



댐핑안전 구조물을 고려한 완전밀폐식 LNG 저장탱크 시스템의 강도안전성에 관한 유한요소해석

†김청균 · 김태환

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2007년 10월 30일 접수, 2007년 12월 18일 채택)

FE Analysis on the Strength Safety of a Full Containment LNG Storage Tank System with Damping Safety Structures

†Chung Kyun Kim · Tae Hwan Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received October 30, 2007, Accepted December 18, 2007)

요 약

본 논문에서는 유한요소법을 사용하여 댐핑안전 구조물을 설치한 완전밀폐식 LNG 저장탱크 시스템의 강도안전성에 대해 해석하였다. 내부탱크의 FEM 해석을 위해, 탱크에 저장된 LNG에 의한 유체정압, 초저온 온도하중, BOG 압력, LNG 자중량, 내부탱크의 코너 측벽면에 가해진 침하하중 등과 같은 모든 복합하중을 내부탱크 구조물에 적용하였다. FEM 계산결과에 의하면 기존의 내부탱크는 주어진 모든 하중 조건에 대하여 안전하지만, 압축 스프링과 같은 댐핑안전 구조물은 탱크시스템의 안전성을 확보하는데 대단히 유용한 구조물일 것이라는 사실이다. 따라서 스프링의 강성도를 높이고 최적의 설치위치를 찾으면 스프링 구조물에 의해 탱크시스템의 댐핑강도 안전성을 증가시킬 수 있는 중요한 설계요소가 될 것이다.

Abstract – This paper presents the finite element analysis on the strength safety of a full containment LNG storage tank system with damping safety structures. For the FEM analysis of the inner tank, the combined loads in which are related to a hydrostatic pressure, a cryogenic temperature load, BOG pressure, LNG weight, and a sinking force at the corner of the inner tank have been applied to the inner tank structure. The FEM computed results show that the conventional inner tank is safe for the given combined loads, but the damping safety structure such as compressive springs may be more useful structures to increase the safety of the tank system. The increased stiffness and the appropriate position of the springs are very important design parameters for increasing the damping strength safety of the tank system.

Key words : Full containment LNG storage tank, Strength safety, Inner tank, Compressive spring, FEM

I. 서 론

LNG 저장탱크는 액화천연가스(LNG)를 안전하게 저장하고 효율적으로 도시가스를 생산하기 위해 제작한 거대 인공구조물이다. LNG 저장탱크는 비중이 낮고 연소하기 쉬운 천연가스를 안전하게 저장하기 위한 초대형 용기로 첨단 계측장치와 운영시스템, 긴급한 위험에 대처할 수 있는 안전장치와 안전구조물 등을 완벽하게 구축하고 있다[1].

초대형 인공구조물인 LNG 저장탱크는 대단히 위험

한 연료를 저장하고 있으므로 원자력 발전소 구조물에 버금가는 최고의 안전성을 보장할 수 있도록 최첨단 설계기술과 안전시스템을 갖추고 있으나, 어느 정도의 사고는 예상할 수 있다. 연소하기 쉬운 LNG를 대량으로 저장하는 탱크에서 사고가 발생하게 되면 상상하기 어려운 정도의 높은 폭발력을 나타내기 때문에 LNG 저장탱크는 가능한 인구밀도가 높은 지역에서 멀리 떨어진 지에 건설하여 사고로 인한 인명과 재산 피해를 최대한 줄여야 한다. 또한 가연성이 대단히 높은 LNG 연료를 취급하는 거대 탱크가 대도시 인근에 노출되어 사람들이 느끼는 위험성에 대한 우려를 줄이기 위해 지상식 LNG 저장탱크보다는 지중식 또는 지하식 저장탱

†주저자:chungkyunkim@empal.com

크를 건설하는 노력을 기울이기도 한다.

LNG 저장탱크에 관련된 사고는 최악의 경우 대형폭 발로 연결되어 심각한 사고를 발생하게 되므로 사전에 예방하는 안전설계, 운전, 시스템 관리 등의 측면에서 지속적으로 연구되어야 한다. 새로운 기술이 개발되면 기존의 LNG 저장탱크에 적용되어 개량되고 보완되어야 저장탱크의 생산성과 효율성, 안전성이 확보된다.

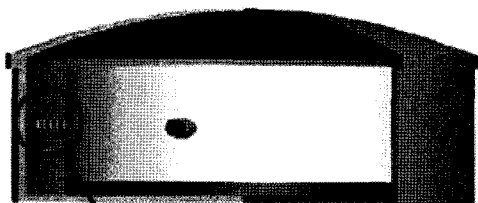
세계에서 2번째로 많은 LNG 저장탱크를 보유한 우리나라는 최근에 평택생산기지, 통영생산기지, 인천생산기지에서 LNG 저장탱크에 관련된 크고 작은 가스누출 사고가 발생되면서 많은 위험성을 노출하고 있다[2,3]. LNG 저장탱크 관련 사고는 천재지변이나 전혀 예상치 못한 상태에서 우연하게 발생하기보다는 설계, 운전, 안전시스템 구축 등에서 문제점이 발생되고 있다는 사실을 인식해야 한다.

LNG 저장탱크 시스템의 구조 안전성이 아무리 우수하다고 주장해도 공학설계 구조물은 항상 완벽할 수 없으므로 지속적인 연구개발을 통해 안전성과 효율성을 개량하고 보완하는 것이다. 본 연구에서는 기존의 완전 밀폐식 LNG 저장탱크 시스템에 대한 강도안전성을 유한요소법으로 해석하고, 기존의 LNG 저장탱크의 시스템적 강도안전성을 보장하기 위해 새로운 스프링 댐핑 안전 구조물을 설치하고 시스템 구조물의 강도안전성을 증가시켜 LNG 저장탱크의 사고발생을 줄이는데 기여하고자 한다.

II. 해석모델 및 해석조건

2.1. 해석모델

Fig. 1은 완전밀폐식 LNG 저장탱크 시스템의 내부탱크에 대한 강도안전성 해석을 위해 사용한 축대칭 유한요소해석용 3차원 시스템을 보여주고 있다. 완전밀폐식 LNG 저장탱크는 LNG를 저장하는 내부탱크가 자립식으로 외부탱크에 대하여 완전하게 독립적으로 하중안전성을 확보하고 있어야 한다. 여기에 외부탱크는



Spring structure

Fig. 1. Full containment LNG storage tank system with damping structures.

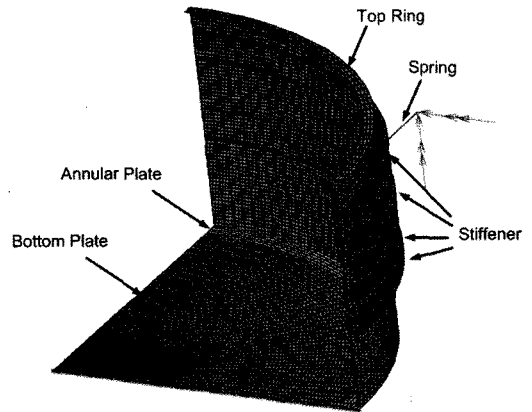


Fig. 2. FE analysis model of a full containment inner tank system.

내부탱크의 파손으로 인해 발생하는 LNG에 의한 가스 누설이나 폭발 등과 같은 위험성이 발생해도 최악의 상황은 감당할 수 있을 정도의 강도안전성을 확보하고 있어야 한다[4].

완전밀폐식 LNG 저장탱크 시스템의 안전성은 1차적으로 내부탱크의 강도안전성에 의해 결정되기 때문에 내부탱크에 대한 유한요소해석을 위해 사용된 유한요소 모델을 Fig. 2에서 제시하고 있다.

내부탱크 구조물의 강도안전성 해석을 위해 사용된 유한요소는 4개의 노드를 갖는 Bilinear Thin-shell로 복잡한 판 구조물뿐만 아니라 곡선형태의 셸 구조물 해석에 적합하고, 특히 비선형 유한요소해석에 유용한 요소이다. 본 연구에서 사용된 유한요소해석 프로그램은 선형 및 비선형 해석이 가능한 MSC/MARC를 사용하였다[5].

2.2. 해석조건

Fig. 3은 -162°C 의 LNG를 안전하게 저장하기 위해 완전밀폐식 내부탱크에 작용하는 초저온 온도하중, 초저온 액체의 자중량에 의한 유체하중, BOG 발생에 의한 가스압력 등을 적용한 경계조건을 보여주고 있다.

본 유한요소해석에서는 저장탱크를 받치고 있는 지반 구조물의 부등침하로 인해 발생하는 내부탱크의 변형거동이 비대칭적으로 발생할 것으로 예상되며, 저장탱크의 강도안전성에 대한 신뢰성을 높이기 위해 Fig. 2에서 보여준 것과 같은 3차원 유한요소 해석모델을 사용하였다.

저장탱크 지반의 부등침하로 인해 탱크의 바닥면에 작용하는 하중의 균형이 깨어진 상황에서 내부탱크의 측면면의 거동특성을 해석한다. 즉, 저장탱크의 바닥면

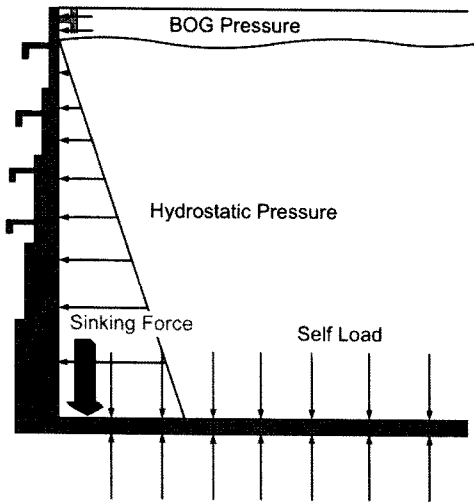


Fig. 3. Boundary conditions due to a cryogenic temperature and a weight of a LNG and a boil-off gas pressure.

과 지반 사이에 바닥면에 불균일한 하중(Fig. 3 참조)을 임의로 적용하여 저장탱크가 국부적으로 약 4 cm 침하한 것으로 가정한다. 침하량 발생에 의해 발생하는 변형거동 불안전성을 해소하기 위해, 즉 저장탱크 시스템의 안전성 확보를 위해 내부탱크와 외부탱크를 연결하는 압축뎀핑 스프링을 원주방향을 따라서 90° 간격으로 4개 설치하여 강도안전성을 보강하도록 하였다.

내부탱크와 외부탱크 사이의 단열재 공간을 통과하여 설치된 스프링은 내부탱크의 벽면에 부착할 때 단열되었다고 가정하여 내부탱크에서 전달되는 초저온 온도에 의해 발생될 수 있는 스프링의 강성도 변화에 의한 강도저하를 차단하였다.

본 해석에 사용된 내부탱크의 소재는 9% 니켈강재로 물리적 특성을 Table 1에서 제시한다. 사용된 9% 니켈강재의 항복강도는 670 MPa이고, 탄성계수는 191 GPa로 다른 강재에 비해 높고, 특히 초저온 특성이 우수하기 때문에 완전밀폐식 LNG 저장탱크 제작에 적합하다.

Table 1. Mechanical properties of a 9% Ni steel plate.

Material parameters of 9% Ni	Values
Young's modulus, Pa	1.91×10^{11}
Poisson's ratio	0.3
Mass density, kg/m ³	7850
Thermal expansion coefficient at -200°C, $\mu\text{m/m} \cdot \text{K}$	-9.2×10^{-6}

III. 강도안전성 해석 및 고찰

3.1. 기존 LNG 내부탱크 시스템의 강도안전성 해석

완전밀폐식 LNG 저장탱크의 강도안전성을 고찰하기 위해 내부탱크 구조물에서 발생하는 응력 및 변형거동 특성을 앞에서 제시한 하중조건과 사용소재 데이터를 사용하여 해석하였다. Fig. 4는 내부탱크의 강도안전성을 탱크측벽의 바닥면에서 상단부로 올라가면서 해석하였고, 이 그림에서 L(최저높이기준)→M(중간높이기준)→H(최고높이기준)로 각각 표시하였다.

Fig. 5는 내부탱크에 작용하는 응력을 해석한 결과로 탱크의 바닥면보다 약간 높은 위치에서 내부탱크의 스티프너(stiffener)가 설치된 중간위치까지 높은 응력이 걸리고, 탱크의 상단부로 갈수록 응력이 크게 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이것은 탱크의 중간위치 아래는 별도의 스티프너와 같은 안전구조물을 설치하기보다는 소재의 두께로 강도를 해결하는 설계기법을 활용하고, 상단부에는 스티프너와 톱거더(top girder)를 설치하여 탱크의 강도안전성과 좌굴문제를 해결하는 탱크기술을 적용하기 때문이다. 특히 탱크에 저장된 LNG에 의한 유체정압을 비롯한 LNG 자중량은 탱크의 팽창거동에

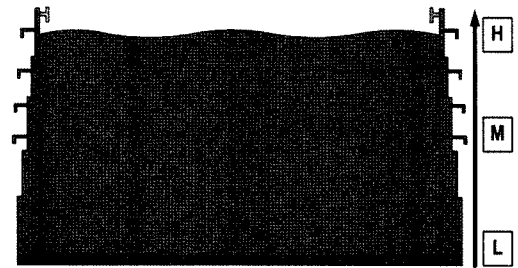


Fig. 4. FEM analysis direction from the bottom to the top of the inner tank.

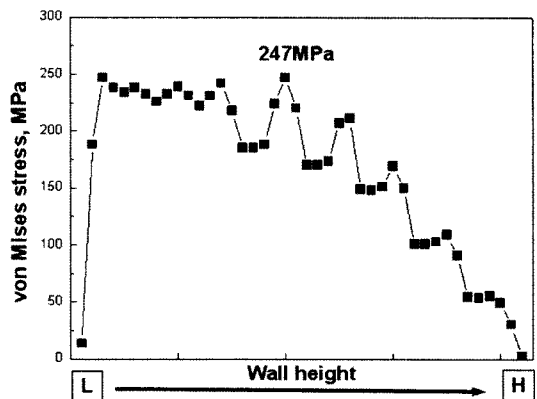
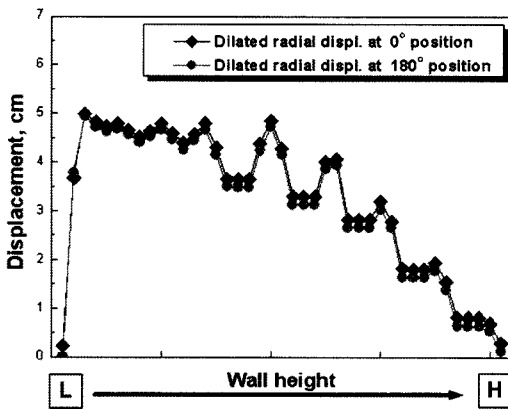
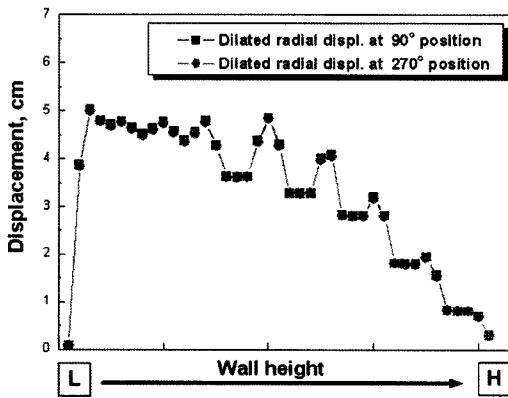


Fig. 5. von Mises stress of an inner tank wall.



(a) Dilated displacement at 0° and 180°



(b) Dilated displacement at 90° and 270°

Fig. 6. Radial displacement of the dilated LNG tank due to an internal loadings along the height of the tank.

큰 영향을 미치고 있다. FEM 강도해석 결과에 의하면 탱크에 걸리는 최대응력 247 MPa는 9% 니켈강재의 항복강도 670 MPa의 36.8% 수준으로 우수한 강도안전성을 보여주고 있다. 그럼에도 불구하고 내부탱크의 안전성을 보강할 필요가 있다. 이것은 탱크를 설계할 당시에 고려한 경계조건을 벗어나 복합하중이 동시에 걸리는 최악의 경우 위험해질 수 있으므로 내부탱크에 작용하는 응력수준이 높은 내부탱크의 중간위치와 하단부의 바닥면 사이에 강도안전성을 보완할 수 있는 새로운 안전구조물을 설치하는 것도 하나의 대안이다.

Fig. 6은 LNG 저장탱크의 변형거동을 억제하기 위해 설치한 스프링 안전구조물을 설치한 4개의 위치(원주 방향을 따라서 90°씩 떨어진 위치)에 대해 탱크의 측벽 바닥면 \square 에서 상단면 \square 를 따라서 발생하는 팽창 변위량을 해석한 결과이다. 여기서 임의로 가한 부등침하량 4 cm를 가한 위치를 0° 위치로 기준을 잡고, 탱크

의 팽창거동 특성을 고찰하기 위해 원주방향을 따라 90°, 180°, 270°의 위치에서 각각의 팽창 변형률을 예측하였다.

Fig. 6(a)의 해석결과에 의하면, 탱크 구조물의 강도 안전을 확보하기 위해 Fig. 3에서 보여준 것처럼 탱크를 두껍게 제작하였음에도 불구하고 저장탱크의 측벽면에 침하력을 가한 위치를 기준벽면(0° 위치로 4 cm의 부등침하를 외력으로 가한 위치)과 원주방향을 따라서 180° 떨어진 위치의 측벽면 중간부에서 바닥면으로 내려가면서 5 cm 정도의 팽창량이 반경방향으로 발생되어 탱크의 잠재적 위험요소로 작용하고 있다. 여기서 0°로 나타낸 기준벽면의 팽창 변위량이 원주방향으로 180° 떨어진 측벽면의 반경방향 변위량보다 약간 높게 나타났다.

또한 Fig. 6(b)는 부등침하를 가한 측벽면 위치(0° 위치)에서 원주방향을 따라서 90°와 270° 회전한 위치에서 측정한 반경방향의 팽창 변위량은 탱크의 중간부에서 바닥면으로 내려가면서 크게 팽창된 변형률을 나타내고, 이것은 0°와 180°의 위치에서 예측한 팽창 변형거동과 유사한 경향을 보여준다.

여기서 발생된 저장탱크 측벽면의 팽창 변위량은 기존의 저장탱크에 작용하는 하중조건에 추가하여 측방향으로 4 cm 정도의 임의 부등침하가 발생되었다고 가정하였기 때문에 나타난 현상이다.

저장탱크의 부등침하는 저장탱크 내부의 유체정압을 불균일하게 하여 부등침하가 실제로 발생된 0°의 위치에서 작용하는 유체정압이 원주방향으로 180° 떨어진 위치보다 조금 더 높게 작용하면서 내부탱크의 측벽면에 발생한 팽창 변위량이 더 많이 발생하는 현상이 나타난다. 그러나 부등침하가 직접 작용한 위치, 즉 0°가 아닌 90°와 180°의 위치에서 예측한 팽창 변위량은 같게 나타났다. 결국은 저장탱크에서 발생된 부등 침하량은 저장탱크의 안전성에 어느 정도는 영향을 미치고 있다는 사실을 예상하는 결과로 향후 탱크의 안전설계에 활용될 수 있다.

3.2. 댐핑안전 구조물을 설치한 LNG 저장탱크 시스템의 강도안전성 해석

LNG 저장탱크의 강도안전성은 현재의 설계조건을 만족하지만, 저장탱크에 가해지는 하중이 복합적이거나, 설계에서 예측한 하중조건을 넘어서는 현상이 발생할 경우는 취약할 수 있다는 결과에 기반하여 내부탱크의 하단부에 별도의 스프링 구조물을 설치하고 기존의 내부탱크 구조물과 비교한 해석 데이터를 Fig. 7~ Fig. 9에서 제시한다.

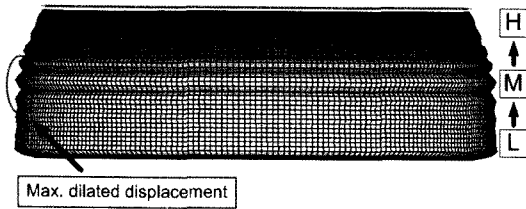


Fig. 7. Dilated displacement distribution of the inner tank.

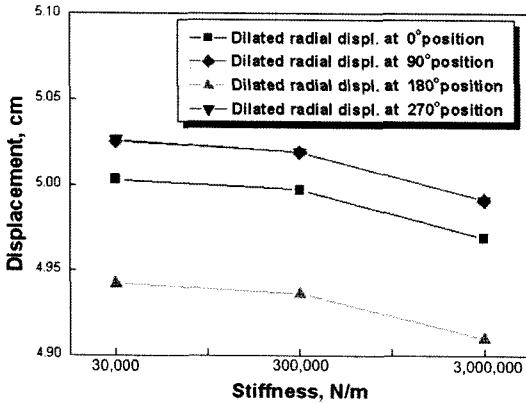


Fig. 8. Maximum dilated displacement along the bottom to the top as a function of a spring stiffness.

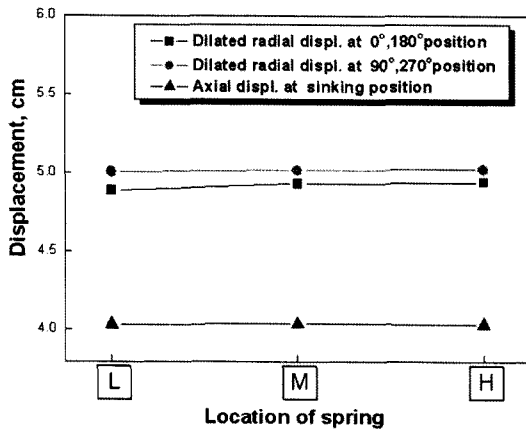


Fig. 9. Maximum displacement of a compressive spring depending on the location of the spring along the height of the wall.

Fig. 7은 LNG 저장탱크의 강도안전성을 보강하기 위해 스프링 댐핑안전 구조물을 내부탱크와 외부탱크 사이에 원주방향을 따라서 90° 간격으로 4개를 설치하고, 내부탱크의 측벽면에 발생하는 팽창 변위량 분포도를 보여주고 있다. FEM 구조해석 결과에 의하면, 탱크의 팽창거동은 바다면으로 갈수록 LNG의 유체정압과 자중량에 의한 거동량이 크게 증가되면서 탱크의 중간

부와 하단부로 내려갈수록 큰 팽창량이 발생되고 있음을 보여준다.

Fig. 8은 스프링 댐퍼의 기준 강성도를 30,000 N/m로 잡고, 스프링의 강성도를 10배씩 증가시켜 내부탱크의 측벽면에서 발생한 최대 팽창 변위량을 해석한 결과로, 스프링의 강성도를 증가시키면 팽창 변위량은 줄어들고 있음을 보여주고 있다. 스프링의 강성도가 30,000 N/m일 경우 270°와 90° 위치에서 예측한 최대 팽창량은 5.03 cm이고, 원주방향으로 180° 떨어진 위치에서 예측한 최대 팽창량은 4.94 cm로 미미하지만 낮아졌다. 여기서, 탱크에 설치된 스프링 강성도는 탱크의 저장용량에 적합하도록 스프링 강성도와 설치 수량을 최적화하면 저장탱크의 안전성은 충분히 확보될 수 있을 것이라는 추측이 가능하다.

본 연구에서 해석한 결과에 의하면, 저장탱크의 안전성 확보에 스프링 안전댐퍼를 사용하면 우수한 강도안전성을 확보하게 될 것이라는 가능성을 확인하였다. 이것을 위해 LNG 저장탱크에 설치되어야 하는 스프링 댐퍼의 강성도와 설치수량은 저장탱크에 걸리는 전체 하중과 설치위치를 잘 선정하면 응력 및 변위량을 우수하게 제어할 수 있다. 더욱이 LNG 저장탱크의 국부적인 침하는 LNG 저장탱크 시스템의 토달 강도안전성으로 제어하면 현재의 LNG 저장탱크보다는 안전성이 우수하고, 효율적인 안전설계가 가능할 것으로 예상된다.

상기의 해석결과를 볼 때 내부탱크에 스프링의 장착은 그 값의 크기가 미세하기는 하나 내부탱크의 반경방향 변위 제어에 긍정적인 영향을 주고 있다는 사실을 알 수 있다.

3.3 댐핑안전 구조물의 설치위치에 따른 탱크시스템의 강도안전성 해석

Fig. 9는 내부탱크의 외측벽면을 따라서 설치한 스프링의 위치에 따라 발생하는 최대 팽창 변위량을 나타낸 결과이다.

Fig. 4에서 나타난 것처럼 탱크의 맨 위쪽벽면을 H, 중간벽면을 M, 바닥벽면을 L 위치로 각각 설정하고, 이들 위치에 스프링 구조물을 설치하였을 경우 각 위치에서 발생하는 반경방향의 최대 변위량을 보면, 스프링의 설치위치에 따른 변위량 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 다만, 스프링을 내부탱크의 맨 위쪽벽면에 설치하기보다는 바닥면 부근에 설치할 경우 최대 변위량은 약간 감소하는 현상을 보여준다. 이것은 LNG의 유체정압으로 인해 내부탱크의 위쪽 벽면보다는 아래쪽 벽면에 큰 하중이 걸리면서 발생하는 변위량 또한 증

가하기 때문이다.

Fig. 9는 하중지지용 스프링을 설치하는 위치에 따라 변형거동을 제어하는 역할을 충분히 발휘될 수 있음을 제시하는 해석결과로 스프링의 강성도와 설치수량 못지않게 저장탱크 시스템의 안전성에 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 탱크무게를 받치고 있는 지반의 부등침하로 인해 내부탱크 바닥면의 압력균형이 깨졌을 경우 저장탱크의 측면면에 스프링 안전장치를 설치하여 내부탱크의 강도안전성을 확보하자는 것이다. 이것을 위해 내부탱크와 외부탱크 사이의 공간에 90°의 간격으로 스프링 댐퍼를 설치하여 스프링의 강성도와 설치 위치에 따른 내부탱크 구조물의 응력과 팽창 변위량 특성을 해석하여 스프링 구조물의 효용성에 대해 고찰하였다.

내부탱크에 별도의 스프링 안전장치를 설치하면 탱크의 반경방향 팽창 변형량을 줄여주고, 강도를 보강하는 역할을 하고 있음을 고찰하였고, 특히 스프링 강성

도와 설치위치에 따라 내부탱크 시스템의 강도안전성을 제어할 수 있다는 가능성을 확인한 결과를 제시하였다. 따라서 LNG 저장탱크의 용량과 구조물 특성에 적합한 스프링 안전댐퍼를 최적의 작동조건으로 설계하면 대단히 우수한 LNG 저장탱크를 건설할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 김청균 외, “완전방호식 LNG 저장탱크 내부탱크 구조물의 설계 안전성에 한 연구”, 2001 추계학술발표회 논문집, *한국가스학회*, pp.122-129, (2001)
- [2] 최인수, “LNG 탱크 안전성 논란 갈등 증폭”, 투데이에너지, Feb. 15, (2007)
- [3] 황무선, “가스공사 LNG 터미널 긴급점검”, 투데이에너지, Feb. 15, (2007)
- [4] 김청균 외, “유체정압을 고려한 9% 니켈강재 내부탱크 바닥판의 설계 안정성에 관한 수치적 연구”, *한국가스학회*, 8(2), 35-41, (2004)
- [5] “MARC User's Manual”, Version K6.1, MARC Analysis Research Co., (1996)