

# 생애주기 분석을 통한 LNG운반선 추진시스템의 환경 영향 평가 연구 Investigation on Environmental Impact of Marine LNG Propulsion Systems through a Life Cycle Assessment

이재웅\*†  
Jae-Ung Lee\*†

(Received 17 April 2020, Revision received 15 June 2020, Accepted 16 June 2020)

**Abstract :** Given that using LNG as a marine fuel has increasingly drawn more and more attraction from the marine industry, this paper was aimed to evaluate the optimal selection of three credible LNG engine systems by identifying environmental perspective; they are ultra steam turbine, four-stroke medium speed engine, and two-stroke low speed engine systems. To achieve this goal, this study has chosen one of the various novel techniques as life cycle assessment using software ‘Gabi.’ Research findings from a case study with a 174K LNG carrier have revealed that two-stroke low speed engine systems are the most effective overall, suggesting that this type of engine systems will hold a lead over the other candidates in the-not-too distance future. This paper has finally presented an underlying novelty of the proposed model that could extend our short-term view to the long-term one. Therefore, the impact of the proposed model was strongly believed to be extensive and remarkable to various studies which need proper decision-makings, not necessarily limited to the marine systems.

**Key Words :** Life cycle assessment, LCA, LNG fuelled systems, Environmental impact analysis

## — 기 호 설 명 —

CST : Conventional Steam Turbine  
UST : Ultra Steam Turbine  
FMEFE : 4행정 중속이중연료엔진(Four-stroke Medium speed Dual Fuel Engine)  
TLDFE : 2행정 저속이중연료엔진(Two-stroke Low speed Dual Fuel Engine)  
FGSS : LNG연료공급시스템(Fuel Gass Supply System)  
OPEX : 유지보수비용(Operation Expenditure)

NBOG, FBOG : 자연기화가스(Natural Boil-Off Gas), 강제기화가스(Forced Boil-Off Gas)  
ECA : 배출통제지역(Emission Control Area)  
CAPEX : 초기투자비용(Capital Expenditure)

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경

조선/해양 산업분야 환경 문제에 대한 인식이 증가됨에 따라 국제해사기구(IMO) 및 각 기국

\*† 이재웅(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2839-0448) :  
조교수, 한국해양대학교 해사IT공학부  
E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662

\*† Jae-Ung Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2839-0448)  
: Assistant Professor, Division of Marine Information  
Technology, Korea Maritime and Ocean University.  
E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662

(Flag state)에서는 선박 운항에 기인하는 대기 오염원의 배출량을 감소시키기 위해 단계적으로 규제를 강화해 왔다. 특히, 해양오염방지협약(MARPOL) 부속서(Annex) VI 13규칙 및 14규칙에서는 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx)<sup>1)</sup> 및 입자상물질(PM)의 배출을 점진적으로 감소시킬 것을 명문화한 바 있다. 이와 같은 배경에서, 액화천연가스(LNG)는 액체연료(liquid fuel) 대비 보다 경제적이고 친환경적인 선박 연료로서 환경 규제를 만족시키는 가장 현실적인 대안으로 인식되고 있다. LNG를 주 추진 연료로 운항하는 선박의 수는 꾸준히 증가하는 추세이며, 2025년까지 전 세계적으로 700척에 달할 것으로 전망<sup>2)</sup>되는 가운데 현재 선박 건조시장에서는 크게 울트라 스팀 터빈(UST, Ultra Steam Turbine), 4행정 중속 이중연료 엔진(FMDFE, Four-stroke Medium speed Dual Fuel Engine) 및 2행정 저속 이중연료엔진(TLDFE, Two-stroke Low speed Dual Fuel Engine)이 LNG 선박의 추진시스템으로서 각각의 특징을 가지고 경쟁하고 있다. 그간 각 추진시스템에 대한 경제성 및 안정성 평가에 관한 연구는 엔진제작사의 주도로 활발히 진행되었으나 아직까지 이러한 추진시스템이 장기적인 관점에서 환경에 미치는 영향평가에 대한 연구는 없었다. 따라서 본 연구에서는 174K LNG 운반선을 대상으로 LNG 추진시스템의 생애주기 분석을 통한 환경영향 평가에 대한 사항을 검토하고자 한다.

## 2. LNG 추진 시스템의 개요

비교적 최근까지 LNG 운반선에 적용된 추진시스템은 대부분 주보일러와 고압(HP) 및 저압(LP)터빈이 조합된 외연기관(CST, Conventional Steam Turbine)이 대부분이었다. 그러나 2000년 이후, LNG 연료공급 시스템(FGSS, Fuel Gas Supply System) 기술이 성숙되어 내연기관에서도 LNG연료 사용이 가능하게 됨에 따라 LNG 운반선에 보다 다양한 형태의 추진시스템이 적용 가능하게 되었다. 현재까지 LNG 운반선에 적용되고 있는 대표적인 추진시스템의 개요는 다음과 같다.

### 1) 울트라 스팀 터빈(UST)

UST는 CST를 개선한 시스템으로서 CST 대비 과열증기(super heated steam)의 초온과 초압 설계치가 상향되고 고압(HP) 및 저압(LP) 터빈 사이에 중압(IP) 터빈이 추가 적용됨으로써 추진효율이 향상되었다.

### 2) 4행정 중속 이중연료 엔진(FMDFE)

FMDFE는 오토(otto)사이클 가스모드 또는 디젤(Diesel)사이클 액체모드로 운전이 가능한 내연기관으로 CST, UST 대비 기계효율이 다소 높은 반면, OPEX가 다소 높은 것으로 알려져 있다.

### 3) 2행정 저속 이중연료 엔진(TLDFE)

TLDFE는 FMDFE와 달리 가스모드 및 액체모드에서 동일하게 디젤사이클로 운전이 가능하다. LNG 탱크에서 자연기화된 NBOG는 FGSS를 통해 고압(300 Bar)으로 승압되어 연소실에 직접 분사되므로 UST, FMDFE에 비해 기계효율이 가장 높은 반면, 압축비를 높일 수 있는 디젤사이클 특성상 Nox 발생량이 LNG 추진시스템 중 가장 높아 ECA통과 시 IMO Tier III 요건을 만족시키기 위해 선택적 촉매환원장치(SCR, Selective Catalytic Reduction) 등의 후 처리장치(After Treatment Equipment)를 추가로 설치해야 하므로 CAPEX가 다소 높은 것으로 알려져 있다. 연구대상선박은 174K LNG선으로서 미국 Sabine Pass-인천 간 항로로 연간 약 2,800,000 ton의 LNG를 운송한다.

Fig. 1에 대상선박의 항해정보를 나타내었으며, Table 1에는 선박 정보 및 제시된 엔진 시스템의



Fig. 1 Case ship operational profile

Table 1 Arrangement and specification of engine systems for the case ship

Engine type	Outlines	Composition	Power transmission	Generator engines
UST		High-pressure boiler (2 sets) High, medium & low-pressure turbine	Reduction gear	T/G (2 sets) D/G (for emergency)
FMDFE		Medium Speed Diesel (4 sets)	Electric propulsion	NIL
TLDFE		Slow Speed Diesel (2 sets)	Mechanical shaft	G/E (3 sets)

특성을 고려하여 대상 선박에 장착 가능한 형태로 각 엔진 시스템의 구성을 요약하였다.

### 3. 연구분석 방법론

본 절에서는 앞 절에 열거한 LNG 추진시스템에 대하여 생애주기 분석을 수행하고 환경적 관점에서의 장기적 영향을 평가하는 방법론을 제시한다. 생애주기분석은 특정 시스템, 제품, 프로세스 등의 환경 영향력을 분석하는 기법의 하나로써, 특정 시스템, 제품, 프로세스를 구성하는 원재료의 초기 수집에서부터 제품의 제조, 사용 및 폐기에 이르는 모든 단계를 고려한, 포괄적인 환경 분석 접근 방식을 말한다. 이러한 생애주기 분석 기법은 다음과 같은 4단계의 과정을 통해 수행된다.

- 1) 목표 정의 및 범위 지정; 대상 제품, 프로세스 또는 서비스의 정의 및 연구 범위 식별.
- 2) 인벤토리 분석; 에너지, 원재료 사용량 및 환경 오염원 배출량 분석.

3) 영향 평가; 각 오염원이 인체와 환경에 미치는 유해도 식별 및 오염원 배출량에 따른 환경 영향성 평가.

4) 해석; 영향 평가 결과 고찰을 통해 의사 결정을 위한 최적의 결과 도출.

생애주기 분석을 위한 분석 모델링의 첫 번째 단계는 각 LNG 추진시스템에 대한 분석 범위 및 모델을 지정, 수립하는 것이다. 이후 각 시스템이 환경에 미치는 영향도를 분석, 비교함으로써 보다 친환경적인 LNG 추진 시스템을 선정하는데 필요한 정보를 제공할 수 있게 된다. 다음으로 인벤토리 분석이란 선박의 생애주기 동안 발생하는 에너지 및 원자재 소모량, 대기 오염원 배출량 등을 정의하고 이를 정량화 하는 과정을 말한다. 이를 통해 시스템이 장기적으로 환경에 영향을 미치는 사항을 목록화 할 수 있게 된다. 예를 들어, 주기관을 제작하려면 Steel, 알루미늄과 같은 원자재가 필요하다. 인벤토리 분석은 이러한 원자재의 양, 가공에 필요한 에너지 소모, 환경 영향 등을 종합

적으로 목록화 하여, 각 환경 지표를 계량화 및 정량화 할 수 있다.

Fig. 2에서는 대상 추진 시스템들에 대한 환경 영향 분석 프로세스를 국제 표준화기구(ISO)<sup>3,4)</sup>가 제시한 생애주기 분석 가이드를 토대로 나타내었다. 본 연구에서는 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 PE International GmbH 사의 상용 소프트웨어 ‘GaBi’를 평가도구로 사용<sup>5)</sup>하였으며, 선박의 생애주기는 선박의 ‘건설 (construction)’, ‘운항 (operation)’ 및 ‘폐기(decommission)’ 3단계로 구성하여 모델링하였다. 분석 대상 배출원은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 질소 산화물(NO<sub>x</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>), 비-메탄 휘발성 유기 화합물(NM VOC, Non-methane volatile organic compound), 미립자 물질(PM2.5)과 같이 5가지 주요 해양 오염 물질 유형으로 설정하였다. 또한 추진 시스템 간 상대적인 환경 영향성을 비교하기 위해 모든 배출원은 지정한 화폐 가치로 전환<sup>6)</sup>하였다. 먼저, Fig. 3에서와 같이 모델링의 첫 번째 단계인 선박의 건조 단계에서는 주로 전기 형태의 에너지가 강판, 서포터, 엔진, 장비, 부속품, 도료 등의 제조 및 생산에 사용되는

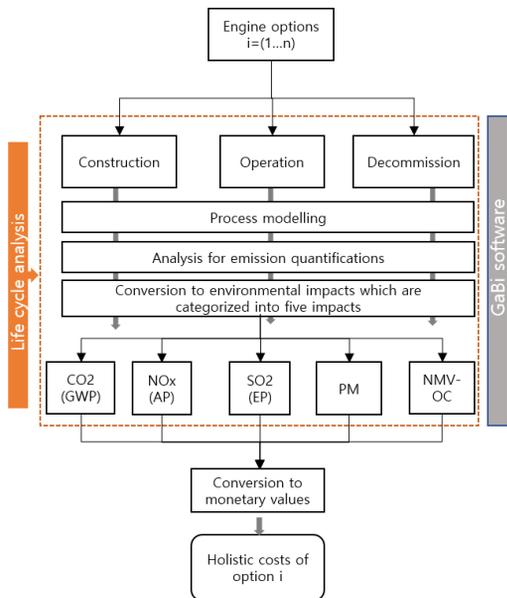


Fig. 2 LCA process for case systems

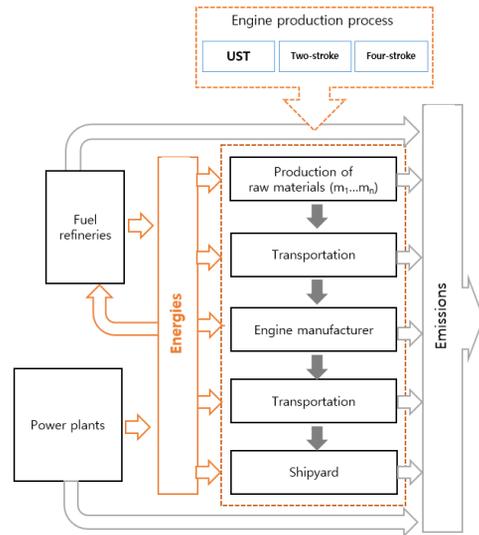


Fig. 3 Construction stage of propulsion system process

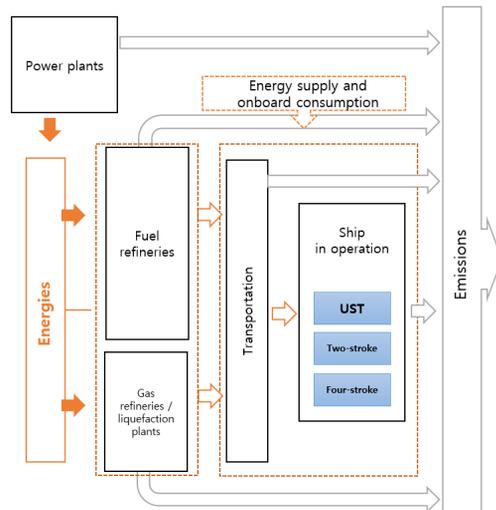


Fig. 4 Operation stage of propulsion system process

것으로 설정<sup>7)</sup>하였다. 또한 주기관 시스템의 생산 및 설치와 관련된 에너지 소비를 추적하고 분석하는 데 중점을 두었으며, 선박 추진 시스템의 생애주기 분석을 위해 엔진제조에서 현장 설치에 이르는 프로세스(원자재의 생산 및 운송, 제조업체에서의 가공 및 재운송, 선박 설치)를 모델링하였다. 또한 강제 절삭 공정의 경우 면적당 8.5 MJ,

용접 공정의 경우, 길이당 15.1 MJ의 전기가 소비되는 것으로 가정<sup>8)</sup>하였다. 각 공정에 대한 에너지 소비는 기본적으로 “GaBi” 데이터를 사용하였으며, 특정 부분에 대해서는 대상선박의 상세 자료를 참고하였다.

Table 2 Emission factors for various fuel types

Emissions substance	Marine HFO emissions factor (g/g fuel)	Marine MGO emissions factor (g/g fuel)	Marine LNG emissions factor (g/g fuel)
CO <sub>2</sub>	3.11400	3.20600	2.75000
CH <sub>4</sub>	0.00006	0.00006	0.05120
N <sub>2</sub> O	0.00016	0.00015	0.00011
NO <sub>x</sub>	0.09300	0.08725	0.00783
CO	0.00277	0.00277	0.00783
NMVOG	0.00308	0.00308	0.00301
SO <sub>x</sub>	0.04908/0.01158	0.00264	0.00002
PM	0.00699	0.00102	0.00018

두 번째로, 선박의 운항 단계에서는 Fig. 4에서와 같이 선박 운항 시 추진 시스템의 활동 단계를 나타내었다. 기본적으로 선박 추진에 관련된 사항이 운항 단계의 주요 프로세스인 것을 감안하면, 에너지 소비 및 오염원 배출은 추진 시스템의 운전과 밀접한 관계가 있음은 자명하다. 각 오염원의 배출량은 Table 2에서와 같이 연료 유형에 따른 오염원 배출 계수와 소비된 연료의 곱으로 나타내었다.<sup>9)</sup> 마지막으로 선박의 폐선 단계에서는 대상 선박이 20년 운항 후, 재활용 시설로 운송되어 폐선되는 것으로 가정하였다. 이 단계에서 각 시스템과 부속품은 재활용 시설에서 해체/폐기/재활용 과정을 거치게 된다. 폐선단계에서 사용되는 에너지원 및 오염원 분석을 위하여 Fig. 5에서와 같이 프로세스 모델링을 수행하였다. 이를 토대로 선박 재활용 과정에서 발생하는 에너지 소비량 및 배출량을 데이터화<sup>10-11)</sup> 하였다. 또한 분석에서 추정된 다양한 유형의 배출량을 금전적 가치로 환산하기 위해 정규화(normalization) 프로세스를 적용하였다.

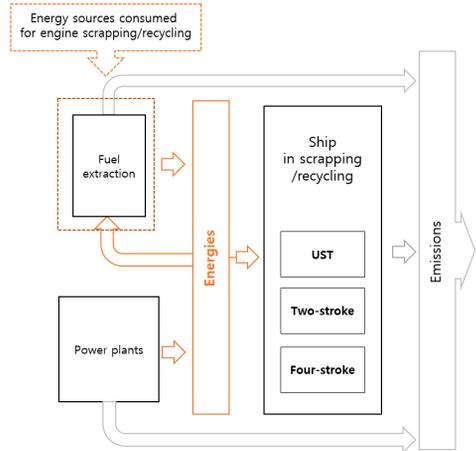


Fig. 5 Decommission stage of propulsion system process

#### 4. 결과 및 고찰

본 절에서는 상기와 같은 방법에 의해 도출한 결과를 고찰한다.

먼저 Fig. 6의 배기가스 환경영향평가에 따르면 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 배출량은 다른 배기가스의 전체 배출량보다 상당히 높음을 알 수 있었다. 그중 UST가 2.63E9 kg로 CO<sub>2</sub> 배출량이 가장 높게 나타난 반면, TLDFFE는 2.09E9 kg로 가장 낮게 나타났다. 이러한 CO<sub>2</sub> 발생량의 차이는 각 추진시스템에서 사용된 연료의 양에 비례한다는 것을 나타낸다. 즉 엔진효율(기계효율 및 압축비)과 직접적인 관련이 있음을 의미한다. 반면 UST에서는 CO<sub>2</sub>를 제외한 다른 유형의 배출량은 타 추진시스템에 비해 상대적으로 낮게 나타났는데, 이러한 결과는 외연기관인 UST에 비해 점화를 위한 파일럿 액체연료(MGO, Marine Gas Oil 또는 MDO, Marine Diesel Oil)를 부가적으로 사용해야 하는 내연기관의 특성에 기인한 것으로 판단된다.

모든 추진시스템에서 CO<sub>2</sub>를 제외한 나머지 배출량은 NMVOC가 가장 높고 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM 순으로 배출량이 나타나는 것으로 확인되었다. 마지막으로 TLDFFE에서 CO<sub>2</sub>를 제외한 나머지 배출량이 타 추진 시스템에 비해 높게 나타났는데, 이는 추진시스템 중 가장 높은 압축비를 가지기 때문인

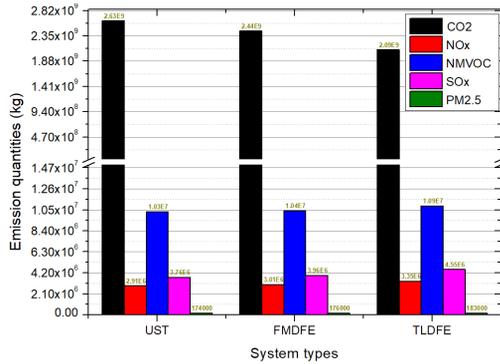


Fig. 6 Summary of environmental impacts

것으로 판단된다. 그러나 Fig. 6으로는 이해당사자의 관점에 따라 어느 추진시스템이 가장 친환경적인지에 대한 판단은 다소 정성적일 수밖에 없다.

그러므로 정규화 과정을 통해, Fig. 6에서의 배출량(환경 영향성)을 금전적 가치로 환산<sup>6)</sup>하는 경우, 시스템의 환경비용을 보다 정량적으로 확인할 수 있다. Fig. 7에서와 같이 UST는 \$1.57E11로 가장 높은 환경 비용을 갖는 것으로 나타났으며, FMDFE는 \$1.53E11, TLDPE는 \$1.47E11로 가장 낮은 환경 비용 값을 가지는 것으로 나타났다. 대기 오염은 해상에서 가장 중요한 문제 중 하나가 되어 환경 규제가 점점 더 엄격해지고 있다. 결과적으로, 기존의 선박 연료는 LNG와 같은 청정 연료로 전환될 것이라는 전망은 설득력을 가질 것으로 판단된다. 현재의 LNG 추진시스템의 강점과 한계를 논의하면서 이와 관련하여, 본 연구 결

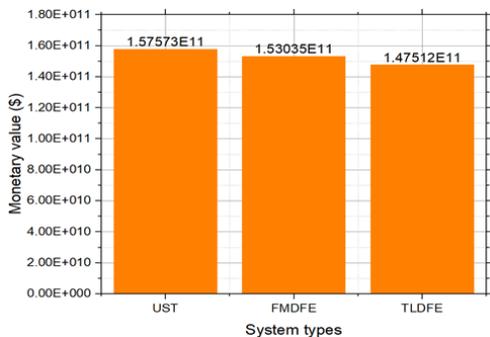


Fig. 7 Conversion of environmental impacts to monetary values

과가 LNG 추진시스템 선택을 위한 의사 결정 시 장기적 관점에서 환경에 미치는 영향을 고려한 합리적 결정을 내리는 데 유용한 지침이 될 것으로 판단되며, LNG 엔진의 미래 동향을 예측할 수 있는 좋은 지표로 간주될 것으로 사료된다. 뿐만 아니라 본 연구결과는 엔진 제조업체로 하여금 친환경성과 시장경쟁력을 강화하기 위한 기술 개발에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단한다.

## 5. 결론

174K LNG 선박을 대상으로 LCA를 통한 추진시스템의 환경영향을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) UST 추진시스템은 CO<sub>2</sub> 배출을 제외한 다른 모든 값에서 환경적으로 우수한 시스템으로 나타났다. CO<sub>2</sub> 배출량이 다른 시스템의 배출량보다 크게 나타남에 따라 이를 개선하기 위한 노력이 필요해 보인다.

2) 반면 TLDPE 추진시스템은 비교대상 중 가장 낮은 CO<sub>2</sub> 배출량을 나타내었다. CO<sub>2</sub>가 지구 온난화에 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 고려할 경우, TLDPE는 친환경성분야에서 상당한 경쟁력을 확보한 추진 시스템으로 평가 가능하나 CO<sub>2</sub> 외의 배출량에 대한 고민이 필요해 보인다.

3) 정규화 과정을 거쳐, 금전적 가치로 환산한 결과, 현재로서는 TLDPE 시스템이 상대적으로 높은 경쟁력을 가진 것으로 판단되며, CO<sub>2</sub> 배출량 최소화에 가장 높은 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시된 접근법을 통하여 추후 친환경성 측면에서 선박 시스템의 성능을 평가할 수 있을 것으로 판단되며, 향후 다양한 선박의 사례를 통해 LNG 추진선의 합리적 추진시스템 선정의 고도화를 위한 후속연구가 필요하다.

## References

1. B. Jeong, 2018, "Comparative Analysis of SOx

- Emission-Compliant Options for Marine Vessels from Environmental Perspective", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 72-78.  
(<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2018.22.1.072>)
2. DNV, 2014, LNG-fuelled fleet as of March 2014. DNV, Oslo Norway.
  3. ISO, E., 2006, "Environmental Management-Life Cycle Assessment Principles and Framework (ISO 14040: 2006)". The International Organization for Standardization Geneva, Switzerland.
  4. ISO, E., 2006. ISO 14044-2006 Environmental management-life cycle assessment-Requirements and Guidelines.
  5. PE, 2018, GaBi 4 software-system and databases for life cycle engineering.
  6. M. Maibach, C. Schreyer, D. Sutter, H. Van Essen, B. Boon, R. Smokers, A. Schrotten, C. Doll, B. Pawlowska and M. Bak, 2008, Handbook on estimation of external costs in the transport sector, CE Delft.
  7. M. A. Shama, 2005, "Life cycle assessment of ships", *Maritime transportation and exploitation of ocean and coastal resources: Proceedings of the 11th international congress of the international maritime association of the mediterranean*, pp. 1751-1758.
  8. P. Gilbert, P. Wilson, C. Walsh and P. Hodgson, 2017, "The role of material efficiency to reduce CO<sup>2</sup> emissions during ship manufacture: a life cycle approach", *Marine Policy*, Vol. 75, 227-237.  
(<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.04.003>)
  9. IMO, 2015. Third IMO Greenhouse Gas Study 2014.
  10. J. Ling-Chin, O. Heidrich and A. Roskilly, 2016, "Life cycle assessment (LCA) - from analysing methodology development to introducing an LCA framework for marine photovoltaic (PV) systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, 352-378.  
(<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.058>)
  11. 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", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 187, 111-130.  
(<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.184>)