

후면 추돌에 대한 자동차용 수소연료용기의 형상별 안전성 평가

서성연*, 우지명*, 이상윤*, 김정진**
 *대구 미래형자동차산업 혁신아카데미
 **계명대학교 기계자동차공학부
 e-mail:kjj4537@gmail.com

Safety test of hydrogen fuel containers for automobiles for rear collisions by shape.

Seong-Yeon Seo*, Ji-Myeong Woo*, Sang-Yun Lee*, Jung Jin Kim**
 *Daegu Future Automobile Industry Innovation Academy
 **Dept. of Mechanical Engineering, Keimyung University

요약

탄소규제가 강화되면서 친환경 자동차 시장이 점차 확대되고 있다. 수소자동차는 전기자동차에 비해 충전시간이 짧고 연비가 높아 차세대 친환경 자동차로 각광받고 있다. 수소차에 사용되는 수소연료용기는 수소 기체의 내압과 외부 충격을 충분히 버틸 수 있어야 하며, 다양한 차량에 적용이 가능하도록 여러 형상의 수소연료탱크의 설계가 필요하다. 이에 본 연구는 기존 수소연료용기의 길이와 외경을 달리하여, 후면 추돌에 대한 형상별 수소연료용기의 안전성을 평가하고자 한다.

1. 서론

전 세계적인 탄소 배출규제 강화로 인해 전기 및 수소 자동차 시장은 점차 확대되고 있다. 수소차 시장은 2025년에 약 19만대, 2030년까지 약 58만대가 판매될 것으로 예측되며 2020년 대비 약 20배의 증가율을 보일 것으로 나타난다[1]. HMG, 다임러, 토요타, 혼다, GM 등과 같은 완성차 업체에서도 수소 인프라 구축과 수소자동차 연구개발에 대한 전략을 제시함에 따라 향후에 다양한 수소자동차들이 상용화될 것으로 전망된다.

수소연료용기의 설계와 관련한 연구들이 다각도로 진행되고 있다. 김청균 외 1명은 다구찌법을 이용한 복합소재 수소연료탱크의 최적설계에 관한 연구를 진행하였다[2]. 박건영 외 3명은 최대 내부 용적을 갖는 수소압력용기의 형상설계 및 성형해석을 진행하였다[3]. 이정주 외 4인은 유한요소 해석을 이용하여 연료 전지 차량용 Type 2 복합재 압력 용기의 경량화 최적 설계를 수행하였다[4].

본 연구에서는 다양한 차종에 적용할 수 있도록 현재 상용화된 수소연료용기의 형상을 변경하여, 후방 추돌 상황 아래 수소연료용기의 형상별 안전성 평가를 진행하고자 한다.

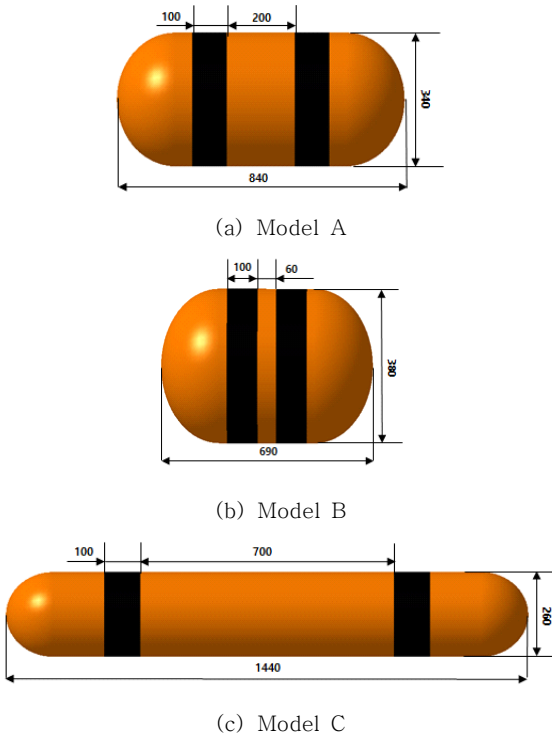
2. 본론

2.1 수소연료용기의 형상

본 연구에서는 수소연료용기의 3가지 형상들에 대해 안전성을 평가하였다. 첫 번째 형상(Model A)은 현대자동차 넥쏘(Nexo)에 장착되는 수소연료용기로 선정하였다. 해당 용기는 840 mm의 길이, 340 mm의 외경, 20 mm의 두께를 가지며 총 50 L 수소 저장 용량을 가진다. 두 번째 형상(Model B)와 세 번째 형상(Model C)은 Model A를 기준으로 길이와 외경을 변경하여 생성하였다(표1). Model B는 Model A 대비 82%의 길이와 112%의 외경을 가지며, Model C는 Model A 대비 171%의 길이와 76%의 외경을 가진다. 다만, 3개 모델은 동일한 두께와 저장용량을 가진다.

[표 1] 수소연료용기의 Model별 제원표

	Model A	Model B	Model C
용량(L)	50	50	50
두께(mm)	20	20	20
길이(mm)	840	690	1,440
외경(mm)	340	380	260



[그림 1] 수소저장용기의 3가지 다른 형상

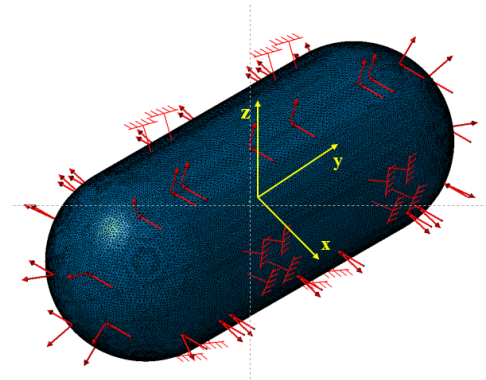
2.2 유한요소해석

본 연구에서는 CATIA V5-6R2019를 사용하여 모델링 및 해석을 수행하였다. 3개의 수소연료용기를 선형 사면체요소(Mesh size: 5 mm, Absolute sag: 1 mm)로 나누어 유한요소모델을 구성하였다. Model A, B, C의 유한요소모델에 대한 Node와 Element의 수는 표 2와 같다. 각 요소에는 탄소섬유 복합재의 물성치를 부여하였다(Young's Modulus: 165GPa, Poisson's ratio: 0.3, Yield stress: 1,315 MPa).

후면 충돌 상황을 모사하기 위해 그림 2와 같이 클램프가 닿는 부분에 경계조건을 적용하였다. 수소가 내부에 충전되어 있는 상황을 가정하여 70 MPa의 내압을 주었다. 하중조건은 후면 충돌하는 경우로 용기의 x축 방향으로 31,111 N(1,400 kg의 차량이 80 km/h로 충돌)의 분포하중을 주고 각각의 Model에 대해 정적 해석을 진행하였다. 해석에는 Intel(R) Core(TM) i7-9700 CPU @ 3.00 GHz, RAM 16 GB의 사양을 갖는 컴퓨터를 사용하였다.

[표 2] Model별 Node와 Element의 수

	Model A	Model B	Model C
Node	178,919	162,029	227,411
Element	830,050	747,267	1052,031



[그림 2] 후면 충돌 상황을 모사한 하중 및 경계 조건

수소연료용기의 안전성을 분석하기 위해 본 연구에서는 3가지 형상의 등가응력, 방향별 변위, 최대 주응력을 정량적으로 분석하였다. 안전율은 최대 등가응력과 항복 응력을 이용하여 계산하였으며 최소 안전율이 높을수록, 최대 변위와 최대 주응력이 낮을수록 안전성이 높다고 판단하였다.

2.3. 해석 결과

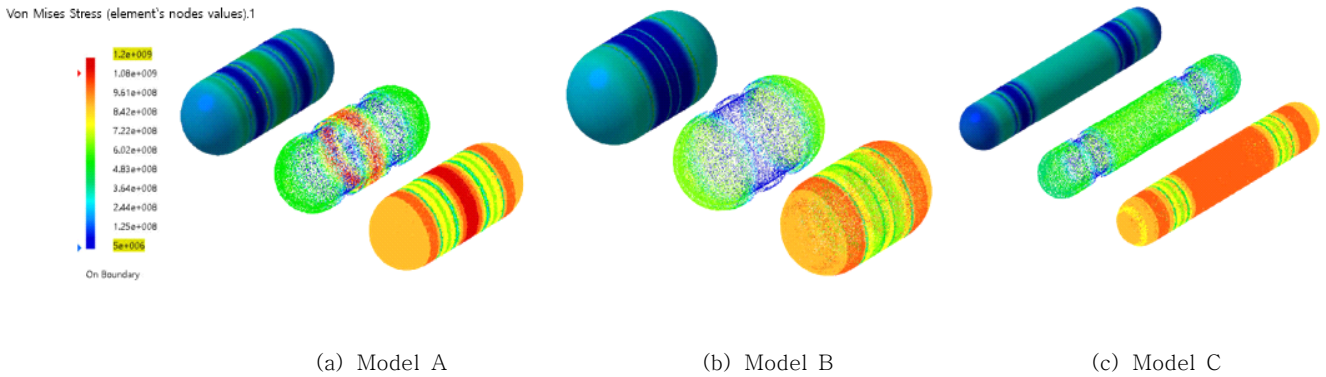
해석 결과에 따른 Model별 응력과 변위 분포를 그림 3에 나타내었다. Model A와 C에서는 용기의 중심부에서 등가응력, 변위량, 주응력이 가장 컸다. 반면, Model B의 경우 용기의 가장자리에서 가장 크게 나타났다.

각각의 최소 안전율과 최대 변위, 최대 주응력의 값은 표 4에서 확인할 수 있다. 최소 안전율은 Model A가 1.19, Model B가 1.31, Model C가 1.79로 Model C가 가장 우수했다. Model C의 최대 변위는 Model A에 비해 약 43% 작은 수치를 보였으며, 최대 주응력 또한 Model A보다 20% 작게 나타났다. 반면, Model B와 Model C의 최대 변위와 최대 주응력 값에는 앞선 비교에 비해 큰 차이가 없었다.

Model별 해석 결과값에 다소 차이가 존재하였는데, 이는 형상 외에도 클램프 사이의 간격과 하중을 받는 부분의 면적 차이에 기인한 것으로 예상된다.

[표 4] Model별 유한요소해석 결과

	Model A	Model B	Model C
Von-Mises Stress (MPa)	1,102.81	1,003.23	735.08
Translational Displacement (mm)	0.56	0.36	0.32
Stress Principal Tensor (MPa)	636.66	541.39	514.49
Safety Factor	1.19	1.31	1.79



[그림 3] Model별 유한요소해석 결과 (좌측 상단 : 등가응력, 중앙 : 변위, 우측 하단 : 주응력)

3. 결론

기존 모델의 길이와 외경을 달리하여 후면 추돌에 대한 형상별 안전성 평가를 진행하였다. 기존 형상 대비 길이 18% 감소, 외경 12% 증가한 Model B는 안전율이 10% 증가하였고, 기존 형상 대비 길이 71% 증가, 외경 24% 감소한 Model C는 안전율이 50% 증가한 것을 확인하였다.

그 결과, Model C의 최소 안전율이 1.79으로 가장 높았고, 최대 변위가 0.32 mm, 최대 주응력이 514.49 MPa으로 가장 낮게 나타나 세 모델 중 가장 안전한 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 기존 형상(Model A)뿐만 아니라 다양한 형상의 적용가능성을 확인하였다. 그 결과, 차량 하부 구조에 적합하게 용기의 형상을 변경하는 것이 가능하여 향후에 다양한 차종에 적용이 기대된다.

참고문헌

- [1] 최웅철, “수소전기자동차 현황과 시장확대를 위한 표준화 노력”, *오토저널*, 42(10), 60-64, 10월, 2020년.
- [2] 김청균 외 1명, “다구찌법을 이용한 복합소재 수소연료 탱크의 최적설계에 관한 연구”, *한국가스학회지*, 15(6), 57-62, 12월, 2011년.
- [3] 박건영 외 3명, “최대 내용적을 갖는 수소압력용기의 형상설계 및 성형해석”, *대한기계학회논문집*, 941-948, 10월, 2017년.
- [4] 이정주 외 4명, “유한요소 해석을 이용한 연료 전지 차량용 Type 2 복합재 압력용기의 경량화 최적 설계”, *대한기계학회 논문집*, 241-248, 3월, 2020년.