

## 원뿔형 금형을 이용한 초소성 변형 특성 평가

권용남\* · 이승진\* · 이영선\* · 이호성\*\* · 이정환\*

# Characterization of Superplasticity Using Cone-Type Bulge Test

Y.-N. Kwon, S. J. Lee, Y. S. Lee, H. S. Lee, J. H. Lee

### Abstract

Superplastic formability depends on flow parameters such as temperature, strain rate, strain and stress, microstructures. Usually, superplastic properties of materials are characterized with using a uni-axial tension testing. However, superplastic sheet is formed under mutiaxial loading condition in most forming practices.

In the present study, superplastic characteristics of Al5083 alloys were determined with using both a uni-axial and biaxial bulging tests. Specially, cone-type die was used to achieve constant strain rate under constant pressure condition. Even though constant strain rate under a certain pressure was achieved only approximately, a cone-type bulging test was found to be quite beneficial to get a multiaxial formability of superplastic materials.

**Key Words :** Superplasticity, Superplastic Forming, Formabilty, Cone-shape Die, Bulging, Constitutive Relation, Al5083

### 1. 서 론

초소성 변형은  $0.5T_m$ ( $T_m$ : 용점(K)) 이상의 고온에서 낮은 유동응력을 나타내며 수백 % 이상의 높은 연신율을 나타내는 현상으로 정리할 수 있다. 초소성 변형을 나타내는 재료는 대부분의 경우  $10\mu\text{m}$  이하의 미세한 결정립 크기를 나타내며 고온에서 결정립 성장 속도가 상대적으로 낮은 특징을 가진다. 초소성 변형을 표현하는 구성방정식은 식 (1)과 같이 온도 및 유동관련 인자들이 포함되어 있어야 한다. 식 (1)의 상수  $k$  는 결정립 크기 및 온도에 의존하는 값으로 특정 온도에서 결정립 크기 및 미세조직의 변화가 없다는 가정하에 사용된다.

$$\sigma = k\dot{\epsilon}^m \epsilon^n \quad (1)$$

식 (1)에 정의된  $m$  과  $n$  은 각각 변형율속도 민감지수 및 가공경화지수로 식 (2)에 정리하였다.

$$m = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right|_{\epsilon}, \quad n = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \epsilon} \right|_{\dot{\epsilon}} \quad (2)$$

일반적으로  $m$  값이 0.5 이상일 경우 결정립계 미끄러짐이 주 변형기구이며 높은 연신율을 얻을 수 있다고 알려져 있다. 일반적으로 초소성 변형은 정상상태 변형으로 가정하여 많은 경우  $n$  의 영향은 무시하는 경우가 많다. 하지만, 결정립 성장으로 인해 일정 변형율속도하에서 유동응력의 증가를 나타내는 초소성 재료들이 많다. 따라서 초소성 변형은  $m$  과  $n$  의 합으로 표현된 식(3)과 같은 관계식에 의해 변형의 안정성을 표현하는 것이 더욱 합리적이다. 즉, 식(3)을 만족할 경우 변형이 불안정해져 일축 인장의 경우 내킹이 발생하게 된다.

\* 한국기계연구원 공정연구부

\*\* 한국항공우주연구원 우주발사체기술실

$$m + n \leq 1 \quad (3)$$

초소성 재료의 특성을 평가하는 일반적인 방법은 일축 인장 시험을 통해 식(1)의 구성방정식의 상수들을 결정하는 방법이 사용되고 있다. 하지만, 실제 초소성 변형은 다축 응력하에서 이루어지며 초소성 판재의 경우 이방성을 가지고 있는 경우가 많기 때문에 다축 응력하에서 초소성 특성을 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 원뿔형 금형을 이용한 부풀림 성형시험을 통해 Al5083 합금의 고온 변형 특성을 조사하였다. 원뿔형 금형을 사용할 경우 실험시 일정 압력으로 성형할 경우 성형 전체 과정을 통해 거의 일정한 응력을 얻을 수 있다고 알려져 있다. 따라서 시간에 따른 초소성 판재의 변형량만을 측정한다면 초소성 재료의 변형 특성을 설명해주는 응력-변형률 속도 선도를 비교적 용이하게 얻을 수 있다. 본 연구에서는 인장 및 변형률 속도 변환 시험을 실시하여 Al5083 합금의 변형 특성을 조사하였다. 이와 함께 원뿔형 금형을 이용한 부풀림 시험을 실시하여 일축 인장시험을 통해 얻은 결과와 비교를 통해 각 시험법의 특징 및 타당성을 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용한 재료는 11 $\mu$ m의 평균 결정립 크기를 가지는 상용 Al 5083 합금을 사용하였으며 화학 조성은 표 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of Al5083 Alloy used in the present study.

(unit: wt. %)					
Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Al
4.70	0.74	0.004	0.018	0.10	Bal.

Al5083합금의 초소성 특성을 평가하기 위하여 먼저 460~520°C의 온도 범위에서 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 최저 3 $\times 10^{-4}$ /s, 최고 1 $\times 10^{-1}$ /s의 변형률 속도 범위에서 실시하여 변형 조건에 따른 연신율 및 유동응력을 측정하였다.

초소성 변형특성을 평가하는데 일반적으로 가장 많이 사용되는 변형률 속도 변화 시험(Step strain rate test)을 실시하여 인장시험에서 얻은 결과

와 비교하고자 하였다. 변형률 속도 변화 시험은 단계별로 5%의 변형률씩 변형시켰을 때 유동응력을 측정하는 방식을 사용하였다.

인장 및 변형률 속도 변화 시험에 대해 부풀림 성형법에 의한 초소성 특성 평가의 장점은 먼저 실제 성형시 가장 많이 사용되는 응력상태와 유사한 조건하에서 평가를 실시하는 점이다. 또한, 일반적으로 초소성 재료의 평가에서 무시하는 가공경화 및 연화 현상을 고려할 수 있으며 초소성 판재의 부위별 물성 편차에 대해 평균값을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그림 1은 원뿔형 금형을 사용한 초소성 부풀림성형의 모식도를 나타낸 것이다. 원뿔형 금형에서 Membrane이론을 적용하면 판재가 금형에 닿기 전까지는 식(4)에 정리한 것과 같이 판재에 작용하는 압력과 응력사이의 관계를 얻을 수 있다. 식(4)에서  $t$ 는 판재두께,  $\rho$ 는 판재의 곡률반경이다.

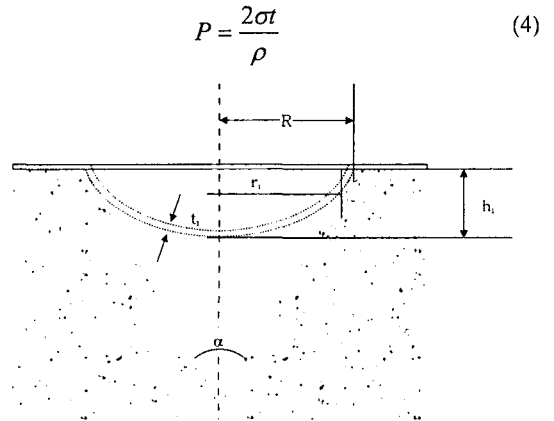


Fig. 1 Schematic diagram of superplastic sheet bulging with using cone-type die.

원뿔형 금형의 각도  $\alpha$ 가 60° 근처의 값을 가질 경우 성형이 진행됨에 따라 판재의 두께 감소에 거의 비례하여 판재의 곡률반경  $\rho_i$ 도 감소한다고 알려져 있다. 즉, 식(5)와 같은 관계식에 따라 일정한 압력을 가할 경우 성형중 판재는 동일한 응력하에서 성형될 수 있다.

$$\frac{P}{\sigma} = \frac{2t_i}{\rho_i} \quad (5)$$

소재가 등방성을 가진다면 성형시 원뿔의 꼭지점은 이축 평면변형상태( $\epsilon_x = \epsilon_\theta$ )에 놓이게 된다. 체적 일정 법칙에 의해 원뿔 꼭지점에서 유효변형

율은 두께 방향의 변형율로부터 식(6)과 같이 측정할 수 있다. 시간의 변화에 따라 식(6)에 정의된 변형률을 측정하면 일정 응력에서의 변형율속도를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_i = -2\epsilon_\theta = \ln\left(\frac{t_0}{t}\right) \quad (6)$$

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 2 는 세 온도에서 일정 변형율속도를 변화시키며 인장시험한 결과이다. 온도가 높아질수록 그리고 변형율속도가 낮아질수록 연신율이 증가하는 일반적인 경향을 잘 보여주고 있다. 본 연구에서 실시한 시험조건중에서는 520°C,  $3 \times 10^{-4}/s$  조건에서 500%로 최고 연신율을 관찰할 수 있었다. 변형율속도가  $1 \times 10^{-3}/s$  이상의 경우 조건에서는 온도 및 변형율속도에 관계없이 거의 동일한 연신율(250%)을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다. 실제 초소성 성형법을 이용해 부품을 제조할 경우 약 150%정도의 연신율을 나타내면 충분한 것으로 알려져 있다. 그림 3 은 변형율속도 변화 시험을 실시한 결과를 나타내주는 그림이다. 변형율 속도가 증가함에 따라 유동응력이 높아지는 것을 보여주고 있다. 그림 4 는 부풀림 시험 결과로 일정 압력하에서 시간에 대한 변형량의 기울기로부터 변형율속도를 계산할 수 있다.

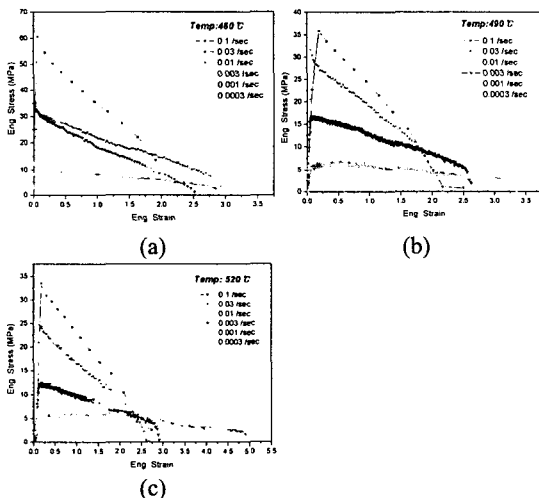


Fig. 2 Tensile results of Al5083 alloy tested at (a) 460, (b) 490 and (c) 520°C with the various strain rate conditions.

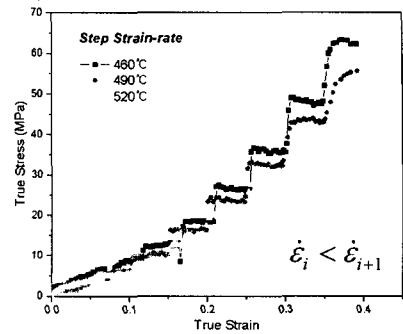


Fig. 3 Step strain rate test of Al5083 alloy.

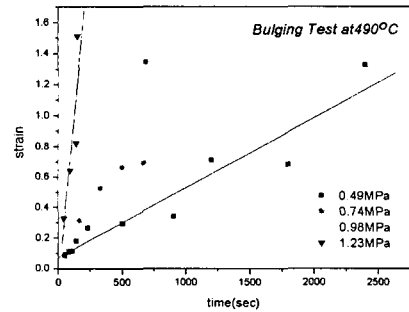
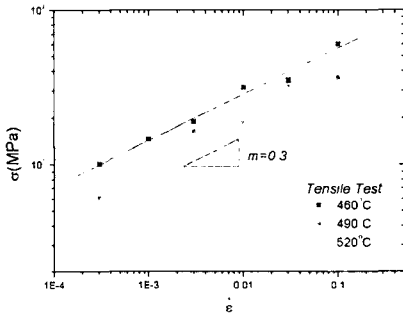


Fig. 4 Bulging test with cone-type die of Al5083 alloy.

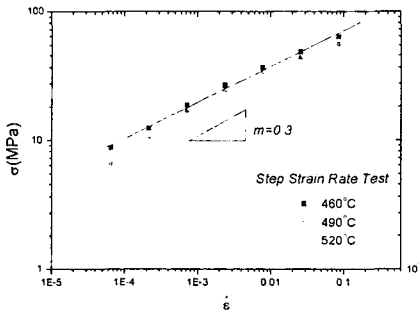
그림 5 는 그림 2 의 인장시험 결과로부터 얻은 응력-변형율속도 곡선을 나타낸 것이다. 시험한 온도구역에서 변형율속도 민감계수(strain rate sensitivity, m)는 0.3 의 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 초소성 재료는 0.5 이상의 높은 값을 가지는 것에 비해 작은 값을 가지고 있다. 하지만, 그림 2 에 나타낸 바와 같이 최고 500%의 높은 연신율을 나타내는 이유는 변형시 가공경화가 발생하여 변형의 안정성을 높여주기 때문으로 판단된다. 그림 6 은 변형율속도 변화시험을 통해 얻은 응력-변형율속도 곡선으로 인장시험에서 얻은 곡선과 동일한 특징을 보여주고 있다. 즉, m 값이 전 온도 영역에서 0.3 수준을 유지하고 있음을 확인할 수 있었다. 이상의 결과는 기존 문헌에 보고된 Al5083 합금의 m 값의 수준과 일치하는 결과이다.

그림 7 은 원뿔형 금형을 이용한 부풀림 성형시험을 통해 얻은 응력-변형율속도 곡선이다. 식(4)에 제시된 곡률반경과 두께의 비( $\rho/t$ )는 판재가 금형과 접촉한 시점을 기준으로  $\rho/t=38.5$  로 계산되었다. 원뿔형 금형의 부풀림 성형을 통해 측정된 응력-변형율속도 곡선은 일축 인장 시험법을 통해 얻은 응력-변형율속도 곡선에 비해 온도별로 수

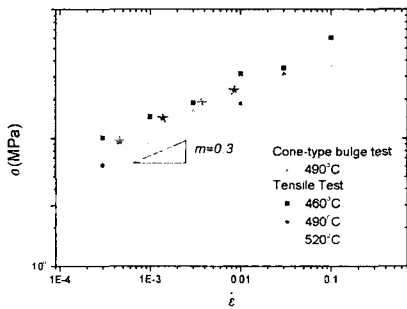
1Pa 정도의 높은 유동응력값을 가지는 것으로 확인할 수 있었다. 그러나  $m$  값은 일축 인장 시험법과 동일한  $m$  값은 0.3 의 값을 가진다. 결과적으로 Al5083 합금의 경우 일축 변형 조건과 이축 변형 조건에서 얻은 변형 특성이 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 부풀림 성형시 일축 시험 결과와 차이를 가질 경우 실제 성형 공정에서 사용하는 압력-시간 선도에 부합하는 성형 결과물을 얻을 수 없기 때문에 다축 응력 상태에서의 유동 응력에 관한 정확한 평가가 요구된다.



ig. 5 Stress-strain rate curves of Al5083 alloy obtained from tensile test at the strain of 10%.



ig. 6 Stress-strain rate curves of Al5083 alloy obtained from step strain rate test.



ig. 7 Stress-strain rate curves of Al5083 alloy obtained from cone-type bulge test.

## 5. 결론

본 연구에서는 실제 성형 조건과 유사한 상태에서 변형특성을 조사하기 위하여 60°의 원뿔각을 가지는 금형을 이용한 부풀림 성형을 실시하여 Al5083 합금의 변형 특성을 조사하였다. 본 연구에서 연구한 결과는 초소성 성형 뿐만 아니라 무금형 성형(Dieless forming)에 필요한 기초 데이터를 확보하는데 성공적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. Al 5083 합금의 변형율속도 민감계수 값은  $m=0.3$  을 가지는 것으로 관찰되었으며 이 결과는 인장 및 변형율속도 변화시험에서 얻은 결과와 동일한 수준임을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 과기부 프론티어 사업, “차세대 소재 성형 사업단”의 연구비 지원으로 이루어진 결과 중 일부이며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) E. W. Hart, 1967, “Theory of tensile test”, Acta Metal., vol. 15, p. 351.
- (2) H. Iwasaki, H. Hosokawa, T. Mori, T. Tagata and K. Higashi, 1998, “Quantitative assessment of superplastic deformation behavior in a commercial 5083 alloy”, Mater. Sci. & Eng., Vol. 252A, p.199.
- (3) A. R. Ragab, 1983, “Thermoforming of superplastic sheet in shaped die”, Material Technology, vol. 10, p. 340.
- (4) S. Yu-Quan, Z. Zun, 1987, “Technological analysis of superplastic bulging of a metal sheet”, Mater. Sci. & Eng., Vol. 86, p. 179.
- (5) R. E. Goforth, N. A. Chandra and D. George, 1988, “Analysis of the cone test to evaluate forming characteristics of sheet metal”, Proceeding of Superplasticity in Aerospace(ed. By H. C. Heikkenen), The Metallurgical Society, p. 140.
- (6) R. J. Lederich, S.M.L. Sastry, M. Hayasw and T. L. Mackay, 1982, “Superplastic Formability Testing”, J. of Metals, August, p.16.
- (7) 홍성석, 김용환, 1996, “초소성 성형/확산접합 공정의 유한요소 해석”, 한국소성가공학회지, vol. 5, p. 37.