

AZ61 마그네슘 압출재의 압출 온도에 따른 기계적 특성 및 고주기 피로 특성

김예진¹ · 차재원² · 김영민³ · 박성혁^{4,#}

Effect of Extrusion Temperature on Mechanical Properties and High-cycle Fatigue Properties of Extruded AZ61 Alloy

Y. J. Kim, J. W. Cha, Y. M. Kim, S. H. Park

(Received April 5, 2022 / Revised April 8, 2022 / Accepted April 16, 2022)

Abstract

In this study, a commercial AZ61 magnesium alloy is extruded at 300 °C and 400 °C and the microstructures, mechanical properties, and high-cycle fatigue properties of the extruded materials are investigated. Both extruded materials have a fully recrystallized microstructure with no Mg₁₇Al₁₂ precipitates. The average grain size and maximum basal texture intensity of the extruded material increase with increasing extrusion temperature. The material extruded at 400 °C (AZ61-400) has higher tensile yield strength and lower compressive yield strength than the material extruded at 300 °C (AZ61-300) because of the stronger basal texture of the former. Because of coarser grain size, the tensile elongation of AZ61-400 is lower than that of AZ61-300. Despite the differences in microstructures and tensile/compressive properties, the two extruded materials have the same fatigue strength of 110 MPa. This is because the finer grain size of AZ61-300 causes an increase in fatigue strength, but its weaker texture causes a decrease in fatigue strength. In both extruded materials, fatigue cracks initiate at the surface of fatigue specimens at all stress amplitudes tested.

Keywords: Magnesium alloy, Extrusion temperature, Microstructure, Mechanical properties, High-cycle fatigue properties

1. 서 론

최근 전 세계적으로 탄소 배출규제가 강화됨에 따라 수송기기의 이산화탄소 배출을 저감시키기 위한 연구가 지속되고 있다. 수송기기의 배출가스 저감을 위한 효과적인 방법 중 하나는 경량화이며, 이를 위해 상용 구조용 금속재료 중 가장 낮은 밀도를 가지는 마그네슘합금을 차량에 적용시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1,2]. 하지만 자동차 부품으로 주로 사용되고 있는 마그네슘 주조재

는 철강이나 알루미늄합금과 비교하여 낮은 기계적 특성을 나타내기 때문에 [3,4], 고특성이 요구되는 샤시, 바디와 같은 차량 프레임 부품에는 적용이 제한된다. 따라서 압연이나 압출과 같은 금속 가공 공정을 통해 강도와 연성을 향상시켜야 한다. 이러한 공정 중 압출은 단 1 회의 공정 작업으로 원하는 형상의 부품을 제조할 수 있어 다양한 산업에서 적용되고 있다 [5]. 압출재의 조직 및 물성은 압출 온도, 압출비, 램속도와 같은 공정 조건에 따라 크게 달라진다 [6-8]. 그 중에서도 압출 온도는 동적재결정 거동에 주된 영향을 미치기 때문에 가장 중요한 공정 변수이다 [7].

마그네슘 압출재가 수송기기에 적용되면 운행 중 반복적인 응력을 받게 되어 예상치 못한 피로 파단이 발생할 수 있다. 피로 특성은 소재의 항복강도

1. 경북대학교 신소재공학부, 박사과정

2. 경북대학교 신소재공학부, 석사과정

3. 한국재료연구원, 책임연구원

4. 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

[9], 인장강도 [10], 경도 [11] 등에 영향을 받는다고 알려져 있다. 압출재의 미세조직과 기계적 물성은 압출 온도에 따라 달라지므로 [7,12], 압출 온도에 따라 피로 특성 또한 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상용 마그네슘합금인 AZ61을 300 °C와 400 °C에서 압출을 수행한 후 압출재의 미세조직, 기계적 물성 및 고주기 피로 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Mg-6Al-1Zn-0.3Mn (AZ61, wt%) 합금을 사용하였다. 합금을 제조하기 위해 유도 용해로를 이용하여 용융하였으며 용융 중 발화를 방지하기 위해 SF₆와 CO₂가 혼합된 불활성 가스를 주입하였다. 용탕을 720 °C에서 20분간 안정화시킨 후 200 °C로 예열된 스틸 몰드에 부어 원통 형태로 제조하였다. 제조된 빌렛을 420 °C에서 24 시간 동안 균질화 열처리 후 수냉을 하였다. 압출을 수행하기 위해 균질화된 빌렛을 200 mm, 직경 80 mm의 원기둥 모양으로 절삭 가공한 후, 500 ton 용량의 수평식 압출기를 사용하여 300 °C와 400 °C 온도에서 25:1의 압출비와 1 mm/s의 램속도로 직접압출을 수행 후 상온에서 공랭하였다. 300 °C와 400 °C의 압출 온도로 제조된 압출재를 각각 AZ61-300과 AZ61-400으로 나타내었다.

미세조직 관찰을 위해 압출재의 압출방향(extrusion direction, ED)과 평행한 면을 #120부터 #2000까지의 사포와 3 μm와 1 μm 다이아몬드 연마제를 사용하여 연마 후 콜로이드 실리카를 이용하여 20분 동안 마무리 연마하였다. 미세조직 분석을 위해 광학 현미경(OM)을 사용하였으며 집합조직 관찰을 위해 주사전자현미경에 내장된 전자 후방 산란 회절(EBSD)를 사용하였다. EBSD 측정을 위해 Oxford Instruments Aztec 5.0 software를 사용하였으며 EBSD 데이터는 Oxford Instruments AztecCrystal 2.0을 사용하여 분석하였다.

압출재의 기계적 특성 평가를 위해 압출재를 게이지 길이 25 mm, 게이지 직경 5 mm를 갖는 dog-bone 모양의 인장시편으로 가공하였으며(Fig. 1a) 길이 12 mm, 직경 8 mm의 원통 모양의 압축시편으로 가공하였다. 인장 및 압축 시험은 Shimadzu AGS-100kNX 장비를 사용하여, 상온(23 °C)에서 ED와 평행한 방향으로 0.001 s⁻¹의 변형률 속도(strain rate)로

변형을 가하며 수행하였다. 고주기 피로 특성 평가를 위해 시편 중심부 직경이 6 mm이며 곡률 반지름이 48 mm인 ASTM E466 규격의 모래시계 형상(hourglass type)의 시편으로 가공하였다(Fig. 1b). 고주기 피로 시험은 상온에서 대기분위기에서 수행하였고 응력 진폭 제어 방식으로 응력비는 -1에서 시험하였다. 시험속도는 15 Hz, 시간에 따른 응력의 파형은 사인(Sine) 형태로 시험을 수행하였다. 피로강도(fatigue strength)는 2 × 10⁶ cycle 이상에서 미파단된 시편이 2개 이상 존재하는 응력으로 정의하였다.

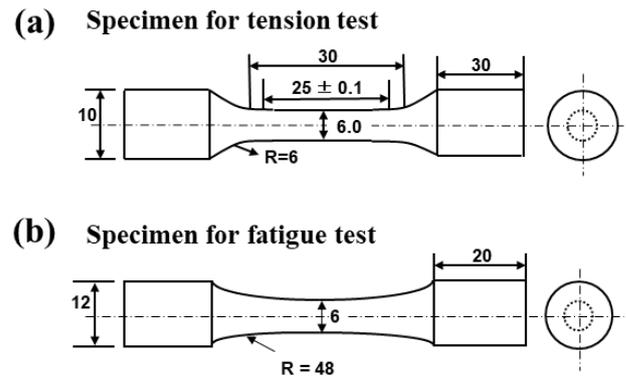


Fig. 1 Dimensions of specimens for (a) tension and (b) high-cycle fatigue tests.

3. 결과 및 고찰

3.1 압출재의 미세 조직

Fig. 2a와 b는 AZ61-300과 AZ61-400 압출재의 OM 미세조직이다. 압출 온도와 관계없이 압출 중에 완전 재결정되어 등방성의 결정립으로 이루어진 균일한 미세조직을 가진다. 평균 결정립 크기는 AZ61-300은 10.1 μm이고 AZ61-400은 14.4 μm로, 높은 온도에서 압출된 압출재가 43% 가량 큰 결정립을 가진다. 이러한 결정립 크기 차이는 압출 온도가 높을수록 압출 중 결정립 성장이 활발하게 발생하기 때문이다 [13]. 또한 Fig. 2c에 나타난 Mg-xAl-1Zn의 평형상태도에 따르면, AZ61 합금의 경우 압출 온도 400 °C는 마그네슘 단일상 영역에 포함되며 300 °C에서 알루미늄 고용량은 약 5.9%이다. 따라서, 300 °C와 400 °C 압출 중 Mg₁₇Al₁₂ 상의 동적 석출이 거의 발생하지 않고 AZ61-300과 AZ61-400 압출재 모두 마그네슘 기지상과 소량의 Al-Mn 미고용상으로 이루어진 미세조직을 가지게 된다.

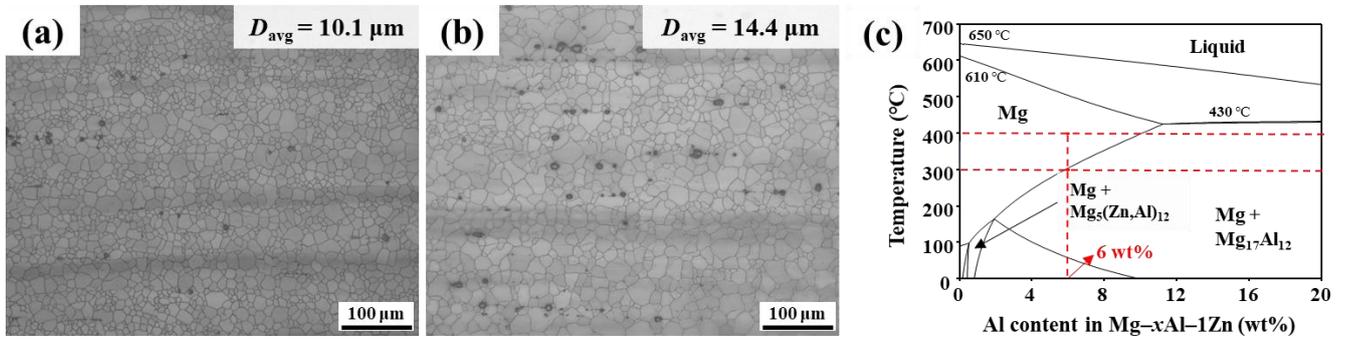


Fig. 2 Optical micrographs of (a) AZ61-300 (b) AZ61-400. (c) Equilibrium phase diagram of Mg-xAl-1Zn ($x = 0-20$ wt%), as calculated using PANDAT software. D_{avg} denotes the average grain size.

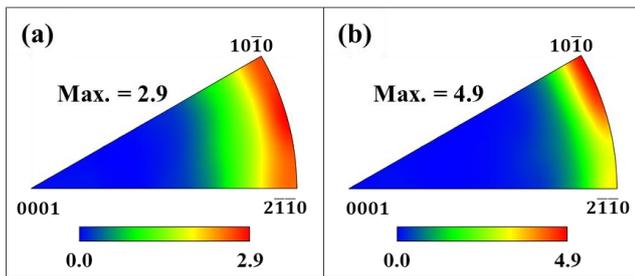


Fig. 3 ED inverse pole figures of (a) AZ61-300 (b) AZ61-400. Max. denotes the average maximum texture intensity.

Fig. 3은 AZ61-300과 AZ61-400 압출재의 역 극점도(inverse pole figure)이다. 두 압출재 모두 (0001) 극점이 ED와 수직하게 배열된 전형적인 상용 마그네슘합금 압출재의 집합조직을 나타낸다. 소재가 압출 중 ED에 수직하는 방향으로 압축응력을 받으면 상용 마그네슘 압출재는 기저면 슬립이 활발히 발생하여 압출재는 ED와 기저면이 평행한 강한 집합조직을 나타낸다 [14]. 압출 온도가 300 °C에서 400 °C로 증가할수록 (0001) 극점이 ED와 90°에 가까운 방향으로 집중되며 최대 극점 강도가 2.9에서 4.9로 증가한다 (Fig. 3). 압출 온도가 증가할수록 압출 중 동적재결정이 활발하게 발생하여 재결정립이 압출 초기에 형성되고 재결정립이 압출 중 받는 변형량이 증가하여 격자 회전이 더 많이 발생한다 [15]. 이로 인해 압출 온도가 증가함에 따라 압출재의 기저면 집합조직이 더욱 강하게 형성된다

3.2 압출재의 인장 · 압축 특성

Fig. 4a와 Table 1은 AZ61-300과 AZ61-400 압출재의 인장 시험 결과를 나타낸다. 인장 항복강도

(tensile yield strength)는 AZ61-300이 181 MPa이고 AZ61-400이 194 MPa로 압출 온도가 높을수록 증가한다. 하지만 인장 연신율(tensile elongation)의 경우 AZ61-300은 23.4%이고 AZ61-400은 21.2%로 압출 온도가 증가할수록 인장 연신율이 다소 감소하며 최대 인장강도(ultimate tensile strength)는 압출 온도와 관계없이 유사한 값을 나타낸다. 일반적으로 마그네슘합금에서 압출 온도가 증가할수록 결정립 조대화로 인해 항복강도의 감소가 나타난다고 알려져 있다 [13]. 하지만 본 연구에서는 일반적인 경향과 달리 보다 높은 온도에서 압출된 AZ61-400이 AZ61-300보다 높은 항복강도를 가진다. AZ61-400과 AZ61-300은 모두 이차상이 거의 존재하지 않고 동일한 합금 원소량을 가지기 때문에 석출강화와 고용강화 효과에 차이가 존재하지 않는다. 하지만 AZ61-400은 AZ61-300에 비해 강한 기저면 집합조직을 가지기 때문에, 인장 시 기저면 슬립에 대한 평균 Schmid factor (SF)가 0.14로 AZ61-300의 0.19보다 낮은 값을 가진다 (Table 1). SF가 낮을수록 슬립계에 가해지는 분해전단응력이 감소하여 소성 변형을 위해 요구되는 하중이 증가한다 [16]. 따라서, 인장 시 집합조직 강화 효과가 AZ61-400이 AZ61-300보다 크며, 이로 인해 AZ61-400이 더 높은 인장 항복강도를 가지게 된다. 하지만 AZ61-300은 AZ61-400보다 작은 결정립 크기로 인한 결정립계 강화 효과로 인해 두 압출재의 항복강도의 차이가 다소 감소한다. 항복강도의 차이에도 불구하고 AZ61-300의 가공경화율이 AZ61-400보다 높아 두 압출재는 유사한 최대 인장강도를 가진다. AZ61-300이 AZ61-400에 비해 높은 가공경화율을 나타내는 이유는 기저면 슬립이 비교적 활발하게 발생하여

Table 1 Tensile and compressive properties and average Schmid factors (SFs) of the extruded materials. TYS, UTS, TE, and CYS denote the tensile yield strength, ultimate tensile strength, tensile elongation, and compressive yield strength, respectively. $SF_{\text{Basal slip}}$ and $SF_{\{10-12\} \text{ twinning}}$ denote the average SF value for basal slip under tensile loading along the ED and that for $\{10-12\}$ twinning under compressive loading along the ED, respectively.

Material	TYS (MPa)	UTS (MPa)	TE (%)	CYS (MPa)	$SF_{\text{Basal slip}}$	$SF_{\{10-12\} \text{ twinning}}$
AZ61-300	181	294	23.4	135	0.19	0.40
AZ61-400	194	295	21.2	122	0.14	0.43

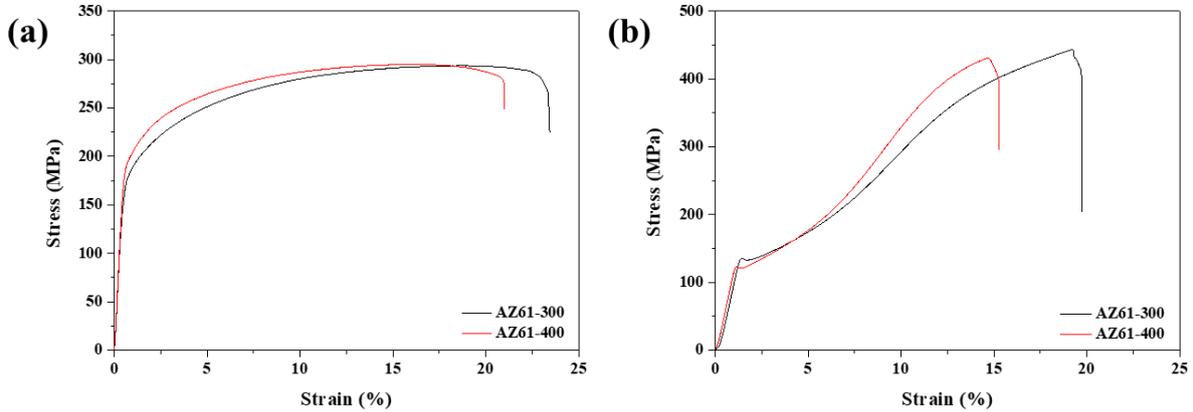


Fig. 4 Engineering (a) tensile and (b) compressive curves of extruded materials.

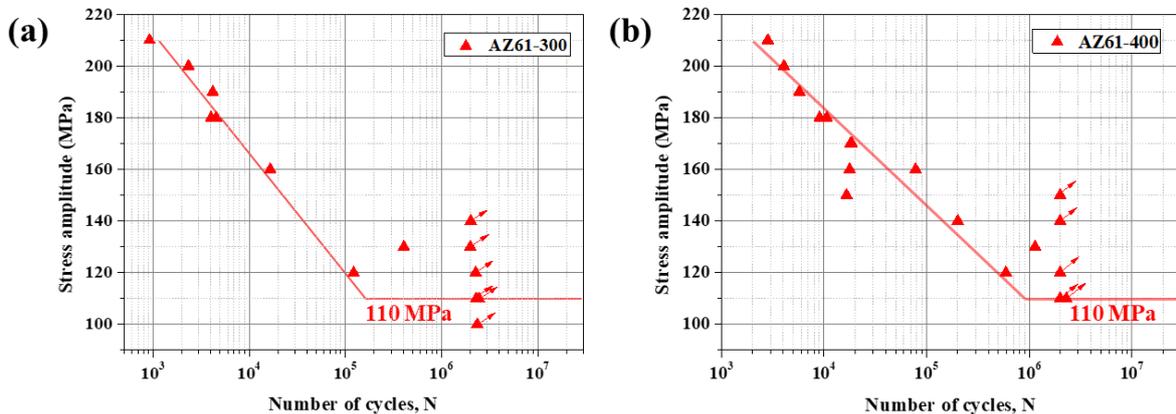


Fig. 5 Stress amplitude-fatigue life curves of (a) AZ61-300 and (b) AZ61-400.

전위의 축적이 야기되기 때문이다 [17]. 또한 평균 결정립 크기가 클수록 인장 시 균열 형성을 야기하는 $\{10-11\}$ - $\{10-12\}$ 쌍정의 활성화가 용이하기 때문에 AZ61-400의 연신율이 AZ61-300에 비해 다소 낮다 [18].

Fig. 4b는 두 압출재의 압축 응력-변형률 곡선을 보여준다. 인장 항복강도와는 다르게, 압축 항복강도(compressive yield strength)는 AZ61-300이 135 MPa로 AZ61-400의 122 MPa보다 높다 (Table 1).

인장과 압축 시 서로 다른 항복강도 차이를 나타내는 이유는 인장과 압축 시 변형을 수용하는 지배적인 거동이 다르기 때문이다. 강한 기저면 집합조직을 가지는 마그네슘 압출재의 경우, 인장 시에는 슬립으로 대부분의 변형을 수용하는 반면 압축 시에는 초반 변형을 $\{10-12\}$ 쌍정으로 수용한다 [19]. 압축 시 $\{10-12\}$ 쌍정에 대한 평균 SF는 AZ61-300이 0.40이고 AZ61-400이 0.43이다 (Table 1). 이는 AZ61-400이 보다 낮은 응력 하에서 $\{10-12\}$

twinning 이 활성화됨을 의미하며, 따라서 AZ61-400 이 AZ61-300 에 비해 더 낮은 압축 항복 응력을 가지게 된다. 또한, {10-12} 쌍정은 기저면 슬립에 비해 결정립 크기 감소에 따른 활성화 응력 증가 정도가 크기 때문에 [19], 두 압출재의 결정립 크기 차이로 야기되는 압축 항복강도 증가량이 인장 항복강도 증가량 보다 크게 된다. 따라서 AZ61-400 이 AZ61-300 에 비해 높은 인장 항복강도를 가짐에도 불구하고 낮은 압축 항복강도를 나타낸다.

3.3 압출재의 고주기 피로 특성

Fig. 5 는 AZ61-300 과 AZ61-400 의 고주기 피로 시험 결과를 나타낸 응력-수명(stress-life, S-N) 그래프이다. 전체 응력 구간에서 AZ61-300 과 AZ61-400 이 유사한 피로수명을 보이며 피로강도 또한 두 압출재 모두 110 MPa 로 동일하다. Fig. 6 에 나타낸 피로 파면을 보면 두 압출재 모두 시편의 표면에서 피로 균열이 발생하여 시편 내부로 전파된다. 반복적인 응력이 소재에 가해지면 국부적인 영역에서 전위의 이동과 재배열이 발생하여 영구슬립밴드(persistence slip band, PSB)가 형성되며 이러한 PSB 는 항복강도 보다 낮은 응력 하에서도 형성될 수 있다 [20]. 이렇게 형성된 PSB 는 소재 표면에 슬립띠 도출부(extrusion)와 슬립띠 골(intrusion)로 이루어진 미세한 요철을 생성시켜 응력이 집중되고 피로 균열을 야기한다 [20]. 일반적으로 기공이나 이차상이 소재 내부에 존재하는 경우 전위의 축적이 발생하여 지배적인 피로 균열 형성 위치로 작용한다 [21]. 하지만 두 압출재 모두 압출공정 중 높은 열과 강한 소성 변형으로 주조 결함이 사라지며 잔류하는 미고용상은 크기가 작고 소량만 존재하기 때문에 피로균열 형성에 영향을 미치지 않는다. 따라서 3 차원 격자 결함에 의한 피로 균열 형성은 본 실험에서 가해진 210 MPa 부터 100 MPa 까지의 응력 진폭에서는 나타나지 않았다.

또한, 피로 특성은 평균 결정립 크기가 작을수록 결정립계 분율이 증가하여 소재 내 응력집중이 감소하며, 이로 인해 피로균열 형성이 억제되어 피로 강도가 향상된다고 알려져 있다 [22]. 하지만 본 연구 결과에서는 AZ61-300이 AZ61-400보다 작은 평균 결정립 크기를 가짐에도 두 압출재는 동일한 피로 강도를 가진다. 그 이유는 두 압출재의 집합조직 차이로 인한 피로 저항성 변화 때문으로 볼 수 있다.

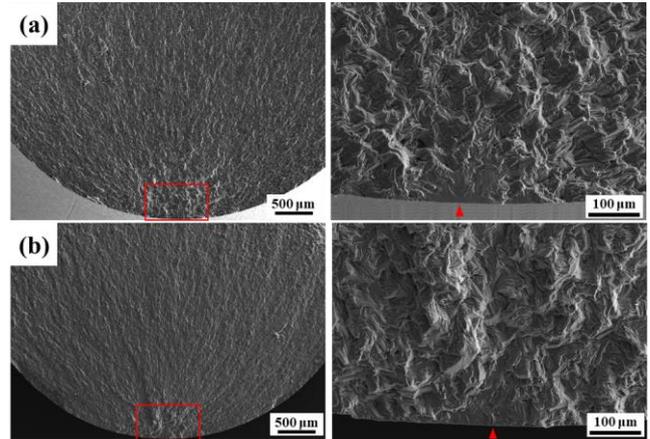


Fig. 6 Representative SEM fractographs of fracture fatigue specimens of (a) AZ61-300 and AZ61-400.

AZ61-300 은 AZ61-400 에 비해 약한 기저면 집합조직을 가지고 있어 기저면 슬립 발생이 비교적 용이하다. 그 결과 피로 시험 동안 AZ61-300 에서 전위 축적이 비교적 활발하게 발생하여 피로 균열이 보다 쉽게 형성된다. 따라서 AZ61-300 과 AZ61-400 은 결정립 크기와 집합조직 영향이 서로 상쇄되어 두 압출재에서 동일한 피로강도를 나타낸다. 결과적으로 AZ61-300 과 AZ61-400 은 결정립 크기 및 집합조직 차이로 인해 서로 다른 인장 및 압축 항복강도를 가지지만, 피로 균열 형성 거동과 고주기 피로 강도는 동일하다.

4. 결론

본 연구에서는 상용 AZ61 마그네슘합금을 300 °C 와 400 °C에서 각각 압출하여 제조된 AZ61-300과 AZ61-400의 상온 기계적 특성과 고주기 피로 특성에 대하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) AZ61-300과 AZ61-400 모두 이차상이 거의 존재하지 않으며 완전 재결정된 미세조직을 나타낸다. AZ61-300이 AZ61-400에 비해 미세한 결정립 크기와 약한 기저면 집합조직을 가진다.

(2) 두 압출재의 집합조직 강도 차이로 인해 인장 항복강도는 AZ61-400이 높은 반면 압축 항복강도는 AZ61-300이 더 높다. 인장 연신율은 작은 평균 결정립 크기로 인해 주된 인장균열 형성 위치인 {10-11}-{10-12} 쌍정의 활성화가 용이하지 않은 AZ61-300이 비교적 높다.

(3) AZ61-300과 AZ61-400 모두 시편 표면에서 피

로 균열이 발생하고 110 MPa의 동일한 피로강도를 가진다. 동일한 피로 특성은 결정립 크기와 집합조직 차이에 의한 피로 수명 영향이 서로 상쇄되었기 때문이다.

후 기

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

REFERENCES

- [1] V. V. Ramalingam, P. Ramasamy, M. D. Kovukkal, G. Myilsamy, 2020, Research and Development in Magnesium Alloys for Industrial and Biomedical Applications: A Review, *Met. Mater. Int.*, Vol. 26, pp. 409–430. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00346-8>
- [2] A. Gökçe, 2020, Metallurgical Assessment of Novel Mg–Sn–La Alloys Produced by High-Pressure Die Casting, *Met. Mater. Int.*, Vol. 26, pp. 1036–1044. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00539-1>
- [3] M. K. Kulekci, 2008, Magnesium and its alloys applications in automotive industry, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 39 pp. 851–865. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1279-2>
- [4] J. Feng, H. Sun, X. Li, J. Zhang, W. Fang, W. Fang, 2016, Microstructures and mechanical properties of the ultrafine-grained Mg–3Al–Zn alloys fabricated by powder metallurgy. *Adv. Powder Technol.*, Vol. 27, pp. 550–556. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.008>
- [5] M. Bauser, G. Sauer, K. Siegert, 2006, Extrusion, 2nd ed. Materials Park (OH), ASM International, Ohio. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.ex2.9781627083423>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] H. J. Kim, S. H. Kim, S. W. Lee, B. G. Moon, Y. M. Kim, J. H. Lee, J. Yoon, H. Yu, S. H. Park, 2021, Significant Improvement in Extrudability of Mg–9Al–0.8Zn–0.9Ca–0.6Y Alloy Through Mischmetal Addition, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 514–521. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00822-6>
- [9] I. Nonaka, S. Setowaki, Y. Ichikawa, 2014, Effect of load frequency on high cycle fatigue strength of bullet train axle steel, *Int. J. Fatigue*, Vol. 60, pp. 43–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.08.020>
- [10] K. Tanaka, S. Matsuoka, F. Kouzu, K. Nagata, 1983, Fatigue strength of a rotor steel subjected to torsional loading simulating that occurring due to circuit breaker reclosing in an electric power plant, *Fatigue Eng. Mater. Struct.* Vol. 6, pp. 103–120. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1983.tb00328.x>
- [11] S. H. Park, C. S. Lee, 2017, Relationship between mechanical properties and high-cycle fatigue strength of medium-carbon steels, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 690, pp. 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.080>
- [12] H. J. Kim, S. C. Jin, J. G. Jung, S. H. Park, 2021, Influence of undissolved second-phase particles on dynamic recrystallization behavior of Mg–7Sn–1Al–1Zn alloy during low- and high-temperature extrusions, *J. Mater. Sci. Tech.*, Vol. 71, pp. 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.08.056>
- [13] W. Zhang, H. Zhang, L. Wang, J. Fan, X. Li, L. Zhu, S. Chen, H. J. Roven, S. Zhang, 2020, Microstructure Evolution and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheets Prepared by Low-Speed Extrusion with Different Temperature, *Cryst.*, Vol. 10, pp. 644. <https://doi.org/10.3390/cryst10080644>
- [14] T. Mayama, M. Noda, R. Chiba, M. Kuroda, 2011, Crystal plasticity analysis of texture development in magnesium alloy during extrusion, *Int. J. Plast.*, Vol. 27, pp. 1916–1935. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.02.007>

- [15]S. H. Kim, S. W. Lee, B. G. Moon, H. S. Kim, Y. M. Kim, S. H. Park, 2019, Influence of extrusion temperature on dynamic deformation behaviors and mechanical properties of Mg-8Al-0.5Zn-0.2Mn-0.3Ca-0.2Y alloy, *J. Mater. Res. Tech.*, Vol. 8, pp. 5254–5270. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.048>
- [16]G. E. Dieter, 1988, *Mechanical metallurgy*, 3rd ed, McGraw-Hill, New York, pp. 124–127. <https://doi.org/10.1002/crat.2170230211>
- [17]H. Liu, S. Deng, S. Chen, H. Song, S. Zhang, B. Wang, 2022, Correlation of the anisotropic hardening behavior and texture features of cold rolled Zr-4 sheet under uniaxial tension, *J. Mater. Sci. Tech.*, Vol. 119, pp. 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.069>
- [18]S. H. Kim, S. W. Bae, S. W. Lee, B. G. Moon, H. S. Kim, Y. M. Kim, J. Yoon, S. H. Park, 2018, Microstructural evolution and improvement in mechanical properties of extruded AZ31 alloy by combined addition of Ca and Y, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 725, pp. 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.04.031>
- [19]D. L. Yin, J. T. Wang, J. Q. Liu, X. Zhao, 2009, On tension–compression yield asymmetry in an extruded Mg–3Al–1Zn alloy, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 478, pp. 789–795. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.12.033>
- [20]S. Suresh, 1998, *Fatigue of Materials*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511806575>
- [21]M. F. Horstemeyer, N. Yang, K. Gall, D. L. McDowell, J. Fan, P. M. Gullett, 2004, High cycle fatigue of a die cast AZ91E-T4 magnesium alloy, *Acta Mater.*, Vol. 52, pp. 1327–1336. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.11.018>
- [22]Z. Li, Q. Wang, A. A. Luo, P. Fu, L. Peng, Y. Wang, G. Wu, 2013, High Cycle Fatigue of Cast Mg-3Nd-0.2Zn Magnesium Alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 44, pp. 5202–5215. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1843-3>