

고압 충전 시 수소 저장 탱크의 온도 변화 및 충전량에 관한 해석

이길강¹ · 이길초¹ · 명노석¹ · 박경우² · 장선준² · 권정태^{2†}

¹호서대학교 일반대학원 기계공학과, ²호서대학교 기계자동차공학부

An Analysis on the Temperature Changes and the Amount of Charging of Hydrogen in the Hydrogen Storage Tanks During High-Pressure Filling

JI-QIANG LI¹, JI-CHAO LI¹, NO-SEUK MYOUNG¹, KYOUNGWOO PARK², SEON-JUN JANG²,
JEONG-TAE KWON^{2†}

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea

²Division of Mechanical and Automotive Engineering, Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea

†Corresponding author :
jtkwon@hoseo.edu

Received 19 April, 2021
Revised 17 June, 2021
Accepted 17 June, 2021

Abstract >> Securing energy sources is a key element essential to economic and industrial development in modern society, and research on renewable energy and hydrogen energy is now actively carried out. This research was conducted through experiments and analytical methods on the hydrogen filling process in the hydrogen storage tank of the hydrogen charging station. When low-temperature, high-pressure hydrogen was injected into a high-pressure tanks where hydrogen is charged, the theoretical method was used to analyze the changes in temperature and pressure inside the high-pressure tanks, the amount of hydrogen charge, and the charging time. The analysis was conducted in the initial vacuum state, called the First Cycle, and when the residual pressure was present inside the tanks, called the Second Cycle. As a result of the analysis, the highest temperature inside the tanks in the First Cycle of the high-pressure tank increased to 442.11 K, the temperature measured through the experiment was 441.77 K, the Second Cycle increased to 397.12 K, and the temperature measured through the experiment was 398 K. The results obtained through experimentation and analysis differ within $\pm 1\%$. The results of this study will be useful for future hydrogen energy research and hydrogen charging station.

Key words : Compressed hydrogen(압축 수소), High-pressure filling(고압 충전), Theoretical method(이론적 방법), Hydrogen storage tank(수소 저장 탱크), Hydrogen safe(수소 안전)

1. 서론

오늘날의 사회에 있어 에너지원의 확보는 경제 및 산업 발달에 꼭 필요한 핵심 요소이며 새로운 에너지원의 개발 중요성은 오늘날의 사회에 이르러 에너지 소비량의 급속한 증가와 화석 연료의 가채매장량의 가시화에 의해 더욱 증대되고 있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯 수소에너지는 인류가 직면하고 있는 에너지 문제와 환경 문제를 동시에 해결할 수 있는 에너지 원으로서 현대사회에서 에너지가 이용하는 대부분의 분야에 전반적으로 활용도가 매우 높은 에너지원이

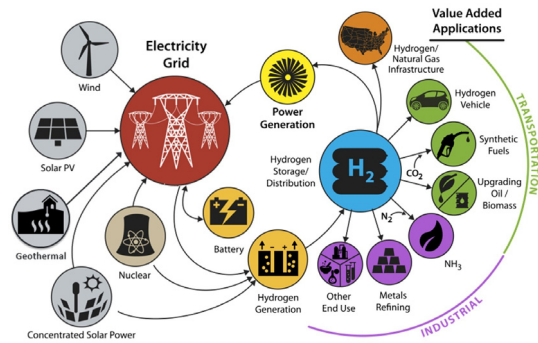


Fig. 1. Energy conversion and integration diagram

라고 할 수 있다¹⁾.

온실 가스의 영향 때문에 환경 문제의 해결방안으로 수소에너지와 신재생에너지의 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 수소에너지의 활용분야로는 수소 연료전지 자동차가 있다. 수소 연료전지 자동차가 활발하게 보급되고 있으며, 수소 충전소의 고압용기의 내구성 및 충전 중 압력 상승에 관한 연구가 진행되고 있다^{2,3)}.

Wang 등⁴⁾은 에너지 방정식을 기반으로 열역학 모델을 설정하였으며, 이는 충전 후 충전수소의 질량과 최종 온도를 분석하고 얻을 수 있다. Hosseini 등⁵⁾은 에너지 방정식을 기반으로 온도에 대한 초기 조건의 영향을 조사한 결과 초기 압력이 높을수록 온도 병화에 적다는 것을 발견하였다. Monde 등⁶⁾은 대류 열전달 계수가 온도 변화에 미치는 영향을 연구하기 위해 열역학적 모델을 확립하였으며 적절한 일정한 열전달 계수로 온도 상승을 계산할 수 있음을 보여주었다. Zhao 등⁷⁾은 2차원 축 대칭 모델을 개발하고 부스트 모드의 효과를 모델에 의해 급속한 팽창 시 수소 탱크 온도 상승률을 과급시켰다. Yang⁸⁾은 단열 및 등온 조건에서 이상적인 기체와 실제 기체를 활용하여 수소의 빠른 충전에 대한 모델 분석을 수행하였다. 결과는 단열 및 등온 조건에서 충전 시간이

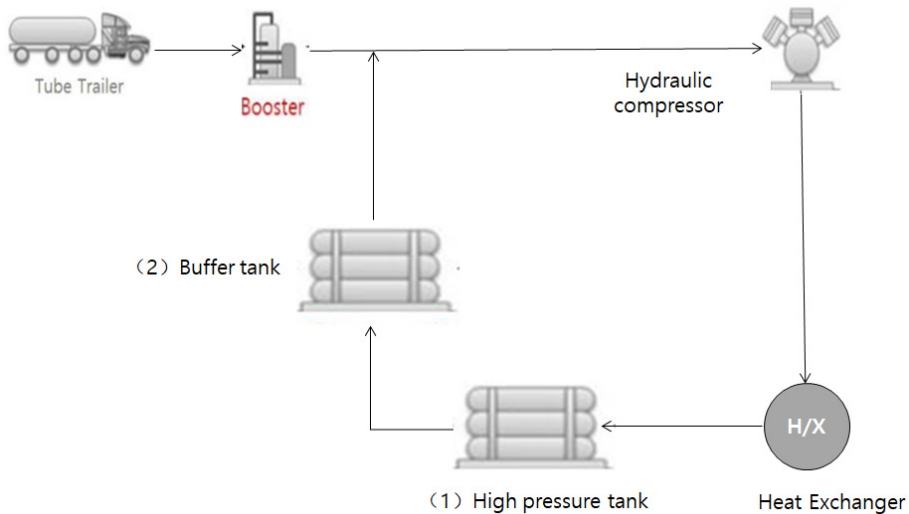


Fig. 2. Hydrogen tank overall system structure

주어진 최종 목표 압력에 대한 하한 및 상한임을 보여준다. Xiao 등⁹⁾은 수소의 온도는 에너지 밸런스 법에 따라 추정되며 최종온도는 초기 온도와 특성 온도의 가중 평균으로 나타난다. 2020년에 Liu 등¹⁰⁾은 II, III, IV형 차량용 수소 저장 탱크의 고압 충전에 대한 수치적 연구를 수행하였다. II형 및 IV형 탱크에서 수소 온도의 변화가 크게 나타났다.

현재 개발되고 있는 수소 충전소의 전체적인 과정은 압축기를 사용하여 수소를 초고압으로 압축 후 열교환기를 사용하여 압축된 수소의 온도를 낮춘 후 고압용기로 보내는 방법을 이용하고 있다. 이때, 저장용기 내에 고온, 고압으로 가열된 수소의 반복 사이클 및 저장되는 과정에서 생기는 피로누적으로 인해 용기의 안전성에 있어 문제가 발생할 수 있다^{11,12)}.

본 논문은 수소 충전소에서 수소를 저장할 수 있는 고압용기에 관하여 충전 과정 중 압력의 변화에 따른 수소의 온도 상승과 용기 내 수소 충전량과 수소가 완충되는 시간 및 용기 내의 대류열전달계수를 계산하여 주변온도까지의 냉각 시간을 수치해석적인 방법과 실험적 방법을 이용하여 해석하였다.

2. 고압용기 내부 수소 충전 모델링

2.1 시스템 해석

Fig. 2는 실험을 진행할 전체적인 시스템 구조로 튜브트레이러에서 수소배출 후 2단 압축을 통해 고압으로 압축된 수소가 열교환기를 지나 저온 고압으로 변화된 수소를 고압탱크(1)와 버퍼탱크(2)에 저장 후 저장된 수소를 소모하게 되었을 때 일련의 과정을 반복할 수 있도록 하는 시스템이다¹³⁾.

2.1 부분 고압용기 내부 수소 충전 모델링

Fig. 2의 전체적인 시스템에서 고압탱크 및 버퍼탱크로 수소가 충전될 때 탱크 내부의 온도, 압력, 질량의 변화를 Fig. 3과 같이 단순화 하여 모델링하였다.

P_i 와 T_i 는 고압용기 내부로 공급되는 수소의 압력과 온도이며, P_1 , T_1 , m_1 의 상태는 수소가 용기 내부에 충전되기 전인 초기상태이며 P_2 , T_2 , m_2 는 충전이 완료된 상태를 나타낸다¹⁴⁾.

2.3 부분 수학적 모델링

급속충전에 의한 용기 내의 온도 상승 모델을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 고압용기의 First Cycle에서의 초기상태는 진공 상태이며, Second Cycle에서의 초기상태는 11.3 MPa의 압력이 존재하였을 때, 수소의 운동 에너지와 위치에너지는 무시한다.
- 고압용기로 유입되는 수소의 온도와 압력은 일정하다.
- 충전과정은 단열 및 외부와의 열교환은 무시하였다.
- 외부온도는 실측온도인 302.05 K로 일정하다.

튜브 트레이러를 통해 공급된 수소가 압축기를 지나 저온 고압으로 변화된 수소가 용기 내부로 들어갈 때 변화된 수소의 최종온도를 실제기체에 적용 가능한 상태방정식, 질량 보존 방정식, 에너지 보존 방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

상태방정식

$$PV = zmRT \tag{1}$$

여기서 z 값은 수소의 온도와 압력에 따른 압축성 인자이며, R 은 기체상수다.

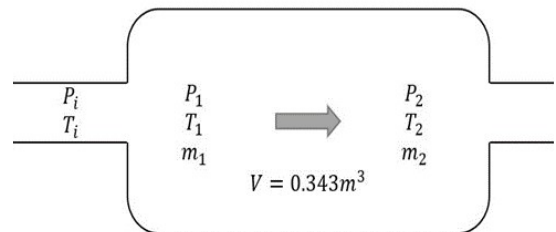


Fig. 3. Modeling of high pressure tank

질량 보존 방정식

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_e \quad (2)$$

에너지 보존 방정식

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \quad (3)$$

외부에서의 일은 없으므로 $\dot{W} = 0$ 를 사용하였다¹⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 이론적 해석

고압탱크 및 버퍼탱크의 용기 내부 상태는 진공상태로 충전과정이 시작되었을 때를 First Cycle 해석, 용기 내부에 잔여압력이 존재한 상태로 충전과정이 시작 되었을 때를 Second Cycle 해석이라고 한다.

실험을 통한 결과와 수치해법을 통한 결과를 비교 및 검증하기 위한 고압용기의 조건은 다음과 같다.

압축된 수소가 고압용기로 들어갈 때의 라인압력을 50 MPa, 40°C이며 고압용기의 외경 0.3985 m, 내경 0.3143 m, 두께 0.0842 m, 길이 4.4197 m, 수소가 용기 내부로 유입될 때 들어가는 인젝터의 직경 0.0143 m, 고압용기의 열전도도 16.3 W/m·K, 부피 0.343 m³, 대기 열전달계수 40 W/m²·K의 값을 이용하였다. 고압용기의 조건을 Table 1에 나타내었으며,

Table 1. Condition and properties of high pressure tank

Condition	Property
L (m)	4.4197
D_1 (m)	0.3143
D_2 (m)	0.3985
d_{in} (m)	0.0143
t (m)	0.0842
κ (W/m · K)	16.3
h_1 (W/m ² · K)	113.49/108.38
h_2 (W/m ² · K)	40

Fig. 4는 고압용기 모델의 개략도이다³⁾.

용기 내부의 열전달계수는 Nusselt number를 이용하여 계산하였다^{15,16)}.

$$Nu_{D_n} = \frac{Dh}{k} = 0.14Re_{d_{in}}^{0.67} \quad (4)$$

(4)의 공식을 이용하여 고압 및 버퍼탱크 내부의 열전달계수를 구하였다. 그때의 고압탱크 내부의 열전달계수는 113.49 W/m² · K, 버퍼탱크 내부의 열전달계수는 108.38 W/m² · K의 값을 구하였고, 외부온도는 실측온도인 302.05 K을 사용하였다.

수평 탱크의 경우 외벽의 대류 열전달 계수는 식 (5-7)을 사용하여 계산할 수 있다^{17,18)}.

$$N_{out} = \{0.752 + 0.387[Ra \cdot f(Pr)]^{1/6}\}^2 \quad (5)$$

$$f(Pr) = [1 + (0.599/Pr)^{9/16}]^{-16/9} \quad (6)$$

$$h_{out} = N_{out}\lambda/L \quad (7)$$

전체적인 해석과정에서 필요한 수소의 물성치는 미국표준연구소(National Institute of Standards And Technology)에서 제작한 프로그램인 REFPROP 9.5를 사용하였다.

3.1.1 고압용기의 First Cycle 해석

First Cycle의 해석적 방법을 진행하기 전 고압탱크와 버퍼탱크 내부는 최초 진공상태로 진행하였고 단열된 조건을 적용하여 계산하였다.

초기 진공상태인 고압탱크에 50 MPa까지 수소의 충전이 이루어지며 단열조건으로 수소를 충전하였을 때의 탱크 내부의 온도 T_2 에 관하여 질량 보존 방정

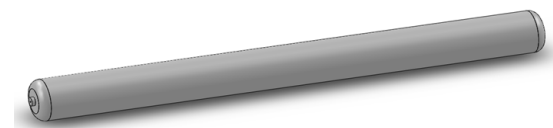


Fig. 4. Schematic diagram of a high pressure tank

식과 에너지 보존 방정식을 이용하여 식(5)를 유도할 수 있었다.

$$T_2 = kT_i \quad (8)$$

유도한 공식을 사용하여 50 MPa로 충전된 고압탱크의 최대 온도인 T_2 를 계산 후 상태방정식을 사용하여 충전된 수소의 질량 m_2 를 구하였다.

충전 후 고압탱크의 내부온도는 442.10 K, 충전된 질량은 7.705 kg, 수소 저장탱크(hydrogen storage tank)의 교환된 열량은 15,985.63 kJ로 계산되었다.

고압용기에서의 열전달은 Fig. 4를 보게 되면 용기의 옆면과 원통부분에서 전도와 대류의 열전달이 이루어지게 되는데 원통부분에서의 열전달률 \dot{Q}_{cyl} 과 용기 옆면에서의 열전달률 \dot{Q}_{side} 의 합으로써 식(9)로 표현이 가능하다. 또한 열전달이 이루어질 때의 온도 변화는 고압용기 내부와 외부의 온도차로 $\Delta T = T_2 - T_{\infty}$ 를 사용하여 표현이 가능하다.

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{cyl} + \dot{Q}_{side} = \frac{\Delta T}{R_{cyl}} + \frac{\Delta T}{R_{side}} \quad (9)$$

식(9)를 사용하여 구해진 총 열전달률은 20 kW로 계산되었으며, 열전달이 시작되고부터 외부온도와의 열평형이 이루어질 때까지 선형그래프로서 표현되므로 평균 열전달률은 $\dot{Q}_{ave} = \dot{Q}_{total}/2$ 로 표현가능하다. 평균 열전달률과 열량을 이용하여 외부와의 열평형이 이루어지는 시간을 계산해보면 26분 34초의 시간이 소요되는 것을 알 수 있다.

용기의 내벽, 외벽면의 온도를 계산하기 위하여 식(10)을 사용하였고, 용기의 내부온도 $T_{\infty 1}$, 내벽면의 온도 T_{w1} , 외벽면의 온도 T_{w2} , 외부온도 $T_{\infty 2}$, 용기 내부와 외부 사이에서의 복합 열 저항을 각각 R_{cov1} , R_{cov2} 로 표현하였다. Fig. 5는 고압용기에서의 열전달률과 벽면 온도이다.

$$\frac{T_{\infty 1} - T_{w1}}{R_{cov1}} = \dot{Q}_{ave}, \quad \frac{T_{w2} + T_{\infty 2}}{R_{cov2}} = \dot{Q}_{ave} \quad (10)$$

위 식(10)을 사용하여 고압탱크 벽면에서의 온도 T_{w1} 과 T_{w2} 를 계산하면 외벽면의 온도 T_{w1} 은 422.95 K, T_{w2} 는 345.42 K의 온도를 구할 수 있다.

버퍼탱크에서의 결과는 고압탱크와 동일한 방법을 사용 하였으며, 고압용기에서의 First Cycle의 결과 값을 Table 2에 나타내었다.

3.1.2 고압용기의 Second cycle 해석

Second Cycle은 고압탱크와 버퍼탱크 내부에 First Cycle 이후 잔여압력이 존재하였을 때의 해석을 진

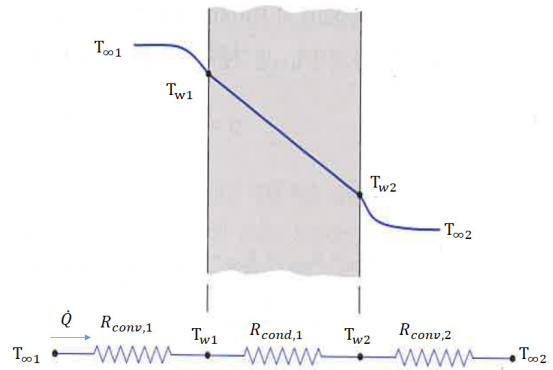


Fig. 5. Different between the inner and outer wall temperature of the tank

Table 2. First Cycle result of high pressure tank and buffer tank

Condition	High pressure tank	Buffer tank
P_2 (MPa)	50	20
T_2 (K)	442.11	444.17
m_2 (kg)	7.705	3.4429
Q (kJ)	15,985.63	7,178.1
R_{cyl} (K/W)	0.00706	0.007157
R_{side} (K/W)	0.625	
\dot{Q}_{cyl} (kW)	19.8385	19.8575
\dot{Q}_{side} (kW)	0.2241	0.2249
\dot{Q}_{ave} (kW)	20.06	20.08
T_{w1} (K)	422.95	424.09
T_{w2} (K)	345.42	345.46
t (s)	1,594	715

행하였다.

First Cycle 과정이 끝난 이후 11.3 MPa의 잔여압력과 고압탱크 내부온도가 300.15 K인 용기에 First Cycle과 동일하게 압축기와 열교환기를 통해 저온 고압의 수소가 고압용기로의 충전이 진행된다. 충전이 완료된 후 탱크 내부의 온도 T_2 에 관한 식(11)을 질량보존 방정식과 에너지보존 방정식을 사용하여 유도할 수 있다¹⁴⁾.

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_1} \left\{ \frac{c_v T_1}{c_p T_i} \left(1 - \frac{P_1 z_2}{P_2 z_1} \right) + \frac{P_1 z_2}{P_2 z_1} \right\} \quad (11)$$

탱크 내부의 온도를 구하기 위해서는 압축 후의 압축성인자 z_2 의 값을 구해야 한다. z 값은 온도와 압력의 함수이므로 First Cycle에서의 T_2 값으로 가정 후 식(11)에 대입하였으나 가정한 T_2 의 결과와 다르게 나와 시행착오법을 사용하여 반복 계산한 결과 T_2 는 397.12 K의 온도를 얻었고, 구해진 온도와 최종압력을 REFPROP 9.5 프로그램을 사용하여 구해진 압축성인자를 식(8)에 대입한 결과가 동일함을 보였다.

T_2 를 제외한 나머지 값들은 First Cycle과 동일한 방법을 사용하여 계산하였다. 버퍼탱크 또한 고압탱크와 같은 가정을 하여 T_2 를 구하였으며, 고압용기에서의 Second Cycle의 결과 값을 Table 3에 나타내었다.

3.1.3 고압용기의 완충 시간 해석

First Cycle과 Second Cycle에서 수소가 충전된 양은 Tables 2, 3에서 확인할 수 있고, 각각의 탱크로 들어가는 질량유량은 29.05 kg/h이다.

용기로 들어가는 질량유량과 질량을 통해 수소가 용기로 충전된 시간을 계산할 수 있다.

$$m = \int_0^t \dot{m} dt \quad (12)$$

$$t = \frac{m}{\dot{m}} \quad (13)$$

식(13)을 사용하여 고압탱크의 First Cycle 충전 시간을 계산해 보면 약 16분의 시간을 소요하는 것을 알 수 있다. 고압용기의 충전시간에 관하여 Table 4에 나타내었다.

3.2 실험적 해석

Second Cycle의 고압탱크 내부에 11.3 MPa의 잔여압력이 존재하고 버퍼탱크 내부에 11 MPa의 잔여압력이 존재하였을 때, 충전과정에서 변화되는 압력을 실험을 통하여 측정하였다. 측정된 압력을 통하여 압력에 해당하는 온도분포를 계산하였다. 실험이 진행되었을 때의 주변 온도는 측정 당일의 최고온도인 302.05 K이다.

Table 3. Second cycle result of high pressure tank and buffer tank

Condition	High pressure tank	Buffer tank
P_2 (MPa)	50	20
T_2 (K)	397.12	351.91
m_1 (kg)	2.9323	2.8198
m_2 (kg)	8.4127	4.2671
Q (kJ)	1,1891.36	3,132.01
R_{cyl} (K/W)	0.00706	0.007157
R_{side} (K/W)	0.625	
\dot{Q}_{cyl} (kW)	13,466.01	6,966.61
\dot{Q}_{side} (kW)	152.112	78.89
\dot{Q}_{ave} (kW)	6.809	3.522
T_{w1} (K)	384.11	344.86
T_{w2} (K)	331.49	317.28
t (s)	1,747	890

Table 4. Hydrogen charging time for high pressure tanks

Condition	High pressure tank	Buffer tank
First Cycle (s)	955	427
Second Cycle (s)	680	180

Fig. 6는 실험이 진행되는 과정에서 변화되는 고압용기와 버퍼탱크의 압력과 온도를 보여준다.

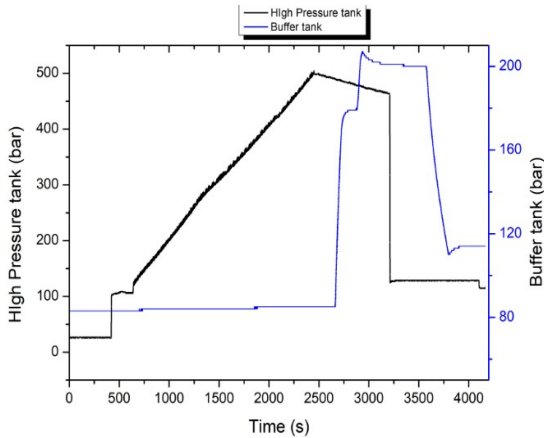
측정된 고압탱크와 버퍼탱크의 최대온도를 보게 되면 고압탱크는 약 398 K 즉, 124.85°C로 측정되었고, 버퍼탱크는 약 355 K, 81.85°C로 측정되었다. 고압용기 내의 최고온도 T_2 에 관하여 이론적 방법과 실험적 방법의 결과 비교를 Table 5에 나타내었다.

4. 결론

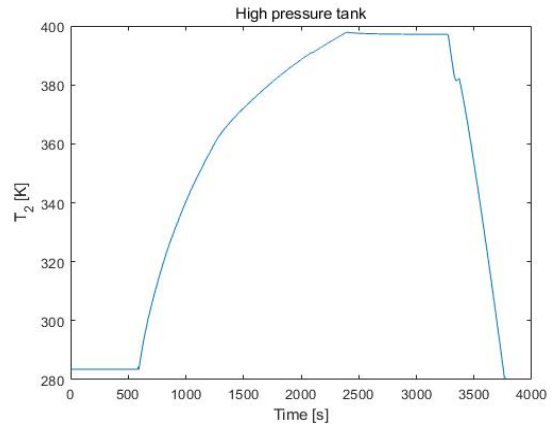
본 연구는 수소에너지를 이용해 수소 스테이션에 들어갈 탱크의 능력을 해석적 방법을 통하여 계산하

Table 5. Comparison of temperature variation in high pressure vessels according to analysis method

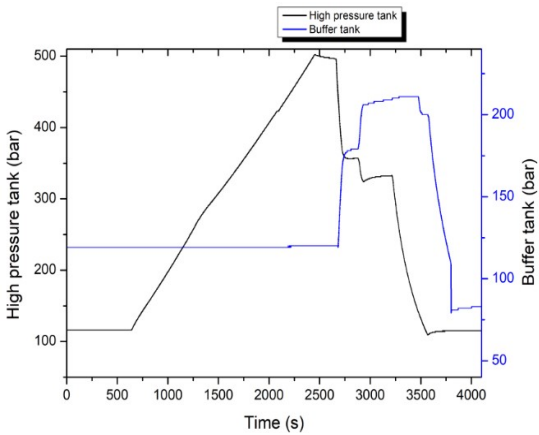
Condition	First Cycle		Second Cycle	
	Analytical method	Experimental method	Analytical method	Experimental method
High pressure tank Temperature [K]	442.11	441.77	397.12	398
buffer tank Temperature [K]	444.17	442.74	351.91	355



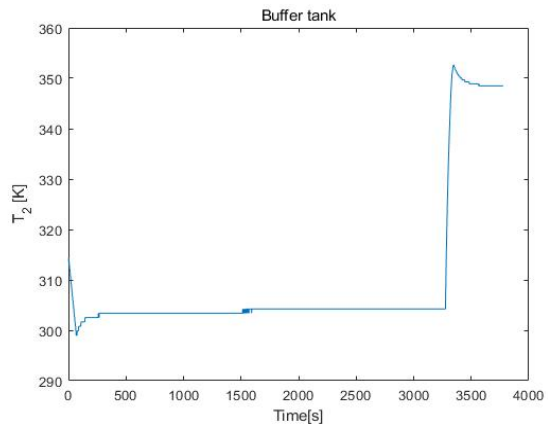
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Temperatures and pressures varying over time. (a) Experimental pressure curve for the first cycle, (b) temperature of the high pressure tank, (c) experimental pressure data for the second cycle and (d) temperature in buffer tank.

고 실험을 통한 결과와의 비교를 하였다. Fig. 2는 수소 충전소의 전체 시스템 구조를 개략화 하였고, 그 중 (1)번, (2)번에 위치한 고압탱크, 버퍼탱크에 각각 T_i , P_i 가 유입되었을 때 고압탱크와 버퍼탱크의 변화를 살펴보았다.

First Cycle과 Second Cycle의 고압탱크와 버퍼탱크를 먼저 살펴보면 First Cycle의 초기조건은 진공 상태에서 계산을 진행하였고, Second Cycle의 고압탱크에서는 잔여압력이 11.3 MPa, 버퍼탱크에서는 11 MPa가 존재하였을 때의 계산을 진행하였다. 고압탱크는 최대 50 MPa의 압력을 견딜 수 있고, 버퍼탱크는 최대 20 MPa의 압력을 견딜 수 있다. 각각의 탱크가 버틸 수 있는 극한의 조건인 최대 압력까지 수소가 채워졌을 때 탱크의 내부 온도는 First Cycle에서 고압탱크는 442.11 K, 버퍼탱크는 444.17 K의 결과를 갖게 되었고 Second Cycle에서는 고압탱크는 397.12 K, 버퍼탱크는 351.91 K로 First Cycle에 비해 Second Cycle의 유입된 수소 온도 변화가 적은 것을 알 수 있었다.

실험을 통하여 측정된 Second Cycle의 결과를 보게 되면 고압탱크는 398 K로 측정되었고, 버퍼탱크는 355 K로 측정되었다.

본 논문은 First Cycle에서 진공상태로, Second Cycle에서는 잔여압력이 존재하였을 때의 온도 변화를 실험적 방법과 해석적 방법을 비교하였다. 실험을 통한 결과와 해석적 방법을 사용하여 계산한 결과가 $\pm 4\%$ 의 오차를 보여 매우 유사함을 보이고 있다. 본 연구 결과는 앞으로의 수소에너지 연구 및 수소 충전소 개발 등에 있어 매우 유용하게 활용될 것이다.

후 기

This study was a research project conducted by the Ministry of Trade, Industry and Energy and supported by the Korea Energy Technology Evaluation Institute (KETEP) as an energy technology development project (No. 202000580002, No. 20200502001).

References

1. J. Q. Li, N. S. Myoung, J. T. Kwon, S. J. Jang, and T. Lee, "A study on the prediction of the temperature and mass of hydrogen gas inside a tank during fast filling process", *Energies*, Vol. 13, No. 23, 2020, pp. 6428, doi: <https://doi.org/10.3390/en13236428>.
2. T. H. Lee, B. W. Kang, E. W. Lee, J. B. Chung, and S. J. Hong, "The study to find causes for measuring differences of hydrogen fillings in hydrogen refueling station", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 32-40, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.32>.
3. J. Q. LI, N. S. Myoung, J. T. Kwon, S. J. Jang, T. Lee, and Y. H. Lee, "A theoretical analysis of temperature rise of hydrogen in high-pressure storage cylinder during fast filling process", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 12, 2020, pp. 1-10, doi: <https://doi.org/10.1177/1687814020971920>.
4. G. Wang, J. Zhou, S. Hu, S. Dong, and P. Wei, "Investigations of filling mass with the dependence of heat transfer during fast filling of hydrogen cylinders", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 9, 2014, pp. 4380-4388, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.189>.
5. M. Hosseini, I. Dincer, G. F. Naterer, and M. A. Rosen, "Thermodynamic analysis of filling compressed gaseous hydrogen storage tanks", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 6, 2012, pp. 5063-5071, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.047>.
6. M. Monde, P. Woodfield, T. Takano, and M. Kosaka, "Estimation of temperature change in practical hydrogen pressure tanks being filled at high pressures of 35 and 70 MPa", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 7, 2012, pp. 5723-5734, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.136>.
7. Y. Zhao, G. Liu, Y. Liu, J. Zheng, Y. Chen, L. Zhao, and Y. He, "Numerical study on fast filling of 70 MPa type III cylinder for hydrogen vehicle", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 22, 2012, pp. 17517-17522, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.046>.
8. J. C. Yang, "A thermodynamic analysis of refueling of a hydrogen tank", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 16, 2009, pp. 6712-6721, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.015>.
9. J. Xiao, P. Bénard, and R. Chahine, "Estimation of final hydrogen temperature from refueling parameters", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 11, 2017, pp. 7521-7528, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.213>.
10. J. Liu, S. Zheng, Z. Zhang, J. Zheng, and Y. Zhao, "Numerical study on the fast filling of on-bus gaseous hydrogen storage cylinder", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 15, 2020, pp. 9241-9251, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.033>.

11. T. H. Lee, M. J. Kim, and J. K. Park, "Experimental and numerical study on the hydrogen refueling process", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 18, No. 3, 2007, pp 342-347. Retrieved from <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200721036737514.page>.
12. T. H. Lee, T. W. Kim, T. S. Park, Y. J. Kang, and J. H. Noh, "Compact heat exchanger design for biogas application", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 25, No. 2, 2014, pp. 183-190, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.2.183>.
13. J. Q. Li, J. C. Li, K. Park, S. J. Jang, and J. T. Kwon, "An analysis on the compressed hydrogen storage system for the fast-filling process of hydrogen gas at the pressure of 82 MPa", *Energies*, Vol. 14, No. 9, 2021, pp. 2635, doi: <https://doi.org/10.3390/en14092635>.
14. B. H. Song, N. S. Myoung, S. J. Jang, and J. T. Kwon, "Hydrogen compressor cycle analysis for the operating pressure of 50 MPa and high charging capacity", *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol. 21, No. 2, 2020, pp. 66-73, doi: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.2.66>.
15. T. Bourgeois, F. Ammouri, M. Weber, and C. Knapik, "Evaluating the temperature inside a tank during a filling with highly-pressurized gas", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 35, 2015, pp. 11748-11755, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.096>.
16. Y. Kim, D. H. Shin, J. S. Kim, Y. Moon, J. Heo, and J. Lee, "Flow boiling heat transfer characteristics on sintered microporous surfaces in a mini-channel", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 105-110, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.105>.
17. D. Melideo, D. Baraldi, B. Acosta-Iborra, R. Ortiz Cebolla, and P. Moretto, "CFD simulations of filling and emptying of hydrogen tanks", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 11, 2017, pp. 7304-7313, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.262>.
18. S. Deng, J. Xiao, P. Benard, and R. Chahine, "Determining correlations between final hydrogen temperature and refueling parameters from experimental and numerical data", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 39, 2020, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.225>.