

반응표면법을 이용한 차체 부재의 충돌성능 향상을 위한 설계 최적화

나 승 열¹⁾ · 송 정 한²⁾ · 허 훈²⁾ · 김 현 섭³⁾

삼성전자 메카트로닉스 센터¹⁾ · 한국과학기술원 기계공학과²⁾ · 기아자동차 차체설계3팀

Design Optimization of Auto-body Members for Crashworthiness Enhancement with the Response Surface Method

Seungyul Na¹⁾ · Junghan Song²⁾ · Hoon Huh^{*2)} · Hyunsub Kim³⁾

¹⁾Samsung Electronics Corporation, Whaseo-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi 440-150, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 350-701, Korea

³⁾Kia Motor Corporation, 772-1 Jangduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 10 November 2004 / Accepted 9 May 2005)

Abstract : The response surface method is the statistical method which can be applied to the non-sensitivity based optimization. The response surface which is constructed by the least square method contains only the polynomial terms so that the global maximum and minimum points are easily obtained. In this paper, this response surface method is utilized to optimize the crashworthiness of auto-body members. As the first step, the thickness of a simple circular tube is optimized to confirm the application of the response surface method to the crashworthiness. Optimization of the thickness on the front side member is, then, performed with the constructed response surface of the absorbed energy and deformation. Optimization results demonstrate that the absorbed energy and the deformation pattern of the front side member is improved in the viewpoint of enhancement of the crashworthiness.

Key words : Response surface method(반응표면법), Least square method(최소자승법), Crashworthiness(충돌성능), Front side member(프런트 사이드 멤버)

1. 서론

최적설계는 다양한 분야에서 널리 응용되고 있으며, 자동차 산업에서는 차량의 구조 성능 향상을 위한 수단으로 도입 하였다. 그러나 자동차 산업에 도입된 초기의 최적설계는 설계에 직접 적용하기 보다는 설계에 적용 가능한 아이디어를 확인하는 과정에 불과하였다. 최근에는 유한요소법의 발달과 컴퓨터 성능의 획기적인 향상을 바탕으로 최적설계를 유한요소법과 결합시켜서 초기 설계 단계부터

다양하게 적극적으로 적용하고 있다. 특히, 차량의 충돌 안전성과 경량화에 대한 요구가 높아지며 구조 최적화의 필요성이 증가하였기 때문에 차량의 구조 설계나 부품의 설계에 빈번히 시도되고 있다. 위에서 언급한 충돌 안전성의 확보와 경량화된 차체 구조의 설계는 서로간의 상보성을 요구하기 때문에 개인의 경험과 지식을 바탕으로 달성하기에는 어려운 문제이며 너무나 많은 변수를 고려해야 하기 때문에 최적설계의 적용이 반드시 필요하다.

차량 구조 설계에 필수적인 최적설계는 민감도 기법과 비 민감도 기법으로 분류가 가능하다. 민감도 기법의 경우에는 상황모사와 수치적 부정확성

*To whom correspondence should be addressed.
hhuh@kaist.ac.kr

그리고 많은 제한조건으로 인하여 계산량이 급격히 증가되는 단점으로 인하여 효율적인 해를 얻기 힘들게 된다. 이와 비교하여 반응표면법과 같은 비 민감도 기법을 적용하는 경우에는 민감도 기법에 비하여 경제적인 방법으로 최적화를 수행할 수 있으며, 국소적으로 발생하는 최소, 최대의 영향을 받지 않고 전체적인 경향을 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있다.

반응표면의 개념은 1951년 Box와 Willson¹⁾에 의하여 제시되었다. 이후 통계 분야에서 반응표면을 구성하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. Allen^{2,3)}은 근사된 반응표면의 예측성을 나타낼 수 있는 통계적 파라미터인 R^2 를, Seber⁴⁾는 반응표면의 근사 정도를 나타낼 수 있는 R_{adj}^2 을 제시하였다. 이러한 반응표면법을 충돌 문제의 최적화에 적용한 연구로서 Yamazaki⁵⁾는 간단한 원통형 튜브의 최적화를 수행하였으며, Kutaran⁶⁾은 Yamazaki의 원통형 튜브 문제, 단순 차량 모델의 충돌 최적화, 그리고 고속도로 콘크리트 장애물의 형상 최적화를 수행하였다. 이외에도 다양한 형상에 관해서 반응표면을 이용한 설계 최적화가 수행되었다.^{7,8)}

그러나 현재 반응표면을 적용한 충돌 최적화의 경우 대부분의 문제가 기하학적으로 간단하며, 실제 설계에 적용하기 힘든 단순 형상 부재에 제한되거나, 반응표면법이 충돌 문제의 최적화에 적용 가능한 가를 타진하는데 국한되고 있다. 본 논문에서는 반응표면법을 이용하여 우선 간단한 원형 구조형 부재의 충돌 최적화를 수행하여 적용 가능성을 검토하고, 이를 바탕으로 실제 차체용 부재인 프런트 사이드 멤버(front side member)의 충돌성능 향상을 위한 최적화에 적용하였다. 프런트 사이드 멤버의 경우 기하학적 형상이 복잡하고, 서로 여러 부재가 연결되어 있으므로 모든 부재를 설계변수로 사용할 수는 없다. 따라서 프런트 사이드 멤버의 최적화를 위하여 본 논문에서는 변수결정 단계와 적절한 반응표면을 구성하는 단계로 나누어 수행하였으며, 변형량과 단위 변형당 흡수하는 에너지를 동시에 목적함수로 고려하여 최적화를 수행하였다.

2. 반응표면의 구성 및 적합성

반응표면법(response surface method)을 이용하여 최적화를 수행하는 과정은 설계영역에서 결정된 실험점(design point)를 바탕으로 반응표면을 구성하는 단계와 앞에서 얻어진 반응표면을 통하여 최적화를 수행하는 과정으로 분류할 수 있다. 반응표면을 구성하는 단계에서는 설계점에 대해서 얻은 결과를 바탕으로 최소자승법(least square method)을 적용함으로써 반응표면을 구성하게 된다.

최소자승법은 다중선형회귀분석(multiple linear regression analysis)에서 회귀계수를 구하기 위하여 사용하는 가장 보편적인 방법이다. 그 과정은 관심을 가지고 있는 반응에 대하여 영향을 미치는 인자를 설계변수로 정의한다. 그리고 설계변수에서 제외된 인자들은 오차로 고려한다. 마지막으로 설계변수로 고려된 인자에 관하여 적절한 실험이나 해석을 반복하고, 여기서 얻어진 결과에 최소자승법을 적용하여 식 (1)과 같이 반응표면을 결정하게 된다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

where y_i : i-th response

β_i : regression coefficient

x_{ij} : design variable

ε_i : error term of the i-th response

여기서 회귀계수는 식 (2)와 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \min L &= \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) \\ \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\beta}} &= -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} = 0 \\ \therefore \boldsymbol{\beta} &\cong \mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 근사된 반응표면은 식 (3)과 같다.

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\mathbf{b} \quad (3)$$

where $\hat{\mathbf{y}}$: approximate response

\mathbf{b} : regression coefficient

최소자승법을 통하여 얻어지는 반응표면의 모델은 다항식의 차수에 따라서 다양하게 결정될 수 있

다. 따라서 최소자승법을 통하여 얻어진 반응표면 중에서 실제의 결과를 가장 잘 표현하고 동시에 오차의 영향이 가장 적은 반응표면을 선정하기 위하여 반응표면의 근사정도를 평가하여야 한다. 본 논문에서는 통계적 매개 변수인 R^2 와 R_{adj}^2 를 이용하여 판단하였다. 구성된 반응표면에 대하여 R^2 및 R_{adj}^2 는 식 (4)와 같이 정의되며, 0과 1 사이의 값을 가지게 되고, 반응표면의 근사도가 좋아질수록 1에 가까운 값을 가지게 된다. 그리고 R_{adj}^2 는 반응표면의 구성에 있어서 새로 추가된 항이 전체의 반응표면에 나쁜 영향을 미치는 경우에는 이전보다 나쁜 결과를 보이는 특성이 있다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) (1 - R^2) \quad (4)$$

where y_i : i-th real response

\hat{y}_i : i-th approximate response

\bar{y} : mean value

3. 반응표면법을 이용한 원형부재의 충돌성능 향상

앞 절에서 설명한 반응표면법이 충돌 문제의 최적화에 적용 가능한가를 타진하기 위하여 본 논문에서는 Yamazaki⁵⁾가 제안한 원통형 튜브의 충돌 최적화를 변형하여 적용하였다. Yamazaki의 충돌 최적화 문제는 동일한 질량을 가지는 원통이 강체 벽에 충돌 시 흡수 에너지를 최대화 하는 기하학적 형상을 결정하는 문제로 반지름과 두께를 설계 변수로 고려하였다. 이와 비교하여 본 논문에서는 부재의 질량과 길이를 일정하게 유지하면서 두께를 설계 변수로 고려하고 에너지 흡수율을 최대화 하는 문제와 변형량을 최소화하는 두 가지의 최적화제를 고려하였다. 이는 실제 설계에서 단품 부재의 길이는 독립적인 변수가 아닌 타 부재에 구속되는 변수이며, 충돌 성능을 평가하는 인자로서 에너지 흡

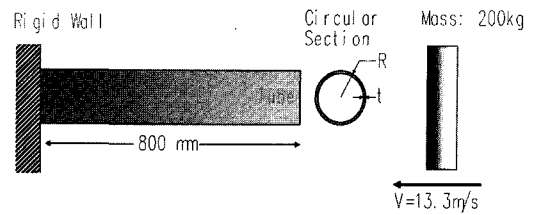


Fig. 1 Crash analysis condition for the circular tube

수율의 증가 뿐 만 아니라 변형량의 감소 역시 중요하기 때문이다.

원형 부재의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같으며 부재의 질량은 4 kg, 길이는 800 mm로 유지하면서 부재의 두께에 변화를 주었다. 따라서 전체 부재의 형상은 질량과 길이가 일정하기 때문에 반지름과 부재의 두께에 의해 변하게 된다. 유한요소 해석은 외연적 탄소성 프로그램인 LS-DYNA 3D를 사용하였으며, 해석 조건은 차량의 정면충돌과 비슷한 조건을 유도하기 위해서 Fig. 1과 같이 부재의 좌단 끝 부분의 모든 자유도를 구속하여 고정하고 우단에는 200 kg의 질량체가 13.3 m/s의 속도로 20 msec 동안 충돌하는 상황으로 정의하였다.

3.1 원형부재의 에너지 흡수 최대화

부재의 에너지 흡수를 최대화하는 두께를 결정하기 위하여 다음과 같은 최적화 수식을 정의하였다.

Maximize Absorbed Energy (5)

Subject to $mass = 4 \text{ kg}$

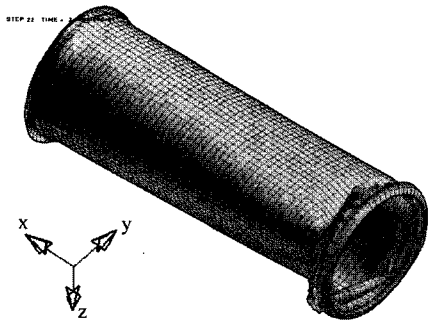
$$0.6 \text{ mm} \leq t \leq 6.0 \text{ mm}$$

where t : thickness of the tube

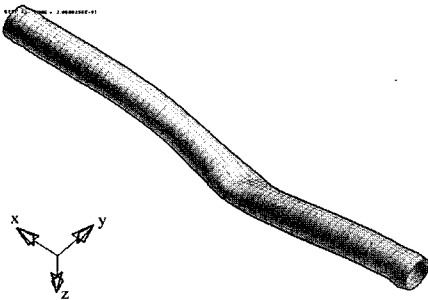
여기서 내부에너지는 20msec 동안의 최대 흡수 에너지로 정의 하였다. 식 (5)와 같은 최적화 수식을 만족하는 부재의 두께를 구하기 위하여 7 번의 선행 해석을 통하여 반응표면을 구성하였다. 이 때 내부 에너지에 관한 식은 두께를 변수로 0.6 mm에서 6.0 mm 까지 고려하였다. 각 두께에 따른 반지름의 변화는 구속조건을 이용하여 결정하였으며, Table 1에 20msec 동안의 최대 내부에너지와 변형량에 대하여 정리하였다. Table 1에서 부재의 변형은 축방향 변형이 일어나는 경우와 좌굴이 발생하는 경우로 구별할 수 있으며 Fig. 2에 도시하였다.

Table 1 Maximum internal energy and deflection of the circular tube at 20 msec

	Thickness (mm)	Radius (mm)	Internal Energy (kJ)	Deflection (mm)	Deformation Pattern
Run 1	0.6	169.60	6.653	235.28	Axial
Run 2	1.0	101.76	9.635	218.19	Axial
Run 3	2.0	50.88	15.947	154.14	Axial
Run 4	3.0	33.92	17.666	95.81	Axial
Run 5	4.0	25.44	17.596	79.55	buckling
Run 6	5.0	20.35	17.611	94.11	buckling
Run 7	6.0	16.96	17.560	98.02	buckling



(a) Axial



(b) Column buckling

Fig. 2 Deformation pattern of circular tube

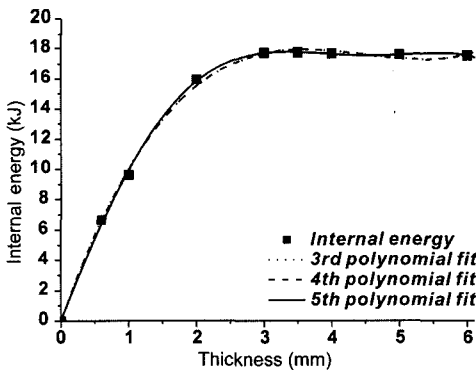


Fig. 3 Response for the absorbed energy of the circular tube with respect to the fitting order

Table 2 Fitting results of the response surface

fitting order	R^2	R_{adj}^2
3rd	0.9985	0.9976
4th	0.9985	0.9970
5th	0.9994	0.9984

Table 3 Results of the optimization and FEM analysis

		Thickness (mm)	Energy (kJ)	Error (%)
Absorbed Energy	RSM	3.336	17.791	-0.28
	FEM		17.741	

최적화를 수행하기 위하여 Table 1의 내부에너지에 대하여 두께를 변수로 하는 반응표면을 구성하였다. 이 과정에서 Table 1의 결과를 가장 잘 표현할 수 있는 반응표면을 구성하기 위해서 Fig. 3에 도시된 바와 같이 3차, 4차와 5차로 반응표면을 구성하고 반응표면의 적합도를 Table 2에 비교하였다. 3차와 4차의 반응표면이 거의 비슷한 형태를 보여줄 것을 예상할 수 있으며, 5차로 구성된 반응표면이 더 좋은 결과를 보여주고 있다. 에너지 흡수율에 관하여 구성된 5차의 반응표면은 식 (6)과 같다.

$$E(t) = 0.0504 + 11.087t - 0.369t^2 \tag{6}$$

$$- 1.037t^3 + 0.243t^4 - 0.0163t^5$$

여기서 t 는 두께를 나타낸다.

식 (6)의 반응표면을 이용하여 최적화를 수행하면 반응표면은 두께가 3.336 mm인 경우에 17.791 kJ로 최대의 에너지 흡수율을 예측한다. 5차로 구성된 반응표면의 정확성을 확인하기 위하여 3.336 mm로 부재의 두께를 적용하여 실제 유한요소 해석을 수행한 결과 17.741 kJ을 흡수하는 결과를 얻었다. 이

결과는 반응표면에 의해서 예측된 결과보다 0.28% 적은 결과로 이를 통하여 5차로 구성된 반응표면이 실제 값을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

3.2 원형 부재의 변형량 최소화

차량의 충돌 사고 발생 시 부재는 충돌 에너지를 많이 흡수함과 동시에 부재의 변형량이 적게 제어되어야 한다. 따라서 이러한 관점에서 부재의 변형량을 최소로 할 수 있는 두께를 결정하기 위하여 식 (7) 과 같은 최적화 수식을 정의하였다. 여기서 변형량은 20 msec 동안의 충돌 후 부재의 길이 방향의 변형량 차이를 의미한다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && \text{Deflection} && (7) \\ & \text{Subject to} && \text{mass} = 4 \text{ kg} \\ & && 0.6 \text{ mm} \leq t \leq 6.0 \text{ mm} \\ & && \text{where } t : \text{thickness of the tube} \end{aligned}$$

최적화를 수행하기 위한 선형 해석의 결과는 Table 1에 나타나 있는 결과를 적용하였으며, 반응표면을 구성하기 위해서 Fig. 4에 도시된 바와 같이 3차, 4차와 5차로 반응표면을 구성하고 반응표면의 적합도를 Table 4에 비교하였다.

Table 4 Fitting results of the response surface

	R^2	R_{adj}^2
3rd	0.9843	0.9748
4th	0.9969	0.9939
5th	0.9993	0.9981

이 결과는 3차와 4차의 반응표면의 차이가 크게 나타나고, R_{adj}^2 값을 통하여 4차의 향 추가가 적합도에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며 5차로 구성된 반응표면이 더 좋은 결과를 보여주고 있다. 부재의 변형량에 관하여 구성된 5차의 반응표면은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} D(t) = & 267.416 - 50.272t + 6.659t^2 \\ & - 10.956t^3 + 3.596t^4 - 0.309t^5 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 t는 두께를 나타낸다.

최적화를 수행하기 위해서 5차 반응표면을 사용하여 최적화를 수행하였으며, 그 결과 두께 3.949

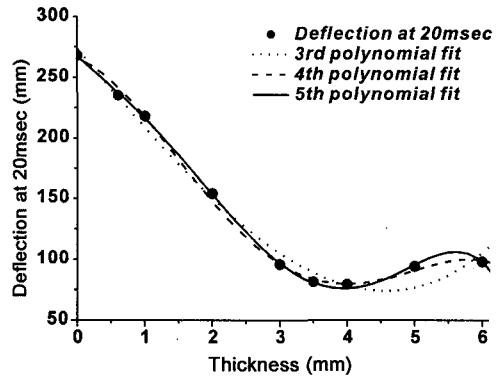


Fig. 4 Response for the deflection of the circular tube with respect to the fitting order

Table 5 Results of the optimization and FEM analysis

		Thickness (mm)	Deflection (mm)	Error (%)
Deflection	RSM	3.949	75.902	3.8
	FEM		78.770	

mm에서 부재의 변형이 75.902 mm 로 최소가 됨을 반응표면을 통하여 예측 할 수 있다. 반응표면을 통하여 예측한 두께 3.949 mm를 이용하여 유한요소 해석을 수행한 결과 78.77 mm로 반응표면이 예측하는 결과보다 3.8% 크게 나타난다. 변형량에 관한 반응표면 함수의 경우, 부재의 좌굴로 인한 변형모드의 변화에 따른 비선형성으로 Fig. 4에 도시한 바와 같이 근사 차수에 따라 오차가 발생하며 적합한 근사함수의 설정으로 이러한 오차를 감소시킬 수 있다고 여겨진다.

4. 프런트 사이드 멤버의 두께 최적화

앞 절에서 반응표면법을 이용하여 간단한 원통형 튜브의 충돌특성에 관한 최적화를 수행하였다. 그 결과 두께를 설계 변수로 하여 반응표면법을 적용하는 경우, 실제 유한요소 해석에서의 결과와 거의 유사한 결과를 보이고 있으며, 이를 통하여 반응표면법이 충돌문제의 최적화에 적용 가능함을 살펴 보았다. 본 절에서는 이러한 반응표면법을 실제 차체용 부재인 프런트 사이드 멤버의 두께 최적화에 적용하고 이를 평가하였다.

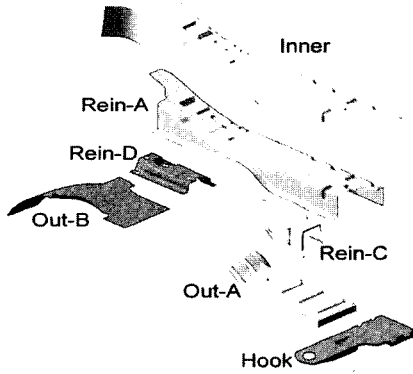


Fig. 5 Construction of the front side member

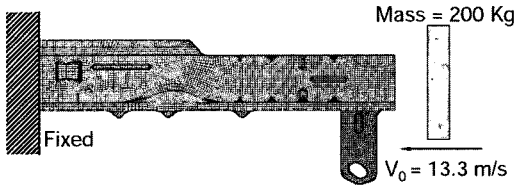


Fig. 6 Analysis condition of the front side member

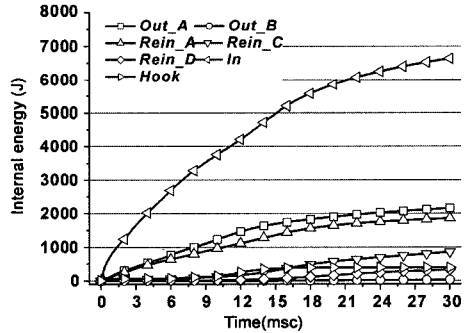
프런트 사이드 멤버는 차량의 정면 충돌 시 초기에 가장 많은 에너지를 흡수하는 부재로 Fig. 5와 같이 7개의 주 부재로 구성되어 있으며, 축방향 붕괴를 유도하고 에너지 흡수율을 높이기 위하여 각 부분에 노치 등을 부여하고 있다. 각 부재는 서로 다른 재료로 제작되어 있으며, 상이한 두께를 가지고 있다. 각 부재의 재료, 두께, 그리고 질량은 Table 6과 같다. 프런트 사이드 멤버의 충돌 해석 조건은 Fig. 6에 도시된 바와 같이 끝 부분을 고정하였으며, 질량 200 kg이 13.3 m/s의 속도로 충돌하는 상황을 정의하였다.

Table 6 Material, thickness and mass of the each part

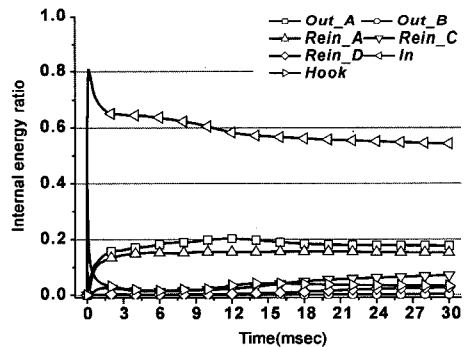
Part	Material	Thickness (mm)	Mass (kg)
Out-A	SPRC40	1.2	1.014
Out-B	SPRC40	1.2	0.111
Reinforce-A	SAPH38	0.9	1.111
Reinforce-C	SPRC45	2.0	0.905
Reinforce-D	SPRC45	1.6	0.360
Inner	SPRC40	1.6	2.848
Hook	SPRC45	2.0	0.702

4.1 설계변수 결정을 위한 초기해석

본 논문에서는 프런트 사이드 멤버의 충돌 성능을 향상시키기 위하여 각 부재의 두께를 변경하는 것을 목표로 한다. 그러나 모든 부재의 두께를 변경하는 경우에는 반응표면을 구성하기 위하여 필요한 해석의 수가 급격히 증가한다. 따라서 부재의 충돌 성능에 영향이 적은 인자를 제거하기 위해서 초기 해석을 수행하여, 각 부재가 흡수하는 에너지를 비교하였다. Fig. 7의 (a)에 각 부재가 30 msec 동안에 흡수하는 에너지를 도시하였으며, 각 부재 별 질량이 다르기 때문에 단위질량당 흡수하는 에너지를 Fig. 7의 (b)에 도시하였다. 이를 통하여 30 msec 동안에 에너지를 가장 많이 흡수하는 부재는 Inner, Out-A, Reinforce-A 등 3개로 전체 에너지의 90%를 흡수함을 확인할 수 있다. 따라서 이 세 가지 부재의 두께를 적절히 조절하면 프런트 사이드 멤버의 충돌 성능을 향상시킬 수 있을 것이라 판단되며 이에 따르는 최적화를 수행하였다.



(a) Energy of each part



(b) Energy per unit mass

Fig. 7 Absorbed energy of the front side member

반응표면법을 이용한 두께 최적화를 수행하기 위하여 반응표면의 구성은 3 수준에 대한 요인설계법을 적용하였다. 그리고 이를 바탕으로 27번의 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 7에 도시하였다. 해석 결과를 바탕으로 프런트 사이드 멤버가 흡수하는 에너지(E), 변형량(D), 단위 변형당 흡수하는 에너지(EDR) 에 관한 반응표면을 구성하였다.

$$E(t_{in}, t_{out}, t_{rein}) = -3.879 + 10.55t_{in} - 1.285t_{in}^2 + 8.667t_{out} - 2.019t_{out}^2 - 4.206t_{rein} + 2.158t_{rein}^2 - 2.164t_{in}t_{out} + 1.49t_{rein}t_{out} \quad (9)$$

$$D(t_{in}, t_{out}, t_{rein}) = 439.607 - 94.591t_{in} + 10.1t_{in}^2 - 54.443t_{out} + 13.12t_{out}^2 + 31.817t_{rein} - 10.317t_{rein}^2 + 11.629t_{in}t_{out} - 8.325t_{in}t_{rein} - 19.449t_{rein}t_{out} \quad (10)$$

$$EDR(t_{in}, t_{out}, t_{rein}) = -14.104 + 31.797t_{in} - 1.749t_{in}^2 + 35.12t_{out} - 9.738t_{out}^2 - 33.758t_{rein} + 11.86t_{rein}^2 - 7.054t_{in}t_{out} + 5.666t_{in}t_{rein} + 10.435t_{rein}t_{out} \quad (11)$$

Table 8에 도시된 적합도를 통해서 에너지에 대해서 구성된 반응표면이 가장 큰 오차를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 실제 최적화를 수행에서는 변형

Table 8 Fitting results of the each response surface

	R^2	R_{adj}^2
Energy	0.9306	0.9108
Deformation	0.9868	0.9824
E/D ratio	0.9657	0.9542

량과 에너지 흡수 능력이 동시에 고려되어야 한다. 그러나 에너지 함수의 경우 적합도가 상대적으로 낮기 때문에 본 논문에서는 다중 목적함수 최적화를 수행하는 대신에 단위 변형 당 흡수하는 에너지를 채택하여 변형량과 에너지 흡수율을 동시에 고려하면서 오차의 영향이 최소화 되도록 하였다.

4.2 반응표면법을 이용한 두께 최적화

프런트 사이드 멤버의 충돌 성능을 향상하기 위하여 단위 변형당 에너지 흡수율에 대하여 다음과 같은 최적화 수식을 정의하였다.

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} && EDR(t_{in}, t_{out}, t_{rein}) && (12) \\ &\text{Subject to} && mass \leq 7.024 \text{ kg} \\ &&& 1.0 \text{ mm} \leq t_{in} \leq 2.0 \text{ mm} \\ &&& 1.0 \text{ mm} \leq t_{out} \leq 2.0 \text{ mm} \\ &&& 0.6 \text{ mm} \leq t_{rein} \leq 1.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

식 (12)를 통하여 얻어진 결과를 Table 9와 10에 도시하였다. 변수로 고려된 3가지 부재의 두께 변경

Table 7 Maximum internal energy, deflection and mass of the front side member

Run	In	Out-A	Rein-A	Energy (kJ)	Deflection (mm)	Mass (kg)	Run	In	Out-A	Rein-A	Energy (kJ)	Deflection (mm)	Mass (kg)
1	1.0	1.0	0.6	8.151	325.39	5.416	15	1.5	2.0	0.9	11.633	279.50	7.523
2	1.0	1.5	0.6	10.540	315.26	5.840	16	2.0	1.0	0.9	13.575	263.45	7.567
3	1.0	2.0	0.6	10.649	307.63	6.263	17	2.0	1.5	0.9	14.171	254.11	7.99
4	1.5	1.0	0.6	11.758	291.95	6.306	18	2.0	2.0	0.9	13.307	252.04	8.413
5	1.5	1.5	0.6	13.247	283.58	6.729	19	1.0	1.0	1.2	10.277	312.34	6.157
6	1.5	2.0	0.6	11.347	286.22	7.153	20	1.0	1.5	1.2	10.885	300.38	6.58
7	2.0	1.0	0.6	13.070	267.86	7.196	21	1.0	2.0	1.2	12.495	283.03	7.003
8	2.0	1.5	0.6	13.864	259.13	7.619	22	1.5	1.0	1.2	12.407	281.70	7.047
9	2.0	2.0	0.6	12.828	259.54	8.042	23	1.5	1.5	1.2	12.586	270.27	7.47
10	1.0	1.0	0.9	9.464	320.51	5.787	24	1.5	2.0	1.2	13.719	258.51	7.893
11	1.0	1.5	0.9	10.183	305.87	6.210	25	2.0	1.0	1.2	14.279	257.55	7.937
12	1.0	2.0	0.9	10.190	300.81	6.633	26	2.0	1.5	1.2	15.125	236.62	8.36
13	1.5	1.0	0.9	11.976	283.93	6.677	27	2.0	2.0	1.2	14.532	238.92	8.783
14	1.5	1.5	0.9	13.707	275.65	7.1							

을 통해서 반응표면은 기존의 성능보다 10.4%가 향상될 것으로 예측되었다. 그러나 실제로 해석을 수행하면 동일한 질량을 가지면서 6.4% 향상되는 것으로 나타난다. 이는 반응표면의 에너지 부분에서 오차가 발생하기 때문으로 생각된다. Table 11에서 보는 바와 같이 30 msec 동안에 프런트 사이드 멤버가 흡수하는 에너지와 변형량을 비교하면 에너지의 측면에서는 4.4%가 향상됨을 확인할 수 있으며 변형량은 1.93%가 감소함을 확인할 수 있다.

Fig. 8의 (a)에 부재의 두께를 변경하였을 때 각 부재의 에너지 흡수 능력의 변화를 나타내었다. Inner panel의 경우에는 이전의 경우보다 많이 향상되었음을 확인할 수 있다. 이는 부재의 두께 증가와 관련이 있다. 그러나 나머지 부재는 에너지 흡수율이 약간 감소하게 나타난다. Fig. 8의 (b)와 (c)를 통하여 30 msec 동안 부재의 흡수하는 에너지가 기존의 설계보다 증가하고 있음을 살펴 볼 수 있으며, 충돌 시 부재의 변형량은 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9에 초기 설계와 개선된 디자인을 적용한 부재의 시간별 변형을 도시하였다. 초기 디자인의 경

Table 9 Fitting results of the each response surface

	In (mm)	Out (mm)	Rein-A (mm)
Initial Design	1.6	1.2	0.9
Optimized Design	1.9	1.0	0.6

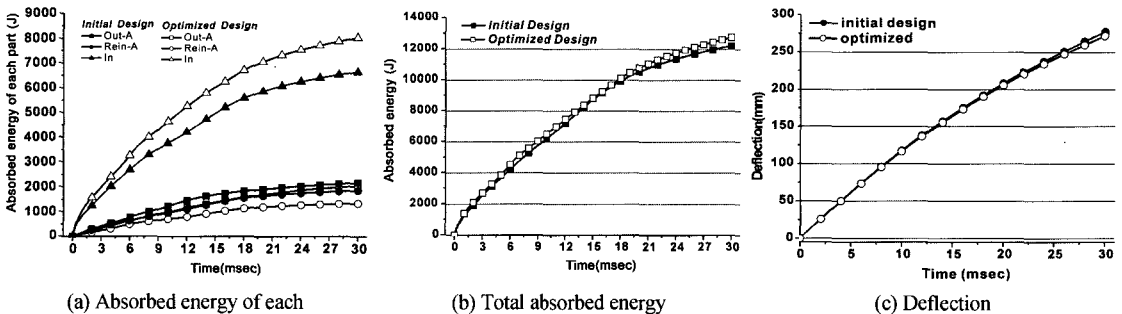
Table 10 Optimized results and actual results

	Energy/Deflection (J/mm)	Mass (kg)
Initial design	44.156	7.024
Response surface	48.775	7.024
Actual analysis	47.011	7.024

Table 11 Design improvement with respect to the absorbed energy and deflection

	Absorbed energy (kJ)	Deflection (mm)
Initial design	12.2416	277.23
Actual analysis	12.7803	271.86
Improved rate	4.4%	-1.93%

우에는 변형이 진행되면서 점차 부재가 축 방향을 기준으로 뒤틀리고 있음을 확인할 수 있다. 그러나



(a) Absorbed energy of each
Fig. 8 Comparison of the optimized results

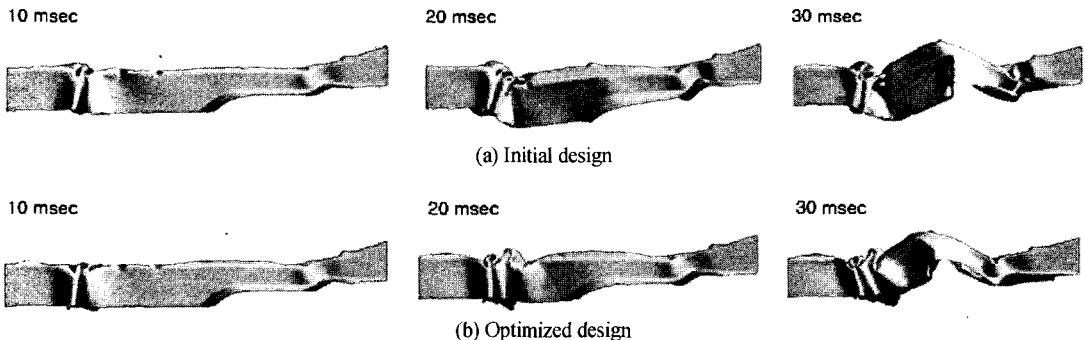


Fig. 9 Comparison of the deformed shape

개선된 디자인을 적용하는 경우에는 부재의 뒤틀림이 없고 축 방향으로 변형이 지속적으로 발생하고 있다. 이와 같은 변형 형상을 검토한 결과 반응표면을 통한 두께 최적화를 수행한 경우에 프런트 사이드 멤버의 변형 형상이 기존보다 더 안정적으로 일어남을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 대표적인 비민감도 기법인 반응표면법과 외연적 탄소성 유한요소 프로그램인 LS-DYNA 3D를 이용하여 차량 충돌 부재의 최적화를 시도하였다. 최적화를 위하여 단면이 원형인 간단한 부재의 실제 충돌성능 향상을 위한 반응표면을 적용하였으며, 목적함수에 따른 반응표면의 특성 및 적합도를 검토하였다. 그리고 실제 차량의 충돌 안전성을 위한 부재로 반응표면 최적화를 확대하였다.

차체의 프런트 사이드 멤버를 대상으로 선정하고 반응을 구성하기 위하여 16개의 기본 반응표면을 미리 저장한 후 가장 좋은 적합도를 가지는 반응을 최적의 반응으로 결정하였다. 초기 해석을 통하여 3 변수 문제로 감소시켰으며, 최적화하여 단위 변형당 흡수 에너지는 6.4% 향상하였다. 동일한 질량에서 실제 흡수하는 변형 에너지는 4.4%의 향상 효과를 기대할 수 있으며, 이 때의 변형량은 1.93% 감소시켰다. 변형형상 측면에서는 기존의 설계를 따르는 프런트 사이드 멤버의 변형은 충돌이 진행되는 동안 밑으로 많은 변형을 일으키고 있으나, 최적화된 부재는 길이 방향으로 변형하여 기존의 변형 양상에 비해서 더 안정적으로 일어나게 되었으며 동시에 부재의 뒤틀림을 개선하는 결과를 얻었다.

References

1) G. E. P. Box and K. B. Willson, "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions," *Journal of the Royal Statistical Society*,

Series B, Vol.13, pp.1-14, 1951.
 2) D. M. Allen, "Mean Square Error of Prediction as a Criterion for Selecting Variables," *Technometrics*, Vol.13, pp.469-475, 1971.
 3) D. M. Allen, "The Relation Between Variable Selection and Data Augmentation and a Method for Prediction," *Technometrics*, Vol.16, pp.125-127, 1974.
 4) G. A. F. Seber, *Linear Regression Analysis*, John Wiley, New York, 1977.
 5) K. Yamazaki and J. Han, "Maximization of the Crushing Energy Absorption of Cylindrical Shells," *Advances in Engineering Software* 31, pp.425-434, 2000.
 6) H. Kurtaran, A. Eskandarian, D. Marzougui, and N. E. Bedewi, "Crashworthiness Design Optimization Using Successive Response Surface Approximations," *Computational Mechanics*, Vol.29, pp.409-421, 2002.
 7) M. Avalle, G. Chiandussi and G. Belingardi, "Design Optimization by Response Surface Methodology : Application to Crashworthiness Design of Vehicle Structures," *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol.24, pp.325-332, 2002.
 8) E. P. Hong, M. K. Shin and G. J. Park, "Determination of Crash Pulse to Minimize Injuries of Occupants and Optimization of Crash Components Using Response Surface Method," *Transactions of KSAE*, Vol.9, No.2, pp.116-129, 2001.
 9) S. D. Pyun, S. B. Lee and H. J. Yim, "A Study on Design Optimization System for Thin Walled Beam Structures," *Transactions of KSAE*, Vol.8, No.6, pp.238-246, 2000.
 10) H. Huh, J. H. Lim, J. H. song, K. S. Lee, Y. W. Lee and S. S. Han, "Crashworthiness Assessment of Side Impact of an Auto-Body with 60TRIP Steel for Side Members," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.4, No.3, pp.149-156, 2003.