

LNG 저장탱크용 관통 파이프의 설계 최적화 연구

서흥석* · 양영명* · 홍성호* · 김형식* · 김영균*

The Optimum Design of Internal Pipes for LNG Storage Tank

H.S. Seo, Y.M. Yang, S.H. Hong, H.S. Kim, Y.K. Kim

Key Words: LNG Storage Tank (액화천연가스 저장탱크), Internal Pipe (관통 배관), Pump Column (펌프 배관), Restraint Force (반력), Optimum Design (최적 설계)

Abstract

Internal pipes technology for LNG Storage tank developed because of the perceived safety risk of having an opening near the base of the shell. This is because the shell at this point is the most highly stressed component of the primary containment. other, secondary, problems arise because the movement of the tank in this region is also at a maximum. This requires the use of bellows either in the interspace or on the outside of the outer tank. Therefore the internal pipe, through the roof, solves these problems. The loading conditions calculated from design concept are then used to perform a pipe stress analysis. As well as determining the stresses in the internal pipe and checking against allowable stress, it determines the reaction forces at the support positions.

1. 서 론

일반적으로 LNG 저장탱크는 9% Ni 강식 또는 멤브레인 방식의 내조와 콘크리트 외조로 구성되고, 외조는 다시 바닥, 벽체 및 지붕으로 구성되어 있다. 저장탱크의 지붕을 관통하는 배관은 LNG 배관, NG 배관, 퍼지 배관 등 2 인치에서 20 인치에 이르는 다양한 배관이 있으나, 4 인치 이상의 배관 중 저장탱크 바닥까지 연결되어 내부구조에 영향을 미치는 펌프 배관(Pump column), 하부 인입 배관(Bottom Fill Line), 계기용 배관(LTD pipe) 등에 대해서 안전성 평가를 실시한다. 관통 파이프에 영향을 미치는 하중 조건으로는 자중, 압력, 온도 등의 정적 하중과 지진 하중 및 슬로싱(sloshing) 등의 동적 하중이 있다. 저장탱크의 종류 및 크기에 따라 관통 파이프의 구조는 변경되므로, 가장 일반적인 9% Ni 강식

LNG 저장탱크의 관통 파이프를 대상으로 하고 측면 지지대가 있는 경우를 설계 대상으로 하였다. 관통 파이프의 구조는 각각의 배관에 따라 조금씩 상이한 구조를 가지고 있으나 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 펌프 배관 등의 배관은 지붕에 고정되고 중간부 또는 하부가 가이드(Guide)로 지지되어 있으며, 하부 인입 배관 등의 배관은 바닥판에 고정되고 중간부가 가이드로 지지된다. 펌프 배관은 일반적으로 저장탱크 1기당 2~3기가 설치되는 관통 파이프의 가장 중요한 요소이므로 해석 대상으로 선정하였다. 측면부가 저장탱크 내부 벽체에 연결된 구조를 가지고 있는 경우, 온도의 변화에 따른 탱크 내부의 열수축에 의해 관통 파이프에 변위를 가하게 되므로, 이에 따른 각 단계에서의 안전성 평가 및 최종 해석 결과에 의한 가이드 안전성 평가 등 전반적인 안전성 평가가 필요하다. 따라서, 가이드의 위치 및 하중 조건 등에 따른 해석 결과를 분석하여 배관 자체의 안전성 평가 및 가이드에 전달되는 최소 하중의 관계를 정립하고, 전체 배관에 대한 구조적 취약점을 분석하여야 한다.

* 한국가스공사 연구개발원

2. 해석 대상 및 방법

2.1 관통 파이프의 구조

현재 국내에 시공되어 있는 9% Ni LNG 저장 탱크의 경우 중간부의 가이드가 없고 관통 파이프가 서로 연결되어 있는 방식으로서 비교적 설계가 단순하나, 해석 대상인 방식은 Fig.1과 같이 중간부에 두 개의 가이드가 내부 탱크와 연결되어 있다. 관통 파이프와 가이드의 재질은 STS304 스테인레스강이므로, 9% Ni 강인 벽체와 열수축 차이가 발생하여 구조적인 문제를 발생한다.

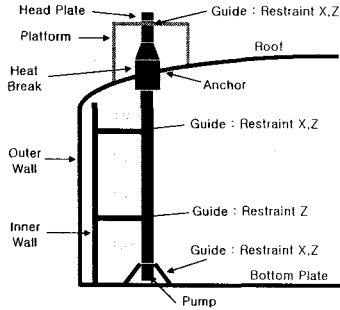


Fig.1 Pump column arrangement

Fig.1에서 관통 파이프는 열차단(Heat Break) 노즐에 의해 지붕과 연결되고, 배관의 중간부와 하부에서 가이드에 의해 X, Z 방향이 구속되어 배관의 변형을 제한한다.

2.2 해석 절차 및 방법

범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 탱크 내조의 변형거동을 평가하였으며, 전체적인 해석 방법 및 절차는 Fig.2와 같다.

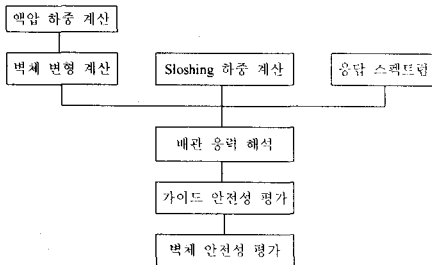


Fig.2 Analysis procedure of the internal pipes

배관과 탱크가 연결된 지점의 응답 스펙트럼과

지진에 의한 유체의 거동에 따라 발생하는 슬로싱을 고려하여 해석에 필요한 데이터를 분석하였다. 분석된 해석 조건을 배관 전용해석 프로그램인 CAESAR II를 사용하여 각 조건에 따른 정적, 동적 해석을 실시하고, 평가된 하중에 따라 가이드에서 발생하는 반력을 구하여 설계 조건에 따른 허용 응력과 관계를 비교하였다. Fig.3은 배관전용해석 프로그램에서 사용한 펌프 배관의 해석 모델이다.

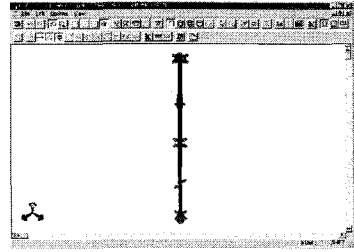


Fig.3 Analysis model of the pump column

상단과 하단에는 각각 플랜지와 펌프에 의한 가상 중량을 추가로 가하였고, 열차단 노즐과 지붕이 연결되는 지점을 고정점(Anchor)으로 지정하여 해석을 수행하였다.

2.3 하중 조건

저장탱크는 -162°C 의 온도에서 운전되고 설계에서는 -165°C 를 고려한다. 이때 배관에 작용하는 압력과 내용물인 LNG의 밀도가 자중에 영향을 미치며, 탱크 벽체와 가이드의 열수축에 의한 영향을 고려한 정적 해석이 요구된다. 지진하중이 작용함에 의해 벽체의 변위가 발생하고 이 변위와 저장탱크 유체에 의한 탱크 변위를 복합적으로 고려한 해석과 슬로싱 하중에 의한 고려도 병행되어야 한다. 또한 저장탱크 액위에 따라 모든 해석조건이 변동하므로 모든 가능한 조건에 대한 해석이 필요하다.

Table 1 Summary of the load conditions

Load	Condition	Load	Condition
Filling(%)	100,75,50,25	Pressure	1863 KPa
Seismic	OBE, SSE	Temp.	-165°C
Sloshing	X, Z Dir.	Contents	480 kg/m^3
Deflection	Contraction, Liquid Head, Seismic		

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 설치 조건에서의 해석 결과

LNG 저장탱크와 같이 초저온 조건에서 운전되는 경우는 탱크는 수축이 내부의 구조물에 미치는 영향을 사전에 고려하여 설계되고 시공되어야 한다. 탱크의 수축에 따라 배관의 변형이 발생하게 되며 이 조건에서의 응력 및 변형을 검토해야 한다. Fig.4는 계산된 변형을 고려하여 설치된 배관의 위치에서 탱크의 냉각(Cool down)에 따른 각 지점의 변위를 표현한 것이다.

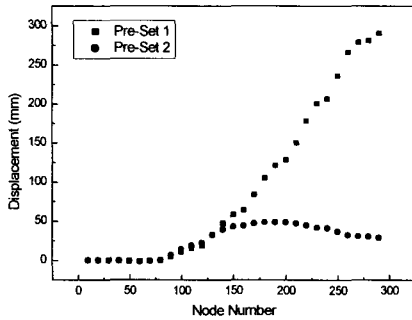


Fig.4 Displacement in the Pre-Set case

탱크의 열수축은 배관 하부에 연결된 가이드와 중간부에 연결된 가이드에 의해 전달되며, 이때 가이드의 수축을 고려하여 계산된 변위를 각각 적용하였다. Pre-Set 1 조건은 배관의 설치 초기 조건으로서 배관 하부의 변위에 의해 전체 배관의 변위가 형성되었으며, Pre-Set 2 조건은 냉각이 진행되어 저장탱크의 온도가 -165°C 에 도달했을 때의 조건으로서 전체 배관이 초기 조건에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. Pre-Set 2 조건은 액압에 의한 탱크의 변형을 고려하지 않은 것으로서, 액압이 작용했을 경우의 운전조건에서는 변위가 0점에 근접하게 된다.

각 조건에서 배관에 작용하는 응력은 Fig.5와 같이 배관과 지붕이 연결되는 열차단 노즐 부위에서 최대 응력이 발생하였다. 열차단 노즐은 배관에 작용하는 응력 및 변위를 정확하게 해석하기 위하여 모델링에는 포함하였으나 배관의 평가에서는 고려하지 않으므로 평가 대상에서 제외하였다. 설치된 배관의 열수축에 따라 46MPa의 응력이 71MPa로 증가하였으나 허용 응력이

138MPa이므로 안전성이 검증되었으며, 열수축에 따른 배관의 변형은 액압에 의해 감소되므로 운전조건에서도 문제가 없을 것으로 보인다.

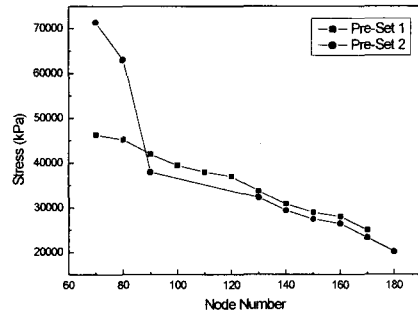


Fig.5 Stress distribution in the Pre-Set case

3.2 운전 조건에서의 해석 결과

배관의 설계는 일반적으로 ANSI B31.3에 따라 수행하며, 각 하중 조건이 주어진 허용 응력에 만족하는지에 따라 안전성을 평가한다. 기본적인 조건으로는 지지조건(Sustained)과 지진하중(Earthquake) 조건이 있으며, 배관의 전반적인 안전성을 평가하기 위하여 운전 조건(Operating)을 고려하여야 한다. Fig.6은 지지조건과 운전조건에서 배관에 작용하는 응력을 구한 해석 결과이다.

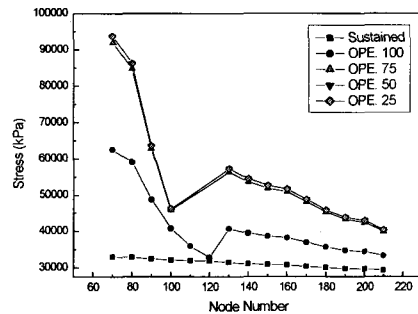


Fig.6 Stress distribution (SUS and OPE)

지지조건에서의 최대 응력은 33MPa로서 배관과 열차단 노즐의 연결부인 Node 70에서 나타났으며, 배관 전체에 걸쳐 균일한 분포를 보이고 있다. 지지조건은 배관의 자중과 압력만을 고려한 조건이므로 배관의 안전성에는 큰 영향을 미치지 않는다. 운전조건은 4가지 조건으로 다시 분리할 수 있는데, 저장탱크의 액위에 따라, 100,

75, 50, 25% 조건으로 구분한다. 최대 응력이 발생한 조건은 50% 조건으로서 94MPa의 응력을 보이고 있다. 운전조건은 압력과 온도, 액압에 의한 탱크의 변형을 고려하고, 액압에 의한 탱크의 변형은 Pre-Set 조건에서 구해진 변형과 조합하여 최대 응력을 발생하는 주요 인자로서 작용하므로 100%에서 변형이 최소화하도록 한 설계에 의해 50%에서 최대 응력이 발생한 것이다. 지지조건과 마찬가지로 최대 응력은 열차단 노즐 연결부에서 발생하며, Node 100 또는 120에서 응력이 다시 증가하다가 감소하는 현상은 탱크의 열수축 변형이 가이드를 통하여 전달되기 때문이며, 액위의 변화가 100% 조건을 제외하고는 응력에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 결국 액압에 의해 발생한 변형이 일정한 수준 이상으로 작용하여야 배관에 직접적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

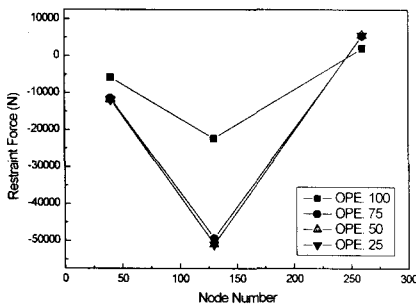


Fig.7 Restraint force (OPE)

배관과 벽체를 연결하는 가이드에 의해 배관에 변형이 전달되며, 다시 배관의 하중은 가이드에 반력을 가하게 된다. 지지조건에서는 자중 및 압력만을 고려하므로 가이드의 반력이 발생하지 않으며, 운전조건에서는 변형에 의해 최대 응력이 발생한 50% 조건에서 최대 반력이 발생하였다. 응력의 변화와 마찬가지로 운전조건에서의 반력 분포는 액압에 의한 벽체의 변형이 발생한 75% 이하의 조건에서 유사한 결과를 보였으며, 100% 조건은 중점 설계 고려 사항이므로 최소 반력을 보였다.

3.3 슬로싱 조건에서의 해석 결과

지진하중에 의해 발생하는 슬로싱은 지진하중과 동시에 고려하여야하나 복합적인 하중조건은

다양한 하중을 양산하므로 전체 해석을 단순화하기 위하여 지진하중과 분리하여 해석을 실시하고 가이드의 반력 계산에 대수적인 합산에 의해 고려하는 것이 바람직하다. 단, 슬로싱에 의한 반력이 지진하중에 의한 반력에 비해 상대적으로 작아야 하며, 응력 또한 무시할 수 있을 정도로 작아야 한다.

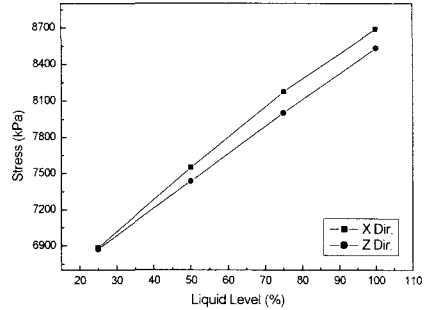


Fig.8 Stress-Liquid level curve (Sloshing)

Fig.8은 슬로싱이 작용하는 경우 액위의 변화에 따른 응력 분포를 나타낸 것이다. 최대 응력은 9MPa 미만으로 다른 하중 조건에 비해 상당히 작은 값이며, 응력의 분포는 최대 액위에서 최저 액위까지 선형적으로 감소하는 양상이다. 슬로싱 하중은 독립적으로 작용하며 액위가 미치는 배관에 균일하게 작용하므로 이러한 결과가 발생한다. X방향의 하중이 Z방향의 하중에 비해 다소 큰 수치를 보이고 있는 것은 중간부의 가이드에서 X방향으로 구속이 상대적으로 적기 때문에 발생한 결과이다.

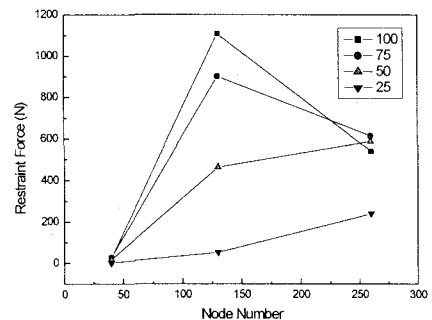


Fig.9 Restraint Force (Sloshing-X)

X방향의 반력은 Fig.9와 같이 Node 130에서 최

대 반력이 나타나며, 운전조건과는 달리 100%에서 최대 반력이 발생한다. 슬로싱 하중이 균일 분포하중으로 액위의 전체에 작용하므로 중간부의 가이드에서 최대 반력이 발생하고, 25% 조건에서는 슬로싱 하중이 배관 하단에 집중되므로 반력 또한 하단에서 크게 발생한다.

Z방향 반력의 경우는 X방향과는 달리 Node 210에서 구속이 작용하므로 보다 복잡한 경향을 나타낸다. 25%의 경우는 X방향과 동일하나 50% 이상에서는 Node 210번에서 최대 반력을 보이고, 50%에서는 반력의 감소와 증가가 반복되는 경향을 나타내고 있다. 이것은 가이드의 위치와 하중의 위치가 복합되는 Node 150 부근에서 발생한다.

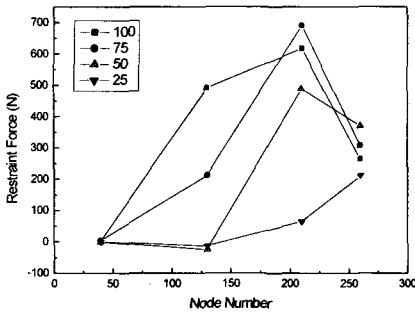


Fig.10 Restraint Force (Sloshing-Z)

3.4 지진하중 조건에서의 해석 결과

지진하중에 대한 해석은 운전조건에서의 하중에 배관 주변의 유체에 의해 추가되는 자중 (Added Mass)과 벽체의 변형에 의해서 발생하는 가이드 변형을 고려하여 수행하였다. 이때의 허용응력은 ANSI B31.3에 따라 183MPa를 사용하였으며, 해석 결과에 의해 액위에 따른 최대 응력 선도는 Fig.11과 같다.

최대 응력은 액위 75%에서 발생하며, 붕괴방지 조건(SSE)이 기능수행조건(OBE)보다 큰 응력을 보이고 있다. 응력-액위 선도에 표시된 (+), (-) 부호는 지진하중에 의한 변형 방향과 설계 조건에서의 변형 방향에 따라 결정되는 것으로서, (-)로 작용할 경우가 설계 지배 인자에 작용한다는 것을 알 수 있다. 최대 응력은 129MPa로서 허용응력을 만족하며, 액위가 75%에서 최대 응력이 발생하였다.

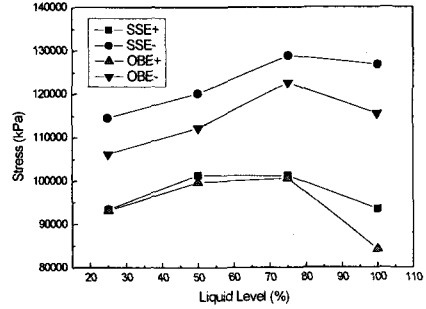


Fig.11 Stress-Liquid level curve (Seismic)

SSE 조건이 OBE 조건에 비해 설계 측면에 지배적인 요소이므로 이때의 반력을 평가하면 Fig.12와 13과 같다. X방향의 가이드 반력은 Node 130에서 최대를 보이며 이것은 운전조건, 슬로싱 조건의 경우와 동일하다. 따라서, X방향의 가이드 설계가 관통 배관의 전체 설계에 핵심이라고 할 수 있다.

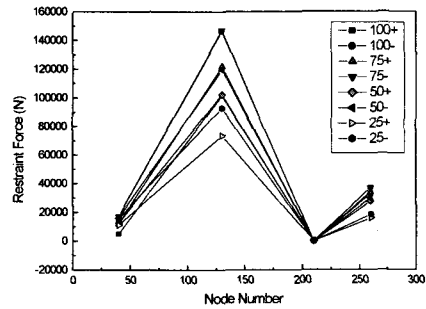


Fig.12 Restraint Force (SSE, FX)

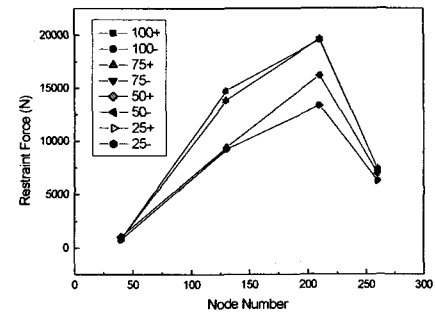


Fig.13 Restraint Force (SSE, FZ)

Z방향의 반력은 운전조건에서는 나타나지 않음

나 슬로싱 조건에서는 Z방향 하중에 의해 발생하였고, 지진하중 조건에서도 Z방향의 응답 스펙트럼에 의해 발생하게 된다.

Z방향의 반력 분포인 Fig.13을 보면 슬로싱 하중에 의한 반력 분포와 상당히 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. X방향과 같이 (-)에서 최대값을 보이고, Node 210의 75%에서 발생하는 최대값이 100% 조건과 거의 동일한 값을 보였다.

4. 결론

9% Ni LNG 저장탱크의 관통 파이프에 대한 해석 결과에 따라 가이드에 작용하는 반력의 지배인자 결정하고, 최대 응력이 발생하는 조건 및 응력 분포를 통해 가이드의 위치 및 구조의 최적화에 활용할 수 있다. 각 하중 조건에 따른 가이드 지배인자는 다음과 같다.

(1) 배관의 설치 조건에서는 허용 응력과의 비교를 통해 배관 자체의 안전성을 평가하고, 초기 설치시의 응력과 냉각 진행시의 변형을 설계시 고려하여야 한다.

(2) 운전조건에서 액압에 의한 벽체의 변형은 일정 수준 이상으로 작용할 경우에 배관에 직접적인 영향을 미치며, 이때의 변형은 관통 파이프 설계에 최대 응력비를 발생하는 부분으로 응력을 최소화하기 위한 초기 설계시의 중점 고려 사항이다.

(3) 가이드가 위치하는 지점에서 발생하는 반력은 슬로싱 조건에서 방향성을 가지며, 단방향 가이드를 설치할 경우 응력의 집중과 반력의 증대를 일으킨다. 따라서, 기본 설계시 가이드의 선택에 따라 발생 가능한 응력 분포를 고려하여야 한다.

(4) 지진하중 조건의 해석 결과 X방향의 반력이 전체 반력의 지배인자이며, 이때의 반력을 최소화하는 것이 전체 설계의 핵심으로 가이드의 위치를 조절하여 변형을 최소화함에 의해 최적화를 이룰 수 있다.

참고문헌

(1) Kobayashi, Nobuyuki, 1995. "Vibration characteristics of pump-barrel structures in large PCLNG storage tank", Ishikawajima-Harima

Engineering Review, V35, N4, pp. 239~242

(2) T. Yoshihara, Y. Mentani, 1996, "Development of Seismic Design Methods of Pump Barrels for Above-ground LNG Tanks", 川崎重工技報, 129号, pp. 65~70

(3) J. H. Park, 1995. "Structural analysis of LNG pump tower", The sixth international symposium on Practical Design of Ships and Mobile Unit, V2, pp. 982~991

(4) P. K. Paik, 1998. "A Study on the Sloshing Phenomena of Membrane the LNG Carrier in the Time Domain", 일본조선학회논문집, V184, pp. 409 ~ 418

(5) N. Kokkavessis, 1999. "Finite element modelling and analysis of sloshing waves in spherical tanks", Seismic engineering(ASME), PVP-Vol. 387, pp. 105 ~ 109