

〈 論 文 〉

Fe-17wt%Mn 합금의 진동감쇠능에 미치는 탄소와 티타늄 첨가의 영향

백승한 · 김정철 · 지광구* · 신명철* · 최종술**

(주)우진 계측기술연구소

* 한국과학기술연구원 금속연구부

** 연세대학교 공과대학 금속공학과

Effects of carbon content and Titanium Addition on
Damping Capacity in Fe-17wt%Mn Alloy

S.H.Baik, J.C.Kim, K.K.Jee* M.C.Shin* and C.S.Choi**

Research Institute of Measuring Technology, Woojin OSK Corp., Korea

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

** Yonsei Univerty, Department of Metallurgical Engineering, Seoul 120-749

ABSTRACT

Effects of carbon and Ti on damping capacity are investigated in an Fe-17%Mn alloy. The suppressive force of carbon against $\gamma \rightarrow \epsilon$ transformation increases linearly with an increase in its content, lowering Ms temperature and volume fraction of ϵ martensite. Carbon deteriorates damping capacity by reducing the interfacial area of damping sources and mobility of the boundaries contributing to anelastic deformation. The reduction in damping capacity is accelerated when carbon-containing alloy is aged at higher temperatures above room temperature. The effect of Ti on damping capacity is found to be beneficial in carbon-containing alloy, which is attributed to the depletion of carbon solute due to the formation of TiC.

1. 서 론

산업문명이 고도로 발전함에 따라 인류의 생활은 편의와 풍요를 누리게 되었지만, 그것이 남긴 각종 부산물은 공해로서 우리의 자연환경을 위협하고 있

다. 이들 공해중 소음과 진동은 인간에게 심리적 불안감과 난청 등의 질병을 유발시키며, 공업적 측면에서는 정밀기계의 정밀도 저하 및 부품의 조기피로파괴 등의 성능저하를 야기시킨다. 이러한 소음과 진동을 방지하기 위해서 종래에는 진동체에 오일댐퍼나

에어댐퍼를 설치하여 진동에너지를 흡수시키거나 (system damping), 금속과 금속사이에 점탄성이 큰 고분자재료를 끼워서 진동에너지를 흡수시키는 방법 (structure damping) 등이 강구되어 왔었다. 이러한 구조적 방법에 의해서는 진동과 소음을 제거하는 데 있어서 많은 문제점들이 내포되어 있을 뿐만 아니라, 공업적 이용면에서도 그 한계성을 벗어날 수가 없다. 따라서 최근에 와서는 금속재료 그 자체가 진동에너지를 직접 흡수케 하는 적극적인 방식(material damping)으로 방진대책이 전환되면서 방진합금의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻³⁾.

최근 저자들 중의 일부⁴⁻⁸⁾가 Fe-17%Mn 이원계 합금이 높은 진동감쇠능을 나타내며, 기계적 성질 또한 매우 우수하다는 사실을 처음으로 밝혀내었으며, 방진합금의 성능을 표시하는 α 값(비감쇠능 \times 인장강도)이 $30\% \times 70 \text{ kg/mm}^2 = 2100\% \cdot \text{kg/mm}^2$ 으로써 지금까지 개발된 어느 합금보다도 우수한 성능을 가지고 있다.

그러나, 경제성과 관련하여 이 합금을 공업적으로 제조하기 위해서는 양산과정중에 탄소가 불순물로서 불가피하게 혼입된다.

따라서 본 연구에서는 Fe-17wt%Mn 합금에 탄소가 함유될 때 감쇠능이 어떻게 변하는지를 조사하기 위하여, 탄소량을 0.28wt%까지 각 량 첨가하여 감쇠능을 측정하였으며, 100℃ 이하의 여러 온도에서 등온시효한 후 탄소량에 따른 감쇠능의 변화를 조사하였다. 이들 데이터를 이용하여 시효에 따른 감쇠능의 변화를 속도론적 측면에서 고찰하였다. 또한 Fe-Mn 합금에서 탄소와 같은 침입형원소가 불순물로서 혼입되는 경우 감쇠원을 고차하므로 감쇠능의 저하가 예상된다.

따라서 탄소가 0.1wt% 이상 함유되더라도 감쇠능이 저하되지 않도록 하기 위하여 탄화물 형성원소인 Ti를 미량 첨가하여 감쇠능을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 Fe-17%Mn-X% C 합금과 Fe-17%Mn-0.2%C-X%Ti 합금은 고주파 진공 유도로

에서 용해하였다. 먼저 마그네시아 도가니에 99.9% 순도의 전해철을 장입하여 용해시킨 다음, 전해공간을 첨가하고 곧이어 티타늄과 가탄재(흑연전극분말)를 장입하여 용해하였다. 이때 공간의 비산을 막기위해 200torr 정도의 아르곤 분위기를 유지하였으며, 용해된 후 용탕을 금형에 주입하여 합금별로 6kg의 잉곳트를 제조하였다. 이들 잉곳트를 1150℃에서 24시간 균질화처리 하여 용고중에 형성된 편석을 제거하였다.

본 연구에 사용된 합금의 화학조성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of the alloys used.

Alloy No.	Chemical Composition (wt%)			
	Mn	C	Ti	Fe
Alloy 1	17.68	0.02	-	bal.
Alloy 2	17.84	0.10	-	bal.
Alloy 3	17.86	0.20	-	bal.
Alloy 4	17.32	0.28	-	bal.
Alloy 5	17.88	0.20	0.43	bal.
Alloy 6	17.81	0.21	0.82	bal.
Alloy 7	17.56	0.21	1.31	bal.

1150℃에서 균질화처리를 행한 후, 스케일을 제거하기 위하여 잉곳트를 적당한 크기로 절단 및 가공하였으며, 비틀림 진자 진동시험편을 제작하기 위하여 950℃에서 열간압연하여 직경 15mm의 봉상을 제조하였다. 또한 950℃에서 3mm의 두께로 열간압연하여 X-선 회절시험편 및 조직관찰용 시험편을 제작하였다. 기계가공한 각 시험편의 진동감쇠능을 측정하기 위하여, 1050℃에서 1시간 용체화처리한 후 수냉하였으며, X-선 회절시험편 및 조직관찰용 시험편도 같은 1050℃에서 1시간 용체화처리 후 수냉하였다. 또한, 이들 시편을 가지고 시효에 따른 진동감쇠능의 변화를 조사하기 위해 100℃ 이하의 여러 온도에서 등온시효처리하였다.

각 시편내에 존재하는 ϵ 마르텐사이트의 부피분율

은 Fe-K α 선으로 X-선 회절시험하여 얻은 회절도로 부터 ϵ (10·1), γ (200) 회절선의 적분강도를 측정하여 계산하였다⁹⁻¹⁰). 그리고 각 합금의 Ms, As점은 열 팽창계를 이용하여 측정하였다.

본 연구에서 진동감쇠능의 측정은 본 연구실에서 제작한 Föpple-Pertz형 비틀림 진자 시험장치¹¹⁾를 사용하였으며, 시편을 자유진동 시켰을 때 시간의 경과에 따라 진동의 진폭이 점차 감소해 가는 것을 potentiometer로 감지하여, 증폭기를 거쳐 A/D converter를 통해 입력된 신호인 시간 대 진폭 변화 곡선으로부터 strain에 따른 진동감쇠능(Specific Damping Capacity)을 측정하였다. 또한 Fe-17%Mn-0.2%C-0.82%Ti 합금에서 탄화물을 관찰하기 위하여 투과전자현미경을 이용하였다. 이때 TEM 시편은 -50℃에서 10%HClO₄/methanol용액에서 전해연마하였으며, Philips CM-30을 사용하여 가속전압 300kV로 관찰하였다.

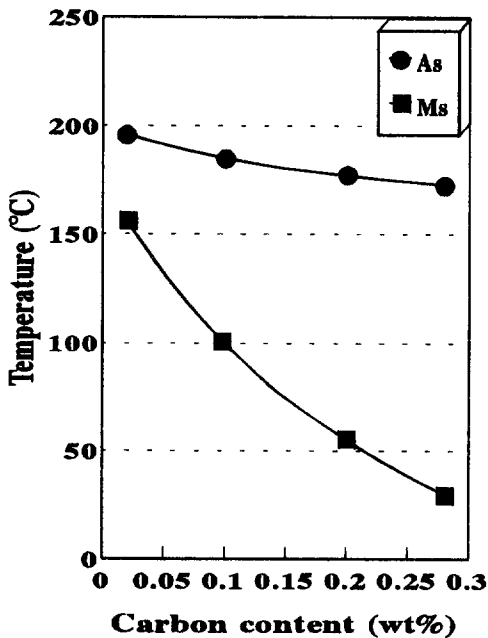


Fig. 1 Variation of transformation temperatures with carbon content in water-quenched Fe-17%Mn-X%C alloy.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Fe-17%Mn 합금의 진동감쇠능에 미치는 탄소의 영향

Fig. 1은 Fe-17%Mn-X%C 합금을 1050℃에서 1시간 용체화처리한 후, 각각 수냉한 후의 탄소함량에 따른 Ms 및 As 점의 변화를 나타낸 것인데, 탄소량이 증가할수록 Ms점이 낮아지며 0.28%C에서는 Ms점이 상온 근처에 존재한다. Ms점이 탄소량에 따라 낮아지는 이유는 화학적으로는 탄소가 오스테나이트를 안정화시키기 때문이며, 물리적으로는 탄소의 고용강화로 오스테나이트의 전단강도가 증가하기 때문에 전단변태가 일어나기 어렵기 때문이다.

Fig. 2는 X-선 회절시험한 결과로부터 구한 각 상분율을 탄소량에 대해 나타낸 것이다. γ 상은 탄소량의 증가와 더불어 증가하는 반면, ϵ 량은 탄소량과 더불어 감소함을 알 수 있다.

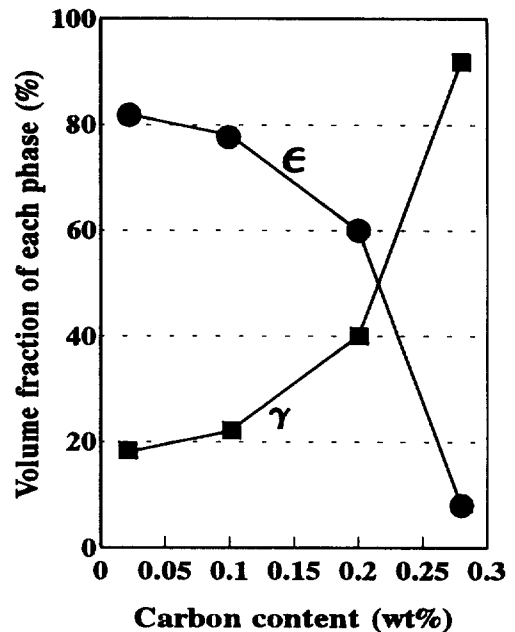


Fig. 2 Variation of amount of each phase with carbon content in water-quenched Fe-17%Mn-X%C alloy.

Fig. 3은 Fe-17%Mn-X%C 합금을 1050℃에서 1시간 용체화처리한 후, 각각 수냉한 후의 탄소함량에 따른 감쇠능의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 탄소함량이 증가함에 따라 감쇠능이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 탄소함량이 증가함에 따라 Fig. 2에서와 같이 ϵ 마르텐사이트량이 감소하여 상대적으로 γ/ϵ 계면적이 적어짐과 동시에 고용 탄소 원자의 계면 고착 효과가 더욱 커져서 계면의 이동을 방해하므로 감쇠능이 감소한다고 생각된다.

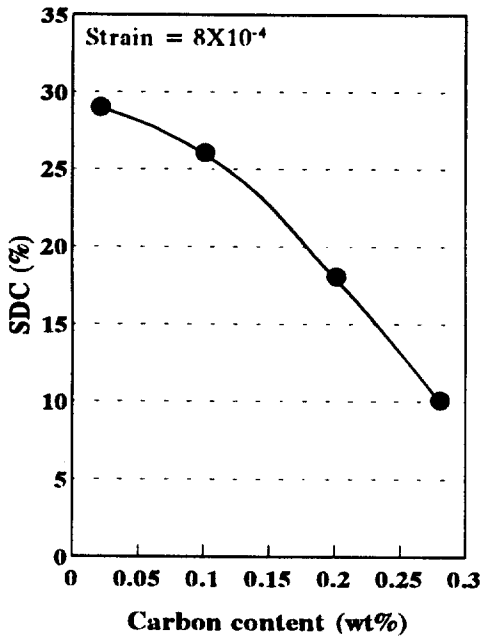


Fig. 3 Variation of specific damping capacity with carbon content in water-quenched Fe-17%Mn-X%C alloy.

3.2 Fe-17%Mn-X%C 합금의 시효에 따른 진동감쇠능의 변화

Fig. 4는 각 합금을 40℃에서 등온시효한 후 시간에 따른 감쇠능의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 5는 60℃에서 각 합금에 대해 등온시효한 결과를 나타낸 것이고 Fig. 6은 80℃에서 등온시효한 결과를 나타

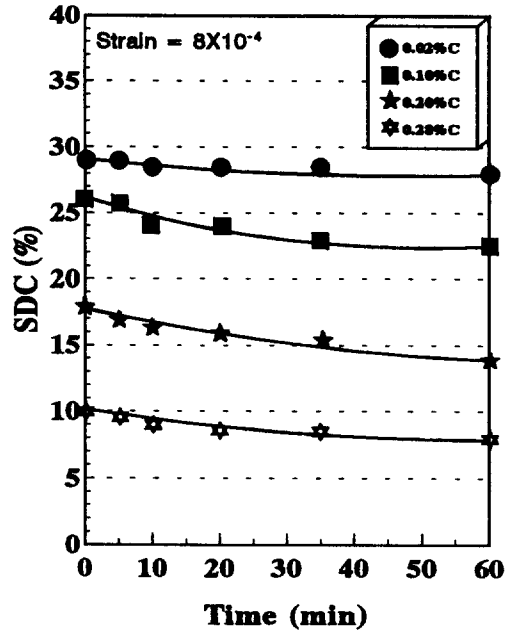


Fig. 4 Variation of specific damping capacity with aging time at 40°C in Fe-17%Mn-X%C alloy.

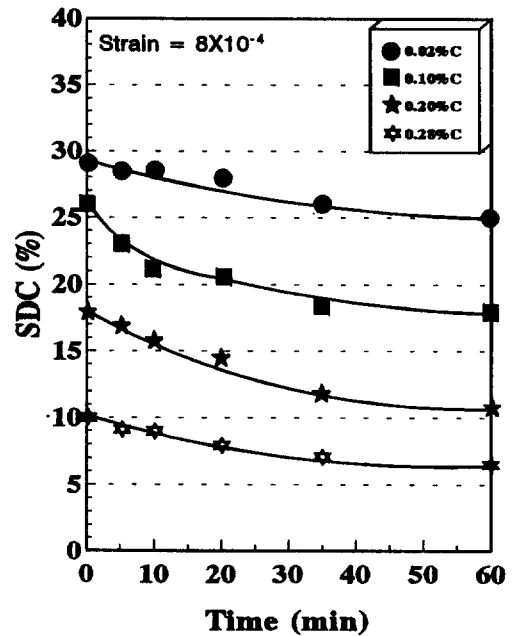


Fig. 5. Variation of specific damping capacity with aging time at 60°C in Fe-17%Mn-X%C alloy.

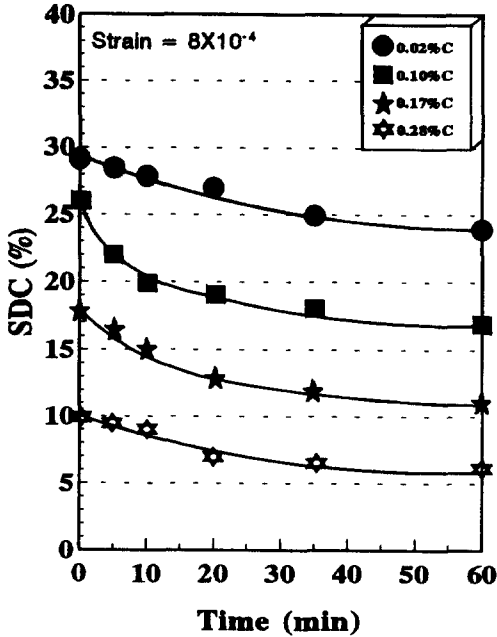


Fig. 6 Variation of specific damping capacity with aging time at 80°C in Fe-17%Mn-X%C alloy.

낸 것이다. Fig. 4~6을 살펴보면 동일 탄소량에서 시효온도가 높을수록 시효시간이 길수록 감쇠능이 많이 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 시효시간에 대한 감쇠능의 감소속도는 탄소량에 비례하지 않음을 관찰할 수 있다.

지금 감쇠능의 감소속도가 탄소량에 대해 어떻게 변하는지를 알아보기 위해 감쇠능의 평균감소속도 (V_d)를 다음과 같이 정의한다.

$$V_d = \left(\frac{\Delta\delta}{t} \right)_T \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $\Delta\delta$ 는 일정온도(T)에서 일정시간 시효한 후 감쇠능의 감소량이고, t는 일정온도에서 시효한 시간이다. 본 연구에서 (1)식의 V_d 를 구하는 데 있어서 t를 60분으로 하였다. 식(1)을 이용하여 구한 감쇠능의 평균감소속도를 시효온도 40°C, 60°C 및 80°C에서 탄소량에 대해 각각 나타낸 것이 Fig. 7, 8, 9이다. 이들 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 V_d 는

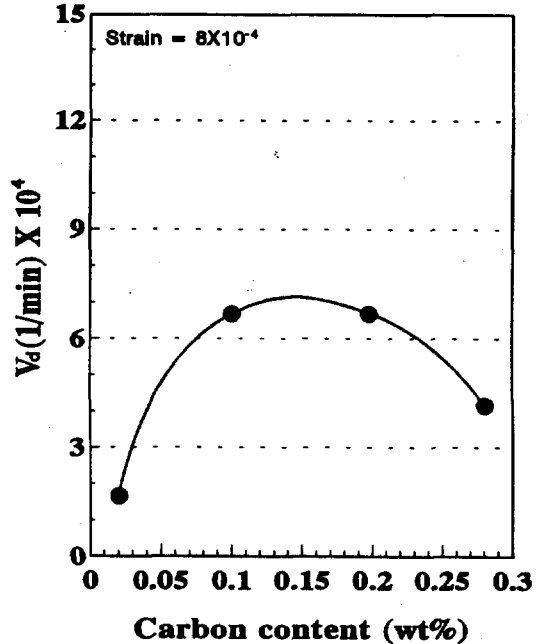


Fig. 7 Variation of decreasing rate of specific damping capacity with carbon content at 40°C in Fe-17%Mn-X%C alloy.

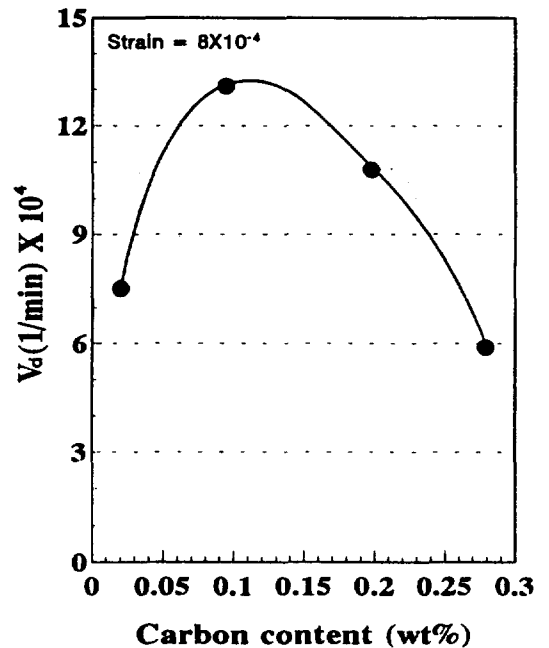


Fig. 8 Variation of decreasing rate of specific damping capacity with carbon content at 60°C in Fe-17%Mn-X%C alloy.

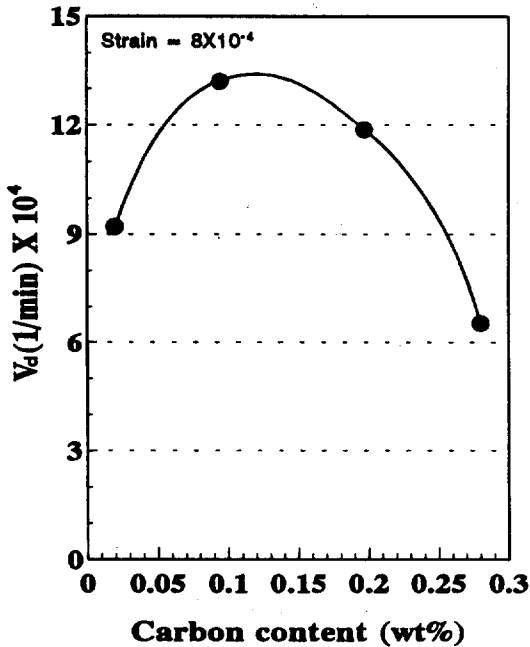


Fig. 9 Variation of decreasing rate of specific damping capacity with carbon content at 80°C in Fe-17%Mn-X%C alloy.

시효온도에 관계없이 탄소가 약 0.12wt% 부근일 때 최대치를 나타내고 탄소량이 이 점을 이탈할수록 V_d 는 감소한다. 이러한 현상이 나타나는 이유에 대해 다음에 고찰해 본다. 저자들은 Fe-17%Mn 합금의 감쇠기구가 γ/ϵ 계면의 이동, ϵ 마르텐사이트 형제정 경계의 이동 및 ϵ 마르텐사이트 내의 적층결합 경계의 이동으로 이루어져 있다고 이미 보고¹²⁻¹³⁾한 바 있다. 그러므로 시효시 감쇠능이 떨어지는 것은 시효 중 탄소원자가 확산하여 감쇠를 일으키는 이러한 계면을 고착하기 때문이라 생각된다. 따라서 단위체적당 총 감쇠원의 계면적이 클수록 그리고 편석되는 탄소농도가 높을수록 단위시간당 탄소원자에 의해 고착되는 감쇠원의 계면적이 커지기 때문에 V_d 는 커질 것이다. 따라서 V_d 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_d = K A_d \cdot C_s \dots\dots\dots (2)$$

여기서 K는 상수이며, A_d 는 단위체적당의 감쇠원

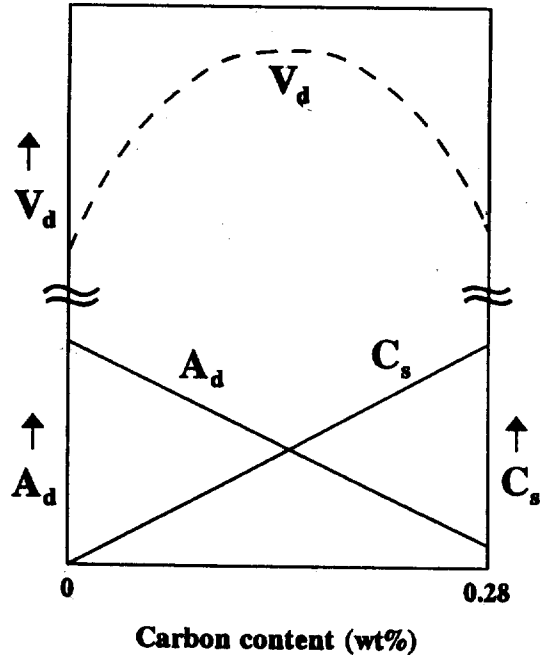


Fig. 10 Effects of carbon content on V_d , A_d and C_s in Fe-17%Mn-X%C alloy.

의 총 계면적이고, C_s 는 단위체적당 감쇠원에 편석되는 탄소량이다.

단위체적당 감쇠원의 총 계면적은 ϵ 마르텐사이트량이 많을수록 커지고, 감쇠원의 계면을 고착하는 탄소량은 당초의 탄소농도에 비례하기 때문에, 이들 관계를 도식적으로 그리면 Fig. 10과 같다. Fig. 10의 실선의 데이터를 식 (2)에 대입하면 V_d 는 점선과 같이 표시될 것이다. 즉, V_d 는 0~0.28wt%C의 중간에서 최대치를 가지게 되며, 이는 Fig. 7~9와 잘 일치한다.

3.3 Fe-17%Mn-0.2%C 합금의 진동감쇠능에 미치는 Ti 첨가의 영향

Fig. 11은 Fe-17%Mn-0.2%C-X%Ti 합금을 1050°C에서 1시간 용체화처리한 후, 수냉한 후의 Ti 첨가량에 따른 Ms 및 As 점의 변화를 나타낸 것인데, Ti량이 증가함에 따라 Ms가 증가하였다. 즉 Ti량

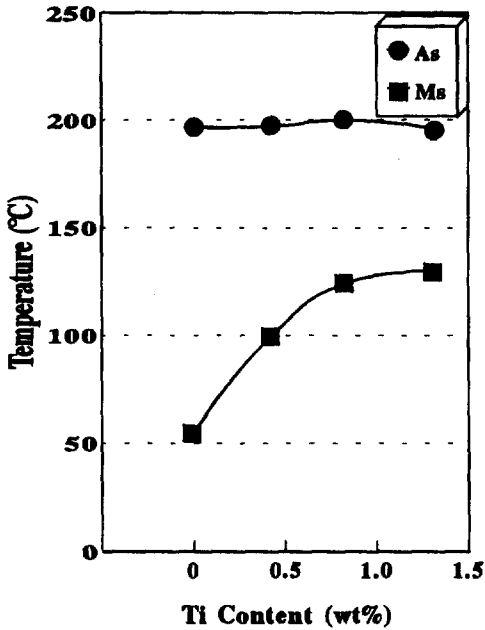


Fig. 11 Variation of transformation temperature with Ti content in water-quenched Fe-17%Mn-0.2%C alloy.

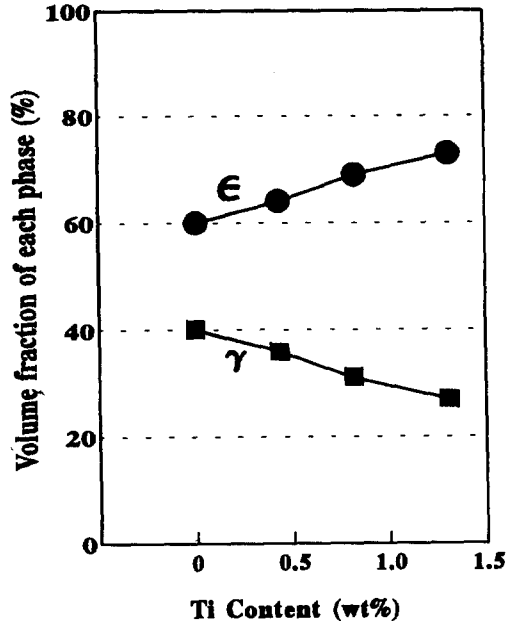


Fig. 12 Variation of amount of each phase with Ti content in water-quenched Fe-17%Mn-0.2%C alloy.

이 증가함에 따른 Ms 증가에 따라 상온까지의 ϵ 마르텐사이트 성장에 필요한 화학적 구동력이 커져 그만큼 많은 ϵ 마르텐사이트가 생성된다고 생각할 수 있다.

Fig. 12는 X-선 회절시험한 결과로부터 구한 각 상의 양을 Ti량에 대해 나타낸 것인데, Ti량이 증가할수록 Ms가 상승하기 때문에 γ 량이 적어지고, ϵ 량은 증가함을 알 수 있다.

Fig. 13에는 Fe-17%Mn-0.2%C-X%Ti 합금의 Ti 첨가량에 따른 진동감쇠능의 변화를 보여 주고 있는데, Ti량이 많아질수록 진동감쇠능이 증가함을 볼 수 있다. 이는 Photo 1에 보이는 바와 같이 Ti 첨가로 인해 고용된 탄소를 탄화물로서 석출시킴으로써 감쇠원의 계면을 고착시키는 고용탄소의 양이 감소하게 되어 진동감쇠능이 증가한 것으로 생각된다.

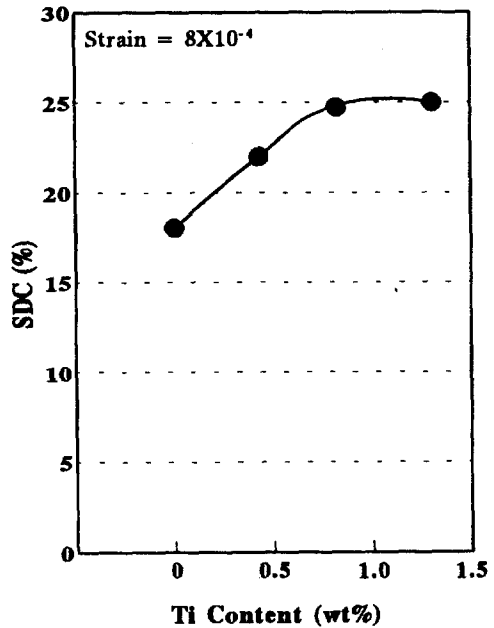


Fig. 13 Variation of specific damping capacity with Ti content in water-quenched Fe-17%Mn-0.2%C alloy.

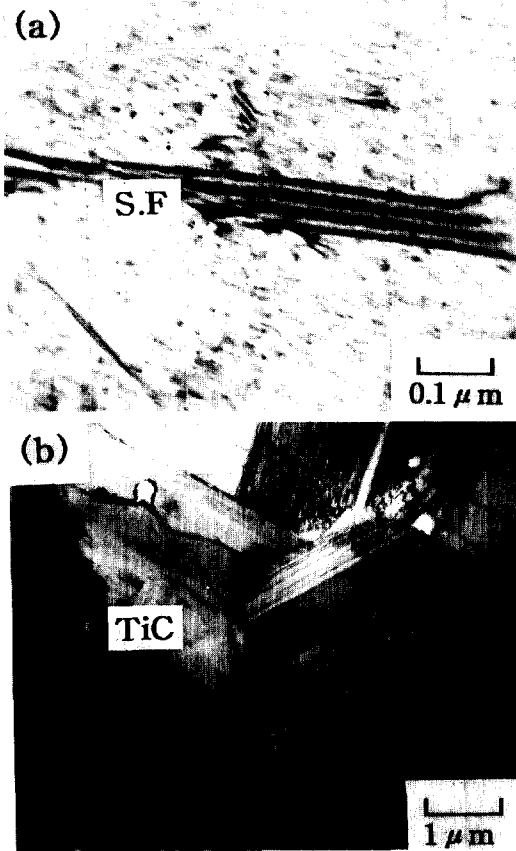


Photo 1 Transmission electron micrographs of Fe-17%Mn-X%C-Y%Ti alloy.
 a) Fe-17%Mn-0.2%C alloy
 b) Fe-17%Mn-0.2%C-0.8%Ti alloy

3.4 Fe-17%Mn-0.2%C-X%Ti 합금의 시효에 따른 진동감쇠능의 변화

Fe-17%Mn-0.2%C 합금에 Ti를 각각 첨가한 합금에 대하여 80℃에서 0~300분 등온시효하여, 시효시간에 따른 진동감쇠능의 변화를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14에 보이는 바와 같이 탄소가 0.02%이고 Ti가 전혀 함유되지 않은 Alloy 1은 등온시효에 따른 진동감쇠능의 변화가 거의 없으나, 탄소가 0.2%이고 Ti가 전혀 함유되지 않은 Alloy 3은 시효시간 40분까지는 진동감쇠능이 급격히 감소하고 있다. 이와 같

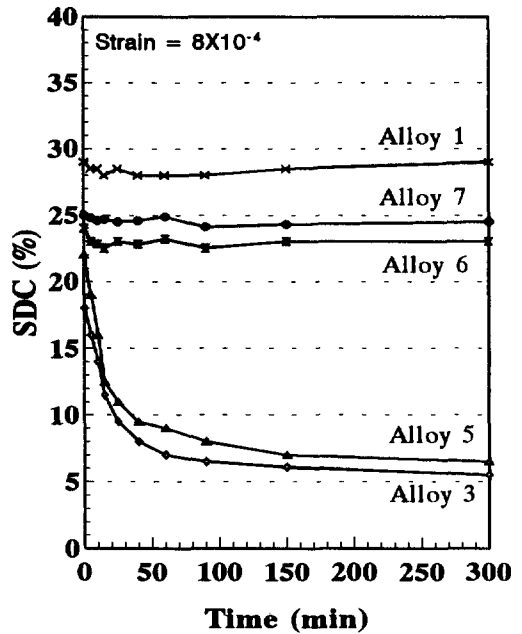


Fig. 14 Variation of specific damping capacity with aging time at 80℃ in Fe-17%Mn-X%C-Y%Ti alloy.

이 시효시 감쇠능이 떨어지는 것은 시효중 탄소 원자가 확산하여 감쇠원의 계면을 고착하기 때문이라 생각된다.

탄소가 0.2%이고 Ti이 0.43% 첨가된 Alloy 5도 시효시간 40분까지는 감쇠능이 크게 떨어지고 있으나, 반면에 같은 탄소량이지만 Ti이 0.82%, 1.31% 첨가된 Alloy 6과 Alloy 7은 시효시간 300분까지 등온시효를 하여도 진동감쇠능에는 아무런 변화가 없음을 보이고 있다. 이러한 현상에 대해 Ti은 강력한 탄화물 형성원소로서 탄소와 결합하여 MC형 탄화물을 형성하며 NaCl형 결정구조를 가지고 있는데, 합금에 고용되어 존재하는 모든 탄소와 Ti이 결합할 수 있는 화학양론적 비는 원자비로 Ti:C = 4:1 이다. 따라서 완전한 TiC 탄화물을 형성하는 조성을 갖는 Alloy 6과 Alloy 7에서만 고용탄소를 모두 석출시켰기 때문에 시효에 대한 저항성이 향상되어 일정한 감쇠능을 유지하고 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

Fe-Mn 이원계 합금중에서 진동감쇠능이 가장 우수한 Fe-17wt%Mn 합금에 탄소와 티타늄을 각각 첨가하여 등온시효에 따른 진동감쇠능의 변화를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Fe-17%Mn-X%C 합금의 경우, 탄소량이 증가함에 따라 진동감쇠능은 감소하였는데, 이는 탄소량의 증가에 따른 Ms점의 저하로 ϵ 량의 감소에 기인된 것이다.
2. Fe-17%Mn-X%C 합금의 시효시 감쇠능의 평균감소속도는 탄소량과 더불어 증가하여 약 0.12%C 부근에서 최대치를 보이다가 그 이상으로 탄소량이 증가하면 감소하였다.
3. Fe-17%Mn-0.2%C 합금의 경우, Ti량이 증가할수록 Ms점이 상승하고 동시에 ϵ 마르텐사이트의 양이 증가하여 진동감쇠능이 증가되었다.
4. 80℃에서 등온시효시 Fe-17%Mn-0.02%C 합금과 고용탄소를 모두 탄화물로 석출시킨 Fe-17%Mn-0.2%C-0.82%Ti 합금, Fe-17%Mn-0.2%C-1.31%Ti 합금은 시효하여도 감쇠능을 그대로 유지하였다.

참 고 문 헌

1. 杉本孝一: 鐵と鋼, 14(1974), 127
2. 川邊尙志, 榮原改造: 日本金屬學會誌,

44(1980), 776

3. X.W. Wang: Scripta Metallurgica, 23(1989), 507
4. 최중술, 김준동, 문인기, 백승한: 열처리공학회지, Vol.4, No.4, 15
5. 조태희, 최중술, 유계현, 백승한: 대한금속학회 추계발표대회 개요집, 1991, 199
6. 김정철, 최중술: 대한금속학회 추계발표대회 개요집, 1992, 45
7. C.S. Choi, J.D. Kim, T.H. Cho, S.H. Baik and G.H. Ryu: "Damping Capacities in Fe-X%Mn Martensitic Alloys", Proc. of ICOMAT-92, Monterey, California, 20~24, July, 1992
8. C.S. Choi and Woojin OSK Corp.: Korea Pat., No.057437(1992), U.S. Pat., No.5290372(1994)
9. B. L. Averbach and M. Cohen: Trans. Met. Soc., AIME, 176(1948), 401
10. J. Burke and D.W. Harvey: ISIJ, 208(1970), 779
11. 백승한, 김정철, 지광구, 최중술: 열처리공학회지, Vol.8, No.2(1995), 113
12. 전중환, 이영국, 최중술: 대한금속학회지, Vol.33, No.12(1995), 1600
13. Joong Hwan Jun, Won Jin and Chong Sool Choi: Scripta Metallurgica, Vol.33, No.8(1995), 1339