

LNG 선박 펌프배럴 및 유도배관의 구조 안전성 해석

윤상국*

*한국해양대학교 기계정보공학부 교수

Structural Safety Analysis of the Pump Barrels and Lead Pipe of LNG Carrier

S. K. Yun*

*Division of Mechanical Information Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 본 논문은 현재 운용되고 있는 LNG운반선 탱크내부의 펌프배럴과 유도배관 설계의 안전성을 평가하기 위하여 구조해석을 수행하였다. LNG를 선적하고 하역하는 시스템은 통상 3개의 펌프배럴과 하나의 유도배관으로 구성된다. 펌프는 탱크의 바닥에 위치하며 LNG는 탱크 측벽과 상부천정에 지지되어 있는 펌프배럴을 통하여 하역하게 된다. 유도배관은 펌프배럴의 중간에 위치하며 3개의 펌프배럴에 의하여 지지되고 있다. 이 펌프배럴과 유도배관에 걸리는 내압, 자체 하중 및 초저온 온도에서 발생하는 응력과 변형을 Ansys를 사용하여 해석하였다. 해석결과 상기 3가지 인자에 의한 응력과 변형값이 재료인 SUS304의 허용규격 이내로 안전하게 설계, 운용되고 있는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 펌프배럴, 유도배관, LNG 선박, 저장 탱크, 내압, 자체 하중, 열응력, 열변형

ABSTRACT : In this paper the structural analysis for pump barrels and lead pipe in storage tank of LNG carrier was carried out to evaluate the present structural design in the aspect of safety. The LNG unloading and loading system from tank are composed of normally three pump barrels and one lead pipe. Pumps are submerged in the bottom of storage tank and LNG is flowing up through pump barrel which is supported in the ceiling and side wall of tank. Lead pipe is located in the center of three pump barrels and supported by the support bars to three pump barrels. The stress and strain of pump barrels and lead pipe caused by the internal pressure, self weight and cryogenic temperature were analysed using Ansys 11.0. The results showed that the stress and strain by internal pressure, self weight and cryogenic temperature were obtained well below the allowable tensile strength of SUS304. As a result, it is safe enough for the present design values for pump barrel and lead pipe to be applied in the storage tank of LNG carrier.

KEY WORDS : Pump barrel, Lead pipe, LNG carrier, Storage tank, Internal pressure, Self weight, Thermal stress, Thermal strain

1. 서 론

국내 대형 조선중공업 중심을 중심으로 부가가치가 높은 LNG선박의 수주가 크게 증가하여 세계시장의 90% 이상을 우리나라가 건조하고 있다. 그러나 이러한 조선 산업의 팽창에도 불구하고 고부가 가치 선박의 원천기술인 설계기술, 기자재 국산화기술 등을 보유하고 있지 못하여 막대한 외화를 지불하고 있는 실정이다. 따라서 지속적인 관련기술 개발과 기자재의 국산화가 요구되고 있다[1].

LNG선박의 여러 기술 중 LNG화물창 내부의 펌프배럴과 유도배관의 설계는 내압, 자체 하중 및 열응력을 고려한 안전한 설계가 요구되고 있다. LNG선박의 펌프는 LNG화물탱크의 바닥에 위치하여 -162℃의 LNG액에 잠겨져 있으며 LNG의 선적과 하역의 기능을 한다. 탱크 내부의 LNG는 펌프에 의하여

파이프 형태의 펌프 배럴(Pump barrel)을 통하여 멤브레인 탱크 외부로 송출된다. LNG를 선적할 때는 펌프 배럴과 함께 지지되어 있는 유도배관(Lead pipe)을 통하여 충전하게 된다.

LNG펌프의 개수는 통상 2~3개이며 LNG가 배출되는 배럴과 유도배관이 같이 상호 용접이나 핀으로 연결되어 있다. 또한 펌프배럴과 유도배관은 탱크 상부 천정부에만 고정되거나, 상부와 측벽에 고정 지지되는 시스템으로 설계되어 있다. 펌프배럴의 통상 길이는 25~30m이며 유도배관의 길이는 23~28m로 자체 하중이 크게 작용된다. 또한 LNG선적 경우 유도배관에는 고압이 적용되며, 극저온 조건에서 사용되기 때문에 수축이 크게 발생하게 되어 일반적인 펌프와는 달리 구조적인 안전성이 확보되어야 한다.

본 연구에서는 펌프배럴과 유도배관의 고압과 극저온조건에 의하여 발생하는 열응력과 변형에 대하여 해석하고자 한

* skyun@hhu.ac.kr (051)410-4363

다. 대상 모델로는 펌프배럴 3개, 유도배관 1개 그리고 천정과 측벽에 고정되는 시스템을 채택하여, 측벽 지지시스템의 열응력과 변형 해석을 수행하였다. 이를 통하여 LNG선박의 펌프배럴과 유도배관 설계의 안전성 진단이 가능할 것이며, 향후 새로운 펌프배럴 및 유도배관 시스템 설계의 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 형상 모델링

Fig. 1은 LNG펌프배럴과 유도배관에 대한 구조를 보여준다. 펌프배럴은 3개로 직경 406.4mm, 두께 21.44mmT, 길이 25m의 배관이며, 유도배관은 609.6mm, 12.7mmT, 20m이다. Fig. 1(b)는 펌프배럴과 유도배관의 연결도이다. 3개의 펌프배럴은 각기 지지대(Supporter)에 의하여 연결 지지되어 있으며, 유도배관은 펌프배럴에 지지되어 있다. 또한, 펌프배럴들은 측벽 상하 2개 지점에 배럴당 각기 4개의 지지봉에 의하여 고정되어 있다. 이들의 각 규격은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS V11.0 Classic을 이용하여 구조해석과 열해석을 수행하였다[2].

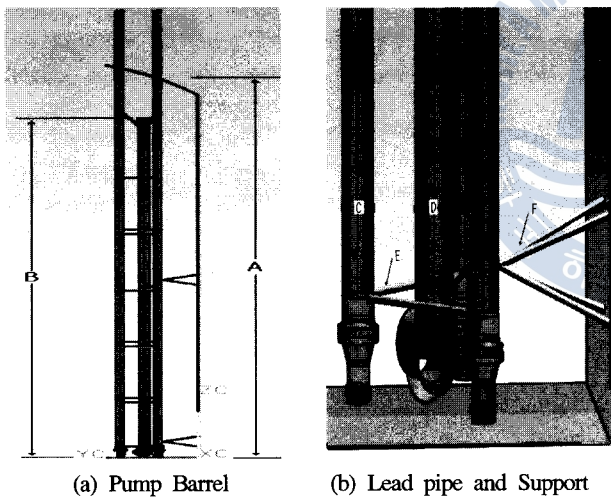


Fig. 1 Typical LNG pump barrel and pump structures

Table 1 Material properties of the support system.

Items	Dimension(mm)	Remarks
A	3,000	Pump barrel
B	2,500	Lead pipe
C	406.4	OD of pump barrel
D	609.6	OD of lead pipe
E	φ50, 6T	Lead pipe support bar
F	φ114.3, 4T	Wall support

3. 유한요소모델링 및 경계조건

극저온 LNG 펌프배럴의 자체하중, 내압 및 열변형 해석을 수행하였다. 유한요소해석을 위한 요소의 형태는 Ansys 요소 라이브러리의 Pipe16을 적용하였으며 배럴들을 지지하는 요소는 Link8 요소를 사용하였다. Pipe16 요소는 직관 형태의 응력과 변형을 해석하는 요소이며, Link8번은 각종 연결봉, 스프링, 케이블, 트러스 등의 해석에 유용하게 적용되는 요소이다. Table 2는 펌프배럴과 유도배관의 해석에 적용한 물성치이다 [3].

Table 2 Properties of materials in the support system.

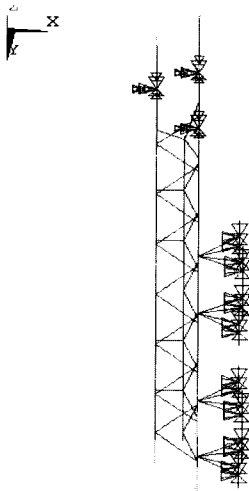
Items	SUS304
Thermal conductivity	14.9 W/m K
Coefficients of thermal expansion	1.4E-5
Allowable tensile strength	1,310kg/cm ²
Poisson's ratios	0.3
Density(kg/cm ³)	0.00785

Table 3은 각 지점의 경계조건으로 화물창 탱크의 천정부에 연결된 펌프배럴들은 지붕에 의하여 고정되며, 또한 측벽에 완전 구속된다. 펌프배럴들을 지지하는 지지봉(Support bar)들은 슬리브 형태로 펌프배럴에 연결되어, 수평방향인 x, y축 방향으로는 상호 용접에 의하여 지지되나, 상하방향인 z축 방향으로는 배럴의 수축 팽창에 무관하게 움직이도록 설계된다. LNG가 충전되는 유도배관은 3개의 펌프배럴 중앙부에 위치하고 있으며 지지봉에 의하여 펌프배럴에 연결되어 걸려있다. 유도배관의 하부 끝 LNG토출부는 부분은 T자 형으로 분지되어 있다.

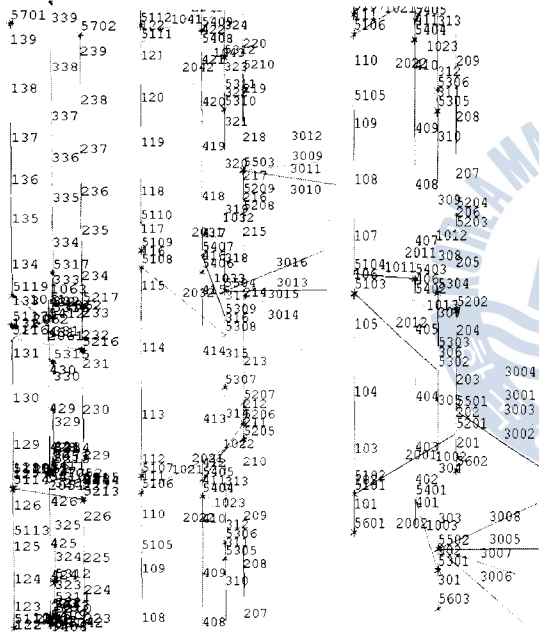
Table 3 Boundary conditions

	δx	δy	δz	Θx,Θy,Θz
Roof support	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed
Barrel/ side wall	Fixed	Fixed	Fixed	-
Barrel/ support bar	Fixed	Fixed	Free	-

Fig. 3은 해석을 위한 경계조건의 적용과 절점과 요소들의 번호를 보여준다. 응력과 변형 해석을 수행하면 각 절점으로 형성된 요소의 값이 결과로 얻어지게 된다.



(a) Modeling and boundary condition



(b) Node and element numbers

Fig. 3 Analysis modeling

4. 해석결과 및 고찰

4.1 내압과 자체 하중 해석

먼저 펌프배럴과 유도배관의 내압과 자체 하중에 의한 변형을 해석하였다. 펌프배럴과 유도배관에 적용되는 압력에 대한 영향을 분석하기 위하여 적용한 내압은 설계 최대압인 42 kg/cm²를 적용하였다. 적용 자체 하중으로는 부착된 피팅류 등을 고려하여 1m당의 총무게에 5%를 더 가하여 펌프배럴은 208kg, 유도배관은 1m당 198kg을 적용하였다. 그리고 화물창 바닥의 펌프 1개의 무게는 3,000kg, 상부 플랜지 750kg, 펌프

배럴내의 LNG의 무게는 총 1,250kg을 적용하였다.

Fig. 4는 자체하중에 의한 펌프배럴과 유도배관의 von Mises 등가응력을 나타낸 것이다. von Mises 응력은 x, y, z방향의 합성 등가 응력값을 나타낸다. 펌프배럴의 최대 응력값은 천정 부에 가까운 요소 234와 334에서 847kg/cm²이 되었다. 유도배관의 최대응력은 요소 431 즉 유도배관의 제일 상부에서 41kg/cm²으로 매우 적은 값이 된다. 펌프배럴의 지지봉의 압축응력은 벽체지지부와 배럴이 만나는 지점이 최대값인 1,052kg/cm²이 되었다. 이 값들은 모두 SUS304의 허용인장강도인 1,310kg/cm² 이하의 값으로 안전하다.

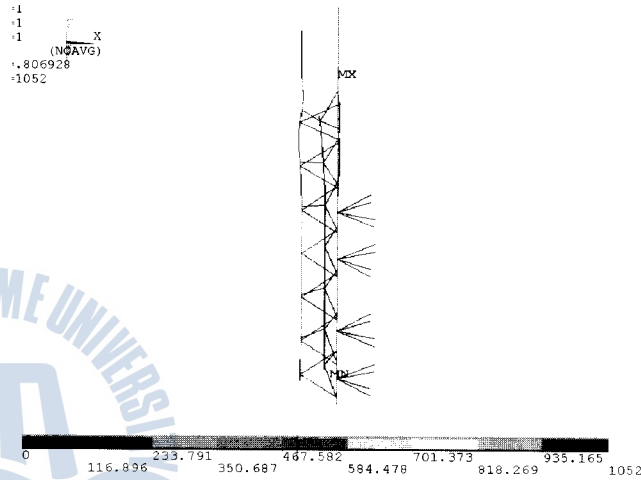


Fig. 4 Von Mises stress by self weight and internal pressure

Fig. 5는 자체하중과 내압에 의한 변위해석결과로 최대 변위를 갖는 지점은 요소 101번 즉 탱크 중앙부 측 펌프배럴의 하부 펌프가 연결된 부분에 8.06mm가 팽창되었다.

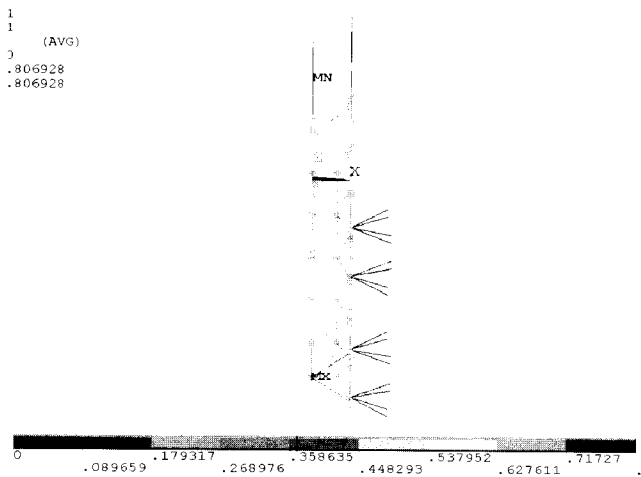


Fig. 5 Displacement by self weight and internal pressure

4.2 열응력 해석

온도에 의한 변형 해석의 경계조건은 LNG가 잠기는 부분

LNG 선박 펌프배럴 및 유도배관의 구조 안전성 해석

은 -162℃, 천정은 35℃로 하였다. 열응력이 가장 큰 경우를 적용하여 해석하기 위하여 모든 펌프배럴과 유도배관 그리고 화물창에 LNG가 최대로 적재된 경우로 하였다. 온도차에 의한 영향은 자체하중과 내압에 열응력을 더하여 해석을 수행하였다.

Fig. 6은 펌프배럴과 유도배관의 온도구배 해석으로 LNG에 잠긴 부분으로부터 상부까지 온도구배가 발생하고 있음을 알 수 있다.

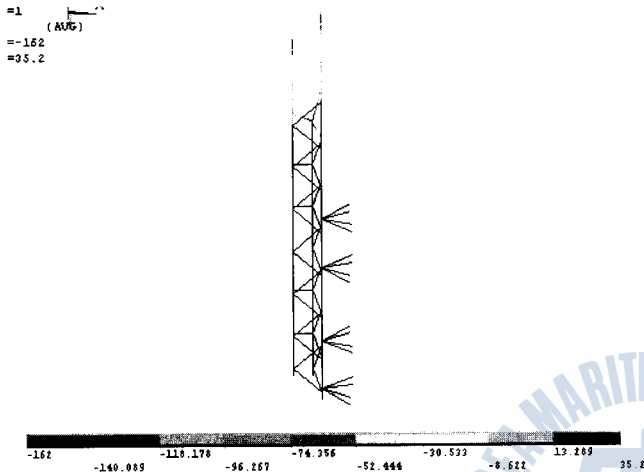


Fig. 6 Temperature distribution of pump barrel and lead pipe

Fig. 7은 극저온, 내압 및 자체하중에 의한 등가응력을 보여 준다. 해석 결과 펌프배럴의 최대 열응력 값은 요소 317, 즉 상부 벽체 지지봉 부로 1,086kg/cm², 유도배관은 배관의 중간부인 요소번호 417에서 459kg/cm²이 되었다. 배럴 지지봉은 하부 벽체지지부에서 최대값으로 1,109kg/cm²이 되었다. 상하 z축 응력값이 적은 이유는 z축 방향으로 극저온 열변형을 흡수할 수 있는 펌프배럴과 지지봉의 연결부를 슬리브 구조로 설계하여 Z축 방향의 수축, 인장이 자유롭게 설계되었기 때문으로 보인다.

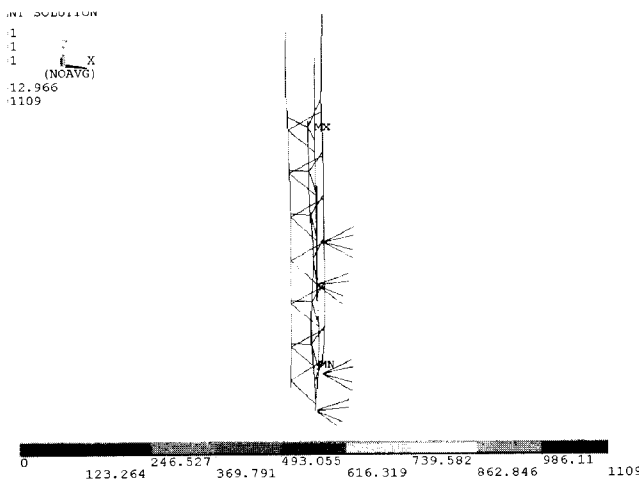


Fig. 7 Von Mises stress by thermal, internal pressure and self weight

Fig. 8은 극저온, 내압 및 자체하중에 의한 변형을 나타낸 것이다. 최대변위는 유도배관의 하부 요소인 401번으로 x, y축 방향의 변위는 각각 3.2cm, 0.0cm 그리고 z축 방향 최대 변위는 12.96cm로 수축되었다. 요소 401에 큰 변위가 발생하는 것은 펌프배럴 등의 변형과 함께 여기에 걸려 있는 유도배관이 변형이 되기 때문이다.

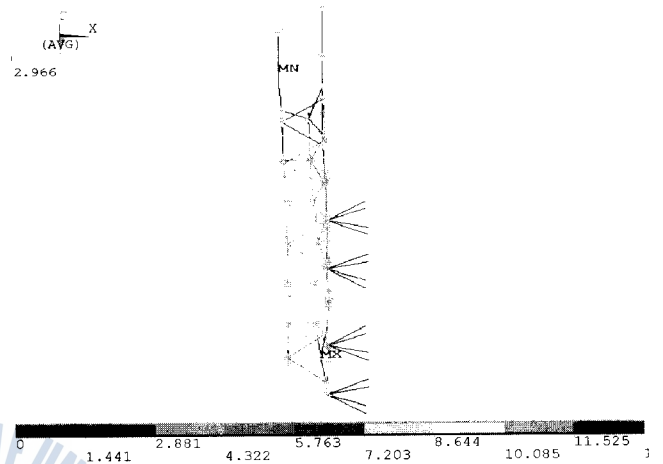


Fig. 8 Displacement by thermal, internal pressure and self weight

내압, 자체하중 및 열응력에 의한 구조해석결과 펌프배럴과 유도배관의 최대 응력값이 SUS304의 허용인장강도인 1,310kg/cm² 보다 모두 적은 값으로 설계 규격은 안전함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 LNG운반선의 화물창 LNG탱크의 펌프배럴과 유도배관의 설계 안전성을 진단하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 이를 위하여 펌프배럴과 유도배관의 자체하중, 내압, 극저온 온도차를 모두 고려한 응력과 변형 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 내압과 LNG 무게를 포함한 자체하중에 의한 펌프배럴의 변형은 허용인장강도의 80.3% 였으며 유도배관은 3.1%로 매우 적은 값을 보였다. 이는 내압과 자체하중에 충분한 강도를 지니고 있음을 알 수 있다.
- 2) 자체하중과 내압에 더하여 -162℃의 LNG와 상온의 온도차에 의한 해석을 수행한 결과, 펌프배럴 응력은 항복강도의 84.75%, 유도배관의 응력은 35%이며 최대 변형은 12.96cm로 안전하였다.

결과를 보면, LNG화물창의 펌프배럴과 유도배관의 설계 규격은 안전한 것으로 판단되나 향후 선박의 Sloshing을 고려한 보다 정밀한 분석이 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] 최길선, 2005: 한국의 조선산업-성장과 과제, 한국조선협회
- [2] Ansys Inc.: ANSYS CFX Documentaution, Ver. 11, <http://www.ansys.com>.
- [3] J.F. Harvey, 1980: Pressure Component Construction, design and materials application, Van Nostrand Reinhold Co.

원고접수일 : 2010년 01월 05일

원고채택일 : 2010년 02월 10일



