316 L 스테인리스강의 인장성질과 감쇠능의 관계

권민기 · 강창룡[†]
부경대학교 금속공학과

Correlationship between Tensile Properties and Damping Capacity of 316 L Stainless Steel

Min-Gi Kwon and Chang-Yong Kang[†]

Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(2013년 11월 11일 접수 : 2013년 11월 21일 최종수정 : 2013년 11월 25일 채택)

Abstract This study is experimentally investigated whether or not a relationship exists between the mechanical properties and damping capacity of cold-rolled 316 L stainless steel. Deformation-induced martensite was formed with surface relief and directionality. With the increasing degree of deformation, the volume fraction of ϵ - martensite increased, and then decreased, while α' - martensite increased rapidly. With an increasing degree of deformation, tensile strength was increased, and elongation was decreased; however, damping capacity was increased, and then decreased. Tensile strength and elongation were affected in the α' - martensite; hence, damping capacity was influenced greatly by ϵ - martensite. Thus, there was no proportional relationship between strength, elongation, and damping capacity.

Key words stainless steel, tensile properties, damping capacity, deformation induced martensite.

1. 서 론

최근 감쇠능이 우수한 재료를 소음과 진동원에 적용함으로써 사회적 문제가 되고 있는 소음과 진동을 감소하려는 노력이 활발히 진행되고 있고, 오스테나이트계 스테인리스강도 그러한 재료중 하나로 검토되고 있다.¹⁾

오스테나이트계 스테인리스강 중 316 L 스테인리스강은 입계부식성 등을 저하시키기 위하여 탄소량을 극히 낮추는 대신에 2 % 이상의 Mo를 첨가하여 만든 강으로서 가공성과 내식성이 뛰어나 여러 산업분야에서 사용되고 있는 강이다.²⁾ 또한 이 강은 상온에서 가공에 의해 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하는 가공유기 마르텐사이트변태 거동을 나타내기 때문에³⁾ 가공하여 마르텐사이트로 만든 다음 역변태처리하여 초미세립 오스테나이트로 만들거나 또는 오스테나이트와 마르텐사이트의 2상 조직강으로 만들어 강도와 연신율의 우수한 조합을

얻어 사용범위를 확대하려는 연구가⁴⁾ 수행되고 있다. 뿐만 아니라 오스테나이트가 가공에 의해 마르텐사이트로 변태되면 진동 감쇠능에도 크게 영향을 미치기 때문에¹⁾ 이에 대한 연구도 일부 수행되고 있다. 그러나 이러한 강의 사용범위를 확대하고 사용상 안정성 등을 확보하기 위해서는 가공유기 마르텐사이트 변태에 따른 기계적 성질과 감쇠능의 상호관계를 조사하는 것이 필요하다.

일반적으로 금속재료는 강도가 높으면 진동에너지 열 에너지로 소실하기 어려워 감쇠능은 낮아진다고 알려져 있다.^{5,6)} 그러나 이러한 관계는 그 재료가 갖는 감쇠기구에 따라 달라진다고 판단된다. 특히 316 L과 같이 상온에서 오스테나이트 조직을 갖는 강에서는 강도와 연신율은 주로 가공에 의해 생성되는 α' 및 ϵ -마르텐사이트에 지배되지만, 감쇠능은 ϵ -마르텐사이트에 지배되기 때문에⁷⁾ 인장성질과 감쇠능과의 상호관계는 일반 금속재료에서와는 다를 것으로 예상된다. 그러나 316 L강에서 감

[†]Corresponding author

E-Mail : metkcy@pknu.ac.kr (C.-Y. Kang, Pukyong Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

쇠능에 대한 인식은 내식성 보다 낮아 감쇠능에 대한 연구가 활발히 수행되지 못하여 이를 연구한 논문은 없다.

따라서 본 연구는 316 L 스테인리스강에서 가공도를 달리하여 오스테나이트 조직을 마르텐사이트 조직으로 변태시킨 다음 인장성질과 감쇠능을 조사하고 아울러 이들의 상호 관계를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료

시료는 Table 1에 나타난 화학조성을 갖는 316 L 공시재를 사용하였다. 먼저 판재의 시료를 최종 여러 압연율로 냉간압연 하였을 때 2 mm 두께가 되도록 필요한 두께로 열간압연 하였고, 이를 산세 등을 거쳐 1050 °C에서 용체화처리를 하였다. 다음 가공도를 달리한 냉간압연에 의해 2 mm의 두께로 만들어 시료로 사용하였다.

2.2 미세조직관찰

용체화처리한 시료와 가공량을 달리하여 냉간압연한 시료의 미세조직을 광학현미경으로 관찰 하였다. 또한 가공에 의해 생성되는 α' 및 ϵ -마르텐사이트는 냉간압연 한 시료로부터 연마와 정마과정을 거쳐 얇은 두께로 만든 다음 jet연마하여 박막으로 만들어서 투과전자현미경(Hitach, 200 kV)으로 관찰하였다.

2.3 X선 회절시험

용체화처리한 시료와 가공량을 달리하여 냉간압연한 시료에서 각상의 체적분율은 Mo-K α 특성 X선을 이용하여 2°/min.의 속도로 회절시험(Rigaku D/Max-IIA) 하였을 때 얻은 회절선도로부터 얻은 각 상에 해당하는 피크의 상태 적분강도 값을 사용하여 구하였다.⁸⁾

2.4 감쇠능 측정

감쇠능 측정은 용체화처리 및 가공량을 달리하여 냉간압연한 시료로부터 120 mm × 20 mm × 1 mm 크기로 방전가공에 의해 제작후 횡 형 내부 마찰측정장치(internal friction measurement machine, 진공이화학, IFT-1500)로 대수감쇠율을 측정하는 방법으로 측정하였다. 이 방법은 진동을 가하는 전극과 진동을 검출하는 전극위에 시료를 2개의 평행한 세선으로 전극에 접촉되지 않게 배열한 다음, 진동을 가하는 전극으로 강제 진동시킨 후 자유 감쇠시켜 최종 감쇠할 때까지의 파수를 측정하여 대

수 감쇠율($\delta = 1/n \ln A_0/A_n$; n; 파수, A_0 ; 최초파의 진폭, A_n ; n번째 파의 진폭)을 구하였다.

2.5 인장시험

인장성질은 용체화처리 및 가공량을 달리하여 냉간압연한 시료로부터 평행부 길이가 50 mm 인 ASTM E-8의 규격을 따라 방전가공에 의해 시험편을 제작한 다음 상온에서 cross head speed를 2 mm/min 로 인장시험하여 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직관찰

Fig. 1은 실험에 사용된 316 L 스테인리스강의 미세조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 쌍정들이 존재하고 있는 오스테나이트 조직임을 알 수 있다.

Fig. 2는 용체화처리후 20 % 및 65 % 냉간압연한 시료의 미세조직을 광학현미경으로 조사하여 나타낸 것이다. 냉간압연에 의해 오스테나이트의 일부가 마르텐사이트로 변태되어 오스테나이트와 마르텐사이트가 함께 존

Fig. 1. Optical micrograph of 316 L stainless steel.

a) 20% cold rolling

b) 65% cold rolling

Fig. 2. Optical micrographs of cold worked 316 L stainless steel.

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.

재하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 316 L 스테인리스강을 가공하면 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하는 가공유기 마르텐사이트 변태가 일어나고 있는 것을 알 수 있고, 이 때 마르텐사이트는 표면기복을 일으키면서 방향성을 지니고, 일부는 교차하면서 생성되고⁹⁾ 있는 것을 알 수 있다. 또한 65 % 냉간압연한 시료가 20 % 냉간압연한 시료보다 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트의 양은 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 가공에 의해 생성된 마르텐사이트를 결정학적으로 조사하기 위하여 30 % 냉간압연한 시료의 미세조직을 투과전자현미경으로 조사하여 그 상의 제한시야 회절패턴과 이를 분석한 결과를 함께 나타낸 것이다. 사진 a)에서는 BCT 구조를 갖는 α' -마르텐사이트가 사진 b)에서는 HCP 구조를 갖는 ϵ -마르텐사이트가 동일하게 밴드 형상으로 방향성을 띄고 생성되고 있는 것을⁹⁾ 알 수 있다.

Fig. 4는 가공량을 달리하여 냉간압연한 시료의 오스테나이트와 가공에 의해 생성되는 α' 및 ϵ 마르텐사이트

트의 체적분율을 조사하여 나타낸 것이다. 압연량이 증가 할수록 오스테나이트의 양은 빠르게 감소하고 있고, ϵ -마르텐사이트의 양은 증가하다 특정 가공량 이상이 되면 감소하고 있는데 반하여, α' -마르텐사이트의 양은 서서히 증가하다 ϵ -마르텐사이트가 감소하기 시작하는 가공량 부근에서 부터 빠르게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 가공량이 증가함에 따라 오스테나이트의 양이 감소하는 이유는 가공에 의해 오스테나이트가 α' 및 ϵ -마르텐사이트로 변태되기 때문이다. 또한 가공량의 증가와 함께 ϵ -마르텐사이트의 양이 증가하다 특정 가공량 이상이 되면 감소하고 있는데 반하여, α' -마르텐사이트의 양은 서서히 증가하다 ϵ -마르텐사이트가 감소하기 시작하는 가공량에서부터 빠르게 증가하는 이유는 오스테나이트 조직을 갖는 강에서 가공에 의해 생성되는 α' -마르텐사이트는 오스테나이트 내 전위 집적부, ϵ -마르텐사이트의 밴드와 밴드 교차점 등에서도 생성되어 성장한다고 알려져 있다.¹⁰⁾ 본 연구에서도 α' -마르텐사이트가 오스테나이트 내 전위 집적부에서도 생성되지만, ϵ -마르텐사이트의 밴드와 밴드 교차점 등에서 생성되어 성장하기 때문에 ϵ -마르텐사이트의 양은 증가하다 특정 가공량 이상이 되면 감소하고, α' -마르텐사이트는 ϵ -마르텐사이트의 양이 감소하는 가공량 부근에서부터 빠르게 증가하기 때문이라 생각 된다.

3.2 인장성질과 감쇠능에 미치는 가공의 영향

Fig. 5는 가공량을 달리하여 냉간압연 한 시료의 대수감쇠율을 변화율 조사하여 나타낸 것이다 대수감쇠율은 가공량이 증가함에 따라 증가하다 특정 가공량 이상이 되면 감소하고 있으며, 이러한 거동은 Fig. 4에서 나타낸 가공량 변화에 따른 ϵ -마르텐사이트의 체적분율 변화와 비슷한 것을 알 수 있다.

Fig. 3. TEM micrographs showing the α' and ϵ -martensite in 30 % cold rolled 316 L stainless steel.

Fig. 4. Effect of degree of cold rolling on volume fraction of each phase in 316 L stainless steel.

Fig. 5. Effect of degree of cold rolling on the logarithmic decrement of 316 L stainless steel.

Fig. 6. Effect of volume fraction of ϵ - martensite on the logarithmic decrement of cold rolled 316 L stainless steel.

Fig. 7. Effect of degree of cold rolling on the tensile properties of 316 L stainless steel.

Fig. 6은 압연율을 달리하여 냉간압연 한 시료의 대수 감쇠율에 미치는 ϵ -마르텐사이트의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. ϵ -마르텐사이트의 양이 증가함에 따라 대수 감쇠율이 직선적인 비례관계로 증가하고 있는 것을 알 수 있고 이와 같은 이유는 ϵ -마르텐사이트가 생성되면 ϵ -마르텐사이트 내 적층결함, ϵ -마르텐사이트와 오스테나이트의 계면 등이 진동에 의해 용이하게 이동함으로써 진동에너지가 잘 소실하기 때문이다. 따라서 진동 감쇠능은 가공에 의해 생성되는 ϵ -마르텐사이트에 크게 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다

Fig. 7은 가공량을 달리하여 냉간압연한 시료의 인장강도와 연신율을 조사하여 나타낸 것이다. 가공량의 증가와 함께 인장강도는 서서히 증가하고 있는데 반하여, 연신율은 빠르게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 가공량이 증가함에 따라 강도가 증가하고 연신율이 감소하는 이유는 가공에 의해 오스테나이트가 자신보다 강한 마르텐사이트로 변태되고, 가공량이 증가할수

Fig. 8. Effect of volume fraction of α' -martensite on the tensile properties in 316 L stainless steel.

록 가공에 의해 생성되는 α' 마르텐사이트의 양이 많아지기 때문이라 판단된다.

Fig. 8은 압연율을 달리하여 냉간압연한 시료의 인장성질에 미치는 α' -마르텐사이트의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. α' -마르텐사이트의 양이 증가함에 따라 인장강도가 비례관계로 서서히 증가하고 있고, 연신율은 감소하고 있다. 따라서 강도와 연신율은 가공에 의해 생성되는 α' -마르텐사이트에 크게 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다.

3.3 인장성질과 감쇠능과의 관계

Fig. 9는 가공량을 달리하여 냉간압연 한 316 L 강의 인장강도와 감쇠능과의 관계를 조사하기 위하여 가공량을 달리하여 냉간압연 한 시료의 인장강도와 대수감쇠율의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. 인장강도가 증가함에 따라 대수감쇠율은 낮아지기도 하고 높아지기도 하고 있다. 따라서 316 L 오스테나이트 스테인리스강에서 인장강도와 감쇠능과의 사이에는 일반 금속재료에서와 같은 비례관계는 성립되지 않고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 가공량을 달리하여 냉간압연한 강의 연신율과 대수감쇠율과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다. 연신율이 증가함에 따라 대수감쇠율은 증가하기도 하고, 낮아지기도 하고 있다. 연신율도 인장강도와 마찬가지로 감쇠능과 비례관계가 성립되지 않고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 316 L 스테인리스강의 강도, 연신율과 감쇠능과의 관계는 일반 금속재료에서와 같이 강도가 증가하고 연신율이 낮아지면 감쇠능이 낮아지는 관계는^{5,6)} 성립하지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 Fig. 6 과 8의 결과에서 알 수 있듯이 인장강도와 연신율은 가공에 의해 생성되는 α' -마르텐사이트에 지배되고 있고, 감쇠능은 ϵ -마르텐사이트에 영향을 받고 있다. 따라서 강도와 연신율에 미치는 미세조직과 감쇠능

Fig. 9. Relationship between tensile strength and logarithmic decrement of cold rolled 316 L stainless steel.

Fig. 10. Relationship between elongation and logarithmic decrement of cold rolled 316 L stainless steel.

에 미치는 미세조직이 다르고, 가공에 따른 이들 미세조직의 변태거동도 다르기 때문이라 판단된다.

4. 결 론

가공량을 달리하여 냉간가공 한 316 L스테인리스강의 인장성질과 감쇠능의 관계를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가공에 의해 생성되는 마르텐사이트는 표면기복을 일으키면서, 그리고 방향성을 지니고 생성되었다.

2) 가공도가 증가할수록 ϵ -마르텐사이트의 양은 증가하다 감소하고 있는데 반하여, α' -마르텐사이트는 서서히 증가하다 빠르게 증가하였다.

3) 가공도가 증가할수록 인장강도는 증가하는데 반하여 연신율은 감소하였다. 그러나 감쇠능은 증가하다 감소하였다.

4) 인장강도와 연신율은 가공에 의해 생성되는 α' -마르텐사이트에 영향을 받고, 감쇠능은 ϵ -마르텐사이트에 크게 영향을 받았다. 따라서 강도와 연신율과 감쇠능과의 사이에는 비례관계는 없었다.

References

1. D. W. Soon, J. H. Kim, I. S. Kim, K. Miyahora, C. Y. Kang, J. Kor. Inst. Met. Mater, **42**(8), 621 (2004).
2. G. Gemmel, Applications of stainless steel, ASM International, Stockholm, Sweden, 664 (1992).
3. Y. Tomota, M. Strum and J. W. Morris, Metal. Trans., **17A**(3), 537 (1986).
4. V. F. Zacky, Z. R. Parker, D. Fahr and R. Bush, Trans., ASM, **60**, 252 (1967).
5. D. W. James, Mat. Cvi. Eng., **4**, 1 (1969).
6. K. Sugimoto, Men, Inst. Sci. Ind. Res., Osaka Univ., **35**, 31 (1978).
7. D. W. Soon, J. M. Lee, H. J. Kim, K. W. Nam, K. S. Park, C. Y. Kang, J. Ocean Eng. Technol., **20**(1), 1 (2006).
8. K. K. Jee, J. H. W. Y. Jnag, Mater. Sci. Eng., **378**(1-2), 310 (2004).
9. T. Y. Hur, J. P. Whang and C. Y. Kang, J. Kor. Soc. Heat Treat., **24**(5), 271 (2011).
10. J. W. Brooks, M. H. Loretto and R. E. Smallman, Acta Metall., **27**(12), 1839 (1979).