

LNG 저장탱크용 Still Well의 설계 최적화 연구

서흥석, 양영명, 홍성호, 김형식, 김영균
한국가스공사 연구개발원

The Optimum Design of Still Well for LNG Storage Tanks

H.S. Seo, Y.M. Yang, S.H. Hong, H.S. Kim, Y.K. Kim
R&D Division, Korea Gas Corporation

1. 서론

9% Ni 강식 LNG 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(Still Well)등에 대해서 안전성 평가를 실시한다. 관통 배관에 영향을 미치는 하중 조건으로는 자중, 압력, 온도 등의 정적 하중과 지진하중 및 슬로싱(sloshing) 등의 동적 하중이 있다. 저장탱크의 종류 및 크기에 따라 관통 배관의 구조는 변경되므로, 일반적으로 측면 지지대가 있거나 배관의 상호 연결에 의해 구속되는 경우를 설계 대상으로 하고 있다.

관통 배관의 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. 그러나 Still Well은 펌프 배관 및 하부 인입 배관과는 전혀 다른 독특한 방식으로 구성된다. 기본 구속조건이 펌프 배관과 유사하나 저장탱크 지붕과 연결되지 않고 LTD pipe와 연결되어 추가적인 하중을 받고 있다. 측면부가 저장탱크 내부 벽체에 연결된 구조를 가지고 있으므로 온도의 변화에 따른 탱크 내부의 열수축에 의해 배관에 변위를 가하고, 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. 또한, LTD 배관이 Still Well에 미치는 영향을 고려하여 상호 지지점의 위치를 최적화 하여야 한다.

2. 해석 대상 및 방법

2.1 Still Well의 구조

해석 대상인 Still Well의 구조는 Fig. 1.과 같이 중간부에 두 개의 가이드가 내부 탱크와 연결되어 있다. 배관과 가이드의 재질은 STS304 스테인레스강이므로, 9% Ni 강인 벽체와 열수축 차이가 발생하여 구조적인 문제를 발생한다.

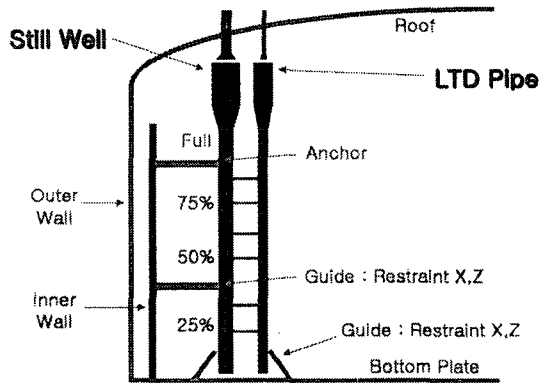


Fig. 1. Still Well & LTD Pipe arrangement

Fig. 1.에서 Still Well은 배관의 중간부와 하부에서 가이드에 의해 X, Z 방향이 구속되고, 하부만 X, Z 방향으로 구속된 LTD Pipe와 상호 연결되어 하중 및 변형이 영향을 받게 된다.

2.2 해석 절차 및 방법

범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 탱크 내조의 변형거동을 평가하고, 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 응력과의 관계를 비교하였다. Fig. 2.는 배관 전용해석 프로그램에서 사용한 Still Well 및 LTD Pipe의 해석 모델이다.

상단과 하단에는 각각 Cone과 플랜지에 의한 강성 중량을 추가로 가하였으며, 상단 벽체 가이드를 고정점(Anchor)으로 지정하고 하부 가이드를 수평 방향 구속하여 해석을 수행하였다.

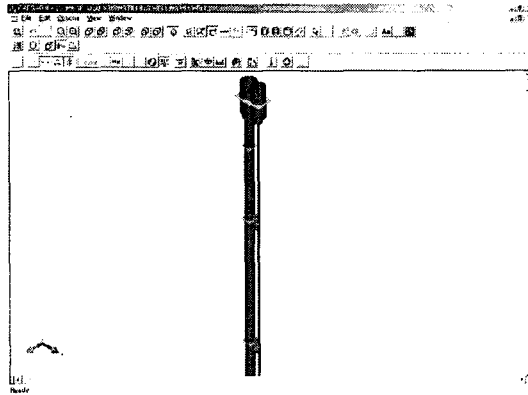


Fig. 2. Analysis model for Still Well & LTD Pipe

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.

3. 해석 결과

3.1 배관 전체에 작용하는 응력

Still Well 및 LTD Pipe에 작용하는 하중 조건을 분석하면, 시공 조건, 탱크냉각조건 및 정하중 조건에서 발생하는 응력 수준보다는 정하중 및 지진하중이 복합적으로 작용하는 SSE 조건에서 가장 큰 수준의 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 배관에 작용하는 직접적인 응력 평가 및 가이드와 탱크 벽체의 안전성 평가에서도 SSE 조건이 지배조건으로 작용하며, 이때 발생하는 응력 분포 및 변형 거동을 분석하여 반력을 최소화하는 것이 궁극적인 목표인 가이드 및 탱크 벽체의 작용 하중을 감소하는 방안일 것이다. Fig. 3은 액위 100%, SSE 조건에서 Still Well 및 LTD Pipe에 발생하는 응력을 나타낸 것이다. 액위의 감소에 따라 응력 분포경향이 조금 상이한 결과를 나타내나, 응력의 절대치 및 평균치가 가장 큰 경우가 액위 100%일 경우이므로 이 조건의 분석이 가장 중요 요소이다. Still Well의 Node 60은 Anchor 부위로서, 유일하게 수직하중을 받고 있는 지점이다. 발생 응력이 180MPa로서 허용응력 183MPa에 98% 수준에 이르는 과도한 응력이 발생하고 있으며, 이를 감소하는 것이 전체 설계를 좌우하는 핵심요소라 할 수 있다.

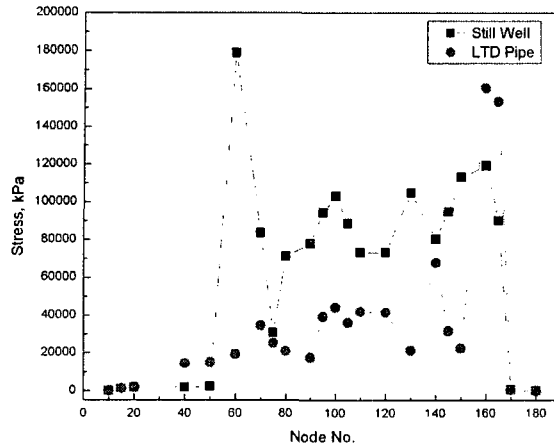


Fig. 3. Stress Distribution of Pipes in SSE case

LTD Pipe는 Still Well과 여섯 지점에서 판재에 의해 연결되어 있고 하부에 X, Z 방향의 가이드에 의해 구속되므로, 하부 가이드 지점에서 최대 응력이 발생하게 된다. LTD Pipe와 Still Well의 연결지점에서 응력이 상승하는 경향을 보이지는 않으며, 이는 두 배관의 연결부가 충분히 작용하중을 지지하고 있다는 것을 나타낸 것이다. Still Well의 응력이 급등하는 지점은 모두 가이드가 설치되어 있는 지점으로서, 전체 응력 분포가 기타의 관통 배관과는 상이한 경향을 보이는 것은 LTD Pipe와 Still Well의 연결부가 서로의 구속 작용을 일으켜 전체적인 변형을 최소화하고 응력을 고루 분배하기 때문인 것으로 볼 수 있다.

3.2 배관에 작용하는 반력

최대 액위 및 SSE 조건에서 응력 및 변형이 최고 수준이므로, 이때의 반력을 분석하여 최소화하는 것이 필요하다. Fig. 4.는 SSE 조건에서 Still Well의 Anchor에 발생하는 반력의 분포를 저장탱크의 액위 변화에 따라 표현한 것이다. 저장탱크의 액위가 증가함에 따라 반력의 종류에 상관없이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 축하중이 비교적 선형적인 반면에 모멘트는 액위 50% 이상에서 급등하는 경향을 나타냈다. 이것은 액위의 변화가 반력의 절대치에 중요 인자라는 것을 의미하며 이 액위는 지진하중 적용시 배관에 부가되는 자중에 영향을 미치므로, 결국 지진하중에 의한 배관의 변형이 중요한 인자라는 것을 의미한다.

축방향 하중에서 X, Z 방향 하중은 동일한 값을 나타냈으나, 수직방향 하중이 상대적으로 높은 수준을 보이고 있다. Still Well과 LTD Pipe가 수직방향의 자중 및 기타 하중을 단지 Anchor 부위에서 전담하도록 설계되어 있기 때문이며, 추가적으로 모멘트가 발생하여 전체 반력 수준을 높이고 있으므로 현 설계가 부적합한 것은 아니나 Anchor 설계를 추가하여 응력을 분산하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 모멘트가 가장 큰 작용요소이므로 이를 감소하기 위하여

Anchor 사이의 간격을 조정하여야 한다. 수직방향의 모멘트는 기타 모멘트 및 축하중에 비해 상대적으로 낮은 수준을 보였다.

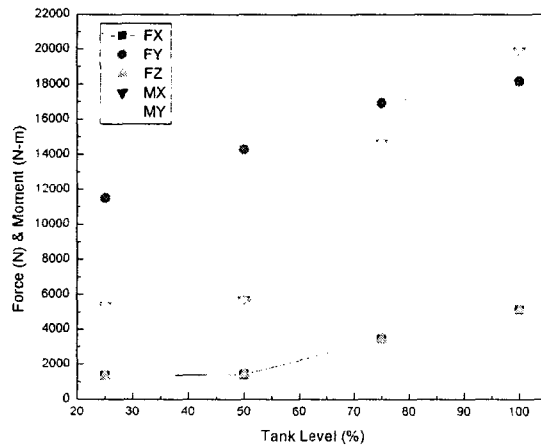


Fig. 4. Restraint Forces of Anchor in SSE case

Still Well 가이드의 반력 분포를 나타낸 Fig. 5를 보면, Anchor에 작용하는 모멘트와 같이 액위 50% 이상에서 급격히 상승하는 경향을 보인다. 하부 가이드에 비해 상부 가이드의 응력 수준이 높은 것은 지진하중의 모드 1과 모드 2에서 상대적으로 구속이 약한 상부가이드 부근에 변형이 집중되기 때문이며, 이때 X, Z 방향에 대한 절대치 및 경향은 동일한 것으로 나타났다. 가이드 반력의 절대치는 최대 7000N으로 Anchor 지점의 반력의 1/3 수준이므로 무시될 수 있다. LTD Pipe 하부 가이드에 대한 반력은 Still Well - Guide 2 반력의 80% 수준을 나타내었다.

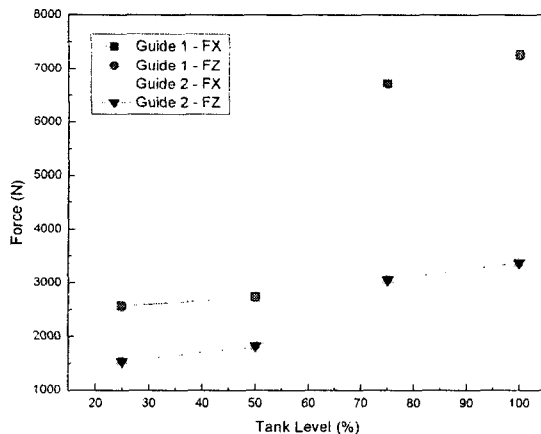


Fig. 5. Restraint Forces of Guides in SSE case

4. 결론

9% Ni LNG 저장탱크의 Still Well 및 LTD Pipe에 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. 응력 및 반력 분포를 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 하중조건에 따른 응력 분포 및 반력을 평가한 결과, 지진하중 조건에서 최대치를 보이며, OBE 조건보다는 SSE 조건이 지배하는 것으로 나타났다. 또한 액위가 증가할수록 배관에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.
- (2) 응력 분포의 분석결과, Still Well의 Anchor 지점과 LTD Pipe의 하부 가이드를 전체 배관 설계의 우선 인자로 고려하여야 하며, Still Well과 LTD Pipe의 연결부위에 대한 현 설계는 전체 배관에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.
- (3) 액위의 변화가 반력의 절대치에 영향을 주는 중요 인자이며, 이 액위는 지진하중 적용시 배관에 부가되는 자중에 영향을 미치고, 결국 지진하중에 의한 배관의 변형이 중요한 인자인 것이 해석 결과로 나타났다.
- (4) 수직방향의 자중 및 기타 하중을 Anchor에서 전담하도록 설계되어 있기 때문이며, 추가적으로 모멘트가 발생하여 전체 반력 수준을 높이고 있으므로 Anchor 설계를 추가하여 응력을 분산하는 것이 바람직하며, 또한 모멘트가 가장 큰 작용요소이므로 이를 감소하기 위하여 Anchor 사이의 간격을 조정하여야 한다.

참고문헌

- [1] 서홍석, 양영명, 홍성호, 김형식, 김영균 : “LNG 저장탱크용 관통 파이프의 설계 최적화 연구”, 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 A (2001)
- [2] Kobayashi, Nobuyuki : “Vibration characteristics of pump-barrel structures in large PCLNG storage tank”, Ishikawajima-Harima Engineering Review, (1995)
- [3] T. Yoshihara, Y. Mentani : “Development of Seismic Design Methods of Pump Barrels for Above-ground LNG Tanks”, 川崎重工技報, 129号, (1996)
- [4] J. H. Park : “Structural analysis of LNG pump tower”, The sixth international symposium on Practical Design of Ships and Mobile Unit, (1995)