

## 자동차 충돌시 에어백의 거동해석의 경향

### The Trend of Airbag Analysis in Automobile Crash

임 재 문, 박 경 진  
J. M. Lim, G. J. Park



임 재 문

- 1963년 3월생
- 승객거동해석
- 한양대학교 대학원  
기계설계학과



박 경 진

- 1957년 1월생, 정회원
- 구조최적설계/승객거동해석
- 한양대학교 공학대학  
기계공학과

#### 1. 서 론

자동차의 급증으로 인한 교통사고로부터 승객을 보호하기 위하여 에어백(airbag)의 장착이 의무화되어가고 있다. 에어백을 장착했을 때의 효과를 정확하게 산출하기 위해서는 고정벽(barrier)에 직접 차량을 충돌시키는 실차시험(crash test)이 요구된다<sup>(1-4)</sup>. 시험을 통한 에어백의 성능 평가는 필수적이거나 고가의 비용이 요구되므로 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 시험의 횟수를 최소화하려는 노력이 계속되어 왔다. 또한 실차시험의 결과는 같은 조건하에서도 시간에 따라 상이한 결과가 발생할 수 있기 때문에 매개변수에 대

한 정확하고 정량적인 평가가 용이하지 않다<sup>(5)</sup>. 따라서 현재 자동차 업계에서는 고가의 충돌시험의 횟수를 줄이고 설계에의 반영이 용이한 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 이용하고 있다<sup>(1-8)</sup>.

에어백이 포함된 승객거동해석 시뮬레이션은 크게 다물체 동력학을 이용하는 수학적인 모델과 비선형 유한요소법을 이용하는 유한요소 모델로 나눌 수 있다. 승객거동해석을 위한 기존의 소프트웨어 중에서 MVMA-2D<sup>(9)</sup>, MADYMO-2D<sup>(10)</sup>, CAL3D<sup>(11)</sup> 등이 수학적인 모델을 이용하며, MADYMO-3D<sup>(12)</sup>, PAM-SAFE<sup>(13)</sup> 등이 유한요소 모델을 이용한다. 이들 외에도 승객거동해석 소프트웨어가 많이 있으나 대개는 이상에 소개한 소프트웨어들의 변형된 형태이며 성능이나 사용법 등이 거의 비슷할 것으로 생각된다. 수학적인 모델을 이용할 경우에는 계산시간이 적게 들고 시뮬레이션 결과를 설계에 반영하는 것이 비교적 용이하나, 에어백의 형상이 승객(occupant)과 차량 내부에 의해 변형되는 것을 적절하게 표현하지 못하는 단점이 있다<sup>(14)</sup>. 유한요소 모델을 사용하는 경우에는 승객과 차량에 의해 변형되는 형상을 실제적으로 표현할 수 있고, 에어백의 관성력(inertia force)을 생성시킬 수 있으며 재질특성을 직접 에어백에 연결시킬 수 있다. 반면에 모델을 구성하는 것이 매우 복잡하고 계산시간이 많이 소요되는 단점으로 인하여 시뮬

레이션 결과를 설계에 반영하기 보다는 설계된 제품의 평가에 주로 이용되고 있다<sup>(14)</sup>. 이와 같은 수학적인 모델과 유한요소 모델의 각각의 장점을 살리기 위해서는 두 모델을 적절하게 섞어서 사용할 필요가 있다. 즉, 시물레이션의 초기 단계에서는 수학적인 모델을 사용하여 더미와 에어백 거동의 경향을 파악하고 이를 토대로 유한요소 모델을 작성하면, 승객거동을 보다 적절하게 시물레이션할 수 있으며 모델링에 대한 시행착오를 줄일 수 있으므로 보다 효과적일 것으로 생각된다. 또한, 수학적인 모델은 컴퓨터를 이용한 자동설계와의 연계가 유한요소 모델에 비해 비교적 용이하므로 시물레이션 결과를 통하여 빠른 시간 내에 설계값을 구할 수 있고, 유한요소 모델을 이용하여 최종적인 설계값에 대해 검증할 수 있을 것이다.

여기에서는 에어백의 수학적인 모델과 유한요소 모델에 대한 모델링 기법과 이에 대한 발달과정을 간략하게 고찰하고 설계에의 적용 예를 들어, 승객거동해석 시물레이션 및 설계를 에어백을 중심으로 서술하고자 한다.

## 2. 에어백의 모델링 발달과정

본 절에서는 승객거동해석에 사용된 에어백의 모델링기법에 대한 발달 과정을 간략하게 고찰하고자 한다. Wang과 Nefske는 기존의 CAL3D에 점화기(inflator)를 표현하기 위하여 질량흐름율(mass flow rate)과 가스의 온도를 테이블 형태로 입력할 수 있고, 에어백 재질의 펼침(stretch)과 가스의 누설(leakage)을 계산할 수 있는 새로운 에어백 모델을 개발하였다<sup>(15)</sup>. 운전자용 에어백은 팽창과정과 완전히 팽창했을 때의 형상이 타원체(ellipsoid)와 유사하므로 하나의 타원체로도 에어백을 적절하게 표현할 수 있지만, 조수석의 에어백(passenger side airbag)은 팽창과정의 형상과 완전히 팽창했을 때의 형상과 부피가 타원체와는 다른 양상을 나타낸다. Wang과 Ngo는 이와 같은 단점을 보완하고 조수석의 에어백이 팽창할 때의 승객거동을 시물레이션하기 위하여 3개의 타원체를 이용하여 에어

백을 모델링하였다<sup>(16)</sup>. 최근에는 운전자용 에어백의 팽창과정을 보다 실제에 가깝게 하기 위하여 기존의 타원체 대신 구(sphere)와 원환체(torus)를 이용한 에어백모델이 개발되었으며, 비정상위치시의 승객거동해석에 적용하였다<sup>(17)</sup>.

Nieboer 등은 타원체와 타원형상의 실린더(elliptical cylinder)로 에어백을 모델링하여 MADYMO-2D에 추가하였으며, MADYMO-3D에는 3절점 막요소(3 node membrane element)를 이용하여 유한요소로 에어백을 모델링할 수 있게 하였다<sup>(6)</sup>. Hoffmann 등은 대변형(large structural deformation)을 하는 동적인 문제의 해를 구하는 비선형 유한요소법의 장점과 기존의 검증된 승객모델의 장점을 결합시키기 위하여 PAM-CRASH와 MADYMO를 결합하여 승객거동 해석을 하였다<sup>(18)</sup>. 즉, PAM-CRASH로는 에어백의 팽창(inflation)과 더미와 에어백의 충돌시 에어백과 무릎판(kneebolster) 및 운전대(steering wheel)의 구조적인 변형(structural deformation)을 나타낼 수 있도록 했으며, MADYMO로는 에어백이 승객과 접촉했을 때 발생하는 힘과 모멘트를 구하고 승객의 동적인 거동을 해석하였다. Khalil 등은 MVMA(Motor Vehicle Manufacturers Association)의 지원하에, DYNA3D를 이용하여 에어백의 팽창과 승객과의 상호작용을 시물레이션할 수 있는 에어백의 유한요소 모델을 개발하였다<sup>(19)</sup>.

이상에서 비록 에어백의 모델링기법에 대한 모든 것을 소개하지는 않았으나, 전반적인 흐름은 충분히 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

## 3. 에어백의 모델링에 관한 고찰

### 3.1 수학적인 모델

승객거동해석 소프트웨어는 MADYMO, CAL3D, PAM-SAFE 외에도 여러가지가 있으나 대개는 이들의 변형된 형태로 이들과 특성이 유사하다. 여기에서는 수학적인 모델이 도입된 에어백의 특성해석과 모델링 기법을 설명하기 위하여 CAL3D의 내용을 소개하고자 하며 그외의 모든 소프트웨어에서도 대부분의 경우에 같은 개

념을 공유하고 있다고 사료된다.

3.1.1 에어백의 특성 해석

에어백의 팽창과정은 Fig.1과 같이 팽창하고 있는 관제역(control volume)으로 생각할 수 있으며, 점화기(inflator)에서 생성된 가스가 관제역으로 유입되고 가스방출구(vent hole) 및 누설(leakage)을 통하여 관제역 외부로 유출된다. 에어백 내부의 기체는 일정한 비열(constant specific heat)을 갖는 이상기체이며, 관제역내부로 열전달이 없는 단열과정(adiabatic process)이며 온도와 압력이 균일하다고 가정한다<sup>(15)(17)(20)(21)</sup>.

이상기체 상태방정식과 질량보존의 법칙을 이용하여 팽창중인 에어백의 압력과 온도, 질량 및 부피를 구하기 위하여, 팽창하는 도중과 완전히 팽창한 후의 두가지 경우로 나누어진다. 에어백 재질의 초기효과를 무시하고 승객과의 상호작용을 무시하면 에어백이 팽창하는 도중의 압력은 대기압으로 가정할 수 있으며 누수와 방출이 없으므로 에어백의 특성은 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_2 = \frac{RT_1 \dot{m}_{in}}{P_2}$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{in} \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{m_2 R}$$

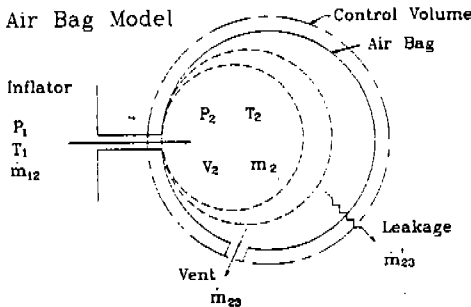


Fig.1 Schematic view of airbag inflation process

여기에서,  $\dot{V}_2$ 는 에어백의 압력변화율,  $\dot{m}_2$ 는 질량변화율,  $\dot{m}_{in}$ 는 에어백내부로 유입되는 질량흐름률,  $T_1$ 은 점화기 온도,  $T_2$ 는 에어백내부의 온도이며  $R$ 은 기체상수이다.

에어백이 완전히 팽창한 후의 에어백의 특성은 (2)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}$$

$$\dot{P}_2 = \frac{\kappa R(T_1 \dot{m}_{in} - T_2 \dot{m}_{out}) + x P_2 \Delta \dot{V}}{V_2 + x P_2 C_s V_{20}} \quad (2)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{c_s V_{20} \kappa R(T_1 \dot{m}_{in} - T_2 \dot{m}_{out}) + V_2 \Delta \dot{V}}{V_2 + \kappa P_2 C_s V_{20}}$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{R m_2}$$

여기에서,  $\kappa$ 는 비열상수,  $V_{20}$ 은 에어백이 완전히 팽창했을 때의 이론적인 체적,  $c_s$ 는 펼침계수(stretch factor)이며 실험적으로 결정되는 양이고  $\Delta V$ 는 충돌시 발생하는 에어백과 승객 및 차량내부와의 접촉으로 인한 체적 변화이며 계산된 값이다.

에어백 내부로 들어가는 질량유량을 최대화하고 인플레이션(inflation) 시간을 최소화하기 위해 가스압력을 오리피스에서 음속유동(sonic flow)이 발생하도록 고압으로 할 경우, 에어백 내부의 압력은 가스의 유량에 영향을 미치지 않게 된다. 따라서, 점화기의 가스 거동은 전체 에어백의 모델링에서 분리될 수 있다. 점화기로부터 생성된 가스의 시간에 따른 온도와 질량흐름율은 점화기의 특성을 나타내는 중요한 요소이며, Fig.2와 같이 탱크시험(tank test)을 통하여 구한다<sup>(15)</sup>.

3.1.2 에어백의 모델링<sup>(2)(17)(22)</sup>

에어백은 실차시험으로부터 구한 위치와 제원이 동일하도록 운전대(steering wheel)의 무게 중심으로부터 3차원 공간상에서 지정되며 여기에서부터 에어백이 전개된다. 시뮬레이션시의 에어백의 부피는  $x, y, z$ 축의 길이를 갖는 타원체

로 정의되며 시간에 따른 부피는 3축의 길이변화에 따라 최초로 정의된 최대부피에 이를 때까지 변화된다. 실제의 에어백은 타원체의 일부분이 운전대에 의하여 지지되어 승객과의 접촉시에 각 방향으로의 요동과 뒤틀림을 방지한다. 시뮬레이션에서는 이와 유사한 효과를 갖도록 Fig.3과 같이 에어백과의 접촉에만 사용되는 네개의 접촉타원체(contact ellipsoid)를 정의하였다. 에어백은 조향계와 선형스프링에 의하여 지지되도록 모델링되고 이때의 스프링특성은 스프링상수로 정의된다. 충돌시 에어백과 승객사이에서 발생하는 접촉력(contact force)은 더미의 각 부분과 에어백과의 접촉면적을 시간에 따라 측정하여 이때의 에어백의 압력값을 곱하여 프로그램 내부에서 계산한다.

### 3.2 유한요소 모델

비선형 유한요소법을 이용한 에어백의 모델링은 상용 소프트웨어인 PAM-CRASH, MADYMO-3D 및 DYNA3D를 이용하여 수행하고 있으며, 수학적인 모델에서와 마찬가지로 이들외에도 많은 소프트웨어가 존재하고 있으나, 모델링과정이 거의 유사하므로 여기에서는 DYNA3D의 내용을 위주로 하여 소개하고자 한다.<sup>(18)(19)</sup>

에어백의 재질은 직교이방성 탄성재질(orthotropic elastic material)이며 다층 셸요소(multi-layered shell element)로 모델링하였다. 에어백의 내부를 모델링하는 직접적인 방법은 솔리드요소(solid element)를 사용하여 분할하는 것이다. 이 방법은 팽창된 에어백에는 적절하지만, 팽창하고 있는 도중의 에어백에는 시간과 비용이 많이 소요되므로 적용하기 어렵다. 에어백의 체적을 계산하기 위하여 팽창하는 도중의 에어백은 관제역(control volume)으로 처리한다<sup>(15)</sup>. 관제역은 관제면(control surface)으로 둘러싸인 체적으로 정의된다. 팽창과정중의 관제면의 위치와 방향 및 면적을 알 수 있기 때문에 그린의 법칙(Green's theorem)을 사용하여 관제역의 체적을 (4)식과 같이 계산한다.

$$V = \int x_n d\Gamma \approx \sum_{i=1}^N \bar{x}_i n_{ix} A_i \quad (4)$$

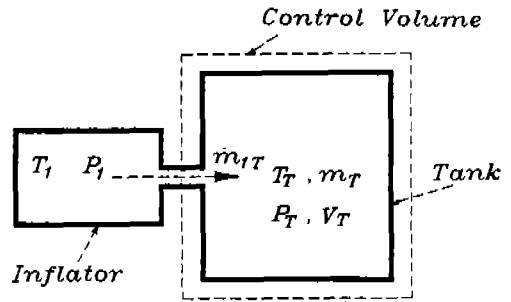


Fig.2 Schematic of inflator-tank system

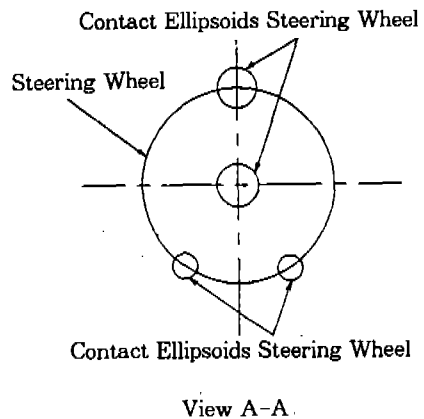
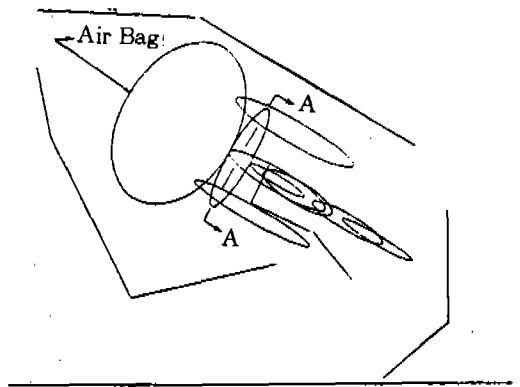


Fig.3 A schematic of the contact ellipsoids to simulate the interaction between the airbag and steering - side view & section view

여기에서,  $V$ 는 관계역의 체적,  $N$ 은 요소수 (number of element),  $x$ 는 각 요소의 평균  $x$ 좌표,  $n_{ix}$ 는 요소의 법선과  $x$ 좌표 사이의 방향여현 (direction cosine)이며  $A_i$ 는 요소의 면적이다.

매순간마다의 관계역에 대응하는 에어백의 압력의 계산은 다음의 식으로 구한다.

$$P = (\gamma - 1)\rho e \quad (5)$$

여기에서,  $P$ 는 압력,  $\gamma$ 는 비열비(specific heat ratio),  $\rho$ 는 밀도이며  $e$ 는 가스의 비내부에너지(specific internal energy of the gas)이다.  $e$ 의 변화는 다음식으로 결정된다.

$$e_2 = e_1 \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{(\gamma-1)} \quad (6)$$

(4)에서 (6)식은 팽창하는 에어백의 압력과 부피와의 관계를 완전하게 정의한다.

에어백의 점화기는 참고문헌(15)에 기초하여 모델링하였다. 즉, 가스배출구와 누설을 고려하였고, 점화기에서 에어백으로의 질량흐름을 (mass flow rate)과 가스의 온도는 입력데이터로 제공되며 시간에 따른 함수이다.

접힌 에어백(folded airbag)의 전개와 승객과의 접촉작용을 모델링하기 위하여 첫번째로는 압축가스가 에어백내로 유입될 때 에어백의 접힌 층(folded layer) 사이의 상호작용을 처리할 수 있고, 두번째로는 승객과 에어백 사이의 접촉을 설명하는 것이 필요하다. 에어백이 펼쳐지는 동안의 접촉을 처리하기 위하여 단일 면적 접촉 알고리즘(single surface contact algorithm)을 토대로 하였으며, 팽창하는 도중의 에어백과 승객과의 접촉은 면적대 면적의 접촉 알고리즘(surface-to-surface contact algorithm)에다 솔리드 모델링에 가능한 기하학적인 접촉특성을 추가하여 구하였다<sup>(18)</sup>.

#### 4. 승객거동해석 시뮬레이션

##### 4.1 수학적인 모델

승용차 충돌을 컴퓨터 시뮬레이션하는데 가장

중요한 사항은 충돌시험시의 상황을 컴퓨터에 맞게 모델링하여 입력하는 것이다. 다물체 동역학을 사용하는 승객거동해석 프로그램에서는 차량과 승객에 대한 적절한 모델링이 필요하다. 승객, 차체, 자동차내부, 안전벨트(seat belt) 및 조향계(steering system) 등은 질량과 부피가 있는 강체(rigid body), 평면(plane), 스프링(spring) 및 감쇠기(damper) 등으로 Fig.4와 같이 모델링하였다. 승객은 하이브리드 III (hybrid III) 더미를 사용하였으며, 충돌시 발생하는 접촉은 정적, 동적시험으로부터 구한 힘-변형함수(force-deflection function)를 이용하여 나타내었다. 승객과 에어백의 접촉에 민감한 영향을 주는 조향계는 11개의 스프링-감쇠기로 이루어진 에너지흡수 조향계(energy absorbing steering system)를 사용하였고, 안전벨트는 하니스(harness) 모델을 사용하였다<sup>(1)(2)(3)(17)(22)</sup>.

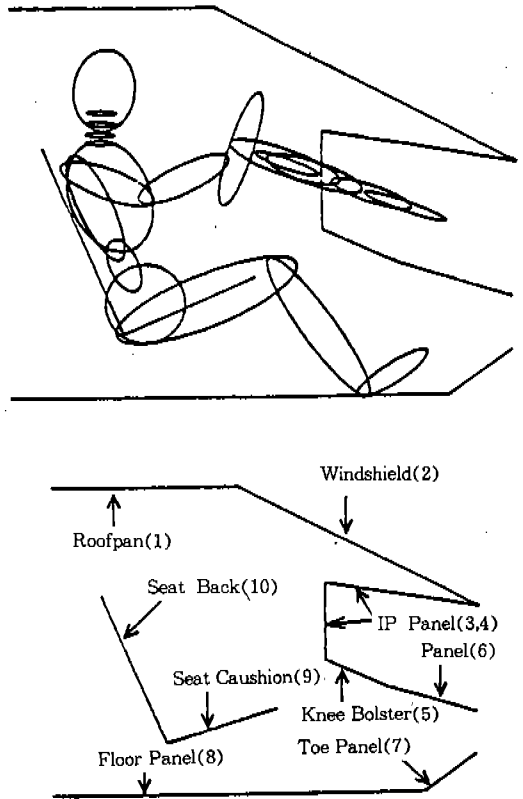


Fig.4 Hybrid III dummy model and vehicle interior panel model

Fig.5에 CAL3D를 이용한 시뮬레이션 결과를 그래픽 후처리 과정을 통하여 나타내었다. Fig.6에는 비정상위치시의 승객거동을 시뮬레이션한 결과를 나타내었다<sup>(17)</sup>. 그림에서 보는 것과 같이 더미와 에어백의 시간에 따른 거동을 분석하여 모델링과 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증할 수 있을 것이다.

#### 4.2 유한요소 모델

더미와 의자(seat), 바닥(floor) 등은 MADYMO의 강체와 평면을 이용하였으며, 에어백과 조향계 및 무릎판 등은 유한요소 모델을 이용하여 Fig.7과 같이 모델링하였다<sup>(18)</sup>. Fig.8은 팽창된 에어백의 제한과 접촉형태의 유한요소 모델을 나타낸 것이다<sup>(19)</sup>. 완전히 팽창한 후의 에어백의 부피는 60리터이고 4000Pa의 압력을 가지며 고정띠(strap)을 포함한 무게는 405.6g이다. 더미와 에어백의 거동을 Fig.9에 나타내었다

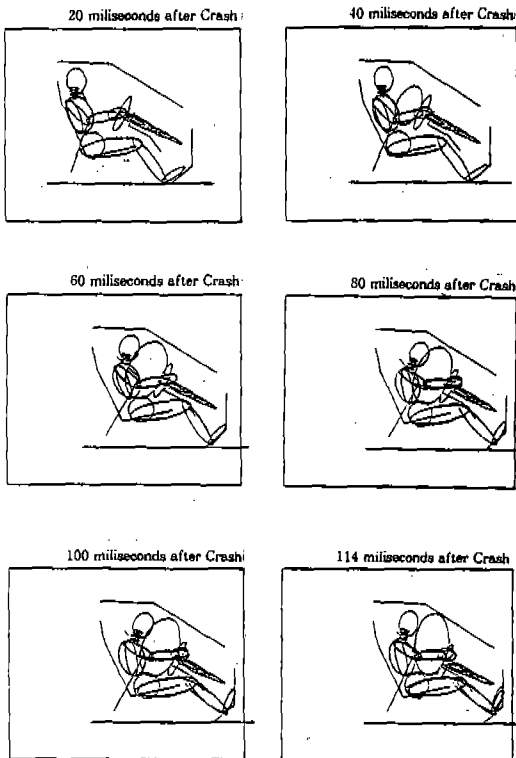


Fig.5 Simulated occupant kinematics

<sup>(18)</sup>. 그림에서 보는 것과 같이 에어백의 팽창도중 및 더미와의 접촉시의 형상이 실제에 가까운 것을 알 수 있다.

#### 5. 설계의 적용 예

승객거동해석의 시뮬레이션 결과는 법규의 만족여부를 판정하는 것에는 많이 이용되고 있으나

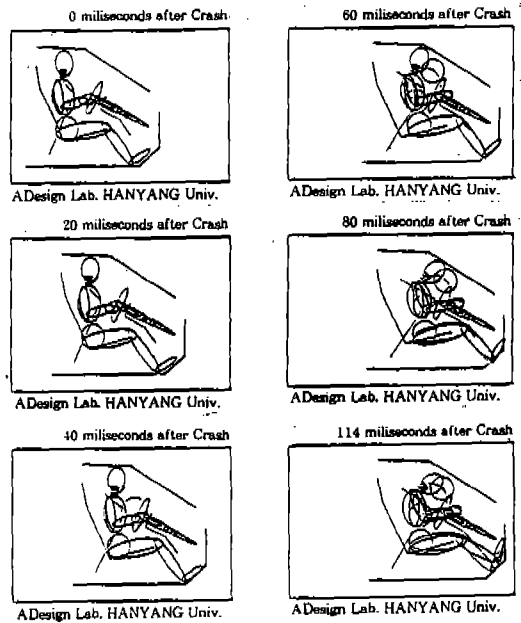


Fig.6 Simulated occupant kinematics(out-of-position)

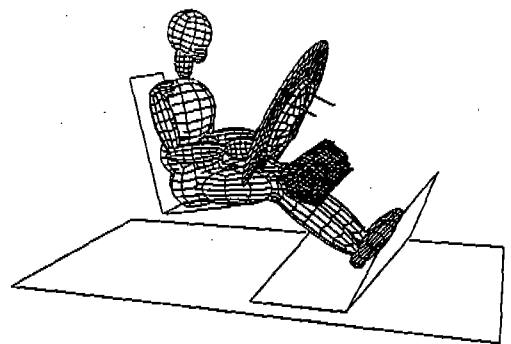


Fig.7 Assembled simulation model consisting of finite element and rigid body submodels

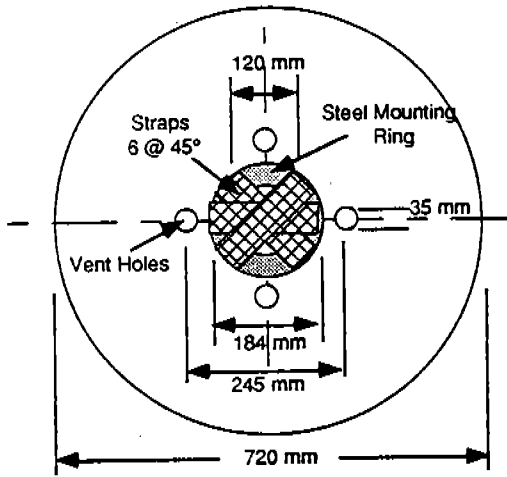


Fig.8 Schematic of deflated generic airbag and finite element model of a folded airbag

설계에까지 직접 적용한 예는 많지 않다. 에어백의 설계는 차량의 복잡한 충돌상황하에서 승객의 보호를 목적으로하기 때문에 대단히 큰 비선형성과 복잡성을 지닌다. 에어백에서 선정 가능한 설계변수에 대하여 목적함수인 승객의 상해치는 함축함수(implicit function)이며 또한 설계변수들이 차원을 달리하며 매우 큰 단위차를 갖기 때문에 최적설계에서 요구되는 민감도해석(sensitivity analysis)이 어려워진다<sup>(7)(22)</sup>. 이러한 단점을 극복하고자 근사적인 최적설계가 제안되었으며<sup>(7)</sup>, 통계적방법에 기초한 직교배열표를 사용하여 구한 설계변수의 최적조합을 초기치로하여 설계변수의 범위를 좁혀 다시 최적설계하는 반복적인 알고리즘<sup>(22)</sup>이 제안되었다. Table 1은 운전자용 에어백에 대한 설계의 예이며 설계변수는 질량흐

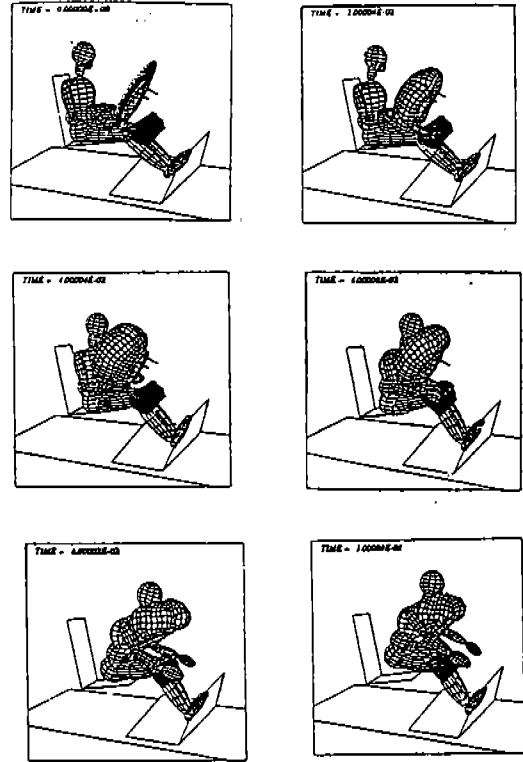


Fig.9 Predicted dummy kinematics and airbag deployment

름율(mass flow rate), 에어백의 부피, 가스의 온도, 점화기의 점화 시간, 가스방출구의 면적이다<sup>(22)</sup>. Table 1에서 IC는 승객상해의 보다 정량적인 평가를 위하여 에어백에 직접 접촉되는 머리와 가슴의 상해도를 (7)식과 같은 비율로 조합한 승객상해도이며 최적설계시 목적함수이다<sup>(22)</sup>. 여기에서, HIC(head injury criterion)는 머리의 상해도이며 CSI(chest severity index)는 가슴의 상해도이다<sup>(1)(2)(3)(22)(23)(24)</sup>.

$$IC = 0.6 \times HIC + 0.4 \times CSI \quad (7)$$

조수석의 에어백에 대한 FMVSS 208과 NCAP(New Car Assessment Program)의 시험조건에 따른 설계의 예를 Table 2에 나타내었

으며, 질량흐름율, 가스방출구의 면적, 에어백을 나타내는 타원체의 x축과 z축의 길이 및 안전벨트에 대한 여러가지 변수를 설계변수로 잡았다<sup>(6)</sup>. 여기에서 FMVSS 208에 의한 것은 승객이 안전벨트를 착용하지 않은 상태에서 30mph의 속도로 고정벽시험을 시뮬레이션한 것이고, NCAP에 의한 것은 승객이 안전벨트를 착용한 상태에서 35mph의 속도로 고정벽시험을 시뮬레이션한 것이다. 목적함수는 (8)식과 같으며 NCAP 시험조건에 의한 승객의 정규화된(normalize) 머리상해치(HIC2)와 가슴의 피크(peak) 가속도값(CHG2)을 이용하여 정의하였다.

$$OBJ = \frac{HIC2}{1000} + \frac{CHG2}{60} \quad (8)$$

6. 향후 전망

그간 컴퓨터 용량 증대 및 소프트웨어의 기술 발전에 동승하여 발전되어온 에어백의 해석에 대한 향후 발전은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 현재의 기술은 많은 해석기술이 적용되면서 우수한 것들이 선택되어져서 이루어진 것이므로 당분간은 근본적인 큰 변화보다는 현재 사용되고 있는 알고리즘의 효율화 등을 개선하는 방향으로 갈 것이다.
- (2) 기존의 소프트웨어가 아직도 익숙하지 않은 사용자에게는 다소 어려운 점이 있으므로 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 메뉴시스템 등이 개발될 것이다.
- (3) 현재 해석에는 상당한 진전이 있으나 설계와의 연계는 앞에서의 예에도 불구하고 세계적으로 대단히 미약한 상태이다. 따라서, 실험과의 연계 및 현장 엔지니어들의 경험을 포함하는 해석기술을 통해 설계에의 반영이 이루어질 것이다.
- (4) 국내에서는 몇명의 엔지니어를 제외하고는 아직도 해석기술 조차 정확하게 인식되어 있지 않은 상태라고 할 수 있다. 따라서 우선은 외국의 해석기술 사례를 도입하는 것이 중요하다. 이때 후발 국가의 장점을 살려 나중에 사용될 설계에의 반영을 염두에 두는 것이 중요하다고 사료

Table1 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	29msec	36cm <sup>2</sup>	313.07
최적값	0.8	644.4	85	21	36	233.14

Table2 Results of optimum design based on an approximate method

설계변수 및 결과 설계값	질량흐름율	가스배출구면적 (cm <sup>2</sup> )	X (cm)	Z (cm)	무릎벨트강성	어깨벨트강성	무릎벨트슬랙 (cm)	어깨벨트슬랙 (cm)	좌측		우측			
									HIC1	CHG1	HIC2	CHG2		
초기값	1.00	1.00	32.0	32.0	0.51	4.24	9.6	3.1	481	47	641	56	7.44	7.04
D1	0.94	2.89	26.2	40.(L)	0.1(L)	0.(L)	1.0	1.9	123	31	202	40	7.82	7.73
D2	1.13	2.76	33.0	34.2	0.1(L)	0.(L)	5.6	1.(L)	242	36	370	45	7.97	7.90
D3	1.40	3.(U)	20.(L)	40.(L)	1.20	7.50	2.7	1.(L)	268	32	423	49	6.46	4.88
D4	1.70	1.70	25.6	34.4	0.41	3.50	10.4	3.7	543	37	858	52	7.38	7.18
D5	1.90	1.90	20.(L)	38.8	0.31	2.64	12.3	4.3	506	33	700	46	7.66	7.77



된다.

- (5) 현재 외국의 소프트웨어를 도입하고 있는 국내 회사들은 엄청난 양의 소프트웨어 사용비를 지불하고 있다. 따라서 이러한 소프트웨어의 국내개발이 신중히 고려되어야 한다. 여기에는 국내 소프트웨어 개발기술이 낙후되었다는 측면과 함께 외국에서 도입된 소프트웨어의 사용기간이 앞으로도 길게 갈 것이라는 측면이 함께 고려되어야 한다.

### 참 고 문 헌

1. 신문균, 박경진, 이완익, 김형중, 정근섭, “승용차 충돌시 승객 해석을 위한 모델링의 예”, 한국자동차공학회지 No.923710, 1992년.
2. 박영선, 이주영, 박경진, 위인혁, 유재석, “승객 안전을 위한 승용차 에어백의 모델링 및 설계”, 한국자동차공학회 학술대회, 93년 11월.
3. 박경진, 박영선, 이주영, 정근섭, 서명원, 위인혁, “승객 거동 해석의 시물레이션에 관하여”, 한국자동차공학회지, 제14권, 제 6호. 1992년 12월.
4. 윤영한, “측면 충돌시 승객 보호와 차체 해석용 모델”, 한국자동차공학회지, 92년 8월.
5. Prasad, P., “An Overview of Major Occupant Simulation Models”, SAE Paper No. 840855, 1984.
6. Deng, Y.C. and Wang J.T., “Computer Experiments for Optimal FMVSS 208 and NCAP Performance”, SAE Paper No. 942230, 38th Stapp Car Crash Conference Proceedings, 1994.
7. Bennett, J.A. and Park, G.J., “Automotive Occupant Dynamics Optimization”, ASME Advances in Design Automation, DE-Vol.32-1, Sept. 1991.
8. Deng, Y.C. and Lust, R. V., “Parameter Identification for Nonlinear Dynamic Systems Using Optimization Techniques”, ASME Advances in Design Automation, DE-Vol.32-1, Sept. 1991.
9. Bowman, B.M., Bennett, R.O. and Robbins, D.H., “MVMA Two-Dimensional Crash Victim Simulation Ver.4, Vol. 1; final Report UM-HSRI-79-5-1, Highway Safety Research Institute, June 29, 1979.
10. MADYMO User's Manual 2D, Ver.4.2 : TNO, Oct. 1988.
11. Fleck, J.T., “Validation of the Crash Victim Simulator, Volumes I Through IV”, Report No. DOT HS-806 279, December 1981.
12. MADYMO User's Manual 3D, Ver.5.0, July 1992.
13. PAM-SAFE User's Manual.
14. Nieboer, J.J., Wismans, J. and de Coo, P. J.A., “Airbag Modeling Techniques”, SAE Paper No.902322, 1990.
15. Wang, J.T. and Nefske, D.J., “A New CAL3D Airbag Inflation Model”, SAE Paper No.880654, March 1988.
16. Wang, J.T., and Ngo, T., “Modeling of Passenger Side Airbags with A Complex Shape”, SAE Paper No.900545, 1990.
17. 임재문, 김창환, 박경진, “구와 원환체를 이용한 에어백의 모델링 및 비정상위치시의 승객거동 해석”, 한국자동차공학회 논문집 게재예정, 1995.
18. Hoffmann, R., Ulrich, D., Protard, J., Wester, H., Jaehn, N., and Scharnhorst, T., “Finite Element Analysis of Occupant Restraint System Interaction with PAM-CRASH”, SAE Paper No.9002325, 34th Stapp Car Crash Conference Proceedings, 1990.
19. Khalil, T., Wasko, R., Hallquist, J., and Stillman, D., “Development of a 3-Dimensional Finite Element Model of Air Bag Deployment and Interactions with an Oc-

- cupant Using DYNA3D", SAE Paper No. 912906, 35th Stapp Car Crash Conference Proceedings, 1991.
20. Van Wylen, G. and Sonntag, R.E., Fundamentals of Classical Thermodynamics, SI Version, John Wiley & Sons, 1978.
  21. 손병진, 맹주성, 이상환, 유체역학, 회문당, 1992.
  22. 박영선, 이주영, 박경진, "직교배열표틀 이용한 승용차의 에어백의 설계", 한국자동차 공학회논문집 95년 3월호 게재예정, 1995.
  23. Chou, C.C and Gerald W.Nyquist, "Analytical Studies of the Head Injury Criterion(HIC)", SAE Paper No.740082.
  24. Chou, C.C., Howell, R.J. and Chang, B.Y., "A Review and Evaluation of Various HIC Algorithms", SAE Paper No.880656