

## 균질화법을 이용한 충돌 최적화 기초 연구(I)

### A Basic Study of Crashworthiness Optimization Using Homogenization Method(I)

조용범\*, 신호철\*\*

Y. B. Cho, H.-C. Sin

#### ABSTRACT

The homogenization method is applied to maximize crash energy absorption for a given volume. To obtain the best combination of optimizing factors by resizing and threshold algorithms for an example problem, the sensitivity analysis has been performed using design of experiments. The results show that very little interaction among optimizing factors is found. Optimization analysis of several combination of factors is conducted; and the original design and a new design with holes for an example problem are compared for crash energy absorption.

주요기술용어 : Homogenization method(균질화법), Design of experiments(실험계획법), Optimality criteria(최적화 기준법), Interaction(상호작용), Internal energy(내부 에너지), Analysis of variance(분산 분석)

#### 1. 서론

충돌문제의 최적화는 크게 차체 구조의 최적화와 구속장치(에어백, 벨트등)의 최적화가 있다. 일반적으로 충돌 성능을 최적화하기 위해서는 차량의 충돌 구조가 충돌에너지를 많이 흡수하여 차량 탑승자에게 작은 양의

에너지가 전달되도록 최적화 한 후 자동차 실내 부품과의 2차 충돌에 의한 더미의 상해치를 구속장치를 사용하여 최적화한다. 구속장치의 최적화는 슬레드 실험과 해석 등 비교적 비용이 저렴하고 재현이 용이하나 차량 구조의 최적화는 실험 비용이 상대적으로 고가이며 해석적으로 최적화를 하기 위해서는 고가의 컴퓨터 환경을 필요로 한다.

충돌구조의 최적화 경향은 수치적 방법보다는 경험에 의한 반복실시로 문제를 해결하려 하였다. 설계 상 구조물의 위치 제한조건이나 금형 형상 변경 불가능으로 인하여 형상 개선에 의한 최적화가 매우 어려우며 주

\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

로 해석이나 실험으로 문제가 되는 부재의 재질이나 두께를 변경하여<sup>12,13)</sup> 강성을 높이거나 보강재를 추가하는 방향으로, 즉, 중량이 증가하는 관점으로 설계를 한다. 이러한 설계는 주로 구조물의 형상 비대칭이나 강성 불균형에 의한 굽힘 변형을 보강하여 굽힘 하중을 높이는 경우가 많고, 중량증가에 비하여 개선효과가 크다고 보기 어렵다. 이외의 방법으로는 구조물의 앞부분에 초기 결함을 설정 축 압축 변형을 유도하여 효과적으로 에너지를 흡수하는 방법이다. Kitagawa<sup>14)</sup> 등은 초기 결함(initiator)의 위치 및 크기를 반복해석으로 구하였으며, 이 방법은 초기 결함의 위치와 크기를 정하는데 많은 반복계산과 경험을 필요로 한다.

최근에 충돌 구조물의 중량을 증가시키거나 형상을 변경하지 않고 균질화법(Homogenization Method)을 이용 변형률이 작은 요소를 제거하여 굽힘 변형 모드를 축 압축 변형 모드로 개선하여 구조물이 좀더 많은 충돌에너지를 흡수하도록 하는 충돌 최적화를 Mayer 등<sup>1,11)</sup>이 후면 충돌에 적용하였다. 본 연구에서는 Mayer가 제안한 방법을 이용하여 간단한 단품 해석으로 효용성을 검증하고 실험계획법으로 최적화 알고리즘에 사용하는 인자의 민감도를 분석한다.

## 2. 균질화법 개념

### 2.1 기본개념

미세구조를 갖는 복합재료를 이용한 구조물의 거시적 응답을 평가하기 위해 복합재료의 등가재료특성을 구하는데서 출발하였으며 프랑스의 Lions의 연구그룹이 수학적 이론을 균질화법이라 하였다.<sup>2)</sup> Guedes<sup>3)</sup>는 균질화 기법과 유한요소법으로 미세구조 단위의 함수로 탄성 및 탄소성 균질화 상수를 구하였다. Bendsoe와 Kikuchi<sup>4)</sup>는 평면 응력

상태에서 주기적인 정사각형의 구멍이 있는 정사각형의 미세구조에서 구멍의 크기와 균질화 상수의 관계에 대한 함수를 구했다. 특정 문제를 사각형 요소를 사용하여 주어진 부피 조건에서 강성을 최대화하도록 최적화 기준법(Optimality Criteria)을 적용하여 해석하였다. Suzuki<sup>5)</sup>는 축 대칭과 3차원 문제로 적용범위를 확대하였고 Min과 Kikuchi<sup>6)</sup>는 좌굴 문제에 적용하였다.

균질화법을 충돌 해석에 적용할 때의 기본 개념은 1차 충돌해석을 한 후 각 요소에 발생하는 변형률을 이용하여 변형률이 작은, 즉, 변형이 적게 또는 발생하지 않은 요소를 제거하여(부재에 구멍 설치) 형상 비대칭 또는 강성 불균일에 의한 굽힘 변형 또는 불완전한 축 압축 변형을 축 압축 변형으로 잘 유도하여 충돌에너지를 충분히 흡수하도록 하는 방법이다.<sup>1,11)</sup>

### 2.2 균질화 탄성계수

모니터의 새도우 마스크처럼 구조물에 미세구멍 있는 경우, 이러한 비균질 탄성체를 역학적 거동의 기술이 가능하도록 등가의 균질한 탄성체로 바꾸어 사용한다.

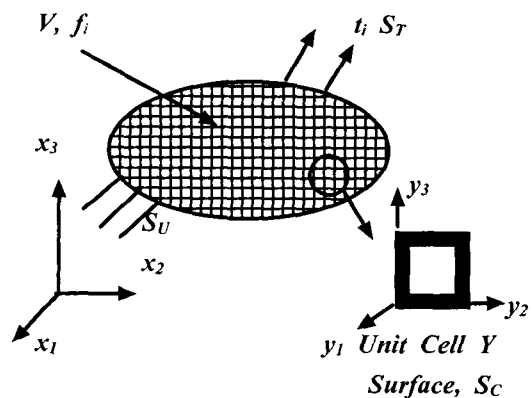


Fig. 1 Body with microstructure

위 그림과 같은 물체에 가상일 원리를 적용

하면 지배방정식은 다음과 같다.

$$\int_V E_{ijkl} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial v_k}{\partial x_l} dV = \int_V f_i v_i dV + \int_S t_i v_i dS \quad (1)$$

$v_i$  : 가상변위

$u_i$  : 변위

이 탄성체 거동을 거시 스케일의 거동과 미시 스케일의 거동으로 나눌 수 있으며 변위를 다음과 같이 표시한다. 미시 스케일 거동  $y_m$ 은 Fig. 1의 단위 셀의 거동을 표시하며 주기는 1이다.

$x_m$  : 거시거동

$y_m$  : 미시거동(주기적, 주기 1)

$u_i = u_i(x_m, y_m)$

변위를 미세구조의 크기,  $\epsilon$ , 에 대하여 점근적인 전개(asymptotic expansion)로 표현하면 다음 식과 같다.

$$u_i^\epsilon = u_i^0(x_m, y_m) + \epsilon u_i^1(x_m, y_m) + \epsilon^2 u_i^2(x_m, y_m) + \dots \quad (2)$$

균질화하기 위해서는 위 식을 이용하여 균질화된 탄성계수  $E_{ijkl}^H$ 를 구한다. 이것을 수식 전개하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y (E_{ijkl} - E_{ijpm} \frac{\partial \chi_p^{ij}}{\partial y_m}) dY \quad (3)$$

### 2.2 탄성 평면 응력

Fig. 2 같이 정사각형 구멍이 있는 미세구조의 단위 셀의 밀도는  $\mu = 1 - a^2$  이다. 평면 응력의 경우 응력과 변형률의 관계는 식(4)와 같다. 균질화된 탄성 계수를 식(3)을 이용하여 구한 것과 밀도  $\mu$ 를 이용하여 근사적으로 구한 것을 비교하면 Fig. 3과 같고  $\mu^6$ 에 비례하는 것을 알 수 있다.<sup>1)</sup> 이것을 정리하면 식 (5)~(7)과 같다.

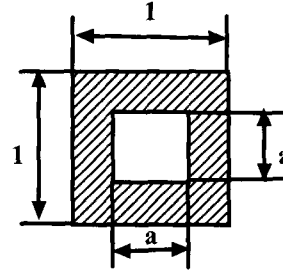


Fig. 2 Plane stress unit cell

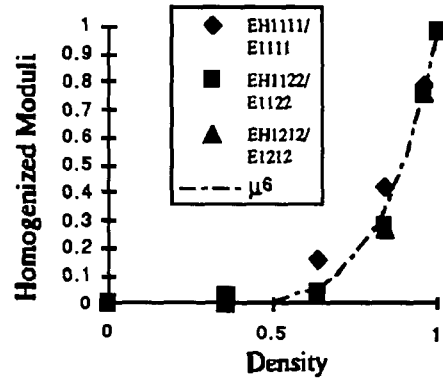


Fig. 3 Elastic homogenized moduli

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1111} & E_{1122} & 0 \\ E_{2211} & E_{1111} & 0 \\ 0 & 0 & E_{1212} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$E_{1111}^H = E_{1111} \mu^6 = \frac{E}{1 - \nu^2} \mu^6 \quad (5)$$

$$E_{1122}^H = E_{1122} \mu^6 = \frac{\nu E}{1 - \nu^2} \mu^6 \quad (6)$$

$$E_{1212}^H = E_{1212} \mu^6 = \frac{E}{1 + \nu} \mu^6 \quad (7)$$

### 2.3 탄-소성 평면 응력

Fig. 4에서 소성계수  $E_p$ 는 식(8)과 같이 구할 수 있으며, 또한 균질화된 소성계수와 항복응력은 각각 식 (9), (10)과 같이 나타낼

수 있다.<sup>1)</sup>

$$E_p = \frac{E_T E}{E - E_T} \quad (8)$$

$$E_{ijkl}^H |^{\mu} = E_{ijkl} |^{\mu} \mu^6 \quad (9)$$

$$\sigma_y^H = \sigma_y(1-a) = \sigma_y(1-\sqrt{1-\mu}) \quad (10)$$

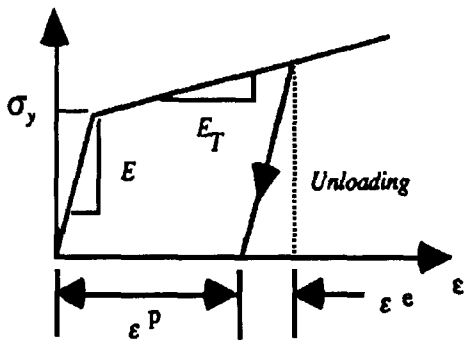


Fig. 4 Uniaxial stress-strain curve

### 2.4 최적화

최적화의 목표는 해석 마지막 시간에서 층돌에너지를 충분히 흡수할 수 있도록 내부에너지를 최대화하는 것이다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\max_{\mu} \int_{\Omega} \frac{1}{2} E_{ijkl}^H(\mu) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} dx \Big|_{t=t_f} \quad (11)$$

제한조건으로는 미세구조의 함수인 부피  $V(\mu)$ 가 임의의 최대 부피  $V_{max}$  보다 작거나 같아야 한다.

$$\int_{\Omega} V(\mu) dx - V_{max} \leq 0 \quad (12)$$

설계변수의 제한조건은 다음과 같다.

$$0 \leq \mu \leq 1 \quad (13)$$

식(11)을 이용 최적화를 하면 해석중 변형과정의 고른 반영 없이 한순간의 변형률

만을 이용하므로 목표함수를 과대 또는 과소 평가 할 수 있다.<sup>1,11)</sup> 이를 보완하기 위해 해석시간을 몇 개의 일정시간으로 나누어 해석 최종시간의 내부에너지와 비교하여 미리 정한 시간에서의 내부에너지 값이 최종 내부에너지 값과 같도록 가중치를 곱하여 목표함수를 변경하여 사용한다.

식(11)에 밀도, 변위, 제한 조건에 대하여 라그랑지승수, 최적화 기준법<sup>7)</sup>을 적용하여 식을 전개하고 정리하여 각 시간별로 내부 에너지를 동일한 비율로 이용하기 위해 가중치를 곱하여 구하면 식 (14)와 같다. 식 (14)는 각 요소별  $\Lambda^{(e)}$  값이 된다.

$$\Lambda^{(e)} = ( W_1 \int_{V^{(e)}} \frac{dU^H}{d\mu^{(e)}} \Big|_{t=t_1} dV^{(e)} + W_2 \int_{V^{(e)}} \frac{dU^H}{d\mu^{(e)}} \Big|_{t=t_2} dV^{(e)} + \dots ) / \int_{V^{(e)}} \frac{dU^H}{d\mu^{(e)}} dV^{(e)} = const. \quad (14)$$

$W_i$ 는  $t = t_i$  에서 가중치이다.

부피제한조건(VF)는 최적화 수행 전 부피에 대한 비율로 표시하는데 최대값은 1 이고 이것을 식으로 쓰면 아래와 같다.

$$VF \equiv \frac{V}{V_0} = \frac{V}{\int_V V_{\mu=1} dV} \quad (15)$$

### 2.5 재분배 및 요소제거 알고리즘

재분배 알고리즘(resizing algorithm)은 식 (16)과 같다. 각 요소의  $\Lambda^{(e)}$  값은 식(14)와 같이 구하며  $\Lambda^{(e)}$  값이 작은 요소를 제거하기 위해  $\Lambda^{(e)}$  의 평균값으로 각 요소  $\Lambda^{(e)}$ 을 나눈다. 이 값을 식(16)의 재분배 알고리즘을 이용하여 최적화를 한다. 재분배 알고리즘을 시작할 때 모든 요소의 밀도  $\mu_k^{(e)}$ 는 1이다. 변형률이 작은 요소는 1보다 작지만 1에 근접한 값에서 시작하여 재분배 과정을 반복할수록  $\mu_k^{(e)}$ 가 지수함수이므

로 0에 수렴하며, 반대로 변형률이 큰 요소는 1보다 약간 큰 값에서 시작하여 지수함수 형태로 증가한다. 각 k번째 재분배 과정에서 모든 요소에서 구한  $\mu_k^{(e)}$  를 더하여 밀도값을 구한 후 초기에 설정한 VF값 이하이면 재분배 알고리즘을 종료한다. 종료시 각 요소의  $\mu_k^{(e)}$  값을 미리 정한 요소 제거 기준값(threshold value)미만인 요소를 제거하여 새로운 설계안을 얻는다. 이와 같은 과정을 요소제거 알고리즘(threshold algorithm)이라 한다.

$$\Lambda_{ave} = \frac{\sum_{e=1}^n \Lambda^{(e)}}{n}$$

$$\mu_{k+1}^{(e)} = \left( \frac{\Lambda^{(e)}}{\Lambda_{ave}} \right)^{\beta_1} \mu_k^{(e)}$$

If  $\mu_{k+1}^{(e)} > \mu_k^{(e)} + \beta_2$ , then

$$\mu_{k+1}^{(e)} = \mu_k^{(e)} + \beta_2 \quad (16)$$

이와 같은 재분배와 요소제거 알고리즘을 그림으로 표시하면 Fig. 5와 같다. 최적화 단계별로 재분배와 요소제거 과정을 한번씩 수행한다.

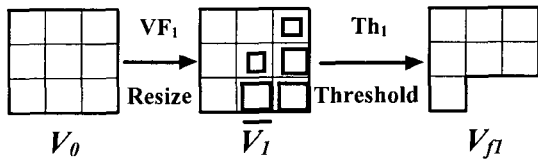


Fig. 5 Resizing and threshold algorithms

### 3. 적용예

#### 3.1 적용모델

Fig. 6과 같은 부재를 균질화법을 이용하여 내부에너지를 증가시키는 최적화를 실시한다. 모델의 요소수는 5,332 개다. 재질은 SPC, 부재 후방에 400 kg의 하중이 작용한

다. 모델 1의 두께는 1.2 mm, 모델 2는 2.0 mm, 모델 3은 2.5 mm의 3가지의 대하여 해석을 실시하며, 해석 조건은 전방의 고정벽에 7 m/s의 속도로 정면 충돌한다.

#### 3.2 적용모델 기초해석

적용모델 중 두께 1.2 mm 대한 기초 해석한 결과 Fig. 7과 같이 단면의 형상이 변하기 시작하는 부재의 중간 부분에서 형상 불균형에 의하여 축 압축 변형이 아닌 굽힘 변형이 발생한다. 충돌 후 24 ms까지의 내부에너지는 3,095 J이며 부재의 무게는 3.536 kg이다. 단위 무게당 내부에너지는 875.3 J/kg이다. 해석 모델의 변형 모습은 Fig. 7과 같다.

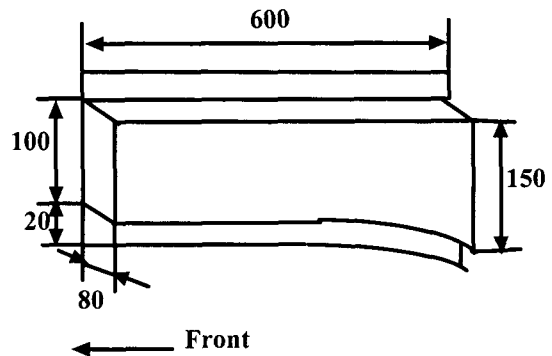


Fig. 6 Base model dimension(unit, mm)

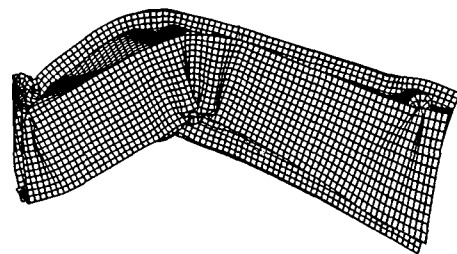


Fig. 7 Model 1 deformed shape at 20ms

가중치는 매 4 ms마다 내부에너지 값을 비교하여 24 ms까지 적용하였으며, 24 ms

에서의 값을 1로 하였을 때 각 시간별 가중치는 3.13, 2.05, 1.58, 1.28, 1.10, 1.0 이다.

### 3.3 균질화법 인자들의 민감도해석

균질화법을 이용한 최적화방법에서 인자 VF, 요소제거 기준값(Threshold value, Th),  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ 의 값에 따라 해석 결과가 변할 수 있다. 이 변수들에 대하여 Mayer<sup>11)</sup>는  $\beta_1 = 0.01$ ,  $\beta_2 = 0.1$ , VF 는 0.55 ~ 0.7, Th 는 0.3 정도의 값이 적절하다고 하였다.

식(16)를 이용 최적화할 때 요소의 밀도는 지수함수적으로 변하며 변형률이 작은 요소는 감소하는 양이 k값이 증가할수록 작아지고 변형률이 큰 요소는 점점 증가한다. 매 k번째 계산에서 모든 요소의 밀도를 더하여 전체구조의 부피를 계산할 때,  $\beta_1$ 을 큰 값을 사용하면 변형률이 큰 요소의 밀도가 매우 빠르게 증가하여 1보다 커져 발산한다. 모델 1 해석결과를 여러 가지  $\beta_1$ 값을 이용 재분배 알고리즘을 돌려서 밀도를 계산한 결과는 Fig. 8과 같다. 변형률이 큰 요소의 밀도값의 증가량을 제한하여 수렴성을 높이기 위해  $\beta_2 = 0.1$  을 사용하였다.

Mayer가 최적화 예제로 사용한 자동차 rear frame<sup>1,11)</sup>의 경우는 문제의 경계조건과 기본적 강성이 커서 앞부분의 일부만 국부적으로 변형되어 변형률이 큰 요소의 비율이 낮아 Mayer가 이용한 0.55 ~ 0.7 정도의 VF값에 수렴할 수 있다. 그러나 여러 가지의 형상을 가진 예제들을 검토한 결과 변형이 작은 경우, 즉, 변형률이 작은 요소가 상대적으로 많은 경우는 재분배 알고리즘에서 k가 증가하여도 밀도의 감소량이 증가량보다 커서 작은 VF값을 사용하여도 잘 수렴하나, 변형이 비교적 잘 일어나는 경우는 0.8 이하로는 잘 수렴되지 않고 발산한다. 변형이 적은 예제로 VF를 0.55 ~ 0.7을 사용하였을 때 제거되는 요소와 0.9 전후의

값을 사용하여 제거되는 요소를 비교하면 요소의 수와 위치는 차이가 없다. 그러므로 여러 가지의 해석모델의 경우에 수렴이 잘 되게 하려면 VF값은 0.9 전후의 값을 이용하는 것이 수렴성이 좋은 것으로 사료된다. 또한, VF를 0.9 전후의 값을 사용하게 되면 Th도 0.6 전후의 값을 이용하는 것이 안정적이라 판단된다.

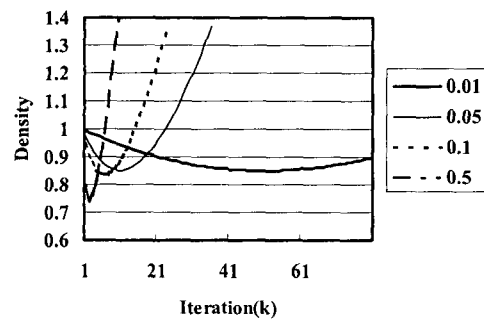


Fig. 8 Convergence of density of Model 1 : according to different  $\beta_1$  value

각 인자들 값에 따라 실제로 최적화 해석 결과에 어느 정도 영향을 미치는지 실험계획법을 이용하여 민감도를 검토한다.<sup>8-10)</sup>

#### 3.3.1 인자의 수준 및 직교배열표

Table 1 Level of factors

Factor		Level		
		1	2	3
e	dummy factor	-	-	-
e	dummy factor	-	-	-
A	Volume Fraction	0.92	0.91	0.90
B	Threshold Value	0.64	0.62	0.60
C	$\beta_1$	0.008	0.010	0.012
D	$\beta_2$	0.06	0.09	0.12
e	dummy factor	-	-	-
e	dummy factor	-	-	-

민감도해석 적용 모델은 두께가 1.2 mm의 경우에 대하여 실시하며 나머지 모델은 이 결과를 이용하여 최적화 해석을 실시한다.

인자의 수준은 수렴 가능한 값을 이용하였으며, 이를 정리하면 Table 1과 같고 직교배열표는  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 를 이용한다. 목표값으로는 해석시 마다 부재의 무게가 변하므로 단위 무게당 내부에너지로 한다.

### 3.3.2 해석결과 및 분석

해석결과를 각 해석 경우별로 단위무게당 내부에너지와 제거된 요소의 수를 정리하면 Table 2와 같다. Table 2의 평균값으로 각 경우의 결과를 나누어 퍼센트로 표시하여 단위 무게당 내부에너지의 반응표를 구하면 Table 3과 같고 그림으로 그리면 Fig. 9와 같다.

Table 2 Analysis results

Experiment No.	Internal energy(J/kg)	Number of deleted elements
case1	1046.1	46
case2	1033.6	77
case3	992.1	109
case4	1046.1	46
case5	969.6	80
case6	992.1	109
case7	1031.8	27
case8	1059.1	56
case9	771.9	205
case10	863.2	10
case11	999.2	93
case12	962.0	132
case13	1080.6	20
case14	1094.0	47
case15	724.7	178
case16	962.6	14
case17	811.7	118
case18	679.8	157

반응표를 이용 ANOVA(Analysis of Variance)를 실시하여 각 인자의 목표값에 대한 민감도를 구하면 Table 4와 같다.<sup>10)</sup> Table 4에서 민감한 인자는 부피제한조건(VF)과 요소제거 기준 값이다. 민감도가 높은 부피제한조건과 요소제거 기준값 사이에는 상호 작용이 존재한다.

각 인자들의 수준별 변화에 따른 민감도를 분석한 결과 VF는 0.91~0.92의 값에서 최적화 결과가 비슷하며 0.90, 즉, 요소를 많이 제거할 경우는 변형 양상의 개선에 의한 효과가 강성 부족으로 일부 상쇄되어 내부에너지 증가량이 적다. Th는 0.60의 경우가 가장 좋으며 값이 증가할수록, 즉, 제거 요소가 많을수록 내부에너지 증가량이 적다. 나머지는 비슷한 결과를 보여준다.  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  값은 목표값에 대한 민감도가 작으므로 Mayor<sup>11)</sup>가 사용한 각각 0.01, 0.1을 사용한다.

Table 3 Response table

Factor	Level		
	1	2	3
A Volume Fraction	105.67	104.57	89.76
B Threshold Value	94.62	100.89	104.49
C $\beta_1$	102.39	101.42	96.19
D $\beta_2$	104.29	96.18	99.53

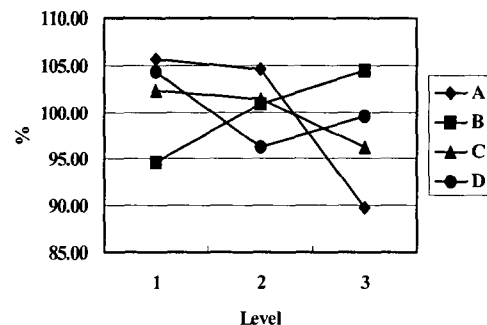


Fig. 9 Response table of internal energy

Table 4 ANOVA results

Factor		Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F ratio
A	Volume Fraction	2	946.64	473.32	4.05
B	Threshold Value	2	299.50	149.75	1.28
C	$\beta_1$	2	133.67	66.83	0.57
D	$\beta_2$	2	199.45	99.72	0.85
A×B		4	1001.5	250.37	2.14
error		11	1284.8	116.8	
total		19	2864.1		

3.4 균질화법을 이용한 최적화 결과

균질화법을 이용한 최적화과정의 각 단계(step)는 상용프로그램을 이용, 1차 해석으로 구한 요소의 변형률을 식(14), (16)을 이용해 요소가 일부 제거된 새로운 설계안을 얻고, 새로운 설계안을 상용프로그램으로 다시 해석한 것까지이다. 1단계에서의 최적화 결과가 미진할 경우 위의 과정을 반복한다.

Table 5 Optimized results of model 1

	Base	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
VF=0.91 Th=0.60	875.3	1094.0			
VF=0.92 Th=0.64	875.3	1046.1	1060.4		
VF=0.92 Th=0.60	875.3	863.2	871.7		
VF=0.91 Th=0.62	875.3	1033.6	1025.6		
VF=0.90 Th=0.60	875.3	992.1	972.3	979.6	962.2
VF=0.90 Th=0.62	875.3	962.0	969.5	1004.1	1021.3

민감도해석에서 최적의 결과를 얻을 수 있는 VF와 요소제거 기준값(Th)을 이용, 모델 1에 여러 단계의 최적화를 적용한 결과는 Table 5와 같다. Table 5에서 VF가 0.91, Th

값이 0.60일 때 가장 좋은 결과를 보여주며 1 단계이후 2 단계에서는 축 압축이 변형이 잘 일어나 추가로 제거되는 요소가 발생하지 않는다. 최적화 단계별로 요소를 많이 제거하지 않는 VF가 0.91, 0.92의 경우는 최적화가 1단계 또는 2단계에서 끝나며, 대체로 1단계 최적화 결과가 좋으며 최적화를 계속하여도 개선 효과가 크지 않다. VF = 0.92, Th = 0.60의 경우는 제거되는 요소가 아주 적어 굽힘 변형 양상을 개선시키지 못하여 기초 해석의 내부에너지와 차이가 없다. VF가 0.90 일 때는 상대적으로 요소를 많이 제거하여 개선효과가 적으며 단계별 최적화가 진행되어도 단위 무게당 내부에너지가 크게 증가하지 않는다.

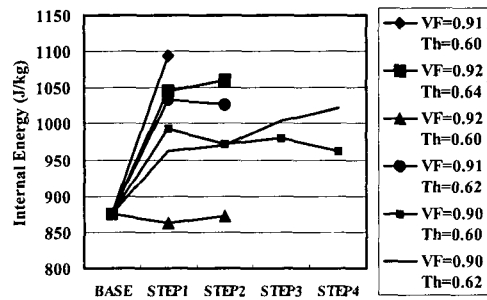


Fig. 10 Internal energy per mass : model 1

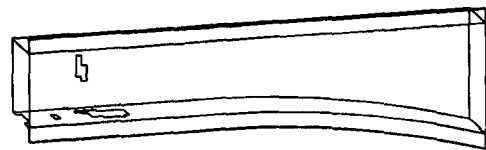


Fig. 11 New design after optimized step 1 : model 1 (VF = 0.91, Th = 0.60 case)

Fig. 11은 VF = 0.91, Th = 0.60일 때 1단계 최적화후의 새로운 설계안이다. 부재의 앞쪽 아래쪽과 왼쪽 면의 일부요소가 제거된 모습을 보여 주고, Fig. 12는 최적화해석에 의해



변형 양상이 굽힘 변형에서 축 압축 변형으로 개선된 현상을 보여준다.

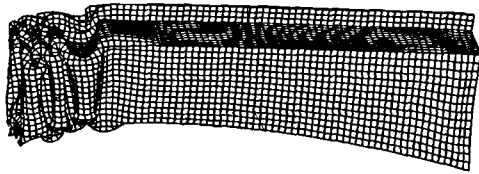


Fig. 12 Deformed shape of new design after optimized step 1 : model 1 at 20 ms (VF=0.91, Th=0.60 case)

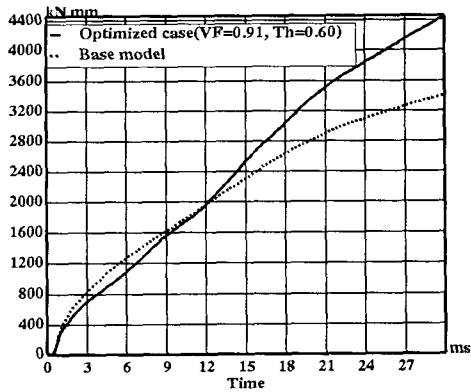


Fig. 13 Comparison of internal energy curve: model 1 (VF = 0.91 Th = 0.60)

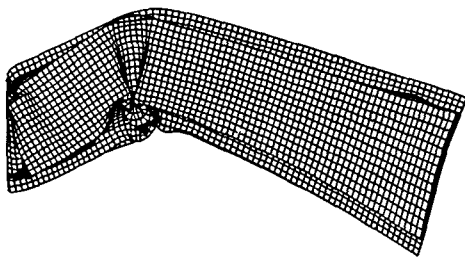


Fig. 14 Deformed shape of base run : model 2 at 20 ms

두께 2.0 mm의 모델 2와 2.5mm의 모델 3의 기초해석의 변형모습은 Fig. 14, 15와 같

고 굽힘 변형이 발생하는 위치가 약간 다르다. Fig. 16, 17은 최적화를 2단계까지 실시하였을 때의 설계안이다. 각각의 설계안은 초기 결함과 구멍의 위치는 거의 일치하며 구멍의 형상만 약간 차이가 난다. 중간 지점에서 약간 뒷부분의 구멍은 1단계의 결과이며, 앞부분 아래 면의 구멍은 2단계 최적화

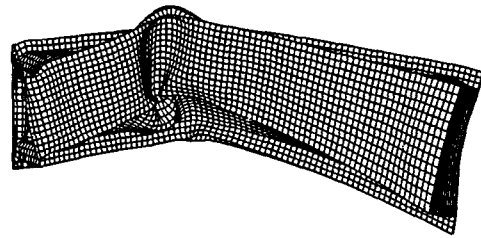


Fig. 15 Deformed shape of base run : model 3 at 20 ms

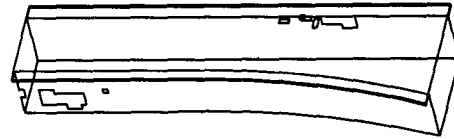


Fig. 16 New design after optimized step 2 : model 2

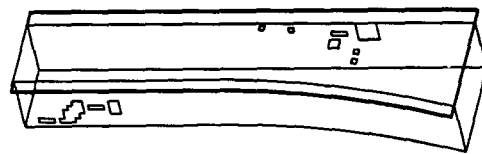


Fig. 17 New design after optimized step 2 : model 3

결과이다. Fig. 18, 19는 Fig. 16, 17의 설계안에 대한 해석 결과이며 변형이 굽힘에서 축 압축으로 바뀐 것을 알 수 있다. 모델 2와 3의 해석 결과를 정리하면 Table 6과 같다.

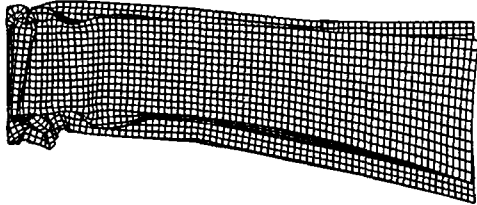


Fig. 18 Deformed shape of new design after optimized step 2 : model 2 at 20 ms

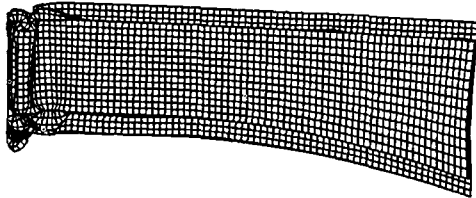


Fig. 19 Deformed shape of new design after optimized step 2 : model 3 at 20 ms.

Table 6 Optimized results of internal energy(J/kg)

	Base	Step 1	Step 2
Model 1	875.3	1094.0	
Model 2	1276.6	1190.0	1634.5
Model 3	1147.2	1253.1	1722.4

모델 2에서는 1단계 최적화에서는 제거되는 요소수가 적어 VF = 0.91, Th = 0.64를 사용하였고, 굽힘 변형이 계속되었으나 굽힘 발생위치가 뒤쪽으로 이동하였다. 1단계 해석 결과로 2단계 최적화를 할 때 제거되는 요소가 많아서 VF = 0.93, Th = 0.60을 이용하였다. 모델 3의 경우는 1단계에서 VF = 0.91, Th = 0.63을 이용하였고 2단계에서는 VF = 0.92, Th = 0.62를 이용하였다. 이상과 같은 결과에서 해석 모델의 조건에 따라 최적화에 적용하는 부피제한조건(VF)과 요소

제거 기준값(Th)값의 민감도가 변하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

균질화법을 이용한 충돌 최적화에 대한 기초 연구를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 균질화법을 이용하여 최적화를 예제에 적용 해석한 결과 가장 좋은 경우는 기본 모델에 비하여 단위 무게당 내부에너지량이 25%에서 최대 50%까지 증가하며, 무게를 많이 경량화 한 경우는 기본적인 강성 부족으로 기본모델 보다 나쁜 결과를 준다. VF는 0.92~0.91정도, Th값은 0.62~0.64 정도의 값에서 좋은 최적화 결과를 얻었다. 여러 단계의 최적화를 실시한 결과 1단계 또는 2단계 최적화, 즉, 적은 수의 해석만으로도 만족할 수준의 충돌 성능 향상 효과를 얻을 수 있다.

2) 최적화 변수인 부피제한조건(VF)값,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , 요소제거 기준값(threshold value, Th) 대한 민감도를 분석한 결과, VF와 Th값에 민감하고, 두 변수간의 상호작용은 존재하며 상호작용에 대한 추가적 연구가 필요하다.

3) 본 연구에서 얻은 결과는 본 연구의 적용 모델에 관한 것이며, 다양한 충돌 조건에 폭 넓게 적용하려면 부재의 여러 형상과 재질 및 충돌 실험 조건에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 단품상태가 아닌 실제 충돌 모델에서의 연구도 요구되며, 해석에 의한 최적 설계안을 검증할 수 있는 단품 및 실차 실험이 필요하다.

최적화 알고리즘의 수렴성과 민감도개선을 위해 사용한 변수 및 알고리즘에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 1) R. R. Mayer, N. Kikuchi and R. A. Scott, "Application of Topological Optimization Techniques to Structural Crashworthiness", International Journal for Numerical in Engineering, Vol. 39, pp.1383-1403, 1996.
- 2) J. L. Lions, "Some methods in mathematical analysis of systems and their control", Science Press, 1981.
- 3) J. M. Guedes and N. Kikuchi, "Preprocessing and Postprocessing for Materials Based on The Homogenization Method with Adaptive Finite Element Methods", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 83, pp.143-198, 1990.
- 4) M. P. Bendsoe and N. Kikuchi, "Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71, pp.197-224, 1988.
- 5) K. Suzuki and N. Kikuchi, "A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 93, pp.291-318, 1991.
- 6) S. Min and N. Kikuchi, "Optimal reinforcement design of structures under the buckling load using the homogenization design method", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 5, No.5, pp.565-576, 1997.
- 7) G. V. Reklaitis, A. Ravindran and K. M. Ragsdell, "Engineering Optimization Methods and Applications", John Wiley and Sons, 1983.
- 8) 박성현, "다구찌 방법과 통계적 공정관리를 중심으로 한 품질공학", 민영사, 1993.
- 9) 박동규, "최신 실험계획법", 기전연구소, 1999.
- 10) Phadke, M. S., "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall, 1989.
- 11) R. Mayer, "Application of topological optimization techniques to structural crashworthiness", Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 1994.
- 12) J. D. Reid, "Towards the Understanding of Material Property Influence On Automotive Crash Structures", Thin-Walled Structures, Vol. 24, pp.285-313, 1996.
- 13) J. D. Reid, "Crashworthiness of Automotive Steel Midrails: Thickness and Material Sensitivity", Thin-Walled Structures, Vol. 26, pp.83-103, 1996.
- 14) Y. Kitagawa, I. Hagiwara and M. Tsuda, "Development of a Collapse Mode Control Method for Side Members in Vehicle Collisions", SAE 910809, pp.69-75, 1991.