

AZ80 마그네슘 합금 압출재의 압축 성형조건에 따른 방위특성 분석

윤종현[#] · 이상익¹ · 이정환¹ · 박성혁¹ · 조재형¹

Texture Evolution of Extruded AZ80 Mg Alloy under Various Compressive Forming Conditions

J. H. Yoon, S. I. Lee, J. H. Lee, S. H. Park, J. H. Cho

(Received February 3, 2012 / Revised April 2, 2012 / Accepted April 12, 2012)

Abstract

With the increasing demand for light-weight materials to reduce fuel consumption, the automobile industry has extensively studied magnesium alloys which are light weight metals. The intrinsic poor formability and poor ductility at ambient temperature due to the hexagonal close-packed (HCP) crystal structure and the associated insufficient number of independent slip systems restricts the practical usage of these alloys. Hot working of magnesium alloys using a forging or extrusion enables net-shape manufacturing with enhanced formability and ductility since there are several operative non-basal slip systems in addition to basal slip plane, which increases the workability. In this research, the thermomechanical properties of AZ80 Mg alloy were obtained by compression testing at the various temperatures and strain rates. Optical microscopy and EBSD were used to study the microstructural behavior such as misorientation distribution and dynamic recrystallization. The results were correlated to the hardening and the softening of the alloy. The experimental data in conjunction with a physical explanation provide the optimal conditions for net-shape forging under hot or warm temperatures through control of the grain refinement and the working conditions.

Key Words : AZ80 Mg Alloy, EBSD(Electron Backscatter Diffraction), Basal Texture, Gleeble Machine, OIM

1. 서론

자동차를 비롯한 수송기기의 연비향상과 에너지 절감을 위하여 산업 전반에 걸쳐 마그네슘 합금의 적용이 확대되고 있는 추세이다. 알루미늄이나 철계 합금에 비하여 비강도와 비강성이 높은 마그네슘 합금은 비중이 1.7로서 최대 30~50%의 경량화를 이룰 수 있다[1, 2]. 조밀육방 격자 구조(HCP)를 갖는 마그네슘 합금의 경우, 낮은 성형성과 강한 이방성 등으로 인하여 대체소재로의 전환 및 상용화에 많은 어려움이 있다. 특히, 인

장과 압축 변형 시에 발생하는 소성 비대칭성으로 인하여 변형거동을 동시에 모델링 하기 어려우며 압축변형에 수반되는 쌍정(twin)의 발생으로 집합조직의 발달을 예측하기 어렵다. 이러한 마그네슘 합금의 비저면 슬립을 활성화하기 위하여 단조 성형 시, 고온 성형을 시도하고 있으며, 성형성 향상을 위한 재료의 미세조직 및 집합조직을 제어하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 열간 압출된 AZ80 Mg 합금의 성형온도, 변형률속도에 따른 물성 및 변형 특성을 평가하고 EBSD 를 이용하여 성형조건에 따른 AZ80

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소,
E-mail:jhyoon@kims.re.kr

Mg 합금의 집합조직 변화와 동적 재결정(Dynamic Recrystallization) 등의 효과를 관찰하고자 하였다.

2. 인장 및 압축시험

본 논문에서는 대표적 상용 마그네슘 합금인 AZ80 압출봉재를 사용하였으며 소재의 화학 조성은 Table 1 과 같다. 기본적으로 AZ80 Mg 합금의 상온 및 고온 물성데이터를 확보하기 위하여 변형률속도에 따른 인장시험과 압축시험을 수행하였다. Fig. 1 은 AZ80 압출봉재를 가공하여 준비된 인장시편(ASTM B557M)을 나타내며 압축시험은 직경 10mm, 높이 15mm (D10L15)의 원기둥 시편을 사용하였다. Fig. 2 는 상온에서 AZ80 Mg 합금의 준정적(quasi-static, 0.001/sec) 인장 및 압축시험 결과를 비교한 그래프이다. 인장 변형 시에 AZ80 Mg 합금의 유동응력은 전형적인 슬립 변형에 의한 형태로서 일반적인 알루미늄이나 스틸에서 나타나는 위로 볼록한 경화(hardening)곡선을 나타내지만, 압축 변형 시에는 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정이 형성되어 아래로 볼록한 형태의 경화곡선을 갖는다. 본 논문에서는 열간 단조 시에 적용되는 마그네슘 합금의 특성을 관찰하기 위하여 AZ80 Mg 합금의 다양한 성형조건에 따른 압축변형 특성 및 집합조직 변화에 초점을 맞추어 실험을 진행하였다.

압축시험은 Gleeble3800 을 이용하여 수행하였으며 성형온도 및 변형률속도 조건은 Table 2 와 같다. 압출 봉재로부터 채취된 압축시편의 경우, 채취 방향에 따라 압축 유동응력의 차이가 발생하게 된다. 따라서, Fig. 3 과 같이 압출 방향과 평행하게 가공된 시편은 ED(extrusion direction), 수직한 방향으로 가공된 시편(Fig. 3(b))은 TD(transverse direction)로 정의한 뒤, 두 종류의 시편에 대하여 압축시험을 수행하였다. Fig. 4 는 ED 압축시편에 대하여 온도조건 250, 300, 350, 400°C 와 변형률속도 0.001, 0.1, 1, 10/sec 에 대한 유동응력 분포를 나타낸다. 모든 성형조건에서의 유동곡선은 소성 변형이 진행됨에 따라 피크(peak) 유동응력에 도달한 뒤, 연화(softening)되면서 포화(saturation) 응력 상태에 도달하는 형태를 보이고 있다. 유동응력이 피크 유동응력에 도달하는 양상을 살펴보면 Fig. 4(a), 10/sec 과 같이 아래로 볼록한 형태로 경화가 진행되는 경우가 있는 반면, Fig. 4(d), 10/sec 과 같이 위로 볼록한 형태의 경화가 발생하는 경우가 있다. 변형 초기 낮은 경화율을 보이는 아래로 볼

Table 1 Chemical composition of AZ80 Mg alloy (wt, %)

Al	Zn	Mn	Cu	Si	Mg
8.10	0.52	0.25	≤0.05	≤0.10	Bal



Fig. 1 Tensile specimen

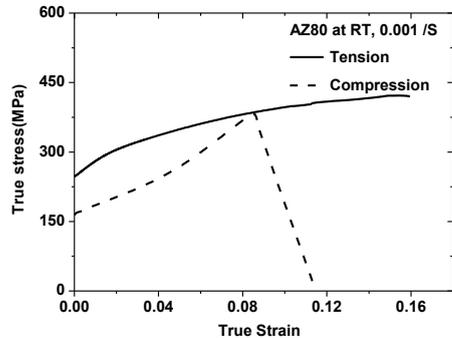


Fig. 2 Comparison of tensile and compressive flow curves for AZ80 Mg alloy

Table 2 Condition for simple compression test

Temperature (°C)	250, 300, 350, 400
Strain rate (/sec)	0.001, 0.1, 1, 10

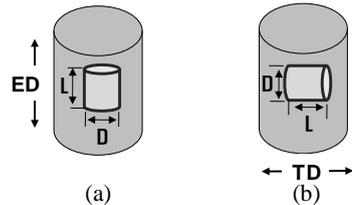


Fig. 3 Specimen orientations for compression test from extruded AZ80 Mg alloy

록한 경화곡선은 성형온도가 낮을수록 그리고 변형률 속도가 높을수록 뚜렷이 나타나며 이는 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정 발생이 낮은 온도와 높은 변형률 속도에서 용이해지기 때문이다. 성형 온도가 증가함에 따라 비저면 슬립의 임계분해 전단응력(CRSS, critical resolved shear stress)이 감소하여 쌍정의 형성이 억제되고 슬립이 용이하게 활성화되어, 대부분의 유동곡선이 위로 볼록한 형태를 보인다. 또한, 변형률속도가 증가함에 따라 변형률속도 경화

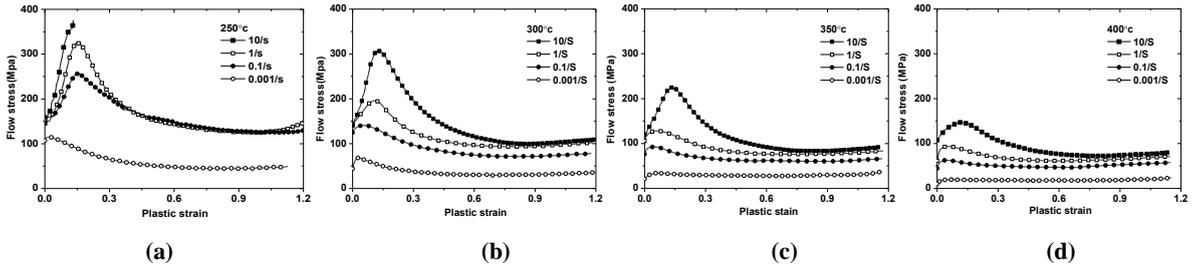


Fig. 4 Thermomechanical flow curves of AZ80 Mg alloy

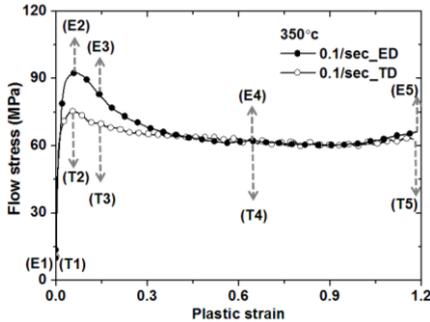


Fig. 5 Comparison of flow stresses according to specimen orientations

Table 3 Imposed strain at the specific position

ED specimen		TD specimen	
Position	Strain	Position	Strain
(E1)	0	(T1)	0
(E2)	0.06	(T2)	0.05
(E3)	0.19	(T3)	0.15
(E4)	0.68	(T4)	0.68
(E5)	1.20	(T5)	1.20

(strain rate hardening)를 보이고 있으며 0.001/sec 변형률속도의 유동곡선을 제외하고 모든 곡선들이 0.6 이상의 변형률 영역에서 비슷한 크기의 유동 응력으로 포화되는 것을 관찰할 수 있다.

AZ80 Mg 합금의 방향 별 유동응력을 서로 비교하기 위하여 압축 봉채로부터 압축방향에 수직인 압축시편(TD)을 가공하여 압축시험(350°C, 0.1/sec)을 수행하였다. Fig. 5 는 ED 와 TD 시편의 압축 유동응력을 비교한 결과이다. TD 시편의 유동응력을 관찰하면 피크 값에 도달한 뒤 ED 시편에 비하여 연화가 크게 일어나지 않고 포화되고 있다. AZ80 Mg 합금의 방향 별 유동응력 차이를 미시적으로 분석하기 위하여 Fig. 5 와 같이 ED, TD 시편에 일정한 변형률을 부과한 뒤, 방위변화와 결정

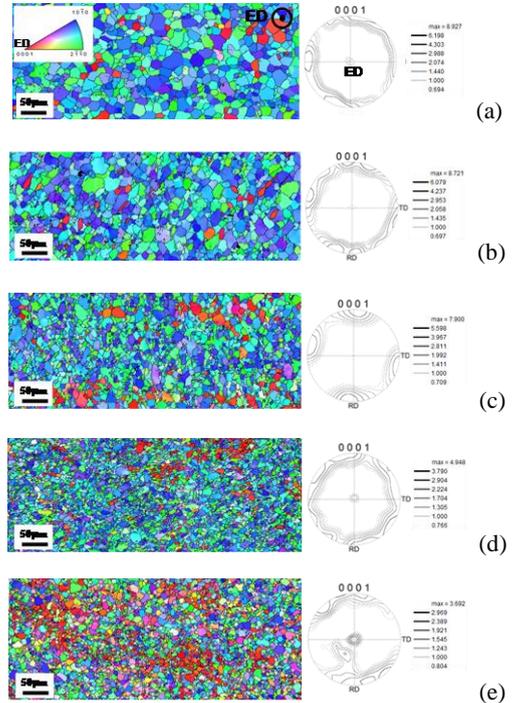


Fig. 6 EBSD inverse pole figure map and basal pole figure of ED specimen with increase of plastic strain: (a) initial; (b) 0.06; (c) 0.19; (d) 0.68; (e) 1.2

립 변화를 관찰하였다. 변형률속도에 따른 집합조직 효과를 최소화하기 위하여 0.1/sec 으로 압축속도는 고정하였다. 각 유동곡선 상에서 특징적인 변화를 갖는 지점을 Table 3 과 같이 선정한 뒤, 일정한 압축 변형률을 부과하여 조직 실험을 위한 시편을 가공하였다.

3. EBSD를 이용한 집합조직관찰

3.1 변형률 증가에 따른 집합조직 변화

EBSD 분석을 수행하기 위하여 특정한 변형률이 부과된 ED, TD 시편 각 5 개, 총 10 개의 시편을 기계 연마 후에 전해연마 하였다. 전해연마는 뷰틸 150ml, 에탄올 30ml 와 과염소산 15ml 를 이용하였다. EBSD 실험은 Schottky 방식의 HITACHI SU6600 FE-SEM 전계방출형 주사전자현미경을 이용하였다. ED 시편의 경우 초기 압출봉재의 집합조직으로 인하여 Fig. 6(a)와 같이 $\{10\bar{1}0\}$, $\{2\bar{1}\bar{1}0\}$ 의 조직이 지배적으로 나타나고 있다. Fig. 6(b)에서는 수 개의 쌍정이 관찰되고 있지만, 350°C의 비교적 높은 성형온도에서 쌍정의 분율(fraction)은 매우 낮은 것으로 관찰되었다. 소성변형률이 증가함에 따라 결정립계의 굴곡(corrugated)이 심해지며 (Fig. 6(c)), 이를 따라서 미세한 결정립들이 생성되는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 전형적인 동적 재결정은 변형률 0.19, 즉, 유동곡선 상에서는 피크 응력과 포화 응력의 중간지점에서 시작되고 있다. 동적 재결정으로 인한 결정립 크기의 감소로 인하여 변형률 0.68을 부과한 시편에서는 전 영역에 걸쳐 균일한 결정립 미세화가 진행되었다 (Fig. 6(d)). 일반적으로 HCP 구조를 갖는 마그네슘 합금은 온간 및 열간 변형 시 기저면이 압축방향에 수직하게 배열되어 basal 집합조직이 형성된다. Fig. 6(e)의 pole figure를 보면 basal 집합조직이 급격하게 증가한 것을 관찰할 수 있으며 측정 영역의 방위가 등축정(equiaxed)화 된 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 TD시편의 변형률 증가에 따른 집합조직 변화를 나타낸 그림이다. 초기 시편에서 기저면이 압출방향과 평행하게 배열된 전형적인 압출 집합조직이 지배적으로 관찰되고 있으며 ED 시편과 같이 변형률 0.15 지점에서 동적 재결정이 시작되고 있다. Fig. 8은 변형률 증가에 따른 ED, TD 시편의 평균 결정립 크기 변화를 나타낸다. 동적 재결정으로 인하여 결정립 크기가 감소하고 있으며, ED와 TD 방향의 유동응력이 거의 일치하게 되는 변형률 0.68영역에서 평균 결정립 크기 역시 8 μm 로 수렴하는 것을 볼 수 있다. TD 시편과 비교하여 ED 시편의 평균 결정립 크기 감소율이 변형률 0.19에서 매우 큰 것을 확인할 수 있다(Fig. 8). ED와 TD 시편의 가장 큰 차이점은 초기 집합조직의 분포인 점을 고려할 때, ED와 TD의 유동응력 차이는 초기 집합조직의 변화에 기인한다고 할 수 있다. TD 시편은 초기 basal 집합조직이 지배적인 구조를 갖고 있어 변형률이 증가함에 따라 basal 집합조직이 강화될 뿐 변화가 크지 않지만,

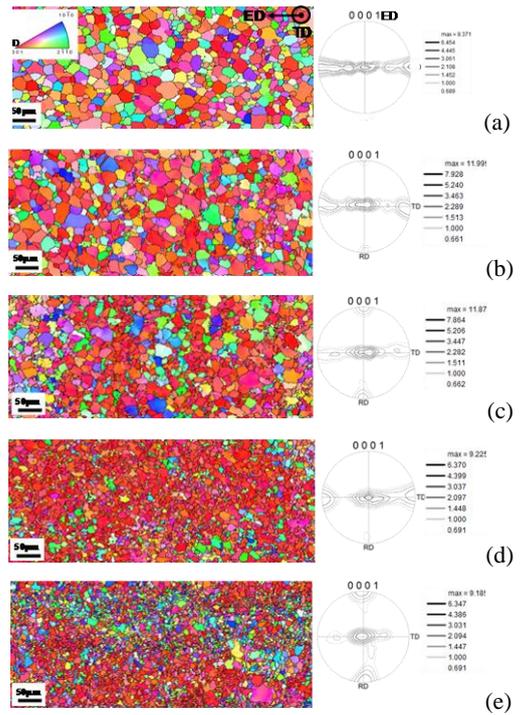


Fig. 7 TD Inverse pole figure map and basal pole figure of TD specimen with increase of plastic strain: (a) initial; (b) 0.05; (c) 0.15; (d) 0.68; (e) 1.2

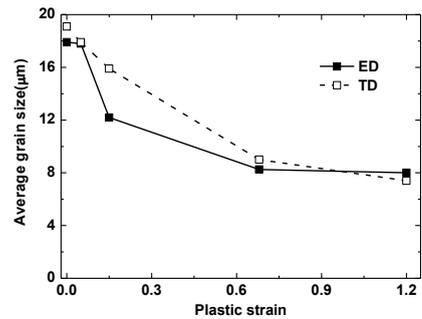


Fig. 8 Average grain size with increase of plastic strain

ED 시편의 경우 HCP의 기타 집합조직(prismatic, pyramidal)에서 basal 집합조직으로의 변화가 상대적으로 많기 때문에 유동응력의 차이를 발생시킨다고 판단된다. 또한, AZ80압축 시편의 방향 별 유동응력 차이는 피크 응력이 발생하는 변형률 영역에서 쌍정의 발생으로 인하여 발생된다고 할 수 있다. ED 시편의 경우 피크 응력이 발생하는

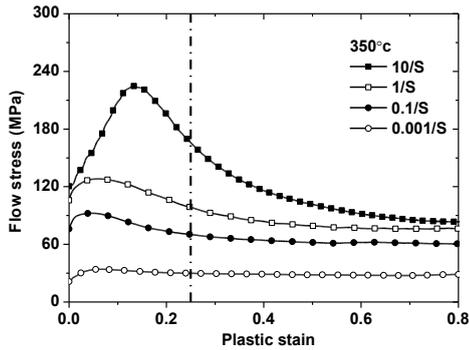


Fig. 9 Imposed strain at various strain rates

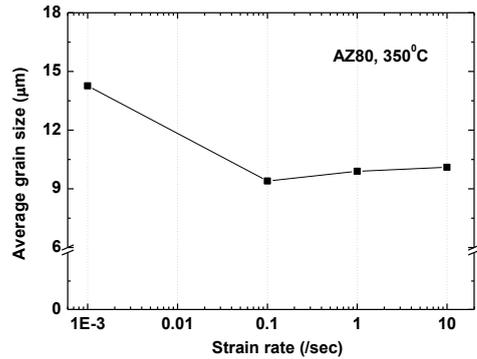


Fig. 11 Average grain size according to strain rate

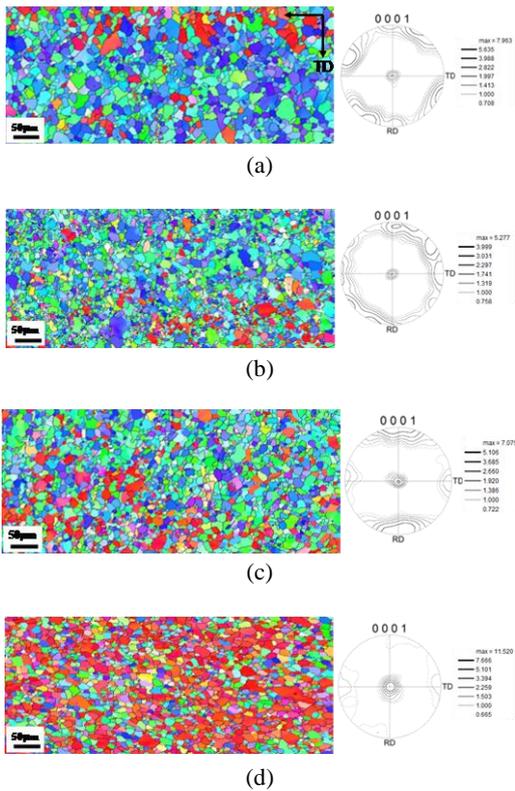


Fig. 10 ED Inverse pole figure map and pole figure of ED specimen at strain of 0.25 according to various strain rates: (a) 0.001; (b) 0.1; (c) 1; (d) 10/sec

변형률 부근까지 낮은 분율의 쌍정이 관찰되었지만 TD 시편의 경우 쌍정의 발생을 찾아볼 수 없었다. ED 시편에서 피크 응력이 나타나는 변형률 근처에서 발생된 쌍정으로 인하여 동적 재결정이

가속화되고 유동응력의 연화가 급격히 발생하게 된다. 이에 대한 분석은 지속적인 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.2 변형률속도에 따른 집합조직 변화

변형률속도에 따른 AZ80 Mg합금의 집합조직 변화를 관찰하기 위하여 다양한 변형률속도(0.001, 0.1, 1, 10/sec) 조건으로 350°C에서 압축 변형률 0.25(Fig. 9)를 부과하여 EBSD 시편을 제작하였다. Fig. 9에서 제시된 바와 같이 일정한 변형률이 부과되었을 때, 변형률속도가 증가할수록 basal 집합조직의 분율이 증가하였으며, 10/sec에서는 basal pole의 강도가 급격히 증가한 것을 관찰할 수 있다(Fig. 10). 평균 결정립 크기는 0.001/sec(14.3μm)을 제외하고 모두 9.5~10μm 범위를 갖는 것으로 관찰되었다(Fig. 11). 준정적 변형률속도(0.001/sec)에서는 동적 재결정의 시점이 지연되어 결정립 미세화가 늦게 이루어질 뿐만 아니라 결정립의 방위변화율도 낮은 것으로 관찰되었다. 이와 반면, 변형률속도가 증가함에 따라 동적 재결정에 의한 결정립 미세화 뿐만 아니라 basal 집합조직으로의 방위변화도 빠르게 진행되는 것으로 관찰되었다. 특정 변형률속도(0.1/sec) 이상에서는 동적 재결정에 의한 결정립 미세화는 둔화되고 방위변화만 급격하게 증가하는 결과를 관찰하였다. 이러한 원인으로서는 높은 변형 온도일지라도 높은 변형률속도(10/sec)에서 쌍정이 쉽게 발생하여 급격한 방위변화를 유도했다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 상용 마그네슘 합금인 AZ80 압

출재를 이용하여 상온인장 및 소재 방향별 압축 실험을 수행하였으며 유동응력을 데이터베이스화 하여 성형조건에 따른 유동응력 곡선의 특징을 분석하였다. 또한 EBSD를 이용하여 변형률 및 변형률 속도에 따른 집합조직의 변화를 관찰하였다. 250~400°C 온도 영역에서 변형률이 증가함에 따라 동적 재결정이 발생하여 결정립 미세화가 진행되었으며 basal 집합조직이 발달되는 것을 관찰하였다. 변형률속도가 증가함에 따라 basal 집합조직이 급격히 발달하였으나 결정립 크기에는 큰 변화가 없었다.

참 고 문 헌

- [1] S. H. Park, S. G. Hong, J. H. Lee, C. S. Lee, 2010, Effect of $\{10\bar{1}2\}$ Twinning Characteristics on the Deformation Behavior of Rolled AZ31 Mg Alloy, Trans. Mater. Proc., Vol. 19, No. 7, pp. 416~422.
- [2] I. Ulaciaa, C. P. Salisburyb, I. Hurtadoa, M. J. Worswickb, 2011, Tensile Characterization and Constitutive Modeling of AZ31B Magnesium Alloy Sheet Over Wide Range of Strain Rates and Temperatures, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 211, No. 5, pp. 830~839.