



# LNG-DF추진 중형선박의 지속가능한 기본설계 대안을 위한 전과정평가(LCA) 분석

정기석<sup>1</sup>·이동건<sup>2,†</sup>

목포해양대학교 대학원 해양시스템공학과<sup>1</sup>

목포해양대학교 조선해양공학과<sup>2</sup>

## Analysis of Life Cycle Assessment (LCA) for Sustainable Basic Design Alternatives for Medium-Sized LNG-DF Propulsion Ship

Ki Seok Jung<sup>1</sup>·Dong Kun Lee<sup>2,†</sup>

Department of Ocean System Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University<sup>1</sup>

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University<sup>2</sup>

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.

Due to the International Maritime Organization's (IMO) environmental regulations on NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub>, LNG-fueled eco-friendly ships are gaining attention worldwide, and various eco-friendly ships are being proposed and demanded for conversion to eco-friendly ships in Korea, as the eco-friendly ship law has recently been enforced. In this study, the initial basic design was performed to convert an existing Marine Gas Oil (MGO) fueled ship into an LNG-DF propulsion ship, targeting medium-sized ship, to select the fuel tank capacity and main dimensions and appropriate fuel ratio between the two fuels. In particular, Sustainable basic design method considering environmental impact were proposed by performing a Life Cycle Assessment (LCA) throughout the design process, and various design options were compared and analyzed to meet different design conditions by applying them.

**Keywords** : Life cycle assessment(전과정평가), LNG-DF propulsion ship(LNG 이중 연료 추진선박), Sustainable basic design(지속 가능한 기본설계), Fuel ratio(연료비율)

## 1. 서론

국제해사기구(IMO)의 지속적인 환경규제로 인하여 NO<sub>x</sub> 배출량의 경우 '16년부터 배출규제해역(Emission Control Area, ECA)에서는 Tier I 대비 80 % 절감 수준인 Tier III 규제가 시행되고 있으며 점차 그 해역이 추가되고 있다. 또한, SO<sub>x</sub> 배출량의 경우 '20년부터 대양해역은 황 함유량이 0.5 %, 배출규제해역은 0.1 %로 규제되고 있는 상황이다. 이러한 환경규제의 대응 방안으로 NO<sub>x</sub> 규제는 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 또는 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 같은 전·후처리 장비의 설치, SO<sub>x</sub> 규제는 Scrubber의 설치 또는 저유황연료의 사용 같은 다양한 방안으로 대응하고 있으며 이 중 LNG(Liquefied Natural Gas) 연료의 사용은 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 규제에 모두 대응할 수 있는 방

안으로 LNG연료추진선박이 친환경선박으로 각광받고 있다.

그러나 LNG 연료 또한 본질적으로 화석연료이기 때문에 CO<sub>2</sub>를 배출하므로 2050년까지 CO<sub>2</sub> 발생량 50 % 감소를 목표로 하는 CO<sub>2</sub> 규제에 대응하기 위해서는 한계가 있으며, 이에 따라 탄소중립 연료의 사용을 위한 기술 개발 등 탄소제로선박을 위한 탈탄소화(decarbonization)가 진행되고 있는 과도기적 상황이다(KR R&D Division). 이러한 시점에서 LNG연료는 징검다리 연료(bridge fuel)로서 역할을 수행하고 있으며 향후 '40 ~ '50년까지는 그 수요가 증가할 것으로 전망되고 있다 (Constantine et al., 2016).

최근 국내의 경우 '20년부터 친환경선박법이 시행됨에 따라 LNG연료추진선박, 전기추진선박 및 두 가지 이상의 추진시스템을 적용한 선박 등 다양한 친환경선박이 제안되고 있으며 친환경

선박으로의 전환이 요구되고 있는 상황이다 (Ahn, 2022). 이에 친환경선박법이 적용되는 중형선박을 대상으로 기존의 MGO (Marine Gas Oil) 추진선박을 LNG-DF 추진선박으로 전환함에 있어 LNG연료탱크의 용량 및 주요제원과 같은 기존의 기본설계 변경뿐만 아니라 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 고려한 기본설계 변경이 필요하다고 판단하였다. 중형선박의 경우 선박의 공간 대비 LNG연료탱크가 차지하는 비율이 상대적으로 높고 선박의 주요제원에 미치는 영향이 크기 때문에 적정 규모의 LNG연료탱크 용량 및 제원 선정이 중요하다. 또한, LNG연료의 경우 MGO 대비 CO2 배출량은 약 20 ~ 30 % 정도 감소하지만 전과정평가에 따라 환경영향지수(Environmental Impact Factor)를 고려하면 LNG-DF 추진 시 지구온난화 지수(Global Warming Potential, GWP)는 오히려 증가할 수 있기 때문에 LNG연료의 사용이 무조건적으로 친환경적이라 할 수 없으며 환경영향범주(Environmental Impact Category)에 따라 비교하여 적절한 사용이 필요하다 (Hwang et al., 2020).

이처럼 MGO와 LNG의 연료비율(fuel ratio)은 기본설계와 친환경설계 관점에서 주요한 설계 변수로 사용될 수 있으며, 이에 본 연구에서는 중형선박의 기본설계 시 전과정평가를 적용하는 지속가능한 기본설계(Sustainable basic design) 방법을 제안하였으며, 이를 연구대상 선박에 적용함으로써 설계안을 비교 분석하여 적절한 연료비율을 갖는 친환경 설계안을 도출하였다.

여기서 지속가능성이란 환경과 관련한 제품 규제가 증가함에 따라 1987년 세계환경발전위원회에서 제안된 환경적으로 건전하고 지속가능한 발전(sustainable development)에서 대두된 개념으로 현재는 ISO(International Standard Organization) 14000 시리즈를 통해 관리되고 있다. 제품의 재료 획득 단계에서, 제조, 사용, 폐기 단계까지 전과정을 고려한 제품개발의 투명성 제고를 요구하고 있으며 미국, 유럽 등 선진국에서는 제품개발에 환경성 평가 적용 및 의무를 시행하고 있다 (Lee et al., 2021).

선박연료로 사용되는 LNG에 대한 전과정평가 결과 중속 엔진의 경우 LNG를 연료로 사용하는 LNG-DF 엔진이 Diesel 엔진에 비해 지구온난화 지수와 같은 특정 환경영향범주에서는 오히려 역효과가 발생할 수 있으며 이에 따라 LNG-DF 추진선박으로의 전환함에 있어 LNG의 사용이 친환경적으로 사용될 수 있도록 적절한 연료비율을 선정하는 것이 필요하다고 판단하였다.

이러한 LNG의 전과정(Life Cycle)은 크게 두 가지 단계로 나눌 수 있으며, 먼저 추출된 천연가스(Natural Gas)가 배관, 정제 및 액화 시설, LNG운반선, LNG터미널, LNG추진선까지 운송되는 단계를 의미하는 Well to Tank(WtT)와 LNG추진선에서 연소되는 단계를 의미하는 Tank to Wake(TtW)로 나누어지고 전과정을 Well to Wake(WtW)로 나타낼 수 있다. LNG의 전과정의 경우 TtW, 즉 LNG를 연료로 사용하는 단계에서 대부분의 환경영향이 발생하고 있다는 것을 확인하였으며 이에 따라 사용단계에서의 환경영향을 감축하는 것이 친환경선박의 중요한 요소라고 판단하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 지속가능한 기본설계

본 연구에서의 지속가능한 기본설계란 LNG-DF 추진선박의 요구기준을 만족함과 동시에 선박의 주요제원을 선정함에 있어 주요 설계변수와 전과정평가 결과를 모두 고려하는 친환경 선박설계를 의미하며, Fig. 1은 ISO 14040의 전과정평가 Framework에 기본설계 과정을 추가함으로써 지속가능한 기본설계에 대한 전반적인 개념을 나타내었다 (ISO 14040, 1997).

Fig. 1과 같이 지속가능한 기본설계는 크게 두 단계로 나눌 수 있으며, 먼저 기본설계 단계에서는 선박의 복원성 검토를 위해 2008 IS Code를 만족하도록 하였으며 MGO 및 LNG연료탱크의 제원을 선정하여 항해거리를 만족하도록 하였다. 또한 LNG를 연료로 사용하는 선박에 적용되는 IGF Code 5.3.4의 Alternative Method를 만족하도록 설계를 수행하였다 (IMO IGF, 2015).

Alternative Method란 LNG연료탱크를 배치함에 있어 유연한 설계를 위한 확률론적 접근법으로 각각의 길이, 폭, 높이 방향의 손상 확률( $f_l, f_t, f_v$ )을 계산하여 요구 손상 확률( $f_{CN}$ )을 만족해야 한다 (IMO, SOLAS 2017 Amendment (98th), 2017).

이러한 IGF Code에 따라 직접적으로 영향을 받는 LNG연료탱크의 제원과 LNG연료탱크의 변화에 주요한 영향을 받는 선박의 주요제원 및 steel weight, Gross Tonnage(G/T), 요구마력을 설계변수로 선정하였다. 또한 항해거리에 따라 변화하는 MGO 및 LNG연료의 부피와 무게를 설계변수로 선정하였다.

다음으로 전과정평가 단계에서는 항해거리에 따라 결정된 연료의 무게와 LNG연료탱크의 제원 및 주요제원에 따라 결정된 steel weight, 요구마력에 따른 SFOC(Specific Fuel Oil Consumption), SGC(Specific Gas Consumption)를 전과정평가의 목록분석에 사용하였으며, 영향평가의 경우 선박의 운항기간을 고려한 방법과 SFOC, SGC를 고려하여 저속, 중속, 고속으로

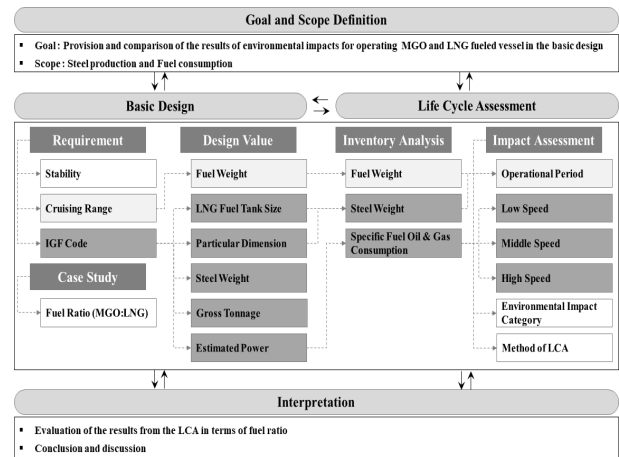


Fig. 1 Concept of the Sustainable basic design

Table 1 Factors and categories according to LCA methods

| Emission factors(g/g fuel) |           |           | Environmental impact categories |     |      |      |      |
|----------------------------|-----------|-----------|---------------------------------|-----|------|------|------|
|                            | MGO       | LNG       | GWP                             | AP  | PM   | PO   | ME   |
| CO <sub>2</sub>            | 3.21.E+00 | 2.75.E+00 | ✓                               |     |      |      |      |
| CO                         | 2.77.E-03 | 7.83.E-03 | ✓                               |     | ✓    | ✓    |      |
| N <sub>2</sub> O           | 1.60.E-04 | 1.08.E-04 | ✓                               |     |      |      |      |
| CH <sub>4</sub>            | 6.00.E-05 | 5.00.E-02 | ✓                               |     |      |      | ✓    |
| PM                         | 9.70.E-04 | 1.80.E-04 |                                 |     | ✓    |      |      |
| NO <sub>x</sub>            | 9.61.E-02 | 1.40.E-02 |                                 | ✓   | ✓    | ✓    | ✓    |
| NM <sub>VO</sub> C         | 3.08.E-03 | 3.00.E-03 |                                 |     |      |      | ✓    |
| SO <sub>2</sub>            | 1.00.E-02 | 0.00.E+00 |                                 | ✓   | ✓    | ✓    |      |
| Methods of LCA             |           |           | CML                             | CML | ILCD | ILCD | ILCD |

나선 선속에 따른 방법 두 가지로 평가하였다. 환경영향범주의 경우 지구온난화 지수(GWP), 산성화(Acidification Potential, AP), 미세먼지(Particulate Matter, PM), 광화학오존생성(Photochemical Ozone Formation, PO), 해양 부영양화(Marine Eutrophication, ME)에 대한 결과를 도출하였다.

Table 1에는 전과정평가에 사용된 데이터베이스와 방법론을 나타내었다. MGO와 LNG의 연소로 인해 발생하는 각종 배출계수(Emission Factor)의 경우 IMO에서 분석한 자료를 사용하였으며 (IMO, Third IMO Greenhouse Gas Study 2014, 2015), 선박의 선체를 구성하는 steel weight의 경우 World Steel Association에서 제공하는 ELCD(European reference Life Cycle Database)를 사용하였다 (World Steel Association, 2018).

또한, 전과정평가 방법론으로는 CML-IA와 ILCD 2011을 사용하였으며 환경영향범주에 속하는 배출가스를 분류하여 각각의 방법론에 따라 전과정평가를 수행하였다 (Lee et al., 2017). 예를 들어 CML-IA 방법론에 따라 CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>와 같은 배출가스는 지구온난화 지수로 분류하였으며 MGO와 LNG의 배출계수를 적용하여 전과정평가를 수행하였다.

Fig. 2에는 전과정평가를 위한 LNG연료추진선박의 전과정을 LNG관점에서의 전과정과 선박건조관점에서의 전과정을 비교하여 나타내었다. 선박연료로서의 LNG의 경우 전과정을 WtT와 TtW로 나눌 수 있으며 TtW단계에서 차지하는 비율이 85%로 나타났다 (Hwang et al., 2019). 또한 선박건조의 전과정은 건조, 사용, 유지·보수, 해체로 나눌 수 있고 CO<sub>2</sub>배출량의 경우 사용단계에서 96% 이상인 것으로 나타났다. 이때 LNG연료의 TtW 단계와 선박건조의 사용단계는 연료의 연소에 따른 환경영향을 도출하는 것으로 동일한 단계로 볼 수 있으며 환경영향이 차지하는 비율이 높은 단계로 우선적으로 환경영향을 줄여야 하는 단계로 판단하였다.

또한, Fig. 3에는 지속가능한 기본설계에 대한 설계 절차를 나타내었으며 제안된 절차에 따라 설계를 수행하여 친환경 선박설계를 수행하였다. 절차는 크게 기본설계 절차와 전과정평가 절차로 나눌 수 있으며 기본설계 과정에서 얻어진 설계정보를 기반으로 전과정 목록 분석을 수행하여 환경영향을 도출하였다.

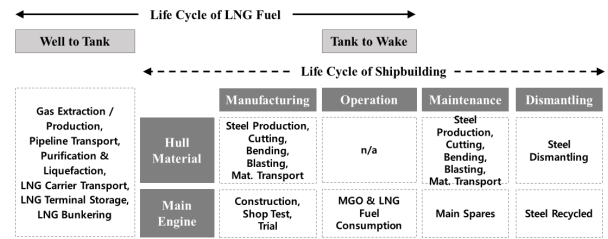


Fig. 2 Life cycle of the LNG-DF propulsion ship

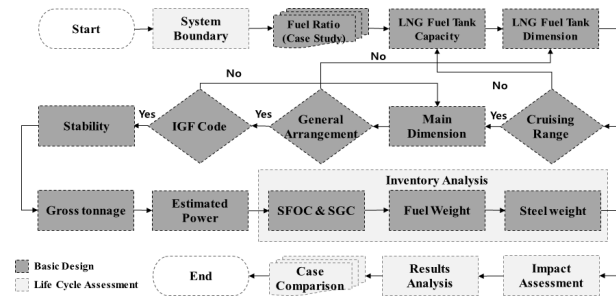


Fig. 3 Process of the Sustainable basic design

## 2.2 연구대상 선박

지속가능한 기본설계를 적용하기 위한 연구대상 선박으로는 MGO추진의 2,000톤급 관공선을 선정하여 참고선(reference ship)으로 활용하였다. 중형선박의 경우 LNG-DF추진으로 전환함에 있어 기본설계 단계의 검토가 선박의 특성 및 성능에 미치는 영향이 크고 그에 따라 환경영향에 미치는 영향도 크기 때문에 선박의 친환경성을 극대화 할 수 있다고 판단하였다. 참고선에 대한 주요제원을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Main dimensions of the reference ship

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| Length overall, LOA               | 90.0 m     |
| Length between perpendicular, LBP | 80.4 m     |
| Breadth                           | 14.0 m     |
| Depth                             | 7.4 m      |
| Speed                             | 16.0 knots |
| Maximum continuous rating, MCR    | 2,920 kW   |

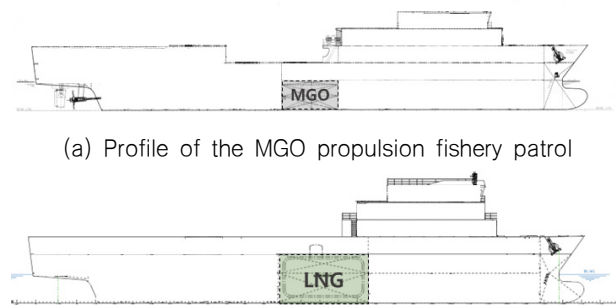


Fig. 4 Outline arrangement of the LNG fuel tank

Table 3 Comparison of basic design cases according to fuel ratio

|                                 | Reference Ship    | Case-1             | Case-2             | Case-3             | Case-4             | Case-5              | Units          |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------|
| Fuel ratio (MGO/LNG)            | 100 % / -         | 30 % / 70 %        | 30 % / 70 %        | 20 % / 80 %        | 20 % / 80 %        | 10 % / 90 %         | -              |
| Main dimension (L/B/D)          | 80.4 / 14.0 / 7.4 | 81.8 / 14.0 / 7.7  | 80.4 / 15.0 / 7.7  | 87.6 / 14.0 / 7.7  | 82.1 / 15.0 / 7.7  | 86.3 / 16.0 / 7.7   | m              |
| LNG fuel tank dimension (L/B/H) | -                 | 13.1 / 8.95 / 5.75 | 12.2 / 9.95 / 5.75 | 14.3 / 8.95 / 5.75 | 14.0 / 9.95 / 5.75 | 14.3 / 10.95 / 5.75 | m              |
| Fuel tank capacity (MGO/LNG)    | abt. 520 / -      | abt. 166 / 640     | abt. 172 / 667     | abt. 111 / 700     | abt. 118 / 763     | abt. 65 / 858       | m <sup>3</sup> |
| Estimated power (NCR)           | 2,500             | 2,450              | 2,650              | 2,290              | 2,600              | 2,640               | kW             |
| Stability (GM)                  | 1.4               | 0.937              | 1.326              | 1.012              | 1.405              | 1.882               | m              |
| Cruising range                  | abt. 7,600        | abt. 2,320/5,030   | abt. 2,260/5,040   | abt. 1,580/5,760   | abt. 1,550/5,760   | abt. 850 / 6,480    | N.M            |
| IGF code ( $f_{CN}$ ), <0.04    | -                 | 0.0324             | 0.0316             | 0.0339             | 0.0388             | 0.0396              | -              |
| Domestic gross tonnage          | abt. 2,000        | abt. 2,400         | abt. 2,530         | abt. 2,650         | abt. 2,620         | abt. 3,020          | ton            |

Fig. 4에는 LNG연료탱크 배치에 따른 측면도를 비교하여 나타내었다. 선주 요구사항에 따라 LNG연료탱크는 선체 내부에 배치하도록 하였으며, 탱크의 형태에 따라 Cylinder type, Bi-lobe type, Lattice type을 비교하였다. Cylinder type과 Bi-lobe type의 경우 동일 부피 대비 Lattice type과 비교하여 LNG연료탱크의 길이가 과도하게 증가하여 선체 내부에 배치가 어렵고 선박의 주요제원이 과도하게 변경되어 최종적으로 Lattice type을 기반으로 설계를 수행하였다 (Kim et al., 2012). 이에 따라 참고선의 일반배치를 변경하여 LNG연료탱크를 위한 공간을 확보하였으며, 이 과정에서 선실의 공간이 부족하여 선실을 위한 갑판을 1 tier 추가하였다.

### 3. 지속가능설계안 비교

#### 3.1 지속가능성을 위한 기본설계안 비교

앞서 2장의 지속가능한 기본설계를 연구대상 선박에 적용하고 5가지의 Case를 나누어 Table 3에 나타내었다. 초기 MGO와 LNG의 연료비율은 3:7, 2:8, 1:9로 3가지로 나누어 설계 검토를 수행하였다. 먼저 LNG연료탱크를 배치함에 따라 선박 주요제원의 증가는 불가피하였으며 연료비율이 3:7인 Case-1, Case-2의 경우 동일한 연료비율을 갖지만 주요제원의 변경 시 폭을 유지하고 길이를 변경한 Case-1과 길이를 유지하고 폭을 1 m 증가시킨 Case-2로 나누었다. 연료비율이 2:8인 Case-3, Case-4의 경우 Case-1, Case-2와 같이 동일한 조건으로 길이를 변경한 Case-3과 폭을 변경한 Case-4로 나누어 주요제원을 변경하였으나 길이의 경우 IGF Code를 만족시키기 위하여 두 Case 모두 참고선의 제원보다 증가시켰다. 연료비율이 1:9인 Case-5는 폭을 1 m 증가시킨 경우 LNG연료탱크를 배치하기 위해 선박의 길이가 과도하게 증가하여 폭을 2 m 증가시켜 비교하였다.

LNG연료탱크의 제원 및 용량의 경우 선박의 주요제원과 연계하여 폭 방향 손상 복원성을 만족하기 위한 B/5 m를 고려하여

LNG연료탱크의 폭을 결정하였으며 높이의 경우 갑판과 Tank-top의 높이를 고려하여 결정하였다. 이처럼 폭과 높이의 경우 선박의 주요제원에 따라 결정되었으며 길이의 경우 요구 항해거리를 만족하는 MGO와 LNG용량을 적재할 수 있도록 길이를 결정하였으며 IGF Code 만족여부도 확인하여 설계하였다.

다음으로 각각의 Case에 따른 연속상용출력(Nominal Continuous Rating, NCR)을 추정하여 주기관을 선정하였으며, 폭을 증가시킨 Case-2, Case-4, Case-5의 경우 참고선 대비 NCR이 증가하였으나 폭을 유지한 경우에는 유사하거나 감소하는 것으로 나타났으며 이는 L/B가 커졌기 때문으로 보이며 NCR 관점에서는 폭을 유지하는 것이 유리한 것으로 판단된다.

복원성 계산 시 Loading condition은 Fully loaded departure condition에서 2008 IS Code를 만족하도록 하였다. 각 Case 별로 추정된 steel weight 및 무게중심을 적용하였으며 LNG연료탱크 및 주요장비의 위치는 변경된 주요제원에 따라 적절히 재배치하였다. 복원성의 주요 지표인 GM의 경우 폭을 1 m 증가시킨 Case-2, Case-4의 경우 참고선의 GM과 유사한 결과를 나타냈으나 폭을 유지한 Case-1, Case-3의 경우 GM이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 추가로 적재된 LNG연료탱크와 갑판으로 인하여 선박의 VCG가 상승한 결과로 판단되며 참고선 수준의 복원성을 유지하기 위해서는 폭을 증가시켜야 한다고 판단하였다.

항해거리의 경우 각각의 연료에 따른 항해거리를 합산하여 요구 항해거리 7,000~8,000 nautical mile을 만족하도록 하였다. 요구마력을 만족하는 상용엔진을 선정하였으며 SFOC와 SGCC는 각 NCR에서의 값을 이용하였고 LCV(Lower Calorific Value)의 경우 MEPC.308(73)의 값을 이용하여 계산을 수행하였다.

다음으로 IGF Code에 따르면 LNG연료탱크의 배치에 대한 방법으로는 결정론적 방법과 확률론적 방법이 있으며 결정론적 방법의 경우 B/5 m 또는 11.5 m 중 작은값 만큼 선체외판으로부터 떨어져 배치하는 방법이고 확률론적 방법의 경우 SOLAS 2017 Amendment (98th)에서 제시하는 손상 확률 계산 방법에 따라 LNG연료탱크를 배치하는 방법이다. 중형선박의 경우 결정론적 방법에 따라 배치하는 경우 선체외판과 LNG연료탱크 사이

의 이격해야하는 거리가 과도하여 확률론적 방법을 사용하였다. 총톤수의 경우 선박톤수의 측정에 관한 규칙에 따라 국내 총톤수를 비교하였으며 LNG연료탱크의 배치에 따라 선박의 부피가 얼마나 증가하였는지 확인하기 위하여 설계변수로 반영하였다. 참고선 대비 모든 Case의 총톤수가 증가한 것을 확인하였으며 Case-1과 Case-2의 비교 시 연료비율은 동일한 Case-2의 경우 폭 증가에 따라 NCR이 증가하고 총톤수가 증가하여 Case-1에 비해 불리하다 할 수 있으나 복원성 측면에서는 유리한 결과를 나타내었다. 또한 Case-3과 Case-4의 비교 시 비슷한 경향을 보이거나 총톤수에는 큰 변화를 보이지 않았다. Case-5의 경우 2m의 폭 증가에 따라 총톤수가 크게 증가하였으나 Case-2와 Case-4와 비슷한 NCR을 나타내었다.

### 3.2 전과정 목록 분석 및 영향평가 결과

본 연구의 대상 선박의 경우 상선과 다르게 특정한 항로가 정해진 것이 아니기 때문에 전과정평가 결과를 도출함에 있어 세 가지 시나리오로 나누어 수행하였다. 첫 번째 시나리오는 연료탱크의 용량을 1회 소진한 경우, 두 번째는 선박의 연령 동안 사용한 경우, 마지막으로 선속에 따른 연료소모량으로 나누어 도출하였다. 이때 연료의 무게는 연료탱크의 용량과 비중 및 Filling ratio를 고려하여 산정하였으며, 저속, 중속, 고속에 따른 SFOC와 SGC는 추정된 NCR과 선정된 주기관을 고려하여 산정하였다. 또한 steel weight의 경우 참고선의 steel weight와 주요제원을 고려한 추정식 (1)과 (2)를 기반으로 추정하였다 (Ventura, 2011).

$$W_H = W_{HP}(1 + f_{sl} + f_{sb} + f_{sd} + f_{sc}) \quad (1)$$

여기서,  $f_{sl} = 1.133(LBP - LBP_P)/LBP_P$   
 $f_{sb} = 0.688(B - B_P)B_P$   
 $f_{sd} = 0.45(D - D_P)/D_P$   
 $f_{sc} = 0.50[1 - (f_{sl} + f_{sb} + f_{sd})](C_b - C_{bp})$

$$W_H = W_{HP}(1 + f_{sl} + f_{sb} + f_{sd} + f_{sc} + f_{st}) \quad (2)$$

여기서,  $f_{sl} = 1.167(LBP - LBP_P)/LBP_P$   
 $f_{sb} = 0.67(B - B_P)B_P$   
 $f_{sd} = 0.50(D - D_P)/D_P$   
 $f_{sc} = 0.17(C_b - C_{bp})/C_{bp}$   
 $f_{st} = 0.17(T - T_P)/T_P$

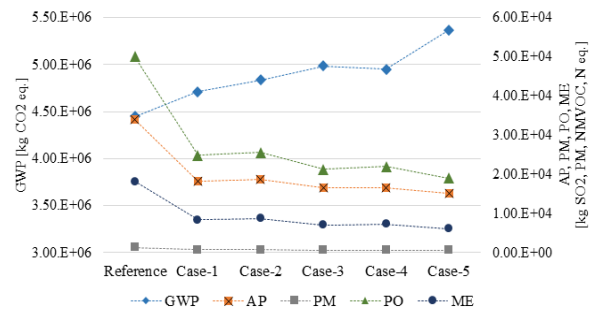
Table 4에 나타난 전과정 목록 분석(Life Cycle Inventory Analysis) 데이터는 각각의 시나리오를 위해 환경영향을 평가하기 위한 목록이다. 먼저 steel weight는 앞서 연료비율에 따라 정해진 주요제원에 따른 선체의 무게를 의미하며 LNG연료의 비율이 높아질수록 선박의 부피도 증가하기 때문에 steel weight도 증가하는 경향을 확인하였다. 마찬가지로 MGO, LNG의 연료 무게 또한 LNG 연료의 비율이 높아질수록 LNG 무게는 증가하고

Table 4 Data of the life cycle inventory analysis

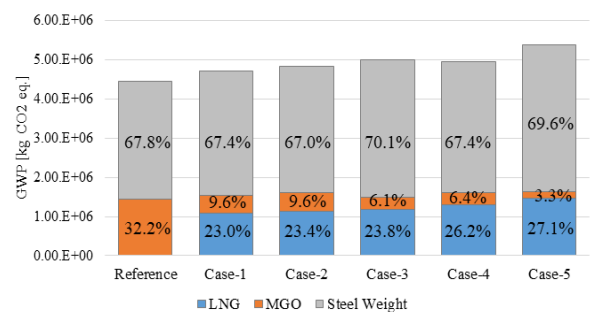
|                      |      | Case-1 | Case-2 | Case-3 | Case-4 | Case-5 |
|----------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Steel weight (ton)   |      | 1580   | 1610   | 1740   | 1660   | 1860   |
| Fuel weight (ton)    | MGO  | 138.3  | 143.3  | 92.9   | 98.5   | 53.9   |
|                      | LNG  | 259.2  | 270.3  | 283.5  | 308.9  | 347.5  |
| Low speed (g/kWh)    | SFOC | 278.7  | 276.3  | 276.8  | 276.1  | 272.5  |
|                      | SGC  | 337.3  | 332.5  | 333.6  | 332.0  | 324.6  |
| Meddle speed (g/kWh) | SFOC | 201.8  | 199.9  | 202.2  | 200.0  | 198.4  |
|                      | SGC  | 182.2  | 178.6  | 183    | 178.8  | 175.8  |
| High speed (g/kWh)   | SFOC | 182.8  | 176.8  | 185.9  | 178.4  | 177.2  |
|                      | SGC  | 153.2  | 149.6  | 156    | 150.6  | 149.8  |

MGO 무게는 감소하는 경향을 보였다. 반면 저속, 중속, 고속에서의 SFOC, SGC는 각기 다른 결과를 나타내었으며 저속의 경우 Case-1이 가장 많은 연료를 사용하고 Case-5가 가장 적은 연료를 사용하는 것으로 나타났다. 중속과 고속의 경우 Case-3이 동일하게 가장 많은 연료를 사용하는 것으로 나타났으며 각각 Case-5와 Case-2가 낮은 연료 사용량을 보여주었다. 이러한 전과정 목록 분석 데이터 중 steel weight와 MGO, LNG 연료의 무게는 첫 번째, 두 번째 시나리오의 전과정 평가를 위한 자료로 사용되었으며 저속, 중속, 고속에서의 SFOC, SGC는 세 번째 시나리오를 위한 자료로 사용되었다.

첫 번째 시나리오에 따라 연료탱크의 용량을 1회 소진 시 연료의 무게와 steel weight에 대한 전과정평가 결과를 Fig. 5(a)에 나타내었다. LNG-DF추진을 사용함으로써 GWP를 제외한

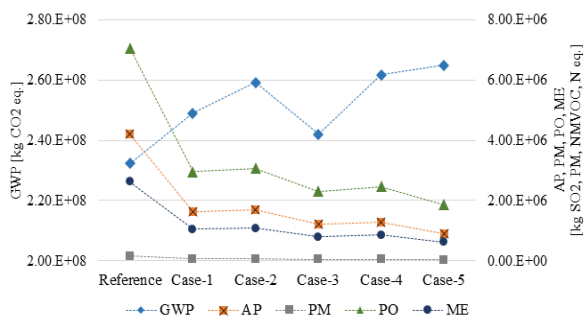


(a) Comparison of LCA Results by case

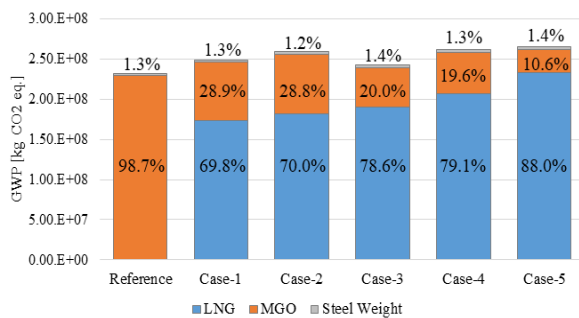


(b) Comparison of LCA results of GWP

Fig. 5 LCA results according to scenario 1



(a) Comparison of LCA Results by case



(b) Comparison of LCA results of GWP

Fig. 6 LCA results according to scenario 2

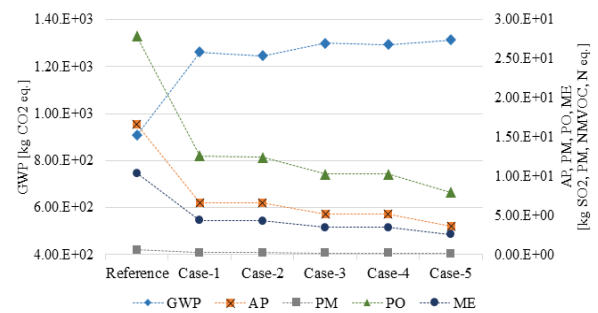
AP, PM, PO, ME의 경우 참고선 대비 Case-5에서 각각 55 %, 51 %, 62 %, 66 %의 감소율을 보이며 가장 친환경적으로 나타났다. 반면 GWP의 경우 LNG연료를 사용함으로써 오히려 6~21 % 정도 환경영향이 증가하였으며 Case-1이 6 %의 증가율을 보이며 가장 친환경적으로 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 연료에 따른 환경영향 보다 steel weight에 따른 환경영향이 크게 작용한 것으로 보이며 특히 Case-3과 Case-5는 선박의 길이 증가로 인해 전반적인 G/T가 증가하여 steel weight가 증가한 것으로 판단된다.

다음으로 두 번째 시나리오에 따라 선박의 연령을 20년으로 가정하고 소진된 연료의 무게와 steel weight에 대한 전과정평가 결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다. 선박의 연령을 고려한 경우 GWP를 제외한 환경영향범주에서는 참고선 대비 Case-5가 최대 78 %까지 감소율을 나타내며 가장 친환경적인 Case로 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 6(b)에 나타난 것 같이 steel weight에 따른 환경영향이 1 % 대로 미비해지고 연료에 따른 환경영향이 크게 작용하기 때문이며, 특히 GWP의 경우 Case-3의 증가량이 4 %로 가장 적은 증가율을 보이며 친환경적으로 나타났으며 그 원인은 Case-3의 NCR이 상대적으로 작게 추정되어 MGO 및 LNG의 연료탱크 용량이 적게 설계되었기 때문이다.

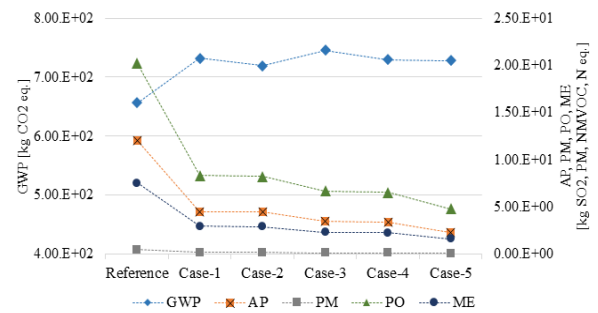
마지막 시나리오에 따라 선속에 따른 연료소모량의 전과정평가 결과를 저속, 중속, 고속에 따라 Fig. 7에 각각 나타내었다. 모든 선속에서 GWP를 제외한 환경영향은 대략 60~80 %까지 감소한 것으로 나타났다. GWP의 경우 저속에서는 Case-5의 SFOC와 SGC가 가장 작고 Case-1이 가장 크게 나타났지만 연료비율을 고려한 결과 참고선 대비 Case-2의 증가율이 37 %로

가장 적게 나타났으며 Case-5의 증가율이 45 %로 가장 큰 것으로 나타났다. 또한, 중속에서는 저속과 마찬가지로 Case-5의 SFOC와 SGC가 가장 작고 Case-3이 가장 크게 나타났지만 연료비율을 고려한 결과 Case-2의 증가율이 10 %로 가장 적게 나타났으며 Case-3의 증가율이 14 %로 가장 크게 나타났다. 고속에서는 Case-2의 SFOC와 SGC가 가장 작고 Case-3이 가장 크게 나타났지만 Case-2가 4 % 증가율로 가장 적게 나타났으며 Case-3이 9 %로 가장 크게 나타났다. 이와 같이 SFOC와 SGC의 크기가 환경영향에 비례하게 작용하지 않은 것은 연료비를 때문이며 GWP 관점에서만 본다면 저속, 중속, 고속 모두에서 Case-2가 가장 환경적이라 할 수 있다.

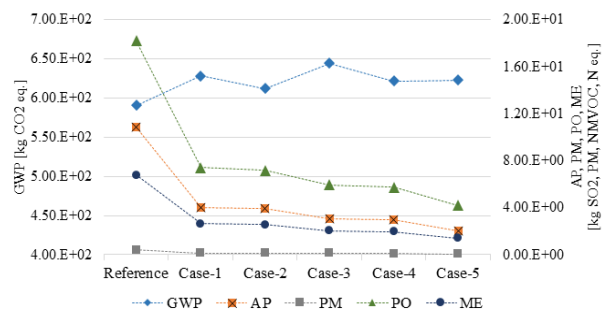
특히, Case-3의 경우 Fig. 6의 선박의 연령을 고려한 시나리오에서는 GWP가 상대적으로 감소하는 것으로 나타났으나 반면에 선속에 따른 시나리오에서는 중속과 고속에서 GWP가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 선박의 연령을 고려한 시나리오에서는 Case-3이 추정된 NCR에 따라 선박의 연령 기간 동안 요구 항해 거리를 가는데 상대적으로 적은 연료탱크의 용량으로 적은 연료



(a) Comparison of LCA results at low speed



(b) Comparison of LCA results at middle speed



(c) Comparison of LCA results at high speed

Fig. 7 LCA results according to scenario 3

가 사용되어 GWP가 감소한 것으로 사료되며, 또한 선속을 고려한 시나리오에서는 중속과 고속에서 선정된 주기관의 엔진부하에 따른 SFOC와 SGC의 사용량이 상대적으로 많기 때문에 선속에 따른 GWP는 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 환경영향을 평가하는 시나리오에 따라 그 결과가 상이할 수 있음을 보여주었으며 본 연구에서는 각 시나리오의 결과를 복합적으로 고려하여 지속가능한 기본설계 결과를 도출하였다.

### 3.3 기본설계안 지속가능성 비교 분석 결과

본 장에서는 기본설계 평가 결과 및 각 시나리오에 따른 전과정평가 결과를 참고선과 Case별로 비교하여 각 Case의 지속가능성을 분석하였다. 먼저 Fig. 8에는 기본설계 항목 중 중요 설계 요구사항인 Fuel weight, steel weight, Stability, G/T, NCR를 선정하여 평가 결과를 비교하였으며 서로 다른 단위와 데이터의 크기를 정규화(Normalization)하여 상대적인 비교를 수행하였다. 정규화를 수행한 결과 양수값을 갖는 설계항목은 상대적으로 성능에 긍정적인 영향을 미치는 것을 의미하며 음수값을 갖는 설계항목의 경우 상대적으로 부정적인 영향을 미치는 것을 의미한다. 예를 들어 참고선의 경우 양수값의 NCR, G/T, Stability, steel weight 항목은 상대적으로 우수한 성능을 의미하며 음수값인 Fuel weight 항목은 상대적으로 부족한 성능을 의미한다. 따라서 참고선 대비 모든 Case의 기본성능이 감소하였지만 Case-3의 경우 설계항목은 다르지만 유사한 수준의 성능을 나타내었고 다음으로 Case-1, Case-4, Case-2, Case-5 순으로 나타났다. 이는 기본성능 측면에서는 친환경선박으로 전환함에 따라 참고선 대비 선박의 성능이 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 9에는 각 시나리오에 따른 전과정평가 결과 중 지구온난화 지수(GWP) 환경영향범주의 데이터를 정규화하여 상대비교를 수행하였으며 그 결과 참고선 대비 모든 Case의 GWP의 환경영향이 증가한 것으로 나타났다. 이는 앞서 서론에서 예측한 것과 같이 LNG연료를 사용함으로써 환경영향지수(Environmental Impact Factor)에 의해 GWP가 오히려 증가한 결과를 확인하였다. 각 Case별로 GWP를 비교하면 Case-2가 참고선 대비 가장 적은 증가량을 보였으며 다음으로 Case-1, Case-4, Case-3,

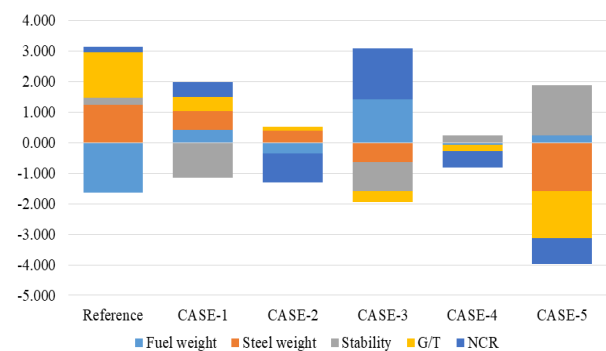


Fig. 8 Comparison of basic design assessments results

Case-5 순으로 적게 증가한 것으로 나타나 GWP 범주에서는 Case-2가 환경적인 설계안으로 판단된다.

Fig. 10에는 마찬가지로 GWP 이외의 산성화(AP), 미세먼지(PM), 광화학오존생성(PO), 해양 부영양화(ME) 환경영향범주의 데이터를 상대비교 하였으며 AP, PM, PO, ME의 데이터의 결과가 거의 동일한 경향을 띄고 있기 때문에 하나의 그래프로 나타내었다. 나머지 환경영향범주에 대해 Case별로 비교한 결과 참고선 대비 모든 Case의 환경영향이 감소한 것으로 나타났다. 이 중 Case-5가 가장 많이 감소한 것으로 나타났으며 다음으로 Case-3, Case-4, Case-1, Case-2 순으로 감소한 것으로 나타났다. 이로서 AP, PM, PO, ME 범주에서는 Case-5가 가장 환경적인 설계안으로 판단된다. 따라서 선박의 기본성능 측면에서는 연료비율이 2:8인 Case-3을 택하는 것이 가장 적절한 설계안이라 할 수 있으며 GWP 환경영향 측면에서는 연료비율이 2:7인 Case-2가 적절한 설계안이라 판단된다. 또한 AP, PM, PO, ME 환경영향 측면에서는 연료 비율이 1:9인 Case-5가 가장 환경적인 설계안이라 판단된다.

본 연구의 지속가능한 기본설계의 목적은 선박의 성능과 친환경성 중 어느 한 방향으로 치우친 설계안을 택하기 위한 방법이 아닌 선박의 성능은 최대한 유지하는 동시에 친환경선박 설계안을 도출하기 위한 방법으로 이러한 목적에 따라 설계안을 택한다면 기본성능을 참고선 대비 유지하면서 AP, PM, PO, ME 범주에서 친환경적인 연료비율 2:8인 Case-3이 좋은 대안이라 판단되며 또는 기본성능은 Case-3에 비해 부족하지만 GWP 범주에서

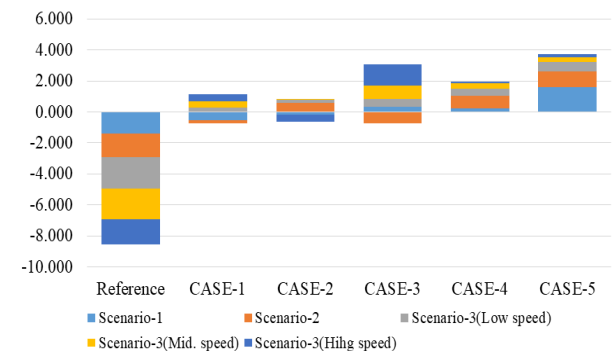


Fig. 9 Comparison of GPW results

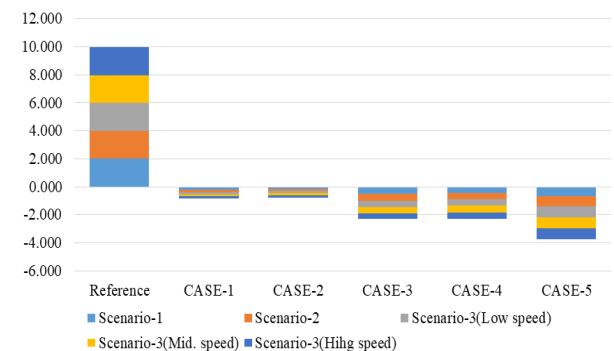


Fig. 10 Comparison of AP, PM, PO, ME results

는 Case-3보다 환경적이라 할 수 있는 Case-1도 적절한 대안이라 판단된다.

이와 같이 본 연구에서 제안하는 지속가능한 기본설계 절차에 따라 설계를 수행한다면 설계자의 설계 주관점이나 설계자에게 요구되는 요구사항에 맞는 설계안을 비교 평가 할 수 있으며 특정한 설계항목이나 환경영향범주에 가중치를 설정하여 특별한 요구사항에 맞는 결과를 도출할 수도 있다. 또한 전과정 목록 분석 시 선박의 특성에 맞게 시나리오를 수정 및 추가하여 전과정 평가를 수행한다면 더욱 다양한 친환경 설계안을 도출 할 수 있으며 기본설계 평가 결과와 비교함으로써 최적의 설계안을 도출 할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 친환경 중형선박설계를 위하여 기본설계 시 전과정평가를 적용한 지속가능한 기본설계 수행 절차를 제안하였으며, LNG-DF추진선박에 적용함으로써 지속가능한 기본설계를 수행하였다. 이를 위하여 연료비율 및 기본설계 항목에 따라 5가지 Case를 선정하고 각 Case에 따른 전과정 목록 분석 및 영향 평가 결과를 도출하였다. 마지막으로 기본설계 및 전과정평가 결과를 Case 별로 상대적으로 비교함으로써 환경영향범주에 따른 MGO와 LNG의 적절한 연료비율을 선정하였으며 가장 적절한 설계 대안을 도출하였다.

본 연구에서는 선박의 전과정 중 LNG연료를 연소하여 환경에 영향을 미치는 사용단계의 환경영향을 줄이는 것이 효율적인 방법이라 판단하였으며 또한 LNG연료의 경우 환경영향지수가 MGO보다 높아 친환경연료로서의 한계점이 있어 LNG연료의 적절한 사용이 필요하다고 판단하였다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 지속가능한 기본설계를 수행한다면 LNG-DF추진선박을 설계함에 있어 선박의 특성에 맞는 적절한 수준의 연료비율을 도출할 수 있으며 필요에 따라 여러 설계변수를 설정하고 가중치를 적용함으로써 설계자가 참고선 대비 다양한 설계안을 비교 검토하여 최적의 설계안을 선정하는데 도움이 될 것이라 판단된다.

최근 친환경선박은 대체연료를 사용하는 추세이며 LNG연료와 같이 저탄소 연료를 사용하는 LPG추진 선박, 메탄올추진 선박 등이 개발되고 있다. 또한, 수소연료를 사용한 수소연료전지 선박, 암모니아를 연료로 사용한 암모니아 연료추진 선박, 배터리를 사용한 전기추진선박과 같이 무탄소 연료를 사용하는 다양한 친환경선박이 개발되고 있으며, 앞서 언급한 대체연료를 혼합하여 사용하는 혼합연료 추진선박도 검토되고 있다. 이에 향후 연구 계획으로는 본 연구에서 제안하고 있는 지속가능한 기본설계를 다양한 친환경선박에 적용하여 대체연료의 종류에 따른 기본성능 및 친환경성을 정량적으로 비교함으로써 선박 특성에 맞는 적절한 대체연료를 선정하고 대체연료 사이의 상대비교를 수행하고자 한다. 특히 혼합연료 추진선박의 경우 적절한 연료비율에 대한 후속연구를 진행하고자 한다.

#### References

- Ahn, J.K., 2022. A study on improvement for green ship certification scheme to achieve net-zero. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(6), pp.372-384.
- Constantine, S., Hernandez, P. and Gallagher, C., 2016. Natural gas as a bridge fuel - measuring the bridge. *Center for Sustainable Energy*, pp.1-12.
- Hwang, S.S., Gil, S.J., Lee, G.N., Lee, J.W., Park, H., Jung, K.H. and Suh, S.B., 2020. Life cycle assessment of alternative ship fuels for coastal ferry operating in Republic of Korea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(660), pp.1-18.
- Hwang, S., Jeong, B., Jung, K., Kim, M. and Zhou, P., 2019. Life cycle assessment of LNG fueled vessel in domestic services. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(359), pp.1-25.
- International Organization for Standardization (ISO), 1997. Environmental management - Life cycle assessment - Principle and framework, ISO 14040.
- IMO, 2015. International code of safety for ships using gases or other low-flashpoint fuels (IGF Code), IMO, 1 PREAMBLE.
- IMO, 2017. SOLAS 2017 Amendment (98th) / Chapter II-1 / Reg. 7-1, 7-2.
- IMO, 2015. Third IMO greenhouse gas study 2014 - executive summary and final report.
- Kim, T.W., Suh, Y.S., Jang, K.B., Chun, M.S., Lee, K.D. and Cha, K.H., 2012. A study and design on tank container for fuel tank of LNG fueled ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(6), pp.504-511.
- Korean Register R&D Division, 2020. Forecasting the Alternative Marine Fuel: Ammonia.
- Lee, D.K., Jung, K.S., Oh, D.K. and Kim, B.I., 2017, A study on the case of life cycle assessment for a sustainable design of a composite small craft. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 34(11), pp.835-841.
- Lee, D.K. and Park, B.Y., 2021. A case study on the sustainability for a stanchion of recreational crafts based on the design for additive manufacturing using a FFF-type 3D Printer. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 58(5), pp.294-302.
- Ventura, M., 2011. *Estimation methods for basic ship design*, MSc in Marine Engineering and Naval Architecture, Course Note, Instituto Superior Tecnico, Technical University of Lisbon, Portugal.



World Steel Association, 2018. Life cycle inventory study -  
2018 data release.

