

# Evaluation of neck injury on occupants in low speed rear-end collision with braking system

Han A Lee<sup>1</sup>, Dong Hyun Kim<sup>1</sup>, Dong Hyun Hwang<sup>1</sup>, Ye Eun Song<sup>1</sup>, Dae Eun Kim<sup>1</sup>,  
Seo Hyun Kim<sup>1</sup>, Lee Yong Song<sup>2</sup>, Dohyung Lim<sup>2</sup>, Han Sung Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Biomedical Engineering, The University of Yonsei, Wonju, 220-710

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, The University of Sejong, Seoul, 143-747

## ABSTRACT

**Objective:** The purpose of this study is to evaluate the braking system, which affects neck of occupants directly and vehicle kinematics refers to low speed rear-end collision. **Background:** Since whiplash injury is the most significant injury caused by low speed rear-end collision, we particularly examined the incidence of injury in the neck when the collision happens. Although many research have previously analyzed degree of injury occurred in various collision, which were either presence or absence of seat belt, seatback angle etc., research about the influence of braking system in collision is limited. Therefore, we focused on the influence of braking system to drivers, particularly their neck, when low speed rear-end collision happens. **Method:** Experiments were conducted using a sled which was simulated the low speed rear-end collision. Eleven male volunteers (average age: 25.0±1.7years; height: 173.3±2.5cm; weight: 70.1±2.9kg) participated in the experiment. Two conditions were given: 1) unaware occupant without braking, 2) unaware occupant with braking. The 3D motion captured data were collected from the results of dynamic sled tests and analyzed by calculating effective impact speed and two criteria of neck injury which include neck injury criteria (NIC), shear and tensile force on the occipital condyle. **Results:** The average peak effective impact speed increased in collision without the braking system as compared with the braking system ( $P<0.005$ ). However, the NIC peaks showed no significant differences between with and without the braking system. The shear and tensile force on the occipital condyle increased during collision with the braking system as compared without the braking system. **Conclusion:** When low speed rear-end collision happened, both shear force and tensile force were measured significantly higher when a braking system was activated. Also effective impact speed, which relates to the incidence of injury, tended to be higher when a braking system was activated. These results reveal that both the braking system and vehicle kinematics are considerable factors affecting neck injury of occupants when low speed rear-end collision happens.

Keywords: Low speed rear-end collision, Braking system, Neck injury, Effective impact speed, Sled test

## 1. Introduction

교통사고 상해는 차량 간의 충돌 및 추돌이나 차와 사람 간의 충돌로 인해 발생하는 외적 손상을 말하며, 높은 발생 빈도로 인해 심각한 사회적 손실이 야기되고 있다. 교통사고에 의한 상해는 추돌속도, 방향, 인지여부 등 다양한 사

고 상황에 따라 상이한 양상을 보인다. [1, 2] 사고에 따른 피해를 최소화하기 위해서는 사고 상황에 따른 정확한 상해 정도를 파악할 수 있어야 한다. 그러나 골절이나 장기 손상과 같이 뚜렷한 상해 양상이 드러나는 고속추돌(45km/h 이상)과 달리 저속추돌(15km/h 이하)의 경우, 외형적으로 상해 양상이 잘 드러나지 않으므로 실제 상해 발생 유무나 사후 진단에 많은 어려움이 있다.

보험개발원의 자동차보험 통계에 의하면, 저속추돌 시 탑승자의 부위별 치료비 중 후방추돌에 의해 선행 차량 탑승자가 입은 경추 편타성 손상(whiplash injury)에 대한 치료비가 높은 비중을 차지하였다. [3] 일본에서는 저속추돌에 의한 경추손상 입원율이 6.5%인 것에 반해 국내의 경우 58.5%로 약 9.5배 높은 것으로 드러나 저속추돌이 실제 손상을 유발하는지, 아니면 의학적으로 객관적 진단이 어렵다는 점을 악용한 모럴 해저드 문제인지에 대해 여전히 많은 논란이 있다. 이러한 논란으로 인해 국내외에서 저속추돌에 관한 연구들이 수행되어 왔다.

Deutscher 등은 85명의 피험자들에게 충돌속도 10-15 km/h로 추돌실험을 수행한 결과, 일부가 가벼운 고통을 호소하였으나 장기적 통증 환자는 없는 것으로 조사되었다. [4] McConnell 등은 7명의 자원자를 대상으로 실제 차량을 이용하여 유효충돌속도 5.8-10.9 km/h로 후방추돌 시험을 수행한 결과 모두 별도의 치료가 필요 없는 경상으로 결론지었다. [5] 국내에서는 Hong 등이 최초로 30-50대 남성 50명을 대상으로 5-8 km/h의 속도로 후방 추돌 사고를 재현하여 경추 상해가 없음으로 보고하였다. [6] 그러나 대부분의 선행 연구는 후방 추돌 상황만을 모사하여 경추 손상 가능성을 평가하였다.

이에 본 연구에서는 저속 후방추돌 시 일어날 수 있는 다양한 상황 중 차량의 브레이크 유·무에 따른 영향을 분석해보고자 한다. 이를 위해 20-30대 성인 남성을 대상으로 저속후방추돌 시험을 수행하고, 획득한 데이터를 기반으로 브레이크 유무에 따른 3가지의 목 상해지수 분석을 통해 실제 상해 가능성을 예측해 보았다.

## 2. Method

### 2.1 피험자 선정 및 추돌시험 시스템

실험은 근골격 및 신경계에 질환이 없는 20대 남성 11명을 대상으로 진행하였다 (평균 신장 및 체중: 173.3±2.5cm, 70.1±2.9kg).

추돌속도는 무게 진자(weight pendulum)의 무게와 높이 조절을 통해 결정할 수 있다. 본 실험에서는 모든 실험의 초기 속도를 10km/h로 고정하였다. 브레이크 조건을 적용하기 위해 추돌실험 시스템에 유압식 브레이크 시스템을 추가적으로 부착하였다 (그림 1). 실험은 브레이크 유무에 따라 각각 한번씩 진행되었으며, 이전 조건의 실험(브레이크 무)이 다음 실험(브레이크 유)에 미치는 영향을 최소화하기 위해 개별 실험 사이에 3시간의 휴식기를 두었다.

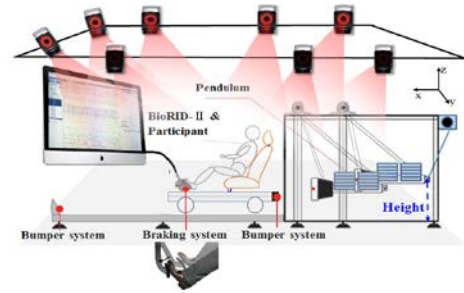


Figure 1 Sled test and 3D motion capture System

### 2.2.3차원 모션 캡처 시스템 및 마커셋

충돌 시 발생하는 3차원 운동학 데이터는 모션 캡처 시스템인 VICON MX-T10S (VICON Motion Capture Systems, Ltd., Oxford; UK)를 통해 획득하였다. 본 시스템은 샘플링 주파수가 200Hz인 8대의 적외선 카메라를 통해 반사 마커의 움직임을 감지한다.

본 실험에서는 목과 머리의 움직임을 보다 정밀하게 분석하기 위해 플러그인 보행 마커 셋(Plug in gait marker set)에 3쌍(6개)의 추가 마커를 부착하였다(그림 2). 추가된 마커는 표 1과 같다.

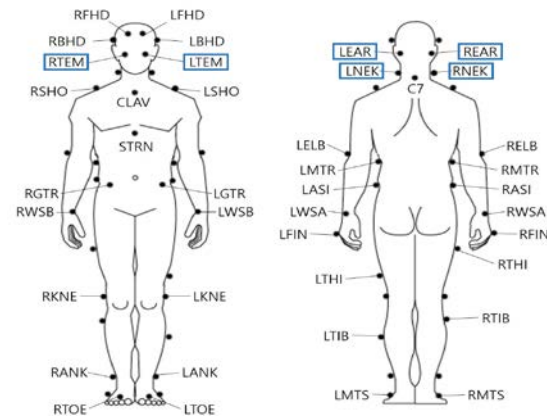


Figure 2 Customized Marker Set

Table 1 Added markers

Table 1 Added markers	
L/RTEM (Left or Right Temple)	To understand more precise movement of cervical joint, these marker were added.
L/REAR (Left or Right Ear)	
L/RNEK (Left or Right Neck)	

## 2.3 상해정도 예측을 위한 상해지수

### 2.3.1. 유효충돌속도

유효충돌속도(effective impact speed,  $\Delta v$ )는 운동량보존의 법칙과 복원계수(coefficient of restitution,  $e$ )에 의해 산출할 수 있다. [1]

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2 \quad (1)$$

$$e = \frac{V_{separation}}{V_{closing}} = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} = \frac{v_s}{v_c} \quad (2)$$

$V_{closing}$ 은 충돌하는 순간의 두 물체 간 속도변화,  $V_{separation}$ 은 충돌 이후 두 물체가 이동하면서 발생하는 속도변화를 의미한다. 이때  $m_1, v_1$ 은 충돌을 유발한 차량(bullet),  $m_2, v_2$ 은 충돌을 당한 차량(target)의 질량과 속도로 정의한다.

선행 연구에 의하면, 고속충돌 상황에서는 충돌체에 큰 변형이 일어나므로 복원계수를 0으로 가정하나, 저속충돌에서는 복원계수가 충돌운동학에 영향을 미칠 수 있다고 보고하고 있으므로,  $\Delta v$ 를 계산 과정에서  $e$ 값을 고려한 수식을 유도하였다. 일반적으로  $e$ 값은 0.2-0.8 범위 내에서 산출된다. [7-10] 식 (1), (2)를 통해 유도한  $\Delta v$ 는 다음과 같다.

$$\text{Bullet:} \quad \Delta v_1 = \frac{m_2(1+e)v_c}{m_1+m_2} \quad (3)$$

$$\text{Target:} \quad \Delta v_2 = \frac{m_1(1+e)v_c}{m_1+m_2} \quad (4)$$

한편, 식 (1), (3), (4)은 충돌 물체 간의 영향만 고려하였으므로 불균형한 외력(unbalanced external force)은 반영하지 않았다. 고속충돌에서는 지면과 타이어 사이의 저항력(impulse)은 충돌 물체 간 운동량 변화에 무시할 수 있는 값이나, 저속충돌의 경우 이 역시 고려되어야 한다. [8, 10, 11] 따라서 브레이크 상황을 고려한  $\Delta v$ 는 아래와 같이 식 (3), (4)에 외력 구간을 적용한 변형 수식을 유도하였다.

$$\text{Bullet:} \quad \Delta v_1 = \frac{m_2(1+e)v_c + \sum F_{ext}\Delta t}{m_1+m_2} \quad (5)$$

$$\text{Target:} \quad \Delta v_2 = \frac{m_1(1+e)v_c - \sum F_{ext}\Delta t}{m_1+m_2} \quad (6)$$

이때  $\sum F_{ext}\Delta t$ 는 시스템에 가해지는 불균형한 외력의 총합으로 브레이크 시 발생하는 저항력을 의미한다.

따라서 target에서 받는  $\Delta v$ 는 브레이크가 고려되지 않은 상태에서는 식 (4)을 통해, 브레이크를 고려했을 때는 식 (6)을 통해 계산하였다.

### 2.3.2. 목 상해지수 (NIC)

목 상해지수 (Neck injury criteria, NIC)은 7번째 경추(C7)와 후두관절(occipital joint)의 수평방향 상대가속도와 상대속도에 대한 상해지수로 아래 수식의 최대값을 구한다. [12]

$$NIC(t) = 0.2 \times a_{rel}(t) + (v_{rel}(t))^2 \quad (7)$$

$a_{rel}$ 은 수평방향 상대가속도이고,  $v_{rel}$ 은 수평방향 상대속도이다. 0.2는 Boström 등이 제안한 길이변수이다. 선행연구에서는 상해 한계값으로  $15m^2/s^2$ 가 제시되어 있다.

### 2.3.3. 목 상부 전단력 및 인장력

머리와 목이 연결된 부인 후두과(occipital condyle)의 전단력 및 축방향 인장력을 확인하는 지수이다. 최대 전단력 및 인장력을 구한다. [13]

## 2.4 데이터 분석

운동학적 분석을 위한 데이터는 Matlab (Matlab, The Mathworks Inc., Natick, MA, USA) 소프트웨어를 활용하였다. 이때, x-축은 관상면, y-축은 시상면, z-축은 수평면을 기준으로 혹은 이와 평행한 면을 기준으로 하여 위치데이터를 추출하였다. 체절별 질량 중심은 R. Dumas et al. (2007) 가 제시한 체절별 좌표계 (segment coordinate systems, SCSs)에 따른 질량중심의 위치와 다른 해부학적 지표 2개 사이의 거리를 기반으로 비례식을 생성하여, 이를 본 실험 데이터에 적용하여 질량중심을 설정하였다.

통계는 통계전용 프로그램인 Graph Pad Prism 5.0을 통해 수행하였고, 이표본 t검정을 통해 유의수준 0.05 ( $p < 0.05$ )이 하면 통계적으로 유의한 것으로 설정하였다.

## 3. Results

### 3.1 유효충돌속도

Table 2 Coefficient of restitution and Effective impact speed of occupants

Weight	Coefficient of restitution (e)		Effective impact speed (Target $\Delta v$ )	
	Braking	No-Braking	Braking	No-Braking
73.3	0.273	0.295	5.390	6.936
67.5	0.272	0.274	5.547	6.933
71.0	0.274	0.276	5.584	6.879
75.8	0.280	0.278	5.397	6.799
67.8	0.266	0.267	5.462	6.887

72.7	0.275	0.274	4.449	6.839
67.5	0.281	0.284	5.556	6.990
69.8	0.260	0.266	5.472	6.846
66.8	0.281	0.288	5.598	7.025
67.0	0.280	0.273	5.621	6.935
72.0	0.277	0.272	5.513	6.840
<b>Mean</b>	<b>0.275</b>	<b>0.277</b>	<b>5.417</b>	<b>6.901</b>
<b>Stdev</b>	<b>0.007</b>	<b>0.009</b>	<b>0.330</b>	<b>0.070</b>

결과에서 보는 것과 같이 복원계수는 브레이크 유무와 관계없이 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 값은 각각  $0.275 \pm 0.007$  (브레이크 유),  $0.277 \pm 0.009$  (브레이크 무)로 선행 연구에서 제시한 범위 내의 값으로 산출되었다.

반면, 유효추돌속도는 브레이크가 없는 경우가 브레이크 있는 경우에 비해 큰 양상을 보였다. ( $P < 0.005$ )

### 3.2 목 상해지수 (NIC)

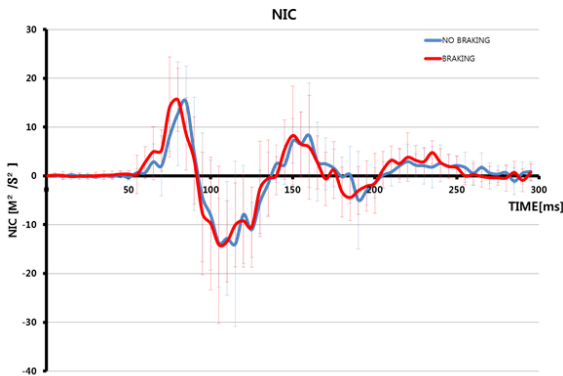


Figure 3 NIC

Table 3 NICmax of groups

Peak NIC [ $m^2/s^2$ ]	Braking	No-Braking
	$15.58 \pm 6.48$	$15.18 \pm 7.31$

NIC 최댓값은 브레이크 유무와 관계없이 추돌 후 50ms 이내의 시간 범위 내에 분포하였다. 브레이크가 있는 경우 ( $15.58 \pm 6.48 m^2/s^2$ )가 없는 경우 ( $15.18 \pm 7.31 m^2/s^2$ )에 비해 큰 값이 도출되었으나 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다. 두 경우 모두 평균값은 상해 한계값 ( $15 m^2/s^2$ )의 경계에 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.3 목 상부 전단력 및 인장력

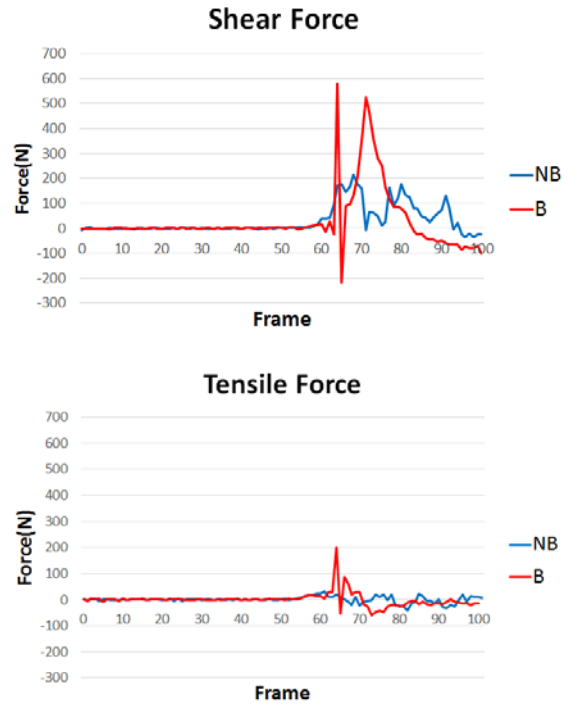


Figure 4 Upper neck Fx, Upper neck Fz

브레이크가 없는 경우에 비해 브레이크가 있는 경우가 최대 전단력 및 최대 인장력 모두 더 큰 경향을 보였다.

## 4. Conclusion

후방추돌 시 인체의 상해정도는 일반적으로 충격가속도가 클수록, 충격지속시간이 길수록 심하다. 다시 말하면, 충돌에 따른 속도변화량인 유효추돌속도가 클수록 충격가속도가 높아져 차내 승객이 받는 충격손상도 커지게 된다.

유효추돌속도의 결과를 보면 (table 2),  $\Delta v$ 는 브레이크가 없는 경우가 브레이크가 있는 경우에 비해 큰 값을 보임을 확인할 수 있다. 본 결과에 의하면 저속 추돌 상황에서는 브레이크가 없는 상태에서의 추돌이 인체에 상해 가능성을 높이는 것으로 예측된다. 이는 고속추돌 상황과는 반대 양상이다. 고속추돌의 경우, 브레이크가 걸려있는 상태에서 후방추돌이 발생하면 브레이크가 없는 경우에 비해 편타성 손상 비율이 더욱 높은 것으로 알려져 있다. [12]

Robert D. Anderson의 연구에 따르면 고속추돌 상황에서는 추돌에 의한 운동량이 매우 크므로 정지 상태를 유지시키는 바닥과의 저항력을 무시할 수 있다. 그러나 저속추돌 시에는 운동량이 적으므로 바닥 저항력이 소멸시키는 일부의 운동량도 무시할 수 없는 크기로 적용되어 목 상해를

유발할 수 있다고 판단된다.

NIC의 경우, 브레이크가 있는 경우에 미세하게 더 큰 경향을 보였다. 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않으나 브레이크가 있는 경우가 브레이크가 없는 경우에 비해 상해 발생 가능성이 좀 더 높다는 것을 나타냈다. 두 경우 모두 평균값이 상해 한계값( $15\text{m}^2/\text{s}^2$ )의 경계에 분포하고 있으나 실험 후 통증을 유발된 사례가 없는 것으로 나타났다. 이는 건강한 20대 남성들을 대상으로 실험을 진행하였기 때문이라 판단된다. 추후 연구에서는 다양한 연령대의 피험자를 대상으로 실험을 진행하여 상해 한계값을 객관화되어야 할 것이다.

목 상부의 전단력과 인장력은 브레이크 유무에 따라 NIC 결과와 유사한 경향을 보여주고 있으며, 인장력에 비해 전단력이 우세한 값을 보인다. 이는 경추 상해가 발생하게 될 경우, 상해 방향은 전단력 방향, 즉 관상면을 기준으로 앞, 뒤 방향에 따라 존재할 가능성이 큼을 유추해볼 수 있다.

본 연구에서는 저속 후방추돌 시 차량의 브레이크 유·무에 따른 영향 분석을 통해 상해 가능성을 예측해 보고자 하였다. 이를 위해 대표적인 3가지 목 상해지수를 분석하였다. 분석 결과, 3가지 지수가 모두 동일한 경향을 나타내지 않았다. 하지만 각각의 지수에서, 특히 NIC와 유효추돌 속도 상해지수에서 브레이크의 유무가 목 상해에 있어 중요한 지표 될 수 있을 것으로 판단된다. 추후 연구에서는 보다 많은 피험자를 대상으로 실험을 수행하고, 연령이나 성별에 따른 실험이 진행 되어야 할 것으로 판단된다.

## References

- [1] Robert D. Anderson et al., Effect of braking on human occupant and vehicle kinematics in low speed rear-end collisions, SAE TECHNICAL PAPER SERIES (ISSN 0148-7191), 1998
- [2] Huichang Jo, Youngeun Kim, A Study on Influence of the Impact Direction on the Neck Injury during Low Speed Rear Impacts, Transactions of KSAE, 15(2), pp. 135-142, 2007
- [3] Automobile insurance statistical reports, Korea insurance development institute, 2002-2006.
- [4] Deutscher C. Flow of movement of vehicle occupants in a rear-end collision: determining objective measured values for assessing type and severity of injury, Doctorate in engineering, 1994
- [5] McConnel WE et al., Human head and neck kinematics after low velocity rear-end impacts understanding "whiplash", Proceedings of the 39th Stapp Car Crash Conference, 215-38, 1995
- [6] Hong SW et al., Motion analysis of head and neck of human volunteers in low-speed rear impact, J Auto-Vehicle Safety, 4, pp. 37-43, 2012
- [7] Bailey MN, King DJ, Romilly DP, Thompson R, "Characterization of Automotive Bumper Components for Low Speed Impacts", Proceedings of the Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference VII, pp 190-203, Vancouver, BC, June 1991
- [8] Bailey MN, Wong BC, Lawrence JM, "Data and Methods for Estimating the Severity of Minor Impacts", Society of Automotive Engineers (SAE No. 950352), 1995
- [9] Bailey M, King D, Siegmund G "Minor Impact Investigations: Basic Fundamentals and Application of Collision Test Data", SATAI (Southwestern Association of Technical Accident Investigators) Low Speed Seminar, Phoenix, AZ, July 20-21, 1995
- [10] Emori RI, Horiguchi J, "Whiplash in Low Speed Vehicle Collisions", Society of Automotive Engineers (SAE No. 900542), 1990
- [11] Howard RP, Bomar J, Bare C, "Vehicle Restitution Response in Low Velocity Collisions", Society of Automotive Engineers (SAE No. 931842), 1993
- [12] Boström, Ola, et al. "A new neck injury criterion candidate-based on injury findings in the cervical spinal ganglia after experimental neck extension trauma." PROCEEDINGS OF THE 1996 INTERNATIONAL IRCOBI CONFERENCE ON THE BIOMECHANICS OF IMPACT, SEPTEMBER 11-13, DUBLIN, IRELAND, 1996
- [13] Siwoo Kim, Sojung Shim, Myungwon Suh, Comparison Head-Neck Movement and Neck Injury Criteria of BioRID II in Rear-impact Sled Test, Transactions of KSAE, 18(1), pp. 51-57, 2010

## Author listings

**Han A Lee:** hanah4378@naver.com

**Highest degree:** Bachelor, Department of Biomedical Engineering, Yonsei

**Position title:** Undergraduate, Department of Biomedical Engineering, Yonsei

**Areas of interest:** Ergonomics, Biomechanics

**Dong Hyun Kim:** aspayul@gmail.com

**Highest degree:** Bachelor, Department of Biomedical Engineering, Yonsei

**Position title:** Graduate student, Department of Biomedical Engineering, Yonsei

**Areas of interest:** Ergonomics, Biomechanics

**Han Sung Kim:** hanskim@yonsei.ac.kr

**Highest degree:** PhD, Dept. of Mechanical Eng., Applied Mechanics, UMIST

**Position title:** Professor, Department of Biomedical Engineering, Yonsei

**Areas of interest:** Biomechanics, Microgravity, Machine Design & Production