

# 다구찌법을 이용한 자동차 승객 보호 장구의 설계

## Design of Occupant Protection Equipment for Passenger Car Using Taguchi Method

이 권 회\*      주 원 식\*\*      이 주 영\*\*\*  
Lee K.H.      Choo W.S.      Lee J.Y.

### ABSTRACT

---

The design of an occupant protection equipment has been considered as the important process in developing a new car since the crash performance plays an important role on the market. The cost is increased when an unexpected real test is carried out in the proto-design stage. Thus, the exact prediction of a crash performance can reduce the number of full-car test. In this research, the robust design of an airbag system considering the frontal crash is suggested to predict the more reliable responses. On the contrary, most existing researches do not consider the uncertainties. The uncertainties treated in this research are the tolerances of the vent hole, the time to fire and the length of a strap in airbag and the tolerance of the load limiter load in seat belt. The Taguchi method is utilized to determine the robust optimum of each parameter

주요기술용어 : Occupant Protection Equipment(승객보호장구), Taguchi Method(다구찌법), Airbag(에어백), Uncertainties(불확실성)

---

### 1. 서 론

자동차 개발 시 충돌 관련 우수한 성능들은 판매 홍보를 위한 중요한 항목이 되고 있으며 각 자동차 제조 업체에서는 이를 향상시키기 위한 노력을 기울이고 있다. 그러나 점차 신차 개발기간이 단축되고 있어 충돌 성능의 향상을 위해서는 보다 정확한 반응치의 예측이 요구된다.<sup>(1)</sup> 특히 시차설계 단계에서 실차 실험을 대체할 수 있는 전산모사는 이미 필수적인 절차로 수행되고 있으나 아직도 전산모사의 결과는 전산모사 자체 오차 및 불확실성의 존재로 인해 실험결과와의 정확히 일치하지 않는다. 본 연구에서는 승용차의 정면 충돌

---

\* 동아대학교 기계산업시스템공학과 전임강사  
\*\* 동아대학교 기계산업시스템공학과 교수  
\*\*\* 이튼기술 대표

상황에서 전산모사와 실험 시 존재할 수 있는 불확실성을 고려하여 충돌 관련 반응치들을 예측하고 이에 대한 강건설계를 수행하고자 한다.

승용차의 정면충돌해석은 차체의 충돌 관점과 승객거동의 관점에서 접근 할 수 있다. 차체의 충돌을 1차 충돌이라고 하면, 승객거동에 관한 반응치는 2차 충돌의 결과라 할 수 있다. 이러한 충돌 성능을 취급하기 위한 시험 조건 및 기준은 각 나라별로 법규화하여 시행, 관리하고 있다. 법규이외에 충돌 성능을 평가하기 위한 미국, 유럽, 호주 등의 신차평가제도(NCAP, New Car Assessment Program)가 있다.<sup>(2-3)</sup> 이 제도에 의하여 실험을 수행한 후, 대상 차 별로 등급을 부과하여 소비자들에게 공개하고 있다. 따라서 자동차 제조업체들은 충돌 성능을 향상시키기 위하여 차체 및 승객보호장구 설계 시, 여러 설계 기술들을 적용하고 있다.

충돌관련 부품의 설계<sup>(4-5)</sup>의 성능은 실차 실험을 통해 얻어지는 것이 일반적이지만, 개발단계에서의 시작차 실험은 고가이어서 이를 대체하기 위한 전산모사 기술이 발전되어 왔다. 그러나 전산모사 시, 각 설계변수 및 인자들이 갖고 있는 불확실성은 고려되지 않고 있으며 이에 대한 성능이 민감할 경우, 예측된 성능은 큰 오차를 수반할 수밖에 없다. 주로 전산모사를 통한 정면충돌 해석은 1차 충돌의 경우, 유한요소법을 이용하여 수행하며, 2차 충돌인 경우에는 다물체 동역학을 이용하여 수행한다.

본 연구에서는 2차 충돌을 취급하는 승객거동 해석 시, 설계변수의 제작공차를 고려하여 반응치인 머리상해치인 HIC(Head Injury Criterion), 흉부가속도(Chest Acceleration) 및 종합상해 가능성의 확률 등을 산출하고 이들의 최적값을 제시하고자 한다. 이를 위해 사용된 방법은 다구찌법이며, 고려된 설계변수는 에어백의 밴트홀 크기, 점화시간, 인플레이터 압력, 테더(Tether) 길이, 안전띠에 부착되는 로드리미터(Load Limiter) 하중이다. 다물체동역학 해석용으로써 MADYMO Ver. 5.4.1<sup>(6)</sup>을 이용하였다.

## 2. 다구찌 법을 이용한 강건설계

1920 년대 영국에서 피셔(Fisher, R. A.)에 의해 개발된 전통적인 실험계획법은 다양하고 복잡한 통계적 지식을 요구하므로 사용하기가 쉽지 않았다. 그러나 2 차 세계대전 이후 일본산업 제품의 품질향상을 위해 개발된 다구찌법은 이러한 문제점을 해결해 주고 있다. 다구찌는 1949 년 일본의 전기통신연구소(Electrical Communication Laboratories)에서 생산성 향상에 관한 업무를 맡았었는데 그가 조사한 결과는 실험과 테스트에 드는 비용이 소요시간 및 지출의 대부분을 차지한다는 것이었다. 그는 이것을 위해 전통적인 실험계획법에서 사용되는 직교배열표(orthogonal array)와 통신공학에서 사용되는 SN 비(SN ratio)를 도입하여 새로운 방법을 전개하였다. 이 SN 비는 각 특성치별로 정의하여 전개하였으며 망소특성(smaller-the-better type characteristic)인 경우에는 다음과 같이 표시된다.<sup>(7-8)</sup>

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{N_{out}} \sum y_i^2 \quad (1)$$

여기서  $y_i$ 는 특성치를  $N_{out}$ 는 잡음을 고려한 실험횟수를 의미한다. 승객거동해석에서 특성치는 머리상해치, 흉부가속도 및 종합상해 가능성의 확률 등이 될 수 있다. 식 (1)의 SN비를 계산하기 위해서는 외측배열(outer array)을 이용한 방법과 테일러 급수 전개를 이용한 방법이 사용될 수 있다.

그림 1은 내측배열 및 외측배열을 표시한 것이다.  $N_{out}$  개의 외측배열로부터 각각의 평균  $\mu_f$  및 표준편차  $\sigma_f$ 가 산출되어 내측배열이 구성된다. 그리고 평균 및 표준편차를 구하기 위해 외측배열이 아닌 테일러급수 전개를 이용할 수 있다. 임의의 설계변수  $n$  개에 대하여 평균  $\mu_f$  및 분

산  $\sigma_f^2$ 은 식 (2), (3)과 같이 표시할 수 있다.<sup>(9-10)</sup>

$$\mu_f = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$\sigma_f^2 = \sum \frac{\partial f}{\partial x_i}^2 \cdot \sigma_{x_i}^2 \quad (3)$$

여기서 함수 f는 임의의 반응치를,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 은 설계변수를 표시한다.

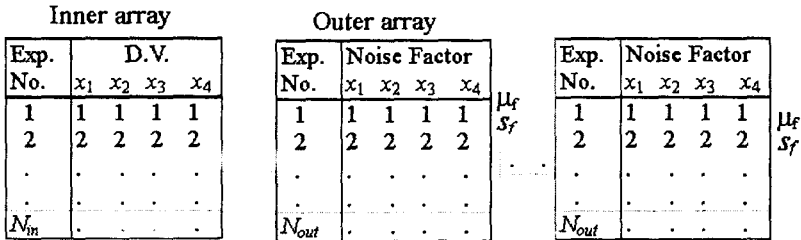


그림 1 내측배열 및 외측배열

### 3. 다구찌법을 이용한 에어백의 강건설계

#### 3.1 정면충돌 조건

미국의 경우, 미연방도로교통안전국에서는 정면충돌에 관련된 FMVSS208 법규를 제정, 시행하고 있다. 에어백은 1997년 중반 이후에 생산되는 모든 승용차의 운전석과 조수석에 장착이 의무화 되어 있다. 이 법규에 의하면, 안전띠를 착용하지 않은 Hybrid III 50%tile더미를 태우고 30mph의 속도로 고정벽에 충돌시켰을 때 규정된 조건을 만족해야 한다. 식 (1)로 표시되는 머리상해치는 1000이하가 되어야 한다.<sup>(1-2)</sup>

$$HIC = \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (4)$$

여기서 a(t)는 중력가속도의 배수로 표시되는 머리 중심부의 합성가속도이며  $t_1, t_2$ 는 충돌시에 36 msec 이하의 간격을 갖는 두 시간을 의미한다.

흉부가속도는 3msec 이상 연속적으로 중력가속도의 60배를 초과하지 않도록 규정하고 있으며 대퇴부 작용 하중은 10,000 N을 초과하지 않도록 규정하고 있다. 이 시험조건은 1997년 초까지 유효하였지만 저속충돌시의 문제점으로 인해 개정되었다. 그렇지만 일부 자동차 제조업체에서는 내부적인 기준으로 여전히 사용하고 있으나 스마트 에어백의 장착이 의무화 되는 시점부터는 큰 의미를 갖지 않게 될 것이다.<sup>(2)</sup>

충돌관련 성능을 평가하는 시험은 법규이외에도 NCAP이 있는데, 미국도로교통안전국의 NCAP이 가장 널리 알려져 있다. 이는 안전띠를 착용시킨 더미를 실차에 태우고 35mph로 고정벽에 충돌시켰을 때, 머리부와 가슴부의 상해 가능성을 계량화해 별 표시로써 등급을 부여한다. 머리상해치, HIC와 흉부가속도  $a_{chest}$ 로부터 종합상해 가능성의 확률  $P_{com}$ 은 다음 식에 의해 결정된다.<sup>(1-2)</sup>

$$P_{com} = P_{head} + P_{chest} - (P_{head} \times P_{chest}) \quad (5)$$

$$P_{head} = [1 + \exp(5.02 - 0.00351 \times HIC)]^{-1} \quad (6)$$

$$P_{chest} = [1 + \exp(5.55 - 0.0693 \times a_{chest})]^{-1} \quad (7)$$

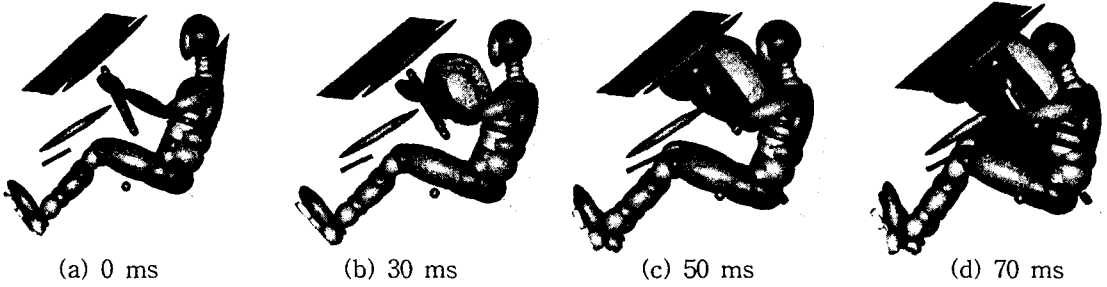


그림 2 승객거동 모델 및 초기모델 반응

여기서  $P_{head}$  및  $P_{chest}$ 는 머리상해치와 흉부가속도의 함수이다. 별 개수로 표시되는 등급은  $P_{com}$ 의 값으로 결정된다.

### 3.2 에어백의 설계변수

설계변수는 안전띠 부품인 로드리미터의 하중( $x_1$ ), 에어백의 벤트홀 지름( $x_2$ ), 에어백 압력 조절 온도( $x_3$ ), 에어백 테더길이( $x_4$ ), 에어백 전개시간( $x_5$ )으로써 총 5 개이다. 이때 차량은 MADYMO에서 제공하는 임의의 모델이며 에어백은 유한요소 모델로 나머지 부품은 강체모델로 구성되어 있다. 모델링된 형상은 그림 2에 표시하였고 초기모델의 0ms, 30ms, 50ms, 70ms의 결과이다.

각 설계변수에 대한 수준 값은 현장에서 사용될 수 있는 값으로 설정하였으며 설계변수  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ 의 각 허용차는  $\pm 225(\Delta x_1)N, \pm 1.5(\Delta x_2)mm, \pm 25(\Delta x_3)K, \pm 25(\Delta x_4)mm, \pm 1.0(\Delta x_5)ms$ 이다. 각 설계변수는 정규분포를 갖는다고 가정한다.

### 3.3 강건설계 결과

설계변수의 각 수준은 로드리미터의 하중( $x_1$ )인 경우 [1수준 2수준 3수준]=[3000N 4500N 6000N], 에어백의 벤트홀 지름( $x_2$ )인 경우 [1수준 2수준 3수준]=[20mm 30mm 40mm], 에어백 압력 조절 온도( $x_3$ )인 경우 [1수준 2수준 3수준]=[400K 500K 600K], 에어백 테더길이( $x_4$ )인 경우 [1수준 2수준 3수준]=[200mm 250mm 300mm], 에어백 전개시간( $x_5$ )인 경우 [1수준 2수준 3수준]=[15ms 20ms 25ms]이다. 따라서 각 인자의 내측 배열 및 외측배열 수준을 표시하면 표 1과 같다.

표 1 내측배열 및 외측배열에서의 설계변수의 수준

Array	Level	Design Variable				
		$x_1(N)$	$x_2(mm)$	$x_3(K)$	$x_4(mm)$	$x_5(ms)$
Inner Array	1	3000	20	400	200	15
	2	4500	30	500	250	20
	3	6000	40	600	300	25
Outer Array	1	$x_1-225$	$x_2-1.5$	$x_3-25$	$x_4-25$	$x_5-1.0$
	2	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
	3	$x_1+225$	$x_2+1.5$	$x_3+25$	$x_4+25$	$x_5+1.0$

설계변수가 5개이고 수준수가 3개이므로 L<sub>18</sub> 직교배열표를 선정하여 표 2와 같이 배치하였다.

표 2 설계변수의 배치(L18 직교배열표)

Exp.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$\mu_{P_{com}}$	$\sigma_{P_{com}}$	SN
1	3000	20	400	200	0.015	0.16191	0.00656	15.853
2	4500	30	500	250	0.020	0.08918	0.00168	21.138
3	6000	40	600	300	0.025	0.08479	0.00180	21.470
4	3000	20	500	250	0.025	0.13353	0.00540	17.487
5	4500	30	600	300	0.015	0.08082	0.00204	21.721
6	6000	40	400	200	0.020	0.10992	0.00098	19.406
7	3000	30	400	300	0.020	0.08515	0.00349	21.546
8	4500	40	500	200	0.025	0.07110	0.00031	23.099
9	6000	20	600	250	0.015	0.18119	0.00720	14.943
10	3000	40	600	250	0.020	0.06832	0.00187	22.901
11	4500	20	400	300	0.025	0.10987	0.00201	19.157
12	6000	30	500	200	0.015	0.12459	0.00432	18.145
13	3000	30	600	200	0.025	0.10264	0.00392	19.931
14	4500	40	400	250	0.015	0.07890	0.00104	21.995
15	6000	20	500	300	0.020	0.14353	0.00250	16.760
16	3000	40	500	300	0.015	0.10384	0.00607	19.625
17	4500	20	600	200	0.020	0.22305	0.00784	13.057
18	6000	30	400	250	0.025	0.11577	0.00104	18.750

이 결과는 차체의 감속도 펄스곡선이 일정하다는 가정 하에 산출된 것이며 평균  $\mu_{P_{com}}$  및 표준편차  $\sigma_{P_{com}}$  은 식 (2), (3)으로부터 산출된 것이며 SN비는 식 (1)을 이용하여 산출 된 것이다. 평균분석을 해 보면  $P_{com}$  의 평균과 분산 모두 최적수준은 [ $x_1$   $x_2$   $x_3$   $x_4$   $x_5$ ]=[2수준 3수준 1수준 3수준 3수준]으로써 동일한 결과를 갖는다. 이 최적수준에 대하여 확인실험을 해 보면,  $P_{com}$ 의 평균은 0.0634, 표준편차는  $0.81710^{-3}$ 이 계산된다.  $P_{com}$ 가 정규분포를 갖는다면 이 최적수준으로 설계된 에어백 제품의 최악조건은  $\mu_{com}+3\sigma_{com}=0.0659$ 가 된다. 설계단계에서  $P_{com}$ 의 예측치를 0.0634가 아닌 0.0659로 보는 것이 타당하다. 설계변수의  $P_{com}$ 의 평균 및 분산에 대한 영향도는  $x_2, x_4, x_5, x_1, x_3$ 순으로 크며, 표준편차에 대한 영향도는  $x_2, x_5, x_1, x_3, x_4$  순이다. 이 결과로부터 에어백의 벤트홀 크기가 다른 설계변수에 비해서  $P_{com}$ 의 평균 및 분산에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

두 번째로,  $P_{com}$ 의 평균 및 분산을 구하기 위해 외측배열을 이용한 경우이다. 이 때는 총 324 회의 해석 횟수가 요구된다. 테일러 급수를 이용하여  $P_{com}$ 의 평균 및 분산을 구하는 방법 보다 약 3배의 계산시간이 소요된다. 그 결과 최적수준은 테일러 급수를 이용한 방법과 동일하게 산출 되었다.

최적수준에 대하여 확인실험을 위해, 외측배열을 구성하고  $P_{com}$ 의 평균 및 표준편차를 구해보 면  $\mu_{P_{com}}=0.0654, \sigma_{P_{com}}=1.9510^{-3}$ 이다. 테일러 급수를 이용한 경우와 외측배열을 이용한 경우의 최적수준은 동일하게 산출되었지만 확인실험시  $P_{com}$ 의 평균 및 분산에 차이를 보이고 있다. 이것은 테일러 급수에서는 설계변수의 분포를 정규분포로 가정한 것인 반면, 외측배열을 이용한 경우에는 세 개의 수준을 균일분포로 가정했기 때문에 나타나는 결과이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 자동차 승객보호장구 중 에어백의 일부 파라미터와 벨트 로드리미터 하중을 설계변수로 취하여 설계변수의 불확실성을 고려한 강건설계를 수행하였다.

- 1) 종합상해 가능성의 확률  $P_{com}$ 의 평균과 분산을 구하기 위해 테일러 급수 및 외측배열을 이용하였으며 그 결과를 비교, 검토하였다.
- 2) 설계변수의 공차 등이 정규분포일 경우에는 테일러 급수를 이용하는 것이 바람직하지만 외측배열에 의한 산출은 과대평가될 수 있다. 많은 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교, 평가하여 이에 대한 예측치 오차 범위를 판단하는 것이 필요하다.
- 3) 설계변수의 불확실성 이외에도 차체의 감속도 펄스 곡선에 대한 불확실성을 고려하는 것이 필요하다.

#### 5. 참고문헌

- (1) 임재문, 1997, 차량충돌시 승객거동해석을 위한 소프트웨어의 개발 및 관련 부품의 설계방안 제시, 한양대학교 박사학위논문
- (2) 전현용, 2000, 전방에어백과 관련법규, 자동차공학회지, 제22권, 제 2호, pp. 12-19.
- (3) D. C. Viano, 1991, "Effectiveness of Safety Belts and Airbags in Preventing Fatal Injury," SAE Paper No. 910901.
- (4) Y. S. Park, G. J. Park, 2001, "Crash analysis and design of a belt integrated seat for occupant safety," Vol. 215, No.8, pp. 875~889.
- (5) J. M. Lim, D. H. Wu, G. J. Park, "Analysis and Design Consideration of an Energy Absorbing Steering System Using Orthogonal Arrays, International Journal of Crashworthiness," Vol.5, No.3, pp.271-278.
- (6) TNO, 1999, MADYMO Users Manual.
- (7) Taguchi, 1987, Systems of Experimental Design (Vol. I, II), Kraus International Publications, New York.
- (8) M. S. Phadke, 1989, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, New Jersey.
- (9) K. H. Lee, G. J. Park, Robust Optimization in Discrete Design Space for Constrained Problems, AIAA J., Vol.40, No.4, pp.774-780, 2002.
- (10) K. H. Lee, G. J. Park, 2001, "Robust Optimization Considering Tolerances of Design Variables," Computers & Structures, Vol.79, No.1, pp.77-86.