

Mg-Bi-Al-Mn 초고속 마그네슘 압출재의 미세조직 및 기계적 특성

차재원¹ · 진상철² · 박성혁^{3, #}

Microstructure and Mechanical Properties of Very-high-speed Extruded Mg-Bi-Al-Mn Alloy

J. W. Cha, S. C. Jin, S. H. Park

(Received January 25, 2022 / Revised February 28, 2022 / Accepted March 2, 2022)

Abstract

In this study, a developed Mg-5Bi-2Al-0.4Mn (BAM520, wt%) alloy was successfully extruded at an extremely high speed of 70 m/min. Microstructural evolution during extrusion and the microstructural characteristics and tensile properties of the very-high-speed extruded BAM520 alloy were then investigated. The homogenized BAM520 billet contained only thermally stable Mg₃Bi₂ phase particles without any Mg₁₇Al₁₂ phase with a low melting temperature. Therefore, the BAM520 alloy exhibited excellent extrudability. The very-high-speed extruded BAM520 alloy had a completely recrystallized grain structure and a typical basal fiber texture. Despite the extremely high extrusion speed of 70 m/min, the extruded BAM520 alloy had a high ultimate tensile strength of 280 MPa due to combined strengthening effects of a small grain size, numerous fine Mg₃Bi₂ particles, and strong basal texture.

Keywords : Magnesium alloy, High-speed extrusion, Microstructure, Dynamic recrystallization, Mechanical properties

1. 서론

마그네슘 합금은 상용 구조용 금속재료 중 가장 낮은 밀도를 가질 뿐만 아니라, 높은 비강도, 우수한 진동감쇠능 등 우수한 기계적 특성을 가져 자동차, 철도 및 항공 기기의 경량화를 위해 주목 받고 있는 금속 소재이다. 산업에서 마그네슘 합금은 주로 주조재가 적용되어 왔지만 주조 결함과 조대한 결정립 크기 등으로 인해 낮은 기계적 특성을 가지고 있다. 반면, 마그네슘 압출재는 압출 중 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)의 발생으로 주조재보다 미세하고 균일한 결정립을 가지며 우수한

기계적 특성을 보여 최근 압출재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1-5]. 하지만 상용 마그네슘 합금인 Mg-Al-Zn 계 합금 및 Mg-Zn-Zr 계 합금의 경우, 각각 용점이 낮아 열적으로 불안정한 Mg₁₇Al₁₂, MgZn₂ 상이 형성된다. 압출 속도가 증가하면 압출 중 가공 발열로 인해 압출 온도가 증가하고 이로 인해 낮은 용점을 가지는 이차상이 용융되어 열간 균열(hot cracking)이 발생하므로 압출 속도 증가에 제한이 따르게 된다 [6, 7]. 마그네슘 합금의 압출 속도 제한은 생산성의 저하를 의미하며, 이는 제품 단가의 상승으로 이어진다. 이러한 단점을 극복하고자 열적으로 안정한 고용점의 이차상을 형성하는 마그네슘 합금의 개발이 요구되고 있다.

최근 개발된 Mg-Bi-Al 합금은 Al을 첨가했음에도 열적으로 불안정한 Mg₁₇Al₁₂ 상을 형성하지 않고, 823 °C 의 높은 용점을 가지는 열적으로 안정한 Mg₃Bi₂ 상을 형성하여, 최대 70 m/m 의 압출 속도로

1. 경북대학교 신소재공학부, 석사과정

2. 경북대학교 신소재공학부, 박사과정

3. 경북대학교 신소재공학부, 교수

Corresponding Author : School of Materials and Engineering, Kyungpook National University, E-mail: sh.park@knu.ac.kr

ORCID : 0000-0001-5710-7878

압출을 수행하여도 압출재의 표면에 열간 균열이 발생하지 않은 건전한 압출재를 제조할 수 있다고 보고되었다 [8]. 하지만, 우수한 생산성을 갖는 Mg-Bi-Al 초고속 압출재의 실제 산업 현장으로의 적용을 위해서는 추가적인 합금 첨가를 통한 기계적 특성 향상에 대한 연구가 필요하다. 마그네슘 합금에 Mn 을 미량 첨가할 시 결정립 미세화 효과와 더불어 인장 및 피로 특성이 향상되는 것으로 보고되었다 [9, 10]. 따라서 본 연구에서는 0.4 wt%의 Mn 이 첨가된 Mg-5Bi-2Al-0.4Mn 합금을 제조하고 초고속 압출을 수행한 후 압출재의 미세조직을 분석하고 상온 인장 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Mg-5Bi-2Al-0.4Mn (BAM520, wt%) 합금을 사용하였다. 압출을 위한 빌렛은 SF₆ 와 CO₂ 가 혼합된 불활성 가스를 주입시키며 유도 용해로를 이용하여 용융 시키고, 720 °C 에서 20 분간 안정화 시킨 후 200 °C 로 예열 된 스틸 몰드에 부어 제조하였다. 제조된 빌렛은 450 °C 에서 10 시간 동안 균질화 열처리를 수행하였으며, 열처리 후 수냉을 하였다. 균질화된 빌렛을 높이 120 mm, 직경 68 mm 의 원기둥형 빌렛으로 절삭 가공 후 300 ton 의 용량을 가지는 수평식 직접압출기를 사용하여 400 °C 의 온도에서 15.3 mm/s 의 램 속도(ram speed)와 76.5:1 의 압출비(extrusion ratio)로 직접 압출을 수행하였다. 압출재의 출구 속도(exit speed)는 70 m/min 이며, 최종 봉상 압출재의 직경은 7.8 mm 이다.

균질화 빌렛 및 압출재의 미세조직 관찰을 위해 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM)을 사용하였다. X-선 회절 분석기(XRD, Panalytical Empyrean diffractometer, Cu K_α)를 통해 2 °/min 의 스캔 속도로 균질화 빌렛 및 압출재에 존재하는 상을 분석하였다. 또한, 압출재의 집합조직은 상온에서 FE-SEM 에 내장된 전자 후방산란 회절(EBSD) 디텍터를 사용하여 17.0 mm 의 작동거리(working distance)에서 20 kV 의 가속전압을 인가하며 측정하였다. Oxford Instruments Aztec 5.0 software 를 사용하여 1.0 μm 의 스텝 크기(step size)로 EBSD 측정을 수행하였으며, Oxford Instruments AztecCrystal 2.0 를 사용하여 집합조직 및 Schmid factor (SF)를 분석하였다. 신뢰도 높은

데이터를 획득하기 위해 1.0 미만의 평균 각도 편차(mean angular deviation)를 가지는 데이터만을 사용하여 분석하였다.

압출재의 인장 특성 평가를 위해 압출재를 게이지 길이 25 mm, 게이지 직경 5 mm 를 갖는 dog-bone 모양의 인장시편으로 가공하였다. 압출재의 인장 시험은 Shimadzu AGS-100kNX 장비를 사용하여, 상온(23 °C)에서 압출방향(extrusion direction, ED)과 평행한 방향으로 0.001 s⁻¹ 의 변형율 속도(strain rate)로 변형을 가하며 수행하였다.

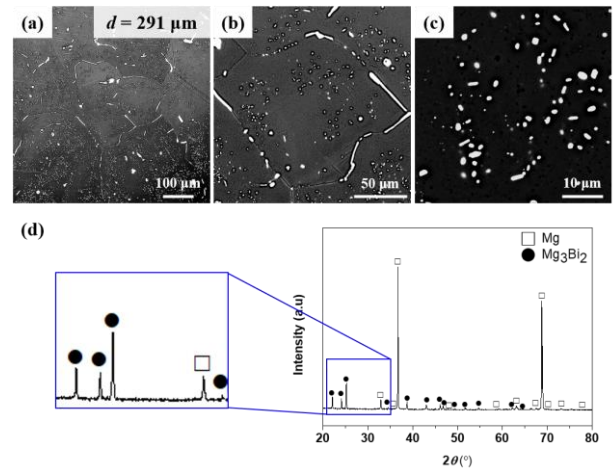


Fig. 1 (a-c) SEM micrographs at (a) low, (b) medium, and (c) high magnifications and (d) X-ray diffraction pattern of homogenized BAM520 billet.

3. 결과 및 고찰

3.1 압출빌렛 및 압출재의 미세조직

Fig. 1a-c 는 균질화 처리된 BAM520 합금 빌렛의 FE-SEM 미세조직이다. 빌렛은 291 μm 의 결정립 크기를 가지며 (Fig. 1a), 결정립계를 따라 비교적 조대한 미고용상이 존재하고 (Fig. 1b), 결정립 내부에는 미세한 구상의 미고용상이 존재하는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 1c). 이전 연구에서 BA53 합금을 400 °C 이상에서 균질화 열처리 시 빌렛에 구상의 Mg₃Bi₂ 미고용상이 존재한다고 보고되었다 [11]. 빌렛의 XRD 분석 결과, Mg₁₇Al₁₂ 상이 검출되지 않고 Mg 과 Mg₃Bi₂ 상만이 검출되었으며 (Fig. 1d), 이는 이전에 보고된 Mg-Bi-Al 합금에서 형성된 상과 동일하다 [8, 11]. 따라서 BA52 합금에 소량의 Mn 을 첨가하더라도 열적으로 불안정한 Mg₁₇Al₁₂ 상 또는

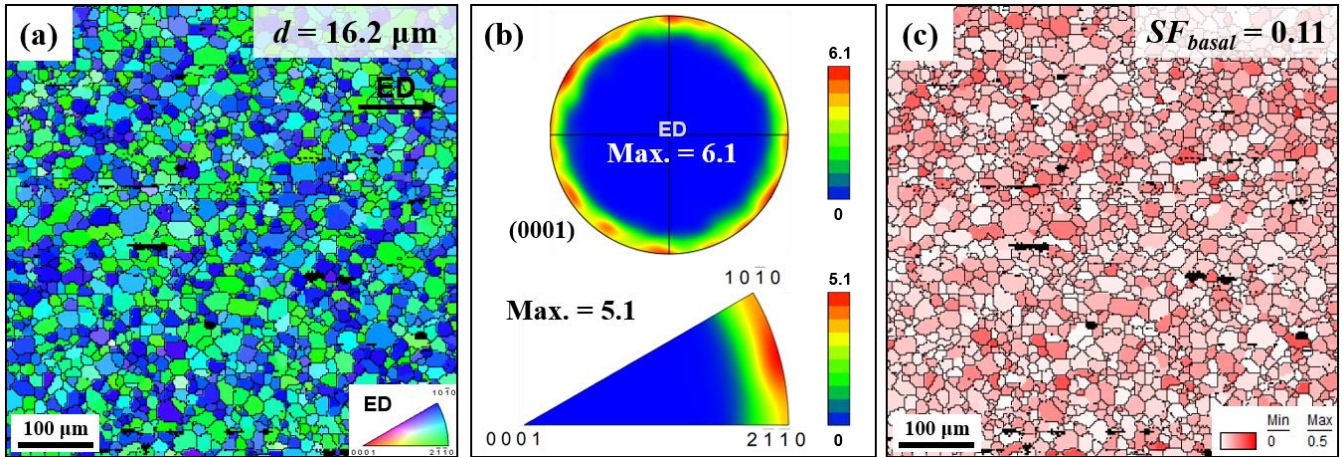


Fig. 2 EBSD measurement results of extruded BAM520 alloy: (a) inverse pole figure (IPF) map, (b) (0001) pole figure and ED IPF, and (c) Schmid factor (SF) map for basal slip under tension along the extrusion direction.

Mn 을 포함하는 다른 Al-Mn 과 같은 이차상의 형성 없이 열적으로 안정한 Mg_3Bi_2 상만이 형성된다는 것을 나타낸다. 따라서, BAM520 합금 또한 초고속 압출 시 압출재의 표면에 열간 균열의 발생 없이 건전한 압출재를 제조할 수 있음을 의미한다.

Fig. 2는 BAM520 합금 압출재의 EBSD 측정 결과 보여준다. 역 극점도(inverse pole figure, IPF) 지도를 통해 압출재는 압출 방향으로 연신된 조대한 결정립이 없이 균일한 등축정 결정립으로만 이루어져 있으며, 평균 결정립 크기가 $16.2 \mu m$ 로 압출 전 빌렛과 비교했을 때 매우 미세한 결정립 크기를 가지는 것을 알 수 있다 (Fig. 2a). 이는 고온 고속의 압출 조건으로 인해 압출 중에 완전한 동적 재결정이 발생했기 때문이다. 또한, 기존 BA53 합금 압출재의 경우 일반적으로 $20 \mu m$ 이상의 결정립 크기를 갖는다고 보고되었기 때문에 BA52 합금에 Mn을 첨가할 시 더욱 미세한 결정립 크기를 갖는 압출재를 생산할 수 있음을 의미한다 [8, 11]. (0001) 극점도와 ED 역 극점도를 보면 BAM520 합금 압출재는 결정립의 기저극(basal pole)이 압출 방향과 수직하게 배열된 전형적인 마그네슘 압출재의 기저면 집합조직을 가지며 [12, 13], 최대 집합조직 강도(maximum texture intensity)는 각각 6.1와 5.1로 강한 집합조직이 형성되었음을 알 수 있다 (Fig. 2b). Fig. 2c는 압출 방향으로 인장 시 기저면 슬립(basal slip)에 대한 Schmid factor 지도를 보여준다. 상온 인장 변형 시 기저면 슬립이 주된 슬립기구로써 활성화되는데, BAM520 합금 압출재는 강한 집합조직으로 인해 기저면 슬

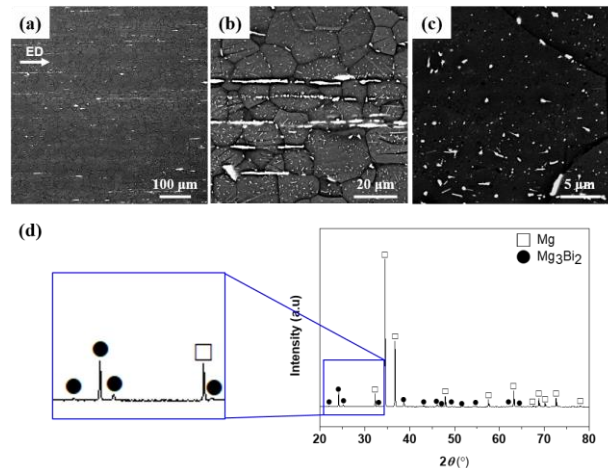


Fig. 3 (a-c) SEM micrographs at (a) low, (b) medium, and (c) high magnifications and (d) X-ray diffraction pattern of extruded BAM520 alloy.

립이 활성화되기 어려워 Schmid factor 가 0.11 로 낮다. 이로 인해 압출재를 인장 변형 시 강한 집합조직 강화 효과가 나타난다.

Fig. 3 은 BAM520 합금 압출재의 FE-SEM 미세조직과 XRD 분석 결과를 보여준다. 압출 방향을 따라 배열된 조대한 상과 결정립 내부에 존재하는 미세한 상이 혼재되어 있으며, 이러한 상은 XRD 분석 결과를 통해 모두 Mg_3Bi_2 상인 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 70 m/min 의 초고속 압출을 수행하여 압출이 완료되는데 소요되는 시간이 약 5 초 내외로 매우 짧기 때문에 압출 중 동적 석출(dynamic precipitation)이 발생하기 어렵다. 또한, 최종 압출재

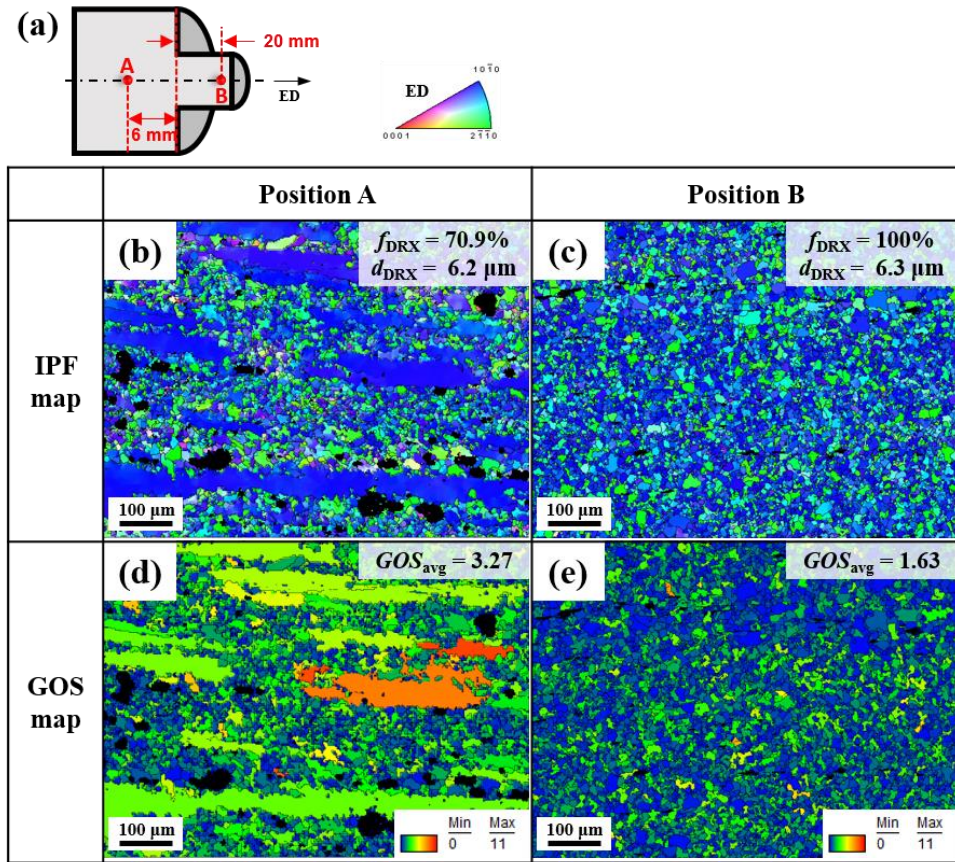


Fig. 4 EBSD measurement results of BAM520 extrusion butt: (a) schematic image of analyzed butt; (b, c) IPF maps at positions (b) A and (c) B; (d, e) grain orientation spread (GOS) maps at positions (d) A and (e) B.

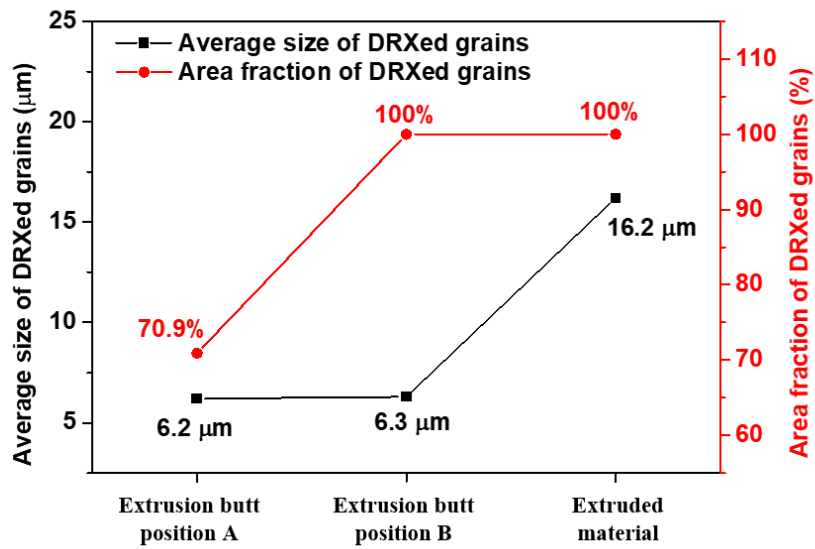


Fig. 5 Variations in average size and area fraction of DRXed grains during extrusion process.

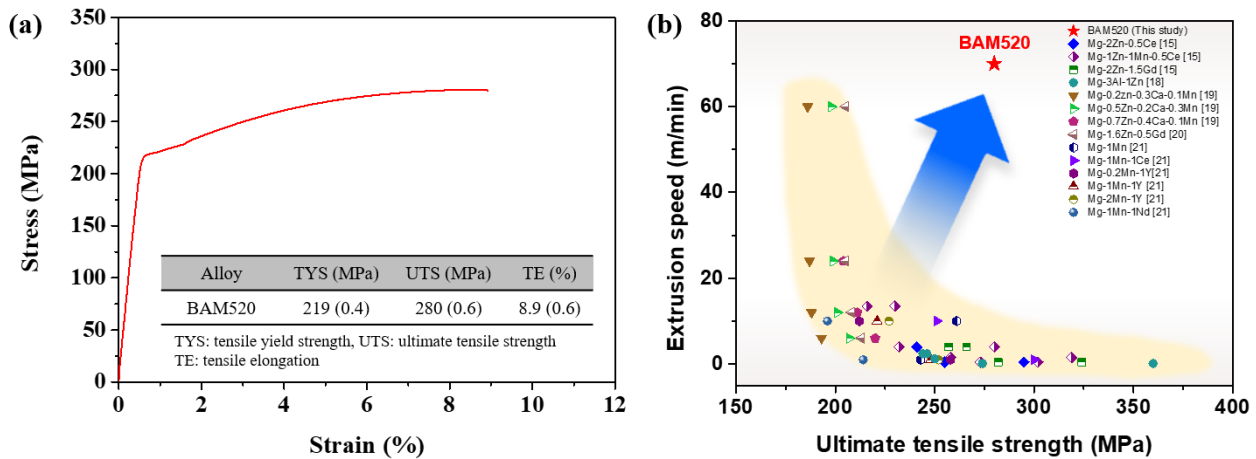


Fig. 6 (a) Tensile engineering stress–stress curve of extruded BAM520 alloy and (b) relationship between ultimate tensile strength (UTS) and extrusion speed for various extruded Mg alloys, including BAM520 alloy developed in this study

가 7.8 mm 의 작은 직경을 가지기 때문에 압출 후 공냉(air cooling)과정에서 빠르게 냉각되어 정적 석출(static precipitation)이 발생하기에 충분한 온도와 시간을 가지지 못한다. 따라서 압출 방향으로 배열된 조대한 상들은 압출 전 빌렛의 결정립계를 따라 존재하던 조대한 Mg_3Bi_2 상이 압출 중 유동 방향을 따라 배열된 것이다 (Fig. 3a and b). 압출재의 결정립 내부에 존재하는 미세한 상은 압출 공정 중에 추가적으로 형성된 석출물이 아닌 빌렛의 결정립 내부에 존재하던 미세한 Mg_3iB_2 상이 재분포되어 존재하는 것이다 (Fig. 3c). 또한, 압출재의 Mg_3Bi_2 피크 강도 (peak intensity)가 빌렛의 Mg_3Bi_2 피크 강도와 다소 편차를 보이는데, 이는 빌렛은 Mg_3Bi_2 미고용상이 결정립계 근처에 응집되어 있고 결정립 내부에는 소수가 존재하는 불균일한 미세조직을 보이기 때문에 XRD 측정 위치에 따른 편차로 판단된다.

3.2 압출 중 미세조직 변화

Fig. 4 는 압출 후 컨테이너 내부에 남아있는 빌렛을 즉시 수냉한 압출 버트(extrusion butt)의 수직 단면 모식도와 IPF 및 GOS(grain orientation spread) 지도를 보여준다. 모식도에서 나타낸 Position A 는 압출 다이로부터 6 mm 이전의 빌렛 부분이며, Position B 는 압출 다이로부터 20 mm 지난 압출재에 해당하는 부분이다 (Fig. 4a). 즉, 압출 버트의 Position A 는 압출 다이를 통과하기 전의 미세조직이며 Position B

는 압출 다이를 통과한 압출재가 수냉 되었을 때의 미세조직임을 의미한다. 각 부분의 IPF 지도를 통해 압출이 진행됨에 따라 동적 재결정(DRX)이 지속적으로 발생하여 재결정된 결정립의 면적 분율(f_{DRX})이 70.9%에서 100%로 증가함을 확인할 수 있다 (Fig. 4b and c). 반면, Positions A 와 B 에서의 재결정된 결정립의 평균 크기(d_{DRX})는 각각 6.2 μm 와 6.3 μm 로 거의 동일하였다.

GOS 는 한 결정립 내부에서 측정 위치별 결정 방위차를 계산하여 평균 방위각도로부터 벗어난 정도를 나타낸 것으로, 변형을 많이 받은 결정립일수록 높은 GOS 값을 갖게 된다 [14]. Position A 에서 압출 방향으로 연신된 조대한 미재결정립들(unDRXed grains)은 압출 중 동적 재결정을 통한 응력 해소가 발생하지 않고 변형 에너지가 내부에 지속적으로 축적되었기 때문에 높은 GOS 값을 갖게 된다. 이에 따라, 앞선 Position A 와 B 의 재결정된 결정립의 면적분율을 계산할 때 4.0 이상의 GOS 값, 50 μm 이상의 크기, 2.2 이상의 중형비(aspect ratio)를 갖는 결정립을 미재결정립으로 구분하고 계산하여 동적재결정 정도를 판단하였다. 이러한 높은 GOS 를 가지는 미재결정립들로 인해 Position A 에서의 평균 GOS 값 (GOS_{avg})이 3.27 로 높다 (Fig. 4d). 반면, Position B 에서의 평균 GOS 값은 1.63 으로 Position A 와 비교했을 때 2 배 가까이 감소하였는데, 이는 압출 중 동적 재결정이 소재 전반에 발생하여 높은 GOS 를 가지는

미재결정립이 소멸되었기 때문이다.

Fig. 5 는 BAM520 합금 압출 버트와 압출재의 재결정립의 평균 크기와 면적 분율을 비교한 그래프이다. 먼저 압출 버트의 Position A 와 B 를 비교했을 때, 재결정립의 면적분율은 100 %로 증가했지만, 재결정립의 크기는 변화 없는 것을 다시 한번 확인할 수 있다. 이는 빌렛에 존재하는 이차상으로 인해 야기되는 결정립계 고착 효과(grain boundary pinning effect) 때문에 압출 중 열과 응력이 동시에 가해지는 조건에서 발생하는 동적 결정립 성장(dynamic grain growth)이 효과적으로 억제되었기 때문이라 판단된다. 하지만 압출 버트의 Position B 와 압출재의 결정립 크기를 비교했을 때 재결정립의 크기가 6.3 μm 에서 16.2 μm 로 증가하였는데, 이는 압출 다이로 통과한 압출재가 공냉 과정에서 이루어지는 정적 결정립 성장(static grain growth)이 억제되지 못하고 활발히 이루어진 것을 의미한다. 압출 공정에서 압출재가 압출 다이를 통과할 때 많은 발열이 발생하게 되며 압출 온도, 압출비, 램 속도 등이 증가할수록 발열량은 증가하게 된다 [15, 16]. 본 연구에서는 높은 압출비로 고온 및 고속 압출을 수행하였기 때문에 압출재가 압출 다이를 통과할 때 매우 많은 소성 변형을 받게 되어 큰 변형 발열로 인해 압출 다이를 통과한 직후의 위치인 Position B 에서 압출 다이를 통과하기 전의 위치인 Position A 보다 높은 온도를 갖게 된다. 이러한 이유로 압출 후 공냉 과정에서 정적 결정립 성장이 활발히 발생한 것으로 판단된다.

3.3 압출재의 상온 인장 특성

Fig. 6a 는 BAM520 합금 압출재의 상온 인장 곡선을 나타낸 것으로 인장 항복 강도(tensile yield strength, TYS)는 219 MPa, 최대 인장 강도(ultimate tensile strength, UTS)는 280 MPa, 인장 연신율(tensile elongation, TE)은 8.0%를 가진다. 일반적으로 마그네슘 합금은 압출 속도가 증가하게 되면 결정립 조대화가 발생하여 압출재의 강도가 감소하게 되므로, 빠른 압출 속도로 제조된 압출재는 낮은 강도를 가지게 된다. 하지만, 본 연구에서 사용한 BAM520 합금은 70 m/min 의 압출 속도로 초고속 압출을 수행하였음에도 불구하고 최대 인장 강도가 280 MPa 로, 이전 연구들의 BA 합금 압출재보다 높은 최대 인장 강도를 가진다 [8, 11, 17]. BAM520 합금 압출재가 초

고속 압출을 했음에도 높은 강도를 가지는 이유는 Mn 첨가에 따른 결정립 미세화 효과로 인해 16.2 μm 의 비교적 미세한 결정립 크기를 가지고 있으며 소재 전반에 걸쳐 미세한 Mg_3Bi_2 상이 분포하고 있기 때문에 결정립계 강화(grain-boundary strengthening)와 입자 강화(particle strengthening) 효과로 인해 인장 변형 시 전위(dislocation)의 움직임이 효과적으로 방해되었기 때문이다. 또한, 압출재의 강한 기저면 집합조직도 인장 변형 시 집합조직 강화(texture strengthening)를 야기하여 강도 향상에 기여한다. Fig. 6b 는 BAM520 합금 압출재와 다른 여러 마그네슘 합금 압출재들에 대한 압출 속도와 최대 인장 강도를 비교한 그래프이며, 마그네슘 합금 압출재는 압출 속도 증가 시 최대 인장 강도가 감소하는 것을 보여준다. 하지만, 본 연구를 통해 제조된 BAM520 합금 초고속 압출재는 이러한 압출 속도와 최대 인장 강도의 반비례 관계를 극복하고 70 m/min 의 매우 빠른 압출 속도로 압출을 수행하여도 다른 마그네슘 합금 압출재에 비해 높은 강도를 가지는 것을 알 수 있다. 따라서, BAM520 합금은 초고속 압출이 가능하여 빠른 제조를 통한 생산성 증대와 압출 부품 가격 인하를 가져올 수 있을 뿐만 아니라, Mn 첨가로 인한 결정립 미세화 효과로 인해 초고속 압출로 제조된 압출재가 우수한 기계적 특성을 가지고 있어 다양한 분야에 저비용 고강도 마그네슘 부품으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 초고속 압출을 수행한 BAM520 합금 압출재의 미세조직과 압출 중 미세조직 변화, 그리고 상온 인장 특성에 대하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) BAM520 합금 빌렛에는 열적으로 불안정한 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 상이 형성되지 않았으며 결정립계를 따라 조대한 Mg_3Bi_2 미고용상과 함께 결정립 내부에 미세한 Mg_3Bi_2 미고용상이 존재하였다.

(2) 70 m/min 의 압출 속도로 초고속 압출 수행한 결과, 소재 내부와 표면에 균열이 전혀 없는 건전한 압출재가 성공적으로 제조되었다. BAM520 합금 초고속 압출재는 조대한 미재결정립 없이 기존 BA 합금 압출재보다 미세한 등축정 결정립으로 이루어져 있었다. 또한, 추가적인 석출물의 형성 없이 압출

방향을 따라 조대한 Mg_3Bi_2 상이 배열되어 있으며 결정립 내부에는 미세한 Mg_3Bi_2 상이 다수 분포하고 있었다.

(3) 상온 인장 시험 결과, BAM520 합금 압출재는 초고속 압출을 수행했음에도 불구하고 TYS 219 MPa, UTS 280 MPa 로 높은 강도를 가졌으며, 이는 미세한 결정립 크기, 다수의 Mg_3Bi_2 상의 분포 및 강한 집합 조직으로 인한 강화 효과 때문이다.

후 기

본 연구는 2021 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2C1085272)

REFERENCES

- [1] Z. B. Sajuri, Y. Miyashita, Y. Hosokai, Y. Mutoh, 2006, Effects of Mn content and texture on fatigue properties of as-cast and extruded AZ61 magnesium alloys, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 48, pp. 198–209.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.09.003>
- [2] Y. Z. Du, M. Y. Zheng, C. Xu, X. G. Qiao, K. Wu, X. D. Liu, G. J. Wang, X. Y. Lv, 2013, Microstructure and mechanical properties of as-cast and as-extruded Mg-4.50Zn-1.13Ca (wt%) alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 576, pp. 6–13.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.034>
- [3] D. H. Lee, S. H. Kim, H. J. Kim, B. G. Moon, Y. M. Kim, S. H. Park, 2021, Effects of extrusion speed on the microstructure and mechanical properties of Mg-9Al-0.8Zn-0.9Ca-0.6Y-0.5MM alloy, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 530–537.
<https://doi.org/10.1017/s12540-020-00867-7>
- [4] J. W. Cha, Y. J. Kim, Y. M. Kim, J. H. Bae, S. H. Park, 2022, Tensile and high-cycle fatigue properties of extruded AZ91-0.3Ca-0.2Y alloy with excellent corrosion and ignition resistances, *Met. Mater. Int.*, Vol. 28, pp. 385–396.
<https://doi.org/10.1017/s12540-021-01101-8>
- [5] O. Sadeddin, M. M. Goudarzi, M. J. Nayeri, 2021, Effect of hot extrusion on microstructure and mechanical properties of Mg-5Sn-xZr alloys, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 4996–5007.
<https://doi.org/10.1017/s12540-020-00919-y>
- [6] S. Meng, H. Yu, H. Zhang, H. Cui, S. H. Park, W. Zhao, B. S. You, 2017, Microstructure and mechanical properties of an extruded Mg-8Bi-1Al-1Zn (wt%) alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 690, pp. 80–87.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.095>
- [7] S. H. Park, S. H. Kim, H. S. Kim, J. Yoon, B. S. You, 2016, High-speed indirect extrusion of Mg-Sn-Al-Zn alloy and its influence on microstructure and mechanical properties, *J. Alloys Compd.*, Vol. 667, pp. 170–177.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.163>
- [8] J. Go, S. C. Jin, H. Kim, H. Yu, S. H. Park, 2020, Novel Mg-Bi-Al alloy with extraordinary extrudability and high strength, *J. Alloys Compd.*, Vol. 843, 156026.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156026>
- [9] L. B. Tong, M. Y. Zheng, S. W. Xu, S. Kamado, Y. Z. Du, X. S. Hu, K. Wu, W. M. Gan, H. G. Brokmeier, G. J. Wang, X. Y. Lv, 2011, Effect of Mn addition on microstructure, texture and mechanical properties of Mg-Zn-Ca alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 528, No. 10–11, pp. 3741–3747.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.037>
- [10] S. A. Khan, Y. Miyashita, Z. B. Sajuri, 2006, Influence of Mn content on mechanical properties and fatigue behavior of extruded Mg alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 420, No. 1–2, pp. 315–321.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.091>
- [11] J. W. Cha, S. C. Jin, J. G. Jung, S. H. Park, 2021, Effects of homogenization temperature on microstructure and mechanical properties of high-speed-extruded Mg-5Bi-3Al alloy, *J. Magnes. Alloys*, In press.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.07.007>
- [12] W. Cheng, Y. Liu, Y. Zhang, S. Meng, S. Arthanari, H. X. Wang, L. Wang, 2021, Tensile properties and corrosion behavior of a dilute Mg-0.5Sn-0.7Al-0.8Zn alloy applied for biomaterials, Vol. 27, *Met. Mater. Int.*, pp. 4510–4516.
<https://doi.org/10.1007/s12540-020-00703-y>

- [13] J. S. Suh, B. C. Suh, J. O. Choi, Y. M. Kim, B. S. You, 2021, Effect of extrusion temperature on mechanical properties of AZ91 alloy in terms of microstructure and texture development, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 2696–2705.
<https://doi.org/10.1007/s12540-020-00642-8>
- [14] N. A. Bonasso, F. Wagner, S. Berbenni, D. P. Field, 2012, A study of the heterogeneity of plastic deformation in IF steel by EBSD, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 548, pp. 56–63.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.068>
- [15] S. H. Park, B. S. You, R. K. Mishra, A. K. Sachdev, 2014, Effects of extrusion parameters on the microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–(Mn)–Ce/Gd alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 598, pp. 396–406.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.051>
- [16] X. Yun, F. Wan, S. Bi, B. Li, 2017, Effect of billet preheating temperature on continuous extrusion forming of Al–Sr alloy, *Procedia Eng.*, Vol. 207, pp. 395–400.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.794>
- [17] S.C. Jin, J. W. Cha, J. Go, J. H. Bae, S. H. Park, 2021, Comparative study of extrudability, microstructure, and mechanical properties of AZ80 and BA53 alloys, *J. Magnes. Alloys*, In press
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.07.009>
- [18] F. R. Elsayed, T. T. Sasaki, T. Ohkubo, H. Takahashi, S. W. Xu, S. Kamado, K. Hono, 2013, Effect of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of microalloyed Mg–Sn–Al–Zn alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 558, pp. 318–328.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.09.050>
- [19] M. G. Jiang, C. Xu, T. Nakata, H. Yan, R. S. Chen, S. Kamado, 2016, High-speed extrusion of dilute Mg–Zn–Ca–Mn alloys and its effect on microstructure, texture and mechanical properties, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 678, pp. 329–338.
<https://doi.org/10/1016/j.msea.2016.10.007>
- [20] M. G. Jiang, C. Xu, T. Nakata, H. Yan, R. S. Chen, S. Kamado, 2016, Rare earth texture and improved ductility in Mg–Zn–Gd after high-speed extrusion, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 667, pp. 233–239.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.093>
- [21] J. Bohlen, S. Yi, D. Letzig, K. U. Kainer, 2010, Effect of rare earth elements on the microstructure and texture development in magnesium-manganese alloys during extrusion, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, No. 26, pp. 7092–7098.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.081>