

수소 잔존 용량에 따른 수소 탱크 충전 시간 및 온도 변화 예측

이현우¹ · 오동현² · 서영진^{1†}

¹금오공과대학교 기계공학과, ²한국화학융합시험연구원

Prediction of Changes in Filling Time and Temperature of Hydrogen Tank According to SOC of Hydrogen

HYUNWOO LEE¹, DONGHYUN OH², YOUNGJIN SEO^{1†}

¹Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

²Korea Testing & Research Institute, 15 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44412, Korea

†Corresponding author :
yjseo@kumoh.ac.kr

Received 10 June, 2020
Revised 15 July, 2020
Accepted 30 August, 2020

Abstract >> Hydrogen is an green energy without pollution. Recently, fuel cell electric vehicle has been commercialized, and many studies have been conducted on hydrogen tanks for vehicles. The hydrogen tank for vehicles can be charged up to 70 MPa pressure. In this study, the change in filling time, pressure, and temperature for each hydrogen level in a 59 L hydrogen tank was predicted by numerical analysis. The injected hydrogen has the properties of real gas, the temperature is -40°C, and the mass flow rate is injected into the tank at 35 g/s. The initial tank internal temperature is 25°C. Realizable k-epsilon turbulence model was used for numerical analysis. As a result of numerical analysis, it was predicted that the temperature, charging time, and the mass of injected hydrogen increased as the residual capacity of hydrogen is smaller.

Key words : Hydrogen(수소), Numerical analysis(수치해석), SOC(잔존 용량), Temperature(온도), Pressure(압력), Filling time(충전 시간)

1. 서론

수소는 석탄 연료를 대신할 수 있는 친환경 에너지 공급원이다. 수소는 에너지 함량이 높고 온실가스 배출이 없다. 미래 환경을 위해 수소에 대한 연구는 다양하게 이루어지고 있으며 여러 산업에 사용되고 있다¹⁻⁵⁾. 그중 수소전기차는 수소를 이용한 이동수단으로 고압의 수소 탱크를 자동차에 설치하여 수소의

에너지를 전기 에너지로 변환하여 자동차가 움직일 수 있도록 한다. 수소가 깨끗할수록 에너지 전환 효율은 높아진다⁶⁾. 현재 수소전기차에 사용되고 있는 수소 탱크의 충전 압력은 최대 70 MPa이다⁷⁾. 차량용 수소 탱크는 수소 주입기를 통해 수소를 주유할 시에 주입되는 고압의 수소를 안전하게 저장할 수 있으며 충전 시에 높아지는 온도를 제어할 수 있는 쿨링 시스템이 설치되어 있다⁸⁾. 수소는 산소와 만났을

때 폭발성이 강하여 탱크에서의 누수가 없어야 하며 70 MPa의 고압을 버틸 수 있을 만큼의 강도가 필요하다. 그러므로 최고 100 MPa의 압력을 버틸 수 있도록 설계된다⁹⁾. 수소 저장용기는 제작 방식과 재료에 따라 type I에서 type IV까지로 분류된다. Type I은 금속재 용기로 주로 철이나 알루미늄을 이용하여 제작된다. Type II는 금속재 용기에 유리섬유로 보강한 형태이며 type III는 알루미늄 라이너에 탄소섬유를 덧씌운 형태이다. 수소 자동차용 수소 저장용기로 각광받고 있는 type IV는 플라스틱 라이너에 탄소섬유를 덧씌운 형태로 소재의 유연성으로 인하여 재충전 내구도가 높으며 소재의 특성상 가벼운 무게를 가지고 있다는 장점을 가지고 있다¹⁰⁾.

수소전기차에 사용되고 있는 수소 탱크는 실험과 수치해석으로 다양한 방향의 연구가 진행되고 있다. 진행된 연구들의 예로 Zheng 등⁸⁾은 74 L의 type III 수소 탱크를 사용하여 사전 냉각 시스템이 수소 충전 시 발생하는 열에 미치는 영향을 실험과 수치해석으로 연구하였다. 연구 결과 사전 냉각은 수소 충전 시 발생하는 온도를 낮추는 데 효과가 있음을 확인하였다. Suryan 등¹⁰⁾은 type III와 type IV 탱크를 3차원 수치해석으로 real gas model을 사용하여 수소 충전 시 초기 온도에 따른 탱크 내부의 온도 변화를 연구하였다. 연구 결과 초기 온도가 높을수록 최종 온도가 높아짐을 확인할 수 있었다. Melideo 등¹¹⁾은 computational fluid dynamics (CFD)로 수소 탱크 충전 시 사전 냉각된 수 온도의 영향을 확인하기 위해 실험과 CFD의 결과를 비교하여 CFD의 신뢰성을 확보하였으며 CFD로 주입되는 수소의 온도 변화에 의한 탱크 내부 온도 변화를 예측하였다. CFD 결과 주입되는 수소의 온도가 낮을수록 탱크 내 수소의 잔존 용량(state of charge, SOC), 질량 그리고 질량 유량이 높게 나타남을 예측할 수 있었다. Johnson 등¹²⁾은 36.9 L의 type IV 탱크를 사용하여 완충 시간이 동일한 조건에서 초기 압력에 따른 충전 특성의 변화를 확인하기 위해 실험과 CFD를 수행하였다. CFD에는 약 25만 개의 격자와 real gas model이 사용되었다. 연구 결과 수소 탱크 내부의 초기 압력이 클수

록 충전되는 수소의 질량과 최대 온도가 감소함을 예측하였다¹²⁾. Galassi 등¹³⁾은 29 L의 type IV 탱크의 입구 압력 증가비의 변화, 사전 냉각이 수소 충전 특성에 미치는 영향에 대하여 수치해석으로 연구하였으며 압력, 온도 그리고 질량유량에 대한 결과값을 탱크 내부 임의의 7개의 점에서 얻어 비교하였다. 수치해석 결과 입구 압력 증가비의 변화는 충전 중에 온도 변화의 경향은 달랐으나 최종 온도는 유사한 결과를 보였으며 사전 냉각된 수소를 충전하는 경우에는 최종 온도의 감소를 예측할 수 있었다. Dicken과 Mérida¹⁴⁾는 74 L의 35 MPa 수소 탱크 모델에 대하여 완충 시간을 40초로 설정하여 충전 과정 중 탱크 내부에서의 온도 변화를 실험과 CFD로 분석하였다. CFD는 2D로 진행되었으며, 온도의 상승과 질량 유량의 변화를 확인할 수 있었다.

본 연구는 59 L의 type IV 수소 탱크 내부 수소의 SOC에 따른 충전 특성의 변화를 예측하기 위하여 3D 수치해석을 사용하였다. 수치해석을 통하여 탱크 내부 수소 SOC가 5%, 30% 그리고 60% 조건에서 -40°C의 수소를 충전할 시 나타나는 탱크 내부에서의 온도 및 압력 변화와 목표 압력인 70 MPa에 도달하는 시간을 예측하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 모델링

수소 탱크의 제원은 길이 0.74 m, 지름 0.34 m로 59 L의 용량을 가지며 수소가 주입되는 튜브의 직경은 5 mm이다. 모델링에는 CATIA V5 (CATIA V5 R21, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, France)를 사용하였으며 곡선을 단순화하여 모델링 하였다. 곡선을 단순화한 이유는 곡선으로 인하여 격자를 생성할 때 격자의 품질을 떨어뜨리기 때문이다. 이를 STP 형식의 파일로 변환하여 상업용 유한요소 프로그램의 격자 생성 프로그램인 Ansys Mesher (Ansys version 16.1, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, US)를 사용하여 약 27만 개의 격자를 생성하였다. 수소 탱

크의 형상과 생성된 격자 모습은 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 수치해석 조건

수치해석에는 상용 프로그램인 FLUENT (Version 16.1; ANSYS Inc.)가 사용되었으며 해석 영역의 경계 조건은 다음과 같다. 시간에 따른 온도와 압력의 변화를 확인하기 위해 비정상 유동으로 진행하였다. Time step size는 0.0005초이다. 난류 모델로는 Realizable k-epsilon이 사용되었으며 coupled scheme 과 second order implicit 조건으로 수치해석이 진행

되었다⁷⁾. 수치해석에 사용된 수소의 물성으로는 National Institute of Standards and Technology (NIST) 의 real gas model이 사용되었다¹⁵⁾. 입구는 mass flow rate inlet으로 설정하였으며 입구를 통해 주입되는 수소의 온도는 -40°C 이고 35 g/s의 일정한 양으로 충전되도록 설정하였다. 초기 조건을 위해 hybrid initialization을 진행한 다음 patch 기능을 사용하여 수소 저장 탱크 내부의 초기 온도를 25°C 그리고 초기 압력을 각 수소 탱크 내부에 남아있는 수소 SOC에 해당하는 압력으로 설정해주었으며 최종 압력 70 MPa을 목표로 수치해석을 진행하였다. 수소 탱크 내부의 수소 SOC에 대한 압력은 Table 1에 나타내었다.

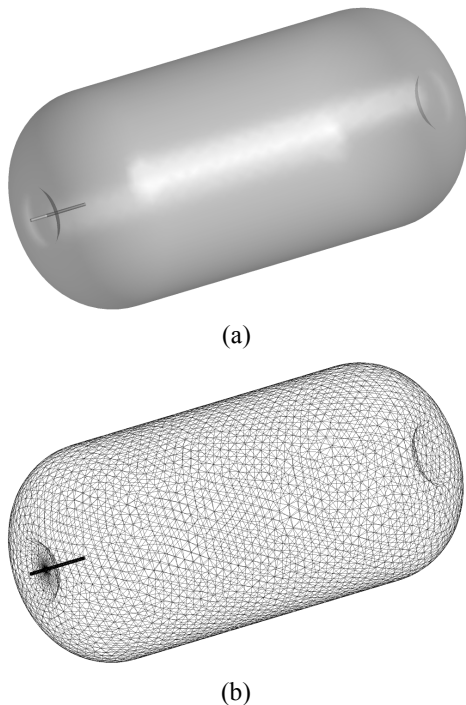


Fig. 1. 3D modeling of hydrogen tank (a) shape of tank, (b) generated mesh

3. 수치해석 결과

수소 탱크 내부 수소의 SOC에 따른 충전 시간의 변화와 시간 경과에 따른 온도 및 압력 변화를 예측하기 위해 수치해석을 진행하였다. 수치해석은 총 3 케이스로 탱크 내 수소 SOC 5%, 30% 그리고 60%인 경우이다. 초기 조건은 내부 온도 25°C 와 주입되는 수소의 질량 유량 35 g/s로 모든 케이스에 동일하게 적용되었다. 충전 목표 압력은 70 MPa이므로 탱크 내부 압력이 70 MPa에 도달하였을 때의 시간을 충전 시간으로 정의하였다.

Table 1. Internal pressure according to state of charge (SOC) of hydrogen in tank

SOC (%)	Pressure (MPa)
5	2.18
30	12.915
60	25.83

Table 2. Results of numerical analysis of hydrogen tank filling

State of charge (%)	Initial pressure (MPa)	Filling times (sec)	Max. temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Charged mass hydrogen (kg)
5	2.18	81.3	62.2	2.85
30	12.915	55.6	46.1	1.95
60	25.83	35.4	42.9	1.24

수치해석 결과는 Table 2에서 확인할 수 있으며 압력은 입구 압력 그리고 온도는 탱크 내부 평균 온도이다. 압력의 변화와 충전 시간을 수소 SOC가 5%일 때 2.18 MPa에서 70 MPa까지 도달하는 데 81.3초가 걸렸으며 30%인 경우에는 12.915 MPa에서 70 MPa까지 55.6초가 소요되었다. 그리고 60%의 경우 25.83 MPa에서 충전이 시작되어 35.4초가 지난 후 70 MPa에 도달하였다. 수소 SOC 5%, 30%, 60% 순서로 81.3초, 55.6초 그리고 35.4초의 충전 시간 결과를 얻어 탱크 내 수소 SOC가 많을수록 충전 시간이 단축됨을 확인할 수 있었다. 충전 시간이 단축됨에 따라 충전된 수소의 질량은 2.85 kg, 1.95 kg 그리고 1.24 kg으로 감소하였다. 탱크 내부 평균 온도의 변화는 수소 SOC 5%인 경우 충전이 종료될 때 62.2°C였으며 30%의 경우 46.1°C 그리고 60%의 경우 42.9°C로 나타났다. 시간에 따른 온도 및 압력의 변화는 Fig. 2에서 확인할 수 있다. -40°C의 수소가 탱크로 주입되면서 탱크 내부의 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. SOC가 상대적으로 낮은 5%의 경우, 주입 초기 온도 상승이 SOC 30%와 60%의 경우보다 더 급격하다는 것을 확인할 수 있다. 이는 탱크 내부의 압력에

기인한 것으로 5%의 경우 초기 압력이 가장 낮기에 상대적으로 더 많은 수소 주입이 발생되었기 때문일

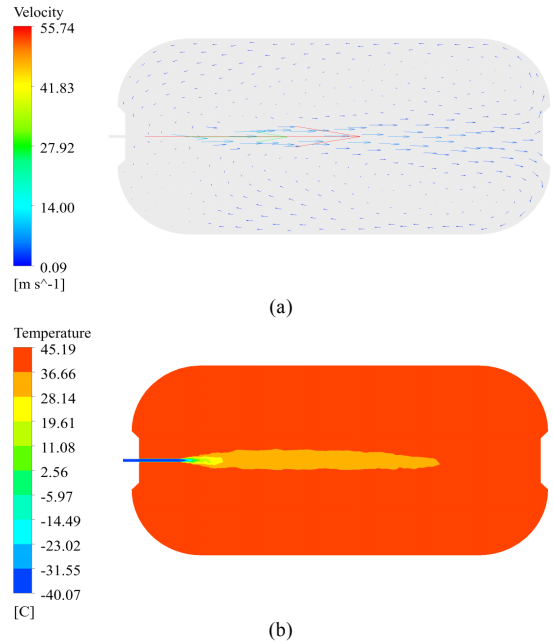


Fig. 3. Cross-section view during charging (a) velocity vector, (b) temperature contour (state of charge 60%, 15 sec)

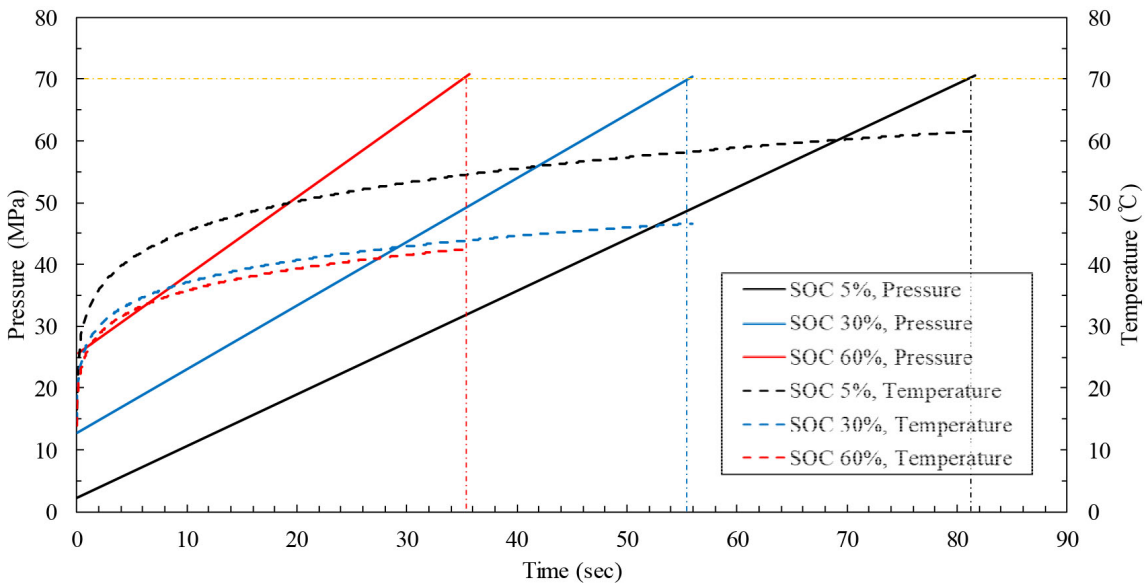


Fig. 2. Results of temperature and pressure changes over time; initial percentage of hydrogen in tank (a) 5% (b) 30% (c) 60%. SOC, state of charge.

것이다. Fig. 3에는 수소가 주입되는 과정에서의 속도 벡터와 온도 분포를 나타내었다. 속도 벡터를 통해 탱크 내부에서의 수소의 흐름과 속도를 확인할 수 있으며 내부에 와류가 형성됨을 확인할 수 있다. 온도 분포는 -40°C 의 수소가 탱크 입구로 주입되어 퍼짐과 동시에 내부의 온도가 상승하고 있음을 보여 준다.

4. 결론

수소 탱크 내부 수소의 SOC에 따른 충전 시간, 압력 그리고 온도 변화에 대한 수치해석적 연구를 진행하였다. 수소의 SOC는 5%, 30% 그리고 60%이다. 수치해석에는 상용 프로그램 FLUENT를 사용하였다. 수치해석 조건으로 realizable k-epsilon 난류 모델, coupled scheme 그리고 second order implicit를 적용하였으며 비정상 유동해석 조건으로 time step size는 0.0005초이다. 경계 조건은 입구는 mass flow rate inlet으로 35 g/s의 질량 유량으로 -40°C 의 수소를 주입하였으며 수소는 NIST의 데이터를 사용하여 real gas model이 적용되었다. 수소 탱크의 충전 시간 예측을 위하여 목표 압력인 70 MPa에 도달할 때까지 소요된 시간을 충전 시간으로 정의하였다. 탱크 내부 초기 압력은 수소 SOC가 늘어남에 따라 2.18 MPa, 12.915 MPa 그리고 25.53 MPa이며 내부 온도는 25°C 이다.

수치해석 결과 수소 SOC에 따른 수소의 충전 시간은 5%인 경우 81.3초, 30%인 경우 55.6초 그리고 60%인 경우에 35.4초로 수소 SOC가 많을수록 단축되는 것을 확인할 수 있었으며 온도는 시간이 지남에 따라 증가하여 초기 온도 25°C 에 충전 시작하여 충전 종료 시에 62.2°C , 46.1°C , 42.9°C 까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통하여 수소의 SOC가 적을수록 탱크 내부의 초기 온도가 더욱 급격히 상승하는 것을 확인하였으며, 주입 초기에 충전 시간과 주입되는 수소의 질량이 증가함을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통하여 수소 SOC에 따라 탱크 내부의 온도 및 충전시

간 등의 현상을 확인할 수 있게 되었다.

References

1. S. Sapre, K. Pareek, R. Rohan, and P. K. Singh, "Investigation of compressed hydrogen refueling process of 60 L type IV tank used in fuel cell vehicles", *Energy Storage*, Vol. 1, No. 6, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/est2.91>.
2. K. H. Lee, K. M. Koo, C. H. Ryu, and G. J. Hwang, "Study on cooling of hydrogen gas for the pre-cooler in the hydrogen refueling station", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 237-242, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.237>.
3. S. I. Hwang, S. K. Kang, and Y. S. Huh, "A study on the safety improvement by CFD analysis for packaged type hydrogen refueling system", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 243-250, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.243>.
4. B. H. Park, "Calculation and comparison of thermodynamic properties of hydrogen using equations of state for compressed hydrogen storage", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 2, 2020, pp. 184-193, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.2.184>.
5. B. H. Park, "Simulation of temperature behavior in hydrogen tank during refueling using cubic equations of state", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 385-394, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.385>.
6. H. Gürbüz, "The effect of H₂ purity on the combustion, performance, emissions and energy costs in an SI engine", *Thermal Science*, Vol. 24, No. 1A, 2020, pp. 37-49, doi: <https://doi.org/10.2298/TSCI180705315G>.
7. M. M. A. Alam, T. Setoguchi, and S. Matsuo, "An attempt of simulating the real time filling of H₂ cylinder at 70MPa", *OTEC*, Vol. 19, 2014, pp. 27-32. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/f20d/6e53fc1795ca4470731959f7558e7436c4d4.pdf>.
8. 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", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 25, 2013, pp. 10956-10962, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.053>.
9. S. H. Kim, J. M. Han, and Y. G. Jung, "Theoretical study on hoop wrap of the metal wire for type 2 high pressure tank", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 2, 2020, 1-8, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.2.194>.
10. A. Suryan, H. D. Kim, and T. Setoguchi, "Three dimensional numerical computations on the fast filling of a hydrogen tank

- under different conditions”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 9, 2012, pp. 7600-7611, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.019>.
11. 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”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 9, 2014, pp. 4389-4395, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.196>.
 12. T. Johnson, R. Bozinovski, J. Ye, G. Sartor, J. Zheng, and J. Yang, “Thermal model development and validation for rapid filling of high pressure hydrogen tanks”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 31, 2015, pp. 9803-9814, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.157>.
 13. M. C. Galassi, D. Baraldi, B. A. Iborra, and P. Moretto, “CFD analysis of fast filling scenarios for 70 MPa hydrogen type IV tanks”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 8, 2012, pp. 6886-6892, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.041>.
 14. C. J. B. Dicken and W. Mérida, “Modeling the transient temperature distribution within a hydrogen cylinder during refueling”, *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 53, No. 7, 2008, pp. 685-708, doi: <https://doi.org/10.1080/10407780701634383>.
 15. M. Deymi-Dashtebayaz, M. Farzaneh-Gord, N. Nooralipoor, 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>.