

균일한 두께분포를 위한 신장/블로 공정을 이용한 초소성 성형 공정설계 해석

홍성석*, 이종수*, 김민호*, 김용환**

Analysis of Superplastic Forming Process Design Using a Combined Stretch/Blow Process for Uniform Thickness Distribution

Sung-Suk Hong*, Jong-Soo Lee*, Min-Ho Kim*, Yong H. Kim**

ABSTRACT

A rigid-viscoplastic finite element method has been used for modeling superplastic stretch/blow process design to improve thickness distribution. Punch velocity-time relationship of the stretch forming and pressure-time cycle of the blow forming for a given strain rate are calculated. A superplastic material is assumed to be isotropic and a plane-strain line element based on membrane approximation is employed for the formulation. The effects of the width, corner radius and height of the punch during stretch forming are examined for the final thickness distribution, and the process design to improve thickness distribution can be established.

Key Words : Superplastic Forming(초소형 성형), Rigid-Viscoplastic FEM(강-점소성 유한요소법), Line Element(선요소), Stretch/Blow Forming(신장/블로 성형)

기호설명

F_i	: 절점에서의 내력	$\bar{\sigma}$: 유효 응력
F_e	: 절점에서의 외력	$\bar{\epsilon}$: 유효 변형률
F_n	: F_e 의 수직력	$\Delta \bar{\epsilon}$: 유효 변형률 증분
K	: 재료강도 계수	$\Delta \dot{\bar{\epsilon}}$: 유효 변형률 속도
m	: 변형률 속도 민감도	$\Delta \dot{\bar{\epsilon}}_{opt}$: 요구 최적 변형률 속도
P	: 압력	$\Delta \mu$: 콜롱 마찰계수
Δt	: 시간 증분		
ΔIU	: 변위 증분		
ΔIU	: 상대 접선 변위		
ΔV	: 체적 증분		

1. 서 론

초소형 성형(Superplastic forming : SPF)은 자동차 산업이나 항공우주 산업에서 기존의 성형 방법으로는 불가능하던 복잡한 형상의 부품을 제작가능하게 하는

* 국방과학연구소

** 충남대학교 기계설계 공학과

새로운 성형기술로 많은 관심을 모으고 있다. 초소성 재료는 보통 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세입자 구조를 가지며, 특정한 온도(보통 재료의 용해온도의 중간 이상)와 매우 느린 변형률속도(보통 $10^{-1}\sim 10^{-5}/\text{sec}$)에서 500% 이상의 인장 연신율을 나타내며 이 영역에서 유동응력이 매우 낮아진다⁽¹⁾.

이러한 초소성 성형은 잠재력이 매우 다양하며 중요한 형상이나 정밀한 치수를 요하는 부품을 하나의 공정으로 성형할 수 있으며, 또한 성형과 접합이 동시에 수행되는 초소성 성형/확산 접합으로 복잡한 형상의 구조물을 쉽게 성형할 수 있는 특징이 있다. 일반적으로 초소성 재료의 특성은 보통 낮은 유동응력에 매우 큰 변형률 속도민감도, m 값을 나타내는 것이며, 매우 좁은 구간의 특정 변형률속도 영역에 제한되어 나타난다. 또한 이 m 값은 보통 변형률속도에 대한 종 모양의 함수로 표시될 수 있다. 따라서 m 의 최대값에 일치하는 변형률속도 $\dot{\epsilon}_{opt}$ 값이 존재하게 되며, 초소성 성질을 유지하고 성형 시간을 최소화하기 위하여는 이 영역 내에서 가능한 높은 변형률 속도를 유지하는 것이 필요하며 그 값은 $\dot{\epsilon}_{opt}$ 를 초과하지 말아야 한다.

초소성 성형의 기본공정은 판재를 경계 주위에서 클램프하고 재료의 낮은 유동응력 특성을 이용하여 변형매체로서 가스압력을 사용하는 블로(blow) 성형공정과 펀치등의 이동공구를 이용하여 성형하는 신장(stretch) 성형 공정으로 구분된다. 재료의 초소성 특성이 매우 좁은 영역의 변형률 속도 구간에 존재하므로, 이 영역에서 성공적인 성형을 위하여 최적 변형률 속도를 공정간에 일정하게 유지하기 위한 압력-시간 선도를 예측하는 것은 매우 중요한 일이다. 또한 최종 부품에 대한 두께분포 등을 예측하는 것도 중요한 일이다. 특히 최종형상의 두께분포는 최종부품의 기계적 물성치 요구 조건에 큰 영향을 미치게 되므로 가능한 두께분포를 균일하게 하는 공정을 설계하는 것은 매우 중요한 일이되며 형상이 복잡할 수록 이러한 요구사항은 증대하게 된다. 현재까지 초소성 성형부품의 두께분포를 개선하는 방법은 주로 실험적인 방법에 의하여 이루어져 왔다. Johnson⁽²⁾ 등은 여러가지 금형 형상 및 성형방법에 따른 두께분포 등을 실험적으로 고찰하여 마찰이 초소성 성형에 중요한 역할을 하며, 다단계 공정이 더 균일한 두께분포를 줄 수 있음을 보여 주었으며, Laycock⁽³⁾은 블로 성형뿐 아니라 신장 성형에서의 두께분포 개선을

위한 여러가지 성형방법을 소개하였다. Takahashi⁽⁴⁾ 등은 반구셀을 대상으로 초소성 벌지성형의 두께제어를 위하여 소재의 초기 두께를 보정하는 방법을 제시하였으나 초소성 성형부품의 대부분이 박판이므로 초기 소재두께를 다르게 가공하는 것은 용이한 것이 아니다.

그러나 실험적인 방법은 시행착오에 의한 많은 시간과 노력이 필요하게 되며, 각 공정 변수들의 영향을 정확히 규명하는데는 한계가 있게 된다. 최근에는 컴퓨터의 발달과 함께 유한요소법을 이용한 공정해석이 널리 이용되고 있어 변형률 속도를 일정하게 유지시킬 수 있는 압력-시간 선도 및 두께분포 예측이 가능하게 되었으나 대부분이 블로 성형에 제한되어 이루어져 왔다⁽⁵⁻⁸⁾. 또한 초소성 성형부품의 형상은 주로 3차원 형상이나 길이가 긴 사각상자와 같이 평면변형을 조건으로 대치할 수 있는 단면들이 많이 존재하여 평면변형 가정에 의한 해석들이 많이 수행되고 있다⁽⁹⁻¹²⁾.

본 연구에서는 초소성 성형공정의 균일 두께분포를 위하여 성형초기에 신장 공정에 의하여 성형되고 후에 블로 성형되는 신장/블로의 복합공정의 설계를 위하여 강-점소성 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 일반적으로 신장/블로 복합공정이 블로 공정만으로 성형하는 경우에 비하여 두께분포를 더 균일하게 할 수 있는 것으로 알려져 있다⁽¹³⁾. 신장 및 블로 성형해석시 주어진 변형률 속도를 유지하기 위한 펀치 속도-시간 및 압력-시간 선도, 두께분포 등을 예측하였다. 또한 신장 성형시 펀치 폭 및 구석반경과 펀치 이동높이가 블로 성형 후 최종형상의 두께분포에 미치는 영향을 규명하여 두께분포 개선을 위한 공정설계가 가능하도록 하였으며 깊이가 깊은 사각상자 및 2단계 팬 형상의 해석에 적용하여 그 타당성을 밝혔다.

2. 강-점소성 유한요소법

강-점소성 유한요소법은 소성변형에 비하여 탄성변형이 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정된 것으로 매 단계마다 재료의 항복을 검증하는 탄소성 방법에 비하여 보다 큰 시간간격을 사용할 수 있어 계산시간을 줄일 수 있는 이점이 있다. 초소성 성형의 신장/블로 복합공정의 유한요소 해석을 위하여 등방성 von-mises 재료에 대하여 막막이론(membrane theory)에 근거를 둔 평면응력(plane stress)의 평면변형률 선요소(plane-

strain line element)를 사용하였다.

2.1 유한요소 해석

평형상태 방정식은 가상일의 원리(virtual work principle)로부터 유도된다. 미소시간 Δt 동안 주변형을 속도의 비가 일정하고, 주변형을 속도의 방향은 회전 없이 일정하다고 할 때 소성일량 ΔW_p 는 다음과 같이 표현될 수 있다(14).

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

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

초소성 변형시의 외력으로 압력 P를 고려하면 일함수(work function) $\Delta \pi$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta \pi = \Delta W_p - \int_{V_0}^{V_0+\Delta V} PdV \quad (2)$$

여기서, V_0 는 현재의 체적, ΔV 는 미소시간 Δt 동안의 체적 증가분을 각각 나타낸다. 식(2)에서 가상일의 원리를 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$F_i - P_H = F_e \quad (3)$$

여기서, F_r 는 내부저항력, P는 압력, F_e 는 절점에서의 외력을 각각 나타낸다.

식(3)에 Newton-Raphson 법을 적용하여 고차항을 무시하고 선형화하면 다음과 같이 된다.

$$K\delta U = F_e - F_i + P_H \quad (4)$$

여기에서

$$K = K_1 - PK_2 - K_3 = \left(\frac{\partial F_i}{\partial \Delta U} - P \frac{\partial H}{\partial \Delta U} - \frac{\partial F_e}{\partial \Delta U} \right) \begin{cases} \Delta U = \Delta U_i \\ \Delta \bar{\epsilon} = \Delta \bar{\epsilon}_i \end{cases}$$

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

이며, 신장 성형공정 해석에서는 압력 P에 관한 항은 없게 된다. IU_i 와 $\Delta \bar{\epsilon}_i$ 는 시도 변위 증분과 유효 변형률 증분을 각각 나타낸다. 상세한 강성 방정식의 수식화는 참고문헌(7)에, 평면 변형을 선요소와 관련한 내용은 참고문헌(15)(16)에 잘 나타나 있다.

초소성 재료는 일반적으로 다음과 같이 유효변형률 속도의 함수로 표시할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = K \dot{\bar{\epsilon}}^m \quad (5)$$

여기서, K는 재료의 강도 계수이고, m은 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity)를 나타낸다.

금형과 소재사이의 접촉 영역에 대하여 수정된 쿨롱(Coulomb) 법칙(17)을 사용하면 전체 외력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_e = F_n (\mu \phi(\Delta U_t) t + n) \quad (6)$$

여기에서, F_n 은 법선력의 크기, μ 는 마찰계수를 나타낸다. t와 n은 금형과 소재의 접촉절점에서의 접선 및 수직벡터를 각각 나타내며, $\phi(\Delta IU_t)$ 는 접선방향 변위의 함수로서 다음과 같다.

$$\phi(\Delta U_t) = 1 \quad \text{if } \|\Delta U_t\| > \delta \quad (7)$$

$$\phi(\Delta U_t) = \frac{\|\Delta U_t\|}{\delta} \quad \text{if } \|\Delta U_t\| \leq \delta$$

여기서 δ 은 고착 상태의 영역을 나타내는 매우 작은 상대 접선변위이며 $\delta=0$ 이면 쿨롱의 법칙과 일치한다.

2.2 변형률 속도 제어

초소성 성형공정의 수치 모의화(numerical simulation)에서 궁극적인 목표인 재료의 최적 변형률 속도를 유지하면서 가능한 빨리 성형을 완성하기 위하여는 신장 성형공정에서의 편치속도-시간 및 블로·성형 공정에서의 최적 압력-시간 선도를 예측하는 것이다.

신장 성형공정에서 편치속도와 변형률 속도 사이의 관계는 비례하므로 한변형 단계에서 수렴이 되면 요소내의 최대 변형률 속도값을 최적 변형률 속도 값과 비교

하여 그 차가 주어진 오차 범위내에 존재하지 않으면 새로운 시간증분 및 편치속도를 다음과 같이 계산한다. 여기에서 Δt 및 V_D 는 매 단계에서의 시간증분 및 편치 속도를 각각 나타낸다.

블로 성형공정에서는 한번형 단계에서 수렴이 되면

$$(\Delta t)_{new} = \frac{\bar{\epsilon}_{max}}{\bar{\epsilon}_{opt}} \times (\Delta t)_{old} \quad (9)$$

$$(V_D)_{new} = (V_D)_{old} \times \frac{(\Delta t)_{old}}{(\Delta t)_{new}} \quad (10)$$

그때의 압력 P_1 에 대하여 요소내의 최대 변형을 속도값을 최적 변형을 속도값과 비교하여 그차가 주어진 오차 범위내에 존재하지 않으면 임의의 새로운 압력값 P_2 를 사용하여 다시 계산한다. 만약 그 차가 오차 범위내에 존재하지 않으면 다음 단계의 새로운 압력값은 다음과 같이 선형내삽(linear interpolation)을 이용하여 구한다.

$$P_{new} = P_1 \left(1 - \frac{\bar{\epsilon}_{opt} - \bar{\epsilon}_1}{\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1} \right) + P_2 \left(\frac{\bar{\epsilon}_{opt} - \bar{\epsilon}_1}{\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1} \right) \quad (11)$$

여기에서 ϵ_1 및 ϵ_2 는 압력이 P_1 및 P_2 인 경우의 최대 변형을 속도값을 각각 나타내며, ϵ_{opt} 는 요구하는 최적 변형을 속도값을 나타낸다. 각 공정 모두 매단계마다 최대 변형을 속도와의 허용오차 범위는 최적 변형을 속도값의 $\pm 5\%$ 이내로 유지시켰다.

3. 해석결과 및 고찰

강-점소성 유한요소법을 이용하여 포트란(FORTRAN) 프로그램을 작성하고 초소성 성형공정의 균일 두께 분포를 위한 신장/블로 복합공정의 문제를 해석하였다.

개발된 프로그램의 타당성을 위하여 블로 성형공정만의 해석결과를 기존의 실험결과(5)와 비교하였으며, 두께 분포 개선을 위한 해석으로는 깊이가 깊은 사각상자 및 2단계 팬(pan)형상에 대하여 각각 수행하였다.

계산에 사용된 재료는 Ti-6Al-4V로 응력 및 변형을 속도관계는 다음과 같으며, 요구 변형을 속도 값은 $3 \times 10^{-4} s^{-1}$ 로 하였다.

$$\bar{\sigma} = 460 \bar{\epsilon}^{0.5} \quad (MPa) \quad (12)$$

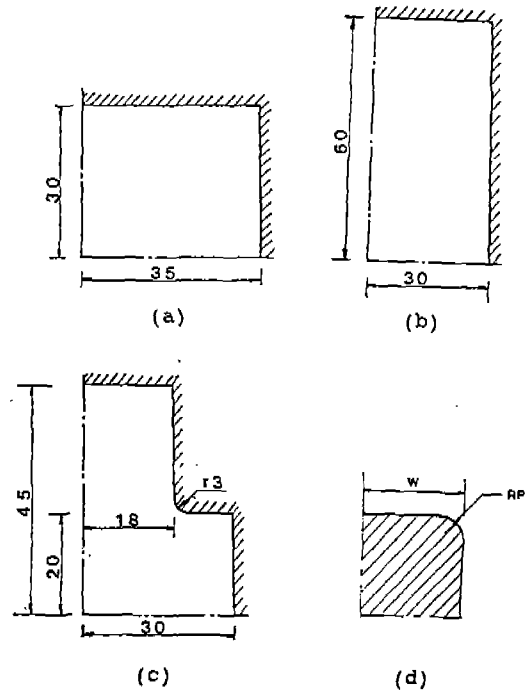


Fig.1 Various tool geometries : (a) rectangular box, (b) deep rectangular box, (c) two step pan, (d) punch

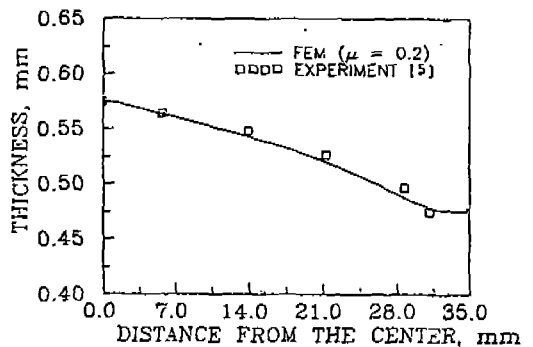


Fig.2 Comparison of predicted thickness with experimental data for rectangular box

Fig. 1은 해석에 사용된 금형형상으로 반 단면을 나타내고 있다. Fig. 1(a)의 사각 상자 형상 해석에는 초기 소재 두께를 0.96mm로 하였으며 35개 절점을 균일간격으로 하여 계산하였다. 금형과 소재사이의 마찰계수는 비교를 위하여 0.2로 하였다. Fig. 2는 중심에서 길이 방향으로의 두께분포 해석결과를 Bellet (5)의 실험결과와 비교하였으며 두 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.1 깊이가 깊은 사각상자 해석

해석에 사용된 금형형상은 Fig. 1(b)로 측면의 빠짐 기울기는 1°로 하였다. 절점수 31개, 요소수 30개의 등간격으로 하였으며, 초기 소재 두께는 1mm로 하였다. 금형과 소재 경계면의 마찰계수는 0.2 및 0.4인 경우에 대하여 해석하였다. 신장 성형 공정시의 편치형상은 폭(W) 20mm에 대하여 편치 모서리 반경(RP) 및 편치성형 높이(H)를 달리하여 전체의 1/2만을 해석하였다.

Fig. 3은 신장 성형공정 동안의 시간에 따른 편치속도 및 블로 성형공정 동안의 시간에 따른 압력 선도를 마찰계수가 0.2인 경우에 대하여 표시한 것이다. 변형률 속도를 일정값으로 유지하기 위하여 편치속도는 초기에는 빠르게 진행하다가 급격히 감소해야 함을 알 수 있으며, 블로 성형 동안의 압력-시간 선도는 블로 공정만의 성형시 압력-시간 선도와 유사한 경향을 보여 주고 있다⁽⁸⁾. Fig. 4는 신장 및 블로 성형시 시간에 따른 변형형상을 마찰계수가 0.2인 경우에 대하여 나타낸 것이며, Fig. 5는 매단계마다 최대 변형률 속도값을 나타낸 것으로 목표하는 최적 변형률 속도값 부근에 근접하게 해석되고 있음을 알 수 있으며, 본 프로그램에서 사용한 편치속도 및 압력제어 방법이 초소성 성형공정 해석에 유용하게 이용되고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6~Fig. 9는 편치 모서리 반경 2mm 및 8mm에 대하여 편치 이동 높이에 따른 최종 형상의 두께 분포를 각 마찰값에 따라 나타낸 것이다. 블로 공정만으로 성형된 경우의 최종 형상 두께 분포는 구석 부분에서 최대로 얇아지고, 클램프 부분이 최대 두께로 되며, 그 편차는 마찰계수가 0.2인 경우 0.12mm, 0.4인 경우가 0.19mm로 마찰계수가 적을수록 두께가 더 균일하게 분포됨을 알 수 있다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 마찰계수가 0.2인 경우의 두께

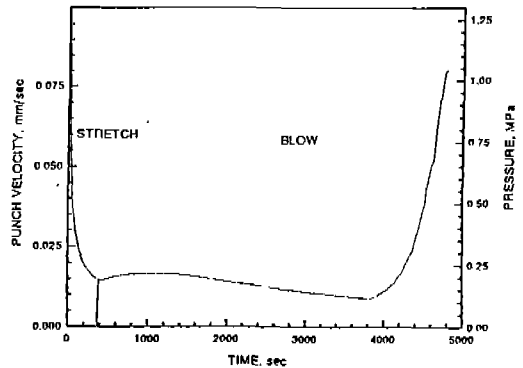


Fig. 3 Optimal punch velocity-time and pressure-time curves for superplastic forming of deep rectangular box

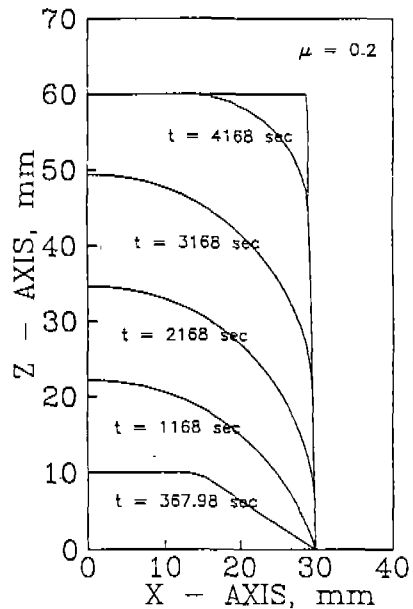


Fig. 4 Variation of deformed profile for different time step

분포를 나타낸 것으로 편치 모서리 반경이 클수록 더 균일한 두께 분포를 얻을 수 있으며, 편치 이동 높이를 10mm로 한 경우가 두께편차 0.09mm로 가장 좋은 두께 분포를 보여주고 있다. Fig. 8 및 Fig. 9는 마찰계수가 0.4인 경우로 마찰계수가 0.2인 경우와 비슷한 경향을 보여주고 있으나, 마찰계수가 클수록 두께 분포의 편차는 더 심하게 일어나고 있음을 보여준다. 편치 이

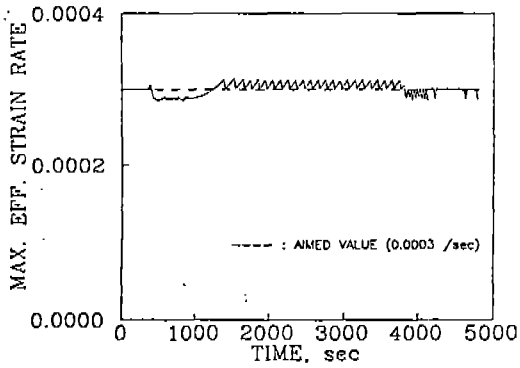


Fig. 5 Variation of the maximum effective strain rate with time for stretch/blow process

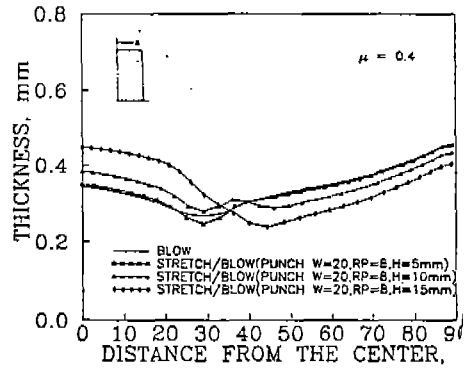


Fig. 8 Thickness distribution for larger punch corner radius ($\mu=0.4$)

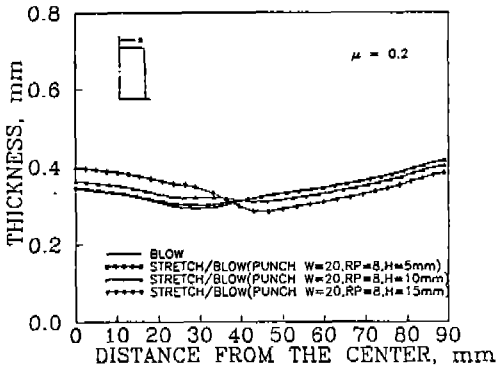


Fig. 6 Thickness distribution for larger punch corner radius ($\mu=0.2$)

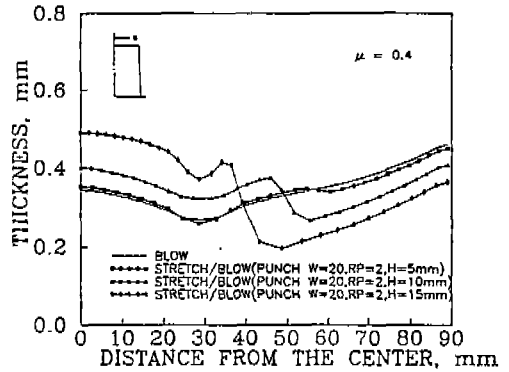


Fig. 9 Thickness distribution for smaller punch corner radius ($\mu=0.4$)

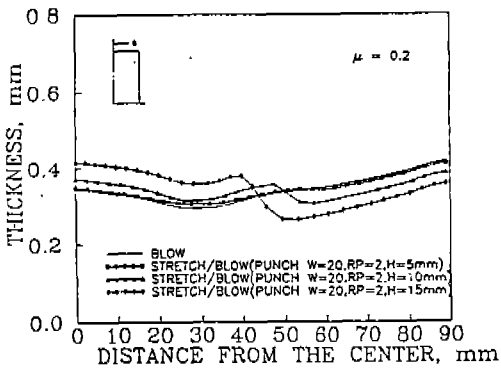


Fig. 7 Thickness distribution for smaller punch corner radius ($\mu=0.2$)

동 높이를 10mm로 한 경우가 0.15mm 편차로 가장 좋은 두께 분포를 보여주고 있다. 따라서, 깊이가 깊은 사각상자와 같은 형상인 경우에 펀치 모서리 부의 반경과 펀치이동 높이가 최종 부품의 두께 분포에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.2 2단계 팬 해석

해석에 이용된 금형형상은 Fig. 1(c)와 같으며 측면의 빠짐 기울기는 동일하게 1°로 하였다. 절점수 31개 요소수 30개의 등간격으로 하였으며, 소재 두께 및 마찰 조건은 앞절과 동일하게 하였다.

블로 공정만으로 생성된 경우의 최종형상 두께분포는 상부 구석 부분에서 최대로 얇아지고, 클램프 부분이

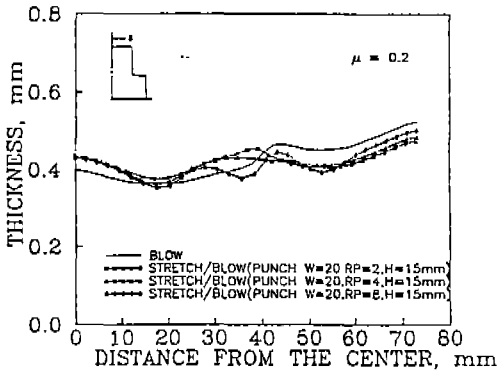


Fig. 10 Thickness distribution for different punch corner radius ($\mu=0.2$)

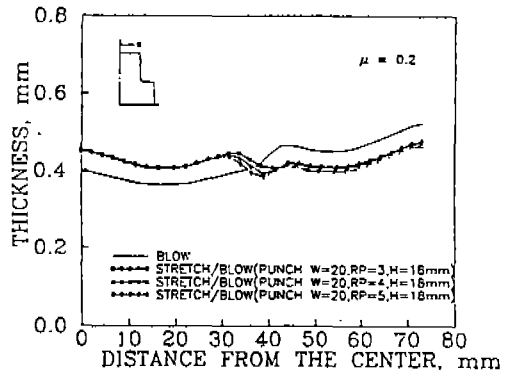


Fig. 12 Thickness distribution for different smaller punch corner radius ($\mu=0.2$)

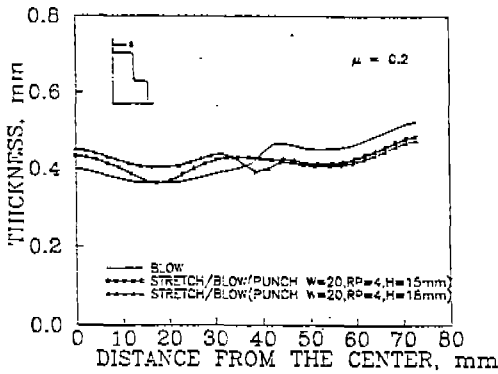


Fig. 11 Thickness distribution for different punch height ($\mu=0.2$)

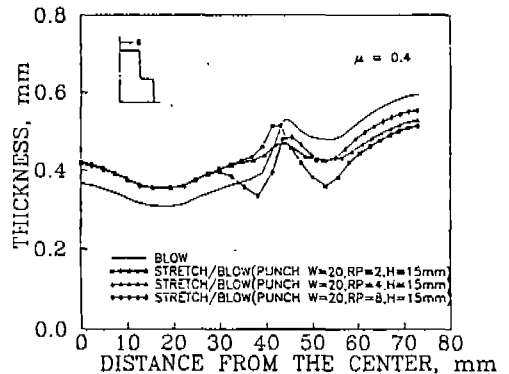


Fig. 13 Thickness distribution for different punch corner radius ($\mu=0.4$)

최대 두께로 되며, 그 편차는 마찰계수가 0.2인 경우 0.16mm, 0.4인 경우가 0.29mm로 마찰계수가 클수록 두께 편차가 크게 일어남을 알 수 있다.

Fig. 10은 마찰계수가 0.2인 경우 펀치폭 및 이동높이를 일정하게 하고 모서리 반경을 변화하면서 해석한 결과로 동일펀치 높이에 대하여 모서리 반경을 작게하는 것이 두께 분포 개선에 유리함을 알 수 있다. Fig. 11은 동일한 펀치 모서리 반경에 대하여 펀치 이동 높이를 달리한 것으로 펀치 높이가 클수록 두께분포 개선이 이루어짐을 알 수 있으며 펀치 높이가 18mm인 경우 두께 편차를 0.08mm로 크게 줄일 수 있다. 이것으로부터 펀치이동 높이는 크게하고 모서리 반경은 작게하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있으며 이 결과를 토대

로 Fig. 12에 세부해석 결과를 나타내었으며, 모서리 반경이 3mm인 경우가 0.07mm의 두께 편차로 개선할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 13은 마찰계수가 0.4인 경우로 앞의 경우와는 달리 동일 펀치 높이에 대하여 모서리 반경이 4mm인 경우가 가장 좋은 두께분포를 보여주고 있으며, 동일한 펀치 모서리 반경에 대하여서도 Fig. 14와 같이 펀치이동 높이를 크게하지 않는 것이 두께분포 개선에 효과적임을 알 수 있다. Fig. 14에서 펀치 높이를 15mm로 한 경우가 0.17mm의 두께편차로 불로 공정만으로 성형된 경우에 비하여 두께편차를 크게 줄이면서 더 균일하게 성형할 수 있음을 알 수 있다. 이것은 마찰의 영향에 따라 신장 성형공정시 두께분포가 다르게 형성되는

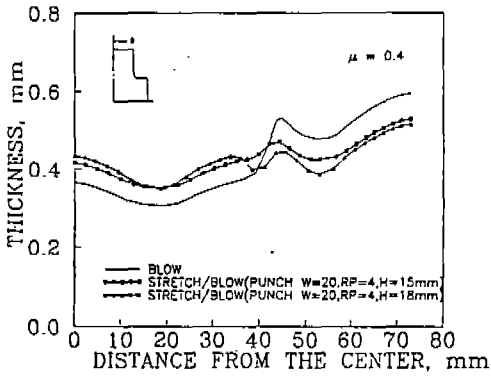


Fig. 14 Thickness distribution for different punch height ($\mu=0.4$)

것과 블로 성형시 먼저 접촉되는 부위에 따라 나타나는 결과로 신장 성형시의 펀치 모서리 반경 및 펀치이동 높이가 두께분포에 크게 좌우됨을 알 수 있으며, 이 변수들을 적절히 조합하여 설계하므로써 최종 부품의 두께분포를 가능한 균일하게 유도할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

초소성 성형공정의 두께분포를 개선하기 위하여 신장/블로 복합 성형공정의 설계를 위하여 강-점소성 유한요소법으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 평면변형을 선요소를 이용한 강-점소성 유한요소 해석으로 변형을 속도를 일정하게 유지하기 위한 신장 성형에서의 펀치이동 속도-시간 선도 및 블로 성형에서의 최적 압력-시간 선도의 예측이 가능하게 되었다.
- (2) 블로 공정만으로 성형된 부품의 두께편차는 마찰값이 클수록 더 커지며, 이 편차는 신장/블로 복합 공정에 의하여 크게 줄일 수 있으며, 특히 2단계 팬 형상과 같은 복잡한 형상의 성형시 두께분포를 크게 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.
- (3) 깊이가 깊은 사각상자 형상인 경우 일정한 펀치폭에 대하여 펀치 모서리 반경이 클수록, 더 균일한 두께분포를 얻을 수 있으며, 펀치 이동높이에 따라 두께분포가 다르게 분포됨을 알 수 있다. 또한 마

찰값이 작을수록 두께분포는 더 균일하게 나타난다.

- (4) 2단계 팬 형상인 경우에는 동일한 펀치폭 및 펀치 이동 높이에 대하여 마찰값이 작을수록 펀치 모서리 반경을 작게하고, 펀치이동 높이를 크게하는 것이 두께분포 개선에 유리함을 알 수 있다.
- (5) 최종 제품의 형상에 따른 신장/블로 복합 공정을 통하여, 신장 성형시 펀치의 형상(폭 및 모서리 반경) 및 이동높이에 따른 공정해석 수행으로 최종 제품의 두께 균일화를 위한 공정설계가 가능하게 되었다.

후 기

본 연구의 일부는 한국 학술진흥재단의 지방대 육성 연구비의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 제위께 감사 드립니다.

참고문헌

1. K. A. Padmanabhan and G. J. Davis, "Superplasticity", Springer, Berlin, 1980
2. Johnson. W, Al-Naib. T. Y. M and Duncan. J. L, "Superplastic Forming Techniques and Strain Distributions in a Zinc-Aluminium Alloy", Journal of the Institute of Metals, Vol. 100, pp.45~50, 1972
3. Laycock. D. B, "Superplastic Forming of Sheet Metal", Superplastic Forming of Structural Alloys, N. E. Paton and C. H. Hamilton, editors, pp.257~272, 1982
4. Akio Takahashi, Shouji Shimizu and Takayuki Tsuzuku, "Thickness Control in Superplastic Bulge Forming of Spherical Tank Shell", Journal of the JSTP Vol. 31, No. 356, pp.1128~1134, 1990
5. Bellet. M and Chenot. J. L, "Numerical Modeling of 3-Dimensional Superplastic Forming of Titanium Sheet", International Conference on Titanium, Products and Applications, SANFRANCISCO, 1986

6. Doltsinis. J. St, Luginsland. J and Nölting. S, "Some Development in the Numerical Simulation of Metal Forming Processes", *Eng. Comput.*, Vol. 4, pp.266~280, 1987
7. 홍성석, 김용환, 이종수, R. H. Wagoner, "강-점소성 유한요소법을 이용한 초소성 성형공정 해석 (I) - 초소성 벌지 성형 -", *대한기계학회 논문집*, 제17권 제4호, pp.796~805, 1993
8. 홍성석, 김용환, 이종수, R. H. Wagoner, "강-점소성 유한요소법을 이용한 초소성 성형공정 해석 (II) - FEMALE 성형 -", *대한기계학회 논문집*, 제17권 제11호, pp.2800~2808, 1993
9. Kuperfarb. G., Germain. Y and Abouaf. M, "A Mechanical Study of Superplastic Forming of Ti-6Al-4V Sheet", *J. of Mechanical Working Technology*, Vol. 14, pp.159~172, 1987
10. Chandra. N, "Analysis of Superplastic Metal Forming by a Finite Element Method", *Int. J. for Num. Meth. in Engng.*, Vol. 26, pp.1925~1944, 1988
11. Bonet. J, Wargadipura. A. H. S and Wood. R. D. "A Pressure Cycle Control Algorithm for Superplastic Forming", *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 5, pp.121~128, 1989
12. Agelet de Saracibar. C and Onate. E, "Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Problems Using a Selective Bending /Membrane Formulation", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 3, pp.1409~1416, 1990
13. Laycock. D. B, "Superplastic Forming of Sheet Metal". *Proc. Symp.*, "Superplastic Forming of Structural Alloys", San Diego, CA, published by TMS-AIME, pp.257~271, 1982
14. Germain. Y. Chung. K and Wagoner. R. H, "A Rigid-Viscoplastic Finite Element Program for Sheet Metal Forming Analysis", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 31, No. 1, pp.1~24, 1989
15. 김민호, "유한 요소법을 이용한 박판 성형의 단면 해석", 석사학위논문, 충남대학교, 1991
16. 김영탁, 이승열, Wagoner. R. H., "입자의 성형 조건을 갖는 박판의 평면 변형을 해석", *한국소성가공학회*, 제1권 제1호, pp.95~103, 1992
17. Oden. J. T and Pires. E. B, "Nonlocal and Nonlinear Friction Laws and Variational Principles for Contact Problems in Elasticity", *J. of Applied Mechanics*, Vol. 1, 50, pp.67~76, 1983