

# 분말야금 Al-Li 합금의 초소성 변형 특성

권용남\*, 장영원\*

## Superplastic Deformation Characteristics in Powder Metallurgy Al-Li Aluminum Alloy

Yong Nam Kwon and Young Won Chang

### Abstract

The superplastic deformation characteristics in powder metallurgy(PM) Al-Li alloy has been studied within the framework of a recently proposed internal variable theory of superplasticity(SSP). The flow curves were obtained by performing a series of load relaxation tests at the temperature range from 450 °C to 520 °C. It has been found that the overall flow curves were separated into the grain boundary sliding(GBS) and the accommodating dislocation glide processes. The tensile curves were also obtained to clarify the superplastic deformation behavior of PM Al-Li alloy. The microstructural features of PM Al-Li alloy have been examined through the transmission electron microscopy.

**Key Words:** rapidly solidified process, Al-Li alloy, high strain rate superplasticity, internal variable theory.

### 1. 서론

분말야금 알루미늄 합금은 분말 제조법에 따라 급냉응고 합금(rapidly solidified alloy), 기계적합금화 합금(mechanical alloying alloy) 및 Al 기지에 강화재를 첨가한 복합재료(Al matrix composite) 등이 있다. 분말야금 알루미늄 합금은 기존 주조법으로 제조한 알루미늄 합금에 비해 상당히 미세한 결정립을 보이는 특징을 가지고 있어 고온 변형시 초소성 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 또한 미세한 결정립으로 인해 최적 초소성 변형율을 속도가 10<sup>-1</sup> ~ 10/sec 으로 기존 wrought 합금에 비해 매우 높은 특징을 가지고 있다. 분말야금 알루미늄 합금의 고변형율속도 초소성(high strain rate superplasticity, HSRs)은 초소성 가공법의 적용 범위를 보다 넓게 해 주고 있다.

현재까지 보고된 분말야금 알루미늄 합금의 초소성 변형에 관련된 연구 결과를 정리하면 아래와 같은 독특한 특징을 보여주고 있다.

1. 식 (1)과 같은 구성방정식에서 정의된 응력지수(stress exponent) n 이 기존의 많은 초소성 합금이 n=2 의 값을 나타내는데 반해 PM Al 합금은 n=2~3 사이의 비교적 높은 값을 나타내고 있다.

$$\dot{\epsilon} \propto \frac{D}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \quad (1)$$

2. 초소성 변형에 대한 임계응력(threshold stress for superplasticity)의 존재 및 발생 원인은 아직까지 명확하게 밝혀진 바가 없다. 하지만 PM Al 합금의 초소성 변형의 임계응력은 기존 초소성 Al 합금에 비해 큰 값을 가진다고 보고되고 있다.

3. 일반적으로 결정립 크기가 1μm 이하의 매우 미세한 PM Al 합금의 경우 기존 초소성 변형 이론이 적절하게 적용될 수 있는지에 대한 판단이 명확하지 않은 상태이다.

본 연구에서는 여러 초소성 재료의 초소성 거동을 잘 설명하여 준 내부변형변수이론으로부터 유도된 초소성 변형 이론을 이용하여 분말야금법으로 제조된 Al-Li 합금의 초소성 변형 거동을 고찰하였다. 새로운 초소성 이론에서는 결정립계 미끄러짐(grain boundary sliding, GBS)의 가장 중요한 도움기구로 결정립내의 전위 활주(grain matrix deformation, GMD)를 가정하였으며, 기존 변형거동 연구에서 일반적으로 사용해 오고 있는 외부변수(external variable) 대신에 내부변수(internal variable)를 사용하여 있다는 큰 차이점을 가지고 있다.

### 2. 실험방법

본 연구에 사용된 합금은 Al-3Li-1Cu-0.5Mg-0.5Zr(mass%)으로 2.5 g/cm<sup>3</sup>의 낮은 밀도를 가지며 급냉응고법과 분말야금법으로 통해 미국 Allied-Signal사에서 제조하였다. 시편의 제조방법은 먼저 25 ~ 40 μm의 두께로 급냉응고한 melt-spun 리본을 이용하여 -40 mesh 분말을 제조한 후 지름 110 mm의 빌렛으로 vacuum hot pressing을 하였다. 이후 18:1의 압출비로 압출하여 63.5×10.2mm의 판으로 제조하였다.

고온 변형거동을 조사하기 위하여 450 ~ 520 °C의 온도 구역에서 응력이완시험(load relaxation test)을 실시하였다. 시험 결과로 얻은 유동곡선은 내부변형변수이론을 이용한 초소성 이론으로 분석하였다. 또한 초소성변형 특성을 조사하기 위하여 520 °C에서 변형율을 변화시키면서 고온인장 시험을 실시하였다. 합금의 미세조직 및 변형조직

\* 포항공과대학교 항공재료연구소

관찰을 위하여 광학현미경 및 투과전자현미경 관찰을 실시하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 1은 급냉응고 Al-Li 합금의 압출조직으로 초기 분말이 압출방향으로 길게 늘어나 있으며 다량의 산화물들(oxides)이 깨지지 않은 상태로 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 그림 2는 압출조직의 투과전자현미경 사진으로 약 2~3 μm의 결정립 크기를 가지고 있으며 결정립 내부에는 조대한 산화물과 미세한 분산입자들(dispersoids)이 초기 분말의 입계를 따라 분포하고 있음을 관찰할 수 있다. 대부분의 미세한 분산입자들은 β'(Al<sub>3</sub>Zr)입자들로서 알루미늄 기지와 정합관계(coherency)를 가지고 있다.

그림 3은 510 °C에서 응력이완 시험을 실시하여 얻은 유동곡선(flow curve)을 보여주고 있다. 일반적으로 미세립 재료의 초소성 변형은 결정립계 미끄러짐(grain boundary sliding, GBS)과 이를 보완해주는 결정립내 변형(grain matrix deformation, GMD)으로 구성되어 있다고 알려져 있다. 내부변형변수이론에서 유도된 새로운 초소성 이론에서는 결정립내 변형 및 결정립계 미끄러짐의 구성방식을 각각 식 (2) 및 (4)와 같이 제안하였다.

$$(\sigma^* / \sigma^1) = \exp(\dot{\epsilon}^* / \dot{\epsilon}^1)^p \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}^* = f^1 (\sigma^* / \mu^1)^{n^1} \exp(-Q^1 / RT) \quad (3)$$

$$(\dot{\epsilon}^g / \dot{\epsilon}^g_0) = (\sigma / \Sigma_g - 1)^{1/M_g} \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}^g = f^g (\Sigma_g / \mu^g)^{n^g} \exp(-Q^g / RT) \quad (5)$$

실험에서 얻은 데이터의 curve fitting을 통해 분말 야금 Al-Li 합금의 고온 유동곡선은 두개의 변형기구로 구성되어 있음을 확인할 수 있었으며 식 (2)와 (4)에 정의된 재료상수를 결정하였다.

응력이완 시험으로 얻은 유동곡선은 10<sup>-2</sup>/sec order부터의 변형거동을 나타내고 있다. 하지만 실험결과로부터 식 (2) 및 (4)에 정의된 재료상수를 결정한 후, 이 값들을 이용하여 유동곡선을 예측할 경우 그림 3에 굵은 실선을 얻을수 있다. 초소성 변형의 기본 변형기구인 결정립계 미끄러짐이 1/sec의 높은 변형율속도구간에 이르기까지 주 변형기구로 작용함을 확인할 수 있다. 본 PM Al-Li 합금의 인장시험시 최대연신율은 10<sup>-1</sup>/sec에서 관찰되는데 이는 응력이완시험에서 예측된 결과를 잘 확인해 주고 있다.

본 연구에서 확인할 수 있었던 가장 특징적인 점은 결정립계 미끄러짐이 M<sub>g</sub>=0.4의 점성유동거동을 나타낸다는 점이다. 기존에 보고된 8090 Al 합금의 경우는 M<sub>g</sub>=1.0으로 대표되는 결정립계 미끄러짐을 나타낸 것과는 상이한 결과이며 이는 급

냉응고법으로 제조한 본 합금의 결정립계 구조와 밀접한 관련을 가지고 있는 것으로 판단된다.

### 4. 결론

분말야금 Al-Li 합금의 고온변형시 초소성 현상이 관찰되며 이때 작용하는 변형기구는 기존 초소성 재료에서와 동일하게 결정립계 미끄러짐과 이를 보완해주는 결정립내 변형으로 확인되었다.

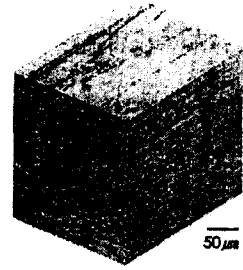


그림 1. Three-dimensional optical micrograph of the rapidly solidified Al-Li alloy.

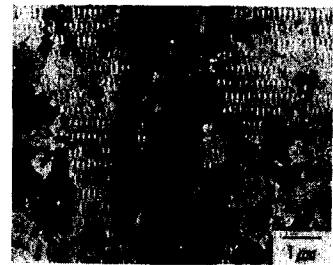


그림 2. TEM micrograph of the rapidly solidified Al-Li alloy in as extruded condition.

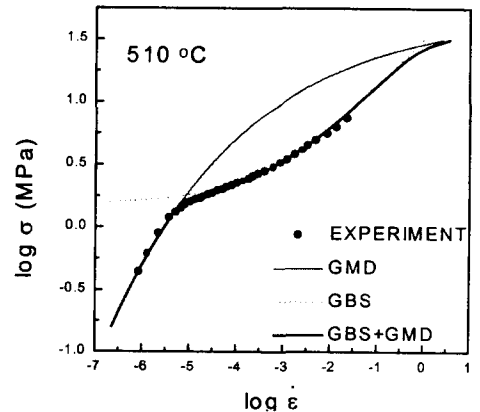


그림 3. The flow curve of PM Al-Li alloy obtained from load relaxation test at 510 °C.