

G7 전산응용 안전도 해석기술 과제 소개

— 총괄 및 승객거동해석 —

Introduction of a G7 Project Titled as Software Development of Computational Safety Analysis for Automobile Crashworthiness

— Overall Introduction and Occupant Analysis —

박 경 진, 임 재 문
G. J. Park, J. M. Lim



박 경 진
·57년 1월생
·정회원
·한양대학교 기계공학과
·최적설계, 충돌 안전도



임 재 문
·63년 3월생
·한양대학교 대학원
·충돌 안전도

설계에 있어서 그들의 효과 및 역할에 대한 분석이 수반되므로, 실차시험 및 부품시험 등을 통해 이들의 현상을 파악하는 것이 가장 적절한 방법이지만 너무 고가의 비용이 소요되므로, 자동차 관련 업계에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 실차시험을 보조하려고 노력해왔다^{3)~8)}. 즉, 모델링이 잘 된 데이터를 가지고 각종 요소들을 변화시켜가면서 컴퓨터로 실제 상황을 예측하고 이를 통하여 실차시험 및 부품시험을 최소화하려는 것이다.

자동차의 충돌상황을 컴퓨터로 시뮬레이션 하는 것은 크게 승객의 안전도를 해석하는 승객거동해석과 차체의 거동을 해석하는 차체충돌해석의 두가지로 분류할 수 있다. 현재로서는 두가지를 분리하여 해석하고 있으나 점차 두가지가 통합된 형태의 해석으로 진행될 것이다. 국내 자동차업계에서도 외국에서 개발한 승객거동해석 소프트웨어인 ATB (Articulated Total Body)^{9)~11)}, MADYMO¹²⁾, PAM-SAFE¹³⁾ 및 차체충돌해석 소프트웨어인 PAM-CRASH¹⁴⁾, DYNA3D¹⁵⁾ 등을 도입하여 자동차 설계에 사용하고 있다. 그러나, 외국에서 개발된 이들 소프트웨어

1. 서 론

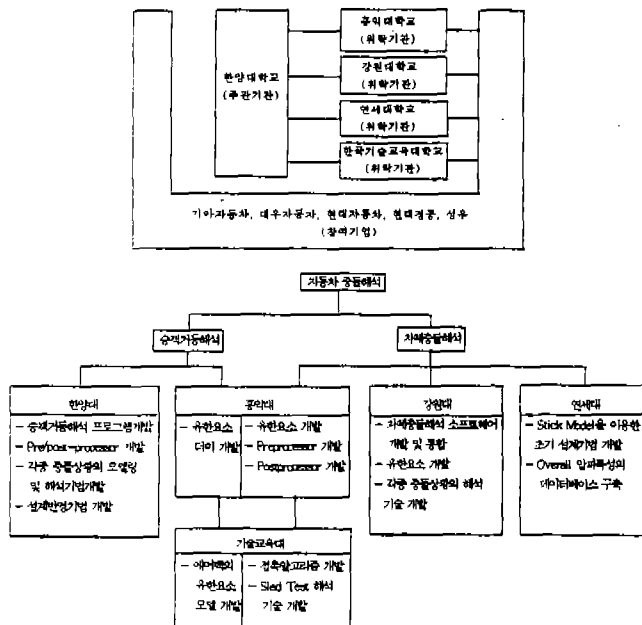
최근들어 국외 수출용 차량 뿐만 아니라 내수용 차량도 충돌시 승객의 안전도 문제가 대단히 중요해지고 있다. 수출차량의 경우는 외국의 까다로운 법규제정으로 인하여 충돌 특성이 우수한 차량의 설계 및 생산이 매우 중요하며, 국내에서도 충돌안전도에 관한 법규가 제정되어 시행되고 있다¹⁾. 자동차의 설계시 충돌효과를 최소화 시키기 위해서는 차체의 보강을 비롯하여 안전벨트나 에어백과 같은 승객에 대한 보호장구의 개발이 요구되고 있다^{2)~4)}. 충돌시 관련되는 각 요소들의

어들도 지속적인 연구개발을 통하여 개선될 것이므로, 이에 따라 지금까지는 크게 염두에 두지 않았던 기술료의 지속적인 증가와 관련 핵심기술의 이전기피 등과 같은 상황이 도래할 수 있다. 더욱이 독자적으로 소프트웨어를 개발할 능력이 없고 해석 및 모델링 기술이 부족할수록 상대적으로 기술료는 더욱 증가할 것이다. 이는 연간 300만대 이상의 자동차 생산능력을 갖추고 자동차 산업을 국가의 중추산업으로하는 선진국을 지향하고 있는 우리의 현실을 감안할 때 매우 심각한 문제라고 할 수 있다. 따라서 독자적인 프로그램의 개발을 시작함으로써 국산 소프트웨어의 확보는 물론 관련 해석 및 모델링 기술의 향상과 국내 기술의 저변확대를 위하여 장치 직면하게 될지도 모를 기술의 예측화를 극복하기 위한 가장 확실한 방법이 될 것이다¹⁶⁾.

여기에서는 현재 자동차부품연구원이 총괄하여 주관하고 있는 G7 차세대자동차기술개발의 일환으로써 공통기반과제로 창출된 “전산응용 안전도 해석기술 개발” 과제를 소개

하고자 한다. 본 기술개발의 최종목표는 승객거동해석 및 자동차 차체충돌해석에 필요한 이론의 정립과 이를 바탕으로한 독자적인 소프트웨어를 개발하는 것이다. 또한, 많은 노력을 기울여 얻은 해석결과를 단지 어떤 상황의 만족여부만을 판단하는데 사용하고 그것을 설계에까지 연결시키는 것이 부족한 현실이므로, 해석결과를 설계에 반영하는 기술도 개발하는 것을 목표로하고 있다. 이미 종료된 1단계(1993. 12~1995. 10)에서는 소프트웨어의 기본적인 형태를 구성하고 모델링 및 해석기술의 향상에 초점을 두었으며, 이를 바탕으로 2단계(1995. 1~1998. 10)에서는 소프트웨어의 개발이 완료될 것이다.

독자적인 소프트웨어의 개발을 목표로 한 양대학교가 주관이 되어 승객거동해석의 이론 및 소프트웨어를 개발하고 있으며, 홍익대학교·강원대학교·연세대학교·한국기술교육대학교 등이 참여하여 차체충돌해석 이론 및 소프트웨어를 개발하고 있다. 또한, 기아자동차·대우자동차·현대자동차·현대정공·성우 등이 참여하여 각 대학의 연구를 지원하



고 있으며, 다음의 그림에 기술개발체계를 나타내었다.

본고에서는 정면충돌·측면충돌 등과 같은 각종 충돌상황시의 승객보호기준과 모델링 및 해석결과 등을 승객거동해석을 중심으로 소개하고자 한다. 또한, 승객거동해석결과와 차체충돌해석결과를 연계하여 이를 초기설계에 이용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 차체충돌해석 소프트웨어 개발에 관해서는 계속되는 글에서 설명될 것이다.

2. 승객보호기준

2.1 정면충돌

정면충돌에 관한 승객보호기준은 FMVSS-208에 규정되어 있으며, 30mph(47.3km/h)의 속도로 자동차를 고정벽(barrier)에 충돌시켰을 때 운전석에 착석시킨 인체모형(dummy)에서 측정한 값을 가지고 구한 머리상해치인 HIC(head injury criterion), 가슴상해치(chest injury) 및 대퇴부의 압축하중(femur load)으로써 승객의 상해정도를 판단하는 것이다^{1), 17)}. HIC는 머리의 무게중심에서 구한 가속도를 가지고 다음과 같은 식으로부터 구해지는 값이며 1000 이하가 되도록 규정되어 있다.

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

여기에서, $a(t)$ 는 머리의 무게중심에서 측정한 X, Y, Z 세방향의 합가속도(resultant acceleration)이며 t_1 , t_2 는 충돌시 36msec 이하의 간격을 갖는 임의의 두 순간이다. 가슴상해치는 흉부의 가속도 3msec 이상 계속하여 중력가속도의 60배를 초과하지 않아야 하며, 대퇴부에 작용하는 압축하중은 2,250lbs

(1,020kgf)를 초과하지 않도록 규정되어 있다. 또한, HYBRID III 인체모형을 사용하는 경우에는 흉부의 압축변형량이 76.2mm를 초과하지 않도록 규정되어 있다^{1), 17)}.

FMVSS208과 유사한 승객보호기준으로 NCAP(New Car Assessment Program) 시험이 있으며, FMVSS208과 다른 점은 충돌속도가 35mph(56.3km/h)이며 차량의 충돌 성능을 HIC, 가슴상해치에 기초한 별표의 갯수로 표시하는 것이다. NCAP 시험은 FMV-SS208보다 가혹한 시험조건에서 충돌시험을 실시하는 것이므로 승객의 안전도를 높이기 위하여 만들어진 것이라고 할 수 있다.

2.2 측면충돌

측면충돌시의 승객보호기준은 FMVSS214에 규정되어 있으며, 준정적 측면문 강도요건과 승용차에만 적용되는 동적 강도요건으로 나누어져 있다^{18)~19)}. 준정적 측면문 강도요건은 측면충돌시 차량의 측면구조물이 승객의 거주공간으로 밀치고 들어오는 정도를 감소시킴으로써 승객의 상해도를 완화시키기 위한 것으로, 측면문은 피스톤 압축실린더에 의해 문의 바깥면에 가해지는 압축력을 견뎌야 한다. 동적시험요건은 정지된 차량의 측면에 27도의 각도를 유지하면서 33.5mph(53.9km/h)의 속도로 움직이는 이동벽(MDB: moving deformable barrier)을 충돌시켰을 때 충돌하는 방향의 앞좌석과 뒷좌석에 착석시킨 인체모형에서 측정한 값으로부터 구한 흉부상해치인 TTI(Thoracic Trauma Index)와 골반(Pelvis)의 횡방향 가속도로써 승객의 상해정도를 판단하는 것이다. TTI는 다음의 (2)식과 같이 구해지며 문이 4개인 차량에서는 중력가속도의 85배, 문이 2개인 차량에서는 중력가속도의 90배를 초과하지 않아야 한다.

$$TTI(d) = \frac{1}{2} (G_R + G_{L_S}) \quad (2)$$

여기에서, G_R 은 갈비뼈(rib)의 가속도값이며 갈비뼈의 상·하에서 측정된 가속도값 중에서 큰값을 사용한다. G_{L_S} 는 척추(spine) 아랫쪽에서 측정된 가속도값이다. 다른 상해기준의 하나인 골반의 횡방향 가속도(pelvis lateral acceleration)는 골반에서 측정된 가속도값이 중력가속도의 130배를 초과하지 않도록 규정되어 있다.

3. 충돌안전도 시뮬레이션의 소개

충돌시 안전도를 해석하는 방법은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 즉, 유한요소법에 근거한 차체충돌해석과 다물체 동역학에 근거한 승객거동해석으로 분류되며, 다음의 표에 두가지를 요약하였다.

승객거동해석 소프트웨어로는 MADYMO, PAM-SAFE, ATB 등이 있으며, 인체모형과 차량 및 에어백 등을 강체, 평면 스프링-댐퍼 등을 이용하여 구성하고 승객이 차량내부와 충돌했을 때의 접촉은 힘-변형함수를 이용하여 이를 동역학 과정에 포함시킴으로써 충돌시 승객의 거동을 고찰하고 상해치를 구할 수 있게 해준다. MADYMO나 PAM-SAFE 등에는 에어백의 경우 기존의 강체모

델뿐만 아니라 유한요소 모델도 사용할 수 있어 에어백이 작동할 때의 승객과의 거동을 강체요소모델보다 상세하게 고찰할 수 있다는 장점이 있다. 반면에 현재 유한요소 모델에 사용된 에어백으로 유입되는 가스의 열역학·유체역학적인 거동은 강체모델에 사용된 것과 같고 접촉시의 힘-변형함수를 정의하여 접촉력을 구하므로 전반적인 관점에서는 유한요소모델과 강체요소모델이 큰차이가 없다고 볼 수 있다. ATB는 프로그램의 소스코드(source code)가 공개되어 있는 것으로 MADYMO나 PAM-SAFE와 구성이나 기능면에서 큰 차이가 없는 것으로 한양대에서 독자적인 소프트웨어를 개발하기 위한 기본 프로그램으로 사용하고 있다. ATB의 경우는 MADYMO 등과는 달리 에어백에 유한요소 모델이 포함되어 있지 않으며, 한양대에서 에어백의 유한요소 모델을 포함시킬 예정으로 있다.

차체충돌해석 소프트웨어인 PAM-CRASH, DYNA3D 등은 비선형 유한요소법에 근거하여 충돌시 차체의 변형상태 및 에너지흡수 능력 등을 해석할 수 있다. 차체충돌해석 소프트웨어는 홍익대·강원대·한국기술교육대에서 개발중이며 1차적으로는 개발이 완료된 상태이며 기능과 사용의 편의성 등을 추가하고 있는 중이다. 차체충돌해석의 다른 분야로는 간편모델을 이용한 해석 및 설계가 있

기술명	승객거동해석	차체충돌해석
필요기술	<ul style="list-style-type: none"> - 충돌에 관련된 부분을 강체로 가정 <ul style="list-style-type: none"> · 다물체 동역학, 열역학, 재료역학 유체역학 등의 이론이 사용됨 - 충돌에 관련된 부분을 변형가능한 물체로 가정 <ul style="list-style-type: none"> · 비선형 유한요소법의 이론은 주로 에어백의 거동을 표현하는데 사용됨 	<ul style="list-style-type: none"> - 충돌시 차체 변형의 해석을 목적으로 비선형 유한요소법의 이론이 사용됨 - 탄소성역학이론 - 압괴실험기술

으며 CRASH-CAD라는 소프트웨어가 개발되어 주로 에너지흡수를 고려한 충돌부재의 초기설계에 이용되고 있다¹⁹⁾. 본 연구진에서는 연세대학교에서 충돌부재의 에너지흡수 특성에 관한 이론을 개발하고 부재의 정적·동적실험 결과를 데이터베이스화하는 한편, 소프트웨어를 개발하여 충돌부재의 초기 설계지침을 구할 수 있도록 하고 있다.

최근에 유한요소해석을 이용한 차체충돌해석에서도 유한요소로 모델링된 인체모형을 포하시켜, 충돌시 차체의 거동과 인체모형의 거동을 해석할 수 있도록 차체충돌해석과 승객거동해석을 통합하려고 시도하고 있다. 인체모형의 유한요소 모델은 가슴부위와 같이 충돌시에 변형량을 측정해야할 필요가 있는 부위는 셸요소(shell element)나 솔리드요소(solid element)와 같은 변형이 가능한 유한요소를 사용하고 나머지 부위는 강체요소(rigid element)를 사용한다. 이와 같이 모델링하는 이유는 인체모형 전체를 변형이 가능한 유한요소로 만들면 차체만 해석하는 경우보다 해석시간이 훨씬 많이 소요되기 때문일 것이다. 또한, 인체모형은 충돌시에 전체적으로는 강체운동(rigid body motion)을 하며 조향계나 에어백 및 차량내부와 접촉할 때에는 접촉부위에 국부적으로 변형이 발생하기 때문이다. 인체모형의 거동에 영향을 미치는 차량내부와의 접촉력은 인체모형과 차량내부와의 힘-변형 함수를 정의하여 구하고 있다. 즉, 인체모형의 거동에 관해서는 유한요소모델을 사용하는 것이 동력학에 근거한 승객거동해석의 경우와 동일하다고 볼 수 있다. 유한요소모델을 이용하여 인체모형의 거동을 해석하는 경우는 모델링과 해석에 많은 비용과 시간이 소요되므로, 아직까지는 일반적이지 못하며 특히 매개변수의 조절을 통해 차량과 보호장구의 설계변경을 시도하고자 하

는 경우는 더욱더 부적당하다고 볼 수 있다. 다물체 동력학을 이용한 승객거동해석의 경우에는 유한요소해석에 비해 해석시간이 훨씬 적게 소요되므로 매개변수 조절을 통한 설계변경에 드는 시간도 많이 단축할 수 있다. 따라서 에어백과 같은 보호장구의 해석과 설계에는 다물체동력학에 근거한 승객거동해석을 이용하는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

4. 승객거동해석 시뮬레이션

여기에서는 승객거동해석 시뮬레이션의 일반적인 사항 및 G7 연구과제에서 수행되었던 내용들을 중심으로 정면충돌과 측면충돌에 관하여 모델링 및 해석 사례를 간략하게 소개하고자 한다.

4.1 정면충돌 모델링 및 해석

충돌상황을 컴퓨터로 시뮬레이션할 때 가장 중요한 사항은 충돌시험 상황을 컴퓨터에 맞게 모델링하여 입력하는 것이다. 다물체 동력학을 사용하는 승객거동해석 소프트웨어에서는 차량과 승객에 대한 적절한 모델링이 필요하다. 승객, 차량의 내부, 조향계 등을 질량과 부피가 있는 강체요소(rigid body segment), 평판(plane), 스프링-댐퍼(spring-damper) 등으로 Fig.1과 같이 모델링하였다^{2), 4)~6)}. 승객은 HYBRID III 인체모형을 이용하였으며 18개의 강체요소로 구성되어있다. 충돌시 인체모형의 거동에 영향을 미치는 차량의 내부를 구성하는 의자, 바닥(floor panel), 무릎판(knee bolster), 인스트루먼트 판넬(instrument panel), 앞유리(wind shield) 등은 그림에 나타난 것처럼 3차원 공간상에 평면요소로 나타내었다. 충돌시 이들 평면은 승객의 몸체 각 부분과 접촉하게 되

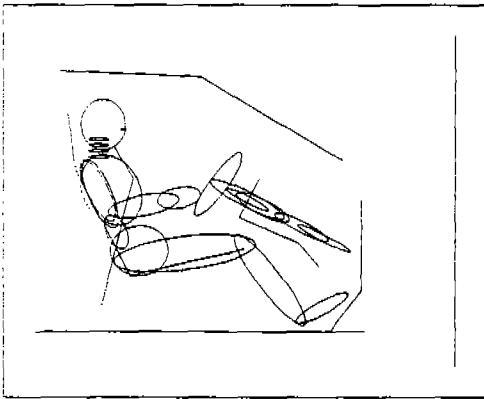


Fig.1 Simulation model

며, 접촉시의 힘-변형 곡선은 실험에서 구한 값을 입력한다. 안전벨트는 하니스벨트모델을 이용하였으며 해석의 정확성을 높이기 위해 안전벨트의 실제모양에 가깝게 되도록 하나의 벨트를 여러개의 벨트요소의 조합으로 나누었다.

조향계(steering system)는 운전자와 가장 먼저 충돌이 일어나 직접적인 충격흡수원으로 작용한다²⁰⁾. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 승객거동해석을 통해 조향계 부품이 승객상해에 미치는 영향을 평가하고, 평가된 결과를 설계에 반영하기 위해서는 무엇보다도 정확한 모델링이 우선되어야 한다. 조향계는 Fig.1에 나타낸 것과 같이 운전대와 조향주로 구성되어 있다. 조향주는 상축(upper shaft), 하축(lower shaft), 상주(upper column) 및 하주(lower column)로 구성되어 있다. 상축에는 운전대가 장착되며 하축은 상축에서 전달받은 토오크를 유니버설 조인트를 통해 스티어링 기어박스(steering gear box)에 전달하는 역할을 한다. 상주는 상주축과 볼베어링으로 연결되어 있어 상축을 지지하며 브래킷으로 차량에 부착되고, 하주는 하축을 지지하여 조향주가 움직이지 않도록

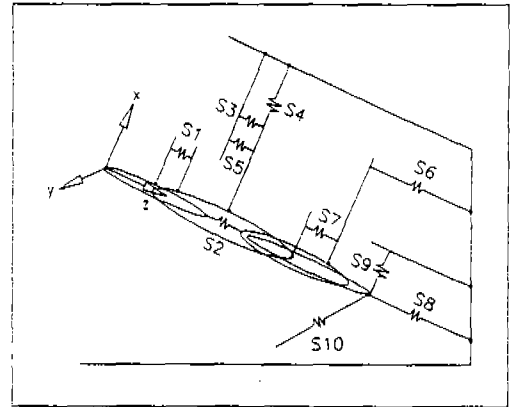


Fig.2 The steering column with the spring-damper

차량의 마운팅프레임에 고정시켜주는 역할을 한다. 조향계는 Fig.2에 나타낸 것과 같이 10개의 스프링-댐퍼와 6개의 강제요소를 이용하여 모델링하였다^{4), 21)}. 6개의 세그먼트는 운전대 림과 허브, 상축, 하축, 상주, 하주를 나타낸다. 여기에서 세그먼트는 질량과 관성모멘트를 갖는 강제요소이며 3차원 타원체(ellipsoid)로 구성되어 있다. 10개의 스프링-댐퍼중 일부는 강제요소를 연결하는 조인트의 특성을 나타내고 있으며, 일부는 조향계를 차량에 부착시키는 역할을 한다. 조향주의 축에 수직인 스프링-댐퍼는 축방향의 운동에 의해 원하지 않는 변위가 발생하게 되는데 이를 최소화하기 위해 스프링-댐퍼의 길이를 매우 길게 하였다. 스프링-댐퍼의 힘-변형 특성(force-deflection characteristics)은 정적 시험의 결과로부터 얻어진다. 그러나 각 부품에 대한 자세한 시험이 어려우므로 모든 자료가 얻어지지 못할 수가 있다. 이러한 경우 모형몸체시험(body block test) 시험의 결과와 모델링과의 차이를 최소화시키는 각부품의 함수값을 최적설계를 이용하여 역추정하는 방법을 제시하였으며 Fig.3에 그 결과를 나타내었다^{3), 22)~23)}. 그림에서 왼쪽

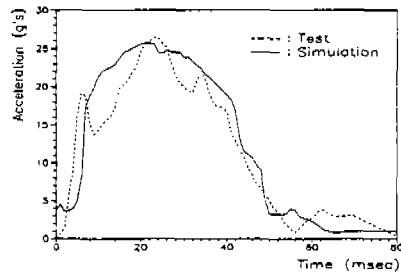
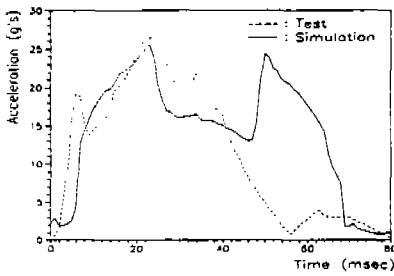


Fig.3 The time history of body block acceleration

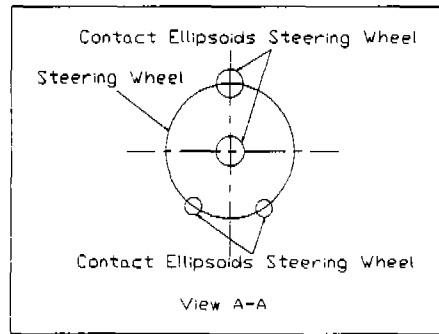
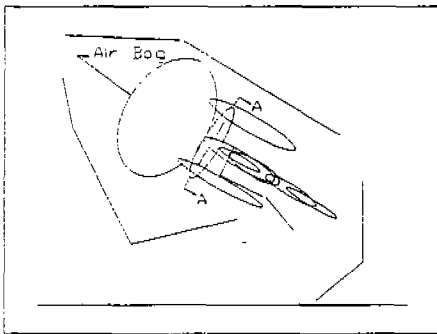


Fig.4 A Schematic view of the contact ellipsoids to simulate the interaction between the airbag and the steering-side and section view

은 최적설계를 도입하기 전의 시험결과와 해석결과를 비교한 것이며 오른쪽 최적설계과정을 통하여 구한 함수값을 이용하여 구한 해석결과와 시험결과를 비교한 것이다 그림에서 보는 것처럼 시험결과와 해석결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

에어백은 설치실험으로부터 얻어진 위치와 제원이 동일하도록 조향계 휠(wheel)의 무게중심으로부터 3차원 공간상에서 지정되며 이로부터 에어백의 펼침이 발생된다. 시뮬레이션에서 에어백의 부피는 X, Y, Z축으로 길이를 갖는 타원체로 정의되며 시간에 따른 부피는 삼축의 길이변화에 따라 최초로 정의된 최대부피에 이를 때까지 변화된다. 실제 에어백은 타원체의 밑부분이 조향계 휠에 의하여 지지되어 승객과의 접촉시 각 방향으로의 요동과 뒤틀림을 방지한다. 시뮬레이션에

서는 이와 근사한 효과를 갖도록 Fig.4와 같이 에어백과의 접촉에만 사용되는 네개의 접촉타원체가 정의되며 충돌시 에어백의 요동과 뒤틀림을 방지한다. 에어백은 조향계와 선형 용수철에 의하여 지지되도록 모델링되고 이때의 지지용수철의 특성은 용수철 계수로 정의된다. 충돌시 에어백과 승객사이에서 발생하는 접촉력은 더미의 각부분과 에어백과의 접촉면적을 시간에 따라 측정하여 이때의 에어백의 압력값을 곱하여 프로그램 내부에서 계산한다¹⁰⁾.

Fig.5에 에어백이 작동할 때의 승객거동해석한 결과를 나타내었다²⁴⁾. 그림에서 보는 것처럼 타원체 형상을 갖는 에어백이 충돌후에 승객을 조향계나 차량내부의 패널(panel)과 접촉하는 것을 방지하여 상해를 감소시키는 것을 알 수 있다. 승객거동해석의 시뮬레이

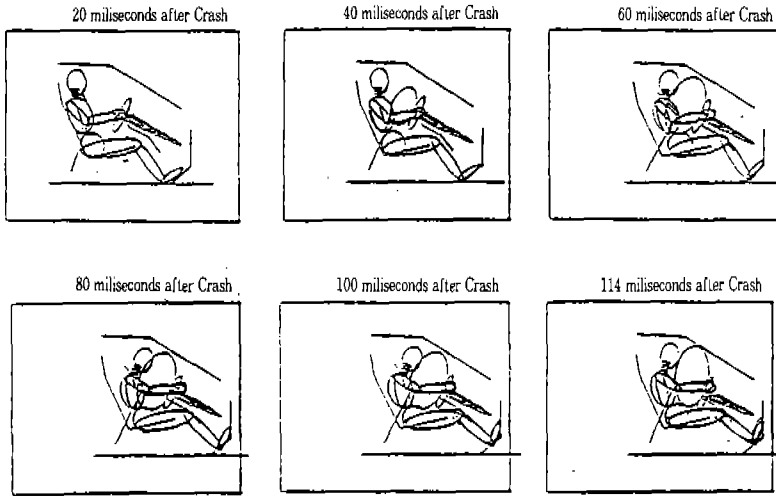


Fig.5 Simulated occupant kinematics

Table 1 Results of optimum design based on orthogonal array

	Design Variable					Response (IC)
	Mass Flow Rate	Gas Temperature	Bag Volume	Firing Time	Vent Hole Area	
초기값	1	644.37K	60 l	29 msec	36 cm ²	313.07
최적값	0.8	644.4K	85 l	21 msec	36 cm ²	233.14

선 결과는 법규의 만족여부를 판정하는 것에 많이 이용되고 있으나 설계에까지 직접 적용한 예는 많지 않다. 에어백의 설계는 차량의 복잡한 충돌상황하에서 승객의 보호를 목적으로 하기 때문에 대단히 큰 비선형성과 복잡성을 지닌다. 에어백에서 선정가능한 설계변수에 대하여 목적함수인 승객의 상해치는 함축함수(implicit function)이며 또한 설계변수들이 차원을 달리하며 매우 큰 단위차를 갖기 때문에 최적설계에서 요구되는 민감도해석이 어려워진다. 이러한 단점을 극복하고자 근사적인 최적설계가 제안되었으며^{22)~23)}, 통계적방법에 기초한 직교배열표를 사용하여 구한 설계변수의 최적조합을 초기값으로하여 설계변수의 범위를 좁혀 다시 최적설계하는

반복적인 알고리즘이 제안되었다^{25)~26)}. Table 1에 에어백의 질량흐름율, 부피, 가스의 온도, 점화기의 점화시간, 가스방출구의 면적 등을 설계변수로하여 운전자용 에어백을 최적설계한 예를 나타내었으며 자세한 사항은 참고문헌 [25]에 수록되어 있다. Table에서 IC는 승객상해의 보다 정량적인 평가를 위하여 에어백에 직접 접촉되는 머리와 가슴의 상해도를 (3)식과 같은 비율로 조합한 승객상해도이며 최적설계시 목적함수로 된다^{12), 25)}. 여기에서 HIC는 머리상해치이며 CSI는 가슴의 상해치이다.

$$IC = 0.6 \times HIC + 0.4 \times CSI \quad (3)$$

에어백은 운전자(driver)와 승객(passen-

ger)이 안전벨트를 착용하고 정상위치(regular position)에 착석한 경우에 승객이 받는 상해치를 감소시켜 인명피해를 줄일 수 있다. 즉, 충돌시 에어백은 승객이 조향계(steering system)나 차량내부와 직접적으로 충돌하는 것을 방지하여 충격을 완화시켜주는 역할을 담당한다. 이와는 달리 승객이 비정상위치(out-of-position)에 있을 경우에는 에어백이 팽창하는 순간에 승객에게 충격을 가하는 역할을 하여, 이로인한 팽창력(inflation force)이 승객의 머리와 가슴의 가속도 값을 증가시켜 승객이 받는 상해치가 증가할 수도 있다는 연구결과가 보고되고 있다^{27)~31)}. 비정상위치는 운전자나 승객의 의자(seat)를 앞으로 당겨 앉거나 상체를 앞으로 숙이는 경우 등을 말하여, 5% 여자 더미(dummy)와 3살짜리 어린이 더미같이 더미의 크기가 다른 경우도 이에 해당된다. 이러한 자세에서는 충돌시 에어백이 팽창하는 순간에 에어백에 근접해 있어, 에어백으로부터 팽창력이 머리와 가슴에 전달된다. 비정상위치에서는 에어백이 완전히 팽창하기전에 승객과 접촉하게 되므로 에어백의 팽창하는 현상을 실제와 가깝게 표현해야 할 필요성이 생긴다. 비정상위치에서 승객과 에어백의 거동을 적절하게 표현할 수 있도록 구와 원환체를 이용하여 에어백을 모델링하였으며 그 결과를

Fig.6, 7에 나타내었으며, 자세한 사항은 참고문헌 [27]에 수록되어 있다. Fig.7에서 보는 것과 같이 머리와 가슴의 가속도 피크가 정상위치보다 상당히 높게 나오는 것을 알 수 있다.

4.2 측면충돌 모델링 및 해석

측면 충돌은 차량의 정면이 다른 차량의 측면에 충돌하여 충돌된 차량의 도어가 차실

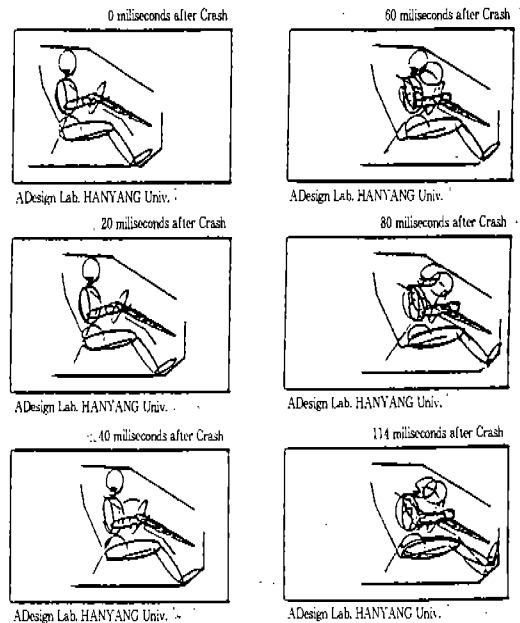


Fig.6 Simulated occupant kinematics(out-of-position)

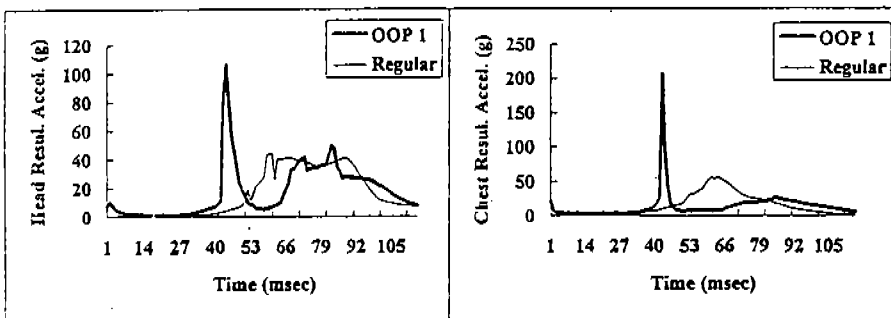


Fig.7 Head and chest resultant acceleration curves of the out-of-position

내로 침입하면서 승객에게 상해를 입히는 현상으로서, 실제 교통사고에서 정면충돌사고 다음으로 많이 발생하는 사고 유형이지만 이에 대비한 연구는 미흡한 형편이었다. 측면 충돌시 안전벨트나 에어백과 같이 정면충돌시에 승객이 조향계나 차량의 내부에 충돌하는 것을 방지하여 승객의 상해치를 감소시킨던 보호장구들이 협소한 공간으로 인한 충돌 시간의 단축에 의해 별다른 효과를 거두지 못하는 것으로 알려져 있다^{3), 32)}. 이에 따라 자동차업계에서는 측면 충돌시에 승객보호를 위하여 임팩트바(impact bar)를 도어 내부에 보강하여 도어의 강성을 높이거나 충돌에너지를 흡수할 수 있도록 도어의 안쪽면에 패딩(padding)을 하는 등의 대책을 마련하고 있다^{33)~40)}.

측면 충돌에 관한 해석기술을 개발하기 위하여 기존의 연구 결과를 토대로 ATB(Articulated Total Body) 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 측면충돌은 정면충돌과는 달리 차량의 문을 비롯한 측면구조의 자세한 모델링이 요구되므로 Fig.8에 나타난 것과 같이 모델링하였다. 모델링은 크게 차량과 이동벽 및 승객으로 나눌 수 있다^{16), 38)~39)}. 승객은 SID(Side Impact Dummy)를 사용하였으며 10개의 강체요소로 나타내었으며, 갈비뼈의 변형을 나타낼 수 있도록 하였다. 차량의 모델링은 충돌하는쪽의 측면구조(side structures)와 이를 제외한 차량 및 타이어의 3부분으로 다시 나누어 모델링 하였으며 그림에 나타난 것과 같다. 측면구조는 충돌시 변형되는 형상을 시뮬레이션할 수 있도록 그림과 같이 10개의 강체 요소로 모델링하고 임팩트바(impact bar)와 패딩재(padding material)도 모델링하였으며 요소와 요소 사이는 핀조인트(pin-joint)로 연결하였다. 이동벽은 편의상 1개의 강체를

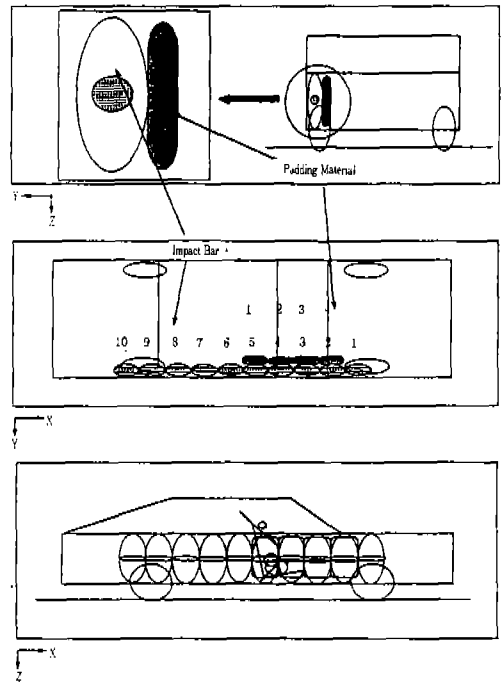


Fig.8 The developed side impact model of 2-door vehicle

이용하여 모델링하였으며 접촉을 정의하기 위하여 3개의 평면요소를 사용하였다. Fig.9에는 시험결과와 해석결과를 비교하였으며 자세한 사항은 참고문헌 [16]에 수록되어 있다. 그림에서 보는 것과 같이 시험결과와 해석결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 고 찰

지금까지 G7 전산응용 안전도 해석기술 개발과제 전반적인 것과 승객거동해석의 모델링 및 시뮬레이션 결과를 간략하게 소개하였다. 시뮬레이션을 수행하는 목적은 제품을 설계하여 제작하고자 할 때 목표한 성능이 제대로 나오는가를 시험을 대신하여 확인하는 것이며, 설계변경이 요구될 때에는 그 결과를 설계에 반영하여 개선된 설계결과를 구

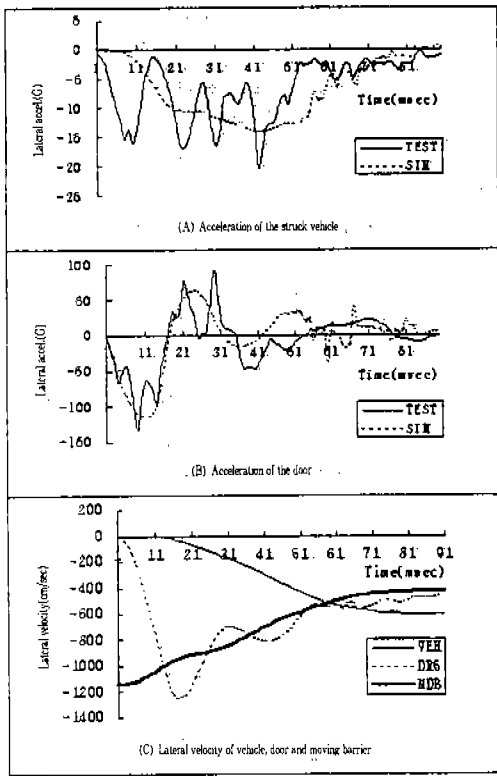


Fig.9 The validation of the new side impact model

할 수 있도록 하는데 있을 것이다. 자동차를 개발하는 초기단계에서는 개발차량에 대한 상세한 사항이 준비되어 있지 못하므로 설계자들이 설계의 방향을 잡아나가기에 용이하지 않고, 차량개발이 어느정도 진행된 단계에서는 여러 가지 제약조건으로 인해 설계변경이 용이하지 못한 실정이다. 따라서 시뮬레이션을 적절하게 활용하여 개발초기 단계뿐만 아니라 모든 단계에서 설계자에게 설계 방향을 적절하게 제시하여 설계변경에 용이하게 대처할 수 있도록 하는 것이 궁극적으로 시뮬레이션이 나아가야 할 방향일 것이다.

초기 설계단계에서는 개발차량의 상세한 사항이 준비되어 있지 못하므로 개발될 차량

의 기본모델을 가지고 설계자의 직관에 의거하여 기존의 유한요소해석모델을 변경하여 새로운 차량의 해석모델을 구성할 수 있을 것이다. 이 유한요소모델을 전체적인 설계에 사용하려면 해석수행시간이 많이 소요되므로 설계초기단계의 부품의 급속한 설계변경을 따라갈 수 없을 것이므로, 설계초기 단계에서 충돌특성이 우수한 차량의 개발이 효과적으로 진행될 수 있는 적절한 설계방안이 마련되어야 할 것이다. 초기 개발단계에서는 시뮬레이션 시간이 유한요소해석보다 훨씬 적게드는 다물체 동력학을 이용한 승객거동해석과 유한요소해석을 적절하게 조합하여 사용함으로써 다음과 같은 설계방안을 마련할 수 있을 것이다. 유한요소모델의 해석을 통해서 개발될 차량의 감속도 곡선과 조향계를 비롯한 차량내부의 힘-변형 곡선을 구할 수 있을 것이며, 이 데이터들을 이용하여 승객거동해석을 수행함으로써 아래의 표에 나타낸 것과 같이 각종 충돌 상황에서 승객의 상해를 감소시킬 수 있는 각종 부품의 충돌특성을 정의할 수 있을 것이다. 즉, 승객의 상해치를 감소시키기 위해서 무릎판의 강성의 증감여부와 조향계의 에너지흡수 부재의 강성의 증감 및 에어백의 가스방출구의 면적이나 점화기의 점화시간 등을 어떻게 변경시켜야 할지 결정할 수 있을 것이다. 이상과 같이 승객거동해석에서 구한 충돌특성을 구현할 수 있도록 유한요소모델의 형상과 치수 등을 결정하여 새로운 유한요소모델을 구성함으로써, 실차시험을 수행하지 않고도 설계변경을 검증할 수 있을 것이며 개발차량의 충돌특성이 더욱 개선될 수 있도록 이상과

각종 충돌상황	충돌시 고려해야할 주요 부품
정 면 충돌	에어백, 안전벨트, 조향계, 인스트루먼트판넬 등
측 면 충돌	도어, 임팩트바, 패딩재, 사이드 에어백 등
후 방 충돌	의자, 안전벨트 등

같은 절차를 반복적으로 수행할 수도 있다.

한편, 사이드레일(side rail)과 같은 주요 충돌에너지흡수 부재에 대해서는 정적·동적 압괴시험으로부터 구한 실험식과 데이터베이스를 이용하여 단면의 형상과 부재의 길이를 설계할 수 있으며, 이와 같은 부재들로 차량의 골격모델(stick model)을 구성하여 셸과 솔리드요소로 구성된 유한요소 상세모델에 비해 간편하게 차체충돌해석을 수행할 수 있다. 선진국에서는 이미 이와 관련된 소프트웨어가 개발되어 FORD와 같은 자동차회사에서 초기설계단계에 이용하고 있으며 설계자로 하여금 초기설계단계에서 충돌 관련 부재의 형상과 치수 등을 결정하는데 도움을 주고 있다. 충돌부재의 형상과 치수를 입력하면 그 부재의 충돌특성을 알 수 있으며 이를 개선하기 위해서는 부재의 단면형상과 치수를 어떻게 결정해야할 것인지 제안을 해준다. 따라서, 간편모델의 해석과정을 통해 충돌특성을 향상시킬 수 있는 부재의 단면의 형상과 치수 등을 결정하고 이에따른 유한요소를 재구성하여 설계변경을 검증할 수 있을 것이다.

이상과 같이 승객거동해석에서는 충돌시 승객보호를 높일 수 있는 보호장구를 설계하고, 간편모델을 이용한 자체충돌해석에서는 충돌에너지 흡수특성이 좋은 부재의 형상이나 치수 등을 결정하여 이 결과들을 토대로 유한요소 모델을 재구성하여 초기 설계단계에서 개발될 차량이 성능을 만족시킬지의 여부를 파악할 수 있을 것이다. 이상과 방법을 사용하면 급속하게 진행되는 초기부품설계변경을 효과적으로 검토할 수 있을 것이며 그만큼 시간과 노력을 줄일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. “자동차 안전기준에 관한 규칙 및 사업용 자동차 구조 등의 기준에 관한 규칙”, 교통안전공단, 1995.
2. 박영선, 이주영, 박경진, 위인혁, 유재석, “승객 안전을 위한 승용차 에어백의 모델링 및 설계”, 한국자동차공학회 추계 학술대회, 1993.
3. 윤영한, “측면 충돌시 승객 보호와 차체 해석용 모델”, 한국자동차공학회지, Vol. 14, No.4, pp. 6~12, 1992.
4. 박영선, 이주영, 박경진, “컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 안전 조항주의 최적설계”, 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제1호, pp. 33~44, 1995.
5. 신문균, 박경진, 이완익, 김형중, 정근섭, “승용차 충돌시 승객해석을 위한 모델링의 예”, 한국자동차공학회지, 제14권, 제2호, pp. 88~98, 1992.
6. 박경진, 박영선, 이주영, 정근섭, 서명원, 위인혁, “승객 거동해석의 시뮬레이션에 관하여”, 한국자동차공학회지, 제14권, 제6호, pp. 29~34, 1992.
7. Prasad, P., “An Overview of Major Occupant Simulation Models”, SAE Paper No. 840855.
8. Prasad, P. and Chou, C. C., “A Review of Mathematical Occupant Simulation Models”, AMD-Vol. 106, Proceedings of the Winter Annual Meeting of the ASME, San Francisco, Dec., 1989.
9. Obergefell, L. A., Gardner, T. R., Kaleps, I. and Fleck, J. T., “Articulated Total Body Model Enhancements”, Report No. AAMRL-TR-88-043, 1988.
10. Fleck, J. T. and Butler, F. E., “Validation of the Crash Victim Simulator”, Report No. DOT HS-806 279, 181.

1. “자동차 안전기준에 관한 규칙 및 사업

11. Butler, F. E., Fleck, J. T., "Advanced Restraint System Modeling", AFAM-RL-TR 80-14, May, 1980.
12. MADYMO User's Manual, 1995.
13. PAM-SAFE User's Manual, 1994.
14. PAM-CRASH User's Manual, 1994.
15. DYNA3D User's Manual, Ver. 930.
16. 박경진 외, "전산응용 안전도 해석기술 개발에 관한 연구", 1단계보고서, 통상 산업부·과학기술처, 1995.
17. FMVSS 208.
18. FMVSS 214.
19. CRASH-CAD User's Manual, Ver 3.2, 1995.
20. John D. Horsch, David C. Viano, and James Decou, "History of Safety Research and Development on the General Motors Energy-Absorbing Steering System", SAE Paper No. 912890, 1991.
21. Wang, J. T. and Kuang-Huei Lin, "A Cal3d Steering System Impact Model", SAE Paper No. 880650, 1988.
22. 박영선, 박경진, 이완익, "최적설계시 이차근사법의 수치성능 평가에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제16권, 제2호, pp. 236~247, 1992년.
23. Bennett, J. A. and Park, G. J., "Automotive Occupant Dynamics Optimization", DE-Vol. 32~1, Advances in Design Automation-Vol. 1, ASME, 1991.
24. 임재문, 박경진, "자동차 충돌시 에어백의 거동해석의 경향", 자동차공학회지, Vol. 17, No. 2, pp. 14. 14~22, 1995.
25. 박영선, 이주영, 박경진, "직교배열표를 이용한 승용차의 에어백의 설계", 한국자동차공학회 논문집, Vol. 3, No. 2, pp. 62~77, 1995.
26. Park, G. J., Hwang, W. J., and Lee, W. I., "Structural Optimization Post-Process Using Taguchi Method", JSME, Vol. 37, No. 2, 1994.
27. 임재문, 김창환, 박경진, "구와 원환체를 이용한 에어백의 모델링 및 비정상위치 시 승객 거동 해석", 한국자동차공학회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp. 96~109, 1996.
28. Hayano, K., Ono, K. and Matsuoka, F., "Test Procedures for Evaluating Out-of-position Vehicle Occupant's Interactions with respect to the Depolyment of Air Bags", The 14th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles, Munich, May 1994.
29. O'connor, C. S. and Rao, M. K., "Development of a Model of a Three-Year-Old Child Dummy Used in Air Bag Applications", SAE Paper No. 922517, 1992.
30. Horsch, J. H., Lau, I., Adrezejak, D., Viano, D., Melvin, J., Pearson, J., Cok, D. and Miller, G., "Assesment of Air Bag Deployment Loads", In Proceedings of the 34th Stapp Car Crash Conference, pp. 267~288, SAE Paper No. 902324, 1990.
31. Melvin, J., Horsch, J., McCleary, D., wideman, L., Jensen, J. and Wolanin, M., "Assesment of Air Bag Deployment Loads with the Small Female Hybrid III Dummy", SAE Paper No. 933119, 1993.
32. 김규현, "측면충돌시 승객보호 기준에 관한 연구", 대한기계학회지, Vol. 35, No. 6, pp. 525~541, 1995.

33. 윤영한, “측면충돌시 차체강도 및 안전도 예측을 위한 동시적 실험-해석법(CC-CTP)에 대한 연구”, 한국자동차공학회지, No. 943846, 1992.
34. Willke, D. T. and Monk, M. W., “Side Stiffness Measurement”, SAE Paper No. 861800, 1986.
35. 윤영한, “측면충돌시 도어의 패딩이 인체 상해치에 미치는 영향”, 자동차공학회지, No. 923881, 1992.
36. Trellar, T. J., “Side Impact Crashworthiness Design Evaluation of Padding Characteristics through Mathematical Simulation”, SAE Paper No. 912900, 1991.
37. Youn, Y. H., and Carballada, J., “The Effect of the Visco-Elastic Property in Padding Materials on CTP Simulation Results”, MGA-C89R-03, 1989.
38. Deng, Y. C., “Design Considerations for Occupant Protection in Side Impact-A Modeling Approach”, SAE Paper No. 881713, 1988.
39. Deng, Y. C., “Side Impact Simulation and Thoracic Injury Assessment”, Proceedings of The 11th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, pp. 77~86, 1987.
40. Deng, Y. C. and Ng, P., “Simulation of Vehicle Structure and Occupant Response in Side Impact”, SAE Paper No. 933125, 1993.