

급속 충전에서 탱크 내부의 수소 온도 변화에 관한 이론 연구

이길초¹ · 이길강^{2†} · 허 항³ · 최병철⁴ · 권정태^{4†}

¹제형대학교 산업학부, ²루동대학교 교통공학부, ³호서대학교 일반대학원 기계공학과, ⁴호서대학교 기계자동차공학부

A Theoretical Study on the Hydrogen Temperature Evolution Inside the Tank under Fast Filling Process

JI-CHAO LI¹, JI-QIANG LI^{2†}, HENG XU³, BYUNG CHUL CHOI⁴, JEONG-TAE KWON^{4†}

¹Department of Industrial Engineering, Jining University, HX25+526, Chengle Rd, Qufu, Jining 273155, China

²School of Transportation, Ludong University, 186 Hongqi-ro, Zhifu-gu, Yantai 264025, China

³Department of Mechanical Engineering, Hoseo University General Graduate School, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea

⁴Division of Mechanical & Automotive Engineering, Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea

[†]Corresponding author :

ljq7436@ldu.edu.cn
jtkwon@hoseo.edu

Received 9 June, 2023

Revised 26 November, 2023

Accepted 4 November, 2023

Abstract >> The fast filling process of high-pressure hydrogen has an important impact on the filling efficiency and safety. In this paper, a specific study is carried out on the thermophysical phenomena during the fast filling process. Starting from the gas state equation of hydrogen, the change law of the hydrogen storage temperature is obtained, and then the temperature rise prediction is constructed. The model can clarify the relationship between the filling parameters and the temperature rise during the fast filling process, thereby revealing the flow and heat transfer laws of the fast charging process. To improve the theoretical research basis for the evaluation of vehicle-mounted hydrogen fast charging capacity, temperature prediction and optimization of hydrogenation methods.

Key words : Hydrogen storage(수소 저장), Fast filling(급속 충전), Heat and mass transfer(열 및 물질 전달), Thermal effect(열 효과), Numerical analysis(수치 해석)

1. 서론

이산화탄소 등 온실가스 배출로 인한 전 세계의 기후 변화는 급세기 인류가 직면한 가장 큰 도전 중 하나가 되었다. 탄소 중립을 달성하는 것은 기후 변화에 대한 세계적인 대응을 위한 가장 근본적인 조치이다. 수소에너지 개발은 에너지 시스템의 녹색 및

저탄소 전환을 촉진하는 경로 중 하나이다¹⁾. 수소에너지의 전형적인 응용 중 하나는 수소에너지를 자동차의 동력원으로 사용하는 것이다. 수소연료 차량 업계가 날로 발전함에 따라, 수소에너지 활용 인프라 건설과 수소충전소의 수소 충전 과정에서의 파라미터 매칭의 필요성이 더욱 높아지고 있다. 정상 온도와 압력 조건에서 수소의 체적 에너지 밀도는 상대

적으로 낮다. 체적 에너지 밀도를 향상시키기 위해 수소 저장 물질을 통한 수소 저장, 액체수소 저장, 고압가스 수소 저장 등의 기술이 개발되었다. 고압가스 수소 저장 기술은 저렴한 비용과 발달한 기술로 인해 수소충전소의 주요 수소 저장 방식이 되었다²⁾. 수소 급속 충전 과정에서는 수소의 급속 압축, 줄-톰슨 역효과(Joule-Thomson negative effect) 및 운동에너지의 전환으로 인해 수소 저장탱크 내의 온도가 급격히 상승하게 된다. 온도 상승 현상은 수소 저장 밀도가 낮아지면 충전 질량이 감소하여 항속 주행 거리에 영향을 줄 수 있으며, 온도가 너무 높아져도 수소 저장탱크의 안전성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 빠르고 효율적이며 안전한 수소 충전을 위해 급속 수소 충전 과정 동안의 온도 변화에 대한 연구가 필요하다^{3,4)}.

이 문제에 대해 국내외 학자들이 연구를 진행하였다. Deymi-Dashtebayaz 등⁵⁾의 연구를 보면 충전 과정에서의 온도는 충전 과정에 영향을 미치며, 특히 최종 수소 저장탱크 내의 온도와 충전 질량에 현저한 영향을 미치는 것으로 나타났다. Melideo 등⁶⁾과 Melideo와 Baraldi⁷⁾는 충전 과정 동안 수소 저장탱크 내부의 computational fluid dynamics (CFD) 시뮬레이션 모델을 수립하여 다양한 충전 매개변수가 저장탱크 내부의 수소 상태에 미치는 영향을 연구했다. Melideo 등⁸⁾은 수소 저장탱크 흡입구 구조가 충전 과정 중 수소 온도 분포에 미치는 영향을 연구하였고, 합리적인 수소 입구의 경사 각도를 설정함으로써 수소탱크 내부의 온도차를 줄일 수 있고 국소적으로 극단적인 온도를 피할 수 있다고 하였다. Zheng 등⁹⁾은 수소 이용률과 충전 시간을 고려한 다목적 최적화 모델을 수립하고 압력 수준이 다른 수소 저장탱크 군의 수소 공급 전략에 대한 연구를 수행하였다. Cheng 등¹⁰⁾과 Xiao 등^{11,12)}은 충전 후 저장탱크 내부의 수소 온도 예측을 결과를 보고했으며, 이는 충전 전략 공식화에 대한 참고 자료가 될 수 있다. Sadi와 Deymi-Dashtebayaz¹³⁾는 1단식 고압 수소 저장 시스템과 다단식 수소 저장 시스템의 충전 과정을 비교하였는데, 1단식 수소 저장 시스템은 비교적 빠른 충

전 속도를 제공할 수 있지만, 수소의 기온 상승과 운항시에너지 소비량이 비교적 높다. 캐스케이딩(cascading) 수소 저장 시스템은 수소충전소의 압축의 에너지 소비를 줄일 수 있고, 수소 예냉 제어를 통해 수소 온도 상승을 효과적으로 제어할 수 있다. 합리적인 압력 전환 및 온도 제어 전략을 수립하면 수소 충전 속도를 효과적으로 높이고 사전 냉각의 에너지 소비를 줄일 수 있다^{14,15)}.

앞서 말한 내용을 종합하면 현재 수소 급속 충전에 대한 연구는 주로 CFD 시뮬레이션 및 에너지 소모 분석에 집중되어 있으며, 실제 충전 과정에서의 온도 상승 메커니즘(mechanism)에 대한 연구는 비교적 적다. 급속 충전 프로세스(process)의 온도 상승에 대한 통용적이고 간편하며 신뢰할 수 있는 예측은 차량 고압 수소 시스템의 충전 프로세스(process)에서 중요한 과제이다. 따라서 본 연구에서는 차량용 수소 저장탱크에서 수소 온도와 충전 질량의 이론 모델을 구축하여 기체 상태 방정식에 기초한 수소 저장탱크 내 온도 상승 표현식을 도출하고, 수소 저장탱크 내부 온도의 시간에 따른 변화 과정을 탐구하였다. 이를 통해 급속 충전 과정에서의 수소 온도 변화 법칙을 밝히고, 급속 충전 과정에서의 충전 파라미터와 온도 상승의 관계를 분석하며, 동시에 온도 상승 제어 전략을 연구하여 차량용 수소 저장 시스템의 급속 충전 및 수소충전소 충전 조건 최적화 등을 위한 이론과 응용의 기초를 제공한다.

2. 수소 충전 과정의 이론 분석

2.1 모델 가정

수소충전소에서는 트레일러의 수소를 압축기를 통해 가압하여 고압가스 수소 저장탱크에 저장한다. 충전 시 고압가스 수소 저장탱크에서 수소가 방출되어 교환기를 거쳐 예냉 처리된 후 수소충전기를 통해 차량용 수소 저장탱크에 충전된다. 모델의 정확성을 고려하면서 다음과 같이 간략화 및 가설을 세울 수 있다.

(1) 충전 과정 중 수소충전소용 수소 저장 시스템에서 수소 온도와 압력은 일정하다.

(2) 파이프라인 내 수소의 열손실 및 압력 강하는 무시한다.

(3) 충전 과정에서 준안정 상태 과정이라고 가정하면 차량용 수소 저장탱크 내부의 수소 온도와 압력이 균일하게 분포된다.

(4) 차량에 탑재된 수소 저장탱크는 단열로 간주되며, 벽을 통한 기체와 외부의 열교환은 없다.

2.2 수소 충전 모델

Fig. 1은 위의 가정과 같이 수소 충전 과정을 단순화한 것이다. 수소 공급 시스템에서 수소 저장탱크에 기체수소를 충전할 때 수소 충전 모델은 과도 변화 조건에서 개방 열역학 시스템에 속한다. t 부터 $t+dt$ 까지 이 시스템의 에너지 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{dE}{dt} |_{cv} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i(u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i + pV_i) - \dot{m}_e(u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e + pV_e) \quad (1)$$

\dot{Q} 는 시스템과 주위와의 열교환량, E 는 총 열에너지, \dot{W} 는 시스템에서 수행한 작업의 동력, u_i 와 u_e 는 각각 입력 및 출력 시스템의 내부에너지, \dot{m}_i 와 \dot{m}_e 는 각각 입력 및 출력 시스템의 질량유량을 의미한다. 본 연구에서는 수소 저장탱크를 강체로 간주하였다. 따라서 시스템의 기계적 동력(\dot{W})은 0이다. 또한 충전 초기의 수소 역류 현상을 무시한다.

$$m_2u_2 - m_1u_2 - h_i(m_2 - m_1) = Q \quad (2)$$

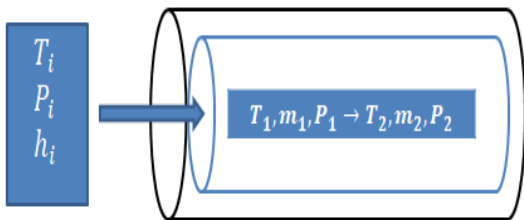


Fig. 1. Diagram of the compressed hydrogen tank

내부에너지와 엔탈피의 표현식은 $u = c_v T$, $h = c_p T$. 이고, 기체 상태 방정식은 $PV = mRT$ 이다. 언급한 식을 식 (2)에 대입하면 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$(m_2 - m_1)c_p T_i = \frac{c_v p_2 V}{R} - \frac{c_v p_1 V}{R} = c_v V \frac{p_2 - p_1}{R} \quad (3)$$

여기서 c_v 는 수소의 정적비열, c_p 는 정압비열이다. 비열비 $k=c_p/c_v$ 로 표현하면 수소 충전 예측 방정식은 식 (4)와 같다.

$$(m_2 - m_1) = V \frac{p_2 - p_1}{kRT_i} = \frac{p_2 V}{RT_2} - \frac{p_1 V}{RT_1} \quad (4)$$

충전 완료 후에 최종 수소의 표현식은 식 (5)와 같다.

$$T_2 = \frac{p_2}{\frac{p_2 - p_1}{kT_i} + \frac{p_1}{T_1}} \quad (5)$$

식 (5)의 관련 매개변수를 분석해 보면 수소 저장탱크의 충전 과정 중에 기체 온도는 충전 압력이 증가함에 따라 점차적으로 증가한다. 수소탱크의 초기 압력이 증가하면 온도 상승률이 점차 감소하고, 초기 온도와 충전 온도가 증가함에 따라 온도 상승률이 점차적으로 증가한다.

수소충전소에서 수소가 일정한 수소 충전 온도와 수소 충전 압력으로 충전되고 목표 압력이 수소탱크 정격 압력으로 충전될 때의 온도 표현식을 통해 차량에 탑재된 수소 저장탱크의 최종 수소 온도 및 충전 질량을 예측할 수 있다.

2.3 온도 표현식 검증

온도 표현식의 정확성을 검증하기 위해 실제 수소 충전 과정에서 얻은 실험 데이터를 표현식에서 계산한 예측값과 대조함으로써 모델의 정확성을 검증하였다. 검증용 실험 데이터는 Zheng 등¹⁶⁾의 수소 저장탱크 온도 상승 실험 데이터를 사용하였다. 실험의

초기 상태와 실험 결과는 Table 1과 같다.

본 논문에서 예측 모델에 따라 구한 차량용 수소 저장탱크 내 수소 최종 온도 예측값은 Table 1의 실제 초기 파라미터를 기준으로 각각 369.58 K와 358.06 K이다. 모델 예측값과 실제 사이의 오차는 각각 5.59%와 4.69%이다. 계산 결과를 통해 수소를 예냉 처리하는 것이 온도 상승 현상을 해결하기 위한 방법 중 하나라는 결론을 내릴 수 있다. 계산된 값은 실험 데이터에서 특정 편차 범위 내에 있으므로 유도된 공식이 비교적 높은 정확도를 가지며 엔지니어링 요구 사항을 충족할 수 있다.

3. 예측 모델의 응용

70 MPa의 높은 수소 저장 압력으로 인해 차량에 장착된 수소 저장탱크는 충전 압력이 상승함에 따라 온도 상승 현상을 나타낸다. 온도가 너무 높으면 차량용 수소 저장탱크의 재질 성능이 손상되어 안전사고가 발생할 수 있다. 미국자동차기술자협회는 수소 저장탱크 기술 표준 SAE-J2579에서 차량에 탑재된 수소 저장탱크 내 수소 온도가 -40°C 이하, 85°C 이상이어서는 안 된다고 명시하였다. 따라서 본 논문에서는 충전 질량에 대한 충전 매개변수와 차량용 수소 저장탱크 내 수소의 최종 온도 사이의 관계를 연구하기 위해 예측 모델을 사용한다.

3.1 초기 압력

다른 초기 압력하에서 차량용 수소 저장탱크 내의 충전 질량 예측 결과는 Fig. 2와 같다. 차량용 수소 저장탱크의 다른 초기 압력하에서 차량용 수소 저장탱크 내의 수소 최종 온도 예측 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 수소 충전 온도가 높아

짐에 따라 가스 충전 질량이 감소하고 초기 가스 압력이 높아짐에 따라 수소 충전 온도가 변화하면서 충전 질량이 점차 안정된다. 초기 압력이 클수록 수소 충전 온도가 충전 가능한 수소의 질량에 미치는 영향이 줄어든다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 수소 충전 온도가 273 K 이상일 때 수소 저장 실린더에 있는 수소의 최종 온도가 358 K 온도 한계를 초과하므로 70 MPa에서 수소화할 때 수소 충전 온도를 273 K 이하로 예냉해야 함을 보여준다. 차량용 수소 저장탱크의 초기 압력이 낮을수록 수소 충전 온도가 증가함에 따라 충전 가능한 수소 질량의 감소율이 커진다. 또한 수소 충전 온도의 증가에 따라 최종 온도의 온도 상승률이 높아진다.

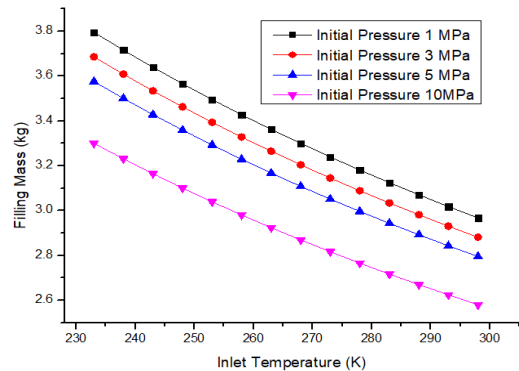


Fig. 2. The filling amount of the hydrogen storage tank

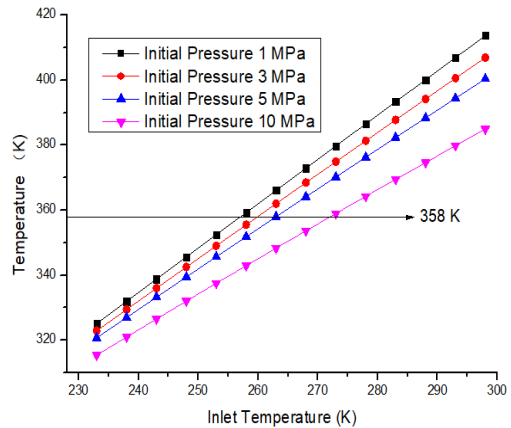


Fig. 3. The temperature of the hydrogen storage tank

Table 1. Initial parameters of the experiment and the results of the experiment

V/L	P1/MPa	P2/MPa	T1/K	Ti/K	Tf/K
74	5.5/9.5	70	293	270/265	350/342

3.2 초기 온도

Fig. 3에서 알 수 있듯이 수소 충전 온도가 상승함에 따라 초기 수소 압력이 낮을 때 수소 저장탱크 내의 최종 수소 온도 상승률이 크다. 따라서 수소 충전 온도가 온도 상승에 미치는 영향도 커진다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 초기 온도가 높을수록 차량용 수소 저장탱크 내의 최종 온도가 높다. 초기 가스 압력이 낮을수록, 온도 상승률이 낮을수록 초기 온도가 온도 상승 현상에 미치는 영향도 적다.

3.3 충전 압력의 영향

Fig. 5의 곡선을 보면 급속 충전 과정에서 충전 압력이 증가함에 따라 수소 온도가 점차 증가하고 온도 증가율이 점점 작아지는 것을 알 수 있다.

3.4 충전 온도

탑재된 수소 저장탱크의 충전 과정을 분석하기 위하여 다음과 같이 조건을 설정하였다. 탑재된 수소 저장탱크의 수소 압력은 70 MPa, 수소 충전 온도는 각각 233.15, 253.15, 273.15, 283.15, 293.15 K로 설정하였다. 수소 충전 온도에 따른 수소 저장탱크의 압력 및 온도 변화는 Fig. 6과 Fig. 7에 나타낸다. 수소 충전 온도가 증가함에 따라 탑재된 저장탱크의

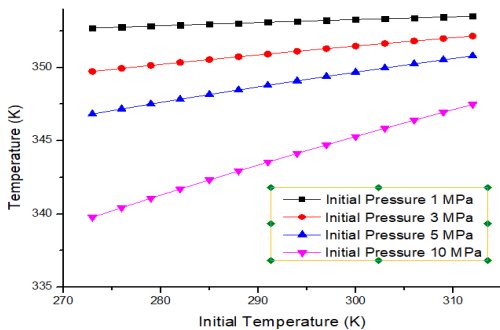


Fig. 4. The temperature of hydrogen in high pressure tank under different initial temperatures

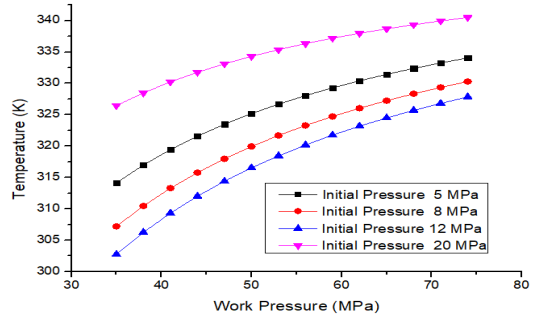


Fig. 5. The hydrogen temperature with different work pressures

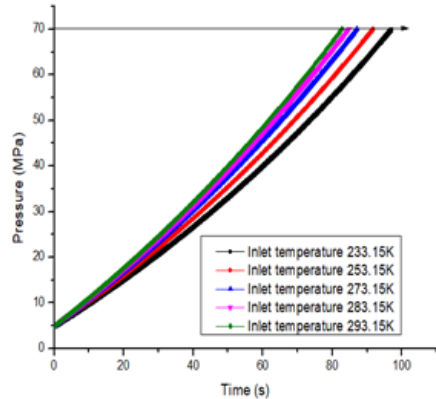


Fig. 6. Change of hydrogen pressure in hydrogen storage tank under different inlet temperatures

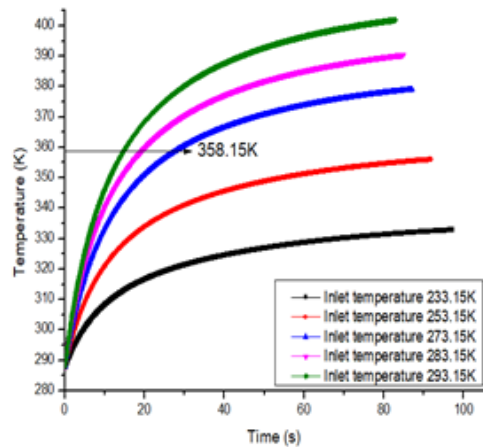


Fig. 7. Temperature change of hydrogen in the tank under different inlet temperatures

수소 온도와 압력이 증가하며, 수소 충전 시간은 약간 단축되지만 최종 수소 온도는 크게 상승한다. 수소 충전 온도는 233.15 K에서 293.15 K로 20.6% 증가하였다. 계산 결과로부터 예냉각 온도는 최종 온도에 큰 영향을 미치며, 수소의 예냉각 처리는 온도 상승 현상을 해결하는 방법 중 하나라고 결론지을 수 있다. 충전 온도가 273.15 K일 때 최종 온도는 탄소 섬유용의 한계 온도인 358.15 K를 초과하였다. 온도가 358.15 K에 도달하면 충전이 완료된다. 충전 온도가 233.15 K일 때 수소의 충전 질량은 충전 온도가 283.15 K일 때의 2.4배이다. 따라서 높은 충전 온도는 수소 저장탱크의 하중을 유발하고 내구성을 감소시킨다.

4. 결론

본 논문은 수소 저장탱크의 급속 충전 시 온도 상승 과정에 대한 이론적 분석을 실시하여 수치 해석 모델을 수립하였으며, 급속 충전의 주요 파라미터(초기 압력, 초기 온도, 충전 압력, 충전 온도)가 온도 상승에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) 수립된 온도 상승 수치 해석 모델은 비교적 계산 정밀도가 우수하며 급속 충전 과정에서 수소 저장탱크 내부의 온도 상승을 정확하게 계산할 수 있다. 또한 이 모델을 사용하면 다른 충전 파라미터에서 수소 저장탱크의 온도 상승을 예측할 수 있다.
- 2) 특정 충전 조건에서 수소 저장탱크의 온도 상승은 주로 질량유량, 수소 저장탱크의 초기 압력 및 초기 온도에 의해 결정된다.
- 3) 차량용 수소 저장탱크의 초기 압력이 낮을수록 수소 충전 온도가 증가한다. 따라서 충전 가능한 수소 질량의 감소율이 커지고 수소 충전 온도의 증가에 따라 최종 온도의 온도 상승률이 높아진다.
- 4) 차량용 수소 저장탱크의 초기 압력이 낮을수록 주위 온도가 증가함에 따라 최종 온도의 온도 상승률이 낮아진다.
- 5) 예측 모델은 차량용 수소 저장탱크 내의 다른

초기 조건에 대해 수소 압축에 필요한 최소 예냉 온도를 예측하여 현재 수소충전소에서 수소 압축 시 온도 제어를 위한 이론적 바탕을 제공하고, 수소 냉각에 필요한 에너지 소모를 감소시킬 수 있다.

6) 본 연구에서는 온도 상승 해석 공식을 바탕으로 온도 제어 방법을 제안하고 있는데, 충전 속도를 제어하거나 예냉 장치를 추가함으로써 온도 상승을 효과적으로 제어할 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과이다(No. 2021RIS-004). 본 연구는 제령대학 자연과학분야 성급중점프로젝트 “100명의 우수인재” 지원을 받았다(No. 2023ZYRC23).

References

1. T. Kim, D. Kim, D. Lee, Y. Kim, K. Ahn, Y. Bae, J. Park, and Y. Kim, “Study on thermodynamic performance of electrochemical hydrogen compressor”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 141-148, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.141>.
2. S. J. Oh, J. H. Yoon, K. S. Jeon, and J. J. Choi, “A study on the thermal characteristics of hydrogen storage vessel related to condition of charging”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 36, No. 3, 2022, pp. 1579-1586, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0243-2>.
3. J. Q. Li, J. C. Li, N. S. Myoung, K. Park, S. J. Jang, and J. T. Kwon, “An analysis on the temperature changes and the amount of charging of hydrogen in the hydrogen storage tanks during high-pressure filling”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 3, 2021, pp. 163-171, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.3.163>.
4. J. Q. Li, H. Xu, J. C. Li, and J. T. Kwon, “A theoretical study on the compressibility factor of hydrogen gas in the high pressure tank”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 162-168, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.162>.
5. M. Deymi-Dashtebayaz, M. Farzaneh-Gord, N. Nooralipour, and H. Niazmand, “The complete modelling of the filling process of hydrogen onboard vehicle cylinders”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 33, No. 2, 2016, pp.

- 391-399, doi: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20160332s20140209>.
6. D. Melideo, D. Baraldi, M. C. Galassi, R. O. Cebolla, B. A. Iborra, and P. Moretto, "CFD model performance benchmark of fast filling simulations of hydrogen tanks with pre-cooling", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 9, 2014, pp. 4389-4395, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.196>.
 7. D. Melideo and D. Baraldi, "CFD analysis of fast filling strategies for hydrogen tanks and their effects on key-parameters", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 1, 2015, pp. 735-745, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.10.138>.
 8. D. Melideo, D. Baraldi, N. D. M. Echevarria, and B. A. Iborra, "Effects of some key-parameters on the thermal stratification in hydrogen tanks during the filling process", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 26, 2019, pp. 13569-13582, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.187>.
 9. J. Zheng, J. Ye, J. Yang, P. Tang, L. Zhao, and M. Kern, "An optimized control method for a high utilization ratio and fast filling speed in hydrogen refueling stations", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 7, 2010, pp. 3011-3017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.001>.
 10. J. Cheng, J. Xiao, P. Bénard, and R. Chahine, "Estimation of final hydrogen temperatures during refueling 35 MPa and 70 MPa tanks", *Energy Procedia*, Vol. 105, 2017, pp. 1363-1369, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.505>.
 11. J. Xiao, P. Bénard, and R. Chahine, "Estimation of final hydrogen temperature from refueling parameters", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 11, 2017, pp. 7521-7528, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.213>.
 12. J. Xiao, J. Cheng, X. Wang, P. Bénard, and R. Chahine, "Final hydrogen temperature and mass estimated from refueling parameters", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 49, 2018, pp. 22409-22418, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.131>.
 13. M. Sadi and M. Deymi-Dashtebayaz, "Hydrogen refueling process from the buffer and the cascade storage banks to HV cylinder", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 33, 2019, pp. 18496-18504, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.023>.
 14. E. Talpacci, M. Reuß, T. Grube, P. Cilibrizzi, R. Gunnella, M. Robinius, and D. Stolten, "Effect of cascade storage system topology on the cooling energy consumption in fueling stations for hydrogen vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 12, 2018, pp. 6256-6265, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.030>.
 15. T. Kuroki, N. Sakoda, K. Shinzato, M. Monde, and Y. Takata, "Prediction of transient temperature of hydrogen flowing from pre-cooler of refueling station to inlet of vehicle tank", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 3, 2018, pp. 1846-1854, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.033>.
 16. J. Zheng, J. Guo, J. Yang, Y. Zhao, L. Zhao, X. Pan, J. Ma, and L. Zhang, "Experimental and numerical study on temperature rise within a 70 MPa type III cylinder during fast refueling", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 25, 2013, pp. 10956-10962, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.053>.