

휠체어 탑승 개조버스의 구조안전성능 연구

신재호* · 한경희* · 김경진* · 용기중* · 강병도**

Research of Structural Safety Tolerance for Wheelchair Bus Rollover Characteristics

Jaeho Shin*, Kyeonghee Han*, Kyungjin Kim*, Geejoong Yong*, Byung Do Kang**

Key Words : Wheelchair bus(휠체어 탑승 버스), Rollover(전복사고), Crashworthiness(충돌 안전도), Finite element analysis(유한요소해석)

ABSTRACT

While the advanced traffic environment systems are developed recently, the traffic systems for transportation vulnerable are still under development and their social life are limited as well. In order to the secure their mobility rights, it had been required to set up the particular system for the traffic welfare. One of the significant items is the express bus operation for wheelchair users. Thus, the research of development and operation for express buses with wheelchair users was funded by the Korean government. Before the express bus development for wheelchair users based on the current bus model, this study set up the evaluation method for the bus rollover characteristics to ensure occupant safety using the finite element method. The partial bus model was developed corresponding to the full bus model response under rollover event and the evaluation method based on two model (full bus model and partial bus model) responses is planned to apply the model development of express bus modification for wheelchair users.

1. 서론

국가 교통 정책 및 공공 서비스의 한계성으로 인해 교통약자의 이동 제한이 있으며 사회활동이 축소되고 삶의 질이 저하될 수 있다. 장애인뿐만 아니라 고령화 사회에 따른 휠체어 사용자는 지속적으로 증가하는 추세이며 교통약자의 대부분이 휠체어를 사용하고 있는 실정이다. 이동 시 휠체어가 필요한 중증 장애인의 비중은 증가하고 있는 추세이고 선진화된 복지 정책과 노인 인구의 증가로 휠체어 사용은 근거리 이동 시 증가하고 있다.

우리나라의 국가인권위원회는 교통약자의 이동편의

증진을 위한 국가의 의무(“장애인차별 금지 및 권리구제 등에 관한 법률”, “교통약자의 이동편의 증진법”, “장애인의 권리에 관한 협약”, “장애인 복지법” 등의 법률을 근거로)를 충실히 이행하지 않은 것으로 판단하고 휠체어 사용자 등이 장거리 이동을 위한 고속/시외버스를 안전하고 편리하게 이용할 수 있도록 관계 기관(국회, 기획재정부, 국토교통부, 지방자치단체)에 정책을 권고하였다. “교통약자의 이동편의 증진법 시행규칙”의 “이동편의시설의 구조/재질 등에 관한 세부기준”에는 계단이 있는 버스에 휠체어 승강설비를 갖추 수 있도록 일률적으로 임의 규정하고 있으나, 이를 버스 운송사업자의 규모, 신규 제작 차량 구입시점 등을 고려하여 연차별, 단계적으로 의무화할 수 있도록 관련 내용을 개정할 것을 권고하였다. 향후 휠체어 탑승설비가 설치된 고속 및 시외버스를 휠체어 사용

* 경일대학교 기계자동차학부

** 한국교통안전공단 자동차안전연구원

E-mail : jhshin@kiu.kr

장애인 등이 안전하고 편리하게 탑승할 수 있도록 고속/시의 버스터미널 내부 승강장, 고속도로 휴게소 주차장, 중간 정류소 등의 구조 및 설비에 관한 표준 기준을 마련할 것을 권고하고 있다.

한편 장애인 단체의 교통약자 시의 이동권 소송과 시의 접근권을 보장하라는 집회를 전국 주요 도시에서 지속적으로 개최하는 등 사회 이슈로 부각되면서 휠체어 사용자가 탑승 가능한 고속 및 시외버스 개조차량의 개발 필요성이 요구되고 있다.

도시 또는 지역 간 이동을 위한 대중교통수단인 고속/시외버스는 저렴한 가격과 사용이 편리한 장점 등이 있으나, 휠체어 사용자의 탑승빈도, 승강설비 설치에 따른 승차정원 축소 등의 경제성 문제로 현재 운행 중인 고속/시외버스에는 휠체어 승강설비를 갖춘 차량이 없어 교통약자의 이동권이 크게 제한되고 있는 실정이다.

대한민국 정부는 교통약자의 지역 내 원활한 이동을 위해 저상시내버스의 도입, 도시철도 접근성 향상 등 많은 노력을 기울여 제한적인 통행 등을 완화시켰으나 교통약자의 지역 간 이동을 위한 적절한 대중교통서비스 수단을 확보하지 못해 교통약자는 원거리 대중교통서비스를 제공받지 못하고 있는 실정에 있다. 고령화에 따른 노약자와 장애인 인구의 증가로 휠체어 사용자가 증가하고 있으나, 이러한 사회적 요구에 부응한 지역 간 이동권을 보장하는 휠체어 탑승 고속/시외버스 개발 및 운행은 수익성을 추구하는 민간 사업자의 자발적 개발 및 보급을 기대하기에 많은 어려움이 있다.

따라서 교통약자의 이동권 보장 관련 법령의 준수 및 장애인의 지역 간 이동 편의 증진을 위하여 휠체어 승강장치 요소기술의 국산화 개발과 기존의 운행되고 있는 고속/시외버스 차종별로 적합한 휠체어 승강장치의 국산화 및 개조버스의 안전도 확보, 고속/시의 버스터미널 승강장 등의 구조와 설비에 관한 표준 및 개발 기술의 보급 활성화를 위한 운영방안 등의 마련이 시급한 실정이다. 휠체어 사용자가 탑승 가능한 고속/시외버스 개조차량의 안전도를 확보하고 표준개조기술의 개발, 보급 및 운영상의 효율화 방안에 관한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는, 휠체어 사용자가 탑승 가능한 고속/시외버스의 개조 방안을 검토하기 위해서 기본연구단계로 휠체어 탑승을 위한 구조 변경에 따른 버스모델의 안전도(구조 및 전복) 평가 방안에 관해 연구하였다. 굽힘과 비틀림 강성도 평가를 통해 구조적 안전도를 분석하였고 전복 사고 시 승객 생존 공간의 확보 정도를 개조 전후 모델의 유한요소해석을 통해 해석결과를 비교하였다. 또한 효

율적인 승객거동해석을 위한 버스 부분 모델의 유효성 평가에 관해 연구하였다.

2. 버스 전복 사고 및 시험

버스의 여러 사고 유형 중 탑승객 안전에 심각한 영향을 줄 수 있는 사고 유형 중 하나가 전복 사고(Rollover)이며, 전형적인 전복사고의 예는 Fig. 1과 같다. 전복 사고 시 안전벨트에 의해 구속되지 않은 탑승객은 버스 내부와 접촉 및 버스 외부로 이탈하여 치명적인 상해 또는 사망의 원인이 되고 있다. 대부분의 경우 전복 사고 도중 버스가 지면과 접촉 및 슬라이딩되는 과정에서 승객은 상대적으로 큰 충격 하중에 노출될 수 있다. 일반 승용차와는 달리 버스의 전복 사고 시 차량의 회전(무게) 중심에서부터 승객까지의 거리가 상대적으로 크기 때문에 승객의 상해 또는 사망 등 전복 사고로 인한 인명 피해가 적지않다. 버스 전복 사고 시의 차체 구조 및 승객의 안전도를 파악하기 위해서 Fig. 2와 같이 전복 사고 재현 시험(Rollover Test)을



Fig. 1 Bus rollover accident
(<http://www.hankookilbo.com/News/Read/201611061298956703>)



Fig. 2 Bus rollover experiment
(https://www.youtube.com/watch?v=KYm-L5i8_5o)

반복적으로 수행하여 버스 설계 및 개발에 적용하고 있다.

버스의 전복 사고 시 버스 구조(기둥, Pillar)가 충분한 강도를 유지하도록 설계 되어 있지 않으면 버스 전복 사고 시 차량의 과도한 변형으로 탑승객의 상해를 가중시킬 수 있으며, 버스 제작사에서는 전복 사고의 안전도 확보를 위해 버스 구조의 충분한 강도 및 강성을 확보하는 연구가 수행되고 있다. 버스 전복 사고로 인한 승객의 안전을 확보하기 위해, 유럽의 ECE R66, FMVSS 규정 등이 있으며, 2003년부터 국내에서도 차량 총 중량 4.5 ton 초과 승합자동차에 대해서 전복시험의 안전기준이 적용되고 있다. 유럽의 ECE R66⁽¹⁾는 시험 대상 차량을 강체 바닥으로부터 800mm 위에 있는 회전 가능한 플랫폼에 위치시킨 후 지그로 플랫폼을 들어 올려 버스가 강체 회전할 때 차량의 무게 중심이 시험장치의 힌지 점을 통과하면서 자유낙하운동이 유도된다. ECE R66의 시험 평가는 버스 차체 변형에 따른 승객 생존 공간(Residual Space) 침범 여부로 법규의 만족여부를 판단한다. 승객 생존 공간의 정의는 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

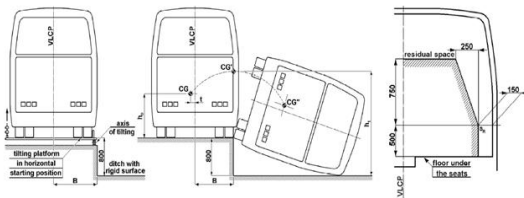


Fig. 3 Test regulation of bus rollover (ECE R66)

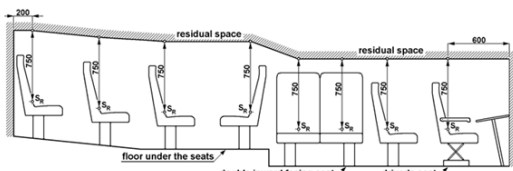


Fig. 4 Residual space for bus rollover test

3. 버스 유한요소해석 연구

1997년, 정태은 등⁽²⁾은 대형 버스의 전복 해석과 측정법에 관한 연구를 통해 대형 버스의 전복 시험을 수행하고 시험 결과를 유한요소해석의 결과와 비교 평가하여 대형 버스의 전복 사고 시 버스 내의 승객을 보호하기 위한 생존 공간 확보 방안을 연구하였다.

2010년 박재우 등⁽³⁾은 버스의 신차 개발 시 초기 개념

설계 단계부터 전복 저항 성능을 고려하여 버스를 설계하고, 다양한 시험 및 해석 방법 등을 이용하여 각 설계 단계별로 구조의 전복 안전 성능을 지속적으로 검토함으로써 최적의 버스 전복 저항 성능 개발 프로세스 구축의 연구를 수행하였다. 빔 모델을 이용하여 버스 전복 해석을 수행하여 초기 개념 설계 단계에 대응하였고, 주요 부재 및 조인트 부위의 굽힘 시험을 통해 해석 결과를 검토하여 해석의 신뢰성을 확보하고, 유한요소모델의 데이터 입력을 위한 주요 부재의 단품시험과 빔 모델 해석 결과를 이용한 개념 설계를 통해 셸 모델로 구성된 버스 모델을 시험 결과와 비교하여 매우 유사한 결과를 보고하였다.⁽³⁾

또한 2014년 박상민 등⁽⁴⁾은 전복 사고로 인한 승객의 중증도 파악을 위해 소형 버스 전복사고에서 발생한 탑승자 손상유형 분석과 문헌고찰을 통해 실사고 기반 연구를 수행하였고, 좌석 안전벨트 착용이 손상 중증도에 미치는 중요한 인자인 것으로 분석하였다. 25인승 버스의 운전석 측 1/4 회전(One Quarter Turn) 전복사고에서 조수석 옆 탑승자의 손상 중증도가 높은 경향을 보고하였고, 상지 손상의 비중이 높은 것으로 파악하였다. 안전벨트 미착용에 의한 승객 간 상호 접촉에 의해 동일 좌석 행복수 탑승자의 손상 중증도가 높은 것으로 파악하였다.⁽⁴⁾

Erich Mayrhofer 등의 Enhanced Coach and Bus Occupant Safety 연구에서 버스의 실사고 분석, 승객의 상해 분석, 전복 사고에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 Parametric Study로 요인 분석을 파악하였다.⁽⁵⁾

또한 Body Section Model을 구성하고 유한요소법을 적용한 버스 부분 구조의 롤오버 해석을 통해 전복 사고에 대응할 수 있는 차체 구조 설계안에 관한 연구가 수행되었다.⁽⁶⁻⁹⁾ 부분 구조모델의 검증에 위해 시험결과와 해석결과를 비교하였으나 부분 구조 모델이 Full Bus Model을 대표할 수 있는 분석은 제한적인 것으로 파악되었다. 일반버스의 천장강도와 전복강도를 비교 및 평가하는 기법에 관한 연구를 Pankaj S. Deshmukh가 수행하였다.⁽¹⁰⁾

실사고 기반 버스 전복 사고 시 승객의 상해 분석과 버스의 Rollover 시험과 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한 버스 차체 구조의 설계안에 관한 연구가 다양하게 수행되고 있으나, 휠체어 사용자 탑승을 위한 개조 버스에 관한 연구와 버스 승객의 안전도 확보를 위한 연구는 초기 단계로 파악되고 있다.

4. 버스 유한요소모델의 구성

휠체어 사용자 탑승 가능 버스의 개발을 위해 개조 대

상 버스를 선정하고 부분 설계 변경을 통해 휠체어 사용자 탑승이 가능한 구조로 설계안을 검토하였다. 본 연구에서는 휠체어 사용자 탑승을 위한 버스의 개조안을 유한요소모델로 구성하고 부분 설계 변경에 따른 구조적 안전성을 파악하였다.

기존의 버스 유한요소모델은 약 2,600,000 개의 요소로 구성하였으며, 평균 요소의 크기는 약 10mm 이다. 버스 유한요소모델의 무게는 약 12 ton 으로 계산되었다. 버스 하단부에 장착된 휠체어 Lifting System(약 250 kg) 과 도어를 포함한 버스 측면 개조 부위를 반영한 유한요소모델은 Fig. 5와 같다.

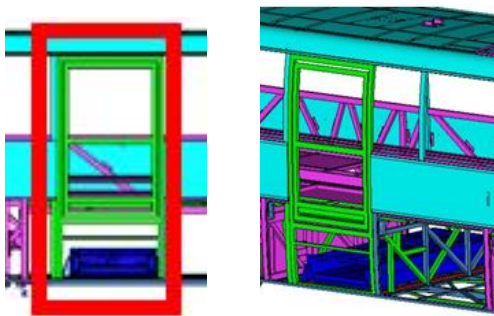


Fig. 5 The modified bus FE model for wheelchair users

5. 버스 유한요소해석 및 결과

버스 유한요소모델의 구조적 안전성을 파악하기 위해서 굽힘 및 비틀림 하중에 의한 버스 모델의 강성해석을 수행하였다. 버스 모델의 Wheelbase를 기준으로 굽힘 및 비틀림 강성해석을 위한 경계조건을 부여하고 기준 하중을 적용하였다. 기본 버스 모델과 휠체어 승강을 위한 측면부 절개 모델, 그리고 최종 개조 모델 각각의 강성해석을 수행하였고 계산된 상대 강성도(기본 버스 모델의 결과를 기준으로 측면부 절개 모델과 최종 개조 모델의 결과를 비교)는 Table 1과 같다. 휠체어 탑승을 위한 측면부 보강을 통해 강성도

Table 1 Result comparisons of bending and torsional stiffness

Relative stiffness	Bending	Torsion
Base model (기본 모델)	1.00	1.00
Trimming model (측면부 절개 모델)	0.89	0.80
Final modified model (최종 개조 모델)	1.80	1.17

는 증가하는 것으로 계산되었으며, 측면 중앙부의 보강으로 인해 기본 모델 대비 굽힘 강성도(180%)의 향상이 비틀림 강성도(117%)의 향상보다 큰 것으로 계산되었다.

유럽 ECE R66 기준의 버스 전복 시험 조건을 적용하여 세 모델(기본 모델 / 측면부 절개 모델 / 최종 개조 모델)의 유한요소해석을 수행하였으며 승객 생존 공간의 침범 정도를 평가하기 위한 위치는 Fig. 6과 같다. 휠체어 탑승을 위한 개조 부위 주변(Location A and B)의 침범 정도를 기본 모델의 침범 정도와 비교한 결과는 Table 2와 같으며 최종 개조 모델의 침범 정도는 기본 모델 대비 약 88% 수준인 것으로 계산되었다. 기본 모델의 경우 100 mm 이상의 여유 공간이 계산되어 최종 개조 모델도 충분한 여유 공간이 확보된 것으로 나타났다.

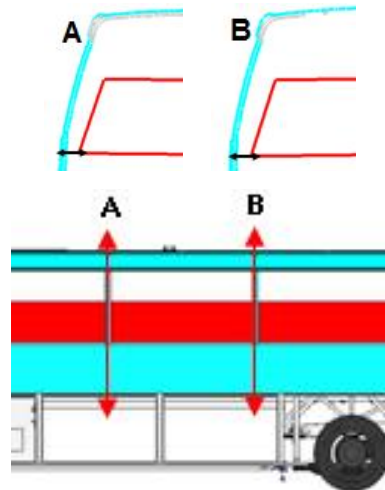


Fig. 6 The target locations of residual space in the rollover simulation

Table 2 Residual space comparison of rollover simulations

Amount of space	Location A	Location B
Base model (기본 모델)	1.00	1.00
Trimming model (측면부 절개 모델)	1.01	0.98
Final modified model (최종 개조 모델)	0.88	0.87

6. 버스 전복 해석 모델의 개발

휠체어 사용자 탑승 가능 버스의 개발을 위해 개조 대상 버스를 선정하고 개조 부위에 관한 구조 변경 및 급강

속, 전복 사고 시 등의 승객 거동 해석의 연구가 수행되고 있으며, 김태용 등⁽¹¹⁾은 충돌모의 시험에 의한 특별교통수단 휠체어 탑승자 상해에 관한 연구를 최근에 수행하였다. 승객 상해치의 정확한 분석을 위해 정밀한 승객 모델을 적용하고 있으며, 고비용의 해석으로 해석 모델의 효율성이 요구되고 있다.

본 연구에서는 버스 전복 사고 시 효율적인 승객거동 해석을 위해서 관심있는 승객공간만을 고려한 부분 버스 모델의 유효성을 연구하였다. NHTSA(National Highway Transportation Safety Administration)에서 제공하는 버스 유한요소모델을 이용하여 Full Bus Model과 Partial Bus Model의 전복 해석을 수행하고 두 모델 간의 전복충돌성능을 평가하였다. Full Bus Model은 Fig. 7과 같다. 휠체어 사용자 탑승을 위한 개조 부위만을 고려한 Partial Bus Model의 전복 해석 결과와 Full Bus Model의 해석 결과와 비교하여 Partial Bus Model의 유효성을 분석하고자 하였다. NHTSA에서 제공하는 버스 유한요소모델의 정보는 Table 3과 같으며, 휠체어 사용자 탑승을 위한

개조 예상 부위인 버스의 중앙 부위의 부분모델(Partial Bus Model)을 Fig. 8과 같이 구성하였다.

Full Bus Model과 Partial Bus Model의 전복 해석 결과(at 200 msec)를 각각 Fig. 9와 Fig. 10에서 보여 주고 있으며, 국부적으로 두 모델 간의 변형 형상의 차이가 나타났으나, 전반적으로 유사한 변형 형상이 계산되었다. 버스 모델 지붕 상단부의 최대 변형량은 Full Bus Model과 Partial Bus Model에서 118 mm와 150 mm로 각각 계산되었다. Full Bus Model의 정보를 통해서 Partial Bus Model에 동일한 회전중심을 적용하였으나, 두 모델 간의 무게 분포의 차이로 인해 변형 형상 및 정도의 차이가 국부적으로 나타난 것으로 파악되었고, 버스 앞뒤 구조의 유무로 그 결과의 차이를 파악할 수 있다. 또한 지면과의

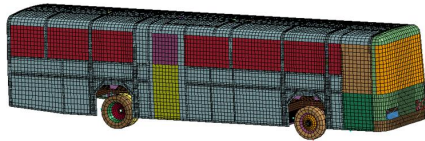


Fig. 7 Bus FE model provided by NHTSA



Fig. 8 Partial bus finite element model

Table 3 Information of the bus FE model

Number of nodes	54,643
Number of elements	53,096
Total weight	12 ton
Termination time	300 msec

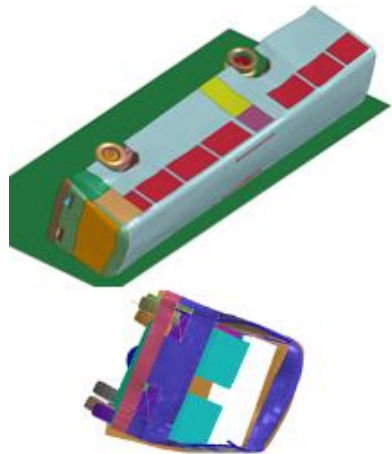


Fig. 9 Deformed shape of full bus model at 200 msec

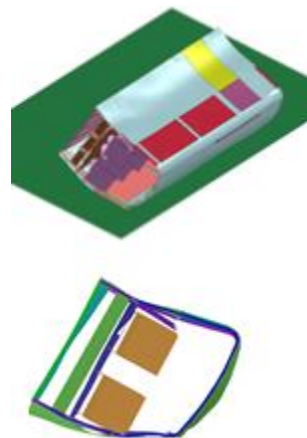


Fig. 10 Deformed shape of partial bus model at 200 msec

접촉되는 정도가 증가할수록 두 모델간의 더 큰 변형 정도의 차이가 계산되었다.

7. 결 론

휠체어 사용자의 이동 편의성을 확보하기 위한 휠체어 탑승 가능 버스의 개발을 위해 개조 대상 버스를 파악하고 휠체어 탑승을 위한 개조 부위의 구조 변경 등의 연구가 진행되고 있으며, 본 연구에서는 휠체어 탑승을 위한 버스 개조 방안을 반영한 버스 구조물의 강성 및 전복 해석을 수행하였고, NHTSA에서 제공하는 버스 유한요소 모델을 이용하여 Full bus model과 Partial bus model의 전복 해석을 수행하여 승객거동해석을 위한 효율적인 해석방안을 검토하였다. 휠체어 탑승을 위한 측면부 개조에 따른 버스 구조의 굽힘 강성도는 약 80%p, 비틀림 강성도는 약 17%p 향상되는 결과가 계산되었다. 전복 사고 시뮬레이션 결과에서는 모델에 따라 승객 생존 공간이 충분히 확보되는 것으로 계산되었다. 또한 휠체어 사용자 탑승을 위한 개조 부위만을 고려한 Partial bus model의 전복 해석 결과와 Full bus model의 전복 해석 결과의 차체 변형 모드 및 정도를 비교하여 Partial bus model의 유효성을 분석하였다.

후 기

본 연구는 “휠체어 사용자가 탑승 가능한 고속/시외 버스 개조차량 표준모델 및 운영기술 개발(휠체어 탑승 고속/시외버스 안전성 검증 연구), 과제번호 18TLRP129286-02”의 결과로써 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 지원 하에 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) ECE Regulation, No. 66, 2006.
- (2) 정태은, 김기범, 홍승준, 이용래, 김창수, 조용욱, 1996, “버스 차체의 전복 시험에 관한 연구,” 한국자동차공학회 1996년도 춘계학술대회, 96380117.
- (3) 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.
- (4) 박상민, 김상철, 이강현, 이재완, 전혁진, 김호중, 김진용, 곽영수, 이우성, 2014, “25인승 버스 전복사고의 탑승자 손상 분석,” Journal of Trauma and Injury, Vol. 27, No. 3, pp. 50~56.
- (5) Erich Mayrofer, Hermann Steffan, Heinz Hoscopf, 2005, “Enhanced Coach and Bus Occupant Safety”, ESV Conference, Paper No. 05-0351.
- (6) D.A. Micu, M.D. Iozsa, Gh. Fratila, 2013, “A Rollover Test of Bus Body Sections using ANSYS”, 5th International Conference Computational Mechanics and Virtual Engineering.
- (7) D.A. Micu, M.D. Iozsa, C. STAN, 2012, “Quasi-static Simulation Approach on Rollover Impact of a Bus Structure”, Advances in Automatic Control, ISBN: 978-960-474-383-4.
- (8) Lakhwinder Singh, Sanjay Vohra, Manu Sharma, 2016, “Finite Element based Static Analysis of a Bus Superstructure”, International Journal of Computer Analysis(0975-8887), pp. 32~34.
- (9) Wolfgang Schwartz, Christian Kvocic, Klaus Lesti, Klaus Schott, Ondrey Vaculin, 2004, “Simulation with LS-DYNA for Registration Approval of a Coach according to ECE R66 Regulation”, 22nd CAD-FEM Users’ Meeting, International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX & ICEM CFD Conference, November 10-12, Germany.
- (10) Pankaj S. Deshmukh, 2006, “Rollover and Roof Crush Analysis of Low-floor Mass Transit Bus”, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Wichita State University.
- (11) 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.