

가공경화를 고려한 알루미늄 합금의 초소성성형공정해석  
**(Modeling of Superplastic Forming Process for Aluminum Alloys  
with Strain Hardening Effect)**

권용남, 장영원  
항공재료연구센터(CAAM)  
포항공과대학교(POSTECH)

ABSTRACT

Superplastic forming of thin sheet into complex shape is an important manufacturing process especially in aerospace industry. The main interest in modeling the superplastic forming process is to predict the forming pressure cycle to maintain optimum strain rate and the resulting thickness distribution. Many researchers have attempted to model superplastic forming using the various techniques including finite element method. But in most of their researches have disregarded the strain hardening effect which occurs in several superplastic materials. In this study ABAQUS finite element code was used for prediction of process variables for axisymmetric cup forming of Supral 100 and 7075Al alloys considering strain hardening. The performance of numerical results were compared with the experimental results.

Key Word: Superplastic Forming, Finite Element Analysis, Strain Hardening,  
Supral 100, 7075Al

1. 서론

초소성 성형공정(superplastic forming process)은 복잡한 부품을 단공정으로 생산할 수 있는 장점을 가진 제조공정으로 항공기산업 및 자동차산업에 많이 응용되고 있다. 초소성성형공정중 대표적인 것은 부풀림성형법으로 기존의 생산방법에 비해 장비의 간소화 및 후속공정의 단순화로 제조원가를 많이 낮출 수 있다. 또한 복잡한 부품을 일체형으로 제조함으로써 부품의 경량화와 부품사용시 수리비의 절감을 기대할 수 있다. [1,2]

일반적으로 초소성은 비교적 제한적인 변형율속도범위와 온도범위에서 일어난다. 따라서 초소성성형공정시 최적의 변형율속도를 유지해 주기 위한 압력주기 (pressure-time cycle)의 설계가 필수적으로 요구된다. 초소성으로 제조된 부품은 위치에 따라 심한 두께의 변화를 나타낸다. 따라서 초소성공정을 이용한 부품설계시에는 각 부분의 두께분포를 미리 예측하여 설계에 고려할 필요가 있다. 현재까지 많

은 연구자들은 유한요소법등의 여러방법을 통해 위의 문제들을 연구중이다. [3,4,5]

본 연구에서는 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 Supral 100 합금과 7075Al 합금의 초소성성형공정을 연구하였다. 두 알루미늄합금의 초소성특성을 평가하기 위하여 여러조건에서 응력이완시험과 인장시험을 실시하였다. 시험결과 7075Al 합금은 변형이 진행됨에 따라 가공경화가 발생함을 관찰할 수 있었다. 현재까지 보고된 초소성성형공정의 유한요소해석연구에서는 초소성 특성을 표현해 주는 구성방정식으로  $\sigma = K\epsilon^n$  과 같은 비교적 간단한 형태의 식이 사용하고 있다. 하지만 이러한 구성방정식에 의해서는 변형의 진행에 따라 발생하는 가공경화현상을 표현해 줄 수가 없으므로 변형량이 큰 초소성 공정의 해석시 많은 오차의 원인이 될 수 있다. 본 연구에서는 변형이 진행됨에 따라 발생하는 가공경화를 고려한 해석을 실시하여 이 결과를 실제 성형시험과 비교고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 미세조직

Supral 100 합금은 Alcan사에서 2.6mm의 두께를 가지는 판재로 구입하였으며 표 1은 합금의 화학조성을 나타내고 있다. Supral 100 합금의 미세한 결정립은 동적재결정(dynamic recrystallization)에 의해 얻어진다. 즉 변형의 진행됨에 따라 열간가공을 받은 조직이 재결정을 통해 미세한 결정립을 가져 초소성에 적합하게 변화한다. 그림 1은  $1 \times 10^{-2}$ 의 변형율속도에서 200%변형한 후 시편 게이지(gage)부와 그립(grip)부의 미세조직을 보여준다. 게이지부는 균일하게 미세화된 조직을 보이나 이에 비해 그립부는 상대적으로 불균일한 결정립크기와 완전히 재결정되지 못한 조직을 보여주고 있다.

7075Al 합금의 결정립미세화를 위한 가공열처리(thermomechanical treatment)는 그림 2와 같은 이중재결정처리(double recrystallization)를 통해서 이루어져 있다. 7075Al의 재결정은 Supral 100 합금과는 다른 정적재결정(static recrystallization)을 통해 이루어진다. 그림 3은 490°C에서 재결정처리한 뒤의 미세조직을 보여준다.

### 기계적시험

초소성 특성을 평가하기 위해 응력이완시험과 인장시험을 실시하였다. 응력이완 시험은 시험중 변형량이 매우 작아 시험도중 일정한 상태에서 미세구조의 변화가 거의 없다.[6] 이러한 장점을 이용하여 변형량을 증가시키면서 초소성변형특성의 특성을 조사하였다.

Table 1. The chemical composition of Supral 100

Cu	Zr	Fe	Si	Al
5.86	0.42	0.12	0.065	bal.

Table 2. The chemical composition of 7075Al

Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe	Si	Al
5.52	2.47	1.56	0.042	0.30	1.91	0.047	bal.

### 초소성성형의 유한요소해석

본 연구에서는 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS version 5.4 를 이용하여 컵모양의 다이에 대한 성형을 해석하였다. 성형시 사용된 다이모양은 컵모양이므로 축대칭문제에 해당한다. 성형다이는 ABAQUS 에서 제공된 rigid surface definition 을 이용하였으며 초소성판재는 CAX4R 요소 216 개로 표현하였다. CAX4R 요소는 4-node bilinear, reduced integration, hour glass control element 의 특징을 가진다.[7]

초소성변형특성을 표현해주는 구성방정식은  $\sigma = K\dot{\epsilon}^m(\epsilon + \epsilon_0)^n$  을 이용하여 소성변형의 축적에 따른 영향을 고려하였다. 위의 구성방정식은 user subroutine 을 이용하여 입력한 후 사용하였다.

초소성성형공정중 최적 변형율속도의 유지는 \*CRREP STRAIN RATE CONTROL 를 이용하였으며 이를 통해 압력과 시간과의 관계를 얻을 수 있었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 응력이완시험

그림 4 는 450°C 에서 실시한 Supral 100 합금의 응력이완시험결과이다. 변형율 (strain)이 0.06 일 때의 유동곡선에 비해 변형율이 0.32 로 증가하였을 때 응력값이 많이 증가함을 알 수 있다. 하지만 변형량이 0.66, 0.99 로 증가했을 때 더 이상의 응력의 증가는 없었다. 이로부터 일정정도의 변형이 진행된 후에는 더 이상의 가공경화(strain hardening)가 일어나지 않음을 알 수 있다. 표 3 은 구성방정식  $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$  에서 정의된 재료상수 K, m 을  $10^{-4}$  이상의 변형율속도구간에서 curve fitting 하여 구한 결과이다. 변형율속도 민감계수(strain rate sensitivity) m 은 변형이 일정정도 진행된 후로는 0.35 정도의 비교적 작은 값을 가지고 있다.

그림 5 는 7075Al 합금을 515 °C 에서 응력이완시험을 실시하여 얻은 변형률 증가에 따른 유동곡선(flow curve)이다. Supral 100 합금과는 달리 변형량이 증가함에 따

라 가공경화의 경향이 뚜렷이 관찰된다. 가공경화의 원인은 변형 및 시간에 따른 결정립의 성장에 따른 것으로 판단된다. 표 4는 Supral 100 합금과 같이 구성방정식  $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$  에 의해 재료상수를 구한 결과이다.

변형에 따라 가공경화가 진행되는 경우  $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$  와 같은 구성방정식을 통해서 정확한 재료의 유동성질은 나타낼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 변형량 축적에 의한 가공경화를 고려한  $\sigma = K\dot{\epsilon}^m(\epsilon + \epsilon_0)^n$  과 같은 구성방정식을 사용하였다. 이 구성방정식에 정의된 재료상수인 변형율속도민감계수  $m$  과 가공경화지수  $n$  등은 각각 변형율속도와 변형율의 함수로써 이 관계를 정확하게 구하기 위해서는 많은 양의 실험이 필요하다. 하지만 변형율민감계수는 그림 4와 5에서 알 수 있듯이 변형율의 증가에 따라 큰 차이를 보이지 않아 일정한 상수값으로 표현할 수 있다. 또한 가공경화지수  $n$  은 변형율속도에 따른 영향이 크지 않다고 가정하여 일정 상수로 고정시켰다. 따라서 실제 성형할 특정 변형율속도에서 변형의 축적에 따른 가공경화정도를 측정하였다. 실제 성형시 돔(dome)의 위치에 따라 변형율속도 및 변형양이 달라지므로 위와 같은 구성방정식에 의해 초소성특성을 정확하게 표현하는데는 일정한 한계가 있다. 이러한 방법으로 구한 구성방정식의 재료상수값은 표 5에 나타나 있다.

Table 3. The material parameters determined from load relaxation test results of Supral 100 alloy at 450°C

	log K	m
$\epsilon = 0.06$	1.935	0.264
$\epsilon = 0.32$	2.400	0.334
$\epsilon = 0.66$	2.511	0.353
$\epsilon = 0.99$	2.526	0.354

Table 4. The material parameters determined from load relaxation test results of 7075Al alloy at 515°C using  $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$

	log K	m
$\epsilon = 0.01$	1.210	0.320
$\epsilon = 0.43$	1.474	0.317
$\epsilon = 0.72$	1.617	0.306
$\epsilon = 0.94$	1.698	0.294
$\epsilon = 1.12$	1.752	0.296

Table 5. The material parameters determined from load relaxation test results of 7075Al alloy at 515°C using  $\sigma = K\dot{\epsilon}^m(\epsilon + \epsilon_0)^n$

K	m	n	$\epsilon_0$
10.93	.0310	2.112	1.169

### 인장시험

그림 6 과 7 은 각각 Supral 100 과 7075Al 합금의 변형율속도에 따른 인장곡선 및 변형시편을 보여주고 있다. 응력이완시험결과에서 예측되듯이 7075Al 합금은 Supral 100 합금에 비해 매우 높은 가공경화를 보임을 확인할 수 있다.

### 성형공정해석

그림 8 은 Supral 100 합금을 변형율속도를  $\dot{\epsilon}=0.003/\text{sec}$  로 성형하기 위한 압력-시간의 관계이다. 이러한 압력주기(pressure cycle)에 따라 성형되는 돔(dome)의 시간에 따른 모양 변화는 그림 9 와 같이 해석되었다. 변형이 진행됨에 따라 돔의 모양은 반구형상(semi-spherical shape)에서 벗어나고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 0.35 정도의 낮은 변형율속도민감계수(strain rate sensitivity)에 원인이 있다. 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 그림 8 에 주어진 압력주기에 의해 부풀림성형을 실시한 결과가 그림 10 에 나타나 있다. 유한요소해석에서 예측되었듯이 실제 성형시 돔의 모양은 시간에 따라 점점 반원형상에서 벗어나 뾰족한 형태의 돔으로 변형이 진행됨을 확인할 수 있었다. 초소성변형시 낮은 변형율속도민감계수를 가지는 재료는 높은 값을 가지는 재료에 대해 돔의 높이 방향으로 두께의 변화가 커지게 된다. 따라서 낮은 변형율속도민감계수를 가지는 재료의 경우 돔의 극점(pole)쪽에서 훨씬 빨리 일어나는 두께 감소를 보상하려면 자오선 방향(meridional direction)과 원주 방향(circumferential direction)의 변형율(strain)이 커져야 한다. ( $\epsilon_t + \epsilon_m + \epsilon_c=0$ ) 하지만 원주 방향으로의 변형은 반원형상을 유지할 정도로 크지 않으므로 돔의 모양은 뾰족한 형태로 나타난다.

그림 11 은 7075Al 합금을  $\dot{\epsilon}=0.001/\text{sec}$  의 속도로 성형할 때 필요한 압력 주기로써 가공경화를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 따른 압력 주기의 변화를 보여주고 있다. 그림 12 과 13 는 가공경화를 고려하지 경우와 고려한 경우에 따른 시간에 따른 변형의 양상을 나타낸 것이다. 그림 12 에서 볼 수 있듯이 가공경화를 고려하지 않을 경우 Supral 100 합금과 동일한 경향을 보여 준다. 하지만 가공경화를 고려한 그림 13 의 경우 돔의 모양이 반원형상을 유지하면서 성형이 진행됨을 알 수 있다. 실제 부풀림 성형한 결과는 그림 14 에 나타내고 있는데 해석 결과와 잘 일치하는 경향을 보여 주고 있다. 구성방정식  $\sigma = K\dot{\epsilon}^m(\epsilon + \epsilon_0)^n$  에서 변형응력은 변형

울민감계수  $m$  뿐만 아니라 가공경화지수  $n$ 에 의해서도 영향을 받는다. 7075Al 합금의 변형울민감계수값이 0.3 정도의 낮은 값을 가지더라도 가공경화의 영향으로 인해 돔내의 변형은 보다 균일하게 일어나게 된다. Hart는 일축인장시 변형은 변형울속도민감계수와 가공경화지수의 합이 1보다 큰 조건을 만족하면 안정적으로 진행된다고 설명하였다.[8] 즉 변형량이 큰 위치에서는 가공경화로 인해 응력이 높아지고 이로 인해 변형은 전체돔내로 보다 균일하게 진행되게 된다.

Supral 100 합금과 가공경화현상이 뚜렷한 7075Al 합금의 초소성성형특성을 비교한 결과 두 합금의 최적초소성온도에서 변형울속도민감계수는 각각 0.35와 0.3 정도의 값으로 비교적 낮은 값을 보이나 7075Al 합금의 경우 높은 가공경화경향으로 인해 초소성변형의 안정성이 높아져 Supral 100 합금보다 변형이 균일하게 일어나고 있음을 알 수 있었다. 현재까지 많은 초소성성형공정해석에서 가공경화현상을 고려한 해석은 이루어지고 있지 않다. 하지만 초소성변형시 변형 및 고온에서 장시간 노출에 따른 결정립성장은 많은 연구자들에 의해 보고되고 있으며 이러한 결정립성장에 따른 가공경화를 고려하지 않은 해석은 성형압력주기설계 및 두께 분포의 예측 등 성형공정해석에 큰 오차를 가져올 수 있다.[9,10] 따라서 보다 정확한 공정설계를 위해서는 초소성시 발생하는 결정립성장, 공공(cavity)의 발생과 같은 미세조직의 변화가 재료의 유동(flow)성질에 미치는 영향을 보다 정확하게 정량화한 구성방정식이 필요하다.

#### 4. 결론

1. 변형량의 축적에 따른 초소성특성을 응력이완시험을 통해 조사한 결과 Supral 100 합금은 일정 변형의 진행후 가공경화가 거의 없음을 확인할 수 있었으나 7075Al 합금은 변형 및 시간에 따른 결정립성장에 기인한 가공경화현상이 일어남을 확인하였다. 하지만 각각의 합금에서 변형속도민감계수의 값은 변형량의 축적에 따라 변화가 거의 없이 일정한 값을 가짐을 알 수 있었다.

2. 상용유한요소 프로그램 ABAQUS를 이용한 초소성성형공정의 유한요소해석에서 최적변형울속도를 유지하기 위한 압력주기를 얻었다. 또한 시간에 따른 돔의 모양의 변화는 Supral 100 합금의 경우 반원에서 벗어난 뾰족한 형상으로 7075Al 합금은 반원모양을 유지하면서 성형이 진행되는 것으로 해석되었다. 이러한 해석결과는 계산된 압력주기를 통해 실시한 실제 성형실험결과와 잘 일치하였다.

3. Supral 100 합금과 7075Al 합금의 부풀림성형시 돔 형상의 차이는 가공경화로 인한 변형의 안정성에 영향을 받아 발생한 것으로 생각된다. 따라서 보다 정확한 성형공정설계를 위해서는 재료의 유동특성을 보다 잘 표현해 줄 수 있는 구성방정식의 제안이 필요하다.

## 5. 참고문헌

1. H.E.Friedrich and P.-J.Winkler, 1991, Superplasticity in Advanced Materials, JSRS, 601
2. O.D.Sherby and J. Wadsworth, 1990, Prog.Mater.Sci, 33, 169
3. Z.X.Guo, K.Highasi and N.Ridley, 1990, Metall. Trans., 21A, 2957
4. N.Chandra and S.C.Rama, 1992, Trans.ASME, 114, 452
5. J.Bonet, A.H.S.Wargadipura and R.D.Wood, 1989, Comm.Appl.Numer.Methods, 5, 121
6. 성환진, 김기수, 장영원, 1993 대한금속학회지, 31, 48
7. ABAQUS USER's manuals
8. E.W.Hart, 1967, Acta.Metall., 15, 351
9. D.S.Wilkinson and C.H.Caceres, 1984, Acta Metall., 32, 1335
10. O.N.Senkov and V.A.Likhachev, 1986, Phys.Stat.Sol(A), 98, 441

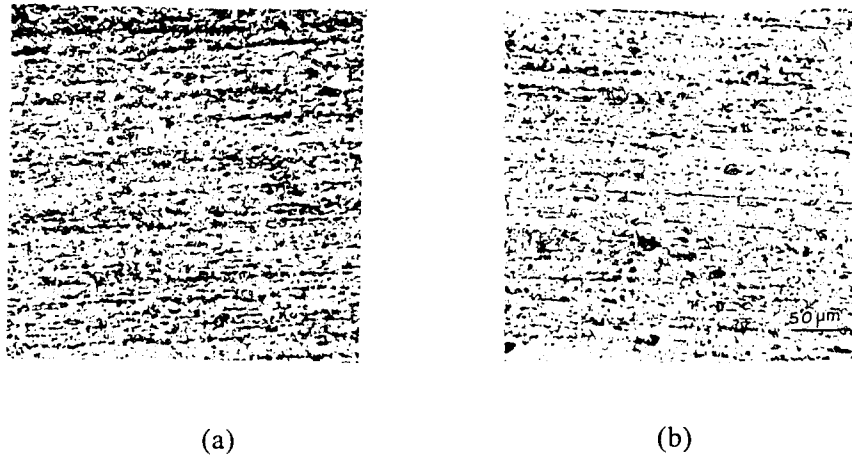


Fig. 1 The microstructure of Supral 100  
 (a) gage section after 200% elongation at  $\epsilon=1 \cdot 10^{-2}$   
 (b) grip section after 200% elongation at  $\epsilon=1 \cdot 10^{-2}$

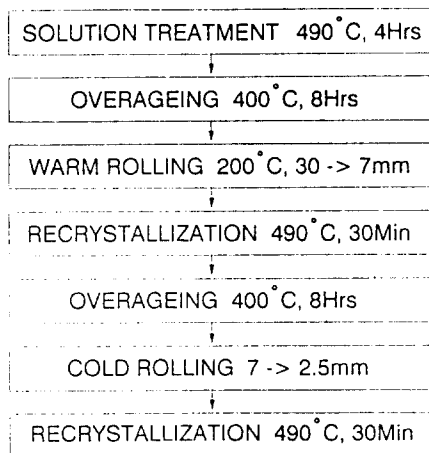


Fig. 2 The procedure of the thermomechanical treatment processes of 7075Al



Fig. 3 The microstructure of 7075Al after recrystallization at 490°C



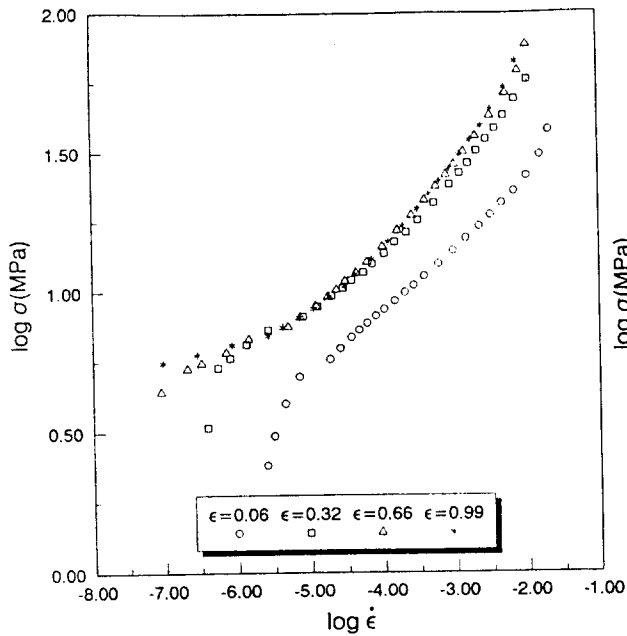


Fig. 4 The flow curves of Supral 100 at 450 °C with increasing strain

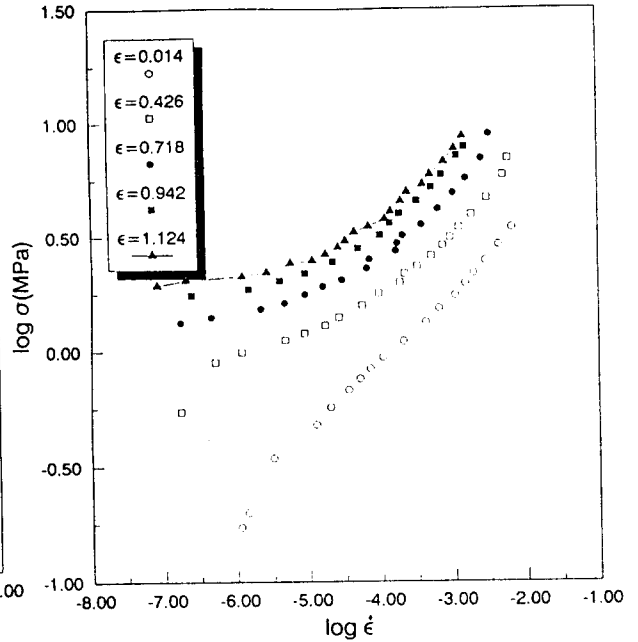


Fig. 5 The flow curves of 7075Al at 515 °C with increasing strain

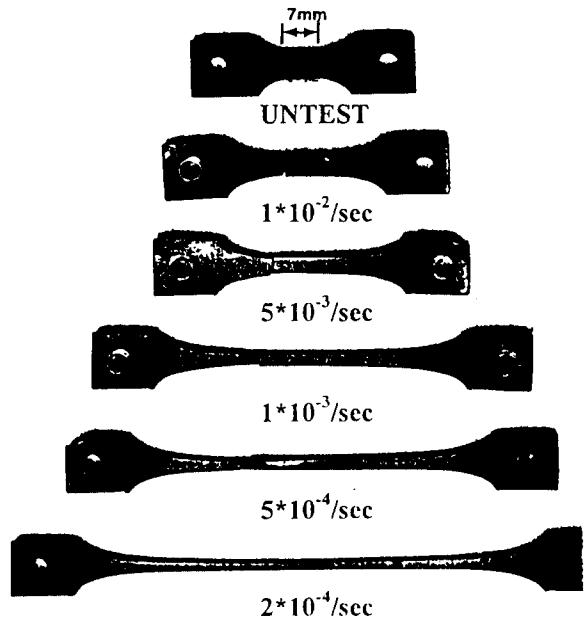
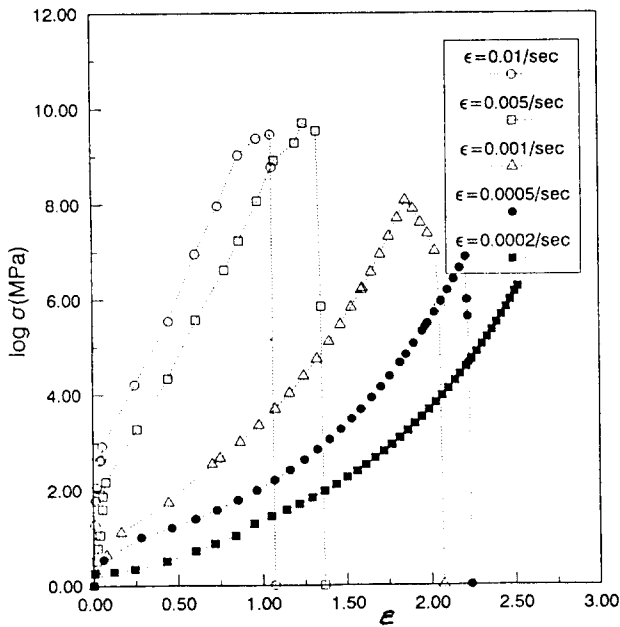


Fig. 6 (a) The stress-strain curves of Supral 100 with the variation of strain rates  
(b) The elongated specimens of Supral 100 with the variation of strain rates

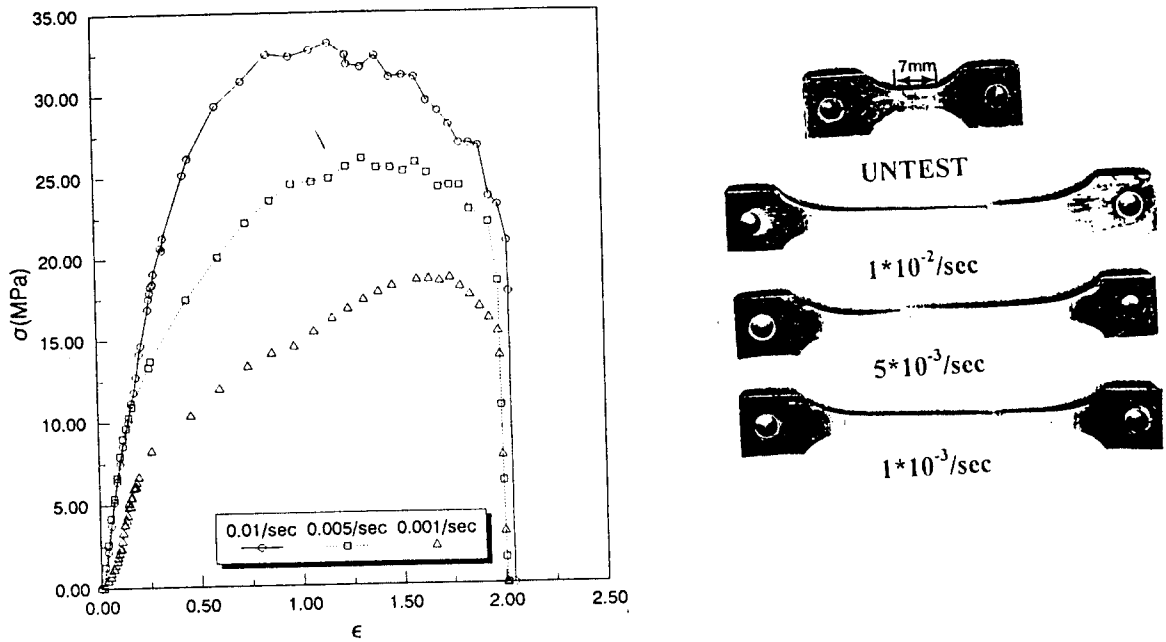


Fig. 7 (a) The stress-strain curves of 7075Al with the variation of strain rates  
 (b) The elongated specimens of 7075Al with the variation of strain rates

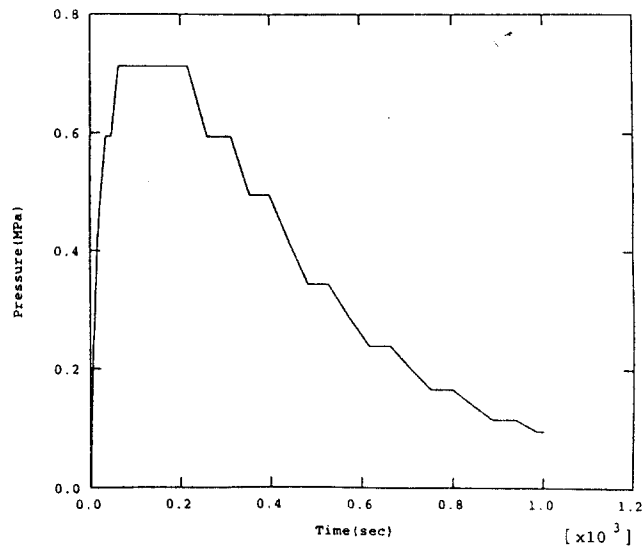


Fig. 8 The pressure-time relationship obtained from finite element analysis  
 (Supral 100,  $\dot{\epsilon} = 0.003/\text{sec}$ ,  $450^\circ\text{C}$ )

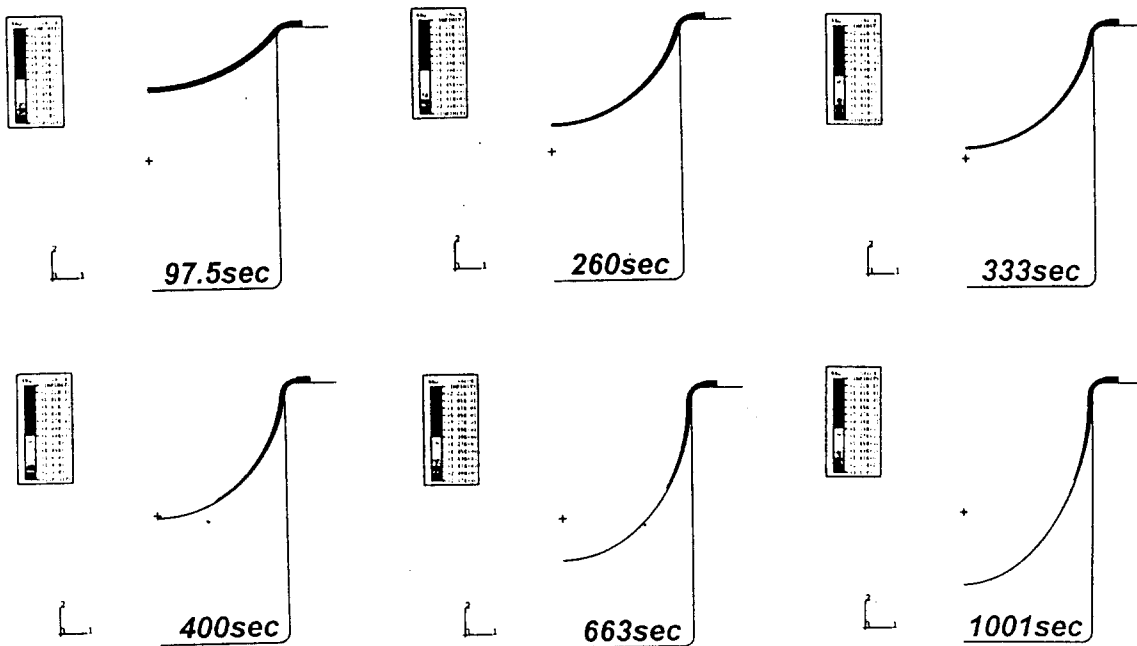


Fig. 9 The change of superplastically formed dome shape of Supral 100 with time

SUPRAL  $\dot{\epsilon} = 0.003/\text{sec}$

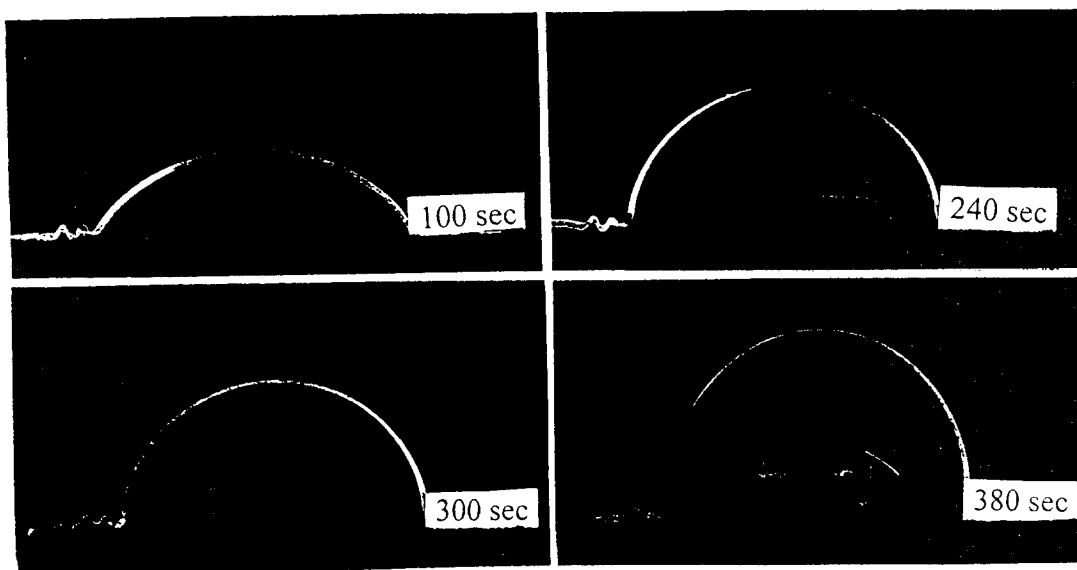


Fig. 10 The dome shapes of Supral 100 with time

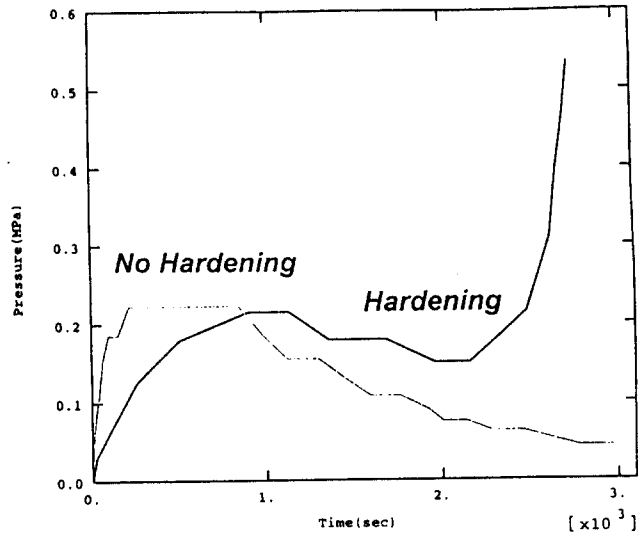


Fig. 11 The pressure-time relationship obtained from finite element analysis (7075Al,  $\dot{\epsilon} = 0.001/\text{sec}$ , 515°C)

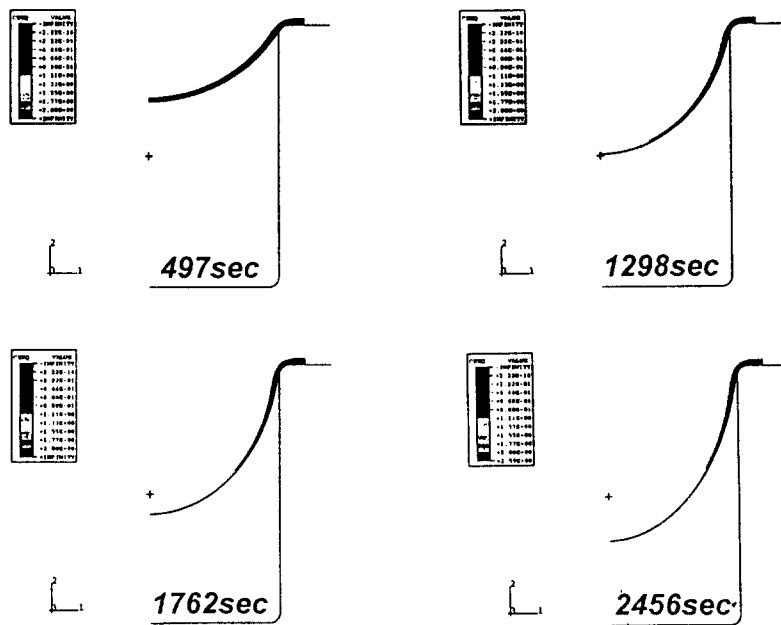


Fig. 12 The change of dome shape of 7075Al with time when considering strain hardening effect

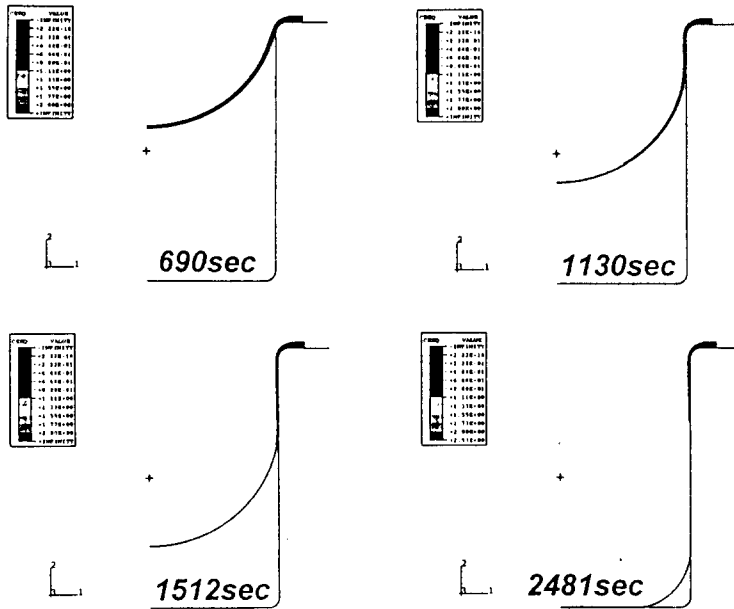


Fig. 13 The change of dome shape of 7075Al with time considering strain hardening effect

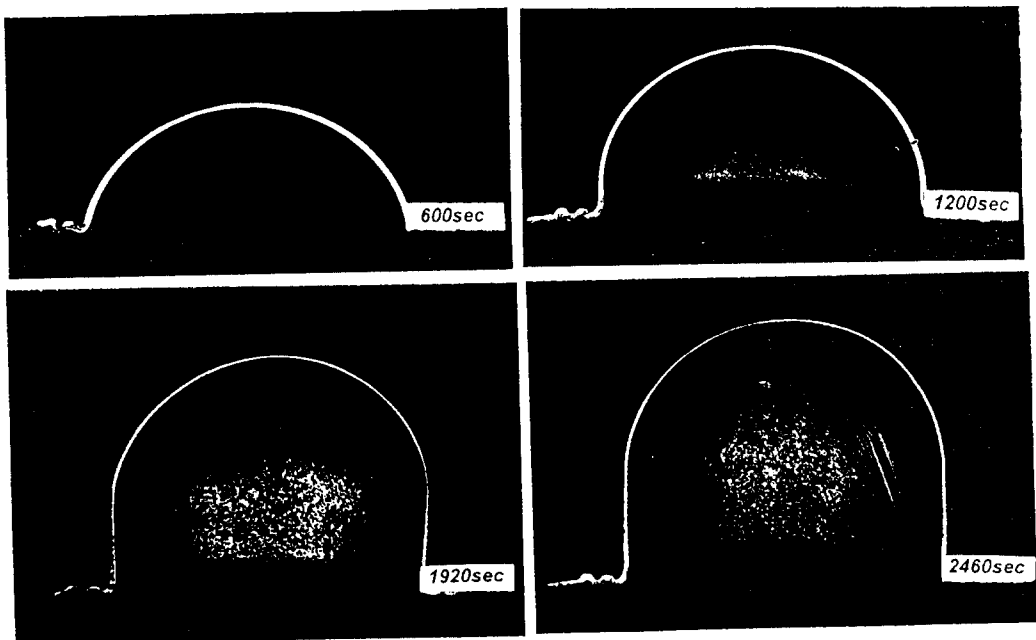


Fig. 14 The dome shapes of 7075Al with time