

축대칭 초소성 블로성형의 두께분포 최적화를 위한 블랭크 설계

이정민* · 홍성석* · 김용환**

(1998년 9월 15일 접수)

Blank Design for Optimized Thickness Distribution for Axi-symmetric Superplastic Blow Forming

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

Abstract

A procedure is proposed for determining the initial thickness distribution in order to produce a specified final thickness distribution for the axisymmetrical superplastic blow forming processes. Weighted parameter is introduced to improve the simple add/subtraction method and the initial blank thickness distribution is obtained by optimizing the weighted parameter. This method is applied to superplastic free bulging process with the uniform thickness distribution of final shape to confirm its validity. The optimum initial blank thickness distributions is obtained from arbitrary axisymmetrical superplastic blow forming processes such as dome, cone and cylindrical cup forming with die contact. It is concluded that the add/subtraction method with weighted parameter is an effective method for an optimum blank thickness distribution design.

Key Words : Superplastic Blow Forming, Sensitivity Analysis, Add/Subtraction Method, Rollback Method, Thickness Distribution, Weighted Parameter

1. 서 론

블로성형은 초소성 성형의 기본공정 중의 하나로 Fig. 1과 같이 판재를 경계주위에서 클램프하고 유동응력이 낮은 특성을 이용하여 가스압력을 변형매체로 성형시키는 것이다. 초소성 블로성형은 최근 들어 중요한 생산기술의 하나로 꼽히고 있으며 특히 경량화가 매우 중요한 항공우주 부품 제작분야에서의 활용도가 증대되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 블로성형은 일반적으로 균일한 두께의 판재를 가공하여 소요

형상의 부품을 만드는 것이므로 성형 량이 많아 최종부품의 두께균일도가 좋지 않게 될 수 있으며 이는 기계적 물성값 요구조건에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 가능한 한 최종제품의 두께분포가 균일하게 되도록 공정을 설계하는 것은 매우 중요한 일이다. 여기서 소재의 두께분포를 적절히 변화시키면 블로성형에 의하여 원하는 두께분포를 갖는 최종성형품을 얻을 수 있을 것이다. 소재의 준비는 균일두께의 판재를 가공하여 얻게 되는데, 판재의 가공은 NC밀링과 같은 3차원 수치제어 공작기계를 사용하여 가

* 국방과학연구소

** 충남대학교 기계설계공학과

능하나 축대칭 소재의 경우에는 NC선반에 의하여 간단하게 가공할 수 있다. 이러한 방법으로 소재를 준비하는 경우에는 기계적 가공이 필요하기 때문에 균일한 두께의 소재를 사용하였을 경우보다 가공 및 재료소모에 있어서 경제적으로 불리하나 최종제품의 두께분포에 따라 얻어지는 기계적 물성값 및 중량효과를 감안할 때 우주선의 액체연료탱크 용기와 같은 고가의 소량생산 제품에는 경제성이 있게된다.⁽⁴⁾

초소성 블로성형시 소재의 초기두께를 보정하여 최종제품의 두께분포를 균일하도록 하는 방법이 Takahashi⁽⁴⁾ 등에 의해 처음으로 소개된 후 Cheng⁽⁵⁾이 유한요소해석과 해석적 방법을 연계하여 접촉이 없는 반구형 자유팽창 블로성형 공정에 있어서 균일한 두께의 최종형상에 대한 초기소재 두께분포를 계산하였다. 또한, 이정민⁽⁶⁾등은 초기소재 두께분포를 3차식으로 가정한 뒤 민감도해석을 통한 최적화 기법을 사용하여 이를 계산하였다. 그러나, Cheng⁽⁵⁾의 연구결과는 성형 금형이 없는 자유팽창의 경우에만 유용하므로 접촉이 발생되는 성형에서는 적용할 수 없는 한계를 가지며, 이정민⁽⁶⁾ 등의 연구결과는 초기소재 두께분포를 3차식으로 근사 시킬 수 없는 경우에는 사용할 수 없게 된다.

본 연구에서는 축대칭 초소성 블로성형공정에서 소요의 두께분포를 갖는 최종제품을 얻기 위한 일반적인 초기소재 두께분포 결정방법을 제안하였다. 이 초기소재 두께분포 결정방법은 유한요소해석 결과에 따라 초기소재의 두께를 요소 단위로 보정하는 것으로 두께보정 과정은 최적화 기법과 유한요소 해석을 연계하여 수행하였다.

2. 최적화 기법

일반적으로 비선형 최적설계 문제는 수학적으로 다음과 같이 표시된다.

$$\min F(X) \quad (1)$$

$$\text{subject } g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, m \quad (2)$$

$$X_i^l \leq X_i \leq X_i^u \quad i = 1, n \quad (3)$$

여기서, $F(X)$ 는 목적함수, $g_j(X)$ 는 구속조건 식, X_i 는 설계변수이며 X_i^l 및 X_i^u 는 각각 설계변수의 상한 및 하한을 나타낸다. 대부분의 최적화 전략은 매 단계마다 설계변수들을 조합하여 탐색방향을 결정함으로써 목적함수에 대한 1차원 최적화로 구성하고 1차원 탐색을 수행하

는 과정을 되풀이하는 구조를 갖는다. 1차원 탐색에 있어서 설계변수의 생성은 다음 식에 따른다.

$$X^{q+1} = X^q + a^* S^q \quad (4)$$

이때, q : 반복횟수

S^q : 탐색방향 벡터

a^* : S방향으로의 탐색거리

이러한 과정에서 탐색방향을 결정하기 위해서 설계변수들의 변화에 따른 목적함수의 변화, 즉 민감도해석(sensitivity analysis)을 수행하게 되며, 탐색방향 벡터 S^q 는 설계변수에 대한 목적함수의 도함수를 요소로 가지며 다음 식으로 주어진다.

$$S^q = -\nabla F = \left[\frac{\partial F}{\partial X_1}, \frac{\partial F}{\partial X_2}, \dots, \frac{\partial F}{\partial X_n} \right]^T \quad (5)$$

목적함수의 도함수를 구하는 간단한 방법은 유한차분근사를 이용하는 방법이다. 즉, F 가 목적함수로 설계변수 X_i 의 함수라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dF}{dX_i} \approx \frac{F(X_i + \Delta X_i) - F(X_i)}{\Delta X_i} \quad (6)$$

차분식을 사용하는 방법은 모든 설계변수의 교란에 따른 해석모델에 대한 해가 필요하다. 비선형 문제에 있어서 이것은 개개의 경우에 전체의 강성계수행렬이 모두 달라 새로운 계산이 필요하게 되며 설계변수가 많은 경우에는 계산상 비경제적이 된다. 따라서 이 방법은 적용의 용이함으로 자주 사용되고 있음에도 실제문제에 있어서 매우 비효율적이다.

최적화 문제에 있어서 달성해야 할 가장 중요한 과제는 최적화 결과가 요구되는 범위 내에 존재하는 것과 계산량의 최소화이다. 일반적인 축대칭 초소성 블로성형공정에서 최종제품의 두께분포의 균일화를 위한 초기소재 두께분포의 계산은 두께분포를 곡선으로 가정하고 곡선을 정의하는 각 변수들을 최적화 절차에 따라 결정하는 방법을 사용한다.⁽⁶⁾ 그러나 초기소재 두께분포의 가정은 간단한 다항식만으로는 대부분의 경우에 대해 요구되는 결과를 얻을 수 없고 Bezier곡선, B-spline곡선, NURB곡선 등을 사용해야 한다. 이 경우 조정점의 위치, 가중치 등을

설계변수로 하여 설계민감도를 사용하는 비선형 최적화방법을 고려해 볼 수 있는데 일반적인 형상을 정의하기 위해 서는 많은 설계변수를 필요로 하므로 설계민감도를 사용하는 최적화방법을 적용하기 어렵게 된다.

박판성형공정에서 초기소재 예측을 위하여 여러 가지 방법들이 제안되고 있으나 대부분이 제한적인 문제에만 적용이 가능한 수준이다. 최근에는 일반적인 박판성형공정에 적용하기 위하여 가감법^(7,8), 롤백방법⁽⁹⁾ 등 유한요소해석결과와 성형 목표값과의 차이를 보정하여 초기소재를 설계하는 방법들이 제안되었다. 이러한 방법들은 최초에 가정된 소재형상으로부터 유한요소 해석을 수행하여 계산결과와 성형 목표값과의 차이만큼 재료를 더하거나 제거하여 초기소재의 형상을 수정하여 초기소재를 예측하게 된다.

Fig. 2는 가감법에 의한 초기소재 두께 보정방법에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 최초의 초기소재 두께 분포이며 Fig. 2(b)는 성형해석에 따라 계산된 제품의 두께분포와 두께분포 목표값을 나타낸다. 즉, Fig. 2(b)에서 \overline{OP} 만큼이 목표값 보다 모자라는 부분이고 $\overline{O'Q}$ 만큼이 목표값 보다 남는 부분이다. 이 크기만큼을 최초두께에 더하거나 제거하여 Fig. 2(c)와 같이 보정된 초기소재를 얻게된다. 이때, 가감법으로 초기소재의 형상을 수정하면 요소의 크기변화에 따라 개개 요소들의 변형경로가 변화하기 때문에 한번의 보정으로 원하는 초기소재의 형상을 결정할 수 없으며 반복적인 보정절차가 필요하게 된다. 즉, $q+1$ 번째 반복계산시 요소 i의 두께는 다음과 같다.

$$X_i^{q+1} = X_i^q + (t_m - t_i)^q \quad (7)$$

이때 X_i 는 설계변수이고 t_m , t_i 는 각각 성형목표값 및 성형해석에 따른 요소 i의 두께이다. 이러한 방법은 초기소재를 여러 개의 요소로 분할한 다음 각각의 요소의 두께를 설계변수로 설정하고 개개의 설계변수를 독립적으로 변화시키는 것으로 단순하며, 유한요소해석이 가능한 모든 문제에 일반적으로 적용할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 3은 균일한 두께를 가지는 초기소재를 가지고 초소성 블로성형에 의하여 반구형상으로 성형하였을 경우의 유한요소해석 결과로 성형 진행에 따른 두께분포의 변화를 보여준다. 그림에서 보는바와 같이 성형완료 후 목표값(1 mm)을 기준으로 남는 부분과 모자라는 부분을 쉽게 알 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3에서의 차이를 가감법에 의하여 보정한 초기소재를 가지고 성형하였을 경우에 성형 진

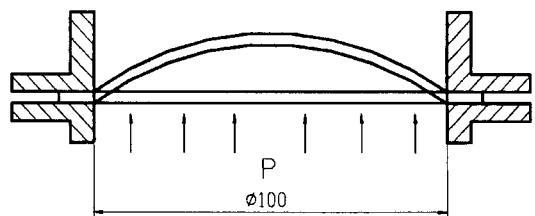


Fig. 1 Schematic of blow forming

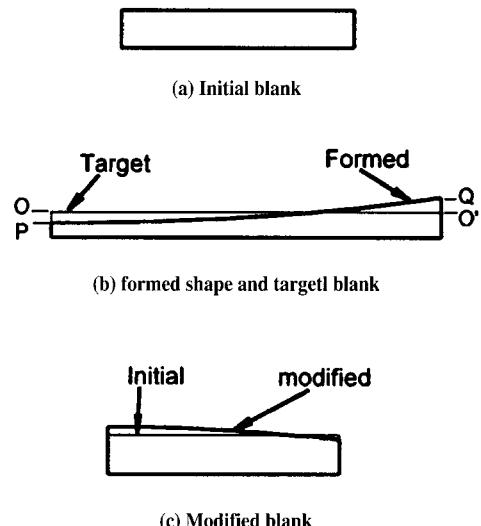


Fig. 2 Illustrating the process of optimum blank thickness

행에 따른 두께분포의 변화를 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4를 비교하여 보면 남거나 모자라는 부분이 반대로 되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 5는 초소성 블로성형공정에 의한 반구형상 성형시 설계 목표값과 해석결과와의 차이를 단순한 가감에 의한 보정방법으로 최적화를 수행했을 경우에 중심 및 고정 단에 위치한 요소의 최종제품 두께변화를 나타낸 것이다. 이와 같이 단순한 가감법을 사용하면 최종제품의 두께가 목표값을 기준으로 진동하는 것을 알 수 있으며, 따라서 유한요소 해석결과와 성형 목표값과의 차이($t_m - t_i$) 만큼을 단순히 더하거나 제거하여 초기소재 형상을 예측하는 방법은 수렴성에 문제가 있을 것으로 예상된다. 이때, 요소별 설계목표값과 해석결과와의 차이에 미지의 변수 β_i 를 곱하고 가감량이 최적이 되도록 β_i 를 계산하면 요구되는 범위 내로 초기소재를 예측할 수 있을 것이다. 즉,

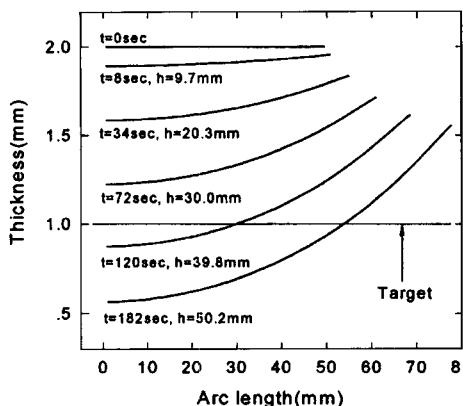


Fig. 3 Evaluation of thickness during blow forming with flat blank

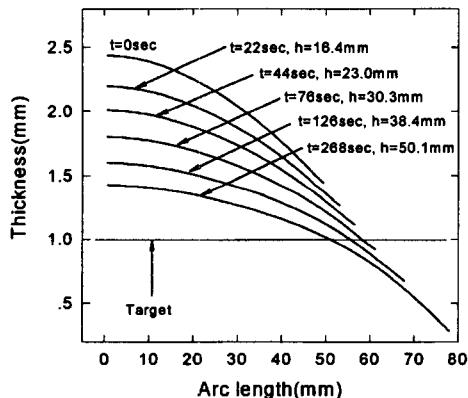


Fig. 4 Evaluation of thickness during blow forming with modified blank by add/subtraction

$$X_i^{q+1} = X_i^q + \beta_i(t_m - t_i)^q \quad (8)$$

이때 β_i 는 요소마다 그 크기가 각기 다를 것이므로 요소수 만큼의 계산이 필요하나 요소별 β_i 값은 다른 요소의 β_i 값에 따라 영향을 받게 되므로 개별적인 계산은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 i 값이 전 요소에 걸쳐서 동일한 값을 갖는다고 가정하였으며 최적의 β^* 를 1차원 최적화를 통하여 계산하는 절차를 도입하였다. 이때 유한요소 해석결과와 성형목표치와의 차이만큼 단순히 재료를 더하거나 제거하는 가감법은 $\beta = 1$ 인 특수한 경우에 해당한다.

초소성 블로성형공정의 최적화에서는 유한요소 해석으로부터 얻어지는 판 두께를 사용하고, 판 두께 균일화의

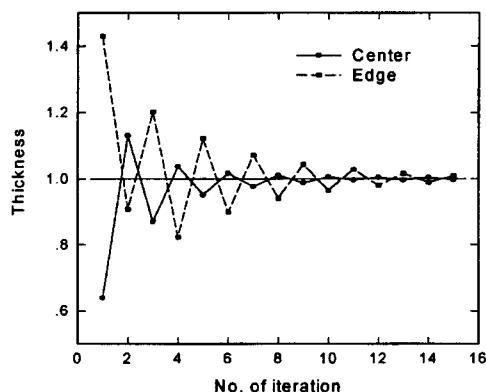


Fig. 5 Thickness variation of pole and equator with simple add/subtraction method for superplastic blow forming

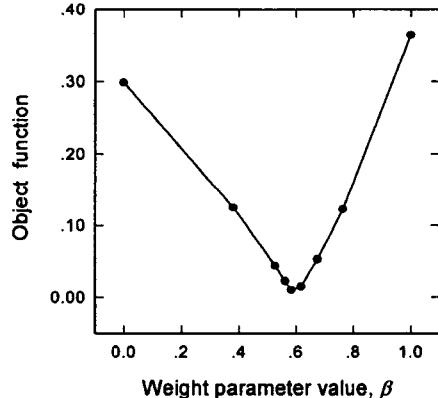


Fig. 6 Variation of object function with weight parameter

정량적 평가식 즉, 목적함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$F(X) = \frac{1}{t_m} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - t_m)^2} \quad (9)$$

여기에서 N은 유한요소수, t_i 는 각 유한요소의 성형후 판 두께, t_m 은 이상적인 성형 품의 판 두께이다. 결국, 목적함수 F(X)는 이상적인 판 두께로부터의 편차를 나타낸다.

식(8)을 가지고 β 의 변화에 따른 목적함수 F(X)의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 β 가 증가함에 따라 목적함수는 감소하다가 다시 증가하는 모습을 볼 수 있는데 이것은 β 의 변화에 따라 목적함수의 최소값이 존재함을 보여준다. 따라서 식(8)을 1차원

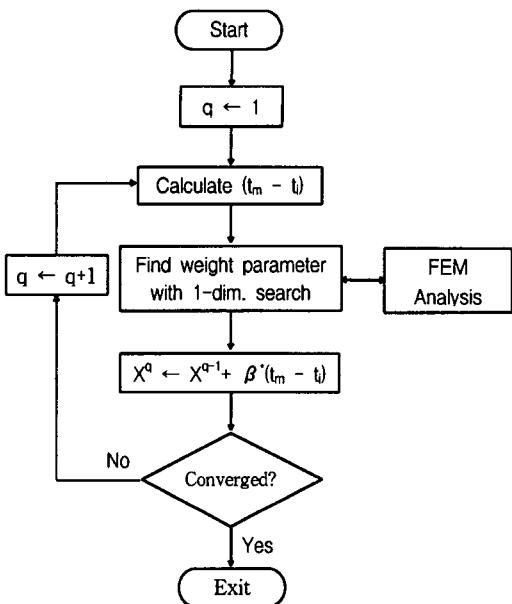


Fig. 7 Flow chart of optimization process

최적화 문제로 정의하여 Fig. 7과 같이 최초의 두께분포로부터 가감 량을 계산하여 목적함수를 최소로 하는 β^* 를 구하고 β 가 최소인 상태에서의 가감 량을 다시 계산하는 절차를 되풀이하면 목적함수가 최소가 되는 초기초재의 두께분포를 계산할 수 있다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 비접촉 반구형 초소성 블로성형공정

최적화는 전술한 바와 같이 가중 매개변수 β 를 갖는 1차원 최적화 문제로 정의하여 이를 황금분할법을 이용하여 프로그램을 구성하고 기존에 개발된 강점소성 유한요소프로그램을 해석도구로 사용하여 수행하였다. 초소성형해석을 위한 강점소성 유한요소 프로그램에 대한 자세한 수식화 및 적용 예는 참고문헌^(10,11)에 잘 나타나 있다.

최종제품의 형상은 금형이 없는 비접촉 블로성형에 의하여 반구형상을 성형하는 것으로 유한요소 모델은 반경 50 mm의 원형초재를 50개의 등간격 축대칭요소를 사용하여 구성하였으며 최종제품의 두께가 1 mm로 균일하게 분포하는 것을 목표로 모든 요소의 성형 후 두께변화가 목표 값의 1/100이내에 있으면 계산을 종료하도록 하였다. 계산에 사용된 재료는 Supral 150으로 구성 식은 다음과 같으며 요구 변형률속도 값은 $6.93 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 로 하였다.

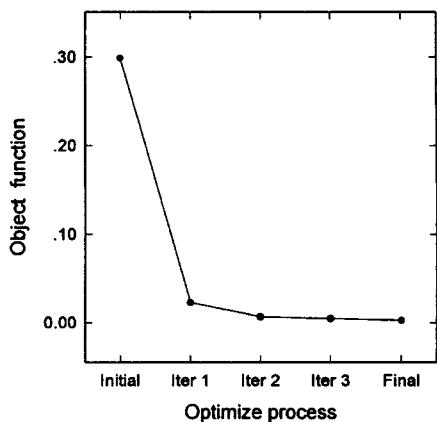
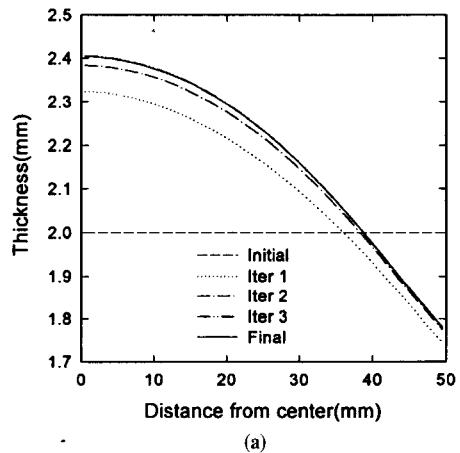
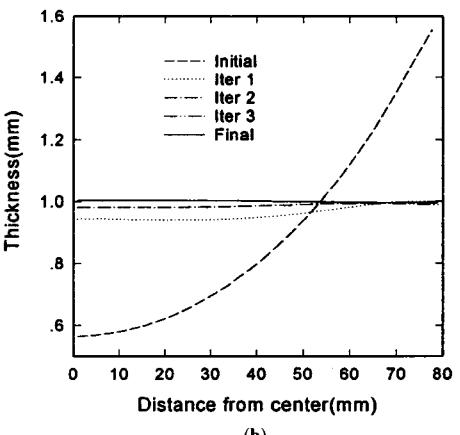


Fig. 8 Variation of object function with optimize process for superplastic bulging



(a)



(b)

Fig. 9 Thickness distributions of (a)blank, (b)deformed shape with optimize process for superplastic bulging

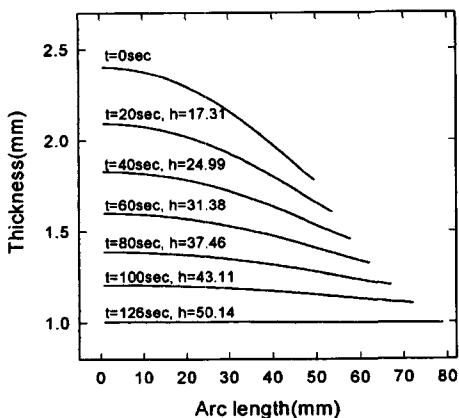


Fig. 10 Evaluation of thickness during superplastic bulging with optimized blank

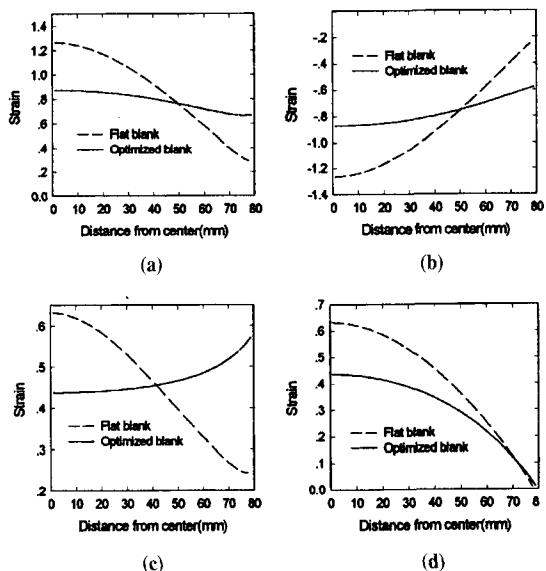


Fig. 11 Comparison of (a) effective strain, (b) thickness strain, (c) radial strain and (d) circumferential strain distribution for superplastic bulging with flat and optimized blank

$$\bar{\sigma} = 105.9\dot{\varepsilon}^{0.4} \quad (\text{MPa}) \quad (10)$$

Fig. 8은 2 mm의 균일 두께를 갖는 초기소재로부터 최적화를 수행하였을 경우에 목적함수의 변화를 나타낸 것으로 4번의 반복적인 1차원 최적화를 통하여 원하는 초기소재의 두께분포를 계산할 수 있었다.

Fig. 9에는 반복계산에 따른 초기소재 두께분포와 최종

성형제품의 두께분포를 나타내었는데 처음단계에서는 커다란 두께변화를 보이다가 최적화 절차의 진행에 따라 두께변화량은 점점 작아지며 최적의 두께분포로 수렴하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10에는 최적화된 초기소재를 가지고 성형하였을 때 성형 진행에 따른 제품의 두께변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 성형시간은 126초가 소요되었으며 성형 후 제품의 두께가 1 mm부근에 분포하고 있음을 볼 수 있으므로 본 논문에서 제시한 최적화 절차에 의하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 균일 두께의 초기소재 및 최적화된 초기소재를 가지고 성형하였을 때 성형완료후 변형률 분포를 나타내었다. Fig. 11(a)는 유효변형률 분포를 비교한 것으로 균일한 두께의 소재로 성형하였을 경우에는 1.26에서 0.28의 분포를 보이나 최적화된 소재를 가지고 성형하였을 경우에는 0.87에서 0.66 정도의 분포를 보여 최적화된 초기소재를 가지고 성형했을 경우에 훨씬 더 균일한 분포를 보이고 있다. Fig. 11(b)~(d)에는 두께변형률, 반경방향변형률 및 원주방향변형률을 각각 비교하여 나타낸 것으로 모든 경우에 최적화된 초기소재를 가지고 성형하면 보다 더 균일한 변형률 분포를 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

3.2 접촉이 있는 축대칭 초소성 블로성형공정

앞에서는 접촉이 없는 자유팽창의 경우에 대하여 고찰하였으며, 여기에서는 이를 확장하여 접촉이 있는 다양한 축대칭 형상에 적용하여 보았다. Fig. 12는 최적화 대상의 금형 형상을 나타낸다. Fig. 12(a)는 반구형 금형으로 유한요소 모델은 반경 50 mm의 원형소재를 50개의 등간격 축대칭요소를 사용하였으며 최종제품의 두께 목표치는 1 mm이다. Fig. 12(b)는 원추형 금형으로 유한요소 모델은 반경 40 mm의 원형소재를 40개의 등간격 축대칭요소를 사용하였으며 최종제품의 두께 목표치는 0.8 mm이다. 또한 Fig. 12(c)는 원통형 금형으로 유한요소 모델은 반경 50 mm의 원형소재를 50개의 등간격 축대칭요소를 사용하였으며 최종제품의 두께 목표치는 1 mm이다. 각각의 경우에 계산은 모든 요소의 두께가 목표값의 ±1/100 mm 일 때 수렴한 것으로 하였다. 계산에 사용된 재료는 Supral 150으로 구성 식은 (10)식과 동일하고 요구 변형률속도 값은 $6.93 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 로 하였으며 마찰계수는 0.4로 하였다. 접촉이 있는 반구형 블로성형시 최적화 진행에 따른 목적함수의 변화를 Fig. 13에 나타내었으며 4

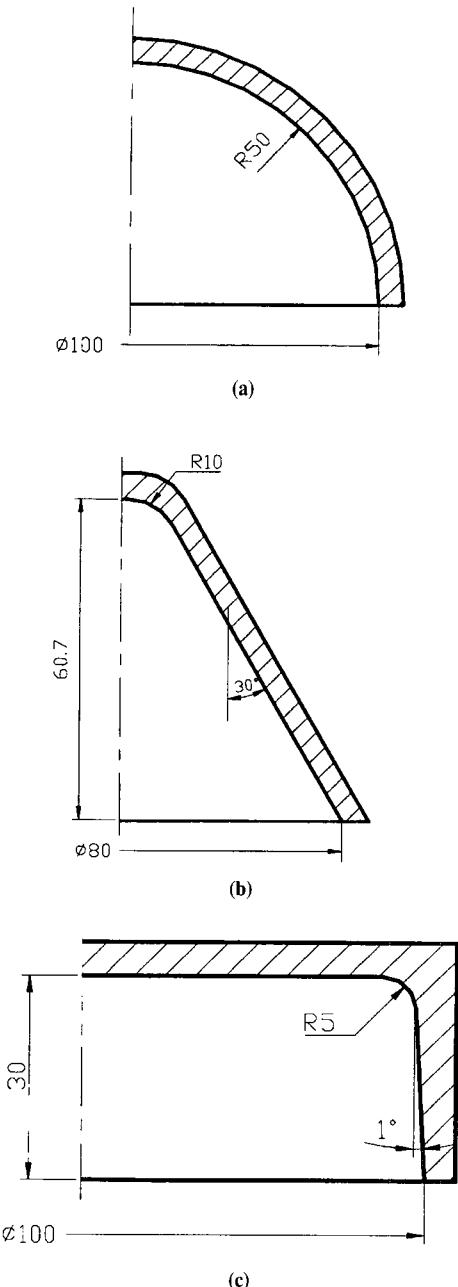


Fig. 12 Die geometry for (a) hemispherical, (b) cone and (c) cylindrical cup forming

회의 1차원 최적화에 의하여 최적의 초기소재 두께분포를 얻을 수 있었다. Fig. 14는 최적화 된 초기소재를 가지고 성형하였을 때 성형 진행에 따른 두께변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 성형시간은 122초로 성형 후 제

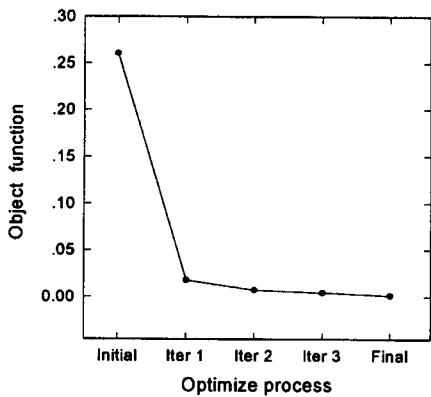


Fig. 13 Variation of object function with optimizing process for superplastic blow forming of hemispherical cup

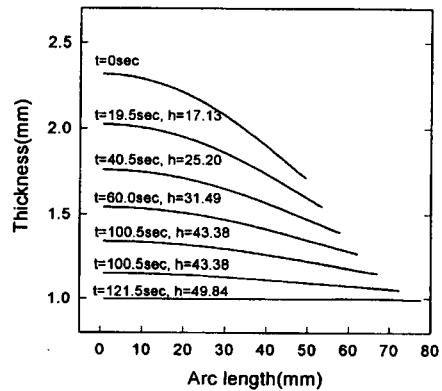


Fig. 14 Evaluation of thickness during hemispherical blow forming with optimized blank yielding a uniform final thickness

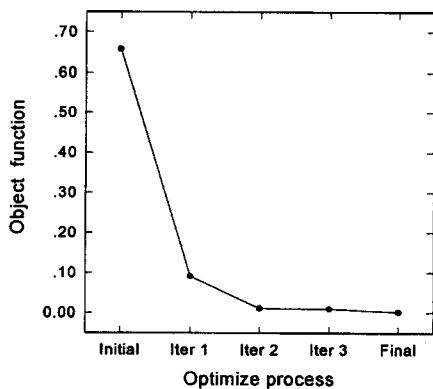


Fig. 15 Variation of object function with optimizing process for superplastic blow forming of cone

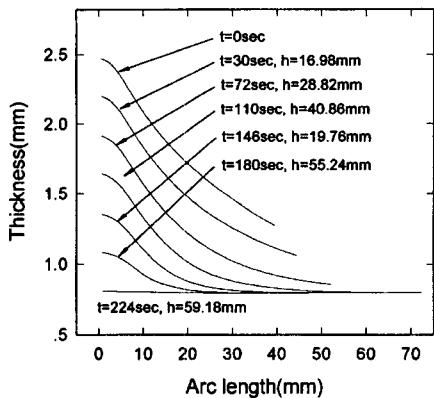


Fig. 16 Evaluation of thickness during blow forming of cone with optimized blank yielding a uniform final thickness

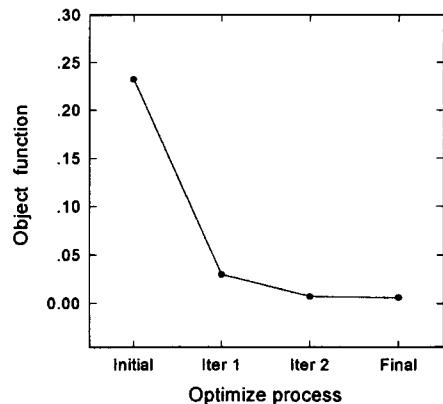


Fig. 18 Variation of object function with optimizing process for superplastic blow forming of cylindrical cup

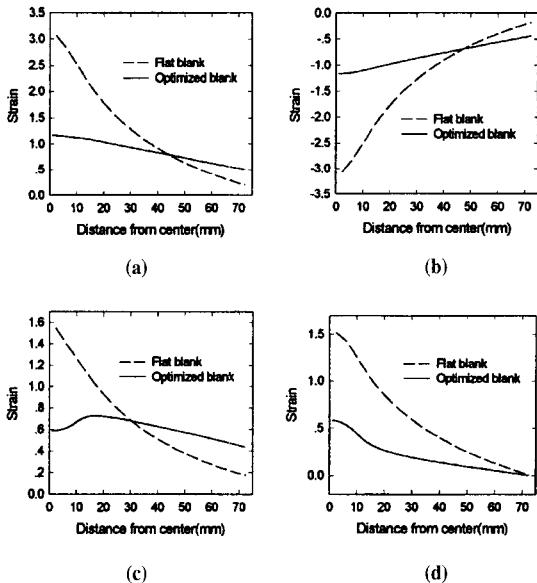


Fig. 17 Comparison of (a) effective strain, (b) thickness strain, (c) radial strain and (d) circumferential strain distribution for blow forming of cone with flat and optimized blank

품의 두께가 목표값인 1 mm부근에 분포하여 최적화된 초기소재를 계산하였음을 알 수 있다. 반구형 블로성형시 접촉이 있는 경우와 접촉이 없는 경우 즉, 반구형 금형의 사용여부에 따른 차이를 비교하여 보면 Fig. 10과 Fig. 14에서처럼 성형시간은 126초와 122초로 비슷하며 성형양상도 비슷하여 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

원추형 블로성형시 최적화 진행에 따른 목적함수의 변

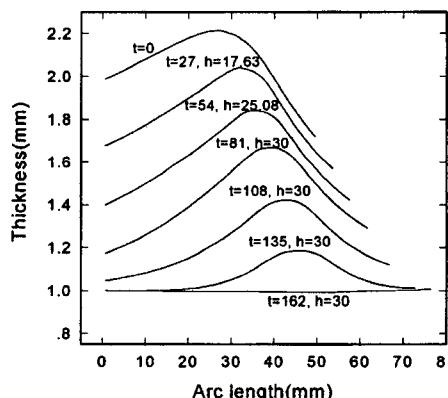


Fig. 19 Evaluation of thickness during blow forming of cylindrical cup with optimized blank yielding a uniform final thickness

화는 Fig. 15에 나타내었으며 4회의 1차원 최적화에 의하여 최적의 초기소재 두께분포를 얻을 수 있었다. Fig. 16에는 최적화 된 초기소재를 가지고 성형하였을 때 성형 진행에 따른 두께변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 성형시간은 214초이며 성형 후 제품의 두께가 목표값인 0.8 mm부근에 분포하여 최적화된 초기소재를 얻었음을 알 수 있다. Fig. 17은 균일 두께의 초기소재 및 최적화 된 초기소재를 가지고 원추형 블로성형 하였을 때 성형 완료후 변형률 분포를 나타내었다. 균일두께의 소재로 원추형 블로성형을 하며 성형과정 동안에 접촉의 영향으로 두께감소가 많은 꼭지점 부근에 변형이 집중되지만 최적화된 초기소재는 가운데 부분이 두꺼워 성형초기의 변형

이 억제되어 변형률 분포가 크게 개선됨을 알 수 있다. 원통형 블로성형시 최종제품의 두께분포 개선을 위한 초기소재 두께분포의 최적화를 수행하였다. 최적화 진행에 따른 목적함수의 변화는 Fig.18에 나타내었으며 4회의 1차원 최적화에 의하여 최적의 초기소재 두께분포를 얻을 수 있었다. Fig. 19에는 최적화 된 초기소재를 가지고 성형하였을 때 성형 진행에 따른 두께변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 성형시간은 162초이며 성형 후 제품의 두께가 목표값인 1 mm부근에 분포하여 최적화된 초기소재를 얻었음을 알 수 있다.

접촉이 있는 다양한 축대칭 형상에 대하여 최적화를 수행하여 각각의 경우에 모두 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제시한 방법은 접촉이 수반되는 문제에도 적용될 수 있음을 알 수 있으며, 일반적인 축대칭 형상에 대한 최적화 된 초기소재의 두께분포를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 축대칭 초소성 블로성형공정에서 균일한 두께분포를 갖는 최종제품을 얻기 위한 초기소재 두께분포 최적화 절차를 제안하여 실제 성형공정에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 가감법에 가중매개변수를 도입하고 1차원 최적화 절차를 통하여 가중매개변수를 계산하는 초기소재 두께분포 최적화 절차를 제안하였으며 이 절차에 따라 일반적인 축대칭 초소성 블로성형공정에 있어서 초기소재의 두께분포를 예측할 수 있었다.

(2) 접촉이 없는 반구형 초소성 블로성형공정에 적용하여 최종제품의 두께분포가 요구되는 범위 내에 존재하도록 초기소재 두께분포를 계산하였으며 이를 통하여 본 연구에서 제안한 초기소재 두께분포 결정방법의 타당성을 입증하였다.

(3) 접촉이 있는 반구형, 원추형, 원통형 초소성 블로성형공정에 적용하여 최적화 된 초기소재 두께분포를 계산하여 일반적인 축대칭 형상에 대한 최적화 된 초기소재의 두께분포를 예측할 수 있음을 보여주었다.

(4) 최종제품의 두께분포가 균일하게 되도록 초기소재 두께분포를 설계하면 두께균일도 향상뿐만 아니라 성형에 따른 변형률 분포도 보다 균일하게 개선됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) K. A. Padmanabhan and G. J. Davis, 1980, "Superplasticity", Springer-Verlag, Berlin.
- (2) C. H. Hamilton and A. K. Ghosh, 1988, "Superplastic Sheet Forming", Metals Handbook, 9th Edition, Vol. 14, pp. 852~873, ASM International.
- (3) J. Pilling and N. Ridley, 1989, "Superplasticity", The Institute of Metals, London.
- (4) Akio Takahashi, Shouji Shimizu and Takayuki Tsuzuki, 1990, "Thickness Control in Superplastic Bulge Forming of Spherical Tank Shell", J. JSTP, Vol. 31, No. 356, pp. 1128~1134.
- (5) J. H. Cheng, 1994, "A Procedure for Designing Initial Thickness Variation for Superplastic Free Inflation", Int. J. Mech. Sci. Vol. 36, No. 11, pp. 981~1000.
- (6) 이정민, 홍성석, 김용환, 1998, "초소성 성형공정 최적화", 한국소성가공학회지, 제7권, 제3호, pp. 207~214.
- (7) 박상후, 윤정환, 양동열, 김용환, 이장희, 1997, "이상적 변형이론을 이용한 박판, 초기형상 설계에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제5권, 제4호, pp.207~218.
- (8) 김두현, 이정민, 박상후, 양동열, 김용환, 1997, "박판성형의 초기소재 설계시스템", 한국소성가공학회지, 제6권, 제5호, pp. 400~407.
- (9) 김종엽, 김낙수, 허만성, 1998, "우물정자형 Sub-frame의 블랭크설계", 한국소성가공학회지, 제7권, 제3호, pp. 260~273.
- (10) 홍성석, 김용환, 이종수, Wagoner,R.H., 1993, "강점소성 유한 요소법을 이용한 초소성 성형 공정 해석 (I) -초소성 별지성형-", 대한기계학회 논문집, 제7권 제4호, pp. 796~805.
- (11) 홍성석, 김민호, 김용환, 1995, "유한 요소법을 이용한 초소성 성형공정 해석", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제6호, pp. 1411~1421.