

Fe-17%Mn 합금의 진동감쇠능과 기계적 성질에 미치는 합금원소(C, Si) 및 열간압연의 영향

김정철 · 한동운 · 백진현 · 김태훈 · 백승한 · 이영국*†

(주)우진 계측기술연구소, *연세대학교 금속공학과

Effects of Alloying Elements(C, Si) and Hot-Rolling on Damping Capacity and Mechanical Properties of Fe-17%Mn Alloys

J.C.Kim, D.W.Han, J.H.Back, T.H.Kim, S.H.Baik, and Y.K.Lee*

Research Institute of Measuring Technology, Woojin Inc., Kyungki 445-813, Korea

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

Abstract In this study, the effects of C and Si on damping capacity and mechanical properties of as-cast and as-rolled Fe-17%Mn alloys were investigated as a basic study for the purpose of the commercialization of the alloy. The M_s temperature of $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation in Fe-17%Mn alloy was decreased with increasing C and Si contents, resulting in the less volume fraction of ϵ martensite. The damping capacity was also decreased with increasing alloying content because of less ϵ amount and the reduction in mobility of the damping sources such as the stacking fault boundaries and γ/ϵ interfaces due to the pinning effect by alloying elements. The mechanical properties of as-rolled alloys were superior to those of as-cast alloys probably because of finer γ grains, larger amount of ϵ martensite, and chemical homogeneity.

(Received 28 January 2005; accepted 14 March 2005)

Key words: Specific damping capacity(SDC), Mechanical property, ϵ -martensite, Fe-Mn alloy

1. 서 론

소음 및 진동공해에 대한 사회적 관심이 점차로 고조되어 차량, 선박, 가전제품 등의 소음, 진동에 관한 법적 규제도 점차 강화되고 있고, 최근 우리나라에서도 건물 붕괴사고를 줄이기 위해 내진설계를 의무화하였다. 또한 노동환경의 개선이나 상품의 고부가가치화라는 측면에서도 기계, 기기류의 저소음, 저진동화가 불가결한 과제로 대두되고 있다. 따라서, 높은 진동감쇠능을 갖는 소위 방진합금에 관한 연구도 꾸준히 진행되어오고 있다[1-6]. 방진합금이란 내부마찰(Internal friction)이 커서 외부에서 가한 진동 에너지의 대부분을 열에너지로 전환시키는 합금을 말한다. 일반적으로 금속은 강도가 낮을수록 진동감쇠능이 큰 경향이 있기 때문에, 감쇠능만 크다고 해서 모두 방진합금이 될 수는 없으며, 반드시 일정 수준 이상의 인장강도를 유지해야 한다. 일반적으로 방진합금은 비감쇠능(Specific damping capacity)이

10% 이상이면서 동시에 "비감쇠능 \times 인장강도"의 값이 1000%·kgf/mm² 이상인 합금으로 정의하며, 또한 방진합금을 제진합금, 감쇠합금 또는 흡진합금이라고도 부른다.

본 연구진은 Fe-Mn 합금이 높은 진동감쇠능 및 우수한 기계적 성질을 가지고 있음을 처음으로 밝혀냈으며[7], 진동감쇠는 γ/ϵ 계면과 ϵ 마르텐사이트의 파괴분율에 비례한다고 보고한 바 있다[8].

본 연구에서는 Fe-17%Mn 방진합금의 상용화를 위해 제조단가를 낮추고, 용탕의 유동성 및 기계가공성을 개선하고자 C 및 Si를 첨가하였는데, 이때 이들 합금원소의 첨가가 주조상태 및 압연상태의 Fe-17%Mn 방진합금의 진동감쇠능과 기계적 성질에 어떤 영향을 주는지 조사하였다.

2. 실험방법

Fe-17wt.%Mn 합금의 용해시 사용되는 Fe의 재료

†E-mail : yklee@yonsei.ac.kr

비를 줄이고자 전해철 대신 C가 함유된 고철을 사용하고자 하였으며, 이를 위해 사전에 C가 이 합금의 진동감쇠능 및 기계적 성질에 미치는 영향을 조사할 필요가 있다. 이를 위해 C가 각각 0.02wt.% 및 0.08wt.% 첨가된 합금을 고주파 유도용해로를 사용하여 대기용해하였다. 또한, 위와 같이 C가 함유된 합금들에 용탕의 유동성 및 기계가공성을 개선시키기 위하여 Si를 0.5% 첨가한 합금들도 용해하였다. 대기 용해시 순철과 0.08wt.%C를 함유한 고철을 먼저 용해한 후 Mn, Si를 첨가하여 1650°C에서 용해하고, 1400°C 이상에서 용탕을 직경 30 mm, 길이 300 mm의 환봉 형태의 사형에 주입하여 잉곳트를 만든 후 상온까지 공냉하였다. 이들 합금의 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

이 잉곳트들을 1100°C에서 24시간 균질화처리한 후, 주조상태의 진동감쇠능과 기계적 성질을 보기 위해 일부 잉곳트들은 바로 시편가공되었다. 한편, 열간압연상태의 특성을 조사하기 위해서 나머지 잉곳트들을 1000°C에서 열간압연하여 약 ϕ 15 mm의 봉으로 만든 후, 그 봉들로부터 봉상의 진동감쇠능 및 인장시험편들을 제작하였다. 모든 주조 및 압연상태의 시험편들을 각각 실험에 앞서 1050°C에서 2시간 용체화처리한 후 상온까지 공냉하였다.

진동감쇠능은 Fig. 1의 Föpple-Pertz 비틀림 시험장치[9]를 이용하여 측정되었으며, Fig. 2에 보이는 바와 같이 한 사이클당 손실되는 에너지를 백분율로 나타내는 비감쇠능(SDC, Specific Damping Capacity)으로 나타내었다[10]. 인장시험은 JIS 4호 봉상시편을 Instron-4468 만능시험기에 장착한 후, 상온에서 crosshead speed 2 mm/min로 실시하였다. 각 시편들의 미세조직을 관찰하기 위해 먼저 기계연마하고, 그 연마로 인해 형성될 수 있는 응력유기 마르텐사이트를 제거하기 위해 acetic acid(90ml)+perchloric

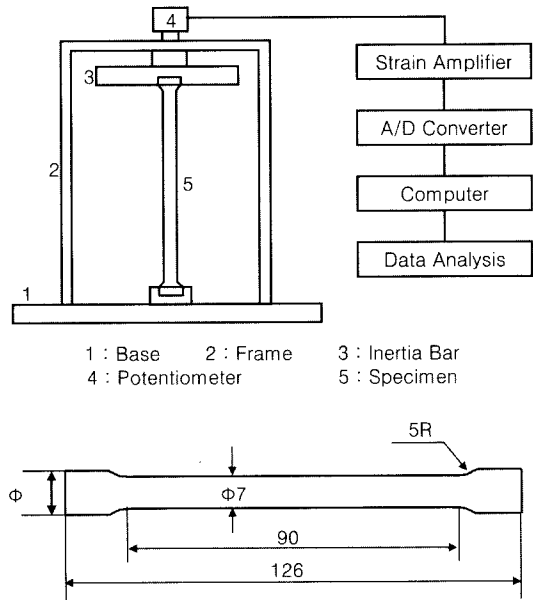
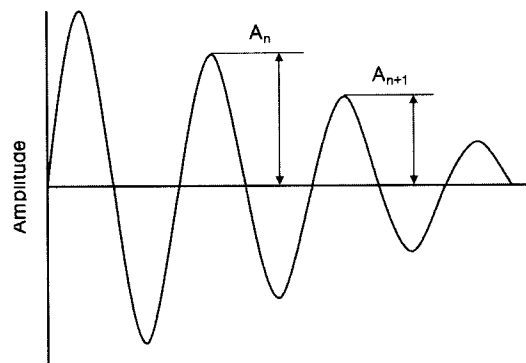


Fig. 1. Schematic diagram of damping measuring apparatus and dimension of its specime.

acid(10 ml)의 혼합용액에서 전압 20V, 전류 90 mA의 조건으로 전해연마한 후, 증류수(10cc)+K₂S₂O₅(0.12 g)의 용액으로 부식시켜 광학현미경 조사를 관찰하였다.

용체화처리 후 냉각하는 동안 열적으로 생성된 ϵ



$$SDC = \frac{\Delta W}{W} \times 100 (\%) = \frac{A_n^2 - A_{n+1}^2}{A_n^2} \times 100$$

W : vibration energy

ΔW : vibration energy that is dissipated per cycle

A_n, A_{n+1} : amplitude of vibrational curve

Fig. 2. Calculation of specific damping capacity from free vibratio.

Table 1. Chemical composition of the alloys used

Alloy No.	Chemical Composition (wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
C2Si0	0.01	-	17.7	0.02	0.01	bal.
C2Si5	0.02	0.49	17.6	0.01	0.01	bal.
C8Si0	0.08	-	17.6	0.02	0.01	bal.
C8Si5	0.09	0.46	17.5	0.02	0.02	bal.

마르텐사이트는 우선방향을 갖지 않기 때문에, 각 상 별로 대표적인 회절선을 선택하여 분석하였다. 주사 선과 filter는 각각 Fe-K α 선($\lambda = 1.937\text{\AA}$)과 Mn을 사용하였으며, 회절각(2θ)에 40~120°, 주사속도는 4°/min, 선택한 회절선은 ϵ (10.1), γ (200), α' (110)이었다.

각 회절선의 적분강도를 이용하여 상분율을 구하는 식은 다음과 같다[11]~[12].

$$V_{\epsilon} + V_{\gamma} + V_{\alpha} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{I_{\gamma}}{I_{\epsilon}} = \frac{R_{\gamma}}{R_{\epsilon}} \times \frac{V_{\gamma}}{V_{\epsilon}} \quad (2)$$

$$\frac{I_{\alpha}}{I_{\epsilon}} = \frac{R_{\alpha}}{R_{\epsilon}} \times \frac{V_{\alpha}}{V_{\epsilon}} \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{v^2} \cdot F^2 \cdot p \cdot (L.P) \cdot e^{-2M} \quad (4)$$

V : 각 상의 부피분율

I : 각 상의 특정회절선의 적분강도

v : 각 상의 단위격자의 부피

F : 구조인자

p : 다중도인자

L.P : Lorentz-편광인자

e^{-2M} : Debye-Waller 온도인자

(4)식의 R 값을 구하는데 필요한 인자들은 Cullity[13]가 제시한 값을 사용하였으며, 이중 온도 인자는 20°C에서의 철의 온도인자를 사용하였다. 이렇게 구한 각 상의 R 값과 실제 측정된 각 상의 적분강도를 (2)식과 (3)식에 대입한 후, (1)식을 이용하여 각 상의 부피분율을 구하였다.

마르텐사이트 변태개시온도는 열팽창측정기(Dilatometer)를 이용하여 1050°C에서 5°C/sec의 냉각속도로 냉각시키면서 측정된 열팽창곡선으로부터 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 마르텐사이트 변태개시온도(M_s)를 구했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 C 첨가의 영향

Fig. 3은 압연한 시험편의 C 첨가량에 따른

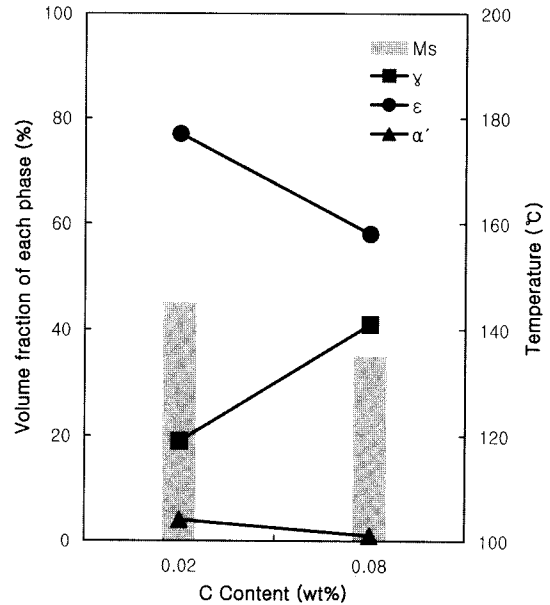


Fig. 3. Variation of transformation temperature and volume fraction of each phase with C content in Fe-17%Mn alloy.

$\gamma \rightarrow \epsilon$ 마르텐사이트 변태 개시온도(이하 M_s)와 각 상의 상분율의 변화를 보여주고 있다. C 함량이 0.08%로 증가함에 따라 오스테나이트 상이 더욱 안정해져서 M_s 가 약 10°C 낮아졌으며, 이와 비례하여 ϵ 및 α' 마르텐사이트의 양도 감소하였다.

Fig. 4는 압연한 시험편의 C 첨가량에 따른 ϵ 마르텐사이트량과 진동감쇠능의 변화를 나타내고 있는데, C가 많을수록 ϵ 마르텐사이트량의 감소와 더불어 진동감쇠능도 감소하였다. Fig. 5의 광학현미경 조직사진에서 보는 바와 같이 주조상태 및 압연상태에 상관없이 C 첨가량이 증가하면, M_s 온도가 낮아져 ϵ 마르텐사이트 부피분율이 감소하여 주 진동감쇠원인 ϵ 내 적층결함과 γ/ϵ 상계면의 감소가 발생하여 진동감쇠능이 저하되는 것으로 생각된다. 또한, C는 ϵ 마르텐사이트 내 적층결함 및 γ/ϵ 상계면으로 편석하여 이들 계면의 이동을 방해하기 때문에 진동감쇠능을 크게 저하시킨다고 생각된다.

3.2 Si 첨가의 영향

Fig. 6은 압연한 시험편의 Si 첨가량에 따른 M_s 와 각 상의 분율의 변화를 보여주고 있다. Si이 0.5%

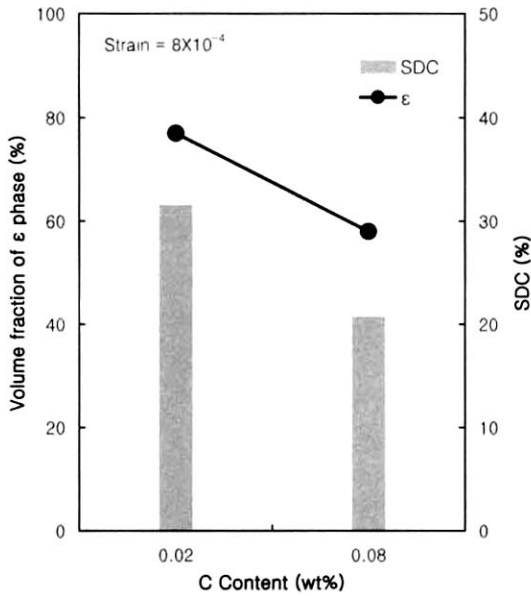


Fig. 4. Variation of specific damping capacity and volume fraction of ε phase with C content in Fe-17%Mn alloy.

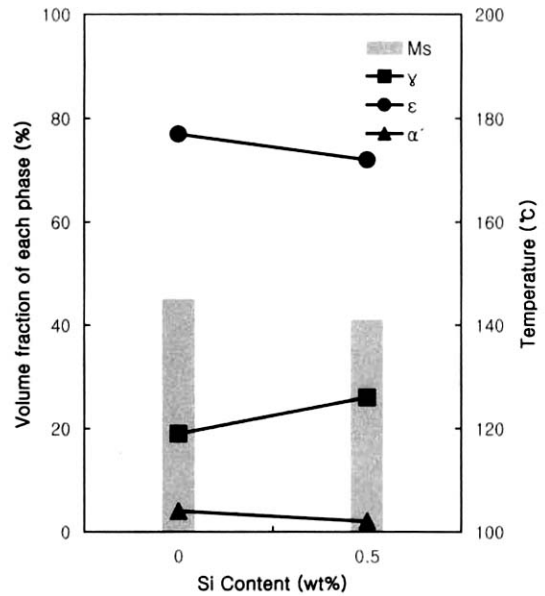


Fig. 6. Variation of transformation temperature and volume fraction of each phase with Si content in Fe-17%Mn-0.02%C alloy.

첨가되었을 때, M_s 가 약 5°C 낮아졌으며, 이와 비례하여 ϵ 마르텐사이트의 양도 감소하였다. 그러나, C의 영향에 비해 큰 영향을 미치지 못하는 듯하였다. Si은 오스테나이트의 적층결함에너지를 감소시키고 오스테나이트(fcc)와 ϵ (hcp) 상의 자유에너지가 같게 되는 T_0 온도를 증가시키는 것으로 알려져 있어 [14], M_s 온도의 상승과 ϵ 마르텐사이트양의 증가가

예상되었지만 결과는 그 반대로 나타났다. 이는 Si 고용강화로 인해 마르텐사이트 전단변태시 수반되는 탄성 및 소성변형에너지의 증가에 기인된 것으로 판단된다.

Fig. 7은 압연한 시험편의 Si 첨가량에 따른 ϵ 마

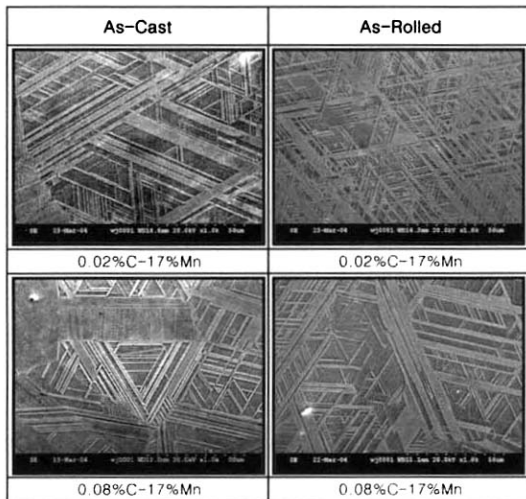


Fig. 5. Microstructures of as-cast and as-rolled Fe-17%Mn-x%C alloy.

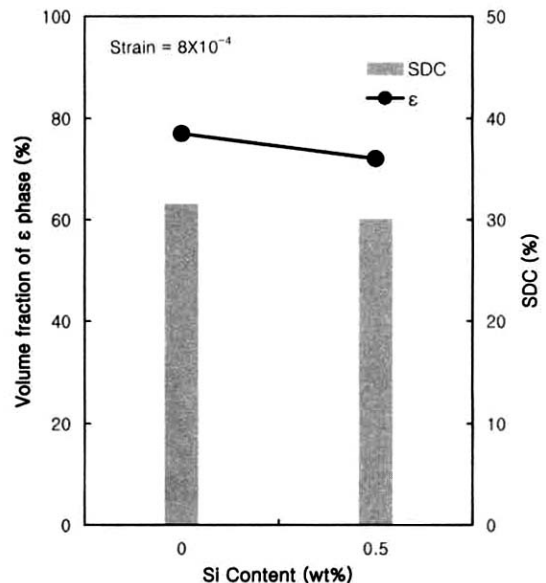


Fig. 7. Variation of specific damping capacity and volume fraction of ε phase with Si content in Fe-17%Mn alloy.

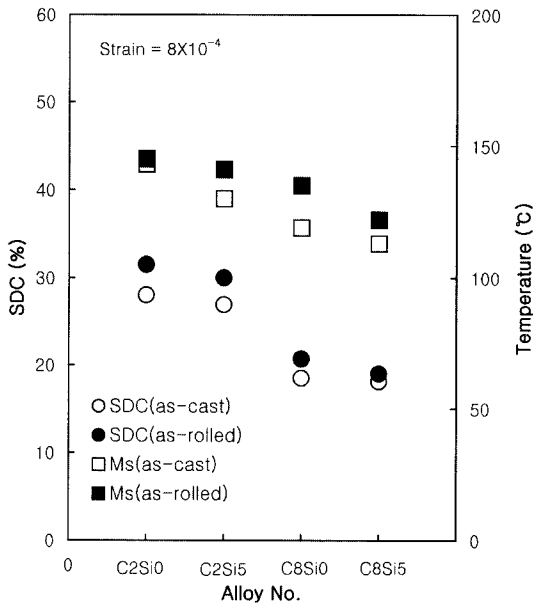


Fig. 8. Variation of specific damping capacity and transformation temperature with C and Si contents in Fe-17%Mn alloy.

르텐사이트량과 진동감쇠능의 변화를 나타내고 있는데, Si 첨가로 인해 ϵ 마르텐사이트량이 감소하고 더불어 진동감쇠능도 약간 저하되었다. 그러나, Si 첨가량이 0.5%까지는 진동감쇠능이 현저히 저해되지 않으므로 용탕의 유동성이나 고용강화로 인한 강도 향상 등을 위해 소량의 Si 첨가는 바람직한 것으로 판단된다.

3.3 주조 및 압연상태의 비교

Fig. 8은 본 실험에 사용된 모든 합금의 주조 및 압연상태에 따른 M_s 온도와 진동감쇠능의 변화를 보여주고 있다. 모든 합금에서 압연상태의 시편들이 모두 주조상태보다 M_s 온도가 높고, 진동감쇠능도 보다 높은 값을 보여주고 있다. 이는 Fig. 5의 조직 사진에서 보이는 바와 같이, 압연상태 시편에서는 ϵ 마르텐사이트양이 클 뿐 아니라, ϵ 마르텐사이트가 치밀하고 미세하여 진동감쇠원중 하나인 γ/ϵ 계면이 보다 많이 존재하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 9는 본 실험에 사용된 모든 합금의 주조 및 압연상태에 따른 인장성질의 변화를 보여주고 있다. 모든 합금에서 압연상태가 주조상태보다 인장강도가

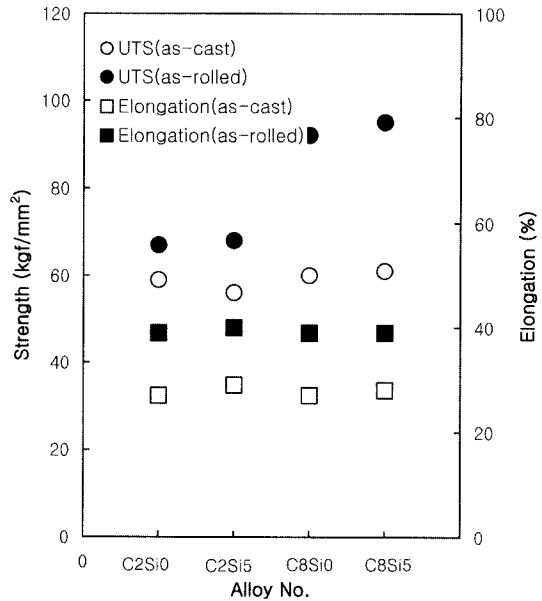


Fig. 9. Variation of mechanical properties with C and Si contents in Fe-17%Mn alloy.

우수한 것으로 나타났는데, 이는 Fig. 5와 같이 압연에 의해 주조상태보다 조직이 치밀하고 미세한 ϵ 마르텐사이트의 양이 많아졌기 때문이라고 생각된다. 한편, 0.08%C이 0.02%C보다 높은 인장강도를 보였는데, 이는 C에 의한 고용강화때문인 것으로 생각된다. 또한, 연신율도 압연상태가 주조상태보다 우수한

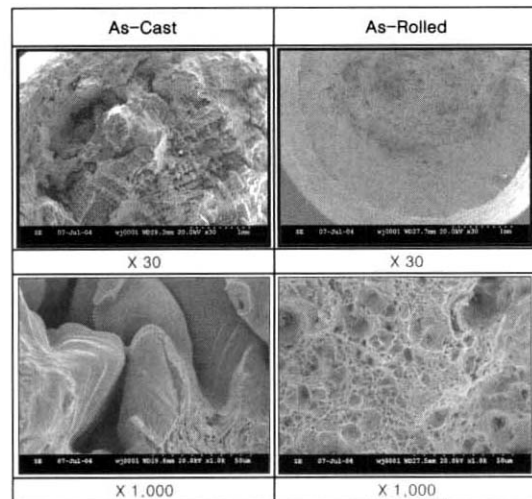


Fig. 10. Fractographs of as-cast and as-rolled Fe-17%Mn-0.02%C alloy.

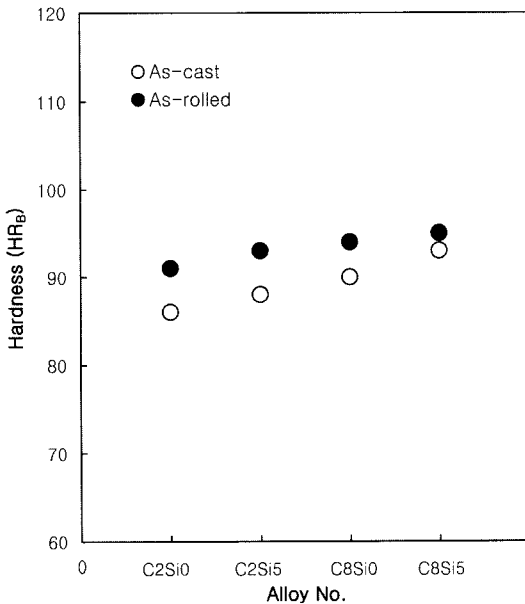


Fig. 11. Variation of hardness with C and Si contents in Fe-17%Mn alloy.

것으로 나타났는데, 이는 인장시편의 파단면을 통하여 검증되었다. Fig. 10과 같이 주조상태의 파단면은 취성파괴 단면을 보이지만, 압연상태의 파단면은 연성의 파단면을 보였다. 즉, 주조상태의 취성파괴는 크랙이 입계를 따라 성장하여 파괴가 전파되는 입계 파괴의 양상을 보였으며, 압연상태의 연성파괴는 전형적인 단면적 감소와 덩플의 형성거동이 확인되었다.

Fig. 11은 C와 Si가 첨가된 합금의 주조 및 압연 상태에 따른 로크웰 경도 변화를 보여주고 있는데, 인장강도와 비슷한 경향을 보였다.

4. 결 론

Fe-17%Mn 합금에 C 및 Si 첨가하여 이에 따른 진동감쇠능 및 기계적 성질의 변화를 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. C가 0.08% 첨가되었을 때, M_s 온도의 저하로 ϵ 마르텐사이트량이 감소하였으며, 탄소원자의 진동 감쇠원 고착과 ϵ 마르텐사이트량 감소로 인해 진동 감쇠능이 감소하였다.

2. Si이 0.5% 첨가되었을 때, C와 마찬가지로 M_s 온도, ϵ 마르텐사이트량 및 진동감쇠능이 모두 감소하였다. 그러나, 진동감쇠능의 감소량은 매우 작았다.

3. 모든 합금에서 압연상태의 시편들이 주조상태보다 진동감쇠능뿐만 아니라 강도, 경도, 연신율 등 기계적 성질도 상당히 우수하였다.

참고문헌

1. R. D. Adams : Journal of Sound and Vibration, 23(1972) 199.
2. 杉本孝一 : 鐵と鋼, 14(1974) 127.
3. S. H. Baik, J. C. Kim, K. K. Jee, M. C. Shin and C. S. Choi : Journal de Physique IV, Vol.5(1995) C8-391.
4. 백승한, 김정철, 지광구, 최종술 : 한국열처리공학회지, 8(1995) 113.
5. 백승한, 김정철, 지광구, 신명철, 최종술 : 한국열처리공학회지, 8(1995) 197.
6. 백승한, 김정철, 지광구, 신명철, 최종술 : 한국열처리공학회지, 9(1996) 53.
7. 최종술, (주)우진 : 대한민국 특허 제057437호 (1992).
8. 김정철, 최종술 : 대한금속학회 추계발표대회 개요집, (1992) 45.
9. A. W. Cochardt : Trans. AIME, 226(1956) 1295.
10. L. M. Schetky and J. Perkins : Machine Design, April 6(1978) 202.
11. B. L. Averbach and M. Cohen : Trans. Met. Soc. AIME, 176(1948) 401.
12. J. Burke and D. W. Harvey : J. Iron and Steel Inst., 208(1970) 779.
13. B. D. Cullity : Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Co., (1956) 139.
14. A. Sato, Y. Yamaji and T. Mori : Acta Metall., 34(1982) 287.