

# Mg-Sn-Al-Zn 마그네슘 합금 간접압출재의 미세조직 및 소성이방성

박성혁<sup>#</sup> · 김영민<sup>1</sup> · 김하식<sup>1</sup> · 임창동<sup>1</sup> · 유봉선<sup>1</sup>

## Microstructure and Yield Asymmetry Behavior of Indirect-extruded Mg-Sn-Al-Zn Alloys

S. H. Park, Y. M. Kim, H. S. Kim, C. D. Yim, B. S. You

(Received June 28, 2012 / Revised July 19, 2012 / Accepted July 20, 2012)

### Abstract

Mg-(9-x)Sn-xAl-1Zn (x=1, 2, 3 and 4 wt.%) alloys were subjected to indirect extrusion, and the microstructure and mechanical properties of the as-extruded Mg-Sn-Al-Zn (TAZ) alloys were investigated. The TAZ 811 alloy exhibited a finer grain structure than the TAZ 541 alloy due to a larger number of Mg<sub>2</sub>Sn particles, which pinned the grain boundaries and prevented growth of recrystallized grains. The TAZ alloys showed an unusual yield asymmetry behavior. The tension-compression yield asymmetry increased with decreasing average grain size. The TAZ 811 alloy with a small grain size exhibited a larger yield asymmetry than that of the TAZ 541 alloy having a relatively large grain size, which is mainly attributed to the low Al content and large number of second phase particles in the TAZ 811 alloy.

**Key Words** : Magnesium Alloy, Indirect Extrusion, Microstructure, Yield Asymmetry, Particles

### 1. 서 론

마그네슘 합금은 사용 가능한 구조용 소재 중 가장 밀도가 낮은 경량 금속 소재이면서, 높은 비강도, 뛰어난 기계가공성, 진동흡수능, 전자파 차폐성과 같은 우수한 특성으로 인해 자동차 산업 및 전자부품 산업에 주목을 받고 있는 재료이다. 현재 사용중인 마그네슘 합금 부품은 주조재가 주류를 이루었으나, 최근 들어 기계적 물성이 우수한 가공재(압출재, 압연재, 단조재 등)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 압출재의 경우에 있어, AZ61, AZ80, ZK60 과 같은 상용 마그네슘 합금은 알루미늄 합금 대비 매우 낮은 최대압출속도를 가지고 있어 마그네슘 압출재 적용에 주

요한 장애물로 여겨지고 있다 [1]. 이러한 상용 마그네슘 합금이 낮은 압출속도를 보이는 이유는 낮은 녹는점을 가지는 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>, MgZn<sub>2</sub> 이차상이 압출 중에 발생하는 높은 열에 의해 국부적인 용해가 발생하고 이로 인해 표면에서 터져나가는 hot tearing 현상이 발생하기 때문이다. 이를 해결하고 최대압출속도를 향상시키기 위해 낮은 녹는점을 가지는 이차상 대신 열적으로 안정한 이차상을 형성시키는 합금들이 개발되고 있다. 그 중, Mg-Sn 합금은 열적으로 매우 안정한 Mg<sub>2</sub>Sn 이차상을 형성시킴으로서 분당 20m에 이르는 매우 높은 속도까지 압출이 가능하다.

또한 간접압출 공정의 경우 빌렛의 뒷부분에서 압력이 가해지는 직접압출과 달리 빌렛이 나오는

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

전방에서 압력이 가해지므로 압출 중에 빌렛이 이동하지 않아 빌렛과 콘테이너벽 사이에 마찰이 발생하지 않는다. 이러한 마찰 감소로 압출 시 하중이 감소하게 되어 압출을 용이하게 해준다. 이와 같이 마찰열과 압출하중의 감소로 인해 간접압출의 경우 직접압출에 비해 빠른 속도에서 압출을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 고강도 고속 압출용 합금인 Mg-Sn-Al-Zn 합금을 간접압출법을 통해 압출한 후 조성에 따른 미세조직과 기계적 물성 변화를 조사하였다. 또한 이들 합금들에서 나타나는 소성이방성 이상거동에 대해서도 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 소재는 Mg-(9-x)Sn-xAl-1Zn ( $x=1,2,3$ , and 4wt.%) 합금으로 Mg-8Sn-1Al-1Zn (TAZ811), Mg-7Sn-2Al-1Zn(TAZ721), Mg-6Sn-3Al-1Zn (TAZ631), Mg-5Sn-4Al-1Zn(TAZ541) 4 개의 합금이다. 압출을 위한 빌렛은 CO<sub>2</sub> 와 SF<sub>6</sub> 의 혼합보호 가스 주입하에 용해시킨 후 700°C 에서 안정화된 용탕을 200°C 로 예열된 스틸몰드에 부어 제조하였다. 이러한 빌렛은 평형상태도 하에서 단상영역에 속하는 온도에서 8 시간동안 균질화 처리 후 과고용체(supersaturated solid solution) 상태로 만들기 위해 수냉(water quenching)시켰다. 균질화처리된 빌렛은 직경 80mm, 길이 200mm 로 가공 후 저장호에서 250°C 에서 1 시간 예열한 뒤, 500kN 급 압출기를 이용하여 250°C 에서 출구속도 2m/min, 압출비 25:1 로 간접압출(indirect extrusion)을 수행하였다. 압출 후 압출봉체의 최종직경은 16mm 이다.

압출봉체를 가공하여 얻어진 게이지 직경 6mm, 게이지 길이 25mm를 가지는 인장시험편과 직경 10mm, 높이 15mm를 가지는 원기둥 압축시험편을 INSTRON 4206 시험기를 이용하여 상온에서 0.001/sec의 변형률 속도로 인장, 압축 시험을 수행하였다.

그리고 압출재의 집합조직 분석을 위해 2400 번 abrasive paper 까지 연마한 시편의 표면에 X-ray diffraction 을 통해 {0002} pole-figure 를 관찰하였다. 극점도 (pole figure)관찰에는 RICA KU-DMAX X-ray diffractometer 가 사용되었으며, 압출 방향과 평행한 방향 (ED 방향)에서 X-선을 조사하였다.

미세조직과 석출물 분석을 위해 전계방사형 전자현미경(FE-SEM) SU6600 장비에 내장된 전자 후

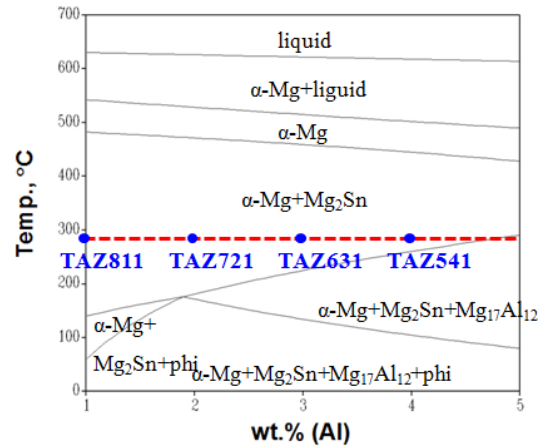


Fig. 1 Stable phase diagram calculated with PANDAT software

방산란 회절(EBSD)과 전계방사형 투과전자현미경(FEG-TEM) JEM-2100F 를 사용하였다. EBSD scan 은 TSL data acquisition software 를 통해 이루어졌으며, 분석은 TSL OIM analysis software 를 사용해 confidence index(CI) 0.1 이상의 데이터에 대하여 이루어졌다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 압출재의 미세 조직

Fig. 1 은 PANDAT7.0 software 를 통해 구해진 Mg-(9-x)Sn-xAl-1Zn 합금의 평형 상태도이다. 250°C 에서 압출이 수행되었으나 압출 중에 발생하는 가공발열(deformation heating)로 인해 압출직 후 출구에서 측정된 온도는 약 290°C 였다. 이는 압출시 변형이 일어나는 영역에서의 실제 온도에 가까운 값으로 290°C 부근에서 압출이 진행될 경우 Fig. 1 에 보이는 바와 같이 Al 과 Sn 함량에 상관없이 4 개의 TAZ 합금 모두 a-Mg 와 Mg<sub>2</sub>Sn 상으로 이루어진 영역에 속하게 된다. 이를 통해 균질화 열처리를 통해 a-Mg 단상을 가지는 빌렛은 압출에 의해 단지 Mg<sub>2</sub>Sn 이차상만이 형성될 것으로 예측할 수 있다.

이러한 예측은 압출재의 XRD 분석 결과와 잘 일치한다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 Mg-Al 또는 Mg-Zn 상에 대한 peak 은 전혀 관찰되지 않으며, 단지 a-Mg 과 Mg<sub>2</sub>Sn 상의 peak 만 관찰되었다. 따라서, TAZ541 합금과 같이 4wt.%의 비교적 높은 Al 의 첨가에도 불과하고 본 연구의 압출 조건에

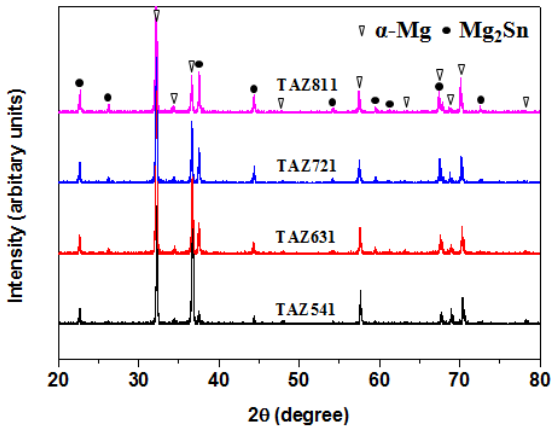


Fig. 2 X-ray diffraction patterns of TAZ alloys

서는 열적으로 불안정한  $Mg_{17}Al_{12}$  이차상이 형성되지 않으며, 1wt.% Zn 첨가로 인한  $MgZn_2$  석출상도 존재하지 않는다. 따라서, TAZ541, TAZ631, TAZ721, TAZ811 합금 압출재는 단지  $Mg_2Sn$  석출상만이 존재한다.

Fig. 3은 TAZ 합금 압출재들의 수직단면에 대한 EBSD 결과를 보여준다. 모든 합금이 등축정의 균질한 조직을 보이고 있으며, 이는 압출 동안에 동적재결정 (dynamic recrystallization)이 재료 전반에 걸쳐 발생하였음을 의미한다. 이러한 TAZ 합금 압

출재의 평균 결정립 크기는 동일한 조건에서 압출한 AZ31 합금의 결정립 크기( $\sim 10\mu m$ )보다 작으며, Sn 함량이 증가함에 따라 점차 감소함을 알 수 있다. 이는 Sn 함량이 증가함에 따라 압출 시 동적 석출되는  $Mg_2Sn$  상의 양이 증가하게 되고 이러한 미세한  $Mg_2Sn$  석출상은 pinning 효과를 통해 재결정으로 새롭게 생성된 결정립이 성장하는 것을 막는 역할을 하여 결정립을 미세화 한다.

이는 Fig. 4의 TEM 관찰 결과와도 잘 일치한다. Sn 함량이 적은 TAZ541의 경우 수십 nm 크기를 가지는 구형의  $Mg_2Sn$  석출상이 조직 내 균일하게 분포되어 있고, Sn 함량이 증가함에 따라 수십 nm에서 수백 nm의 석출상이 다양하게 분포되어 있으며 석출상의 양 또한 증가하고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 생성된 모든 석출상들은 TEM-EDS 분석 결과  $Mg_2Sn$  상이었다.

### 3.2 압출재의 인장특성

Fig. 5는 압출재의 인장특성 변화를 나타낸 것으로, 합금별 인장 물성값은 Table 1에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 Sn 함량이 증가함에 따라 항복강도가 점차 증가한다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 Sn 함량이 증가함에 따라 미세한  $Mg_2Sn$  석출상이 증가하고 이로 인해 결정립 성장이 억제되어, 결정립 미세화로 인한 강화 효과와

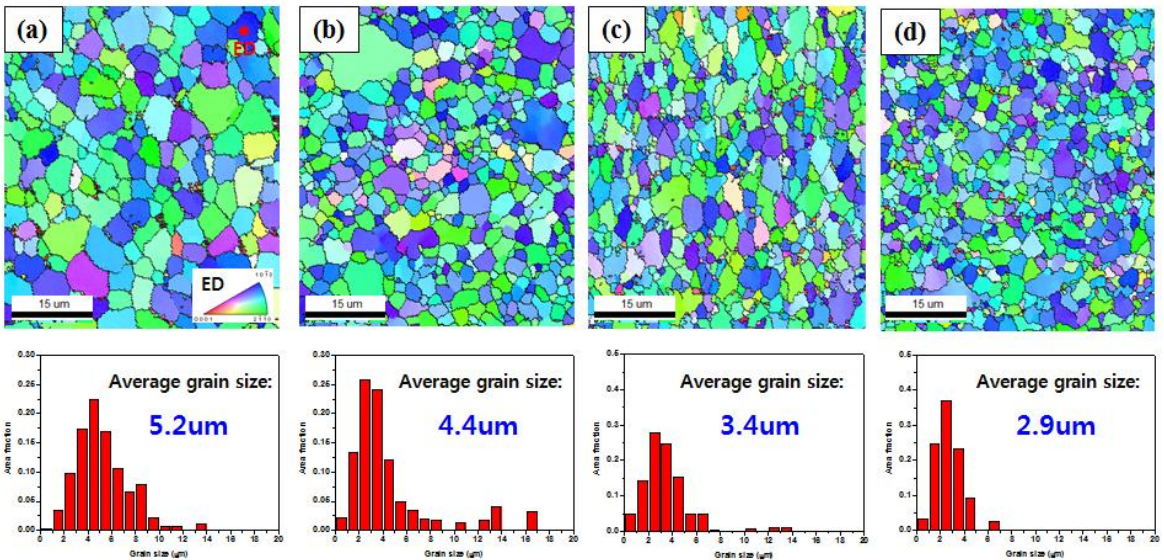


Fig. 3 EBSD results: ED inverse pole figure maps and grain size distributions of (a) TAZ541, (b) TAZ631, (c) TAZ721, and (d) TAZ811 alloys

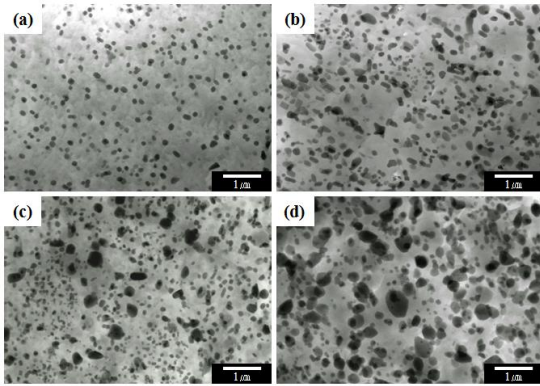


Fig. 4 TEM images of (a) TAZ541, (b) TAZ631, (c) TAZ721, and (d) TAZ811 alloys

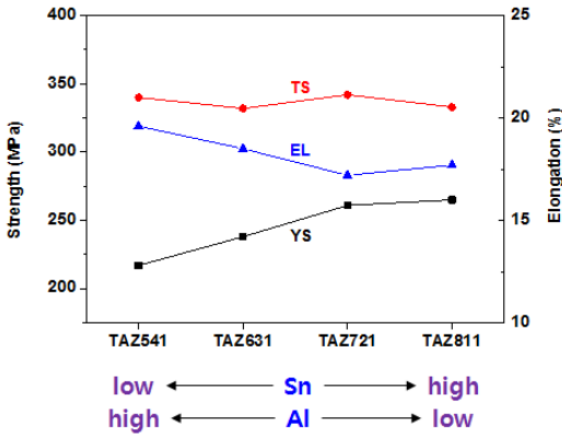


Fig. 5 Evolution of mechanical properties

Alloy	YS (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)
TAZ541	217	340	19.6
TAZ631	238	332	18.5
TAZ721	261	342	16.6
TAZ811	265	333	17.7

출상에 의한 석출강화 효과로 인해 항복강도가 증가하게 된다. 한편, Al 함량이 증가하면 가공경화 능력이 증가하게 되므로, TAZ541 합금의 경우 비교적 큰 결정립과 적은 석출상 양으로 인해 낮은 항복강도를 가짐에도 불구하고 4wt.%의 높은 Al 함량으로 인해 항복 이후 큰 가공경화가 발생하여 높은 인장강도를 가지게 된다. 이와 같이 Sn 첨가량 증가로 인한 결정립강화 및 석출강화 효과와

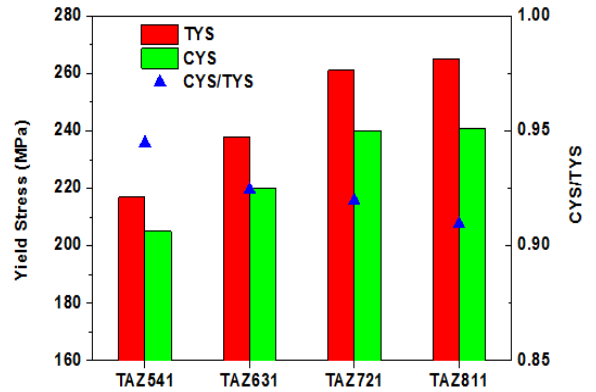


Fig. 6 Tensile and compressive yield stresses and yield asymmetry

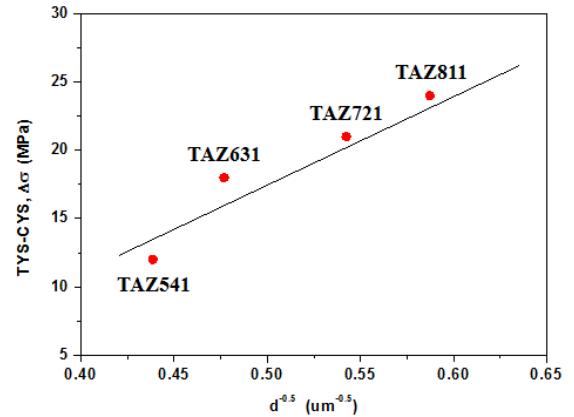


Fig. 7 Relationship between yield asymmetry and average grain size

Al 첨가량 증가로 인한 가공경화 효과가 상충되어 Sn 과 Al 함량이 각기 다른 4 개의 TAZ 합금의 인장강도는 유사한 값을 가지게 된다. 이는 Sn 과 Al 함량의 조절을 통해 압출재의 인장물성을 임의로 조절 가능함을 의미한다.

### 3.3 압출재의 소성이방성

Fig. 6 은 압출재의 인장 및 압축 항복강도와 소성이방성(압축항복강도 / 인장항복강도)을 나타낸 것이다. Sn 함량이 증가함에 따라 인장항복강도와 압축항복강도는 점차 증가한다. 그러나 인장항복강도의 증가량 보다 압축항복강도의 증가량이 작아 Sn 함량이 작을 수록 소성이방성은 감소한다. 즉, TAZ541 합금이 보다 1 에 가까운 값을 보인다. 일반적으로 소성이방성은 결정립 크기가 감소함에



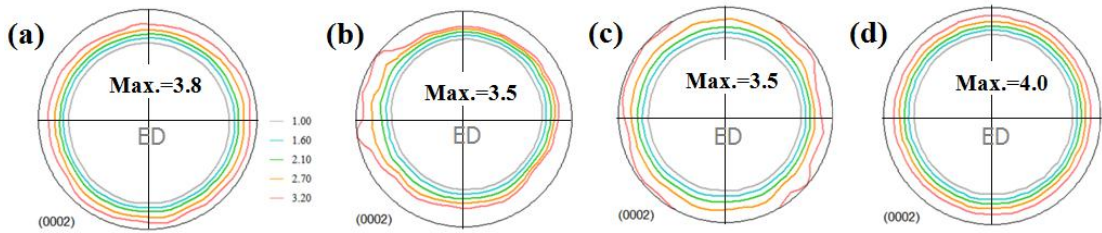


Fig. 8 XRD (0002) pole figures of (a) TAZ541, (b) TAZ631, (c) TAZ721, and (d) TAZ811 alloys

따라 감소하는 것으로 알려져 있다[2]. 그러나, TAZ 합금 압출재는 Fig. 7 과 같이 결정립 크기가 가장 작은 TAZ811 합금에서 가장 큰 소성이방성으로 보이며, 결정립 크기가 가장 큰 TAZ541 합금에서 낮은 소성이방성을 보이는 이상거동(unusual behavior)을 보인다. 이는 Al 함량과 석출물의 차이에 의한 것으로 판단된다. Al 함량이 증가하면 결정립 내의 고용강화와 슬립의 활성화 변화로 인해 소성이방성이 감소하는 것으로 보고되고 있다 [3]. 따라서, TAZ541 합금의 경우 결정립은 비교적 크지만 높은 Al 함량으로 인해 낮은 소성이방성을 나타낼 수 있다.

또한, 석출물로 인해 쌍정전위의 응력이 증가하게 되고, 이는 {10-12} 쌍정 형성을 촉진시킨다 [4]. 이러한 쌍정 형성을 촉진시키는 석출물로 인해 야기되는 Orowan 응력은 아래의 식과 같으며,

$$\Delta\tau = \left( \frac{Gb}{2\pi\lambda\sqrt{1-\nu}} \right) \log \frac{d_p}{r_0}$$

여기서  $G$  는 전단탄성계수(shear modulus),  $b$  는 버거스 벡터 크기(magnitude of Burgers vector),  $\nu$  는 포아송비(Poisson ratio),  $r_0$  는 전위핵 반지름(dislocation core radius),  $\lambda$  는 석출물간의 거리(interparticle spacing),  $d_p$  는 석출물의 유효지름(effective particle diameter)을 의미한다. 따라서 석출물의 간격이 좁을 수록 그리고 석출물의 크기가 클수록, 석출물 주위에 보다 큰 Orowan 응력이 발생하게 된다. 따라서, Fig. 4 의 TEM 결과에서와 같이 TAZ811 합금이 석출물 양이 가장 많고 크기 또한 크므로 쌍정 형성을 촉진시키는 Orowan 응력 또한 가장 크게 발생된다. 즉, Sn 함량이 클수록 석출물 주위에 형성되는 Orowan 응력이 증가하여 쌍정이 용이하게 발생하게 되고 이로 인해 쌍정변형이 주가 되는 압축 시험시 Sn 함량이 높은 합금에서 응력 감소 효과가 커지게 된다. 따라

서, TAZ811 합금이 작은 결정립 크기에도 불구하고 많고 큰 석출물로 인해 압축항복강도가 낮아지는 효과가 커져 인장과 압축의 항복강도 차이가 증가하여 큰 소성이방성을 보이게 된다.

또한, 항복 및 인장강도는 재료의 집합조직에 따라 달라질 수 있으며, HCP 결정구조를 가지는 마그네슘의 경우 제한된 슬립기구로 인해 기계적 물성이 집합조직에 매우 의존적이다. TAZ 합금의 소성이방성 이상거동에 대한 집합조직의 영향을 알아보기 위해, 압출재의 수직단면에 압출방향으로 X-ray 를 조사하여 Fig. 8 과 같이(0002) 기저면 집합조직을 얻었다. Fig. 8 에서 보이는 바와 같이, 모든 압출재는 기저면이 압출방향과 평행하게 배열되어 있는 전형적인 압출재 집합조직을 보이고 있으며, 최대 강도(maximum intensity) 또한 유사한 값을 보이는 것으로 보아 집합조직은 소성이방성 이상거동에 영향을 주지 않은 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 간접압출 공정을 통해 얻어진 Mg-(9-x)Sn-xAl-1Zn(TAZ811, TAZ721, TAZ631, TAZ541) 합금 압출재에 대하여 합금 성분에 따라 조직 및 물성 변화를 살펴보고자 압출재에 대하여 XRD, EBSD, TEM 분석과 상온 인장, 압축시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 모든 TAZ 합금 압출재는 Al, Sn 의 함량과 상관없이 a-Mg 와 미세한 Mg<sub>2</sub>Sn 이차상으로 이루어져 있다.
- (2) Sn 함량이 증가함에 따라 석출물의 양과 크기가 증가하여 결정립이 미세해졌으며, 결정립강화와 석출강화 효과로 인해 항복강도가 증가하였다.
- (3) Al 함량이 증가함에 따라 가공경화능이 향상되어, 모든 합금에서 유사한 인장강도를 보였다.
- (4) 결정립 크기가 감소함에 따라 소성이방성이

증가하는 이상거동을 보였으며, 이는 Al 함량과 미세석출물 차이에 의한 것으로 여겨진다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 “World Premier Material Program” 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] C. J. Bettles, M. A. Gibson, 2005, Current Wrought Magnesium Alloys: Strengths and Weaknesses, JOM, Vol. 57, No. 5, pp. 46~49.
- [2] J. Bohlen, P. Dobron, E. Meza Garcia, F. Chmelik, P. Lukac, D. Letzig, K. U. Kainer, 2006, The Effect of Grain Size on the Deformation Behavior of Magnesium Alloys Investigated by the Acoustic Emission Technique, Adv. Eng. Mater., Vol. 8, No. 5, pp. 422~427.
- [3] J. Bohlen, P. Dobron, J. Swiosteck, D. Letzig, F. Chmelik, P. Lukac, K. U. Kainer, 2007, On the Influence of the Grain Size and Solute Content on the AE Response of Magnesium Alloys Tested in Tension and Compression, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 462, No. 1-2, pp. 302~306.
- [4] J. D. Robson, N. Stanford, M. R. Barnett, 2007, Effect of Particles in Promoting Twin Nucleation in a Mg-5wt.% Zn Alloy, Scr. Mater., Vol. 63, No. 8, pp. 823~826.