

정적충돌성을 고려한 자동차 옆문 충격빔의 최적설계

Optimization of the Automotive Side Door Impact Beam Considering Static Requirement

송 세 일*, 차 익 래**, 이 권 희***, 박 경 진****
Seil Song, Ikrae Cha, Kwonhee Lee, Gyungjin Park

Abstract

The door stiffness is one of the important factors for the side impact. Generally, the researches have been conducted on the assembled door. A side impact door beam is installed in a door to protect occupants from the side impact. This research is only concentrated on the side impact beam and a side impact beam is designed. The cross section is defined to have an elliptic shape. An optimization problem is defined to find the design maximizing the intrusion stiffness within the specified weight. Design variables are the radii and the thickness of the ellipsoid. The analysis of the side impact is carried out by the nonlinear finite element method. The optimization problem is solved by two methods. One is the experimental design scheme using an orthogonal array. The other is the gradient-based optimization using the response surface method(RSM). Both methods have obtained the better designs than the current one.

주요기술용어 : Side door impact beam(옆문 충격빔), Optimization(최적설계), Orthogonal array(직교배열표), Response surface method(반응표면법)

1. 서 론

충돌사고에서 승객보호를 위한 성능은 안전에 대한 인식의 증가로 자동차 전체 성능 중 가장 중요한 부분을 차지하게 되었다. 이미 미국, 유럽 공동체 등에서는 자동차 충돌에 관하여 더욱 강화된 법규를 제정 실시하고 있다. 국내 관련 업계에서도 이러한 움직임에 대응하기 위하여 자동차 설계시 충돌하중을 효과적으로 흡수하거나

충돌저항을 확보하는 것이 중요한 설계목표의 하나가 되었다. 측면충돌의 경우, 전방충돌의 경우와 더불어 그 피해를 줄이기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 차체 관점에서 진행되고 있다. 이것은 자동차 차체 관점에서 실험 및 설계가 수행되고 있어, 충돌성능에 중요한 영향을 미치는 보호장구에 대한 부품 단위 성능은 차체가 완성된 후에야 검증되어야 하기 때문이다. 기존의 연구중 최형연 등¹⁾은 도어에 충격빔이 장착되었을 때와 그렇지 않았을 때의 영향을 비교하였다. 그리고 김현영 등²⁾은 충격빔 모델에 대한 측면 충격시험시 속도의 크기, 속도 이력 및 힌지부 모델링의 영향을 검토하

* 회원, 자동차부품연구원
** 회원, 김&장법률사무소
*** 회원, 동아대학교 기계공학과
**** 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

였다. 그리고, 한길영 등³⁾은 충격빔의 재질에 대한 검토를 하였다. 본 논문의 목적은 측면충돌 시 침투(intrusion) 강성을 최대화시키도록 측면보호장구 중 하나인 충격빔(side impact beam)의 형상 및 치수를 결정하는 것이다. 이것을 위해 충격빔을 부품단위로 독립시킨 상태에서 해석 조건을 정의하고 최적설계 기법^{4,5)}을 제시하였다.

자동차 측면충돌 성능은 차체의 정적성능 및 동적성능으로 분류하여 검토한다. 각 시험조건 및 차체가 가져야 할 성능은 미연방 도로교통안전국(NHTSA)의 경우, FMVSS 214에 측면충돌보호(side impact protection)로써 명시되어 있다.⁶⁾ 국내의 경우에도 자동차 안전기준 시행세칙에 승객보호시험 및 옆문강도 시험으로써 명시되어 있다.⁷⁾

정적성능을 검토하기 위한 시험조건은 규격화된 강철 원주로 일정 이하의 저속도로 연속적으로 하중을 차체의 앞문에 밀착하여 작용시키는 것이다. 한편 동적성능을 검토하기 위한 시험조건은 이동벽(moving deformable barrier)을 특정 속도로 차체에 충돌시키는 것이다. 대부분 동적성능은 차체의 필라(pillar), 락커(rocker) 등의 영향이 크며 도어의 부품 등도 영향을 주고 있다. 반면에 정적성능은 하중이 강철 원주 자체가 문에 밀착되어 작용하므로 충격빔의 영향이 크다고 할 수 있다. 따라서 충격빔 설계시 먼저 정적성능만을 고려하여 설계한 후 차체 단위로 동적성능을 검토하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 정적성능을 위한 하중조건을 고려하여 충격빔의 최적설계를 수행하였다. 이때 LS/DYNA3D를 이용한 준정적 해석을 통해 이 시험조건에 대한 전산 모사를 수행하였다.^{8,9)}

기존의 충격빔에서 보편적 단면 형태였던 원형을 타원으로 일반화시켜, 타원의 장경(major axis)과 단경(minor axis), 두께를 설계변수로 설정하여 이들을 결정하였다. 이 설계변수들을 결정하기 위하여 실험계획법의 일종인 직교배열표(orthogonal array) 방법과 반응표면법(response surface method)에 의한 최적화 방법의 두 가지 기법을 각각

이용하였다. 각 기법의 적용시 목적함수는 침투저항(intrusion resistance)으로, 제한조건함수는 중량으로 설정하였다. 즉, 최적설계를 수행하여 중량이 목표중량 이하로 되면서 침투저항이 최대가 되는 타원의 형상 및 두께를 결정하는 것이다.

직교배열표 실험을 이용한 설계 기법에서는 설계변수의 수준을 가정하고, 이에 적합한 직교배열표를 선정하여 실험(여기서는 유한요소해석)을 통하여 최적해를 산출하였다.^{10,11)} 이것을 위해, 각 설계변수의 수준을 설정하고 이에 따른 직교배열표를 선정하여 특성함수(characteristic function)를 계산하였다. 특성함수는 목적함수 및 제한조건함수의 유용성에 따라 부과되는 벌칙함수로 정의한 것이다.¹²⁾ 이 결과로부터 평균분석을 통하여 최적수준을 결정하도록 하였다. 직교배열표를 이용한 자세한 설계과정은 참고문헌 12)에 수록되어 있다.

반응표면법을 이용한 최적설계에서는 직교배열표 실험시 사용되었던 설계점을 이용하여, 충격빔의 중량 및 침투저항 값과 설계변수와의 함수관계를 회귀분석을 통한 이차함수로 근사화하였다.^{13,14)} 이 함수들을 목적함수 및 제한조건함수로 설정하고, 구배기초최적설계(gradient-based optimization)를 이용하여 타원의 형상 및 두께를 결정하였다.

두 가지 기법으로 구한 최적해를 비교, 분석하였으며 그 결과 약 10%의 경량화를 이루었고, 20%의 충돌 저항 성능의 향상을 얻을 수 있었다.

2. 자동차 옆문 충격빔의 비선형 해석

2.1 외연적 연산방법(explicit algorithm)

가상일의 원리를 이용하고, 감쇠(damping)를 무시하면 비선형 유한요소 운동방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.⁸⁾

$$\sum_{e=1}^n (m^e \ddot{v}_n^e + c^e m^e \dot{v}^e + k^e v^e - f^e + r_c^e) = 0 \quad (1)$$

여기서, \ddot{v} 는 가속도벡터, \dot{v} 는 속도벡터, v 는 변

위벡터, n_e 는 요소의 수, m^e 는 질량행렬, $c^e m^e$ 는 질량비례 감쇄행렬, k^e 는 강성행렬, f^e 는 체력 및 표면 작용력벡터, r_c^e 는 접촉력벡터를 표시한다. 비선형 유한요소 방정식은 감쇄효과를 무시하면, 시간 n 단계에서 식 (2)와 같은 행렬식으로 쓸 수 있다.

$$[M]\{\ddot{v}_n\} + [K]\{v_n\} - \{F_n\} + \{R_{cn}\} = 0 \quad (2)$$

위 식으로부터 시간증분 $n+1$ 에서의 해를 얻기 위하여 다음과 같은 중심차분법(central difference method)을 사용한다.

$$\ddot{v}_n = \frac{\dot{v}_{n+\frac{1}{2}} - \dot{v}_{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{v_{n+1} - 2v_n + v_{n-1}}{\Delta t^2} \quad (3)$$

여기서,

$$\dot{v}_{n+\frac{1}{2}} = \frac{v_{n+1} - v_n}{\Delta t} \text{ or } \dot{v}_n = \frac{v_{n+1} - v_{n-1}}{2\Delta t} \quad (4)$$

식 (3)을 (2)식에 대입하고 정리하면 간단한 계산에 의해 계속적인 해를 얻을 수 있는 형태가 된다.

$$\frac{[M]}{\Delta t^2} \{v_{n+1}\} = \{F_n\} - \{R_{cn}\} + \left(\frac{2[M]}{\Delta t^2} - [K]\right) \{v_n\} - \frac{[M]}{\Delta t^2} \{v_{n-1}\} \quad (5)$$

식 (5)에서 알 수 있듯이 외연적 시간적분법(implicit integration method)의 경우 전체 강성행렬의 역행렬을 구할 필요가 없다. 따라서 강성행렬을 위한 반복계산이 불필요하게 되어 많은 해석시간을 단축할 수 있는 장점이 있다.

2.2 충격빔의 모델링 및 해석

미국이나 유럽공동체 등 자동차 관련 법규를 제정하고 있는 국가에서는 모두 측면충돌 규정을 제정, 시행하고 있다. 우리나라 역시 자동차 안전기준 시행세칙 중, “충돌시 승객보호 시험”과 “옆문 강도시험”을 통해 이에 대한 기준을 정하여 시행하고 있다.^{6,7)} 본 연구에서는 서론에서도 언급하였듯이 자동차 도어 충격빔 설계를 위해 정적충돌 성능인 옆문 강도시험 조건만을 고

려하였다.

‘옆문 강도시험’은 다음과 같은 조건으로 수행된다. 모서리 반경이 12.7mm이며 직경 305mm의 강철 원주나 반원주로 제작된 시험장치를 사용하여 하중을 작용시킨다. 하중 방향은 차량 중심선 상의 수직면에 대하여 직각을 이루는 차 실내의 방향이다. 이 방향으로 옆문 외부표면이 전체 변위량이 460mm에 도달할 때까지 12.7mm/sec 이하의 속도로 연속적인 하중을 가한다. 그리고 155mm 변위량에 대한 평균하중인 초기충돌저항, 310mm 변위량에 대한 평균하중인 중간충돌저항, 460mm 변위량에 대한 평균하중인 최대충돌저항을 기록하도록 한다. 초기충돌저항시험은 120초 이내에 완료되어야 하며, ‘자동차 안전 기준에 관한 규칙’ 제104조 제1항 기준에 적합하여야 한다.

‘옆문강도시험’은 차체의 시스템 상태에서 수행되어야 한다. 그러나 충격빔 자체의 침투저항 성능 향상을 목적으로 설계를 수행하였기 때문에 충격빔 외의 다른 부품들은 고려하지 않았다. 정적성능을 위한 조건은 준정적 상태이다. 따라서 함축적 방법(implicit method)으로 해를 구하는 것이 바람직하지만 계산시간이 과도하게 걸리는 단점이 있다. 본 논문에서는 충격빔의 전산모사를 위하여, 외연적 시간적분법에 의한 LS/DYNA3D를 가지고 비선형 해석을 수행하였다. 외연적 시간적분법의 특성상 실제 시험과 같은 낮은 속도로 해석을 수행할 경우 계산량이 너무 많아 해석이 거의 불가능하게 된다. 이것을 해결하기 위하여 충격체의 속도를 800mm/sec로 증가시켰다. Fig. 1은 유한요소 모델과 전산모사과정을 표시한 것이다.

실제 시험은 차체단위로 수행되므로 전산모사와 실제 시험결과와의 튜닝절차가 필요하다. 전산모사에서 실제 차체의 거동을 표현하기 위해 충격빔과 옆문의 내판과 연결되는 지점을 스프링으로써 모델링하였다.

Fig. 2는 초기설계시의 실차 시험결과와 유한요소법에 의한 전산모사 결과를 나타내고 있다.

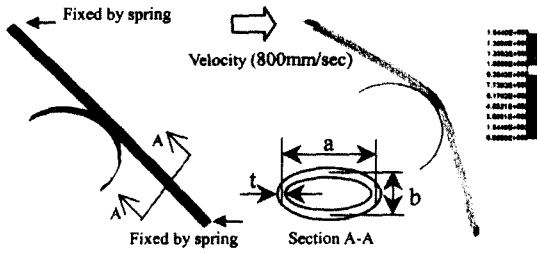


Fig. 1 Intrusion analysis of impact beam

실차시험은 침투량이 155mm, 310mm, 460mm인 지점에서의 평균저항 하중값으로 성능을 판단하게 된다. 전산모사 수행시 초기충돌저항이 나타나는 155mm 침투를 기준으로 침투저항성능을 판단하였다. 시험 결과로부터 침투량이 약 120mm 근에서 하중의 급격한 변화가 있음을 알 수 있다. 이것은 충격빔의 연결부인 브라킷(bracket)에서 용접점 탈착이 발생하여 생긴 결과이다. 따라서 실차 시험에서 나타난 용접부 탈착의 영향을 고려하지 않기 위하여 탈착 전의 값인 120mm일 때의 값을 비교 기준으로 해석하였다.

3. 자동차 옆문 충격빔의 설계

3.1 문제의 정식화

측면충돌의 경우, 정면충돌에 비하여 충격체와 승객간의 거리가 매우 가깝다. 그리고 Fig. 2에서도 알 수 있듯이, 관심영역에서 변위-침투저항곡선의 비선형성이 크지 않으므로 강성증대를 통한 침투저항성능의 향상이 우선되어야 한다. 결국 이러한 시도는 Fig. 2의 곡선아래 영역을 최대화시키는 결과를 가져 올 것이다. 이것을 목적으로 충격빔의 최적화를 수행하였다.

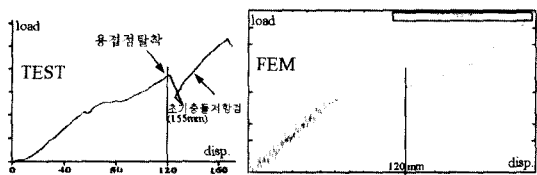


Fig. 2 Side impact protection test and simulation results for static requirement

충격빔의 크기와 두께가 커지면 강성 역시 계속 커지게 된다. 따라서 충격빔의 초기모델에 대한 중량을 제한조건으로 설정하였다. 식 (6)과 같이 최적화 문제를 정식화하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && a, b, t \\
 & \text{Maximize} && f(a, b, t) \\
 & \text{Subject to} && g \leq g_0
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, a 는 타원의 장경, b 는 타원의 단경, t 는 빔의 두께, $f(a, b, c)$ 는 충격빔과 충격체간의 접촉력 함수, g_0 는 충격빔의 목표중량, g 는 타원형상 빔의 중량을 나타내며 빔의 길이는 일정하다.

초기설계에서 충격빔의 단면이 원형이었던 것에 비해 본 논문에서는 단면의 형태를 보다 일반적인 타원으로 취급하였다. 그리고 최적설계를 위한 기법으로써, 직교배열표를 이용한 실험계획법과 반응표면법에 의한 최적화 방법을 각각 이용하였다. 식 (6)과 같이 타원형상을 가진 충격빔 단면의 장경과 단경, 충격빔의 두께를 설계변수로 설정하고 충격빔의 침투저항성능을 목적함수로 하여 최적화를 수행하였다. 유한요소 해석 시 발생하는 충격체와 충격빔의 접촉력으로 충격빔의 침투저항성능을 나타내었다.

3.2 직교배열표를 이용한 충격빔 설계

3.2.1 직교배열표를 이용한 최적화 기법

실험을 계획하여 배치하는 여러 가지 방법이 있으나, 가장 정확한 방법은 모든 경우를 고려하는 전조합실험법이다. 전조합 실험법의 경우 인자수 및 수준수가 늘어남에 따라 실시해야 하는 실험횟수가 급격히 증가하게 된다. 따라서 전조합실험법은 사용이 불가능한 경우가 있다. 이런 경우 실험계획법 중 하나인 직교배열표 실험을 이용하면 실험 횟수를 줄이고 전조합실험법의 효과를 얻을 수 있다.

직교배열표의 실험으로부터 얻어지는 특성치는 최적설계에 취급되는 제한조건을 포함하고 있지 않다. 직교배열표의 각 실험에서 제한조건의 유용성이 포함될 수 있도록 특성함수를 정의

한다. 먼저 식 (7)과 같이 제한조건함수의 유용성을 처리할 수 있는 벌칙함수, $P(x)$ 를 정의한다. 그 다음 식 (8)과 같이 목적함수, $f(x)$ 및 벌칙함수로 구성되는 특성함수, $Q(x)$ 를 정의할 수 있다.

$$P(x) = s \times \max [0, e] \quad (7)$$

$$Q(x) = f(x) - P(x) \quad (8)$$

윗식에서 x, e, s 는 각각 설계변수벡터(식 (6)의 a, b, t), 제한조건함수의 최대 위배량과 조절계수를 표시한다.

조절계수, s 는 목적함수 및 벌칙함수의 영향도를 조절하는 역할을 한다. 임의의 설계점에서 모든 제한조건을 만족시키는 경우 벌칙함수는 영의 값을 갖는다. 즉, 식 (8)에서는 원래 최적설계 정식화인 식 (6)에서 목적함수를 최대화시키는 설계변수를 찾는 것이므로 제한조건을 위배하는 경우 특성함수는 벌칙함수 앞에 음의 부호를 갖게 된다. 벌칙함수에서 조절계수를 크게 설정할 경우 이것은 특성함수에서 목적함수의 영향을 무시하는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 목적함수, $f(x)$ 에 비해 벌칙항이 한 차원 낮도록 값을 부여하였다.

특성함수에 의해 새롭게 정의된 반응치를 이용하여 새로 구성된 직교배열표로부터 최적수준을 결정하는 방법은 실험계획법의 직교배열표 해석 기법과 동일하다. 그러나 구해진 최적수준의 조합이 제한조건을 위배하였을 경우 다음과 같은 과정을 밟는다.¹²⁾ 모든 설계변수의 수준 조합에 대해 특성함수의 추정치를 구하여 내림차순으로 배열한다. 이때 추정치는 이미 구해진 특성치 값을 이용하므로 추가적인 유한요소 해석은 수행할 필요가 없다. 그 다음 추정치가 큰 순서부터 차례대로 유한요소 해석을 수행하여 제한조건함수를 위배하는지를 검토한다. 이때 위배되지 않는 조합을 최적해로 선정한다. 설계변수의 조합에 대한 추정치는 교호작용을 무시하고 가법모델(additivity)을 구성하면 다음 식과 같이 표시할 수 있다.¹⁰⁻¹²⁾

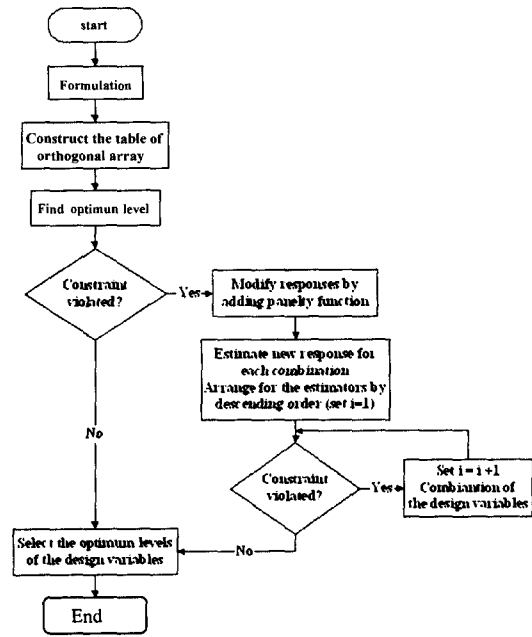


Fig. 3 Flow chart of discrete design for a constrained problem

$$\hat{Q}(x) = m_{x_1} + m_{x_2} + \dots + m_{x_n} - (n-1)\bar{m} \quad (9)$$

여기서 $\bar{m} = \sum_{i=1}^N Q_i / N$ (전체 특성치의 평균)이고, m_{x_n} 은 설계변수, x_n 의 최적수준에 대한 특성함수 값의 합을 N_l 로 나눈 값이며, N 은 직교배열표의 실험 횟수, l 은 수준수, n 은 설계변수의 수를 나타낸다. 직교배열표 실험에 의한 최적설계 과정을 Fig. 3에 나타내었다.

3.2.2 결과

충격빔 설계문제에서 설계변수의 수는 3이며 수준수는 3으로 설정하였다. Table 1은 각각의 설계변수에 대한 수준값을 표시한 것이다. 여기서 상한값과 하한값은 제작 가능한 치수의 범위를 잡은 것이며 상한값은 1수준, 하한값은 3수준, 그 중간값은 2수준으로 설정하였다. Table 1의 수준값을 갖고, Table 2와 같이 각 설계변수를 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표에 배치하였다.

그리고, 각 행에 대응하는 18개의 특성함수 값

Table 1 Design variables and their levels(mm)

D.V.	Level		
	1	2	3
a	17.0	15.5	14.0
b	14.0	12.5	11.0
t	2.6	2.4	2.2

Table 2 L₁₈(2¹×3⁷) orthogonal array

Exp No.	Column number and design variables assigned								(Qx)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	error	a	b	t	error	error	error	error	
1	0	17.0	14.0	2.60	0	0	0	0	3.51E+07
2	0	17.0	12.5	2.40	0	0	0	0	2.83E+07
3	0	17.0	11.0	2.20	0	0	0	0	2.69E+07
4	0	15.5	14.0	2.60	0	0	0	0	2.75E+07
5	0	15.5	12.5	2.40	0	0	0	0	2.71E+07
6	0	15.5	11.0	2.20	0	0	0	0	2.59E+07
7	0	14.0	14.0	2.40	0	0	0	0	2.50E+07
8	0	14.0	12.5	2.20	0	0	0	0	2.39E+07
9	0	14.0	11.0	2.60	0	0	0	0	2.72E+07
10	0	17.0	14.0	2.20	0	0	0	0	2.98E+07
11	0	17.0	12.5	2.60	0	0	0	0	3.07E+07
12	0	17.0	11.0	2.40	0	0	0	0	2.87E+07
13	0	15.5	14.0	2.40	0	0	0	0	2.48E+07
14	0	15.5	12.5	2.20	0	0	0	0	2.47E+07
15	0	15.5	11.0	2.60	0	0	0	0	2.87E+07
16	0	14.0	14.0	2.20	0	0	0	0	2.34E+07
17	0	14.0	12.5	2.60	0	0	0	0	2.82E+07
18	0	14.0	11.0	2.40	0	0	0	0	2.67E+07

은 18회의 유한요소해석을 통해 목적함수, 제한 조건 함수로부터 계산되었다. 그 다음, 직교배열 표 분석을 통하여 최적해를 산출하였다. 이 직교배열표를 선정할 이유는 설계변수인 충격빔의 장경, 단경 및 두께 사이의 교호작용 영향을 실험

Table 3 ANOM and ANOVA

D.V.	Level means			Sum of square	Mean of square
	1	2	3		
error	2.67E+07	2.69E+07		8.45E+10	8.45E+10
a	2.87E+07	2.60E+07	2.57E+07	3.41E+13	1.70E+13
b	2.65E+07	2.66E+07	2.73E+07	2.42E+12	1.21E+12
t	2.82E+07	2.65E+07	2.57E+07	2.03E+13	1.02E+13
error2	2.71E+07	2.62E+07	2.71E+07	2.80E+12	1.40E+12
error3	2.70E+07	2.68E+07	2.66E+07	5.76E+11	2.88E+11
error4	2.71E+07	2.74E+07	2.60E+07	6.75E+12	3.38E+12
error5	2.78E+07	2.61E+07	2.65E+07	1.01E+13	5.07E+12

전에 미리 파악하는 것이 불가능하므로 각 설계 변수 사이의 교호작용이 다른 행에 골고루 분산 되어 나타나게 하기 위함이다.

특성함수의 값은 제한조건을 위배하지 않았을 경우는 목적함수값인 충격빔과 충격체 사이의 접촉력이며, 위배하였을 경우는 목적함수에 벌칙함수를 더한 값이다. 직교배열표의 실험결과로부터 구한 분산분석 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3의 분산분석을 통하여 구한 제곱합의 계산 결과로부터, 주어진 수준 영역에서 인자 a와 t가 상대적으로 b에 비해서 비교적 영향력이 큰 인자임을 알 수 있다.

실험계획법에서 제곱합은 주어진 영역에서의 민감도를 의미하는 값이다. 평균분석을 통하여 예측된 최적조합은 $[a_1, b_3, t_1]^T = [17, 11, 2.6]^T$ (mm)이며, 예측된 최적수준에서의 충격빔과 충격체 간의 접촉력은 해석을 통하여 $3160 \times 10^7 \text{kgmm/sec}^2$ 이다. 직교배열표의 분산분석을 통해 구해진 추정치와 실험에 의한 결과치를 비교하면 가산성 성립여부를 평가할 수 있다. 분산분석으로부터 구해진 추정치는 $3.08 \times 10^7 \text{kgmm/sec}^2$ 이며, 오차 분산(σ_0^2)은 1.14×10^{12} , $1/n_0$ 은 0.389이다. 따라서, $2\sigma_{pred}$ 은 1.33×10^6 이다. 실험치와 추정치의 차가 8.78×10^5 으로 $2\sigma_{pred}$ 의 값보다 작으므로 95% 신

Table 4 Arrangement for the estimators by descending order

	Estimator	Factor			Constraint
		a	b	T	
1	30677777.8	1	3	1	violated
2	29977777.8	1	2	1	violated
3	29861111.1	1	1	1	violated
4	28961111.1	1	3	2	satisfied
5	28261111.1	1	2	2	
.	
.	
.	
25	24544444.4	2	1	3	
26	24377777.8	3	2	3	
27	24261111.1	3	1	3	

되도 범위에서 가산성이 만족하는 것을 알 수 있다. 그러나, 결정된 치수에 의한 조합에서 제한조건을 위배하였으므로 추정치 내림차순에 의한 정리를 통하여 치수를 재선정하였다. 추정치 내림차순에 의한 정리는 직교배열표에 의해 구한 추정치를 가장 큰 값부터 순차적으로 배열하는 것이다. 내림차순 결과를 Table 4에 표시하였다.

추정치 내림차순 정리에 의하여 구한 제한조건을 만족하는 최적의 조합은 $[a_1, b_3, t_2]^T = [17, 11, 2.4]^T$ (mm)이다. 이 수준조합에서 충격빔과 충격체 사이의 접촉력은 기존의 원형단면에 대한 값으로 정규화할 경우, 1.196 N/N이 산출되었다. 원형 충격빔과 최적설계 후 결정된 충격빔의 성능 비교를 Table 5에 나타내었다. 최적수준에서는 기존의 원형 충격빔 비하여 19.6%의 강성 증가

Table 5 Result and comparison of performance

Section shape	Results		Improvements	
	Force(N/N)	Mass(kg/kg)	Force	Mass
Circle	1.000	1.000	-	-
Optimum	1.196	0.896	19.6%	-10.4%

와 10.4%의 중량 감소의 결과를 얻었다.

3.3 반응표면법을 이용한 충격빔 설계

3.3.1 반응표면법을 이용한 최적설계

반응표면법이란 여러 개의 설명변수들이 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 여기서 설명변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 의미한다. 반면에 반응변수는 설명변수의 영향을 받아서 어떤 반응을 나타내는 종속변수를 의미한다.^{11,13-15)}

반응표면법을 이용하여 독립변수들과 종속변수 간의 함수관계를 데이터로부터 추정하여 독립변수들의 값의 변화에 의한 반응량을 예측할 수 있다. 또한 반응량이 어떠한 값에서 최적화 될 것인가를 찾아낼 수 있다. 추정된 회귀모형에 대한 정도(precision) 평가를 위하여 분산분석표에 의한 F-검정, 결정계수(coefficient of determination) R^2 , 잔차 평균제곱(MSE) 등 여러 가지 방법들이 사용된다. 본 논문에서는 결정계수, R^2 을 이용하여 회귀모형의 정도를 측정하였다.

구배기초 최적설계(gradient-based optimization)에서 계산시간이 많은 비선형 유한요소해석을 포함하는 문제의 경우, 작은 수의 데이터를 이용하여 원하는 조건을 만족하는 결과를 얻기 위하여 반응표면법을 이용하고 있다. 반응표면법을 이용, 관심영역 안에서 회귀모형을 추정하면 목적함수나 제한조건의 근사화된 함수를 얻을 수 있어 추정된 목적함수나 제한조건함수를 이용하여 최적설계를 수행할 수 있다.

반응표면법을 이용한 최적설계는 근사함수를 이용하는 접근방식을 사용하고 있다. 그러므로 최적값이 원래 정식화문제에 대한 수학적인 최적값을 구하지는 못하는 단점이 있다. 또는 실제 적용할 수 없는 값이 산출될 수도 있다. 그러나 함수계산 비용이 비싸거나, 해석에 많은 시간이 필요한 문제들에 적용하곤 한다. 그리고 비선형성이 크거나 민감도해석이 어려운 분야에서 매

우 유용한 도구가 될 수 있다.

3.3.2 결과

앞에서 수행한 직교배열표 실험을 통한 최적설계의 결과와의 비교를 위하여, 반응표면법을 위한 최적설계에서는 설계 후보 점 선정시 앞에서 수행했던 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 의 결과를 그대로 이용하였다. 선정된 18개의 목적함수 값을 이용하여 회귀분석을 하였다. 회귀 분석을 통하여 추정된 목적함수의 회귀모형을 식 (10)에 나타내었다.¹³⁾

$$f(a, b, t) = 421010 - 26773274 a - 16339739b - 88044159 t + 6.25 \times 10^8 a^2 + 1.89 \times 10^8 b^2 + 1.44 \times 10^{10} t^2 + 5.58 \times 10^8 ab + 1.27 \times 10^9 bt + 7.13 \times 10^8 ta \quad (10)$$

추정된 회귀모형의 정도는 결정계수, R^2 의 값이 89.6%로 산출되었다. 이는 반응치의 약 90%가 추정된 회귀방정식에 의하여 설명되어지고 있음을 알 수 있다. 반면에 식 (6)에서 제한조건으로 설정된 중량은 설계변수에 대한 간단한 함수로 표시되므로, 원함수를 그대로 이용하였다. 추정된 회귀모형을 목적함수로 놓고 제한조건함수로 중량을 고려하여 식 (6)의 정식화를 표현하였다. 최적해는 순차적 이차 프로그래밍(Recursive Quadratic Programming)방법¹⁴⁾을 이용하여 산출하였다.

구해진 최적해의 조합은 $[a_1, b_3, t_1]^T = [17, 11, 2.403]^T$ (mm)이다. 이 값은 직교배열표를 이용하여 구한 최적해와 거의 동일하다. 그 이유는 침투성능을 높이기 위하여 타윈의 장경은 최대가 되고, 단경은 최소가 되려는 경향이 있기 때문이다. 반면에 두께는 우연히 하한값과 상한값의 중간을 유지하게 되었다. 각각의 설계변수들의 침투성능에 대한 기여도를 알기 위하여 최적해에 대한 민감도를 구하였다. 단면의 장경에 대한 민감도는 2.33×10^6 , 단면의 단경에 대한 민감도는 3.56×10^5 , 충격빔 두께에 대한 민감도는 2.25×10^6 이다. 이 결과로부터 단면의 장경과 두께의 기여도가 단면의 단경보다 큰 것을 알 수 있다. 민감도

결과의 경향은 직교배열표를 이용한 최적설계시 제곱합의 분석결과와 동일한 것이다. 그러나 항상 동일한 결과를 가져 올 수 있다고는 말할 수 없다. 실험계획법의 제곱합은 영역에 관한 영향도인 반면, 구배기초최적설계시의 민감도는 특정 설계점에서의 영향도이기 때문이다.

4. 결론

자동차 충격빔의 충돌저항성능 향상과 중량의 감소를 위하여 충격빔 단면의 형상 최적화를 수행하였다. 충격빔 단면의 장경과 단경, 그리고 두께를 설계변수로 선정하고 직교배열표 및 반응표면법에 의한 최적화를 수행하여 충격빔의 형상을 결정하였다.

1) 충격빔의 설계를 위하여 직교배열표 실험에 의한 최적설계와 반응표면법을 이용한 최적설계를 각각 수행하여 비교하였다. 두 방법에 의한 최적설계 결과 매우 유사한 최적값을 얻을 수 있었다.

반응표면법을 이용한 최적화 방법에서는 보다 신뢰성 있는 해를 결정하기 위해서는 후보설계점 선정이 중요한 반면, 직교배열표를 이용한 방법에서는 직교배열표의 선정, 수준의 결정과 설계변수의 배치가 중요하다. 충격빔 설계 문제에서는 빔두께 값이 하한값 및 상한값의 중간으로 해가 산출되어 두 방법 모두 비슷한 결과를 갖게 되었다.

2) 최적해에 대한 민감도를 구한 결과 두 방법에서 모두 충격빔 단면의 장경과 두께가 단면의 단경에 비하여 큰 기여도를 가짐을 알 수 있었다. 이 결과로부터 기존의 원형 단면을 가지는 충격빔에 비하여 타원형 단면을 가지는 충격빔에서 성능 및 경량화가 가능한 이유를 찾을 수 있다.

3) 직교배열표 및 반응표면법을 이용한 최적화 기법에서, 기존 원형단면 충격빔에 대하여 충돌저항성능이 19.6% 향상되었으며, 10.4%의 중량이 감소되었다.

후 기

이 연구는 한국과학재단지정 최적설계신기술 센터의 연구비 및 교육부 지원 BK21 사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 최형연, 신재호, 박현호, "유한요소법을 이용한 도어 패딩과 Intrusion Bar의 설계 해석," 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp.449-455, 1995.
- 2) 김현영, 강신유, "자동차 프론트 도어의 측면 충격 해석," 자동차공학회지, 제19권 제2호, pp.1-9, 1997.
- 3) 한길영, 이동기, "자동차 사이드 도어용 인트루전 비임 개발을 위한 케블라 섬유 강화 복합재료의 기계적 특성에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제14권 제2호, pp.89-98, 2000.
- 4) J. S. Arora, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill Book Company, New York, 1989.
- 5) G. N. Vanderplaats, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.
- 6) Fmvss Standard No.214 Side Impact Protection, National Highway Traffic Safety Administration.
- 7) 자동차안전기준시행세칙, 개정 1.28 건설교통부고시제1997-17호, 1997.
- 8) LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology, CO., 1999.
- 9) Klaus-Jurgen Bathe, Finite Element Procedures, Prentice-Hall, Inc. A Simon and Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1996.
- 10) N. S. Phadke, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, New Jersey, 1989.
- 11) 박성현, 현대실험 계획법, 민영사, 1990.
- 12) 이권희, 박경진, "제한조건이 있는 문제의 이산설계공간에서의 강건최적설계," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제5호, pp.728-737, 1998.
- 13) MINTab Minitab help: Release 12, Minitab, Inc., 1997.
- 14) VisualDOC Manual 1.0, Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suit M-210, Colorado Springs, CO., 1998.
- 15) Y. S. Park, S. H. Lee, G. J. Park, "A Study of Direct vs. Approximation Methods in Structural Optimization," Structural Optimization, Vol.10, No. 1, pp.64-66, 1994.