

## 에어백 단품설계를 위한 전개과정과 승객거동해석

### Analyses of Deployment Process and Sled Test for Designing Airbag Module

김 현 영\*, 이 상 근\*\*, 신 윤 제\*\*\*  
H. Y. Kim, S. K. Lee, Y. J. Shin

#### ABSTRACT

Finite element analyses are carried out to provide results usable in the design of airbag module that consists of inflater, cushion, cover, mounting plate, etc. In the first phase, a deployment process of airbag module is analyzed to evaluate the pressure waveform of developed airbag and deployment characteristics, and is compared with the test results. Interaction between head form and inflated airbag module is investigated in the second phase. In the last stage, sled test with rigid dummy, airbag module, driving system and car interior part are simulated to investigate the influence of airbag design factor on the behavior of dummy with seat belt. The procedures can be provided as a guideline for airbag module design and improvement of airbag module performance.

주요기술용어 : Airbag module(에어백 단품), Pressure waveform(압력 파형), Sled test(대차시험), Deployment process(전개과정), Driving system(조향장치)

#### 1. 서론

차량충돌시 승객보호는 자동차의 개발 과정에서 매우 중요한 설계인자로 고려된다. 정면충돌

에서 승객은 전방으로 과도하게 움직이게 되며 차량 내장재와의 2차 충돌로 인해 승객은 심각한 상해를 입게된다. 이러한 승객의 상해를 줄이기 위해서 다양한 승객보호 안전장치(Seat belt, airbag, knee bolster, anti-submarine seat etc.)의 사용<sup>1)</sup>, 자동차 승객보호를 위한 안전기준의 제정 등, 차량의 충돌시 승객보호를 위한

\* 정희원, 강원대학교 기계공학과

\*\* 한국ESI

\*\*\* (주) 성우 A/B 기술부

많은 연구가 이루어지고 있다. NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)에서는 자동차의 각종 충돌로부터 승객을 보호하기 위해서 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard) 법규들을 제시하고 있다. 특히 자동차의 정면충돌로부터 승객을 보호하기 위하여 제정된 FMVSS 208 법규는 고정벽(Barrier)에 대해서 30mph 속도의 자동차가 정면충돌시 Table 1과 같이 승객의 머리상해치(HIC; Head Injury Criteria(36 msec)), 가슴의 가슴가속도(Peak chest G's(3msec)), 대퇴부 하중(Femur load), 가슴변형량(Chest deflection)의 한계를 제시하고 있으며<sup>2)~13)</sup>, 생산되는 모든 승용차량에 대해 이러한 제한조건을 충분히 만족하도록 승객보호용 안전장치의 장착을 요구하고 있다.

Table 1의 각 항목에 대한 승객 상해치는 실제 충돌사고를 대체하는 다양한 시험을 통해서 승객보호용 안전장치의 수행능력 평가로 얻을 수 있다. 에어백 단품의 전개발과정에 있어서, 자동차 회사는 에어백 단품에 대해서 Fig.1과 같이 정적 단품시험(Static module test), 동적 단품 시험(Dynamic module test), 대차시험(Sled test) 및 고정벽 시험(Barrier test)을 단계적으로 수행하며 자동차의 충돌특성에 적합하고 승객의 상해를 최소로 줄이는 최적의 에어백 단품을 개발한다. 충돌더미(Crash dummy)로 불리는 승객 내용물을 탑재하고 실시되는 고정벽 시험은 운전석 에어백(DAB; Driver side airbag), 조수석 에어백(PAB; Passenger side airbag), 뒷좌석 에어백(RAB; Rear side airbag), 측면 에어백(SAB; Side impact airbag) 등의 개발 과정에서 필수적으로 사용되고 있으나, 실차의 사용으로 인한 고가의 시험 장비와 시험 비용으

로 인해 승객보호 안전장치의 수행능력의 평가는 최소의 시험 횟수 내에서 FMVSS 208 규제치에 적합하도록 조절되어야 한다. 고정벽 시험의 고가비용으로 인해서 대차시험이 승객보호 안전장치의 신개발단계에서 대체시험방법으로 수행되고있으나, 테스트를 거친 각종 승객보호 안전장치나 차량내장재(Knee bolster, steering column, steering wheel assemblies, airbag modules and other miscellaneous hardware)가 대차에 장착되어야 하기 때문에 여전히 고가의 비용과 관련되어 있다. 이러한 물리적 충돌 시험의 고가비용으로 인해서, 자동차회사들은 시험횟수를 최소화하면서 다양한 변수들의 적절한 조합과 최소 경비와 시간으로 실시할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션을 적극적으로 활용하고 있다.<sup>14)</sup>

본 논문에서는 에어백 단품의 개발과정을 단계적으로 제시하고 있으며, 에어백 단품의 설계 과정에서 승객안전평가에 대한 방법론으로 유용한 결과를 제공하고자 시험과 유한요소해석(Finite element analysis)을 실시하고 비교·분석하였다. 본 논문은 3단계로 시험과 유한요소해석을 수행하였다. 첫 번째 단계로, 에어백 단품의 구조적 안정성과 수행능력평가를 위해서 에어백 단품의 전개과정을 해석하였으며, 에어백의 전개특성과 전개과정에서의 에어백내 압력파형을 산출하고, 해석결과를 시험결과와 비교·분석하였다. 두 번째 단계로, 자동차 충돌시, 승객에 대한 에어백 단품의 에너지 흡수성을 평가하기 위해서 머리모양(Head form)의 강체와 전개되는 에어백 단품과의 상호작용을 연구하였다. 마지막 단계로, 자동차의 충돌시 승객안전관련 단품들의 기능과 변수의 추출과 적용, FMVSS 208 법규 규제치에 대한 만족여부를 확인하기 위해서 에어백 단품, 차량내장재, 벨트에 구속되어있는 Hybrid III 더미로 구성된 대차시험을 수행하였으며, 해석결과를 시험결과와 비교·분석하였다.

Table 1 FMVSS 208 regulation

ITEM	LIMITATION
HIC(Head Injury criteria)	<1,000
PEAK CHEST G's(3 msec)	<60 G
PEAK FEMUR LOADS	<10,000 N
PEAK CHEST DEFLECTION	<3 inch(Airbag systems) <2 inch(Belt systems)

## 2. 에어백의 열역학적 모델(Thermodynamic model of airbag)

에어백을 열역학적 모델로 단순화시킬 때, Fig.

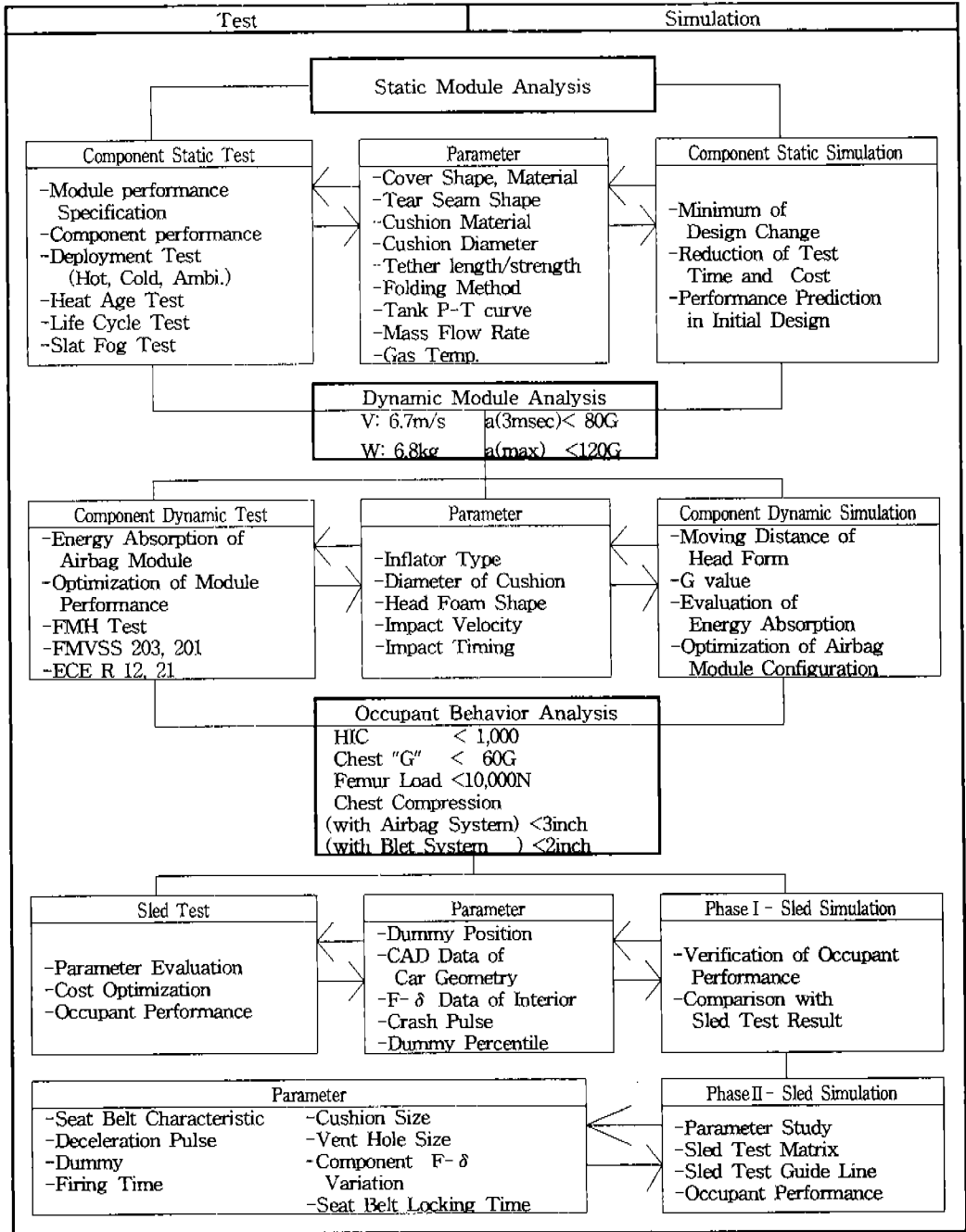


Fig.1 Development process of airbag system

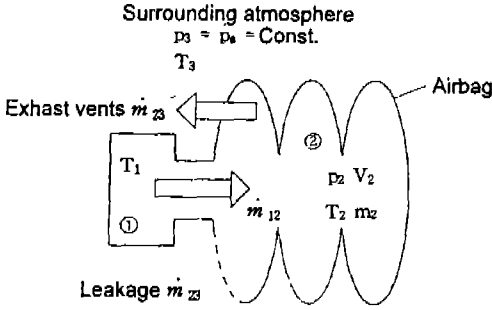


Fig.2 Thermodynamic model of airbag

2와 같이 나타낼 수 있다. 에어백 모델은 크게 인플레이터(Inflator), 에어백(Airbag), 주위압(Surrounding atmosphere) 부분으로 나누어지며, 백내부와 외부에서 열의 흐름이 없다고 가정하는 단열과정(Adiabatic process)과 이상기체(Ideal gas), 그리고 압력과 온도가 백내에서 균일하게 분포한다고 가정한다.<sup>15)</sup>

기본 방정식은 식(1)의 기체의 상태방정식, 식(2)의 에너지 보존법칙과, 식(3)의 질량보존의 법칙이다. 식(4)는 식(1), (2), (3)으로부터 유도된 에어백 모델의 기체 지배방정식을 나타낸다.

$$pV = mRT \quad (1)$$

$$dU/dt = dQ/dt - pdV/dt \quad (2)$$

$$\begin{aligned} dm/dt &= dm_{in}/dt - dm_{out}/dt, \\ (dm/dt &= \dot{m}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} dm/dt &= CA(P_1/RT_1)(P_2/P_1)^{1/k} \cdot \\ [2RT_1(1 - (P_2/P_1)^{k-1/k})(k/(k-1))]^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서  $p$ 는 압력이고,  $V$ 는 체적,  $m$ 은 질량,  $R$ 은 기체상수이며,  $T$ 는 온도이다. 에너지 보존법칙에서  $dU/dt$ 는 백에서의 에너지 변

화량,  $dQ/dt$ 는 백으로 들어오는 에너지변화량,  $pdV/dt$ 는 백의 에너지변화량이다. 질량 보존법칙에서  $dm/dt$ 는 백의 질량의 변화량,  $dm_{in}/dt$ 는 백으로 들어오는 질량변화량,  $dm_{out}/dt$ 은 백에서 빠져나가는 질량변화량이다. 식(4)에 나타난 지배방정식에서  $C$ 는 백에서의 방출계수,  $A$ 는 백에서의 방출구멍의 면적,  $k$ 는 인플레이터 가스의 비열비이다.

### 3. 에어백 단품의 전개과정 해석(Inflation process of airbag module)

Fig.3은 에어백만을 분리하여 부풀렸을 때 얻어지는 에어백내 압력파형의 전형적인 예다.<sup>16)</sup> (A)에서 1차 최대피크에 도달한 후, (B)에서 순간적인 진공상태가 백내에서 일어나고, 연속적인 여압(C)으로 백을 부풀리며 대략 30 msec에서 2차 피크(D)에 도달하게 된 후 압력이 대기압(E)까지 점차적으로 감소한다. 에어백 거동과 압력파형의 관계에 있어서, 사실상 에어백은 2차 피크 부근에서 완전히 부풀러지기 때문에, (D)근처 이후의 압력파형은 운전자의 접촉을 고려하여 점진적인 감압파형을 가져야만 한다. 에어백은 차량의 정면 충돌시 승객의 상해를 최소화하기 위해서 차량 충돌후 승객이 전방으로 일정 기준

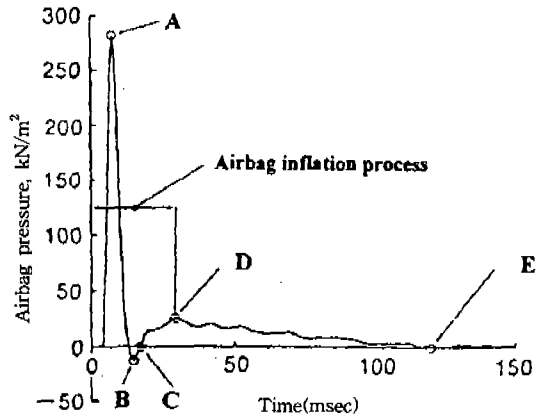


Fig.3 Typical airbag pressure waveform

이상 과도하게 거동하기 전에 완전하게 전개되어야 한다. 따라서 에어백을 작동시키기 위해서는 적절한 기준이 필요하며 대표적으로 125mm~30msec 기준(OPC; Occupant Performance Criteria)이 사용된다.<sup>17)</sup> 125mm~30msec 기준에서 에어백이 완전히 전개되는 시간인 30msec는 승객이 차량 충돌후 앞으로 125mm 이동하기 전에 에어백은 완전히 전개되어져야 하고 승객보호를 시작할 시간대이다. 이러한 에어백의 전개특성은 안전장치의 효과적인 기능 발휘와 에어백 인플레이터의 정확한 가스 분출시간대가 매우 중요하게 작용한다. Fig.4는 차량 충돌시 운전자를 보호하기 위한 운전석 에어백단품으로 인플레이터(Inflator), 커버(Cover), 백(Bag, cushion), 마운팅플레이트(Mounting plate), 리테이너링(Retainer ring) 등으로 구성된다. Fig.5는 운전석 에어백에 대한 유한요소해석모델로서,

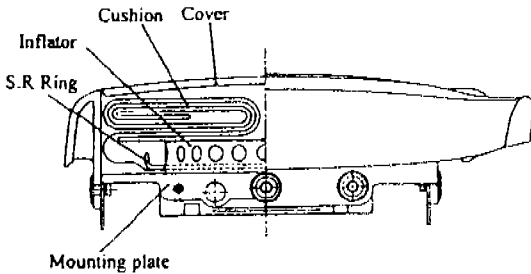


Fig.4 Driver side airbag module

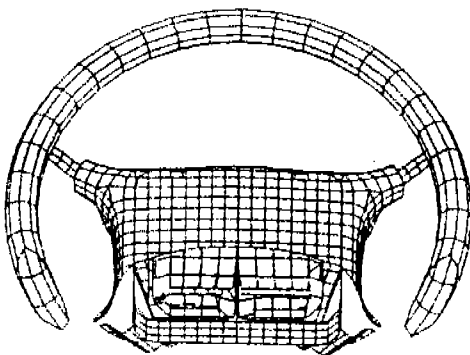


Fig.5 A finite element model of driver side airbag

에어백 전개 시뮬레이션을 위하여 에어백의 커버와 쿠션, 운전대(Steering wheel)를 모델링하였다. 마운팅 플레이트는 해석에 소요되는 시간의 절감을 위하여 강체벽(Rigid wall)으로 처리하여 쿠션의 반동면을 정의하였다. 에어백 커버는 탄소성 셸요소(Elastic-plastic shell element)를 이용하였으며, 에어백의 압력에 의해서 찢어지는 에어백 커버의 홈분리대(Tear seam)는 리벳(Rivet) 요소를 사용하여 허용응력 이상에서 끊어지도록 정의했다. 에어백 쿠션은 다층 멤브레인(Layered membrane) 요소를 사용하였으며, 각각  $-45^\circ$ ,  $45^\circ$ 를 이루는 레이어와 등방성의 코팅층으로 정의하여 윗판넬(Upper panel)과 아랫판넬(Lower panel)을 모델링하였다. 에어백의 전개 후 쿠션의 형태를 유지하고 백슬랙(Bag slack)을 줄임으로 쿠션과 운전자의 백슬랩(Bag slap)을 방지하는데 중요한 역할을 하는 테더(Tether)는 비선형바(Non-linear bar) 요소를 사용하였다. 에어백 전개를 위해서 사용된 인플레이터의 질량흐름률은 인플레이터의 탱크시험(Inflator tank test)에 의해서 구해졌으며, Fig.6과 같이 4가지 인플레이터에 대해서 정의했으며 사용된 가스는  $N_2$ 이다. Fig.7은 에어백 쿠션을 접는 과정으로 쿠션은 필연적으로 초기

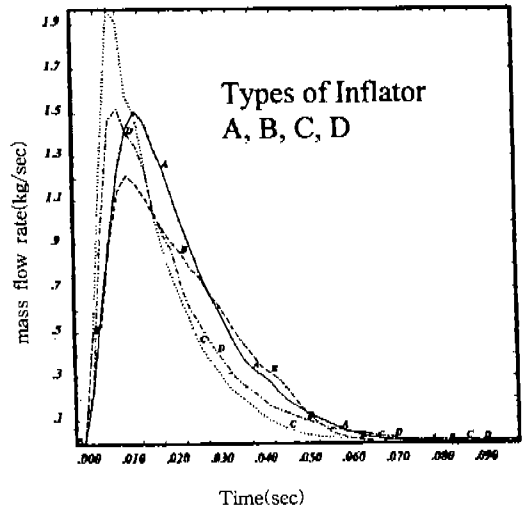


Fig.6 Mass flow rates of 4 types of inflators

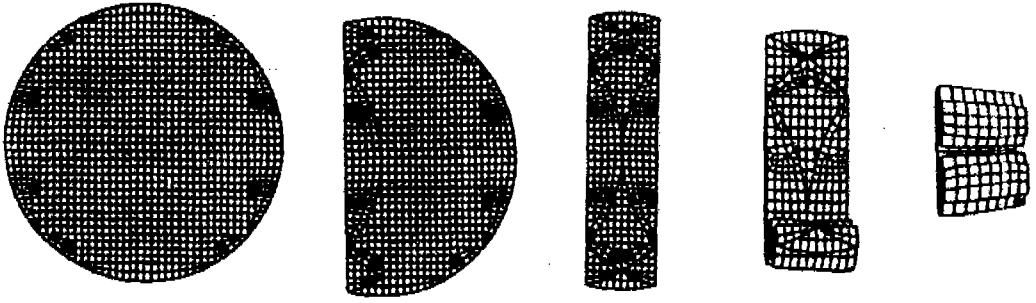
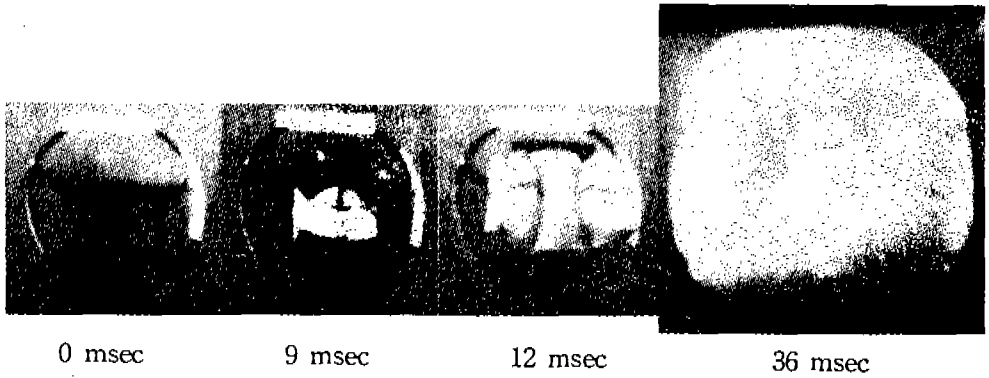
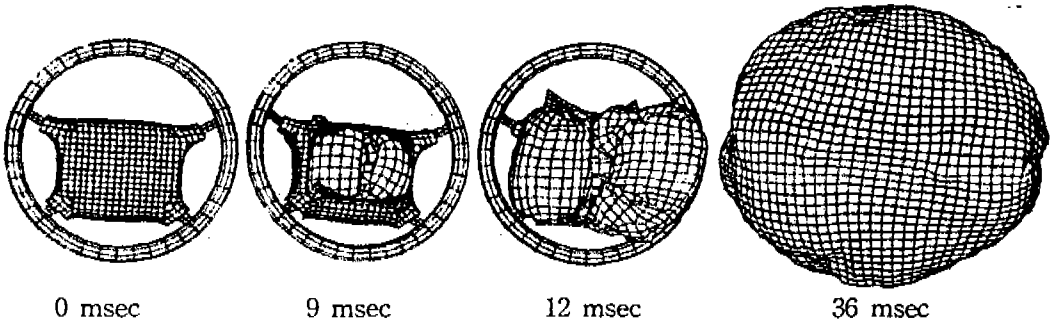


Fig.7 Folding process of driver side airbag



(a) Test



(b) Simulation

Fig.8 Inflation process of driver side airbag - test vs. simulation

침투(Initial penetration)가 발생하게 되므로 각 폴딩레이어(Folding layers) 간에 적절한 간격을 유지시켜 주어야 한다. Fig.8은 Fig.6의 질량 흐름률 A에 대해서 운전석 에어백에 대한 시뮬레이션과 시험에 대한 전개과정을 나타낸다. 복잡하게 접혀진 에어백 쿠션의 전개과정에서 쿠

션의 정확한 형상을 표현하기 위해서 PAM CRASH에서 제공되는 "Initial metric" 옵션을 사용하였다.<sup>18-19)</sup> Fig.9는 운전석 에어백의 압력 파형을 보여준다. 1차 피크 압력 이후 시험에서, 백은 운동에너지에 의해 급격히 전방으로 이동함에 따라서 백내의 순간적인 와류가 발생하여

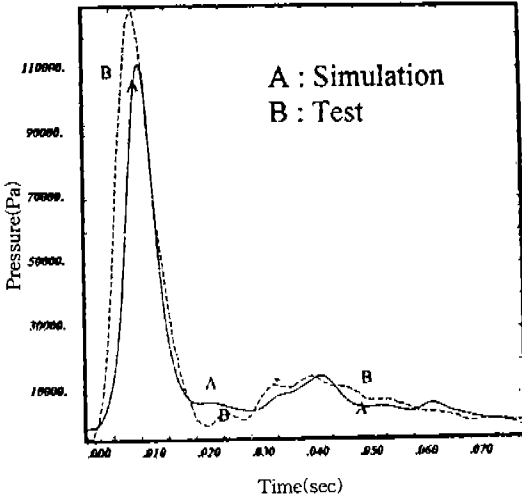


Fig.9 Pressure waveform of airbag

백내의 압력차가 매우 심해져 대기압 이하로 떨어지며, 또한 압력측정기구의 측정방법이나 위치에 따라서도 차이가 난다. 그러나 해석모델에서는 백내의 압력이 균일하다고 가정하고 있어, 거동양상과 백내 압력파형이 시험치와 차이가 난다. 그러나 2차 피크 시간대와 에어백의 전개과정에 있어서는 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 보다 정확한 해석을 위해서는 인플레이터의 가스젯(Gas jet)<sup>19)</sup> 정의를 고려해야 하겠다.

#### 4. 헤드폼 충격해석(Head form impact simulation)

헤드폼 충격해석(Head form impact simulation)의 유한요소모델은 접혀진 쿠션과 커버의 흠분리대의 모델을 포함하는 운전석 에어백 단품과 운전대, 머리모양의 강체모델로 구성되며, 헤드폼 충격에 대한 법규 ECE R21에 적용하여 모델링하였다. 실제 법규상에 사용되는 직경 168mm 반구대신 사람머리모양의 헤드폼을 임의로 사용했으며, 강체(Rigid body)로 정의된 헤드폼은 자중 6.8kg, 충격속도 6.67m/sec로 전개되는 에어백과 충돌을 일으키도록 모델링하였다. 초기 모델에서 헤드폼과 에어백과의 거리는 OPC 표준을 사용하여 산정하였다. Fig.10은 헤드폼 충

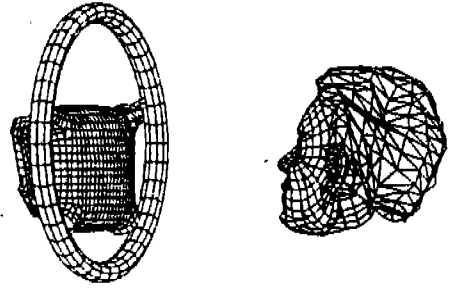


Fig.10 F.E. model of head form, airbag module, and S/wheel

격에 사용되는 유한요소 해석모델을 나타내며, Fig.11은 인플레이터 A에 대해서 전개되는 에어백과 헤드폼과의 충돌 과정을 시간에 따라 보여주고 있다.

Fig.12, 13은 헤드폼의 가속파형과 에너지 흡수성을 나타낸다. 해석결과는 ECE R21 법규에 제시된 규정 값을 기준으로 적정성 여부를 판단하였으며, 그 기준은 Table 2에 나타내었다. 그러나 위와 같은 기준은 일반적인 기준이며, 종합적인 판단은 쿠션과 헤드폼의 충격력, 이동거리, 쿠션내의 압력파형 등 전반적인 승객보호관점에서 안전장치나 그 외 관련 부품에 대해서도 충분히 고려하여 조심스럽게 결정되어야 할 것이다.

Table 3은 각각 4가지 형태의 인플레이터에 대해서 헤드폼의 가속도와 이동거리, 에너지 흡

Table 2 ECE R21 regulation

SPECIFICATION	LIMITATION
a (3msec)	< 80G
a (max)	< 120G

Table 3 Characteristic of types of inflator

Type	Specification			
	a(3msec)	a(max)	Distance	Energy absorp.
A	26.7G	35.6G	43.6cm	185Nm
B	32.2G	35.8G	46.1cm	178Nm
C	20.2G	25.7G	48.4cm	159Nm
D	27.9G	27.9G	48.3cm	165N,

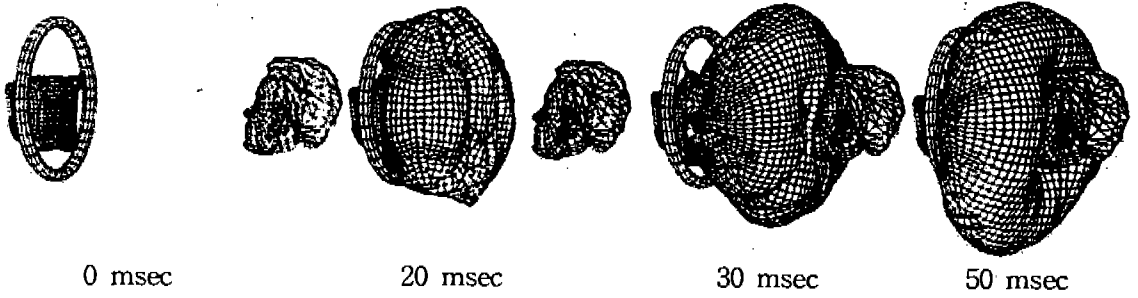


Fig.11 Inflation process of head form simulation

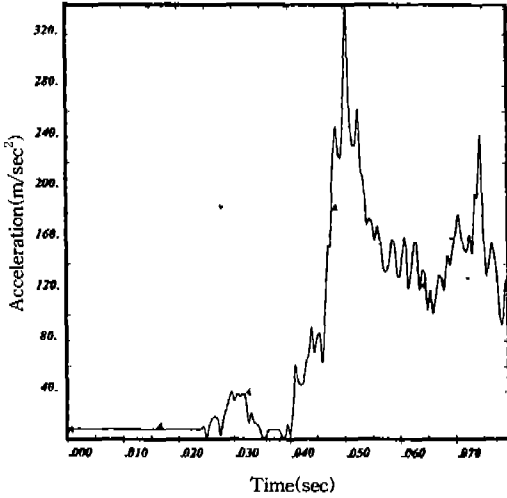


Fig.12 Acceleration waveform of head form

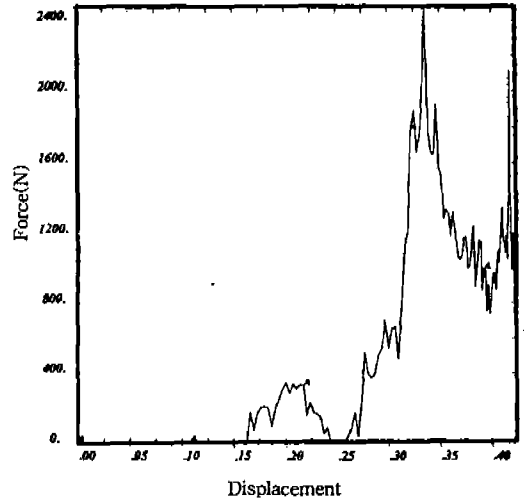


Fig.13 Energy absorption of head form

수성을 종합적으로 보여주고 있다. 각 4가지 형태의 인플레이터는 모두 ECE R21 법규를 충분히 만족하며 인플레이터 A가 에너지 흡수특성, 이동거리, a(3 msec), a(max)에서 가장 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

### 5. 승객거동해석(Analysis of occupant behaviour in sled test)

대차시험(Sled test)은 자동차의 정면 충돌시 승객의 거동과 승객상해를 평가하기 위해 고정벽 시험(Barrier test)을 대신하여 실시되며, 실차와 유사한 상황에서 안전관련 장치의 수행과 최적의 비용, 승객거동해석에 대한 변수산출이

주목적이다. 승객을 포함한 복잡한 수치해석은 모든 승객구속장치의 입증된 입력자료를 근거로 하여야만 성공적으로 수행될 수 있으며, 각종 차량내장재 및 승객안전 구속보호장치(Airbag, kneebolster, seat, windshield, floor panel, steering system, seat belt, roof etc.)가 포함된다.

Hybrid III 더미는 안전벨트에 구속된 상태로 운전석에 장착되며 승객을 대신하여 거동해석과 상해치를 산출하게 된다. 시험을 근거로한 가속도/속도 경계조건과 힘-변형(Force-deflection) 특성이 조향장치와 대차몸체(Sled body)에 대해서 실제차와 유사하게 적용된다. 에어백 모델에 사용되는 인플레이터 모델은 위 두 과정에서 채



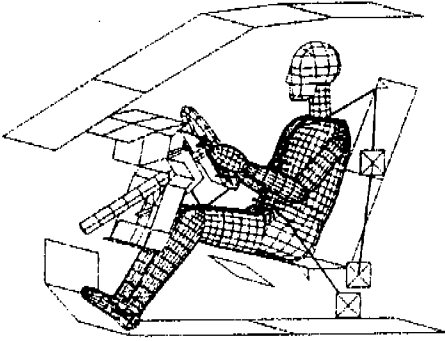


Fig.14 A finite element model of sled test

택된 A형이 사용되었다. Fig.14는 대차해석(Sled simulation)에 사용되는 유한요소모델이며, Fig. 15는 시간에 대한 승객거동해석을 보여준다. 승객과 에어백과의 접촉은 에어백 전개후 25msec에서 발생하며 최대가슴 G값은 56.5msec에서 48.7G, 머리상해치(HIC : Head Injury Criterion)는 49.5~85.8msec에서 541, 골반(Pelvis)의 최대 가속도는 61msec에서 51.7G로 FMVSS 208 범규와 비교하여 만족스럽게 나타난다. Fig.16은 대차시험해석에서 승객의 머리, 가슴, 골반의 가속도를 나타내며, 각각 시험값과 비교하여 매우 잘 일치되는 양상을 보인다.

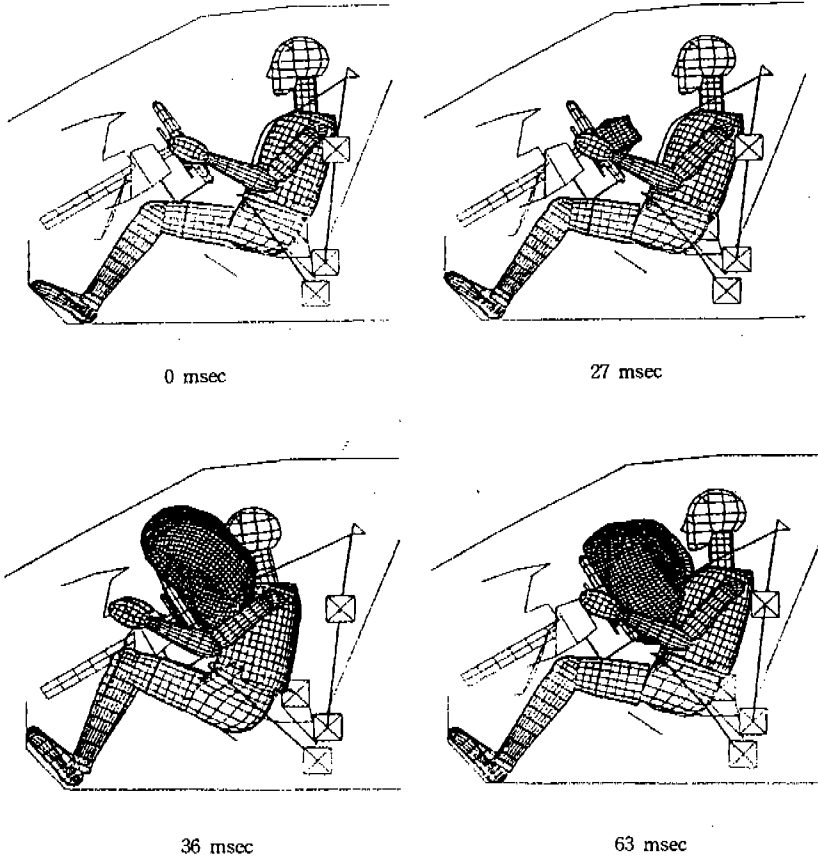
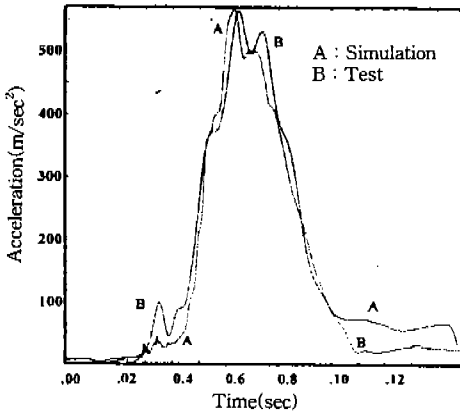
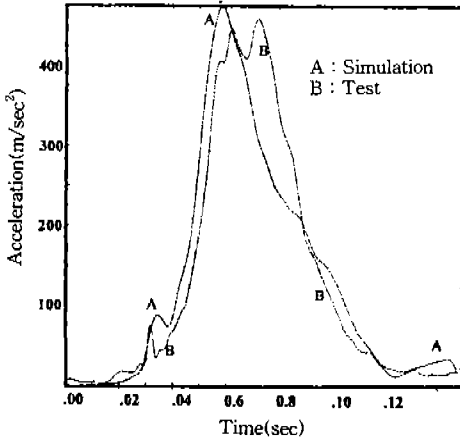


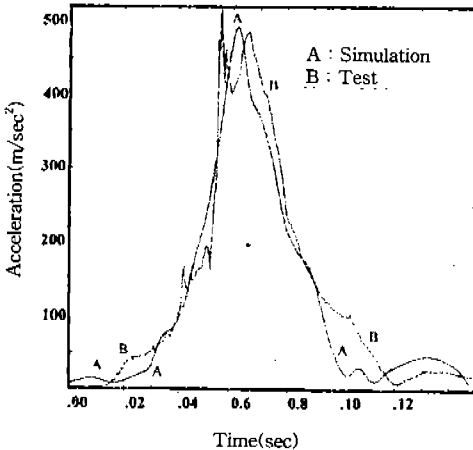
Fig.15 Occupant behaviors in sled test



(a) Head



(b) Chest



(c) Pelvis

Fig.16 Acceleration of head, chest and pelvis in sled test simulation

## 6. 결 론

본 연구에서는 에어백 단품의 전개과정에 대한 유한요소해석과 시험을 동시에 수행하였으며, 향후 에어백 단품 설계에 유용하게 사용될 결과를 제공하였으며, 해석과 시험은 각각 에어백 전개과정 해석, 헤드폼 충격해석, 대차 시험해석의 3단계로 구성하였다.

- 1) 에어백의 전개과정해석에서 정확한 쿠션의 형상을 묘사하기 위해서 집혀진 에어백을 모델링 하였다.
- 2) 최적의 인플레이터(Inflator)를 선정하기 위해서, 4가지 형태의 질량흐름률에 대한 에어백의 전개과정, 변형양상, 백내 압력과 형을 해석하였으며, 시험결과와 비교 분석 하였다.
- 3) 쿠션의 에너지 흡수특성, 헤드폼의 가속과 형을 평가하기 위해서 전개되는 에어백 단품과 헤드폼과의 충격해석을 수행하였고, ECE R21법규와 비교하여 충분히 만족스러운 결과를 보였다.
- 4) 정면충돌에서 승객의 거동과 상해를 선정하기 위해 대차시험해석을 수행하였다. 해석결과는 시험결과와 비교하여 좋은 일치양상을 보였으며, FMVSS 208법규와 비교하여 매우 만족스러운 결과를 보였다.
- 5) 본 논문은 에어백 시스템의 개발과정을 3 단계로 구분하여 제시하였으며, 이러한 과정들은 에어백 설계와 에어백 모듈의 수행성 향상에 대한 지표로서 유용하게 제공될 것이다.
- 6) 향후 연구과제로, 대차시험에 있어 승객거동에 영향을 미치는 에어백 단품의 설계변수에 대하여 변수연구를 수행하고 그 영향을 분석 및 평가하고자 한다.

## 참 고 문 헌

1. Otte, D., "Review of the Airbag Effectiveness in Real Life Accidents Demands for Positioning and Optimal De-

- ployment of Airbag Systems", SAE paper No. 952701.
2. Ynag, K. H. and Li, Y. Q., "Effects of the Airbag Folding Pattern in Out-of-Position Frontal Impact with an Airbag", 1993 ASME winter Annual Meeting, AMD-Vol 169/BED-Vol. 25, pp 255~267.
  3. Wawa, C. J., Chandra, J. S., and Verma, M. K., "Implementation and Validation of a Finite Element Approach to simulate Occupant Crashes with Airbag: Part 1-Airbag model", 1993 ASME winter Annual Meeting, AMD-Vol 169 /BED-Vol. 25, pp 269-286.
  4. Wawa, H. J., Chandra, J. S., and Mukul K. Verma, "Implementation and Validation of a Finite Element Approach to simulate Occupant Crashes with Airbag: Part 2-Airbag Coupling with crash victim", 1993 ASME winter Annual Meeting, AMD-Vol 169/BED-Vol. 25, pp 287~309.
  5. Nieboer, J. J., Wismans, J. and Coo, P. J. A. de, "Airbag Modeling Techniques", SAE paper No. 902322.
  6. Khalil, T. B., Hallquist, R. J. and Stillman, D. W., "Development of a 3-Dimensional Finite Element Model of Air bag Deployment and Interactions with an Occupant Using DYNA3D", SAE paper No. 912906.
  7. Lundell, B., Evarsson, M., Komer, L. J., J. and Pilhal, S., "SIPSBAG - The Seat-Mounted Side Impact Protection", SAE paper No. 950878.
  8. Deng, Yih-Charng, "How Air Bags and Seat Belts Work Together in Frontal Crashes", SAE paper No. 952702.
  9. Malczyk, A. and Adomeit, H. D., "The Airbag Folding Pattern as a Means for Injury Reduction of Out-of-Position Occupants", SAE paper No. 952704.
  10. Lin, T. C., Wawa, C. and Khalil, t. B., "Evaluation of the Hybrid III Dummy Interactions with Airbag in Frontal Crash by Finite Element Simulation", SAE paper No. 952705.
  11. Chou, C. C. and Gerald, W. N., "Analytical Studies of the Head Injury Criterion(HIC)", SAE paper No. 740082.
  12. Chou, C. C., Howell, R. J. and Chang, B. Y., "A Review and Evaluation of Various HIC Algorithms", SAE paper No. 880656.
  13. Mertz, H. J. and Lrwin, A. L., "Brain Injury Risk Assessment of Frontal Crash Test Result", SAE paper No. 941056.
  14. 김현영, 이상근, 신윤재, "운전석 및 조수석 에어백 단품의 유한요소 모델링과 전개과정 해석", 한국자동차공학회논문집, Volume 4, Number 6, November, 1996, pp. 236~246, SAE No. 96370137.
  15. R. Hoffman, A. K. Pickett, D. Ulrich, E. Haug, D. Lasry and J. Clinkemillie, "A Finite Element Approach to Occupant Simulation: The PAM-CRASH Airbag Model", SAE Paper No. 890754.
  16. Omura, H. and Shimamura, M., "Analysis of Airbag Inflation", SAE paper No. 890192.
  17. Shokoohi, F., "Airbag Sensor Fire Time-Occupant Performance Criterion", SAE paper No. 950873.
  18. Lasry, D., Hoffmann, R., Protard, J.-B., "Numerical Simulation of Fully Folded Airbags and Their Interaction with Occupants with PAM-SAFE", the 1991, SAE Annual Congress.
  19. "PAM-CRASH user's manual", v95.