

등가정하중을 이용한 축대칭 단조품의 형상최적화에 관한 기초연구

정의진* · 이재준* · 박경진*†

* 한양대학교 기계공학과

A Preliminary Study on the Optimal Shape Design of the Axisymmetric Forging Component Using Equivalent Static Loads

Ui-Jin Jung*, Jae-Jun Lee* and Gyung-Jin Park*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received June 29, 2010 ; Revised October 29, 2010 ; Accepted November 1, 2010)

Key Words : Equivalent Static Loads(등가정하중), Shape Optimization(형상최적설계), Forging(단조), Preform(예비성형체)

초록: 본 논문은 등가정하중을 이용하여 단조공정의 예비성형체 및 빌렛의 형상설계를 위한 최적화 방법을 제안한다. 단조공정에서 예비성형체의 형상은 최종 성형품의 품질을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 본 연구는 빌렛 및 예비성형체의 형상을 설계하기 위하여 등가정하중법을 사용하였다. 등가정하중법은 비선형 동적하중을 등가정하중으로 변환하고 여기서 구한 등가정하중을 이용하여 선형 응답 최적화를 수행하는 방법이다. 설계변수의 갱신은 선형 응답 최적화와 비선형 해석을 통하여 이루어진다. 본 논문에 포함된 예제는 원하는 단조품의 생산을 위한 최적의 예비성형체와 빌렛의 형상을 도출하여 제안한 방법의 유용성을 검증한다. 비선형 해석과 선형 응답 최적화는 각각 LS-DYNA와 NASTRAN을 사용하였다.

Abstract: An optimization method is proposed for preform and billet shape designs in the forging process by using the Equivalent Static Loads (ESLs). The preform shape is an important factor in the forging process because the quality of the final forging is significantly influenced by it. The ESLSO is used to determine the shape of the preform. In the ESLSO, nonlinear dynamic loads are transformed to the ESLs and linear response optimization is performed using the ESLs. The design is updated in linear response optimization and nonlinear analysis is performed with the updated design. The examples in this paper show that optimization using the ESLs is useful and the design results are satisfactory. Consequently, the optimal preform and billet shapes which produce the desired final shape have been obtained. Nonlinear analysis and linear response optimization of the forging process are performed using the commercial software LS-DYNA and NASTRAN, respectively.

- 기호설명 -

M : 질량행렬
C : 감쇠행렬
K : 강성행렬
b : 설계변수 벡터
b^(k) : k 번째에서의 설계변수 벡터
N : 비선형
L : 선형
k : 사이클 번호
t : 시점 번호

s : 하중 번호
q : 제한조건 번호
n : 설계변수 번호
z(t) : t에서의 변위 벡터
ẋ(t) : t에서의 속도 벡터
ẏ(t) : t에서의 가속도 벡터
f(t) : t에서의 외력 벡터
f_{eq}^s(s) : s에서의 등가정하중
f : 목적함수
g : 부등제한조건
m : 평균값
S : 표준편차
ε : 유효변형률

† Corresponding Author, gjpark@hanyang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

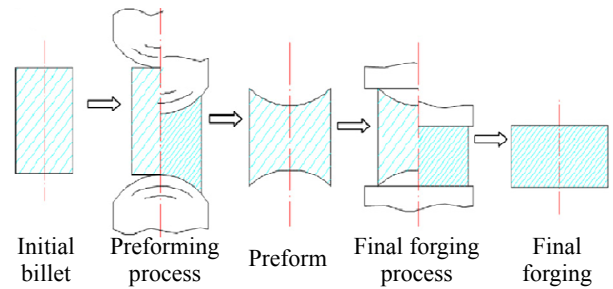
단조는 기계적 성질이 우수한 제품을 대량 생산할 수 있는 기계가공법으로, 각종 기계 부품들을 생산하는데 이용되고 있다. 이러한 단조가공은 원하는 형상의 제품을 얻기 위해 다단계의 예비성형공정이 필요하다. 예비성형공정의 결과물인 예비성형체는 빌렛과 최종제품의 중간형상이며 그 형상은 최종제품의 품질을 결정하는데 중요한 역할을 한다.^(1,2) Fig. 1은 예비성형공정이 포함된 다단계 공정과 그렇지 않은 단일공정에서의 단조품 성형 결과를 비교한 것이다.^(3,4)

적절하지 않은 예비성형체는 소재의 불충진과 플래시 등의 성형결함을 발생시킨다. 플래시의 발생은 플래시 제거를 위한 추가공정이 필요하고 이로 인한 재료의 손실이 발생하게 된다. 또한 소재의 불충진은 제품의 품질 저하의 원인이 되며 부품으로서 부적합하여 사용하지 못한다.^(1,4) 이러한 이유로, 최종가공에 적합한 예비성형체의 형상 설계가 요구되며 관련 연구가 활발하게 진행 중이다.

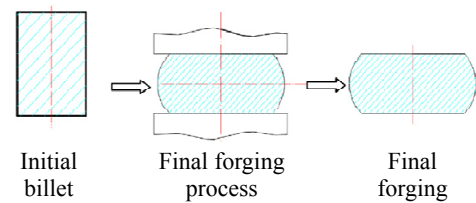
Kobayashi 등은 후방추적기법을 사용하여 주어진 마지막 형상으로부터 하중의 후방경로를 추적하여 몇 가지 단조문제를 해결하였다.⁽⁵⁻⁸⁾ Vemuri는 단조공정에서 기존의 경험법칙을 컴퓨터 프로그램 형태로 만들어 예비성형체 설계를 자동화하였다.⁽⁹⁾ Ghosh 등은 유전자 알고리즘을 예비성형체 설계 기법으로 활용하여 금속성형에 최적화 기법을 적용하였으며,⁽¹⁰⁻¹²⁾ Ko 등은 다구찌법, 반응표면법 등을 이용하여 예비성형체를 설계하였다.⁽¹³⁻¹⁶⁾ Grandhi 등은 민감도해석에 기초한 최적화 기법을 예비성형체의 형상설계에 활용하였다.^(2,17)

단조공정에서 예비성형체의 설계는 금속의 소성 변형경로를 정확히 예측하기 어렵기 때문에 원하는 예비성형체의 형상을 수학적으로 계산하는 것이 매우 어렵다. 또한 단조공정은 시간영역에서 높은 비선형성을 갖고 있기 때문에 비선형 동적 응답 구조최적설계를 요구한다. 기존의 방법을 사용한 최적설계는 비선형 해석과 민감도 계산에 매우 많은 비용이 발생한다. 또한 반응표면법과 같은 근사화법을 이용한 최적화는 그 해가 정확한 값을 갖지 못하며 설계변수가 많을 경우 비선형해석에 많은 시간을 소모한다. 따라서 단조공정의 예비성형체 형상최적설계에 적합한 새로운 방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 등가정하중법(Equivalent Static Loads method for non linear static response Structural Optimization; ESLSO)⁽¹⁸⁾을 이용하여 단조공정에서



(a) The forging process with preforming process



(b) The forging process without preforming process

Fig. 1 The forging process with performing and without performing process

의 최적화 문제를 해결한다. 등가정하중법은 기하비선형, 재료비선형, 경계비선형을 고려한 최적화 문제의 해결을 위하여 개발되었다.^(18,19) 몇 가지 예제를 통하여 등가정하중법을 이용한 형상최적설계를 수행하고 최적화된 예비성형체의 형상을 찾는다. 등가정하중법에서 설계변수는 잘 발달된 선형 응답 최적화와 비선형 해석을 통하여 갱신된다. 이러한 과정은 수렴조건을 만족할 때까지 사이클 단위로 반복되며, 그 해는 효율적이고 정확하게 수렴하는 장점이 있다.⁽¹⁹⁾

본 연구는 단조문제를 해결하기 위하여 최적화의 정식화를 정의하였고, 2단계 단조공정을 모두 등가정하중을 이용한 방법으로 최적화하여 원하는 최종형상을 도출하였다. 이러한 과정을 통하여 제안한 방법의 유용성과 그 결과를 확인하였다. 단조공정의 비선형 해석은 LS-DYNA⁽²⁰⁾를 사용하였고, 등가정하중의 계산과 선형 응답 최적화는 NASTRAN⁽²¹⁾을 사용하였다. 또한 이 두 프로그램을 연결하기 위한 프로그램을 개발하여 사용하였다.

2. 단조공정의 해석과 최적화

2.1 단조공정의 해석

단조공정의 해석은 기하비선형, 재료비선형, 경계비선형을 포함한다. 기하비선형은 변형률과 변위의 관계가 비선형인 것을 말하며, 대변형 및 대회전의 효과를 고려한다. 단조공정은 압축력을 이용하여 재료에 대변형을 발생시키는 방법으로 성

형하므로 기하비선형을 고려한 해석이 필요하다. 재료비선형은 응력과 변형률의 관계가 비선형인 것을 말하며, 큰 하중으로부터 재료의 항복강도를 초과하는 응력이 발생 할 경우 그 변형은 소성구간의 경로를 따른다. 단조의 재료는 성형과정에서 소성변형을 거치므로 재료비선형이 포함 된 비선형해석이 필요하다. 경계비선형은 역학적, 기하학적 경계조건이 시간에 따라 변하는 것을 말하며, 단조공정은 성형과정에서 재료와 다이 사이의 접촉이 시간에 따라 변한다. 이러한 이유로 단조공정은 접촉비선형의 고려가 필요하다.⁽²⁰⁻²³⁾

단조품은 재료의 소성변형경로를 따라 성형된다.⁽²²⁾ 그러나 재료의 소성변형경로는 변형률속도에 따라 다르며, 변형률속도는 단조품 성형 시 다이의 속도에 영향을 받는다. 따라서 단조공정의 해석은 시간에 의존적이며, 그 해석은 비선형 동적 해석을 필요로 한다. 본 연구는 LS-DYNA를 사용하여 단조공정의 비선형 동적 해석을 수행한다.

2.2 단조공정의 최적화

단조공정에서 예비성형체를 설계하기 위한 연구는 몇 가지 방법들에 의해 진행 중이다. 단조공정에서 사용하는 대표적인 방법은 후방추적기법이다.⁽⁵⁻⁸⁾ 후방추적기법은 후방 변형경로가 유일하지 않기 때문에 해석과정에서 예비성형체의 형상이 주요 변수에 의해 많은 변화를 받을 수 있다. 만약 소성경로가 복잡하면, 이러한 원인으로 오차의 크기는 증가한다. 또한 일 단계의 후방추적은 일반적으로 큰 오차를 가지고 있기 때문에 예비성형체의 형상을 예측하기에 정확하지 않다. 오차를 줄이기 위해 다단계의 해석을 사용하게 되면, 이 방법은 매우 많은 시간을 필요로 한다. 또한 다단계의 후방 추적 중 중간 단계 형상이 정확하지 않으면 예비성형체의 형상을 구하기 어렵다. 이 방법은 공정의 설계 시 설계자의 주관적 개입이 불가피하고, 설계변수의 선정에 따라 결과값이 달라진다는 단점이 있다.

실험계획법^(13,14)과 같은 확률론적 방법과 반응표면법^(15,16)과 같은 근사화법을 사용하여 단조공정의 예비성형체 형상을 설계 하는 연구도 진행 중이다. 그러나 이러한 최적화 방법은 설계변수를 갱신할 때마다 매우 많은 비선형 동적 해석을 필요로 하며, 설계영역에서 발생 가능한 모든 경우의 예비성형체 형상을 모델링 하여야 한다. 따라서 단조 문제에 이러한 최적화 방법을 적용하는 것은 많은 시간과 비용을 필요로 한다.⁽²⁴⁾ 또한 위의 방법들

은 예비성형체의 형상을 결정할 때 메타모델을 사용하기 때문에 정확한 소성변형이력을 고려하지 못하는 단점이 있다. 단조공정의 최적화에서 소성 변형이력을 정확하게 고려하지 않으면 예비성형체의 정확한 형상설계가 어렵다. 또한 근사화법의 사용으로 재료의 변형 시 절점의 속도가 유추되기 때문에 오차가 존재하게 된다.

민감도 해석에 기초한 최적화 기법을 예비성형체의 형상설계에 활용한 연구도 진행 중이다.^(2,17) 그러나 이 방법은 매 시간 단계마다 민감도의 계산이 필요하여 많은 시간과 비용을 소모한다.

본 연구에서는 기존의 문제점을 극복하기 위하여 단조공정에 구조최적설계기법을 적용하여 예비성형체의 형상을 구한다. 최적화의 설계정식화는 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Find } \mathbf{b} \in R^n \tag{1a}$$

$$\text{to minimize } f(\mathbf{P}(\mathbf{b})-\mathbf{T}) \tag{1b}$$

$$\text{subject to } g_i(\mathbf{b}) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, q) \tag{1c}$$

식 (1)은 원하는 최종 형상의 성형에 적합한 예비성형체의 형상을 결정하는 정식화이다. \mathbf{b} 는 설계변수 벡터이고 n 은 설계변수 번호, q 는 제한조건 번호이다. 설계변수는 섭동벡터의 배열이며 섭동벡터는 예비성형체의 형상을 조정한다. \mathbf{P} 는 예비성형체에서 선택된 절점들의 성형 후 위치이며, \mathbf{T} 는 그 선택된 절점들의 성형 후 목표 위치이다. 목적함수는 \mathbf{P} 와 \mathbf{T} 사이의 거리를 이용하여 제곱합이나 표준편차를 사용한다. 제한조건은 목적함수에서 사용한 절점들의 위치를 제한하거나 예비성형체의 다른 부분 형상을 제한하는 것으로 정의할 수 있다. 이러한 정식화를 사용한 단조공정에서의 최적화는 소재의 충전, 플래시의 제거 등을 동시에 고려할 수 있다.

3. 등가정하중법

3.1 등가정하중의 정의

등가정하중은 비선형 동적 응답 해석으로부터 얻어지는 임의의 시간에서의 응답과 동일한 응답을 발생시키는 선형 정적 응답 해석에서의 하중을 의미한다. 등가정하중은 다음과 같은 과정을 통하여 구한다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{z}}_N(t) + \mathbf{C}(\mathbf{b})\dot{\mathbf{z}}_N(t) + \mathbf{K}(\mathbf{b}, \mathbf{z}_N(t))\mathbf{z}_N(t) = \mathbf{f}(t) \tag{2}$$

$$; (t=t_0, t_1, \dots, t_f)$$

식 (2)는 비선형 동적 응답 해석을 위한 유한요소 방정식이다. \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} 는 각각 최적설계 시

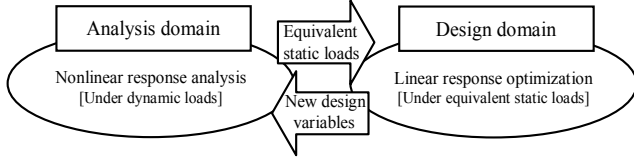


Fig. 2 Schematic process between the analysis domain and the design domain

의 설계변수 벡터 \mathbf{b} 에 대한 시스템의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이다. $\mathbf{f}(t)$ 는 시간 t 에 따라 달라지는 외력을 의미한다. 식 (2)로부터 비선형 동적 응답 해석을 수행하면 비선형 동적 변위벡터인 $\mathbf{z}_N(t)$ 가 얻어진다.

$$\mathbf{f}_{eq}^z(s) = \mathbf{K}_L(\mathbf{b})\mathbf{z}_N(s) \quad (s=1, 2, \dots, l) \quad (3)$$

식 (3)은 등가정하중을 계산하는 식이다. 등가정하중은 선형 강성행렬과 비선형 동적 변위벡터와의 곱으로부터 계산한다. 여기서 $\mathbf{f}_{eq}^z(s)$ 는 시간 t 에 대응하는 하중조건 s 에서의 등가정하중을 의미한다. $\mathbf{K}_L(\mathbf{b})$ 는 선형 강성행렬을 의미한다. t 는 시간조건에 따른 표현이고 s 는 하중조건에 따른 표현이며, t 와 s 는 서로 정확히 대응된다. l 은 시점점의 개수이다. 이렇게 계산한 등가정하중 $\mathbf{f}_{eq}^z(s)$ 는 식(4)의 우측 항으로 이용한다.

$$\mathbf{K}_L(\mathbf{b})\mathbf{z}_L(s) = \mathbf{f}_{eq}^z(s) \quad (4)$$

식 (4)로부터 선형 정적 변위벡터인 $\mathbf{z}_L(s)$ 을 구할 수 있다. 이 값은 비선형 동적 변위벡터인 $\mathbf{z}_N(t)$ 와 같은 값을 갖는다. 앞에서 계산한 등가정하중을 선형 해석의 외력으로 적용하면 선형 해석에서 비선형 동적 변위와 같은 변위 값을 구할 수 있다.⁽¹⁸⁾

3.2 등가정하중을 이용한 최적화 과정

등가정하중을 이용한 비선형 동적 응답 최적설계는 Fig. 2와 같이 해석영역과 설계영역으로 나뉜다. 이 두 영역은 등가정하중을 매개로 하여 완전히 독립적이다. 두 영역 중 해석영역에서는 비선형 동적 해석을 수행하고 등가정하중을 구한다. 설계영역에서는 해석영역에서 얻어진 등가정하중을 외력으로 사용하여 선형 정적 최적설계를 수행한다. 최적해가 얻어지면 설계변수를 갱신한 후 다시 해석영역에서 비선형 동적 해석을 한다. 이러한 한번의 반복과정을 사이클이라고 부르며, 이 과정은 수렴조건을 만족할 때까지 반복한다.

Fig. 3은 등가정하중을 이용한 비선형 동적 응답 최적화에 대한 과정이다. 최적화의 과정은 다음의 6단계로 요약할 수 있다.

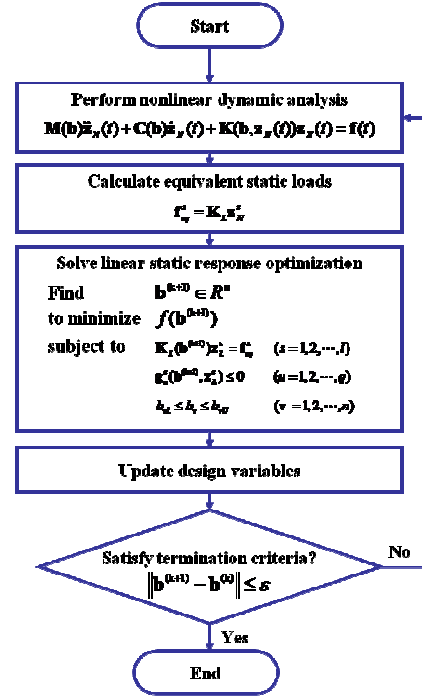


Fig. 3 Optimization process using equivalent static loads

단계 1: 초기값을 설정한다. (사이클 $k=0$, 설계변수 $\mathbf{b}^{(k)} = \mathbf{b}^{(0)}$, 수렴조건 ϵ)

단계 2: 설계변수 $\mathbf{b}^{(k)}$ 에 대하여 비선형 동적 응답 해석을 수행한다. 여기서 선형 강성행렬과 비선형 동적 변위벡터를 얻을 수 있다.

단계 3: 다음과 같이 등가정하중을 계산한다.

$$\mathbf{f}_{eq}^{s,(k)} = \mathbf{K}_L \mathbf{z}_N^s \quad (s=1, 2, \dots, l) \quad (5)$$

단계 4: 다음의 선형 정적 최적화를 수행한다.

$$\text{Find } \mathbf{b}^{(k+1)} \in R^n \quad (6a)$$

$$\text{to minimize } f(\mathbf{b}^{(k+1)}) \quad (6b)$$

$$\text{subject to } \mathbf{K}_L(\mathbf{b}^{(k+1)})\mathbf{z}_L^s = \mathbf{f}_{eq}^s \quad (s=1, 2, \dots, l) \quad (6c)$$

$$g_u^s(\mathbf{b}^{(k+1)}, \mathbf{z}_L^s) \leq 0 \quad (u=1, 2, \dots, q) \quad (6d)$$

$$b_{vL} \leq b_v \leq b_{vU} \quad (v=1, 2, \dots, n) \quad (6e)$$

단계 5: 최적해로 얻어진 설계변수를 갱신한다.

단계 6: 다음의 조건을 만족하면 반복과정을 멈추고 그렇지 않다면 단계 2로 간다. ($k=k+1$)

$$\|\mathbf{b}^{(k+1)} - \mathbf{b}^{(k)}\| \leq \epsilon \quad (7)$$

$$g_u^s(\mathbf{b}^{(k+1)}, \mathbf{z}_L^s) \leq 0 \quad (u=1, 2, \dots, q) \quad (8)$$

이러한 과정을 통하여 등가정하중법은 비선형 동적 해석과 잘 발달된 선형 정적 최적화를 이용한다. 이로써 비선형성이 고려된 최적화 문제를

Table 1 Material properties

Property	Young's modulus	Poisson's ratio	Yield strength	Ultimate strength
Value	150 GPa	0.3	169 MPa	448 MPa

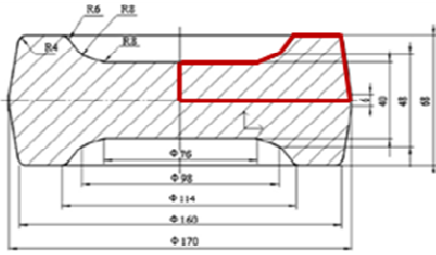


Fig. 4 H-shape forging

수학적으로 최적화하고 그 비용을 크게 줄일 수 있다.⁽¹⁹⁾

4. 축대칭 단조품의 형상최적설계

4.1 H-형 단조품의 2단계 형상최적설계

등가정하중법을 이용하여 축대칭 단조품의 형상 최적설계를 수행하였다. 첫 번째 예제는 단면의 형상이 Fig. 4와 같은 H-형 단조품이며 해석 및 최적설계 시 본 단조품의 1/4모델을 사용하였다. 사용한 물성치는 Table 1과 같다. 본 예제에서 사용한 H-형 단조품은 2단계의 단조공정을 거친 후 최종 제품을 얻게 된다. 2단계 단조공정은 빌렛을 예비성형하여 예비성형체를 만들고 이것을 최종가공하여 최종제품을 만드는 가공 공정을 말한다. 4.1.1절에서는 형상최적화를 통하여 원하는 최종제품에 적합한 최적의 예비성형체 형상을 구한다. 4.1.2절에서는 앞에서 구한 예비성형체의 가공에 필요한 빌렛의 최적 형상을 찾는다.

4.1.1 예비성형체의 형상최적설계

최종성형을 거친 단조품은 Fig. 5와 같이 예비성형체의 초기 형상에 따라 소재의 불충진과 과도한 플래시가 발생한다. 이러한 결함의 발생은 등가정하중법을 이용한 예비성형체의 형상최적설계로 해결이 가능하다.

형상 최적설계에 사용된 정식화는 아래와 같다.

Find b_i ($i=1, 2, 3$) (9a)

to minimize Y_j ($j=1, 2, \dots, 28$) (9b)

subject to $-0.2 \leq m_h \leq 0.2$ (9c)

$S_h \leq 0.2$ ($h=1, 2, 3, \dots, 21$) (9d)

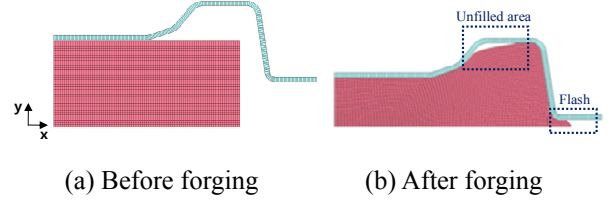


Fig. 5 Forging defects

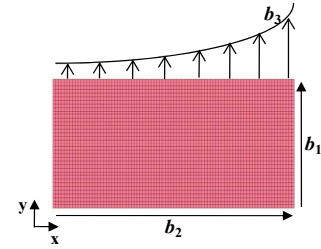


Fig. 6 Perturbation vectors

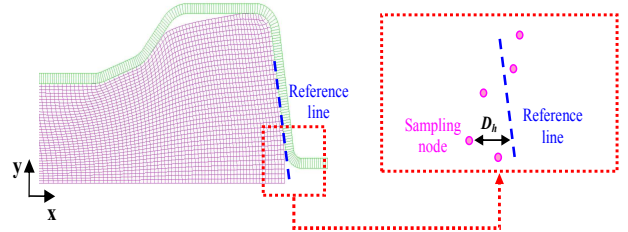


Fig. 7 The distance between sampling nodes and the reference line

여기서 b_1, b_2, b_3 는 형상최적화에 사용된 섭동벡터의 배열이며 설계변수를 의미한다. 본 예제의 설계영역은 예비성형체의 단면 형상으로써 섭동벡터는 이 형상의 치수와 곡률반경을 조정하며 Fig. 6은 섭동벡터를 나타낸다.

목적함수는 단조가공 후 불충진 영역의 최소화이다. 불충진 영역을 나타내는 지표는 Y_j 이며, 이 지표는 불충진 영역에 존재하는 절점들의 y 방향 좌표들을 이용하여 계산한다. Y_j 의 최소화는 불충진이 발생하는 부분을 감소시킴으로써 소재의 충전률을 증가시키는 것을 의미한다.

$$Y_j = -\frac{1}{28} \sum_{j=1}^{28} y_j \quad (10)$$

제한조건은 플래시 발생과 관련이 있다. m_h 는 D_h 의 평균값을 나타내며 D_h 는 Fig. 7에 나타난 것과 같이 플래시가 발생하는 부분에서의 기준선과 표본 절점들 사이의 거리를 나타낸다.

$$m_h = \frac{1}{21} \sum_{h=1}^{21} D_h \quad (11)$$

S_h 는 D_h 의 표준편차이다.

$$S_h = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{h=1}^{21} (D_h - m_h)^2} \quad (12)$$

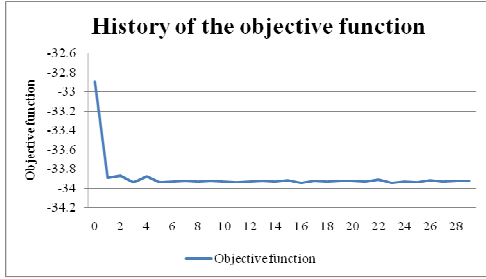
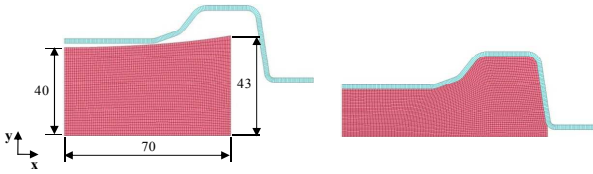


Fig. 8 History of the objective function



(a) Before forging

(b) After forging

Fig. 9 Optimum preform of the H-shape forging

본 예제의 수렴기준 값 ε 은 0.005로 정의하였으며 29번째 사이클에서 수렴하였다. 제한조건 위배율은 175.4%에서 0.0%로 감소하였고, 목적함수는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 -32.892에서 -33.925로 감소하였다. Fig. 9는 최적값을 갖는 H-형상 단조품의 예비성형체와 성형 결과를 표현하고 있다. 또한 최적화 된 예비성형체는 성형 후 불충진 영역과 플래시가 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

4.1.2 빌렛의 형상최적설계

앞에서 구한 예비성형체는 빌렛을 가공하는 예비성형단계를 통하여 얻게 된다. 이때 필요한 빌렛의 형상은 등가정하중을 이용한 최적설계를 사용하여 최적의 값을 구할 수 있다.

빌렛의 형상 최적설계에 사용된 정식화는 아래와 같다.

$$\text{Find } b_1, b_2 \quad (13a)$$

$$\text{to minimize } -Y_A \quad (13b)$$

$$\text{subject to } -0.25 \leq m_e \leq 0.25 \quad (13c)$$

$$S_e \leq 0.5 \quad (e=1, 2, 3, \dots, 37) \quad (13d)$$

여기서 b_1, b_2 는 형상최적화에 사용된 섭동벡터의 배열이며 설계변수를 의미한다. 본 예제의 설계영역은 초기 빌렛의 단면 형상으로써 섭동벡터는 초기 빌렛의 반경 및 높이를 조정한다. Fig. 10은 빌렛에 설정한 섭동벡터를 나타낸다.

목적함수는 예비성형 후 예비성형체의 상단부 형상과 목표형상의 차이를 최소화하는 것이다. Y_A 는 Fig. 11에 나타난 A점의 y방향 좌표이며, 이 값을 최대화 함으로써 예비성형 후 예비성형체는

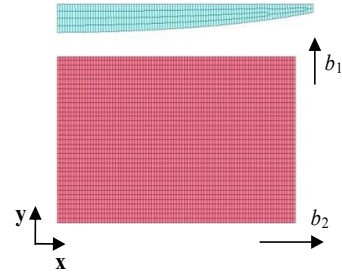


Fig. 10 Perturbation vectors

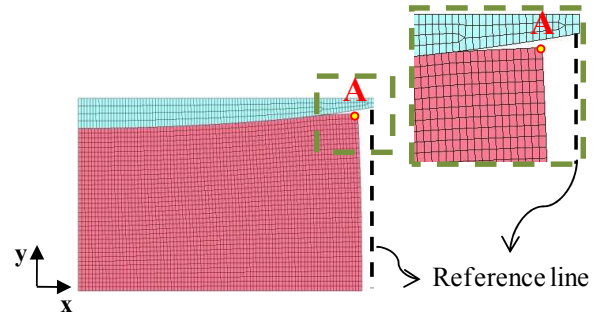


Fig. 11 The objective function and constraints

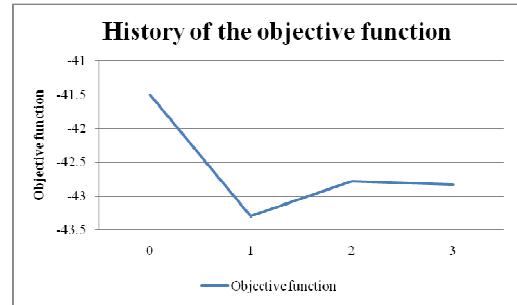


Fig. 12 History of the objective function

상부 다이와 가깝게 접촉하며 성형되고, 목표형상과의 차이는 줄어들게 된다.

제한조건은 예비성형 후 예비성형체의 반경방향 크기와 관련이 있다. m_e 는 D_e 의 평균값을 나타내며 D_e 는 Fig. 11에서 볼 수 있는 기준선과 반경방향 끝 부분에 존재하는 표본 절점들 사이의 거리를 나타낸다.

$$m_e = \frac{1}{37} \sum_{e=1}^{37} D_e \quad (14)$$

S_e 는 D_e 의 표준편차이다.

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{36} \sum_{e=1}^{37} (D_e - m_e)^2} \quad (15)$$

수렴기준 값 ε 은 0.005이며 3번째 사이클에서 수렴하였다. 제한조건 위배율은 29.9%에서 0.0%로 감소하였고, 목적함수는 Fig. 12에 나타난 것과 같이 -41.500에서 -42.830으로 감소하였다. Fig. 13은 최적의 형상을 갖는 초기 빌렛을 표현하고 있다. 최적화 된

초기 빌렛은 예비성형 후 원하는 크기와 형상의 예비성형체로 성형되는 것을 확인할 수 있다.

4.1.3 최적화 결과를 이용한 2단계 단조공정

빌렛 최적화의 결과를 이용하여 2단계 단조공정을 수행하였다. 최종 목표 형상과의 비교를 통하여 최적설계 결과의 유용성을 확인하였다. Fig. 14는 H-형 단조품의 2단계 단조공정을 나타낸다. 최적화 된 초기 빌렛을 이용하여 예비성형과 최종성형을 거친 제품은 불충진 영역과 플래시가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 그 결과물은 최종 목표형상과 동일한 형상임을 Fig. 14의 (c), (d) 두 그림을 비교함으로써 알 수 있다.

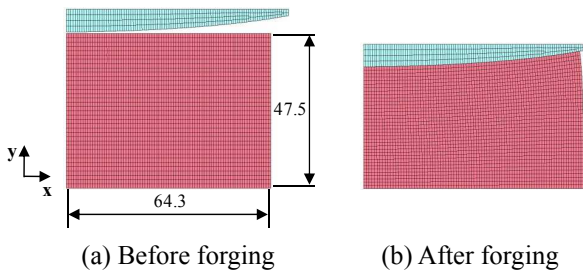


Fig. 13 Optimum billet of the H-shape forging

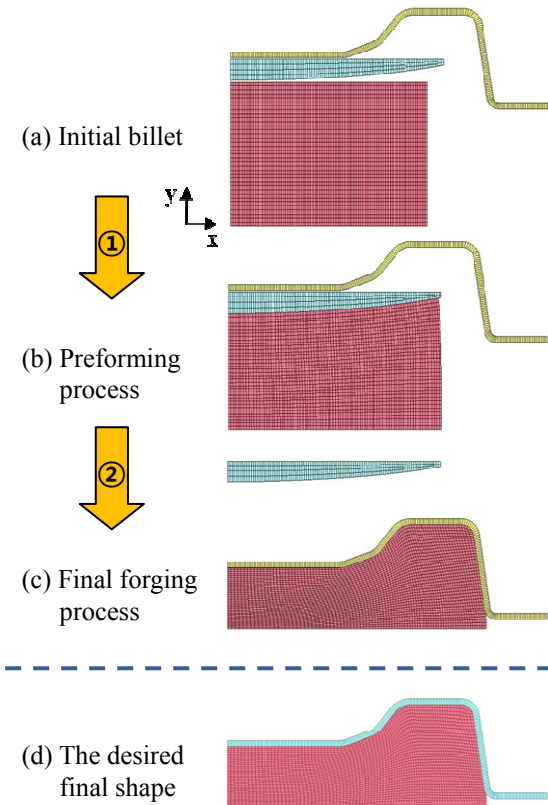


Fig. 14 Optimum model of the H-shape forging

4.2 T-형 단조품 예비성형체의 형상최적설계

두 번째 형상최적설계 예제는 단면의 형상이 Fig. 15와 같은 T-형 단조품 1/4 모델을 사용하였다. 사용한 물성치는 Table 1과 같다. T-형 단조품은 Fig. 16에서 보이는 바와 같이 성형 결함이 쉽게 발생하여, 적절한 예비성형체의 설계가 필요한 모델이다. 본 예제는 등가정하중을 이용한 형상최적화를 통하여 결함이 발생하지 않는 최적의 예비성형체 형상을 도출한다. 또한 성형 후 높은 기계적 성질을 유지하기 위하여 목적함수는 최대 유효변형률의 최소화로 설정하였다.⁽²⁾

형상 최적설계에 사용된 정식화는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Find } & b_i \quad (i=1, 2, 3, 4) & (16a) \\ \text{to minimize } & \beta & (16b) \\ \text{subject to } & -0.6 \leq m_u \leq 0.6 & (16c) \\ & S_u \leq 0.3 \quad (u=1, 2, 3, \dots, 7) & (16d) \\ & -0.6 \leq m_f \leq 0.6 & (16e) \\ & S_f \leq 0.3 \quad (f=1, 2, 3, \dots, 12) & (16f) \\ & \bar{\epsilon} \leq \beta & (16g) \end{aligned}$$

위의 정식화는 테일러-벤조 베타 정식화⁽²⁵⁾를 사용하였다. 이 식은 가상의 변수 베타(beta: β)를 목적함수로 하여 이를 최소화하면서 설계자가 원하는 최대값을 베타보다 작거나 같도록 제한하는 최대값의 최소화 문제 방법 중 하나이다. 본 문제에서는 목적함수를 베타의 최소화라고 하고 단조공정

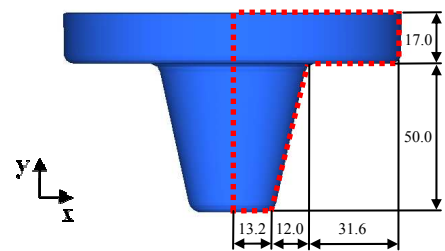


Fig. 15 T-shape forging

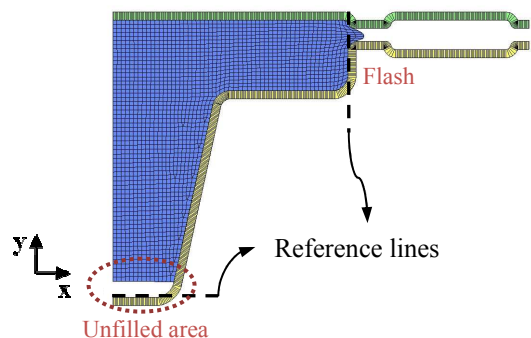


Fig. 16 Forging defects and constraints

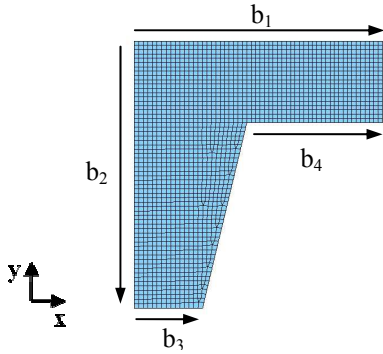


Fig. 17 Initial preform model and perturbation vectors

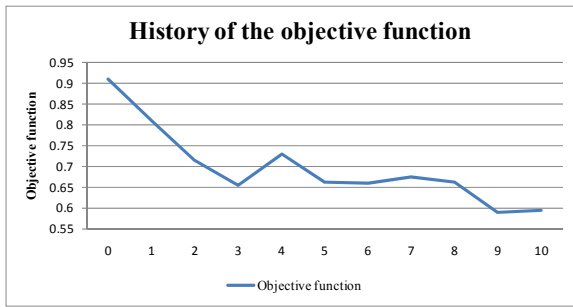


Fig. 18 History of the objective function

후 최종 단조품에 발생한 유효변형률을 베타보다 작도록 제한조건으로 정하였다. 이러한 방법을 통하여 유효변형률을 최소화하는 형상최적설계를 수행하였다.

여기서 b_1, b_2, b_3, b_4 는 형상최적화에 사용된 섭동 벡터의 배율이며 설계변수를 의미한다. 본 예제의 설계영역은 예비성형체의 단면 형상으로써 섭동 벡터는 이 형상의 치수를 조정한다. 초기 예비성형체의 형상과 섭동벡터는 Fig. 17과 같다.

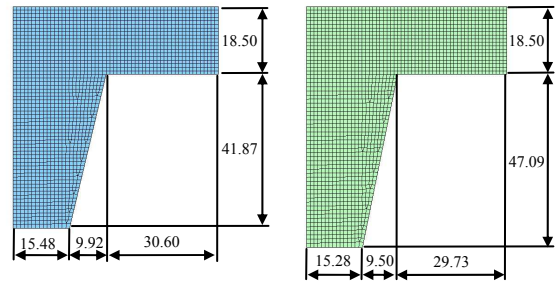
첫 번째 제한조건은 불충진 영역의 발생과 관련하여 설정하였다. m_u 는 D_u 의 평균값을 나타내며 D_u 는 Fig. 16에 나타난 것과 같이 불충진 영역이 발생하는 부분의 기준선과 7개 표본 절점들 사이의 거리를 나타낸다.

$$m_u = \frac{1}{7} \sum_{u=1}^7 D_u \quad (17)$$

S_u 는 D_u 의 표준편차이다.

$$S_u = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{u=1}^7 (D_u - m_u)^2} \quad (18)$$

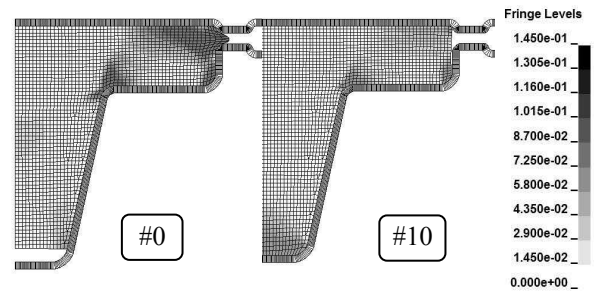
두 번째 제한조건은 플래시의 발생과 관련하여 설정하였다. m_f 와 S_f 는 각각 평균과 표준편차를 의미하며 계산 방법은 앞에서 설명한 방법과 동일하다. 플래시 방지를 위한 표본절점은 12개를 사용하였다.



(a) Initial model

(b) Optimum model

Fig. 19 Preform shape of the T-shape forging



(a) Initial model

(b) Optimum model

Fig. 20 Distribution of the effective strain

$$m_f = \frac{1}{12} \sum_{f=1}^{12} D_f \quad (19)$$

$$S_f = \sqrt{\frac{1}{11} \sum_{f=1}^{12} (D_f - m_f)^2} \quad (20)$$

본 예제의 수렴기준 값 ε 은 0.005로 정의하였으며 10번째 사이클에서 수렴하였다. 제한조건 위배율은 322.89%에서 0.0%로 감소하였고, 목적함수는 Fig. 18에 보이는 것과 같이 0.909에서 0.593으로 감소하였다. 설계영역으로 정의한 예비성형체의 단면 형상은 최적화 과정을 통하여 Fig. 19 (a)와 같은 초기 형상에서 Fig. 19 (b)와 같은 최적화 된 형상으로 변화 하였다. Fig. 20의 (a)와 (b)는 각각 초기 예비성형체와 최적화 된 예비성형체의 최종 성형 결과를 나타낸다. 최적화 된 예비성형체 모델은 최종 성형 후 유효변형률의 분포가 감소하고 불충진 영역과 플래시가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

단조공정에서 원하는 형상의 최종제품을 성형하는 것은 어렵다. 최종제품의 성형에 적합한 예비성형체의 형상을 구하기 위해 여러 가지 방법의

연구가 진행되었다. 그러나 단조문제가 높은 비선형성을 갖는 특징 때문에 대부분의 연구는 실험계획법과 같은 확률론적 방법과 반응표면법과 같은 근사화법, 그리고 후방추적기법 등을 이용하여 설계를 수행하였다. 이러한 방법은 매우 많은 시간과 비용을 소비하고 정확하지 못한 결과를 갖는다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위하여 단조공정에 등가정하중법을 이용한 형상최적설계를 수행하였다. 또한 단조공정에 적합한 최적설계 정식화를 제안하고 그 결과를 확인하였다.

본 연구에서의 최적설계는 2단계 단조공정의 예비성형공정과 최종성형공정을 모두 포함하였다. 형상최적설계를 통하여 단조공정의 예비성형체 및 빌렛의 최적형상을 도출하였다. 도출된 형상을 이용한 최종 성형품은 성형 결함이 없으며 높은 품질을 갖는 것을 확인 하였다. 또한 예제를 통하여 제안한 정식화와 등가정하중법이 단조공정의 예비성형체 및 빌렛의 최적화에 유용한 방법임을 검증하였다.

그러나 현재 등가정하중법은 선형 정적 반응 최적설계에 적용이 가능한 변수만을 단조공정의 설계변수로 선택할 수 있다는 한계를 가지고 있다. 따라서 단조공정에 영향을 미치는 다양한 요인들을 설계변수로 사용하기 어려우며 고려할 수 있는 성형 결함에도 한계가 있다. 향후 관련연구를 통하여 이러한 부분을 보완할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2008-000-10012-0).

참고문헌

(1) Zhao, G., Wright, E. and Grandhi, R. V., 1996, "Computer Aided Preform Design In Forging Using The Inverse Die Contact Tracking Method," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 7, pp. 755~769.

(2) Gao, Z.Y. and Grandhi, R.V., 1999, "Sensitivity Analysis and Shape Optimization for Preform Design in Thermo-Mechanical Coupled Analysis," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 45, No. 10, pp. 1349~1373.

(3) Guan, J., Wang, G.C., Guo, T., Song, L.B. and Zhao, G.Q., 2009, "The Microstructure Optimization of H-Shape Forgings Based on Preforming Die Design,"

Materials Science and Engineering A, Vol. 499, No. 1-2, pp. 304~308.

(4) Jolgaif, M., Sulaiman, S.B., Ariffin, M.K.A. and Faieza, A.A., 2008, "Closed Die Forging Geometrical Parameters Optimization for AI-MMC," *American Journal of Engineering and Applied Science*, 1 (1), pp. 1~6.

(5) Park, J. J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1983, "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 71~79.

(6) Kim, N. and Kobayashi, S., 1990, "Preform design in H-shaped Cross Section Axiymmetric Forging by Finite Element Method," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 30, pp. 243~268.

(7) Kim, S. H., Lee, J. H. and Im, H. J., 1996, "Process Development to Form Net-Shape Nosing Shells by the Backward Tracing Scheme of the Rigid-Plastic FEM and Its Experimental Confirmation," *Transactions of the Korean Society of mechanical engineers*, Vol. 20, No. 7, pp. 2118~2133.

(8) Zhao, G., Wang, G. and Grandhi, R. V., 2002, "Die Cavity Design of Near Flashless Forging Process using FEM-based Backward Simulation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, No. 2/3, pp. 173~181.

(9) Vemuri, K. R., Oh, S.I. and Altan, T., 1989, "BID: A Knowledge-Based System to Automate Blocker Design," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 29, No. 4, pp. 505~518.

(10) Roy, S., Ghosh, S. and Shivpuri, R., 1997, "A New Approach to Optimal Design of Multi-Stage Metal Forming Processes with Micro Genetic Algorithms," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 1, pp. 29~44.

(11) Conceicao Antonio, C. A. and Magalhaes Dourado, N., 2002, "Metal Forming Process Optimization by Inverse Evolutionary Search," *Material Processing Technology*, Vol. 121, pp. 403~413.

(12) Yeom, S. H., Lee, J. H. and Woo, H. K., 2006, "A Study on the Preform Design of One Direction Flow Forged Part using Genetic Algorithm," *Autumn Conference of Transactions of Machine Tool Engineers*, pp. 386~391.

(13) Ko, D. C., Kim, D. H. and Kim, B. M., 1999, "Application of Artificial Network and Taguchi Method to Preform Design in Metal Forming Considering Workability," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 5, pp. 771~785.

(14) Park, J. H., Kang, J. H., Ha, M. S., Kim, S. G., Choi, S. G., Baek, D. G. and Park, Y. C., 2007, "Preform

- Shape Optimization of a Shipping Connecting-Rod using Taguchi method," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp. 44~49.
- (15) Thiagarajan, N. and Grandhi, R. V., 2005, "Multi-level Design Process for 3-D Preform Shape Optimization in Metal Forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 1/2, pp. 421~429.
- (16) Tang, Y. C., Zhou, X. H. and Chen, J., 2008, "Preform Tool Shape Optimization and Redesign Based on Neural Network Response Surface Methodology," *The International Journal of Applied Finite Elements and Computer Aided Engineering*, Vol. 44, No. 8, pp. 462~471.
- (17) Zhao, G., Wright, E. and Grandhi, R. V., 1997, "Sensitivity Analysis Based Preform Die Shape Design for Net-Shape Forging," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 9, pp. 1251~1271.
- (18) Park, G. J., 2007, *Analytical Methods for Design Practice*, Springer, London, pp. 255~310.
- (19) Shin, M. K., Park, K. J. and Park, G. J., 2007, "Optimization of Structures with Nonlinear Behavior Using Equivalent Loads" *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol.196, No.4, pp. 1154~1167.
- (20) *LS-DYNA User's Manual Version 971*, 2007, Livermore Software Technology Corporation.
- (21) *MD R3 NASTRAN User's Guide*, 2007, MSC Software Corporation.
- (22) Hosford, W. F. and Caddell, R. M., 1993, *Mechanics and Metallurgy*, Prentice Hall, New Jersey.
- (23) Reddy, J. N., 2005, *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*, Oxford University Press, New York.
- (24) Lee, J. J. and Park, G. J., 2010, "Shape Optimization of the Initial Blank in the Sheet Metal Forming Process using Equivalent Static Loads," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, (Published online).
- (25) Taylor, J. E. and Bendsoe, M. P., 1984, "An Interpretation for Min-Max Structural Design Problems Including a Method for Relaxing Constraints," *International Journal of Solids Structures*, Vol. 20, No. 4, pp. 301~314.