〔논문〕 한국소성가공학회지(1998), 제7권 제3호
*J. of the Korean Society for Technology of Plasticity* **Vol. 7, No. 3, (1998)**

# 초소성 성형공정 최적화

이정민* · 홍성석* · 김용환**

(1998년 1월 23일 접수)

# Optimization of Superplastic Forming Process

**J.M. Lee, S.S. Hong and Y.H. Kim**

**Abstract**

Influence of final thickness distribution in superplastic forming processes on mechanical properties of the product becomes very crucial. We should improve the thickness distribution of products by combining process parameters adequately. In this paper, we adopt a non-linear optimization technique for optimal process design of superplastic forming. And, optimum design variable which makes the most adequate thickness distribution in combined stretch/blow forming and blow forming is predicted by this optimization scheme and rigid-viscoplastic finite element method.

**Key Words** : Optimal Design(최적설계), Superplastic Stretch/Blow Forming(초소성 신장/블로우 성형), Blow Forming(블로성형), Steepest Descent Method(최대경사법)

## 1. 서 론

초소성 성형(superplastic forming)은 초소성 재료가 가지고 있는 낮은 유동응력에서의 큰 인장연신율 특성을 이용하여 복잡한 형상의 부품을 일체로 성형하는 기술이다. 이러한 초소성 현상은 재료의 특정한 미세 결정립 구조(보통 10 ㎛이하), 성형온도(재료 용해온도의 중간 이상)와 가공시 느린 변형률속도($10^{-3}$~$10^{-5}$/sec)의 조건 하에서 나타난다.[1] 초소성의 공업적 이용은 제조공정의 복잡성과 열간에서 장시간의 가공공정으로 제작경비가 많이 들게 되므로 주로 부가가치가 높은 분야에 한정되어 사용되고 있다. 그 대표적인 예로는 항공우주 산업에서의 응용인데 이 경우 제품의 경량화 및 기계적 물성치가 매우 중요하다.

초소성 성형은 성형량이 많기 때문에 최종부품의 두께 균일도가 좋지않게 될 수 있으며 이는 기계적 물성치 요구조건에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 가능한한 최종제품의 두께분포가 균일하게 되도록 공정을 설계하는 것은 매우 중요한 일이 되며 형상이 복잡할 수록 이러한 요구는 증대 된다. 현재까지 초소성 성형부품의 두께분포를 개선하는 방법은 주로 실험적인 방법에 의하여 이루어져 왔다. Johnson[2] 등은 여러가지 금형형상 및 성형방법에 따른 두께분포를 실험적으로 고찰하여 마찰이 초소성 성형공정에서 중요한 역할을 하며, 다단계 공정으로 보다 균일한 두께분포를 얻을 수 있음을 보여 주었다. Laycock[3]은 블로성형 및 신장성형에서 두께분포 개선을 위한 여러가지 성형방법을 소개하였으며 Takahashi[4] 등은 반구쉘의 초소성 블로성형시 소재의 초기두께를 보정하여 두께분포를 균일하도록 하는 방법을 제시하였다. 또한 홍성석[5] 등은 신장/블로의 복합공정을 수치 시뮬레이션에 의하여 해석하여 신장/블로의 복합공정에 의하여 최종제품의 두께분

* 국방과학연구소
** 충남대학교 기계설계공학과

포를 개선시킬 수 있음을 보여 주었다. 그러나 공정설계의 궁극적인 목적은 최적화된 제품을 얻기 위하여 필요한 설계변수들을 예측하는 것으로 기존의 실험적인 방법이나 수치해석에 의한 시뮬레이션만 가지고는 시행착오에 의한 공정설계 만이 가능하므로 보다 효율적인 성형공정의 설계기법이 요구된다 하겠다. 본 연구에서는 초소성 성형공정에서 최종제품의 두께분포를 보다 균일하게 얻기 위하여 공정변수를 최적화 기법에 의하여 예측고자 하였으며 해석도구로는 강-점소성 유한요소법을 사용하였다.

## 2. 강-점소성 유한요소법

박판성형을 유한요소법으로 해석하기 위하여는 요소분할과 더불어 시간분할도 고려해야 하는데, 본 연구에서는 이러한 분할은 증분변형이론, 박막가정, 등방성 및 기공성장이나 입자성장등 미세구조 변화에 의한 영향은 고려하지 않는 기본 가정하에 이루어 졌다.

평형 상태 방정식은 가상일의 원리(virtual work principle)로 부터 유도된다. 수식화는 작은 시간 구간내에서 최소 소성일 경로를 가정하는 증분 변형이론(incremental deformation theory) 에 근거를 두었다.[6] 이때 시간 구간 동안의 소성일량 $\Delta W_p$ 는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\Delta W_p = \int_{V_0}\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \bar{\sigma}\dot{\bar{\varepsilon}}\ dt\ dV_0 = \int_{V_0}\int_{\bar{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}_0+\Delta\bar{\varepsilon}} \overline{\sigma(\varepsilon)}\ \overline{d\varepsilon}\ dV_0 \qquad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력(effective stress), $\bar{\varepsilon}(=\int\dot{\bar{\varepsilon}}dt)$ 는 유효변형률 (effective strain), $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 는 유효 변형률 속도(effective strain rate)를 각각 나타내며, $\Delta\bar{\varepsilon}$ 는 분할된 시간 구간 동안의 유효 변형률 증가분을 나타낸다.

초소성 변형시의 외력으로 압력 $\boldsymbol{P}$ 를 고려하고 가상일의 원리를 적용하면 다음과 같은식으로 표현 할 수 있다.

$$F_i - P\boldsymbol{H} = \boldsymbol{F_e} \qquad (2)$$

여기서

$$\boldsymbol{F_i} = \int_{V_0} \bar{\sigma}\frac{\partial\Delta\bar{\varepsilon}}{\partial\Delta\boldsymbol{U}}\ dV_o$$

$$\boldsymbol{H} = \frac{\partial\Delta V}{\partial\Delta\boldsymbol{U}}$$

이며, 여기서 $\boldsymbol{F_i}$ 는 내부 저항력, $\boldsymbol{P}$ 는 압력, $\boldsymbol{F_e}$ 는 절점에서의 외력, $\Delta\boldsymbol{U}$ 는 변위증분, $\Delta\boldsymbol{V}$ 는 체적증분을 나타낸다. 식(2)는 재료가 소성변형을 함에 따라 발생되는 물질적 비선형뿐만 아니라 경계 조건상에서의 비선형이 발생되어 이의 해결을 위하여 반복법을 필요로 하게된다. 식(2)에 Newton Raphson 법을 적용하여 고차항을 무시하고 선형화 하면 다음과 같이된다.

$$(\mathrm{K_1} - P\mathrm{K_2} - \mathrm{K_3})\ \delta\mathrm{U} = \mathrm{F_e} - \mathrm{F_i} + P\mathrm{H} \qquad (3)$$

상세한 강성방정식의 수식화는 참고문헌[7,8]에 잘 나타나 있다.

항온 조건하에서 미세한 결정립을 갖는 초소성 재료에 대하여 그 주 특성은 유동응력이 변형률 속도에 매우 민감하다는 것이며, 이러한 현상이 변형의 안정화에 대한 주요 요인이다. 이 현상은 느린 변형률 속도의 특정한 영역에서 발생하며 따라서 유동응력은 상대적으로 낮고 일반적으로 다음과 같이 유효 변형률 속도의 함수로 표시 할수있다.

$$\bar{\sigma} = K\ \dot{\bar{\varepsilon}}^m \qquad (4)$$

여기서 $\boldsymbol{K}$ 는 재료의 강도계수이고, $m$은 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity)를 나타낸다. 초소성 성형공정에서 공정간 변형률속도를 일정하게 유지시키기 위하여 한 변형단계에서 수렴이되면 그때의 압력 $\boldsymbol{P_1}$ 에 대하여 요소내의 최대 변형률 속도값을 최적 변형률 속도값과 비교하여 그 차가 주어진 오차 범위내에 존재하지 않으면 임의의 새로운 압력값 $\boldsymbol{P_2}$ 를 사용하여 다시 계산한다. 만약 그 차가 오차 범위내에 존재하지 않으면 다음 단계의 새로운 압력값은 다음과 같이 선형 내삽을 이용하여 구한다.

$$P_{new} = P_1\left(1 - \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_{opt} - \dot{\bar{\varepsilon}}_1}{\dot{\bar{\varepsilon}}_2 - \dot{\bar{\varepsilon}}_1}\right) + P_2\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_{opt} - \dot{\bar{\varepsilon}}_1}{\dot{\bar{\varepsilon}}_2 - \dot{\bar{\varepsilon}}_1}\right) \qquad (5)$$

여기에서 $\dot{\bar{\varepsilon}}_1$ 및 $\dot{\bar{\varepsilon}}_2$는 각각 압력이 $\boldsymbol{P_1}$ 및 $\boldsymbol{P_2}$인 경우의 최대 변형률속도 값을 나타내며, $\dot{\bar{\varepsilon}}_{opt}$는 요구하는 최적 변형률 속도값을 나타낸다.

## 3. 최적화 기법

일반적으로 최적설계 문제는 수학적으로 다음과 같이 표시된다.

$$\min \quad \mathbf{F(X)} \tag{6}$$

$$\text{subject} \quad \mathbf{g}_j(\mathbf{X}) \le 0 \qquad j = 1,m \tag{7}$$

$$\mathbf{X}_i^l \le \mathbf{X}_i \le \mathbf{X}_i^u \quad i = 1,n \tag{8}$$

설계변수 X에 의하여 형성되는 n차원 공간을 설계공간이라 하며 이 설계공간내에서 구속조건을 만족하면서 목적함수 F(X)를 최소화시키는 설계변수 $X_i$의 집합 X를 찾는 것이 최적설계이다. 최적화 절차는 설계변수의 초기치 $X^0$로 부터 반복적인 방법에 의하여 설계변수를 갱신하여 수행되며 설계변수의 갱신은 다음 식에 따른다.

$$\mathbf{X}^{q+1} = \mathbf{X}^q + \alpha^* \mathbf{S}^q \tag{9}$$

이때, q : 반복횟수
$S^q$ : 탐색방향 벡터
$\alpha^*$ : S방향으로의 탐색거리

따라서 최적화 절차는 두 단계에 걸쳐 수행되는 데, 첫 단계에서는 탐색방향 벡터를 구하고 다음단계에서는 탐색방향으로 목적함수가 최소가 되도록 $\alpha^*$를 구한다.

본 연구의 목적은 초소성 성형공정에서 두께분포를 보다 균일하게 갖도록 설계변수를 구하는 것이 목적이므로 균일한 두께분포를 평가하는 적절한 방법이 필요하다. 박판성형에 있어서 균일두께로 성형되는 경우의 가상두께를 $T_0$라 하고 성형 완료후 각 요소에서의 두께를 $T_i$라 하면, 다음과 같이 두께편차의 합을 계산할 수 있으며 이 값이 작을수록 보다 더 균일한 두께분포를 갖는 것으로 생각할 수 있으므로 본 연구에서는 이를 목적함수로 하였다.

$$F(X) = \sum_{i=1} (T_0 - T_i)^2 \tag{10}$$

$T_0$ : 성형완료후 평균두께
$T_i$ : 성형완료후 i번째요소의 두께

최적화 절차중 탐색방향 벡터를 구하는 방법으로는 최대경사법[9] (steepest descent method)을 이용하였으며 여기서 $S^q$는 다음식으로 주어진다.

$$S^q = -\nabla F = \left[ \frac{\partial F}{\partial X_1}, \frac{\partial F}{\partial X_1}, \ldots, \frac{\partial F}{\partial X_n} \right]^T \tag{11}$$

또한 S 방향으로의 탐색거리 $\alpha^*$는 1차원 최적화 절차인 Swann's[10]법을 사용하였다.

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + 2^k \Delta \tag{12}$$

여기서 $\Delta$는 step size parameter이다.

본 연구에서 사용한 최적화 절차의 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다. 최적화는 설계변수의 초기값으로부터 시작하여 목적함수가 최소가 되는 설계변수의 조합을 찾아가는 방식으로 수행되며 수렴조건 $(-\nabla F \cong 0)$을 만족하는 경우에 종료된다.

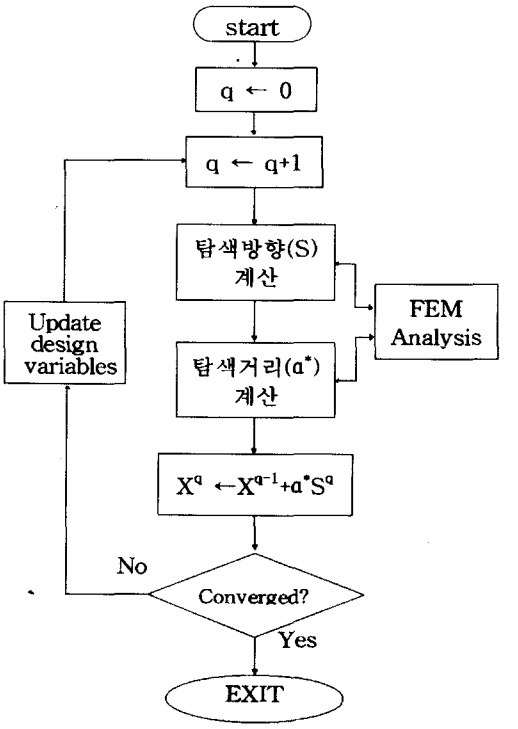


**Fig. 1 Flow chart of optimization process**

## 4. 해석결과 및 고찰

### 4.1 신장/블로(Stretch/Blow) 성형공정의 최적화

초소성 성형의 최종제품의 두께분포를 보다 균일하게 하기 위하여 성형 1단계를 신장성형으로 성형하고 2단계로 블로공정에 의하여 성형하는 신장/블로 성형공정(Fig. 2)의 최적화를 수행하였다. 일반적으로 신장/블로 복합공정이 블로공정만으로 성형하는 경우에 비하여 최종제품의 두께분포를 보다 더 균일하게 할 수 있는 것으로 알려져 있다.[11] 최대경사법 및 Swann's법을 이용하여 최적화 프

로그램을 구성하고 기존에 개발된 강-점소성 유한요소 프로그램을 해석도구로 사용하여 수행하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 금형형상의 반단면으로 측면의 빠짐 기울기는 1°로 하였다. 또한 절점수는 61개, 요소는 60개의 등간격 평면변형률요소를 사용하였으며 초기 소재의 두께는 1mm로 하였다. 계산에 사용된 재료는 Ti-6Al-4V로 응력 및 변형률속도 관계는 다음과 같으며 요구 변형률속도 값은 $3\times10^{-4}s^{-1}$로 하였다.

$$\bar{\sigma} = 460\dot{\bar{\varepsilon}}^{0.5} \quad (MPa) \tag{13}$$

### 4.1.1 펀치형상에 따른 두께분포.

Fig. 4는 사각상자를 블로공정만으로 성형된 경우의 최종형상 두께분포로 구석부분에서 최대로 얇아지고 클램프부분이 최대두께가 됨을 알 수 있다. 따라서 구석부분의 두께를 증가시키고 클램프 부분의 두께를 줄임으로써 두께분포를 향상시킬 수 있을 것이다. 신장/블로 성형은 신장성형시 중심부분의 변형을 억제시키고 클램프부분의 변형을 유도하여 최종적으로 두께분포를 향상시키는 방법인데 이것은 펀치 폭, 펀치 구석반경 및 펀치 압입깊이에 따라 변화할 것이다.

본 연구에서는 먼저 펀치의 형상 즉, 펀치 폭, 펀치 구석반경 및 펀치 압입깊이의 변화에 따른 두께분포의 변화를 고찰하였다. Fig. 5는 펀치 구석반경을 8.0 mm 로 고정한 상태에서 펀치 폭을 변화시켜 가며 펀치 압입깊이를 각각 6.0, 7.0, 8.0 mm로 하였을 때의 목적함수 값의 변화를 관찰한 것이다. 그림에서 처럼 펀치 폭이 최대일 경우에 목적함수의 값이 최소가 되어 두께분포가 가장 좋게 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 펀치 압입깊이가 6.0 mm, 펀치 구석반경이 8.0 mm인 경우의 최종제품에 대한 두께분포를 펀치 폭

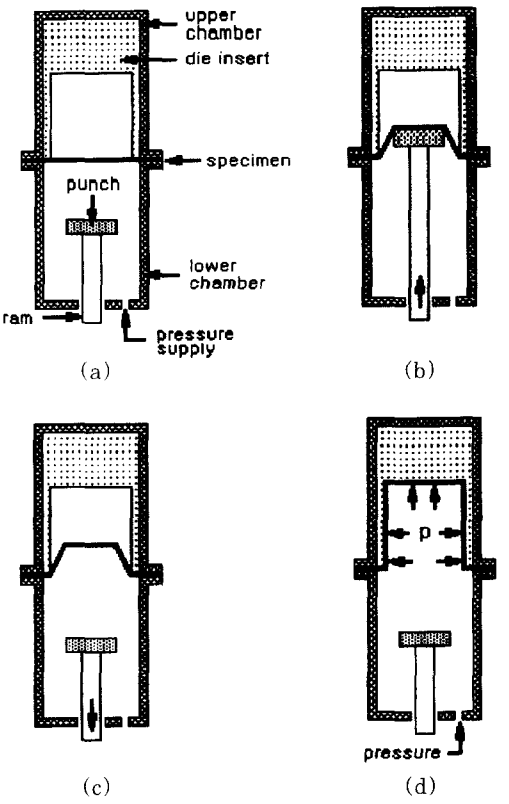


**Fig. 2 Schematics of combined stretch/blow forming**

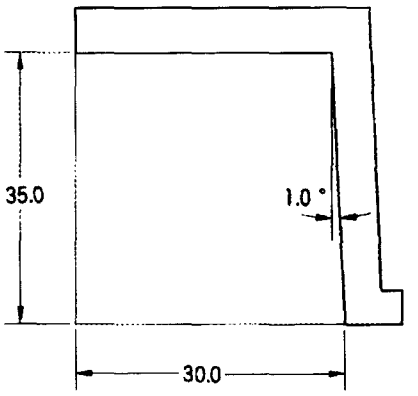


**Fig. 3 Geometry of forming tool for rectangular box.(unit:mm)**

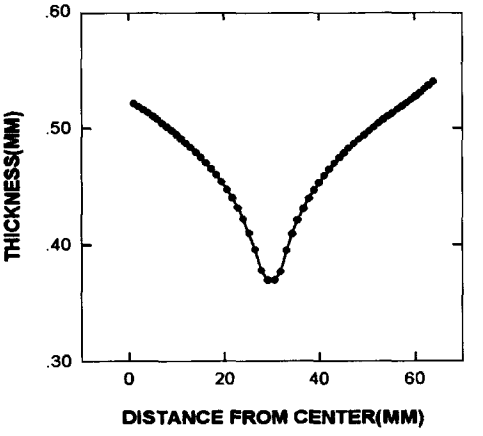


**Fig. 4 Final thickness distribution for rectangular channel forming by blow forming**

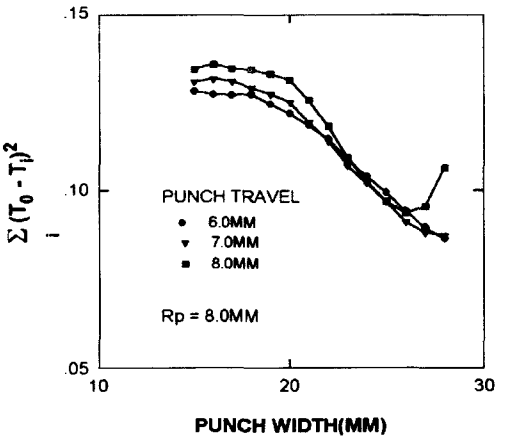


Fig. 5 Variation of object functions with punch width for various punch travel in the stretch/blow forming

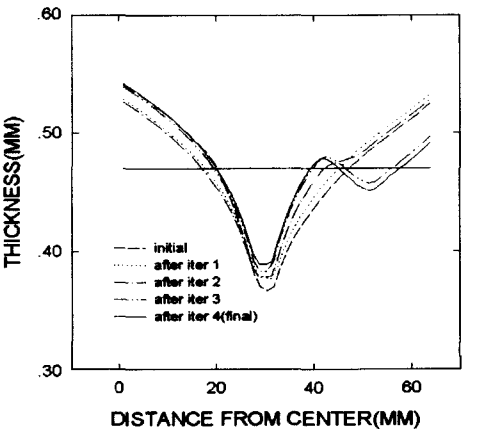


Fig. 7 Thickness distribution for each iteration of stretch/blow forming

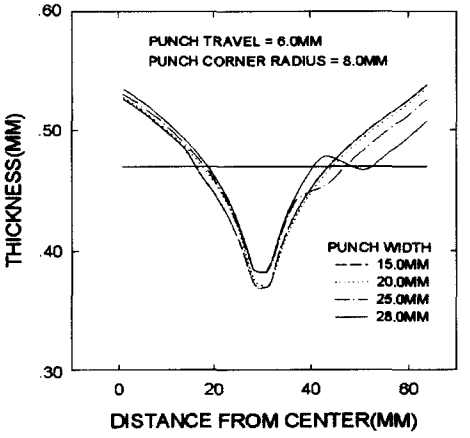


Fig. 6 Thickness distribution for various punch widths in stretch/blow forming

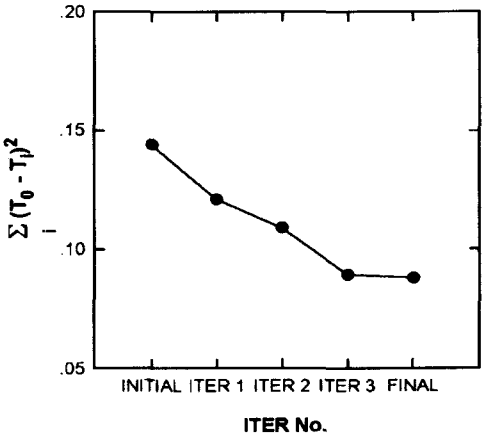


Fig. 8 Variation of object function with iteration of stretch/blow forming

에따라 표현한 것이다. 여기에서 관찰된 바에 따르면 펀치 폭이 최대(28.0 mm)인 경우에 목적함수의 값이 최소가 되는 것은 펀치 폭이 클수록 클램프 부위의 두께를 크게 감소 시킬 수 있기 때문인 것을 알 수 있다.

### 4.1.2 신장/블로 성형공정의 두께분포 최적화

신장/블로 성형공정의 두께분포를 최적화 시키기 위하여 신장성형시의 펀치 폭, 펀치 구석반경 및 펀치의 압입량을 설계변수로 선택하였다. 그러나 앞에서 펀치 폭을 크게하여 클램프 부분의 두께를 감소시키면 두께분포가 크게 개선됨을 알수 있었으므로, 펀치 폭을 소재의 두께 및 성형여유를 제외한 최대크기 28.0 mm로 고정시키고 펀치의 코너반경 및 압입량만을 설계변수로 하였다. 이렇게 하면 설계공간을 3변수문제에서 2변수문제로 단순화 시킬 수 있다.

최적화는 최초설계변수로 부터 출발하여 앞에서 논의된 최적화절차에 따라 목적함수가 최소가 되는 설계변수의 조합을 찾아가는 방법으로 수행하였다. Fig. 7은 최적화 절차가 진행됨에 따라 갱신된 설계변수에 있어서의 두께 분포를 나타낸 것이고 Fig. 8은 최적화절차 진행에 따른 목적함수의 변화를 나타내었다. 또한 설계변수(펀치 구석반경 : $R_p$ , 펀치 압입깊이 : TRPU) 및 목적함수의 값은 Table 1에 나타내었다. 따라서 신장/블로 복합성형시 펀치 구석반경 및 펀치 압입깊이를 적절히 조합함으로서 최

**Table 1 Design variables and object function with iteration of stretch/blow forming**

| iteration | $R_p$ | TRPU | F(X) |
|---|---|---|---|
| initial | 15.0 | 18.00 | 0.14406 |
| 1st | 6.0 | 15.36 | 0.12098 |
| 2nd | 4.4 | 8.52 | 0.10893 |
| 3rd | 6.6 | 7.64 | 0.08932 |
| final | 7.0 | 8.15 | 0.08734 |

종제품의 두께분포를 보다더 균일하게 유도할 수 있음을 알 수 있으며, 본 연구에서 사용한 최적화절차에 의하여 보다 개선된 두께분포를 갖는 펀치의 형상 및 펀치 압입깊이에 대한 설계치를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에 의하면 펀치폭이 28.0 mm, 펀치 구석반경이 7.0 mm, 펀치의 압입깊이가 8.15 mm 였을 때 가장 균일한 두께분포를 갖는 것으로 계산되었다.

### 4.2 블로 성형공정의 최적화

블로성형공정은 초소성성형의 기본공정 중의 하나로 판재를 경계주위에서 클램프하고 유동응력이 낮은 특성을 이용하여 가스압력을 변형매체로 성형시키는 것이다. 블로성형은 일반적으로 균일한 두께의 판재를 가공하여 소요형상의 부품을 만드는 것이나 소재의 두께분포를 적절히 변화시키면 블로성형에 의하여 보다 개선된 두께분포를 갖는 최종성형품을 얻을 수 있을 것이다. 이러한 방법으로 소재를 준비하는 경우에는 기계적 또는 화학적가공이 필요하기 때문에 균일한 두께의 소재를 사용하였을 경우보다 가공 및 재료소모에 있어서 경제적으로 불리하나 최종제품의 두께분포에 따라 얻어지는 기계적 물성치 및 중량효과를 감안할 때 우주선의 액체연료탱크 용기와 같은 고가의 소량생산 제품에는 경제성이 있게된다.[12,13] 본 연구에서는 원형판재를 가스압력에 의하여 반구형으로 성형시키는 초소성 블로 성형공정에서 소요의 최종제품 두께분포를 얻기 위한 초기소재 두께분포를 구하고자 하였다.

소재의 초기두께 분포는 다음과 같이 3차다항식으로 가정하여 수행하였다.

$$f(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 \tag{14}$$

따라서 설계변수는 $a_0$, $a_1$, $a_2$, $a_3$ 가 된다. 축대칭 형상이므로 $r=0$ 에서의 연속성을 고려하면

$$a_1 = 0 \tag{15}$$

반경이 $R$인 초기소재로부터 최종형상으로의 성형완료시까지 체적의 변화가 없다고 가정하고 성형완료된 반구의 요구두께를 $t$라고 하면

$$\pi \int_0^R f(r) r \, dr = \pi R^2 t \tag{16}$$

로부터

$$a_0 = 2t - \frac{R^2}{2} a_2 - \frac{2R^3}{5} a_3 \tag{17}$$

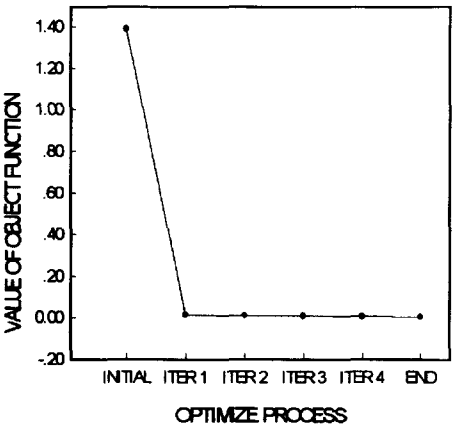


**Fig. 9 Variation of object function with iteration of blow forming**

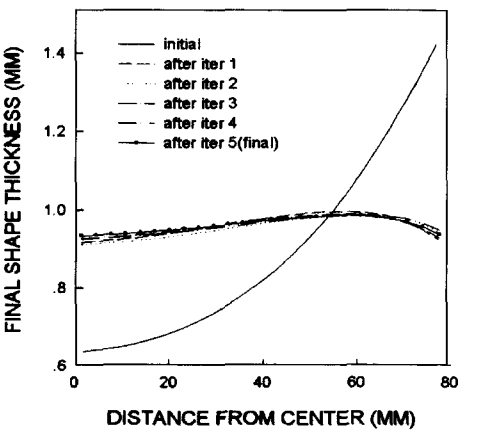


**Fig. 10 Thickness distribution for each iteration of blow forming**

$$\therefore\ f(r)=\left(2t-\frac{R^2}{2}a_2-\frac{2R^3}{5}\ a_3\right)+a_2r^2+a_3r^3 \tag{18}$$

여기서 $t$ 및 $R$ 은 상수이므로 설계변수는 $a_2$, $a_3$가 되어 2변수 최적화문제가 된다.

최적화는 최대경사법 및 다항식근사법을 이용하여 프로그램을 구성하고 기존에 개발된 강점소성 유한요소프로그램을 해석도구로 사용하여 수행하였다. 유한요소모델은 반경 50 mm의 원형소재를 50개의 등간격 축대칭요소를 사용하여 구성하였으며 최종제품의 두께가 1 mm로 균일하게 분포하는 것으로 하였다. 계산에 사용된 재료는 신장/블로 성형공정의 최적화의 경우와 동일한 것으로 하였으며 응력 및 변형률속도 관계는 식(13)에 따르는 것으로 하였다.

최적화는 최초설계변수로 부터 출발하여 앞에서 논의된 최적화절차에 따라 목적함수가 최소가 되는 설계변수의 조합을 찾아가는 방법으로 수행하였다. Table 2는 최적화를 수행하는 과정에서의 설계변수, 목적함수등을 나타낸 것이며 Fig. 9는 최적화 진행에 따른 목적함수의 값, Fig. 10은 최적화 절차가 진행됨에 따라 갱신된 설계변수에 있어서의 최종성형품의 두께분포를 나타낸 것이다. 따라서 초소성블로성형시 소재의 초기두께분포를 적절히 변화시킴으로써 최종성형품의 두께분포를 보다 더 균일하게 유도할 수 있음을 알 수 있으며, 본 연구에서 사용한 최적화 절차에 의하여 보다 개선된 두께분포를 갖는 최종성형품을 얻을 수 있도록 소재의 초기두께분포에 대한 설계치를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 계산된 최적의 초기소재 두께분포는 다음의 식으로 주어진다.

**Table 2 Design variables and object function with iteration of blow forming**

| iteration | $a_2$ | $a_3$ | F(X) |
|---|---|---|---|
| initial | 0 | 0 | 1.39127 |
| 1st | $-5.532\times10^{-3}$ | $-5.532\times10^{-3}$ | 0.01452037 |
| 2nd | $-6.806\times10^{-3}$ | $-5.532\times10^{-3}$ | 0.01087044 |
| 3rd | $-7.006\times10^{-3}$ | $-5.532\times10^{-3}$ | 0.00967825 |
| 4th | $-7.995\times10^{-3}$ | $-5.532\times10^{-3}$ | 0.00715326 |
| final | $-8.188\times10^{-3}$ | $-5.532\times10^{-3}$ | 0.00622486 |

$$f(r')=0.045367-0.008188r'^2-0.003183r'^3 \qquad (r'=r/R) \tag{19}$$

## 5. 결 론

초소성 성형공정에 의하여 성형된 최종제품의 두께분포를 개선하기 위한 공정설계를 유한요소법 및 최적화 절차를 기반으로 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 블로 공정만으로 성형된 최종제품의 두께편차는 신장/블로 복합성형 공정에 의하여 보다 균일하게 개선 시킬 수 있음을 확인 하였다.

(2) 신장/블로 복합성형 공정에 있어서 펀치 압입깊이 및 펀치 구석반경이 동일한 경우에는 펀치 폭이 최대일 경우에 클램프 부위의 두께가 크게 감소하여 두께분포가 가장 좋게 됨을 알 수 있다.

(3) 적절한 목적함수 및 최적화절차에 의하여 신장/블로 복합성형 공정에 있어서 두께분포가 가장 좋은 펀치의 형상 및 펀치 압입깊이에 대한 설계치를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

(4) 블로성형시 초기두께분포를 적절히 하여 최종성형품의 두께분포를 개선할 수 있음을 알 수 있으며 제안된 최적화 절차에 의하여 초기두께분포에 대한 설계치를 얻을 수 있었다.

## 후 기

본 연구의 일부는 교육부 학술연구조성비(기계공학분야)의 지원과제(ME94-E-14)로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) K.A.Padmanabhan & G.J.Davis, 1980, "Superplasticity", Springer-Verlag, Berlin.

(2) Johnson. W, Al-Naib. T. Y. M and Duncan. J. L, 1972, "Superplastic Forming Techniques and Strain Distributions in a Zinc-Aluminium Alloy", J. the Institute of Metals, Vol. 100, pp. 45~50.

(3) Laycock. D. B, 1982, "Superplastic Forming of

Sheet Metal", Superplastic Forming of Structural Alloys, N. E. Paton and C. H. Hamilton, eds., pp. 257~272.

(4) Akio Takahashi, Shouji Shimizu and Takayuki Tsuzuki, 1990, "Tickness Control in Superplastic Bulge Forming of Spherical Tank Shell", J. JSTP, Vol. 331, No. 356, pp. 1128~1134.

(5) 홍성석, 이종수, 김민호, 김용환, 1994, "균일한 두께 분포를 위한 신장/블로 공정을 이용한 초소성 성형 공정설계 해석", 한국정밀공학회, 제11권 제1호, pp. 129~137.

(6) Y.Germain, K.Chung and R.H.Wagoner, 1989, "A Rigid-Viscoplastic Finite Element Program for Sheet Metal Forming Analysis", Int. J. Mech. Sci., Vol. 31, No. 1, pp. 1~24.

(7) 홍성석, 김용환, 이종수, Wagoner. R.H., 1993, "강-점소성 유한 요소법을 이용한 초소성 성형 공정 해석 (I) -초소성 벌지성형", 대한기계학회 논문집, 제7권 제4호, pp. 796~805

(8) 홍성석, 김민호, 김용환, 1995, "유한 요소법을 이용한 초소성 성형공정 해석", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제6호, pp. 1411~1421

(9) G. N. Vanderplaats, 1984, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill.

(10) W. H. Swann, 1964, "Report on the Development of a Direct Search Method of Optimization", ICI Ltd., Central Instr. Res. Lab, res. Note, 64/3, London.

(11) A. K. Green, 1982, "Guidelines for the Use of Superplastic Forming of Metals in Spacecraft Cnstruction", N82-31409, Fulmer Research Laboratories Limited, Slough, England.

(12) J. Pilling and N. Ridley, 1989, "Superplasticity", The Institute of Metals, London.

(13) A. Takahashi, S. Shimizu, T. Tsuzuku, 1990, "Thickness Control in Superplastic Bulge Forming of Spherical Tank Shell", 일본소성가공학회지, 제31권, 제356호, pp. 1128~1134.