

9% Ni강 LNG 저장탱크 내조의 시공에 따른 용접부의 불연속으로 인한 응력 집중부 구조 건전성에 대한 연구

A Study on the Structural Integrity of Stress Concentration Region Caused by Welding Discontinuity for Construction of 9 % Ni Steel of LNG Storage Tank Internal

이 영 민* · 이 영 신** · 이 성 진* · 김 영 균***

Lee, Young-Min · Lee, Young-Shin · Lee, Sung-Jin · Kim, Young-Kyun

요 약

본 논문에서는 9 % Ni강 LNG 저장탱크 조사를 통해서 유한요소해석을 수행하여 구조건전성을 평가하였으며 실용에서 활용할 수 있는 자료를 제시하였다. 과거의 LNG 저장탱크의 설계는 2차원 선에서만 유한요소해석이 수행되었으나 보다 진보된 하드웨어와 소프트웨어의 발전으로 3차원 유한요소해석이 가능케 되었다. 본 연구에서는 9 % Ni 강 LNG 저장탱크 내조의 정적 구조 해석이 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 통해 수행되었다. LNG 저장 탱크 내조 시공 시 용접부 형상을 참고하여 용접부 모델을 고려한 해석을 각각 수행하였다. 용접부의 탄성계수의 변화를 통하여 최대응력과 최대변위를 계산하였다. 실제 LNG tank의 운용 시 발생하는 하중은 자중과, 수두 압과, 온도차에 의한 열응력이며 이들이 복합적으로 작용하였을 시, 용접선을 고려하지 않은 모델에 대해서는 최대응력이 207 MPa이며, 동일 조건에서 용접선을 포함한 모델에 대해 해석을 수행한 결과로서 최대응력이 그보다 약 100 MPa 정도 상승한 결과가 나타났다. 하중조건에서 온도차에 의한 열응력을 고려함과 고려하지 않음을 비교함으로써 실제 열응력에 대해서는 내조에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

keywords : LNG Tank Internal, FEM, Static Analysis, Seismic Analysis, 9 % Ni Steel

1. 서 론

LNG Tank 설계를 살펴보면 대부분 2차원 유한요소해석을 통해 ASME 규정을 만족하는 선에서 설계를 마무리 하였으나, 내부탱크, 코너프로텍션 등에 대해서 발달된 하드웨어와 소프트웨어 기술을 도입하여 3차원으로 거동을 평가하는 것이 가능하게 되었다. 따라서 경제적인 설계를 이루는 것뿐만 아니라 해외 프로젝트 추진에 미진함이 없도록 관련 기술을 서둘러 정립할 필요가 있게 되었다. 세부적인 개발 목표와 수행체계를 통해 LNG 저장탱크 구조 건전성 평가에 활용할 만한 데이터를 확보하는 것이 목표가 되겠다. 특히 중대 재해를 방지하기 위하여 불연속에 의한 응력집중부에 대한 안전성을 확보하는 것이 극히 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 용접부의 유무에 따른 정적해석을 통하여 그 구조 건전성을 검토하였다.

* 학생회원 · 충남대학교 기계설계공학과 석사과정 solid85@cnu.ac.kr

** 정회원 · 충남대학교 기계설계공학과 교수 leeys@cnu.ac.kr

*** 한국가스공사 선임연구원 kyk@kogas.or.kr

2. 정적 구조 해석

2.1 해석 모델

그림 1은 200,000 kl 용량의 육상용 9 % 니켈강 내조로 제작한 LNG저장탱크의 모습이다. 내조는 두께를 달리하는 9 % 니켈강 10단으로 구성되어 있으며, 내압에 버티기 위해 Top stiffener를 제외한 7개의 stiffener가 존재하게 된다.

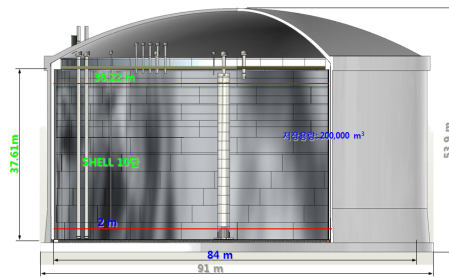
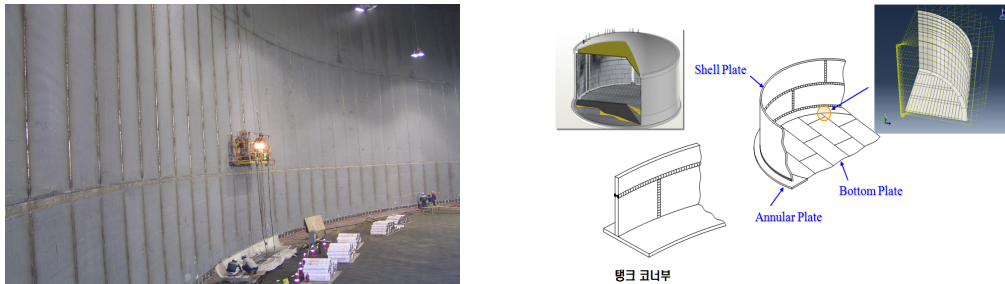


그림 1 200,000 kl LNG 저장탱크 형상정보

2.2 용접부 모델

그림 2 는 실제 현장에서 LNG 탱크 내조 시공을 보여준다. 용접부 모델을 표현하기 위하여 실제 내조공정을 참고하였으며, 용접부를 고려한 해석을 위한 모델링 절차를 보인다.



(a) LNG 저장 탱크 9 % Ni 강 내조 시공 모습

(b) 용접부를 포함한 모델링

그림 2 용접부 모델링 고찰

2.3 경계 조건

내조는 loading과 unloading 즉 LNG 저장에 따라 발생하는 -162도 환경에서의 열하중 그리고 최대액위까지 필링 filling 되었을 때 부하되는 액압이 가장 주요한 하중이다. 이러한 하중은 정적 거동으로 작용한다. 표 1에 본 해석에서 수행된 대표하중을 정리하였으며, 3가지 하중조건으로 나누어 분류하였다. 해석은 ABAQUS를 이용하였으며, 수직방향인 Y방향 단순지지 조건은 지반을 표현하였고, 밑바닥 가운데 포인트 하나를 고정함으로 X-Z방향 이동을 막았다. 4절점 쉘요소를 사용하였으며 해석에 사용된 절점수는 103,334개, 요소수는 102,761개다.

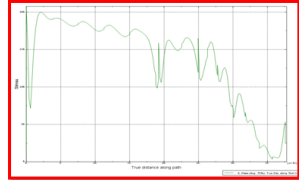
표 1 하중조건에 따른 분류

Load case		Substance	Quantity
Load-1	Self weight	standard gravity(g)	9.81m/s ²
Load-2	Hydrostatic	SG	0.48
		Height	35.8m
Load-3	Thermal Condition	Thermal	-170

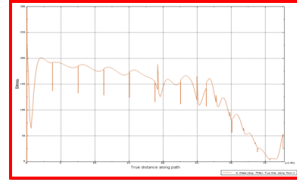
2.4 해석 결과

2.4.1 용접선 유무에 따른 응력과 변위 해석 결과

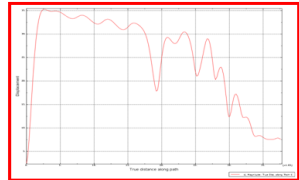
그림 4는 하중조건으로서 자중과, 수두 압을 주었을 시에 벽면에 바닥에서 수직방향으로 고찰한 응력을 보여준다. 최대응력 206 MPa이며, 최대 변위는 35 mm이다. annular plate와 wall 의 경계면에서 최대응력이 발생하였으며, 용접선이 포함된 해석에서는 최대응력 296~322 MPa이며 최대변위는 36 mm이다. 각 연결부위인 용접선에서 응력이 변화함을 알 수 있다. 또한 stiffener를 지날때 응력이 감소함을 확인하였다.



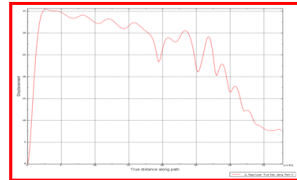
(a) 용접부를 고려하지 않은 모델의 응력 결과



(b) 용접부를 고려한 모델의 응력 결과



(c) 용접부를 고려하지 않은 모델의 변위 결과



(d) 용접부를 고려한 모델의 변위 결과

그림 4 용접선 유무에 따른 내조의 응력 및 변위 고찰

2.4.2 용접선 탄성 계수 변화에 따른 해석 결과

표 2에 용접선을 포함한 모델에서 동일 하중조건과 경계조건을 주고 탄성계수의 변화를 주었을시에 최대변위값을 정리하였다. 용접부의 탄성계수가 커질수록 최대응력은 커지는 경향을 보였으며, 최대변위는 큰 차이를 보이지 않았다.

표 2 용접부의 탄성계수 변화에 따른 LNG 저장탱크 내조의 최대하중과 변위 해석 결과

탄성계수(GPa)	최대응력(MPa)	최대변위(mm)
150	296	36
210	301	
250	308	
300	322	

2.4.3 하중조건에 따른 정적 구조 해석 결과

표 3에는 용접선을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 동일모델에서 동일 경계조건을 주고 하중조건을 달리 적용했을때 해석결과를 정리하였다. 하중조건에 따른 최대응력의 차이는 크지 않음을 확인하였다. 실제 LNG tank의 운용시 발생하는 하중은 자중과, 수두압과, 온도차에 의한 열응력이며 이들이 복합적으로 작용하였을시, 용접선을 고려하지 않은 모델에 대해서는 최대응력이 207 MPa이며, 동일 조건에서 용접선을 포함한 모델에 대해 해석을 수행한 결과로서 최대응력이 그보다 약 100 MPa 정도 상승한 결과가 나타났다. 하중조건에서 온도차에 의한 열응력을 고려함과 고려하지 않음을 비교함으로써 실제 열응력이 내조에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

표 3 다양한 복합 하중 조건에 따른 LNG 저장탱크 내조의 최대 응력 해석 결과

하중조건	완전 결합 조건	용접 조건
Load 1+ Load 2	206 MPa	301 MPa
Load 1+ Load 2 + Load 3	207 MPa	303 MPa

3. 구조 건전성 평가

정적구조해석을 통한 구조 건전성 평가를 위하여 20 mm 폭의 용접부를 모델링하여 모재와 용접재의 물성치를 동일하게 하여 해석을 수행하였다.

즉 완전 접합으로 가정한 해석에서 최대응력은 206 MPa로서 annular plate와 wall 의 경계면에서 발생하였으며, 최대변위는 35 mm로서 annular plate와 wall 의 경계면 위쪽으로 약 5m 지점에서 최대변위가 발생하였다. 이는 모두 실제 200,000 kl LNG tank에서 사용중인 소재의 허용응력 내의 값으로 안전함을 입증하였다.

또한 용접부가 있는 모델에 대하여 용접재의 물성치에 150 GPa, 250 GPa, 300 GPa 등 탄성계수를 변화하여 해석하였다. 그 때 최대응력은 296~322 MPa로서 역시 annular plate와 wall 의 경계면 용접부에서 최대응력이 발생하였고, 최대 변위는 36 mm 로서 큰 변화를 보이지 않았으나, 벽면에 바닥에서 수직방향으로 고찰한 변위분포를 살펴보면, 용접선을 고려함으로써 층간 변위차가 적음을 보였다.

실제 LNG tank의 운용시 발생하는 하중은 자중과, 수두압과, 온도차에 의한 열응력이며 이들이 복합적으로 작용하였을시, 용접선을 고려하지 않은 모델에 대해서는 최대응력이 207 MPa이며, 동일 조건에서 용접선을 포함한 모델에 대해 해석을 수행한 결과로서 최대응력이 그보다 약 100 MPa 정도 상승한 결과가 나타났다. 하중조건에서 온도차에 의한 열응력을 고려함과 고려하지 않음을 비교함으로써 실제 열응력에 대해서는 내조에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

4. 결 론

현재 LNG 저장탱크 설계시 필요되어지는 9 %Ni강의 경우 세계적인 제강기술 수준으로 보아 기본적인 9 % Ni강에 대한 검증보다는 대형용접구조물 제작에 따른 용접 결함부호로 인한 불연속부 그리고 용접 열영향으로 인한 불균질부가 발생하며 이에 대한 집중적인 평가가 필요하다는 것을 파악하였다.

따라서 이러한 불연속부 존재에 의한 응력집중 발생에 따른 9 % Ni강 부재에 부하되는 응력과 변형률 분포에 대한 해석적으로 평가하여 LNG저장탱크 내조의 구조 건전성을 평가 하였다.

본 연구에서는 특히 저온이라는 특수성을 고려하여, 중대 재해를 방지하기 위하여 불연속에 의한 응력집중부에 대한 안전성을 확보하여야 한다는 점에 초점을 두어 연구를 진행하였으며 9 %Ni강 LNG 저장탱크 응력집중부에 대한 이론 및 실험적 해석을 통한 구조건전성을 확립하였다. 얻어진 연구 결과를 다음과 같이 요약하였다.

- 1) 20 mm 폭의 용접부를 모델링하여 모재와 용접재의 물성치를 동일하게 하여 해석을 수행하였고 용접부가 있는 모델에 대해서는 용접재의 물성치에 탄성계수를 변화해가며 해석한결과 허용응력범위내의 응력이 발생함을 알 수 있었다.
- 2) 완전접합으로 가정한 해석에서는 206 MPa의 최대 응력을 확인하여 안전하다고 판단하였으며, 용접부를 고려한 경우 용접부의 강성 증가에 따라 바닥면과 벽면이 접하는 부분에서 최대 응력이 발생함을 확인하였다.
- 3) OBE 기준 내진 해석 결과 최대 응력은 88~128 MPa 수준으로 그 구조 건전성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2010년 한국 가스공사의 연구비 지원으로 수행한 과제이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 김형식 (2002) LNG 저장탱크의 9 % Ni강 용접부 설계 및 용접기술 현황, **대한용접학회지**, 20(5), pp.605~611.
장웅섭 (2000) 국산 극저온용 Ni강 용접재료 특성 평가, **RIST 연구논문**, 14(2), pp155~163