

# LNG 탱크 수위 넘침 방지 시스템의 구조 안전성을 검증하기 위한 수치 해석에 관한 연구

류영춘<sup>1</sup>, 박영철<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>동아대학교 기계공학과

## Study on Numerical Analysis for Structural Safety Verification of Overflow Preventer System for LNG Tank

Young-Chun Ryu<sup>1</sup> and Young-Chul Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate school, Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

**요약** 본 논문은 LNG 저장 탱크의 수위 넘침을 방지하기 위한 레벨 미터 개발에 관한 연구이다. LNG 저장 탱크는 주위 환경이 초저온 상태이므로 이에 대한 환경 및 구조적 조건을 충분히 고려한 상태에서 관련 기자재에 대한 개발이 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 수치 해석적으로 초저온 환경에서 안정적으로 구동되는 플로터의 설계 조건을 우선 선정하였다. 이를 바탕으로 LNG 저장 탱크 내에서 수위 넘침 방지 시스템의 구조 안정성을 평가하였다.

**Abstract** This paper proposed the design technology for the level meter of the overflow preventer system of LNG storage tank. The parts of LNG ship should be developed under considering the cryogenic environment. Therefore, we proposed the structure of level meter to prevent overflow of LNG tank using the numerical analysis method. The proposed level meter for the overflow preventer is manufactured and the performance is verified through international authorized inspection agency.

**Key Words** : Cryogenic, LNG, Level meter, Measurement

### 1. 서론

우리나라는 세계 조선시장의 1~2위를 다투는 조선강국이지만, 고부가가치 LNG 선박의 주요 기자재는 대부분 유럽 및 일본등 조선 분야 선진국에서 그 기술을 선점하고 있다. 국내 조선기자재 관련업체도 국산화를 위해 제품개발에 나서고 있으나, 기술수준이나 제품의 신뢰도가 낮아 경쟁력을 갖추지 못하고 있다. 이러한 이유로 국내 조선 및 해양 플랜트 산업 분야에서 외국 기자재에 대한 의존도가 높은 실정이다. 특히, 본 연구에서 고려하고 있는 LNG 저장 탱크의 수위 넘침 방지 정보 시스템의 경

우 전망 수입에 의존하고 있으며 이에 대한 관련 연구는 전무한 상태이다. 그러나 자동차 및 상온의 액체 상태의 수위를 측정하는 시스템에 대해서는 관련 센서 및 구조에 대한 연구가 일부 이루어지고 있다. 그 예로써 대형 선박의 액체 탱크용 수위 모니터링 시스템에 관해서는 U자형 금속 캔틸레버에 FBG(Fiber Bragg Grating)를 부착하여 수위를 측정하는 시스템에 대한 연구[1], 유량의 흐름에 따라 톱니바퀴가 회전하여 탱크 내부로 흡입된 유량을 측정하는 구조에 대한 연구가 있으며[2]. 자동차에 사용되는 변속기 오일 수위 측정에 관해서는 초음파 센서를 이용한 방법에 관한 연구[3]가 이루어진바 있으

본 연구는 산업통상자원부 지정 지역혁신센터사업(RIC) 고기능성밸브기술지원센터 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Young-Chul Park(Dong-A Univ.)

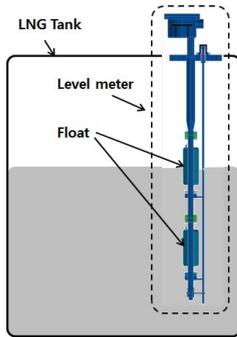
Tel: +82-51-200-7652 email: parkyc67@dau.ac.kr

Received October 10, 2013

Revised (1st January 9, 2014, 2nd March 6, 2014)

Accepted April 10, 2014

며, 초저온 액체질소 저장 탱크 관련하여 지지대 용접부 설계에 대한 연구[4]가 이루어졌다. 또한, 선박의 각종 탱크의 수위를 실시간 모니터링 하는 시스템에 대한 연구는 일부 이루어지고 있다[5]. 그러나 본 논문에서 고려하는 초저온 환경에 대한 수위 넘침 방지 시스템에 대해서는 현재 관련 연구가 국내에서는 이루어지고 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 초저온 수위 넘침 경보 시스템의 구조에 대해서 안정성평가를 실시하였다.



[Fig. 1] Schematic diagram of level meter system

## 2. 초저온 수위 넘침 방지 시스템

### 2.1 초저온 플로터의 구조해석

LNG를 하역할 때 LNG가 저장 탱크의 일정 수위 이상으로 주입될 경우 이를 알려 주는 알람이 작동하여야 한다. 이러한 넘침 상태를 경보하기 위해서 액화된 LNG가 탱크의 일정 부분이상 차올랐을 때, 상승운동을 하는 플로터(float)를 이용하여 레벨 미터를 설계해야 된다. 그러나 LNG 저장 탱크의 환경은 초저온 상태임으로 이를 고려하여 레벨 미터를 설계하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 초저온 환경에서 플로터의 구조 안정성을 확보하고자 티타늄 소재를 이용하여 제작하도록 제안하였다. 또한 플로터는 초저온 액화 상태의 유체와 접촉되기 때문에,  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  초저온에서도 플로터 내부 기체의 상변화가 일어나지 않도록 비활성기체인 헬륨(액화온도  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ )을 주입해서 플로터 내부의 상변화로 인한 응력변화가 발생하지 않도록 제안하였다. 액화 LNG의 실제온도는  $-167\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이지만, 이보다 더 낮은 온도를 가지는 액화 질소가 탱크 내부에 있다고 가정하였다. 본 연구에서 제안한 플로터의 구조는 Fig. 2와 같고, Table.1과 Fig. 3에서는 플로터의 유한요소모델을 대한 정보를 나타내었다.

공기와 헬륨으로 충전된 플로터가 각기 다른 압력의 영향을 받을 때의 구조 안정성을 평가하기 위해서 사용 해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 구조 해석을 실시하였다.

[Table 1] Information about the number of mesh

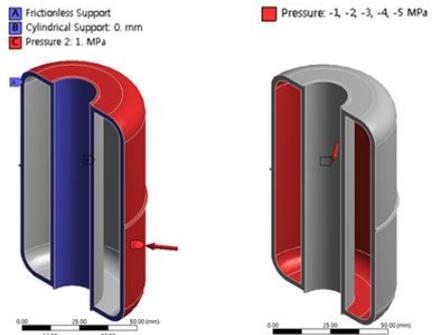
Node	Element
261,012	51,681



[Fig. 2] Structure of float



[Fig. 3] Finite element model



[Fig. 4] Boundary condition of float

구조해석을 위한 구속조건 및 경계조건은 다음과 같다.

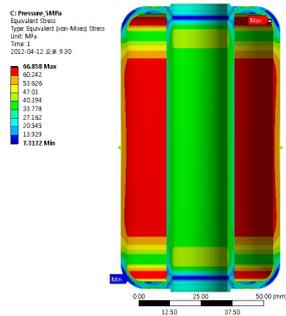
- (1) LNG 탱크 외부에는 1 MPa의 압력이 작용한다.
- (2) 충전된 공기의 상변화로 인해서 체적감소를 고려하고, 그로인한 플로터의 변형 및 응력을 모사하기 위해 1 MPa ~ 5 MPa의 상변화 대한 내압이 작용한다고 가정하였다.
- (3) 플로터의 형상은 원통형이며, 해석 시간의 단축을 위해서 절반만 모델링하여 해석을 수행하였다.
- (4) 플로터를 지지하는 축에 대한 구속조건은 원통형 강성(Cylindrical Rigid Body)조건을 사용하여 실제와 유사하도록 선정하였다.

상기의 조건을 고려한 플로터의 구속 및 경계조건은 Fig. 4와 같다. 구조해석 결과는 Table 2에 나타내었다.

[Table 2] Float simulation result

Inner pressure [MPa]	Max. stress [MPa]	Max. strain [mm/mm]	Safety factor
1	21.7	0.00011	11.5
2	32.6	0.00016	7.7
3	44.4	0.00022	5.6
4	55.6	0.00027	4.5
5	66.9	0.00033	3.7

Fig. 5은 내압 조건 5 MPa일 때 최대응력에 대한 해석 결과 그래프이다.



[Fig. 5] Simulation result at 5 MPa inter-pressure

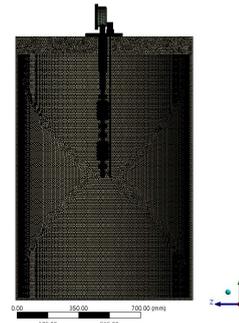
플로터 내부의 상변화를 고려하여, 플로터 구조의 안전성을 수치해석을 통해서 검토한 결과, 상변화로 인하여 축 방향으로 작용하는 압력인 5 MPa에서 가장 큰 응력이 발생하였고, 이때의 최소 안전율은 3.74로 구조적으

로 안전함을 검증하였다.

초저온 액화 질소가 플로터 외부에 맞닿아 발생하는 내부 공기의 상변화로 인한 내압이 작용하지만, 플로터의 구조설계상 안전하다고 판단 할 수 있었다. 또한 공기를 완전히 제거시켜 헬륨을 주입할 수 있는 기술의 개발이 필요하다고 판단된다.

## 2.2 플로터 시스템의 구조안정성 평가

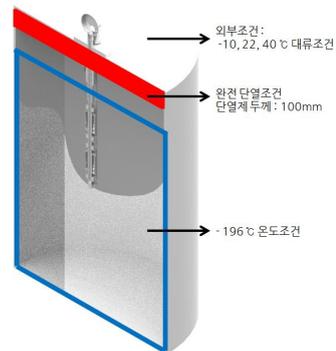
Fig. 1과 같이 제안한 초저온 수위 넘침 방지 경보시스템은 LNG선박이 이동하는 경로에 따라 열대, 온대 그리고 한대 지역으로 분류하여 이때의 내·외부 온도차로 인한 열응력을 고려하고, ANSYS Workbench를 이용하여 열-구조 연성해석을 수행하고, 제안된 시스템의 안정성을 검증하였다. 수치해석을 위한 구속조건 및 경계조건은 다음과 같고, Fig. 7에 나타내었다.



[Fig. 6] Finite element model

[Table 3] Information about the number of mesh

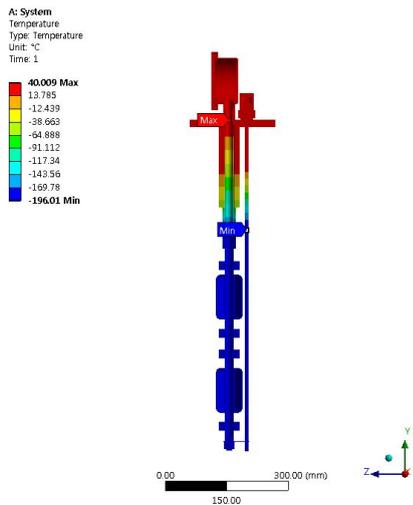
Node	Element
2,937,466	1,200,643



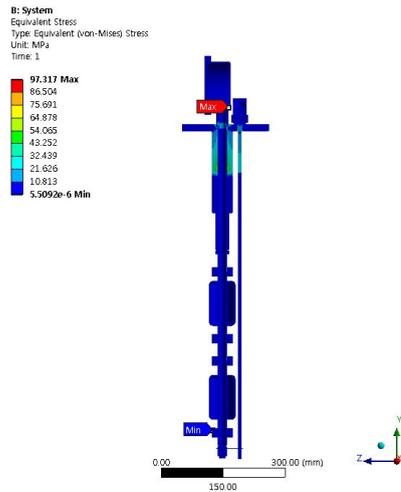
[Fig. 7] Boundary condition of system

- (1) 초저온 수위 넘침 방지 경보시스템이 설치된 탱크 내부에는 -196 ℃의 초저온 액화 질소가 탱크 높이의 2/3 지점까지 채워져 있다.
- (2) 가상의 탱크 크기는 액화 질소의 경계조건을 적용하기 위해 실제 액화 질소가 채워지는 높이에 맞춰 초저온 수위 넘침 방지 경보시스템과 일정거리를 유지하도록 설치하였다.
- (3) 가상의 탱크 상단에 100 mm의 단열재를 적용하여, 열전도율이 0 W라 가정하였다.
- (4) 또한 초저온 수위 넘침 방지 경보시스템에는 부분적으로 단열재가 설치되어 있고 단열에 대한 조건을 고려하여 경계조건을 설정하였다.
- (5) 시스템 바깥부분은 외기와 맞닿으므로 -10℃, 22℃, 40℃의 자연대류 조건을 적용하였다.
- (6) 초저온 수위 넘침 방지 경보시스템과 체결된 탱크에 한하여 접촉조건을 설정하였다.
- (7) 탱크 바닥부에 Y 방향으로의 구속만을 주어 X와 Z의 방향으로는 변위가 자유롭도록 구속을 주었다.

열 해석 결과로써, 시스템 온도 분포를 구조 해석에서의 열응력으로 적용시켜 구조 해석을 진행하였고, 그 결과로 외부 온도가 40 ℃일 때, 가장 크게 발생하였다. 그에 따른 해석결과를 Fig. 7-9에 나타내었다.



[Fig. 7] Temperature distribution(40℃)



[Fig. 8] Equivalent stress distribution(40℃)



[Fig. 9] Equivalent stress distribution(40℃)

각 기후대별 온도 분포의 결과를 구조해석의 열응력 데이터로 이용하여 레벨 미터의 구조 해석을 수행한 결과를 각 최대응력과 변형을 그리고 안전율로 Table 4에 나타내었다.

[Table 4] Simulation results

Climate[℃]	Max. stress [MPa]	Max.strain [mm/mm]	Safety factor
subarctic region(-10℃)	73.5	0.00037	2.8
temperate region(22℃)	85.8	0.00043	2.4
tropical region (40℃)	97.3	0.00049	2.1

해석 결과 온도차이가 가장 많이 발생하는 열대지역(40℃)의 조건에서 최대응력과 안전율을 확인할 수 있었다. 플로터부에서 발생한 최대 응력은 97.3 MPa이고, 안전율은 2.1로 전체 시스템은 구조적으로 안정하다고 평가되었다.

초저온 액화 질소가 탱크(Tank)의 2/3 지점까지 차올라서 발생할 수 있는 열응력은 플로터 시스템의 구조설계상 안전함을 판단할 수 있었다.

다음 Fig. 10은 초저온 액화 넘침 방지 경보시스템의 초기 제작품을 나타내었다.



[Fig. 11] Prototype of level meter

### 3. 결론

본 논문에서는 LNG선박에 필수적으로 사용되는 초저온 수위 넘침 방지 시스템의 레벨 미터를 제안하였다. 결론은 다음과 같다.

- (1) 초저온 상태에서 플로터 내부의 상변화에 따른 응력변화를 방지하기 위해 플로터 내부에 헬륨가스와 공기를 주입한 케이스에 대하여 구조해석을 실시하였다.
- (2) 주입된 공기의 상변화로 인해 발생할 수 있는 내압을 1~5 MPa까지 적용시켜 구조해석을 실시하였고, 구조안정성을 검증하였다.
- (3) 플로터 시스템이 설치되어 있는 탱크의 내부에는 -196℃의 액화 질소가 채워져 있고, 외부에는 각 기후대별(-10, 22, 40℃)로 온도 차등조건을 설정하여 열 해석을 수행하였다.
- (4) 열 해석에서 산출되어진 온도를 구조해석에서의 열응력에 데이터로 활용하여 구조해석을 진행하였으며 이를 바탕으로 시스템의 구조안정성을 검증하였다.

본 논문에서 제안한 수위 넘침 방지 시스템은 산학협력을 통해 수행되었으며 제안된 구조의 시스템은 제작되었다.

### References

- [1] S. Y. Choi, K. J. Han, and B. H. Kim, "Comparison of Different Multiple Linear Regression Models for Real-time Flood Stage Forecasting", Journal of the Korean Society of Civil Engineering, Vol. 32, No. 1B, pp. 9-20, 2012.
- [2] K. R. Sohn, J. W. Kim, S. J. Cho and J. H. Shim, "A Study on the Tank Liquid-Level Monitoring Sensor Systems for Large Scaled Vessels", Journal of the Korea Society of Marine Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 330-335, 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2009.33.2.330>
- [3] J. Y. Cho and M. H. Kang, "Design of a Ultrasonic Oil Level Meter Using a FPGA", Journal of Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 49, No. 11, pp. 167-174, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5573/ieek.2012.49.11.167>
- [4] D. J. Choi, J. T. Oh, J. R. Cho, J. H. Jung, "Weldment Design of Supports for Cryogenic Storage Tank considering Insulation", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 131-136, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2008.32.1.131>
- [5] W. J. Choi, H. B. Cho and M. J. Kim, "Development of Flowmeter for Precise Flowrate Measurements", Conference on the Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1750-1751, 2010.

류 영 춘(Young-Chun Ryu)

[정회원]



- 2011년 2월 : 동아대학교 기계공학과 대학원 (석사)
- 2007년 8월 ~ 현재 : (주)선일계전 기술연구소 이사

<관심분야>  
제어계측

**박 영 철**(Young-Chul Park)

[정회원]



- 1982년 2월 : 부산대학교 금속공학과 대학원 (석사)
- 2002년 2월 : 일본 동북대학교 기계공학과 대학원 (박사)
- 2009년 3월 ~ 2013년 7월 : 동아대학교 산학협력단 단장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

금속재료, 구조설계