

LNG 저장탱크 바닥판 단열 시스템 개선

Improvement of Insulation System for LNG Storage Tank Base Slab

이 용 진^{1)*}

노 병 철²⁾

Lee, Yong Jin

Lho, Byeong Cheol

Abstract

Liquefied natural gas(LNG) is natural gas that has been converted temporarily to liquid form for ease of storage and transport it. Natural gas is the worlds cleanest burning fossil fuel and it has emerged as the environmentally preferred fuel of choice. In Korea, the demand of this has been increased since the first import from the Indonesia in 1986. LNG takes up about 1/600th the volume of natural gas in the gaseous state by cooling it to approximately -162°C (-260°F). The reduction in volume therefore makes it much more cost efficient to transport and store it. Modern LNG storage tanks are typically the full containment type, which is a double-wall construction with reinforced concrete outer wall and a high-nickel steel inner tank, with extremely efficient insulation between the walls. The insulation will be installed to LNG outer tank for the isolation of cryogenic temperature. The insulation will be installed in the base slab, wall and at the roof. According to the insulation's arrangement, the different aspects of temperature transmission is shown around the outer tank. As the result of the thermal & stress analysis, by the installing cellular glass underneath the perlite concrete, the temperature difference is greatly reduced between the ambient temperature and inside of concrete wall, also reducing section force according to temperature load.

Keywords : LNG Containment, Insulation, Cellular glass, Perlite concrete, Resilient Blanket

1. 서 론

청정연료로 각광받고 있는 LNG(Liquefied Natural Gas)는 석유 에너지의 의존도를 낮추고 에너지 사용의 다변화를 위해 1986년 인도네시아로부터 처음 도입된 이래로 산업의 성장과 더불어 그 수요량이 지속적으로 증가하고 있다. LNG는 천연가스를 약 -163°C 까지 냉각하여 액화시킨 것으로서, 기체에서 액체로 되는 과정에서 부피가 약1/600로 감소되어 저장에 용이하게 된다. LNG 저장탱크는 단일방호식(single containment type), 이중방호식(double containment type) 및 완전방호식(full containment type)으로 나눌 수 있으며, 이중 완전방호식이 가장 발전된 형태로 볼 수 있다.(BS 7777, 1993; BS EN 1473, 1996; EN 14620, 2006)

대체로 1970년대 후반까지는 단일방호식이, 1970년대 중반~1980년대 후반까지는 이중방호식이 꾸준히 건설되었다. 주로 1980년대 중반부터 건설되기 시작한

완전방호식은 우수한 안전성 측면 및 9% 니켈(Ni)의 제작기술 발전 등에 힘입어, 이후 지상식 LNG 저장탱크의 대용량화를 주도하고 있다. 또한, LNG 저장탱크는 설치 위치에 따라 지상식(above-ground type), 지중식(in-ground type), 그리고 지하식(under-ground type) 등으로 나눌 수 있다.(BS 7777, 1993; BS EN 1473, 1996; EN 14620, 2006) 이러한 LNG 저장탱크의 해석 및 설계에서 고려해야 하는 중요한 사항은 LNG 저장탱크의 극저온에 대한 구조안정성 및 사용성을 확보하여야 한다. 정상가동시 내조가 LNG를 보유하고 있으므로 이에 대해 단열재가 온도를 차단하는 역할을 하여 콘크리트 외조가 직접적으로 극저온에 노출되지는 않는다. 그러나 LNG 저장탱크의 단열재의 배치에 따라 콘크리트 외조에 작용하는 온도분포에 차이가 발생한다. 본 연구에서는 국내에서 최근에 설계 및 시공된 지상식 완전방호식 LNG 저장탱크 바닥판 단열재의 배치에 대해 검토하고, 이를 바탕으로 단열 시스템 개선방안을 제안하고자 한다.

1) 정회원, 다산건설컨설팅 구조부 상무

2) 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

* Corresponding author : lyj011@empal.com 02-2222-4308

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. LNG 저장탱크 구성 및 사용재료

최근에 시공중인 LNG 저장탱크의 구성 및 사용재료는 다음과 같다.

2.1 단열재 재구성

단열재는 내조에서 저장되는 극저온 액체 온도(-163°C)를 외조인 콘크리트 표면에 전달되는 온도가 콘크리트 외측과의 온도 차이를 최소화하기 위해 바닥판 및 벽체에 배치하고 지붕 콘크리트부 역시 저온이 전달되는 것

을 방지하기 위해 deck를 설치하고 그 위에 단열재를 배치한다. 또한 LNG의 유출시 극저온의 액체가 콘크리트에 접촉되는 것을 방지하기 위해 바닥판 단열재 상부에서 대략 5m 가량의 temperature corner protection (TCP)을 설치한다. 바닥판의 단열재에서 내조의 하중이 전달되는 부분에 재료의 강성이 큰 펠라이트 콘크리트(perlite concrete)를 배치하였는데, 이는 타 단열재에 비해 단열 효과가 현저하게 감소되기 때문이다. Fig. 1은 국내에서 설계 및 시공중인 LNG 저장탱크의 단열재 배치 구성 예이다.

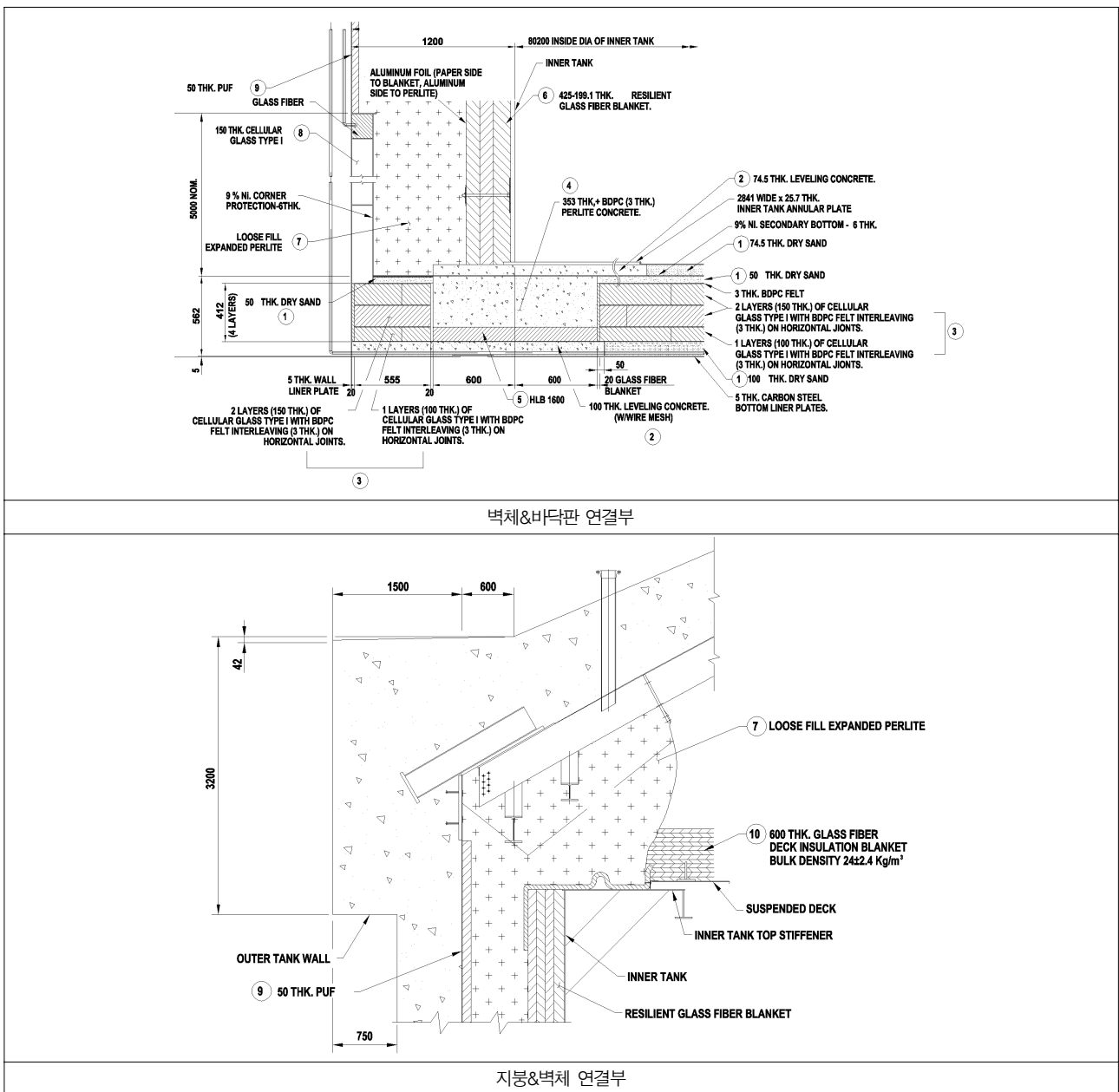


Fig. 1 단열재 구성(주포스코, 2008)

2.2 단열재 특징

9% Nickel 형식에 주로 사용되는 단열재의 특징은 다음과 같다.(JGA RPAS, 1981; JGA RPIS, 1979)

2.2.1 다공질 유리

다공질 유리(cellular glass)는 그 자체의 압축강도가 0.1N/mm^2 정도 밖에 안 되고, 깨어지기 쉬운 재료이기 때문에 지압부에 사용하는 경우에는 캡핑재를 병용할 필요가 있다. 또한 병용되는 캡핑재의 종류에 의해 저온에서 다공질 유리의 압축강도가 저하하는 것도 있으므로 대기온도부터 사용온도까지의 실측값을 확인하여 사용해야 한다.

2.2.2 펠라이트

펠라이트는 펠라이트의 수축과 충전 그리고 정착효과에 의해 내조가 고정되기에 충분한 양을 사용해야 한다. 또한 LNG 저장탱크의 사용기간 동안 펠라이트를 재충전하지 않아도 될 만큼 충분한 용량을 시공하여야 한다. 펠라이트의 단위질량은 $48\text{--}75\text{kg/m}^3$ 이며 열전도율은 $0.044\text{ W/m}^\circ\text{C}$ 를 넘지 않아야 하며 습도함유 한계는 0.5%의 것을 사용해야 한다.

2.2.3 펠라이트 콘크리트

펠라이트 콘크리트는 시멘트, 펠라이트, 물 및 혼화제를 혼합, 양생, 건조시킨 것이며, 그 배합, 제조방법에 따라 여러 가지의 물성값이 얻어지기 때문에, 사전에 배합설계를 하여, 강도, 열전도율 등의 기준값을 정해 놓아야 한다.

2.2.4 탄성모포

Mineral wool은 내조의 외측표면에 자립할 수 있는 탄력있는 압축 쿠션 덮개 형태로 시공된다. 탄성모포(resilient blanket)는 주기적 하중 테스트에 의해 만족할 만한 성능이 검증된 것을 사용해야 하며, 덮개의 가장 외측은 펠라이트 콘크리트 시공시 마찰력에 의해 표면에 발생하는 높은 인장 파괴에 저항할 수 있도록 설계되어야 한다.

2.2.5 폴리우레탄 폼

일반적으로 폴리우레탄 폼(poly urethane foam, PUF)은 압축하중을 재하한 경우 내부가 균일하게 압축되지 않고, 내부에 발생하는 압축변형도 균일하지 않는 특성을 보인다. 따라서 PUF의 압축변형은 시험편의 변형량에 근거하여 산출된다. 또한 일반적으로 저온으로 됨에 따라 PUF의 압축강도는 상승하나 안전성을 고려하여 대기온도의 실측값을 근거로 정한다.

2.3 단열재의 물성값

Table 1은 2개 현장에서 사용된 단열재에 대한 온도 해석시 주요 물성값중의 하나인 열전도도(thermal conductivity)를 나타낸 것이다. 다소 차이는 있지만, 이는 각 현장의 구입시 시방서에서 요구하는 내용의 차이로 판단되나, 언급된 열전도도의 차이는 온도흐름 및 응력에 대하여 거의 차이가 나지 않는다.

Fig. 2에서 A현장 및 B현장의 단열재 배치시 원호안에서와 같이 B현장의 경우 바닥판과 내조 사이가 펠라이트 콘크리트 및 Leveling Concrete로 구성되는 반면, A현

Table 1 열전도도(Pittsburgh Corning Literature)

Member	Material	A 현장	B 현장
		Thermal Conductivity (W/m/K)	Thermal Conductivity (W/m/K)
Concrete		2.0	2.0
Bottom Insulation	① Dry Sand	0.93	0.79
	② Leveling Concrete	2.0	2.0
	③ Cellular Glass (TYPE I)	0.043	0.0446
	④ Cellular Glass (TYPE II)	0.048	0.0496
	⑤ Perlite Concrete	0.270	0.270
	⑥ HLB 1600	0.0496	0.0496
Wall Insulation	⑦ Resilient Blanket	0.021	0.0372
	⑧ Perlite	0.044	0.044
	⑨ Cellular Glass (TYPE I)	0.043	0.0411
	⑩ PUF	0.0233	0.021
⑪ Ground		2.0	1.2

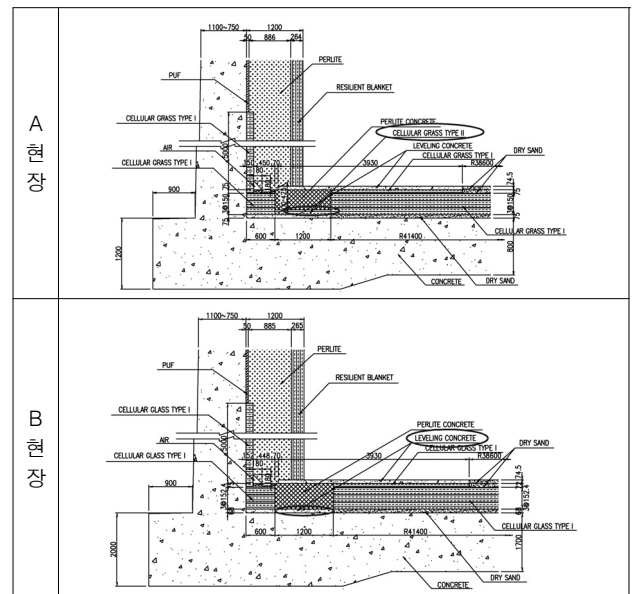


Fig. 2 단열재 구성 비교(한국가스공사, 2005; 한국가스공사, 2006)

장에서는 콘크리트 하부에 다공질 유리(100mm)가 배치되어 있다.

Table 1에서 표시된 바와 같이 펠라이트 콘크리트와 다공질 유리의 열전도도 차이는 5.6배의 차이가 난다. 이에 따라 콘크리트에 전달되는 온도의 차이 및 이로 인한 단면력의 증가가 예상된다.

3. 수치 해석

바닥판 단열재 배치에 따른 온도장 해석시 온도 분포도의 차이를 알아보고, 이에 따라 발생하는 단면력을 비

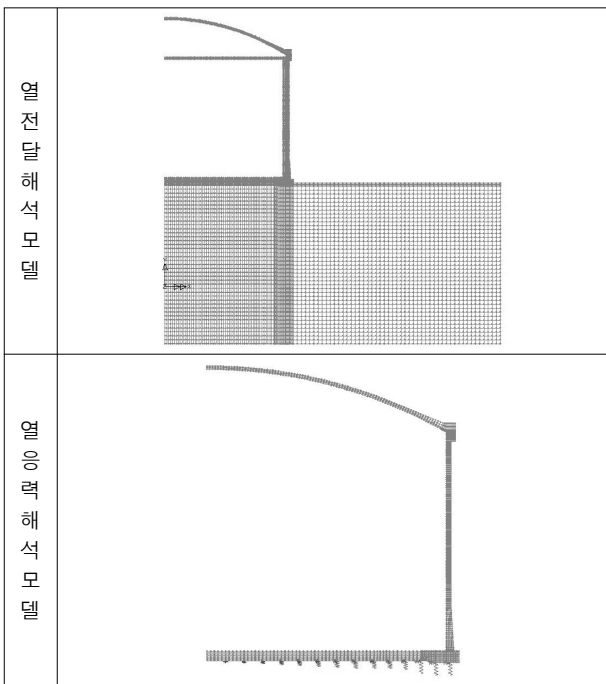


Fig. 3 해석 모델

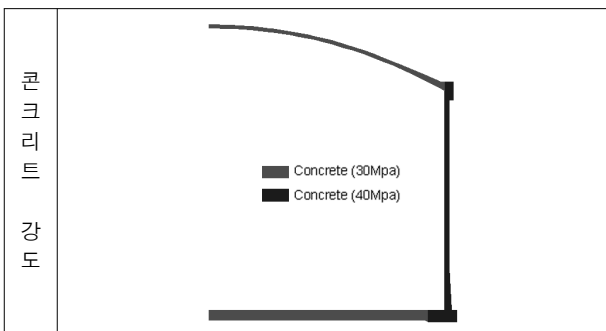


Fig. 4 콘크리트 강도

Table 2 정상상태 해석 시 온도 조건

구분	LNG 유체 온도	외기 온도	Electric Heater 온도
여름	-170℃	30℃	7℃

교하여 합리적인 단열재 배치에 대한 방안을 제시하기 위하여, LNG 저장탱크의 온도 해석의 경우 정상상태 및 유출상태로 나누어 수행하는데 본 연구의 목적은 단열재의 합리적인 배치에 대한 제시에 있으므로 정상상태에 대해서만 고려하였다.

한편, LNG 저장탱크의 열해석 모델은 전형적인 축대칭 구조(axi-symmetric)라고 볼 수 있으며, 구조물 두께 방향의 온도 분포를 구현하기 위해 LUSAS 해석프로그램의 축대칭 솔리드 요소를 사용하여 해석을 수행하였다.(Theory Manual Volume 1&2)

해석을 위한 LNG 유체 온도 및 외기 조건은 여름의 외기조건(30℃)을 사용하였으며, LNG의 온도는 Table 2에 나타난 바와 같이 -170℃로 가정하였다.

전기히터(electric heater)를 사용한 이유는 초저온 LNG로 인해 바닥판 하단의 지반이 동결되지 않도록 바닥판 내부에 열을 인위적으로 가하는 목적이며, 이러한 조건을 만족시키기 위해 히터 위치에서의 온도는 대략 +7℃ 정도 이다.(EN 14620, 2006)

4. 비교분석

4.1 온도장 해석(Thermal Analysis)

Fig. 5에 나타난 바와 같이 펠라이트 콘크리트부의 단열재 하단에 다공질 유리 배치시와 미배치시에 따라 온도 차이가 바닥판 상부에서 -6.70℃가 발생됨을 알 수 있다. Fig. 6은 중심기점 40m 부근에서의 콘크리트 두께

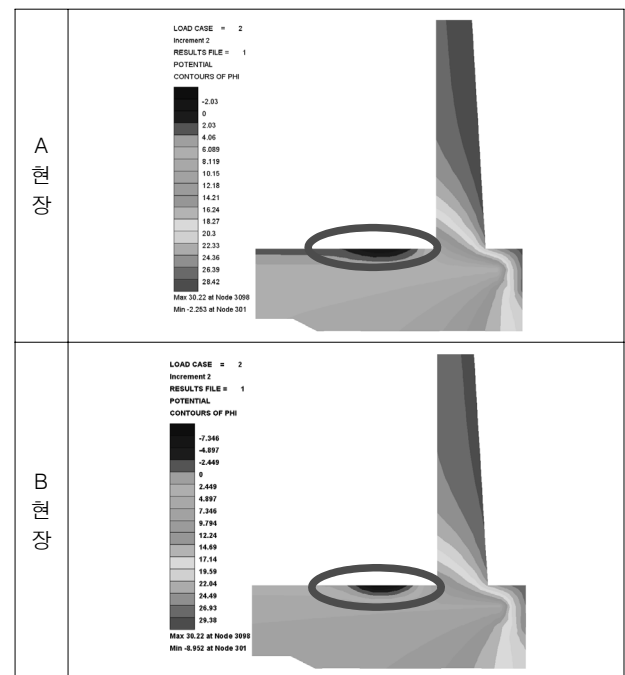


Fig. 5 온도 분포 등고선 비교

방향의 바닥판 온도분포를 나타낸다.

4.2 응력장 해석(Stress Analysis)

Fig. 7~12는 바닥판, 벽체 및 지붕에 작용하는 원주 방향(hoop) 과 수직방향(inplane)에 대한 축력 및 모멘트를 비교 하였다.

Table 3은 온도장 해석 및 응력장 해석에서 비교한 단면력 및 Perlite Concrete의 하부 콘크리트의 온도를 나타낸 것이다.

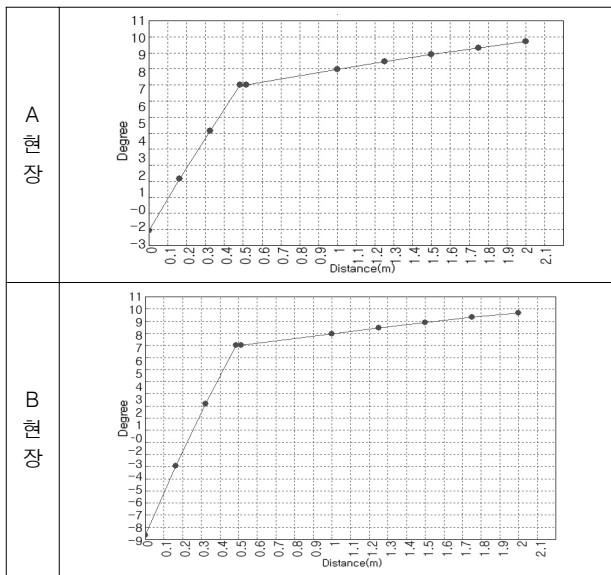


Fig. 6 온도 분포도 비교

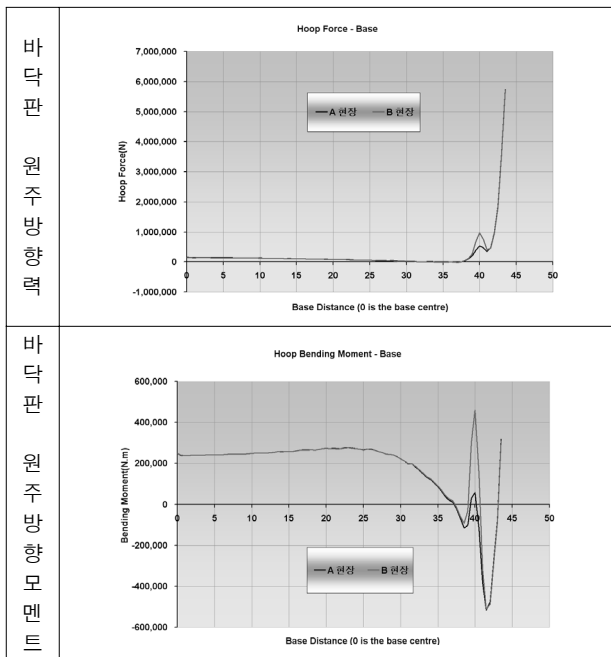


Fig. 7 바닥판 원주방향 단면력 비교

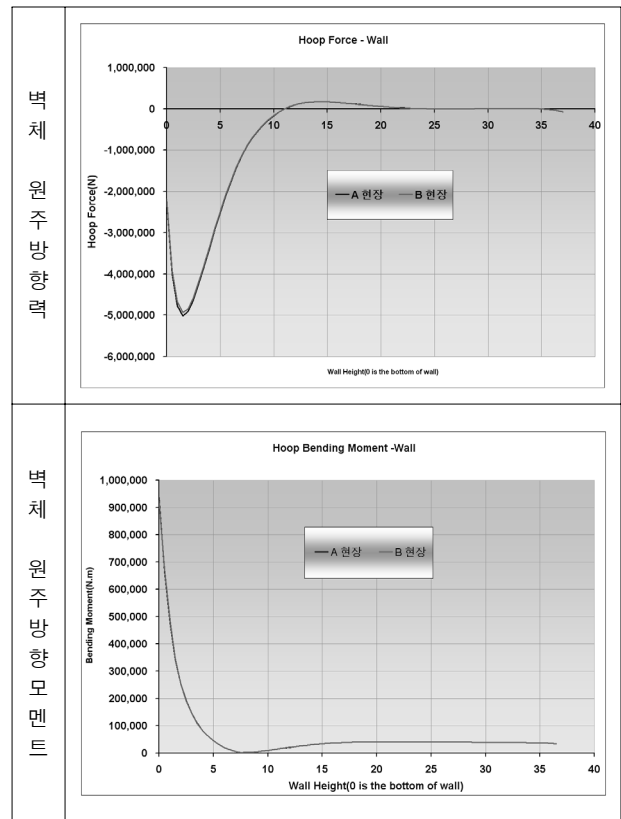


Fig. 8 벽체 원주방향 단면력 비교

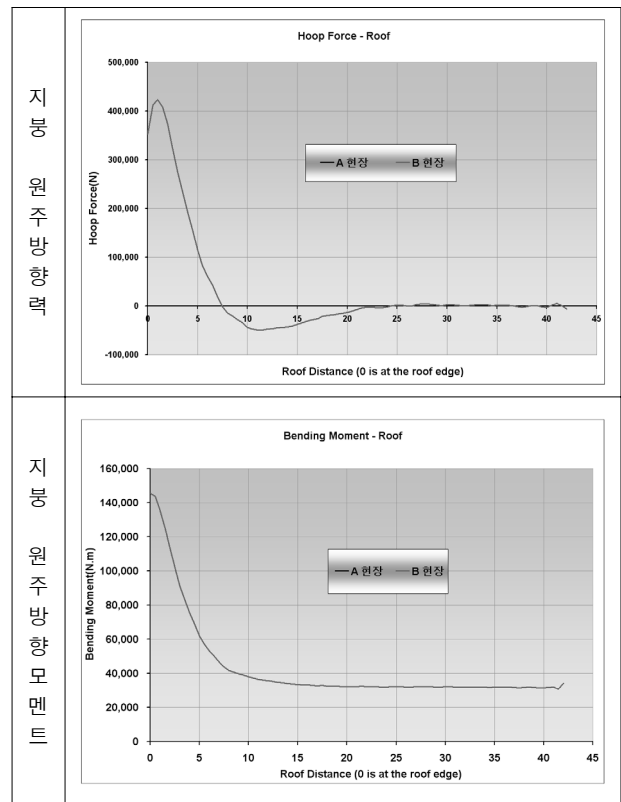


Fig. 9 지붕 원주방향 단면력 비교

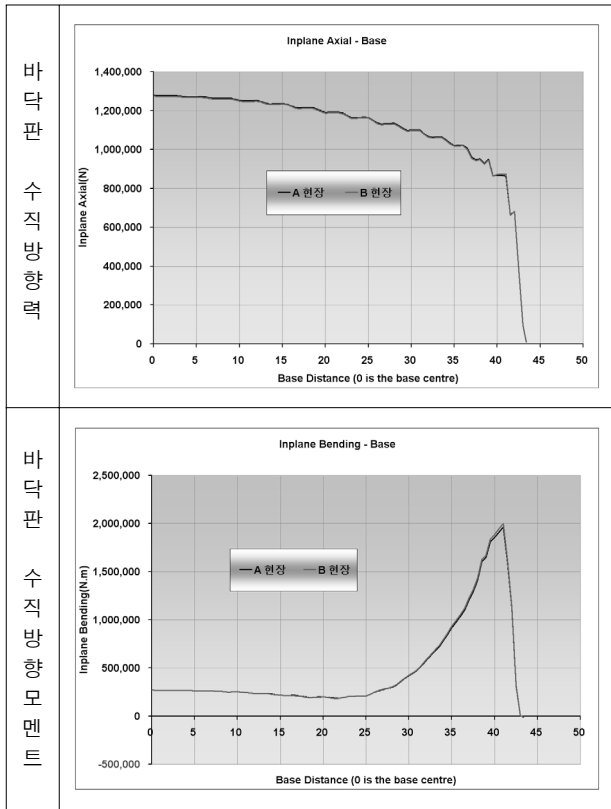


Fig. 10 바닥판 수직방향 단면력 비교

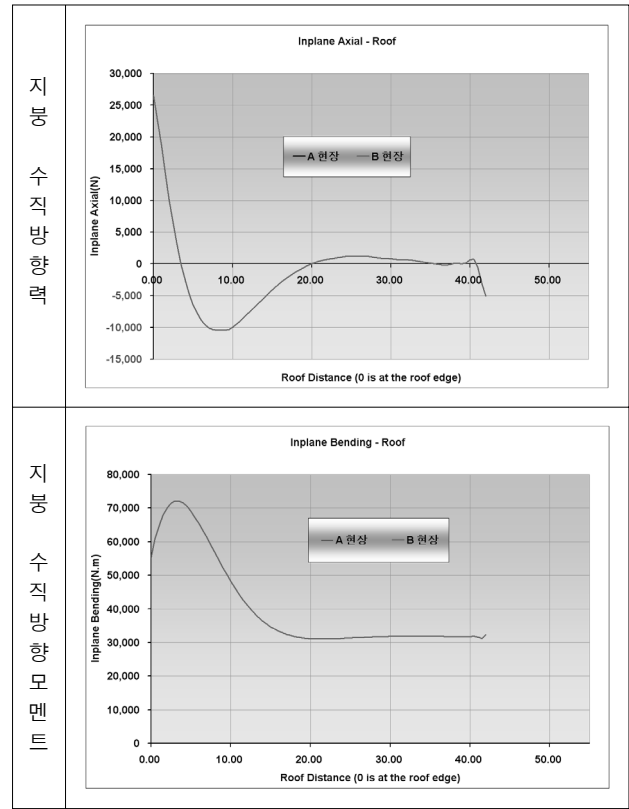


Fig. 12 지붕 수직방향 단면력 비교

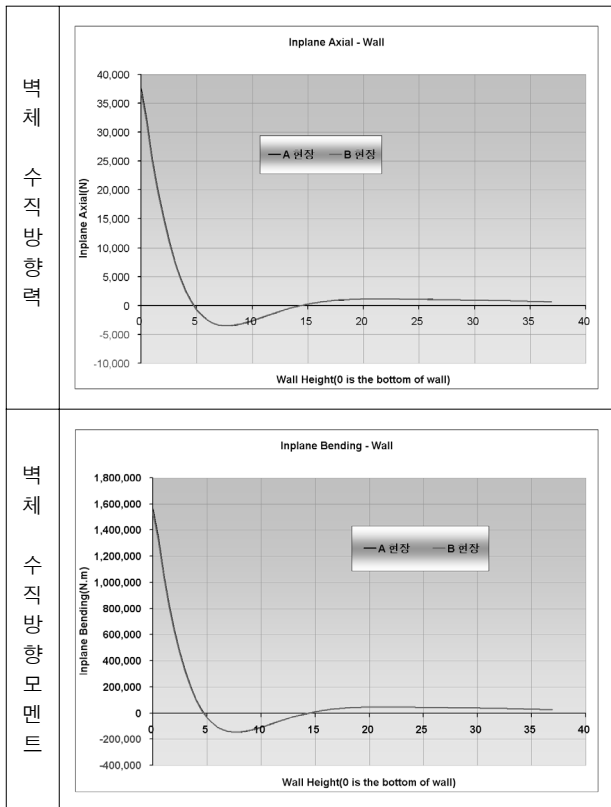


Fig. 11 벽체 수직방향 단면력 비교

Table 3 단면력 및 온도분포 비교

구 분	A 현장	B 현장	비교
바닥판 펠라이트 콘크리트 하부 바닥판 콘크리트의 온도 (°C)	-2.25	-8.95	6.7°C (ThermalGap)
바닥판 원주방향력 (kN)	532	975	45% (감소)
바닥판 원주방향 모멘트 (kN·m)	58	460	87% (감소)

결과에서와 같이 바닥판 수직방향, 벽체, 지붕의 단면력은 거의 동일한 값을 나타내고 있으나, Fig. 7의 바닥판 원주방향 단면력은 바닥판 단부에서는 작용하는 원주방향 축력이 중심기점 약 40m 부근에서 다공질 유리를 설치한 A현장의 경우 B현장과 비교시 975kN에서 532kN으로 45%(약 1.8배) 감소하였고, 원주방향 모멘트는 중심기점 약 40m 부근에서 A현장의 경우 B현장과 비교시 460kN·m에서 58kN·m으로 87%(약 7.9배) 감소하였다. 이와 같이 100mm의 다공질 유리를 사용하여 원주방향의 단면력을 감소시킴으로써 바닥판의 단면 두께 또는 철근량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 최근에 A 현장과 B 현장에 시공중인 LNG저장탱크의 단열재 배치에 대해 합리적인 방안을 검토하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 펠라이트 콘크리트 하단에 다공질 유리(100mm)의 배치 유무에 따라 온도차는 -6.70°C 를 보였으며, 이 결과 단면력 발생의 차이는 원주방향 모멘트에서 대략 8배의 증가를 나타내어, 다공질 유리의 배치가 온도응력저감에 효율적임을 알 수 있었다.

2) LNG 저장탱크의 단면 설계시 온도하중에 의한 영향은 다른 개별하중에 비해 영향이 크므로, 단면력의 감소 측면에서 펠라이트 콘크리트 하단에 다공질 유리를 설치하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

3) 이러한 정량적인 문제 이외에 바닥판 하단의 지반이 동결되지 않도록 Heating System이 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 로 유지되어야 하는데, 이러한 측면에서도 바닥판의 단열재 배치는 중요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 한국 가스 공사 “00 생산기지 2단계 4차 확장 탱크 건설 공사”, 2005.
2. 한국 가스 공사 “00 생산기지 제2공장 2단계 탱크 건설 공사”, 2006.
3. (주)포스코 “00 LNG 터미널 증설 공사”, 2008.
4. BS 7777 “Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service”, 1993.
5. BS EN 1473 “Installation and equipment for liquefied natural gas(Design of onshore installations)”, 1996.
6. EN 14620 “Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C ”, 2006.
7. JGA RPAS(Recommended Practice for LNG Above-ground Storage; LNG 地上式貯槽指針), 1981.
8. JGA RPIS(Recommended Practice for LNG Inground Storage; LNG 地下式貯槽指針), 1979.
9. Pittsburgh Corning Literature.
10. Theory Manual Volume 1 & 2 “LUSAS V14.3”.

(접수일자 : 2010년 3월 15일)
(심사완료일자 : 2010년 4월 28일)

요 지

LNG 천연가스로서 저장과 운반이 용이한 액체로 변형이 가능하며, 청정연료로 각광받게 되어, 석유에너지의 의존도를 낮추고 에너지사용의 다변화를 위해 1986년 인도네시아로부터 처음 도입된 이래로 산업의 성장과 더불어 그 수요량이 지속적으로 증가하고 있다. LNG는 천연가스의 부피를 영하 약 -162°C (-260°F)까지 냉각시켜 1/600까지 줄일 수 있으므로, 저장 및 운반에 있어서 매우 효율적이다. 현대의 LNG 저장탱크는 철근 콘크리트 이중벽과 내부 니켈방호벽 및 벽사이의 효율이 높은 단열재로 구성된 완전 방호식이 적용되고 있다. 단열재는 극저온의 온도가 LNG 탱크 외벽으로 전달되는 것을 차단하며, 바닥슬래브, 외벽 및 상부에 설치된다. LNG 저장탱크의 단열재의 배치에 따라 콘크리트 외조에 작용하는 온도분포에 차이가 나므로, 본 연구에서는 기 건설된 완전 방호식 LNG 저장탱크 바닥판 단열재의 배치에 대해 검토하고, 이를 바탕으로 단열시스템 개선 방안을 제안하고자 한다.

핵심 용어 : LNG 탱크, 단열재, 다공질 유리, 펠라이트 콘크리트, 탄성모포