



Fe-27Mn-4Co-2Al-3Si 제진합금의 감쇠능에 미치는 냉간가공의 영향

Effect of Cold Working on the Damping Capacity of Fe-27Mn-4Co-2Al-3Si Damping Alloy

강창룡* · 손영민* · 김영화* · 남궁원**†
 Chang-Yong Kang*, Young-Min Son*, Young-Hwa Kim* and
 Won Namgung**†

(Received 11 November 2018, Revision received 2 July 2019, Accepted 3 July 2019)

Abstract : This study was carried out to investigate the effect of cold working on the damping capacity of Fe-27Mn-4Co-2Al-3Si alloy. α' and ϵ -martensite were formed by cold rolling, and these martensite was formed according to the specific direction, surface relief and partially intersection. With the increasing degree of cold rolling, amount of α' -martensite was rapidly increased, whereas amount of ϵ -martensite was decreased after rising to maximum value at specific lever of cold rolling. Damping capacity increased and then decreased with an increase in degree of cold rolling. Damping capacity was greatly influenced by the volume fraction of ϵ -martensite formed by cold rolling, but the effect of volume fraction of α' -martensite on the damping capacity was not observed. Damping capacity of cold rolled Fe-27Mn-4Co-2Al-3Si alloy was effected by the amount of α' -martensite.

Key Words : Damping capacity, Cold working, Internal friction, α' -Martensite, ϵ -Martensite

1. 서 론

소음과 진동은 다양한 형태의 인적 및 물적 손실을 초래하고 있기 때문에 이에 대한 규제가 강

화되어 가고 있다. 뿐만 아니라, 노동환경의 개선, 기기 또는 장치 등의 안정성과 장수명화 등을 위해서도 진동과 소음의 저감에 대한 중요성과 필요성이 높아지고 있다.

**† 남궁원(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8960-6361>) : 교수, 한국폴리텍대학 자동설비화과
 E-mail : nkw570@kopo.ac.kr, Tel : 041-539-9432
 *강창룡(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9420-0788>) : 교수, 부경대학교 금속공학과
 *손영민(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3729-3858>) : 대학원생, 부경대학교 금속공학과
 *김영화(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4747-4233>) : POSCO

**† Won Namgung(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8960-6361>) : Professor, Department of Automatic Facilities, Korea Polytechnics.
 E-mail : nkw570@kopo.ac.kr, Tel : 041-539-9432
 *Chang-Yong Kang(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9420-0788>) : Professor, Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University.
 *Young-Min Son(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3729-3858>) : Graduate studeant, Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University.
 *Young-Wah Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4747-4233>) : POSCO.

현재 공업적으로 이용되고 있는 소음과 진동 방지법은 System(시스템), Structure(구조) 및 Material damping(재료 감쇠)법 등이 있다. 그러나 System 및 Structure damping법은 감쇠효과가 적고, 제품의 경, 박, 단, 소화가 어려울 뿐만 아니라 가공성과 용접성 등이 낮아 공업적 이용 측면에서는 제한적이다. 따라서 최근에는 강도 및 가공성 등이 우수하고 내부마찰계수가 큰 금속재료를 소음과 진동원에 직접 적용함으로써 감쇠효과가 큰 Material damping법에 대한 관심이 크게 높아지고 있고 이에 대한 연구도 많이 수행되고 있다¹⁻⁵⁾.

제진합금이란 재료 내부에서 진동에너지를 소모시키는 특성인 내부마찰이 커 외부에서 가한 진동에너지의 대부분을 열 또는 다른 형태의 에너지로 용이하게 전환시키는 합금을 말하고²⁾, 제진 합금의 감쇠는 외부응력에 의한 금속 내 존재하는 전위 등과 같은 결함 이동에 기인되므로 감쇠능은 열 기계적 이력(Thermo-mechanical history), 즉 미세조직 등에 따라 크게 달라진다⁴⁾. 또한 제진재료는 제진에 의한 주파수 의존성, 온도 의존성 등이 낮을수록 유리하고, 강도가 높아지면 감쇠능은 낮아진다^{3,6)}. 따라서 이러한 여러 성질들을 만족하는 강도와 감쇠능의 조합이 우수한 제진합금 개발은 극히 어렵다. 때문에 강도와 감쇠능의 조합이 우수한 구조용 재료로 사용가능한 제진합금 개발을 위한 다양한 연구가 수행되어 왔지만¹⁻⁷⁾ 아직도 많이 부족하다.

본 연구는 감쇠능과 강도의 조합이 우수한 제진합금개발에 필요한 자료를 얻기 위해 가공에 의해 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태되는데 기인되어 감쇠능과 강도가 우수한 Fe-Mn계 합금을⁷⁾ 기본으로 하였다. 여기에서 적층결합생성에 의한 감쇠능향상과 고용강화와에 의한 강도향상 그리고 내식성향상을 위하여 4%의 Co와 3%의 Si 및 2% Al이 첨가된 제진합금을 설계 제작한 다음, 압연량을 달리하는 냉간압연하여 감쇠능 변화를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시료

시료는 먼저 진공용해로에서 목적성분으로 용해 후 잉곳으로 제작하였다. 다음 잉곳을 1,200℃로 가열하여 필요한 여러 두께를 갖는 판재로 열간압연하였다. 다음 1,050℃에서 1시간 유지 후 수냉하는 용체화처리와 산세과정 등을 거친 다음 압연율을 달리하는 냉간압연하여 최종 2 mm 두께 판재로 만들어 시료로 사용하였다. Table 1에 시료의 화학조성을 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt.%)

C	N	P	S	Mn	Co	Al	Si	Fe
0.01	0.02	0.001	0.008	27.5	4.10	2.18	3.15	bal.

2.2 미세조직의 관찰

시료의 미세조직은 광학현미경으로 관찰하였고, 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트를 상세히 조사하기 위하여 주사 및 투과전자현미경으로도 관찰 하였다. 투과전자현미경 관찰은 시료를 약 80 μm 두께로 만든 다음 Jet Polishing하여 박막으로 만들어 200 kV 가속전압의 투과전자현미경(JEOL JEM 2010)으로 조사하였다.

2.3 X선 회절시험

시료가 갖는 각 상의 체적분율은 X선 회절시험으로 측정하였다. X선 회절시험은 Mo-K α 특성 X선을 사용하여 1°/min의 속도로 10~80° 사이의 범위를 회절시험하였고, 이때 얻은 회절선도로 부터 얻은 각상에 해당되는 피크의 상대 적분강도 값을 사용하여 구하였다.

2.4 감쇠능 측정

감쇠능은 각 시료로부터 2 mm \times 120 mm \times 10 mm 크기의 시험편으로 제작한 다음 횡 형 내부마찰 측정 장치를 이용하여 10-4 torr의 진공 하에서 대수감쇠율을 구하는 방법으로 측정하였다. 이 방법은 진동을 가하는 전극과 진동을 검출하는

전극인 두 전극 위에 시료를 극세선으로 전극에 접촉되지 않게 배열시킨 다음 진동을 가하는 전극으로 강제진동시킨 후 자유 감쇠시켜 감쇠가 끝날 때까지의 파수를 측정하여 감쇠율($\delta=1/n \ln A_0 / A_n$, n: 파수, A_0 :최초파의 진폭, A_n :n 번째 파의 진폭)을 구하는 방법이다⁶⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 1은 본 연구에 사용된 용체화처리한 Fe-27Mn-4Co-2Al-3Si 합금의 미세조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 부분적으로 쌍정이 존재하는 오스테나이트 조직에 마르텐사이트 조직이 약간 존재하는 것을 확인할 수 있다.

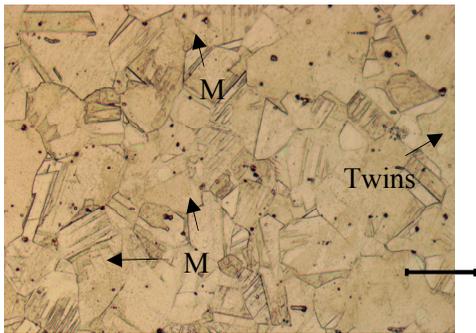


Fig. 1 Optical micrograph of Fe-27Mn-3Co-2Al-3Si damping alloy

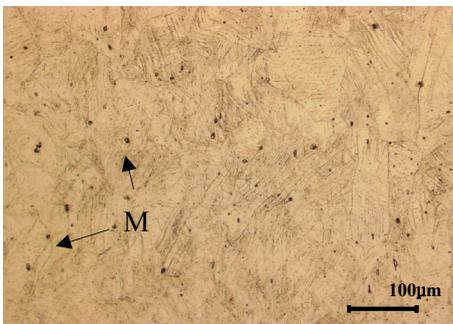


Fig. 2 Optical micrographs showing the effect of 28% cold rolled in Fe- 27Mn-3Co-2Al-3Si damping alloy

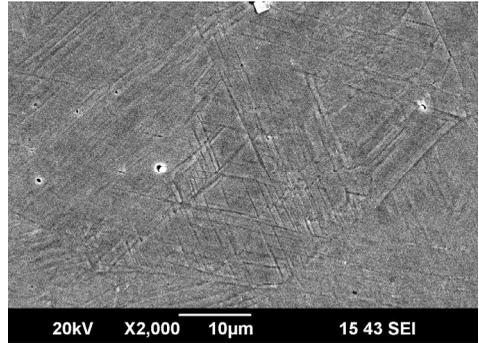
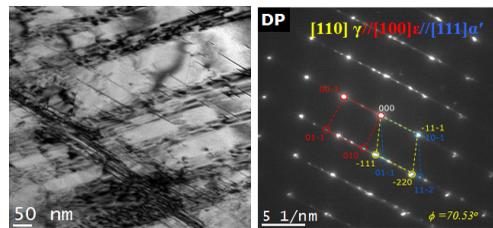


Fig. 3 SEM micrograph of 28% cold rolled Fe-27Mn-3Co-2Al-3Si damping alloy

Fig. 2는 미세조직에 미치는 냉간가공의 영향을 조사하기 위하여 용체화처리 후 28% 냉간압연 한 시료의 미세조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 가공에 의해 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태되는데 기인하여 많은 양의 마르텐사이트가 존재하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 냉간가공에 의해 생성되는 마르텐사이트를 상세히 조사하기 위하여 Fig. 2 시료의 미세조직을 주사전자현미경으로 나타낸 것이다. 마르텐사이트가 퀘칭에 의해 생성되는 마르텐사이트와 동일하게 표면기복을 일으키며 방향성을 지니고 일부는 서로 교차하며 생성되어 있는 것을 확인할 수 있다⁴⁾.

Fig. 4는 냉간가공에 의해 생성된 마르텐사이트를 결정학적으로 알아보기 위하여 Fig. 2 시료의 미세조직을 투과전자현미경으로 나타낸 것으로



a) Bright field, b) SADP and indexing of SADP

Fig. 4 TEM micrograph showing the martensite obtained by 28% cold rolling in Fe-27Mn-3Co-2Al-3Si damping alloy.

a)는 암시야상 b)는 암시야상에서 나타난 상의 제한시야회절 패턴과 이를 분석하여 나타난 것이다. b)의 결과로부터 BCT 결정구조를 갖는 α' -마르텐사이트와 HCP 결정구조를 갖는 ϵ -마르텐사이트가 함께 생성되어 있는 것을 알 수 있다⁸⁾.

3.2 미세조직과 감쇠능에 미치는 냉간가공의 영향

Fig. 5는 미세조직 변화에 미치는 냉간가공의 영향을 조사하기 위하여 용체화처리 후 가공량을 달리하여 냉간압연한 시료에서 존재하는 각 상들의 체적분율을 조사하여 나타난 것이다. 압연량이 증가함에 따라 오스테나이트 양은 빠르게 감소하고, α' -마르텐사이트 양은 빠르게 증가하고 있는데 반하여, ϵ -마르텐사이트 양은 증가하다 특정 가공량 이상이 되면 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 압연량이 증가함에 따라 오스테나이트

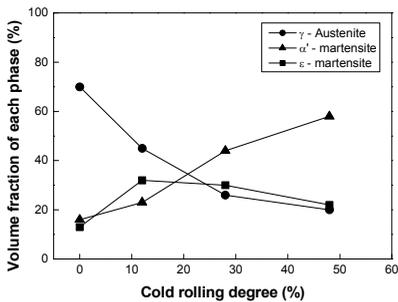


Fig. 5 Effect of cold rolling degree on the volume fraction of each phase of Fe-27Mn-3Co-2Al-3Si alloy

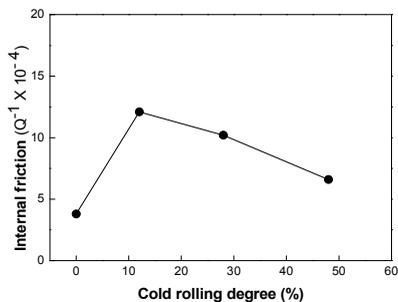


Fig. 6 Effect of cold rolling degree on the internal friction of Fe-27Mn-3Co-2Al-3Si alloy

내 전위집적부, 슬립밴드 등에서 생성되지만, ϵ -마르텐사이트의 위 또는 교차점 등에서 생성되어 성장해 가기 때문에 가공량 증가에 따라 ϵ -마르텐사이트는 증가하다 감소하고, α' -마르텐사이트는 계속 증가한다고 생각된다.

3.3 감쇠능에 미치는 마르텐사이트의 영향

가공에 의해 오스테나이트 조직이 α' 및 ϵ -마르텐사이트로 변태하는 합금에서 강도는 α' -마르텐사이트에 지배하고 감쇠능은 ϵ -마르텐사이트에 지배한다고 알려지고 있다^{4,10)}. 따라서 본 합금에서도 감쇠능에 미치는 가공에 의해 생성된 마르텐사이트의 영향을 조사하는 것이 필요하고, 중요하다.

Fig. 7은 가공량을 달리하여 냉간가공한 시료의 내부마찰계수와 α' -마르텐사이트 체적분율과의 상호관계를 조사하여 나타난 것이다. α' -마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 내부마찰계수는 증가하다 최댓값을 나타낸 다음 서서히 감소하는 것을 알 수 있다.

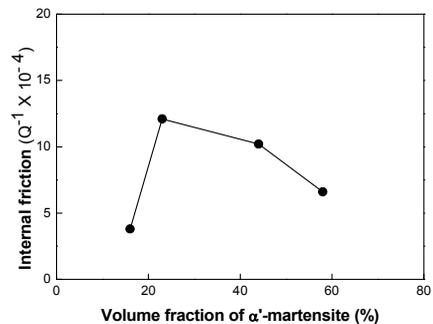


Fig. 7 Effect of volume fraction of α' -martensite on the internal friction of cold rolled Fe-27Mn-3Co-2Al-3Si damping alloy

Fig. 8은 가공량을 달리하여 냉간가공한 시료의 내부마찰계수와 ϵ -마르텐사이트 체적분율과의 상호관계를 조사하여 나타난 것이다. 내부마찰계수는 ϵ -마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 비례관계로 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 냉간가공한 재료의 감쇠능은 가공에 의해 생성되는 α' -마르텐사이트와 비례하지 않지만, ϵ -마르텐사이트와는 비례관계를 나타내는 것을 알 수 있고, 이 결과로부터 감쇠능은 가공에 의해 생성되는 α' -마르텐사이트보다는 ϵ -마르텐사이트에 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 이유는 가공에 의해 α' 및 ϵ -마르텐사이트가 생성되는 합금에서 감쇠는 오스테나이트와 ϵ -마르텐사이트계면 이동, ϵ -마르텐사이트 내 적층결합 경계의 이동 및 ϵ -마르텐사이트 플레이트 내부 형제정 계면 이동 등에 의해 일어나기¹¹⁾ 때문에 감쇠능이 주로 ϵ -마르텐사이트에 지배되기 때문이다.

Fig. 9는 감쇠능에 미치는 냉간가공에 의해 생성된 α' 와 ϵ -마르텐사이트를 더한 전체 마르텐사이트의 영향을 조사하기 위하여 가공량을 달리

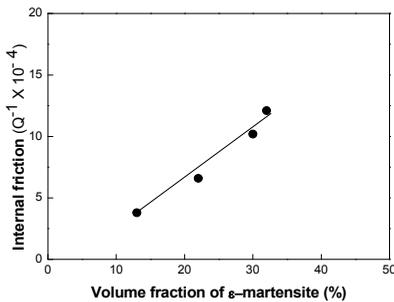


Fig. 8 Effect of volume fraction of ϵ -martensite on the internal friction of cold rolled Fe-27Mn-3Co-2Al-3Si damping alloy

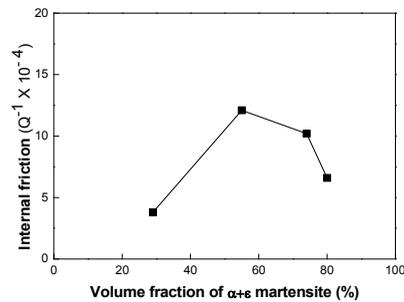


Fig. 9 Effect of volume fraction of total martensite on the internal friction of cold rolled Fe-27Mn-3Co-2Al-3Si damping alloy

하여 냉간가공 한 시료의 내부마찰계수와 전체 마르텐사이트 체적분율과의 관계를 나타낸 것이다. 전체 마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 내부마찰계수는 빠르게 증가하다 감소하는 것을 알 수 있고, 이러한 거동은 Fig. 6에서 나타낸 감쇠능에 미치는 냉간가공의 영향과 Fig. 7의 감쇠능에 미치는 α' -마르텐사이트의 영향을 나타낸 결과와 비슷한 것을 알 수 있다. 또한 이러한 이유는 감쇠능은 ϵ -마르텐사이트에 영향을 받지만, 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트의 양은 α' -마르텐사이트가 ϵ -마르텐사이트보다 많을 뿐만 아니라, 가공량이 증가함에 따라 ϵ -마르텐사이트의 양은 증가하다 감소하는데 반하여, α' -마르텐사이트의 양은 계속 증가하고 있다. 따라서 ϵ -마르텐사이트보다는 양이 많은 α' -마르텐사이트가 더 크게 영향을 미치기 때문이고⁵⁾, 이러한 결과는 다른 연구결과와도^{4,10)} 잘 일치하고 있다.

이상의 결과로부터 감쇠능은 가공에 의해 생성되는 ϵ -마르텐사이트에 크게 영향을 받지만, 그 재료가 갖는 감쇠능은 재료내 존재하는 미세조직 중에서 양이 많은 α' -마르텐사이트에 지배되고 있는 것을 알 수 있다¹⁰⁾.

4. 결론

Fe-27Mn-4Co-2Al-3Si 합금을 가공량을 달리하는 냉간압연하여 미세조직을 변화시킨 다음 감쇠능을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 냉간가공에 의해 α' 및 ϵ -마르텐사이트가 생성되었다. 또한 α' 및 ϵ -마르텐사이트는 방향성을 지니고, 표면기복을 일으키며 생성되었다.
- 2) 가공량이 증가함에 따라 α' 마르텐사이트의 양은 증가하는데 반하여, ϵ -마르텐사이트의 양은 증가하다 특정 가공량에서 최댓값을 나타낸 다음 감소하였다.
- 3) 가공량이 증가함에 따라 감쇠능은 증가하다 감소하였다.
- 4) 감쇠능은 가공에 의해 생성되는 ϵ -마르텐사이트에 크게 영향을 받았다. 그러나 냉간가공된 재료가 갖는 감쇠능은 양이 많은 α' -마르텐사이트에 지배되었다.

Author contributions

W. Namgung; Conceptualization, Funding acquisition
 Y. M. Son; Data curation, Formal analysis, Y. H. Kim;
 investigation Resources C. Y. Kang; Writing – original draft, Visualization.

References

1. N. Chiba, 1985, "Current Status of vibration Damping Laminated steel sheets", *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 71, No. 15, pp. 1742-1750.
2. K. K. Jee, W. Y. Jang, S. H. Baik and M. C. Shin, 1999, "Damping mechanism and application of Fe-Mn based alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, Vol. 273-275, pp. 538-542. (DOI:10.1016/S0921-5093(99)00395-0)
3. M. G. Kwon and C. Y. Kang, 2014, "Correlation Between Tensile Properties and Damping Capacity of 316L Stainless Steel", *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-5. (DOI:10.3740/MRSK.2014.24.1.1)
4. D. U. Son, J. H. Kim, I. S. Kim, K. Miyahara, J. H. Sung and C. Y. Kang, 2004, "Effect of ϵ Martensite on the Damping Capacity of Austenitic Stainless Steel", *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, Vol. 42 No. 8, p. 621.
5. S. H. Baik, J. C. Kim, K. K. Jee and C. S. Choi, 1997, "Transformation Behavior and Damping Capacity in Fe-17%Mn-X%C-Y%Ti Alloy", *ISIJ Inter*, Vol. 37, No. 5, pp. 519-522.
6. D. Birchon, D. E. Bromly and D. Healey, 1968, "Mechanism of Energy Dissipation in High-Damping-Capacity Manganese-Copper Alloys", *Material Science Journal*, Vol. 2, p. 41.
7. Y. K. Lee, J. H. Jun and C. S. Choi, 1997, "Damping Capacity in Fe-Mn Binary Alloys", *ISIJ Inter*, Vol. 37, p. 1023.
8. J. A. Venables, 1962, "The Martensite Transformation in Stainless Steel", *The Philosophical Magazine*, Vol. 7, No. 73, pp. 35-44.
9. A. J. Boger and W. G. Rurgers, 1964, "Partial dislocations on the {110} planes in the B.C.C. lattice and the transition of the F.C.C. into the B.C.C. lattice", *Acta Metall*, Vol. 12, p. 255.
10. G. S. Jeong and C. Y. Kang, 2016, "Effect of Deformation Induced Martensite on the Damping Capacity of Fe-26Mn-4Co-2Al Alloy", *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 26, No. 9, pp. 493-497. (DOI:10.3740/MRSK.2016.26.9.493)
11. J. H. Jun, Y. K. Lee and C. S. Choi, 1995, "Effect of cold rolling on damping capacity of Fe-23% Mn alloy", *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, Vol. 33, p. 1600.