

LNG선박 화물창의 펄라이트 단열재 적용성에 관한 설계 특성 연구

윤상국[†]

(원고접수일 : 2013년 9월 23일, 원고수정일 : 2013년 10월 25일, 심사완료일 : 2013년 10월 31일)

Study on the characteristics of perlite insulation for the storage tank in LNG carrier

Yun Sangkook[†]

요약: LNG 수요의 증가에 따라, LNG FPSO (부유식 생산저장 하역설비) 선박 및 LNG 선박의 건조도 지속적으로 증가하고 있고, 다양한 형태의 저장탱크 설계가 시도되고 있다. 본 논문에서는 LNG를 저장하는 선박 화물창 내부탱크의 방식으로 5~9% Ni강재를 적용하고, 단열재를 우레탄폼 블록 대신에 펄라이트 분말을 충전하는 새로운 선박 탱크 형식을 제안하였다. 펄라이트 단열재의 적용 가능성을 위하여 필수적으로 검토되어야 하는 펄라이트의 내부탱크 벽체에 가하는 압력, 압력 흡수를 위하여 적용되는 탄성 블랭킷의 특성, 블랭킷의 적정 설계두께, 내부탱크 설계압력 등 설계 인자들을 분석하였다. 연구결과로, 블랭킷의 두께설계 기준은 내부탱크 단열간격의 1/4~1/3 사이가 되어야 하고 적정 두께는 30% 정도가 되었으며, 탱크 설계압력 기준은 블랭킷 두께에 따라 1,500 Pa 이하가 되어야 하는 것으로 얻어졌다.

주제어: LNG FPSO 선박, 펄라이트 단열, 탄성 블랭킷, 설계 압력, 설계 두께

Abstract: As the LNG demands are growing, the constructions of LNG FPSO (Floating Production Storage and Off-loading) and LNG carriers have been constantly increased, and the various design of storage tank has been tried. This paper propose that the material of inner storage tanks is made of 5~9% Ni steel plate and perlite powder insulation instead of urethane foam block. It needs essentially to obtain the proper design specifications that are the pressure of perlite, the characteristics of resilient blanket as the pressure absorber, optimum thickness of blanket and design pressure of tank wall, etc. to enable the perlite insulation system to LNG carrier, The results show that the design thickness of blanket should be between 1/4 to 1/3 of insulation width and the optimum rate becomes 30%, and the design pressure be applied below 1,500 Pa with blanket thickness.

Keywords: LNG FPSO carrier, Perlite insulation, Resilient blanket, Design pressure, Design thickness

1. 서 론

LNG는 편리하고 저렴하면서 청정에너지여서 전 세계 및 국내의 주요 에너지원으로 자리를 확고히 하고 있다. 최근 쉘가스의 대두와 함께 LNG는 60년의 매장량을 고려하여 볼 때 향후에도 지속적인 팽창이 예견된다. 우리나라도 도시가스, 발전, 차량용 연료로의 사용량의 증가와 함께 도입량이 매년 증가되면서, LNG FPSO 선박 및 LNG 운송 선박의 건조, 수주

량도 증가하고 있다.

-162℃의 초저온 액체상태인 LNG를 원해에서 생산 저장하는 FPSO나 운송 선박의 화물창 탱크 형식은 단열이 된 이중 탱크로 제작된다. 내부탱크의 재료 형태에 따라 철재로 제작된 직육면체의 멤브레인 식과 알루미늄으로 제작된 원형의 모스형으로 나뉜다. 현재는 LNG의 열응력과 하중에 견디도록 주름(Corrugation)이 잡혀있는 9% Ni강으로 두께가 1~2

[†] Corresponding Author: Division of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: Khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4363

mm에 불과한 멤브레인식이 LNG선박 탱크의 주를 이루고 있다. 그러나 멤브레인식은 외국 기술로 선박 비용의 4%에 달하는 특허비용을 지불하여야 하는 문제 등으로 대형 조선사를 중심으로 한국형 LNG선박의 개발을 시도하고 있으나 이는 멤브레인의 주름 형태를 변형하는 방식을 취하고 있다 [1]-[3]. 한편, LNG선박용 멤브레인식 탱크의 단열에는 외부의 열유입을 차단하고 멤브레인을 지지할 수 있는 구조로 우레탄폼 블록을 약 55~ 60 cm 두께로 적용하고 있다.

본 연구에서는 육상의 LNG 탱크에 적용되고 있는 탱크 형태로 내부탱크의 재료는 5~9% Ni강재 혹은 316L강 그리고 외부탱크는 일반 탄소강을 사용하는 LNG저장탱크를 새로이 선박에 적용하고자, 내외부 탱크 사이에 가설되는 단열재를 우레탄폼 단열재와 비슷한 열전도도 값을 갖는 펄라이트 분말을 충전식 탱크를 검토하였다. 이 탱크 방식의 장점을 보면 강관 규격이 폭 3.1 m, 길이 6~12 m로, 길이 1.5 m 내외의 멤브레인 보다 용접 길이를 기준할 때 50%가 감소되어 제작 기간이 크게 단축될 수 있으며, 단열재의 시공과 비용이 크게 감소하게 된다. 이는 특히 LNG FPSO 선박과 같이 운항을 하지 않고 원해에서 LNG를 생산, 저장하는 선박의 경우에 매우 효과적인 구조로 판단된다. 그러나 LNG선박용 탱크에 펄라이트 분말을 단열재로 적용할 때는 우레탄폼 블록과는 달리 내외 탱크 간격의 크기와 탱크 높이에 따라 내측벽체에 펄라이트가 압력을 가하게 되어, 이 압력을 흡수하는 조치가 필요하게 된다. 이를 위하여 탄성이 있는 그래스 울(Glass wool)로 제작된 블랭킷(Blanket)을 적정 두께로 가설하게 된다.

본 연구에서는 LNG 내외부탱크 사이의 단열부 설계와 내부탱크의 두께 및 벽체 지지장치(Stiffener)의 설계에 필수적으로 고려되어야 하는 펄라이트 충전 압력 설계기준을 파악하기 위하여 5~9% Ni 철재의 온도에 따른 변형, 펄라이트 충전에 따른 탱크 압력 특성, 블랭킷의 두께와 복원력에 따른 펄라이트 분말의 압력 흡수 특성, 블랭킷의 특성 등을 분석하여 그 결과를 선박에 적용 가능하도록 적정 설계기준을 검토, 제시하였다. 본 연구의 해석을 위하여 LNG 펄라이트 단열재 적용탱크의 내부벽체에 가해지는 압

력 산정 프로그램을 개발하여 사용하였다.

본 연구는 선박용 LNG 화물창의 새로운 탱크 형식의 설계 개념을 정립하여 이의 적용성을 제공하고, 선박 건조의 작업량과 기간을 줄일 수 있는 보다 효과적이고 안전하며 다양한 우리 고유기술의 선박용 LNG탱크 설계 및 제작기술을 보유하는 데 기여할 수 있을 것이다.

2. LNG화물창의 구조 및 관계식

2.1 LNG 내부탱크의 구조

Figure 1은 논문에서 검토하고자 하는 선박용 LNG 내외부 탱크 및 단열공간을 나타내며, 내외부 탱크 사이에는 미세한 흰색 분말의 펄라이트를 단열재로 충전하고, 하부와 상부의 코너 부분은 우레탄 블록을 가설하는 구조를 갖추었다. 약 60 cm 두께의 펄라이트 분말 단열부는 그래스 울 블랭킷이 내부 탱크 벽체에 설치되며, 이 블랭킷의 두께, 탄성도 등의 특성에 따라 탱크 내부 벽체에 가해지는 하중이 증가 혹은 감소하게 된다. 만약 압력이 증가하게 되면 탱크의 안전에 영향을 미치게 되므로 펄라이트 분말의 충전에 따라 적절한 두께의 그래스 울 블랭킷의 설계가 요구되어지는 것이다.

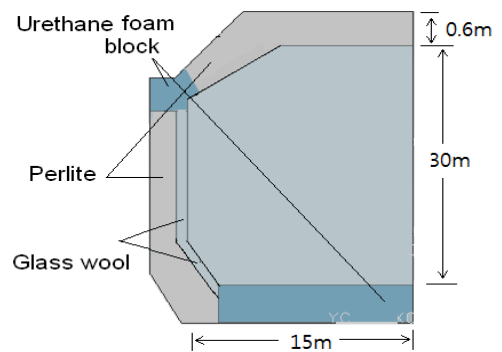


Figure 1: The proposed wall structure of storage tank in LNG FPSO vessel.

2.3 펄라이트 분말 충전 압력 산정식

펄라이트는 미세한 분체로 충전압력의 산정은 곡식을 저장하는 호퍼의 실험식에 근거하여 산정하게

된다. Janssen이 제시한 곡식 저장용 Hopper 압력산정 해석방법을 이용하여 LNG탱크에 적용되는 펄라이트 분말 특성치를 적용하면 내외탱크 간격에 가해지는 압력(P_i)은 식 (1)과 같이 된다[4][5].

$$P_i = g \rho \left(\left((R_0 - R_i) / 2 \right) + (dR / B_a) - (Bt (1 - C_i)) \right) V / (2\mu) \quad (1)$$

$$dR = [4LW / (L + 2W)] / 2 \quad (2)$$

여기서 dR 은 탱크의 수력반경, ρ 는 펄라이트의 밀도, B_a 는 블랭킷의 탄성 복원율, Bt 는 블랭킷의 두께, C_i 는 블랭킷의 펄라이트 압력에 따른 압축율, V 는 내부 탱크의 형상 보정 계수, μ 는 펄라이트 분말의 탱크벽체 마찰계수이며, 본 연구에 적용한 값은 Table 1과 같다. 식 (2)는 직육면체의 수력직경을 구하는 식으로 L 은 탱크 길이, W 는 탱크 폭이며, 본 연구에서는 1개 탱크의 규격을 길이 30 m, 폭 30 m로 하여 수력직경 40 m를 기준하였다[6].

Table 1: Applied physical values for analysis

Item	Value	Item	Value
Perlite density (ρ)	60 kg/m ³	Wall friction factor of perlite (μ)	0.7
Blanket hysteresis factor (B_a)	0.6	Inner wall annulus factor (V)	0.996

3. 해석결과 및 고찰

3.1 LNG 탱크의 변형

3.1.1 LNG 내부탱크의 변형

LNG는 -162℃의 초저온 액체상태로 5~9% Ni강인 내부탱크의 변형인자를 보면 온도와 액의 하중에 의하여 발생하게 된다. 내부탱크 벽체의 온도변화는 LNG가 충전되면 온도가 강하하고, 배출되면 기체 공간이 증가하여 온도가 상승하게 된다. 온도의 저하는 탱크 내측 방향으로 수축을 가져와 블랭킷과 펄라이트에 작용하는 압력을 감소시키며, LNG액 하중은 가해지는 압력을 증가시키게 된다. LNG의 경우 온도에 의한 변형이 액하중에 의한 변형보다 크기 때문에 블

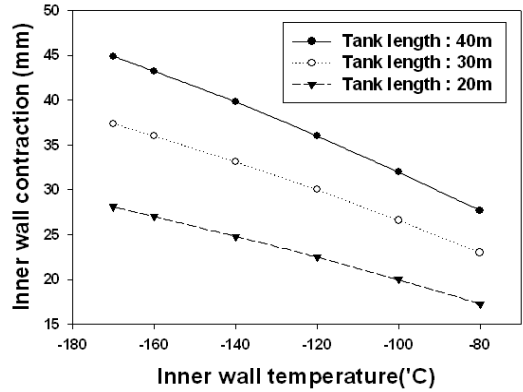


Figure 2: Inner wall contraction of tank with inner LNG temperature.

랭킷 설계에서는 액하중에 의한 변형은 무시한다.

Figure 2는 탱크 폭 30 m, 길이 20 m, 30 m, 40 m 경우 온도에 따른 내부탱크의 수축을 나타낸다. 탱크 길이가 크고 온도가 낮을수록 수축 변형량은 증가하여 길이 30 m, 폭 30 m인 탱크의 경우 -170℃에서 44.9 mm, 상부 증기의 온도인 -80℃에서는 27.7 mm의 탱크 수축이 발생하게 된다. 온도에 따른 열팽창계수는 6단계로 나누어 적용하였다[7]. 이 내부탱크의 수축 값은 외부탱크의 변형값과 함께 내외부 탱크 사이의 블랭킷과 펄라이트에 가해지는 압력의 산정에 적용된다. 이 내부 탱크 변형량은 탱크벽체에 적용되는 펄라이트의 압력산정에 적용되는 데, 온도변화에 의한 내 탱크 변형량을 합한 값이 적용된다. 즉, 변형이 증가하면 내부 탱크 간격이 증가하여 펄라이트 충전량이 증가하면서 벽체에 가하는 압력이 증가하게 되는 것이다.

3.1.2 펄라이트 분말의 충전 압력

Figure 3은 내외탱크 사이에 압력 흡수제인 블랭킷이 없이 펄라이트만을 충전할 때 상기 조건에서 내외 탱크 간격 크기에 따른 압력변화를 산정한 결과를 나타낸 것이다. 내외탱크의 간격이 클수록 펄라이트가 탱크벽체에 가하는 압력이 증가하였다. 즉, 펄라이트가 탱크에 가하는 압력은 탱크 길이보다는 내외탱크의 폭 간격 즉 단열 공간에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다. 탱크 적정 탱크 단열간격인 55~60 cm의 경우 압력이 301.0~325.2 Pa이 되었다.

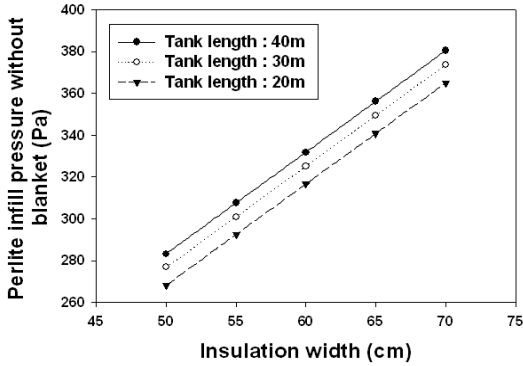


Figure 3: Infill pressure with no blanket and various tank length.

3.1.3 블랭킷의 특성

블랭킷은 기공율이 크고 탄성이 있는 그라스울로 제작한 것으로 탱크의 움직임에 따라 수축과 팽창을 반복하게 되며, 압축율과 복원력의 정도에 따라 펠라이트의 압력을 흡수하는 능력이 다르게 된다. Figure 4는 블랭킷에 적용되는 압력에 따른 압축을 변화 전형적 특성곡선으로 제품마다 각기 다른 특성치를 갖는다. 그림에서 아래쪽 곡선 A의 블랭킷이 곡선 B의 블랭킷 보다 압력에 대한 특성이 좋은 것으로, 동일 압력이 가해질 때 압착이 더 적게 발생되는 것이다. 압축율(C_f) 값이 크게 되면 펠라이트의 충전압이나 설계압 등이 증가하게 된다. 또한, 그림의 곡선 A는 부하가 가해지는 압축곡선이고 곡선 B는 부하가 없어져 복원되는 특성 곡선도 되며, 곡선 B가 곡선 A에 근접할수록 블랭킷 압력흡수 능력이 좋게 되어 블랭킷의 복원력(B_0)은 1.0에 가깝게 된다. 역으로 곡선 B가 곡선 A에서 이격될수록 펠라이트가 탱크에 가하는 압력이 증가하게 된다. 복원력의 값은 제품마다 다르게 되므로 본 해석에서는 통상 제품의 설계 기준 값이 되는 0.6을 적용하였다.

또한, 선박용 LNG저장탱크의 단열재로 펠라이트 분말과 블랭킷을 적용할 때 충전압(Infill pressure)과 설계압(Design pressure)의 산정을 위해서는 적용하는 블랭킷의 고유 특성값이 필요하며, 본 연구에서는 Figure 4의 압력-압축 그래프 값이 아래의 식으로 나타내지는 대표적 블랭킷 값을 적용하였다[8].

$$P = 69 (423.8 C_i^{0.667}) / (0.879 - C_i) \quad (3)$$

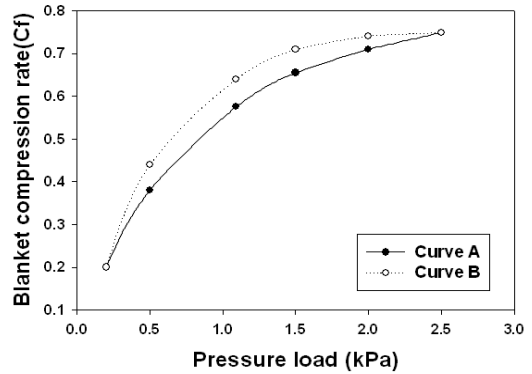


Figure 4: Blanket characteristic curve with pressure load.

3.2 LNG탱크와 펠라이트 충전압력

3.2.1 블랭킷 두께에 따른 충전압 변화

블랭킷의 두께에 따른 펠라이트의 탱크 내벽에 가하는 압력의 산정은 먼저 Figure 3의 블랭킷이 없는 경우의 압력값을 블랭킷에 적용하여 식 (3)에서 압축율을 구한다. 그 압축율 값을 식 (1)에 대입하여 탱크에 걸리는 압력을 얻게 된다.

Figure 5의 블랭킷의 두께에 따른 탱크 내벽에 가하는 펠라이트 압력 산정 결과를 보면, 내외탱크 간격 크기 즉 단열공간인 60 cm의 경우 200 mm 블랭킷을 가설하게 되면 244.5 Pa로 75%로 감소하게 된다. 블랭킷 복원율 등 산정기준은 Table 1을 기준한 것이며, LNG를 저장하는 내부 탱크 수력직경은 40 m로 한 것이다. 그림에서 내외탱크 간격이 적을수록 그리고

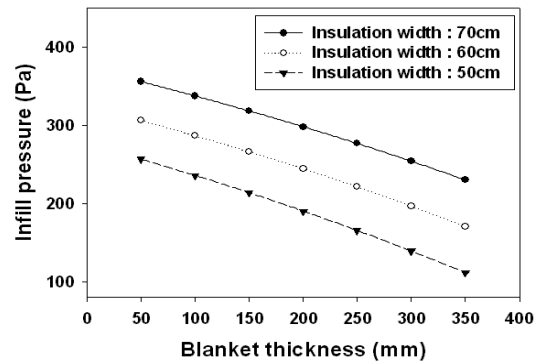


Figure 5: Infill pressure with various blanket thickness.

블랭킷의 두께가 두꺼울수록 압력 흡수 효과가 증가함을 알 수 있다.

3.2.2 블랭킷 복원력에 따른 충전압 특성

탱크의 움직임에 따라 압축과 팽창을 반복하는 블랭킷은 복원력의 정도에 따라 펠라이트 압력의 흡수력이 다르게 된다. Figure 6은 복원력에 따른 충전압으로 복원력이 클수록 충전압이 감소함을 보여준다. 내외탱크의 간격은 단열 두께인 60 cm의 전 후를 비교하였다. 블랭킷 두께를 단열간격의 30%로 기준하였을 때 복원율이 0.5에서 0.7로 커지면 압력도 309.9 Pa에서 214.1 Pa로 69%로 감소한다.

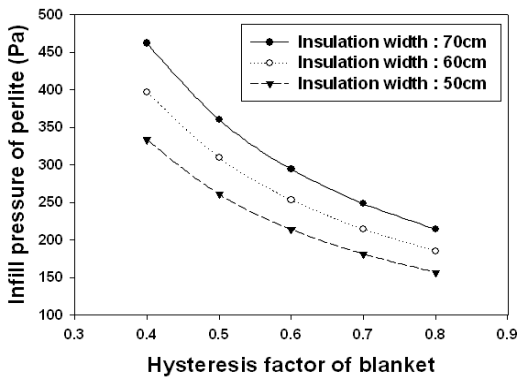


Figure 6: Infill pressure with hysteresis factor of blanket.

3.2.3 블랭킷 두께에 따른 설계압 변화

선박의 탱크내 LNG충전과 방출은 내부 벽체의 반복된 열적 기계적 변형을 발생시키며, 이에 따라 충전되어 있는 펠라이트 분말은 압력이 증가하게 되고 이 압력이 블랭킷에 가해지게 된다. 이것이 또한 내부 탱크에 가해지는 최대 압력값으로 최종 설계압력이 된다. 블랭킷은 이 반복 변형에 따라 복원력이 감소하여 압축율이 증가하게 된다.

Figure 7은 수력직경 40 m, 높이 30 m 저장탱크의 블랭킷 두께와 단열재 충전공간 변화에 따른 설계압력을 보여준다. 내외탱크 간격 즉 단열간격이 클수록 탱크에 걸리는 압력이 증가하며, 블랭킷의 두께가 탱크 단열간격의 약 25~30% 이하가 되면 압력이 급격히 상승함을 알 수 있다. 그러므로 그림에서 적정 설

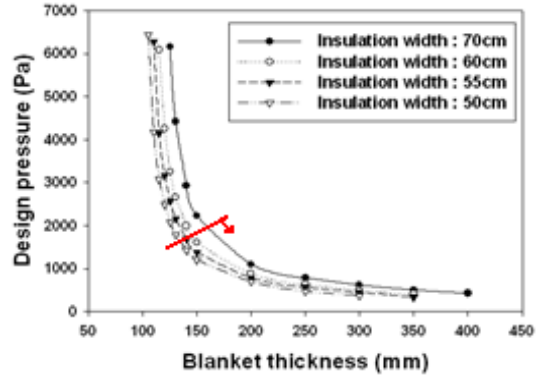


Figure 7: Design pressure with various blanket thickness.

계압력은 1,500 Pa 이하가 되어야 함을 알 수 있다. 이에 따른 블랭킷의 설계 두께는 내외탱크 간격 즉 단열 간격의 1/4이상, 1/3이하 사이로 적절한 설계 두께는 30% 정도가 되었다. 블랭킷이 두꺼우면 압력은 낮으나 단열에의 영향과 블랭킷의 비틀림 변형 등의 문제를 초래하게 된다.

3.2.4 블랭킷 복원력에 따른 설계압 변화

Figure 8은 블랭킷의 복원력에 따른 설계압력의 변화를 나타낸 것이다. 복원력의 값이 클수록 압력이 감소하고 있으며 작으면 급격히 상승하게 된다. 요구되는 블랭킷의 적정 복원력은 내외탱크 단열간격으로 널리 설계되는 55~60 cm 경우 0.5이상이 요구되고 이때 설계압력은 1,500 Pa이 되고 있다.

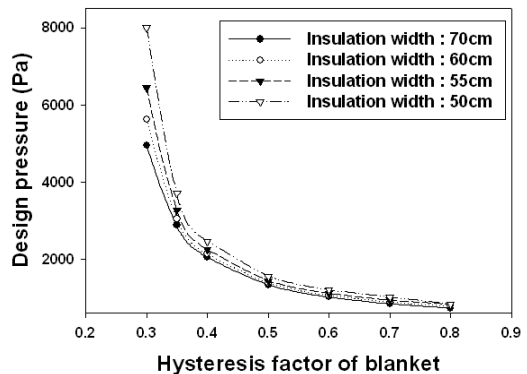


Figure 8: Design pressure with various hysteresis factor of blanket.

내외탱크 단열간격의 크기에 관계없이 동일한 추세를 보이며 복원력 0.4이하에서는 압력 2,000 Pa 정도에서 급격히 상승하게 되므로 복원율 0.5 이상의 제품이 바람직하게 된다.

그러므로 **Figure 7**과 **Figure 8**의 결과를 고려할 때 분석 범주인 내외탱크 간격 55~60 cm에서 블랭킷의 적정 설계기준 압력은 1,500 Pa이하가 바람직함을 알 수 있다. 이와 같이 적정 설계압력 기준은 내외탱크 간격, 블랭킷의 복원력 등을 고려하여 LNG탱크의 적용 블랭킷 두께를 결정하고 설계압력 기준을 설정하여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 FPSO 선박용 LNG 내부탱크의 재료와 단열방식을 5~9%Ni강재와 펄라이트 분말을 적용하는 새로운 탱크 형태를 적용함에 있어 필수적으로 필요한 설계사양을 얻기 위하여, 내부온도에 따른 변형, 펄라이트 충전에 따른 탱크압력 특성, 압력 흡수용 블랭킷의 두께와 복원력에 따른 펄라이트 분말의 압력, 블랭킷의 특성 등을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다

- (1) 펄라이트가 탱크에 가하는 압력은 탱크 직경 보다는 내외탱크의 간격이 클수록 벽체에 가하는 압력이 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 블랭킷 두께에 따른 충전압력 변화를 보면, 탱크 단열간격이 적을수록 그리고 블랭킷의 두께가 두꺼울수록 압력 흡수효과가 증가하였다.
- (3) 블랭킷의 적정 설계압력기준은 1,500 Pa 이하가 되어야 하며, 적정 적용두께는 내외탱크 단열간격의 1/4~1/3 사이로 30%가 적절한 것으로 얻어졌다.

참고문헌

[1] Korea Gas Corporation, "LNG storage tank installed inside the ship and manufacturing method the tank." Korea, Patent 100499710000, June 28, 2005 (in Korean).

[2] Samsung Heavy Industries, "Membrane structure and liquefied gas storage structure." Korea, Patent 1011296460000, March 16, 2012 (in Korean).

[3] Hyundai Heavy Industries, "Membrane type cargo tank for liquefied gas, method of manufacturing the same and ship having the same." Korea, Patent 1011315360000, June 15, 2011 (in Korean).

[4] H. A. Janssen, "Versuche uber getreidedruck in silozellen", CZ. Vereines Deutscher Ingenieure, 39, 1045-1049, 1895.

[5] D. Singh, and E. B. Moysey, "Grain bin wall pressures: theoretical and experimental", Canadian Agricultural Engineering, vol. 27, no. 1, pp. 43-48, 1985.

[6] The European Committee for Standardization, "Actions on structure - Part 4 : Silos and tanks," EN 1991-4 (English) : Eurocode 1, 2006.

[7] D. A. Wiegley, "Mechanical properties of materials at low temperatures", Plenum Press, New York, pp. 55-56, 1971.

[8] I. M. Leadley, Technical Note for Mechanical Design of Shell Insulation, Technical Report, Preussag Co., Germany, 2009.