

# 빌렛 형상 제어를 통한 Mg-5Bi 합금 압출재의 조직 균일도 및 기계적 물성 변화

진상철<sup>1</sup>, 차재원<sup>2</sup>, 박성혁<sup>3,#</sup>

## Variation in Microstructural Homogeneity and Mechanical Properties of Extruded Mg-5Bi Alloy Via Controlling Billet Shape

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

(Received September 7, 2022 / Revised September 27, 2022 / Accepted September 27, 2022)

### Abstract

Extruded Mg-Bi binary alloys are known to have an undesirable bimodal grain structure containing a large amount of coarse unrecrystallized grains. Accordingly, to improve the microstructural homogeneity of extruded Mg-Bi alloys, it is necessary to promote the dynamic recrystallization (DRX) behavior during hot extrusion. An effective way to promote DRX is an increase in nucleation sites for DRX through a pre-deformation process before extrusion, such as cold pre-forging and hot pre-compression. However, the application of these pre-deformation processes increases the cost of final extruded Mg products because of an increase in energy consumption and decrease in productivity. Therefore, a low-cost new continuous process with high productivity is required to improve the microstructural homogeneity and mechanical properties of extruded Mg alloys without a drastic increase in the entire process cost. This study proposes a new extrusion method using an extrusion billet with a truncated cone shape (i.e., tapered billet) instead of a conventional extrusion billet with a cylindrical shape. When the hot extrusion of a Mg-5Bi alloy is conducted using the tapered billet, the DRX behavior during extrusion is considerably promoted. The DRX fraction and average grain size of the extruded alloy significantly increase and decrease from 65% to 91% and from 225  $\mu\text{m}$  to 49  $\mu\text{m}$ , respectively. Consequently, the extruded Mg-5Bi alloy fabricated using the tapered billet has a finer homogeneous grain structure and higher tensile elongation than the extruded counterpart fabricated using the cylindrical billet.

**Keyword:** Magnesium alloy, Billet shape, Extrusion, Microstructure, Mechanical properties

### 1. 서 론

전 세계적으로 차량의 연비에 대한 규제가 강화되고 있는 가운데, 차량의 경량화를 통한 연비와 전비

향상을 이루고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 마그네슘은 상용 구조용 금속 소재 중 가장 밀도가 낮고, 비강도가 높아 경량화 부품의 소재로 주목받고 있다. 마그네슘 합금을 압출하여 부품을 제조할 경우 압출 중 동적재결정 (dynamic recrystallization, DRX)이 발생하면서 조대한 주조조직이 사라지고 미세한 결정립이 형성되어 기계적 물성이 향상된다 [1-3].

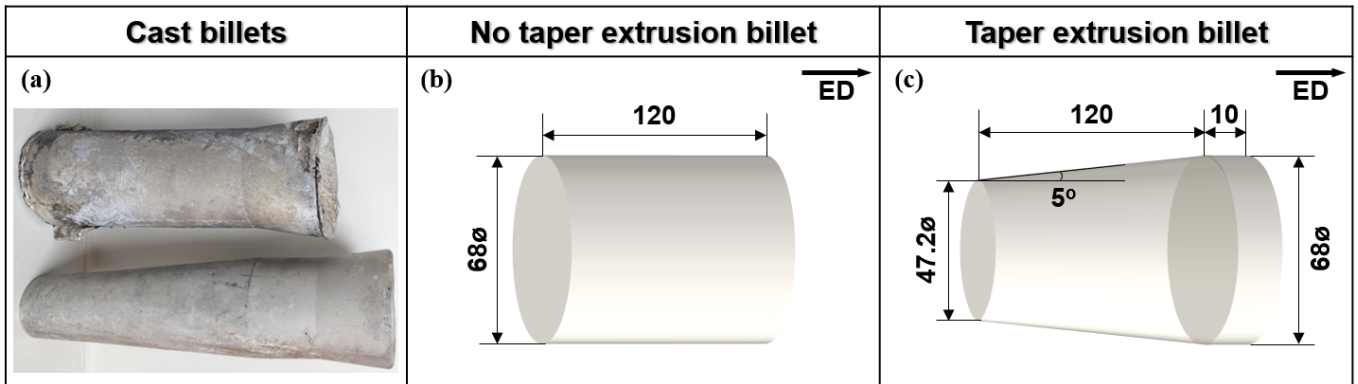
1. 경북대학교 신소재공학부, 박사과정

2. 경북대학교 신소재공학부, 석사과정

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



**Fig. 1. (a) Photographic image of cast billets; conventional cast billet (top) and tapered cast billet (bottom) and illustration of extrusion billets; (b) conventional extrusion billet and (c) taper extrusion billet.**

최근 압출 중 동적재결정을 촉진시키기 위해 압출 전 빌렛에 선변형(pre-strain)을 추가하는 방법이 보고되었다 [4,5]. 이는 빌렛을 냉간 단조 하거나 열간 압축을 함으로써 압출 전 빌렛 내에 쌍정(twin)을 형성시키고, 이러한 쌍정은 압출 중 재결정립의 핵 생성 사이트로 작용하여 동적재결정을 촉진시켜 압출재의 결정립을 미세화하는 방법이다. 하지만 이러한 방법은 압출 전 쌍정을 형성시키기 위한 별도의 공정을 적용 해야하므로 제조 리드타임(lead-time)이 증가하고 추가 공정장비가 요구되어 제작품의 비용이 상승되는 단점이 있다.

비스무트(Bismuth, Bi)는 마그네슘 내에 최대 9wt% 까지 고용될 수 있어 고용강화 효과와 더불어 고용 후 열처리에 따른 석출강화 효과를 기대할 수 있다 [6]. 또한 Mg-Bi 계 합금에서 형성되는 Mg<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub> 상은 용점이 823 °C로 매우 높아 열적 안정성이 우수하다는 장점이 있다. 이로 인해 Mg-Bi 계 합금은 상용 Mg-Al 및 Mg-Zn 계 합금에 비해 10 배 이상 뛰어난 압출성을 가지고 있어 최근 고속 압출용 합금으로 활발히 연구되고 있다 [7,8]. 그러나 Mg-Bi 이원계 합금의 경우 빌렛 내에 존재하는 미세한 미고용 Mg<sub>3</sub>Bi<sub>2</sub> 입자들에 의해 동적재결정이 억제되어 압출 동안 재결정이 소재 전반에 발생하지 않아 압출재에 조대한 미세결정립이 잔존하여 불균일한 미세조직을 가지게 된다 [9].

본 연구에서는 Mg-Bi 이원계 합금의 미세조직적 균일도와 기계적 물성 향상을 위하여 기존에 제안된 압출 전 별도의 공정을 통한 선변형이 아닌 압출 중에 선변형을 가할 수 있도록 압출 빌렛을 원기둥형이 아닌 원뿔대 형태로 제조하였고, 이를 통

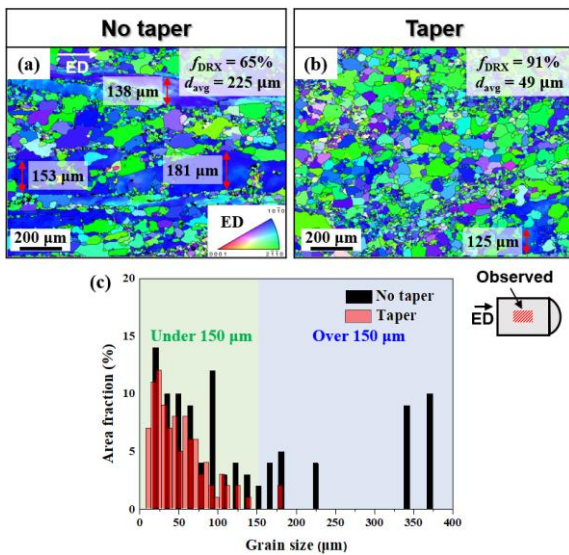
해 제조된 압출재의 미세조직과 인장 물성의 변화에 대해 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 Mg-5Bi (wt%) 합금을 사용하였다. 빌렛 제조를 위해 750 °C 에서 20 분간 용해하였고, 용탕의 안정화를 위해 보호가스로 SF<sub>6</sub> 와 CO<sub>2</sub> 를 사용하였다. 이후 용탕을 200 °C 로 예열한 스틸 몰드에 출탕하여 빌렛을 제조하였다. 원뿔대형 빌렛으로 절삭가공하여 제조시 발생하는 소재 손실을 막고자 기존의 원기둥형 스틸 몰드와 별개로 특정 각도를 가지는 원뿔대형 몰드를 이용하여 빌렛을 제조하였다 (Fig. 1a). 제조된 원기둥형 빌렛과 원뿔대형 빌렛을 410 °C 에서 10 시간 균질화 열처리 한 후 수냉하였다. 표면 결함 제거를 위해 균질화처리된 빌렛의 표면을 기계가공 하였다. 가공된 압출 빌렛은 Fig. 1b and c 와 같이 1) 높이 120 mm, 직경 68 mm 의 통상의 원기둥 형태와, 2) 높이 120 mm, 한쪽면의 직경 68 mm 이고 다른 면의 직경은 47 mm 로 두 면간의 각도가 5° 를 이루는 원뿔대 형태를 가진다. 압출은 300 ton 용량의 수평식 직접압출기를 이용하여 압출온도 350 °C, 압출비 10:1, 압출 램속도 1 mm/s 조건에서 진행하였다. 이 때 제조되는 압출재는 직경 21.5 mm 의 봉상의 형태를 가지며, 원기둥형 빌렛과 원뿔대형 빌렛으로 제조된 압출재를 각각 no-taper 압출재와 taper 압출재로 명명하였다. 압출재의 미세조직 관찰을 위해 광학현미경(OM)과 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM)을 이용하였고, 압출재의 집합조직을 분석하기 위해 전자 후방 산란 회절

(EBSD)를 사용하였다. Oxford Instruments AztecCrystal 2.0 을 이용하여 시료의 집합조직과 kernel average misorientation (KAM) 및 Schmid factor (SF)를 분석하였다. 이 때 분석의 신뢰성을 확보하기 위해 mean angular deviation (MAD) 값이 1.0 이하의 데이터를 사용하였다.

인장시험용 시편은 압출재를 게이지부 길이 25 mm, 게이지부 직경 6 mm 인 봉상의 dog-bone 형태로 기계가공 하였다. Shimadzu AGS-100kNX 시험기를 이용하여 상온에서 변형률 속도  $0.001 \text{ s}^{-1}$  로 압출 방향으로 인장시험을 실시하였다.



**Fig. 2.** Inverse pole figure maps of extrudates using (a) cylinder and (b) tapered billets. (c) Grain size distributions of extrudates.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 압출재의 미세 조직

Fig. 2a and b 는 각각 no-taper 압출재와 taper 압출재의 역극점(inverse pole figure, IPF) 지도를 보여준다. No-taper 압출재는 65%의 재결정 분율과  $225 \mu\text{m}$  의 평균 결정립 크기를 가지며 (Fig. 2a), taper 압출재는 91%의 재결정 분율과  $49 \mu\text{m}$  의 평균 결정립 크기를 가진다 (Fig. 2b). 따라서, taper 빌렛을 이용하여 압출 시 압출재의 재결정 분율이 26% 증가하고 평균 결정립 크기는 78% 감소한다.

마그네슘 합금은 연속 동적재결정, 불연속 동적재결정과 같은 다양한 동적재결정 현상에 의해 미세

조직이 변화한다. 마그네슘 합금의 열간 압출은 고온에서 큰 변형량이 가해지기 때문에 동적재결정 현상이 필연적으로 발생한다 [10]. 소재내의 전위밀도가 높은 부분은 동적재결정 핵생성 사이트로 작동한다고 알려져 있다 [11]. 마그네슘 합금은 결정립의 방위와 가해지는 힘의 방향에 따라 쌍정 혹은 슬립으로 변형을 수용한다 [10]. Taper 압출 빌렛의 경우 압출 초기 컨테이너 내부를 가득 채우기 위해 선변형이 가해지고, 결국 no-taper 압출 빌렛 보다 더 많은 양의 변형이 가해진다. 더 많은 변형을 수용하기 위해 taper 압출 빌렛은 no-taper 압출 빌렛보다 소재 내 더 높은 전위밀도를 가지거나, 쌍정이 더욱 활발하게 형성된다. 이렇게 형성된 높은 전위밀도와 쌍정이 압출 중 동적재결정 핵생성 사이트로 작용함으로 인해 taper 압출 빌렛에서 동적재결정이 촉진되고, 재결정 분율이 크게 향상된다. 그 결과 결정립이 미세해지고, 미세결정된 결정립의 크기도 최대  $181 \mu\text{m}$  에서  $125 \mu\text{m}$  으로 감소한다.

선행 연구 결과에 의하면 Mg-Bi 이원계 합금은 소재내에 존재하는 미세한  $\text{Mg}_3\text{Bi}_2$  상에 의해 압출 중 동적재결정이 억제되어 압출 후 상당량의 미세 결정립이 잔존하게 된다 [9]. 예를 들어, Mg-6Bi (wt%) 압출재는 재결정 분율이 76.4%로 미세한 재결정립과 조대한 미세결정립이 혼재해 있다 [9]. 이는 본 연구의 no-taper 압출재의 미세조직에도 유사하게 나타난다. Fig. 2c 의 결정립 크기 분포를 살펴보면 no-taper 압출재는 결정립 크기가  $150 \mu\text{m}$  이하를 갖는 결정립이 69%였고,  $150 \mu\text{m}$  를 초과하는 결정립이 31%로 매우 불균일한 이중(bimodal) 미세조직을 가지고 있다. 이러한 불균일한 미세조직을 가지면 변형 중에 응력이 국부적인 영역에 집중되어 균열 발생이 용이해져 기계적 물성이 저하될 수 있다 [12]. 반면 taper 압출재는 재결정 분율이 91%로 압출 중 동적재결정이 소재 전반에 걸쳐 발생하여  $150 \mu\text{m}$  이상의 조대한 결정립이 거의 없는 미세하고 균일한 결정립들로 이루어져 있다. 이러한 결과는 taper 빌렛 사용 시 동적재결정 촉진을 통해 Mg-Bi 이원계 합금 압출재의 미세조직을 미세화시키고 조직의 균일도를 크게 향상시킨다는 것을 보여준다.

#### 3.2 압출재의 인장 특성 및 강화기구

Fig. 3 는 압출재의 상온 인장시험 결과를 보여준다. No-taper 압출재와 taper 압출재의 인장항복강도

(tensile yield strength)는 각각 125 MPa 와 126 MPa 로 거의 동일하다. 하지만, taper 압출재의 최대인장강도(ultimate tensile strength)와 연신율(elongation)은 197 MPa 와 3.9%로 no-taper 압출재의 184 MPa 와 2.7% 보다 높다. 마그네슘 합금 가공재의 강화기구로는 결정립계 강화, 변형경화, 집합조직 강화, 고용강화 등이 있다. 본 연구에서는 동일하게 Mg-5Bi (wt%) 합금을 사용했으므로 고용강화 효과는 동일하다. 그러나 미세조직적 차이로 인해 결정립계 강화, 변형경화, 그리고 집합조직 강화는 두 압출재에서 다르게 발생한다.

결정립이 미세화 되면 결정립계 강화에 의해 소재의 강도가 향상된다. 결정립계 강화 효과는 Hall-Petch 관계식인  $\sigma_y = \sigma_0 + kd^{1/2}$  을 따르며 [13], 여기서  $\sigma_y$  는 항복강도,  $\sigma_0$  는 슬립면에서 전위 슬립으로 발생한 마찰응력,  $k$  는 Hall-Petch 계수,  $d$  는 평균 결정립 크기이다. Taper 압출재의 평균 결정립 크기가 49  $\mu\text{m}$  로 no-taper 압출재의 225  $\mu\text{m}$  보다 크게 작으므로, Hall-Petch 관계식에 따라 taper 압출재가 no-taper 압출재 보다 큰 결정립계 강화 효과를 가진다.

Fig. 4 는 두 압출재의 KAM 지도와 KAM 평균값을 보여준다. KAM 은 한 픽셀과 그 픽셀을 둘러싸고 있는 커널(kernel) 사이의 방위 차이를 정량화 한 값이다. 이를 통해 소재 내의 변형 에너지를 간접적으로 평가할 수 있다. No-taper 압출재와 taper 압출재의 KAM 평균값은 각각 0.53 과 0.38 을 가진다. 압출 중 지속적으로 변형을 받는 미재결정립은 재결정립에 비해 높은 전위밀도를 가진다. Taper 압출재는 이러한 높은 전위밀도를 가지는 미재결정립의 분율이 9%로 no-taper 압출재의 35% 보다 크게 적기 때문에 더 낮은 KAM 평균값을 가진다. 소성 변형 중 소재내에 필연적으로 기하학적 필요 전위(geometrically necessary dislocation, GND)가 형성되며, 이를 통해 소재의 변형경화 정도를 비교할 수 있다 [14]. Gao et al. [15], Kubin 과 Mortensen [16] 등에 의해 KAM 값을 바탕으로 GND 의 밀도를 계산하는 모델이 개발되었다. EBSD 결과를 통해 GND 의 밀도를 계산하는 식은  $\rho_{GND} = 2\theta/ub$  로,  $\theta$  는 평균 KAM 값,  $u$  는 측정된 misorientation 의 간격,  $b$  는 버거스 벡터의 크기이다. 이를 이용하여 계산한 결과 no-taper 압출재는  $4.41 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ , taper 압출재는  $3.16 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$  의 GND 밀도를 가진다(Fig. 4c). 따라서, no-taper 압출재가 taper 압출재 보다 GND 밀도가 약

40% 높으며, 이는 no-taper 압출재가 보다 높은 변형경화 효과를 가짐을 의미한다.

Fig. 5 은 압출방향으로 인장 시 기저면 슬립(basal slip)에 대한 SF 지도, 압출방향 IPF 및 SF 분포를 보여준다. 미재결정립은 강한 <10-10> 집합조직을 가지기 때문에 압출 방향으로의 인장 시 basal slip 이 활성화되기 어렵다. 따라서 미재결정립은 재결정립 보다 더 낮은 SF 를 가진다. No-taper 압출재는 taper 압출재 보다 더 많은 양의 미재결정립을 가지기 때문에 0.1 이하의 낮은 SF 를 갖는 결정립의 분율이 taper 압출재에서 28.9%인 반면 no-taper 압출재는 48.3%로 훨씬 더 높다(Fig. 5e). 따라서 no-taper 압출재의 평균 SF 는 0.15 로 taper 압출재의 평균 SF 인 0.19 보다 낮고, 따라서 no-taper 압출재에서의 집합조직 강화 효과가 더 크게 나타남을 의미한다. 이러한 결과들을 볼 때 변형경화와 집합조직 강화 효과는 no-taper 압출재가 더 큰 반면, 결정립계 강화 효과는 taper 압출재가 더 크다. 이러한 강화효과의 차이가 서로 상쇄되어 두 압출재는 결정립 크기, 변형에너지, 집합조직 차이에도 불구하고 거의 동일한 인장항복강도를 가지게 된다.

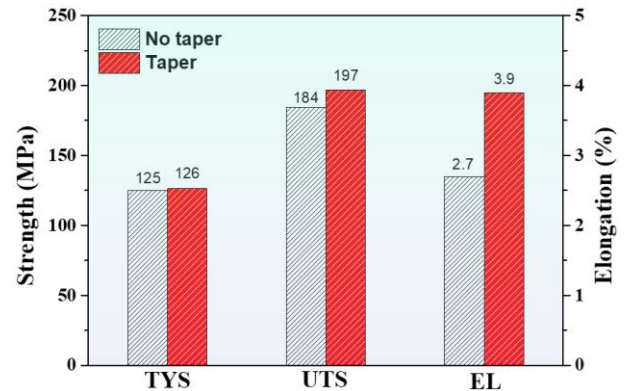
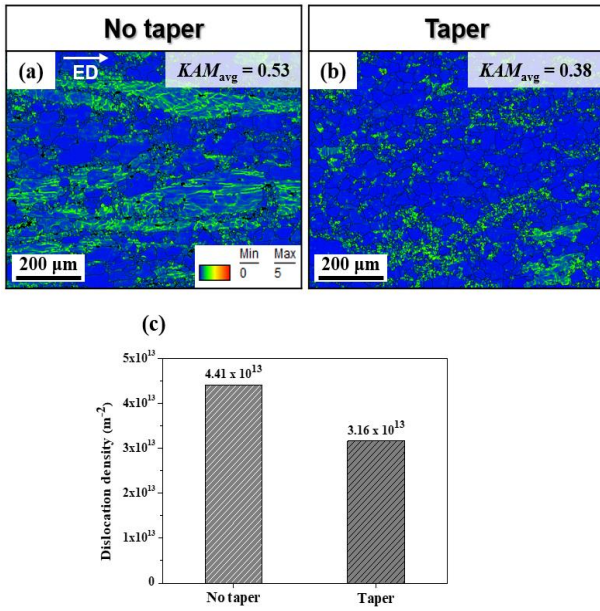


Fig. 3. Tensile properties of no-taper and taper extrudates. TYS, UTS, and EL denote the tensile yield strength, ultimate tensile strength, and elongation, respectively.

### 3.3 압출재의 인장 파단 거동

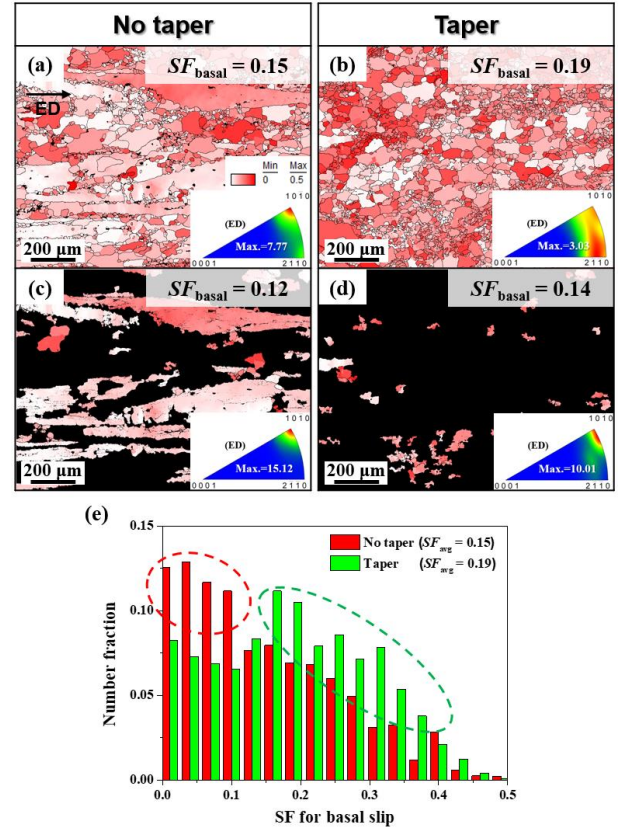
Taper 빌렛 적용 시 압출재의 연신율이 44% 가량 상승한 이유에 대해 알아보기 위해 파단된 인장시편에 대한 길이방향 단면(Fig. 6a and b)과 파단면(Fig. 6c and d)을 관찰하였다. 기저면 집합조직을 가지는 마그네슘 합금 압출재를 압출 방향으로 인장 시,



**Fig. 4.** Kernel average misorientation (KAM) maps of (a) no-taper and (b) taper extrudates. (c) Calculated geometrically necessary dislocation (GND) densities.  $KAM_{avg}$  denotes the average KAM value.

높은 응력이 가해지는 인장 변형 후반부에 {10-11} 압축 쌍정과 {10-11}-{10-12} 이중 쌍정이 형성된다. 이러한 쌍정들은 basal slip의 활성이 용이한 결정학적 방위를 가지기 때문에 쌍정 내에 전위가 과도하게 축적되고 결국 쌍정에서 미세 균열이 형성된다 [17]. 이러한 균열 형성 사이트로 작용하는 {10-11} 압축 쌍정과 {10-11}-{10-12} 이중 쌍정은 Hall-Petch 관계식에 따라 결정립 크기가 증가할수록 쉽게 형성된다 [18]. No-taper 압출재의 경우 미세결정립의 최대 폭이 181  $\mu\text{m}$ 으로 조대하며, 상당한 양이 존재하기 때문에 미세결정립들이 서로 인접해 있다 (Fig. 2a). 이로 인해 인장 변형 중에 미세결정립에서 쌍정이 쉽게 생성되고 균열의 병합(coalescence)에 의해 조기 파단 되어 낮은 연신율을 가지게 된다. 반면 taper 압출재는 압출 중에 거의 대부분 재결정되어 소량의 미세결정립을 가지며, 미세결정립의 폭 또한 125  $\mu\text{m}$ 이하로 no-taper 압출재에서 보다 작다.

Taper 압출재의 파단된 인장 시편을 관찰한 결과 균열의 병합은 관찰되지 않으며, no-taper 압출재에서 보다 작은 크기의 벽개면(cleavage plane)이 관찰된다 (Fig. 6). 따라서, taper 압출재의 적은 미세결정립 분율과 작은 평균 결정립 크기로 인해 인장 변형 중 균열



**Fig. 5.** (a-d) Schmid factor (SF) maps and ED inverse pole figures and (e) SF distributions: (a, b) total region, and (c, d) unDRXed region.  $SF_{basal}$  denotes the average SF value.

발생을 야기하는 {10-11} 압축 쌍정과 {10-11}-{10-12} 이중 쌍정의 형성이 억제되어 no-taper 압출재에 비해 44% 향상된 연신율을 가진다. 이는 기존의 낮은 연신율을 갖는 압출재의 동적재결정 촉진과 결정립 미세화에 의해 연성을 상당히 개선시킬 수 있음을 의미한다. 소재의 성형성은 굽힘성(bendability)에 의해 평가될 수 있다. 최근 연구결과에 의하면 굽힘성과 소재의 연신율은 선형적인 관계를 가진다 [19]. 따라서 taper 압출을 이용하여 제작된 압출재의 경우 연신율 증가와 더불어 소재의 성형성도 개선될 수 있다.

Taper 빌렛 압출은 압출 초기 컨테이너 내에서 선 변형이 부가되어 압출 중 동적재결정 거동을 촉진 시킴으로써 압출재의 평균 결정립 크기가 감소하고 조직 균일도가 크게 향상된다. 또한 결정립 미세화로 인해 인장 변형 중 쌍정의 형성이 억제되어 압출재의 연신율 또한 향상된다. 본 연구는 압출 전

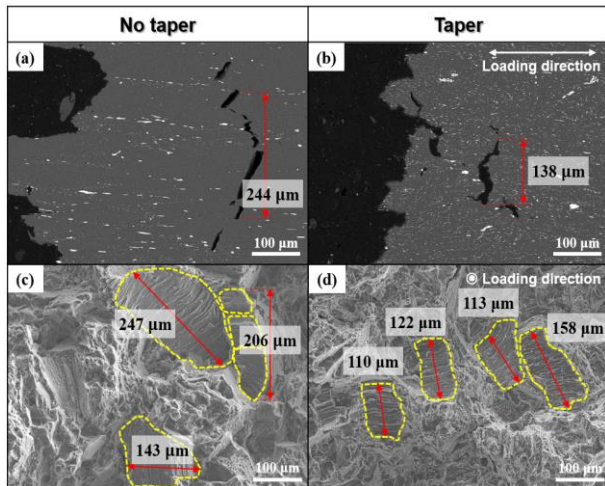
단조 및 압축과 같은 추가적인 공정의 도입 없이 빌렛의 형상만을 제어함으로써 마그네슘 합금 압출재의 미세조직 균일도와 연성을 크게 향상시킬 수 있음을 보여준다.

## 후 기

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

## REFERENCES

- [1] F. Liu, X. Liu, B. Zhu, H. Yang, G. Xiao, M. Hu, 2022, Influence of Microstructure and Mechanical Properties on Formability in High Strain Rate Rolled AZ31 Magnesium Alloy Sheets, *Met. Mater. Int.*, Vol. 28, pp. 1361–1371. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-00996-7>
- [2] Y. Feng, Y. Yang, Z. Xiao, X. Meng, G. Zhou, J. Leng, X. Teng, 2022, Effect of Al on the Microstructure and Mechanical Properties of Mg–Sn–Ca–Mn Wrought Alloy, *Met. Mater. Int.*, Vol. 28, pp. 1480–1487. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01001-x>
- [3] O. Sadeddin, M. Moazami-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] S. H. Park, H. S. Kim, J. H. Bae, C. D. Yim, B. S. You, 2013, Improving the mechanical properties of extruded Mg–3Al–1Zn alloy by cold pre-forging, *Scr. Mater.*, Vol. 69, pp. 250–253. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.04.011>
- [5] H. Wang, L. Zhang, W. Chen, D. Fang, W. Zhang, G. Cui, 2018, Improved tension/compression asymmetry achieved in high-strength magnesium alloys via compression-extrusion process, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 736, pp. 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.110>
- [6] M. Hansen, K. Anderko, 1958, *Constitution of Binary Alloys*, McGraw-Hill, New York. pp. 317–318.
- [7] 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. Alloy. Compd.*, Vol. 843, 156026. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156026>



**Fig. 6. SEM images of fractured tensile specimens of extrudates: (a, b) on longitudinal cross-sections and (c, d) on fracture surfaces.**

## 4. 결 론

본 연구에서는 Mg-5Bi 합금 빌렛의 형상을 변화 시킴으로써 압출재의 미세조직과 인장 특성을 개선 하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Taper 빌렛을 사용 시 압출 초기 선변형 효과에 의해 소재 내에 큰 변형이 부가되어 압출 중 동적 재결정이 촉진된다. 이로 인해 압출재의 재결정 분율이 65%에서 91%로 증가하며 평균 결정립 크기가 225 μm 에서 49 μm 로 감소하여 미세조직 균일도가 크게 향상된다.

2) No-taper 압출재는 taper 압출재에 비해 변형경화와 집합조직 강화 효과가 높으나, taper 압출재의 높은 결정립계 강화 효과로 인해 두 압출재는 거의 동일한 인장항복강도를 가진다.

3) Taper 압출재는 no-taper 압출재 보다 44% 가량 높은 인장 연신율을 가진다. 이는 taper 압출재의 결정립 미세화로 인해 인장 변형 중 {10–11} 압축 쌍정과 {10–11}-{10–12} 이중 쌍정의 형성이 억제되어 응력 집중에 의한 균열이 쉽게 형성되지 않기 때문이다.

- [8] 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>
- [9] 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>
- [10] M. G. Jiang, C. Xu, H. Yan, G. H. Fan, T. Nakata, C. S. Lao, R. S. Chen, S. Kamado, E. H. Han, B. H. Lu, 2018, Unveiling the formation of basal texture variations based on twinning and dynamic recrystallization in AZ31 magnesium alloy during extrusion, *Acta Mater.*, Vol. 157, pp. 53–71.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.014>
- [11] J. H. Lee, S. W. Lee, S. H. Park, 2019, Microstructural characteristics of magnesium alloy sheets subjected to high-speed rolling and their rolling temperature dependence, *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 8, pp. 3167–3174.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.020>
- [12] Y. Chen, C. He, F. Liu, C. Wang, Q. Xie, Q. Wang, Y. Liu, 2020, Effect of microstructure inhomogeneity and crack initiation environment on the very high cycle fatigue behavior of a magnesium alloy, *Int. J. Fatigue*, Vol. 131, 105376.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105376>
- [13] N. Hansen, 2004, Hall–Petch relation and boundary strengthening, *Scr. Mater.*, Vol. 51, pp. 801–806  
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>
- [14] N. A. Fleck, M. F. Ashby, J. W. Hutchinson, 2003, The role of geometrically necessary dislocations in giving material strengthening, *Scr. Mater.*, Vol. 48, pp. 179–183.  
[https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00338-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00338-X)
- [15] H. Gao, Y. Huang, W. D. Nix, J. W. Hutchinson, 1999, Mechanism-based strain gradient plasticity— I. Theory, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 47, pp. 1239–1263.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(98\)00103-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(98)00103-3)
- [16] L. P. Kubin, A. Mortensen, 2003, Geometrically necessary dislocations and strain-gradient plasticity: a few critical issues, *Scr. Mater.*, Vol. 48, pp. 119–125.  
[https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00335-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00335-4)
- [17] M. R. Barnett, 2007, Twinning and the ductility of magnesium alloys: Part II. “Contraction” twins, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 464 pp. 8–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.109>
- [18] M. R. Barnett, Z. Keshavarz, A. G. Beer, D. Atwell, 2004, Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg–3Al–1Zn, *Acta Mater.*, Vol. 52, pp. 5093–5103.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.07.015>
- [19] G. M. Lee, J. U. Lee, S. H. Park 2021, Effects of post-heat treatment on microstructure, tensile properties, and bending properties of extruded AZ80 alloy, *J. Mater. Res. Technol.* Vol. 12, pp. 1039–1050.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.046>