

액체수소 저장탱크용 고효율 지지 시스템 개발 및 해석

윤상국† · 박동훈*

(원고접수일 : 2006년 10월 11일, 심사완료일 : 2006년 11월 24일)

Development and Analysis of the Highly Efficient Support System in a Liquid Hydrogen Vessel

Sang-kook Yun† · Dong-Heun Park*

Abstract : Probably the most significant heat transfer in the cryogenic liquid hydrogen storage tank from the atmosphere may occur through its support system. In this paper the efficient support system for the cryogenic storage vessel was newly developed and analysed. The support system was composed of a spherical ball as a supporter to reduce the contact area, which is located between two supporting SUS tubes inserted SUS and PTFE blocks. Numerical analyses for temperature distribution, and the thermal stress and strain of the support system were performed by the commercial codes FLUENT and ANSYS. The heat transfer rate of the supporter was evaluated by the thermal boundary potential method which can consider the variation of thermal conductivity with temperature.

The results showed that the heat transfer rate through the developed supporter compared with the common SUS tube supporter was significantly reduced. The thermal stress and strain were obtained well below the limited values. It was found that the developed supporter can be one of the most efficient support systems for cryogenic liquid storage vessel.

Key words : Cryogenic liquid storage vessel(초저온 액체 저장탱크), Support system(지지 시스템), Heat transfer rate(전열량), Spherical ball(구형 볼)

기호설명

A : 지지대의 표면적 [m^2]
 C_p : 정압비열 [$J/kg \cdot K$]
 k : 열전도도 [$W/m \cdot K$]
L : 지지대의 높이 [m]

Q : 열전달율 [W]
 t : 판 두께 [m]

그리스 문자

α : 열확산계수 [m^2/s]

† 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부), E-mail : skyun@hhu.ac.kr, Tel : 051)410-4363

* 한국해양대학교 대학원

β : 체적열팽창계수 [K^{-1}]

σ_r : 열응력 [N/m^2]

μ : 점성계수 [$N \cdot s/m^2$]

하첨자

r : 반경 방향

t : Tangential 방향

l : Longitudinal 방향

1. 서 론

인류의 주된 에너지원인 화석연료는 탄소를 포함한 탄화수소계 물질로, 연소될 때 CO_2 를 다량으로 배출하여 지구 온난화 등 환경문제를 크게 야기하고 있다. 이러한 문제의 해결과 미래 에너지원의 확보 방안으로 수소에너지 개발 및 이용기술 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다. 수소는 연소 반응 중 산소와 반응하여 물만을 생성하므로 환경에 전혀 영향을 미치지 않을 뿐 아니라 발열량이 커서 미래의 청정에너지원으로 크게 각광을 받고 있다. 그러나 수소를 에너지원으로 사용하기 위해서는 많은 관련 기술개발이 뒷받침이 되어야 한다. 즉 수소 생산기술, 액화 및 운송기술, 저장기술, 안전기술 등이 그 것이다. 이러한 기술들은 모두 국내 기술에 의하여 개발이 가능한 것들로 각 기술들이 통합적으로 개발되어야 할 것이다.

대량의 수소를 운송 및 저장하는 기술은 액체상태의 운송, 압축된 기체상태의 운송, 수소저장 합금에 의한 운송방법 등이 있다. 그 중 액체수소에 의한 저장방법은 많은 연구자들에 의해 가장 효율적인 방법으로 제시되고 있다^{[1],[2]}. 또한, 액체상태의 저장은 고압가스 저장에 비하여 저장압력이 낮아 안전성도 크게 향상 되는 장점을 지닌다. 그러나, 액체 상태는 $-253^\circ C$ 의 극저온 상태이므로 장기간 보관을 위해서는 효율 높은 단열기술의 개발이 필수적으로 요구된다.

초저온 저장탱크의 열전달은 벽체뿐만 아니라 지지 장치와 배관에 의해서 발생하게 된다. 현재 적용하고 있는 벽체의 단열방법으로는 다층 진공단열

(Multi-layer vacuum insulation), 진공단열, 분말 진공단열 등이 적용되고 있다^[3]. 이 중 다층 진공단열은 10^{-5} Torr 이하의 진공도에서 Mylar를 사용하여 복사열을 차단함으로써 단열 효과를 극대화하는 것으로 극저온 유체의 단열에 널리 사용되고 있다. 한편 배관을 통한 열전달 차단은 외부 실린더 벽까지의 배관을 진공 2중 튜브 형태를 취하여 전열량을 최소화하고 있다. 그러나, 내부 실린더를 지지하고 있는 지지 시스템을 통한 전열은 실린더 하중과 유체의 무게를 지탱하여야 하는 목적 때문에 전열이 크게 발생함에도 불구하고 견고한 두꺼운 구조로 제작되고 있다.

이와 관련된 연구들을 보면 주로 선진국에서 액체수소 저장 실린더의 단열성능 향상을 위한 해석과 실험적 연구들이 활발하게 수행되어 왔다^{[4]-[9]}.

국내에서도 수소의 액화 및 저장을 위한 단열특성 파악 등의 연구가 일부 수행되고 있으나 지지시스템의 연구는 전무한 상태이다^{[10],[11]}.

본 연구에서는 액체수소 저장탱크에 있어서 지지 시스템을 통한 전열량을 최소화하기 위하여 새로운 구조의 지지 시스템을 고안하였고, 그 시스템에 대한 열 및 기계적 응력 해석을 통하여 실 저장탱크에의 적용 가능성을 분석하였다.

2. 지지 시스템의 구조

초저온 유체의 저장설비에서 지지 시스템 설계는 매우 중요한 인자이다. 지지 시스템의 설계에 있어 유의하여야 할 사항으로는 내부 실린더 하중의 지지와 함께 외부로부터 열유입을 최소화하는 것이다.

통상 극저온 유체 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^[3].

Fig. 1은 극저온 유체의 대표적 지지 시스템들을 보여준다. Fig. 1(a)는 단순한 내부 외부 실린더 사이에 배관을 용접하여 지지하는 시스템으로 국내에서 통상 적용하고 있는 방법이며, 이는 전열량이 매우 크게 된다. Fig. 1(b)의 방법은 내벽과

지지봉에 플라스틱 워셔를 삽입하여 금속재의 직접 접촉을 막아 전열량을 감소시키고 있으나 구조가 복잡하고 제작의 어려움이 따른다.

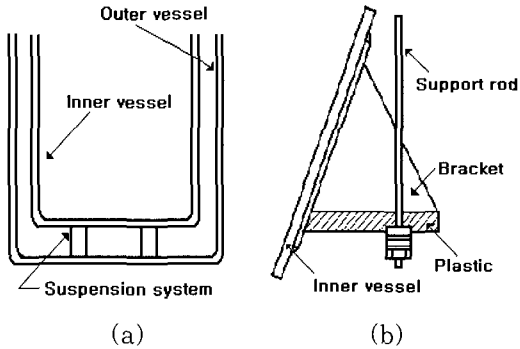


Fig. 1 Typical support system of cryogenic storage tanks

본 연구에서는 -253℃의 액체수소 저장탱크 지지시스템으로 Fig. 2와 같은 구조를 고안하였다. 그 구조는 상부와 하부 실린더 사이에 극저온에 사용 가능한 플라스틱류인 PTFE 블록을 설치하고 블록의 중앙부에는 SUS 블록을 설치하며, 상부 SUS 블록과 하부 SUS 블록 사이는 SUS 볼로 지지하는 구조를 갖는다. 이 지지 시스템은 하부 실린더의 3개 지점에 설치됨으로써 내부 실린더의 지지와 함께 열유입을 차단하게 되는 것이다.

이 지지 시스템의 실제 적용 가능성을 판단하기 위해서는 전체 블록의 온도 구배를 구하고 각 구성품의 저온에 의한 수축율을 분석하여야 한다. 만약 내부 실린더에 -253℃의 액체수소를 충전하였을 때 지지 블록의 수축이 한계치 이상 발생하게 되면, 상부 실린더와 하부 실린더의 블록 사이 볼에 간격이 생기게 되어 실린더 하중을 지지할 수 없기 때문이다. 지지 블록의 전열 온도 구배 해석은 상용프로그램인 Fluent를 이용하였고, 열응력과 하중응력은 Ansys를 이용하여 온도에 따른 수축과 팽창의 반복에 따른 열 및 응력 해석을 수행하였다.

또한, 지지 시스템의 제작에 해석의 결과를 이용하게 된다. 극저온 유체가 충전되었을 때 블록의 각 재료에 가해지는 온도 구간에서의 수축율로 부

터 수축된 볼의 간격을 얻게 된다. 이를 상쇄하기 위하여 Prestress(사전 응력) 방법을 적용한다. 즉 상하부 PTFE 블록의 규격을 수축 길이만큼 크게 제작한 다음, -196℃의 액체질소로 사전에 수축시켜 동일 규격으로 제조 설치하는 것이다.

본 연구에서 개발한 이 지지 시스템은 플라스틱인 PTFE를 통한 전열량 감소와 구형 볼에 의한 열전달 접점의 최소화로 전열량이 극소화되는 효과를 얻게 된다.

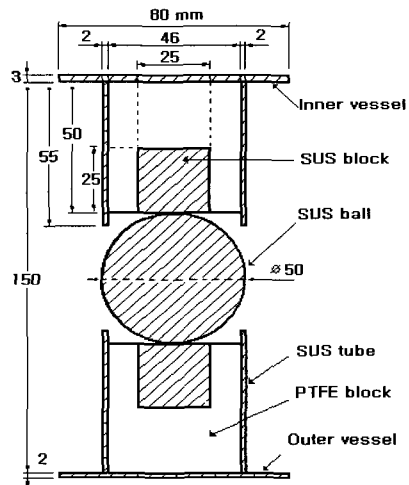


Fig. 2 Dimensions of new support system

3. 지지시스템 열 및 응력해석 관계식

3.1 전도열전달량 산정

극저온에서 전도열전달 산정을 보다 정밀하게 수행하기 위해서는 열경계 전위 방법을 적용하고 있다⁽³⁾. 이 방법은 온도에 따라 열전도도가 바뀌는 물질의 열전달량을 보다 정확하게 산정할 수 있다. SUS의 경우를 예로 들면, 액체수소의 온도인 -253℃와 15℃의 열전도도 값이 약 7배의 차이를 나타낸다. 즉 모든 물질은 온도에 따라 열전도도 값이 변하며, 열전도도를 하나의 값으로 하여 전도열전달의 총 전열량을 산정하면 오차를 크게 갖게 되는 것이다.

열경계 전위 E(T)는 기준온도에서 적용온도까지 열전도도를 적분한 값으로 나타낸다.

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

$$\frac{dE(T)}{dT} = k(T) \quad (2)$$

열전도도 값이 전체 온도 범위에서 하나의 값을 갖는 전도 열전달의 총 전열량 산정식은 Fourier 식으로 다음과 같다.

$$Q = -k A \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

여기서, 열전도도 값이 온도에 따라 변하는 값을 적용하기 위하여 식(3)을 식(2)로 변형하면 다음과 같다.

$$Q = -A \frac{dE(T)}{dT} \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

$$Q = -A \frac{dE(T)}{dx} \quad (5)$$

상기 식을 이용하여 지지 시스템의 총 전도열전달량을 산정하게 된다.

한편, 지지 시스템의 온도 분포 해석을 위한 수치해석은 유한체적법인 상용코드 Fluent를 이용하였다. 수치적 해의 수렴은 1.0×10^{-6} 이하에서 수렴된 것으로 하였으며, 총 격자수는 약 6,000개로 하였다. Fluent의 열전달 해석에 적용된 연속방정식과 에너지방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

에너지방정식

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

3.2 열응력 해석 관계식

열응력에 대한 기계적 변형 해석을 위한 관계식

으로 반경방향의 응력은 다음과 같다^[12]

$$\sigma_r = \frac{\alpha E T_a}{2(1-\mu) \log_e \left(\frac{b}{a}\right)} \left[-\log_e \left(\frac{b}{r}\right) - \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2}\right) \log_e \left(\frac{b}{a}\right) \right] \quad (8)$$

Tangential 방향의 응력은

$$\sigma_t = \frac{\alpha E T_a}{2(1-\mu) \log_e \left(\frac{b}{a}\right)} \left[1 - \log_e \left(\frac{b}{r}\right) - \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) \log_e \left(\frac{b}{a}\right) \right] \quad (9)$$

Longitudinal 방향의 응력은

$$\sigma_z = \frac{\alpha E T_a}{2(1-\mu) \log_e \left(\frac{b}{a}\right)} \left[1 - 2 \log_e \left(\frac{b}{r}\right) - \frac{2a^2}{b^2 - a^2} \log_e \left(\frac{b}{a}\right) \right] \quad (9)$$

이 된다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 전도열전달 해석 및 전열량 산정

전도 열전달 해석을 위한 Fluent용 Grid 형태는 Fig. 3과 같다. Fig. 4는 실린더 내부온도를 -253°C , 외부실린더 온도를 15°C 로 설정하여 Fluent로 해석한 지지 시스템의 온도 분포 결과를 나타낸 것이다. 해석 결과를 보면 중앙부의 볼을 중심으로 내외부 온도가 균일하게 분포되고 있음을 알 수 있다.

지지 시스템을 통한 전열량은 식 (5)를 이용하여 산정하였다. 내외부 온도 조건은 -253°C , 15°C 로 하였고 지지 시스템의 규격은 Fig. 2를 기준하였다. Table 1은 Fluent와 Ansys 해석에 사용된 재료의 물성치이다.

Fig. 2의 개발 지지 시스템을 통한 총 전열량은 0.031kJ/h 로 아주 적은 값이 얻어졌다. 이를

Fig. 1의 (a)와 비교하기 위하여, 규격을 동일하게 직경 50mm, 2T의 SUS봉으로 하여 산정한 전열량은 70.56kJ/h나 되었다. 즉, 개발 지지 시스템의 전열량 값은 통상의 기존 시스템에 비하여 0.05% 정도로 현저하게 감소됨을 알 수 있다.

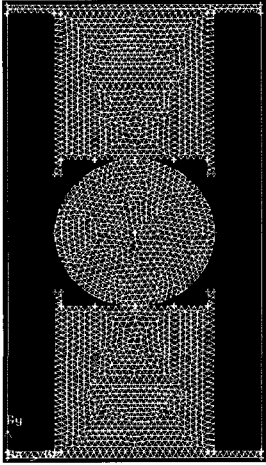


Fig. 3 Grid for thermal analysis

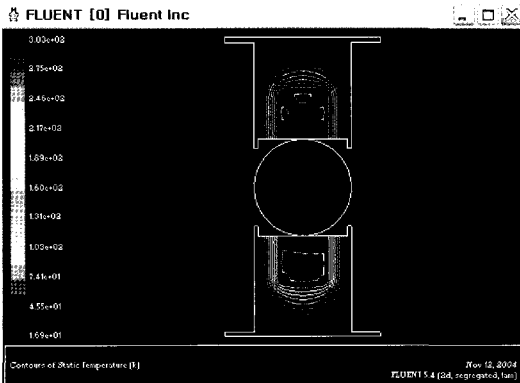


Fig. 4 Temperature contour of support system

4.2 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 상태이기 때문에 대류 열전달이 없다고 가정하였다. 모델형상은 앞뒤 좌우가 대칭이므로 1/4 면만을 해석하였다. 기준온도

는 액체질소를 이용하여 사전 냉각시키므로 -196°C 로 하여 -196°C 이하이면 압축되고, 이상이면 팽창되는 것으로 하였다.

Fig. 5는 열응력 해석을 위한 격자 모양을 보여주며, 변위 경계조건으로 앞뒤좌우가 대칭이므로 측면과 바닥의 변위를 0로 하였다. 지지 시스템의 온도 조건은 내부 실린더 -253°C , 외부 즉 하부온도는 15°C 이다. 상부의 PTFE와 SUS 블록은 열수축을 고려하여 -196°C 로 초기 냉각 후 삽입한다.

Fig. 6은 열변형에 의한 상하 즉 Y방향 변위를 보여주는 것으로, 먼저 상부 블록을 -196°C 으로 냉각 후, 내부 -253°C , 외부 15°C 가 되면 상하 Y방향 변위는 0.43mm 팽창하였다.

Table 1 Properties of materials in the support system

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

Fig. 7은 열변형에 의한 Y방향 변위 그래프로 y축 지점별 변위값을 나타낸다. 지지 시스템의 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. 8은 열변형에 의한 유효 변형율(von Mises stain)을 나타낸 것이다. von Mises 변형율은 x, y, z방향의 합성 유효 변형율 값이다. 변형율이 크게 나타나는 부위의 온도 분포는 영하 14°C ~영상 14°C 가 되었다. -193°C 를 초기 기준온도로 하였기 때문에 큰 열팽창에 의해 변형이 크게 작용한 것으로 판단된다. 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 0.037로 크게 된다. 열변형에 의한 응력을 보면 응력이 크나타나는 부위의 온도는 영하 14℃~영상 14℃이었다. 초기 냉각온도를 -19.6℃로 하였기 때문에 큰 열팽창에 의해 응력이 많이 걸린 것으로 보인다. 특히 내부 재질(PTFE)은 SUS 보다 열팽창이 크므로 실제에서는 PTFE와 SUS가 만난 지점에서 슬립이 일어나지만 해석에선 동일 변형으로 해석을 하여 응력이 크게 나타났다. 해석 결과최대 열응력 값은 400MPa이하로 각 재질의 한계 응력보다 훨씬 적어, 본 지지 시스템을 극저온 유체의 저장탱크에 효과적으로 적용할 수 있음을 알 수 있다.

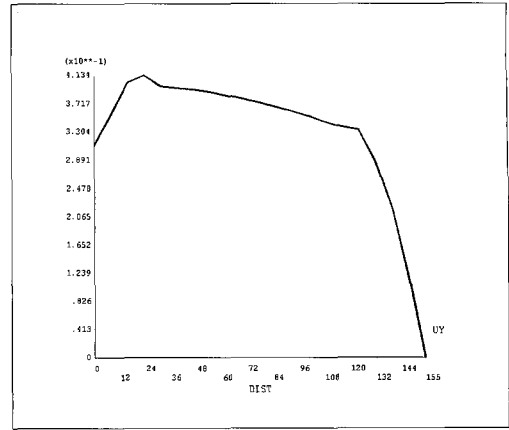


Fig. 7 Thermal strain curve for Y-direction

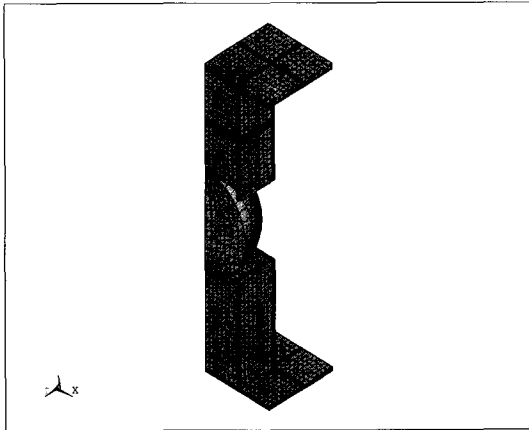


Fig. 5 Grid for thermal stress analysis

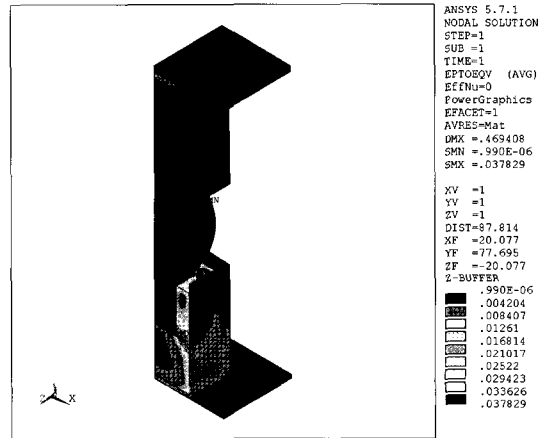


Fig. 8 Von Mises stain by thermal stress

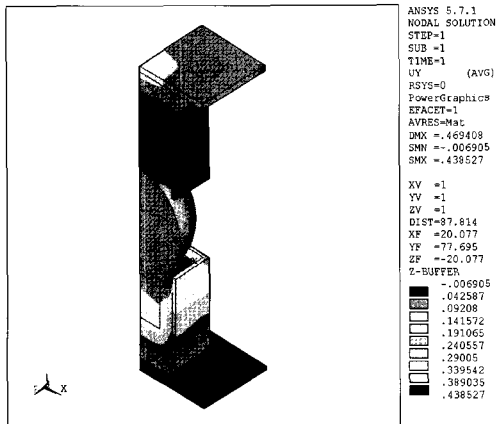


Fig. 6 Y-direction strain from thermal stress

5. 결 론

본 연구에서는 액체수소 등 극저온 액체의 저장 탱크 지지 시스템을 통한 전열량을 최소화하기 위하여 새로운 구조의 지지 시스템을 고안하였다. 그리고 그 시스템의 적용 가능성을 판단하기 위하여 열적 그리고 기계적 응력을 해석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 개발한 지지 시스템의 전열량은 기존 시스템의 0.05%에 불과하여 침입열량을 획기적으로 감소시킬 수 있다.
- 2) 온도에 따른 기계적 응력은 최대 열응력 값이 한계 허용치보다 크게 낮아, 본 지지 시스템을 극

저온 액체 저장탱크 지지 시스템으로 적용할 수 있음을 알 수 있다.

3) 고안된 지지 시스템은 외부로 부터의 열유입을 극소화시켜 극저온 액체를 상온에서 장기간 저장할 수 있게 함으로, 널리 보급될 때 국가 에너지 절약 등에 일조를 할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Ewald R. and Kesten M., "Cryogenic Equipment of Liquid Hydrogen Powered Automobiles", Adv. Cryogenic Engineering, Vol. 35, pp.1777-1781, 1990.
- [2] Hasan MM., Lin CS, and Van Dersar NT, "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, 1991.
- [3] Barron R. F., Cryogenic Systems, Oxford University Press, pp. 372-377, 1985.
- [4] Rudiger H., "Design Characteristics and Performance of a Liquid Hydrogen Tank System for Motor Cars", Cryogenics, Vol. 32, pp. 327-329, 1992.
- [5] S. M. Aceves, G. D. Berry, and G. D. Rambach, "Insulated Pressure Vessels for Hydrogen Storage on Vehicles", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 7, pp. 583-591, 1998.
- [6] S. M. Aceves, J. Martinez-Frias, and O. Garcia-Villazana, "Analytical and Experimental Evaluation of Insulated Pressure Vessels for Cryogenic Hydrogen Storage", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 25, pp. 1075-1085, 2000.
- [7] N. Takeichi, H. Senoh, H. Tsuruta, and N. Kuriyama, "Hybrid Hydrogen Storage Vessel, a Novel High-pressure Hydrogen Storage Vessel Combined with Hydrogen Storage Material", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 28, pp. 1121-1129, 2003.
- [8] S. Kamiya, K. Onishi, N. Konshima, and K. Nishigaki, "Thermal Test of the Insulation Structure for LH2 Tank by Using the Large Experimental Apparatus", Cryogenics, Vol. 40, pp. 737-748, 2000.
- [9] W. Notardonato, "Task III-E. Experimental Design & Evaluation of ZBO of Cryogenic Systems", NASA Statement of Work, 2004.
- [10] 김서영, 강병하, 최항집, "극저온액체 저장용기에서 열전도 차폐단의 영향", 수소에너지 논문집, Vol. 9, No. 4, pp. 169-176, 1998.
- [11] S. Y. Kim and B. H. Kang, "Thermal Design Analysis of a Liquid Hydrogen Vessel", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 25, pp. 133-141, 2000.
- [12] Harvey J. F., Pressure Component Construction Design and Materials Application, Van Nostrand Reinhold Co., pp. 30-94, 1980.

저 자 소 개



윤상국(尹相國)

1955년생. 1977년 성균관대학교 화학공학과 졸업(학사). 1982년 연세대학교 대학원 졸업(공학석사). 1989년 Southampton 대학교 초저온공학과 졸업(공학박사). 1993~현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수



박동훈(朴東勳)

1981년 12월생, 2005.2 한국해양대학교 냉동공조에너지시스템 공학과 졸업, 현재 한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과 석사과정