

초소성 판재의 벌지성형 공정 해석

홍성석 · 이성호 · 이종수

An Analysis of Superplastic Bulging of Sheet Metal

Sung Suk Hong, Sung Ho Lee and Jong Soo Lee

Agency for Defense Development, Daejeon 305-600

ABSTRACT

An analytical method has been presented for the study of the superplastic bulging process of sheet metal. Through this method, it is possible to obtain the optimum pressure-time curve for the superplastic forming and to predict the thickness distribution of bulged sheet metal with less computational cost than that by finite element analysis. Experiments have been performed to confirm the results of this analysis with Supral 150 sheets by adopting the computed optimum pressure-time curve. Good agreement between predictions and experimental data has been obtained for the bulged profile and its thickness distribution.

Key Words : superplastic forming, bulging, pressure-time curve, thickness distribution

기호설명

R_i	: i 번째 링 요소의 초기 반지름	하첨자	
r_i	: i 번째 링 요소의 현재 반지름	θ	: 원주 방향
t_i	: i 번째 링 요소의 현재 두께	ϕ	: 자오선 방향
t_0	: 판재의 초기 두께	t	: 두께 방향
m	: 변형률속도 민감도		
ϵ	: 변형률		
$\dot{\epsilon}$: 변형률속도		
σ	: 응력		
$\bar{\epsilon}$: 유효 변형률		
$\dot{\bar{\epsilon}}$: 유효 변형률속도		
$\bar{\sigma}$: 유효 응력		
ρ	: 벌지된 형상의 곡률 반경		
ϕ_i	: i 번째 링 요소의 대칭축으로부터의 각도		

1. 서 론

초소성 재료는 특정한 온도구간(일반적으로 $0.5T_m$ 이상, T_m : 재료의 용점, K)과 변형률속도(보통 $10^{-1} \sim 10^{-4}/\text{sec}$) 하에서 매우 큰 연성을 나타내며 이 영역 내에서는 유동응력이 매우 낮으므로 요구하는 형상을 성형할 때 변형 매체로서 가스를 사용할 수 있다.

초소성 성형은 매우 좁은 영역의 온도와 변형률속도 범위 내에서 이루어진다. 따라서 성형시 초소성 재료가 지니고 있는 성형온도 및 최적 변형률속도를 유지시키는 것이 무엇보다도 중요하다. 이를 위해서는 최적의 압력-시간 선도를 예측하고, 이 선도의 타당성을 확인하기 위해 최적 선도에 따른 성형 후 최종 부품의 두께분포 및 최대 얇아짐 등을 구하는 것이 필요하다.

초소성 판재 성형의 기본공정은 판재를 경계주위에서 클램프하고 한쪽 면에 가스압을 가하여 벌지성형하는 것으로서 이에 대한 여러 연구가 진행되어 왔으며, 이 중 이론적 해석을 수행하여 공정 변수의 영향에 대한 훌륭한 정보를 제공한 경우도 있다. Jovane^[1]은 최적 변형률속도를 유지하기 위한 하중 과정을 제시하였으며 Al-Naib와 Duncan^[2]은 튜브성형을 포함한 여러가지 성형 공정에 대한 실험을 수행하였다. Cornfield와 Johnson^[3]은 원형 판재의 자유 벌지를 고려하여 두께 분포에 대한 변형률속도 민감도 m 값의 영향을 연구하였으며 Ghosh와 Hamilton^[4]은 긴 사각 상자의 평면변형 영역에 관한 공정해석을 수행하여 성형시간을 최소화하도록 압력 사이클을 계산했다. Ragab^[5]은 여러가지 형상의 금형에 대한 성형공정 해석을 수행하여 압력, 성형시간 뿐 아니라 두께 분포를 예측하였다. Song과 Zhao^[6]는 초소성 벌지성형 해석에 cosine 형태의 모델로 변형률속도 민감도가 변화하는 것을 고려하여 성형공정을 해석하였다.

본 연구에서는 초소성 성형 공정의 기본 모델

인 벌지성형의 해석을 위해 Woo^[7]의 모델을 수정하여 사용하고 이를 기존의 해석 방법과 비교 검토하였다. 또한 압력 제어가 가능한 초소성 성형 장치를 개발하여 알루미늄 초소성 재료에 대한 벌지성형을 수행하여 해석결과와 실험결과를 비교하였다.

2. 이론해석 및 결과

2. 1. 기존의 해석 방법

본 논문에서 고려한 기존의 해석방법은 첫째, 판재의 두께가 항상 균일하다고 가정하여 성형 압력을 구하는 방법, 둘째, Ragab^[5]의 방법, 셋째, 연속체 요소를 이용한 유한요소법^[8]이다.

이 중 판재의 두께가 항상 균일하다고 가정하여 초소성 성형 압력을 구하는 경우에는 실제 성형시 나타나는 두께의 불균일 분포를 무시하는 단점이 있다. 한편 Ragab^[5]은 극점에서의 변형률 속도를 기준으로 하여 변형되는 판재의 기하학적 형상으로부터 성형압력과 두께분포 등을 계산하였으나 여기에는 판재 전체의 응력 상태를 등이축응력 상태 또는 평면응력 상태로 가정하였다는 문제점이 있다. 이러한 문제점의 해결을 위해서는 좀 더 일반적인 해석방법이 필요하고 유한요소법이 이에 적절하다고 여겨지나 이 방법은 해석적인 방법보다 시간적 노력이 많이 필요하다.

2. 2. 본 연구에서의 해석 방법

본 연구에서는 초소성 판재의 벌지성형 공정 해석을 위하여 Woo^[7]의 모델을 이용하였다. 초소성 판재는 여러 개의 링 요소(ring element)로 구성되어 있고 두께 방향의 응력은 다른 방향의 응력에 비하여 무시할 수 있는 평면응력(plane stress) 문제로 가정하였다(Fig. 1). 또한 벌지된 형상은 구의 일부로 가정하며 초소성 재료가 변형률속도에 매우 민감하므로 유동응력식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = K\dot{\epsilon}^m \quad \dots (1)$$

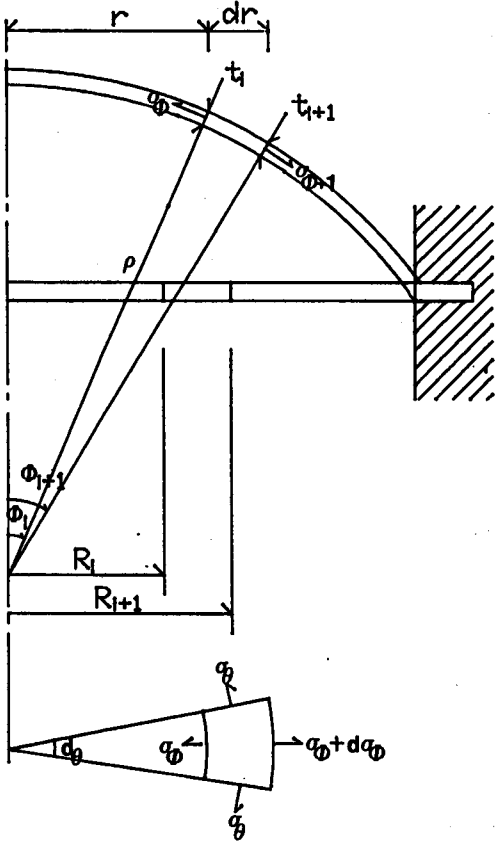


Fig. 1. Schematic diagram of analytical model for a bulged sheet.

von Mises의 항복 조건으로부터 변형률속도와 응력과의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\dot{\epsilon}_\phi - \dot{\epsilon}_\theta}{\sigma_\phi - \sigma_\theta} = \frac{\dot{\epsilon}_\theta - \dot{\epsilon}_t}{\sigma_\theta - \sigma_t} = \frac{\dot{\epsilon}_t - \dot{\epsilon}_\phi}{\sigma_t - \sigma_\phi} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} \quad \dots\dots (2)$$

두께 방향의 응력 σ_t 는 무시할 수 있으므로

$$\sigma_\phi = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} (-\dot{\epsilon}_\theta - 2\dot{\epsilon}_t) \quad \dots\dots (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} (\dot{\epsilon}_\theta - \dot{\epsilon}_t) \quad \dots\dots (4)$$

로 나타낼 수 있다.

초기반경 R_i, R_{i+1} , 두께 t_0 의 링 요소를 고려

하면 체적일정 조건으로부터 다음의 관계가 성립한다.

$$(R_{i+1}^2 - R_i^2)t_0 = \left(\rho + \frac{t_i + t_{i+1}}{4}\right)^2 (\cos\phi_i - \cos\phi_{i+1})(t_i + t_{i+1}) \quad \dots\dots (5)$$

또한 유효 응력 및 유효 변형률속도는 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\sigma} = (\sigma_\phi^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_\phi\sigma_\theta)^{1/2} \quad \dots\dots (6)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \left[\frac{4}{3} \{(\dot{\epsilon}_t + \dot{\epsilon}_\theta)^2 - \dot{\epsilon}_t\dot{\epsilon}_\theta\}\right]^{1/2} \quad \dots\dots (7)$$

링의 접선 방향의 평형 방정식으로부터

$$(\sigma_\phi \cdot t)_{i+1} = (\sigma_\phi \cdot t)_i + \int_{r_{i+1}}^{r_{i+1}} \frac{(\sigma_\theta - \sigma_\phi) \cdot t}{r} dr \quad \dots\dots (8)$$

이 되며 이 식을 trapezoid법을 이용하여 적분하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\sigma_\phi \cdot t)_{i+1} = (\sigma_\phi \cdot t)_i + \frac{1}{2} \left[\left\{ \frac{(\sigma_\theta - \sigma_\phi)}{r} t \right\}_{i+1} + \left\{ \frac{(\sigma_\theta - \sigma_\phi)}{r} t \right\}_i \right] (r_{i+1} - r_i) \quad \dots\dots (9)$$

상기의 수식들을 초소성 판재의 벌지성형 해석에 적용하기 위한 계산 순서는 다음과 같다.

- (1) 초기의 벌지 높이 증분을 가정한다.
- (2) $r_i = 0$, 즉 극점에서의 $\epsilon_{t,i}$ 를 가정하여 $\epsilon_{\theta,i}, \bar{\epsilon}_i$ 를 구하고 변형률 증분 $\Delta\epsilon_{t,i}, \Delta\epsilon_{\theta,i}, \Delta\bar{\epsilon}_i$ 를 계산한다. 또한 유지하고자 하는 변형률 속도로부터 시간증분 ΔT_j 를 구하여 변형률속도 $\dot{\epsilon}_{t,i}, \dot{\epsilon}_{\theta,i}, \dot{\bar{\epsilon}}_i$ 를 계산하면 응력성분 $\bar{\sigma}_i, \sigma_{r,i}, \sigma_{\theta,i}$ 를 구할 수 있다.
- (3) 초기 R_{i+1} 에 일치하는 다음 점에서 두께 t_{i+1} 을 가정한다. 식 (5)에서 ϕ_{i+1} 을 구하면 r_{i+1} 과 $\epsilon_{\theta,i+1}$ 이 계산된다.
- (4) 전 단계와 현 단계에서의 변형률 증분을 각각 구하면 변형률속도를 계산할 수 있고, 따라서 $\sigma_{\phi,i+1}, \sigma_{\theta,i+1}, \bar{\sigma}_{i+1}$ 을 구할 수 있다.
- (5) 식 (9)로부터 $(\sigma_\phi \cdot t)'_{i+1}$ 을 구하고 이 값

을 (3),(4)항의 결과로부터 계산한 $(\sigma_{\theta} \cdot t)_{i+1}$ 의 값과 비교하여 $(\sigma_{\theta} \cdot t) / (\sigma_{\theta} \cdot t)' - 1 \leq \pm 0.0001$ 이면 만족하는 것으로 하고 그렇지 않을 경우에는 새로운 t_{i+1}' 을 다음 식으로부터 구한다.

$$\dot{\epsilon}_{t,i+1}' = -\frac{1}{2} \left[\frac{3}{2} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} \right)_{i+1} \frac{(\sigma_{\theta} \cdot t)'_{i+1}}{t_{i+1}} + \dot{\epsilon}_{\theta,i+1} \right]$$

이 값을 이용하여 (3)항에서부터 반복 수행한다.

(6) 평형 방정식을 모두 만족하면 클램프에서의 경계조건 $\epsilon_{\theta} \approx 0$ 을 검토하여 오차 범위 (0.0005)내에 존재하면 압력을 계산한 후 다음 단계로 진행한다. 수렴하지 않는 경우에는 극점에서의 두께 t_1 을 다시 가정하여 (2)항부터 다시 계산한다. 이때 압력은 다음 식으로부터 계산한다.

$$P = \frac{2\sigma_{\theta,1}t_1}{\rho}$$

2. 3. 변형률속도 민감도 m 에 의한 두께 분포 변화

초소성 재료의 m 값이 두께 분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 극점에서의 변형률속도가 일정값 $\dot{\epsilon}_0 = 1.26 \times 10^{-2} / s$ 로 유지되도록 하여 m 값에 따른 두께분포를 계산하였다. 계산에 사용된 유동응력은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} (MPa) = 75.95 \dot{\epsilon}^m \quad \dots (10)$$

m 값을 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1.0으로 변화시킬 때 최종 형상이 반구(높이/직경=0.5)인 경우의 두께와 높이를 무차원수로 나타내면 Fig. 2와 같다. m 값에 따라 두께 변화가 상당히 크게 나타남을 알 수 있으며 이 현상은 Cornfield와 Johnson^[3]이 계산한 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있으나 오히려 Bellet 등^[9]이 점소성 유한요소 해석으로 계산한 결과와 정량적으로 더 잘 일치하고 있음을 보여준다.

Fig. 3은 극점에서의 두께분포를 m 값에 따라 나타낸 것으로 극점에서의 두께 편차가 변형이 진행됨에 따라 점점 더 증가하는 것을 알 수 있으며 결국 초소성 성형에서 문제가 되는 두께

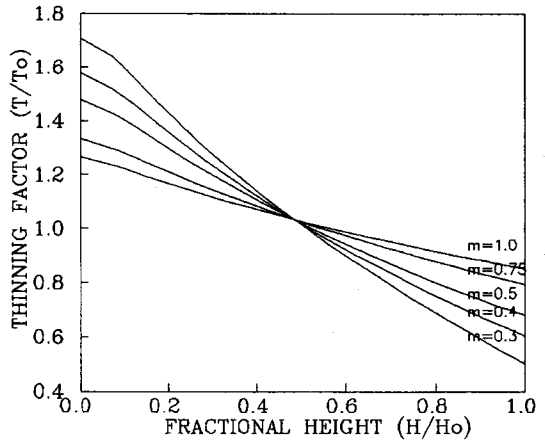


Fig. 2. Variation of thinning factors with fractional height showing the effect of strain-rate sensitivity, m (T : actual thickness, T_0 : average thickness calculated by constant volume condition, H : current height, H_0 : pole height)

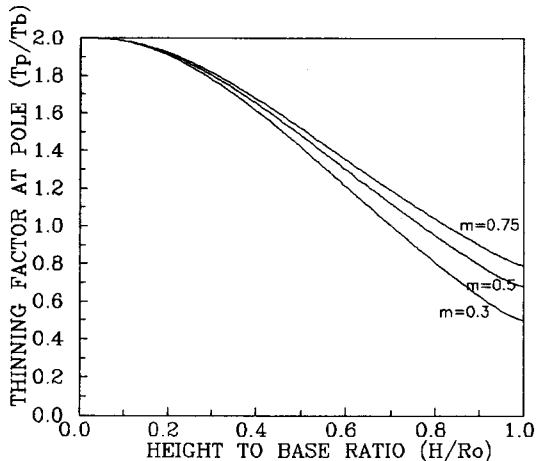


Fig. 3. Variation of thinning factors at pole with bulge height-to-base ratio (T_p : thickness at pole, T_b : average thickness calculated by constant volume condition)

분포는 m 값에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

2. 4. 최적 압력-시간선도

초소성 재료는 큰 변형률속도 민감도를 가지며 재료마다 초소성을 나타내기 위한 특정한 온도 범위와 변형률속도 범위를 갖는다. 초소성

재료의 변형특성 평가는 대개 인장실험을 통해 이루어지는데 보통 재료의 유동이 정상상태를 나타내는 지점에서 유동응력과 그 때의 변형률 속도를 측정하여 변형률속도에 따른 유동응력과 변형률속도 민감도 등을 계산한다. 본 연구에 사용된 Supral 150 판재의 유동응력-변형률 속도 관계는 다음과 같다^[10].

$$\bar{\sigma} (MPa) = 105.9 \dot{\epsilon}^{0.4} \quad \dots\dots (11)$$

이 때 m 값이 최대가 되는 변형률속도는 $6.93 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 로 성형 도중에 최대 변형률속도가 이 값을 초과하지 않도록 유지하여야 한다.

계산된 압력-시간 선도는 Fig. 4에 나타나있다. Fig. 4로부터 변형 시 두께가 균일하다고 가정하여 해석한 결과가 압력이 가장 높고 성형 시간이 짧으며, Ragab^[5]의 모델을 사용하는 경우가 압력이 가장 낮고 성형시간이 제일 길게 나타남을 알 수 있다. 이는 두께가 균일하다고 가정한 경우 극점의 두께가 다른 부위의 두께와 동일하므로 압력이 가장 크게 나타나며 상대적으로 Ragab의 모델을 사용하는 경우는 극점의 두께가 가장 얇게 진행되고 있음을 보여주고 있다. 본 해석 방법으로 계산된 결과는 이 두 선도의 중간에 위치하고 있고 연속체 요소(continuum element)를 사용하여 계산한 유한요소 해석 결과^[8]와 잘 접근하고 있다.

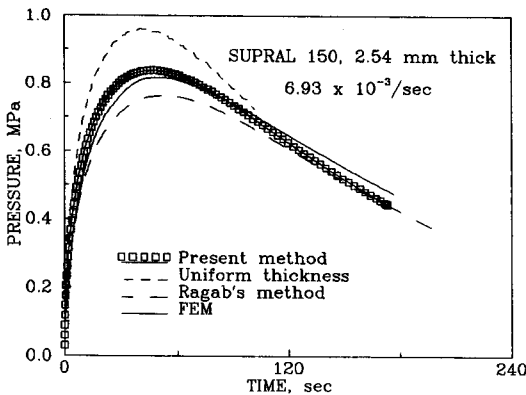


Fig. 4. Calculated optimal pressure cycles using various models.

3. 실험 및 고찰

3. 1. 초소성 성형 장치

앞 절에서 계산된 압력-시간 선도를 따라 압력을 조절할 수 있는 초소성성형 장치를 개발하였다. 성형장치의 개략도는 Fig. 5와 같으며 상·하 두 부분으로 구분되어 소재의 클램핑 및 금형을 설치할 수 있는 프레스 부분, 소재 및 금형을 적정 온도로 상승 및 유지시키는 가열부 및 온도 및 가스압력을 제어할 수 있는 제어부의 세 부분으로 구성되어 있다.

프레스부는 소재를 하부금형에 위치시켜 적절한 온도로 금형 및 소재를 가열하고 하강한 상부 램이 소재를 클램프하여 가압 시 가스의 밀봉이 가능하도록 하는 역할을 한다. 가열부에 설치된 가열로는 분리형으로 하였으며 단열재로는 유리섬유를 사용하였다. 온도제어는 제어부에 설치된 콘트롤러에 의하여 제어되며 AI합금 초소성 재료가 일반적으로 450~600°C부근,

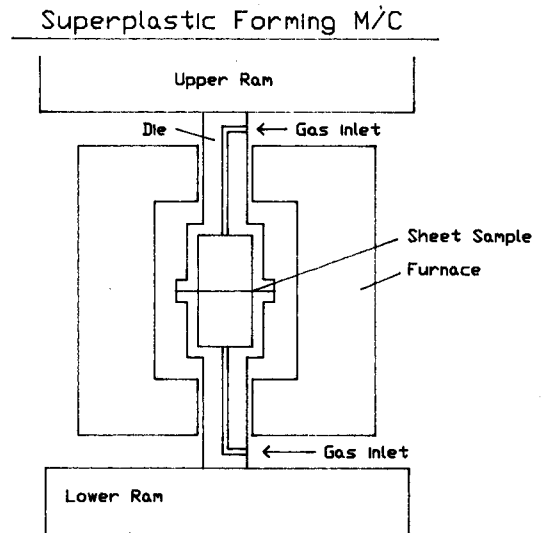


Fig. 5. Schematic diagram of superplastic forming machine.

티타늄 합금인 경우 900~1000℃부근에서 성형되므로 최고 가열온도는 1200℃까지로 하였다.

제어부는 온도 제어부와 압력 제어부로 나누어지는데 온도는 세 개의 열전대에 의해 각 부위의 온도가 기록되며 압력은 프로그램식 컨트롤러(programmable controller)에 의해 지정된 압력-시간 선도를 따라 제어될 수 있고 필요에 따라 배압력(back pressure)도 가할 수 있게끔 설계되었다. PC에 의한 제어 압력은 20 kg/cm²까지이며 그 이상의 압력이 요구될 때에는 수동으로 제어가 가능하도록 하였다. 압력 제어용 밸브는 압력을 미세하게 제어할 수 있는 니들 밸브(needle valve)를 사용하였다.

3. 2. 벌지성형 실험

판재를 하부 금형에 위치시키고 최적 성형온도인 470℃로 가열시킨다. 사용된 Supral 150 판재의 두께는 2.54 mm이며 성형온도에 도달하면 유압 프레스에 의해 소재를 클램프시킨다. 성형에 사용된 가스는 Ar였으며 성형시간이 비교적 짧기 때문에 X-Y 플로터 펜이 미리 그려진 최적 압력-시간 선도를 따라 움직이도록 수동으로 압력을 제어하였다. 계산된 압력-시간 선도와 실험에서 제어된 압력-시간 선도는 Fig. 6에 나타냈으며 이론 선도에 잘 일치하도록 압력 제어가 이루어졌음을 알 수 있다.

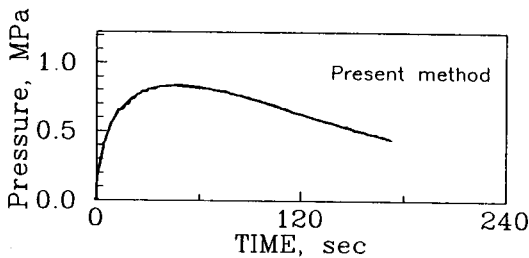


Fig. 6. Pressure-time curve used in the experiment.

성형된 최종 벌지형상은 Fig. 7과 같다. 실제 계산이 극점의 높이가 50 mm인 때까지 수행된 결과에 비해 실험 결과로 나타난 극점의 높이는

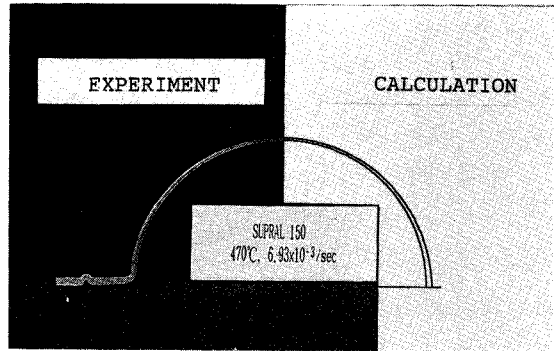


Fig. 7. Calculated and experimental result of section of bulged Supral 150 sheet.

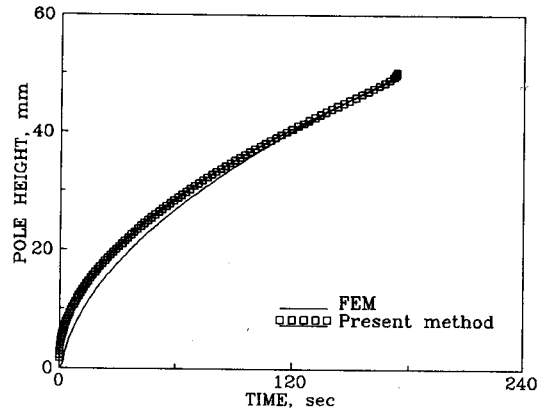


Fig. 8. Variation of pole height with time.

49.1 mm로 1.8%의 오차를 보여주고 있어 해석 방법이 타당함을 알 수 있다. Fig. 8은 시간에 따른 극점높이의 계산값을 유한요소해석 결과와 비교하여 보여주고 있다. 성형 초기에 극점의 높이가 유한요소해석 결과보다 다소 높게 나타나고 있으며 성형 후반부에서는 두 선도가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 현상은 이론 해석 시 성형되는 형상을 구의 일부로 가정하면서 나타나는 것으로 성형 초기에는 이 가정이 다소 맞지 않으나 성형 후반부에서는 어느 정도 타당한 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 성형이 완료된 판재의 두께 분포를 비교한 것이다. 두께의 측정값이 예측값보다 더 크게 나타나며 차이는 극점에 가까울수록 커진다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 성형 중 결

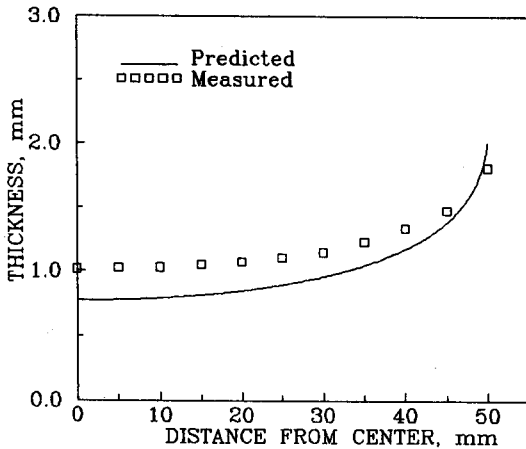


Fig. 9 Comparison of predicted thickness with experimental data.

정립 성장에 의한 변형 경화와 공동 발생에 의한 부피팽창의 두 가지를 들 수 있다^[11]. 즉, 재료의 변형경화로 두께 감소에 대한 저항이 증가하고 또 공동이 발생하기 때문에 소성변형 중의 변형 경화와 체적 변화를 고려하지 않은 예측값이 실제 두께보다 작게 나타난다.

4. 결 론

초소성 성형공정 중 가장 기본적인면서도 중요한 벌지성형 해석에 수정된 Woo의 방법을 제시하여 기존의 해석방법에 의한 결과 및 실험결과와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초소성 재료의 변형률속도 민감도는 성형된 판재의 두께 분포에 크게 영향을 주고 있으며 본 해석 방법으로 이 영향이 잘 나타나고 있음을 알 수 있었다.

2) 본 해석 방법으로 극점의 변형률 속도를 일정하게 유지하기 위한 압력-시간 선도를 계산한 결과 유한요소해석 결과와 잘 일치하고 있다.

3) 압력제어가 가능한 초소성 성형 장치를 개발하여 이론적으로 얻어진 압력-시간 선도에 잘 일치하도록 압력을 제어할 수 있었다.

4) 최종 형상에 대한 이론해석 및 실험결과와의 두께 분포는 잘 일치하고 있으며 따라서 본 해석결과가 타당함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Jovane, F., "An Approximate Analysis of the Superplastic Forming of a Thin Circular Diaphragm: Theory and Experiments", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.10, 1968, pp.403~427.
2. Al-Naib, T. Y. M. and Duncan, J. L., "Superplastic Metal Forming", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.12, 1970, pp.463~477.
3. Cornfield, G. C. and Johnson, R. H., "The Forming of Superplastic Sheet Metal", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.12, 1970, 479~490.
4. Ghosh, A. K. and Hamilton, C. H., "Superplastic Forming of a Long Rectangular Box Section-Analysis and Experiment", *ASM Conference on Process Modeling*(T. Altan and H. Gegel, eds.), ASM, Metal Park, Ohio, 1980, pp.303~331.
5. Ragab, A. R., "Thermoforming of Superplastic Sheet in Shaped Dies", *Metals Technology*, Vol.13, 1983, pp.340~348.
6. Song, Y. and Zhao, J., "A Mechanical Analysis of the Superplastic Free Bulging of Metal Sheet", *Mater. Sci. Engng.*, Vol.84, 1986, pp.111~125.
7. Woo, D. M., "The Analysis of Axisymmetric Forming of Sheet Metal and the Hydrostatic Bulging Process", *Int. J. Mech. Sci.* Vol.6, 1964, pp.303~317.
8. 허 훈, 한수식, 양동열, 이종수, "초소성 박판성형 공정의 유한요소 압력제어 해석", *대한기계학회논문집*, Vol.15, 1991, pp.1563~1571.
9. Bellet, M., Massoni, E. and Chenot, J.

L., "A Viscoplastic Membrane Formulation for the 3-dimensional Analysis of Thin Sheet Metal Forming", Proc. Int. Conf. on Computational Plasticity, Barcelona, Pineridge Press, 1987, pp.917~926.

10. 초소성 성형 연구(I), 1990, 기술보고서, MRDD-411-91011, 국방과학연구소.
11. 정성규, 최준환, 이동녕, 이혁모, 홍순형, 홍성석, 이종수, "초소성 7475 Al 합금판의 부플립 성형," 대한금속학회지, Vol.29, 1991, pp.379~388.