

# 버스의 승객안전도 평가방법 연구

신재호\*

## Investigation of Evaluation Method for Bus Occupant Safety

Jaeho Shin\*

*Key Words: Occupant Behavior Analysis(승객거동해석), Rollover Accident(전복사고), Restraint System(구속 장치), Occupant Residual Space(승객거주공간), Finite Element Analysis(유한요소해석)*

### ABSTRACT

In a previous study, an investigation of occupant behaviors and injuries (to the head and chest) was performed during vehicle impact loading cases in order to ensure the safety of wheelchair passengers on a bus. The computational results showed overall safety tolerances of wheelchair occupants under different accident configurations. The bus crashworthiness is described as the capability of a bus to protect occupants during rollover loadings. The residual space containing occupants should be undamaged without any intrusions. However it is necessary to evaluate the residual space according to the bus occupant kinematic analysis under the rollover crash simulation. This study focuses on the evaluation of occupant behaviors during rollover loading cases in order to ensure the safety of bus passengers sitting in general seats and wheelchairs and evaluates the residual space of the bus by analyzing the bus occupant kinematics.

### 1. 서론

버스의 다양한 사고 사례 중 승객의 안전에 가장 심각한 영향을 줄 수 있는 사고는 전복사고(Rollover)이며, 차량 단독 사고의 약 10% 빈도로 발생하고 있다.<sup>(1)</sup> 박원일의 버스 차내 안전사고 감소방안 연구에서, 2016년~2018년 경찰청, 도로교통공단 교통사고분석시스템 교통사고 자료와 버스공제조합 버스 교통사고 통계자료 및 한국교통안전공단의 운행기록분석시스템 분석자료를 바탕으로 버스 교통사고 추이 및 현황과 버스 교통사고 특성 분석, 버스 차내 안전사고 예측모형 개발, 버스 차내 안전사고 예방대책 등의 연구를 수행하였다.<sup>(1)</sup>

사고 발생건수와 사망자수 및 부상자수 등의 전반적인 버스 교통사고 추이의 감소율은 다소 둔화되고 있는 것으

로 분석되었고, 부상자수의 감소율이 사망자수의 감소율 보다 낮은 결과가 보고되었다.<sup>(1)</sup> 버스대수는 전체 자동차 등록대수의 약 0.2%에 불과하지만, 사고 발생건수는 전체 사고의 2.7%, 사망자는 전체 교통사고 사망자수의 3.3%로 대수에 비해 버스 사고 발생율과 사망자 비율이 매우 큰 것으로 조사되었다.<sup>(1)</sup> 또한 주행거리당 자동차 용도별 교통사고 분석에서 사업용 승합차는 비사업용 승합차에 비해 2배 이상 교통사고 발생률이 높은 것으로, 사망자수도 약 3배의 차이가 나타나는 것으로 분석되었고 동일 주행거리를 이동 시 비사업용 버스에 비해 사업용 버스의 교통사고가 더 많이 발생하고 피해도 크다는 것을 시사하고 있다.<sup>(1)</sup>

버스 차량 단독 사고의 약 10% 빈도로 발생하고 있는 전복사고의 경우 승객구속장치에 의해 구속되지 않은 승객에게는 버스의 변형된 내부구조와 접촉에 의한 상해 또는 버스의 측면 유리창 파손으로 외부로 쉽게 이탈하여 2차 충돌에 의한 심각한 승객 상해가 발생할 수 있다. 전

\* 경일대학교 기계자동차학부, 교수  
E-mail: jhshin@kiu.kr

복사고에 의해 버스 차량의 지면과 충돌 및 미끄러짐의 발생으로 버스 승객은 일반 승용차의 승객보다 차량의 회전(무게) 중심에서부터 승객까지의 거리가 상대적으로 크기 때문에 더 큰 충격하중과 감속도에 노출될 수 있다.

한편 Matolcsy의 연구에서 전복사고에 대한 체계적인 통계자료 및 전복사고 분석결과가 도출되었다.<sup>(2)</sup> 약 40여개 나라의 전복사고(117 건)를 분석하여 상해정도, 전복사고 유형, 버스 유형, 변형형상에 대해 보고하였다.<sup>(2)</sup> 상해정도는 경상의 비율이 가장 많았고 심각한 상해는 약 30%로 조사되었다. 1/4 회전 이상의 전복사고가 전체 전복사고 유형의 약 43%로 조사되었고 관광 및 장거리 운행을 위한 버스의 사고가 총 사고버스의 약 49%로 분석되었다. 버스 구조의 심각한 변형이 발생한 사고는 약 21%로 조사되었다.<sup>(2)</sup> 그리고 전복사고 시 버스의 승객 안전도는 생존공간의 확보여부와 매우 큰 연관성이 있음을 결론으로 도출하였다.<sup>(2)</sup>

국내 버스 전복사고의 체계적인 분석연구는 미흡한 편이나 전복사고의 언론 보도내용으로 분석한 사고내용은 다음과 같다. 2001년 고속도로에서 발생한 전복사고에서는 1명의 사상자와 41명의 중경상자가 발생했으며 사고충격으로 생존공간은 확보되지 않은 경우이고, 2019년 지방도로에서 45인승 버스가 중앙분리대와 충돌 후 반대편 차선으로 넘어가 마주오던 화물차 및 승용차와 충돌하며 전복된 사고로 1명의 사상자와 15명의 중경상자가 발생했다. 또한 2020년 시외버스가 빗길에서 미끄러져 도로 아래로 추락하는 전복사고가 발생했고 1명의 사상자와 17명의 중경상자가 발생하였다. 한편 국토교통부는 버스 전복사고 시 안전띠 착용 효과시험을 국내 최초로 실시하여 승객안전도 확보를 위한 시험결과를 비교 분석하여 발표하였다.<sup>(3)</sup> 언덕 위 도로를 시속 25km로 주행하던 버스가 6m 언덕 아래로 구를 때 버스 승객의 안전띠 착용 유무에 따른 상해정도를 비교하였다. 버스 전복 시험 결과로 안전띠를 매지 않은 인체모형은 천정이나 버스 내측 벽, 의자 등에 부딪쳐 머리와 가슴 부위에 가해지는 충격으로 인한 중상가능성이, 안전띠를 착용한 인체모형에 비해 18배 높게 계산되었다. 반면 안전띠를 착용한 인체모형은 전복 시 의자에 구속되어 의자 등 버스 내부의 단단한 부위와 접촉하지 않아 부상정도가 경미한 것으로 확인되었다. 버스 전복 시 안전띠를 착용하지 않은 승객은 버스 외부로 이탈될 가능성이 매우 높아, 버스 외부로 이탈되어 사망할 가능성은 16.8%로 버스 내부에서의 사망률 0.7% 보다 24배 높은 것으로 조사되었고, 상세한 시험결과는 Table 1과 같다.<sup>(8)</sup>

Table 1 Experimental data of bus rollover tests

Dummy	Probability of severe injury	Injury index	
		With belt	Without belt
50 <sup>th</sup> tile	Head	4.0	155
	Neck	0.08	0.57
	Thorax	6.3	34.2
	Average	3.5	63.3
Child	Head	3	455
	Neck	0.07	0.71
	Thorax	7.3	42.5
	Average	3.5	166.1

버스 전복사고 시 승객안전도 평가방법의 심층적 연구를 위해 본 연구에서는 전복사고 시 인체모형의 승객거동을 전산해석기법을 적용하여 분석하고 승객거주공간으로 정의된 승객안전도 평가방법과 실제 인체모형의 승객거동 해석결과를 비교하여 승객거주공간의 유효성 및 개선 방향을 모색하고자 하였다. 또한 휠체어 사용자가 탑승 가능한 버스의 승객거동 해석결과를 바탕으로 버스 승객의 조건에 따른 상세한 승객안전도 평가방법을 제시하고자 하였다. 신재호<sup>(4,5)</sup>와 김경진<sup>(6)</sup> 등이 구성한 버스와 승객의 유한요소모델을 적용하여 버스 전복 사고조건에서의 승객거동해석과 승객 안전도 평가방법 연구를 수행하였다.

## 2. 버스의 전복 안전도 평가

유럽 최초의 버스 전복시험은 1970년대 초반에 헝가리에서 시작되었고 1986년에 유럽연합에서 버스 강도에 관한 새로운 법규를 제정하였다.<sup>(7)</sup> Sandor Vineze-Pap의 연구에서 UN R No. 66의 시험방법에 관해 연구 및 분석하고 새로운 준정적 시험방법과 컴퓨터 시뮬레이션을 적용한 전복시험방법을 발표하였다.<sup>(7)</sup> Sandor Vineze-Pap은 고가도로에서의 낙하사고와 경사면에서의 전복사고 등 실사고 기반 연구를 수행하고 실사고 기반의 시험기준을 수립하고자 하였다. 수행한 경사면에서의 버스 전복시험은 Fig. 1과 같다.<sup>(7)</sup>

버스 전복시험으로 인한 승객의 안전도를 평가하기 위해 UN R No. 66 규정 등이 있으며, UN R No. 66 규정은 시험 대상 버스를 바닥면으로부터 800mm 위에 있는 회전 가능한 면에 위치시킨 후 회전대를 들어 올려 버스를 회전시켜 버스의 전복, 즉 자유낙하를 유도한다.<sup>(8)</sup> UN R



Fig. 1 Bus rollover test on 33.6° slope<sup>(7)</sup>

No. 66 규정의 평가 항목은 버스구조의 변형에 따른 버스 내부의 가상 승객거주공간(Residual Space) 침범 여부로 법규의 만족여부를 판단하며 승객거주공간 영역을 표시하는 판넬을 제작하여 시험 자동차의 가장 취약한 부분에 설치하며 가상의 승객거주공간은 Fig. 2와 Fig. 3과 같다. 그러나 승객의 착좌 위치와 높이에 따라 승객 안전도에 영향을 미치므로 승객생존공간의 유효성을 검토하기 위한 연구가 필요하다.

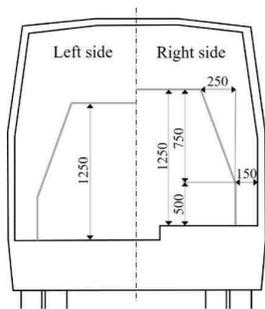


Fig. 2 Residual space in lateral arrangement<sup>(8)</sup>

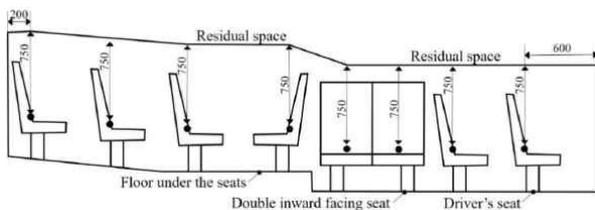


Fig. 3 Residual space in longitudinal arrangement<sup>(8)</sup>

### 3. 승객 거동해석을 위한 유한요소모델의 구성

버스와 휠체어의 유한요소모델<sup>(4-6)</sup>을 적용하여 전복 사고 시 승객의 거동해석을 위한 승객을 포함한 버스 전

복 해석모델을 구성하였다. UMTRI(University of Michigan Transportation Research Institute)의 휠체어 교통안전 기준 연구그룹에서 제공하는 표준 휠체어 도면<sup>(9)</sup>을 적용한 휠체어 유한요소모델이 적용되었고 일반 승객과 휠체어 탑승 승객의 유한요소모델은 50th%tile Hybrid-III 더미 모델이 적용되었다.

버스-승객-휠체어 유한요소모델은 10mm의 평균 요소 크기로 약 300만 개의 요소로 구성되었으며, Fig. 4와 같이 버스 시트모델과 약 85kg의 휠체어 모델에 50th%tile Hybrid-III 더미 모델을 착석시켜 일반 승객과 휠체어 탑승 승객모델을 각각 구성하였다. 승객의 구속장치로 일반 승객은 2점식 안전띠 모델을 적용하였고 휠체어 탑승 승객은 3점식 안전띠 모델을 적용하였다.<sup>(9,10)</sup>

김경진 등은 휠체어 탑승 승객의 슬레드 시험과 해석 결과로 휠체어 탑승 승객의 구속장치 성능평가와 휠체어-승객 유한요소모델의 검증을 수행하였다.<sup>(9)</sup> 최대 25g의 감가속도가 약 100msec 동안 작용한 슬레드 시험에서 측정된 더미 머리와 흉부 가속도의 최대값과 가속도의 지속 시간 등이 휠체어-승객 유한요소해석에서 계산된 결과와 매우 유사함을 보고하였고 슬레드 시험과 해석에서 측정 및 계산된 더미의 머리 및 흉부 상해치와 구속장치의 최대 반력값을 비교하여 휠체어-승객 해석모델의 성능을 검증하였다.<sup>(9)</sup>

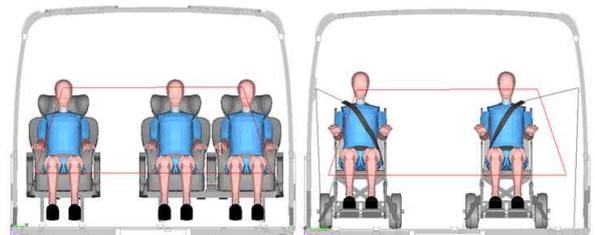


Fig. 4 Occupants and wheelchair FE models for the bus rollover simulations

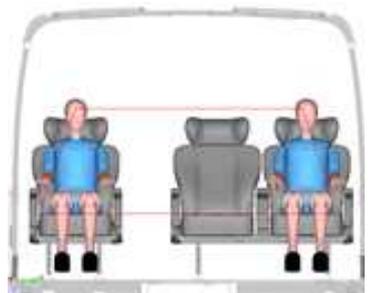
### 4. 버스 전복해석과 승객 거동해석

김경진 등<sup>(6)</sup>이 수행한 버스 전복해석 모델과 유사한 조건(UN R No. 66)으로 일반 승객과 휠체어 탑승 승객의 승객 거동해석을 수행하였다. 이전의 연구에서 전복사고, 측면충돌, 급감속 및 급회전 시의 휠체어 탑승 승객의 승객거동해석이 수행되었고, 승객 위치에 따른 인체 상해치를 계산하여 평가하였다.<sup>(6)</sup>

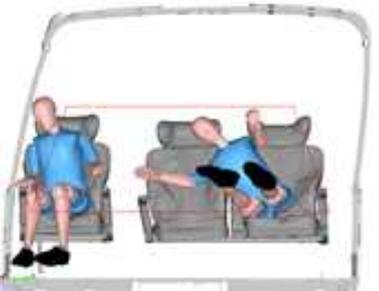
본 연구에서는 전복 시 버스-승객의 자유낙하운동을 반영하고 버스 모델이 지면과 접촉 후 승객의 거동이 충

분히 계산될 수 있도록 500msec까지 전복시물레이션을 수행하였다. 2점식 안전띠 구속조건인 일반 승객 및 3점식 안전띠 구속조건인 휠체어 탑승 승객과 승객거주공간과의 상호 관계를 분석하고자 가상의 승객거주공간(강체 모델)을 모델링하고 버스 및 승객과의 접촉은 적용하지 않았다. 전복해석을 통한 승객의 차량 내 시간 경과에 따른 움직임을 계산하였고, 버스의 자유낙하운동과 지면과의 접촉으로 버스구조의 변형과 차량 내부의 감가속도의 영향으로 일반 승객은 승객거주공간에서 이탈하는 것으로 계산되었다. Fig. 5와 같이 머리부위의 이탈 정도가 심한 것으로 나타났고 또한 지면과 접촉하는 오른쪽 승객의 어깨부위의 이탈정도도 큰 것으로 계산되었다.

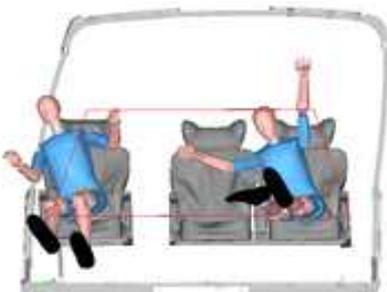
머리와 어깨의 시간에 따른 방형별 변위 그래프는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.



(a) at 0 msec

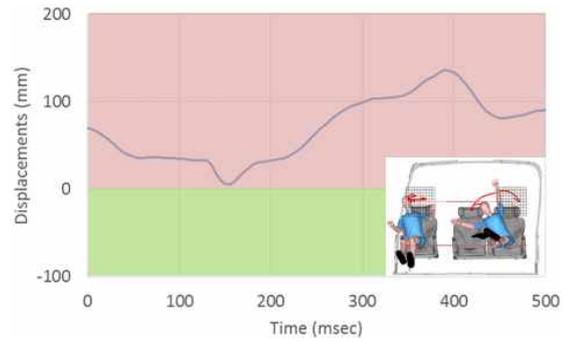


(b) at 250 msec

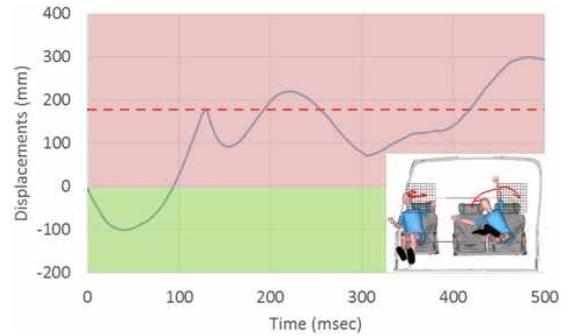


(c) at 500 msec

Fig. 5 Occupant kinematics during bus rollover simulations

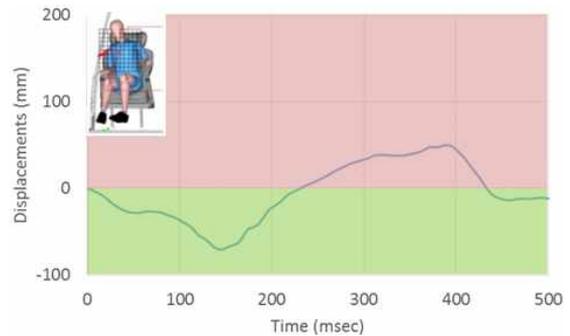


(a) Vertical displacement-time history

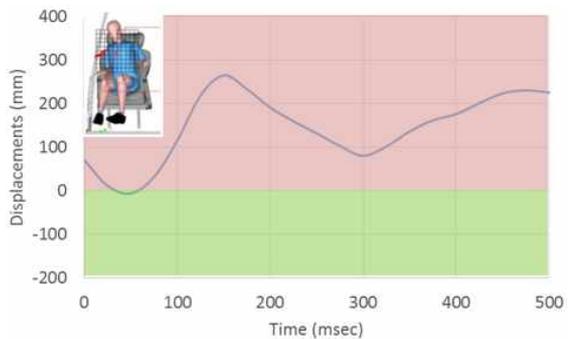


(b) Horizontal displacement-time history

Fig. 6 Head trajectories during bus rollover simulations



(a) Vertical displacement-time history



(b) Horizontal displacement-time history

Fig. 7 Shoulder trajectories during bus rollover simulations

머리와 어깨의 시간에 따른 방향별 변위 그래프(Fig. 6과 Fig. 7)에서 상단의 영역은 승객거주공간을 이탈하는 영역으로 상하, 좌우의 방향별 머리와 어깨 부위의 이탈정도를 나타내었다. 일반 승객 머리의 시간에 따른 상하(Vertical) 방향 변위그래프(Fig. 6(a))에서 최대 136 mm 이탈됨이 계산되었고, 좌우(Horizontal) 방향 변위 그래프(Fig. 6(b))에서 최대 300mm 이탈됨이 계산되었다. 특히 버스 모델과 지면과의 접촉에 따른 측면방향 여유 공간은 180mm로, 약 200msec 이후 머리와 지면과의 접촉이 계산되었다. 한편 어깨부위는 최대 50mm(상하), 265mm(좌우)의 이탈 정도가 계산되었다(Fig. 7(a), 7(b)).

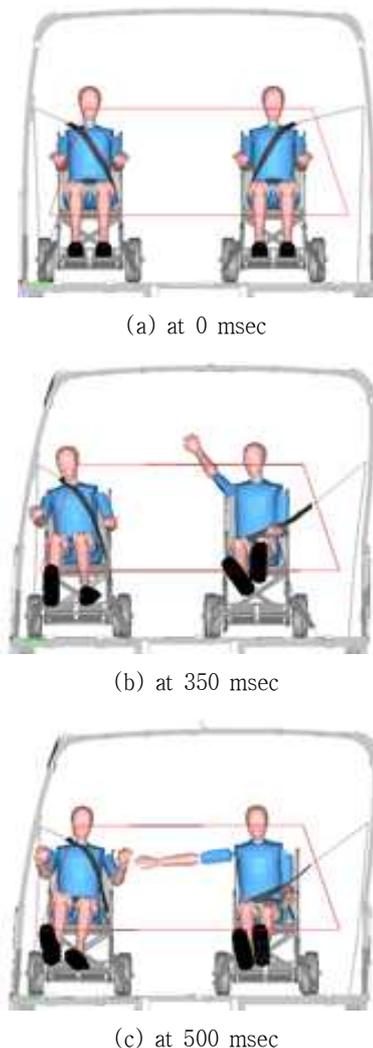


Fig. 8 Kinematics of wheelchair occupants during bus rollover simulations

### 5. 버스 전복 시 휠체어 승객의 거동해석

휠체어 탑승 승객의 특성을 반영하고자, 50th%tile Hybrid-III 더미 모델과, 장애인 더미 모델을 모사하기 위해 더미 하지의 무게를 감소시킨 총 무게 46kg의 더미 모델을 적용하여 각각 승객거동해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 3점식 안전띠 구속조건으로 해석을 수행하였고 Fig. 8과 같이 승객거주공간과 비교하여 승객의 움직임을 계산하여 약 350msec에서 최대 이탈됨이 파악되었다. 한편 버스 전복 시 머리의 지면접촉이 계산된 2점식 안전띠 구속조건 일반 승객의 거동과 비교하면 3점식 안전띠 구속조건 휠체어 탑승 승객 모델의 경우 지면과의 접촉은 없는 것으로 계산되었다.

Fig. 9 및 Fig. 10과 같이 더미의 무게변화에 따른 변위-시간 그래프에서 상하방향 변위의 차이보다 좌우방향 변위의 차이가 큰 것으로 계산되었다. Table 2와 같이 좌우(Horizontal) 방향의 비교에서 무게 46kg 더미의 머리부위는 16%, 어깨부위는 7%의 변위 증가가 계산되었다. 반면 상하(Vertical) 방향에서는 변위가 거의 동일하거나 상대적으로 감소하였으나 그 값은 미비한 것으로 계산되었다.

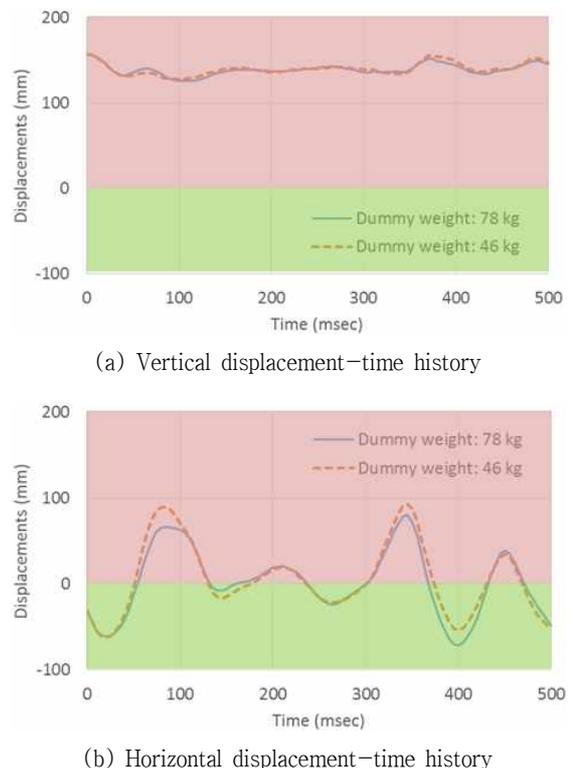
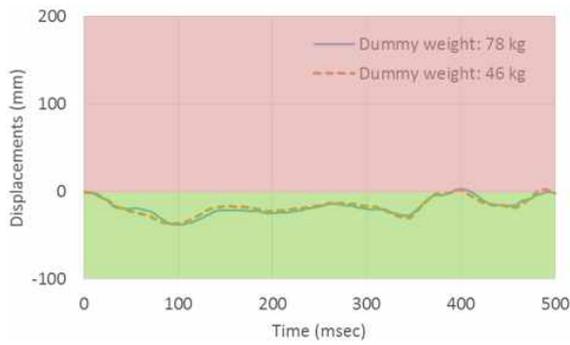
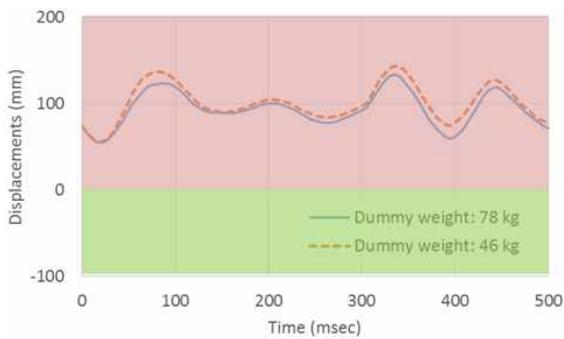


Fig. 9 Head trajectories of wheelchair occupants during bus rollover simulations



(a) Vertical displacement-time history



(b) Horizontal displacement-time history

Fig. 10 Shoulder trajectories of wheelchair occupants during bus rollover simulations

Table 2 Dummy injury results in the rollover simulation

Max. displacement comparison (46 kg dummy/78 kg dummy)	Vertical Disp.	Horizontal Disp.
Head	100%	116%
Shoulder	71.4%	107%

## 6. 결 론

본 연구에서는 전복사고 시 인체모형의 승객거동을 유한요소법을 적용하여 분석하고 승객거주공간으로 정의된 승객안전도 평가방법과 실제 인체모형의 승객거동 해석결과를 비교하여 승객거주공간의 유효성을 평가하고 개선 방향을 모색하였다. 그리고 휠체어 사용자가 탑승 가능한 버스의 승객거동 해석결과를 바탕으로 버스 승객의 조건에 따라 세분화된 승객안전도 평가방법을 연구하였다.

선행연구에서 검증된 버스-승객-휠체어 유한요소모델을 버스 전복해석 모델에 적용하여 승객거주공간과 비교하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 버스 전복해석의 인체더미 거동을, 전복시험 시 승객안전도 평가에 적용되는 승객거주공간과 비교하여 승객거주공간의 유효성을 평가할 수 있는 방법을 제시 하였다.
- 2) 버스의 일반적인 승객구속장치인 2점식 안전띠보다 3점식 안전띠로 승객이 구속될 경우 좌우 및 상하 방향의 승객구속에 효과적인 것으로 계산되어 구속장치에 따른 승객거주공간의 조정이 필요한 것으로 파악되었다.
- 3) 인체더미모델의 무게를 감소시켜 휠체어 탑승 장애인 승객을 모델링하고 더미 무게변화에 따른 승객 거동을 분석하였다. 최대 16%의 변위 증가가 계산되어 탑승 승객에 따른 승객거주공간의 선택적 적용의 필요성이 도출되었다.

버스 전복해석 모델의 적용으로 일반 승객, 휠체어 탑승 승객, 장애인 승객 등의 승객거동을 계산하고 일반적인 승객거주공간과 비교하여 승객거주공간의 유효성을 분석하였다. 본 연구결과를 기반으로 개별 승객중심의 승객거주공간에 관한 연구와 전복사고 시 승객의 거동과 인체 상해치의 연관성에 관한 연구 및 다회전 전복사고 시의 승객거동과 승객 간 접촉에 의한 상해연구 등이 추가적으로 수행될 것이다.

## 후 기

본 연구는 “휠체어 사용자가 탑승 가능한 고속/시외 버스 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) 박원일, 2019, “버스 차내 안전사고 감소방안 연구”, 기본연구 19-1, 한국운수산업연구원.
- (2) Matolcsy, 2003, “Lesson and Conclusions-Learned from the Analysis of Bus Rollover Accidents” 84<sup>th</sup> GRSG 5-9.
- (3) 국토해양부 자동차운영과, 2012, “버스 전복사고 시 안전띠 착용 효과시험, 국내 최초 실시” 보도자료, 2012. 9. 13.

- (4) 신재호, 한경희, 김경진, 용기중, 강병도, 2018, “휠체어 탑승 개조버스의 구조안전성능 연구”, 자동차안전학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 54~59.
- (5) 신재호, 강병도, 2019, “휠체어 탑승 개조버스의 안전도 연구”, 자동차안전학회지, Vol. 11, No. 4, pp. 63~68.
- (6) 김경진, 신재호, 용부중, 강병도, 2020, “휠체어 탑승 버스의 승객안전도 분석”, 자동차안전학회지, Vol. 12, No. 1, pp. 39~45.
- (7) Sandor Vinezé-Pap, 1998, “European Test Methods for Superstructures of Buses and Coaches related to ECE R66 (The Applied Hungarian Calculation Method)”, ESV Conference, Paper No. 98-S4-P-18.
- (8) UN Regulation, No. 66, 2006.
- (9) UMTRI Wheelchair Transportation Safety <http://wc-transportation-safety.umtri.umich.edu/wts-standards/WC4engineeringdrawings>
- (10) MohammadReza Seyedi, Grzegorz Dolzyk, Sungmoon Jung, Jerzy Wekezer, 2018, “Occupant Response in Rollover Crashworthiness Assessment of Cotaway Bus”, 15<sup>th</sup> International LS-DYNA<sup>®</sup> Users Conference.