

보행자 법규와 자동차 후드 및 범퍼 구조물 설계방안

이재완¹⁾ · 윤경한¹⁾ · 강연수²⁾ · 박경택³⁾ · 박경진⁴⁾

교통안전공단 자동차성능시험연구소¹⁾ · 교통개발연구원²⁾ · 한양대학교 대학원 기계설계학과³⁾
· 한양대학교 기계정보경영학부⁴⁾

Hood and Bumper Structure Design Methodology for Pedestrian Regulation

Jaewan Lee^{*1)} · Kyonghan Yoon¹⁾ · Younsoo Kang²⁾ · Kyungtaek Park³⁾ · Gyungjin Park⁴⁾

¹⁾Korea Automobile Testing and Research Institute, 625 Samjon-ri, Songsan-myun, Hwasung-si, Gyeonggi 445-871, Korea

²⁾The Korea Transport Institute, 2311 Daehwa-dong, Ilsan-Gu, Goyang-si, Gyeonggi 411-701, Korea

³⁾Department of Mechanical Design Production Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

⁴⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

(Received 21 December 2004 / Accepted 4 March 2005)

Abstract : Although the numbers of pedestrian fatalities and injuries are steadily declining worldwide, pedestrian protection is still an important issue. Extensive researches have been carried out in the field of pedestrian protection in order to establish pedestrian safety regulations. The automobile hoods and bumpers, which pedestrians frequently run into during accidents, should be safely designed for pedestrians. Two analysis methods are utilized to design safe structures of the hood and the bumper. They are real experiment and computer simulation. In this research, a method is developed to simultaneously utilize the results from the experiment and the simulation. For design, orthogonal arrays are employed to combine the two methods. Based on this method, a hood and a bumper are designed to protect pedestrians.

Key words : Directive 70/156/EEC(2003/102/EC), Bumper(범퍼), Hood(후드), Orthogonal Array(직교배열표), Pedestrian Protection(보행자 보호)

1. 서론

전 세계적으로 차대 보행자 사고로 인한 보행자 사상자 수가 매우 많이 발생함에 따라 보행자 보호를 위한 자동차 안전기준을 제정하고 이를 만족하기 위한 노력을 기울이고 있다. 보행자가 빈번하게 부딪히는 자동차의 후드 및 범퍼 구조물을 보행자 친화형으로 설계, 제작함으로써 보행자 상해감소 효과를 얻을 수 있다.^{1,2)}

보행자 보호를 위한 자동차 후드 및 범퍼 구조물을 개발시 이들의 성능을 평가하기 위한 방법으로 실험과 컴퓨터에 의한 모사(simulation) 등을 이용한다. 그러나 컴퓨터에 의한 모사는 모델링의 부정확성이나 근사화한 지배방정식의 근을 구하게 됨에 따라 많은 오차를 포함하고 있다. 한편 실험은 실험시의 실수나 오차의 가능성이 있음에도 불구하고 그 결과가 정확하다고 간주한다. 설계경향을 도출하는데 있어서 모든 자료를 실험으로 얻을 수 있다면 최상이나 실험이 대단히 고가일 때는 제한적으

*To whom correspondence should be addressed.

jwlee@kotsa.or.kr

로 실시하고 있다. 최적화 방식의 하나로 실험계획법의 직교배열표를 이용하기도 한다. 직교배열표에 의한 설계는 한정된 수의 실험회수만 필요하다. 직교배열표에 실험과 모사를 동시에 사용하는 방법이 있으며, 실험과 모사를 직교배열표의 각 행에 적절히 배치하는 것이다. 이러한 배치방식은 오차를 최소화하기 위해 제안되었다. 이 경우 적은 실험 오차가 균등하게 분포하게 되어 설계변수 결정에 정확성을 기할 수 있다.³⁾

따라서 본 연구에서는 직교배열표의 각 경우를 실험과 모사를 혼합하여 차대 보행자 사고시 보행자 상해감소를 위한 자동차의 후드 및 범퍼 구조물의 설계를 수행하였다. 설계결과 실험과 컴퓨터 모사 결과를 동시에 이용하여 직교배열표로 설계하는 방법의 경우 적은 실험 오차가 균등하게 분포하게 되어 설계변수 결정에 정확성을 기할 수 있음을 보여 주었다.⁴⁾

2. 보행자 상해 및 평가방법

2.1 보행자 사고현황

차대 보행자 사고는 총 교통사고의 상당부분을 차지하고 있다. 2000년 기준으로 각국의 보행자 사고로 인한 사망자 비율은 유럽 19.0% (7,000여명), 미국 11.3% (4,739명), 일본 28.3% (2,605명), 한국 38.0% (3,890명), 중국 약 50% (19,000여명)에 이르는 것으로 나타났다. 부상자 수 역시 매우 많아 유럽 30만명 이상, 미국 78,000여명, 일본 86,000여명, 한국 74,102명에 이르고 있다.^{1,2,5)}

차대 보행자 사고시 상해 (AIS 2~6)의 대부분은 머리, 얼굴 및 목을 포함한 머리부분으로 36.9%를 차지하며 다리부분은 32.4%이다.⁶⁾ 여기서 AIS (abbreviated injury scale)는 상해지수로서 상해 정도에 따라 AIS 0 (상해 없음)에서 AIS 6 (사망)까지 7등급으로 구분한다. 머리부분 상해의 가장 큰 원인은 자동차 앞면 창유리는 33.5%, 그 다음은 후드와 윈드필름 19.5% 및 앞면 창유리 프레임과 A 필라가 17.2%로 나타났으며, 다리상해의 주된 원인은 범퍼이며 61.2%를 차지하고, 그 다음으로 후드 선단부가 12.1%로 알려져 있다.⁶⁾

2.2 보행자 보호기준 및 실험방법

보행자 보호를 위한 충격실험은 Fig. 1과 같이 구성된다.⁵⁾ 본 연구에서는 Directive 70/156/EEC (2003/102/EC)⁷⁾의 1단계 하체모형 충격실험 기준과 2단계 어린이 머리모형 충격실험 기준에 따라 실험을 수행하였다. 머리충격부위 전후경계선(wrap around distance) 1,000~1,500mm 사이의 후드에 수평면 기준으로 50°의 각도로 충격을 가한다. 충격속도는 40km/h이다. 요구조건은 HIC가 1,000 이하이다. HIC의 계산은 식 (1)과 같이 나타낸다.^{5,7)}

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

여기서 **a**는 머리모형 구의 중심에 설치된 3축 가속도계로부터 측정된 중력가속도의 배수로 표시되는 합성가속도이고, t_1, t_2 는 충격 중 15msec 이하의 간격을 갖는 임의의 두 순간을 의미한다.

하체모형 충격실험은 범퍼에 대하여 최소 3곳에 충격을 가하는데 목표지점은 상해를 유발할만하거나 형상이 변하는 곳을 선정하여 40km/h로 차량의 길이방향과 평행하게 충격을 가한다. 요구조건은 무릎굽힘각도 21° 이하, 전단변위량 6mm 이하, 경골의 위 끝단에서 측정된 가속도 200g 이하이다.^{5,7)}

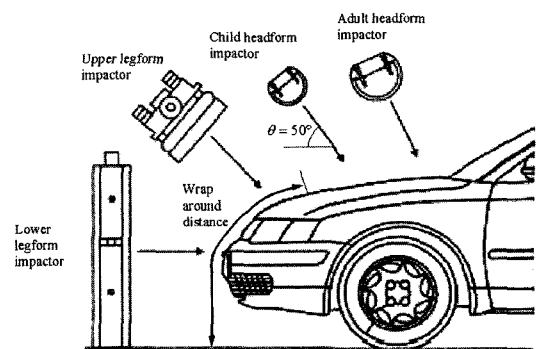


Fig. 1 Pedestrian protection test method

3. 실험과 컴퓨터 모사결과를 동시에 이용하여 직교배열표로 설계하는 방법

일반적인 최적화나 설계문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

Find $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$

to minimize $f(\mathbf{b})$

subject to

$$\begin{aligned} h_i(\mathbf{b}) &= 0, & i &= 1, \dots, l \\ g_j(\mathbf{b}) &\leq 0, & j &= 1, \dots, m \\ \mathbf{b}_L &\leq \mathbf{b} \leq \mathbf{b}_U \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{b} 는 n 개의 요소로 이루어진 설계변수 벡터, f 는 목적함수, h_i 는 i 번째 등제조건, g_j 는 j 번째 부등제조건, \mathbf{b}_L 과 \mathbf{b}_U 는 각각 설계변수의 하한, 상한벡터이다. 한편 l 은 등제조건 수, m 은 부등제조건 수이다. 직교배열표를 설계에 직접 이용할 때는 특성치를 식 (2)의 정식화과정에서 사용한 식들을 변형하여 사용하고 있다.

3.1 직교배열표를 이용한 설계방법^{3,8)}

직교배열표의 각 행에 직교성을 이용하여 최소한의 숫자의 실험을 배치하면 평균분석^{3,4)}을 하여 설계값을 구할 때 적은 실험오차가 균등하게 분포하게 된다. 따라서 설계변수의 수준에 대한 효과의 산출시 오차의 분산이 감소되므로 설계변수의 결정에 정확성을 기할 수 있다.

Table 1의 $L_9(3^4)$ 로부터 특성치의 평균은 식 (3)과 같다.

$$m = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \eta_i \quad (3)$$

각 인자의 수준에 의한 효과는 인자 A 가 A_3 의 값을 가질 때의 평균 m_{A_3} 는 A_3 가 포함된 실험결과의 평균으로 나타내며 식 (4)와 같이 된다.

$$m_{A_3} = \frac{1}{3} (\eta_7 + \eta_8 + \eta_9) \quad (4)$$

따라서 수준 A_3 의 효과는 $(m_{A_3} - m)$ 이다. 식 (4)는 가법모형에 의하여 식 (5)와 같다.⁹⁾

$$m_{A_3} = (\mu + a_3) + \frac{1}{3} (e_7 + e_8 + e_9) \quad (5)$$

여기서 μ 는 모평균, a_3 는 $(m_{A_3} - m)$ 의 참값, e_j 는 Table 1의 j 번째 열의 오차이다. 식 (2)의 최적화 정

식에 직교배열표를 적용할 때는 제한조건이 존재한다. 이 때는 제한조건을 고려하여 다음과 같은 특성치를 정의할 수 있다.

$$\eta_{aug.} = f + \bar{P} \quad (6)$$

$$\bar{P} = \max(0, |h_i|; i=1, \dots, l, g_j; j=1, \dots, m) \times s \quad (7)$$

여기서, \bar{P} 는 제한조건의 위배량에 따라 크기가 결정되는 벌칙함수이며, s 는 조절계수이다. 조절계수의 크기에 따라 제한조건 위배량의 고려하는 정도가 변하게 된다. 계산시, 제한조건의 위배량에 대한 정규화를 실시한다. 이는 제한조건간의 차원의 차이가 벌칙함수에 미치는 영향을 줄이기 위함이다. 제한조건의 위반여부를 점검하기 위하여 η 를 η_{aug} 로 대치하여 각 행에 대한 η_{aug} 를 구한 후 η_{aug} 에 대해 일원표를 작성하여 각 설계변수의 최적수준을 구한다. 최적수준에서의 확인실험값과 직교배열표상의 배치에 대한 결과에서 제한조건을 모두 만족하는 해 가운데 가장 우수한 것을 최종해로 한다.⁹⁾

3.2 실험과 컴퓨터 모사 결과를 동시에 이용하여 직교배열표로 설계하는 방법^{3,4)}

실험과 컴퓨터 모사를 동시에 이용하여 직교배열표를 설계에 사용하는 방법은 다음과 같다. 예를 들어 3수준을 가지는 4개의 설계변수가 존재하는 문제의 경우, Table 1과 같은 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 사용할 수 있다. 각 행의 오차의 표준편차는 σ_e 이고 A_3 의 효과에 대한 오차의 표준편차는 $1/3\sigma_e$ 이다. Table 1의 직교배열표의 1, 5, 9 행에 대해서는 실험을 실시하고 나머지 행에 대해서는 컴퓨터 모사를 실시한다고 가정하자. 또한 실험의 오차에 대한 표준편차는 σ_{ex} , 컴퓨터 모사 시의 오차에 대한 표준편차는 σ_{sim} 라 하면 일반적으로 $\sigma_{ex} \ll \sigma_{sim}$ 의 관계를 가정할 때 식 (5)는 식 (8)과 같이 된다. 이는 앞에서 언급했듯이 실험의 오차가 모사의 오차보다 대단히 작다는 가정으로부터 도출한 것이다.

$$m_{A_3} = (\mu + a_3) + \frac{1}{3} (e_{sim} + e_{sim} + e_{ex}) \quad (8)$$

여기서 e_{sim} 은 모사 시의 오차, e_{ex} 은 실험 시의 오차이다. 이 때 총 오차분산 σ_E^2 은 각 오차가 독립일 때 다음과 같이 된다.

$$\sigma_E^2 = \frac{2}{9}\sigma_{sim}^2 + \frac{1}{9}\sigma_{ex}^2 \quad (9)$$

만일 $\sigma_e \cong \sigma_{sim} \gg \sigma_{ex}$ 라면 식 (9)의 오차분산은 식 (5)에서 얻어지는 오차분산에 비해 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. Table 1에서 1, 5, 9행의 각 열과 같이 설계변수 A, B, C 의 수준이 공히 1번씩 동일하게 나타나도록 배치함으로써 오차분산의 각 수준에 대한 동일한 감소효과를 얻을 수 있다.

4. 보행자 상해감소를 위한 자동차 후드 및 범퍼 구조물의 설계

보행자 사고시 보행자 상해감소를 위한 자동차 후드 및 범퍼 구조물을 설계하기 위하여 양산 소형 승용차의 범퍼 및 후드 부분을 포함하며, 범퍼 및 후드 구조물 설계변수의 수준값을 조절할 수 있도록 “가변식 전면 구조물”을 제작하여 범퍼개발 실험용 대차에 고정하였다. 이와 동시에 “가변식 전면 구조물”에 대하여 직교배열표에 따라 유한요소 모델링을 하였다. 설계조건을 후드 구조물에는 $L_9(3^4)$, 범퍼 구조물에는 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 을 적용하였다.

설계단계는 Fig. 2와 같으며, 설계방법은 기존의 직교배열표의 각 경우를 컴퓨터 모사 결과만 이용한 설계방법과 실험과 컴퓨터 모사 결과를 동시에 이용하여 직교배열표로 설계하는 방법으로 설계하고 그 결과를 비교한다. 후드 및 범퍼 구조물 해석은 상용 유한해석 프로그램인 LS-DYNA¹⁰⁾를 이용하였다.

4.1 후드 구조물 설계

머리모형 충격실험 요건을 고려하여 3개의 설계변수 즉, A = 후드 앞부분 고정 장치인 스트라이커 높이, B = 후드 판넬의 강성을 유지시켜주는 안쪽 프레임의 구멍 수, C = 후드 뒷부분 고정장치인 힌지의 높이를 선정하였다.^{4,11,12)} 설계변수의 변화에 따른 경향을 분석하기 위하여 어린이 머리모형의

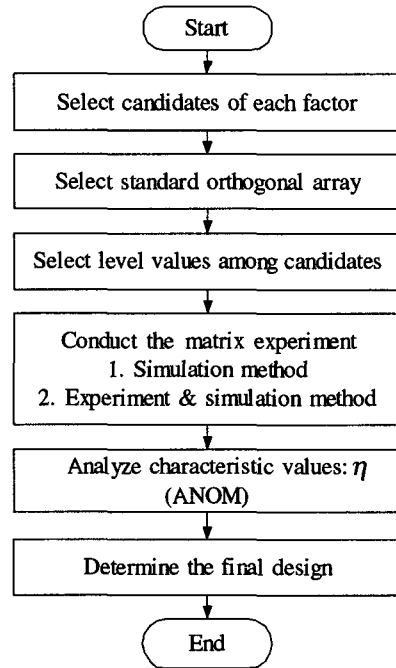


Fig. 2 Flow of discrete design problems

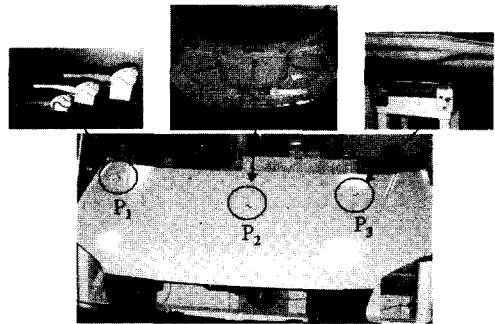


Fig. 3 Impact points and design variables of hood structure

충격부위 전후경계선인 1,000~1,500mm 사이의 후드 3곳에 충격을 가하였다. Fig. 3과 같이 P_1 은 스트라이커 및 힌지의 영향을, P_2 는 후드 프레임의 구멍의 영향을, P_3 는 엔진룸 내부의 배터리와 같은 구조물의 영향을 확인할 수 있는 위치로 선정하였다.^{4,10)} 이 때, 후드 구조물 3곳을 동시에 고려하여 설계변수의 최적값을 선정하여야 하므로 충격지점 중에서 P_3 는 주변이 강성이 높은 지점이므로 특성치에 가중치를 더 부가하였다. Fig. 4와 같이 유한요소 모델링을 하였다.

문제의 정식화는 다음과 같다.

Find A, B, C

to minimize $\eta_{res} = 0.3\eta_{p_1} + 0.3\eta_{p_2} + 0.4\eta_{p_3}$

subject to

$$\begin{aligned} \eta_{p_1} &\leq 1000 \\ \eta_{p_2} &\leq 1000 \\ \eta_{p_3} &\leq 1000 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, η_{p_1} , η_{p_2} , η_{p_3} 는 머리모형 충격지점 (P₁, P₂, P₃)에서의 특성값이며, η_{res} 는 응답 특성값이다. 설계변수에 대한 수준값은 각각 A(mm) = {0, 10, 20}, B(개) = {0, 7, 16}, C(mm) = {0, 20, 40}으로 설정하였다.

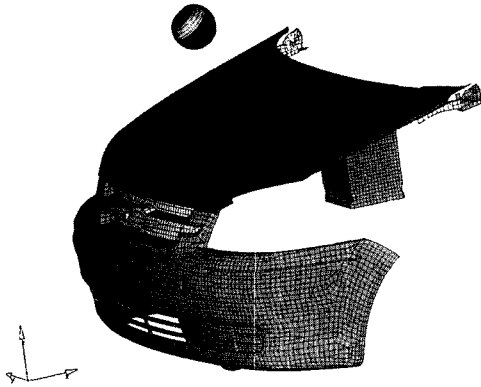


Fig. 4 FE model of the child Headform impact test

4.1.1 모사결과만을 이용한 설계

Table 2의 직교배열표 1 행에 대하여 Fig. 5와 같이 설계변수를 조절할 수 있는 구조 “가변식 전면 구조물”의 각 구성품을 조립한 후에 후드 부분에 어린이 머리모형 충격실험을 수행하였다. 이와 함께 Fig. 4와 같이 1행과 동일한 유한요소 모델링에 대하여 1행에 대한 실험결과와 모사의 결과가 일치하도록 모사에서의 각종 파라미터를 조절하면서 실험결과에 가장 가까운 결과를 만드는 최종 입력자료를 확정하였다. 이후에 나머지 행에 대하여 유한요소 모델링을 수행한 후에 컴퓨터 모사를 수행하였으며, 모사 결과는 Table 1과 같다. 식 (10)의 최적화 정식은 제한조건을 만족하면서 특성치 η_{res} 를 최소화하는 문제이다.

Table 1 $L_9(3^4)$ orthogonal array using computer simulation for hood structure

Exp.	Factor assigned			Characteristic value		
	A	B	C	η_{res}	\bar{P}	η_{aug}
1	1	1	1	989.9	204.0	1193.8 ✓
2	1	2	2	839.3	25.0	864.3 ✓
3	1	3	3	784.0	0.0	784.0
4	2	1	2	955.2	133.0	1088.2 ✓
5	2	2	3	832.5	0.0	832.3
6	2	3	1	785.5	0.0	785.5
7	3	1	3	963.8	153.0	1116.8 ✓
8	3	2	1	831.8	0.0	831.8
9	3	3	2	814.9	0.0	814.9

식 (6)으로부터 η_{aug} 를 정의하고, 식 (10)을 그대로 사용하면서 조절계수 $s = 1$ 로 했다. $L_9(3^4)$ 직교배열표의 각 행에 대하여 모사를 수행한 결과는 Table 1과 같다. Table 1에서 1, 2, 4, 7번째 행은 제한조건에 위배되어 η_{aug} 에 ✓ 표시를 하였다. 각 수준에 대한 평균분석을 통하여 A_2, B_3, C_3 임을 알 수 있다. 이러한 수준에 해당하는 설계변수의 값에 대하여 확인을 위해 모사실험을 수행하여 얻은 결과 목적함수 $\eta_{aug} = 768.0$ 이며, 제한조건을 만족한다. 이후에 평균분석 결과와 Table 1의 결과를 비교하여 목적함수 η_{aug} 가 가장 적은 설계변수는 일원표에 의한 A_2, B_3, C_3 를 얻게 되었다. 즉, 스트라이커 높이 $A = 10$ mm, 후드 프레임 구멍 수 $B = 6$ 개, 힌지 높이 $C = 40$ mm를 구할 수 있었다.

4.1.2 실험과 컴퓨터 모사결과를 동시에 이용하여 직교배열표로 설계하는 방법

Fig. 5와 같이 “가변식 전면 구조물”로 실험을 준비하고 Table 2의 1, 5, 6행은 실험을 배치하고 나머지 행은 모사를 배치하였다. η_{aug} 를 정의하고 식 (10)을 그대로 사용하면서 조절계수 $s = 1$ 로 했다. $L_9(3^4)$ 직교배열표의 각 행에 대하여 모사를 수행한 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 1, 2, 4, 5, 7번째 행은 제한조건에 위배되어 η_{aug} 에 ✓ 표시를 하였다. 각 수준에 대한 평균분석을 통하여 A_2, B_3, C_3 를 얻게 되었다.

이러한 수준에 해당하는 설계변수의 값에 대하여 확인을 위해 모사실험을 수행하여 얻은 목적함수

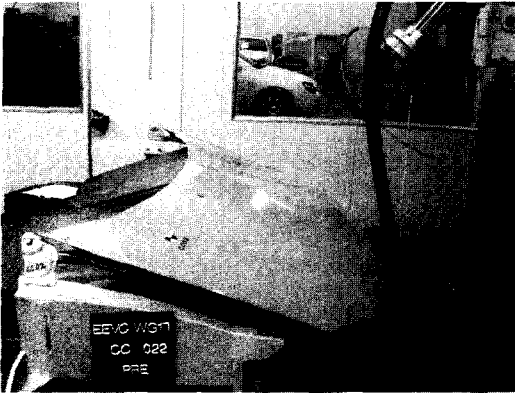


Fig. 5 Child headform impact test setup

Table 2 $L_9(3^4)$ orthogonal array using experiment and computer simulation for hood structure

Exp.	Factor assigned			Characteristic value		
	A	B	C	η_{res}	\bar{P}	η_{aug}
1	1	1	1	1056.1	225.5	1281.6 ✓
2	1	2	2	839.3	25.0	864.3 ✓
3	1	3	3	784.0	0.0	784.0
4	2	1	2	955.2	133.0	1088.2 ✓
5	2	2	3	795.0	35.0	830.3 ✓
6	2	3	1	785.5	0.0	785.5
7	3	1	3	963.8	153.0	1116.8 ✓
8	3	2	1	831.8	0.0	831.8
9	3	3	2	794.6	0.0	794.6

$\eta_{aug} = 768.0$ 이며, 제한조건을 만족한다. 이후에 평균분석 결과와 Table 2의 결과를 비교하여 목적함수 η_{aug} 가 가장 적은 설계변수는 일원표에 의하여 A_2, B_3, C_3 를 얻게 되었다. 즉, 스트라이커 높이 $A = 10\text{mm}$, 후드 프레임 구멍 수 $B = 6$ 개, 힌지 높이 $C = 40\text{mm}$ 를 구할 수 있었다.

4.1.3 결과분석 및 고찰

후드 구조물 설계의 경우 두 가지 설계방법 모두 동일한 최종 설계값(A_2, B_3, C_3)을 얻게 되었다. 최종 설계값에 대한 확인실험을 수행하여야 하나 실험 대신 후드 구조물에 최종 설계변수를 적용하여 모사를 수행한 결과, 특성치 $\eta_{p_1} = 824.3, \eta_{p_2} = 605.7, \eta_{p_3} = 847.6$, 및 $\eta_{aug} = 768.0$ 을 얻었다. 이 값 역시 제한조건에 위배되지 않은 값이다. 컴퓨터에 의한 모사만 이용한 경우에는 많은 오차가 포함되어 있으므로

오차의 크기로 인하여 설계결과에 대한 확신이 부족할 수 있으나, 오차가 적은 실험을 직교배열표에 배치함으로써 보다 정확한 설계변수 결정에 확신을 가질 수 있었다.

4.2 범퍼 구조물 설계

하체모형 충격실험 요건을 고려하여 Fig. 6과 같이 5개의 설계변수 즉, $A =$ 후드 끝단과 범퍼 끝단과의 거리, $B =$ 충격에너지를 흡수하는 범퍼 폼 두께, $C =$ 하체의 꺾임각도를 줄이기 위한 구조물인 스티프너 끝단과 범퍼 끝단과의 거리, $D =$ 범퍼 크로스 멤버 강성 및 $E =$ 범퍼 높이를 선정하였다.^{4,10,11} 여기서, 설계변수 C 의 스티프너는 기존의 차량에는 적용되지 않고 있으나 보행자의 하체를 보호하기 위해 고려하였으며, 설계변수 E 는 차종에 따라 범퍼의 높이가 차이가 있음을 고려하였다.

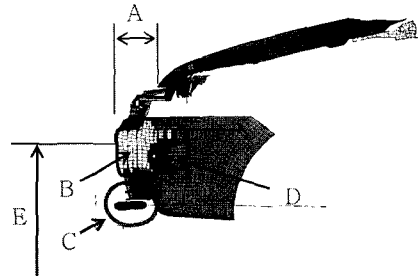


Fig. 6 Design variables of bumper structure

설계변수의 수는 5개이고, 수준수가 3인 점을 감안하여 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 표준 직교배열표를 선택하여 설계변수를 배치하였다. 설계변수가 가질 수 있는 후보값들은 양산차를 초기 설계값으로 설정하여 1수준에 배치하고 적용 가능성을 고려하여 후보값 중에서 초기 설계값보다 높은 값들을 이산값으로 선정하여 각각 2, 3수준으로 배치하였다.

설계변수 5개로 구성된 범퍼 구조물의 중앙지점에 하체모형 충격장치를 40km/h 의 속도로 충격을 가할 때 식 (11)과 같이 목적함수인 가속도, 굽힘각도, 전단 변위량이 최소가 되는 각 설계변수의 수준값을 결정하는 문제이다. 여기서 가속도 및 굽힘각도는 기준 만족이 어려운 점을 감안하여 가중치를 더 부가하였다.

문제의 정식화는 다음과 같다.

Find A, B, C, D, E

to minimize

$$\eta_{res} = (0.45 \times \frac{accel}{200} + 0.45 \times \frac{bend_angle}{21} + 0.10 \times \frac{shear_disp.}{6})$$

subject to

$$accel. \leq 200 g$$

$$bend._angle \leq 21^\circ$$

$$shear_disp. \leq 6mm$$

(11)

여기서, *accel.* 은 하체모형에서 측정된 가속도값, *bend._angle* 은 굽힘각도, *shear_disp.* 은 전단변위 량이며, η_{res} 는 응답 특성값이다. 설계변수에 대한 수준값은 각각 $A(mm) = \{78, 105, 132\}$, $B(mm) = \{25, 50, 75\}$, $C(mm) = \{none, -25, 0\}$, $D(ratio) = \{1, 0.7, 0.5\}$, $E(mm) = \{0, 30, 60\}$ 으로 설정하였다.

4.2.1 모사결과 만을 이용한 설계

Table 3의 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표 1행에 대하여 Fig. 8과 같은 “가변식 전면 구조물”의 각 구성품을 조립한 후에 범퍼 중앙부에 대하여 하체모형 충격 실험을 수행하였다. 이와 함께 Fig. 7과 같이 1행과 동일한 유한요소 모델링에 대하여 1행에 대한 실험 결과와 모사의 결과가 일치하도록 모사에서의 각종 파라미터를 조절하면서 실험결과에 가장 가까운 결과를 만드는 최종 입력자료를 확정하였다. 이후에 나머지 행의 유한요소 모델링을 수행한 후에 컴퓨터 모사만 이용하였다.

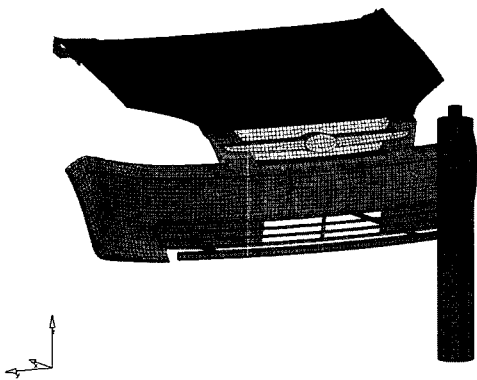


Fig. 7 FE model of the lower legform impact test

Table 3 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ orthogonal array using computer simulation for bumper structure design

Exp.	Factor assigned					Characteristic value		
	A	B	C	D	E	η_{res}	\bar{P}	η_{aug}
1	1	1	1	1	1	1.325	0.688	2.010 ✓
2	2	2	2	2	2	1.063	0.310	1.373 ✓
3	3	3	3	3	3	1.026	0.097	1.122 ✓
4	1	1	2	2	3	1.329	0.557	1.886 ✓
5	2	2	3	3	1	0.782	0.000	0.782
6	3	3	1	1	2	1.152	0.695	1.847 ✓
7	1	2	1	3	2	1.109	0.667	1.775 ✓
8	2	3	2	1	3	1.339	0.538	1.877 ✓
9	3	1	3	2	1	0.997	0.106	1.103 ✓
10	1	3	3	2	2	0.690	0.000	0.690
11	2	1	1	3	3	1.238	0.829	2.067 ✓
12	3	2	2	1	1	0.820	0.000	0.820
13	1	2	3	1	3	1.030	0.104	1.134 ✓
14	2	3	1	2	1	1.098	0.629	1.726 ✓
15	3	1	2	3	2	1.108	0.238	1.346 ✓
16	1	3	2	3	1	0.942	0.065	1.007 ✓
17	2	1	3	1	2	0.983	0.072	1.054 ✓
18	3	2	1	2	3	1.192	0.776	1.968 ✓

식 (6)으로부터 η_{aug} 를 정의하고, 식 (11)을 그대로 사용하면서 조절계수 $s = 1$ 로 했다. $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표의 각 행에 대하여 모사를 수행한 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 5, 10, 12번째 행을 제외한 나머지 행은 제한조건에 위배되어 η_{aug} 에 ✓ 표시를 하였다. 각 수준에 대한 평균분석을 통하여 A_3, B_2, C_3, D_3, E_1 을 얻었다. 이러한 수준에 해당하는 설계변수의 값에 대하여 확인을 위해 모사실험을 수행하여 얻은 결과 목적함수 $\eta_{aug} = 0.587$ 이며, 가속도 166.5g, 무릎굽힘각도 8.3° 및 전단변위량 2.1mm로 제한조건을 만족한다. 이후에 평균분석 결과와 Table 3의 직교배열표상의 결과와 비교하여 제한조건을 만족하며 목적함수 η_{aug} 가 가장 적은 설계변수는 일원표에 의하여 최적값 A_3, B_2, C_3, D_3, E_1 을 얻게 되었다. 즉, $A = 132mm, B = 50mm, C = 0mm, D = 0.5$ 및 $E = 0mm$ 를 구할 수 있었다.

4.2.2 실험과 컴퓨터 모사결과를 동시에 이용하여 직교배열표로 설계하는 방법

동일한 범퍼 구조물에 대하여 실험과 컴퓨터 모사 결과를 동시에 이용하여 직교배열표로 설계하였

다. 설계방법은 설계변수의 수준이 공히 2번씩 나타나는 1~6행은 Fig. 8과 같이 실험을, 나머지 행은 모사를 수행하였다. Table 4에서 보는 바와 같이 3, 5, 10, 12번째 행을 제외한 나머지 행은 제한조건에 위배되어 η_{aug} 에 \surd 표시를 하였다. Table 4의 결과를 토대로 각 수준에 대한 평균분석을 통하여 A_3, B_2, C_3, D_3, E_1 을 얻었다.

이러한 수준에 해당하는 설계변수의 값에 대하여 확인을 위해 모사실험을 수행하여 얻은 결과 목적

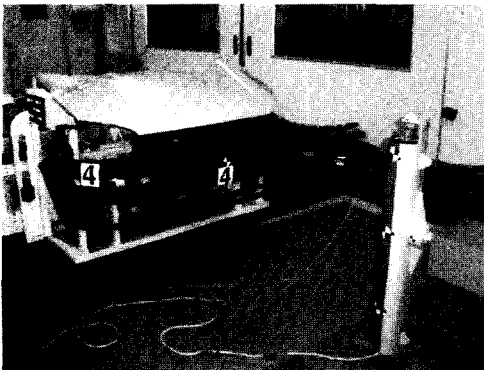


Fig. 8 Lower legform impact test setup

Table 4 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ orthogonal array using experiment and computer simulation for bumper structure design

Exp.	Factor assigned					Characteristic value		
	A	B	C	D	E	η_{res}	\bar{P}	η_{aug}
1	1	1	1	1	1	1.348	0.614	1.962 \surd
2	2	2	2	2	2	0.816	0.143	0.957 \surd
3	3	3	3	3	3	0.565	0.000	0.565
4	1	1	2	2	3	1.007	0.257	1.265 \surd
5	2	2	3	3	1	0.588	0.000	0.588
6	3	3	1	1	2	1.055	0.657	1.712 \surd
7	1	2	1	3	2	1.109	0.667	1.775 \surd
8	2	3	2	1	3	1.339	0.538	1.877 \surd
9	3	1	3	2	1	0.997	0.106	1.103 \surd
10	1	3	3	2	2	0.690	0.000	0.690
11	2	1	1	3	3	1.238	0.829	2.067 \surd
12	3	2	2	1	1	0.820	0.000	0.820
13	1	2	3	1	3	1.030	0.104	1.134 \surd
14	2	3	1	2	1	1.098	0.629	1.726 \surd
15	3	1	2	3	2	1.108	0.238	1.346 \surd
16	1	3	2	3	1	0.942	0.065	1.007 \surd
17	2	1	3	1	2	0.983	0.072	1.054 \surd
18	3	2	1	2	3	1.192	0.776	1.968 \surd

함수 $\eta_{aug} = 0.587$ 이며, 가속도 166.5g, 무릎굽힘각도 8.3° 및 전단변위량 2.1mm로 제한조건을 만족한다. 이후에 평균분석 결과와 Table 4의 직교배열표상의 결과와 비교하여 제한조건을 만족하며 목적함수 η_{aug} 가 가장 적은 설계변수는 3행(A_3, B_3, C_3, D_3, E_3)으로 나타났다. 가속도 86.6g, 무릎굽힘각도 15.2° 및 전단변위량 2.7mm이며, $A = 132\text{mm}, B = 75\text{mm}, C = 0\text{mm}, D = 0.5$ 및 $E = 60\text{mm}$ 를 구할 수 있었다.

4.2.3 결과분석 및 고찰

두 가지 설계방법에 따라 각각 서로 다른 최종 설계값을 얻게 되었다. 모사 결과만 이용한 경우는 A_3, B_2, C_3, D_3, E_1 이고 목적함수 $\eta_{aug} = 0.587$ 이다. 실험과 모사 결과를 동시에 이용한 경우는 Table 4의 3행(A_3, B_3, C_3, D_3, E_3)을 최종 설계값으로 얻었으며 목적함수 $\eta_{aug} = 0.565$ 로 특성치가 개선되었음을 알 수 있었다. 컴퓨터에 의한 모사를 이용한 경우에는 많은 오차가 포함되어 있으므로 오차의 크기에 따라 설계결과가 달라질 수 있다. 따라서 오차가 적은 실험을 직교배열표에 배치할 때 정확한 설계변수를 결정할 수 있었다.

5. 결론

- 1) 보행자 보호를 위한 자동차 후드 및 범퍼 구조물을 개발하는 설계문제에 직교배열표의 특성을 이용하여 실험의 결과를 설계에 직접 반영하는 새로운 방법을 적용하였다.
- 2) 기존의 직교배열표를 이용한 방법과 실험과 컴퓨터 모사 결과를 동시에 이용하여 직교배열표로 설계하는 방법 두 가지로 설계하고 설계변수의 수준값에 따른 효과 등 그 결과를 비교하여 최종 설계변수를 결정하였다.
- 3) 실험과 컴퓨터 모사 결과를 동시에 이용하여 직교배열표로 설계하는 방법의 경우 적은 실험 오차가 균등하게 분포하게 되어 설계변수 결정에 정확성을 기할 수 있었다.
- 4) 특성값에 대한 제한조건을 고려함으로써 예측되는 후드 및 범퍼의 특성값을 현실적으로 산출하였다.
- 5) 보행자 보호 기준을 만족하는 설계가 기존의 정

면, 읍셋 충돌 및 범퍼 충돌특성 등에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 건설교통부의 국가교통핵심기술개발사업 중 보행자 보호를 위한 첨단안전차량 개발 연구 및 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) UNECE/TRANS/WP.29/AC.3/7, "Proposal to Develop a Global Technical Regulation Concerning the Protection of Pedestrians and Other Vulnerable Road Users in Collision with Vehicles," <http://www.unece.org/trans/main/welcwp29.htm>, 2004.
- 2) P. J. Schuster, "Evaluation of the Real-world Injury-Reduction Potential of the Proposed European Pedestrian 'Leg-form' Impact Test Using a Detailed Finite Element Model of the Lower Limb," Michigan Technological University, 2000.
- 3) G. J. Park, "A Design Methodology with Orthogonal Arrays Using Experiments and Computer Simulations," J. of KSME (A), Vol.28, No.7, pp.885-895(in Korean), 2004.
- 4) J. W. Lee, "Vehicle Hood and Bumper Structure Design to Mitigate Casualties of Pedestrian Accidents," Dissertation for Ph.D. Hanyang University, Seoul, Korea(in Korean), 2004.
- 5) EEVC Working Group 17 Report, "Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Affected by Passenger Cars," European Enhanced Vehicle-Safety Committee, 1998.
- 6) UNECE/TRANS/WP.29/GRSP, "Pedestrian Traffic Accident Data," <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grsp>, 2003.
- 7) Commission of the European Communities, "Directive 2003/102/EC of the European Parliament and of the Council of 17 November 2003 Relating to the Protection of the Pedestrians and Other Vulnerable Road Users in the Event of a Collision with a Motor Vehicle and Amending Council Directive 70/156/EEC," Commission of the European Communities, 2003.
- 8) S. H. Park, Modern Design of Experiments, Minyoungsa, Seoul, Korea, 1991.
- 9) G. J. Park, Analytic Methods for Design Practice, Springer-Verlag, Germany(to be published), 2005.
- 10) LS-DYNA ver 960, "Keyword User's Manual," Livermore Software Technology Corporation, Livemore, CA 94550, 2001.
- 11) Y. H. Han and Y. W. Lee, "Development of a Vehicle Structure with Enhanced Pedestrian Safety," SAE 2003-01-1232, 2003.
- 12) J. W. Lee, C. W. Kim, K. T. Park and G. J. Park, "Vehicle Hood and Bumper structure Design to Mitigate Casualties of Pedestrian Accidents," KSAE04-F0117, 2004.