

Fe-26Mn-2Al 합금의 진동 감쇠능에 미치는 결정립 크기의 영향

The Effect of grain size on the damping capacity of Fe-26Mn-2Al alloy

강창룡 · 엄정호 · 김효종 · 성장현

C. Y. Kang, J. H. Eom, H. J. Kim and J. H. Sung

Key Words : Deformation Induced Martensite(가공유기 마르텐사이트), Damping Capacity(감쇠능), Stacking Faults(적층결합), Grain Size(결정립크기)

Abstract : The effect of grain size on the damping capacity of Fe 26Mn 2Al alloy studied in this paper has been investigated after changing the microstructure by cold rolling and changing grain size. Micro structures in Fe 26Mn 2Al at room temperature consist of a large quantity of austenite and a small quantity of ϵ and α' martensite. And ϵ and α' martensite was increased by increasing the degree of cold rolling. The content of deformation induced martensite was increased with increasing the degree of cold rolling.

Damping capacity was linearly increased with increasing ϵ martensite content, which suggests that stacking faults and ϵ martensite variant boundaries are the principle damping sources. With increasing the grain size in Fe 26Mn 2Al alloy, the damping capacity was increased due to increasing the volume fraction of ϵ martensite by decrement in stability of austenite phase. With decreasing the grain size, the content of deformation induced martensite was decreased and the damping capacity was decreased.

1. 서 론

소음과 진동을 제어 방지하기 위해서 종래에는 진동체의 질량 및 강성을 증가시키고, 공진주파수를 피하며, 진동체에 감쇠계수가 큰 댐퍼를 설치하여 진동에너지를 흡수시키는 등의 기계적인 방법을 이용하여 왔지만 이러한 방법들은 가공성, 용접성 등의 측면에서 공업적으로 이용하는 데는 많은 문제점을 가지고 있다^{1) 5)}.

따라서 최근에는 이와 같은 소극적인 방법보다는 금속재료 그 자체가 진동에너지를 직접 흡수하게 하는 적극적인 방법이 크게 각광을 받게 되었고^{6) 9)}, 또한 이 방법은 기계적인 방법에 비해 소음 및 진동의 방지 효과가 크고 피로 수명 등의 증가를 가져올 수 있는 장점이 있어 최근에 많은 관심의 대상이 되고 있고, 이에 따라 제진합금에 대한 연구^{6) 9)}가 활발히 수행되어 왔으며, 그 결과 많은 제진합금들이

개발되어 일부는 현재 공업적으로 사용 중에 있다.

본 연구는 이러한 측면을 고려하여 기존의 Fe-Mn계 제진합금에 필적할 만한 높은 감쇠능을 지니면서 강도가 높고 가공성이 뛰어나는 뿐만 아니라 내식성이 우수한 자동차 엔진 회전부품 등에 적용이 가능한 새로운 제진합금을 개발하는데 필요한 기초자료를 얻기 위해 Fe-26Mn-2Al의 화학조성을 갖는 합금을 설계 제작하였다. 제작된 이 합금의 결정립 크기를 다르게 한 다음 가공도를 달리하는 냉간압연을 실시하여 오스테나이트, α' 마르텐사이트 및 ϵ 마르텐사이트의 체적분율을 달리하고, 이러한 상들의 체적분율 변화에 따른 감쇠능의 변화를 정성 및 정량적으로 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시료

본 실험에 사용된 시료는 Fe-26%Mn의 화학조성을 기본으로 하고, 여기에서 2%의 Al을 첨가한 시료를 진공고주파 용해로에서 용해한 다음 잉곳으로 만들었다. 잉곳은 1200℃에서 약 10mm 두께의 판재로 압연 한 다음 산세 과정을 거친 후, 실온에서

접수일 : 2006년 11월 21일, 채택확정 : 2007년 2월 12일
강창룡(책임저자) : 부경대학교 금속시스템공학과
E-mail : metkcy@pknu.ac.kr, Tel : 051-620-1479
엄정호, 김효종 : 부경대학교 금속시스템공학과
성장현 : 동아대학교 신소재공학과

1.0, 1.2, 1.85mm 두께로 압연하였다. 이렇게 만든 시료는 진공열처리로를 사용하여 용체화 열처리를 실시한 다음, 결정립 크기가 감쇠능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1050°C에서 1시간, 10시간, 30시간 어닐링하여 결정립 크기를 다르게 만든 후, 압연율을 달리(약 0, 20, 45%)하여 최종 두께가 1.0mm가 되도록 실온에서 압연하였다.

Table.1에 본 실험에 사용된 시료의 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

Comp. Spec.	Mn	Al	Cu	P	Si	C	Fe
Specimen	26	2.16	0.08	0.003	0.009	0.002	Bal.

2.2 미세조직 및 결정립 크기 측정

용체화 처리한 시료 및 결정립 크기를 달리하는 열처리를 한 후, 냉간 가공한 시료의 미세조직은 10% nital로 부식한 후 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM : Hitachi S-2400)으로 관찰하였다. 그리고 감쇠능에 크게 영향을 미치는 것으로 알려진 ϵ 마르텐사이트 상의 보다 상세한 관찰은 냉간 가공이 끝난 시료를 약 80 μ m 두께의 박막(Thin Foil)으로 전해 연마하고, Perchloric Acid와 Acetic Acid를 1:9로 혼합한 용액으로 전압 25~30V, 전류 1~1.5A의 조건에서 Jet-Polishing 한 후 200kV의 가속전압의 투과전자현미경(TEM : JEOL JEM 2010)으로 각 상의 하부 조직을 관찰하였고, 패턴 분석을 통해 각 상을 확인하였다.

결정립 크기의 정확한 측정을 위하여 광학현미경 조직 사진을 상분석기(Image Analyzing Program : TDI-Plus)를 이용하여 3장의 조직 사진에서 측정된 결정립 크기의 평균치를 구하였다.

2.3 X선 회절 시험

결정립 크기, 압연을 변화에 따른 각 상($\gamma, \epsilon, \alpha'$)의 정량적인 측정을 위해 본 실험에서는 X선 회절 시험기(Rigaku D / Max II A)를 사용하여 Mo-K α_1 특성 X선을 이용하여 1°/min의 속도로 10~40°의 범위에서 회절 시험하였고, 이때 얻은 X선 회절 선도를 이용하여 α' 마르텐사이트, 오스테나이트 및 ϵ 마르텐사이트상의 체적분율을 측정하였다.

각상의 체적분율은 얻어진 X선 회절 선도 중 α' (110), γ (311), ϵ (10·0)면에 해당하는 회절선의 적분

강도 값으로부터 구하였다.¹⁰⁾

2.4 감쇠능 측정

진동 감쇠능 측정은 압연이 끝난 시료를 최종적으로 120mm×10mm×1.0mm (길이×폭×두께) 크기로 방전가공에 의해 진동감쇠능 측정용 시편을 제작하여 횡형 내부 마찰측정장치(Internal Friction Measurement Machine : 진공이화학, IFT-1500)를 이용하여 대수 감쇠율을 측정하는 방법에 의해서 측정하였다. 이 방법은 진동을 가하는 전극과 진동을 검출하는 전극위에 시료를 2개의 평행한 세선으로 전극에 접촉되지 않게 배열한 다음, 진동을 가하는 전극으로 강제 진동시킨 후 자유 감쇠시켜 최종 감쇠 할 때까지의 파수를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직 및 각 상의 체적분율

Photo. 1, 2 그리고 3은 Fe-26Mn-2Al의 화학조성을 갖는 시료를 용체화 처리 시간을 달리하여 결정립 크기를 달리 만든 후 이를 가공도를 달리하는 냉간압연을 실시한 시료의 미세조직 변화를 광학현미경으로 나타낸 것이다. 이 사진에서 알 수 있는 바와 같이 세 시료 모두 용체화 처리한 시료의 경우 거의 대부분이 오스테나이트 단일상인 것을 확인할 수가 있고, 가공도를 달리하여 냉간압연 한 시료는 모두 오스테나이트 조직과 마르텐사이트(α' 및 ϵ) 조직으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 또한 가공에 의해 오스테나이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 가공유기 변태되고 있음을 알 수 있고, 가공량이 증가할수록 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양이 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 1, 2, 3은 가공량의 변화에 따른 각상의 체적분율 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 결정립 크기가 다른 세 시료 모두 가공량이 증가함에 따라 오스테나이트의 체적분율은 감소하고 있는데 반하여 ϵ 마르텐사이트의 체적분율은 서서히 증가하고, α' 마르텐사이트의 체적분율은 초기에는 서서히 증가하다가 급격하게 증가하고 있다.

결정립 크기가 각 상의 체적분율에 미치는 영향을 보다 자세하게 알아보기 위해서 결정립 크기가 다른 세 시료에 대해 가공량에 따른 마르텐사이트의 체적분율과의 관계를 조사하여 Fig. 4에 나타내었다.



Photo. 1 Optical micrographs of Fe-26Mn-2Al alloy with 70µm grain size
(a) As solution treated, (b) After 19.1% cold rolling, (c) After 43% cold rolling

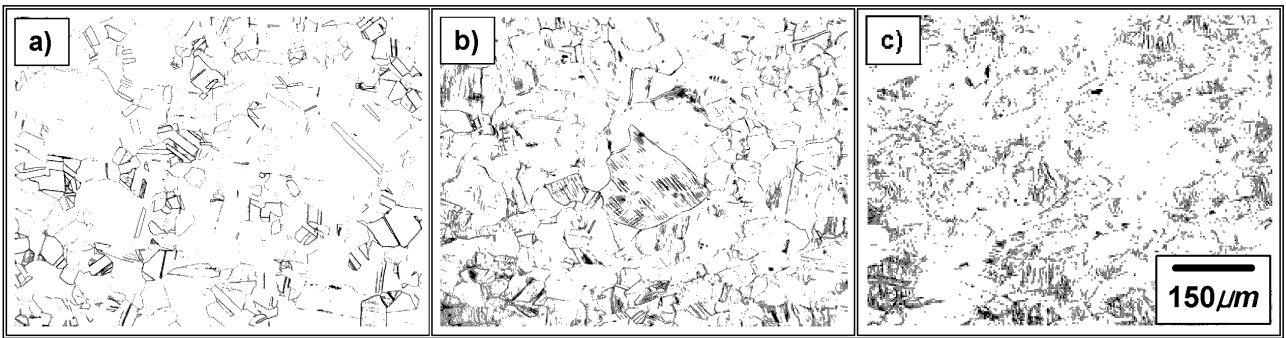


Photo. 2 Optical micrographs of Fe-26Mn-2Al alloy with 105.58µm grain size
(a) As solution treated, (b) After 26.3% cold rolling, (c) After 44.7% cold rolling

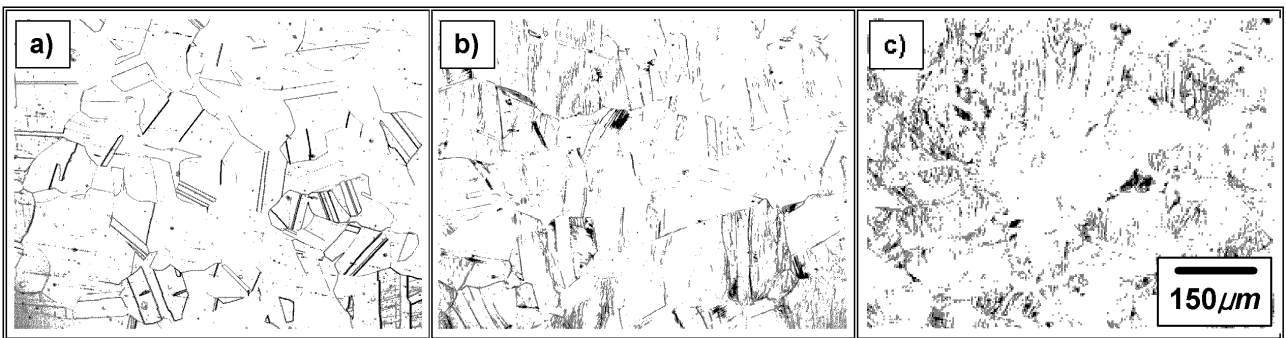


Photo. 3 Optical micrographs of Fe-26Mn-2Al alloy with 148.77µm grain size
(a) As solution treated, (b) After 22.9% cold rolling, (c) After 44.9% cold rolling

결정립 크기가 큰 시료의 경우가 작은 시료보다 가공유기 생성되는 마르텐사이트 체적분율의 증가 정도가 큰 것을 알 수 있는데 이는 오스테나이트 결정립이 크면 오스테나이트조직의 안정도가 낮아지고, 그 결과 오스테나이트 내에 더 많은 적층결함이 생성 될 수 있으며, 이 적층 결함은 마르텐사이트 변태의 핵생성 장소로써 작용하기 때문으로 생각되고, 이는 Jiang 등의 기존의 연구¹¹⁾ 결과와도 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

지금까지의 연구 결과에 의하면, 준안정 오스테나이트조직을 갖는 강을 변형하면 α' 및 ε 마르텐사이트가 가공유기 생성되며 이때 α' 마르텐사이트는 ε 마르텐사이트의 교차점 또는 ε 마르텐사이트의 밴드 그리고 전위 쌍극자군 근방의 응력 집중 장소 등에서 생성되어진다고 알려져 있다¹²⁾. 본 실험에서도 변형을 하지 않은 용체화처리된 상태 및 변형 초기 단계에서 생성된 ε 마르텐사이트의 교차점 또는 ε 마르텐사이트의 밴드 위에서 α' 마르텐사이트가 생

성되어 성장되어 가기 때문에 ϵ 마르텐사이트의 양은 서서히 증가하는데 반해 α' 마르텐사이트의 양은 빠르게 증가한다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 α' 및 ϵ 마르텐사이트의 변태 거동을 보다 명확하게 조사하기 위하여 투과전자 현미경으로 α' 및 ϵ 마르텐사이트의 생성을 조사하였고, 그 결과를 Photo. 4에 나타내었다. Photo. 4는 Fe-26Mn-2Al 조성을 갖는 시료를 44% 냉간 압연한 시료의 미세조직을 투과전자현미경으로 나타낸 것이다. α' 및 ϵ 마르텐사이트가 공존하고 있음을 알 수 있고 또한 α' 마르텐사이트가 ϵ 마르텐사이트의 교차점 및 ϵ 마르텐사이트의 밴드 위에서 생성되어 존재하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 시료에서도 α' 및 ϵ 마르텐사이트의 변태 거동은 준안정 오스테나이트계 스테인리스강에서와 동일한 변태거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

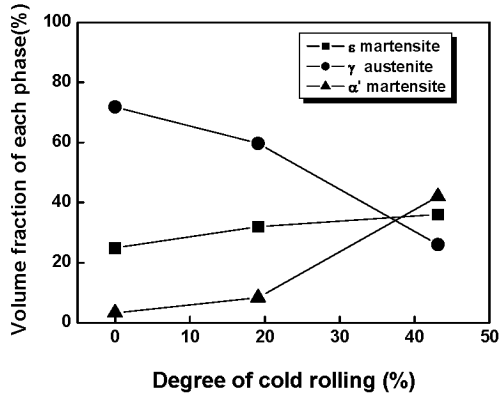


Fig. 1 Relationship between the volume fraction of each phase and degree of cold rolling in Fe-26Mn-2Al alloy with 70.1μm grain size

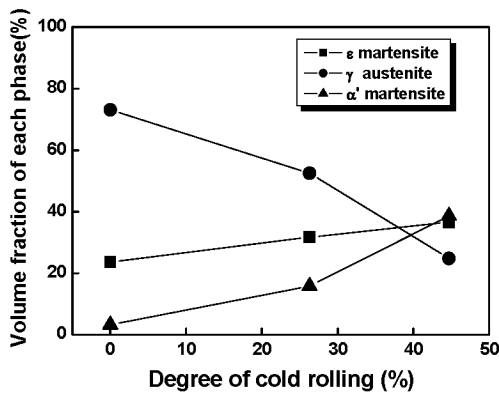


Fig. 2 Relationship between the volume fraction of each phase and degree of cold rolling in Fe-26Mn-2Al alloy with 105.6μm grain size

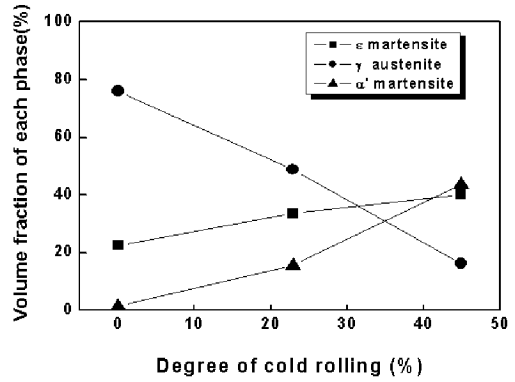


Fig. 3 Relationship between the volume fraction of each phase and degree of cold rolling in Fe-26Mn-2Al alloy with 148.8μm grain size

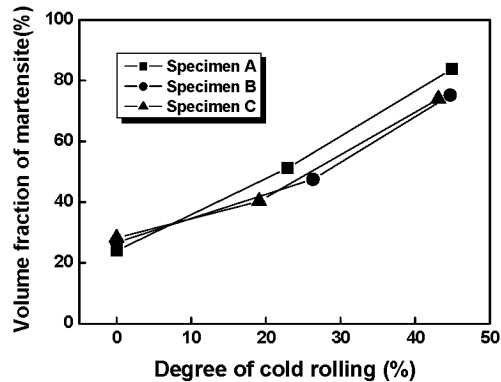


Fig. 4 Relationship between volume fraction of martensite and degree of cold rolling in Fe-26Mn-2Al alloys with different grain size (Specimen A : 148.8μm, Specimen B : 105.6μm, Specimen C : 70.1μm)

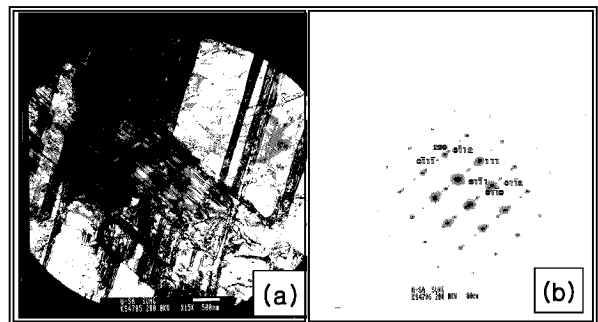


Photo. 4 TEM micrographs of α' martensite and ϵ martensite formed after 30% strain in Fe-26Mn-2Al alloy (a) bright field image, (b) SADP of (a) and index

3.2 감쇠능에 미치는 미세조직의 영향

지금까지 보고 된 연구 결과에 의하면 가공유기 마르텐사이트 변태거동을 갖는 Fe-Mn계 합금에서 감쇠능은 주로 ϵ 마르텐사이트 상 중의 적층결함의 수축 및 팽창, ϵ 마르텐사이트 상 중의 확장전위의 히스테리시스 및 ϵ/γ 계면에서 소성유동 등에 좌우된다고 알려져 있다. 따라서 감쇠능은 ϵ 마르텐사이트와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다¹³⁾. 본 연구에서도 이러한 점을 조사하기 위하여 가공량의 변화에 따른 내부 마찰계수를 조사하였고, 또한 결정립 크기가 내부 마찰계수에 미치는 영향을 조사하여, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5는 Fe-26Mn-2Al 합금의 결정립 크기가 다른 세 시료에 대해 가공량의 변화에 따른 내부마찰계수의 변화를 측정하여 나타낸 것이다. 가공량이 증가할수록 내부마찰계수가 서서히 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, 이러한 결과를 Fig. 1, 2, 3의 가공량의 변화에 따른 각상의 변화를 조사하여 나타낸 결과와 비교하여 볼 때 ϵ 마르텐사이트의 곡선과 내부마찰계수의 곡선이 유사한 형태를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 내부 마찰계수와 ϵ 마르텐사이트와는 서로 밀접한 관계가 있음을 알 수 있고, 이러한 관계를 보다 정량적으로 알아보기 위하여 ϵ 마르텐사이트 체적분율 변화에 따른 내부 마찰계수의 변화를 조사하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 시료 모두 ϵ 마르텐사이트 량의 증가와 더불어 직선적인 비례관계로 내부 마찰계수 값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 Fe-26Mn-2Al 합금의 감쇠능은 ϵ 마르텐사이트의 체적분율에 강하게 지배되고 있음을 알 수 있다¹²⁾.

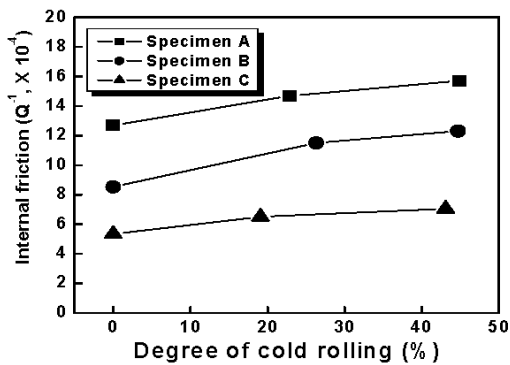


Fig. 5 Relationship between internal friction and degree of cold rolling in Fe-26Mn-2Al alloys with different grain size (Specimen A : 148.8 μ m, Specimen B : 105.6 μ m, Specimen C : 70.1 μ m)

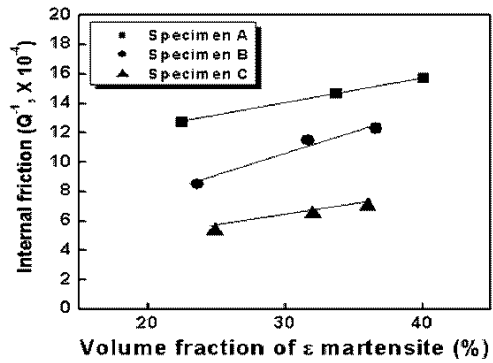


Fig. 6 Relationship between internal friction and volume fraction of ϵ martensite in Fe-26Mn-2Al alloys with different grain size (Specimen A : 148.8 μ m, Specimen B : 105.6 μ m, Specimen C : 70.1 μ m)

3.3 감쇠능에 미치는 결정립 크기의 영향

일반적으로 낮은 적층결함 에너지를 가지는 Fe-Mn계 합금에 있어서, 오스테나이트 기지 내의 완전 전위는 적층결함 에너지를 형성하면서 쉽게 2개의 부분전위로 분리될 수 있고 이 4 혹은 5층의 적층결함 에너지는 ϵ 마르텐사이트의 핵생성 장소로 작용한다고 판단된다. 그러므로 결정립의 크기가 클수록 ϵ 마르텐사이트의 핵생성의 가능성이 더 높아지게 된다고 알려져 있다¹⁴⁾.

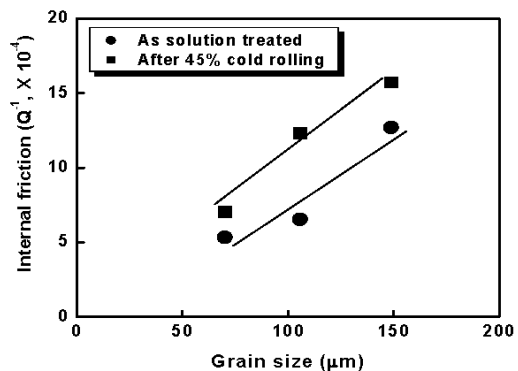


Fig. 7 Effect of grain size on the internal friction of Fe-26Mn-2Al alloy as solution treated and after cold rolling

Fig. 7은 감쇠능에 미치는 결정립 크기의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 용체화처리한 시료와 약 45%의 냉간 압연을 실시한 시료 둘 다 결정립 크기가 커지면 오스테나이트의 안정도가 낮아져 더 많은 마르텐사이트가 생성되는데 기인되어 결정립 크기가 커질수록 감쇠능은 높아지고, 또한 냉간 압연을 한 시료가 하지 않은 시료보다도 더 큰 내부마찰

계수를 가지는 것을 확인할 수 있는데 이는 압연에 의해 내부마찰계수에 크게 영향을 미치는 ϵ 마르텐 사이트의 양이 많아지기 때문이라고 사료 된다.

4. 결 론

Fe-26Mn-2Al 합금의 감쇠능에 미치는 결정립 크기의 영향을 조사하기 위해, 결정립 크기를 달리 하는 용체화처리 후 가공량을 달리하는 압연을 실시하여 미세조직을 변화시켜 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다량의 오스테나이트와 소량의 ϵ 및 α' 마르텐 사이트로 이루어진 Fe-26Mn-2Al 합금의 상온조직은 냉간 가공량이 증가할수록 ϵ 및 α' 마르텐 사이트의 양이 증가하였다.
- 2) 결정립크기에 관계없이 가공량이 증가함에 따라 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양이 증가하였다.
- 3) 감쇠능을 나타내는 내부마찰계수는 결정립크기에 관계없이 모두 ϵ 마르텐사이트의 영향을 강하게 받는 것으로 판단된다.
- 4) 결정립이 미세할수록 가공유기 생성되는 ϵ 마르텐사이트의 양이 적어지고 또한 감쇠능도 감소하였다.

참고 문헌

1. 西山勝廣, 2000, "制振合金の開発の状況と展望", 金屬, Vol. 41, No6, pp 43~46.
2. K. Miyahara et al., 2004, "Effect of Epsilon Martensite on the Damping of High Strength Fe - Cr - Mn alloys", Materials Science and Engineering A, Vol. 370, pp. 519~523.
3. K. Sugimoto, 1974, "Recent Advances in High Damping Alloys", Tetsu to Hagane, Vol 60, No 14, pp 2203~2206.
4. O. Matsumura, K. Ohtsuki, K. Dobashi and T. Furukawa, 1995, "Damping Behavior of Pre-Strained High Mn Steels", Tetsu to Hagane, Vol. 81, No. 6, pp. 685~690.
5. M. Hakaru, S. Showhachi and H. Masakatsu, 1978, "Damping Capacity of Gentalloy in the Fe-Co Alloys", Transactions of the Japan Institute of Metals, Vol. 19 No. 6, pp. 312~316.

6. D. W. James, 1969, "High Damping Metals for Engineering Applications", Materials Science and Engineering, Vol. 4 No. 1, pp. 1~8.
7. I. Hiroshi, T. Shin, A. Humio and T. Manabu, 1985, "Effect of Microstructure on Damping Capacity and Young's Modulus of High Strength Steel HT80", Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 26 No. 6, pp. 225~230.
8. K. Matsui et al., 1976, "Studies on the Damping Capacity of Flaky Graphite Cast Irons", Journal of the Japan Institute of Metals, Vol. 40, No. 10, pp. 1062~1068.
9. L. Wang and T. Ge, 1988, "Nonlinear Internal Friction in Mn-Cu Martensite", Physica status solidi. A, Applied research, Vol. 105, No. 2, pp. 447~453.
10. Y. K. Lee, B. S. Lim, B. I. Cho and C. S. Choi, 1997, "Effect of ϵ Martensite Content on Damping Capacity of Co-32%Ni Alloy", Scripta Materialia, Vol. 37 No. 10, pp. 1611~1615.
11. B. H. Jiang, L. Sun, R. Li and T. Y. Hsu, 1995, "Influence of Austenite Grain Size on γ - ϵ Martensitic Transformation Temperature in Fe-Mn-Si-Cr Alloys", Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 33, No. 1, pp.63~68.
12. J. A. Venables, 1962, "The Martensite Transformation in Stainless Steel", Phil. Mag., No. 7, pp. 35~44.
13. Y. K. Lee, J. H. Jun and C. S. Choi, 1997, "Damping Capacity in Fe-Mn Binary Alloys", ISIJ International, Vol. 37, No. 10, pp. 1023~1026.
14. J. H. Jun and J. S. Choi, 1998, "Variation of Stacking Fault Energy with Austenite Grain Size and Its Effect on the MS Temperature of γ - ϵ Martensitic Transformation in Fe-Mn Alloy", Material Science & Engineering A, Vol. 257, No. 2, pp. 353~356.