

고정벽을 활용한 차대차 경사충돌 재현

배준석* · 김 호** · 소영명***

Utilization of Rigid Barrier to Simulate Car to Car Crash of Two Identical Vehicles

Junsuk Bae*, Ho Kim**, Young Myoung So***

Key Words: Automated Driving(자율 주행), Finite Element Method(유한요소법), Vehicle Safety(차량 안전)

ABSTRACT

Commercial use of autonomous vehicles is to come soon. So far most of responsibility of the accident is on the human driver with conventional vehicles whereas that will be on the car OEM and transportation related organizations with autonomous vehicles, which asks car OEM's and government to do vast study of car crash in various conditions. Test protocols need amendment and to be newly enacted to reflect new findings from the study aforementioned. Rigid stationary barrier and moving or stationary deformable barrier as well as car to car test which is same as actual accident can be utilized to simulate the crash happening on the road. Among those 3 test methods, rigid stationary barrier is most economic and has good repeatability. Limitation as well as advantage of the rigid stationary barrier is studied through comparison between car to car crash and oblique rigid barrier crash.

1. 서론

기존 유인 조정 자동차에서는 사고 발생 시 과실을 운전자에게 전적으로 혹은 일부 물을 수 있었지만, 완전 자율차가 상용화되면 충돌사고 발생 시 사고의 책임은 온전히 완성차 업체 및 교통 관련 기관에 귀속된다. 차량 간 충돌사고 발생 시 사고 과실의 책임을 보다 명확히 판단하고자 자율차의 안전성 평가 기준을 평가하려는 방법을 찾고자 한다.

현재 차량의 안전성 평가방법은 고정벽, 혹은 대차를 이용한 충돌을 통하여, 차량의 가속도 및 인체 상해를 측정하여 평가한다.⁽¹⁾ 자율 자동차는 주행 로직에 따라 사고

회피, 충돌 전 감속 기능을 통한 사고 심각성을 낮추는 기능이 추가되어 상대 차가 부주의로 발생하는 차대차 사고 재현 및 평가를 연구한다.

고정벽 시험은 차대차 충돌 대비 비용 절감과 실험 재현성에서 장점을 보이지만, 고정벽 시험이 모든 실차 충돌 상황을 충실히 모사할 수 없기에 본 연구에서는 실차간 충돌, 즉 차대차 충돌과 고정벽 충돌 시 차량 거동을 비교하여 고정벽 시험법의 적합성과 한계, 그리고 적절한 활용 방법을 확인하고자 한다.

본 연구에서는 충돌 시 차량 거동을 평가하기 위해 ACU (Airbag Control Unit - 차량의 CG점에 근접) 가속도 X 성분(차량 진행방향), 좌우 B pillar 하단 가속도 및 ACU의 X 성분을 적분하여 구해낸 속도 변화를 비교 검토하였다. ACU X 적분으로 구해낸 속도 변화에 차량 중량을 곱하면 충돌 중 차량에 가해진 충격량으로 충돌 상황을 정량적으로 표현할 수 있는 적절한 물리량이며, ACU X는 차량의 감속 특성으로 승객 거동에 지대한 영향을 주는 인자이다.

* (주)유이엔지니어링, 선임연구원
 ** (주)유이엔지니어링, 이사
 *** (주)유이엔지니어링, 대표
 E-mail: jsbae@ue-eng.co.kr

완성차 업체와 수차례 연구 용역을 수행한 결과 정면 충돌의 경우 ACU X 적분으로 구해진 속도 변화는 승객 상해치와 선형적 관계가 있음을 밝혀냈고 차량 충돌 시 심각도를 평가하기에 충분한 물리량으로 판단된다. 차량의 진행 방향 뿐 아니라 차량의 회전(yawing)도 승객 거동에 큰 영향을 주나 본 연구는 고정벽을 활용할 수 있는 정면 및 경사 충돌에 한정된 연구이므로 ACU에서 구해진 진행 방향 속도의 변화는 본 연구에서 충분한 의미를 지닌다고 본다. B pillar 하단 가속도는 차량의 회전 거동을 파악할 수 있기에 보조적으로 사용하였다. 고정벽과 차대차 정면 및 정면 경사 충돌의 ACU X 속도 변화를 서로 비교하여 고정벽 충돌과 차대차 충돌 거동의 유사성을 평가하였다.

두 충돌해석 차이에 따른 더미 거동을 비교하기 위하여 승객해석 모델을 구성하였으며, 더미의 거동 및 머리 상해를 비교하여 유사성을 평가하였다.

2. FE 충돌해석 모델 및 충돌 모드 구성

본 연구에서는 2014년형 Honda Accord 모델로 NHTSA에서 제공하는 해석 모델을 사용했다.⁽²⁾ 총 요소의 개수는 약 2백 50만 개이며 LS-Dyna MPP를 이용하여 해석을 수행하였다. 해석 차량의 중량은 1,596kg이고 운전석에 Hybrid 3 50%lie 남성 더미를 탑재한 효과를 모사하기 위해 78kg의 집중 질량을 운전석 시트 마운팅에 각각 분산시켜 설치하였다. 다만 Accord 해석 모델이 IIHS small overlap이나 IIHS side impact의 경우에 있어 floor 강성 및 강도가 지나치게 낮아 후방 seat cross member를 추가한 뒤 해석에 사용하였다.

고정벽은 LS-Dyna의 rigid wall을 사용하였으며 차대차 해석의 경우 동일 Accord 모델을 복사한 뒤 renumbering

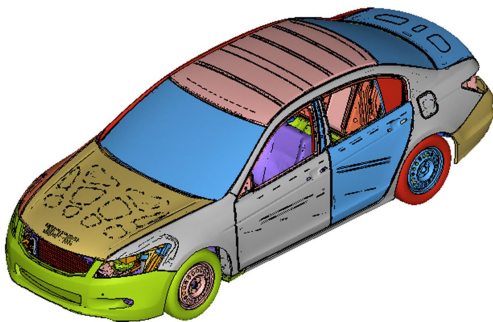


Fig. 1 2014 Honda Accord FE model

하여 두 대의 충돌 상황을 구성하였다. 정면 및 정면 경사 충돌의 경사 각도별 고정벽 및 차대차 해석 모델은 Fig. 2a 및 Fig. 2b와 같다.

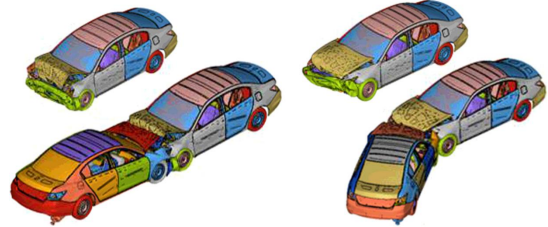


Fig. 2a Frontal and 30 deg. oblique crash



Fig. 2b 45 deg. and 60 deg. oblique crash

구성된 정면충돌 모드는 NCAP 상품성 평가의 규정 속도인 56kph 속도를 두 차량에 선언하여 충돌시켰으며, 경사충돌의 경우 북미 경사충돌에서 최대 법규 속도인 40kph로 충돌시켰다. 이때 경사 각도는 고정벽 규제치인 30도를 기준으로 45도 60도를 가정한 충돌 각도를 구성하였다.

3. 정면 충돌 시험

고정벽 시험은 본래 동일 차량이 동일한 속도로 서로 마주보고 충돌하는 상황을 재현하는 시험법이다. Fig. 3a는 56kph 정면 충돌 시 차대차 상황에서 나온 결과이며 Fig. 3b는 고정벽 상황이다. ACU X에서 나온 속도의 변화 뿐 아니라 B pillar 가속도 등 모두 고정벽과 차대차의 결과가 유사하게 나와 고정벽이 차대차 상황을 충실히 모사하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 정면 경사 충돌

고정벽의 효용성을 다른 충돌 조건에도 적용이 가능한지 확인하기 위해 고정벽의 각도를 30도, 45도 60도 등 세가지 조건으로 변경해가며 40kph 충돌 속도에 대하여 차대차 30도, 45도, 60도 경사 충돌 조건과 서로 비교해보

고정벽을 활용한 차대차 경사충돌 재현

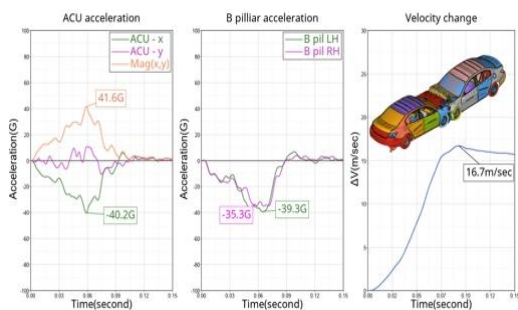


Fig. 3a 56kph frontal impact of car-to-car : ACU acc. / B pillar acc. / velocity change

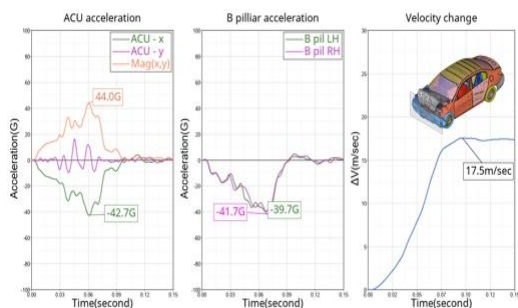


Fig. 3b 56kph frontal impact to rigid wall : ACU acc. / B pillar acc. / velocity change

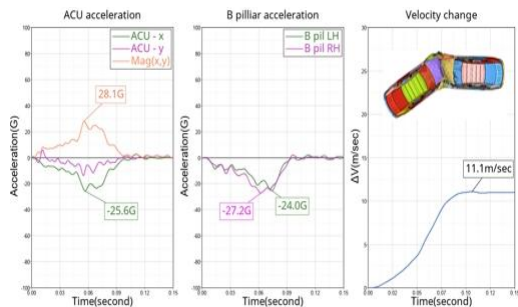


Fig. 4a 40kph 30 deg. oblique impact of car-to-car : ACU acc. / B pillar acc. / velocity change

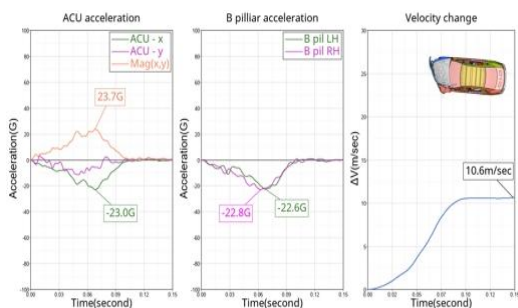


Fig. 4b 40kph 30 deg. oblique impact to rigid wall : ACU acc. / B pillar acc. / velocity change

았다.

Fig. 4a, 4b에서 보이는 바와 같이 30도 경사면 충돌과 유사하게 ACU X 최대 가속도는 7% 차이, 속도 변화의 최대값은 5%로서 비교적 작은 차이를 보이고 있다. 즉, 30도 정도의 경사 충돌 재현을 위해 시험하기 어려운 실제 차대차 충돌을 이용한다던지, 대차 충돌을 하지 않아도 고정벽을 이용해 경제적으로 재현할 수 있음을 확인하였다.

실제 도로에서 발생하는 충돌은 30도 뿐 아니라 보다 다양한 각도에서 경사 충돌이 발생할 수 있기 때문에 더 넓은 영역으로 고정벽을 활용할 수 있는 지 검토하기 위해 45도 및 60도에 대해서도 차대차 조건과 고정벽 조건을 비교해 보았다.

Fig. 5a, 5b는 40kph 45도 차대차 정면 충돌 시 ACU 가속도 / B pillar 가속도 / 속도 변화를 차대차와 고정벽 충돌해석결과를 비교한 그래프이고, Fig. 6a, 6b는 40kph 60도 차대차 정면 충돌 시 ACU 가속도 / B pillar 가속도 / 속도 변화를 차대차와 고정벽을 비교한 그래프이다.

Fig. 7a, 7b에서 보이는 바와 같이 각 경사 충돌에 대해 고정벽과 차대차 해석 결과를 ACU X와 속도 변화량(충격

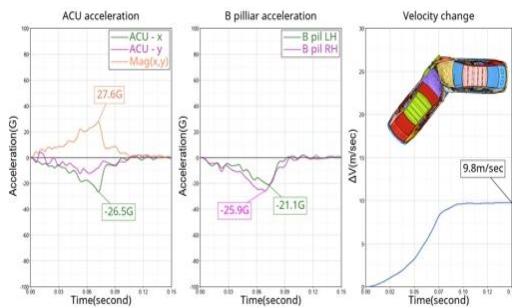


Fig. 5a 40kph 45 deg. oblique impact of car-to-car : ACU acc. / B pillar acc. / velocity change

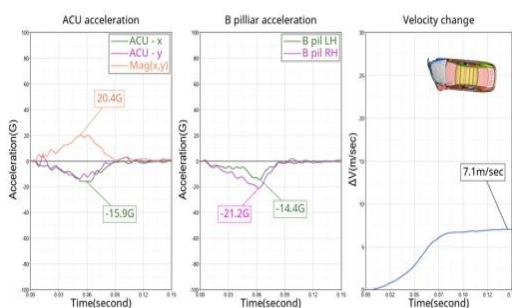


Fig. 5b 40kph 45 deg. oblique impact to rigid wall : ACU acc. / B pillar acc. / velocity change

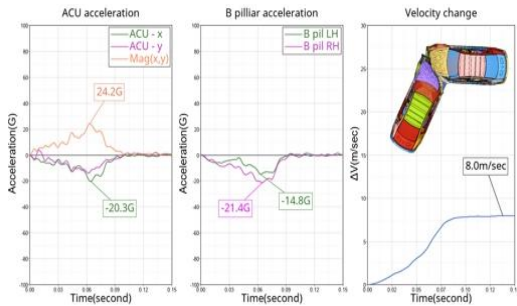


Fig. 6a 40kph 60 deg. oblique impact of car-to-car : ACU acc. / B pillar acc. / velocity change

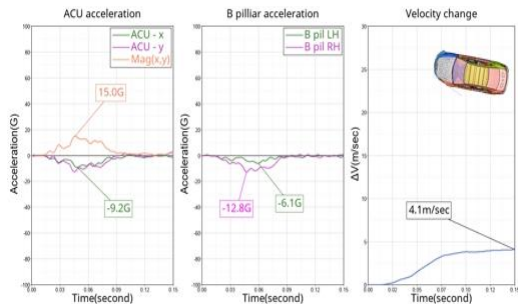


Fig. 6b 40kph 60 deg. oblique impact to rigid wall : ACU acc. / B pillar acc. / velocity change

량) 측면에서 비교하였다. 30도 경사 충돌까지는 고정벽 충돌 특성이 차대차 대비 7% 이내의 차이를 보이기 때문에 고정벽이 차대차 충돌 현상을 충실히 모사할 수 있다고 볼 수 있으나 45도를 넘어서면 그 차이가 30%를 넘어서게 되어 차량 진행방향 속도의 상호 연관성이 매우 떨어진다. 즉, 30도 경사 충돌까지는 정면 충돌의 성격이 강하나 45도를 넘어서면 차량의 회전 및 측방향 운동 성분이 커져 정면뿐 아니라 측면 충돌의 성격이 강하게 나타나기 시작한다. 따라서 정면 고정벽은 30도 정면 경사 충돌까지 차대차 거동과 유사한 거동을 보여주는 것으로 사료된다.

5. 고정벽 개선 방안 검토

앞에서 밝힌 바와 같이 고정벽은 30도까지만 차대차 조건과 높은 연관성을 보였다. 실제 경사면 고정벽 충돌 시 고정벽과 차량의 마찰은 차량의 회전에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 해석적으로 고정벽과의 마찰 조건을 바꾸어가며 차대차와의 일치성이 증가하는지 확인해보고, 40% offset 충돌에 사용하는 deformable barrier를

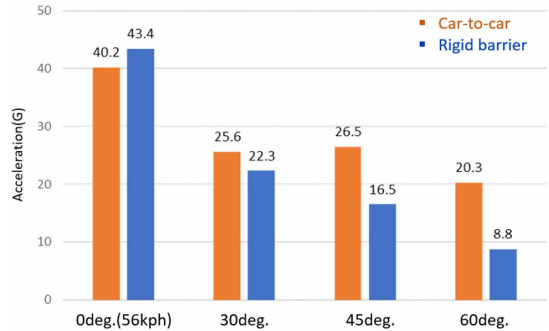


Fig. 7a Comparison of ACU X peak accelerations

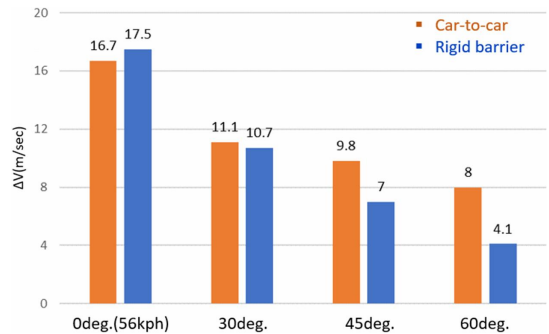


Fig. 7b Comparison of ACU X velocities

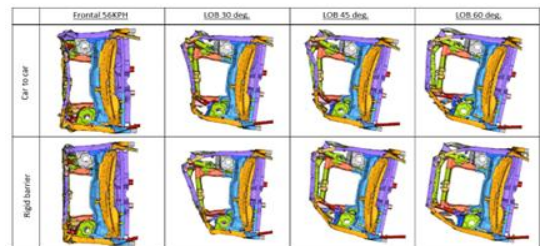


Fig. 7c Deformation of front structure

이용하여 45도 경사 충돌에 대하여 실제 차대차 해석 결과와 유사성이 있는지 확인하였다.

현재 해석에서는 고정벽과 차량간 마찰 계수가 0.3이 었으나 마찰 계수를 0.1로 감소시켰을 경우 차량의 회전 량이 실제 차대차 해석 대비 증가하여 일치성이 떨어진다. 실차의 경우 차량 부품간의 마찰 뿐 아니라 직접 충돌이 발생한 인접 부품 및 구조의 변형이 두 차량의 접촉면 접 선 방향 거동에 큰 영향을 미치는데 고정벽 사용시 0.3 수 준의 마찰계수가 차대차 충돌 거동과 가장 유사한 거동을 보임을 확인하였다. Fig. 8 해석 뿐 아니라 실제 시험 결과를 분석했을 때 경사 고정벽의 상태에 따라 마찰계수가

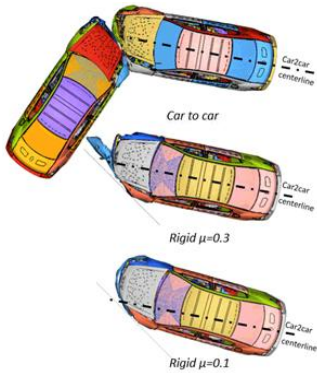


Fig. 8 Yawing behaviors of vehicle with different friction coefficients

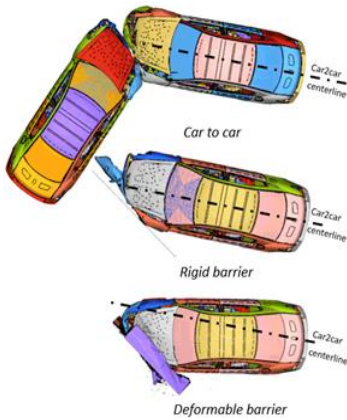


Fig. 9 Yawing behaviors of vehicle with oblique deformable barrier

0.1에서 0.3까지 변하는 경우를 볼 수 있었는데, 가능하면 실차와 비슷하도록 0.3상태에 이를 수 있도록 경사벽 표면을 관리하는 것이 중요하다.

역학적인 논리성은 크지 않으나 고정벽이 아닌 다른 시험법 적용 시 차량의 거동을 보기 위하여 40% offset 충돌에 이용하는 deformable barrier를 45도 회전시켜 고정벽 대신 사용하여 보았다(Fig. 9). 하지만 이 경우 차량의 회전이 너무 적게 발생하여 차대차의 해석 결과와 많은 차이를 보이고 있다. 이는 차대차 충돌 시 상대 차에 발생하는 거동이 자차와 대칭적으로 발생하는 것이 아니라 오히려 자차보다 큰 변형이 발생하는 경우로서 상대차가 자차 대비 충돌 강성이 매우 낮은 경우에 해당한다고 볼 수 있다.

6. 승객거동해석 모델 구성

자동차 제작사들과 다수의 연구 용역을 통해 전방 충돌 시 ACU X 속도 변화가 승객 상해치와 선형적인 관계가 있음을 확인했으나, 본 연구에서 재확인을 위하여 MADYMO 솔버 기반 승객거동해석 모델을 이용하여 고정벽 충돌과 차대차 충돌 시 승객 상해를 비교하였다.

승객거동해석 모델은 Honda Accord LS-Dyna 유한요소법 객실모델을 1차로 구성하고 해당 모델을 MADYMO 모델로 변환하여 사용하였다. 적용된 승객거동해석 모델은 Accord USNCAP Test No.MD5303⁽³⁾ 데이터를 이용하여 더미를 착좌하고 검증해석을 실시하였다. 본 연구과제는 Honda Accord 개발을 위한 연구는 아니며, 물리적 타당성을 갖춘 USNCAP 4 Star 수준의 세단형 기반 승객거동해석 모델을 구성하여, 이를 활용한 차대차 해석과 고정벽 충돌 해석의 승객 거동 및 상해의 유사성을 검증하는 것으로 시험결과와 정합성 검증은 수행하지 않았다. 운전석 기준으로 더미 거동과 상해를 검토하기 위하여 좌측 B-Pillar 하단부에서 추출한 X, Y 방향의 감가속도를 추출하여 해당 모델에 가속도를 부여하는 방식을 활용하였다. 본 방식은 승객거동해석 방법의 하나로 객실부를 고정하고 더미에 상대적으로 차체에서 발생하는 감가속도를 부여하는 해석 방법이다. 이때 더미에서 발생하는 가속도 장에는 1차로 부여한 차체 감가속도 성분이 포함되므로 이를 차감해 보정해 주어야 한다.⁽⁴⁾

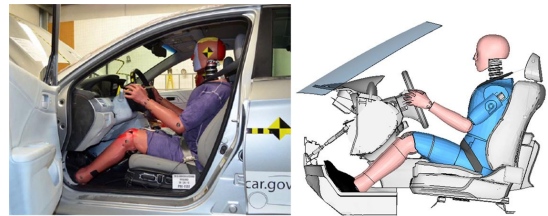


Fig. 10 Comparison of driver dummy position

7. 고정벽, 차대차 충돌 모드간 승객 상해

Hybrid 3 50%lie 남성 더미를 이용해 승객 거동을 상해 관점에서 비교 결과 56KPH 정면과 30도 정면 경사 충돌의 경우 더미 머리 감속도가 고정벽과 차대차에 있어 유사한 거동을 보이나 45도, 60도의 경우 머리 감속도 파형이 서로 큰 차이를 보임을 확인할 수 있었다.

HIC15의 값도 30도 경사 충돌에서는 65(차대차):80

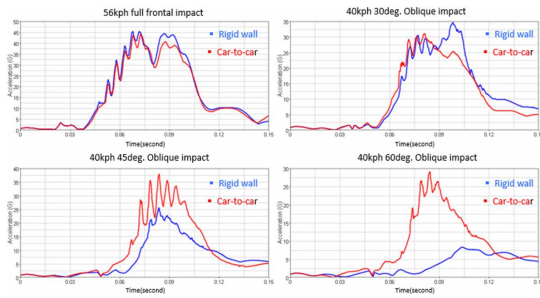


Fig. 11 Comparison of dummy head acceleration

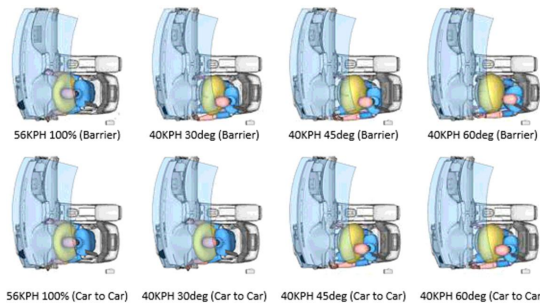


Fig. 12 Comparison of dummy behaviors(at 0.15sec)

(고정벽)로 19% 오차가 있으나 45도에서는 80(차대차): 33(고정벽)로 60% 수준의 차이를 보이기 시작함을 알 수 있다.

8. 결론

본 연구에서는 정면 충돌 및 정면 경사 충돌 시 고정벽의 유용성 및 한계를 확인하는 작업을 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 고정벽 충돌조건은 동일 차량간 정면 및 일부 정면 경사 충돌을 모사할 수 있다.
- 2) 차량 무게 중심점(혹은 ACU)의 차량 진행 방향 속도 변화는 정면 및 일부 정면 경사 충돌 시 충돌 심각성을 표현할 수 있는 물리량이다.
- 3) 고정벽 충돌조건은 30도 정면 경사 충돌까지는 차

대차 충돌조건을 잘 모사하나 그 이상의 경사 충돌 시에는 차대차 충돌조건과 정합성이 떨어진다.

- 4) 두 충돌조건을 차이를 승객거동해석 관점에서 비교하기 위하여, MADYMO를 해석모델을 활용하여 Hybrid 3 50%lie 남성더미 거동을 비교하였다.
- 5) 고정벽 정면 충돌 및 30도 정면 충돌에서 더미 머리의 감소도 파형이 차대차 충돌과 유사한 경향을 보이나, 그 이상의 경사 충돌 시에는 정합성이 떨어진다.

후 기

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

참고문헌

- (1) NHTSA, 2008, "U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS 208, Occupant Crash Protection", National Highway Traffic Administration. Report No. TP208-14.
- (2) NHTSA, 2018, "Vehicle Interior and Restraints Modeling Development of Full Vehicle Finite Element Model Including Vehicle Interior and Occupant Restraints Systems For Occupant Safety Analysis Using THOR Dummies", National Highway Traffic Safety Administration. Report No. DOT-HS-812-545.
- (3) NHTSA, 2012, NEW CAR ASSESSMENT PROGRAM (NCAP) FRONTAL BARRIER IMPACT TEST HONDA OF AMERICA MFG., INC, 2013 HONDA ACCORD EX-L 4-DOOR SEDAN, National Highway Traffic Safety Administration. Report No. NCAP-KAR-13-021.
- (4) SIEMENS, 2019, Simcenter MADYMO Theory Manual.