

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0053

후방추돌시 탑승자 목 상해 감소를 위한 연구

A Study on Occupant Neck Injury in Rear End Collisions

이재완*, 윤경한*, 박경진**
Jaewan Lee, Kyonghan Yoon, Gyungjin Park

ABSTRACT

The position of the automobile seat back is very important for the neck injury in the rear-end collisions. The effects of the position have been evaluated experimentally. A sled simulator is utilized with a velocity of 33 km/h. The position is varied by the angle of seat back from 25 to 65 degrees. All the configurations of the seat are fixed except the angle. The neck injuries are calculated by the equations accepted in the industries. Also, the sled tests with other velocities are carried out for the comparison study. Using the results of the test, the effects of seat back strength are discussed to minimize the occupant neck injury in rear end collisions.

주요기술용어 : 후방추돌(Rear End Collision), 목 상해(Neck Injury), 좌석등받이(Seat Back), 젓힘(Extension) 모멘트, 굽힘(Flexion) 모멘트, 복합목상해지수(N_{ij}), 후두관절융기(Occipital Condyles)

Nomenclature

- AIS : Abbreviated Injury Scale
- %-ile : Percentile(백분위수)
- M_E : Extension Moment
- M_F : Flexion Moment
- F_X : Neck Shear Force
- F_Z : Neck Axial Tension
- F_Z : Neck Axial Compression
- N_{ij} : Combined Neck Injury Criteria

1. 서론

오늘날 자동차는 속도를 동반한 복잡한 교통환경에서 오랜 시간 운전이 요구되고, 때때로 충돌, 전복 등의 사고가 발생함에 따라, 자동차 좌석은 탑승자의 안락성과 함께 사고시 상해를 최소화하기 위한 안전성 확보가 필수적으로 요구된다. 미국의 통계를 보면 자동차 후방 추돌사고는 전체 교통사고의 약 30%를 차지하고 운전자의 50% 이상이 목 상해를 입었으며, '90년대초 일본의 교통사고

* 회원, 자동차성능시험연구소

** 회원, 한양대학교 공학대학
기계산업공학부

분석결과 후방추돌에 의한 목 상해가 80 % 증가된 것으로 보고되고 있다.¹⁾

최근 30여 년간의 후방추돌에 대한 좌석의 강도, 탑승자 거동 및 상해관련 연구는 좌석의 영구변형이 발생하지 않는 상해지수 1등급(AIS²⁾ 1 - 상해정도에 따라 AIS 0(비상해)에서 AIS 6(사망)까지 7등급으로 구분) 이하의 후방추돌과 좌석의 영구변형을 수반하는 상대적으로 상해가 심한 중상(AIS 3) 이상의 경우에 대한 연구로 크게 분류되어 수행되었다.³⁾

그러나 미국 국립 사고 표본 연구(NASS - National Accident Sampling Study) 자료에 의하면 48~62 km/h 후방추돌시 92 %가 AIS 2 (보통) 이하의 상해이고 전체 후방추돌사고의 86 %가 26~32 km/h로 조사되었다.³⁾

또한 많은 연구보고에 의하면 AIS 3(중상) 이상의 상해는 전체 후방추돌 사고의 1 % 이하로 조사 보고됨에 따라 최근 후방추돌에 대한 연구는 AIS 1(경상) 이하의 상해를 일으키는 저속 후방추돌시 목 상해 감소를 위한 좌석의 강도 및 설계방안 등의 연구에 관심이 집중되고 있다. 그리고, 에어백 전개에 의한 사망자의 증가로 충돌과 관련 미국연방자동차 안전기준(FMVSS 208)에 목 상해기준이 추가되는 등 첨단 에어백(Advanced Airbag)에 대한 새로운 기준이 제정 및 입법예고 되면서 최근 목 상해에 대한 관심이 높아지고 있다.⁴⁾

따라서 본 연구는 후방추돌시 좌석등받이 강도와 목 상해의 기본적 상관 관계를 이해하고 탑승자 보호 및 좌석설계의 기본 개념을 확보하기 위하여 동일 좌석에 대하여 속도별 추돌시험과 FMVSS 301 시험속도에 준하는 추돌속도 시험을 실시하여 등받이 강성 변화에 따른 추돌시험 5회를 실시하여 그 결과를 분석 고찰하였다.

2. 후방추돌과 목 상해의 특성

사람의 머리는 해부학적으로 굽힘(Flexion), 젖힘(Extension), 회전(Rotation) 등의 운동이 가능하며, 후방추돌시 탑승자는 머리의 젖힘에 의한 목 부상이 대부분이다. 젖힘 현상은 차량의 후방추돌시 차량이 앞으로 갑자기 가속하게 됨에 따라 탑승자의 상체는 좌석과 함께 차량과 같은 속도로 이동하나 머리는 상체와 견고하게 지지되지 못하고 상체보다 0.5~0.6배 낮은 속도로 이동하게 된다.⁵⁾ 따라서 상체와 머리는 각각 서로 다른 운동을 하게 되어 상해를 입게 된다. 이러한 목 상해의 동적 주요인자는 후두 관절용기(Occipital Condyles)에 대한 동적 모멘트(Dynamic Moment)로 후방추돌시 젖힘에 의한 경상(AIS 1) 이하의 목 상해가 가장 일반적이며 대부분의 경우 잘 알려진 휩레쉬(Whiplash) 상해이다.

휩레쉬는 1928년 Crowe에 의해 처음 소개되었으며 일반적으로 50 msec 이내의 짧은 시간동안의 감·가속도와 비접촉에 의한 상해로서 근육과 인대 변형(Strain)에 의한 척추통증, 두통, 언어장애 등의 다양하고 복합적인 증세로 나타난다. Nygen 등의 연구에 의하면 339,000건의 사고중 10 %가 사고후 5년까지도 휩레쉬 상해에 의한 고통을 경험하는 것으로 조사되었다.⁶⁾

3. 좌석관련 상해비용 분석 및 좌석 관련 법규동향

3.1 좌석관련 상해비용 분석

미국의 국립 사고 표본 연구(NASS)의 1995년 이후 충돌 데이터 체계(Crashworthness Data System(CDS))에 의하면 속도구간에 따른 상해비용은 Table 1과 같다. 즉, 10~24 km/h 영역에서 등받이 붕괴시 상해비용이 등받이가 견딜 때 보다 상해비용이 3.8배 높고, 25~39 km/h 영역의 경우 1.2배 높으나, 오히려 40~54 km/h 영역에서는 3.1배 낮다.

따라서 ΔV 가 10~39 km/h까지는 등받이

가 건디고 ΔV 가 40~54 km/h 에서 등받이가 붕괴된다면 승차자의 상해비용은 최소가 될 것으로 분석하고 있다.⁷⁾

Table 1 Injury Cost per Seat for Front Outboard Occupants in Rear Impacts as a Function of Delta V Range and Seat Performance⁷⁾

ΔV (km/h)	상해비용		비율 (cc : mc)
	붕괴시(cc)	건달때(mc)	
10~24	\$6,580	\$1,733	3.8 : 1
25~39	\$2,989	\$2,415	1.2 : 1
40~54	\$5,308	\$16,303	1 : 3.1

3.2 좌석 관련 법규동향

미국의 FMVSS 207의 좌석관련 기준은 좌석강도 및 좌석이 자동차에 지지되는 강도에 대한 최소 요건을 규정하고 있으며, 1968년부터 승용차에 적용된 이후 1972년부터 다목적 승용차, 화물 및 승합차로 확대 적용되어 왔다. 그러나 1989년 이후 후면추돌시 등받이 붕괴빈도를 낮추기 위해서 등받이 모멘트 기준을 강화해야 한다는 주장이 제기되어 왔다. 미국 연방도로교통안전청(NHTSA)의 견해는 최적의 상해 감소를 위해 등받이 강도와 머리 및 안전띠가 상호 양립할 수 있는 적절한 균형 확보 등이 필요하다는 주장이다. 따라서 상당한 연구가 진행되기 전까지는 좌석관련 기준의 개정을 늦추고 있으며, 최근에는 일체형 안전 좌석의 개발을 통하여 후면추돌시 등받이가 유연하게 변형되게 하여 에너지를 흡수하고 반동을 줄이는 설계개념 등이 연구되고 있다.⁸⁾

4. 목의 강도 및 상해기준

젓힘과 굽힘 모멘트에 대한 목 상해 기준

은 30여년전 Merz와 Patrick에 의해 제안되었다. Fig. 1과 같이 사체시험 결과 젓힘 모멘트(M_E)에 의한 인대의 상해 임계값은 57.4 Nm(42 ft · lb), 비상해 임계값은 47.4 Nm(35 ft · lb) 이다.

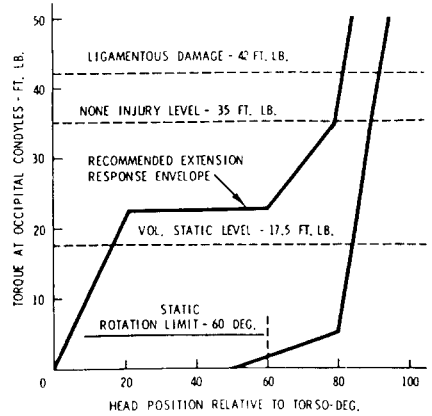


Fig. 1 Head-Neck Response Envelope for Extension and Various Tolerance Levels⁹⁾

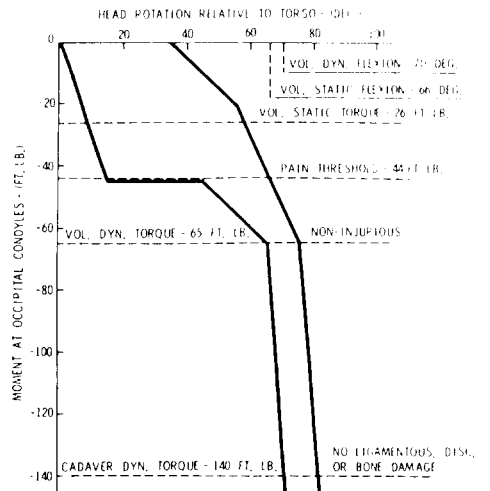


Fig. 2 Head-Neck Response Envelope for Flexion and Various Tolerance Levels⁹⁾

Fig. 2와 같이 굽힘 모멘트(M_F)에 의한 인대 및 경추의 상해 임계값은 사체시험 결과 190 Nm(140 ft·lb) 이며, 비상해 임계값은 지원자 시험결과 88.1 Nm(65 ft·lb)이며, 통증이 시작되는 임계값은 59.6 Nm(44 ft·lb)이다.

또한 인장, 압축 및 전단하중에 의한 목 상해는 작용하는 하중값과 하중 유지시간에 따라 Fig. 3과 같다. 지원자에 대한 정적시험 결과 비상해에 대한 임계 정적 인장력(F_z)은 1,134 N(255 lb), 임계 정적 압축력($-F_z$)은 1,111 N(250 lb) 그리고 임계 정적 전단력(F_x)은 845 N(190 lb) 이다.

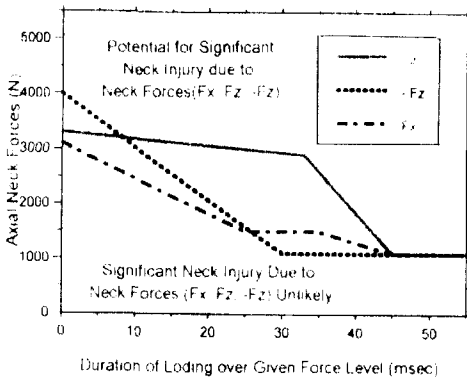


Fig. 3 Neck Forces Injury Criteria²⁾

FMVSS 208에 에어백의 전개압력 감소를 위하여 새로이 추가 제정된 목상해 기준은 Fig. 1~3을 기초로 Table 2와 같이 기준이 설정되었다. 그러나 대부분의 목 상해가 인장력과 젓힘 모멘트의 결합에 의해 발생함에 따라 인장력과 젓힘 모멘트의 결합된 효과가 무시된 단점을 보완하기 위하여 최근에 복합 목상해지수(N_{ij})가 FMVSS 208에 제시되어 입법예고 중이며, Table 2의 목 상해 기준 또는 N_{ij} 의 기준 만족를 요구하고 있다. 또한 N_{ij} 에 의한 중상 이상 가능성($p(AIS \geq 3)$)은 다음 식

(1) 및 (2)에 의하여 계산된다.^{4, 10)}

$$N_{ij} = (F_z/F_{int}) + (M_y/M_{int}) \quad (1)$$

여기서

- N_{ij} : 복합목상해지수
- F_z : 축 인장/압축력
- F_{int} : 일반화를 위한 축 인장/압축력의 임계값
- M_y : 젓힘/휨 모멘트
- M_{int} : 일반화를 위한 젓힘/휨 모멘트의 임계값

$$p(AIS \geq 3) = \frac{1}{1 + \exp^{3.906 - 2.185N_{ij}}} \quad (2)$$

여기서

$p(AIS \geq 3)$: 중상 이상 상해 가능성

식(1)로부터 산출되는 복합 목상해지수(N_{ij})의 허용 한계값은 1.4로, 중상 이상의 상해 가능성은 30 %이다. Fig. 4는 Table 2의 목상해 기준과 N_{ij} 와의 상관관계를 나타내며, 식(2)로부터 중상이상 가능성을 N_{ij} 에 대하여 산출하면 Fig. 5와 같다.

Table 2 Tolerance Limits of Neck Injury and Proposed Critical Intercept Values for N_{ij} Neck Injury Calculation of Hybrid III 50 Percentile Male^{4, 10)}

구 분	상해 기준	F_{int} 및 M_{int}
젓힘 모멘트(M_E)	57 Nm	125 Nm
굽힘 모멘트(M_F)	190 Nm	410 Nm
축 인장력(F_z)	3300 peak N	3600 N
축 압축력($-F_z$)	4000 peak N	3600 N
전·후방전단력(F_x)	3100 peak N	-

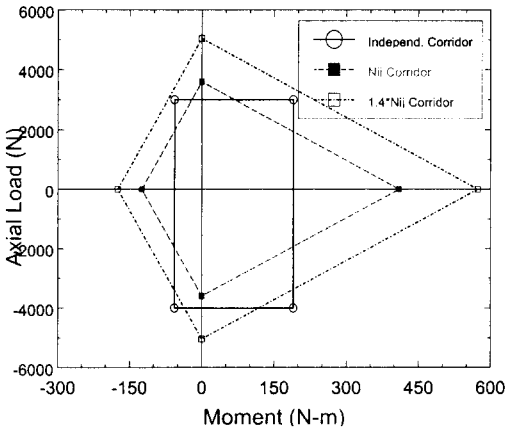


Fig. 4 Typical Plot Comparing N_{ij} with Independent Injury Criteria¹⁰⁾

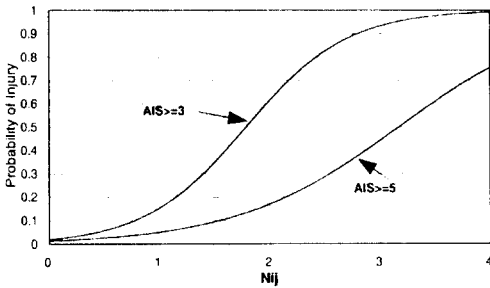


Fig. 5 N_{ij} Risk Curve for AIS 3+ and AIS 5+ Injuries¹⁰⁾

5. 후방추돌 모의시험

좌석등받이 강성과 탑승자 목 상해의 상관 관계를 파악하기 위하여 Table 3과 같이 동일 좌석에 대한 추돌 속도별 시험(V1~V5)과, 동일 속도에서 좌석등받이 강성(등받이 각도)의 변화를 가하는 시험(A1~A5)을 각각 5회 실시하였다. Fig. 7의 속도변화는 Fig. 8과 같이 시험 대차의 가속도를 측정하여 그 값을 적분하여 얻었다. 속도별 시험은 동일한 조건에서 단지 후방추돌 속도의 변화를 주었으며, 등받이 강성 변화에 대한 충돌모의 시험은 FMVSS 301 시험시 추돌된 차량

(Struck Vehicle)이 받는 속도에 준하는 33 km/h로 시험하였다. 등받이 강성 변화에 대한 시험시 탑재된 인체모형의 거동과 하중에 대하여 좌석등받이가 일정 강성을 유지하도록 Fig. 6과 같이 등받이 뒷부분에 지지대(Stopper)를 설치하여 등받이가 일정 각도 이상 넘어가지 않도록 유지하였다.

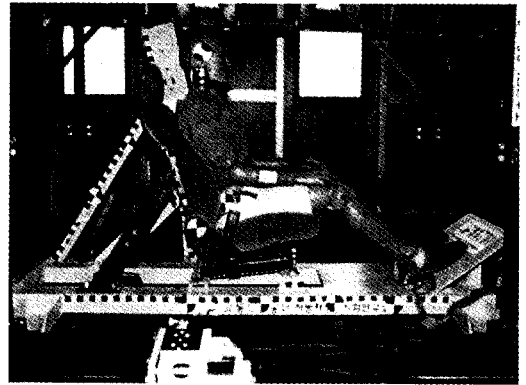


Fig. 6 Sled Test Configurations with Stopper

Table 3 Conditions of Rear End Collisions Sled Test

시험 번호	시험속도 (km/h)	등받이 각도		비 고
		시험전	시험후	
V1	16		-	속도별
V2	20		40°	
V3	27	25°	53°	
V4	33		65°	
V5	39		넘어짐	
A1	33	25°	25°	지지대 설치로 등받이 각도 유지
A2			35°	
A3			45°	
A4			55°	
A5			65°	

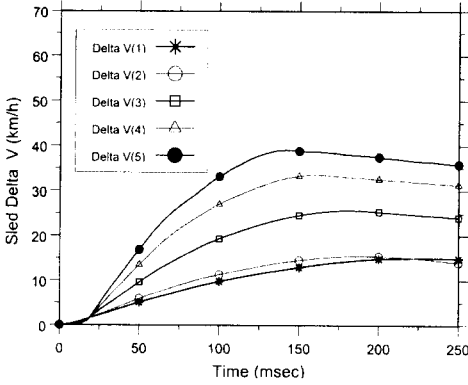


Fig. 7 Test Delta Velocities

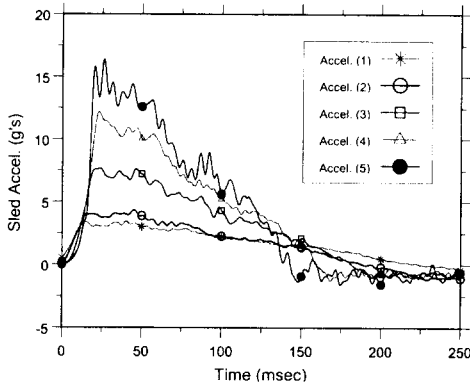


Fig. 8 Test Accelerations

등받이의 강성을 변화시키기 위하여 지지대에 의한 등받이 각도를 25° ~65° 까지 10° 씩 증가시켰다. 이 때의 등받이 각도는 좌석에 인체모형을 착좌시킬 때 수직선에 대하여 인체모형의 어깨 및 둔부 기준점을 연결하는 몸통기준선이 이루는 각도를 말한다. 목 하중과 모멘트의 측정을 위해 각종 센서가 장착된 Hybrid III 50 %-ile 성인남자 인체모형을 탑재하였고, 좌석안전띠는 미착용, 머리지지대는 최하단에 고정하였다.



Fig. 9 Upper(Left) and Lower Neck Load Cell of Hybrid III 50 %-ile Male Dummy

후두 관절용기에 대한 M_E 및 M_F 계산은 식 (3)과 같으며, Fig. 9와 같은 6채널 목 로드 셀(Neck Load Cell)로부터 측정된 데이터로부터 얻는다.

$$M_E \text{ (또는 } M_F) = M_Y + F_X \cdot D_Z \quad (3)$$

여기서

M_Y : 상부 목 모멘트(측정값)

F_X : 상부 목 전/후방 전단력(측정값)

D_Z : 17.8 mm(50 %-ile Hybrid III 성인남자 인체모형의 후두 관절용기에서 상부 목 로드셀까지의 거리)

Table 4 및 Table 5의 모멘트 및 하중에 대한 시험결과는 Table 2에 제시된 기준값으로 정규화(Normalization)하였으며, N_{ij} 및 증상 이상 상해 가능성($p(AIS \geq 3)$)은 식 (1) 및 (2)로부터 직접 산출하였다.

5.1 속도별 시험결과 및 분석

○ Table 4에서 속도별 시험시 목상해에 영향이 큰 인자는 M_E , F_Z 및 M_F 순서로 나타났다.

○ F_Z , F_X 는 Fig. 3의 해당 하중에 대한 임

계 상해기준 곡선보다 훨씬 낮다. 또한 M_F 는 매우 낮은 값을 보였으나 M_E 는 상대적으로 높으며, 속도가 증가함에 따라 M_E 가 증가한다.

Table 4 Results of the Normalized Neck Moments and Forces for Various Delta Velocities

구분 시험	M_E	M_F	F_Z	$-F_Z$	F_X	N_{ij}	$p(AIS \geq 3)$
V1	12.7	3.6	4.1	0.5	5.1	0.10	2.4%
V2	29.3	5.1	15.4	0.7	6.1	0.27	3.5%
V3	41.8	7.1	43.4	1.1	5.5	0.59	6.8%
V4	43.0	7.9	32.5	3.0	9.3	0.49	5.5%
V5	55.3	16.6	16.0	2.7	6.2	0.40	4.6%

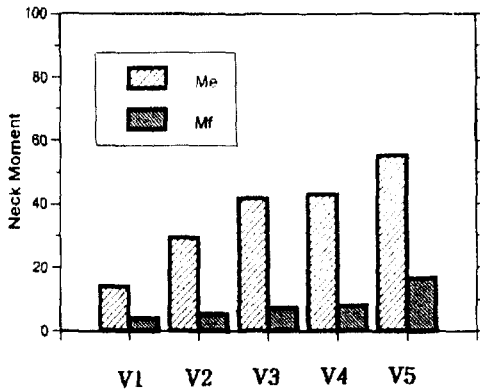


Fig. 10 Results of the Normalized Neck Extension and Flexion Moments for Various Delta Velocities

○ Fig. 10에서 M_E 는 모든 속도에서 목에 심각한 상해가 되는 임계 상해기준값 보다는 적지만 굽힘에 의한 모멘트(M_F) 보다 상대적으로 높으며, 목의 심한 젓힘 현상에 의한 휩레쉬(Whiplash) 상해 가능성은 충분하다.

○ N_{ij} 는 M_E , M_F 및 F_Z 의 함수로서 속도에

비례하지 않고 중간속도인 V3에서 가장 높으며, 이 때의 증상 이상 가능성은 6.8 %이다. 이것은 속도 증가에 따른 등받이 변형이 F_Z 에 영향을 미치기 때문이다. 이와 같이 목상해는 추돌 속도 및 등받이의 변형정도에 영향을 받는다.

○ V5의 경우, 등받이가 완전히 무너졌음에도 불구하고 N_{ij} 에 의한 증상 이상 가능성은 4.6 %로 오히려 5.5 %의 V4 보다 낮다. 따라서 고속 추돌의 경우 좌석 등받이가 무너지는 것이 상해비용 측면에서 유리하다는 Table 1의 결과와 간접적으로 일치한다.

5.2 등받이 각도별 시험결과 및 분석

○ 등받이 각도별 A1~A5 시험결과, Table 5 및 Fig. 11에서 보는 바와 같이 M_E , M_F , F_Z , F_X 모두 해당 하중에 대한 임계상해기준값 보다 낮다.

○ Fig. 12에서 M_F 는 매우 낮으나 M_E 및 F_Z 은 상대적으로 매우 높다. 따라서 젓힘 모멘트(M_E) 및 인장력(F_Z)이 후방추돌로 인한 목상해에 영향을 끼치는 주요 인자임을 알 수 있다.

○ Fig. 11에서 젓힘 모멘트(M_E)는 등받이 각도 변화에 따라 차이가 있으며, A4에서 가장 낮다.

○ 복합 목상해지수(N_{ij})는 등받이 각도가 높을수록 N_{ij} 는 낮게 평가되고 있다. 그러나 A5의 경우는 등받이 상대 변형각이 40° 로 매우 크며 완전 붕괴상황에 가까우므로 뒷좌석 승객과 부딪힘으로 인한 상해우려가 있으며, $\Delta V=33$ km/h에서는 등받이가 붕괴되지 않고 견딜 때 Table 1에서 상해비용이 낮게 나타나므로 A5는 적합하지 않다. 따라서 A4

의 경우가 목상해에 대한 안전성이 높다고 평가할 수 있다.

Table 5 Results of the Normalized Neck Moments and Forces for Various Seat Back Position

구분 시험	M_E	M_F	F_Z	$-F_Z$	F_X	N_{ij}	$p(AIS \geq 3)$
A1	45.3	4.1	41.4	7.9	10.7	0.59	6.8 %
A2	50.9	7.9	62.1	8.1	18.6	0.80	10.3 %
A3	36.5	9.4	58.0	5.3	13.5	0.70	8.5 %
A4	28.9	6.5	42.9	1.3	15.5	0.53	6.0 %
A5	43.0	7.9	32.5	3.0	9.3	0.49	5.5 %

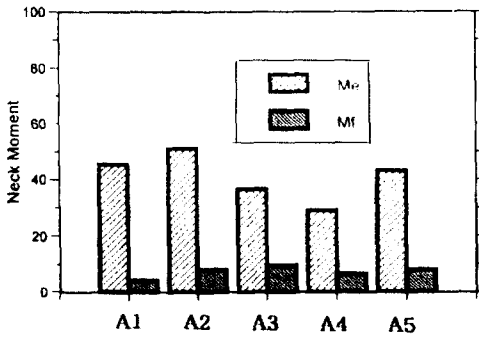


Fig. 11 Results of the Normalized Neck Extension and Flexion Moments for Various Seat Back Position

○ $\Delta V=33$ km/h의 추돌시험의 경우 식 (2)에 의해 계산된 중상 이상 가능성은 등받이 강성이 큰 A2의 경우가 10.3 %로 가장 높고 등받이가 적절히 변형된 A4의 경우는 6.0 %로 목 상해 가능성이 낮게 평가되었다.

○ 이상에서 추돌속도 $\Delta V=33$ km/h 경우에 등받이 강성의 최적상태 A4를 확인할 수

있듯이 좌석의 설계시, 등받이 강성을 최적화 함으로써 추돌 빈도가 가장 높은 속도 영역에서 머리의 과도한 짓힘 및 인장력을 최소화하여 목 상해에 대한 안정성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

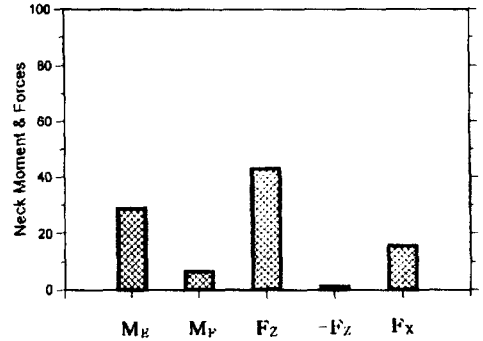


Fig. 12 Normalized Neck Moments and Forces for Test A4

6. 결론

정면충돌시 탑승자의 반동 또는 후방추돌의 경우는 탑승자의 목 상해가 매우 큰 비중을 갖게 되고 좌석의 특성이 매우 중요하다. 후방추돌시 탑승자 목 상해에 대한 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

○ 속도별 시험결과 후방추돌로 인한 목상해에 영향을 미치는 주요인자는 짓힘모멘트(M_E), 목 인장력(F_Z) 및 굽힘모멘트(M_F)로 평가되었고 저속 및 고속 영역 모두 허용 기준값 보다는 낮지만 휠레쉬 등의 상해 가능성은 존재함을 알 수 있다.

○ 등받이 각도(강성)변화에 따라 탑승자 목 상해 값의 차이가 있으므로 후방추돌시 발생하는 탑승자의 운동에너지를 등받이의 적절한 변형을 통해서 효과적으로 에너지를

흡수함으로써 탑승자의 목 상해 최소화가 가능하다.

○ 복합 목상해지수(N_{ij})는 M_E , M_F 및 F_Z 의 함수이므로 후방추돌에 의한 목 상해는 모멘트 및 하중에 의한 개별적 평가보다는 모멘트, 하중이 상호 연관관계를 갖는 N_{ij} 로 평가하는 것이 보다 타당하다.

후 기

이 연구는 한국과학재단지정 최적설계신기술센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) P.L.Arduino, "Kinematics and Dynamics of the Vehicle / Seat / Occupant System Regarding Whiplash Injuries", 1996.
- 2) Pike, Jeffrey A. "First Technology Safety Systems", SAE, 1990.
- 3) Prasad,P, Kim, A, et al, "Relationships Between Passenger Car Seat Back Strength and Occupant Injury Severity in Rear End Collisions : Field and Laboratory Studies", SAE 973343, 1997.
- 4) DOT 49 CFR Parts 571, 585, 587 and 595 Docket No. NHTSA 98-4405 ; Notice 1 RIN 2127-AG70 "Federal Motor Vehicle Safety Standards; FMVSS 208 : Occupant Crash Protection", 1998.
- 5) Watts,A.J, Atkinson,A.R, Hennessy,C.J, "Low Speed Automobile Accidents", Lawyers & Judges Publishing Co., 1996.
- 6) Nygren, A., et al, "Effects of Different Type of Headrests in Rear-End Collisions", 10th International Tech. Conf. on Experimental Safety Vehicles, Oxford, England : NHTSA, 856023, 1985.
- 7) Louis Molino, "Preliminary Assessment of NASS CDS Data Related to Rearward Seat Collapse and Occupant Injury" NHTSA May, 1997.
- 8) Louis Molino, "Determination of Moment-Deflection Characteristics of Automobile Seat Backs" NHTSA Nov., 1998.
- 9) Mertz,H, Patrick,L., "Strength and Response of the Human Neck", SAE 710855, 1971.
- 10) Michael Kleinberger, Emily Sun, et al, "Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems" NHTSA, Sept., 1998.
- 11) Mertz, H., "Injury Assessment Values Used to Evaluate Hybrid III Response Measurements", 1994.
- 12) Cesarani, D., Boniver, R. et al, "Whiplash Injury, Diagnosis and Treatment", Springer, 1996.
- 13) Mertz,H., Patrick,L., "Investigation of the Kinematics and Kinetics of Whiplash During Vehicle Rear-End Collisions", 11th Stapp Car Crash Conf. SAE 670919, 1967.
- 14) Prasad, P., Kim, A., "Biofidelity of Anthropomorphic Test Devices for Rear Impact", 41th Stapp Car Crash Conf, SAE, 1997.
- 15) David M. Blaisdell, Andrew E. Levitt and Michael S. Varat, "Automotive Seat Design Concepts for Occupant Protection", SAE 930340, 1993.
- 16) 이재완, "후방추돌시 좌석등받이 강도와 목 상해 상관관계에 대한 실험적 연구", 한양대학교 석사학위 논문, 1999.
- 17) 윤경한, 이재완, 박형원 등, "후방추돌시 좌석등받이 강도와 목 상해 상관관계에 대한 연구", KSAE Paper No. 98380127, 1998.