

# 실험계획법을 이용한 측면 에어백 인플레이터 최적 설계

## Optimizing Design of Side Airbag Inflator using DOE Method

김병우<sup>1,✉</sup>, 허진<sup>1</sup>  
Byeong Woo Kim<sup>1,✉</sup> and Jin Hur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 울산대학교 전기공학부 (Department of Electrical Engineering, Ulsan Univ.)  
✉ Corresponding author : bywokim@ulsan.ac.kr, Tel: 052-259-1282

Manuscript received: 2011.3.23 / Accepted: 2011.6.27

*For side airbag, the pipe type inflators have been wide used while the disk type inflators have been used for front airbag. For helping to prevent injury and death the airbag inflator system should be design with great care. The present study deal with optimizing the design of side airbag inflator by finite element analysis and design of experiment method. An optimization process was integrated to determine the optimum design variable values related to the side airbag inflator. Free shape optimization method has been carried out to find a optimal shape on an side airbag inflator model. Optimization of the air bag inflator was successfully developed using Sharpe optimization was carried out to find a new geometry. The improved results compared to the base design specification were achieved from design of experiment and optimization.*

Key Words: Side-Airbag Inflator (측면 에어백 인플레이터), Design of Experiment (실험 설계), Finite Element Analysis (유한요소해석), Optimization (최적화)

### 기호설명

DOE = design of experiment  
FEA = finite element analysis  
RSA = response surface analysis  
CCD = central composite design  
RA = regression analysis  
L = length  
D = diameter  
T = thickness  
MCS = maximum charging-state stress  
MOS = maximum operating-state stress  
MBP = minimum burst pressure  
W = weight  
GCV = gas chamber volume

### 1. 서론

자동차 안전에 대한 중요성이 증대되면서 에어백 시스템에 대한 장착이 보편화되고 있다. 자동차 에어백 시스템에서 가장 중요한 역할을 수행하는 것으로서는 인플레이터(Inflator)를 꼽을 수 있다. 자동차 인플레이터는 장착 위치에 따라서 전면용과 측면용으로 대별할 수 있다. 국내에서 양산되고 있는 에어백 인플레이터는 미국 등의 선진국에서 제공한 기술에 생산기술을 접목한 것이기 때문에 독자적인 설계기술을 확보하지 못하고 있다. 국내에서 진행된 자동차 에어백 연구는 대부분 시스템 및 제어장치/센서 등에 집중되어 있다. 그동안 국내에서 자동차 에어백 인플레이터와 관련하여 연구를 진행한 것은 대부분 전면용과 관련된 것이었다.<sup>1-3</sup> 국외인 경우, 전면 에어백에 대한 다

양한 연구를 진행하여 단순한 제품설계가 아닌 표준화된 설계 방법을 도입하여 운영하고 있다.<sup>4</sup> 그러나, 측면 인플레이터인 경우에는 국내외를 막론하고 매우 제한적으로 실시되고 있고 특정 사양에 대하여 일부 진행되고 있을 뿐이다. 특히, 국내인 경우에는 측면용 에어백에 적합한 인플레이터의 설계 및 제작에 대한 연구가 전무한 실정이다.<sup>5</sup> 측면용 에어백 인플레이터를 설계하기 위해서는 다양한 이론해석과 실험을 통한 설계인자 도출이 요구된다. 또한, 다양한 자동차 사양에 적합한 측면 인플레이터를 효과적으로 설계하기 위해서는 DOE와 FEA를 활용한 설계 최적화 및 자동화 방안 마련이 필수적이다.

이에 본 연구에서는 DOE(Design of experiment)와 FEA(Finite element analysis)를 이용하여 측면 에어백용 인플레이터의 핵심부품인 용기의 설계 최적화 방안을 모색하였다.

## 2. 설계인자 선정

본 연구에서는 완전요인 배치법을 통하여 실험인자와 반응인자에 대한 주요 효과와 교호작용을 파악하였다.

다음에는 요인설계 분석을 통하여 실험인자와 반응인자 간의 수학적 모델을 유도하였다. 수학적 모델과 최적화 도구를 이용하여 최적조건에 대한 반응인자의 예상 값을 도출하였다. 또한, 설계 최적조건에 대한 실제유한요소해석을 실시하여 실험 계획법으로 도출된 반응인자의 예상 값과 해석 결과를 비교하여 수학적 모델의 신뢰성을 검증하였다. 완전요인 배치법의 신뢰성에 대한 비교분석을 위하여 반응표면 분석법에서 중심합성계획법으로 추가적인 실험과 유한요소해석을 실시하였다. 또한, 이를 기반으로 하는 반응표면의 설계분석을 실시하여 수학적 모델을 도출하였다. 그리고 완전요인배치법과 마찬가지로 반응 최적화 도구를 이용하여 설계 최적조건에 대한 예상 값을 도출하고, 그 지점에 대한 실제 유한요소해석을 실시하여 결과를 비교하였다.

마지막으로 완전요인 배치법과 중심합성 계획법의 결과를 비교 분석하여 인플레이터 용기 설계 최적화에 적합한 실험 계획법을 선정하고, 그 실험 계획법에서 도출된 최적조건을 통해 설계 최적화를 실시하였다.

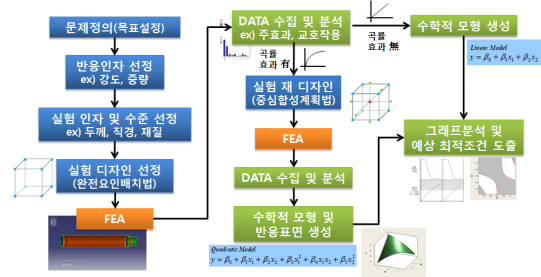


Fig. 1 Procedure of optimal design

## 2.1 반응인자 선정

최적 설계단계에서 실험계획법을 적용하는 경우, 실험인자는 설계하는 대상의 성능에 영향을 미치는 설계 변수로 작용하고 반응인자는 주요 목표로 정하는 성능 변수로 작용된다. 기존에 다양한 설계 경험이 있는 경우에는 주요 설계변수와 성능변수를 결정하기 쉬우나 처음 설계단계에서는 변수 결정이 쉽지 않게 된다. 이때 가장 손쉽게 접근할 수 있으면서 효과적인 방법이 기존에 적용되고 있는 제품을 분석하는 것이다.

측면 에어백용 인플레이터 용기에서 가장 중요하게 요구되는 성능변수는 강도, 무게, 가스 챔버 체적 이라고 할 수 있다. 금번 연구대상 인플레이터가 장착될 측면 에어백과 유사한 에어백 시스템에 장착되는 외국산 인플레이터를 분석하여 기준 수치들을 유추하였다.

먼저, 강도특성을 유추하기 위하여 일반적으로 에어백에 적용되고 있는 상시 충전 압력 300bar, 작동 시 최대 압력 650bar 를 하중 조건으로 하여 Static, Dynamic Implicit 해석을 실시하였다. 이 같은 응력 조건은 인플레이터 안전기준이라 할 수 있는 북미 NCAP 및 ISO 12097 규격을 만족시키기 위한 기준 응력으로 설정한 것이다. 그 결과 상시 충전 시는 190.8 MPa, 작동 시에는 413.8 MPa 의 최대 응력이 작용하는 것을 알 수 있었다. 이 최대 응력은 압력용기에 사용된 재질 1510 연강의 항복강도 930MPa 의 44.5%에 해당하는 값이다. 그래서 이 결과를 기준으로 FEA의 오차를 고려하여 상시 최대 응력의 기준은 200MPa 이하, 작동 시 최대 응력의 기준은 420MPa 이하로 선정하였다.

인플레이터 전체의 평균 무게는 284.5g 임을 확인하였고 전체 인플레이터 무게에서 용기가 차지하는 비율이 38.4% 이기 때문에 용기 자체의 무게는 109.2g 를 나타냈다.

Table 1 Response factor of side inflator

Response factor	Reference
Normal max stress	200MPa under
Operating max stress	420MPa under
Burst pressure	1625Bar over

본 연구에서는 부품에 대한 경량화 요구가 크고, 다른 부품이나 요인에 의한 인플레이터의 총 무게증가 가능성을 고려하여 목표 무게 기준은 109.2g 의 90% 수준인 100g 이하로 선정하였다.

Table 2 Inflater specification of conventional side inflator

Model	D [mm]	L [mm]	W [mm]	CG Mole
A	25	167	242	0.57
B-1	25	150	250	0.32
B-2	30	216	450	0.67
B-3	25	185	300	0.67
C-1	25	167	275	0.65
C-2	21	157	190	0.43
Average	25.2	173.7	284.5	0.55

질소 0.55 몰 상태에서 압력 300bar, 온도 20℃로 상시 충전되어 있는 상태에서 이를 이상기체로 가정하면 가스 챔버 체적은 44.7cc 가 된다. 계산의 오차를 고려 해서 가스 챔버 체적의 목표기준은 45cc 이상으로 선정하였다.

2.2 실험인자 선정 및 계획

만약 인플레이터의 형상이 동일하게 유지된다면 반응인자인 강도와 무게, 가스 챔버 체적에 영향을 많이 미칠 것으로 예상되는 설계변수는 직경, 길이, 두께라 할 수 있다.

Table 2 의 데이터를 기반으로 하여 회기 분석을 실시하였는데, 이를 통하여 도출된 수학적 관계는 다음 식과 같다.

$$D = 0.0238 W + 18.91 \quad (1)$$

$$L = 0.238 W + 46.8 \text{ Mole} + 77.71 \quad (2)$$

$$W = 4.01 L - 188.99 \text{ Mole} - 297.915 \quad (3)$$

반응인자에 영향을 줄 것으로 예상되는 실험인자의 종류와 범위는 Table 1 과 식 (1)~(3)에 근거하여 선정하였다. Fig. 2 에 표시되어 있는 것처럼 실험인자

범위 종류는 용기의 가스 충전부 외경(D), 길이(L), 두께(T)이고 실험인자 범위는 표시된 치수범위이다. 위에서 정해진 실험인자의 종류와 범위를 토대로 MINITAB 을 이용해서 실험 계획법의 중심합성 계획법으로 실험을 설계하였다.

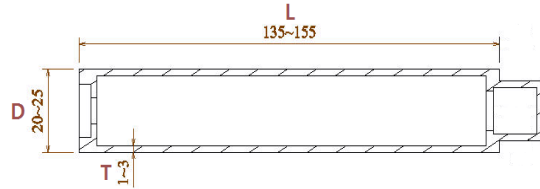


Fig. 2 Inflater Vessel Dimension

Table 3 Experimental factors of central composite design method

Order	Length	Diameter	Thickness
1	135	20.0	1
2	155	20.0	1
3	135	25.0	1
4	155	25.0	1
5	135	20.0	3
6	155	20.0	3
7	135	25.0	3
8	155	25.0	3
9	135	22.5	2
10	155	22.5	2

3. FEA 이론 해석

2 장에서 시도한 실험계획법에 의거하여 도출된 반응 및 실험인자의 타당성을 규명하기 위하여 인플레이터에 대한 유한요소 해석을 실시하였다. 자동차 인플레이터에 작용되는 압력에 의한 파단은 소성변형까지 전체 과정을 해석하여야 하기 때문에 비선형 해석이 가능한 ABAQUS 를 이용한 모델링과 해석을 실시하였다.

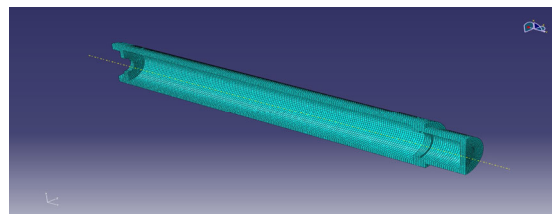


Fig. 3 Modeling of Inflater Vessel

본 연구에서는 유한요소해석에 적용한 모델을 축 대칭 구조로 하였고 단면에 Symmetry, Antisymmetry, Encastre ZSYMM(U<sub>3</sub>=UR<sub>1</sub>=UR<sub>2</sub>=0) 조건을 부여하였다. 또한, 인플레이터에 대한 구속은 실제 파단에서 고정이 되는 최 말단을 U<sub>1</sub>=U<sub>2</sub>=U<sub>3</sub>=0로 처리하였다. 하중조건은 상시 충전, 작동 상태, 극한 파단 과 같은 세가지 모드를 고려하였다. 본 연구에서 적용한 인플레이터 용기의 재질은 1510 계열의 연강을 사용하였다.

Table 4 FEA Modeling method

Element Type/Shape	C3D8R / Hex
Technique	Sweep
Algorithm	Medial axis - Minimize the mesh transition
Nodes	14742 ~ 30064
Elements	7999 ~ 21685

Table 5 FEA Material Properties

Density [ton/mm <sup>3</sup> ]	7.85e-009
Young's Modulus [MPa]	205,000
Poisson's Ratio	0.3
Yield / Ultimate strength [MPa]	930 / 1000
Elongation at Break [%]	9

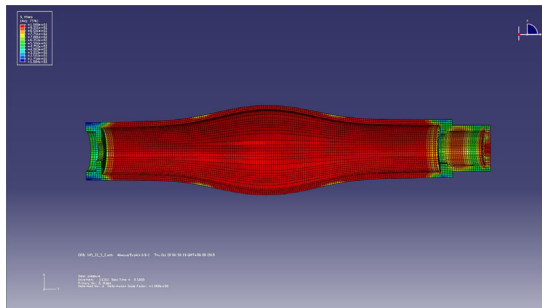


Fig. 4 Results of Dynamic Explicit

#### 4. 해석결과 및 고찰

##### 4.1 완전요인 배치법

인플레이터에 대한 해석 모델을 기반으로 하여 상시 충전 압력에 대한 정적 해석, 작동 시 최대 압력에 대한 Dynamic Implicit 해석, 파단 압력을 유추하기 위한 Dynamic Explicit 해석 결과를 Table 4 와 같이 얻었다.

Table 6 FEA results of full factorial design method

	Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Normal Stress (Mpa)	Oper Stress (MPa)	Burst Pressure (bar)	Weight(g)	GC Volume (cc)
1	135	20	1	273.1	5	112	4	31.68
2	155	20	1	273.1	5	112	4	36.77
3	135	25	1	333.9	7	891	5	51.73
4	155	25	1	333.9	7	891	6	60.04
5	135	20	3	93.7	2	305	9	19.17
6	155	20	3	93.7	2	305	1	22.24
7	135	25	3	151.2	2	292	1	35.30
8	155	25	3	151.2	2	292	1	40.97
9	145	22.	2	151.8	3	209	8	36.15

상시 응력에 대한 영향도는 두께가 가장 크게 작용하였고 두께 증가에 비례하여 작용 응력이 감소하는 경향을 나타냈다. 반면에 직경 크기가 증가할수록 비례적으로 응력이 증가하였다. 이와 반면에 인플레이터의 길이는 주요 인자로 작용하지 못하였다. 이는 인플레이터에 적용되는 압력이 길이 방향보다는 원주 방향으로 작용되는 것에 기인하는 현상이다. 다시 말하자면, 실제 인플레이터에 적용 가능한 일정 길이 범위안에서 인플레이터에 작용하는 압력은 길이 변화보다는 직경과 두께 변화에 무관하게 작용하는 설계변수이다.

작동 응력에 대한 주효과는 상시 응력의 결과가 보여주는 성향과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이 같은 현상을 통하여, 동일 대상의 인플레이터에서 작동 응력에 의한 설계 영향과 상시 응력에 의한 설계 영향은 유사함을 확인할 수 있었다. 그러나, 파단압력의 주효과는 앞서 언급한 응력 주효과와 정반대 성향을 나타냈다. 이 같은 현상은 인플레이터의 파단이 발생하는 시점에 소성변화에 의한 비선형 변화에 기인한다고 판단된다.

인플레이터 최적 설계에 미치는 주요 설계인자를 확인한 후에 반응인자와 실험인자간의 수학적 관계를 다음 식과 같이 도출하였다.

$$\text{Normal Stress} = 11.83 D - 90.525 T + 121.053 \quad (4)$$

$$\text{Operating Stress} = 36.42 D + 34.675 T - 10.62 D * T + 18.611 \quad (5)$$

$$\text{Burst Pressure} = -57.65 D + 752.5 T + 10.65 D * T + 1323.54 \quad (6)$$

$$\text{Weight} = 0.034 + 1.455 D - 39.79 T + 0.229 L * T + 1.655 D * T - 14.7 \quad (7)$$

$$\text{GC Volume} = 0.277 L + 4.755 D + 1.7 T - 0.423 D * T - 94.365 \quad (8)$$

상기 관계식과 반응 최적화 범위를 활용하여 최적 설계안을 도출하였다. 상시 응력의 상한 값은 작동 시 응력 목표값으로 설정하였고 작동 시 응력의 상한 값은 재료의 항복강도 930MP 로 정하여 탄성영역 내의 응력만 유효하도록 하였다. 그리고, 파단압력 하한 값은 작동 시 최대압력 650bar 의 2 배인 1300bar 로 설정하였다. 무게 상한 값의 경우, 기존 외국산 유사 제품들의 평균치 110g 로 정하여 평균 값 이하만 유효하도록 하였다. GC 체적의 하한 값도 기존 외국산 유사 제품들의 평균 값인 37cc 이상만 유효하도록 하였다.

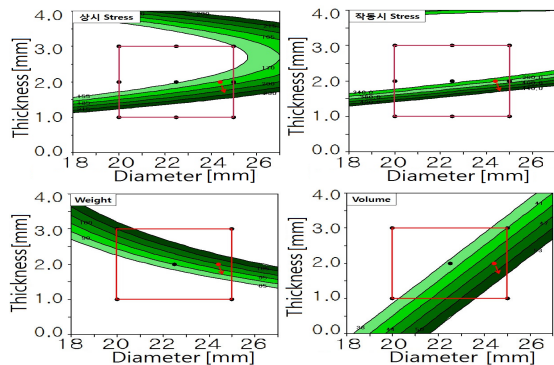


Fig. 5 Results of full factorial design method

Fig. 5 는 완전요인 배치법에 의해서 도출된 부하 작용조건과 설계사양의 관계를 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이, 인플레이터의 길이변화는 설계사양에 큰 영향을 끼치지 않기 때문에 두께와 직경을 변수로 하여 상관관계를 나타냈다.

완전요인 배치법의 등고선 그래프를 활용하여 강도와 체적에 거의 변화가 없으면서 무게를 감소시킬 수 있는 두께와 직경의 조정 방향(적색 화살표)을 찾을 수 있다. 등고선 그래프를 활용한 직경과 두께의 조정을 통하여 최종적으로 도출한 완전

요인 배치법의 최적 설계는 길이 150mm, 직경 24.4mm, 두께 2.1mm 가 되었다.

Table 7 Error ratio using full factorial design method

	Normal Stres. [MPa]	Oper. Stres. [MPa]	Burst Pres. [Bar]	Weight [g]	GC Vol. [cc]
Target	200 under	420 under	1625 over	100 under	45 over
DOE	219.6	435.9	2043	99.2	45.1
FEA	156.1	337.7	2018	101.0	44.7
Error	40.7%	29.1%	1.2%	-1.8%	0.9%
FEA-Target	-43.9	-82.3	393	1	-0.3

본 최적 조건을 적용하였을 경우에 상시 및 동작 응력에 대한 오차는 Table 5 에 나타낸 것과 같이 40.7%와 29.1% 로 상당히 크게 발생됨을 알 수 있었다. 이는 수학적 관계식이 선형적으로 표현되어 곡률효과를 반영하지 못한 것에 기인한다.

그러나, 파단압력, 무게, 가스 챔버 체적은 상대적으로 정확성이 우수하였는데, 일부 오차가 발생된 것은 응력관련 인자의 과도설계로 인한 것으로 판단된다.

#### 4.2 중심합성 계획법

완전요인 배치법으로 도출된 수학적 모델은 선형적이기 때문에 곡률효과를 반영하지 못하였다. 이로 인하여 인플레이터에 작용하는 응력에 대한 반응 분야의 오차 가 크게 발생되었다. 이 같은 문제를 해결하기 위하여 차 항의 교호작용까지 파악이 가능한 중심합성 계획법으로 실험을 재설계하고 유한요소해석을 실시하였다.

중심합성 계획법에 의한 결과를 활용하여 반응 표면 분석을 실시한 작용응력의 설계인자와의 수학적 관계 식은 다음과 같았다.

$$\text{Normal Stress} = 10.672 D - 340.71 T + 63.23 T^2 + 340.62 \quad (9)$$

$$\text{Operating Stress} = 12.99 D - 412.406 T + 0.515D + 0.5 D^2 + 111.421 T^2 - 10.62D * T + 630.863 \quad (10)$$

$$\text{Burst Pressure} = -49.96 D + 1390.9 T - 97.5 T^2 + 836.1 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Weight} = & -0.537 L - 2.24 D - 33.196 + T - 1.65T^2 + \\ & 0.0255 L * D + 0.229 L * T + \\ & 1.655 D * T + 62.896 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{GC Volume} = & -0.263 L - 4.23 D + 8.46 T + 0.106 D^2 + \\ & 0.422 T^2 + 0.029 L * D - 0.0583 L * T - \\ & 0.423 D * T - 38.27 \end{aligned} \quad (13)$$

Fig. 6 은 중심합성 계획법으로 도출된 인플레이터 설계인자간의 상관관계를 나타낸 것이다. 완전요인 배치법과 마찬가지로 등고선 그래프를 활용하여 만족도 100%를 가지면서 최대한 여유롭게 무게와 가스 챔버 체적을 갖는 방안을 모색하였다.

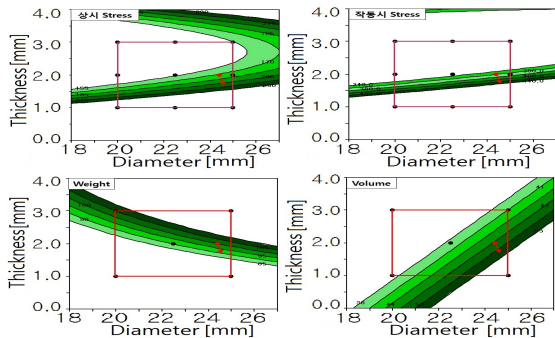


Fig. 6 Results of central composite design method

최대한의 직경과 GC 체적 여유를 갖도록 인플레이터 두께와 직경을 화살표 방향으로 조정하면서 최적 설계인자를 모색하였다. 최적화 그림의 조정을 통하여 최종적으로 도출한 중심합성 계획법에 의한 최적 설계조건은 길이 155mm, 직경 24.5mm, 두께 1.8mm 이다.

또한, 완전요인 분석법과 비교하여 대체로 낮은 오차율을 보이고 있는데, 상시와 동작응력의 오차가 5.6%, 2.9%로서 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 여기서, 파단압력의 에러가 상대적으로 일부 높게 도출된 것은 Dynamic Explicit 해석과 실험인자 조합에 적용된 국부 형상변화가 강도에 영향을 끼쳐서 발생된 것으로 판단된다.

Table 8 Error ratio using central composite design

	Normal Stress [MPa]	Oper. Stress. [MPa]	Burst Pres. [Bar]	Weigh. [g]	GC Vol. [cc]
Target	200 under	420 under	1625 over	100 under	45 over
DOE	193.7	408.9	1800	93.3	49.6
FEA	183.5	397.2	1697	93.4	49.6
Error	5.6%	2.9%	6.1%	-0.1%	0.0%
FEA - Target	-16.5	-22.8	72	-6.6	4.6

### 5. 결론

자동차에 적용되는 측면 인플레이터의 최적 설계를 위하여 완전요인 배치법과 중심합성 계획법을 적용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 자동차 인플레이터 설계단계에서 완전요인 배치법 대비 중심합성 계획법에 의한 설계가 발생 오차가 적고 정확성 향상에 기여함을 확인하였다.
- 2) 중심합성 계획법은 설계인자와 인플레이터 동작 인자의 비선형적인 수학적 상관관계를 나타낼 수 있기 때문에 오차율이 축소됨을 확인하였다.
- 3) 자동차 인플레이터 설계에서 길이변화는 설계 및 성능 및 설계인자에 영향을 끼치지 못하였으나 직경과 두께변화는 인플레이터 성능에 큰 영향을 끼쳤다.

4) 최종적으로 중심합성 계획법을 적용한 자동차 인플레이터의 최적 설계조건은 길이 155mm, 직경 24.5mm, 두께 1.8mm 임을 확인하였다.

본 연구는 자동차 측면 인플레이터 국산화를 위하여 처음으로 시도한 연구로서 실험계획법과 유한요소해석 병행의 정확성과 타당성을 확인할 수 있었다. 향후에는 본 결과를 기반으로 최적의 설계인자를 쉽게 도출할 수 있는 방법 연구가 필요할 것이다.

### 후 기

본 논문은 교육과학기술부 지역혁신인력양성사업과 지식경제부 부품소재기술개발사업 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

## 참고문헌

1. Federal Safety Standards MVSS 208, "Injury criteria for the 49 C FR part 572," National Highway Traffic Safety Administration, 2007.
2. Zucrow, M. J. and Hoffman, J. D., "Gas dynamics," Vol. 1, John Wiley, 1976.
3. Nilson, L., "Simulation of airbag inflation process using a coupled fluid structure approach," Computational Mechanics, Vol. 29, No. 4-5, pp. 289-297, 2002.
4. Hong, C. S., Oh, C. Y. and Lee, D. C., "Development of a Finite Element Model for studying the occupant behavior of a mid size truck with a drive side airbag," J of KSPE, Vol. 17, No. 4, pp. 220-225, 2000.
5. Choi, W. C., Kim, K. H., Ko, H. K., Kim, D. S. and Son, C. K., "A Study on the Passenger Airbag Design Parameters Influencing Child Injury," Trans. of KSAE, Vol. 17, No. 1, pp. 176-181, 2009.