

## 가공 온도가 다른 STS316L의 탄성파 특성

### Elastic Wave Properties of STS316L with Different Rolling Temperature

탁영준<sup>1</sup>, 구경희<sup>2</sup>, 이금화<sup>2</sup>, 남기우<sup>1,2\*</sup>

Young-Joon Tak<sup>1</sup>, Kyoung-Hee Gu<sup>2</sup>, Gum-Hwa Lee<sup>2</sup>, Ki-Woo Nam<sup>1,2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

In this study, austenitic 316L stainless steel was rolled at three different temperatures (100°C, -50°C, -196°C) at five rolling degree (0, 16, 33, 50, 66 and 80%). The rolled specimen was examined for micro structure, and the volume fraction and mechanical properties were evaluated. In particular, the rolling specimen detected the elastic wave generated in tensile and investigated the relationship between the rolling degree and the dominant frequency. As the rolling degree increased, austenite decreased and martensite increased. The volume fraction of martensite more increased at lower temperatures, but increased rapidly at the rolling degree of 50% of all rolling temperature. Tensile strength increased rapidly with the increase of the rolling degree, and was larger at lower temperatures. The elongation decreased sharply to the rolling degree of 33%, but decreased gently thereafter. The dominant frequency highly appeared as the volume fraction of martensite increased, but the dominant frequency was higher at the low temperature rolling temperature. A similar trend was also observed in the relationship between tensile strength and dominant frequency.

*Keywords : Dominant Frequency, Elastic Wave, Martensite, Rolling Temperature, Time-Frequency Analysis, Volume Fraction, Wavelet(WT)*

1,2\* 정희원, 부경대학교 재료공학과, 교수  
E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1 부경대학교 재료공학과 대학원생

2 부경대학교 마린융합디자인공학과 대학원생

1,2\* Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

1 Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

2 Department of Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University

### 1. 서론

스테인리스강은 Fe에 Cr (12% 이상)을 혼합하여 내부식성을 증가시킨 것으로서 C, Ni, Si, Mn 및 Mo 등을 소량 혼합한 합금이다. 스테인리스강 316은 Mo 첨가로 비자성이며, 내식성, 내공식성, 우수한 고온 강도 및 가공 경화성이 특징적이다. 스테인리스강 316L은 316보다 저탄소이고, 316의 특성에 내입계부식성이 우수하다. 이와 같은 특징 때문에 염분 및 유독가스 등 부식 요인이 많은 환경에 많이 사용되며, 많은 연구 결과가 있다[1-3]. 또한 틈새 부식 과정을 평가하기 위하여 주기적 전위 역학 분석, 분극 저항, 전위차 테스트, 동적 전기 화학적 임피던스 분광법, 쓰지카와-히사 마츠 방법과 같은 다양한 전기 화학적 기술이 사용되었다. 틈새 부식에 대한 온도, 틈새 형성 재료, 화학 원소, 틈새 형상 및 용액과 같은 변수의 영향이 연구되었다[4-10].

오스테나이트 스테인리스강은 가공으로 마르텐사이트로 상변태하며, 이와 같은 미세구조의 변화는 기계적특성이 변한다[11-13]. 최 등은 마르텐사이트로 상변태한 STS316 및 STS202를 사용하여 기계적 성질을 평가하고, 비커스경도는 와이블 분포 해석하였다[14,15] 남 등은 감쇠능, 진동 고유주파수[16], 침지 특성[17] 및 탄성파특성[18]을 평가하였다.

본 연구에서는 오스테나이트계 316L 스테인리스강을 3종류 가공 온도에서 5가지의 압연율로 압연하였다. 오스테나이트 조직은 가공 온도 및 압연율에 따라서 마르텐사이트로 상변태하며, 제 특성이 달라진다. 따라서 상변태한 압연시편은 조직관찰, 조직의 체적분율 및 기계적특성을 평가하였고, 인장에서 발생하는 탄성파를 검출하여, 가공 온도, 압연율 및 탁월주파수의 관계를 조사하였다.

### 2. 재료 및 실험방법

본 연구에 사용한 재료는 오스테나이트계 316L 스테인리스강이다. Table 1은 오스테나이트 316L 스테인리스강의 화학 조성을 나타낸다.

재료는 1,200°C로 가열하여, 열간압연으로 두께 2~4mm 강판으로 만들었다. 그 후, 30분간 1,050°C 진공로에서 열처리하고, 고용체들이 석출하지 못하게 급랭하는 용체화 처리로 오스테나이트 상을 만들었다. 그리고 100°C, -50°C 및 -196°C 가공 온도에서 압연율 0, 16, 33, 50, 66 및 80%로 압연하여, 두께 2mm 판재를 얻었다. 가공 온도 및 압연율에 따라서 제 특성이 다르므로 명확하게 파악하기 위해서이다.

압연시편의 마르텐사이트의 체적분율은 X-선 회절분석기로 측정하였다. X-선 회절은 3KW Cu-K $\alpha$  X-선 튜브를 사용하여, 상온에서 측정범위 2 $\theta$  =10~50°에서 하였다. 회절 선도에서 마르텐사이트 체적분율은  $\gamma$ -오스테나이트(111),  $\alpha$ -마르텐사이트(200)에 해당하는 피크에서 얻었다.

인장시험은 만능 인장시험기를 사용하여 cross speed 2mm/min로 인장하였다. Fig. 1은 인장시험에서 탄성파 획득 및 분석 흐름도이다. 탄성파

Table 1. Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.016	0.6	1.04	0.03	0.002	10.26	16.51	2.03

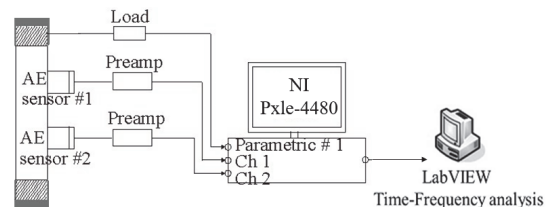


Fig. 1 Flow chart of acquisition and analysis of elastic wave

획득 장비는 PXIE-4480 Sound and vibration module로서, 최대 1.25 MS/s에서 500kHz 대역 폭으로 동시에 샘플링된 아날로그를 입력할 수 있다. 탄성파는 28dB preamplifier를 거쳐 증폭하였고, 탄성파 획득은 1MHz 광대역 센서를 사용하였다. 탄성파는 인장 시험편의 중앙에서 대칭 거리에 부착한 2개의 센서에서 획득하였다. 하나의 탄성파는 4,096point이다. 획득한 탄성파는 자체 제작한 랩뷰를 활용하여, 시간-주파수 분석하였다. 이때 시간-주파수 분석은 웨이블릿을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 미시 조직

Fig. 2는 미시 조직을 관찰한 것이다. (a)는 모재의 조직을 나타내며, 부분적으로 쌍정(흰 화살표)을 갖는 오스테나이트이고, 조직관찰을 위한 연마 과정에서 생성된 마르텐사이트(검은 화살표)가 미량 관찰되었다. 이 조직은 대표적인 오스테나이트계 스테인리스강을 나타낸다. (b)는 -50°C에서 33% 압연한 시험편의 SEM 관찰을 나타낸다. 조직은 쌍정(흰 화살표)이 생성되었고, 조직 내부는 많은 마르텐사이트(줄무늬 모양)를 관찰할 수 있다.

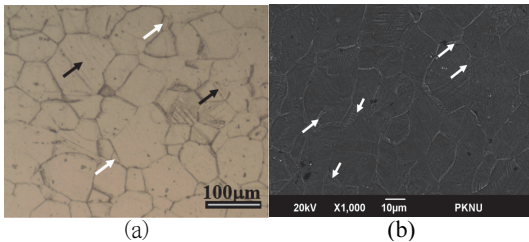


Fig. 2 Microstructure. (a) As-received specimen, (b) Specimen with rolling degree of 33% at -50°C

#### 3.2 체적분률

Fig. 3은 3종류 가공 온도에서 압연율에 따른 각 상의 체적분율을 나타낸다. 오스테나이트와 마르텐사이트는 압연율의 증가에 따라서 반비례하였다. 즉, 오스테나이트는 감소하였지만, 마르텐사이트는 증가하였다. 압연율 0%에서 2종류의 상은 같지만, 가공 온도가 저온이 될수록 오스테나이트에서 마르텐사이트로 변태하는 양이 급증하였다. 각 상은 압연율 50%까지 직선적으로 감소 또는 증가하지만, 그 이후에 급감 또는 급증하였다. 압연율 50%에서 마르텐사이트는 22% (100°C) →

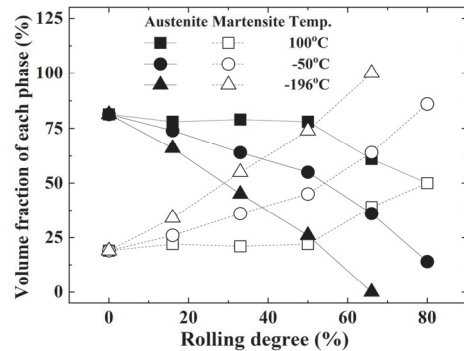


Fig. 3 Volume fraction of each phase according to the rolling degree at three different temperature

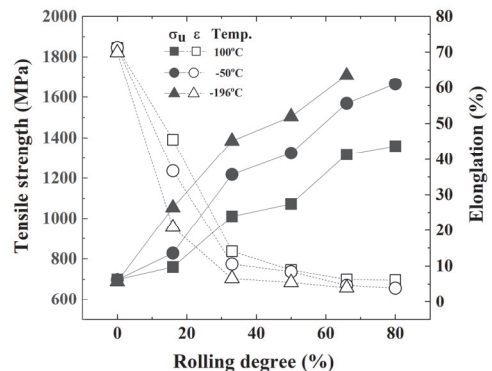


Fig. 4 Tensile strength and elongation according to rolling degree at three different temperature

45% (-50°C) → 74% (-196°C)로 증가하였다. 특히 압연율 66%에서 오스테나이트는 가공 온도 -196°C에서 100% 마르텐사이트로 변태하였다. 압연율 80%에서 마르텐사이트는 50% (100°C) → 86% (-50°C)로 증가하였다. 이처럼 오스테나이트는 가공 온도가 낮을수록, 압연율이 증가할수록 마르텐사이트로 변태량이 급증하였다.

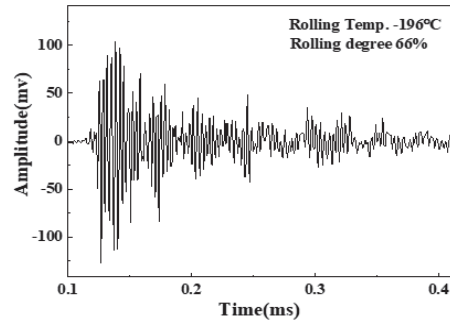
Fig. 4는 3종류 가공 온도에서 압연율에 따르는 인장강도와 연신율을 나타낸다. 마르텐사이트 체적분율은 압연율 50%에서 급증하였으나, 인장강도와 연신율은 압연율 33%에서 절곡점을 가지는 것으로 나타났다. 인장강도는 압연율 0%에서 약 700MPa이었으나, 압연율 33%에서 1,010MPa (100°C)로 1.44배, 1,218MPa (-50°C)로 1.74배 및 1,385MPa (-196°C)로 약 2.0배로 급증하였다. 이처럼 인장강도는 가공 온도가 저온이 될수록 크게 나타났다. 한편, 연신율은 약 70%(0% 압연율)에서 약 14% (100°C), 약 10.6% (-50°C) 및 약 6.6% (-196°C)로 급감하였다. 압연율 66%에서 연신율은 약 6.3%(100°C), 약 4.7%(-50°C) 및 약 4.0%(-196°C)로 압연율 및 가공 온도와 관계없이 연신율이 작게 나타났다. 이것은 압연율의 증가에 따라서 마르텐사이트의 변태량이 증가하였기 때문이다.

### 3.3 WT에 의한 시간-주파수 해석

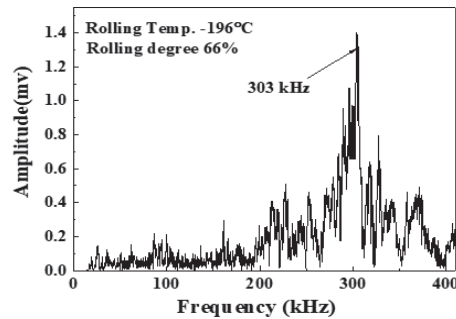
Fig. 5는 -196°C에서 66% 시험편의 인장시험에서 얻어진 파형, 주파수 스펙트럼 및 웨이블릿 (Wavelet; WT) 해석을 대표적으로 나타낸다. (a)는 탄성파의 파형, (b)는 주파수, (c)는 시간-주파수를 나타낸다.

Fig. 6은 3종류의 가공 온도에서 압연율과 탁월주파수의 관계를 나타낸다. 그림에는 표준편차(I)도 나타내었다. 전체적으로 탁월주파수는 각 가공 온도에서 압연율의 증가와 함께 높아지는 경향을

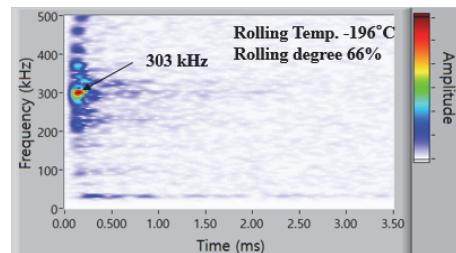
나타내었다. 각 가공 온도에 대하여 살펴보면, 고온 가공 온도 100°C의 탁월주파수는 저온 가공 온도 -50°C 및 -196°C의 탁월주파수보다 낮을 것을 알 수 있다. 100°C의 탁월주파수는 압연율 50%까지는 약 255kHz로 비슷하였으나, 압연율 66% 및 80%에서 약 262kHz 및 286kHz로 높게



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Frequency characteristic obtained from elastic wave of rolling degree 66% at rolling temperature -196°C. (a) Waveform of elastic wave, (b) Frequency and (c) Time-frequency by WT

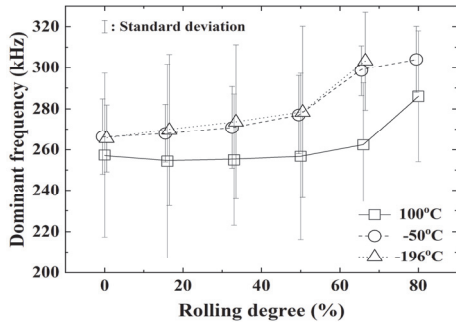


Fig. 6 Relationship between rolling degree and dominant frequency according of rolling temperature

나타났다. 한편 -50°C 및 -196°C의 탁월주파수는 압연율 0%의 약 265kHz에서 서서히 증가하여, 압연율 50%에서 약 278kHz를 나타내고, -50°C의 탁월주파수는 압연율 80%에서 약 304kHz, -196°C의 탁월주파수는 압연율 66%에서 약 303kHz로 높게 나타났다. 이처럼 탁월주파수가 급증하는 것은 압연율 50%에서 마르텐사이트 변태량이 급증하는 것과 관계있다.

Fig. 7은 3종류의 가공 온도에서 마르텐사이트 체적분율과 탁월주파수의 관계를 나타낸다. 전체적으로 탁월주파수는 마르텐사이트 체적분율이 증가함에 따라서 높아지는 경향을 나타내었다. 각 가공 온도에서 상세하게 살펴보면, 고온 가공 온도 100°C의 탁월주파수는 저온 가공 온도 -50°C 및 -196°C의 탁월주파수보다 낮지만, 마르텐사이트 체적분율 50%에서는 높게 나타났다. 100°C의 탁월주파수는 마르텐사이트 체적분율 약 20%에서 평균 255kHz로 나타났으나, 마르텐사이트 체적분율 39% 및 50%에서 약 262kHz 및 286kHz로 높게 나타났다. 한편 -50°C의 탁월주파수는 마르텐사이트 체적분율 0%에서 36%까지는 약 266kHz에서 270kHz로 서서히 증가하다가, 마르텐사이트 체적분율 64%에서 약 298kHz를 나타내고, 86%에서 304kHz를 나타내었다. 또한 -196°C의 탁월

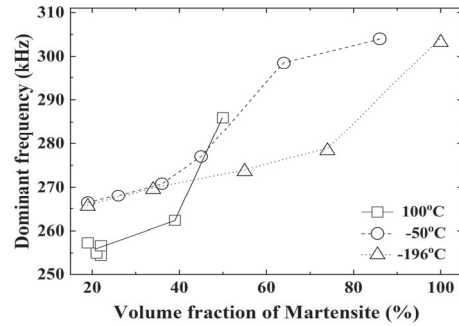


Fig. 7 Relationship between dominant frequency and volume fraction of martensite according of rolling temperature

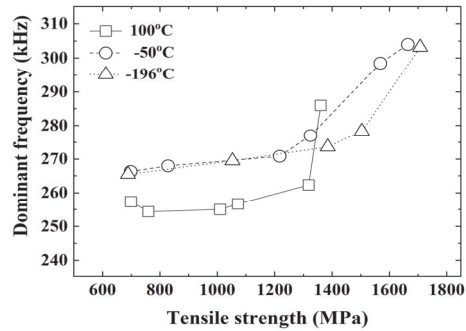


Fig. 8 Relationship between tensile strength and dominant frequency according of rolling temperature

주파수는 마르텐사이트 체적분율 0%에서 74%까지는 약 266kHz에서 278kHz로 직선적으로 증가하다가, 마르텐사이트 체적분율 100%에서 약 303kHz를 나타내었다. 이처럼 탁월주파수는 마르텐사이트 체적분율이 증가함에 따라서 높게 나타나지만, 가공 온도에 따라서 탁월주파수가 다르다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 3종류의 가공 온도에서 인장강도와 탁월주파수의 관계를 나타낸다. 탁월주파수는 인장강도가 증가함에 따라서 높아지는 경향을 나타내었으며, 가공 온도와 관계없이 탁월주파수는 절곡점을 나타내었다. 고온 가공 온도 100°C의 탁월주

파수는 저온 가공 온도  $-50^{\circ}\text{C}$  및  $-196^{\circ}\text{C}$ 의 탁월 주파수보다 낮지만, 인장강도 1,360MPa에서 높게 나타났다.  $100^{\circ}\text{C}$ 의 탁월주파수는 인장강도 약 698MPa의 약 255kHz에서 인장강도 760MPa의 약 254kHz로 낮아져서 인장강도 1,318MPa의 약 262kHz로 완만하게 높아졌다. 그리고 탁월주파수는 인장강도 1,360MPa에서 286kHz로 급격하게 높아졌다. 한편  $-50^{\circ}\text{C}$ 의 탁월주파수는 인장강도 약 698MPa의 약 266kHz에서 1,217MPa의 270kHz로 완만하게 높아졌으나, 인장강도 1,324MPa의 277kHz에서 1,664MPa의 304kHz로 급격하게 높아졌다. 또한  $-196^{\circ}\text{C}$ 의 탁월주파수는 인장강도 688MPa의 약 266kHz에서 1,385MPa의 274kHz로 완만하게 높아지다가, 인장강도 1,504MPa의 약 278kHz에서 1,707MPa의 303kHz로 높아졌다. 이처럼 탁월 주파수는 인장강도가 증가함에 따라서 높게 나타나지만, 1,300MPa~1,500MPa 사이에서 절곡점이 나타났다. 절곡점은 가공 온도가 낮을수록 높은 인장강도에서 나타났으며, Fig. 3의 각 가공 온도에서 압연율 50%에 상당하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3종류 가공 온도( $100^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $-196^{\circ}\text{C}$ )에서 5가지의 압연율(0, 16, 33, 50, 66 및 80%)로 압연한 오스테나이트계 316L 스테인리스강의 체적분율, 기계적 특성 및 탄성파의 탁월 주파수를 조사하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 모재는 부분적으로 쌍정을 갖는 오스테나이트이고, 연마 과정에서 마르텐사이트가 미량 생성되었다. 압연재는 모재보다 쌍정과 마르텐사이트가 많이 생성되었다.
- (2) 압연율의 증가에 따라서 오스테나이트는 감소하고, 마르텐사이트는 증가하였다. 마르텐

사이트 체적분율은 저온일수록 증가하였으나, 압연율 50%에서 급증하였다.

- (3) 인장강도는 압연율의 증가에 따라서 급증하였고, 저온일수록 증가폭이 크게 나타났다. 연신율은 압연율 33%까지 급감하였으나, 그 후는 완만하게 감소하였다.
- (4) 탁월주파수는 각 가공 온도에서 압연율의 증가와 함께 높게 나타났으며, 저온 가공 온도는 고온 가공 온도보다 높게 나타났다. 그러나  $-50^{\circ}\text{C}$  및  $-196^{\circ}\text{C}$ 는 비슷하게 나타났다.
- (5) 탁월주파수는 마르텐사이트 체적분율의 증가에 따라서 높게 나타나지만, 저온 가공 온도에서 더 높은 탁월주파수가 나타났다. 이것은 인장강도와 탁월주파수의 관계에서도 비슷한 경향을 나타내었다.
- (6) 이처럼 가공 상태에 따라서 기계적 특성 및 비파괴 특성이 다르게 나타나기 때문에 구조물에 적용하기 위하여 재료를 가공할 때는 상변태가 발생하지 않도록 주의해야 한다.

#### 참고문헌

- [1] W. He, O.Ø. Knudsen and S. Diplas, "Corrosion of stainless steel 316L in simulated formation water environment with  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{S-Cl}^-$ ", Corrosion Science, vol. 51, pp. 2811-2819, (2009).
- [2] B. Cai, Y. Liu, X. Tian, F. Wang, H. Li and R. Ji, "An experimental study of crevice corrosion behaviour of 316L stainless steel in artificial seawater", Corrosion Science, vol. 52, pp. 3235-3242, (2010).
- [3] I. Betova, M. Bojinov, O. Hyökyvirta and T. Saario, 2010, "Effect of sulphide on the corrosion behaviour of AISI 316L stainless steel and its constituent elements in simulated Kraft digester



- conditions”, *Corrosion Science*, vol. 52, pp. 1499-1507, (2010).
- [4] X. Shan and J. H. Payer, “Comparison of Ceramic and Polymer Crevice Formers on the Crevice Corrosion Behavior of Ni-Cr-Mo Alloy C-22”, *Corrosion*, NACE International, Nashville, TN. (Paper No. 07582), (2007).
- [5] X. Shan and J. H. Payer, “Effect of Crevice Former on the Evolution of Crevice Damage”, *Corrosion*, NACE International, New Orleans, LO. (Paper No.08575), (2008).
- [6] X. He, D. S. Dunn and A. A. Csontos, “Corrosion of similar and dissimilar metal crevices in the engineered barrier system of a potential nuclear waste repository”, *Electrochimica Acta*, vol. 52, pp. 7556-7569, (2007).
- [7] X. He and T. Mintz, “Localized Corrosion of Alloy 22 in the potential yucca mountain repository environment”, *JOM*, vol. 60, pp. 44-51, (2008).
- [8] S. Azuma, T. Kudo, H. Miyuki, M. Yamashita and H. Uchida, “Effect of nickel alloying on crevice corrosion resistance of stainless steels”, *Corrosion Science*, vol. 46, pp. 2265-2280, (2004).
- [9] H. Baba and Y. Katada, “Effect of nitrogen on crevice corrosion in austenitic stainless steel”, *Corrosion Science*, vol. 48, pp. 2510-2524, (2006).
- [10] S. Wang and R. C. Newman, “Crevice corrosion of type 316L stainless steel in alkaline chloride solutions”, *Corrosion*, vol. 60, pp. 448-454, (2004).
- [11] M. K. Kwon and C. Y. Kang, “Correlation between Tensile Properties and Damping Capacity of 316L Stainless Steel”, *Korean Journal of Materials Research*, vol. 24, No. 1, pp. 1-5, (2014).
- [12] S. D. Antolovich and B. Singh, “On the toughness increment associated with the austenite to martensite phase transformation in TRIP steels”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 2, pp. 2135-2141, (1971).
- [13] K. W. Nam, S. D. Cho, S. J. Kim and S. H. Ahn, “A study on Weibull Probability Statistics Characteristics for Vickers Hardness of Degraded Stainless Steel”, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 21, pp. 79-85, (2017).
- [14] B. C. Choi, C. Y. Kang and K. W. Nam, “Characteristics for Weibull Distribution of Vickers Hardness to Different Cold Rolled STS316L”, *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 23, pp. 85-90, (2019).
- [15] S. W. Choi, B. C. Choi, K. W. Nam, “Elastic Wave Characteristics of Austenitic STS202 with Subzero Treatment”, *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 24, pp. 295-300, (2021).
- [16] K. W. Nam, B. S. Kim, J. W. Kim, D. J. Son and B. C. Choi, “Damping Capacity and Natural Frequency of STS316L Steel according to Degree of Cold Rolling and Different Thickness”, *Journal of Power System Engineering*, vol. 24, pp. 11-17, (2020).
- [17] K. H. Gu, S. H. Yun, K. W. Nam, 2022, “Examination of Pitting Corrosion for Laser and Ultrasonically Peened STS316L”, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 46, pp. 371-378, (2022).
- [18] S. G. Lee, B. C. Choi, K. W. Nam, “Elastic Wave Characteristics of Incoloy 825 with Different Solution Treatment Temperature and Aging Time”, *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, vol. 24, pp. 261-269, (2021).