

액체수소 충전 비율에 따른 액체수소 연료탱크의 내부 압력 거동 비교

최동국^{1,†} · 이수용²¹한국항공대학교 항공우주산업기술연구소²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Comparison of the Internal Pressure Behavior of Liquid Hydrogen Fuel Tanks Depending on the Liquid Hydrogen Filling Ratio

Dongkuk Choi^{1,†} and Sooyong Lee²¹Research Institute for Aerospace Engineering and Technology, Korea Aerospace University²School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

Because hydrogen has very low density, a different storage method is required to store the same amount of energy as fossil fuel. One way to increase the density of hydrogen is through liquefaction. However, since the liquefied temperature of hydrogen is extremely low at $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$, it is easily vaporized by external heat input. When liquid hydrogen is vaporized, a self-pressurizing phenomenon occurs in which the pressure inside the hydrogen tank increases, so when designing the tank, this rising pressure must be carefully predicted. Therefore, in this paper, the internal pressure of a cryogenic liquid fuel tank was predicted according to the liquid hydrogen filling ratio. A one-dimensional thermodynamic model was applied to predict the pressure rise inside the tank. The thermodynamic model considered heat transfer, vaporization of liquid hydrogen, and fuel discharging. Finally, it was confirmed that there was a significant difference in pressure behavior and maximum rise pressure depending on the filling ratio of liquid hydrogen in the fuel tank.

초 록

수소는 매우 낮은 밀도를 갖기 때문에 화석연료와 동일한 수준의 에너지량을 저장하기 위해서는 기존과 다른 저장방식이 요구된다. 수소의 밀도를 높이는 방법으로는 수소를 액화하여 저장하는 방법이 있다. 하지만, 수소의 액화온도는 $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 극저온이기 때문에 외부 열 유입에 의해 쉽게 기화된다. 액체수소가 기화되면 탱크 내부의 압력이 증가되는 자가증압 현상을 발생하므로, 탱크 설계 시 이 상승하는 압력을 잘 예측해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 극저온 액체수소 연료탱크의 액체수소 충전 비율에 따른 내부 압력을 예측하였다. 탱크 내부의 압력 상승을 예측하기 위하여 1차원 열역학적 모델을 적용하였다. 열전달 모델은 열 유입, 액체수소의 기화, 연료 배출에 현상이 고려되었다. 최종적으로 연료 탱크 내의 액체수소의 충전 비율에 따라 압력 상승 거동과 최대 상승 압력에 큰 차이가 있음을 확인하였다.

Key Words : Hydrogen Energy(수소 에너지), Liquid Hydrogen(액체수소), Cryogenic Tank(극저온 탱크), Internal Pressure(내부 압력), Thermodynamic Model(열역학적 모델)

1. 서 론

수소는 비에너지가 높다는 장점과 연소 시 이산화탄

소를 배출하지 않는다는 장점이 있다. 수소의 비에너지는 120 MJ/kg 으로 화석연료인 항공유 Jet A의 비에너지 43.2 MJ/kg 에 비하여 약 2.8배 크다[1]. 이러한 이점으로 우주발사체 분야에서는 1966년 S-IVB에 추진제로 액체수소-액체산소를 사용하였으며[2], 현재 까지도 액체수소-액체산소를 추진제로 사용하는 발사체가 개발되고 있다[3-5]. 또한, 항공분야에서는 이산

Received: Jan. 02, 2024 Revised: Mar. 22, 2024 Accepted: Apr. 22, 2024

† Corresponding Author

Tel: +82-2-300-0464, E-mail: dkchoi@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

화탄소 배출 저감을 위하여 수소를 연료로 사용하는 탄소제로 미래비행체[6-8]를 개발하고 있다. 에어버스는 2035년까지 수소를 연료로 사용하는 여객기를 개발하는 것을 목표로 하고 있으며 3가지 형태의 비행체 형상을 제시하였다[9]. Fig. 1은 수소탱크가 적용된 항공기의 개념도를 보여준다[10]. 이처럼 항공, 우주 분야에서 수소를 연료로 사용하고자 연구개발이 진행되고 있다.

그러나 수소는 밀도가 매우 낮다는 단점이 있다. 수소의 밀도는 상온 대기압에서 0.0852 kg/m^3 로써 화석연료인 케로신의 밀도 808 kg/m^3 와 비교하여 매우 작다. 대기압 상태의 수소는 밀도가 매우 낮기 때문에 화석연료와 동일한 수준의 에너지를 저장하려면 매우 큰 저장공간이 필요하다[10]. 이러한 점으로 인하여 수소를 저장하기 위해서는 일반적인 화석연료 저장 방식과는 다른 방식이 요구된다. 따라서, 수소를 연료로 사용하는 운송수단에 수소를 고밀도로 저장하기 위한 수소 연료탱크 설계 연구가 필요하다.

수소를 저장하는 방법에 따라 수소 연료탱크를 설계하는 방법이 달라진다. 수소를 저장하는 방법에는 기체수소를 고압으로 압축하여 저장하는 방법과 액화하여 저장하는 방법이 있다. 먼저, 기체수소를 고압으로 압축하여 저장하는 경우 수소는 대개 35 MPa (350 bar) 또는 70 MPa (700 bar)의 압력으로 저장된다[11-14]. 이렇게 기체수소를 고압으로 압축하면 수소의 밀도는 상온에서 각각 23.995 kg/m^3 , 40.172 kg/m^3 로 높아진다. 고압으로 압축된 기체수소는 상온에서 저장할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 탱크에 작용하는 압력 하중이 매우 커지게 되는데, 고압의 기체수소 탱크는 이 매우 높은 압력을 견뎌야 하므로 구

조 중량도 증가하게 되는 단점이 있다.

두 번째로, 수소를 액화하여 저장하는 방법이 있다. 수소를 액체 상태로 저장하면 고압의 기체 수소보다 밀도를 더 높일 수 있다. 액체수소의 밀도는 대기압에서 70.848 kg/m^3 로 기체수소를 70 MPa 의 고압으로 압축한 것보다 1.5배 이상 높다. 그러나 수소를 액화하기 위해서는 대기압 기준 영하 $252.78 \text{ }^\circ\text{C}$ (20.37 K)의 극저온으로 냉각시켜야 한다. 극저온으로 냉각된 액체수소는 열 유입에 취약하다. 수소를 액화하면 가장 높은 밀도로 저장할 수 있지만, 극저온의 온도를 유지하기 위하여 액체수소 탱크에는 단열 설계가 요구된다[15-18].

액체수소 탱크의 액체수소는 외부에서 유입된 열에 의하여 기화된다. 탱크의 단열 성능이 아무리 뛰어나다고 할지라도 외부에서 유입되는 열을 완전히 차단하기는 어렵다. 극저온의 액체수소가 대기압 조건에서 기화되면 비체적은 $0.0141 \text{ m}^3/\text{kg}$ 에서 $0.7507 \text{ m}^3/\text{kg}$ 으로 약 53배 팽창된다. 비체적의 팽창으로 인하여 기화된 액체수소는 탱크의 내부 압력을 급격하게 증가시키는 가장 큰 요인이다. 따라서, 액체수소는 끓는점이 낮고 증발잠열이 작아 열유입에 의하여 쉽게 기화되기 때문에 탱크의 압력을 지속적으로 상승시키는 자가 증압 현상을 발생시킨다[19-21]. 이러한 현상으로 인하여, 액체수소 탱크는 액체수소의 기화로 인해 상승된 압력을 견딜 수 있는 구조를 갖추어야 하고, 압력이 허용치를 넘어가지 않게 주의를 기울여야 한다.

본 논문에서는 극저온 액체수소 연료탱크의 외부 열 유입에 의한 내부 압력 거동을 연구하고자 한다. 탱크의 내부 압력 상승을 예측하기 위하여 1차원 열역학적 모델을 적용한다. 압력 예측 모델은 열전달에 의한 외부 열 유입, 열 유입에 의한 액체수소의 기화, 기체수소의 열역학적 변화와 수소의 외부 배출을 고려한다. 최종적으로 액체수소의 충전 비율에 따른 극저온 액체수소 연료탱크의 내부 압력을 비교하고자 한다.

2. 극저온 연료탱크 열역학적 모델

극저온 연료탱크는 탱크 구조물과 내부에 탑재되는 연료로 구성된다. 탱크 구조의 형상과 단열 설계 방법에 따라 탱크 외부에서 내부로 전달되는 열전달량이

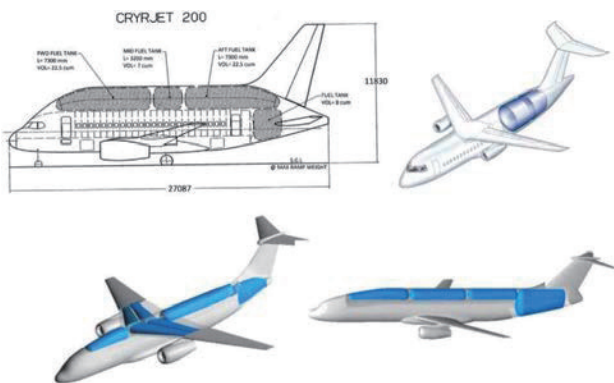


Fig. 1 Concepts of hydrogen tanks in Aircraft

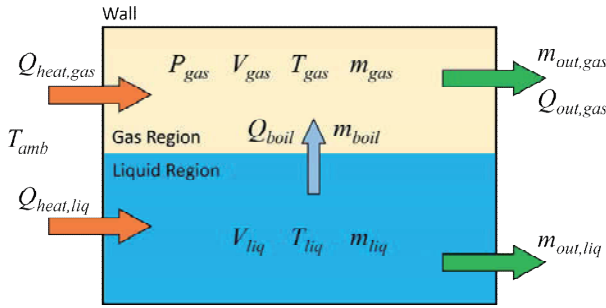


Fig. 2 Thermodynamic schematic of a cryogenic fuel tank

달라진다. 탱크의 복잡한 단열 구조는 하나의 단열재로 구성된 외벽으로 단순화하여 하나의 열전달 계수로 표현할 수 있다. 탱크 내부에 탑재되는 연료는 액체영역과 기체영역으로 나누어 표현할 수 있다. Fig. 2는 극저온 연료탱크의 열역학적 개념도를 보여준다.

탱크 외부와 내부의 온도 차이에 의해 유입되는 열은 탱크 외벽을 통하여 전달된다. 탱크 내부로 유입되는 열은 액체영역과 기체영역에 따로 전달된다고 가정하였다[19, 22]. 각 영역에 전달되는 열은 Eq. 1과 Eq. 2와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{heat,liq} = h_{wall,liq} A_{liq} (T_{amb} - T_{liq}) \quad (1)$$

$$Q_{heat,gas} = h_{wall,gas} A_{gas} (T_{amb} - T_{gas}) \quad (2)$$

여기서, $h_{wall,liq}$ 는 액체영역 외벽의 총열전달 계수, $h_{wall,gas}$ 는 기체영역 외벽의 총열전달 계수, A_{liq} 는 액체영역의 열전달 면적, A_{gas} 는 기체영역의 열전달 면적, T_{amb} 는 탱크 주변 온도, T_{liq} 와 T_{gas} 는 액체영역과 기체영역의 온도를 의미한다. 본 연구에서는 탱크 외부의 대류에 의한 영향을 무시하고 탱크 내부에는 대류가 충분히 발생한다고 가정하여, 유체의벽을 통한 열전도만을 고려하였기 때문에 외벽의 열전달 계수는 Eq. 3과 같이 적용하였다.

$$h_{wall,liq} = h_{wall,gas} = \frac{k_{wall}}{L_{wall}} \quad (3)$$

여기서 k_{wall} 은 단열재의 열전도 계수, L_{wall} 은 단열재의 두께이다.

극저온의 액체연료는 액체영역으로 유입된 열에 의하여 일부가 기화된다. 액체연료의 기화 에너지에 해

당하는 만큼의 질량이 기체영역으로 이동하게 되며, 이때 기화되는 질량은 Eq. 4와 같이 표현할 수 있다. 또한, 연료를 사용하는 등의 이유로 연료가 탱크 외부로 배출되는 경우 기체나 액체 또는 둘의 형태로 배출될 수 있다. 그러므로, 기화된 질량과 외부로 배출된 질량에 의한 액체영역과 기체영역의 질량 변화는 Eq. 5 및 Eq. 6과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_{boil} = \frac{Q_{heat,liq}}{H_{fg}} \quad (4)$$

$$dm_{liq} = - \int \dot{m}_{boil} dt - \int \dot{m}_{out,liq} dt \quad (5)$$

$$dm_{gas} = \int \dot{m}_{boil} dt - \int \dot{m}_{out,gas} dt \quad (6)$$

여기서, H_{fg} 는 액체연료의 단위 무게당 기화열이다.

기체영역의 내부에너지 변화량은 기체영역의 열량 변화량과 일 에너지 변화량의 합으로 표현된다. 기체영역의 열량 변화는 탱크 외부에서 기체영역으로 전달된 열량, 액체수소에서 기화되어 이동한 질량에 의한 열량, 그리고 기체수소가 외부로 배출되면서 빠져나간 열량으로 구성되며 Eq. 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$dQ_{gas} = \int (Q_{heat,gas} + Q_{boil} - Q_{out,gas}) dt \quad (7)$$

기체연료의 배출과 액체연료의 기화에 의한 기체영역의 체적변화에 의한 일 에너지는 Eq. 8과 같이 계산할 수 있다. 따라서 기체영역의 내부에너지 변화량은 Eq. 9와 같이 표현할 수 있다. 기체영역의 온도 변화는 열용량식을 이용하여 Eq. 10과 같이 산출할 수 있다.

$$dW_{gas} = P_{gas} dV_{gas} \quad (8)$$

$$dU_{gas} = dQ_{gas} - dW_{gas} \quad (9)$$

$$dT_{gas} = \frac{dU_{gas}}{C} \quad (10)$$

여기서, C 는 기체영역의 열용량이다. 최종적으로 탱크의 내부 압력은 Eq. 11과 같이 이상기체 상태방정식을 통해 계산된다.

$$P_{gas} = \frac{(m_{gas} + dm_{gas})R_{gas}(T_{gas} + dT_{gas})}{V_{gas} + dV_{gas}} \quad (11)$$

여기서 R_{gas} 는 기체영역의 기체상수를 의미한다.

탱크의 해석은 과도해석을 통해 수행되며, 시간 지남에 따라 액체수소가 기화되면서 열전달 면적 (A_{liq} 와 A_{gas})의 변화가 반영되어 탱크의 압력이 계산된다.

3. 모델 검증

열역학적 모델의 정확성을 확인하기 위하여 검증을 수행하였다. 극저온 연료탱크에서 나타나는 물리적 현상은 액체수소가 기화되면서 나타나는 열역학적 현상과 연료가 배출되면서 나타나는 열역학적 현상으로 분리할 수 있다. 따라서, 연료 배출 없이 액체수소가 기화되는 경우와 기체수소 탱크에서 연료만 배출되는 경우로 구분하여 각각 검증을 수행하였으며 예측 정확도를 확인하였다.

3.1 액체수소 기화 모델 검증

액체수소의 기화에 대한 검증모델로 Liu[22]의 탱크 모델을 선정하였다. 참고문헌의 탱크 모델은 열전달 및 질량 이동 메커니즘을 고려한 온도성층화 모델이 적용되어 극저온 액체수소 탱크의 온도와 압력을 예측하였다. 탱크의 형상은 원통형으로 지름 1.0 m, 높이

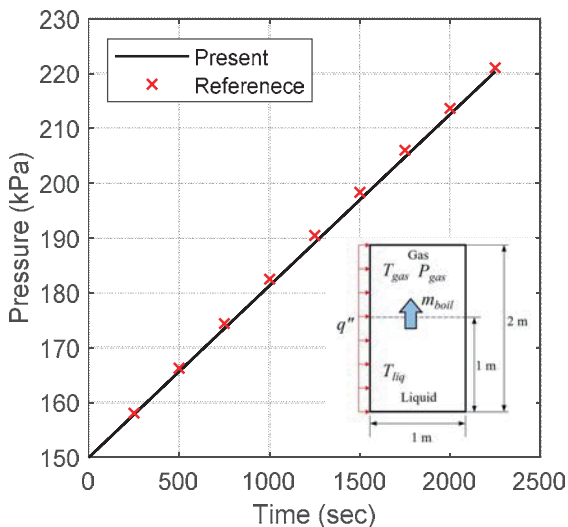


Fig. 3 Comparison of tank pressure for evaporation model

2.0 m를 갖는다. 탱크에는 21 K의 액체수소가 1.0 m 높이까지 채워져 있고, 나머지 영역에는 24 K, 150 kPa의 기체수소가 충전되어 있다. 탱크의 윗면과 아랫면은 단열되어 있으며, 탱크의 옆면(몸통)을 통해 10 W/m²의 일정한 열유속으로 열이 유입된다.

열역학적 모델의 정확성을 확인하기 위하여 탱크의 압력을 비교하였다. Fig. 3은 탱크 내부의 압력 변화를 시간에 따라 보여준다. 검정색 실선은 개발된 모델의 해석결과이며, 붉은색 'x' 마크는 참고문헌에서 추출한 데이터이다. 적용된 열역학적 모델이 예측한 탱크 압력은 참고문헌의 데이터보다 낮은 수치를 나타냈으나 0.74% 이내의 상대오차를 보이며 매우 잘 예측하였다.

3.2 연료 배출 모델 검증

연료 배출에 대한 검증모델로 Miguel[23]의 탱크 모델을 선정하였다. Miguel은 반구형 돔을 갖는 실린더형 탱크 내부에 8개의 열전대와 1개의 압력센서를 장착하여 고압의 기체수소가 배출되는 동안의 온도와 압력을 측정하였다. 탱크는 외경 329 mm, 내경 290 mm, 외부 길이 920 mm이며, 40L의 체적을 갖는다. 초기 탱크는 70MPa(700 bar)의 압축수소로 충전되어 있고, 수소 온도와 외기 온도는 25 °C이다. 외부로 배출되는 기체수소의 평균 질량유량은 1.8 g/sec이다.

개발된 모델의 정확성을 확인하기 위하여 탱크의 압

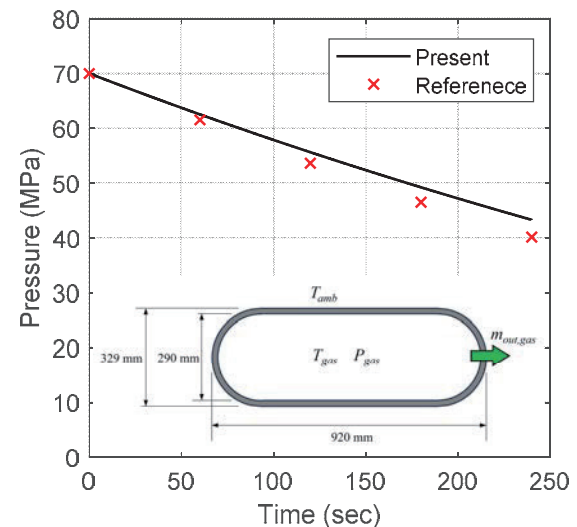


Fig. 4 Comparison of tank pressure for discharging model

력을 비교하였다. Fig. 4는 탱크 내부의 압력 변화를 시간에 따라 보여준다. 검정색 실선은 본 연구에서 적용된 모델의 해석결과이며, 붉은색 'x' 마크는 참고문헌에서 추출한 데이터이다. 적용된 열역학적 모델이 예측한 탱크 압력은 참고문헌의 데이터보다 높은 수치를 나타냈다. 탱크 내부의 압력이 70 MPa(700 bar)에서 약 40 MPa(400 bar)까지 30 MPa(300 bar)의 큰 범위에 걸쳐 변화하는 기체수소를 이상기체로 간주하였음에도 불구하고 상대오차 7.84% 이내로 압력을 예측하며, 적용된 열역학적 모델이 좋은 결과를 도출하고 있다고 할 수 있다.

4. 액체수소 연료탱크 압력 해석

4.1 연료탱크 모델 및 해석 조건

열역학적 모델을 통해 극저온 액체수소 탱크의 압력을 계산하였다. 탱크의 형상은 원통형으로 0.1 m의 직경과 0.15 m의 길이를 갖는다. 탱크의 외벽은 열전도 계수 0.037 W/m·K인 단열재로 되어 있으며, 탱크 내부에는 온도 21 K의 액체수소와 온도 24 K의 기체수소가 150 kPa(1.5 bar)로 충전되어 있다. 탱크 외부로 배출되는 수소의 양은 Spectronik Pte. Ltd.의 300 W 급 수소연료전지인 PROTIUM-300[24]의 연료소비율을 계산한 값인 7.229×10^{-3} g/s을 적용하였다. 수소의 공급은 기체수소가 우선적으로 공급되고 탱크 내에 기체수소가 부족할 경우 액체수소가 공급되는 것으로 가정하였다. 탱크 내 액체수소 충전 비율에 따른 탱크 내부의 압력 거동을 비교하기 위하여 충전 비율을 70%, 80%, 그리고 90%로 설정하였으며 이때의 탱크 내 액체수소의 높이는 0.105 m, 0.120 m, 0.135 m이다. 또한 탱크의 단열 성능 차이에 따른 압력 거동의 변화를 비교하기 위하여 단열재의 두께가 비교적 두꺼운 경우(80 mm)와 비교적 얇은 경우(60 mm)로 설정하여 각각 해석을 수행하였다. 액체수소의 충전 비율과 단열재의 두께에 따른 총 6가지 조건에 대하여 탱크의 내부 압력 거동을 분석하였다.

4.2 압력 거동 비교

탱크 내의 액체수소는 외부에서 유입되는 열에 의하여 점차 기화된다. 탱크 내부의 수소는 연료소모, 벤트

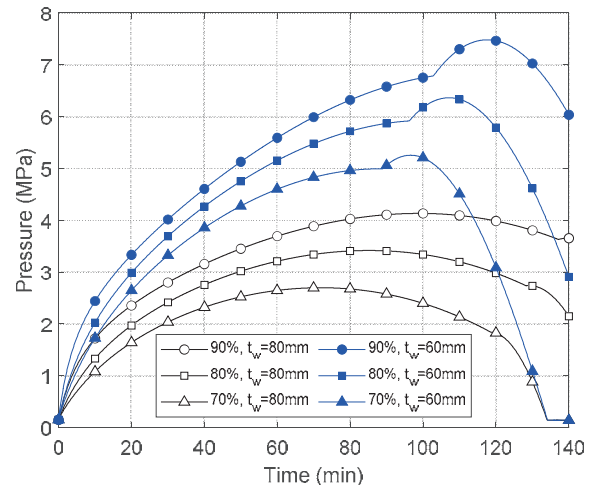


Fig. 5 Estimated results of tank inside pressure

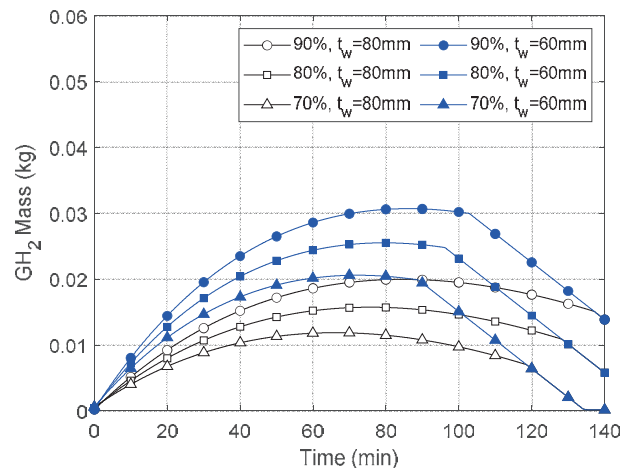


Fig. 6 Gaseous hydrogen mass behavior in tank

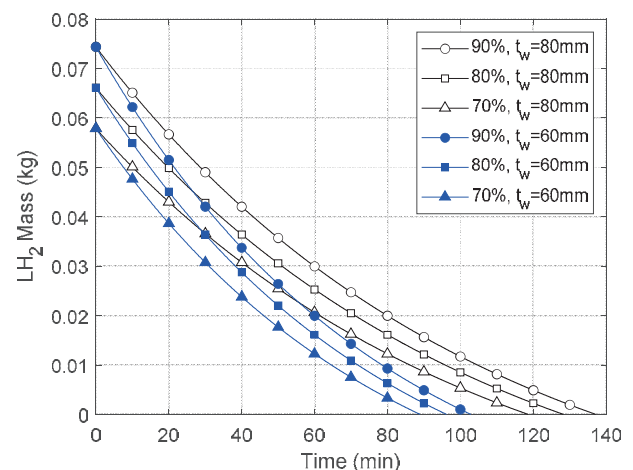


Fig. 7 Liquid hydrogen mass behavior in tank

(Vent) 등의 이유로 외부로 배출된다. 액체수소가 기화되는 속도가 탱크 내부의 수소가 외부로 배출되는 속도보다 크면, 탱크의 내부 압력은 상승하게 된다. 이러한 압력 거동을 자세히 알아보기 위하여 탱크 내부의 기체수소와 액체수소의 질량 변화를 같이 살펴볼 필요가 있다.

먼저, 액체수소 탱크의 외부 열 유입에 의한 내부 압력 변화는 Fig. 5와 같이 나타났다. 여기서 검은색 실선은 단열재 두께가 비교적 두꺼운 경우(80 mm), 파란색 실선은 단열재 두께가 비교적 얇은 경우(60 mm)이며, 원 표식은 충전 비율 90%, 사각형 표식은 충전 비율 80%, 삼각형 표식은 충전 비율 70%를 의미한다. 모든 조건의 탱크에서 내부 압력은 초기에 급격하게 상승하다가 이내 완만하게 상한 후 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 탱크 압력은 액체수소의 충전 비율이 높을수록 더 빠르게 상승하였으며, 최대 압력도 더 크게 발생하였다.

단열재 두께가 비교적 두꺼운 경우인 탱크에서 최대 압력은 충전 비율이 90%, 80%, 70%일 때, 각각 4.13 MPa(41.3 bar), 3.42 MPa(34.2 bar), 2.70 MPa(27.0 bar)로 나타났으며, 단열재 두께가 비교적 얇은 경우인 탱크에서 최대 압력은 각각 7.48 MPa(74.8 bar), 6.36 MPa(63.6 bar), 5.25 MPa(52.5 bar)로 예측되었다. 두 경우 모두 유사하게 액체수소의 충전 비율이 10% 감소할 때마다 최대 압력은 15% 이상 감소하는 경향을 보였다.

액체수소의 충전 비율이 감소할수록 탱크에 발생하는 최대 압력도 감소하였다. 이는 액체수소가 기화되면서 비체적이 급격하게 증가하게 되는데, 액체수소의 충전 비율이 낮으면 기체영역의 초기 체적이 크기 때문에 압력이 비교적 천천히 증가하게 된다. 반대로 액체수소의 충전 비율이 높으면 기체영역의 체적이 작아지게 되면서 기화된 수소가 팽창할 공간도 작아지므로 압력은 급격하게 상승하게 된다.

탱크 내의 기체수소의 초기 질량 변화는 압력 증가와 유사한 거동을 보였다. Fig. 6과 Fig. 7은 탱크 내의 기체수소와 액체수소의 질량 거동을 보여준다. 외부에서 유입된 열에 의하여 액체수소가 기화되면서 기체수소의 질량이 증가하게 된다. 액체수소의 충전 비율이 높을수록 기체수소의 질량도 빠르게 증가하였는

데, 충전 비율이 높으면 액체수소와 탱크가 접하는 표면적과 이를 통한 열전달량도 커졌기 때문이다. 액체수소가 기화되는 질량은 충전 비율에 따라 약간의 차이를 보이기는 하지만 대부분의 구간에서 유사한 경향을 보였다. 액체수소가 기화하면서 탱크 내부의 기체수소 질량이 증가하면 압력도 함께 증가하였으며, 기체수소 질량이 감소하면 압력도 감소하는 경향을 보였다.

단열재의 두께가 비교적 얇은 경우의 탱크 압력 거동을 보면, 중간에 압력이 완만해지다가 급격하게 상승하여 최대 압력에 도달하는 구간이 존재한다. 단열재 두께가 비교적 두꺼운 경우에도 유사한 현상이 있었으나 그 정도가 크지 않았다. 탱크의 단열 성능이 좋지 않은 경우, 더 많은 양의 열 유입이 발생하여 액체수소의 기화가 더 빠르게 진행되고, 짧은 시간에 모든 액체수소가 기화된다. Fig. 5와 Fig. 7에서 보이는 것과 같이 액체수소가 모두 기화되자 탱크의 압력이 급격하게 상승하였다. 초기 액체수소 충전 비율이 높을수록 상승하는 압력의 폭이 더 크게 나타났다. 이러한 현상의 원인은 액체수소의 기화열 때문으로 볼 수 있다. 액체수소가 기체로 상변화할 때 열을 흡수하게 되는데, 액체수소가 모두 기화된 이후에는 상변화가 발생하지 않아 상변화에 흡수되던 열이 그대로 기체로 전달되었기 때문이다.

단열재의 두께가 비교적 두꺼운 경우에도 액체수소가 모두 기화된 후에 압력이 상승하는 현상을 보였다. 또한, 초기 액체수소의 충전 비율이 높을수록 압력이 더 많이 상승하였다. 하지만, 이 경우에는 액체수소가 기화되어 기체수소에 더해지는 양이 기체수소가 탱크 외부로 배출되는 양보다 크지 않아서 기체수소의 질량이 감소하고 탱크 압력도 낮아지는 상황이었기 때문에, 압력 상승은 크게 나타나지 않았으며 최대 압력보다 낮은 값을 보였다.

액체수소 연료탱크에서 초기 액체수소의 충전 비율이 높을수록 탱크의 최대 내부 압력이 크게 발생하였다. 또한, 탱크의 단열 성능이 좋지 못하면 액체수소가 모두 기화되었을 때 또다시 급격한 압력 상승이 발생하여 최대 압력이 증가하는 현상이 발생하였다. 두 번째 발생하는 급격한 압력 상승은 초기 충전 비율이 낮을수록 그 상승 폭이 낮게 나타났다. 연료탱크는 탱크

내부에 작용하는 최대 압력을 견딜 수 있는 구조를 가져야 한다. 액체수소의 충전 비율을 높이면 더 많은 양의 수소를 채울 수 있지만, 그만큼 탱크가 견뎌야 하는 압력도 높아진다. 탱크에 가해지는 압력이 증가하면 탱크의 구조 중량도 증가하게 되기 때문에, 탱크의 구조 중량을 줄이기 위해서는 최대 압력을 낮추어야 한다. 따라서 극저온의 액체수소 연료탱크를 설계하고 운용함에 있어서, 최대 내부 압력은 탱크의 구조물에 영향을 주기 때문에 구조물이 견딜 수 있는 최대 압력을 넘지 않도록 액체수소의 초기 충전 비율이 고려되어야 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 극저온 액체수소 연료탱크의 외부 열 유입에 의한 내부 압력 거동을 초기 액체수소 충전 비율에 따라 분석하였다. 액체수소 연료탱크의 압력을 예측하기 위하여 1차원 열역학적 모델을 적용하였으며, 적용된 모델은 열전달에 의한 열 유입, 액체수소의 기화로 인한 상변화, 수소연료의 외부 배출에 의한 현상이 반영되었다. 압력 예측 모델의 예측 정확성을 확인하기 위하여 액체수소의 기화 모델과 연료 배출 모델로 구분하여 검증을 수행하였으며 기체수소를 이상기체로 간주하였음에도 불구하고 상대오차 7.84% 이내의 좋은 결과를 보였다.

연료탱크 내의 액체수소 충전 비율이 낮아질수록 탱크에 발생하는 최대 압력도 감소하였으며, 충전 비율이 10% 감소하면 압력은 약 15%가 감소하였다. 또한, 단열 성능이 좋지 못한 경우 액체수소가 모두 기화된 이후에 탱크의 압력이 급격하게 증가하는 현상이 발생하였으나, 액체수소의 초기 충전 비율이 낮을수록 압력 상승폭은 작아졌다. 그러므로 액체수소의 충전 비율도 액체수소 연료탱크를 설계하고 운용하는 데 있어서 다른 요소와 함께 복합적으로 고려되어야 한다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: 2022R1A6A1A03056784)과 과학기술정보통신부

의 거대과학연구개발사업인 스페이스파이오니어사업(2021M1A3B9096764)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] H. Nojoumi, I. Dincer, and G.F. Naterer, "Greenhouse gas emissions assessment of hydrogen and kerosene-fueled aircraft propulsion," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 1363-1369, February 2009.
- [2] M. Vietze, C. Mundt, and S. Weiland, "Investigation of Thermal Characteristics of Sandwich Common Bulkhead Equipped Launcher Tank," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 54, no. 1, pp. 67-74, January 2017.
- [3] N.-K. Cho, S.-Y. Park, S.-H. Kim, and Y.-M. Han, "Liquid Hydrogen/Liquid Oxygen Rocket Engine Technology," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 26, no. 2, pp. 47-59, April 2022.
- [4] N. Liu, B. Ma, F. Liu, W. Huang, B. Xu, L. Qu, Y. Yang, "Progress in research on composite cryogenic propellant tank for large aerospace vehicles," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 143, pp. 106297, April 2021.
- [5] S. Sumith and R. Ramech Kumar, "Thermo-structural analysis of cryogenic tanks with common bulkhead configuration," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 236, no. 5, pp. 900-909, June 2021.
- [6] S. Nicolay, S. Karpuk, Y. Liu, and A. Elham, "Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 64, pp. 32676-32694, September 2021.
- [7] M. Prewitz, A. Bardenhagen, and R. Beck, "Hydrogen as the fuel of the future in aircrafts - Challenges and opportunities," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp.

- 25378-25385, September 2020.
- [8] D. C. Bingaman, Mark K. Holly, J. L. Mace, C. Rice, R. K. Agarwal, M. K. Bradley, W. Smith, and U. Bhattarai, "A Systems Engineering Approach for the Transition to Zero Emission Aviation," *AIAA AVIATION 2022 Forum*, Chicago, IL, June 2022.
- [9] M. Duvelloy, L. Benquet, S. Schaffrath, and M.-A. Delestrade, "Airbus reveals new zero-emission concept aircraft," *Airbus*, <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft>, September 2020.
- [10] B. Khandelwal, A. Karakurt, P. R. Sekaran, V. Sethi, and R. Singh, "Hydrogen powered aircraft : The future of air transport," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 60, pp. 45-59, July 2013.
- [11] P. Sharma, T. Bera, K. Semwal, R. M. Badhe, A. Sharma, S.S.V. Ramakumar, and S. Neogi, "Theoretical analysis of design of filament wound type 3 composite cylinder for the storage of compressed hydrogen gas," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp. 25386-25397, September 2020.
- [12] G. Romeo, F. Borello, G. Correa, and E. Cestino, "ENFICA-FC: Design of transport aircraft powered by fuel cell & flight test of zero emission 2-seater aircraft powered by fuel cells fueled by hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 469-479, January 2013.
- [13] Q. Zhang, H. Xu, X. Jia, L. Zu, S. Cheng, and H. Wang, "Design of a 70 MPa type IV hydrogen storage vessel using accurate modeling techniques for dome thickness prediction," *Composite Structures*, vol. 236, pp. 111915, March 2020.
- [14] M. Nebe, A. Soriano, C. Braun, P. Middendorf, and F. Walther, "Analysis on the mechanical response of composite pressure vessels during internal pressure loading: FE modeling and experimental correlation," *Composites Part B: Engineering*, vol. 212, pp. 108550, May 2021.
- [15] J. Joseph, G. Agrawal, D. K. Agarwal, J.C. Pisharady, and S. Sunil Kumar, "Effect of insulation thickness on pressure evolution and thermal stratification in a cryogenic tank," *Applied Thermal Engineering*, vol. 111, pp. 1629-1639, January 2017.
- [16] K. Kim, D. Shin, Y. Kim, and S. Karng, "Adiabatic Performance of Layered Insulating Materials for Bulk LH2 Storage Tanks," *The Korean Hydrogen and New Energy Society*, vol. 27, no. 6, pp. 642-650, December 2016.
- [17] N. Darkow, A. Fischer, H. Scheufler, H. Hellmann, and J. Serstmann, "Concept Development of a Cryogenic Tank Insulation for Reusable Launch Vehicle," *8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences*, Madrid, Spain, July 2019.
- [18] T. Reimer, C. Rauh, G. D. Di Martino, and M. Sippel, "Thermal Investigation of a Purged Insulation System for a Reusable Cryogenic Tank," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 59, no. 4, pp. 1205-1213, July 2022.
- [19] H.R. Wang, B. Wang, Q.W. Pan, Y.Z. Wu, L. Jiang, Z.H. Wang, and Z.H. Gan, "Modeling and thermodynamic analysis of thermal performance in self-pressurized liquid hydrogen tanks," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 71, pp. 30530-30545, August 2022.
- [20] J. Zheng, L. Chen, J. Wang, Y. Zhou, and J. Wang, "Thermodynamic modelling and optimization of self-evaporation vapor cooled shield for liquid hydrogen storage tank," *Energy Conversion and Management*, vol. 184, pp. 74-82, March 2019.
- [21] J. Fu, B. Sunden, X. Chen, and Y. Huang, "Influence of phase change on self-pressurization in cryogenic tanks under microgravity," *Applied Thermal Engineering*, vol. 87, pp. 225-233, August 2015.
- [22] Z. Liu, L. Wang, Y. Jin, and Y. Li, "Development of thermal stratification in a rotating cryogenic liquid hydrogen tank," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 43, pp. 15067-15077, November 2015.
- [23] N. de Miguel, B. Acosta, P. Moretto, and R. O.

Cebolla, “The effect of defueling rate on the temperature evolution of on-board hydrogen tanks,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 42, pp. 14768-14774, November 2015.

[24]Spectronik Pte. Ltd, “PROTIUM-300 Fuel Cell System User Guide Version 5.0,” <https://www.spectronik.com/protium-300>, August 2022.