

저속 40% 오프셋 충돌시험을 통한 차량의 손상성·수리성 및 안전성에 관한 연구

Damageability, Repairability and Safety of Vehicles at Low Speed 40% Offset Crash Test

박인송*, 허승진**, 정태용**
Insong Park, Seungjin Heo, Taeyong Chung

ABSTRACT

The research committee for automobile repairs (RCAR), an international body of insurance research centers, has adopted the typical low speed crash test based on an average damage level in crash accidents to estimate the damageability, repairability and safety. The characteristics of body acceleration and the probability of injury are investigated based on damaged components, accelerations of body and injured dummy to analyze damageability and the driver's safety under low speed crash environment. It is found from the experimental results that the probability of head and thorax injuries are very low comparing to the injury criteria of FMVSS No.208. Furthermore, it is suggested that the deployment of airbag may not be necessary at RCAR low speed frontal crash test.

주요기술용어 : Damageability(손상성), Repairability(수리성), Head Injury Criteria(머리상해 기준), Crash(충돌), Dummy(인체모형), Injury(상해), Abbreviated Injury Scale(상해등급)

1. 서 론

세계자동차수리기술연구위원회(RCAR)는 자동차 수리기술 연구에 관한 국제기구로서 1975년에 설립되었으며, 손상성과 수리성을 평가하기 위하여 충돌사고시 수리비 지급비율과 도로상에서 빈번히 발생하는 평균적인 손상형태를 토대로 한 저속충돌시험을 도입하였다.

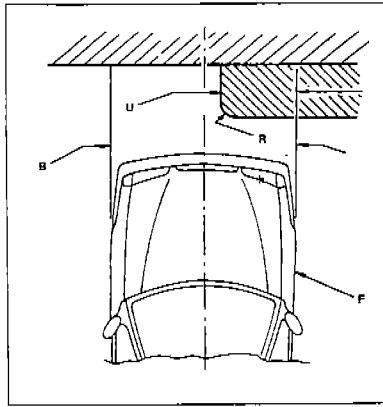
손상성은 차량이 저속충돌력을 견딜 수 있는 능력의 척도이며, 충돌의 결과로서 차체

및 기타 부품이 손상되는 정도를 파악하여 결정된다. 특히 저속 손상성 개선은 범퍼의 성능과 충격흡수 공간확보 그리고 수리비가 가장 낮은 부분이 손상되게 하여 충격에너지가 수리비가 높은 부품측으로 전달되는 것을 방지함으로써 이루어 질 수 있다.

수리성은 손상된 부품, 어셈블리 또는 시스템을 손상되기 이전의 상태로 회복시킬 수 있는 용이성의 척도이다.⁽¹⁾ 수리성을 개선하기 위하여는 손상된 부품, 시스템, 구조물을 손상되기 이전의 상태로 얼마나 쉽게, 신속하게, 저렴한 비용으로 회복시킬 수 있는가를 알아야 한다.

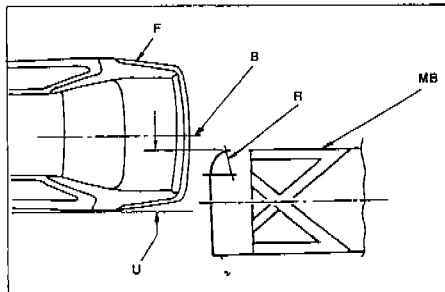
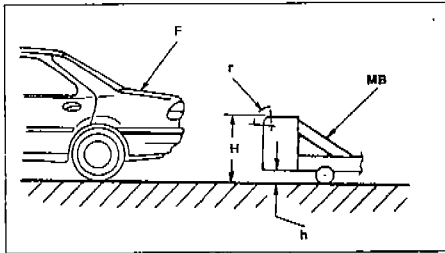
* 보험개발원 자동차기술연구소

** 정회원, 국민대학교 기계·자동차공학부



Key:
 U = Offset 40%
 B = Overall width of test vehicle
 $V_i = 15.0 \pm 1.0 - 0 \text{ km/h}$
 R = 150mm constant radius
 F = Test vehicle

(a) frontal



Key:
 MB = Mobile barrier
 $M_{MB} = 1000 \text{ kg} \pm 5 \text{ kg mass}$
 U = Offset 40%
 H = 700mm barrier height $\pm 10 \text{ mm}$
 B = Overall width of test vehicle
 h = 200 mm barrier ground clearance $\pm 10 \text{ mm}$
 $V_{MB} = 15.0 \pm 1.0 - 0 \text{ km/h}$
 F = Test vehicle
 $V_i = 0 \text{ km/h (handbrake off)}$
 r = 50 mm constant radius
 R = 150 mm constant radius
 F = Test vehicle

(b) Rear

Fig. 1 RCAR offset 40% frontal and rear moving barrier crash test

이러한 수리성과 손상성의 특성을 평가하기 위하여 실제 충돌시험을 하고 그 결과를 분석하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 두가지 형태의 충돌시험 즉, 15km/h의 속도로 시험자동차를 40% 오프셋 고정충돌벽에 충돌시키는 정면충돌시험과 이동벽을 시험자동차 후면에 충돌시키는 후면충돌시험을 표준 평가방법으로 채택하였다. 자동차기술연구소(KART)에서 우리나라의 자동차사고를 분석한 결과 11시 방향부터 1시 방향까지의 정면충돌은 전체의 44.5%, 5시 방향부터 7시 방향까지의 후면충돌은 27.6%로 분류되었으며, 이 결과는 국제적인 공동기준으로 사용하고 있는 RCAR 저속충돌시험이 우리나라의 충돌사고를 충돌방향별 빈도면에서 평가하는 적합한 방법인 것으로 분석되었다.⁽²⁾ 충돌시 승객보호를 위하여 제정된 우리나라의 자동차 안전기준은 시속 48.3km/h의 속도로 자동차가 고정벽에 완전정면충돌시 승객의 상해가 어떤 수준을 초과하지 않도록 규정하고 있으며, 이것은 미국의 49CFR Part 571의 FMVSS No. 208의 요건과 동일한데 그 시험 방법 및 요건들은 Table 1과 같다.^(3~4)

본 연구에서는 손상성 및 수리성을 평가하기 위하여 저속충돌시험을 수행하였다. RCAR 기준에 따라 정면 및 후면 충돌시험을 실시한 후 차체의 가속도와 운전자석에 탑재한 인체모형의 각 부위에 설치한 센서들로부터 측정된 충격값들로 부터 인체의 상해가능성을 분석하였다. 또한, 운전자의 인체의 상해 정도와 에어백 작동을 위한 차체 가속도에 대한 분석을 통하여 에어백 전개 필요성 여부를 검토하였다.

2. 머리상해기준(HIC)

머리상해기준의 기원은 1932년 Guardjian과 그 동료들의 연구로부터 나왔다. 그들은 "웨인주립대의 뇌충격 허용한도 곡선(WSTC)"

Table 1 The test method and requirements of occupant crash protection

Regulation		KMVSS No. 102(Korea)	FMVSS No. 208(U.S.A.)	ECE Regulation No.94 (Europe)
Impact speed(km/h)		48.3		50.0
Impact method		A fixed collision barrier perpendicularary		30° fixed barrier with anti-slide devices
Injury criteria	HIC	1,000		1,000
	Acceleration of upper thorax	60g's at cumulative duration 3msec		-
	Deflection of sternum	76.2mm		75mm
	Force of upper leg	1,020kgf		10kN

을 발표하였는데, 이것은 유효한 가속도의 지속시간을 나타낸 곡선으로, “두개골 골절” 영역과 “두개골 비골절” 영역을 구분하는 경계를 표시한 것이다.⁽⁵⁾ 1966년에 Gadd는 SI(Severity Index)라는 개념을 소개하였는데 이것은 WSTC의 사용을 향상시키기 위하여 해석적으로 표현한 것으로 식(1)과 같다.⁽⁶⁾

$$SI = \int_{t_1}^{t_2} \bar{a}^{2.5} dt \quad (1)$$

여기서, \bar{a} 는 유효 가속도이며, t 는 가속도 곡선의 지속시간이다. SI가 발표된 후 많은 해석과 실험의 연구결과로써 1971년 Versace는 WSTC와 SI 사이의 연관관계에 대한 HIC의 기초가 되는 해석결과를 발표하였다. 그 후 HIC는 여러번 수정되었으나 현재의 정의는 식(2)와 같다.⁽⁷⁾

$$HIC = (t_2 - t_1) [1 / (t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt]^{2.5} \quad (2)$$

여기서, a 는 중력가속도의 배수로 표시되는 합성가속도이며, t_1 과 t_2 는 두 점간의 지속시간이 36msec 이하로서 식(2)의 값을 최대화하는 임의의 두 순간이다. HIC는 뇌가 점성-탄성 매개물이며 부서지지 않는다는 가정을 근거로 하여 정의되었으며, 가속도와 지속시간의 상승작용의 영향이 고려되어 있다.

3. 실험장치

시험자동차의 정면 또는 후면 충돌을 위하여 충돌시험 구동장비를 사용하였다. 정면충돌의 경우 시험자동차를 체인을 사용하여 구동케이블에 연결하고 구동모터를 이용하여 케이블을 당겨서 자동차를 약 200m 길이의 주행로에서 가속한다. 시험속도에 도달한 자동차는 등속을 유지하면서 40% 오프셋 고정벽 앞까지 구동되고 충돌지점 600mm 앞에서 케이블과 자동으로 분리되면서 충돌된다. 충돌시험속도는 1m 간격으로 설치된 2조의 레이저 속도 측정장치를 사용하였다. 탑승자의 인체 각부 상해치를 측정하기 위하여 미국 49CFR Part 572 Subpart E에 명시된 50% 성인남자 인체모형(Hybrid III)을 사용하였다. 인체모형의 머리와 가슴에 x, y, z 방향으로 3개의 가속도계, 상부 대퇴부 좌·우에 대퇴부 하중계, 흉부의 압축변위량을 측정하기 위한 변위계를 설치하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 RCAR 기준에 따라 안전띠를 착용한 상태로 7회, 안전띠를 착용하지 않은 상태로 1회 정면충돌시험을 수행하였으며, 후면충돌시험은 안전띠를 착용한 상태로 3회 수행하였다. 또한, FMVSS No.208에 따라 시속

48.3km/h의 속도로 고정벽 완전 정면충돌시험을 1회 실시하였는데 각 시험차에 대한 실험조건은 Table 2와 같다. 실험속도는 허용오차 범위내에서 이루어졌으며 A-차량과 E-차량은 운전자석 에어백이 전개되었다.

Table 2 Experimental conditions for crash

Vehicle	Standard	Restraint system	Remark
A-car	15km/h 40% offset frontal barrier crash	3-point s/belt & airbag	Hybrid III 50th percentile male dummy
B-car		None	
C-car			
D1-car		3-point s/ belt	
D2-car	48.3km/h full frontal and barrier crash	3-point s/belt	
D3-car		3-point s/belt	
E-car	15km/h 40% offset frontal and rear mov'g barrier crash	3-point s/belt & airbag	
F-car			
G-car			

4.1 손상성 고찰

Photo. 1은 저속 40% 오프셋 충돌 손상형태의 대표적인 사례이다. 충돌시 운동에너지는 특정 부품이나 부속시스템을 파손시키면서 흡수된다. 시험자동차의 특성 및 구조에 따라 차이는 조금 있었으나 충격에너지의 흡수경로는 유사하였다. 충격에너지가 차량 내부방향으로 전파되어 감에 따라 부품이 충격을 흡수하면서 휘고 좌굴되었으며, 이때 손상부품은 크게 범퍼, 앞패널, 라디에이터, 에어컨콘덴서, 냉각팬, 사이드멤버, 휠더, 휠하우스, 본넷 등이다. 저속정면충돌 손상성에 크게 영향을 미치는 것은 범퍼의 성능과 사이드멤버의 손상형태이며 특히 사이드멤버가 선단 100mm이내서 축중심점접촉손상이 이루어질 때 손상범위가 작게 됨을 알 수 있었다. 또한 손상영역에서 인접부품간의 간격을 최대로 하여 충분한 파손공간을 확보하고 손상성 및 수리성을 향상시킬 수 있을 것으로 분석되었다.

차체의 B-필라 하부와 자동차의 무게중심에 해당되는 콘솔박스 하부에 가속도계를 설치하여 감가속도를 계측하였으며 정면충돌시험차체의 B-필라 하부로 부더의 가속도를 이용하여 속도, 변위, 힘, 에너지를 분석한 결과는 Table 3과 같으며 Fig. 2 및 Fig. 3에 가속도 곡선과 힘-변위 곡선을 비교한 결과를 나타내었다. RCAR 시험의 B-필라 하부의 가속도 곡선에서 G-차량이 10.8g로 가장 높았으며 C-차량이 5.9g로 가장 낮게 나타났다. 특히 A-차량의 경우 범퍼의 강도에 해당되는 가속도의 초기값과 전반적인 평균가속도의 수준이 높았으며, 다른 자동차에 비하여 20~30msec 감소된 80msec정도에서 가속도가 급격히 감소되었다. 이것은 힘-변위곡선에서도 잘 나타나고 있는데 다른 자동차에 비하여 범퍼와 차체가 단단함으로 인하여 충격력은 큰 반면 변위량은 적게 나타났다. A-차량의 전면부의 정적 변위량이 적었으며 이로 인해 차체 및 부품의 손상이 적은 것으로 분석되었다.

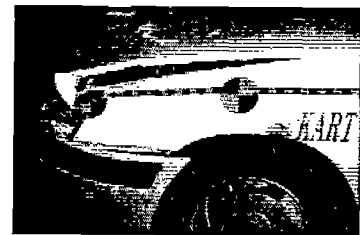


Photo 1 Damaged of 15km/h 40% offset frontal impact test for passage vehicle

Table 3 Test results of body at frontal crash

Vehicle		A	B	C	D1	D3	E	F	G	Remark
Acceleration (g's)	X	15.5	8.6	6.1	9.5	-	8.9	11.4	15.0	Body -C.G.
	Y	4.6	3.0	2.9	4.2	-	3.2	5.0	4.8	
	Z	6.7	4.5	3.5	5.4		5.4	3.8	4.6	
Acceleration(g's)		9.2	7.6	5.9	8.0	29.2	8.6	9.0	10.8	Side sill of B-plr. lower
Displacement(mm)		194	243	256	242	621	224	257	212	
Force(kgf)		1,167	967	779	956	3,473	1,241	1,255	1,551	
Energy(kgf · m)		211	231	176	220	1,858	204	270	329	

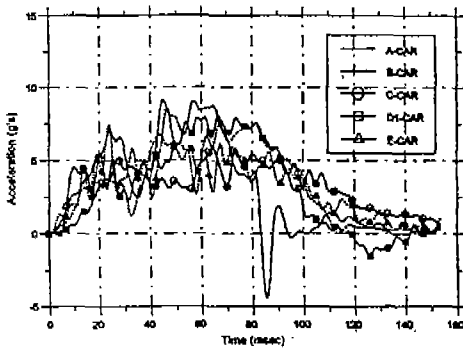


Fig. 2 Variation of longitudinal acceleration of 'B' Pillar at frontal crash

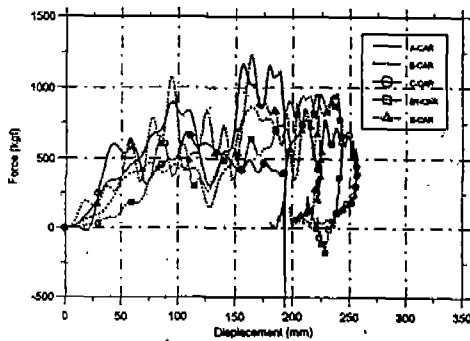


Fig. 3 Variation of force-displacement of 'B' Pillar at frontal crash

4.2 안전성 고찰

충돌시 운전자의 인체상해 정도를 평가하기 위하여 인체 각부에 센서를 장착한 인체모형

으로부터 측정된 인체상해값은 Table 4와 같다. 충돌순간을 고속으로 촬영한 필름을 분석한 결과 저속 정면충돌에서 안전띠에 의해 인체모형이 구속된 경우 모두 머리나 흉부가 조향핸들에 부딪히지 않음이 판명되었으며 머리는 목을 중심으로 조금 회전되었다. 안전띠를 착용하지 않은 D2-차량에서는 인체모형의 코와 입이 조향핸들 상부 림에 가볍게 부딪혔으며 HIC는 안전띠를 착용한 경우와 비슷한 값으로 나타났다. 머리상해기준인 HIC의 경우 범규 요건은 1,000이하이지만, 본 시험의 경우 10~23 수준으로 매우 낮게 나타났으며 흉부가속도는 9g~17g으로 나타났다. 후면 충돌시험에서 HIC는 7~14로 정면충돌과 비교하여 상해값이 비슷하거나 낮은 수준이며 흉부가속도는 5g으로 더 적은 것으로 나타났는데 이것은 머리지지대나 좌석 등받이가 인체모형을 받쳐주어 움직임을 적게 하면서 충격을 흡수하였기 때문으로 사료된다. 정면충돌 자동차에 대하여 HIC, 흉부 합성가속도를 비교한 결과를 각각 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 에어백이 전개된 A-차량과 E-차량의 경우 HIC와 흉부압측변위량의 최대값이 20~40msec 빠르게 발생하였는데 이것은 좌석안전띠가 인체모형을 구속하는 경우보다 운전자석 에어백의 전개로 인하여 인체모형의 머리와 흉부가 에어백에 빠른 시점에서 부딪혔기 때문이다. NASS에 의해 발표된 1980년과 1981년의 자동차 충돌사고시 인체부위별 상

Table 4 Test results of dummy at frontal and rear crash

Crash type		Frontal									Rear		
Vehicle		A	B	C	D1	D2	D3	E	F	G	E	F	G
Head	Result.(g)	18	13	10	15	14	228	12	12	10	13	10	11
	HIC	23	15	11	23	13	1,352	11	15	10	14	7	10
Chest	Resultant (g, 3msec)	12	13	9	17	8	58	10	12	14	5	5	5
	Deflection (mm)	8	5	4	8	4	101	10	13	8	-	-	-
Femur load (kgf)	Left	29	20	17	25	342	250	18	23	65	-	-	-
	Right	8	121	22	17	146	330	27	27	67	-	-	-
Seat belt load (kgf,shoulder)		153	268	255	322	-	594	141	301	-	-	-	-

해비율은 머리가 35.5%, 흉부가 26.7%로서 대부분의 상해가 머리와 흉부에서 발생하고 있는 것으로 보고되고 있기 때문에 본 연구에서도 머리와 흉부에 대한 상해가능성을 분석해 보았다. Hybrid III 인체모형에서 측정된 HIC에 대한 뇌상해의 생명위험 가능성은 HIC가 400이하에는 1%이하⁽⁵⁾로 나타남으로 10~20대 수준의 HIC에서의 위험 가능성은 매우 낮다고 사료되며 8~17g으로 나타난 흉부가속도는 AIS 3이상의 상해가능성이 0.25% 이하⁽⁸⁾로 분석되었다. 따라서 저속충돌에서 머리와 흉부의 상해가능성은 매우 낮음을 규명할 수 있었다.

4.3 수리성 고찰

차량은 설계 초기부터 안전성능 충족에 개발의 초점이 맞추어져 있기 때문에 실질적으로 고객이 느낄 수 있는 것은 차량 유지관리 측면에서는 불만족한 점이 여러 가지로 나타난다. 그 중에서 차량이 충돌사고 또는 내구성 결함으로 복원수리가 이루어질때 지불해야 하는 수리비 차이는 고객으로 하여금 차량의 선호도에 막대한 영향을 주게된다. 따라서 RCAR에서는 이러한 차량의 수리비를 차량등급별로 차별화하기 위해 다음과 같은 공식에 의하여 DI지수(Damageability Index)를 책정하여 평가하고 있다.

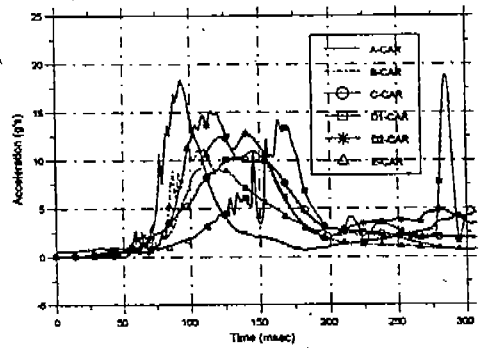


Fig. 4 Variation of HIC for driver at frontal crash

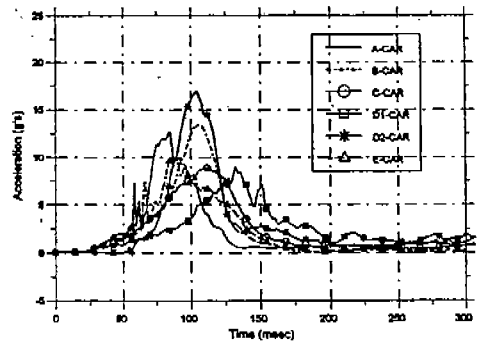


Fig. 5 Variation of resultant acceleration of chest for driver at frontal crash

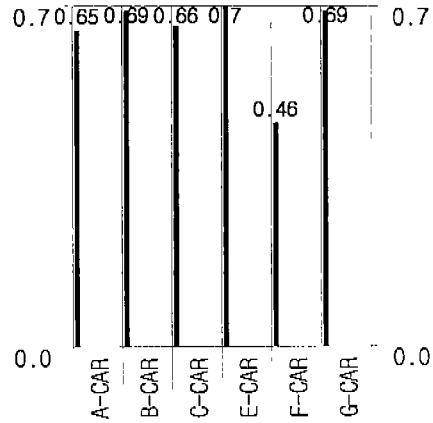
$$DI = \frac{\text{TOTAL REPAIRING CHARGES} \times 100}{\text{PRICE OF 0-MILEAGE VEHICLE} \times \text{SAC}}$$

(SAC : Speed Adjuster Coefficient)

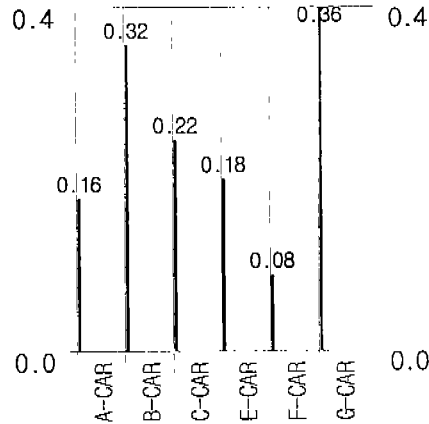
본 연구에서도 상기 공식에 의거 DI지수를 산출하여 Fig. 6 에 나타내었다. 수리 및 교환 탈착 판단기준은 외관조사 결과 뿐 아니라 성능저하 그리고 작업시간, 부품가격, 수리기술 능력, 수리장비성능 등을 고려하여 설정된다. 차량등급별 DI지수 분포는 전면의 경우 차량 등급에 관계없이 균일한 분포를 나타내고 있는데 약 0.46 ~ 0.69를 기록하였다. 특히 A-차량과 E-차량은 에어백의 전개로 인한 수리비 상승으로 타차량에 비해 DI지수가 높게 났다. 그러나 DI- 차량은 고속충돌사고와 같은 경우로서 B필라 및 루프 그리고 C필라까지의 손상이 발생하여 차량가격 대비 수리의 의미를 상실하므로 본 분석에서는 제외하였다. 후면의 경우는 전면과 다르게 DI 지수가 약 0.08~0.35로서 차량별 불규칙한 결과를 보였다. 따라서 본 시험에서는 전면의 경우는 차량등급별 손상성과 수리성이 동급 수준으로 나타났으나, 후면의 경우는 그렇지 못한 것으로 나타났다. 그러므로 DI지수는 동일한 부품이라도 변형형태와 손상유형이 충돌부위에 집중적으로 에너지가 흡수되는 차체의 구조와 메카니즘 부품의 배치가 손상빈도에 따라 적절히 이루어져야 만 우수한 DI지수를 기록할 수 있다. 특히 전면에서는 에어백의 전개 및 프론트 사이드멤버의 손상정도에 따른 DI 지수 상승 요인을 설계단계부터 방지하고 후면에서는 리어사이드멤버와 트렁크프로워의 손상정도에 따른 DI지수 상승을 방지 해야 할 것으로 사료된다.

4.3 수리비증가와 에어백 전개의 필요성 고찰

에어백 전개로 인해 발생하는 추가 수리비용은 수리비에 많은 영향을 미치므로 에어백 전개의 필요성 여부에 대하여 분석할 필요가



(a) Frontal Crash



(b) Rear Crash

Fig. 6 Damageability Index at frontal and rear crash

있다. Table 4에서 A-차량과 E-차량의 경우 각각 HIC 값이 23과 11, 흉부 상해값이 12g과 10g, 흉부 압축변위량이 8mm와 10mm 등으로 나타났는데 이 값들은 안전띠에 의해 구속된 7 차량과 비교하여 비슷한 수준이다. 그러므로 본 연구에서와 같은 저속충돌에서는 운전자 보호를 위한 에어백은 전개될 필요가 없는 것으로 사료된다. 정면충돌시 에어백 전개

여부를 결정하는 충격감지 센서 설치위치에 x, y, z 3축방향으로 장착한 가속도계로 부터 시간에 대한 가속도 곡선을 비교한 그래프는 Fig. 7과 같이 나타났다. 다른 차량과 비교하여 A-차량의 최대가속도는 15.5g으로 가장 높게 나타났는데 이것은 A-차량이 낮은 충격에서 범퍼 및 차체가 단단하기 때문이며, E-차량의 경우 8.9g으로 가속도 값이 낮은 편이었지만 에어백이 전개된 것은 에어백 작동센서의 감지값이 낮게 설정되었기 때문으로 사료된다. 저속 충돌에서 에어백이 전개되지 않도록 하기 위하여 차체 감가속도를 에어백전개 수준 이하로 낮추거나 에어백 전개에 필요한 감가속도 수준을 높여 에어백이 전개되지 않게 하므로써 수리비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

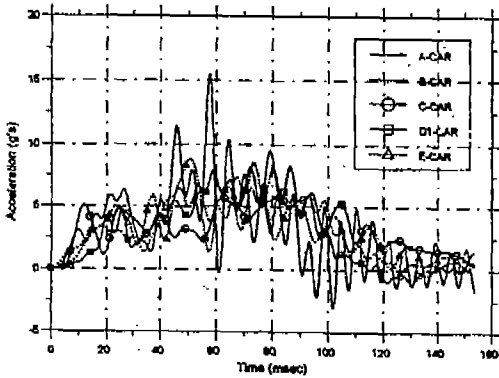


Fig. 7 Variation of longitudinal acceleration of body C.G. at frontal crash

5. 결론

자동차의 저속충돌시 손상성 수리성 및 안전성을 평가하기 위하여 RCAR 시험절차에 따라 시험을 실시하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저속 15km/h, 40% 오프셋 충돌사고에서 손상성과 수리성을 평가하는 DI지수를 향상시키기 위해서는 특히 전·후면 공히 범퍼의

성능을 사고빈도가 높고 수리비 지급비율이 가장 높은 충돌사고속도 약 13~14.5km/h에 견딜수 있도록 개선하고 프론트 및 리어 사이드레일의 구조와 성능을 100mm이내에서 선단집중점힘변형과 분할보급형태로의 개선이 요구되며, 고가부품의 저손상 위치로의 배치를 통한 인접부품간의 간격을 최대로 하여 파손공간을 확보하여 주고 또한 부품가격의 경쟁력 있는 책정도 매우 중요한 것으로 분석되었다. 즉 차량의 구조형태, 보급형태, 배치형태, 부품가격 등에 대한 정보가 차량 개발 초기 단계부터 적용되어 질 수 있도록 기술육성 코드화가 요구된다.

(2) 정면충돌에서 3점식 안전띠를 착용한 경우 일반적으로 인체모형의 머리와 가슴은 조향핸들에 부딪히지 않았으며 운전자의 머리와 흉부 상해 가능성은 매우 낮게 나타났다.

(3) 후면충돌의 경우 운전자의 머리와 흉부 상해 정도는 정면충돌과 비교하여 비슷하거나 더 적은 것으로 분석되었다.

(4) 저속정면충돌에서 에어백이 전개하여도 운전자를 더 안전하게 보호할 수 없으므로 에어백은 전개될 필요가 없을 것으로 판명되었다.

참고 문헌

1. "Recommended practice on optimizing damageability, reparability and serviceability and theft deterrence", SAE J1555, pp. 5, 1985.
2. 세계 각국의 자동차 수리기술 연구, '95 RCAR 연례 의회 보고 자료, pp. 245~247, 1996.
3. "Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 208 : Occupant crash protection", Part571 49CFR, pp. 455~456, 1994.
4. "Regulation No.94 : Uniform provisions concerning the approval of vehicles with

- regard to the protection of the occupants in the event of a frontal collision", E/ECE/324 E/ECE/TRANS/505, pp. 9~10, pp. 17~23, 1995.
5. J. A. Pike, "Automotive safety :Anatomy, injury, testing & regulation", pp. 69~72, pp. 57~60, 1990.
 6. S. H. Backaitis, "Biomechanics of impact injury and injury tolerances of the head-neck complex", SAE PT-43, pp. 309~313, 1993.
 7. J. A. Newman, "Head injury criteria in automotive crash testing", SAE Paper No.801317, pp. 1~4, 1980.
 8. R. M. Morgan, "Thoracic trauma assessment formulations for restrained drivers in simulated frontal impacts", SAE Paper No.942206, pp. 19~20, 1994.
 9. Jack. A. Ribbens, "Designing for Optimum Damageability, Repairability and Insurability How Repair Costs Relate to Insurance Costs", SAE Paper No. 94049, PP. 4~5, 1994.