KIGAS Vol. 18, No. 2, pp 69~72, 2014
(Journal of the Korean Institute of Gas)
http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2014.18.2.69

너클 형상에 따른 LNG 저장탱크 코너프로텍션 피로수명 예측

이승림* · 이경민* · †김한상
*한국가스안전공사 가스안전연구원, 가천대학교 기계 · 자동차공학과
(2014년 3월 23일 접수, 2014년 4월 28일 수정, 2014년 4월 28일 채택)

Prediction of Fatigue Life for a 270,000 kl LNG Storage Tank According to Shape of Corner-protection Knuckle

Seung Rim Lee* · Kyong Min Lee* · †Han Sang Kim
**Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation*
Department of Mechanical and Automotive Engineering, Gachon University
(Received March 23, 2014; Revised April 28, 2014; Accepted April 28, 2014)

요 약

LNG 저장탱크의 9% Ni강 내부탱크가 파손되면 LNG가 유출되어 콘크리트 외부탱크가 LNG를 저장하게 되는데 이때 외부탱크의 내면과 외면의 온도차에 의해서 외부탱크 원통형 하단부에 큰 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 온도차에 의해 발생되는 인장응력을 감소시키기 위해 단열재와 9% Ni 강재로 이루어진 코너프로텍션이 2차 방벽으로 설치된다. 본 눈문에서는 유한요소법을 이용하여 코너프로텍션의 직사각형 너클형상과 원형 너클형상에 따른 구조해석을 실시하여 Von-Mises 응력과 용접부의 피로수명을 예측하였다. 구조해석 결과 안전계수는 원형 너클이 직사각형 너클보다 23% 크게 나타났고, 피로수명은 원형 너클이 직각 너클보다 21% 크게 나타났다. 동 결과를 이용해서 향후 코너프로텍션의 수명평가 및 최적설계 등에 활용이 가능할 것이다.

Abstract - If LNG is leaked from 9% Ni steel inner tank by damage, LNG is retained by outer concrete tank. Then large tensile stress can be caused at cylindrical bottom of outer tank by temperature difference between outer and inner surface of outer tank. Therefore, in order to reduce the tensile stress is caused by temperature difference, corner-protection is installed with insulation and 9% Ni steel as a second barrier. In this paper, using finite element method, structural analysis was performed for rectangular and circular shape of knuckle and based on the results, fatigue life of welds of corner protection was predicted. As a consequence of structural analysis, safety factor of circular knuckle shows 33% bigger than rectangular one shows, and circular knuckle has 25% bigger fatigue life time than rectangle has. These results can be applied to life time assessment and design optimization in the future.

Key words : corner-protection, knuckle, fatigue life, LNG storage tank

†Corresponding author:hskim70@gachon.ac.kr
Copyright ⓒ 2014 by The Korean Institute of Gas

Ⅰ. 서 론

한국에서 주로 운영하고 있는 9% 니켈강형 내조를 가지는 LNG저장탱크는 완전방호식 LNG저장탱크(Full containment type LNG storage tank)로서 내부탱크(inner tank)와 외부탱크(outer tank)가 각각 독립적으로 LNG를 저장할 수 있는 기능을 갖는 이중구조의 탱크를 말한다[1,2].

정상운전(normal operation) 시에 초저온의 LNG를 직접 접촉, 저장하는 내부탱크의 재료로는 초저온 성능이 우수한 9% 니켈강이 사용된다. 그리고 외부탱크는 프리스트레이트 콘크리트 구조물로서 내부탱크의 파손 시에 2차적으로 LNG를 저장할 수 있도록 설계되어있다[3].

그러므로 콘크리트 외부탱크는 LNG 유출에 의한 열하중을 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 내부탱크의 파손에 의해 유출된 LNG는 원통형 콘크리트 외부탱크의 내부 코너에 고이게 되므로 콘크리트와 LNG가 직접 접촉하게 된다. 이때 LNG와 직접 접촉되어 있는 내부콘크리트 표면과 상온의 대기와 접해있는 외부 콘크리트 표면 간에 급격한 온도구배로 인해 콘크리트 코너에 원주방향으로 큰 인장응력이 발생하게 된다[4].

코너프로텍션은 LNG 저장탱크의 핵심 안전설비이며 LNG 저장탱크의 장기간 운전을 위해서 효율적인 수명평가가 요구된다.

따라서 본 연구는 27만 kl급 LNG 저장탱크 코너프로텍션의 직사각형 너클과 원형 너클 형상에 대해서 ABAQUS 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 온도 차에 의해 발생되는 열 해석과 구조해석을 실시하였고 그 결과를 바탕으로 FEMFAT 피로해석 프로그램을 이용하여 코너프로텍션 용접부의 피로수명을 예측하였다.

Ⅱ. 해석모델 및 해석절차

2.1. 해석모델

본 연구에서는 27만 kl LNG 저장탱크의 외부탱크, 내부탱크, 코너프로텍션 및 단열재를 모델링하여 해석을 수행하였다[5].

내부탱크와 코너프로텍션은 9% 니켈강, 외부탱크는 콘크리트로 구성되어 진다. 코너프로텍션을 포함한 해석모델의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 해석을 위한 유한요소모델은 Fig. 2와 같다. 해석시간을 단축하기 위해 대칭조건으로 원통형의 탱크의 1/36 모델을 이용하였다.

직각 너클 코너프로텍션은 Abaqus의 shell element DS4 type을 사용하여 global size 0.2로 지정하였고, 펄라이트(perlite) 단열재의 경우 solid element C3D8R type을 사용하여 global size 0.5로 지정하여 모델링하였다.

2.2. 경계 조건

해석모델의 경계조건으로 외부탱크의 바닥면의 Z방향 병진 자유도를 구속시켰고, 외부탱크와 코너프로텍션 사이 및 내부탱크와 코너프로텍션 사이 온도차에 따른 수축에 의한 변위가 코너프로텍션에 가해질 수 있도록 접촉조건 및 구속 조건을 적용하였다. contact type은 surface-to-surface로 주었으며 shell의 두께를 고려하였다. 실제 모델링의 경계 조건으로는 Fig. 3과 같다.

2.3. 하중 조건

내부탱크에 가해지는 하중 조건으로는 LNG저장

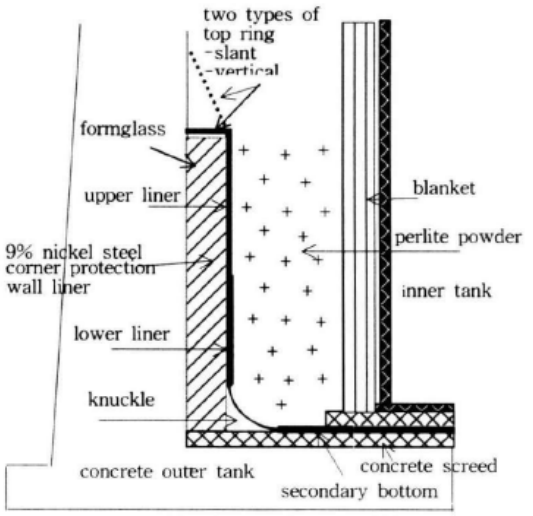

Fig. 1. Corner Protection Arrangement.

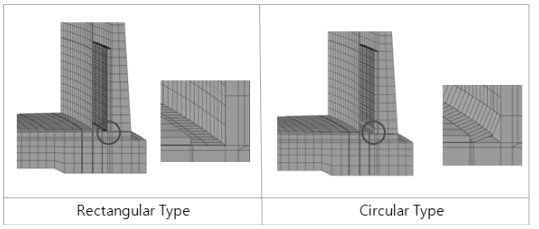

Fig. 2. Finite Element Model.

탱크 운전에 따른 최고, 최저 액위에 대한 유체정압과 자중을 고려하여 설정하였다. 그 밖에 코너프로텍션과 내부탱크 벽면에 작용하는 가스압력과 펄라이트 단열재의 압력을 Fig. 4와 같이 설정하였다.

2.4. 해석 절차

코너프로텍션의 피로해석 절차는 다음과 같다. ABAQUS 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 코너프로텍션을 포함하는 구조물을 모델링한다. 액화 LNG 접촉부 내부탱크의 온도 -170℃, 바닥가열기 온도 조건 5℃, 외부 대기 접촉부 외부탱크의 온도 37℃를 온도 조건으로 부여하고 열 해석을 수행한다.

LNG 탱크 운전 거동에 따른 최고 46.2m, 최저 1.6m 액위에 대한 구조해석을 수행한다. 이때 앞서 수행한 열 해석을 Predefined Fields로 설정하여 온도차에 의한 열 하중을 조건으로 준다.

그리고 FEMFAT 피로해석 프로그램을 이용하여 용접부위를 정의하고 구조해석 결과를 바탕으로 용접부위에 대한 피로해석을 수행한다.

구조해석결과와 코너프로텍션을 구성하는 9% 니켈강의 S-N 선도를 이용하여 피로수명을 평가한다.

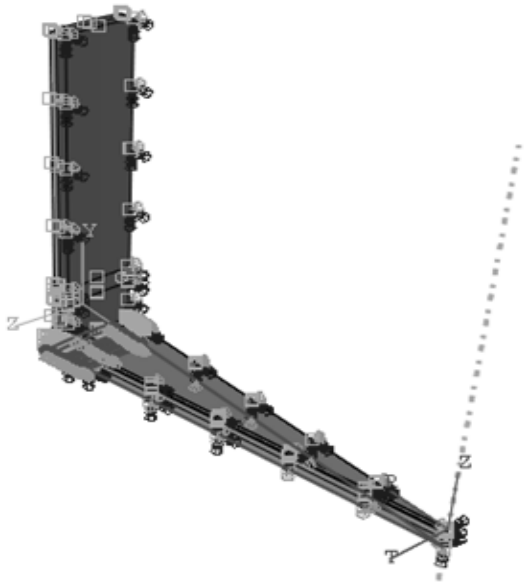

Fig. 3. Boundary Condition.

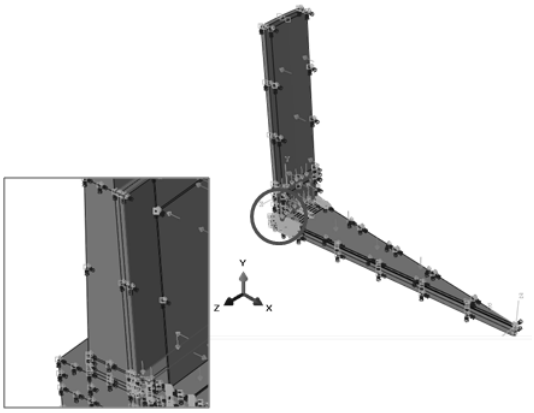

Fig. 4. Load Condition.

Ⅲ. 해석결과

3.1. 구조해석 결과

구조해석 결과 Fig. 5와 같이 나타났다. 용접부위에서 직사각형 너클 형상의 최대 액위의 경우 최대 Von-Mises응력이 314.4 MPa로 나타났고, 원형 너클 형상의 경우 241.4 MPa로 나타났다. 9%니켈강의 항

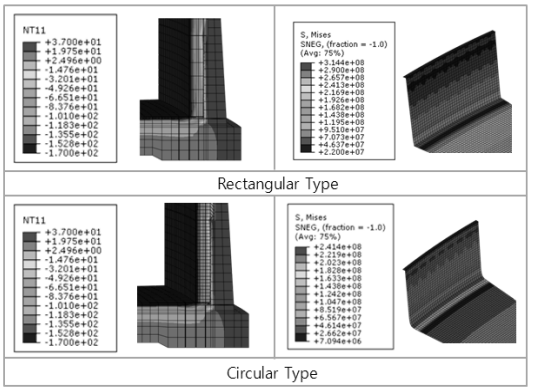

Fig. 5. Heat Transfer(Left), Structural Analysis(right)

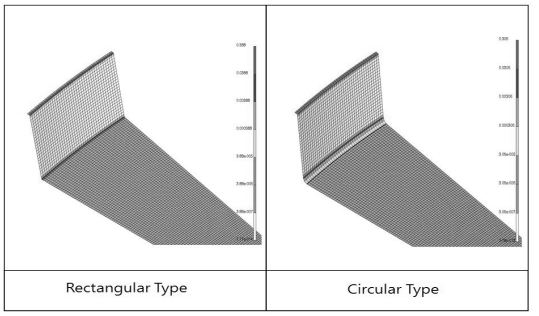

Fig. 6. Fatigue Analysis Results

복응력이 517 MPa인 것을 고려하면 직사각형 너클 형상의 최대 액위 코너프로텍션의 안전계수는 1.6, 원형 너클 형상의 최대액위 코너프로텍션의 안전 계수는 2.1로 나타났다.

3.2. 피로해석 결과

Fig. 6 와 같이 직사각형 너클 형상과 원형 너클 형상의 코너프로텍션을 special weld finishing(계수 0.89) 의 조건을 주어 피로해석을 수행한 결과, 최대 Damage는 각각 3.876e-01, 3.059e-01 로 나타났다. Welding finish는 용접 품질을 나타내는 계수이며 값이 작을수록 용접품질이 우수함을 의미한다.

피로파괴는 피로하중에 의한 일이 재료가 흡수할 수 있는 일의 총량에 도달했을 때 일어나며, 피로손상은 최대응력이 피로한도 응력보다 큰 경우만 일어난다는 마이너의 손상법칙(Miner's Rule)과 피로해석을 통해 구한 Damage 값을 이용하여 피로수명을 예측하였다. 마이너 식은 D=n/N이 며 여기서 D는 Damage, n은 가정수명, N은 실제수명을 의미한다. 가정수명 n을 10,000 cycle로 가정하고 피로해석을 통해 구한 Damage 값을 이용하여 실제수명을 예측해보면 직사각형 너클 형상의 경우 25,799 cycle이며 원형 너클 형상의 경우 32,690 cycle이다. 한 달에 탱크에 LNG의 송출과 유입이 4회 일어난다고 가정하면, 직사각형 너클 형상의 코너프로텍션 피로수명은 537년이며 원형 너클 형상의 코너프로텍션 피로수명은 681년 이다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 구조해석을 통해 27 만 kl LNG저장탱크 코너프로텍션의 너클 형상에 따른 최대 Von-Mises 응력을 확인하였으며 구조해석 결과를 바탕으로 피로수명을 예측하였다.

안전계수는 원형 너클형상이 직사각형 너클 형상보다 23% 크게 나타났으며, 피로수명은 원형 너클 형상이 직각 너클 형상보다 21% 크게 나타났다. 이 결과는 향후 완전방호식 LNG 저장탱크 코너프로텍션 수명평가 및 최적설계 등에 활용 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 LNG플랜트 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] BS EN 14620-1~5(Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0℃ and -165℃), CEN, (2006)

[2] Seung Rim Lee, Han Sang Kim, 2012, " The comparative risk assessment of LNG tank designs using FTA", KIGAS, Vol .16, No. 6, pp. 48-53

[3] Yoon Insu, Lee Yongwon, Hong seongho and Lee Yongwon, 1994, "Finite Element Analysis of Membrane for Liquified Natural Gas,"Trans. of the KSME, Vol .18, No. 10, pp. 2797-2804

[4] Kim, H.S., Hong, S.H., Seo, H.S., 2002, "Integrity comparison for various design specifications of corner protections in LNG storage tank", KIGAS, Vol.6, No 4.

[5] Kim, H.S., Hong, S.H., Seo, H.S., 2002, "A Study on the optimum design of corner protection for LNG storage tank." Trans. of the KSME, No. 11, pp. 51-57