

극저온 액체수소 저장탱크 지지시스템의 열응력 해석

박 동 훈†, 윤 상 국, 이 정 환*, 조 원 일*, 백 영 순*

한국해양대학교 대학원†, 한국해양대학교 기계정보공학부, 한국가스공사 연구개발원*

Thermal Stress Analysis of the Support System in Cryogenic Liquid Hydrogen Storage Tank

Dong-Huen Park, Sangkook Yun, *Jung-Hyan Lee, *Young-Sun Baek

ABSTRACT: The reduction of heat transfer rate to the stored liquid hydrogen from outside condition is extremely important to keep the liquid hydrogen longer. In this paper the highly efficient support system for the liquid hydrogen storage vessel was newly developed and analysed. The support system was composed of a spherical ball in the center of supporter to reduce the heat transfer area, with its above and below supporting blocks which are the SUS and PTFE blocks inserted in the SUS tube. The heat transfer rate and temperature distribution of the support system were evaluated by FLUENT, and the thermal stress and strain were estimated by ANSYS software.

The results showed that the heat transfer rate from outer vessel to inner one was extremely decreased compared with the common method which is simply SUS tubes inserted between inner and outer tanks. The thermal stress and strain were obtained well below the limited values. As a result, it was the most efficient support system of storage vessel for liquid hydrogen and most cryogenic fluids.

Key words: Liquid hydrogen(액체수소), Storage vessel(저장조), spherical ball(구형 볼구슬), PTFE(테프론), Thermal stress(열응력), Thermal strain(열변형)

기 호 설 명

C_p : 정압비열 [J/kg·K]

σ_r : 열응력 [N/m²]

μ : 점성계수 [N/m²s]

Q : 열전달율 [W]

k : 열전도도 [W/m²K]

α : 열확산계수 [m²/s]

β : 체적열팽창계수 [K⁻¹]

L : 지지대의 높이[m]

t : 판 두께[m]

A : 지지대의 표면적[m²]

하첨자

r : 반경 방향

t : Tangential 방향

l : Longitudinal 방향

1. 서론

인류의 주된 에너지원인 화석연료는 탄소를 포함하고 있는 탄화수소계 물질로, 연소될 때 CO₂를 다량으로 배출하여 지구 온난화 등 환경문제를 크

†Corresponding author

Tel.:+ 82-51-410-4363 ; fax:+ 82-51-405-4790

E-mail address: rel@mail.hhu.ac.kr

게 야기하고 있어 이러한 문제 해결과 미래 에너지원의 확보 방안으로 대체에너지 개발 및 이용기술 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그 해법이 될 수 있는 대체에너지원 중 가장 대표적인 것의 하나가 수소에너지일 것이다. 수소는 연소시 공기 중의 산소와 반응하여 물만을 생성하여 환경에 전혀 영향을 미치지 않을 뿐 아니라 발열량이 커서 미래의 청정에너지원으로 크게 매력적이며 각광을 받는 에너지원임에는 틀림없다.

그러나 수소를 에너지원으로 사용하기 위하여는 대량의 취급 기술이 뒷받침이 되어야 한다. 즉 대량의 수소 생산기술, 액화 및 운송기술, 저장기술 등이 그 것이다. 이러한 기술들은 모두 국내 기술에 의하여 개발이 가능한 것들로 각 기술들이 통합적으로 개발되어야 할 것이다.

본 연구에서는 이 기술들 중 액체수소의 저장기술에 관한 것이다. 수소에너지를 널리 사용하기 위하여는 다량의 수소를 운송하는 기술개발이 필요하게 되며, 그 것들에는 액체상태 운송, 압축기체 상태 운송, 수소저장 합금에 의한 운송방법이 있다. 그 중 많은 연구자들이 액체수소에 의한 저장법이 가장 효율적인 저장방법으로 제시하고 있다.^{3,4,5)} 또한 수소가스의 압축에 의한 저장에 비하여 액체상태는 대기압 근처의 압력으로 저장압력이 낮아 안전성도 크게 된다. 그러나, 액체 상태의 저장은 -253℃의 초저온 온도에서 저장하게 되어 장기간 저장을 위해서는 다른 방법과는 달리고도의 단열 기술이 요구되어 진다. 이러한 이유로 효율적인 단열기술의 개발이 필수적으로 요구되며, 이는 주요한 관심사가 되고 있다.

저장탱크 내에서 이러한 극저온 유체의 기화를 지연시키기 위하여는 내부 실린더와 외부 실린더 사이의 열전달량을 최소화 하여야 한다. 양 실린더 사이의 열전달은 벽체 뿐 만 아니라 지지 장치와 배관에 의해서도 발생한다. 현재 적용하고 있는 벽체의 단열방법들로는 다층 진공단열(Multi-layer vacuum insulation, super insulation), 진공단열, 분말 진공단열 등이 사용되고 있다. 이 중 단열도가 가장 큰 효과적인 방법은 다층 진공단열로 10^{-5} Torr 이하의 진공도에서 복사열을 차단함으로써 단열 효과를 극대화하는 방법으로 알려져 있으며 널리 적용되고 있다. 또한 배관을 통한 열전달 차단은 외부 실린더 벽까지의 배관을 진공 2중 튜브 형태를 취하여 열전달을 최소화 하고 있다. 그

러나, 내부 실린더를 지지하고 있는 지지 시스템의 전열은 실린더와 유체의 하중을 지지하여야 하는 특성 때문에 피할 수 없는 것으로 간주하고 장치를 설계, 제작하고 있다.

본 연구에서는 액체수소 저장탱크 지지시스템을 통한 전열량을 최소화하기 위하여 새로운 구조의 지지시스템을 개발하였고, 그 시스템의 적용성 판단을 위하여 열적 그리고 기계적 응력을 해석하였다.

2. 지지 시스템의 구조

초저온 유체의 저장설비에서 지지 시스템 설계는 매우 중요한 인자이다. 지지대의 설계시 유의 사항으로는 내부 실린더의 하중을 지지할 수 있을 뿐 아니라 외부로부터 열유입이 최소화 되도록 설계 및 재료를 선택하여야 한다.

통상 극저온 저장설비의 지지 시스템으로는 (1)응력이 가해진 고강도 SUS 튜브, (2) 금속이나 플라스틱 버팀대 (3)플라스틱 압축 블록 (4)다지점 지지대 (5)압축 튜브, (6)wire cable/chain 등이 있다.⁽⁴⁾

Fig.1은 극저온 유체의 대표적 지지 시스템들로, 그림 중 ①은 단순한 내부 외부 실린더 사이에 배관을 용접하여 연결 지지하는 국내 통상 적용하는 방법으로 전열량이 대단히 크게 된다. ②의 방법은 내벽과 지지봉에 플라스틱 워셔를 삽입하여 금속재의 직접 접촉을 막아 전열량을 감소시키고 있으나 구조가 복잡하고 제작의 어려움이 따른다.

20K의 극저온 유체인 액체수소 저장탱크 지지대의 주된 고려인자로는 외부로부터 열유입을 최소화하는 데 있다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 구조를 고안하였다. 그 구조는 상부와 하부 실린더 사이에 플라스틱류인 PTFE 블록을 설치하고 블록의 중앙부에는 SUS 블록을 설치하며, 상부 SUS블록과 하부 SUS블록 사이는 SUS 볼로 지지하는 구조이다. 이 블록은 하부 실린더 3개 지점에 설치되며 내부 실린더의 지지와 함께 열유입을 차단하게 된다. 이 구조의 우수성과 적용 가능성은 온도에 따른 수축과 팽창의 반복에 따른 기능 해석을 필요로 한다. 이를 위하여 블록의 열전달 현상을 Fluent를 이용하여 해석하고 열응력과 하중응력은 Ansys를 이용하여 해석하였다. 이렇게 얻어진 온

도 구배를 기준하여 블록 각 구성품의 저온에 의한 수축 정도를 분석한다. 만약 내부 실린더에 액체수소를 충전하였을 때 수축이 한계치 이상 발생하게 된다면, 상부 실린더와 하부실린더의 블록 사이 볼에 간격이 생기게 되어 실린더 하중을 지지할 수 없기 때문이다. 액체수소가 충전되었을 때, 사용된 각 재료의 온도에 따른 수축율, 블록 각 지점 재료의 온도 구간에서 수축율로부터 수축에 의한 볼의 간격이 산정된다. 이를 상쇄하기 위하여 Prestress(사전 응력) 방법을 적용한다. 즉 상하부 PTFE 블록의 상하 규격을 수축길이 만큼 크게 제

작한 다음, -196°C 의 액체질소로 미리 사전에 수축시켜 동일 규격으로 제조 설치하는 것이다.

본 연구에서 개발한 이 지지 시스템은 플라스틱인 PTFE를 통한 전열량 감소와 구형 볼에 의한 전열접점을 최소화하게 되어 전열량을 극소화하게 된다.

3. 지지시스템 열 및 응력해석 관계식

가. 전도열전달 산정

극저온에서 전도열전달 산정을 보다 정밀하게 수행하기 위하여는 열경계 전위방법을 적용한다. 이 방법은 온도에 따라 열전도도가 바뀌는 물질의 열전달량을 산정하는 방법이다. 열경계 전위는 기준 온도에서 적용온도까지 열전도도를 적분한 값으로 나타낸다.

$$E(T) = \int_{T_R}^T k(T) dT \quad (1)$$

열전도도가 전체 온도 범위에서 하나의 값 즉 일정한 값일 때 전도 열전달 일반식은 다음과 같다.

$$Q' = -\nabla^2 T + \rho C_p \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

이를 열경계 전위로 변형하면,

$$\frac{dE(T)}{dT} = k(T) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = \frac{d^2 E}{dx^2} \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{k} \frac{dE}{dt} \quad (5)$$

식 2를 식 3, 4, 5로 치환하여 정리하면

$$Q' + \nabla^2 E = \left(\frac{\rho \cdot C_p}{k} \right) \frac{dE}{dt} \quad (6)$$

와 같이 된다. 이 식으로부터 복합물질 사이의 온

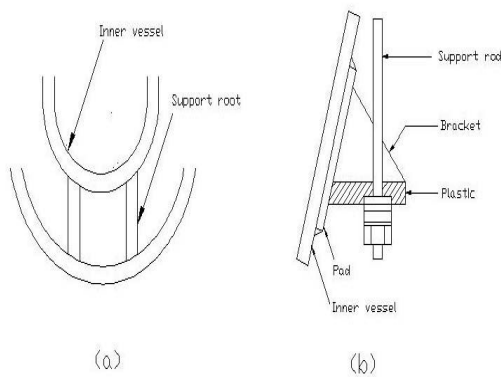


Fig. 1 Typical support system of cryogenic storage tanks.

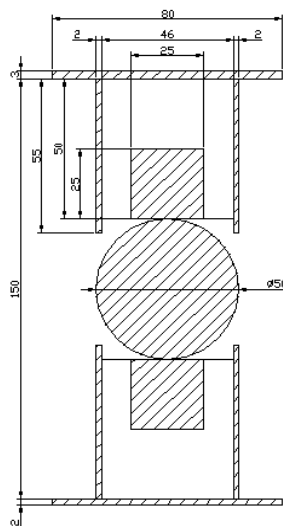


Fig. 2 Dimensions of new support system.

도를 구하게 되며, 총 전열량은 다음 식에서 얻어진다.

$$\frac{dE}{dX} = k(E_{(x)} - E_{\infty}) \quad (7)$$

온도 분포 해석을 위한 수치해석은 유한체적법인 상용코드 Fluent를 이용하였다. 수치적 해의 수렴은 1.0×10^{-6} 이하에서 수렴된 것으로 하였으며 총 격자수는 약 6,000개이다. 열전달 해석에 적용된 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지방정식은 다음과 같다.

가) 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

나) 운동량방정식

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) + \rho\beta g(T - T_o) \quad (9)$$

다) 에너지방정식

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (10)$$

다. 열응력 해석 관계식

열응력에 대한 기계적 변형 해석을 위한 관계식으로 반경방향의 응력은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\sigma_r = \frac{\alpha ET_a}{2(1-\mu)\log_e(\frac{b}{a})} [-\log_e(\frac{b}{r}) - \frac{a^2}{b^2-a^2}(1-\frac{b^2}{r^2})\log_e(\frac{b}{a})] \quad (11)$$

Tangential 방향의 응력은

$$\sigma_t = \frac{\alpha ET_a}{2(1-\mu)\log_e(\frac{b}{a})} [1 - \log_e(\frac{b}{r}) - \frac{a^2}{b^2-a^2}(1 + \frac{b^2}{r^2})\log_e(\frac{b}{a})] \quad (12)$$

Longitudinal 방향의 응력,

$$\sigma_z = \frac{\alpha ET_a}{2(1-\mu)\log_e(\frac{b}{a})} [1 - 2\log_e(\frac{b}{r}) - \frac{2a^2}{b^2-a^2}\log_e(\frac{b}{a})] \quad (13)$$

이 된다.

4. 해석결과 및 고찰

가. 전도열전달 해석

전도 열전달 해석은 범용 프로그램인 Fluent를 이용하여 해석하였다. Fig. 3은 본 해석의 Grid 형태를 보여주며, Fig. 4, 5는 실린더 내부온도는 -253°C , 외부 실린더 온도는 15°C 를 적용하여 열해석에 의한 지지시스템의 온도 분포를 나타낸다. 그림에서 중앙부의 볼을 중심으로 내외부 온도가 균일하게 분포되고 있음을 알 수 있다.

본 Fig. 2의 지지시스템을 통한 총 열전달량은

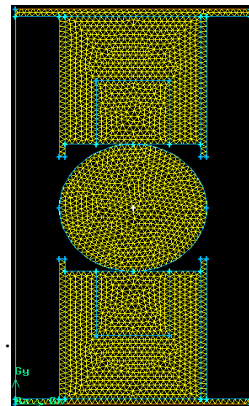


Fig. 3 Grid for thermal analysis

0.031 kJ/h로 산정되었다. 이 전열량을 직경 50mm, 1T의 SUS봉 규격의 Fig. 1 (a) 시스템과 비교하면, Fig. 1의 (a) 시스템의 전열량은 70.56 kJ/h로 Fig. 2의 개발시스템의 전열량이 현저하게 감소됨을 알 수 있다.

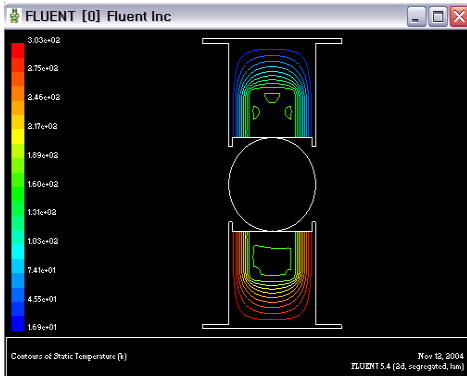


Fig. 4 Temperature contour of support system.

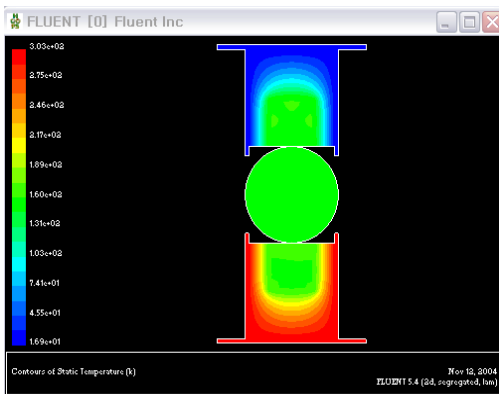


Fig. 5 Temperature distribution of support system.

나. 열응력 해석

열응력 해석은 상용 프로그램인 Ansys를 사용하였으며, 열전달 해석과 동일하게 실린더 내부온도는 -253°C , 외부 실린더 온도는 15°C 를 적용하였다. 실린더 내부는 진공 상태임으로 대류 열전달이 없다고 가정하였다. 모델형상은 앞뒤좌우가 대칭이므로 1/4 면만을 해석하였다. 기준온도는 액체질소를 이용하여 사전 냉각 시키므로 -196°C 로 하여 -196°C 이하이

면 압축되고, 이상이면 팽창되는 것으로 하였다.

Table 1은 해석에 사용된 물성치이다. Fig. 6은 열응력 해석을 위한 격자 모양을 보여주며, Fig. 7은 변위 경계조건으로 앞뒤좌우가 대칭이므로 측면과 바닥의 변위를 0로 하였다.

Table 1. Properties of materials in the support system

	SUS	PTFE
Thermal conductivities	14.9 ~ 1.9 W/m K	0.26 ~ 0.141 W/m K
Coefficients of thermal expansion	1×10^{-5}	10×10^{-5}
Elastic moduli	210000 MPa	21000 MPa
Poisson's ratios	0.3	0.35
Density(kg/mm ³)	$7850e^{-9}$	$2140e^{-9}$

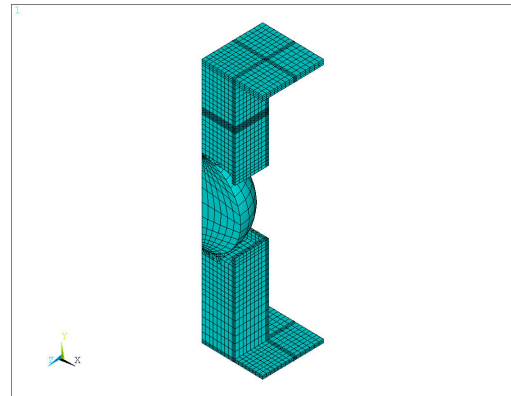


Fig. 6 Grid for thermal stress analysis

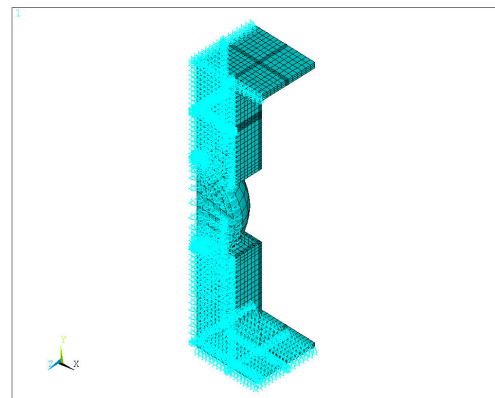


Fig. 7 Strain boundary condition of grid

지지시스템의 온도 분포는 내부 실린더 -253°C , 외부 즉 하부온도는 15°C 이다. 상부의 PTFE와 SUS 블록은 열수축을 고려하여 -196°C 로 초기 냉각 후 삽입한다.

Fig. 8은 열변형에 의한 상하 즉 Y방향 변위를 보여주는 것으로, 먼저 상부 블록을 -196°C 로 냉각 후, 내부 -253°C , 외부 15°C 가 되면 상하 Y방향 변위는 0.43mm 팽창하였다.

Fig. 9는 열변형에 의한 Y방향 변위 그래프로 y축 지점별 변위값을 나타낸다. 지지시스템의 아래 즉 하부 실린더에서 팽창을 하다가 상부 실린더에서는 약간 수축이 작용함을 보여준다. 이것은 윗부분의 온도는 -253°C 이고 상부 PTFE 및 SUS의 초기 기준온도가 -196°C 임으로 상부는 수축, 하부는 팽창되어 전체적으로는 수축이 발생한다.

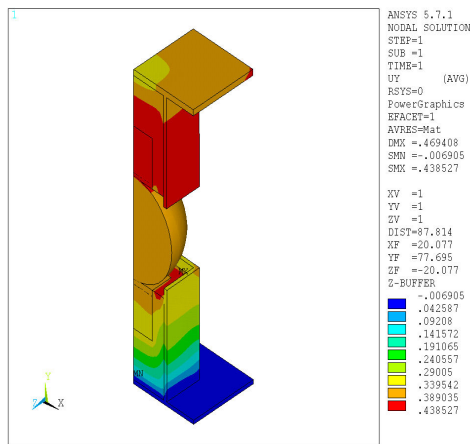


Fig. 8 Y-direction strain from thermal stress

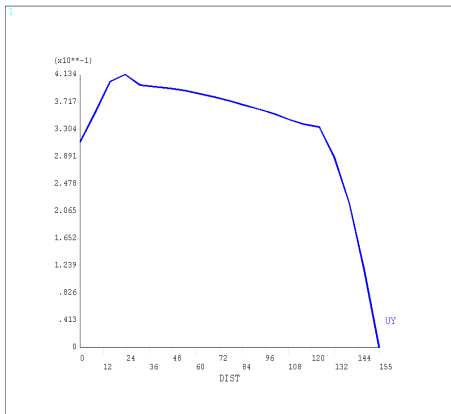


Fig. 9 Thermal strain curve for Y-direction

Fig. 10은 열변형에 의한 유효 변형율(von Mises stain)을 나타낸 것이다. von Mises 변형율은 x,y,z 방향의 합성 유효 변형율 값이다. 변형률이 크게 나타나는 부위의 온도 분포는 영하 14°C ~ 영상 14°C 이 되었다. -193°C 를 초기 기준온도로 하였기 때문에 큰 열팽창에 의해 변형이 크게 작용한 것으로 생각된다. 특히 내부 재질(PTFE)은 SUS보다 열팽창이 크므로 변형이 크게 나타남을 알 수 있다. -196°C 로 처음에 냉각했다가 15°C 로 상승하면서 PTFE의 팽창이 커서 변형이 PTFE부에서 0.037 로 크게 된다.

Fig. 11은 열변형에 의한 응력을 보여준다. 응력이 크게 나타나는 부위의 온도는 영하 14°C ~ 영상 14°C 이었다. 초기 냉각온도를 -196°C 로 하였기 때문에 큰 열팽창에 의해 응력이 많이 걸린 것으로

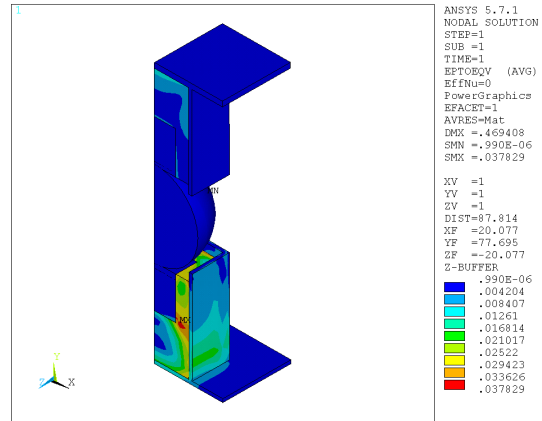


Fig. 10 Von Mises stain by thermal stress

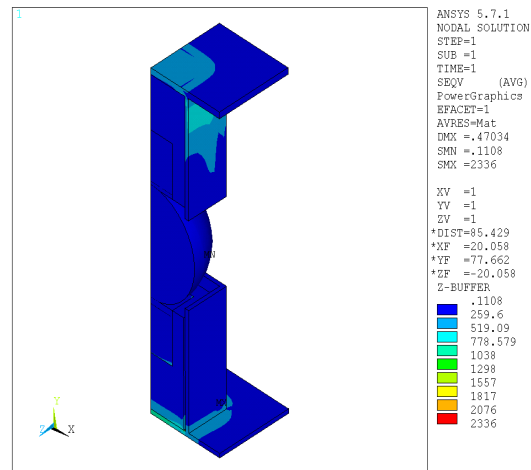


Fig. 11 Von Mises stress by thermal strain

생각된다. 특히 내부 재질(PTFE)은 SUS보다 열팽창이 크므로 실제에서는 PTFE와 SUS 가 만난 지점에서 슬립이 일어나지만 해석에선 동일 변형으로 해석을 하여 응력이 크게 나타났다. 해석 결과 최대 열응력 값은 400MPa이하로 각 재질의 한계 응력보다 훨씬 적어 본 지지시스템이 적용 가능함을 알 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 액체수소 저장탱크 지지시스템을 통한 전열량을 최소화하기 위하여 새로운 구조의 지지시스템을 개발하였고, 그 시스템의 적용성 판단을 위하여 열적 그리고 기계적 응력을 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 개발한 지지시스템의 전열량은 전열량이 크게 감소시킬 수 있어 액체수소용 초저온 저장조의 지지시스템으로 적절함을 알 수 있었다.

2) 온도에 따른 기계적 응력을 해석한 결과 최대 열응력 값이 한계허용치보다 크게 낮아 본 지지시스템이 액체 수소저장탱크 지지시스템으로 적용 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

1. Ewald R., Kesten M., 1990, Cryogenic Equipment of Liquid Hydrogen Powered Automobiles, Adv. Cryogenic Engineering, Vol. 35, pp.1777-1781.
2. Hasan MM., Lin CS, Van Dersar NT, 1991, Self-pressurization of a Flight Weight Liquid Hydrogen Storage Tank Subjected to Low Heat Flux, ASME HTD Cryogenic Heat Transfer, Vol. 167, pp.37-42.
3. Rudiger H., 1992, Design Characteristics and Performance of a Liquid Hydrogen Tank System for Motor Cars, Cryogenics, Vol.32, pp.327-329.
4. Barron R.F., 1985, Cryogenic Systems, Oxford University Press, pp.372-377.
5. Harvey J.F., 1980, Pressure Component Construction Design and Materials Application, Van Nostrand Reinhold Co., pp.30-94.