

액체수소 저장용기의 열해석

김서영 · 강병하

KIST 공조 · 환경제어연구팀

Thermal Analysis of a Liquid Hydrogen Vessel

Seo Young Kim and Byung Ha Kang

Air-Conditioning and Environmental Control Lab., KIST
P. O. Box 131, Cheongryangn, Seoul 130-650, Korea

Abstract

Thermal analysis has been performed to design a high-performance LH₂ vessel with about 1% per day evaporation loss. Analysis includes the combined insulations of MLI(Multi-Layer Insulation) and VCS(Vapor-Cooled Shield) under high vacuum. Combined insulation of MLI and VCS shows the existence of optimal location of VCS to minimize evaporation loss. Comparison of parallel-type DVCS(Double Vapor-Cooled Shield) and serial-type DVCS is also made to show the effectiveness of the system. The results indicate that the serial-type DVCS vessel is better than the parallel-type DVCS vessel with respect to overall evaporation loss. The combined insulation of SVCS(Single Vapor-Cooled Shield) with a partial MLI can give a similar performance characteristics compared to that with MLI and DVCS.

1. 서 론

화석연료의 과다 사용으로 인하여 심화되고 있는 대기오염 및 지구온난화 등의 환경 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 수소 에너지의 사용에 관한 연구가 선진국을 중심으로 현재 활발히 수행되고 있다¹⁾. 수소는 자연으로부터 무한히 얻을 수 있으며 연소후에도 CO₂ 등을 발생하지 않는 청정에너지로서 많은 주목을 받고 있다. 그러나 현재 사용되어 온 내연기관 등에 수소를 대체 에너지로 이용하기 위해서는 해결되어야 할 문제점들이 많이 있는데 그 중의 하나로 수소를 안전하고 효율적으로 탑재하여 사용할 수 있는 적절한 저장방법의 개발을 들 수 있다.

수소는 크게 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 금속수소화물(metal hydride)을 이용하는 것으로 Ferrotitanium이나 LaNi₅ 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 미국은 Apollo 계획 이후로 우주선의 로켓추진 연료로서 액체수소가 사용되고 있으며 현재 독일의 Mercedes, BMW 등 여러 선진 자동차 회사에서 개발 중인 미래형 수소자동차의 연료탱크로서도 액체수소 저장 용기의 장착이 유력시 되고 있다.

액체수소 저장용기의 설계시 고려하여야 할 가장 중요한 요소는 다른 극저온 저장용기와 마찬가지로 매우 우수한 단열을 해야 한다는 것이다. 그

러나 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), 증기냉각섶드(vapor-cooled shield) 등이 있다^{5), 6)}.

진공단열은 1892년에 Sir James Dewar에 의해 개발된 Dewar vessel에 사용된 방법으로 이중벽 사이를 고 진공(high-vacuum)상태로 유지하여 두 가지 열전달 모드(전도와 대류)를 차단할 수 있다. 용기에 설치되는 지지대(supports)와 배관(pipe) 등을 통한 전도열 유입을 무시하면 열은 상온의 외부대기로부터 진공단열된 내부용기로 복사를 통해서만 전달되게 되므로 열유입을 상당히 감소시킬 수 있는 방법이다. 분말단열은 고 진공을 유지하기 힘든 상황에서도 사용이 가능하고 용기의 제작이 비교적 용이하기 때문에 대형 저장용기에 사용되고 있으나 단열 성능은 그리 좋지 못한 편이다. 최근에 개발되어 사용되고 있는 다층단열재(MLI)는 얇은 Mylar 필름에 알루미늄을 초박 코팅한 것을 열전도도가 낮은 spacer와 겹겹이 쌓아 제작되는 것으로 특별한 spacer없이 필름을 구기거나 embossing하여 접촉점을 최소로 하면서 겹겹이 감아 제작되기도 한다. 다층단열방법은 고 진공(10^{-4} torr 이하)상태에서 매우 좋은 단열성능을 보이는 것으로 알려지고 있다. 증기냉각 섶드는 외부 열의 유입에 의해 액체수소 저장용기 내에서 기화되는 수소가스를 내부 용기주위를 감싸면서 돌아 방출되도록 하여 유입되는 복사열을 차단하는 방법이다. 내부용기에서 기화된 수소가 스 역시 매우 낮은 온도이므로 이를 그대로 외부

대기로 방출하지 않고 복사실드로 이용하므로 매우 효율적인 방법이라 할 수 있다.

액체수소 저장용기의 설계는 크게 구조해석과 열해석으로 이루어진다. 구조해석은 용기내 수소가스의 허용 압력에 따른 내압설계를 위한 것으로 필수적인 설계인자이지만 효율적인 저장을 위해서는 단열성능의 개선을 목적으로 하는 열해석이 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 배출되게끔 만들어지기 때문이기도 하다. 따라서 본 연구에서는 몇 가지 복합 단열방법들의 성능을 열해석을 통하여 면밀히 분석하여 그 자료를 액체수소 저장용기의 설계 및 제작에 적용하고자 한다.

2. 고 진공 하에서 다층단열재과 이중 증기냉각실드를 사용하는 LH₂ 용기

액체수소의 내부용기는 원통형으로 설계되는데 이때 단위체적당 내부용기표면적 A_i/V 을 최소화 하는 것이 매우 중요하다. 용기의 표면적이 증가하면 내부용기로의 열 유입량이 급격히 증가하여 액체수소의 기화손실이 커지기 때문이다. 먼저 2-liter용량의 액체수소 저장용기를 설계하기 위하여 내부용기의 반경 r_1 에 따른 A_i/V 의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 단위체적당 내부용기표면적 A_i/V 이 최소가 되는 $r_1=7\text{cm}$ 을 내부용기의 반경으로 하고 10%의 여유 공간(ullage volume)을 고려하여 용기의 길이는 $L=15\text{cm}$ 로 결정하였다.

2.1 병렬형 이중증기냉각실드(parallel-type double vapor-cooled shield)

병렬형 이중증기냉각실드를 장착한 용기의 개

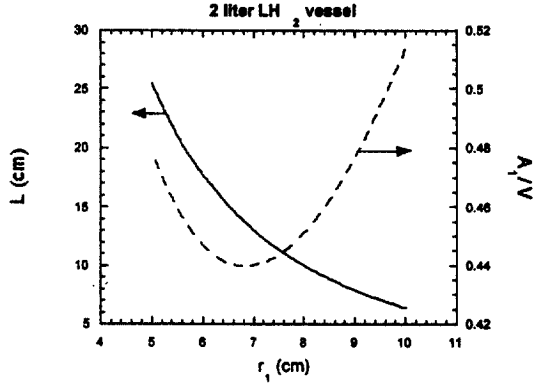


Fig. 1 Variation of surface area as the radius of inner vessel changes

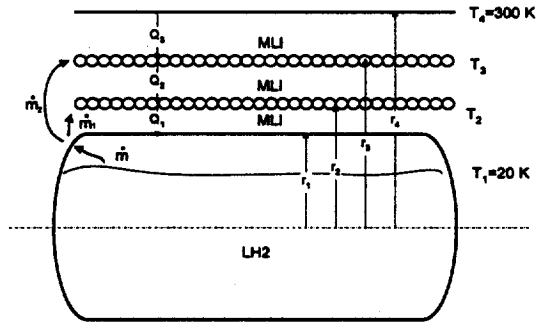


Fig. 2 Combined insulation of MLI and parallel-type DVCS

략도를 Fig. 2에 나타내었다. 반경 r_2 와 r_3 의 위치에 증기냉각실드가 설치되어 있고 그 사이는 모두 다층단열재(MLI)로 채워진 용기를 나타낸다. 외부 열의 유입에 의하여 내부용기내에서 기화된 수소가스는 r_2 와 r_3 에 설치된 냉각실드를 각각의 독립적인 통로를 통해 내부용기 주위를 흐르면서 외부에서의 열유입을 차단하게 된다. 저장용기의 단열 성능해석을 위하여 내부용기의 온도 T_1 는 20K, 외부용기의 온도 T_4 는 300K로 하고, 초기에 내부용기에는 99.8%의 para-수소가 채워진 것으로 가정하였다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 Q_1 은 내부 증기냉각설 드 T_2 에서 내부용기 T_1 로 전달되는 열량을 나타내며 내부용기의 액체수소량 \dot{m} 을 기화시키게 된다.

$$Q_1 = \dot{m}h_{fg} = \frac{2\pi k_t(T_2 - T_1)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (1)$$

여기서 k_t 는 다층단열재를 통한 유효열전도도(apparent thermal conductivity)를 나타내는데 고진공(10^{-4} torr 이하)상태에서 층밀도를 30 layer/cm 정도로 하여 다층단열재를 장착하였을 때 $k_t \approx 0.04$ mW/mK이다⁴⁾. 그리고 h_{fg} 는 대기압하에서 para-수소의 증발열($h_{fg} = 443$ kJ/kg)이다.

Q_2 는 외부 증기냉각설 드 T_3 에서 내부 증기냉각설 드 T_2 까지 다층단열재를 통하여 전달되는 열량을 나타낸다. 이때 Q_2 는 에너지평형에 의해 내부용기로 유입되는 열 Q_1 과 내부용기에서 기화된 수소가스가 내부 증기냉각설 드를 통과함에 따라 흡수하는 현열(sensible heat) $\dot{m}_1 \Delta h_1$ 의 합으로 표현될 수 있다. \dot{m}_1 은 내부용기에서 기화된 전체 기화수소량 \dot{m} 중에서 내부 증기냉각설 드를 통과하는 기화수소량을 나타낸다.

$$Q_2 = Q_1 + \dot{m}_1 \Delta h_1 = \frac{2\pi k_t(T_3 - T_2)}{\ln(r_3/r_2)} \quad (2)$$

여기서 $\Delta h_1 = C_{p1}(T_2 - T_1)$ 이다.

Q_3 은 상온의 외부용기에서 외부 증기냉각설 드로 전달되는 열량을 나타내는데 에너지평형에 의해 Q_3 은 다시 내부 증기냉각설 드로 유입되는 열 Q_2 와 내부용기에서 기화된 수소가스가 외부 증기냉각설 드를 통과함에 따라 흡수하는 현열(sensible heat) $\dot{m}_2 \Delta h_2$ 의 합으로 표현된다. \dot{m}_2 은 전체기화수소량 \dot{m} 중에서 외부 증기냉각설 드를 통하여 방출되는 수소량을 나타내며 $\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$ 이다.

$$Q_3 = Q_2 + \dot{m}_2 \Delta h_2 = \frac{2\pi k_t(T_4 - T_3)}{\ln(r_4/r_3)} \quad (3)$$

여기서 $\Delta h_2 = C_{p2}(T_3 - T_1)$ 이다. (1)식을 (2)식으로 나누어 \dot{m} 을 소거하면 (4)식을 얻을 수 있는데 이때 기화된 para-수소의 비열 C_{p1} , C_{p2} 는 온도 변화 범위 내에서 크게 변하지 않으므로 같다고 가정하였다($C_{p1} = C_{p2} = C_p = 12.14$ kJ/kgK). 또한 기화된 전체수소량중 내부 증기냉각설 드와 외부증기냉각설 드를 통과하는 양은 같다고 가정하였다($\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}/2$).

$$\frac{\ln(r_3/r_2)}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = \frac{h_{fg}}{h_{fg} + \frac{C_p}{2}(T_2 - T_1)} \quad (4)$$

마찬가지로 (1)식을 (3)식으로 나누면 (5)식과 같다.

$$\frac{\ln(r_4/r_3)}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{(T_4 - T_3)} = \frac{h_{fg}}{h_{fg} + \frac{C_p}{2}(T_2 - T_1) + \frac{C_p}{2}(T_3 - T_1)} \quad (5)$$

위 (4)~(5)식을 이용하여 반경 r_2 , r_3 , r_4 의 변화에 따른 내부 및 외부 증기냉각설 드에서의 온도 T_2 와 T_3 를 구하고 내부용기에서 기화되는 수소량 \dot{m} 을 다시 (1)식을 이용하여 추정할 수 있게 된다. 그리고 반복적인 계산을 통하여 최소의 \dot{m} 를 얻는 반경비를 정하게 된다.

위의 해석적 방법을 통하여 얻은 결과를 정리하여 반경비 $a = r_2/r_1$ 과 $b = r_3/r_1$ 에 대한 기화질량 \dot{m} 의 변화분포를 Fig. 3에 나타내었다. 주어진 외부용기의 크기 $c = 2.0$ 에 대하여 최소의 기화질량을 보이는 최적의 반경비 a , b 가 존재함을 알 수 있다. 여기서 얻어진 반경비 a , b 는 병렬형 이중증기냉각설 드를 단열방법을 채용하여 액체수소 저장용기를 제작할 경우 가장 중요한 설계자료

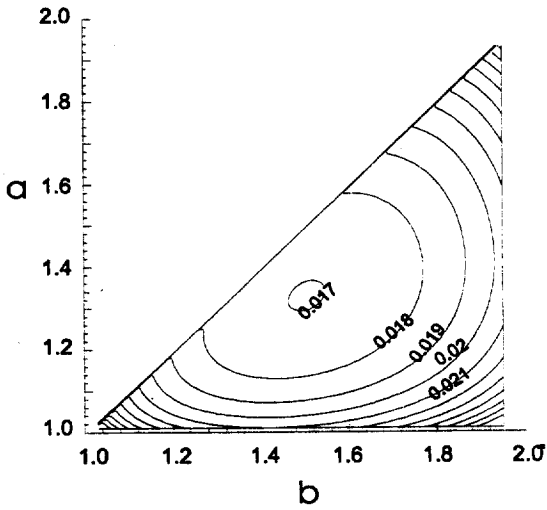


Fig. 3 Distribution of mass flow rate for parallel DVCS(c=2.0)

가 될 수 있다. 결론적으로 병렬형의 경우에는 외부용기의 크기에 관계없이 약 35% 부근에 내부 증기냉각실드(a)를 장착하고 약 50% 부근에 외부 증기냉각실드(b)를 장착하면 최소의 기화질량을 얻을 수 있다.

2.2 직렬형 이중증기냉각실드(serial-type double vapor-cooled shield)

직렬형 이중증기냉각실드를 장착한 용기의 개략도는 Fig. 4에 보이고 있다. 반경 r_2 와 r_3 의 위치에 이중으로 증기냉각실드를 설치한 것은 위에서 언급한 병렬형과 차이가 없다. 다만 내부용기에서 기화된 수소가스가 반경 r_2 의 내부증기냉각실드를 통과한 후 다시 반경 r_3 에 설치된 외부증기냉각실드를 통과하여 외부로 방출되는 점만 다르다. Q_1 은 내부 증기냉각실드 T_2 에서 내부용기 T_1 로 전달되는 열량을 나타내며 내부용기의 액체 수소량 \dot{m} 만큼 기화시킨다.

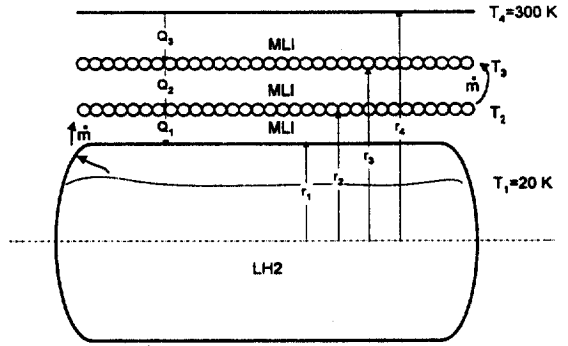


Fig. 4 Combined insulation of MLI and Serial-type Double VCS

$$Q_1 = \dot{m}h_{fg} = \frac{2\pi k_t (T_2 - T_1)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (6)$$

이렇게 기화된 수소가스는 r_2 의 위치에 설치된 내부증기냉각실드를 통과하고나서 다시 r_3 의 위치에 설치된 외부증기냉각실드를 통과하여 대기로 배출되므로 에너지평형관계에 의해 Q_2 와 Q_3 은 다음식과 같이 표현될 수 있다.

$$Q_2 = Q_1 + \dot{m}C_p(T_2 - T_1) = \frac{2\pi k_t (T_3 - T_2)}{\ln(r_3/r_2)} \quad (7)$$

$$Q_3 = Q_2 + \dot{m}C_p(T_3 - T_2) = \frac{2\pi k_t (T_4 - T_3)}{\ln(r_4/r_3)} \quad (8)$$

(6)~(8)식을 풀기 위해 (6)식을 (7)식과 (8)식으로 나누어 \dot{m} 을 소거하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\frac{\ln(r_3/r_2)}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = \frac{h_{fg}}{h_{fg} + C_p(T_2 - T_1)} \quad (9)$$

$$\frac{\ln(r_4/r_3)}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{(T_4 - T_3)} = \frac{h_{fg}}{h_{fg} + C_p(T_3 - T_1)} \quad (10)$$

병렬형 해석과 같은 방법으로 T_2 , T_3 에 대해 (9)와 (10)식을 풀고 다시 (6)식을 이용하여 기화질량을 \dot{m} 을 산출할 수 있다.

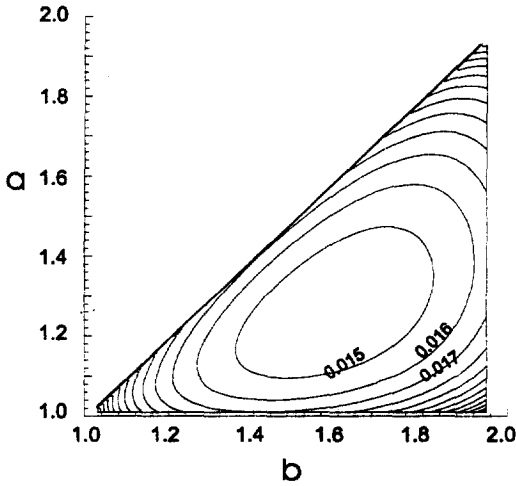


Fig. 5 Distribution of mass flow rate for serial DVCS($c=2.0$)

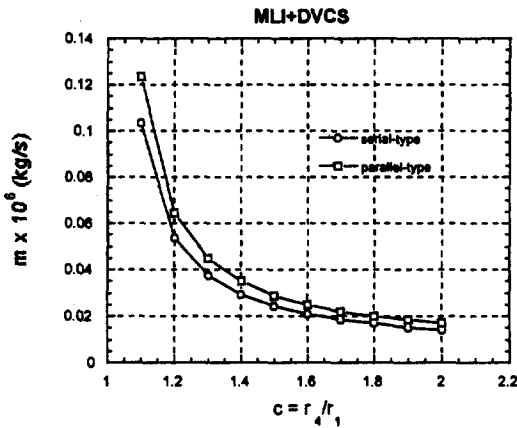


Fig. 6 Comparison of mass flow rate between serial- and parallel-type

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 병렬형과 마찬가지로 기화 질량을 \dot{m} 이 최소가 되는 최적의 반경비 $a = r_2/r_1$ 과 $b = r_3/r_1$ 가 존재한다. 직렬형의 경우에는 r_1 과 r_4 사이의 약 30% 부근에 내부 증기냉각실드(a)를 장착하고 약 60% 부근에 외부 증기냉각실드(b)를 장착했을 때 최소의 기화율을 얻을 수 있다.

최적조건인 a 와 b 에서 외부용기의 크기 변화에 대한 병렬형과 직렬형의 기화질량을 비교를 Fig. 6에 나타내었다. 외부용기의 크기가 증가할수록 기화질량은 상당히 감소함을 알 수 있으며 직렬형이 병렬형에 비해 약 16%이상 낮은 기화질량을 보이고 있다. 따라서 이중증기냉각실드를 액체수소 저장용기에 적용할 경우에는 직렬형의 장점이 바람직하다.

3. 고 진공 하에서 다층단열재와 단일 증기 냉각실드를 사용하는 LH₂ 용기

Fig. 7에 보이는 것과 같이 반경 r_2 의 위치에 단일증기냉각실드(vapor-cooled shield)를 설치하고 그 위에 다층단열재를 반경 r_3 의 높이까지 부분적으로 장착한 용기를 나타낸다. 증기냉각실드 위에만 부분적으로 다층단열재를 감게되므로 용기의 제작이 용이하여 고려된 모델이다. Fig. 7에서 Q_1 은 증기냉각실드 T_2 에서 내부용기 T_1 로 전달되는 복사열량을 나타낸다.

$$Q_1 = \dot{m} h_{fg} = F_{e1} \sigma A_1 (T_2^4 - T_1^4) \quad (11)$$

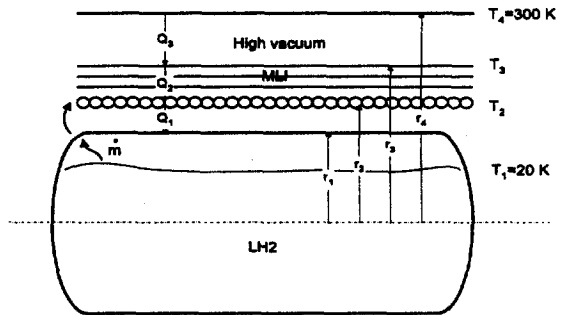


Fig. 7 Combined insulation of partial MLI and single VCS

여기서 F_{e1} 는 방사율계수 (emissivity factor), σ 는 stefan-Boltzmann 상수 ($\sigma=5.670 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$), $A_1=2\pi r_1$ 는 $r=r_1$ 에서의 단위길이당 표면적을 나타낸다. Q_2 는 다층단열재의 외부면 r_3 에서 다층단열재를 통하여 증기냉각셀드 r_2 까지 전달되는 열량을 나타낸다. 에너지평형에 의해 Q_2 는 내부용기로 유입되는 열 Q_1 과 내부용기에서 기화된 수소가스가 증기냉각셀드를 통과함에 따라 흡수하는 현열 (sensible heat) $\dot{m} \Delta h$ 의 합으로 표현된다.

$$Q_2 = Q_1 + \dot{m} \Delta h = \frac{2\pi k_t}{\ln(r_3/r_2)} (T_3 - T_2) \quad (12)$$

여기서 $\Delta h = C_p(T_2 - T_1)$ 이고 k_t 는 다층단열재를 통한 유효열전도도(apparent thermal conductivity)를 나타낸다. Q_3 은 외부용기에서 다층단열재의 외부표면으로 전달되는 복사열량을 나타내며 에너지평형에 의해 Q_3 은 Q_2 와 같다.

$$Q_3 = F_{e3} \sigma A_3 (T_4^4 - T_3^4) = Q_2 \quad (13)$$

여기서 F_{e3} 는 방사율계수 (Emissivity factor), $A_3 = 2\pi r_3$ 는 $r=r_3$ 에서의 단위길이당 표면적을 나타낸다. (11)식과 (13)식에서 사용되는 방사율계수 F_{e1} , F_{e3} 는 다음과 같이 정의된다. 이때 증기냉각셀드와 내부 및 외부용기의 방사율(emissivity)은 0.08, 다층단열재의 방사율은 0.04로 하였다.

$$F_{e1} = \frac{e_1 e_2}{e_2 + \frac{\gamma_1}{\gamma_2} (e_1 - e_1 e_2)} \quad (14)$$

$$F_{e3} = \frac{e_3 e_4}{e_4 + \frac{\gamma_3}{\gamma_4} (e_3 - e_3 e_4)} \quad (15)$$

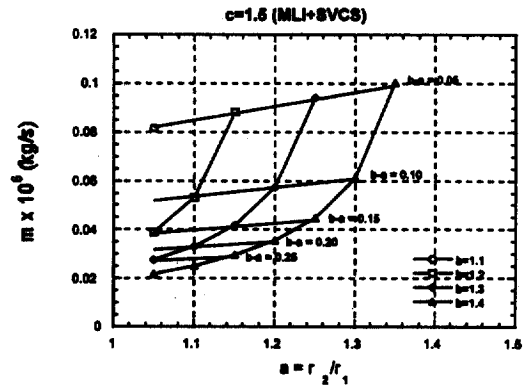
(13)식의 에너지 평형관계로부터

$$\frac{2\pi k_t (T_3 - T_2)}{\ln(r_3/r_2)} = F_{e3} \sigma A_3 (T_4^4 - T_3^4) \quad (16)$$

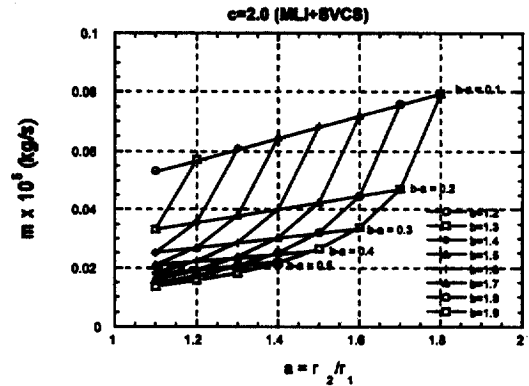
(11)식을 (12)식으로 나누어 \dot{m} 을 소거하면 다음 식을 얻는다.

$$\frac{F_{e1} \sigma A_1 (T_2^4 - T_1^4)}{2\pi k_t (T_3 - T_2) / \ln(r_3/r_2)} = \frac{h_{fg}}{h_{fg} + C_p(T_2 - T_1)} \quad (17)$$

따라서 반경 r_2, r_3, r_4 에 다른 T_2 와 T_3 를 (14)



(a) c=1.5



(b) c=2.0

Fig. 8 Variation of mass flow rate as α and b changes

~(17)식을 이용하여 구하고 기화되는 수소량 \dot{m} 을 (11)식을 이용하여 산출할 수 있다.

Fig. 8은 반경비 $a = r_2/r_1$ 과 $b = r_3/r_1$ 에 대한 기화질량을 \dot{m} 의 변화를 나타내고 있다. 위에서 언급한 이중중기냉각설드의 결과와는 달리 기화질량을 보이는 최적반경비 a, b 는 존재하지 않음을 알 수 있다. 다층단열재 외부면의 위치 b 를 고정하고 중기냉각설드의 위치 a 가 증가하면(단층단열재의 두께가 얇아지면) 기화질량을 \dot{m} 은 급격히 상승한다. 또한 용기내에 같은 두께의 다층단열재 ($b - a = const.$)를 장착할 경우에는 중기냉각설드의 위치 a 가 내부용기에 가까울수록 기화질량을 \dot{m} 은 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 외부용기의 크기가 바뀌어도 변하지 않는다[Fig. 8(a)와 8(b) 비교].

Fig. 9는 외부용기의 반경비 $c = r_4/r_1$ 에 대한 기화질량을 \dot{m} 의 변화를 보이고 있다. 외부용기의 크기 c 는 내부 중기냉각설드와 다층단열재의 두께가 결정되면 전체적인 기화질량에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 따라서 단일 중기냉각설드와 부분적 다층단열재를 채용했을 경우에 외부용기의 크기는 다층단열재의 두께를 결정한 후 이에

맞추어 되도록 작게 하는 것이 바람직하다. 결론적으로 중기냉각설드의 위치 a 는 내부용기에 가깝게 설치하고 다층단열재 (MLI)의 두께 ($b - a$)는 두꺼울수록 좋다고 할 수 있다. 그러나 다층단열재를 많이 감게 되면 저장용기의 열 용량(heat capacity)이 크게 증가하여 그만큼 저장초기에 용기의 cool-down 시간은 늘어나게 된다⁶⁾. cool-down 시간이 늘면 저장 초기에 액체수소가 계속적으로 기화하여 손실이 크게 되므로 cool-down 시간을 고려한 적절한 다층단열재의 두께 선정이 바람직하다.

4. 성능평가

성능평가의 기준으로 위의 단열 성능해석에 구한 기화질량을 \dot{m} (kg/s)로부터 하루에 기화되는 손실율(evaporation loss)을 산출할 수 있다. 기화손실율의 위한 액체수소 2 liter의 질량은 20K의 온도에서 밀도가 70.79kg/m^3 이므로 0.14158kg이다.

Table 1은 본 연구에서 고려한 세 가지 복합 단열방법들에 대한 기화손실율의 비교를 나타내고 있다. 참고로 고 진공단열 방법만이 채용된 액체수소 저장용기의 기화손실율을 보였는데 약 42분 만에 2 liter의 액체수소가 모두 기화됨을 알 수 있다. 따라서 액체수소 저장용기의 단열방법으로 고전적인 Dewar vessel의 진공단열방법만을 사용할 수는 없음을 알 수 있다. 직렬형 이중중기냉각설드와 다층단열재를 복합적으로 단열방법으로 적용한 경우에는 적절한 장착위치를 선정하면 약 1%/day이하의 성능을 갖는 액체수소 저장용기의 설계가 가능함을 알았다. 특히 단일중기냉각설드와 다층단열재만을 장착한 방법은 직렬형 이중중기냉각설드와 비슷한 성능을 보였다. 따라서 용기의 열용량에 의한 저장 초기의 cool-down 시간과 제작 경비의 관점에서도 단일중기냉각설드와

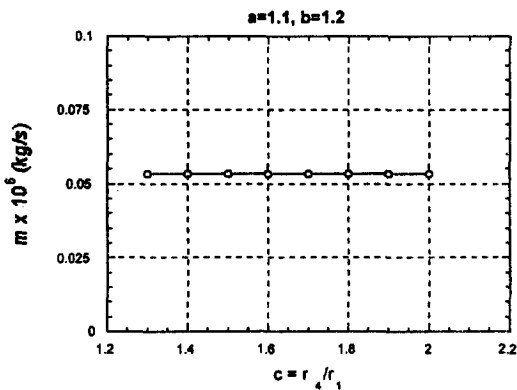


Fig. 9 Variation of mass flow rate for the change of radius of outer vessel

부분적으로 감긴 다층단열재를 채택한 방법이 적합하다고 생각된다.

Table 1 Comparison of evaporation loss for various insulations(c=2.0)

Insulation type	$a=\gamma_2/\gamma_1$	$b=\gamma_3/\gamma_1$	Evaporation loss
High vacuum only			100%/43min
High vacuum+full MLI+DVCS(Parallel)	1.33	1.51	1.04%/day (optimum)
High vacuum+full MLI+DVCS(Serial)	1.26	1.59	0.86%/day (optimum)
High vacuum+partial MLI+SVCS	1.10	1.80	0.89%/day

5. 결 론

고 진공 하에서 다층단열재와 증기냉각설드를 복합적으로 사용하는 액체수소 저장용기의 설계를 위한 기본적인 열해석을 수행하였다. 이중증기냉각설드의 경우에는 병렬형과 직렬형 두 가지의 증기냉각설드방식을 고려하였고 단일증기냉각설드를 사용한 경우에는 다층단열재를 단일증기냉각설드의 외부에 부분적으로 장착한 저장용기의 열해석을 수행하였다.

이중증기냉각설드의 장착한 용기는 병렬형과 직렬형 모두 최소의 기화질량을 보이는 최적의 설드위치가 존재하였으며 병렬형의 경우 내부용기와 외부용기사이의 약 35% 부근에 내부설드를 설치하고 약 50% 부근에 외부설드를 설치하면 최적

의 조건을 얻을 수 있었고 직렬형의 경우에는 약 30% 부근에 내부설드를 약 60% 부근에 외부설드를 설치하면 최적의 조건이 됨을 알았다. 반면에 단일증기냉각설드와 부분적으로 감긴 다층단열재를 장착한 용기는 최소의 기화질량을 보이는 최적 설드위치는 존재하지 않았으며 증기냉각설드를 내부용기에 되도록 가깝게 설치하고 다층단열재를 두껍게 감을수록 기화손실율은 감소함을 보였다. 또한 단일증기냉각설드와 부분적으로 감긴 다층단열재의 복합단열 방법은 cool-down 시간의 감소와 제작상의 편의라는 관점에서 유리하며 성능은 직렬형 이중증기냉각설드와 유사하게 나타났다.

6. References

- 1) W. Peschka, Adv. Cryogenic Engineering, Vol. 39, pp.35~44, 1994.
- 2) 장병하 공저, 수소액화 및 저장시스템 개발 제1차년도 중간보고서, KIST 보고서 No. UCM0593-5879-2, 1996.
- 3) H. Rudiger, Cryogenics Vol. 32, pp, 327~329, 1992.
- 4) R. Ewald and M. Kesten, Adv. Cryogenic Engineering, Vol. 35, pp. 1777~1781, 1990.
- 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.