의 연구는 거시적 또는 산업적 관점에서의 분석에 초점을 맞추고 있다(Miola et al., 2011; Wang et al., 2015). 선행연구 중 일부는 배출권 가격이 상품의 가격에 미치는 영향을 연구하였다(Sijm et al., 2006, Chen et al., 2008, Kim et al., 2010). 또한, 배출권 가격과 기업의 수익성 및 주가 사이의 관계를 분석하기도 하였다(Smale et al., 2006; Demailly and Quirion, 2008; Oberndorfer, 2009; Veith et al., 2009; Mo et al., 2012). 탄소배출권 거래제 참여자에게 효율적이고 공평하게 탄소배출권을 할당하는 방법에 대해서도 많은 연구가 수행되었다(Bode, 2006).

탄소배출권 거래제에 대한 연구는 발전과 항공 등 주요 부문에 집중되어 있다. 2012년 항공 부문이 EU-ETS에 포함됨에 따라 항공 ETS의 정책적 영향을 분석한 연구가 다수 수행되었다(Anger and Köhler, 2010; Cui et al., 2017). 최근에는 항공 ETS의 효율적인 운영을 위해 유용한 정책적 시사점을 제공하는 연구가 수행되었다(Nava et al., 2018; Efthymiou and Papatheodorou, 2019). 한편, 이론적으로 항공기는 출발지와 목적지 공항 사이의 비행에 의해 발생하는 모든 배출량에 대해 책임이 있으나, 선박의 운항과 마찬가지로 이러한 경로 기반 접근법은 이해관계자가 복잡하여 적용하기 어려운 실정이다(Kågeson, 2008; Franc and Sutto, 2014).

3) 탄소배출권 거래제에 대한 게임이론적 접근 관련 연구

탄소배출권 거래제 시장에서는 참여자 간의 전략적 상호작용이 중요하다. 이에 탄소배출권 거래제 하에서의 참여자 행동을 연구하기 위해 여러

연구들이 게임이론을 기반으로 접근하고 있다(이광호·김옥, 2014; 박경원·권오상, 2018; Defra, 2018; 정경화·심성희, 2015; Nava et al., 2018; Du et al., 2015; 문새다슬·이덕주·김태구, 2017; Sabzevar et al., 2017; Pang & Chen, 2023). 분석 대상 산업분야로는 주로 전력·발전 분야(이광호·김옥, 2014; 문새다슬·이덕주·김태구, 2017) 및 항공분야(Defra, 2018; Nava et al., 2018; Pang & Chen, 2023)가 많으며, 해운 부문을 대상으로 시장 참여자의 행동을 수학적으로 분석한 연구는 확인되지 않았다. 또한 선행연구 검토 결과, 탄소배출권 거래 시장을 게임이론 기반으로 모델링하기 위해 꾸르노 모형이 많이 활용되었다(조아현, 2021). 꾸르노 모형은 기업이 경쟁하는 시장을 설명하기 위한 경제모형 중 하나로 해석이 용이하고 다양한 환경적 조건을 고려한 분석이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 위 선행연구에 대한 구체적인 연구목적, 연구방법, 주요 연구 내용 등은 부록에 정리되어있다.

2. 선행연구와의 차별점

본 연구는 미시적 관점에서 탄소배출권 거래제 도입을 가정하고 환경규제의 강화 및 정부 지원에 따른 해운선사의 수익 극대화 운영 전략과 해운 시장의 균형을 분석한 첫 번째 연구이다. 해운 부문 탄소배출권 거래제는 곧 도입을 앞둔 상황으로 매우 초기 단계이기 때문에 관련된 연구가 희소하다. 일부 존재하는 해운 부문 탄소배출권 거래제 연구는 대부분 법률 및 규정을 다루고 있다. 기존 연구는 국제법 및 국내법 등 법률 검토에 초점을 맞추거나, 국내외 법, 제도적 대응 사례를 분석했다. 또는, 용선계약, 운송계약, 보험계약 등 규정을 검토하거나 법, 제도적 쟁점을 정리하고 거시적 관점의 시사점을 제시했다. 일부 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 영향을 계량적으로 분석한 연구가 존재하지만, 이는 대부분 선박에 의해 발생한 총배출량에 배출권 가격을 곱하는 등 분석 방법이 매우 단순하다. 본

연구는 모형 내에서 타 선사와의 경쟁구조, 탄소배출권 거래제의 시장원리, 배출권 가격, 배출량 총량 제한, 선박의 배출계수 등을 동시에 고려하여 제도의 영향을 분석할 수 있다. 또한, 환경규제 수준의 강화나 정부 정책에 의한 친환경선박으로의 전환 등의 효과도 모형 내 시나리오 설정을 통해 분석이 가능하다. 이러한 분석을 통해 기존 연구들과는 달리 탄소배출권 거래제 도입 시 해운 시장에 미치는 영향을 보다 입체적으로 이해할 수 있으며, 이를 바탕으로 합리적인 대응 방안 도출에 대한 근거를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 최근 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 검토안을 반영하여 해운 부문 탄소배출권 거래제의 도입을 배출권의 무상할당이 존재하는 경우와 폐지된 경우로 구분하여 모형화하고 각 환경규제에 따른 시장 균형의 변화를 살펴본다. 또한, 본 연구는 꾸르노 모형과 EU-MRV 데이터를 사용하여 해운 부문 탄소배출권 거래제의 도입에 따른 실증 분석 결과를 제공한다. 과거 연구는 해운 부문 탄소배출권 거래제를 주로 이론 모형과 가상의 데이터에 근거하여 분석했기 때문에 분석 결과에 대한 실증적인 근거를 제공하지 못하였다. 본 연구는 실증 데이터에 기반한 데이터와 꾸르노 모형을 결합하여 실제 해운 부문 탄소배출권 도입에 따른 현실적인 효과를 분석하고자 한다. 구체적으로, 탄소배출권 거래제 도입에 따른 개별 선사의 수송량, 배출량, 배출권 거래량, 수익의 변화 등을 분석하고자 한다. 또한, 각 선사의 수익 극대화 전략에 따른 해운 시장 균형을 분석하여 총수익, 총배출량, 해상운임, 배출권 가격의 변화 등을 검토하고 시사점을 제시한다. 문헌 연구에 따르면 실제 데이터를 사용한 꾸르노 모형의 내쉬 균형은 실제 시장에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있다(Bushnell et al., 2008; Tanaka and Chen, 2012).

또한, 해운 부문 탄소배출권 거래제의 도입 형태가 아직 구체적으로 결정되지 않았으므로, IMO와 EU에서 논의되고 있는 탄소배출권 거래제

도입 계획을 고려하여 탄소배출권 무상할당량 폐지와 탄소배출권 가격 상승에 따른 영향을 분석할 수 있는 모형을 구축한다. 실증 데이터를 사용하여 모형을 검증하고 현실적인 정책적 시사점을 제시한다. 연구 결과를 바탕으로 국내외 관계자 및 전문가 자문을 통해 선제적으로 환경규제에 대응하기 위한 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

〈표 1-2〉 선행연구와 본 연구의 차별성

구분	선행연구	본 연구
연구 목적	<ul style="list-style-type: none"> 주로 발전, 항공 등 부문의 EU-ETS 도입 효과를 분석 해운 부문 EU-ETS 편입 관련 연구는 주로 관련 법, 제도 검토를 바탕으로 대응 방안을 검토 해운 부문 EU-ETS에 관한 계량적 연구는 소수이며, 소수의 계량 연구들은 주로 거시적 관점, 예를 들면 총배출량 감축, 경제적 효과, 배출권 할당 방법 등에 초점이 맞춰져 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 개별 선사의 관점에서 탄소배출권 거래제 도입에 따른 해운선사의 수익 최대화 전략과 그에 따른 해운 시장의 균형을 분석하기 위한 이론 모형을 구축 배출권 무상할당량 감소, 탄소배출권 가격 증가 등에 따른 해운 선사의 전략 변화와 해운 시장 균형 변화 분석 분석 결과를 근거로 하여 선사 및 정부 관점에서 환경규제에 효과적으로 대응하기 위한 시사점을 제시
연구 방법	<ul style="list-style-type: none"> 일부 소수 연구가 해운 부문 EU-ETS 도입 영향을 계량적으로 분석하였으나 분석 모형이 비교적 단순 2018년부터 기록이 시작된 EU-MRV의 실증 데이터를 사용한 연구는 존재하지 않으며 대부분 실제 데이터가 아닌 가상의 데이터를 사용한 이론 모형 연구, 시뮬레이션 연구, 또는 인터뷰 등 정성적 연구를 수행 	<ul style="list-style-type: none"> 수학적 모델링을 통해 해운 부문 EU-ETS 편입에 따른 영향을 계량적으로 분석 기업이 경쟁하는 시장을 설명하기 위한 경제모형인 꾸르노 모형과 실증 데이터인 EU-MRV 데이터를 사용하여 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입에 따른 보다 현실적인 효과를 분석 해운 탈탄소화 가속화 노력을 고려, EU-ETS 체제 하에서 탄소규제 강화 및 정부 정책 지원 효과를 분석
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> 주로 관련 법, 제도 검토를 바탕으로 대응 방안을 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 해운선사 관점에서 운영비용, 배출계수 등 개별 선사의 특성에 따른 선사의 이익과 배출량 변화를 분석 해운 시장 관점에서 개별 선사의 수익 최대화를 위한 의사결정에 따른 시장 균형 상태의 총수송량, 총이익, 총배출량의 변화 등을 분석

자료: 저자 작성

02

해운 부문 환경규제 동향

국제사회에서 산업의 탄소중립이 주요한 과제로 떠오르면서 해운 부문 역시 탄소 배출 저감을 위한 글로벌 환경규제가 점차 강화되고 있다. 해운 부문의 환경규제는 해운 부문 EU-ETS 편입이 대표적이며, 선박에 대한 기술적 규제, 운항적 규제 등도 포함된다. 이러한 규제들이 동시다발적으로 적용되면서 국가 차원의 정책 지원과 선사들의 자발적 노력을 유도하여 해운 시장의 탈탄소화 노력을 가속화할 것으로 기대된다. 이에 본 장에서는 EU-ETS를 포함한 해운 부문의 환경규제 동향과 그에 따른 주요 선사 및 국가별 대응 동향을 살펴본다.

제1절 국제 환경규제 동향

1. EU-ETS('24~)⁴⁾

EU-ETS는 지역 기반 환경규제 중 하나로, 에너지 집약 산업 및 발전 부문을 대상으로 배출 허용량의 배출권 거래를 기반으로 온실가스 감축을 유도하는 제도이다. EU-ETS는 2005년부터 시행되었으며 2023년 현재까지는 육상산업분야 및 항공분야⁵⁾를 대상으로 시행되고 있다. 2021년 7월

4) EU Commission, Reducing emissions from the shipping sector(검색일: 2023.11.15.); EU Commission, FAQ - Maritime transport in EU Emissions Trading System(ETS)(검색일: 2023.11.15.)의 자료를 바탕으로 저자 작성

5) 다만, 지금까지는 배출허용권(permits)의 무상할당 비율이 높은 편이며, 추후 무상할당은 단계적으로

14일, EU는 유럽기후법(European Climate Law)⁶⁾의 중기 감축목표⁷⁾ 달성을 위한 입법안 패키지인 「Fit for 55」를 발표하며 EU-ETS의 범위를 해운 부문까지 점진적으로 확장하는 것을 제안하였으며, 그 결과 2024년부터 해운 부문이 EU-ETS에 편입될 예정이다. 이로써 EU-ETS는 해운 부문 배출량에 명시적인 탄소 가격을 부과하는 최초 조치가 된다.

〈표 2-1〉 EU-ETS의 단계별 주요 내용

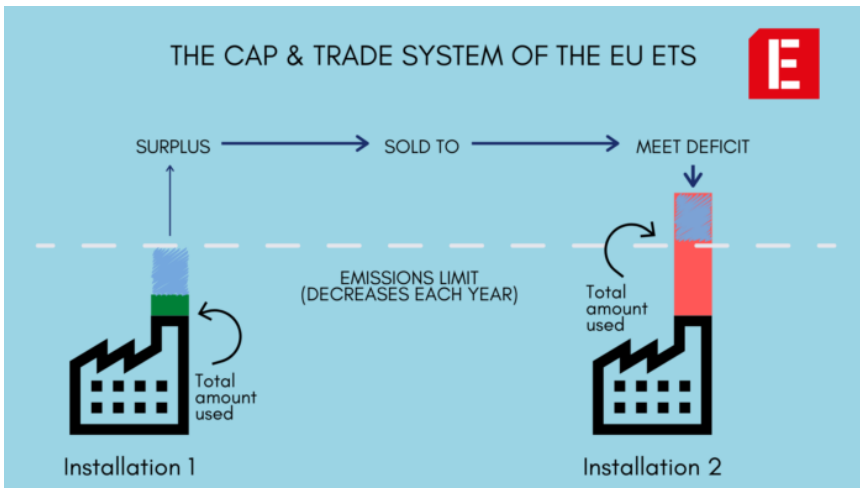
구분	Phase1 (2005~2007)	Phase2 (2008~2012)	Phase3 (2013~2020)	Phase4 (2021~2030)
대상국	EU 27개국	EU 27개국, 노르웨이, 아이슬란드, 리히텐슈타인	EU 28개국, 노르웨이, 아이슬란드, 리히텐슈타인	3기와 동일
적용 부문	<ul style="list-style-type: none"> • 20MW 이상의 발전 및 연료연소시설 • 석유정제 • 코크스로 • 철강 • 시멘트 클링커 • 유리 • 석회 • 벽돌 • 도자기 • 펄프 • 제지 및 합판 	<ul style="list-style-type: none"> • 1기 해당부문 • 항공(2012년부터) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1기 해당부문 • 알루미늄 • 석유화학 • 항공(2014년 1월 1일부터) • 암모니아 • 질산, 아디프산, 글리 옥살산 생산물 • 이산화탄소 포집, 수송 파이프라인, 이산화탄소 지중저장 	<ul style="list-style-type: none"> • 3기 해당 부문 • 해운 • 항공(개혁) • 건물, 도로운송 등 신규 부문 추가 예정(새로운 배출권 거래 시스템인 ETS2 도입 예정)
유·무상 할당	대부분 무상할당	최대 90% 무상할당	유상할당 57% (발전 100%, 제조업 20%, 항공 15%)	유상할당 57% (2026년부터 2034년까지 단계적 폐지)

주: 현재 항공의 경우 유럽경제지역 역내 항공편 및 스위스, 영국 출발 항공편에만 적용
 자료: EU(2015), pp. 18~19; EU Commission(2021), pp. 2~8; 이경연(2023.10.5.), p. 4, ICAP(검색일: 2023.10.30.)의 자료를 바탕으로 저자 재정리

폐지하기로 결정
 6) 2020년 3월 제정, 2021년 6월 말 최종 채택
 7) 1990년 대비 2030년까지 최소 55% 온실가스 배출량 감축

EU-ETS의 기본 운영 원칙은 ‘Cap&Trade’ 방식으로, 모든 시장 참여자는 온실가스 배출 총량의 상한선을 가지며 상한선은 EU 기후 목표에 따라 점진적으로 줄어든다. 배출 한도 내에서 시장 참여자들은 필요한 배출권을 추가로 구매하거나 여분을 판매할 수 있으며 보유한 배출권 외 초과 배출에 대해서는 벌금이 부과된다.

〈그림 2-1〉 EU-ETS 운영 메커니즘

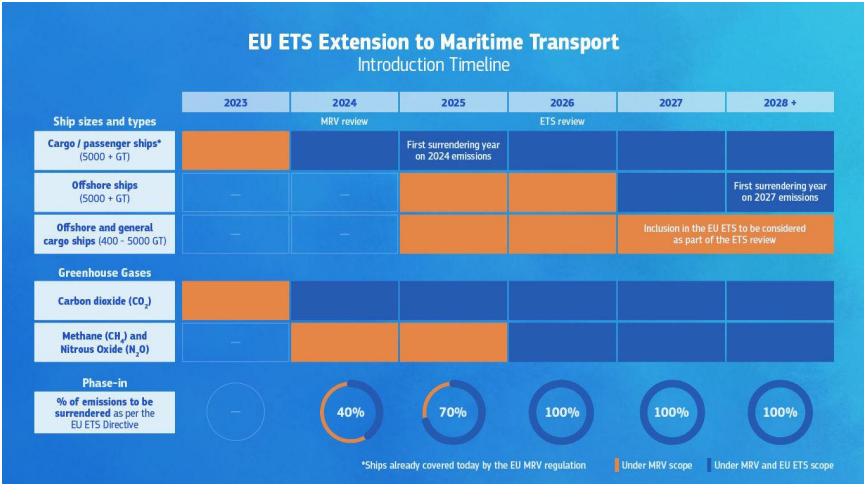


자료: Anderson(2020.8.6.)(검색일: 2023.8.14.)

한편, EU-ETS는 초기 제도 안착, 탄소누출(carbon Leakage) 위험 등을 이유로 타 부문의 경우 도입 초기에는 배출권을 무상으로 할당하고 점진적으로 유상할당을 늘리는 방식을 적용하였다. 하지만 해운 부문의 경우 도입 초기부터 무상할당 없이 전량 유상할당하는 방식으로 도입 예정이며, 대신 2024년부터 3년에 걸쳐 유상할당량 비율을 단계적으로 도입하는 방안을 적용한다. 그에 따라 해운선사의 탄소배출권의 제출 의무는 2024년까지는 40%(2025년 제출), 2025년까지는 70%(2026년 제출), 2026년부터는 100%(2027년부터 제출)로 점진적으로 증가하는 것으로 설정되었다.

또한 2026년부터는 EU-ETS가 적용되는 대상 온실가스에 이산화탄소뿐만 아니라 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)까지 포함되는 것으로 예정되어 있어 해운 부문 환경규제는 더욱 강화될 것으로 전망된다.

〈그림 2-2〉 해운 부문 EU-ETS 도입 타임라인

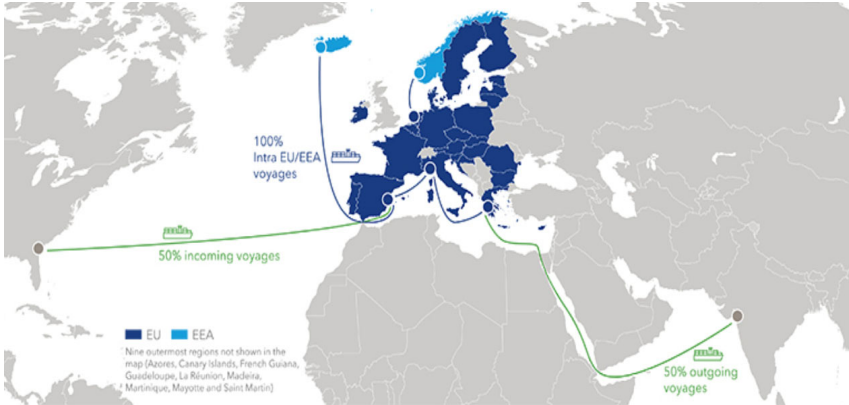


자료: EU Commission, FAQ – Maritime transport in EU Emissions Trading System(ETS)(검색일: 2023.11.15.)

해운 부문 EU-ETS의 적용 대상은 2024년 기준 총톤수 5,000톤 이상의 EU 권역 내 기항하는 화물 및 여객선(cargo and passenger ships)이며, 2027년부터는 총톤수 5,000톤 이상의 연안선(offshore ships)에도 적용될 예정이다. 배출량 산정 대상은 EU 권역 내에서 항해 또는 기항에 따라 발생하는 배출량의 경우 100%, EU 역내 진출입 지점 및 역외 항만 간 항해에서 발생하는 배출량은 50% 적용 예정이다.⁸⁾

8) 이와 함께 EU는 EU 항만 기피 가능성을 최소화하고 제도 악용을 방지하기 위하여 EU/EEA 항만에 기항하기 직전에 300nm 이내 존재하는 타 항만에 기항한 경우 컨테이너선은 해당 인접 항만으로의 항해에 대한 배출량의 50%도 포함하도록 하는 등 대안을 추가로 함께 마련함

〈그림 2-3〉 EU-ETS 대상 선박 운항의 범위



자료: DNV(검색일: 2023.4.19.)

대상 선박들은 배출되는 1톤 CO₂ eq당 EUA를 구매하여야 하며, 선사들은 다음 해 9월 30일까지 1년분의 허용량을 구매하여야 한다. 여기서 선사는 발전 및 육상산업 부문에서 사용하는 동일한 EUA를 획득하여야 하며, 경매나 기업 간 거래 등을 통해 구매할 수 있다. 한편, 할당량을 초과 배출하는 경우에는 1톤 CO₂ eq당 100유로의 벌금이 부과되는 등의 패널티가 주어진다.

2. EEDI(Energy Efficiency Design Index)(‘13~)⁹⁾

신조선에 대한 에너지 효율 개선 규제인 EEDI는 2013년 발효된 건조 선박부터 적용된 규제로, 총 3단계에 걸쳐 시행된다. IMO에 의한 국제 규제 중 하나로, 선박 설계과정에서 1톤의 화물을 1해리 운송하는데 배출되는 CO₂ 량을 사전적으로 산정하고, 배출허용 기준을 초과할 경우 선박의

9) Resolution MEPC.364(79)(검색일: 2023.8.14.); IMO(검색일: 2023.11.15.)의 자료를 바탕으로 저자 작성

인도 및 취향을 금지하는 규제이다. 1단계인 2015년 이후부터는 초기 기준치 대비 10% 감축, 2단계인 2020년 이후부터는 20% 감축, 3단계인 2025년¹⁰⁾부터는 30% 감축을 목표로 하며, 단계적 감축 목표에 미달하는 선박은 건조가 불가하다.

3. EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index)(‘23~)¹¹⁾

EEXI는 IMO가 시행하는 총톤수 400톤 이상의 현존선에 대한 규제로, 2023년 1월 1일부터 시행되었다. 선박 소유자는 선박 제원을 기준으로 사전에 1톤의 화물을 1해리 운송하는데 배출되는 선박의 CO₂량을 산출하여 선박검사기관에게 EEXI 규제 기준 충족 여부를 검증받아 국제에너지 효율증서(International Energy Efficiency Certificate, IEEC)를 발급받아야 한다. 이 증서가 선내에 비치되지 않으면 해당 선박은 운항 제한 조치가 가해지며, 설비 개조, 전력 제한 등을 통해 에너지 효율을 높이고 해당 증서를 발급받아야 선박을 다시 운항할 수 있다. 규제기준은 점진적으로 강화되며, 1999년~2009년 건조된 선박의 에너지효율 평균값을 기준으로 2024년까지 약 20%, 2025년 이후 약 30%를 감축하여야 한다.

4. CII(Carbon Intensity Indicator)(‘23~)¹²⁾

CII는 총톤수 5,000톤 이상 현존선에 대한 규제로, 1년간의 실제 운항정보를 바탕으로 연료사용량, 선박 용량, 운항거리 등을 활용하여 선박 효율성을 산정하고 선박별로 요구되는 CII 허용값 및 달성값에 따라 A~E까지

10) LNG·LPG 운반선, 컨테이너선은 2022년

11) Resolution MEPC.350(78)(검색일: 2023.8.14.); IMO(검색일: 2023.11.15.)의 자료를 바탕으로 저자 작성

12) KR(2021.10.6.)(검색일: 2023.8.14.); IMO(검색일: 2023.11.15.)의 자료를 바탕으로 저자 작성

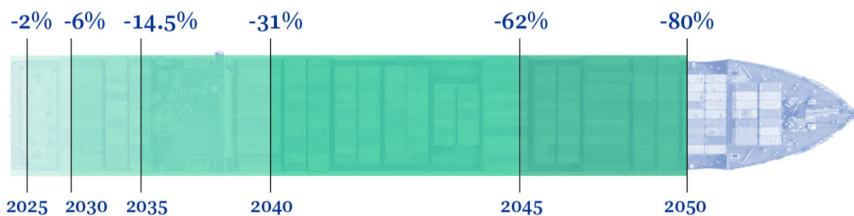
등급을 부여하는 IMO의 규제이다. 실제 선박의 운항 정보를 바탕으로 산정한다는 점에서 EEXI와 차이가 있으며 선박의 운항 효율에 초점을 두고 있는 조치로 볼 수 있다. 3년 연속으로 D를 받거나 1회 E를 받을 경우, 해당 선박은 CII 허용값 달성에 관한 사항이 포함된 선박 에너지 효율 관리 계획(SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan)을 선박검사 기관에게 승인받아야 하며 그전까지는 운항이 제한된다. CII 규제 역시 EEXI와 같이 단계적으로 감축률이 상향¹³⁾되며 그에 따라 선사들의 부담은 증가할 것으로 전망된다.

5. FuelEU Maritime('25~)¹⁴⁾

FuelEU Maritime는 EU에서 시행하는 친환경선박 연료 사용 확대를 위한 환경규제로, EU 항만에 기항하는 총톤수 5,000톤 이상 선박을 대상으로 2025년부터 시행 예정이다. 이 규제는 특정 형태의 연료 사용을 요구하지 않으나, 연료의 온실가스 배출량을 점진적으로 낮추는 것을 목표로

〈그림 2-4〉 2050년까지의 선박의 온실가스 집약도 제한 목표(2020년 대비)

Annual average carbon intensity reduction compared to the average in 2020



자료: European Council&Council of the EU(검색일: 2023.11.15.)

13) 2023년 5%, 2024년 7%, 2025년 9%, 2026년 11% 등

14) European Council&Council of the EU(검색일: 2023.11.15.)의 자료를 바탕으로 저자 작성

한다. 에너지 사용에 따른 온실가스 집약도를 2020년 대비 2025년 2%에서 2050년 80%까지 감축하여야 하며 집약도 기준보다 높은 연료를 사용할 경우 벌금을 징수한다. 그 외 컨테이너선 및 여객선은 EU 항만에 2시간 이상 정박 시 무배출 기술을 사용하지 않는 한 육상전원공급장치를 의무적으로 사용하도록 하는 규정도 포함한다.

제2절 국가별 환경규제 대응 동향

1. 한국

1) 제도·정책적 대응 동향

우리나라는 친환경선박의 개발 및 보급 촉진을 위하여 2018년 12월, 「환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률(이하 친환경선박법)」을

〈표 2-2〉 2030 한국형 친환경선박(Greenship-K) 추진전략의 주요 내용

구분	주요내용	
비전	<ul style="list-style-type: none"> • Greenship-K 기반 구축으로 2050 탄소중립 산업 생태계 구현 	
목표 및 추진전략	<ul style="list-style-type: none"> • 미래 친환경선박 세계 선도 기술 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 온실가스 70% 감축기술 개발('25년: 40% → '30년: 70%) • 선박배출 온실가스 감축 및 친환경 新시장 창출 <ul style="list-style-type: none"> - 친환경선박 전환율 15% 달성(전환대상 3,542척 중 528척 전환) 	
중점 추진과제	개발 (산업통상자원부)	<ul style="list-style-type: none"> • 미래 친환경선박 세계 선도 기술 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 수소·암모니아 수소·암모니아 등 무탄소 선박 기술 확보 - 혼합연료 추진 등 저탄소 선박 기술 개발 - LNG·전기·하이브리드 추진기술 고도화 • 新기술 확산을 위한 시험기반 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 시험·검사기준 마련 - 시험·평가 시설 구축 • 한국형 실증 프로젝트(그린쉽-K) 추진 <ul style="list-style-type: none"> - 그린쉽 K 시범선박 건조 - 해상실증을 통한 기술검증 및 시장진입 지원
	보급 (해양수산부)	<ul style="list-style-type: none"> • 연료공급 인프라 확충 <ul style="list-style-type: none"> - LNG선박 연료공급 확대 - 무탄소 연료공급 인프라 구축 • 친환경선박 보급 촉진 <ul style="list-style-type: none"> - 공공부문 선제적 전환 - 민간부문 전환 확산 • 친환경선박시장 주도 생태계 조성 <ul style="list-style-type: none"> - 국내 신기술의 국제 표준화 지원 - 디지털·통계기반 선박운영 체계 마련

자료: 관계부처합동(2020), p. 12의 자료를 바탕으로 저자 재정리

제정, 2020년 1월부터 시행하였다. 해당 법령에 따라 2020년 12월, 해양수산부(보급)와 산업통상자원부(개발) 등이 협동으로 「제1차 친환경선박 개발 보급·촉진 기본계획(’21~’30)(이하 2030 한국형 친환경선박(Greenship-K) 추진전략)」을 수립하여 친환경선박 개발·보급의 기본방향과 중장기 목표를 제시하였다. 그리고 기본계획의 내용을 바탕으로 2021년 1월부터 2023년 1월, 「환경친화적선박 개발시행계획(이하 한국형 친환경선박(Greenship-K) 개발·보급 시행계획)」을 부처별로 매년 수립하고 있다.

또한 2023년 2월에는 국가전략인 「국제해운 탈탄소화 추진전략」을 수립하여 해운산업의 탈탄소화에 대응하고 국가 경쟁력을 강화하기 위한 친환경

〈표 2-3〉 국제해운 탈탄소화 추진전략의 주요 내용

구분	주요내용	
비전	<ul style="list-style-type: none"> • 2050 국제해운 탄소중립을 이끄는 기후 모범국가 	
목표 및 추진전략	<ul style="list-style-type: none"> • 국제해운 탄소 감축(’08년 대비) <ul style="list-style-type: none"> - ’30년 60% → ’40년 80% → ’50년 100% • (현재) 해운 선복량 4위 경쟁 <ul style="list-style-type: none"> - (향후) 친환경 해운 전환 1위 국가(’30년 미·유럽 정기선 60%, ’50년 전체선대 100% 전환) • (’30년) 전·후방 생산유발 17조원 <ul style="list-style-type: none"> - (’50년) 최대 158조원 경제효과 창출(국적 외항선대 친환경 전환을 위해 ’30년 까지 8조원, ’50년까지 총 71조원 투자(민·관)) 	
중점 추진과제	친환경선대 전환	<ul style="list-style-type: none"> • 국적선 친환경선대구조 개편 • 운항 중인 선박 개조 및 설비개량 지원 • 운항선박 탄소배출량 저감 및 관리
	해운산업 투자여건 개선	<ul style="list-style-type: none"> • 친환경선박 세제·금융 등 패키지 지원 • 중소형선사 친환경 전환 지원방안 마련 • 선사·화주가 협력하는 친환경 전환모델 구축
	친환경 기술 및 연료인프라 확충	<ul style="list-style-type: none"> • 친환경선박 기술개발 및 상용화 • 미래연료 공급망·인프라 구축 • 시장 선점을 위한 민간주도 규제완화
	무탄소 항로 구축 및 국제협력	<ul style="list-style-type: none"> • 글로벌 그린쉬핑 프로젝트 추진 • 한국 주도의 국제 친환경 거버넌스 구축 • 산·학·연·관 국제해운 탈탄소 협의체 구성

자료: 관계부처합동(2023), p. 5의 자료를 바탕으로 저자 재정리

선대 전환, 해운산업 투자여건 개선, 친환경 기술 및 연료인프라 확충, 무탄소 항로 구축 및 국제협력이라는 4대 전략 기반의 12가지 추진과제를 제시하였다.

2) 기술개발 및 보급 지원

앞서 살펴본 바와 같이 우리나라의 경우 친환경선박의 기술개발은 산업자원부에서, 보급은 해양수산부에서 본격 지원하고 있다. 기술개발 내용을 자세히 살펴보면 저탄소·무탄소 선박 개발에 대한 내용이, 보급의 경우 연료공급 인프라 구축, 세제·금융지원, 규제완화, 국제협력 등에 대한 내용이 주를 이루고 있다. 기술개발 및 보급 지원에 대한 보다 세부적인 내용은 앞의 <표 2-2>, <표 2-3>과 같다.

2. 유럽연합(EU)

1) 제도·정책적 대응 동향

2013년, EU는 해운 부문 배출량 저감을 위한 추진전략을 발표하였다¹⁵⁾. 전략은 3개의 단계로 구성된 점진적 접근 방식을 제안하고 있으며, 선박 대상 MRV 시스템 구현, 해운 부문 온실가스 감축 목표 정의, 시장기반 조치 적용이 이에 해당한다. 다만, 우리나라와 같이 친환경선박의 개발 및 보급 등에 대한 EU 차원의 전략은 별도로 구상되어 있지 않다.

2) 기술개발 및 보급 지원

EU는 해운 부문 탄소중립 달성을 위해 다양한 프로그램을 활용하여 기술개발 투자를 추진하고 있다. 먼저 기후변화 대응 및 지속가능한 개발 목표

15) EU Commission(2013)

달성 지원을 위한 과학기술 연구개발 핵심 프로그램인 Horizon Europe를 통해 Ship-aH2oy 프로젝트¹⁶⁾, LNG 선박 메탄 슬립 방지 등 친환경선박 관련 기술 개발에 적극 투자하고 있다. 또한, EU-ETS 경매 수익 등을 활용하여 조성된 Innovation Fund를 통해 해양, 저탄소 운송연료 등과 관련된 탈탄소화 프로젝트 개발을 지원하고 있다. 그 외 InvestEU, Modernisation Fund 등도 유사한 지원을 하고 있다¹⁷⁾. EU는 IMO와 협력을 통해 해양 기술협력센터(MTCC; Maritime Technology Cooperation Centres)를 구축하여, 선박 개조, 에너지 효율화 등 선박 온실가스 배출량 감소를 위한 프로젝트를 지원하고 있다¹⁸⁾. 한편, 2016년부터는 EIB(European Investment Bank)를 통해 유럽 해운산업의 친환경 기술 투자를 가속하여 친환경선박 신조, 개조 등을 포함하는 프로젝트에 자금을 지원하는 Green Shipping Guarantee Program과 Green Shipping Program Loan 등도 함께 진행하고 있다.

3. 미국

1) 제도·정책적 대응 동향

미국의 경우 2022년 7월, 해운 부문 탄소중립 달성의 일환으로 「Clean Shipping Act of 2022」를 발의하고 입법에 대한 논의를 진행 중에 있다.¹⁹⁾ 제안된 법안은 EPA의 「Clean Air Act」의 개정안으로, 선박 연료의 탄소 집약도 기준, 선박 무배출 기준 등에 대한 내용을 포함한다.

16) H2TECH(2023.2.3.)(검색일: 2023.4.9)

17) Şaşmaz(2022), pp. 42-49.

18) Maersk(2022), pp. 22-24; EU Commission(2022.11.15.)(검색일: 2023.4.12.)의 자료를 바탕으로 저자 작성

19) Congress.gov(검색일: 2023.4.12.); Bahtić(2022.11.18.)(검색일: 2023.4.12.)의 자료를 바탕으로 저자 작성

한편 2023년 1월에는 “2050 운송수단 탈탄소화 계획(The U.S. National Blueprint for Transportation Decarbonization)”²⁰⁾을 발표하였으며 해당 계획 내 해양 부문에 대한 정책 조치를 포함하였다. 해양 분야의 주요 내용을 살펴보면 2030년까지 10개의 대형 무역항에서 무탄소 연료를 공급하고, 친환경 연료 및 기술에 대한 R&D를 지원하여 미국의 국내 해양 부문을 지원하고 미국 상선 운영자가 온실가스 배출량을 줄이도록 장려하며 2050년까지 국제해운 배출량 제로를 달성하는 것을 목표로 설정하였다.

해당 계획에 제시된 해운 부문과 관련된 주요 조치 및 수단 중 하나는 실행가능한 대체연료 및 신기술에 대한 연구 및 혁신의 추진이다. 주요 연구 주제 예시로는 바이오연료, 암모니아, 수소, 메탄올 등 친환경 연료, 전기선박, AMP, 에너지 효율화 및 하이브리드화 등이 포함되었다. 다음으로 IMO, Quad Shipping Task Port 등 국제·국내 이해관계자가 참여하여 효과적인 탈탄소화 전략(strategies) 및 규정(regulation)의 개발 및 구현의 필요성을 강조하였다. 또한 연료 인프라 투자, 선박 업그레이드·개조 및 전환, 연료 충전 및 보급 인프라 구축 지원 등 신규 및 기존 연방 프로그램을 통한 자금 지원이 필요함을 제시하였다. 그 외에도 EPA는 선박 외 항만의 인프라 개선, 친환경 장비 도입 등 항만의 환경 개선을 위한 다양한 정책지원도 함께 추진하고 있다.

2) 기술개발 및 보급 지원

미국은 ‘해양환경 및 기술지원 프로그램(Maritime Environmental and Technical Assistance (META) Program)’을 통해 해양 산업 환경의 지속가능성 향상을 위한 기술·연구를 지원하고 있다. 주요 추진 연구

20) Departments of Energy, Transportation, Housing and Urban Development, and the Environmental Protection Agency(2023), p. 57, pp. 68-70.

내용으로는 선박 및 항만 대기오염 배출량 저감장비(효율화 등), 친환경 연료 연구 등이 있다. 또한 2017년부터는 해양환경규제 기준을 상회하는 기술에 대해 추가 보조금을 지원하고 있다.²¹⁾

한편, EPA는 「Diesel Emissions Reduction Act(DERA)」에 의거하여 저탄소 연료 선박으로 교체하거나 엔진을 친환경화하는 경우, 선박 내 AMP를 설치하는 경우 등에 대하여 보조금을 지원하고 있으며, 그 외 Federal Ship Financing Program(Title XI) 등에도 일부 친환경 기술에 대한 지원 방안이 포함되어 있다.²²⁾

21) U.S. Department of Transportation(검색일: 2023.4.9.)

22) EPA(검색일: 2023.4.9.)

제3절 국내외 해운선사 환경규제 대응 동향

1. 온실가스 감축 로드맵 수립

탄소중립이라는 글로벌 패러다임에 맞추어 국내외 일부 글로벌 선사들은 선박이 배출하는 온실가스 감축을 위한 전략 및 감축 목표를 제시함으로써 해운 부문 기후변화 대응에 적극적으로 참여할 계획을 밝히고 있다. 주요 추진전략으로는 친환경선박으로의 전환이 있다.

〈표 2-4〉 국내외 글로벌 ‘건’ 선사의 선박 온실가스 감축 로드맵

선사	목표연도	감축목표	주요 추진전략
Maersk	• 2030년	<ul style="list-style-type: none"> 친환경 연료 화물선 최소 25% 이상 2020년 대비 탄소집약도 (EEOI) 50% 감축 	<ul style="list-style-type: none"> 연료 효율 개선 친환경 연료 선박 전환
MSC	• 2030년	• 2008년 대비 탄소집약도 (EEOI) 40% 감축	<ul style="list-style-type: none"> 친환경 연료 선박 전환 에너지 효율화 프로그램
	• 2050년	• 2008년 대비 온실가스 배출량 50% 감축	
HMM	• 2030년	• BAU(Business As Usual) 대비 21.5% 감축	<ul style="list-style-type: none"> 선박의 감속 및 정속 운항 ESD(Energy Saving Device) 적용 CII 규제 충족 선박 도입 저탄소/무탄소 선박 전환

자료: Maersk(2022), pp. 22~24; MSC(2021), pp. 38~42; HMM(2021), pp. 38~43의 자료를 바탕으로 저자 작성

2. 선박 개조 및 설비 개량

한편, 선박의 교체 시기가 도래하지 않아 대체 건조가 어려운 경우 기존

선박에 친환경 설비를 설치하거나 고효율 기자재를 탑재하는 등 선박 개조·설비 개량을 통해 환경규제에 대응하고 있다. 기존 선박에 평형수 처리장치, AMP 수전장치, 에너지 효율 개선장치 등을 설치하거나 고효율 발전기, 선박추진 보조설비 등을 탑재하는 것이 여기에 해당한다. 아래 <표 2-5>에서 볼 수 있는 것처럼 해운업계는 전반적으로 친환경 기술을 많이 적용하고 있으며 에너지 저감을 위한 기술(ESTs; Energy Saving Technologies)도 많이 장착한 것을 확인할 수 있다.

<표 2-5> 친환경 기술 탑재 추이

설비 종류	SOx 스크러버	'LNG Capable'	'LNG Ready'	'LPG Capable'	타 대체연료 Capable	ESTs	선박평형수 관리 시스템	NOx SCR/EGRs	HVSC Systems	'Eco' Engine (Modern)
선박량	>4,815	>881	>340	>55	>436	>5,775	>26,744	>2,167	>1,597	>7,940
%선박량 (%GT 용량)	4.6% (24.4%)	0.8% (4.6%)	0.3% (2.7%)	0.1% (0.2%)	0.4% (0.5%)	5.5% (25.3%)	25.5% (73.9%)	2.1% (8.3%)	1.5% (5.0%)	7.6% (29.4%)
선박 주문	>364	>825	>106	>88	>305	>927	>2,964	>1,196	>343	
%선박 주문 (%GT 용량)	8.0% (18.5%)	18.0% (39.9%)	2.3% (3.7%)	1.9% (2.1%)	6.7% (6.1%)	20.3% (34.8%)	64.8% (93.6%)	26.2% (42.8%)	7.5% (5.7%)	

주: ESTs – Energy saving technologies
자료: Clarkson's Research(2023.1.16.) (검색일: 2023.4.9)

3. 친환경선박 건조

글로벌 환경규제가 강화됨에 따라 선사들은 저탄소·무탄소 선박 신조를 추진하고 있다. 온실가스, 미세먼지, 황 등 다양한 오염물질을 배출하는 기존의 병커유를 대체하기 위한 저탄소·무탄소 연료에는 대표적으로 LNG,

암모니아, 메탄올 등이 있다. 한편, 2022년 1~9월 전체 신조선 발주량 중 59%가 대체연료 선박 발주인 것을 미루어 보아 친환경선박에 대한 선사들의 관심이 높아진 것을 확인할 수 있으며, 특히 LNG 및 메탄올 추진선의 선호가 높은 것으로 나타났다.²³⁾

〈표 2-6〉 국내외 글로벌 ‘컨’ 선사의 친환경선박 발주 현황

선사	개발 현황
Maersk	• 메탄올 ‘컨’ 선박 19척 발주(2023~2025년 순차 인도 예정)
MSC	• 26년까지 LNG·암모니아 연료 ‘컨’ 선박 51척 도입 추진
CMA-CGM	• 메탄올 ‘컨’ 선박 18척 발주(2026년 12척, 2025년 하반기 6척 인도예정) • 바이오가스 ‘컨’ 선박 7척 발주(2024년 인도 예정) • 이중연료엔진 장착 e-메탄 ‘컨’ 선박 77척 보유 예정(~2026년) • LNG ‘컨’ 선박 44척 확대 계획(~2024년말)
Cosco	• 메탄올 이중연료 ‘컨’ 선박 12척 발주(2027~2028년 순차 인도 예정)
HMM	• 메탄올 ‘컨’ 선박 9척 발주(2025~2026년 순차 인도 예정)

자료: 해양한국(2023.4.7.)(검색일: 2023.4.9.); 관계부처합동(2023), p. 2의 내용을 참고하여 저자 작성.

한편, 지금까지 주요 글로벌 선사들이 고려하고 있는 친환경선박의 주요 연료는 LNG, 메탄올, 암모니아, 수소, 바이오 연료 등이 있으며, 각 연료의 특징은 아래 〈표 2-7〉과 같다.

〈표 2-7〉 탄소중립 선박 대안연료 개발 현황 및 문제점

선박연료	개발 현황	문제점
LNG	• 기 상용화	• 메탄슬립 등 탄소저감 효과 한계 • 벙커링 설비 부족
메탄올	• 기 상용화	• 연료 공급능력 부족
암모니아	• 2024년 엔진개발 완료 기대	• 막대한 연료생산설비 투자 • 연료의 독성 문제

23) 해양한국(2023.4.7.)(검색일: 2023.4.9.)

선박연료	개발 현황	문제점
탄소포집	<ul style="list-style-type: none"> • 육상은 기 상용화 • 해상은 초기 단계 	<ul style="list-style-type: none"> • IMO 등 국제기구가 탄소저감 인정문제 검토 중 • 아직까지 경제성 없음 • 포집된 탄소 매립지 불확실
수소	<ul style="list-style-type: none"> • 궁극적 대안으로서 기대 • 세계적으로 연구개발 진행 중 • 내연기관 및 연료전지 방식 	<ul style="list-style-type: none"> • 청정수소 생산을 위한 막대한 투자 필요 • 운반과 저장 어려움 • 내연기관 효율 낮음
연료전지	<ul style="list-style-type: none"> • 자동차는 기 상용화 • 선박용 대형화 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 가격 • 큰 부피와 무게 • 짧은 수명으로 인한 잦은 교체
소형원자로	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 기술은 기 확보 • 선박에 대한 적용은 현재로서도 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 국제적 거부감과 규제 예상 • 폐기물 처리 문제 • 사고 시 예상 피해 규모 추정 어려움
바이오 연료	<ul style="list-style-type: none"> • 기 상용화 • 선박 연료에 혼합유로 사용 중 	<ul style="list-style-type: none"> • 생산능력 한계로 다량 공급 어려움
전기추진 (배터리)	<ul style="list-style-type: none"> • 상용화 단계 • 소형선에는 하이브리드 형태로 이미 적용 	<ul style="list-style-type: none"> • 경제성과 소형화에 어려움 • 소형선에는 적용 가능하나 대형선은 어려울 전망

자료: 한국수출입은행 해외경제연구소(2022.7.4.), p. 4.

4. 친환경 연료 개발 및 생산지원

친환경선박으로의 전환 확대 계획과 함께 선박 연료 공급을 위한 병커링 시설에 대한 투자 및 협력 또한 적극적으로 추진하고 있는 추세이다. 대표적으로 Maersk는 메탄올 추진선 건조와 함께 싱가포르에 메탄올 병커링 허브를 조성하고 있을 뿐 아니라 이집트, 스페인 등과 메탄올, 수소 등 친환경 연료 확보를 위한 파트너십 계약을 맺고 추진 중이다.²⁴⁾ 또한

24) Mitsui&CO(2022.10.4.)(검색일: 2023.4.9.); Maersk(2022.11.3.)(검색일: 2023.4.9.); Maersk(2022.3.28.)(검색일: 2023.4.9.)의 자료를 바탕으로 저자 작성

Maersk의 자회사 Maersk Growth는 그린 액체 리그닌(Lignin)에 투자하고 있다.²⁵⁾ CMA-CGM의 경우 최근 바이오메탄 생산 투자 협약을 맺었으며 에너지 특별기금(Special Fund for Energies)을 조성하여 재생가능 연료 개발 및 생산지원에 중점 투자할 것임을 밝힌 바 있다.²⁶⁾

5. 에너지 효율 개선(소프트웨어 측면)

소프트웨어 측면에서도 선박의 에너지 효율 개선을 위한 기술개발 및 도입이 이루어지고 있다. 대표적인 방안으로 선박의 에너지 소비 및 배출량 최적화를 위한 프로그램의 개발, 최적 항로 도출 및 선박 속도 최적화를 위한 프로그램의 도입 등이 있다.

〈표 2-8〉 국내외 글로벌 ‘컨’ 선사의 에너지 효율 개선(소프트웨어 측면) 추진 현황

선사	개발 현황
Maersk	<ul style="list-style-type: none"> • 선박 배출량 데이터 관리 및 최적화를 위한 디지털 솔루션 개발(Emission Dashboard) • Fleet Decarbonization Optimizer 개발
CMA-CGM	<ul style="list-style-type: none"> • 선박 속도 최적화를 위한 Opt-E-Arrive 채택
HMM	<ul style="list-style-type: none"> • SEEMP를 통한 선박 효율 향상 및 선박 속도 최적화 • ECOS(Energy Consumption Optimization System), TFMS(Total Fleet Management System)를 활용한 선박 운영 최적화 • Hi-stow(화물 적부 프로그램)를 활용한 선박 적재 최적화 • 최적 항로 분석을 위한 첨단 IT 기반 딥러닝 시스템 Vessel Insight 개발

자료: Maersk(검색일: 2022.4.9.); Maersk Broker·McKinsey&Company·Maersk MC-Kinney Møller (2022), pp. 2-4; HMM(2021), pp. 38-43의 자료를 바탕으로 저자 작성

25) Maersk(2021.10.14.)(검색일: 2023.4.9.)

26) CMA-CGM(2022.7.1.)(검색일: 2023.4.9.)

제4절 시사점

2장에서는 해운 부문 탄소배출권 거래제를 비롯한 다양한 환경규제 및 선사의 대응 동향을 살펴보았다. 먼저 환경규제의 경우, 기후변화 대응이 국제사회의 주요 이슈로 부상하면서 해운 부문에서도 글로벌 환경규제가 시행되고, 기술개발 투자·지원이 확대되는 등 탈탄소화를 위한 다양한 접근 방식이 고려되고 있다. 그중에서 2024년부터 EU 기항 선박을 대상으로 시행될 EU-ETS는 EEXI, CII, EEDI 등과 같은 선박의 효율 개선에 대한 규제와 별도로 시행되는 지역기반 조치로, EU를 기항하는 일부 해운선사에게 상당한 비용 부담을 줄 수 있는 규제이다. 그러므로 탄소배출권 시장의 편입은 선사의 운영 전략에 변화를 가져올 수 있을 뿐 아니라 공급망 전반에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 해운선사 및 정책 입안자들은 해운 부문 EU-ETS 편입에 따른 시장의 변화 메커니즘을 사전에 검토하여 새로운 환경규제 시행에 대응하기 위한 전략을 마련할 필요가 있다.

한편, 해운 부문 탄소배출권 거래제는 도입 초기부터 배출권의 무상할당이 없는 방식으로 논의되고 있다. 해운과 산업의 성격이 유사한 항공 부문 탄소배출권 거래제의 경우에는 제도가 충분히 성숙하기 이전인 2012년에 최초로 도입되어 적응기가 필요했기 때문에 무상할당 제도가 존재했다. 반면에, 해운 부문 탄소배출권 거래제는 이미 제도가 충분히 성숙한 이후에 도입되고, 당장 배출량 감축에 대한 요구가 매우 크기 때문에 배출권의 무상할당이 허용되지 않은 것으로 해석된다. 따라서, 해운 부문 탄소배출권 거래제를 초기의 무상할당량이 존재하지 않는 모형으로 분석할 필요가 있다. 또한 해운 부문 탈탄소화 가속화를 위해 여러 환경규제들이 동시다발적으로 운용되고 있다는 점과 친환경 패러다임이 지속될 가능성이 있음을 고려하면, 탄소비용 상승과 같이 탄소 규제가 더욱 강화된 모형에 대해 살펴보는 것도 필요하다고 사료된다.

한편, 해운선사들의 경우 글로벌 환경규제 수준이 강화됨에 따라 친환경 선박 전환, 친환경선박 연료 관련 기술 개발 및 인프라 투자 등을 활발히 추진하고 있는 것을 확인하였다. 또한, 우리나라를 비롯하여, EU, 미국 등에서는 해운 탄소중립과 관련된 기술개발에 대한 활발한 투자를 추진·지원하고 있는 것으로 나타났다. 다만, 연료비 지원 등과 같은 직접적인 비용지원책을 시행하는 경우는 없는 것으로 나타났다. 따라서, 국내 선사 지원시에도 배출규제에 대해 일시적으로 대응하기 위한 직접적인 금융지원이 아닌, 중장기적으로 선사가 경쟁력을 갖추어 환경규제에 적극 대응할 수 있는 환경을 조성할 수 있는 방안이 필요할 것으로 보인다.

세계 각 국가의 정부와 해운선사는 탈탄소 규제에 대해 다양한 방식으로 접근하고 있지만, 어떠한 대응 방안이 가장 최적의 방법인지는 아직 확실하지 않다. 지난 'IMO 2020'의 선박 연료유 황산화물 함유량 규제 당시에도 LNG 추진선과 스크러버 설치 등 다양한 대응 방안이 선택지로 고려되었다. 하지만, 아직 어떠한 대응 방안이 확실한 최선이었는지에 대해서는 평가하기 어렵다. 이는 다양한 규제 대응 방안이 국제 유가와 같은 통제할 수 없는 요인과도 밀접하게 관련되기 때문이다. 따라서, 환경규제에 대한 적절한 대응 방안을 마련하기 위해서는 환경규제에 대한 명확한 이해를 바탕으로 규제 도입에 따른 영향을 충분히 분석한 뒤, 분석 결과를 근거로 하여 합리적인 대응 방안을 수립해야 한다.

해운산업에 대한 환경규제가 단계적으로 강화될 것으로 전망되는 가운데, 국내 해운선사들이 경쟁력을 확보하기 위해서는 환경규제 추진에 따른 해운선사의 운영 전략과 해운산업의 변화 양상을 살펴보고 이를 고려하여 대응 전략과 방안을 체계적, 구체적으로 마련할 필요가 있다. 위에서 살펴본 해운 부문 탄소배출권 거래제의 영향을 보다 구체적으로 살펴보기 위해 본 연구는 꾸르노 모형을 사용하였다. 다음 3장에서는 해운 부문 탄소배출권 거래제를 분석하기 위한 모형인 꾸르노 모형을 소개하고 이 모형을 적용한 근거를 제시한다.

03

탄소배출권 거래제 분석 모형

본 연구는 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 영향을 분석하기 위해 꾸르노 모형을 도입하여 해운 시장을 모형화하고자 한다. 기존 연구는 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 영향을 분석하기 위해 총배출량에 배출권 가격을 곱하는 등 단순한 접근 방법을 이용했다는 한계점이 존재한다. 반면, 본 연구에서 사용한 방법론은 모형을 통해 타 선사와의 경쟁 구조, 탄소배출권 거래제의 시장기반원리, 배출권 가격, 배출량 총량 제한, 선박의 배출계수 등을 동시에 고려하여 환경규제의 영향을 분석할 수 있다는 장점이 있다.

본 장에서는 해운산업의 특성을 살펴본 뒤, 산업 및 시장의 구조에 따라 분석에 적합한 모형을 결정한다. 또한, 선정한 모형을 활용하여 탄소배출권 거래제가 도입된 해운 시장을 구조화하고 분석에 필요한 가정을 설정한다. 마지막으로 실증 분석에 필요한 데이터를 소개한다. 본 연구는 꾸르노 모형과 EU-MRV, 선사의 연간보고서 등을 데이터를 사용하여 해운 부문 탄소배출권 거래제의 도입에 따른 실증 분석 결과와 그에 따른 시사점을 제시한다.

제1절 탄소배출권 거래제 분석을 위한 모형 선정

1. 컨테이너 해운 시장의 특성

시장은 대표적으로 독점시장, 과점시장, 독점적 경쟁시장 및 완전경쟁시장으로 분류될 수 있다. 독점시장은 공급자가 단독인 독점 기업이 존재하는 시장, 과점시장은 소수의 공급자가 존재하는 시장, 독점적 경쟁시장은 다수의 공급자가 존재하나 공급자들이 제공하는 재화가 차별화된 시장, 완전경쟁시장은 다수의 공급자가 존재하는 시장을 말한다. 해운 시장은 하나의 기업이 독점하는 형태는 아니므로 독점시장은 아니며, 선사들은 수송서비스라는 동질적인 재화를 가지고 경쟁하기 때문에 독점적 경쟁시장 또한 아니다.

공급자 수의 측면에서 글로벌 해운 시장을 살펴보면, 2023년 4월 기준, 상위 4개 선사가 시장의 57.6%를, 상위 10개 선사가 85.1%의 선복량을 점유²⁷⁾하고 있으며 그 중 상위 9개 선사가 2M, Ocean Alliance, THE Alliance의 3개의 얼라이언스에 가입되어 있다. 얼라이언스를 결성한 선사 간에는 일부 항로에서 상호 간의 자원을 공유하기 때문에 값비싼 신규 선박을 발주할 필요 없이 새로운 노선을 개척한 효과를 얻을 수 있다. 즉, 얼라이언스 결성을 통해 선사들은 얼라이언스를 맺지 않은 선사들에 비해 서비스 경쟁력을 확보할 수 있고 결과적으로 시장에서의 입지를 공고히 할 수 있다. 다시 말해 해운 시장은 얼라이언스에 속한 상위 9개 선사에 의해 시장이 지배되므로 과점시장의 형태를 띤다고 볼 수 있다(최진우 외, 2023).

27) Alphaliner TOP 100(2023.4.9.)(검색일: 2023.4.9)

〈표 3-1〉 3대 얼라이언스의 시장점유율

구분	선사(순위)	시장점유율
2M	MSC(1), Maersk(2)	33.9%
Ocean Alliance	CMA-CGM(3), Cosco(OOCL)(4), Evergreen(6)	30.0%
THE Alliance	Hapag-Lloyd(5), ONE(7), HMM(8), Yang Ming(9)	19.1%
계		83.0%

주: 2023년 4월 9일 기준이며 순위 및 시장점유율은 선복량 기준임

자료: Alphaliner TOP 100(2023.4.9.) (검색일: 2023.4.9)

해운 시장을 과점시장으로 볼 수 있는 또 다른 근거는 해운시장은 전략적 시장이라는 점이다. 과점시장 안의 기업들은 상호의존도가 높기 때문에 본인의 행동에 대한 시장의 반응을 고려하여 전략을 개발해야 할 필요가 있다. 해운 시장은 신조선 발주, 선대 투입 등 신규 투자를 추진할 때 타 선사들의 반응을 고려하여 전략적으로 투자하게 되므로 과점시장의 특성을 보인다. 그 외 신규 기업의 진입장벽이 비교적 높다는 점도 과점시장의 특성과 유사하다.

한편, 해운 시장은 공급량(선복량)과 수요량(컨테이너 물동량)에 따라 요금의 상승과 하락이 결정되므로 가격이 아닌 공급량을 통해 경쟁하는 시장에 가깝다. 과점시장에서 공급량을 통해 경쟁하는 경우, 슈타켈버그 모형과 꾸르노 모형의 적용을 고려할 수 있다. 이에 본 연구는 두 모형의 특징을 검토한 뒤 본 연구에서 적용할 모형을 선정하고자 한다.

2. 분석 모형 검토 및 선정

1) 슈타켈버그 모형(Stackelberg Model)

슈타켈버그 모형은 과점시장에서 그 시장을 주도하는 선도기업이 어떠한 의사결정을 먼저 내리고, 그 후 추종기업들이 그에 기초하여 의사결정을

한다고 보는 모형이다. 선도기업은 추종기업의 반응을 예상하고 자신에게 유리한 공급량을 결정하며, 추종기업은 선도기업의 선택을 주어진 것으로 보고 자신의 이익을 극대화할 수 있는 공급량을 결정한다. 다만 탄소배출권 거래제 하의 해운 시장의 경우 선도기업과 추종기업이 존재하는 형태로 보기는 어려우므로 본 모형의 적용은 적절하지 않은 것으로 보인다.

2) 베르트랑 모형(Bertrand Model)

베르트랑 모형은 기업들이 동질적인 재화에 대하여 동일한 한계비용으로 생산하고 있으며 이들이 가격으로 경쟁하는 상황을 가정한다. 이때 각 기업은 경쟁을 위해 서로 상대방보다 조금씩 더 낮은 가격을 설정한다. 그 결과, 각 기업이 설정한 가격은 기업의 한계비용까지 하락한다. 두 개 이상의 기업이 베르트랑 경쟁을 하면 완전경쟁시장과 마찬가지로 균형가격이 한계비용과 같아지는 결과가 도출된다. 각 기업이 생산량으로 경쟁한다고 가정한 쿠르노 모형보다 현실을 더 잘 묘사한 모형임에도 불구하고 완전경쟁시장과 같이 균형가격이 한계비용에 수렴한다는 쉽게 이해할 수 없는 결론이 도출된다. 두 기업이 베르트랑 경쟁을 하는 경우 만약 기업들의 한계비용이 서로 다르다면 시장가격은 한계비용이 낮은 기업의 한계비용을 따르며 한계비용이 높은 기업은 퇴출된다. 해운 시장에서 각 선사는 운임보다는 선복량(생산량)으로 경쟁하기 때문에 본 모형의 적용은 적절하지 않다.

3) 쿠르노 모형(Cournot Model)

쿠르노 모형은 과점시장에 포함된 각 기업이 경쟁기업의 현재 생산량을 그대로 유지할 것이라고 보고 자신의 이윤을 극대화할 수 있는 생산량을 선택하는 방식으로 경쟁하는 형태로 모든 기업이 추종기업의 역할을 하게 된다. 그리고 생산된 재화의 가격은 기업들에 의하여 공급된 생산량 총량과 시장수요에 의해 결정된다. 탄소배출권 거래제 하에서 해운 시장에서

선사 간 경쟁 형태를 가정하면, 각 선사는 타 선사의 전략을 예상하면서 할당받은 탄소배출권과 구매 또는 판매할 탄소배출권의 양을 고려하여 자신의 이윤을 극대화하는 방향으로 선박 운항, 즉 수송량을 결정하게 된다. 이때 각 선사의 결정은 동시적인 성격을 지니므로 꾸르노 모형의 특성에 부합한다. 따라서 탄소배출권 거래제 도입에 따른 선사 운영 전략 검토를 위해 꾸르노 모형을 적용하는 것은 적절할 것으로 판단된다.

또한, 꾸르노 모형은 수학적으로 풀이가 수월하여 분석 결과에 대한 해석이 용이하고 모형 내에 다양한 정책, 기술 변화 등 세부 조건을 반영할 수 있어서 보다 다양한 시사점을 제공한다는 장점이 있다. 마지막으로, 문헌에 따르면 실증 데이터와 꾸르노 모형을 결합하여 분석한 결과는 실제 시장의 분석에 대한 유의미한 근사치를 제공할 수 있다(Bushnell et al., 2008; Tanaka and Chen, 2012).

제2절 꾸르노 모형

1. 모형의 구성 요소 및 가정

본 연구에서는 해운 부문 탄소배출권 거래제의 형태를 크게 두 가지로 나누어 분석한다. 첫 번째는 제도 초기에 해운선사에게 탄소배출권이 무상으로 할당되는 경우이다. 타 부문 탄소배출권 도입 과정을 살펴보면, 제도의 도입 초기에는 제도 운영을 위한 정보가 많지 않고, 참가자 역시 제도에 익숙하지 않기 때문에 각 참가자의 과거 배출량을 기반으로 무상으로 탄소배출권을 할당했다. 이후, 탄소배출권 거래제에 참가자가 적응하면서 점차 무상할당량을 줄이고 경매를 통해 탄소배출권 할당량을 늘려 시장기반조치로서의 성격을 강화했다. 따라서, 본 연구에서도 해운 부문의 탄소배출권 거래제가 각 참가자의 과거 배출량을 기반으로 무상으로 탄소배출권을 할당하는 형태를 분석하였다.

하지만, 앞서 서술했듯이 해운 부문 탄소배출권의 경우 배출권 총량 제한에 대한 무상할당이 전면 폐지된 상태로 도입될 가능성이 매우 크다. 즉, 해운선사는 영업에 따라 배출한 온실가스만큼 반드시 배출권 전량을 구입해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 탄소배출권 거래제의 무상할당이 폐지되고 전량 경매로 거래되는 형태를 분석하였다. 이처럼 두 가지 형태의 탄소배출권 거래제를 모형화하고 분석하여, 가까운 시일 내 도입될 예정인 해운 부문 탄소배출권 거래제 대한 다양한 실증적 증거를 도출할 수 있을 것으로 기대하였다. 예를 들어, 무상할당량이 존재하는 모형과 무상할당량이 폐지된 모형을 비교하여 무상할당량이 개별 해운 선사와 해운 시장의 균형에 어떠한 영향을 미치는지 살펴볼 수 있다. 이를 통해 각 해운선사는 탄소배출권 거래제 도입 형태에 따라 적합한 대응 방안을 설정할 수 있으며 시장 관리자는 보다 효과적으로 해운 시장에서 발생하는 배출량을 감소시키기 위한 정책을 수립할 것으로 기대된다. 또한, 두 가지 형태의 탄소

배출권 거래제를 모형화하고 비교하여 탄소배출권 거래제 내 배출권 무상 할당량의 효과와 탄소배출권 가격에 시장 관리자의 개입 효과를 분석할 수 있다.

본 연구에서 구축한 모형은 다음과 같은 한계점을 가지고 있다. 먼저, 해운선사의 화물 수송에 물리적인 한계를 고려하지 않았다. 본 연구에서 구축한 모형 내에서 각 해운선사는 배출계수와 운영비용 등 특성과 경쟁 선사의 의사결정에 따라 수익을 극대화하는 최적 수송량을 결정하였다. 결정된 최적 수송량은 해운선사가 모두 처리할 수 있는 것으로 가정하였다. 실제로는 신조선 인도에 최소 1~2년 이상이 소요되지만, 본 연구에서는 즉각 공급이 가능한 것으로 가정하였다. 또한, 본 모형 내에서 각 해운선사가 결정한 최적의 수송량은 운송시장 내에 충분한 수요에 의해 충족되는 것으로 가정하였다.

마지막으로, 배출권 거래제 시장은 개방된 형태(Open-ETS)로 도입되었음을 가정했다. 이는 각 해운선사가 다른 산업으로부터 추가적인 배출권을 구매하여 할당된 배출권 이상으로 더 많은 온실가스를 배출할 수 있다는 것을 의미한다. 반대로, 해운 부문에서 탄소배출권을 저감하여 타 부문에 판매하는 것도 가능하다. 개방된 ETS는 탄소배출량 감소를 위해 해당 산업 내에서뿐만 아니라 다른 산업 간의 경쟁도 장려하기 때문에 일반적으로 더욱 진보된 시스템으로 간주된다(Wang et al., 2015). EU의 항공부문 탄소배출권 거래제의 경우, 환경규제로부터 산업을 보호하기 위해 초기 단계에서는 폐쇄된 형태(Close-ETS)로 도입되었다. 한편, 해운 부분 배출권 거래제는 환경규제의 효과를 강화하기 위해 초기부터 개방된 형태로 도입되는 것이 논의되고 있다.

1) 해운선사 수익 및 비용 함수

본 연구에서 채택한 꾸르노 모형은 산출물 시장과 배출권 시장을 동시에

고려하는 Westskog(1996)와 Tanaka and Chen(2012)의 모형을 기반으로 한다. 해운 부문 탄소배출권 거래제를 분석하기 위해 꾸르노 모형을 사용하는 것에 대한 당위성은 3장 1절에서 충분히 다루었다. 본 연구에서 사용한 꾸르노 모형에서 기업 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 는 시장의 생산량(선사의 경우 선복량 또는 수송량)을 조절함으로써 경쟁한다. 각 해운선사는 경쟁 선사의 수송량이 변하지 않는다는 가정 하에 본인의 이윤을 극대화할 수 있는 수송량을 결정한다. 탄소배출권 거래제는 산업 내 배출권 총량의 상한을 설정하고 참가자에게 배출권을 할당한다. q_i 를 해운선사의 i 의 수송량(또는 생산량)으로 정의하고, 탄소배출권이 각 선사에게 배분되면 해운선사 i 의 총이익은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pi_i(q_i) = \Pi_i^S(q_i) + \Pi_i^C(q_i) \quad (1)$$

여기서 $\Pi_i^S(q_i)$ 은 해운 시장에서 선박 운영을 통해 창출한 수익을 나타내며, $\Pi_i^C(q_i)$ 은 배출권 거래 시장에서 배출권 거래로 인해 발생한 수익을 나타낸다. $\Pi_i^C(q_i)$ 는 배출권의 판매 또는 구입에 따라 양과 음의 값을 모두 가질 수 있다. 이 두 항은 모두 q_i 의 함수이다. 해운 시장에서 발생하는 영업 이익과 배출권 거래 이익은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Pi_i^S(q_i) = P^S q_i - C_i(q_i) \quad (2)$$

그리고

$$\Pi_i^C(q_i) = P^C x_i \quad (3)$$

여기서 P^S 와 P^C 는 각각 해상 운임과 배출권의 가격을 나타내며, x_i 는 해운선사 i 의 온실가스 감축량을 의미한다.

2) 해상 운임 및 배출권 시장 가격 함수

$Q = \sum_{i=1}^n q_i$ 를 해상운송의 총수요로 정의하면 해상 운임 $P^s = P(Q)$ 는 해운 시장의 역수요 함수로 나타낼 수 있다. 해상운송 수요가 단기적으로 음의 가격 탄력성을 가진다고 가정하면 해상 운임 P^s 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P^s = -m_s Q + b_s \quad (4)$$

여기서 파라미터 m_s 와 b_s 는 실증 데이터를 바탕으로 추정한 해상 운임 함수의 기울기와 상수값이다. 본 연구에서 사용하는 실증 데이터에 관한 서술은 3장 3절에서 자세하게 다룬다. 해운선사 i 가 q_i 를 해상으로 운송하는데 소요되는 총비용은 $C_i(q_i)$ 로 표기된다. 일반적으로 해운선사의 총비용 함수는 규모의 경제 특성을 반영할 수 있는 로그 함수의 형태로 알려져 있지만, 본 연구에서는 모형의 단순화를 위해 선형 방정식으로 가정하였다.

$$C_i(q_i) = a_i q_i + c_i \quad (5)$$

여기서 파라미터 a_i 와 c_i 는 각각 해운선사의 가변 비용과 고정 비용을 나타낸다. 해운선사의 운영비용을 나타내는 두 파라미터 값 또한 실증 데이터를 바탕으로 산정되었다.

해운선사의 이산화탄소 총 감축량은 $x_i = \sum_{i=1}^n x_i$ 로 정의된다. 또한 k_i 는 해운선사 i 에게 무상으로 할당된 배출권으로 정의된다. 본 연구에서 무상할당 배출권 k_i 은 해운선사의 과거 배출량을 고려하여 할당되는 Grandfathering 방식을 적용하였다(Böhringer and Lange, 2005). 따라서, 해운선사 i 의 이산화탄소 감축량은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$x_i = k_i - e_i q_i \quad (6)$$

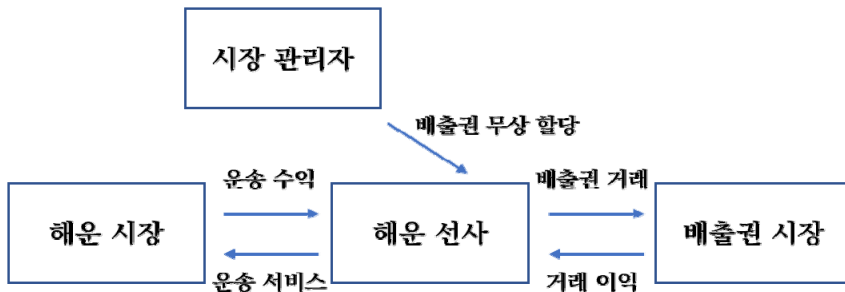
여기서 e_i 는 해운선사의 해상 운송량 단위당 배출하는 이산화탄소로서 양의 실수의 값을 가진다. 배출계수 e_i 는 EU-MRV의 실증 데이터를 기반으로 산정되었다. 탄소배출권의 가격은 이산화탄소 총 감축량에 반비례하기 때문에 다음 선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$P^C = -m_c x_t + b_c \quad (7)$$

여기서 파라미터 m_c 와 b_c 는 실증 데이터를 기반으로 산정되었으며 각각 탄소배출권 가격 함수의 기울기와 절편을 나타낸다.

아래 그림은 본 연구에서 설정한 꾸르노 모형의 시장 구조를 나타낸다. 위에서 언급하였듯 해운선사는 이익을 최대화하기 위해 운송량과 배출권 거래량에 대해 전략적 의사결정을 수행한다. 해운선사는 탄소배출권 시장에서 배출권을 추가로 구입하여 더 많은 해상 운송량을 처리하고 운송 수익을 증가시킬 수 있다. 또는, 해상 운송량을 축소하고 할당받은 탄소배출권 일부를 판매하여 배출권 판매 수익을 얻을 수도 있다. 이는 탄소배출권 거래제의 규제 수준, 선사 특성, 경쟁 선사에 의해 결정된다.

〈그림 3-1〉 무상할당을 포함한 탄소배출권 거래제 모형



자료: 저자 작성

2. 쿠르노-내쉬 균형의 도출

위에서 서술한 선사의 수익 극대화 모형은 다음과 같은 최적화 문제로 정리할 수 있다.

$$\text{Max } \Pi_i(q_i) = \Pi_i^S(q_i) + \Pi_i^C(q_i), \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

위 수식(8)을 수송량인 q_i 에 대해 아래와 같은 1차 조건을 만족하는 수송량을 구하면 수익을 극대화하는 q_i^* 를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \Pi_i(q_i)}{\partial q_i} = 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (9)$$

모든 해운선사 i 에 대해 식 (9)를 동시에 풀면 내쉬 균형의 결과로서 각 선사의 최적 수송량 q_i , 감축량 x_i , 시장 균형 상태의 해상운임 P^s , 배출권 가격 P^c 를 얻을 수 있다. 이러한 균형 결과를 바탕으로, 해운선사 i 의 총 이익 $\Pi_i(q_i) = \Pi_i^S(q_i) + \Pi_i^C(q_i)$ 를 산정할 수 있다. 위 방정식을 풀기 위해 수식(8)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pi_i(q_i) &= \Pi_i^S(q_i) + \Pi_i^C(q_i) \\ &= P^S q_i - C_i(q_i) + P^C x_i \\ &= (-m_s Q + b_s) q_i - a_i q_i - c_i + (-m_c x_t + b_c)(k_i - e_i q_i) \end{aligned} \quad (10)$$

수식(10)의 일반화된 1차 조건은 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} m_s Q + m_c e_i e_1 q_1 + m_c e_i e_2 q_2 + \dots + (2m_c e_i e_i + m_s) + \\ \dots + m_c e_i e_n q_n + a_i = b_s - e_i b_c + m_c e_i k_1 + m_c e_i k_2 + \\ \dots + 2m_c e_i k_i + m_c e_i k_n \end{aligned} \quad (11)$$

3. 탄소배출권 거래제 내 무상할당 폐지 가정

한편, 위에서 서술했듯이 해운 부문 탄소배출권 거래제는 초기부터 탄소 배출권의 무상할당 없이 전량 경매로 할당하는 방안이 고려되고 있다. 따라서, 탄소배출권이 각 해운선사에게 전량 경매로만 할당되는 탄소 배출권 거래제를 분석하는 모형을 구축하였다. 즉, 해운선사는 선박 운영에 따라 배출한 온실가스만큼 반드시 배출권 거래 시장에서 배출권을 구입해야 한다. 마찬가지로 해운선사 i 의 이익 극대화 문제는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Pi_i(q_i) = \Pi_i^S(q_i) + \Pi_i^C(q_i) \quad (12)$$

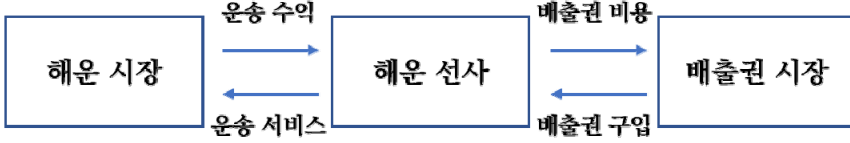
이때, $\Pi_i^C(q_i)$ 항은 배출권 거래 시장에서 배출권 거래로 인해 발생하는 이익을 나타내며 q_i 의 함수이다. 해운선사는 무상으로 할당받은 배출권이 없기 때문에 영업에 따라 배출한 온실가스만큼 반드시 배출권을 구입해야 한다. 따라서, 배출권 시장에서 발생하는 이익(비용)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi_i^C(q_i) = -P^C \times e_i q_i \quad (13)$$

여기서 P^C 는 배출권 가격을 나타내며, e_i 는 해운선사의 해상운송 단위당 발생하는 배출량이다. 한편, 해운선사의 이산화탄소 총감축량은 $x_i = \sum_{i=1}^n x_i$ 로 정의되었다. 무상할당이 존재하지 않는 경우, 모형 내에서 무상 할당 배출권을 나타내는 k_i 은 모든 선사에 대하여 0의 값을 가진다. 따라서, 해운선사 i 의 이산화탄소 감축량은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$x_i = -e_i q_i \quad (14)$$

〈그림 3-2〉 무상할당을 폐지한 탄소배출권 거래제 모형



자료: 저자 작성

이러한 균형 결과를 바탕으로, 해운선사 i 의 총이익 $\Pi_i(q_i) = \Pi_i^S(q_i) + \Pi_i^C(q_i)$ 를 계산할 수 있다. 위 방정식을 풀기 위해 식 (14)는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Pi_i(q_i) &= \Pi_i^S(q_i) + \Pi_i^C(q_i) \\
 &= P^S q_i - C_i(q_i) - P^C e_i q_i \\
 &= (-m_s Q + b_s) q_i - a_i q_i - c_i + (-m_c x_i + b_c)(-e_i q_i)
 \end{aligned} \tag{15}$$

식 (15)의 일반화된 1차 조건은 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned}
 m_s Q + m_c e_i e_1 q_1 + m_c e_i e_2 q_2 + \cdots + (2m_c e_i e_i + m_s) + \\
 \cdots + m_c e_i e_n q_n + a_i = b_s - e_i b_c
 \end{aligned} \tag{16}$$

제3절 분석 데이터

1. 기초데이터 수집

본 연구는 꾸르노 모형과 수치적 방법을 통해 EU-ETS 도입에 따른 컨테이너 해운선사의 대응 변화 메커니즘을 검토하고자 하였다. 해운 시장의 대응을 보다 현실성 있게 분석하기 위하여 수치해석을 위한 데이터는 실제 선사가 EU에 제출한 EU-MRV 데이터를 기초로 하였다.

이에 먼저 EU-MRV 시스템에서 제공하는 2022년 EU 권역 내 항만을 기항한 5,000GT 이상 선박별 이산화탄소 배출 데이터²⁸⁾를 수집하였다. 이후, 수집된 데이터에 대해 선종, 운영 선사 등의 정보를 추가적으로 파악하기 위하여 IHS Markit의 선박 정보 데이터를 이용하였다. 그리고 수집된 두 데이터를 활용하여 총 12,474건의 EU-MRV 데이터 중 컨테이너 선박에 해당하는 1,769건을 추출하였다. 그 후 추출된 컨테이너 선박 데이터 중 수송량(M tonnes·n miles)²⁹⁾당 평균 이산화탄소 배출량(gCO₂)이 전체 데이터의 상·하위 각 0.5%에 해당하는 값들은 일반적인 선박 운항의 형태를 벗어난 것으로 간주하고 이상치(Outlier)로 처리 및 제거하였다. 이러한 데이터 전처리 과정을 거쳐 총 125개 선사³⁰⁾의 1,752척 선박의 데이터를 최종 분석 대상으로 선정하였다.

한편, 모형 분석을 위해 필요한 파라미터는 선사별 할당배출권(k_i), 배출계수(e_i), 단위 운영비용(a_i) 및 연간 고정비용(c_i)으로 구성되며, 각 파라미터의 값을 산출한 방법은 다음과 같다. 먼저 할당배출권(k_i)은 선사별로

28) EU-MRV Public Emission Report v20(2023.7.20).(검색일: 2023.7.27.)

29) EU-MRV 데이터 세트 중 'Transport work' 기준

30) A사의 자회사인 B사가 데이터에 포함된 경우, 자회사는 모회사와 구별되는 법인으로 간주하고 별도로 분석함

할당된 이산화탄소 배출허용량을 의미하며, 100% 무상할당을 가정하고 EU-MRV에서 수집된 선박별 총 이산화탄소 배출량을 선사별로 취합하여 설정하였다.

배출계수(e_i) 또한 EU-MRV 데이터를 활용하였다. EU-MRV 데이터는 EEDI, EIV(Estimated Index Value) 등 선박의 기술적 효율성을 나타내는 값들을 제공하고는 있지만, 이는 선박의 건조 과정에서 측정된 값으로 실제 선박 운영에 따른 온실가스 배출량과는 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 EU-MRV에 집계된 선사별 총 이산화탄소 배출량(tonne)을 수송량(tonne)³¹⁾ 값으로 나누어 단위 수송량 대비 탄소배출량을 산정, 배출계수로 활용하였다.

단위 운영비용(a_i)은 선박 수송량을 늘리기 위해 필요한 단위 비용이다. 단위 운영비용은 각 선사에서 발간한 2020년도 재무보고서, 연간보고서 등을 참고하여 연간 매출액 대비 운영비용 비중(%)과 연평균 톤당 화물료(USD/tonne)³²⁾ 데이터를 활용하여 산정하였다. 2021년과 2022년의 경우 COVID-19 및 유류비 급증으로 일반적인 수준의 운영비용으로 보기 어렵기 때문에 2020년의 데이터를 활용했다. 여기서 연간 매출액 대비 운영비용 비중은 EBITDA margin³³⁾을 제외한 비중으로 설정하였으며 구체적인 산정 방식은 아래와 같다.

31) 기존 m tonnes·n miles 단위의 값을 환산계수를 적용하여 재산정한 값임. 환산계수는 Clarkson Shipping Intelligence(2023.3.1.)의 'Shipping Review and Outlook Tables March 2022(Excel)' (검색일: 2023.8.1.) 데이터를 활용하여 2022년 기준 m tonnes·n miles 단위의 컨테이너 물동량 값과 tonnes 단위의 컨테이너 물동량 값을 활용하여 산정하였음

32) 기존 USD/TEU 단위의 값을 USD/TEU - USD/tonnes 환산계수를 적용하여 재산정한 값임. 환산계수는 IHS Markit에서 수집한 데이터의 선박별 TEU 대비 Deadweight 값을 기중평균하여 산정하였음

33) 회사의 영업활동을 통한 현금창출능력을 보기 위한 수익성 측정지표. 이자, 세금, 감가상각비 차감 전 이익인 EBITDA(Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization)를 총매출액으로 나눈 값임

$$a_i = Freight\ rate \times (1 - (EBITDA\ margin))$$

또는 = 수송량 당 단위 운영비용(USD/tonne)

Freight rate = 화물료(USD/tonne)

EBITDA margin = EBITDA 마진(%)

마지막으로 고정비용(c_i)은 선박의 운항과 관계없이 발생하는 금액으로, 본 연구에서는 자본비용에 해당하는 선박 비용으로 설정하였다. 이에 선사별 선박 비용을 도출하기 위하여 Cullinane&Khanna(1999, 2000)의 연구 결과를 참고하여 EU-MRV 내 선박별 가격을 산정한 후 해당 선박이 속한 해운선사로 취합하였다. 개별 선박의 가격 산출을 위해 사용한 수식은 다음과 같다(Cullinane&Khanna, 1999, 2000).

$$\ln(Ship\ price) = 4.8097 + 0.759 \times \ln(N)$$

Ship price = 선박 비용(USD)

N = 선박 크기(TEU)

이렇게 산출된 선사별 선박 가격은 선사가 보유한 선박들에 대한 전체 금융비용으로, 분석을 위해서는 연간 부담 비용으로의 조정이 필요하다. 이에 본 연구에서는 연간등가비용, 즉 원리금 균등상환의 개념을 적용하여 연간 고정비용을 산출하였다. 이때, 선박의 수명은 20년으로, 연간 이자율은 6%로 가정하였다.

2. 해운선사 및 파라미터 설정

본 연구에서는 수집된 실증 데이터 값을 활용하여 모형 내 4개의 가상 선사를 가정하였다. 이때, 본 연구에서는 선사의 운영비용과 배출계수에 따른 선사의 전략적 의사결정을 살펴보기 위해 두 변수를 기준으로 선사를

구분했다. 즉, 수집한 EU-MRV 데이터를 기준으로 S1과 S2는 단위 운영 비용이 상대적으로 낮은 선사이며, S3과 S4는 단위 운영비용이 상대적으로 높은 선사이다. 반면, S1과 S4는 상대적으로 배출계수가 낮아 친환경적인 선사이며, S2와 S3는 배출계수가 높아 수송량 당 단위 배출량이 많은 선사이다. 4개 선사에 대한 분석이 EU-MRV로 부터 수집된 전체 컨테이너 해운 시장을 대표할 수 있도록 탄소배출권 등 각 선사의 데이터를 재조정 하였다.

〈표 3-2〉 가상의 4개 선사별 파라미터값

선사	단위 운영비용 (a_i)	배출계수 (e_i)	연간고정비용 (c_i)	할당배출권 (k_i)
S1	65	0.04	5,132,950	12,429,125
S2	65	0.06	4,387,480	14,220,729
S3	75	0.06	2,954,270	8,953,240
S4	75	0.04	1,026,590	1,580,561

자료: 저자 작성

a_i = 수송량 당 단위 운영비용(USD/tonne)

e_i = 단위 수송량 당 탄소배출량(배출계수, tonne/tonne)

c_i = 연간 고정비용(USD)

k_i = 무상으로 할당받은 탄소배출권(tonne)

3. 해상운임 및 배출권 가격 함수 설정

컨테이너 운임 함수는 세계 컨테이너 물동량³⁴⁾과 중국 컨테이너 운임 지수(CCFI)³⁵⁾의 연간 데이터로부터 도출하였다. 10년(2010~2019)간 데이터를 바탕으로 운임 함수를 도출했으며 COVID-19로 인한 이상치를 제거하기 위해 2020, 2021년 데이터는 제외하였다. EU-MRV 데이터

34) The World Bank(검색일: 2023.11.29.)

35) Clarkson Shipping Intelligence(검색일: 2023.7.27.)

규모에 맞게 조정된 해상 운임 함수를 도출하기 위해 The World Bank의 세계 컨테이너 물동량 데이터를 사용했으며 EU-MRV³⁶⁾와 The World Bank의 총 컨테이너 물동량 간의 비율을 사용하여 세계 컨테이너 처리량 데이터를 규모에 맞게 조정했다. 마지막으로, 조정된 세계 컨테이너 처리량을 독립변수로 사용하여 EU-MRV의 규모에 맞게 조정된 해상 운임 함수를 도출했다.

탄소배출권 가격 함수는 지난 10년(2013~2022)간 European Energy Exchange(EEX)³⁷⁾의 총 배출권 수량과 EUA 가격³⁸⁾을 기반으로 도출하였다. 2023년 기준, 배출권의 연 평균 가격은 약 USD 86.2이다. 마찬가지로, EU-MRV 데이터 중 컨테이너 해운에 국한된 배출권 가격 함수를 도출하기 위해 EU 총배출량 대비 컨테이너 선박에 의한 배출량 비율을 이용하여 규모를 재조정했다. 위의 과정을 거쳐 산정된 컨테이너 운임 함수와 배출권 가격 함수의 파라미터는 아래와 같다.

$$m_s = 1.13e - 07$$

$$b_s = 137.38$$

$$m_c = 1.51e - 06$$

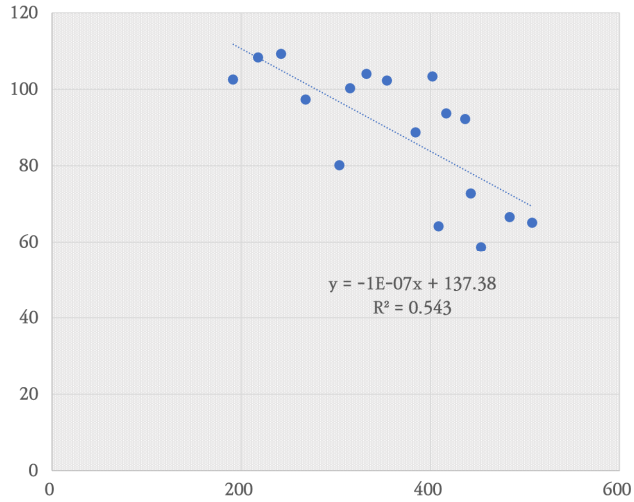
$$b_c = 101.53$$

36) EU-MRV Public Emission Report v20(2023.7.20.)(검색일: 2023.7.27.)

37) European Energy Exchange (EEX)(검색일: 2023.7.27.)

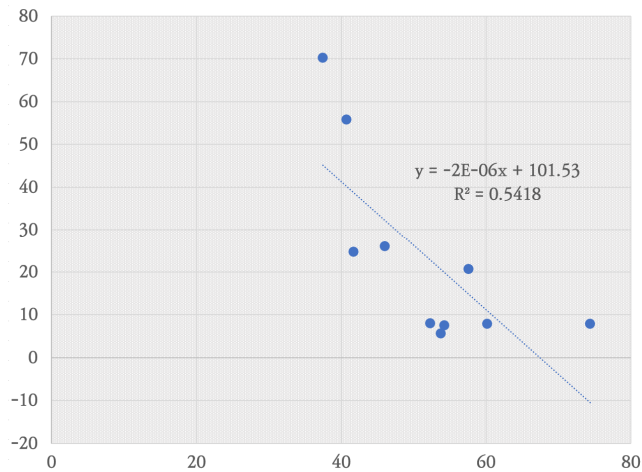
38) European Environmental Agency (EEA)(검색일: 2023.7.27.)

〈그림 3-3〉 컨테이너 운임 함수(USD/M tonnes)



자료: 저자 작성

〈그림 3-4〉 탄소배출권 가격 함수(USD/M tonnes)



자료: 저자 작성

04

탄소배출권 거래제 모형 분석 결과

본 4장에서는 3장에서 설정한 탄소배출권 거래제 분석 모형을 바탕으로 해운 부문 탄소배출권 거래제가 해운 시장 및 각 해운선사에 미치는 영향을 분석한다. 또한, 규제 수준의 변화와 정부 정책에 따른 효과를 분석하기 위해 다양한 시나리오를 설정하여 분석을 수행한다. 먼저, 무상할당량, 배출권 가격, 선사 운영비용 등 주요 파라미터가 변화할 때 해운 시장 전체에 미치는 영향을 분석하기 위해 해석적 접근 방법을 이용한다. 이를 통해 탄소배출권 도입이 해운 시장에 미치는 영향에 대한 일반적인 시사점을 도출할 수 있다.

다음으로, 닫힌 형태의 수식이 너무 복잡하여 해석적으로 풀이가 어려운 것은 통계 자료를 기반으로 하는 수치적 방법을 활용한다. 실증 데이터를 바탕으로 운영비용 등의 선사 특성과 배출권 가격 및 운임 함수를 도출하여, 배출권 가격의 상승, 선사의 친환경선박 도입 등에 따른 시장 균형의 변화를 분석한다. 이를 통해, 환경규제 수준의 강화와 정부 정책 시행에 따른 해운 시장 및 해운 선사의 수송량, 배출량, 총이익의 변화를 살펴볼 수 있다. 이러한 분석을 통해 해운 부문 탄소배출권 거래제의 효과에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 기대한다.

제1절 탄소배출권 거래제 영향 분석

1. 탄소배출권 거래제 이해관계자

탄소배출권 거래제는 기후 변화 대응을 위한 환경규제 수단 중 하나로, EU 또는 IMO 등 국제기구, 해운선사, 정부로 구분할 수 있다. 먼저, IMO 또는 EU와 같은 국제기구는 해운 부문에서의 탄소 배출량을 통제하기 위해 탄소배출권 거래제 도입을 고려하고 있다. 국제기구는 탄소배출권 거래제의 배출량 감축 효과를 높이기 위해서 탄소배출권의 무상할당량을 점차 줄일 수 있다. 또한, 시장 원리에 기반한 탄소배출권 거래제는 배출권의 가격을 높여 해운선사의 탄소 배출 비용을 증가시키고, 이에 따라 해운 시장에서 발생하는 배출량을 줄일 수 있다.

해운 부문 탄소배출권 거래제 도입에 따른 직접적인 이해관계자는 일반적으로 같이 국제기구, 해운선사, 정부로 구분할 수 있다. 먼저, IMO 또는 EU와 같은 국제기구는 해운 부문에서의 탄소 배출량을 통제하기 위해 탄소배출권 거래제 도입을 고려하고 있다. 국제기구는 탄소배출권 거래제의 배출량 감축 효과를 높이기 위해서 탄소배출권의 무상할당량을 점차 줄일 수 있다. 또한, 시장 원리에 기반한 탄소배출권 거래제는 배출권의 가격을 높여 해운선사의 탄소 배출 비용을 증가시키고, 이에 따라 해운 시장에서 발생하는 배출량을 줄일 수 있다.

해운선사는 탄소배출권 거래제와 같은 환경규제가 도입되면 비용 최소화 및 생존을 위해 탄소 배출량을 줄여야 한다. 이때, 각 해운선사는 탄소 배출량을 줄이기 위해 필요한 비용과 경쟁 해운선사의 의사결정 등을 고려하여 자신의 수익을 극대화하기 위한 전략을 취할 것이다. 탄소 배출량을 줄이기 위해 해운선사가 취할 수 있는 대표적인 전략은 선대를 LNG, 암모니아, 수소 등을 대체 연료로 사용하는 친환경선박으로 전환하는 것이다.

친환경선박은 기존 선박과 비교하여 배출계수가 낮기 때문에 배출 비용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 경쟁 선사 대비 상대적 우위를 점할 수 있다.

마지막으로 각 정부는 새로운 환경규제로부터 국적선사를 보호하기 위해 다양한 지원 정책을 수행할 것이다. 대표적으로 국적선사들이 친환경선박으로 전환하는 것을 돕는 금융, 세금 혜택 등을 제공하거나 친환경 연료에 대한 인프라 확충을 도울 수 있다. 본 연구에서는 위에서 설명한 것과 같이 국제기구, 해운선사, 정부의 관점에서 탄소배출권이 해운 시장에 미치는 영향을 분석한다.

2. 탄소배출권 거래제 모형 해석적 분석

탄소배출권 거래제가 해운 시장에 미치는 영향을 분석하기 위해 푸르노 모형에 의해 도출된 수식을 해석적으로 분석하였다. 해석적 접근법은 수식을 분석하여 정확한 해나 추론을 제공할 수 있지만, 모형이 복잡한 경우에는 명확한 해석이 어려울 수 있다. 이 경우에는, 수치적인 방법을 사용하여 근사적인 결과를 얻어내어 복잡한 문제를 분석하였다.

1) 선사 간 대칭성 가정

해석적 방법을 이용하여 닫힌 형태(closed form)의 해를 얻기 위해서는 일반적으로 모형이나 함수의 복잡성을 줄이는 추가적인 가정이 필요하다. 여기서는 모형 내 선사 이익 함수의 복잡성을 줄이기 위해, 해운 시장 내 선사가 모두 동일한 특성(운영비용, 배출계수, 무상할당량)을 갖는다고 가정하였다. 이러한 대칭성 가정에 따르면 모형 내 선사의 최적 전략이 모두 동일하게 도출되어 선사 간 특성 차이에 따른 영향은 분석할 수 없지만, 탄소배출권 거래제가 해운 시장 전체에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

두 선사의 특성이 동일하다고 가정하고, 최적 수송량(q^*)과 탄소저감량(x^*)을 닫힌 형태의 해로 도출하면 다음과 같다.

$$q_1^* = q_2^* = \frac{(3km_c - b_c)e - c + b_s}{3(m_c e^2 + m_s)} \quad (17)$$

$$x_1^* = x_2^* = -\frac{e((3km_c - b_c)e - c + b_s)}{3(m_c e^2 + m_s)} \quad (18)$$

한편, 국제기구는 탄소배출권 거래제 도입 후에 배출권 무상할당량(k) 감소와 배출권 가격(b^c) 상승을 통해 해운 시장의 배출량을 더욱 줄이려고 할 것이다. 많은 전문가가 현재 설정된 탄소배출권의 가격이 너무 낮기 때문에 탄소배출권 거래제가 시장기반조치로서 온실가스 배출을 억제하고 기술 혁신을 촉진하기 위한 역할을 제대로 하지 못하고 있음을 지적하고 있다 (Bayer and Aklin, 2020; Chu et al., 2021). 따라서, 본 연구에서는 향후 탄소배출권의 가격이 지속적으로 상승할 것으로 가정하여 해운선사의 최적 의사결정과 해운 시장 균형의 변화를 분석하였다. 무상할당량(k) 감소와 배출권 가격(b^c) 상승이 해운선사의 수송량(q^*)에 미치는 영향을 분석하기 위해 1차 미분한 수식을 도출하면 아래와 같다.

$$\frac{dq^*}{dk} = \frac{em_c}{m_s + e^2 m_c} \quad (19)$$

$$\frac{dq^*}{db_c} = -\frac{e}{3(m_s + e^2 m_c)} \quad (20)$$

이때, 수식(19) 오른쪽 항의 모든 상수(e, m_c, m_s)는 0보다 큰 값을 가지므로, $\frac{dq^*}{dk} = \frac{em_c}{m_s + e^2 m_c}$ 는 0보다 크다. 즉, 탄소배출권 거래제 하에서 무상

할당량이 증가하는 경우, 해운 시장 전체의 수송량은 증가한다는 것을 알 수 있다. 반대로, 수식(20)의 오른쪽 항은 반드시 0보다 작으므로, 탄소배출권 거래제 하에서 탄소배출권 가격이 상승하면 해운 시장의 총수송량은 감소한다는 사실을 도출할 수 있다.

다음으로, 무상할당량(k) 감소와 배출권 가격(b^c) 상승이 해운 시장의 탄소저감량(x^*)에 미치는 영향을 분석하기 위해 1차 미분한 수식을 도출하면 다음과 같다.

$$\frac{dx^*}{dk} = -\frac{e^2 m_c}{m_s + e^2 m_c} \quad (21)$$

$$\frac{dx^*}{db_c} = \frac{e^2}{3(m_s + e^2 m_c)} \quad (22)$$

이때, 수식(21) 오른쪽 항의 모든 상수 역시 0보다 큰 값을 가지므로 $\frac{dx^*}{dk} = -\frac{e^2 m_c}{m_s + e^2 m_c}$ 는 0보다 작다. 즉, 탄소배출권 거래제 하에서 무상할당량이 증가하면 해운 시장의 총 탄소저감량(x^*)은 감소한다. 즉, 무상할당량이 증가하면 탄소배출량($e_i q_i = k_i - x_i$)은 증가한다. 반대로, 수식(22)의 오른쪽 항은 0보다 크므로, 탄소배출권 거래제 하에서 탄소배출권 가격이 상승하면 해운 시장의 탄소배출량은 감소한다.

다음으로, 개별 선사의 특성인 운영비용(a)과 배출계수(e)의 변화가 해운 시장의 수송량(q^*)과 탄소저감량(x^*)에 미치는 영향을 분석하기 위해 1차 미분한 수식을 각각 도출하면 다음과 같다.

$$\frac{dq^*}{da} = -\frac{1}{3(m_s + e^2 m_c)} \quad (23)$$

$$\frac{dx^*}{da} = \frac{e}{3(m_s + e^2 m_c)} \quad (24)$$

$$\frac{dq^*}{de} = \frac{(3km_c - b_c)(m_c e^2 + m_s) - 2em_c((3km_c - b_c)e - a + b_s)}{3(m_s + e^2 m_c)^2} \quad (25)$$

$$\frac{dx^*}{de} = - \frac{(a - b_s)e^2 m_c + (6km_c - 2b_c)em_s + (b_s - c)m_s}{3(m_s + e^2 m_c)^2} \quad (26)$$

여기서 수식(23) 오른쪽 항의 모든 상수 역시 0보다 큰 값을 가지므로 $\frac{dq^*}{da} = - \frac{1}{3(m_s + e^2 m_c)}$ 는 0보다 작다. 즉, 선사의 운영비용이 증가하면 해운 시장의 총수송량은 감소한다. 반대로, 수식(24)의 오른쪽 항은 0보다 크므로, 선사의 운영비용이 증가하면 해운 시장의 탄소배출량은 감소한다는 사실을 도출할 수 있다.

한편, 수식(25), (26)은 해운선사의 배출계수(e)가 증가함에 따라 각각 해운 시장의 총수송량과 배출량에 미치는 영향을 닫힌 형태로 나타낸 수식이다. 그러나, 두 수식의 오른쪽 항은 주어진 수식과 상수에 대한 정보만으로는 부호를 판단하기가 어렵기 때문에 배출계수가 해운 시장의 수송량과 탄소저감량에 미치는 영향은 해석적 방법으로 분석하기에는 한계가 있다. 따라서, 이는 다음 절에서 수치적 방법을 이용해 살펴본다.

2) 선사 간 비대칭성 가정

한편, 선사의 특성 차이에 따른 탄소배출권 효과를 분석하기 위해서는 선사의 운영비용, 배출계수, 무상할당량에 차이를 가정할 필요가 있다. 선사 간 비대칭성을 가정한 모형을 분석하면 개별 선사의 특성에 따라 최적 전략이 다르게 도출되어 선사 간 특성 차이에 따른 탄소배출권 거래제의

영향을 분석할 수 있다. 두 기업의 특성이 모두 다르다고 가정하고, 수익을 극대화하는 수송량(q^*)을 닫힌 형태의 해로 풀이하면 다음과 같다.

$$q_1^* = \frac{2(b^s - c_1 - f_1 b^c + f_1 m^c(k_1 + k_2) + m^c f_1 k_1)(m^s + f_2^2 m^c)}{4(m^s + f_1^2 m^c)(m^s + f_2^2 m^c) - (m^s + f_1 f_2 m^c)^2} - (m^s + f_1 f_2 m^c)(b^s - c_2 - f_2 b^c + f_2 m^c(k_1 + k_2) + m^c f_2 k_2) \quad (27)$$

$$\frac{4(m^s + f_1^2 m^c)(m^s + f_2^2 m^c) - (m^s + f_1 f_2 m^c)^2}{4(m^s + f_1^2 m^c)(m^s + f_2^2 m^c) - (m^s + f_1 f_2 m^c)^2}$$

$$q_2^* = \frac{2(b^s - c_2 - f_2 b^c + f_2 m^c(k_1 + k_2) + m^c f_2 k_2)(m^s + f_1^2 m^c)}{4(m^s + f_1^2 m^c)(m^s + f_2^2 m^c) - (m^s + f_1 f_2 m^c)^2} - (m^s + f_1 f_2 m^c)(b^s - c_1 - f_1 b^c + f_1 m^c(k_1 + k_2) + m^c f_1 k_1) \quad (28)$$

$$\frac{4(m^s + f_1^2 m^c)(m^s + f_2^2 m^c) - (m^s + f_1 f_2 m^c)^2}{4(m^s + f_1^2 m^c)(m^s + f_2^2 m^c) - (m^s + f_1 f_2 m^c)^2}$$

하지만, 위의 수식(27), (28)에 나타난 것처럼 선사의 비대칭성을 가정한 경우에는 각 선사의 수익을 극대화하기 위한 최적 수송량을 나타내는 수식이 너무 복잡하여 해석적으로 풀이하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 선사의 특성 차이에 따른 탄소배출권 거래제의 영향 분석은 수치적 방법을 이용해 살펴본다.

3. 탄소배출권 거래제 모형 실증적 분석

수치적 방법을 적용하기 위해 사용한 데이터는 3장 제3절에서 간략히 설명하였다. 본 연구에서는 선사 특성에 따른 탄소배출권 거래제 도입 효과와 시장 균형 상태를 분석하기 위해 선사의 단위 운영비용과 배출계수를 기준으로 총 4개의 가상 선사를 설정하였다. 각 선사의 파라미터 값은 EU-MRV와 각 선사의 연간보고서 등 실제 값을 바탕으로 설정하였다. 선정된 선사의 파라미터 값은 <표 3-2>에 나타나 있다. S1과 S2 선사는 S3,

S4 선사에는 S1과 S2 선사는 S3, S4 선사들에 비해 낮은 단위 운영비용으로 컨테이너 화물을 처리하고 있다. 또한, S1과 S4 선사는 S2, S3 선사들에 비해 배출계수가 낮다. 배출계수는 1단위 화물을 수송하기 위해 배출되는 온실가스의 양을 말한다. 즉, S1과 S4는 S2, S3 선사들에 비해 친환경적인 선사임을 나타낸다.

1) 탄소배출권 거래제 도입 시 해운선사에 미치는 영향

〈표 4-1〉은 〈표 3-2〉의 파라미터를 바탕으로 탄소배출권 거래제가 도입되었을 시, 각 해운선사의 이익 최대화를 위한 의사결정에 따른 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 즉, 각 해운선사는 선사의 특성(파라미터)을 바탕으로 이익을 최대화할 수 있는 수송량과 탄소저감량을 결정한다. 4개 선사의 이익최대화를 위한 수송량과 탄소저감량 결정에 의해 해운 시장의 균형 운임과 균형 배출권가격이 결정된다. 선사의 수송량이 많아지면 균형 운임이 하락하고, 선사의 탄소저감량이 많아지면, 즉 탄소배출권 판매량이 많아지면 배출권 가격이 하락한다.

〈표 4-1〉에 따르면 수송량이 가장 많은 선사는 단위 운영비용이 낮고 배출계수가 낮은 S1 선사로, 약 139M tonnes의 화물을 수송한 것으로 나타났다. S1 선사는 무상으로 할당받은 12.4M tonnes의 배출권 중 5.5M tonnes의 배출권을 컨테이너 화물 수송에 사용했으며 6.9M tonnes의 잉여 배출권을 배출권 시장에 판매했다. S1 선사가 139M tonnes의 화물을 수송한 결과, 시장 균형 운임인 USD 86.1에 의해 약 USD 11,929M의 운송수익이 창출되었다. 운송비용인 USD 9,006M를 제외하면 운송으로 인한 순이익은 약 USD 2,922M 수준인 것으로 나타났다. 여기에 6.9M tonnes의 잉여 배출권을 시장 균형 배출권 가격인 USD 74에 판매한 배출권 수익 USD 510M을 더하면 S1 선사의 시장 균형 총수익은 약 USD 3,432M이 된다.

〈표 4-1〉 탄소배출권 거래제 도입 이후 해운 시장 균형

선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	138.5	6.9	12.4	86.1	74.0
S2	128.7	6.5	14.2		
S3	53.8	5.7	9.0		
S4	60.5	-0.8	1.6		
합계	381.5	18.3	37.2		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	11,928.7	9,006.2	509.8	3,432.3	65.0
S2	11,089.9	8,372.5	480.7	3,198.1	65.0
S3	4,631.2	4,035.2	423.8	1,019.8	75.1
S4	5,215.6	4,542.0	-62.2	611.3	75.0
합계	32,865.4	25,955.9	1,352.0	8,261.5	68.0

자료: 저자 작성

이처럼, S1 선사는 다른 선사(S2~S4)가 의사결정을 변경하지 않는다는 가정 아래, 139M tonnes의 화물을 수송하고 6.9M tonnes의 잉여 배출권을 배출권 시장에 판매하는 것이 최대의 이익을 얻을 수 있는 의사결정이다. S1 선사가 139M tonnes보다 더 많거나 더 적은 양의 화물을 수송한다면 현재의 이익인 USD 3,432M보다 더 적은 이익을 얻게 된다. 이는 잉여 배출권 판매량에도 동일하게 적용된다.

한편, 각 선사의 수송량을 살펴보면 단위 운영비용이 낮은 선사(S1, S2)가 단위 운영비용이 높은 선사(S3, S4)보다 2배 이상 많은 물동량을 처리했음을 알 수 있다. 총이익 역시 단위 운영비용이 낮은 선사의 수익이 단위 운영비용이 높은 선사보다 3배 이상 높게 나타났다. 반면, 단위 운영비용이 동일한 그룹 내에서는 배출계수가 낮은 선사가 배출계수가 높은 선사보다 수송량과 총이익이 높은 것으로 나타났다. 예를 들면, S1과 S2선사는 모두 단위 운영비용이 비교적 낮은 선사이지만, 둘 중에서는 배출계수가 더

낮은 S1 선사가 수송량과 총이익이 더 많은 것으로 나타났다. 이를 통해, 해운선사의 단위 운영비용과 배출계수, 배출권 가격이 모두 현 수준과 비슷하게 유지되는 경우에는 탄소배출권 거래제 도입 시 배출계수를 낮추는 것보다 단위 운영비용을 낮추는 것이 선사의 이익 측면에서는 유리함을 알 수 있다. 즉, 선사는 새로운 환경규제에 대응하기 위해 친환경선박을 도입하는 등 배출계수를 낮추기보다 운영비용을 낮추고 배출권을 추가 구입하는 등의 단위 운영비용을 낮추는 전략을 선택할 경제적 동기가 높다는 의미이다. <표 4-1>의 S4 선사처럼 배출권을 일부 구입하여 수송서비스를 생산하는 것이 훨씬 경제적이기 때문이다. 음수인 탄소저감량은 추가적인 선박 운영을 위해 할당권 외의 추가적인 배출권을 배출권시장으로부터 구입했음을 의미한다.

이처럼, 탄소배출권 거래제가 해운 시장에 도입이 되면 <표 4-1>에 나타난 것처럼 4개 해운선사는 이익 최대화를 위한 전략적 의사결정을 수행한다. 그리고 각 선사의 전략적 의사결정에 의해 시장 균형이 도출되고, 도출된 해운 시장의 총수송량은 약 382M tonnes, 총배출량은 약 18.9(37.2-18.3)M tonnes, 총이익은 약 USD 8,262M으로 나타났다

2) 무상할당량 감소 시 해운 시장 균형

<표 4-2>는 탄소배출권 거래제의 시장 기반 조치로서의 규제 수준을 더욱 강화하기 위해 배출권의 무상할당량을 전량 폐지한 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. EU 또는 IMO 등의 국제기구는 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해 해운 부문 ETS의 도입 초기부터 무상할당량 없이 유상경매로만 배출권을 공급할 가능성이 매우 높다. 2012년에 최초로 도입된 항공 부문 ETS는 당시 배출권 거래 제도가 충분히 성숙하기 이전에 도입되어 제도에 대한 적응 기간이 필요했기 때문에 초기에는 무상으로 배출권을 할당하였다. 반면에, 해운 부문 ETS는 이미 배출권 거래 제도가 충분히

〈표 4-2〉 무상할당량 감소 시 해운 시장 균형

선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	무상할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	137.1	-5.5	-	88.9	128.1
S2	115.8	-6.9	-		
S3	44.3	-2.7	-		
S4	64.0	-2.6	-		
합계	361.2	-17.6	-		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	12,186.9	8,918.4	-702.9	2,565.6	65.0
S2	10,293.8	7,533.1	-890.5	1,870.2	65.0
S3	3,933.4	3,322.3	-340.3	270.7	75.1
S4	5,686.1	4,799.6	-327.9	558.6	75.0
합계	32,100.2	24,573.4	-2,261.6	5,265.1	68.0

자료: 저자 작성

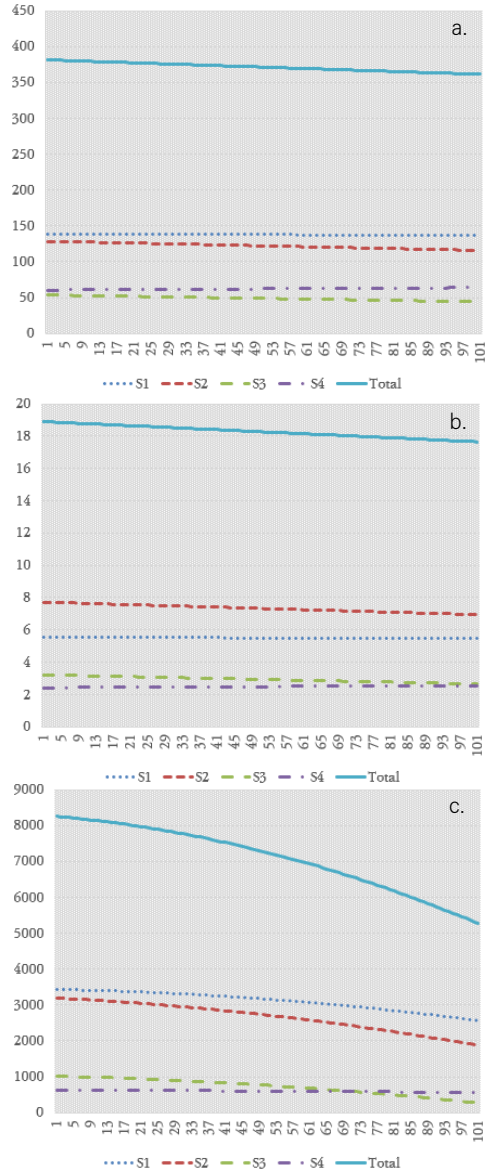
성숙한 이후에 도입되고, 전 세계적으로 온실가스 저감에 대한 필요성과 목표가 확실하기 때문에 배출권의 무상할당량이 존재하지 않는 형태로 도입될 가능성이 매우 크다.

〈표 4-1〉과 비교하여 〈표 4-2〉의 분석 결과에 따르면, 배출권의 무상할당량이 전량 폐지됨에 따라 해운 시장의 총수송량과 총배출량의 감소하는 것으로 나타났다. 총수송량은 381.5M tonnes에서 361.2M tonnes으로 약 20.3M tonnes 감소하였고, 총배출량은 18.9M tonnes에서 17.6M tonnes으로 약 1.3M tonnes 감소하였다. 즉, 해운 시장의 총수송량은 약 5% 감소하였으며 탄소배출량은 약 7% 감소했다. 이는 수식(19)와 (21)에서 시장에 참여하는 선사의 특성이 동일함을 가정하고 무상할당량과 시장 전체의 총수송량, 총배출량과의 관계를 닫힌 해를 통해 이론적으로 도출한 결론과 같은 결과이다.

한편, 배출권의 무상할당량 감소로 인해 모든 선사의 생산량, 배출량, 수익이 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 배출권 무상할당량 감소로 인한 수송량의 감소로 인해 해운 시장 총수익은 USD 8,262M에서 USD 5,265M으로 약 36% 감소했다. 이러한 감소는 환경규제의 강화로 배출권의 무상할당량이 폐지되면서 선사의 탄소 배출에 대한 비용 부담이 증가했기 때문으로 해석된다. 다만, 비교적 친환경적인 선박을 보유한 선사(S1, S4)는 상대적으로 이익 감소의 폭이 작은 것으로 나타났다. <표 4-2>의 분석 결과를 통해 배출권의 무상할당량 감소가 선사의 수송량 및 이익에 악영향을 미친다는 것을 확인하였으며, 선사에게는 이익 감소 규모를 완화함으로써 친환경선대로의 전환을 촉진하는 경제적 유인이 된다는 것을 보여준다.

아래 <그림 4-1>은 해운 부문 탄소배출권 거래제 하에서 각 선사의 무상할당량이 100%에서 0%로 감소함에 따른 시장 균형의 변화를 보여준다. x축은 무상할당량 감소 비율(%)을 나타낸다. 3개의 그래프에서 y축은 각각 순서대로 4개의 선사와 해운 시장 전체의 1) 수송량, 2) 배출량, 3) 총이익을 나타낸다. 그래프 b.에서 볼 수 있는 것처럼, 무상할당량이 감소함에 따라 해운 시장의 총배출량이 감소하는 추세를 확인할 수 있다. 또한, 그래프 c)에서 무상할당량이 감소함에 따라 해운 시장의 총이익이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이때, 비교적 친환경적인 선사인 S1과 S4를 나타내는 그래프의 감소 기울기가 S2와 S3의 기울기보다 완만한 것을 확인할 수 있으며, 이는 <표 4-2>에서 확인했듯이 무상할당량의 감소가 선사에게 친환경선대로의 전환을 촉진하는 경제적 유인이 될 수 있다는 것을 보여준다.

〈그림 4-1〉 무상할당량 감소(%) 시 해운 시장 균형 변화



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

3) 탄소배출권 가격 상승 시 해운 시장 균형

〈표 4-3〉은 탄소배출권 거래제의 시장 기반 조치로서의 규제 수준을 더욱 강화하기 위해 탄소배출권의 가격이 크게 상승한 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 배출권은 〈표 4-1〉의 경우와 마찬가지로 무상으로 할당되었음을 가정한다. 모형 분석 결과에 따르면, 배출권 가격이 USD 74에서 USD 272로 상승함에 따라 해운선사의 수송량 및 배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 탄소배출권 거래제 도입 시 해운선사에 미치는 영향을 분석한 〈표 4-1〉의 결과와 비교했을 때, 해운 시장의 총수송량은 약 58.4M tonnes, 배출량은 약 3.5M tonnes 감소한 것으로 나타났다. 즉, 탄소배출권 도입 이후, 배출권의 가격이 3배 이상 급격히 상승함에 따라 해운 시장의 총수송량과 배출량이 각각 15%, 19% 추가적으로 감소하였다. 이는 수식 (20)와 (22)에서 시장에 참여하는 선사의 특성이 동일함을 가정하고 탄소배출권의 가격과 시장 전체의 총수송량, 총배출량과의 관계를 닫힌 해를 통해 이론적으로 도출한 결론과 같은 결과이다. 이러한 결과는 배출권 가격의 급격한 상승으로 인해 해운선사는 탄소 배출에 대해 더 많은 비용을 지불해야 하고, 이는 곧 선사의 운영비용의 증가로 이어져 이익 최대화를 위한 선사의 최적 수송량이 감소한 것으로 해석된다.

하지만, 탄소배출권의 가격이 크게 상승하여 수송량이 감소했음에도 불구하고, 해운선사의 총이익은 USD 14,416M으로 약 75% 증가했다. 개별 선사의 이익도 모두 증가하였다. 이처럼 선사의 이익이 크게 증가한 이유는 무상으로 할당받은 배출권의 가격이 크게 상승했기 때문이다. 배출권의 가격이 크게 상승하면, 해운선사는 배출권을 사용하여 운송수익을 늘리는 것보다 배출권을 판매하여 이익을 늘리는 방안을 고려해 볼 수 있다. 〈표 4-1〉과 비교했을 때, 〈표 4-3〉에서 보이는 것처럼 각 선사의 배출권 수익이 크게 증가한 것을 볼 수 있으며, 무상할당량이 많은 선사(S2)일수록

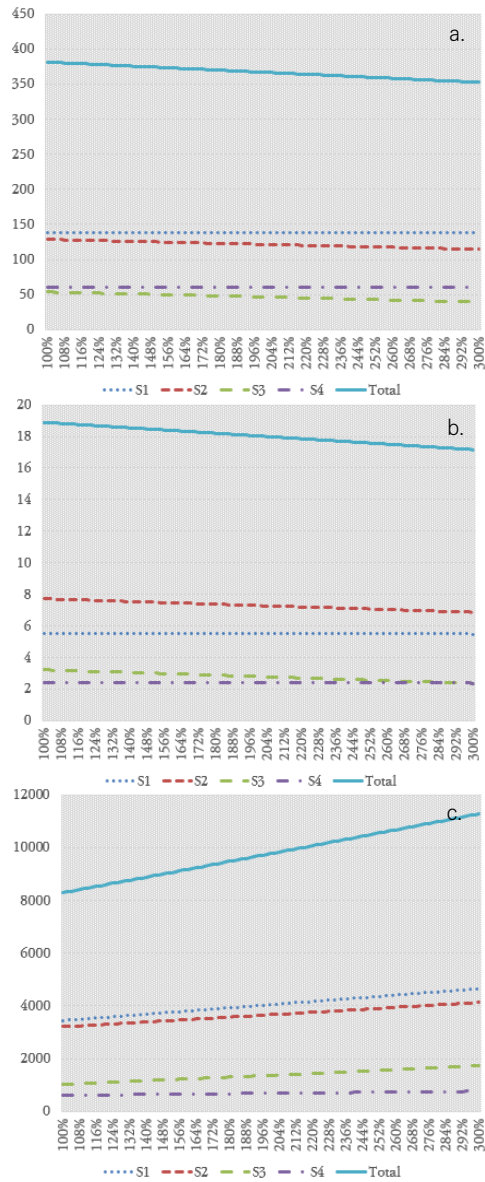
배출권 수익 증가 폭은 더 크게 나타났다. 또한, 비교적 친환경적인 선사인 S1과 S4는 <표 4-1>과 비교했을 때 수송량 및 운송수익이 비슷한 수준으로 유지되었지만, 그렇지 않은 S2와 S3는 수송량을 대폭 줄이고 배출권을 판매한 것을 확인할 수 있다.

〈표 4-3〉 탄소배출권 가격 상승 시 해운 시장 균형

선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	무상할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	138.0	6.9	12.4	94.0	271.8
S2	100.0	8.2	14.2		
S3	25.0	7.5	9.0		
S4	60.1	-0.8	1.6		
합계	323.1	21.8	37.2		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	12,972.5	8,976.3	1,877.7	5,873.9	65.0
S2	9,396.9	6,502.9	2,234.8	5,128.8	65.0
S3	2,349.7	1,877.9	2,025.8	2,497.6	75.1
S4	5,647.6	4,507.5	-223.7	916.4	75.0
합계	30,366.7	21,864.5	5,914.6	14,416.7	67.7

자료: 저자 작성

〈그림 4-2〉 탄소배출권 가격(%) 상승 시 해운 시장 균형 변화



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

위 분석 결과는 배출권의 무상할당과 배출권 가격의 상승은 해운선사의 수송량과 배출권 거래량 결정에 큰 영향을 미치며, 해운 시장의 총배출량의 감소와 총이익의 상승을 동반한다는 결과를 보여준다. 위 <그림 4-2>에서 x축은 탄소배출권 가격 상승 비율(%)을 나타낸다. <그림 4-2>에서 볼 수 있는 것처럼, 탄소배출권의 가격이 상승함에 따라 총수송량과 총배출량은 감소하고, 총이익은 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 총이익 그래프에서 무상할당량이 많은 선사 S1, S2의 총이익 증가가 두드러짐을 볼 수 있다.

<표 4-2>와 <표 4-3> 결과에 따르면, 탄소배출권 거래제 도입 후 배출권 무상할당량의 감소와 배출권 가격의 상승 조치는 모두 해운 시장의 탄소 배출량을 저감하는 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서, EU나 IMO 등 국제기구는 탄소배출권 거래제의 시장 기반 조치로서의 탄소 배출 저감 효과를 극대화하기 위해 두 조치를 시행할 가능성이 매우 높다. 다만, 무상할당량의 감소가 선사의 수익성을 악화시키고, 배출권 가격의 상승이 선사의 수익을 증가한다는 점이 두 조치 간의 차이점으로 나타났다. 한편, 국제기구는 해운 부문의 탄소 배출량을 줄이기 위해 무상할당량의 감소와 배출권 가격의 상승 조치를 독립적으로 시행하지 않고, 동시에 시행할 가능성이 높다.

4) 무상할당량 감소 및 탄소배출권 가격 상승 시 해운 시장 균형

<표 4-4>는 탄소배출권 거래제 도입 후 국제기구가 무상할당량을 폐지하고, 동시에 탄소배출권의 가격을 크게 높인 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 모형 분석 결과에 따르면, 탄소배출권 거래제에서 배출권 무상할당량의 폐지와 배출권가격의 상승이 동시에 발생하는 시나리오에서도 해운선사의 수송량 및 배출량이 감소했다. 이는 여전히 수식(19)~(22)에서 무상할당량과 탄소배출권의 가격이 시장 전체의 총수송량, 총배출량과의 관계를 단힌 형태의 해를 통해 이론적으로 도출한 결론과 같은 결과이다. <표 4-1>과 비교했을 때, 해운 시장의 총수송량은 약 78.8M tonnes, 총배출량은 약 4.7M tonnes 감소하였다. 즉, 총수송량은 약 21% 감소했으며 총배출량은 약 24% 감소했다,

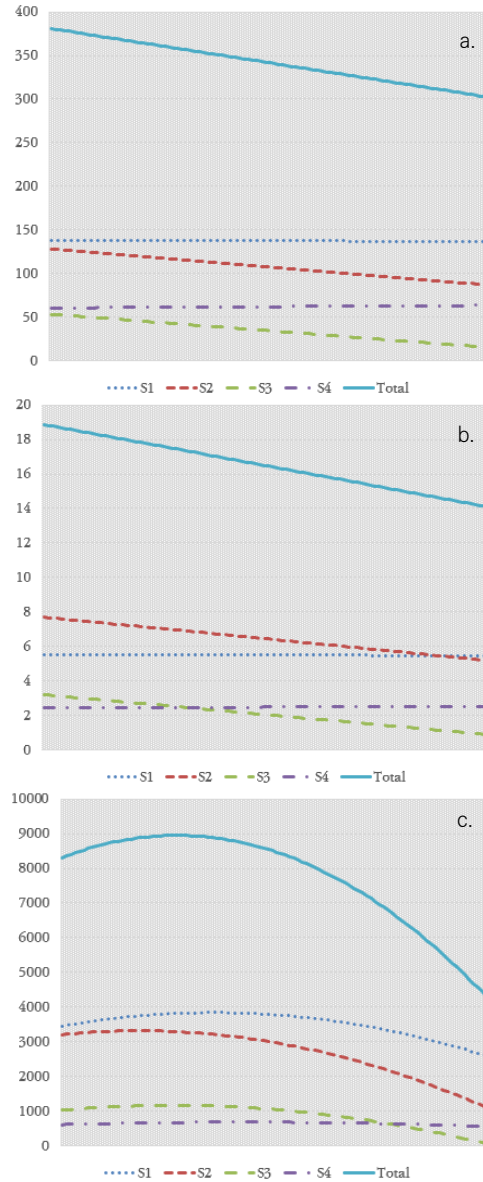
〈표 4-4〉 무상할당량 감소 및 탄소배출권 가격 상승 시 해운 시장 균형

선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	무상할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	136.7	-5.5	-	96.7	326.0
S2	87.1	-5.2	-		
S3	15.5	-0.9	-		
S4	63.5	-2.5	-		
합계	302.7	-14.2	-		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	13,218.7	8,888.5	-1,781.9	2,548.4	65.0
S2	8,420.9	5,663.5	-1,702.7	1,054.7	65.1
S3	1,498.7	1,165.0	-303.0	30.6	75.2
S4	6,143.9	4,765.1	-828.2	550.6	75.0
합계	29,282.2	20,482.1	-4,615.8	4,184.3	67.7

자료: 저자 작성

이는 배출권 무상할당량의 감소와 배출권 가격 상승으로 인해 해운선사의 탄소 배출에 따른 비용 부담이 크게 증가하고, 그에 따라 수송량을 대폭 축소한 결과이다. 이에 따라, 해운 시장의 총수익은 약 49% 대폭 감소했다. 이는 배출권 가격의 상승과 무상할당량의 감소로 인한 비용 증가와 수송량 감소로 인한 운송수익 감소가 중첩된 결과로 추정된다. 이처럼, 탄소배출권 거래제가 도입되고 규제 수준이 강화되면, 해운 시장 전체의 수익은 크게 줄어든다. 특히, 배출계수가 높은 선박을 운용하는 선사(S2, S3)는 친환경 선박을 운용하는 선사(S1, S4)보다 이익 감소폭이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 아래 〈그림 4-3〉에서 확인할 수 있다. 아래 〈그림 4-3〉에서 x축은 무상할당량 감소 비율(%) 및 탄소배출권 가격 상승 비율(%)을 동시에 나타낸다. 〈그림 4-3〉 중 총이익을 나타내는 그래프 c.에서 S1과 S4의 곡선 기울기가 S2와 S3의 곡선 기울기보다 비교적 완만한 것을 통해 확인할 수 있다. 즉, 배출량이 많은 선박을 사용하는 선사는 규제 강화에 따른 이익 감소폭이 매우 크다.

〈그림 4-3〉 무상할당량 감소(%) 및 탄소배출권 가격(%) 상승 시 해운 시장 균형 변화



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

한편, 무상할당량 폐지와 탄소배출권의 가격 상승 조치를 함께 시행할 시, 탄소배출권 거래제의 배출량 감소 효과는 더욱 증대되는 것으로 나타났다. <표 4-2>와 <표 4-3>의 결과에 따르면, 무상할당량만 폐지하면 7%, 배출권 가격을 현재의 3배 수준인 USD 272까지 올리면 9%의 해운 시장 내 총배출량이 각각 감소하는 것으로 나타났다. 하지만, <표 4-4>의 결과에 따르면, 배출권의 무상할당량 폐지와 탄소배출권의 가격 상승, 두 조치를 함께 시행하면 총 24%의 해운 시장 내 총배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 배출권의 무상할당량은 폐지하지 않고, 배출권의 가격만 올리면 무상할당량이 많은 선사의 수익이 증가하여 배출량 저감에 대한 경제적 유인이 다소 떨어지는 것으로 나타났으나, 두 조치를 함께 시행하면 <그림 4-3>에 나타난 것처럼 친환경선사의 수익이 상대적으로 보존되어 친환경선박으로의 전환을 촉진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

결과적으로, 탄소배출권 거래제의 규제 수준이 강화될수록, 즉, 배출권의 무상할당량이 줄어들고 배출권가격이 상승할수록 배출계수가 높은 기존 선박을 운영하는 선사는 경제적 손실의 규모가 커지는 것으로 나타났다. 환경규제가 강화될수록 선사는 친환경선대로 전환할 동기, 경제적 유인이 더욱 커진다. 하지만, <그림 4-3>의 그래프 c.에서 S2와 S4 선사의 총이익 비교를 통해 확인할 수 있듯이, 선사 간 배출계수 차이에 따른 수익 효과는 운영비용 차이에 의한 수익 효과에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이는 현 시점의 선사 특성과 운임, 배출권 가격 수준에서는 해운선사가 친환경선대로 전환하기 위해 노력하는 것보다는 운영비용을 조금이라도 더 감축하기 위해 노력하는 것이 선사의 이익 측면에서 더 효과적이라는 사실을 시사한다. 다시 말해, 현 시점의 선사 배출계수와 단위 운영비용을 기준으로 비교하면 탄소배출권 거래제 도입 시 해운선사는 친환경선대로 전환할 필요성을 크게 느끼지 못한다. 해운선사가 친환경선대로 전환할 필요성을 느끼기 위해서는 배출권의 가격이 더 크게 상승하거나 배출량을 획기적으로 줄일 수 있는 친환경선박이 도입되어야 한다.

제2절 정부 정책의 효과

1. 친환경선박 선대 전환 지원 효과

탄소배출권 거래제는 해운선사가 배출한 탄소에 비용을 부과하여 해운선사가 탄소 배출을 줄이도록 유도하는 규제이다. 해운선사는 선박 운영으로 발생한 탄소 배출량에 해당하는 만큼의 배출권을 구입하여 규제 기관에 제출해야 한다. 단기적으로는, 해운선사는 보유한 배출권 이상의 배출량에 대해서는 배출권을 추가 구입하여 규제에 대응할 수 있다. 하지만, <표 4-4>에서 살펴본 것처럼, 탄소배출권 거래제 내 무상할당량이 감소하고 배출권 가격이 증가하는 등 규제 수준이 강화되는 경우에는 배출계수가 높은 선사는 막대한 경제적 손실을 입는다. 따라서, 장기적인 관점에서 해운선사는 배출계수가 낮은 친환경선대로 전환하는 것이 합리적인 대응 방안이 될 수 있다.

정부는 국적선사의 경쟁력 강화와 생존, 국내외 수출입 경제의 활성화를 위해 친환경선박 전환을 위한 지원 정책을 시행할 수 있다. 친환경선박 전환을 위한 구체적인 지원 정책으로는 국가 주도의 친환경선박 기술 개발 또는 신조선 발주를 위한 금융 지원 등이 있다. 본 절에서는 위와 같은 정부의 친환경선박 전환 지원 정책의 효과를 살펴보기 위해 꾸르노 모형을 적용하였다. 앞서 설정한 4개의 선사 중 단위 운영비용과 배출계수가 모두 열등한 S3 선사가 친환경선대로의 전환 동기가 가장 강한 것으로 가정하고, S3 선사의 배출계수를 0.06에서 0.01로 개선했을 경우의 해운 시장 균형 상태를 분석했다. 또한, 정부 정책의 효과를 살펴보기 위해서 S3 선사를 국적선사로 가정하였다.

<표 4-5>는 S3 선사의 배출계수가 0.01 수준으로 개선되었을 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 이는 모형 분석을 위해 가정한 선사 중에서 배출계수가 낮은 선사인 S1과 S4에 비해서도 25% 수준이다. <표 4-1>과

〈표 4-5〉 배출계수 개선 시 해운 시장 균형(S3)

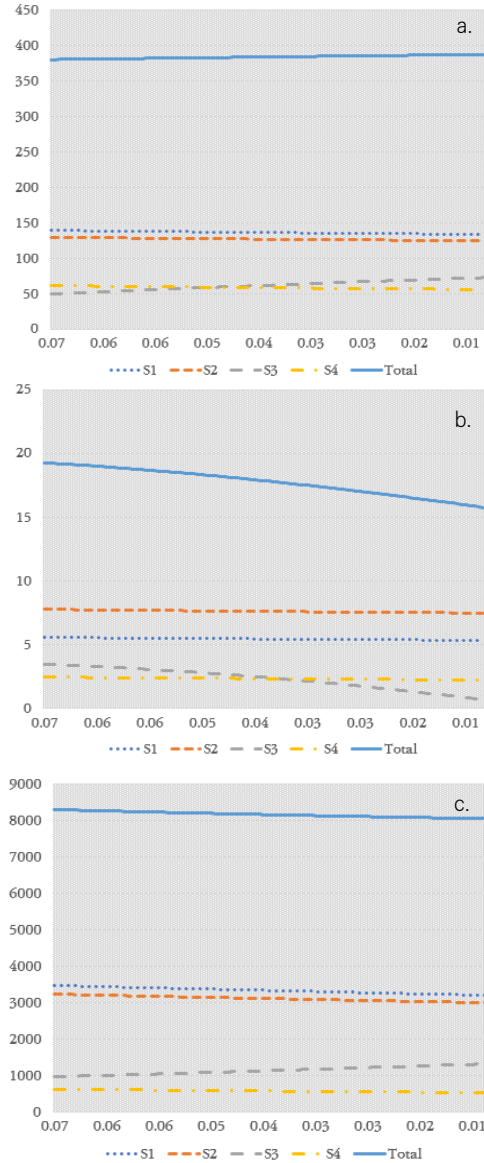
선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	133.9	7.1	12.4	85.3	69.3
S2	124.9	6.7	14.2		
S3	72.7	8.2	9.0		
S4	56.0	-0.7	1.6		
합계	387.6	21.4	37.2		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	11,427.8	8,710.0	490.3	3,208.1	65.0
S2	10,662.2	8,126.1	466.2	3,002.3	65.0
S3	6,203.3	5,455.1	570.3	1,318.5	75.0
S4	4,777.7	4,200.2	-45.7	531.8	75.0
합계	33,070.9	26,491.4	1,481.1	8,060.6	68.4

자료: 저자 작성

비교했을 때, S3 선사의 배출계수를 0.01 수준으로 개선하면 S3 선사의 배출량은 약 75% 감소(3.3→0.8M tonnes)하고, 이익은 약 30% 증가(1,020→USD 1,319M)하는 것으로 나타났다. 또한, 해운 시장의 총배출량도 약 16% 감소(18.9→15.8M tonnes)하였는데, 이는 대부분 S3 선사의 배출량 감소에 의한 것이다. 〈그림 4-4〉의 x축은 S3 선사의 배출계수를 나타낸다. 즉, 오른쪽에 가까울수록 S3선사가 더 친환경적인 선대를 운용하는 것이다. 〈그림 4-4〉의 a.와 b. 그래프를 보면 S3의 배출계수가 개선됨에 따라 S3 선사의 수송량은 증가하고, S3 선사와 해운 시장 전체의 배출량은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 친환경선박으로의 전환을 지원하는 정책이 실제로 해운 시장 전체의 탄소 배출량 감소에 기여함을 보여준다.

주목할 점은 S3 선사가 친환경선박으로 전환하기 위해 소요되는 비용 대비 증가한 수익이다. 〈표 4-1〉의 결과와 비교했을 때, S3 선사의 총이익이 약 30% 증가하긴 했지만, 경쟁 선사와 비교했을 때 극적인 수익 상승은

〈그림 4-4〉 배출계수(tonne/tonne) 향상 시 해운 시장 균형 변화



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

보이지 않았다. 이는 <그림 4-4>의 c. 그래프에서 S3 선사의 배출계수가 낮아짐에도 불구하고 증가하는 총이익 그래프의 기울기가 다소 완만함에서 확인할 수 있다. S3 선사는 S2 선사에 비해 배출계수가 17% 수준임에도 불구하고, 단위 운영비용이 USD 10 낮은 S2 선사(USD 3,003M)보다 훨씬 적은 총이익인 USD 1,319M를 기록했다.

결론적으로, 탄소배출권 거래제 도입 시 국적선사에 대한 친환경선박 전환 지원 정책은 해당 선사의 배출량 감소와 수익 증대라는 두 가지 긍정적인 효과를 가져왔다. 또한, 해운 시장 전체의 배출량 감소에도 상당히 기여하는 것으로 보여진다. 그러나, 해운선사 입장에서는 막대한 비용을 들여 친환경선대로 전환하더라도, 배출계수는 높고 운영비용이 낮은 선사보다 낮은 수준의 이익을 창출하기 때문에 친환경선대 전환으로의 경제적 유인이 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

2. 운영비용 절감 효과

해운 부문 탄소배출권 거래제가 해운 시장에 미친 영향을 분석한 <표 4-2>~<표 4-4>에 따르면, 탄소배출권 거래제의 규제 수준 강화는 해운 부문 탄소배출량 저감 효과가 유의미한 것으로 나타났다. 또한, 배출계수가 낮은 선사는 환경규제에 의한 경제적 손실 폭이 비교적 적기 때문에 장기적으로는 친환경선대로 전환하는 것이 환경규제에 대응하기 위한 합리적인 방안이 될 수 있음을 보여주었다. 하지만, <표 4-5>의 분석 결과에서 볼 수 있는 것처럼 친환경선박으로 전환하여 배출계수를 낮추는 것은 운영비용 절감에 비하면 경제적 이익이 크지 않기 때문에 해운선사의 수익성을 강화하기 위해서는 운영비용을 낮추는 것이 효과적이라는 것을 확인했다. 따라서, 새로운 환경규제에 대응하기 위해 정부는 친환경선박으로의 전환 대신에 유류비에 대한 보조금을 지원할 수 있다. 또한, 해운선사는 친환경

선박으로 전환하는 것 대신에 자구적으로 노력하여 운영비용을 낮추는 방안을 선택할 수 있다.

해운선사가 탄소세 또는 배출권으로 인해 발생하는 추가적인 비용을 줄이기 위해 친환경선박을 도입하더라도, 친환경 연료의 가격이 너무 높다면 친환경선박으로 전환한 해운선사의 수익성은 오히려 악화될 수도 있다. 이러한 경우가 발생한다면 해운선사의 친환경선박 전환에 대한 경제적 유인이 감소하고, 결국에는 온실가스 배출량 감축 목표 달성이 어려워질 수 있다. 따라서, 정부는 친환경연료에 대해 보조금을 지급하거나 인프라를 확충하여 공급 안정성을 확보하는 등 친환경선박의 운영비용을 낮게 유지하여 해운선사에게 친환경선박 전환에 대한 경제적 유인을 확보할 필요가 있다.

〈표 4-6〉은 S3 선사의 단위당 운영비용을 USD 75에서 USD 50로 저감하였을 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 〈표 4-1〉과 비교했을 때, S3 선사의 운영비용이 USD 50까지 줄어들면, S3 선사의 수송량과 배출량은 모두 3배 이상 증가했다(54→197M tonnes, 3.3→11.8M tonnes). 이처럼 선사의 단위 운영비용이 감소하면, 수송량이 증가함에 따라 배출량도 증가하는 경향을 보인다. 이는 수식(23)과 (24)에서 선사의 운영비용과 시장 전체의 총수송량, 총배출량과의 관계를 닫힌 형태의 해를 통해 이론적으로 도출한 결론과 같다. 〈그림 4-5〉의 x축은 S3 선사의 단위당 운송비용을 나타낸다. 즉, 축의 오른쪽일수록 S3 선사의 운영비용이 낮아진다. 〈그림 4-5〉의 a.와 b. 그래프에서 볼 수 있듯이 S3 선사의 수송량과 배출량은 운영비용이 감소함에 따라 꾸준히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 나머지 경쟁 선사는 S3 선사에 비해 단위당 운영비용이 낮으므로 경쟁 열위가 발생하고, 이로 인해 S1, S2, S4 선사의 수송량과 배출량이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다.

〈표 4-6〉 운영비용 절감 시 해운 시장 균형(S3)

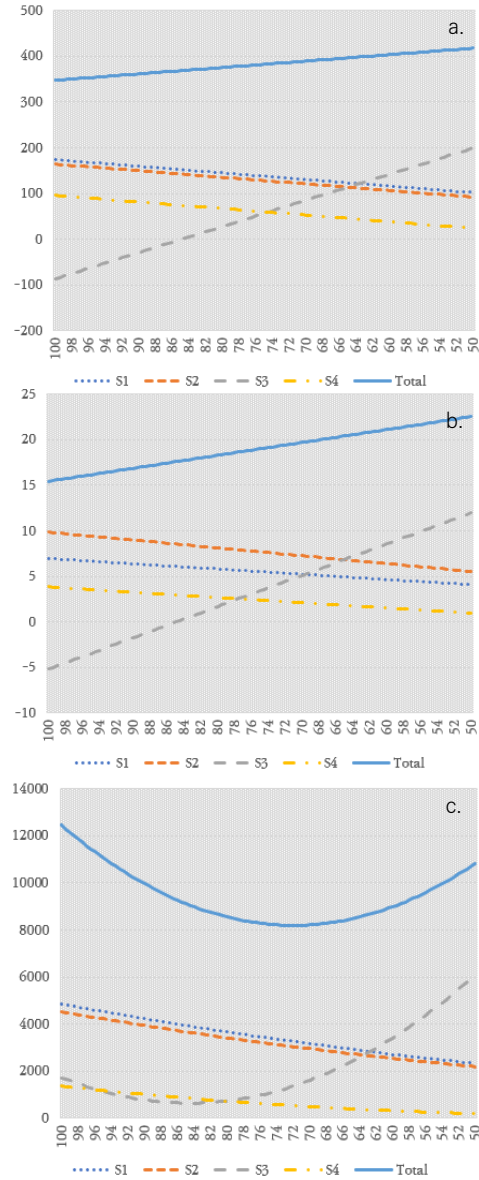
선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	102.5	8.3	12.4	81.4	79.3
S2	92.8	8.7	14.2		
S3	196.7	-2.8	9.0		
S4	24.6	0.6	1.6		
합계	416.6	14.7	37.2		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	8,347.3	6,667.6	660.7	2,340.3	65.1
S2	7,555.3	6,034.8	686.5	2,207.0	65.0
S3	16,020.0	9,838.8	-226.1	5,955.1	50.0
S4	2,000.8	1,843.7	47.4	204.5	75.0
합계	33,923.4	24,384.9	1,168.6	10,707.0	58.5

자료: 저자 작성

해운 부문 탄소배출권 거래제가 도입되었을 때 해운 시장의 영향을 분석한 최초의 〈표 4-1〉과 비교했을 때, 〈표 4-6〉에서 S3 선사의 운영비용이 감소하면서 S3 선사의 총이익은 약 500% 증가(1,020→USD 5,955M)하였다. S3 선사는 운영비용이 감소하여 다른 선사 대비 경쟁우위를 가지게 되었고, 이로 인해 다른 경쟁 선사의 생산량, 배출량, 총이익은 감소하는 경향을 보인다. 〈그림 4-5〉의 c.총이익 그래프를 보면 S3 선사의 운영비용이 감소함에 따라 S3 선사의 총이익은 기하급수적으로 증가하고 타 경쟁 선사의 수익은 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

위 〈표 4-6〉과 〈그림 4-5〉의 분석 결과를 통해 개별 선사의 수송량과 이익에 미치는 영향은 배출계수보다 운송비용이 더 크다는 것을 다시 한번 확인하였다. 즉, 탄소배출권의 가격이 선박 운영에 따른 비용 중 하나로 작용하더라도, 아직은 그 비중이 전체 비용 대비 매우 적다는 것을 의미한다. 심지어 배출계수 개선과 달리 운영비용의 저감이 경쟁 우위로 인해 타 선사

〈그림 4-5〉 운영비용(USD/tonne) 지원 시 해운 시장 균형 변화



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

의 배출량 및 수익을 크게 감소하는 효과가 있다는 것을 확인하였다. 결론적으로, 탄소배출권 거래제에서 국적선사의 운영비용 지원은 해당 선사의 수송량 및 수익 증대에 크게 기여하며, 이는 다른 경쟁 선사들의 수송량, 배출량, 수익 감소로 이어질 수 있다. 하지만 단순한 운영비용의 저감은 환경규제의 수준이 점차 강화되는 추세에서는 장기적으로 해운선사의 경쟁력을 약화시킬 수 있다는 한계가 있다. 즉, 환경규제 수준이 강화되면 탄소 배출에 따른 비용이 운영비용보다 더 커지는 경우가 발생할 수 있다.

3. 친환경선박 선대 전환 및 운영비용 지원 효과

〈표 4-5〉와 〈그림 4-4〉에서 살펴봤듯이, 해운선사의 친환경선대 전환은 개별 선사의 수익을 증가시킬 뿐만 아니라 개별 선사 및 해운 시장 전체의 배출량을 줄일 수 있다. 따라서, 단순히 해운 시장의 이산화탄소의 배출량을 줄이기 위한 것이 목적이라면, 친환경선대로 전환하는 것이 탄소배출권 거래제의 가장 이상적인 대응책이라고 할 수 있다. 하지만, 선사의 수익성 측면에서 친환경선대로의 전환은 경쟁 선사 대비 뚜렷한 우위를 보여주지 않았기 때문에 선사가 친환경선박을 도입할 경제적 유인이 미흡함을 보였다. 이산화탄소 배출량 측면에서도 친환경선대로 전환한 선사의 배출량만을 감축하는 것에 그쳤으며, 경쟁 선사의 배출량 감축에는 유의미한 영향을 미치지 못했다. 반면, 〈표 4-6〉과 〈그림 4-5〉에서 살펴본 것처럼 특정 선사의 운영비용이 감소하는 경우에는 경쟁 선사 대비 수익이 극적으로 증가하고, 반면에 비용의 경쟁 우위로 인해 경쟁 선사의 수송량과 배출량이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 정부는 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입 시 국적선사의 경쟁력 강화와 생존을 위해 친환경선박 전환을 위한 금융 및 세제 지원 외에 연료비 보조금 지원, 친환경연료 인프라 확충 등 운영비용 절감을 위한 정책을 함께 고려할 수 있다. 동시에, 강화되는 환경규제에 대응하기 위하여 선사

자구적으로 운영비용을 낮추려는 노력을 할 수 있다. 아래 <표 4-7>과 <그림 4-6>은 국적선사의 배출계수 감소와 운영비용 저감이 동시에 이루어졌을 때 해운 시장의 균형을 분석한 결과를 나타낸다.

먼저, <표 4-5>에서 확인했듯이 국적선사가 친환경선박으로 전환하여 배출계수가 감소되는 경우, 국적선사의 배출량은 약 75% 감소하고, 총이익은 약 30% 증가하는 결과가 나타났다. 이러한 변화는 해운 시장 전체에서도 영향을 미치는데, 해운 시장의 총배출량은 약 16% 감소하고, 총수익은 약 2% 증가하는 것으로 나타났다.

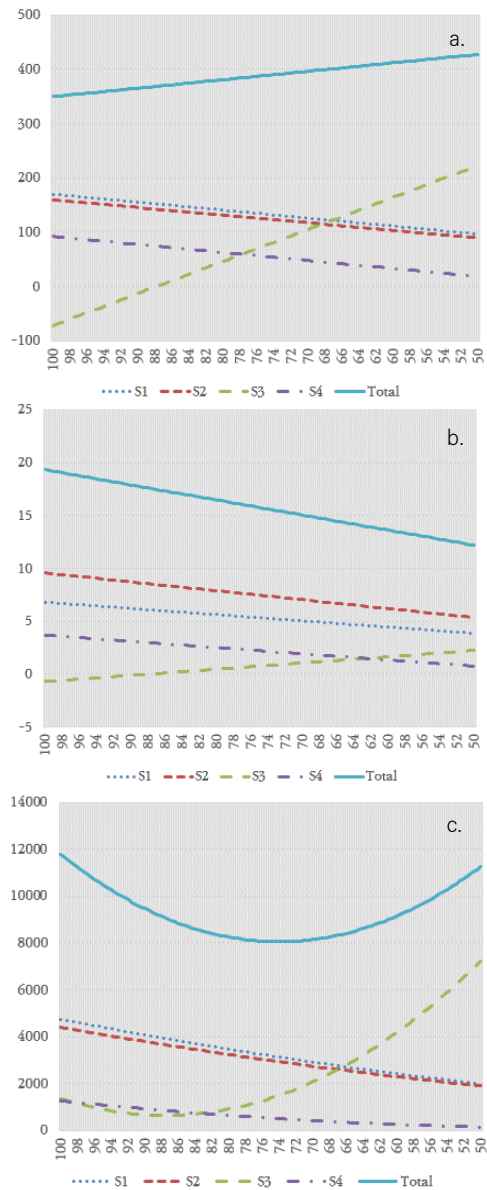
반면, <표 4-7>은 S3 선사의 배출계수를 0.01 수준으로 개선함과 동시에 단위 운영비용을 USD 75에서 USD 50으로 감축하였을 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 즉, <표 4-5>와 <표 4-6>의 시나리오가 모두 적용된 경우의 모형 분석 결과를 나타낸다. 국적선사가 친환경선대로 전환한 이후

<표 4-7> 배출계수 향상 및 운영비용 절감 시 해운 시장 균형(S3)

선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	97.2	8.5	12.4	80.1	64.0
S2	89.8	8.8	14.2		
S3	220.1	6.8	9.0		
S4	19.3	0.8	1.6		
합계	426.5	24.9	37.2		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	7,788.8	6,325.4	546.1	2,009.4	65.1
S2	7,195.2	5,843.0	564.8	1,916.9	65.0
S3	17,633.2	11,009.7	431.8	7,055.3	50.0
S4	1,546.3	1,448.8	51.7	149.2	75.1
합계	34,163.5	24,627.0	1,594.4	11,130.8	57.7

자료: 저자 작성

〈그림 4-6〉 배출계수 향상 및 운영비용(USD/tonne) 지원 시 해운 시장 균형 변화



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

에 정부가 친환경연료에 대한 보조금을 지원하거나 선사의 자구적인 노력으로 인해 운영비용이 약 33% 감소(75→USD 50)할 경우, 배출계수의 효과가 더욱 강조됨을 확인할 수 있다. 또한, <표 4-1>과 비교했을 때는 S3 선사의 배출량은 약 33% 감소(3.3→2.2M tonnes)하고, 수익은 무려 6배 이상 증가(1,020→USD 7,055M)하였다. 이에 따라, 해운 시장의 총배출량은 약 35% 감소(18.9→12.3M tonnes)하고, 총이익은 약 35% 증가(8,262→USD 11,031M)하는 등 막대한 영향을 미치는 것으로 나타났다. <그림 4-6>의 x축은 S3 선사의 단위당 운송비용을 나타낸다. 즉, 오른쪽일수록 S3 선사의 운영비용이 낮아진다. 다만, <그림 4-6>은 <그림 4-5>와 다르게 S3 선사의 배출계수를 0.01로 낮춘 후에 단위당 운영비용을 점차 감소함에 따라 수송량, 배출량, 총이익 측면에서 시장 균형의 변화를 나타낸 그래프이다.

종합적으로, 국적선사의 친환경선박 전환과 함께 운영비용을 일부 저감하는 정책 방향은 탄소배출권 거래제 도입 시 국적선사의 경쟁력 향상 및 배출량 저감에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 정부가 국적선사에 친환경선대 전환과 친환경 연료 비용 지원을 위한 정책을 동시에 시행할 경우에 두 정책 간에 시너지효과가 있음을 확인할 수 있다. <그림 4-6>의 c.총이익 그래프를 보면 선사 S3의 친환경선대 전환 및 운영비용 절감에 따라 총이익이 기하급수적으로 증가하였다. 이는 정부가 국적선사에 친환경선대 전환을 위한 정책을 시행하여 국적선사의 배출계수를 낮추기만 한다면, 국적선사는 자구적인 노력을 통해 운영비용 절감하여 총이익을 극대화할 경제적 유인이 존재함을 시사한다.

위 분석 결과를 통해 친환경선대 전환을 위한 금융 및 세제 혜택뿐만 아니라 친환경선박 운영에 대한 비용에 대한 정부 지원이 함께 시행될 경우, 선사는 수익성 증대를 위해 친환경선대로의 전환을 보다 적극적으로 참여, 추진할 수 있다. 반면에 해운선사가 친환경선대로 전환하기 위해 막대한

투자를 하였으나 친환경연료의 비용이 상승하여 운영비용이 높아진다면, 친환경선박에 대한 투자의 가치는 감소하고 선사는 막대한 피해를 입게 될 것이다. 정부는 친환경연료에 대한 보조금을 지원하고 친환경연료의 원활한 공급을 위한 인프라를 확충함으로써, 선사들의 장기적인 투자를 보호하고 환경보호에 대한 확고한 의지를 보여줄 필요가 있다. 또한, 해운선사는 친환경선대로 전환하기만 하면, 자구적으로 운영비용을 저감하여 해운 시장에서의 경쟁력을 강화하고 수익성을 증가시킬 수 있는 기회가 발생한다.

제3절 환경규제 강화 시 정부 정책 효과

본 절에서는 제1절에서 분석하였던 탄소배출권 거래제의 규제 수준 강화에 따른 해운 시장에 미치는 영향과 제2절에서 살펴본 정부 정책 시행 효과를 함께 살펴본다. 즉, 탄소배출권 거래제가 배출권 무상할당량 폐지와 배출권 가격을 상승시키는 등 규제 수준을 강화할 때, 정부의 국적선사 지원 정책인 친환경선대 전환 금융 및 세제 지원과 선사 운영비용 절감의 효과가 어떻게 나타나는지 살펴본다. 본 절에서 ‘정부 정책 효과’는 친환경선대 전환을 통한 배출계수 감소와 운영비용 저감이 함께 시행되는 경우의 효과를 의미한다.

1. 무상할당량 감소 시 정부 정책 효과

〈표 4-8〉과 〈그림 4-7〉은 탄소배출권 거래제 내 무상할당량이 폐지된 상황에서 정부가 국적선사(S3)의 친환경선대 전환과 운영비용을 함께 지원하는 정책을 시행한 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 제2절의 분석 결과와 비교했을 때, 탄소배출권 거래제의 무상할당량이 폐지되면 정부 정책의 효과가 더욱 강화되는 것으로 나타났다. 정부 정책의 효과가 더욱 강화되었다는 것은 친환경선대로 전환한 선사(S3)의 총이익이 증가하고, 해운 시장 총배출량은 감소하는 것을 의미한다. 국적선사의 배출계수 감축 및 운영비용 저감 시 해운 시장의 균형을 나타낸 〈표 4-7〉과 비교했을 때, 같은 정부 정책의 시행 효과가 무상할당량이 폐지되는 경우를 나타내는 〈표 4-8〉에서는 해운 시장의 총배출량이 12.3M tonnes에서 11.0M tonnes으로 더욱 감소했다. 또한, 해운 시장 전체의 총이익은 다소 감소(11,131→USD 9,023M)했지만, 국적선사의 이익은 USD 7,055M에서 USD 7,133M으로 약간 증가했다. 이는 탄소배출권 거래제의 무상할당량이 폐지되면

정부의 지원 정책이 국적선사의 친환경선대 전환을 더욱 촉진시킬 수 있음을 시사한다.

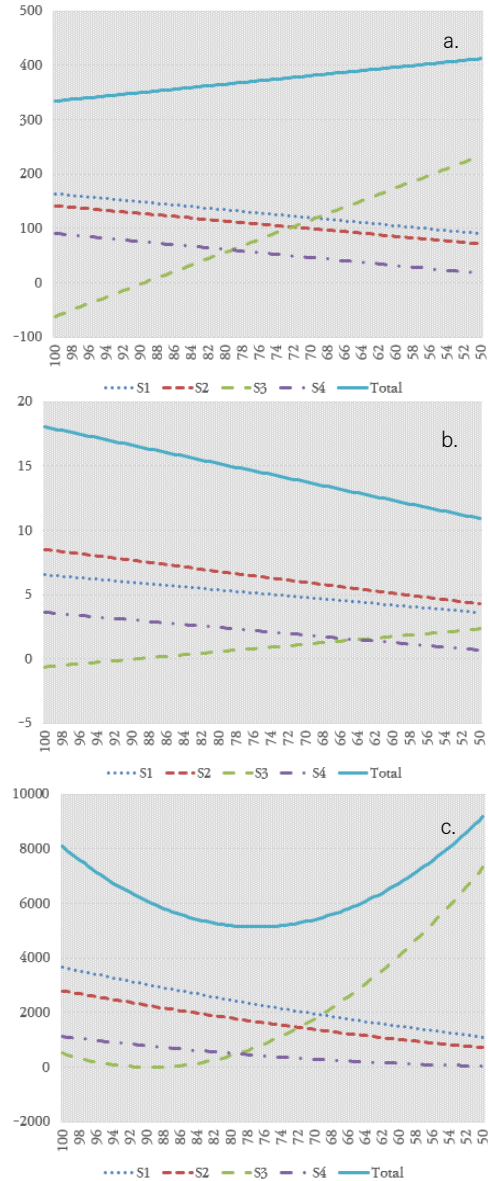
〈그림 4-7〉의 x축은 S3 선사의 단위당 운송비용을 나타낸다. 즉, 오른쪽 일수록 S3 선사의 운영비용이 낮아지는 것이다. 다만, 〈그림 4-7〉은 S3 선사의 배출계수를 0.01로 낮춘 후에 단위당 운영비용이 점차 감소함에 따라 수송량, 배출량, 총이익 측면에서 시장 균형의 변화를 나타낸 그래프이다.

〈표 4-8〉 무상할당량 폐지 시 정부 정책 효과(S3)

선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	90.9	-3.6	-	82.2	118.1
S2	72.1	-4.3	-		
S3	230.4	-2.3	-		
S4	17.8	-0.7	-		
합계	411.2	-11.0	-		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	7,471.5	5,916.4	-429.6	1,125.6	65.1
S2	5,921.7	4,689.5	-510.7	721.5	65.1
S3	18,927.6	11,522.2	-272.0	7,133.3	50.0
S4	1,462.1	1,335.7	-84.1	42.3	75.1
합계	33,782.9	23,463.8	-1,296.3	9,022.7	57.1

자료: 저자 작성

〈그림 4-7〉 무상할당량 폐지 시 정부 정책 효과(USD/tonne)



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

2. 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과

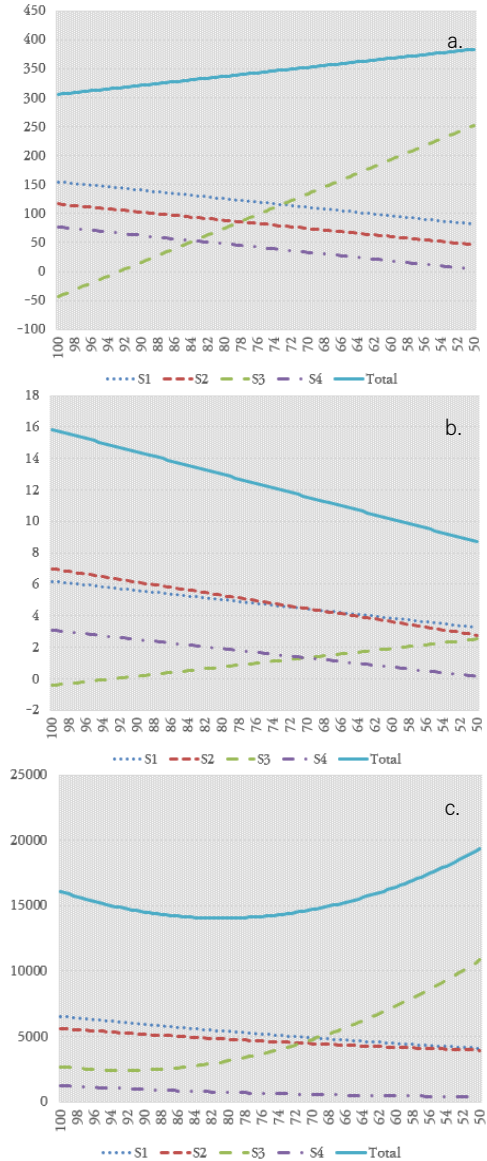
〈표 4-9〉는 탄소배출권 거래제 내 탄소배출권 가격이 상승한 상황에서 정부가 국적선사(S3)의 친환경선대 전환과 운영비용을 함께 지원하는 정책을 시행한 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 무상할당량 폐지 효과와 마찬가지로 탄소배출권 가격이 상승하면 정부 정책의 효과가 더욱 강화되는 것으로 나타났다. 국적선사의 배출계수 감축 및 운영비용 저감 시 해운 시장의 균형을 나타낸 〈표 4-7〉과 비교했을 때, 같은 정부 정책의 시행 효과가 탄소배출권 가격이 상승하는 경우에는 더욱 두드러졌다. 예를 들어, 해운 시장의 총배출량은 12.3M tonnes에서 8.8M tonnes으로 더욱 크게 감소한 것으로 나타났다. 또한, 친환경선사의 총이익은 USD 7,055M에서 USD 10,651M으로 크게 증가했다. 이는 탄소배출권 거래제의 배출권 가격이 상승할 시 정부의 지원 정책이 국적선사의 친환경선대 전환을 더욱 촉진시킬 수 있음을 시사한다.

〈표 4-9〉 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과(S3)

선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	82.3	9.1	12.4	86.0	261.8
S2	46.9	11.4	14.2		
S3	249.1	6.5	9.0		
S4	4.4	1.4	1.6		
합계	382.8	28.4	37.2		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	7,078.1	5,356.3	2,391.6	4,113.4	65.1
S2	4,034.1	3,054.3	2,985.7	3,965.6	65.1
S3	21,418.1	12,458.7	1,691.6	10,651.0	50.0
S4	377.8	330.6	367.7	415.0	75.2
합계	32,908.1	21,199.9	7,436.7	19,144.9	55.4

자료: 저자 작성

〈그림 4-8〉 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과(USD/tonne)



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

〈그림 4-8〉의 x축은 S3 선사의 단위당 운송비용을 나타낸다. 오른쪽에 가까울수록 S3 선사의 단위 운영비용이 낮아진다. 〈그림 4-8〉은 S3 선사의 배출계수를 0.01로 낮춘 후에 단위당 운영비용이 점차 감소함에 따라 수송량, 배출량, 총이익 측면에서 시장 균형의 변화를 나타낸 그래프이다.

3. 무상할당량 감소 및 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과

마지막으로, 〈표 4-10〉은 탄소배출권 거래제의 무상할당량이 폐지되고 탄소배출권 가격이 상승한 상황에서 정부가 국적선사(S3)의 친환경선대 전환과 운영비용을 함께 지원하는 정책을 시행한 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 즉, 환경규제의 수준이 보다 강화됨에 따라 정부가 국적선사에 대해 친환경선대 전환을 위한 금융 및 운영비용을 지원하는 정책을 시행한 경우이다. 또는 정부가 국적선사에 대해 친환경선대 전환을 위한 정책을 시행한 상태에서 이익 극대화를 위해 선사가 자구적으로 운영비용 절감을 위해 노력한 경우라고 볼 수 있다.

〈표 4-10〉 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과(S3)

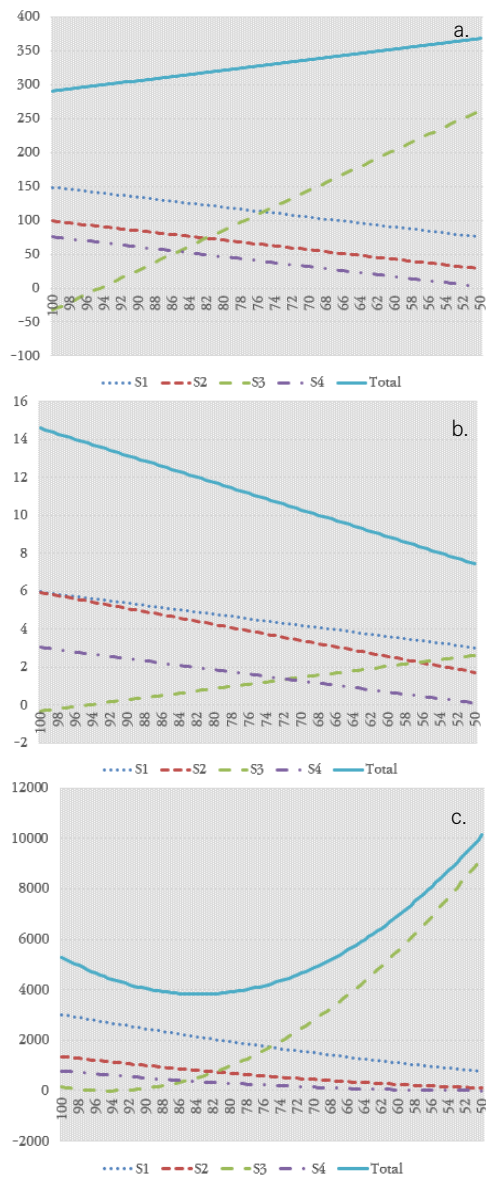
선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	76.0	-3.0	-	88.0	315.9
S2	29.2	-1.8	-		
S3	259.4	-2.6	-		
S4	2.9	-0.1	-		
합계	367.5	-7.5	-		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	6,693.3	4,947.3	-960.8	785.2	65.1
S2	2,568.2	1,900.7	-553.0	114.5	65.2
S3	22,832.3	12,971.3	-819.4	9,041.6	50.0
S4	254.1	217.5	-36.5	0.1	75.4
합계	32,347.8	20,036.7	-2,369.6	9,941.5	54.5

자료: 저자 작성

정부 정책의 효과를 나타낸 <표 4-7>과 환경규제가 보다 강화된 상황에서 정부의 정책의 효과를 나타낸 <표 4-10>을 비교하면, 해운 시장의 총배출량은 12.3M tonnes에서 7.5M tonnes으로 크게 감소하였다. 즉, 정부 정책의 효과는 환경규제가 강화된 상황에서 더욱 커지는 것이다. 선사 S3의 이익은 USD 7,055M에서 USD 9,041M으로 증가했다. 이를 탄소배출권 거래제가 도입됨에 따라 추가적인 규제 및 정부의 지원 정책 없이 해운 시장의 균형을 분석했던 <표 4-1>의 결과와 비교하면, 해운 시장의 전체 총배출량은 18.9M tonnes 대비 7.5M tonnes으로 약 60% 감소했으며 이는 주로 S3 선사의 운영비용 경쟁 우위로 인해 타 선사가 수송량을 줄이면서 배출량이 감소했기 때문으로 보인다. S3 선사는 운영비용의 경쟁 우위에 따라 수송량을 늘리면서 오히려 배출량이 증가하였고, 수익은 크게 증가하였다.

탄소배출권 거래제에서 국적선사에 대한 정부의 지원 정책의 효과를 꾸르노 모형을 통해 분석한 결과, 친환경선박 전환에 대한 지원이 배출량 저감 및 수익 상승 등 충분한 효과가 나타남을 확인했다. 또한, 무상할당량 폐지와 배출권 가격 상승 등 환경규제의 수준이 강화되었을 때, 선사는 친환경선대로 전환하기 위한 경제적 유인이 더욱 강화되는 것을 확인할 수 있다. <그림 4-9>의 x축은 S3 선사의 단위당 운송비용을 나타낸다. <그림 4-9>는 S3 선사의 배출계수를 0.01로 낮춘 후에 단위당 운영비용이 점차 감소함에 따라 수송량, 배출량, 총이익 측면에서 시장 균형의 변화를 나타낸 그래프이다.

〈그림 4-9〉 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과(USD/tonne)



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

〈표 4-11〉은 〈표 4-10〉과 달리, 탄소배출권 거래제 내 무상할당량이 폐지되고 탄소배출권 가격이 상승한 상황에서 정부가 국적선사(S3)의 친환경선대 전환만 지원하고, 운영비용은 지원하지 않는 경우의 해운 시장 균형 상태를 나타낸다. 또는 정부가 특정 선사(S3)에게 친환경선대 전환을 위한 지원책을 시행했음에도 불구하고, 선사가 운영비용 절감을 위한 자구적인 노력을 하지 않은 경우로 볼 수 있다.

〈표 4-11〉에서 S3 선사는 S1 선사에 비해 단위 운영비용은 USD 10 높은 반면에 배출계수는 25% 수준인 0.01이다. 하지만, 〈표 4-11〉에서 볼 수 있듯이 S1 선사의 총이익은 USD 1,731M, S2 선사의 총이익은 USD 1,681M으로 나타나 두 선사의 총이익은 거의 동일한 것을 알 수 있다. 즉, 해운선사 간 단위 운영비용 USD 10의 차이는 배출권거래제의 무상할당량이 폐지되고 배출권 가격이 치솟은 상황에서 배출계수를 25% 수준으로 줄이는 것과 수익성 측면에서 비슷한 효과임을 알 수 있다. 즉, 친환경선박을

〈표 4-11〉 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시 친환경선대 전환 효과(S3)

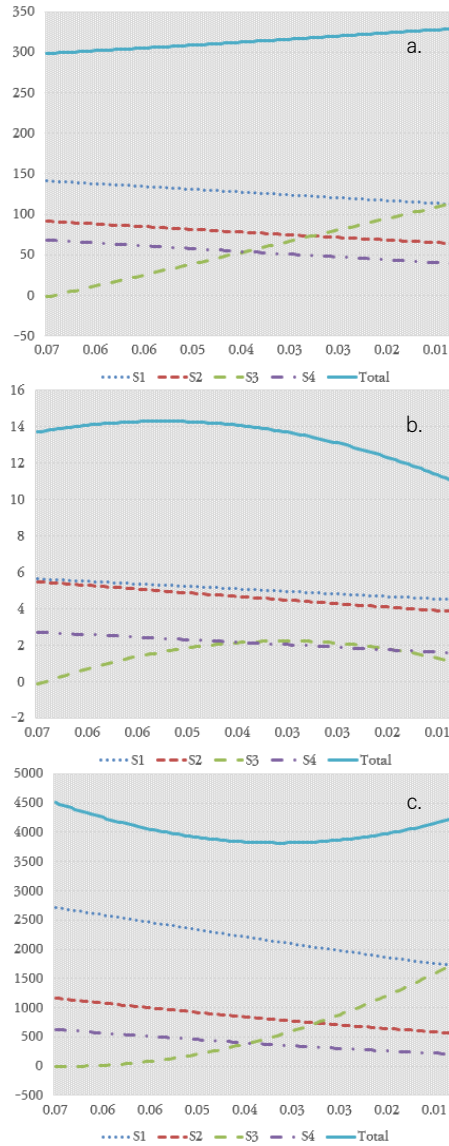
선사	수송량 (M tonnes)	탄소저감량 (M tonnes)	할당량 (M tonnes)	운임 (USD)	배출권 가격 (USD)
S1	112.7	-4.5	-	93.3	321.3
S2	64.3	-3.9	-		
S3	111.9	-1.1	-		
S4	39.6	-1.6	-		
합계	328.5	-11.1	-		
선사	운송수익 (M USD)	운송비용 (M USD)	배출권수익 (M USD)	총이익 (M USD)	단위 운영비용 (USD)
S1	10,512.2	7,331.8	-1,448.6	1,731.8	65.0
S2	5,996.5	4,183.7	-1,239.5	573.3	65.1
S3	10,438.4	8,397.4	-359.6	1,681.4	75.0
S4	3,690.5	2,968.9	-508.6	213.1	75.0
합계	30,637.6	22,881.8	-3,556.3	4,199.5	69.7

자료: 저자 작성

도입하여 배출계수를 75% 감축하여도, 선사의 수익성 측면에서는 단위 운영비용을 16% 감축하는 것이 더 유리하다. 이는 현 시점의 EU-MRV와 선사의 연간보고서에 나타난 파라미터를 기준으로 산정된 결과이며, 미래에 파라미터값이 변화할 경우에는 분석 결과가 달라질 수 있다.

위 결과를 바탕으로, 국적선사들의 친환경선대 전환을 촉진시키기 위해서는 친환경선박 전환 지원과 더불어 운영비용 절감에 대한 노력이 반드시 수반되어야 함을 알 수 있다. 위의 분석 결과는 보다 강화된 탄소배출권 거래제가 도입될 것으로 예상되는 상황에서는 정부의 적극적인 지원 정책이 해운 시장에서의 국적선사 경쟁력 강화에 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 특히, 선사의 환경 부담을 줄이면서도 이익을 증대시킬 수 있는 방안으로서, 친환경선박의 도입과 운영비용 절감이 효과적임을 확인했다. <그림 4-10>의 x축은 S3 선사의 배출계수를 나타낸다. 즉, 오른쪽일수록 S3 선사의 친환경 정도가 높아진다. <그림 4-10>은 S3 선사의 배출계수가 0.01까지 낮아짐에 따라 수송량, 배출량, 총이익 측면에서 시장 균형의 변화를 나타낸 그래프이다.

〈그림 4-10〉 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시
배출계수(tonne/tonne) 개선 효과



a. 수송량(M tonnes), b. 배출량(M tonnes), c. 총이익(M USD)

자료: 저자 작성

제4절 소결

탄소배출권 거래제가 해운 부문에 도입됨에 따라 해운선사 및 해운 시장에 미친 영향을 꾸르노 모형으로 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, 해석적 방법을 이용하여 배출권 무상할당량, 배출권 가격, 선사 운영비용과 같은 주요 파라미터가 변화할 때 해운 시장 전체에 미치는 영향을 분석했다. 그 결과로 첫째, 해운 부문 탄소배출권 거래제의 무상할당량이 감소하면 해운 시장의 총수송량 및 총배출량은 감소한다. 둘째, 해운 부문 탄소배출권 거래제의 배출권 가격이 증가하면 해운 시장의 총수송량 및 총배출량이 감소한다. 셋째, 해운선사의 단위당 운영비용이 증가하면 해운 시장의 총수송량 및 총배출량이 감소한다.

닫힌 형태의 수식이 너무 복잡하여 해석적으로 풀이하기 어려운 분석은 실증 데이터를 기반으로 하는 수치적 방법을 활용하였다. 이를 위해 통계 자료를 바탕으로 현 시점의 선사 특성과 배출권의 가격과 운임 함수를 설정하였다. <그림 4-11>은 4장에서 분석한 해운 부문 탄소배출권 거래제 영향 분석 중 대표적인 시나리오에 따른 해운 시장 균형 결과(배출량과 총이익)를 나타낸다. 수치적 방법을 통해 특정 선사의 배출계수가 감소함에 따라 해당 선사의 배출량이 감소하고 이익도 증가하는 것을 확인하였다. 1번 시나리오의 두 그래프에서 볼 수 있듯이, 특정 선사(S3)가 단독으로 친환경선대로 전환하는 것은, 전환 선대의 배출량이 감소하고 총이익도 증가하는 등 바람직한 효과가 나타남을 알 수 있다.

하지만 이 효과는 2번 시나리오에서처럼 운영비용의 저감이 수반되는 경우 더욱 극대화됨을 알 수 있다. 친환경선대 전환과 더불어 정부가 친환경 연료 보조금 등 운송비용을 일부 지원하거나 선사의 자구적인 노력을 통해 운송비용을 감축하는 경우에는 친환경선대 전환의 배출량 감소 및 경제적

이익 창출 효과가 더욱 극대화되는 것으로 나타났다. 2번 시나리오의 배출량 그래프를 보면, 친환경선박으로 전환한 선사(S3)는 운영비용 저감에 따른 배출량은 오히려 증가하고 있지만, 경쟁 선사들이 배출량을 줄이면서 시장 전체의 배출량은 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 S3 선사를 제외한 경쟁 선사가 비용 측면에서 경쟁열위에 따라 수송량을 줄이기 때문이다. 또한, 친환경선박으로 전환한 S3의 수익은 기하급수적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 연구 결과는 친환경선박을 도입한 선사에 운영비용을 일부 지원하는 정책이 해운선사가 친환경선대로 전환하는 경제적인 유인을 증가시킬 뿐만 아니라 자구적인 운영비용 절감을 통해 큰 경쟁 우위를 가질 수 있음을 보여준다.

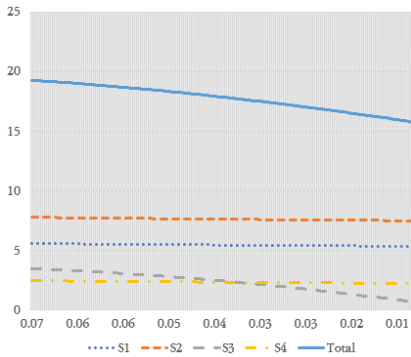
한편, 위와 같은 친환경선박 전환의 효과는 환경규제가 심화됨에 따라 더욱 강조된다. 3번 시나리오는 2번 시나리오에서 환경규제가 더욱 심화되는 경우의 시나리오를 나타내고 있는데, 해운 시장의 배출량은 더 가파르게 감소하고 S3 선사의 총이익은 더욱 가파르게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 배출권의 무상할당량이 폐지되고 배출권의 가격이 오르는 등 탄소배출권 거래제의 규제 수준이 심화되는 경우에는 배출계수 저감에 따른 선사의 이익 증대와 배출량 감소 효과가 더욱 강조되는 것으로 나타났다. 이처럼, 환경규제의 수준이 강화되면 해운선사는 친환경선대로 전환할 경제적 유인이 더욱 커지는 것을 확인하였다.

마지막으로 4번 시나리오는 3번 시나리오에서 운영비용이 저감되지 않는 경우를 나타낸다. 이는 1번 시나리오에서 환경규제만 강화된 경우와 동일한 시나리오이다. 4번 시나리오에 따른 배출량, 총이익 그래프를 살펴보면 특정 선사(S3)가 친환경선대로 전환한 후 운영비용이 저감되지 않으면 시나리오 3번에 비해서 배출량이 감축 효과와 총이익 증가 효과가 매우 축소됨을 알 수 있다.

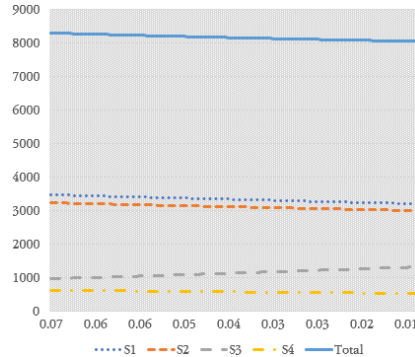
〈그림 4-11〉 시나리오에 따른 해운 시장 배출량 및 총이익

1. S3 선사 배출계수 저감 시 해운 시장 균형 변화

b. 배출량(M tonnes)

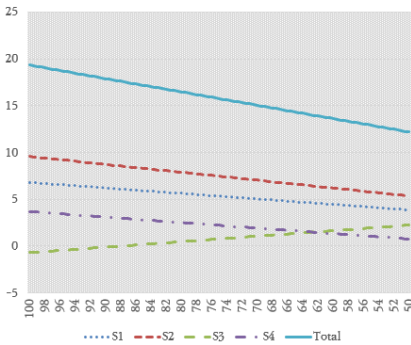


c. 총이익(M USD)

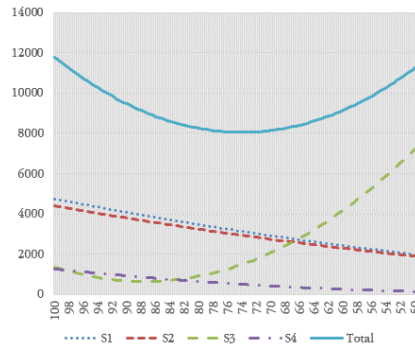


2. S3 선사 배출계수 저감 및 운영비용 지원 시 해운 시장 균형 변화

b. 배출량(M tonnes)

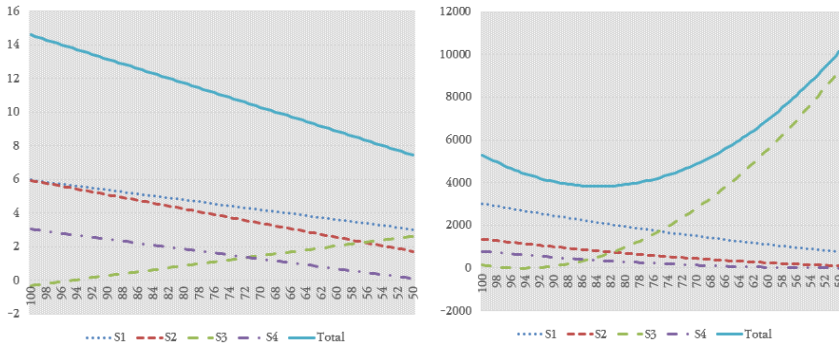


c. 총이익(M USD)



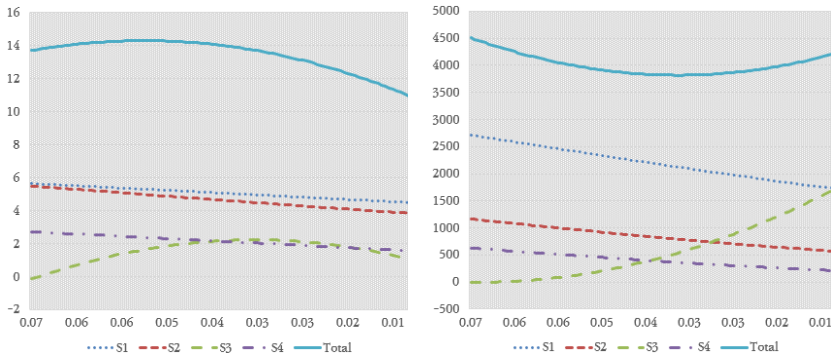
3. 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시 정부 정책 효과(S3)

b. 배출량(M tonnes) c. 총이익(M USD)



4. 무상할당량 폐지 및 탄소배출권 가격 상승 시 친환경선대 전환 효과(S3)

b. 배출량(M tonnes) c. 총이익(M USD)



자료: 저자 작성

05

결론 및 정책 제언

제1절 연구요약 및 결론

2020년 9월, EU 의회에서 2022년부터 해운 부문을 EU-ETS에 포함시키는 법안이 통과되었다. 최근 탄소중립이 전 세계적인 의제로 떠오르면서 해운 분야의 온실가스 감축 노력에 대한 필요성이 증가하였다. 이에 따라 EU와 IMO가 해운 부문 탄소배출권 거래제의 구체적인 도입 방안을 논의 중이나, '제도의 시행 방식에 대한' 글로벌 선사의 완강한 반대로 인해 구체적인 적용 방안을 재검토하고 있다. IMO 해운 부문 환경규제는 전 세계적으로 적용되고, 강제성을 가지기 때문에 우리나라 해운선사와 항만 산업에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

해운 부문 탄소배출권의 도입이 임박하였으나, 우리나라는 아직 이에 관한 연구나 정책적 대응이 부족한 상황이다. 지난 2020년, IMO에 의해 시행된 선박 연료유 내 황산화물 규제에서 볼 수 있듯이 해운 부문 환경규제는 영향력의 공간적 범위가 매우 넓고 정도가 강력하다. 항만, 해운, 조선업 등 해양 산업이 우리나라 경제에서 수행하는 역할이 매우 중요하고, 탄소배출권 거래제가 산업에 미칠 잠재력이 크다는 점을 고려했을 때 선제적 대응 정책 연구는 우리나라 산업의 생존을 위해 필수적이다.

본 연구는 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 영향을 분석하기 위해 꾸르노 모형을 활용한 이론 모형을 구축했다. 제안한 모형은 해운 시장과 탄소배출권 거래제 시장에서 선사의 수익 극대화를 위한 최적 공급량을 결정하는 모형이다. 이 모형을 활용하여 해운 부문 탄소배출권 거래제와 친환경선박의 도입이 해운선사와 해운 시장에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 해운선사 관점에서는 운영비용, 배출계수 등 개별 선사의 특성에 따른 선사의 이익과 배출량 변화를 분석하였고, 개별 선사의 수익 최대화 목적의 의사결정에 따라서 시장 균형 상태의 총수송량, 총이익, 총배출량의 변화 등을 분석했다.

다음으로, 닫힌 형태의 수식이 너무 복잡하여 해석적으로 풀이가 어려운 것은 통계 자료를 기반으로 하여 수치적 방법을 활용했다. 실증 데이터를 기반으로 하는 선사 특성과 배출권의 가격과 운임 함수를 적용하여, 배출권 가격의 상승, 선사의 친환경선박 도입 등에 따른 시장 균형의 변화를 분석했다. 이를 통해, 환경규제 수준의 강화와 정부 정책 시행에 따른 해운 시장 및 해운 선사의 수송량, 배출량, 총이익의 변화를 살펴보았다. 이러한 분석을 통해 본 연구가 해운 부문 탄소배출권 거래제의 효과에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 구체적인 연구 결과는 다음과 같다. 먼저, 무상할당량, 배출권 가격, 선사 운영비용 등 주요 파라미터가 변화할 때 해운 시장 전체에 미치는 영향을 분석하기 위해 해석적 접근 방법을 이용했다. 이를 통해 탄소배출권 도입이 해운 시장에 미치는 영향에 대한 일반적인 시사점을 도출했다. 해석적 방법으로 풀이한 결과, 탄소배출권 거래제 도입 시 배출권의 무상할당량의 감소와 배출권 가격의 상승 조치는 해운 시장의 총배출량을 감소시키는 것으로 나타났다. 이를 수치적 방법으로 분석한 결과, EU-ETS의 해운 부문 총배출량은 무상할당량을 폐지하면 7%, 배출권 가격을 현재의 3배 수준인 USD 272까지 올리면 9% 각각 감소하며, 두 조치를 함께 시행하면 총 24%의 배출량이 감소하는 것으로 나타났다.

또한, 탄소배출권 거래제가 도입되고 규제 수준이 강화되면 해운 시장의 총이익이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 탄소배출권 거래제 도입 후 무상할당량만 폐지하면 36%의 총이익이 감소하고, 배출권의 가격만 현재의 USD 72에서 USD 272까지 올리면 75%의 총이익이 증가하며, 두 조치를 함께 시행하면 총 49%의 총이익이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 배출권 가격의 상승과 무상할당량의 감소로 인한 비용 증가와 수송량 감소로 인한 운송수익 감소가 중첩된 결과로 추정된다. 반면, 친환경선대를 보유한 선사는 상대적으로 수익의 감소 폭이 작은 것으로 나타나, 환경규제의 강화가 친환경선박으로의 전환에 경제적 유인을 제공하는 효과가 있는 것으로 나타났다. 다만, 선사 간 배출계수 차이에 따른 이익 효과는 운영비용의 수익 효과에 비해 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 현재를 나타내는 실증 데이터를 바탕으로 선사 특성 및 가격 함수를 설정한 뒤 분석을 수행한 결과, 탄소배출권 거래제 도입 시 해운선사는 수익 극대화를 위해 배출계수를 낮추기보다는 운영비용을 절감하는 대응 방법을 선택할 가능성이 높음을 시사한다.

다음으로, 정부 정책에 의해 국적선사가 친환경선대로 전환하면, 선사의 배출량은 크게 감소하고 이익도 증가하는 것으로 나타났다. 구체적으로, 국적선사가 친환경선대 전환을 통해 배출계수를 0.06에서 0.01 수준으로 낮추어 경쟁 선사의 배출계수(0.04)의 25% 수준으로 낮추면, 국적선사의 배출량은 약 75% 감소하고, 총이익은 약 30% 증가하는 효과가 나타났다. 배출계수 개선으로 국적선사의 총이익이 약 30% 증가했지만, 경쟁 선사와 비교했을 때 배출계수에 의한 경쟁우위에 따른 수익 상승은 나타나지 않았다. 국적선사의 친환경선대 전환 효과로 인해 해운 시장의 총배출량도 약 16% 감소하는 효과가 나타났으나, 경쟁 선사의 배출량과 총이익에는 큰 영향을 미치지 않았다.

배출계수 개선 없이 국적선사의 운영비용만 감축되는 경우에는 선사의 수송량, 배출량, 이익은 크게 증가했다. 국적선사의 단위당 운영비용이 현

수준 대비 약 30% 감소(USD 75→USD 50)하여 경쟁 선사의 운영비용(USD 65)보다 낮아지면, 국적선사의 수송량과 배출량이 모두 약 3배 증가하며, 수익은 약 5배 크게 증가했다. 또한, 국적선사의 운영비용 감축으로 인한 경쟁 우위로 다른 경쟁 선사의 생산량, 배출량, 총이익 상당히 감소하는 경향을 보였다.

정부의 친환경선대 전환 지원 정책과 함께 정부의 친환경연료비 보조금 지급 또는 선사의 자구적인 노력으로 인해 운영비용이 감소할 경우에는 친환경선대의 수익 증대 효과가 더욱 강조됨을 확인하였다. 위에서 언급했듯 국적선사의 배출계수 개선과 함께 운영비용을 낮추면, 해당 선사의 배출량은 약 33% 감소하고, 수익은 무려 6배 이상 증가했다. 이에 따라, 전체 해운 시장의 총배출량은 약 35% 감소하고, 총수익은 약 35% 증가하는 등 시장에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 정부가 친환경선대 전환 지원 정책을 시행할 시, 선사가 운영비용 감축을 통해 큰 이익을 창출할 수 있으므로 해운선사가 자구적인 노력을 통해 비용을 절감할 경제적인 유인이 존재함을 보여준다. 또한, 환경규제에 대해 퍼스트 무버로서 적극적으로 친환경선대로 전환하는 경우에는 타 선사와의 경쟁우위를 바탕으로 시장 점유율 상승 및 큰 경제적 이익을 얻을 수 있음을 확인하였다. 이 연구 결과는 해운선사에게 보다 적극적으로 탄소배출권 거래제에 대응할 것을 촉구하는 근거 자료를 제시한다.

마지막으로, 환경규제 강화 조치와 정부 정책의 효과를 함께 살펴보았다. 정부 정책의 효과는 친환경선대 전환과 운영비용 절감이 함께 이루어지는 경우의 효과를 뜻한다. 탄소배출권 거래제의 무상할당량이 폐지되면 정부 정책의 효과가 더욱 강화되는 것으로 나타났다. 정부 정책만 시행했을 때보다 무상할당량이 폐지되면 해운 시장의 총배출량이 더욱 감소한다. 해운 시장 전체의 총이익은 다소 감소했지만, 친환경선사의 이익은 오히려 증가하였다. 탄소배출권의 가격 상승 역시 정부 정책의 효과를 더욱 강화

했다. 정부 정책만 시행했을 때보다 탄소배출권 가격이 함께 상승하는 경우 해운 시장의 총배출량이 더욱 감소하고 친환경선사의 이익은 크게 증가했다. 위 두 사례를 통해 정부의 지원 정책이 탄소배출권 거래제의 규제수준이 강화되는 상황에서 국적선사의 친환경선대 전환을 더욱 촉진시킬 수 있음을 알 수 있다.

한편, 모든 분석 결과에서 정부 정책에 의해 선사가 친환경선대로 전환했더라도, 해당 선사의 운영비용 절감이 수반되지 않는다면 정부 정책의 효과는 반감되는 것으로 나타났다. 친환경선대로 전환하면 배출량 저감 효과는 분명하지만, 수익성 측면에서는 큰 효과가 없는 것으로 나타났다. 수치적 분석 결과에 따르면, 해운선사 간 단위 운영비용 USD 10의 차이는 배출권거래제의 무상할당량이 폐지되고 배출권 가격이 치솟은 상황에서 배출계수를 25% 수준으로 줄이는 것과 수익성 측면에서 비슷한 효과임을 알 수 있다. 이를 통해, 국적선사가 친환경선대로 전환한 경우, 정부는 친환경연료에 대한 보조금 지급 또는 친환경연료 인프라 확충을 통해 국적선사의 운영비용 절감을 도모할 필요가 있다. 또한, 해당 선사는 수익 극대화 및 정부 정책 효과의 극대화를 위해 자구적인 운영비용 절감 노력이 필요하다.

제2절 학술적 기여도

본 연구는 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 영향을 분석하기 위해 꾸르노 모형을 적용하여 해운 시장을 모형화하였다. 기존의 해운 부문 탄소배출권 거래제 연구는 대부분 국제법 및 국내법 등 법률 검토에 초점을 맞추거나, 국내외 법, 제도적 대응 사례를 분석하는 데 그쳤다. 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 영향을 계량적으로 분석한 연구가 소수 존재하지만, 선박에 의해 발생한 총배출량에 배출권 가격을 곱하는 등 분석 방법이 매우 단순하여 연구 결과를 신뢰하기는 어렵다. 반면, 본 연구는 게임 이론 모형 중 하나인 꾸르노 모형을 적용하여 타 선사와의 경쟁구조, 탄소배출권 거래제의 시장원리, 배출권 가격 변화, 무상할당량의 여부, 선박의 배출계수 변화 등을 고려하여 환경규제의 영향을 분석했다.

또한, 본 연구는 꾸르노 모형과 실증 데이터인 EU-MRV 데이터를 사용하여 해운 부문 탄소배출권 거래제의 도입에 따른 현실적인 분석 결과를 제공했다. 해운 부문 탄소배출권 거래제를 모형화하여 분석한 연구가 소수 존재하지만 주로 가상의 데이터에 근거하여 분석했기 때문에 분석 결과에 대한 실증적인 근거를 제공하지는 못하였다. 본 연구는 EU-MRV에 기반한 실제 데이터와 꾸르노 모형을 결합하여 해운 부문 탄소배출권 도입 효과에 대한 현실적인 증거를 제공하였다.

본 연구는 해운 부문 탄소배출권 거래제의 환경규제 효과 및 정책지원 효과를 EU-MRV의 실증 데이터와 게임이론을 적용하여 분석한 최초의 연구이다. 해운 부문 탄소배출권 거래제는 아직 전 세계적으로 활발하게 연구되지 않은 분야이기 때문에 학술적으로 선점효과를 누릴 수 있다. 해운 부문 탄소배출권 거래제를 분석하기 위한 이론 모형으로 꾸르노 모형을 제안하고 구축하였으며, 이를 통해 향후 해운 부문 탄소배출권 거래제

의 다양한 측면을 분석하기 위한 모형의 토대를 제시하였다. 예를 들면, 해운 부문 탄소배출권 거래제의 배출권 총량의 제한 효과, 정기선/비정기선 간 영향 차이, 선내 CCUS 도입 효과 등을 본 모형을 기반으로 발전된 모형을 구축하여 분석할 수 있을 것으로 기대된다. 이와 같은 연구 과제를 향후 연구의 방향으로서 제안하였다.

제3절 정책·산업적 제언

1. 정책적 제언 및 연구 활용 방안

정부는 국적선사의 친환경선대 전환을 적극적으로 지원해야 한다. 이를 위해 재정 지원, 세제 혜택, 연구 및 개발 지원 등 다양한 방안을 모색하여 선사들이 환경친화적인 선박으로의 전환을 원활하게 진행할 수 있도록 도와야 한다. 본 연구 결과에 따르면 친환경선대로 전환한 선사의 경쟁력을 유지하고 환경규제에 효과적으로 대응하기 위해서는 운영비용의 절감이 필수적이다. 하지만, 정부가 직접적으로 유류비에 대한 보조금 등을 지원하면 세계무역기구(WTO)의 통상규범에 어긋날 가능성이 매우 높다. 따라서, 정부는 운영비용 절감을 위한 지원 프로그램을 마련하고, 관련 기술 개발 및 인프라 구축에 투자하여 선사들의 부담을 줄이는 방안을 고려할 필요가 있다.

정부는 선사의 친환경선박 운영비용을 절감하기 위해 친환경연료가 원활하게 공급되도록 인프라를 구축할 필요가 있다. 해운 부문 탈탄소화를 위해서는 항만에서의 친환경연료 공급 인프라 구축이 필수적이다. 현재 가장 선진적, 적극적으로 친환경연료 공급 인프라 구축에 적극적인 곳은 로테르담과 싱가포르이며, 현재 전 세계에서 로테르담의 친환경연료 가격이 가장 저렴하다. 우리나라도 울산항을 중심으로 친환경연료 인프라 구축을 위한 발걸음을 시작했으며, 이는 가까운 미래에 부산항의 존망을 위해서도 아주 중요한 과제로 인식되고 있다.

위험을 감수하고 친환경규제에 적극적으로 대응하는 선사를 장려하기 위해 퍼스트 무버에게 인센티브를 제공해야 한다. 환경규제에 대해 선사에서 선택할 수 있는 전략 중 하나는 퍼스트 무버로서 적극적으로 대응할 것인지, 패스트 팔로어(fast follower)로서 비교적 소극적으로 대응할 것인지

결정하는 것이다. 우리나라의 경우, HMM과 같은 대형선사는 환경규제에 대한 깊은 이해와 자본력을 바탕으로 퍼스트 무버로서 적극적으로 대응하는 전략을 취할 가능성이 높다. 이러한 대형선사는 탄소배출권 거래제 등 환경규제와 관련된 부서를 구성하고, 이를 연구하여 친환경선박에 대한 투자 시기 등을 결정할 수 있다. 대형선사의 대응 방안을 벤치마크하는 중소형선사를 위해서라도 위험을 감수하고 친환경규제에 적극적으로 대응하는 선사를 장려하기 위해 퍼스트 무버를 위한 인센티브를 제공할 필요가 있다.

한편, 다수의 중소형 선사는 환경규제에 적극적으로 대응하기 위한 자원이 부족한 경우가 많다. 이러한 선사는 재무 여건이 열악하고 선박금융에 대한 접근성이 부족하여 친환경선박으로 전환하는 등 초기에 적극적으로 대응하는 것이 불가능하다. 따라서, 저탄소연료 등을 사용하면서 상황을 관망하다가 퍼스트 무버의 전략을 관찰한 뒤 적절한 대응 방안을 선택하는 전략을 취할 가능성이 높다. 이 같은 중소형선사도 환경규제에 참여할 수 있도록 중소형선사의 패스트 팔로잉(fast following)을 장려하는 정책이 필요하다.

또한, 탄소배출권 거래제에 대한 이해를 높이고 효과적으로 대응할 수 있도록, 정부는 국내 해운선사를 대상으로 교육 및 홍보 활동을 강화할 필요가 있다. 워크숍, 세미나, 교육 프로그램 등을 통해 해운선사의 인식을 높이고, 새로운 환경규제의 세부 사항과 이를 통해 경쟁우위를 향상시킬 기회를 안내하여야 한다. 마지막으로, 정부의 관계 부처와 기관은 IMO와 같은 국제기구와의 협력을 강화하여 국제 환경규제의 흐름을 파악하고, 국가의 입장을 효과적으로 대표해야 한다. 이를 통해 국제적인 무대에서 우리나라의 의견이 반영되도록 노력해야 한다.

정부는 환경규제의 효과와 대응 정책의 효과를 미리 가늠해 보고, 정부 정책 수립의 근거를 마련하기 위해 본 연구에서 제안된 모형을 활용할 수 있다. 탄소배출권 거래제와 같은 새로운 환경규제가 해운 부문에 도입되는

경우, 그 효과를 사전에 가늠하는 것은 매우 어렵다. 이는 지난 2020년부터 도입된 선박 연료유 황산화물 함유량 규제에서도 확인할 수 있었다. 국적선사를 지원하는 정부 입장에서도 구체적인 정보가 부족하기 때문에 지원 정책을 효과적, 효율적으로 시행하는 것이 매우 어렵다. 제도 초기에는 다양한 대응 방안이 동시에 고려되며, 해운 선사는 부족한 정보와 각자의 판단을 바탕으로 환경규제에 대응하기 위한 최선의 대응 방안을 선택할 것이다.

본 연구는 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 효과를 분석하기 위한 경제적 모형을 제안하였다. 배출권 가격의 변화, 친환경선박 배출계수의 변화 등 다양한 시장 변화의 효과를 모형으로 분석하였다. 이러한 분석을 통해 정부에서 계획 또는 추진 중인 정책에 대한 실증적인 근거자료를 제공할 수 있다. 이러한 근거자료를 바탕으로 정부는 정책 관계자와 효율적으로 협의하여 정책의 합의점을 도출할 수 있으며, 보다 효과적인 정책을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 산업적 제언 및 연구 활용 방안

해운선사는 환경규제의 강화에 따른 영향을 최소화하고 장기적인 경쟁력을 확보하기 위해 친환경선박을 도입하는 방안을 고려해야 한다. 본 연구의 분석 결과에 따르면, 탄소배출권 거래제 도입에 효과적으로 대응하기 위해서는 친환경선박으로 전환함과 동시에 운영비용을 절감하기 위한 노력이 수반되어야 한다. 퍼스트 무버로서 친환경선대 전환 후 자구적인 노력을 통해 운영비용을 절감하는 경우, 시장점유율 상승 및 큰 경제적 이익이 발생함을 확인하였다. 반대로, 배출권의 무상할당이 폐지되고 배출권의 가격이 상승하는 상황에서 배출계수를 줄이지 않으면 친환경선대로 전환한 경쟁 선사에 의해서 시장점유율을 빼앗기고, 수익이 감소하게 된다. 따라

서, 해운선사는 여건에 따라 퍼스트 무버로서 적극적으로 대응할 것인지, 패스트 팔로어로서 신중하게 대응할 것인지 신속히 결정해야 한다. 모형 분석 결과에 따르면 퍼스트 무버로서 대응하는 것은 위험이 따르지만 경쟁 우위로 인한 시장 점유율 확대, 수익 증가의 이득을 누릴 수 있을 것으로 기대된다. 반면, 패스트 팔로어로서 대응하는 것은 위험은 적겠지만 친환경 선대로 전환한 선사의 경쟁우위에 의해 시장점유율이 하락하고 수익이 악화되는 것을 감수해야 한다.

선사는 선박의 배출량을 줄이는 것 외에 운영비용도 함께 절감하여야 해운 시장 내 경쟁 우위로 인한 선사의 수익 극대화가 가능하다. 하지만, 탄소배출권 거래제와 같은 환경규제가 도입될 경우, 국적 해운선사에 대해 정부가 직접적으로 유류비에 대한 보조금 등을 지원하면 WTO의 통상규범에 위배될 우려가 있다. 이러한 상황에서 국적 해운선사는 스스로의 경쟁력을 강화하기 위한 방안을 모색해야 한다. 운영비용 절감, 에너지 효율성 향상, 친환경 기술의 도입 등 다양한 방법을 통해 선사의 경쟁력을 높일 수 있다. 또한, 국제 해운 시장의 변화와 기후 변화 대응을 위한 국제적인 협력을 통해 새로운 기회를 창출할 수 있다.

결론적으로, WTO의 무역 규범과 탄소배출권 거래제 도입 사이의 복잡한 관계 속에서 국적 해운선사는 정부의 친환경선대 전환 지원책을 적극적으로 수용하고, 자구적인 노력을 통해 운영비용을 절감하고, 경쟁력 강화를 통해 지속 가능한 미래를 위한 새로운 방향을 모색해야 한다.

또한, 해운 선사는 본 연구 결과를 참고하여 탄소배출권 거래제에 대응하기 위한 참고 자료로 사용할 수 있다. 본 연구는 탄소배출권 거래제에 참여하는 해운 선사를 단위당 운영비용과 선박의 배출계수를 기준으로 4개의 그룹으로 구분하였다. 그리고 그 중 단위당 운영비용이 높고 배출계수가 높은 S3 선사가 친환경선대로 전환하기 위한 동기가 가장 큰 것으로

가정하고 4장에서 시나리오 분석을 수행하였다. 연구 결과에 따르면 각 시나리오 따른 탄소배출권 거래제 도입 효과는 4개 선사의 특성에 따라 조금씩 다르게 나타났다. 예를 들어, S3 선사와 유사한 특징을 지닌 임의의 해운 선사는 환경규제에 대응하기 위해 운영비용을 절감하거나, 배출계수를 감소하는 방안을 고려할 수 있다. 이 중 적절한 방안을 선택하기 위해서 S3 선사 대비 운영비용을 절감한 선사(S2)와 배출계수를 감소한 선사(S4)의 모형 결과값을 참고할 수 있다.

제4절 연구 한계점 및 후속 연구

본 연구는 해운 부문 탄소배출권 거래제 도입의 영향을 분석하기 위해 꾸르노 모형을 활용한 이론 모형을 제안했다. 하지만 본 연구에서 제안한 모형은 다음과 같은 한계점을 내포하고 있다. 첫째, 해운 선사의 물리적인 한계 및 운송 수요를 고려하지 않았다. 본 연구에서는 각 선사가 모형 내에서 결정한 최적 수송량 수준까지 화물을 운송할 수 있도록 허용하고 있다. 즉, 각 선사가 수익최대화를 위해 결정한 수송량에 대해서는 모두 운송 수요가 충족되는 것으로 가정했다. 또한, 실제로는 공급량 증가를 위한 신조선 인도에 최소한 1~2년 이상이 소요되지만, 본 연구에서는 즉각 공급이 가능한 것으로 가정하였다. 이러한 단순화는 향후 모형에 각 해운 선사의 운송능력에 대한 제약을 포함시키거나 총 운송 수요를 설정하여 보다 현실적인 분석 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 본 연구에서는 해운 부문 탄소배출권 거래제가 Open-ETS 형태로 도입되었다고 가정했다. 이는 해운 선사가 배출권이 부족한 경우, 다른 산업으로부터 추가 배출권을 구매하여 더 많은 온실가스를 배출할 수 있음을 의미한다. Open-ETS 형태의 배출권거래제는 해당 산업 내뿐만 아니라 다른 산업 간에도 배출량 감축 경쟁을 촉진하기 때문에 보다 발전된 배출권 거래제로 여겨진다(Wang et al., 2015). 항공 부문 탄소배출권 거래제의 사례를 고려할 때, 초기 단계의 M-ETS는 폐쇄형 형태로 시행될 수 있다. 따라서 폐쇄형 ETS의 특성을 반영하여 보다 현실적인 M-ETS 꾸르노 모형을 구축할 필요가 있다.

마지막으로, 본 연구에서는 해운 부문 탄소배출권 거래제를 정적인 형태로 분석하였다. 즉, 탄소배출권 거래제의 시간적 연속성을 고려하지 않았다. 실제로는 탄소배출권 거래제는 이전 시기와 다음 시기가 단절되지 않

고 연속성을 가진다. 예를 들어, 이전 시기에서 절약한 배출권은 다음 시기로 이월하여 사용이 가능하며, 반대로 이전 시기에서 보유한 배출권을 초과하여 배출한 온실가스에 대해서는 다음 시기에 모자란 배출권을 보완하여 제출해야 한다. 본 연구에서는 이처럼 탄소배출권 거래제의 시간적 연속성이 반영된 해운선사의 전략 및 해운 시장의 균형은 고려되지 못하였다.

향후 연구는 위에서 언급한 모형의 한계점을 반영하여 보다 현실적인 해운 부문 탄소배출권 거래제 분석 모형이 제안되기를 기대한다. 또한, 아직까지 구체적인 탄소배출권 거래제의 도입 방식 및 형태가 결정되지 않았기 때문에 향후 구체적인 도입 방식이 결정되면 이를 모형에 반영하여 새로운 시사점을 도출할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 이외에도 해운 부문 탄소배출권 거래제의 정기선/비정기선 간 영향 차이, 선내 CCUS 도입 효과 등도 본 모형을 통해 분석할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

국내 문헌

- 관계부처합동(2020), 2030 한국형 친환경선박(Greenship-K) 추진전략-제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획('21~'30).
- 관계부처합동(2023), 국제해운 탈탄소화 추진전략.
- 김진형(2022), EU 의 신규 국제해운 온실가스 규제-EU ETS 및 FuelEU Maritime 최신 동향 및 파급영향, 대한조선학회지, 59(6), pp. 16-19.
- 김한나 외(2022), IMO 시장기반조치 도입이 국내 해운기업에 미치는 영향, 한국해양수산개발원.
- 문새다슬·이덕주·김태구(2017), 탄소배출권 거래제도 도입이 기업의 최적 생산요소 결정에 미치는 영향: 게임이론적 분석, 한국경영과학회 학술대회논문집(2017년 춘계공동학술대회), pp. 1289-1305.
- 박경원·권오상(2018), 불완전경쟁 CGE 모형을 이용한 배출권거래제의 경제효과 분석, 환경정책, 26(3), pp. 233-265.
- 이경연(2023.10.5.), 글로벌 탄소배출권 거래 시장 -탄소, 사고 팔 준비가 되었나요?, ESG, 대신증권.
- 이광호·김욱(2014), 배출권 거래를 고려한 쿠르노 모형 기반의 전력시장 모델링 기법에 관한 연구, 한국지능시스템학회 논문지, 24(4), pp. 379-384.
- 이현균(2021), 해운 분야 탄소배출과 관련된 법률문제에 대한 검토, 한국해법학회지, 43(2), pp. 51-95.
- 정경화·심성희(2015), 쿠르노 경쟁하의 배출권 이월 및 차입과 감축기술개발투자, 환경정책연구, 14(4), pp. 63-101.

조아현(2021), 온실가스 배출권 거래제가 해운산업에 미치는 영향, 박사학위논문
인하대학교 물류전문대학원.

최건우 외(2023.4), 2023년 컨테이너 해운시장 이슈와 전망-경영 최적화를 통한 비용
절감, 선제적 투자와 적극적인 산업 지원대책 필요-, KMI 동향분석 제187호.

한국수출입은행 해외경제연구소(2022.7.4), 국내 해운산업의 친환경 경쟁력 확보
방안, 2022 이슈보고서, vol. 2022-이슈-12.

해양수산부·한국해사협력센터(2023.7.17.), IMO, 선박 온실가스 감축 개정전략
채택, IMO 소식&국제해사동향, 제23-28호.

국외 문헌

Aldy, J. E., Krupnick, A. J., Newell, R. G., Parry, I. W., & Pizer, W. A.(2010), Designing
climate mitigation policy. *Journal of Economic Literature*, 48(4), pp. 903-934.

Anger, A., & Köhler, J.(2010), Including aviation emissions in the EU-ETS: Much ado
about nothing? A review. *Transport Policy*, 17(1), pp. 38-46.

Bayer, P., & Aklın, M.(2020). The European Union emissions trading system reduced
CO₂ emissions despite low prices. *Proceedings of the National Academy of
Sciences*, 117(16), 8804-8812.

Bode, S.(2006), Multi-period emissions trading in the electricity sector—winners
and losers. *Energy Policy*, 34(6), pp. 680-691.

Böhringer, C., & Lange, A.(2005), On the design of optimal grandfathering schemes
for emission allowances. *European Economic Review*, 49(8), pp. 2041-2055.

Bushnell, J. B., Mansur, E. T., & Saravia, C.(2008), Vertical arrangements, market
structure, and competition: An analysis of restructured US electricity
markets. *American Economic Review*, 98(1), pp. 237-266.

Chen, Y., Sijm, J., Hobbs, B. F., & Lise, W.(2008), Implications of CO₂ emissions
trading for short-run electricity market outcomes in northwest Europe.
Journal of Regulatory Economics, 34(3), pp. 251-281.

Christodoulou, A., Dalaklis, D., Ölçer, A. I., & Ghaforian Masodzadeh, P.(2021),

- Inclusion of shipping in the EU-ETS: Assessing the direct costs for the maritime sector using the MRV data. *Energies*, 14(13), 3915.
- Chu, J., Shao, C., Emrouznejad, A., Wu, J., & Yuan, Z.(2021). Performance evaluation of organizations considering economic incentives for emission reduction: A carbon emission permit trading approach. *Energy Economics*, 101, 105398.
- Cui, Q., Li, Y., & Wei, Y. M.(2017), Exploring the impacts of EU-ETS on the pollution abatement costs of European airlines: An application of network environmental production function. *Transport Policy*, 60, pp. 131-142.
- Cullinane, K., & Khanna, M.(1999), Economies of scale in large container ships. *Journal of transport economics and policy*, pp. 185-207.
- Cullinane, K., & Khanna, M.(2000), Economies of scale in large containerships: optimal size and geographical implications. *Journal of transport geography*, 8(3), pp. 181-195.
- Defra, U. K.(2008), A study to estimate the impacts of emissions trading on profits in aviation. A report for the UK Department for Environment, Food and Rural Affairs Defra) and the Department for Transport, January. London.
- Demaily, D., & Quirion, P.(2008), European Emission Trading Scheme and competitiveness: A case study on the iron and steel industry. *Energy economics*, 30(4), pp. 2009-2027.
- Departments of Energy, Transportation, Housing and Urban Development, and the Environmental Protection Agency(2023), The U.S. National Blueprint for Transportation Decarbonization.
- Ding, W., Wang, Y., Dai, L., & Hu, H.(2020), Does a carbon tax affect the feasibility of Arctic shipping?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 80, 102257.
- Du, Ma, Fu, Zhu & Zhang(2015), Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a 'cap-and-trade' system, *Annals of Operations Research*, 228, pp. 135-149.
- Efthymiou, M., & Papatheodorou, A.(2019), EU Emissions Trading Scheme in aviation: Policy analysis and suggestions. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117734.

-
- EU(2015), EU-ETS Handbook.
- EU(2021), 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality.
- EU Commission(2013), Integrating maritime transport emissions in the EU's greenhouse gas reduction policies. COM(2013) 479 final.
- Franc, P., & Sutto, L.(2014), Impact analysis on shipping lines and European ports of a cap-and-trade system on CO₂ emissions in maritime transport. *Maritime Policy & Management*, 41(1), 61-78.
- Gu, Y., Wallace, S. W., & Wang, X.(2019), Can an Emission Trading Scheme really reduce CO₂ emissions in the short term? Evidence from a maritime fleet composition and deployment model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 74, 318-338.
- HMM(2021), We Carry the Future -HMM ESG Report 2021-.
- IMO(2021), Fourth IMO GHG Study 2020.
- Kågeson, P.(2008), The maritime emissions trading scheme. Nature Associates, Stockholm, 12.
- Keohane, N. O.(2009), Cap and trade, rehabilitated: Using tradable permits to control US greenhouse gases. *Review of Environmental Economics and policy*, 3(1), 42-62.
- Kim, W., Chattopadhyay, D., & Park, J. B.(2010), Impact of carbon cost on wholesale electricity price: a note on price pass-through issues. *Energy*, 35(8), 3441-3448.
- Koesler, S., Achtnicht, M., & Köhler, J.(2015), Course set for a cap? A case study among ship operators on a maritime ETS. *Transport Policy*, 37, 20-30.
- Maersk(2022), 2022 Sustainability Report.
- Maersk Broker, McKinsey & Company, & Maersk MC-Kinney Møller(2022), Introduction to the Fleet Decarbonization Optimizer.
- Miola, A., Marra, M., & Ciuffo, B.(2011), Designing a climate change policy for the international maritime transport sector: Market-based measures and technological options for global and regional policy actions. *Energy Policy*, 39(9), 5490-5498.

- Mo, J. L., Zhu, L., & Fan, Y.(2012), The impact of the EU-ETS on the corporate value of European electricity corporations. *Energy*, 45(1), 3-11.
- MSC(2021), 2021 Sustainability Report.
- Nava, C. R., Meleo, L., Cassetta, E., & Morelli, G.(2018), The impact of the EU-ETS on the aviation sector: Competitive effects of abatement efforts by airlines. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 113, 20-34.
- Oberndorfer, U.(2009), EU emission allowances and the stock market: evidence from the electricity industry. *Ecological Economics*, 68(4), 1116-1126.
- Pang, S., & Chen, M. C.(2023), The EU emissions trading system and airline low-carb on transition: A game-theoretic approach. *Journal of Air Transport Management*, 110, 102407.
- Sabzevar, N., Enns, S. T., Bergerson, J., & Kettunen, J. (2017). Modeling competitive firms' performance under price-sensitive demand and cap-and-trade emissions constraints. *International Journal of Production Economics*, 184, 193-209.
- Şaşmaz, A(2022), A new fund model for maritime decarbonization in the EU: the Blue Premium Fund(Master dissertation, World Maritime University World Maritime University).
- Sijm, J., Neuhoff, K., & Chen, Y.(2006), CO₂ cost pass-through and windfall profits in the power sector. *Climate policy*, 6(1), 49-72.
- Smale, R., Hartley, M., Hepburn, C., Ward, J., & Grubb, M.(2006), The impact of CO₂ emissions trading on firm profits and market prices. *Climate Policy*, 6(1), 31-48.
- Lagouvardou, S., & Psaraftis, H. N.(2022), Implications of the EU Emissions Trading System (ETS) on European container routes: A carbon leakage case study. *Maritime Transport Research*, 3, 100059.
- Stern, N.(2008), The economics of climate change. *American Economic Review*, 98(2), 1-37.
- Tanaka, M., & Chen, Y.(2012), Market power in emissions trading: Strategically manipulating permit price through fringe firms. *Applied Energy*, 96, 203-211.
- Thepsithar, P., Kiong, M.K.E., Piga, M.B., Zengqi, M.X., Yin, S.J., Ming, L., Li, M.P., Xueni, M.G. and Rosario, M.M.K.P., (2020). Alternative fuels for international

-
- shipping. Maritime Energy & Sustainable Development (MESD) Centre of Excellence, Nanyang Technological University.
- Veith, S., Werner, J. R., & Zimmermann, J.(2009), Capital market response to emission rights returns: Evidence from the European power sector. *Energy economics*, 31(4), 605-613.
- Westskog, H.(1996), Market power in a system of tradeable CO₂ quotas. *The Energy Journal*, 17(3).
- Wang, K., Fu, X., & Luo, M.(2015), Modeling the impacts of alternative emission trading schemes on international shipping. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 35-49.
- Zhang, C., Wang, Q., Shi, D., Li, P., & Cai, W.(2016), Scenario-based potential effects of carbon trading in China: An integrated approach. *Applied Energy*, 182, 177-190.
- Zhu, M., Yuen, K. F., Ge, J. W., & Li, K. X.(2018), Impact of maritime emissions trading system on fleet deployment and mitigation of CO₂ emission. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 474-488.

인터넷 자료

- 산업통상자원부 보도자료(2022.7.6.), 22년 상반기 조선업, 전세계 발주량 중 45.5%를 수주하여 4년 만에 세계 1위 탈환, http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=165759&bbs_cd_n=81¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v=(검색일: 2023.1.3.)
- 통계청, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=134&tblId=DT_134002_001&conn_path=I3(검색일: 2023.1.3.)
- 해양한국(2023.4.7.), '그린 메탄올에 쏠리는 친환경선박, 다른 연료는 아직', <http://www.monthlymaritimekorea.com/news/articleView.html?idxno=37584> (검색일: 2023.4.9.)
- Alphaliner TOP 100(2023.4.9.), <https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100/>(검색일: 2023.4.9.)

- Anderson, Paul(2020.8.6.), As part of our investigation into fossil fuel subsidies, we explain the European Union's Emissions Trading Scheme (ETS), Investigate Europe, <https://www.investigate-europe.eu/en/posts/eu-emissions-trading-scheme-explained>(검색일: 2023.8.14.)
- Bahtić, Fatima(2022.11.18.), U.S. Congress urged to pass bill to zero out shipping pollution, <https://www.offshore-energy.biz/u-s-congress-urged-to-pass-bill-to-zero-out-shipping-pollution/>(검색일: 2023.4.12.)
- Brown, Jennifer et al.(2022.5.12.), Carbon revenues from shipping: A game changer for the energy transition, Worldbank Blogs, <https://blogs.worldbank.org/transport/carbon-revenues-shipping-game-changer-energy-transition>(검색일: 2023.10.24.)
- Clarksons Research(2023.1.16), Green Technology Tracker: January 2023, <https://insights.clarksons.net/green-technology-tracker-january-2023/>(검색일: 2023.4.9.)
- Clarkson Shipping Intelligence(2023.3.1.), Shipping Review and Outlook Tables March 2022(Excel), <https://sin.clarksons.net/>(검색일: 2023.8.1.)
- Clarkson Shipping Intelligence, CCFI Container Freight Rate Index, <https://sin.clarksons.net/>(검색일: 2023.07.27.)
- CMA-CGM(2022.7.1.), CMA-CGM and ENGIE set to co-invest in the Salamander project, to produce second-generation biomethane, <https://cmacgm-group.com/en/news-media/cma-cgm-and-engie-set-co-invest-salamander-project-produce-second-generation-biomethane>(검색일: 2023.4.9.)
- Congress.gov, H.R.8336 - Clean Shipping Act of 2022, <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/8336/text>(검색일: 2023.4.12.)
- DNV, EU ETS - Emissions Trading System, <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eu-emissions-trading-system/index.html>(검색일: 2023.4.19.)
- DNV(2023.1.23.), EU ETS: Preliminary agreement to include shipping in the EU's Emission Trading System from 2024, <https://www.dnv.com/news/eu-ets-preliminary-agreement-to-include-shipping-in-the-eu-s-emission-trading-system-from-2024-238068>(검색일: 2023.4.19.)

European Environmental Agency(EEA), EU Emissions Trading System(ETS) data viewer, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1>(검색일: 2023.7.27.)

European Energy Exchange(EEX), Emission Spot Primary Market Auction Report, <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/eua-primary-auction-spot-download>(검색일: 2023.4.9.)

EPA, Ports Initiative, <https://www.epa.gov/ports-initiative>(검색일: 2023.4.9.)

EU Commission(2022.11.15.), Decarbonising international shipping: European Commission provides additional 10 million euro, https://transport.ec.europa.eu/news/decarbonising-international-shipping-european-commission-provides-additional-10-million-euro-2022-11-15_en(검색일: 2023.4.12.)

EU Commission, FAQ – Maritime transport in EU Emissions Trading System(ETS), https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets_en(검색일: 2023.11.15.)

EU-MRV, Public Emission Report v20(2023.7.20), <https://mrv.emsa.europa.eu/#public/emission-report>(검색일: 2023.7.27.)

European Council&Council of the EU, Infographic - Fit for 55: increasing the uptake of greener fuels in the aviation and maritime sectors, <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/>(검색일: 2023.11.15.)

H2TECH(2023.2.3.), 그린수소를 선박 연료로 활용, 무배출 추진 기술을 개발하는 프로그램, <https://h2-tech.com/news/2023/02-2023/horizon-europe-funds-maritime-onboard-application-for-ship-ah2oy-project/>(검색일: 2023.4.9.)

ICAP, EU Emission Trading System(EU ETS), <https://icapcarbonaction.com/en/ets/eu-emissions-trading-system-eu-ets>(검색일: 2023.10.30.)

IEA, International Shipping, <https://www.iea.org/energy-system/transport/international-shipping>(검색일: 2023.8.14.)

IMO, Improving the energy efficiency of ships, <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx>(검색일: 2023.11.15.)

- KR(2021.10.6.), CII 규제 대응 지침서, <https://www.krs.co.kr/kor/Webzine/View.aspx?WMDR=264&WCDR=4612>(검색일: 2023.8.14.)
- Maersk, <https://www.maersk.com/sustainability/our-esg-priorities/climate-change/decarbonising-ocean-shipping>(검색일: 2022.4.9.)
- Maersk(2021.10.14.), Maersk invests in Vertoro to develop green lignin marine fuels, <https://www.maersk.com/news/articles/2021/10/14/maersk-invests-in-vertoro-to-develop-green-lignin-marine-fuels>(검색일: 2023.4.9.)
- Maersk(2022.3.28.), Maersk explores new ways to accelerate green fuel production, <https://www.maersk.com/news/articles/2022/03/28/maersk-explores-new-ways-to-accelerate-green-fuel-production>(검색일: 2023.4.9.)
- Maersk(2022.11.3.), Maersk and the Spanish Government to explore large-scale green fuels production, <https://www.maersk.com/news/articles/2022/11/03/maersk-and-the-spanish-government-to-explore-large-scale-green-fuels-production>(검색일: 2023.4.9.)
- Mitsui&CO(2022.10.4.), Maersk Oil Trading, METS, Mitsui and ABS Develop Methanol Bunkering Project in Singapore, https://www.mitsui.com/jp/en/topics/2022/1245064_13410.html(검색일: 2023.4.9.)
- Resolution MEPC.350(78), 2022 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency existing ship index(EEXI), [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.350\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.350(78).pdf)(검색일: 2023.8.14)
- Resolution MEPC.364(79), 2022 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index(EEDI) for new ships, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf)(검색일: 2023.8.14)
- The World Bank, Container port traffic, <https://data.worldbank.org/indicator/IS.SHP.GOOD.TU?end=2019&start=2000&view=chart>(검색일: 2023.11.29.)
- U.S. Department of Transportation, <https://www.maritime.dot.gov/innovation/meta/maritime-environmental-and-technical-assistance-meta-program>(검색일: 2023.4.9.)

부 록

1. 선행연구 정리

저자(연도)	연구목적	연구방법	주요연구내용
이현균 (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • 해운 부문에서 탄소배출과 관련하여 발생할 수 있는 여러 법률 문제를 검토 	<ul style="list-style-type: none"> • 문헌조사(규제, 법·제도, 관련 정책 등 검토) 	<ul style="list-style-type: none"> • 해운 부문 탄소배출에 대한 국제적 규제 및 감축 논의 검토 • 국내 대응현황 및 현행 법·제도 개선방안 검토 • 연료 공급, 대체 장비 추가 설치, 운송지원, 보험 계약, 탄소배출권 귀속주체 및 비용분담 등 해상 운송과 관련된 법률문제 도출 및 시사점 제시
이광호·김욱 (2014)	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소배출권 시장에서 수익 극대화를 위한 발전회사의 전략적 입찰행위 분석 방법 제안 	<ul style="list-style-type: none"> • 모의 전력시장 대상 수학적 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> • 꾸르노 모형을 기반으로 하는 탄소배출권 거래 시장을 고려한 전력시장 모델링 • 모형 분석 결과, 탄소배출권 거래 가격에 따라 발전회사들의 입찰전략이 변동 • 또한 탄소배출권 시장에서는 기존 발전회사들이 적정 용량의 신재생에너지 설비에 투자를 하는 것이 유리 • 실적치 기반의 파라미터 사용을 하지 못하였다는 한계 존재
박경원·권오상 (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • 완전경쟁구조 및 과점시장구조 하에서 우리나라의 배출권거래제 경제효과 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 실제 자료를 활용한 수학적 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> • 완전경쟁구조 하에서의 CGE모형과 일부 산업이 꾸르노 모형의 과점시장구조를 갖는 CGE모형 구축 • 분석 결과, 배출권거래제 도입에 따라 불완전경쟁산업에서는 독점화가 심화 • 독점화된 산업에서 생산량이 줄어드는 만큼 온실가스 배출저감효과는 없고, 오히려 배출권 가격은 상승되는 것으로 나타남

저자(연도)	연구목적	연구방법	주요연구내용
Defra (2018)	<ul style="list-style-type: none"> 항공부문 배출권 거래제 도입이 항공사 수익에 미치는 영향 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 실제 자료 및 일부 가정 데이터를 활용한 수학적 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> ETS 도입에 따른 항공사 수익 분석을 위한 꾸르노 모형 기반 모델링 분석 결과, 탄소배출권 거래제 도입 시 항공권 가격이 오르더라도 항공사 이익이 줄어들 수 있음 특히 대형 항공사가 소규모 항공사보다 더 많은 이익이 감소할 것으로 추정
Zhu et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> 해운 부문 배출권 거래제 도입의 효과 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 시나리오 기반 확률적프로그래밍 모델 구축 사례 데이터 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 해운 부문 배출권 거래제 도입은 선박의 탈탄 소화에 기여할 수 있는 것으로 나타남 또한 이산화탄소 감축에는 ETS보다 벅커 가격이 높을수록 더욱 효과적
정경화·심성희 (2015)	<ul style="list-style-type: none"> 과점시장 대상 감축기술개발투자에 대한 유인 수준이 배출권 이월 및 차입의 허용 여부에 따라 증가하는지를 검토함 	<ul style="list-style-type: none"> 수학적 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> 배출권 이월 및 차입으로 인한 감축기술개발 투자 유인 수준은 감축비용, 할인계수, 초기무상 할당, 감축기술개발투자효과 등에 의존
Nava et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> 항공분야 EU-ETS가 항공 부문에 미치는 영향을 검토하기 위한 모형 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 수학적 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> 꾸르노 모형을 기반으로 EU-ETS 및 항공사 비용의 경감 노력을 고려한 항공시장 모델링 무료할당이 많을수록 항공사의 온실가스 배출량 저감에 따른 인센티브가 줄어들 동일한 항공 노선에서 경쟁하는 항공사의 수가 많을수록 꾸르노 과점 또는 시장 담합구조에 따른 이익 증가가 줄어들
조아현 (2021)	<ul style="list-style-type: none"> 해운 부문 탄소 배출권 거래제가 해운선사 및 해운 시장에 미치는 영향 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 게임이론 (꾸르노 모형) 	<ul style="list-style-type: none"> 해운 선사의 특성에 따라 탄소배출권 거래제가 긍정 또는 부정적인 영향을 줄 수 있음 LNG 추진선 등 친환경 선박의 도입이 해운산업의 온실가스 배출량을 상당히 저감할 수 있음을 확인
Du et al. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> 배출량에 의존하는 공급망에서 각 참여자들의 행동과 의사결정을 조사 	<ul style="list-style-type: none"> 수학적 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> 게임 이론 분석 모델을 제안하고 고유한 내쉬 균형을 도출 배출권 공급자와 배출 의존 기업은 각각 배출권 가격과 생산량에 대한 최적의 결정을 내림 플레이어의 협상력은 정부 환경 정책, 시장 위험 등과 같은 여러 외생적 요인의 영향을 받음

저자(연도)	연구목적	연구방법	주요연구내용
문새다슬· 이덕주·김태구 (2017)	<ul style="list-style-type: none"> 탄소배출권 거래제 도입이 발전 회사의 투입요소 조합에 미치는 영향을 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 실제 자료를 활용한 수학적 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> 투입요소의 대체에 영향을 주는 요인은 탄소 배출권 가격, 각 투입요소별 가격, 각 투입요소별 탄소배출계수, 대체 파라미터 다만, 투입 요소간 대체가 원활하지 않은 경우 두 투입요소의 조합에는 큰 변화 없으며, 대체가 원활한 경우 친환경 투입요소 사용이 증가 탄소배출권 거래제도를 도입하려는 국가의 경우, 자국 기업들이 친환경 투입요소로의 대체가 용이한 경우에 도입하는 것이 좋을 것으로 추정
Sabzevar, Enns, Bergerson & Kettunen (2017)	<ul style="list-style-type: none"> 배출권 거래제 체제 하에서 개인 이익을 극대화하려는 두 참가자의 행동을 연구 	<ul style="list-style-type: none"> 수학적 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> 꾸르노 복점모형을 활용, 단일 시장에서 2개의 기업이 경쟁하는 모형을 구축하고 배출권 거래제 정책이 참여자의 수익성에 미치는 영향을 검토 이 때 참가자들은 개인 이익을 극대화하고자 함 전반적으로 배출총량제한 정책은 잠재적으로 더 높은 총 이익을 얻을 수 있으며, 배출 집약도가 낮은 회사는 운영비용이 경쟁업체보다 높으면 배출권을 구매하지 않는 것으로 나타남 두 개의 경쟁 회사만을 다루었다는 점에서 한계
Pang & Chen (2023)	<ul style="list-style-type: none"> 항공사가 강화된 ETS 규정에 직면했을 때 전략을 선택하는 방법을 연구 	<ul style="list-style-type: none"> 시나리오기반 수학적 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> ①EU-ETS 시행 전 시나리오, ②기존 항공사가 초과배출량에 대해 아무것도 지불하지 않는 시나리오, ③기존 항공사가 타 산업분야에서 배출 허용량을 구매하는 시나리오, ④기존 항공사가 친환경적 항공사로부터 배출허용량을 구매하는 시나리오의 4가지 시나리오를 기반으로 강력한 ETS 규제가 항공사의 시장점유율 및 수익성에 미치는 영향을 검토 EU 항공 시장에는 명백한 Stackelberg 리더 항공사가 없으므로 꾸르노 경쟁시장을 가정 일반적으로 ETS는 항공사 수익을 낮추며 더 노후한 항공기를 운영하는 항공사의 수익이 더 많이 감소 배출권 금액이 적은 등 특정 경우에는 패널티 정책이 저탄소 전환으로 이어지지 않을 수 있음

저자(연도)	연구목적	연구방법	주요연구내용
김진형 (2022)	<ul style="list-style-type: none"> EU-ETS 및 FuelEU Maritime 최신 동향 및 파급영향 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 동향조사 사례분석 	<ul style="list-style-type: none"> 2021년 EU-MRV 보고 데이터를 기초로 EU-ETS 적용에 따른 해운 부문 추가 비용을 분석한 결과, EU 역외 50% 및 역내 100% 기준 연간 61.8억 유로 및 EU 역내외 모두 100% 기준으로는 연간 93.4억 유로의 추가비용이 발생되는 것으로 추정
Lagouvardou & Psaraftis (2022)	<ul style="list-style-type: none"> EU-ETS 시행에 따른 EEA 내 항만의 회피 위험도 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 사례연구 비용-편익분석 	<ul style="list-style-type: none"> EU-ETS에의 해운 부문 편입은 탄소누출, ETS 수익 손실, EEA 항만의 불이익 등의 부작용을 수반할 수 있는 것으로 분석됨

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 2023

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

| 2022년

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

수시연구보고서 발간목록

Ⅰ 2023년

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

Ⅰ 2022년

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

일반연구보고서 발간목록

Ⅰ 2023년

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

Ⅰ 2022년

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

기본연구 2023-10

탄소배출권 거래제가 해운선사에 미치는 영향 분석 연구

인쇄 2024년 1월 29일

발행 2024년 1월 31일

발행인 김 종 덕

발행처 한국해양수산개발원

주소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연락처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 디자인글꼴 (051-636-1210)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 15,000원

탄소배출권 거래제가 해운선사에 미치는 영향 분석 연구

A Study on the Impact of the Emission
Trading Scheme on Shipping Companies

 **한국해양수산개발원**
KOREA MARITIME INSTITUTE

49111 부산광역시 영도구 해양로 301번길 26 (동삼동)
TEL. 051-797-4800 FAX. 051-797-4810

값 15,000원
93300

9 791168 661721
ISBN 979-11-6866-172-1