

FuelEU Maritime 규제 적용에 따른 해양 연료의 영향분석 및 대응방안 연구

김진형^{1,2}, 최재혁^{3,†}

한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과¹

(사)한국선급 연구본부 친환경선박해양연구소 친환경기술팀²

한국해양대학교 기관시스템공학부³

A Study on Impact and Countermeasures of Marine Fuels in the FuelEU Maritime Regulation

Jin-Hyung Kim^{1,2}, Jae-Hyuk Choi^{3,†}

Department of Marine Systems Engineering, Graduate School, Korea Maritime & Ocean University¹

Greenship Technology Team, Decarbonization · Ship R&D Center, R&D Division, Korean Register²

Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This study performed the analysis on an economic feasibility of each marine fuel, potential fuel pathways and the relevance of compliance measures to ensure compliance with the FuelEU Maritime regulation. Additionally, it identified certain regulatory gaps to encourage the use of alternative marine fuels. Regarding GHG emissions calculations, the existing GHG regulations for ships applies the Tank-to-Wake (TtW) method, whereas FuelEU Maritime applies the Well-to-Wake (WtW) method. The main results present that important information to establish response strategy for FuelEU Maritime including the costs and benefits of each marine fuel, the minimum blending ratio of alternative fuels, and compliance impacts of measures. For the regulatory costs and benefits of marine fuels following the implementation of the FuelEU Maritime from 2025, our findings indicate that while most fossil fuels incur regulatory costs from 2025, most of biofuels and RFNBO fuels do not incur costs until 2050. This will play a role to narrow the price gap between fossil fuels and alternative fuels.

Keywords : FuelEU maritime(해상교통의 재생가능 및 저탄소 연료 사용 규제), Biofuels(바이오 연료), RFNBO(비생물학적 기원의 재생 에너지 연료), GHG intensity(온실가스 집약도), Well-to-wake(연료의 생산부터 선박에서 사용까지의 온실가스 배출량), Life cycle assessment(전과정평가)

1. 서론

전체 해운 분야는 2018년에 1,056백만톤의 이산화탄소(CO₂)를 배출하였으며, 이는 전 세계의 인위적인 CO₂ 배출량의 2.89%를 차지한다. 항해 기반 배출량 할당 방법을 적용한 국제해운은 2018년에 740백만톤의 CO₂를 차지한다. 신뢰성 있는 장기적 관점의 경제 및 에너지 기반의 현재 추세(BAU, Business-As-Usual) 시나리오에 따르면, 배출량은 2050년까지 2008년의 90~130%를 차지할 것으로 전망된다 (IMO, 2020).

2018년에 IMO는 선박의 온실가스 배출량 감축에 관한 초기

전략(Initial IMO Strategy)을 채택하였고, 합의된 후속 조치에 따라 2023년에 개정사항을 포함한 2023 IMO GHG Strategy를 채택하였다. 2023 IMO GHG Strategy는 국제해운의 운송업무량(transport work) 당 CO₂ 배출량으로 표현되는 탄소집약도를 2030년까지 최소 40%까지 감축하고 2030년까지 국제해운에서 사용하는 에너지의 최소 5%를 제로 또는 제로에 가까운 기술, 연료 및 에너지원으로 활용할 것을 촉구한다. 또한, 2050년까지 국제해운 온실가스의 순 배출량을 제로화(net-zero)하는 것을 목표로 설정하였다 (IMO, 2023a). IMO의 선박 온실가스 감축을 위한 규제에는 2013년부터 시행된 에너지효율설계지수(EEDI,

Energy Efficiency Design Index) 및 선박에너지효율관리계획서 (SEEMP, Ship Energy Efficiency Management Plan), 2019년부터 시행된 선박의 연료유 사용량에 대한 데이터 수집 시스템 (DCS, Data Collection System) 그리고 2023년부터 시행되는 에너지효율현존선지수(EEXI, Energy Efficiency Existing ship Index)와 탄소집약도지표(CII, Carbon Intensity Indicator)가 있다. 또한, 기술적 요소 및 경제적 요소를 결합한 조치(basket measure)를 2025년까지 채택하고 2027년부터 발효를 목표로 하는 개발 계획을 확정하였다.

IMO의 글로벌 이니셔티브와 별도로, 유럽연합(EU)에서는 2018년부터 EU에 운항하는 국제해운의 CO₂ 배출량에 대한 모니터링, 보고 및 검증(MRV, Monitoring, Reporting and Verification)에 관한 규정을 시행하였다 (European Parliament and Council, 2015). 유럽 그린딜(European Green Deal) 제안 이후, EU는 2021년 7월에 Fit for 55 package를 발표하였다. Fit for 55 package는 유럽 기후법에서 규정하는 1990년 대비 2030년까지 감축 목표를 기존 40%에서 55%로 상향 조정된 중기 감축 목표를 달성하기 위하여 다양한 산업 분야에 적용되는 여러 입법 제안사항의 구성을 의미하며, 국제해운과 직접 관련된 사항은 2024년부터 EU 배출권거래제(ETS, Emissions Trading System)의 해상운송 배출량으로 확대 적용 및 해상교통의 재생가능 및 저탄소 연료의 사용 촉진 규제(FuelEU Maritime)이다 (Council of the European Union, 2022).

선박 온실가스 감축을 위한 IMO의 국제협약 및 EU를 비롯한 지역적 규제는 Fig. 1과 같이 요약할 수 있다.

해운 탈탄소화를 실현하기 위해서는 저탄소 및 무탄소 연료의 효과적인 도입 필요성이 제시되고 있으며, 화석연료와 대체연료 간의 차별화를 위하여 전과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment) 도입 필요성이 제안되고 있다. LCA는 연료의 생산에서 가장 배출 집약적인 단계, 즉 원료 추출(WtT, Well-to-Tank) 및 연료의 운송과 처리뿐만 아니라 직접적인 선박 배출로서의 연소(TtW, Tank-to-Wake)를 포함한다 (Kramel et al., 2021). IMO의 EEDI, EEXI 및 CII와 EU의 MRV, ETS와 같이 온실가스 배출량 측면에 초점을 맞춘 규제는 TtW 방법을 적용하고 있지만, IMO의 온실가스 연료 표준(GFS, GHG Fuel Standard) 및 EU의 FuelEU Maritime과 같이 연료 전환의 촉진에 초점을 맞춘 규제는 WtW 방법을 적용하고 있다.

선박의 온실가스 감축에 대한 EU의 행동은 IMO에 대한 글로벌 행동을 자극하며, IMO 논의의 방향과 결과에 상당한 영향을 미치고 있다. 예를 들면, EU의 MRV 규제는 IMO가 유사한 DCS 규제를 채택하도록 이끌었다. 따라서 EU Fit for 55 package에서 국제해운과 직접적인 관련이 있는 FuelEU Maritime 및 Maritime EU ETS에 대한 검토는 매우 중요하다. 특히 FuelEU Maritime 규제는 지금까지 시행되어 온 선박 온실가스 감축 규제의 체계와 배출량 산정 범위 및 방법 등에서 상당히 다르며 세부 규제방법도 매우 복잡하므로 이에 대한 면밀한 검토 및 분석이 중요하다.

Christodoulou and Cullinane (2022)는 2020년 MRV 데이터를 검토하고 FuelEU Maritime의 규제치 준수를 위해 사용될 대체 연료의 잠재적인 전망을 제시하였으나, 배출량 산정 방법을 TtW

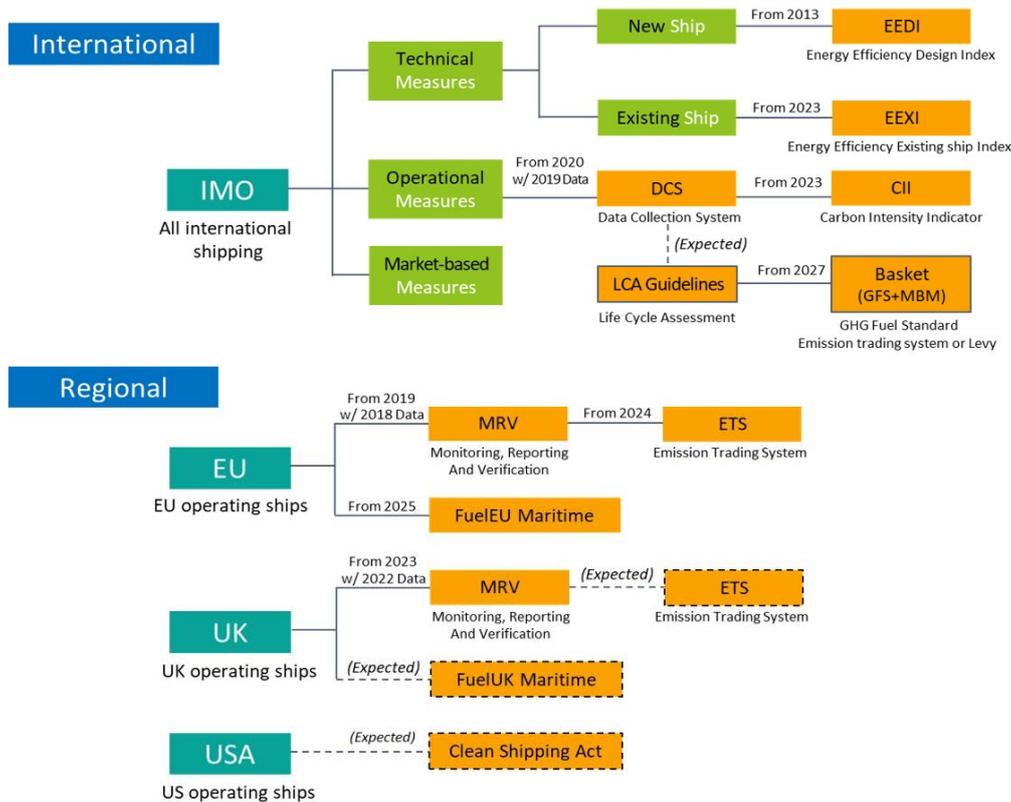


Fig. 1 Main international and regional regulations to reduce GHG emissions from ships

방법을 적용하였으며, 연료종류별 FuelEU Maritime의 온실가스 집약도 기준치의 달성 정도의 분석도 단순히 HFO 대비 온실가스 감축 잠재량으로 수행하였다는 한계가 있다. Solakivi et al. (2022)는 EU ETS, FuelEU Maritime 및 에너지조세규정(ETD, Energy Taxation Directive)를 포함한 Fit for 55 전반에 대하여 로로선 사례 적용을 통한 저탄소 및 무탄소 연료의 비용 영향을 추정하였다. 본 연구는 가장 최신의 FuelEU Maritime 규정의 요구사항에 대한 검토 및 이를 통한 해양 연료에 대한 경제성 분석을 수행하고 최적의 대응방안 검토 결과를 제공함으로써 해사 이해관계자에게 중요한 정보를 제공하는 것을 목표로 한다. 2장에서는 FuelEU Maritime 규정에 대한 검토 및 연구방법론에 대해 설명하고, 3장에서는 분석결과를 제시한다. 4장에서는 주요 시사점 제시와 함께 본 연구의 결론을 정리한다.

2. 연구방법

2.1 FuelEU Maritime

FuelEU Maritime은 해상교통에서의 재생가능 및 저탄소 연료 사용을 규제하는 것을 목표로 하는 제도이다 (Kim, 2022).

FuelEU Maritime (European Parliament and Council, 2023)은 선박의 등록된 기국에 관계없이 EU에 운항하는 총톤수 5,000 이상의 모든 선박의 (1) 유럽경제지역(EEA, European Economic Area) 관할 기항지(port of call)에서 머무르는 동안 사용된 에너지의 100%, (2) EEA 관할 기항지에서 EEA 관할 기항지까지의 운항에서 사용된 에너지의 100%, (3) EEA 관할 최외곽 지역(outermost region)에 위치한 기항지로 도착 또는 기항지에서 출발한 운항에서 사용된 에너지의 50% 그리고 (4) EEA 관할 기항지에서 출발하여 제3국의 관할 기항지로 도착 또는 제3국의 관할 기항지에서 출발하여 EEA 관할 기항지로 도착하는 운항에서 사용된 에너지의 50%에 대해 적용된다. 여기서 기항지의 정의는 화물의 선하역 또는 승객의 승하선을 위한 정박을 의미하며, 재급유, 보급품 수령 등을 위한 정박 및 제2조(2)에 따른 인근컨테이너환적항(neighbouring container transshipment)에 대한 컨테이너선의 정박은 해당하지 않는다.

온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄) 및 아산화질소(N₂O)를 포함한다. 온실가스 집약도(GHG intensity)는 선박에서 사용된 에너지 당 WtW 기반의 온실가스 배출량(gCO_{2eq}/MJ)으로 표현되며, 식 (1)과 같이 FuelEU Maritime의 Annex I에 명시된 계산 방법론에 따라 식 (2)에 따른 WtT 및 식 (3)에 따른 TtW에 대한 계산 결과의 합계에 풍력추진에 대한 보상계수(f_{wind})를 적용하여 계산된다. 이와 함께, 온실가스 집약도 계산에서 2033년까지 소위 e-fuel로 표현되는 비생물학적 기원의 재생에너지 연료(RFNBO, Renewable Fuels of Non-Biological Origin)를 사용한 선박은 RFNBO 연료의 사용량을 2배로 산정해주는 보상계수 2(RWD)가 적용된다. 2034년부터는 선박에서 사용하는 연간 평균 에너지량의 최소 2%를 RFNBO 연료로 의무적으로 사용해야 한다.

$$GHG\ intensity = f_{wind} \times (WtT + TtW) \quad (1)$$

$$WtT = \frac{\sum_i^{n\ fuel} M_i \times CO_{2eq\ WtT, i} \times LCV_i}{\sum_i^{n\ fuel} M_i \times LCV_i \times RWD_i + \sum_k^c E_k} + \frac{\sum_k^c E_k \times CO_{2eq\ electricity, k}}{\sum_i^{n\ fuel} M_i \times LCV_i \times RWD_i + \sum_k^c E_k} \quad (2)$$

$$TtW = \frac{\sum_i^{n\ fuel\ m\ engine} \sum_j M_{i, j}}{\sum_i^{n\ fuel} M_i \times LCV_i \times RWD_i + \sum_k^c E_k} \times \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{100} C_{slip\ j} \right) \times (CO_{2eq, TtW, i, j}) \right]}{\sum_i^{n\ fuel} M_i \times LCV_i \times RWD_i + \sum_k^c E_k} + \frac{\left[\left(\frac{1}{100} C_{slip\ j} \times CO_{2eq\ TtW, slip, i, j} \right) \right]}{\sum_i^{n\ fuel} M_i \times LCV_i \times RWD_i + \sum_k^c E_k} \quad (3)$$

여기서, i는 연료 종류, j는 연료 소모원, k는 육상전력공급시설 연결점, n은 연료 종류의 총개수, c는 육상전력공급시설 연결점의 총개수, m은 연료 소모원의 총개수, M은 연료소모량(gFuel), E는 육상전력공급시설의 전력공급량(MJ), CO_{2eq, WtT}는 WtT 온실가스 배출계수(gCO_{2eq}/MJ), CO_{2eq, electricity}는 육상전력공급시설의 전력공급량에 대한 WtT 온실가스 배출계수(gCO_{2eq}/MJ), LCV는 저위발열량(MJ/gFuel), C_{slip}은 비산과 슬립 배출량에 의한 연료 손실 계수(%), CO_{2eq, TtW}는 식 (4)에 따라 계산되는 TtW 온실가스 배출계수(gCO_{2eq}/gFuel) 그리고 CO_{2eq, TtW, slip}은 식 (5)에 따라 계산되는 슬립 연료에 대한 TtW 온실가스 배출계수(gCO_{2eq}/gFuel)를 의미한다. 식 (1)에서 분자항의 E_k × CO_{2eq, electricity, k}에 대해서는 0을 적용한다.

$$CO_{2eq, TtW, i, j} = (C_{fCO_2, j} \times GWP_{CO_2}) + (C_{fCH_4, j} \times GWP_{CH_4} + C_{fN_2O, j} \times GWP_{N_2O})_i \quad (4)$$

여기서, C_{fCO₂}, C_{fCH₄} 및 C_{fN₂O}는 TtW 온실가스 배출계수(gGHG/gFuel)을 의미하며, GWP_{CO₂}, GWP_{CH₄} 및 GWP_{N₂O}는 100년 기준의 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)를 의미한다. 온실가스 배출량은 CO₂를 기준 물질로 하여, 특정 물질의 단위 질량이 선택된 시간 동안 누적된 복사 강제력을 측정하는 지표인 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)에 기반한 가중치를 사용하여 CO₂ 환산(CO_{2eq}) 배출량으로 정량화된다 (IPCC, 2014). FuelEU Maritime은 European Parliament and

Council (2018)에 명시된 100년 기준의 지구온난화지수를 사용할 것을 요구하고 있다. 그러나, European Parliament and Council (2018)과 IPCC의 5차 평가보고서 (IPCC, 2014)에서 제시하는 지구온난화지수가 다르다. EU MRV에서는 IPCC의 5차 평가보고서에 따른 지구온난화지수의 적용을 요구 (European Commission, 2020)하고 있으며 European Parliament and Council (2018)도 이를 반영하여 개정될 계획을 고려하여, 본 연구에서는 CO₂에 대해 1, CH₄에 대해 28 및 N₂O에 대해 265를 지구온난화지수로 적용하였다.

$$CO_{2eq, TtW, slip, i, j} = (C_{sfCO_2, j} \times GWP_{CO_2}) + (C_{sfCH_4, j} \times GWP_{CH_4} + C_{sfN_2O, j} \times GWP_{N_2O})_i \quad (5)$$

여기서, C_{sfCO₂}, C_{sfCH₄} 및 C_{sfN₂O}는 슬립 연료에 대한 TtW 온실가스 배출계수(gGHG/gFuel)로서 C_{sfCO₂} 및 C_{sfN₂O}는 0을 적용하며, C_{sfCH₄}는 1을 적용한다.

FuelEU Maritime의 Annex II는 WtW 온실가스 집약도를 계산하기 위한 각 연료 종류에 대한 저위발열량(LCV, Lower Calorific Value), WtT 온실가스 배출계수 및 TtW 온실가스 배출계수에 대한 기본계수를 제시하고 있다. 비산과 슬립 배출량에 의한 연료 손실(C_{slip})은 기본계수 대신 인증된 시험 값을 적용할 수도 있다.

보고 기간에 선박에서 사용된 에너지의 연간 평균 온실가스 집약도는 Table 1에 제시된 해당연도의 온실가스 집약도 제한치를 초과해서는 안 된다.

온실가스 집약도 제한치 및 2034년부터의 RFNBO 연료의 의무 사용 규제 달성 정도로 계산되는 의무준수 잔고(CB, compliance balance)는 FuelEU Maritime의 Annex IV A 부분에 따라 식 (6)으로 계산된다.

$$CB[g CO_{2eq}] = (GHGIE_{target} - GHGIE_{actual}) \times \left[\sum_i^{n_{fuel}} M_i \times LCV_i + \sum_k^c E_k \right] \quad (6)$$

여기서, GHGIE_{target}은 온실가스 집약도 제한치(gCO_{2eq}/MJ)이며, GHGIE_{actual}은 선박의 온실가스 집약도(gCO_{2eq}/MJ)이다.

의무준수 잔고가 양(+)의 값을 가지면, 의무준수 잉여금 (compliance surplus)이라고 하며, 음(-)의 값을 가지면, 의무준수

결손금 (compliance deficit)이라고 한다. 의무준수 잉여금 및 결손금은 FuelEU Maritime의 Annex IV B 부분에 따라 식 (7)을 적용하여 FuelEU 벌금 (penalty)을 계산한다. 해운회사는 의무준수 결손금에 대해 자신에게 정해진 EU 회원국에 벌금으로 납부하거나 다음 보고 기간에 대한 의무준수 잔고에서 1.1을 곱한 사전 의무준수 잉여금을 차입(borrowing)해서 해당 보고 기간에 대한 의무준수 결손금을 대체할 수도 있다. 단, 사전 의무준수 잉여금의 차입 한도는 해당 보고 기간의 온실가스 집약도 제한치에 선박의 에너지사용량을 곱한 값의 2%를 초과할 수 없고, 2년 연속 차입할 수 없다. 보고 기간에 의무준수 잉여금이 발생한 경우, 해운회사는 다음 보고 기간의 의무준수 잔고로 이월(banking)할 수 있다. 이와 함께, 두 척 이상 선박의 의무준수 잔고는 통합(pooling)될 수 있다. 즉, 의무준수 잉여금을 가진 선박이 해당 잉여금을 의무준수 결손금을 가진 선박에 이전하여 해당 결손금을 대체할 수 있다. 단, 의무준수 잉여금을 이전해줄 수 있는 한도는 의무준수 잉여금을 이전해주는 선박의 의무준수 잔고에서 의무준수 결손금이 발생하면 안 된다.

$$FuelEU Penalty = \frac{|CB|}{GHGIE_{actual} \times 41000} \times 2400 \quad (7)$$

FuelEU 벌금의 단위는 유로(EUR)이며, 41000은 41000MJ에 대한 VLSFO 1톤을 의미하며, 2400은 VLSFO 1톤에 상응하는 유로(EUR)로 지불되어야 하는 금액이다.

2.2 연구방법론

FuelEU Maritime은 해양 연료를 저탄소 대체연료로 전환을 촉진하는 것이 규제의 목표다. 따라서 본 연구는 해양 연료 전환을 통한 FuelEU Maritime 규제 달성에 초점을 맞추어 수행하였다.

본 연구에서는 FuelEU Maritime의 Annex II에서 제시되는 연료 종류 중 해사 산업계에서 관심도를 고려하여 Table 2와 같이 18종을 분석 대상으로 선정하였다. LNG 연료의 경우에는 대표적인 연소방식의 세부 분류를 포함하였다.

FuelEU Maritime의 Annex II는 온실가스 집약도를 계산하기 위한 기본계수를 제시하고 있으나, 일부 계수의 경우에는 요구되는 다른 관련 규정을 따르거나 직접측정(TBM, To Be Measured) 또는 이용불가(N/A, Not Available)로 명기된 사항이 있으므로, 완전한 분석을 위해서는 이러한 기본계수가 제시되지 않은 계수에 대한 정립이 필요하며, 최종 정립된 결과는 Table 2와 같다.

LNG의 경우, 비산과 슬립 배출량에 의한 연료 손실(C_{slip})은 연소방식에 따른 기본계수 대신 인증된 시험 값을 적용할 수도 있으나, 본 연구에서는 기본계수를 적용하였다.

바이오 연료 및 RFNBO 연료의 경우에는 모두 지속가능성 기준을 충족한다고 가정하였다. EU는 온실가스 배출량 절감 기준 (greenhouse gas emissions saving criteria)을 바이오 연료에 대해 최소 65% 및 RFNBO 연료에 대해 최소 70%를 달성할 것을 규정한다 (European Parliament and Council, 2018). 온실가스 배

Table 1 GHG intensity limit of FuelEU Maritime

Percentage of GHG intensity limit	Required value (gCO _{2eq} /MJ)
Reference value	91.16
-2% from 1 January 2025	89.34
-6% from 1 January 2030	85.69
-14.5% from 1 January 2035	77.94
-31% from 1 January 2040	62.90
-62% from 1 January 2045	34.64
-80% from 1 January 2050	18.23

출량 절감 기준의 달성 여부를 판단하기 위한 기준 연료는 IMO의 바이오 연료의 사용 임시지침 (IMO, 2023b)에서 제시하는 MGO의 WtW 온실가스 집약도인 94gCO_{2eq}/MJ로 정하였다. 이에 따라 바이오 연료는 32.9gCO_{2eq}/MJ 및 RFNBO 연료는 28.2gCO_{2eq}/MJ로 온실가스 배출량 절감 기준을 설정하였다.

바이오 연료와 관련하여, 저위발열량은 FuelEU Maritime의 요구사항에 따라 European Parliament and Council (2018)의 Annex III에 따라 정하였으며, WtT 온실가스 배출계수(gCO_{2eq}/MJ)는 식 (8)을 적용하여 도출하라고 요구하고 있다.

$$E = \frac{C_{fCO_2}}{LCV} \tag{8}$$

여기서 E는 액체 바이오 연료에 대해서는 European Parliament and Council (2018)의 Annex V의 Part C 및 바이오 LNG에 대해

서는 Annex VI의 Part B에 제시된 방법론에 따라 정해진 값 (gCO_{2eq}/MJ)을 의미한다. E에서 TtW CO₂ 배출계수 및 저위발열량 값의 비율을 빼는 이유는 E는 WtW에 대한 계산 값이지만, FuelEU Maritime에서는 WtW 및 TtW를 분리하여 계산하므로 배출량의 이중계산을 피하기 위함이다.

바이오 디젤의 경우, 가장 감축 효과가 높은 폐식용유(waste cooking oil)와 함께, 폐식용유 기반의 bio-diesel은 높은 가격 및 공급 가능성의 불확실성을 고려하여 현실적인 측면의 바이오 디젤의 감축 효과를 검토하기 위해 온실가스 배출량 절감 기준을 달성하는 바이오 연료 중 가장 높은 온실가스 집약도(온실가스 감축 효과가 낮은)를 가지는 동물지방추출(animals fats from rendering)을 함께 대상 연료로 정하였다. 바이오 LNG의 경우, 바이오 폐기물에서 생산된 바이오 메탄 생산시스템에서 온실가스 배출량 절감 기준을 달성하는 close digestate, off-gas combustion 기술적 옵션을 가진 연료생산 유형을 대상 연료로

Table 2 Factors for fuel types under analysis

Fuel class	Fuel name	LCV (MJ/g)	CO _{2eq} WtT (gCO _{2eq} /MJ)	C _f CO ₂ TtW (gCO ₂ /gFuel)	C _f CH ₄ TtW (gCH ₄ /gFuel)	C _f N ₂ O TtW (gN ₂ O/gFuel)	C _{slip} (%)
Fossil fuels	HFO	0.0405	13.5	3.114	0.00005	0.00018	-
	MDO/MGO	0.041	13.2	3.151	0.00005	0.00018	-
	LNG Otto (dual fuel medium speed)	0.0491	18.5	2.75	0	0.00011	3.1
	LNG Otto (dual fuel slow speed)						1.7
	LNG Diesel (dual fuel)						0.2
Biofuels	Bio-diesel (waste cooking oil)	0.037	-61.69	2.834	0.00005	0.00018	-
	Bio-diesel (animals fats from rendering)		-55.79				
	Bio-LNG Otto (dual fuel medium speed)	0.05	-41.0	2.750	0	0.00011	3.1
	Bio-LNG Otto (dual fuel slow speed)						1.7
	Bio-LNG Diesel (dual fuel)						0.2
Bio-methanol	0.02	-58.35	1.375	0.00014	0.00005	-	
RFNBO	e-diesel	0.0427	-47.6	3.206	0.00005	0.00018	-
	e-methanol	0.0199	-67.1	1.375	0.00014	0.00005	-
	e-LNG Otto (dual fuel medium speed)	0.0491	-26.6	2.750	0	0.00011	3.1
	e-LNG Otto (dual fuel slow speed)						1.7
	e-LNG Diesel (dual fuel)						0.2
	e-H ₂ (fuel cells)	0.12	3.6	0	0	0	-
	e-NH ₃	0.0186	0	0	0	0.00037	-

선정하였다. 바이오 메탄올의 경우, 펄프 공장과 통합된 black-liquor 가스화를 통한 메탄올을 대상 연료로 선정하였다.

RFNBO 연료의 경우, WtT 온실가스 배출계수(gCO_{2eq}/MJ)에 대해 FuelEU Maritime에서는 European Parliament and Council (2018)에 따라 결정할 것을 요구하고 있다. 이에 대해 FuelEU Maritime이 EU 규정임을 고려하여 EU에서 IMO에 제안한 사항을 토대로 RFNBO 연료의 WtT 배출계수를 적용하였다 (IMO, 2022).

TtW 배출계수와 관련하여, 직접측정(TBM, To Be Measured) 또는 이용불가(N/A, Not Available)로 명기된 사항을 정립하기 위하여, 바이오 연료에 대한 CH_4 및 N_2O 배출계수 및 e- NH_3 에 대한 CH_4 및 비산과 슬립 배출량에 의한 연료 손실(C_{slip}) 배출계수는 EU에서 IMO에 제안한 사항을 토대로 정하였다 (IMO, 2022). 바이오 메탄올 및 e-methanol에 대한 CH_4 및 N_2O 배출계수와 e- NH_3 에 대한 N_2O 배출계수에 대해서는 Lindstad et al. (2021)에서 제시하는 배출계수를 적용하였다.

3. 분석결과

3.1 연료별 규제 비용 및 편익 분석

FuelEU Maritime 준수를 위한 연료별 비용 효과성 분석을 위해, 연료별 온실가스 집약도 및 보고 기간에 대한 의무준수 잔고 계산 결과에 따른 FuelEU 벌금을 도출하였다. 연료별 온실가스 집약도는 연료사용량과 관계없이 Table 3과 같이 동일한 계산 결과가 도출된다. RFNBO 연료의 경우, 2033년까지 RFNBO 연료의 사용량을 2배로 산정해주는 보상계수 2가 적용되므로 2033년까지 및 2034년부터의 온실가스 집약도 값이 달라진다.

FuelEU 벌금의 계산 결과는 연료사용량에 따라 달라지며, 연료별 1톤을 사용했을 때, 발생하는 에너지량은 연료별 저위발열량에 따라 다르다. 따라서, 연료별 상호 비교를 위하여 HFO 1톤을 사용했을 때 계산되는 40,500MJ의 에너지량을 기준으로 연료별 저위발열량을 적용하여 연료별 FuelEU 벌금을 계산하였다. FuelEU 벌금 계산 결과는 화석연료에 대해 Fig. 2, 바이오 연료에 대해 Fig. 3 및 RFNBO 연료에 대해 Fig. 4에 제시하였다. 양 (+)의 값은 의무준수 잉여금으로 다음 연도로 이월 또는 의무준수 결손금을 가진 다른 선박에 이전할 수 있는 편익을 의미하며, 음(-)의 값은 의무준수 결손금으로 EU 회원국에 벌금으로 납부해야 하는 비용을 의미한다.

화석연료의 경우, 대부분의 연료가 FuelEU Maritime이 시행되는 2025년부터 규제 비용이 발생한다. LNG 연료의 경우, 연소방식에 따른 메탄 슬립 배출량 비율에 따라 결과에 차이가 있으며, 가장 낮은 메탄 슬립 배출량 비율을 가진 디젤사이클의 경우 2040년부터 규제 비용이 발생하는 것으로 검토되었다.

바이오 연료의 경우, 화석연료와의 상호 비교를 위하여 바이오 연료만을 사용한 경우에 대해서 분석하였다. 동물지방추출 기반 바이오 디젤과 오토사이클 기반의 바이오 LNG를 제외한 모든 연료가 2050년까지 규제 편익이 발생하는 것으로 검토되었다. 분석

Table 3 GHG intensity index of each fuel type

Fuel name	GHG intensity index (gCO_{2eq}/MJ)	
	by 2033	from 2034
HFO	91.6	
MDO/MGO	90.63	
LNG Otto (dual fuel medium speed)	91.03	
LNG Otto (dual fuel slow speed)	83.83	
LNG Diesel (dual fuel)	76.13	
Bio-diesel (waste cooking oil)	15.32	
Bio-diesel (animals fats from rendering)	21.22	
Bio-LNG Otto (dual fuel medium speed)	30.22	
Bio-LNG Otto (dual fuel slow speed)	23.16	
Bio-LNG Diesel (dual fuel)	15.59	
Bio-methanol	11.26	
e-diesel	14.32	28.63
e-methanol	1.43	2.86
e-LNG Otto (dual fuel medium speed)	22.96	45.93
e-LNG Otto (dual fuel slow speed)	19.37	38.73
e-LNG Diesel (dual fuel)	15.51	31.03
e- H_2 (fuel cells)	1.8	3.6
e- NH_3	2.64	5.27

대상 바이오 연료 중에서는 바이오 메탄올이 FuelEU Maritime 규제 대응 관점에서 가장 좋은 것으로 나타났다.

RFNBO 연료의 경우, 화석연료와의 상호 비교를 위하여 RFNBO 연료만을 사용한 경우에 대해서 분석하였다. RFNBO 연료는 온실가스 집약도 계산 과정에서 2033년까지만 RFNBO 연료의 사용량을 2배로 산정해주는 보상계수 2가 적용되므로 2034년을 별도로 추가 계산하였다. 오토사이클 기반의 e-LNG는 2045년부터 규제 비용이 발생하였고, 디젤사이클 기반의 e-LNG는 2050년부터 규제 비용이 발생하였다. 그 외 나머지 RFNBO 연료는 모두 2050년까지 규제 편익이 발생하는 것으로 검토되었다. 분석 대상 RFNBO 연료 중에서는 e-methanol, e- H_2 그리고 e- NH_3 순으로 FuelEU Maritime 규제대응 관점에서 가장 좋은 것으로 나타났다.

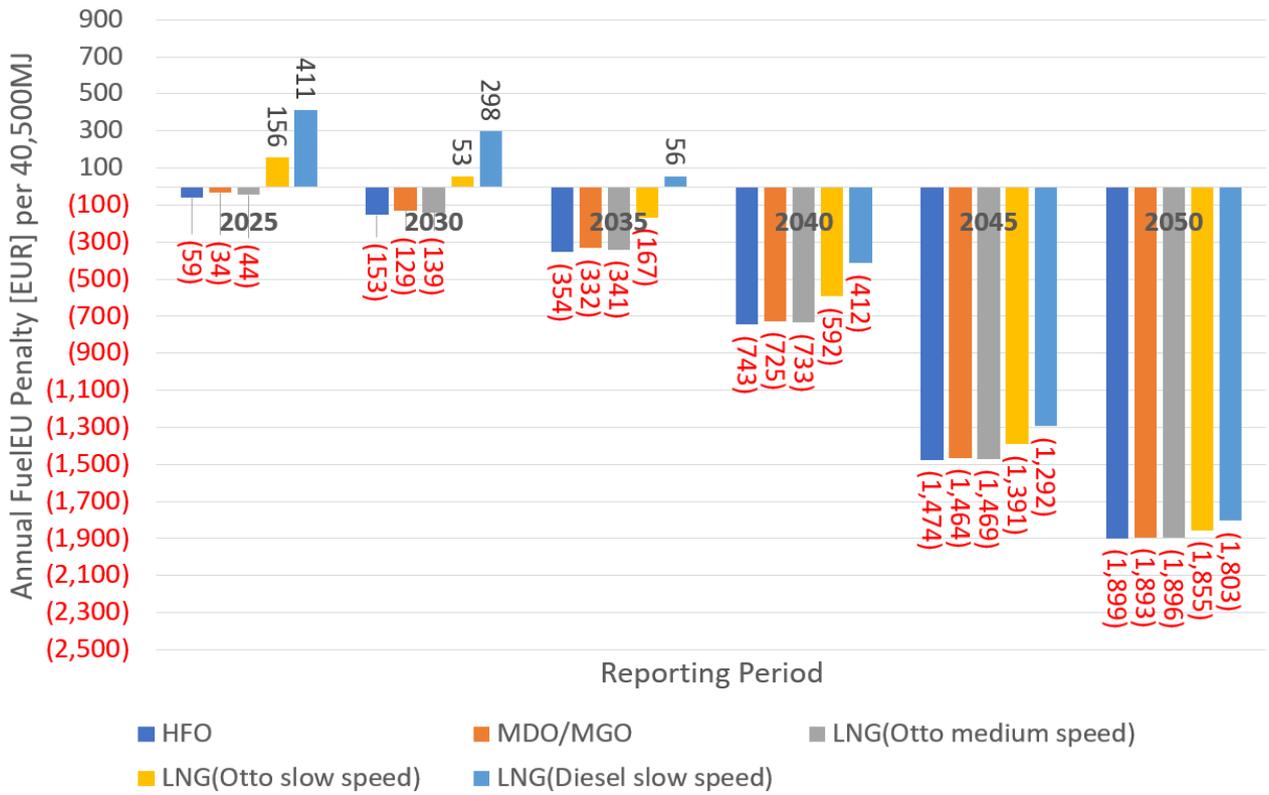


Fig. 2 FuelEU penalty of fossil fuels

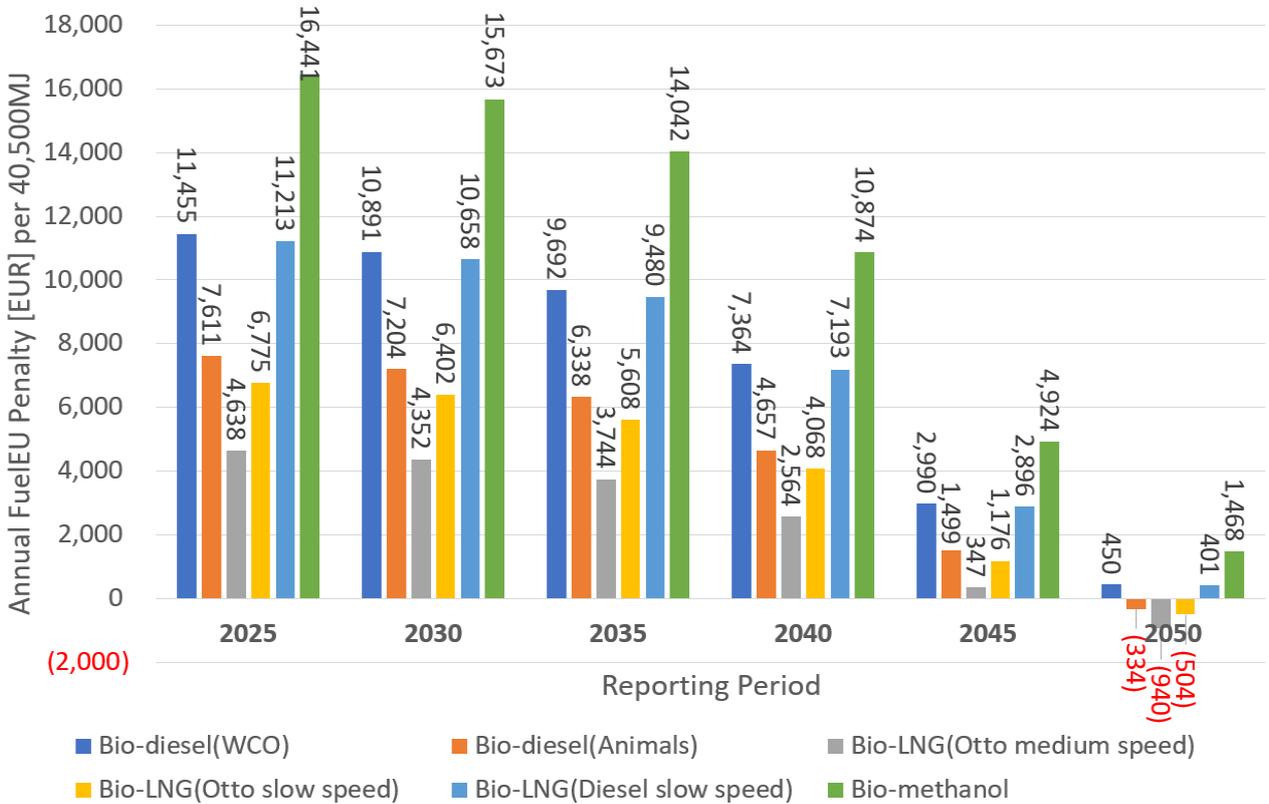


Fig. 3 FuelEU penalty of biofuels

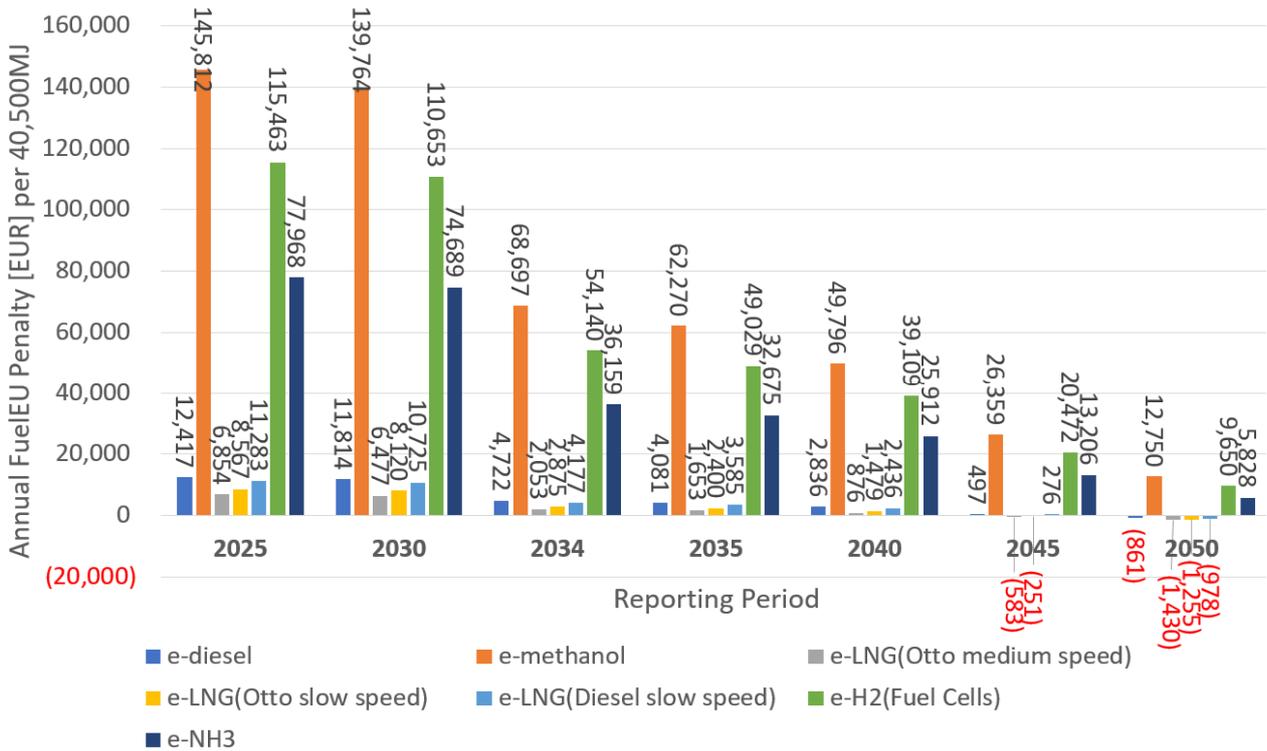


Fig. 4 FuelEU penalty of RFNBO fuels

3.2 연료별 최소 혼합비를 분석

FuelEU Maritime의 온실가스 집약도 제한치는 보고 기간에 따라 강화되며, 친환경 대체연료는 기존 화석연료 대비 가격이 상당히 비싸다. 따라서, 온실가스 집약도 제한치를 달성하기 위해 선박의 모든 연료사용량을 대체연료로 전환하는 것보다 제한치 수준에 따라 대체연료의 최소 요구비율만큼 사용하는 것이 하나의 규제대응 전략이 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 FuelEU Maritime의 온실가스 집약도 제한치 만족을 위해 필요한 친환경 대체연료의 최소 혼합비율을 검토해보았다.

앞서 연료별 규제 비용 및 편익 분석에서와 같이 연료별 상호 비교를 위하여 40,500MJ의 에너지량을 기준으로 혼합되는 연료의 혼합을 및 저위발열량을 적용하여 각 연료량을 도출하고 보고 기간별 온실가스 집약도 제한치를 만족하기 위한 최소한의 대체연료 혼합비율을 Table 4와 같이 도출하였다. 여기서, 0%는 화석연료만으로도 온실가스 집약도 제한치를 만족할 수 있다는 의미이며, 대시(-)는 대체연료를 100% 사용하여도 온실가스 집약도 제한치를 만족할 수 없다는 것을 의미한다.

바이오 연료는 폐식용유 기반 연료와 동물지방추출 기반 연료의 가격 및 공급망을 고려하여 2049년까지는 선택적으로 적용하고 2050년부터는 폐식용유 기반 연료로 전환하는 대응전략 수립이 가능할 것으로 판단된다.

LNG 오토사이클은 바이오 및 RFNBO 기반의 연료를 100% 적용하여도 높은 메탄 슬립에 대한 기본계수 값으로 2050년 온실가스 집약도 제한치를 만족할 수 없다. 따라서, 메탄 슬립 저감기술과 같은 추가적인 감축 기술의 적용이 요구된다.

Table 4 Minimum drop-in rate of alternative fuels in compliance with GHG intensity limit

Fossil fuels	Blended fuels	Drop-in rate of blended fuels					
		2025	2030	2035	2040	2045	2050
HFO	Bio-diesel (waste cooking oil)	3%	9%	18%	38%	75%	97%
	Bio-diesel (animals fats from rendering)	4%	9%	20%	41%	82%	-
	e-diesel	2%	4%	22%	46%	91%	-
LNG Otto (dual fuel medium speed)	Bio-LNG	3%	9%	22%	47%	93%	-
	e-LNG	2%	5%	30%	63%	-	-
LNG Otto (dual fuel slow speed)	Bio-LNG	0%	0%	10%	35%	82%	-
	e-LNG	0%	0%	14%	47%	-	-
LNG Diesel (dual fuel)	Bio-LNG	0%	0%	0%	22%	69%	96%
	e-LNG	0%	0%	0%	30%	92%	-
Methanol	Bio-methanol	14%	18%	26%	43%	75%	93%
	e-methanol	7%	9%	24%	39%	68%	85%
NH ₃	e-NH ₃	18%	20%	41%	53%	77%	90%

RFNBO 연료의 경우에는 2033년까지 온실가스 집약도 계산에 보상계수가 적용되고 2034년부터는 적용되지 않기 때문에 혼합비율이 2035년 시점부터 대폭 증가하는 것으로 검토되었다. 따라

서 2033년까지는 RFNBO 연료를 사용하여 보상계수에 따른 혜택을 받고 2034년부터는 바이오 및 RFNBO 연료의 투입 요구비용, 가격 및 공급망 등을 종합적으로 고려한 대응전략 수립이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 대응조치별 FuelEU Maritime 연관성

2장에서 살펴본 바와 같이 FuelEU Maritime의 온실가스 집약도 제한 규제와 관련한 사항에는 온실가스 집약도 계산 및 의무 준수 잔고 계산으로 구분할 수 있다. 온실가스 집약도는 식 (2) 및 (3)과 같이 분자 및 분모에 설정된 동일한 매개변수를 제외하면 배출계수만 남으므로 온실가스 집약도 계산 결과는 연료를 변경하지 않는 이상 연료별로 동일한 계산 결과가 도출된다. 즉, 연료 변경만이 온실가스 집약도에 영향을 미치는 요인이라고 할 수 있다. 반면에, 의무준수 잔고는 연료 변경에 따른 온실가스 집약도 변경뿐만 아니라 동일한 연료를 사용하였더라도 연료사용량에 따라 의무준수 잔고 계산 결과가 달라진다.

이와 같이, 대응조치의 특성에 따라 FuelEU Maritime 요구사항에 미치는 원인 및 결과가 다르며 이에 대한 식별은 다양한 상황별 최적의 전략 수립에 필요한 사항이라고 할 수 있다. 대응조치 및 FuelEU Maritime 요구사항의 특성을 고려한 연관성 검토 결과는 Table 5에 정리하였다.

Table 5 Relevance of compliance measures to FuelEU Maritime requirements

Compliance measures	Relevance
Renewable and low-carbon fuels	<ul style="list-style-type: none"> GHG intensity with low emission factor If RFNBO, reward factor by 2033 Compliance balance with low GHG intensity
Advanced engine technologies	<ul style="list-style-type: none"> GHG intensity with low methane slip Compliance balance with low GHG intensity
Energy saving measures and devices	<ul style="list-style-type: none"> Compliance balance with reduced energy consumption
Wind-assisted propulsion	<ul style="list-style-type: none"> GHG intensity with wind reward factor Compliance balance with low GHG intensity

4. 결론

본 연구에서는 해운 분야 탈탄소화 실현을 위한 규제의 중장기적 측면에서 개발 방향으로 수립되고 있는 연료의 생산부터 선박에서 사용까지의 온실가스 배출량(WtW, Well-to-Wake) 산정 방법론을 도입하고 이를 통해 저탄소 및 무탄소 대체연료 사용 촉진에 대한 기반이 되는 규제인 EU의 FuelEU Maritime 규제에 대하여 검토하고 경제성 분석 및 최적 대응방안을 검토하였다. 이

와 함께, FuelEU Maritime 규제에서 선박에서 사용한 해양 연료의 온실가스 집약도를 계산하기 위한 배출계수에 대한 보완 필요성 및 CO₂ 이외의 온실가스 배출량을 CO₂ 환산(CO₂eq) 배출량으로 정량화하기 위한 지구온난화지수와 같이 FuelEU Maritime 규제의 현재 규제적인 공백에 대해 검토하였다.

주요 연구 결과는 다음과 같다.

- 동일한 에너지사용량 조건에서 2025년부터 2050년까지 FuelEU Maritime 규제 준수를 위한 해양 연료별 비용 및 편익을 분석하였다.
- FuelEU Maritime 규제 준수를 위해 필요한 최소한의 대체 연료 혼합비율을 분석하였다.
- 온실가스 감축을 위한 대응조치별 특성에 따른 FuelEU Maritime 요구사항에 대한 미치는 원인 및 결과를 검토하였다.

이러한 연구의 결과는 해양 연료의 WtW 관점에서 규제대응 비용 및 최적 대응방안에 대한 기초 연구결과를 제시하고 있으며, 실질적인 대응전략 수립의 기반 정보로 활용될 가치가 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원에 의한 연구임('20016140').

References

Christodoulou, A. and Cullinane, K., 2022. Potential alternative fuel pathways for compliance with the 'FuelEU Maritime Initiative'. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112, pp.103492.

Council of the European Union, 2022. *Fit for 55*, URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> [Accessed 20 December 2023].

European Parliament and Council, 2015. *Regulation (EU) 2015/757 of the European parliament and of the council of 29 April 2015 on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC*.

European Parliament and Council, 2018. *Directive (EU) 2018/2001 of the European parliament and of the council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*.

European Parliament and Council, 2023. *Regulation (EU) 2023/1805 of the European parliament and of the council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon*

- n fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC.*
- European Commission, 2020. *Commission delegated regulation (EU) 2020/1044 of 8 May 2020 supplementing regulation (EU) 2018/1999 of the European parliament and of the council with regard to values for global warming potentials and the inventory guidelines and with regard to the Union inventory system and repealing Commission Delegated Regulation (EU) No 666/2014.*
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. *2014: Synthesis report. Contribution of working group I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Geneva: IPCC.
- International Maritime Organization (IMO), 2020. *Fourth IMO GHG Study.* London: IMO.
- International Maritime Organization (IMO), 2023a. *Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted*, URL: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted.aspx> [Accessed 20 December 2023].
- International Maritime Organization (IMO), 2023b. *MEPC.1/Circ.905, Interim Guidance on the use of biofuels under regulations 26, 27 and 28 of MARPOL Annex VI (DCS and CII).*
- International Maritime Organization (IMO), 2022. *ISWG-GHG 1/2/3, Updated draft Lifecycle GHG and Carbon Intensity Guidelines for marine fuels.*
- Kim, J.H., 2022. EU's new GHG regulations for international shipping – latest trends and impacts of EU ETS and FuelEU Maritime. *SNACKZINE*, 59(6), pp.16–19.
- Kramel, D., Muri, H., Kim, Y., Lonka, R., Nielsen, J.B., Ringvold, A.L., Bouman, E.A., Steen, S. and Stromman, A.H., 2021. Global shipping emissions from a well-to-wake perspective: The MariTEAM model. *Environmental Science & Technology*, 55, pp.15040–15050.
- Lindstad, E., Lagemann, B., Riialand, A., Gamlem, G.M. and Valland, A., 2021. Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of e-fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101, pp. 103075.
- Solakivi, T., Paimander, A. and Ojala, L., 2022. Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 113, pp.103500.

