



## 저속 추돌 시 반발계수에 관한 연구

오원택·김종혁\*·최지훈·하용민·박하선·박종찬

국립과학수사연구원 교통사고분석과

### A Study on the Coefficient of Restitution for Low-speed Rear-end Vehicle Impacts

Wontaek Oh · Jonghyuk Kim\* · Jihun Choi · Yongmin Ha · Hasun Park · Jongchan Park

Traffic Accident Analysis Division, National Forensic Service, 10 Ipchun-ro, Wonju-si, Gangwon 26460, Korea  
(Received 18 April 2017 / Revised 29 June 2017 / Accepted 19 July 2017)

**Abstract** : Demanding excessive settlement or claim for medical expenses when a victim is injured by WAD (Whiplash Associated Disorders) in a minor traffic accident that collided at low-speed comprises a social problem. Experimental studies on the possibility of injury on a rear-end collision at low-speed had been conducted in and out of the country. As the results of these studies showed, the change in speed of the struck vehicle is the most important factor determining whether the occupants are injured or not. In order to estimate the change in speed of the struck vehicle, one needs the coefficient of restitution that fits the low-speed rear-end impact cases. In this study, we used five vehicles to measure the speed changes in the vehicles in line with six low-speed rear-end collision cases with about 8 km/h speed change in the struck vehicles. We obtain the coefficient of restitution in low-speed collision situations and verify the reliability of the coefficient of restitution by applying this to PC-Crash simulation, a traffic accident analysis program.

**Key words** : Coefficient of restitution(반발계수), Low-speed rear-end impact(저속추돌), Vehicle crash test(차량 충돌 실험), Delta-V(속도변화), WAD(Whiplash Associated Disorders, 편타성 상해)

#### 1. 서론

경미한 교통사고에서 피해자가 상해 진단서를 발급받은 뒤 상대차량 운전자에게 과도한 합의금을 요구하거나 과도한 진료비용을 청구하거나 또는 장기 입원을 하는 등의 관행이 사회적 문제로 자리 잡은 지 오래이다. 이러한 사회적 문제를 개선하기 위해 2016년 9월 30일에 보험사기방지 특별법이 시행되었으며, 이를 뒷받침할 충분한 법과학적 연구가 필요하다.

경미한 교통사고 중 후방 추돌 시에 발생하는 편타성 상해(WAD, Whiplash Associated Disorders)는 후방에서 추돌하는 차량에 의해 앞 차량의 차체에

고정된 좌석의 등받이가 탑승자의 등 부분을 순간적으로 전방으로 밀어버리는 현상이 발생되어 추돌 순간 탑승자의 머리 부위는 관성에 의해 정지한 상태가 되어 상체와 머리 부위의 운동 변화에 의해 목 부위가 과도하게 젖혀졌다 굽혀지는 운동이 발생하게 됨에 따라 입게 되는 상해를 의미한다.

후방 추돌 시 피추돌 차량의 순간속도 증가에 따른 편타성 상해의 발생 가능성에 대한 실험적 연구가 국내외에서 진행되었다. 연구 결과들을 종합해 보면, 후방에서 충격하는 차량에 의한 피추돌 차량의 순간속도 증가가 8 km/h 이하인 경우 실험에 참여한 자원자들 대부분이 상해를 입지 않았고, 일부 자원자만이 가벼운 두통이나 일시적인 목의 불편함이 발생하였으며, 특별한 치료 없이 수일 이내에 대

\*Corresponding author, E-mail: jhkim11@korea.kr

체적으로 증상이 사라지는 것으로 보고되었다.<sup>1-5)</sup>

차량 충돌 시 탑승자의 상해 발생 여부를 판단하기 위해서는 기본적으로 여러 공학적, 의학적 변수들을 고려해야한다. 충돌 조건과 탑승자의 상해 발생 간의 상관관계를 명확히 알기는 어려우나, Anderson 등<sup>6)</sup>은 실험을 통해 머리와 목 상해에 대해서는 피추돌 차량의 속도변화가 탑승자의 상해 발생 여부를 결정하는 가장 중요한 요소인 것으로 보고하였다.

피추돌 차량의 속도변화는 양 차량의 질량, 충돌 차량의 충돌속도와 반발계수 등이 주요 변수로 영향을 미친다. 후방 충돌 시 반발계수에 대한 많은 연구가 진행된 바 있다.

Cipriani 등<sup>7)</sup>은 저속 충돌 실험을 통해 반발계수가 0.6 보다 높은 값을 보이며, Siegmund 등<sup>8)</sup>은 저속 충돌 실험에서 일부 반발계수가 0.8을 넘는 경우도 있다고 보고하였다.

또한 Siegmund 등<sup>9,10)</sup>이 실시한 충돌 실험에 따르면 일반적으로 반발계수는 약 0.2 ~ 0.6의 범위 내에서 충돌속도에 반비례하는 경향을 지닌다고 하였다.

이러한 반발계수와 관련된 연구 결과들을 종합해 보면 차량 충돌 시 반발계수는 속도와 관련이 있으며, 조건에 따라 0.2 ~ 0.8 범위의 값이 되는 것으로 확인되었다.

이에 본 연구에서는 경미한 충돌사고에서의 경상해 가능성을 판단하기 위한 기준인 피추돌 차량의 순간 속도 증가가 8 km/h 내외인 저속 충돌 실험을 수행하여 충돌 차량의 속도 변화와 피추돌 차량의 속도변화간의 상관관계를 나타내는 척도인 반발계수를 얻고자 하였다. 이렇게 얻어진 반발계수를 교통사고 해석 프로그램인 PC-Crash에 적용하여 실험 결과와 비교, 분석함으로써 반발계수에 대한 신뢰성을 평가하고, 향후 경미한 충돌사고에 대한 교통사고 분석에 적극 활용하고자 한다.

## 2. 저속 충돌 실험

### 2.1 반발계수 개념

상대 충돌속도에 대한 상대 반발속도의 비를 반발계수  $e$ 라고 한다. 초기 속도  $v_{20}$ 인 피추돌 차량에 초기 속도  $v_{10}$ 인 충돌 차량이 달려와 충돌하였을 경

우에 반발계수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}} \quad (1)$$

where,

$v_{10}$  = the striking vehicle's initial velocity

$v_1$  = the striking vehicle's velocity after impact

$v_{20}$  = the struck vehicle's initial velocity

$v_2$  = the struck vehicle's velocity after impact

질량이  $m_1$ 인 충돌차량이 질량이  $m_2$ 인 피추돌 차량에 충돌할 때 반발계수가 고려된 운동량 변화에 따른 피추돌 차량의 속도 변화는 식 (2)로 산출된다. 충돌 시에 해당되는 반발계수를 알고 있으면 식 (2)로 저속 충돌 상황에서의 피추돌 차량의 속도변화를 구할 수 있고, 피추돌 차량 탑승자의 경상해 여부를 판단할 수 있는 근거로 활용할 수 있다.

$$\Delta v_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} (1 + e)(v_{10} - v_{20}) \quad (2)$$

where,

$m_1$  = the striking vehicle's weight

$m_2$  = the struck vehicle's weight

이에 본 실험에서는 다양한 조건에 대하여 저속 충돌 실험을 수행하고, 충돌 전·후 양 차량의 속도를 측정하여 식 (2)를 통하여 각 조건에 대한 반발계수 값을 산출하고자 한다.

### 2.2 충돌 실험 준비

충돌 실험은 Fig. 1과 같이 국립과학수사연구원의 문막 차량충돌실험장에서 진행되었으며, Table 1과 Fig. 2와 같이 총 5대의 차종에 대하여 속도변화 8 km/h 내외가 되도록 충돌 속도 및 제동 등의 조건을 달리하여 충돌 실험을 수행하였다.

Fig. 3에 보인 영국의 RACELOGIC사에서 개발된 Vbox를 양 차량에 장착하였으며, 충돌 차량에는 10 Hz의 주파수, 피추돌 차량에는 100 Hz의 주파수로 GPS 정보를 기반으로 양 차량의 속도변화를 실시간으로 취득하였다. 충돌 차량에는 몸무게가 81 kg인 운전자가 탑승하였으며, 피추돌 차량에는 몸무게가 60 kg인 운전자가 탑승하였고, 양 차량 운전자의 보



Fig. 1 Low-speed rear-end impacts experiment

Table 1 Experimental vehicles list

No.	Model (maker)	Empty vehicle weight (kg)	Transmission type
1	Credos A (Kia)	1240	Automatic
2	Credos B (Kia)	1230	Manual
3	Matiz (Daewoo)	830	Automatic
4	Sonata III (Hyundai)	1270	Automatic
5	Avante (Hyundai)	1167	Automatic

호를 위해 헬멧 및 안전벨트 등의 보호 장구를 착용하였다.

### 2.3 추돌 실험을 통한 반발계수 산출

Fig. 2에 나타난 차량들에 대하여 제동 상태 및 추돌 차량과 피추돌 차량 등을 달리하여 Table 2에 나타난 바와 같이 총 6개의 상황을 설정하였다.

Case 1에 대한 양 차량의 속도 변화는 Fig. 4와 같으며, 이 그래프에서 추돌 차량이 7.74 km/h로 정지 상태에 있는 피추돌 차량을 추돌한 후, 추돌 차량의 속도는 1.90 km/h로 감속되고 피추돌 차량의 속도는 0 km/h에서 증가하여 최대 6.70 km/h에 도달하는 것을 보여준다. 양 차량의 충돌시점은 피추돌 차량의

Table 2 Conditions of experimental cases

Case	Striking vehicle	Struck vehicle	Braking state of struck vehicle
1	Credos A (Driver 60 kg)	Credos B (Driver 81 kg)	No brake
2	Credos A (Driver 60 kg)	Credos B (Driver 81 kg)	Parking brake
3	Credos A (Driver 60 kg)	Credos B (Driver 81 kg)	Full brake
4	Matiz (Driver 60 kg)	Sonata III (Driver 81 kg)	No brake
5	Sonata III (Driver 60 kg)	Matiz (Driver 81 kg)	No brake
6	Avante (Driver 60 kg)	Sonata III (Driver 81 kg)	No brake



(a) Credos A, 1997, KIA Co.



(b) Credos B, 1997, KIA Co.



(c) Matiz, 1998, Daewoo Co.



(d) Sonata III, 1996, Hyundai Co.



(e) Avante, 1995, Hyundai Co.

Fig. 2 Experimental vehicles



Fig. 3 Vbox of RACELOGIC Co.

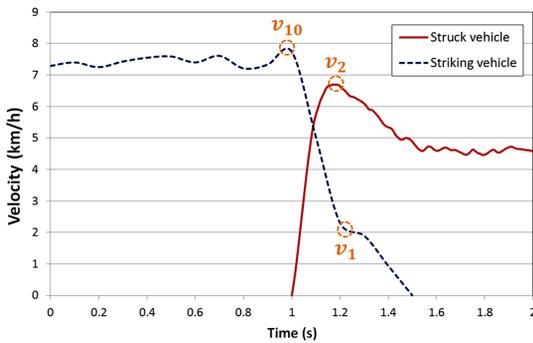


Fig. 4 Velocity profiles of experimental vehicles

Table 3 Experimental results

Case	$v_{10}$ (km/h)	$v_1$ (km/h)	$v_2$ (km/h)	Crash interval (sec)	Restitution coefficient ( $e$ )
1	7.74	1.90	6.70	0.17	0.62
2	7.96	1.04	6.26	0.18	0.66
3	8.23	1.50	7.40	0.17	0.72
4	9.47	1.57	7.50	0.16	0.63
5	6.68	2.23	6.94	0.16	0.71
6	10.40	1.80	10.60	0.17	0.85

속도가 0 km/h에서 증가하기 시작하는 시점으로 볼 수 있으며, 충돌시간은 충돌시점에서 피추돌 차량의 속도가 최대가 되는 시점까지의 시간 간격이다.

Case 1을 포함한 총 6개의 충돌 상황에 대하여 피추돌 차량의 속도 변화가 8 km/h 내외가 되도록 7.74 km/h ~ 10.40 km/h로 추돌 차량이 진행하여 정지 상태에 있는 피추돌 차량을 충격하였으며, 피추돌 차량의 속도변화는 6.26 ~ 10.60 km/h를 나타내었고, 앞서 언급한 식 (1)에 양 차량의 충돌 전·후 속도를

적용해서 각각의 충돌 상황에 대한 반발계수를 산출하여 Table 3에 정리하였다.

Case 1 ~ 3은 동일한 차종에 대하여 피추돌 차량의 제동상태를 달리한 것이다. 피추돌 차량의 기어가 중립 상태에 있는 Case 1의 반발계수는 0.62이며, 주차 브레이크 상태인 Case 2의 반발계수는 0.66, 완전 제동 상태에 있는 Case 3의 반발계수는 0.72로 피추돌 차량의 제동력이 증가함에 따라 반발계수가 증가하는 결과를 보였다.

Case 4와 5는 경차인 마티즈와 중형차인 쏘나타 III간의 충돌 상황으로 두 경우에 대한 충돌 속도가 달라 차급에 따른 경향성을 파악하기는 어려우나 반발계수가 0.63과 0.71로 측정되었다.

Case 6은 준중형차인 아반떼와 중형차인 쏘나타 III간의 충돌 상황으로 반발계수가 0.85로 나타나며, 다른 충돌 상황들 보다 가장 큰 반발계수를 보였다.

또한 각각의 충돌상황에서의 충돌시간은 0.16 ~ 0.18초로 피추돌 차량의 제동상태 및 차종 등의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보였다.

### 3. 시뮬레이션을 통한 반발계수 검증

본 연구에서는 앞서 저속 충돌 실험을 통해 얻은 반발계수를 교통사고해석 프로그램인 PC-Crash에 적용하여 실험 결과에 대한 신뢰성 평가와 향후 교통사고분석에 있어서의 활용성을 확인하고자 하였다.

본 연구에서 사용된 PC-Crash는 교통사고 해석 및 재구성을 위한 상용화 프로그램으로 오스트리아 Graz 대학의 Dr. Hermann Steffan에 의해 개발되었다. 뉴턴 역학인 운동량보존법칙 및 에너지보존법칙을 기반으로 충돌 전 차량의 초기속도, 진행경로, 충돌자세, 차량의 감가속도 및 타이어와 노면 간 마찰 계수 등의 다양한 변수들을 고려하여 사고에 대한 역학적 해석 및 3차원의 사고 재구성이 가능한 프로그램이다.<sup>11,12)</sup>

#### 3.1 해석 조건

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 각각의 실험 차량들의 제원을 PC-Crash에 입력하였고, 충돌 실험 상황과 유사하도록 양 차량의 위치, 추돌 속도 및 제동 상태 등을 설정하였다. Fig. 6과 같이 앞서 충돌실험을 통

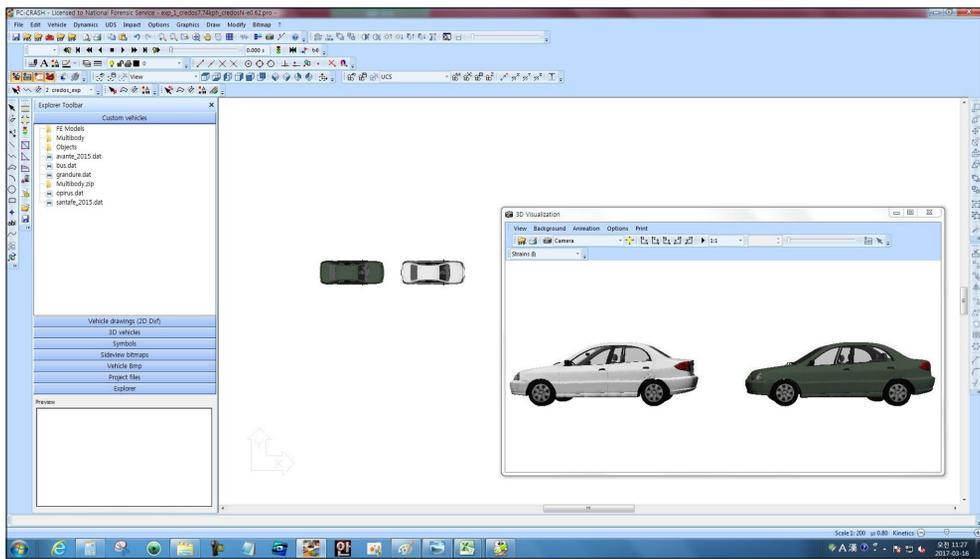


Fig. 5 Simulation screen of PC-Crash (Case 1 in Table 3)

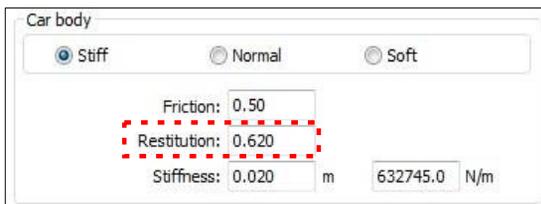


Fig. 6 Input parameters of PC-Crash (Case 1 in Table 3)

해 얻은 반발계수를 적용하였다. 실험 결과에서 확

인된 충돌시간 즉, 충돌되는 시점부터 피추돌차량의 속도가 최대가 되는 시점까지의 시간간격과 시뮬레이션에서의 충돌시간이 같게 되도록 차량의 강성을 설정하였다.<sup>13)</sup>

### 3.2 반발계수의 신뢰성 검토

Table 3의 Case 1에 대하여 해석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 실제 추돌 상황과 유사하게 피추돌 차

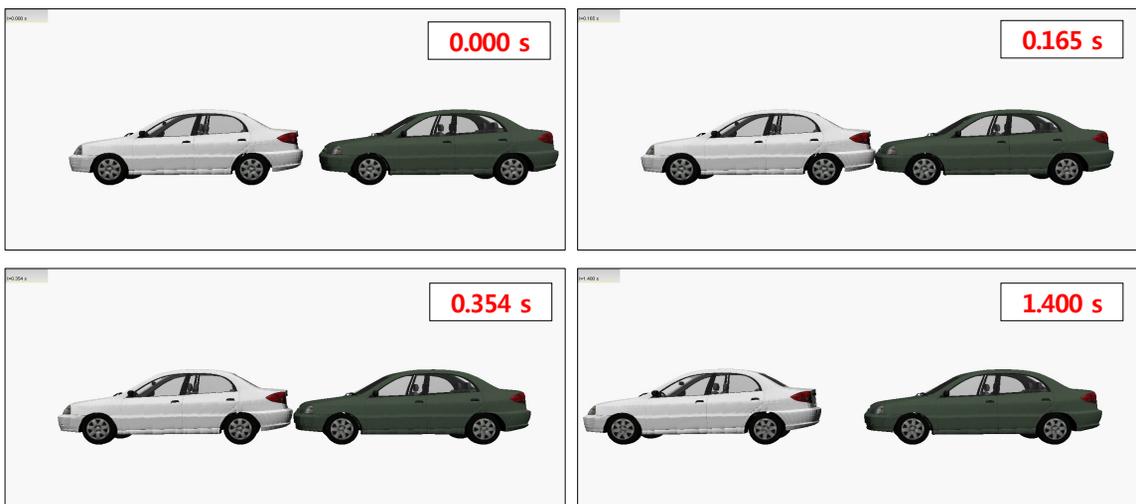


Fig. 7 Simulation results (Case 1 in Table 3)

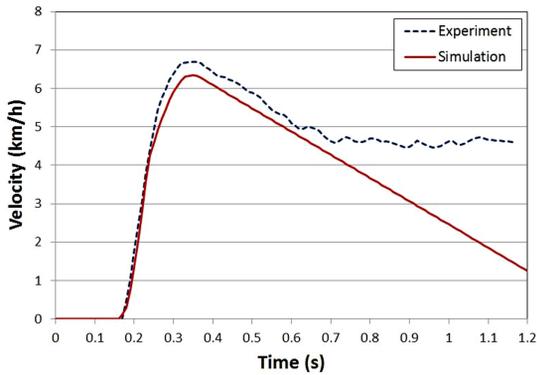


Fig. 8 Velocity profiles of rear vehicle in experiment and simulation (Case 1 in Table 3)

Table 4 Comparison of experiment  $\Delta v$  and simulation  $\Delta v$

Case	Experiment $\Delta v$ (km/h)	Simulation $\Delta v$ (km/h)	Error (%)
1	6.70	6.34	5.37
2	6.26	6.65	6.23
3	7.41	7.16	3.37
4	6.94	7.16	3.17
5	3.85	3.73	3.12
6	10.65	10.17	4.51

량이 충격방향으로 밀리는 것을 확인할 수 있었다.

피추돌 차량의 속도 변화 계산 결과를 실험 결과와 함께 Fig. 8에 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 속도가 0 km/h에서 최대 속도로 증가할 때까지 그래프의 기울기가 매우 유사하다.

피추돌 차량의 최대 속도는 실험 결과인 6.70 km/h 보다 PC-Crash 해석 결과가 약간 낮은 값인 6.34 km/h로 산출되었으며, 그 결과 오차가 5.37%로 계산되었다.

앞서 진행한 방법과 동일한 과정으로 다른 추돌 상황에 대해서도 피추돌 차량의 속도 변화를 비교하여 계산한 오차를 Table 4에 정리하였다. 오차의 범위가 3.12% ~ 6.23%로 약 5% 내외로 실제 상황과 매우 근접하게 예측되는 것을 알 수 있다.

오차 발생 원인으로서는 제동 마찰계수, 구름 마찰계수, 추돌 차량의 크리핑(Creeping), 충격 부위의 강성 등의 입력값들이 실제 실험 환경을 완벽하게 PC-Crash에 반영하는데 한계가 있어 오차가 발생한 것으로 사료된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 경미한 추돌사고에서의 경상해 가능성을 판단하기 위한 기준인 피추돌 차량의 속도 변화가 8 km/h 내외인 저속 추돌 실험을 수행하였다. Vbox를 이용하여 양 차량의 속도변화를 실시간으로 측정하여 양 차량의 속도변화 간의 상관관계를 나타내는 척도인 반발계수를 산출하였다.

실험 결과를 반영하여 구한 반발계수를 교통사고 해석 프로그램인 PC-Crash에 적용하여 산출된 속도 변화 결과와 비교 분석함으로써, 실험을 통해 구한 반발계수에 대한 신뢰성을 평가하였다.

- 1) 실험차량 5대를 이용한 총 6번의 저속 추돌 상황에서의 반발계수는 0.62~0.85이다. 추돌 차량과 피추돌 차량이 동일한 차종일 경우, 피추돌 차량의 제동력이 증가함에 따라 반발계수가 증가하는 결과를 얻었다.
- 2) 저속 추돌 실험으로 구한 반발계수를 PC-Crash에 적용하여 저속 추돌 상황을 재구성한 해석 결과는 실제 추돌 상황과 유사한 결과를 보여주며, 피추돌 차량의 속도변화가 5% 내외의 오차 내에 있는 것을 확인하였다.

이러한 일련의 과정을 통하여 기존 문헌에서 언급된 넓은 범위의 반발계수의 적용에서 벗어나 피추돌 차량의 순간속도 증가가 8 km/h 내외인 저속 추돌 상황에 적합한 반발계수를 적용하는 경미한 추돌 사고에서의 상해 가능성 여부에 대한 분석에 있어 실험 자료에 근거한 해석으로 과학적이고 객관적인 예측 분석이 가능할 것으로 사료된다.

향후 추돌 뿐만 아니라 측면 충돌 등 다양한 형태의 경미한 충돌과 최근에 출시된 차종들에 대해서도 실험적 연구가 필요한 것으로 사료되며, 이를 통해 여러 사고 상황에 적합한 반발계수의 적용 체계 확립이 가능할 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 행정자치부 주관 국립과학수사연구원 과학수사감정기법연구개발사업의 지원을 받아 수행한 연구임(NFS2017TAA01).

## References

- 1) M. Kornhauser, "Delta-V Thresholds for Cervical Spline Injury," SAE 960093, 1996.
- 2) W. H. M. Castro, "Do Whiplash Injuries Occur in Low-speed Rear Impacts," Journal of Eur Spine, Vol.6, pp.366-375, 1997.
- 3) A. J. Watts, Low Speed Automobile Accidents; Chapter 13. Neck Injury, 2nd Edn., Lawyers & Judges Publishing Co., Tucson, 1999.
- 4) H. Steffan and A. Moser, "The Collision and Trajectory Models of PC-CRASH," SAE 960886, 1996.
- 5) N. Lim, S. Shim and H. Jung, "Whiplash Injury Case Studies through Low Speed Rear-end Crash Tests," Transactions of KSAE, Vol.24, No.4, pp.432-438, 2016.
- 6) R. D. Anderson, J. B. Welcher, T. J. Szabo, J. J. Eubanks and W. R. Haight, "Effect Braking on Human Occupant and Vehicle Kinematics in Low Speed Rear-End Collisions," SAE 980298, 1998.
- 7) A. L. Cipriani, F. P. Bayan, M. L. Woodhouse, A. D. Cornetto, A. P. Dalton, C. B. Tanner, T. A. Timbario and E. S. Deyerl, "Low Speed Collinear Impact Severity: A Comparison Between Full Scale Testing and Analytical Prediction Tools with Resitution Analysis," SAE 2002-01-0540, 2002.
- 8) G. P. Siegmund, D. J. King and D. T. Montgomery, "Using Barrier Impact Data to Determine Speed Change in Aligned, Low-Speed Vehicle-to-Vehicle Collisions," SAE 960887, 1996.
- 9) G. P. Siegmund, M. N. Bailey and D. J. King, "Characteristics of Specific Automobile Bumpers in Low-Velocity Impacts," SAE 940916, 1994.
- 10) G. P. Siegmund, D. J. King, J. M. Lawrence, J. B. Wheeler, J. R. Brault and T. A. Smith, "Head/Neck Kinematic Response of Human Subjects in Low-Speed Rear-End Collisions," SAE 973341, 1997.
- 11) I. Han, "Reconstruction Analysis of Vehicle-pedestrian Collision Accidents: Calculation and Uncertainties of Vehicle Speed," Transactions of KSAE, Vol.19, No.5, pp.82-91, 2011.
- 12) S. Park, K. Yang, H. Lee, N. Park, S. Hong, J. Yoo and H. Kim, "A Study of Impact on Head and Neck Using Human Volunteer Low-Speed Rear Impacts Tests," Korean Journal of Legal Medicine, Vol.37, pp.66-72, 2013.
- 13) D. Kim, D. Yun, J. Park, S. Ha and J. Park, "A Case Study on Speed Analysis of the Rear-end Collision Accident," Transactions of KSAE, Vol.24, No.6, pp.724-729, 2016.