◎ 논 문

http://dx.doi.org/10.22680/kasa2019.11.4.063

휠체어 탑승 개조버스의 안전도 연구

신재호* · 강병도**

Study of Safety Tolerance for Wheelchair Bus Crashworthiness

Jaeho Shin*, Byungdo Kang**

Key Words : Wheelchair bus(휠체어 탑승 버스), Crashworthiness(충돌 안전도), Finite element method(유한요소법), Structural analysis(구조 해석), Rollover simulation(전복 해석)

ABSTRACT

The Korean traffic systems for transportation vulnerable are still under development and their social life are limited even if the traffic environment systems are developed consistently. To secure his/her mobility right, it has been required to set up the particular system for the traffic welfare, for example the express and intercity bus operations for wheelchair users. The express and intercity bus development for wheelchair users based on the original bus model has been performed. This study has investigated the safety tolerance for the bus stiffness, rollover and side impact characteristics to ensure occupant safety using the finite element models. The wheelchair bus model showed the improved crashworthiness according to the partially reinforced structure and better safety tolerance for the wheelchair users.

1. 서 론

통계청 분석에 의하면 65세 이상 고령인구는 2015년 654만 명, 2025년에 1,000만 명이 넘고, 2049년에 1,882만 명까지 증가 후 감소할 것으로 전망하고 있고 고령인구 구성비는 2015년 12.8%에서 빠르게 증가하여 2026년 20%, 2037년 30%, 2058년 40%를 초과할 것으로 전망하고 있다.(1) 또한 85세 이상 초고령인구는 2015년 51만 명에서 2024년에 100만 명이 넘고, 2065년에 505만 명으로 2015년 대비 10배 수준으로 증가할 것으로 예측되고, 85세 이상 인구 구성비는 2015년 1% 수준에서 2065년 11.7%로 증가할 것으로 전망하고 있다.(1)

또한 한국의 고령인구 비중은 2015년 12.8%로 OECD 국가 중 가장 낮은 수준이나, 2065년(108.7명)에는 가장 높은 수준이 될 것으로 예상하고 있다.(1)

고령화의 문제는 비단 우리나라에 국한된 문제가 아니라 세계 주요 국가들의 중요 문제 가운데 하나이며 인구구조의 변화와 의료기술의 발달, 생활환경 개선 등의 요인으로 평균수명이 증가하고 있는 것으로 분석하고 있다.(2) 고령인구 비율에 따라 고령화(65세 이상의 노인인구의 비율 7% 이상), 고령사회(14% 이상), 초고령사회(20% 이상)로 분류되며 2026년에는 초고령사회에 도달할 것으로 전망되고 있다.(2) 인구 고령화에 따라 65세 이상 노년층 장애인 수는 지속적으로 증가(2011년 38.0%, 2014년 41.4%, 2016년 43.4%)하고 있어 장애인구의 고령화가 상당한 수준으로 진행되고 있음을 알 수 있다.(3) 증가되고 있는 장애인구와 장애인구의 고령화로 많은 수의 사람들이 휠체어를 사용하여 이동하고 있다.(4) 하지만 우리나라의 대중교통서비스는 휠체어 사용자에게 충분한 이동편의성을 제공하고 있지 못한 실정이다. 저상버스(시내버스)를 제외한 시외/고속버스는 휠체어 사용자들의 탑승을 위한 버스 및 시설이 전무한 상황으로 휠체어 탑

* 경일대학교 기계자동차학부, 교수
** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 실장
E-mail : jhshin@kiu.kr

자동차안전학회지:제11권, 제4호, pp. 63~68, 2019
논문접수일: 2019.11.6, 게재확정일: 2019.12.9

승자들이 장거리 이동을 위해 시외/고속버스를 이용하는 것에는 많은 제한점이 보고되고 있다.[5] 한편 우리나라 국가인권위원회는 교통약자의 이동편의 증진을 위한 국가의 의무를 충실히 이행하지 않은 것으로 판단하고 휠체어 사용자 등이 장거리 이동을 위한 시외/고속버스를 안전하고 편리하게 이용할 수 있도록 관계 기관에 정책을 권고하였다.[6] “교통약자의 이동편의 증진법 시행규칙”의 “이동편의시설의 구조/재질 등에 관한 세부기준”에는 계단이 있는 버스에 휠체어 승강설비를 갖출 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 권고하고[6] 향후 휠체어 탑승설비가 설치된 고속 및 시외버스를 휠체어 사용 장애인 등이 안전하고 편리하게 탑승할 수 있도록 고속/시외 버스터미널 내부 승강장, 고속도로 휴게소 주차장, 중간 정류소 등의 구조 및 설비에 관한 표준 기준을 마련할 것을 권고하고 있다.[6] 따라서 교통약자의 이동권 보장 관련 법령의 준수 및 장애인의 지역간 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 진행되고 있다.[6]

본 연구에서는, 휠체어 사용자가 탑승 가능한 고속/시외버스의 구조 변경에 따른 버스모델의 안전도(구조 및 전복) 분석에 관해 연구하였다. 굽힘과 비틀림 강성도 평가를 통해 버스구조의 안전도를 분석하였고 전복 충돌 시 승객안전도를 확보하기 위해 개조 전후 모델의 전복시뮬레이션을 통해 버스모델의 충돌안전도를 분석하였다.

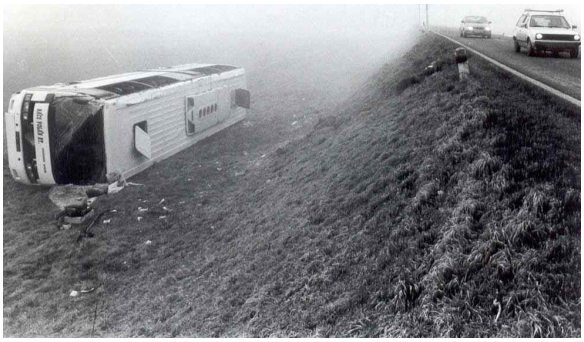

Fig. 1 Bus rollover accident[7]

Fig. 2 Bus rollover test[7]

2. 버스 안전도 평가기준

버스 탑승객 안전에 가장 큰 영향을 미치는 사고 유형은 전복사고(Rollover)이며, 전형적인 전복사고의 예는 Fig. 1과 같다. 전복사고 시 탑승객은 버스 구조물과 접촉 및 차량 외부로 이탈하여 심각한 상해의 원인이 되고 있다. 일반 승용차와 달리 버스의 전복 사고 시 탑승객의 안전벨트 미착용과 버스의 회전중심에서부터 승객의 무게중심까지의 거리가 상대적으로 큰 이유로 탑승객의 심각한 상해 등 대형 인명 사고가 발생되고 있다. 버스 전복사고 시의 차량 구조 및 탑승객의 안전도를 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 전복(Rollover) 시험을 수행하고 있다.

버스 전복 시험으로 인한 승객의 안전도를 평가하기 위해, 국내와 유럽의 ECE R66 규정 등이 있으며, ECE R66는 시험 대상 버스를 바닥면으로부터 800mm 위에 있는 전복(회전) 가능한 바닥판에 위치시킨 후 지그로 바닥판을 들어 올려 버스를 회전시켜 자유낙하운동을 유도한다.[8] ECE R66의 평가 항목은 버스구조의 변형에 따른

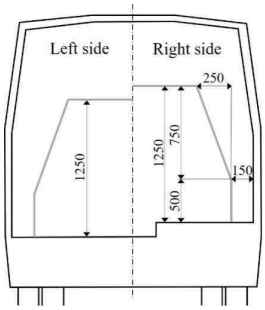

Fig. 3 Residual space in lateral arrangement (ECE R66)

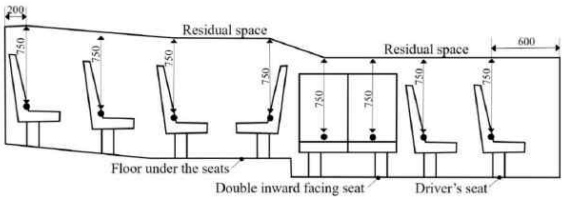

Fig. 4 Residual space in longitudinal arrangement (ECE R66)

버스 내부 가상의 승객생존공간(Residual Space) 침범 여부로 법규의 만족여부를 판단하며 승객생존공간은 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

3. 유한요소모델의 구성

1997년 정태은 등[9]과 2010년 박재우 등[10]은 버스의 전복해석에 관한 연구를 통해 버스의 전복 시험결과와 유한요소해석의 결과를 비교 및 평가하고 버스의 전복충돌 저항성능을 고려한 설계 및 개발 프로세스 구축에 관한 연구를 수행하였다.

한편 전체 차량 구조의 단면변화가 일반 승용차에 비해 상대적으로 일정한 버스 구조의 중앙부위 단면을 고려하여 유한요소모델을 구성하고 버스 중앙부위 구조의 전복해석을 통해 전복충돌에 대응할 수 있는 차체구조 분석에 관한 연구가 수행되었다.[6,11~14] 2018년 신재호 등[6]은 Full bus model과 Partial bus model의 전복 해석을 수행하여 유한요소해석의 효율적인 평가방안을 제시하였다. 그러나 실사고 기반 전복사고에 관한 연구와 휠체어 탑승자를 위한 버스 안전도 확보를 위한 연구의 다양성은 제한적인 것으로 파악되고 있다.[6]

휠체어 탑승자를 위한 버스의 개발을 위해 대상 고속/시외 버스모델을 선정하고 휠체어 탑승을 위한 측면부의 설계 변경과 휠체어 탑승 승강장치(매립형)를 반영한 고속/시외버스의 유한요소모델을 각각 구성하고 부분 설계 변경에 따른 구조적 안전도를 파악하였다. 승강장치는 리프트 케이스, 리미트 스위치, 구동 모터 및 기어박스, 리프트 암, 유압 실린더, 롤 오프 램프, 안전손잡이, 플랫폼 잠금장치 등으로 구성되고 FMVSS Part 571.403 (Platform lift systems for motor vehicle)의 안전기준을 근거로 설계되었다.[5]

한편 휠체어 탑승 승강구는 버스의 2번 필라와 3번 필라 사이에 창유리와 화물칸의 면적을 활용하여 설계가 수행되었고 구조적 안전성을 확보할 수 있도록 보강 설계를 수행하였다.[15] 고속/시외버스의 유한요소모델은 10mm의 평균 요소 크기로 약 260만 개의 유한요소로 구성되었으며, 버스 유한요소모델의 무게는 약 12.5ton으로 계산되었다. 버스 하단부에 장착된 휠체어 탑승 승강장치(lifting system, 약 250kg)와 두 가지 형식(슬라이딩 방식과 여닫이 방식)의 도어(36kg / 21kg)를 포함한 측면부 모델 형상은 Fig. 5와 같다. 슬라이딩 방식 도어의 단면 크기는 40x60mm이며 여닫이 방식 도어의 단면 크기는 38x38 mm 로 제작되었다.

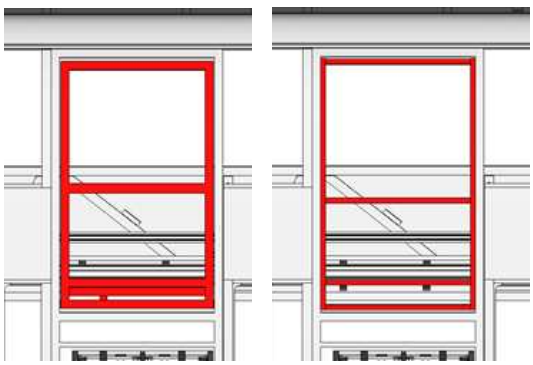

Fig. 5 Two types of the door models for wheelchair buses

4. 버스 구조해석 및 결과

휠체어 탑승 개조버스 유한요소모델의 구조적 강성도를 파악하기 위해 굽힘과 비틀림 하중 및 각각의 경계조건을 적용한 강성도 유한요소모델을 구성하고 굽힘 및 비틀림 강성해석을 수행하였다. 고속/시외버스 모델의 축거 기준 중앙부위에 단위하중을 부여하고 전/후 휠 중심에 경계조건을 적용하여 굽힘강성 해석모델을 구성하였다. 한편 Fig. 6과 같이 비틀림강성 해석모델에는 앞쪽 좌우 휠 중심에 ±단위하중을 부여하고 뒤쪽 휠 중심에 경계조건을 적용하였다. 두 개 차종(고속/시외버스)의 개조 전 버스모델과 휠체어 탑승을 위한 개조 버스모델의 강성해

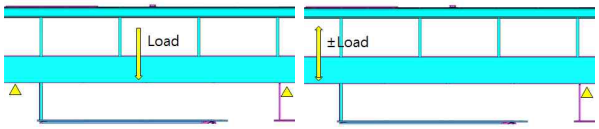

Fig. 6 Boundary conditions of bending and torsion analyses

Table 1 Result comparisons of bending and torsional stiffness

Relative Stiffness	Express bus		Intercity bus	
	Bending	Torsion	Bending	Torsion
Base model	1.00	1.00	1.00	1.00
Final model	1.80	1.17	1.03	1.08

석을 수행하고 계산된 상대 강성도(개조 전 버스모델 결과를 기준으로 휠체어 탑승을 위한 개조 버스모델의 결과의 상대적 비율을 계산)는 Table 1과 같다. 휠체어 탑승을 위한 측면부 절개와 도어 및 측면부 보강 설계로 강성도는 두 개 차종(고속/시외버스)에서 모두 증가하는 것으로 계산되었으며, 고속버스모델에서는 개조 전 버스모델 대비 휠체어 탑승을 위한 개조모델 굽힘 강성도(180%)의 향상이 비틀림 강성도(117%)의 향상보다 큰 것으로 계산되었고, 시외버스모델에서는 개조 전후 모델의 강성도 차이가 크지 않았지만 비틀림 강성도(108%)의 향상이 굽힘 강성도(103%)의 변화보다 큰 것으로 계산되었다.

5. 버스 전복해석 및 결과

고속/시외버스 모델의 전복해석을 위해 유럽 ECE R66의 자유낙하 시험조건과 지면(Ground)을 반영하고 가속도 조건을 부여하여 휠체어 탑승을 위한 개조 전후 고속/시외버스의 전복(Rollover)해석모델을 각각 구성하여 총 4회의 전복해석을 수행하였다. 한편 전복해석을 통해 휠체어 탑승을 위한 개조 전후 고속/시외버스 모델의 승객생존 공간의 침범 정도를 평가하기 위한 위치는 Fig. 7과 같다. 휠체어 탑승을 위해 측면부 개조부위(Location A and Location B)의 침범 정도를 개조 전 모델의 침범 정도와 상대 비교한 결과를 Table 2에서 보여주고 있다. 휠체어 탑승을 위한 개조 고속/시외버스 모델의 측면부 최대 변형 정도는 개조 전 모델 대비 83~90%(고속버스), 77~82%(시외버스) 수준인 것으로 계산되었다. 개조 전 고속/시외버스 모델의 전복해석결과로 ECE R66 기준대비 각각 100mm 이상의 여유 거리(공간)가 확보되는 것으로 계산되었고 버스구조의 변형에 따른 최대 침범량의 상대적 비교를 통해 휠체어 탑승을 위한 개조(고속/시외버스)모델도 충분한 승객생존공간을 확보한 것으로 계산되었다. Fig. 8은 휠체어 탑승을 위한 고속버스 개조모델

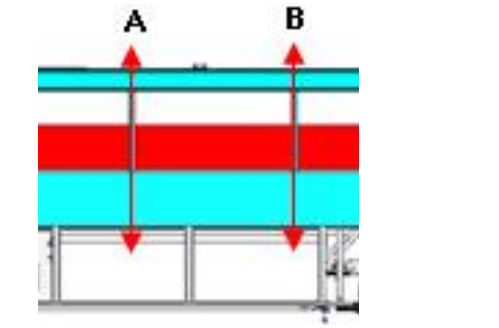

Fig. 7 The target sections of residual space

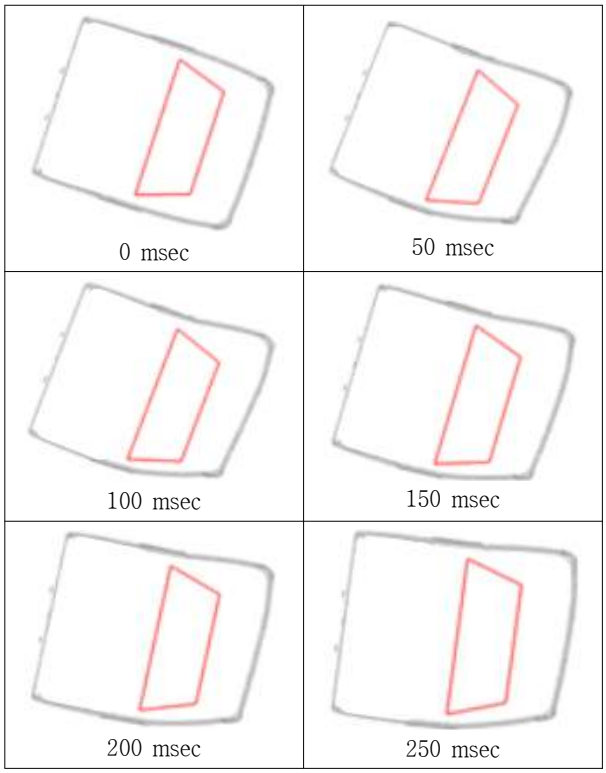

Fig. 8 Deformed shapes of the rollover simulation

Table 2 Residual space comparisons of rollover simulations

Amount of space	Express bus		Intercity bus	
	Section A	Section B	Section A	Section B
Base model	1.00	1.00	1.00	1.00
Final model	0.90	0.83	0.77	0.82

의 전복해석 시 개조부위의 변형정도(0msec~250msec)를 보여주고 있으며 약 100msec에서 버스구조 변형에 의한 최대 침범이 나타나는 것으로 계산되었다. 두 가지 형식(슬라이딩 방식과 여닫이 방식)의 도어 적용에 따른 버스모델의 안전도를 평가하기 위해 추가 전복해석을 수행하였고 측면 개조부의 변형에 따른 승객생존구간과의 침범정도를 계산하여 개조 전 모델 대비 개조부위의 변형정도를 상대비교 하였다. 슬라이딩 방식의 도어가 장착된 개조버스 모델의 변형량이 여닫이 방식의 도어가 장착된 개조버스 모델의 변형량보다 적은 것으로 계산되었고, 측정위치에 따라 7%p~9%p 정도의 차이를 Table 3에서 보여주고 있다. 슬라이딩 방식의 도어를 구성하는 프레임 단면특성이 여닫이 방식의 도어 프레임 단면특성보다 우수하여 나타난 해석결과로 분석되나, 두 방식의 도어에 따른 전복강도 변화에는 큰 차이가 없는 것으로 파악된다.

Table 3 Residual space comparisons of door types

Space of express bus	Sliding door		Hinged door	
	Section A	Section B	Section A	Section B
Final model	0.90	0.83	0.81	0.76

6. 버스 측면충돌해석 및 결과

최근 3년간(2016-2018년) 버스공제조합에 가입된 버스(시내, 농어촌, 시외)의 사고종류별 차대차 사고유형과 사고비중은 정면충돌(3.3%), 측면충돌(23.6%), 추돌(31.9%), 접촉(20.0%), 기타(21.2%) 등으로 보고되고 있어[16] 측면충돌의 빈도가 추돌사고에 이어 두 번째로 높은 것으로 나타났다. 버스의 측면충돌에 따른 차량의 파손 정도나 승객의 상해 정도는 높지 않은 것으로 파악되며 한인환[17]은 승용차와 버스 차량의 사고 관련 특징 및 버스가 개입된 교통사고의 특성과 유형을 조사 및 분석하고 PC-Crash 시뮬레이션 해석 결과로 충돌 후 버스의 속도 방향 변화에 관해 분석하였다. 휠체어 탑승을 위한 승강장치가 버스 하단부에 위치하고 휠체어 탑승을 위해 버스 측면부가 개조되어 개조버스의 측면충돌특성을 파악하기 위해 측면충돌해석을 수행하였다.

FMVSS 214 Barrier 모델을 휠체어 탑승을 위한 개조버스의 측면부 중앙에 위치시키고 Fig. 9와 같이 시험법규의 속도조건과 동일한 속도(54kph)를 적용하여 측면

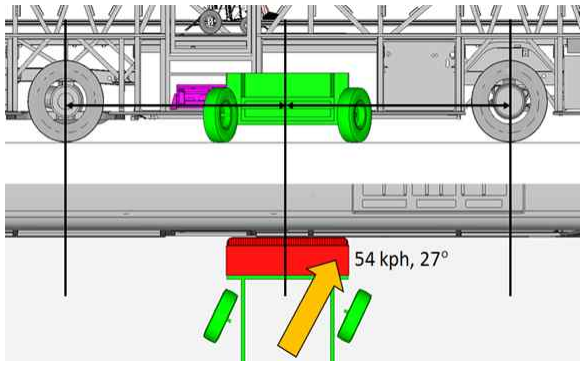

Fig. 9 Bus and barrier models for the side impact simulation (FMVSS 214)

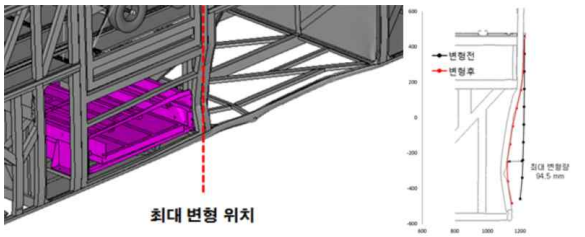

Fig. 10 Maximum deformation of the bus model under side impact loading

충돌 해석모델을 구성하였다. 약 150msec 까지 해석을 수행하였고 Barrier와 버스모델의 중량과 강성의 상대적인 차이로 버스 구조물의 변형과 충돌 후 버스모델의 움직임은 미비한 것으로 계산되었다. Fig. 10과 같이 Barrier와 접촉되는 부위에서 국부적으로 최대 변형량(약 95mm)이 계산되었고 승객탑승공간의 변형은 계산되지 않았다.

7. 결 론

고령화 사회에서 증가되고 있는 교통약자 이동권 요구와 장애인의 지역 간 이동 편의 증진을 위하여 휠체어 승강장치의 개발 및 휠체어 탑승을 위한 개조버스개발을 위해 개조버스의 안전도 분석을 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는, 휠체어 사용자의 탑승을 위한 고속/시외버스의 구조 변경에 따른 버스모델의 구조 및 전복 해석을 수행하여 개조 및 측면부 보강에 따라 증가된 굽힘 및 비틀림 상대강성(굽힘 강성도는 3%p~80%p, 비틀림 강성도는 8%p~17%p 향상)이 계산되었다.

버스 전복해석 결과에서는 고속/시외버스 모델의 승객생존 공간이 충분히 확보되는 것으로 나타났고 두 가지 형식의 도어방식을 적용한 모델의 전복해석을 통해 개조

부의 변형정도를 계산하여 도어방식에 따른 전복 충돌특성을 파악하였다. 또한 실사고 빈도가 높은 측면충돌 조건의 충돌해석을 수행하였고, 해석결과로 약 95mm의 최대 변형이 버스 측면부 하단에서 계산되어 측면충돌 시 버스의 안전도를 확인하였다.

전복 및 측면 충돌조건의 승객거동해석을 통한 승객안전도 평가 연구 수행으로 버스 안전도 평가의 종합적 분석이 요구된다.

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) 통계청, 2016, “장래인구추계: 2015~2065년”.
(2) 한국생산성본부, 2015, “초고령사회 진입에 대비한 지역정책 발전방향”, 연구보고서.
(3) 보건복지부, 2018, “2018년 등록장애인 통계발표”.
(4) K. C. An, 1995, “Aging and Characteristics of the Korean Population”, Korean Journal of Sociology, Vol. 29, pp. 717~732.
(5) 이용우, 강병도, 2019, “고속버스용 가변형 승객 시트 개발 연구”, Transaction of KSAE, Vol. 27, No. 11, pp. 893~901.
(6) 신재호, 한경희, 김경진, 용기중, 강병도, 2018, “휠체어 탑승 개조버스의 구조안전성능 연구”, 자동차안전학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 54~59.
(7) M. Matolcsy, 2007, “The Severity of Bus Rollover Accidents”, Korean Journal of Sociology, ESV Conference, Paper No. 07-0989.
(8) ECE Regulation, No. 66, 2006.
(9) 정태은, 김기범, 홍승준, 이용래, 김창수, 조용욱, 1996, “버스 차체의 전복 시험에 관한 연구”, 한국자동차공학회 1996년도 춘계학술대회, 96380117.
(10) 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.
(11) 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.
(12) 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.
(13) Lakhwinder Singh, Sanjay Vohra, Manu Sharma, 2016, “Finite Element based Static Anlysis of a Bus Superstructure”, International Journal of Computer Analysis (0975-8887), pp. 32~34.
(14) 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.
(15) 이용우, 하성용, 2019, “고속버스용 휠체어 탑승 전용 승강구 개조부 연구”, Journal of the Korea Academia-Industiral cooperation Society, Vol. 20, No. 4, pp. 1~8.
(16) 박원일, 2019, “버스 차내 안전사고 감소방안 연구”, 한국운수산업연구원 기본연구 19-1.
(17) 한인환, 2014, “사업용 버스 차량 충돌사고 해석”, Journal of Korean Society of Transportation, Vol. 32, No. 1, pp. 63~72.