

## 논문

## Fe-17%Mn 합금의 진동감쇠능 및 내식성에 미치는 Cr, Ni 첨가의 영향

김정철 · 한동운 · 백진현 · 김태훈 · 백승한 · 이영국\*†

(주)우진 계측기술연구소

\*연세대학교 금속공학과

## Effects of Cr and Ni on Damping Capacity and Corrosion Resistance of Fe-17%Mn Alloy

Jung-Chul Kim, Dong-Woon Han, Jin-Hyun Back, Tai-Hoon Kim, Seung-Han Baik, and Young-Kook Lee\*\*

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

\*Dept. of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

### Abstract

Effects of Cr and Ni addition on damping capacity, mechanical property, and corrosion resistance of Fe-17%Mn martensitic alloy have been studied. Martensite start temperature( $M_s$ ) of the alloy decreases linearly with increasing Cr and Ni contents up to 15%. The damping capacity decreases gradually from 27 to 22% in specific damping capacity(SDC) with increasing Cr and Ni contents from zero to 10%, and decreases rapidly with further Cr and Ni content in Fe-17%Mn alloy. The tensile strength of the alloy maintains a level of 60 kgf/mm<sup>2</sup> regardless of Cr content with an elongation of 20 to 25%. But, in case of Fe-17%Mn-x%Ni alloy, the tensile strength decreased rapidly with the Ni content of above 10% because of austenite morphology. Immersion test in 5% NaCl solution leads to the result that the corrosion resistance of the alloy becomes excellent above 10% Cr. From the above results, it is concluded that the optimum Cr content to improve the mechanical property and corrosion resistance of the alloy in 5%NaCl solution with a lesser decrease in damping capacity is about 10%. In the case of 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> condition, the Fe-17%Mn-10%Ni is an optimum alloy.

**Keywords :** specific damping capacity(SDC), mechanical property,  $\epsilon$ -martensite, corrosion rate, martensite start temperature

(Received February 18, 2005; Accepted April 6, 2005)

### 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 진동 감쇠능을 갖는 소위 방진합금에 관한 연구도 꾸준히 진행되어 오고 있다[1-6]. 방진합금이란 내부마찰(Internal Friction)이 커서 외부에서 가한 진동 에너지의 대부분을 열에너지로 전환시키는 합금을 말한다. 일반적으로 금속은 강도가 낮을수록 진동 감쇠능이 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×인장

강도"의 값이 1000%·kgf/mm<sup>2</sup> 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  $\gamma/\epsilon$  계면과  $\epsilon$  마르텐사이트의 파괴분율에 비례한다고 보고한 바 있다[8].

한편, 재료의부식에 의한 파괴는 실제 재료들을 설계수명보다도 빨리 파괴시키고, 파괴형태도 커다란 재해(catastrophic failure) 형태로 일어나기 때문에 재료선택에 있어서 부식은 재료의 기계적 강도 측면과 아울러 매우 중요한 의미를 갖는다.

부식으로 인해 보일러, 터빈 블레이드, 교량의 부품(강상판, expansion joint 등) 및 고층건물과 같은 예에서처럼 예기치 못한 무서운 결과를 초래할 수 있다는 점에서, 작동기구나 구조물의 안정성 향상 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

1800년대에 들어오면서 부식기구의 이론적 근거나 전기화학

†E-mail : yklee@yonsei.ac.kr

적 기초의 해명을 통하여 철강의 치명적인 결함이 되는 녹이나 부식에 대해서 연구가 수행되어 왔다. 그 후 철강재료의 방식에 관한 연구가 활발히 진행되면서 도장, 금속용사 및 특정금속 화합물에 따른 표면처리 및 Cr, Ni 등을 함유한 내식성 강이 실용화되는 것이 가능해졌다.

따라서, 본 연구에서는 진동감쇠능이 우수하다고 보고된 Fe-17%Mn 이원계 합금의 내식성을 향상시킬 목적으로 제 3원소인 Cr과 Ni를 각각 0~15% 첨가하여 인장성질, 진동감쇠능 및 미세조직의 변화를 조사하였으며, 침지시험을 통하여 S45C(기계구조용 탄소강재), SS41(일반 구조용 압연강재) 등의 비교재와 함께 상대적인 내식성을 비교 평가하였다.

## 2. 실험 방법

Fe-17%Mn의 기본조성에 내식성을 향상시키기 위하여 Cr 및 Ni를 각각 0, 5, 10, 15%로 변화시켜 첨가하여 진동감쇠능, 내식성 및 기계적 성질의 변화를 조사하였다. 본 연구에 사용된 합금의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 용해는 고주파 유도용해로를 사용하였으며, 순철을 용해한 후 유동성을 위해 Si를 0.5% 첨가하고, 마지막에 Mn을 투입하여 용해하였다. 1650°C에서 용해하여 1400°C 이상에서 사형에 주입하여 직경 30 mm, 길이 300 mm의 환봉으로 주조하였다. 이 잉곳트를 1100°C에서 24시간 균질화처리한 후, 진동감쇠능 및 인장 시험편을 제작하였다. 한편, 제작한 시험편은 1050°C에서 2시간 용체화처리한 후 상온까지 공냉하였다.

진동감쇠능은 Föpple-Pertz 비틀림 시험장치[9]를 이용하여 측정하였으며, 비감쇠능(Specific Damping Capacity, SDC)으로 나타내었다[10]. 인장시험편은 JIS 4호 봉상 인장시험편으로 제작하여 Instron-4468 만능시험기를 이용하여 상온에서 cross-head speed 2 mm/min로 인장하였다. 한편, 열처리를 행한 시험편을 연마에 의해 형성될 수 있는 응력유기 마르텐사이트 생성을 방지하기 위해 acetic acid(90 ml)+perchloric acid(10ml)의 혼합용액에서 전압 20 V, 전류 90 mA의 조건으로 전해연마한 후, 증류수(10 cc)+K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>(0.12 g)의 용액을 사용하여 부식시켜 조직관찰을 하였다. 용체화처리 후 각 상들의 분율은 X-선 회절 실험을 통해 얻어진 대표적인 회절피크 ε(10·1), γ(200), α'(110)의 적분강도를 이용하여 구하였다. 이때, 주사선과 filter는 각각 Fe-Kα선(λ=1.937Å)과 Mn을 사용하였으며, 회절각(2θ)은 40~120°, 주사속도는 4°/min이었다.

용체화처리 후 냉각하는 동안 열적으로 생성된 ε 마르텐사이트는 우선방향을 갖지 않기 때문에, 각 상별로 대표적인 회절선을 선택하여 분석하였다. 주사선과 filter는 각각 Fe-Kα선(λ=1.937Å)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[11-13].

$$V_{\epsilon} + V_{\gamma} + V_{\alpha} = 1 \tag{1}$$

$$\frac{I_{\gamma}}{I_{\epsilon}} = \frac{R_{\gamma}}{R_{\epsilon}} \times \frac{V_{\gamma}}{V_{\epsilon}} \tag{2}$$

$$\frac{I_{\alpha}}{I_{\epsilon}} = \frac{R_{\alpha}}{R_{\epsilon}} \times \frac{V_{\alpha}}{V_{\epsilon}} \tag{3}$$

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

V: 각 상의 부피분율 I: 각 상의 특정회절선의 적분강도

v: 각 상의 단위격자의 부피 P: 구조인자

p: 다중도인자

L.P.: Lorentz-편광인자

e<sup>-2M</sup>: Debye-Waller 온도인자

(4)식의 R 값을 구하는데 필요한 인자들은 Cullity[13]가 제시한 값을 사용하였으며, 이중 온도인자는 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 300°C에서 5°C/sec의 냉각속도로 냉각시키면서 측정된 열팽창곡선으로부터 구했다.

여러 재료들의 상대적인 내식성을 평가하고자 KS D 0222 시험법에 준하여 침지시험을 수행하였다. Cr 및 Ni 첨가합금과 비교재를 각각 직경 10 mm, 두께 10 mm의 봉상시험편으로 가공하여 100°C의 5% NaCl 용액에서 4일, 9일간 각각 침지하였고, 5% 황산용액중에는 상온에서 150분, 360분간 침지한 후에, 부착되어 있는 부식생성물을 실온의 20% 질산으로 산세하여 무게감소를 측정하였다. 이 때의 부식도는 시험 후의 감소된 무게로 단위면적당 값(g/m<sup>2</sup>)으로 나타내었으며, KS A 0021에 따라 소수점 이하 둘째 자리로 끝맺음하였다.

Table 1. Chemical composition of the specimens used.

Alloy No.	Chemical Composition (wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
17Mn	0.017	0.48	18.3	0.02	0.01	-	-	bal.
5Cr	0.020	0.49	18.2	0.01	0.01	5.2	-	bal.
10Cr	0.019	0.45	18.1	0.02	0.01	10.5	-	bal.
15Cr	0.025	0.44	18.0	0.02	0.02	15.2	-	bal.
5Ni	0.023	0.45	18.2	0.02	0.01	-	5.4	bal.
10Ni	0.016	0.47	17.9	0.01	0.01	-	9.5	bal.
15Ni	0.017	0.46	17.9	0.02	0.02	-	14.3	bal.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Cr 및 Ni 첨가량에 따른 진동감쇠능의 변화

Fig. 1은 Cr 및 Ni 첨가량에 따른  $\gamma \rightarrow \epsilon$  마르텐사이트 변태 개시온도(이하 Ms) 및  $\epsilon \rightarrow \gamma$  역변태 개시온도(이하 As)의 변화를 보여주고 있다. Cr 및 Ni 함량이 증가함에 따라 오스테나이트 상이 더욱 안정화되어 Ms가 직선적으로 감소하였다. 특히 Ni이 10% 이상 첨가되었을 때는 Ms가 상온 이하임을 알 수 있었다. 합금원소량에 따른 Ms 온도를 일차식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{Cr의 경우 : } M_s(^{\circ}\text{C}) = 147^{\circ}\text{C} - 8 \times (\text{wt}\% \text{Cr})$$

$$\text{Ni의 경우 : } M_s(^{\circ}\text{C}) = 147^{\circ}\text{C} - 21 \times (\text{wt}\% \text{Ni})$$

즉, 같은 양 첨가시 Ni이 Cr보다 약 2.6배 정도 더 크게 Ms를 저하시켜, 오스테나이트를 안정화시키는 원소라는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2와 Fig. 3은 Cr 및 Ni 첨가량에 따른 X-선 회절시험 결과이다. 이 회절곡선을 이용하여 각 상의 부피분율을 계산하여 Ms와 함께 Fig. 4와 5에 나타내었다.

Fig. 4는 Cr 첨가량에 따른, Fig. 5는 Ni 첨가량에 따른 Ms와 각 상의 부피분율의 변화를 보여주고 있는데, Cr 함량이 증가함에 따라 Ms가 저하되고 이에 따라  $\epsilon$  마르텐사이트량도 감소하였는데, 10%Cr까지는  $\epsilon$  마르텐사이트량이 크게 줄지는 않았다. Cr은 오스테나이트의 적층결함에너지를 감소시키고 오스테나이트(fcc)와  $\epsilon$ (hcp)상의 자유에너지가 같게 되는  $T_0$  온도를 증가시키는 것으로 알려져 있어, s 온도의 하강에도 불구하고  $\epsilon$  마르텐사이트양이 크게 감소하지 않은 결과로 생각된다. Ni의 경우, Cr보다 Ms를 크게 낮추어 10% 첨가되었을 때

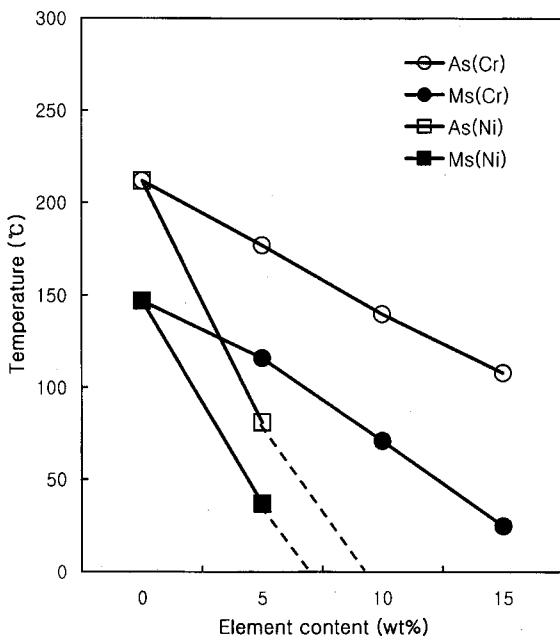


Fig. 1. Variation of transformation temperature with Cr and Ni contents in Fe-17%Mn alloy.

는 Fig. 6의 조직사진에서 보이는 바와 같이  $\gamma$  오스테나이트 단상만이 존재하였다.

Fig. 7는 Cr 및 Ni 첨가량에 따른 진동감쇠능 및  $\epsilon$  마르텐사이트량의 변화를 보여주고 있다. Cr 첨가시에는 10%Cr까지는 Fig. 4에서 설명한 바와 같이  $\epsilon$ 량이 크게 감소하지 않아 진동감쇠능이 유지되고 있다. 반면 Ni 첨가시에는  $\epsilon$ 량이 크게 감소하여 진동감쇠능이 크게 감소되리라 생각되었으나, 내식성이 우수한 10%Ni 첨가 합금에서는 강도가 낮아져 실제 실험 조건인  $8 \times 10^{-4}$ 의 strain이 너무 커 소성영역하에서 측정되어 진동감쇠능이 높게 나타난 것으로 생각된다.

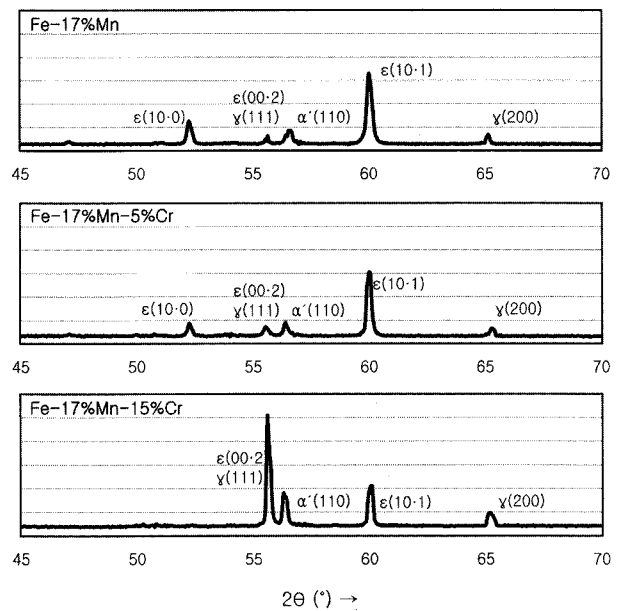


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the Fe-17%Mn-x%Cr alloys.

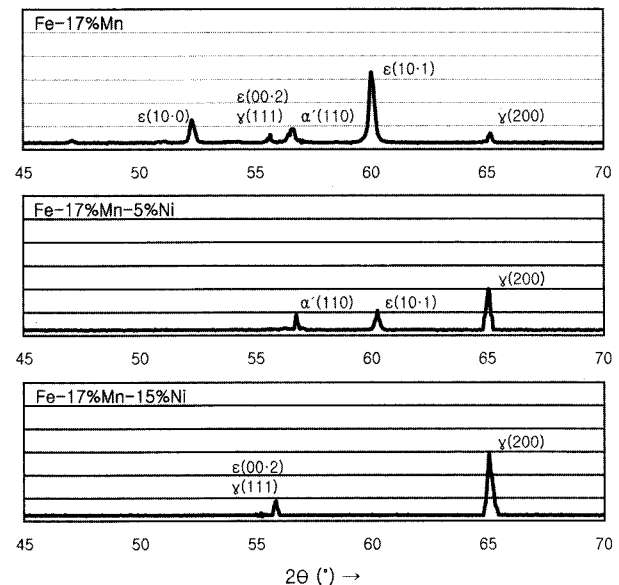


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the Fe-17%Mn-x%Ni alloys.

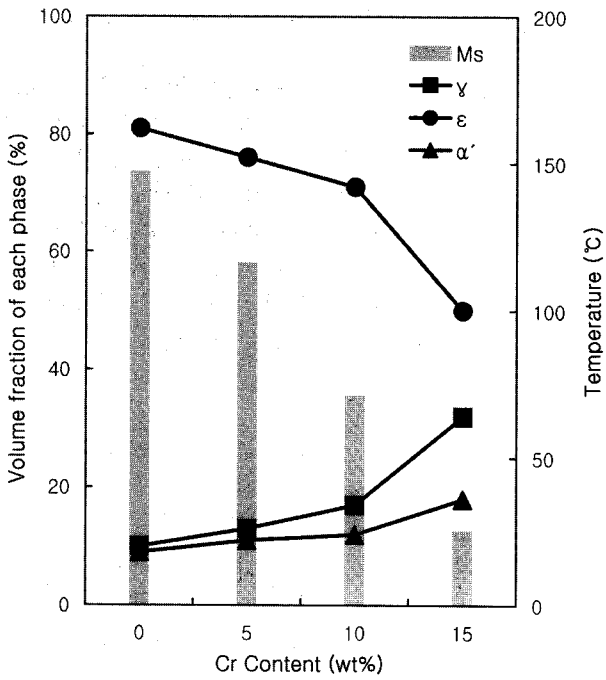


Fig. 4. Variations of transformation temperature and volume fraction of each phase with Cr content in Fe-17%Mn alloy.

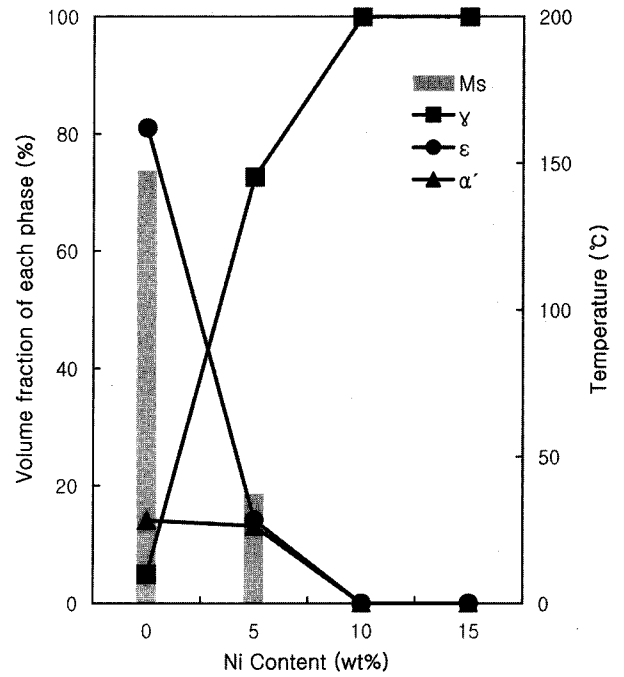


Fig. 5. Variations of transformation temperature and volume fraction of each phase with Ni content in Fe-17%Mn alloy.

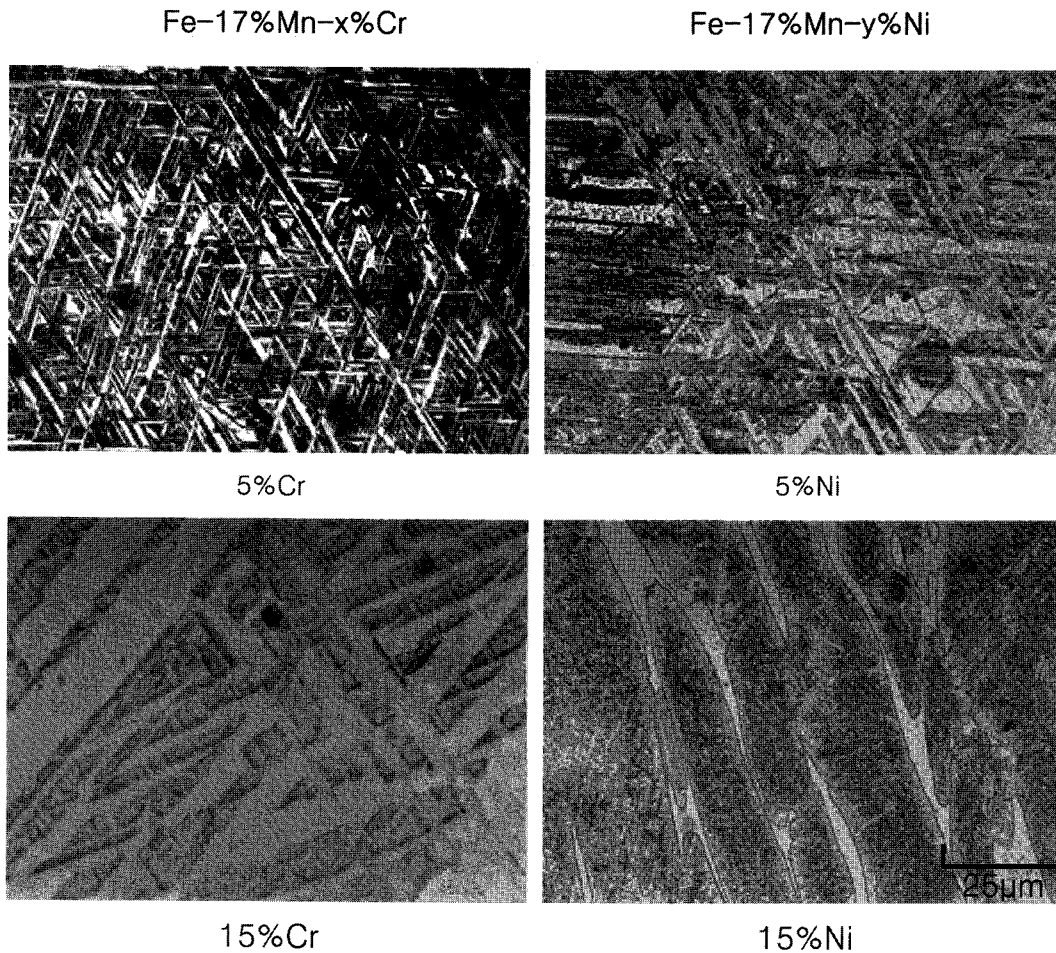


Fig. 6. Optical microstructures of the Fe-17%Mn-x%Cr-y%Ni alloys.

3.2. Cr 및 Ni 첨가에 따른 기계적 성질의 변화

Fig. 8은 Cr 및 Ni 첨가량에 따른 인장성질의 변화이다. 인장강도의 경우Cr, Ni 첨가 합금 모두  $\epsilon$  마르텐사이트량과 유사한 경향을 보여주고 있다. Ni 첨가 합금의 경우, 10%Ni에서는 전부  $\gamma$  오스테나이트로 존재하기 때문에 인장강도가 크게 저하하였다. 연신율은 Cr, Ni 첨가 합금 모두 주조상태이기 때문에 약 20% 정도로 낮은 값을 보였는데, Cr 첨가의 경우가

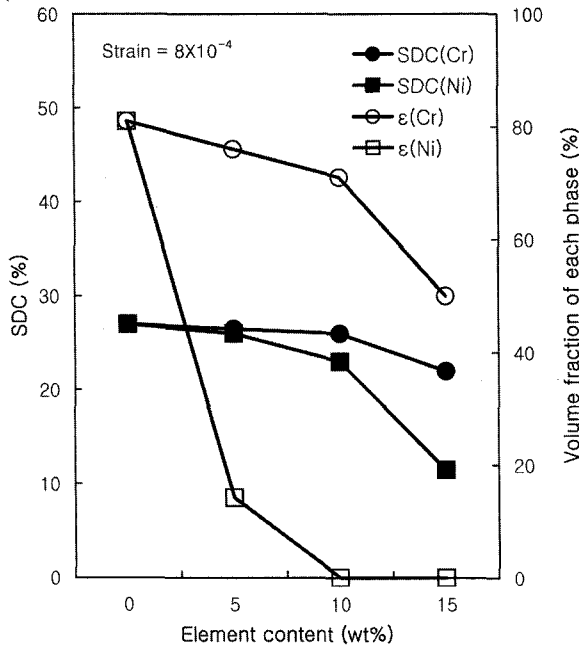


Fig. 7. Variations of specific damping capacity and volume fraction of  $\epsilon$  phase with Cr and Ni content in Fe-17%Mn alloy.

Ni 첨가의 경우보다는 다소 높은 경향을 보였다.

Fig. 9는 Cr 및 Ni 첨가량에 따른 경도의 변화를 보여주고 있는데, 인장강도와 같은 양상을 보였다.

3.3. Cr 및 Ni 첨가에 따른 내식성의 변화

Fig. 10은 100°C의 5% NaCl 용액에서 4일, 9일 침적시험 시, Cr 및 Ni 첨가량에 따른 부식속도의 변화를 보여준다.

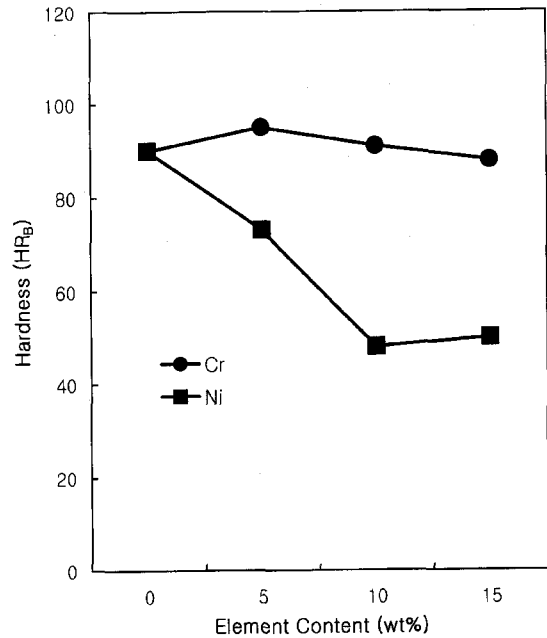


Fig. 9. Variation of hardness with Cr and Ni content in Fe-17%Mn alloy.

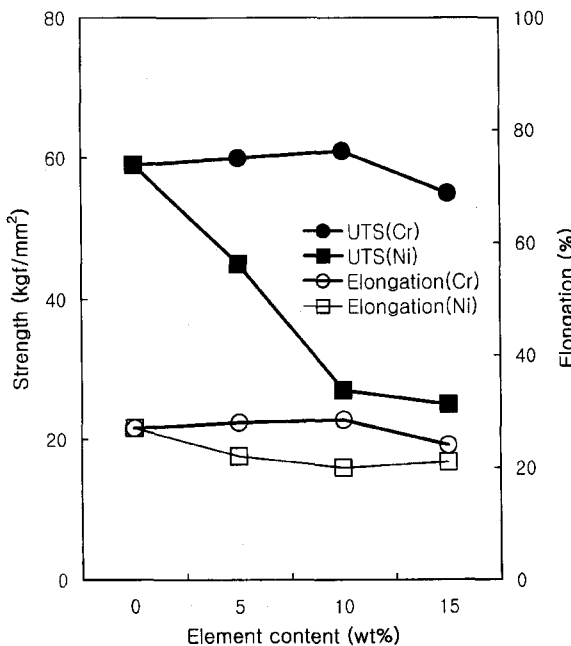


Fig. 8. Variations of mechanical properties with Cr and Ni content in Fe-17%Mn alloy.

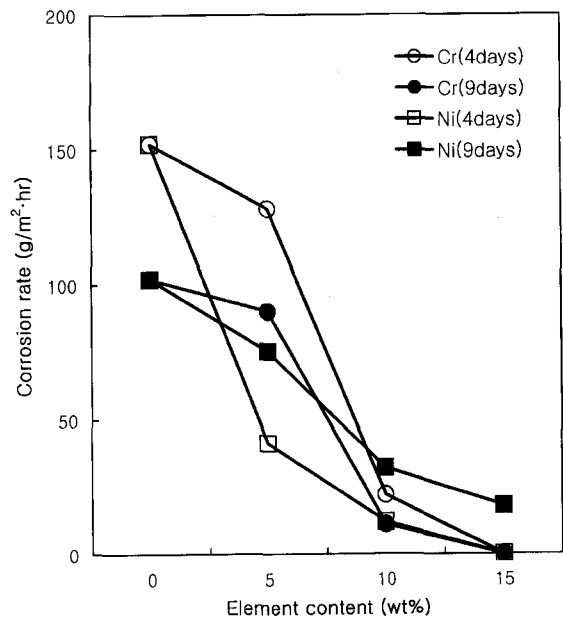


Fig. 10. Variation of corrosion rate with Cr and Ni content in Fe-17%Mn alloy after immersion test in 5%NaCl solution of 100°C.

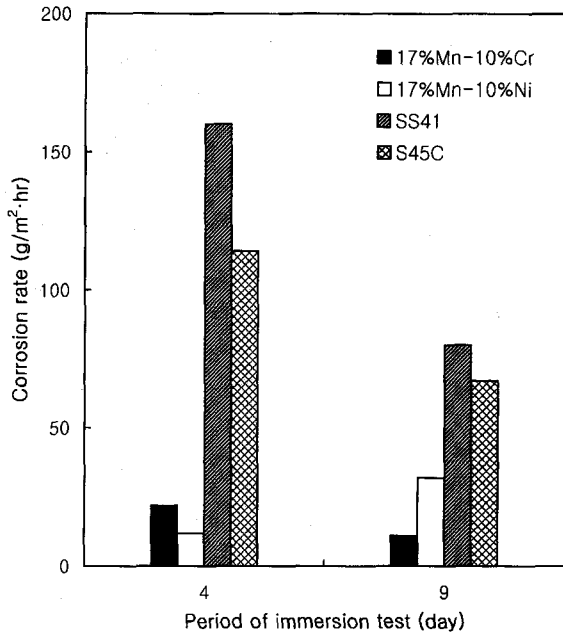


Fig. 11. Comparison of corrosion rate between Fe-17%Mn alloys and other steels after immersion test in 5%NaCl solution of 100°C.

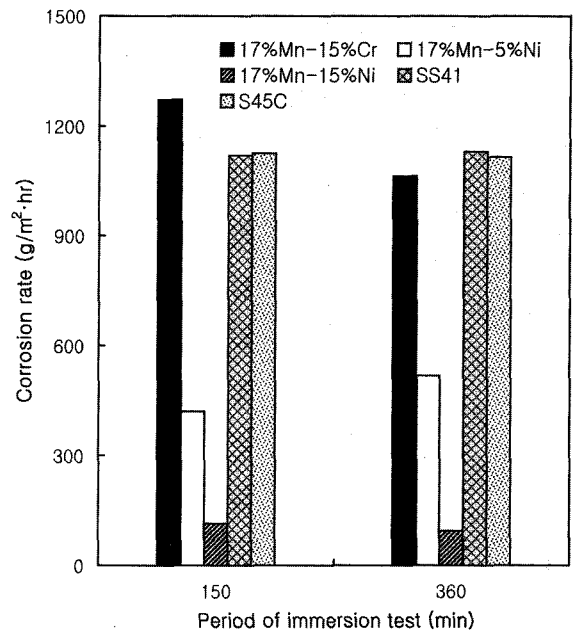


Fig. 13. Comparison of corrosion rate between Fe-17%Mn alloys and other steels after immersion test in 5%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

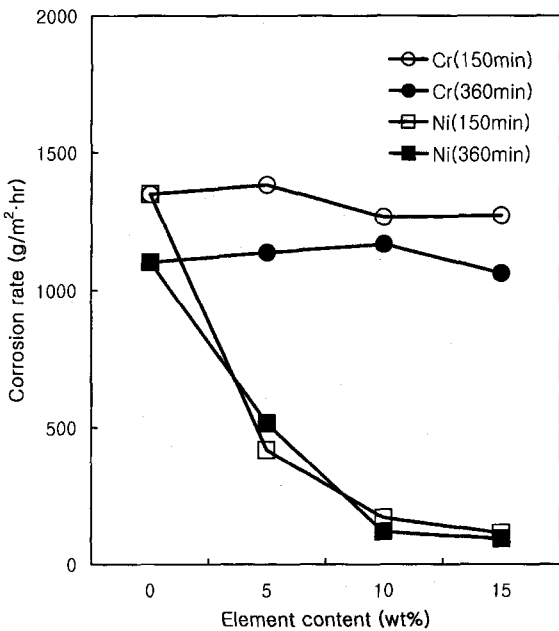


Fig. 12. Variation of corrosion rate with Cr and Ni contents in Fe-17%Mn alloy after immersion test in 5%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.

Cr, Ni의 경우 모두 10% 이상 첨가 시에 크게 부식속도가 감소하여 내식성이 크게 향상되었음을 알 수 있다. 이 중에서 내식성이 크게 향상된 10%Cr과 10%Ni가 함유된 합금을 일반강과 비교하면 Fig. 11과 같다. 일반강과 비교하면 4일 시험한 경우 6~10배 우수하고, 9일 시험한 경우는 3~7배 우수한 것으로 조사되었다.

Fig. 12는 상온의 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액에서 150분, 360분 침적

시험 시, Cr 및 Ni 첨가량에 따른 부식속도의 변화를 보여준다. Cr 첨가 합금의 경우 황산에서의 부식속도는 큰 변화가 없었으나, Ni 첨가의 경우 10% 이상 첨가 시에 부식속도가 감소하여 내식성이 크게 향상되었다. 이를 일반강과 비교하면 Fig. 13과 같다. 10%Ni 합금의 경우, 일반강과 비교하여 약 9배 우수한 내식성을 보였다.

이상의 결과들을 종합해 보면, NaCl 분위기에서는 내식성과 진동감쇠능이 모두 우수한 Fe-17%Mn-10%Cr 합금이 사용 가능하고, 황산분위기에서는 Fe-17%Mn-10%Ni 합금이 사용에 적합한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

Fe-17%Mn 합금에 Cr 및 Ni를 첨가하여 이에 따른 미세조직, 진동감쇠능, 기계적 성질 및 내식성의 변화를 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Cr 및 Ni 함량이 증가함에 따라 오스테나이트 상이 더욱 안정화되어 아래 식과 같이 Ms가 직선적으로 감소하였다.

$$\text{Cr의 경우 : } M_s(^{\circ}\text{C}) = 147^{\circ}\text{C} - 8 \times (\text{wt}\% \text{Cr})$$

$$\text{Ni의 경우 : } M_s(^{\circ}\text{C}) = 147^{\circ}\text{C} - 21 \times (\text{wt}\% \text{Ni})$$

2) Ni 첨가에 따라 ε양이 감소하여 강도의 저하로 소성영역 하에서 진동축정이 되어 진동감쇠능도 10%Ni까지 크게 저하하지 않았고, Cr 첨가시에는 10%Cr까지는 ε양이 크게 감소하지 않아 진동감쇠능이 유지되었다.

3) Cr 첨가의 경우 인장강도는 약 60 kgf/mm<sup>2</sup>를 유지하였으나, Ni 첨가의 경우, 10%Ni에서는 전부 γ 오스테나이트로 존

재하여 인장강도가 크게 저하하였다.

4) NaCl 분위기에서는 Fe-17%Mn-10%Cr 합금, 황산분위기에서는 Fe-17%Mn-10%Ni 합금이 내식성과 진동감쇠능이 가장 우수하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. D. Adams : Journal of Sound and Vibration, 23 (1972) 199-205.
- [2] S. Kyuichi : Bull. Jpn. Inst. Met., 14 (1974) 127-131.
- [3] S. H. Baik, J. C. Kim, K. K. Jee, M. C. Shin and C. S. Choi : Journal de Physique •S, 5 (1995) C8-391-395.
- [4] S. H. Baik, J. C. Kim, K. K. Jee and C. S. Choi : J. Korean Society for Heat Treatment, 8 (1995) 113-117.
- [5] S. H. Baik, J. C. Kim, K. K. Jee, M. C. Shin and C. S. Choi : J. Korean Society for Heat Treatment, 8 (1995) 197-200.
- [6] S. H. Baik, J. C. Kim, K. K. Jee, M. C. Shin and C. S. Choi : J. Korean Society for Heat Treatment, 9 (1996) 53-58.
- [7] C. S. Choi, Woojin Inc. : Korea Pat., No.057437 (1992).
- [8] J. C. Kim, C. S. Choi : J. Kor. Inst. Met. & Mater., 9 (1992) 45.
- [9] A. W. Cochardt : Trans. AIME, 226 (1956) 1295-1302.
- [10] L. M. Schetky and J. Perkins : Machine Design, April 6 (1978) 202-207.
- [11] B. L. Averbach and M. Cohen : Trans. Met. Soc. AIME, 176 (1948) 401-409.
- [12] J. Burke and D. W. Harvey : J. Iron and Steel Inst., 208 (1970) 779-785.
- [13] B. D. Cullity : Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Co., (1956) 139-144.