

열차충돌 사고시 휠체어 탑승자의 충돌 특성 및 상해도 분석에 관한 연구

Characterisation of Crash Behavior and Injury for Wheelchair User in Train during Accidental Collision

함석우¹, 김경석², 전성식^{1,#}

Seok Woo Ham¹, Gyeong Seok Kim², and Seong Sik Cheon^{1,#}

¹ 공주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kongju National University)

² 공주대학교 건설환경공학과 (Department of Civil and Environment Engineering, Kongju National University)

Corresponding Author / E-mail: sscheon@kongju.ac.kr, TEL: +82-41-521-9262

ORCID: 0000-0002-9907-424X

KEYWORDS: Train collision (열차 충돌), Injury criteria (상해 지수), Mobility handicapped (교통약자)

Crash analyses was carried out to characterize crash behavior and injury of a wheelchair user in a train during collision based on SAFETRAIN PROJECT and AV/ST 9001, train safety regulations. There is no restraint system such as seat belt or air-bag in train, a wheelchair user is normally injured by bumping against wall. Crash behavior and injury of a wheelchair user was evaluated with respect to the distance (D_w) of the wheelchair from the wall and the wall foam thickness (t_f). Additional crash analysis for a wheelchair user with seat belt was also performed in order to check the significance of the seat belt effect during crash.

Manuscript received: October 2, 2018 / Revised: December 9, 2018 / Accepted: February 16, 2019

1. 서론

평균 수명의 증가로 고령화 사회가 진행됨에 따라 교통약자(노인, 장애인 등)가 점차 증대할 것으로 사료된다.¹ 이에 대비하여 국토교통부는 2006년부터 교통약자의 이동편의성을 증진시키기 위하여 관련법을 새롭게 개정하고 있다.²

장거리 이동이 가능한 대중교통은 열차, 고속버스, 여객기 등이 있다. 하지만 현재 국내엔 휠체어를 탄 채로 탑승 가능한 대중교통은 열차에 한정되어 있다. 국내에 운용되고 있는 열차는 수동 휠체어 사용자의 경우, 휠체어에서 좌석으로 옮겨 타고, 전동 휠체어 사용자의 경우, 전동 휠체어를 전용 객차의 바닥 고정 부분에 Tie-Down 방식으로 고정하여 탑승하고 있다.²

유럽연합에서는 SAFETRAIN PROJECT,³ SAFEINTERIORS⁴ 등 열차운행의 안전을 높이기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

SAFETRAIN PROJECT에서는 유럽 열차 충돌사고 통계자료를 바탕으로 상해도를 분석하여 사고 시나리오를 정의하였다. 이를 바탕으로 시험 평가 방법, 탑승자 상해도 가이드라인 등을 제시하였다. SAFEINTERIORS에서는 열차상해 기준과 측정 및 시험, 내장 설계 및 검증, 규제 제안 등을 하였다. 영국의 철도 운영자협회에서는 SAFETRAIN PROJECT의 연구결과를 바탕으로 AV/ST 9001 (Vehicle Interior Crashworthiness)⁵ 규정을 만들었고, 이를 통하여 열차 충돌 시 승객의 안전을 보호하기 위해 노력하고 있다. 그럼에도 불구하고, 충돌사고 시 열차 내에서 휠체어를 탑승한 교통약자들의 충돌 특성 및 상해도에 대한 연구는 활발하게 진행되지 않았다.

국토교통부 통계에 따르면 최근 10년 동안의 열차 충돌사고는 전체 사고의 17.2%로 사고가 발생하며, 열차 내부시설물과 2차 충돌로 인해 약 7%가 사망하고 57%가 중상을 입게 된다고 밝히고 있다.^{6,7} 이는 자동차와 달리 승객 고정 안전벨트를 사용

하지 않기에 2차 충돌이 빈번히 발생하기 때문이다. 따라서, 교통약자들에 대한 충돌 특성과 상해도에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.⁸ 충돌 사고 시, 일반인들의 경우, 앞좌석과의 2차 충돌로, 앞좌석의 쿠션 부분이 충돌 에너지를 흡수하여 상해도를 줄여주는 데 비해, 휠체어석의 경우, 좌석 배치 특성상 벽면을 마주하게 되어 있어 벽면과 2차 충돌이 일어나게 되며, 이는 치명적일 것으로 여겨지고 있다.

본 연구에서는 유한요소해석을 통하여, SAFETRAIN 및 AV/ST 9001에 근거한 열차 정면 충돌 사고 시, 전동휠체어 탑승자의 충돌 특성 및 상해도의 변화에 대해 고찰해 보았다.

이를 위하여, 유한요소해석을 통하여 정면 충돌 사고시, 벽면까지의 거리 및 벽면에 부착된 폼(Foam)의 두께에 따른 전동휠체어 탑승객의 두부상해도, 목 상해도, 흉부 상해도, 다리 상해도에 대해 살펴보았다.

2. 연구 방법

2.1 인체 모델 및 휠체어 모델링

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하였으며, 휠체어 탑승자 해석용 더미는 LSTC (Livermore Software Technology Corporation)로부터 제공된 50th Percentile Male Hybrid III형 더미모델을 사용하였다. Fig. 1에서는 슬레드 해석을 위해 준비된, 휠체어에 탑승한 더미의 유한요소해석 모델을 보여주고 있다.

휠체어 모델링에 있어서 WC-19에서 정의하는 시험용 휠체어(Surrogate Wheelchair)를 모델링 하였다. 휠체어 모델의 타이어 내부에는 공기압이 2.72기압이 가해졌으며, 바퀴축은 Revolute Joint로 정의되어 회전할 수 있도록 하였다. 그리고 인체모델 및 휠체어 모델에는 중력가속도가 적용되었다. 휠체어의 고정 장치에는 Tie-Down으로 최적화된 값⁹이 사용되었다.

2.2 슬레드 모델링 및 변수

슬레드 모델링에 있어서 열차의 전동 휠체어석을 구현하기 위하여 Fig. 2와 같이 슬레드와 벽면을 함께 모델링하였다. 벽면은 벽 프레임과 벽에 부착된 폼으로 구성되어 있다. 벽 프레임은 Rigid로 모델링 하였고 폼은 상대밀도가 0.01인 폴리우레탄을 사용하였다. 각 재료의 기계적 물성은 Table 1에 나타나 있다. Rigid는 SAPH440 Type의 철강재료¹⁰를 근거로 하였고, 폼은 NHTSA¹¹에서 제공한 물성치로 근거하였다.

휠체어 전방 고정장치와 벽면 사이의 거리는 Fig. 2에 보이는 것과 같이 D_w 로 나타냈다. 현재 국내 열차에서 운용되고 있는 전동 휠체어석의 D_w 는 0.5 m이며, 이를 기준으로 0.5, 1.5, 2, 4 m로 변수를 설정하여 벽 프레임만 있는 상태로 유한요소해석을 진행하였다.

벽면에 부착된 폼 두께는 Fig. 2에 보이는 것과 같이 t_f 로 나타냈다. 벽면의 두께는 일반좌석과 비슷한 두께인 100 mm를 기준

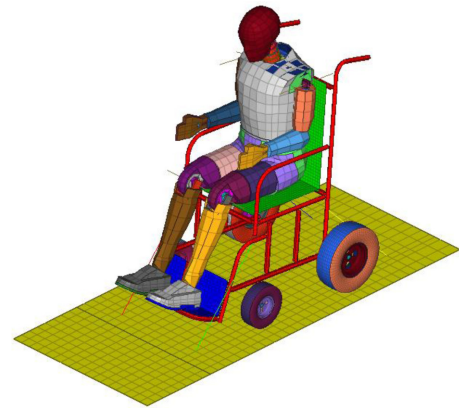


Fig. 1 FE model of sled analysis

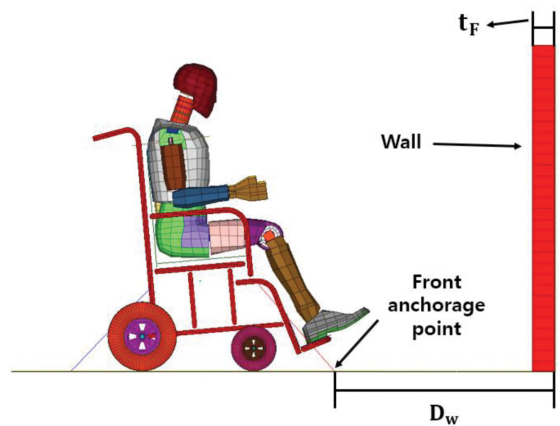


Fig. 2 FE Model with Sled and wall structure

Table 1 Mechanical properties

| Materials | SAPH440 | Polyurethane |
|------------------------------|---------------------|--------------|
| Young's modulus [MPa] | 210×10 ³ | 4.16 |
| Poisson's ratio | 0.3 | - |
| Density [kg/m ³] | 7850 | 101 |

으로 10, 50, 100, 200 mm로 변수를 설정하였다. 휠체어 전방 고정장치와 벽면 사이의 거리 D_w 는 앞서 유한요소 해석을 진행한 거리 변수 D_w 중 인체 상해도 특성이 좋은 D_w 로 고정하였다.

열차의 전동 휠체어석에는 승객 고정 안전벨트가 없다. 이와 안전벨트가 있을 때를 비교하기 위하여 3점식 고정 벨트를 적용하여 유한요소해석을 진행하였다. 3점식 고정벨트는 현재 특별 교통수단에 적용된 고정벨트로 적용하였다.¹²

2.3 감가속도 정의 및 해석 조건

SAFETRAIN PROJECT에서 내부시설물과 2차 충돌 시, 더미의 상해도를 분석할 목적으로 Fig. 3에서 나타난 것처럼 감가속도 펄스의 상한(Upper Limit)과 하한(Lower Limit)을 정의하였다. 감가속도 펄스의 상한과 하한은 실제 열차의 충돌테스트에서 계측된 펄스와 SAFETRAIN PROJECT에서 개발된 충돌 시나리오를 고려한 것이다. 감가속도 펄스로 인한 슬레드의 속도

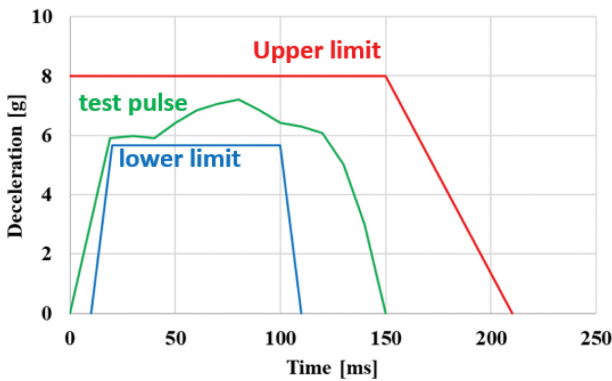


Fig. 3 Deceleration vs time plot from SAFETRAIN PROJECT & AV/ST9001

변화는 30 km/h가 되어야한다.

본 연구에서는 초기 속도 30 km/h에서 Fig. 3에 나타나있는 테스트 펄스¹³를 사용하여 슬레드가 완전히 멈출 때까지 해석을 진행하였다. 이 테스트 펄스는 새마을호 의자의 슬레드 시험에서 계측된 감가속도 펄스이다.

2.4 탑승자 상해도 분석

열차 정면 충돌 사고시, 휠체어 탑승자에 대한 상해도 기준이 존재하지 않아 일반 열차승객에 대한 상해 기준을 근거하여 분석하였다.

탑승자의 머리 상해도는 두부상해 기준(HIC)과 최대 가속도, 목 상해도는 목의 인장 모멘트, 흉부 상해도는 압축량, 그리고 다리 상해도는 대퇴골 압축력으로 분석되었다.

두부상해 기준(HIC)은 두 시간($t_1 < t_2$) 사이, 머리중심에서 발생하는 가속도 (a)의 적분 값으로, 식(1)과 같다.¹⁴

$$HIC = \text{Max} \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\} \quad (1)$$

3. 해석 결과

각 변수에 대한 결과는 Tables 2와 3에 두부상해 기준, 목 상해도, 다리 상해도로 나타내었다.

Fig. 4는 슬레드 해석에서 나타난 더미의 거동을 보여주고 있다. 승객을 고정하는 구속 시스템이 존재하지 않아서 더미가 진동 휠체어에서 이탈한 후 벽면에 충돌하는 것을 확인할 수 있었다.

벽면 사이의 거리 D_w 가 0.5, 1.5, 2.0 m일 때, 더미의 거동은 무릎, 머리, 흉부 순으로 벽과의 충돌이 일어났고, 4.0 m에서는 머리와의 충돌이 먼저 일어났다. 벽면에 부착된 폼의 두께 t_f 대하여 모든 변수들이 무릎, 머리, 흉부 순으로 벽과의 충돌이 일어났다. 이를 통해 더미의 거동 변화는 D_w 의 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2 Results according to distance

| D_w [m] | Limit* | 0.5 | 1.5 | 2 | 4 |
|------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| HIC [s] | <500 | 50393 | 64109 | 35247 | 68167 |
| Head peak acc. [g] | <80 | 792 | 1027 | 1332 | 1437 |
| Neck extension bending moment [Nm] | <57 | 543 | 605 | 410 | 1238 |
| Thorax compression [mm] | <50 | 14 | 2.5 | 2.2 | 1.5 |
| Femur compression force [kN] | <7.58 | Left | | | |
| | | 14.8 | 12.2 | 13.5 | 15.6 |
| | | Right | | | |
| | | 16.1 | 16.5 | 19.0 | 18.4 |

*SAFETRAIN & AV/ST9001

Table 3 Results according to foam thickness

| t_f [mm] | 10 | 50 | 100 | 200 | |
|------------------------------------|--------|-------|------|-------|-----|
| HIC [s] | 165502 | 58843 | 5549 | 53487 | |
| Head peak acc. [g] | 1318 | 747 | 530 | 817 | |
| Neck extension bending moment [Nm] | 173 | 251 | 238 | 214.9 | |
| Thorax compression [mm] | 3.5 | 5.2 | 2.7 | 3.7 | |
| Femur compression force [kN] | Left | | | | |
| | 12.8 | 8.3 | 10.0 | 5.7 | |
| | | Right | | | |
| | | 14.9 | 11.3 | 8.6 | 6.7 |

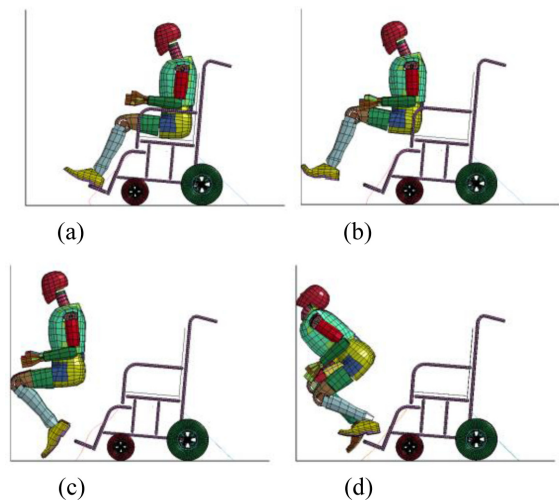


Fig. 4 Dummy behavior of when D_w is 0.5 m : (a) 50 ms, (b) 100 ms, (c) 150 ms, and (d) 200 ms

Table 2는 전방 고정장치와 벽면 사이의 거리 D_w 에 따라 더미의 인체 상해도를 분석한 것이다. D_w 중 종합적으로 상해도가 가장 낮게 나온 2 m인 것으로 나타났다. 전체적으로 인체 상해도가 상해도 기준보다 높게 나왔다.

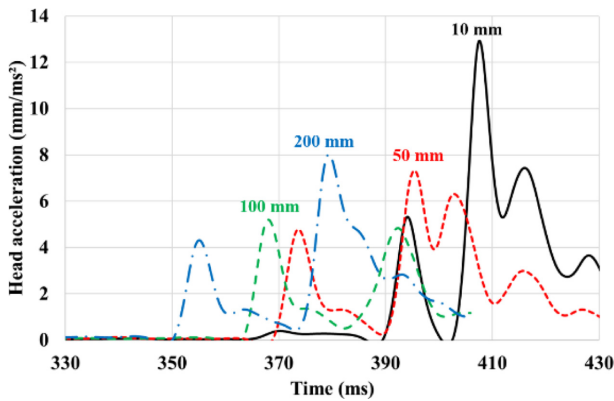


Fig. 5 Head acceleration vs time plot according to t_F

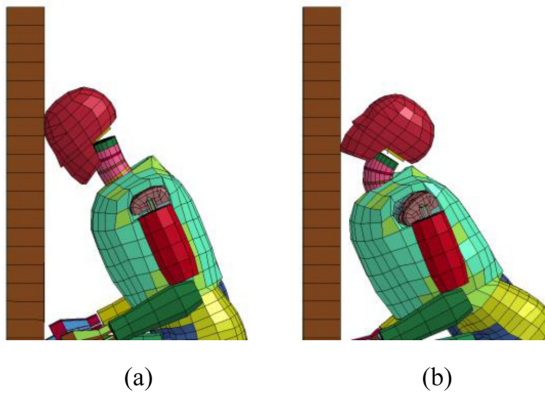


Fig. 6 Dummy's head behavior when D_W is 2 m, t_F is 100 mm : (a) the first collision with wall of foam, (b) thrown back by the wall of foam

Table 3은 벽면에 부착된 폼 두께 t_F 에 따른 더미의 인체 상해도를 분석한 것이다. 앞서 진행한 거리 D_W 는 인체 상해도가 가장 낮은 2 m로 진행하였다. 폼의 두께가 증가할수록 목 상해도, 다리 상해도가 더 낮아지는 경향을 보였으나, 두부 상해도의 경우 200 mm보다 100 mm의 경우가 더 낮았다.

Figs. 5와 6에 나타난 것과 같이 두부가 벽 폼과의 충돌이 일어난 후 벽 폼에 의해 튕겨져 나오는 것을 확인할 수 있었다. 또, Fig. 5에서 모든 t_F 에서 두부가 벽 폼과 충돌한 시간(평균 10 ms)보다 폼에 의해 튕겨져 나오는 시간(평균 22 ms)이 더 길게 나타났음을 확인할 수 있었다. 폼 두께가 10, 50, 200 mm일 경우 2차 충돌 시의 두부 가속도가 높았으며, 100 mm의 경우 1차 충돌 시의 두부 가속도가 높았기 때문에 두부 상해도가 낮은 값을 보였다. 종합적으로 보았을 경우, 100 mm 폼을 사용하였을 때가 인체 상해도가 낮았지만 벽면에 폼을 부착했음에도 불구하고 상해도 기준보다 높았다.

Table 4는 안전벨트가 적용되었을 경우, 더미의 인체 상해도를 분석한 것이다. HIC, 두부 최고 가속도, 목 인장 모멘트, 흉부 압축 변형량, 대퇴부 압축력 모두 상해도 기준을 만족하였다. 이는 안전벨트에 의하여 벽과의 충돌이 일어나지 않았기 때문이다.

Table 4 Results of using 3point seat belt

| Criteria | D_W : 2 m t_F : 100 mm |
|------------------------------------|-------------------------------|
| HIC [s] | 31 |
| Head peak acceleration [g] | 16.5 |
| Neck extension bending moment [Nm] | 28.4 |
| Thorax compression [mm] | 45 |
| Femur compression force [kN] | Left |
| | 1.42 |
| | Right |
| | 1.37 |

하지만 안전벨트가 더미의 흉부를 압박하여 안전벨트가 없을 때보다 흉부 압축량이 더 높았다.

4. 결론

본 연구는 유한요소해석을 통하여 휠체어의 전방 고정장치와 벽면 사이의 거리 D_W 및 벽면에 부착된 폼 두께 t_F 에 따른 인체 상해도의 특성을 분석하였고, 안전벨트를 사용하였을 경우와 비교하였다. 결과는 다음과 같다.

(1) D_W 가 증가할수록 두부 최고 가속도가 높아지는 경향을 보였고, 흉부 압축량이 감소하는 경향을 보였다.

(2) t_F 가 증가할수록 두부 상해도는 감소하다가 증가하는 경향을 보였고, 두부 최고 가속도 역시 같은 경향으로 나타났다. t_F 의 변화에 따라 인체 상해도는 일정한 함수관계로 나타나지 않았다. 하지만 100 mm의 경우, 다른 케이스들보다 인체 상해도가 낮게 나왔음을 확인할 수 있었다.

(3) 벽에 폼이 존재할 경우, 두부와 벽 폼과의 충돌 후, 벽 폼에 의해 두부가 튕겨져 나오는 것을 확인할 수 있었는데, t_F 가 100 mm인 경우를 제외하면 벽 폼에 의해 두부가 튕겨져 나올 때의 두부 가속도가 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

(4) 정면 충돌 사고 시, 휠체어에 탑승한 더미는 휠체어에서 이탈한 후 다리, 머리, 흉부 순으로 벽면에 충돌하는 것을 확인할 수 있었다. 머리, 목, 다리의 상해도는 벽면에 직접적인 충돌로 크게 영향을 받기 때문에 상해도 기준을 만족시키지 못한다. 반면, 흉부의 상해도는 벽면에 크게 영향을 받지 않아 상해도 기준을 만족시키는 것을 확인할 수 있었다. 벽면과의 충돌을 방지할 수 있는 3점식 승객 고정 안전벨트를 사용했을 경우 상해도 기준을 만족시킨다.

위 결과들을 미루어 보아 현재 사용되고 있는 전동 휠체어식은 정면 충돌 사고 시, 상해도 기준을 만족시키지 못하며, 3점식 승객 고정벨트와 같은 안전장치가 추가적으로 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 국토교통부, 교통물류연구사업(교통수단내 휠체어(유모차) 수용을 위한 표준 레이아웃 개발, 18TLRP-B103927-04)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Yeo, G. S., "A Plan on the Legislative Reform of Housing Welfare for the Aged in an Aging Society," Journal of the Seoul Law Review, Vol. 19, No. 2, pp. 391-426, 2011.
2. The National Law Information Center, "Infrastructure and Transport, the Mobility," <http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=202310&efYd=20190222#0000> (Accessed 24 JUN 2019)
3. Bombardier Transportation, "SAFETRAIN Project Results and Rail Passive Safety Harmonisation," <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/218.pdf> (Accessed 24 JUN 2019)
4. International Union of Railways, "SAFEINTERIORS - SAFETRAINPROJECT - Train Crashworthiness for Europe Final Report," <http://www.eurailsafe.net/projects.php?id=2> (Accessed 27 JUN 2019)
5. Association of Train Operating Company, "Vehicle Interior Crashworthiness," <https://www.rssb.co.uk/rgs/oodocs/AVST9001%20Iss%201.pdf> (Accessed 24 JUN 2019)
6. Korean Statistical Information Service, "Railway Accident Status," http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLTM_874&conn_path=I2 (Accessed 24 JUN 2019)
7. Tyrell, D., Severson, L., and Marquis, B., "Crashworthiness of Passenger Trains: Safety of High Speed Ground Transportation Systems," Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Office of Research and Development, pp. 12-98, 1998.
8. Van Roosmalen, L., Bertocci, G. E., Ha, D. R., and Karg, P., "Wheelchair Integrated Occupant Restraints: Feasibility in Frontal Impact," Medical Engineering and Physics, Vol. 23, No. 10, pp. 687-698, 2001.
9. Oh, H. S., Kim, G. S., and Cheon, S. S., "A Study on the Analysis of Human Injury According to the Fixed Position of the Tie-Down Type Wheelchair," Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 19, No. 4, pp. 478-483, 2017.
10. Oh, H. S., Jeong, C. H., and Cheon, S. S., "Evaluation on Structural Characteristics of a Lightweight Automotive Seat Frame Depending upon each Thickness of Material Types," Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 18, No. 3, pp. 344-348, 2016.
11. National Highway Traffic Safety Administration, "Crash Simulation Vehicle Models," <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models> (Accessed 13 JUN 2019)
12. Oh, H. S., "Analytical Study on the Motion Criteria According to the Wheelchair Fixing Belt Angle," M.Sc. Thesis, Kongju National University, 2018.
13. Jung, H. S., Kwon, T. S., Ahn, I. J., and Jeon, J. h., "An Occupant Safety Test for Saemaeul-Ho Seats Based on Europe Train Interior Safety Standard," Proc. of Korean Society of Automotive Engineers Spring Conference, pp. 1097-1102, 2008.
14. Yun, Y. W. and Park, G. J., "An Optimal Design of the Curtain Airbag System Using the Response Surface Method," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 37, No. 1, pp. 129-135, 2013.



Seok Woo Ham

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kongju National University. His research interest is Mechanical design.

E-mail: wooya@smail.kongju.ac.kr



Gyeong Seok Kim

Professor in the Department of Civil & Environment Engineering, Kongju National University. His research interest is Urban and Transportation Planning, ITS.

E-mail: gskim23@kongju.ac.kr



Seong Sik Cheon

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kongju National University. His research interest is Mechanical design.

E-mail: sscheon@kongju.ac.kr