

자원자 저속추돌실험을 통한 두부와 경부 충격량 연구

박성지¹ · 양경무² · 이흥석¹
박남규¹ · 홍성우³ · 유재호⁴
김한성⁵

¹국립과학수사연구원 법과학부
교통공학과

²국립과학수사연구원 서부분원

³한국법과학연구회 교통사고분과

⁴서울스카이병원 정형외과

⁵연세대학교 의공학과

A Study of Impact on Head and Neck Using Human Volunteer Low-Speed Rear Impact Tests

Sung-Ji Park¹, Kyungmoo Yang², Hong-Seok Lee¹, Nam-Kyu Park¹,
Seong Woo Hong³, Jae-Ho Yoo⁴, Hansung Kim⁵

¹Traffic Engineering Div., Forensic Science Dept., National Forensic Service, Seoul, Korea

²Western District Office, National Forensic Service, Jangseong-gun, Jeollanam, Korea

³Traffic Accident Div., Forensic Engineering Research Institute, Seoul, Korea

⁴Department of Orthopedic Surgery, Seoul Sky Hospital, Seoul, Korea

⁵Department of Biomedical Engineering, Yonsei University, Wonju-si, Gangwon, Korea

Whiplash injury in low-speed traffic accidents are not objectively verified by medical equipment, thereby creating scope for misuse, which has resulted in huge social losses worldwide. The aim of this study was to examine the influence of low-speed vehicular rear-impact collisions on middle-aged men, and to analyze the head and neck injury criteria for the symptomatic human volunteers. Data was examined from the results of 50 dynamic sled tests, originally performed by Hong et al. (2012). In the previous tests, 50 men aged 30~50 years were exposed to an impulse equivalent to a bumper-to-bumper rear collision under medical supervision, and no resulting whiplash injury was identified. In this study, for 6 subjects who experienced dull aches over their bodies, head injury criteria (HIC_{15}) and neck injury criteria (N_{km}) were calculated according to the accelerations, forces, and moments at the occipital condyle measured by motion capture system. Although there were no changes in magnetic resonance imaging findings in all subjects at the pre-/post-test orthopedic examination, 6 subjects revealed mild aches around the shoulder, back, or lumbar area, and their symptoms disappeared within 2 days. The head and neck injury criteria, HIC_{15} (3.086 ± 2.942) and N_{km} (0.077 ± 0.064) were obtained, and the maximum HIC_{15} and N_{km} were found to be significantly lower than the critical injury assessment reference values (HIC_{15} : 700, N_{km} : 0.3). Moreover, even though 2 subjects were exposed to the same level of change of velocity (7.9 km/h), each N_{km} was significantly different (0.179, 0.057). One can therefore conclude that N_{km} can vary according to voluntary movements in the human subject.

Key Words : Whiplash injuries, Human experimentation, Automobiles, Traffic accidents

접 수 : 2013년 4월 29일

수 정 : 2013년 5월 15일

게재승인 : 2013년 5월 22일

책임저자 : 홍성우

(151-742) 서울시 관악구 관악로 1

서울대학교 신소재공동연구소 317호

전화 : +82-2-880-8625

FAX : +82-2-872-7109

E-mail : reality23@gmail.com

공동 책임저자 : 양경무

(515-820) 전라남도 장성군 서삼면 축령

로 687 국립과학수사연구원 서부분원

전화 : +82-61-393-8445

FAX : +82-61-393-8444

E-mail : rudany@korea.kr

서 론

편타손상(whiplash injury)은 교통사고 순간 발생하는 관성

력 때문에 경추가 S자로 휘어지는 과신전(hyper-extension)과 과굴곡(hyper-flexion)에 의해 돌기사이관절(facet joint) 부위에 발생하는 모멘트에 의해 기인하여 목 근육과 경추주위를 싸고 있는 근육, 인대 등이 늘어나거나 찢어져 붓고 아픈 증

제가 발생하는 것이다. 특히, 정면 또는 측면 충돌사고보다 후방 추돌사고에서 빈번히 발생하며 경추부의 장기간 통증과 장애를 유발함으로써 사회적, 경제적인 비용이 많이 소요된다. 미국에서는 연간 270,000건의 후방 추돌로 인하여 발생한 경추염좌로 27억 달러(한화 2.9조) 비용이 소요되었고,¹⁾ 유럽의 경우, 약 100억 유로(한화 14조)로 추정된다.²⁾ 국내에서도 회계연도 2006년 기준 보험사고 전체 부상자 중 약 640,000명이 후방 추돌사고로 인해 상해를 입었고 이 중 51.5%가 경추염좌이며 전체 치료비는 6,511억 원에 달했다.³⁾ 국내 교통사고로 인한 경추염좌 치료비에 관한 연구는 객관적 진단이 어려운 경추상해의 특성을 활용하여 합의금을 조속히 수령하는 현상이 발생하고 있음을 보고하였다.⁴⁾ 특히, 우리와 유사한 신체조건을 가지고 있는 일본에서 교통사고로 인한 경추염좌 입원율은 6.5%이지만 국내는 58.5%로 약 9.5배에 이르는 수준이다. 저속 후방 충돌 시 발생하는 편타손상의 명확한 기준을 산출하기 곤란하기 때문에 해외에서는 1990년대부터 지원자 실험을 통해 상해 여부 및 증상에 관한 비교연구를 활발히 수행하였다. 수많은 자원자 실험에 따르면, 편타손상의 주요 손상 기전은 유효충돌속도(change of velocity, ΔV)이며 직접적인 차량의 충돌속도가 아닌, 충돌 시 차량 간의 에너지 교환 후에 탑승자에게 작용하는 순간 속도로 일반적으로 충돌속도보다 40~60% 정도 낮다. Deutscher 등⁵⁾은 85명의 다양한 자원자에 대해 충돌실험장치 사용하여 유효충돌속도 10~15 km/h로 실험하였고, 그 중 일부가 가벼운 두통(19명), 경·요추부 통증(2, 7명), 현기증(5명)을 호소하였으나 장기적 통증 환자는 없었다. McConnell 등⁶⁾은 7명의 자원자로 실제 차량으로 후방 추돌 실험을 유효충돌속도 5.8~10.9 km/h로 수행하였고, 모두 별도 치료가 필요 없는 경상이었다. Castro 등⁷⁾은 19명 대상, 충돌실험 장치로 유효충돌속도 8.7~14.2 km/h로 충격하여 5명의 지원자가 경·요추부 증상을 보였으나, 3~7일 이내 증상이 사라졌다. 이를 근거로 무해한 충격량을 유효충돌속도 10~15 km/h로 결론을 내렸다. Ono 등⁸⁾은 12명에 대해 충돌실험 장치를 사용하여 4, 6, 8 km/h의 유효충돌속도로 충격하여 1명이 다음날 경추부 불편함을 호소하였으나 수일 이내 자연적으로 증상이 사라졌다. Welcher 등⁹⁾은 4명에 대해 유효충돌속도 4, 8 km/h로 10회씩 반복 실험하였고, 모두 2일 이내 증상 사라지고 4개월간 모니터링을 한 결과 증상이 없었다. 국내에서는 최초로 Hong 등¹⁰⁾이 30~50대 남성 50명을 대상으로 5~8 km/h의 유효충돌속도로 후방 추돌 사고를 재현하였고, 전원 경추상해는 발생하지 않았고, 6명이 어깨, 등, 허리에 대한 가벼운 증상을 실험 다음날에 호소하였고, 2일 이내 증상은 소멸하였다. 이러한 실험의 목적은 단순히 편타손상을 유발하지 않는 유효충돌속도만 측정하는 것이 아니라, 자동차 시트 특성 및 머리지지대와 두부의 거리,^{8, 9, 11)} 인체의 연령¹⁰⁾ 및 성별^{12, 13)} 등 인체 또는 차량 특성을 고려한 다양한 조건에 따른 인체반응

및 충격량에 관한 연구를 동시에 수행하였다. 본 연구에서는 한국인 30~50대 남성을 대상으로 한 Hong 등의 실험을 소개하고, 그 중 2일 이내에 소멸한 증상을 호소한 피험자 6인에 대해 기구학(kinematics) 및 동역학(kinetics) 분석을 통해 상해 지수를 산출하여 두부 및 경부에 작용한 충격량 분석을 하고자 한다.

대상 및 방법

Hong 등이 수행한 실험의 목적은, 주로 기왕병력이 없고 사고경험이 없는 건강한 청년을 대상으로 한 해외 연구와는 달리, 실질적으로 운전을 많이 하는 연령대로 경미한 퇴행성 변화, 디스크 변성이 있는 30~50대 남성(평균 나이 44.5세, 체중 68.9 kg, 신장 171 cm)을 대상으로 해외연구를 통해 비교적 안전하다고 알려진 유효충돌속도 8 km/h 이하의 후방 추돌실험을 수행하여 편타손상의 증상 유무 확인 및 충돌 시 인체의 동작분석을 위한 기초자료 축적에 있다. 이 실험은 국내 최초 인체 대상 충돌실험으로 연세대학교 임상시험심사위원회(연구부-513)를 통해 안전성 및 윤리성을 승인받았으며, 실험 전·후 정형외과 전문의의 검진을 통해 의학적 안전성 검증을 하였고, 경부 자기공명영상(MRI)을 촬영하여 Kang 등¹⁴⁾이 제시한 MRI 등급 시스템에 따라 다음과 같이 피험자를 분류하였다(Fig. 1).

Grade 0은 정상, Grade 1은 지주막하 공간의 50% 이상이 폐쇄되었지만, 척수의 변형은 없음, Grade 2는 척수의 변형은 있으나 척수 신호 강도의 변화는 없음, Grade 3은 압박 부위에서 T2 강조 영상 상 척수 신호 강도의 증가가 있음을 나타낸다. 이를 기준으로 실험 전 55명의 상태를 검진하고 MRI 상태

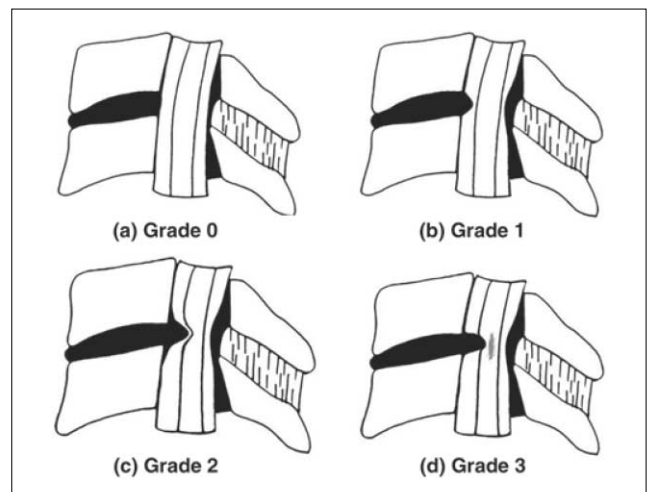


Fig. 1. Schematic diagrams of grading system of cervical canal stenosis in sagittal scans of cervical spines. According to this scheme, MRIs of human subjects were classified.

를 평가하였다. Grade 0는 14명, Grade 1은 28명, Grade 2는 8명, Grade 3은 5명으로 Grade 2 이하에 포함되는 50명은 본 실험에 참여하였고 Grade 3에 해당하는 5명(9%)은 실험과 무관하게 기 내상을 보유한 상태여서 실험에서 제외하였다(Fig. 2).

전문의의 소견으로 일상생활에 문제가 없는 피험자에 한해 검진 후 1주일 이내에 저속 후방 충돌실험을 수행하였다. 실험 후 증상 발생과의 상관분석을 위하여 충돌실험은 1인당 1회로 제한하였고, 안전띠를 착용하지 않은 피험자에게 전가된 충격량은 실제 저속 추돌사고(20 km/h 이하)와 유사한 충격량(유효충돌속도 5~8 km/h)이었다. 편안한 상태를 유지하기 위해 이어폰으로 음악을 듣는 상태에서 승모근에 부착된 근전도 센서를 감시하여 비인지 상태일 때 실험을 개시하였다. 16개 카메라가 장착된 동작분석 시스템인 VICON MX-T40S (VICON Motion Systems, Ltd., Oxford, UK)와 머리지지대와 시트 등받이에 압력센서 F-scan[®]과 Comformat[®] (Tekscan Inc., Boston, USA)를 부착하여 피험자의 거동 및 충격량을 측정하였다. 마커셋은 등 부위에 착용하는 마커를 생략하는 대신 뒤통수 관절용기(Occipital Condyle) 위치와 목의 상단과 하단 중간에 부착하는 Customized Plugged-in Gait를 사용하였다. 그 결과, 실험 후 임상적 진단을 수행하여 50명 피험자 전원 경추상해가 없었음을 확인하였고, 실험 전·후 MRI 비교결과 역시 변화는 없었다. 그 중 6명의 피험자는 2일 이내에 자연 소멸

하는 어깨, 등의 경미한 근육경직을 감지하였다. 변위로 연구진 중 1인이 자원하여 실시한 유효충돌속도 10 km/h에서도 충돌 후 약 15분 후부터 좌측 승모근에 미약한 근육경직이 발생하였으나, 통증은 없었고, 운동반경(Range of motion, ROM)에도 차이가 없었으며, 별다른 처치 없이 약 4시간 후 증상이 사라졌다.

본 논문은 Hong 등의 실험에서 경미한 근육경직을 감지한 피험자 6명을 대상으로 두부, 경부에 미친 충격량 분석을 통해 상해위험곡선(injury risk curve) 기반의 상해지수에 대하여 고찰하고자 한다. 해외에서는 동물,¹⁵⁾ 시체 또는 신체 일부 부위,^{16, 17)} 충돌더미¹⁸⁾를 이용한 충돌실험을 통해 실험대상에 대한 기구학 및 동역학 분석을 통해 각 신체부위별 상해위험곡선을 도출하고 이를 기반으로 상해지수(injury criteria)를 개발하였다. 임계상해지수(IARV, injury assessment reference value)는 주로 자동차 안전평가 시 충돌더미로부터 측정된 상해지수 값과 비교하여 상해 심도를 측정할 때 사용된다. 이러한 상해지수를 이용하여 Park 등¹⁹⁾은 사고재현 시 상해 발생 여부 판단에 활용하고, Kullgren 등²⁰⁾은 실제 차량에 유효충돌속도를 측정할 수 있는 장치를 장착한 후 후방 추돌사고가 발생한 79건에 대해서 차량의 충격량과 탑승자의 상해 인과성에 대해 연구하였다. 두부상해지수(Head Injury Criteria, HIC₁₅)는 식 (1)과 같이 머리 무게중심에서 측정된 가속도로부터 산출된다.

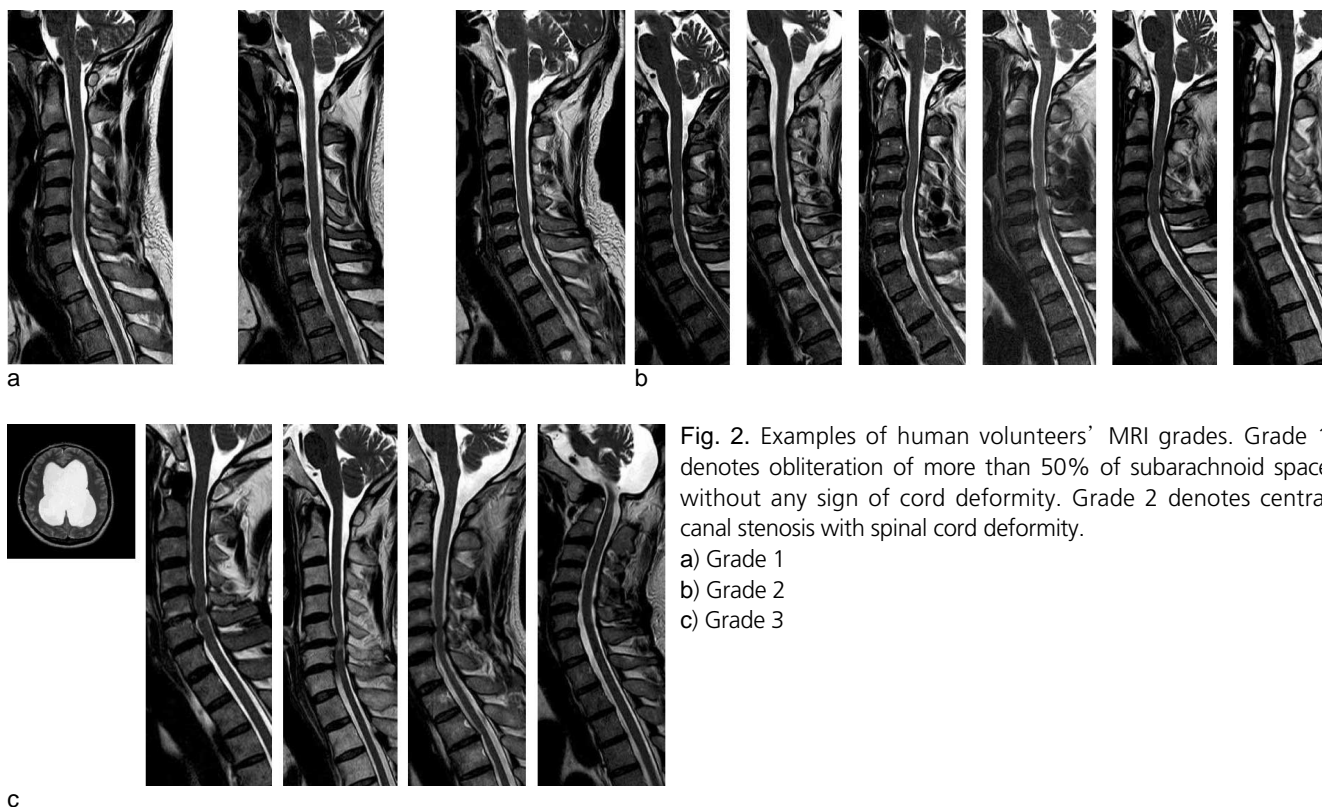


Fig. 2. Examples of human volunteers' MRI grades. Grade 1 denotes obliteration of more than 50% of subarachnoid space without any sign of cord deformity. Grade 2 denotes central canal stenosis with spinal cord deformity.

- a) Grade 1
- b) Grade 2
- c) Grade 3

$$HIC_{15} = \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}_{\max} \quad (1)$$

$a(t)$ 는 머리의 가속도, t_1 과 t_2 는 각각 15 ms 구간의 시작과 끝점이다.

경부상해지수(Neck Injury Criteria, N_{km})는 식 (2)와 같이 경추상단부에서 측정되는 전단력과 뒤통수 관절용기에서 측정되는 모멘트 값으로부터 산출된다.

$$N_{km}(t) = \frac{F_x(t)}{F_c} + \frac{M_{OC_y}(t)}{M_c} \quad (2)$$

F_x 는 목 상단부에서의 전단력, F_c 는 인체가 견딜 수 있는 임계 전단력 845 N, M_{OC_y} 는 뒤통수 관절용기에서의 모멘트, M_c 는 임계모멘트로 굴곡 시에는 88.1 Nm, 신전 시에는 47.5 Nm

이다.

결 과

경미한 증상을 보인 6명에 대한 실험 전·후 MRI 판독 소견은 Table 2, 최대가속도 및 신체 부위별 상해지수는 Table 3과 같다. 6명의 HIC_{15} 는 3.086 ± 2.942 , N_{km} 은 0.077 ± 0.064 로 임계 상해 기준값으로 알려진 각각 $HIC_{15} = 700$, $N_{km} = 0.3$ 보다 훨씬 낮은 수치를 보였다. 44번과 46번 사례를 비교해 보면, 유효충돌속도는 같으나 46번은 두부와 몸통의 가속도가 높고 대신 경부상해지수가 낮았지만, 44번은 두부와 몸통의 가속도가 낮은 대신 경부상해지수가 3배 이상 높았다. 44번의 경우, 충돌 시 46번에 비해 상대적으로 경부의 긴장상태가 덜하여 경부의 굴곡과 신전이 뚜렷하게 나타난 반면, 46번은 경부

Table 1. Test Summary (Age, Weight, Stature, Pre-Test Medical Check-up, Change of Velocity, Post-Test Check-up, Symptoms)

No.	Age	Wt. (kg)	Ht. (cm)	MRI	ΔV (km/h)	Symptom (duration)	No.	Age	Wt. (kg)	Ht. (cm)	MRI	ΔV (km/h)	Symptom (duration)
1	39	85	171	2	4.7	Normal	26	48	74	171	0	6.2	Normal
2	47	70	178	1	6.0	Normal	27	40	49	165	1	6.6	Normal
3	43	64	170	1	4.8	Normal	28	47	69	169	2	6.0	Normal
4	47	60	165	0	5.0	Normal	29	46	62	163	1	6.5	Lumbar dull ache [†] (< 0.5 days)
5	47	73	166	1	5.0	Normal	30	49	76	181	2	6.2	Shoulder dull ache [†] (< 2 days)
6	47	65	165	2	5.0	Normal	31	49	60	167	0	7.4	Normal
7	33	68	170	0	4.9	Normal	32	51	60	165	1	6.6	Normal
8	33	58	176	1	5.1	Normal	33	49	46	166	2	7.6	Normal
9*	34	65	173	0	4.9	Normal	34	51	85	173	0	7.1	Normal
10	52	65	163	1	5.4	Normal	35	50	66	167	1	7.5	Normal
11	42	86	171	1	5.2	Normal	36	43	72	172	1	7.0	Normal
12	49	80	173	1	5.3	Normal	37	51	67	165	1	7.3	Normal
13	43	70	178	1	5.5	Normal	38	51	68	173	1	7.2	Normal
14	47	70	178	1	5.0	Normal	39	47	65	173	0	7.6	Lumbar dull ache [†] (< 2 days)
15*	49	66	170	1	5.3	Normal	40*	49	59	170	2	8.0	Normal
16	33	87	178	1	5.3	Normal	41	53	64	162	1	6.5	Normal
17	42	68	170	1	5.3	Normal	42	46	69	174	0	7.0	Normal
18	42	53	165	0	5.6	Normal	43	39	64	173	0	7.8	Normal
19	46	73	169	0	5.2	Normal	44	32	87	180	1	7.9	Shoulder dull ache [†] (< 2 days)
20*	46	63	173	1	5.5	Normal	45	32	66	168	0	8.1	Normal
21	51	65	162	2	6.4	Normal	46	46	71	170	1	7.9	Back dull ache [†] (< 2 days)
22	46	70	163	2	6.5	Normal	47	36	79	178	1	7.8	Normal
23	51	80	177	0	6.2	Normal	48	32	82	171	1	6.6	Normal
24	52	59	171	1	6.5	Normal	49	40	72	175	0	7.8	Normal
25	50	78	175	1	7.0	Lumbar dull ache [†] (< 1 days)	50	36	70	174	1	7.9	Normal
							51 [‡]	33	67	180	0	9.8	Slight muscle stiffness on left trapezius [†] (< 4 hours)

*: Braced; †: All symptoms disappeared naturally without any medical treatment; ‡: Volunteer among researchers

Table 2. Description of Cervical Spine Status of the Symptomatic Individuals

Subject	Age (year)	MRI (pre-test)	MRI (post-test)	Symptom (duration)
No. 25	50	- Mild degeneration of intervertebral disc with posterolateral protrusion, C5–6	No change	Lumbar dull ache (< 1 days)
No. 29	46	- Multiple level disc degeneration, C3–6 - Protrusion of soft and hard disc, C5–6 with effacement of cerebrospinal fluid space - Hypertrophy of ligamentum flavum, C5–6	No change	Lumbar dull ache (< 0.5 days)
No. 30	49	- Protrusion of soft and hard disc, C5, 6 with effacement of cerebrospinal fluid space - Hypertrophy of ligamentum flavum, C4–6 - Herniation of C5–6 intervertebral disc and hypertrophy of posterior rim of end plate (hard disc) with entrapment of spinal canal, central to left	No change	Shoulder dull ache (< 2 days)
No. 39	47	- Multiple level disc degeneration, C3–6 - Mild degeneration of intervertebral disc with posterolateral protrusion, C5–6	No change	Lumbar dull ache (< 2 days)
No. 44	32	- Multiple level disc degeneration, C4–7 - Mild degenerated of intervertebral disc with posterolateral protrusion, C5–6	No change	Shoulder dull ache (< 2 days)
No. 46	46	- Protrusion of disc C3–4 - Herniation of C5–6, C6–7 intervertebral disc and protrusion to central spinal canal	No change	Back dull ache (< 2 days)

Table 3. Comparison of Responses and Injury Criteria Values of the Symptomatic Individuals

Subject	ΔV (km/h)	MRI —	HIC ₁₅ * —	Head max. accel (G)	Headrest max. impulse (kgf)	N _{km} [†] —	Chest max. accel (G)	Backseat max. impulse (kgf)
No. 25	7.0	1	1.585	7.0	2.8	0.120	4.7	98.1
No. 29	6.5	1	0.478	4.0	3.4	0.001	3.7	123.5
No. 30	6.5	2	0.842	5.1	2.6	0.030	3.0	96.0
No. 39	7.6	0	6.058	11.7	1.7	0.074	6.3	99.4
No. 44	7.9	1	2.072	6.9	1.2	0.179	10.2	114.5
No. 46	7.9	1	7.483	14.1	6.2	0.057	17.1	124.4

*HIC₁₅: Head injury criteria ; [†]N_{km}: Neck injury criteria

의 긴장상태가 심하여 굴곡·신전운동이 미약하여 두부와 흉부가 상대적으로 더 많이 가속되었다. 따라서 피험자에게 작용한 충격량의 총량은 피험자의 거동에 따라 두부, 경부, 흉부 등으로 분산되어 작용함을 알 수 있다.

전체 피험자의 HIC₁₅ 값은 약식상해등급(Abbreviated injury scale, AIS) 기준, 두부에 AIS 3+ 상해가 발생할 위험도인 HIC₁₅ = 700보다 훨씬 낮았다. 상대적으로 비교하면, 유효충돌속도가 7 km/h 이하인 경우와 이상인 경우 HIC₁₅ 값 차이가 3~10배까지 차이가 나나, 유효충돌속도가 낮은 조건(46번)이라도 높은 조건(51번)보다 HIC₁₅ 값이 높은 경우가 있었다. 이 경우는 HIC₁₅ 값이 높은 대신 시트 등받이에 작용하는 충격력이 상대적으로 11% 낮게 나왔다. 이는 충돌 시 충격력이 시트를 통해 인체에 전달되었을 때, 상체로 전달되는 힘을 상체가 견디는 대신, 두부가 전방으로 가속되었음을 알 수 있다. 이는 피험자의 순간적인 거동에 따라 충격량 분포가 달라

질 수 있음을 보여준다. 경부상해지수인 N_{km}은 일반적으로 후방 충돌 조건에서의 좌석 안전성 평가에서는 경부상해지수는 인체 형상의 충돌더미로부터 측정된다. 유럽의 신차평가 프로그램인 EuroNCAP²¹⁾에서는 가속도의 가혹도(Low, medium, high severity)에 따라 0.3 미만인 경우 후방 충돌에 좋은 안전성을 갖고 있다고 평가를 한다. 이번 경미한 증상이 발생한 6명의 피험자들에게서 측정된 N_{km}은 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 최대값이 0.179로 경추상해가 발생하기 위한 기준값인 0.3보다 낮았고, 실제 피험자에게서 경부상해는 보고되지 않았다.

고 찰

본 연구의 한계는 해외 연구사례를 토대로 안전성, 윤리성을 확보하기 위해 속도변화량인 유효충돌속도 8 km/h 이하로 제한을 두어 실험을 했기 때문에, 상해가 발생하는 임계치에 관

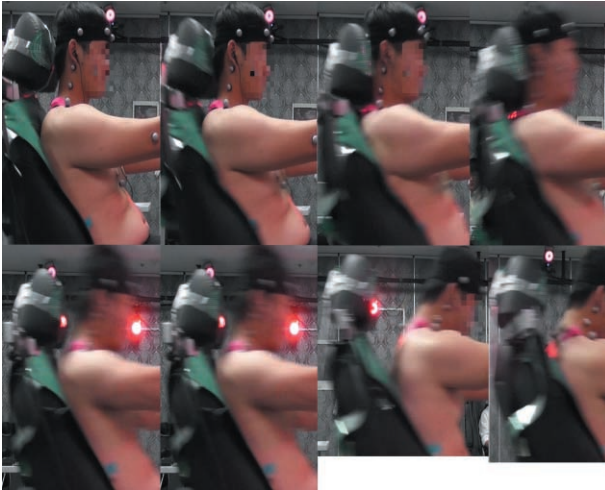


Fig. 3. Movement of a human volunteer (No. 44) at 7.9 km/h of change of velocity. Momentarily, human subject experienced extension and then flexion with 200 ms. Appropriate usage of a headrest can prevent hyper-extension.

한 연구에는 제한적이었다. 하지만, 이를 토대로 컴퓨터 시뮬레이션이나 더미를 이용한 연구의 기초가 될 것으로 판단한다. 연구진 중 한 명의 자원자 실험으로 유효충돌속도 10 km/h도 1회 진행하여 특별한 이상이 없음을 보였고, 해외 연구 사례들도 미루어 볼 때 유효충돌속도 10 km/h 전후로 건강한 피험자를 대상으로 한 자원자 실험도 가능할 것으로 생각된다. 실제 후방 추돌사고를 재현하기 위해서 50명 모두 평상시와 같이 자유롭게 착석을 하도록 하고, 음악을 들으며 근전도 측정센서를 승모근에 부착하여 최대한 긴장하지 않은 상태를 유도하고자 했다. 그래서 머리지지대에 기대거나 멀리 떨어진, 혹은 등을 기대거나 멀리 떨어진 피험자 등이 있었고, 또한, 최대한 방지하긴 했으나 몇몇 머리 충격을 인지하여 목에 힘을 준 피험자도 포함되어 있어 측정치가 다양하게 나타났으나 피험자 50명에서 생활에 지장을 주는 통증이나 신경학적 이상 증상은 나타나지 않았기 때문에 유효충돌속도 8 km/h 이하의 속도변화에서는 경추상해가 발생하지 않을 가능성이 높다고 판단한다. 앉은 자세와 근육 긴장도에 따른 영향도 있을 것으로 예상하나 머리지지대, 시트각도, 착석자세 범위를 달리한 다양한 조건들의 해외 피험자 사례를 고려하면 유효충돌속도 8 km/h 이하에서는 크게 영향을 미치지 않으리라고 생각한다. 나아가 경미한 증상을 가진 6명의 피험자 대상이 아닌, 전체 50명에 대한 모든 동적 반응과 상해지수를 분석하여 한국 중년 남성의 저속 후방 추돌 시 신체 특성을 파악하여 실제 사고통계분석과 연계할 필요성이 있다. 동물, 시체실험을 통해 정의된 생체역학적 상해지수를 생체실험을 통해 검증하고, 경부장애지수(Neck Disability Index, NDI)²²⁾ 등의 의학적 지수와 상관관계를 연구할 필요가 있다고 생각한다.

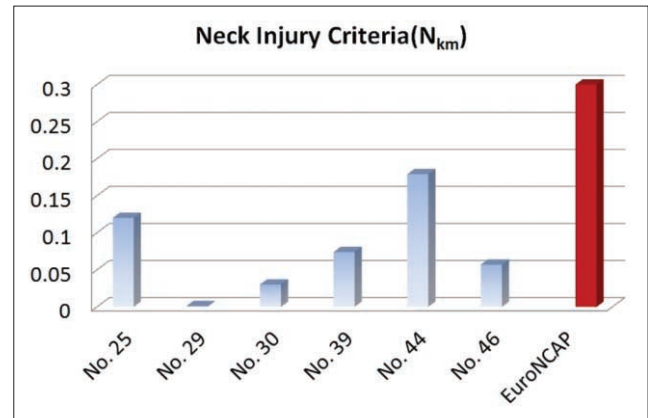


Fig. 4. Comparison of neck injury criteria. N_{km} has no unit because of normalization by critical values of shear force and bending moment.

참 고 문 헌

1. US National Highway Transportation Safety Administration. Federal motor vehicle safety standards. Head restraints; Final rule. 49 CFR Part 571.
2. Richter M, Otte D, Pohlemann T, et al. Whiplash-type neck distortion in restrained car drivers: frequency, causes and long-term results. *Eur Spine J* 2000;9:109-17.
3. Korea Insurance Development Institute 2008 Automobile insurance statistical data (2008)
4. Kim HS, Kim JH. A study of medical expense characteristics whiplash victims on automobile liability insurance. *J Risk Manag* 2011;22:125-53.
5. 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.
6. McConnell WE, Richard PH, Jon VP, et al. Human head and neck kinematics after low velocity rear-end impacts-understanding "whiplash." *Proceedings of the 39th Stapp Car Crash Conference* 1995;215-38.
7. Castro WH, Schilgen M, Meyer S, et al. Do "whiplash injuries" occur in low-speed rear impacts? *Eur Spine J* 1997;6:366-75.
8. Ono K, Kaneoka K. Motion analysis of human cervical vertebrae during low-speed rear impacts by the simulated sled. *Crash Prev Injury Control* 1999;1:87-99.
9. Welcher JB, Szabo TJ. Relationships between seat properties and human subject kinematics in rear impact tests. *Accid Anal Prev* 2001;33:289-304.
10. Hong SW, Park WP, Park SJ, et al. Motion analysis of head and neck of human volunteers in low-speed rear impact. *J Auto-Vehicle Safety* 2012;4:37-43.
11. Watanabe Y, Ichikawa H, Kayama O, et al. Influence of

- seat characteristics on occupant motion in low-velocity rear-end impacts. *Accid Anal Prev* 2000;32:243-50.
12. Davidsson J, Deutscher C, Heel W, et al. Human volunteer kinematics in rear-end sled collisions. *Traffic Inj Prev* 2001;2:319-33.
13. Siegmund GP, Heinrichs BE, Lawrence JM, et al. Kinetic and kinematic responses of the RID2a, Hybrid III and human volunteers in low-speed rear-end collisions. *Stapp Car Crash J* 2001;45:239-56.
14. Kang Y, Lee JW, Koh YH, et al. New MRI grading system for the cervical canal stenosis. *Am J Roentgenol* 2011;197:W134-40.
15. Boström O, Svensson MY, Aldman B, 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 international IRCOBI conference on the biomechanics of impact* 1996
16. Eichberger A, Darok M, Steffan H, et al. Pressure measurements in the spinal canal of post-mortem human subjects during rear-end impact and correlation of results to the neck injury criterion. *Accid Anal Prev* 2000;32:251-60.
17. Yoganandan N, Pintar FA, Stemper BD, et al. Biomechanics of human occupants in simulated rear crashes: documentation of neck injuries and comparison of injury criteria. *Stapp Car Crash J* 2000;44:189-204.
18. Schmitt K-U, Muser MH, Walz FH, et al. N_{km} - a proposal for a neck protection criterion for low-speed rear-end impacts. *Traffic Inj Prev* 2002;3:117-26.
19. Park SJ, Lee HS, Joh GW, et al. Neck fracture case at low speed in frontal collision. *Korean J Leg Med* 2007;31:175-9.
20. Kullgren A, Eriksson L, Bostroem O, et al. Validation of neck injury criteria using reconstructed real-life rear-end crashes with recorded crash pulses. *Int'l ESV Conference* 2003.
21. European New Car Assessment Programme (EuroNCAP), Assessment protocol and biomechanical limits, Ver. 4.1 March 2004. Available at <http://www.euroncap.com>.
22. Vernon H, Mior S. The neck disability index: a study of reliability and validity. *J Manipulative Physiol Ther* 1991;14:409-15.