

수소버스 측면충돌 시험방법 연구

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

Study on Side Impact Test Procedure of Hydrogen Bus

Kyungjin Kim*, Jaeho Shin*[†], Kyeonghee Han*, Jeong Min In**,
Sojung Shim***, 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

Recently hydrogen fuel cell buses have been deployed for the public transportations. In order to introduce buses fueled by hydrogen successfully, the research results of hydrogen bus safety should be discussed and investigated significantly. Especially, Korean government drives research in terms of various applications of hydrogen energy to replace the conventional fuel energy resources and to improve the safety evaluation. Thus it is necessary to examine vehicle crashworthiness under side impact loadings. This study was focused on the simulation result evaluation of full bus model and simplified bus model with hydrogen fuel tank module and mounting system located below floor structure due to the significance of bus side impact accidents. The finite element models of hydrogen bus, fuel tank system and side impact moving barrier were set up and simulation results reported model performance and result comparison of two side impact models. Computational results and research discussion showed the conceptual side impact framework to evaluate hydrogen bus crashworthiness.

1. 서론

2차 산업혁명 이후 대기 중에 급격히 축적된 온실 가스는 지구 기후시스템에 심각한 영향을 미쳐 지구 평균온도를 상승시켰으며 지구 환경에 각종 피해를 초래하고 있어, 국제사회는 1992년 ‘UN기후변화협약’, 1997년 ‘교토의정서’, 2015년 ‘파리기후협약’ 등을 통한 온실가스 감소 대책을 추진하고 있다.⁽¹⁾

대한민국 정부도 자발적 기여방안 대비 37% 이상의 온실가스 감축을 목표로 설정하였으며 온실가스 감축을

위한 제도적인 방안으로 교통 분야에서 수소버스를 포함한 수소자동차 보급과 운행 활성화 등을 추진하고 있다. 전 세계적으로 버스 및 화물차 등 대형 상용차가 전체 차량에서 차지하는 비율은 약 10% 이나, CO₂ 등 배출가스 발생 기여도는 약 46%에 이를 정도로 높아 환경오염 감소를 위해서 대형 상용차의 수소 전기자동차 전환이 적절한 방법으로 알려져 있다.⁽²⁾ 대한민국 정부의 수소버스를 비롯한 수소자동차의 보급 활성화 계획과는 달리 수소버스 및 수소연료장치 부품의 안전성을 평가하고 검증하는 기준 및 평가 장비 관련 연구는 미흡한 수준으로 정부의 수소버스 보급 확대 정책을 뒷받침하는 제도적 인프라(충돌 안전도 평가, 검사기준 구축, 인증장비 개발 등) 구축이 필요한 실정이다. 충돌사고 시 다른 차종에 비해 큰 인명피해를 일으킬 수 있는 버스의 특성과 친환경 연료지만 누출 시 화재 및 폭발 등의 위험성이 큰 수소의 특성을

* 경일대학교 기계자동차학부, 교수

** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 책임연구원

*** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 수석연구원

**** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 안전연구처장

[†]교신저자, E-mail: jhshin@kiu.kr

고려한 안전도 평가기술의 중요성이 대두되고 있다.⁽¹⁾

사망 3명 이상 또는 사상자 20명 이상의 대형교통사고는 감소하고 있으나 2020년 대형교통사고의 대형 상용차(승합차와 화물차 등) 사고 비율은 약 43% 이고 그 중 버스 사고 비율이 30% 이상을 차지하고 있어⁽³⁾ 정면, 측면, 추돌 및 전복 등 다양한 충돌사고 양상을 반영하고 수소 연료의 특성을 고려한 연료장치 안전성 평가기술 개발이 필요하다. 또한 2019년 1월 대한민국 정부는 수소 경제 활성화 로드맵을 발표하고 2040년 수소택시 8만대, 수소버스 4만대, 수소트럭 3만대를 보급 목표로 제시하였다.⁽⁴⁾ 일반적으로 시내버스로 운행 중인 CNG 버스가 전기 및 수소버스로 교체될 것으로 예상되어 2020년 5월부터 수소버스 운행 시 버스 안전사고와 관련한 2차사고(화재 및 폭발 등)의 예방 등을 위한 수소버스의 차량 및 부품 단위 안전성 평가기술 및 장비개발과 안전기준 제·개정을 위한 연구가 수행되고 있다.⁽⁵⁾ 이에 따라 수소버스의 차량 및 부품 단위 안전성 평가기술 및 안전기준에 관한 연구가 진행되고 있어, 임서현 등은 수소버스 제작 단계에서 충돌안전성 관련 안전기준의 도입이 통계적 인명가치와 비용편익분석에 미치는 영향을 검토하고 정량적 결과를 도출하였고 안전기준 도입과 교통사고 감소에 따른 사회적 비용에 대하여 수소버스의 시장규모와 안전기준 도입에 따른 다양한 시나리오의 통계적 인명가치와 비용편익분석 측면의 정량화된 수치를 제시하였다.⁽⁶⁾ 김현준 등은 수소버스에 사용되는 수소저장 내압용기의 수소 검출량 검사방법 개선을 위한 연구를 수행하였고⁽⁷⁾ 이인식 등은 버스정비회사가 보유 및 관리하고 있는 버스 파손수리 자료를 분석하여 버스 안전성 측면에서 활용하기 위한 기초연구를 수행하였다.⁽⁸⁾ 2018년부터 2019년까지 경찰청 교통사고 분석시스템의 사고데이터를 분석하여 전면, 측면, 후면 등 버스 차대차 사고 유형 중 측면부 충돌사고는 가장 많은 사망자 수 및 부상자 수를 발생시킨 것으로 분석하였고 측면부 충돌사고를 중심으로 버스 사고 심각도 유형 분석을 수행하였다.⁽⁸⁾

박원일은 버스공제조합에 가입된 버스의 사고종류별 차대차 사고유형과 사고비중을 조사하고 버스의 측면충돌의 빈도가 추돌사고에 이어 두 번째로 높은 것으로 분석하였다.⁽⁹⁾ 한편 신재호 등은 휠체어 탑승을 위한 승강장치가 버스 하부에 위치하고 휠체어 탑승을 위해 버스 측면부가 개조된 휠체어 탑승 개조버스의 측면충돌 시 버스의 구조 안전성을 계산하기 위해 FMVSS 214 이동대차를 적용한 측면충돌해석을 수행하고, 버스 구조물의 변형과 충돌 후 버스의 움직임은 미비함을 보고하였다.⁽¹⁰⁾

선행 연구를 바탕으로 버스의 측면부 충돌사고의 사고 심각도가 파악되었고 본 연구에서는 버스 충돌해석 결과를 분석하여 수소버스의 측면충돌 시험방법 연구를 수행하였다.

2. 자동차 측면충돌 시험법

버스의 충돌사고 유형 중에서 탑승객 상해에 큰 영향을 미칠 수 있는 사고 유형은 전복사고이며 전복사고 시 탑승객은 버스 내부와 접촉 또는 버스 외부로 이탈되어 치명적인 상해가 발생할 수 있고^(9~11) 버스 전복 사고 시의 차체 구조 및 승객의 안전도를 파악하기 위해 전복시험의 안전기준이 적용되고 있다. 전복시험 후 버스 구조 변형에 따른 승객생존공간의 침범 여부로 안전기준의 만족 여부를 판단한다. 수소버스의 경우 충돌 시 승객 안전도뿐만 아니라 수소저장시스템의 안전성을 고려해야 하고 수소저장시스템의 차량 내 위치에 따라 다양한 충돌조건을 고려해야 한다. 선행연구에서 버스의 대표적 사고유형으로 측면부 충돌사고와 측면충돌의 사고 심각도가 연구되었고, 버스 하부에 수소저장시스템이 장착되는 설계사양일 경우 충돌 시 직접적인 접촉 또는 구조변형에 따른 수소저장시스템 및 체결구조의 파손 등이 예상되어 측면충돌에 따른 수소버스의 안전도 평가는 매우 중요하다.

본 연구에서는 수소저장시스템이 버스 하부에 장착된 수소버스에 일반적인 측면충돌 시험방법을 적용하여 버스의 구조적 안전성을 분석하였다. 승용차의 측면충돌시험은 Fig. 1과 같이 시험대상 자동차에 측면충돌용 인체모형을 탑재한 후 50km/h 속도의 측면충돌용 이동대차를 그 진행방향과 자동차의 길이방향 중심선이 직각이 되도록 자동차의 옆면에 충돌시킨다.^(12~14) 승용차의 측면충돌시험은 일반적인 승용자동차 전면부 특성을 갖춘 이동대차가 정지해 있는 시험차의 측면에 수직으로 충돌하

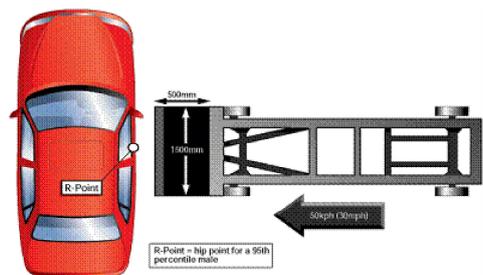


Fig. 1 Schematic drawing of side impact test⁽¹⁴⁾

는 조건으로 본 연구에서 설정한 수소버스의 측면충돌 시험조건은 버스 하부에 장착된 수소저장시스템의 중심부를 기준으로 측면충돌용 이동대차를 위치시킨 것으로 Fig. 2와 같다.

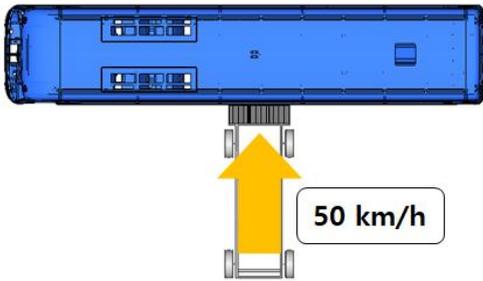


Fig. 2 Schematic drawing of bus side impact test

3. 수소버스 측면충돌 해석모델

본 연구에서는 측면충돌 시 수소버스의 충돌 안전도를 분석하기 위해서 수소저장시스템이 버스 하부에 장착된 수소버스 유한요소모델을 구성하고 측면충돌 시험조건을 적용하여 측면충돌해석을 위한 유한요소모델링을 수행하였다. 신재호 등⁽¹¹⁾이 수행한 선행연구를 기반으로 전체 차량 구조의 단면이 일반 승용차에 비해 상대적으로 일정한 버스 중앙의 수소저장시스템 장착부위만을 고려한 단순 수소버스 구조모델과 전체 수소버스 모델을 각각 구성하였다. 5개의 수소저장 탱크로 구성된 수소저장시스템 모듈의 유한요소모델링을 수행하고 선행연구⁽¹⁰⁾의 기본 버스 모델로 사용된 고상버스모델의 하부 화물적재공간에 수소저장시스템을 위치시켜 측면충돌해석을 위한 수소버스 유한요소모델을 구성하였다. UN Regulation No. 95⁽¹⁵⁾에 적용되는 측면충돌용 대차모델(무게: 950kg)을 수소저장시스템의 중앙부위에 위치시키고 기준 시험 속도, 50km/h를 적용하였다. 전체 수소버스 모델과 단순 버스구조 모델의 정보는 Table 1과 같으며 전체 수소버스 모델의 요소 수 대비 단순 버스구조 모델의 요소 수 비율은 약 17% 이다. 전체 수소버스 모델과 측면충돌용 대차 모델은 Fig. 3과 같고 경계조건으로 타이어 모델과 지면의 접촉을 정의하였다. 반면에 단순 버스구조 모델의 비충돌면은 충돌방향으로 구속하였고 단순 버스구조 모델과 측면충돌용 대차 모델은 Fig. 4와 같다. 측면충돌 시 수소저장탱크와 타 구조물의 접촉여부를 확인하기 위해 탱크와 주변 구조물의 접촉을 독립적으로 정의하였다. 또

한 모델 주요 부위의 가속도 값을 계산하기 위해서 수소 버스 모델과 측면충돌용 대차 모델의 무게중심 및 수소저장시스템 구조물 등에 가속도계를 설정하였다(Fig. 5).

Table 1 Information of full and simple bus FE models for side impact simulations

	Full model	Simple model
No. of nodes	2,746,773	485,046
No. of elements	2,734,815	471,464
Total weight (kg)	13,856	1,882
Termination time (msec)	150	150

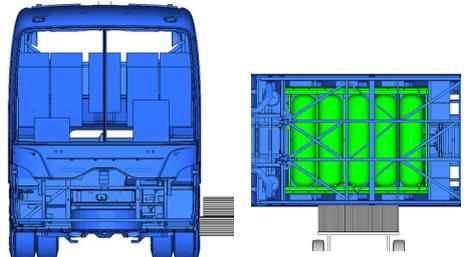


Fig. 3 Hydrogen bus and moving barrier FE models for side impact simulation

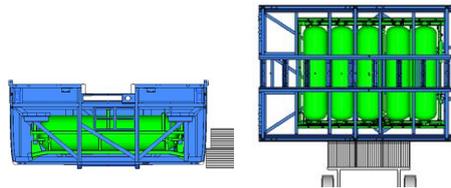


Fig. 4 Simplified bus FE model and moving barrier FE models for side impact simulation

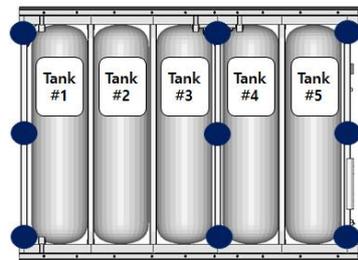


Fig. 5 Hydrogen tanks and nine accelerometer locations for acceleration calculations

4. 수소버스 측면충돌 해석결과

버스 하부에 수소저장시스템이 장착된 수소버스 모델의 측면충돌 시 충돌 안전도를 분석하기 위해 수소버스 모델과 수소저장시스템의 장착부위만을 고려한 단순 버스구조 모델의 측면충돌해석을 수행하였다. 본 연구의 충돌 시뮬레이션은 LS-DYNA 충돌해석 전용프로그램이 사용되었다.

전체 수소버스 모델과 수소저장시스템의 장착부위만을 고려한 단순 버스구조 모델에 50km/h의 초기 속도가

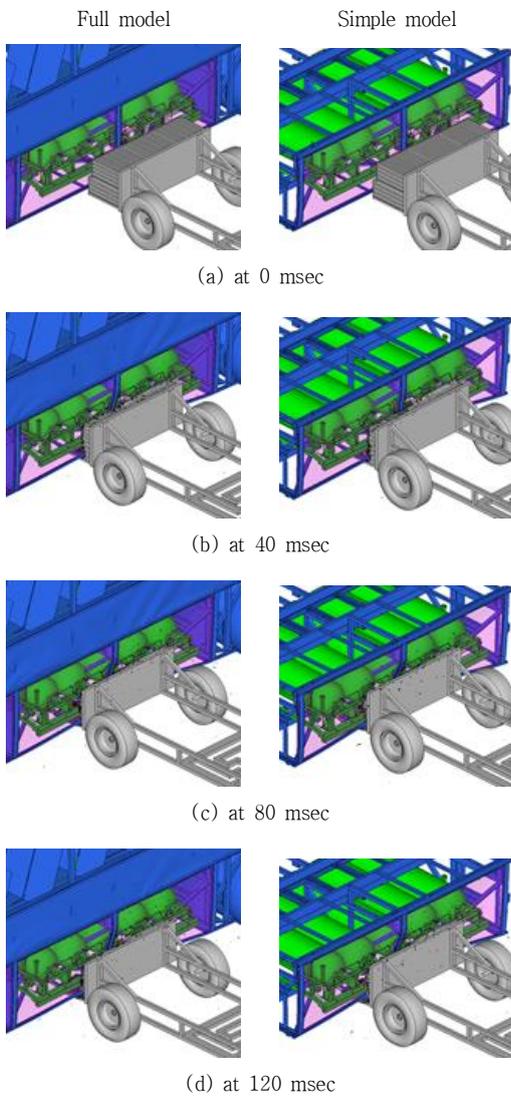


Fig. 6 Deformed shapes of two bus side impact models

적용된 측면충돌용 대차모델이 충돌 시 각각의 시간에 따른 변형모습은 Fig. 6과 같다. 버스모델과 대차의 차량 무게와 구조 강성도의 차이로 측면충돌용 대차의 전면부 구조의 대변형이 계산되었고 대부분의 운동에너지가 변형 에너지로 전환된 것으로 파악된다. 대차 충돌에 의한 전체 수소버스 모델과 단순 버스구조 모델의 변형 모습은 유사하고 각각의 모델에서 수소저장탱크 주변의 접촉하중은 계산되지 않아 대차의 접촉에 의한 탱크와 타 구조물 간의 접촉은 발생하지 않은 것으로 계산되었다.

전체 수소버스 모델과 단순 버스구조 모델의 무게중심점에서의 시간에 따른 가속도 값의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 두 모델에서 대차의 가속도 값 대비 상대적으로 작은 가속도 값이 계산되었고 단순 버스구조 모델의 가속도 값이 다소 큰 것으로 계산되었다. 또한 측면충돌용 대차의 무게중심점에서의 시간에 따른 가속도 값의 변화결과는 Fig. 8과 같으며 두 모델의 계산결과에서 전체적으로 유사한 시간에 따른 가속도 값의 변화가 계산되었으며 단순 버스구조 모델의 해석결과에서 상대적으로 큰 가속도 값이 계산되었다. 유사한 계산결과로 수소저장시스템의 구조물 중앙부위에서의 두 모델의 시간에 따른 가속도 값의 변화는 Fig. 9와 같다. 전체 수소버스 모델의 해석결과에서는 최대 $\pm 5G$ 의 가속도 값이 계산되었으나 단순

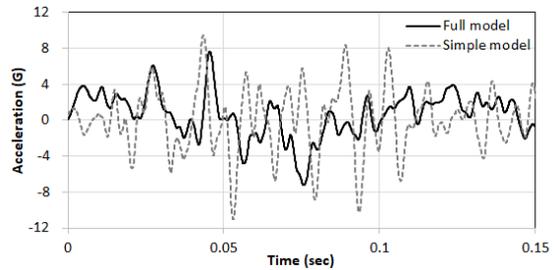


Fig. 7 Y-acceleration vs. time histories of bus CG locations

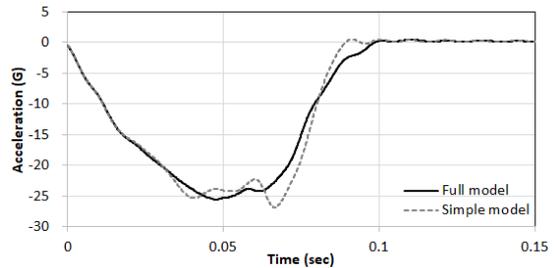


Fig. 8 Y-acceleration vs. time histories of moving deformable barrier CG locations

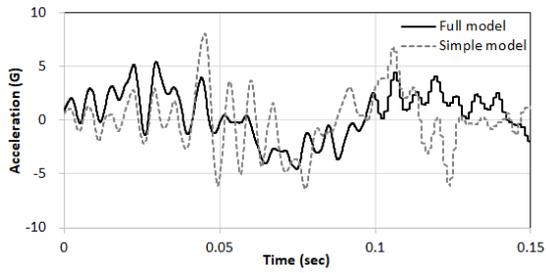


Fig. 9 Y-acceleration vs. time histories at center locations of hydrogen tank mounting frames

버스구조 모델의 해석결과에서는 ±5G 이상의 가속도 값이 계산되었다.

전체 수소버스 모델과 단순 버스구조 모델의 수소저장시스템의 장착부위 단면의 국부적인 변형모습은 Fig. 10

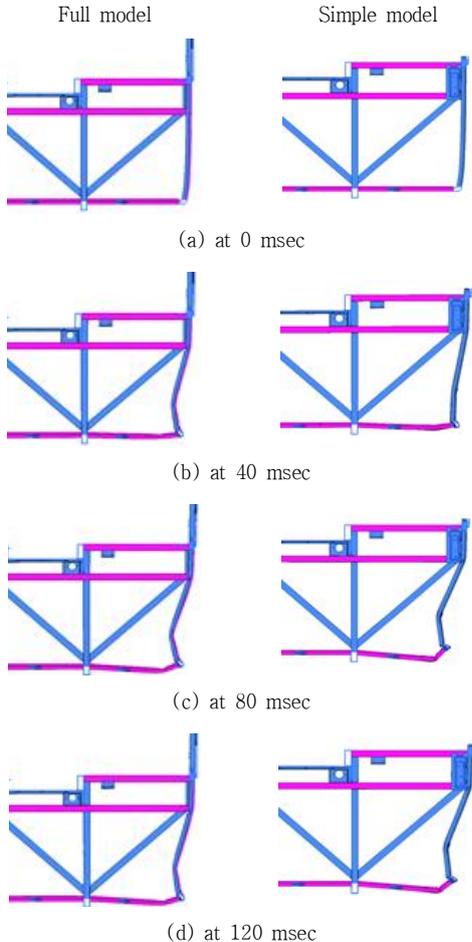


Fig. 10 Deformed shapes at hydrogen tank structures

과 같다. 수소저장시스템 주변의 주요 부재에서 국부적인 굽힘과 좌굴 형태의 변형모드가 계산되었고 두 해석모델 경계조건의 차이로 변형 초기부터(약 50msec 이후) 더 큰 국부적인 변형이 단순 버스구조 모델에서 계산되었다. 측면충돌용 대차와 직접적인 접촉이 발생하는 버스 하부의 횡방향 부재 단면에서의 시간에 따른 전달하중 변화결과는 Fig. 11에 나타내었고 단순 버스구조 모델의 부재 단면에서 상대적으로 큰 최대 하중값(약 75kN)이 계산된 반면에 전체 수소버스 모델의 부재 단면에서는 약 67kN의 최대 하중값이 계산되었다. 한편 버스 하부의 최대 변형량은 두 모델에서 각각 60mm(전체 수소버스 모델)와 107mm(단순 버스구조 모델)로 계산되었다(Table 2).

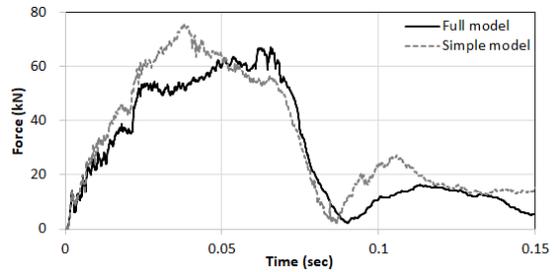
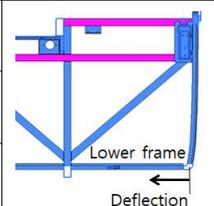


Fig. 11 Force-time histories at hydrogen tank structures

Table 2 Maximum deflections of lower frames in the hydrogen tank structures

Models	Deflection (mm)	
Full model	60	
Simple model	107	

5. 수소버스 측면충돌 시험방법 연구

버스의 유한요소모델을 구성하고 버스의 전복해석을 수행하여 버스의 전복충돌 저항성능을 고려한 설계 및 개발 프로세스 구축에 관한 연구는 정태은 등⁽¹⁶⁾과 박재우 등⁽¹⁷⁾에 의해 발표되었다. 또한 신재호 등⁽¹¹⁾은 전체 버스 모델(Full bus model)과 부분 버스 모델(Partial bus model)의 전복해석을 수행하고 유한요소해석 결과를 비교하여 버스의 중앙부위 구조만을 고려한 효율적인 모델링 방안을 제시하였다. 대부분의 버스 유한요소해석은 전복시험 조건의 구조적 안전성 연구를 위해 수행되었으나

김경진 등⁽¹⁸⁾은 휠체어-승객-버스 유한요소모델을 구성하고 측면충돌해석을 수행하여 측면충돌 시 휠체어 승객의 안전도를 평가하였다.

본 연구에서는 측면충돌 시 수소버스의 충돌 안전도를 분석하기 위해서 수소저장시스템이 버스 하부에 장착된 수소버스의 전체 모델과 단순 모델의 측면충돌해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 단순 모델의 비충돌면을 고정하는 경계조건의 적용으로 전체 수소버스 모델에서 계산된 감가속도와 하중, 변형량 보다 단순 버스구조 모델의 해석 결과가 대체적으로 더 큰 값으로 계산되었고, 전체 수소버스 모델의 해석결과 대비 단순 버스구조 모델의 결과는 가속도의 경우 약 120%, 반력은 약 112%, 국부적 변형량은 약 180% 수준인 것으로 파악되었다. 국부적 변형량의 차이가 다른 물리량의 결과 비교보다 크게 나타나 수소저장시스템의 주변 구조물의 설계 사양(형상, 두께 등)이 측면충돌 안전도에 미치는 영향이 클 것으로 분석된다.

버스 모델의 다양성 및 시험 비용을 고려하여 다양한 방법의 수소버스 측면충돌 시험방법이 연구되고 있고 본 연구의 내용을 바탕으로 단순 버스구조 모델의 적용을 검토할 수 있으나 경계조건 또는 차량의 단순화 정도 등의 추가연구가 필요한 것으로 사료된다. 또한 승용차 형상의 측면충돌용 대차의 고려뿐만 아니라 타 차종 조건의 대차 또는 버스-버스 조건의 측면충돌 방안도 추가연구의 고려대상이다(Fig. 12). 아울러 수소저장시스템 구조만을 시험대상으로 고려하는 Sled 시험도 고려할 필요가 있으며 Sled 시험에 적용될 적절한 가속도 및 상세 시험조건에 관한 추가연구도 본 연구에서 계산된 가속도 결과를 바탕으로 진행될 수 있다.

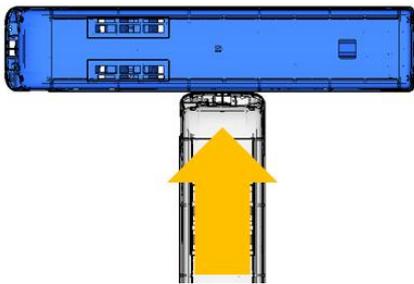


Fig. 12 Schematic drawing of bus to bus side impact test

6. 결 론

기후변화에 대응하기 위한 제도적인 방안으로 교통 분야에서 수소버스를 포함한 수소자동차 보급과 운행 활성

화 등이 추진되고 있으나 수소버스 및 수소연료장치 부품의 안전성을 평가하고 검증하는 기준 및 평가장비 관련 연구는 미흡한 수준으로 충돌사고 시 다른 차종에 비해 큰 인명피해를 일으킬 수 있는 버스의 특성과 사고로 인한 연료누출 시 화재 및 폭발 등의 위험성이 큰 수소의 특성을 고려한 안전도 평가 기술의 중요성이 대두되고 있어 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 수소버스의 측면충돌 시험방법 연구를 수행하였다.

수소저장시스템이 하부구조에 장착되는 수소버스 모델과 수소저장시스템 주변 구조만을 고려한 단순 버스구조 모델을 각각 구성하고 측면충돌용 대차를 적용한 측면충돌해석을 수행하여 두 모델 주요부위의 가속도, 하부구조 부재의 전달하중과 변형량을 비교하여 단순 버스구조 모델의 측면충돌시험 적용성을 검토하였다.

본 연구결과는 수소버스 측면충돌 시험방법 개발을 위한 가이드라인을 제시하며 단순 버스구조 모델의 적용성 검토를 위한 시험조건 연구와 측면충돌용 대차조건, Sled 측면시험법 등의 기초 연구에 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21HBST-B158067-02).

참고문헌

- (1) 한국교통안전공단, 2019, “수소버스 안전성 평가 기술 및 장비개발 기획 최종보고서”, 국토교통연구 기획사업 최종보고서, 국토교통부/국토교통과학기술진흥원.
- (2) 김명환, 2021, “수소전기차 기술 개발 및 보급 정책 동향”, 공업화학 전망, 제24권, 제4호, pp. 22~35.
- (3) 교통사고종합분석센터, 2021, “2021년판(2020년 통계) 교통사고 통계분석”, 도로교통공단.
- (4) 산업통상자원부, 2019, “세계 최고수준의 수소경제 선도국가로 도약, 정부, 「수소경제 활성화 로드맵」 발표”, 산업통상자원부 보도자료.
- (5) 김시우, 2020, “수소차 보급과 안전기준 현황”, 월간교통, Vol. 270, pp. 13~15.
- (6) 임서현, 장정아, 홍성진, 2021, “수소버스 전복 안전기준 도입에 따른 통계적 인명가치 및 비용편익 효과 연구”, 자동차안전학회지, 제13권, 제3호, pp. 47~53.

- (7) 김현준, 여운석, 조현우, 이현철, 황태준, 이호상, 류익희, 최수광, 오영규, 박성욱, 2021, “수소버스 사용 내압용기 수소검출량 검사방법 개선을 위한 연구”, 자동차안전학회지, 제13권, 제1호, pp. 51~56.
- (8) 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.
- (9) 박원일, 2019, “버스 차내 안전사고 감소방안 연구”, 한국운수산업연구원 기본연구 19-1.
- (10) 신재호, 강병도, 2019, “휠체어 탑승 개조버스의 안전도 연구”, 자동차안전학회지, 제11권, 제4호, pp. 63~68.
- (11) 신재호, 한경희, 김경진, 용기중, 강병도, 2018, “휠체어 탑승 개조버스의 구조안전성능 연구”, 자동차안전학회지, 제10권 제4호, pp. 54~59.
- (12) 이동준, 최영태, 이광원, 임재문, 2012, “2011 KNCAP 측면충돌 및 기둥측면충돌 시험결과 고찰”, 자동차안전학회지, 제3권, 제2호, pp. 22~27.
- (13) 국토교통부, 2021, “측면충돌 시 승객보호 기준(제102조제1항 관련)”, 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 [별표 14의2].
- (14) European Commission, 2021, “MOBILITY AND TRANSPORT, Road Safety, Cars, Structure”, https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/vehicle/safety_design_needs/cars_it.
- (15) UN/ECE, 2015, “Regulation No. 95 of the Economic Commission for Europe of the United Nations”, <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29fdocstts.html>.
- (16) 정태은, 김기범, 홍승준, 이용래, 김창수, 조용욱, 1996, “버스 차체의 전복 시험에 관한 연구”, 한국자동차공학회 1996년도 춘계학술대회, 96380117.
- (17) 박재우, 박종찬, 유승원, 2010, “전복 안전성 향상을 위한 고속 버스 차체 개발 프로세스에 관한 연구”, Transaction of KSAE, Vol 18, No. 2, pp. 31~38.
- (18) 김경진, 신재호, 용부중, 강병도, 2020, “휠체어 탑승 버스의 승객안전도 분석”, 자동차안전학회지, 제12권, 제1호, pp. 39~45.