

# 냉간압연률이 다른 STS316L의 탄성과 특성 Elastic Wave Characteristics of STS316L with Degree of Different Cold Rolling

남기우\* · 이기식\*\* · 김공영\*\*\*  
Ki-Woo Nam\*, Ki-Sik Lee\*\* and Kong-Young Kim\*\*

(Received 23 September 2019, Revision received 21 April 2020, Accepted 20 June 2020)

**Abstract :** In this study, the elastic wave was detected by the pencil lead break and tensile test using a stainless steel sheet with a thickness of 1 mm transformed by cold rolling. The detected elastic wave was analyzed by the time-frequency analysis method using Labview. The elastic wave detected from the pencil lead break and tension could be characterized by time-frequency analysis using Labview. As the degree of cold rolling increased, the amount of martensite increased and the dominant frequency decreased.

**Key Words :** Degree of cold rolling, STS316L, Elastic wave, Labview, Dominant frequency

## 1. 서 론

음향방출(acoustic emission; AE)은 재료 내부에서 발생하는 에너지해방으로 인하여 나타나는 탄성파이다. 탄성파의 진동을 검출하고 해석하여, 재료 내부의 동적 거동을 파악하고 결함의 성질과 상태를 평가하는 수동적인 비파괴계측법이 AE 법이다.<sup>1)</sup> 탄성파를 발생하는 음향방출원은 균열의 생성 및 전파, 쌍정변형, 슬립변형, 결정립계의 재방위, 상변태 등의 국부적인 동적변화들이다.<sup>2-5)</sup> 즉, 이러한 탄성파를 적절히 분석함으로써 불연속의 위치, 구조적 성질 등을 알 수 있다.

오스테나이트 스테인리스강은 내간압연에 의하여 마르텐사이트로 변태되고, 강도 및 강성이 증가한다. 또한 용접은 용접 방법에 따라서 용접부의 형상 및 치수가 다르게 나타나고, 조직의 변화가 다양하게 나타난다.<sup>6)</sup> 이와 같은 내부 상태의 변화는 탄성파의 변화를 가져올 수 있다. 음향방출은 Hsu의 연구<sup>7)</sup>에 의하여 Hsu-Nielsen source라고도 한다. 내부 조직의 변화에 따르는 탄성파 특성을 평가하는 방법으로 pencil lead breakage(PLB)가 있다.<sup>8)</sup> PLB는 재현성 있는 인위적인 음향방출(AE) source로서 오랫동안 확립된 표준이다. 연필 리드로 재료에 압력을 가하는 동안 구조물 표

\*\*\* 김공영(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6135-3331>) : STS제강부 파트장, POSCO  
E-mail : poszero@naver.com, Tel : 054-220-8372  
\*남기우(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-7019-358X>) : 교수, 부경대학교 재료공학과  
\*\*이기식(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-5968-7810>) : 냉연부 품질주임, POSCO

\*\*\* Kong-Young Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6135-3331>) : Head of STS steel division, POSCO.  
E-mail : poszero@naver.com, Tel : 054-220-8372  
\*Ki-Woo Nam(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-7019-358X>) : Professor, Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University.  
\*\*Ki-Sik Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-5968-7810>) : Quality Director of Cold Rolling Department, POSCO.

면에 변형이 발생하고, 파손이 발생하면 누적된 응력이 방출되어 미세한 변위가 발생한다. 이때 재료 내부로 전파되는 탄성파를 발생시킨다. 이 유형의 source는 현장 테스트뿐만 아니라 실험실 환경에서 처리하기 쉽기 때문에 AE 테스트에서 가장 일반적인 테스트 방법이다.

본 연구는 냉간 압연에 의하여 상변태한 두께 1mm의 스테인리스 강판을 사용하여, 펜슬리드 파괴로 탄성파를 발생시켰다. 또한 냉간 압연한 두께 1mm의 스테인리스강판은 인장에서 발생하는 탄성파를 검출하였다. 센서에 의하여 검출된 신호는 랩뷰를 활용한 시간-주파수 해석법<sup>9-11)</sup>으로 특성을 분석하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

사용한 재료는 STS316L이다. 탄성파 검출에 사용한 냉간압연 시험편은 0, 17, 33, 50, 67 및 80% 냉간압연한 두께 1 mm이다.

펜슬리드 파괴에 의한 탄성파는 샤프연필심을 45도 기울여 파괴하여, 센서에서 검출하였다. 인장에서 발생하는 탄성파는 시험편의 중앙에서 대칭되는 위치(15 mm)에 광대역 센서를 부착하여, 검출하였다.

탄성파 신호의 파형과 주파수 특성을 검출하기 위한 장비는 최대 8채널까지 지원되는 NI PXI SYSTEM을 사용하여 검출하였다. 장비는 발생하는 모든 음향방출 파형을 디지털화시켜 저장한다. 검출되는 음향방출 신호의 디지털화 속도는 하한계 값 0.5 V로 하고, 샘플링 속도는 1 MHz이고, 샘플링 크기는 4,096개이다. 사용된 센서는 넓은 범위의 주파수 응답 특성을 가지는 광대역 센서인 1 MHz이며, 28 dB 전치증폭기를 거쳐 검출하였다. 센서는 접촉매질을 바르고 시험편에 고무밴드로 고정하고, PLB에 의한 신호를 검출하였다. 이렇게 검출된 신호를 Labview 프로그램을 사용하여 시간-주파수 분석을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 연필심파괴에서 얻어진 탄성파

Fig. 1과 2는 각각 모재시험편과 80% 냉간압연

시험편의 파형, 주파수 스펙트럼 및 시간-주파수 해석의 결과를 대표적으로 나타낸다. 각 그림에서 (a)는 파형(Waveform), (b)는 주파수 스펙트럼(Power spectrum), (c)는 시간-주파수 해석(Time-frequency analysis)을 나타낸다.

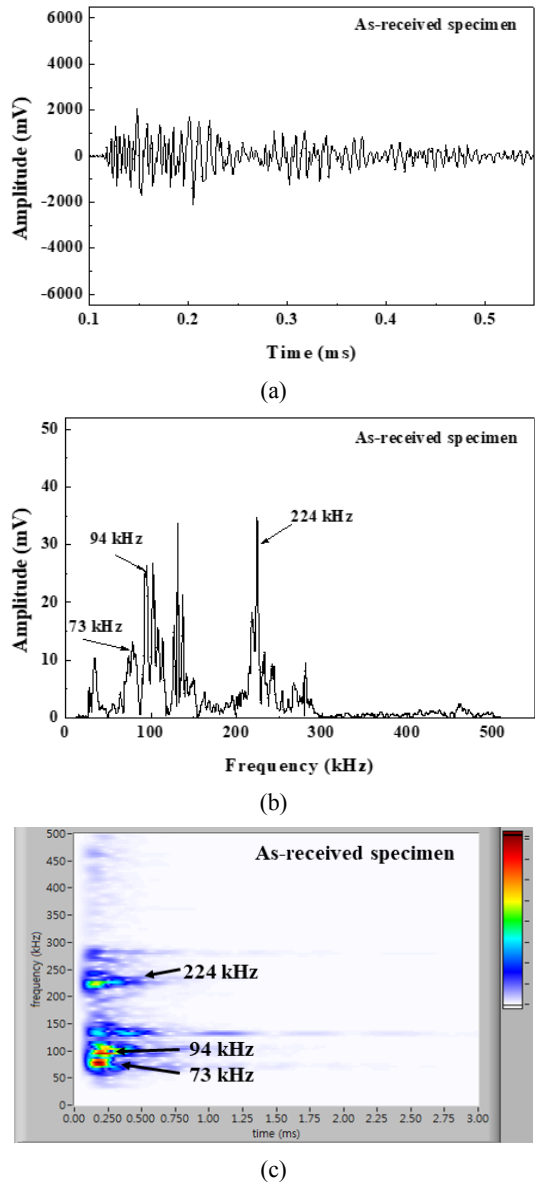


Fig. 1 AE signal detected from a pencil lead break in as-received specimen. (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis

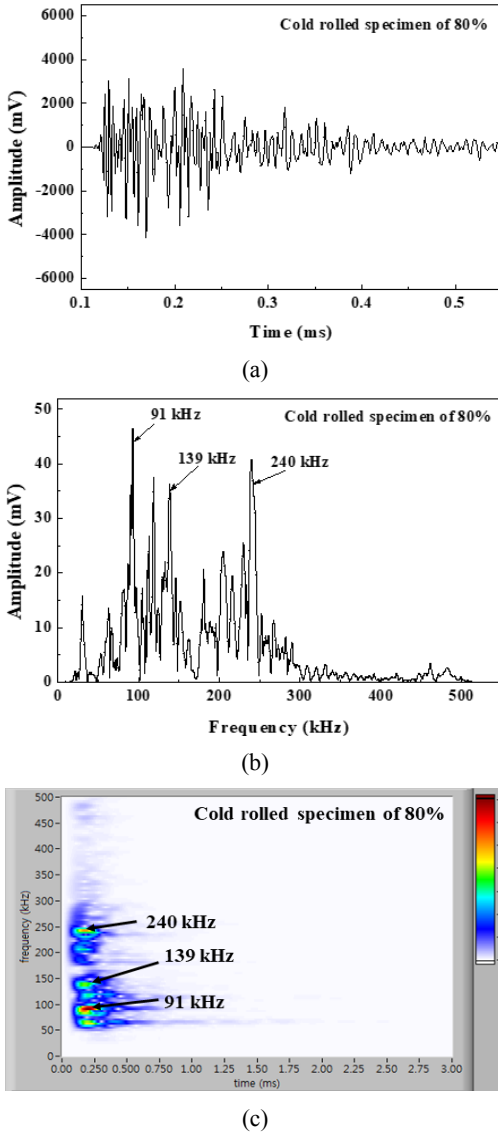


Fig. 2 AE signal detected from a pencil lead break in cold rolled specimen of 80%. (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis

Fig. 1, 2와 같은 그림에서 탁월한 주파수 성분을 구하여 Fig. 3에 나타낸다. 가장 높은 주파수의 스펙트럼 밀도는 탄성파 신호 Fig. 1(a)를 웨이브릿 해석한 결과, Fig. 1(c)의 73, 94, 224 kHz 부근, Fig. 2(c)의 91, 139, 240 kHz에 위치하고 있음을 알 수 있으며, 주파수 분석 Fig. 1(b)와 2(b)의 성

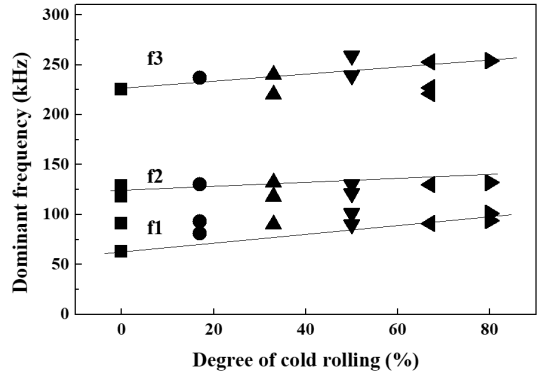


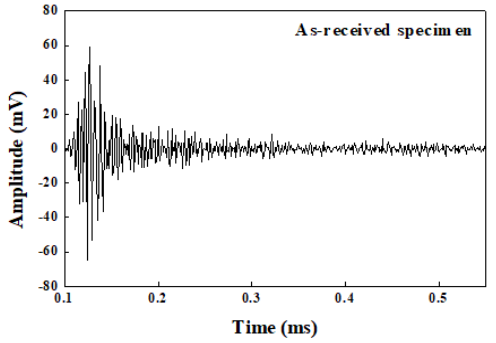
Fig. 3 Relationship of dominant frequency and degree of cold rolling for AE signal detected from a pencil lead break

분과 일치하였다. Fig. 1(b) 및 Fig. 2(b)의 224 및 240 kHz는 Fig. 1(c) 및 2(c)의 주파수 스펙트럼 밀도에서 화살표시한 가장 높은 탁월 주파수 성분으로 나타나 있다. 대개의 경우, 이러한 주파수 성분이 돌발형 AE 신호의 발생 초기에 내재되어 있다. 웨이브릿 해석 결과를 냉간압연률에 따라서 이러한 특성 성분을 조사한 것이 Fig. 3이다. Fig. 3은 대표적인 탁월 주파수 대역인 f1, f2, f3를 평활제(0%)의 결과를 기준으로 냉간압연률에 따라 나타내었다. Fig. 3에서 냉간압연시험편은 평활제시험편(0%)보다 약간 높은 주파수 대역을 나타내었다. 냉간압연시험편의 주파수는 냉간압연률이 증가함에 따라서 약간씩 증가하는 경향을 나타내었으며, 80% 압연시험편이 가장 높은 주파수 대역을 나타내었다.

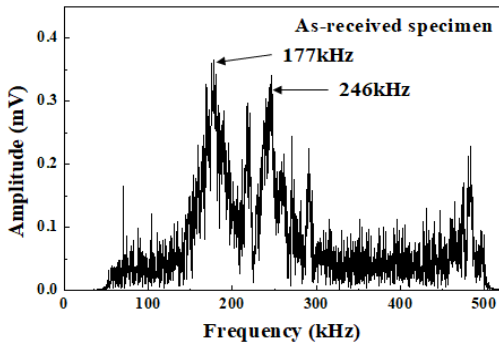
### 3.2 인장시험에서 얻어진 탄성파

Fig. 4와 5는 인장시험에서 얻어진 압연률에 따르는 시험편의 파형, 주파수 스펙트럼 및 시간-주파수 해석을 결과를 나타낸다. Fig. 4는 모재시험편, Fig. 5는 80% 냉간압연시험편을 나타낸다. 각 그림에서 (a)는 파형(Waveform), (b)는 주파수 스펙트럼(Power spectrum), (c)는 시간-주파수 해석(Time-frequency analysis)을 나타낸다.

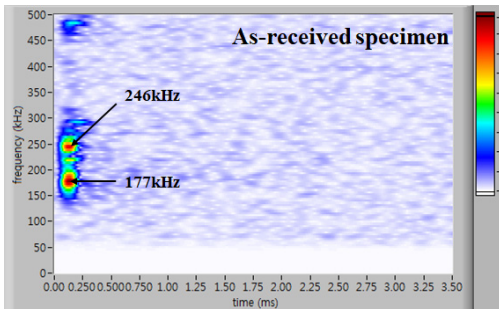
가장 높은 주파수의 스펙트럼 밀도는 탄성파 신호 Fig. 4와 5를 웨이브릿 해석한 결과, Fig. 4(c)



(a)

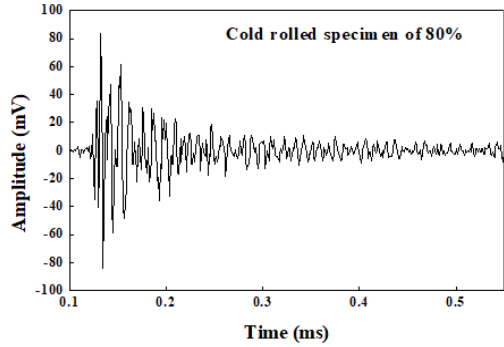


(b)

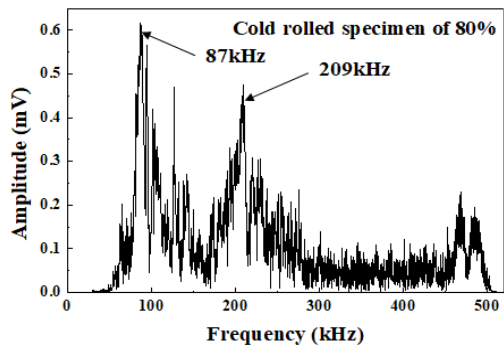


(c)

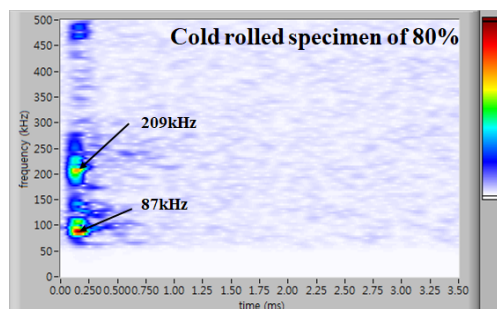
Fig. 4 AE signal detected from tensile test in as-received specimen. (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 AE signal detected from tensile test in cold rolled specimen of 80%. (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis

의 177, 246 kHz 부근, Fig. 5(c)의 87, 209 kHz에 위치하고 있음을 알 수 있으며, 냉간압연량이 증가함에 따라서 가장 뛰어난 주파수 분석은 246에서 209 kHz로 작아졌다. Fig. 4(b)와 5(b)의 파워 스펙트럼의 주파수는 Fig. 4(c)와 5(c)의 시간-주파수 스펙트럼 밀도에서 화살표시한 높은 탁월 주파수 성분으로 나타나 있다. 탄성파의 경우, 이러

한 주파수 성분이 돌발형 AE 신호의 발생 초기에 내재되어 있다.

Fig. 6은 Fig. 4, 5와 같은 인장시험에서 얻어진 탁월한 주파수 성분을 나타낸 것이다. 대표적인 탁월 주파수 대역인 f1, f2, f3, f4를 평활재(0%)의 결과를 기준으로 냉간압연량에 따라 나타내었다. f1 및 f2 주파수는 냉간압연량에 관계없이 같은

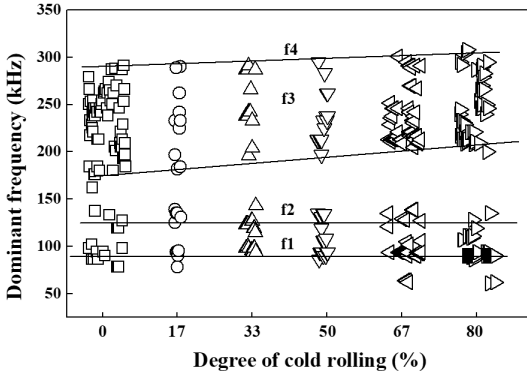


Fig. 6 Relationship of dominant frequency obtained from tensile test and degree of cold rolling

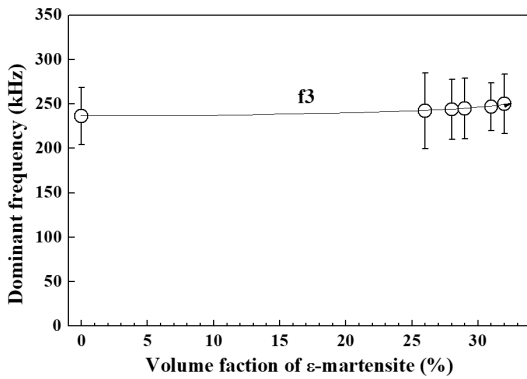


Fig. 7 Relationship of dominant frequency obtained from tensile test and volume fraction of  $\epsilon$ -martensite

대역에 나타났다. 모재시험편(0%)의  $f_3$  주파수는 냉간압연시험편보다 높은 주파수 대역을 나타내었다. 냉간압연시험편의  $f_3$  주파수는 냉간압연률이 증가함에 따라서 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 80% 압연시험편이 가장 낮은 주파수 대역을 나타내었다. 모재시험편과 80% 냉간압연시험편에서 초음파 탐상기로 측정된 음속은 각각 3,860 m/sec와 3,559 m/sec로 나타났다.

압연률이 증가함에 따라서 강성은 증가하지만, 탄성파의 전달 속도(음속)은 느려졌다. 한편, 냉간압연률이 증가할수록 강성에 영향을 미치는  $\alpha'$ -마르텐사이트와 감쇠능에 영향을 미치는  $\epsilon$ -마르텐사이트가 증가하였다. 마르텐사이트의 증가는 음속

이 감소하고, 탄성파의 탁월 주파수 대역이 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 인장시험에서 얻어진 탁월 주파수와  $\epsilon$ -마르텐사이트의 양과의 관계를 나타낸다. 그림에서  $\epsilon$ -마르텐사이트 양이 증가할수록 탁월주파수 대역  $f_3$ 가 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 냉간압연률이 증가할수록 감쇠능에 영향을 미치는  $\epsilon$ -마르텐사이트 양이 증가하므로 강성이 증가하고, 탄성파의 탁월주파수가 증가하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 냉간압연률이 다른 두께 1 mm의 STS316L 스테인리스 강관을 사용하여, 펜슬리드 파괴법 및 인장시험에서 탄성파를 검출하였다. 검출된 신호는 랩뷰를 활용한 시간-주파수 해석법으로 탄성파 특성을 분석하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 연필심 파괴 및 인장에서 검출한 탄성파는 랩뷰를 활용한 시간-주파수 해석으로 특성을 분석할 수 있었다.
- 2) 냉간압연률이 증가할수록 감쇠능에 영향을 미치는  $\epsilon$ -마르텐사이트 양이 증가하여, 탁월주파수 대역은 증가하였다.

#### 후 기

이 논문은 2019학년도 부경대학교 연구년[II] 교원 지원사업에 의하여 연구되었음.

#### Author contributions

K. Y. Kim; Writing-review & editing, K. S. Lee; Investigation & Resources, K. W. Nam; Methodology.

#### References

1. R. G. Liptai, D. O. Harris and C. A. Do, 1972,

- "Acoustic Emission", ASTM STP505.
2. A. G. Evans, M. Linzer and L. R. Russell, 1974, "Acoustic emission and crack propagation in polycrystalline alumina", *Materials Science and Engineering*, Vol. 15, pp. 253-261.  
([https://doi.org/10.1016/0025-5416\(74\)90059-7](https://doi.org/10.1016/0025-5416(74)90059-7))
  3. R. N. G. Wadley, C. B. Scruby and G. Shrimpton, 1981, "Quantitative acoustic emission source characterisation during low temperature cleavage and intergranular fracture", *Acta Metallurgica*, Vol. 29, pp. 399-414.  
([https://doi.org/10.1016/0001-6160\(81\)90166-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(81)90166-8))
  4. P. G. Meredith and B. K. Atkinson, 1983, "Stress corrosion and acoustic emission during tensile crack propagation in Whin Sill dolerite and other basic rocks", *Geophysical Journal International*, Vol. 75, pp. 1-21.  
(<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1983.tb01911.x>)
  5. K. W. Nam and A. Mal, 2001, "Characteristics of elastic waves generated by crack initiation in aluminum alloys under fatigue loading", *Journal of Materials Research*, Vol. 16, pp. 1745-1751.  
(<https://doi.org/10.1557/JMR.2001.0241>)
  6. 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, pp. 1829-1838.  
([https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90073-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90073-7))
  7. N. N. Hsu and F. R. Breckenridge, 1981, "Characterization and calibration of acoustic emission sensors", *Materials Evaluation*, Vol. 39, pp. 60-68.
  8. M. G. R. Sause, 2011, "Investigation of Pencil-Lead Breaks as Acoustic Emission Sources", *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 29, pp. 184-196.
  9. S. H. Ahn and K. W. Nam, (2003), "The Determination of J<sub>Ic</sub> Using the Time-Frequency Analysis Method", *Journal of testing and evaluation*, Vol. 31, pp. 347-351.  
(<https://doi.org/10.1520/JTE12176J>)
  10. S. H. Ahn, J. W. Kim, J. Y. Do and K. W. Nam, 2006, "Evaluation of the Corroded Pipe by Time-Frequency Analysis", *Journal of the Korea Society For Power System Engineering*, Vol. 10, pp. 89-92.
  11. K. W. Nam and K. C. Lee, 2003, "Frequency Characteristics of Acoustic Emission Signal from Fatigue Crack Propagation in 5083 Aluminum by Joint Time-Frequency Analysis Method", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 17, pp. 46-51.