

Fe-23%Mn 마르텐사이트합금의 진동감쇠능에 미치는 Co 첨가의 영향

孔棟健 · 田仲桓* · 崔鍾述

*연세대학교 철강연구소

연세대학교 공과대학 금속공학과

Effects of Co Addition on Damping
Capacity of Fe-23%Mn Martensite Alloy

Dong-Keon Kong, Joong-Hwan Jun* and Chong-Sool Choi

*Research Institute of Iron and Steel Technology, Yonsei University, Seoul 120-749

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

ABSTRACT

Effect of Co content on the microstructure and damping capacity of Fe-23%Mn-X%Co alloy was studied. The volume fraction of ϵ martensite of the alloy was increased with increasing Co content. The hardness was increased with lowering cooling temperature and increasing Co content in Fe-23%Mn-X%Co alloy, which is ascribed to the increase in ϵ martensite content. The damping capacity of Fe-23%Mn-X%Co alloy was linearly increased with increasing the strain amplitude, and was constant regardless of Co content at the same volume fractions of ϵ martensite when the low strain amplitudes ($1 \sim 3 \times 10^{-4}$) were applied, while the damping capacity with large strain amplitudes ($4 \sim 6 \times 10^{-4}$) became higher with increasing Co content at all volume fractions of ϵ .

1. 서 론

최근에 저자들의 일부가 처음으로 보고한 Fe-(15~25)%Mn 방진합금^{1~4)}은 경제성이 높고 진동감쇠능과 기계적 성질이 우수하여 실용화가 기대되는 합금이다. 대부분의 철계합금이 비교적 낮은 진동감쇠능을 보이는 것과는 달리, Fe-Mn 합금이 우수한 진동감쇠능을 나타내는 이유는 이 합금의 미세조직이 진동감쇠원(damping sources)으로 작용할 수 있는 결합들을 많이 포함하고 있기 때문이다. 이러한 진동감쇠원으로는 (i) 오스테나이트(γ) 내부의 적층결합

경계, (ii) ϵ 마르텐사이트의 적층결합경계, (iii) ϵ 마르텐사이트 형체정경계 (variant boundaries), (iv) γ/ϵ 경계 등이 있다는 것을 이미 보고한 바 있다^{5~8)}. Fe-Mn 합금의 진동감쇠능은 Mn 조성이 약 17% 일 때 최대값을 나타내고 그 이상으로 Mn 함량이 증가하면 점차 감소하는 경향을 나타내는데, 저자들의 일부는 그 이유가 Mn이 증가할수록 ϵ 마르텐사이트의 부피분율의 감소, γ/ϵ 계면적의 감소 및 γ/ϵ 상 계면의 이동도(mobility)의 감소가 주된 원인이며, 이것들은 모두 적층결합에너지의 증가와 연관되어 있다고 보고하였다.⁸⁾ 이러한 연구결과를 기초로 할 때,

Fe-Mn 합금에서 오스테나이트의 적층결합에너지를 낮추는 합금원소를 첨가하면 진동감쇠능의 향상을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 Fe-Mn 합금에서 오스테나이트의 적층결합에너지를 낮추는 원소로 알려진 Co⁹⁾를 첨가하여, Co 함량에 따른 마르텐사이트변태 온도, 미세조직 및 진동감쇠능을 조사하고, 그 결과를 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 Fe-Mn 이원계 합금 중 상온에서 ϵ 마르텐사이트를 약 40% 함유하는¹⁰⁾ Fe-23%Mn 합금에 Co를 0%~3%까지 1% 단위로 첨가한 4종의 Fe-23%Mn-X%Co 합금을 실험합금으로 하였다. 이들의 용해는 전해철(순도 99.7%), 전해망간(순도 99.7%) 및 전해코발트(순도 99.5%)를 소정의 조성으로 평량하여 고주파 유도로를 사용하여 행하였으며, 금형에 주조하여 약 5kg의 잉곳으로 제조하였다. 제조된 합금의 화학조성을 분석한 결과는 Table 1과 같았다. 잉곳트를 보호성 분위기 중에서 1200°C에서 24시간 균질화처리한 후, 적당한 크기의 각재로 절단하고 열간압연과 각종 기계적 가공을 행하여 120mm(L) × 12mm(W) × 1.3mm(T)의 치수를 갖는 진동감쇠능 측정용 시편편, 소정의 치수를 갖는 X-선 회절시편편 및 미세조직 관찰용 시편을 각각 제작하였다. 각 합금의 오스테나이트 결정립 크기를 동일하게 맞추기 위하여 1100°C에서 가열시간을 달리하여 용체화처리한 후 상온수에 냉각하였으

며, 일부는 -196°C에 서브제로처리하였다. Co 함량에 따른 ϵ 마르텐사이트 부피분율의 변화는 X-선 회절도로로부터 $\epsilon(10 \cdot 1)$ 과 $\gamma(200)$ 의 회절선의 적분강도를 측정함으로써 계산되었다.^{11~13)}

미세조직은 과염소산(HClO₄)과 초산(CH₃COOH)을 1 : 9로 혼합한 용액에서 전압 29V, 전류 0.8A의 조건으로 전해연마한 시편을 1.2% 피로아류산포타슘(K₂S₂O₈) 수용액으로 에칭한 후 광학현미경(model : Nikon EPIPHOT)으로 관찰하였다. 경도는 미소비커스경도계(model : Mitsutoyo MXT- α)를 이용하여 실험목적에 따라 25g과 500g의 하중하에서 측정하였으며, 10회 측정된 값의 평균값을 취하였다. 한편, 인장시험은 Instron type의 인장시험기를 사용하여 상온에서 1mm/min의 crosshead 속도로 행하였으며, 사용한 시편은 ASTM subsize type의 소형 판상시편(표점거리 : 25mm)이었다.

본 연구에서는 진동감쇠능 조사를 위하여 외팔보(cantilever)형 진동감쇠능 측정장치를 사용하였으며, Fig. 1에 장치의 개략도 및 시편의 형상을 나타내었다. 시편의 자유단을 자유진동시킨 후, 시간에 따른 진폭의 변화를 시편에 부착된 스트레인게이지(strain gauge)를 이용하여 신호전압으로 변환시키고, 이 전압을 증폭기(model : signal conditioning amplifier 2310)로 증폭시킨 후 A/D 변환기(model : data translation DT 2821-G-8DI)를 통해 digital 신호로 변환하여 컴퓨터에 입력시켰다. 입력된 신호전압에 혼재하는 고주파노이즈를 필터링과정을 거쳐 제거한 후 최종적으로 결과를 분석하였다. 스트레인게이지의 신호전압은 시편의 자유단에 생긴 변위(y)에 선형적으로 비례하므로, 컴퓨터에 입력된 신호전압으로부터 시편의 자유진동에 따른 y의 변화를 역으로 계산하였다. 한편, 고정단에서의 최대 진폭변형률(ϵ_{max})은 y의 함수로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다¹⁴⁾.

$$\epsilon_{max} = \frac{t\pi^2}{8l_0^2} y \quad (1)$$

Table 1. Chemical composition of Fe-23%Mn-X%Co alloys

Alloy	Chemical Composition (wt.%)			
	Mn	Co	C	Fe
Fe-23%Mn	23.3	—	0.015	bal.
Fe-23%Mn-1%Co	23.1	1.23	0.011	bal.
Fe-23%Mn-2%Co	23.4	2.30	0.018	bal.
Fe-23%Mn-3%Co	23.4	3.49	0.011	bal.

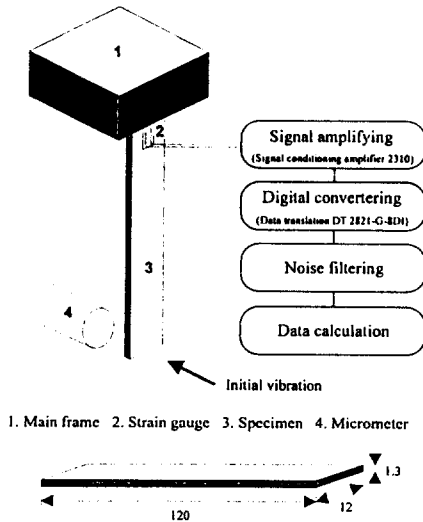


Fig. 1. Schematic illustration showing a damping measuring apparatus and dimension of its specimen (in mm).

여기서, t 는 시편의 두께, l_0 는 시편의 고정단에서 자유단까지의 거리(100mm)이다. 진동감쇠능을 나타내는 단위에는 대수감쇠율(logarithmic decrement, δ)⁵⁾을 사용하였으며, 그 정의는 다음 식과 같이 이웃한 두 변형진폭의 비에 자연대수를 취한 것이다.

$$\delta = \ln\left(\frac{y_n}{y_{n+1}}\right) \quad (2)$$

여기서, y_n 과 y_{n+1} 은 각각 자유진동곡선에서 n 번째와 $n+1$ 번째의 변형진폭을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

미세조직과 상분율

Fig. 2는 1100°C에서 용체화처리한 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 오스테나이트 결정립크기를 용체화처리 시간에 따라 측정된 결과이다. 각 합금 공히 용

체화처리 시간이 증가함에 따라 결정립크기가 증가하고 있으며, 용체화처리 시간이 동일한 경우에는 Co 함량이 많을수록 결정립크기가 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 오스테나이트 결정립크기를 120 μ m로 동일하게 조절하였다.

Fig. 3은 Fe-23%Mn-X%Co 합금을 용체화처리한 후 수냉한 다음, 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 사진에서 관찰의 흰 부분은 ϵ 마르텐사이트이고 검은 부분은 오스테나이트이다. 이 사진으로부터 Co 함량이 많을수록 ϵ 마르텐사이트 부피분율과 단위면적당 ϵ 마르텐사이트 플레이트의 수가 증가하는 것을 감지할 수 있다.

Fig. 4는 Fe-23%Mn-X%Co 합금에서 Co 함량에 따른 ϵ 마르텐사이트 부피분율의 변화를 정량적으로 측정된 결과이다. 동일한 냉각조건에서 Co량이 많을수록 ϵ 마르텐사이트 함량이 많았다.

Co량이 증가할수록 ϵ 량이 많아지는 이유는 Co량이 많을수록 오스테나이트의 적층결함에너지가 낮아져서 ϵ 마르텐사이트의 핵생성처인 적층결함이 쉽게 형성되기 때문이다.

Fig. 5-(a)는 Fe-23%Mn-X%Co 합금에서 Co

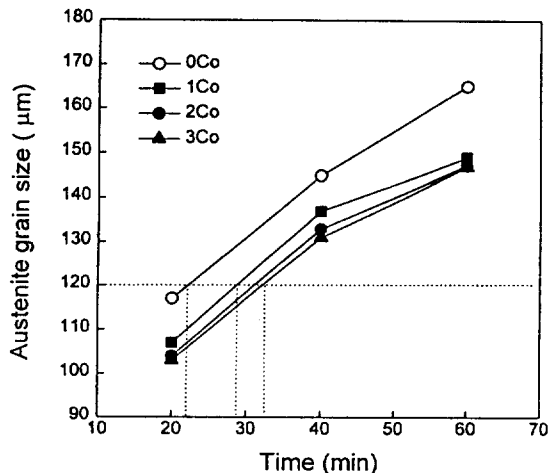


Fig. 2. Variation of austenite grain size with solution treatment time at 1100°C in Fe-23%Mn-X%Co alloys.

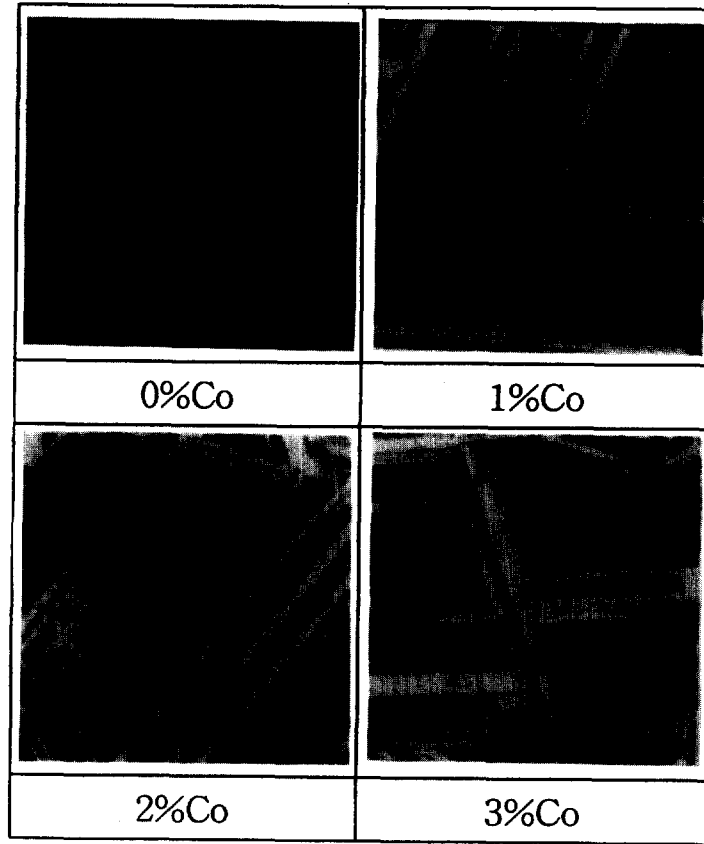


Fig. 3. Optical micrographs of the Fe-23%Mn-X%Co alloys subjected to water quenching after solution treatment.

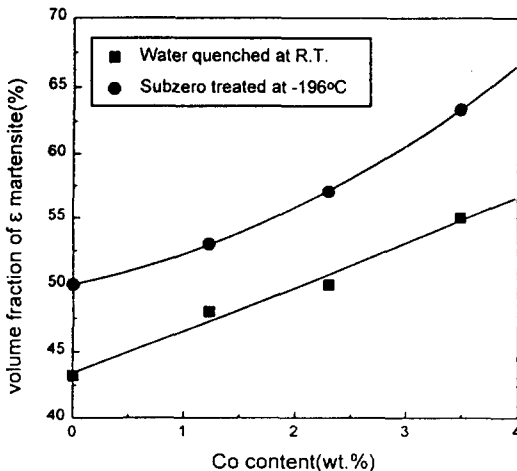


Fig. 4. Variation of volume fraction of ε martensite with Co content in Fe-23%Mn-X%Co alloys.

합량에 따른 경도값의 변화를 나타낸 것이다. 각 냉각조건에서 Co 함량이 많을수록 경도값이 증가하는 경향을 보였으며, 그 원인으로 오스테나이트 기지에 고용된 Co 원자의 고용강화효과와 오스테나이트보다 경도가 높은 ε 마르텐사이트 부피분율의 증가를 생각할 수 있다. Co 원자의 고용강화효과를 확인해보기 위하여 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 경도를 ε 마르텐사이트 부피분율에 대해 Fig 5-(b)에 나타내었다. ε 마르텐사이트 부피분율에 따른 경도값이 Co 함량에 관계없이 하나의 직선상에 나타나는 것으로 보아, Co 함량이 증가할수록 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 경도값이 증가하는 이유는 Co에 의한 고용강화효과가 아니라 ε 마르텐사이트의 부피분율의 증가에 기인한 것으로 생각된다.

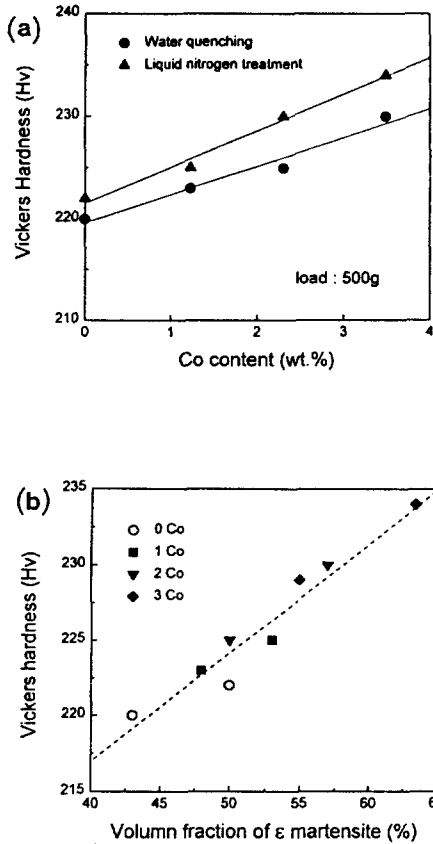


Fig. 5. Variation of Vickers hardness with(a) Co content and with(b) volume fraction of ϵ martensite in Fe-23%Mn-X%Co alloys.

진동감쇠능

Fe-23%Mn-X%Co 합금을 용체화처리 후 각각 수냉(15°C) 및 -196°C에 서브제로처리하여 ϵ 마르텐사이트를 각각 생성시킨 다음, $1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$ 의 진폭변형을 구간에서 진동감쇠능을 측정하여 Fig. 6에 나타내었다.

각 냉각조건에서 각 합금 공히 진폭변형율에 비례하여 진동감쇠능이 증가하는 전형적인 이력형 진동감쇠특성을 보여주고 있다. 같은 냉각조건에서 Co 함량이 많을수록 진동감쇠능이 높으며, 이러한 결과는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 Co 함량이 증가함에 따

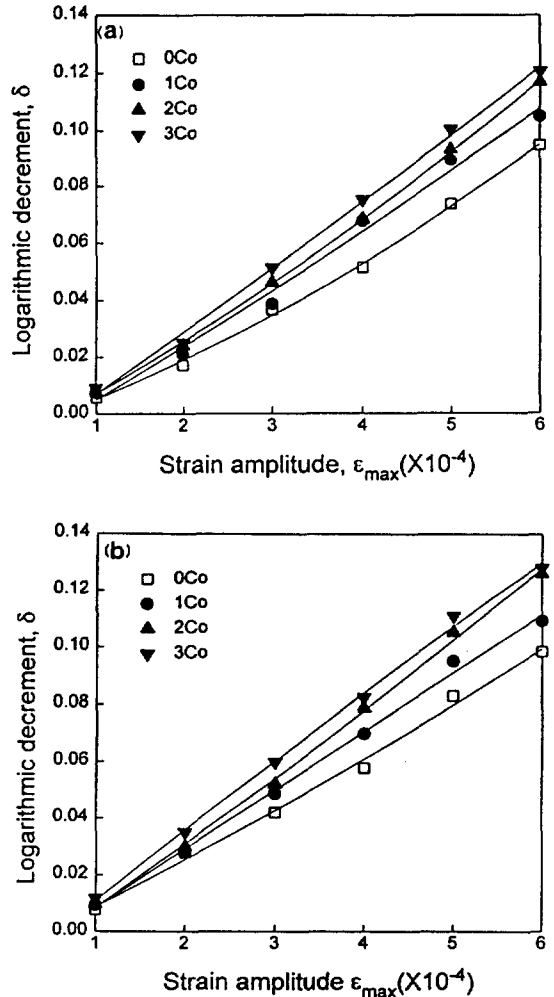


Fig. 6. Variation of damping capacity with strain amplitude in Fe-23%Mn-X%Co alloys subjected to (a) water quenching(15°C) and (b) subzero treatment at -196°C.

라 ϵ 마르텐사이트 파괴분율이 증가하는 결과와 잘 대응한다. 따라서, 같은 냉각조건에서 Co 함량이 많을수록 진동감쇠능이 증가하는 이유는 재료의 단위체 적당 ϵ 마르텐사이트 내부의 적층결합경계, 형체정 경계 및 γ/ϵ 계면과 같은 진동감쇠원의 총계면적이 ϵ 마르텐사이트 함량이 증가와 더불어 증가하기 때문이다.

Fig. 7은 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 진동감쇠능을 ϵ 마르텐사이트 부피분율의 함수로 나타낸 것이다. 저진폭 변형률(1×10^{-4} 와 3×10^{-4})에서는 ϵ 마르텐사이트의 부피분율에 대하여 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 진동감쇠능이 직선적으로 증가하였으며, 동일한 ϵ 마르텐사이트의 부피분율에서는 Co 함량에 관계없이 진동감쇠능이 거의 동일하였다.

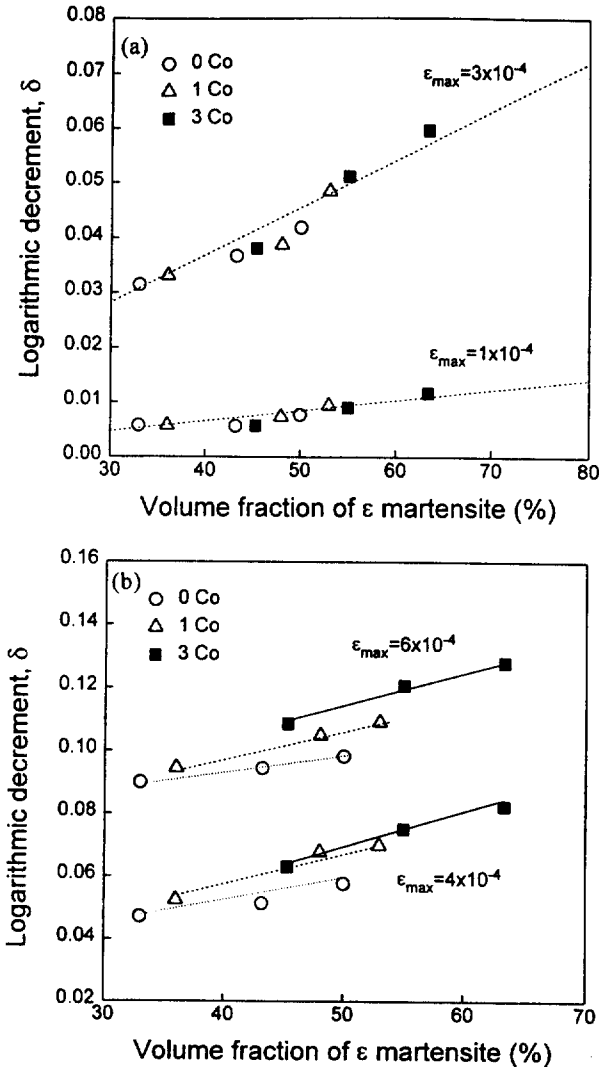


Fig. 7. Variation of damping capacity of Fe-23%Mn-X%Co alloys, measured at (a) 1×10^{-4} , 3×10^{-4} and (b) 4×10^{-4} , 6×10^{-4} strain amplitude, with volume fraction of ϵ martensite.

저자들의 일부^{7,8)}는 저진폭 변형률에서는 Fe-23%Mn합금의 감쇠원으로 적층결합경계와 형제정경계가 작동하고 고진폭 변형률에서는 γ/ϵ 계면이 추가적으로 작동한다고 보고한 바 있다. 따라서 저진폭 변형률에서 동일한 ϵ 마르텐사이트 분율에서는 Co 함량에 관계없이 진동감쇠능이 같다는 사실은 Co가 ϵ 마르텐사이트 내부의 적층결합경계나 형제정경계와 같은 진동감쇠원의 밀도에 거의 영향을 미치지 않음을 의미한다. 한편, 고진폭 변형률(4×10^{-4} , 6×10^{-4})에서는 저진폭 변형률과는 달리 ϵ 마르텐사이트 부피분율이 동일한 경우 Co 함량이 많을수록 진동감쇠능이 높았다. 그 원인으로 γ/ϵ 계면과 관련된 다음 두 가지 항목에 대해 검토한다.

(i) 단위체적당 γ/ϵ 계면적의 증가 : Fig. 8은 수냉한 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 광학현미경 조직사진을 영상분석기(Image analyzer)로 분석하여 단위면적당 γ/ϵ 계면의 총길이를 측정하여 그 결과를 ϵ 마르텐사이트 부피분율의 함수로 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 ϵ 마르텐사이트 부피분율이 동일한 경우 Co 함량이 많을수록 γ/ϵ 계면의 총길이가 증가하였으며, 이는 Co 함량이 많을수록 단위체

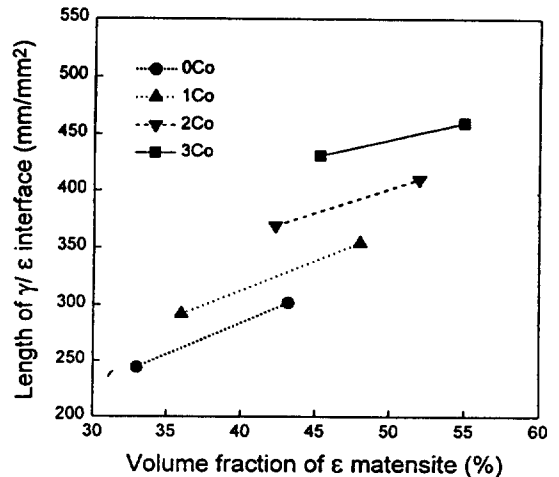


Fig. 8. Variation of length of γ/ϵ interface in Fe-23%Mn-X%Co alloys with volume fraction of ϵ martensite.

적당 ϵ 마르텐사이트 플레이트의 수가 증가하여 γ/ϵ 계면적이 증가하였음을 의미한다.

(ii) γ/ϵ 계면의 이동도 증가 : Fig. 9는 Co함량이 γ/ϵ 계면의 이동도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수냉한 Fe-23%Mn과 Fe-23%Mn-X%Co 합금을 사용하여 상온에서 2%, 4% 인장변형한 후 동일한 부위의 조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 인장변형에 따른 γ/ϵ 계면의 이동을 정량적으로 파악하기 위하여, Fig. 9에 나타난 인장변형에 따른 ϵ 마르텐사이트 플레이트의 폭변화를 영상분석기로 분석하여 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 4%까지

인장변형한 후 Fe-23%Mn 합금과 Fe-23%Mn-X%Co 합금에서 평균 ϵ 마르텐사이트 플레이트의 폭이 각각 11%와 12%가 증가하여 거의 유사한 값을 나타내었다. 이와 같은 결과로부터, Co 함량이 γ/ϵ 계면의 이동도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

따라서, ϵ 마르텐사이트 부피분율이 동일한 경우 고진폭 변형률(4×10^{-4} , 6×10^{-4})에서 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 진동감쇠능이 Co 함량이 많을수록 높아지는 것은 γ/ϵ 계면적의 증가에 주로 기인한다고 생각된다.

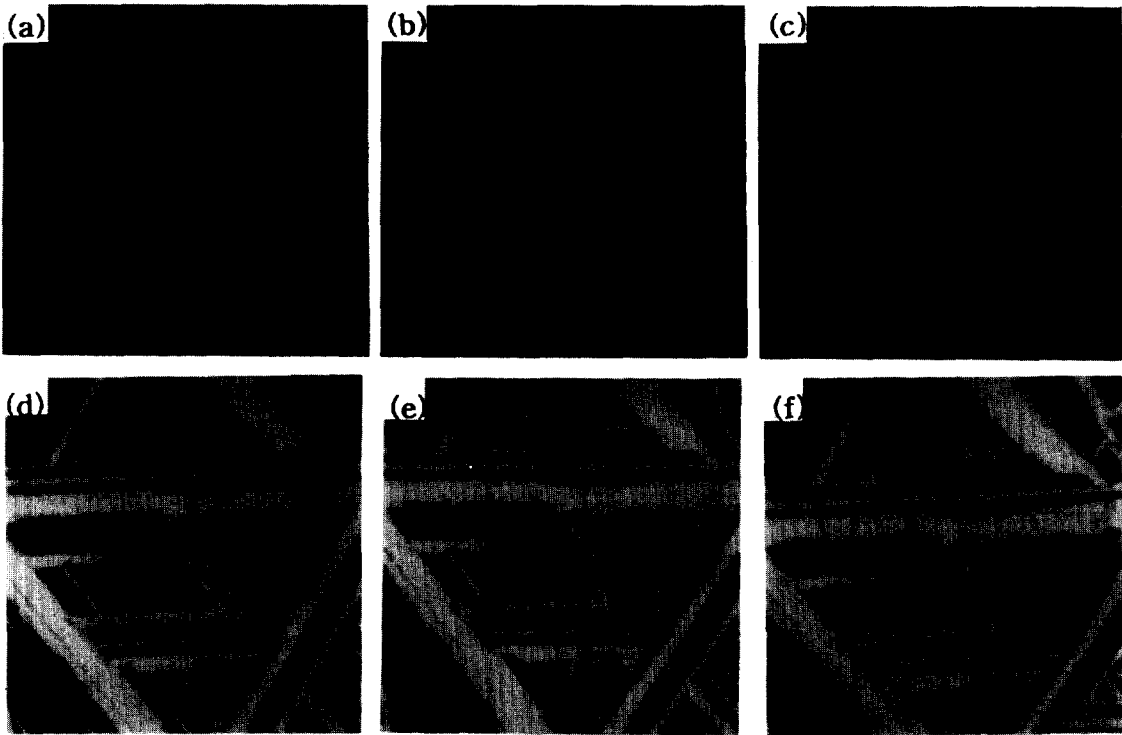


Fig. 9. Optical micrographs of Fe-23%Mn-X%Co alloys before and after 2% and 4% tensile deformations at room temperature.

- (a) undeformed Fe-23%Mn alloy (b) 2% deformed Fe-23%Mn alloy
 (c) 4% deformed Fe-23%Mn alloy (d) undeformed Fe-23%Mn-3%Co alloy
 (e) 2% deformed Fe-23%Mn-3%Co alloy (f) 4% deformed Fe-23%Mn-3%Co alloys

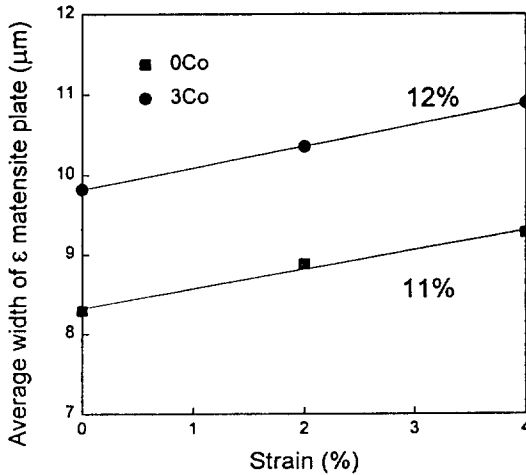


Fig. 10. Average Width of ϵ martensite plate as a function of tensile deformation in Fe-23% Mn and Fe-23%Mn-3%Co alloys.

4. 결 론

Fe-23%Mn 합금의 미세조직과 진동감쇠능에 미치는 Co 첨가의 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Fe-23%Mn-X%Co 합금에서, Co 함량이 증가함에 따라 ϵ 마르텐사이트 부피분율이 증가하였다.
2. 용체화처리 후 수냉 및 -196°C 에 각각 냉각한 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 경도는 Co 함량이 많을수록 증가하였으며, 이것은 주로 ϵ 마르텐사이트 부피분율의 증가에 기인한다.
3. 용체화처리 후 각각 수냉 및 -196°C 에 서브제로 처리한 Fe-23%Mn-X%Co 합금의 진동감쇠능은 진폭변형률에 비례하여 증가하는 전형적인 이력형 진동감쇠특성을 나타내었으며, 같은 진폭변형률에서 Co 량이 많을수록 진동감쇠능이 높았다.
4. Fe-23%Mn-X%Co 합금에서 ϵ 마르텐사이트 부피분율에 따른 진동감쇠능을 조사한 결과, 저진폭 변형률($\epsilon_{\max}=1\sim 3\times 10^{-4}$)에서는 동일한 ϵ 마르텐사이트 부피분율에서 Co 함량에 관계없이

진동감쇠능은 동일하였다. 그러나 고진폭 변형률($\epsilon_{\max}=4\sim 6\times 10^{-4}$)에서는 동일한 ϵ 마르텐사이트 부피분율에서 Co 함량이 많을수록 진동감쇠능이 높았다.

후 기

이 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문연구과제(KOSEF 941-0800-010-2)의 연구비로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다. 그리고 이 논문을 작성하는데 많은 협력과 조언을 아끼지 않은 신한철군(연세대 박사과정 대학원생)에게도 깊은 감사를 표하는 바입니다.

참고문헌

1. 최종술, 김준동, 백승한 : 대한민국특허 제 057437호, 1992년 12월 10일
2. C. S. Choi, M. E. Lee, S. H. Baik, Y. C. Son, J. C. Kim, J. H. Jun and Y. S. Ko : U.S.A. Pat. No. 5290372, Mar. 1 (1994)
3. C. S. Choi, S. H. Baik and J. D. Kim : Jpn. Pat. No. 2036558, Mar. 28 (1996)
4. 최종술, 김준동, 백승한 : 대한민국특허 제 107044호, 1996년 11월 4일
5. Y. K. Lee, J. H. Jun and C. S. Choi : Scripta Mater., 35 (1996) 825
6. 전중환, 이영국, 최종술 : 대한금속학회지, 33 (1995) 1600
7. 전중환, 이영국, 최종술 : 대한금속학회지, 9 (1996) 112
8. 전중환, 이영국, 최종술 : 대한금속학회지, 34 (1995) 1399
9. P. C. J. Gallagher : Metall. Trans., 1 (1970) 2429
10. 전중환 : 공학박사학위논문, 연세대학교, (1997)

11. B. D. Cullity : "Elements of X-ray Diffraction", Addison-Wesley Press, (1978) 472
12. J. Burke and D. W. Harvey : J. Iron Steel Inst., 208 (1970) 779
13. B. L. Averbach and M. Cohen : Trans. Met. Soc. AIME, 176 (1948) 401
14. K. Kawahara, N. Sakuma and Y. Nishizaki : J. Jpn. Inst. Met., 57 (1993) 1089
15. I. G. Ritchie and Z-L. Pan : Metall. Trans. A, 22A (1991) 607