

온실가스 감축조치 예외 선박의 EEXI적용에 관한 연구

임효근¹ · 한기영² · 이지웅^{3,†}

¹한국해양수산연수원 교육기획실 교수

²한국해양수산연수원 오션폴리텍팀 교수

³한국해양대학교 해사IT공학부 교수

A Study on the Application of EEXI to Ships Exempted from GHG Reduction Measures

HyoGeun Lim¹, KiYoung Han², and JiWoong Lee^{3,†}

¹Professor, Education and Planning Division, Korea Institute of Marine and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

²Professor, Oceanpolytech team, Korea Institute of Marine and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

³Professor, Department of Maritime IT Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

기후변화에 대응하기 위하여 국제해사기구(IMO)는 원양수역을 항해하는 선박에 대해 온실가스 및 이산화탄소 배출을 2030년부터 40% 저감, 2050년부터 감축률 70%를 이행하도록 규제하고 있다. 특히 초기 대응 전략 중에서도 기술적 조치와 운항적 조치를 통해 규제를 시행하고 있으며 기술적인 조치로써 신조선에 대한 선박에너지 효율 설계지수(EEDI)를 제정하고 현존선에 대하여 선박에너지 효율지수(EEXI)를 적용하였다. 그러나 이 규제는 상선으로 분류되는 11개 선종 중 이외에 국내 연안선이나 어선, 관공선, 실습선 등은 규제가 적용되지 않는다. 이에 본 연구는 에너지효율지수 적용 제외의 선박인 실습선을 대상으로 11개의 규제 대상 선종 중 연구 대상 선박과 유사한 선종을 선정하고 선박에너지효율지수와 탄소 집약도 지수를 산정하였다. 그리고 이를 감축하기 위한 방안을 모색하고자 이 연구를 진행하게 되었다. 선박의 용도와 선형의 기준인 SPS Code와 방형계수를 통해 유사 선종을 선정하고 연구 대상 선박과 비교하여 EEXI를 도출하였다. Required EEXI를 만족하기 위해 탄소 포집 및 저장 시스템과 같은 이산화탄소 저감 기술 이용 및 연료유의 종류 변화가 적용될 수 있다. 또한, 선박 추진 출력을 제한하거나 선속을 감속하여 선박의 출력을 MCR(Maximum Continuous Rate) 대비 35~53%로 감축하면 Required EEXI를 만족할 수 있다.

Abstract – It is regulated to reduce greenhouse gas and carbon dioxide emissions by 40% in 2030 and 50-70% in 2050 through the early, mid-term and long-term strategies around the International Maritime Organization (IMO). In particular, the initial strategy was enacted as a technical measure to enforce regulations through technical measures and operating measures, and the Ship Energy Efficiency Design Index (EEDI) for the new ship was enacted and the ship energy efficiency index (EEXI) was applied to the existing line. However, this regulation is not included in the regulation because domestic coastal ships, government lines, and practice ships are not included in the regulation, and regulatory applications are not included in the regulation. Vague. Therefore, this study selected a ship that was similar to the ships subject to the 11 ships to confirm whether the ship energy efficiency index and the carbon intensive index were subject to penalty, and to seek ways to reduce them. In the classification criteria, the classification of SPS Code was selected by the use of SPS Code and the classification coefficient of classification by the shape of the ship. As a way to reduce EEXI, it can be reduced by using carbon dioxide reduction technology or using the type of fuel oil used, and reduces the program that restricts the output of ship propulsion, or maintains the output of the ship to 35 ~ 53% compared to MCR(Maximum Continuous Rate). If you can satisfy the required EEXI.

Keywords: Energy efficiency existing ship index(선박에너지효율지수), Carbon reduction short-term strategy(탄소감축초기전략), Government ship(관공선), Training ship(실습선), CO₂ reduction plan(이산화탄소 감축방안)

[†]Corresponding author: woongsengine@kmou.ac.kr

1. 서 론

문명이 발달함과 동시에 화석연료 기반의 동력원이 산업 혁명시대를 거쳐 인류의 발전과 함께 폭발적으로 사용되고 있다. 화석연료를 통해서 배출되는 가스의 영향으로 지구는 자생능력을 잃으면서 곳곳에서 지구 온난화가 발생했고 이로 인해 해수면이 계속적으로 상승하고 이상 기후가 관측되었다. 지구 온난화가 가속되면서 각각의 환경관련 단체에서는 지구 온난화의 원인을 분석했는데 특히 2018년 국제에너지기구의 에너지와 이산화탄소 현황 보고서에서 지구 온도 상승에 대한 화석연료 사용의 기여도를 평가한 결과 지구온도 1도가 오를 때 0.3도 이상 책임이 있다는 것을 확인하였으며 화석연료에 의한 배출가스가 지구 온난화에 상당히 기인한다는 것을 말하였다. 산업적 발전도 중요하지만 환경을 보호함으로써 지구의 자생능력을 향상시키는데 도움을 줄 수 있는 저탄소 경제 체제가 각광을 받고 있으며 그 이상으로 무(無)탄소 경제 체제도 상당히 주목하기 시작하였다.

국제적으로도 저탄소 경제 체제가 발달함에 따라 각국에서 온실가스 감축에 대한 규제가 시행되거나 예정에 있다. 미국환경보호국에서는 IMO 규제(IMO[2021]; MEPC.388(76) GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY REDUCTION FACTORS RELATIVE TO REFERENCE LINES)와 별개로 항만 내 오염물질 배출 운송수단의 규제정책을 펼치고 친환경 항만 정책과 수소 추진 선박 개발 프로젝트를 진행하고 있으며 독일은 재생에너지법 개정을 시행하며 바이오 연료 개발 주도 정책을 통해 선박의 에너지원 전환 정책을 채택하고 있다. 영국은 MARITIME 2050 정책을 발표하여 중장기적으로 선박에서 배출되는 대기 오염 가스를 원천적으로 차단하는 제로 배출 선박으로의 전환 방안을 모색하고 있다.(Martin and Vanesa[2020]) 가까운 중국에서는 선박 배출 대기오염 분야에 대한 국제 협력프로그램(GSMMP: Global

Studies and Monitoring of Marine Pollution)에 적극 참여하고 있고 일본은 수소 연료추진 선박의 안전 가이드라인을 조사하고 검토하는 사업을 추진하면서 국제 기준 정책을 수립을 하고 있다 (Joung *et al.*[2018]).

국내에서는 2021년부터 공공 부문 선박의 상태 평가를 진행하고 이를 친환경 선박으로 전환하고 있다. Table 1 「해운 분야 탄소중립 로드맵」에 따르면 온실가스 배출 시나리오 분석 결과 등을 토대로 국가 차원의 감축 목표와 감축 이행계획, R&D 로드맵 등을 통해(Kim[2022]) 국제 해운감축 목표 상향에 대비하고 있다. 이 과정에서 온실가스 배출에 대한 분석을 위해서 규제 적용 예외 선박에 대한 분석도 같이 진행되어 그에 따른 감축이 이뤄져야 상당한 국제 해운의 목표를 이행할 수 있을 것으로 보인다.

2. 연구 배경 및 방법

2.1 연구 배경

온실가스 및 이산화탄소 배출규제 관련 법안이 제정 및 시행되고 MARPOL 부속서 6장에 따라 2020년부터 선박의 선종 및 크기 별 기준 대비 20%의 이산화탄소를 저감 하고 2025년부터 적용되는 3단계는 기준대비 30%의 이산화탄소를 저감하도록 조치하고 있다. 또한 2022년에 채택된 온실가스 감축을 위한 로드맵에 따라 IMO는 대상 선박에 대하여 이산화탄소 배출을 2030년부터는 40% 저감하고, 2050년에 감축률 70%를 달성하도록 요구하고 있다(Park *et al.*[2020]) 해운분야에서 국제 해사 기구(IMO)를 중심으로 온실가스 감축을 위해서 Table 2와 같이 초기, 중기, 장기 전략을 수립하고 이행하도록 규제하고 있다.

특히 초기 전략 중에서도 기술적 조치와 운항적 조치를 통하여 온실가스를 감축시키기 위한 방안을 모색하도록 하였다. 기술적인 조치로서 2013년 1월 1일부터 선박에너지 효율 설계지수(EEDI)를

Table 1. Road map for carbon neutrality in shipping

No.	Reduction Measure
1	Low carbon (LNG, hybrid, mixed fuel) ships
2	Carbon-free (electricity, hydrogen, ammonia) ships
3	Application of energy efficiency technology and improvement of flight efficiency
4	Supply of low-carbon and non-carbon government ships

(source: Ministry of Oceans and Fisheries., Carbon neutral roadmap 2050, 2020)

Table 2. Greenhouse Gas Reduction Strategy in IMO

	Reduction Measure
Short term	1. Improvement of existing energy efficiency system (based on EEDI, SEEMP) 2. Development of technical/operational energy efficiency measures 3. Establishment of existing ship improvement program 4. Measures and Actions of Methane & VOCs 5. Development of guide line for CII
Mid-term	1. Updating programs and national actions to secure low- and carbon-free fuels 2. Ship's Operational Energy Efficiency Measures
Long term	1. Development and supply of carbon-free or non-fossil fuels 2. Encouraging adoption of emission reduction mechanisms

(source: IMO., 2009, Second IMO Green House Gas study)

Table 3. Contents of Regulation

Contents of Regulation	
EEDI	From Jan.1, 2013, when building 11 types of ships with a gross tonnage of 400 tons or more, the energy design efficiency index must be calculated and designed and built in compliance with the allowable values.
EEXI	From Jan. 1, 2023, a system to reduce CO ₂ emissions by calculating the energy efficiency index for ships currently in operation.
CII	As a regulation applied to ships engaged in international navigation with a G/T5,000 tons or more, ship efficiency is calculated based on the actual annual fuel consumption and mileage of the ship, and A to E grades are obtained according to the degree of achievement compared to the allowable value required for the ship during the period It is a regulation that grants up to.

(source: IMO., 2009, Second IMO Green House Gas study)

제정하고 2023년 1월 1일부터는 선박에너지 효율지수(EEXI)를 적용하여 11개의 선종(산적화물선, 가스운반선, 유조선, 컨테이너선, 일반화물선, 냉동화물운반선 및 검용선, 여객선, 로로 화물선(차량 운반선), 로로 여객선, 로로 화물선(로로 화물 수송 유니트))의 신조선과 현존선에 대하여 규제를 적용하였다. EEDI는 신조선에 대한 선박에너지효율설계지수 이며 EEXI는 현재 운항 중인 현존선에 대한 선박에너지효율지수를 나타내고 있다.

그러나 11개 선종 이외의 국내 연안선이나 국가에서 운영하는 관공선, 해기 교육기관의 실습선 등은 규제 대상에 포함되지 않기 때문에 현재로서는 규제가 적용되지 않는다. 하지만 온실가스는 선박으로부터 배출되며, 규제 적용 예외 선박일지라도 온실가스를 감축해야할 당위성은 충분하며 이러한 선박에 대한 적용 기준도 모호하다. 11개의 선종 중 연구 대상선박과 유사한 선종을 선정하여 선박에너지 효율 지수와 탄소 집약도 지수가 페널티 대상인지 확인하고 이를 감축하기 위한 방안을 모색하고 자 이 연구를 진행하게 되었다.

2.2 연구 방법

온실가스로 인한 지구 온난화 문제가 야기되고 Third IMO Greenhouse Gas study 2014에서는 2007년부터 2012년까지 산업별 이산화탄소 배출량을 산정하였으며, Table 4과 같이 해운분야에서 배출량은 전 세계 대비 평균 2.6%를 차지하였다. 이를 감축하기 위한 기술 동향과 현황 분석에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있으며 현재 운항중인 상선에 대한 에너지효율 운항 지수 연구가 이뤄졌으며(Rho and Choi[2011]) 또한 선박기인 이산화탄소 배출 규제 동향 및 고찰을 통한 현황 파악 연구(Jung[2011])를 하였다.

Rho and Choi[2011]의 연구에서는 현재 운항선에 대한(EEOI: Energy Efficiency Operational Indicator)에 대한 기존의 개념을 제

시하고 현재 운항중인 상선의 데이터를 이용하여 EEOI를 분석하였다. 그리고 새로운 개념의 EEOI로서 다양한 내외부 환경에서 다양한 화물을 싣고 운항하는 선박에서 이산화탄소 발생량을 구하는 화물당 연료소모량을 통한 기존의 산정식 대신 기관 부하(kw)당 연료소모량을 통해 이산화탄소 배출량을 구하는 것을 제안하고 이에 따라 운항선에 실제 적용하여 선박자체의 에너지효율을 극대화 시키고 이산화탄소 배출량을 줄일 수 있는 방안을 제시하였다. Kim[2023]의 연구에서는 한국의 디젤 선박의 연료사용량과 주요 온실가스 배출량을 선종별, 총톤수별로 산정하여 비교 하였으며 이를 통해 온실가스 배출 규제 대상에서 제외된 선박이 선종별로 온실가스 배출에 미치는 영향을 정량화 될 수 있도록 하였으며 선박의 종류와 크기에 따라 온실가스 배출량에 차이가 있기 때문에 향후 온실가스 배출 규제 대상의 세분화 및 확대에 대한 논의가 필요하다고 하였다.

Rho and Choi[2011] 연구에서는 규제가 적용되는 상선을 대상으로 이뤄지고 있었으며 실제 기관의 부하를 이용하여 선박의 환경에 맞춘 산정식을 이용하여 새로운 개념의 선박운항에너지효율 지수를 제안했으나 부하에 따라 영향이 높은 주기관을 중심으로 연구를 시행하였으며 Kim[2023]은 선박에서 배출되는 온실가스 배출량을 선종과 선박의 톤수에 의해 분류하여 데이터를 분석하였다. 본 연구에서는 온실가스 감축을 위한 규제적용 예외 선박 중에서 현재 운항중인 관공선과 실습선 등을 대상으로 하였으며 이산화탄소 배출량과 관련된 규제인 선박에너지효율지수에 관한 연구를 시행하였다. 연구 방법으로서 연구대상선박과 비교를 하기 위해 기존의 선박에너지효율 지수 규제 대상인 11개의 선종 중에서 연구 대상 선박 6척과 유사한 선종을 선정하였다. 연구 대상 선박의 치수를 이용하여 선박의 방형계수 산정한 뒤 11개 선종의 평균적인 방형계수를 비교하여 유사한 범위를 가진 선종을 채택하였으며 이 선

Table 4. Carbon dioxide emission calculation result

Year	Global CO ₂ (10 ⁶ ton)	All Ship (10 ⁶ ton)	Global ship (10 ⁶ ton)	All ship Share (%)	Global ship Share (%)
2007	31,409	1,100	882	3.5	2.8
2008	32,204	1,135	921	3.5	2.9
2009	32,047	978	855	3.1	2.7
2010	33,612	915	771	2.7	2.3
2011	34,723	1,022	850	2.9	2.4
2012	35,640	938	796	2.6	2.2

(source: Third IMO Greenhouse Gas study 2014)

중중에서도 선박의 분류기준 중 하나인 선박의 목적이 유사한 선종을 채택하였다. 비교대상선종으로 채택한 선종의 EEXI reference line과 감축율을 적용한 Required EEXI Line과 6척의 연구 대상선의 선박에너지 효율 지수를 비교하였다. 비교를 통해서 6척의 연구 대상선이 현재 규제 적용기준을 통해 페널티 대상인지 아닌지 확인하였고 현재 규제 적용을 하게 될 경우 Required EEXI를 만족하기 위한 방안을 모색하였다.

3. 현존선 온실가스 감축을 위한 기술적 조치

본 연구는 11개의 선종에 적용되었던 기존의 선박에너지 효율 지수를 산출하는 식을 사용하여(IMO[2009]:Second IMO Green House Gas study) 관공선과 실습선으로 운항중인 선박의 에너지 효율 지수를 산출하고 11개의 선종 중 연구 대상선박과 유사한 형태로서 기준이 되는 선종을 제시하고 비교를 시행하며 에너지 효율 지수를 만족시킬 수 있는 방안을 모색하였다.

3.1 선박에너지효율지수 계산

에너지효율지수의 식은 에너지효율설계지수(EEDI)와 식은 동일하며 아래 식과 같이 주기관, 보조기관, 축발전기/모터에서 발생하는 CO₂ 발생량을 탄소저감 기술을 통해 감소하는 CO₂ 발생량을 계산한다.

주기관과 보조기관의 CO₂ 발생량

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j\right) \left(\prod_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}\right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{(f_i \cdot \text{운송능력} \cdot V_{ref} \cdot f_w)} \quad (1)$$

Eq. (1)는 주기관과 보조기관에서 발생하는 이산화탄소발생량을 계산하는 식으로 P_{ME(i)}는 주기관의 출력으로 제한된 출력(MCR_{lim})의 83% 또는 원래 설치된 출력(MCR)의 75% 중 더 낮은 값을 사용하고 P_{AE}는 기준속력으로 항해하는 조건에서의 선박의 추진 및 선내 거주에 필요한 전력을 포함하여 해상에서의 상용최대부하에 전원을 공급하기 위해 필요한 보조기관의 출력을 말한다. C_{FME(i)}와 C_{FAE}는 탄소변환계수로서 연료유에 포함된 탄소성분을 표시하고 있으며 연료별로 각각 다르다. SFC_{ME}와 SFC_{AE}는 주기관과 보조기관의 연료소모율이며 제한 해제 가능한 축/기관 출력 제한이 있는 경우 NO_x 기술 코드에 따라 승인된 주기관 NO_x 기술 파일에 포함되어 있는 시험 보고서 상의 SFC(Specific Fuel Consumption:연료소모율)를 사용하여 주기관과 보조기관 출력에 해당하는 SFC를 사용하고 있으며, NO_x 기술 파일에 포함된 시험 보고서가 없고 제조자가 특정하거나 또는 검증자가 확인하지 않은 기관의 경우, SFC를 근사화 할 수 있는데 SFC_{ME,app}=190[g/kwh], SFC_{AE,app}=215[g/kwh]이다.

이 때 분자 부분에 해당하는 내용이 주기관과 보조기관에서 발생하는 이산화탄소 발생량이며 이를 운송능력과 선속(V_{ref}), 보정계수인 f_j, f_w의 값으로 나눈다. 이때 f_j는 선박 세부 설계요소에 대한

보정계수이며 f_w는 파고, 파진동수 및 풍속을 대표하는 해상상태에서의 선박 속력 감소를 나타내는 무 차원 계수이며, 에너지효율 설계지수의 검사 및 증서발급에 관한 지침서에 정의된 대로 승인된 선속-출력 곡선에서 선속(V_{ref})을 구해야 한다. EEDI 요구 사항의 범위에 해당하지 않는 선박의 경우 현존선 에너지효율지수의 검사 및 증서 발급에 대한 지침서에 정의된 선속-출력 곡선에서 선박 속력 선속(V_{ref})을 구하며 선박 중 수조 시험에 의해 보정된 시운전 결과가 있는 경우 선속(V_{ref})은 시운전 결과 보고서로부터 얻을 수 있다. 만약 시운전 결과가 없을 경우 다음 정의에 따라 선박 속력 및 기관출력의 통계적 평균에서 얻을 수 있는 선속(V_{ref})으로 근사값을 사용할 수 있다.

(2) 축발전기 또는 축모터의 CO₂ 발생량

$$\frac{\left[\prod_{j=1}^M f_j \cdot \prod_{i=1}^{nME} P_{PTI(i)} - \prod_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)}\right] C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{(f_i \cdot \text{운송능력} \cdot V_{ref} \cdot f_w)} \quad (2)$$

Eq. (2)는 전기추진용 선박의 추진용 전동기(P_{PTI})에서 폐열회수 장치(P_{AEff})로부터 생산된 전력을 차감한 뒤 발생하는 이산화탄소 발생량을 표현한다. 이산화탄소 저감 장치를 작동하는데 발생하는 이산화탄소량을 반영한다.

(3) 탄소 저감기술을 통해 저감되는 CO₂ 발생량

$$\frac{\left(\prod_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right)}{(f_i \cdot \text{운송능력} \cdot V_{ref} \cdot f_w)} \quad (3)$$

Eq. (3)은 에너지저감장치로 인하여 저감되는 이산화탄소의 발생량을 계산하는 식이다. 즉 Eq. (1)과 Eq. (2)의 합을 통해 이산화탄소 발생량을 Eq. (3)의 탄소저감기술을 통해 저감되는 CO₂ 발생량 차감하여 선박에너지효율지수 수치를 계산할 수 있다.

3.2 선박에너지효율지수 규제 적용 예외 대상 선박

3.2.1 선박에너지효율지수 적용 예외 선박

2023년 1월 1일부터 선박에너지효율지수 규제에 해당하는 선종은 11개의 선종이며 국제 항해에 종사하는 선박으로 총톤수 400톤 이상의 상선과 대형여객선이 대상이 된다. 국내운항 선박과 관공선, 해양항만청, 국립수산과학원, 국립해양조사원, 해양환경관리공단 등에서 운영하는 관공선 또는 해양대학교나 한국해양수산연수원과 같은 해기교육기관에서 운영하는 실습선은 선박에너지 효율지수 규제 대상으로 선정이 되지 않았기 때문에 어떤 선종과 비교하여 기준을 산정할지 어떤 선종과 비교하여 선박에너지 효율 지수를 계산할지 기준이 없는 상태이다. 관공선이나 실습선의 경우는 이윤을 위하여 운항하는 선박이 아닌 공공의 업무 및 실습생 교육을 위해 운항하는 형태이기 때문에(Kim *et al.*[2012]) 상선과의 비교는 무의미하나 현재 규제 대상으로 지정된 11개의 선종 중에서 유사한 형태의 선종을 정하여 그에 따른 비교를 통해 선박에너지 효율지수의 높고 낮음을 파악하며 지수 감축을 위한 방안에는 어떤 것이

Table 5. Specification of model ships

Type of ship	실습선				지도선	조사선
선박	A	B	C	D	E	F
G/T[ton]	5255	9196	6686	4701	970	1458
DWT[ton]	1828	3671	2636	1806	839.1	758
M/E출력[kw]	3330	4963.5	4545	3345	1642.5	895.2
G/E 출력[kw]	472	580.9	553	473	359.5	309.7
SFC(M/E)[g/kwh]	189.28	190	190	190	190	190
SFC(G/E)[g/kwh]	218.3	215	215	215	125	215
선속[knot]	14.10	18.11	15.05	15.96	13.41	13.44
EEXI(GT) [g/t-mile]	27.21	20.20	31.30	31.50	95.99	38.72
EEXI(DWT) [g/t-mile]	89.64	50.62	78.04	82.00	109.06	73.21

있는지 확인해보았다.

Table 5는 선박에너지효율지수 산정식을 위한 대상선의 선박용량, 주기관 및 보조기관의 출력, 연료소모율, 선속등을 정리하였으며 이를 토대로 산정식에 대입하여 선박에너지효율지수를 계산하였다.

3.2.2 선박에너지효율지수 적용 예외 선박의 기준 설정

먼저 선박에너지효율지수 예외적용 선박들과 유사한 선종을 선정하기 위해 선박의 분류 기준을 확인하였다. 선박의 종류를 나누는 기준은 선체구조의 재료, 추진동력, 추진기의 종류, 기관실의 위치, 선박의 모양, 법규에 의한 분류, 항해구역, 용도에 의한 분류이다.

이러한 기준 중에서 선박에너지 효율지수 적용 예외 선박 중 국가에서 운영하는 관공선이나 해기 교육기관의 실습선, 해경함정이나 군함 등은 교육을 위한 또는 국가 경비, 어업 지도 등과 같이 특수 목적을 가지고 운항을 하는 선박이며 분류 기준에서 용도에 의한 분류로 볼 수 있다. 특히 공무(公務)를 이행하고 있는 선박이나 특수한 목적을 가지고 운항하는 선박에 대해서 IMO code 중 ‘SPS CODE’가 적용된다(IMO[2008], Code of Safety for Special Purpose Ships, 2008). SPS CODE는 국제총톤수 500톤 이상으로 승무원 이외의 기타의 자(Special personnel)가 12인 초과하여 승선하는 선박에 적용된다. 뿐만 아니라 선박의 모양을 나눌 수 있는 방법은 선박의 각종 치수를 통해서 분류를 할 수 있으나 그 중에서 방형계수를 이용하여 분류하여 기준 선종을 정할 수 있다. 방형계수(Block Coefficient)는 선박의 각 치수들이 시험적으로 선정된 뒤 단면과 수선의 형상을 얻는데 실질적인 도움이 되는 형상 계수(Coefficients of Form) 중 하나이다. 방형계수(Cb)는 물속에 잠긴 선체의 비만도를

나타내며 선박의 형배수용적과 선체를 감싸고 있는 직육면체의 용적과의 비이다.

$$\text{방형계수} = \frac{\text{배수용적}(\Delta)}{\text{수선간장(LBP)} \times \text{형폭(B)} \times \text{형흘수(T)}}$$

일반적으로 선종별 방형계수의 대략적인 범위는 벌크선이나 탱커선의 경우 0.8~0.85, 일반화물선은 0.55~0.75, 컨테이너선은 0.5~0.71, 여객선은 0.4~0.7 이며, 연구대상선박의 방형계수는 Table 6와 같이 도출되며 A-E의 실습선과 지도선은 일반화물선, 컨테이너선, 여객선의 방형계수 범위에 해당하며 F는 여객선에 해당이 된다.

SPS Code에 적용되는 특수 목적선 중에서 총톤수 500톤 이상의 실습선 4척과 어업지도선 1척, 수산과학조사선 1척을 연구 대상으로 설정하여 선박에너지 효율지수를 계산하였으며 각각의 선박의 대한 정보와 선박에너지 효율지수는 Table 5와 같다. 선박에너지 효율지수 산출시 모든 연료유의 유종은 Light Fuel Oil의 사용 한 것으로 가정했으며 연료소모율이 명시되지 않은 선박에 대해서는 정의된 Specific Fuel Consumption of M/E for Applicable test(SFC_{ME, app}), Specific Fuel Consumption of G/E for Applicable test(SFC_{GE, app}) 근사값을 이용하여 선박에너지효율지수를 산정하였다. 또한 선박의 목적에 의한 분류를 통해서 SPS code를 통해서 선종을 구분하고 추가적으로 선박의 모양인 선박의 방형계수를 통해서 유사 선종을 분류해보았다. 연구 대상 선박으로 실습선 4척과 어업지도선 1척, 수산과학조사선 1척의 방형계수를 계산하였다.

결과적으로 선박의 이용 목적에 의한 분류 기준인 SPS Code와 선박의 모양을 구분하는 방형계수의 평균적인 범위로 볼 때 연구 대상선을 선박에너지효율지수 규제에 해당하는 11개의 선종 중에

Table 6. Block coefficient of model ships

Type of ship	실습선				지도선	조사선
선박	A	B	C	D	E	F
배수량(ton)	5184.7	9122.2	6434.6	4626	2005.5	1860.8
수선간장(m)	95.0	120.0	104.0	94.0	65.4	63.0
형폭(m)	16.0	19.4	17.8	15.6	11.0	13.5
형흘수 (m)	5.65	6.40	5.90	5.60	4.60	4.60
방형계수	0.5838	0.5973	0.5876	0.5841	0.6010	0.4700

서 ‘여객선’에 해당되는 것은 ‘로로여객선’과 ‘크루즈 여객선’이 있으며 이를 기준으로 선박에너지효율지수를 비교할 수 있다.

3.2.3 연구대상선의 선박에너지 효율지수 비교

기준 선종으로 지정된 로로여객선과 크루즈 여객선 중 크루즈 여객선은 비전통 추진방식으로 연구 대상선과 비교가 불가하다. 따라서, 로로 여객선을 기준으로 선박에너지효율지수가 높고 낮음을 확인하고 감축하기 위한 방안을 연구하였다.

(1) 로로 여객선의 선박에너지 효율지수

MEPC 76차 회의에서 제시된 「Guideline on the Method of Calculation of the attained EEXI」에 따르면 각 선박의 종류와 무게를 함수로 구하는 평균 지수를 산정한 EEDI reference Line를 구하고 Reference Line 대비 5% 감축율을 반영한 Required EEXI 값을 산출했다. EEDI Reference Line은 운항 데이터의 회귀분석을 바탕으로 11개의 선종 중 로로여객선에 대한 Reference Line의 산출 식을 제시하였다.

$$902.59 \times DWT^{-0.381} \quad (DWT \leq 10,000) \quad (1)$$

$$902.59 \times 10,000^{-0.381} \quad (DWT > 10,000) \quad (2)$$

(2) 로로 여객선과 연구 대상선박의 비교

Table 7은 연구 대상 선박의 Attained EEXI를 로로여객선을 기

준으로 산출한 Required EEXI와 비교한 것이다. 로로여객선의 Reference line과 감축율 5%를 적용한 Required EEXI line과 연구 대상선박의 각각의 Attained EEXI를 하나의 그래프에 표현한 것이 Fig. 1이다. Table 7의 내용과 같이 Required EEXI를 만족하기 위해 A, B, C, D, E호는 각각 40.62, 13.03, 35.40, 32.75, 43.11의 ton mile 당 g-CO₂의 감축이 필요하다.

조사선 F호는 Attained EEXI를 만족하나 감축율 5%를 적용한 Required EEXI를 만족하기 위하여 약 4.65[g-CO₂/ton·Mile]의 감축이 필요하다. 또한 Fig. 1과 같이 그래프 상으로도 RORO 여객선의 Reference Line과 5%의 감축율을 반영한 Required EEXI 그래프를 결과값들이 벗어나있음을 알 수 있다.

4. 선박에너지효율지수 기준 충족 방안

위의 연구 대상 선박을 바탕으로 로로여객선 선종을 기준으로 비교했을 때 감축율 5%를 적용하게 된다면 연구 대상선 선박에너지 효율지수 기준을 만족할 수 없다. 2023년 현재 선박의 온실가스 감축이 시행되고 있으며 단계적으로 감축율 목표를 달성하기 위해서 규제가 강화되고 있다. 하지만 이는 국제 운항선박에 적용되는 반쪽짜리 규제이며 국내선과 적용예외 선박도 온실가스 감축의 도덕적 의무를 가져야 한다.

도덕적 의무를 넘어 법적인 의무를 지우기 위해 적용예외 선박에 대하여 온실가스 감축을 위한 규제적용 방안을 미리 연구하는 것이 때문에 선제적으로 에너지효율지수 기준에 충족할 수 있는 방안에 대해서 모색해야 한다. 주기관이나 보조기관의 이산화탄소의 발생량을 줄이거나 또는 이산화탄소 저감 기술을 이용하는 방법이 있으며 선박의 운송 능력에서는 각종 보정 계수의 값을 증가시키는 방안도 모색할 수 있다.

Table 7. Compared with RoRo passenger ship and sample ship

선박	Required EEXI	Attained EEXI	Required Reduction
A	49.02	89.64	40.62
B	37.59	50.62	13.03
C	42.64	78.04	35.40
D	49.25	82.00	32.75
E	65.95	109.06	43.11
F	68.56	73.21	4.65

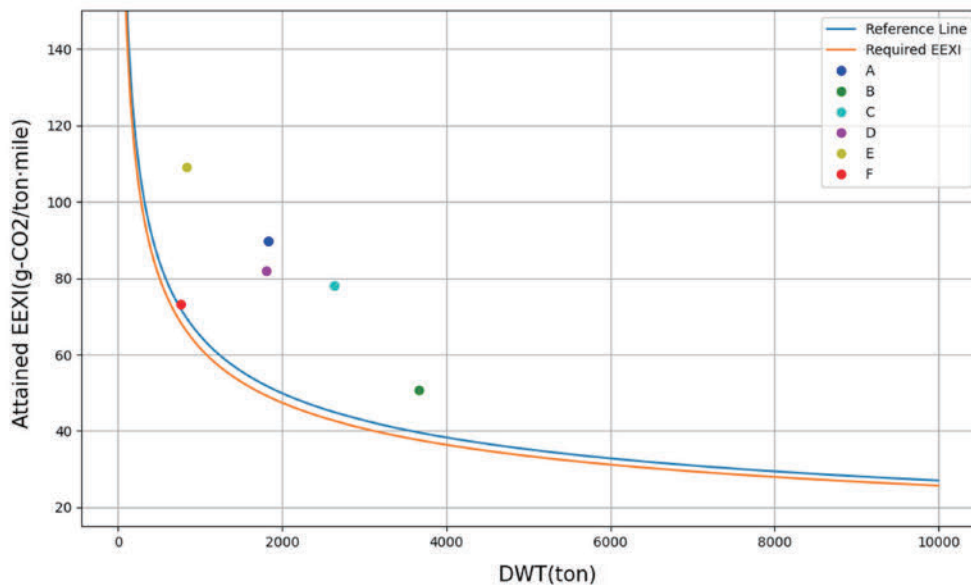


Fig. 1. Compared with RoRo passenger ship and sample ship.

4.1 선박 추진 출력의 제한

선박의 추진 출력 제한은 현재 운항을 하고 있는 현존선을 대상으로 행할 수 있는 가장 좋은 방안 중 하나이며 IMO에서 제시하는 축 출력 제한프로그램은 SHaPoLi와 Engine Power Limitation 이다. 먼저 앞서서 축 출력에 대한 의미를 확인해 보면 축 출력은 기관에서 프로펠러축으로 전달되는 기계적 출력을 의미하며 여러 기관의 경우 기관출력은 기관에서 프로펠러축으로 전달되는 출력의 합을 의미한다(Lee et al.[2015]).

축 출력 제한 시스템에는 SHaPoLi와 EPL 장치가 있는데 SHaPoLi는 선박의 프로펠러에 전달되는 토크 및 회전 속도를 측정하기 위한 센서로, 증폭기와 아날로그-디지털 변환기가 포함되어 있으며 데이터의 추적 및 계산을 위한 데이터 기록 및 처리 장치이며 축에서 프로펠러로 전달되는 출력의 계산 및 제한을 위한 제어 장치이다. Fig. 2와 같이 Engine Power Limitation(EPL)은 기계적으로 제어되는 기관의 경우 선장 또는 당직 책임자의 허가 없이는 선원이 EPL을 해제 할 수 없도록 와이어로 밀봉된 기계식 정지 나사 또는 Governor 제한 설정이 있는 동등한 장치를 사용한다.

Fuel Index를 물리적으로 잠글 수 있는 밀봉 장치나 또는 전자적으로 제어되는 기관의 경우 Fuel Index를 전자적으로 잠그거나 기관 제어 시스템의 출력을 직접 제한 할 수 있다. EPL과 같은 엔진 출력제한 프로그램을 이용하여 연구대상선의 선박의 출력을 Table 8과 같이 MCR 대비 35.5%~53.1%로 제한을 두어 운항을 하여 Required EEXI를 만족할 수 있다.

선박의 출력을 프로그램을 통하여 제한하여 운항하는 것과 더불어서 선박의 속도를 줄이는 것 또한 하나의 방법이 될 수 있다. 선박의 출력이란 선박이 물과 공기에 의한 저항을 이기고 정해진 속도로 전진할 수 있는 필요 동력인 유효마력은 배가 실제로 전진하는데 필요한 동력이다. 이때의 필요 동력은 저항과 선속의 곱으로 표현할 수 있다.

하지만 일반적으로 선박의 저항은 선속의 제곱에 비례하며 결과적으로 배가 실제로 전진하는데 필요한 동력인 유효마력은 선속의 세제곱에 비례한다. 실제로 실험실습선인 고요마루호의 실험을 통해서 선박의 항해에 필요한 동력은 속도의 3승에 비례하는 특성에 있어서 선속을 증가할 경우 출력이 증가함을 설명하였다(MAEDA and Kim[2013]).

결론적으로 선박의 속력이 감소되어 기관의 출력이 세계급의 비로 대폭 저하가 되기 때문에 오히려 지표전체로 보면 에너지 효율이 저감하는 것으로 볼 수 있다. 이를 통해 연구 대상선의 선속을 Table 8과 같이 감속하여 운항할 경우 Required EEXI를 만족시킬 수 있다.

「선박의 에너지효율지수 검사 등에 관한 기준」과 관련하여 [별표 3항]의 최소 추진 출력을 결정하기 위한 간이평가 기준에 명시되어 있는 최저항해속력보다 높은 속력이며 최저항해속력이란 바람 및 파도와 관련해서 순조롭지 않은 침로로 인한 항해위험 및 선체 요동에 의한 위험을 줄이기에 충분한 시간 안에 연안지역을 벗어날 수 있게 하는 속력으로 최저항해 속력은 4.0 knots로 정해져 있다. 그러므로 최저항해 속력의 이상이며 Table 8과 같이



Fig. 2. Engine Power Limitation.

Table 8. Ship's Load&speed to meet Required EEXI

선박	Required EEXI	M/E MCR	Req, EEXI 총축 출력(MCR대비)	Req, EEXI 총축 선속[knot]
A	49.02	4440	35.5%	11.63
B	37.59	6618	53.1%	15.21
C	42.64	6060	36.3%	13.01
D	49.25	4460	41.2%	12.24
E	65.95	2190	38.0%	9.41
F	68.56	1505	50.1%	9.10

Table 9. EEXI according to the type of ship's Fuel

선종 선박	실습선				지도선 E	조사선 F	탄소배출계수 [t-CO ₂ /t-Fuel]
	A	B	C	D			
LFO	89.64	50.60	78.04	80.60	109.06	77.22	3.151
LPG-B	86.20	48.66	75.04	77.50	104.85	74.25	3.030
LPG-P	85.35	48.18	74.30	76.73	103.84	73.52	3.000
LNG	78.23	44.16	68.11	70.34	95.16	67.39	2.750
에탄올	54.42	30.72	47.38	48.93	66.20	46.88	1.913
메탄올	39.11	22.08	34.05	35.17	47.58	33.69	1.375

9.1~15.21[knots]의 선속 이 유지하며 운항할 경우 EEXI 허용 값을 만족할 수 있다.

4.3 사용 연료유 의 변화

기존의 EEXI 계산식에서는 주기관과 보조기관의 출력에 탄소 배출계수 값을 반영하여 산출하고 있다. 이 때 연료별 탄소 변화 계수란 IPCC에서 제시한 것으로 다양한 연료별로 값이 이미 산출되어 있는 형태로 연료의 1 kg에 대한 발열량 비를 기준으로 석유환산계수에 대한 2차 계수이다. 따라서 연료의 종류를 변화 할 경우 연료별 탄소 배출 계수가 다르기 때문에 EEXI를 감축할 수 있다.

Table 9는 각 연료의 탄소 변환계수를 적용하여 선박에너지 효율지수를 계산하였으며 43%의 선박에너지효율지수를 감소시킬 수 있다.

또한 Fig. 3은 대상 선박의 연료유의 종류에 따른 에너지 효율지수를 나타내고 있으며 LFO, LPG-B, LPG-P, LNG, 에탄올, 메탄올의 순으로 탄소변환계수가 낮기 때문에 그래프를 통해서도 탄소배출계수가 낮은 연료를 사용할 경우 선박에너지효율 지수가 낮아짐을 확인할 수 있다. 즉, 연료유의 종류에 따라 탄소 변환 계수가 다르기 때문에 이로 인한 선박에너지 효율 지수를 낮출 수 있다.

특히나 사용 중인 연료유를 LNG의 연료 형태로 변화하거나 메탄올이나 에탄올 등의 저탄소 및 무탄소 연료를 사용하게 될 경우 낮은 탄소변환계수로 인하여 선박에너지효율지수를 낮출 수 있다.

Table 7과 같이 탄소가 상당히 포함되어있는 연료를 사용했을 때의 EEXI에 비해 저탄소 연료를 사용하게 될 경우 43.6%의 EEXI 지수를 낮출 수 있음을 확인할 수 있다. 이와 관련하여 저탄소 또는 무탄소 연료로 운항하는 선박에 대한 연료소비량 분석에 관한 연구도 Lim et al.[2021]에서 이뤄졌다.

이 뿐만 아니라 앞서 언급한 대로 현재 한국의 경우 한국형 친환경 선박 실증 프로젝트(Greenship-K)를 통해 관공선이나 실습선등을 액화천연가스나 저탄소 연료로 추진할 수 있는 기술을 갖춘 선박으로 대체하고 해양수산부와 관계부처의 회의에서도 앞으로의 운용 계획에 대한 방향(MOF[2020], Greenship-K Project)도 제시하고 있다. 뿐만 아니라 국내 LNG 추진 선박과 LNG 병커링에 대한 법적 근거를 마련하고 통영에 있는 가스공사 LNG인수 기지를 병커링 겸용 터미널로 우선 개발하며 향후 광양, 보령, 인천 등으로 확대할 계획을 가지고 있어 LNG사용을 위한 인프라 구축 문제는 해결이 될 것으로 전망하고 있다. 그러나 엔진 개조 가격 자체가 높고, 연료 공급 및 저장 장치 설치에 따른 초기 투자비용이 상당히 높다는 단점이 있으며 탄소가 함유되어있는 연료 이외의 무탄소 연료(수소, 암모니아 등)가 개발 단계이다. 하지만 점차 인프라 구축이 빠르게 되고 있으며 LNG 병커링 선박의 상용화 또한 빠르게 이뤄지고 있다. 하지만 가스 연료의 사용은 이산화탄소 감축을 위한 단기적인 전략이며, 장기적인 관점에서 무탄소 연료의 사용을 목표로 하고 있기 때문에 무탄소 연료에 대한 인프라 구축(Yoon and Shin[2000])이나 관련된 연구가 더 빠르게 이뤄지고 있다.

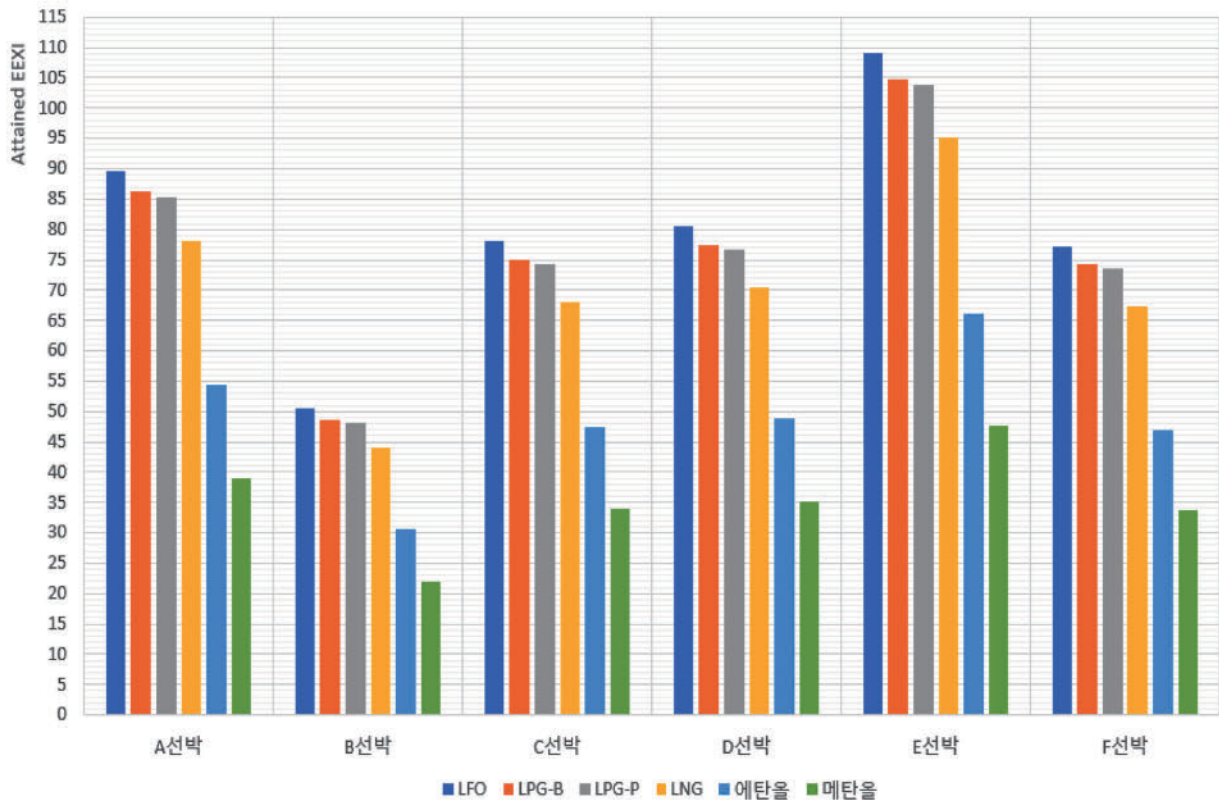


Fig. 3. EEXI according to the type of ship's Fuel Oil.

5. 결 론

2023년 1월부터 일정 선박용량 이상의 국제항해를 종사하는 상선, 11개의 선종(산적화물선, 가스운반선, 탱커선, 컨테이너선, 일반화물선, 냉동화물선, 로로 여객선, 차량운반선, 로로화물수송유니트, LNG 운반선, 크루즈여객선)에 대해 선박에너지효율지수 규제가 시작된다. 반면에 선박에너지효율지수 규제 예외 대상에 속하는 군함, 해양경찰 경비정, 국가 관공선이나 해기교육기관의 실습선 등은 11개의 선종에 해당되지 않는 규제 적용 예외선박이므로 현재로서는 따로 감축 방안을 제시하거나 계획하여 이행하지 않아도 된다.

하지만 적용 예외선박이 추후 규제 대상으로 포함될 경우 규제 관련 법안 또는 기준안을 마련해야하며 규제를 위한 계산식이나 다른 규제안도 만들어야한다. 그에 앞서 본 연구에서는 기존의 선박에너지 효율 지수나 탄소 집약도 지수를 산출하는 계산식이 현재 적용 예외 선박에 적용했을 때 선박에너지 효율지수를 파악하고 기존 11개의 선종 중 1개의 선종과 비교하였을 때 Required 값을 만족할 수 있도록 감축 할 수 있는 방안을 모색하는 연구를 하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

기존의 선박에너지 효율지수 산출식을 이용하는 11개의 선종 중에서 연구 대상선박과 유사한 선종을 선정했고 연구 대상 선박과 같이 SPS Code에 적용하고 선박 방형계수가 비슷한 범위를 가지는 여객선을 비교 대상 선종으로 선정하였다. 연구 대상선과 같은 전통 추진 방식을 따르고 있는 '로로 여객선'을 비교 선종으로 선정하여 적용하는 것이 합리적이다.

로로 여객선을 연구 대상 선박 6척과 비교하였을 때 Required EEXI를 만족하기 위해서 각각의 연구 대상선박은 최소 4.65[g-CO₂ / ton·Mile]에서 최대 43.11[g-CO₂ / ton·Mile]의 선박에너지효율 지수를 감축해야한다. 현재로서 적용을 할 수 있는 감축 방안에는 첫째로 선박의 출력을 제한하거나 둘째, 선속을 제한, 마지막으로 연료유를 변화하여 운항하는 것이다. 먼저 선박의 출력 제한의 방안에는 선박의 출력 제한 프로그램을 이용하는 것이다.

두 번째 방안은 선박의 속도를 낮춰 운항하는 것이다. 출력의 제한과 더불어서 출력에 영향을 줄 수 있는 선박의 속도를 제한함으로써 Required EEXI를 만족할 수 있다. 선박의 항해에 필요한 동력은 속도의 3승에 비례하는 특성에 있어서 선속을 증가할 경우 출력이 증가하기 때문에 오히려 선속을 감속한 만큼 출력도 감소시킬 수 있다. 연구대상선의 Required EEXI를 기준으로 필요한 속도를 계산하게 되면 선속을 9.10~15.20 [knot]의 범위로 운항을 시행해야 Required EEXI를 만족시킬 수 있다.

마지막 방안으로는 선박의 연료유의 종류를 변화하여 이산화탄소 배출 계수를 변화시키는 것이다. 각각의 연료별 탄소 변환 계수가 다르기 때문에 이에 따른 EEXI 지수를 감축할 수 있다. 기존의 계산식을 이용하여 여러 종류의 연료를 이용하여 EEXI를 계산할 경우 에탄올과 메탄올을 사용하여 연료를 이용하게 되면 허용값을 만족할 수 있다. 뿐만 아니라 무탄소로 연료로서 현재 상용화되고

있는 암모니아 연료를 사용할 수 있다. 암모니아는 이산화탄소를 배출하지 않고 저장이 쉽다는 장점으로 온실가스 배출 50% 감축 전략의 최적의 연료수단으로 꼽히고 있다. 만약 이 암모니아 연료를 연구대상선박에 사용할 경우 Required EEXI를 만족시킬 수 있으나 Lim et al.[2021]은 상선의 경우 선적량과 하역량 변화가 선주의 수익 변화에 영향을 미치게 되며 연료소비량을 반영한 운항 형태가 필요한 것으로 예상된다고 하였다.

하지만 연구대상선박과 같은 관공선은 화물의 운송을 하는 상선의 형태가 아니며 수익을 내는 선박이 아니기 때문에 초기 단계의 인프라를 갖춘 암모니아의 형태로의 전환은 상당한 비용과 장기적인 시간이 필요할 것으로 예상된다. 결과적으로 현재 연구대상선박에 대하여 초기 전략으로 EEXI 감축 효과를 볼 수 있는 방법은 선박의 출력을 MCR 대비 30~50%로 낮춰 운항을 하거나 운항 속도를 현재의 평균 운항속도 대비 2~4[knot]로 감축하는 것이 가장 현실적인 방법으로 볼 수 있다.

이 연구에서는 현존선 선박에너지효율지수 규제 대상 선종 11개의 선종 중 한가지의 선종을 비교 대상으로 설정하여 연구 대상선박 6척에 대하여 비교를 시행하였다. 현재 운항중인 관공선과 앞으로 건조 될 관공선의 수를 감안할 때 연구의 표본이 6척으로 상당히 적은 표본수를 지니고 있다. 이에 따라 국내 관공선 및 실습선에 모두 적용하기 위해서는 더 많은 표본을 가지고 비교하는 연구가 필요하다. Kim[2023]의 연구에서도 언급하였듯이 지속적인 환경 규제에 대응하고 규제 대상의 세분화 및 확대에 대한 논의가 필요함을 언급하고 있으며 본 연구에서도 규제 예외대상 선박의 예를 통해서 규제 기준의 세분화가 필요하다는 것을 확인할 수 있다. 이를 위해서 추후 연구에서 현재 운항중인 연구 대상선박의 표본을 추가하여 많은 관공선에 적용될 수 있는 비교 선종을 채택하고 비교 선종의 기존 계산식을 이용하여 Required EEXI를 만족시키는 지 파악하며 비교 선종이 모호할 경우 관공선에 적용할 수 있는 선박에너지효율지수 계산식의 새로운 형태에 대해 연구가 필요하다. 이러한 연구를 통해 관공선에 대한 선박에너지효율지수 산정이나 새로 건조되는 관공선의 선박에너지설계지수를 산정하는데 상당부분 도움이 될 것으로 예상되며 선박에너지효율지수 규제 대상 선박의 확대를 통해 온실가스 감축하는데 도움이 될 것이다.

References

- [1] IMO., 2009, Second IMO Green House Gas study.
- [2] IMO., 2021, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.338\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.338(76).pdf) (accessed 2021.06.17)
- [3] IMO., 2008, <https://www.imorules.com/SPS2008.html> (accessed 2008.05.13.)
- [4] Jung, N.T., 2011, Recent International Development on the Technical and Operational Measures of IMO's CO₂ Emission Control From Ship.
- [5] Joung, T.H., Kang, S.G., Lee, J.K. and An, J.G., 2018, Interna-

- tional Maritime Organization (IMO) Shipping Greenhouse Gas (GHG) Emission Regulation Trends and Introduction of Domestic and International Countermeasures J. Soc. Nav. Archit. Korea 55(4), 48-54.
- [6] Kim, E.M., 2022, Greenhouse Gas Reduction Status and Implications in the Global Transportation Sector.
- [7] Kim, S.Y., Choi, J.H., Ban, Y.G. and Kim, H.Y., 2012, Measure to Improve Management & Operation of Government Vessel.
- [8] Kim, J.S. and Choi, J.H., 2023, A Study on analysis of greenhouse gaseous emitted from ship through operation information J. International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping, Vol. 7, Iss. 2-3.
- [9] Lee, S.D., Koh, D.K. and Jung, S.H., 2015, Countermeasures for reduction for CO₂ emission from training ship J. Soc. Mar. Eng. Korea 39(9), 981-986.
- [10] Lim, S.T., Lee, H.S., Moon, J.H. and Seo, Y.K., 2021, Analysis of Fuel Consumption for Application of Ammonia Propulsion Model in Ammonia Transport Ships.
- [11] MAEDA. and Kim, Y.U., 2013, The Study on Reduction Method of CO₂ Emission from Ships Journal of the fisheries and marine sciences education 25(3), 705-715.
- [12] Martin Cames, Vanessa Cook., 2018, IMO's challenges on the route to decarbonising international shipping Key Issues at Stake at the 71st Session of the IMO Marine Environment Protection Committee (MEPC 71) European Parliament.
- [13] Ministry of Oceans and Fisheries., 2020, <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=48838&menuSeq=375&bbsSeq=9> (accessed 23.01.30).
- [14] Park, H.S., Kim, B.R., Park, S.W. and Jung, I.H., 2020, A Study on Policy Directions for Responding IMO's Regulation on GHG Emission.
- [15] Rho, B.S. and Choi, J.S., 2011, A Study on the Energy Efficiency Operational Indicator for CO₂ Reduction from Ships J. Soc. Mar. Eng. Korea 35(89), 1035-1040.
- [16] Yoon, G.S. and Shin, S.H., 2000, A Study on the performance of the MPI Gasoline Engine with Gasoline-Ethanol Blends.

Received 14 June 2023

1st Revised 27 July 2023, 2nd Revised 5 October 2023

Accepted 26 October 2023