

열처리조건에 따른 AZ61 마그네슘 합금의 미세조직과 감쇠능에 미치는 영향

안재현* · 김권후**†

*부경대학교 마린융합디자인협동과정, **부경대학교 금속공학과

Effect of Annealing Conditions on Microstructure and Damping Capacity in AZ61 Magnesium Alloy

Jae-Hyeon Ahn*, Kwon-Hoo Kim**†

*Marine Convergence Design Co-Work, Pukyong National University, Busan 4857, Republic of Korea

**Marine Convergence Design Co-Work, Pukyong National University, Busan 4857, Republic of Korea

Abstract Many researchers have studied on the precipitation control after solution treatment to improve the damping capacity without decreasing the strength. However, studies on the damping capacity and microstructure changes after deformation in the solid solution strengthening alloys were inadequate, such as the Al-Zn series magnesium alloys. Therefore, in order to investigate the effect of annealing condition on microstructure change and damping a capacity of AZ61 magnesium alloy. In this study, it was confirmed that the microstructure changes affect the damping capacity and hardness when annealed AZ61 alloy. AZ61 magnesium alloy was rolled at 400°C with rolling reduction of 30%. These specimens were annealed at 350°C to 450°C for 30-180 minutes. After annealing, microstructure was observed by using optical microscopy, and damping capacity was measured by using internal friction measurement machine. Hardness was measured by Vickers hardness tester under a condition of 0.3 N. In this study, static recrystallization was observed regardless of the annealing conditions. In addition, uniform equiaxed grain structure was developed by annealing treatment. Hardness is decreased with increasing grain size. This is associated with Hall-Petch equation and static recrystallization. In case of damping capacity, bigger grain size show the larger damping capacity.

(Received February 0, 2018; Revised March 0, 2018; Accepted March 0, 2018)

Key words : Damping capacity, Magnesium alloys, Annealing treatment, Static recrystallization, Grain size

1. 서 론

에너지 절감을 위해 수송기기의 경량성이 요구되는 추세에서 높은 비강도를 가지는 마그네슘 및 마그네슘 합금은 큰 주목을 받고 있다[1, 2]. 이러한 마그네슘 합금은 주로 기계적 성질 및 집합조직 개선을 통한 성형성 향상에 관한 연구들이 두드러진다[3, 4]. 또한 마그네슘의 경우 우수한 진동 감쇠능을 보유하고 있어 제진성과 경량성을 모두 요구하는 부품에 적용될 수 있다. 하지만 Mg-Zr, Mg-Mg₂Ni과 같이 고기능 분야에서 사용되는 마그네슘 합금을 제외한 상용 마그네슘 합금의 감쇠능은 순마그네슘의 감쇠능

에 비해 상당히 낮다[5].

마그네슘 및 마그네슘 합금의 진동감쇠능은 Granato-Lücke 모델의 진폭의존형 감쇠기구를 따르며, 용질함량이 증가함에 따라 진동감쇠능이 감소하는 경향이 있다[6, 7]. 또한 마그네슘 합금의 진동감쇠능은 강도와 반비례하기에 많은 연구자들은 다양한 용질원소(Si, Cu, Cd, Al 등)를 첨가하여 석출물의 형성과 분포에 따른 영향을 주로 관찰하였다[7]. 또한 주로 사용되는 AZ(Mg-X%Al-Y%Zn)계열 합금의 진동감쇠능 연구에서는 석출물인 Mg₁₇Al₁₂의 생성에 따른 계면면적 및 고용된 용질함량 변화로 인한 진동감쇠능의 변화가 주로 연구되었다[8-10]. 그

†Corresponding author. E-mail : mrppeng@naver.com
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

러나 고용체에서 결정립도 또한 진동감쇠능에 큰 영향을 미친다는 사실은 널리 알려져 있으나, 체계적으로 조사된 연구는 미흡하다.

일반적으로 사용되는 AZ계열 마그네슘 합금은 조밀육방격자에 기인한 슬립계 부족으로 가공용으로 사용될 시 일반적으로 열간가공되고 있다. 그 중 AZ61 합금은 같은 가공용 마그네슘 합금인 AZ31에 비해 기계적 성질과 열안정성이 뛰어나나, AZ31 보다 높은 용질함량으로 인하여 진동감쇠능이 낮다고 알려져 있다. 이러한 AZ61 합금의 기계적 성질을 보존함과 동시에 진동 감쇠능을 높일 수 있다면 다양한 산업분야에 적용될 것이다. 따라서 이번 연구는 AZ61합금에서 열간압연 이후 어닐링에 따른 미세조직변화가 진동감쇠능에 미치는 영향을 조사하는 것이 목적이다.

2. 재료 및 실험방법

실험에서 사용된 시료는 Table 1에 표시한 화학조성을 가지는 상용 AZ61 마그네슘 합금 잉곳을 60 mm × 60 mm × 40 mm의 크기로 기계가공하고, 350°C에서 30분간 균질화처리한 뒤 동일 온도에서 압연을 30%로 열간압연을 실시하였다. 열간압연 후 미세조직 사진은 Fig. 1과 같으며, 열간압연 후 변형 조직이 생성된 것을 확인 할 수 있다.

진동 감쇠능 시편은 2 mm × 20 mm × 120 mm의 크기로 방전가공을 실시하여 제작하였다. 제작한 시편은 각각 350과 450°C에서 30~180분간 어닐링을 실시하였고, 어닐링 직후 유냉을 실시하여 미세조직 변화와 석출물 생성을 예방하였다. 압연한 시편과 어닐링한 시편의 중단면(mid plane) 기계 연마 후 알코올 40 ml, 증류수 5 ml, 피크린산 2.1 g, 아세트산 5 ml 용액으로 부식한 뒤 광학현미경을 사용하며 미세조직을 관찰하였다. 관찰한 미세조직은 평적법을 사용하여 평균 결정립도를 측정하였다. 경도 측정은 비커스 경도기를 사용하였으며, 측정 하중은 0.3 N 이다. 진동 감쇠능은 IFT-1500을 사용하여 측정하고, 대수감쇠율은 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 여기서, δ 는 대수감쇠율, A_0 는 초기진폭, A_n 는 n번째 진폭이다.

Table 1. Chemical composition (wt. %)

Alloy code	Al	Zn	Mn	Mg
AZ61	6.04	0.82	0.30	Bal.

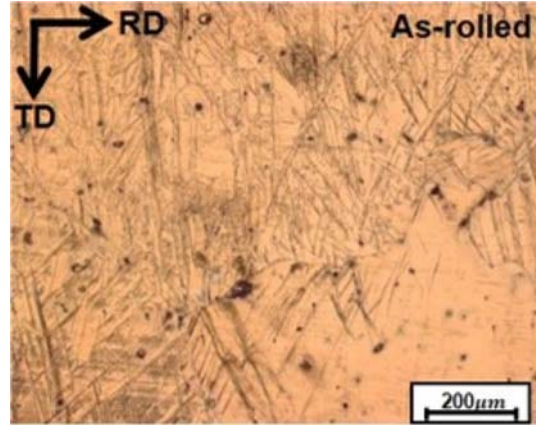


Fig. 1. Microstructure of as-rolled specimen.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 변화

Fig. 2는 350°C에서 30~180분간 어닐링한 사진을 나타낸 것이다. 압연 이후 350°C 30분간 어닐링시 미세한 등축정이 형성된 것을 Fig. 2(a)에서 관찰할 수 있다. 어닐링 시간이 증가하게 됨에 따라 조대한 결정립이 점차적으로 사라지고 등축정이 전체적으로 균질하게 형성하는 것을 Fig. 2를 통해서 관찰된다.

Fig. 3은 450°C에서 30~180분간 어닐링한 사진을 나타낸 것으로, 압연 이후 450°C 30분간 어닐링시 350°C 30분 어닐링 조건보다 조대한 초기 등축정을 형성하는 것을 Fig. 3 (a)에서 확인할 수 있다. 450°C 30분 어닐링 조건에서 형성된 등축정은 어닐링 시간이 증가함에 따라 Fig. 3 (a)~(d)와 같이 전체적으로 조대해지는 것을 관찰된다.

Fig. 4는 350°C, 450°C 등온어닐링시 미세조직 변화를 정량적으로 확인하기 위해 평균 결정립도를 측정 한 것으로, 어닐링 시간이 증가함에 따라 평균 결정립도가 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 어닐링

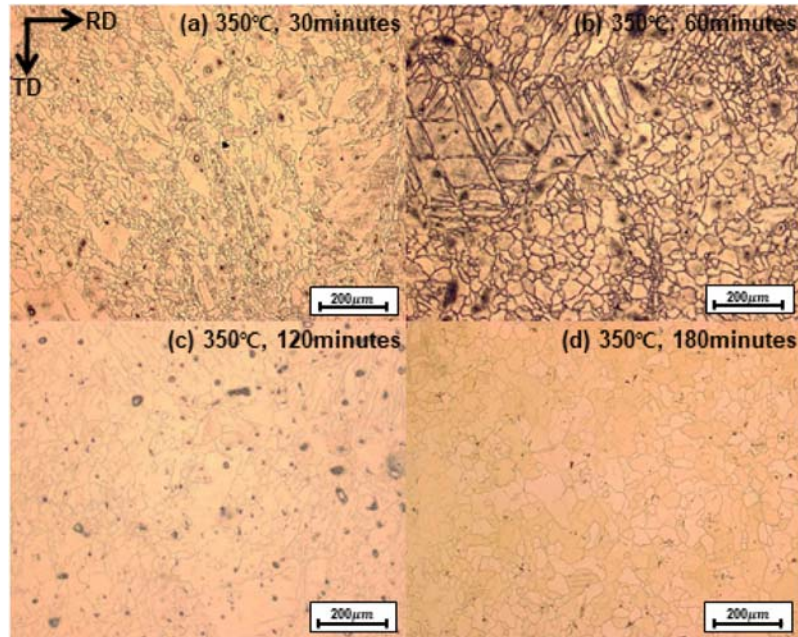


Fig. 2. Microstructure of annealing specimen at 350°C (a) 30 min, (b) 60 min, (c) 120 min, (d) 180 min.

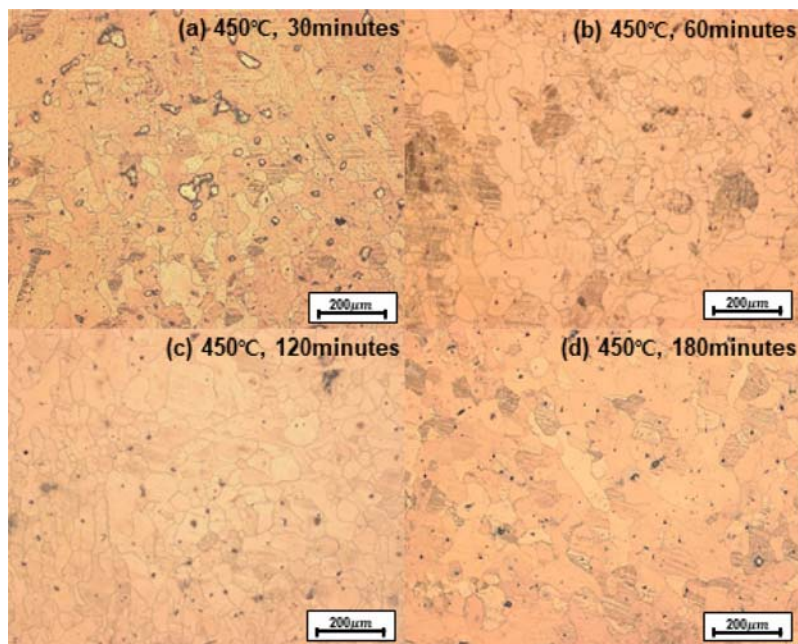


Fig. 3. Microstructure of annealing specimen at 450°C (a) 30 min, (b) 60 min, (c) 120 min, (d) 180 min.

온도가 높은 450°C에서 평균 결정립도가 큰 것을 확인 할 수 있다. 또한 어닐링 시간이 증가함에 따라 초기의 조대한 결정립과 미세한 등축정의 편차

는 감소하는 것을 확인 할 수 있다. YANG[11], Hatherly[12] 등의 결과에서도 열간가공 후 어닐링 시 초기의 불균일한 결정립들이 어닐링 시간과 온도

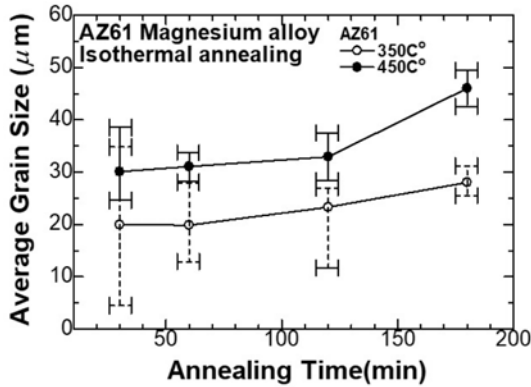


Fig. 4. Relationship on between average grain size and annealing condition.

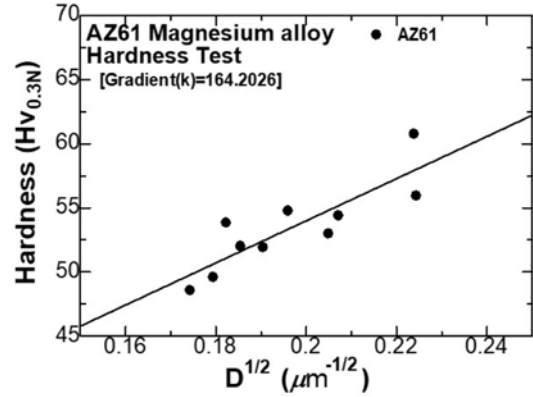


Fig. 6. Relationship on between Vickers hardness and grain size.

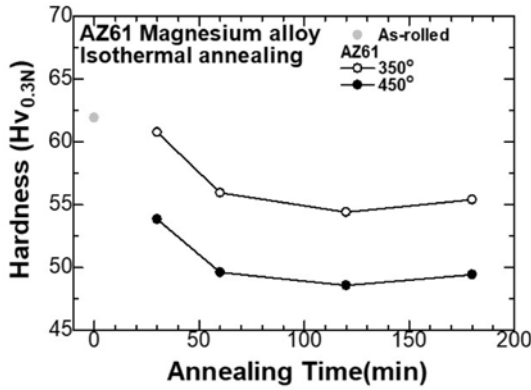


Fig. 5. Relationship on between Vickers hardness and annealing condition.

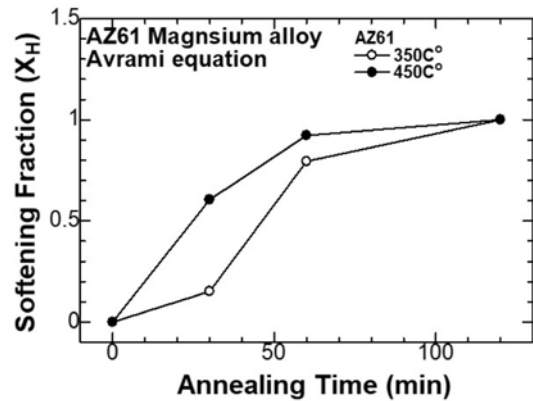


Fig. 7. Relationship on between softening fraction and annealing condition.

가 증가함에 따라 평균적으로 조대해지는 결과를 관찰할 수 있었으며, 이러한 변화를 정적재결정으로 결론 내었다. 본 연구에서도 어닐링 시간 및 온도의 증가에 따라서 균일한 재결정 생성 및 결정립성장이 일어났으며, 이는 정적재결정으로 인한 것으로 생각된다.

3.2 경도 변화

Fig. 5는 350°C, 450°C 등온어닐링시 비커스 경도를 측정된 것으로, 30분~60분간 어닐링시 경도는 점차적으로 감소하였다. 반면 120분~180분간 어닐링시 경도값은 큰 차이가 없는 것이 관찰된다.

동일한 열처리 시간 조건에서 열처리 온도가 100°C 상승되었을 때 경도는 약 10 HV 정도 낮아지는 것을 확인 할 수 있으며, 이러한 이유로 Hall-

Petch equation에서 제시되는 결정립도와 강도의 반비례관계에 의한 것으로 파악된다. 전체 어닐링 조건에서 결정립도와 경도의 상관관계를 명확하게 관찰하기 위해 Fig. 6과 같이 나타내었다. 어닐링 온도나 시간에 상관없이 경도값은 결정립도에 좌우되는 것이 확인되며, 이것을 통해 AZ61 합금의 경도는 결정립도에 직접적인 영향을 받는다는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 어닐링 조건이 경도변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 연화 분율을 계산한 것으로, 연화 분율은 식 (2)를 통하여 계산하였다. 여기서, X_H 는 연화 분율, H_0 는 열처리 이전 경도, H_T 는 열처리 이후 경도, H_F 는 완전 재결정이 일어난 이후 경도를 각각 나타낸다.

$$X_H = \frac{H_0 - H_i}{H_0 - H_r} \quad (3)$$

어닐링 시간이 증가함에 따라 연화 분율이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 120분간 어닐링시 모든 온도조건에서 연화가 끝나고, 동일한 어닐링 시간에서는 온도가 높은 450°C 조건이 더 빠른 연화거동을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

350°C와 450°C 어닐링에서 관찰된 정적재결정을 경도와 연화 분율과 같이 생각하였을 때, Hatherly [18] 등의 실험결과 같이 열간압연 이후 어닐링에 따른 정적재결정 발생 및 연화거동으로 생각할 수 있다. 따라서 Fig. 2, 3 (a)에서 생성된 미세등축정은 정적재결정 생성으로 생각할 수 있으며, 또한 Fig. 2, 3 (d)에서 관찰된 조대한 결정립들은 정적재결정의 성장에 의한 것으로 생각된다.

3.3 감쇠능

Fig. 8은 350°C, 450°C 등온어닐링시 열처리 시간에 따른 감쇠능의 변화를 나타낸 것이다. 열간압연 이후 30분간 어닐링시 감소하였던 감쇠능은 어닐링 시간이 증가함에 따라 점차적으로 증가된다. 이러한 감쇠능은 450°C에서 1시간 이상 어닐링을 실시할 시 초기 열간압연재의 감쇠능보다 높아지는 것을 확인할 수 있으며, 3시간 어닐링시 압연재 대비 약 25% 정도의 감쇠능이 향상된 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 KAGEYAMA[13] 등의 결과에서 보고된 것과 같이 열간압연에 의해 도입된 변형조직(쌍정, 전위)은 전위이동을 방해하여 감쇠능이 낮아진 것이라 생각되며, 이러한 변형 조직은 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 변형조직들은 어닐링에 의해 회복 및 재결정을 거치며 사라지게 되고(Fig. 2, Fig. 3), 이러한 변화는 전위 이동성을 증가시켜 감쇠능이 증가될 수 있다.

식 (3)는 Granato-Lcke model의 진폭의존감쇠능을 나타낸 것으로 각각의 기호는 다음과 같다. Q_H^{-1} 은 진폭 의존 내부마찰, ϵ 는 변형진폭, G 는 전단계수, a 는 원자반경, ρ 는 전위밀도, F_B 는 전위와 약한 고착점간의 결합력, L_d 는 전위의 강한 고착점간 거리(결정립계, 석출물, 부동전위), Ω 는 방위인자, π 는 원주율, R 은 분해전단응력인자, E 는 영률, L_N 은 불

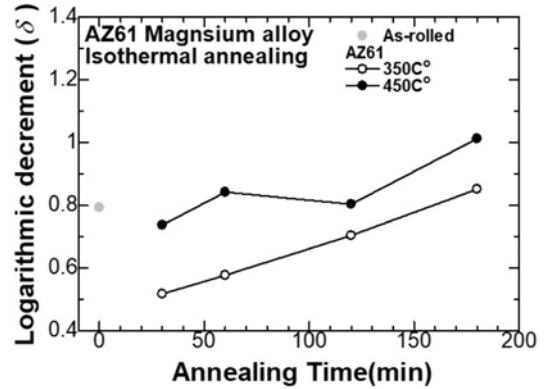


Fig. 8. Relationship on between damping capacity and annealing condition.

순물 원자에 의해 고정된 전위의 작은 전위루프 길이(원자 공공, 용질원자), ϵ 는 전위선의 장력, C_1 은 y절편, C_2 는 기울기다.

$$\begin{aligned} \ln(Q_H^{-1} \times \epsilon_0) &= \ln C_1 - \frac{C_2}{\epsilon_0} \\ C_1 &= \frac{2G\rho F_B L_d^3 \Omega}{RE\pi^3 L_N^2} \quad C_2 = \frac{\pi F_B}{4aREL_N} \end{aligned} \quad (3)$$

Granato-Lcke 식에서 진폭의존감쇠능은 C_1 값이 높거나 C_2 값이 낮으면 감쇠능이 커지게 된다. 이번 실험에서 사용된 AZ61은 고용온도에서 어닐링을 하므로 모든 용질은 결정립에 고용된다고 생각할 수 있고, 어닐링을 진행할수록 전위밀도는 감소하고 재결정 생성 및 결정립성장을 하게 된다. 결정립이 커질수록 한 결정립 안에서 용질의 수는 증가하게 된다. 즉, 용질이 전부 고용되는 온도라도 미세한 결정립보다 큰 결정립은 결정립계 면적이 적으므로 더 많은 용질이 있을 수 있다고 예상된다. 결정립이 클수록 강한 고착점간 거리 L_d 는 증가하고 L_N 는 작아지므로 C_1 의 값은 전위밀도가 적더라도 강한 고착점간 거리가 길어 C_1 의 값은 커지게 된다.

Fig. 8에서 등온어닐링을 실시하였을 때 450°C에서 더 높은 감쇠능을 가지는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 4에서 더 큰 평균 결정립도를 가지는 것을 알 수 있었다. 등온어닐링시 결정립도에 따른 감쇠능의 변화를 상세하게 파악하기 위해 Fig. 9와 같이 나타내었다. 경도값과 마찬가지로 감쇠능은 결정립도에 의존하는 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 10에서

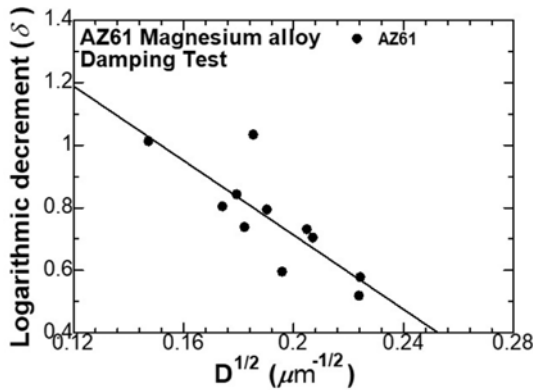


Fig. 9. Relationship on between damping capacity and grain size.

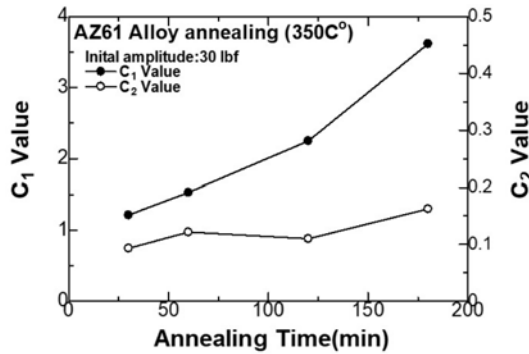


Fig. 10. Relationship on between C_1 , C_2 value and annealing condition.

나타낸 것과 같이 350°C에서 어닐링 시간이 증가함에 따라 C_1 , C_2 값 모두 증가하였다. C_1 값의 증가는 어닐링이 진행됨에 따라 결정립도가 커졌기 때문이라 생각된다. C_2 값은 어닐링 시간이 증가함에 따라 미세하게 증가하였으며, 이러한 결과는 어닐링 시간이 늘어남에 따라 공공의 증가를 야기하였고 따라서 약한고착점이 증가하여, L_N 거리를 감소시켜 C_2 값이 증가되었다 생각된다. 따라서 진동감쇠능에 영향을 미치는 C_1 값과 C_2 값은 증가하였으나 C_1 값의 상승 폭이 C_2 값이 더 크기 때문에 Fig. 8의 350°C 조건과 같이 어닐링 시간에 따라 진동감쇠능이 증가된다고 생각한다.

이상의 결과로 부터 열간압연한 다음 어닐링한 AZ61 마그네슘 합금의 감쇠능은 결정립도가 증가함에 따라 감쇠능이 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 마그네슘 합금의 감쇠는 전위의 이동에

의해 발생하며, 열처리에 의해 결정립도가 조대해지면 강하고착점간 거리가 길어져 C_1 값이 증가하게 되고, 최종적으로 진동 감쇠능이 향상된다고 생각된다.

4. 결 론

AZ61 마그네슘 합금을 열간압연 후 다양한 조건에서 어닐링을 실시하여 미세조직 및 감쇠능에 미치는 영향에 대해서 실험한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

어닐링을 실시하였을 때 미세조직과 감쇠능과의 상관관계는 실험한 결과 다음과 같다.

1. 열간압연에 의해 생성된 변형조직은 350°C, 450°C에서 어닐링을 실시하였을 때 미세등축정이 생성되었고, 어닐링시간이 증가함에 따라 전체적으로 균일한 등축정 조직을 가지는 것을 확인 할 수 있었다.

2. 어닐링을 실시함에 따라 경도는 낮아졌으며, 온도가 높은 450°C에서 더 낮은 경도가 나타났다. 경도값의 변화는 정적재결정에 의한 연화로 생각되며, Hall-Petch equation에 따라 결정립도와 반비례하였다.

3. 열간압연이후 어닐링을 실시하였을 때 진동감쇠능은 감소하였다가 어닐링 시간에 따라 증가하는 것을 확인 할 수 있었고, 결정립도(L_N)가 커짐에 따라 C_1 값이 증가하여 감쇠능이 상승된 것으로 판단되었다.

후 기

This work was supported by the Marine Convergence Design Co-work of Brain Korea 21 PLUS and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. 2017R1C1B5076690). The authors greatly appreciate the foundation.

References

1. B. L. Mordike and T. Ebert : Materials Science and Engineering **302** (2001) 37-45.
2. S. Das : The Journal of The Minerals **55** (2003) 22-26.
3. M. Kohzu, K. Kii, Y. Nagata, H. Nishio, K. Higashi

- and H. Inoue : Journal of Japan Institute of Light Metals **60** (2010) 237-243.
4. Kwonhoo Kim, Kazuto Okayasu, Hiroshi Fukutomi : Journal of Japan Institute of Light Metals **63** (2015) 212-217.
 5. K. Sugimoto, K. Niiya, T. Okamoto and K. Kishitake : Transactions of the Japan Institute of Metals **18** (1997) 277-288.
 6. A. Granato and K. Lücke : Journal of Applied Physics **27** (1956) 583-593.
 7. R. ICHIKAWA and T. TANIKAWA : Journal of Japan Institute of Light Metals **12** (1962) 135-140.
 8. R. González-Martínez, J. Göken, D. Letzig, K. Steinhoff and K.U. Kainer : Journal of Alloys and Compounds **437** (2007) 127-132.
 9. R. González-Martínez, J. Göken, D. Letzig, J. Timmerberg, K. Steinhoff and K. U. Kainer : Acta Metallurgica Sinica **20** (2007) 235-240.
 10. J. H. Jun : Journal of the Korean Society for Heat Treatment **20** (2007) 306-310.
 11. X. Y. YANG, Y. K. ZHU, H. MIURA and T. SAKAI : Trans. Nonferrous Met. Soc **20** (2010) 1269-1274.
 12. A. Rollett, F. J. Humphreys, Gregory S. Rohrer, M. Hatherly : Pergamon 2004 1-658.
 13. Hiroshi KAGEYAMA, Masayuki SHIMAZU, Shigeharu KAMADO, Yo KOJIMA : Journal of Japan Institute of Light Metals **48** (1998) 217-221.