

Ca과 Y 복합 첨가가 AZ91 마그네슘 압출재의 시효 거동에 미치는 영향

김현지¹, 김영민², 배준호³, 박성혁^{4,#}

Effect of Combined Addition of Ca and Y on Aging Behavior of Extruded AZ91 Magnesium Alloy

H. J. Kim, Y. M. Kim, J. H. Bae, S. H. Park

(Received May 11, 2022 / Revised May 19, 2022 / Accepted May 20, 2022)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effects of combined addition of Ca and Y on the precipitation and age-hardening behavior of an extruded AZ91 alloy by conducting the aging treatment at 200 °C for hot-extruded AZ91 and AZ91-0.3Ca-0.2Y alloys. In the AZ91 alloy, many Mg₁₇Al₁₂ discontinuous precipitate (DP) bands formed during air cooling immediately after extrusion are present, whereas in the AZ91-0.3Ca-0.2Y alloy, a few DP bands and numerous Al₂Y, Al₈Mn₄Y, and Al₂Ca phase particles are distributed along the extrusion direction. The peak-aging time of the AZ91-0.3Ca-0.2Y alloy is 16 hours, twice that of the AZ91 alloy. Although both alloys have similar hardness before aging treatment, the hardness after peak-aging treatment (i.e., peak hardness) of the AZ91-0.3Ca-0.2Y alloy is higher than that of the AZ91 alloy, as 93.1 and 88.7 Hv, respectively. The microstructures of both peak-aged alloys comprise DPs and continuous precipitates (CPs). However, the peak-aged AZ91-0.3Ca-0.2Y alloy has a smaller amount of DPs and a larger amount of CPs than the peak-aged AZ91 alloy. Additionally, the inter-particle spacings of DPs and CPs in the former are significantly narrower than those in the latter. These results demonstrate that the addition of small amounts of Ca and Y to a commercial AZ91 alloy considerably affects the formation rate, size, and amount of CPs and DPs during aging and resultant age-hardening behavior.

Keywords: AZ91 alloy, Aging, Precipitation, Microstructure, Hardness

1. 서론

마그네슘은 철강과 알루미늄을 비롯한 다른 상용 금속들에 비해 낮은 밀도와 높은 비강도를 가지고 있어 경량화가 요구되는 자동차, 철도, 항공기 등의

수송기기 산업에서 크게 주목 받고 있는 금속 소재이다 [1-3]. 수송기기용 마그네슘 부품은 다이캐스팅으로 제조된 주조재가 주로 사용되어 왔지만, 최근에는 우수한 기계적 특성을 가지는 압연재, 압출재와 같은 가공재의 사용이 증가하고 있다 [4, 5]. 그러나, 마그네슘 합금은 전기 화학적 전위가 -2.36 V로 매우 낮고, 표면에 형성되는 산화막이 알루미늄과 스테인리스 강의 산화피막에 비해 치밀하지 못해 낮은 부식 저항성을 갖는다 [6]. 또한 마그네슘 합금은 금속성 물질이기 때문에 발화 저항성이 낮으며

1. 경북대학교 신소재공학부, 박사과정

2. 한국재료연구원 마그네슘 연구실, 실장

3. 한국재료연구원 마그네슘 연구실, 책임연구원

4. 경북대학교 신소재공학부, 부교수

Corresponding Author : School of Materials and Engineering, Kyungpook National University. E-mail: sh.park@knu.ac.kr
ORCID : 0000-0001-5710-7878

이로 인해 산업 전반으로 다양한 적용에 있어 어려움을 갖는다 [7]. 이러한 낮은 부식 및 발화 저항성을 해결하기 위해 수십년간 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 최근에는 상용 마그네슘 합금인 AZ계 합금에 소량의 Ca과 Y을 복합 첨가하면, 이차상의 조성이 변화하면서 상과 기지간의 부식 전위 차이를 감소시켜 미소 갈바닉 부식 발생을 억제시키고, 치밀한 산화층 형성으로 인해 부식 저항성과 발화 저항성이 모두 크게 향상된다고 보고되었다 [8, 9]. 또한, 이러한 Ca과 Y이 첨가된 합금은 기존의 AZ계 합금에 비해 높은 경도와 인장 연신율 등의 기계적 물성을 가진다고 알려져 있다 [10-13]. 하지만, 기존에 사용되고 있는 알루미늄 합금 및 철강을 대체하기 위해서는 이러한 난연·내부식 마그네슘 합금의 추가적인 강도 향상이 요구된다. 높은 Al 함량을 가지는 AZ91 마그네슘 합금은 시효 열처리를 통해 $Mg_{17}Al_{12}$ 석출물을 형성시킴으로써 강도를 크게 향상시킬 수 있다 [14, 15]. Ca과 Y의 복합 첨가가 AZ91 합금의 부식성, 발화성, 압출거동에 미치는 영향이 연구되었으나 [8-10], 이런 복합 첨가가 석출 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 AZ91 합금 압출재와 소량의 Ca과 Y이 복합 첨가된 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금 압출재의 미세조직과 석출거동을 비교 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Mg-9Al-0.8Zn-0.2Mn (AZ91, wt%)과 Mg-9Al-0.8Zn-0.2Mn-0.3Ca-0.2Y (AZ91-0.3Ca-0.2Y, wt%) 합금을 사용하였으며, 두 합금 모두 압출온도 350 °C, 램 속도 1 mm/s에서 압출비 30:1로 열간 압출을 수행하여 폭 27 mm, 두께 6 mm를 가지는 압출재를 제조하였다. 시효 열처리를 위해 압출재에서 $10 \times 10 \times 6 \text{ mm}^3$ 크기의 시편을 가공하였다. 가공된 시편은 열처리로를 이용하여 200 °C에서 1, 2, 4, 8, 16, 24, 32, 48, 64 시간에서 시효 열처리를 수행하였다.

압출재 및 시효재의 미세조직적 특성을 분석하기 위해 각 시편을 2000번 샌드 페이퍼까지 표면을 연마 후, 콜로이드 실리카 현탁액을 사용하여 최종 연마하였다. 연마된 시편을 증류수 5 ml, 에틸알코올 50 ml, 피크릭 산 1.5 g, 아세트산 5 ml 혼합용액을

사용하여 에칭 후 광학현미경(optical microscope), 전계방사형 주사 전자 현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM), 전자 후방 산란 회절 기법(electron backscatter diffraction, EBSD)을 이용하여 미세조직, 집합조직, 석출물을 분석하였다. EBSD 측정은 $470 \times 380 \mu\text{m}^2$ 의 면적을 1.0 μm 의 step size로 측정하였으며, EBSD data는 Oxford Instruments Aztec Crystal 2.0을 사용하여 분석하였다. 각 압출재에 존재하는 이차상은 XRD (X-ray diffraction)를 이용하여 분석하였다. 압출재와 시효재의 경도는 비커스 경도 시험기를 이용하여 측정하였으며, 한 시편당 위치를 다르게 하여 15회씩 측정 후 최대 값과 최소 값을 제외한 나머지 값을 평균하여 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초기 미세조직적 특성

Fig. 1은 시효 전 AZ91 합금과 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금 압출재의 광학현미경 미세조직을 보여준다. 두 합금 모두 압출 중 발생한 동적 재결정으로 인하여 압출 후 완전 재결정된 미세조직을 가진다. AZ91 합금에서는 $Mg_{17}Al_{12}$ 석출물(precipitate)들이 압출 방향을 따라 긴 띠 형태로 다량 존재하는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 1a). 반면, AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금에서는 $Mg_{17}Al_{12}$ 석출물 띠가 적게 관찰되며 그 외 다수의 이차상들이 압출 방향을 따라 분포하고 있다 (Fig. 1b). Fig. 2는 두 압출재의 XRD 결과를 보여준다. α -Mg 과 $Mg_{17}Al_{12}$ 상 만이 검출된 AZ91 합금과는 달리 (Fig. 2a), AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금에서는 Al_2Y , Al_8Mn_4Y , Al_2Ca 상이 추가로 검출되었으며 (Fig. 2b), 이러한 상들은 이전에 보고된 Ca과 Y을 첨가한 AZ계 합금에서 형성된 이차상과 동일하다 [10, 13].

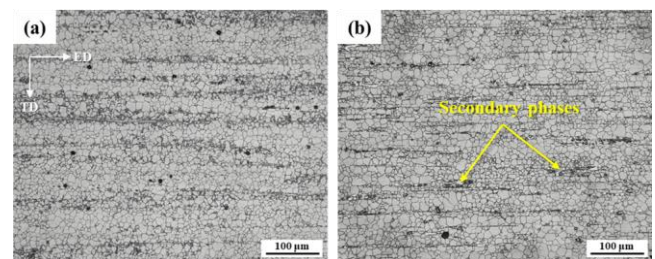


Fig. 1 Optical micrographs of extruded (a) AZ91 and (b) AZ91-0.3Ca-0.2Y alloys.

이러한 이차상들은 $Mg_{17}Al_{12}$ 상에 비해 높은 강도를 가질 뿐만 아니라 열적으로도 매우 안정하여 기지의 열적 안전성 또한 향상시키게 됨으로, 석출 시 석출 거동에 영향을 미친다고 보고된다 [16].

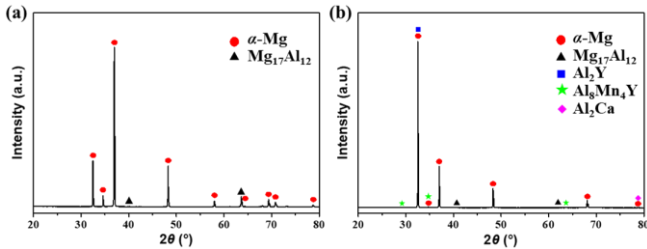


Fig. 2 X-ray diffraction (XRD) results of extruded (a) AZ91 and (b) AZ91-0.3Ca-0.2Y alloys.

Fig. 3은 AZ91 합금과 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금 압출재의 EBSD 분석 결과로, 시효 전 압출재의 미세조직과 집합조직을 보여준다. AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금의 평균 결정립의 크기가 $21.8 \mu\text{m}$ 로, $18.5 \mu\text{m}$ 의 결정립의 크기를 가지는 AZ91 합금에 비해 다소 크다 (Fig. 3). (0001) 극점도(pole figure)를 통해 두 합금 모두 결정립의 기저극(basal pole)이 압출 방향과 수직으로 배열되어 있는 전형적인 마그네슘 압출재 집합 조직을 가짐을 알 수 있다. 최대 집합조직 강도는 각 8.7과 11.2로 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금이 AZ91 합금에 비해 다소 높다.

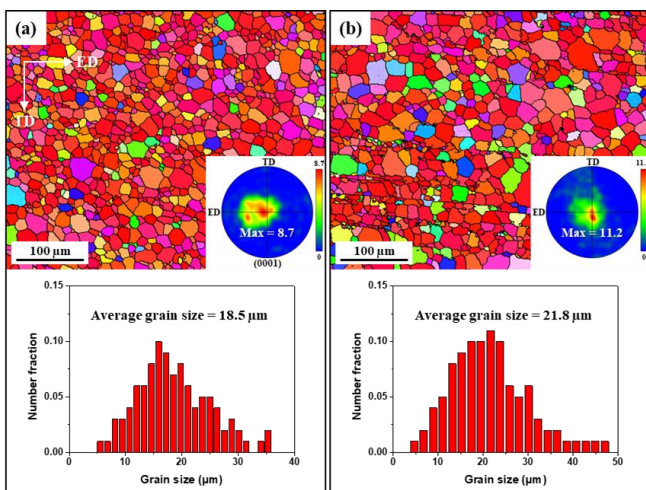


Fig. 3 Inverse pole figure maps, (0001) pole figures, and grain size distributions of extruded (a) AZ91 and (b) AZ91-0.3Ca-0.2Y alloys.

3.2 시효 거동과 미세조직 변화

Fig. 4는 두 합금의 시효 시간에 따른 경도 변화를 보여준다. 시효 전 AZ91 합금과 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금의 경도는 각각 71.9 Hv와 73.2 Hv로 비슷하다. 이는 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금이 AZ91 합금에 비해 결정립의 크기가 크고 $Mg_{17}Al_{12}$ 석출물의 양이 적지만 높은 강도를 가지는 이차상(Al_2Y , Al_8Mn_4Y , Al_2Ca)들이 다수 존재하기 때문에 이로 인한 강화 효과로 인해 비슷한 경도를 나타내는 것으로 판단된다. 초기 경도는 유사하지만 두 합금의 피크 시효 시간 (peak-aging time)과 피크 경도(peak hardness)는 큰 차이를 보인다. 피크 시효 시간은 AZ91 합금이 8 시간으로 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금의 16 시간 보다 크게 짧으며, 피크 경도는 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금이 93.1 Hv로 AZ91 합금의 88.7 Hv 보다 높다.

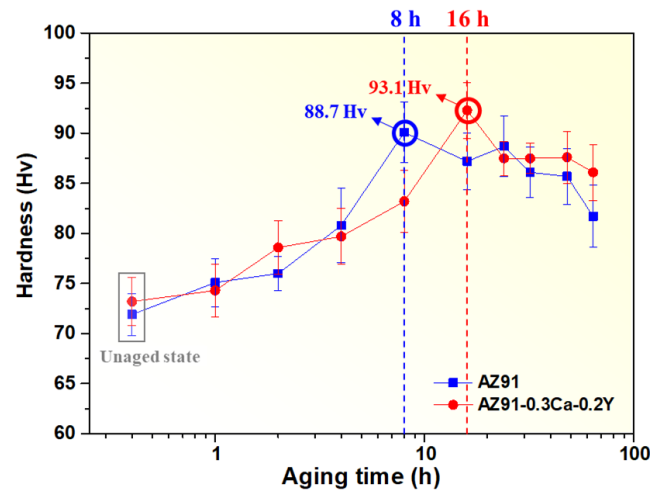


Fig. 4 Age-hardening curves of AZ91 and AZ91-0.3Ca-0.2Y alloys.

일반적으로 추가적인 합금원소를 첨가하지 않은 AZ계 합금을 200°C 의 온도에서 시효 할 경우, 석출 거동에 영향을 미칠 수 있는 인자는 크게 결정립계의 양, 소재 내 잔류 변형량, 그리고 Al의 함량으로 알려져 있다 [17, 18]. 두 합금의 잔류 변형량 측정을 위해 KAM (kernel average misorientation) 분석을 수행하였다. KAM은 측정 지점과 인접 지점 간의 평균 방위차(misorientation)로써, 결정립 내에서 1° – 5° 사이의 국부적인 misorientation 각도를 계산하여 나타낸 것이며, 소재의 변형 에너지가 높을수록 높은 값을 나타낸다. Fig. 5는 두 합금의 KAM 지도와 분포

를 보여주는 것으로, AZ91 합금과 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금의 평균 KAM 값이 각각 0.32와 0.35로 유사하며, 이는 두 합금의 잔류 변형량이 거의 동일하다는 것을 의미한다. 따라서 두 합금의 석출 거동 차이는 결정립계의 양과 Al의 함량으로 볼 수 있다. 결정립계 양은 결정립계에서 형성되는 불연속 석출물(discontinuous precipitate, DP)의 생성 속도와 양에 영향을 미치며, 기지 내 고용된 Al의 함량은 결정립 내부에서 형성되는 연속 석출물(continuous precipitate, CP)의 생성 및 성장에 영향을 미친다. AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금은 결정립계의 양이 AZ91 합금에 비해 적고, Al을 포함하는 이차상들(Al_2Y , Al_8Mn_4Y , Al_2Ca)의 형성으로 인해 일부 Al이 소모되어 기지 내 고용된 Al의 함량이 낮아 $Mg_{17}Al_{12}$ 석출물의 생성 및 성장이 느리게 나타나게 된다. 또한 Ca과 Y과 같이 원자 반지름이 크고 열적으로 안정한 원소가 AZ계 합금에 첨가되면 연속 석출물과 불연속 석출물의 형성이 방해된다고 보고되고 있어 [16, 19], AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금의 피크 시효 시간이 느리게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 6는 1, 2, 8, 16 시간 시효 처리된 두 합금의 광학현미경 조직사진을 보여준다. AZ91 합금의 경우, 시효 초기인 1 시간에서 압출재에 존재하던 석출 띠를 따라 불연속 석출물이 다량 형성되었으며, 시효 시간이 증가함에 따라 석출 띠가 없는 영역의 결정립계에서도 불연속 석출물이 점차 형성되어 8 시간 이후에는 소재 전반에 걸쳐 형성된다 (Fig. 6a).

반면, AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금의 경우 AZ91 합금에 비해 결정립계와 고용 Al 함량이 적어 시효 초기부터 적은 양의 불연속 석출물이 형성되며, 시효 시간이 증가함에 따라 불연속 석출물의 양이 증가하지만 동일 시효 시간에서 비교 시 AZ91 합금 보다 불연속 석출물의 양이 적다 (Fig. 6b). 피크 시효 처리 후 두 합금의 미세조직을 면밀히 비교하기 위해서 8 시간 시효처리한 AZ91 합금과 16 시간 시효처리한 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금의 미세조직을 FE-SEM으로 관찰하여 Fig. 7에 나타내었다.

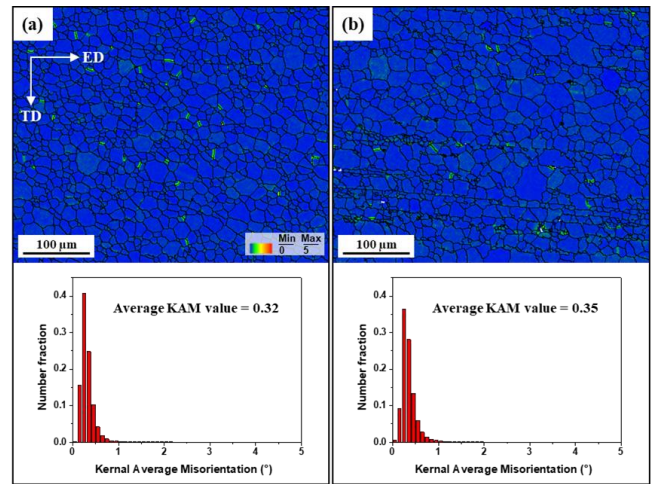


Fig. 5 Kernel average misorientation (KAM) maps and KAM distributions of (a) AZ91 and (b) AZ91-0.3Ca-0.2Y alloys.

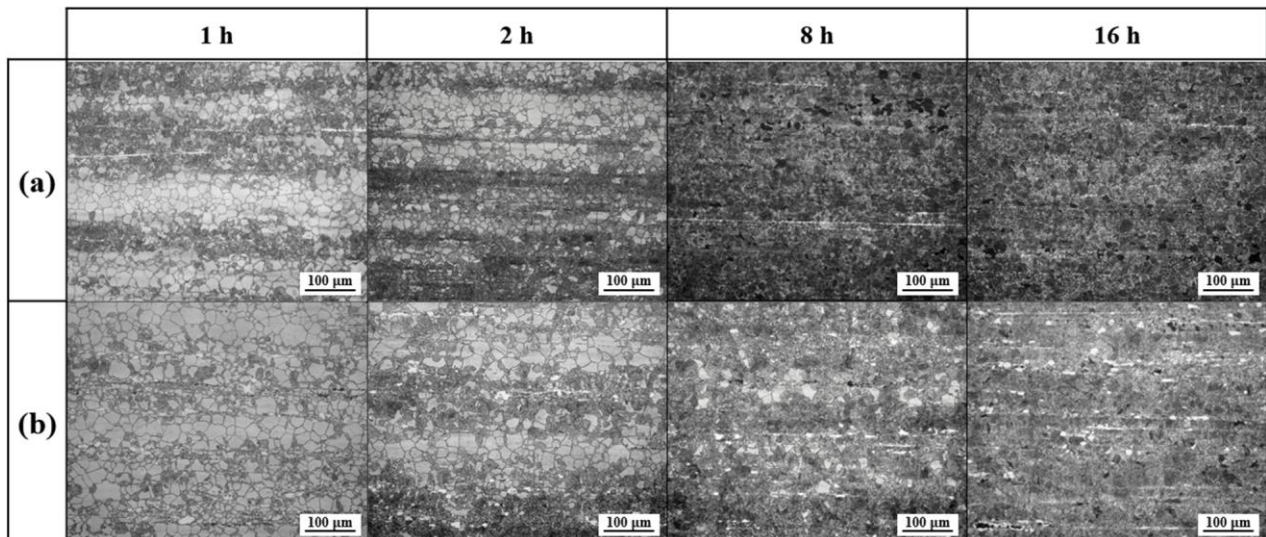


Fig. 6 Optical micrographs of (a) AZ91 and (b) AZ91-0.3Ca-0.2Y alloys aged for 1, 2, 8, and 16 h.

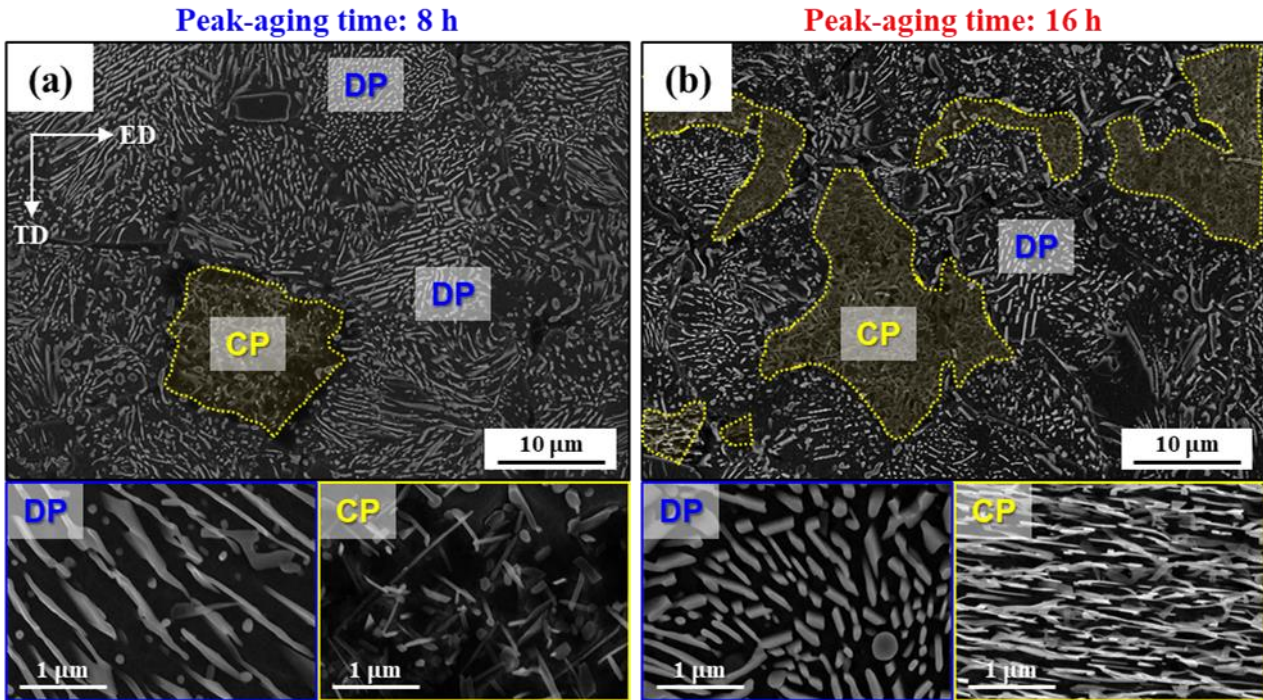


Fig. 7 SEM micrographs of peak-aged (a) AZ91 and (b) AZ91-0.3Ca-0.2Y alloys. CP and DP denote the continuous and discontinuous precipitates, respectively.

피크 시효 처리된 AZ91 합금에서는 불연속 석출물의 양이 연속 석출물의 양에 비해 현저히 많다 (Fig. 7a). 균질화 열처리를 하지 않은 AZ91 합금 압출재에서는 압출 직후 공냉 과정에서 정적으로 석출된 다수의 불연속 석출물 띠가 존재하고 이로 인해 시효 처리 시 불연속 석출물의 성장이 우선적으로 빠르게 발생한다. 이러한 불연속 석출물은 연속 석출물과 서로 경쟁적으로 형성되기 때문에 불연속 석출이 활발하게 발생할수록 연속 석출물의 양은 적어진다. 따라서, 피크 시효 처리된 AZ91 합금에서 연속 석출물의 양이 불연속 석출물에 비해 적게 된다. 반면, AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금에서는 기지 내 고용 Al의 함량이 AZ91 합금에 비해 적음에도 불구하고 피크 시효 후 형성된 연속 석출물의 양이 AZ91 합금에 비해 약 3배 가량 많다 (Fig. 7b). AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금은 이차상 형성으로 인한 낮은 고용 Al의 함량과 Ca과 Y 첨가로 인해 석출물의 형성 속도가 느리다. 하지만, 압출 직후 공냉 과정에서 형성되는 불연속 석출물의 띠가 거의 존재하지 않기 때문에 AZ91 합금에 비해 시효 처리 동안 연속 석출물의 형성과 성장이 활발히 발생한 것으로 판단된다. 한

편, 두 합금은 불연속 석출물과 연속 석출물의 형상에 큰 차이가 나타난다. 일반적으로 불연속 석출물과 연속 석출물은 그 양과 석출물간 입자의 간격이 정도에 중요한 영향을 미친다고 알려져 있으며, 불연속 석출물의 경우 일반적으로 층상구조를 가지고 있으며 층간 간격이 좁을수록, 연속 석출물의 경우 결정립 내에서 석출물간 간격이 좁을수록 높은 경도를 가진다 [16, 20, 21]. AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금에서는 불연속 석출물 내부의 입자간 간격이 AZ91 합금에 비해 비교적 좁고 결정립 내부에 형성된 연속 석출물의 수가 많아 입자의 간격이 좁아 피크 경도가 AZ91 합금에 비해 높은 값을 가진다. 따라서 AZ91 합금과 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금 압출재의 결정립 크기, 고용 Al의 함량, 불연속 석출물 띠의 양에 대한 차이로 인해 두 합금의 시효 열처리 동안의 석출 거동과 경도 변화에 큰 차이를 야기한 것으로 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 AZ91 합금과 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합

금 압출재를 200 °C 에서 시효 처리함으로써 Ca 과 Y 의 복합 첨가가 AZ91 합금 압출재의 석출 거동과 경도 변화에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시효 전 AZ91 합금과 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금 압출재는 완전 재결정된 미세조직을 가지며, 결정립의 크기는 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금이 다소 조대하다. AZ91 합금에서는 압출 직후 공냉 과정에서 형성된 불연속 석출물 때가 다수 존재하는 반면, AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금은 불연속 석출물 때가 거의 없고 다수의 Al_2Y , Al_3Mn_4Y , Al_2Ca 이차상이 압출 방향을 따라 분포한다.

(2) 비커스 경도 시험 결과, 시효 전 경도 값은 두 합금이 비슷하지만 피크 경도는 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금이 93.1 Hv로 AZ91 합금의 88.7 Hv 보다 높다. 반면, 피크 시효 시간은 AZ91 합금이 8 시간으로 AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금의 16 시간에 비해 크게 짧다.

(3) 시효 시간에 따른 미세조직 변화와 피크 시효 후 조직 관찰 결과, AZ91 합금에서는 초기 다수의 불연속 석출물 때로 인해 불연속 석출물 형성이 촉진되고, AZ91-0.3Ca-0.2Y 합금에서는 Ca과 Y 첨가로 인해 석출 속도 지연과 석출물 입자간 간격 감소를 야기한 것으로 사료된다.

후 기

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

REFERENCES

- [1] E. Aghion, B. Bronfin, D. Eliezer, 2001, The role of the magnesium industry in protecting the environment, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 3, pp. 381–385. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00779-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00779-8)
- [2] Y Q. Ji, Y. Wang, R. Wu, Z. Wei, Z. Ma, J. Zhang, L. Hou, M. Zhang, 2020, High specific strength Mg–Li–Zn–Er alloy processed by multi deformation processes, *Mater. Charact.*, Vol. 160, 110135. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110135>
- [3] G.H. Park, J.T. Kim, H.J. Park, Y.S. Kim, H.J. Jeong, N. Lee, Y. Seo, J.Y. Suh, H.T. Son, W.M. Wang, J.M. Park, K.B. Kim, 2016, Development of lightweight Mg–Li–Al alloys with high specific strength, *J. Alloys Compd.*, Vol. 680, pp. 116–120. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.04.109>
- [4] J. Go, J.U. Lee, B.G. Moon, J.H. Yoon, S.H. Park, 2020, Improvement in mechanical properties of rolled AZ31 alloy through combined addition of Ca and Gd, *Met. Mater. Int.*, Vol. 26, 1779–1785. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00591-x>
- [5] Q. Liao, W. Hu, Q. Le, X. Chen, Y. Jiang, 2022, Improvement of yield asymmetry and enhancement of mechanical properties of extruded AZ110 alloy with La–rich misch metal addition, *Met. Mater. Int.*, Vol. 28, pp. 1143–1156. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-00978-9>
- [6] J. Liao, M. Hotta, Y. Mori, 2012, Improved corrosion resistance of a high-strength Mg–Al–Mn–Ca magnesium alloy made by rapid solidification powder metallurgy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 544, pp. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.046>
- [7] F. Czerwinski, 2004, The early stage oxidation and evaporation of Mg–9%Al–1%Zn alloy, *Corros. Sci.*, Vol. 46, No. 2, pp. 377–386. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00151-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00151-3)
- [8] S.K. Woo, C. Blawert, K.A. Yasakau, S. Yi, N. Scharnagl, B.C. Suh, Y.M. Kim, B.S. You, C.D. Yim, 2020, Effects of combined addition of Ca and Y on the corrosion behaviors of die-cast AZ91D magnesium alloy, *Corros. Sci.*, Vol. 166, 108451. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108451>
- [9] S.M. Baek, J.S. Kang, H.J. Shin, C.D. Yim, B.S. You, H.Y. Ha, S.S. Park, 2017, Role of alloyed Y in improving the corrosion resistance of extruded Mg–Al–Ca-based alloy, *Corros. Sci.*, Vol. 118, pp. 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.01.022>
- [10] Y. Go, S.M. Jo, S.H. Park, H.S. Kim, B.S. You, Y.M. Kim, 2018, Microstructure and mechanical properties of non-flammable Mg–8Al–0.3Zn–0.1Mn–0.3Ca–0.2Y alloy subjected to low-temperature, low-speed extrusion, *J. Alloys Compd.*, Vol. 739, pp. 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.229>
- [11] 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>
- [12] S. Yi, J. Victoria-Hernandez, Y.M. Kim, D. Letzig, B. S. You, 2019, Modification of microstructure and texture in highly non-flammable Mg-Al-Zn-Y-Ca alloy sheets by controlled thermomechanical processes, *Metals*, Vol. 9, No. 2, pp. 181-189.
<https://doi.org/10.3390/met9020181>
- [13] H.J. Kim, S.H. Kim, S.W. Kim, 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. 514-524.
<https://doi.org/10.1007/s12540-020-00822-6>
- [14] J.K. Kim, S.H. Oh, K.C. Kim, W.T. Kim, D.H. Kim, 2017, Effect of aging time and temperature on the aging behavior in Sn containing AZ91 alloy, *Met. Mater. Int.*, Vol. 23, pp. 308-312.
<https://doi.org/10.1007/s12540-017-6564-5>
- [15] A. Srinivasan, U.T.S. Pillai, B.C. Pai, 2010, Effects of elemental additions (Si and Sb) on the ageing behavior of AZ91 magnesium alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, No. 24-25, pp. 6543-6550.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.020>
- [16] F. Bu, Q. Yang, X. Qiu, T. Zheng, D. Zhang, X. Niu, Y. Li, X. Liu, J. Meng, 2015, Study on the assemblage of Y and Gd on microstructure and mechanical properties of hot extruded Mg-Al-Zn alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 639, pp. 198-207.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.008>
- [17] H.J. Kim, Y.J. Kim, S.H. Park, Acceleration of aging behavior and improvement of mechanical properties of extruded AZ80 alloy through {10-12} twinning, *J. Magnes. Alloys*, In press.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.008>
- [18] Y. Uematsu, K. Tokaji, M. Matsumoto, 2009, Effect of aging treatment on fatigue behavior in extruded AZ61 and AZ80 magnesium alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 517, No. 1-2, pp. 138-145.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.066>
- [19] Y.X. Wang, J.W. Fu, Y.S. Yang, 2012, Effect of Nd addition on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloys, *Trans. Nonferr. Metals Soc. China*, Vol. 22, No. 6, pp. 1322-1328.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61321-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61321-6)
- [20] S. Celotto, 2000, TEM study of continuous precipitation in Mg-9wt%Al-1wt%Zn alloy, *Acta Mater.*, Vol. 48, No. 8, pp. 1775-1787.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00004-5)
- [21] W. Zuo, L. Ma, Y. Lu, S.Y. Li, Z. Ji, M. Ding, 2018, Effects of solution treatment temperatures on microstructure and mechanical properties of TIG-MIG hybrid arc additive manufactured 5356 Aluminum alloy, *Met. Mater. Int.*, Vol. 24, pp. 1346-1358.
<https://doi.org/10.1007/s12540-018-0142-3>