



LNG 벙커링용 이중 단열적용 LNG 저장탱크 열해석

정일영 · 김남국* · †윤상국**

LG전자, *(주)하나파워시스템서비스, **한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과
(2018년 5월 14일 접수, 2018년 7월 11일 수정, 2018년 7월 12일 채택)

Thermal Analysis on the LNG Storage Tank of LNG Bunkering System Applied with Double Shield Insulation Method

Il-Young Jung · Nam-Guk Kim* · †Sang-Kook Yun**

LG Electronics Co., Changwon Gyeongnam-do 51533, Korea

*Hana Power System Service Co., Changwon Gyeongnam-do 51569, Korea

**Dept. of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received May 14, 2018; Revised July 11, 2018; Accepted July 12, 2018)

요약

IMO에서 규정하는 LNG 벙커링 선박용 연료 탱크 중 C형 가압탱크는 내외 2중 용기로 구성된 초저온 탱크에 10^{-2} Torr 진공과 펄라이트 단열재가 충전되는 것이다. 그러나 이 단열방식은 LNG 기화량이 하루당 2.0% 내외로 증발율이 커서 보다 단열효과가 좋은 탱크가 요구되어 진다. 본 연구에서는 내외탱크 사이에 고진공을 적용하고 외부탱크의 내벽체에 중간 단열로 펄라이트 진공단열을 적용하는 단열 방식을 새로이 고안하여 열해석을 수행하였다. 이의 장점으로는 진공 공간의 감소로 고진공 형성 시간을 크게 감소되고, 진공도 10^{-4} Torr 이하에서 하루당 증발율이 0.16%에 불과한 매우 효율이 높은 탱크 단열방식이 되었다. 만약 현재의 IMO C형 탱크의 진공펄라이트 단열에서 진공이 파괴되는 경우, C형 탱크는 하루당 4.9%의 증발이 발생하고 새 고안 탱크는 5.23%로 거의 동일하게 된다.

Abstract - An LNG bunkering system stores LNG in a horizontal IMO's C-Type tank insulated with perlite powder, and 10^{-2} Torr vacuum in the annular space between the double walls. Current storage tanks have high heat leakage, evaporating over 2.0% daily. A more efficiently insulated storage tank reducing the evaporation rate is required to develop. This research carried out thermal analysis on a new effective insulation method, i.e. double shield insulation system, that separates high super vacuum in the annular space between two tanks with a perlite vacuum in the back side of outer tank. This highly efficient insulation system obtained an evaporation rate of 0.16% per day under a 10^{-4} Torr vacuum. Even if the space loses its vacuum, the new insulation system showed a lower evaporation rate of 5.23% than the present perlite system of 4.9%.

Key words : LNG bunkering, double shield insulation, Perlite vacuum, high vacuum super insulation

1. 서론

LNG는 황산화물 100%, 분진 99%, 질소산화물 90%, SOx가 없고 이산화탄소를 20% 감소시키게

되는 친환경 에너지원으로 환경, 경제성 등의 이유로 전세계의 향후 주요 에너지원이 될 것이다. 선박의 경우 IMO의 NOx 80% 감축 규제의 2016년 발효로 유럽 국가들은 LNG를 연료로 운항되는 신조 연안선박의 보급 및 기술개발을 선점 추진하고 있다[1]. 유럽 선진국은 2014년 기준 LNG추진 연안선박이 이미 83척이며, 향후 10년 안에 미국, 캐

†Corresponding author: skyun@kmou.ac.kr

Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

나, 중국, 일본 등 전세계 선박수가 3,200척이 될 것으로 IMO 예측하고 있다. 현재 선박의 배출가스 통제구역은 발트해, 북해, 그리고 북아메리카 해역이 설정되어 있으며, LNG는 기존 경유운항 선박 대신에 향후 LNG연료로 운항되는 선박이 지속적으로 증가할 것으로 전망되고 있다[2].

국내 선박용 병커링 관련 기술로는 최근 한국가스공사를 포함한 15개 회원사가 'LNG 병커링 협의체'를 발족하였고, 한국선급에서는 LNG 추진선박과 LNG 병커링 기술개발 및 표준화, 제도개선 등을 수행하고 있다. 또한 2013년부터 인천항만공사는 200톤급 LNG추진 선박인 '에코누리호'를 LNG 연료 10톤으로 인천연안 900 km를 시범운항하고 있다[3].

최근 정부는 LNG 병커링 산업 활성화를 위하여 한국가스공사의 통영터미널, 광양, 보령에 LNG 병커링 전용터미널을 구축키로 하였으며, 지난해 정부가 분석한 신규 LNG연료 추진선 발주 및 LNG 연료 추진선 개조시장은 약 6조원 규모로 2025년까지 LNG연료 추진선 신·개조시장 148조 5,000 억원으로 확대될 것으로 전망하고 있다[4]. 이와 같이 우리나라에서도 수년내에 LNG추진 연안선박의 개발 및 보급이 본격화될 것으로 예측되고 있다.

LNG 병커링의 LNG 공급 체계는 'LNG기지→LNG충전 플랜트→LNG충전 공급선박(혹은 LNG 충전 탱크로리) → LNG추진 선박'으로 이루어지며, 각 단계에서 LNG의 저장과 충전, 운송 때 마다 BOG가 발생하게 된다. 발생된 BOG의 대기 방출은 또 다른 지구 온난화를 초래하게 됨으로 LNG를 장기간 액체 상태로 저장할 수 있는 저장탱크의 고효율화 기술개발은 필수적으로 필요한 기술일 것이다.

IMO의 병커링 탱크 규정은 기존의 극저온액체인 액체질소(-196℃), 액체산소(-183℃), 액체알곤(-186℃)의 저장탱크와 동일한 C형 고압탱크 방식으로 진공필라이트 단열방식 탱크이다. 이는 내외 2중 탱크로 구성되며, 내외 탱크 공간에는 필라이트 분말 단열재가 240 mm 정도 충전되고 10⁻² Torr의 진공이 적용된다[5]. -162℃의 초저온 액체인 LNG를 저장하는 병커링 선박의 탱크들은 이 진공 필라이트 분말 단열재가 적절히 시공됨에도 불구하고, 외부로부터의 지속적인 열유입으로 인하여 BOG가 지속적으로 발생하게 되며 LNG 병커링의 대두와 함께 대형 LNG 저장탱크의 제작 및 단열 기술에 대한 연구들이 국내외에서 일부 수행되고 있다[5~9]. 또한 IMO에서는 C형 탱크의 경우 진공이 깨어지더라도 필라이트 분말이 남게 되어 이 단열

방식을 권장하고 있다.

그러나 필라이트 진공단열 탱크의 단열성능을 보면 하루당 증발율이 저장용량의 2%~2.5%가 된다. 또한, 진공필라이트 단열방식은 탱크 운용시간이 증가할수록 단열재인 필라이트분말이 하중으로 침강하게 되어 탱크 상부에 단열재 부재 현상이 발생하게 되고, 진공 형성 작업 동안 필라이트 분말이 진공펌프의 흡입구를 막게 되어 탱크 전체의 균일한 진공작업이 어려운 문제를 보유하고 있다. 이렇게 현재의 저장탱크는 증발율이 큰 단점과 함께 단열방식의 문제점을 갖고 있는 것이다.

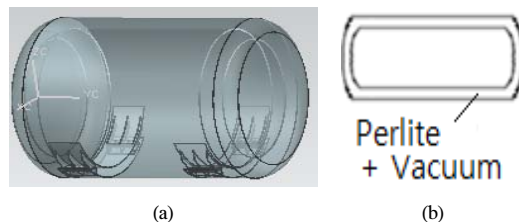
본 연구에서는 이러한 문제점들을 해소하면서 단열 성능을 크게 향상시킬 수 있는 새로운 극저온 저장탱크 단열방식을 제공하고자 한다. 이의 방법으로 현재의 C형 2중 용기의 공간에 10⁻² Torr의 저진공이 적용되는 대신에 10⁻⁴ Torr 이하의 고진공 슈퍼단열을 적용하고, 외부 탱크 내벽체에 중간 단열 공간을 가설하는 단열방식이다. 이는 탱크의 LNG 손실 증발율을 획기적으로 감소시킬 뿐만 아니라, 탱크 내 필라이트 분말을 충전할 발생하는 문제들을 해결하게 된다.

본 연구의 열해석은 상용 프로그램인 Ansys를 사용하여 수행하였다.

II. 현재 선박의 LNG 저장용 C형 탱크

2.1. 현재 C형 저장탱크의 구조

현재의 선박 LNG 병커링용 저장탱크의 구조는 Fig. 1과 같이 내외 2중 횡형 용기로 제작되며, 내외 용기 사이의 단열은 필라이트 분말을 240 mm ~ 280 mm 정도 충전하고, 이 공간에 진공도 1x10⁻² Torr를 적용한 단열 구조로 되어 있다. 본 연구에서는 비교의 기준으로 선박의 화물창에 설치될 수 있는 체적 10 m³의 횡형 탱크로 하였다. 이 때 내부



(a) Inner tank and supporters, (b) Vacuum perlite powder insulation between annular space.

Fig. 1. Modelling of current C-type LNG storage tank.

Table 1. Specification of current marine LNG tank

	Inner wall	Insulation	Outer wall
Thickness	10 mm	240~280 mm	9 mm
Material	SUS 304	Perlite powder +vacuum	SS400

용기의 전열면적은 34.51 m²이 되었고 내외탱크 규격은 **Table 1**과 같다. 또한 내부의 각종 배관들은 6개가 가설되며, 내부 용기를 지지하는 지지부는 내외 용기 단열 공간에 4개가 가설된다.

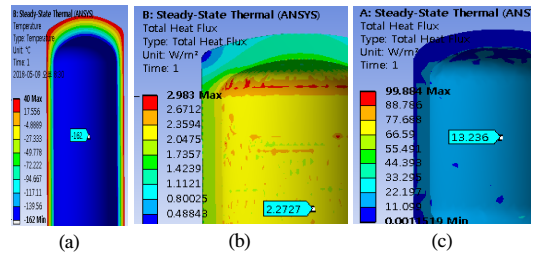
2.2. 횡형 C형 저장탱크 동체의 열유입 해석

Fig. 2는 LNG 벙커링용 저장탱크의 벽체인 실린더부와 경판부를 통한 열해석 그림으로, 탱크 내부는 -162 °C, 외부는 40 °C를 적용하였으며 탱크 표면에서 외기의 자연대류는 5 W/m²h^oC로 하였다. 열유입량 산정은 다음 식에서 구한다.

$$Q = U A \Delta T \tag{1}$$

여기서 Q 는 단위 시간당 전열량 (kJ/s), U 는 총괄전열계수 (kJ/m²h^oC), A 는 전열면적 (m²), ΔT 는 온도차(°C)이다. 해석결과, **Fig. 2(b)**는 1x10⁻² Torr 진공이 적용된 진공필라이트층의 열전도도 값인 0.0019 W/mK를 적용한 것으로, 벽체의 열유입량은 2.273 W/m²로 매우 적게 된다, 그러나 실제는 LNG 저장탱크의 일 기화 발생량은 2.0 % 정도이며, 이를 기준하여 열유입량을 산정하면 **Fig. 2(c)**의 해석과 같이 13.24 W/m²이 되고 벽체 총 전열량은 456.91 W, 이의 열전도도 값은 0.014 W/mK이다.

Table 2는 진공도에 따른 필라이트분말 단열층의 열전도도 값을 보여 준다. 이를 보면, 진공압력의 상승과 함께 열유입량과 열전도도가 증가함을 알 수 있다. 10⁻² Torr의 진공이 균일하게 적용된 열전도도는 0.0019 W/mK로 벽체 총열유입량은 78.44 W에 하루당 증발율은 0.36 %가 되나, 진공압력이 높게 되면 열전도도가 커져서 하루 2.0 %까지 증가하게 되는 것이다. 진공이 파괴되어 공기와 혼합된 필라이트분말의 열전도도는 0.029 W/mK가 되어 총 열유입량은 970.1 W가 유입되어 하루당 LNG 증발율은 4.9 %로 얻어 진다.



(a) Temperature distribution, (b) Heat intake rate with k=0.0019 W/mK, (c) Heat intake with evaporation rate of 2.0 %

Fig. 2. Temperature distribution and heat intake rate through walls of current marine LNG storage tank.

Table 2. Thermal conductivity of evacuated perlite powder with vacuum level

Torr	k (W/mK)	Torr	k (W/mK)
0.01	0.0019	0.5	0.06
0.05	0.0021	1	0.14
0.1	0.0035	760	44

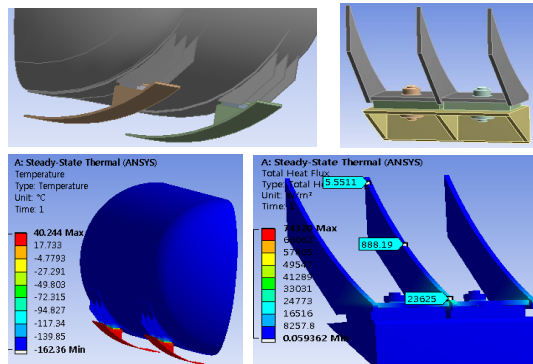


Fig. 3. Temperature distribution and heat intake rate through the support parts of current LNG marine tank.

2.3. 횡형 C형 저장탱크 지지부 열유입 해석

Fig. 3은 LNG 저장탱크의 내부 용기 하부에 가설되는 지지부의 전열량을 해석한 것으로, 내외 용기 사이의 열유입부는 내부 몸체에 접합되는 지지 날개부를 통하여 전달된다. 날개부의 접촉 면적은

0.005664 m²으로 3개씩 4쌍이 가설되어 총 면적은 0.067968 m²이 된다. 해석결과 접촉부인 날개부의 전열량은 평균 900 W/m²으로 총 열유입량은 61.17 W가 되어 몸체 전열량의 13.4 %가 되었다.

2.4. 횡형 C형 저장탱크 배관부 열유입 해석

Fig. 4는 LNG 병커링 저장탱크의 내의 탱크 사이에 가설되는 배관들의 전열량과 온도구배를 해석한 것으로, 배관의 규격은 외경이 각각 60.5 mm, 34 mm, 13.8 mm가 적용된다. 해석결과 1개의 배관을 통한 열유입량은 676.57 W/m²이며, 11개의 배관을 통한 총 열유입량은 배관의 단면적이 적은 관계로 2.64 W에 불과하게 된다.

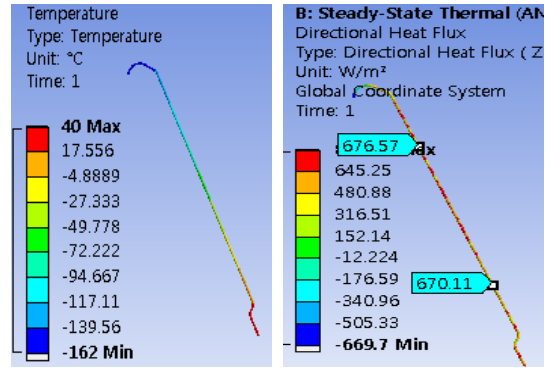


Fig. 4. Temperature distribution and heat intake rate through pipes of marine LNG tank.

III. 새로운 LNG 병커링용 저장탱크

3.1. 새로운 LNG 병커링용 저장탱크의 구조

새로이 고안된 LNG 병커링용 저장탱크의 구조는 Fig. 5와 같이 2중 내외 탱크와 함께, 외부 탱크 내벽에 또 하나의 중간 단열 공간이 형성되어 진 2중 단열 방식을 적용한 것이다. 내외 탱크 사이에는 슈퍼 단열인 1x10⁻⁴ Torr 이하의 고진공과 복사열 차단재가 적용된다. 중간 단열은 펄라이트 진공 단열과 우레탄 폼 단열을 적용하였으며, 중간 단열 공간 단열 두께는 175 mm (슈퍼 단열은 64 mm)로 하여 해석하였다.

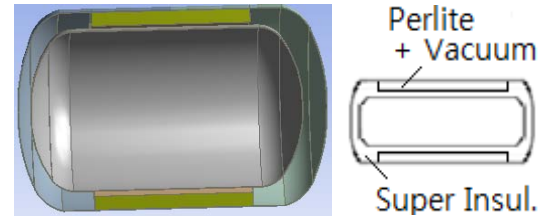


Fig. 5. New LNG bunkering storage tank with double insulation shields.

3.2. 새로운 탱크의 벽체 열유입 해석

Fig. 6은 새로 고안한 LNG 병커링용 저장탱크의 벽체를 통한 열해석 그림으로 탱크 내부는 -162 °C, 외부는 40 °C를 기준하였을 때, (a)는 온도구배, (b)는 시간당 열유입량 해석이다. 고진공 단열층의 열전도도는 4.3x10⁻⁵ W/mK, 중간 단열공간은 펄라이트 진공 경우 일 2% 증발값인 열전도도 0.014 W/mK를 적용하였다. 이때 탱크 벽체 면적 당 열유입량은 0.9983 W/m²가 되어, 벽체 총 전열량은 34.45 W, 하루당 증발율은 0.157 %가 된다. 이 값은 현재 IMO C형 탱크의 열유입량인 456.91 W의 7.5 %에 불과한 단열효과가 크게 향상되는 결과를 얻었다.

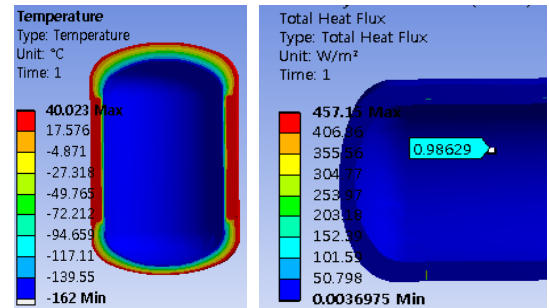


Fig. 6. Temperature distribution and heat intake rate through walls of new marine LNG storage tank.

중간 단열공간을 펄라이트 진공 대신에 우레탄 폼을 충전한 경우에도 열유입량이 거의 동일하게 되며, 이는 단열 효과가 큰 슈퍼 단열 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 슈퍼 단열 진공도에 따른 벽체의 열해석

Fig. 7은 중간 공간의 단열은 유지되면서 슈퍼

단열의 진공도가 변화될 때 단위 면적당 전열량과 증발량 해석이다. 진공도 0.06 Torr에서도 하루당 증발율이 0.32 %로 매우 단열효과가 좋은 결과가 얻어 졌다. 만약 진공이 파괴되거나 0.1 Torr 이상이 되면 증발량이 급격히 증가하게 되며, 단열은 펄라이트 진공단열이나 우레탄폼 단열 만에 의하

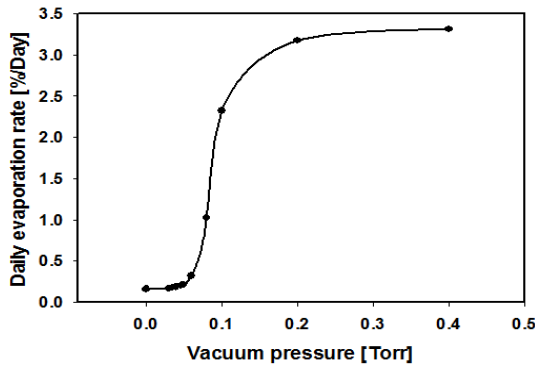


Fig. 7. Heat intake rate with vacuum pressure of double shield insulation wall in new LNG tank.

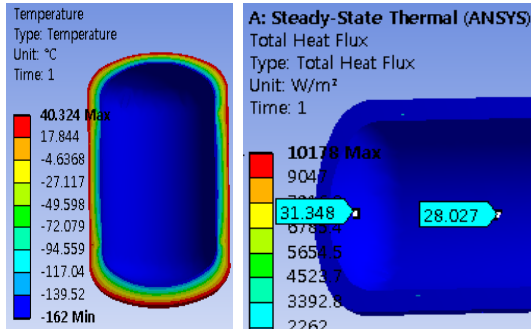


Fig. 8. Temperature distribution and heat intake rate through walls in case of vacuum loss between annular space of new marine LNG storage tank.

여 이루어지게 된다. 해석에 의하면 적정 진공 압력은 하루당 기화율이 0.16 % 이하가 될 수 있는 10^{-3} Torr 이하의 진공압력이 바람직함을 알 수 있다. 이 보다 진공압이 높게 되면 기화량이 급격히 증가하게 된다.

Fig. 8은 슈퍼단열 진공이 깨어져 공기(열전도도 0.0262 W/mK)가 충전되고 중간 단열공간은 펄라이트 진공단열이 유지될 때의 전열 해석이다. 펄라이트 진공단열의 열전도도는 0.029 W/mK를 적용하였다. 벽체 열유입량은 평균 30 W/m^2 으로 총 열유입량은 1,035 W가 되어 하루당 증발율은 5.23 %가 된다. 이는 기존의 펄라이트 진공단열 탱크가 펄라이트 분말만의 단열일 때의 증발율인 4.9 %와 거의 동일한 증발율이 된다. 그러므로 새

로이 고안된 단열방식은 매우 효과적임을 알 수 있다.

3.4. 중간 단열층의 두께에 따른 벽체 열유입

고진공 단열층의 슈퍼 단열과 함께 중간 공간의 단열층인 펄라이트 진공 단열층의 두께에 따른 전열량의 변화를 보면, 고진공 슈퍼 단열 공간의 진공이 유지될 때는 슈퍼 단열의 열전도도 값이 매우 낮아 중간 단열층의 두께에 다른 단열 효과는 매우 적게 되어 벽체 전열량이 거의 동일하게 된다. 그러나 진공이 파괴되었을 때는 펄라이트 진공만이 단열 기능을 수행하게 된다.

슈퍼단열 진공이 파괴된 경우에 펄라이트 진공 단열 두께에 따른 열유입량을 보면, 펄라이트 진공단열의 두께가 175 mm일 때 일 증발율은 4.12 %, 펄라이트 진공단열 두께가 50 mm 일 때는 벽체 전열량은 26.51 W/m^2 , 총 열유입량은 914 W, 하루당 증발율은 4.61 %가 된다. 그러므로 진공 파괴시 펄라이트 단열두께 175 mm를 기준하면 현재의 단열 방식인 펄라이트진공 240 mm 단열의 94 %가 향상된 단열효과를 제공하게 됨을 알 수 있다.

VI. 결론

본 연구에서는 LNG 벙커링 선박에 필수적으로 필요한 IMO의 C형 횡형 저장탱크에 있어서 BOG의 발생을 크게 감소시킬 수 있는 새로운 탱크 단열 구조를 고안하여 전열 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 현재의 LNG 벙커링용 IMO C형 횡형 탱크의 하루당 증발율을 보면 2.03 %인 반면, 본 개발 탱크의 단열 방식은 하루당 증발율이 0.157 %로 매우 효율이 높은 단열 방식이 되었다.
- (2) 새로이 고안된 LNG 벙커링용 탱크의 적정 진공 압력은 하루당 증발율이 0.16 % 이하로 유지될 수 있는 10^{-3} Torr 이하가 바람직하게 된다.
- (3) 현재의 IMO C형 탱크의 진공펄라이트 단열에서 진공이 파괴된 경우 하루당 4.9 %의 증발율이 되나, 새 고안 탱크는 하루당 5.23 %의 증발율로 미량 상회한 값을 갖는다.
- (4) LNG, 액체질소 등 극저온 액체를 저장할 수 있는 2중 횡형 저장 탱크의 새로운 단열 방식으로 진공과 고체 단열재를 추가 가설하는 이중단열 시스템이 매우 효과적이며 안전성을 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

REFERENCES

- [1] Regulation-13, <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides>. Accessed August 10, (2015)
- [2] loyd's Register, "LNG-fuelled deep sea shipping: The outlook for LNG bunker and LNG-fuelled newbuild demand up to 2025." (2012)
- [3] <http://m.maritimepress.co.kr/news/article-View.html?idxno=117010>, March 13, (2018)
- [4] <http://news.joins.com/article/18245551>, July 15, (2015)
- [5] S. Yun, "Thermal Analysis of LNG Storage Tank for LNG Bunkering System", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 39, No. 9, pp. 876-880, (2015)
- [6] A. Uldukis, "LNG Powered Vessel: Trends and Technical Aspects", *HEKLA Final Conference*, March, (2018)
- [7] R. Aronietis, C. Sys, E. Hassel, and T. Vanelander, "Forecasting port-level demand for LNG as a ship fuel: the case of the port of Antwerp", *Journal of Shipping and Trade*, Dec., (2016)
- [8] R. Thomas, and H. Patel, "Design and Certification of Type C Independent Tanks for Gas Fueled Ships", *ASME-USCG Workshop*, (2013)
- [9] P. Yi-qun, L. Sheng, and L. Wen-hua, "Structure Design and Research of Type-C Independent Tank on Small Scale LNG Ship", *Journal of Ship Design*, 02, 28-34, (2012)