

AZ91-0.3Ca-0.2Y 마그네슘 합금 주조재의 시효경화 거동 및 기계적 특성

김현지¹ · 배준호² · 김영민³ · 박성혁^{4,*}

Age-hardening Behavior and Mechanical Properties of Cast AZ91-0.3Ca-0.2Y Alloy

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

(Received May 21, 2023 / Revised June 2, 2023 / Accepted June 2, 2023)

Abstract

In this study, the age-hardening behavior and tensile properties of a cast AZ91-0.3Ca-0.2Y (SEN9) alloy are investigated and compared with those of a commercial AZ91 alloy. Even after homogenization heat treatment, the SEN9 alloy contains numerous undissolved secondary phases, Al_3Mn_4Y , Al_2Y , and Al_2Ca , which results in a higher hardness value than the homogenized AZ91 alloy. Under aging condition at 200 °C, both the AZ91 and SEN9 alloys exhibit the same peak-aging time of 8 h, but the peak hardness of the latter (86.8 Hv) is higher than that of the former (83.9 Hv). The precipitation behavior of $Mg_{17}Al_{12}$ phase during aging significantly differs in the two alloys. In the AZ91 alloy, the area fraction of $Mg_{17}Al_{12}$ discontinuous precipitates (DPs) increases up to ~50% as the aging time increases. In contrast, in the SEN9 alloy, the formation and growth of DPs during aging are substantially suppressed by the Ca- or Y-containing particles, which leads to the formation of only a small amount of DPs with an area fraction of ~4% after peak aging. Moreover, the size and inter-particle spacing of $Mg_{17}Al_{12}$ precipitates of the peak-aged SEN9 alloy are smaller than those of the peak-aged AZ91 alloy. The homogenized AZ91 alloy exhibits a higher tensile strength than the homogenized SEN9 alloy due to the finer grains of the former. However, the peak-aged SEN9 alloy has a higher tensile elongation than the peak-aged AZ91 alloy due to the smaller amount of brittle DPs in the former.

Keywords : AZ91-0.3Ca-0.2Y alloy, Aging, Microstructure, Hardness, Tensile properties

1. 서론

환경 오염이 전세계적으로 심각한 문제로 대두되면서, 이산화 탄소 배출 저감을 위한 수송기기의 경량화가 필수적으로 요구되고 있다. 이에 따라 최근 구조용 금속재료 중 가장 낮은 밀도와 높은 비강도를 가지며 재활용성이 우수한 마그네슘이 수송기기

경량화를 위한 적합 소재로 주목받고 있다[1-4]. 마그네슘은 주로 주조재 형태의 부품으로 수송기기에 적용되고 있으며, AZ91, AM50, AM60 등과 같은 상용 마그네슘 합금들이 널리 사용되고 있다[5, 6]. 하지만, 마그네슘 합금은 알루미늄 합금, 타이타늄 합금, 및 철강에 비해 낮은 기계적 물성과 부식 저항성, 그리고 발화 저항성을 가져 수송기기 부품으로의 적용이 제한적이다[7, 8]. 따라서 마그네슘 합금의 적용 범위를 확대시키기 위해서 기계적 물성, 부식 저항성, 그리고 발화 저항성을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 최근에 한국재료연구원에서 개발된 SEN (Stainless, Environmentally

1. 경북대학교 신소재공학부, 박사과정

2. 한국재료연구원 마그네슘 연구실, 책임연구원

3. 한국재료연구원 마그네슘 연구실, 실장

4. 경북대학교 신소재공학부, 부교수

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

friendly, Non-flammable) 합금은 상용 AZ계 마그네슘 합금에 소량의 Ca과 Y을 복합 첨가한 합금으로 우수한 내부식성, 내발화저항성, 인장강도를 가진다고 보고되었다[9-11]. 하지만, 기존에 수송기기에 사용되고 있는 알루미늄 및 철강 부품을 개발된 SEN 합금으로 대체하기 위해서는 추가적인 강도 향상이 필수적으로 요구된다. 고합금계 마그네슘 합금은 시효 경화를 통해 효과적으로 강도를 향상시킬 수 있으며[12-14], 특히 AZ91 합금은 높은 Al 함량으로 인해 $Mg_{17}Al_{12}$ 석출물을 다량으로 형성시킴으로써 소재의 강도를 크게 향상시킬 수 있다고 보고된다 [15, 16]. 상용 AZ91 합금에 소량의 Ca과 Y이 복합 첨가된 SEN9 합금이 우수한 부식 및 발화 저항성을 가진다고 보고되었으나[9, 17, 18], SEN 합금 주조재의 석출 거동에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 AZ91 합금에 0.3 Ca과 0.2 Y이 첨가된 SEN9 합금 주조재의 시효경화 거동 및 기계적 물성을 AZ91 합금 주조재와 비교 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Mg-9Al-0.8Zn-0.2Mn (AZ91, wt%)과 AZ91-0.3Ca-0.2Y (SEN9, wt%) 합금을 사용하였다. 주조재 제조를 위해, 도가니에 순수 마그네슘을 장입하고 720 °C에서 용해시킨 후 Al, Zn, Mn, Ca, Y의 합금원소를 첨가하여 20분 동안 유지하였고, 용해 중 용탕의 산화를 방지하기 위해 CO_2 와 SF_6 혼합 가스를 주입하였다. 안정화된 용탕을 210 °C로 예열된 스틸몰드(steel mold)에 출탕하였다. 제조된 주조재의 균질화 열처리는 PANDAT 소프트웨어를 통해 얻어진 평형 상태도에서의 용융 온도를 고려하여 AZ91 합금은 410 °C에서 24시간, SEN9 합금은 445 °C에서 24시간 동안 수행한 후 수냉하였다. 시효 열처리를 위해 균질재에서 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ 크기의 시편을 가공하였다. 가공된 시편은 전기로(box furnace)를 이용하여 200 °C에서 1-48 시간 동안 시효 열처리를 수행하였다.

균질재 및 시효재의 미세조직을 관찰하기 위해 각 시편을 #400-2400 연마지(abrasive paper)로 단계적으로 표면 연마 후, OPS를 사용하여 최종 연마하였다. 연마된 시편을 아세트산 5 ml, 증류수 5 ml, 에틸알코올 50 ml, 피크릭 산 1.5 g 혼합용액을 사용하여 에칭 후 광학현미경(optical microscope), 전계방사형

주사 전자 현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM)을 이용하여 미세조직 및 석출물을 분석하였다. 균질재에 존재하는 이차상은 X선 회절분석(X-ray diffraction, XRD)을 통해 분석하였다. 균질재와 시효재의 경도는 비커스 경도 시험기를 이용하여 측정하였으며 거시경도는 0.5 kgf, 미소경도는 0.25 kgf의 하중으로 압입하였다. 한 시편당 위치를 다르게 하여 15회씩 측정한 후 최대 값과 최소 값을 제외한 나머지 값을 평균하여 나타냈다. 인장 시험편은 미국재료시험협회(American Society for Testing and Materials, ASTM) E8M 규격을 따라, 인장 시편 평행부 길이가 30 mm이고 직경이 6 mm인, 25 mm의 게이지 부(gauge section)를 가지는 봉상 시편으로 제작하였다. 인장 시험은 상온에서 만능시험기(Shimadzu AGS-100kNX)를 사용하여 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 속도에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초기 주조재의 미세조직

Fig. 1는 AZ91 합금과 SEN9 합금의 주조재 및 균질재의 미세조직을 보여준다. 두 합금 모두 균질화 열처리 후 결정립계를 따라 존재하는 $Mg_{17}Al_{12}$ 이차상이 α -Mg 기지 내로 완전히 고용되었다. SEN9 합금의 평균 결정립의 크기는 435 μm 로 55 μm 의 결정립의 크기를 가지는 AZ91 합금 비해 조대하다. 이는 기존의 결과와 일치한다[19]. 균질화 열처리로 $Mg_{17}Al_{12}$ 상은 고용되었으나 두 합금 모두에서 결정립계와 결정립내에 미고용된 상들이 존재한다.

Fig. 2는 두 합금의 균질재의 XRD 결과를 보여준

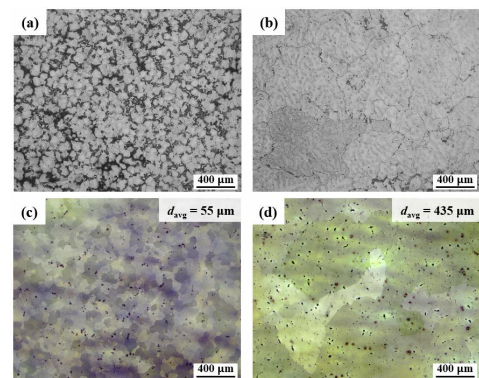


Fig. 1 Optical micrographs of (a, b) as-cast and (b, d) homogenized alloys: (a, c) AZ91 and (b, d) SEN9

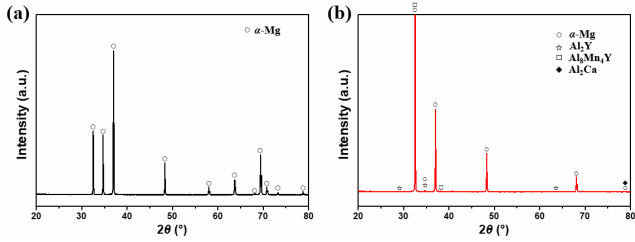


Fig. 2 XRD patterns of homogenized: (a) AZ91; (b) SEN9 alloys

다. AZ91 합금은 α -Mg상만이 검출되었으며 (Fig. 2(a)), 미고용된 이차상들이 이전에 보고된 연구들에서와 같이 Al_8Mn_5 상인 것으로 판단된다[20]. 한편, SEN9 합금에서는 α -Mg, Al_8Mn_4Y , Al_2Y , Al_2Ca 상이 검출되었다 (Fig. 2(b)). Ca과 Y의 첨가로 인해 형성된 이러한 미고용 이차상들은 이전의 SEN 합금 연구들에서 보고된 이차상들과 일치하며, 높은 강도를 가진다고 알려져있다[9, 19].

3.2 주조재의 시효 거동 및 인장물성

Fig. 3은 200 °C에서 AZ91 합금과 SEN9 합금을 시효 후, 시효 시간에 따른 비커스 경도 변화를 보여 준다. 시효 전 두 합금의 경도는 각각 64.9 Hv와 67.1 Hv로 SEN9 합금이 다소 높은 경도 값을 나타낸다. 일반적으로 결정립의 크기가 미세할수록 Hall-Petch 관계식에 따라 결정립계 강화 효과가 크게 증가한다[21]. 본 연구에서는 SEN9 합금의 결정립의 크기가 AZ91 합금에 비해 약 8배 가량 크에도 불구하고 더 높은 경도 값을 가지는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 150 Hv 이상의 높은 경도를 가진다

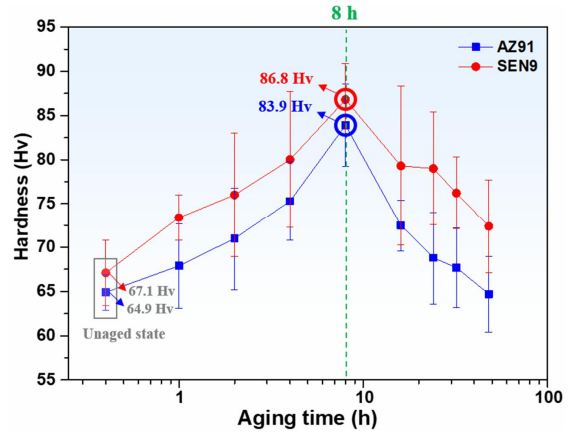


Fig. 3 Age-hardening curves of AZ91 and SEN9 alloys

고 알려진 Al_2Y , Al_8Mn_4Y , Al_2Ca 이차상들이 SEN9 합금의 결정립계 및 결정립내에 다수 존재하여 입자 강화 효과를 야기시킨 결과로 생각된다[22]. 한편, 두 합금 모두 시효 8시간에서 피크 시효 시간(peak-aging time)이 나타났으며, 피크 경도(peak hardness)는 SEN9 합금(86.8 Hv)이 AZ91 합금(83.9 Hv)에 비해 다소 높았다. 두 합금의 석출 거동에 대해 알아보기 위해 시효 시간에 따른 미세조직 관찰 결과를 Fig. 4에 나타냈다.

Mg-Al계 합금을 200 °C의 온도에서 시효 할 경우, $Mg_{17}Al_{12}$ 상이 연속 석출물(continuous precipitate, CP)과 불연속 석출물(discontinuous precipitate, DP)의 형태로 함께 석출되며 연속 석출물은 결정립 내부에서 (0001) 기저면에 평행하게 막대 형태로, 불연속 석출물은 결정립계에서 결정립내로 수직하게 전파되며 라멜라 구조(lamellar structure)를 가진다[23]. 일반적

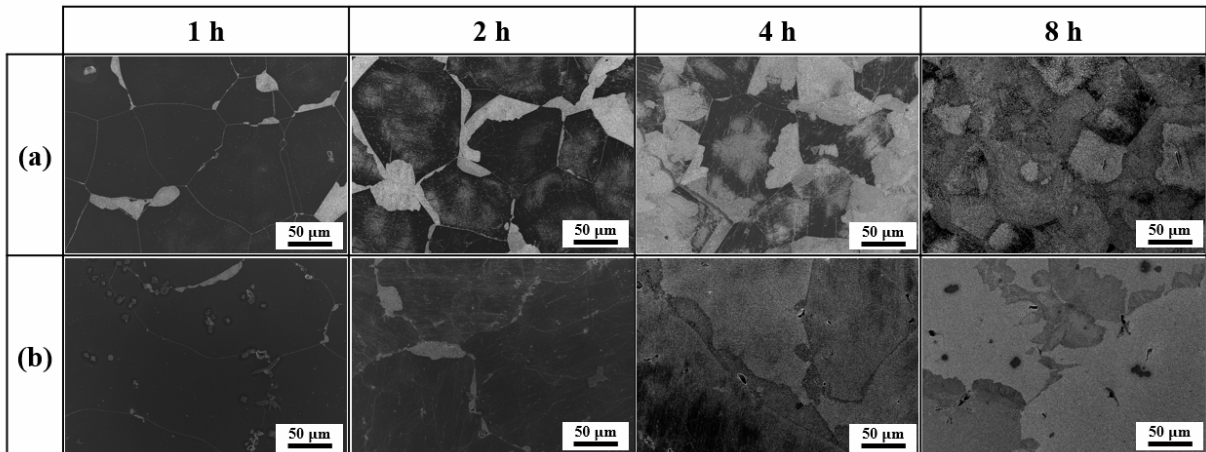


Fig. 4 SEM micrographs of (a) AZ91; (b) SEN9 alloys aged for 1, 2, 4, and 8 h

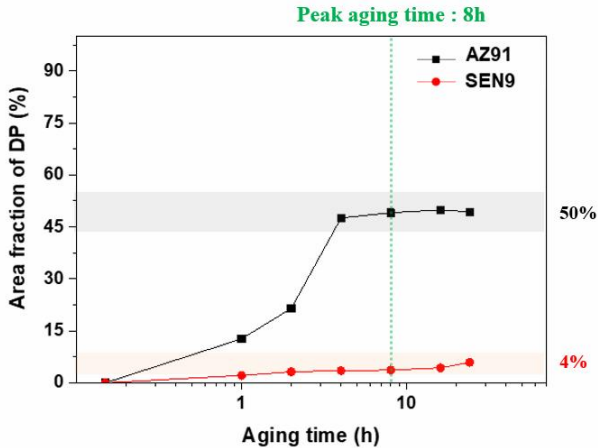


Fig. 5 Variation in area fraction of DPs region in AZ91 and SEN9 alloys with aging time

으로 연속 석출물과 불연속 석출물의 생성 속도와 양은 기지 내 고용된 Al의 함량에 크게 의존한다. 시효 시간이 증가함에 따라 두 합금의 결정립계에서 불연속 석출물이 우선적으로 석출되면서 그 양이 증가하였으며, 연속 석출물 또한 시간이 증가함에 따라 그 양이 증가하였다. 하지만, 동일한 시효 시간에서 SEN9 합금의 불연속 석출물의 양이 AZ91 합금에 비해 현저하게 적었다. 이는 이전 연구에서 보고된 바와 같이 세가지 주된 원인으로 인한 것으로, (1) SEN9 합금의 결정립계 양이 AZ91 합금에 비해 적고, (2) Al을 포함하는 다수의 Al_2Y , Al_8Mn_4Y , Al_2Ca 이차상 형성으로 인해 석출에 필요한 Al이 소모되었고, (3) 열적으로 안정한 Ca 또는 Y을 포함하는 이차상이 불연속 석출물의 생성 및 성장을 방해하기 때문이다[19]. 한편, 이러한 결과는 두 합금의 초기 결정립 크기가 동일한 경우에는 달라질 수 있으며 초기 결정립 크기가 동일할 경우, 불연속 석출 거동의 차이가 뚜렷하게 나타나지는 않지만 SEN9 합금의 불연속 석출물의 양이 AZ91 합금에 비해 여전히 적을 것으로 예상된다. 불연속 석출물의 정량적 비교를 위해, FE-SEM 사진에서 두 합금의 불연속 석출물이 존재하는 영역의 면적 분율을 측정하여 Fig. 5에 나타냈다.

AZ91 합금의 경우 시효 시간 2시간 이후 불연속 석출물 영역의 양이 급격하게 증가하여 4시간 이후에는 약 50%의 높은 면적 분율을 가졌다. 반면, SEN9 합금은 시효시간 증가에 따른 큰 증가 없이 4% 이하의 낮은 면적 분율을 가졌다. 피크 시효 시

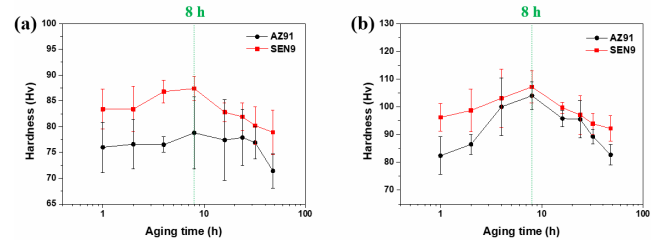


Fig. 6 Microhardness variations in (a) CPs; (b) DPs region of AZ91 and SEN9 alloys with aging time

간인 8시간에서의 불연속 석출물 영역의 양은 SEN9 합금이 AZ91 합금에 비해 약 13배 적으며, 이는 소량의 Ca와 Y의 첨가시 불연속 석출물의 형성을 급격히 감소시킬 수 있음을 보여준다.

두 합금의 연속 석출물과 불연속 석출물이 전체 시효경화 거동에 미친 영향을 확인하기 위해, 각 합금에 존재하는 석출물 영역의 미소 경도를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타냈다.

연속 석출물 영역의 경우, 모든 시효시간에서 SEN9 합금의 경도가 AZ91에 비해 높게 나타났다 (Fig. 6(a)). 불연속 석출물 영역의 경우에도 SEN9 합금이 모든 시효시간에서 높은 경도 값을 가졌다 (Fig. 6(b)). 따라서 SEN9 합금이 AZ91 합금에 비해 전체적으로 높은 경도 값을 가지며 (Fig. 3), 피크 시효 시간에서도 높은 경도 값을 가진다. 합금의 전체 경도는 각 석출물의 면적 분율과 경도 값에 영향을 받으며[24], 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Hv_{tot} = f_{DP} Hv_{DP} + f_{matrix} Hv_{matrix}$$

여기서 f_{DP} 와 f_{matrix} 는 각각 불연속 석출물의 면적 분율과 연속 석출물들이 형성된 기지 영역의 면적 분율이다. 이 식을 통해 구한 피크 시효 시간에서의 전체 경도 값은 SEN9 합금과 AZ91 합금이 각각 88.2 Hv, 91.3 Hv이다. 하지만, SEN9 합금에 존재하는 다수의 미고용 이차상의 영향으로 인해 피크 시효 시간에서의 경도 값의 차이가 시효 전 두 합금의 경도 값의 차이와 비슷하게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 7는 AZ91 합금과 SEN9 합금의 피크 시효 시간에서의 FE-SEM 미세조직을 보여준다. 피크 시효 처리된 AZ91 합금에서는 연속 석출물의 양과 불연속 석출물의 양이 비슷하게 나타나며, 막대형태의 연속 석출물과 라멜라 구조의 불연속 석출물이 나타난다 (Fig. 7(a)). SEN9 합금에서는 불연속 석출물

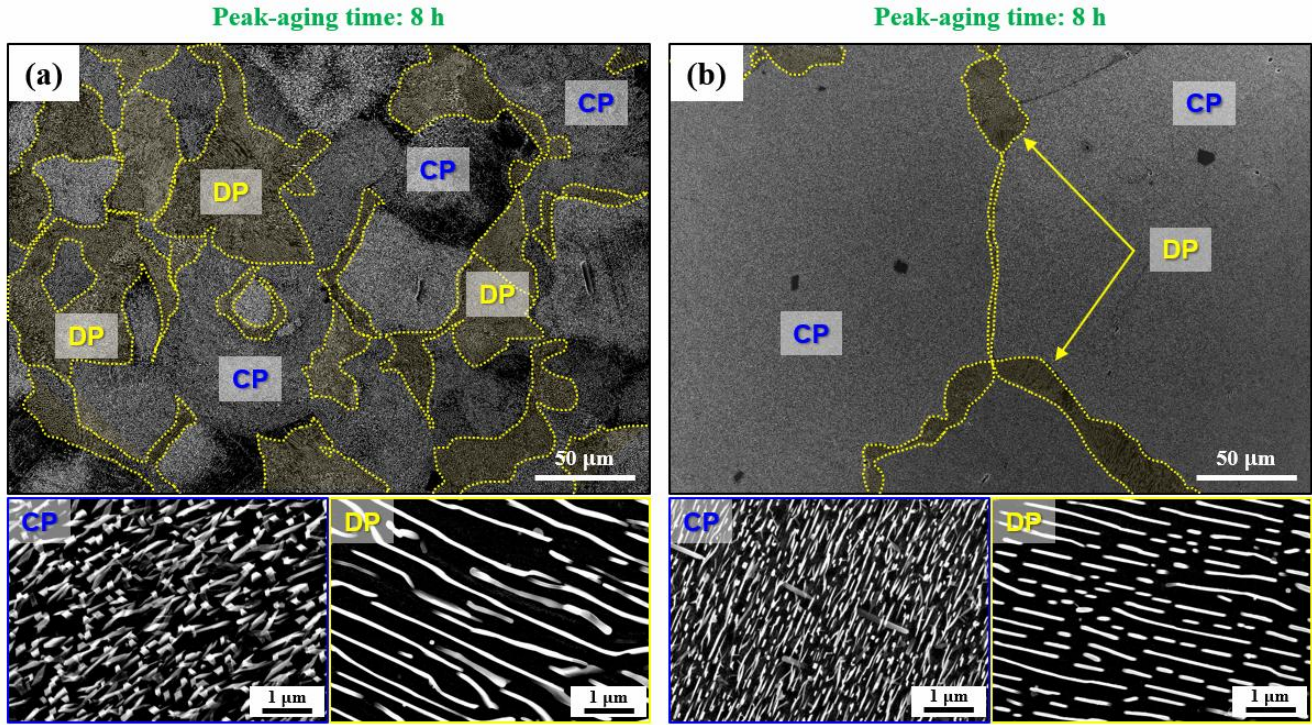


Fig. 7 SEM micrographs of peak-aged (a) AZ91 and (b) SEN9 alloys

의 양이 현저하게 적으며, AZ91 합금에 비해 더 미세하고 석출물 간의 간격이 좁은 연속 석출물과 불연속 석출물이 나타난다 (Fig. 7(b)). 따라서, SEN9 합금의 연속 석출물과 불연속 석출물이 오로완 식 (Orowan equation)에 의해 AZ91 합금의 석출물들 보다 더 높은 경도 값을 가지게 되며[25], 이는 Fig. 6의 두 합금의 석출물 미세경도 결과와 일치한다. Fig. 8은 두 합금의 균질재와 피크 시효 후 소재의 상온 인장 곡선을 보여준다. 균질재의 경우, AZ91 합금의 항복강도(yield strength, YS)는 128.4 MPa로 SEN9 합금의 96.1 MPa에 비해 34% 높다. 최대인장강도(ultimate tensile strength, UTS) 또한 AZ91 합금이 150.3 MPa로 SEN9 합금의 130.6 MPa에 비해 15% 높다. 연신율(elongation, EL)은 SEN9 합금이 2.4%로 AZ91 합금의 1.9%에 비해 27% 높게 나타났다. AZ91 합금의 높은 강도는 결정립 미세화가 주된 요인으로 판단된다. 시효재의 경우, 두 합금의 항복강도는 비슷하나 SEN9 합금의 최대인장강도와 연신율이 166 MPa, 2.1%로 AZ91 합금의 156.7 MPa, 1.2%에 비해 각각 6%, 75% 높다. AZ91 합금 시효재에 비해 SEN9 합금 시효재의 높은 연신율은 취성을 가지는 조대한 불연속 석출물의 양이 SEN9 합금에서가 더

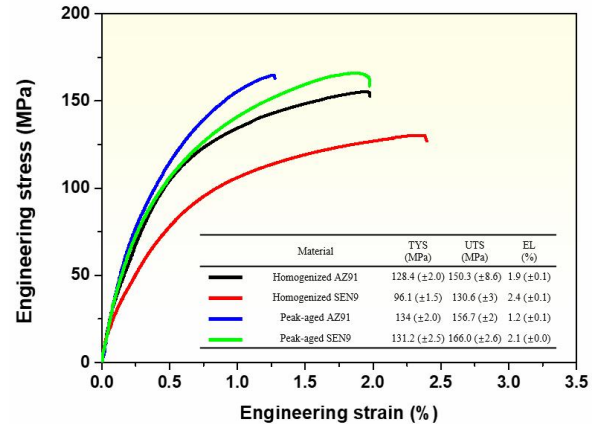


Fig. 8 Tensile curves and properties of AZ91 and SEN9 alloys in homogenized and peak-aged states

적기 때문으로 판단된다. 또한 시효 처리에 의한 강도 증가가 SEN9 합금이 AZ91 합금에 비해 크며, 이는 SEN9 합금에서 보다 미세한 연속 석출물과 불연속 석출물이 형성되었기 때문이다. 따라서, 균질화 처리 상태에서는 상용 AZ91 합금이 비교적 우수한 인장 물성을 보이나, 동일한 시간 동안의 피크 시효 처리 후에는 최근 개발된 SEN9 합금이 더 우수한 인장 물성을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 AZ91 합금과 SEN9 합금을 200 °C에서 시효 열처리하여 시효 시간에 따른 미세조직과 경도 변화를 분석하고, 피크 시효 처리 전과 후의 인장물성에 대해 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) AZ91 합금과 SEN9 합금 주조재는 균질화 열처리 후 $Mg_{17}Al_{12}$ 상이 모두 고용되었고, SEN9 합금은 다수의 Al_2Y , Al_8Mn_4Y , Al_2Ca 미용 이차상을 가진다. 균질재의 평균 결정립 크기는 SEN9 합금이 AZ91 합금에 비해 조대하다.

(2) 시효 전 균질재의 경도 값은 SEN9 합금이 67.1 Hv로 AZ91 합금의 64.9 Hv에 비해 다소 높다. 두 합금의 피크 시효 시간은 8시간으로 동일하며, 피크 경도는 SEN9 합금이 86.8 Hv로 AZ91 합금의 83.9 Hv 보다 높다.

(3) 시효 시간에 따른 미세조직 변화와 피크 시효 시간에서의 미세조직 관찰 결과, SEN9 합금의 불연속 석출물의 양이 AZ91 합금에 비해 현저하게 적으며, 연속 석출물과 불연속 석출물의 크기가 더 작고 석출물 간의 간격이 좁다.

(4) 인장 시험 결과, 시효 전 AZ91 합금 균질재의 항복강도와 최대인장강도가 SEN9 합금균질재보다 높으며, 이는 결정립 크기 차이로 인한 것으로 판단된다. 시효 후 SEN9 합금의 최대인장강도와 연신율이 AZ91 합금보다 높으며, 이는 석출물 미세화로 인한 강화 효과와 취성의 불연속 석출물 양의 감소로 인한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2021년도 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] S. M. Banijamali, Y. Palizdar, S. Najafi, A. Sheikhan, M. Soltan Ali Nezhad, P. Valizadeh Moghaddam, H. Torkamani, 2021, Effect of Ce Addition on the Tribological Behavior of ZK60 Mg-Alloy, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 2732-2742, <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00832-4>
- [3] A. Siahsharani, F. Samadpour, M.H. Mortazavi, G. Faraji, 2021, Microstructural, mechanical and corrosion properties of AZ91 magnesium alloy processed by a severe plastic deformation method of hydrostatic cyclic expansion extrusion, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 2933-2946, <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00828-0>
- [4] D. Dubey, K. Kadali, H. Kancharla, A. Zindal, J. Jain, K. Mondal, S.S. Singh, 2021, Effect of Precipitate Characteristics on the Corrosion Behavior of a AZ80 Magnesium Alloy, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, 3282-3292, <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00764-z>
- [5] S. G. Lee, G. R. Patel, A. M. Gokhale, A. Sreeranganathan, M.F. Horstemeyer, 2005, Variability in the tensile ductility of high-pressure die-cast AM50 Mg-alloy, *Scr. Mater.*, Vol. 53, pp. 851-856, <https://doi.org/10.1007/s12540-021-00978-9>
- [6] C. Dørum, O.S. Hopperstad, O.G. Lademo, M. Langseth, 2005, Numerical modelling of the structural behaviour of thin-walled cast magnesium components, *Int. J. Solids. Struct.*, Vol. 42, pp. 2129-2144, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.08.019>
- [7] F. Cao, G.-L. Song, A. Atrens, 2016, Corrosion and passivation of magnesium alloys, *Corros. Sci.*, Vol. 111, pp. 835-845, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.0>
- [8] H. Kabir, K. Munir, C. Wen, Y. Li, 2021, Recent research and progress of biodegradable zinc alloys and composites for biomedical applications: Biomechanical and biocorrosion perspectives, *Bioact. Mater.*, Vol. 6, 836-879, <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.09.013>
- [9] 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>
- [10] 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 behaviours of die-cast AZ91D magnesium alloy, *Corros. Sci.*, Vol. 166, pp. 108451, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108451>
- [11] B. S. You, Y. M. Kim, C. D. Yim, H. S. Kim, 2014, Oxidation and Corrosion Behavior of Non-flammable Magnesium Alloys Containing Ca and Y, *Magnesium Technology 2014*, pp. 325-329, <https://doi.org/10.1002/9781118888179.ch62>
- [12] H. J. Kim, Y. J. Kim, S. H. Park, 2023, Acceleration of aging behavior and improvement of mechanical properties of extruded AZ80 alloy through (10-12) twinning, *J. Magnes. Alloy.*, Vol. 11, No. 2, pp. 671-683, <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.008>
- [13] B. Amir Esgandari, H. Mehrjoo, B. Nami, S. M. Miresmaeili, 2011, The effect of Ca and RE elements on the precipitation kinetics of Mg₁₇Al₁₂ phase during artificial aging of magnesium alloy AZ91, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 528, pp. 5018-5024, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.022>
- [14] W.-J. Lai, Y.-Y. Li, Y.-F. Hsu, S. Trong, W.-H. Wang, 2009, Aging behaviour and precipitate morphologies in Mg-7.7Al-0.5Zn-0.3Mn (wt.%) alloy, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 476, pp. 118-124, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.043>
- [15] J. U. Lee, S. H. Kim, Y. J. Kim, S. H. Park, 2018, Effects of homogenization time on aging behavior and mechanical properties of AZ91 alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 714, pp. 49-58, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.061>
- [16] A. Srinivasan, U. T. S. Pillai, B. C. Pai, 2007, Effect of Pb addition on ageing behavior of AZ91 magnesium alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 452-453, pp. 87-92, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.119>
- [17] F. Li, W. Y. Peh, V. Nagarajan, M. K. Ho, A. Danno, B. W. Chua, M. J. Tan, 2016, Development of non-flammable high strength AZ91 + Ca alloys via liquid forging and extrusion, *Mater. Design*, Vol. 99, pp. 37-43, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.014>
- [18] F. Wang, Y. Wang, P. Mao, B. Lu, Q. Guo, 2010, Effects of combined addition of Y and Ca on microstructure and mechanical properties of die casting AZ91 alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 20, pp. s311-s317, [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60489-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60489-X)
- [19] H. J. Kim, Y. M. Kim, J. H. Bae, J. Yoon, S. H. Park, 2023, Aging hardening and precipitation characteristics of extruded Mg-9Al-0.8Zn-0.2Mn-0.3Ca-0.2Y alloy, *Met. Mater. Int.*, Vol. 29, pp. 381-389, <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01237-1>
- [20] Y. S. Yang, J. C. Wang, T. Wang, C. M. Liu, Z. M. Zhang, 2014, Effects of ultrasonic treatment on microstructures of AZ91 alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 24, pp. 76-81, [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63030-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63030-2)
- [21] S. N. Naik, S. M. Walley, 2020, The Hall-Petch and inverse Hall-Petch relations and the hardness of nanocrystalline metals, *J. Mater. Sci.*, Vol. 55, pp. 2661-2681, <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04160-w>
- [22] Y. Kim, Y. Kim, S. Hong, D. Kim, C. Lee, S. 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>
- [23] K. Zhang, H. Li, X. Liang, Z. Chen, L. Wang, 2020, Discontinuous and continuous precipitation characteristics and mechanical properties of a AZ80A magnesium alloy at different aging temperatures, *Mater. Charact.*, Vol. 161, pp. 110146, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110146>
- [24] S. H. Kim, J. U. Lee, Y. J. Kim, J. H. Bae, B. S. You, S. H. Park, 2018, Accelerated precipitation behavior of cast Mg-Al-Zn alloy by grain refinement, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 34, pp. 265-276, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.11.019>
- [25] J. F. Nie, 2003, Effects of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in magnesium alloys, *Scr. Mater.*, Vol. 48, pp. 1009-1015, [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00497-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00497-9)