

~~~~~  
**論 文**  
~~~~~

Fe-Mn 이원계에서 비열탄성형 BCC 마르텐사이트와 HCP 마르텐사이트의 진동감쇠능

최종술, 김준동, 문인기*, 백승한**

연세대학교 공과대학 금속공학과

* 한국과학기술원 금속연구부

** (주)우진 계측기술연구소

Damping Capacities of Nonthermoelastic BCC and HCP Martensites of Fe-Mn Binary System

C.S. Choi, J.D. Kim, I.G. Moon and S.H. Baik

Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749

* Division of Metals, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791

* Research Institute of Measuring Technology, Woojin OSK Crap., Korea

ABSTRACT

The damping capacities of the nonthermoelastic bcc type lath martensite and of the nonthermoelastic hcp type thin plate martensite in Fe-Mn alloys were studied. Fe-17%Mn alloy showing the hcp type thin plate martensite was superior to Fe-4%Mn alloy having the bcc type lath martensite in damping capacity. The damping capacity of the Fe-17%Mn alloy became greater with increasing the hcp martensite volume fraction. The damping mechanism of the Fe-4%Mn alloy was well explained by the dislocation model. However, the damping mechanism of the Fe-17%Mn alloy was explained on the basis of austenite/martensite interface moving model. The two alloys showed almost same levels of tensile strength. However, the elongation was greater in the Fe-17%Mn alloy than in the Fe-4%Mn alloy, showing lower yield strength in the former than in the latter. This result was considered to be attributed to formation of stress-induced martensite during tension test.

1. 서 론

방진합금은 내부마찰이 커서 기계나 구조체의 진동과 소음을 줄이기 위해 사용 가능한 금속재료를 총칭하는 말이다. 원래, 금속재료는 고무나 플라스틱 재료등에 비해서 강도는 높지만 진동과 소음에 대해 매우 약하다. 이것은 금속재료의 내부마찰이 고무나 플라스틱에 비해서 일반적으로 작다는 것을 의미한다. 현재 음향공

학이나 기계공학 분야에서 방음 또는 방진대책으로 금속재료는 주로 강도에만 주목하고 진동과 소음의 감쇠 효과는 주로 고무나 플라스틱 재료에 의존하는 것을 설계의 기본지침으로 하고 있다.

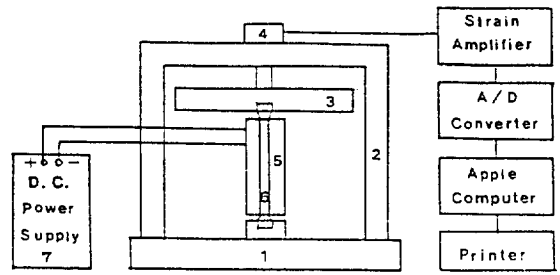
최근, 소음과 진동문제가 심각해짐에 따라 그 대책도 여러가지 방법으로 강구되고 있다. 이들 방법의 최종 목표는 모두 소음과 진동을 일으키는 발생원을 찾아서 그것의 진동을 가능한한 감소시키는데 있다. 따라서,

고무나 플라스틱 재료를 병용하여서는 불충분한 경우가 많기 때문에, 강도가 높은 금속재료에 높은 감쇠능을 부여한 새로운 금속재료를 개발할 필요성이 생기게 되었다. 그간 여러 연구자들¹⁻⁶⁾에 의해 많은 방진합금이 개발되었으며, 이러한 방진합금들은 진동감쇠기에 따라 크게 1)복합형 2)강자성형 3)전위형 4)쌍정형으로 대별되고 있다.⁷⁾ 그러나 쌍정형은 열탄성 마르텐사이트의 내부쌍정에 관한 연구가 대부분이고, 비열탄성 마르텐사이트에 관한 연구는 잘 알려져 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 비열탄성 마르텐사이트 합금도 높은 진동감쇠능을 나타내는지 알아보기 위하여, Fe-Mn 합금을 선정하여 'α' 마르텐사이트 조직과 ε 마르텐사이트 조직을 만들어서 각 조직에 대해 진동감쇠능과 기계적 성질을 조사하여 상호 비교하였다. 또한, 공업적으로 널리 사용되고 있는 저탄소강에 대해서도 진동감쇠능과 기계적 성질을 조사하여 Fe-Mn 합금과 비교 검토하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 합금은, 99.9% 순도의 전해철과 전해망간을 고주파 유도로 소정량 장입하여 용해한 다음, 금형에 주조하여 약 5Kg의 잉곳트를 제작하였다. 이것을 보호성 분위기중에서 1200°C × 24시간 균질화처리하여 이 온도에서 열간압연하여 약 직경 15mm의 환봉으로 만들었다. 본 연구에 사용된 합금의 화학 조성, 결정입 크기 및 변태온도는 Table 1에 나타내었다. 변태온도 측정은 DTA를 사용하여 측정하였으며, 진동감쇠능시험은 Fig.1과 같은 형상과 치수를 가지며 980°C에서 1시간 용체화 처리하여 공냉, 수냉, 염빙수 냉각하였다. 진동감쇠능 측정장치는 본 연구실에서 제작한 Fig.1의 Föpple-Pertz 형 비틀림 진자를 사용하



1. Base 2. Frame 3. Inertia bar 4. Potential meter
5. Solenoid/Heater 6. Specimen 7. Power supply/Controller

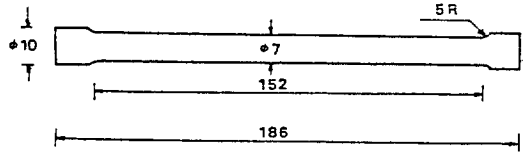


Fig. 1. Schematic torsional pendulum apparatus and dimensions of its specimen.

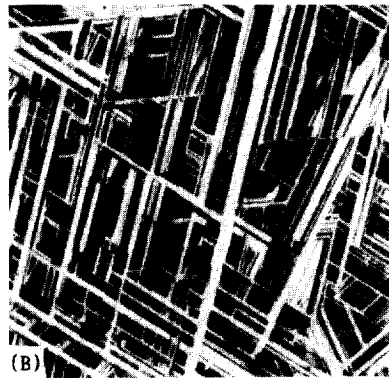
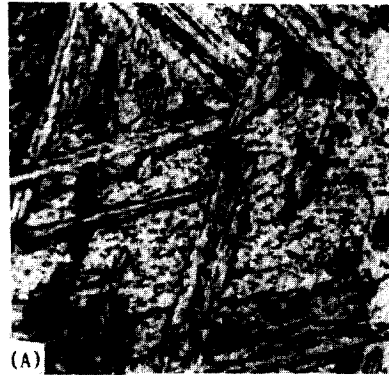


Photo 1. Microstructures of the water-quenched alloys (A) Fe-4%Mn (B) Fe-17%Mn

Table 1. Chemical Composition, Grain Size and Transformation Temperatures of the Alloys Used.

Alloy	Fe (wt%)	Mn (wt%)	Grain Size (μm)	M _s (°C)	A _s (°C)	A _r (°C)
A	95.65	4.13	95	461	551	746
B	82.89	17.01	100	142	206	245

였으며, 시편을 비튼 후 자유진동시킬 때 시간의 경과에 따라 진폭이 감소해가는 것을 potentiometer로 감지하여 8bit A/D converter를 통해 Apple computer로 진동감쇠능 값을 측정하였다. 또한 외부 자장 세기에 따른 진동감쇠능을 측정하기 위하여 D.C. 정류기와 최대 전류가 10A인 solenoid를 사용하였으며, programming digital temperature controller를 사용하였다. 인장시편은 ASTM-E8 type의 소형 판상시편(두께 1.1mm, 표점거리 25mm)을 사용하였으며, Instron으로 인장시험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 냉각조건에 따른 미세조직 관찰 및 X-선 회절 시험

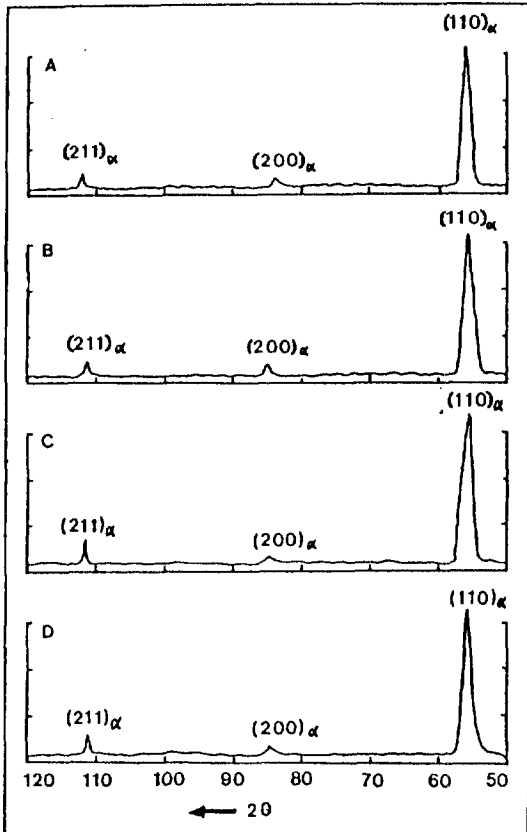


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of Fe-4%Mn alloy subjected to various cooling. (A) air cooled, (B) water quenched, (C) ice-brine quenched, (D) liquid nitrogen treated

두 합금을 용체화처리를 거쳐 각각 공냉, 수냉 및 염빙수냉각을 행하여 광학현미경으로 조직을 관찰한 결과 냉각방법에 따라 조직의 변화가 거의 없었다. Photo.1은 수냉한 시편의 광학현미경 조직사진으로써, Fe-4%Mn 합금은 전형적인 래스(lath) 마르텐사이트 조직을 나타내며, Fe-17%Mn 합금은 전형적인 박판상(thin plate) 마르텐사이트 조직을 나타냈다. Fig.2와 Fig.3에 냉각조건에 따른 Fe-Mn 합금의 X-선 회절도형을 나타내었다. 이로부터, Fe-4%Mn 합금은 100% b.c.c. 구조임을 알 수 있었으며, Fe-17%Mn 합금의 경우에는 f.c.c.구조인 오스테나이트와 h.c.p. 구조인 ε-마르텐사이트로 이루어져 있고 염빙수 냉각 및 액체질소에 심냉처리한 시편에서 ε-마르텐사이트량이 약간 증가되었음을 알 수 있다.

4.2. 진동감쇠능 측정

Fig.4는 수냉한 Fe-4%Mn 합금과 Fe-17%Mn 합금의 자유진동감쇠곡선(최대표면변형률 10×10^{-4})을 나타낸 것이다. 각 변형율에서 얻은 각 곡선으로부터 구

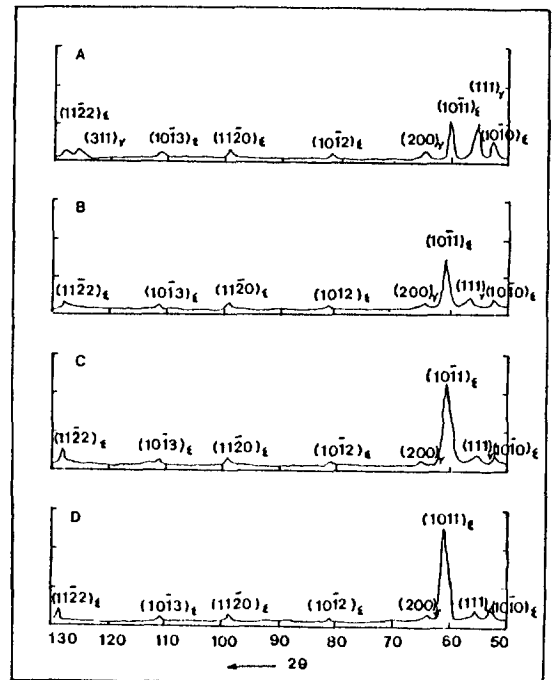


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of Fe-17%Mn alloy subjected to various cooling. (A) air cooled, (B) water quenched, (C) ice-brine quenched, (D) liquid nitrogen treated

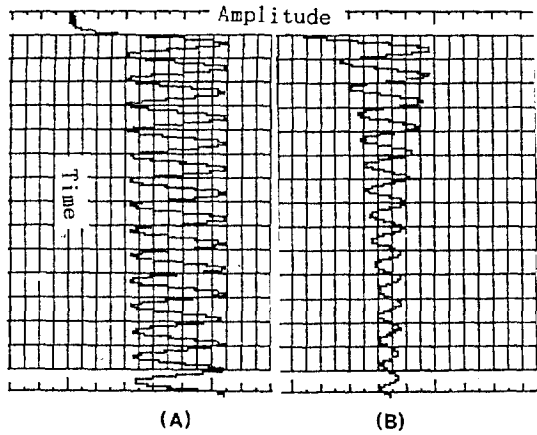


Fig. 4. Damped free vibration curves of Fe-Mn alloys.
(A) Fe-4%Mn alloy (B) Fe-17%Mn alloy

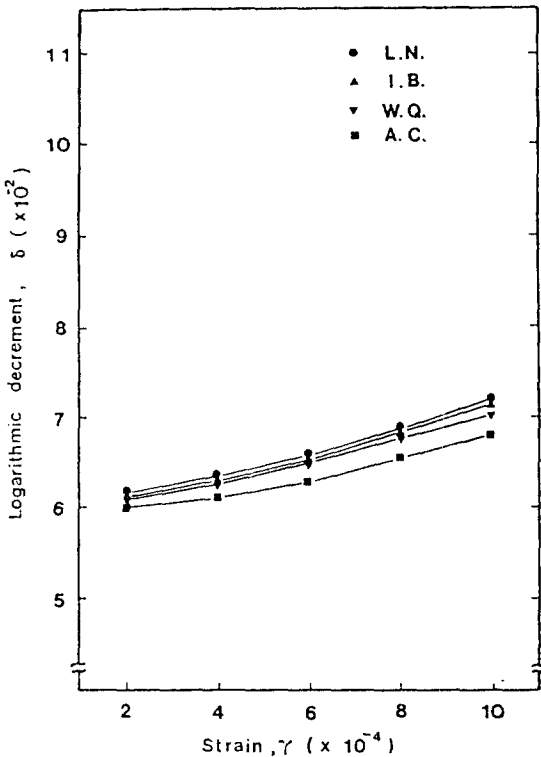


Fig. 5. Variation of logarithmic decrement with max. surface strain in Fe-4%Mn alloy subjected to various cooling processes.
(A.C. : air cooled, W.Q. : water quenched, I.B. : ice-quenched, L.N. : liquid nitrogen treated)

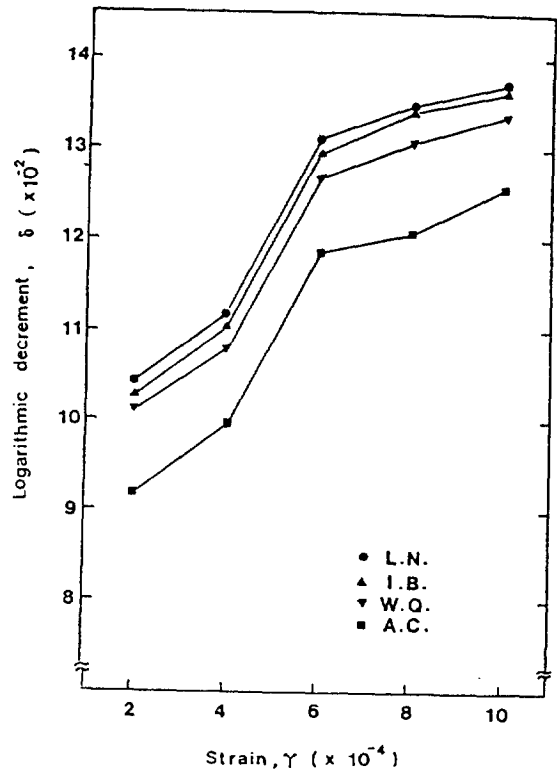


Fig. 6. Variation of logarithmic decrement with max. surface strains in Fe-17%Mn alloy subjected to various cooling processes.
(A.C. : air cooled, W.Q. : water quenched, I.B. : ice-brine quenched, L.N. : liquid nitrogen treated)

한 대수감쇠율을 각 합금에 대해서 나타낸 것이 Fig.5 및 Fig.6이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 합금에서 공히 변형율이 증가함에 따라 감쇠능이 증가하는 것을 알 수 있으며, ϵ -마르텐사이트가 α' -마르텐사이트보다 더 높은 감쇠능을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. Fe-4%Mn 합금의 경우 냉각조건에 상이에 따른 감쇠능의 변화는 미소하였으나, Fe-17%Mn 합금에서는 공냉한 경우와 수냉한 경우의 감쇠능의 차이가 뚜렷하였다. Fig.7은 Fe-Mn 합금의 진동감쇠능을 동일 경도의 탄소강과 비교하기 위하여, 0.2% C 탄소강을 퀴칭하여 템퍼링한 후 경도 및 대수감쇠율의 변화를 템퍼링 온도에 대해 나타낸 그림이다.

템퍼링온도가 증가함에 따라 경도값이 현저하게 감소하는데 대해 진동감쇠능에는 거의 변화가 없었다. Fig. 8에는 Fe-Mn 합금의 진동감쇠능의 절대치를 비교하

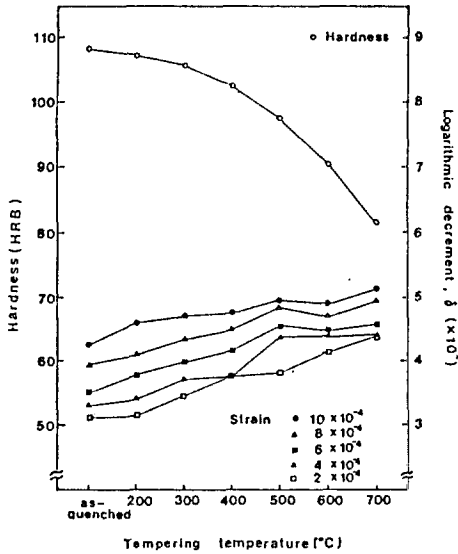


Fig. 7. Variations of logarithmic decrement and hardness with tempering temperature in low-carbon steel.

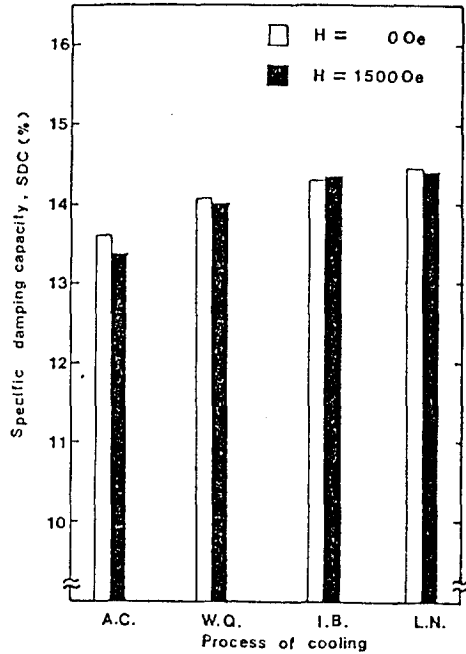


Fig. 9. Specific damping capacity of Fe-4%Mn alloy subjected to various cooling processes. (A.C. : air cooled, W.Q. : water quenched, I.B. : ice-brine quenched, L.N. : liquid nitrogen treated)

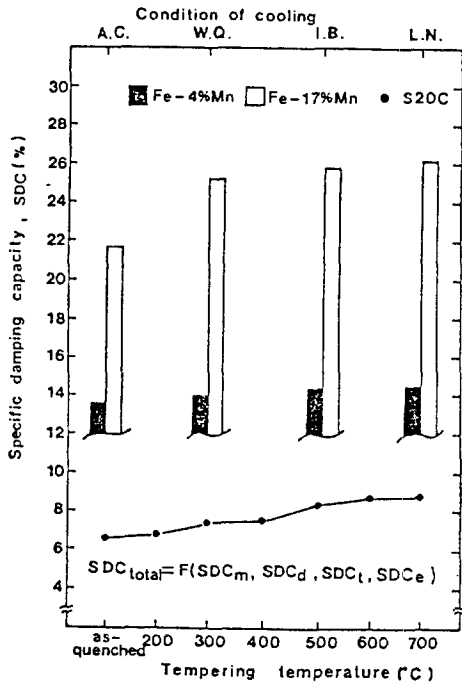


Fig. 8. Variation of specific damping capacity with condition of cooling in Fe-Mn alloys and with tempering temperature in low-carbon steel. (A.C. : air cooled, W.Q. : water quenched, I.B. : ice-brine quenched, L.N. : liquid nitrogen treated)

기 위해 비감쇠능(SDC)을 냉각조건에 대해 나타내었으며, 템퍼링온도에 따른 탄소강의 비감쇠능도 하단부에 참고로 나타내었다. Fe-17%Mn 합금(SDC = 26%)이나 Fe-4%Mn 합금(SDC = 14%)이 동일경도(HRB = 90)의 탄소강(SDC = 9%)보다 진동감쇠능이 월등히 우수함을 알 수 있다. 여기에서 Fe-Mn 합금의 진동감쇠능에 미치는 인자들을 생각해보면 다음과 같다.

- 1) Fe-4%Mn 합금의 α' -마르텐사이트는 상온에서 강자성을 나타내므로, 자구벽의 이동에 의한 자기-기계적 이력손실의 영향
- 2) 마르텐사이트 변태시 도입된 전위의 영향
- 3) 각 합금의 고유탄성계수에 의한 영향
- 4) background의 영향

먼저, 자기-기계적 감쇠의 영향을 알아보기 위하여 Fe-4%Mn 합금의 포화자장세기를 측정된 결과, 보자력(H_c)과 포화자장세기(H_s)가 각각 15 및 1500 Oe였다. Fe-17%Mn 합금의 경우에는 오스테나이트와 ϵ -마르텐사이트가 모두 상자성체로서 상온에서는 자장에 영향이 미약하다. 한편, 자기-기계적 감쇠의 영향은

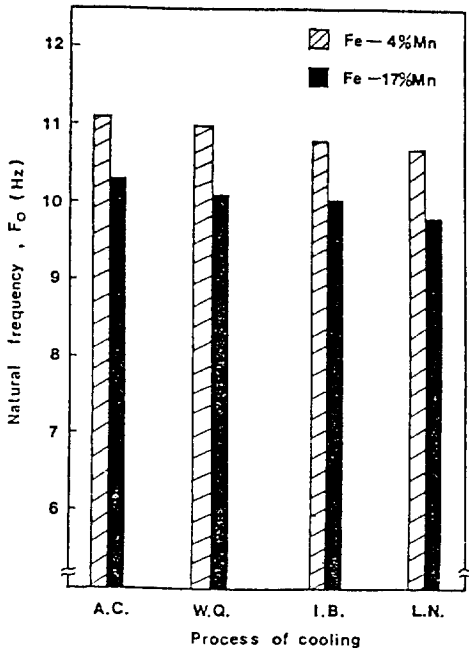


Fig. 10. Natural frequency of Fe-Mn alloys subjected to various cooling processes. (A.C. : air cooled, W.Q. : water quenched, I.B. : ice-brine quenched, L.N. : liquid nitrogen treated)

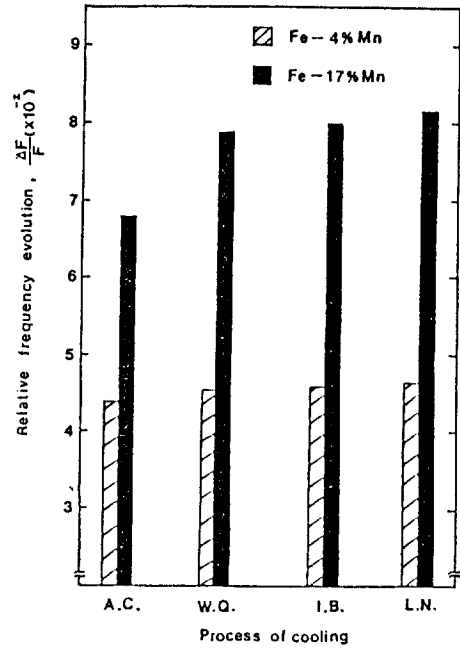


Fig. 11. Relative frequency evolution of Fe-Mn alloys subjected to various cooling processes. (A.C. : air cooled, W.Q. : water quenched, I.B. : ice-brine quenched, L.N. : liquid nitrogen treated)

포화자장을 걸어주면 쉽게 알아낼 수 있으므로, 각시편에 포화자장을 걸어주어서 감쇠능을 측정하였다. Fig.9는 Fe-4%Mn 합금에서 포화자장을 걸어준 경우와 걸어서 주지 않은 경우의 감쇠능을 냉각조건에 따라 비교하여 나타낸 그림이다. 포화자장을 걸어주어도 자장을 걸어서 주지 않은 경우와 비감쇠능의 차이가 없는 것으로 보아, 이 합금도 Fe-17%Mn 합금과 같이 자기-기계적 감쇠의 영향이 감쇠능의 주요인자는 아님을 알 수 있다. 다음으로 각 합금의 고유탄성계수의 영향을 조사하였다. Fig.10에 각 합금의 고유진동수를 나타내었다. 그런데, 탄성계수는 진동수의 제곱에 비례하므로, 결국 Fig.10 으로부터 두 합금에서 냉각조건에 따른 탄성계수의 변화는 미소함을 알 수 있다. 두 합금의 고유진동수의 차이가 크지 않고 냉각조건에 따른 변화가 미소한데도 불구하고 Fe-17%Mn 합금의 감쇠능이 Fe-4%Mn 합금보다 월등히 높은 것으로 보아, Fe-Mn 합금에 있어서 탄성계수 역시 감쇠능에 크게 기여하지 못함을 알 수 있다. Fig.11에 합금에서 냉각조건에 따른 R.F.E.을 나타내었다. Fig.10에서 알 수 있듯이 Fe-Mn 합

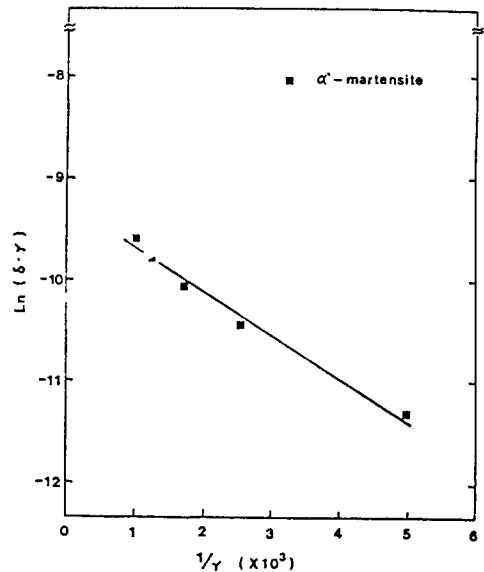


Fig. 12. Granato-Lücke plot for strain-amplitude dependence of dislocation damping in Fe-4%Mn alloy.

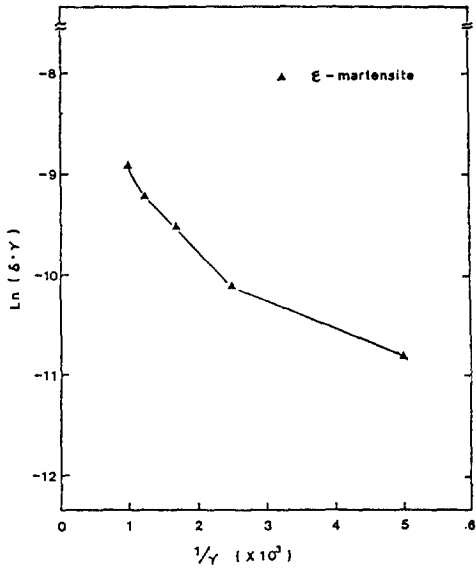


Fig. 13. Granato-Lücke plot for strain-amplitude dependence of dislocation damping in Fe-17%Mn alloy.

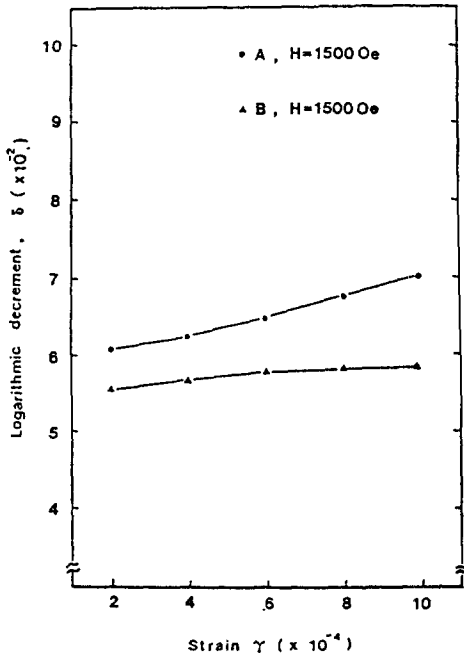


Fig. 14. Variation of logarithmic decrement with max. surface strain in Fe-4%Mn alloy subjected to (A) water-quenching and (B) tempering processes.

금에서는 탄성계수가 감쇠능에 크게 기여하지 못하는 반면에, Fig.11로부터는 냉각조건에 대해 감쇠능 곡선과 R.E.F.이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서, 탄성계수 자체보다는 ΔE 효과를 동반하는 다른 기구가 감쇠능에 지배적으로 기여하고 있음을 알 수 있다. 또한, background 감쇠는 장치상에 의한 것으로 이 효과는 아주 작으며 그 값이 일정하다는 사실로부터, ϵ -마르텐사이트 조직의 감쇠능이 α' -마르텐사이트 조직의 감쇠능보다 큰 이유가 될 수 없다. Fig.12와 Fig.13은 전위형 감쇠를 모델로 하였을 때의 진동감쇠능과 변형률 진폭과의 관계를 알아보기 위한 Granato-Lücke plot으로서⁸⁾, 각각 α' -마르텐사이트와 ϵ -마르텐사이트에 대해 그린 결과이다. α' -마르텐사이트의 경우 거의 직선적인 관계가 성립함을 알 수 있으며, 이로부터 이 합금의 진동감쇠능은 주로 전위형 기구에 의해서 진행됨을 유추할 수 있다. 그러나 ϵ -마르텐사이트의 경우에는 직선적인 관계로부터 크게 벗어나기 때문에 전위형이 아닌 다른 방진기구가 적용됨을 추정할 수 있

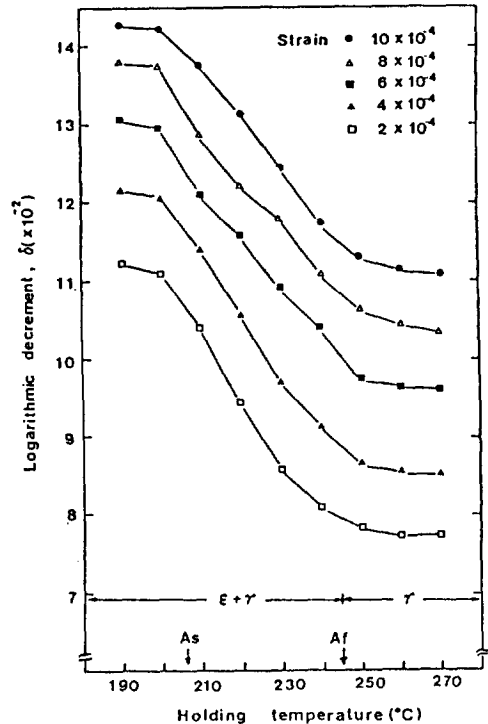


Fig. 15. Variation of logarithmic decrement with ϵ -martensite content at various strains in Fe-17%Mn alloy. (measured at 165°C)

다. Fe-4%Mn 합금의 감쇠기구가 전위형임을 추가적으로 확인하기 위하여 수냉한 상태와 500°C × 1hr 템퍼링한 시편의 감쇠능을 각각 측정하였다. 이때 순수하게

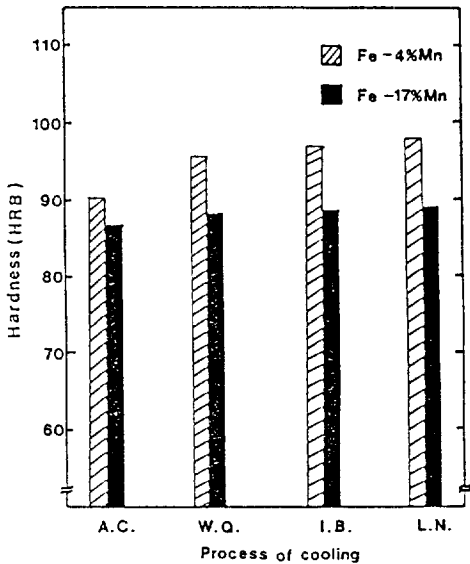


Fig. 16. Hardness of Fe-Mn alloys subjected to various cooling processes. (A.C. : air cooled, W.Q. : water quenched, I.B. : ice-brine quenched, L.N. : liquid nitrogen treated)

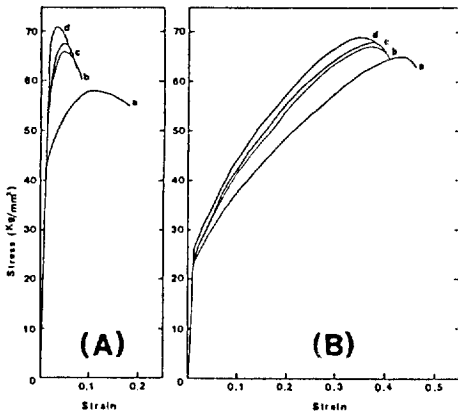


Fig. 17. comparison in stress-strain curves between Fe-4%Mn and Fe-17%Mn alloys. (A) Fe-4%Mn alloy, (B) Fe-17%Mn alloy, (a) air cooled, (b) water quenched, (c) ice-brine quenched, (d) liquid nitrogen treated

전위의 영향만을 알아보기 위해 각 시편에 대해 포화자장을 걸어준 결과, 템퍼링에 의해 전위밀도가 감소한 시편의 감쇠능이 낮은 것으로 보아 (Fig.14), α' -마르텐사이트에서는 전위형 감쇠기구가 틀림없음을 확인할 수 있다. 또한, Fig.15는 고온으로부터 상온에 냉각하여 얻은 Fe-17%Mn 합금의 마르텐사이트 조직을 역변태개시온도(A_s)로부터 역변태종료온도(A_f)까지 온도를 변화시키면서, ϵ -마르텐사이트의 양을 변화시켜서 A_s 이하 M_s 이상의 어떤 중간온도인 165°C에서 진동감쇠능을 측정할 값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 ϵ 의 양이 많을수록 진동감쇠능이 현저하게 증가하였다. 이로부터 Fe-17%Mn 합금의 감쇠기구는 다음과 같이 설명된다. 이 합금은 상온에서 $\gamma + \epsilon$ 의 혼합조직을 가지며, (가) γ 의 적층결함에너지가 매우 낮고 (나) $RT < M_s$ 이므로, 외부의 미소한 응력에 의해서도 γ/ϵ 계면이 쉽게 이동하여 응력유기 ϵ -마르텐사이트가 생성되며, 이때 진동에너지를 흡수한다고 생각된다.

4.3. 냉각조건에 따른 기계적 성질

Fig.16은 냉각조건을 변화시켰을때 Fe-Mn 합금의 경도값의 변화를 나타낸 그림이다. 냉각조건에 따른 경도값의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. Fig.17은 냉각조건을 달리 하였을 때, 두 합금의 응력-변형을 곡선을 나타낸 것이다. 같은 냉각조건에서 두 합금의 인장강도는 거의 유사하나, Fe-17%Mn 합금의 경우 항복강도가 매우 낮고 연신율이 매우 큼을 알 수 있다. 예를 들어, 공냉한 Fe-17%Mn 합금의 경우, 인장강도 및 항복강도가 각각 65 및 23kg/mm²으로 그 차이가 컸으며, 연신율은 46%로 매우 우수하였다. 이는 인장시험중 소성유기 마르텐사이트 변태가 일어났기 때문이라고 생각한다.

5. 결론

Fe-Mn 합금에서 b.c.c. 구조의 lath 마르텐사이트 조직과 h.c.p. 구조의 thin plate 마르텐사이트 조직의 진동감쇠능과 기계적 성질을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) thin plate ϵ -마르텐사이트 조직을 갖는 Fe-17%Mn 합금이 α' -마르텐사이트 조직을 갖는 Fe-4%Mn 합금보다 진동감쇠능이 월등히 우수하였다.
- 2) Fe-17%Mn 합금의 경우, ϵ -마르텐사이트의 양이 증가할수록 진동감쇠능이 증가하였다.
- 3) Fe-4%Mn 합금의 진동감쇠능은 전형적인 전위형

감쇠기구에 의해 설명되었으며, Fe-17%Mn 합금의 감쇠능은 γ/ϵ 계면이동기구에 의해서 설명될 수 있다.

4) 같은 냉각조건에서 Fe-4%Mn 및 Fe-17%Mn 합금의 경도 및 인장강도는 유사하였으나, 항복강도는 Fe-4%Mn 합금이 Fe-17%Mn 합금보다 매우 높고, 연신율은 Fe-4%Mn 합금이 Fe-17%Mn 합금보다 매우 낮았다.

「후 기」

이 연구는 1989년도 문교부 첨단공학(신소재분야) 학술 연구조성비에 의해 이루어진 것이다.

6. 참 고 문 헌

1. F.T. Worrell : J. Appl. Phys., Vol. 19, Oct.

(1948), pp.929~933.

2. A.V. Siefert and F.T. Worrell : J. Appl. Phys., Vol. 22, No. 10, (1951), pp.1257~1259.

3. K.Sugimoto, T.Mori, K.Otsuka and K.Shimizu : Scrip. Metall., 8 (1974), pp. 1341~1348.

4. K.Sugimoto : Journal de Phusique, 42 (1981), pp. C9-971~C5-981.

5. R.R. Hasiguti and K.Iwasaki : J. Appl. Phys., Vol. 39, No. 5, (1968) pp. 2182~2186.

6. O.Mercier, K.N. Melton and Y.de Preville : Acta Metall., 27 (1979), pp. 1467~1475.

7. I.B. Kekalo : "Encyclopedia of Materials Science and Engineering," Vol. 3, Pergamon Press, (1986), pp. 2127~2131.

8. A.V. Granato and K.Lücke : J. Appl. Phys., Vol. 7, No. 6, (1956), pp. 583~593.