

다층단열재와 증기냉각실드를 사용한 액체수소 저장용기의 열해석

정일권*, 강병하†

국민대학교 대학원*, 국민대학교 기계·자동차공학부†

Thermal Analysis of a Liquid Hydrogen Vessel with Multi-Layer-Insulation and Vapor-Cooled Shield

Il Kwon Jung* and Byung Ha Kang†

*Graduate School of Kookmin Univ.

† School of Mechanical & Automotive Engineering, Kookmin Univ.
861-1 Chonnung-dong, Sungbuk-gu, Seoul, 136-702 Korea

ABSTRACT

Thermal analysis of cryogenic-capable vessels with insulations have been carried out to store liquid hydrogen(LH₂). The combined insulations of MLI(Multi-Layer Insulation) and VCS(Vapor-Cooled Shield) under high vacuum are considered in the analysis for various volumes of vessels. Vapor-Cooled Shields(VCS) are installed at cylinder wall as well as disc side of the LH₂ vessels. The results indicate that optimal distribution of boiloff vapor from LH₂ vessel into two sides of VCS exists based on the evaporation loss. As the volume of LH₂ vessel is increased, mass flow rate of boiloff is increased while the evaporation loss per unit volume is decreased.

주요기술용어: LH₂ vessel(액체수소용기), Multi-Layer-Insulation(다층단열재), Vapor-Cooled Shield(증기냉각실드)

1. 서 론

화석연료의 과도한 사용으로 인한 대기오염 및 지구온난화 등의 환경문제를 해결하기 위해 고효

율의 환경친화적 청정에너지 기술개발이 시급하다. 이를 위해 현재 선진국을 중심으로 미래의 에너지 매체로 우수한 특성을 가지고 있는 수소에너지 관련 기술의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 수소는 자연으로부터 무한히 얻을 수 있고, 연소 후에도 극소량의 NO_x 발생을 제외하고는 공해물질이 생성되지 않으며 사용 후에는 다시 물로 재순환 되는 청정에너지로 많은 주목을 받고

† Corresponding author :bhkang@kookmin.ac.kr

있다¹⁾. 그러나 현재 사용되는 수소엔진 및 연료전지 자동차 등에 수소를 대체 에너지로 이용하기 위해서는 해결해야 할 문제점들이 많이 있는데 그 중의 하나로 수소를 안전하고 효율적으로 탑재하여 사용할 수 있는 적절한 저장방법의 개발을 들 수 있다.

수소는 다음의 세 가지 방법으로 저장할 수 있다²⁾. 첫 번째 방법은 수소가스를 고압으로 압축하여 마레이징강, 티타늄, 유리, 보론, 탄소필라멘트(carbon filament) 등으로 제작된 내압 용기에 가스 상태로 저장하는 방법이며, 두 번째로는 금속 수소화물(metal hydride)을 이용하는 것으로 란타-니켈합금(LaNi₅), 티탄-철합금(TiFe) 등의 금속에 수소를 흡착시켜 저장하는 방법이다. 세 번째로는 수소가스를 극저온으로 냉각 액화시켜 단열용기내에 저장하는 방법인데 이 중에서도 액체상태로 저장하는 방법이 독일의 자동차 회사 BMW의 분석에서도 알 수 있듯이 무게 또는 체적당 저장에너지가 가장 크다^{3,4)}. 이러한 이유로 미국의 Applo 계획 이후로 우주선의 로켓추진 연료로서 액체수소가 사용되고 있으며 현재 유럽의 BMW, Daimler-Benz, Renault 등 여러 선진 자동차 회사에서 개발 중인 미래형 수소자동차의 연료탱크로서도 액체수소 저장 용기의 장착을 고려하고 있다.

액체수소 저장용기의 설계 시 고려해야 할 가장 중요한 요소는 다른 극저온 저장용기와 마찬가지로 매우 우수한 단열을 해야 한다는 것이다. 더욱이 액체수소의 경우에는 액체질소, 액체산소 등의 저장보다도 좀더 우수한 단열이 요구된다. 이는 복사에 의한 유입열이 $Q \propto T^4$ 이므로 내부용기의 온도가 낮을수록 상온의 대기로부터 흡수되는 복사열량 Q가 급격히 증가하기 때문이다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 극저온 저장용기의 단열방법으로는 진공단열(vacuum insulation), 분말단열(powder insulation), 다층단열(MLI : Multi Layer Insulation), 증기냉각섀드(vapor cooled shield)등이 있다^{5,6)}.

액체수소 저장용기의 설계는 크게 구조해석과

열 해석으로 이루어진다. 구조해석은 용기 내 수소가스의 허용 압력에 따른 내압설계를 위한 것으로 필수적인 설계인자이다. 하지만 효율적인 저장을 위해서는 단열성능의 개선을 목적으로 하는 열 해석이 가장 중요한 설계의 요소라 할 수 있다. 실제로 사용되는 액체수소 저장용기의 내부압력은 그리 높지 않은 편이고(5기압 이하) 허용압력 이상으로 압력이 높아지면 안전밸브를 통해 외부로 수소가스가 배출되도록 만들어지기 때문이다.

액체수소 저장용기의 열 해석에 관한 연구에서 Kim and Kang⁷⁾은 우수한 성능과 cool-down 시간의 감소, 제작상의 편의라는 관점에서 유리한 단일 증기 냉각섀드와 부분적으로 감긴 다층단열재를 사용한 용기를 제시하였다. 본 연구에서는 이 용기를 좀더 수정 보완하는 측면에서 저장용기의 좌우 디스크부분을 고려하였고, 저장용기의 용적을 다양하시 변화시키면서 연구를 수행하였다. 또한 각각의 증기냉각섀드로 유입되는 기화수소의 비율을 고려하여 열 해석을 수행하였으며, 이를 액체수소 저장용기의 설계 및 제작에 적용하고자 한다.

2. 액체수소 저장용기의 열 해석

본 연구에서 액체수소 저장용기는 원통형으로 설계되고, 이때 내부용기의 반경 r_1 과 용기의 길이 L 은 단위체적당 내부용기의 표면적(A_1/V)이 최소가 되는 조건에서 결정하였다. 이는 용기의 표면적이 증가하면 내부용기로의 열 유입량이 급격히 증가하여 액체수소의 기화손실이 커지기 때문이다. 또한 내부용기는 10%의 여유 공간(ullage volume)을 고려하여 설계하였다. 저장용기의 부피가 정해지면 식(1)과 (2)를 통해 내부용기의 반경 r_1 과 길이 L 을 구할 수 있다.

$$A_1 = 2\pi r_1^2 + 2\pi r_1 L \quad (1)$$

$$V = \frac{\pi}{1.1} r_1^2 L \quad (2)$$

단일 증기냉각셴드를 장착한 용기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 반경 r_2 의 위치에 증기냉각 셴드가 설치되어 있고, 반경 r_2 와 r_3 사이는 모두 다층단열재(MLI)로 채워져 있다. 또한 용기 좌우의 디스크(disk) 부분에는 내부용기와 같은 거리에 각각 증기냉각셴드와 다층단열재가 설치되어 있다. 외부열의 유입에 의하여 내부용기내에서 기화된 수소가스는 각각의 셴드로 적절히 분배되어 내부용기 주위를 흐르면서 외부에서의 열 유입을 차단하게 된다. Kim and Kang⁷⁾의 연구에서 증기 냉각셴드를 내부용기에 가깝게 설치하고 다층단열재를 많이 감을수록 기화손실이 감소함을 보였다. 본 연구에서는 이러한 결론을 적용하여 $a(r_2/r_1)$ 를 1.1, $b(r_3/r_1)$ 를 1.9로 고정시켜놓고 열 해석을 수행하였다. 저장용기의 단열 성능해석을 위하여 내부용기의 온도 T_1 은 20 K, 외부용기의 온도 T_4, T_7, T_0 는 300 K로 하고, 초기에 내부용기에는 99.8%의 para-수소가 채워진 것으로 가정하였다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 \dot{Q}_{21} 은 내부 증기냉각셴드 T_2 에서 내부용기 T_1 로 전달되는 열량을 나타내며, \dot{Q}_{51} 와 \dot{Q}_{81} 은 각각 좌우의 셴드에서 내부용기로 전달되는 열량을 나타내고 좌우대칭으로 그 크기는 서로 같다. \dot{Q}_{21} , \dot{Q}_{51} , 및 \dot{Q}_{81} 은 내부용기의 액체 수소량 \dot{m} 을 기화시키게 되며 이는 식 (3)~(5)로 표현된다.

$$\dot{Q}_{21} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2} + \frac{1}{F_{21} A_2} + \frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{51} = \dot{Q}_{81} = \frac{\sigma(T_5^4 - T_1^4)}{\frac{1-\epsilon_5}{\epsilon_5 A_5} + \frac{1}{F_{51} A_5} + \frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}} \quad (4)$$

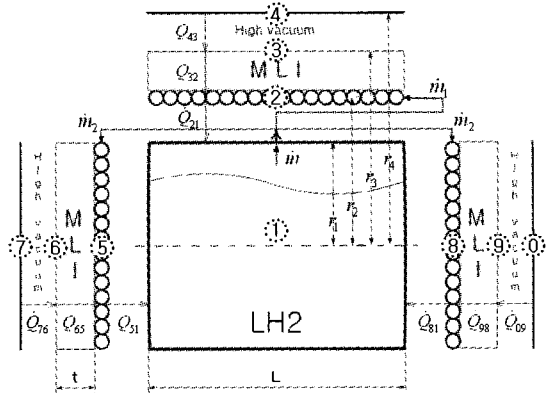


Fig. 1. Combined insulation of partially-filled MLI and SVCS (Single Vapor Cooled Shield)

$$\dot{Q}_{21} + 2 \dot{Q}_{51} = \dot{m} h_{fg} \quad (5)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수를 나타내며 ($\sigma \approx 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$), F_{21}, F_{51} 은 각각의 셴드에서 내부용기로의 형상계수를 나타낸다.

\dot{Q}_{32} 는 식 (6)과 같이 표현되고 이는 실린더 형태로 감겨있는 MLI에서 전도로 인한 열 유입을 나타낸다. \dot{Q}_{65} 와 \dot{Q}_{98} 은 좌우 디스크측의 다층단열재에서 전도로 인한 열 유입을 의미하고, 좌우대칭으로 그 크기는 같으며, 식 (7)로 표현된다.

$$\dot{Q}_{32} = \frac{2\pi k_t L}{\ln(r_3/r_2)} (T_3 - T_2) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{65} = \dot{Q}_{98} = \frac{k_t}{t} A_d (T_6 - T_5) \quad (7)$$

여기서 t 는 다층단열재의 두께이며, k_t 는 다층단열재를 통한 유효 열전도도를 나타내는데 고진공(10^{-4} torr이하)상태에서 층밀도를 30 layer/cm 정도로 하여 다층단열재를 장착하였을 때 $k_t \approx 0.04$ mW/mK이다. 그리고 h_{fg} 는 대기압하에서 para-수소의 증발열($h_{fg} = 443$ kJ/kg)이다.

$\dot{Q}_{43}, \dot{Q}_{76}$, 및 \dot{Q}_{09} 는 식 (3), (4), (5)와 유

사한 복사열유입의 형태로 표현되며, 이는 다음 식 (8), (9)로 나타낼 수 있다. 여기서 F_{43} , F_{76} 은 각각 외부용기에서 다층단열재 바깥부분으로의 형상계수(configuration factor)이다.

$$\dot{Q}_{43} = \frac{\sigma(T_4^4 - T_3^4)}{\frac{1-\epsilon_4}{\epsilon_4 A_4} + \frac{1}{F_{43} A_4} + \frac{1-\epsilon_3}{\epsilon_3 A_3}} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{76} = \dot{Q}_{09} = \frac{\sigma(T_7^4 - T_6^4)}{\frac{1-\epsilon_7}{\epsilon_7 A_7} + \frac{1}{F_{76} A_7} + \frac{1-\epsilon_6}{\epsilon_6 A_6}} \quad (9)$$

위 (3)~(9)식은 에너지 평형에 의해 다음과 같은 식(10)~(13)으로 재정리 할 수 있다.

$$\dot{Q}_{43} = \dot{Q}_{32} \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{32} = \dot{m}_1 C_p (T_{2o} - T_{2i}) + \dot{Q}_{21} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{76} = \dot{Q}_{65} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{65} = \dot{m}_2 C_p (T_{5o} - T_{5i}) + \dot{Q}_{51} \quad (13)$$

여기서 C_p 는 기화된 para-수소의 비열($C_p = 12.14 \text{ kJ/kgK}$)이고, T_{2in} 과 T_{5in} 은 T_1 과 같은 온도인 20 K로 가정하며, \dot{m}_1 은 Fig. 1에서와 같이 전체 기화 수소량 \dot{m} 중에서 실린더측의 증기냉각설드로 들어가는 기화 수소량이다. 또한 \dot{m}_2 는 좌우 디스크측의 증기냉각설드로 들어가는 기화 수소량이고 식(14)와 (15)로 표현할 수 있으며 α 는

$$\dot{m}_1 = \frac{\alpha}{100} \times \dot{m} \quad (14)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m} - \dot{m}_1}{2} \quad (15)$$

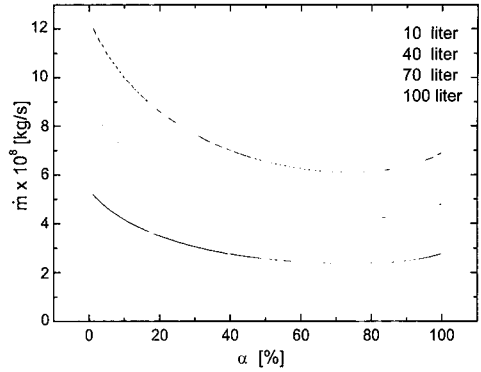


Fig. 2. Variator of the mass flow rate of the boil off vapor as a function of α for various vessel sizes.

\dot{m}_1 의 백분율을 의미한다. Fig. 2는 α 에 대한 기화 질량을 \dot{m} 을 나타내고 있는데, 용기의 크기에 관계없이 α 가 약 74% 일 때 기화 수소량이 최소가 됨을 볼 수 있다.

위 식들을 이용해 각 증기냉각설드의 온도인 T_2 , T_5 와 다층단열재 바깥쪽의 온도인 T_3 , T_6 를 구하고 식(3)~(5)를 이용하여 각 설드에서 내부

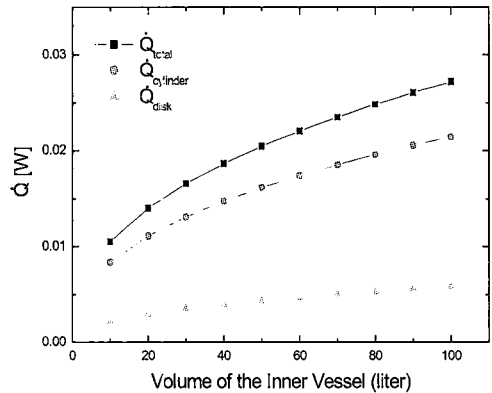


Fig. 3. Variation of the \dot{Q} as a function of the volume 용기로의 열 유입량과 기화되는 수소량 \dot{m} 을 추

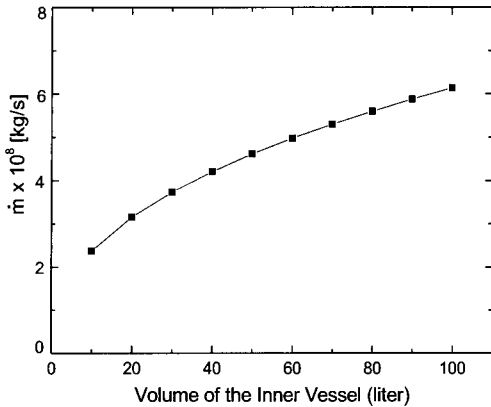


Fig. 4. Variation of the \dot{m} as a function of the volume

정할 수 있게 된다.

위의 해석적 방법을 이용하여 내부 용기의 부피를 증가시키면서 얻은 결과를 정리하여 Fig. 3 과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3은 $a(r_2/r_1)$ 와 $b(r_3/r_1)$ 를 각각 $a=1.1$, $b=1.9$ 로 고정 시켜놓고 액체수소 저장용기의 용량을 증가시켰을 때 내부용기로의 \dot{Q}_{total} , $\dot{Q}_{cylinder}$ 및 \dot{Q}_{disc} 의 변화를 나타내고 있다. 여기서 \dot{Q}_{total} 은 증기냉각설드에서 내부용기로 전달되는 총 열량을 나타내고,

$\dot{Q}_{cylinder}$ 와 \dot{Q}_{disc} 는 각각 \dot{Q}_{total} 중에서 실린더측과 디스크측으로 전달되는 열량을 나타낸다.

A_1/V 를 최소화한 원통형 액체수소 저장용기에서는 디스크측 보다는 표면적이 큰 실린더측으로의 열유입이 상대적으로 많음을 보여주고 있다.

Fig. 4는 a 와 b 를 동일 조건으로 하고 액체수소 저장용기의 용량을 증가시켰을 때 기화되는 액체수소량 \dot{m} 의 변화를 나타낸다. 용기의 체적이 증가함에 따라 기화되는 액체수소량도 증가하나, 증가율은 점차 둔화되고 있음을 알 수 있다.

3. 성능평가

성능평가의 기준으로 위의 단일 성능해석에서 구한 기화 질량을 \dot{m} (kg/s)으로부터 단위체적당 하루에 기화되는 손실률(evaporation loss)을 산출하였다. 액체수소의 밀도는 20 K의 온도에서 70.79 kg/m^3 이므로 기화손실율을 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{evaporation loss}[\%/day] = \frac{\dot{m} \times 3600 \times 24}{70.79 \times V} \times 100 \quad (16)$$

위 식을 이용해 구한 액체수소 저장용기의 부피증가에 따른 단위체적당 기화 손실율을 Fig. 5에 나타내었다. 10 l에서 100 l급의 저장용기 모두 0.3(%/day) 이내의 기화손실율을 보이고 있으며 용기의 체적이 증가함에 따라 기화손실율(%/day)은 감소하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

고 진공 하에서 다층단열재와 단일증기냉각설드를 복합적으로 사용하는 액체수소 저장용기의 설계를 위한 기본적인 열해석과 저장용기의 용적에 따른 열해석을 수행하였다.

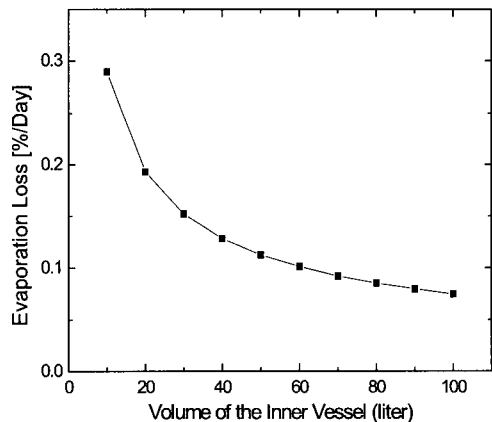


Fig. 5. Variation of the evaporation loss as a function of the volume

A_1/V 를 최소화한 원통형 액체 수소 저장용기에서는 기화질량률을 최소화 시킬 수 있는 \dot{m} 의 분배비율이 존재하였으며, $a(r_2/r_1)$ 와 $b(r_3/r_1)$ 가 각각 1.1과 1.9일 때 실린더축으로 74%, 디스크축으로는 26%로 분배되었을때 최적의 조건을 얻을 수 있었다. 그리고 디스크축의 열 유입에 비해 실린더축의 열 유입이 상대적으로 크므로 실린더축에 단열을 더욱더 신중히 해야 함을 알 수 있었다. 또한 액체수소 저장용기의 용적이 커질수록 기화 질량률 \dot{m} 은 늘어나지만 단위용적당 기화손실율은 감소함을 보였다.

후 기

본 연구는 국민대학교 우수연구센터 사업(과제 번호 2004304)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) W. Peschka : Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 39, 1994, pp. 35-44
- 2) 강병하 공저: 수소액화 및 저장시스템 개발 1차년도 중간보고서, KIST 보고서 NC. UCM05935879-2, 1996.
- 3) H. Rudiger : Cryogenics, Vol. 32, 1992, pp. 327-329.
- 4) R. Ewald and M. Kesten : Adv. Cryogenic Engineering, Vol. 35, 1992, pp. 1777-1781
- 5) K. D. Timmerhaus and T. M. Flynn: cryogenic Process Engineering, Plenum Press, 1989.
- 6) R. B. Scott: Cryogenic Engineering, Met-Chem Research Inc., 1963.
- 7) S. Y. Kim, and B. H. Kang: "Thermal

Design Analysis of a Liquid Hydrogen Vessel," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 25, No. 2, 2000, pp. 133-141.

기 호 설 명

- a, b : 반경비 r_2/r_1 , r_3/r_1
 A : 단면적 [m^2]
 Cp : 정압비열 [W/kgK]
 F : 형상계수
 hfg : 증발잠열 [J/kg]
 kt : 다층단열재의 유효 열전도도 [W/mK]
 L : 내부용기의 길이 [m]
 \dot{m} : 수소의 질량유량 [kg/s]
 \dot{Q} : 열전달률 [W]
 r : 내부용기의 반경 [m]
 t : 다층단열재의 두께 [m]
 T : 온도 [K]
 V : 내부용기의 용적 [m^3]

그리스 문자

- α : 기화수소의 분배비율 [%]
 ϵ : 방사율(emissivity)
 σ : Stefan-Boltzmann 상수 [W/m^2K^4]

하첨자

- cylinder : 실린더
 disk : 디스크
 i : 증기냉각셀드 입구
 o : 증기냉각셀드 출구
 total : 총합
 0,1,2,...9 : 액화수소 저장용기에서의 위치