Fe-Al-Mn 합금의 진동감쇠능 및 인장성질에 미치는 미세조직의 영향

Effect of Microstructure on the Damping Capacity and Tensile Properties of Fe-Al-Mn Alloys

손동욱 · 김재환 · 이종문 · 김익수 · 김한청 · 강창룡
D.U.Son · J.H.Kim · J.M.Lee · I.S.Kim · H.C.Kim · C.Y.Kang

Key words : Damping capacity(감쇠능), Deformation-induced martensite(가공유기마르텐사이트), ε martensite(입실론 마르텐사이트), Internal friction(내부마찰), Noise(소음), Vibration(진동), Austenitic stainless steel(오스테나이트계 스테인리스강)

Abstract : The damping capacity and strength of Fe-2Al-26Mn alloys have been studied for the development of new materials with high strength and damping capacity. Particularly, the effect of α' and ε martensite phase, which constitutes the microstructure of cold rolled Fe-Al-Mn alloys, has been investigated in terms of the strength and damping capacity of the alloys. The damping capacity rises with increasing the degree of cold rolling and reveals the maximum value at 25% reduction. The damping capacity is strongly affected by the volume fraction of ε martensite, while the other phases, such as α' martensite and austenite phase, actually exhibit little effect on damping capacity. Considering that tensile strength increases and elongation decreases with increasing the volume fraction of α' martensite, it is proved that tensile strength is mainly affected by the amount of α' martensite.

1. 서 론

소음과 진동은 심리적 불안감 및 난청 등과 같은 질병을 유발시킬 뿐만 아니라 정밀기기의 정밀도 저하, 부품의 조기 피로 파괴 등 많은 문제를 초래하기 때문에 소음과 진동에 관한 사회적 관심이 고조되어 가면서 이에 대한 법적 규제도 점차 강화되어 가고 있다. 특히 최근에 와서는 노동환경의 개선뿐만 아니라 상품의 고부가가치화 등을 위해서도 정밀기기, 수송기기, 가전기기류 등의 저 소음, 저진동화가 불가결한 과제로 대두되고 있다. 따라서, 관련분야에서는 소음과 진동을 방지하기 위한 많은 노력과 연구를 수행하고 있다[1-14].

현재 이용되고 있는 소음과 진동을 방지하기 위한 방법은 여러 가지가 있지만, 그 중에서도 높은 내부마찰을 갖는 금속재료 그 자체가 소음과 진동 에너지를 직접 흡수하게 하는 적극적인 방식인 material damping법으로 전환되면서 제진 합금의 개발에 관한 연구[3-13]가 활발히 이루어지고 있다.

금속 재료 뿐만 아니라 실제 대부분의 재료들은 재료 내부에서 진동에너지를 소모시키는 특성을 지니고 있는데 이를 내부마찰(internal friction)이라 하며 내부마찰의 크기는 재료에 따라 진동에너지를 흡수하는 기구에 따라서 달라진다.

현재까지 개발된 제진 합금은 Mn-Cu, Cu-Al-Ni, Fe-Mn, Fe-Cr-Mn 등 많은 합금이 있으며, 이러한 합금 중 상온에서 오스테나이트 조직을 갖는

접수일 : 2004년 6월 일
강창룡(책임저자) : 부경대학교 금속시스템공학과
E-mail : metkcy@pknu.ac.kr Tel : 051)620-1479
이종문, 김재환 : 부경대학교 금속시스템공학과
김익수 : 일본 신슈 대학교
김한청 : 부산소재(주)
손동욱 : 대구 기능대학

Fe-Mn, Fe-Cr-Mn강은 적층결함에너지가 매우 낮기 때문에 오스테나이트 조직의 일부가 퀜칭 및 가공에 의해 hcp 구조인 ε 마르텐사이트 조직으로 변태가 용이하고, 이러한 조직변화는 그 재료의 강도[14] 및 감쇠능에 영향을 미친다고 보고 되고 있지만[3,6,11] 아직 Fe-Al-Mn 합금을 대상으로 하여 정성 및 정량적으로 연구한 논문은 없다.

따라서 본 연구는 새로운 높은 강도와 감쇠능을 갖는 합금 개발에 관한 자료를 얻기 위하여 상온에서 오스테나이트 조직을 갖는 Fe-Al-Mn 합금을 만든 다음 이 합금에서 냉간 압연에 의해 오스테나이트 조직의 일부를 마르텐사이트 조직으로 가공유기 변태 시킨 다음 가공유기 생성되는 α′ 및 ε 마르텐사이트 조직이 진동감쇠능 및 인장성질에 미치는 영향을 정량 조직학적으로 조사하였다.

2. 실 험 방 법

2.1 시료 및 열처리

본 실험에 사용된 시료는 전해철, Fe-Mn 등을 사용하여 고주파 진공 용해로에서 용해한 다음 균질화처리 후 열간압연을 실시하였고, 이를 냉간압연에 의해 필요한 두께로 압연하였다. 냉간압연이 끝난 시료를 다시 1050℃에서 1시간 유지 후 수냉하는 방법으로 용체화처리 후 압연율을 달리하는 냉간압연을 실시하여 1㎜두께의 판재로 만든 다음 각종시료로 사용하였으며, 이때 사용된 시료의 최종 화학 조성을 화학조성을 Table.1에 나타내었다.

2.2 미세조직 관찰

용체화처리한 시료와 용체화처리 후 압연율을 달리하여 냉간 압연한 시료의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하였고, 압연에 의해 가공유기 생성되는 ε 마르텐사이트의 보다 상세한 관찰을 투과전자현미경으로 관찰 하였다.

2.3 감쇠능 측정

진동감쇠능 측정은 가공량을 달리하여 압연한 시료를 1×10×120㎜크기로 만든 다음 횡 형 내부마찰 측정 장치(진공이화, IFT-1500)를 이용하여 대수 감쇠율을 측정하는 방법으로 하였다. 이 실험은 진동을 가하는 전극과 진동을 검출하는 전극 위에 시료를 2개의 평행한 세선으로 전극에 접촉되지 않게 배열한 다음 진동을 가하는 전극으로 강제 진동시킨 후 자유 감쇠시켜 감쇠할 때까지의 파수를 측정하여 대수감쇠율($\delta=1/n \ln A_0/A_n$, n: 파수, A_0:최초파의 진폭, A_n: n번째 파의 진폭)을 구하는 방법으로 측정하였다.

2.4 X선 회절 시험

시료의 가공 양 변화에 따른 미세조직의 체적분율 변화를 측정하기 위한 X-선 회절시험(Rigaku D/max-ⅡA)은, Mo $K\alpha_1$ 특성 X선을 이용하여 2°/mim 의 속도로 회절시험 하였고, 이때 얻은 회절선도로부터 얻은 적분강도 값을 이용하여 각상의 체적분율 변화를 구하였다.

2.5 인장시험

가공량을 달리하는 냉간압연 한 시료의 인장성질 변화를 조사하기 위한 인장시험(Shimadzu DCS-25T)은 cross head speed를 1㎜/min의 속도로 정한 다음 상온에서 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직의 정성 및 정량 분석

Photo.1은 Fe-2%Al-26%Mn의 화학조성을 갖는 용체화처리한 시료와 용체화처리 후 냉간 압연율을 달리하여 냉간 압연한 시료의 미세조직을 광학현미경에 의해 나타낸 것이다. 용체화처리한 시료인 사진 a)에서는 주로 오스테나이트의 조직에 소량의 마르텐사이트가 존재하고 있는데 반하여, 25% 및 50%

Table. 1 Chemical compositionsof the material used (wt%)

material	C	Si	N	P	S	Al	Mn	Cr	Fe
Fe-Al-Mn	0.02	0.03	0.02	0.033	0.022	2.2	26.1	0.12	Bal.

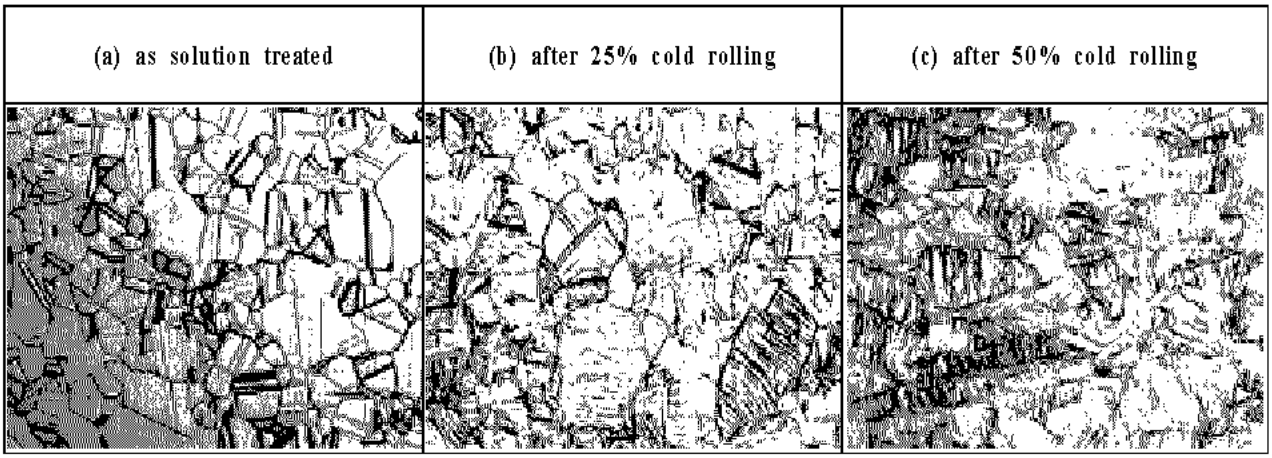

Photo. 1 Optical micrographs showing the effect of cold rolling of Fe-2Al-26Mn alloy

냉간 압연한 시료인 사진 b)와 c)에서는 오스테나이트 조직의 일부가 압연에 의해 마르텐사이트(α′ 및 ε) 조직으로 가공유기 변태되고[13] 있음을 알 수 있다. 또한 가공량이 증가함에 따라 가공유기변태되는 마르텐사이트의 양이 많아지고 있음을 알 수 있다.

상온에서 준안정 오스테나이트 조직을 갖는 강은 가공에 의해 오스테나이트 조직의 일부가 α′ 및 ε

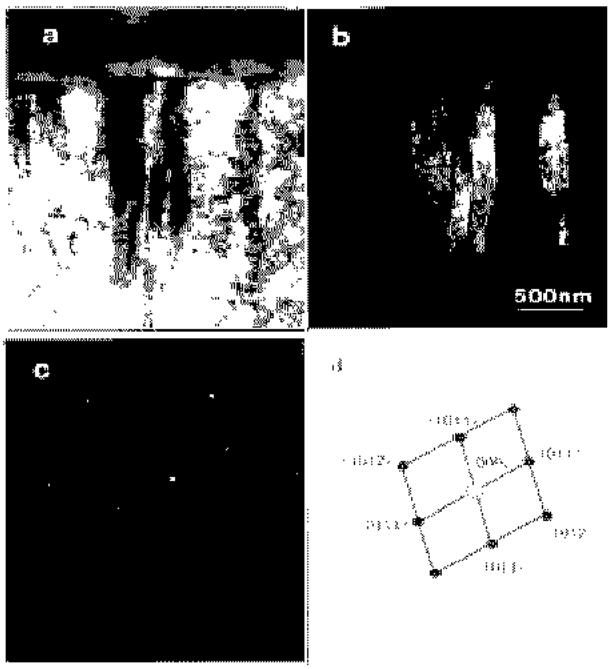

Photo. 2 Image of the Fe-2Al-26Mn after 25% cold rolling
(a)Bright field image
(b)Dark field image of ε martensite
(from the diffraction spot of $\overline{(0111)}\varepsilon$
(c)Diffraction pattern

마르텐사이트 조직으로 변태되며[11,13], 이때 생성되는 ε 마르텐사이트 조직은 진동 감쇠능에 큰 영향을 미친다고 알려져 있다[5,6,13]. 본 실험에서도 가공에 의해 ε 마르텐사이트 상의 생성여부를 보다 상세하게 알아보기 위하여 용체화처리한 시료를 상온에서 25% 압연한 후 투과전자현미경으로 조사하여 Photo. 2에 나타내었다. 명시야 상으로 나타낸 사진 a)와 암시야 상으로 나타낸 사진 b)에서 밴드 형상으로 생성되어 있는 조직을 c)의 회절패턴을 분석하여 나타낸 d)의 결과로부터 ε 마르텐사이트 조직이 밴드형상으로 생성되어 존재하고 있음을 알 수 있다.

3.2 감쇠능에 미치는 미세조직의 영향

Fig. 1은 시료를 용체화처리 후 가공량을 달리하는 냉간압연 한 다음 가공량의 변화에 따른 각상의 체적분율 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 가공량이 증가 할수록 오스테나이트의 양은 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이에 반하여 가공유기 생성되는 ε 마르텐사이트의 양은 증가하다 특정 가공량에서 최대 값을 나타낸 다음 약간 감소하고 있는데 반하여 α′ 마르텐사이트의 양은 가공량이 적은 영역에서는 서서히 증가하다 가공량이 약 10%를 넘어서게 되면 빠른 속도로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 가공량이 증가함에 따라 오스테나이트의 양이 감소하고, α′ 및 ε 마르텐사이트의 양이 증가하는 이유는 가공에 의해 오스테나이트 조직의 일부가 α′ 및 ε 마르텐사이트 조직으로 변태되기 때문이다. 또한 가공량의 증가와 함께 ε 마르텐사이

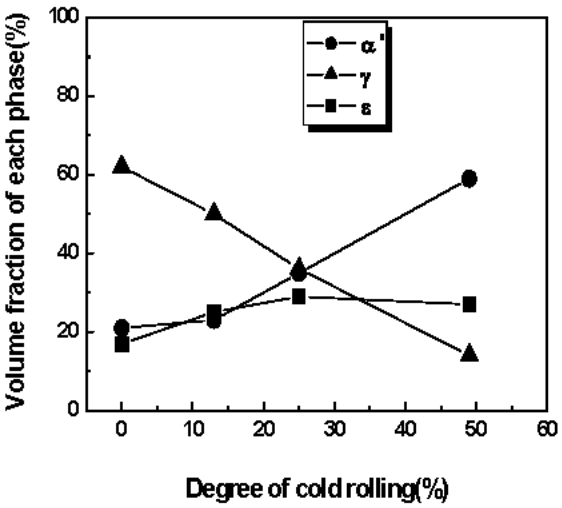

Fig. 1 Relationship between cold rolling and volume fraction of each phase in Fe-2Al-26Mn damping alloy

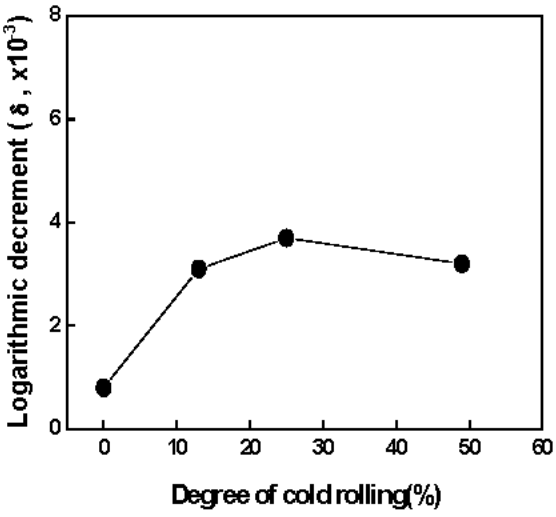

Fig. 2 Logarithmic decrement as function of degree of cold rolling in Fe-2Al-26Mn damping alloy at room temperature

트의 양은 증가하다 특정 가공량에서 최대값을 나타낸 후 감소하고 있는데 반하여, α′ 마르텐사이트는 가공도가 적은 영역에서는 서서히 증가하다 가공량이 많아지면 빠른 속도로 증가하는 이유는 상온에서 준안정 오스테나이트 조직을 갖는 강에서 가공유기 생성되는 α′ 마르텐사이트는 오스테나이트 조직 내 전위 집적부 및 잘 발달된 슬립밴드 등에서 생성된다는 학설과 ε 마르텐사이트 조직의 밴드 및 밴드 교차점 등에서 생성되어 성장한다는 두가지 학설이 있다[14]. 본 실험에서도 α′ 마르텐사이트 조직이 오스테나이트 조직 내 존재하고 있는 전위 및 잘 발달된 슬립밴드 등에서도 생성되지만 ε 마르텐사이트 조직의 밴드와 밴드의 교차점 등에서 생성되어 성장할 뿐만 아니라, 가공량이 많아지면 오스테나이트에서 ε 마르텐사이트로의 변태보다는 ε 마르텐사이트에서 α′ 마르텐사이트로의 변태가 지배적으로 일어나기 때문에 ε 마르텐사이트는 증가하다 감소하고, α′ 마르텐사이트는 가공량이 많아질수록 빠른 속도로 증가한다고 생각 된다.

Fig.2는 시료를 상온에서 가공 양을 달리하여 냉간압연을 한 다음 가공량의 변화에 따른 대수감쇠율의 변화를 조사하여 나타낸 것이다 대수 감쇠율은 가공량이 증가할수록 증가하다 특정 가공 양에서 최대값을 나타낸 다음 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, 이러한 결과는 가공량의 변화에 따른 ε 마르텐사이트 조직의 체적분율 변화와 비슷한 거동임을 알 수 있다. 따라서 이 결과로부터 진동감쇠능은 ε 마르텐사이트 조직에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 실험의 경우 25% 이하의 저가공도에서 가공량의 증가와 함께 대수 감쇠율이 증가하는 것은 주로 ε 마르텐사이트 내의 적층결함 밀도와 ε 마르텐사이트의 양이 증가하기 때문이고, 25%의 가공도 이상에서 대수감쇠율이 감소하는 이유는 ε 마르텐사이트의 양이 감소하여 ε 마르텐사이트내 적층결함수가 감소할 뿐만 아니라 ε 마르텐사이트내 전위가 발생하여 적층결함 등의 이동을 어렵게 하기 때문이라 생각된다[8].

Fig.3은 Fe-Al-Mn 합금에서 진동감쇠능에 미치는 미세조직의 영향을 알아보기 위하여 α′ 및 ε 마르텐사이트 조직의 체적분율변화에 따른 대수감쇠율의 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 대수감쇠율은 ε 마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 직선적으로 증가하고 있는데 반하여, α′ 마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 비례관계도 없이 증가하다다시 감소하고 있는 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 결과로부터 진동감쇠능은 ε 마르텐사이트 조직에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

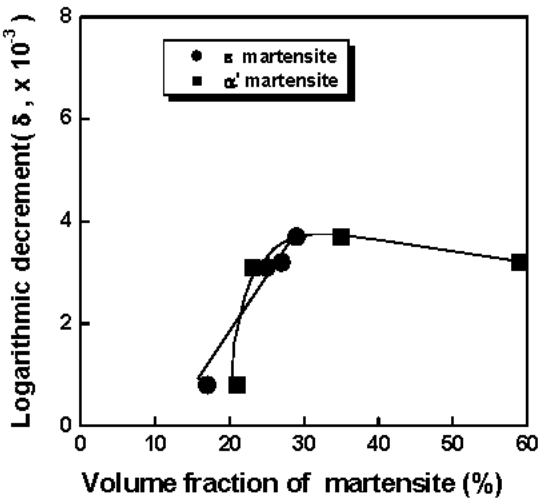

Fig. 3 Relationship between Logarithmic decrement and volume fraction of martensite obtained by cold rolling in Fe-2Al-26Mn damping alloy.

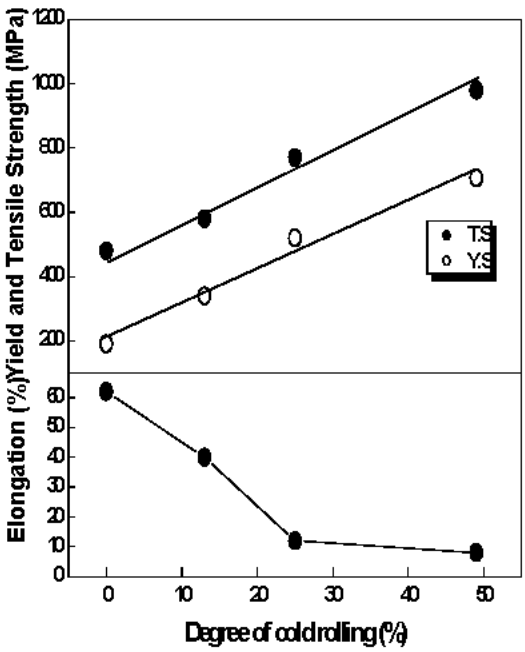

Fig .4 Effect of degree of rolling on the tensile properties obtained at room temperature in Fe-2Al-26Mn damping alloy

지금까지의 연구 결과에 의하면 오스테나이트 조직이 가공에 의해 마르텐사이트 조직으로 가공유기 변태되는 합금에서 감쇠기구는 오스테나이트상과 ε 마르텐사이트상의 계면이동, 오스테나이트상 내부의 적층결함 경계의 이동, ε 마르텐사이트 내부적층 결함 경계의 이동 및 ε 마르텐사이트 플레이트 내부의 형제정계면의 이동 등 4가지로 알려져 있다[4].본 합금에서도 감쇠는 위에서 언급한 4가지기구에 의해서 일어나며 특히 ε 마르텐사이트 조직에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

3,3 인장성질에 미치는 미세조직의 영향

Fig.4은 시료를 상온에서 가공도를 달리하는 냉간압연한 다음 인장시험 하였을 때 얻은 인장성질의 변화를 냉간 가공량에 대해 나타낸 것이다. 냉간가공에 의해 오스테나이트 조직이 강도가 높은 마르텐사이트로 가공유기 변태되는데 기인되어 가공량이 증가할수록 인장 및 항복강도는 직선적인 비례관계로 증가하는 반하여 연신율은 변형의 초기 단계에는 급속하게 감소하지만, 변형량이 약 25%이상을 넘어서게 되면 연신율이 감소하는 정도가 극히 적어 큰 변화가 없는 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 인장성질은 가공유기 변태되는 마르텐사이트 조직에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 인장성질에 미치는 미세조직의 영향을 조사하였다.

Fig.5는 Fe-2Al-26Mn 합금의 인장강도에 미치는 α′ 및 ε 마르텐사이트 조직의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 인장강도는 ε 마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 증가하다 감소하고 다시 증가하는 비례관계가 없는 불규칙한 거동을 나타내고 있는데 반하여, α′ 마르텐사이트의 체적분율이 증가함에 따라 직선적인 비례적인 관계로 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 인장강도는 α′ 마르텐사이트 조직에 비교적 강하게 지배되어 고 있음을 알 수 있고 이러한 결과는 다른 연구결과와 잘 일치되고 있다[13].

Fig.6은 Fe-2Al-26Mn 합금의 인장강도 미치는 α′ 및 ε 마르텐사이트 전체의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. α′ 및 ε 마르텐사이트 조직의 체적분율이증가함에 따라 인장강도가 직선적인 비례관계로 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 인장강도는 ε 및 α′ 마르텐사이트 조직의 합의 증가

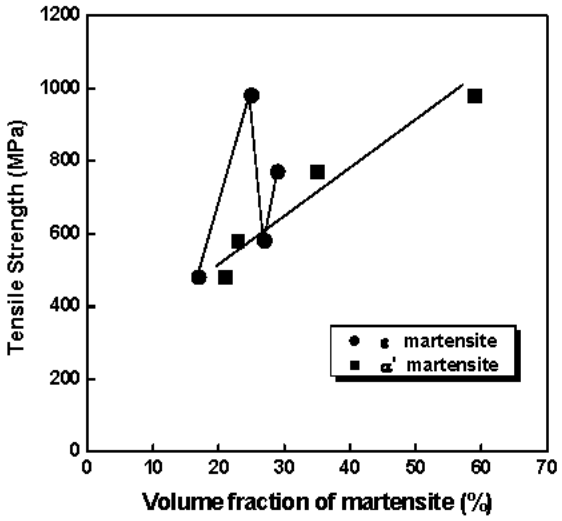

Fig .5 Effect of volume fraction of ε martensite obtained at room temperature on the tensile strength of Fe-2Al-26Mn damping alloy

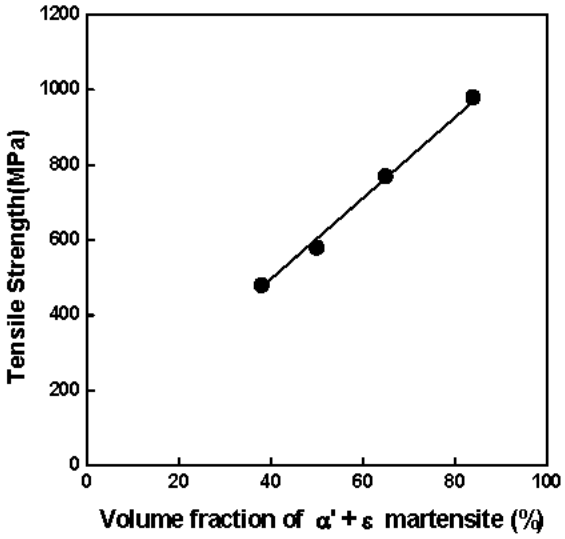

Fig. 6 Effect of volume fraction of α'+ε martensite obtained by cold rolling on the tensile strength in Fe-2Al-26Mn damping alloy

에 따라 비례적으로 증가하고 있지만, Fig.5의 결과와 관련시켜 분석하여 볼 때 α′마르텐사이트 조직에 영향을 받는데 기인되어 직선적인 비례적으로 증가 하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 연신율에 미치는 α′ 및 ε 마르텐사이트의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 연신율은 ε 마르텐사이트의 양이 증

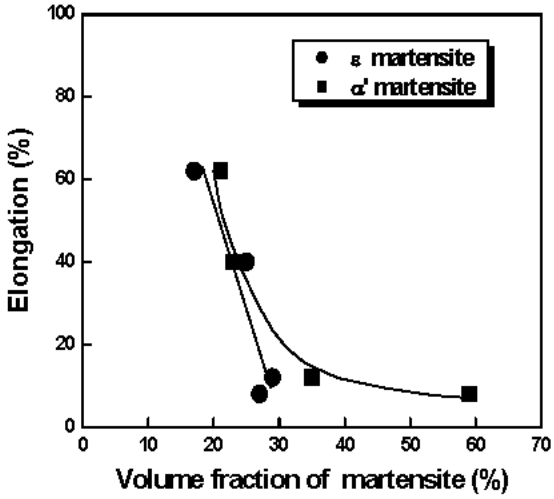

Fig.7 Effect of volume fraction of martensite on the elongation in Fe-2Al-26Mn alloy.

가함에 따라 직선적인 비례관계로 급격히 감소하고 있는데 반하여, α′마르텐사이트의 양이 증가함에 따라 약 35%까지는 급속히 감소하다가 그 이상이 되면 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이결과로 보아 연신율은 변형이 적은 영역에서는 주로 ε 마르텐사이트에 크게 영향을 받지만, 변형량이 많아지게 되면 α′마르텐사이트에도 지배되고 있음을 알 수 있다[14].

4. 결론

Fe-2Al-26Mn 합금을 가공 양을 달리 하는 냉간 압연을 실시하여 미세조직의 체적분율을 달리 한 다음 미세조직변화가 진동 감쇠능 및 인장강도에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1] Fe-2Al-26Mn 합금은 상온에서 오스테나이트 조직에 소량의 α′및 ε 마르텐사이트 조직으로 이루어져 있으며, 가공량이 증가할수록 α′마르텐사이트 량은 증가하고 있는데 반하여 ε 마르텐사이트의 량은 증가하다 특정 가공 량에서 최대 값을 나타낸 후 감소하였다.

2] 대수감쇠율은 ε 마르텐사이트 량이 증가함에 따라 증가하다 최대 값을 나타낸 후 ε 마르텐사이

트 량이 감소함에 따라 감소하였다. 따라서 감쇠능은 ε 마르텐사이트에 강하게 지배되고 있지만, α′ 마르텐사이트 및 오스테나이트의 조직에는 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다.

3] 두 시료 모두 가공량이 증가함에 따라 가공유기 생성된 마르텐사이트의 량이 증가하는데 기인되어 인장 및 항복강도는 증가하고 연신율은 감소하였다. 그러나 인장강도는 α′ 마르텐사이트에 강하게 지배되고 있지만, ε 마르텐사이트에는 그다지 영향을 받고 있지 않음을 알 수 있고, 연신율은 ε 마르텐사이트에 강하게 지배되었다.

후 기

본 연구는 2003년도 지원된 산학협동재단의 연구비에 의해 수행된 연구결과의 일부이며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. K. Sugimoto, 1974, "Recent advances in high damping alloys", *Tesu-to-hagane*, 60, pp. 2203.
2. K. Sugimoto, 1974, "Recent advance in high damping alloys", *Tetsu-to-Hagane*, 60, pp. 127.
3. J. H Jun and C. S. Choi, 1998, "Strain amplitude dependence of the damping capacity in Fe-17%Mn alloy", *Scripta Materialia*,, 38, pp. 543-549.
4. 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*, 273-275, pp. 538-542.
5. K. K. Jee, W. Y. Jang,, S. H. Baik, M. C. Shin and C. S. Choi, 1997, "Damping capacity in Fe-Mn based alloys", *Scripta Materialia*, 37, pp. 943-948.
6. Y. K. Lee, J. H. Jun and C. S. Choi, 1997, "Damping capacity in Fe-Mn binary alloys", *ISIJ International*, 37, pp. 1023.
7. H. Okada, Sahashi, N. Igata, K. Miyahara, 2003, "Effect of ε-martensite and nitrogen on the damping property of high strength Fe-Cr-Mn alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 335, pp. 77.
8. Y. K. Lee, J. H. Jun and C. S. Choi, 1996, "Effect of ε-martensite content on the damping capacity of Fe-17%Mn alloys", *Scripta Materialia*, 35, pp. 825-830.
9. C. Azcoitia and A. Karimi, 2000 "Magneto mechanical damping in Fe-Cr alloys and effect of Al and Mo addition", *Journal of Alloy and Compounds*, 310, pp. 160-164.
10. K. Tsuzaki, M. ,Ikegami, Y. Tomota and T. Maki, 1990, "Effect of transformation cycling on the ε-martensitic transformation in Fe-Mn alloys", *ISIJ International*, 30, pp. 666-677.
11. Y. Tomota, M. Strum and J. W. Morris, 1986, "Microstructural dependence of Fe-high Mn tensile behavior", *Metallurgical Transaction A*. 17A, pp. 537.
12. J. A. Venables, 1962, "The martensite transformation in stainless steel", *Phill, Mag.*, 7, pp. 35.
13. D. W. Shoon , C. Y. Kang, K. Miyahara and J. H. Sung, 2004, "Effect of Microstructure on the damping capacity and strength in Fe-Al-Mn alloys", SAE International, 1, pp. 745.
14. 강창룡, 성장현, 1991, "304L 스테인리스의 인장성질에 대한 변형속도, 변형온도 및 결정립도의 영향" 한국열처리공학회지, 3, pp. 20.