

# 액화천연가스 선박의 기화율 변화에 따른 전망적 전과정평가

## Prospective Life Cycle Assessment of Changes in the Boil-off Rate of LNG Ships

서강현\* · 최혜진\* · 이재웅\*\* †  
Kanghyun Seo\*, Hyejin Choi\* and Jae-Ung Lee\*\* †

(Received 03 April 2024, Revision received 26 April 2024, Accepted 29 April 2024)

**초록 :** 선박에 의한 온실가스 감축을 위해 여러 기술들이 개발되고 있지만, 많은 기술들이 선박용으로 그 성숙도가 낮은 상태이다. 또한, 이런 기술들의 환경영향을 평가할 수 있는 방법도 부족한 상황이다. 본 연구는 액화천연가스 선박의 화물창 기화율을 줄이기 위해 단열기술을 개선하는 것이 환경에 미치는 영향을 평가했다. 이를 위해 장단기메모리와 지수평활법을 통한 예측모델과 시나리오 분석이 적용된 전망적 전과정평가를 사용하였다. 그 결과, 기화율이 0.15%에서 0.04%로 감소함에 따라 지구온난화지수, 산성화 지수 및 부영양화 지수가 약 3.2~11.0% 감소하였고, 저압분사장치 엔진이 탑재된 180,000 m<sup>3</sup>급 선박에서 가장 효과가 높았다. 이는 기술 및 운용 효율성 개선이 상당한 환경 개선을 가능케 하며, 전망적 전과정평가는 온실가스 저감 기술 채택을 위한 의사결정지원 도구로 유용할 수 있음을 보여준 것이다.

**키워드 :** 온실가스, 기화율, 예측모델, 시나리오 분석, 전망적 전과정평가

**Abstract :** Greenhouse gas (GHG) reduction technologies are being developed to reduce emissions from ships, but many are not yet mature for ships. Moreover, the methodology to assess the environmental impact of technologies is lacked. This study assessed the environmental impacts of improving tank insulation to reduce boil-off rate (BOR) in LNG ships. Accordingly, prospective life cycle assessment (P-LCA) was used, incorporating predictive model with long short-term memory and an exponential smoothing, alongside scenario analysis. The results showed that GWP, AP, and EP decreased by about 3.2 to 11.0% as BOR reduced from 0.15% to 0.04%. The mitigation effect was highest for 180,000m<sup>3</sup> capacity with low pressure injection engine. These results suggest that technology and operational efficiency improvements lead to significant environmental improvements. Additionally, using P-LCA for the adoption of GHG reduction strategies has demonstrated its usefulness as a decision support tool.

**Key Words :** Greenhouse Gas, Boil-Off Rate, Prediction Model, Scenario Analysis, Prospective Life Cycle Assessment

\*\* † 이재웅(<https://orcid.org/0000-002-2839-0448>) : 부교수, 한국해양대학교 기관시스템공학부

E-mail : [julee@kmou.ac.kr](mailto:julee@kmou.ac.kr), Tel : 051-410-4662

\*서강현(<https://orcid.org/0000-0002-6495-1820>), 최혜진(<https://orcid.org/0000-0002-4265-9992>) : 대학원생, 한국해양대학교 해사IT공학과

\*\* † Jae-Ung Lee(<https://orcid.org/0000-002-2839-0448>) : Associate Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University.

E-mail : [julee@kmou.ac.kr](mailto:julee@kmou.ac.kr), Tel : 051-410-4662

\*Kanghyun Seo(<https://orcid.org/0000-0002-6495-1820>), Hyejin Choi(<https://orcid.org/0000-0002-4265-9992>) : Graduate student, Division of Marine Information Technology, Korea Maritime & Ocean University.

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 해상 운송과 관련된 대기 오염 영향을 감소시키기 위해 2008년 대비 2050년까지 온실가스 50% 감축 목표를 수립하였다.<sup>1)</sup> 이를 위해, IMO에서는 온실가스(Greenhouse Gas, GHG) 배출량 측정 및 방법에 대한 연구 수행과 GHG 전략의 효과적인 구현 및 개발도상국의 개선 노력에 대한 지원 프로젝트인 GreenVoyage2050을 수행 중에 있다.<sup>2)</sup> GHG 저감을 위한 기술 중 선박 운항효율 최적화 방안은 화물유형, 기상상태, 항로 등의 개선을 통해 연료사용량을 감소시키는 것이다.<sup>3)</sup> 이를 통해 대기오염물질 배출량의 감소를 기대할 수 있다. 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG)를 연료 또는 화물로 적재하는 경우, LNG를 액화 상태로 저장하기 위해 대기압 상태에서  $-162^{\circ}\text{C}$ 를 유지할 수 있도록 단열 설계된 화물창 탱크를 탑재한다. 하지만 단열 성능의 한계로 탱크 내부로 열이 침투하면, LNG는 증발 및 팽창되어 화물창 내 압력 상승을 초래함으로써 탱크의 안전성을 위협하게 된다. 이를 제어하기 위해 증발가스(Boil-Off Gas, BOG)를 방출, 소각, 재액화 및 추진 연료로 사용하는데 이 과정에서 불필요한 LNG의 소모를 야기하게 된다.<sup>4)</sup>

Fig. 1은 대표적인 멤브레인 LNG 탱크 제작사인 GTT사의 실적 데이터를 기반한 기화율(Boil-Off Rate, BOR) 변화 추세를 보여 준다. BOR의 감소 경향은 증발되는 양을 제어하는 단

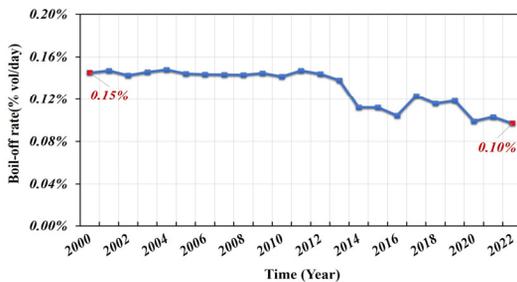


Fig. 1 Trends in boil-off rate (BOR) changes

열기술의 발전이 가능하기 때문이다. 그 예로, 저장탱크 격벽 사이에 열전달율이 낮은 절연재를 채택하고 그 두께를 조정하거나, 화물창 크기를 증가시키는 것이다.<sup>7)</sup> 이러한 기술 발전과 LNG 연료 추진 선박의 운송량 증가 추세를 고려하면 향후 더 낮은 BOR의 요구와 이를 충족시키기 위한 기술의 지속적인 개발이 예상된다. 하지만 기존 연구들은 주로 BOG 발생량을 예측하거나 후처리 방안들에 의해 감소된 연료소모량을 산정하고 이로 인한 CO<sub>2</sub> 배출량 평가에만 중점을 두고 있다.<sup>5)</sup>

이는 지구온난화에 영향을 미치는 GHG 중에 CO<sub>2</sub>보다 더 큰 영향력을 가진 CH<sub>4</sub>(25~30배), N<sub>2</sub>O(265배) 등의 다른 온실가스의 감축량이 배제됨에 따라 정확한 환경영향도를 제공하는데 한계가 있다. 또한 IMO 회원국과 관계자들이 선박에 의한 배출량 평가 시, 연료의 생산과 사용단계를 포함하는 전과정(Lifecycle) 관점과도 부합되지 않는다.<sup>6)</sup>

IMO에서는 이러한 GHG 배출량 산정의 한계를 개선하고자 2018년 MEPC 72차 회의에서 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 가이드라인을 개발하기로 의결하였다. 이후, 2023년 MEPC 80차 회의에서 LCA 가이드라인을 제정하였다.<sup>2)</sup>

LCA는 요람에서 무덤까지 제품 및 서비스와 관련된 배출량을 정량화하는 환경분석기법으로 선박과 관련한 분야인 연료, 선박개조, 선형 및 추진기관 등의 다양한 분야에도 사용되고 있다. 1996년 해운 분야에 처음으로 전주기 관점의 평가방법을 적용한 이래로 선박의 건조, 운영 및 폐선, 선박 추진기관 선정을 위한 의사결정지원 모델을 개발하는 데에도 사용되었다. 또한 환경규제를 충족시키기 위한 기술, 대체연료의 사용에 따른 배출량을 전과정 관점에서 평가하는 연구가 수행되었다. 그 밖에도 선종별 다른 운항특성, 선체구조의 변경 및 선박의 평형수 처리 시스템 적용에 따른 환경영향을 추정하였다.<sup>7-11)</sup> LCA는 Fig. 2와 같이 국제표준기구(International Standard Organization, ISO)에 규정된 4단계의 기본 프레임워크를 따라 수행된다. 하지만 기존 LCA는 과거 및 현재 시스템과 기술 데이터를 사용함에 따라

기술, 정책 변화 및 시장상황 등의 미래의 잠재적인 환경영향을 분석할 수 없다.<sup>12)</sup> 이에 따라 미래의 변화가 반영된 제품과 서비스의 잠재적인 환경영향을 평가하는데 한계가 있다. 이는 GHG 저감 기술의 개발과 그 효과를 평가하기 위해 개선된 LCA 방법론의 필요를 의미한다.<sup>13)</sup>

전망적 전과정평가(Prospective Life Cycle Assessment, P-LCA)는 기술, 제품 및 서비스와 관련된 미래의 환경영향을 평가하는 기법이다. P-LCA는 개발 단계에 있거나 상용화되지 않은 제품이나 기술의 미래 영향을 평가하는데 유용하다. 이를 위해 특정한 시점의 목표값 예측 및 시나리오를 생성하여 그 결과를 산정하고 비교한다. 이러한 과정은 기존 LCA 한계를 개선한 P-LCA가 갖는 차별성이다. 이러한 기법은 미래 친환경 제품 개발, 전력생산 기술변화, 기술 발전, 선단 규모 증가 및 재생에너지 개발 및 생산에 따른 문제점 식별 및 해결 방안을 수립하는 연구에 적용되었다. 또한 친환경 디자인을 위한 솔루션을 제공하기 위해 특허들을 분석하여 환경영향을 평가하는 연구가 수행되었다.<sup>14)</sup>

본 연구에서는 CH<sub>4</sub>로 구성된 LNG의 저장 탱크 BOR을 예측하고 시나리오 분석 단계를 추가한 P-LCA 방법론을 통해 미래의 환경영향도를 전과정 관점에서 산출하여 평가하고자 한다. 이를 통해 미래에 적용될 GHG 저감 기술들의 환경영향도 평가를 위한 방법론과 환경규제의 현실적인 적용을 위한 의사결정 도구로의 실효성을 검증하고자 한다.

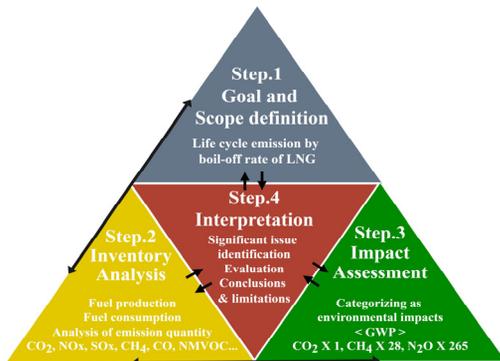


Fig. 2 Life cycle assessment framework by ISO

## 2. 연구 방법

Fig. 3은 P-LCA의 5단계 프로세스를 나타낸다. ISO 지침에 따른 기존의 LCA 4단계는 동일하지만, 미래 기술 및 상황에 대한 예측을 통해 시나리오 생성 단계가 연구의 목적에 맞게 수정되었다. 이 단계를 통해 향후 발생할 수 있는 다양한 변화에 대한 잠재적인 환경영향을 평가할 수 있다. 또한 이 단계는 초기 단계 기술의 발전과 시간 경과에 따른 영향을 확인함으로써 보다 친환경적인 솔루션 개발을 지원할 수 있다.

### 2.1 목표 및 범위 정의

본 연구에서는 Table 1에서와 같은 운송계약하에 미국과 한국을 운항하는 LNG 운반선의 탱크 BOR 기술의 발전에 따른 환경영향도를 평가하였다. 이를 위해 Table 2와 같이 4가지 기준 시나리오를 수립하였다. 시나리오별로 20년간 LNG, LSHFO(Low Sulfur Heavy Fuel Oil) 및 MGO (Marine Gas Oil)를 연료로 사용하는 선박의 화물창 크기와 주기관 출력별 배출량을 산정하였다.

Table 1 Long-term transport contract information

Contract information	
Contract volume/year	2,800,000 ton
Contract period(lifetime)	20 years
Tank filling limit	98.5 %
LNG density	0.45 ton/m <sup>3</sup>
Sailing distance	9998 nm
Normal seagoing distance	9818 nm
Dock repair period	42 days
Shaft loss efficiency	98~99%
Engine margin	20%
Used fuel	LNG / LSHFO / MGO

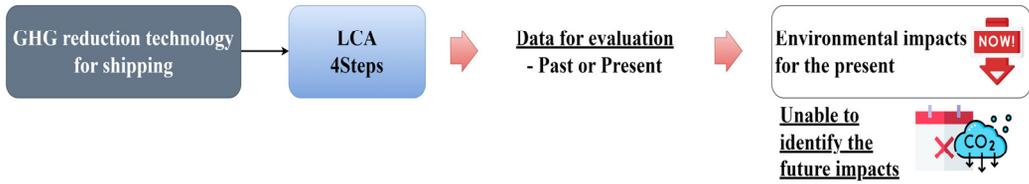
Table 2 BOR target on scenario

BOR target	
Past(2000)	0.15% vol/day
Present(2023)	0.10% vol/day
Future 1(2030)	0.07% vol/day
Future 2(2050)	0.04% vol/day

\* Future 1 & 2 target : From prediction model

A. Conventional LCA → Past or present evaluation

Evaluation of the past or present environmental impacts



B. Prospective LCA → Potential evaluation

Evaluation of the potential environmental on the future technology.

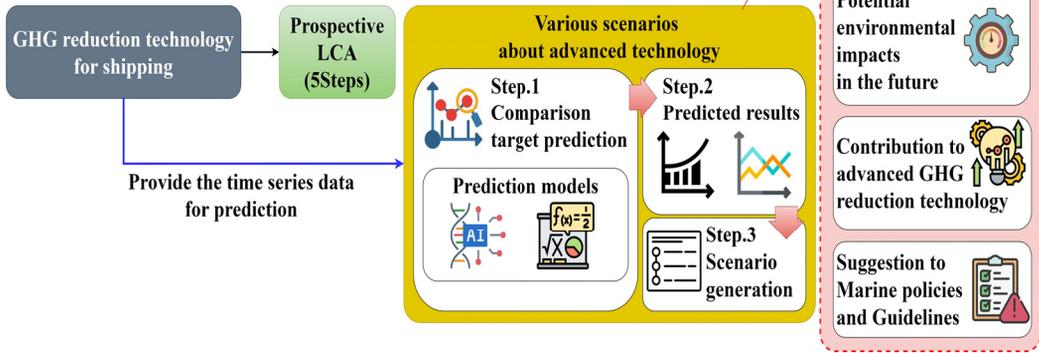


Fig. 3 Comparison between conventional LCA (A) and prospective LCA (B)

2.2 인벤토리 분석(Life Cycle Inventory analysis, LCI)

본 연구에서는 LNG 탱크 제조사의 과거 실적을 기반한 시계열로 구성된 BOR 데이터를 수집하여 예측 분석을 위해 사용하였다. 또한, 선박에서의 연료 사용에 따른 배출량 산정을 위한 계수로 미국의 에너지부에서 개발한 Greet 플랫폼과 IMO GHG study 2020에서 제공하는 데이터를 사용하였다.

이러한 데이터를 가지고 LCA 수행을 위한 모델링 과정을 수행하는데, 본 연구에서는 선박의 건조와 폐선을 제외하고 운항 중 주기관과 발전기의 구동에 필요한 연료의 생산, 사용 및 폐기 단계만을 모델링 하였다.

이는 선박의 전과정 동안 발생하는 배출량을 산정할 경우, 선박의 건조와 폐선 단계에서의 배출량이 운항 단계에서의 배출량에 비해 낮은 비율을 차지하기 때문이다.<sup>15)</sup>

2.3 시나리오 생성(Scenario generation)

이 단계는 기존 LCA와의 차별성을 가진 단계로, BOR 데이터를 통해 LCA 수행 목표값을 예측한다. 하지만 BOR 데이터는 선박의 사양, 기상상태 및 LNG 성분 등과 같은 다양한 변수에 의해 변동성이 높고, 선박관리사와 제조사의 보안 사항으로 데이터 취득에 한계가 있다. 이에 GTT사로부터 공개된 LNG 선박 BOR 실적 데이터를 수집하여 시계열 형태로 처리하였다. 이러한 데이터를 이용해 2030년과 2050년 시점 BOR을 Fig. 4와 같은 예측모델에 적용하였다.

예측모델로 시계열 데이터 예측에 특화된 인공지능 기법인 장단기메모리(Long Short-Term Memory, LSTM) 모델과 추세는 있으나 계절성 패턴이 없는 데이터를 예측하는데 적절한 지수평활(Exponential Smoothing, ES)을 사용하였다. 예측의 정확성과 시나리오 분석을 위한 기준값의 객관성을 높이기 위해 두 모델의 결과값에 가중치를 각

50%씩 부여한 하이브리드 형태로 적용하였다.<sup>16)</sup>

Fig. 5는 이러한 예측모델을 통해 산출된 결과를 보여 준다. 이렇게 예측된 BOR 결과는 선박 화물창 크기별 엔진사양 및 출력별로 환경영향 비교를 위해 Table 3과 같이 적용되었다. 이러한 시나리오를 기반으로 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO 및 NMVOC의 배출량을 연료의 생산과 사용 단계로 구분하여 산출하였다. Table 4와 5는 사용 단계의 배출량 산정을 위한 고압분사방식엔진

(High Pressure Injection Engine, HPIE)과 저압분사 방식엔진(Low Pressure Injection Engine, LPIE)의 주기관별 배출계수를 나타낸다. 추가적으로, 20년간 선박의 발전기 운전에 의한 배출량 산정은 MGO 사용 시, HPIE 배출계수에서 NO<sub>x</sub>만 0.166 (g NO<sub>x</sub>/g fuel)으로 다르게 적용하였다.<sup>1)</sup>

배출량 시나리오상 화물창 크기는 BOR 감소에 영향을 미치는 변수이다.<sup>4)</sup> 이에 따라, Clarkson 리서치로부터 현재 운항 중인 LNG 운송 선박들의 화물창 크기별 현황을 조사한 결과, 174K와 180K가 주를 이루었고, 그 다음으로 200K 크기의 선박이 운항 중인 것으로 나타났다.

IMO가 권고한 온실가스 저감 기술 가운데 주기관의 출력을 낮추어 운항하는 것이 가장 신속하고 용이한 방안으로 알려져 있다. 이러한 환경정책의 방향을 반영하기 위해 정상 항해구간 중 주기관 평균 출력을 85%, 65% 및 45%로 설정하여 BOR 시나리오별로 비교하였다. 또한 주기관의 주 연료로 LNG를 선정하였는데, 이는 선박에 의한 배출량 감소와 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 같은 배출량 제한에 의한 대체연료의 적용이 불가피한 상황을 반영하기 위함이다.

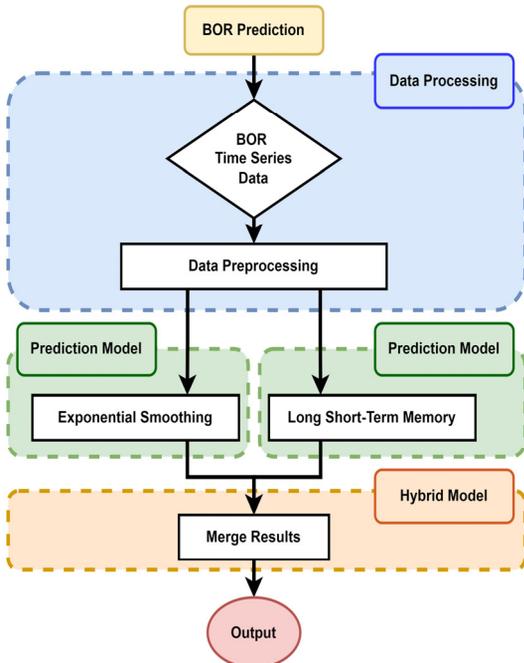


Fig. 4 BOR prediction flowchart using hybrid prediction model

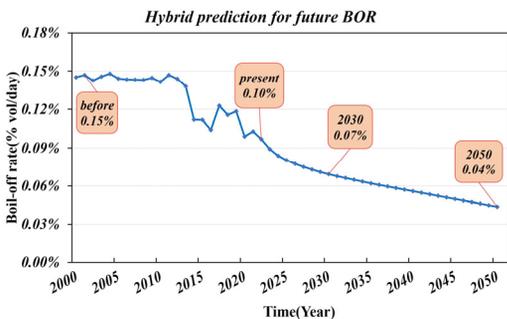


Fig. 5 Result of BOR prediction on 2030 & 2050

Table 3 Category for scenario generation

BOR (% vol/day)	Cargo volume (m <sup>3</sup> )	Engine type	Load (%)
0.15	174,000	HPIE	85
	174,000	LPIE	
	180,000	LPIE	
	200,000	LPIE	
0.10	174,000	HPIE	65
	174,000	LPIE	
	180,000	LPIE	
	200,000	LPIE	
0.07	174,000	HPIE	45
	174,000	LPIE	
	180,000	LPIE	
	200,000	LPIE	
0.04	174,000	HPIE	45
	174,000	LPIE	
	180,000	LPIE	
	200,000	LPIE	

Table 4 Emission factors for various fuel type in case of HPIE (g pollutant/g fuel)

Fuel Emission	LNG	LSHFO	MGO
CO <sub>2</sub>	2.750	3.114	3.206
CH <sub>4</sub>	0.00278	0.00011	0.00012
N <sub>2</sub> O	0.00042	0.00035	0.00036
SO <sub>x</sub>	0.00003	0.01960	0.00140
NO <sub>x</sub>	0.04722	0.03797	0.04033

Table 5 Emission factors for various fuel type in case of LPIE (g pollutant/g fuel)

Fuel Emission	LNG	LSHFO	MGO
CO <sub>2</sub>	2.750	3.114	3.206
CH <sub>4</sub>	0.00278	0.00011	0.00012
N <sub>2</sub> O	0.00042	0.00035	0.00036
SO <sub>x</sub>	0.00003	0.01960	0.00140
NO <sub>x</sub>	0.04722	0.03797	0.04033

Table 6 Characterization factors for environmental impact categories

Impact categories	Characterization factors
GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	CO <sub>2</sub> (1), CH <sub>4</sub> (28), N <sub>2</sub> O (265)
AP (kg SO <sub>2</sub> eq.)	SO <sub>x</sub> (1), NO <sub>2</sub> (0.7), NH <sub>3</sub> (1.88)
EP (kg PO <sub>4</sub> eq.)	PO <sub>4</sub> (1), NO <sub>x</sub> (0.13), NH <sub>3</sub> (0.35)

## 2.4 영향 평가(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

선박은 주로 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO 및 NMVOC 등을 생성하는 화석 연료를 사용한다.<sup>3)</sup> 이러한 배출물은 지구온난화 지수(Global Warming Potential, GWP), 산성화 지수(Acidification Potential, AP) 및 부영양화 지수(Eutrophication Potential, EP)에 직접적으로 기여한다. 이는 Table 6에서 나타낸 것과 같이 배출물질별 특성화 계수에 의해 산정한다. 이러한 영향 범주는 BOR의 변

화에 따른 환경영향을 정량화하므로 시나리오별 비교를 용이하게 한다.

## 2.5 해석(Interpretation)

해석 단계는 다른 단계와 지속적인 상호 작용을 통해 목표 및 범위 설정, 인벤토리 분석 및 평가 결과에 대한 잠재적 문제를 식별하고 그에 따라 개선 조치를 취한다. 다른 단계에서 얻은 모든 결과의 조합을 사용하여 본 단계에서 연구 결과를 해석한다.

# 3. 결 과

## 3.1 지구온난화 지수

Fig. 6은 BOR 시나리오상의 GWP를 비교한 결과이다. 연구 결과, BOR이 감소함에 따라 환경에 미치는 영향은 모든 화물창 크기와 엔진별로 감소하는 경향을 나타냈다. 그 가운데 174K-HPIE 추진기관이 탑재된 선박의 GWP가 모든 시나리오에서 가장 낮게 나타났고, 180K-LPIE 탑재 선박이 가장 높은 결과를 나타냈다.

엔진타입별 배출량 차이는 BOR 0.15%와 주기관 출력 65% 구간에서 174K-HPIE와 180K-LPIE가 1.55E+09로 가장 높게 나타났다. 180K와 200K-LPIE 선박은 더 많은 LNG를 운송할 수 있음에도 불구하고, 174K-HPIE 선박보다 환경적으로 나쁜 영향을 미치는 것으로 나타났다.

LPIE의 경우, 공기와 연료의 예혼합을 통해 저압으로 연료를 실린더 내에 분사하여 연소를 하게 된다. 반면에, HPIE는 고압으로 연료를 실린더 내에 직접적으로 분사하여 연소 과정을 갖기에 LPIE보다 완전한 연소를 하는 특성을 갖기 때문이다.<sup>17)</sup> 또한 LPIE가 CO<sub>2</sub>보다 온난화 영향력이 26배 높은 CH<sub>4</sub>를 직접적으로 배출하는 양이 HPIE보다 많기 때문이다. 비록 180K-LPIE 선박이 가장 높은 GWP 결과를 보여 주었지만, 평균 45%의 엔진 출력으로 운항하면서 BOR이 0.04%까지 감소하는 경우, GWP가 9.6% 개선되는 가장 높은 효과를 나타냈다. 추가로, 이러한 BOR의 감소는 선박에 의한 환경영향을 개선하는 효과뿐만 아니

라 운항의 효율성을 보여 준다. 특히, 174K 선박의 경우, 주기관 출력을 85%로 운항할 때에 BOR이 0.15%에서 0.07%로 개선되면 운송계약 달성을

위해 투입되는 선박 척수가 6척에서 5척으로 감소함을 보여 주었다. 이는 향후, 환경성에 경제성 측면을 추가 고려한 지속가능성 측면에서 BOR

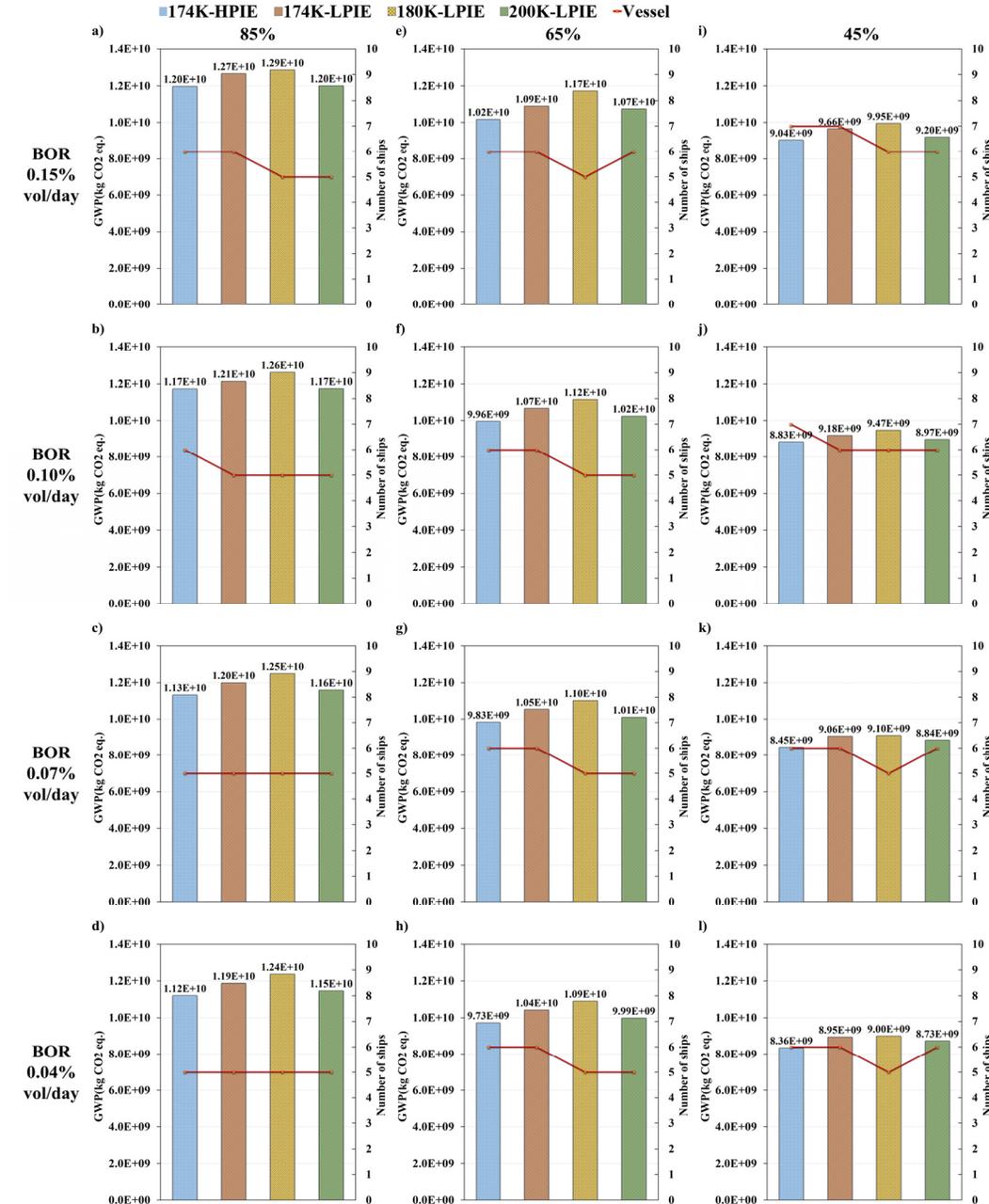


Fig. 6 Result of global warming potential (GWP) by BOR using prospective LCA

감소효과를 확인할 필요가 있음을 나타낸 것이다.

### 3.2 산성화 지수

Fig. 7은 각 시나리오별로 나타낸 AP 결과이다. 앞선 GWP 결과와는 다르게 174K-HPIE 선박이

모든 출력 구간에서 환경적으로 불리하였다. 반면에 200K-LPIE 선박은 모든 시나리오 상에서 174K-HPIE 선박보다 43~50% 낮은 결과를 나타냈다. 이는 LNG를 연료로 사용하기에 SO<sub>x</sub> 배출량은 엔진별로 차이가 없었지만, 2행정 사이클 엔진

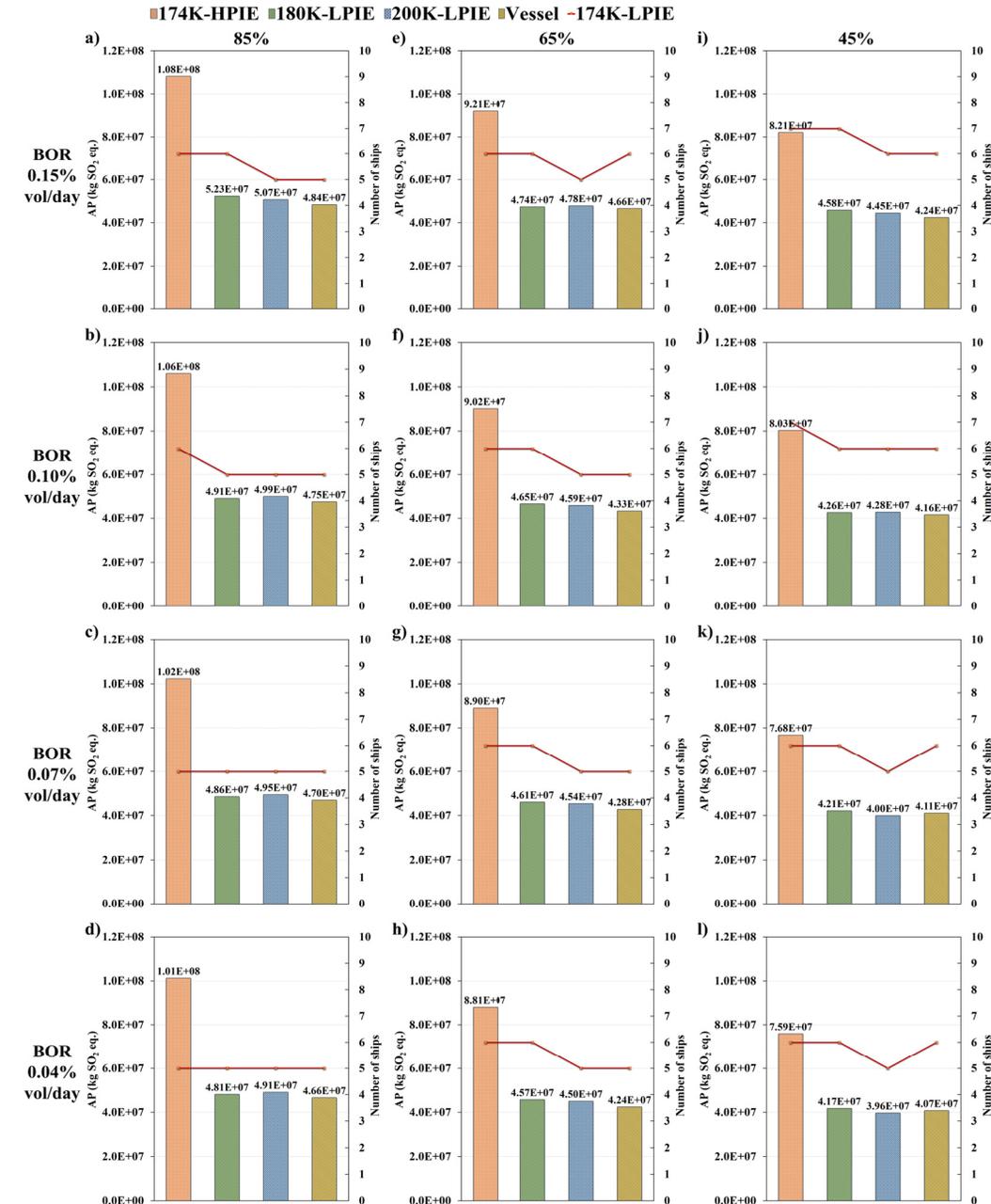


Fig. 7 Result of acidification potential(AP) by BOR using prospective LCA

특성상 높은 연소 온도에 의한 열적 NO<sub>x</sub>가 LPIE 보다 많이 발생하기 때문이다.

이러한 BOR 감소에 따른 AP의 개선율은 180K-LPIE 선박의 경우가 엔진 출력 45%로 운항할 경우, 11.0%로 가장 높은 결과를 보여 주었다.

추가로, AP 지수의 결과만을 고려할 경우, 모든 BOR 조건 하에서 LNG를 연료로 사용하는 선박은 LPIE를 탑재해야 한다. 하지만 GWP 대비 AP 배출량은 대략 100~200배 정도 낮기에 BOR 개선에 따른 유리한 엔진으로 대표하기에는 무리가 있다.

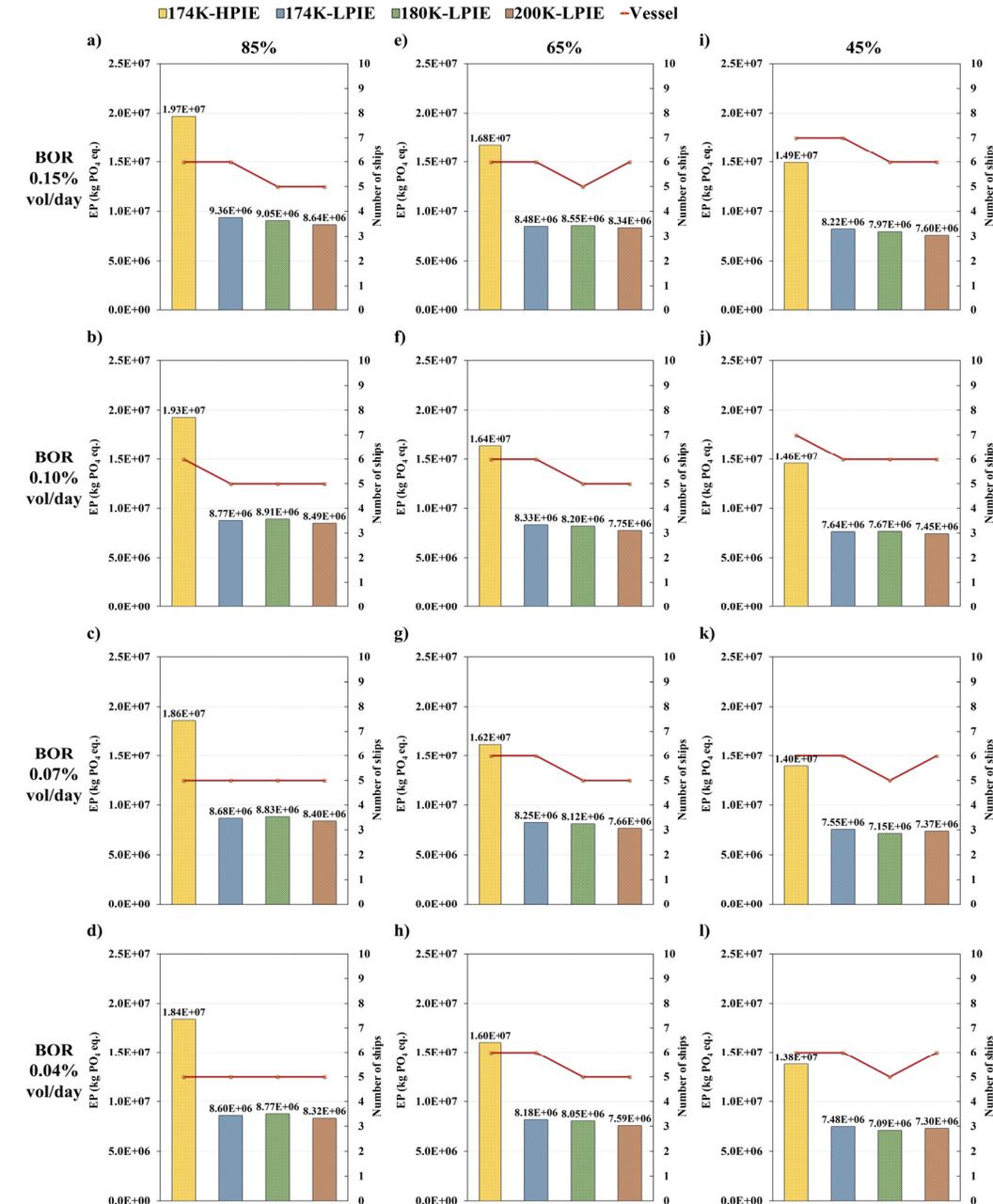


Fig. 8 Result of eutrophication potential(EP) by BOR using prospective LCA

### 3.3 부영양화 지수

Fig. 8은 각 시나리오의 EP 결과를 보여 준다. 그 결과는 AP 지수의 결과와 동일한 경향성을 나타냈다. LPIE 탑재 선박들이 큰 차이가 없게 나타났지만, 그 가운데 200K-LPIE 선박이 174K-HPIE 선박보다 44~53% 가량 적은 양을 배출하는 것으로 나타났다. 이는 앞선 AP 결과와 동일하게 고압 연료 분사 방식의 엔진의 특성에 따라 NOx 배출량이 많이 발생하기 때문이다.

BOR 개선에 따른 시나리오별 감소율은 AP와 동일하게 180K-LPIE 선박이 45%의 출력으로 운항할 경우, 11.0%로 가장 높은 결과를 보여 주었다. EP 결과도 GWP에 비해 600~1400배 정도의 적은 배출량을 나타내기 위해 LPIE가 HPIE에 비해 BOR 감소에 따른 효과가 크다고 판단하기에는 어려움이 있다. 또한 AP와 EP에서 BOR이 0.07~0.04%이고, 출력이 45%인 경우에는 오히려 180K 선박이 더 낮은 배출량을 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 BOR의 변화보다 엔진 및 운항 특성에 따른 영향이 환경적으로는 더 크다는 것을 보여 준 것이다.

## 4. 결론 및 고찰

본 연구의 결론은 다음과 같이 요약된다.

1) 본 연구는 LNG 선박 화물창 단열과 관련한 기술의 발전에 따라 BOR이 감소됨을 예측하고 예측된 BOR 결과에 따른 환경영향도를 보여 주었다. BOR 감소에 따른 배출량의 변화는 크지 않았지만, 전체적인 감소 경향을 나타냄을 알 수 있었다. BOR이 0.15%에서 0.04%까지 감소하고 화물창크기, 엔진타입 및 출력에 따른 범주별 분석 결과는 다음과 같다.

GWP(kg CO<sub>2</sub> eq.) : 174K-HPIE 모든 BOR 구간에서 가장 낮은 결과를 나타냈고, 180K-LPIE 선박이 가장 높은 결과를 나타냈다.

AP(kg SO<sub>2</sub> eq.) : 174K-HPIE 선박이 환경적으로 가장 불리한 결과를 나타냈고, 200K-LPIE 선박이 다른 LPIE 선박과 큰 차이는 없었으나, 가장 유리한 결과를 나타냈다.

EP (kg PO<sub>4</sub> eq.) : AP 지수 결과와 동일한 경향을 보여 주었다.

1) 기술의 발전에 따른 BOR이 0.04%까지 감소함에 따른 GWP 감소 효과는 엔진출력 45%에서 180K-LPIE 선박이 9.6%로 가장 높게 나타났다. 반면에 엔진출력 85%에서 180K-LPIE 선박이 3.8% 감소로 가장 낮은 효과를 나타냈다. 이러한 결과는 AP와 EP의 지수 결과에서도 동일한 경향을 나타냈다. AP와 EP 범주에서 엔진출력 45%일 때 감소 효과는 11.0%로 가장 높았고, 출력 85%일 때 3.2% 가장 낮은 감소효과를 보여 주었다.

2) 배출량 감소뿐만 아니라, 또 다른 효과는 시나리오상 가장 작은 화물창 크기인 174K 선박의 프로젝트에 투입되는 척수를 줄일 수 있는 것이다. 엔진출력 85%와 45% 구간에서 1척을 줄일 수 있고, 이는 경제적 이점을 보여 준 것이다.

3) 추가로, LNG 선박의 BOR 산정 시 외부 온도조건이 고려된다. IMO는 해수온도 32℃, 대기온도 45℃ 기준이고, USCG(United states coast guard)는 각 0℃와 -18℃를 기준으로 한다. 일반적인 BOR 산정은 IMO 기준 하에서 수행된다. 이는 운항계절과 항로에 따라 BOR의 변화가 가능함을 나타내며, 이를 운항 시 고려하면 추가적인 BOR 감소를 달성할 수 있음을 의미한다.

4) 본 연구는 예측모델을 통해 객관성과 현실성을 가진 구체적인 미래 환경을 설정하므로 보다 정확한 환경영향 평가가 가능함을 보여 주었다. 또한 기술 발전 요인이 갖는 환경적 영향을 평가하는데 P-LCA 적용이 적합함을 보여 준 것이라 판단된다. 다만, 데이터 종류에 따른 예측모델의 변경이 불가피하다는 한계를 가진다.

5) 향후, BOR 변화에 따른 경제적 특성을 보완하고 환경적 개선 정도를 비용으로 환산하므로 선박과 관련된 담당자들에게 의사결정 지원을 위한 정보를 제공할 수 있는 연구를 수행하고자 한다.

## 후 기

이 논문은 2020년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20200615, 자율운항선박 기술개발).

이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00256331, 선박배출온실가스(GHG) 통합관리 기술개발).

### Author contributions

K. H. Seo; Conceptualization, Investigation, Methodology, Visualization, Validation, Writing-original draft. H. J. Choi; Investigation, Resources, Visualization, Writing- review&editing. J. U. Lee; Funding acquisition, Investigation, Project administration, Supervision, Writing-review & editing.

### References

1. IMO, 2020, Fourth IMO GHG Study 2020.
2. IMO, 2023, Resolution MEPC.377(80), 2023 IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships.
3. J. U. Heo, Y. J. Lee, J. R. Cho, M. K. Ha and J. N. Lee, 2003, "Heat Transfer Analysis and BOG Estimation of Membrane-Type LNG Cargo during Laden Voyage", *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, 27(3), 393-400.  
(<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2003.27.3.393>)
4. M. Miana, R. Legorburo, D. Diez and Y. H. Hwang, 2016, "Calculation of Boil-Off Rate of Liquefied Natural Gas in Mark III tanks of ship carriers by numerical analysis", *Applied Thermal Engineering*, 93, 279-296.  
(<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.112>)
5. C. Hwang, S. Oh, D. Kim, T. Gundersen and Y. Lim, 2022, "Energy, economic and environmental analysis of a BOG re-liquefaction process for an LNG carrier", *Energy Reports*, 8, 2351-2362.  
(<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.098>)
6. N. Pavlenko, B. Comer, Y. Zhou, N. Clark and D. Rutherford, 2020, "The climate implications of using LNG as a marine fuel", Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden.
7. B. Jeong, 2018, "Comparative Analysis of SO<sub>x</sub> Emission-Compliant Options for Marine Vessels from Environmental Perspective", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 22(1), 72-78.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.1.072>)
8. N. K. Cho, 2021, "Life Cycle Assessment for Green Ship by Electric Propulsion Systems", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 25(1), 49-59.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.1.049>)
9. S. Bengtsson, K. Andersson and E. Fridell, 2011, "A comparative life cycle assessment of marine fuels: liquefied natural gas and three other fossil fuels", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 225(2), 97-110.  
(<https://doi.org/10.1177/1475090211402136>)
10. B. Jeong, H. Jang, P. Zhou and J. U. Lee, 2019, "Investigation on marine LNG propulsion systems for LNG carriers through an enhanced hybrid decision making model", *Journal of Cleaner Production*, 230, 98-115.  
(<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.054>)
11. E. Blanco-Davis and P. Zhou, 2014, "LCA as a tool to aid in the selection of retrofiting alternatives", *Ocean Engineering*, 77, 33-41.  
(<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.12.010>)
12. P. Tecchio, P. Freni, B. De Benedetti and F. Fenouillot, 2016, "Ex-ante Life Cycle Assessment approach developed for a case study on bio-based polybutylene succinate", *Journal of Cleaner Production*, 112(1), 316-325.  
(<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.090>)
13. S. Cucurachi, B. Steubing, F. Siebler, N.

- Navarre, C. Caldeira and S. Sala, 2022, "Prospective LCA methodology for Novel and Emerging Technologies for BIO-based products", Publications Office of the European Union, Luxembourg. (<https://doi.org/10.2760/695092>)
14. D. García-Gusano, D. Garraín and J. Dufour, 2017, "Prospective life cycle assessment of the Spanish electricity production", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 21-34. (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.045>)
15. S. D. Chatzinikolaou and N. P. Ventikos, 2016, "Critical Analysis of Air Emissions from Ships: Lifecycle Thinking and Results", *Green Transportation Logistics: The Quest for Win-Win Solutions*, Springer International Publishing, 387-412. ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3_11))
16. T. Mathonsi and T. L. Van Zyl, 2021, "A Statistics and Deep Learning Hybrid Method for Multivariate Time Series Forecasting and Mortality Modeling", *Forecasting*, 4(1), 1-25. (<https://doi.org/10.3390/forecast4010001>)
17. T. Huan, F. Hongjun, L. Wei and Z. Guoqiang, 2019, "Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers", *Propulsion system*, 1. (<https://doi.org/10.5772/intechopen.82154>)