

## 승객 상해치 저감을 위한 측면 충돌 특성 연구

### A Study on the Side Impact Characteristics for Reduction of Occupant Injuries

박 현 호  
H. H. Park



박 현 호  
· 1963년 2월 23일생  
· 쌍용자동차 기술연구소  
차량연구개발실  
· 충돌 해석 및 승객 거동해석  
담당, 정회원

#### 1. 서 론

일반적으로 안전성이라 함은 0차, 1차, 2차의 3가지로 분류되는데 0차 안전성은 좌석의 위치, 운전에 대한 적절한 정보 제공, 합리적인 계기판 배열등 위험한 상황에 처하지 않도록 하는 능동적인 안전성을 의미한다<sup>1)</sup>. 1차 안전성은 ABS (Anti-Lock Brake System)등을 통하여 위험한 상황에 처했을 때 이를 회피하도록 하는 것을 뜻하는 반면 2차 안전성은 최악의 상황으로 충돌사고시 에어백(Supplementary Airbag System), 차체의 적절한 에너지 흡수 구조 등으로 승객을 보호하는 수동적인 안전성을 말한다. 2차 안전성과 관련하여, 정면 충돌에 부가해 최근 관심이 집중되고 있는 측면 충돌은 승객 상해(Passenger Injury)가 약 28%로 높은 비중을 차지하며 정면 충돌과는 달리 생존 공간이 협소하고 충돌 에너지가 승객에게 직접적으로 전달되어 이로 인한 승객 상해는 치명적이다. 따라서 각국에서는

측면 충돌시 차량의 안전도를 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 이에 따른 관련 법규도 강화되고 있는 추세이다<sup>2)</sup>. 최근 미국, 독일을 비롯한 선진국에서는 기존의 법규에서 탈피하여 측면, 후방 및 Offset전방 충돌등 법규를 더 강화하려는 움직임이 나타나고 있으며 특히 측면 충돌의 경우 기존의 Static 규정에 부가해 이동 충돌벽(Moving Deformable Barrier)에 의해 충돌하는 Dynamic 규정을 제정하여 시행 중에 있다<sup>3)</sup>. 이에 따라 자동차 제작사들은 차량의 개발 초기 단계부터 차량의 충돌 특성 및 승객의 상해치를 평가하여 이를 개선하려는 노력을 기울이고 있다. 이를 위하여 최근 컴퓨터 Simulation을 통한 최적 설계 기법 도입은 이미 보편화되고 있으며 최근 대용량 컴퓨터 등의 개발로 차체의 충돌해석이 가능해졌다. 또한 차체 구조 해석 및 최적 설계를 위하여 유한 요소 해석법(Finite Element Method)이 개발되어 차체의 정적, 동적 해석에 널리 이용되어 왔으며 이들 모델의 정밀도는 모델의 크기(요소의 개수), Time Interval(요소의 크기, 밀도, Young's Modulus) 및 접촉 알고리즘에 의한 영향이 크다. 따라서 보다 정확한 해를 얻기 위해서는 모델의 크기가 증가하게 되지만 컴퓨터의 용량에 제한을 받거나 해석 소요시간 및 비용에도 관련되기 때문에 요소의 크기는 적절하게 조정하여야

한다.

최근에는 유한 요소 모델을 이용하여 차체의 구조 해석뿐만 아니라 승객(Occupant)까지도 함께 포함하여 승객의 거동 양상 및 상해치를 평가하는 해석 기술의 연구가 활발하다. 이는 MADYMO, MVMA2D, PADS 등 기존의 승객 거동 해석 모델은 썰매 시험(Sled Test)의 해석 용으로 사용되어 왔기 때문에 특히, 측면 충돌의 경우 이들 모델들은 도어(Door)와 승객간의 구조적 상관 관계 및 도어의 침입은 무시되었다. 그러나, 측면 충돌은 정면 충돌과는 달리 차체 내부는 강체(Rigid Body)로 유지될 수 없고 승객이 도어와 근접해 있기 때문에 충돌후 차체 내부(Door Trim)와 접촉하여 거동하게 되므로 측면 충돌 승객 거동 해석의 경우 반드시 측면 구조물과 도어에 대한 고려가 선행되어야 한다.

이를 위하여 본 연구에서는 유한요소 충돌 전용 Program인 PAM-CRASH를 이용하여 전체 차량의 측면 충돌시 승객을 포함한 충돌 해석을 실시하고 이를 시험과 비교하였으며 측면 충돌시 도어 Intrusion Bar가 승객 상해치에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 해석에서 사용된 Dummy는 Deformable SID(Side Impact Dummy)이다<sup>4)</sup>.

## 2. FMVSS214 측면 Dynamic 규정

미연방 도로교통 안전국인 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)에서 제정한 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard)No.214의 Dynamic 규정에 대한 개략도가 Figure 1에 나타나 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 정지된 시험차에 1,360kg의 중량을 갖는 이동 충돌벽을 54km/h(33.5MPH)의 속도로 충돌시키는 방법이다. 이때 이동 충돌벽은 27°의 각도를 유지하면서 충돌 차량의 측면과는 수직으로 충돌해야 한다. 이동 충돌벽은 두 개의 블록을 갖는 알루미늄 하니콤(Aluminum Honeycomb) 구조로 구성되어 있다. 충돌 지점은 축간 거리에 따라 달라지는데 축간 거리가 114인치 이하일 때는 차량 축간 중간 거리에서

앞 방향으로 37인치 지점이며 그 이상일 때는 차량의 전륜으로부터 뒤 방향으로 20인치 지점이다. 본 해석에 사용된 차량은 전차의 경우에 속하여 축간의 중간 거리에서 앞방향으로 37인치 지점을 MDB 좌측 끝단이 오도록 위치 시켰다.

측면 충돌시 승객 상해치 평가 기준은 흉부상해치 TTI(Thoracic Trauma Index)가 4도어의 경우 85g, 2도어의 경우 90g를 넘지 말 것과 골반 횡감속도(Pelvis Acceleration)를 130g 이하로 규정하고 있다.

## 3. 해석 및 시험 모델의 구성

Figure 2는 본 해석과 시험에 사용된 전체 차량에 대한 측면 충돌 모델을 나타낸 그림으로 Dummy가 앞, 뒤 좌석에 배치되어 있으며 앞서 설명한 미연방 법규 FMVSS214를 기준으로 해석 및 시험 모델을 구성하였다. 본 연구에서 측

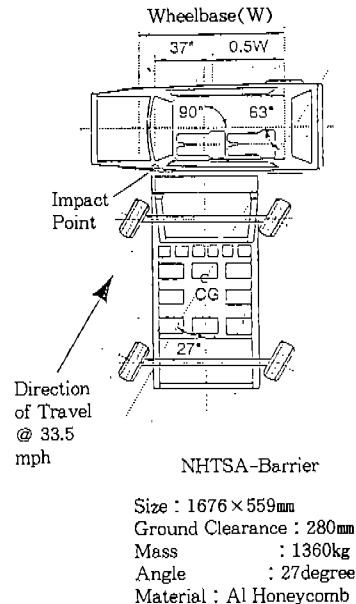
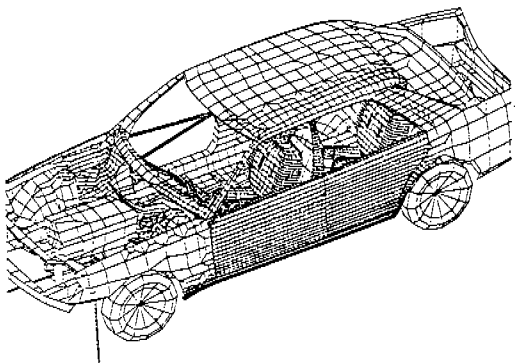
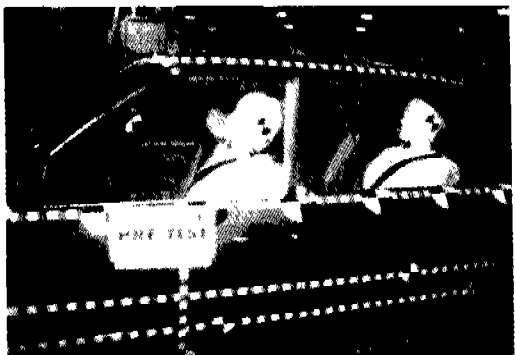


Fig.1 The Configuration of Dynamic Regulation for FMVSS214

면 충돌 시험은 해석 결과에 대한 검증 작업의 목적으로 수행되었기 때문에 여기서는 주로 해석 모델에 대해 설명하기로 한다. 차량의 측면 충돌 모델은 크게 차체, 이동 충돌벽과 Dummy의 3가지 모델로 분류할 수 있는데 이에 대한 유한 요소 모델링(Finite Element Modeling)은 방대한 양의 작업을 필요로 하고 또한 모델링 결과에 따라 해석 결과 및 해석 수행 시간에도 많은 차이가 초래될 수 있으므로 모델링 작업 시작 단계부터 이에 대한 고려가 있어야 한다. 특히 측면 충돌의 경우는 측면 차체 구조(Side Body Structure) 및 도어의 변형에 의해 승객이 받는 영향을 무시할 수 없기 때문에 이 부분에 대한 모델링은 주의를 기울여야 하며 개략적인 사항은 다음과 같다.



Analysis



Test

Fig.2 Full Vehicle Model of Side Impact

### 3.1 차체(Vehicle Body)

충돌 모델을 만들 때 주요한 요인 중의 하나는 요소의 크기를 결정하는 문제인데 측면 충돌의 경우 충돌시 심한 변형을 일으키는 영역인 왼쪽 측면에서부터 오른쪽 측면 부위로 점차 요소의 크기를 증가시킨다. 또한 Engine, Transmission, Drive Shaft와 Differential Gear 등은 Soild, Shell, Beam요소 등으로 모델링 되는데 정면 충돌의 경우 이들에 대한 특성 값은 스프링이나 감쇄 요소를 고려하지만 측면 충돌의 경우 이에 대한 영향보다는 질량 분포에 대한 영향이 더 크기 때문에 이들 특성은 고려하지 않았다. Tire와 Rim은 Shell요소를 사용하였고 이들에 대한 특성 값은 고려되었지만 지면과의 마찰력은 무시되었다. 측면 충돌이 시작되는 왼쪽 측면 부위의 Seat, 도어, 임팩트 바아(Impact Bar)와 내장재(Trim)등은 상세히 모델링 하였으며 변형이 거의 없는 오른쪽 측면 도어 관련 부품들은 Beam요소를 사용하여 질량만을 고려하였다. 또한 모델링은 되지 않지만 샤시 부품, Radiator, Spare Tire, Battery, Wire등 이들에 대한 질량은 집중 질량 요소를 사용하여 모델에 포함된다. Belt는 3점식이며 이에 대한 특성들은 실험 값을 사용한다. 이 차체 모델은 21,458개의 Shell, 117개의 Bar, 380개의 Soild, 320개의 질량 요소를 사용하였다.

### 3.2 이동 충돌벽(Moving Deformable Barrier)

측면 충돌에 대한 이동 충돌벽은 미국과 유럽의 경우 각각 재질, 규격 및 무게가 다르며 본 연구에서는 미 연방 법규에서 정하고 있는 NHTSA Barrier를 사용하였다. 이동 충돌벽은 27도 각도의 방향으로 33.5MPH의 속도로 차량의 측면에 충돌하도록 초기 값을 주게되며 충돌벽은 찌그러지는 특성을 갖도록 두개의 알루미늄 하니콤 블록으로 구성된다. 이동 충돌벽은 굴림 바퀴를 포함하여 1,360kg의 무게를 갖도록 모델링 하였으며 여기서 사용된 모델의 재질은 PAM-CRASH에서 NHTSA 알루미늄 하니콤 Barrier의 특성을 대표하는 Material 41을 사용

하였다. 본 해석에 사용된 모델은 이동 충돌벽의 모서리 부분의 R값은 고려하지 않았다.

### 3.3 인체 모형(Dummy)

본 해석에서 승객의 상해치 평가를 위한 승객의 모델은 US-SID Deformable Dummy를 사용하였으며 이들 Dummy의 특성들은 수많은 실험에 의해 검증된 것으로서 통상 Software사에서 Database로 제공하고 있다. Dummy는 결합(Joint)부에 의해 연결되는 각 Segment, 즉 Deformable 요소와 강체(Rigid Body)로 구성되는데 충격력을 많이 받는 부위는 Deformable 요소가 사용된다. 측면 충돌 해석후 각 Dummy에 대하여 척추, 골반 및 흉부 Rib부위의 변위, 속도 및 가속도 등을 파악하여 상해치를 평가할 수 있다. 앞서 설명한 차체 모델에 좌측 앞 운전석과 뒤쪽에 각각 Dummy를 위치 시켰다. 2개의 Dummy에 대하여 모두 13,730개의 요소가 사용되었으며 절점의 개수는 13,424개이다.

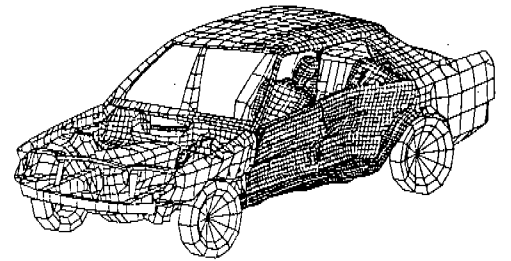
## 4. 결과 및 고찰

이상과 같이 승용차의 측면 충돌에 대한 해석 모델을 완료하고 이를 충돌 전용 해석 프로그램인 PAM-CRASH를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석 시간은 총 70msec의 충돌 현상을 재현하는데 DEC Alpha 기종의 컴퓨터를 이용하여 CPU가 32시간 정도 소요되었다. 본 연구에서 수행한 측면 충돌 해석 결과로부터 측면 충돌시 에너지 분산 경로에 대해 고찰해 보았으며 차체 및 이동 충돌벽의 변형 양상과 승객 상해치를 시험 결과와 비교하여 보았다. 측면 충돌 해석을 통하여 측면 충돌 성능을 예측하고 승객의 상해치를 개선하려면 해석용 모델이 시험 결과와 잘 튜닝(Tuning)이 되어 있어야 한다. 그러나 본 연구에서 해석의 결과는 최초 모델을 가지고 수행한 결과이며 시험과의 비교는 경향 분석의 목적으로 사용되었다.

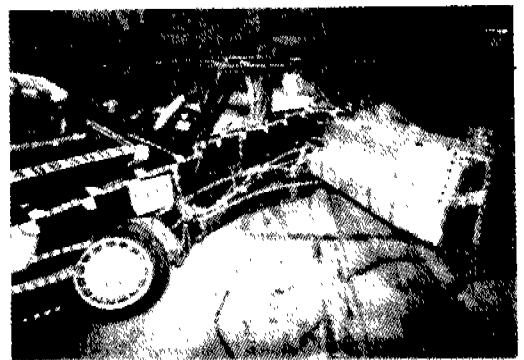
### 4.1 변형 양상의 비교

전체 차량에 대한 측면 충돌후 변형 양상에 대

한 해석과 시험의 비교가 Figure 3에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 변형 양상은 해석과 시험이 유사한 양상을 보이고 있으며 해석은 63msec에서의 변형 양상이므로 이동 충돌벽은 아직 회전하지 않고 있지만 차체는 이미 심한 변형이 일어나 더 이상의 에너지는 흡수하지 않는다. 해석이 더 진행된다면 이동 충돌벽의 충돌 방향이 27도의 각도로 충돌하기 때문에 차실 내 Dummy의 거동은 이동 충돌벽 반대쪽으로 회전하게 되며 차체도 반시계 방향으로 회전하게 되어 시험에서 나타난 그림과 유사하게 될 것이다. 그림에서 나타난 결과를 보면 도어의 경우 앞쪽보다는 뒤쪽의 경우가 더 심한 변형을 나타내고 있으며 이는 앞쪽 도어는 이동 충돌벽의 전체 경계면에 위치하게 되어 측면 구조물과 함께 변형하는 반면 뒤쪽 도어는 이동 충돌벽의 모서리가 도어의 절반 정도에 위치하게 되기 때문이다. Figure 4는 이동 충돌벽의 변형 양상에 대하여



Analysis



Test

Fig.3 The Comparison of Analysis with Test for Deformed Shape after Side Impact

해석과 시험을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 변형 양상은 유사하나 이동 충돌벽의 모서리 부분의 R값을 해석에서는 고려하지 않았기 때문에 모서리 부분의 변형 양상은 약간의 차이를 보이고 있다.

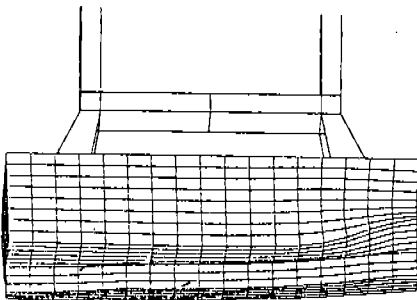
Figure 5는 63msec에서의 측면 충돌시의 승객의 거동 양상을 보여주고 있다. 측면 충돌의 경우 Dummy의 거동 양상은 앞, 뒤 Dummy가 서로 상이한 거동을 보여주고 있으며 이는 앞 Dummy의 경우 도어 전체가 Dummy와 접촉하게 되어 Dummy가 동일한 방향으로 거동하며 뒤 Dummy의 경우는 Upper Leg위치에 이동 충돌벽의 모서리 부분이 접촉하게 되므로 Upper Leg쪽이 도어의 변형과 함께 Dummy의 상체와 반대 방향으로 이동함을 알 수 있다.

#### 4.2 충돌 에너지 흡수 분포의 비교

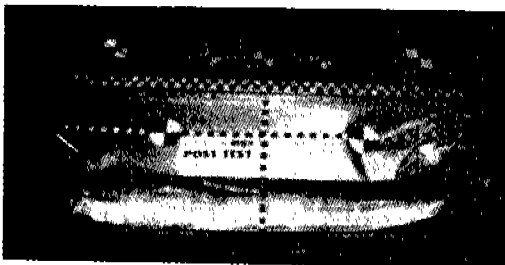
측면 충돌시 이동 충돌벽에 의해 차체로 전달

되는 충돌 에너지는 주로 차체의 측면 구조물, 도어, Seat를 통하여 전체 차량으로 분산되며 차실 내에 있는 승객이 이러한 충격력을 받게 된다. 따라서 차량 전체를 통하여 차체가 더 많은 에너지를 흡수할 수 있는 구조적인 설계가 필요하게 되는데 측면 충돌의 경우 승객이 충돌벽에 근접해 있기 때문에 충돌 에너지를 적절하게 분산하여 승객에게 전달되는 에너지를 최소화하기 위한 에너지 분산 구조가 필요하다. 따라서 측면 충돌후 충돌 에너지는 이동 충돌벽이 먼저 닿게 되는 도어, B' Pillar, Side Sill을 통하여 Floor와 Roof로 전달되게 되는데 이들 충돌 에너지를 적절하게 분산하기 위한 연구가 활발하다.

Figure 6에서는 차량의 측면 충돌후 에너지 분포를 나타낸 것이다. 측면 충돌은 충돌 에너지



Analysis



Test

Fig.4 The Comparison of Analysis with Test for Moving Deformable Barrier

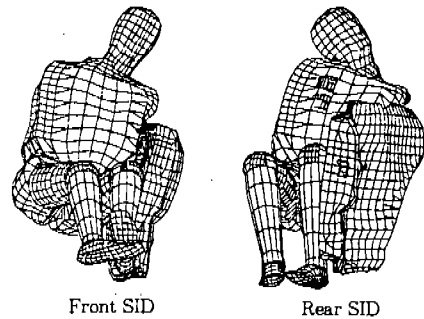


Fig.5 Occupant Behavior for Side Impact

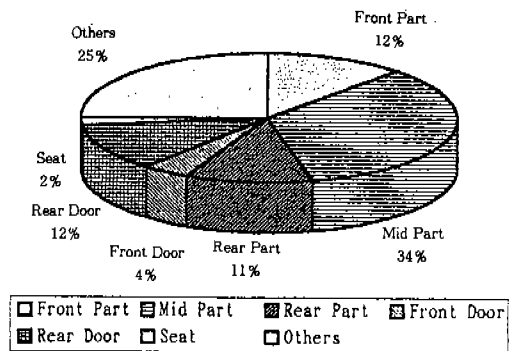


Fig.6 Internal Energy Distribution for Side Impact

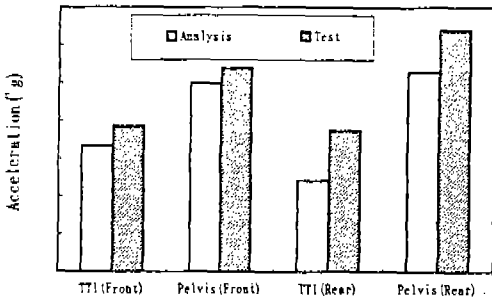


Fig.7 The Comparison of Analysis with Test for Passenger Injuries

의 대부분이 차체의 중간 부분, 즉 B' Pillar, Floor, Side Sill 등에서 흡수되며 도어의 경우 앞 도어보다는 뒤 도어에서 더 많은 에너지를 흡수함을 알 수 있다. 또한 충돌 에너지는 먼저 Side Sill 및 B' Pillar로 전달되고 Under Floor, Seat Cross Member 및 T/M Tunnel로 전파된다. 따라서 충돌 에너지를 효과적으로 분산하기 위해서는 이들 구조에 대한 적절한 분산 Mechanism이 확보되어야 한다.

4.3 승객 상해치의 평가

측면 충돌시 흉부의 상해 기준으로 NHTSA

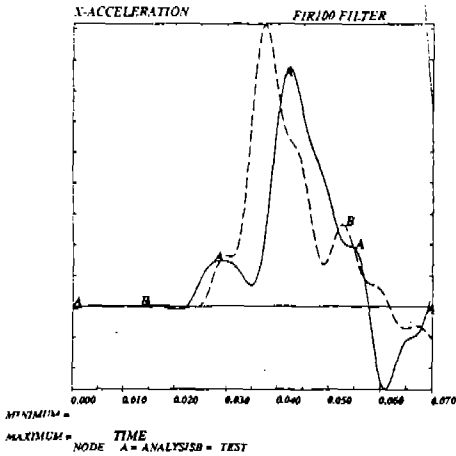


Fig.8 Upper Spine Acc. of Front SID

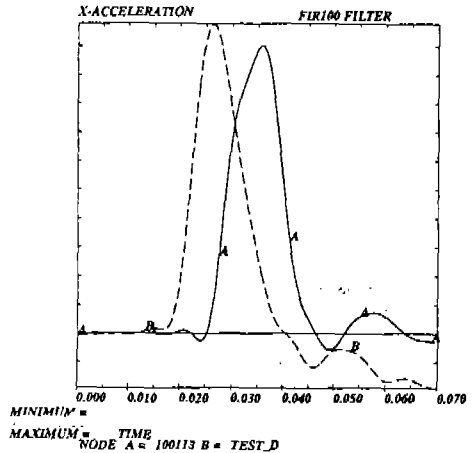


Fig.10 Pelvis Acc. of Front SID

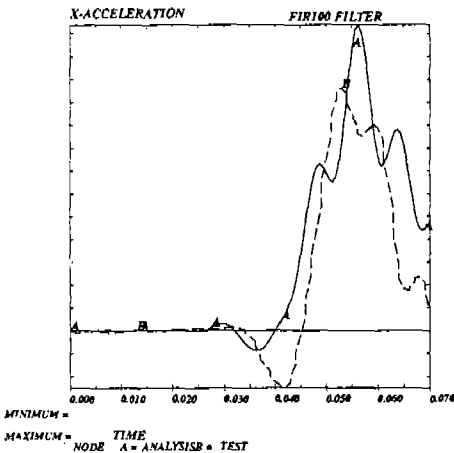


Fig.9 Upper Spine Acc. of Rear SID

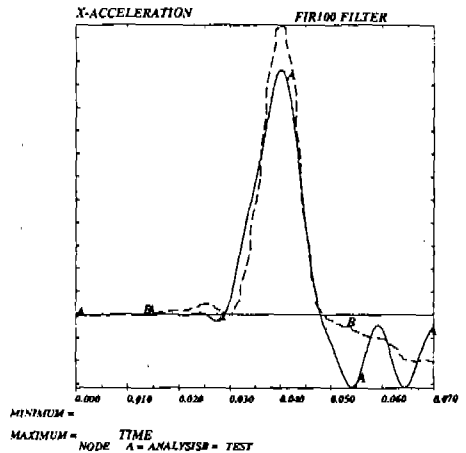


Fig.11 Pelvis Acc. of Rear SID

는 흉부상해지수 TTI(Thoracic Trauma Index)라는 새로운 상해 측정법을 개발하였는데 TTI는 나이나 무게가 다른 사람의 상해 정도를 예측하는 공식으로  $TTI=1/2(G_r+G_{ls})$ 로 표현되는데 여기서,  $G_r$ 은 상부 또는 하부 갈비뼈 가속도 계

의 최대 가속도값중 큰 값이며,  $G_{ls}$ 는 척추 하부 부착 가속도 계의 최대 가속도 값이다. Figure 7은 측면 충돌시의 승객에 대한 TTI와 Pelvis 가속도 값에 대한 해석과 시험을 비교한 것이다. 또한 Figure 8~11은 승객의 상해치 측정 부위 중에 Upper/Lower Spine, Pelvis 가속도 파형에 대한 해석과 시험을 비교한 것이며 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 측면 충돌의 경우 Dummy가 이동 충돌벽에 근접해 있기 때문에 Dummy의 가속도 파형은 해석 모델에 따라 상당한 차이를 나타낼 수 있으나 본 해석의 결과로 볼 때 가속도 파형의 경향은 잘 일치하지만 시간 간격이나 최대값 등에는 차이를 보이고 있는데 이는 본 해석에서 사용된 모델은 최초 모델을 가지고 수행된 것이며 시험과의 튜닝(Tuning)이 필요하다.

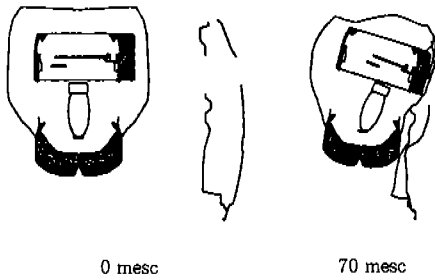


Fig.12 Deformed Shape of Front SID for Case 1 at 70msec

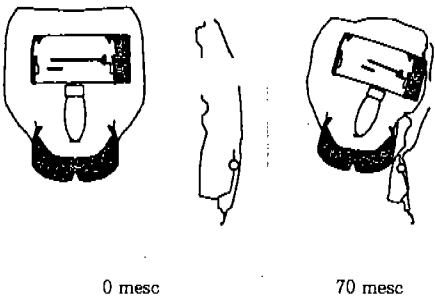


Fig.13 Deformed Shape of Front SID for Case 2 at 70msec

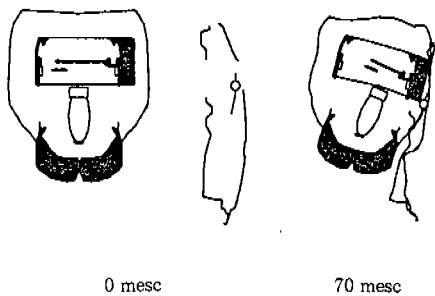


Fig.14 Deformed Shape of Front SID for Case 3 at 70msec

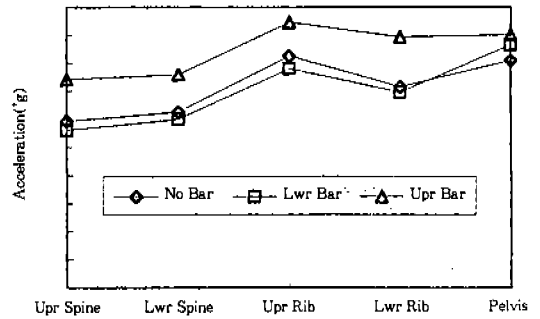


Fig.15 Comparison of Front SID Injury

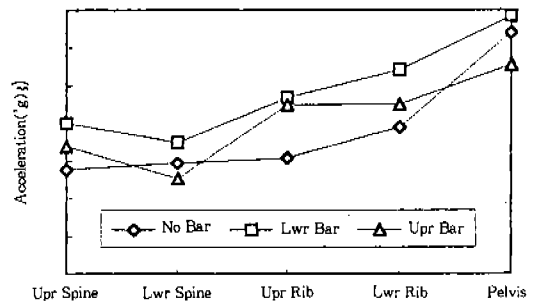


Fig.16 Comparison of Rear SID Injury

#### 4.4 도어 Intrusion Bar의 영향

측면 충돌시 도어 Intrusion Bar가 승객 상해치에 어떻게 영향을 미치는지 알아보기 위하여 다음의 3가지 경우에 대하여 승객을 포함한 전체 차량의 측면 충돌 해석을 실시하고 앞, 뒤 Dummy에 대한 상해치를 비교하여 보았다.

- 1) 장착되지 않은 경우(without intrusion bar)
- 2) 도어 하단에 위치(with lower intrusion bar)
- 3) 도어 상단에 위치(with upper intrusion bar)

Figure 12~14는 70msec에서 앞 Dummy의 YZ단면 변형 양상을 각 경우에 대하여 나타낸 것이다. 도어 부분을 살펴 보면 Intrusion Bar에 따라 Dummy의 거동 양상은 서로 다르게 나타남을 알 수 있다. Figure 15~16은 앞, 뒤 Dummy에 대한 척추(Spine), 갈비뼈(Rib), 골반(Pelvis)에 대한 최대 가속도 값의 비교이다. 앞 Dummy의 경우는 도어 Intrusion Bar가 상단 보다 하단에 위치할 때 상해치를 저감할 수 있으며 Intrusion Bar가 장착되지 않는 경우나 하단에 위치한 경우나 별로 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 앞 도어의 경우는 Intrusion Bar가 Static 시험 만족을 위해서는 유효하나 Dynamic 시험에는 영향을 주지 못함을 의미한다. 그러나 뒤 Dummy의 경우는 Intrusion Bar의 위치가 하단보다 상단에 위치한 경우가 더 좋게 나타나 앞 Dummy와는 반대의 경향을 보여 주고 있다. 따라서 측면 충돌 관련해서는 Intrusion Bar가 승객 상해치에 어느 정도 영향을 주고 있으며 Intrusion Bar의 위치 선정도 설계시 고려가 되어야 할 것이다.

#### 5. 결 론

측면 충돌시 승객을 보호하기 위해 강화되고 있는 법규 규제치를 만족하기 위해 차량의 개발 초기 단계부터 승객의 상해치를 평가하여 이를 개선하기 위한 노력을 기울이고 있으며 이를 위한 컴퓨터 Simulation은 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 승용차의 전체 차량에 대하여 측면 충돌 모델을 확립하고 이에 대한 측면 충돌 해석

을 수행하였으며 차체, 이동 충돌벽 및 Dummy의 상해치등의 해석 결과를 시험과 비교하고 도어의 Intrusion Bar의 위치에 따른 승객 상해치를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 측면 충돌 해석을 수행한 결과 변형 양상 및 승객의 상해치에 대한 가속도 파형은 해석과 시험이 유사한 경향을 나타 내었다.
- 2) 측면 충돌시 충돌 에너지의 대부분은 B' Pillar, Side Sill, Floor(Seat Cross Member), Door 등으로 분산되게 됨을 알 수 있으며 승객에게 전달되는 충격력을 최소화하기 위하여 이들 충돌 에너지를 적절하게 분산할 수 있는 구조적인 설계가 필요하다.
- 3) 도어 Intrusion Bar가 측면 충돌시 승객 상해치에 미치는 영향에 대하여 평가해 본 결과 Intrusion Bar의 위치는 앞 Dummy의 경우 하단에, 뒤 Dummy의 경우는 상단에 위치하는 것이 승객 상해치를 감소시킬 수 있었다.
- 4) 본 해석에 사용된 차량의 측면 충돌 특성은 해석과 시험 결과에서 알 수 있듯이 FMVSS214 규정을 만족하였으나 확립된 측면 충돌 모델을 가지고 여러 가지 설계 변수를 고려하여 이에 대한 승객 상해치의 증감 여부를 파악해볼 필요가 있다.

#### 참 고 문 헌

1. 兩角岳彦, 石野良太郎, “生存の科學”, Motor Fan, Vol.46, No.10, 1992.
2. “Side Impact: Injury Causation & Occupant Protection”, SP769, SAE, Feb27, 1989.
3. Side Impact Protection, FMVSS Standard No.214, NHTSA, US
4. “PAM-CRASH Manual Version 12.1”, ESI Group, 1994.
5. “Strategies for Side Impact Protection”, SP974, SAE, July, 1993.
6. “Side Impact Occupant Protection Technol-



- ogies", SP851, SAE, Feb, 1991.
7. 윤영한, "측면 충돌시 승객 보호와 차체 해석용 모델", 한국 자동차 공학회 학술 강연초록집, 1992
  8. 김규현, "측면충돌시 승객보호 기준에 관한 연구", 대한기계학회지 제35권 제 6 호, 1995.
  9. Kail Gruber, Martin Herrmann, and Martin Pitzer, "Computer Simulation of Side Impact using Different Mobile Barriers", SAE paper 910323, 1991.