

냉간압연률 및 두께에 따른 STS316L의 감쇠능 및 고유주파수 Damping Capacity and Natural Frequency of STS316L Steel according to Degree of Cold Rolling and Different Thickness

남기우* · 김병수** · 김진욱*** · 손대진** · 최병철****†

Ki-Woo Nam*, Byeong-Su Kim**, Jin-Wook Kim***, Dai-Jin Son***
and Byoung-Chul Choi****†

(Received 08 February 2019, Revision received 04 April 2019, Accepted 17 April 2019)

Abstract: This study was investigated mechanical properties, damping capacity and natural frequency using STS316L steel with different thickness and cold rolled STS316L steel. The austenite phase was transformed into a martensite phase by cold rolling. Tensile strength increased with an increase of the degree of cold rolling whereas elongation decreased. The damping capacity decreased as the degree of cold rolling increased. The natural frequency showed a tendency to decrease slightly as the degree of cold rolling increased, and increased as the thickness increased. The natural frequency of the FFT analysis was found to be the secondary frequency. The natural frequency ratios showed a constant value, and there was no structure effect.

Key Words : Cold rolling, Austenite stainless steel, Damping, Natural frequency

1. 서 론

스테인리스강은 내식성이 뛰어나며, 크롬 함량이 증가하면 내식성도 증가한다. 그러므로 스테

인리스강은 강도와 내식성을 요구하는 분야에 많이 응용되고 있다.

삶의 질이 향상됨에 따라서 구조물의 진동 및 소음이 사회적 문제로 떠오르고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 진동 및 소음을 감소시

****† 최병철(<https://orcid.org/0000-0003-3553-3539>) : 교수, 한국폴리텍대학 울산캠퍼스 에너지화학공정과
E-mail : cbc6971@kopo.ac.kr, Tel : 052-290-9610

*남기우(<https://orcid.org/0000-0001-7019-358x>) : 교수, 부경대학교 재료공학과

**김병수(<https://orcid.org/0000-0002-7330-8685>) : 대학원생, 부경대학교 재료공학과, 손대진(<https://orcid.org/0000-0002-7447-6285>) : 대학원생, 부경대학교 재료공학과

***김진욱(<https://orcid.org/0000-0003-2820-4788>) : 책임연구원, 재료연구소 원자력공인사업단

****† Byoung-Chul Choi(<https://orcid.org/0000-0003-3553-3539>) : Professor, Department of Energy and Chemical Process, Ulsan Campus of Korea Polytechnics

E-mail : cbc6971@kopo.ac.kr, Tel : 052-290-9610

*Ki-Woo Nam(<https://orcid.org/0000-0001-7019-358x>) : Professor, Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University.

**Byeong-Su Kim(<https://orcid.org/0000-0002-7330-8685>), Dai-Jin Son(<https://orcid.org/0000-0002-7447-6285>) : Graduate Student, Pukyong National University.

***Jin-Wook Kim(<https://orcid.org/0000-0003-2820-4788>) : Senior Researcher, Authorized Nuclear Inspection Department, Korea Institute of Materials Science.

키는 재료의 개발 및 연구가 활발하게 이루어지고 있다.¹⁻¹⁰⁾ 또한 우리나라는 지진 발생 지역이 아니라고 생각하였으나, 최근 지각의 활발한 활동으로 매년 지진의 발생이 증가하고 있는 추세이다. 스테인리스강은 가공성과 내식성이 우수하여, 진동 및 소음을 감소시키는 재료로 유망하다. 특히 스테인리스강의 오스테나이트 상은 냉간가공에 의하여 마르텐사이트 상으로 변태되면^{3,10)} 감쇠능이 우수해진다는 연구가 있다. 가공유기 α' 와 ϵ -마르텐사이트는 강도 및 연신율에 영향을 끼치지만, ϵ -마르텐사이트는 감쇠능에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾

본 연구는 오스테나이트 상 STS316L을 냉간압연률을 다르게 하고, 마르텐사이트 상으로 변태시켜 기계적 특성 및 감쇠능을 조사하였다. 또한 냉간압연제는 충격에 의한 진동의 고유주파수를 구하였으며, 비교하기 위하여 두께가 다른 모재의 고유주파수도 구하여 비교하였다.

2. 재료 및 실험방법

본 연구에 사용 재료는 화학플랜트용 STS316L이다. 압연률에 따르는 감쇠능 특성을 평가하기 위하여, 0, 17, 33, 50, 67 및 80% 압연하였다. 압연조건은 상온에서 5 mm/sec로 하였다. 냉간압연 시험편의 마르텐사이트 분율은 XRD 데이터에서 각 상 2θ 최대값을 사용하여, 다음 (1) 식을 연립하여, 분율을 구한다.

$$\begin{aligned} V_\epsilon + V_\gamma + V_{\alpha'} &= 1 \\ \frac{I_\epsilon}{I_\gamma} &= \frac{R_\epsilon}{R_\gamma} \cdot \frac{V_\epsilon}{V_\gamma} \\ \frac{I_{\alpha'}}{I_\gamma} &= \frac{R_{\alpha'}}{R_\gamma} \cdot \frac{V_{\alpha'}}{V_\gamma} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, R : 각 상의 정수, V : 각상의 체적분율, I : 상 고유의 회절선에 따른 적분강도. 그리고 두께 및 크기에 따르는 고유주파수 특성을 비교하였다. 두께는 1, 1.5, 2, 3, 5 mm의 5종류, 크기는 120×15 mm를 사용하였다.

감쇠능은 시험편을 실로 매달은 양단 자유보

상태에서 충격을 가하여 강제 진동시킨 후 자유 감쇠가 끝날 때까지의 파형을 측정하여, 아래 (2) 식을 사용하여 구하였다.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_1}{x_n} \quad (2)$$

여기서, n : 파수, x_1 : 최초 파의 진폭, x_n : n 번째 파의 진폭이다. 각 시험편은 5회씩 진동을 가하였다.

고유주파수는 시험편을 실로 매달은 양단자유보 상태에서 충격을 가하여 강제 진동시킨 후, 진동의 감쇠가 끝날 때까지의 파형을 검출하였다. 사용한 장비는 NI PXI system이다. 양단자유보의 고유주파수는 다음 식 (3)으로 구해진다.

$$\omega = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3)$$

여기서 E 는 종탄성계수 (19,700 kg/mm²), ρ 는 밀도(7.93 g/mm³)이다.

검출된 파형에서 고유주파수는 1차 주파수 $\omega_1 = 2.26\omega$, 2차 주파수 $\omega_2 = 6.249\omega$, 3차 주파수 $\omega_3 = 12.25\omega$, 4차 주파수 $\omega_4 = 20.25\omega$ 로 분리할 수 있다. 고유주파수는 고속 푸리에 변환(FFT)으로 분석하고 분리하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 감쇠능 평가

Fig. 1은 압연한 시험편의 인장시험 결과를 나타낸다. 그림에서 인장강도는 냉간압연률이 많을수록 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 연신율은 서서히 증가하고 있는 인장강도와 반대로 급격하게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 냉간압연률이 많을수록 재료의 강성이 증가한 것이다. 즉, 냉간압연에 의하여 오스테나이트는 강한 α' -마르텐사이트로 변태한 것으로 판단된다.

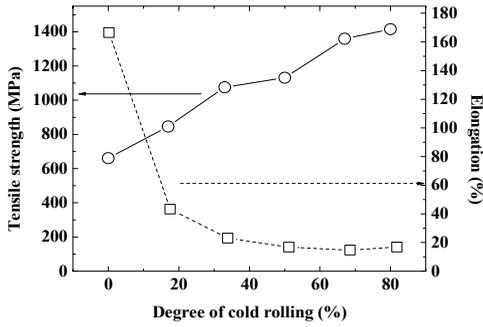


Fig. 1 Tensile strength and elongation according to degree of cold rolling

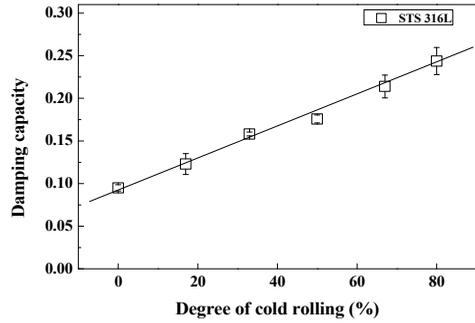


Fig. 3 Damping capacity according to degree of cold rolling

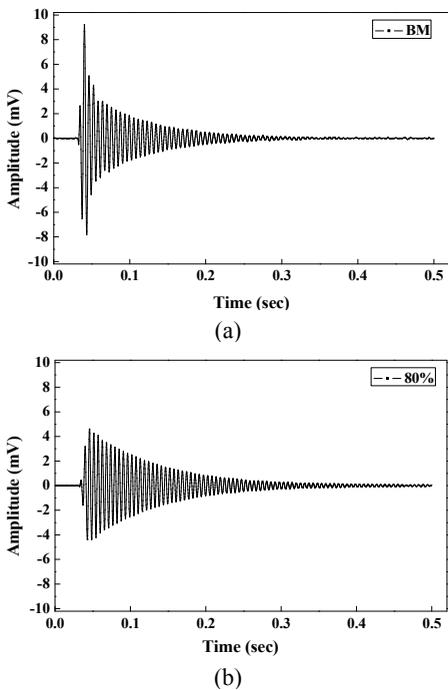


Fig. 2 Typical examples of the waveform according to the degree of cold rolling. (a) As-received specimen, (b) Cold rolling specimen of 80%

Fig. 2는 모재시험편과 80% 냉간압연시험편에서 얻어진 시간-진폭곡선을 나타낸다. 수평축은 시간, 수직축은 진폭을 나타낸다. 시험편에 진동을 가한 후에 진폭이 작아지고 있다. 이러한 경향은 압연시험편보다 모재시험편의 진폭이 급격하게 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 2와 같은 곡선에서 얻어진 냉간압연률과 감쇠능의 관계를 나타낸다. 냉간압연률과 감쇠능은 비례하는 것으로 나타났다. 즉, 감쇠능은 냉간압연률이 많을수록 증가하는 것으로 나타났다. 80% 냉간압연시험편의 감쇠능은 모재시험편(0%)보다 157% 증가하였다. 이러한 결과는 압연에 의하여 증가한 ϵ -마르텐사이트가 감쇠능을 좋게 한다는 연구결과와 일치한다. 즉, 압연에 의하여 마르텐사이트가 증가하고, 강성이 증가함으로써 감쇠능이 좋아졌다.

Fig. 4는 감쇠능에 영향을 주는 ϵ -마르텐사이트의 양과 감쇠능의 관계를 나타낸다. 모재시험편(γ -오스테나이트 100%)의 감쇠능은 약 0.095를 나타내었다. 냉간압연에 의하여 γ -오스테나이트의 양이 감소하고, ϵ -마르텐사이트 양이 많아져서, 강성이 증가하고, 감쇠능이 증가한 것으로

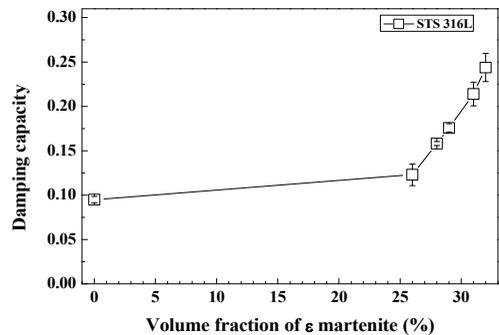


Fig. 4 Damping capacity according to volume fraction of ϵ -martensite

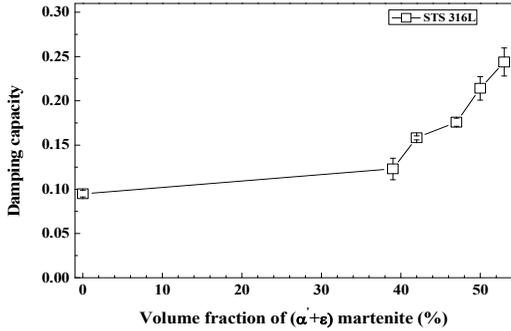


Fig. 5 Damping capacity according to volume fraction of (α' + ε) martensite

로 판단된다. 17% 냉간압연시험편은 모재시험편보다 약 30%의 감쇠능이 증가하고, 그 후는 직선적으로 증가하였다. 냉간압연률 80%에서 γ-오스테나이트, ε-마르텐사이트 및 α'-마르텐사이트의 양은 각각 47%, 32% 및 21%가 얻어졌다.

Fig. 5는 감쇠능에 영향을 미치는 ε-마르텐사이트와 강성에 영향을 미치는 α'-마르텐사이트의 합과 감쇠능의 관계를 나타낸다. 마르텐사이트 양이 증가함에 따라서 강성이 증가하였으며, 감쇠능이 좋아지는 것을 알 수 있다. α' + ε 마르텐사이트는 냉간압연률 17%에서 약 39%, 80%에서 53%를 나타내었다. 이와 같이 마르텐사이트는 오스테나이트가 냉간압연에 의하여 변태하기 때문이다. 즉, α'-마르텐사이트는 오스테나이트 내 전위 집적부 및 ε-마르텐사이트의 밴드와 밴드 교차점 등에서 생성된다.¹⁰⁾

3.2 고유주파수 평가

Fig. 6은 양단자유보 상태에서 얻어진 진동 신호를 시간-주파수로 해석한 것이다. (a)는 모재시험편이고, (b)는 80% 냉간압연시험편이다. 각 시험편은 시간-주파수에서 뛰어난 주파수를 나타내었으며, 진폭-주파수에서 높은 진폭값을 얻었다. 즉, 뛰어난 주파수는 각 시험편의 고유주파수를 나타내며, (a) 모재시험편은 348 Hz, (b) 80% 냉간압연시험편은 336 Hz이다. 이것은 위에서 설명한 2차주파수(ω_2)를 나타내며, 각 재료의 같은 두께에서 얻을 수 있는 고유주파수이다.

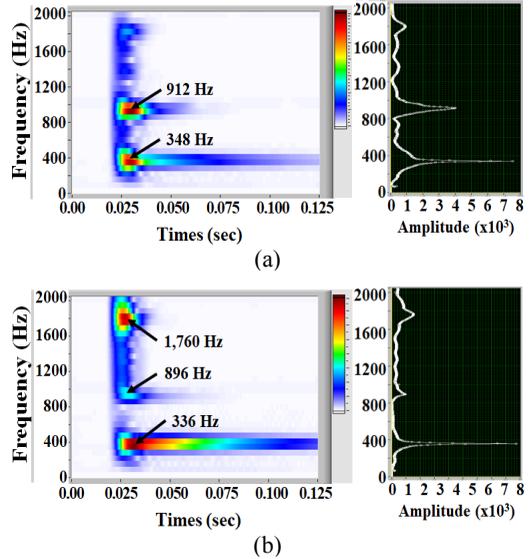


Fig. 6 FFT analysis of signal obtained from specimens. (a) As-received specimen, (b) Cold rolling specimen of 80%

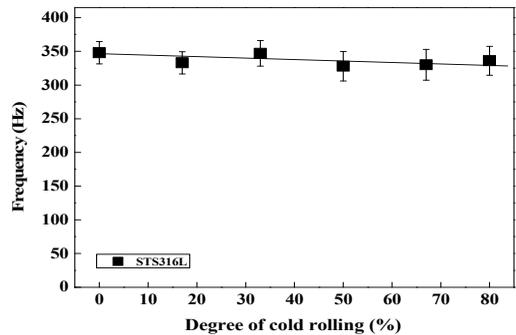


Fig. 7 Frequency according to degree of cold rolling

Fig. 7은 Fig. 6에서 얻어진 고유주파수와 냉간압연율의 관계를 나타낸 것이다. 고유주파수는 냉간압연율이 많아짐에 따라서 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 Fig. 1에서 냉간압연률이 증가함에 따라서 인장강도가 증가하고 연신률이 작아지는 즉, 강성이 증가하면 밀도가 증가하므로 식 (2)에서 고유주파수는 작아지는 것으로 판단된다. 이와 같이 고유주파수는 Fig. 3에 나타난 감쇠능과 반대의 경향을 나타내었다.

Fig. 8은 감쇠능에 영향을 미치는 ε 상 마르텐

사이트와 강성에 영향을 미치는 α' 상 마르텐사이트의 함과 고유주파수의 관계를 나타낸다. 마르텐사이트 양이 증가함에 따라서 감쇠능이 좋아지는 것은 Fig. 5에서 알 수 있었다. ($\alpha' + \epsilon$) 마르텐사이트는 냉간압연률 17~80%에서 약 39~53%를 나타내었으며, 고유주파수는 약간씩 감소하는 경향을 나타내었다. 인장강도의 증가, 즉 강성의 증가에 따라서 진동이 빨리 전달되어, 고유주파수가 감소하는 것이라 판단된다.

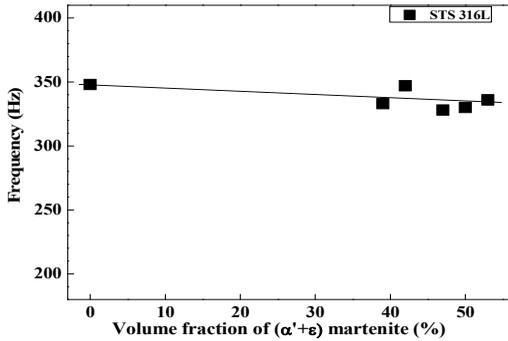


Fig. 8 Frequency according to volume fraction of ($\alpha' + \epsilon$) martensite

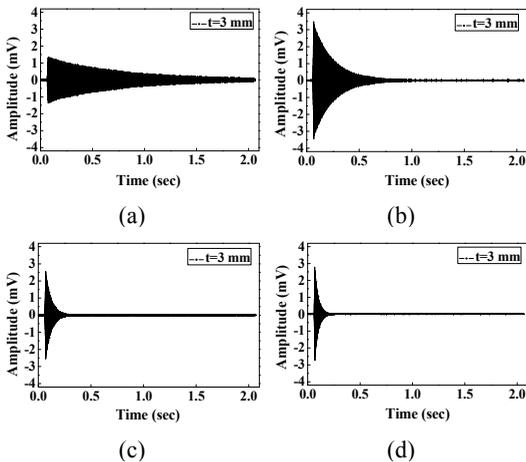


Fig. 9 Waveform of 1st to 4th order frequencies obtained from signal. (a) 1st order frequency waveform, (b) 2nd order frequency waveform, (c) 3rd order frequency waveform, (d) 4th order frequency waveform

Fig. 9는 양단자유보 상태에서 얻어진 진동 신호를 $1(\omega_1) \sim 4(\omega_4)$ 차주파수로 분리한 파형이다. (a)는 1차주파수, (b)는 2차주파수, (c)는 3차주파수, (d)는 4차주파수를 나타낸다. 1차주파수는 전기신호인 60 Hz와 같은 주파수가 주로 얻어졌으며, 파형도 맥동이 심하게 나타났다. 그러나 2차주파수부터는 맥동이 없는 파형이 얻어졌다. 또한 시간-주파수 분석에서 뛰어난 주파수는 2차주파수를 나타내었다. 이것이 두께가 다른 시험편에서 얻어진 각 신호의 뛰어난 주파수로 판단하였다.

Fig. 10은 시험편 두께와 $\omega_1 \sim \omega_4$ 주파수의 관계를 나타낸다. $\omega_1 \sim \omega_4$ 주파수는 시험편 두께에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 식 (2)에 단면 2차모멘트 $I = bh^3/12$ 를 대입하면, 다음 (4) 식과 같이 된다.

$$\omega = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{bh^3 E}{12\rho A}} \quad (4)$$

여기서 b는 시험편 폭, h는 시험편 두께를 나타낸다.

시험편 폭(b)가 일정하다면, 1차(ω_1)~4차(ω_4)주파수는 시험편 두께(h)에 따라서 증가하는 것이다. 그러므로 1차(ω_1)~4차(ω_4)주파수는 동일 재료에서 두께의 증가에 따라 증가하며, 동일 두께에서는 일정한 값이고, 조직이 영향이 없다고 판

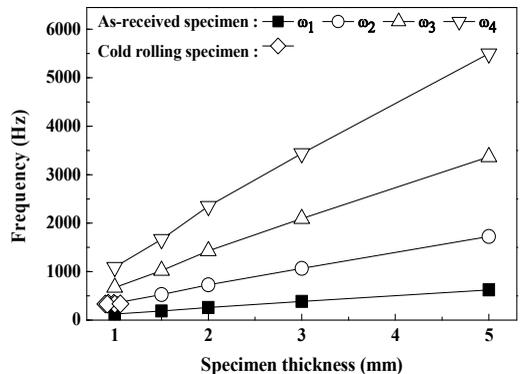


Fig. 10 Frequency according to specimen thickness

단된다. 비교하기 위하여 냉간압연시험편에서 얻어진 고유주파수(\diamond)를 나타내었다. 냉간압연시험편은 두께 약 1 mm로서 거의 일정한 값(328~348 Hz)을 나타내었다. 두께 1 mm의 2차주파수(ω_2)는 냉간압연시험편의 고유주파수와 비슷한 것을 알 수 있다. 이것으로부터 시험편의 두께에 관계없이 고유주파수는 2차주파수(ω_2)라고 판단된다.

Fig. 11은 시험편 두께와 고유주파수 비의 관계를 나타낸다. 종축은 고유주파수 비를 나타내고, 횡축은 시험편 두께를 나타낸다. 계산에서 얻어진 고유주파수 비는 각각 $\omega_2/\omega_1 = 2.76$, $\omega_3/\omega_1 = 5.42$, $\omega_4/\omega_1 = 8.96$ 를 나타내어, 고차 주파수로 갈수록 고유주파수 비가 크게 나타났다. 냉간압연재(\diamond)는 압연하지 않은 1 mm 두께시험편과 비슷한 고유주파수 비를 나타내었으며, 두꺼운 모재시험편도 고유주파수 비가 비슷하게 나타났다. 그러나 상세하게 보면 두께 1 mm의 고유주파수는 약간 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 센서의 무게에 비하여 시험편의 두께가 얇아, 충격에 의한 진동으로 시험편이 흔들린 것이 원인이라 판단된다. 즉, 흔들림이 없으면 두꺼운 시험편의 고유주파수와 같을 것이라 판단된다. 따라서 고유주파수 비는 동일 재료에서 일정한 값을 가지는 재료 고유의 특성이며, 조직이 영향이 없다고 판단된다.

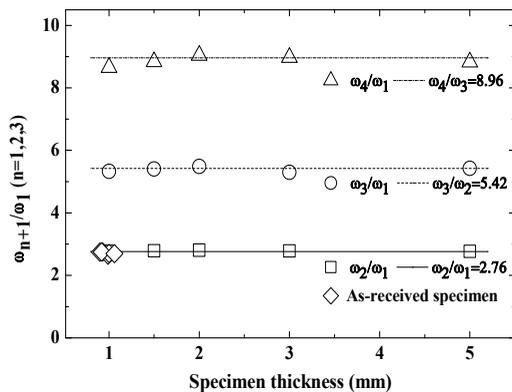


Fig. 11 Frequency ratio according to specimen thickness

4. 결 론

오스테나이트 상 STS316L강을 사용하여, 진동 및 지진 등에 의한 탄성파를 흡수 또는 감쇠 가능성을 연구하였다. 오스테나이트 상 STS316L강은 냉간압연률을 다르게 하고, 마르텐사이트 상으로 변태시켰다. 이것을 사용하여 기계적 특성 및 감쇠능을 조사하였다. 또한 냉간압연재는 고유주파수를 구하였으며, 두께가 다른 모재의 고유주파수와 비교하였다.

1) 인장강도는 냉간압연률의 증가에 따라서 ϵ -마르텐사이트로 많이 변태하여, 증가하였으나, 연신율은 급격하게 감소하였다. 강성은 냉간압연률이 많을수록 증가하여, 감쇠능은 좋아졌다.

2) 고유주파수는 냉간압연률이 많아짐에 따라서 약간 감소하는 경향을 나타내었으나, 두께가 증가함에 따라서 증가하는 경향을 나타내었다. FFT분석한 고유주파수는 2차 주파수로 나타났다. 고유주파수 비는 일정한 값을 나타내고, 조직의 영향은 없었다.

후 기

이 논문은 “2019학년도 부경대학교 연구년(II) 교원 지원사업”에 의하여 연구되었음.

Author contributions

B. C. Choi; Writing-review & editing, K. W. Nam; Writing-original draft, B. S. Kim; Data curation, D. J. Son; Resources, J. W. Kim; Methodology.

References

1. R. Mulyukov, S. Mikhailov, R. Zaripova and D. Salimonenko, 1996, "Damping properties of 18Cr10Ni stainless steel with submicrocrystalline structure", Materials Research Bulletin, Vol. 31, No. 6, pp. 639-645.
([https://doi.org/10.1016/0025-5408\(96\)00048-7](https://doi.org/10.1016/0025-5408(96)00048-7))

2. M. D. Rao, 2003, "Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 262, No. 3, pp. 457-474.
([https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00106-8))
3. J. Talonen and H. Hänninen, 2004, "Damping properties of austenitic stainless steels containing strain-induced martensite", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 35, No. 8, pp. 2401-2406.
(<https://doi.org/10.1007/s11661-006-0220-x>)
4. D. U. Son, J. H. Kim, I. S. Kim, M. Kazuya, J. H. Sung and C. Y. Kang, 2004, "Effect of ϵ Martensite on the Damping Capacity of Austenitic Stainless Steel", *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 42, No. 8, pp. 621-625.
5. N. Igata and S. Takeuchi, 2006, "Applications of High Damping Stainless Alloy (HIDAS)", *Key Engineering Materials*, Vol. 319, pp. 209-216.
(<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.319.209>)
6. C. Y. Kang, 2012, "Effect of Reverse Transformation on the Damping Capacity in High Manganese Austenitic Stainless steel", *The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 60-65.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2012.16.4.060>)
7. T. H. Hwang and C. Y. Kang, 2013, "Damping Capacity of High Manganese Austenitic Stainless Steel with a Two Phase Mixed Structure of Martensite and Austenite", *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, Vol. 51, No. 9, pp. 645-650.
(<https://doi.org/10.3365/KJMM.2013.51.9.645>)
8. Y. H. Kim, J. H. Sung and C. Y. Kang, 2015, "Effect of Reversed Austenite on the Damping Capacity of Austenitic Stainless Steel", *The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 70-75.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2015.19.1.070>)
9. M. G. Kwoon and C. Y. Kang, 2014, "Correlation between Tensile Properties and Damping Capacity of 316L Stainless Steel", *Materials Research Society of Korea*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-5.
(<https://doi.org/10.3740/MRSK.2014.24.1.1>)
10. J. W. Brooks, M. H. Loretto and R. E. Smallman, 1979, "In situ observations of the formation of martensite in stainless steel", *Acta Metallurgica*, Vol. 27, No. 12, pp. 1829-1838.
([https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90073-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90073-7))