

## 측면 충돌시 승객보호와 차체해석용 모델

Models for Occupant Protection and Vehicle Structure in Side Impact

윤 영 한  
Young Han Youn



윤 영 한

- 1955년 5월 22일생
- 자동차 충돌 및 승객보호, Accident Reconstruction, 자동차 관련 안전법규, Computer Simulation 개발 및 시험법 개발연구
- 책임연구원, 자동차성능시험연구소 교통안전진흥공단

### 1. 서 론

지난 수십년동안 급속도의 자동차 산업기술의 발달은 자동차 성능향상에 획기적으로 기여하였으며 모든 현대 과학 기술의 집약체라고 해도 과언은 아니다. 그러나 교통사고시 고성능 자동차로 인한 인명의 피해는 점점 치명적이고 또한, 사고의 양상도 대형화되는 추세이다. 이러한 인명 피해에 대해 생명의 고귀함을 재인식하게 되어 지난 1970년대 초 미국의 자동차 안전법규 제정을 필두로 선진 제국 등은 승객보호 목적으로 이와 유사한 법령을 제정하였는데 그중의 하나가 승용차의 정적시험법인 옆문강도시험(FMVSS 214)이다.

실제 교통사고 유형중 측면충돌은 인명피해 면에서 정면충돌 다음으로 많이 발생하는 사고의 형태이며, 서구에서는 이러한 사고로 승객의 사망, 또는 중상의 비율이 약 30% 정도이고 그 사고의 절반정도가 교차로에서 두대의 차가 서로 수직방향으로 진행중에 일어난

다. 그러나 중전의 정하중의 옆문강성만 요구하는 법규는 차단독사고로 전신주등 도로상의 구조물 또는 기둥에 자동차의 측면이 충돌시는 유효하나 실제 차대차 측면충돌 사고시에는 효과적이지 못하는데 결론을 내리고 1979년도부터 본격적으로 연구하게 되어 미국에서는 1990년 10월에 최종적으로 동적시험법인 측면충돌 시험법을 법제화 하여서 1993년 9월 1일부터 제작되는 승용차에 적용하도록 되어 있다. 그리고 유럽공동체 또한 이에 상응하는 법규제정을 준비하고 있는 중이다.

그러므로 국내자동차 안전분야의 연구에 초보단계에 있는 국내업체의 실정과 주로 소형차를 제작하는 관계로 대미수출 및 신차개발시 상당한 불이익과 어려움이 예상되고 있다.

본 연구는 차체설계시 측면충돌로 인한 승객보호를 어떠한 관점에서 보아야 할 것이며 신법규에 대비하는 세계의 연구동향은 어떠한지를 알아보았다.

### 2. 측면충돌 법규시험

1993년 9월 1일부터 제작되어 미국내에서 판매되는 승용차는 다음과 같은 충돌시험법에 의해서 시험이 이행되어야 하며 이때 시험차

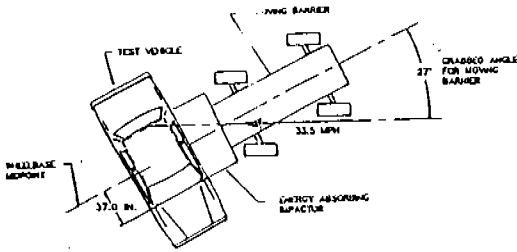


Fig.1 NHTSA FMVSS 214 Side Impact Configuration

에 탑재된 측면충돌 전용 인체모형 (Side Impact Dummy)이 받는 상해값과 충돌된 시험차의 파손상태에 따라서 법규 만족여부를 판정받게 된다.

그림 1 과 같이 정지된 시험차를 1360 KG의 중량을 가지는 이동벽 (Moving Barrier)을 33.5MPH의 등속도로 충돌시키는 방법이다. 이때 이동벽은 27도의 각도를 유지하면서 움직이는데 충돌시 시험차의 측면과는 수직으로 부딪쳐야 한다. 이 시험법은 일반적으로 교차로에서 일어나기 쉬운 측면충돌의 한 유형인 15 MPH의 속도로 진행되는 자동차의 측면을 30 MPH의 속도로 움직이는 자동차가 정면으로 충돌하는 실제 도로상의 사고를 재현하기 위한 시험법이다.

이때, 시험법에 의해서 미리 교정, 보정된 인체모형을 시험규정에 의해 자동차의 운전자 좌석과 그 뒷좌석에 착석시키고 인체모형의 동적인 거동관찰을 위해 가속도계를 인체모형의 내부에 부착시키고 또한 고속 카메라도 장착하여 이동벽, 차체 및 인체모형의 거동을 촬영한다. 시험차의 법규 만족여부는 아래의 기준에 의거하여 결정한다.

답승 인체모형의 상해기준

4 도어형 승용차	2 도어형 승용차
TTI ≤ 85g's	TTI ≤ 90g's
Pelvis ≤ 130g's	Pelvis ≤ 130g's

여기서 TTI (d)란 인체모형의 흉부상해치 (Thoracic Trauma Index)를 말하는데 TTI를 계산하는 공식은 다음과 같다.

$$TTI (d) = [ A (max. rib) + A (lwr. spine) ] / 2$$

그리고, A (max. rib)은 상부와 하부의 갈비뼈에 부착한 가속도계중 최대치로 표시되고 A (lwr. spine)은 인체모형의 하단 등뼈에 부착한 가속도계의 최대 가속도 값으로 정의된다. 이와 유사하게 골반부위의 상해기준 (Pelvis)도 인체모형의 골반부의 무게중심에 부착된 가속도계의 값으로 나타낸다.

시험차체 구조에 대한 기준

- 가) 충돌측 도어가 힌지나 레치에서 시험차 본체로부터 분리되는지 여부
- 나) 반대측 도어가 시험중 열리는지 여부
- 다) 해치백 모델시 뒷문이 시험중 열리는지 여부
- 라) 에이 필러 (A-Pillar)의 붕괴로 차실내의 변형량의 정도
- 마) 연료 누수 여부

### 3. 연구 동향

측면충돌시 승객보호를 위한 연구는 지난 십수년간 많은 연구들이 발표되었지만 정면, 후면 충돌 연구와는 달리 전혀 새로운 분야라는 점에서 많은 어려움이 예상된다. 특히 불과 0.02초 내지 0.04초 사이의 극히 짧은 순간에 모든 현상들이 일어나고 차체와 인체모형이 서로 근접하고 있어 서로 분리해서 해석할 수 없고 충돌시험에서 차체 및 인체모형 거동의 데이터 측정 및 관찰이 제한되어 있다. 그러므로 차체개선을 위해 측면충돌용 수학적 해석모델의 개발 및 응용이 절실하다.

자동차의 차체 구조는 아주 복잡한 형상, 서로 다른 재질의 수많은 부품으로 조립, 용접되어 있다. 특히 충돌시 이들 각 구조의 요소들은 고변형율율 (high strain rate)로 복잡한 비선형 변형양상으로 진행되어 영구변형에 까지 이르고 일부는 파열 (rupture)에 까지 도달한다. 또한 각 요소들은 서로 접촉하여 일부는 관통 (penetration), 또는 서로 분리되는 과정이 극히 짧은 시간에 일어난다.

### 3.1 승객거동 해석모델 (Occupant Crash Simulation Model)

충돌현상에서 승객의 동적거동은 차체보다 복잡하며 실제로 자동차의 안전성 여부는 승객이 받는 상해치로 판정되기 때문에 그 중요성은 이미 언급한 바이다. 초기에는 인체모형을 개발 제작하여 실험적 방법으로 상해치를 측정 예측하였으나 컴퓨터의 급속적인 발전으로 지난 20여년동안 자동차 충돌사고시 승객의 거동해석에도 괄목할 만큼 발전을 하였다. 1963년 McHenry의 2차원 모델의 시작으로 현재에는 MVMA2D, MADYMO 2D/3D, Crash Victim Simulation(CVS), DRACR, PADS 등 다양한 모델들이 개발되어 선보이고 있다. 이들 모델들은 인체의 각 부위를 관절로 나누어서 이들 강체인 관절들을 서로 연결(Joint) 시킴으로 다양한 형상의 인체로 구성할 수 있다. 그림 2는 현재 유럽공동체에서 개발중인 EUROSID를 TNO의 MADYMO로 모델링한 것을 보여주고 있다.

그러나, 비록 이들 모델들이 일반화된 인체의 거동을 해석하기 위해 개발되었지만 주로 정면 및 후면충돌용으로 사용되어 왔다. 즉 차체의 외부구조물이 차체실내로의 침입(Intrusion)이 거의 없거나 무시되는 경우에 주로 사용되어 왔다. 다른말로 바꾸어 말하면 이들 승객거동 해석모델은 모의시험(Sled Test)의 해석용으로 이용된 것이다. 그림 3은 CVS

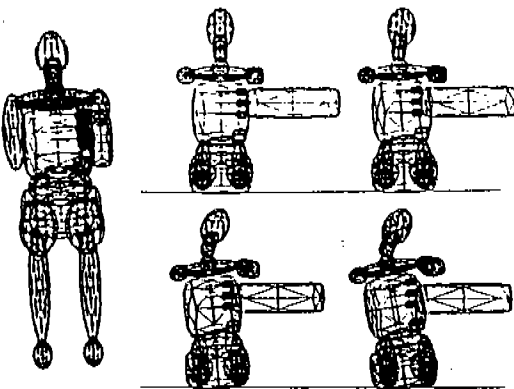


Fig.2 MADYMO Modelling in EUROSID

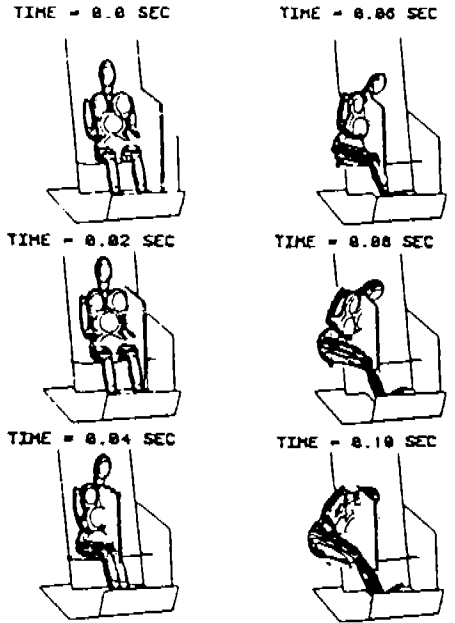


Fig.3 CVS Modelling on Side Impact Simulation

모델을 이용하여 측면충돌을 재현한 것으로 여기서 도어와 승객간의 구조적 상관관계 및 도어의 침입은 무시되었다.<sup>1)</sup>

그러나, 측면충돌은 정면충돌과 달리 차체내부는 강체로 유지될 수 없고 승객이 도어에 근접하게 착석하고 있기 때문에 충돌 즉시 차체내부와 접촉하여 차체변형과 동시에 승객도 도어와 부딪혀서 거동한다. 최근 이러한 단점을 극복하기 위해서 승객거동 해석모델과 유한요소법과의 접합의 연구가 활발히 진행중이다.

### 3.2 유한요소법 모델

보다 정확한 차체구조해석 및 설계를 목적으로 유한요소 해석법등이 개발되어서 지난 수십년동안 차체의 정적, 동적해석에 널리 응용되어 왔다. 그러나 최근 대용량 컴퓨터인 슈퍼 컴퓨터 등의 개발로 차체의 종합적인 충돌해석이 가능해졌다. 최근 국내의 자동차 업계에서도 PAM-CRASH, DYNA 3D 등 이에대한 연구가 진행중이다. 이들 모델의 정밀도는 모델 크기(자유도 수), 시간간격(요소크기, 밀도,

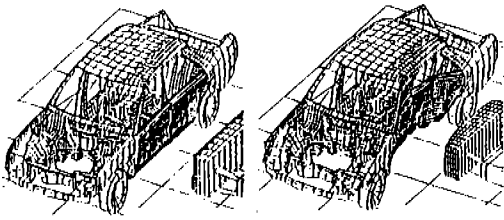


Fig.4 Side Impact Simulation by DYNA3D

Young's 계수) 및 접촉 알고리즘(접촉구간수)에 의한 영향이 지대하다. 그림 4와 같이 독일 벤츠사의 Gruber 등<sup>2)</sup>은 차체 모델링에 15,907개의 셀요소와 114개의 빔요소로 구성시켰으며 변형가능한 대차 또한 수백개의 고체요소와 셀요소로 하여 측면충돌 해석을 하였다. 총 0.07초의 충돌현상을 재현하는데 DYNA 3D로 CRAY Y-MP 4/216 기종의 슈퍼 컴퓨터를 이용하여 6~8시간의 CPU이 소요되었다.

위의 예와 같이 유한요소해석법은 차체 및 대차의 모델링에도 수개월이 걸리고 또한 해석 수행에도 막대한 시간소모로 비용이 많이 든다. 그리고 단 한번의 모델링, 해석으로 유용한 결과를 얻을 수 없기 때문에 이에 따른 분석, 해석, 재모델링의 시간소요가 가장 큰 단점이다. 또한 위에서도 언급한 바 같이 측면충돌은 승객이 차체구조 특히 도어변형에 미치는 영향을 무시할 수 없으므로 유한요소법에 의한 모델링은 차체, 대차뿐만 아니라 승객까지도 모델링에 고려하여야 한다.

### 3.3 강체 질량 모델(Lumped-mass Model)

강체 질량모델은 앞에서 소개한 승객거동 해석용이나 유한요소해석보다 손쉽게 접근할 수 있고 또한 빠른 시간내에 시뮬레이션이 가능하다는 큰 장점이 있다. 주로 일차원화한 모델로 모든 차체 구조물을 크게 변형가능 부위와 강체부위로 나누어서 강체를 변형가능 구조와 서로 연결시키는 스프링-질량 모델법이다. 1968년 Emori<sup>3)</sup>가 정면충돌해석을 시도한 이후 발전을 거듭하여 현재 측면충돌시 차체구조 해석용으로 가장 많이 사용되고 있는 모델이다. 승객 또한 강체질량계로 표현될

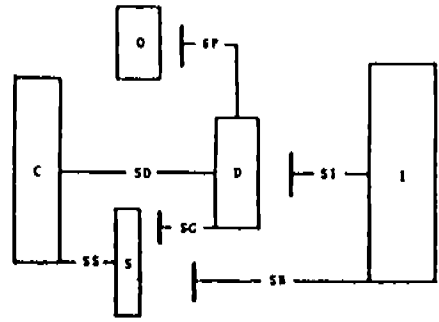


Fig.5 Tomassoni's Simple Side Impact Model

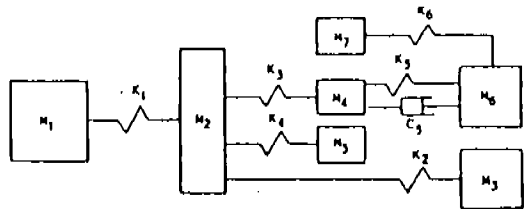


Fig.6 Segal's Side Impact Model

수 있는데, 차체와 승객의 질량은 한방향으로 구속되어 있다. 즉 각각 한개의 질량은 한개씩의 자유도를 가지도록 구성한다. 아마 가장 단순화된 모델은 그림 5와 같이 Tomassoni<sup>4)</sup>이 개발한 모델일 것이다.

시험차는 도어, 사이드실과 차체 실내의 세개의 질량으로 나누었고, 승객과 대차는 각각 한개의 질량으로 모델링 되어 있다. 현 모델에서 나온 결과는 주로 승객의 상해치중 골반부 상해를 예측하는데 이용되었다.

그뒤 계속적으로 발전하여 개발된 것이 그림 6의 Segal 모델<sup>5)</sup>이다. 여기서, 사이드실이 대차의 범퍼와 직접적인 접촉이 없다고 가정하여 사이드실을 모델에서 제외하는 대신 승객모델을 확장하여 네개의 질량 즉 두부(Head), 가슴뼈(Rib), 척추(Spine)와 골반부(Pelvis)로 구성시켰다. 그리고 주목할 점은 가슴뼈와 척추사이에 선형댐퍼(Linear Damper)를 삽입하였다. 또한 도어 패딩(Padding)의 특성을 고려하기 위해 충격시험(도어단품)을 시행하여 스프링 K3과 K4의 데이터를 구하였다.

한편, 미국 NHTSA의 Trella 등은<sup>6)</sup> Segal

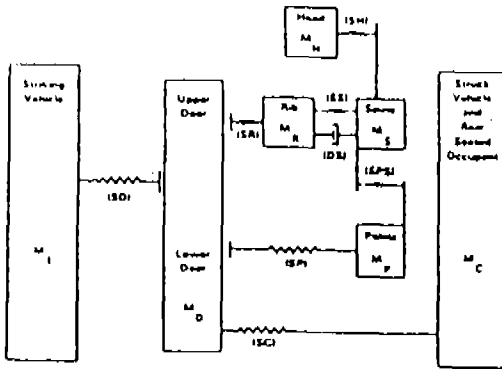


Fig. 7 Trella's Side Impact Model

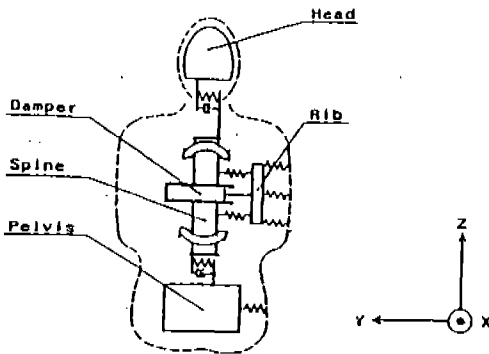


Fig. 8 Toyota's Improved Occupant Model

의 모델에 척추와 골반부 사이에 스프링을 첨가하였다. 그림 7 과 같이 모델에서는 도어 상부와 하부를 분리하였으나 한개의 질량을 나타낸다. 여기서 각 스프링의 입력 데이터는 실제 차량의 측면충돌 시험에서 측정되는 가속도-시간 곡선에서 유도하였다.

그리고 일본 도요다의 Hasewaga 등은<sup>7)</sup> Trella 등의 모델중 승객의 일차원적인 모델을 발전시켜서 그림 8 과 같은 척추의 회전을 고려하였다. 이는 실제 사고때나 충돌시험시 시험차의 도어변형 형태에 따라서 가슴부위와 골반부위의 초기속도가 다르고 또한 가슴의 상단, 하단부위의 속도가 다를 수 있기 때문이다.

그리고 최근 1992년 Struble 등<sup>8)</sup>의 모델은 9개의 질량과 18개의 스프링으로 구성하였다. 특히 도어를 상하로 나누었으며 하중 방향도 또한 다양화 하였다.

이러한 강체질량 모델법은 비록 복잡한 차체 구조를 단순화시킨 모델이고 주로 일차원적 해석에 제한되어 있지만 간단히 차체의 치수, 기하학적 형상이나 부품의 재질특성만으로는 측면충돌 현상을 재현(Simulation)할 수 없다. 각 질량에 연결된 변형가능한 차체 및 승객으로 표현되는 각각의 스프링의 하중-변위 곡선 데이터는 준정적시험, 동적충격시험 또는 유한요소법등의 구조해석을 통해서 얻을 수 있다.

그러나, 일반적으로 준정적시험(Quasi-static crush test)에 의해 각 스프링의 하중-변위 특성을 얻는다. 이 실험에 의해서 계산되는 하중-변위 데이터는 차체를 어떻게 고정시키는가에 따라 크게 달라질 수 있다. 그리고 승객에 직접적인 영향을 미치는 도어 패딩의 경우 도어 외부의 침입양에 따라서 도어내부의 하중-변위 곡선의 형태가 크게 달라질 수 있다.

1987년 독일의 Volkswagen 과 유럽자동차공업협회(CCMC)는 실차충돌시험법의 대체방안으로 CTP(Composite Test Procedure) 시험법<sup>9)</sup>을 발표하였다. CTP는 준정적 시험

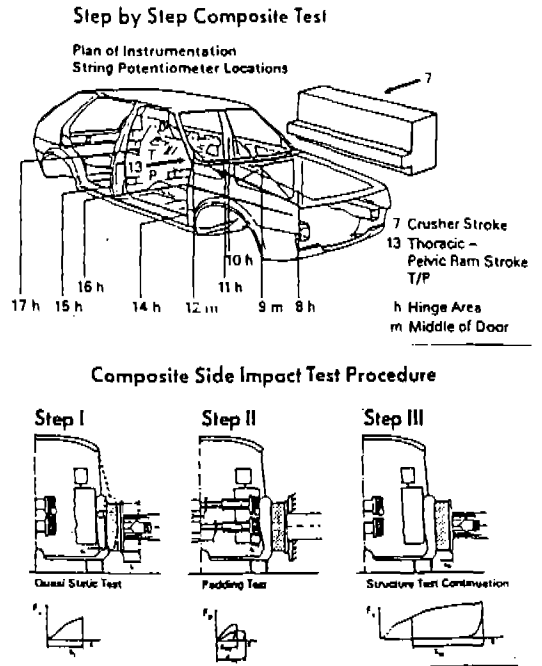
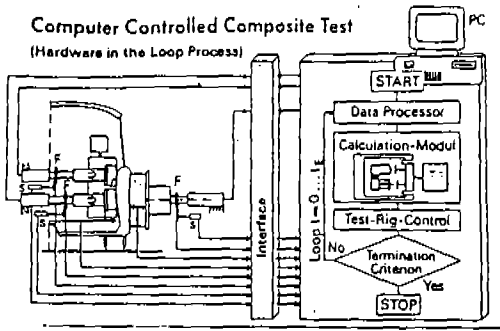


Fig. 9 Step by Step Composite Test procedure



상 유압 실린더의 움직임은 매순간 시뮬레이션의 결과와의 정보교환 (Interface)으로 조정된다. CC-CTP 모델과 알고리즘은 그림 10에 나타나 있다.

#### 4. 결 론

이상에서는 최근 선진국등에서 측면충돌시 승객보호와 차체구조해석에 널리 적용되고 있는 모델에 대해서 소개 설명하였다. 그러나, 현재까지의 수많은 측면충돌의 연구에도 불구하고 측면충돌은 완전히 이해되고 있지 않다. 그러므로 국내업체도 지속적인 연구투자가 필요하다고 사료된다. 그렇지만 어떤 특정한 모델만을 집중적으로 연구할 것이 아니라 각업체에 적합한 총합적인 측면충돌 대비 시스템의 개발이 절실하다.

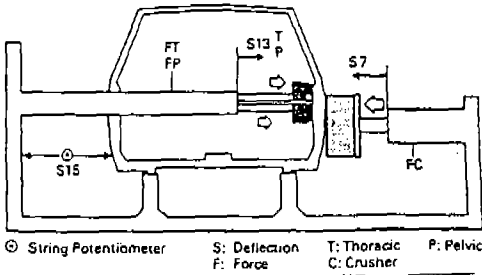
비록 본 연구에 실험적 모델법은 소개하지 않았지만 저자는 충격시험, HYGE 시험등으로 상당한 효과를 얻은 경험에 비추어 볼 때 응용모델의 개발은 노력여하에 따라 다양하리라 생각된다.

본 연구가 앞으로 산업체에서 신차개발, 측면용 에어백 개발, 또는 도어의 패딩재료등의 연구에 실질적인 도움을 줄 수 있기를 바란다.

#### 참 고 문 헌

1. Y. H. Youn, D. Griffith and P. M. Miller "Side Impact Crashworthiness Study on Hyundai Sonata", MGA Final Report MGA-C88R-06, 1989.
2. K. Gruber, M. Hermann and M. Pitzer, "Computer Simulation of Side Impact Using Different Mobile Barriers", SAE Paper 910323, in Side Impact Occupant Protection Technologies, SP-851, Detroit, MI, February 1991.
3. R. Emori, "Analytical Approach to Automobile Collisions", SAE Paper 680016, Detroit, MI, January 1968.
4. J. Tomassoni, "Simulation of a Two-Car Obli-

Computer Controlled Composite Test  
Measurement of Forces and Deflections



◎ String Potentiometer S: Deflection T: Thoracic P: Pelvic  
F: Force C: Crusher

Fig.10 Computer Controlled CTP for Side Impact Simulation

법과 컴퓨터 시뮬레이션의 조합형으로 그림 9와 같이 모두 4단계로 나누어지는데 첫 3단계에 걸친 준정적 시험의 결과를 입력하여 측면충돌을 재현시킨다. 이 CTP가 발표되자 JAMA, MVMA를 비롯한 각국의 자동차공업협회와 자동차 제작회사들은 국제적인 법규 일치화 (International Harmonization)의 가능성에 적극적인 관심을 표시하며 공동연구에 참여하였다.

그러나, CTP의 법규화, 범용화에 가장 큰 장애요소는 위에서 말한 첫 3단계의 실험법은 크기와 무게가 다른 차체에 일률적으로 적용시킬 수 없다는 점이다.

이를 극복하기 위해서 저자들은<sup>10,11,12)</sup> Volkswagen, CCMC, MVMA 등과 함께 컴퓨터에 의해서 준정적 시험과 시뮬레이션이 동시에 제어되는 CC-CTP (Computer Controlled Composite Test Procedure)를 개발하였다. CC-CTP의 장점은 실제의 충돌현상을 준정적 방법으로 재현시키는데 모든 시험

- que Side Impact Using a Simple Crash Analysis Model”, SAE Paper 840858, Washington, DC, May 1984.
5. D. Segal, “Side Impact Modelling Using Lumped Mass and Cal 3D CVS Simulation”, SAE Paper 840859, Washington, DC, May 1984.
  6. T. Trella and J. Kaniathra, “Occupant Response Sensitivity Analysis Using a Lumped Mass Model in Simulation of Car-to-Car Side Impact”, In Proceedings, Tenth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Oxford, England, July, 1985.
  7. J. Hasewaga, T. Fukatsu and T. Katsumata, “Side Impact Simulation Analysis Using an Improved Occupant Model”, In Proceedings, Twelfth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Vol.2, Goteborg, Sweden, May, 1989.
  8. D. Struble and T. Piganell, “An Improved Integrated Simulation Model for Side Impact Countermeasure Design”, SAE Paper, 920355, Detroit, February, 1992.
  9. R. Richter, R. Sinnhuber, H. Oehlschlaeger and R. Zobel, “Composite Test Procedure for Side Impact Protection”, SAE Paper 871117 Government/Industry meetings, Washington, DC, may 1987.
  10. Y. H. Youn, “Computer Controlled Composite Test Procedure for Side Impact Evaluation”, MGA Final Report MGA-C88A-18, 1989.
  11. Y. H. Youn, “The Effect of Visco-Elastic Property in Padding Materials on CTP Simulation Results”, MGA Final Report, MGA-C89R-03, 1989.
  12. Y. H. Youn, “Improved CC-CTP with Simultaneous Motion Algorithm”, MGA Final Report, MGA-C90R-07, 1991.