

LNG 병커링용 고효율 LNG 저장탱크 열해석

윤상국[†]

(Received August 10, 2015 ; Revised October 2, 2015 ; Accepted October 2, 2015)

Thermal analysis of LNG storage tank for LNG bunkering system

Sang-kook Yun[†]

요약: IMO의 규제인 신조 선박에 대한 NO_x 80% 감축의 2016년 발효를 앞두고, 청정에너지인 LNG연료 선박 및 병커링 선박의 보급이 유럽 선진국들을 중심으로 추진되고 있다. LNG 저장탱크는 LNG 병커링의 필수 설비로 현재의 액체질소 등을 저장하는 극저온 액체 저장탱크와 동일한 구조이며, IMO의 “C”형 가압탱크인 내외 용기로 구성된 2중 탱크에 진공펄라이트 단열재가 충전되는 형식이다. 그러나 이 단열방식은 진공작업이 어렵고 일 LNG 기화량이 2.0 % 내외가 되어 보다 고효율의 탱크가 요구되어 진다. 본 연구에서는 진공과 단열재를 분리하여 내외탱크에 고진공을 적용하고 외부 탱크에 우레탄폼을 가설시킨 탱크 단열 방식을 새로이 고안하여 열해석을 수행하였다. 해석결과 본 개발 탱크는 진공도가 10⁻³ Torr 이하일 때 일 기화량이 0.03 % 이하로 매우 적게 유지될 수 있고, 10⁻⁴ Torr 이하가 되면 일 기화량이 0.11 %가 되었다. 진공이 파괴되는 경우에도 현재 진공펄라이트 단열은 일 4.9 %의 증발이 발생하나, 새 고안 탱크는 일 증발율이 4.12 %가 되는 매우 효율이 높고 안전한 LNG 탱크 단열방식이 되었다.

주제어: LNG 병커링, 2중 탱크, 단열재, 진공펄라이트, 고진공, 우레탄폼

Abstract: In 2016, the IMO's new rules for an 80% reduction in NO_x emissions in newly built ships will necessitate the use of LNG as a clean fuel. So far, the developed European countries have led the development of LNG bunkering ships and related facilities. An LNG bunkering system stores LNG in a horizontal or vertical IMO “C”-Type tank insulated with perlite powder, and a vacuum in the annular space between the double walls, like the cryogenic liquid nitrogen tank. Current storage tanks have high heat leakage, evaporating over 2.0% daily, and are difficult to build with the required vacuum. A more efficiently insulated storage tank could reduce the evaporation rate. This research carried out thermal analysis on a new effective insulation method that separates high vacuum in the annular space between two tanks with a solid insulation material, such as urethane foam, lining the outer vessel. This highly efficient insulation system obtained an evaporation rate of 0.03% per day under a 10⁻³ torr vacuum, and an evaporation rate of 0.11% at 10⁻⁴ torr. Even if the space loses its vacuum, the new insulation system showed a lower evaporation rate of 4.12% than the present perlite system of 4.9%. This newly developed tank can increase the efficiency of LNG storage tank and may help keep LNG bunkering systems safe.

Keywords: LNG bunkering, Double-walled tank, Insulation material, Vacuum perlite, High vacuum, Urethane foam

1. 서론

LNG는 깨끗하고 저렴하면서 편리하여 향후 전세계의 교역량과 사용량의 지속적인 증가가 예측되고 있다. 특히 IMO의 규제인 신조 선박에 대한 NO_x 80% 감축의 2016년 발효를 앞두고, LNG는 NO_x의 90%이상 감소, SO_x는 없으며 CO₂ 배출은 20% 감소시킬 수 있어 선진국들은 현 선박 연료를 대체할 수 있는 청정 연료인 LNG를 채택하여 LNG 추진 연안선박의 개발 등 이와 관련된 제반 기술개발을 추진하고 있다[1].

전세계 추세를 보면, LNG를 연료로 운항하는 연안선박이 2014년 기준으로 83개에 달하고, IMO에서는 향후 10년 안에 선박수가 3,200개가 될 것으로 예측하고 있다. LNG추진선박 개발과 보급이 노르웨이 등 북유럽 국가들을 중심으로 활발히 보급되고 있고 향후 급격히 증가할 것으로 미국, 캐나다, 중국, 일본, 싱가포르 등도 LNG 병커링 기술을 개발 중에 있다.

국내 선박용 병커링 관련 기술로는 환경규제 강화 및 고유가 대비 추세에 발맞추어 최근 한국가스공사를 포함한

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5533-3986>): Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-791, Korea, E-mail: SkYun@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4363

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.

15개 회원사가 ‘LNG 벙커링 협의체’를 발족하였고, 한국선급에서는 LNG 추진선박과 LNG 벙커링 기술개발 및 표준화, 제도개선 등의 기획용역을 수행 중에 있다. 또한 2013년부터 인천항만공사는 200톤급 LNG추진 선박인 ‘에코누리호’를 LNG연료 10톤으로 인천연안 900 km를 시범운항하고 있다[2].

최근 정부는 LNG 벙커링산업 활성화를 위하여 한국가스공사의 통영터미널, 광양, 보령에 LNG 벙커링 전용터미널을 구축키로 하였으며[3], 지난해 정부가 분석한 신규 LNG 연료 추진선 발주 및 LNG연료 추진선 개조시장은 약 6조 원 규모로 2025년까지 LNG연료 추진선 신·개조시장 148조 5,000억원으로 확대될 것으로 전망하고 있다. 이와같이 우리나라에서도 수년내에 LNG추진 연안선박의 개발 및 보급이 본격화될 것으로 예측되고 있다.

LNG 벙커링의 LNG 공급 체계는 ‘LNG기지→LNG충전플랜트→LNG충전 공급선박(혹은 LNG충전 탱크로리) → LNG추진 선박’으로 이루어지며[4], 각 단계에서 LNG의 저장과 충전, 운송 때 마다 -162 °C의 폭발성이 있는 BOG(기화천연가스)가 발생하게 된다. 발생된 BOG의 대기 방출은 또 다른 지구 온난화를 초래하게 됨으로 LNG를 장기간 액체상태로 저장할 수 있는 저장탱크의 고효율화 기술개발은 필수적으로 필요한 기술일 것이다.

LNG 벙커링 관련 모든 LNG 운송 및 저장탱크는 IMO의 “C”형 가압탱크로 현재의 액체질소, 액체산소 등을 저장하는 산업용 극저온 액체 저장탱크와 동일한 탱크로 내외용기의 2중 탱크형식에 진공필라이트 단열재가 충전된다[5]. -162°C의 초저온 액체인 LNG를 저장하는 벙커링 선박의 탱크들은 이 진공필라이트 분말 단열재가 적절히 시공됨에도 불구하고, 외부로부터의 지속적인 열유입으로 인하여 BOG가 지속적으로 발생하게 되며 LNG 벙커링의 대두와 함께 대형 LNG 저장탱크의 제작 및 단열기술에 대한 연구들이 국내에서 일부 수행되고 있다[6][7].

진공필라이트 탱크의 단열성능을 보면, 일 기화량이 한국가스안전공사 승인기준으로 하면 탱크 저장량의 2.5%가 허용되며, 이 양이 하루 동안 증발되어 손실되는 것이다. 이렇게 현재의 저장탱크는 증발율이 큰 단점과 함께 단열방식의 문제점을 갖고 있다. 진공필라이트 단열은 진공작업 동안 진공펌프의 흡입구를 필라이트분말이 차단하여 단열공간 전체의 균일한 진공작업이 어려운 문제와, 장기간 탱크를 운용할 때 필라이트분말이 하중에 의하여 침강하여 상부에 단열재 부재 현상이 발생하는 것이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해소하면서 BOG 발생을 최소화할 수 있는 새로운 극저온 저장탱크를 제공하는 데 있다. 이의 방법으로 현재의 탱크와 동일하게 2중 용기 형식이나, 진공과 단열재를 분리하여 가설하는 탱크이다. 이는 상기한 진공문제와 단열재 부재 문제를 해결할 수 있으며 증발율도 획기적으로 감소하여 LNG 손실량을 크게 감소하게 된다.

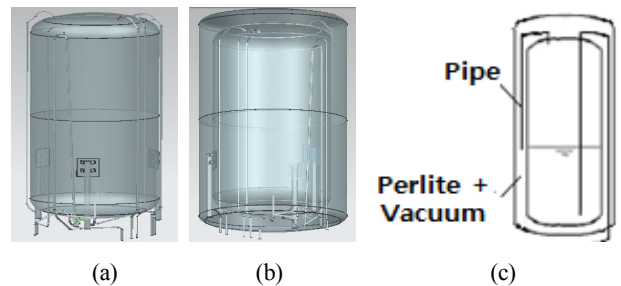
본 연구의 열해석은 상용 프로그램인 Ansys를 사용하여 수행하였다.

2. 현재의 LNG 벙커링용 저장탱크

2.1 현재 LNG 저장탱크의 구조 및 기화량

현재의 LNG 저장탱크의 구조는 Figure 1과 같이 내외 2중 용기로 제작되며, 내외 용기 사이에는 필라이트 분말이 24 cm 두께로 충전되고, 이 분말충전 공간을 진공도 1×10^{-2} Torr가 되도록 공기를 빨아내어 단열을 가한 구조로 되어 있다. 본 연구의 해석은 체적 10 m^3 의 탱크를 기준하여 수행하였고, 이 때 내부 용기의 전열면적은 31.68 m^2 이 되었다. 내외탱크 규격은 Table 1과 같다. 또한 내부 각종 배관들은 이 내외 용기 사이에 7개가 가설되며, 내부 용기를 지지하는 지지대는 4개소에 가설된다.

극저온 액체 저장탱크의 일 기화량은 통상의 액체질소 저장탱크 경우 2.3%~2.5%가 된다. 액체질소와 LNG를 비교하여 보면, LNG의 기화잠열이 액체질소보다 2.2배 크고 밀도는 1/2 정도로 작아, 일 액체질소가 2.5% 증발되는 동일 탱크에서 LNG에 대하여 산정하면 일 2.0 % 기화가 발생하게 된다.



(a) Inner tank with pipe and sturd, (b) Inner and outer tanks, (c) Cut view, (d) Pipe, (e) Sturd

Figure 1: Components of present LNG storage tank

Table 1: Specifications and materials of new LNG tank

	Inner wall	Insulation	Outer wall
Thickness(mm)	10	240	9
Material	SUS 304	Perlite powder /Mylar	SS400

2.2 LNG 저장탱크 열해석

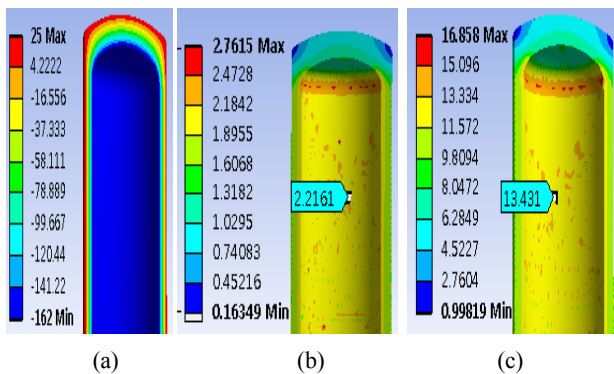
2.2.1 탱크 벽체의 열유입 분석

Figure 2는 LNG 저장탱크의 벽체를 통한 열해석 그림으로, 탱크 내부는 -162°C, 외부는 25 °C를 기준하였으며 탱크 표면에서 외기의 자연대류는 $5 \text{ W/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 로 하였다. 해석결과 그림 (b)는 진공이 1×10^{-2} Torr로 균일하게 적용된 진공 필라이트층의 열전도도 0.0019 W/mK 값을 적용하여 벽체 열유입량은 2.216 W/m^2 이 되고[8][9], 그림 (c)는 현재 LNG

저장탱크의 일 기화 발생량이 2.0 %를 기준하여 벽체만의 열유입량을 산정한 것으로 13.43 W/m²이 되었다.

진공도에 따른 펄라이트분말 단열층의 열전도도 값은 Table 2와 같이 변하게 되며, Figure 3은 이를 기준하여 열전도도에 따른 벽체의 단위 면적당 유입열량과 일 증발율을 해석한 것이다. 압력의 상승과 함께 열전도도와 열유입량, 일 증발율도 증가하게 된다. 진공이 10⁻² Torr로 균일하게 적용된 진공 펄라이트층의 열전도도는 0.0019 W/mK로 이의 벽체 총열유입량은 67.8 W에 일 증발율은 0.31%가 되나, 압력이 높게 되면 열전도도가 커져서 열유입량은 13.43 W/m²로 일 2.0 %까지 증가하게 되는 것이다.

공기가 충전된 펄라이트분말 만의 열전도도는 0.029 W/mK가 되어, 일 LNG 증발량은 4.9 %로 얻어 진다.



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

Figure 2: Temperature distribution and heat flow rate through the wall of present LNG bunkering tank

Table 2: Thermal conductivity (k) of evacuated perlite powder with vacuum

Vacuum(Torr)	k(W/mK)	Vacuum(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

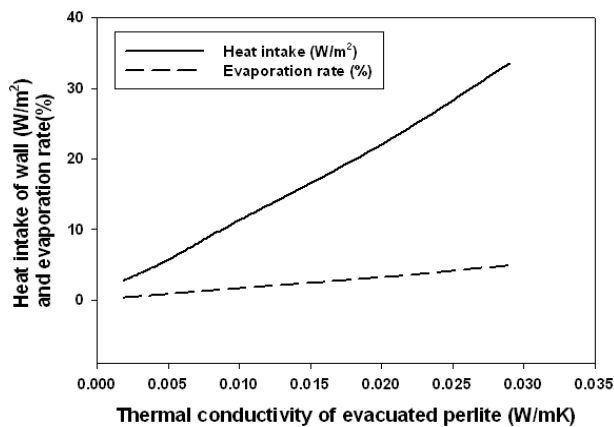


Figure 3: Thermal conductivity with vacuum pressure of evacuated perlite powder

2.2.2 지지부를 통한 열유입 해석

Figure 4는 LNG 저장탱크의 내부 용기 하부에 가설되는 지지부의 전열량을 해석한 것으로, 배관의 외경은 45 mm, 두께 6 mm이며, 해석결과 배관을 통한 총 열유입량은 2335.7 W/m²가 되었다. 그러므로 4개의 지지부를 통한 총 열유입량은 16.12 W가 된다.

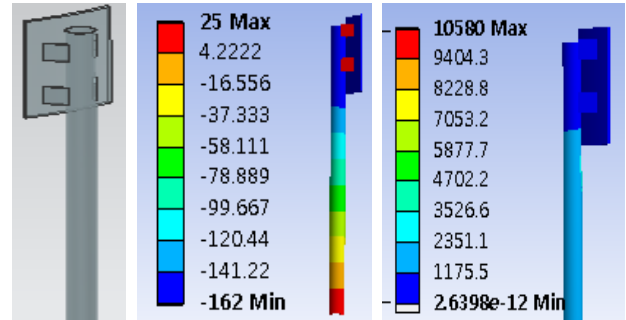


Figure 4: Temperature distribution and heat flow rate through the strut of present tank.

2.2.3 배관을 통한 열유입 해석

Figure 5는 LNG 저장탱크의 내외용기 사이에 가설되는 배관의 온도구배와 전열량을 해석한 것으로, 배관의 외경은 34 mm, 두께 2.2 mm로 하였다. 해석결과 1개의 배관을 통한 열유입량은 696.63 W/m²이며, 7개의 배관을 통한 총 열유입량은 배관의 단면적이 적은 관계로 1.37 W에 불과하게 된다.

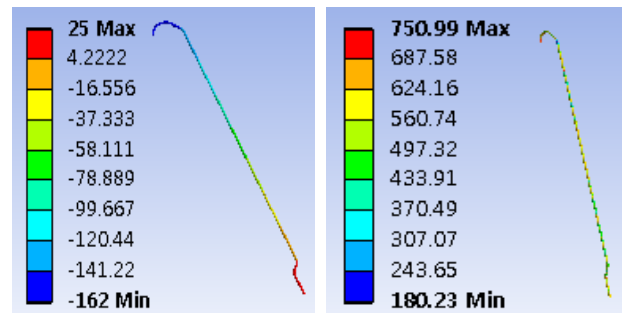


Figure 5: Temperature distribution and heat flow rate through pipe of present tank.

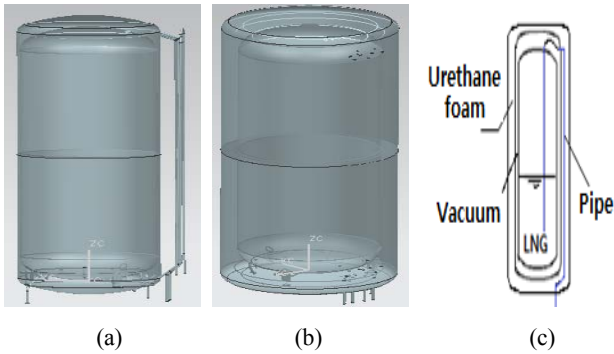
3. 새로운 LNG저장탱크

3.1 새로운 LNG 저장탱크의 구조

새로운 LNG 저장탱크의 구조는 Figure 6과 같이 내외 2중 용기로 제작되며, 내외 용기 사이에는 1x10⁻⁴ Torr~1x10⁻⁵ Torr의 고진공과 복사열 차단재가 적용된다. 또한 외부 용기 외부 표면에 고체 단열재인 우레탄폼이나 스피렌폼 단열재가 가설되고 우레탄폼을 지지하는 얇은 자켓용으로 FRP가 적용되는 구조이다. 고진공이 적용되는 내외 용기 사이의 공간을 최소화하기 위하여 내외 용기 사이의 배관

들은 외부탱크 외면에 가설된다. 새로운 탱크의 각 규격과 재료는 Table 3과 같다.

현재 탱크의 해석결과에서 보듯이 지지부와 배관부의 열유입이 매우 적으므로 여기서는 벽체의 열유입만을 분석하였다.



(a) Inner and outer tank with pipes, (b) Pipe bundles covered with urethane foam, (c) Cut view

Figure 6: Components of new developed LNG storage tank.

Table 3: Specifications and materials of new LNG tank

	Inner wall	Vacuum/reflector	Outer wall	Urethane	FRP
Thickness (mm)	10	60	9	187	2
Material	SUS	Mylar	SS400	-	-

3.2 새로운 LNG 저장탱크 열해석

3.2.1 새로운 탱크 벽체의 열유입 해석

Figure 7은 새로 고안한 LNG 저장탱크의 벽체를 통한 열해석 그림으로, 탱크 내부는 -162℃, 외부는 25℃를 기준하였으며, 고진공 단열층의 열전도도는 $4.3 \times 10^{-5} \text{ W/mK}$ [9], 벽체를 통한 면적당 열유입량은 0.1405 W/m^2 가 되어, 벽체를 통한 일 기화량은 0.021%가 된다.

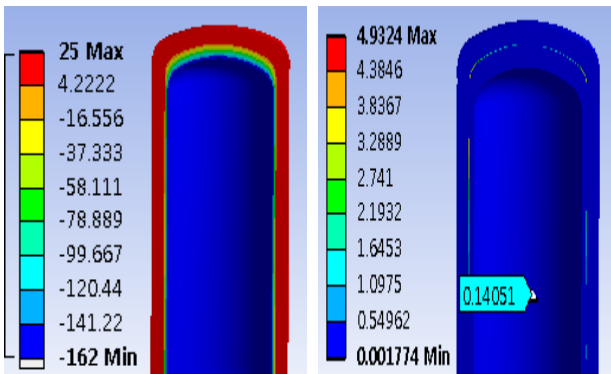


Figure 7: Temperature distribution and heat flow rate through the wall of new developed tank

3.2.2 진공도 변화에 따른 벽체의 열유입 해석

Figure 8 와 9는 진공도의 변화에 따른 단위 면적당 전열량과 증발량으로 진공 압력은 일 기화량이 0.03% 이하로 유지될 수 있는 10^{-3} Torr 이하의 유지가 바람직하게 된다.

해석에 의하면 0.05 Torr에서도 일 기화량이 0.5%로 매우 단열효과가 좋게 얻어졌다. 만약 진공이 파괴되거나 0.1 Torr 이상이 되면 증발량이 급격히 증가하며 오직 우레탄 폼에 의하여 단열이 이루어지게 된다.

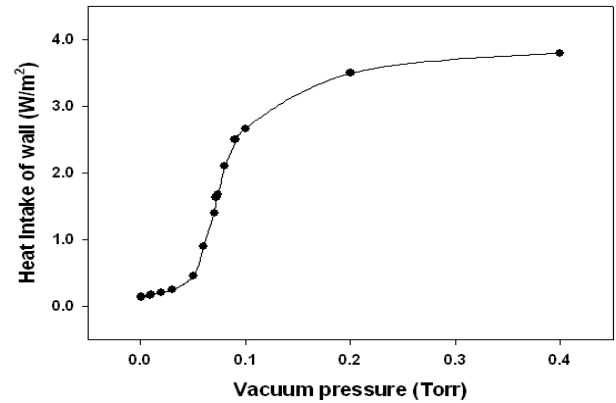


Figure 8: Heat intake rate of wall with vacuum pressure of new tank insulation

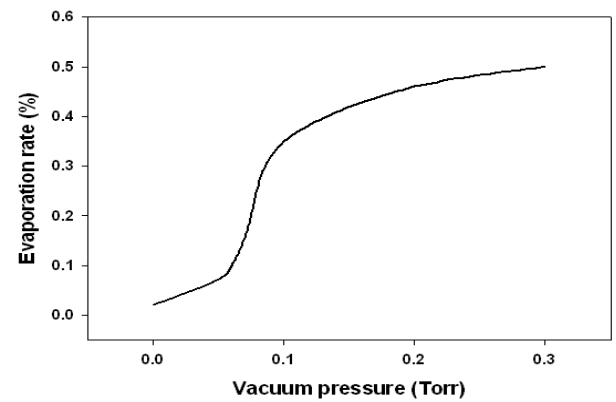


Figure 9: LNG evaporation rate with vacuum pressure of new tank insulation

3.2.3 우레탄폼의 단열 두께에 따른 벽체의 열유입 해석

Figure 10은 우레탄폼의 두께에 따른 전열량의 변화이다. 고진공 단열층의 진공 단열이 유지될 때는 우레탄폼의 두께에 다른 단열 효과는 미약하여 벽체 전열량이 거의 동일하게 된다. 그러나 우레탄폼의 단열 시공이 필요한 이유는 진공이 파괴되었을 때 우레탄폼이 단열 기능을 수행하여 LNG의 급격한 증발과 위험을 막기 위한 것이다. 현재의 벙커링용 LNG 저장탱크도 LNG의 급격한 증발을 막기 위하여 진공필라이트 단열재에서 진공이 파괴되어도 필라이트에 의한 단열이 제공되도록 하고 있다[1][4].

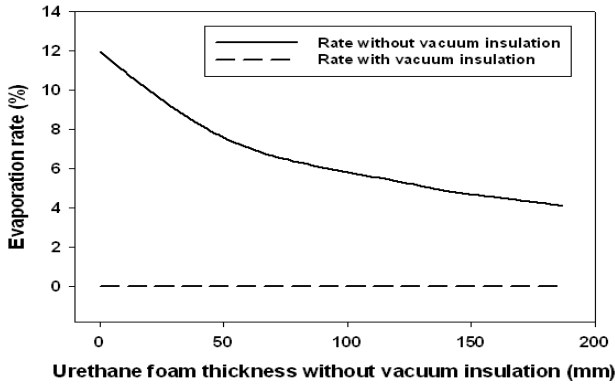


Figure 10: LNG evaporation rate with polyurethane foam thickness of new tank

그림에서 진공이 파괴된 경우에는, 우레탄폼의 두께 187 mm일 때 일 증발율은 4.12 %가 되었으며, 현재 탱크인 진공필라이트 단열에서 진공이 파괴된 경우와 동일한 증발량을 갖는 우레탄폼의 두께는 140 mm가 되었다.

3.2.4 새로운 탱크와 현재 탱크의 차이점

현재의 진공필라이트 단열방식의 2중 LNG 저장탱크의 경우 진공이 파괴되면 LNG의 4.9 %가 하루 동안 증발하게 된다. 반면, 본 연구의 새로운 탱크는 동일한 단열 두께로 진공을 잃더라도 더 낮은 율로 증발이 발생한다.

또한, 정상적으로 동일한 조건에서 운용되는 LNG 병커링 탱크에서 증발하는 LNG의 일 기화량을 보면 현재의 탱크는 2.03 %가 기화되는 반면, 본 개발 탱크는 총 열유입량이 21.94 W, 일 증발량 0.11 %로 매우 효율이 높은 탱크임을 알 수 있다.

탱크의 제작에 소요되는 재료의 차이를 보면, 본 개발 탱크는 외통의 직경이 크게 감소하여 철판의 소요량이 절감되는 반면, 단열재료는 필라이트분말 대신에 우레탄폼과 FRP 자켓 그리고 복사열 차단재가 필요하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 LNG 병커링 선박에 필수적으로 운용되는 LNG 저장탱크에 있어서 BOG의 발생을 최대한 억제시킬 수 있는 새로운 탱크 구조를 고안하여 LNG 증발 열해석을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 극저온 액체를 저장할 수 있는 2중 용기 탱크의 새로운 단열 방식으로 진공과 단열재를 분리하여 단열효과와 진공 작업성이 크게 향상되었다.
- (2) LNG 병커링 탱크에서 증발하는 LNG의 일 기화량을 보면 현재의 탱크는 2.03 %인 반면, 본 개발 탱크는 일 증발량 0.11 %로 매우 효율이 높은 탱크가 되었다.
- (3) 새로운 탱크의 적정 진공 압력은 일 기화량이 0.03 % 이하로 유지될 수 있는 10⁻³ Torr 이하가 바람직하다.
- (4) 진공이 파괴된 경우에도 현재 진공필라이트 단열은

일 4.9 %의 증발이 발생하나, 새 고안 탱크는 일 증발율이 4.12 %이 된다.

References

- [1] Regulation-13, [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pollution Prevention/AirPollution/Pages/Nitrogenoxides](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pollution%20Prevention/AirPollution/Pages/Nitrogenoxides), Accessed August 10, 2015.
- [2] News, Munhwa Ilbo, <http://www.munhwa.com/news/view.html?no=2013071601071343054002>, Accessed July 16, 2013.
- [3] News, Energy & Environment News Plus, <http://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=82507>, Accessed July 15, 2015.
- [4] Swedish Maritime Technology Forum, "LNG ship to ship bunkering procedure," 2013.
- [5] R. Thomas and H. Patel, Design and Certification of "Type C" Independent Tanks for Gas Fueled Ships, ASME-USCG Workshop, 2013.
- [6] T. W. Kim, Y. S. Suh, K. B. Jang, and K. H. Cha, "A study and design on tank container for fuel tank of LNG fueled ship," Journal of the Society of Naval Architects Engineering, vol. 46, no. 6, pp. 504-511, 2012 (in Korean).
- [7] S. B. Shin, D. J. Lee, D. H. Kim, and H. S. Kim, "A study on Design of IMO C type Fuel Storage Tank with Capacity of 500 m³, Proceedings of the Twenty-third International Offshore and Polar Engineering, ISOPE, ISBN 978-880633-99-9, pp. 846-854, 2013.
- [8] R. F. Barron, Cryogenic Systems, 2nd ed., New York, USA: Oxford University Press, 1985.
- [9] L. Jin, C. Lee, J. Park, and S. W. Jung, "Prediction of the effective thermal conductivity of powder insulation," Proceedings of the 25th International Cryogenic Engineering Conference, pp. 1-6, 2014.