

초기 등통로각압출 공정 횟수가 압출된 마그네슘 합금의 이방성에 미치는 영향

배성환¹ · 민경호[†]
(주)선우엔지니어링^{1,†}

Influence of initial ECAP passes on the anisotropic behavior of an extruded magnesium alloy

Seong-Hwan Bae¹ · Kyung-Ho Min[†]

R&D Center, Sunwoo Engineering Co., Ltd.[†]

(Received May 12, 2016 / Revised May 27, 2016 / Accepted June 03, 2016)

Abstract: In this paper, a transversely isotropic behavior of AZ31 Mg alloy produced by equal-channel angular pressing (ECAP) process was investigated through tensile test and microstructure observation. The effects of initial ECAP pass number on the anisotropic behavior and mechanical properties of the Mg alloy are evaluated after conventional direct extrusion test, which are carried out at a temperature of 200°C. As a result of the tensile test in three directions (0°, 45°, and 90° to the extrusion direction of the sheet) at room temperature, elongation of as-extruded AZ31 alloy (ECAP for 0 pass) showed an unusual anisotropic behavior depending on the extrusion direction although the yield strength and tensile strength are similar to the ECAPed AZ31 alloy. After ECAP for 4 passes at 200°C, microstructural observations of ECAPed magnesium alloy showed a significant grain refinement, which is leading to an equiaxed grain structure with average size of 2.5 μm. The microstructures of the extruded billet are observed by the use of an electron back-scattering diffraction (EBSD) technique to evaluate of the influence on the grain refinement during extrusion process and re-crystallization mechanism of AZ31 Mg alloy.

Key Words: ECAP pass, Anisotropic behavior, Microstructure, Magnesium alloy, Equal-channel angular pressing

1. 서 론

마그네슘 합금은 조밀육방(HCP) 구조로 상온에서 변형을 위한 슬립계가 부족하기 때문에 성형성이 취약하다는 단점을 갖고 있다. 따라서 마그네슘 합금의 산업적 적용분야를 확대하기 위하여 이를 개선하고자 합금 개발, 열처리 및 미세조직 제어를 통해서 성형성 향상을 위한 연구가 진행되고 있는 실정이다^{1,2)}. 그 중 미세조직 제어 연구는 강소성 가공법 (severe plastic deformation) 중의 하나인 등통로각압출 공정(equal channel angular pressing)을 적용하여 소재에 극심한 전단변형을 부과하여 초미세 결정립을 갖는 소재를 제조함으로써 기계적 강도와

성형 특성 향상시키는 연구 사례가 발표되었다³⁾. 그러나 ECAP 공정은 공정 특성상 최종 제품의 크기에 제한을 갖는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 등통로각압출 공정을 통해 조직 제어된 시편을 장선화가 가능한 직접 압출공정에 적용하였다. 여기서 직접압출 공정 전의 초기 등통로각압출 공정횟수를 변수로 적용하여 마그네슘 합금 압출판재의 기초물성 평가와 미세조직 변화를 관찰하고 소성변형율비(R-value)를 통해 이방성에 미치는 영향에 대하여 조사 분석하였다. 또한 조직 제어하지 않은 압출판재와 물성을 비교 평가에 하여 등통로각압출 공정의 영향도 고찰하였다.

1,† 교신저자 : (주)선우엔지니어링
E-mail: sunwooRND@hanmail.net

2. 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 상용 AZ31B 합금으로 Mg를 기본으로 2.89 Al, 0.96 Zn, 0.31 Mn 그리고 0.15 Fe (wt%)로 구성되어 있다. 직경 100 mm의 주조재를 압출비 약 2.7:1로 직접압출하여 직경 60 mm의 압출재로 제조한 후 시편의 균일성을 위해 압출재의 중심부로부터 직경 35 mm, 높이 70 mm의 봉형 등통로각압출 시편을 제작하였다. ECAP 공정은 채널각 $\Phi=112.5^\circ$, 모서리각 $\Psi=30^\circ$ 을 갖는 분리형 금형을 이용하여 공정방향은 매 공정마다 시편을 동일한 방향으로 90° 씩 회전시켜 삽입함으로써 다른 route에 비해 가장 균일한 미세조직을 얻는 것으로 알려져 있는 Bc로, 열간 공정 중에 발생할 수 있는 결정립 성장을 고려하여 473 K의 고정된 온도 조건에서 최대 4회 반복 공정을 수행하여 $\epsilon = 2.85$ 을 주었다.

ECAP 공정 후, 장선화 압출 판재를 얻기 위해 압출비 18.5:1, 0.5 mm s^{-1} 의 속도로, 온도 473 K에서 직접 압출하여 최종 폭 26 mm, 두께 2 mm를 갖는 압출판재를 가공하였다.

AZ31B 마그네슘 압출 판재의 기계적 물성치 및 이방성의 영향을 파악하기 위해 마이크로 인장시험을 수행하였고, 인장 시험은 상온에서 초기 변형률 속도 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 을 부과하였으며 시편은 ECAP 공정에 의한 이방성의 영향을 파악하기 위하여 압출 방향에 대하여 각각 0° , 45° , 90° 의 방향으로 채취하여 가공하였다. 또한 인장시험은 상온에서 수행하였으며, 압출판재의 소성이방성에 미치는 초기 ECAP 공정 횟수의 영향을 살펴보기 위해 각 조건에서 R-value를 구하였다.

인장 시험 후 기계적 물성치와 미세조직과의 상관관계를 분석하고자 ECAP 가공한 소재의 압출 방향에 수직 단면과 판재 압출한 소재의 압출방향에 수직단면과 표면에 대하여 미세조직을 관찰하였다.

또한 ECAP 공정을 거친 소재의 이방성 영향을 평가하기 위해 EBSD 분석을 수행하여 집합조직의 변화를 관찰하였다. 관찰된 시편은 판재 압출전과 후로 나누어 압출방향의 수직 단면을 0° 로 하여, 45° , 90° 를 관찰하였다. 시편 준비는 위와 동일하게 기계적 연마를 수행한 후 이온 밀링 (Gatan PIPS II™)을 이용하여 기계적 연마로 인해 변형된 표면과 산화층을 제거하였다. 연마 조건은 총 3단계로 이루어졌으며 첫번째 4 keV의 이온빔을 좌, 우 각도 6°

로 20분간 조사하고 두번째 3.5 keV의 이온빔을 각도 4° 로 1hr간 수행하였고 마지막 단계에서 3 keV, 각도 2° 로 10분간 수행하여 이온빔에 의한 표면 손상을 완화하였다. FE-SEM의 가속 전압은 15 keV, 작동 거리는 15 mm, 스테이지를 70° 회전시켜 EBSD 측정하였고 EBSD 패턴은 TSL OIM system을 이용하여, 측정 면적은 $50 \times 50 \mu\text{m}$ 의 면적을 step size는 $0.1 \mu\text{m}$ 로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 분석

ECAP 공정 이후 압출판재에 대한 기계적 물성 및 이방성의 영향을 분석하기 위해 판재의 3가지 방향에 대하여 일축 인장시험을 수행하였다. Fig. 1은 ECAP 공정을 수행하지 않고 압출공정을 진행한 소재와 ECAP 공정 후 압출공정을 수행한 소재로 나누어 응력-변형률 선도로 나타내었다.

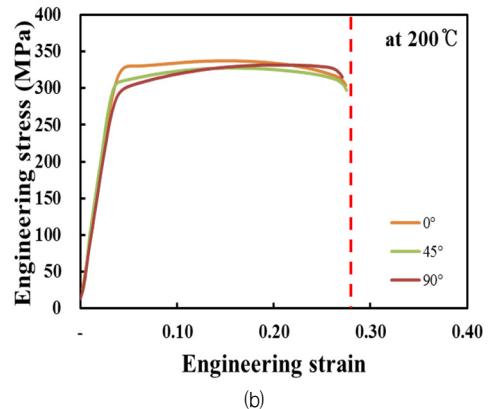
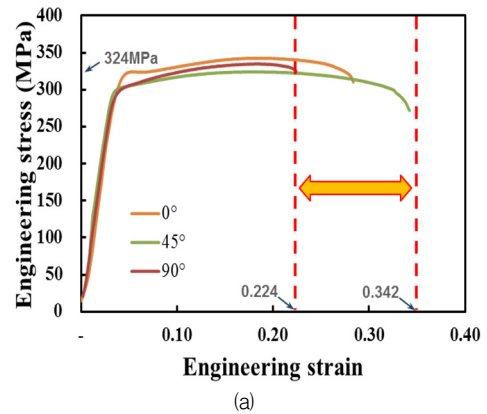


Fig. 1 Engineering stress-strain curves of sheet extrusion for (a) AZ31 billet and (b) ECAP for 4 passes

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 먼저 인장강도의 변화를 살펴보면, ECAP 공정을 수행한 압출판재의 항복강도는 각각 방향에서 ECAP 공정 없이 압출한 판재의 항복강도와 비슷한 수준을 유지하였지만 연신율에서는 ECAP 공정없이 압출한 판재가 각도별 최대 11.8% 차이를 보이는 것에 비해 ECAP 공정 후 압출판재는 0~90° 방향에서 최대 0.5%의 차이만을 나타내었다.

이는 ECAP의 반복공정에 의해 마그네슘 합금이 결정립 미세화를 이루면서 합금의 소성이방성이 줄어든 것으로 판단되며, 이를 보다 명확하게 관찰하기 위해 연신율의 변화를 공정 횟수별로 나누어 Fig. 2에 나타내었다.

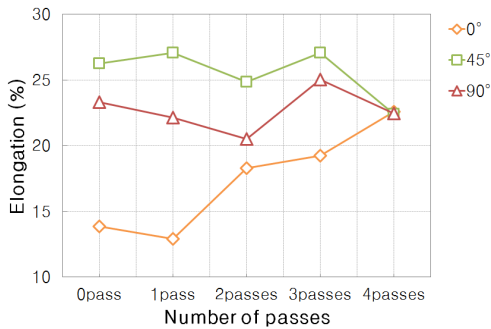


Fig. 2 Elongation in compression with increasing ECAP passes for AZ31 alloy

초기 ECAP 공정 횟수에 따른 연신율의 변화를 살펴보면, 공정 횟수가 증가할수록 각도별 연신율의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 위에서 언급한대로 ECAP 공정에 따른 결정립 미세화가 발생하여 수십 마이크로미터 크기의 미세조직이 평균 1 마이크로미터 이하의 크기로 미세화되었기 때문이며, 또한 반복공정에서 시편을 90°씩 한 방향으로 돌려 삽입하는 B_c 경로를 통해 그 효과가 더욱 증가하였기 때문이다⁹⁾.

추가적으로 상온에서 압출방향과 이루는 각도를 변수로 소성변형율비(r-value)를 측정하여 Fig. 3에 나타내었고 비록 ECAP 공정 후의 R-value 값은 크지만 일정한 수준을 유지한 것으로 보아 ECAP 공정 이후 압출판재의 균일 연신율의 결과와 일치한 것을 확인할 수 있다.

ECAP 공정을 수행하지 않은 압출판재의 소성변형율비는 압출방향 0°일 때 가장 작고, 압출방향의 각도가 클수록 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는

압출방향에 따른 이방성 차이가 현저하게 나타났음을 알 수 있다. ECAP 공정을 거친 압출판재의 경우 소성변형율비가 압출방향과 무관하게 일정한 수준을 유지하고 있다. R-value 값은 높을수록 시편의 두께 변화에 대한 저항성이 크다는 것을 의미하며, 비록 ECAP 공정 후의 R-value 값은 크지만 일정한 수준을 유지한 것으로 보아 ECAP 공정 이후 압출판재의 균일 연신율의 결과와 일치한 것을 확인할 수 있다.

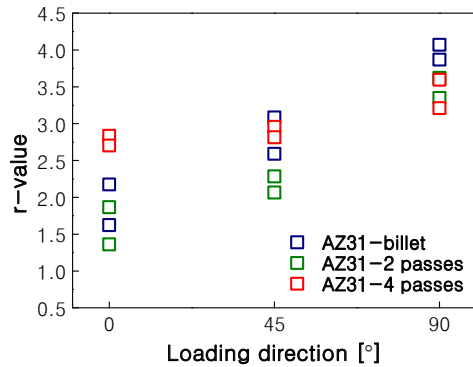


Fig. 3 R-value of AZ31 alloy extruded sheet without ECAP, ECAP for 2 passes and 4 passes

ECAP 공정에 따라 소재의 연신율과 소성변형률비의 변화 양상이 다르게 나타나는 원인을 분석하기 위해 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하여 Fig. 4에 나타내었다.

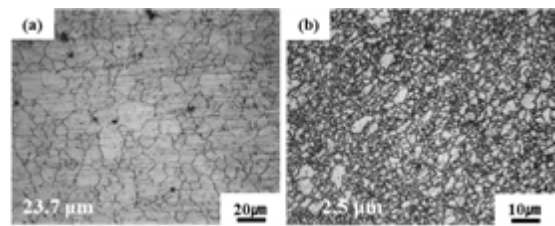


Fig. 4 Microstructures of AZ31 alloy (a) in extrusion condition without ECAP and (b) after ECAP for 4 passes.

AZ31 합금의 압출재와 4 passes 공정 후 판재의 미세조직을 비교해보면 평균 결정립 크기는 초기 압출재 23.7 μm, 4 passes 공정에서는 2.5 μm로 미세해졌고, 또한 불균일한 결정립들이 4 passes 공정 후 사라지는 것으로 보아 ECAP 공정에 통해 결정립 미세화와 동시에 등축적인 결정립을 갖는 것을 관찰할 수 있었다

Fig. 5는 ECAP 공정 없이 압출한 판재와 ECAP 공정 후 압출한 판재의 수직 단면과 압출방향을 관찰한 미세조직 사진이다.

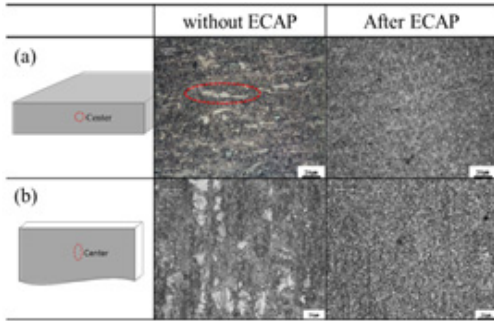


Fig. 5 Microstructures of AZ31 in sheet extrusion without ECAP and after ECAP: (a) center and (b) center of surface.

먼저 ECAP 공정을 수행하지 않고 압출판재 시편에서는 미세조직이 20~30 μm 의 크기를 갖는 길쭉한 결정립들이 압출 방향으로 늘어나 있는 것을 확인할 수 있었고, 압출 판재의 평균 결정립 크기가 1 μm 내외인 것을 감안하면 상당한 크기인 것으로 나타난다.

Fig. 5의 (a)에서 볼 수 있듯이, 압출 수직단면의 중심에서는 약 10 μm 의 크기를 갖는 결정립이 다수 관찰되었고, 폭 방향으로 길쭉한 형태의 미세조직이 불균일하게 분포되었다. 따라서 ECAP 공정을 수행하지 않고 압출한 판재에 잔류하는 길쭉하고 불균일한 결정립들이 기계적 특성 및 소성이방성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

반면 ECAP 공정 후 압출한 판재의 미세조직에서는 시편의 중심에서는 균일한 형태를 지닌 결정립들이 관찰되었고, 평균 결정립 크기는 0.9 μm 이다. 이러한 미세조직의 차이를 좀 더 명확하게 관찰하기 위해 압출방향의 표면 중심부의 미세조직을 측정 후 Fig. 5의 (b)에 나타내었다.

ECAP 공정 이후 압출 소재의 조직 사진은 수직 단면보다 오히려 표면에서 더 균일한 미세조직을 갖는 것을 관찰할 수 있었다. OM 영역에서는 결정립 크기를 측정하기 어려울 정도로 미세한 결정립을 갖고 있었다. 따라서 ECAP 공정여부가 2차 가공 후의 결정립의 크기와 형태에 따라 물성에 영향을 미치는 것으로 판단되며 나아가 소성이방성에도 영

향을 주는 것을 알 수 있다.

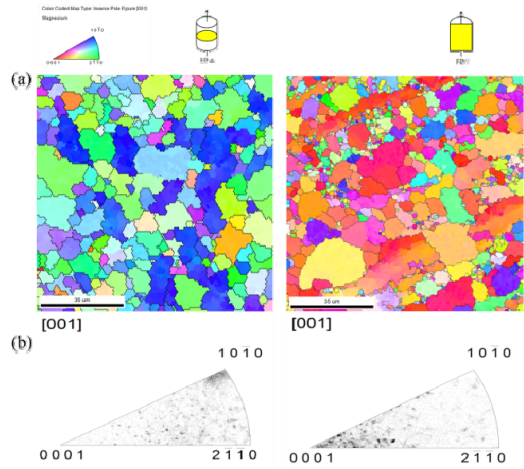


Fig. 6 OIM map observed on the 0 and 90° with respect to the extrusion direction in the as-extruded AZ31 Mg alloy: (a) OIM map and (b) IPF map.

또한 상온 인장강도와 연신율 등의 기계적 물성은 재료의 집합조직에 따라 달라질 수 있으며, HCP 결정구조를 가지는 마그네슘 합금의 경우 제한된 슬립기구로 인해 기계적 특성이 집합조직에 매우 의존적이다. 따라서 추후 AZ31 합금의 소성이방성 이상거동에 대한 집합조직의 영향을 알아보기 위해, 초기 소재와 압출판재의 집합조직을 압출방향에 따라 0°, 90°방향의 단면을 EBSD 분석을 통해 관찰하였다.

Fig. 6의 (a)에서 보이는 바와 같이, 초기 압출재의 0° 방향의 단면은 OIM map에서 조대한 결정립과 부분적으로 작은 결정립의 형태가 전체적으로 불균일하게 발달하고 있는 미세조직을 나타내고 있다.

또한 압출방향으로 연신된 결정립은 {0001}에 가까운 방향을 가지고 있으며, OIM 해석으로부터 계산된 역극점도(inverse pole figure)는 0°일 때 압출재의 압출방향과 수직하게 {101̄0} 결정면들이 놓여있는 <101̄0>/ED 집합조직이 발달하고 있다. basal 면에 놓여 있는 <101̄0> 방향은 압출면에 수직하게 축대칭으로 분포하고 있으며 집합조직의 발달양상이 소성이방성에도 영향을 미치는 것으로 판단되지만 이를 위해선 초기 압출재와 인장시험 후 판단이 발생한 소재에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 AZ31 마그네슘합금을 이용하여 등통로각압출 공정에서 조직제어된 시편으로부터 직접 압출공정에 적용하여 판재제조하였으며 초기 ECAP 공정 횟수를 공정 변수로 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) ECAP 공정 4회된 시편으로부터 직접 압출공정에 적용하여 평균 결정립의 크기가 1 μm 이하인 압출판재를 제조할 수 있었다. 이는 이전 ECAP 공정의 한계였던 최종 제품 크기의 단점을 개선했을 뿐 아니라 기존 압출 판재의 기계적 강도를 향상시켰음을 확인하였다.

2) 초기 등통로각압출 공정을 4단계 적용하였을 때, 판재의 압출 방향별 연신률의 값이 일정한 압출 판재를 제조할 수 있었다.

3) 또한 소성변형율비가 압출방향에 따라 일정한 값을 갖는 것을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

- 1) J. Bohlen, S.B. Yi, J. Swiostek, D. Letzig, H.G. Brokmeier, K.U. Kainer, "microstructure and texture development during hydrostatic extrusion of magnesium alloy AZ31", *Scr. Mater.* 53, pp. 259-264, 2005.
- 2) J. Bohlen, S.B. Yi, J. Swiostek, D. Letzig, H.G. Brokmeier and K.U. Kainer, *Scr. Mater.* Vol. 53, pp. 259-264, 2005.
- 3) R. Jahadi, M. Sedighi, H. Jahed, "ECAP effect on the micro-structure and mechanical properties of AM30 magnesium alloy", *Mater. Sci. Eng. A* 593, pp. 178-184, 2014.
- 4) Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon, "Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials", *Scr. Mater.* 35, pp. 143 - 146, 1996.