

경·소·대형 중고 승용차량에 대한 차 대 차 충돌시험을 통한 차체변형 및 인체상해 특성에 관한 연구

임종훈^{*1)} · 박인송¹⁾ · 허승진²⁾

보험개발원 자동차기술연구소¹⁾ · 국민대학교 자동차공학 전문대학원²⁾

A Study on Human Injury Characteristics and Vehicle Body Deformation with Car to Car Crash Test for Crash Compatability

Jonghun Lim^{*1)} · Insong Park¹⁾ · Seungjin Heo²⁾

¹⁾Automobile Technology Department for Korea Automobile Insurance Repair Research & Training Center(KART), 125-1
Susan-2ri, Sulsung-myun, Icheon, Gyeonggi 467-882, Korea

²⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 3 June 2005 / Accepted 30 August 2005)

Abstract : Currently many safety assessment tests are conducted by crashing a vehicle against a rigid or deformable barrier. It is quite rational to evaluate crash performance of a vehicle in a barrier test in terms of vehicle stiffness and strength. However, there has been a lot of debate on whether barrier testing is a duplicate of real world crash collisions. One of the issues is car to car compatability. There are two essential subjects in compatability. One is partner-protection when crashing into another vehicle and the other is self-protection when struck by another vehicle. When considering a car to car frontal crash between a mini car and a large heavy car, it is necessary to evaluate human body stiffness of each vehicle. In this study, in order to evaluate the compatability of cars in car-to-car crashes, four tests were conducted. Test speed of each car is 48.3km/h, and the overlap of the mini and large car is 40%, and the overlap of the small cars is 100%. In all tests, only a drive dummy is used. The test results of the car to car crash test show that vehicle safety standard of mini car is not satisfied compared with large heavy car and HIC value of mini car is higher than large car. In this case observed that the relatively lower stiffness and weight of the mini car resulted in absorbing a large share of the total input energy of the system when crashed into the large heavy car.

Key words : Crash compatability(상호충돌안전 양립성), HIC(머리상해 기준값), Curb weight(공차중량), AIS (약식상해등급)

Nomenclature

a : resultant acceleration of the head, $g=9.81 \text{ m/s}^2$
 t_1, t_2 : time during for which HIC is at a maximum, ms

1. 서론

현재의 많은 안전평가를 위한 충돌실험들은 고정벽(rigid barrier) 또는 고정 변형벽(offset deformable barrier)에 차량을 충돌시킴으로써 이루어지며, 차량의 충돌 안전성 확보를 위한 개발 시험에서도 각 설계 단계별로 각종 충돌 사고를 대비한 실차 충돌실험을 거치면서 설계 검증을 하게 된다. 이러한 고정

*To whom correspondence should be addressed.
jhlim2@kidi.or.kr

벽 충돌실험은 시험의 반복성과 편의성 측면에서 자차의 차체구조 안전성을 평가하는데 매우 효과적이다. 그러나 이러한 일방향 고정벽 충돌실험은 실제 도로상에서 발생하는 차 대 차 충돌사고의 평가요소를 구현하는 한계로 인하여 많은 논란이 되고 있다. 그러한 논점 중 하나가 차체구조의 기하학적 불일치(vehicle structure mismatch)에 기인한 차 대 차 상호 충돌안전성(crash compatibility)을 확보하는 것이다.

특히 경 승용차와 대형 승용차 사이의 중량차이(weight mismatch)에 기인한 소형 승용차 탑승자가 직면하고 있는 위험(partner protection)에 대한 연구는 해외 연구기관에서는 실행되고 있지만, 아직까지 국내에서는 초기 단계에 이르고 있다.

따라서 본 논문에서는 자차의 충돌안전 뿐만 아니라, 상호 충돌 안전성을 확보하고, 고속충돌사고에서 차체구조 안전성이 확보된 차량의 설계제작을 유도하기 위하여 서로 다른 기하학적 구조를 가진 경 승용차와 대형 승용차, 동일한 차체구조를 가진 소형승용차의 차 대 차 충돌시험을 실시하였다. 차체 변형 특성 및 인체상해 특성 분석을 위해 각각 대형 승용차량과 경 승용차량의 차 대 차 충돌실험을 48.3km/h 40% 옵션 시험조건으로 실시하였으며, 동일한 차체구조를 가진 소형 승용차량과 소형 승용차량의 차 대 차 충돌실험을 48.3km/h 완전정면 실험조건으로 실시하였다.

2. 인체상해 평가 방법

인체상해 특성을 평가하는 요소는 대표적으로 HIC(Head Injury Criterion), 흉부가속도, 대퇴부 압축 하중 등이 있으며, 머리상해 기준값(HIC)은 식 (1)과 같이 산출 된다.¹⁾

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

상해위험곡선을 응용하여 머리와 흉부의 AIS ≥ 4의 상해가능성을 직접 계산 할 수 있는 머리상해 가능성 및 흉부상해 가능성에 대한 수식과 머리와 흉부의 복합적인 효과를 고려한 복합상해 가능성은 식 (2), (3), (4)와 같다.^{1,2)}

$$P_{head} = \{1 + \exp[5.02 - 0.00351 \times HIC]\}^{-1} \quad (2)$$

$$P_{chest} = \{1 + \exp[5.55 - 0.0693 \times CHEST\ G]\}^{-1} \quad (3)$$

$$P_{comb} = P_{head} + P_{chest} - P_{head} \times P_{chest} \quad (4)$$

3. 실험장치 및 방법

본 시험은 스피드 액츄에이터(speed actuator), 스티어링 모터(steering motor), 가이드 케이블(guide cable transmitter), 리모트 콘트롤(radio remote control) 등으로 구성된 차량 충돌을 전자제어 방식으로 제어하는 양방향 차 대 차 충돌시험이 가능한 안전성 평가 ECV(Electronically Controlled Vehicle System) 충돌시험 장비를 이용하여 수행 하였다.

시험차량은 각각 100m 전방에서 ± 1% 이내의 충돌오차 범위가 되도록 위치하고, 전원 스위치는 “ON” 상태에서 차체구동이 가능 하도록 셋업 하였다. 시험차량의 중량은 공차중량(curb weight)에 운전자 75kg 무게를 포함하여 시험 중량으로 하였다.

각 인체모형은 Hybrid III 50% male dummy를 사용하여 운전석 시트에 장착하였으며, 가속도계(2,000g, 19,600m/sec²)와 로드셀을 인체모형 더미의 머리, 가슴, 흉부, 대퇴부, Upper Neck 등에 장착 하였다. 또한 충돌 순간의 차체 변형량 및 인체모형 더미의 거동을 계측하기 위하여 고속카메라(Frame rate : 3,000fps, resolution : 512 × 480)를 설치하였다.

실험은 Table 1과 같이 대형 승용차량과 경 승용차량에 대하여 충돌속도 48.3km/h₀^{±1}의 오차한계 내에서 정면 40% 옵션 조건과, 동일 소형 승용차량의 경우 48.3km/h 완전정면 시험조건으로 실시하였다.

Table 1 Experimental conditions for car to car crash test

| Test vehicle | Test vehicle weight (kg) | Crash speed (km/h) | Vehicle displacement (cc) | Remark |
|--------------|--------------------------|--------------------|---------------------------|---------------|
| Large car | 1,513 | 48.31 | 1,997 | 1997 used car |
| Mini car | 896 | 48.37 | 799 | 1997 used car |
| Small C-car | 1,115 | 48.30 | 1,495 | 1994 used car |
| Small D-car | 1,115 | 48.40 | 1,495 | 1994 used car |

Fig. 1은 차 대 차 충돌시험에서 데이터를 구하기 위한 시험장비 구성요소를 나타낸다.

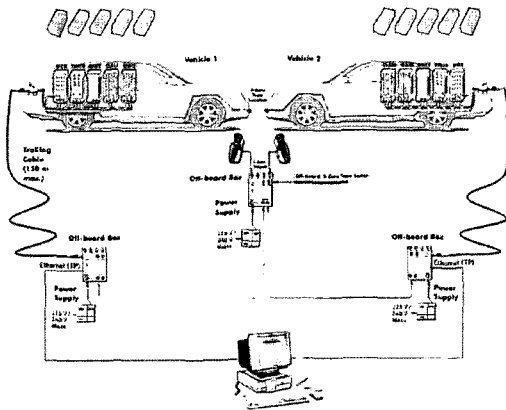


Fig. 1 Car to car crash test with on board boxes configuration diagram

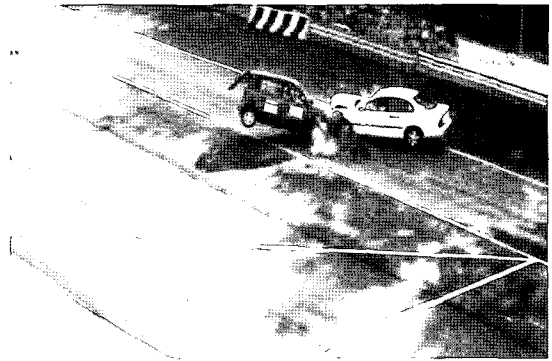
4. 실험결과 및 고찰

본 실험은 경승용 대 대형, 동일한 소형 승용차량 각각의 중고 승용차량에 대해서 각각 photo. 1, photo. 2와 같이 차 대 차 충돌시험을 실시하였다.

경승용 차량의 경우 흉부와 대퇴부 등에서 받는 충격값이 자동차 안전기준을 초과 하였으며, 각각의 소형 승용차량의 경우는 머리와 흉부 상해값이 자동차 안전기준(제 102조)을 초과 하는 것으로 분석 되었다.



(a) Car-to-car crash test of mini and large cars in side view



(b) Car-to-car crash test of mini and large cars in top view
Photo. 1 Mini car to large car crash test with ECV



(a) Car-to-car crash test of small cars in side view



(b) Car-to-car crash test of small cars in side view
Photo. 2 Small car to Small car crash test with ECV

4.1 차체변형 특성 분석

대형 승용차량의 경우 Table 2와 같이 front side member, 카울패널, 대쉬패널, 프론트필라, side sill,

Table 2 Damaged parts of car to car test vehicle

| Car Parts | Damaged contents | | | | Remark |
|------------------|------------------|----------|-------------|-------------|---------------------|
| | Large car | Mini car | Small C-car | Small D-car | |
| Front sidemember | X | X | X | X | X : Damaged part |
| Hood | X | X | X | X | |
| Front panel | X | X | X | X | |
| Sub-frame | X | X | X | X | |
| E/G Assy | - | X | X | X | |
| A-pillar | - | X | X | X | |
| B-pillar | - | X | - | - | |
| Roof panel | - | X | - | - | |

에어백 등의 손상이 발생 되었으나, 승객 탑승 공간(occupant room)은 침입성이 양호한 상태로 유지 되는 것으로 분석 되었다. 그러나 경승용 차량의 경우 엔진룸은 물론 승객룸을 포함한 보디패널 전체의 압괴 손상이 발생하여 차체구조의 취약성 뿐만 아니라, 특히 충돌방향인 운전석 측면의 인체상해 안전에 치명적인 영향을 미치는 것으로 분석 되었다. 이는 초기 운동에너지는 대형차량의 무게 때문에 대형차량에서 크게 나타나지만, 충돌 후 가해지는 순간 운동에너지 및 충돌 후 속도의 변화량은 경승용 차량이 크고 따라서 대형차와 충돌 했을 때 발생하는 전체 충돌 에너지 중 더 많은 부분이 경 승용차량에 흡수되기 때문인 것으로 분석 되었다.³⁾

따라서 자차의 안전성 확보뿐만 아니라, 서로 다른 기하학적 구조에 기인한 차 대 차 충돌사고의 상황에서 충돌 에너지가 승객 탑승공간 까지 전이되는 것을 막고, 전방 충돌안전도 성능 향상을 위해서 연속적인 충격하중의 배분설계 및 다양한 형태의 좌굴새김 설계를 통한 충격하중의 급격한 변화의 억제를 통하여 경승용 차량의 안전성을 확보하여야 될 것으로 분석 되었다.^{4,5)}

동일한 소형 승용차량의 차 대 차 충돌시험의 경우 충돌 후 양 차량의 거동변화는 거의 없었으며, 단지 차량 D에서 충돌 후 차체 뒷부분이 약 1°정도 이동되는 현상을 보였다.

차체 손상 형태는 두 차량 모두 front side member, 카울패널, 대쉬패널, 프론트필라 까지 충격량이 전이 되는 것으로 분석되었다. photo. 3은 시험 후의 각 승용차량의 손상형태를 나타내고 있다.

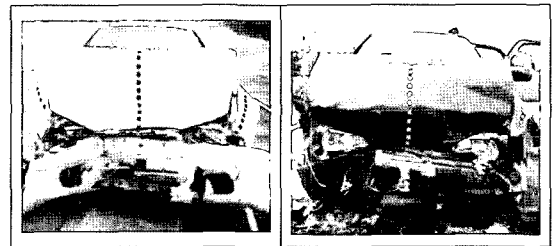
소형 시험차량 모두 충돌방향과 직각으로 충격



(a) After crash test of large car



(b) After crash test of mini car



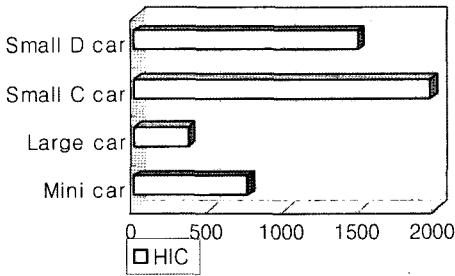
(c) After crash test of small C - car and small D - car
Photo. 3 Damaged type of vehicle structure of each car

에너지가 전달되었으며, 동일한 front side member의 체결형태 및 범퍼 체결구조, 보디형태로 인해 차체 변형은 fire wall의 변형과 함께 벌크헤드 부위를 대칭점으로 상호 유사한 변형 형태를 보이는 것으로 분석 되었다.

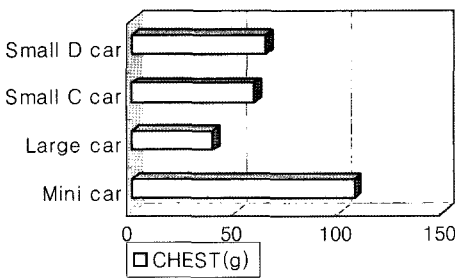
4.2 인체상해 특성 분석

각 시험차량 운전석에 장착한 인체모형 더미에 대한 머리상해 기준값(HIC), 흉부가속도(G), 대퇴부 압축하중(N) 값을 분석한 결과는 Fig. 2와 Table 3과 같으며, 특히 경 승용 차량의 경우 운전석 인체모형(Hybrid III 50th male)의 대퇴부 등이 크래쉬패드가 밀림으로 해서 직접적으로 접촉되어 치명적인 상해를 입는 것으로 분석 되었다.

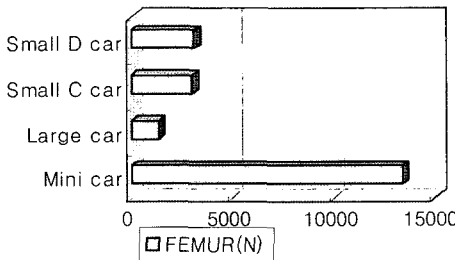
대형 승용차량과 경 승용차량의 흉부가속도(G)



(a) Comparison of HIC for H III 50th male driver in the test vehicles



(b) Comparison of chest Gs for H III 50th male driver in the test vehicles



(c) Comparison of max femur load for H III 50th male driver in the test vehicles

Fig. 2 Comparison of HIC, chest(G), femur(N) for H III 50th male driver in the test vehicle

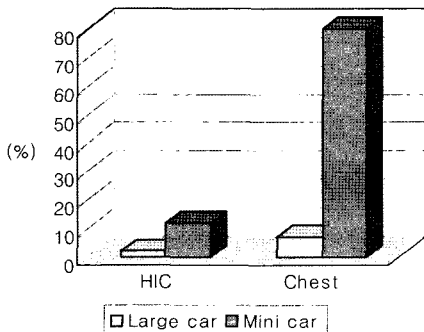


Fig. 3 Risk of AIS ≥ 4 injuries to different body regions in frontal car-to-car crash modes

Table 3 Comparison of HIC, chest(G), femur(N) for H III 50th male driver at car to car crash test

| | HIC | Chest(g) | Femur(N) | Remark |
|-------------|--------|----------|----------|----------|
| Mini car | 751.9 | 107.22 | 13401.81 | 48.3km/h |
| Large car | 359.8 | 38.68 | 1342.65 | 40% 옵션 |
| Small car C | 1961.2 | 59.06 | 3011.49 | 48.3km/h |
| Small car D | 1482.4 | 64.52 | 3075.91 | 완전정면 |

와 상해가능성(AIS ≥ 4)을 분석한 결과, Fig. 3과 같이 80% 이상의 상해 가능성을 나타내는 것으로 분석되었다.⁶⁾

동일한 중고 소형 시험차량 차 대 차 충돌시험의 경우 에어백의 미 장착 및 시트벨트 풀림량의 과다, 인체모형의 머리의 스티어링 휠에 직접적인 접촉 등으로 인해 소형 C차량의 경우 1961.2, 소형 D차량의 경우 1482.4를 기록하여 두 차량 모두 머리상해 기준값(HIC)이 자동차 안전기준(1,000)을 크게 초과하는 것으로 분석 되었다. 특히 소형 C차량의 경우 시트벨트 잠금장치의 불량으로 인한 시트벨트의 비정상적인 풀림으로 인해 더미와 스티어링 휠 간의 직접적인 접촉으로 머리상해 기준값이 소형 D차량과 차이가 있는 것으로 분석 되었다. 흉부 상해치의 경우 시험차량 C는 59.06g @ 80.8ms를 나타내어 안전기준(60g)을 만족 하였으나, 시험차량 D는 64.52g @ 74.7ms를 나타내어 안전기준(60g)을 초과하는 것으로 분석 되었다. 대퇴부 압축 하중의 경우 두 시험차량 모두 자동차 안전기준을 만족하는 것으로 나타났다.

대형 승용차량과 경 승용차량의 차 대 차 충돌시험의 경우 머리상해 기준값(HIC)은 대형 승용차량이 359.8 경 승용차량이 751.9를 기록하여 시험차량 모두 안전기준에는 적합한 것으로 분석 되었으나, 경 승용차량이 대형 승용차량에 비해서 머리상해치가 약 2배 이상 높은 것으로 분석 되었다. 흉부 가속도 값(g)은 대형 승용차량이 38.68g @ 86.9ms, 경 승용차량이 107.22g @ 84.4ms를 기록하여 경 승용차량의 경우 자동차 안전기준(60g)을 초과하였을 뿐만 아니라, 상해 위험가능성이 약 80% 이상인 것으로 분석 되었다.

대퇴부 압축하중(N)은 대형 승용차량의 경우 좌측 800N, 우측 1300N, 경 승용차량의 경우 좌측

13400N, 우측 8200N을 기록하여 특히 경 승용차량의 경우 충돌 시 인체모형의 대퇴부 등이 knee bolster에 직접 강하게 접촉되면서 충격을 입어 치명적인 상해를 입을 수 있으며 대퇴부 압축하중(N)이 자동차 안전기준(9,996N)을 초과하는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 논문에서는 서로 다른 기하학적 구조를 가진 각각의 중고 승용차량에 대해서 차체 변형 형태 및 인체상해 특성의 관점에서 차 대 차(car to car crash test) 충돌실험을 수행하였고, 실차 실험결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 각각의 신차 고정벽 충돌시험을 통한 자차 충돌 안전 기준을 통과한 경 승용 차량의 경우 실제로 도로상에서 발생하는 차 대 차 충돌사고의 경우에는 기하학적 구조의 불일치로 인해 실제 시험에 이용된 경 승용차의 경우 머리상해 기준값은 대형 승용차량에 비해서 약 2배 이상 높은 것으로 나타났으며, 흉부 상해치는 법규상 안전기준(자동차안전기준 제102조)을 초과하는 것으로 분석되었다.
- 2) 대형 승용차량과 경 승용차량의 상호 충돌 시 대형 승용차량의 경우에는 엔진룸 부위에서 최대 충돌에너지가 흡수되어, 승객 탑승공간의 변형이 크게 나타나지 않은 반면에, 경 승용차량은 승객 탑승공간(occupant room) 변형을 통해서 충돌 에너지의 나머지가 흡수되는 것으로 분석되었다.
- 3) 동일한 소형 시험차량의 경우 에어백의 미 장착 및 시트벨트 풀립량의 과다, 스티어링 휠에 인체모형 머리의 직접적인 접촉 등으로 머리상해 기준값(HIC)이 자동차 안전기준(1,000)을 초과하는 것으로 분석되었으며, 특히 대퇴부 부위에 치명적인 상해를 입는 것으로 분석되었다.

References

- 1) I. S. Park, "A Study on the Vehicle Safety at a High Speed Crash and the Vehicle Damageability and Repairability at a Low Speed

Crash," Kookmin University, Ph. D. Dissertation, pp.30-32, 1999.

- 2) Y. Kitagawa and C. Pal, "Evaluation of Vehicle Body Stiffness and Strength for Car to Car Compatability," SAE 2001-01-3098, 2001.
- 3) S. Takizawa, E. Higuchi, T. Iwabe and T. Sugimoto, "Experimental Evaluation of Test Procedures for Frontal Collision Compatability," SAE 2004-01-1162, 2004.
- 4) J. H. Lim, I. S. Park and S. J. Heo, "A Study on Characteristics of Damageability and Repairability with Similar Platform Type at Low Speed 40% Offset Crash Test," Transactions of KSAE, Vol.13, No.2, pp.108-113, 2005.
- 5) J. W. Saunders III, S. Kuppa and A. Prased, "NHTSA's Frontal Offset Research Program," SAE 2004-01-1169, 2004.
- 6) K. Mizuno, K. Wani and H. Yonezawa, "Vehicle Crash worthiness in Full and Offset Frontal Impact Tests," JSAE Review, Vol.24, Issue.2, pp.173-181, 2003.
- 7) B. O'Neill and Y. Kyrychenko, "Crash Incom Patabilities between Cars and Light Trucks Issues and Potential Countermeasures," SAE 2004-01-1166, 2004.
- 8) B. J. Kim, M. S. Kim and S. J. Heo, "Optimization of a F-125 Aluminum Body Considering Static Stiffness, Vibration and Crashworthiness Constraints," Spring Conference Proceedings, Vol.II, KSAE, pp.1064-1066, 2003.
- 9) H. S. Kim and H. J. Yim, "Structure Borne Durability Design of a Vehicle Body Structure," Transactions of KSAE, Vol.12, No.3, pp.109-110, 2004.
- 10) K. Mizuno, K. Tateishi, H. Yonezawa and H. Minda, "Evaluation of Passenger Compartment Strength Car-to-Car Frontal Crashes," SAE 2003-01-0909, 2003.
- 11) S. Fujii, T. Sunakawa and A. Abe "Aggressivity Reducing Structure for Large Vehicles in Frontal Car to Car Crash," SAE 2004-01-1163, 2004.
- 12) M. K. Verma and R. Nagappala, "Significant Factors in Height of Force Measurements for

Vehicle Collision Compatibility,” SAE 2004-01-1165, 2004.

towards Improved Crash Compatability,” SAE 2004-01-1167, 2004.

13) D. Haenchen and T. Schwarz, “Feasible Steps