

자동차 승객보호를 위한 안전장치 해석모델 및 승객거동 연구

한경희* · 신재호*[†] · 김경진* · 소영명** · 김시우***

Study of Restraint System Computational Model and Occupant Behavior for Vehicle Occupant Protection

Kyeonghee Han*, Jaeho Shin*[†], Kyungjin Kim*,
Young Myung So**, Siwoo Kim***

Key Words: *Occupant Protection(승객 보호), Restraint System(승객 보호 장치), Automated Driving(자율 주행), Finite Element Method(유한요소법), Occupant Behavior Analysis(승객 거동 해석)*

ABSTRACT

Vehicle occupant postures are anticipated to vary more widely during automated driving and to become more significant in terms of the autonomous vehicle safety. Experimental and computational approaches are needed to investigate and evaluate occupant behaviors during automated driving in general. However the validity and effect of such occupant postures are unknown, thus it is necessary to examine occupant behaviors and injury countermeasures for various occupant postures. This study was focused on the development and evaluation of restraint system model for occupant behavior examinations in the first step according to autonomous vehicle occupant safety. The finite element models of dummy and restraint system were set up and simulation results showed overall model performance and safety tolerances of different reclined occupant postures during frontal impact loading.

1. 서론

교통사고 감소와 운전편의 그리고 운전자의 고령화 등으로 인한 사고 증대 요인 등으로 인해 자동차의 자율주행 기술이 주목받고 있으며 다양한 세부 기술이 개발 및 발전되고 있다.⁽¹⁾ 대한민국의 65세 이상 고령 인구는 2020년 기준 약 812만 5천 명이고 2030년 약 1,298만 명까지 증가할 것으로 전망하고 있다.⁽²⁾

또한 세계보건기구의 보고에 따르면 전 세계에서 매년 교통사고로 약 120만 명이 사망하고 있으며 대부분이 운

전자의 부주의로 발생하고 있다.⁽³⁾ 그러므로 전 세계적으로 자동차의 안전기능을 강화하기 위한 법안 도입과 교통사고를 방지할 수 있는 기술개발에 다양한 연구를 진행하고 있다.⁽³⁾ NHTSA(National Highway Transportation Safety Administration)는 2013년 미국 내 발생한 교통사고의 90% 이상이 운전자의 잘못으로 인해 발생되며, 자동차의 자율주행기술을 통해 교통사고를 70~80%까지 감소시킬 것으로 예측하였다.⁽³⁾

자율주행자동차는 운전자가 직접 차량을 조작하지 않고 자동차 스스로 도로상황을 인식하여 목적지까지 이동할 수 있는 자동차로서 자동차 스스로 운전자의 인지, 판단, 제어 기능을 대체할 수 있는 다양한 기술이 요구된다. 결국 자율주행은 운전자의 고령화와 과실로 발생할 수 있는 교통사고를 최소화하여 승객과 보행자의 안전도를 향

* 경일대학교 기계자동차학부, 교수

** ㈜유이엔지니어링, 대표이사

*** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 안전연구처장
[†]교신저자, E-mail: jhshin@kiu.kr

상시키고 교통 약자들의 이동성을 확보할 수 있다.⁽⁴⁾ 자율주행자동차의 수준은 운전자의 개입여부, 자동화 수준에 따라 6단계(Level 0~Level 5)로 구분되며 Level 3 단계 이상의 차량은 일부 또는 완전 자율주행이 가능하다. 2020년 대한민국은 자율주행자동차가 안전하게 제작되고 상용화될 수 있도록 부분 자율주행자동차(Level 3) 안전기준을 도입했다.⁽⁵⁾ Level 3의 자율주행자동차가 차로 유지 시 다양한 상황에 적절히 대응할 수 있도록 부분 자율주행 시스템 안전기준이 마련되었고 운전 가능 여부 확인 후 작동, 자율주행 시 안전 확보, 상황별 운전전환 요구, 긴급한 상황의 대응, 운전자 대응이 필요한 상황에서 반응이 없는 상황의 위험 최소화 운행, 시스템 고장 대비 등 6가지 주요 안전기준으로 구성되어⁽⁶⁾ 자율주행자동차산업의 기술발전에 중요한 역할을 하고 있다. 또한 대한민국 정부는 자율주행 실증 및 서비스 기반의 기술개발 촉진을 위한 자율주행자동차 상용화 촉진에 관한 법률 시행과 미래자동차 산업 발전전략 및 미래자동차 확산 및 시장 선점 전략의 발표, 자율주행 Level 3 상용화를 위한 제도 마련 및 자율주행 Level 4 기술개발을 위한 가이드라인 발표를 통해 자동차 안전 정책의 기본 방향을 제시하고 있다.

한편 완전한 자율주행 기술이 상용화될 경우 차량 운행 중 승객의 자세는 현재 일반 자동차의 승객 자세와는 달리 다양하고 자유로운 승객의 상태로 예상할 수 있고 이에 따라 자동차 시트 위치와 배열의 변화 및 진보된 승객보호 기술이 요구된다. 승객을 감싸는 형태의 허그 에어백, 마주보는 승객을 고려하는 대면승객 보호 에어백, 릴렉스 착좌 승객을 보호하는 에어백 등에 다양한 승객보호기술 개발이 진행 중이다. 결국 자율주행자동차 내 탑승객의 자유도를 고려하여 착석 위치, 착좌 유형, 착좌 자세 등에 관한 좌석, 에어백, 안전띠의 종합적인 연구개발이 필요하다.

그러므로 자동차 주행 중 주행방향을 향하고 제한된 등받이 각도의 승객자세와는 달리 다양한 자세가 가능한 자율주행자동차 승객의 주행 중 자세/움직임 및 충돌사고 시 승객안전의 연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 자율주행자동차의 충돌사고 시 승객거동 연구 동향을 분석하였으며 차량 내 안전장치(좌석, 안전띠 등)의 유한요소모델을 구성하고 정면충돌용 더미모델을 적용하여 등받이 각도에 따른 승객거동해석을 통해 자율주행자동차 승객착좌 자세에 따른 승객거동분석의 기초연구를 수행하였다.

2. 자율주행자동차의 승객거동 연구 동향

정면충돌 사고 시 젖혀진 시트에 누운 승객의 자세는

승객 안전도 측면에서 매우 위험한 조건이나 자율주행자동차의 승객자세로는 일반적일 것으로 예상되고 있어 인체모델을 적용한 인체상해분석의 필요성이 커지고 있다. Richardson 등은 젖혀진 시트에 누운 자세의 사체(PMHS)를 착석시킨 정면충돌 Sled 실험(적용 가속도 30g)을 수행하여 승객의 생체역학적 반응과 상해를 분석하였다.⁽⁷⁾ 표준 성인 남성 체형의 사체 5구로 Sled 실험을 수행하였고 승객의 서브마린을 방지할 수 있는 단순화된 시트와 프리텐서너와 로드리미터 기능이 장착된 안전띠를 Fig. 1과 같이 적용하였다.⁽⁷⁾ 실험결과로 머리와 흉부 등의 변위와 가속도를 측정하였고 시트와 안전띠의 반력이 측정되었고 Sled 실험 후 사체 해부를 통해 승객의 상해를 평가

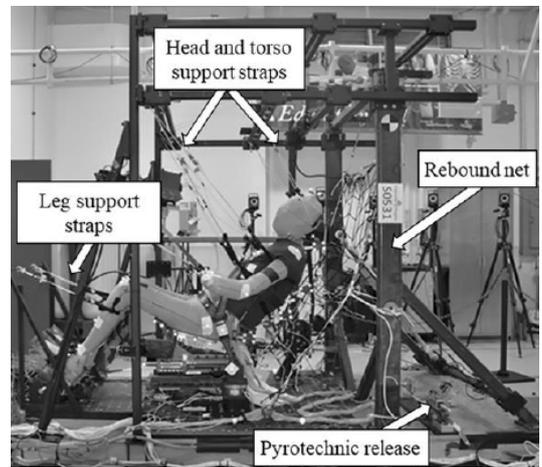


Fig. 1 Sled fixture for reclined occupant tests⁽⁷⁾

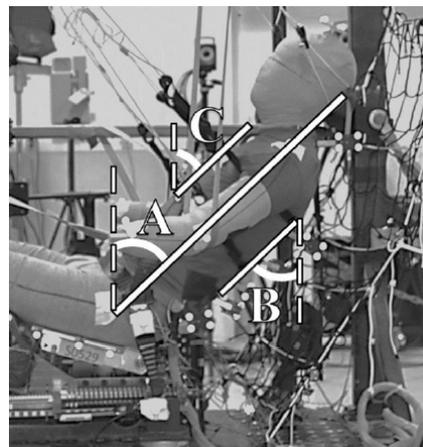


Fig. 2 Angles measured during the subject initial positioning⁽⁷⁾

하였다. 젖혀진 시트와 프리텐서너와 로드리미터가 작용한 시트벨트에 의해 정상적인 승객자세의 승객에 비해 골반과 척추, 흉부의 상해가 발생하는 결과가 보고되었다. 젖혀진 시트에 누운 승객을 모사하기 위한 승객의 초기 기울어진 자세는 Fig. 2와 같이 승객 H-Point 중심의 상반신 기울기(A)와 척추(B) 및 흉부(C)의 기울기로 정의했고 각각의 평균값은 Table 1과 같다.

Table 1 Gross torso angle values of initial subject positioning

Five PMHS	A: Torso Sagittal (deg)	B: Torso Posterior (deg)	C: Sternum (deg)
Mean±SD	46.5±1.12	55.8±2.39	50.6±8.44

승객의 초기 기울어진 자세를 세팅하기 위한 승객 H-Point 중심의 상반신 기울기는 현재 정면충돌시험에서 적용하고 있는 인체모형(Dummy)의 허용 기울기를 반영한 것으로 대표적인 정면충돌용 인체모형인 Hybrid-III와 THOR의 최대 상반신 기울기는 약 48 도이다.⁽⁷⁾

한편 컴퓨터 시뮬레이션의 해석적 접근방법을 적용하여 박지양 등은 자율주행자동차에서 비정상 착석상태로 운전 시 승객 상해도 비교를 수행하였다.⁽⁸⁾ 운전자의 좌석 위치 및 운전자의 착석 각도를 변수로 적용하여 정면충돌 시 더미의 상해 경향을 분석하였다.⁽⁸⁾ 박지양 등은 승객의 착석 자세를 77.5°, 90°, 102.5°, 115°의 경우로 고려하였고 안전띠의 프리텐서너나 로드리미터의 기능은 적용하지 않았으며 MBS(Multi body System) 기반의 충돌해석 프로그램인 MADYMO를 사용하였다.⁽⁸⁾

3. 승객보호장치의 유한요소모델 구성

자율주행자동차 승객착좌 자세에 따른 승객거동분석 연구를 수행하기 위하여 차량 내 안전장치(좌석, 안전띠 등)의 유한요소모델을 구성하고 자율주행자동차의 충돌 사고 시 승객거동 연구 동향을 반영하여 승객석의 구속장치와 정면충돌용 더미모델을 고려한 승객거동 유한요소 해석모델을 구성하였다.

시트-안전띠-승객의 모델은 10mm의 평균 요소 크기로 약 74,500 개의 절점과 74,100 개의 요소로 구성되었고, 강재요소를 적용한 단순화된 시트모델과 프리텐서너와 로드리미터 기능을 적용한 안전띠모델 그리고 50th%tile Hybrid-III 승객모델로 Fig. 3과 같이 시트-안전띠-승객의 모델을 구성하였다. 안전띠(Three point belt system)

모델은 Belt(Cable element), Load Limiter(LL), Emergency Locking Retractor(ELR), Pre-Tensioner(PT)의 네 구성요소로 모델링되었고 승객과 안전띠의 거동을 직관적으로 파악할 수 있도록 Fig. 4와 같이 안전띠 각 요소를 구분하여 모델링(Visual seatbelt model)하였다. 각 요소들은 Seatbelt case 내부에서 움직이도록 경계조건과 접촉을 정의하였고 각각의 안전띠 구성요소에는 스프링 요소와 센서 요소로 하중-변위의 관계 정의와 작용시점의 정의를 부여하여 충돌사고 시 프리텐서너와 로드리미터의 기능이 재현되도록 하였다.

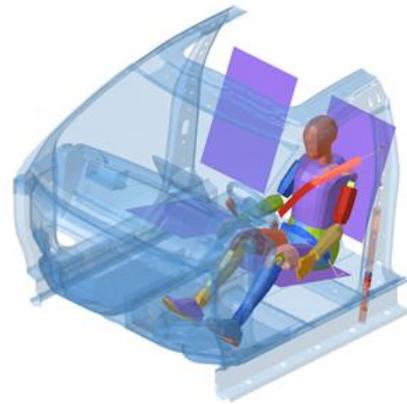


Fig. 3 Seat-Seatbelt-Occupant FE model for sled simulation

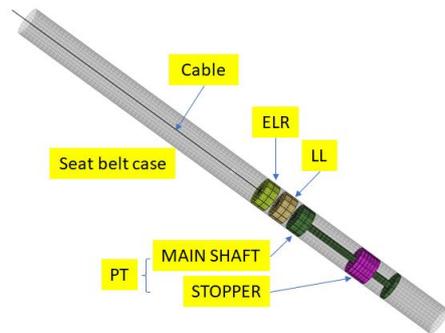


Fig. 4 Visual seatbelt model with ELR, LL and PT

Kang 등은 LS-DYNA 충돌해석 프로그램에 적용 가능한 안전띠 모델의 정확한 모델링을 위한 특성값(Properties)과 변수값(Parameters)에 대한 연구를 수행하고 Sled 시험결과와 해석모델을 비교하여 안전띠 Fabric 모델의 응력-변형률 선도, Buckle과 D-ring의 정적 및 동적 마찰 계수, 감쇠 계수, 접촉 정의를 위한 변수 등을 설정하였

다.⁽⁹⁾ 본 연구의 시트-안전띠-승객 모델의 구성을 위한 세부 요소모델의 변수값 정의를 위해 Kang 등의 연구결과를 적용하였고 각각의 특성값은 Fig. 5~Fig. 7에 나타내었고 Pre-tensioner의 최대 하중값은 3.5kN으로 설정하였다.

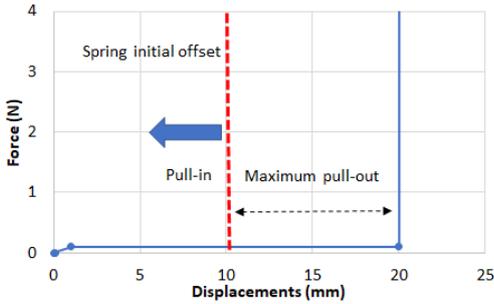


Fig. 5 Force-displacement characteristics of emergency locking retractor

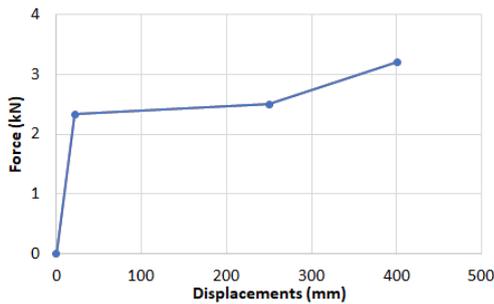


Fig. 6 Force-displacement characteristics of load limiter

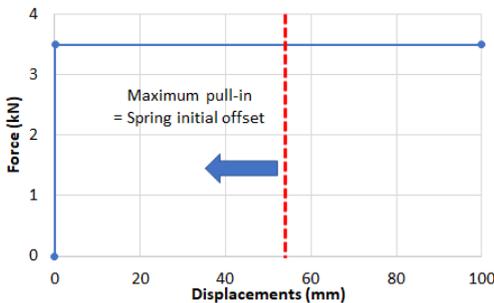


Fig. 7 Force-displacement characteristics of pretensioner

4. 승객보호장치 적용 승객거동해석

구성된 차량 내 안전장치 유한요소모델을 검증하기 위해 정면충돌 Sled 조건의 승객거동해석을 수행하였다.

LS-DYNA 충돌해석 프로그램을 사용하여 승객거동해석을 수행하였고, 개발된 안전장치 모델의 성능을 평가하기 위해 H. Y. Choi 등⁽¹⁰⁾의 연구에서 적용한 정면충돌 Sled 해석모델(Reference model)의 결과와 본 연구에서 개발된 차량 내 안전장치 유한요소모델(Visual seatbelt model)의 해석결과를 Fig. 8과 같이 비교하였다. 승객거동해석의 정면충돌 감가속도는 중형 승형차의 NHTSA 실차 시험(New Car Assessment Program, Frontal Barrier Impact Test)에서 측정된 시간에 따른 가속도 값을 적용하였고,⁽¹¹⁾ 정면충돌 Sled 해석시간은 110msec로 설정하였다.

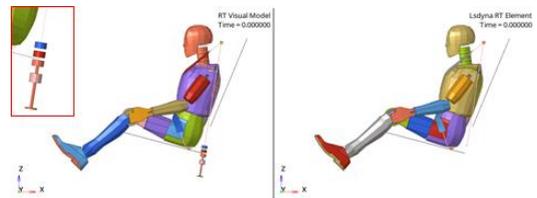


Fig. 8 Visual seatbelt model and reference model for frontal sled simulations

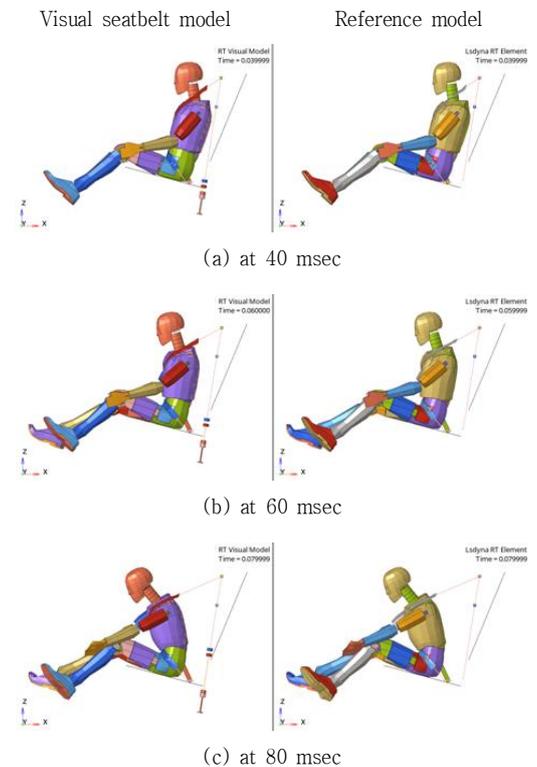


Fig. 9 Occupant behaviors during frontal sled simulations

Visual seatbelt model과 Reference model의 승객거동모습은 Fig. 9와 같으며 두 모델의 시간에 따른 승객거동이 매우 유사함을 보여주고 있다. 충돌해석 상용프로그램에서 제공하는, 시트벨트 Cable 모델과 일체형인, 기능적요소로 구성된 Reference model의 시트벨트 변형과는 달리 본 연구에서 개발한 Visual seatbelt model의 해석결과에서는 시트벨트의 주요 요소(Load Limiter, Emergency Locking Retractor, Pretensioner)의 거동이 시간에 따라 직관적으로 파악되었다. 한편 시트벨트에서 계산되는 시간에 따른 Pull out의 크기와 더미 거동에 따른 시트벨트 반력 값을 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 나타내었으며 두 Sled 해석결과의 유사성이 파악되었다. 그리고 더미의 머리와 흉부의 중심점에서 측정된 움직임을 비교하여 Fig. 12와 같이 두 해석모델 결과가 매우 유사함이 확인되었다.

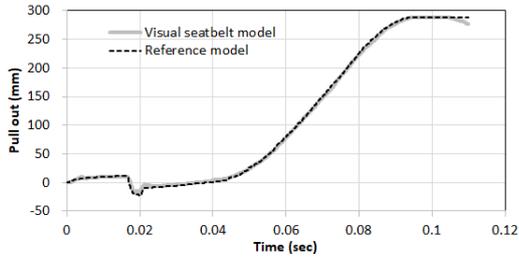


Fig. 10 Pull out responses of two frontal sled simulations

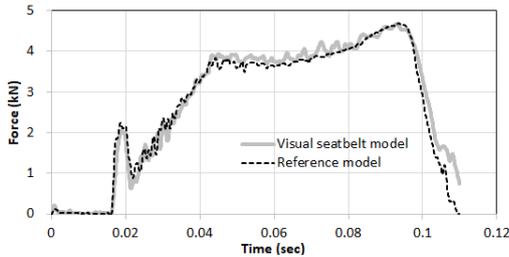


Fig. 11 Reaction force-time history comparison

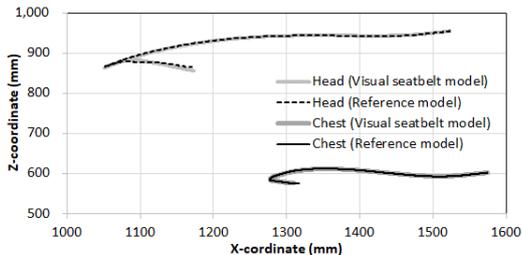


Fig. 12 Head and chest trajectories of two frontal sled simulations

5. 승객거동 분석

본 연구에서는 자율주행자동차 승객좌좌 자세에 따른 승객거동분석을 위한 기초연구로 승객좌석의 등받이 각도에 따른 승객거동을 분석하였다. 시트벨트 움직임은 직관적으로 파악할 수 있는 Visual seatbelt model을 적용하여 승객의 등받이 각도(초기 등받이 각도: 22.5 도)를 10도와 20도로 증가시키면서 Fig. 13과 같이 계산을 수행하였다. 등받이 각도를 증가시킨 승객모델의 거동은 Fig. 14

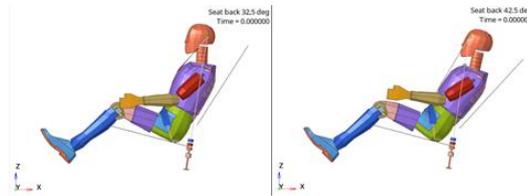


Fig. 13 Reclined dummy model setups for +10 deg. (left) and +20 deg. (right) seatback angles

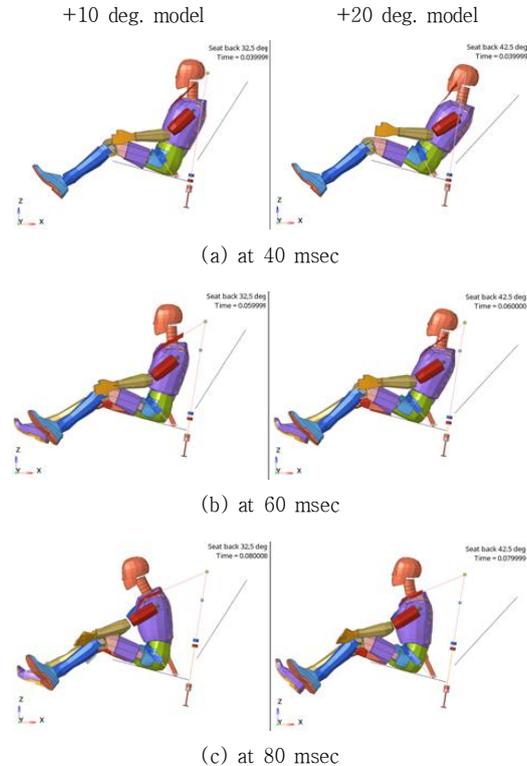


Fig. 14 Reclined occupant behaviors during frontal sled simulations

에 나타내었으며 등받이 각도에 따른 승객 상체의 움직임을 분석하였다.

시트 등받이 각도에 따른 승객 머리와 흉부의 거동을 Fig. 15에 나타내었고 등받이 각도가 증가함에 따라 승객 상체(머리와 흉부)의 움직임이 증가하는 것으로 계산되었다. 등받이 각도가 증가할수록 머리와 흉부의 X 방향 거동이 크게 증가하였고 최대 거동이 발생하는 위치는 세 모델에서 유사한 것으로 나타나 등받이 각도와와의 연관성은 분석되지 않았다. 승객거동 해석결과와 검토를 위해 등받이 각도 20도를 증가시킨 모델(등받이 각도: 42.5도)의 머리와 흉부에서 계산된 최대 변위값을 선행연구에서 보고된 시험결과와 비교한 결과를 Table 2에 나타내었다. 시험대상(PMHS vs. Hybrid-III)과 경계조건, 등받이 각도 등이 정확하게 동일하지는 않지만 머리와 흉부 최대 변위값의 유사성은 확인되었다. 또한 등받이 각도를 증가시킨 Sled 모델의 승객거동해석 결과를 바탕으로 등받이 각도에 따른 머리와 흉부의 최대 변위값의 상대적 비율을 계산하였고 Fig. 16에 나타내었다. 등받이 각도를 20도까지 증가시킨 조건에서 등받이 각도에 따른 머리의 최대 변위값의 상대적 비율은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으나 흉부의 경우 등받이 각도에 따른 최대 변위값 비율의 비선형성이 나타났고, 시트 등받이 각도와 최대 변위값의 관계식은 등받이 각도에 따른 승객 움직임 분석에 적용될 수 있다.

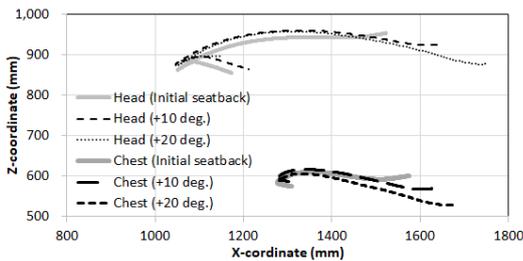


Fig. 15 Head and chest trajectory comparison among three different seatback angles

Table 2 Max. displacement comparison of head and chest

Max. displacement (mm)	Head	Chest
PMHS sled experiment ⁽⁷⁾ (46.5 deg.)	675*	440*
Hybrid-III sled simulation (42.5 deg.)	697	394

*: Mean values of five PMHS test data

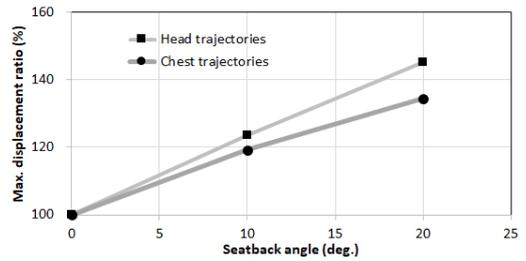


Fig. 16 Relationship between max. displacement ratio and seatback angles for head and chest trajectories

6. 결 론

다양한 승객의 자세가 가능한 자율주행자동차 승객의 충돌사고 시 안전도 연구의 필요성은 확대되고 있다. 본 연구에서는 자율주행자동차의 충돌사고 시 승객거동 및 상해 연구 동향을 분석하였으며 차량 내 안전정치의 유한요소모델을 구성하고 등받이 각도에 따른 승객거동해석을 통한 자율주행자동차 승객좌좌 자세에 따른 승객거동 분석의 기초연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 승객보호를 위한 안전장치인 안전띠 모델을 Belt, Load Limiter, Emergency Locking Retractor, Pretensioner의 네 구성요소로 각각 모델링하여 시트-안전띠-승객 모델을 구성하였고 승객과 안전띠의 거동을 직관적으로 파악할 수 있다.
- 2) 기존 연구에서 적용한 Sled 해석모델의 정면충돌 Sled 조건의 해석결과와 본 연구에서 개발한 시트-안전띠-승객 모델의 해석결과로 결과의 유사성을 확인하여 모델의 검증 과정을 도출하였다.
- 3) 시트 등받이 각도를 증가시킨 모델의 승객거동해석 수행으로 승객 머리와 흉부의 거동을 계산하여 시트 등받이 각도와 승객 상체의 거동과의 관계를 분석하여 다양한 승객자세에 따른 승객거동 연구의 기본연구 방법론을 도출하였다.

본 연구결과를 기반으로 승객의 상해치 연구, 자율주행자동차 전용 더미와 인체모델의 거동 연구 등이 추가적으로 수행될 것이며, 모델의 유효성과 신뢰도가 보고된 시트-안전띠-승객 모델은 승객과 안전띠의 움직임을 보다 직관적으로 파악할 수 있어 자율주행자동차 승객자세에 대한 승객 거동 및 안전도 연구에 다양하게 적용될 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21AMDP-C160637-01).

참고문헌

- (1) 박종록, 김한해, 2019, “자율주행기술”, KISTEP 기술동향브리프, 2019-16호, 한국과학기술기획평가원.
- (2) 통계청, 2020, “2020 고령자 통계”, 통계청 보도자료.
- (3) 최창호, 2016, “자율주행, 자동차산업의 빗장을 열다, 자율주행 동향 분석과 산업 활성화를 위한 시사점”, ICT 정책연구, 한국정보화진흥원.
- (4) 백장균, 2020, “자율주행차 국내의 개발현황”, 산은조사월보, 제771호, pp. 17~36.
- (5) 국토교통부, 2020, “세계 최초 부분자율주행차(레벨3) 안전기준 제정, 자동차로유지기능 탑재한 레벨3 자율차 출시·판매 가능”, 국토교통부 보도자료.
- (6) 국토교통부, 2019, “부분 자율주행시스템의 안전기준(제111조의3 관련)”, 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 [별표 27].
- (7) R. Richardson, J. Donlon, M. Jayathirtha, J. Forman, G. Shaw, B. Gepner and J. Kerrigan, 2020, “Kinematic and Injury Response of Reclined PMHS in Frontal Impacts”, Stapp Car Crash Journal, Vol. 64, 2020-22-0004, pp. 83~153.
- (8) 박지양, 윤영환, 2019, “자율주행자동차에서 비정상 착석상태로 운전 시 에어백 작동시간(TTF)에 따른 승객 상해도 비교”, 자동차안전학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 13~18.
- (9) S. Kang, C. Chen, S. Guha, M. Paladugu, M. S. Ramasamy, L. Gade and F. Zhu, 2018, “LS-DYNA[®] Belted Occupant Model”, 15th International LS-DYNA[®] Users Conference, June 10~12, pp. 1~11.
- (10) H. Y. Choi, J. Shin, C. J. Oh and J. H. Bae, 2017, “Occupant Injury Risk Analysis at NASS/CDS Database”, International Journal of Automotive Technology, Vol. 18, No. 5, pp. 851~860.
- (11) R. Schnorenberg, 2018, “Final Report of New Car Assessment Program Frontal Impact Testing of a 2018 Honda Accord 1.5T LX 4-Door Sedan, NHTSA No.: M20185300”, National Highway Traffic Safety Administration Report No. NCAP-MGA-2018-024.