

AM80 마그네슘 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 대한 압출조건의 영향

이상구¹ · 김덕현² · 김대환³ · 임수근^{2, #}

Effect of Extrusion Conditions on Microstructures and Mechanical Properties of AM80 Magnesium Alloys

S. K. Lee, D. H. Kim, D. H. Kim, S. G. Lim

(Received September 11, 2018 / Revised November 23, 2018 / Accepted November 23, 2018)

Abstract

This study investigated the effect of extrusion conditions on microstructures and mechanical properties of AM80 magnesium alloys. The billets of magnesium alloy used for hot extrusion were prepared by permanent mold casting method, and its extrusion was hot direct extrusion with different extrusion conditions. The results of microstructural analysis showed that the main phases in the as-casted alloys were α -Mg, β -Mg₁₇Al₁₂, and lamella Mg₁₇Al₁₂. Hot extrusion results, The tensile strength of the most soundly manufactured extruded bars (extrusion temp: 350°C, extrusion ratio: 27:1, ram speed: 2mm/s) was approximately 327MPa at room temperature. The increase in the mechanical properties of hot-extruded alloys was as a result of grain refinement by dynamical recrystallization during hot extrusion.

Key Words : Mg Alloy, Hot Extrusion, Extrusion Condition, Microstructure, AM80

1. 서론

최근 자동차 분야에서 소비자의 편의 및 안전에 대한 요구가 증대됨에 따라 차량 구성 부품 수가 증가하게 되고 이로 인해 차량의 중량 또한 증가하고 있다. 그리고 환경 이슈에 따라 HEV, EV 등과 같은 친환경 자동차 시장이 점차 확대되고 있으며, 친환경차 전용 부품은 기존 차량의 부품보다 무거워 이를 경량화 시키려는 많은 노력들이 진행되고 있다.[1-3] 이에 비중이 약 1.78g/cm³으로 상용 금속소재 중 가장 가벼운 마그네슘 합금 소재가 많은 관심을 받고 있다.[4-7] 마그네슘 합금은 경량성 외 높은 비강도 및 절삭성이 우수한 특성을 지니고 있어 철계 부품 소재를 대신할 소재로 적합하나 이 합금은 주조 시 높은 발화

성 및 산화성을 지니고 있으며 조밀육방결정구조(HCP)로 상온에서의 낮은 성형가공성으로 인해 부품성형에 한계가 있다.

이 때문에 대부분의 마그네슘 합금 소재에 관한 연구는 합금의 산화 및 발화성 개선 그리고 소성가공성 향상을 위한 연구들이 주를 이루고 있다. 최근에는 마그네슘 합금의 산화 및 발화성 개선을 위하여 정부출연 연구소 주도로 난연성특성이 우수한 마그네슘 합금을 개발하고 이 기술을 지역의 마그네슘 소재 전문 중소기업으로 이전함으로써 수송기기 분야로의 적용 확대를 기대하고 있는 등 많은 연구가 진행되고 있다.[8,9] 그리고 강소성가공과 같은 새로운 소성가공 공정의 적용함으로써 얇고 우수한 특성의 마그네슘 합금 소재의 개발을 위한 노력도 진행되고 있다.[10,11]

1. 청룡열처리

2. 경상대학교 대학원

3. 한국항공우주산업(주)

Corresponding Author : The Graduate School Gyeongsang National University, Professor, E-mail:suglim@gnu.ac.kr

하지만 이러한 노력에도 불구하고 합금의 적용 및 상용화는 아직 알루미늄 합금에 비해 다소 미약하며, 적용되고 있는 대부분의 마그네슘 합금 부품은 주로 다이캐스팅과 같은 주조공법에 의해 생산되고 있다. 그러나 이러한 주조 공법의 경우 수축 및 기포결함 등의 문제를 해결하기 어렵고, 주조 조직의 특성상 강도가 취약한 편이다. 그에 비해 압출성형에 의한 부품 제조는 표면을 균일하게 할 수 있고 압출금형의 형상에 따라 다양한 제품의 생산이 가능하다. 또한 가공비가 저렴하고 자동화에 따른 생산성의 향상을 기대할 수 있으며, 홀 변형에 따라 주조품에 비해 우수한 기계적 특성을 지닌 부품을 얻을 수 있어 자동차의 범퍼 및 크로스 빔 그리고 시트 프레임 등과 같은 구조물에 적용할 수 있는 장점이 있다. [12] 하지만 마그네슘에 적용하기 위해서는 제한된 슬립계(Slip system)수에 따른 난성형성 해결과 결함이 최소화된 균질한 소재의 사용 그리고 압출비, 압출속도 및 온도, 윤활 등과 같은 주요 압출 공정 변수에 대한 조사가 이루어져야 한다고 판단하여 본 연구를 실행하였다.

본 연구는 미세조직 제어를 통하여 주조/소성 가공 겸용 멀티소재를 제조하기 위한 기초 연구로서 주조재로 사용되고 있는 합금에 대해 압출 특성을 조사하기 위해 수행되었다. 이에 따라 비교적 기계적 특성이 우수하고 주로 주조재로 사용되는 Mg-Al 계 합금을 열간 압출공정에 적용함으로써 주요 공정 변수인 압출비, 압출온도, 램속도 등이 변화함에 따른 압출 특성을 조사하고 제조된 압출재에 대해서도 미세조직 및 기계적 특성을 조사하였다.

2. 실험방법

우선 실험에 사용되어질 압출 빌렛 제조를 위하여 사용한 잉곳은 ㈜HMK 에서 제조되어진 AM80 마그네슘 잉곳이며, 그 화학적 조성을 Table 1. 에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of the AM80 Mg alloys. (wt%)

Elements	Al	Zn	Mn	Si
Composition	8.12	0.05	0.27	0.38

먼저 열간 압출용 빌렛의 제조를 위하여 합금의 용해는 약 740°C 로 설정된 전기저항로에서 2시간 동안 용해하였다. 완전 용해 후 용탕의 안정화를 위하여 30분간 유지 후 합금 빌렛을 주조하였으며, 이 때 주입 온도 680°C로 250°C로 예열된 금형에 주입하여, 약 1분간 유지 후 수냉하였다. 용해 및 주조시 마그네슘 합금 용탕의 산화 방지를 위하여 99.5%CO₂ + 0.5%SF₆ 보호 가스분위기에서 실시하였으며, 제조된 빌렛은 압출을 위해 직경 50mm, 높이 100mm 실린더형상의 압출용 빌렛으로 절삭 가공하였다.

앞서 제조된 AM80 마그네슘 합금 압출용 빌렛과 300톤 수직 압출기를 이용하여 합금의 열간압출을 수행하였으며, 압출온도, 압출비, 램속도 등을 변화함으로써 그 특성을 평가하였다. 이 때 압출 온도에 따른 압출특성 비교하기 위하여 압출비(27:1)와 램 속도(2mm/s)는 고정 후 압출 온도를 각각 300, 320, 350, 380°C로 변화하여 열간 압출을 진행하였다. 그리고 압출비의 변화에 따른 압출 및 압출재의 특성 평가를 위하여 압출온도(350°C)와 램 속도(2mm/s)를 고정한 뒤 압출비를 각각 12:1(지름: Φ15), 19:1(지름: Φ12), 그리고 27:1(지름: Φ10) 로 변화하여 그 특성을 조사하였다. 마지막으로 램 속도에 따른 합금의 압출 특성을 조사하기 위하여 앞서 시행한 압출조건에서 비교적 견전하고 특성이 우수한 압출재가 생산되는 압출온도(350°C)와 압출비(27:1)에서 램 속도를 각각 2mm/s, 4mm/s로 변화하여 그 특성을 평가하였다. 각 압출조건에서 압출 시 제조된 빌렛을 각 온도로 설정된 컨테이너에 장입한 후 빌렛 내부로의 균일한 온도 분포를 위해 1시간 동안 유지 후 열간 압출하였으며, 이 때 압출하는 동안 압출 압력의 변화와 제조된 압출재의 특성 평가로서 압출 견전성을 평가하였다. 이후 미세조직 및 기계적 특성 관찰을 위해 광학현미경, Imagine Analyzer를 이용하여 미세조직 크기를 측정하였으며, 인장 시험(ASTM E8M small-size, $\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-3}/s$)을 실행 하였다

3. 결과 및 고찰

Fig. 1. 은 본 연구를 위해 사용한 마그네슘 합금의 잉곳과 압출을 위해 제조한 빌렛의 미세조직을 나타낸 것이다.

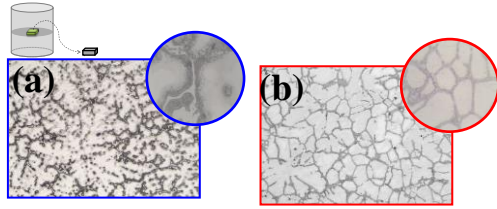
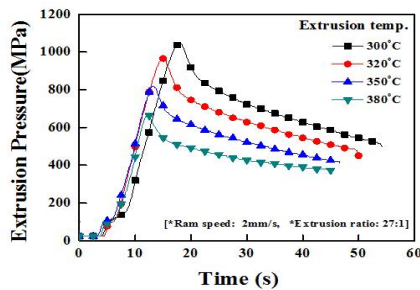


Fig. 1 Microstructures of as-casted AM80 Mg alloys; (a) ingot and (b) billet for hot-extrusion

Fig. 1(a)는 AM80 마그네슘 합금을 느린 냉각속도에서 제조하였을 때 생성되는 전형적인 주조 조직을 나타낸 것으로서 α -Mg 와 그 주변으로 베타상인 $Mg_{17}Al_{12}$ 상이 망상구조로 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이 상들 주변으로 최종 냉각에 의해 정출된 라멜라(lamella) 구조로 $Mg_{17}Al_{12}$ 상이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 라멜라 구조의 상들은 압출 시 압출 압력 상승의 요인이 되므로 상의 형성을 최소화하여 Fig. 1(b)와 같이 제조하여 보다 미세한 조직을 갖는 빌렛을 제조할 수 있었다.

Fig. 2 는 앞서 제조한 합금 빌렛을 이용하여 열간 압출 시 압출온도의 영향을 압출 압력 변화 및 압출재의 표면 특성으로 평가한 것이다. 위의 Fig. 은 압출비 27:1 그리고 램속도를 2mm/s 로 고정 후 서로 다른 압출온도에서 열간 압출하는 동안 램의 행정시간에 따른 압출압력 변화를 나타낸 것이다.



Extrusion Temp.	300°C	320°C	350°C	380°C
M.E.P.	1047MPa	964MPa	817MPa	662MPa
Surface of extrudate				

* M.E.P.: Maximum Extrusion Pressure

Fig. 2 Change in the Extrusion pressure of AM80 Mg Alloys during hot extrusion at different extrusion temperature and surface of as-extruded alloys

직접 압출에서는 컨테이너에 빌렛이 채워질 때까지 램의 진행에 따라 급속하게 압력이 증가하다 최대 압출 압력 이 후 다이 홀로 압출이 되기 시작하게 되고 이 후 압출이 진행되면서 컨테이너 속 빌렛의 길이가 감소함에 따라 압출압력이 점차 낮아지는 개형을 띤다. 여기서, 최대압출 압력, 즉 압출이 되기 시작하는 압력지점은 압출온도가 증가함에 따라 점차 감소하고 최종 압출 시간도 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열간 압출 시 압출온도의 상승은 마그네슘 합금의 유동성을 증가시켜 소재의 흐름응력, 즉 변형에 대한 저항을 감소시키기 때문이다.[13] 그리고 제조한 압출재의 표면 특성을 비교한 결과, 대부분 아주 미려하고 건전한 표면을 갖는 압출재를 제조할 수 있었으나 이 합금의 열간 압출 시 압출 온도 350 도 이상에서는 압출재의 표면에 진나무의 나무 균열과 같은 형상의 표면 결함이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 균열은 합금 소재가 다이 홀을 빠져 나오는 동안 마찰열에 의해 표면부에서의 국부 용해로 압출하는 동안 인장 응력 상태에서 찢김에 의해 발생한 것이다. 이는 합금 소재 표면부 근처에 형성된 이차상의 용융개시 온도가 낮아 발생한 것으로 보고되고 있다.[14] 따라서 이러한 균열은 건전한 압출재를 제조 할 수 없으므로 이로서 이 합금에 대해 표면이 건전한 압출재를 얻기 위해서는 350°C 이하에서 열간 압출을 실시해야 함으로 알 수 있었다.

Fig. 3. 은 압출비 27:1 램속도 2mm/s 일때, 압출온도에 따른 미세조직을 나타내었다.

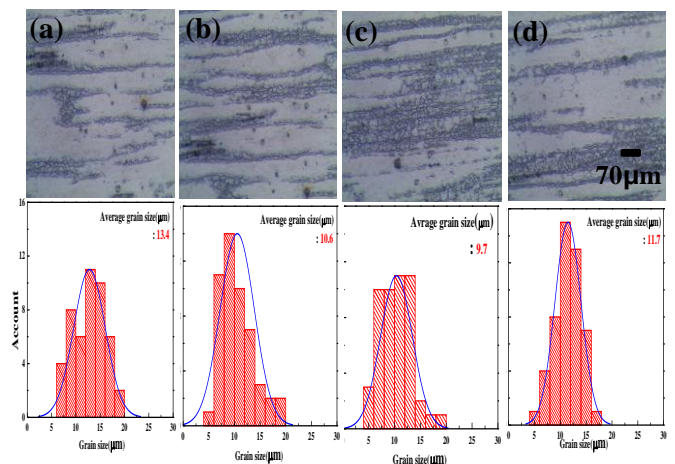


Fig. 3 microstructures and average grain size of as-extruded rods at different extrusion temperature; (a) 300°C, (b) 320°C, (c) 350°C and (d) 380°C

미세조직 관찰 결과를 나타내었다. Y 축 값인 Account 는 X 축 결정립 크기에 포함되는 결정립 개수를 나타낸 것이다. 모든 압출재에서 열간 압출에 의해 연신된 압출 조직과 동적재결정에 의해 생성된 10 μm 내외의 미세한 등축의 조직을 관찰할 수 있었다. 그리고 압출온도가 300℃에서 350℃로 증가함에 따라 평균 결정립의 크기 13.4 μm에서 9.7 μm로 약 30% 감소하였고 표면크랙이 발생한 압출재(압출온도 380℃)의 경우 11.7 μm로서 다시 증가하는 경향을 나타내었으나 그 크기의 차이는 아주 미소한 것으로 나타났다.

Fig. 4 은 제조된 압출재의 압출방향(종단면)에서 인장시험편을 채취하고 이를 인장시험하여 나타난 결과이다.

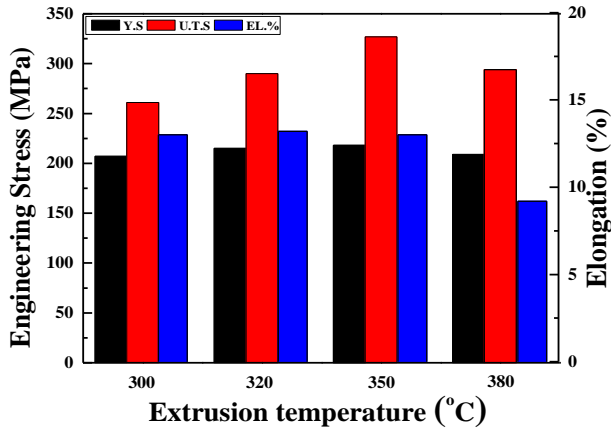
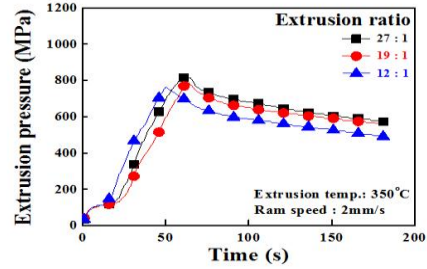


Fig. 4. Mechanical properties of the extruded rods with different extrusion temperature.

인장시험 결과, 압출온도 350℃에서 가장 높은 항복강도 및 인장강도를 가진 것을 확인할 수 있었다. 즉, 압출온도가 증가할수록 항복강도, 인장강도, 연신율이 증가하는 것을 확인할 수 있었으나, 표면균열이 발생한 압출재(압출온도 380℃)의 경우 인장강도 297MPa 및 연신율 9.2%로 모두 감소한 것으로 나타났다. 이는 앞선 결정립 미세화에 따른 강화효과로 판단된다.[15]

Fig. 5 는 AM80 마그네슘 합금의 열간 압출 시 압출비의 변화에 따른 압출 압력 변화 및 각 조건에서 제조된 압출재의 표면 특성으로 평가한 것이다.



Extrusion ratio	12 : 1	19 : 1	27 : 1
M.E.P	776MPa	797MPa	817MPa
Surface of extrudate			

* M.E.P: Maximum Extrusion Pressure

Fig. 5 Change in the extrusion pressure of AM80 Mg Alloy during hot extrusion at different extrusion ratio and surface of as-extruded alloys

위 그림은 앞서 압출온도의 영향에서 비교적 기계적 특성이 우수한 압출온도(350℃)와 램속도를 2mm/s로 고정 후 서로 다른 압출비를 12:1(Φ15mm), 19:1(Φ12mm), 그리고 27:1(Φ10mm)로 변화 시 열간 압출하는 동안 램의 행정시간에 따른 압출압력 변화를 나타낸 것이다. 압출비가 높아짐에 따라 최대압출압력은 776MPa에서 817MPa로 증가하였으며, 이는 압출비가 증가하면 증가할수록 빌렛에 가해지는 압출하중이 증가하기 때문이다. 해당 압출조건에서 제조된 모든 압출재는 표면결함 없이 아주 미려한 표면을 갖는 건전한 압출재를 제조할 수 있었다.

Fig. 6 은 압출비에 따른 미세조직을 나타내었다.

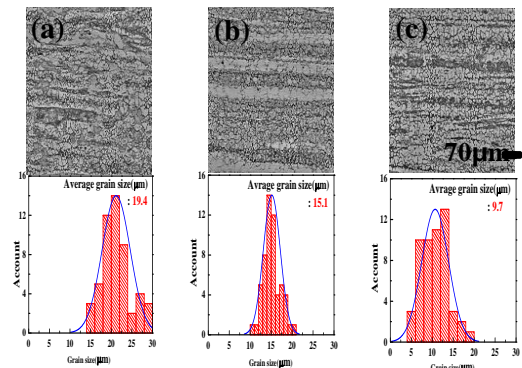


Fig. 6 Microstructures and average grain size of the extruded rods with different extrusion size ratio; (a) 12:1, (b) 19:1 and (c) 27:1

미세조직 관찰 결과, 압출비가 비교적 낮은 압출 조건에서 제조된 압출재 미세조직의 관찰한 결과 낮은 압출비에서 동적 재결정이 일어나지 않은 길게 연신된 조직과 동적재결정에 의한 미세한 등축 조직이 혼재해 있는 것으로 확인되었으나 이러한 연신 조직은 압출비가 증가할수록 점차 감소하는 것으로 나타났다. Y.J. KIM 등의 연구에 의하면 압출비가 증가함에 따라 동적재결정이 많이 발생하여 미세한 등축조직이 더 많이 발생한다는 것을 알 수 있었다.[16] 따라서 평균 결정립 크기는 압출비가 12:1 에서 27:1 로 증가할수록 그 크기는 19.4 μm 에서 9.7 μm 로 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 진변형율과 압출비와의 관계는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.[17]

$$\epsilon = \ln R_e \quad (1)$$

여기서, ϵ 는 진변형율을, R_e 는 압출비를 나타내고 따라서 압출비가 12:1 일 때 진변형율은 약 2.5, 압출비가 19:1 일 때 진변형율은 약 2.9, 그리고 압출비가 27:1 일 때 3.3 로 표현될 수 있다. 이를 그래프로 나타내면 Fig. 7 과 같이 표현될 수 있으며, 이 결과로 압출비가 낮을수록 진변형율의 증가율이 크고 압출비가 증가함에 따라 진변형율의 증가율이 적음을 알 수 있으며, 이러한 결과는 앞서 압출비가 증가함에 따른 최대 압출 압력 증가폭이 매우 크지 않는 이유라 사료된다.

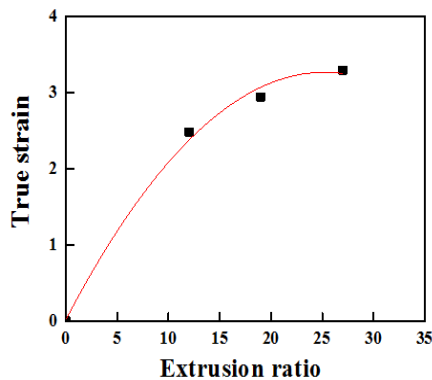


Fig. 7 Relationship between extrusion ratio and true strain.

Fig. 8 은 압출비 변화하여 열간 압출 후 제조된 압출재의 압출방향에서 인장시험편을 채취하여 이를 인장시험한 결과이다.

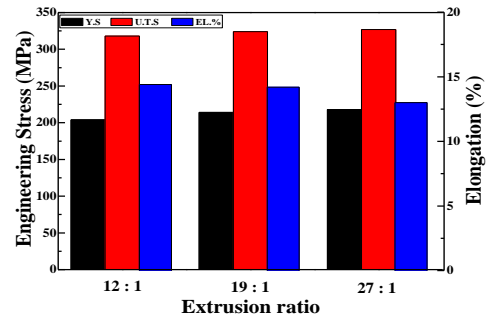
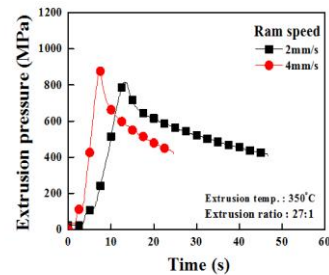




Fig. 8 Mechanical properties of the extruded rods with different extrusion ratio

인장시험 결과, 합금 압출재 항복강도 및 인장강도는 12:1 에서 제조한 합금 압출재는 204MPa 과 318MPa, 19:1 에서 제조한 합금 압출재는 214MPa 과 324MPa, 그리고 27:1 의 압출비에서 제조한 합금 압출재는 각각 218MPa 과 327MPa 값을 가지는 것으로 나타났다. AM80 마그네슘 합금의 열간압출에서 압출비의 증가에 따른 각 압출재의 항복 및 인장강도, 그리고 연신율의 차이는 미소하게 증가하는 것으로 나타났으나 큰 차이가 발생하지 않았다고 판단하였다.

ig.9 는 램속도 변화에 따른 압출압력 변화 및 압출재의 표면 특성을 나타낸다. 압출온도 350 $^{\circ}\text{C}$, 압출비 27:1 조건에서 램 속도를 2mm/s 와 4mm/s 로서 각각 변화하였을 시 열간 압출동안 압력변화를 나타낸 것이다



Ram speed	2mm/s	4mm/s
M.E.P	817MPa	911MPa
Surface of extrudate		

* M.E.P: Maximum Extrusion Pressure

Fig. 9 Change in the extrusion pressure of AM80 Mg Alloys during hot extrusion with different ram speed and surface of as-extruded alloys

보통의 압출 공정에서의 변형률 속도는 압출 빌렛의 직경과 압출재의 직경으로 변형 영역을 통과하는 속도로서 정의되며, 이 때 평균 변형률 속도는 다음 식으로 산출할 수 있다. [18,19]

$$\dot{\epsilon} = \frac{6V_R D_B^2 \ln R \tan \alpha}{D_B^3 - D_E^3} \quad (2)$$

여기서, V_R 은 램 속도, D_B 는 컨테이너 직경, D_E 는 압출재 직경, R 및 α 은 각각 압출비와 다이각(2 θ)을 나타낸다. 따라서 위 식의 각 항에 대입하면 본 연구에서 AM80 마그네슘 합금을 열간 압출 시 램 속도가 2mm/s 와 4mm/s 일 때의 평균 변형률 속도는 0.766/s 와 1.532/s 로 나타낼 수 있고 이 합금에서 압출 시 변형률 속도가 0.766/s 에서 1.532/s 로 변화하면 압출 압력의 증가와 함께 합금 빌렛과 다이간의 마찰력의 증가에 따른 온도 상승으로 인하여 동일한 조건임에도 불구하고 압출재에 균열이 발생할 수 있다.

Fig. 10 은 램스피드에 따른 미세조직을 나타내었다.

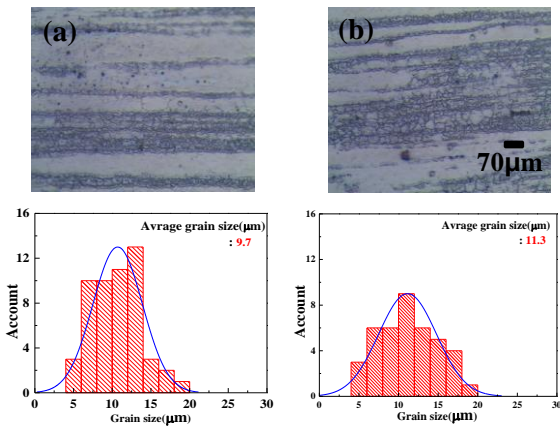


Fig. 10 Microstructures and average grain size of the extruded rods alloy with different ram speed; (a) 2mm/s and (b) 4mm/s

해당 압출조건에서는 2mm/s 의 램 속도에서 제조된 압출재의 미세조직이 4mm/s 의 램 속도에서 제조된 압출재보다 미세한 등축의 재결정 조직을 나타냄을 확인할 수 있다. 일반적으로 건전한 압출재가 제조되는 조건에서는 램 속도, 즉 변형률 속도가 증가할수록 가해지는 압출 압력이 증가하여 보다

미세한 조직을 나타내지만, 해당 조건에서는 4mm/s 의 램 속도로 압출 시 보다 높은 하중에 의한 마찰력 상승과 이로 인한 압출 온도의 상승에 따른 결정립 성장이 기인한 결과라 판단된다.

Fig. 11 은 램 속도 변화에 의해 제조된 두 압출재의 인장실험 결과를 나타낸 것이다.

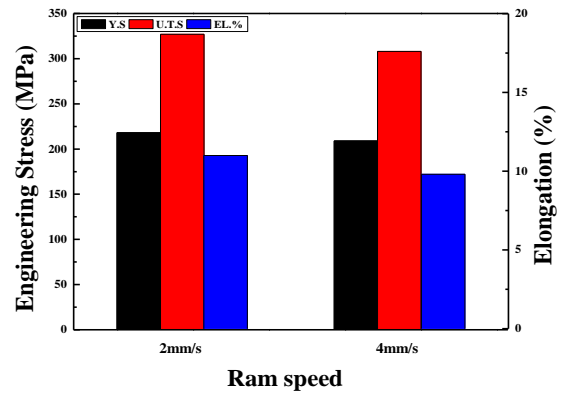


Fig. 11 Mechanical properties of the extruded bars with different extrusion ram speed

램 속도가 2mm/s 일 때, 항복 및 최대인장강도는 각각 218MPa 과 327MPa 그리고 연신율은 약 11%를 나타내었으며, 램 속도 4mm/s 일 때, 각각 209MPa 및 318MPa 과 그리고 약 10%의 연신율을 나타내었다. 즉, 대부분의 기계적 특성이 우수한 경우 미세조직이 상대적으로 미세한 것을 확인할 수 있었다.

따라서 이상의 연구결과에서 나타낸 바와 같이 AM80 마그네슘 합금은 350℃의 압출온도 및 27:1의 압출 조건에서 건전한 압출재의 제조를 위해서는 변형률 속도($\dot{\epsilon}$) 1.532/s 이하의 조건에서 실시해야함을알수있다.

4. 결론

- (1) AM80 마그네슘 합금의 열간 압출에서 표면이 건전한 압출재를 제조할 수 있었다.
- (2) 열간 압출 시 압출 온도가 증가함에 따라 금속 유동이 증가하여 낮은 압출 압력에서 건전한 압출재를 제조할 수 있었으나, 380℃의 이상의 높은 압출온도에서는 압출시 압출재 표면에서의 용융으로

인한 표면결함이 발생하여 불건전한 압출재가 제조되었다.

(3) 열간 압출 시, 압출비가 증가할수록 압출하는 동안 압출을 위한 최대 압출 압력은 증가하였으나, 압출재의 기계적 특성에서는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(4) 이상의 결과로 AM80 마그네슘 합금은 350℃의 압출온도 및 27:1의 압출 조건에서 건전한 압출재의 제조를 위해서는 변형율 속도($\dot{\epsilon}$) 1.532/s 이하의 조건에서 실시해야 함을 알 수 있다.

REFERENCES

- [1] Michael M. Avedesian and Hugh Baker, 1999, ASM Speciality Handbook Magnesium and Magnesium alloys, ASM int, Almere, Nederland, pp. 227~ 249.
- [2] Presidential Council for Future and Vision, 2011, "Automotive technology and outlook", Auto J, Vol. 34, No.4, pp.157~ 183.
- [3] C.H. Bae, J.M. Kim, 2010, "Mechanical Properties of Hyper-Eutectic Aluminum Alloys for Automobile Parts", Transaction of KSAE, Vol. 18, No.1, pp.120~126.
- [4] Horst E. Friedrich and Barry L. Mordike, 2006, Magnesium Technology, Springer, Berlin, Germany, pp.261~268.
- [5] D.H. Kim, 2007, Master Thesis, Gyeongsang National University, Jinju, pp.12~30.
- [6] C.D. Yim, Y.M. Kim, S.H. Park, and B.S. Yoo, 2012, "Corrosion Behavior of AZ91 Magnesium Alloy", Kor J. Met. Mater. Vol. 50, No. 9, pp.619~627.
- [7] K.H. Kim, S.H. Kim, B.K. Moon, G.Y. Son, B.S. Yoo, Y.T. Lee, C.D. Lim, 2004, "Foundations and Applications of Magnesium Alloys", Kor Steel News, Seoul, Korea, pp.11~22.
- [8] B.H. Kim, S.W. Lee, Y.H. Park, I.M. Park, 2010, The microstructure, tensile properties, and creep behavior of AZ91, AS52 and TAS652 alloy, J. Alloys and Compd. Vol. 493, No.1~2, pp.502~506.
- [9] E.S. Lee, 2015, Development The High specific Mg alloy, <http://www.gnnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=231779>
- [10] D.J. Lee, Y.S. Lee, H. K. Kim, Y. N. Kwon, H. S. Kim, E. Y. Yoon, 2016, "Analyses of Sever Plastic Deformation Behavior of Hot Isostatic Pressed Ni-base Superalloy during High Pressure Torsion Process", Trans. Mater. Process, Vol. 25, No. 4, pp.254~260.
- [11] H. W. Yang, Y. G. Ko, 2018, "Effects of Processing Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of Mg Alloy Deformed by Differential Speed Rolling", Trans. Mater. Process., Vol. 27, No. 1, pp.12-17
- [12] The J. Jpn. Soc. Technol. Plast, Editor S.G Kim, 2014, "Magnesium processing technology", Munundang, Seoul, Korea, pp.75~84.
- [13] G.E. Dieter, 1995, Mechanical Metallurgy, Mcgraw-Hill edu, Columbus, USA, Chapter 7, pp.251~272.
- [14] S.S. Park, C.D. Lim, B.S. Yoo, 2009, "Extrusion Technologies of Magnesium Alloys", Trans in Metall & Mater Eng., Vol. 22, No. 3, pp.1~9.
- [15] G.E. Dieter, 1990, Mechanical Metallurgy, Mcgraw-Hill edu, Columbus, USA, Chapter 3, pp.77~80.
- [16] Y.J. Kim, S.H. Kim, J.U. Lee, B.S. You, S.H. Park, 2017, "Evolution of high-cycle fatigue behavior of extruded AZ91 alloy by artificial cooling during extrusion", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 707, No. 7, pp.620~628.
- [17] Y.J. Chen, Q.D. Wang, J.G. Peng, C.Q. Zhai, W.J. Ding, 2007, "Effects of extrusion ratio on the microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy", J. Mater. Process. Technol., Vol.182, No. 1~3, pp. 281~285.
- [18] G.E. Dieter, 1988, Mechanical Metallurgy, Mcgraw-Hill edu., Columbus, USA, Chapter 3, p.629.
- [19] D.H. Kim, 2014, Ph.D Thesis, Gyeongsang National University, Jinju, pp.79~89.