

## 역변태 온도 및 시간이 다른 STS316L의 기계적 및 탄성파 특성

### Mechanical and Elastic Wave Properties of STS316L with Different Reverse Transformation Temperature and Time

도재윤<sup>1</sup>, 탁영준<sup>2</sup>, 신기항<sup>2</sup>, 남기우<sup>3\*</sup>

Jae-Yoon Do<sup>1</sup>, Young-Joon Tak<sup>2</sup>, Ki-Hang Shin<sup>2</sup>, Ki-Woo Nam<sup>3\*</sup>

#### 〈Abstract〉

In this study, the mechanical properties of 80% cold-rolled austenitic 316L stainless steel were evaluated using specimens subjected to reverse transformation at 500–750°C for 20 minutes and reverse transformation at 700°C for 2–60 minutes. Also, for the elastic wave obtained from the tensile test, the dominant frequency according to the reverse transformation condition was investigated by time-frequency analysis. The SEM image of the 80% cold-rolled material was transformed into martensite and showed line and cross shapes. The TEM image showed that line shapes were shown at the grain, and grain boundary of martensite. The higher the heat treatment temperature and the longer time, the larger the grain. Tensile strength decreased as the heat treatment temperature and time increased, but elongation increased. Hardness was proportional to tensile strength. This is because the grain with different directions showed the same direction due to reverse transformation. The dominant frequency was decreased and then increased as the temperature and time increased. This is because the direction of the grain is different at a low temperature and the same direction is shown at a high temperature.

*Keywords : Dominant Frequency, Elastic Wave, Mechanical Properties, Reverse Transformation Temperature and Time, STS316L Stainless*

1 한국폴리텍대학 부산캠퍼스 기계시스템과 교수

2 부경대학교 재료공학과 대학원생

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

1 Professor, Dept. of Mechanical System, Busan Campus of Korea Polytechnics

2 Graduate Student, Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

3\* Professor, Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

## 1. 서론

탄성파는 재료의 변형 및 파괴 과정에서 음파 및 초음파 발생 현상이다. 다양한 재료에서 발생하는 탄성파는 고유한 소스이다. 예를 들어, 금속에서 주요 거시적 원인은 균열, 소성 변형, 개재물의 파괴 및 박리와 관련된 프로세스이다. 다양한 소스에 의해 발생된 탄성파의 양적 및 질적 특성은 재료 특성 및 환경 요인에 직접적으로 의존한다[1-4].

오늘날 산업 응용 분야에서 탄성파의 목표는 금속, 콘크리트 또는 복합 재료로 만들어진 구조물의 결함 검출, 위치 추정 및 평가를 하는 것이다[5-7]. 이러한 재료에서 균열은 탄성파의 주요 원인이다[8-10]. 정적 또는 동적 하중에서 균열은 에너지의 빠른 방출로 이어진다. 이 에너지의 일부는 균열 상단에서 응력장의 빠른 재분배의 결과로 응력파의 형태로 방출된다. 발생하는 응력파는 대부분 탄성파이지만, 응력이 항복한계를 초과하는 경우에도 비탄성파가 발생할 수 있다. 이것은 연성 금속에서 발생하는 균열의 소성 영역에서 검출된다.

한편, 오스테나이트 스테인리스강은 가공으로 마르텐사이트로 변태시키고, 열처리로 오스테나이트 조직으로 역변태시켜서 강도 향상시키거나 [11,12], 잔류 오스테나이트와 가공 유기 마르텐사이트가 공존하는 2상강으로 강도를 향상시킨 연구가 있다[13]. 이같이 2상강의 강도 평가에 관한 연구는 많으나, 2상강의 파괴에 따른 탄성파 특성에 관한 연구는 찾아 볼 수 없다. 탄성파는 재료 조직, 강도 등에 따라서 특성이 다르게 나타난다. 남 등은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Composite Ceramics[14], Graphite Iron[15], 가공도가 다른 STS316L [16-18], Incoloy 825[19] 및 Ultra-high strength steel[20] 파괴에서 얻어진 탄성파를 시간-주파수

해석법으로 해석하였다.

본 연구는 80% 압연한 오스테나이트계 316L 스테인리스강을 500-750°C에서 20분 역변태한 것과 700°C에서 2-60분 역변태한 시험편을 사용하여 기계적특성을 평가하였다. 또한 인장시험에서 발생하는 탄성파를 검출하여 시간-주파수 해석으로 역변태 조건에 따르는 탁월주파수를 조사하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 시험편

시험편은 열간 압연한 오스테나이트계 STS316L로서, 상온에서 압연율 80%로 두께 2mm 판재로 만들었다[21]. 80% 압연 재료는 온도에 따르는 영향을 평가하기 위하여, 500-750°C에서 20분 역변태 처리하고, 시간에 따르는 영향을 평가하기 위하여, 700°C에서 2-60분 역변태 처리하였다.

### 2.2 실험방법

역변태 처리한 압연시험편의 기계적특성 및 탄성파는 인장시험에서 얻었다. 인장시험은 만능 인장시험기를 사용하여 cross speed 2mm/min로 인장하였다. 경도는 로크웰경도기를 사용하여 측정하였다.

탄성파 검출 장비는 PXIE-4480이고, 500kHz 대역폭으로 동시에 샘플링된 아날로그를 입력할 수 있다. 탄성파 검출은 1MHz 광대역 센서를 사용하였다. 탄성파는 인장 시험편의 중앙에서 대칭 거리에 부착한 2개의 센서에서 검출하였다. 검출한 탄성파는 랩뷰를 활용하여, 시간-주파수 분석하였다. 이때 시간-주파수 분석은 웨이블릿을 사

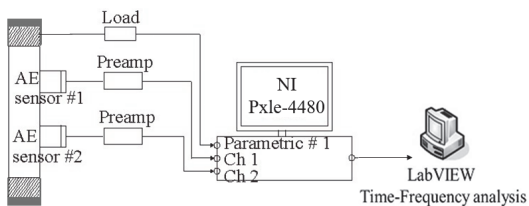


Fig. 1 Flow chart of elastic wave analysis

용하였다. Fig. 1은 탄성파 검출 및 분석 흐름도이다.

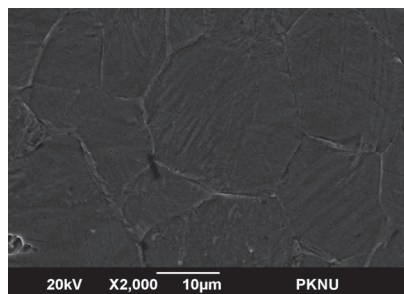


Fig. 2 SEM image of cold rolled STS316L of 80%

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직

Fig. 2는 80% 냉간 압연한 STS316L의 SEM 사진을 나타낸다. 표면은 냉간 압연으로 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태한 것을 확인할 수 있다. 냉간 압연으로 형성된 마르텐사이트는 줄 및 교차 모양을 나타내었다.

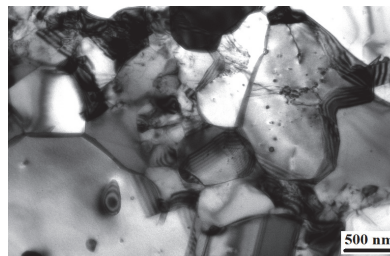
Fig. 3은 역변태한 시험편의 TEM 사진을 나타낸다. (a)(b)는 각각 역변태 온도 550°C에서 20분 및 700°C에서 30분 열처리한 시험편이다. (a)(b)에서 마르텐사이트는 결정립에 줄모양이 생성되었으며, 결정립 경계부에도 줄모양이 생성되었다. 또한 열처리 온도가 높고 시간이 긴 (b)의 결정립이 (a)보다 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 열처리로 마르텐사이트가 오스테나이트로 변태하면서 결정립이 성장하기 때문이다.

Figs. 4와 5는 냉간 압연한 STS316L의 열처리 온도 및 시간에 따르는 마르텐사이트 및 오스테나이트의 분율을 나타낸 것이다.

Fig. 4는 다양한 열처리 온도 500-700°C에서 10분 처리하였을 때, 마르텐사이트 및 오스테나이트



(a)



(b)

Fig. 3 TEM images of reverse transformation specimen (a) 20 minute at 550°C, (b) 30 minute at 700°C

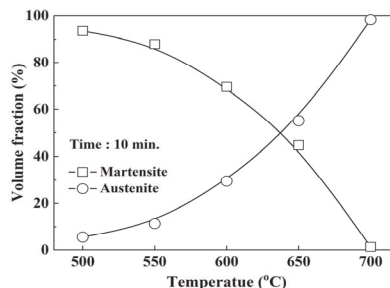


Fig. 4 Volume fraction of martensite and austenite according to temperature

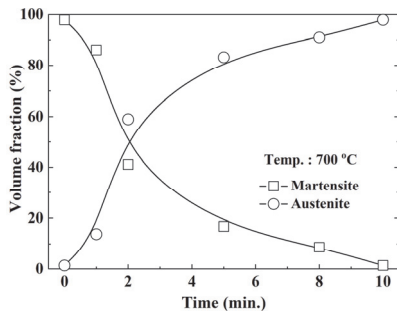


Fig. 5 Volume fraction of martensite and austenite according to time

트의 분율을 나타낸 것이다. 열처리 온도가 증가함에 따라서 오스테나이트가 증가하고, 마르텐사이트는 감소하였다.

Fig. 5는 열처리 온도 700°C에서 다양한 시간 0-10분 처리하였을 때, 마르텐사이트 및 오스테나이트의 분율을 나타낸 것이다. 열처리 시간이 증가함에 따라서 오스테나이트는 증가하고, 마르텐사이트는 감소하였다. 여기서 열처리 온도 700°C에서 10분은 대부분 오스테나이트로 변태하였다.

### 3.2 기계적특성

Fig. 6은 역변태 온도 500-750°C에서 20분간 열처리한 시험편의 인장강도와 연신율을 나타낸다. 인장강도는 열처리 온도가 증가함에 따라서 직선적으로 감소하였다. 이것은 냉간압연에서 형성된 마르텐사이트가 오스테나이트로 변태하였기 때문이라 판단된다. 이같이 오스테나이트로 변태함에 따라서 연신율은 증가하는 경향을 나타내었다[22].

Fig. 7은 역변태 온도 700°C에서 2-60분간 열처리한 시험편의 인장강도와 연신율을 나타낸다. 인장강도는 열처리 시간이 증가함에 따라서 완만하게 감소하였다. 그러나 연신율은 5분에 급격하게 증가하고, 그 후는 완만하게 증가하였다. 이것

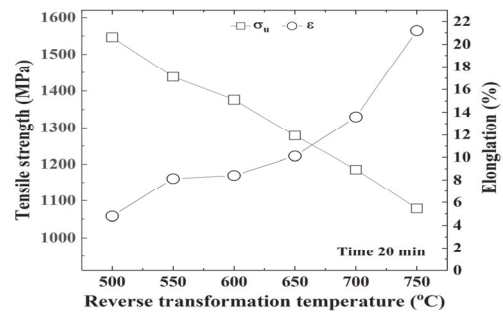


Fig. 6 Relationship between tensile strength and elongation according to temperature for 20 minutes

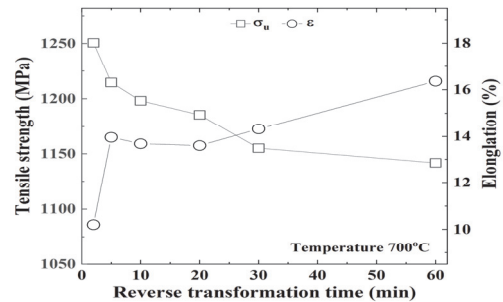


Fig. 7 The relationship between tensile strength and elongation according to time at 700°C

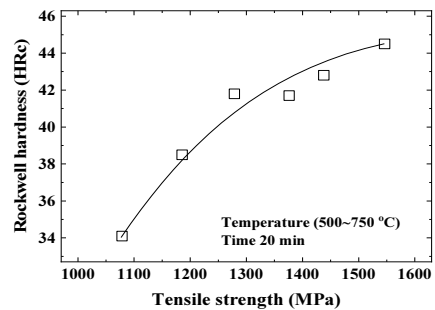


Fig. 8 The relationship between tensile strength and Rockwell hardness according to temperature for 20 minutes

도 마르텐사이트가 오스테나이트로 변태하였기 때문이다[22].

Fig. 8은 역변태 온도 500-750°C에서 20분간

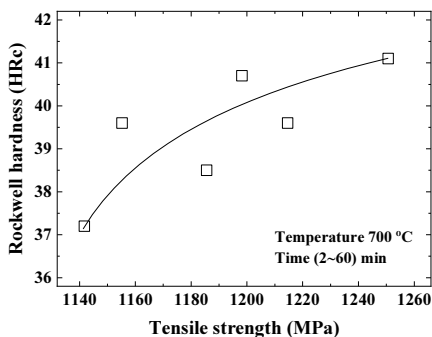


Fig. 9 The relationship between tensile strength and Rockwell hardness according to time at 700°C

열처리한 시험편의 인장강도와 로크웰경도 사이의 관계를 나타낸다. 로크웰경도는 인장강도가 증가함에 따라서 증가하였다.

Fig. 9는 역변태 온도 700°C에서 2-60분간 열처리한 시험편의 인장강도와 로크웰 사이의 관계를 나타낸다. 로크웰경도와 인장강도 사이의 관계는 분산을 나타내었으나, 비례관계를 나타내었다.

### 3.3 다른 역변태 온도에서 시간-주파수해석

Fig. 10은 역변태 온도 500°C에서 20분간 열처리한 시험편의 인장시험에서 얻어진 파형, 주파수 스펙트럼 및 웨이블릿 해석 결과를 대표적으로 나타낸다. 각 그림에서 (a)는 탄성파의 파형, (b)는 주파수, (c)는 웨이블릿에 의한 시간-주파수를 나타낸다.

Fig. 11은 역변태 온도 500-750°C에서 20분간 열처리한 시험편의 탁월주파수를 나타낸다. 탁월주파수는 온도가 증가함에 따라서 감소하다가 증가하였다. 이것은 역변태 온도가 증가함에 따라서 오스테나이트 양은 증가하지만, 결정의 방향이 다르기 때문이다. 그러나 750°C에서 증가한 것은 오스테나이트가 같은 방향을 나타내기 때문이라 판단된다[23].

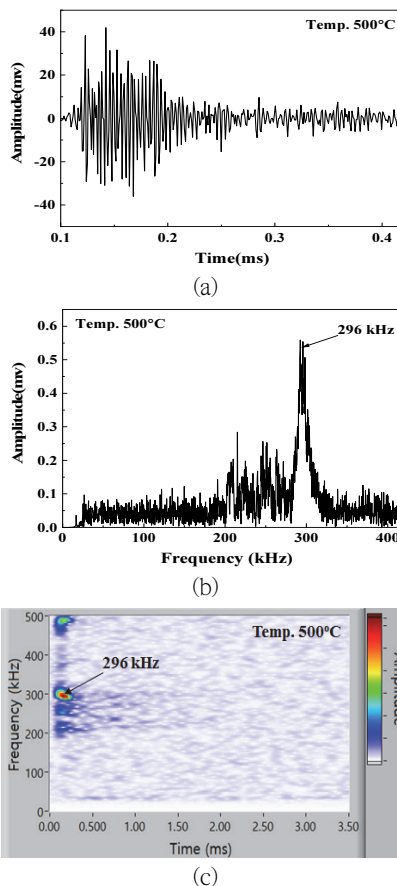


Fig. 10 Frequency characteristic obtained from heat treated specimen for 20 minute at 500°C. (a) waveform of elastic wave, (b) frequency and (c) time-frequency by WT

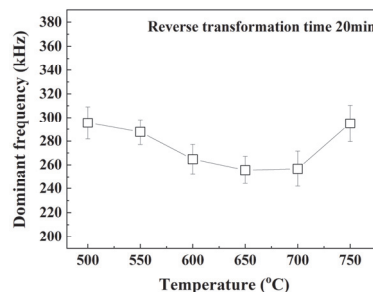


Fig. 11 Relationship between temperature and dominant frequency at heat treatment time of 20 minute

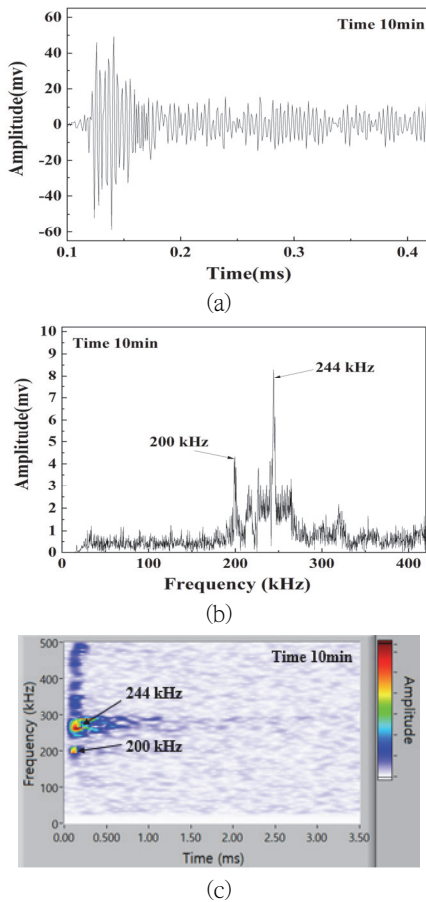


Fig. 12 Frequency characteristic obtained from heat treated specimen for 10 minute at 700°C. (a) waveform of elastic wave, (b) frequency and (c) time-frequency by WT

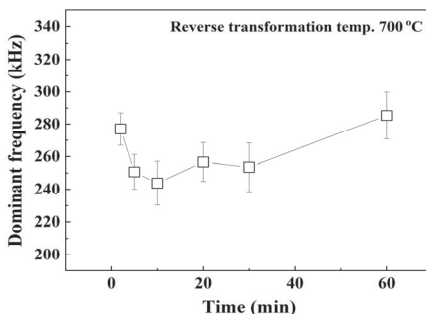


Fig. 13 Relationship between heat treatment time and dominant frequency at 700°C

### 3.4 다른 역변태 시간에서 시간-주파수해석

Fig. 12는 역변태 온도 700°C에서 10분간 열처리한 시험편의 인장시험에서 얻어진 파형, 주파수 스펙트럼 및 웨이블릿 해석 결과를 대표적으로 나타낸다. 각 그림에서 (a)는 탄성파의 파형, (b)는 주파수, (c)는 웨이블릿에 의한 시간-주파수를 나타낸다.

Fig. 13은 역변태 온도 700°C에서 2-60분간 열처리한 시험편의 탁월주파수를 나타낸다. 탁월주파수는 10분까지 감소하다가 20분 이후는 증가하였다. 이것은 역변태 열처리 시간이 증가함에 오스테나이트 양이 증가하지만, 결정립의 방향이 다르기 때문이다. 그러나 20분 이후는 오스테나이트가 증가하면서 같은 방향을 나타내기 때문이라 판단된다[23].

이상에서 역변태 온도가 증가하면, 경도와 강도는 증가하였다. 그러나 탁월주파수는 감소하다가 증가하였다. 이것은 압연으로 생성된 마르텐사이트는 많은 전위가 존재하므로 경도와 강도가 높다. 그러나 열처리 온도 및 시간이 증가하면 마르텐사이트가 오스테나이트로 변태하고, 고온 또는 장시간의 열처리는 결정립이 동일 방향을 나타내기 때문에, 강도가 더욱 감소한다. 한편 탁월주파수는 탄성파 전달을 방해하는 다른 방향의 결정립으로 감소하다가, 결정립이 같은 방향을 나타내면서 증가하였다고 판단된다[23].

## 4. 결론

본 연구는 압연율 80% STS316L을 500-750°C에서 20분 역변태한 시험편과 700°C에서 2-60분 역변태한 시험편을 사용하여 기계적특성 및 탁월주파수를 조사하였다.

- (1) SEM 영상은 마르텐사이트로 변태하였으며, 줄 및 교차 모양을 나타내었다. TEM 영상은 마르텐사이트의 결정립 및 결정립 경계에 줄 모양이 생성되었다. 높은 열처리 온도 및 긴 시간의 결정립이 더 크게 나타났다.
- (2) 인장강도는 열처리 온도 및 시간이 증가함에 따라서 감소하였으나, 연신율은 증가하였다. 경도는 인장강도와 비례하였다. 이것은 역변태로 방향이 다른 결정립이 같은 방향을 나타내었기 때문이다.
- (3) 탁월주파수는 온도 및 시간이 증가하면서 작아지다가 증가하였다. 이것은 냉간 압연으로 낮은 온도는 결정립의 방향이 다르고, 높은 온도에서는 같은 방향을 나타내기 때문이다.

## 참고문헌

- [1] Dynamic Stressing of Naturally Fractured Rocks: On the Relation Between Transient Changes in Permeability and Elastic Wave Velocity”, *Geophysical Research Letters*, vol. 47, e2019GL083557. (2019).
- [2] A. Muc, M. Barski, A. Stawiarski, M. Chwał, M. Augustyn, “Dispersion curves and identification of elastic wave modes for fiber metal laminates”, *Composite Structures*, vol. 255, 112930, (2021).
- [3] M. Bazargan, B. S. G. Almqvist, H. B. Motra, P. Broumand, T. Schmiedel, C. F. Hieronymus, “Elastic Wave Propagation in a Stainless-Steel Standard and Verification of a COMSOL Multiphysics Numerical Elastic Wave Toolbox”, *Resources*, 11050049, (2022).
- [4] F. Qiu, Y. Bai, D. Qu, G. Shan, L. Han, W. Chen, Quantitative characterization of Q235B steel electrochemical corrosion by acoustic emission, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 199, 104686, (2022).
- [5] H. Kaur, S. Fomel, N. Pham, A Fast Algorithm for Elastic Wave-Mode Separation Using Deep Learning With Generative Adversarial Networks (GANs), *Journal of Geophysical Research: Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 126, e2020JB021123, (2022).
- [6] J. Jiao, C. He, B. Wu, R. Fei, X. Wang, Application of wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 81, pp. 427-431, (2004).
- [7] F. Ciampa, G. Scarselli, S. Pickering, M. Meo, “Nonlinear elastic wave tomography for the imaging of corrosion damage”, *Ultrasonics*, vol. 62, pp. 147-155, (2015).
- [8] A. Stawiarski, M. Barski, P. Pająk, Fatigue crack detection and identification by the elastic wave propagation method, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 89, pp. 119-130, (2017).
- [9] M. F. Haider, V. Giurgiutiu, “Analysis of axis symmetric circular crested elastic wave generated during crack propagation in a plate: A Helmholtz potential technique”, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 134, pp. 130-150, (2018).
- [10] K. X. Huang, G. S. Shui, Y. Z. Wang, Y. S. Wang, Meta-arrest of a fast propagating crack in elastic wave metamaterials with local resonators, *Mechanics of Materials*, vol. 148, 103497, (2020).
- [11] T. Y. Hur, H. S. Han, C. Y. Kang, “Effect of Deformation Induced Martensite Transformation on the Mechanical Properties in Austenitic Stainless Steel with High Mn”, *The Korean Society for Power System Engineering*, vol. 16, pp. 51-56, (2012).
- [12] Y. H. Kim, Y. S. Ahn, H. Y. Jeong, C. H. Kang, B. H. Jeong, C. G. Kim, “Strengthening

- of Metastable Austenitic Stainless Steels by Reversion Treatment” *J. of the Met. and Mate.*, vol. 33, pp. 1431-1436, (1995).
- [13] Y. H. Kim, Y. S. Ahn, H. Y. Jeong, C. Y. Kang, B. H. Jeong and C. G. Kim, “Strength of Metastable Austenitic Stainless Steels by Reversion Treatment”, *Journal of the Kor. Inst. of Met. & Mater.*, vol. 33, pp. 1431-1437, (1995).
- [14] H. S. Kim, M. K. Kim, J. W. Kim, S. H. Ahn and K. W. Nam, “Strength of Crack Healed-Specimen and Elastic Wave Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Composite Ceramics,” *Transactions of the KSME(A)*, vol. 31, pp. 425-431, (2007).
- [15] K. W. Nam, B. K. Ahn, S. C. Lee, “Acoustic Emission of Heat Treated Compacted Graphite Iron under 873~1173 K,” *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 33, pp. 415-421, (2013).
- [16] K. W. Nam, K. S. Lee, K. Y. Kim, “Elastic Wave Characteristics of STS316L with Degree of Different Cold Rolling,” *Journal of Power System Engineering*, vol. 24, pp. 11-16, (2020).
- [17] K. W. Nam, K. S. Lee, Y. J. Tak, G. Y. Kim, “Elastic Wave Properties of STS316L according to Thickness and Welding Method by Hsu-Nielsen Source,” *Journal of Power System Engineering*, vol. 24, pp. 5-11, (2020).
- [18] K. W. Nam, H. Jeon, K. S. Lee, Y. J. Tak, “Elastic Wave Properties of STS202 depending on Rolling Temperature and Rolling Degree”, *Journal of Power System Engineering*, vol. 25, pp. 15-22, (2021).
- [19] 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).
- [20] K. S. Lee, J. E. Paeng, K. H. Gu, K. W. Nam, “Threshold stress intensity factor of ultra-high strength steel (HV670) containing surface crack by hydrogen assisted cracking and cumulative elastic wave,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 35, pp. 2441-2447, (2021).
- [21] K. W. Nam, B. S. Kim, J. W. Kim, D. J. Son, 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).
- [22] W. Namgung, M. H. Jung, H. B. Lee, J. N. Kim, C. Y. Kang, “Relationship Between Mechanical Properties and Damping Capacity in Stainless Steel with Two Phases of Reversed Austenite and Deformation Induced Martensite,” *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 17, pp. 114-120, (2013).
- [23] D. P. Yang, D. Wu, H. L. Yi, “Reverse transformation from martensite into austenite in a medium-Mn steel,” *Scripta Materialia*, vol. 161, pp. 1-5, (2019).