

LNG내외탱크 사이의 압력흡수용 탄성 Blanket 설계 특성

†윤상국

한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부
(2013년 6월 12일 접수, 2013년 8월 20일 수정, 2013년 8월 20일 채택)

Design Characteristics of Resilient Blanket as Pressure Absorber in the Insulation Annulus of LNG Tank

†Sang-Kook Yun

*Dev. of Mechanical and Energy Systems, Korea Maritime University, Busan 606-791,
Korea*

(Received June 12, 2013; Revised August 20, 2013; Accepted August 20, 2013)

요약

LNG의 수요 증가와 함께 LNG기지의 저장탱크의 건설도 증가하고 있다. 내부탱크는 9%Ni강재 그리고 외부 탱크는 콘크리트가 적용되는 형식의 LNG탱크의 단열은 내외부 탱크 사이에 펄라이트 분말이 충전되며, 이 펄라이트의 압력을 흡수하기 위하여 탄성이 있는 블랭킷을 사용한다. 본 연구에서는 이 블랭킷을 적용함에 있어 그 특성과 내부 탱크에 미치는 압력 등을 해석, 고찰하여 블랭킷의 적정 설계두께, 설계압력 등 설계기준을 얻고자 하였다. 연구결과, 블랭킷의 적정 두께설계 기준은 내외부 탱크 간격의 30~40%가 되었으며, 설계압력 기준은 블랭킷 두께에 따라 2,200~2,700Pa 이하가 적절한 것으로 얻어졌다.

Abstract - The construction of LNG storage tanks has been increased due to the expansion of LNG demand. LNG tanks which consist of an inner cylindrical 9%Ni metal tank and reinforced concrete, are insulated with perlite powder and resilient blanket for absorbing the perlite pressure in insulation annulus between two inner and outer tanks. This study tries to find out the design specifications and characteristics for blanket thickness and design pressure. The results show that the design basis for the blanket thickness should be approximately 30% to 40% of annulus width and the design pressure be applied below 2,200~2,700Pa with blanket thickness.

Key words : resilient blanket, insulation annulus, LNG tank, perlite, design pressure

1. 서론

LNG는 편리하고 저렴하면서 깨끗하여 국내 주요 에너지원으로 자리를 확고히 하고 있다. 도시가스, 발전, 차량용 연료로의 사용이 매년 증가되면서 도입량이 증가하고 있고, 이에 따라 LNG기지의 건설과 함께 저장탱크의 건설도 증가하고 있다. -16℃의 초저온 액체상태인 LNG를 저장하기 위한 탱크 형식을 보면, 단열이 된 이중 탱크로 내부탱크의

재료 형태에 따라 멤브레인식과 철재식으로 구분된다. 이중 철재탱크는 멤브레인식과 달리 로열티 문제가 없고 직경 60~80m의 대형탱크 제작이 가능하여 주된 탱크 형태로 적용되고 있다.

이중탱크인 철재탱크의 내부탱크는 9%Ni강으로 제작되고, 외부 탱크는 콘크리트나 탄소강으로 제작된다. 이 내외부 탱크 사이에는 미세한 흰색 분말의 펄라이트가 단열재로 충전되며, 충전된 펄라이트는 내외 탱크 간격(Annulus) 크기와 탱크 높이에 따라 내측과 외측벽체에 압력을 가하게 된다. 이 압력을 흡수하기 위한 방법으로 탄성이 있는 그라스울(Glass wool)로 제작된 블랭킷(Blanket)을 적정 두께로 가설

†Corresponding author: yunsangkook@daum.net
Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

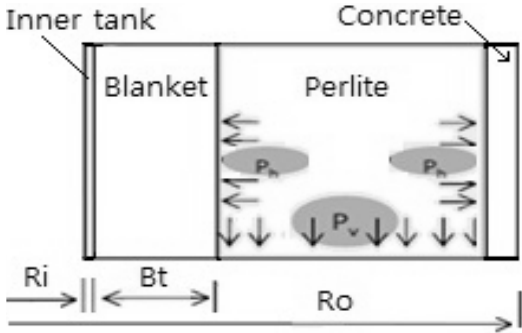


Fig. 1. Perlite Powder and Blanket Arrangement in the Annulus of LNG Tank.

한다. Fig. 1은 두께 Bt의 블랭킷이 반경 Ri, Ro의 내외탱크 사이에 설치된 그림으로 블랭킷은 내측 탱크 벽체 쪽에 가설된다. 이 블랭킷의 특성에 따라 탱크 벽체에 가해지는 하중이 증가 혹은 감소하게 되며, 그림의 압력 Pv와 Ph의 증가는 탱크의 안전에 영향을 미치게 되고 내부탱크 안쪽 벽에 설치되는 지지장치(Stiffener)의 규격이 결정되므로 적절한 두께의 설계가 요구된다.

펄라이트 단열재에 의하여 탱크에 가해지는 압력은 내부탱크와 외부탱크 움직임에 따라 변하게 된다. 내부탱크의 변형으로는 액체부와 기체부의 온도 변화, 액체 저장 하중에 따른 변화 등이고 외부 탱크의 변형은 외부탱크 재료, 벽체에 가해지는 온도에 따른 변화가 고려되어야 한다.

본 연구에서는 LNG 내외부 탱크 사이의 단열부 설계와 내부탱크의 지지시스템의 설계에 필수적으로 고려되어야 하는 펄라이트 충전압력 설계 기준을 파악하기 위하여 철재 및 콘크리트탱크의 온도에 따른 변형, 펄라이트 충전에 따른 탱크 압력 특성, 블랭킷의 두께와 복원력에 따른 펄라이트 분말의 압력 흡수 특성, 블랭킷의 특성 등을 분석하였다. 국내외 설계 기준압력은 하나의 값인 2,500Pa[1]으로 되어 있으나, 본 분석연구를 통하여 설계의 개념을 파악함으로써 보다 효과적이고 안전한 LNG탱크 펄라이트 단열부의 블랭킷 설계 기준압력을 제시하고자 한다.

II. LNG탱크의 변형

1. LNG 내부탱크의 변형

LNG는 -162℃의 액체상태로 9%Ni강으로 제작된 탱크에 저장되어 진다. 내부 탱크의 변형인자를 보면 액과 기체의 온도 그리고 액의 하중에 의하여 발생하게 된다. 내부탱크 벽체의 온도 변화는 LNG

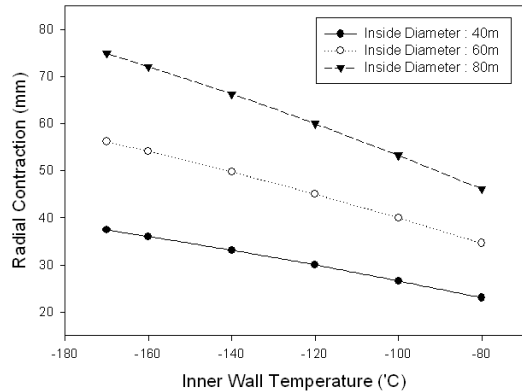


Fig. 2. Radial Contraction of Inner Tank with Inner Wall Temperature.

가 충전되면 온도가 강하하고, 배출되면 기체 공간이 증가하여 온도가 상승하게 된다. 온도의 저하는 탱크 반경 방향으로 수축을 가져와 블랭킷과 펄라이트에 작용하는 압력을 감소시키며, LNG액 하중은 가해지는 압력을 증가시키게 된다. LNG의 경우 온도에 의한 변형이 액하중에 의한 변형보다 크기 때문에 블랭킷 설계에서는 액하중에 의한 변형은 무시한다.

Fig. 2는 온도에 의한 반경방향의 탱크 변형으로 탱크 직경이 크고 온도가 낮을수록 수축 변형량은 증가하여 직경 80m 탱크 경우 74.9mm, 상부 증기의 온도인 -80℃에서는 46.1mm의 탱크 수축이 발생하게 된다. 산정에 이용한 열팽창계수는 6단계[2]로 나누어 적용하였다. 이 내부탱크 수축값은 외부탱크의 변형값과 함께 내외부 탱크 사이의 블랭킷과 펄라이트에 가해지는 압력의 산정에 적용된다.

2. LNG 외부탱크의 변형

외부 탱크는 강재나 콘크리트 탱크가 적용될 수 있으나, 본 연구에서는 강재에 비하여 온도의 영향을 적게 받는 장점 등으로 주로 적용되고 있는 강화콘크리트에 대하여 검토하였다.

탱크 외벽의 최대 변형은 최대 대기 온도 조건에 태양 직사열이 가해질 때 발생하게 되며, 최소 변형은 최소 대기 온도에서 발생하게 되므로, 온도에 따른 반경방향으로의 변형량(dR_o) 산정은 다음 식과 같이 된다.

$$dR_o = \alpha R_o ((T_s + T_{sh}) - (T_s - T_d)) \quad (2)$$

여기서 α 는 콘크리트의 열팽창계수로 5.91E-6 [$1/^\circ\text{C}$], T_s 는 대기 최대온도(35℃ 적용), T_{sh} 는 태양직

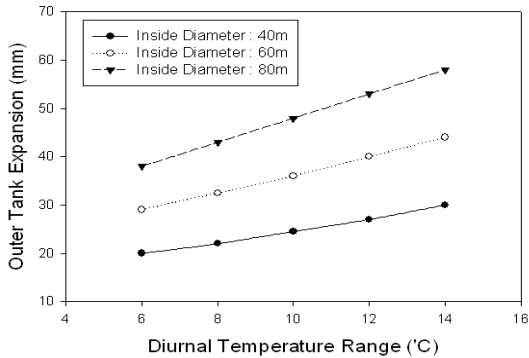


Fig. 3. Outer Tank Expansion with Diurnal Temperature Range.

사에 의한 온도 상승으로 통상 8~10°C가 되나 본 해석에는 10°C를 적용하였으며, Td는 일교차로 10°C를 적용하였다.

Fig. 3은 일교차에 따른 외부 콘크리트 탱크의 반경 방향으로의 변형량을 나타내었다. 내부 직경 80m, 내외탱크 간격 1.2m의 탱크를 기준할 때 일교차 10°C에 대하여 48mm의 팽창이 발생하며, 일교차 온도 6도차에 대하여 20mm의 변화가 발생하게 된다.

이 내외탱크 전체 변형량은 탱크벽체에 적용되는 펄라이트의 압력산정에 적용된다. 즉, 내부탱크는 수축하고 외부 탱크는 팽창하여 변형이 증가하면 내외부 탱크 간격이 커져 펄라이트 충전량이 증가하면서 벽체에 가하는 압력이 증가하게 된다.

LNG탱크 변형에 고려될 수 있는 또 다른 인자로 내외부 탱크 사이에 가설되는 블랭킷 재료인 그라스울의 변형값이 있다. 블랭킷은 그 자체가 시간에 따라 미세하게 수축이 발생하며, LNG탱크의 적용 경우 블랭킷 가설 후 초기 탱크 냉각 전까지의 시간동안에 변형된 값이 고려된다. 그러나 그 값은 제품에 따라 다르게 되고 LNG온도에 의한 내부탱크 변형량의 2~3%에 불과하여 본 연구에서는 무시하였다.

III. 펄라이트 충전과 LNG탱크

1. 펄라이트 분말 충전압력

펄라이트는 미세한 분체로 충전압력의 산정은 곡식을 저장하는 사이로의 실험식에 근거하여 산정하게 된다. Janssen[3,4]이 제시한 곡식 저장용 호퍼 압력 산정식인 식(2)에 LNG탱크에 적용되는 펄라이트 분말 특성치를 적용하면 내외탱크 간격에 가해지는 압력(P_i)은 식 (3)과 같이 된다.[1]

Table 1. Applied Physical Values for Analysis

Item	Value	Item	Value
Perlite Density(ρ)	60 kg/m ³	Curvature of Annulus (V)	0.9952
Blanket Hysteresis Factor(B_0)	0.6	Wall Friction Factor of Perlite (μ)	0.7

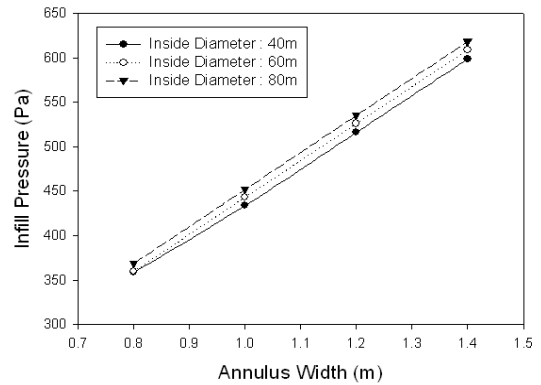


Fig. 4. Infill Pressure with Various Annulus Width.

$$P_v = g \rho R(1 - e^{-K\mu h/R}) + P_{vo} e^{-K\mu h/R} \quad (2)$$

$$P_i = g \rho \left(\frac{(D_0 - D_i)/2}{B_0} + \frac{dR/B_0}{B_0(1 - C_i)} \right) V / (2\mu) \quad (3)$$

여기서 ρ 는 펄라이트의 밀도, dR 은 탱크 전체 변형량, B_0 는 블랭킷의 탄성 복원율, B 는 블랭킷의 두께, C_i 는 블랭킷의 펄라이트 압력에 따른 압축율, V 는 Annulus의 진원도 보정 계수, μ 는 펄라이트 분말의 탱크벽체 마찰 계수 등이며, 본 연구에 적용한 값들은 Table 1과 같다.

Fig. 4는 내외탱크 사이에 압력 흡수제인 블랭킷이 없이 펄라이트만을 충전할 때 상기 조건에서 내외탱크 간격 크기에 따른 압력 변화 산정 결과이다. 내외탱크의 간격이 클수록 펄라이트가 탱크벽체에 가하는 압력이 증가하였다. 즉, 펄라이트가 탱크에 가하는 압력은 탱크 직경보다는 내외탱크의 간격에 의한 영향이 큰 것으로 나타났으며, 탱크 단열을 고려할 때 적정 탱크 간격인 1~1.2m의 경우 압력이 452.1~535.4Pa이 되었다.

3.2. Blanket의 특성 곡선

블랭킷은 기공율이 크고 탄성이 있는 그라스울로 제작한 것으로 탱크의 움직임에 따라 수축과 팽창을 반복하게 된다. 블랭킷의 압축율과 복원력의 정도에 따라 필라이트의 압력을 흡수하는 능력이 다르게 된다. Fig. 5는 블랭킷에 적용되는 압력에 따른 압축율 변화 전형적 특성곡선으로 제품마다 각기 다른 특성치를 갖는다. 그림에서 아래쪽 곡선 A의 블랭킷이 곡선 B의 블랭킷 보다 압력에 대한 특성이 좋다. 즉, 동일압력이 가해질 때 압착이 더 적게 발생하는 것이다. 압축율(C_i) 값이 크게 되면 필라이트의 충전압이나 설계압 등이 증가하게 된다.

그림의 곡선 A는 부하가 가해지는 압축곡선이고 곡선 B는 부하가 없어져 복원되는 팽창(Decompression)곡선이며, 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 블랭킷의 압력 흡수능력이 감소하며 복원력(B_0)은 0에 가까운 값을 갖게 되어 필라이트가 탱크에 가하는 압력이 증가하게 된다. 복원력의 값은 제품마다 다르게 되므로 본 해석에서는 적정 설계 기준값이 되는 0.6을 적용하였다.

3.3. Blanket 두께에 따른 충전압 변화

LNG탱크에 단열재로 필라이트 분말을 충전할 때 블랭킷을 적용한 경우 충전압(Infill pressure)과 설계압(Design pressure)의 산정을 위하여, 본 연구에서는 블랭킷의 특성인 Fig. 5의 압력-압축 그래프 값이 아래의 식으로 나타내지는 대표적 블랭킷을 적용하였으며, 각 블랭킷 특성치가 변화될 때 압력에

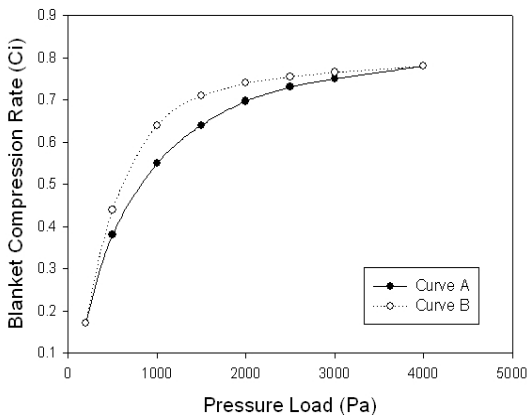


Fig. 5. Blanket Characteristic Curve with Pressure Load.

미치는 영향을 검토하였다.

$$P = 69(423.8 C^{0.667}) / (0.879 - C) \quad (4)$$

블랭킷의 두께에 따라 필라이트가 탱크 벽에 가하는 압력의 산정은 Fig. 4의 블랭킷이 없는 경우의 압력값을 블랭킷에 적용하여 식 (4)에서 압축율을 구한다. 그 압축율을 식 (3)에 대입하면 탱크에 걸리는 압력을 얻게 된다.

Fig. 6의 블랭킷의 두께에 따라 탱크벽에 필라이트가 가하는 압력의 산정 결과를 보면, 내외탱크 간격이 1~1.2m, 블랭킷이 없는 경우 압력은 452.1~535.4Pa이었으나, 400mm 블랭킷을 가설하게 되면 352.9~448.6Pa로 78~83.7%로 감소하게 된다. 블랭킷 복원율 등 산정 기준은 Table 1을 기준한 것이며 탱크 직경은 80m로 하였다. Fig. 6에서 탱크간격 폭이 적을수록 그리고 블랭킷의 두께가 두꺼울수록 압력 흡수 효과가 증가함을 알 수 있다.

3.4. Blanket 복원력에 따른 충전압 변화

탱크의 움직임에 따라 압축과 팽창을 반복하는 블랭킷은 복원력의 정도에 따라 필라이트 압력의 흡수력이 다르게 된다. Fig. 7은 복원력에 따른 충전압으로 복원력이 클수록 충전압이 감소함을 보여준다. 내외탱크의 간격은 널리 적용되는 1.2m의 전 후를 비교하였다. 복원율이 0.6에서 0.8로 커지면 압력도 352.9Pa에서 336.1Pa로 5%정도가 감소한다.

3.5. Blanket 두께에 따른 설계압 변화

정상 운전 중인 탱크 내 LNG충전과 방출은 내부

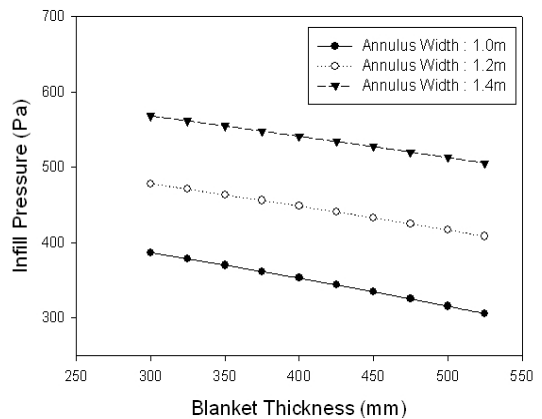


Fig. 6. Infill Pressure with Various Blanket Thickness.

LNG내외탱크 사이의 압력흡수용 탄성 Blanket 설계 특성

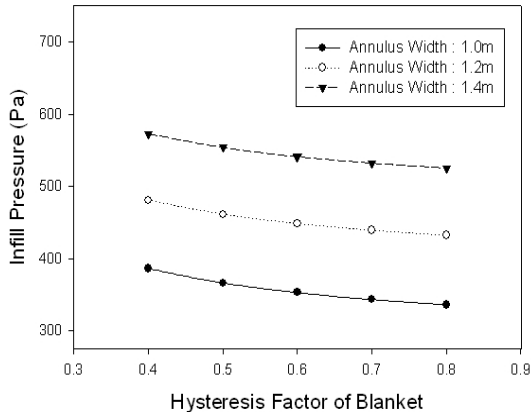


Fig. 7. Infill Pressure with Hysteresis Factor of Blanket.

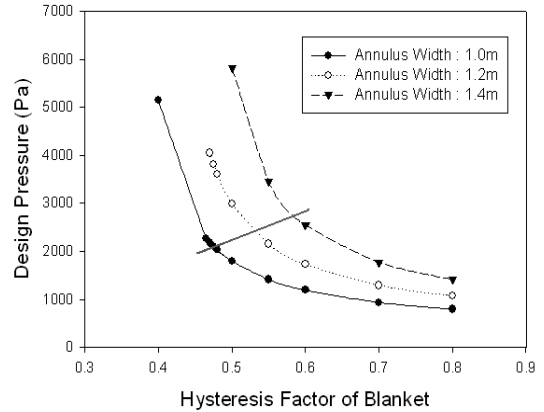


Fig. 9. Design Pressure with Various Hysteresis Factor of Blanket.

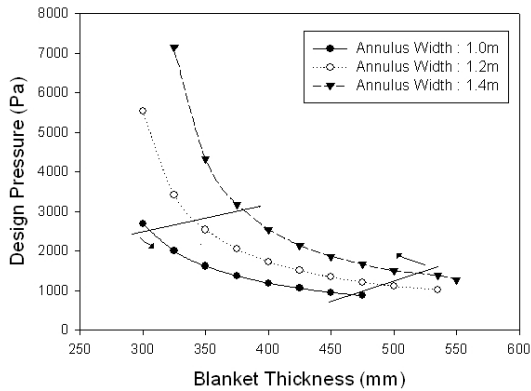


Fig. 8. Design Pressure with Various Blanket Thickness.

벽체의 반복된 열적 기계적 변형을 발생시키며, 이에 따라 충전되어 있는 필라이트 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.

Fig. 8은 탱크 내경 80m, 높이 35m 탱크의 블랭킷 두께 변화에 따른 설계압력을 보여준다. 블랭킷의 두께가 같을 때 내외탱크 간격이 클수록 탱크에 걸리는 압력이 증가하며, 블랭킷의 두께가 탱크간격의 27~30%보다 적게 되면 압력이 급격히 상승함을 알 수 있다. 그러므로 블랭킷의 적정 설계두께는 그림의 화살표 구간인 내외탱크 간격의 약 30% 이상 40% 이하가 적절한 것으로 판단된다. 이 때 설계압력은 2,500~3,000Pa 이하가 된다.

3.6. Blanket 복원력에 따른 설계압 변화

Fig. 9는 블랭킷의 복원력에 따른 설계압력의 변화를 나타낸 것이다. 복원력의 값이 클수록 압력이 감소하고 있으며 작으면 급격히 상승하게 된다. 요구되는 블랭킷의 적정 복원력은 내외탱크간격으로 널리 설계되는 1.2m 경우 0.55이상이 요구되고 이때 설계압력은 2,500Pa이 되고 있다. 내외탱크 간격이 적은 1.0m에서는 0.5이상, 간격이 큰 1.4m에서는 복원력이 0.6이상의 제품을 사용하여야 하며, 이때의 설계압력은 2,200~2,700Pa이 된다. 그러므로 Fig. 8과 Fig. 9의 결과를 고려할 때 분석 범주인 내외탱크 간격 1.0~1.4m에서 블랭킷의 적정 설계기준 압력은 2,200Pa~2,700Pa이하가 되며 보수적으로는 2,200kPa이하가 바람직함을 알 수 있다. 이와 같이 적정 설계압력 기준은 2,500Pa의 하나의 값이 아니라, 내외탱크 간격, 블랭킷의 복원력 등을 고려하여 LNG탱크의 적용 블랭킷 두께를 결정하고 설계압력 기준을 설정하여야 한다.

IV. 결론

본 연구에서는 LNG 내외부 탱크 사이의 단열부 설계에 필수적으로 고려되어야 하는 9%Ni강 및 콘크리트탱크의 내외부 온도에 따른 변형, 필라이트 충전에 따른 탱크 압력 특성, 압력 흡수용 블랭킷의 두께와 복원력에 따른 필라이트 분말의 압력 특성, 블랭킷의 특성 등을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 필라이트가 탱크에 가하는 압력은 탱크 직경보다는 내외탱크의 간격이 클수록 벽체에 가하는 압력이 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 블랭킷 두께에 따른 충전압을 보면, 탱크간격이 적을수록 그리고 블랭킷의 두께가 두꺼울수록 압력 흡수 효과가 증가하였다.

(3) 블랭킷의 적정 적용두께는 내외탱크 간격의 30%이상 40%이하가 되며, 설계압력기준은 2,200Pa ~2,700Pa 이하가 바람직한 설계기준이 된다.

참고문헌

- [1] Leadley, I.M., *Technical Note for Mechanical Design of Shell Insulation*, Preussag Co., Germany, (2009)
- [2] Wiegley, D. A., *Mechanical Properties of Materials at Low Temperatures*, Plenum Press, New York, (1971)
- [3] Janssen, H. A., "Versuche uber Getreidedruck in Silozellen", *CZ. Vereines Deutscher Ingenieure*, 39, 1045-1049, (1895)
- [4] Singh, D. and Moysey, E.B., "Grain Bin Wall Pressures: Theoretical and Experimental", *Canadian Agricultural Engineering*, 27, 43-48, (1985)