

## 단열을 고려한 초저온 액체질소 저장 탱크의 지지대 용접부 설계

최동준\* · 오정택\*\* · 조종래† · 정재현\*\*\*

(원고접수일 : 2007년 8월 21일, 심사완료일 : 2007년 12월 18일)

### Weldment Design of Supports for Cryogenic Storage Tank considering Insulation

Dong-Jun Choi\* · Jung-Taek Oh\*\* · Jong-Rae Cho† · Jae-Hyun Jung\*\*\*

**Abstract** : The double-walled steel vessel with powder insulation in the space between the walls is used to minimize heat transfer by radiation and conduction in cryogenic storage tank. The vacuum required the insulation is much less extreme than with high-vacuum or multilayer insulations. The solid supports are used to bear the weight of the inner container. Thermal and structural analysis of the tank have been carried out to study the effect of vacuum and weldment geometry of the internal supports. Heat flux in wall is increased with increasing of thermal conductivity of perlite. Heat flux and stress of support is not affected by weldment geometry.

**Key words** : Cryogenic storage tank(초저온 저장탱크), Double-walled vessel(이중벽 용기), Support(지지대), Weldment design(용접부 설계), Insulation(단열)

#### 1. 서 론

초저온 저장 탱크는 저온의 내부 압력용기와 단열을 위한 외부용기로 구성되어 있다. 두 용기 사이는 단열을 위해 진공을 만들고 펄라이트(perlite)로 충전하고 있다. 펄라이트 단열은 펄라이트 충전 후 작용하는 진공도가 순수 진공만으로 단열시키는 고진공단열(high-vacuum insulation)과 비교하여 상대적으로 낮고 단열성이 좋기 때문에 많이 사용되고 있다. 그러나 펄라이트 분말은 분말의 입자에

따라 열전도도(thermal conductivity)를 정확히 알 수 없고 진공도에 따라서 열전도도가 달라진다<sup>[1]</sup>. 또한 초저온의 압력용기는 단열이 무엇보다 중요하기 때문에 내부 압력용기를 지지하는 지지대도 Fig. 1과 같이 단열층 내부에 만들어 외부와 분리시키며 용접부의 면적도 작게하여 열전달에 의한 열유입을 최소화하려고 한다.

현재까지 초저온 압력용기의 연구 분야는 대형 저장탱크의 구조의 건전성과 설계 안전성에 대한 연구<sup>[2], [3]</sup>와 주로 열유동 및 액체의 기화에 따른

† 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부), E-mail:cjr@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4298

\* 부영CST(주)

\*\* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 한국해양대학교 기계정보공학부

압력상승 연구<sup>[4], [5]</sup> 등에 초점을 두고 있다.

본 연구에서는 먼저 펄라이트 열전도도에 의한 단열효과를 평가하고, 지지대(support)와 내부 용기의 용접부에서 용접길이와 형상에 따른 지지응력 및 열응력을 평가하며 열유속(heat flux)을 비교하여 용접부 설계의 기준을 설정하는 것이 목적이다.

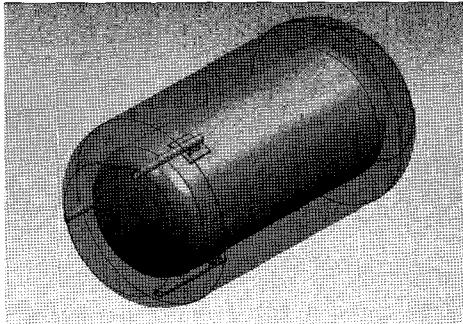


Fig. 1 3D model of storage tank with double walls

## 2. 2중벽의 단열 해석

### 2.1 모델링 및 해석

액체 질소 탱크는 이중 벽면으로 되어 있고 두 벽면사이에는 단열재인 펄라이트를 채우고(Fig. 2) 단열효과를 높이기 위해서 진공으로 만든다. Fig. 3은 진공도에 따른 펄라이트의 열전도도를 나타내고 있다.

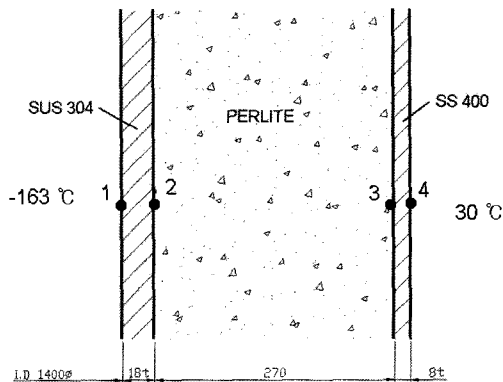


Fig. 2 Dimension and structure of cross section for the storage vessel (unit:mm)

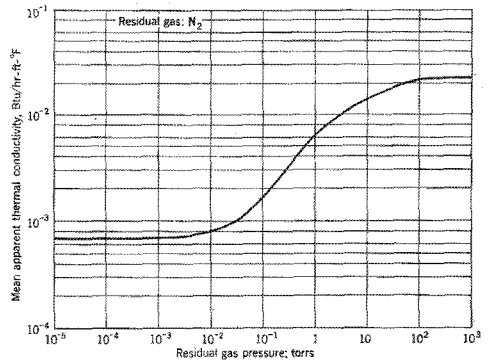


Fig. 3 Thermal conductivity of pearlite verses gas pressure

탱크의 단면은 ANSYS를 이용하여 축대칭으로 모델링하고 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 펄라이트 분말과 양측벽면은 밀착되어 있는 것으로 가정하여 접촉저항은 무시하였다.

### 2.2 해석 결과

Table 2에서는 진공도가 낮아 펄라이트의 열전도율이 높은 경우와 진공도가 높아 펄라이트의 열전도율이 낮은 2가지 경우에 대해 각 구간별 온도 분포와 열유속을 비교한 것이다. 셀 내에서는 온도 구배가 거의 없으며 펄라이트의 열전도율이 6.25배로 커진 경우에 열유속은 6.25배 증가함을 알 수 있다.

Table 1 Material properties

Material	Conductivity (W/mK)
SUS 304	16
Pearlite	0.0008 ~ 0.005
SS 400	60

Table 2 Comparison of temperature and heat flux

Case	Temperature (°C)				Heat Flux (W/m <sup>2</sup> )
	1	2	3	4	
High conductivity (k=0.005)	-162.993	-162.989	29.643	29.643	3.567
Low conductivity (k=0.0008)	-162.999	-162.998	29.943	29.943	0.572

### 3. 지지대 용접부 크기에 따른 단열성 및 구조해석

#### 3.1 모델링

지지대는 탱크에 Fig. 4와 같이 필렛(fillet) 용접으로 부착되어 있고 이 지지대는 단열층을 지나 밖으로 노출되어 열전도가 예상된다. 따라서 탱크 벽에 직접적으로 접촉하는 용접부의 크기에 따른 열유속을 예측할 필요가 있다. 보강 및 용접을 하기 위한 패드(pad)는 압력용기의 셸과 직접 접촉하지 않고 용접부를 통해 연결되어 있는 것으로 가정하였다.

Fig. 4의 type1의 경우 패드와 셸은 3곳의 용접부로 결합되어 있고 이것이 일반적이지만, Fig. 5의 type2의 경우는 2곳의 용접부로 결합되어 있다. 총 용접부 길이는 거의 같지만 현장의 작업효율과 경제성 관점에서 type2가 type1에 비해서 우수한 방법이다. 따라서 type1과 type2를 비교 해석하여 type2 방법의 타당성을 확인하고자 한다.

3차원 형상 모델링 및 해석은 Unigraphics NX4<sup>[6]</sup>와 ANSYS Workbench<sup>[7]</sup>을 활용하였다. Table 3은 해석에 사용한 SUS304의 물성치<sup>[8]</sup>를 나타내고 있다. 해석의 초점이 지지대에 작용하는 기계적하중과 열하중이기 때문에 국부적이 응력이 발생하므로 계산 시간과 메모리 용량을 줄이고자 지지대 부근만 고려하여 Fig. 6과 Fig. 7과 같이 모델링하였으며 3차원 사면체요소와 육면체요소를 사용하였으며, type1과 type2의 요소의 수는 각각 7993, 6904이다.

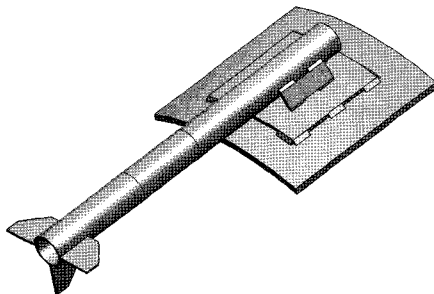


Fig. 4 Shape of weldment of type1

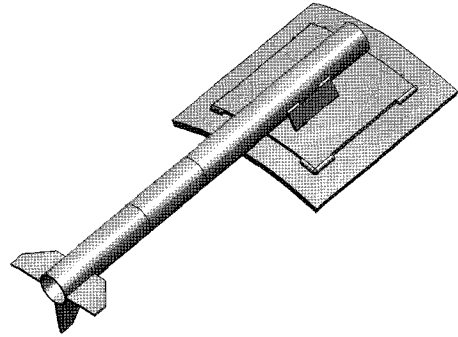


Fig. 5 Shape of weldment of type2

Table 3 Material properties(AISI SUS304-annealed)

Property	Value
Young's modulus(GPa)	201
Poisson's ratio	0.3
Yield strength(MPa) @30 °C	205
Ultimate tensile strength(MPa)	515
Allowable stress(MPa) @30 °C	138
Thermal expansion coefficient	13.3e-6
Thermal conductivity(W/mK)	14.8
Specific heat(J/kgK)	480
Mass density(kg/m <sup>3</sup> )	7900

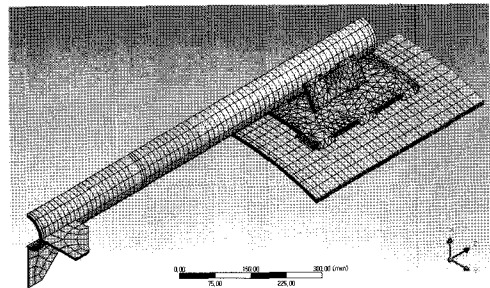


Fig. 6 3D mesh shape of type1

#### 3.2 탱크 자중에 의한 응력해석

주어진 탱크의 자중(45kN)과 지지대의 개수를 고려하여 지지대 바닥에서 하중이 작용하는 것으로 하였다(Fig. 9). 내부 탱크 벽면을 구속시키고 지지부(leg) 절단면에는 대칭 조건을 부여한다. 따라서 탱크의 자중은 용접부가 지지하고 있다.

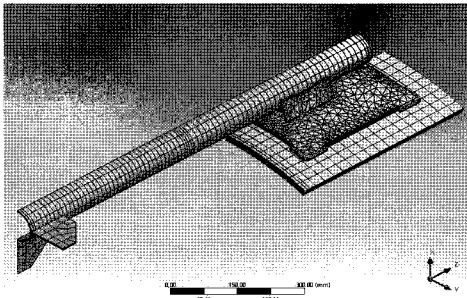


Fig. 7 3D mesh shape of type2

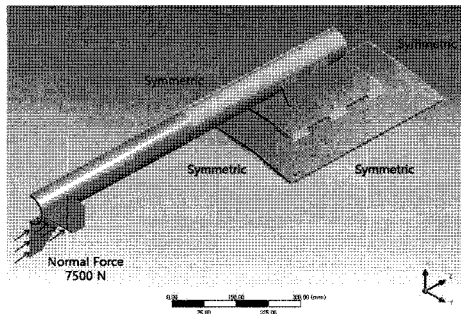


Fig. 8 Boundary condition of structure analysis

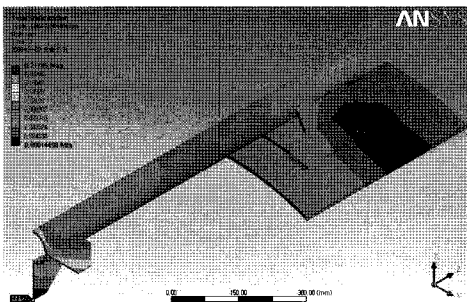


Fig. 9 Displacement of type1 (max. 0.22mm)

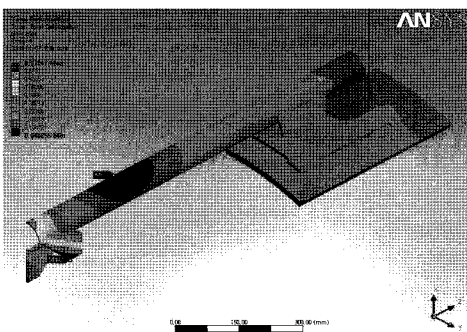


Fig. 10 Displacement of type2 (max. 0.57mm)

Fig. 9과 10은 두가지 경우의 전체변위(total displacement)를 계산한 결과를 보여준다.

Fig. 11과 12는 von Mises 응력 분포와 최대 응력이 발생하는 부분을 나타낸다. type1의 경우 최대응력의 발생 지점은 파이프와 판 사이의 용접 부이며 최대값은 89.4 MPa이고, type2의 경우 판과 패드사이의 용접부에서 최대값이 104.4MPa 이다.

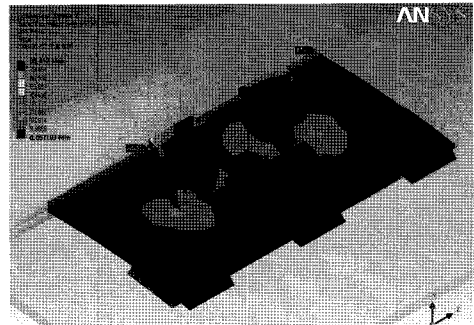


Fig. 11 Stress distribution of type1 (max. 89.4MPa)

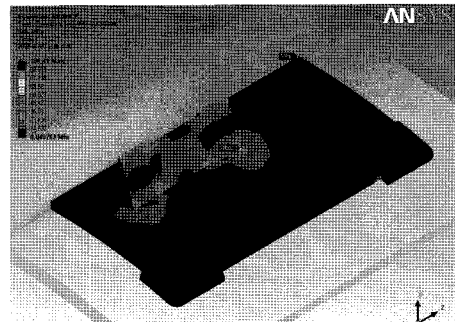


Fig. 12 Stress distribution of type2 (max. 104.4MPa)

### 3.3 열응력 해석

온도 분포에 의한 지지대부의 열응력 대해서 해석하였다. Fig. 13은 온도 경계 조건을 나타내고 있다. 셀의 안쪽면은 액체의 온도와 동일한 것으로 가정하였고, 셀의 바깥면과 지지대 주위는 단열된 것으로 가정하였으며 지지대와 외부 용기가 만나는 용접부를 상온으로 가정하였다.

Fig. 14과 Fig. 15는 각각의 온도분포를 나타내는데 서로 유사한 경향을 보여주고 있다. Fig. 16과 Fig. 17은 온도 구배에 의한 열응력분포를 나

타내고 있다. 최대응력은 패드와 탱크 벽면의 용접부에 발생하였으며, type2의 경우 73.6MPa으로 type1의 58.6MPa에 비해서 큰 것으로 나타났다.

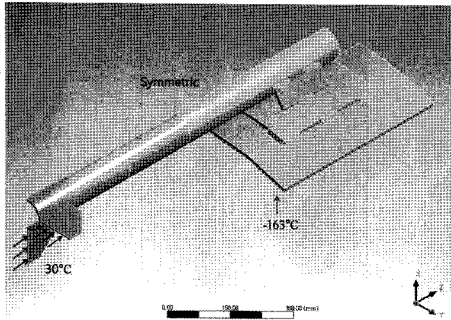


Fig. 13 Boundary condition of thermal analysis

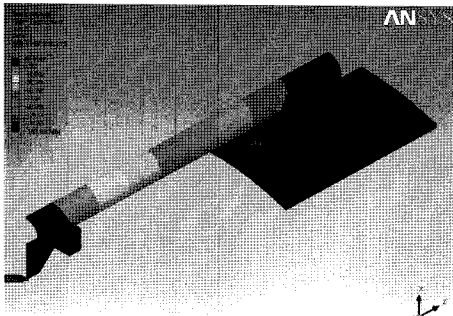


Fig. 14 Temperature distribution of type1

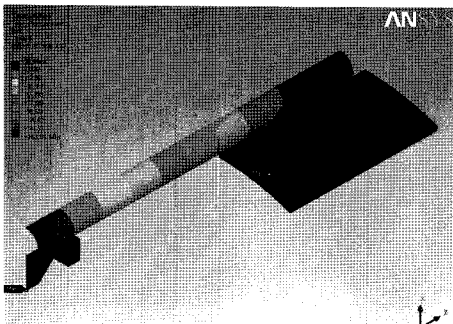


Fig. 15 Temperature distribution of type2

Table 4에서는 결과를 비교한 것으로 type2의 경우 정적응력과 열응력이 15~25% 증가 하였으나 허용응력보다 훨씬 낮은 값이며 열유속도 차이가 없어 2점 용접부인 type2로의 설계변경이 가능한 것으로 나타났다.

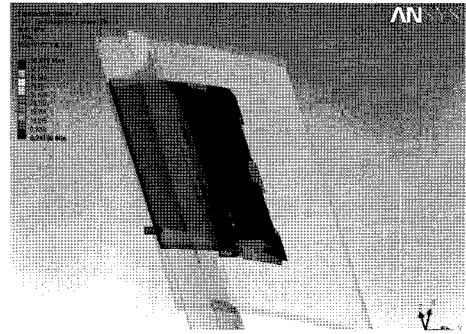


Fig. 16 Thermal stress distribution (type1)

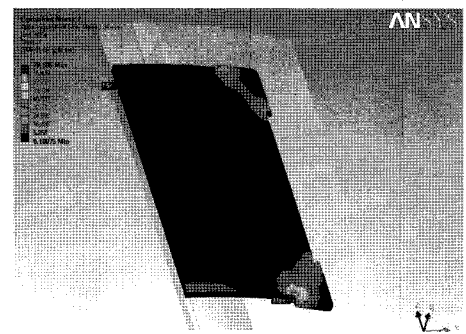


Fig. 17 Thermal stress distribution (type2)

Table 4 Summary of results

Results		Type1	Type2
Displacement(mm)		0.22	0.57
Static stress(MPa)	Calculated	89.4	104.4
	Allowable in Table 3	138	
Thermal stress(MPa)	Calculated	58.6	73.6
	Yield stress	205	
Maximum total stress(MPa)		117.4	162.0
Heat flux(W/m <sup>2</sup> )		3096	3186

#### 4. 결 론

이중벽으로 단열시키는 초저온 탱크에서 하중을 지지하는 3개의 파이프 지지대는 패드와 탱크 셸을 용접으로 부착한다. 패드와 셸은 일반적으로 3점 용접과 2점 용접 방법이 있으나 주로 3점 용접을 하고 있다. 이 두가지 경우의 정적응력과 열응력을

해석하였으며 계산된 온도분포에서 열유속도 비교하여 2점 용접의 타당성을 검토하였다.

(1) 이중 벽 사이의 진공도가 낮아지면 충전된 필라이트의 열전도도가 급격히 증가하며 탱크의 외부에서 내부에 유입되는 열유속이 열전도도에 비례하여 증가한다.

(2) 2점 용접의 경우 3점 용접에 비해서 응력은 15%~25%씩 다소 증가하지만 건진성에는 문제가 없으며 열유속도 거의 차이가 없다. 따라서 작업 효율성과 경제성이 우수한 2점 용접이 구조해석을 통해 타당함을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] T.M. Flynn, Cryogenic engineering, second ed., 2005, Marcel Dekker.
- [2] 김청균, 조승현, 초저온 하중을 고려한 내부탱크 바닥판의 설계 안정성에 관한 유한요소해석, 한국가스학회지 제8권 제3호, pp. 8-15, 2004년 9월.
- [3] 김청균, 최동열, 내부탱크 저장 시스템에서 9% 니켈강재 구조물의 설계 안전성에 관한 연구, 한국가스학회지, Vol.5, No.4, pp. 49-55, 2001.
- [4] 김호연, 최성희, 박영, 이정환, 윤익근, 김동혁, 하종만, 주상우, LNG 저장탱크의 종합 열유동 해석프로그램 개발, 한국가스학회지, Vol.5, No.2, pp. 52-61, 2001.
- [5] 박병휘, 이현철, 박두선, 손무룡, 초저온액화가스 저장탱크 내에서의 액화질소의 거동, 한국가스학회지, Vol.2, No.3, pp. 37-48, 1998.
- [6] Unigraphics NX4, UGS.
- [7] Ansys user manual, Ansys Inc.
- [8] ASME Boiler & pressure vessel Sec. II, Part D, ASME, 2007.

## 저 자 소 개



**최동준(崔東俊)**

1979. 2. 20 동의대학교 기계설계과 졸업, 2006. 2. 22 한국해양대학교대학원 기계공학과 석사과정 졸업, 2006. 3. 1 한국해양대학교대학원 기계공학과 박사과정 입학, 2008. 현재 한국해양대학교대학원 기계공학과 박사과정 재학중, 2008. 현 부영CST(주) 대표이사



**조종래(趙琮來)**

1959년 3월생, 1982년 부산대학교 기계공학 졸업(학사), 1984년 한국과학기술원 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1993년 한국과학기술원 대학원 정밀공학과 졸업(박사), 1984년 1995년 한국중공업 기술연구소, 1999년 Post-Doc. (영국-Birmingham Univ.), 1995년 ~ 현재 한국해양대학교 기계정보공학부



**정재현(鄭在鉉)**

1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업(공학사), 1980년 한국해양대학교 (원) 졸업 기관학과 졸업(공학석사), 1987년 일본북해도대학 정밀기계공학과 졸업(공학박사), 1982년 ~ 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수