

변형률속도와 온도에 따른 SPF8090 Al-Li 초소성 재료의 물성 특성

이기석* · 허 훈*

(1997년 6월 23일 접수)

Characterization of superplastic material SPF8090 Al-Li with the variation of the strain rate and the temperature

Ki-seok Lee and Hoon Huh

Abstract

A superplastic material, aluminum-lithium alloy 8090, was examined with uniaxial tensile tests to investigate its thermomechanical behavior. The tests were carried out at the strain rate ranging from 2×10^{-1} to 1×10^{-2} and at the temperature from 480°C to 540°C. The experiments produced force-displacement curves which were converted to stress-strain curves. From the curves, the optimum conditions of superplastic forming were obtained by determining the strain rate sensitivity, the optimum strain rate, and the strength coefficient for various forming temperatures.

Key Words : Superplastic Materials, SPF 8090 Al-Li, Strain Rate Sensitivity, Optimum Strain Rate

1. 서 론

1.1 개요

미세 결정립 구조의 초소성 재료는 특정 조건의 온도와 변형률속도에서 낮은 유동 응력하에 국소 변형이 없는 큰 연신율을 보이는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상은 1934년 Pearson⁽¹⁾에 의해 Bi-Sn의 1950%에 이르는 이상 연신율이 보고된 이래로 많은 연구가 행하여 졌으며 최근 들어서는 학문적인 관심만이 아니라 유용한 공업적 생산 기술의 하나로 발전되고 있다. 이미 부가가치가 높은 항공기 구조용 부품에서 Al합금과 Ti합금 계열의 재료가 초소성 성형을 통해 사용되고 있다.

초소성 성형은 기존의 박판 금속성형에서의 다단계 성

형이나 여러 부품이 필요한 복잡한 형상의 성형이 단일 공정으로 가능하며 성형 시에 유동 응력이 낮기 때문에 저렴한 성형 금형 및 기계를 사용할 수 있다. 또한 최종 형상에 가깝게 성형할 수 있어 후 가공을 줄일 수 있고 재료의 절감 효과도 증대시킬 수 있다. 반면에 초소성 성형은 소재의 미세 결정립 구조 특성으로 인해 소재의 제조 공정이 어렵고, 소재 원가가 높으며, 열간에서의 긴 성형 시간 등의 단점이 있어 고가 부품의 소량 생산에서 경제성을 갖는다.

초소성 재료에서 재료의 초소성 특성이 매우 좁은 영역의 변형률속도 구간에서 존재하기 때문에 공정간에 변형률속도를 최적 변형률속도로 유지하여야 재료의 성공적인 초소성 성형을 할 수 있으며 최단의 성형 시간을 갖게 된

* 한국과학기술원 기계공학과

다. 따라서, 재료의 초소성 성형에서는 공정간에 변형률속도를 최적 변형률속도로 유지할 수 있는 압력-시간 선도 같은 공정 변수들의 산출이 선행되어야 하며 이와 함께 최종 형상에 대한 여러 가지 정보를 계산하는 것은 초소성 성형 공정 설계에 필수적이다.

Mukherjee^(2,3) 등은 초소성 재료의 변형 거동을 GBS (Grain Boundary sliding)에 대한 기하학적 모델로 설명하였고 여러 가지 기존의 변형 이론에 따른 역학적 물성치 간의 관계를 설명하였다. Ghosh와 Hamilton⁽⁴⁾은 Ti-6Al-4V재료와 Al 7475재료에 대하여 대수 좌표계에서의 응력과 변형률속도의 관계를 4차 다항식으로 제안하였으며, 결정립 성장에 관한 변형률속도 민감계수의 변화를 Ashby-Verrall모델로 설명하였다. Liu^(5,6,7) 등은 Al-Li-Cu-Mg-Zr재료의 2단계 변형률속도 변화에서의 물성치와 미소 구조변화, 기공 특성을 실험하였으며 Bradley와 Emigh⁽⁸⁾는 일정한 인장 속도에서의 Al-2.4Mg-1.8Li-0.5Sc합금에 대한 물성치를 실험하였다. Han과 Chan⁽⁹⁾은 SiCp reinforced 8090 Al 합금의 물성치를 시험을 통해 계산하였다. Argyris와 Doltsinis⁽¹⁰⁾는 유한요소법의 자연수식화를 개발하여 축대칭 문제를 해석하였다. 초소성 재료를 비압축성 조건으로 가정하고 일반적인 지수 형태의 구성 방정식을 사용하였다. Bonet과 Wood^(11,12)는 초소성 재료를 일반적인 지수 형태의 구성 방정식을 사용하여 유한요소법으로 다상자 문제 및 확산접합문제를 해석하였다. Rama와 Chandra⁽¹³⁾는 초소성 재료를 일반적인 지수 형태의 구성 방정식을 사용하여 유한요소법으로 박막 요소를 사용하여 평면 변형 및 축대칭 문제를 해석하였다. Song과 Zhao⁽¹⁴⁾는 초소성 재료를 변형률과 변형률속도의 지수 형태의 구성 방정식을 사용하여 원형 벌징문제를 해석 하였다.

본 논문에서는 초소성 성형공정 해석을 위해 필수적인 최적 성형 조건과 그때의 물성치를 실험을 수행하여 온도, 변형률, 변형률속도 등의 함수로 database화 하였다. 이러한 최적 조건과 재료의 물성치는 초소성 성형공정 해석 및 설계에 있어서 필수적인 요소이다. 이를 토대로 성형공정에서 온도의 변화나 성형의 진행 정도의 변화에 대해 최적의 초소성 성형을 할 수 있는 성형공정변수의 변화를 제시하였다. 즉, 종래의 등온, 등변형률속도의 최적 조건으로부터 가변 온도, 가변 변형률속도에서의 최적 조건을 추적하며 성형할 수 있는 성형공정에서의 기초 자료를 확보 하였다.

2. 인장 시험

2.1 초소성 재료의 구성 방정식

초소성 재료는 비탄성 비압축성 재료로 가정하여 다음과 같은 형태로 구성 방정식을 표현할 수 있다.

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, d) \tag{1}$$

여기서, ϵ 는 변형률, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률속도, d 는 결정립의 크기이다.

식(1)을 대수량의 관계로 표현하면 다음과 같다.

$$\ln \sigma = F(\ln \epsilon, \ln \dot{\epsilon}, \ln d) \tag{2}$$

식(2)를 평형 상태에 대해 Taylor 급수 전개를 하고 고차 항을 무시하면 초소성 재료의 구성 방정식은 식(3)으로 표현된다.

$$\sigma = K_1 \epsilon^n \dot{\epsilon}^m d^p \tag{3}$$

$$n = \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \epsilon)}, m = \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})}, p = \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln d)} \tag{4}$$

여기서, K_1, n, m, p 는 물질상수이다.

초소성 재료는 실험적으로 변형 응력이 변형률속도에 지배적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 변형률과 결정립 크기의 영향을 내연적으로 물질 상수에 포함시키면 식(3)은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \tag{5}$$

K 는 물질상수이며 m 은 변형률속도 민감계수이다.

식(5)는 재료의 한 평형 상태에서부터 재료의 물질상수 K 를 정하고 그를 바탕으로 전 구간의 변형 상태를 물질상수(K)와 변형률속도 민감계수(m)으로 표현한 것으로 재료의 변형에 따른 응력의 변화를 대표 값으로 표현한 식이다. 일반적으로 많은 초소성 성형 해석^(10,13)에서 식(5)를 구성 방정식으로 해석에 사용하고 있다.

Ghosh와 Hamilton⁽⁴⁾은 초소성 재료Ti-6Al-4V합금에 대해 다음과 같은 구성 방정식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 + B_f \\ \ln \sigma_0 &= A_0 + A_1(\ln \dot{\epsilon}) + A_2(\ln \dot{\epsilon})^2 \\ &\quad + A_3(\ln \dot{\epsilon})^3 + A_4(\ln \dot{\epsilon})^4 \end{aligned} \tag{6}$$

식(3)에서 변형률과 결정립 크기의 영향을 무시하고 4차식까지 Taylor급수 전개를 사용하고 변형률에 의한 가공경화 효과를 포함시키면 식(6)을 얻을 수 있다. 식(6)은 재료의 인장 시험에서 보여지는 응력과 변형률속도와 관계를 고차 항까지 근사한 것이다. 이는 초소성 재료의 성질로 잘 알려져 있는 변형률속도에 따른 인장 응력의 변화율을 나타내는 변형률속도 민감계수의 변화를 잘 표현하여 재료의 성형 조건에 따른 변형률속도 민감계수의 영향을 나타낼 수 있다.

2.2 인장 시험에서의 물성치 산출

초소성 재료의 물성치는 일반적으로 인장 시험을 통하여 구하여진다. 많은 경우 크로스 헤드(cross head) 속도가 시험 중에 일정하게 유지되거나 구간별로 일정한 속도를 유지하는 조건에서 인장 시험이 행하여진다.^{14,15)} 일정한 크로스 헤드 속도에서의 시험은 변형률속도가 계속 감소하게 된다. 이에 따라 시험결과를 구간마다의 평균 변형률속도 하의 시험결과로 가정하여 물성치를 계산하므로 오차의 요인이 된다. 이러한 오차 요인을 배제하기 위하여 인장 시험 중에 일정한 변형률속도를 유지할 수 있는 크로스 헤드의 속도 조절이 필요하다.

시간 t 에서의 시편 표점거리와 크로스 헤드의 속도는 식(7), (8)과 같다.

$$L(t + dt) = L(t) + v(t) \times dt \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon} = v(t) / L(t) \quad (8)$$

여기서, L 은 시편의 표점거리이고 v 는 크로스 헤드의 속도이다. 식(7), (8)을 정리하여 시편 표점거리와 크로스 헤드의 속도를 시간에 대한 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$L(t) = L_0 \exp(\dot{\epsilon}t) \quad (9)$$

$$v(t) = L_0 \dot{\epsilon} \exp(\dot{\epsilon}t) \quad (10)$$

식(10)에서 결정된 크로스 헤드 속도에 따라 각각의 온도에서 인장 시험을 실시하여 진응력-진변형률 관계 선도를 구할 수 있다. 이 인장 시험의 결과를 변형률, 변형률속도, 온도에 대하여 정리하여 초소성 재료의 주요 물성치인 변형률속도 민감계수(m)와 재료상수(K)의 관계를 나타낼 수 있다. 각 온도에서 변형률이 각각 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 일때의 각각의 변형률속도에 따른 인장 응력을 대수 좌표계에 도시하여 근사식을 통해 물성치를 구한다. 초소성 재료

의 구성 방정식은 응력과 변형률속도와의 대수적 관계를 나타낸 것으로 대수 좌표계에 도시하여 변형률속도에 따른 인장 응력의 변화를 근사하면 물성치를 구할 수 있다.

일반적으로 초소성 재료는 Fig.1에서 보여지는 것과 같이 특징적인 진응력-진변형률속도 관계를 나타낸다.

물성치를 구하기 위해 적용하는 근사식은 두 가지로 1차와 3차 다항식을 사용한다. 1차 근사식의 이용은 식(5)의 구성 방정식에서의 m, K 값을 구하는 것이다. 식(5)는 한 평형 상태에서부터 재료의 구성 방정식을 전개한 것으로 물질상수 K 값이 하나의 평형 상태를 표현하는 상수라는 가정하에 행하여진다. 만일 K 값이 변한다면 이 때 구해지는 m 값도 더 이상 변형률속도 민감계수의 의미를 갖지 못하게 된다. 따라서, 구성 방정식 식(5)의 물성치 m 과 K 는 진응력-진변형률속도 관계를 1차식으로 근사하여 상수 값으로 구한다.

대수 좌표계에 도시된 진응력 - 진변형률속도 관계를 1차식으로 근사하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\log \sigma = a_0 + a_1 (\log \dot{\epsilon}) \quad (11)$$

식(4)에서 같이 식(11)의 기울기 함수가 변형률속도 민감계수의 함수이므로 식(11)의 1차 미분을 구하면 다음과 같다.

$$m = a_1 \quad (12)$$

$$\log K = a_0 \quad (13)$$

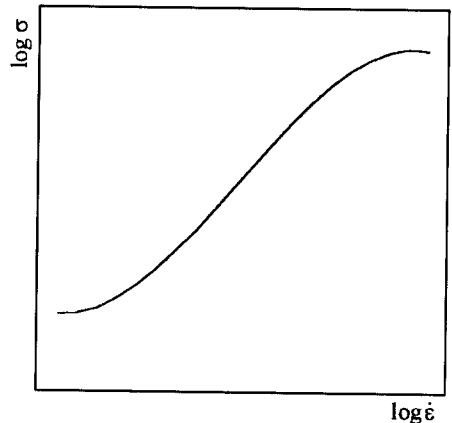


Fig. 1 Schematic curve of logarithmic true stress vs. logarithmic true strain

여기서 구해지는 m, K 는 각각 상수로 초소성 재료의 구성 방정식 식(5)에 사용할 수 있는 값이다.

그러나, 1차 근사에 따른 결과로는 초소성 재료의 중요한 변형 특성인 변형률속도 민감성에 대한 정보를 구할 수 없다. 실제적으로 진응력과 진변형률속도 관계에서의 기울기의 변화는 특정 변형률속도에서 최대값을 갖는다. 초소성 성형에서 진응력값의 진변형률속도에 대한 기울기인 변형률속도 민감계수가 최대값일 때 변형 중인 초소성 재료는 변형이 빨리 일어나는 부유일수록 인장 하중이 높아지는 국부 변형에 대한 저항력이 높아진다.⁽²⁾ 이러한 변형 조건에서 재료는 안정적이면서 가장 빠른 변형을 하게 되므로 이를 최적 성형 조건에 부합되는 조건이라 할 수 있다.

이러한 최적 성형 조건은 진응력-진변형률관계선도를 3차 다항식 이상으로 근사식을 사용 하여야 구할 수 있다. Ghosh와 Hamilton⁽⁴⁾은 4차식으로 진응력-진변형률속도 관계를 근사하였으나 본 논문에서는 시험결과가 3차식으로 근사가 가능하여 변형률속도 민감성을 나타낼 수 있는 가장 단순한 3차 다항식으로 근사하였다. 대수 좌표계에 도시 된 진응력-진변형률속도 관계를 3차 다항식으로 가정하여 근사하면 식(14)로 표현된다.

$$\log \sigma = a_0 + a_1(\log \dot{\epsilon}) + a_2(\log \dot{\epsilon})^2 + a_3(\log \dot{\epsilon})^3 \quad (14)$$

여기서 변형률속도 민감계수는 변형률속도에 따른 민감성을 나타내는 지표로 식(4)에서와 같이 식(14)를 변형률속도의 대수량에 대해 1차 미분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m = a_1 + 2a_2(\log \dot{\epsilon}) + 3a_3(\log \dot{\epsilon})^2 \quad (15)$$

여기서 구한 m 값은 국부 변형에 대한 저항력을 나타내는 값으로 최대값을 가질 때의 변형률속도를 최적 성형 조건으로 정한다. 한편, 이 때의 K 값이 식(5), (14), (15)에서 상수가 아닌 변형률, 변형률속도, 온도의 함수로 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\log K = a_0 - a_2(\log \dot{\epsilon})^2 - 2a_3(\log \dot{\epsilon})^3 \quad (16)$$

따라서, 식(15)의 m 값은 K 를 상수로 하는 식(5)의 구성 방정식에서는 의미를 갖지 못하는 값으로 구성 방정식 식(5)에는 사용할 수 없다.

본 논문에서는 3차식 근사를 통하여 해석에서 부가될

재료의 최적 성형 조건을 구하고, 1차식 근사를 통하여 초소성 성형 해석에서 사용될 구성 방정식 식(5)에서 필요한 재료의 물성치인 물질상수와 변형률속도 민감계수를 구하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 인장 시편 및 인장 시험

인장 시편은 영국 ALCAN사의 SPF 8090 Al-Li합금을 사용하였으며, 인장 시험은 Instron 4206 기종을 이용하여 실험하였다. 인장 시험에 사용한 시편의 치수는 Fig.2에 도시하였다.

인장 시편은 압연 방향의 횡 방향을 기준으로 제작하였으며, 시편에 대한 예비 열처리는 하지 않았다. 시편을 연신율이 작은 것으로 보고된 횡 방향으로 제작한 것은 실제 성형 조건에서는 한계연신율에서 파단이 일어나므로 최소 연신율을 나타내는 물성치를 확보하기 위하여 횡 방향을 기준으로 제작하였다. 인장 시험에서 성형 온도까지의 온도 상승 시간을 40분으로 하고 성형 온도에서 15분간의 시험 전 유지시간을 주어 실험을 행하였다. 실제적인 성형 공정에서는 성형 온도를 맞추고 유지하는데 걸리는 시간이 인장 시험의 경우보다 많이 소요되므로 충분한 온도 상승 시간과 유지시간을 주었다.

Fig.3은 각각 성형온도 480℃, 500℃, 520℃, 540℃에서 변형률속도를 변화시키면서 인장 시험을 수행한 결과이다. 온도가 낮을수록 각 변형률속도에 따른 인장 하중이 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 변형률속도가 높을수록 인장 하중이 높아지는 결과를 보이는데 변형률속도에 지배적인 영향을 받는 초소성 재료의 변형 기구의 특성을 잘 보여 주고 있다.

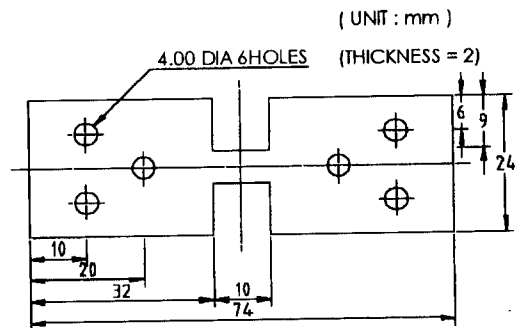
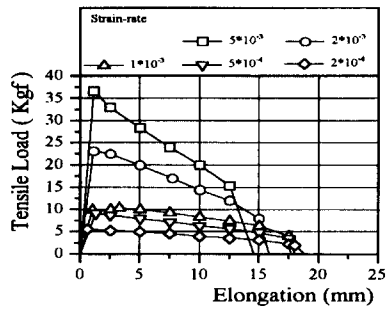
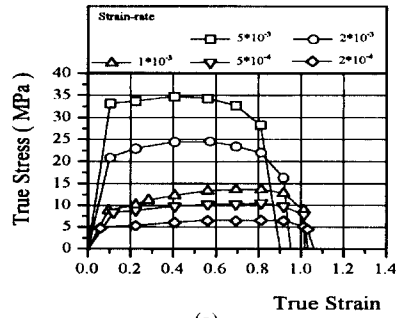


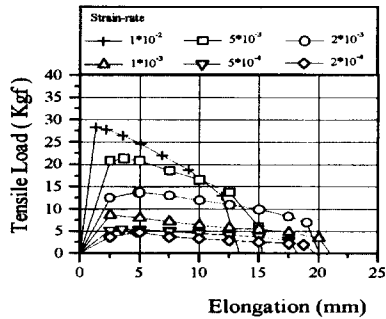
Fig. 2 Dimension of a tensile test specimen of superplastic material



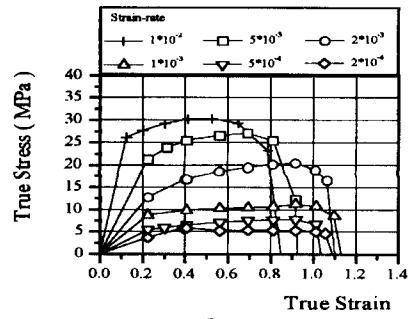
(a)



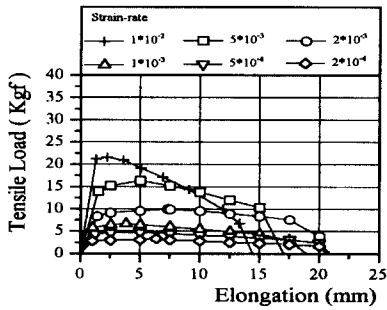
(a)



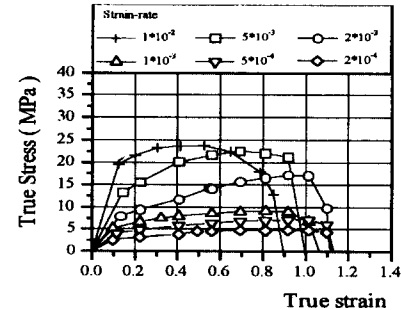
(b)



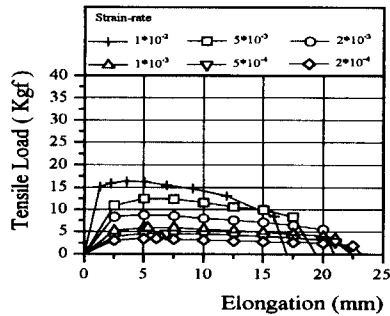
(b)



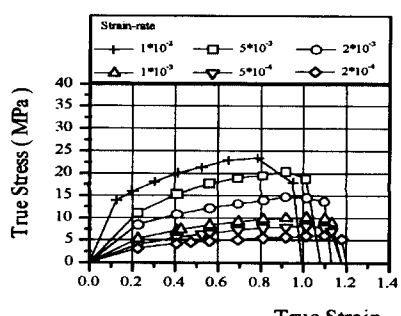
(c)



(c)



(d)



(d)

Fig. 3 Tensile load vs. specimen elongation with the variation of the temperature and the strain rate : (a) T = 480 °C ; (b) T = 500 °C ; (c) T = 520 °C ; (d) T = 540 °C

Fig. 4 True stress vs. true strain with the variation of the temperature and the strain rate : (a) T = 480 °C ; (b) T = 500 °C ; (c) T = 520 °C ; (d) T = 540 °C

Fig.3의 인장 시험결과를 변형에 따른 단면적 감소에 의한 영향을 보정하기 위하여 진응력 - 진변형률 선도도 도시하면 Fig.4와 같다.

Fig.4로부터 진응력은 변형률보다는 변형률속도에 따라 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다. 특히 변형률속도가 1×10^{-3} 이하의 시험결과들은 변형률에 관계없이 변형률속도에 따라 거의 균일한 값을 나타내고 파단까지의 변형률도 1.0이상의 연신율을 보임을 알 수 있다. 이것은 일반적인 초소성재료에서 보고된 연신율보다 낮은 연신율을 나타내는데 이는 인장 시험에서의 시편의 형상과 방향의 차이와 성형 온도 조건의 차이에서 기인한 것으로 보인다. 본 논문에서는 초소성 재료의 결정립 변화, 기공 성장 등의 미시적 관점보다는 동 재료의 성형공정 해석 시에 필요한 재료의 물성치 산출에 그 목적이 있다. 따라서 본 논문에서는 시험에 사용된 재료의 미시적 관점의 해석이 아닌 시험의 결과를 토대로 한 재료의 물성치를 산출하였다.

3.2 초소성 재료의 인장 거동 고찰

위의 결과로부터 변형률속도 변화에 따른 응력의 변화를 살펴기 위해 변형률이 각각 0.2, 0.4, 0.6, 0.8인 경우의 진응력-진변형률속도 선도를 대수 좌표계에 도시하면 Fig.5로 나타내어진다.

초소성 재료의 구성 방정식 식(5)에 사용할 변형률속도 민감계수(m)와 재료 상수(K)는 Fig.5를 1차식으로 근사하여 다음의 Table 1과 같이 구할 수 있다. 식(5)의 물질 상수(K)가 같은 온도와 같은 변형률 상태에서 같은 평형

Table 1 Strain rate sensitivity coefficient and material coefficient obtained by curve-fitting with the 1st order polynomial function

(rounded up values)							
ϵ	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	mean	
480°C	m	0.593	0.561	0.527	0.471	-	0.538
	K	772.8	691.0	568.5	370.1	-	579.0
500°C	m	0.550	0.468	0.480	0.555	-	0.513
	K	347.9	275.3	309.0	560.5	-	358.9
520°C	m	0.501	0.514	0.484	0.497	0.542	0.508
	K	209.9	298.4	278.2	323.5	466.6	304.8
540°C	m	0.454	0.409	0.398	0.398	0.375	0.407
	K	122.7	130.5	143.1	159.2	143.2	139.2

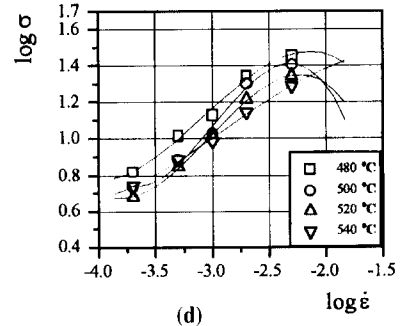
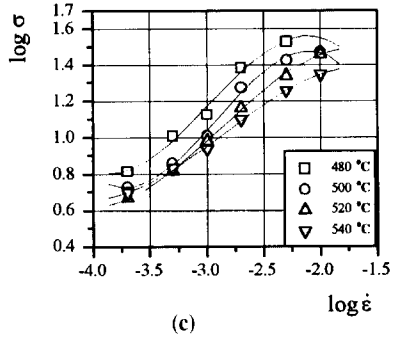
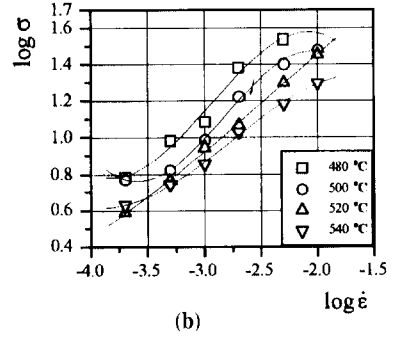
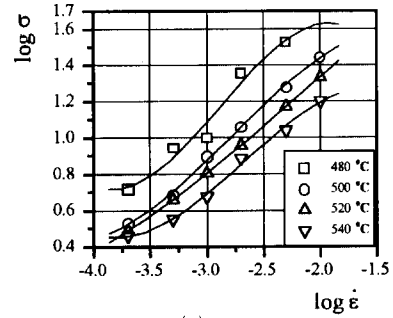
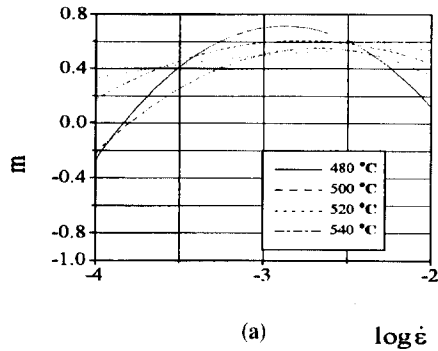
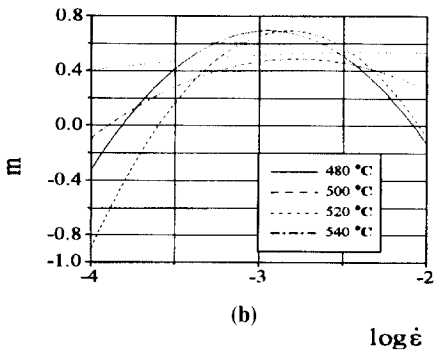


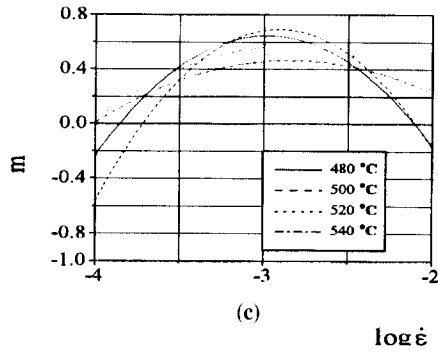
Fig. 5 Logarithmic true stress vs. logarithmic true strain rate with the variation of the strain : (a) $\epsilon = 0.2$; (b) $\epsilon = 0.4$; (c) $\epsilon = 0.6$; (d) $\epsilon = 0.8$



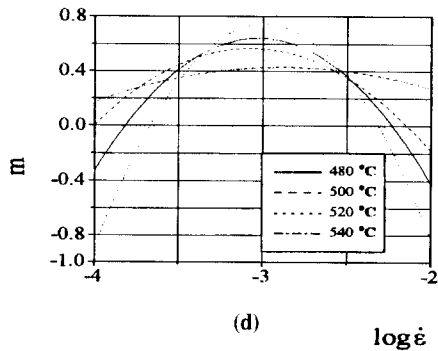
(a) $\log \dot{\epsilon}$



(b) $\log \dot{\epsilon}$



(c) $\log \dot{\epsilon}$



(d) $\log \dot{\epsilon}$

Fig. 6 Strain-rate sensitivity coefficient (m) vs. logarithmic strain-rate with the variation of the strain : (a) $\epsilon = 0.2$; (b) $\epsilon = 0.4$; (c) $\epsilon = 0.6$; (d) $\epsilon = 0.8$

Table 2 Strain rate sensitivity coefficient obtained by curve-fitting with the 3rd order polynomial function with the variation of the strain : (a) $\epsilon = 0.2$; (b) $\epsilon = 0.4$; (c) $\epsilon = 0.6$; (d) $\epsilon = 0.8$

$\log \dot{\epsilon}$	480°C	500°C	520°C	540°C
-4.0	-0.26428	0.17606	0.33045	-0.21590
-3.8	0.05372	0.30551	0.37418	-0.00084
-3.6	0.30953	0.41195	0.41285	0.17894
-3.4	0.50315	0.49540	0.44646	0.32346
-3.2	0.63458	0.55584	0.47502	0.43271
-3.0	0.70382	0.59328	0.49851	0.50669
-2.8	0.71087	0.60772	0.51694	0.54540
-2.6	0.65574	0.59916	0.53032	0.54885
-2.4	0.53841	0.56759	0.53864	0.51703
-2.2	0.35890	0.51303	0.54189	0.44994
-2.0	0.11720	0.43546	0.54009	0.34758

(a)

$\log \dot{\epsilon}$	480°C	500°C	520°C	540°C
-4.0	-0.32002	-0.89405	0.40259	-0.09276
-3.8	0.02952	-0.39974	0.43198	0.08020
-3.6	0.30544	0.00263	0.45774	0.22255
-3.4	0.50774	0.31305	0.47986	0.33428
-3.2	0.63643	0.53154	0.49836	0.41540
-3.0	0.69151	0.65808	0.51322	0.46590
-2.8	0.67297	0.69268	0.52445	0.48579
-2.6	0.58082	0.63534	0.53205	0.47506
-2.4	0.41505	0.48606	0.53602	0.43372
-2.2	0.17566	0.24484	0.53636	0.36177
-2.0	-0.13734	-0.08833	0.53307	0.25920

(b)

$\log \dot{\epsilon}$	480°C	500°C	520°C	540°C
-4.0	-0.22644	-0.55873	0.02590	0.01002
-3.8	0.08287	-0.14137	0.20119	0.15320
-3.6	0.32483	0.19160	0.34238	0.26934
-3.4	0.49942	0.44019	0.44945	0.35846
-3.2	0.60666	0.60438	0.52242	0.42054
-3.0	0.64654	0.68419	0.56129	0.45559
-2.8	0.61906	0.67961	0.56605	0.46361
-2.6	0.52422	0.59064	0.53670	0.44460
-2.4	0.36203	0.41728	0.47325	0.39856
-2.2	0.13247	0.15953	0.37569	0.32548
-2.0	-0.16444	-0.18261	0.24402	0.22538

(c)

$\log \dot{\epsilon}$	480°C	500°C	520°C	540°C
-4.0	0.00510	-0.88851	-0.32431	0.17230
-3.8	0.22154	-0.30519	0.03146	0.25589
-3.6	0.38563	0.14966	0.30589	0.32312
-3.4	0.49739	0.47605	0.49897	0.37398
-3.2	0.55680	0.67398	0.61070	0.40848
-3.0	0.56387	0.74344	0.64108	0.42661
-2.8	0.51860	0.68444	0.59011	0.42838
-2.6	0.42099	0.49697	0.45780	0.41377
-2.4	0.27103	0.18103	0.24414	0.38281
-2.2	0.06874	-0.26337	-0.05087	0.33548
-2.0	-0.18590	-0.83623	-0.42723	0.27178

(d)

상태를 나타내는 상수 값을 갖게 된다. 변형률속도 민감계수(m)은 시험 범위 내에서 변형률이 커짐에 따라 온도가 높아짐에 따라 감소하는 경향을 보인다.

초소성 성형의 최적 성형 조건을 구하기 위하여 Fig.5를 3차식으로 근사하여 각 온도와 변형률에서의 변형률속도 민감계수 값을 도식하면 Fig. 6과 같고 Table 2에 각각의 수치를 표로 나타내었다. Table 2의 결과에서 국부 변형과 기공 성장이 많지 않은 변형률 0.6가지의 변형률속도 민감계수의 변화를 평균적으로 구하면 Table 3으로 계산되어지고 그때의 최적 조건은 Table 4에 나타내었다.

한편, Fig. 6에서의 변형률속도 민감계수와 관계되는 재료상수(K)는 식(16)과 같이 상수가 아닌 함수 형태의 변수로 구성 방정식 식(5)의 재료상수(K)로 사용할 수 없다. 이때의 재료상수(K) 값을 도식하면 Fig. 7과 같다.

Fig. 6(a,b,c,d)에서 변형이 진행되어도 변형률속도가 1×10^{-3} 부근에서 변형률속도 민감계수가 최대값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 변형이 진행되어도 최적 변형률속도가 많이 변화되지 않는 것을 나타내는 것으로 알려진 바와 같이 초소성 재료의 변형이 변형 중에도 같은 결정립구조를 갖는 GBS (Grain Boundary Sliding) 변형 거동임을 나타낸다. 또한, 성형온도 520℃조건의 시험결과가 변

Table 3 Average strain rate sensitivity coefficient obtained by curve-fitting with the 3rd order polynomial function within the variation of the strain 0.6

$\log \dot{\epsilon}$	480°C	500°C	520°C	540°C
-4.0	-0.27025	-0.42557	0.25298	-0.09955
-3.8	0.05537	-0.07853	0.33578	0.07752
-3.6	0.31327	0.20206	0.40432	0.22361
-3.4	0.50344	0.41621	0.45859	0.33873
-3.2	0.62589	0.56392	0.49860	0.42288
-3.0	0.68062	0.64518	0.52434	0.47606
-2.8	0.66763	0.66000	0.53581	0.49827
-2.6	0.58693	0.60838	0.53302	0.48950
-2.4	0.43850	0.49031	0.51597	0.44977
-2.2	0.22234	0.30580	0.48465	0.37906
-2.0	-0.06153	0.05484	0.43906	0.27739

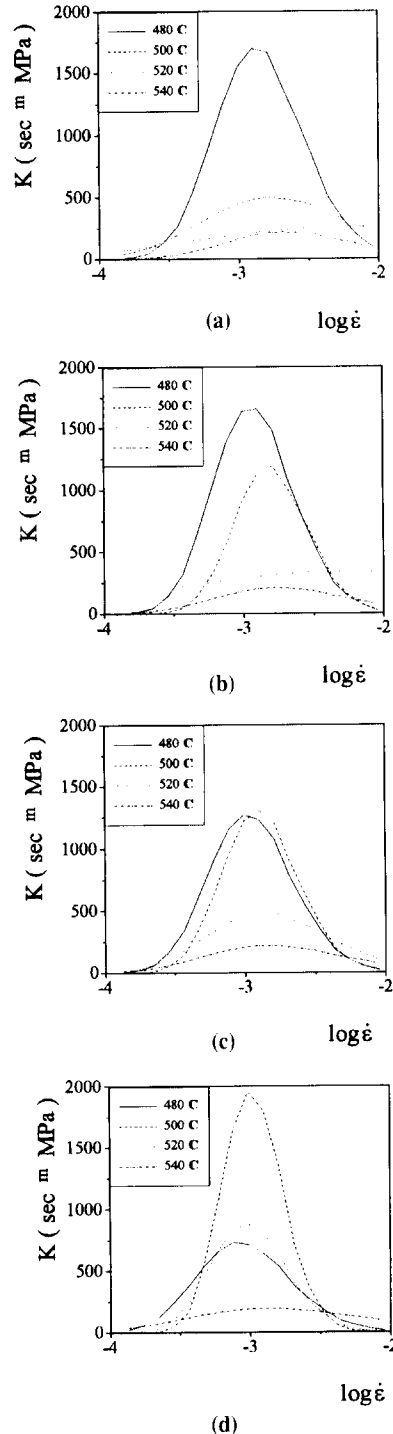


Fig. 7 Material coefficient vs. logarithmic strain rate with the variation of the strain:
(a) $\epsilon = 0.2$; (b) $\epsilon = 0.4$; (c) $\epsilon = 0.6$; (d) $\epsilon = 0.8$

Table 4 Optimum strain rate and strain rate sensitivity coefficient for each temperature level

	480°C	500°C	520°C	540°C
$\log \dot{\epsilon}^*_{ Max(m)}$	-2.93837	-2.85538	-2.73906	-2.75659
$\dot{\epsilon}^*_{ Max(m)}$	0.00115	0.00140	0.00182	0.00175
$m _{\dot{\epsilon}}$	0.68388	0.66252	0.53644	0.49899

형률속도 민감계수의 변형률속도와 변형률에 대한 변화가 가장 적게 나타남을 알 수 있다.

3.3 최적 성형조건 및 물성치 산출

이상의 결과에서 SPF 8090 Al-Li 재료의 물성치를 다음과 같이 구하였다. 초소성 재료의 최적 성형조건은 실제적으로는 성형 과정을 통해 계속 변화하게 되고 그에 따라 적용해야 하는 물성치도 변화하게 되고 그 값은 Table 2,3,4에 나타내었다.

위의 결과와 같이 초소성 재료의 물성은 변형률에 따라 변화하는데, 물성치의 변형률에 대한 편차가 작을수록 변형률이 아닌 변형률속도에 지배적인 변형거동을 나타낸다. 일반적인 초소성 성형은 일정한 온도에서 행하여지는데, 변형률에 대한 변형률속도 민감계수의 편차가 가장 작은 성형온도를 최적 성형온도로 하여 그 때의 물성치와 최적 성형조건을 구할 수 있다. SPF 8090 Al-Li 재료의 인장 시험 자료 Table 1에서 재료의 변형률에 대한 변형률속도 민감계수의 편차가 성형 온도가 520 °C에서 가장 작은 값을 나타낸다. 따라서, SPF 8090 Al-Li 재료의 최적 성형 조건과 물성치를 구하여 대표값으로 제시하면 다음과 같다.

온도 (°C) : 520°C
 최적 상당 변형률속도 ($\dot{\epsilon}^*_{|Max(m)}$) : $1.82 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$
 변형률속도 민감계수 ($m|_{\dot{\epsilon}}$) : 0.53644

초소성 재료의 해석에서의 구성 방정식 식(5)의 물성치는 위에서 구한 성형조건에서의 변형률속도 민감계수 및 재료 상수를 Table 1에서 구하였다. 위의 조건하의 구성 방정식에 적용할 물성치는 Table 1로부터 다음과 같다.

재료 상수 (K) : 304.80 [sec]^m MPa
 변형률속도 민감계수 (m) : 0.50762

따라서, 최적성형조건인 성형해석을 위한 8090 SPF Al-Li의 구성 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma = 304.80 \times \dot{\epsilon}^{0.50762} \quad (15)$$

이때의 성형온도는 520°C이고, 최적변형률속도는 $1.82 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ 이다.

본 논문에서 제안하는 성형공정에서의 최적 성형조건인 유지는 성형온도가 올라가거나 변형이 진행됨에 따라 변하는 변형률속도 민감계수를 이용하여 성형 온도를 상승시키며 성형할 때의 최적 변형률속도를 추적함으로써 할 수 있다. 이것은 실제적인 성형 해석 시에 온도와 변형률속도 두 가지 모두를 동시에 제어하여 성형 과정에 따른 최적의 상태를 유지할 수 있는 중요한 정보이다. 예컨대, 제품이 성형온도 480°C에서 540°C 구간에서 성형된다면 Table 1, 4에서 각 구간마다 다음 표와 같은 물성치와 성형조건을 유지하면서 성형할 수 있다.

이와 같은 자료를 통해 초소성 성형에서 온도의 변화와 성형의 진행 정도에 따라 최적의 성형조건을 유지할 수 있는 성형 인자 제어가 가능하다.

Temp.	m	K	$\dot{\epsilon}^*_{ Max(m)}$
480°C	0.538	579.0	0.00115
500°C	0.513	358.9	0.00140
520°C	0.508	304.8	0.00182
540°C	0.407	139.2	0.00175

4. 결 론

본 논문에서 초소성 재료 SPF 8090 Al-Li의 기계적 물성치를 구하기 위하여 변형률속도를 일정하게 유지할 수 있는 크로스 헤드 속도 제어 방법을 사용하여 인장 시험을 수행하였다. 온도 및 변형률의 변화에 따른 SPF 8090 Al-Li 재료의 물성치와 최적 성형조건을 구하고, 성형조건 변화에 따른 성형 모사 해석의 기초 자료를 확보하기 위하여 특정 온도 구간과 특정 변형률속도 구간에서의 기계적 응답 특성을 실험으로 구하였다. 확보된 초소성 재료의 물성치에 관한 자료는 최적 성형조건 및 그 때의 수치 모사 해석을 위한 구성 방정식을 제공하며, 온도가 변하는 공정에서 최적 성형조건을 따라 성형하기 위해

필요한 특정 조건과 각각의 구성 방정식도 제공할 수 있는 다양한 용도로 활용될 수 있다.

참고문헌

- (1) C. E. Pearson, 1934, "The viscous properties of extruded eutectic alloys of lead-tin and bismuth-tin", *J. Inst. Met.*, 54, pp.111~124.
- (2) A. Arieli and A. K. Mukherjee, 1982, "The Rate-Controlling Deformation Mechanisms in Superplasticity - A Critical Assessment", *Metall. Trans. A*, vol. 13A, pp.717~732.
- (3) M. G. Zelin and A. K. Mukherjee, 1996, "Geometrical aspects of superplastic flow", *Mater. Sci. Eng.*, A208, pp.210~225.
- (4) A. K. Ghosh and C. H. Hamilton, 1982, "Influences of Material Parameters and Microstructure on Superplastic Forming", *Metall. Trans. A*, vol. 13A, pp.733~743.
- (5) Q. Liu, J. Yang, and M. Yao, 1991, "Effect of Two-Stage Strain-Rate Test on the Superplastic Behavior of an Al-Li-Cu-Mg-Zr Alloy - Mechanical Behavior", *Scr. Metall. et Mater.*, vol. 25, pp. 109~114.
- (6) Q. Liu, J. Yang, and M. Yao, 1991, "Effect of Two-Stage Strain-Rate Test on the Superplastic Behavior of an Al-Li-Cu-Mg-Zr Alloy - Microstructural characterization", *Scr. Metall. et Mater.*, vol. 25, pp.115~120.
- (7) Q. Liu, X. Huang, J. Yang, and M. Yao, 1991, "The Characteristics of Cavitation During Superplastic Deformation of a Warm-Rolled Al-Li-Cu-Mg-Zr Alloy", *Scr. Metall. et Mater.*, vol. 25, pp. 387~392.
- (8) E. L. Bradley, III, R. A. Emigh, and J. W. Morris, Jr., 1991, "Superplastic Properties of an Al-2.4Mg-1.8Li-0.5Sc Alloy", *Scr. Metall. et Mater.*, vol. 25, pp.717~721.
- (9) B. Q. Han and K. C. Chan, 1996, "Superplastic deformation mechanisms of particulate reinforced aluminum matrix composites", *Mater. Sci. Eng.*, A212, pp.256~264.
- (10) J. H. Argyris and J. St. Doltsinis, 1984, "A primer on superplasticity in natural formulation", *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.*, 46, pp. 83~131.
- (11) J. Bonet, A. H. S. Wargadipura and R. D. Wood, 1989, "A pressure cycle control algorithm for superplastic forming", *Commun. appl. numer. methods*, 5, pp.121~128.
- (12) J. Bonet, R. D. Wood and A. H. S. Wargadipura, 1990, "Numerical simulation of the superplastic forming of thin sheet components using the finite element method", *Int. J. Numer. Methods Engng.*, vol. 30, pp.1719~1737.
- (13) S. C. Rama and N. Chandra, 1991, "Development of a pressure prediction method for superplastic forming process", *Int. J. Non-Linear Mechanics*, vol. 26, No. 5, pp.711~725.
- (14) Y. Q. Song and J. Zhao, 1986, "A mechanical analysis of the superplastic free bulging of metal sheet", *Mater. Sci. Eng.*, 84, pp.111~125.
- (15) 오관영, 1993, "8090 Al-Li 합금의 초소성 변형특성", 서울대학교 대학원. 공학석사학위논문.