

자동차용 액체수소 저장 용기의 열해석

오병수, 정진삼

전남대학교 기계공학과
광주광역시 북구 용봉동 300, 500-757

Thermal analysis of a LH₂ storage for vehicles

Byeong Soo Oh, Jin Sam Jung

Dept. of Mechanical Engineering Chonnam National University
300 Yongbong-Dong, Puk-ku, Kwangju 500-757, Korea

Abstract

The development of hydrogen vehicles has been actively progressed in the developed countries such as U. S., Japan and Germany. The most important technology of using hydrogen fuel is to develop a compatible storage tank with respect to the fossil fuel tank. Among many storage methods, the liquid hydrogen is the most desirable state because of the lowest volume and weight. The metal hydride tank is too heavy and the compressed hydrogen tank is too bulky. Because of these reasons, it is the principal purpose to analyze the theoretical heat transfer for designing and manufacturing an actual LH₂ tank. The insulation methods of the room between inner and outer vessel are non-vacuum, vacuum, vacuum with MLI(Multi-Layer Insulation). According to the results of the numerically calculated heat leak through the walls of the LH₂ tank, the vacuum insulated tank has 20 times and the MLI tank has 5616 times less heat leak than the non-vacuum tank.

1. 서론

비록 수소는 2차 에너지이지만 매우 높은 효율의 에너지이며 이러한 잠재능력이 수소의 경제적 이용 가능성에 대한 관심을 널리 확산시켜 왔다. 수소를 연료로 사용하는 자동차는 기존의 내연기관 또는 연료전지를 동력원으로 하고 있다. 이러한 엔진과 더불어 수소 저장용기의 문제점이 수소 자동차의 근본적인 해결 과제이다. 수소 저장 방법으로는 금속 수소화물(metal hydride), 1기압 및 20 K의 초저온으로 저장하는 액체수소, 그리고 고압기체 수소 등 크게 3가지 방법을 취하고 있다.^(1,2) 각각의 저장 방법에 대한 장·단점이 있으나 액체 수소는 단위 부피당, 단위 무게당 에너지 저장량이 많아 다른 방법보다 자동차의 장거리 운행을 할 때 현재의 가솔린 연료 시스템을 대체할 수 있다.⁽³⁾ 그러나 저장 용기내 온도는 초저온을 유지해야 하는 것 때문에 대기로부터 열에너지가 액체 수소 연료 통으로 유입되어 액체가 기체로 기화하는 과정에 압력 상승을 가져온다. 압력상승이 용기의 허용 압력 이상이 되면 대기로 수소를 배출하여 압력을 조절하여야 한다. 이렇게 무의미하게 버려지는 수소의 양을 최소화시키기 위해서 많은 연구가 진행중이다. 1892년에 James Dewar에 의해서 이중 벽으로 진공 단열된 용기가 개발된 이후 미국, 일본, 독일등 선진국에서는 액체 수소 연료통을 개발하여 하루 증발율을 1.5%이하로 내리는 실험을 하고 있다.⁽⁴⁾

본 논문에서는 자동차 연료탱크에 액체 수소의 저장 및 이용 등에 관하여 기초적인 자료로 활용하기 위하여 저장용기의 간단한 모델을 설정하고 열저항 네트워크를 이용한 열전달을 다음과 같이 수행하였다. 첫째, 단열방법을 무진공, 완전진공, 완전진

공과 다층단열재의 병행 등 3가지로 나누어 열 유입량 계산.

둘째, 단열방법별로 알루미늄포일실드 수, 액체 수소의 양, 용기의 외부온도 등이 변화할 때 열전달 해석

셋째, 진도 열전달의 영향.

2. 저장 용기의 설계 및 열전달 해석

2.1 저장 용기의 설계

2.1.1 용기의 형태

자동차 연료 탱크는 자동차에 부착하기 쉽고, 외부의 충격에 안전하며 진동 및 가속도 등의 영향을 억제할 수 있는 구조이어야 한다. 현재 각국에서 개발중인 용기의 형태는 양쪽 끝이 반구형 또는 타원형이고 가운데가 실린더형 또는 계란형이 대표적이며 자동차에 어울리는 적당한 크기를 갖추어야 한다. 본 논문에서는 Fig.1과 같이 열전달 해석이 용이하도록 반구형과 실린더형으로 이루어진 모델을 선정하였다.

2.1.2 용기의 상태

용기의 재질은 저온에서 안전한 재질이며 구하기가 비교적 쉬운 STS 304(외통)와 STS 316(내통)으로 하였다. 용기의 두께는 두꺼울수록 저장 초기에 Cool-Down 시간이 늘어나 액체 수소의 손실이 많고 재료값 상승으로 제작비용이 늘어나기 때문에 용기의 안정성을 고려한 최소의 두께가 필요하다. 용기의 상태는 다음과 같다.

1. 재질 : 내통 - STS 316, 외통 - STS 304
2. 두께 : 내통 - 5mm, 외통 - 4mm
3. 반경(내경) : 내통 - 78mm, 외통 - 104mm
4. 실린더 길이 : 440mm

- 5. 내통과 외통의 간격 : 21mm
- 6. 용기 내부용적 : 10.4 l

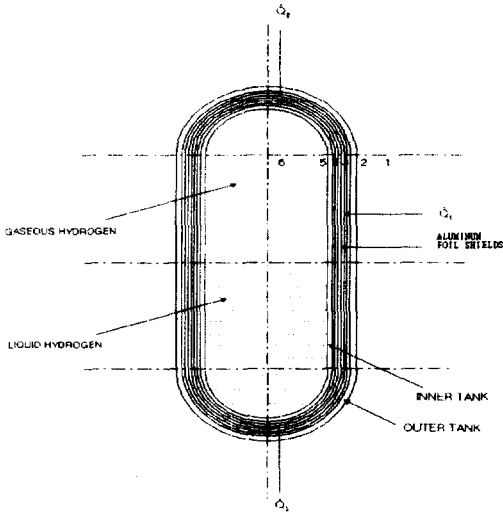


Fig.1 A simplified LH₂ tank for calculation

2.2 저장 용기의 열전달 해석

열전달을 해석하기 위한 용기의 개략도를 Fig. 1에 표기한 바와 같이 용기의 외부를 1, 외통의 내·외부를 2와3, 내통의 내·외부를 4와5, 용기의 내부를 6으로 정하였다. Table 2는 저장용기의 물성치 들이다.⁽⁴⁾

2.2.1 지배방정식

열전달을 해석하기 위한 지배 방정식으로 외통에서 전도 열전달량을 실린더 부분에서는 (1)식을 사용하였고

$$q_{23} = \frac{2\pi kL(T_2 - T_3)}{\ln(r_2/r_3)} \quad (1)$$

반구 부분에서는 (2)식을 사용하였다.

$$q_{23} = \frac{2\pi k(r_2 r_3)(T_2 - T_3)}{(r_2 - r_3)} \quad (2)$$

외통과 내통사이에는 대류 열전달과 복사 열전달을 고려하여 (3)식과 (4)식을 사용하였다.

$$q_{341} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{1}{h_3 A_3} + \frac{1}{h_4 A_4}} \quad (3)$$

$$q_{342} = \frac{\sigma(T_3^4 - T_4^4)}{(1 - \epsilon_3)/\epsilon_3 A_3 + 1/A_3 F_{43} + (1 - \epsilon_4)/\epsilon_4 A_4} \quad (4)$$

여기서 $F_{43}=1$ 은 형상 계수(shape factor)로서 첨자 4는 용기 내통의 바깥 표면, 첨자 3은 외통의 안 표면을 나타내며 ϵ 는 용기의 방사율(emissivity)이다. 외통과 내통사이에 복사 열전달을 적게하기 위하여 n 겹의 알루미늄 포일로 차폐하였을 때 (5)식을 사용하였다.

$$q_{34} = \frac{\sigma(T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\epsilon_4 A_4} + (\frac{2}{\epsilon_s} - 1)(\frac{1}{A_{s1}} + \frac{1}{A_{s2}} + \dots + \frac{1}{A_{sm}}) + \frac{(1 - \epsilon_3)}{\epsilon_3 A_3}} \quad (5)$$

여기서 ϵ_s 는 알루미늄 포일의 방사율(emissivity)이다.

2.2.2 열전달량 계산

열해석을 위하여 Fig. 2와 같이 열저항 네트워드를 사용하였고 열흐름은 1차원 정상상태로 한다. 아래쪽 반구는 용기 안의 수소상태가 액체이고 위쪽 반구는 수소가 기체이므로 대류 열전달 계수를 다르게 하였다. 외통의 외부표면은 대기와 직접 접하므로 복사 및 대류 열전달을 계산하고 태양이나 다른 열 기구로부터의 직접 열전달은 없다고 가정했다. 방사율은 진공이나 진공이 아

닐 때도 같다고 계산하였고 복사열전달을 줄이기 위해서 설치한 n겹의 알루미늄 포일 단열은 포일 사이의 대류 열전달은 무시하였다. Table 1에서와 같이 외통의 외부 공기온도를 298K로, 내통의 수소 온도를 20K로 가정하였고, 일정한 온도에서의 열전도도는 동일시 하였다. 외부로부터 저장용기로의 열전달량은 Fig. 1에서처럼 실린더 방향 열 유입량을 \dot{Q}_1 , 반구방향 열 유입량을 각

각 \dot{Q}_2 , \dot{Q}_3 로 하였다. 그리고 전체 용기 내로 유입되는 열은 $\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$ 로 계산했다. 내부로 유입된 \dot{Q} 가 액체수소를 기화시키는데, 그 증발률은 $\dot{Q} = \dot{m}h_{fg}$ 식에서 $\dot{m}(\text{g/h})$ 를 구하였다. 여기에서 h_{fg} (443kJ/kg)는 대기압하에서 액체 수소의 증발 잠열이다.

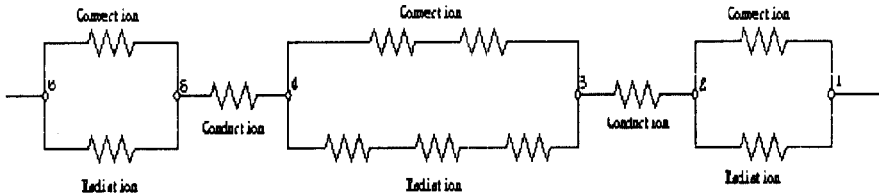


Fig. 2 Thermal resistance network

Table 1. Heat transfer properties of the LH₂ tank

Emissivity, ϵ	Outer Shell : 0.17 Inner Shell : 0.14
Stefan-Boltzmann Constant, σ	5.669×10^{-8} (W/ m^2K^4)
Conductivity, κ	Outer Shell(298K) : 14.9 (W/mK)-STS304 Inner Shell(20K) : 1.95 (W/mK)-STS316
Heat Transfer Coefficient, h	Outer Shell : 10.0 (W/ m^2K) Gaseous Hydrogen : 36.0 (W/ m^2K) Liquid Hydrogen : 845 (W/ m^2K)

3. 결과 및 고찰

3.1 단열방법 변화와 열전달

통사이의 공간을 진공 하였을 때, 진공하지 않았을 때, 알루미늄 포일로 복사열을 차단하였을 때로 구분하여 해석한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 그림에서 온도 분포를 살펴보면 진공 단열일 때는 내통의 바깥표면 온도가 22K 정도이나 진공하지 않았을 때는 70K정도로서 진공으로 인한 단열효과가 크다는 것을 알 수 있다. 외부공기로부터 내통의 수소로 열유입량을 계산하면 Fig. 5에 도시한 것과 같이 진공과 다층단열(알루미늄포일)혼합은 0.06W, 진공 단열일 때는 12.5W, 진공하지 않았을 때는 337W로 나타났다. 여기에서 다층단열은 알루미늄 포일수를 50겹으로 하였을 때이고 포일 사이의 대류열전달은 무시하였으며 전도열전달 저항($h=34\mu W/m-K$, at 10^{-5} torr)도 무시했다.⁽¹⁰⁾ 열전달 해석결과 진공단열과 다층단열을 병행한 방법의 단열 성능이 가장 우수한 것은 진공으로 대류 열전달이 차단되고 알루미늄 포일에 의한 차폐로 복사 열전달이 줄어들었기 때문이다.

3.2 알루미늄 포일 셸드 수 변화와 열전달

용기사이의 복사 열전달을 줄이기 위해서 용기 사이의 공간에 진공을 유지한 상태에서 방사율이 0.06인 알루미늄 포일을 5겹에서 50겹까지 5겹 간격으로 변화시켜 단열하였을 때 용기로의 유입 열량을 계산한 결과 Fig. 6과 같이 나타났다. 그림에서 알루미늄 포일수가 5겹에서 50겹까지 증가할 때 열유입량은 0.9W에서 0.06W까지 감소한다.

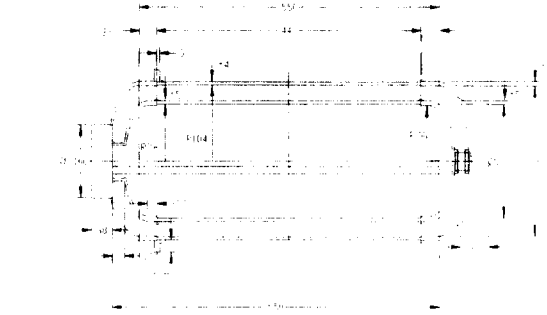


Fig. 3. A LH₂ tank model

Fig. 4. Temperature distribution from outside to inside of a LH₂ tank

3.3 용기내의 액체수소 양의 변화와 열전달

용기 전체 체적은 변화시키지 않고 액체 수소의 양만 가감시켰을 때 전달 열량은 진공 단열하였을 시에는 액체 수소 량의 변화에 의한 용기 내부로의 열유입량이 변화하지 않았지만 진공하지 않았을 때는 액체 수소의 양이 전체량의 90%일 때는 347W, 30%일 때는 331W로 액체 수소의 양이 많을수록 열 유입량이 크게 나타났다. 이것은 용기 벽과 액체수소와의 대류 열전달이 기체 수소와의 대류 열전달보다 큰 결과이다.

한 열전달량 만큼 많으므로 실제로 연료통을 제작할 때는 헤드부분의 설계가 매우 중요하다는 것을 알았다.

Fig. 5. Heat leak through the walls of a LH₂ tank

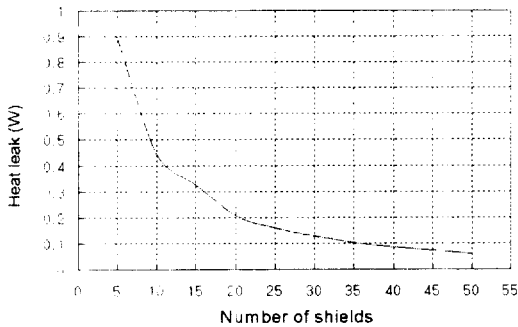


Fig. 6. Heat leak with aluminum foil shields

3.4 전도 열전달의 영향

Fig. 7은 용기사이에 진공 하였을 때 계산한 결과 헤드부분에서 대기와 접촉한 바깥 부분부터 용기내 수소까지 온도 분포를 나타낸 것이다. 열전달량을 계산한 결과 헤드부분을 통한 열유입량은 10.2W이었다. Fig.1과 같이 헤드 부분을 무시하고 전체 유입 열량을 계산한 12.5W와 비교할 때 매우 큰 양이다. 헤드부분에서 전도에 의한 열전달량이 그 외의 부분에서 대류와 복사에 의

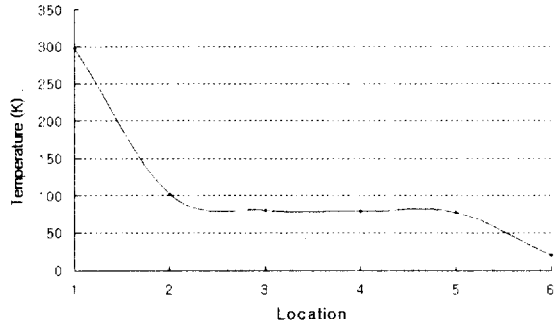


Fig. 7. Temperature distribution in the head of a LH₂ tank

3.5 외부온도 변화의 영향

계절이나 지역별로 자동차 외부의 온도가 변하므로 자동차내의 LH₂저장용기 표면의 온도가 달라지며 용기내의 저장 연료의 증발 손실량도 변화할 것이다. 단열방법을 완전진공과 다층단열재 병행으로 하고 외부환경 온도를 350K, 298K, 250K, 200K의 4가지로 변화시켜 열전달량을 해석한 결과 Fig. 8과 같다.

Fig. 8. Heat leak vs number of shields at certain outer temperature

5. 결론

자동차용 액체 수소 저장용기의 열전달을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단열 방법중 진공과 다층단열재 병행 방법의 성능이 가장 좋은 이유는 진공에 의해서 대류 열전달이 차단되고 알루미늄 포일에 의해서 복사열전달이 차단되었기 때문이다.
- (2) 용기의 이중벽 사이에 알루미늄 포일수를 증가할 때 복사로 인한 열전달량은 점차 감소하였다.
- (3) 용기의 헤드 부분에서 전도에 의한 열전달량이 10.2W, 헤드 부분을 무시한 전체 열 유입량이 12.5W로 전도에 의한 영향이 컸다.
- (4) 완전진공과 다층단열재(50겹) 병행 단열 방법에서 용기의 외부 온도가 1K 상승할 때 용기 내부로의 열 유입량은 0.002W 상승하였다.

참고 문헌

1. K. Binder and G. Withalm, Mixture formation and combustion in a hydrogen engine using hydrogen storage technology, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.7, No.4, pp.651-659 (1982)
2. John E. Anderson and Dale A. Fester, Evaluation of long-term cryogenic storage systems requirements, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol.35 (1990)
3. J. S. Wallace and C.A. Ward, Hydrogen as a fuel, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.8, No.4, pp.255-268 (1983)
4. Randall F. Barron, *Cryogenic Systems*, 2nd ed., Oxford University Press, New York (1985)
5. M. M. Hasan, C. S. Lin and N. T. Van Dresar, Self-pressurization of a flightweight liquid hydrogen storage tank subjected to low heat flux, *ASME HTD-Vol. 167, Cryogenic Heat Transfer*, pp. 37-42, 1991
6. C. Carpetis, Comparison of the expenses required for the on-board fuel storage systems of hydrogen powered vehicles, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 7, No. 1, pp. 61-77 (1982)
7. S. A. Sherif, N.Zeytinoglu and T.N. Veziroglu, Liquid hydrogen : Potential, Problems, and A proposed research program, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.22, No. 7, pp. 683-688 (1997)