

Type IV 고세장비 모듈형 수소저장용기의 충전 조건에서의 수치해석적 연구

백중택¹ · 문지훈¹ · 민지훈¹ · 박균범² · 기광택² · 주성욱^{1*}

¹(재)경북하이브리드부품연구원, ²(주)동희홀딩스

A Numerical Analysis Study on Charging Conditions of Type IV High Aspect Ratio Modular Hydrogen Storage Vessel

JOONGTAK BACK¹, JIHUN MUN¹, JIHOON MIN¹, KYUNBUM PARK², KWANGTAEK KI², SUNGWOOK JOO^{1*}

¹Gyeongbuk Hybrid Technology Institute, 24-24 Goeyeon 1-gil, Yeongcheon 38899, Korea

²Donghee, 8 Saneop-ro 155beon-gil, Gwonseon-gu, Suwon 16648, Korea

*Corresponding author :
jsw@ghi.re.kr

Received 30 December, 2022

Revised 25 January, 2023

Accepted 2 February, 2023

Abstract >> In this study, in order to propose a modular method for type IV high aspect ratio modular hydrogen storage vessel, a numerical analysis was conducted on the heat transfer behavior in series and parallel connection methods, and the differences according to each connection method were reviewed. Computational fluid dynamics software was used to check the internal temperature and pressure values of the hydrogen storage container under charging conditions. In terms of thermal safety when charging hydrogen gas, it was confirmed that the parallel modularization method was superior.

Key words : Type IV hydrogen storage vessel(Type IV 수소저장용기), Numerical analysis(수치해석), Charge(충전), Turbulence behavior(난류거동), High aspect ratio(고세장비), Modular(모듈형)

1. 서론

이동수단의 동력 연료로서 수소는 무공해, 중량당 높은 에너지 밀도, 열 및 전기화학적 에너지로의 변화 용이성뿐만 아니라 연소 시 환경 오염물질을 배출시키지 않는 장점을 보유하고 있어 화석 연료를 대체하기 위한 차세대 에너지원으로 많은 연구가 진행되고 있으며^{1,2)}, 수소자동차는 국내 및 일본에서 상

업적 목적으로 완성차 업체에서 제작되어 시장에 판매되기 시작하였다. 수소자동차는 수소저장용기 내부의 수소가스와 공기 중의 산소로 인하여 연료전지 시스템에서 발생하는 전기에너지를 구동 모터를 통해 운동에너지로 전환되는 원리로 움직인다. 따라서 리튬이온 이차전지의 전기에너지로 모터를 구동하는 일반 전기자동차의 플랫폼을 상당 부분 공용으로 활용하지만, 고압의 수소가스를 저장하는 압력용기의

형상으로 인한 구조적 제한이 따르는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 전기자동차 차체 하부의 배터리 팩케이스 공간에 실장이 가능한 고세장비형 수소저장용기의 개발이 진행되고 있으며³⁾, 개별 고세장비형 수소저장용기의 모듈화를 목표로 다양한 시도가 연구되고 있다⁴⁾.

이에 본 논문에서는 고세장비형 수소저장용기의 모듈화 방법을 제안하기 위해 직렬연결방식과 메니폴더에서의 분배를 통한 병렬연결방식에서의 열전달 거동에 대해서 수치 해석적 연구를 진행하고 각 연결방식에 따른 차이를 검토하였다.

2. 시험 방법

2.1 수치해석 모델

본 논문에서 해석 대상으로 하는 수소저장용기는 종횡비(aspect ratio)가 높은 고세장비형 수소저장용기로 길이 1,800 mm, 실린더부 지름 100 mm 종횡비 18의 type IV 수소저장용기를 모델링하였다.

모델링된 개별 수소저장용기를 모듈화하기 위하여 총 11개의 실린더(용량 약 94 L)를 사용하였으며, 각 개별 용기의 연결 방식을 직렬형과 병렬형의 두 가지 방식으로 구분하여 모델링하였다. 개별 저장용기 및 연결 방식에 따른 모델링 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

Type IV 고세장비 모듈형 수소저장용기의 실린더 라이너, 보강재, 가스 주입구 및 연결 부재의 각각에 사용되는 재질인 폴리아마이드(polyamide, PA), 탄

소섬유강화플라스틱(carbon fiber reinforced plastic, CFRP), 스테인리스 스틸의 물성값은 Table 1과 같이 적용하였다.

2.2 지배 방정식

본 논문에서 유동 해석은 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 등 총 3가지 방정식에 기반을 둔 나비에스토크스 방정식(Navier-Stokes equations)을 사용하였다. 본 해석에 적용된 수소저장용기 내부의 유체 유동은 모두 난류이므로 유동 해석은 주로 난류 유동에 대해 시뮬레이션을 진행하고 해석하였다⁵⁾. 난류 유동을 예측하기 위해서 파브르 평균화된 나비에스토크스 방정식을 사용하였으며, 유동 파라미터에 따른 유동 난류의 시간 평균화 효과를 고려하였다.

연립 방정식을 풀기 위해서는 난류 운동에너지와 해당 소산율($k-\epsilon$ 모델)에 대한 수송 방정식을 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i^j, i=1,2,3 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial P}{\partial t} + \rho e + S_i u_i + Q_H \tag{3}$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} + \frac{5}{3}k - \frac{\Omega^2 r^2}{2} - \sum_m h_m^o y_m \tag{4}$$

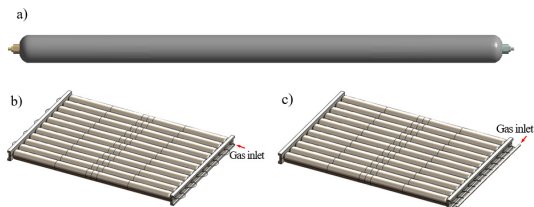


Fig. 1. 3D modeling of type IV high aspect ratio hydrogen cylinder (a), serial type connection module (b), and parallel type connection module (c)

Table 1. Material properties for high-aspect ratio hydrogen tank module

Properties	PA (Liner)	CFRP	Stainless steel
Density (kg/m ³)	1,100	1,540	7,930
Specific heat (J/kg·K)	1,872	1,040	466
Thermal conductivity (W/m·K)	0.334	1.2	25

여기서 u 는 유체 속도, ρ 는 유체 밀도, S_i 는 다공성 매체 저항, 부력 및 좌표계 회전으로 인한 단위 질량당 질량 분포 외력이다. 또한 h 는 엔탈피, Q_H 는 단위 체적당 열원, τ_{ik} 는 점성 전단 응력 텐서, q_i 는 확산 열 유속, Ω 는 회전 좌표계의 각속도, r 은 회전 참조 프레임의 점에서 회전축까지의 거리, k 는 난류 운동에너지이다(h_m^o 은 m 번째 혼합물 성분의 개별 열 엔탈피이고, y_m 은 m 번째 혼합물 성분의 농도이다). 아래 첨자는 세 좌표의 방향을 간략히 나타내기 위해 사용된 것이다.

2.3 해석 조건

고세장비 모듈형 수소저장용기의 충전 조건에서 수소저장탱크 내부 유동 해석을 통한 온도 압력 등을 확인하기 위하여 압축성 난류 유동에 대한 비정상상태 해석으로 시간에 따른 과도 해석을 진행하였으며⁶⁻⁸⁾, 전산 유체역학 상용 프로그램인 SolidWorks Flow Simulation 2022 (SolidWorks Corporation, Waltham, MA USA)를 사용하였다. 수소가스 충전 시 가압되는 조건을 모사하기 위하여 기존 출시 모델인 현대자동차의 넥쏘 차량의 충전 조건(충전 6분 기준 156.6 L)을 참조하여 1.055 kg/min의 질량 유량 조건으로 설정하였다. 수소가스 충전 온도 조건은 국제 충전 규격인 SAE J2601 (수소충전 프로토콜)에서 규정하는 -40°C로 설정하였다.

압력용기 내부 충전 수소기체는 초기 상태(state of charge, SOC) 5% 수준으로 가정한 20 bar의 조건에

서 외부 환경을 25°C 자연대류로 가정하였다⁹⁾. 수소가스 충전 시간을 수소자동차 상용 모델 충전 기준 시간인 6분으로 설정하여 고세장비 모듈형 저장용기에 충전한 결과 직렬형에서는 676 bar, 병렬형에서는 670 bar의 압력에 도달하는 것으로 계산되었다. 본 논문에서는 700 bar 이상의 압력에 도달하였을 때 고세장비 모듈형 저장용기의 온도, 압력 분포를 확인하기 위해 충전 기준 시간을 7분으로 설정하였다¹⁰⁾. 해석에 사용한 충전 시 수소가스의 조건은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

3. 수치해석 결과

고세장비 모듈형 저장용기의 수소가스 충전 0.5분, 3분, 7분 후의 직렬형, 병렬형 모델에서 압력 분포를 Fig. 2에 나타내었다.

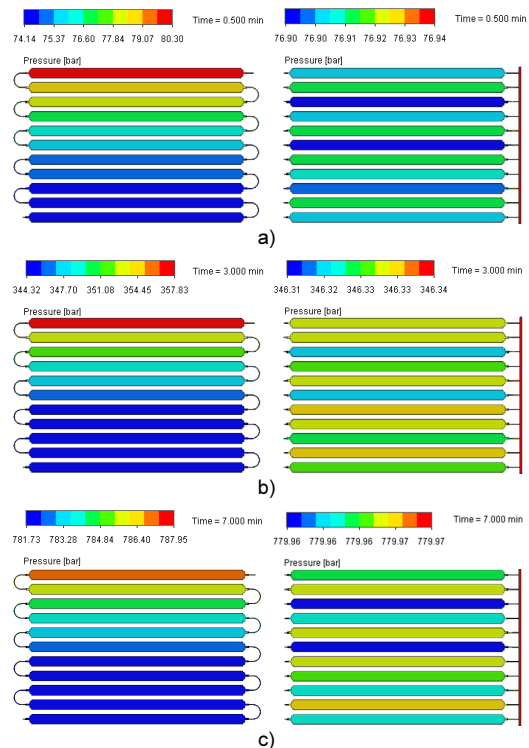


Fig. 2. The results of static pressure after (a) 0.5 min, (b) 3 min and (c) 7 min hydrogen gas charging for serial type connection module and parallel type connection module

Table 2. Hydrogen gas charging condition

Initial pressure (bar)	20
Charging time (min)	7
Ambient temperature (K)	298
Pre-cooled charging gas temperature (K)	233
Mass flow (kg/min)	1.055
Specific heat at 25°C (J/kg·K)	14,310
Thermal conductivity at 25°C (W/m·K)	0.187
Outer wall convection (W/m ² ·K)	6

직렬형에서는 7분 후 최대압력 787.95 bar, 최소압력 781.73 bar로 나타났으며, 병렬형에서는 7분 후 최대압력 779.97 bar, 최소압력 779.96 bar로 나타나, 최대압력 기준 병렬형에서 8 bar 정도 압력이 낮은 것으로 확인되었다. 또한, 압력용기 모듈 전체에서의 압력 편차는 직렬형에서는 약 5 bar 발생되고 있으나, 병렬형에서는 거의 동일한 압력 분포를 나타내는 것으로 확인되었다. 수소가스 충전 중의 모듈형 저장용기 전체에서의 압력 분포 또한 병렬형에서는 압력 차이가 1 bar 이하로 거의 발생되지 않았으나, 직렬형에서는 충전 후 3분 정도 경과 후에 최대 13 bar 정도의 압력 차이가 발생하였다.

수소가스 충전 0.5분, 3분, 7분 후 압력용기 내부의 온도 분포는 압력 분포 결과와 같이 각각 Fig. 3에 나타내었다.

직렬형에서는 충전 시간 7분 경과 후 최고온도 24.9°C,

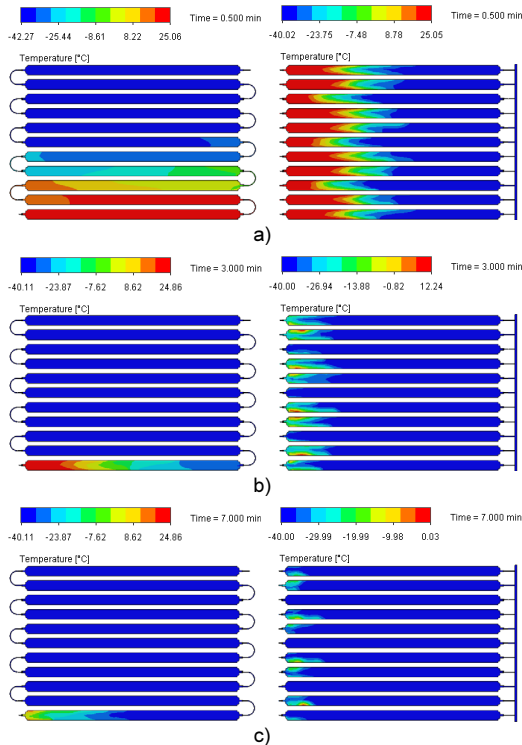


Fig. 3. The results of the fluid temperature after (a) 0.5 min, (b) 3 min and (c) 7 min hydrogen gas charging for serial type connection module and parallel type connection module

병렬형에서는 최고온도 0.0°C의 온도 분포를 나타내어 병렬형에서 24.9°C 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 수소저장용기 구조에 따른 충전 시 내부 온도 상승은 병렬형에서 더 낮은 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 직렬형과 병렬형 수소저장용기 모듈 연결 방식 각각에서 수소가스 충전 시 압력용기 내부에서 최고온도의 시간에 따른 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

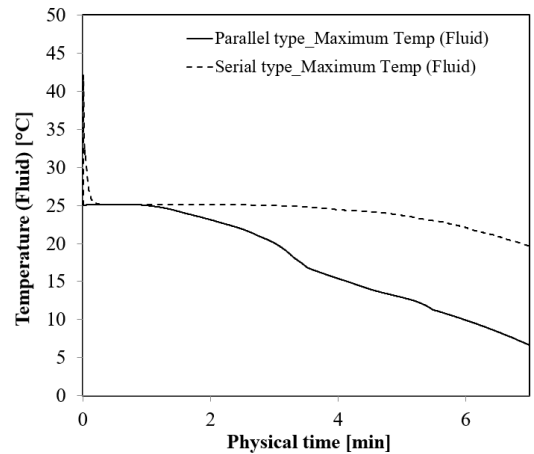


Fig. 4. The results of maximum temperature during hydrogen gas charging for serial type connection module and parallel type connection module

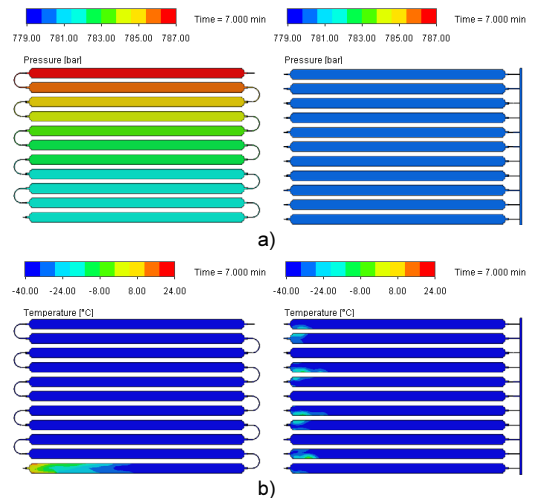


Fig. 5. The results of (a) static pressure and (b) temperature after 7 min hydrogen gas charging for serial type connection module and parallel type connection module

직렬형 수소저장용기 모듈에서는 수소가스 충전시작 직후(약 0.1초 이후) 온도가 42.5°C 까지 급격히 상승 되었으나, 충전시간 경과에 따라 -40°C의 유입가스 온도의 영향으로 점차 감소되는 경향을 나타내고 있다. 또한 병렬형 수소저장용기 모듈에서는 온도 상승 구간 없이 용기의 전체 온도 분포가 저온의 유입가스의 영향으로 인하여 낮아지는 경향을 나타내는 것으로 확인되었다.

국제 충전 규격인 SAE J2601 (수소충전 프로토콜)에서는 저장용기 표면 온도를 85°C 이하로 유지하도록 규정하고 있어 모듈화를 위한 두 가지 연결 방식인 직렬형 및 병렬형 모두 해당 규정은 만족시키는 것으로 확인되었으나, 직렬형에서는 충전 시작과 동시에 온도가 순간적으로 상승하는 현상을 보일 뿐만 아니라, 시간에 따른 온도 분포에서도 병렬형 대비 높은 수치의 온도 분포를 나타내고 있어 수소가스 충전 시 열적 안정성 측면에서는 병렬형 모듈화 방식이 우수한 것으로 확인되었다.

직렬형과 병렬형 수소저장용기 모듈 연결 방식 각각에서 충전 시간 7분 경과 후 압력과 온도에 대한 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 직렬형 모듈에서는 가스 주입구에서 높은 압력 분포를 나타내고 있으며 압력 분포 차이는 약 6 bar 정도로 확인되었다. 병렬형에서는 전체 용기의 압력 분포가 거의 동일한 경향을 나타내고 있다. 온도 분포 또한 압력 분포와 마찬가지로 직렬형의 주입구 쪽에서 멀어질수록 높은 온도를 나타내고 있으며, 병렬형에서는 각 고세장비 저장용기의 끝단에서 동일한 온도 분포를 보이는 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 논문에서는 Type IV 고세장비 수소가스 저장용기 11개를 모듈화하기 위한 설계 기초자료 확보를 목적으로 개별 용기의 연결 방식을 직렬형과 병렬형으로 구분하여 모델링하고, 고압 수소의 충전 조건에서 난류 거동에 대한 수치 해석을 통해 각각의 모듈에서 분포하는 압력과 온도를 예측하여 다음과 같은

결론을 도출하였다.

1) 고세장비형 수소가스 저장용기의 연결 방식에 따른 충전 시 용기 내부 압력 차이는 병렬형보다 직렬형 연결 방식에서 약 1.02% 높게 나타나는 것으로 예측되었다.

2) 7분간 수소가스를 충전하였을 때 각 연결 방식에 따른 수소저장 모듈에서의 최고온도는 직렬형에서 42.0°C, 병렬형에서 25.1°C로 둘 다 수소 충전 규격(표면 온도 85°C 이하 유지)을 만족하는 것으로 예측되었으나, 열적 안정성 측면에서는 병렬형 연결 방식이 유리할 것으로 판단되었다.

후 기

본 논문은 산업통산자원부의 지원을 받아 수행한 연구 과제(과제번호 20011899)의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. D. K. Kim, J. S. Lim, and J. S. Lee, "Current status of standardization for quality control of hydrogen fuel in hydrogen refueling stations for fuel cell electric vehicles", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 33, No. 4, 2022, pp. 284-292, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.4.284>.
2. J. Choi and J. Choi, "Research Status of Hydrogen Fuel Cell System Based on Hydrogen Electric Vehicle", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 29, No. 4, 2020, pp. 26-34. Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART002678713>.
3. Y. M. Goo, "Commercial vehicle and passenger car technology trends using hydrogen fuel cells", *Mobility Insight*, Vol. 9, 2020, pp. 8-13. Retrieved from <https://www.katech.re.kr/page/aeacfe71-c99b-4eef-99e6-64a0c6d3f007?ac=view&post=21ee64ec-506c-4741-b9d4-4414a7c86170&keyword=&page=2>.
4. E. Dahl, J. S. Becker, C. Mittelstedt, and H. Schürmann, "A new concept for a modular composite pressure vessel design", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 124, 2019, pp. 105475, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105475>.

5. S. J. Oh, J. H. Yoon, K. S. Jeon, J. K. Kim, J. H. Park, and J. J. Choi, "A study on the characteristics of temperature distribution related to geometry of tube in hydrogen storage vessel", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 32, No. 4, 2021, pp. 205-211, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.4.205>.
6. M. S. Kim, J. H. Ryu, S. Y. Jung, S. W. Lee, and S. W. Choi, "Numerical analysis of discharge flow in type III Hydrogen tank with different gas models" *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 558-563, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.558>.
7. V. Ramasamy and E. S. Richardson, "Thermal response of high-aspect-ratio hydrogen cylinders undergoing fast-filling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 160, 2020, pp. 120179, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120179>.
8. M. S. Kim, J. H. Ryu, S. K. Lee, and S. W. Choi, "Numerical analysis of filling flow in type III hydrogen tank with different turbulence models", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 32, No. 6, 2021, pp.483-488, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.6.483>.
9. H. W. Lee, D. H. Oh, and Y. J. Seo, "Prediction of changes in filling time and temperature of hydrogen tank according to SOC of hydrogen", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 4, 2020, pp. 345-350, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.345>.
10. M. M. A. Alam, T. Setoguchi, and S. Matsuo, "An attempt of simulating the real time filling of H2 cylinder at 70 MPa", *OTEC*, Vol. 19, 2014, pp. 27-32. Retrieved from <https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/files/uploads/19-5.pdf>.