

오스테나이트계 316L 스테인리스강의 강도 및 감쇠능에 미치는 미세조직의 영향

손동욱* · 이종문* · 김효종* · 남기우* · 박규섭** · 강창룡*

* 부경대학교 신소재공학부

** 창원대학교 세라믹공학과

The Effects of Microstructure in Austenitic 316L Stainless Steels on the Strength and Damping Capacity

DONG-WOOK SON*, JONG-MOON LEE*, HYO-JONG KIM*, KI-WOO NAM*,
KYU-SEOP PARK** AND CHANG-YONG KANG*

* Division of Materials Science and Engineering, PKNU, Busan, Korea

** Dept. of Ceramic Science & Engineering, CNU, Chungwon, Korea

KEY WORDS : 316L Stainless Steel 316L 스테인리스 강, Damping Capacity 감쇠능, Cold Working 냉간가공, Volume Fraction 체적분율, Tensile Strength 인장강도, Elongation 연신율

ABSTRACT : The effects of microstructure on the damping capacity and tensile properties of 316L stainless steel were investigated. Increasing the degree of cold working, the volume fraction of ϵ -martensite decreased after rising to maximum value at specific level of cold working, the volume fraction of α' -martensite slowly increased and then dramatically increased from the point of decreasing ϵ -martensite volume fraction. Increasing the degree of cold working, the behavior of damping capacity is similar to that of the ϵ -martensite. After the damping capacity showing the maximum value at about 20% of cold rolling, damping capacity was decreased with the volume fraction of ϵ -martensite. Tensile strength was proportional to the volume fraction of α' -martensite, and elongation steeply decreased in the range low volume fraction of α' -martensite, then slowly decreased in range the above 10% volume fraction of α' -martensite. The damping capacity and elongation is strongly controlled by the volume fraction of ϵ martensite with liner relationship. However, the effect of the volume fraction of α' -martensite and austenite phase on the damping capacity was not observed. Tensile strength was governed by the volume fraction of α' -martensite.

1. 서 론

316L 스테인리스강은 탄소양이 극히 낮고 2% 이상의 Mo가 첨가되어 있기 때문에 우수한 내식성 외에 강도가 높은 특성을 지니고 있다. 따라서 해양구조물과 선박관련 부품에서부터 항공기 및 화학플랜트 등에 이르기까지 다양하게 이용되고 있다(Stickler and Vinckier, 1961)

또한 이 강은 상온에서 준안정 오스테나이트 조직으로 이루어져 있기 때문에 상온 부근의 온도에서 가공 하면 오스테나이트(γ) 조직의 일부가 마르텐사이트 조직으로 변태(가공 유기변태)하고, 가공에 의해 변태 되는 정도는 오스테나이트 상의 안정도, 가공양 등에 따라 달라지며(Kang and Sung, 1991). 이러한 변태 유기 소성 거동은 기계적 성질 뿐만 아니라 진동감쇠능에도 큰 영향을 미치게 될 것이다(Okada et al., 2004).

최근 소음과 진동에 관한 규제가 강화되어 짐에 따라 내부마

찰계수가 큰 금속 재료를 소음과 진동원에 적용함으로써 소음과 진동을 감소하고자 하는 재료 개선에 의한 방법에 대한 관심이 높아지면서 감쇠효과가 큰 재료를 개발하고자 많은 연구가 진행되어 왔다(Lee et al., 1997; Lee et al., 1994; Lee et al., 1997).

상온에서 준안정 오스테나이트조직을 갖는 316L 스테인리스강도 내식성과 강도를 지니고 있지만, 가공유기 변태거동을 나타내기 때문에 뛰어난 감쇠능을 지니고 있을 것으로 판단된다. 그러나 이 강에 대한 연구는 지금까지는 내식성과 강도를 위주로 하여 많은 연구가 진행되어 왔지만(Fiedler et al., 1954), 가공유기 변태 거동이 기계적 성질과 감쇠능에 미치는 영향을 정성 및 정량 조직학적으로 연구한 논문은 많지 않다.

따라서 본 연구는 상온에서 준안정 오스테나이트 조직을 갖는 오스테나이트계 스테인리스강에서 가공 유기 생성되는 마르텐사이트 조직이 인장성질 및 진동감쇠능에 미치는 영향을 정성 및 정량적으로 조사하기 위하여 316L 스테인리스강을 사용하여 상온에서 가공양을 달리하는 압연을 실시하여 미세조직을 변화시킨 다음 미세조직 변화가 강도 및 감쇠능에 미치는 영향을 조사하였다.

제1저자 강창룡 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산 100번지
051-620-1479 metkcy@pknu.ac.kr

2. 실험방법

본 실험에 사용된 시료는 공시재인 상온에서 오스테나이트 조직을 갖는 316L 스테인리스강을 사용하였으며, 그 화학조성을 Table 1 에 나타내었다.

실험에 사용된 시료는 약 20mm의 두께를 갖는 판재를 필요한 소정의 두께까지 열간 압연 한 다음 1,373K에서 1시간 균질화 처리를 행한 후, 이것을 1mm 두께로 냉간압연 하였다. 냉간압연의 가공 도는 각각 0%, 20% 45%, 65% 및 80%가 되도록 하였다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.02	0.3	1.99	0.03	0.02	12.06	16.19	2.0	Bal.

용체화 처리 한 시료와 가공양을 달리하여 냉간압연 한 시료의 미세조직 변화를 광학현미경으로 관찰하였고, 미세조직의 정성 및 정량적 변화는 X선 회절 시험을 통한 회절 선도의 적분 강도 값을 이용하여 구하였다(Jee et al., 2003). X선 회절 시험은 Mo-K α 선을 사용하여 1°/min.의 속도로 하였다.

한편 시료의 진동 감쇠능 측정은 압연이 끝난 시료를 최종적으로 120 X 10 X 1 mm의 크기로 방전가공에 의해 제작 한 후 횡형 내부마찰 측정장치(internal friction measurement machine, 진공이화학, IFT-1500)를 이용하여 대수 감쇠율을 측정하는 방법에 의해 측정하였다.

또한 미세조직 변화에 따른 인장성질 변화를 조사하기 위한 인장시험은 시료를 ASTM E-8의 규격을 따라 제작한 다음 상온에서 cross head speed를 1mm/min 으로 정하여 시험하였으며 각 시험값은 3개의 시험편에서 측정된 값을 평균하여 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직의 정성 및 정량 분석

Fig. 1은 용체화 처리한 시료와 용체화 처리 후 가공양을 달리하는 냉간압연을 행한 시료의 미세조직을 광학현미경에 의해 나타낸 것이다. 용체화 처리 한 시료의 미세조직을 나타 낸 사진 a)에서는 기지 조직이 오스테나이트(이하 γ) 조직으로 된 전형적인 오스테나이트계 스테인리스강 조직을 나타내고 있지만, 20% 및 60% 냉간 압연한 시료의 미세조직을 나타낸 사진 b)와 c)에서는 압연에 의해 γ 조직의 일부가 마르텐사이트(이하 α' 및 ϵ) 조직으로

가공유기 생성되어 있음을 알 수 있다. 또한 가공양이 증가함에 따라 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양이 많아지고 있음을 알 수 있다.

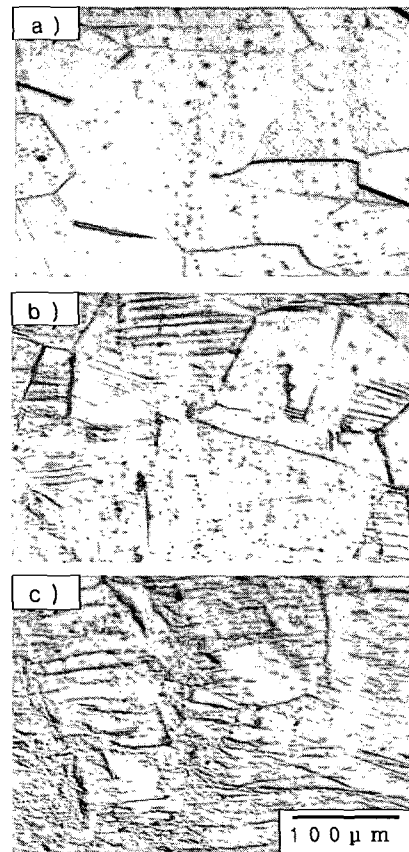


Fig. 1 Optical micrographs of 316L stainless steel. a) as solution treated, b) after 20% cold worked, c) after 65% cold worked

상온에서 준안정 γ 조직을 갖는 강은 가공에 의해 γ 조직이 α' 및 ϵ 조직으로 변태되고, γ 조직이 α' 및 ϵ 조직으로 변태되는 그 정도는 가공온도, 가공양 등에 따라 달라진다고 알려져 있다(Shoon et al., 2004). 본 실험에서도 가공양에 따라 달라지는 이들 상들의 체적분을 변화를 조사하였고, 그 결과를 Fig. 2 에 나타내었다.

가공양이 증가 할수록 기지조직인 γ 의 양이 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이에 반하여 가공유기 생성되는 ϵ 의 양은 가공양의 증가와 함께 증가하다 가공양이 약 20%되는 부근에서 최대의 값을 나타낸 다음 감소하고 있고, α' 의 양은 가공양이 20%가 될 때 까지는 가공양의 증가와 함께 큰 변화가 없이 거의 비슷한 값을 나타내다가 ϵ 의 양이 감소하기 시작하는 가공양이 20%가 되는 부근에서부터 서서히 증가한 다음, ϵ 의 양이 빠르게 감소하기 시작하는 지점인 가공양이 40%가 되는 부근에서부터 빠른 속도로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 가공양이 증가함에 따라 γ 의 양이 감소하고, α' 및 ϵ 의 양이 증가하는 이유는 가공에 의해 γ 의 조직 일부가 α' 및 ϵ 으로 가공유기 변태되기 때문이다. 또한 가공양의 증가와 함께 ϵ 의 양은 증가하다 특정 가공양에서 최댓값을 나타낸 후 감소하고, α' 가 가공도가 적은 영역에서는 서서히 증가하다 ϵ 이 감소하기 시작하는

지점에서부터 급격히 증가하는 이유는 상온에서 γ 조직을 갖는 강에서 가공유기 생성되는 α' 상은 γ 상 내 전위 집적부에서도 생성되지만, ϵ 상의 밴드 및 밴드 교차점 등에서 생성되기 때문이라 판단된다 (Kang and Sung, 1991).

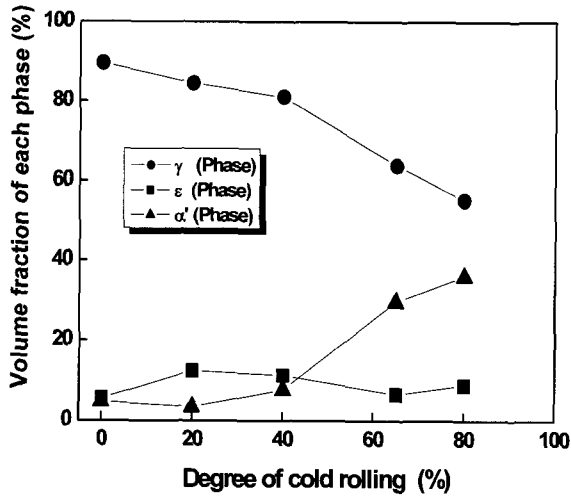


Fig. 2 Relationship between degree of cold rolling and volume fraction of each phase at room temperature in 316L stainless steel

3.2 감쇠능에 미치는 미세조직의 영향

Fig. 3은 시료를 상온에서 가공양을 달리하는 냉간압연 한 다음 가공양 변화에 따른 대수 감쇠율 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 대수 감쇠율은 가공양이 증가 할수록 증가하다 특정 가공양에서 최대값을 나타낸 다음 감소하고 있는 거동을 나타내고 있음을 알 수 있는데 이러한 거동은 Fig. 4의 가공양 변화에 따른 ϵ 의 체적분율 변화와 비슷한 거동을 나타내고 있는데 이 결과로부터 진동감쇠능은 ϵ 상과 밀접한 관계가 있을 것으로 예상된다. 따라서 진동감쇠능에 미치는 미세조직의 영향을 정량적으로 조사하였다.

Fig. 4는 대수 감쇠율에 미치는 α' 의 영향을 알아보기 위하여 용체화 처리 한 시료 및 용체화 처리 후 가공양을 달리하는 냉간 압연한 시료의 대수 감쇠율과 α' 조직의 체적분율과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. α' 상의 체적분율이 증가함에 따라 대수 감쇠율과 α' 상과의 사이에는 비례관계가 성립되지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 α' 조직은 대수 감쇠율에는 크게 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 ϵ 조직이 진동 감쇠능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 용체화 처리 한 시료 및 용체화 처리 후 가공양을 달리하는 냉간 압연한 시료의 대수 감쇠율과 ϵ 상의 체적분율과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. ϵ 상의 체적분율이 증가함에 따라 대수 감쇠율이 직선적인 비례 관계로 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 ϵ 조직이 대수 감쇠율에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다 (Shoon et al., 2004; Lee et al., 1997).

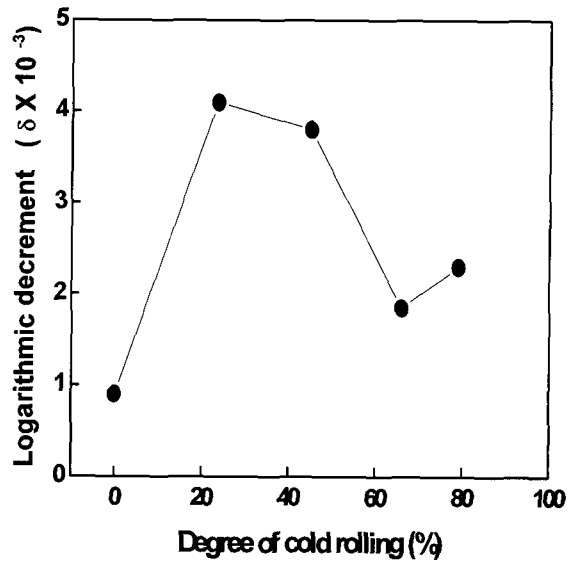


Fig. 3 Relationship between degree of cold rolling and logarithmic decrement at room temperature in 316L stainless steel

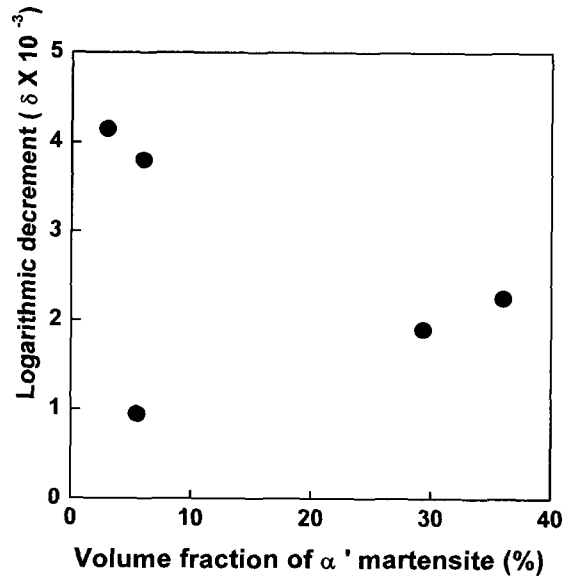


Fig. 4 Relationship between logarithmic decrement and volume fraction of α' martensite at room temperature in 316L stainless steel

이상의 결과로부터 316L 스테인리스강의 진동 감쇠능은 ϵ 상에는 크게 영향을 받지만 α' 상에는 영향을 크게 받고 있지 않고 있음을 알 수 있고, 이러한 결과는 상온에서 γ 조직을 갖는 Fe-Al-Mn 합금에서 미세조직과 감쇠능과의 관계를 연구한 Kang 등의 연구 결과와(Shoon et al., 2004) 잘 일치하고 있다.

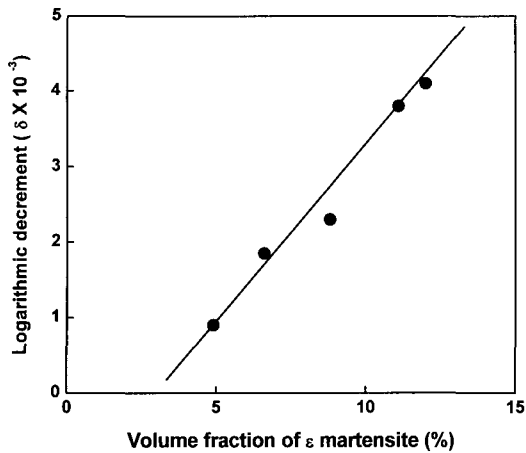


Fig. 5 Relationship between logarithmic decrement and volume fraction of ϵ martensite at room temperature in 316L stainless steel

3.3 인장성질에 미치는 미세조직의 영향

상온에서 준안정 γ 조직을 갖는 강은 가공에 의해 γ 조직이 마르텐사이트 조직으로 변태되며, 이러한 미세조직의 변화는 인장성질에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kang and Sung, 1991). 본 연구에서도 가공에 의해 생성되는 ϵ 및 α' 상의 체적분을 변화가 인장성질에 미치는 영향을 정량적으로 조사하였다.

Fig. 6은 316L 스테인리스강을 용체화 처리 및 용체화 처리 후 가공량을 달리하여 냉간 압연한 다음 상온에서 인장시험 하였을 때 얻은 인장강도와 연신율의 변화를 가공량에 대해 나타낸 것이다. 가공량의 증가와 함께 인장강도는 서서히 증가하고 있는데 반하여, 연신율은 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 가공량이 증가함에 따라 강도가 증가하고 연신율이 감소하는 이유는 γ 상이 가공에 의해 α' 및 ϵ 상으로 변태되기 때문이다.

Fig. 7은 316 L 스테인리스강의 강도 및 연신율에 미치는 가

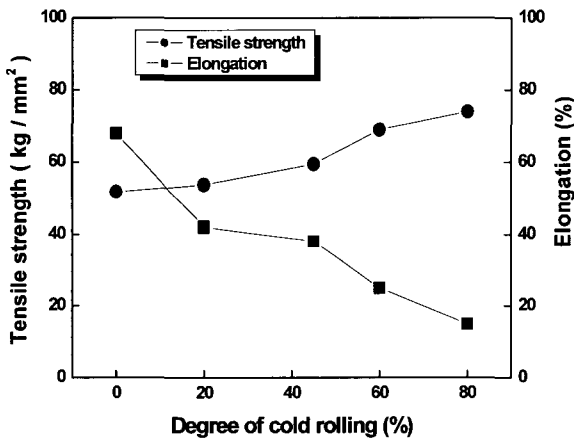


Fig. 6 Relationship between tensile strength and degree of cold rolling in 316L stainless steel

공유기 생성된 α' 및 ϵ 의 영향을 나타낸 것이다. 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양이 증가 할수록 인장강도는 직선적으로 증가하고 있는데 반하여, 연신율은 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양이 적은 변형의 초기단계에서는 급격히 감소하지만, 그 후 가공유기 생성되는 마르텐사이트의 양이 많아지면서 서서히 감소하고 있는 특이한 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 마르텐사이트 조직의 양이 증가함에 따라 인장강도가 직선적인 비례관계로 증가하는 이유는 가공량의 증가와 더불어 γ 상이 강한 마르텐사이트 상으로 변태되기 때문이라 생각되며, 연신율이 마르텐사이트 조직의 양이 적은 변형의 초기단계에서 급격히 감소하는 이유는 변형의 초기 단계에서는 ϵ 조직이 많이 생성되는데 기인되어 연신율이 급격히 감소한다고 생각된다.

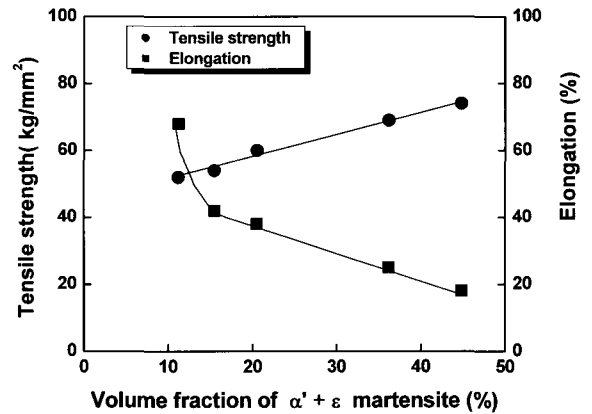


Fig. 7 Relationship between tensile strength and volume fraction of $\alpha' + \epsilon$ martensite at room temperature in 316L stainless steel

Fig. 8은 Fig. 7의 실험에서 얻은 인장강도와 연신율을 α' 상의 체적분율에 대해 나타낸 것이다. 인장강도는 α' 상의 양이 증가할수록 직선적인 비례관계로 증가하고 있는데 반하여, 연신율은 α' 상의 양이 적은 변형의 초기 단계에서는 급격히 감소하다 α' 상의 양이 증가함에 따라 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 인장강도는 α' 상에 강하게 영향을 받지만, 연신율은 α' 상에는 크게 영향을 받고 있지 않고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 인장강도와 연신율에 미치는 ϵ 상의 영향을 알아보기 위하여 316L 시료를 용체화 처리 후 가공량을 달리하는 냉간 압연을 한 다음 인장시험 하였을 때 얻은 인장강도와 연신율을 ϵ 상의 체적분율에 대해 나타낸 것이다. ϵ 상의 양이 증가함에 따라 인장강도는 증가하다 감소하는 거동을 나타내고 있는데 반하여 연신율은 거의 직선적인 비례관계로 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 인장강도는 ϵ 상에는 큰 영향을 받지 않지만, 연신율은 ϵ 조직에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, Fig. 6에서 마르텐사이트 상의 양이 적은 영역에서 연신율이 급격히 감소하는 이유는 α' 상 보다는 ϵ 상이 생성되는데 기인된다고

생각된다.

이상의 결과로부터 인장강도는 주로 α' 의 영향을 받아 α' 의 양이 증가하는데 기인되어 증가하고, 연신율은 α' 보다는 ϵ 상에 더 크게 영향을 받아 변형의 초기 단계에서는 크게 감소하지만, ϵ 상의 양이 감소하는 변형량이 높은 영역에서는 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다.

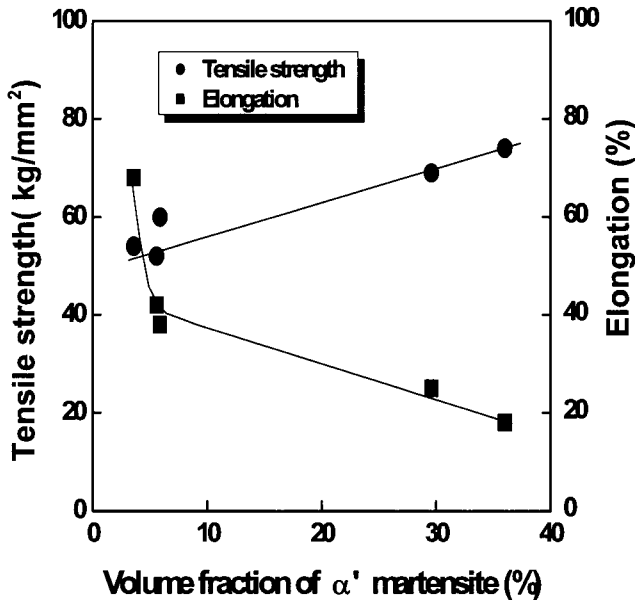


Fig. 8 Relationship between tensile strength and volume fraction of α' martensite at room temperature in 316L stainless steel

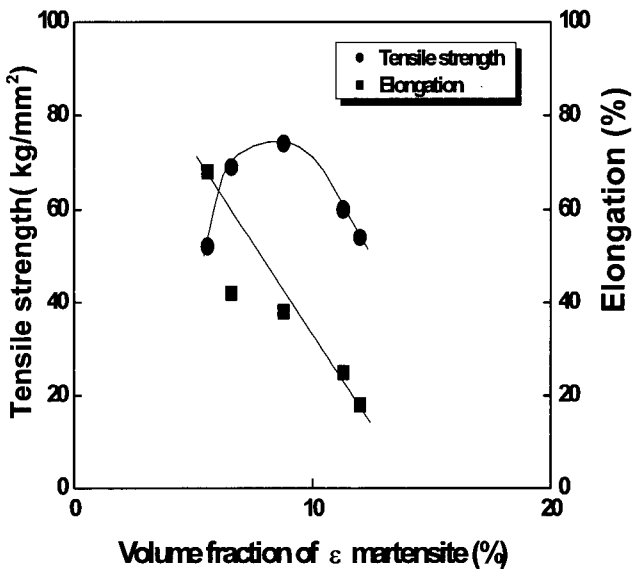


Fig. 9 Relationship between tensile strength and volume fraction of ϵ martensite at room temperature in 316L stainless steel

4. 결 론

상온에서 준안정 γ 조직을 갖는 316L 스테인리스강을 냉간 압연에 의해 미세조직을 변화 시킨 다음 미세조직 변화가 진동감쇠능 및 인장성질에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ϵ 상의 체적분율은 가공량이 증가함에 따라 증가하다 특정 가공양에서 최대값을 나타낸 후 감소하는데 반하여, α' 상의 체적분율은 가공량이 적은 범위에서는 서서히 증가하다가 ϵ 상의 체적분율이 감소하기 시작하는 시점에서부터 급격히 증가하였다.

(2) 진동감쇠능은 가공량이 증가함에 따라 가공유기 생성되는 ϵ 상의 체적분율이 증가하는데 기인되어 증가하다 가공량이 약 20%가 되는 부근에서 최대값을 나타낸 후 ϵ 상의 체적분율이 감소함에 따라 감소하였다.

(3) 인장강도는 가공유기 생성되는 마르텐사이트 상의 체적분율이 증가 할수록 직선적인 비례관계로 증가하지만, 연신율은 가공유기 생성되는 마르텐사이트 상의 체적분율이 적은 영역에서는 급격히 감소하지만 가공유기 생성되는 마르텐사이트 상의 양이 10% 이상이 되면 서서히 감소하였다.

(4) 진동감쇠능과 연신율은 ϵ 조직에는 크게 영향을 받고 있지만, γ 및 α' 조직에는 크게 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 인장강도는 α' 조직에 크게 영향을 받는데 기인되어 가공유기 생성되는 마르텐사이트 조직에 지배되지만, 연신율은 ϵ 조직에 영향을 받아 변형의 초기단계에서 급격히 감소하였다.

참 고 문 헌

Fiedler, H. C., Averbach, B. L. and Morris Cohen (1954). "The Effect of Deformation on the Martensitic Transformation in Austenitic Stainless Steels", Transactions of the ASM, Vol 47, pp 267-290.

Jee, K. K., Han, J. H. and Jang, W. Y. (2004). "Measurement of Volume Fraction of ϵ Martensite in Fe-Mn based Alloys", Materials Science and Engineering A, Vol 378, pp 319-322

Kang, C. Y. and Sung, J. H. (1991). "Effect of Deformation Temperature and Manganese Contents on the Tensile Properties of Fe-Cr-Ni-Mn Duplex Stainless Steel", J. of the Kore. Soc. for Heat Treat., Vol 4, pp 44-52.

Lee, K. H., Udovenko, V. H., Lee, B. J., Cho, K. K. and Shin, M. C. (1994). "The Effect of Micro and Magnetic Structure on the Damping Capacity of Fe-Al Based High Damping Alloy", J. of Kor. Inst. Met. Mater., Vol 32, No 12, pp 1499-1505.

Lee, Y. K., Lim, B. S., Cho, B. I. and Choi, C. S. (1997). "Effect of Martensite Content on Damping Capacity of Co-32%Ni Alloy", Scripta Mate., Vol 37, No 10, pp 1611-1615.

Lee, Y. K., Jun, J. H. and Choi, C. S. (1997). "Damping

- Capacity In Fe-Mn Binary Alloys", *ISIJ Inter.*, Vol 37, No 10, pp 1023-1027.
- Lee, K. K., Jang, W. Y., Baik, S. H., Shin, M. C. and Choi, C. S. (1997). "Damping Capacity In Fe-Mn Based Alloys", *Scripta Mate.*, Vol 37, No 7, pp 943-948.
- Okada, H., Sahashi, H., Kim, I. S., Kang, C. Y., Igata, N. and Miyahara, K. (2004). "Effect of epsilon martensite on the damping of high strength Fe.Cr.Mn alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol 370, pp 519-523.
- Shoon, D. W., Kang, C. Y., Miyahara, K. and Sung, J. H. (2004). "Effect of Microstructure on the Damping Capacity and Strength in Fe-Al-Mn Alloy", *SAE International*, Vol 1, pp 745.
-
- 2005년 7월 6일 원고 접수
2006년 2월 17일 최종 수정본 채택