

저속 후방 추돌 자원자 실험을 통한 두부와 경부의 동작분석

홍성우* · 박원필* · 박성지** · 유재호*** · 공세진**** · 김한성*****

Motion Analysis of Head and Neck of Human Volunteers in Low-Speed Rear Impact

Seong Woo Hong*, Won-Pil Park*, Sung-Ji Park**, Jae-Ho You***, Sejin Kong****, Hansung Kim*****

Key Words : Motion analysis(동작분석), Human volunteer(자원자), Subject(피험자), Low-speed rear impact(저속 후방 추돌)

ABSTRACT

The purpose of this research is to obtain and analyze dynamic responses from human volunteers for the development of the human-like mechanical or mathematical model for Korean males in automotive rear collisions. This paper focused on the introduction to a low-speed rear impact sled test involving Korean male subjects, and the accumulation of the motion of head and neck.

A total of 50 dynamic rear impact sled tests were performed with 50 human volunteers, who are 30-50 year-old males. Each subject can be involved in only one case to prevent any injury in which he was exposed to the impulse that was equivalent to a low-speed rear-end collision of cars at 5-8km/h for change of velocity, so called, ΔV . All subjects were examined by an orthopedist to qualify for the test through the medical check-up of their necks and low backs prior to the test. The impact device is the pendulum type, tuned to simulate the crash pulse of a real vehicle. All motions and impulses were captured and measured by motion capture systems and pressure sensors on the seat.

Dynamic responses of head and T1 were analyzed in two cases(5 km/h, 8 km/h) to compare with the results in the previous studies. After the experiments, human subjects were examined to check up any change in the post medical analysis. As a result, there was no change in MRI and no injury reported. Six subjects experienced a minor stiffness on their back for no more than 2 days and got back to normal without any medical treatment.

1. 서론

자동차 산업이 발전함에 따라 탑승자 안전을 위한 연구개발은 정부, 학계, 자동차 산업계가 주도하여 지속적으로 노력하여 왔다. 그럼에도 불구하고 여전히 교통사고로 인한 사망과 부상은 빈번히 발생하고 있으며, 이에 대한 안전장치 개발 연구는 꾸준히 진행되고 있다. 탑승자에 대한 안전장치를 개발하기 위해서 충

* 삼성교통안전문화연구소
** 국립과학수사연구원
*** 서울스카이병원 정형외과
**** 두리시스템 동작분석 연구소
***** 연세대 의공학과
E-mail : sw23.hong@samsung.com

돌 시의 인체 거동에 대한 분석은 필수 불가결한 요소이며, 이를 근거로 인체와 유사한 충돌 더미 모델, 또는 컴퓨터 모델을 개발하여 안전장치에 대한 기능적 효과를 검증해야 한다.

전체 사고유형 중 후방충돌은 빈번히 발생하는 충돌유형이며¹⁾, 이 때 발생하는 경부 상해는 1) 충돌 시 순간적인 목의 과신전, 과굴곡 때문이라는 설과 2) 충돌 순간 머리의 정지관성과 몸통의 전진운동으로 인해 경부의 후관절(Facet Joint)에 전단력이 발생하여 인대와 건을 손상시킨다는 설이 다수설이나 이에 대해 확실한 결론은 아직 없는 상태이다^{2,3)}. 또한, 해외 뿐 아니라 국내에서도 AIS1~2 이하의 낮은 상해도에도 불구하고 많은 사람들이 경추부의 장기적인 통증으로 고통 받고 있다⁴⁾.

이에 대해, 본 연구는 자원자 실험을 통해 저속 후방충돌 시의 머리와 목의 동작분석을 통해 자원자 실험 데이터를 축적하였으며, 이러한 데이터는 충돌 안전 개발과 평가를 위한 향후 탑승자의 수학적, 기계적 모델을 개발하기 위한 기초 데이터가 될 수 있다⁵⁾. 또한, 이 모델들은 안전보호 장치의 개발에서 뿐만 아니라 상해 지수의 정합성 평가 및 개발 프로세스에서의 도구로도 사용될 수 있다^{6,7)}. 궁극적으로, 본 연구결과를 활용하여 한국 중년 성인 남성에 대한 동적 반응의 특성을 도출하여 향후 한국형 더미 개발의 초석이 되고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 실험 과정

피험자 대상 충격실험이기에 피험자의 안전을 최우선으로 하였다, 흡시 모를 사고나 상해에 대비하여, 연세대학교 임상시험윤리위원회(연구부-513) 심사를 통해 이번 실험의 절차를 승인받았다. 경부, 요부의 X-ray, MRI 촬영 및 정형외과 전문의의 진찰을 통해 실험 전에 충돌실험에 적합한 피험자인지를 점검하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 피험자의 경추와 요추의 X-ray 및 자기공명사진(MRI)의 예이다.

전문의를 소견으로 실험에 적합하다고 판단된 피험자에 한해서 검진 후 1주일 내에 저속 후방 충돌 슬레드 실험을 수행하였다. 충돌실험은 1인당 1회로 제한하여 수행하였고, 50명에 대하여 슬레드의 변화속도가 5~8km/h가 되도록 설정하였다.

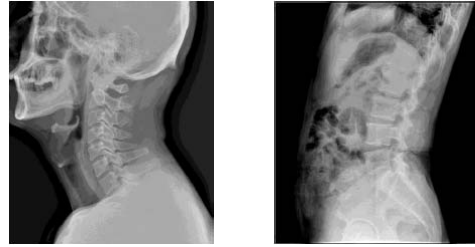


Fig. 1 Examples of X-ray images(left: neck, right: lumbar)

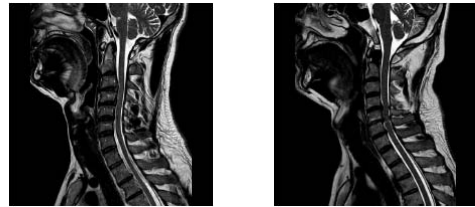


Fig. 2 Cases of MRI images(Pass/Fail)

피험자의 각 관절부위에 마커와 목 부위 승모근에 2개의 근전도(EMG) 센서(Delsys Inc., USA, Triagno wireless)를 부착하였다(Fig. 3). 실험 장치에 착석한 후 피험자가 충격에 대해 사전 인지하지 않은 상태를 유지하기 위해 이어폰을 이용하여 음악을 듣도록 하고 근전도 센서를 통해 실험 개시 전 인지(braced)상태/비인지(relaxed)상태 여부를 모니터링하면서 인지하지 않는 순간 충격을 인가하였다. Fig. 4는 충돌 직후(0초) 0.2초 이후 목 근육의 반응을 측정할 값이다. 또한, 충돌 전후의 근골격계 반응특성 비교를 위해, 1주일간 피험자의 신체상태를 모니터링 하였다.

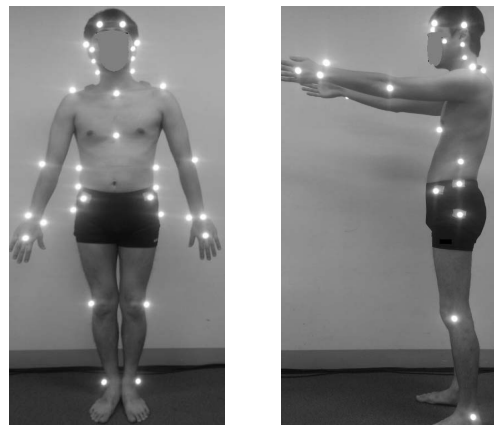


Fig. 3 Marketset positions(customized Plug-In, white spots)

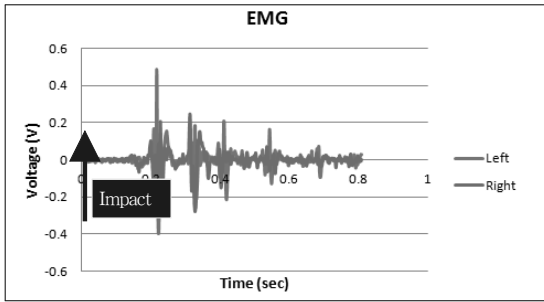


Fig. 4 Examples of measurements of EMG sensors' trigger around 0.2sec after impact

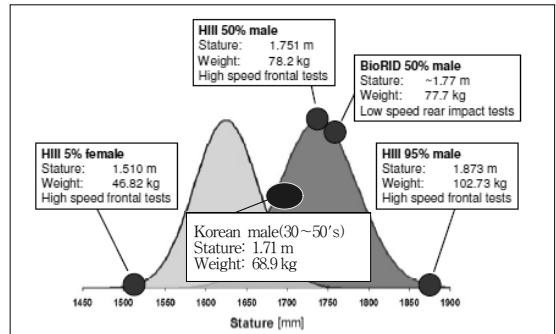


Fig. 5 Examples of measurements of EMG sensors' trigger around 0.2s after impact

2.2 자원자 정보

피험자는 기왕병력이 없는 30대~50대 성인 남자를 대상으로 공개모집을 하였다(Table 1). 실험 전 의료검진을 통해 선발하였는데 완전한 정상인뿐만 아니라 일상생활에 특별한 문제가 없는 경미한 퇴행성 변화, 디스크 변성이 있는 사람들도 정형외과 전문의의 검진을 통해 포함하였다. 평균 나이 44.5세, 평균 체중 68.9kg, 평균 키 171 cm로, 충돌 더미와 비교하면 Fig. 5와 같은 포지션에 있다⁸⁾.

Table 1 Human volunteer subject information

No.	Age	Wt (kg)	Ht (cm)	ΔV (km/h)	번호	나이	체중 (kg)	키 (cm)	ΔV (km/h)
1	39	85	171	4.7	26	48	74	171	6.2
2	47	70	178	6.0	27	40	49	165	6.6
3	43	64	170	4.8	28	47	69	169	6.0
4	47	60	165	5.0	29	46	62	163	6.5
5	47	73	166	5.0	30	49	76	181	6.2
6	47	65	165	5.0	31	49	60	167	7.4
7	33	68	170	4.9	32	51	60	165	6.6
8	33	58	176	5.1	33	49	46	166	7.6
9	34	65	173	4.9	34	51	84.5	173	7.1
10	52	65	163	5.4	35	50	66	167	7.5
11	42	86	171	5.2	36	43	72	172	7.0
12	49	80	173	5.3	37	51	67	165	7.3
13	43	70	178	5.5	38	51	68	173	7.2
14	47	70	178	5.0	39	47	65	173	7.6
15	49	66	170	5.3	40	49	59	170	8.0
16	33	87	178	5.3	41	53	64	162	6.5
17	42	68	170	5.3	42	46	69	174	7.0
18	42	53	165	5.6	43	39	64	173	7.8
19	46	73	169	5.2	44	32	87	180	7.9
20	46	63	173	5.5	45	32	66	168	8.1
21	51	65	162	6.4	46	46	71	170	7.9
22	46	70	163	6.5	47	36	79	178	7.8
23	51	80	177	6.2	48	32	82	171	6.6
24	52	59	171	6.5	49	40	72	175	7.8
25	50	78	175	7.0	50	36	70	174	7.9

* Average - Age: 44.5, Weight: 68.9 kg, Height: 171 cm

후방 추돌 테스트용 BioRID 50퍼센타일 남자 더미와는 키 6cm, 체중 8kg의 차이가 있다.

2.3 실험 조건

펜듈럼의 무게와 높이를 조절하여 슬레드 후미를 충격 후 슬레드가 전면으로 5~8km/h의 속도로 진행하도록 조절하였다. 여기서의 속도는 자동차 시트가 전면으로 동작하는 속도이며, 실제 자동차 추돌 시 탑승자의 머리는 관성의 법칙으로 멈추어 있고, 둔부는 전면으로 전진하여 목에 하중이 작용하는 상태가 되는데, 이 때 속도를 유효충돌속도(델타 V; ΔV)라 하여 충돌 속도와는 다르다. Fig. 6은 피험자 착석자세이며, Fig. 7은 슬레드의 속도별 x방향 가속도 펄스이다.

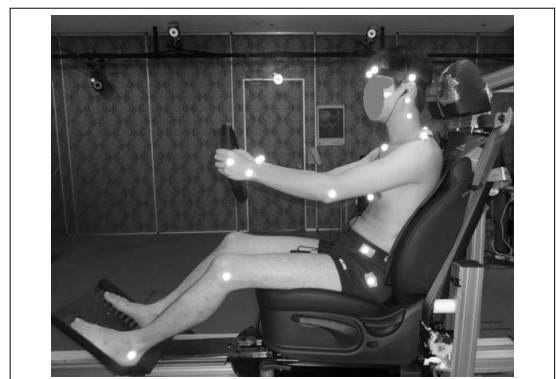


Fig. 6 Posture of human subject on the sled around VICON motion capture cameras(installed)

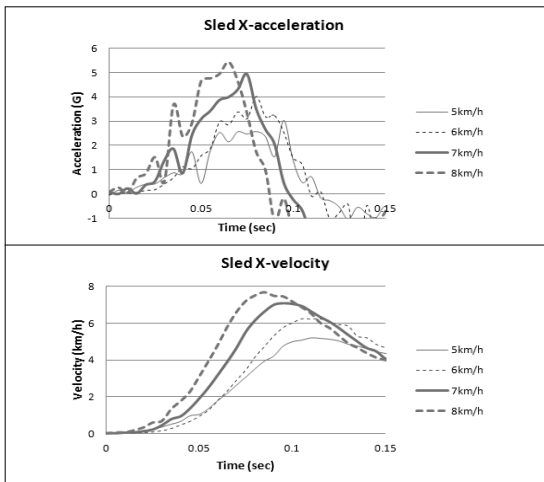


Fig. 7 Examples of measurements of accelerations and velocities of a sled from t=0s to t=0.15s at each severity

2.4 측정 방법

Fig. 8과 같이 피험자 몸 관절부에 빛을 반사하는 마커를 부착하여, 16개의 카메라와 함께, 모션 캡처 시스템(VICON Motion Systems, Ltd., UK, MX-T40S)으로 피험자의 움직임을 캡처하여 동작분석을 하였다. Fig. 9은 측정된 마커를 이용하여 피험자의 동작을 재현한 것이다.

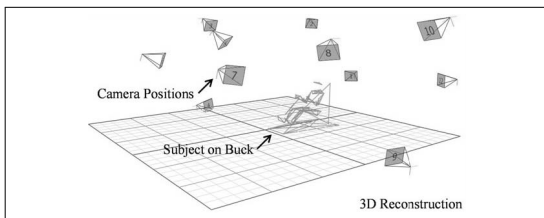


Fig. 8 Example of experimental set-up of VICON motion capture systems with cameras

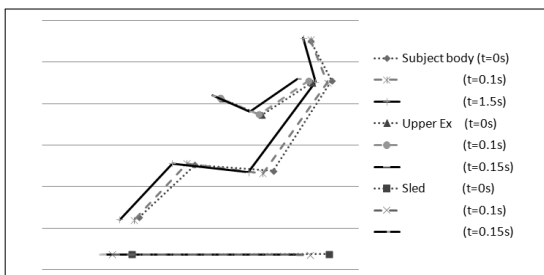


Fig. 9 General motions of human subject from t=0s to t=0.15s

또한, 헤드레스트 부위와 시트 등받이 부분에 압력 센서(Tekscan Inc., USA, F-scan® & Comformat®)를 부착하여 충격 시 시트에 가해지고 동시에 탑승자에게 가해지는 충격량을 측정하였다(Fig. 10).



Fig. 10 Installation of pressure sensors on the headrest, and on the backseat

Fig. 11은 압력센서를 통해 측정된 힘의 분포의 예이다.

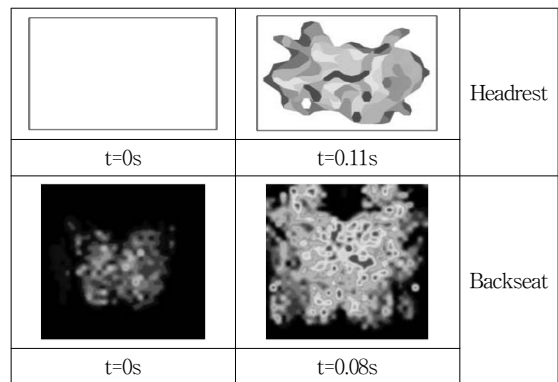


Fig. 11 Example of pressure on the headrest(up), and on the backseat(down)

3. 실험 결과

본 논문에서는 기존 해외연구 결과와 비교하기 위해 ΔV 5km/h와 8km/h에서의 동적반응을 비교하였다.

3.1. 머리 및 T1 x-방향 가속도 비교

Fig. 12는 저속 후방 추돌 시 슬레드 가속도가 먼저 발생하고 이후 가슴, 머리 순서대로 발생함을 보여준다.

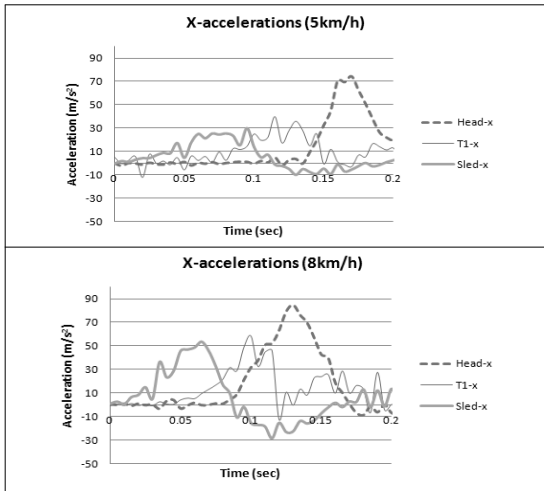


Fig. 12 Measurements of x-accelerations of head and T1 at each severity

ΔV 가 5km/h와 8km/h일 때의 가장 큰 차이는 슬레드의 가속도 피크값의 발생시점과 크기이다. 이에 따라 머리의 경우, 0.05초 정도 더 빨리 발생하고 크기는 약 1.3배 정도(약 8g)이다. 머리 가속도에 비해 T1 가속도가 먼저 앞서기 때문에 머리-T1을 연결하는 목에 힘과 모멘트가 작용하게 된다. 5km/h인 경우 머리의 가속도 값이 해외 논문(9, 10)에 비해 2배 가량 컸다(약 8g vs. 2g). 이를 분석하기 위해서는 다음 장에서 변위와 함께 비교하도록 한다.

Table 2 Comparisons of x-accelerations of human volunteers at both severity.

x-acceleration		5~6 km/h		7~8 km/h	
		m/s ²	sec	m/s ²	sec
Head	Western male	39	157	51	145
	Korean male	74.5	170	85	130
T1	Western male	30	126	48	116
	Korean male	39.6	115	58.5	100

3.2 머리 및 T1 x-방향 변위, 상대변위 비교

Fig. 13과 Table 3을 보면 ΔV 가 5km/h인 경우, 충돌 후 0.1초까지 머리와 T1의 x-방향 변위는 거의 제로임을 알 수 있다. 이는 시트에 의해 변위는 감소되었기 때문에, 머리와 T1의 x-방향 변위가 최소화되어서 머리의 x-방향 가속도가 상대적으로 증가했음을 알 수 있다. 8km/h인 경우에도 역시 해외 사례에 비해 x

방향 변위가 작았다. 이에 비해 Fig. 14에서 보듯이 머리-T1간의 상대거리에서 알 수 있는 것은 8km/h일 때가 5km/h일 때보다 목의 상대변위의 반응이 먼저 발생했고 더 짧았다. 따라서, 상대변위가 반응할 때라고 머리와 헤드레스트가 접촉할 때라고 하면 이 때 헤드레스트와 등받이에 발생하는 충격량 분포를 함께 분석해야 자원자의 거동특성을 알 수 있을 것이다.

Table 3 Comparisons of x-displacements of human volunteers at both severity.

x-acceleration		5~6 km/h		7~8 km/h	
		mm	sec	mm	sec
Head	Western male	-118	155	-151	146
	Korean male	-3	135	-120	120
T1	Western male	-79	131	-104	124
	Korean male	0	0	-85	110
Head rel. T1	Western male	-60	191	-84	188
	Korean male	-74	165	-37	125

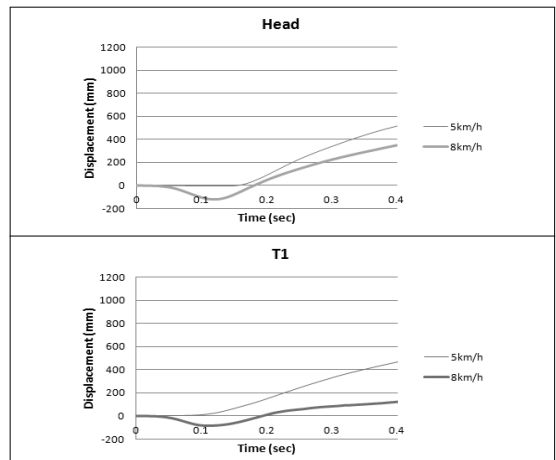


Fig. 13 Measurements of x-displacement of head and T1 at each severity

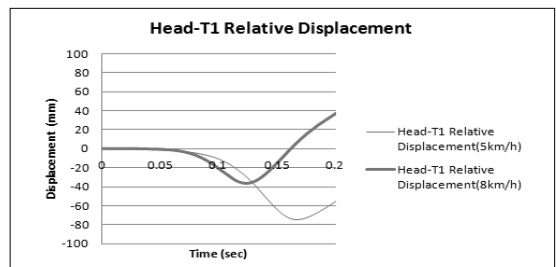


Fig. 14 Calculation of rearward relative displacement and velocity of head and T1 at each severity

4. 결론 및 토의

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 머리, T1의 가속도만으로는 두부와 경부에 대한 동작분석이 부족하며, 상대변위에 대해서 동시에 분석하여야 한다.
- 2) 후방 충돌 시 목의 x방향 변위가 줄어들면 머리의 가속도가 증가한다. 이는 목의 거동이 줄면 머리와 헤드레스트 간의 충격이 증가하면서 접촉에 의한 충격량이 증가할 것으로 예측된다.
- 3) 탑승 자세, 시트와의 거리, 충돌의 인지 등이 인체의 거동에 미치는 영향에 대해 심층 인자분석이 필요하다.
- 4) 전체 50명에 대한 모든 동적 반응을 분석하여 중년 남성의 충돌 시 신체 특성을 파악하여 통계분석 및 경향을 분석해야 한다.
- 5) 추후 한국 여성에 대한 연구 필요하다.
- 6) 30~50대 성인남성 50명에 대하여 실험직후 통증을 호소하는 경우는 없었으며, 1주일 간 모니터링 한 결과 6명(12%)가 경미한 통증을 경험하였고, 평균 1.6일안에 별도의 치료없이 자연치유가 되었다 (Table 4).

후 기

서울대학교 법의학교실 이윤성 교수님, 이승덕 교수님, 경찰병원 이승립 교수님, 교통안전공단 자동차안전연구원 김시우 박사님의 자문 및 조언에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Bartch, A. J., Gilbertson, L. G., Prakash, V., Morr, D. R., Wiechel, J. F., 2008, "Minor crash and 'Whiplash' in the United States," 52nd AAAM Annual Conference.
- (2) Ono, K. and Kaneoka, K., 1999, "Motion analysis of human cervical vertebrae during low-speed rear impacts by the simulated sled," Journal of

Crash Prevention and Injury Control, Vol. 1, No. 2, pp. 87~99.

- (3) Siegmund, G. P., Heinrichs, B. E., Lawrence, J. M., Philippens, M. M., 2001, "Kinetic and kinematic responses of the RID2a, Hybrid III and human volunteers in low-speed rear-end collisions," Proceedings of 45th Stapp Car Crash Conference, SAE 2001-22-0011, pp. 1-18.
- (4) 홍승준, 조경근, 최형연, 2008, "차량 파손유형 및 머리지지대가 목부상 위험에 미치는 영향," 한국자동차안전학회 춘계학술대회 논문집, pp. 96~103
- (5) 유한규, 김영은, 2009, "지속 후방 충돌시 인체 크기가 목 상해 지수에 미치는 영향 분석," 한국자동차공학회 학술대회, pp. 2327~2331.
- (6) 김길주, 최병용, 정동우, 정재운, 2012, "목상해 성능 향상을 위한 충격 저감 시트 프레임 연구," 한국자동차안전학회 춘계학술대회 논문집, pp. 20~23
- (7) Schmitt, K.-U., Muser, M.H., Niederer, P., 2001, "A new neck injury criterion candidate for rear-end collision taking into account shear forces and bending moments," Proceedings of the 17th ESV Conference.
- (8) Carlsson, A., Siegmund, G. P., Linder, A., Svensson, M. Y., 2012, "Motion of head and neck of female and male volunteers in rear impact car-to-car impacts," Traffic Injury Prevention, Vol. 13, pp. 378~387.
- (9) Carlsson, A., Linder, A., et al., 2011, "Dynamic kinematics responses of female volunteers in rear impacts and comparison to previous male volunteer tests," Traffic Injury Prevention, Vol. 12, pp. 347~357.
- (10) Davidsson, J., Deutscher, C., Hell, W., Loevsund, P., Svensson, M. Y., 2001, "Human volunteer kinematics in rear-end sled collisions," Journal of Crash Prevention and Injury Control, Vol. 2, No. 4, pp. 319~333.

저속 후방 추돌 자원자 실험을 통한 두부와 경부의 동작분석

부 록

Table 4. Test Results (Age, Weight, Stature, Change of Velocity, Post medical check-up, Symptom)

번호	나이	체중 (kg)	신장 (cm)	유효충돌 속도 (kph)	실험 후 체크업	증상 (기간)	번호	나이	체중 (kg)	신장 (cm)	유효충돌 속도 (kph)	실험 후 체크업	증상 (기간)
1	39	85	171	4.7	정상	정상	26	48	74	171	6.2	정상	정150/16상
2	47	70	178	6.0	정상	정상	27	40	49	165	6.6	정상	정상
3	43	64	170	4.8	정상	정상	28	47	69	169	6.0	정상	정상
4	47	60	165	5.0	정상	정상	29	46	62	163	6.5	정상	허리 빠근 (<0.5일**)
5	47	73	166	5.0	정상	정상	30	49	76	181	6.2	순간 현기증	어깨 빠근 (<2일**)
6	47	65	165	5.0	정상	정상	31	49	60	167	7.4	정상	정상
7	33	68	170	4.9	정상	정상	32	51	60	165	6.6	정상	정상
8	33	58	176	5.1	정상	정상	33	49	46	166	7.6	정상	정상
*9	34	65	173	4.9	정상	정상	34	51	84.5	173	7.1	정상	정상
10	52	65	163	5.4	정상	정상	35	50	66	167	7.5	정상	정상
11	42	86	171	5.2	정상	정상	36	43	72	172	7.0	정상	정상
12	49	80	173	5.3	정상	정상	37	51	67	165	7.3	정상	정상
13	43	70	178	5.5	정상	정상	38	51	68	173	7.2	정상	정상
14	47	70	178	5.0	정상	정상	39	47	65	173	7.6	정상	허리 빠근 (<2일**)
*15	49	66	170	5.3	정상	정상	*40	49	59	170	8.0	정상	정상
16	33	87	178	5.3	정상	정상	41	53	64	162	6.5	정상	정상
17	42	68	170	5.3	정상	정상	42	46	69	174	7.0	정상	정상
18	42	53	165	5.6	정상	정상	43	39	64	173	7.8	정상	정상
19	46	73	169	5.2	정상	정상	44	32	87	180	7.9	정상	어깨 빠근 (<2일**)
*20	46	63	173	5.5	정상	정상	45	32	66	168	8.1	정상	정상
21	51	65	162	6.4	정상	정상	46	46	71	170	7.9	정상	몸 빠근 (<2일**)
22	46	70	163	6.5	정상	정상	47	36	79	178	7.8	정상	정상
23	51	80	177	6.2	정상	정상	48	32	82	171	6.6	정상	정상
24	52	59	171	6.5	정상	정상	49	40	72	175	7.8	정상	정상
25	50	78	175	7.0	정상	허리 빠근 (<1일**)	50	36	70	174	7.9	정상	정상
* 사전인지함							51	33	67	180	9.8	정상	승모근 빠근 (<4시간**)
** 본인 의사에 따라 자연치유 됨													
*** 연구진 중 자원자													