

Mg-5Bi-3Al 마그네슘 고속 압출재의 미세조직과 고주기피로 특성

차재원¹, 진상철², 박성혁^{3,#}

Microstructure and High-Cycle Fatigue Properties of High-Speed-Extruded Mg-5Bi-3Al Alloy

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

(Received August 4, 2022 / Revised August 8, 2022 / Accepted August 11, 2022)

Abstract

In this study, the microstructural characteristics of a high-speed-extruded Mg-5Bi-3Al (BA53) alloy and its tensile, compressive, and high-cycle fatigue properties are investigated. The BA53 alloy is successfully extruded at a die-exit speed of 16.6 m/min without any hot cracking using a large-scale extruder for mass production. The homogenized BA53 billet has a large grain size of ~900 μm and it contains fine and coarse Mg_3Bi_2 particles. The extruded BA53 alloy has a fully recrystallized microstructure with an average grain size of 33.8 μm owing to the occurrence of complete dynamic recrystallization during high-speed extrusion. In addition, the extruded BA53 alloy contains numerous fine lath-type Mg_3Bi_2 particles, which are formed through static precipitation during air cooling after exiting the extrusion die. The extruded BA53 alloy has a high tensile yield strength of 175.1 MPa and ultimate tensile strength of 244.4 MPa, which are mainly attributed to the relative fine grain size and numerous fine particles. The compressive yield strength (93.4 MPa) of the extruded BA53 alloy is lower than its tensile yield strength, resulting in a tension-compression yield asymmetry of 0.53. High-cycle fatigue test results reveal that the extruded BA53 alloy has a fatigue strength of 110 MPa and fatigue cracks initiate at the surface of fatigue test specimens, indicating that the Mg_3Bi_2 particles do not act as fatigue crack initiation sites. Furthermore, the extruded BA53 alloy exhibits a higher fatigue ratio of 0.45 than other commercial extruded Mg-Al-Zn-based alloys.

Keywords: Magnesium alloy, High-speed extrusion, Microstructure, Mechanical properties, High-cycle fatigue

1. 서론

최근, 운송산업 분야에서 탄소 배출 저감을 위해 내연기관 자동차에서 전기자동차로 빠르게 변환되고 있다. 전기자동차의 전비 향상을 위해서는 차체의 경량화가 필수적인데, 알루미늄이나 마그네슘과 같은 경량 금속으로 기존 철강 소재를 대체하여 차

체의 경량화를 효과적으로 이룰 수 있다. 특히, 마그네슘은 구조용 금속재료 중 가장 낮은 밀도와 높은 비강도를 갖고 있어 차체의 경량화를 위한 소재로 주목받고 있다. 압출재와 같은 마그네슘 가공재는 열간 가공 중 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX) 발생하여 미세한 결정립 크기를 갖게 되어 주조재보다 우수한 기계적 물성을 갖는다 [1-3]. 특히, 마그네슘 합금 압출재 중 Mg-Al-Zn (AZ)계열 합금 압출재는 우수한 기계적 특성을 갖고 있어 활발한 연구가 진행되었다 [4-6]. 하지만, AZ 계열 합금은 낮은 용점을 갖는 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 이차상이 형성되어 압출 속도를 증가시킬 경우 마찰열 및

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

가공 발열로 인해 이차상이 용융되어 압출재 표면에 열간 균열이 발생한다 [7,8]. 따라서, 고합금계 AZ 계열 마그네슘 합금은 5 m/min 이하로 압출 속도가 제한됨에 따라, 고속 압출 공정을 통한 압출재의 생산성 향상을 목적으로 고속 압출이 가능한 마그네슘 합금의 개발이 이루어지고 있다 [9, 10].

다양한 마그네슘 합금 중 Mg-Bi 계 합금은 800 °C 이상의 용점을 갖는 Mg_3Bi_2 이차상이 형성되어 열간 균열의 발생 없이 고속 압출이 가능한 합금으로 최근 주목을 받고 있다 [11,12]. 특히, 최근 개발된 Mg-5Bi-3Al (BA53, wt%) 합금은 $Mg_{17}Al_{12}$ 이차상이 형성되지 않고 오직 Mg_3Bi_2 이차상만이 형성되어 고합금계임에 불구하고 70 m/min의 출구 속도로 초고속 압출을 수행하여도 압출재 표면에 열간 균열이 발생하지 않는 것으로 보고되었다 [13]. 또한, BA53 고속 압출재는 220 MPa 이상의 최대인장강도(ultimate tensile strength, UTS)를 갖고 있어 고속 압출이 가능하면서 우수한 기계적 물성을 갖는 압출재로 평가를 받고 있다 [13]. 하지만, 현재까지 BA53 고속 압출재는 300 ton의 유압 용량을 갖는 연구실 규모(lab-scale) 수준의 압출 장비를 이용하여 제조한 압출재에 대해 연구가 진행되었다 [13,14]. 따라서, BA53 고속 압출재가 실제 산업 현장에서 사용되는 압출 장비를 사용하였을 때도 우수한 생산성과 기계적 물성을 유지할 수 있는지에 관한 연구가 필요한 상황이다.

한편, 마그네슘 압출재를 차량용 부품으로 사용할 경우 엔진의 진동 및 지면과의 마찰로 인해 반복적인 응력이 가해지며 급작스러운 피로 파괴가 발생할 수 있다. 그러므로, 마그네슘 압출재를 차량용 부품으로 사용하기 위해서는 인장 특성뿐만 아니라 피로 특성에 대한 평가가 필수적으로 요구된다. 하지만, BA53 고속 압출재에 대한 피로 특성 연구는 진무한 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 최근 개발된 BA53 합금의 양산형 대형 장비에서의 압출성 및 차량용 부품으로의 적용 가능성을 검토하기 위해, 압출 기업에서 현재 사용하고 있는 1,600 ton의 유압 용량을 갖는 대형 압출기를 이용하여 ~17 m/min로 고속 압출을 수행한 뒤, 압출재의 미세조직, 인장 특성, 압축 특성, 그리고 고주기피로 특성에 대한 분석을 수행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Mg-5Bi-3Al (BA53, wt%) 합금을 사용하였다. 압출 수행을 위해 450 °C에서 24시간 동안 균질화 열처리된 원기동형 빌렛(직경: 178 mm, 높이: 1,000 mm)을 절단 가공하여 동일 직경에 330 mm의 높이를 갖는 압출용 빌렛을 제작하였다. 그 후, 1,600 ton의 유압 용량을 갖는 수평식 양산 압출기를 사용하여 350 °C의 압출온도, 27.4의 압출비(extrusion ratio), 10 mm/s의 램 속도(ram speed)로 직접 압출(direct extrusion)을 수행하였다. 압출 금형은 2개의 원형 홀(hole)을 갖는 포트홀 다이(porthole die)를 사용하였으며, 압출재가 압출 금형을 빠져나오는 출구 속도는 16.6 m/min이다. 제조된 압출재는 25 mm의 직경을 갖는 봉상 압출재이며 압출 금형을 빠져나온 후 공랭(air cooling) 되었다.

균질화 빌렛 및 압출재의 미세조직 분석을 위해 전계방사형 주사전자 현미경(field-emission scanning electron microscope, FE-SEM) 및 광학 현미경(optical microscope, OM)을 사용하였다.

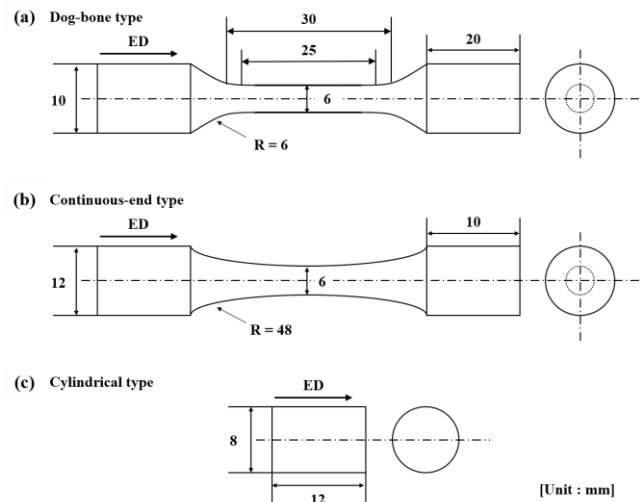


Fig. 1 Schematic drawing of mechanical test specimens: (a) tensile, (b) high-cycle, and (c) compressive test specimens. ED denotes the extrusion direction.

압출재의 기계적 특성을 평가하기 위해 Fig. 1과 같은 규격을 갖는 인장, 압축 및 고주기피로 시험편을 압출재에서 가공하였다. 인장 및 압축 시험은 상온에서 만능재료 시험기(AGS-100kNX, Shimadzu)를 사용하여 1×10^{-3} s의 변형률 속도(strain rate)로 압출 방향(extrusion direction, ED)과 평행한 방향으로 응력을 가하며 수행하였다. 고주기피로 시험은 상온

에서 유압식 피로시험기(Instron 8501, Instron)를 사용하여 응력제어방식으로 15 Hz의 진동수 및 -1의 응력비(stress ratio)로 일축 인장-압축 피로 시험을 수행하였다. 2×10^6 cycles 이상의 수명을 갖는 미파단 시험편이 2개 이상 존재하는 응력 주기를 피로 강도(fatigue strength)로 정의하였다. 피로 파단 균열의 시작점을 확인하기 위해 파단된 피로 시험편을 FE-SEM을 통해 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 균질화 빌렛 및 압출재의 미세조직

Fig. 2a는 BA53 균질화 빌렛의 미세조직으로 빌렛은 850–1,000 μm 범위의 결정립 크기를 갖는다. 또한, 결정립계에는 비교적 조대한 이차상이 존재하며, 결정립 내부에는 조대한 이차상과 매우 미세한 이차상이 혼재되어 존재한다 (Fig. 2b–d). Mg_3Bi_2 이차상은 823 $^\circ\text{C}$ 의 높은 용점을 갖기 때문에 균질화 열처리 후에도 완전히 고용되지 않고 균질화 빌렛에 잔존하게 된다 [13,14]. 따라서, Fig. 2에서 보여지는 조대한 이차상과 미세한 이차상은 모두 균질화 열처리 후 잔존하는 Mg_3Bi_2 이며, 이러한 이차상들은 균질화 빌렛 전반에 걸쳐 분포하고 있다.

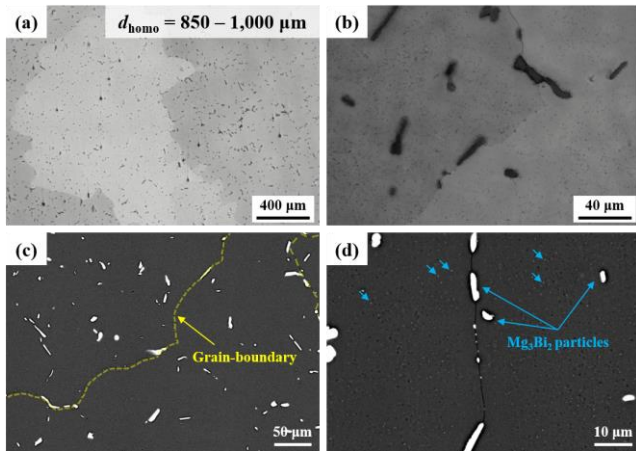


Fig. 2 (a, b) Optical and (c, d) SEM micrographs of homogenized BA53 billet. d_{homo} denotes the average grain size of homogenized BA53 billet.

BA53 균질화 빌렛은 1,600 ton의 유압 용량을 갖는 대형 압출기를 이용한 16.6 m/min의 고속 압출에서도 열간 균열의 발생없이 성공적으로 압출재가 제조되었다 (Fig. 3a). Fig. 3b–d는 BA53 고속 압출재

의 미세조직을 보여주고 있으며, 마그네슘 합금은 압출 중 동적 재결정이 완료되지 않을 경우, 압출 전 초기 빌렛이 갖고 있던 조대한 결정립이 압출 중 압출 방향으로 길게 연신 되어 압출재 내부에 조대한 결정립으로 잔존하게 되는데, 이러한 결정립을 미재결정립(non-dynamically recrystallized grain, non-DRXed grain)이라 부르며, BA53 고속 압출재는 이러한 조대한 미재결정립이 존재하지 않고 등축정의 결정립들로 이루어진 것을 알 수 있다. 또한, 압출재의 평균 결정립 크기는 33.8 μm 로 압출 전 빌렛의 결정립 크기에 비해 매우 미세하다. 압출재가 연신된 조대한 미재결정립 없이 빌렛 보다 미세한 결정립 크기를 갖는 이유는 압출 중 완전한 DRX가 발생했기 때문이다. 한편, 결정립계는 열간 가공 중 DRX가 발생할 수 있는 주요한 핵생성 지점으로 작용한다 [15]. 따라서, 빌렛의 결정립 크기가 감소할수록 압출 중 DRX가 더욱 활발히 발생하여 압출재 내부에 존재하는 미재결정립의 면적 분율과 크기가 감소하게 된다 [16]. 하지만, 본 연구에서는 빌렛의 결정립 크기(850–1,000 μm)가 조대함에도 불구하고 완전히 재결정된 미세조직을 가진다. 이는 고속 압출 시 발생하는 큰 마찰 및 가공 발열로 인해 변형 온도가 증가하여 압출 중 재결정 거동이 촉진되며, 빌렛에 존재하는 조대한 이차상에서 응력이 집중되어 핵생성 지점으로 작용되는 particle-stimulated nucleation (PSN) 현상이 발생했기 때문으로 사료된다 [17].

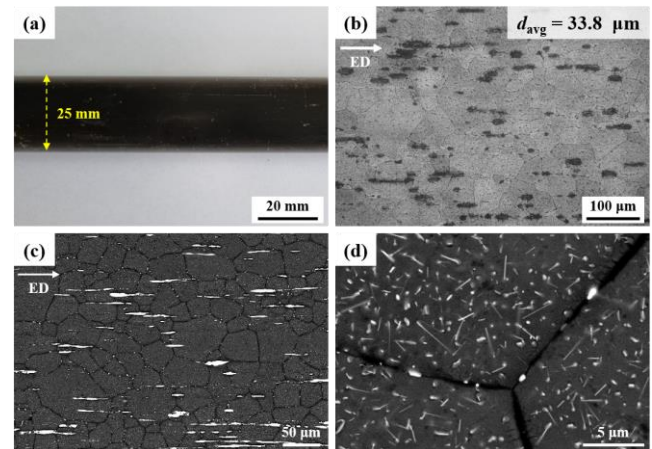


Fig. 3 (a) Surface appearance, (b) optical micrograph, and (c, d) SEM micrographs of extruded BA53 alloy. d_{avg} denotes the average grain size of extruded BA53 alloy.

또한, 조대한 Mg_3Bi_2 이차상들이 압출 방향을 따라 배열되어 있으며, 결정립 내부에는 미세한 lath-type Mg_3Bi_2 이차상이 형성된 것을 확인할 수 있다 (Fig. 2c and d). Lath-type Mg_3Bi_2 이차상은 압출 전 빌렛 내에 존재하지 않는 것을 Fig. 2 를 통해 알 수 있다. 고속 압출을 수행하였기 때문에 압출 중 과포화 된 기지에서 동적 석출(dynamic precipitation)이 발생하기 위한 시간이 부족하다. 따라서, 이러한 lath-type Mg_3Bi_2 이차상들은 압출재가 압출 다이로 빠져나온 후 공랭 과정에서 정적 석출(static precipitation)이 발생하여 형성된 것으로 판단된다.

3.2 압출재의 인장 및 압축 특성

Fig. 4 와 Table 1 은 BA53 고속 압출재의 상온 인장 및 압축 시험 결과를 보여준다. 압출재의 인장 항복 강도(tensile yield strength, TYS)와 최대 인장 강도(ultimate tensile strength, UTS)는 각각 175.1 MPa 와 244.4 MPa 이며 인장 연신율(tensile elongation, TE)는 14.9 %이다. 이전 연구 결과에서 lab-scale 수준의 압출 장비를 이용하여 제조한 BA53 고속 압출재는 240–270 MPa 범위의 높은 UTS 를 갖는 것으로 보고되었는데, 본 연구에서 양산형 대형 압출기를 이용하여 제조한 BA53 고속 압출재 또한 240 MPa 이상의 높은 UTS 를 갖는 것을 알 수 있다. [13,14]. 이는, 일반적인 마그네슘 압출재가 갖는 압출 속도와 강도의 trade-off 관계를 따르지 않는 고강도의 BA53 고속 압출재를 양산할 수 있음을 시사한다. 이전 연구를 통해, BA53 고속 압출재를 180 °C 에서 10 시간 동안 시효 처리를 수행할 시, 미세한 lath-type Mg_3Bi_2 이차상이 석출되어 압출재의 TYS 와 UTS 가 각각 26 MPa 및 18 MPa 향상된 것을 확인할 수 있다 [13]. 게다가, BA53 고속 압출재는 33.8 μm 의 결정립 크기를 갖는데, 이는 1.5 m/min 의 출구 속도로 압출을 수행한 AZ91 (Mg–9Al–0.8Zn–0.18Mn, wt%) 합금 압출재의 결정립 크기(41 μm)와 12 m/min 의 출구 속도로 압출을 수행한 TAZ711 (Mg–7Sn–1Al–1Zn, wt%) 합금 압출재의 결정립 크기(75 μm)보다 미세한 것을 알 수 있다 [18,19]. 즉, BA53 고속 압출재는 강도 향상에 효과적으로 기여하는 lath-type Mg_3Bi_2 이차상이 다수 존재할 뿐만 아니라 고속 압출을 수행했음에도 불구하고 비교적 미세한 결정립 크기를 갖기 때문에 결정립계 강화 및 입자 강화 효과가 증가하여 압출재의 강도와 압출 속도의 trade-off 관

계를 극복할 수 있는 것이다.

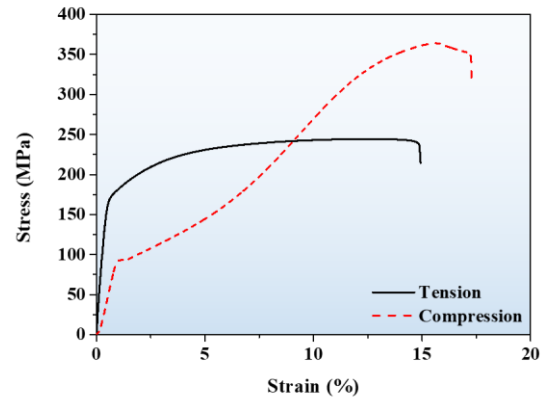


Fig. 4 Engineering tensile and compressive stress-strain curve of extruded BA53 alloy.

Table 1 Tensile and compressive properties of extruded BA53 alloy.

Alloy	TYS (MPa)	UTS (MPa)	TE (%)	CYS (MPa)	YR
BA53	175.1	244.4	14.9	93.4	0.53

TYS, UTS, TE, CYS, and YR denote the tensile yield strength, ultimate tensile strength, tensile elongation, compressive yield strength, and tension–compression yield stress ratio (= CYS/TYS), respectively.

압축 시험 결과, 압축 항복 강도(compressive yield strength, CYS)는 93.4 MPa 로 TYS 보다 다소 낮은 값을 갖는다. 이는, 인장과 압축 시 지배적으로 활성화되는 변형 기구가 다르기 때문인데, 일반적인 마그네슘 압출재는 기저면(basal plane)이 압출 방향과 평행하게 배열된 강한 기저면 집합 조직(basal fiber texture)을 갖는다 [4,6,20]. BA53 고속 압출재 또한 이전 연구 결과에서 강한 기저면 집합 조직과 약 5.0 의 높은 최대 집합 조직 강도(maximum texture intensity)를 갖는 전형적인 마그네슘 압출재의 기저면 집합 조직을 갖는 것으로 보고되었다 [13,14]. 강한 기저면 집합 조직을 갖는 압출재를 압출 방향으로 인장 시 기저면 슬립(basal slip)이 지배적으로 활성화되는 반면 압축 시 {10-12} 인장 쌍정이 지배적으로 활성화되어 변형을 수용한다 [20–22]. 압출재를 압출 방향으로 인장 시 활성화되는 기저면 슬립에 대한 낮은 Schmid factor 로 인해 높은 TYS 를 갖게

되고, 압축 시 활성화되는 {10-12} 인장 쌍정에 대한 높은 Schmid factor로 인해 낮은 CYS를 갖게 된다 [21,22]. 이전 연구에 따르면 강한 기저면 집합조직을 가져 10.8의 높은 최대 집합 조직 강도를 갖는 TZ71 (Mg-7Sn-1Zn, wt%) 합금 압출재의 경우, 압출 방향으로 인장 시 지배적으로 활성화되는 기저면 슬립에 대한 Schmid factor는 0.11로 낮고, 압축 시 지배적으로 활성화되는 {10-12} 인장 쌍정에 대한 Schmid factor는 0.45로 높은 것으로 보고되었다 [22]. 이러한 Schmid factor 차이로 인해 TZ71 합금 압출재는 인장 시 197 MPa의 높은 TYS를 갖는 반면, 압축 시 146 MPa의 비교적 낮은 CYS를 갖게 된다 [22]. 이와 같이, 강한 기저면 집합조직을 갖는 마그네슘 압출재는 인장 및 압축 항복 강도의 차이로 인한 항복 이방성(yield asymmetry)이 나타나는데 [20-22], BA53 고속 압출재 또한 항복 이방성을 보이며 0.53의 인장-압축 항복 응력비(tension-compression yield stress ratio, YR)를 갖는다.

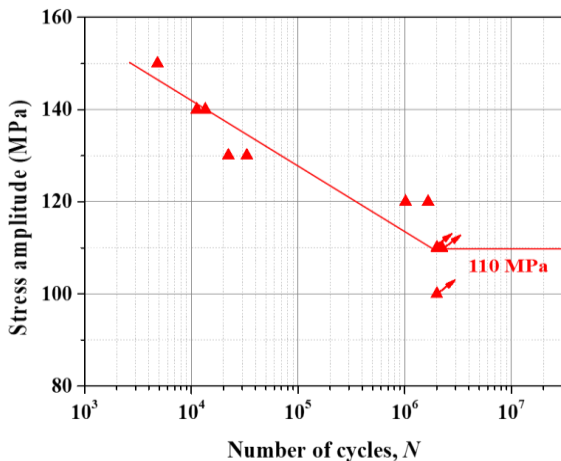


Fig. 5 High-cycle fatigue test results (S-N curves) of extruded BA53 alloy.

3.3 압출재의 고주기피로 특성

Fig. 5는 고주기피로 시험을 통해 얻어진 BA53 고속 압출재의 응력-수명 그래프(S-N curves)를 보여준다. BA53 고속 압출재의 피로 강도(fatigue strength, FS)는 TYS의 63% 수준인 110 MPa임을 알 수 있다. 한편, 고주기피로 특성은 발생한 균열의 전파 거동보다는 균열이 형성되는 거동에 큰 영향을 받는다 [23]. 따라서, 피로 균열 시작점(crack initiation site)을 규명하기 위해 피로 파면을 관찰한 결과, 시험편의 표면에서부터 균열이 발생하고 전파된 것을 확인하

였다 (Fig. 6). 고주기피로 시험 시 항복 응력보다 낮은 응력이 재료에 가해지더라도 반복적인 응력에 의해 재료 내부에 영구 슬립밴드(persistent slip band, PSB)가 형성된다 [24]. 형성된 PSB로 인해 재료 표면에 미세한 돌출부(extrusion)와 골(intrusion)이 형성되는데, 이러한 표면 단차에 응력이 집중되어 표면으로부터 피로 균열이 형성되고 전파되어 피로 파괴를 야기한다 [24]. 또한, 재료 내부에 존재하는 이차상도 피로 균열 시작점으로 작용될 수 있다 [23]. 하지만, BA53 고속 압출재의 경우, 존재하는 Mg_3Bi_2 이차상에서부터 균열이 발생하지 않고 모든 피로 시험편이 표면으로부터 균열이 발생하였다. 이는, BA53 고속 압출재 내부에 존재하는 Mg_3Bi_2 이차상은 고주기피로 특성에 영향을 미치지 않음을 의미한다.

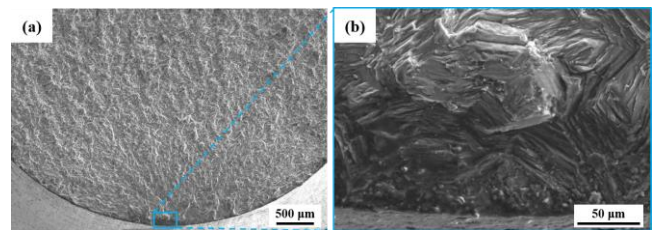


Fig. 6 SEM micrographs at (a) low and (b) high magnifications of fractured fatigue test specimen of extruded BA53 alloy.

Fig. 7은 본 연구에서 다룬 BA53 고속 압출재를 포함한 다양한 상용 AZ 계열 마그네슘 합금 압출재의 피로 강도와 최대 인장 강도 사이의 관계를 보여준다. 금속 재료는 피로 강도와 최대 인장 강도는 직선적 비례관계를 가져, 높은 최대 인장 강도를 갖는 금속 재료가 일반적으로 높은 피로 강도를 갖는다 [25]. 이에 따라, 피로 강도와 최대 인장 강도의 비율인 피로율(fatigue ratio, FS/UTS)을 통해 금속 재료의 피로 특성을 판단할 수 있다. Fig. 7을 통해 상용 AZ 계열 마그네슘 합금 압출재는 0.42 이하의 피로율을 보이는 반면, 본 연구에서 다룬 BA53 고속 압출재는 0.45의 높은 피로율을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는, 시효 처리나 합금 첨가와 같은 방법으로 BA53 고속 압출재의 인장 강도를 향상시킨다면 상용 AZ 계열 마그네슘 합금 압출재보다 우수한 피로 특성을 갖는 압출재를 양산할 수 있음을

의미한다. 즉, 본 연구를 통해, BA53 고속 압출재는 양산형 대형 압출 장비를 사용하여 고속 압출이 가능할 뿐만 아니라 높은 피로율을 갖기 때문에 우수한 피로특성이 요구되는 수송기기용 부품으로 적합한 소재임을 알 수 있다.

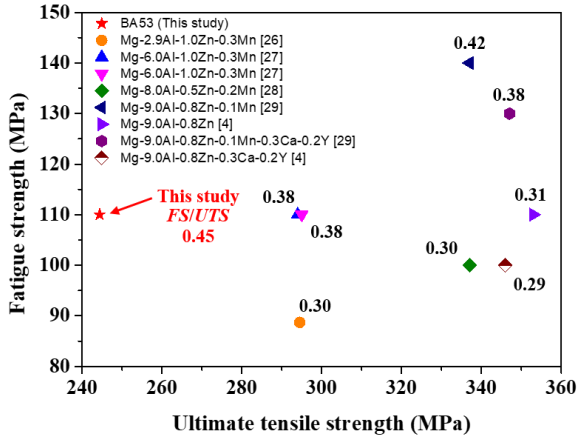


Fig. 7 Relationship between FS and UTS for various extruded Mg alloys, including extruded BA53 alloy in this study. The numbers in graph indicate the fatigue ratio (= FS/UTS) of each alloy.

4. 결론

본 연구에서는 최근 개발된 BA53 합금을 대형 압출 장비를 사용하여 고속 압출을 수행한 뒤, 압출재의 미세조직과 상온 인장 및 압축 특성 그리고 고주기피로 특성에 대하여 분석하였고, 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) BA53 균질화 빌렛은 850–1,000 μm 의 결정립 크기를 가지며, 비교적 조대한 Mg_3Bi_2 이차상과 미세한 Mg_3Bi_2 이차상이 균질화 열처리 후에도 빌렛 내에 잔존하고 있다.

(2) BA53 고속 압출재는 완전히 재결정화된 미세 조직을 가지고 33.8 μm 의 평균 결정립 크기를 갖는다. 또한, 압출 방향으로 길게 배열된 조대한 Mg_3Bi_2 이차상이 존재하며, 결정립 내부에는 압출 후 공랭 과정에서 형성된 미세한 lath-type Mg_3Bi_2 이차상이 다수 존재한다.

(3) BA53 고속 압출재는 175.1 MPa의 인장 항복강도와 244.4 MPa의 최대 인장 강도를 가져 우수한 인장 특성을 보인다. 하지만, 강한 기저면 집합조직

으로 인해 항복 이방성을 보이며 0.54의 인장-압축 항복 응력비를 갖는다.

(4) 상온 고주기피로 시험 결과, BA53 고속 압출재의 피로 강도는 110 MPa이며, 압출재 내부에 존재하는 Mg_3Bi_2 이차상은 피로 균열의 시작점으로 작용하지 않고, 시험편의 표면에서부터 균열이 발생하였다. 또한, 피로율이 0.45로 상용 AZ 계열 마그네슘 합금 압출재보다 우수한 피로율을 갖는다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 소재부품기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [No. 20011091, 주단조용 고인성 마그네슘과 고속 압출용 고내식 마그네슘 소재 개발 및 부품화 기술 개발]

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] J.A. Liu, J. Wang, M.L. Yang, Y.M. Yao, 2021, Microstructure and Mechanical Properties of Mg–8Y–2Ho–2Zn Alloy with Long Period Stacking Ordered Phase, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 1613–1619.
<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00587-7>
- [3] 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/10.1007/s12540-020-00919-y>
- [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/10.1007/s12540-021-01101-8>
- [5] A. Afsharnaderi, M. Lotfipour, H. Mirzadeh, M. Emamy, M. Malekan, 2020, Enhanced mechanical properties of as-cast AZ91 magnesium alloy by combined RE-Sr

- addition and hot extrusion, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 792, pp. 139817.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139817>
- [6] J. Bohlen, S.B. Yi, J. Swiostek, D. Letzig, H.G. Brokmeier, K.U. Kainer, 2005, Microstructure and texture development during hydrostatic extrusion of magnesium alloy AZ31, *Scr. Mater.*, Vol. 53, pp. 259–264.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.03.036>
- [7] 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/10.1007/s12540-020-00867-7>
- [8] S.H. Kim, J.U. Lee, Y.J. Kim, B.G. Moon, B.S. You, H.S. Kim, S.H. Park, 2017, Improvement in extrudability and mechanical properties of AZ91 alloy through extrusion with artificial cooling, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 703, pp. 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.mesa.2017.07.048>
- [9] 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://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.163>
- [10] M.G. Jiang, C. Xu, T. Nakata, H. Yan, R.S. Chen, S. Kamado, 2016, Rare earth texture and improved ductility in a Mg-Zn-Gd alloy after high-speed extrusion, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 667, pp. 233–239.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.093>
- [11] 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>
- [12] J. Go, J.U. Lee, H. Yu, S.H. Park, 2020, Influence of Bi addition on dynamic recrystallization and precipitation behaviors during hot extrusion of pure Mg, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 44, pp. 62–75.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.10.036>
- [13] 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, pp. 156026.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156026>
- [14] 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>
- [15] A. Galiyev, R. Kaibyshev, G. Gottstein, 2001, Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60, *Acta Mater.*, Vol. 49, pp. 1199–1207.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00020-9)
- [16] S.H. Park, J.H. Bae, S.H. Kim, J. Yoon, B.S. You, 2015, Effect of Initial Grain Size on Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Mg-9Al-0.6Zn Alloy, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 46A, pp. 5482–5488.
<https://doi.org/10.1007/s11661-015-3164-1>
- [17] F.J. Humphreys, M. Hatherly, 2004, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, 2nd ed., Elsevier, Oxford.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-044164-1.x5000-2>
- [18] 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>
- [19] S.H. Park, H.S. Kim, B.S. You, 2013, Extrudability and Tensile Properties of the Mg-7Sn-1Al-1Zn Alloy, *Korean J. Met. Mater.*, Vol. 51, pp. 637–644.
<https://doi.org/10.3365/KJMM.2013.51.9.637>
- [20] S. Kleiner, P.J. Uggowitzer, 2004, Mechanical anisotropy of extruded Mg-6%Al-1%Zn alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 379, pp. 258–263.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.02.020>
- [21] S.W. Bae, S.H. Kim, J.U. Lee, W.K. Jo, W.H. Hong, W. Kim, S.H. Park, 2018, Improvement of mechanical properties and reduction of yield asymmetry of extruded Mg-Al-Zn alloy through Sn addition, *J. Alloys Compd.*, Vol. 766, pp. 748–758.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.028>

- [22] S.H. Kim, S.H. Park, 2018, Underlying mechanisms of drastic reduction in yield asymmetry of extruded Mg-Sn-Zn alloy by Al addition, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 733, pp. 285–290.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.063>
- [23] K.S. Chan, 2010, Roles of microstructure in fatigue crack initiation, *Int. J. Fatigue*, Vol. 32, pp. 1428–1447.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.10.005>
- [24] S. Suresh, 1998, *Fatigue of Materials*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511806575>
- [25] Z. Li, Q. Wang, A.A. Luo, P. Fu, L. Peng, 2015, Fatigue strength dependence on the ultimate tensile strength and hardness in magnesium alloys, *Int. J. Fatigue*, Vol. 80, pp. 468–476.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.001>
- [26] F. Yang, S.M. Yin, S.X. Li, Z.F. Zhang, 2008, Crack initiation mechanism of extruded AZ31 magnesium alloy in the very high cycle fatigue regime, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 491, pp. 131–136.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.02.003>
- [27] Y.J. Kim, J.W. Cha, Y.M. Kim, S.H. Park, 2022, Effect of Extrusion Temperature on Mechanical Properties and High-cycle Fatigue Properties of Extruded AZ61 Alloy, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 31, pp. 117–123.
<https://data.doi.or.kr/10.5228/KSTP.2022.31.3.117>
- [28] P. Zhang, J. Lindemann, 2005, Influence of shot peening on high cycle fatigue properties of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80, *Scr. Mater.*, Vol. 52, pp. 485–490.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.11.003>
- [29] Y.J. Kim, Y.M. Kim, S.G. Hong, D.W. Kim, C.S. Lee, S.H. Park, 2021, Comparative study of tensile and high-cycle fatigue properties of extruded AZ91 and AZ91–0.3Ca–0.2Y alloys, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 93, pp. 41–52.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.039>