

편이자세 탑승자의 정면충돌유형에 따른 상해특성 평가 연구

인 정 민 · 마 재 홍 · 김 홍 익 · 김 시 우

자동차안전연구원

Analysis Study on Injury Characteristic of Occupants with the Reclined Posture According to Various Frontal Crash Modes

Jeongmin In · Jaehong Ma · Hongik Kim · Siwoo Kim

Vehicle Safety Research, Korea Transportation Safety Authority, Korea Transportation Safety Authority, 200 Samjon-ro Songsan-myun Hwaseong-si Gyeonggi-do Korea

(Received 23 October 2024 / Revised 5 December 2024 / Accepted 16 December 2024)

Abstract : The risk of incurring serious injury in car crash accidents for reclined posture occupants has been well documented through both actual crash accident data and research. With the recent entry of autonomous vehicles in the market and the increasing level of autonomous driving features, the possibility of having reclined occupants is expected to increase, particularly in the front passenger seat. Therefore, there is an urgent need to improve the crashworthiness of front passenger occupants in direct car collisions, as front-seat passengers are particularly vulnerable in reclined positions. Test methods include the evaluation of the possibility of severe injury and injury mechanisms for the front-seat passenger on a fully reclined(50 degrees) posture in a representative direct crash scenario in an autonomous vehicle and in traditional direct crash assessment types. The evaluation results indicated that the head, neck, chest, and lumbar spine of the front-seat passenger in a reclined posture suffered more severe injuries than those in an upright posture, regardless of the direct collision scenarios. It was also found that the higher the severity of the crash, the more serious would be the head, neck, chest, and lumbar injuries. Except for chest injuries, the injury occurrence mechanisms in the reclined posture are similar, regardless of the type of direct collision. Thus, it was considered that the 56 km/h full frontal crash test mode to a rigid barrier, which is the most severe crash type among frontal crash types, could cover occupant safety in a reclined posture compared to other direct collision scenarios. The results obtained through this study can be utilized as reference data in developing new crash evaluation methods and in improving crash restraint systems to enhance safety to a reclined posture passenger in the event of a direct collision.

Key words : Reclined posture occupant(편이자세 탑승자), Upright posture(편이자세), Crash severity(충돌가혹도), Frontal crash types(정면충돌 유형), 56 km/h full frontal crash test mode to rigid barrier(56 km/h 고정벽 정면충돌)

1. 서론

국내 자동차안전기준(KMVSS) 및 자동차안전도평가(KNCAP)는 실도로에서의 충돌사고를 반영할 수 있도록 탑승객 유형 확대(남성에서 여성 또는 어린이 탑승자까지 확대)¹⁾ 및 자동차안전도평가에서는 신규 충돌시험모드 신설(차대차상호충돌평가 신설¹⁾)되고, 인체상해를 평가하는 인체모형 등은 더욱 생체충실도가 향상되었다.

그럼에도 불구하고, 충돌시험조건 중 탑승객의 자세는 몸통각도가 약 19 ~ 25도 사이의 정상좌좌(Upright position) 조건만으로 평가하고 있다. 물론 많은 탑승객은 정상좌좌로 탑승비율이 높겠지만, 실제 충돌사고 발생 시에는 제작사가 제시하는 정상좌좌보다 등받이를 뒤로 젖힌 조건에서 착석한 편이자세(Reclined posture) 탑승자의 상해가 정상좌좌보다 중상해 위험성이 더 높다는

*Corresponding author, E-mail: ijm2000@kotsa.or.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

것은 실제 도로에서의 교통사고 분석데이터^{2,4)} 및 많은 실험적 연구^{5,7)}를 통하여 확인되었다. 앞으로 다가올 자율주행차 시대에는 탑승객이 편이자세를 지금보다 더 선호할 것^{8,9)}이다. 이에 따라 편이자세 탑승자의 충돌안전성을 평가할 수 있는 신규 평가 개발을 마련하여, 자동차 및 자동차부품 제작사에서 충돌 시 편이자세 탑승자의 충돌안전성을 향상시킬 수 있는 충돌구속장치(에어백, 좌석안전띠 및 좌석 등) 개발을 유도하여야 한다.

앞에서 언급하였듯이 이미 많은 국내외 학술연구 등에서 편이자세 탑승자에 중상해 위험성에 대한 연구를 통하여 머리 및 목 상해, Submarining 등에 따른 복부상해와 요추상해 등과 관련한 충돌모의시험(Sled) 및 해석시험(Virtual test)이 대부분^{10,11)}이고 충돌시험모드 역시도 고정벽정면충돌의 충돌펄스를 대부분 활용하였다. 하지만 실제 정면충돌사고는 다양한 정면충돌 유형에서 발생¹²⁾할 수 있고 인체상해 특성 역시 충돌유형에 따라 차이가 있을 수 있기 때문에 이에 따라 편이자세 탑승자에 대한 자동차의 충돌안전성 개발에 대한 접근방법도 다를 수 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 정면충돌유형에 대한 실차를 사용한 평가시험을 통하여 인체상해 발생 특성 및 상해 심각도 등을 분석하여 향후 자율주행차 뿐만 아니라 현재도 동승석 등에는 편이자세로 착석한 탑승자의 비중이 높기 때문에 일반적인 범용차량까지도 편이자세 탑승자의 충돌안전성을 향상시킬 수 있는 충돌평가방법 개발에 활용하고자 한다.

2. 시험방법(정면 충돌평가모드 구성 등)

본 연구 평가시험모드는 연구기간과 비용의 한계 등으로 최소한의 시험차량(1차종 4대)으로 시험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 확인하고자 하는 주요 내용은 편이자세 탑승자의 다양한 정면충돌유형에서의 상해특성을 확인하는 것이다.

본 연구는 기존에 대부분의 탑승객 편이자세에서의 충돌안전성평가연구 방법인 해석평가 또는 충돌모의시험(Sled)이 아닌 실차 충돌시험(Full scale crash test)방법으로 수행하고자 한다.

시험대상 차량은 탑승객이 편이자세에 대한 선호도가 높을 가능성이 있는 자율주행기능이 장착된 자동차 유형과 유사할 수 있는 전기차로 평가대상 차종을 고려하였다. 이에 따라 국내에서 판매되는 대표적인 중형전기차량으로 Table 1에 명시된 시험차종으로 선택하였다.

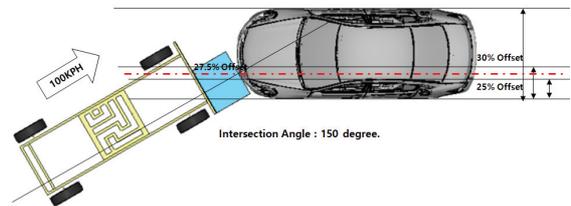
정면충돌시험모드는 Photo 1과 같이 크게 3개의 충돌유형을 수행하였다. 본 평가 연구의 첫번째 정면충돌시험 유형은 ‘자율주행기술개발혁신사업, 주행 및 충돌상

황 대응 안전성 평가기술 개발’ 연구로 도출된 자율주행차의 대표 충돌시험모드¹³⁾를 반영한 복미 신경사충돌시험과 유사한 경사 충돌시험모드(1,400 kg 대항차로 50% Offset 150도 경사 100 km/h 충돌시험 : Case 1)이다. 두번째 정면충돌시험 유형은 KNCAP의 차대차 충돌시험모드(56 km/h 1,400 kg 대항차와 차량 50% Offset 상호충돌 시험 : Case 2)이다. 세번째 충돌시험모드는 전통적인 정면충돌시험모드인 KNCAP의 56 km/h 고정벽정면 충돌시험모드(Case 3)이다.

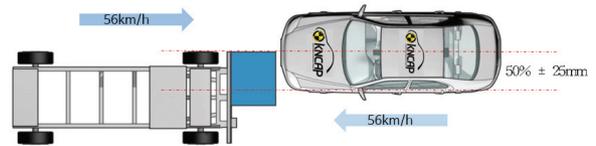
평가시험은 현재 자율주행차가 아닌 차량에서도 편이자세 착석이 가능할 수 있는 동승석 착석 탑승자를 대상으로 고려하였다. 또한 향후 운전석 역시도 완전한 편이자세가 가능한 자율주행차를 검토하더라도 운전대(Steering wheel)가 없거나 편이자세 조건에서는 필요하

Table 1 Specifications of test vehicle

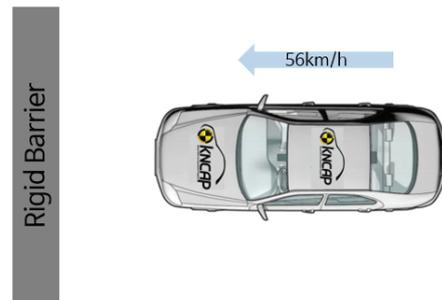
Vehicle type	SUV(EV)	Curb weight	1975 kg
Crash restraint	Front/Side/Curtain Airbag, PT/LL of seat-belt		



Case 1) 150° 50% offset vehicle crash by 100 km/h trolley



Case 2) 56 km/h 50% offset Car-to-1,400 kg trolley



Case 3) 56 km/h full frontal crash test

Photo. 1 Various crash test mode conducting this research

지 않을 가능성이 높아 동승석의 내부구조와 유사할 것으로 판단되어 향후 자율주행기능 Level 4 이상의 자율주행차의 운전석 등도 연구범위로 고려될 수 있다.

동승석 편이자세 탑승자의 정면충돌평가에는 신 정면충돌 성인남성 인체모형(THOR 50M)을 사용하였다. 완전한 편이자세의 몸통각도는 Photo 2와 같이 인체모형의 착석기준점을 통과하는 지면에 수직인 평면으로부터 몸통의 어깨 볼트 중심점까지의 연결된 각도로 편이자세



Photo. 2 Measuring method of the reclined thorax angle



Remove the head restraint due to pushing the head by head restraint



No contact between femur and seat-cushion

Photo. 3 Different seating characteristic between human and dummy

기울기를 도출하였다. 완전한 편이자세 평가 연구결과 등에서 대표적으로 적용하는 몸통각도^{14,15)}인 50 ~ 51도로 적용하였다.

인체모형의 구조적 특성¹⁶⁾으로 완전한 편이자세(Full reclined)를 완벽하게 반영할 수는 없다. 최대한 완전한 편이자세 조건이 가능하도록 몸통을 젖힘자세로 하기 위하여 인체모형(THOR 50M)의 척추구조를 자동차안전도평가(KNCAP)의 차대차 상호충돌안전성평가에서 사용하는 굽힘자세 조건(9°, Sloched)이 아닌 젖힘자세 조건(-9°, Erected)으로 수행하였다. 그럼에도 불구하고, 실제 사람이 착석한 조건과 일부 다른 특성이 나타났다. 첫 번째로는 완전한 편이자세 착석 시 머리를 머리지지대에 접촉하도록 할 경우 몸통 상부(어깨) 부위가 과도하게 좌석등받이로부터 간격이 벌어지는 것을 확인하였다. 반대로 몸통 상부(어깨) 부위를 좌석등받이에 접촉시킬 경우 머리지지대로 인하여 머리가 전방으로 굽혀지는 현상이 발생하여 머리와 몸통 중에 몸통을 좌석등받이에 접촉시키는 것을 우선적으로 고려하여 Photo 3과 같이 머리를 머리지지대에서 제거하고 평가를 수행하였다. 두 번째로는 허벅지 부위 역시 실제 사람의 편이자세에서의 착석조건과 다르게 경직된 인체모형의 골반 및 허벅지 구조 등으로 인체모형의 허벅지가 완벽하게 좌석쿠션에 접촉하지 못하고 무릎에 가까운 허벅지 부위가 좌석시트에 접촉하지 못하는 조건으로 수행할 수밖에 없었다.

서두에 언급한 본 평가 연구의 목적을 고려할 때 앞에 3가지 정면충돌시험모드는 정상착좌와 편이자세를 각각 수행할 필요가 있다. 하지만 제한된 시험차량 대수로 인하여 Case 1의 정면충돌시험유형인 100 km/h 경사부 분정면충돌에서만 몸통각도가 21도를 반영한 정상착좌와 완전 편이자세를 비교하였고, 나머지 Case 2와 3에서는 완전한 편이자세(몸통각도 50 ~ 51도)로 인체모형을 착석시켜 평가를 수행하였다.

3. 결과

3.1 단위질량당 충격량

서두에도 언급하였듯이 본 연구의 평가시험모드는 연구기간과 비용의 한계 등으로 최소한의 시험차량(4대)로 시험을 수행하였고, 본 연구내용 외에도 다른 목적의 연구도 동시에 수행하였기 때문에 정면충돌모드의 충돌 속도 등을 동일하게 적용하지 못하여 충돌가속도 등에 차이가 발생하였다. 또한 충돌모드 역시 현행 자동차안전도평가(KNCAP)의 정면충돌모드에 따른 영향 평가도 같이 검토하다보니 충돌속도가 동일하더라도 충돌가속도에 차이가 발생할 수밖에 없다. 이에 따라 충돌속도 및

Table 2 Impact pulse(I) per the vehicle mass according to the frontal crash types

	Case 1 w/ Upright	Case 1 w/ Reclined	Case 2	Case 3
I/kg (mm/s)	1.343	1.298	1.641	1.938

충돌모드에 따른 충돌가속도의 차이를 우선적으로 검토 하여야지 정면충돌모드에 따른 편이자세의 인체상해 특성 등을 동등한 기준에서 비교가 가능할 수 있기에 충돌 시 차량의 충돌가속도를 차량의 무게중심점에서 측정된 3축 가속도를 합성하여 적분한 값을 단위질량당 충격량 (Impulse/vehicle mass)으로 판단하여 충돌가속도의 기준으로 검토하였다.

이에 따라 고정벽정면충돌(Case 3)이 충돌가속도(차량 충격량)이 가장 낮은 Case 1 충돌모드 조건 대비 약 47 % 충돌가속도가 높으며, 대항차(1,400 kg)에 충돌조건인 Case 1과 Case 2에서도 Case 2가 약 24 % 높은 것으로 확인되었다.

3.2 머리 및 목 상해

세가지 정면충돌유형에서 편이자세 동승석 탑승자의 머리 및 목 상해를 분석하였다. 모든 비교차트(Figs. 1 ~ 3)의 좌측 첫번째 조건만 정상착좌(Case 1 충돌모드에 정상착좌)로 평가결과이고, 나머지 3개 충돌 조건의 측정 결과는 완전한 편이자세의 착좌(Case 1 ~ 3 충돌모드에서의 완전한 편이자세)에서의 결과이다. 머리 및 목 모두 유사한 결과가 도출되었다. 동승석 정상착좌 탑승자의 상해가 모든 정면충돌유형에서의 완전한 편이자세 착좌 탑승자의 상해값보다 낮은 것으로 확인되었다. 물론 3.1에서 언급하였듯이 정상착좌조건은 Case 1 충돌모드로 시험하여 가장 낮은 충돌가속도로 인하여 Case 2 및 3의 완전한 편이자세에서의 충돌 시 머리 및 목상해보다 낮을 수 있지만 동일한 Case 1에서의 완전한 편이자세 조건과 비교하여도 낮은 것을 알 수 있다.

Fig. 1부터 2와 같이 정상착좌 조건을 제외하고는 모든 편이자세 착좌조건에서 초기에 좌석안전띠에 구속되지 못하였고, 에어백에 접촉하는 시점이 정상착좌보다 늦어 에어백의 압력 및 부피 등이 충분히 유지되지 못한 조건에서 충돌하거나 아예 충돌이 발생하지 않아 충돌 시 머리에 발생한 관성력을 좌석안전띠 및 에어백이 거의 흡수하지 못하여 정상착좌보다 머리 상해가 HIC15의 경우 약 3 ~ 20배, 머리합성가속도(ACC_3ms)는 약 40 ~ 235 % 높게 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 3과 같이 목 상해 역시도 머리가 에어백에 불완전하게 구속되기 때문에 좌석안전띠에 몸통이 최대 구속

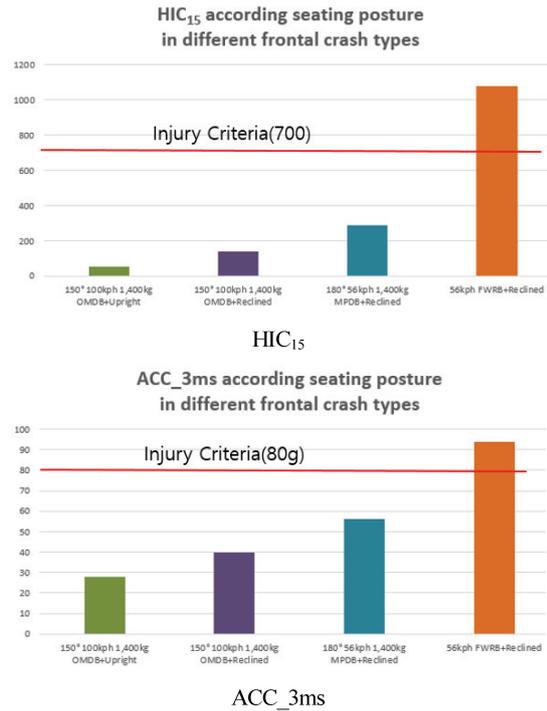


Fig. 1 Comparison of the head injury values (HIC₁₅ and ACC_3ms) in the different frontal crash types

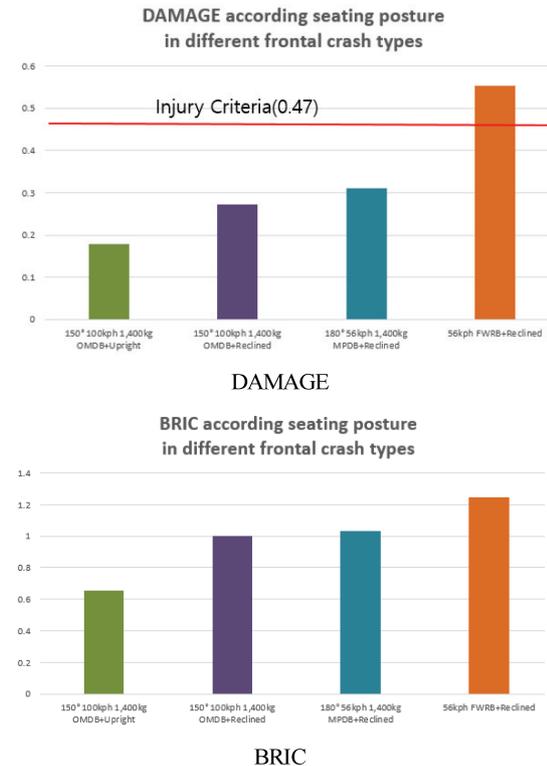
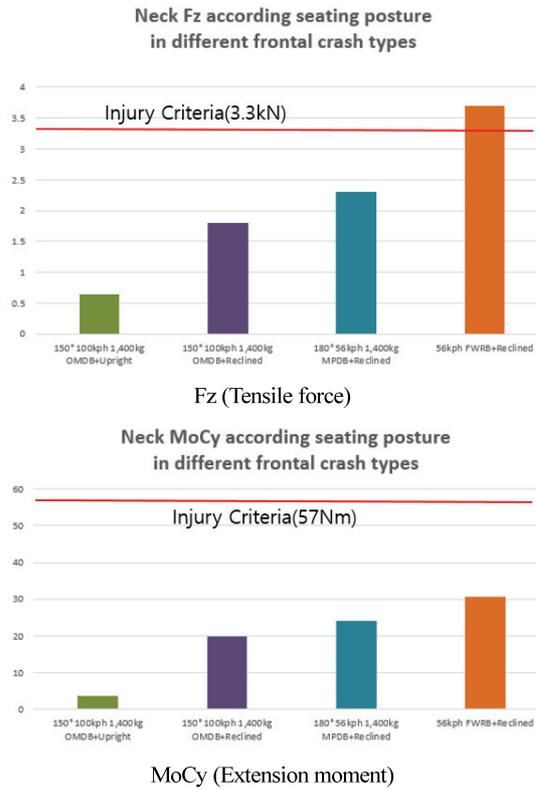


Fig. 2 Comparison of the head injury values (DAMAGE and BRIC) in the different frontal crash types



Measuring points of the chest deflection

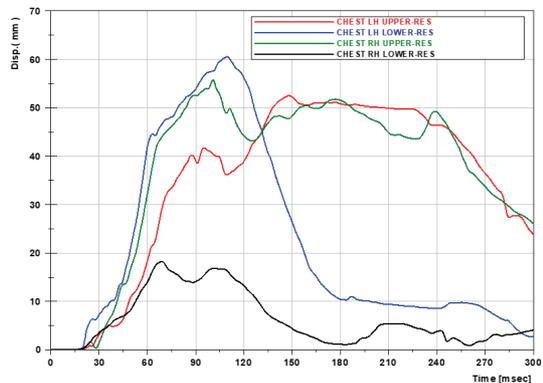
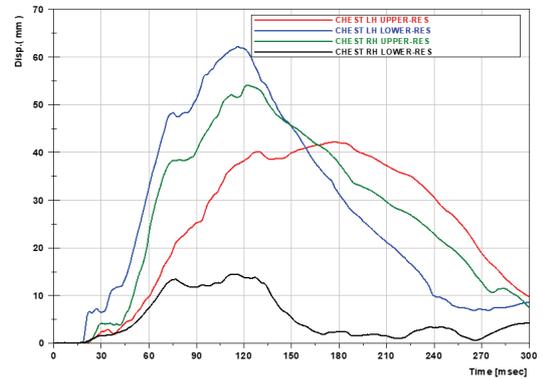


Fig. 3 Comparison of the neck injury values in the different frontal crash types

되는 시점에도 머리가 앞으로 이동하려는 높은 관성하중으로 굽힘 및 인장하중이 정상좌좌보다 각각 약 3 ~ 8 배, 3 ~ 5배 높게 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 3.1.에 따른 충돌가속도(단위질량당 충격량)이 높아 충돌 초기 인체모형에 높은 관성력을 발생시키는 정면충돌유형에서 머리 및 목상해가 가장 높게 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 완전한 편이자세에서 머리와 목상해는 동일하게 비례하여 증가하는 패턴을 확인하였다. 부분정면충돌 유형인 Case 1과 2보다 고정벽정면충돌이 HIC₁₅ 및 머리 합성가속도(ACC_{3ms}) 뿐만 아니라 뇌손상과 관련된 DAMAGE 및 BRIC도 높게 발생하였다. 이는 충돌 시 차량의 회진(Yawing)보다 충격량이 동승석 편이자세 탑승자의 DAMAGE 및 BRIC 상해에도 더 큰 영향을 주는 것으로 판단되어진다.

3.3 흉부 상해

세가지 정면충돌유형에서 편이자세 동승석 탑승자의 흉부상해를 분석하였다. 흉부상해(흉부 변위량)는 머리 및 목상해와 유사한 경향과 일부 다른 경향이 나타났다.

첫 번째로는 우선 유사한 경향으로 머리 및 목상해와 같이 흉부상해도 정상좌좌보다 완전한 편이자세에서 약

Fig. 4 Chest deflection of passenger across the entire timeline according to frontal crash types

46 ~ 84 %까지 증가하는 것이다. 그 이유는 완전한 편이자세에서 머리 및 목 상해 증가와 유사하게 정상좌좌보다 충돌 시 좌석안전띠에 초기에 정상적으로 구속되지 못하고 또한 초기에 좌석안전띠가 정상적으로 구속되지 못하기 때문에 충돌 중 어깨부위 좌석안전띠가 어깨 아래로 내려오면서 Fig. 4와 같이 흉부 변위량 발생 부위 역시 정상적인 좌좌 조건에서 높게 발생하는 부위인 좌측-상부(Left upper)가 아닌 좌측-하부(Left lower) 및 우측-상부(Right upper) 부위에서 높게 발생하였다.

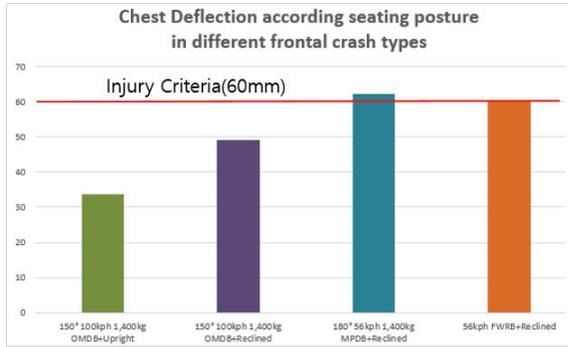


Fig. 5 Comparison of the chest injury values (Chest deflection) in the different frontal crash types



Photo. 4 Movement of the passenger dummy during 56 km/h MPDB test

두번째로는 Fig. 5와 같이 전반적으로 충격량이 증가할수록 흉부상해(흉부 변위량) 역시 증가하는 것이다. 하지만, 머리 및 목상해와 다르게 Case 2와 3에서 상해값의 차이가 거의 없었으며, 오히려 충격량이 제일 높아 가장 가혹할 것으로 예상되었던 Case 3의 고정벽정면충돌보다 Case 2가 조금 더 안 좋은 결과가 도출되었다. 이는 Case 3과 다르게 Case 2에서는 충돌 시 차량의 회전모멘트(Yawing moment)가 높게 발생하고 따라서 동승석 인체모형의 몸통부위 역시 회전 거동이 발생한다. 완전한 편이자세의 경우 정상좌좌보다 충돌 시 좌석안전띠에 정상적으로 구속되지 못하는 조건에서 동승석 인체모형의 회전모멘트로 Photo 4와 같이 몸통을 구속하는 좌석안전띠 루트 방향으로 더 높은 하중이 흉부에 가해지기 때문에 판단되어진다.

3.4 복부 및 요추 상해

복부 상해의 경우 복부 변형량과 좌석안전띠가 골반을 정상적으로 구속하지 못하여 복부에 하중을 가하는 Submarining 현상 등을 주요 평가항목으로 검토하였다. 세 가지 정면충돌유형에서 복부 변형량의 경우 정상좌좌와 완전한 편이자세에서 명확한 경향성 차이가 나타

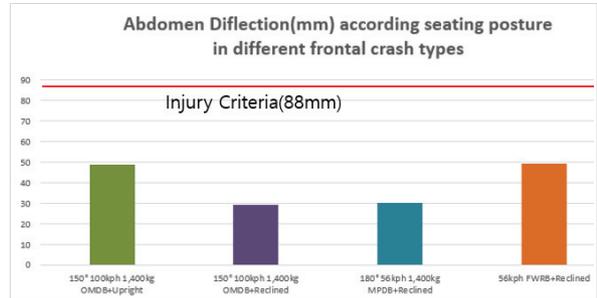


Fig. 6 Comparison of the abdomen injury values (Deflection) in the different frontal crash types

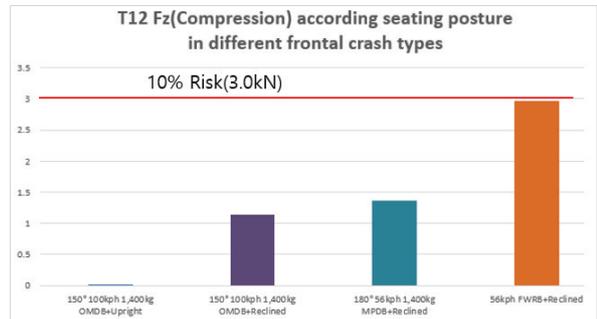


Fig. 7 Comparison of the lumbar spine injury values (Fz Compression of T12) in the different frontal crash types

나지 않았다. 다만, 차량 충격량이 가장 높은 Case 3을 제외하고는 완전한 편이자세보다 정상좌좌에서 복부의 압축 변형량은 더 높게 나타나는 경향을 확인하였다. 또한, 경사충돌각도가 가장 커서 자동차의 회전(Yawing moment)에 따른 동승석 인체모형의 측면 이동량이 가장 많이 발생한 Case 1 충돌모드에서 Submarining이 발생한 것으로 보아 완전한 편이자세 착석조건에서 회전모멘트가 중요한 영향인자로 파악된다.

요추상해와 관련하여 아직 국내외 안전기준 및 안전도 평가 등에서는 상해평가 등이 수행되지 않고 있지만, 연구 논문^{17,18)} 등에서 편이자세에서 요추상해(골절 등) 위험성이 증가한다고 보고되고 있다. 이에 따라 요추 중상해 위험 가능성에 따른 기준¹⁹⁾으로 검토한 결과 중상해 위험성 10%에 해당하는 평균 요추 압축하중(Fz compression of T12)인 3.0 kN이 Case 3에서 발생하는 것을 확인하였다. 반면, 정상좌좌에서는 요추에 압축하중이 거의 발생하지 않는 것을 확인하였다. 또한, 완전한 편이자세 조건에서는 차량의 충격량이 증가할수록 요추 압축하중이 증가하여 요추상해 위험성이 커지는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 국내외적으로 거의 수행되지 않는 완성차로 실제 충돌평가시험(Full scale crash test)을 통하여 다양한 정면충돌 조건에서 정상좌좌와 완전한 편이자세 좌좌 조건에서의 동승석의 상해특성을 분석하는 연구를 수행하였다. 다만, 서두에서 확인하고자 하는 연구내용 외에도 다른 연구 목적의 평가도 함께 수행하여 충돌속도 및 충돌모드 등을 동일하게 적용하지 못하여 충돌가혹도에 차이로 인한 상해 및 인체모형의 거동 등에 비교에 어려움이 있었다. 또한, 평가에 사용한 현행 신 정면충돌 인체모형(THOR 50M) 역시 완전 편이자세(Full reclined)가 완벽하게 구현되지 않는 구조이며, 단 1개 차종으로 충돌모드별 1회 시험만을 수행하여 시험결과의 신뢰성 등이 매우 제한적일 수 있다. 그럼에도 불구하고 자율 주행차 시대가 도래함에 따라 자율 주행차 대표 정면충돌모드를 포함한 기존의 차대차 충돌 및 고정벽 정면충돌모드에서의 완전한 편이자세 좌석 동승자 탑승자의 상해특성에 대하여 머리, 목 및 몸통 등 인체 주요부위에 대하여 종합적으로 평가한 것은 향후 편이자세 탑승자의 충돌안전성평가기술 개발 등에 중요한 근거자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

본 연구를 통하여 다양한 정면충돌 조건에서 완전한 편이자세에서 동승석 탑승자의 주요 상해특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 머리 부위 상해는 완전한 편이자세 조건에서 정면충돌유형에 상관없이 초기에 정상좌좌보다 좌석안전띠 및 에어백 등에 정상적으로 구속되지 못하고 머리의 속도 등이 최고시점에서 에어백이 전혀 충돌에너지를 흡수하지 못하여 머리 상해가 높게 발생하는 것을 확인하였다. 특히 Case 3의 56 km/h 고정벽정면충돌 모드에서 머리 상해의 주요 평가항목인 HIC15, 머리합성가속도(ACC_3ms), BRIC 및 Damage 등이 모두 높게 나타났다. 이는 완전한 편이자세에서 자동차의 충격량이 증가할수록 머리 상해 역시 비례하여 증가하는 것으로 확인된다. 이에 따라 향후 자동차안전도 평가(KNCAP) 등에서 편이자세 탑승자 충돌안전성 평가방법을 개발할 때 1개의 정면충돌유형만을 고려한다면 머리 상해는 정면충돌유형에 따른 충돌 상해 메커니즘의 차이보다는 충격량에 따른 영향이 더 크기 때문에 머리 상해가 가장 높은 56 km/h 고정벽정면충돌유형을 우선적으로 고려될 수 있다고 판단된다.
- 2) 목 부위 상해 역시도 완전한 편이자세 조건이 정상좌좌보다 높은 상해값이 발생하는 것을 확인하였다. 특히 목 상해 중 목 인장 하중(Fz)의 경우 완전한 편이자

세 탑승자의 상해가 정상좌좌보다 현저히 높고 또한 차량의 충격량이 높을수록 비례하여 증가하는 것을 확인하였다. 이는 머리와 동일하게 초기에 머리부위가 에어백 및 좌석안전띠에 구속되지 못하고 최고 충돌 관성하중이 인체모형에 발생하는 시점에서 에어백에 정상적으로 머리가 충돌하여 충돌에너지를 흡수하지 못하기 때문에 몸통은 좌석안전띠에 구속되었지만 목은 정상좌좌 조건보다 전방으로 이동량 및 관성하중이 높게 발생하는 메커니즘 때문이다.

- 3) 흉부 부위 상해와 관련해서도 머리 상해와 동일하게 완전한 편이자세에서의 정면충돌이 정상좌좌 조건보다 흉부상해(흉부 변위량)가 높게 발생하는 것을 확인하였다. 흉부상해 역시도 머리상해와 유사하게 초기에 좌석안전띠에 정상적으로 구속되지 못하고 몸통에 높은 관성하중을 유지한 조건에서 늦은 시점에 어깨 부위 좌석안전띠가 어깨 아래로 내려오는 비정상적인 루트로 구속되어 좌석안전띠와 흉부 사이에 높은 압축하중이 발생한 것으로 확인되었다. 또한 흉부 상해도 충격량이 클수록 흉부 상해가 높게 발생하였다. 다만, 머리상해보다는 경사충돌에 따른 차량의 회전모멘트(Yawing moment)로 인한 흉부와 좌석안전띠의 루트사이에 흉부 압축변위량이 다소 증가하는 영향이 있는 것을 확인하였다.
- 4) 복부 부위상해와 관련하여 현재 자동차안전도평가 등에서 복부 상해를 평가하는 복부압축하중 항목에서는 정상좌좌가 완전한 편이자세보다 오히려 복부 상해발생 위험성이 더 높은 것으로 확인되었다. 하지만, 좌석안전띠가 골반부위를 정상적으로 구속하지 못하여 복부에 중상해를 유발할 수 있는 Submarining 현상과 관련해서는 3번의 완전편이자세 충돌평가 중 단 1회만 발생하였지만 발생 가능성을 확인하였고 발생한 정면충돌 유형이 경사충돌로 차량의 회전모멘트가 가장 크게 발생한 조건인 점을 고려하면, 완전한 편이자세 탑승객의 몸통의 회전이 주요한 영향인자로 판단된다.
- 5) 요추 부위 상해와 관련해서는 충돌 시 요추 골절 등을 유발할 수 있는 요추 압축하중(Fz of T12)을 평가하였고, 완전한 편이자세가 정상좌좌보다 요추에 압축하중이 높게 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 충격량이 클수록 완전한 편이자세에서 요추의 압축하중이 높은 것을 확인하였다.

위에서 언급한 5개의 주요 연구결론을 정리하면 기존에 발표된 연구 논문과 유사하게 정면충돌에서 완전한 편이자세 탑승자의 머리, 목, 흉부 및 요추 상해 등이 높

게 나온다는 것을 확인하였다. 특히 정면충돌 유형이 다르더라도 머리, 목 및 흉부에서의 중상해 발생 메카니즘은 거의 유사한 것으로 확인되었다.

이에 따라 향후 자동차안전도평가(KNCAP)에서 동승석 편이 자세 탑승자의 충돌안전성을 평가할 수 있는 평가시험방법 개발에서도 관련 연구결과를 활용하여 정면충돌유형에 차이가 있더라도 탑승자의 중상해 발생 메카니즘이 유사한 점과 중상해 심각도는 충돌가속도(충돌 충격량)와 비례하는 점을 고려할 경우 충돌가속도가 가장 높은 고정벽정면충돌평가방법을 우선 검토될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 ‘자율주행기술개발혁신사업, 주행 및 충돌 상황 대응 안전성 평가기술 개발’의 연구 결과로서 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA160637).

References

- 1) KNCAP, <http://www.KNCAP.org>, 2024.
- 2) B. D. Stemper, F. A. Printar and J. L. Baisden, Lumbar Spine Injury Biomechanics, in *Accidental Injury*, N. Yoganandan, A. Nahum and J. Melvin, Eds., New York, Springer, 2015.
- 3) S. Dissanaikie, R. Kaufman, S. Mack, C. Mock and E. Bulger, “The Effect of Reclined Seats on Mortality in Motor Vehicle Collisions,” *Journal of Trauma*, Vol.64, pp.614-619, 2008.
- 4) L. C. Schaefer, M. Junge, I. Vörös, K. Koçaslan and U. Becker, “Odds Ratios for Reclined Seating Positions in Real-World Crashes,” *Accident Analysis & Prevention*, Vol.161, 2021.
- 5) Y. M. So, H. Kim and J. Bae, “A Study of Occupant Injury of Various Sitting Postures in Frontal Crash Modes,” *Journal of Auto-vehicle Safety Association*, Vol.15, No.4, pp.48-57, 2023.
- 6) A. Górnjak, J. Matla, W. Górnjak, M. Magdziak-Tokłowicz, K. Krakowian, M. Zawiślak, R. Włostowski and J. Cebula, “Influence of a Passenger Position Seating on Recline Seat on a Head Injury during a Frontal Crash,” *Sensors*, Vol.22, No.5, Paper No.2003, 2022.
- 7) R. Richardson, J. P. Donlon, M. Jayathirtha, J. L. Forman, G. Shaw, M. Östling, K. Mroz and B. Pipkorn, “Kinematic and Injury Response of Reclined PMHS in Frontal Impacts,” *Stapp Car Crash Journal*, Vol.64, pp.S83-S153, 2020.
- 8) S. Koppel, J. O. Jimenez, K. Bohman, D. Logan, W. Raphael, L. Q. Jimenez and F. Lopez-Valdes, “Seating Configuration and Position Preferences in Fully Automated Vehicles,” *Traffic Injury Prevention*, Vol.20, pp.S103-S109, 2019.
- 9) M. Han and H. Choi, “The Study on the Preference of Seat Configuration and Sitting Posture in Highly Automated Vehicles,” *Traffic Injury Prevention*, Vol.20, pp.S103-S109, 2019.
- 10) E. Mishra and N. Lubbe, “Assessing Injury Risks of Reclined Occupants in a Frontal Crash Preceded by Braking with Varied Seatbelt Designs Using the SAFER Human Body Model,” *Traffic Injury Prevention*, Vol.25, No.3, pp.445-453, 2024.
- 11) R. Richardson, J. P. Donlon, M. Jayathirtha, J. L. Forman, G. Shaw, B. Gepner, J. R. Kerrigan, M. Östling, K. Mroz and B. Pipkorn, “Kinematic and Injury Response of Reclined PMHS in Frontal Impacts,” *Stapp Car Crash Journal*, Vol.64, pp.83-153, 2020.
- 12) Y. Park, W. Park and S. Kim, “An In-depth Analysis of Head-on Collision Accidents for Frontal Crash Tests of Automated Driving Vehicles,” *Journal of Auto-vehicle Safety Association*, Vol.15, No.4, pp.88-94, 2023.
- 13) J. Lee, M. Lee and J. Jeong, “Intersection Collision Situation Simulation of Automated Vehicle Considering Sensor Range,” *Journal of Auto-Vehicle Safety Association*, Vol.13, No.4, pp.114-122, 2021.
- 14) R. Richardson, J. P. Donlon, M. Jayathirtha, J. L. Forman, G. Shaw, M. Östling, K. Mroz and B. Pipkorn, “Pelvis Kinematics and Injuries of Reclined Occupants in Frontal Impacts,” *Proceedings of the International Research Conference on the Biomechanics of Impact (IRCOBI)*, Paper No.IRC-20-60, 2020.
- 15) C. K. Thorbole, “Dangers of Seatback Recline in a Moving Vehicle: How Seatback Recline Increases the Injury Severity and Shifts Injury Pattern,” *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol.57380, American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- 16) B. Been and J. El, EuroNCAP, THOR Specification and Certification, TB026 Version 1.0, 2018.
- 17) Y. Liu, J. Fei, X. -M. Wan, P. -F. Wang, Z. Li, X. -T. Yang, L. -W. Zhang and Z. -H. Bai, “Research of Injury Mapping Relationship of Lumbar Spine in Reclined Occupants Between Anthropomorphic Test Devices and Human Body Model,” *Chinese Journal of Traumatology*, 2024.

- 18) D. -Y. Liu, S. Xiao, F. -F. Han and B. -T. Hu, "Lumbar and Neck Injuries of Occupants in Different Reclining Postures," Chinese Journal of Traumatology, Vol.27, No.4, pp.211-217, 2024.
- 19) B. D. Stemper, F. A. Printar and J. L. Baisden, Lumbar Spine Injury Biomechanics, in Accidental Injury, N. Yoganandan, A. Nahum and J. Melvin, Eds., New York, Springer, 2015.