

ECAP으로 제조된 초미세립 Al-Mg 합금의 동적 변형거동

김양곤¹ · 고영건² · 신동혁³ · 이성학^{1#}

High-Strain Rate Deformation of Ultra-Fine Grained Al-Mg Alloys Fabricated by Equal-Channel Angular Pressing

Y.G. Kim, Y.G. Ko, D.H. Shin, and S. Lee

Abstract

The influence of equal-channel angular pressing (ECAP) route on dynamic deformation behavior of ultra-fine grained Al-4.4%Mg alloys was investigated in this study. The 8-pass ECAPed specimens consisted of ultra-fine grains of 0.5 μm in size, and contained the considerable amount of second phase particles, which were fragmented and distributed homogeneously in the matrix. The result of dynamic torsional tests indicated that the maximum shear stress and fracture shear strain were lowest in the specimen deformed by ECAP via route A among the 8-pass ECAPed specimens. The formation of adiabatic shear bands was addressed by concepts of critical shear strain, deformation energy required for void initiation, and microstructural homogeneity related to ECAP routes.

Key Words: Al alloy, ultra-fine grain, equal-channel angular pressing(ECAP), dynamic torsional test, adiabatic shear band

1. 서론

전단변형을 이용한 강소성 가공법(severe plastic deformation)에 대한 활발한 연구가 진행되고 있는데, 이 중 ECAP (equal-channel angular pressing) 가공법은 변형량 혹은 가공경로를 달리함으로써 초미세 결정립을 제어하는데 효과적인 방법으로 알려져 있다.[1-2]. 최근까지 ECAP가공으로 제조된 초미세 결정립에 대한 연구들로 Terhune 등[3]은 순수 알루미늄의 ECAP 실험을 통하여 가공경로의 변화에 따라 상이한 미세조직을 관찰한 바 있으며, Dobatkin 등[4]은 무산소동을 이용한 ECAP 실험을 통하여 가공횟수와 회전조건에 따른 미세조직의 발달과 물성의 변화를 관찰하였으며 많은 횟수의 가공 후 항복강도, 연신을 등에서 route B, route C, 그리고 route A 의 순으로 큰 값을 가짐을 관찰하였다.

이와 같이 초미세 결정립 재료의 미세조직 및

물성에 관해 활발한 연구가 이루어지고 있지만, 그 대부분의 연구는 정적 및 준정적 하중 하에서 일어나는 현상에 대해서 한정적으로 보고되고 있다[3,4]. 차세대 구조용 소재중의 하나로 고려할 수 있는 초미세 결정립 소재는 향후 극심한 환경 즉, 복잡한 응력 혹은 동적변형 상황에 적용될 가능성이 크기 때문에 이를 위해 동적변형 거동에 대한 이해가 필요하다. 또한, 동적 하중 조건에서는 단열성 전단밴드(ASB, adiabatic shear band)등의 생성으로 인하여 준정적 조건보다 상대적으로 소재의 변형 및 파괴에 대한 저항성이 급격히 낮아지기 때문에[2], 동적 변형 및 제반 현상에 대한 소재의 기계적 신뢰성이 평가되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 2차상입자가 존재하는 준단상 Al-4.4%Mg 합금을 다양한 회전조건 하에서 ECAP 가공하여 각 조건에 따라 초미세 결정립을 제어하였으며, 동적 비틀림 변형 후 미세조직과 파면을 관찰하였다. 이를 통하여 동적 물성

1. 포항공과대학교

2. 영남대학교

3. 한양대학교

포항공과대학교, E-mail: shlee@postech.ac.kr

에 미치는 회전조건의 영향에 대해서 고찰하였으며, 미세조직을 바탕으로 단열성 전단밴드의 형성과 파괴특성에 대해서 살펴보았다.

2. 실험방법

화학조성이 4.4%Mg-0.7%Mn-0.15%Cr-Al(wt.%)인 상용 5083 알루미늄 합금 압출재를 사용하였고, 이를 450°C 에서 1 시간 어닐링하여 잔류변형을 제거하였다. 초기 결정립 크기는 약 20 μm 이며, 10 μm 이하 크기의 MnAl₆, CrAl₇, Mg₃Mn₂Al₁₂ 와 같은 금속간 화합물의 2 차상 입자들이 존재한다. 이를 200 °C 에서 교차각(ϕ)과 만곡각(ψ)을 각각 90 ° 및 20 ° 인 금형으로 가공 사이에 시편의 회전 없이 가공한 route A, 매회 가공 사이에 일정한 방향으로 각각 90 ° 와 180 ° 씩 회전하는 방법인 route B 와 route C 의 세 가지 회전조건으로 8 회 의 ECAP 가공을 각각 수행하였다.

이 시편들을 에칭한 후 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였고, 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope) 내에서 EBSD 분석하여, 결정방위는 TSL 사(TexSEM Laboratories, Inc.)에서 제공되는 OIM(orientation imaging microscopy) Analysis 소프트웨어를 이용하여 분석하였다.

인장 시험을 위하여 인장방향이 ECAP 다이 방향에 평행하도록 표점거리 6 mm, 게이지 폭 2 mm, 게이지 두께 1.5 mm 의 판상 시편으로 가공하였으며, 10 톤 용량의 인장시험기를 사용하여 10^{-3} s^{-1} 의 변형속도로 상온에서 인장 시험하였다. 동적 비틀림 시험에 사용된 시편은 ECAP 가공방향에 평행한 방향으로 표점거리 2.5 mm, 두께 280 μm 의 얇은 판 형태로 제작하였다. 동적 비틀림 시험장치는 지름이 25.4 mm 이고 길이가 2 m 인 한 쌍의 2024 알루미늄 봉으로 구성되어 있다(그림 2(b)). 동적 비틀림 시험에서는 클램프(clamp)와 풀리(pulley) 사이에 일정한 양의 토오크(torque)를 축적시킨 후 클램프를 파괴시키면, 축적된 토오크의 절반에 해당하는 진폭을 가지는 탄성 전단파(elastic shear wave)가 순간적으로 시편에 전달되어 시편을 변형시킨다. 이 과정에서 입사파, 반사파, 투과파는 변형계(strain gage)에 각각 감지되고 오실로스코프에 기록된다. 기록된 신호 중에서 반사파로부터 시간의 함수로 표시되는 평균전단변형

율, $\gamma(t)$ 를, 그리고 투과파로부터 전단응력, $\tau(t)$ 를 측정한다. 이 $\gamma(t)$ 와 $\tau(t)$ 로부터 시간을 소거하여 동적 전단응력-전단변형율(dynamic shear stress-shear strain) 곡선을 구한다[2]. 시험과정에서 전단변형속도(shear strain rate)는 약 1200 s^{-1} 이었으며, 상온에서 시험하였다. 동적 비틀림 시험 후 파괴된 시편의 파면과 게이지부의 변형부위를 SEM 으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 미세조직

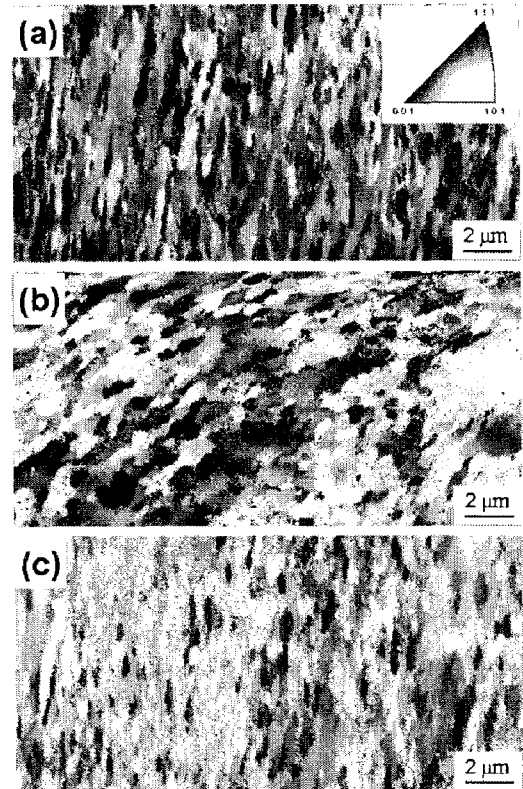


Fig. 1 Image quality (IQ) maps of the (a) route A, (b) route B, and (c) route C specimens, respectively.

그림 1(a)-(c)는 EBSD 분석결과를 보여준다. 금형 출구에서 보았을 때 옆면과 평행한 Y 면에 대해서 EBSD 분석하였다. 결정립 크기가 0.5 μm 정도로 미세하게 감소함을 볼 수 있고(그림 1(a)-(c)), Route B 와 C 시편은 비교적 등축의 결정립 형상을 보이며, 결정립의 방향도 불규칙한 편이다(그림 1(b)-(c)). Route A 시편은 결정립의 형상이 상당히 연신되어 있으며, 그 결정방위도 한쪽으로 치우쳐 있는 경향을 보인다(그림 1(a)).

그림 2(a)-(d)는 as-received, route A, B, 그리고 C 시편의 광학현미경 미세조직으로, 모든 시편들에서 2 차상 입자들을 볼 수 있다. route B와 C 시편에서는 부서진 2 차상입자들이 어느 정도 모여있는 경향을 보이는데(그림 2(b)-(c)), 이는 8 회 ECAP 가공 후 시편의 형상이 초기 시편과 같은 모양으로 돌아오기 때문이다. Iwahashi 등[5]은 초기 결정립 크기가 조대한 순수 알루미늄에서 ECAP 가공경로의 효과에 대하여 연구하였다. 10 회 가공 후 평균 결정립 크기는 1 μm 이하로 감소하였지만, route C가 route A보다 가공 횟수의 증가에 따라 연신된 아결정립이 더욱 급격하게 소멸하고 저경각 입계에서 고경각 입계로의 변화가 더 많이 일어났다. 또한 route B의 경우[6] 아결정립계가 고경각으로 가장 빠르게 배열되었다. 더욱이 시편들의 결정립은 그림 1에서 보듯이 route A 시편은 $\{111\}$ 방향으로 편중되어 있지만, route B와 C 시편은 비교적 균일한 분포의 방향성을 보이고 있다. 특히 route B 시편은 각 가공 사이에 90° 씩 회전하여, 180° 씩 회전하는 route C 시편보다 좀더 균일한 미세조직을 가진다. 따라서, ECAP 가공된 시편의 미세조직은 route B, C, 그리고 A의 순서로 균일하다고 할 수 있다.

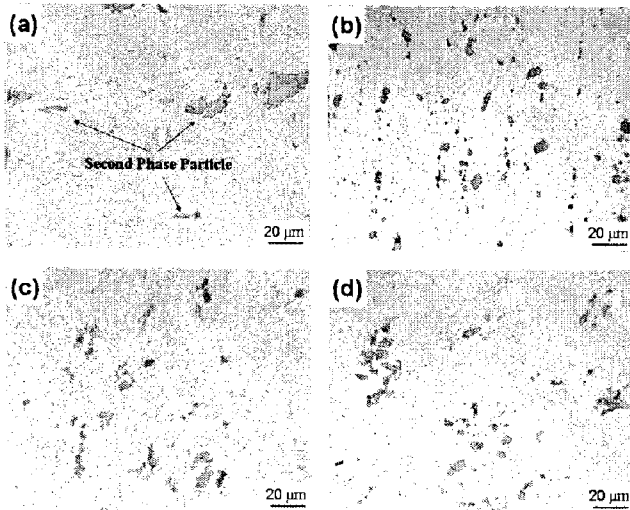


Fig. 2 OM micrographs of ECAP deformation for (a) as-received, and 8-pass using (b) route A, (c) route B, and (d) route C, revealing the degree of distribution in second phase particles.

3.2. 동적 변형 특성

동적 비틀림 시험으로부터 얻은 전단응력-전단

변형을 곡선을 그림 3에 나타내었다. 최대전단응력은 route B 시편에서 가장 크고, route C, route A, 그리고 as-received 시편의 순서로 감소한다. 최대 전단응력점에서의 전단변형률과 파괴전단변형률은 as-received 시편보다 route A 시편에서 크게 감소한다. 그러나 route B와 C 시편에서는 as-received 시편보다 증가하여, route B 시편에서 가장 높은 값을 나타낸다.

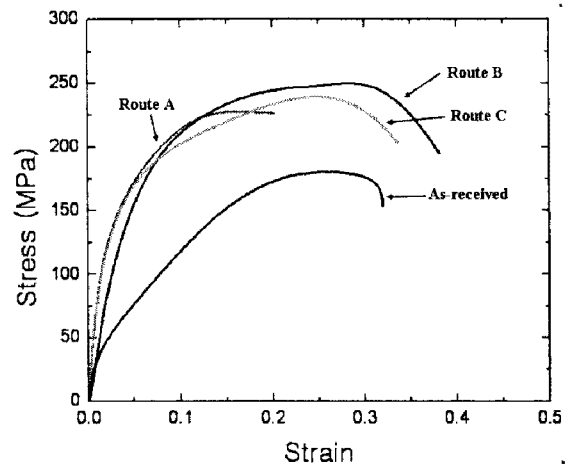


Fig. 3 Shear stress-shear strain curves obtained from dynamic torsional tests at room temperature.

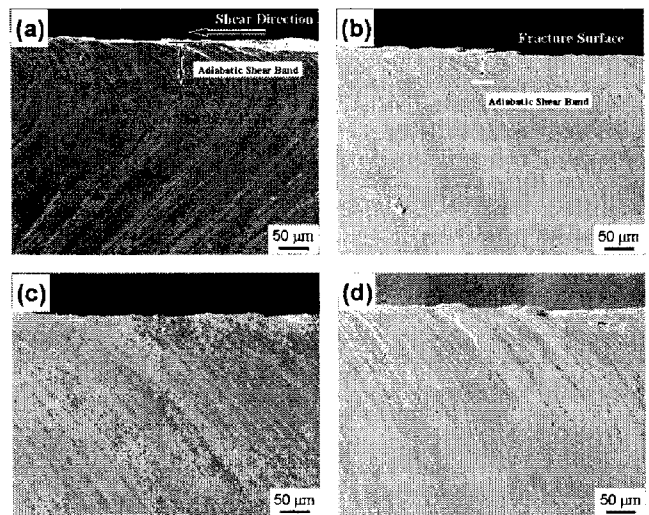


Fig. 4 SEM micrographs of the deformed area of the dynamically deformed specimen of the (a) as-received, (b) route A, (c) route B, and (d) route C

그림 4(a)-(e)는 동적 비틀림 시험으로 파괴된 시편들의 파면 아래의 측면 영역을 관찰한 SEM 사진이다. 파면 부근에서는 전단방향으로 휘어진 소성유동(plastic flow)이 존재하며, 이러한 소성유

동의 휨 현상은 단열성 전단밴드가 형성되는 과정으로, As-received 시편과 route A 시편에서는 단열성 전단밴드가 존재하며(그림 4(a)-(b)), Route B와 C 시편에서는 완전한 유동곡선이 내부까지 전반적으로 균일한 변형을 보인다.(그림 4(c)-(d)).

8회 가공된 route A, B, 그리고 C 시편은 같은 변형량을 가지며, 2 차상의 크기나 분율의 차이는 거의 없지만, 미세조직의 방향성이 다르다(그림 1(a)-(c)). 그림 2(a)-(d)에서 보듯이 2 차상 입자의 분포의 측면에서는 route A 시편이 가장 균일하지만, 동적 시험 결과는 route A 시편에서 가장 낮은 강도와 연신율을 나타낸다. 연신율의 경우 route A 시편에서 특히 낮은 값을 보이는데, 이는 단열성 전단밴드의 형성으로 설명할 수 있다. 단열성 전단밴드가 형성되기 위해서는 국부적인 소성불안정의 발생이 우선되는데[7], route A 시편의 경우 한 방향으로 연신되어 있는 불균일한 미세조직을 가지고 있어 균일한 미세조직을 가지는 다른 두 시편에 비하여 국부적인 소성불안정의 발생이 용이하기 때문에 단열성 전단밴드가 쉽게 형성되었다고 생각할 수 있다. 따라서 그림 4(c)-(e)에서와 같이 route A 시편에서는 발생한 단열성 전단밴드가 다른 두 시편에서는 발생하지 않으며, 이러한 단열성 전단밴드의 형성으로 인하여 route A 시편의 동적 물성은 다른 두 시편에 비하여 낮게 나타난다. 또한, 단열성 전단밴드의 폭은 route A 시편에서 가장 좁았는데, 이는 심한 방향성과 불균일한 미세조직을 가지는 route A 시편이 국부적 변형집중이 더욱 잘 일어나 단열성 전단밴드가 쉽게 형성되었다는 것을 의미한다.

5. 결론

As-received, 8회 ECAP 가공된 세 종류의 알루미늄 합금을 관찰한 결과, 결정립이 8회 가공에 이르렀을 때 약 0.5 μm 로 미세해졌으며, route A 시편은 다른 시편에 비해 연신되고 한 방향으로 치우친 불균일한 미세조직을 보였다. 동일한 변형량의 8회 가공된 시편들에서 2차상 입자의 크기와 분율은 큰 차이를 보이지 않았고, 동적 시험결과, route B, C, 그리고 A 시편의 순서로 최대전단변형율, 파괴전단변형율이 높았다. 심한 방향성과 불균일한 미세조직을 가지는 route A 시편에서는 단

열성 전단밴드가 형성되어 연신율의 감소가 컸다.

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업(M10400000361-06J0000-36110), 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업인 나노소재 기술개발 사업단(06K1501-00220), 2007년 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-357-D00136)으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, and I.V. Alexandrov, 2000, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Prog. Mater. Sci.*, vol.45, pp. 103~189.
- [2] Y.G. Kim, Y.G. Ko, D.H. Shin, C.S. Lee, and S. Lee, 2008, Effect of annealing temperature on dynamic deformation behavior ultra-fine-grained aluminum alloys fabricated by equal channel angular pressing, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, vol.46, 563~571..
- [3] S.D. Terhune, D.L. Swisher, K. Oh-ishi, Z. Horita, T.G. Langdon, and T.R. Mcnelley, 2002, An investigation of microstructure and grain-boundary evolution during ECA pressing of pure aluminum, *Metall. Mater. Trans.*, vol.33A, 2173~2184.
- [4] S.V. Dobatkin, J.A. Szpunar, A.P. Zhilyaev, J.-Y. Cho, and A.A. Kuznetsov, 2007, Effect of the route and strain of equal-channel angular pressing on structure and properties of oxygen-free copper, *Mater. Sci. Eng.*, vol.A462, 132~138.
- [5] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, and T.G. Langdon, 1998, The process of grain refinement in equal-channel angular pressing, *Acta Mater.*, vol.46, 3317~3331.
- [6] C.P. Chang, P.L. Sun, and P.W. Kao, 2000, Deformation induced grain boundaries in commercially pure aluminum, *Acta Mater.*, vol.48, 3377~3385.
- [7] S.P. Timothy, 1987, The structure of adiabatic shear bands in metals: a critical review, *Acta Metall.*, vol.35 301-306.