

# 유한요소해석을 이용한 내부 압력에 따른 수소연료전지 철도 차량용 Type IV 수소탱크의 변형 및 안전성 예측

이현우<sup>1,2</sup> · 오동현<sup>3</sup> · 서영진<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>(주)현대중합금속 기계사업본부, <sup>2</sup>국립금오공과대학교 기계공학부, <sup>3</sup>한국화학융합시험연구원

## Prediction of Deformation and Safety of Type IV Hydrogen Tank for Hydrogen Fuel Cell Railway According to Internal Pressure Using FEA

HYUNWOO LEE<sup>1,2</sup>, DONGHYUN OH<sup>3</sup>, YOUNGJIN SEO<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Machinery Business, HYUNDAI Welding, 641 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44547, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

<sup>3</sup>Korea Testing & Research Institute, 15 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44412, Korea

†Corresponding author :  
yjseo@kumoh.ac.kr

Received 11 March, 2025

Revised 1 April, 2025

Accepted 14 April, 2025

**Abstract >>** The purpose of this study is to predict the safety of hydrogen tanks through finite element analysis (FEA). Hydrogen tanks for vehicles must be designed to withstand pressures of up to 700 bar and ensure safety even at higher pressures. To solve this problem, high-pressure vessels using type IV composite materials are being manufactured, and research on type IV materials is actively underway. In this study, FEA was performed on the spacing between hydrogen tanks placed in parallel and the fixed frame to ensure safe and efficient installation by considering deformation that occurs at high pressure. Studies have shown that deformation of hydrogen tanks can cause interference between tanks and damage the holding frame.

**Key words :** Hydrogen tank(수소탱크), High pressure(고압), Composite materials (복합재료), Finite element analysis(유한요소해석), Safety factor(안전율)

## 1. 서론

최근 환경에 대한 관심이 많아지면서 석탄 연료를 대신할 수 있는 친환경 에너지에 대한 관심도 함께 높아지고 있다. 친환경 에너지 중 수소는 석탄 연료를 대신할 수 있는 친환경 에너지이며 에너지 함량이 높고 온실가스에 대한 문제를 해결해 줄 수 있는

자원이다. 친환경을 위한 연구는 다양하게 이루어지고 있으며 다양한 분야에서 사용되고 있다<sup>1-6)</sup>. 석탄 연료를 많이 사용하는 이동 수단 중 하나인 철도 차량은 운행에 많은 에너지가 필요하여 운행 시에 많은 양의 석탄 연료가 사용된다. 많은 양의 석탄 연료가 사용되면 탄소의 배출 또한 많아지므로 환경에 부정적인 영향을 미치게 된다. 이러한 문제를 해결하

기 위하여 친환경 에너지원인 수소를 활용한 수소연료전지 철도 차량이 개발되었다<sup>7,8)</sup>. 현대 로템에서 개발한 수소연료전지 철도 차량에 설치되는 수소탱크는 700 bar의 압력으로 수소가 저장될 수 있도록 하였다<sup>9)</sup>. 수소는 산소와 반응하였을 때 폭발성이 강하여 탱크에서 누수가 없어야 하며 충전 압력 이상의 고압을 버틸 수 있도록 설계되어야 한다<sup>10)</sup>. 현재까지 개발된 수소탱크는 type I에서 IV까지로 분류된다. Type I은 주로 철이나 알루미늄과 같은 금속재를 이용하여 제작한 것이다. Type II는 금속재에 유리섬유로 보강한 형태이며 type III는 알루미늄 라이너에 탄소섬유를 덧씌워 강도를 보완한 복합재료이다. Type IV는 플라스틱 라이너에 탄소섬유를 덧씌워 소재의 유연성을 증가시켜서 재충전 내구도를 높였으며 경량에 대한 장점을 가지고 있어 차량용 수소탱크로 가장 적합하다고 평가되고 있는 복합재료이다<sup>11)</sup>.

복합재료 및 유한요소해석과 관련된 이전 연구 사례로 Do<sup>12)</sup>는 복합재료를 이용한 수소 압력용기의 설계를 위해 유한요소해석을 진행하였으며 압력용기의 제작 비용과 재료를 최소화하면서 파괴 압력에 견딜 수 있는 최적의 형상을 설계하고자 하였다. 그 결과 Tsai-Wu 파손 이론과 준측지 궤적(semi-geodesic) 알고리즘을 사용하여 형상을 설계하였으며 유한요소해석을 통해 설계의 타당성을 검증하였다. Park<sup>13)</sup>은 연료전지 차량용 type III 수소저장용기의 응력 해석과 균열 진전에 관한 평가를 플라이 모델링 기법과 확장유한요소법을 사용하여 수소저장용기에 대한 안전성 평가 연구를 진행하였다. 연구 결과 플라이 모델링 기법과 확장유한요소법을 통하여 용기 파손의 경우 수소 누출 위험성이 가장 큰 취약부를 파악할 수 있음을 확인하였다. Cho 등<sup>14)</sup>은 type I 수소 충전용 압력용기를 유한요소법을 이용하여 가스 압력과 포아송비에 따른 거동 특성을 관찰하였으며 연구 결과를 활용하여 고압 수소저장용기의 파괴해석 연구 및 구조적 안전성 판단에 활용하고자 하였다. Lim 등<sup>15)</sup>은 돔 형상으로 설계된 type IV 압력용기의 모델에 대한 구조해석을 진행하여 helical winding의 각도가 용기의 안전성에 미치는 영향을 분석하였다. Park 등

<sup>16)</sup>은 type IV로 만들어진 수소저장용기에 대하여 인장 시험과 유한요소해석 결과를 비교하여 유한요소해석에 대한 신뢰성을 얻었으며 건전성 예측에 활용할 수 있음을 확인하였다. Kim 등<sup>17)</sup>은 구조해석을 활용하여 수소 트레일러용 type IV 압력용기 설계에 관한 연구를 진행하였는데 1,350 bar에서 구조해석을 통해 파열압 및 파손 부위에 대한 연구를 진행하여 1 MPa 이상의 고압에서도 안전한 압력용기를 설계하였다.

본 연구의 목적은 유한요소해석을 통해 수소연료전지 철도 차량용 수소탱크의 설치에 대한 안전성을 예측하는 것이다. 본 연구에서는 고압에서 발생하는 변형을 고려하여 안전하고 효율적인 설치를 검증하기 위하여 평행하게 배치된 수소탱크와 고정 프레임 사이의 간격에 대한 유한요소해석을 수행하였으며 수소탱크 내부 압력에 따른 용기의 변형과 변형에 의한 탱크 및 고정 프레임 간의 간섭과 안전성을 예측하고자 하였다.

## 2. 유한요소해석

수소연료전지 철도 차량용 수소탱크의 유한요소해석은 다양한 내압 조건으로 진행되었다. 유한요소해석에 적용된 내압은 100, 500, 900, 1,300 그리고 1,575 bar이다. 수소탱크의 배열 구조는 type A와 type B로 두 가지이다. 두 type은 Fig. 1에 3D 모델링 형상으로 나타내었다. Fig. 1(a)는 type A이며 총 4개의 수소탱크가 나열되어 있다. 수소탱크의 부피는 두 가지이며 큰 용량의 탱크가 가운데에 존재하고 작은 용량의 탱크가 바깥쪽에 존재한다. 그리고 수소탱크를 고정하고 있는 프레임이 존재한다. Fig. 1(b)에 나타낸 type B의 수소탱크는 모두 동일한 부피이며 3개가 나란히 배열되어 있다. 수소탱크를 고정하기 위하여 탱크의 양쪽에 고리 형태의 구조물로 고정시켰으며 상단과 하단에 플레이트를 두어 수소탱크를 보호하고 있는 모습이다.

유한요소해석을 위하여 형상에 대한 단순화 작업을 진행하였다. 3D 모델링 수정에는 ANSYS Space

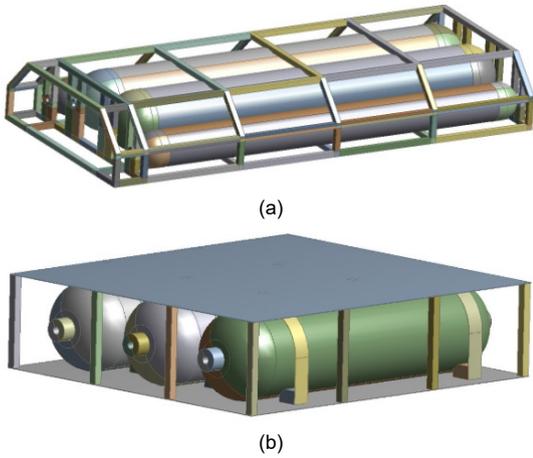


Fig. 1. Two types of hydrogen tanks used in finite element analysis. (a) Type A. (b) Type B

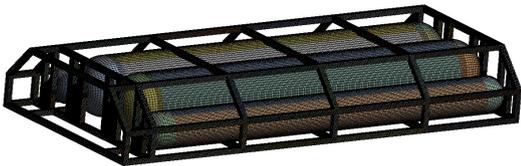


Fig. 2. Generated mesh-type A

claim (ANSYS, Canonsburg, PA, US)이 사용되었다. 해석에 필요한 격자는 ANSYS Mesher (Ansys version 17.1)로 생성하였다. 생성된 격자는 약 33만 개의 정렬 격자이다. 격자의 독립성을 확인하기 위하여 약 10, 20, 33, 50만 개의 격자로 유한요소해석을 진행하였으며 그 결과 약 33만 개와 약 50만 개를 사용한 유한요소해석 결과에서 응력, 변형, 그리고 안전율의 차이와 전체적인 발생 응력의 분포가 유사함을 확인하였다. 격자의 독립성 확인 과정을 통해 약 33개의 격자를 사용하여 유한요소해석을 진행하였다. 격자의 모습은 Fig. 2에 type A에 대한 격자의 모습을 대표로 나타내었다. 해석에 대한 조건으로 프레임은 structure steel의 물성이 적용되었으며 수소탱크는 복합재료인 type IV의 물성을 생성하여 적용하였다. 자세한 물성치는 Table 1과 2에 나타내었다. 유한요소해석은 ANSYS Mechanical (Ansys version 17.1)로 진행되었다.

유한요소해석에는 fixed support, pressure 그리고 gravity acceleration 조건이 사용되었다. 철도 차량과

Table 1. Frame properties

Density	7,850
Tensile yeild strength, MPa	250
Tensile ultimate strength, MPa	460
young's modulus, GPa	200
poisson's ratio	0.3

Table 2. Hydrogen tank properties

Density, kg/m <sup>3</sup>	970
Tensile ultimate strength, MPa	3,600
Modulus of elasticity for local axis 1, GPa	147
Modulus of elasticity for local axis 2, GPa	10
Modulus of elasticity for local axis 3, GPa	10
Poisson's ratio for local plane 12	0.27
Poisson's ratio for local plane 13	0.27
Poisson's ratio for local plane 23	0.54

Table 3. Maximum stress-excluding frame (Unit: GPa)

Pressure	Type A	Type B
100 bar	0.184	0.322
500 bar	0.921	1.610
900 bar	1.658	2.898
1,300 bar	2.396	4.185
1,575 bar	2.903	5.071

Table 4. Minimum safety factor-excluding frame

Pressure	Type A	Type B
100 bar	15.00	11.18
500 bar	3.91	2.236
900 bar	2.17	1.242
1,300 bar	1.50	0.860
1,575 bar	1.24	0.710

프레임이 고정되는 프레임의 아랫면에 fixed support 조건을 주었으며 수소탱크의 내벽에 pressure 조건으로 주어 예측하고자 하는 상황에서의 내압 조건을 설정하였다. 내압 조건은 100, 500, 900, 1,300 그리고 1,575 bar이다. 그리고 중력에 의한 영향을 반영하기 위하여 gravity acceleration 조건을 함께 설정해주었다.

### 3. 유한요소해석 결과

각 내부 압력에 의해 수소탱크에 발생하는 최대응력 및 안전율을 Table 3과 4에 정리하여 나타내었다. 유한요소해석 결과 안전율은 프레임을 제외한 수소탱크만의 결과를 보았을 경우 두 타입 모두 내부 압력 900 bar까지 1 이상의 안전율을 보였으나 1,300 bar가 넘어가면서 type B의 안전율이 1 이하로 떨어지는 결과를 보였다. 또한 내부 압력이 높아지면서 탱크 간의 간섭 발생을 확인할 수 있다. Type A의 경우에는 1,300 bar 이상부터 탱크 간의 간섭이 발생하였으나 type B는 1,575 bar에서도 탱크 간의 간섭이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다. 내부 압력에

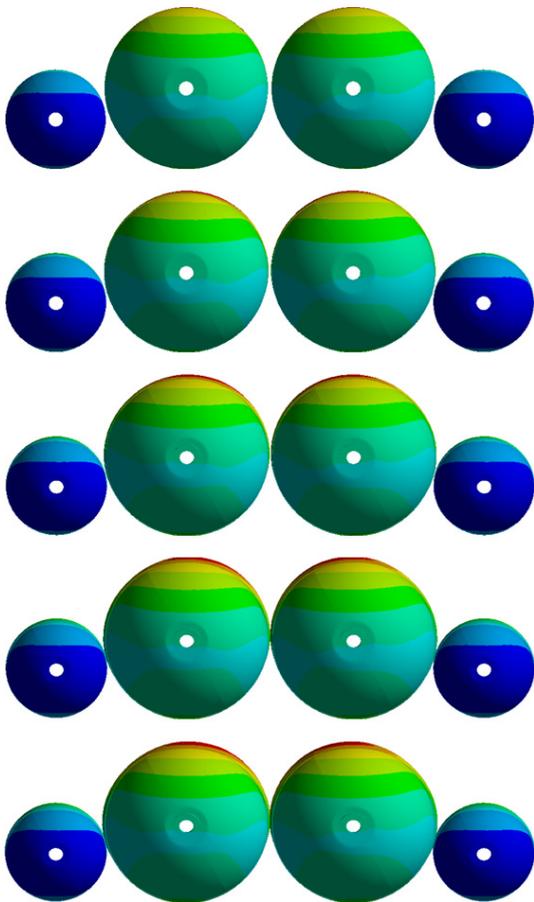


Fig. 3. Deformation of hydrogen tank according to internal pressure of type A (100-1,575 bar)

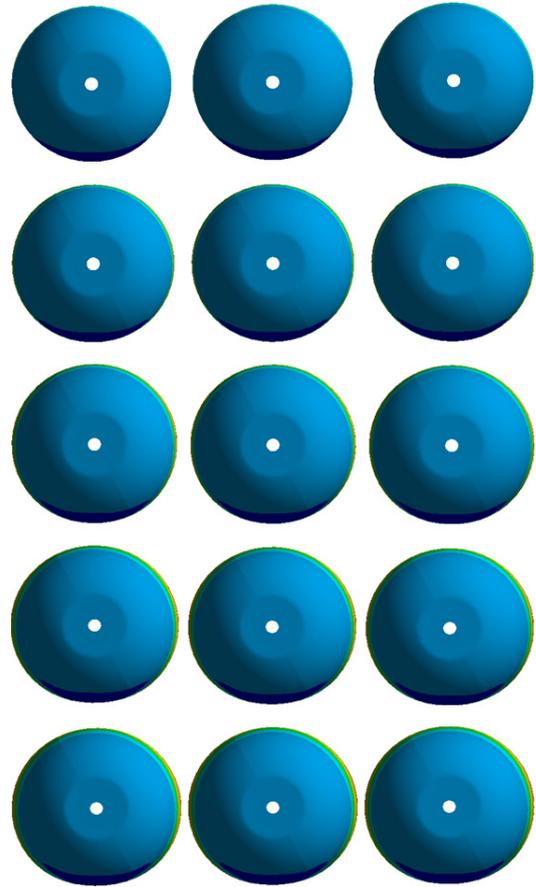


Fig. 4. Deformation of hydrogen tank according to internal pressure of type B (100-1,575 bar)

의한 수소탱크의 팽창에 따른 탱크 간 간격 변화를 정면 모습으로 Fig. 3과 4에 나타내었다. Table 5와 6에는 수소탱크와 프레임을 함께 보았을 때 나타난 결과를 정리하였다. 분석 결과 수소탱크와 프레임을 함께 보게 되면 탱크와의 접촉으로 프레임에 변형이 생기는 모습을 확인할 수 있었다. 이때 발생한 접촉으로 프레임에는 0.3 이하의 매우 낮은 안전율이 나타났으며 수소탱크의 팽창 정도와 접촉 면적에 따라 최대 응력과 안전율이 다르게 나타났다.

### 4. 결론

본 연구에서는 수소탱크의 안전에 관한 예측을 위

**Table 5.** Maximum stress-including frame (Unit: GPa)

Pressure	Type A	Type B
100 bar	0.867	1.136
500 bar	4.339	5.678
900 bar	7.811	10.22
1,300 bar	11.28	14.76
1,575 bar	13.67	17.88

**Table 6.** Minimum safety factor-including frame

Pressure	Type A	Type B
100 bar	0.288	0.22
500 bar	0.057	0.044
900 bar	0.032	0.024
1,300 bar	0.022	0.017
1,575 bar	0.018	0.014

하여 유한요소해석을 진행하였다. 유한요소해석을 통하여 내부 압력의 크기에 따른 최대응력과 안전율에 관한 결과를 얻을 수 있었으며 취약 부분의 위치 및 배치에 대한 문제점을 확인할 수 있었다. 유한요소해석은 두 가지 타입의 수소 저장탱크 배열을 이용하여 진행되었다. 분석 결과 두 가지 타입 모두 내부 압력에 의해 수소 저장탱크가 팽창함에 따라 프레임과 접촉하게 되며 접촉된 프레임은 변형이 되면서 매우 낮은 안전율을 보였다. 이때의 안전율은 0.3 이하의 값으로 매우 낮게 나타나 파손에 대한 위험이 매우 큼을 예측할 수 있었다. 하지만 프레임을 제외하고 수소 저장탱크만의 안전율을 확인하면 내부 압력이 900 bar인 경우 type A는 2.17, type B는 1.242로 안전에 주의할 필요는 있으나 파손될 수 있는 위험은 낮을 것으로 예측되었다. 추가로 type A에서 내부 압력이 1,300 bar 이상이 되면 배치된 탱크 간에 접촉이 일어남을 확인하였다.

현재 설계된 두 가지 타입 모두 프레임에 대한 안전율이 매우 낮음으로 재료 또는 설계에 보완이 필요할 것으로 예측되었다. 내부 압력이 높아짐에 따라 발생하는 팽창에 대한 영향 또한 고려하여 수소탱크 간의 간격에 대한 검토가 필요해 보인다. 본 연구를 통해 유한요소해석을 활용하여 다양한 조건에서 안

전에 대한 예측이 가능함을 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 국립금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(2024-2026).

## References

1. H. Lee, D. Oh, and Y. Seo, "Prediction of changes in filling time and temperature of hydrogen tank according to SOC of hydrogen", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 4, 2020, pp. 345-350, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.345>.
2. 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, pp. e91, doi: <https://doi.org/10.1002/est2.91>.
3. 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", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 237-242, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.237>.
4. 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", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 243-250, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.243>.
5. B. H. Park, "Calculation and comparison of thermodynamic properties of hydrogen using equations of state for compressed hydrogen storage", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 2, 2020, pp. 184-193, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.2.184>.
6. B. H. Park, "Simulation of temperature behavior in hydrogen tank during refueling using cubic equations of state", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 385-394, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.385>.
7. S. M. Lim, S. W. Sung, Y. K. Lee, and J. W. Kim, "Technical trends of hydrogen fuel cell railway rolling stock", *Proceedings of 2018 Autumn conference of the Korean Society for Railway*, 2018, pp. 314-317. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07557304>.
8. J. B. Lee, "Domestic and foreign technology trends of hydrogen fuel cell-based railway vehicle propulsion system", *KIPE Magazine*, Vol. 28, No. 2, 2023, pp. 43-47. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE11342806>.

9. J. S. Lee and J. H. Ryu, "Hydrogen fuel-cell/battery hybrid train", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 22, No. 1, 2019, pp. 19-26, doi: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2019.22.1.19>.
10. S. Kim, J. Han, and Y. Jung, "Theoretical study on hoop wrap of the metal wire for type 2 high pressure tank", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 2, 2020, pp. 194-201, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.2.194>.
11. A. Suryan, H. D. Kim, and T. Setoguchi, "Three dimensional numerical computations on the fast filling of a hydrogen tank under different conditions", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 9, 2012, pp. 7600-7611, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.019>.
12. K. W. Do, "Design and analysis of a hydrogen pressure vessel of composite materials [Master's thesis]", Seoul: Hanyang University, 2009.
13. W. R. Park, "A study on the optimization of carbon fiber composite pattern and fatigue life of type III high pressure hydrogen storage vessel for fuel cell vehicles [Doctoral dissertation]", Busan: Pukyong National University, 2020.
14. S. Cho, S. K. Byon, Y. T. Kim, and H. Y. Choi, "A numerical analysis on the stress behavior characteristics of a pressure vessel for hydrogen filling by FEM", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 26, No. 3, 2022, pp. 38-44, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2022.26.3.38>.
15. T. H. Lim, J. I. Byun, M. S. Cho, and H. S. Kim, "Design and structural analysis of type 4 composite pressure vessel fitted in spare tire well", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 29, No. 6, 2018, pp. 570-577, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.6.570>.
16. M. Park, J. Lee, W. Yoon, K. Park, H. Yun, and S. Joo, "A numerical study on the hoop tensile test of type IV high aspect ratio hydrogen storage vessel", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 1, 2023, pp. 32-37, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2023.34.1.32>.
17. G. W. Kim, T. H. Lim, J. W. Park, and H. S. Kim, "Design and structural analysis of type 4 composite pressure vessel for hydrogen trailer", *Proceeding of Korean Institute of Gas 2019 Spring Annual Conference*, 2019, pp. 66. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08761338>.