

휠체어 탑승 버스의 승객안전도 분석

김경진* · 신재호*[†] · 용부중* · 강병도**

Occupant Safety Analysis for Wheelchair Bus Development

Kyungjin Kim*, Jaeho Shin*[†], Boojoong Yong*, Byungdo Kang**

Key Words : Wheelchair bus(휠체어 탑승 버스), Occupant Behavior Analysis(승객거동해석), Rollover(전복사고), Restraint system(구속 장치), Occupant Residual Space(승객생존공간), Finite element analysis(유한요소해석)

ABSTRACT

The express/intercity bus models have been developing for wheelchair users to provide the preferable long-distance travels by the Korean government research. In the previous studies, evaluation method was set up for the wheelchair users' safety and the study for wheelchair occupants' safety was performed under various crash loadings mimic to real accidents, frontal crash, side impact and rollover, etc. This study was focused on the evaluation of occupant behaviors and injuries (head and chest) during vehicle impact loading cases in order to ensure the safety of wheelchair passengers in the bus. The occupant response and belt loading data during the sled FE simulation were compared with those of the sled test. The simulation results showed overall safety tolerances of wheelchair occupants under the severe frontal deceleration, side impact loading based on the FMVSS 214 configuration and bus rollover loading.

1. 서론

우리나라 장애인의 이동권 수요 증가와 인구의 고령화로 인해 휠체어 사용자는 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 장애인의 이동권은 접근권의 한 부분으로 이동할 수 있는 권리와 안전하게 교통시설을 이용하며 대중교통수단을 이용하여 원하는 목적지까지 갈 수 있는 권리를 의미한다.⁽¹⁾ 한편 통계청 분석에 의하면 고령인구(65세 이상)는 654만명(2015년), 1,000만명(2025년), 1,882만명(2049년)으로 증가하고 고령인구의 구성비도 2026년 20%, 2037년 30%, 2058년 40%로 증가할 것으로 전망하고 있다.⁽²⁾

제한적인 교통서비스의 제공으로 휠체어 사용자를 포함하는 교통약자의 충분한 이동권이 확보되지 않아 사회

활동의 만족도가 낮은 실정이고 교통약자에 대한 차별 없는 교통복지정책이 요구되고 있다. 교통과 이동의 중요성에도 불구하고 대부분의 교통약자는 적절한 이동수단을 찾지 못하고 있으며, 미국의 경우 교통약자의 약 40% 이상이 이동의 어려움이 있다고 한다.⁽³⁾

국민의 이동권은 '원하는 목적지까지 어떠한 외적사회적 장애요인 없이 안전하고, 편리하게 이동할 수 있는 권리'를 의미하여, 이러한 이동권은 인간다운 삶을 영위하는데 있어 반드시 보장되어야 하는 국민의 기본권으로 해석된다. 법률에 의해 교통약자는 모든 교통수단에 대하여 차별없이 안전하고 편리하게 이용할 수 있는 권리를 가지며 이동편의 시설 개선 및 확충 등에 관하여 정부는 이동편의 증진계획을 수립하고 시행토록 규정하고 있다.⁽⁴⁾ 또한 우리나라의 국가인권위원회는 "장애인차별금지 및 권리구제 등에 관한 법률", "교통약자의 이동편의 증진법", "장애인 복지법", "장애인의 권리에 관한 협약" 등의 규정을 근거로 휠체어 사용자 등이 장거리 이동을 위한 고속/

* 경일대학교 기계자동차학부, 교수

** 지능형자동차부품진흥원 정책기획단, 단장

[†]교신저자, E-mail : jhshin@kiu.kr

시외버스를 안전하고 편리하게 이용할 수 있도록 관계 기관에 정책을 권고하였다.⁽⁵⁾ 한편 교통약자의 이동편의 증진법(법률 제15400호)에서 교통약자의 사회 참여와 복지 증진에 이바지할 수 있도록 여객, 도시철도, 항공, 해운에 이르기까지 다양한 교통수단에 대해 교통약자의 이동권 확보를 법안으로 마련하고 있다.⁽⁶⁾

그러므로 2017년 5월부터 교통약자의 이동권 보장 관련 법령의 준수 및 장애인의 지역 간 이동 편의 증진을 위하여 휠체어 승강장치기술의 국산화와 기존의 운행되고 있는 고속/시외버스 차종별로 적합한 휠체어 승강장치의 개발 및 개조버스의 안전도 확보, 고속/시외 버스터미널 승강장 등의 구조 및 설비에 관한 표준 및 개발 기술의 보급 활성화를 위한 운영방안 등을 마련하고 있고, 휠체어 사용자가 탑승 가능한 고속/시외버스 개조차량의 안전도를 확보하고 표준개조기술의 개발, 보급 및 운영상의 효율화 방안에 관한 연구가 국토교통과학기술진흥원 교통물류연구사업으로 진행되고 있다.⁽⁵⁾

휠체어 승객의 안전에 관한 연구는 University of Michigan Transportation Research Institute(UMTRI)에 의해 주도적으로 수행되고 있다. 교통사고의 유형과 승객의 위치, 승객의 수에 따른 휠체어 승객의 상해를 분석하고 구속장치(lap/shoulder-belt restraints)의 적용으로 상해 감소방안에 대한 연구 결과를 보고하였다.⁽⁷⁾ Fig. 1과 같이 휠체어 승객의 상해 감소를 위한 구속 장치와 Hybrid-III (5th%tile female and 50th%tile male) 더미로 슬래드 실험을 수행하여 승객 상해치를 분석하였다. 또한 C. Wiacek 등은 자동차 구조와 휠체어의 기본적인 구속조건뿐만 아니라 승객 안전을 위한 다양한 구속조건에 관한 연구를 수행하고 구속 장치의 설계와 성능평가를 위한 요구조건 및 시험방법(충돌 및 급감속 조건) 등에 관해 보고하였다.⁽⁸⁾



Fig. 1 Sled test of wheelchair occupant⁽⁷⁾

한편 김태용 등은 휠체어 탑승자 보호를 위한 국내의 평가방법인 SAE J2249, WTORS 및 UN R107 등을 분석하고 휠체어 탑승자 보호장치의 상해저감 효과를 확인

하였다. 특히 현재 운용되고 있는 특별교통수단의 탑승자 보호장치 및 휠체어 고정장치의 평가기준 만족여부를 확인하였다.⁽⁹⁾ 그러나 휠체어의 구속과 탑승객 구속장치의 부적절한 위치로 적절한 인체 상해값을 도출하지 못하고 추가적인 동적시험 및 정적시험의 보완이 필요함을 보고하였다.⁽⁹⁾

특별교통수단의 휠체어 탑승자의 안전도를 제한적인 시험 방법으로 평가한 기존의 연구를 바탕으로 본 연구에서는 휠체어 사용자가 탑승 가능한 버스의 승객안전도를 전산해석의 방법으로 평가 및 분석하였다. 기존의 고속/시외 버스를 개조한 휠체어 탑승 가능 버스는 제작 비용과 대수의 제한으로 다양한 승객거동시험을 수행하기가 어렵기 때문에 버스 탑승 휠체어 승객의 안전도를 효율적으로 평가하고자 휠체어와 승객의 유한요소모델링을 수행하고 전산해석기법을 적용하였다. 슬래드 시험결과와 비교를 통해 휠체어-승객 유한요소모델을 검증하였고, 휠체어-승객 모델을 신재호 등⁽⁵⁾이 모델을 구성하고 구조 및 충돌 해석을 수행한 버스모델에 적용하여 버스 정면 및 측면 충돌과 전복 사고조건에서의 승객 거동과 안전도 평가를 수행하였다.

2. 휠체어-승객 유한요소모델의 구성

휠체어 승객의 거동해석을 위해 휠체어 유한요소모델링을 수행하고 50th%tile Hybrid-III 유한요소모델을 이용

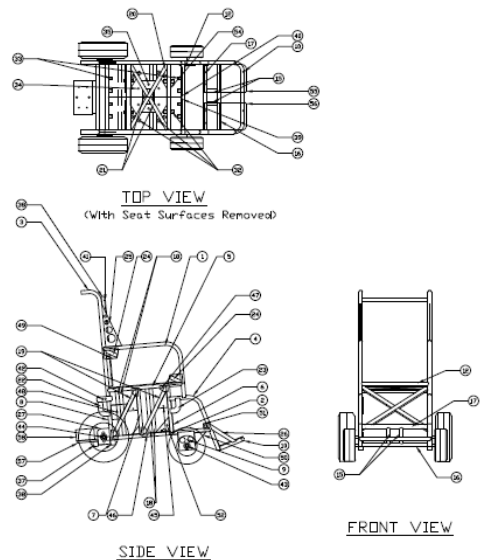


Fig. 2 Drawing of wheelchair model⁽¹⁰⁾

하여 휠체어-승객 유한요소모델을 구성하였다. Fig. 2와 같이 UMTRI의 휠체어 교통안전기준 연구그룹에서 제공하는 기준 휠체어의 2차원 도면⁽¹⁰⁾을 활용하여 휠체어의 3차원 형상을 구성하고 휠체어 유한요소모델링을 수행하였다. UMTRI의 휠체어 교통안전기준 연구그룹은 ISO 규정을 기초로 휠체어 안전성 확보를 위한 연구를 지속적으로 수행하고, RESNA(Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America) 기준을 제시하고 보완하고 있다.⁽¹¹⁾

휠체어 유한요소모델은 10mm의 평균 요소 크기로 약 2만 개의 요소로 구성되었으며, 휠체어 유한요소모델의 무게는 약 85kg으로 모델링되었다. Fig. 3과 같이 50th%tile Hybrid-III 유한요소모델을 추가하여 휠체어-승객 유한요소모델을 구성하였다.

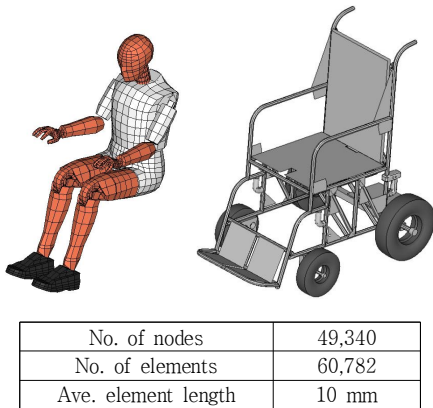


Fig. 3 FE models of dummy and wheelchair

3. 휠체어 승객의 슬래드 시험과 해석

휠체어 승객의 안전도 및 휠체어 및 승객 구속 장치의 성능 평가를 위해 Fig. 4와 같이 슬래드 시험을 수행하여 구속장치의 기본적인 성능평가를 수행하였고 동일한 조건의 유한요소모델을 구성하여 휠체어-승객(더미) 모델을 검증하였다. 최대 25g의 감가속도가 약 100 msec 동안 작용하는 시험조건이 적용되었으며 시험조건과 동일하게 휠체어와 더미의 구속을 위한 벨트 유한요소모델을 구성하고 벨트모델에 인장방향의 재료 물성치와 휠체어-승객 모델에 감가속도를 적용하여 슬래드 시뮬레이션을 수행하였다.

계산된 휠체어-더미 유한요소모델의 시간대별 변형 형상은 Fig. 5에서 보여주고 있으며, 80 msec~120 msec

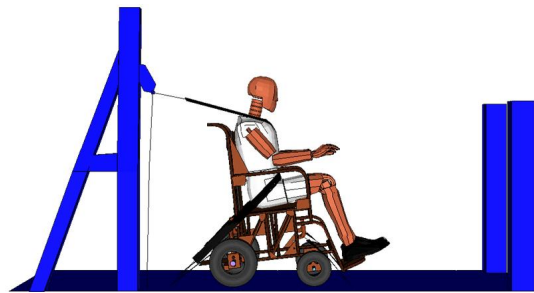


Fig. 4 Sled test and simulation for the wheelchair occupant

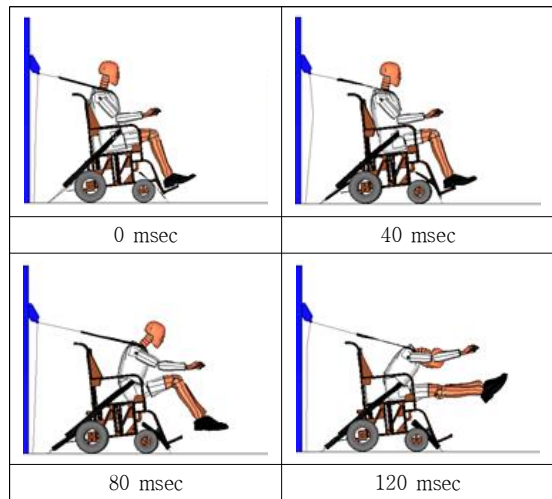


Fig. 5 Occupant behaviors during the sled simulation

에서 감가속이 되는 것으로 계산되었다.

더미 머리와 흉부의 시험 및 해석의 가속도 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 슬래드의 시험에서 측정된 더미 머리와 흉부 가속도의 최대값과 가속도의 지속 시간 등이 휠체어-더미 슬래드 시뮬레이션에서 계산된 결과와 매우 유사한 것으로 나타났다. 또한 더미의 머리 및 흉부 상해치와 시험과 해석 중에 얻어진 구속장치(Shoulder and

lap belts)의 최대 반력값을 Table 1에 비교하여 휠체어-더미 유한요소모델을 검증하였다.

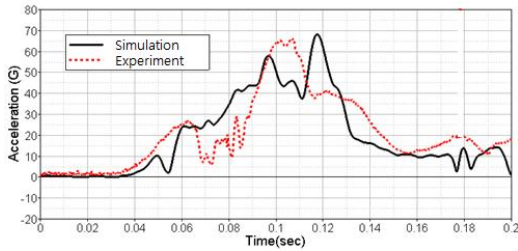


Fig. 6 Resultant acceleration-time histories of dummy head

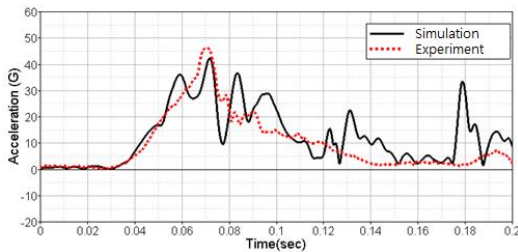


Fig. 7 Resultant acceleration-time histories of dummy chest

Table 1 Result comparisons of sled test and simulation

	Injuries		Max. belt forces	
	HIC	Chest Acc.	Shoulder	Lap
Experiment	648	44.0 g	6.5 kN	8.9 kN
Simulation	650	40.0 g	5.8 kN	8.1 kN

4. 휠체어 승객 거동 해석

슬래드 시험과 해석결과의 비교로 검증된 휠체어-승객 유한요소모델을 휠체어 탑승 개조버스 모델에 추가하여 승객거동해석을 수행하였다.

급감속 시 휠체어 승객의 안전도를 평가하기 위하여 휠체어 고정장치 및 휠체어 탑승객 구속장치 안전성 평가 기준(ISO 10542-1)⁽¹¹⁾의 가장 가혹한 감가속 조건(80 msec 동안 가속도 28g 유지)을 휠체어-승객-개조버스 모델에 적용하고 더미 모델의 상해치와 구속장치가 고정되는 부위의 최대 응력값을 계산하였다. Fig. 8에서 휠체어-승객-개조버스 모델의 초기형상과 120 msec에서의 승객거동과 변형모습을 보여주고 있으며 승객 구속장치와 휠체어 고정장치 주변의 버스 구조물(pillar와 floor)

의 최대 응력값은 약 210MPa로 계산되었다. Table 2와 같이 휠체어 승객의 머리 상해치는 1,100(HIC), 흉부 상해치는 67g(흉부 가속도)로 계산되어 슬래드 해석보다 가혹한 가속도 조건인 것으로 나타났다.

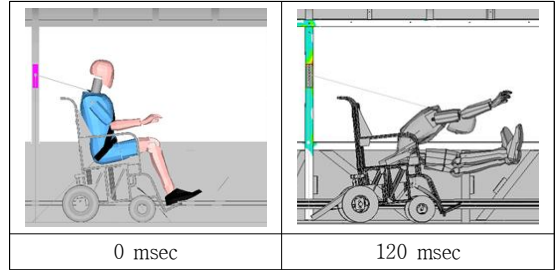


Fig. 8 Frontal impact simulation of the wheelchair occupant

Table 2 Simulation results of the Hybrid-III model

Injuries	HIC	Chest Acc.
Wheelchair occupant	1,100	67.0 g

측면충돌 시의 휠체어 승객의 안전도를 평가하기 위하여 휠체어-승객-버스 모델의 측면충돌 해석을 수행하였다. 휠체어-승객 모델을 버스의 좌우에 위치시키고 휠체어 고정장치와 승객 구속장치를 각각 반영하였다. 측면충돌용 대차모델인 FMVSS No. 214⁽¹²⁾ Barrier(무게 1,360kg, 27도 경사충격) 모델을 휠체어-승객-버스 모델의 측면부 중앙에 위치시키고 Fig. 9와 같이 FMVSS No. 214(Dynamic Side Impact Protection)의 시험 속도(54kph)와 동일한 조건을 적용하여 Fig. 9와 같이 측면충돌 해석을 수행하였다. 해석결과로 측면충돌 시 좌우 휠체어 승객의 거동과 머리 및 흉부의 상해치를 계산하였다. Fig. 10에서 150 msec까지의 좌우 휠체어 승객의 거동을 보여주고 있으며 좌측 승객의 움직임이 우측 승객의 움직임보다 상대적으로 큰 것으로 계산되었고 좌우 휠체어 승객의 상해치는 Table 3과 같이 낮은 값이 계산되었다. 특히 흉부 상해치의 경우 측면충돌에 의한 움직임이 상대적으로

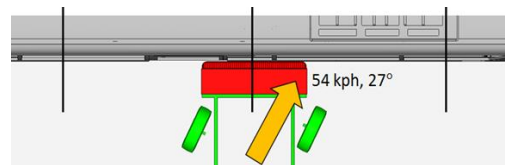


Fig. 9 Side impact simulation for the wheelchair bus model

휠체어 탑승 버스의 승객안전도 분석

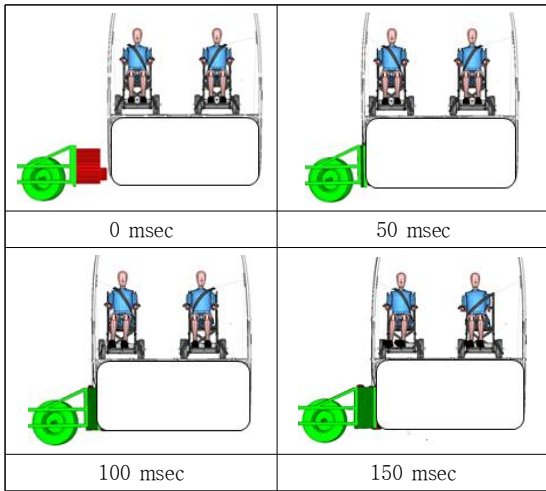


Fig. 10 Occupant behaviors during the side impact simulation

Table 3 Dummy injury results in the side impact simulation

Injuries	HIC	Chest Acc.
Left occupant	8	20.0 g
Right occupant	24	13.9 g

로 큰 좌측 휠체어 승객의 상해치가 우측 휠체어 승객의 상해치보다 큰 것으로 계산되었다.

휠체어 탑승으로 승객의 무게 중심은 버스 시트에 탑승한 일반 승객의 무게 중심보다 높기 때문에 버스의 좌우 급회전 시 휠체어 탑승 승객은 휠체어로부터 이탈될 확률이 높을 것으로 예상되어 버스의 좌우 급회전 시 휠체어 승객의 거동해석을 수행하였다. 휠체어-승객-버스 모델의 중심에 좌우 회전속도(30km/h의 주행 속도 및 편도 6.5m 도로 회전)를 부여하여 좌우 급회전 상황을 구현하여 승객의 거동과 상해치를 계산하였다. Fig. 11에서

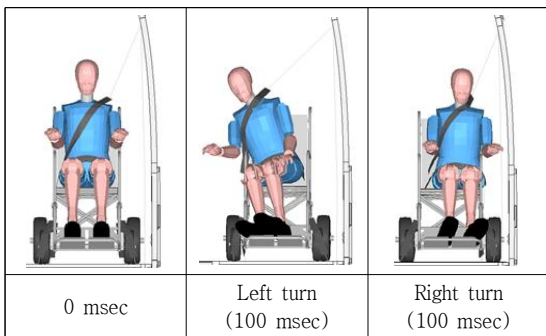


Fig. 11 Dummy behaviors of left and right turn simulations

좌우 각각의 회전속도가 최대인 약 100 msec의 휠체어 승객의 거동을 보여주고 있으며 좌회전 시 승객의 움직임이 우회전 시 승객의 움직임보다 상대적으로 큰 것으로 계산되었다. 좌우 회전 시 승객의 상해치는 Table 4와 같으며, 승객 거동이 상대적으로 큰 좌회전 조건의 승객 상해치(머리 및 흉부)가 우회전 조건의 승객 상해치보다 높은 것으로 계산되었고 특히 흉부 상해치가 상대적으로 큰 것으로 계산되었다.

Table 4 Dummy injury results in the left and right turn simulations

Injuries	HIC	Chest Acc.
Left turn	324	49.9 g
Right turn	4	8.2 g

5. 버스 전복 시 승객 안전도 분석

전복사고는 버스 승객 상해에 큰 영향을 미치는 사고 유형으로 버스 승객은 전복사고 시 버스 내부구조와의 충돌 또는 버스 외부로 이탈하여 이차충돌의 위험에 노출된다.⁽⁵⁾ 그러므로 버스 전복사고 시 버스 구조 및 승객의 안전도는 국내와 유럽의 전복시험(ECE R66) 규정에 의해 평가되고 있다. 선행연구에서 개발된 휠체어 탑승 개조버스의 전복사고 시 휠체어 승객의 안전도를 분석하기 위해 ECE R66 규정을 적용하여 승객거동해석을 수행하였다. 기울어진 바닥면에 의한 휠체어-승객-버스 모델의 자유낙하운동을 반영하여 200 msec 까지 전복해석을 수행하였고 버스모델의 변형정도 및 좌우측 휠체어 승객의 거동과 상해치를 계산하였다.

Fig. 12와 같이 버스 전복에 의한 버스 측면부의 변형이 계산되었고 좌우측 휠체어 승객의 시간대별 거동이 계산되었다. 약 100 msec 이후에서 버스 측면부의 최대 변형이 계산되었고 이후 시간대에 우측 휠체어 승객과 버스 구조 및 지면과의 거리가 최소가 되나 직접적인 접촉은 나타나지 않았다. 또한 좌측 휠체어 승객도 휠체어 고정장치와 승객 구속장치에 의한 거동이 계산되었다. 한편 좌우측 휠체어 승객의 머리 상해치(HIC)는 100 이하로 상해의 정도는 낮게 계산되었고 전복사고 시 지면과 가까운 우측 휠체어 승객의 흉부 상해치는 반대편 좌측 휠체어 승객의 흉부 상해치보다 작게 계산되어 회전 중심과의 거리에 따른 승객의 운동에너지 크기의 영향으로 파악된다.

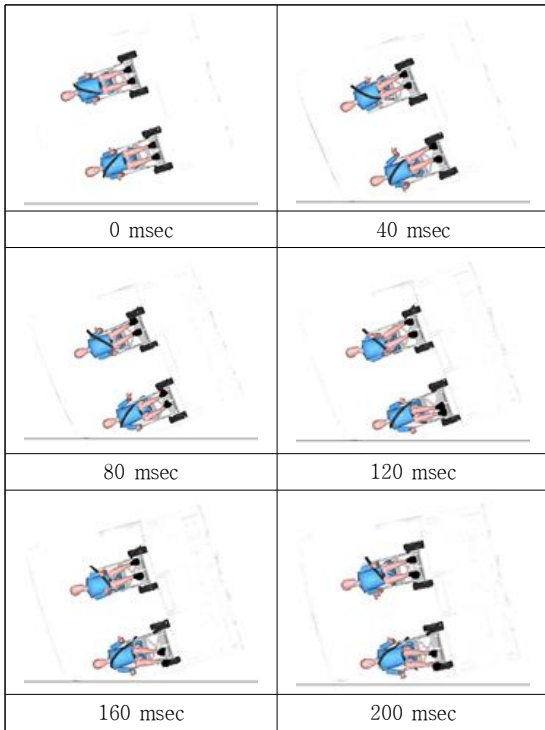


Fig. 12 Occupant behaviors of the rollover simulation

Table 5 Dummy injury results in the rollover simulations

Injuries	HIC	Chest Acc.
Left occupant	182	44.4 g
Right occupant	116	25.0 g

6. 결론

장애인의 이동권 수요 증가와 인구의 고령화로 인해 휠체어 사용자는 지속적으로 증가할 것으로 예상되며 교통약자의 지역 간 이동 편의 증진을 위한 휠체어 탑승 개조버스의 승객안전도 분석을 연구하였다. 본 연구에서는 제한적인 승객 안전도 평가 시험을 보완하고 버스 탑승 휠체어 승객의 안전도를 평가하고자 휠체어-승객 유한요소모형을 구성하고 슬래드 시험결과와 비교를 통해 휠체어-승객 유한요소모형을 검증하였다. 검증된 휠체어-승객 유한요소모형을 휠체어 탑승 개조버스 모델에 적용하여 다양한 충돌조건에 따른 승객거동해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 가혹한 조건의 감가속도 적용으로 정면충돌 시 승객거동을 분석하고 승객과 휠체어 구속 및 고정 장치의 장착 부위의 최대 응력값을 계산하여 버스 구조의 설계사양을 검토하였다.
- 2) 버스 측면충돌 시 승객 상해치는 낮은 수준인 것으로 계산되었고 좌회전 시 승객 상해치가 우회전 시 승객 상해치보다 상대적으로 큰 것으로 계산되었다.
- 3) 버스 전복사고 시 좌측 휠체어 승객의 상해치는 우측 휠체어 승객의 상해치 대비 약 157%(머리 상해치)와 약 178%(흉부 상해치) 수준인 것으로 계산되어 전복사고 시 지면 반대편 승객의 상해 위험도가 높은 것으로 파악되었다.

급감속, 급회전, 측면 및 전복 충돌조건에 따른 승객거동해석 수행으로 승객안전도 평가 결과가 도출되어 휠체어 승객의 전형적인 교통사고 및 운행상황에서의 안전도를 분석하였다. 본 연구결과를 기반으로 휠체어 승객과 일반 승객의 안전도 비교 분석 및 전복사고 시 승객의 거동과 승객생존공간과의 비교 연구 등이 추가적으로 수행될 것이다.

후 기

본 연구는 “휠체어 사용자가 탑승 가능한 고속/시외버스 개조차량 표준모델 및 운영기술 개발(휠체어 탑승 고속/시외버스 안전성 검증 연구), 과제번호 18TLRP 129286-02”의 결과로써 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 지원 하에 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 장정아, 2018, “휠체어 탑승 가능 시외버스의 도입에 따른 휠체어 장애인의 이동권 문제 고찰” 월간교통, 12월호, pp. 16~20.
- (2) 통계청, 2016, “장애인구추계: 2015~2065년”.
- (3) C. Denson, 2015, “Public Sector Transportation for People with Disabilities: A Satisfaction Survey”, Journal of Rehabilitation, Vol. 66, No. 3, pp. 29~37.
- (4) 최원준, 2016, “휠체어 이용자의 교통수단별 이용형태와 선호요인 분석”, 연세대학교 공학대학원 석사학위논문.
- (5) 신재호, 한경희, 김경진, 용기중, 강병도, 2018, “휠체어 탑승 개조버스의 구조안전성능 연구”, 자동차

- 안전학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 54~59.
- (6) 김정현, 김종배, 황수빈, 장완호, 2019, “한국형 휠체어 탑승 고속버스에 대한 사용성 연구”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 20, No. 7, pp. 571~577.
- (7) L. W. Schneider, M. A. Manary, N. R. Orton, J. H. Hu, K. D. Klinich, C. A. Flannagan, J. L. Moore, 2016, “Wheelchair Occupant Studies”, UMTRI-2016-08, National Highway Traffic Safety Administration Final Report (2006-2016).
- (8) C. Wiacek, A. Prasad, D. Weston, N. R. Orton, L. W. Schneider, 2017, “Assessing the Performance of Steering Wheel Air Bags for Drivers Seated in Wheelchairs during Frontal Crash Tests”, ESV Conference, Paper No. 17-0219.
- (9) 김태용, 심소정, 김시우, 강병도, 2017, “충돌모의 (Sled) 시험에 의한 특별교통수단 휠체어 탑승자 상해에 관한 연구”, Transaction of KSAE, Vol. 25, No. 2, pp. 140~148.
- (10) UMTRI Wheelchair Transportation Safety <http://wc-transportation-safety.umtri.umich.edu/wts-standards/WC4engineeringdrawings>
- (11) ISO, 2001, “Technical systems and aids for disabled of handicapped persons – Wheelchair tiedown and occupant-restraint systems – Part 1: Requirement and test methods for all systems”, ISO 10542-1.
- (12) U.S. DOT NHTSA, 2012, “Laboratory test procedure for FMVSS No. 214, Dynamic side impact protection – Moving deformable barrier test requirements using advanced test dummies”, TP-214D-09.