



탄소 락인(Carbon Lock-in), 국제해운 탈탄소는 지연 중

총배출량 기반 국제해운 탈탄소 전략의 중요성

기후솔루션은 전 세계 온실가스 감축 및 올바른 에너지 전환을 위해 활동하는 비영리법인입니다.
리서치, 법률, 대외 협력, 커뮤니케이션 등의 폭넓은 방법으로 기후위기를 해결할 실질적 솔루션을 발굴하고,
근본적인 변화를 위한 움직임을 만들어 나갑니다.

| | |
|-----|---|
| 발간월 | 2025년 4월 |
| 저자 | 기후솔루션 해운팀 한유민 연구원 플랜잇 박진수, 지혜련, 홍상현 연구원 |
| 디자인 | 조안나 디자이너, 디자인 밸런스 |
| 문의 | 기후솔루션 해운팀 한유민 연구원 (yumin.han@fourclimate.org) |

* 참고

본 보고서는 해운에서의 온실가스 감축과 에너지 전환을 위해 작성된 자료로서 정보 및 비상업적 목적으로만 활용될 수 있습니다. 기후솔루션은 독립적이고, 중립적인 비영리법인으로서 특정 기업체, 국가, 공공기관, 정당 및 이익단체, 개인 등을 대변하지 않으며, 투자 자문 또는 법률 자문 서비스를 제공하는 기관이 아닙니다. 따라서 본 보고서는 특정 기업체나 산업 분야를 홍보하거나, 이에 투자를 유도하는 것이 아님을 밝히며, 본 보고서의 그 어떠한 내용도 투자 유도, 기업 홍보, 경제적 활동 등 사적 이익 추구에 활용될 수 없습니다. 본 보고서의 모든 내용은 발간 시점 기준으로 작성되었고, 신뢰할만한 정보를 바탕으로 하여 검증 과정을 거쳤으나 정보의 정확성, 완결성, 적시성에 대해 보장하지 않습니다. 기후솔루션은 이 보고서를 사용함으로써 발생하는 직·간접적 피해에 대한 법적 책임을 지지 않습니다.

탄소 락인(Carbon Lock-in), 국제해운 탈탄소는 지연 중

총배출량 기반 국제해운 탈탄소 전략의 중요성



요약

기후위기 대응을 위한 국제해운 부문의 탈탄소화는 단편적인 연료 유형별 전환이나 화석연료 퇴출 시점의 설정만으로는 충분하지 않다. 탈탄소화 과정의 핵심은 온실가스 총배출량을 기준으로 한 종합적인 정책 설계이며, 이를 통해 구조적인 전환이 유도되어야 한다. 본 연구는 다양한 정책 시나리오를 바탕으로, 배출량 총량 규제에 기반한 연료 전환 경로와 그 효과를 정량적으로 분석하였으며, 이를 통해 국제해운이 실질적인 감축과 구조적 전환을 일관되게 이행할 수 있는 정책 설계 방향과 근거를 제공하고자 한다.

온실가스 감축 전략의 핵심은 선박 연료 연소에 따른 직접 배출에 국한하지 않고, 연료의 전주기를 고려해야 한다.

LNG가 경제성을 기반으로 빠르게 확산하는 경우는 IMO 감축 규제를 미준수하는 시나리오였으며, 이는 화석연료 간 전환을 야기해 해운 산업에서 탄소 락인(Carbon Lock-in) 현상을 구조적으로 고착할 위험이 있다. 반면, 배출 규제가 적용되는 경우 LNG의 역할은 억제되고, e-연료 및 블루 수소 등으로 조기 전환이 이루어졌다. 이는 LNG 확산 여부가 전적으로 정책 설계에 달려 있으며, 장기적 대안으로서의 위치는 재검토되어야 함을 시사한다.

바이오 연료는 e-연료 도입 이전 과도기적 수단으로 해운산업에서 제한적 활용이 가능하나, 원료의 지속가능성, 전주기 배출 불확실성, 다른 산업과의 수요 경쟁 등을 고려할 때 정책적 기준 및 통제 없이 장기 대안으로 채택하는 것은 감축 목표 달성에 역행할 수 있다. 공급망 실사와 환경성 검토 없는 무분별한 수요는 오히려 온실가스 배출량 증가로 이어질 수 있으며, 해운산업에서 과도기 연료로서 바이오 연료는 '기한이 명시된 임시 전략'으로 한정하여 활용할 필요가 있다.

본 연구는 IMO가 추진 중인 연료표준제도(GFS) 등 변동하는 국제 규제에 대응하면서, 국내 해운 및 조선산업이 탄소중립 전환을 위한 전략적 경로를 수립할 수 있도록 정량적 분석과 정책 시사점을 제공한다. 국제해운 부문의 탄소중립 이행이 개별 산업을 넘어 파리협약 1.5도 달성이라는 전 세계의 목표에 이바지할 수 있음을 간과하여서는 안 된다. 본 연구는 다양한 정책 조합 시나리오를 통해 연료 전환 경로와 온실가스 감축 효과를 정량적으로 분석한 결과, 배출량 총량 규제가 병행될 때 e-연료 중심의 실질적 전환이 가능하다는 점을 확인했다.

목차

| | |
|----|---|
| 요약 | 5 |
|----|---|

| | |
|----|---|
| 목차 | 6 |
|----|---|

| | |
|-------|---|
| I. 서론 | 7 |
|-------|---|

| | |
|----------------|----|
| II. 방법론 및 시나리오 | 9 |
| 1. 방법론 | 9 |
| 2. 데이터 | 10 |
| 3. 한계 | 10 |
| 4. 가정 | 11 |
| 5. 시나리오 | 13 |

| | |
|---------|----|
| III. 결과 | 15 |
|---------|----|

| | |
|------------------------------|----|
| IV. 결론 및 시사점 | 18 |
| 1. LNG는 규제 없을 경우 '탄소 락인'을 초래 | 18 |
| 2. 지속가능한 바이오연료 기준 수립의 필요성 | 18 |
| 3. 배출량 기반 정책 접근의 의의 | 19 |

| | |
|----|----|
| 부록 | 20 |
|----|----|

I. 서론

국제해운 부문은 전 세계 온실가스 배출량의 약 2.9%를 차지하며, 지속적인 무역량 증가에 따라 배출량 또한 증가할 가능성이 높다¹. 2021년 세계무역기구(WTO)²는 전 세계 무역량이 2020년 팬데믹 이후 급격히 회복되었으며, 그 증가세가 지속되고 있다고 발표했다. 이러한 추세는 해운업에 대한 수요 증가뿐만 아니라 온실가스 배출량 또한 더욱 늘어날 가능성이 크다는 점을 시사한다. 이에 따라 국제사회는 해운 부문의 탈탄소화를 위한 적극적이고 긴급한 정책적 대응을 요구받고 있다.

국제해사기구(IMO)는 2023년 개정된 온실가스 감축 전략을 통해 2050년까지 넷제로(Net Zero) 달성을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 2030년까지 20~30%, 2040년까지 70~80%의 단계적 감축 목표를 제시하였다³. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 해운산업의 연료 전환, 비용 구조 변화 그리고 탄소 배출 규제 강화가 불가피하며, 이는 산업 전반에 걸친 기술적·정책적 대전환을 요구한다.

해운 부문의 탈탄소화는 기술적, 경제적, 정책적 측면에서 해결해야 할 과제를 동반하고 있다. 우선, 기존 화석연료(HFO, LSFO, LNG, LPG)에서 무탄소·저탄소 비화석연료로의 전환이 필수적이다. 그러나, 대체연료의 높은 비용과 이를 지원할 인프라 부족은 주요한 걸림돌로 작용하고 있다⁴. 예를 들어, 수소와 암모니아는 생산과 저장, 운송을 위한 대규모 인프라 구축이 필요하며, 이 과정에서 발생하는 비용은 설치 항만 및 해운사들에 상당한 부담이 될 수 있다. 또한, 탈탄소화 과정에서 발생하는 비용 부담의 배분 문제는 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있는 선사, 연료 공급자, 조선업체, 항만 등 이해관계자 간의 재정적 부담을 어떻게 조정할 것인지에 대한 명확한 방향성이 아직 제시되지 않았기 때문이다⁵.

한편, IMO의 감축 목표와 개별 국가의 정책 간 정합성을 확보하는 것도 중요한 과제다. 특히 유럽연합은 EU 배출권 거래제(ETS; Emission Trading System) 및 FuelEU Maritime를 통해 보다 강력한 탄소비용 부과를 추진 중이며, 미국과 중국도 각각 자국 중심의 규제 강화를 검토하고 있다⁶. 이러한 국제 규제는 해운산업의 탈탄소화를 가속하는 한편, 정책 간 충돌 및 산업 혼란 가능성도 내포하고 있다. 이에 따라 각국의 대응 전략과의 정합성을 확보하는 방향으로 한국 해운산업의 정책 방향을 설정할 필요가 있다.

한국은 전 세계 조선시장 점유율 1~2위를 차지하는 국가로, 대체연료 추진선박 기술 개발 및 상용화에 있어 핵심적인 역할을 수행하는 위치에 있다⁷. 특히, 한국 정부는 '2030 친환경선박 전환 지원 로드맵'을 발표하며 조선·해운업의 탈탄소화를 정책적 지원을 강화하고 있다. 그러나 연료 전환 경로와 그에 따른 경제적 영향에 대한 정량적 분석 기반의 정책 연구는 제한적이다⁸.

1 IMO 2020 "Fourth IMO Greenhouse Gas Study"

2 World Trade Organization(WTO) 2021 "World Trade Statistical Review 2021"

3 IMO 2023 "2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships"

4 IEA 2022 "The Role of Hydrogen and Ammonia in the Future Energy System"

5 OECD 2021 "Decarbonising Maritime Transport: Pathways to Zero-carbon Shipping by 2050"

6 European Commission 2023 "FuelEU Maritime Initiative"

7 Clarkson Research 2023 "Shipping Market Outlook"

8 한국해양수산개발원(KMI) 2022 "친환경선박 전환 정책과 기술 동향"

본 연구는 국제해운 부문의 탈탄소화 경로를 비용-최적화 분석을 통해 도출하고, 이를 바탕으로 한국 해운산업 및 정책적 대응 방향을 제시하는 것을 주요 목표로 한다. 이를 위해 선형계획법(Linear Programming) 기반의 최적화 모델을 활용하여, IMO 감축 목표를 준수하는 동시에 최소 비용으로 연료 전환을 달성할 수 있는 최적의 경로를 도출한다. 또한, 다양한 정책 및 기술적 가정을 반영한 여섯 가지 시나리오를 구성하여, 정책 선택에 따른 배출량 감축 효과 및 비용 변화에 미치는 영향을 비교 분석한다.

본 연구는 비용-최적화 접근법을 활용하여 연료 전환 경로를 분석하고, 한국 해운산업의 특성을 반영한 정책적 시사점을 도출하는 데 중점을 둔다. 기존 연구들이 글로벌 관점에서 접근했지만, 본 연구는 국내 해운산업에서 더욱 직접적인 적용이 가능하도록 설계되었다. 또한, IMO 목표 준수 여부와 화석연료 퇴출 정책을 반영한 시나리오 기반 분석을 통해 각 정책의 실효성을 평가하고자 한다.

II. 방법론 및 시나리오

1. 방법론

본 연구에서는 국제해운 부문의 탈탄소화 경로를 분석하기 위해 선형계획법(Linear Programming, LP) 기반의 최적화 모형을 활용하였다. 이는 해운 부문의 연료 전환이 제한된 탄소 예산과 연료 비용이라는 두 가지 주요 제약 속에서 이루어지는 만큼, 자원을 효율적으로 배분할 수 있는 최적화 방법이 필요하기 때문이다. 선형계획법은 이러한 자원 배분 문제를 수리적으로 해결하는 데 적합한 도구이며, 연료 선택과 배출 감축 목표 간의 최적 균형을 도출하는 데 효과적이다.

우선, 해운 부문의 탈탄소화는 기본적으로 탄소 배출을 줄이면서도 비용을 최소화하는 문제로 정의할 수 있다. 예를 들어, 그린 암모니아나 그린 수소와 같은 무탄소 연료는 초기 도입 비용이 높지만, 탄소 예산이 줄어들면서 필연적으로 전환이 필요해진다. 선형계획법을 활용하면 이러한 연료 전환의 시점과 속도를 정량적으로 분석할 수 있으며, 가장 경제적인 전환 경로를 찾는 것이 가능하다.

또한, 해운 부문의 연료 선택은 연료 단위 비용, 에너지 밀도, 탄소 배출 계수와 같은 선형적인 요인에 의해 결정된다. 따라서, 선형계획법을 적용하면 문제를 보다 단순화하면서도 높은 계산 효율성을 유지할 수 있다. 규모의 경제나 기술 발전과 같은 비선형적 요소는 직접적으로 모델에 포함하기보다는, 시나리오 분석을 통해 외생 변수로 반영하여 현실성을 확보하였다.

아울러, 다른 최적화 방법과 비교했을 때도 선형계획법이 가장 적절한 접근법임을 확인하였다. 일반균형모형(CGЕ)은 산업 간 상호작용을 분석하는 데 유용하지만, 해운 부문 내 연료 전환의 기술적 대체 관계를 세밀하게 반영하는 데에는 한계가 있다. 시스템 다이내믹스(SD)는 장기적인 변화를 분석하는 데 강점이 있지만, 최적의 연료 조합을 찾기보다는 시스템의 거시적 흐름을 파악하는 데 초점이 맞춰져 있다. 비선형 최적화(NLP)의 경우보다 정교한 분석이 가능하지만, 연료 선택의 주요 요인들이 선형적 특성을 가지는 점을 고려하면 불필요한 계산 부담이 커질 가능성이 높다.

또한, IMO의 감축 목표를 충족하면서 최적의 연료 조합을 도출하는 것을 핵심 과제로 삼고, 이를 위해 연료비(OPEX)를 중심으로 탄소중립의 경제성을 분석하였다. 해운 부문에서 연료비는 전체 운영비용 중 큰 비중을 차지하는 만큼, 선박 건조비용(CAPEX)보다 탈탄소화 비용 결정에 있어 더욱 중요한 영향을 미친다. 특히 2025년 4월에 예정된 제83차 해양환경보호위원회(MEPC83)에서 채택될 연료표준제도(GFS; GHG Fuel Standard)는 2027년부터 단계적으로 시행되며, 연료 전주기의 온실가스 집약도(GFI; GHG Fuel Intensity)에 기준을 부과함으로써 저탄소·무탄소 연료로의 전환이 사실상 의무화될 것이다.

이러한 규제강화는 단순한 기술적 선택의 문제가 아니라, 연료비 구조 전반에 중대한 변화를 초래한다. IMO의 GFS 시행에 따라, 기존의 화석연료(HSFO, LSFO, LNG 등)는 상대적으로 높은 전주기 온실가스 배출 계수로 인해 추가적인 비용이 부과될 가능성이 높아지고, 반대로 재생에너지 기반의 e-연료나 비생물학적 재생연료(RFNBO; Renewable Fuel from Non Biological Origin) 기반의 바이오 연료 등은 정책적 인센티브와 함께 경쟁력을 확보하게 된다.

반면, 선박 건조비용은 장기적인 투자 주기에 따라 결정되며 단기간에 조정하기 어려운 경직된 요소이다. 이러한 특성으로 인해, 탈탄소화를 위한 경제적 접근은 연료비 변화가 선박 건조비용보다 더 큰 영향을 미칠 수밖에 없으며, 선박 건조 및 해운산업의 비용 구조에 결정적인 영향력을 갖고 있는 것만큼 본 과제에서는 비용 측정에 있어 연료비를 주요 요소로 적용하였다.

연료비는 탄소세, 보조금, 의무 혼합제도 등과 같은 정책적 개입에 직접적으로 반응하는 변수이다. 따라서, 정책 효과를 평가하기 위해서는 연료비 중심의 분석이 필수적이다. 또한, 해운업계는 연간 연료비를 기준으로 운영 전략을 수립하는 반면, 선박 건조 및 개조에 대한 결정은 장기적 투자 계획에 따라 이루어지므로, 본 연구에서는 단기·중기적으로 정책 및 경제적 요인에 따라 변화할 수 있는 최적의 연료 믹스를 도출하기 위해 연료비 중심의 최적화 접근법을 적용하였다.

2. 데이터

본 연구에서 사용된 기초 데이터는 IMO의 글로벌 통합 선박정보시스템(GISIS) 데이터베이스에서 제공한 2019~2021년 기간 동안의 연료 소비 데이터이다. 이 데이터는 MARPOL 부속서 VI 제22A규칙에 따라 5,000 GT 이상 선박의 연료 소비를 포함하며, 이는 보고된 총톤수의 약 93%를 차지한다. 구체적으로, 2021년 기준으로 전 세계 5,000 GT 이상 선박 15,387척의 연료 소비 데이터를 분석하였고, 해당 선박들은 연간 약 2억 1천만 톤의 연료를 소비하는 것으로 조사되었다. 화석연료와 대체연료 비용에 대한 전망은 Longva 등(2024)의 연구 시나리오를 기반으로 하였다. 각 연료의 배출계수는 IMO의 4차 온실가스 연구(2020)를 바탕으로 적용하였다.

3. 한계

본 연구는 비용-최적화 모형을 통해 국제해운 부문의 연료 전환 경로를 분석하였으나, 몇 가지 주요 한계가 존재한다.

첫째, 온실가스 배출량 계산 시 이산화탄소(CO₂)만이 반영되었으며, 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등 IMO 온실가스 배출 전략에서 점차 중요한 배출 항목으로 간주하고 있는 비이산화탄소 온실가스는 포함되지 않았다. 특히 LNG 및 바이오 연료와 같은 일부 연료는 연소 및 공급망 단계에서 메탄 누출(Methane slip)이 발생할 수 있으며, 이는 전체 온실가스 배출에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 연료 전환의 탄소감축 효과를 정확히 분석하기 위해서는 비이산화탄소 온실가스 배출도 고려하여 연료 전주기 평가가 필요하다.

둘째, 본 연구는 연료 전환을 중심으로 분석하여, 혼합 연료 사용 등과 같은 선박 기술의 특징은 포함되지 않았다. 그러나 실제 산업에서는 바이오 연료와 화석 기반 연료가 혼합되어 사용되는 경우가 증가하고 있으며, 이는 단기적인 온실가스 감축 효과를 가져올 수 있으나, 장기적으로 화석연료의 사용을 구조적으로 연장하는 문제를 야기할 수 있다.

셋째, 본 연구는 연료비(OPEX)를 중심으로 경제성을 평가하였으며, 연료 전환에 수반되는 항만 인프라 및 저장·공급 설비의 구축비용(CAPEX)은 고려되지 않았다. 무탄소 연료 도입을 위한 저장탱크, 냉각 설비, 안전시설 등의 초기 투자 비용은 항만 및 해운사에 상당한 경제적 부담으로 작용할 수 있다. 정책 실현 단계에서는 관련 설비 도입 비용에 대한 분석이 필수적이다.

이와 같은 한계점들은 향후 연구 및 분석의 정교화를 위해 보완되어야 하며, 특히 IMO의 연료표준제도(GFS) 및 각국의 연료 혼합 의무제, 항만 인프라 정책과 연계한 통합적 분석이 요구된다.

4. 가정

본 연구는 국제해운 부문의 탈탄소화 경로를 분석하기 위해 다양한 정책 및 기술적 가정을 반영한 여섯 가지 시나리오를 구성하였다. 각 시나리오는 온실가스 배출량 제한과 화석연료 퇴출 정책의 조합을 기반으로 설계되었으며, 분석의 일관성과 현실성을 확보하기 위해 다음과 같은 주요 가정을 적용하였다.

첫째, 바이오 연료(bio-MGO, bio-liquefied methane, bio-methanol)는 생산량의 제약과 환경 관련 문제⁹를 고려하여 적절한 제약을 적용하였다. 바이오 연료는 기존 화석연료 대비 탄소 배출량이 낮고, 혼합하여 활용 시 기존 선박 연료 인프라를 활용할 수 있다는 장점이 있으나, 대규모 도입에는 구조적·환경적 한계가 존재한다. 바이오 연료의 생산량은 현재 글로벌 수요 대비 매우 제한적이며, 해운과 항공 등 다수의 탈탄소 수요 부문이 동시에 존재하기 때문에 수요 초과 경쟁이 불가피하다. 특히 항공 부문에서는 바이오 연료가 SAF(Sustainable Aviation Fuel)로 분류되어 국제적 감축 목표 이행을 위한 전략적 자원으로 우선시되고 있다. 이에 따라 해운 부문에서 합리적인 가격으로 안정적인 바이오 연료 공급을 확보하기 어려울 가능성이 높다.

또한 바이오 연료의 원료인 바이오매스가 농업·임업 자원을 활용할 경우 식량 생산과 토지 이용에 미치는 부정적 영향이 우려되며, 이는 생태계 보전 및 지속가능성 측면에서 문제를 일으킬 수 있다. 특히 연료 전주기 관점에서 보았을 때, 바이오 연료는 원료의 유형과 생산 방식에 따라 온실가스 배출 계수가 크게 달라질 수 있는 특성이 있다¹⁰. 이는 탄소 감축 효과에 대한 신뢰성과 정책 설계의 일관성을 저해할 위험 요소이다. 따라서 본 연구에서는 바이오 연료의 역할을 과도기 기술로 제한하기 위해서, 일부 시나리오에서 바이오 연료의 사용을 2049년까지만 허용하였다.

9 한국선급(KR) 2024 "선박 연료로서 바이오연료의 현황과 전망"

10 기후솔루션(SFOC) 2024 "해운 중간 대체 연료의 환경 리스크와 한중일 연료 활용 계획"

둘째, 연료 전환 속도는 연간 최대 10%로 제한하였다. 이는 2025년 기준 총 연료 사용량을 기준으로 하며, 연료 전환이 기술적·인프라적 제약을 고려할 때 단기간에 급격하게 진행되기 어렵다는 점을 반영한 것이다. 새로운 연료를 도입하기 위해서는 선박 개조 및 신규 건조, 연료 공급망 구축, 항만 인프라 정비가 필요하며, 이러한 변화를 단기간에 추진하기에는 현실적 어려움이 존재한다. 현재 글로벌 조선업계의 연간 선박 건조 능력은 전체 선박 총 적재량(DWT)의 약 7.5% 수준으로 추정¹¹되며, 기존 선박 개조를 포함하더라도 전환 속도가 급격히 증가하기는 어려운 상황이다. 이를 고려할 때 연간 10%의 전환 속도는 해운업계가 더욱 유연한 방식으로 연료 전환을 추진할 수 있도록 하면서도, 탄소 감축 목표를 달성하기 위한 기술 혁신과 인프라 구축 속도를 반영한 현실적인 한계를 적용한 수치로서 과도한 목표 설정이 현실적으로 불가능할 수 있다는 점을 명확히 가정하였다.

셋째, 운송 수요는 모든 시나리오에서 동일하게 유지하였다. 이는 탈탄소화 정책의 효과를 더 명확하게 분석하기 위한 가정으로, 연료 믹스 변화가 해운산업의 총에너지 수요 변동과 혼재되지 않도록 하기 위함이다. 해운 부문의 총운송량 및 에너지 수요는 글로벌 경제 성장, 무역 흐름 변화, 국제 규제 등에 따라 변동 가능성이 존재하지만, 이러한 외부 요인의 영향을 포함할 경우 연료 전환 정책의 효과를 정량적으로 분석하기 어려워진다. 또한, 외부 요인들에 의한 변화는 해운 부문의 에너지 수요 및 운송량에 영향을 미칠 수 있지만, 본 연구는 특정 정책에 따른 조건 별 시나리오에 의해 연료 믹스 변화가 탄소 배출에 미치는 영향을 직접적으로 분석하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 각 시나리오에서 동일한 운송 수요를 유지하여, 연료 선택 변화와 정책적 조치가 해운산업의 탄소 배출에 미치는 영향을 직접적으로 비교할 수 있도록 하였다.

넷째, 연료의 가격과 배출계수는 외생 변수로 주어지며, 시계열적으로 변화한다고 가정하였다. 연료 가격은 기술 발전, 공급망 확장, 정책적 개입(탄소세, 보조금 등) 등의 요인에 의해 변동할 수 있으며, 이를 반영하기 위해 국제 에너지 시장 전망 및 주요 연구 기관의 데이터를 활용하여 장기적인 가격 변화를 설정하였다. 특히, 무탄소 연료의 경우 초기에는 높은 비용을 보이지만, 기술 발전과 생산 규모 확대에 따라 가격이 점진적으로 하락하는 경로를 반영하였다. 배출계수는 IMO의 운실가스 배출 연구 데이터를 기반으로 연료별 이산화탄소(CO₂) 배출량을 적용하였으며, 연료 믹스 변화가 배출 감축에 미치는 영향을 정확히 평가할 수 있도록 하였다.

이러한 가정들을 바탕으로, 본 연구는 국제해운 부문의 탈탄소화 전략에 대한 비용 최적화 분석을 수행하며, 다양한 정책적 시나리오에 대한 분석을 통해 실현할 수 있는 탈탄소화 경로 및 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

11 Clarksons Research Data 2010년~2024년 신규 건조량 범위 DWT 기준 (최종 접속일 2025년 3월 24일)

5. 시나리오

본 연구는 국제해운 부문의 탈탄소화를 위한 연료 전환 경로를 분석하기 위해 6개의 시나리오로 구성하였다. 각 시나리오는 온실가스 배출 감축 목표와 화석연료 퇴출 시점에 따라 구분되며, 정책 조합이 해운산업의 연료 믹스 변화 및 비용 구조에 미치는 영향을 비교, 분석하는 데 목적이 있다. 본 연구는 이러한 시나리오 비교를 통해, 온실가스 감축 목표 기반 접근법과 연료 퇴출 정책이 각각 해운산업의 탈탄소화 경로에 미치는 영향, 두 정책이 동시에 적용될 경우의 상호작용, 가장 비용 효율적인 연료 전환 경로를 유도할 수 있는 정책 조합을 평가한다.

[그림 1] 국제해운 탈탄소 정책 시나리오 유형화



1) 기준 시나리오(Baseline)

현시점의 시장 및 기술 추세가 지속된다고 가정하는 시나리오이다. 추가적인 규제 개입 없이 기존의 연료 사용 패턴이 유지되며, 화석연료 및 대체연료에 대하여 사용 제한이 없는 상황을 가정한다. 다만, IMO가 시행 중인 EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index), CII(Carbon Intensity Indicator)와 같은 연료 효율성 관련 규제는 모든 시점에서 적용된다고 가정한다. 본 시나리오는 시장 주도형 탈탄소화 가능성을 평가하는 기준점 역할을 하며, 정책 미개입 시의 해운산업의 탈탄소화 진행 및 연료 믹스 변화를 분석하는 데 활용된다.

2) IMO 목표 시나리오(Target)

IMO의 온실가스 감축 목표를 준수하는 정책 환경을 가정하는 시나리오이다. 2005년 배출량을 기준으로 2030년까지 30%, 2040년까지 70%, 2050년까지 100% 감축(넷제로)하는 단계적 목표를 설정한다. 모든 연료 사용이 가능하지만, 온실가스 배출 총량이 IMO 감축 목표를 초과하지 않도록 연료 믹스를 조정하는 방식으로 연료 전환을 예측한다. 본 시나리오는 온실가스 감축 목표에만 초점을 맞추었을 경우, 해운 사업 내 연료 전환이 어떻게 진행되는지 분석하는 데 활용된다.

3) 화석연료 퇴출 2040(Phase Out 2040)

IMO의 온실가스 감축 목표 미준수하면서, 2040년부터 주요 화석연료(HFO+scrubber, LNG, LSFO+MGO, LPG)의 사용을 전면 중단하는 정책을 적용하는 규제 시나리오이다. 연료의 온실가스 배출량과 무관하게 화석연료의 사용을 강제적으로 종료하고, 바이오 연료의 사용을 2049년까지만 가능하도록 제한한다. 바이오 연료는 재생 가능 에너지를 사용하여 합성된 연료인 e-연료 전환을 위한 과도기 기술로 활용되는 것을 가정하였다. 이는 단계적인 연료 퇴출 정책이 산업의 탈탄소화 경로에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이다.

4) 화석연료 퇴출 2050(Phase Out 2050)

상기 시나리오와 동일한 방식이지만, 화석연료 퇴출 시점을 2050년으로 유예한 상대적으로 완화된 규제의 시나리오이다. 본 시나리오는 2040년부터의 화석연료 퇴출을 연기함으로써 해운산업의 연료 전환 부담을 상대적으로 완화하는 대신, 탈탄소화 속도의 상대적 차이를 확인한다. 이 시나리오는 화석연료 퇴출 시점이 2040년과 2050년일 때의 영향을 비교하여, 연료 전환 비용·효과 차이를 분석하는 데 활용된다.

5) 강화 시나리오 2040(Strict 2040)

IMO 감축 목표와 화석연료 퇴출 2040 정책을 동시에 적용하는 시나리오이다. 본 시나리오는, 온실가스 배출 감축 목표를 엄격히 준수하면서 2040년부터 모든 화석연료 퇴출을 강제하며 2050년 이후 모든 바이오 연료의 퇴출을 가정한다. 이 시나리오는 가장 강력한 규제 조합을 가정하며, 단기간 내 온실가스 배출량 감축과 연료 전환을 동시에 추진하는 경우 해운산업에 미치는 영향을 분석하는 데 활용된다.

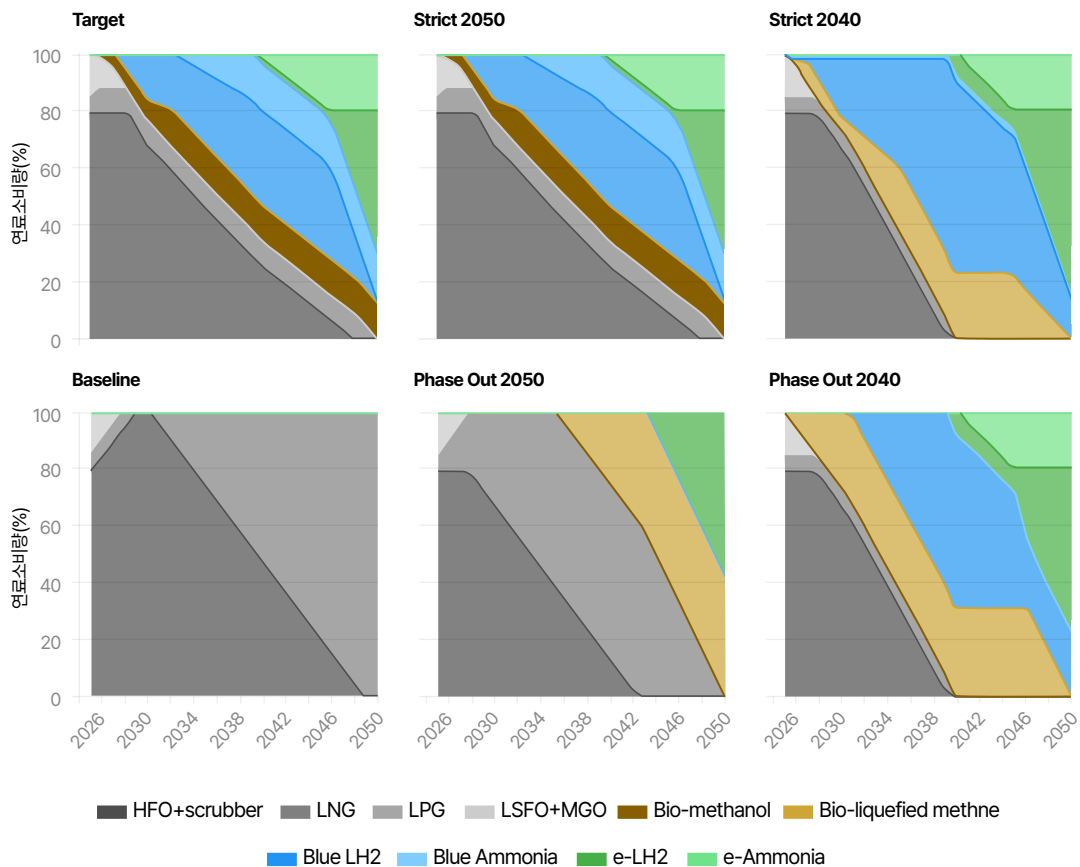
6) 강화 시나리오 2050(Strict 2050)

*Strict 2040*과 동일한 배출 감축 목표를 유지하되, 화석연료 퇴출 시점을 2050년으로 연기한 시나리오이다. 규제 강도는 유지하면서도 화석연료 퇴출 시점을 2050년으로 연기하여 완화된 정책 조합을 가정한다. 이 시나리오는 IMO 배출량 감축 목표를 준수하며 점진적인 화석연료 퇴출을 진행하여, 연료 전환 속도와 비용이 고려되어 정책의 유연성을 평가 분석하는 데 활용된다.

III. 결과

본 연구는 다양한 정책 조합 시나리오에 따라 해운산업의 연료 전환 경로와 탄소 배출량, 총연료비 변화를 정량적으로 비교하였다. 각 시나리오는 정책 개입의 강도 및 시점에 따라 연료 믹스 구성과 경제적 부담에 상이한 영향을 미쳤다.

[그림 2] 시나리오별 연간 선박 연료 소비 비중의 변화

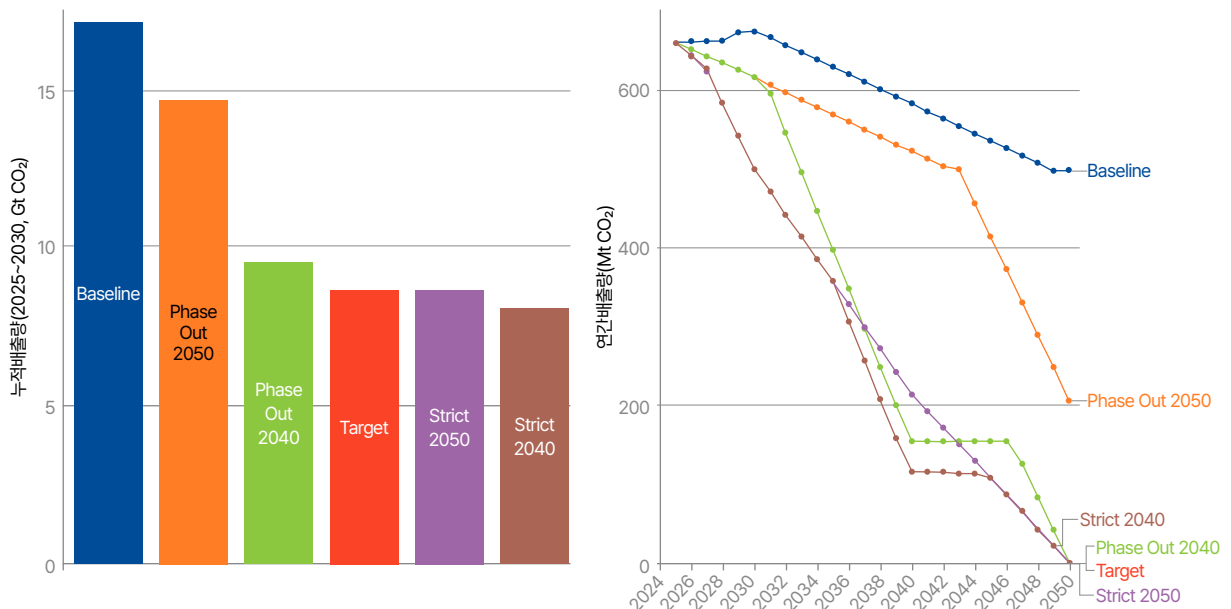


*Baseline*에서는 별도의 정책 제한 없이 연료 비용만을 고려할 경우 LNG의 가격 경쟁력이 HFO 보다 높아짐에 따라 LNG가 빠르게 HFO를 대체하는 것으로 나타났다. *Phase Out 2050*에서는 2028년부터 HFO에서 LNG로의 전환이 시작되고, 2036년 이후부터 바이오 연료가 도입되어 점차 확대된다. 2044년부터는 e-연료가 도입되어, 2050년까지 전체 연료의 최대 58.6%를 차지하는 주요 연료로 성장한다. *Phase Out 2040*의 경우, 블루 수소가 탄소연료(화석연료 및 바이오 LNG)와 e-연료 사이의 브릿지 역할을 하게 되며, e-연료가 2050년 77.7%를 공급하게 된다.

*Target*에서는 바이오메탄올이 조기에 도입되어, 2032년부터 2050년까지 전체 연료의 최소 12.8%를 차지하게 된다. 블루연료와 e-연료 역시 지속적으로 확대되어, 블루 암모니아가 2039년부터 2045년 기간 동안 연간 연료 소비의 최대 49.0%를 공급할 수 있으며, e-연료가 전체의 71.3% 이상을 공급하는 구조가 전망된다.

*Strict 2050*은 *Phase Out 2050*에 탄소배출 규제를 추가한 경우로, 분석 결과 온실가스 배출량과 연료 소비구조 모두 *Target*과 동일한 결과를 보였다. 이는 2050년 화석연료 퇴출 정책만으로는 배출 규제에 상응하는 감축 효과를 내기 어렵다는 점을 시사한다. 반면, *Strict 2040*은 화석연료의 2040년 전면 퇴출을 강제하는 동시에 탄소배출 총량을 규제하고 있기 때문에, 다른 양상을 보인다. 해당 시나리오에서는 e-연료의 도입이 2040년 이후로 지연되고, 그 공백을 메우기 위해 블루 수소와 블루 암모니아의 비중이 급격히 증가한다. 또한 2040년에 화석연료의 퇴출이 강제되고, 연간 연료 전환율이 제한되어 있어, 화석연료는 선형으로 빠르게 감축이 되며 LNG와 동일한 배출량을 갖고 있는 바이오 LNG가 부족분을 채우게 된다.

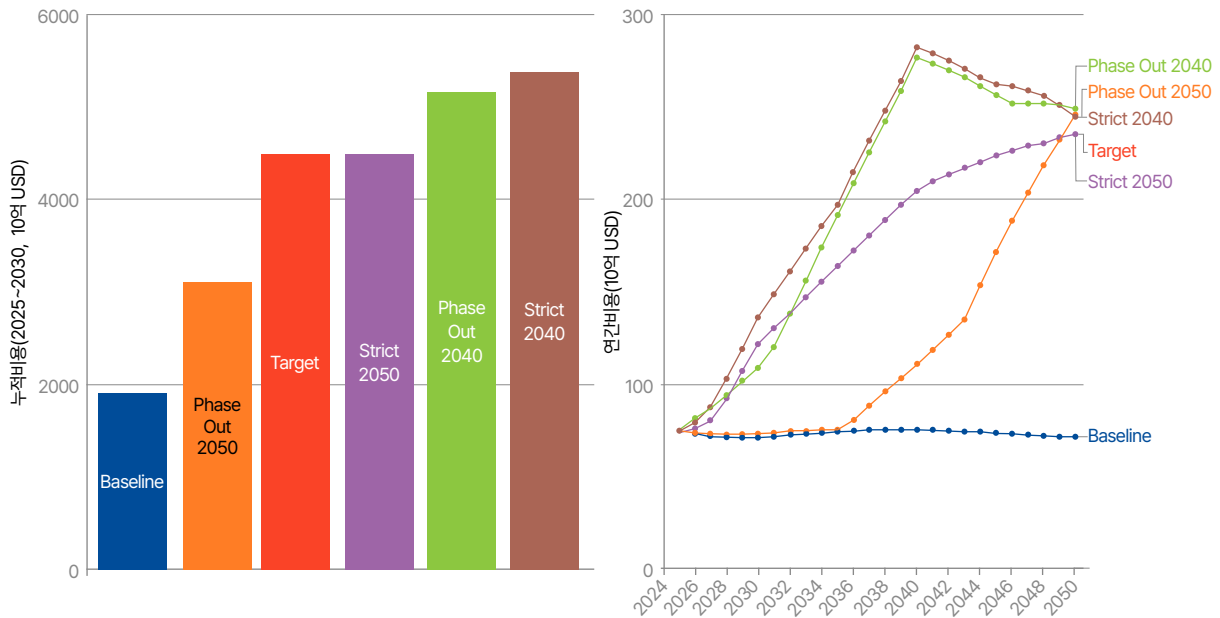
[그림 3] 시나리오별 누적 CO₂ 배출량과 연간 CO₂ 배출량 추이



*Baseline*은 총 15.6 Gt-CO₂의 누적 배출량을 기록하며, 가장 높은 이산화탄소 배출 수준을 보인다. 이는 가장 배출량이 적은 *Strict 2040*의 7.5 Gt-CO₂의 약 2.1배의 누적 CO₂ 배출량이다. 즉, 아무런 정책 개입 없이 시장 주도로 전환이 이루어질 경우 배출 감축 효과가 제한적임을 보여준다. 또, *Baseline*의 경우 2050년에도 탄소중립에 이르지 못한다. 하지만 연간 배출량은 해운 부문의 연료 효율 증가로 2050년에 2025년 대비 24.6%(163 Mt-CO₂) 감축된다.

*Phase Out 2050*은 HFO 대체와 장기적 청정연료로의 전환을 통해, *Baseline* 대비 약 14.5%의 누적 배출량을 감축하여 13.3 Gt-CO₂를 배출한다. *Target* 및 *Strict 2050*은 각각 8.0 Gt-CO₂ 수준의 배출량으로, LNG 역할 제한이 *Phase Out 2050* 대비 약 5.4 Gt-CO₂ 추가 감축 효과가 있는 것으로 나타났다.

[그림 4] 시나리오별 누적 연료비와 연간 연료비 추이



*Baseline*은 누적 기준 가장 낮은 연료 비용을 보이지만, 탈탄소 전환이 지연됨에 따라 장기적 배출 감소 효과는 미미하다. *Phase Out 2050*은 2035년 이후 점진적 비용 상승으로 인해서 *Baseline* 대비 약 61.9%의 추가적인 비용이 발생되었으며, *Target*과 *Strict 2050*은 2025년부터 지속적인 비용 상승으로 인해서 *Baseline* 대비 약 2.3배의 추가적인 비용이 발생되었다. 반면, 2040년까지 조기 탈탄소화를 목표로 하는 *Phase Out 2040*과 *Strict 2040*은 2040년 최고점을 기록한 후 2050년까지 정점 대비 비용이 낮아지나, 누적 비용은 *Baseline* 대비 최소 2.7 (*Phase Out 2040*)배에 달한다.

IV. 결론 및 시사점

본 연구는 다양한 정책 조합 시나리오 분석을 통해 해운 부문의 연료 전환 경로와 배출량 감축 효과, 연료 비용 구조를 정량적으로 분석하였다. 그 결과, 국제해운 부문에서 실질적인 감축을 달성하기 위해서는 연료 전환 방식이나 퇴출 시점을 설정하는 것에 더해, 온실가스 총배출량을 기준으로 한 정책 설계와 정합성 있는 규제 체계가 핵심임이 확인되었다.

1. LNG는 규제 없을 경우 '탄소 락인'을 초래

분석 결과, LNG는 규제가 없는 시나리오에서 가장 빠르게 확산하는 전환 연료로, *Baseline* 및 *Phase Out 2050* 시나리오에서 HFO를 빠르게 대체하며 e-fuel의 도입을 2044년까지 지연시켰다. 이는 온실가스 효과가 제한적인 화석연료 간 전환만을 유도한 것으로, 탄소 락인(Carbon Lock-in) 현상을 야기하여 산업의 구조적 전환을 지연시키는 결과를 초래한다.

LNG가 HFO 대비 온실가스 배출계수가 낮고 단기적으로 경제성이 높기 때문에, 정책이 부재한 시나리오에서는 가장 먼저 도입되는 경향을 보인다. 반대로 배출량 규제가 존재하는 *Target* 및 *Strict* 시나리오에서는 그 사용이 억제되고, 보다 낮은 배출계수의 연료들로 조기 전환이 이루어졌다.

이는 LNG가 규제가 없을 때만 비용 경쟁력이 있다는 점을 보여주며 확산 여부가 정책 설계에 크게 좌우됨을 시사한다. 따라서 LNG를 장기 대안으로 간주하고 관련 인프라 투자를 장려할 경우, 기술 및 자본이 화석연료 기반으로 고착될 위험이 크다. LNG는 제한적 역할에 그쳐야 하며, LNG 중심 정책 지원은 구조적으로 재검토되어야 한다.

2. 지속가능한 바이오연료 기준 수립의 필요성

바이오 연료는 e-연료 상용화 이전, 과도기 연료로서 일정 역할을 수행할 수 있으나, 그 사용이 기후·환경 측면으로 지속가능한 방식으로 이뤄지지 않을 경우 오히려 전환을 지연시키고 온실가스 배출을 증가시킬 수 있다. 특히 전주기 관점에서는 연료의 배출량뿐 아니라 원료가 어디에서, 어떻게 생산되었는지가 핵심적인 판단 기준이 되어야 한다.

공급량의 한계, 원료의 지속가능성, 식량·환경과의 경쟁 등 다양한 문제를 고려할 때, 바이오 연료는 장기 대안이 되기 어렵기 때문에 정책적 통제가 필수적이다. 한국의 해운 부문이 바이오연료를 일정 수준 활용하더라도, 반드시 지속가능한 바이오연료 사용을 위한 명확한 기준과 규제 체계를 갖춰야 한다. 원료의 종류와 생산 지역, 생산방식에 대한 공급망 실사(due diligence) 기반의 지속가능성 평가를 의무화하고, 1세대 식량 기반 원료의 배제를 포함한 위험 회피 전략을 수립하며, '친환경 바이오' 프레이밍을 통한 산업계의 면책을 방지하기 위한 정책적 통제 장치가 함께 설계되어야 한다. 결론적으로, 해운 연료로서 바이오 연료의 정책적 위치는 '기한이 명시된 임시 전략'으로 규정되어야 하며, 엄격한 지속가능성 기준 아래에서 제한적으로 활용되어야 한다.

3. 배출량 기반 정책 접근의 의의

해운 부문의 연료 전환은 단순한 연료의 종류 구분이 아닌, 온실가스 배출량 총량 감축을 기준으로 접근해야 한다. 시나리오 분석 결과, 화석연료 퇴출 시점만을 기준으로 하여 연료 유형에만 제한을 준 *Phase Out* 시나리오는 탄소 감축 효과가 제한적이며, 배출 총량에 직접적으로 규제를 가한 시나리오(*Target, Strict*)에서 e-연료 중심의 구조 전환과 실질적 감축이 가능함을 확인하였다. 단, 적극적인 연료 전환 정책 혹은 규제는 (*Phase Out 2040*), 배출 총량에 직접적으로 규제를 가하는 것과 유사한 효과를 볼 수 있었다.

특히 IMO가 도입 예정인 연료표준제도(GFS)는 연료의 전주기 배출량을 기준으로 규제하는 제도로, 단순 연료 유형이 아닌 배출계수 중심의 정량적 접근이 국제적으로 강화되고 있음을 보여준다. 본 연구에서는 선박 연소 시 이산화탄소 배출량만을 고려했지만, IMO가 요구하는 전주기 평가를 적용할 경우 LNG 및 바이오 연료와 같은 과도기 연료의 배출 영향이 현재보다 더 높게 평가될 가능성이 있으며, 이에 따라 연료 선택 및 전환 시점은 달라질 수 있다.

또한, *Phase Out 2050* 시나리오의 누적 배출량은 약 13.3 Gt-CO₂로 감축 효과가 제한적이었던 반면, 배출 총량 규제를 병행한 *Target* 및 *Strict* 시나리오는 약 8 Gt-CO₂ 이하로 누적 배출을 억제, 5 Gt-CO₂ 이상의 추가 감축이 가능하였다. 이는 배출량을 기준으로 설계된 정책이 화석연료 퇴출 단독 정책보다 훨씬 더 효과적인 감축 경로를 제공함을 보여준다.

결국, 화석연료의 단계적 퇴출은 탈탄소 전환의 중요한 수단 중 하나이지만, 퇴출 시점만 설정할 경우 LNG와 같은 화석연료로의 대체가 일어나며, 온실가스 총량에는 큰 변화가 없을 수 있다. 화석연료 퇴출 시점 설정과 병행하는 배출량 기준 접근은 해운산업의 전환을 보다 실질적이고 일관된 방향으로 이끌 수 있으며, 경제성과 환경성을 동시에 고려한 정책 설계를 가능하게 한다.

부록

모형 구조

본 연구는 선형계획법(Linear Programming) 기반의 동적 최적화 모형을 통해 국제해운 부문의 비용 효율적 연료 전환 경로를 분석한다.

결정변수

$x_{y,t,f}$ = 연도 y 에 선박 유형 t 가 연료 f 를 사용하는 양

목적함수

총 연료 비용의 최소화:

$$\cdot \min \sum_{y \in Y} \sum_{f \in F} c_{y,f} \cdot x_{y,t,f}$$

- Y = 분석 기간 내 연도 집합 (2025-2050)
- T = 선박 유형 집합
- F = 연료 유형 집합

주요 제약조건

1. **배출량 제약:** IMO 감축 목표를 반영한 연도별 최대 배출량

$$2. \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} e_{y,f} \cdot x_{y,t,f} \leq E_y \quad \forall y \in Y$$

- $e_{y,f}$ = 연도 y 에 연료 f 의 배출계수 (톤 CO₂/톤 연료)
- E_y = 연도 y 의 배출 허용량

3. 에너지 수요 충족: 각 선박 유형별 에너지 수요 충족

$$\sum_{f \in F} x_{y,t,f} \cdot n_{y,f} = D_{y,t} \quad \forall y \in Y, \forall t \in T$$

- $n_{y,f}$ = 연도 y 에 연료 f 의 에너지 밀도 (MJ/톤)
- $D_{y,t}$ = 연도 y 에 선박 유형 t 의 에너지 수요

4. 연료 전환 속도 제약: 연도별 연료 믹스 변화 속도 제한

$$\sum_{t \in T} \sum_{f \in F} |x_{y,t,f} - x_{y-1,t,f}| \leq \alpha$$

- α = 연간 최대 전환 비율 (10%)
- $base$ = 기준 연도 (2025)

5. 연료 가용성 제약: 특정 연도에 특정 연료 사용 가능 여부

$$x_{y,t,f} \leq M \cdot A_{y,f} \quad \forall y \in Y, \forall t \in T, \forall f \in F$$

- $A_{y,f}$ = 연도 y 에 연료 f 의 가용성 (이진변수: 0 또는 1)
- M = 상수

Baseline 연료 사용량 기준

| 선박종류 / 연료 사용량 (ton) | HFO | LNG | LPG | LSFO+MGO |
|---------------------|------------|-----------|-------|-----------|
| bulk | 49,427,538 | 0 | 0 | 5,310,695 |
| combination | 100,701 | 0 | 0 | 17,385 |
| containership | 52,095,315 | 24,893 | 8 | 7,475,034 |
| cruise | 4,950,051 | 23,209 | 0 | 1,694,258 |
| gas_carrier | 4,692,209 | 2,733,961 | 0 | 774,822 |
| general_cargo | 5,341,618 | 8,025 | 1,576 | 1,465,417 |
| lng_carrier | 2,953,889 | 7,494,993 | 0 | 705,260 |
| others | 5,007,311 | 43,399 | 1,182 | 3,218,224 |
| passenger | 583,761 | 0 | 0 | 211,834 |
| refrigerated_cargo | 1,230,226 | 0 | 0 | 231,683 |
| ro_ro_cargo | 1,859,403 | 6,167 | 0 | 703,253 |
| ro_ro_vehicle | 5,226,774 | 0 | 0 | 926,131 |
| ro_ro_passenger | 2,153,461 | 69,381 | 0 | 1,380,704 |
| tanker | 35,805,879 | 78,714 | 4,618 | 6,940,471 |

연료 가격 시나리오

| 연료 유형 (USD/MJ) | 2025 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-----------------------|------|------|------|------|
| HFO+scrubber | 8.2 | 8.2 | 8.8 | 8.8 |
| LNG | 9.3 | 9.0 | 8.6 | 8.2 |
| LPG | 15.4 | 14.9 | 14.0 | 13.4 |
| LSFO+MGO | 10.5 | 10.4 | 11.3 | 11.2 |
| bio-MGO | 26.6 | 28.0 | 31.4 | 35.7 |
| bio-liquefied methane | 23.9 | 24.2 | 25.1 | 26.8 |
| bio-methanol | 25.1 | 25.6 | 26.9 | 29.5 |
| blue CH2 | 43.1 | 44.3 | 44.3 | 43.5 |
| blue LH2 | 34.9 | 36.4 | 34.9 | 33.8 |
| blue ammonia | 25.7 | 27.4 | 27.4 | 25.4 |
| e-CH2 | 54.2 | 50.8 | 45.5 | 39.6 |
| e-LH2 | 44.0 | 42.4 | 36.1 | 29.4 |
| e-MGO | 49.5 | 46.3 | 40.3 | 35.1 |
| e-ammonia | 34.9 | 33.5 | 27.1 | 20.9 |
| e-liquefied methane | 45.5 | 43.1 | 37.5 | 32.3 |
| e-methanol | 42.6 | 39.9 | 35.2 | 31.1 |

연료 배출계수

| 연료 명 (tCO2/ton) | 배출계수 |
|-----------------------|-------|
| HFO | 3.114 |
| LNG | 2.75 |
| LPG | 3 |
| LSFO+MGO | 3.206 |
| bio-MGO | 3.206 |
| bio-liquefied methane | 2.75 |
| bio-methanol | 0 |
| blue CH2 | 0 |
| blue LH2 | 0 |
| blue ammonia | 0 |
| e-CH2 | 0 |
| e-LH2 | 0 |
| e-MGO | 3.206 |
| e-ammonia | 0 |
| e-liquefied methane | 2.75 |
| e-methanol | 0 |



기후솔루션은 전 세계 온실가스 감축 및 올바른 에너지 전환을 위해 활동하는 비영리법인입니다.
리서치, 법률, 대외 협력, 커뮤니케이션 등의 폭넓은 방법으로 기후위기를 해결할 실질적 솔루션을 발굴하고,
근본적인 변화를 위한 움직임을 만들어 나갑니다.