

수소버스 수소저장용기의 측면충돌 안전성 평가방법 연구

김경진* · 신재호*[†] · 한경희* · 한현민** · 이정민*** · 김시우****

Study on Safety Evaluation Process for Hydrogen Storage System of Hydrogen Bus

Kyungjin Kim^{*}, Jaeho Shin^{*[†]}, Kyeonghee Han^{*}, Hyeon Min Han^{**}, Jeong Min In^{***}, Siwoo Kim^{****}

Key Words: Hydrogen Bus(수소 버스), Fuel Tank System(연료 저장 시스템), Side Impact Test(측면 충돌 시험), Moving Barrier(대차), Finite Element Analysis(유한 요소 해석)

ABSTRACT

The structural safety of hydrogen buses is being evaluated for the successful introduction of hydrogen buses. The crash test methodology, for example, side impact test procedure is being discussed for hydrogen bus structure safety with a compressed hydrogen storage system located under the bus floor. Thus this study describes a new experiment method for side impact test with compressed hydrogen storage system independently based on finite element analysis instead of side impact test using full hydrogen bus. A side crash procedure of conceptual compressed hydrogen storage structure was investigated and impact simulations were performed. The finite element models of hydrogen bus, simplified structures, fuel tank system and side impact moving barrier were set up and simulation results reported model performance and result comparison of three different simplified models. Computational results and research discussion proposed the fundamental test framework for safety assessment of the compressed hydrogen storage system.

1. 서론

제26차 UN 기후변화협약 당사국 총회(COP26, 2021년)에서 대한민국은 2030년까지 국가온실가스를 2018년 대비 40% 이상 감축하기로 발표하였다.

이에 따라 2030년 국가 온실가스 총배출량은 436.6백만 톤을 목표로 하고 있으며, 이중 수송부문의 경우 온실

가스 배출 목표량은 61백만 톤으로, 2018년에 비해 37.8% 감축된 양이다. 수송부문에서 온실가스를 감축하기 위한 핵심은 기존의 내연기관 자동차를 친환경 자동차로 전환하는 것으로 2030년까지 전기 자동차 또는 수소연료전지 자동차를 450만 대 보급하여 약 29.7백만 톤의 온실가스를 감축할 계획이다.⁽¹⁾ 또한 2019년 대한민국 정부는 수소경제 활성화 로드맵을 발표하고 2040년 수소택시 8만 대, 수소버스 3만대, 수소트럭 3만 대를 보급 목표로 제시하였다.⁽²⁾ 세계적으로 버스 및 화물차 등의 대형 상용차가 전체 차량에서 차지하는 비율은 약 10% 이지만, 이산화탄소 등의 온실가스 배출 기여도는 약 46%를 차지하고 있다. 따라서 대형 상용차를 전기/수소차 등의 친환경 자동차로 대체한다면 온실가스 감축에 상당한 효과가 있을 것

* 경일대학교 기계자동차학부, 교수

** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 연구원

*** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 책임연구원

**** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 자율주행연구처장

[†]교신저자, E-mail: jhshin@kiu.kr

으로 예상된다.⁽³⁾

대한민국 정부가 친환경 버스의 보급을 확대하려는 계획과는 달리 교통사고 발생 시 수소의 누출, 화재 및 폭발 등에 의해 더 큰 피해를 야기할 수 있는 수소버스 및 수소저장시스템 부품의 안전성을 평가하고, 검증하는 기준 및 안전성 평가 세부 방법에 대한 연구는 미흡한 상황이다.⁽¹⁾ 정부의 수소버스 보급 확대 정책을 뒷받침하고, 2020년 전체 교통사고 중 버스 사고 비율이 30% 이상⁽⁴⁾인 것을 고려한다면 다양한 사고 상황과 수소저장시스템의 특성을 포함한 수소버스 안전성 평가기술의 개발이 필요하다.

박원일 등의 버스 사고유형과 사고비율을 분석한 교통사고 통계연구에서 측면충돌 사고는 추돌 사고 다음으로 빈번히 발생하는 사고유형⁽⁵⁾으로서 1980년대 후반부터 미국과 유럽을 중심으로 측면충돌 사고유형에 대한 다양한 연구 및 안전기준 제정에 노력을 기울이고 있다.⁽⁶⁾ 차량의 측면은 전면부에 비해 충돌에너지 흡수할 수 있는 구조물의 설계가 제한되어 있어 일반 차량에서는 승객의 치명적 상해가 나타날 수 있는 것으로 보고되었다.^(7,8) 수소버스의 경우 충돌 시 승객 안전도뿐만 아니라 수소저장장치의 안전성을 고려해야 하고 수소저장시스템의 차량 내 위치에 따라 다양한 충돌 조건을 고려해야 한다. 특히 버스 하부에 수소저장시스템이 장착되는 경우 측면충돌 시 수소저장시스템에 직접적인 접촉 또는 충격으로 인해 수소저장시스템 및 체결구조의 파손 등이 발생할 수 있으므로, 측면충돌에 따른 수소버스의 안전도 평가는 매우 중요하다.⁽⁹⁾ 그러나 일반승용차가 아닌 수소버스의 실차 충돌시험은 요구되는 비용이 상대적으로 크기 때문에 버스의 실차 충돌시험을 대체할 수 있는 수소저장시스템 단위에서의 안전성 평가기술이 더욱 필요하다. 하영호⁽¹⁰⁾와 최현진⁽¹¹⁾은 실제 측면충돌 시험을 대체하기 위한, Sled를 이용한 측면충돌 모의시험의 감가속도 신호(Crash Pulse)를 구하기 위한 연구를 진행하였다. 장규진 등⁽¹²⁾은 연료전지 자동차의 고압수소저장시스템 신뢰성 평가를 위해 실차 측면충돌 시험결과와 측면충돌 해석결과를 비교 분석하였다. 신재호 등은 유한요소해석을 통해 휠체어 탑승 개조버스의 측면충돌 및 전복사고 시 버스의 구조안전성⁽¹³⁻¹⁵⁾을 분석하였다. 김경진 등은 수소버스의 측면충돌에 대해 전체 수소버스 모델(Full car)과 수소저장시스템 장착영역만을 고려한 모델을 사용하여 충돌해석을 수행한 결과를 비교 분석하였다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 선행연구⁽⁹⁾를 기반으로 충돌해석기법을 활용하여 수소버스 실차 측면충돌 시험과 동등한 수준으로 수소저장시스템 단위의 안전성을 평가할 수 있는 방법

을 연구하였다. 수소저장시스템이 차량의 하부에 장착된 수소버스의 유한요소모델을 구성하여 측면충돌 해석을 수행한 결과와 수소저장시스템을 독립적으로 고려한 세 가지 유형의 유한요소 구조모델을 적용하여 수행한 측면충돌 해석결과를 비교하였다.

2. 수소버스 측면충돌 안전성 기준

수소버스는 미국, 유럽 등을 중심으로 2000년대 초부터 사용되기 시작하여 국내에서는 2018년 울산시 시내버스로 최초 도입한 이후 2022년 7월까지 193대가 등록되었다.⁽¹⁶⁾ 국내에서는 “자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙(자동차 안전기준)”의 17조에서 수소버스의 운행 중 수소 누출 등에 대한 안전성 평가 방법, 91조에서 수소를 연료로 사용하는 차량의 충돌 사고 시 수소연료장치의 안전성 기준을 규정하고 있다.⁽¹⁷⁾

수소전기차의 세계기술규정인 UN GTR 13은 2013년 제정되어 수소연료장치 내압용기의 성능, 내구성 등과 수소연료장치 부품의 적합성, 안전성, 그리고 전기안전성 등의 평가 기준에 대해 규정하고 있다. 하지만 수소버스와 다른 차량의 충돌 사고 시 수소연료장치에 대한 안전 기준 및 안전성 평가 방법 등은 아직 국내의 모두 미비한 상황이다.⁽¹⁾ 일반차량의 경우 유럽과 미국에서 실행하고 있는 측면충돌 시험 방법에 차이가 있으며 국내에서는 실시하는 측면충돌 시험은 유럽의 측면충돌 시험방법과 동일하다. Table 1에 국내 및 유럽과 미국의 측면충돌 시험방법을 간단히 비교하였다.⁽¹⁸⁾

본 연구에서는 국내 및 유럽의 측면충돌 시험법에 기반을 두고 수소버스의 수소저장시스템 안전성 평가방법을 연구하였다. Fig. 1에 유럽 측면충돌 시험방법을 개략적으로 나타내었다.⁽¹⁹⁾

Table 1 Impact test parameters

Category	Korea & Europe (EEC96/27)	U.S.A. (FMVSS214)
MDB Weight	950 kg	1,367 kg
Impact speed & angle	50 kph, 90 deg.	54 kph, 63 deg.
Impact location	Centered on R-point	940 mm from wheelbase center

3. 수소버스 측면충돌 해석모델

본 연구에서는 5개의 수소 탱크로 구성된 수소저장시스템이 버스 하부에 장착된 수소버스를 대상으로 국내 및 유럽의 측면충돌 시험법을 적용하여 수소저장장치의 구조적 안전성을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 일반 승용차의 측면충돌 시험은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 시험 대상 차량에 인체모형을 탑재하고 이동대차의 진행방향과 시험차량의 길이방향 중심선이 직각이 되도록 이동대차를 50km/h의 속도로 시험차량에 충돌시킨다.^(20,21) 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 수소버스에 장착된 수소저장시스템의 중심부를 지나는 방향을 따라서 이동대차가 이동하여 수소버스의 측면에 충돌하는 조건을 적용하였다.⁽⁹⁾

수소버스에 장착된 수소저장시스템의 측면충돌 안전성 평가를 위한 측면충돌해석을 위해 네 가지 유한요소모델을 구성하였다. 수소저장시스템을 포함한 수소버스 실차 모델과 세 가지 유형의 측면충돌 단순 모델을 생성하여

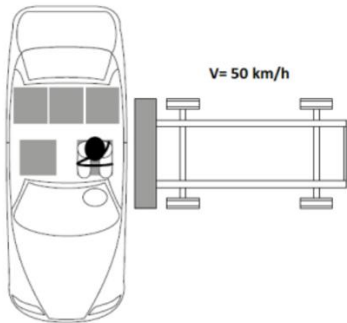


Fig. 1 UN R95 side impact test configuration⁽¹⁹⁾

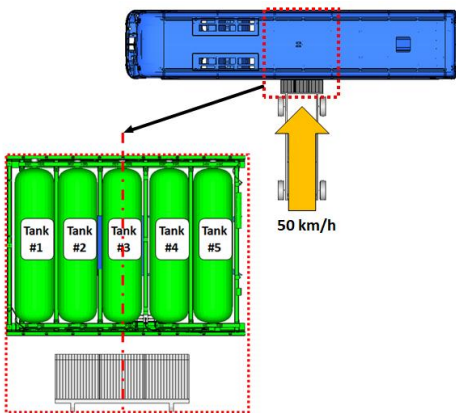


Fig. 2 Side impact simulation setup for hydrogen bus

실차 모델에서 수소저장시스템에 미치는 영향과의 유사성을 비교 분석하였다. 첫 번째 모델은 수소저장시스템, 승객 공간 등을 포함한 수소버스 전체를 유한요소모델로 구성하여 실제 버스와 동일한 구조와 조건을 갖는다. 두 번째 모델은 수소버스 내에서 수소저장장치가 장착된 영역만을 고려한 부분모델이다. 5개의 수소저장탱크와 탱크에 연결된 연료장치시스템, 수소저장장치 주변의 구조물로 구성되어 있다. 이동대차와 충돌하는 면의 반대쪽 면은 충돌방향으로의 변위를 구속하는 경계조건을 부여하였다. 세 번째 모델은 두 번째 모델에서 사용된 수소저장장치 부분모델에 경계조건을 부여하는 대신 측면충돌을 위한 가상의 대차 모델(Fig. 3)을 도입하여 수소저장장치 부분모델을 가상의 대차모델 상부에 위치시키고 구속조건을 정의하였다. 가상의 대차모델에서 바디부분은 강체(Rigid body)로 가정하고, 타이어와 바디는 서로 연결되도록 구속조건을 적용하였다. 또한 타이어와 지면의 접촉을 정의하였다. 네 번째 모델은 두 번째 모델에서 사용한 수소저장장치의 부분모델에서 수소저장탱크와 연료장치시스템만을 고려하고 주위의 구조물을 배제하여 세 번째 모델과 동일하게 가상의 대차모델을 적용한 모델이다.

첫 번째 모델부터 네 번째 모델을 순서대로 Model 1 - Model 4로 표시하였으며, 각 모델의 개략적인 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 모든 유한요소모델에서 측면충돌을 위한 이동대차의 무게는 950kg이며 수소저장시스템의 중앙과 이동대차의 중앙을 일치시켜 50km/h의 속도로 충돌시켰다. 측면충돌에 대한 수소저장시스템의 거동을 확인하기 위해 Fig. 5에 표시된 수소저장시스템의 1번부터 6번 위치에 가속도계를 설정하였다. 측면충돌은 y방향을 따라서 이루어진다. 전체 버스 모델을 사용한 Mode 1과 다른 모델의 해석결과를 비교하여 수소저장시스템의 안전성을 독립적으로 평가할 수 있는 최선의 방안을 찾을 수 있도록 해석결과를 정량적으로 비교하였다.

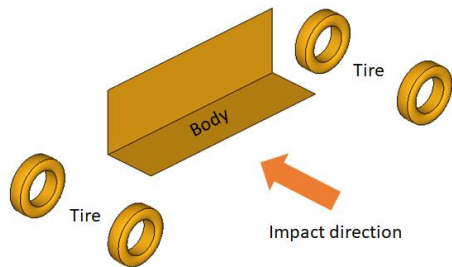


Fig. 3 Virtual moving barrier for side impact simulation

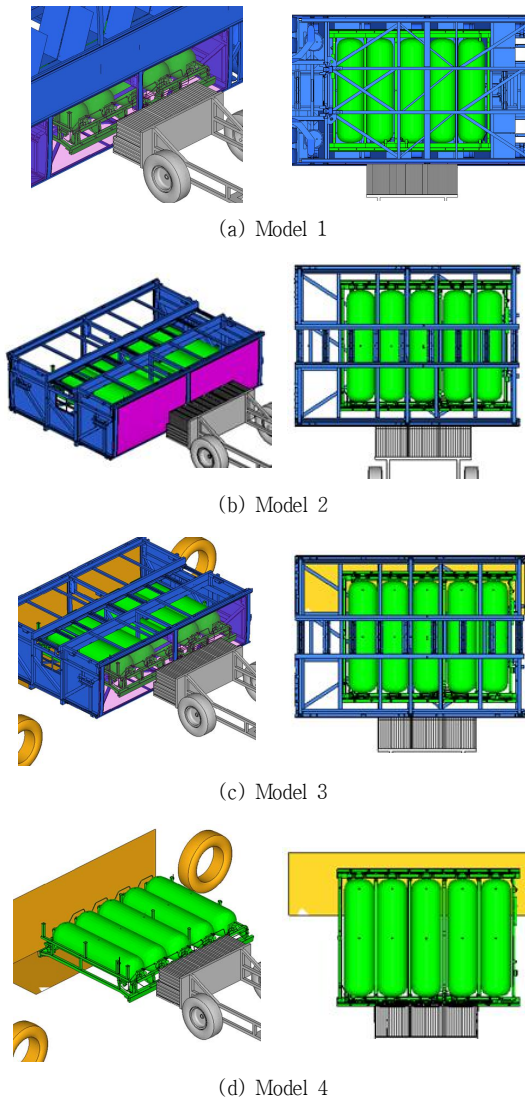


Fig. 4 FE models for side impact simulations for compressed hydrogen storage system in hydrogen bus

4. 측면충돌 해석결과

수소버스의 하부에 장착된 수소저장시스템의 측면충돌 안전성을 평가할 수 있는 모의 측면충돌 시험방법을 연구하기 위해 앞서 제안한 네 가지 유한요소모델을 대표적인 상용 충돌해석 소프트웨어인 LS-DYNA를 사용하여 충돌해석을 수행하였다. 측면충돌 시 수소저장시스템에 가장 큰 영향을 미치는 것은 측면충돌에 의해 수소저장시스템에 발생되는 가속도와 주변 구조물과의 접촉하중

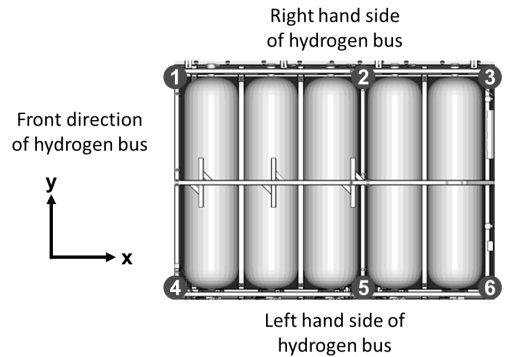


Fig. 5 Hydrogen tanks and six accelerometer locations for acceleration calculations

이다. Fig. 5의 수소저장시스템에 표시한 위치에서 각 모델별로 시간에 따른 가속도의 변화를 측정하였으며, 수소탱크에 연결된 밸브의 체결부에 미치는 하중을 계산하여, 수소버스 실차 모델인 Model 1의 해석결과와 비교하였다. Fig. 6~8에서 각 모델의 가속도 측정 위치에서 측면충돌에 따른 가속도의 변화를 Model 1의 결과와 비교하였다.

Fig. 6, 7에서 볼 수 있듯이 Model 1과 Model 2, 3은 6개의 측정위치에서 시간에 따른 가속도의 변화가 유사한 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 하지만, Model 4의 경우 1, 3번 위치에서는 Model 1에 비해 현저히 낮은 가속도를 나타내고 있으며, 반대로 2, 5번 위치에서는 Model 1에 비해 월등히 큰 최대 가속도를 나타내고 있다. 각 모델에서 측면충돌에 의해 수소저장시스템에 발생하는 가속도를 좀 더 정량적으로 비교하기 위해 Model 2~4의 각 측정 위치에서의 최대 가속도와 Model 1의 최대 가속도를 비교한 결과를 Table 2에 나타내었다. Model 1에서 계산된 최대가속도에 비해 Model 2와 3에서는 각각 89~174%, 79~188% 범위의 최대가속도를 나타내는데 비해 Model 4에서는 Model 1에 비해 18~919% 범위의 최대 가속도가 발생하는 것을 알 수 있다. Model 4와 Model 2, 3의 가장 큰 차이는 수소저장시스템에서 수소탱크 주변의 구조물을 고려하지 않았다는 점이다. 따라서 수소저장시스템의 측면충돌 안전성을 평가하기 위한 모의 측면충돌 시험에서는 수소저장시스템이 장착되는 실제 수소버스와 유사한 주변 구조물을 반드시 같이 고려해야 할 것으로 판단된다.

측면충돌에 의해 수소저장시스템에 가해지는 접촉하중을 평가하기 위해 아래의 Fig. 9에서 원으로 표시한 수

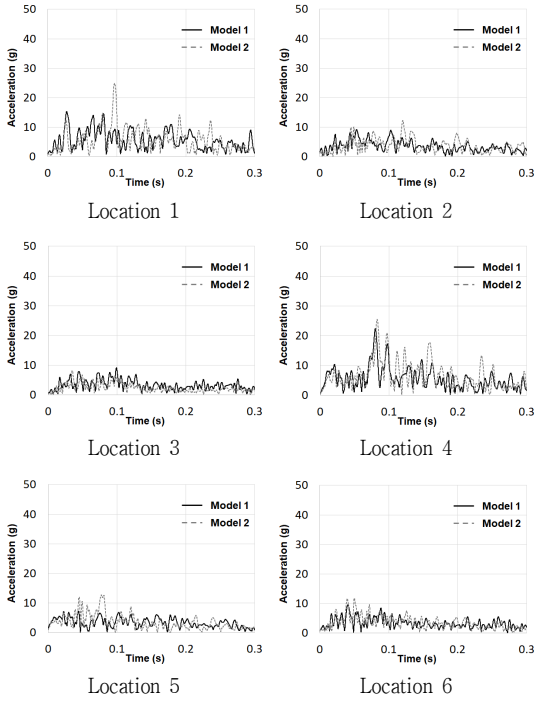


Fig. 6 Comparison of acceleration responses of Model 1 & 2

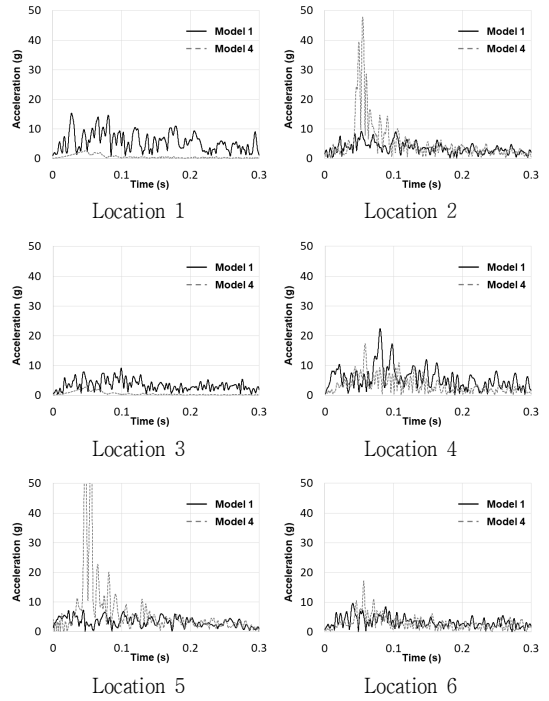


Fig. 8 Comparison of acceleration responses of Model 1 & 4

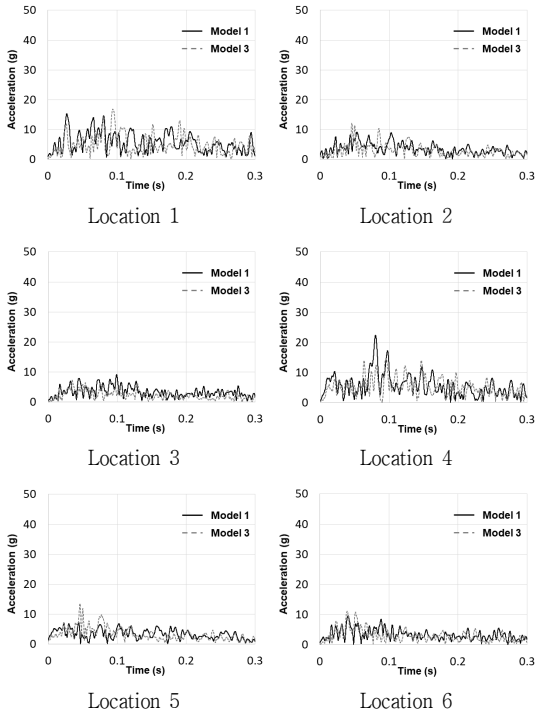


Fig. 7 Comparison of acceleration responses of Model 1 & 3

Table 2 Ratios of max. acceleration on measured points in each model to Model 1

Acc. location	Max. acceleration ratio		
	Model 2 (%)	Model 3 (%)	Model 4 (%)
1	162	109	18
2	133	132	522
3	89	79	30
4	114	65	77
5	174	188	919
6	124	116	178

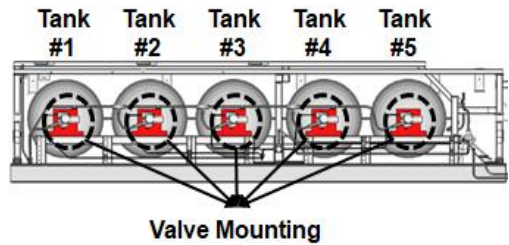


Fig. 9 Valve mounting locations of compressed hydrogen storage system

Table 3 Ratios of max. force on valve mounting in each model to Model 1

Tank No.	Max. force ratio on valve mounting					
	Model 2 (%)		Model 3 (%)		Model 4 (%)	
	LH	RH	LH	RH	LH	RH
#1	112	151	87	128	190	265
#2	163	168	120	185	215	291
#3	157	132	127	105	100	149
#4	125	139	197	159	143	336
#5	106	126	121	152	148	241

소탱크의 밸브가 연결되는 마운트에 가해지는 하중을 각 모델에서 비교하였다.

Table 3은 Model 2-4에서 측면충돌 시 각 수소탱크의 밸브 마운팅에 가해지는 최대 하중을 Model 1의 최대하중과 비교한 결과이다. LH는 Fig. 5에서 표시한 측면충돌이 발생하는 수소버스의 좌측면, RH는 수소버스의 우측면을 나타낸다. 수소탱크의 밸브 체결부에 가해지는 최대 하중은 Model 1의 최대하중에 비해 Model 2는 112-168%, Model 3은 87-197%, Model 4는 100-336%의 범위에 해당된다. Model 2가 Model 1과 가장 유사한 결과를 나타내고 있으며, Model 4의 경우에는 가속도 측정결과와 마찬가지로 Model 1에서 계산된 하중과의 차이가 큰 것으로 관찰된다.

5. 수소버스 모의측면충돌 시험방법 제안

측면충돌 시 수소버스에 장착된 수소저장시스템의 안정성 평가를 위해 실차 시험을 대체할 수 있는 방법을 제안하는 연구를 진행하기 위해 수소저장시스템이 버스 하부에 장착된 수소버스의 전체 모델과 이를 간략화한 세 가지 유형의 측면충돌 단순모델을 구성하여 충돌해석을 수행하였다. 측면충돌 시 수소저장시스템에 발생하는 가속도와 밸브의 마운팅에 가해지는 하중을 해석 모델별로 비교 분석하여 수소버스 전체 모델의 측면충돌해석 결과와의 유사성을 분석하였다. 수소저장시스템 단위로서 수소버스의 실차 측면충돌을 모사하기 위해서는 수소버스에 장착된 수소저장시스템 주변의 구조물을 반드시 같이 고려해야 하며, 측면충돌이 발생하는 면의 반대면을 고정시키는 조건으로 인해 실차 모델에 비해 가속도와 하중 등이 더 크게 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 비충돌면

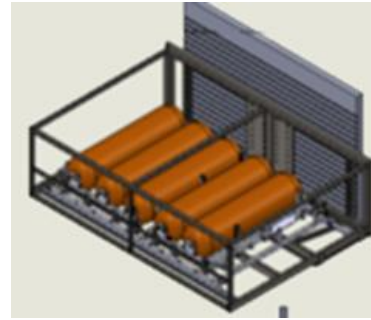


Fig. 10 Schematic description of side impact test for compressed hydrogen storage system

에 충격을 어느 정도는 흡수할 수 있는 방안이 마련되어야 할 것으로 생각된다. 또한 수소저장시스템과 주변 구조물만을 고려하는 모의 측면충돌 모델은 실제 버스에 비해 무게가 작기 때문에 이동대차의 충돌 속도도 현재의 50 km/h 보다는 작은 속도로 시험하는 것이 적절하다. 이러한 사항을 고려하여 Fig. 10과 같이 수소버스의 수소저장시스템의 안전성을 평가할 수 있는 모의 측면충돌 시험방법을 개략적으로 제안하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 활용하여 수소버스의 측면충돌 시험방법을 수소저장시스템 단위의 시험으로 대체할 수 있는 모의 측면충돌 시험방법을 개발하기 위해 수소버스 전체 모델과 세 종류의 수소저장시스템 단위의 측면충돌 모델을 구성하여 이동대차를 적용한 측면충돌 해석을 수행하였다. 각 모델에서 수소저장시스템의 주요 위치에서의 가속도 변화, 수소탱크의 밸브 마운팅에 가해지는 하중을 비교하였고, 이를 바탕으로 하여 수소저장시스템 단위의 측면충돌 시험의 개략적인 방법을 제안하였다. 모의 측면충돌 시험을 위한 이동대차의 속도, 비충돌면의 경계조건 등의 추가 연구를 진행하여 제안한 측면충돌 시험방법을 구체화할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 22HBST-C158067-03).

참고문헌

- (1) 한국교통안전공단, 2019, “수소버스 안전성 평가기술 및 장비개발 기획 최종보고서”, 국토교통연구기획사업 최종보고서, 국토교통부/국토교통과학기술진흥원.
- (2) 산업통상자원부, 2019, “세계 최고수준의 수소경제 선도국가로 도약, 정부, 「수소경제 활성화 로드맵」 발표”, 산업통상자원부 보도자료.
- (3) 김명환, 2021, “수소전기차 기술 개발 및 보급 정책 동향”, 공업화학 전망, 제24권, 제4호, pp. 22~35.
- (4) 교통사고종합분석센터, 2021, “2021년관(2020년 통계) 교통사고 통계분석”, 도로교통공단.
- (5) 박원일, 2019, “버스 차내 안전사고 감소방안 연구”, 한국운수산업연구원 기본연구 19-1.
- (6) 신재호, 용기중, 2014, “자동차 측면 충돌 안전도 평가 분석”, 자동차안전학회지, 제6권, 제2호, pp. 12~17.
- (7) Kahane, Charles Jesse, 1982, “An Evaluation of Side Structure Improvements in Response to Federal Motor Vehicle Safety Standard 214”, National Highway Traffic Safety Administration.
- (8) 윤영환, 1992, “측면 충돌시 승객보호와 차체해석용 모델”, 한국자동차공학회 학술강연초록집, pp. 15~22.
- (9) 김경진, 신재호, 한경희, 이정민, 심소정, 김시우, 2021, “수소버스 측면충돌 시험방법 연구”, 자동차안전학회지, 제13권, 제4호, pp. 92~98.
- (10) 하영호, 2000, “측면충돌모의시험 방법 개발과 응용”, 한국자동차공학회논문집, 제8권, 제1호, pp. 101~109.
- (11) 최현진, 2004, “모의 측면 충돌 시험 기법 개발 및 응용”, 한국자동차공학회논문집, 제12권, 제1호, pp. 138~144.
- (12) 장규진, 최영민, 안병기, 임태원, 2008, “연료전지자동차의 고압수소저장시스템 신뢰성 평가”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제19권 제4호, pp. 266~275.
- (13) 신재호, 강병도, 2019, “휠체어 탑승 개조버스의 안전도 연구”, 자동차안전학회지, 제11권, 제4호, pp. 63~68.
- (14) 신재호, 한경희, 김경진, 용기중, 강병도, 2018, “휠체어 탑승 개조버스의 구조안전성능 연구”, 자동차안전학회지, 제10권 제4호, pp. 54~59.
- (15) Jaeho Shin, Kyungiin Kim, Kyeonghee Han, Jeong Min In, Hyung-Jin Chang, Sojung Shim, Siwoo Kim, 2022, “Crashworthiness Evaluation of a Hydrogen Bus Fuel System”, International Journal of Automotive Technology, Vol. 23, No. 5, pp. 1483~1490.
- (16) 이인식, 이현미, 장정아, 이용주, 2021, “K-평균 군집모형 및 순서형 로짓모형을 이용한 버스 사고 심각도 유형 분석 측면부 사고를 중심으로”, 자동차안전학회지, 제13권, 제3호, pp. 69~77.
- (17) 용기중, 이광범, 권해봉, 2014, “수소연료전지자동차에 대한 안전기준 고찰”, 자동차안전학회지, 제6권 제2호, pp. 72~77.
- (18) 김영기, 허용정, 2004, “측면 충돌 시험 평가 법규 및 평가결과에 대한 지원 시스템 연구”, 한국산학기술학회 춘계 학술발표논문집, pp. 47~49.
- (19) Carhs, 2018, “Safety companion 2018”, Carhs GmbH, <http://www.carhs.de/en/>
- (20) 이동준, 최영태, 이광원, 임재문, 2012, “2011 KNCAP 측면충돌 및 기동측면충돌 시험결과 고찰”, 자동차안전학회지, 제3권, 제2호, pp. 22~27.
- (21) 국토교통부, 2021, “측면충돌 시 승객보호 기준(제102조제1항 관련)”, 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 [별표 14의2].