

초소성과 초소성 성형

이성호 · 홍성석 · 이종수

Superplasticity and Superplastic Forming

Sung-Ho Lee, Sung-Suk Hong, Jong-Soo Lee



- 이성호(국방과학연구소)
- 1962년생.
- 금속가공을 전공하였으며, 금속가공 공정의 해석에 관심을 가지고 있다.



- 홍성석(국방과학연구소)
- 1958년생.
- 소성역학을 전공하였으며, 초소성 성형공정의 수치해석에 관심을 가지고 있다.



- 이종수(국방과학연구소)
- 1947년생.
- 소성역학 및 소성가공을 전공하였으며, P/M, RSP 초소성을 이용한 신소재 가공에 관심을 가지고 있다.

1. 초소성

1.1 거시적 관점에서의 초소성

초소성은 다결정 재료가 수백% 이상의 인장 연신율을 나타내는 현상을 일컫는 말이

다. 표 1과 그림 1은 여러가지 초소성 재료의 인장변형 특성을 나타낸 것^(1,2)이다. 이처럼 초소성 재료가 파단에 이르기까지 커다란 연신이 가능한 것은 재료의 변형률속도 민감도와 관련이 있다. 일반적으로 변형률속도 민감도 m값이 증가할수록 연신율이 증가하

표 1 금속재료의 초소성 변형 특성⁽¹⁾

합 금	성형온도(°C)	변형률속도(sec ⁻¹)	변형률속도 민감도(m)	연신율(%)
Supral 220	460	$6.7 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3}$	0.65	>1800
Al 7475	515	$2 \times 10^{-4} \sim 8.3 \times 10^{-4}$	0.5~0.8	1200
Al 8090	500~540	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	0.4~0.55	500~1000
Ti-6Al-4V	790~940	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	0.8	700~1400
Ti6242	900	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	0.6~0.7	>500
IN-100	920~1050	$3.3 \times 10^{-4} \sim 8.3 \times 10^{-3}$	0.5~0.65	>850
IN-744	960	3×10^{-3}	0.55	>1000
Zn-22Al	200-250	$1.7 \times 10^{-5} \sim 1.7 \times 10^{-3}$	0.4~0.66	500~2900

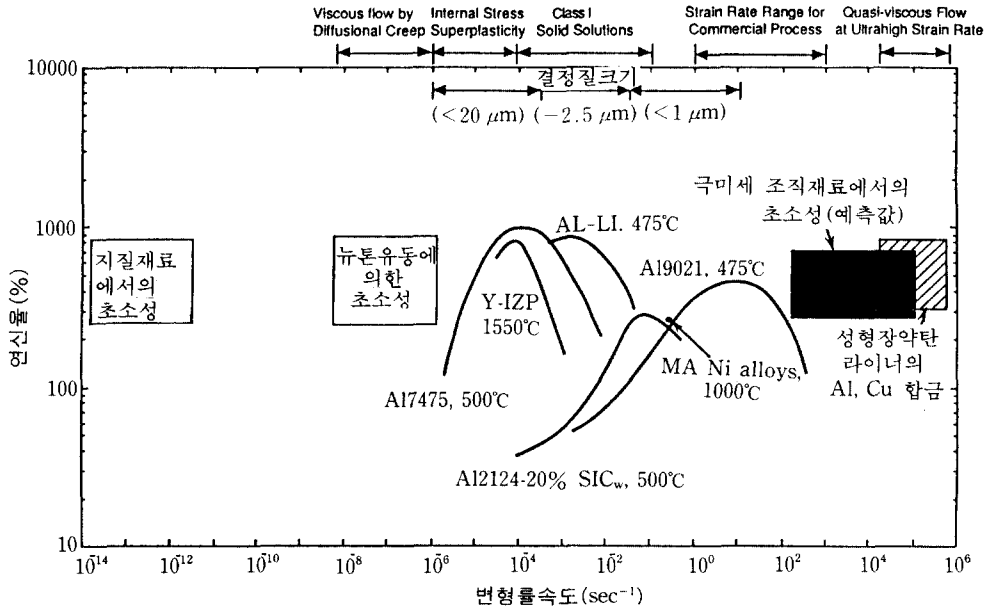


그림 1 여러 종류의 재료에서 나타나는 초소성거동⁽²⁾

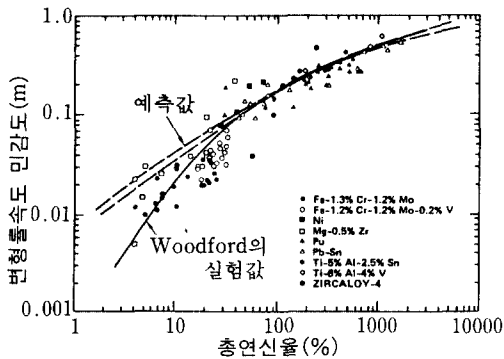


그림 2 변형률속도민감도 m 과 인장연신율과의 관계⁽³⁾ (점선은 식(1)에 의한 예측값)

는데 이는 그림 2에 점들로 나타난 실험값으로부터 명확히 알 수 있다. 이같은 m 값과 연신율 사이의 관계는 인장변형 시의 소성불안정성에 관한 이론에 의해 설명될 수 있으며⁽⁴⁻⁶⁾ 그 중 Marciniak의 해석을 이용한 결과⁽⁴⁾는 다음과 같다.

$$\epsilon^* = -m \ln(1 - f^{1/m}) \quad (1)$$

여기서, ϵ^* 는 파단에 이르기까지의 변형률이

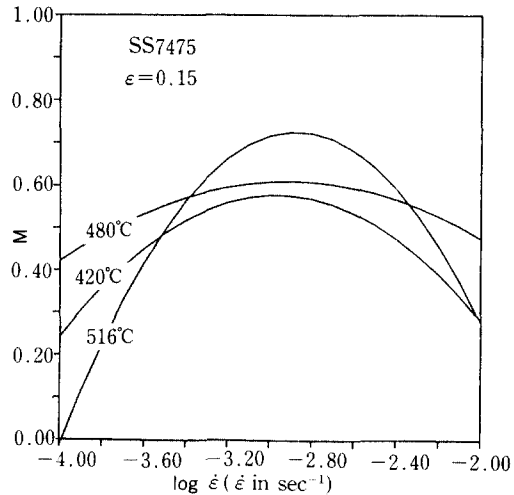


그림 3 초소성 7475 알루미늄 합금의 변형온도에 따른 변형률속도와 변형률속도 민감도와의 관계⁽⁷⁾

며, f 는 재료가 갖는 초기 국부불균일 정도, m 은 변형률속도 민감도이다. 식 (1)에 의한 결과가 그림 2의 점선이며, 이는 실험값과 잘 일치하고 있다.

한편 초소성 재료의 m 값은 변형률속도와 변형온도에 따라 변하는데 그림 3은 Al 7475 합금의 초소성 특성평가에서 얻어진 m 값의 변화 양상이다.⁽⁷⁾ 이상으로부터 최대 m 값이 얻어지는 온도와 변형률속도에서 초소성 재료의 최대 연신율이 얻어짐을 알 수 있고, 따라서 그림 1에서처럼 재료마다 다른 최적 변형률속도 즉, 최대 연신율이 얻어지는 변형률속도가 있음이 설명된다.

1.2 미시적 관점에서의 초소성

초소성은 일반적으로 구조적(structural) 초소성과 환경적(environmental) 초소성으로 분류된다. 환경적 초소성은 변태유기 초소성(transformation induced superplasticity)으로도 불리우며 환경적 요인에 의해 재료가 상변태를 일으킴으로써 나타난다. 보통 초소성이라고 하면 구조적 초소성을 가리키는데 구조적 초소성 재료는 10 μm 이하의 미세한 결정립, 0.5 Tm(Tm: 절대온도로 나타낸 재료의 용점) 이상의 변형온도, 특정한 변형률속도 범위($10^{-5} \sim 10^{-1}/\text{sec}$)를 갖는 것이 특징이다.

구조적 초소성 재료의 유동은 주로 결정립계 미끄럼(grain boundary sliding)에 의해 일어나며 결정립 성장, 결정립내 슬립 등의 복잡한 미세구조 변화를 동반한다.⁽⁸⁾ 이러한 초소성현상을 설명하기 위해 여러 모델들이 제안되었으며,⁽⁸⁻¹⁰⁾ 이 중 Perevezentsev 등⁽¹⁰⁾의 모델에 의하면 초소성 유동이 일어날 수 있는 변형률속도는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\epsilon} = C \left[\frac{G\Omega}{kT} \right] \left[\frac{b}{r_d} \right] \frac{D_b}{d^2} \zeta^{3/2} \quad (2)$$

$$C \cong \ln(d/b)/(1-\nu) \quad (3)$$

여기서, ζ 는 상수, G 는 전단 탄성계수, Ω 는 원자의 부피, k 는 Boltzmann 상수, T 는 온도, b 는 Burgers 벡터, r_d 는 전위 중심부의 입계에서의 유효반경, D_b 는 입계 확산계수, d 는 결정립의 크기, ν 는 Poisson

비이다. 위 식에 의하면 결정립 크기가 작을수록, 변형온도가 높을수록 변형률속도가 커지며 이로부터 그림 1에서 결정립이 작은 재료가 최적 변형률속도가 크고 또 그림 3에서 온도가 높아질수록 최적 변형률속도가 커지는 실험적 결과를 설명할 수 있다.

2. 초소성 재료의 변형특성

2.1 두께 분포의 불균일

초소성 재료의 유동응력은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (4)$$

또한 변형률속도는 식 (5)로 쓸 수 있으므로 인장변형 시 재료 단면적의 감소속도는 식 (4), (5)로부터 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\dot{\epsilon} = -\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (5)$$

$$-\frac{dA}{dt} = \left[\frac{P}{K} \right]^{1/m} A^{-(1-m)/m} \quad (6)$$

여기서, A 는 단면적, P 는 하중을 나타낸다.

식 (6)에 의하면 m 값이 증가할수록 확산 네킹에 대한 저항이 증가하며 $m=1$ 이면 단면 감소속도는 단면적 A 에 관계없이 일정하게 되어 단면의 불균일이 확대되지 않는다. 따라서 m 값이 비교적 큰 초소성 재료들은 두께분포의 불균일이 적으며 역으로 두께가 균일한 성형품을 얻기 위해서는 큰 m 값을 갖는 조건 즉 최적 변형률속도와 온도로 성형을 해야 한다.

한편 초소성 재료가 어느 한 방향으로 인장연신을 받는 경우 두께의 감소량은 응력상태에 따라 달라지며 그 감소량은 일축인장, 평면변형, 등이축 인장의 순으로 커진다. 따라서 m 값이 크더라도 완전히 균일한 두께분포를 얻을 수는 없으며 이러한 두께의 불균일 분포의 원인으로는 응력상태의 불균일, 금형과 재료와의 마찰효과 등의 재료 외부적

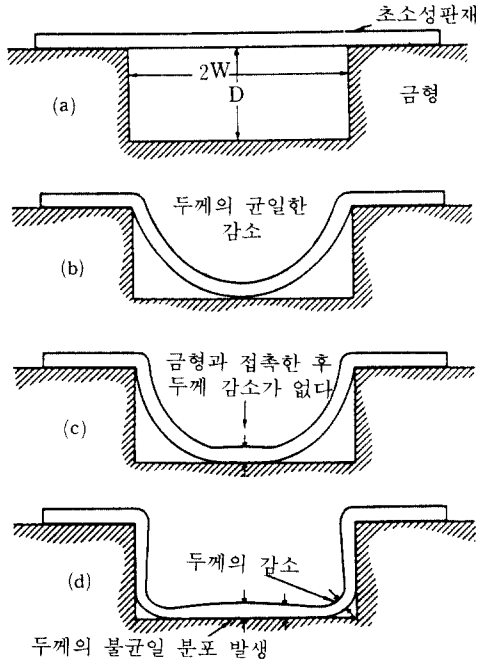


그림 4 사각 다이(die)로의 블로우 성형시 나타나는 두께의 불균일 분포⁽³⁾

인 것과 성형 시 온도구배에 의해 생기는 재료성질의 변화, 미세조직의 불균일 등의 재료 내부적인 것이 있다. 그림 4는 금형과의 마찰에 의해 생기는 두께 불균일을 나타낸 것이다.⁽³⁾

2.2 공동의 생성·성장

초소성 재료 중의 하나인 Ti-6Al-4V 합금은 인장변형시 네킹의 성장에 의해 파단이 일어나므로 그 때의 연신율은 식 (1)에 의해 예측된 값과 크게 다르지 않다. 그러나 초소성 Al 합금은 예측값보다 작은 연신율을 나타내는데 이것은 인장변형 시 재료 내부에 발생하는 공동(cavity)에 의한 것이다. 앞에서 지적한 바와 같이 초소성 재료의 유동은 주로 결정립계 미끄럼에 의한 것인데 결정립들이 서로 미끄러지면서 결정립계의 삼중점이나 입계 석출물 주변에는 응력이 발생한다. 만일 재료 내의 물질이동 즉 확산이나,

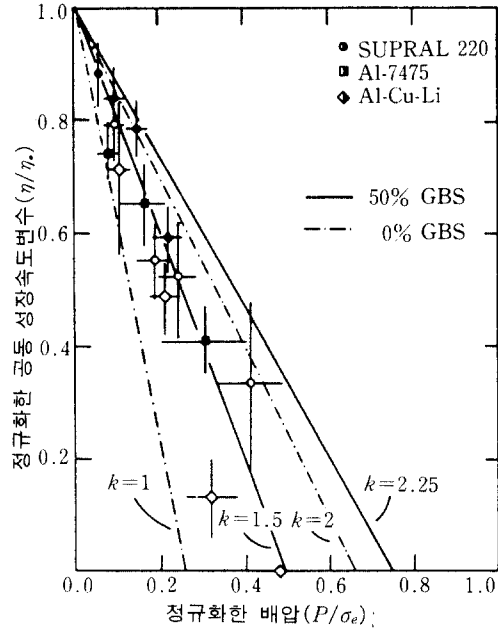


그림 5 배압에 의한 공동 성장속도 변수 η 의 변화 (● : 이축인장, ○ : 일축인장에서 실험값)⁽¹¹⁾

전위들의 활주 등에 의해서 이러한 내부응력이 완화되지 못한다면 이 지점에서 공동이 발생한다. 발생된 공동은 변형이 진행함에 따라 크기가 커지며 이 경우 공동의 부피와 변형률과의 관계는 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$V = V_0 \exp(\eta \epsilon) \tag{7}$$

여기서, V 는 공동의 부피, ϵ 는 변형률을 나타내며, η 는 응력상태에 의존하는 상수로서 식 (8)로 표현된다.

$$\eta = \frac{3}{2} \left[\frac{m+1}{m} \right] \sinh \left[2 \left(\frac{2-m}{2+m} \right) \left[\frac{k-P}{3-\sigma_e} \right] \right] \tag{8}$$

여기서, m 은 변형률속도민감도, σ_e 는 재료의 유동응력, P 는 중첩압력 또는 배압(back pressure)이다. 또한 k 는 응력상태 및 결정립계 미끄럼 정도에 따라 결정되는 상수이며 일축인장시 k 는 1~2, 평면변형시 1.73~

2.31, 이축인장시 2~2.5의 값을 갖는다. 특히 초소성 변형에 기여하는 결정립계 미끄럼은 전체 변형의 50% 정도인데 이 때의 k 값은 일축인장에서 1.5, 이축인장에서 2.25이다.

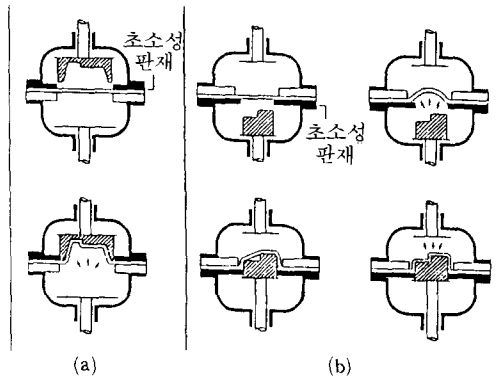
그림 5는 배압을 가하는 경우 식 (8)에 의한 η 의 계산값과 실험값을 비교한 것⁽¹¹⁾이다. 배압이 커질수록 공동부피의 증가 즉, 공동의 성장이 억제됨을 알 수 있다. 또한 공동의 성장이 심한 이축인장($k=2.25$)의 경우에도 재료의 유동응력의 3/4 정도의 배압을 가하면 공동의 성장을 억제할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 최대 주응력이 양의 값을 갖는 한 공동의 생성·성장을 완전히 없앨 수는 없으며 이는 초소성 변형과정의 물리적 기구(mechanism)에 기인한다.⁽¹¹⁾ 이와는 별도로 재료에 전기장을 가해 물질이동을 촉진시킴으로써 공동의 생성·성장이 억제되었다는 연구도 있다.⁽¹²⁾

3. 초소성 성형

초소성 성형은 초소성 재료의 변형특성을 이용하는 성형법으로서 압축을 이용하는 성형공정인 압연, 단조, 압출 등과 인장을 이용하는 박판성형, 인발 등으로 구분할 수 있으나 여기에서는 가장 널리 쓰이고 있는 박판성형 공정인 블로우 성형(blow forming)과 확산접합(diffusion bonding)에 대하여 소개하고자 한다.

3.1 블로우 성형

초소성 재료의 유동응력은 매우 낮기 때문에 기체의 압력으로도 성형이 가능하다. 기체압을 사용하는 성형법 중 가장 간단한 것이 Female Forming이며 이 방법에서는 그림 6의 (a)처럼 금형의 내부로 판재를 부풀린다. 이 때 금형의 구석 부근에서 가장 심한 두께 감소가 일어나며 이 편차는 금형측면과 바닥 사이의 구석반경이 작을수록, 금



(a) Female forming (b) Male forming

그림 6 기본적인 초소성 성형 공정⁽¹³⁾

형의 바닥 크기에 비해 깊이가 깊을수록 커진다. 따라서 이 성형법은 구석반경이 비교적 크고 깊이가 깊지 않은 제품의 성형에 적합하며 두께편차를 줄이기 위한 다른 성형법으로는 Reverse Billowing법과 Drape Forming법이 있다.⁽¹⁾

이와는 달리 Male Forming은 그림 6의 (b)처럼 판재를 공구의 외부 형상으로 성형하는 방법이다. 먼저 판재를 적당한 크기로 부풀린 후 공구를 판재 공간 내부로 이동시킨 다음, 반대 방향으로 기체압을 가하여 판재를 공구 외형에 밀착시킨다. 이 때 판재를 부풀린 크기가 공구의 표면적에 알맞도록 하는 것이 중요한데 만약 너무 크게 부풀리면 최종 제품의 표면에 주름이 생기며, 반대로 너무 작으면 양호한 두께 분포를 얻기 힘들다.

3.2 확산접합

초소성 성형의 효용은 확산접합과 성형을 동시에 수행함으로써 더욱 커진다. 원래 확산접합은 별개의 분야이나 초소성 성형과 확산접합 공정이 요구하는 온도, 분위기, 재료의 미세조직이 유사하기 때문에 두 공정을 쉽게 결합할 수 있다. 또한 초소성 재료의 유동응력이 낮기 때문에 기체압과 같은 작은

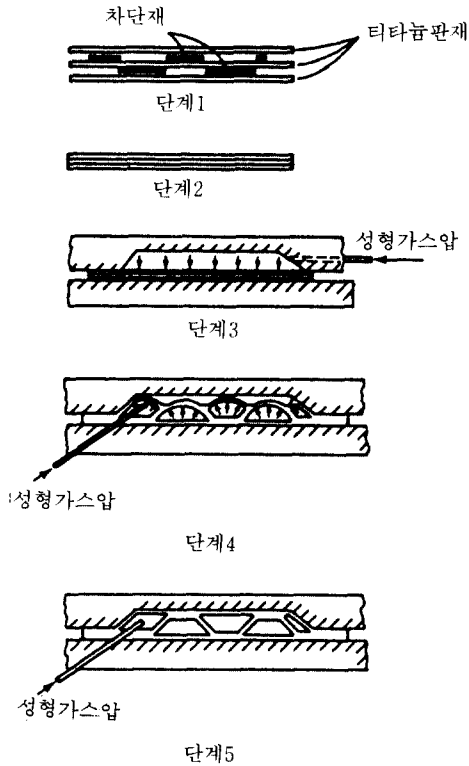


그림 7 초소성 성형과 확산접합을 동시에 이용하여 세 장의 티타늄 합금 판재를 성형하는 과정⁽¹³⁾

압력으로도 양호한 접합이 이루어진다.

그림 7은 티타늄 합금 판재의 초소성 성형·확산접합 공정을 나타낸 것이다.⁽¹³⁾ 먼저 접합을 원치 않는 부분에 차단재 (stop-off) 를 바르고 초소성 온도로 가열한 후 나머지 부분을 확산접합시킨다. 그리고 기체압으로 가장 바깥쪽 소재를 금형 내부로 밀착시켜 성형을 완료하게 된다. 이러한 확산접합 공정은 티타늄 합금에서는 쉽게 이루어지나 알루미늄 합금에서는 재료 표면의 견고하고 안정한 산화막 때문에 접합이 잘 이루어지지 않는다. 따라서 알루미늄 합금의 경우 두 판재 사이에 다른 재료를 삽입하거나 표면에 은등을 코팅하여 확산접합을 쉽게 하려는 시도가 행해지고 있다.^(14,15)

3.3 초소성 성형공정의 모델링

초소성 성형에서는 성형공정 동안 초소성 재료가 갖고 있는 최적 변형률속도를 유지시켜 주는 것이 중요하며 이를 위하여 매 공정마다 최적의 압력-시간 선도를 구해야 한다. 압력-시간 선도를 구하기 위해서는 성형공정을 해석적, 수치적으로 모사해야 하며 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^(16~23)

초소성 성형공정의 모델링에서는 성형 중 가장 빠른 변형률속도를 최적 변형률속도의 값으로 제어하는 것이 일반적이다. 여러 해석적 방법이 초소성 성형공정의 해석에 이용되었으나^(16~18) 이들은 해석시 사용된 가정이나 해법 상의 제약 때문에 단순한 형상의 성형공정 해석에만 적용될 수 있다. 최근에는 복잡한 형상의 해석이 가능하고 변형 중의 재료의 거동이나 마찰의 영향을 고려할 수 있는 유한요소법^(19,20)이 점차 널리 쓰이고 있으며 이 때 통상의 판재성형 유한요소 코드와는 달리 변형률속도 제어를 위한 부분이 첨가된다.

변형률속도의 제어를 위해서 성형압력을 제어하는 기법이 쓰이고 있으며 이에 유한요소 해법과정에 성형압력을 부가적 변수로 첨가하는 방법⁽²¹⁾과 매 계산 단계마다 성형압력을 예측-보정하는 방법,⁽²²⁾ 두 가지가 있다.

먼저 성형압력을 부가적 변수로 첨가하는 방법에서는 초소성 성형 유한요소 방정식인 식 (9), 외에 변형률속도 구속 조건식인 식 (10)을 연립하여 해를 구한다.

$$T(v, x) = P(t) F(x, t) \quad (9)$$

$$L(v, x) = \dot{\epsilon}_0 \quad (10)$$

한편 성형압력 예측-보정법에서는 매 시간 단계에서 예측된 압력을 이용하여 계산한 변형률속도를 최적 변형률속도와 비교하여 그 값이 오차 범위를 벗어날 때 성형 압력을 보정한다. 시간 t 에서 보정된 성형압력은 다음 식들로부터 ⁽ⁱ⁾ $\dot{\epsilon}^t$ 가 $\dot{\epsilon}_{opt}$ 의 오차 범위 내에

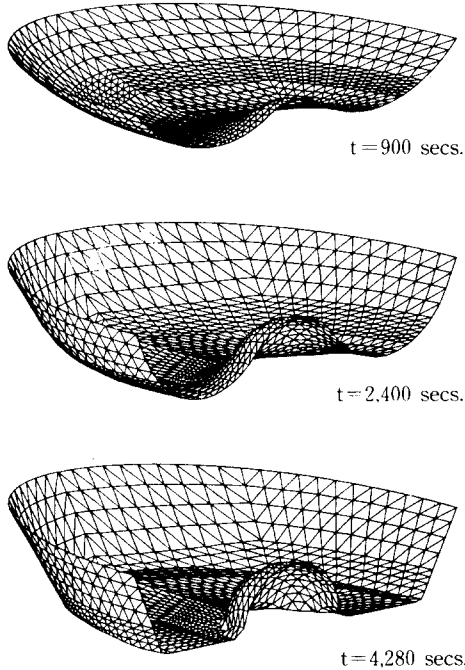


그림 8 유한요소법에 의한 초소성 성형과정의 모델링 예⁽²⁰⁾

이를 때까지 반복 계산하여 얻어진다.

$$P' = \left[\frac{\dot{\epsilon}_{opt}}{(i) \dot{\epsilon}^t} \right]^{m(i)} P^t \quad (11)$$

$${}^{(i+1)}P^t = \theta P' + (1 - \theta) {}^{(i)}P^t \quad (12)$$

여기서, 왼쪽 상첨자 $i, (i+1)$ 은 압력보정 반복계산 횟수이고 오른쪽 상첨자 t 는 시간이며, θ 는 가중값이다. 이상과 같은 해석법 외에도 유한요소법과 막이론에 의한 해석적 방법을 절충한 막요소 해석법⁽²³⁾이 있다. 그림 8은 초소성 성형공정을 유한요소 해석한 예다.⁽²⁰⁾

한편 앞에서 지적한 것과 같이 초소성 재료는 변형 중에 미세구조의 변화를 동반한다. 이러한 변화는 재료의 변형특성에 영향을 끼치며 초소성 성형공정의 해석시 이를 고려한 경우도 있다.^(19,20,24) 이런 경우 미세구조의 변화가 재료의 변형특성에 미치는 영향을 실험적으로 정량화하는 것이 필수적이다.

4. 맺음말

이상에서 초소성과 초소성 성형에 관한 몇 가지 사항을 간략히 다루었다. 더욱 자세한 내용은 참고문헌에서 도움을 얻기 바라며 이해설을 계기로 국내 초소성 성형 연구가 더욱 활발히 이루어지길 바란다.

참고문헌

- (1) Pilling, J. and Ridley, N., 1989, Superplasticity in Crystalline Solids, The Inst. of Metals.
- (2) Wadsworth, J., Nieh, T. G. and Sherby, O. D., 1991, "Future Directions for Superplasticity," Superplasticity in Advanced Materials (S.Hori, M. Tokizane and N. Furushiro, eds.), The Japan Soc. for Research on Superplasticity, pp. 13~22.
- (3) Ghosh, A. K. and Hamilton, C. H., 1982, "Influences of Materials Parameters and Microstructure on Superplastic Forming," Metall. Trans., Vol. 13A, pp. 733~743.
- (4) Ghosh, A. K. and Ayres, R. A., 1976, "On Reported Anomalies in Relating Strain-Rate Sensitivity to Ductility," Metall. Trans., Vol. 7A, pp. 1589~1591.
- (5) Liu, C., 1986, "Dependence of Total Elongations of Superplastic Materials on m ," Metall. Trans., Vol. 17A, pp. 685~690.
- (6) Al-Naib, T. Y. M. and Duncan, J. L., 1970, "Superplastic Metal Forming," Int. J. Mech. Sci., Vol. 12, pp. 463~477.
- (7) 정성규, 최준환, 이동녕, 이혁모, 홍순형, 홍성석, 이종수, 1991, "초소성 7475 Al 합금판의 부풀림 성형," 대한금속학회지, 제29권, pp. 379~388.
- (8) Padmanabhan, K. A. and Davies, G. J., 1980, Superplasticity, Springer, Berlin.

- (9) Arieli, A. and Mukherjee, A. K., 1982, "The Rate Controlling Deformation Mechanisms in Superplasticity-A Critical Assessment," *Metall. Trans.*, Vol. 13A, pp. 717~732.
- (10) Perevezentsev, V. N., Rybin, V. V. and Chuvildeev, V. N., 1992, "The Theory of Structural Superplasticity-I. The Physical Nature of the Superplasticity Phenomenon," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 40, pp. 887~894.
- (11) Pilling, J. and Ridley, N., 1986, "Effect of Hydrostatic Pressure on Cavitation in Superplastic Aluminum Alloys," *Acta Metall.*, Vol. 34, pp. 669~679.
- (12) Conrad, H., Cao, W. D., Lu, X. P. and Sprecher, A. F., 1991, "Effect of Electric Field on Cavitation in Superplastic Aluminum Alloy 7475," *Mater. Sci. Engng.*, Vol. A138, pp. 247~258.
- (13) Hamilton, C. H. and Ghosh, A. K., 1988, "Superplastic Sheet Forming," *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 14, pp. 852~868.
- (14) Maehara, Y., Komizo, Y. and Langdon, T. G., 1988, "Principles of Superplastic Diffusion Bonding," *Mater. Sci. Technol.*, Vol. 4, pp. 669~674.
- (15) Partridge, P. G., 1989, "Diffusion Bonding of Metals," AGARD-LS-168, pp. 5.1~5.29.
- (16) Jovane, F., 1968, "An Approximate Analysis of the Superplastic Forming of a Thin Circular Diaphragm: Theory and Experiments," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 10, pp. 403~427.
- (17) Ragab, A. R., 1983, "Thermoforming of Superplastic Sheet in Shaped Dies," *Metals Technology*, Vol. 13, pp. 340~348.
- (18) Song, Y. and Zhao, J., 1986, "A Mechanical Analysis of the Superplastic Free Bulging of Metal Sheet," *Mater. Sci. Engng.*, Vol. 84, pp. 111~125.
- (19) Chandra, N., 1988, "Analysis of Superplastic Metal Forming by a Finite Element Method," *Int. J. Num. Method Engng.*, Vol. 26, pp. 1925~1944.
- (20) Bonet, J., Wood, R. D. and Zienkiewicz, O.C., 1988, "Finite Element Modelling of the Superplastic Forming of Thin Sheet," *Superplasticity and Superplastic Forming* (C. H. Hamilton and N. E. Paton, eds.), TMS, pp. 291~295.
- (21) Bonet, J., Wargadipura, A. H. S. and Wood, R. D., 1989, "A Pressure Cycle Control Algorithm for Superplastic Forming," *Comm. Appl. Numer. Method*, Vol. 5, pp. 121~128.
- (22) Rama, S. C. and Chandra, N., 1991, "Development of a Pressure Prediction Method for Superplastic Forming Processes," *Int. J. Non-Linear Mechanics*, Vol. 26, pp. 711~725.
- (23) Chandra, N. and Roy, B., 1988, "Membrane Element Analysis of Axisymmetric and Non-Axisymmetric Superplastic Metal Forming Processes," *Superplasticity and Superplastic Forming* (C. H. Hamilton and N. E. Paton, eds.), TMS, pp. 283~289.
- (24) Zhou, D. J. and Lian, J., 1987, "Numerical Analysis of Superplastic Bulging for Cavity Sensitive Materials," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 29, pp. 565~576.