한국해양공학회지 제22권 제6호, pp 46-51, 2008년 12월 (ISSN 1225-0767)

# 진동제어에 의한 정밀기기의 고성능화를 위한 고강도 및 고감쇠능 합금개발

강창룡* · 김익수**
*부경대학교 신소재공학부
**일본 신슈대학교 기능기계학과

# Development of Alloy with High Strength and Damping Capacity for High-Performance of Precision Devices by Vibration Control

CHANG YONG KANG* AND IK SU KIM**
*Div.of Advanced Materials Science & Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea
**The department of Mechanical Engineering, ShinSu University, Shinsu, Japan

**KEY WORDS**: Damping capacity 감쇠능, Vibration 진동, Internal friction energy 내부마찰에너지, ε martensite ε마르텐사이트 Stacking fault energy 적층결함에너지

**ABSTRACT:** *The effect of the addition of Co and N and subzero treatment on tensile strength and damping capacity was investigated in Fe-Cr-Mn alloy. Austenite was transformed into martensite by cold rolling increasing the degree of cold rolling led to an increase in the volume fraction of martensite. The damping capacity linearly increased with increasing volume fraction of ε martensite in cold rolled specimens and subzero treated specimens after cold rolling. The volume fraction of εmartensite, tensile strength and damping capacity was also increased by the addition of Co, while this treatment decreased the elongation. However, the volume fraction of ε martensite, elongation and damping capacity were reduced by the addition of N, although the tensile strength increased. Tensile strength and damping capacity werealso increased by subzero treatment, while elongation decreased.*

## 1. 서 론

소음과 진동은 다양한 형태의 인적, 물적 손실을 유발하고 있기 때문에 해양 플랜트 산업을 비롯한 자동차 산업 등 모든 산업 분야에서는 소음과 진동에 대한 사회적 관심이 점차 고조되고 있고, 규제도 점점 강화되고 있다.

또한 노동환경 개선, 상품의 고부가 가치화, 쾌적한 생활환경의 추구와 더불어 수송 및 산업기기 또는 각종 장치의 장수명화 등을 위해서도 저 소음, 저 진동 화는 불가결한 과제로 대두되고 있다(Suzuki, 1997).

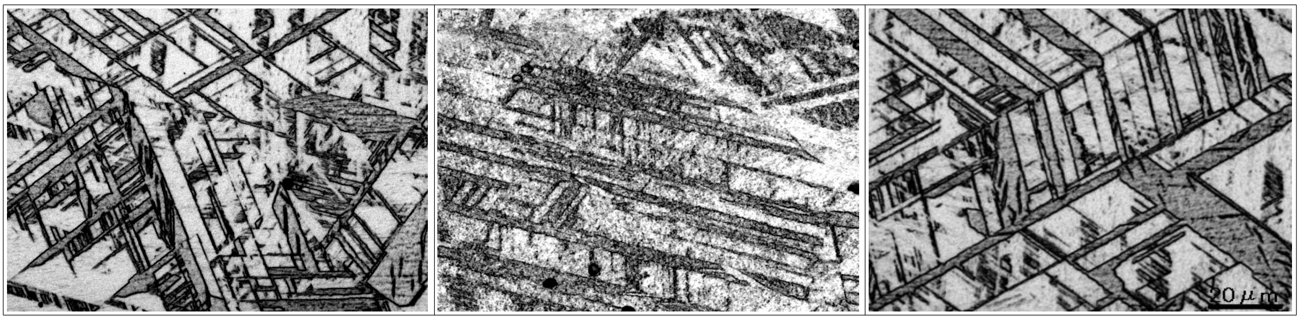
지금까지 각종 분야에서 주로 이용되고 있는 소음과 진동 방지법인 System damping 법과 Structure damping법은 장치 설치에 따른 필요 이상의 넓은 공간이 요구되거나, 강판과 고분자 재료와의 접착성이 문제되어 가공이 어렵거나, 고분자 재료가 전기를 통하지 않아 용접성이 떨어지는 등 많은 문제점이 있어 공업적 이용 면에서는 극히 제한적이다. 때문에 최근에는 내부마찰계수가 큰 금속재료를 소음과 진동원에 적용하여 소음과 진동을 방지하기 때문에 그 효과가 큰 것으로 알려지고 있는 Material damping법에 대한 관심이 높아지고 있고, 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있지만(김익수 등, 2007; 손동욱 등, 2004; 손동욱 등, 2006; James, 1969) 감쇠능과 강도가 높은 새로운 재료 개발이 강하게 요구되고 있다.

따라서 본 연구는 해양 플렌트 산업, 선박. 항공 자동차 산업, 가전산업 및 산업기기 등에 적용 가능한 우수한 감쇠능과 높은 강도를 갖는 재료 개발에 필요한 자료를 얻고자 수행하였다. 즉 감쇠능과 강도가 높은 것으로 알려져 있는(Okada et al., 2004) Fe-Cr-Mn계 합금을 기본으로 하고, 여기에 강도 상승을 고려하여 침입형 원소인 N를 첨가하고, 적층결함 에너지 감소에 의한 감쇠능 증가를 고려하여(김익수 등, 2007) 치환형 원소인 Co을 첨가한 시료를 만든 후 이들 합금원소가 감쇠능과 강도에 미치는 영향을 조사함과 동시에 서브제로처리가 감쇠능 및 강도에 미치는 영향을 계통적으로 조사하였다.

교신저자 강창룡: 부산광역시 남구 용당동 산 100번지
051-629-6346 metkcy@pknu.ac.kr

**Table 1** Chemical composition of specimens (wt.%)

| Comp. / Spec. | C | P | S | Si | Mn | Cr | N | Co | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0.013 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 22.8 | 12.1 | 0.009 | 0.002 | Bal. |
| B | 0.08 | 0.012 | 0.03 | 0.03 | 22.9 | 12.1 | 0.002 | 2 | Bal. |
| C | 0.09 | 0.002 | 0.007 | 0.04 | 23.1 | 11.9 | 0.13 | 0.01 | Bal. |



A specimen B specimen C specimen

**Photo. 1** Optical micrographs of damping alloys

## 2. 실험방법

### 2.1 시료 및 열처리

Fe-12%Cr-22%Mn의 조성에 2%Co와 0.13%N가 첨가된 시료를 진공용해로에서 용해하여 잉곳으로 제작하였다. 이를 열간압연하여 판재로 만든 다음 1200℃에서 용체화처리 후 산세 등의 과정을 거쳐 최종 냉간 압연에서 압연율이 약 15%와 50%가 되도록 필요한 두께로 압연 하였다. 그 후 다시 용체화처리 한 다음 냉간 압연하여 1mm 두께로 만들어 감쇠능, 인장 및 미세조직 시험편 등으로 사용하였고, Table 1에 화학조성을 나타내었다. 한편 서브제로처리는 액체질소를 사용하여 -196℃에서 3시간 유지하는 처리를 하였다.

### 2.2 미세조직의 관찰

고용화처리 한 시료와 고용화처리 후 냉간압연 한 시료 및 압연 후 서브제로 처리한 시료의 미세조직을 광학현미경과 주사전자 현미경으로 관찰하였다. 한편, ε마르텐사이트 조직의 보다 상세한 관찰은 시료를 80㎛ 두께로 만든 다음 Jet polishing 하여 박막으로 만든 후 200㎸ 가속전압의 투과전자현미경(TEM : JEOL JEM 2010)으로 조사하였다.

### 2.3 X선 회절시험

각 시료가 갖는 미세조직의 정량적 측정을 위한 X선 회절시험은 Mo-Kα 특성 X선을 사용하여 1°/min의 속도로 10~40°의 범위를 회절시험 하였을 때 얻은 회절선도로 부터 얻은 각상에 해당되는 피크의 상대 적분 강도 값을 구하여 측정하였다(Okada et al., 2004).

### 2.4 인장 시험

고용화 처리 후 50% 냉간가공 한 시료와 가공 후 서브제로 처리한 시료의 인장성질 측정은 시험편을 ASTM E-8의 규격으로 제작 후 인장시험기를 사용하여 상온에서 1mm/min의 속도로 시험하여 측정하였다.

### 2.5 감쇠능 측정

감쇠능 측정은 시료를 1mm×120mm×10mm 크기로 제작한 다음 횡 형 내부마찰 측정 장치를 이용하여 10-4torr의 진공하에서 대수 감쇠율을 구하여 측정하였다. 즉, 이 방법은 진동을 가하는 전극과 진동을 검출하는 전극인 두 전극위에 시료를 극 세선으로 전극에 접촉되지 않게 배열시킨 다음 진동을 가하는 전극으로 강제 진동 시킨 후 자유 감쇠시켜 감쇠가 할 때까지의 파수를 측정하여 감쇠율($\delta$=1/n ln A0 / An, n: 파수, A0:최초파의 진폭, An :n 번째 파의 진폭)을 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 미세조직관찰

Photo. 1은 Fe-12%Cr-22%Mn 및 여기에 2%Co와 0.13%N가 첨가된 시료를 용체화처리 하였을 때의 미세조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 세 시료 모두 쌍정을 갖는 오스테나이트조직으로 이루어져 있음을 알 수 있고, Co 및 N 첨가에 따른 미세조직의 차이는 크게 나타나지 않고 있다.

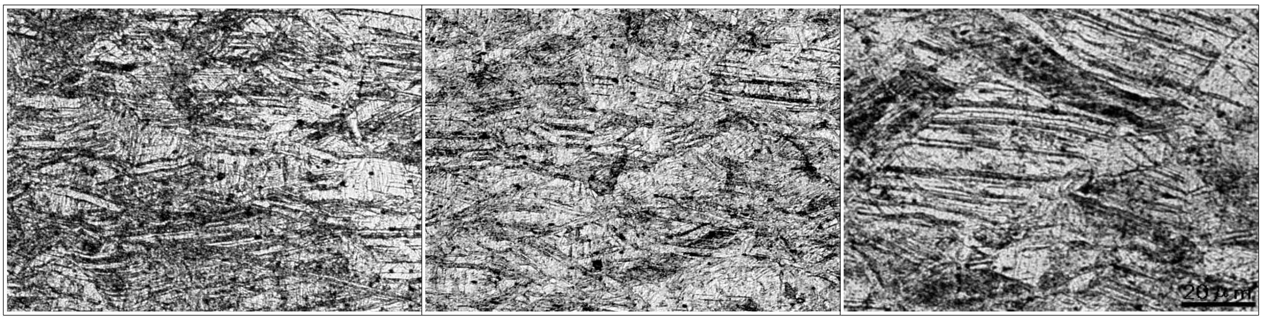



**Photo. 2** Optical micrographs of damping alloys obtained after 50% cold rolling

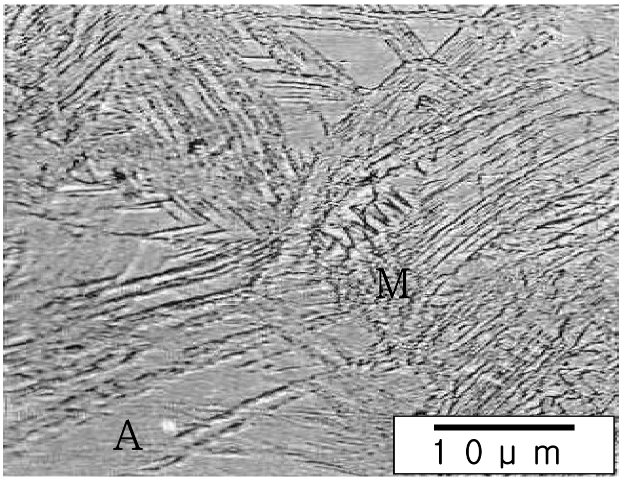



**Photo. 3** SEM micrograph showing the deformation induced martensite

Photo. 2는 Photo. 1의 조직을 갖는 시료를 상온에서 약 50% 냉간압연 하였을 때의 미세조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 세 시료 모두 가공에 의해 오스테나이트조직의 일부가 마르텐사이트 조직으로 변태되고 있지만 냉간 가공 한 시료 에서도 합금원소 첨가에 따른 미세조직의 차이는 크게 나타나지 않고 있다.

Photo. 3은 냉간가공에 의해 생성된 마르텐사이트 조직을 보다 상세하게 조사하기 위하여 N가 첨가된 시료를 50% 냉간압연 후 주사전자 현미경으로 조사하여 나타낸 것이다. 마르텐사이트가 가공에 의해 표면기복을 일으키며 서로 교차하거나, 또는 특정한 방향성을 띄면서 생성되고 있음을 알 수 있다.

Photo. 4는 감쇠능에 크게 영향을 미치는 것으로 알려진 ε마르텐사이트의 생성을 조사하기 위하여 상온에서 50% 냉간 압연 한 Fe-12%Cr-22%Mn 조성을 갖는 시료가 갖는 미세조직을 투과전자 현미경으로 나타낸 것이다. 명시야 상인 사진 a)와 암시야 상인 사진 b)를 회절패턴 분석하여 나타낸 c)의 결과로 부터 ε마르텐사이트가 벤드형상으로 생성되어 있음을 알 수 있다.

### 3.2 ε 마르텐사이트의 체적분율에 미치는 냉간압연 및 서브제로처리의 영향

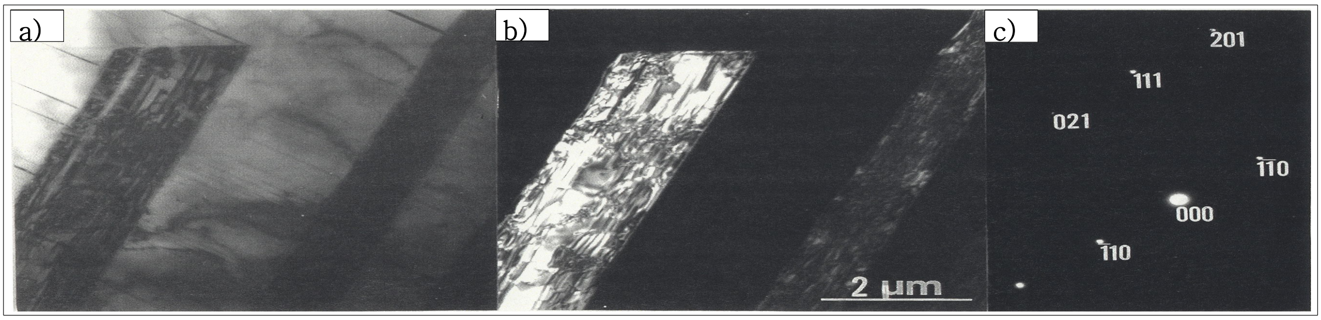
상온에서 준안정 오스테나이트 조직을 갖는 강의 감쇠능은 그 재료가 갖는 ε마르텐사이트조직에 크게 영향을 받는다고 알려져 있다(Okada et al., 2004). 따라서 본 연구에서도 세 시료의 냉간압연 및 냉간압연 후 서브제로 처리에 따른 ε마르텐사이트의 체적분율 변화를 조사하여 Fig. 1에 나타내었다.

냉간압연 한 시료 및 냉간압연 후 서브제로처리 한 시료 모두 압연 량이 증가함에 따라 ε마르텐사이트의 량이 빠르게 증가하다가 압연 량이 15% 이상 되면 서서히 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, ε마르텐사이트의 량은 2%Co가 첨가된 시료는 약간 많은데 반하여, 0.13%의 N가 첨가된 시료는 큰 차이는 나타나지 않고 있다. 이와 같은 이유는 Co가 첨가되면 오스테나이트 조직의 적층결함 에너지가 낮아지기 때문에(김익수 등, 2007) 가공시 ε마르텐사트의 생성이 용이해지기 때문이고, N가 첨가되면 오스테나이트 조직의 안정도가 높아지기 때문에(Eichelman, 1952) 압연에 의해 오스테나이트가 마르텐사이트로의 변태가 어려워지기 때문이라 생각된다. 또한, 세 시료 모두 냉간압연 후 서브제로 처리를 하면 ε마르텐사이트의 량이 많아지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 냉간압연시 마르텐사이트로 변태되지 않고 남아있는 오스테나이트 조직의 일부가 서브제로 처리에 의해 마르텐사이트(α′ 및 ε마르텐사이트)조직으로 변태되기 때문이다.

### 3.3 감쇠능에 미치는 ε 마르텐사이트 및 서브제로처리의 영향

Fig. 2는 세 시료의 감쇠능에 미치는 서브제로 처리의 영향을 조사하기 위하여 50% 냉간압연 한 시료와 50% 냉간 압연 후-196℃ 온도에서 3시간 서브제로 처리 한 시료에서 얻은 감쇠능을 나타낸 것이다. 냉간압연 및 냉간압연 후 서브제로 처리 한 시료 모두 Fig. 1의 압연 량 변화에 따른 ε마르텐사이트의 체적분율 변화와 비슷한 거동으로 감쇠능은 압연 량이 증가할수록 비교적 빠르게 증가하다 압연 량이 15% 이상이 되면 서서히 증가하고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 압연 량이 증가함에 따라 감쇠능이 증가하는 이유는 냉간압연에 의해 ε 마르텐사이가 생성되고(Photo. 4 참




a) Bright field image b) Dark field image c) Diffraction pattern and index

**Photo. 4** TEM micrograph of ε martensite formed after 50% cold rolling

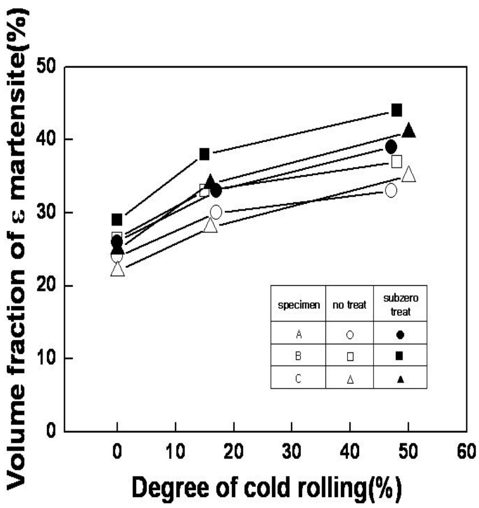



**Fig. 1** Effect of subzero treatment on volume fraction of ε martensite obtained after cold rolling

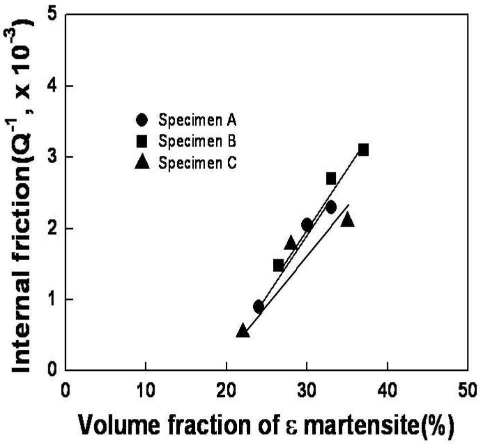



**Fig. 3** Relationship between the internal friction and volume fraction of ε martensite obtained after cold rolling

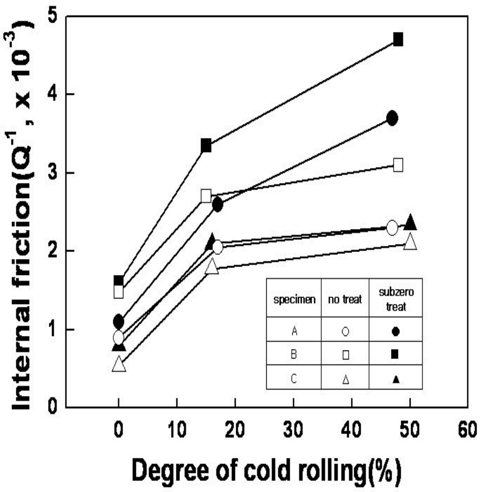



**Fig. 2** Effect of subzero treatment on the internal friciton obtained after cold rolling

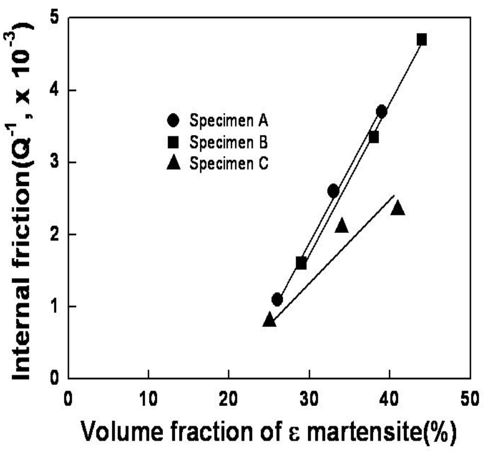



**Fig. 4** Relationship between internal friction and volume fraction of ε martensite of cold rolling obtained by subzero treatment after cold rolling

고), 압연 량이 증가할수록 생성되는 ε마르텐사이트가 많아지기 때문이다. 또한 Co가 첨가된 시료는 감쇠능이 크게 높아지는데 반하여 N가 첨가된 시료는 감쇠능이 약간 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 Co가 첨가되면 적층결함에너지가 낮아지는데 기인되어 ε마르텐사이트가 많이 생성되기 때문이고, N가 첨가되면 오스테나이트의 안정도가 높아지게 되어 가공에 의해 마르텐사이트 조직으로 변태가 잘 일어나지 않을 뿐만 아니라(Eichelman, 1952), N가 감쇠원으로 작용하는 쌍정 계면의 이동, 전위의 이동, 오스테나이트와 ε마르텐사이트의 계면 이동 등을 어렵게 하기 때문(Okada et al., 2004)이라 생각된다. 또한, 세 시료 모두 냉간 압연 후 서브제로 처리하면 감쇠능은 증가하지만, Fe-12%Cr-22%Mn 시료 및 여기에 Co가 첨가된 시료는 크게 증가하는데 반하여, N가 첨가된 시료는 약간 증가하고 있다. 이와 같이 N가 첨가된 시료에서 서브제로 처리를 하여도 감쇠능이 크게 증가하지 않는 이유는 N가 가 감쇠원으로 작용하는 쌍정 계면의 이동, 전위의 이동, 오스테나이트와 ε마르텐사이트의 계면 이동 등을 어렵게 하기 때문이라(Okada et al., 2004) 생각된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 냉간압연 및 냉간압연 후 서브제로처리 한 시료의 감쇠능에 미치는 ε마르텐사이트의 영향을 알아보기 위해 50% 냉간 압연한 시료(Fig. 3)와 50% 냉간압연 후 서브제로처리 한 시료(Fig. 4)에서 얻은 감쇠능을 ε마르텐사이트 체적분율에 대해 나타낸 것이다.

두 시료 모두 ε마르텐사이트의 량이 증가함에 따라 감쇠능이 직선적인 비례관계로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 냉간압연 한 시료 및 냉간압연 후 서브제로처리 한 시료 모두 감쇠능은 ε마르텐사이트에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한 냉간압연 한 세 시료는 감쇠능이 비슷한 비율로 증가하고 있는데 반하여 냉간압연 후 서브제로 처리한 시료의 경우 Fe-12%Cr-22%Mn 시료와 여기에 Co가 첨가된 시료는 ε마르텐사이트의 량이 증가함에 따라 감쇠능이 빠른 속도로 증가하는데 반하여, N가 첨가된 시료는 두 시료에 비해 서서히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 또한 N가 첨가되면 감쇠원으로 작용하는 쌍정계면, 오스테나이트상과 ε마르텐사이트의 계면, 전위의 이동 등을 어렵게 하기 때문일 뿐만 아니라 서브제로 처리에 의해 생성되는 ε마르텐사이트의 량이 적기 때문이다.

### 3.4 인장성질에 미치는 서브제로처리의 영향

Fig. 5는 세 시료를 약 50% 냉간압연 후 인장시험을 하였을 때 얻은 인장강도와 50% 냉간 압연 후 서브제로처리 한 다음 인장시험 하였을 때 얻은 인장강도를 나타낸 것이다.

냉간가공 한 시료 및 냉간가공 후 서브제로처리 한 시료 모두 0.13%N가 첨가 된 시료가 인장강도는 가장 높지만 그 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다. 또한 세 시료 모두 서브제로 처리에 의해 인장강도가 약간 증가하였지만 증가하는 정도 역시 크지 않으며, 강도가 증가하는 비율은 N가 첨가된 시료가 가장 낮게 나타났다.

Fig. 6은 세 시료를 약 50% 냉간압연 후 인장시험 하였을 때 얻은 연신율과 50% 냉간압연 후 서브제로 처리 한 다음 인장시험 하였을 때 얻은 연신율을 나타낸 것이다.

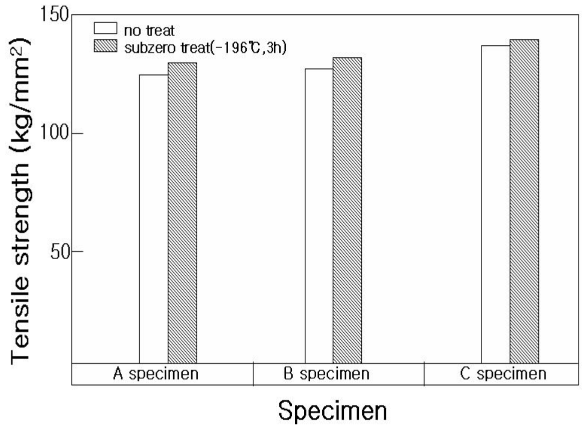



**Fig. 5** Effect of subzero treatment on the tensile strength obtained after 50% cold rolling

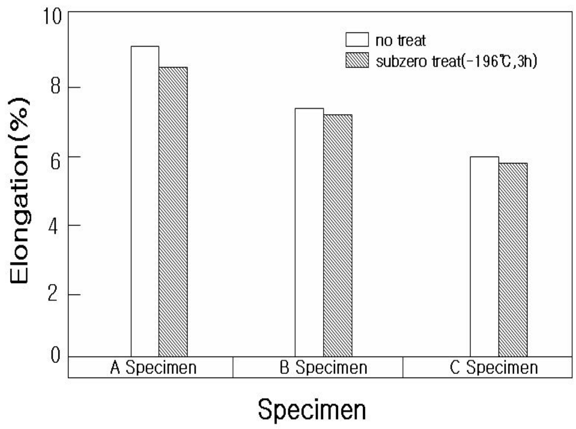



**Fig. 6** Effect of subzero treatment on the elongation obtained after 50% cold rolling

냉간가공 한 시료 및 냉간가공 후 서브제로처리 한 시료 모두 연신율은 Co 및 N의 첨가에 의해 낮아지고, 0.13%N가 첨가된 시료가 가장 낮지만 그 차이는 크지 않다. 한편 세 시료 모두 서브제로 처리 하면 연신율은 약간 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이상의 실험결과로부터 냉간가공 후 서브제로처리하면 강도는 증가하고 연신율은 낮아지고 있음을 알 수 있다. 또한 냉간가공과 서브제로처리를 잘 병행 한다면 $4\times10^{-3}$크기 이상의 감쇠능을 가지면서 120kg/mm$^2$ 이상의 강도를 갖는 제진합금의 개발이 가능함을 알 수 있다.

## 4. 결 론

Fe-12%Cr-22%Mn의 화학조성을 갖는 시료의 인장성질 및

감쇠능에 미치는 Co와 N 첨가의 영향 및 서브제로처리의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 세 시료 모두 쌍정을 갖는 오스테나이트 조직으로 이루어져 있고, 냉간압연에 의해 오스테나이트조직이 마르텐사이트 조직으로 변태되며, 압연 량이 증가할수록 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 량이 많았다.

(2) 냉간압연 한 시료 및 냉간압연 후 서브제로 처리한 시료 모두 감쇠능은 ε마르텐사이트의 량이 증가함에 따라 직선적인 비례관계로 증가하였다.

(3) Co가 첨가되면 ε마르텐사이트의 량과 인장강도 및 감쇠능은 증가하지만 연신율은 약간 낮아지는데 반하여, N를 첨가하면 ε마르텐사이트의 량은 큰 변화가 없고, 연신율 및 감쇠능은 낮아지고 강도는 약간 증가하였다.

(4) 서브제로처리를 하면 ε마르텐사이트의 량과 강도 및 감쇠능은 증가하는데 반하여 연신율은 감소하였다. 또한, 서브제로 처리에 의해 감쇠능이 증가하는 정도는 N가 첨가된 시료가 가장 낮게 나타났다.

## 후 기

이 논문은 2005년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음(PK-2005-18).

## 참 고 문 헌

김익수, Nishimura, Y., 이수민, Aatanabe, Y., 김주용, 정해룡, 강창룡, Miyahara, K. (2007). "고강도 Fe-Cr-Mn-Co 합금의 진동 감쇠능에 미치는 Co 및 ε마르텐사이트의 영향", 대한금속·재료학회, 제45권, 제7호, pp 403.

손동욱, 김재환, 김익수, Miyahara, K., 성장현, 강창룡(2004). "오스테나이트계 스테인리스강의 진동감쇠능에 미치는 ε 마르텐사이트의 영향", 대한금속·재료학회, 제42권, 제8호, pp 621-625.

손동욱, 이종문, 김효종, 남기우, 박규섭, 강창룡 (2006). " 오스테나이트계 316L 스테인리스강의 강도 및 감쇠능에 미치는 미세조직의 영향", 한국해양공학회지, 제20권, 제1호, pp 1-6.

Eichelman G.H. (1952). "The Effect of Composition on the Temperature of Trasnsformation of Austenite to Martensite in 18-8 Stainless Steel", Vol 45, p 77.

James D.W. (1969). "High Damping Metals for Engineering Application", Materials Science and Engineering, Vol 4, No 1, pp 1-8.

Okada, H., Kim, I.S., Kang, C.Y., Sahashi, H., Igota, N. and Miyahara, K. (2004). "Effect of Epsilon Martensite on the Damping on High Strength Fe-Cr-Mn Alloy", Materials Science & Engineering A, Vol 307, pp 519-523.

Suzuki G. (1997). Damping Technology controling vibrations, Ohmsha, pp 48-63.

2008년 12월 4일 원고 접수
2008년 12월 12일 최종 수정본 채택