

충돌에너지 흡수효율 최대화를 위한 자동차 사이드 멤버 최적 설계에 관한 연구

A Study on the Optimum Design of the Automotive Side Member to Maximize the Crash Energy Absorption Efficiency

이정환¹, 정낙탁², 서명원^{3,✉}
Jung Hwan Lee¹, Nak Tak Jeong², and Myung Won Suh^{3,✉}

1 (주)만도 연구개발본부 (Global Research and Development Center, Mando Corporation)

2 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

3 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

✉ Corresponding author: suhmw@skku.edu, Tel: +82-31-290-7447

Manuscript received: 2013.7.26 / Accepted: 2013.10.14

In this study, the design optimization of the automotive side member is performed to maximize the crash energy absorption efficiency per unit weight. Design parameters which seriously influence on the frontal crash performance are selected through the sensitivity analysis using the Plackett-Burman design method. And also the design variables, which are determined from the sensitivity analysis, are optimized by two methods. One is conventional approximate optimization method which uses the statistical design of experiments (DOE) and response surface method (RSM). The other is a methodology derived from previous work by the authors, which is called sequential design of experiments (SDOE), to reduce a trial and error procedure and to find an appropriate condition for using micro-genetic algorithm. The proposed optimization technique shows that the automotive side member structure can be designed considering the frontal crash performance.

Key Words: Crash energy absorption (충돌에너지 흡수), Optimum design (최적설계), Sensitivity analysis (민감도 분석), Design of experiments (실험계획법), Automotive side member (자동차 사이드 멤버)

1. 서론

2012년 기준 국내 자동차 등록대수는 약 2천만 대에 달하며, 자동차 1대당 평균인구수는 2.7명으로 나타났다.¹ 이것은 우리의 현재와 미래 사회가 자동차와 항상 밀접한 관계를 가지고 있음을 의미한다. 하지만 자동차의 급속한 증가와 더불어 발생하는 교통사고는 국내를 포함한 해외의 자동차 선진국에서도 큰 사회적 문제를 야기하고 있으며, 각국의 정부들은 탑승자 상해를 줄이기 위한 대책을 수립하기 시작하였다. 미국의 경우 FMVSS (Federal Motor

Vehicle Safety Standard)라 불리는 규정을 미 연방법규의 일부로 제정하였으며, 유럽의 경우에는 ECE (Economic Commission for Europe) 또는 EEC (European Economic Community)를 통해서 충돌성능에 대한 유럽통합법규를 제정하고 있는 실정이다.

따라서 자동차 제조회사들은 차량의 충돌성능을 높이기 위하여 많은 연구를 진행하고 있으며,²⁻⁶ 충돌성능 향상을 위해서는 탑승자를 안전하게 보호하는 역할을 하는 차 실(compartment)의 예와 같이 충돌 시 에너지를 흡수함으로써 충격을 줄여주는 부재를 효과적으로 설계하는 것이 무엇보다 중

요하다.⁷⁻⁹ 즉, 충돌사고 발생 시 충돌에너지는 차량의 변형을 통해 흡수되는데, 차량의 압괴 강도를 증가시키면 동일한 에너지를 흡수하는데 필요한 압괴량이 작아지게 되므로 더 많은 생존공간을 확보 할 수 있다. 반면, 압괴 강도가 커져서 동일한 에너지를 흡수하는데 필요한 압괴량이 작아지면, 승객이 받는 가속도가 증가되어 탑승자의 부상 가능성이 높아지게 된다.¹⁰ 그러므로 이를 해결하기 위한 방법은 자동차를 합리적으로 설계하는 것이 필요하며, 자동차 분야에서 적용되고 있는 합리적 설계방법은 설계 초기 단계에서의 전산구조해석에 의한 최적화 방안이다.

따라서 본 연구에서는 정면 충돌 시 에너지 흡수의 주요 역할을 하는 엔진 룸의 종 부재에 대한 충돌해석 및 민감도 분석을 통해 설계 주요인자를 도출하고, 이에 대한 최적설계를 하고자 한다. 또한, 축 압축변형 유도를 통한 충돌에너지 흡수효율 최대화를 위하여 저자들의 선행연구¹¹에서 제시한 위상최적화 기법을 이용하고자 하며, 위상최적화를 위한 재분배 및 요소제거 알고리즘의 주요 파라미터는 행렬실험과 평균분석을 반복 적용하는 개념인 순차적 실험계획법¹²과 적은 함수비용으로 비선형성이 높은 문제 해결 능력이 우수하다고 알려진 마이크로 유전알고리즘을 이용하여 도출하고자 한다.

2. 정면충돌 시험방법 및 기준

한국 신차 평가의 정면충돌 시험은 Fig. 1과 같이 운전석과 전방 탑승자석에 인체모형을 탑재한 시험차를 법규상의 시험속도(시속 48km/h)보다 15% 빠른 56km/h로 콘크리트 고정 벽에 정면충돌시켰을 때 머리와 흉부의 충격 량을 인체모형에 설치한 센서로부터 측정하여 평가한다.

정면 충돌 시험의 안전도는 식(1)~(3)과 같이, 운전자와 전방 탑승자의 머리상해 기준 값 (*HIC*)과 흉부가속도 (*Chest G*)로부터 머리와 흉부의 복합상해 가능성 (P_{comb})을 계산하고, 이를 Table 1과 같이 5단계로 구분하여 최고등급을 별 5개, 최저 등급을 별 1개로 표시하며, 충돌 시 문 열림 여부, 충돌 후 문 열림 용이성, 연료유출 여부를 추가로 확인한다.

$$P_{head} = 1 / \{1 + \exp(5.02 - 0.00351 \times HIC)\} \quad (1)$$

$$P_{chest} = 1 / \{1 + \exp(5.55 - 0.0693 \times Chest\ G)\} \quad (2)$$

$$P_{comb} = P_{head} + P_{chest} - P_{head} \times P_{chest} \quad (3)$$

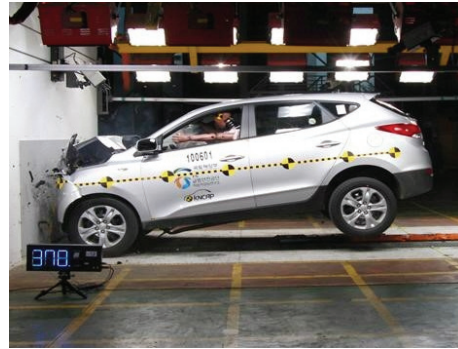


Fig. 1 Korea NCAP frontal crash test

Table 1 Korea NCAP star rating

Star rating	P_{comb}
★★★★★	under 10%
★★★★	11%~20%
★★★	21%~35%
★★	36%~45%
★	over 45%

Table 2 Material properties

Material	SPRC440E
Young's Modulus (GPa)	210
Poisson's ratio	0.31
Density(kg/m ³)	7,850

3. 충돌해석 및 민감도 분석

3.1 충돌해석

본 연구에서는 자동차 사이드 멤버의 충돌 해석을 위해 북미충돌조건(New Car Assessment Program, NCAP)의 기준을 적용하였다. NCAP에서는 2장에서 언급한 것처럼, 자동차 정면 충돌 시 56km/h의 속도로 고정벽면에 정면충돌시키도록 규정하고 있다. 따라서 법규와 동일한 충돌속도를 부여하였으며, 사이드 멤버 단품에 대한 해석을 수행하기 때문에 2,000cc 중형차종의 BIW (Body in White) 계에 대한 하중을 고려하여 부재 후방에 400kg의 질량을 질점 형태로 부여하고 충돌해석을 실시하였다. Fig. 2는 BIW계의 실제 충돌 후 변형형상과 해석을 통해 얻어진 정면 충돌 시 변형 형상이다. 즉, 압축 변형 형상이 유사하게 발생하는 것을 확인하였으며, 이를 통해 충돌조건이 적절하게 정의되었음을 확인하였다. 이때 사용한 사이드 멤버의 재질은 SPRC440E로써 Table 2와 같고, 두께는 1.8mm이다.

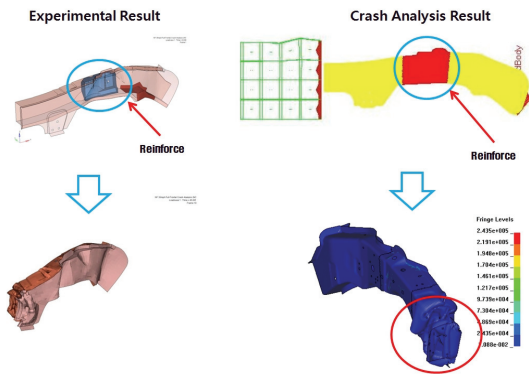


Fig. 2 Compare crash mode of Body in White with simple model

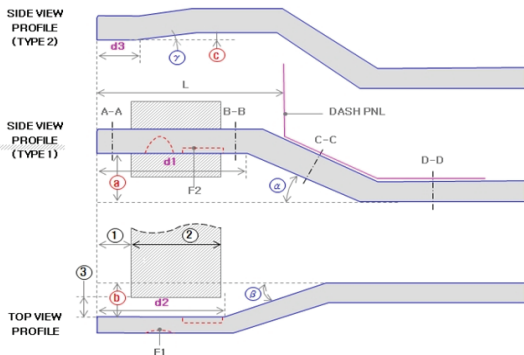


Fig. 3 Design variables of automotive side member

3.2 설계인자 민감도 분석

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 모자 형 단면형상을 갖는 자동차 사이드 멤버를 대상으로 해석을 수행하였으며, 설계변수는 자동차 사이드 멤버에 대하여 다년간의 설계경험을 갖고 있는 설계자의 조언을 바탕으로 총 16개로 설정하였다. 즉, 단차 (a, b, c), 절각(α, β, γ), 절점(d1, d2, d3), 단면 폭 (A-A, C-C, D-D) 및 단면 높이 (A-A, B-B, C-C, D-D)이다.

일반적으로 16개의 설계변수를 고려한 2수준 요인배치법의 실험횟수는 2^{16} 으로 총 65,536번의 실험을 수행해야 하며, 많은 실험점(design point)을 이용한 민감도 분석(sensitivity analysis)은 경제적, 시간적으로 불가능하다. 따라서 일부 실시법의 하나인 Plackett-Burman 방법을 이용하였으며, 이 방법은 최소의 실험으로 2수준의 주 효과만을 고려할 수 있는 기법으로써 설계인자 별 교호작용은 무시된다. 따라서 설계인자 16개에 대한 실험계획 및 각 실험점에 대한 충돌해석 결과는 Table 3과

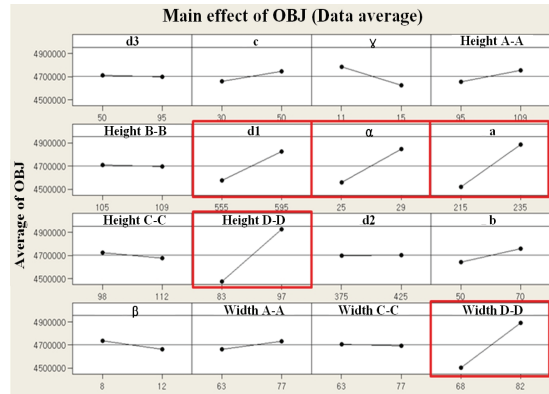


Fig. 4 Sensitivity analysis result for the parameter optimization

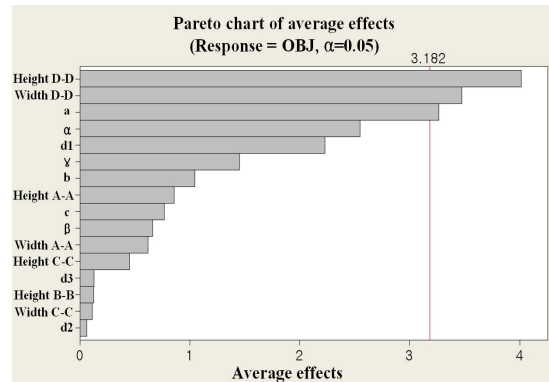


Fig. 5 Pareto chart for the selection of main design variables

같다. 즉, 16개의 설계인자에 대하여 20회의 충돌 해석을 수행하고, 목적함수인 충돌 내부에너지를 도출한 것이며, 이에 대한 민감도 분석결과는 Fig. 4 및 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 목적함수에 가장 영향도가 큰 주요인자는 Fig. 5에 나타난 것처럼 단면 높이 (D-D), 단면 폭 (D-D), 단차 (a), 절각(α), 절점(d1) 순이다.

4. 실험계획법(DOE)과 반응표면법(RSM)을 이용한 최적설계

본 장에서는 민감도 분석을 통하여 선정된 5개의 주요 설계변수에 대하여 목적함수인 단위 무게당 충돌 내부에너지를 극대화 하기 위하여 최적설계를 수행한 것이며, 이의 전체적인 과정은 Fig. 6과 같다.

Table 3 Experimental design and response values of Plackett-Burman

No	Width(mm)			Angle(°)			Horizontal length(mm)			Vertical Length(mm)			Height(mm)				OBJ (J/kg)
	D	C	A	α	β	γ	d1	d2	d3	a	b	c	A	B	C	D	
1	82	77	77	25	12	15	555	425	95	215	50	30	109	105	112	83	3,952,394
2	68	63	77	29	12	11	595	425	50	215	50	50	109	109	98	97	4,866,565
3	82	63	77	25	8	11	595	375	95	235	50	50	95	109	112	83	4,732,933
4	82	63	63	25	12	11	595	425	95	235	70	30	95	105	98	97	5,301,685
5	82	77	63	25	12	15	595	425	50	215	50	50	95	109	98	83	4,372,459
6	82	63	77	29	12	15	555	375	50	235	50	30	95	109	112	97	5,227,253
7	82	77	63	29	8	11	555	425	50	215	70	30	95	109	112	97	4,823,929
8	82	77	77	25	8	11	555	375	95	215	70	50	109	109	98	97	5,133,955
9	68	63	63	25	12	15	595	375	95	215	70	30	109	109	112	97	4,404,295
10	82	63	77	29	8	15	595	375	50	215	70	30	109	105	98	83	4,793,300
11	82	63	63	29	8	15	555	425	95	235	50	50	109	105	98	97	5,315,177
12	68	77	77	25	12	15	555	375	50	235	70	50	95	105	98	97	4,488,894
13	68	63	63	25	8	11	555	375	50	215	50	30	95	105	98	83	3,861,970
14	68	77	77	29	8	15	595	425	95	235	70	30	95	109	98	83	4,759,234
15	82	77	63	29	12	11	595	375	50	235	70	50	109	105	112	83	5,324,429
16	68	63	63	25	8	15	555	425	50	235	70	50	109	109	112	83	4,248,868
17	68	63	77	29	12	11	555	425	95	215	70	50	95	105	112	83	4,328,628
18	68	77	63	29	12	11	555	375	95	235	50	30	109	109	98	83	4,378,816
19	68	77	63	29	8	15	595	375	95	215	50	50	95	105	112	97	4,637,894
20	68	77	77	25	8	11	595	425	50	235	50	30	109	105	112	97	5,082,399

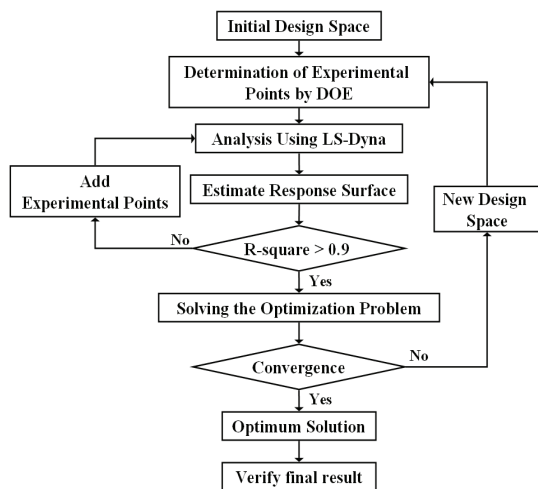


Fig. 6 Flowchart of a methodology for the optimal design of automotive side member

4.1 문제의 정의

3.1절에 표시한 것처럼 Fig. 3은 자동차 사이드 멤버구조이며, 충돌에너지 흡수 효율 최대화를 위하여 실험계획법(design of experiments)과 반응표면

법(response surface method)을 이용하여 최적설계를 수행한 것이다. 이를 위한 최적화 문제 정의는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{find } x \\
 &\text{to maximize } f(x) \\
 &\text{subject to} \\
 &x_k^{lower} < x_k < x_k^{upper}, \quad k = 1, \dots, 5
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서 x 는 설계변수로서 3.2절에서 도출된 주요 설계변수인 단면 높이 (D-D), 단면 폭 (D-D), 단차 (a), 절각 (α), 절점 (d1)이며, $f(x)$ 는 최대화하기 위한 목적함수로서 자동차 사이드 멤버의 단위 무게당 충돌 내부에너지 값이다. 또한 $lower$ 와 $upper$ 는 설계변수가 존재할 수 있는 설계영역의 하한과 상한(side constraint)을 의미한다.

4.2 최적화 결과

Table 4는 최적설계 수행을 위한 실험점을 나타낸 것이며, 이러한 결과를 이용하여 설계변수와 목적함수 사이의 관계를 적절히 표현할 수 있는 회귀함수를 도출하면 식 (5)와 같다.

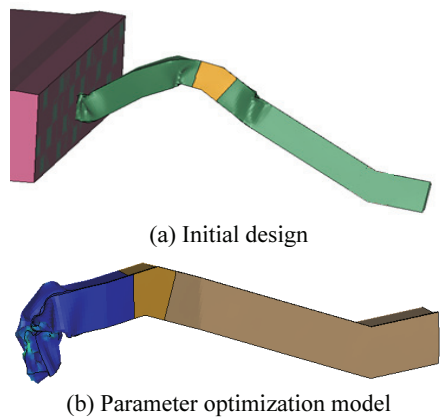


Fig. 7 Crash analysis result of parameter optimization model

$$\begin{aligned}
 Y = & 1762770.8 + 19955.4x_1 - 399635.0x_2 \\
 & + 2196.7x_3 + 84556.3x_4 - 8226.1.1x_5 - 14.3x_1^2 \\
 & + 5888.9x_2^2 - 1.76x_3^2 - 615.7x_4^2 + 57.7x_5^2 \\
 & - 13.8x_1x_3 + 110.9x_2x_5 - 4.2x_3x_5 + 86.1x_4x_5
 \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)의 실제 반응량에 대한 적합도를 나타내는 R^2 값은 0.9612가 나왔으며, 이는 회귀함수가 반응량을 잘 모사하고 있다는 것을 나타낸다. 따라서, 도출된 회귀함수를 이용하여 단위 무게당 충돌 내부에너지가 최대화 되는 최적화를 수행하였으며, 최종적으로 얻어진 주요 설계인자 별 최적 값은 Table 5와 같다. 그러므로 이러한 값을 이용한 회귀함수의 결과 값은 5,397,000(J/kg)이 얻어졌다.

4.3 최적화 모델 검토

4.2절에서 수행한 최적화 결과의 유효성 검토를 위하여 목적함수인 단위 무게 당 충돌 내부에너지를 초기모델과 비교하였다.

즉, 3.1절에서 언급한 충돌조건을 이용하여 해석을 수행하였으며, 충돌 해석결과는 Fig. 7 및 Table 6과 같다. 요약하면, 초기모델의 경우 단위 무게당 충돌 내부에너지는 4,855,456 (J/kg) 이며, 최종적으로 Table 5의 파라미터를 적용하여 구성한 모델의 충돌 해석결과는 5,445,082 (J/kg) 이다. 따라서 초기모델 대비 설계인자를 최적화 한 모델의 단위 무게당 충돌 내부에너지가 12.14% 증가함을 확인하였다. 그러나 충돌 후 변형 형상(Fig. 7의 (b))을 보면, 완전하게 축 압축변형이 나타나지 않

Table 4 Experimental design of main factors

No	d1	α	a	Width D	Height D
1	450	24	180	60	60
2	450	24	180	60	90
3	450	24	180	60	120
4	450	28	230	75	60
5	450	28	230	75	90
6	450	28	230	75	120
7	450	32	280	90	60
8	450	32	280	90	90
9	450	32	280	90	120
10	550	24	230	90	60
11	550	24	230	90	90
12	550	24	230	90	120
13	550	28	280	60	60
14	550	28	280	60	90
15	550	28	280	60	120
16	550	32	180	75	60
17	550	32	180	75	90
18	550	32	180	75	120
19	650	24	280	75	60
20	650	24	280	75	90
21	650	24	280	75	120
22	650	28	180	90	60
23	650	28	180	90	90
24	650	28	180	90	120
25	650	32	230	60	60
26	650	32	230	60	90
27	650	32	230	60	120

Table 5 Results of optimum design for main factors

Main factor	Optimum value
d1	639.92mm
α	24.13°
a	277.46mm
Width D	77.059mm
Height D	118.654mm

고 굽힘 변형이 발생하는 현상이 발생하였으며, 이를 개선하기 위한 추가연구가 필요하다.

5. 순차적 실험계획법(SDOE)과 마이크로 유전 알고리즘(MGA)를 이용한 최적설계

본 장에서는 자동차 사이드 멤버의 축 압축변형 유도를 통한 충돌 내부에너지 최대화를 위하여 저자들의 선행연구¹¹에서 제시한 위상최적화 기법을 이용하고자 하며, 위상최적화의 주요 파라미터에 대한 최적설계를 수행한 것이다.

Table 6 Results of the crash analysis (parameter optimization)

Result type	Original model	DOE+RSM	Analysis result
Internal energy/mass	4,855,456	5,397,000 (11.15%)	5,445,082 (12.14%)

Table 7 Results of side member by SDOE

Step	D.V.	Levels			Optimum
		1	2	3	
1	x_1	<u>0.935</u>	0.939	0.943	0.935
	x_2	0.48	0.53	<u>0.58</u>	0.58
	x_3	0.005	0.0075	<u>0.01</u>	0.01
	x_4	0.05	0.075	<u>0.1</u>	0.10
2	x_1	0.935	<u>0.937</u>	0.939	0.937
	x_2	0.54	0.56	<u>0.58</u>	0.58
	x_3	0.008	<u>0.009</u>	0.01	0.009
	x_4	0.08	0.09	<u>0.1</u>	0.1

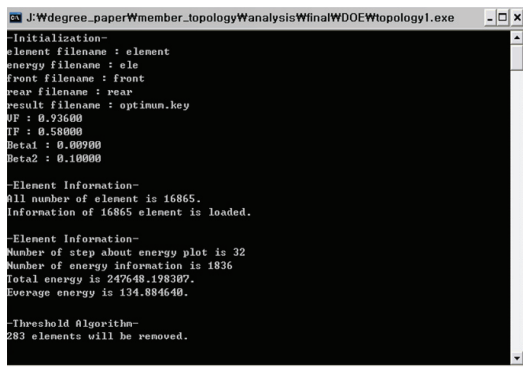
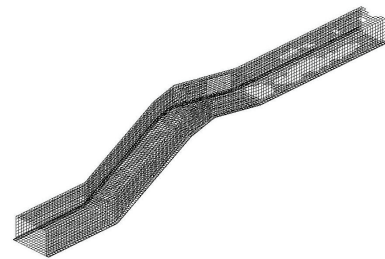


Fig. 8 Topology optimization of side member using developed program by the authors

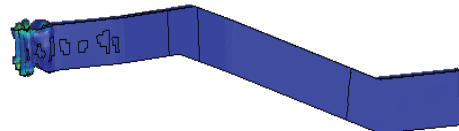
5.1 문제의 정의

선행연구에서 언급한 것처럼, 위상최적설계를 위한 재분배 및 요소제거 알고리즘의 파라미터는 VF (부피 제한조건), Th (요소제거 기준값) 및 $\beta_{1,2}$ (최적화 알고리즘 상수)이다. 따라서 이에 대한 최적설계를 수행한 것이며, 최적화 문제정의는 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{find } x \\
 &\text{to maximize } f(x) \\
 &\text{subject to} \\
 &0.935 < VF < 0.943, \quad 0.48 < Th < 0.58 \\
 &0.005 < \beta_1 < 0.010, \quad 0.05 < \beta_2 < 0.10
 \end{aligned} \tag{6}$$



(a) Schematic diagram of topology optimization result



(b) Crash analysis result of topology optimization model

Fig. 9 Optimum topology design of side member structure and crash analysis result

여기서, $f(x)$ 는 최대화하기 위한 목적함수로서 단위 무게당 충돌 내부에너지이다.

5.2 최적화 결과

식(6)의 초기설계영역에 대한 순차적 실험계획법¹²의 적용결과는 Table 7과 같으며, step 1의 x_2, x_3 및 x_4 와 같이 도출된 최적수준이 초기 설계영역의 최대값과 같으면, step 2의 실험수행을 위한 3수준의 값으로 사용하게 된다.

최종적으로 얻어진 설계영역(Table 7의 step 2)을 참고하여 해 탐색을 위한 설계변수의 구간을 설정하면, x_1 은 0.935~0.939, x_2 는 0.54~0.58, x_3 는 0.008~0.01 및 x_4 는 0.08~0.1이 된다.

그러므로 도출된 영역에 대하여 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행한 결과는 $x_1 = 0.936, x_2 = 0.58, x_3 = 0.009, x_4 = 0.1$ 이며, 이를 Fig. 8과 같이 저자들의 선행연구¹¹에서 개발한 위상최적화 프로그램에 적용한 결과는 Fig. 9와 같다. 즉, 4장의 결과보다 축 압축변형이 유도되어 굽힘 변형이 최소화 된 것을 알 수 있다. 따라서, 충돌해석을 통한 목적함수 값은 7,918,856(J/kg)이며, 이는 4장의 설계최적화를 통한 결과보다 45.4% 증가된 값이다.

6. 결론

본 연구에서는 자동차 사이드 멤버의 충돌에너지 흡수효율 최대화를 위하여 민감도 분석을 수행

하였으며, 이를 통해 주요변수를 도출하고 이의 최적설계를 실시하였다. 또한, 축 압축변형 유도를 통한 충돌성능 극대화를 위하여 선행연구에서 제시한 위상최적설계를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 자동차 사이드 멤버에 대한 16개의 설계변수에서 주요 변수 5개를 도출하였으며, 이의 최적설계를 통해 단위 무게당 충돌 내부에너지가 12.14% 증가되는 것을 확인하였다.

(2) 설계변수 최적화 결과에 대한 충돌 해석을 통해 축 압축변형과 함께 굽힘 변형이 발생하는 것이 확인되었으며, 이의 개선을 위하여 위상최적설계를 수행하였고 적용 결과 이상적인 축 압축변형이 유도되어 단위 무게당 충돌 내부에너지가 45.4% 개선되는 것을 확인하였다.

(3) 자동차 사이드 멤버의 단품 충돌 해석을 위하여 BIW계의 정면 충돌 변형 양상과 유사하게 사이드 멤버 종단에 자동차의 질량을 질점 형태로 부여하여 충돌 해석 시간을 단축하였으며, 범규화된 충돌 사고 시나리오를 적용하여 해석을 수행하였다.

참고문헌

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Automotive Vehicle Management Status," 2012.
2. Kim, H. Y., Kim, J. K., Heo, S. J., and Kang, H., "Design of the Impact Energy Absorbing Members and Evaluation of the Crashworthiness for Aluminum Intensive Vehicle," *Inter. J. of Automotive Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 216-233, 2002.
3. Koo, J. S. and Youn, Y. H., "Crashworthy Design and Evaluation on the Front-end Structure of Korean High Speed Train," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 173-180, 2004.
4. Koo, J. S., Cho, H. J., and Kwon, T. S., "A study on Establishing the Accident Scenarios for Crashworthiness of Rolling Stocks," *Korean Society for Railway spring conference*, pp. 1-10, 2007.
5. Kim, E. K., "Study on the Design of the Passenger Cars Bumper Rail to Reduce the Weight," M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Chonnam National Univ., 2001.
6. Yoon, K. H., "Plastics in Automotive Components," *Advanced Materials and Manufacturing in Automotive Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 33-39, 2006.
7. Kim, H. J., Cho, H., Jung, H. S., Kwon, T. S., and Suh, M. W., "Crashworthiness Design and Evaluation on the Leading-cap Structure of Rolling Stock using Topology," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 10, No. 2, pp. 79-85, 2009.
8. Kim, H. J., Kim, S. H., Jung, H. S., Kwon, T. S., and Suh, M. W., "The Study on Conceptual Structure Design in Protective Shell Frame of Rolling Stock Leading-cab using Topology Optimization," *Proc. of KSAE spring conference*, pp. 2025-2030, 2007.
9. Bense, M. P. and Kikuchi, N., "Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method," *Comp. Meth. in Applied Mech. and Eng.*, Vol. 71, No. 2, pp. 197-224, 1998.
10. Ministry of Construction Transportation(MOCT), "Transit Safety Act, Standard Accident Scenario 16 articles," 2007.
11. Kim, H. J., Kim, B. Y., and Suh, M. W., "Development of a Topology Optimization Program Considering Density and Homogenization Methods," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 12, No. 2, pp. 303-312, 2011.
12. Lee, J. H. and Suh, M. W., "Development of Optimization Algorithm for Unconstrained Problems Using the Sequential Design of Experiments and Artificial Neural Network," *Transaction of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 3, pp. 258-266, 2008.