

친환경 전기추진 선박의 생애주기분석

Life Cycle Assessment for Green Ship by Electric Propulsion Systems

조락균*†
Nak-Kyun Cho*†

(Received 30 November 2020, Revised 10 February 2021, Accepted 15 February 2021)

Abstract : This paper investigated the holistic environmental impacts for ships with electric propulsion using battery systems. It performed the comparative life cycle analysis among diesel, battery and fuel cell systems to determine whether hybrid technology would be excellent in the marine industry overall. A hybrid short route ferry, presently served in West Scotland, was chosen as the case vessel. Using the collected data, various scenarios were modeled in the platform of GaBi Software. Results revealed that battery electric propulsion could generally contribute to reducing environmental impacts, such as global warming potential, acidification potential and eutropication potential. On the other hand, research findings also pointed out that the degree of reduction in emissions would be significantly influenced by the ways of producing electricity. Given that different nations use different types/ratios of energy sources, emission levels vary across countries. For example, the same ship may lead to disparate results by producing 7.5×10^6 CO₂ equivalent in UK but 2.3×10^7 CO₂ equivalent in India. That means battery ships do not always necessarily guarantee cleaner shipping, given that a diesel ship may produce 1.78×10^7 CO₂ equivalent. Such findings offer a meaningful insight into future policy making and regulatory frameworks.

Key Words : Battery ship, Life cycle assessment, Fuel cell, Hybrid ship

1. 서 론

환경보전에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 국제 규제가 점점 더 엄격해짐에 따라, 해운에서도 기존 디젤 기반의 선박 연료를 친환경 대체 에너지로 전환하는 것이 그 어느 때보다 중요한 현안으로 자리 잡고 있다.¹⁾

특히, 해운 규정을 관리하는 주요 기관인 국제해사기구(또는 IMO, International Maritime Organization)는 2008년 대비, 선박으로부터 배출되는 온실가스의 양을 2050년까지 배출량을 50% 줄이고 2100년까지 배출량을 제로화하는 새로운 전략을 수립하였다(Fig. 1 참조).²⁾

기존의 화석 기반의 디젤 연료는 온실가스 배출량에 있어 큰 장애 요소로 고려가 되어, 현재

*† 조락균(ORCID:0000-0001-6836-8539) : 조교수, 서울과학기술대학교 Manufacturing Systems and Design Engineering (MSDE) 학과
Email : nkcho@seoultech.ac.kr, Tel : 02-970-7278

*† Nak-Kyun Cho(ORCID:0000-0001-6836-8539) : Assistant Professor, Department of Manufacturing Systems and Design Engineering (MSDE), Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech).
Email : nkcho@seoultech.ac.kr, Tel : 02-970-7278

다양한 대체 에너지들의 연구 개발이 진행되고 있다. 액화 천연가스(LNG)는 점점 대중화되고 있으며, 수소는 해양 산업에서 미래의 연료로 많은 주목을 받고 있지만, 기술의 성숙도, 시장성, 안전성 등을 고려해 볼 때, 둘 다 앞서 언급한 화석 연료와 비교할 수 있을 만큼의 잠재력을 충분히 발휘하지 못하고 있다.²⁾

이에 따라 글로벌 2050 목표를 달성하기 위한 가장 현실적인 솔루션 중 하나로 디젤 엔진 대신 배터리 전기 시스템을 도입함에 따라 전 세계적으로 배터리로 구동되는 선박의 수가 급증하고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 2019년 3월 기준 전 세계적으로 300개 이상의 배터리 전기 선박이 운항 중이거나 건조될 예정이다.³⁾

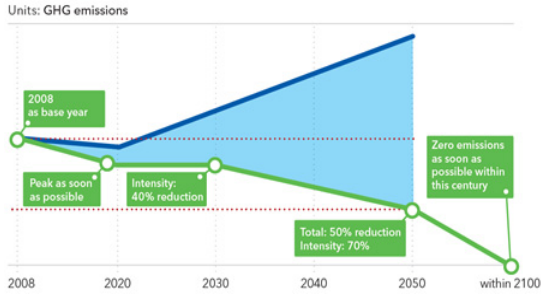


Fig. 1 IMO GHG emission reduction strategy²⁾
MEPC.304(72), adopted April. 2018

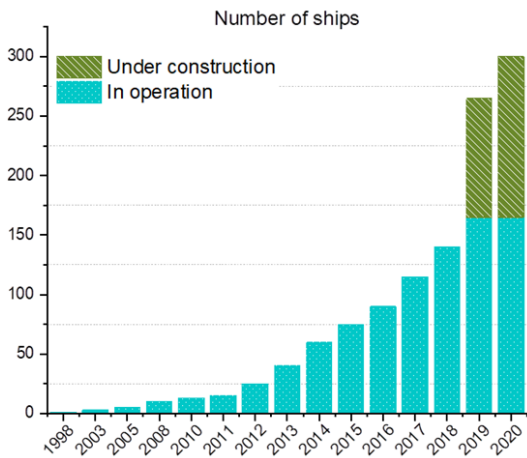


Fig. 2 Growth trend in global battery-powered ships³⁾

1.1 현안

현재 대부분의 연구 및 해운 정책은 배터리를 포함한 다양한 대체 에너지를 사용하는 선박은 운항 단계에서 대기 오염 물질을 배출하지 않기 때문에 ‘무공해 선박(Zero emission ship)’이라고 소개되고 있다. 이에 따라 전 세계의 해운은 서로 앞다투어 관련 대체 에너지의 선박 적용을 가용화하는데 적극적인 투자를 아끼지 않고 있다.⁴⁾

한편, 배터리 충전을 위해서는 추가적인 발전 활동이 필수적이며, 육상 전력망을 통해 선박에 공급되면 발전 단계에서 잠재적인 대기 오염 물질의 배출량이 증가한다.

또한 전기는 다양한 1차 에너지원에서 생산되며, 사용되는 에너지원에 따라 생성되는 대기오염 원 수준에 큰 차이가 있다. 이는 배터리 선박이 환경적 이점이 있더라도 발전소가 전기를 생산하는 방법에 따라 배출 감소 수준에 여전히 큰 차이가 있을 수 있음을 의미한다. 예를 들어, 석탄 발전은 풍력 발전 대비 50배 가까이 많은 온실가스를 배출한다.⁵⁾

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 현재 세계 에너지 평균 구성(석탄·석유 계통에 대한 높은 의존도)은 전 세계의 배터리 전기 추진 선박이 궁극적으로 기존 디젤 선박에 비해 더 환경친화적인 결과를 가져올 수 있는지 여부에 관한 질문이 제기된다.

한편, 국제해사기구는 선박이 환경에 미치는 영향을 평가 및 저감하기 위하여 에너지효율설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI) 및 에너지효율운항지수(Energy Efficiency Operational

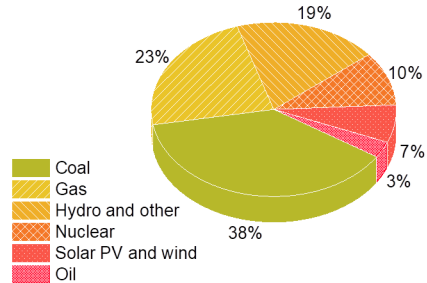


Fig. 3 Global power generation energy ratio as of the end of 2018 (26,700 TWh)⁶⁾

Indicator, EEOI)와 같은 다양한 방법을 소개하고 적용하도록 강제화하고 있다.⁷⁾ 하지만 이와 같은 환경평가기법들은 선박이 운항 시 나오는 CO₂ 배출량에만 국한하여 계산되기 때문에, 선박의 실제적인 환경 영향을 평가하는 데는 분명한 한계가 있다. 특히, 배터리 추진 선박과 같이 운항 중에는 대기오염원이 전혀 발생하지 않는 경우, 기존의 환경평가기법은 적용 자체가 불가능한 실정이다.

최근 국제해사기구에서는 기존의 환경분석기법들의 한계를 인식하고, 이를 극복할 수 있는 대체 기법의 필요성이 제기되기 시작하였다. 그 결과, 국제해사기구의 각 기국은 2018년 MEPC 72차 회의를 통해 생애주기(또는 Life cycle) 관점에서의 선박 환경분석기법의 지침을 개발할 것을 결의하였다.⁸⁾ 그러나 이러한 환경분석기법은 상당히 복잡하고 전문성이 필요하여 현재까지도 표준화에 어려움을 겪고 있다. 반면에 본 저자를 비롯한 대한민국 정부 대응팀에서는 ISWG-GHG 5/4/5 및 ISWG-GHG 6/5/1 의제 문서를 통해 국제해사구에 생애주기 환경분석기법(Life cycle assessment, LCA)의 올바른 방향을 제시하였다.^{9,10)}

1.2 연구 방향

본 연구는 당시 국제해사구에 제안된 LCA 기법을 실제 대상 선박에 적용하여 제안된 환경 분석기법의 실효성을 보여 주고자 한다.

특히, 배터리 추진 선박의 친환경 여부에 대한 근본적인 질문에 답하기 위해서는 선박 운항상 발생하는 대기오염원뿐만 아니라 연료의 생산 및 발전 시 생산되는 대기오염원 역시 고려가 되어야 한다. 따라서 국가별 발전 방식에 따른 전 방위적 환경 영향 분석을 수행하고자 한다.

즉, LCA 연구 범위는 선박 연료의 생산에 필요한 자원 채굴에서부터 본선 사용까지의 모든 주요 프로세스가 포함된다(Cradle to Grave 범위).

반면, LCA 기법은 2000년대에 들어서면서 서서히 조선해양분야에 소개되기 시작하였다. 특히, 선박 대체 에너지와 관련하여, 몇 가지 의미 있는 연구가 수행되었다. 대표적인 예로, Ma et al.¹¹⁾은 여러 종류의 SO_x 스크러버 시스템과 저유황 선박

연료유)에 대한 환경 분석을 수행하였으며, Brynolf et al.¹²⁾은 기존 HFO를 LNG, LBG(Liquified Biogas), 메탄올과 비교하였다. 비슷한 예로, Gilbert et al.¹³⁾은 다양한 선박 대체 연료(LNG, 메탄올, LH2(액체 수소), 바이오 디젤)을 분석하여 생애주기 관점에서의 선박 연료의 환경 영향성을 분석하였다. Jeong et al.¹⁴⁾은 배터리 추진 선박의 생애주기 관점의 환경 분석을 수행하여, 기존 디젤 엔진 대비 환경보호에 이바지하는 정도를 보여 주었다. 또한 가장 최근의 연구로는 Hwang et al.¹⁵⁾은 수소 연료를 사용하는 연료전지와 기존의 LNG 및 선박 디젤 연료의 환경 분석을 수행하여, 대체 에너지들의 환경적 이점에 대해 정량적으로 보여 주었다. 상기 연구들은 기존의 환경분석기법의 한계를 여실히 보여 주는 좋은 사례 연구로서, LCA 기법의 선박 적용에 대한 우수성을 증명하였다. 다시 말하자면, 상기 연구들은 LCA가 운전 중에 발생하는 대기 오염 측정에만 초점을 맞춘 기존 환경 분석 방법 및 관행의 한계를 극복하고 특정 연료의 친환경성을 실제로 검증할 수 있는 수단이 될 수 있다는 것을 보여 주었다.

반면에 기존 연구들은 개별사례에 대해서만 국한적으로 수행되었다. 특히, 배터리 추진 선박의 경우, 기존 디젤-기계식 추진과 디젤-전기식 추진 시스템과 비교함으로써 추진시스템의 상대적 우수성에 대하여 집중 조명하였다.

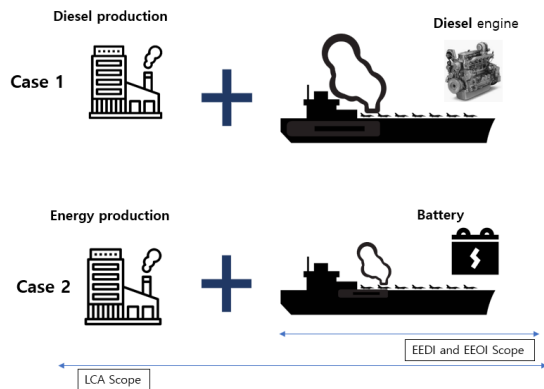


Fig. 4 Comparison between scopes of LCA and EEDI/EEOI

그러나 앞서 본 연구에서 제기한 배터리 추진 선박이 실제적인 친환경 선박의 대안이 될 수 있는지의 질문에 대한 보편적인 답을 내리기에는 상기 연구들은 여전히 한계를 가진다. 따라서 본 연구는 이러한 질문에 대한 답을 찾기 위하여 수행되었다.

2. 방법론

LCA는 특정 제품 및 제조 공정의 환경 영향을 평가하기 위한 분석 기술이며, 제품의 전체 수명 주기에 걸쳐 관련 배출을 추적하고 정량화하는 방법으로 사용된다. 여기에는 원자재 생산부터 시작되는 다양한 제품 스크랩·재활용 블록이 포함된다. 국제 표준¹⁶⁾(또는 ISO)은 다음 4단계로 LCA의 기본 프로세스를 확립하였다.

- 1) 목표 범위 설정 (goal and scope definition),
- 2) 인벤토리 분석 (Inventory analysis),
- 3) 영향 분석 (Impact assessment),
- 4) 해석 (Interpretation)

2.1 목표 범위 설정(Goal and Scope)

연구 대상으로는 현재 영국 스코틀랜드의 본토와 인근의 작은 섬들을 연결하는 하이브리드 소형 여객선(Caledonian MacBrayne 社)을 선정하여, 현재 운항데이터를 바탕으로 환경 분석을 시행하였다.

본 연구에서는 아래의 세 가지 시나리오에 대하여 LCA를 수행하고자 한다.

- 시나리오 1 : 배터리 추진
- 시나리오 2 : 연료 전지 (수소 연료 사용)
- 시나리오 3 : 디젤 추진

특히, 시나리오 1의 경우, 영국을 비롯하여 미국, 일본 및 인도의 발전 방식을 함께 고려하여, 국가별 환경 영향에 대해서도 비교·분석을 시행하였다. 선박의 데이터는 Table 1과 같다.

대상 선박을 30년간 운항을 한다고 가정하고, 현재 운항데이터를 기반으로 연간 313일을 운항하는 것으로 고려하였다. 마찬가지로, 1년 치의 전력 분석 데이터를 기반으로 선박의 운항 상태에

Table 1 Ship specification

Parameter	Value	Unit
LxBxD	39.99 × 12.2 × 1.73	
Dead weight	100 t	
Total propulsion power	2 × 375 kW voith units	
Battery	2 × 350 kW (litum-ion)	
Ship mode	Hrs/ Season	% of season
Transit	1,969.6	26.4
Manoeuvring	103.6	1.4
At slip	1,643	22.0
Overnight	3747.8	50.2
Total	7464.0	100

따른 전력 부하 분석을 실시하여 30년간 본선에 사용되는 에너지양을 디젤, 전기 및 수소 형태로 산정하였다.

또한 연료전지의 경우 60% 효율로 고려하였다.

2.2 인벤토리 분석(Life cycle inventory analysis, LCI)

2.2.1 데이터 수집

본 논문에서 사용될 데이터는 가장 널리 이용되는 LCA 소프트웨어 GaBi 2020 Version¹⁷⁾을 기본적으로 사용하되, 논문, 저널 등의 다양한 출처에서 수집된 정보들을 함께 취합하여 분석을 진행하였다. GaBi 소프트웨어는 전 세계에서 가장 널리 사용되는 LCA 지원 프로그램으로, 본 프로그램에서 지원하는 인터페이스를 통해, 특정 제품·시스템의 생애주기에 대한 모델링을 수행할 수 있다. 또한 함께 지원되는 환경 데이터베이스와 결합하여, 해당 제품·시스템의 환경 영향성이 원재료의 생산에서부터, 제품화, 사용, 재활용까지의 전 방위에 걸쳐 분석할 수 있도록 지원한다.

이를 기반으로 본 연구에서는 환경분석을 위해 수집된 기본 데이터들을 주 입력값으로 사용하여, 소프트웨어가 제공하는 플랫폼 내에서 대상 선박에 대한 모델링을 수행하여, 각 모델의 내장 데이터 및 계산 수식들과 결합하여 환경분석 결과가 다양한 형태로 도출된다.

LCA 분석 범위 설정과 관련하여, 본 연구는 선박의 연료에 대한 분석에 집중하고자 한다. 즉, 관련 시스템이나 기계에 대한 분석은 생략되며, 이는 이미 다양한 연구의 결과에서 보이는 바와 같이, 연료에 대한 환경 영향성이 전체 선박 환경 영향성의 대부분을 차지하기 때문이다.¹⁴⁾

2.2.2 LCA 모델링

Fig. 5는 연료별 전력 생산에 대한 LCA 모델링 도식화를 보여 준다. 전력의 전체 공급망을 포함하여, 원재료의 시추, 원유 생산 및 가공은 물론 파이프라인을 통한 에너지 운송 역시 포함된다. 또한 발전소의 건설, 운전 및 폐쇄에 이르기까지의 전 방위의 환경 영향성이 분석된다. 각 생애주기 단계별 배출물을 정량화하여, 전력 생산량 기준 전체 배출물의 종류 및 정량이 이 과정을 통해 분석된다.

배터리 추진 선박의 경우, 다양한 에너지에 의해 생산된 전기가 국가 전력 그리드에 통합이 되어 최종적으로 선박에 공급된다. 가령, 영국의 경우, Fig. 5에서 보는 바와 같이, 총 11종류의 에너지원에 의해 전기가 생산되고 사용되고 있다.

상기 전력생산 LCA 모델이 에너지별로 모두 적용되고, 국가별 에너지 사용 비율에 따라 가중치가 더해지고 최종적으로 선박에 보급되도록 모델링이 되었다(Table 2 참조).

영국과 마찬가지로 나머지 3개의 국가에 대해서도 동일한 방식으로 LCA 모델링을 수행하였다. 영국의 경우, 현재 천연가스(46.4%)를 이용한 발전이 가장 높으며, 원자력(23.2%) 및 풍력 발전(12.1%)이 그 뒤를 따른다.

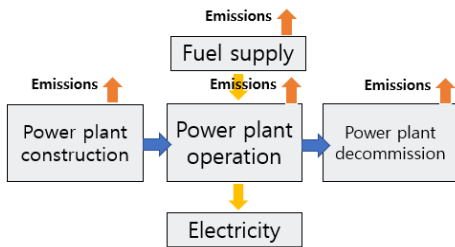


Fig. 5 LCA modeling for Power generation

Table 2 Ratio of energy sources for electric power generation by country

Energy source	Electric power generation rate (%)			
	U.K.	U.S.A.	Japan	India
Biogas	2.32%	0.40%	0.02%	0.08%
Biomass	5.91%	1.00%	1.46%	2.77%
Coal gas	0.23%	0.10%	3.17%	0.15%
Geo-thermal	0.00%	0.40%	0.25%	0.00%
Hard coal	9.25%	29.09%	31.16%	64.08%
HFO	0.55%	0.60%	8.30%	1.59%
Hydro	2.52%	6.62%	8.36%	9.32%
Lignite	0.00%	1.50%	0.00%	10.63%
Natural gas	43.20%	34.00%	39.93%	4.83%
Nuclear	21.61%	19.76%	1.77%	2.57%
Peat	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
PV	3.14%	0.90%	5.01%	0.96%
Wind	11.26%	5.62%	0.58%	3.04%

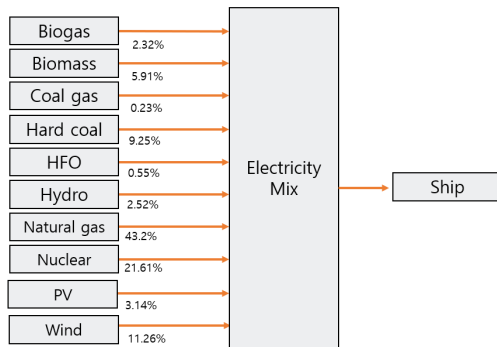


Fig. 6 LCA modeling for UK power grid

석유 정제는 복잡한 공정에 의해 이루어지며, 공정의 조합과 순서는 일반적으로 원유 및 생산되는 제품의 특성에 따라 매우 다르다.

Fig. 7의 디젤 연료 LCA 모델링은 정유 제품의 전체 공급망을 포함한다. 여기에는 유정 시추, 원유 생산 및 가공 및 파이프라인을 통한 원유 운송까지 포함된다. GaBi Software에서 제공하는 정제 모델을 그대로 사용하여, 단위 디젤 연료 생산에 따른 전 방위적인 배출원의 종류 및 양을 계산한다.

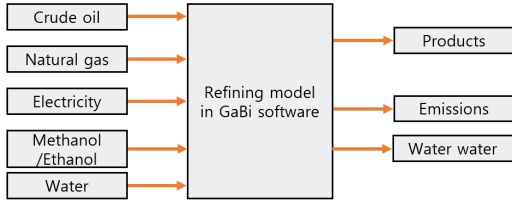


Fig. 7 LCA modeling for diesel fuel

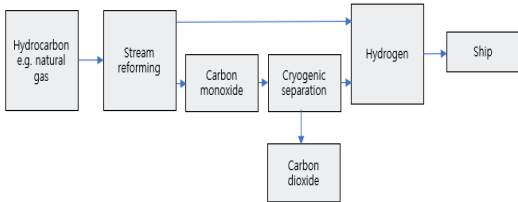


Fig. 8 LCA modeling for hydrogen production

Fig. 8은 수소 생산 LCA 모델링을 도식화하였다. 연료전지에 사용되는 수소를 생산하는 방식으로는 물의 전기 분해와 탄화수소의 수소화 분해 외에도 천연가스의 증기 개질은 산업 규모의 수소 생산에서 가장 많이 사용되는 방식이다. 전체 증기 개질 공정에는 산화아연 베드 또는 활성탄에 흡착을 통한 공급 원료의 탈황, 개질 및 이동 반응 및 제품 가스 정화의 세 가지 주요 공정 단계가 포함된다. 개질 공정 단계에서 천연가스와 증기는 니켈 기반 촉매를 통해 수소와 일산화탄소를 형성한다. 다음 공정 단계에서 일산화탄소와 물(증기)은 이산화탄소와 수소로 전환된다. 생성 가스는 일반적으로 압력 변동 흡착(PSA) 장치 내에서 최종적으로 정화된다. 마찬가지로, GaBi의 데이터 및 기본 모델을 사용하여 배출물의 양과 종류가 계산되었다.

2.3 영향 평가(Life cycle impact assessment, LCIA)

LCIA 단계는 LCI 단계의 결과를 바탕으로 잠재적인 환경 영향을 평가하는 단계이다.

즉, 온난화, 산성화, 부영양화를 비롯하여, 생태독성, 고갈 및 오존층 고갈 등의 다양한 환경 영향 요소에 대한 평가가 수행된다.

다만, 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 환경 영향 범주인 지구 온난화 지수(GWP, global warming potential), 산성화 지수(AP, acidification potential) 및 부영양화 지수(EP, eutrophication potential)에 대하여 평가하고자 한다.

본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되는 CML2001을 기반으로 LCIA를 실시하였다.

2.4 해석 (Interpretation)

Interpretation에서는 LCI 및 LCIA의 결과를 해석 및 요약한다. 즉, 연구에 대한 일련의 결론 및 권장 사항 등을 제시하는 단계이다. 본 논문에서는 ‘3장 결과’ 및 ‘4장 결론’이 이에 해당한다.

3. 결 과

3.1 지구 온난화 지수(Global warming potential, GWP)

Fig. 9는 각 시나리오에 대하여 GWP를 비교한다. 우선 시나리오 1(배터리 추진)의 경우 동일한 선박이 환경에 미치는 영향이 국가마다 크게 다르다는 것을 확인할 수 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 가령, 영국의 경우, GWP는 약 7.5×10^6 인 반면 인도의 경우, GWP는 약 2.3×10^7 로 타 국가 대비 상당히 높게 나타났다. 이 수치는 해당 선박을 디젤 연료로 운항을 했을 경우(1.78×10^7)보다도 훨씬 높게 나타났다. 다시 말해, 배터리 추

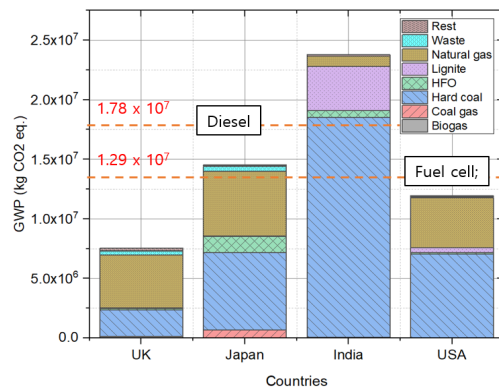


Fig. 9 Comparison of GWP results for each scenario

진 선박의 경우, 영국, 일본 및 미국에서는 환경적인 우위를 점할 수 있으나 인도에서는 오히려 디젤 추진보다 환경에 더욱 악영향을 미친다는 사실이 확인된다. 이는 인도의 전력생산의 70% 이상(다른 국가들 대비 2~3배 이상)이 여전히 화석연료 기반이기 때문에 발전 시 발생하는 대기오염원의 수준이 타국보다 상당히 높아지는 것으로 해석이 된다(화석연료 기반이 신재생에너지 기반의 발전과 대비하여 대기오염 수준이 얼마나 큰지를 확인하기 위하여 섹션 3.4에서 연료별 민감도 분석을 수행하였다).

마찬가지로 수소 연료를 이용한 연료전지 추진(시나리오 3)이 디젤 추진(시나리오 2)보다 더 효과적인 것으로 나타났다. 반면, 영국과 미국에서는 전기추진이 연료전지 추진보다 더 효과적인 것으로 나타났지만 일본과 인도에서는 연료전지 추진이 더 효과적인 것으로 간주된다.

화석 연료 기반의 발전에너지원들이 환경에 미치는 영향이 큰 것으로 재확인되었다. Hard Coal이 전체 국가 중 GWP에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 확인이 되었으며, Natural gas 역시 환경 영향에 큰 부분을 차지하는 것으로 보인다.

3.2 산성화 지수(Acidification potential, AP)

Fig. 10에서는 각 시나리오별 AP 결과를 비교하였다. 앞선 GWP 과는 다소 다르며, 배터리 추진의 경우, 모든 국가에서 디젤 추진 대비 친환경적인 것으로 판명되었다. 그런데도 인도는 여전히 다른 국가에 비해 훨씬 높은 AP 지수를 갖고 있다. 이는 인도의 석탄 기반 에너지 의존도가 다른 국가에 비해 상대적으로 높기 때문에 해석된다. 유사하게, Hard coal 및 Lignite에서 높은 수준의 배출이 생성되는 것을 볼 수 있다.

반면에 수소에너지 기반의 연료전지 추진의 경우, 배터리 추진의 경우보다 훨씬 더 AP 지수가 낮은 것으로 확인되었다. 이는 수소 개질 과정에서의 AP 관련 배출물들이 발전 과정에서의 AP 배출물보다 현저히 낮기 때문으로 해석된다.

AP의 결과만 놓고 보면, 배터리나 연료전지 추진이 디젤 추진 대비 친환경성이 보장된다고 보아도 무방하나, 전체 배출물의 양을 따져보면,

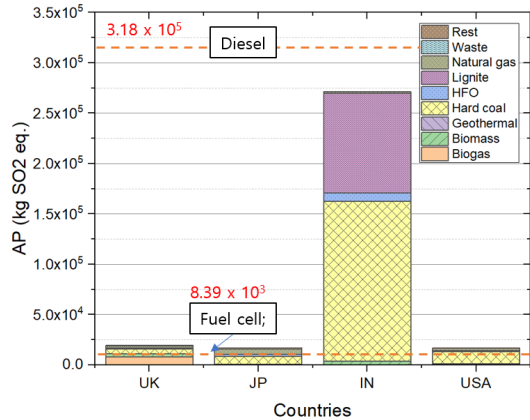


Fig. 10 Comparison of AP results for each scenario

GWP 이 AP 대비 100배 가까이 많아서 단정을 짓기에는 분명 어려움이 있다.

3.3 부영양화 지수(Eutrophication potential, EP)

Fig. 11은 각 시나리오의 EP 결과를 비교·분석한 결과를 보여 준다. EP 결과는 전체적으로 AP 결과와 비슷한 양상을 보인다. 전체적으로 디젤 추진의 경우가 환경에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인이 되었으며, 반면 연료전지 추진이 가장 친환경적인 것으로 판단되었다. 마찬가지로 배터리 추진의 경우에도, 국가별로 EP 지수에 큰 편차를 보였는데, 인도의 경우, 다른 국가들에 비해 상당히 높은 EP 지수를 보여 준다.

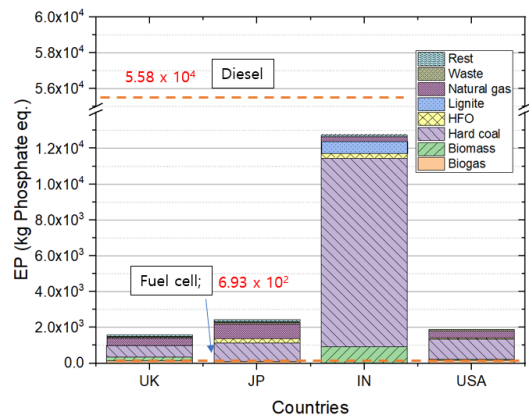


Fig. 11 Comparison of EP results for each scenario

이는 발전 방식 및 에너지 사용 비율이 얼마나 배터리 추진 선박의 ‘친환경성’을 결정하는 요인으로 작용하는지를 다시 한 번 보여 준다.

3.4 연료 및 국가별 환경 영향성의 민감도 분석

보다 보편적이고 일반적인 정보를 제공하기 위하여, 상기 분석 결과를 기반으로 각 연료가 발전 시 미치는 환경 영향을 보다 정량적으로 살펴볼 필요가 있다.

즉, 100% 단일 연료로 발전을 하는 경우, 연료의 종류에 따른 환경 영향성이 어떻게 되는지를 제시함으로써, 배터리 선박이 어떤 국가에서는 유용한지 또 어떤 국가에서는 무용한지를 더 상세히 판단을 할 수 있을 것으로 생각한다.

GWP 그래프에서 보여 주는 바와 같이, 영국과 인도에서 Coal gas를 100%로 발전을 하게 되는 경우, GWP가 가장 높은 것으로 드러났다. 하지만 미국과 일본에서 Coal gas를 쓰는 경우는 오히려 인도에서 HFO, Lignite 그리고 Hard coal을 쓸 경

우보다 GWP가 더 낮을 것으로 분석된다. 이는 국가별 발전 기술 및 연료의 공급망의 차이에서 발생하는 것으로 보인다.

반면에, Wind, Hydro 그리고 Nuclear 에너지와 같은 신재생에너지를 이용하여 발전하는 경우, 네 나라 모두 GWP가 다른 에너지를 사용할 경우보다 현저하게 낮다. 이러한 경향은 AP나 EP에서도 국가에 상관없이 동일하게 나타난다.

AP 지수에서는 인도에서 Lignite를 쓸 경우가 가장 많은 대기오염원을 배출하고, HFO를 사용할 경우가 그 뒤를 따른다.

EP 지수에서는 GWP, AP와 달리, Biogas를 쓸 때 미국과 인도에서 가장 많은 배출물을 만드는 것으로 나타난다. 이는 Biogas를 생산할 시 EP에 영향을 크게 미치는 phosphate가 많이 발생하기 때문으로 분석된다.

Natural gas, Hard coal, Coal gas는 GWP 상으로 국가에 상관없이 GHG를 가장 많이 배출하는 것과 달리, AP, EP상으로는 다소 적은 emission을

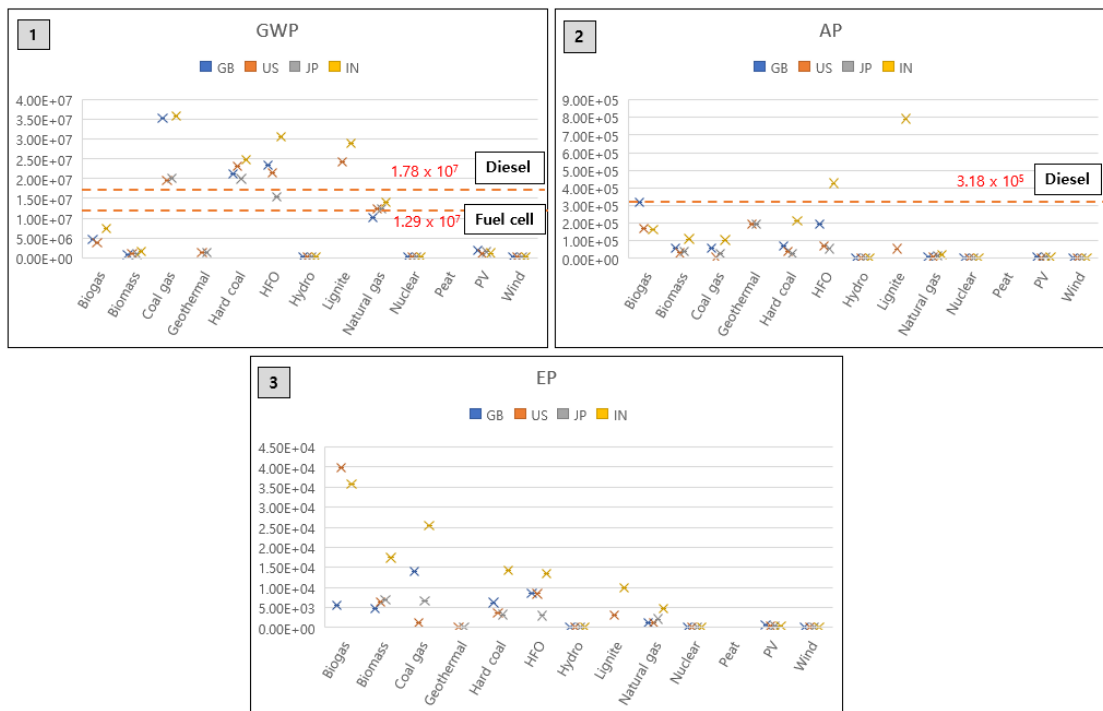


Fig. 12 Comparison of the results of sensitivity analysis of fuel/country on environmental impact

배출하는 것으로 예상되기 때문에 이러한 점을 고려하여 에너지를 사용해야 할 것으로 보인다.

결론적으로, Wind, Hydro 그리고 Nuclear가 GWP, AP 그리고 EP 환경 지수를 고려할 때 종합적으로 가장 친환경적인 것으로 드러났고, Coal gas, Lignite, HFO 그리고 Biogas를 사용할 때 국가에 상관없이 오염원을 많이 배출하는 것으로 요약된다.

본 연구는 주요 4개국에 대해서만 국한적으로 연구 결과가 제시되었지만, 국가별 다소 오차가 있다 하더라도 본 연구에서는 화석 연료 기반의 발전이 배터리 추진 선박에 미치는 환경 영향이 상당히 심각하다는 사실을 여실히 보여 준다.

4. 고 찰

상기 결과는 우리에게 시사하는 바가 분명히 크다. 앞서 보여 준 Fig. 3을 다시 살펴보면, 아직 전 세계의 70%에 가깝게 화석 연료 기반의 발전이 이루어지고 있다. 즉, 배터리 추진 선박이 이처럼 기존 화석 연료 발전을 주도하는 국가에서 운항이 되는 경우, 디젤 선박 대비 큰 환경적 이점이 없거나 오히려 더 악화시킬 수 있다는 사실을 알 수 있다.

반면, 본 연구에서는 LCA 기법을 선박에 적용하는 중요성에 대해서 다시 한번 피력하며, 표준화된 적용 방식의 도입 및 적용의 필요성을 재차 확인시켜 준다. LCA는 최적의 의사 결정을 위해서 필요한 것으로 인식되기 시작하였음에도 불구하고, 여전히 조선/마린 분야에서의 적용 및 보급은 미비하다.

여전히 국제해사기구 및 엔지니어들은 훈련된 지식과 데이터의 부족으로 표준화된 LCA 방법을 제시하는데 어려움을 겪고 있는 가운데, 본 연구는 LCA를 사용하여 배터리 추진 선박의 친환경성을 확인함으로써 현재 국제사회의 문제점을 해결하는 데 도움을 줄 것으로 사료된다.

또한 조선소, 선주나 연구원들에게 LCA의 선박 연료에 적용하는 표준화 된 방법을 마련하기 위한 예비 연구로 볼 수 있다.

본 연구의 결과는, 표면적으로는 배터리 추진 선박이 궁극적으로 해상 환경보호에 크게 이바지할 것으로 기대가 되지만, 국가별 발전 방식에 따라 그 기여도에 큰 차이가 있다는 사실을 보여 준다. 따라서 향후 해운 정책 및 제도 개발 및 개선에 있어서 이와 같은 사실을 고려하여 더 긍정적인 방향으로 나아갈 수 있어야 할 것으로 판단된다.

만약 기존의 환경분석기법인 EEDI 또는 EEOI를 배터리 추진 선박 또는 연료전지 선박에 적용하는 경우, 국가/발전 연료에 상관없이 항상 대기 오염 양은 항상 '0'으로 나타나게 된다. 이는 앞서도 말한 바와 같이, 상기 방식들은 선박의 운항 중에 나오는 대기오염원에서만 계산하기 위하여 수식화되어 있기 때문이다. 이는 국제 해운이 왜 LCA 기법을 시급하게 도입해야 하는지에 대한 이유가 된다.

본 연구가 소프트웨어에 의존하여 결과를 해석하고 했다는 점에 대하여 논문이 가져야 할 방법론에 대한 독창성이 부족해 보일 수 있다. 그러나 각각의 LCA 모델들 속에는 복잡한 정보들이 함축되어 있고, 모델링 방식, 사용하는 데이터의 범위 및 신뢰성, 실제적인 모델들의 결합 등이 제대로 이루어져야만 비로소 의미 있는 결과가 도출될 수 있다. 현재 조선-해운 분야에는 LCA 적용에 대한 상당한 어려움을 겪고 있는데, 이는 표준화된 방식의 부재와 전문성의 결여에서 비롯된다.

바꿔 말해, 우리가 주목해야 하는 부분은, 프로그램 자체가 아니라, 적용된 LCA 모델링 및 환경 분석이 얼마만큼 깊이 있고 현실적으로 이루어졌는가, 그리고 적용 방식이 얼마만큼 보편성을 가지는가에 따라 LCA의 독창성이 판단되어야 한다. 이런 관점에서 보면, 본 연구는 선박에 대한 LCA의 표준화에 기여할 수 있다는 점에서 독창성이 있다고 판단된다.

그와 더불어, 연구 결과가 던지는 메시지는 우리의 편견을 깨고, 실질적으로 친환경 사회로 갈 수 있는 방향을 간접적으로 제시한다는 점에서 시사하는 바가 크다. 이 때문에, 논문의 본질적인 목적인 '새로운 지식에 대한 독창적 기여(Original contribution to Knowledge)'라는 관점에서 의미 있는 연구임을 믿어 의심치 않는다.

5. 결 론

본 연구의 결론은 다음과 같이 요약된다.

1) 본 연구는 각 발전용 에너지가 환경에 미치는 영향을 비교하여 환경 편익이나 해악 정도를 보여 주었으며, 국가별로 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 특히, 대상 선박을 4개국에 동일한 운항 조건으로 운항시켰을 때, 국가별 환경 분석 결과는 아래와 같다.

GWP (kg CO₂ eq.) : 7.52 × 10⁶ (영국), 1.45 × 10⁷ (일본), 2.38 × 10⁷ (인도), 1.19 × 10⁷ (미국)

AP (kg SO₂ eq.) : 1.97 × 10⁴ (영국), 1.75 × 10⁴ (일본), 2.71 × 10⁵ (인도), 1.71 × 10⁴ (미국)

EP (kg Phosphate eq.) : 1.57 × 10³ (영국), 2.44 × 10³ (일본), 1.28 × 10⁴ (인도), 1.90 × 10³ (미국)

2) 일반적으로 선진국의 경우, 개발 도상국에 비해 상대적으로 발전에 의한 대기오염원의 배출량이 적음을 알 수 있다. 실제로 이는 해당 국가들이 친환경 연료 사용을 보다 적극적으로 추진하고 있기 때문이다.

3) 또한 이러한 발전 방식에 따른 다른 환경 결과는 심지어 배터리 추진 선박이 기존의 디젤 선박 대비 환경 영향이 크게 나타날 수 있으므로, 국제 해운이 적절한 에너지 정책을 수립하기 위해 반드시 고려해야 할 사항으로 판단된다.

4) 배터리 추진은 친환경 선박 에너지로 알려졌지만 기존 화석 연료보다 환경에 더 해로운 사례를 찾을 수 있음을 확인했다. 본 연구는 현재 우리가 오해하는 대체 에너지의 고정 관념을 LCA 기법이라는 연구 방법을 통해 제대로 이해하는데 기여할 것으로 기대되며, LCA의 선박 적용이 보다 보편화될 필요성을 보여 준다.

References

1. T. H. Joung et al., 2020, "The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050", *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, Vol. 4,

No. 1, pp 1-7.

(<https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1707938>)

2. DNVGL, 2018, *Maritime Forecast to 2050*, p. 24, Oslo, Norway.

3. DNVGL, 2019, *Alternative Fuels in the Arctic (Norway-WWF)*, p. 30, Oslo, Norway.

4. T. H. Lee and H. J. Nam, 2017, "A study on green shipping in major countries: in the view of shipyards, shipping companies, ports, and policies", *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Vol. 33, No. 4, pp. 253-262. (<https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2017.12.009>)

5. I. B. Fridleifsson et al., 2008, "The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change", *IPCC scoping meeting on renewable energy sources, proceedings, Luebeck, Germany*, Vol. 20. No. 25. pp. 59-80.

6. IEA, 2018, *World Electricity Generation (26,700 TWh)*. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=CO2%20emissions%20from%20electricity%20generation%20factors>. [Viewed 2020-02-26].

7. C. Faităr, and I. Novac, 2016, "A new approach on the upgrade of energetic system based on green energy. A complex comparative analysis of the EEDI and EEOI", In *ModTech International Conference Modern Technologies in Industrial Engineering*, Vol. 145, p. 042014.

8. IMO, 2018, *IMO resolution MEPC, 204(72): Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, London IMO.

9. Republic of Korea, 2019, *ISWG-GHG 6/5/1: Further consideration of concrete proposals to encourage the uptake of alternative low-carbon and zero-carbon fuels, including the development of lifecycle GHG/carbon intensity guidelines for all relevant types of fuels and incentive schemes, as appropriate.*

10. Republic of Korea, 2019, ISWG-GHG 5/4/5: Consideration on development of the lifecycle GHG/carbon intensity guidelines for all types of fuels.
11. H. Ma, K. Steernberg, X. Riera-Palou and N. Tait, 2012, "Well-to-wake energy and greenhouse gas analysis of SOX abatement options for the marine industry", *J. Transport. Res. Part D.: Trans. Environ. Res. Eng. Manag.*, Vol. 17, pp. 301-308.
(<https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.01.005>)
12. S. Brynolf, E. Fridell and K. Andersson, 2014, Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol, *J. Clean. Prod.*, Vol. 74, pp. 86-95.
(<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.052>)
13. P. Gilbert et al., 2018, "Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels", *J. Clean. Prod.*, Vol. 172, pp. 855-866.
(<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.165>)
14. B. Jeong, H. Wang, E. Oguz and P. Zhou, 2018, "An effective framework for life cycle and cost assessment for marine vessels aiming to select optimal propulsion systems", *J. Clean. Prod.* Vol. 187, pp. 111-130.
(<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.184>)
15. S. S. Hwang et al., 2020, "Life Cycle Assessment of Alternative Ship Fuels for Coastal Ferry Operating in Republic of Korea", *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8, No. 9. pp. 660-668.
(<https://doi.org/10.3390/jmse8090660>)
16. ISO, 2006. ISO 14001: Environmental Management: Life cycle Assessment; Requirements and Guidelines, Geneva: ISO.
17. Sphera. GaBi Solutions: GaBi LCA Database Documentation 2020; Extension Database II: Energy, 2020 Available at:<http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-database-2020-lci-documentation/extension-database-ii-energy/>. [Viewed 2020-07-26]