

Hsu-Nielsen source에 의한 두께 및 용접 방법에 따른 STS316L의 탄성과 특성

Elastic Wave Properties of STS316L according to Thickness and Welding Method by Hsu-Nielsen Source

남기우* · 이기식** · 탁영준** · 김공영***†

Ki-Woo Nam*, Ki-Sik Lee**, Young-Joon Tak** and Gong-Young Kim***†

(Received 30 September 2019, Revision received 17 June 2020, Accepted 9 July 2020)

Abstract : Elastic waves are signals that appear as energy releases inside a material. Elastic waves show the behavior inside the material. Elastic wave characteristics of stainless steel according to the thickness and welding method are evaluated and will be used as basic data for monitoring the structure. In this study, elastic wave was generated by Hsu-Nielsen source using different thickness of stainless steel plate. Welding method used two types of TIG welding and laser welding. Elastic waves were detected using the NI PXI SYSTEM, which supports up to eight channels. Elastic waves analyzed by time-frequency analysis using Labview. As the thickness of specimen increases, the lower frequency band increases and the upper frequency band decreases. The elastic waves were affected by the welding method, welding power and welding speed. That is, they were affected by the weld shape.

Key Words : Elastic wave, Different thickness, Laser welding, TIG welding, Time-frequency analysis

1. 서 론

탄성파는 재료 내부에서 발생하는 에너지 해방으로 나타나는 신호이다. 탄성파를 검출·해석하여 재료 내부의 동적 거동을 파악하고 결함의 성질과 상태를 평가하는 수동적인 비파괴방법이다.¹⁾ 탄성파를 적절하게 분석함으로써 불연속의 위치

및 구조적 성질을 알 수 있다. 많은 연구자들은 구조물의 안정성 확보를 위한 연구로서, 구조 내부의 균열 등에서 발생하는 탄성파를 검출하여 재료 특성 등을 평가하였다.²⁻⁶⁾ 이것은 구조물의 유지·보수 측면에서 매우 중요한 것이다. 전보⁷⁾에서는 Hsu-Nielsen source^{8,9)} 및 인장에 의하여 냉간 압연율이 다른 STS316L의 탄성파 특성을 연구하

***† 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), 탁영준(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-8207) : 대학원생, 부경대학교 재료공학과

***† Gong-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), Young-Joon Tak(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5968-8207)
7) : Graduate student, Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University.

었다. 연필심 파괴(pencil lead break; PLB)라고도 하는 Hsu-Nielsen source는 탄성파 신호를 생성하는 인공적인 방법으로 재료 손상을 파악할 수 있다. 탄성파 특성은 데이터를 시각화하여 보여주는 Labview에 의하여 분석하였다.

본 연구는 두께 및 용접 방법에 따르는 스테인리스강의 탄성파 특성을 평가하여, 구조물의 모니터링에 기초 데이터로 활용하고자 한다. 모재는 두께가 다른 1, 5 및 25 mm의 스테인리스강을 사용하였으며, 용접재는 레이저 용접 및 TIG 용접한 두께 6 mm의 스테인리스강을 사용하였다. 탄성파는 Hsu-Nielsen source로 발생시켰다. 검출된 신호는 랩뷰를 활용한 시간-주파수 해석법¹⁰⁻¹²⁾으로 탄성파 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 실험방법

재료는 화학플랜트용 STS316L이다. 탄성파 검출 시험편은 모재시험편, 레이저용접시험편 및 TIG용접시험편으로 3종류이다. 두께가 다른 시험

Table 1 Conditions for laser welding and TIG welding

	Laser	TIG
Wavelength	1,030 nm	-
Beam Quality	16 mm·mrad	-
Power	5.2~5.8 kW	-
Defocus	-2 mm	-
Incidence angle	10°	-
Voltage	-	DC 16~20 V
Current	-	1 st : 75~80 A 2 nd : 85~95 A 3 rd : 85~95 A 4 th : 75~80 A
Arc length	-	1.5~3 mm
Welding speed	1.0~2.0 m/min	0.06 m/min, 8-Weaving
Shielding gas	Ar	Ar
Shielding gas rate [L/min]	21/15 (Face/Root)	>5/5~10 (Face/Root)
Improvement angle	0°	45°
Gap between materials	0 mm	3.2~3.5 mm
Filler metal	not used	Φ1.2 STS308

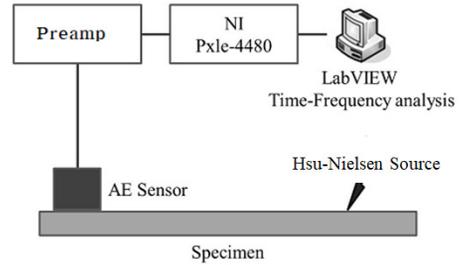


Fig. 1 Block diagram of experiment setup for elastic wave measurement

편은 두께 1, 5 및 25 mm를 사용하였으며, 용접시험편은 레이저 및 TIG 용접한 두께 6 mm를 사용하였다. 레이저 용접 및 TIG 용접 조건은 Table 1에 나타낸다.

Hsu-Nielsen source에 의한 탄성파는 샤프연필심을 45도 기울여 각 시험편에서 20번 파괴하여, 센서에서 검출하였다. 인장변형에서 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 고무 밴드로 고정하고, PLB에 의한 신호를 검출하였다. 이렇게 검출된 신호는 랩뷰 프로그램을 사용하여 시간-주파수 분석하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 장비의 Block diagram이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 두께에 따른 탄성파 특성

Fig. 2-4는 두께 1, 5 및 25 mm인 시험편에서 얻어진 파형, 주파수 스펙트럼 및 시간-주파수 분석 결과를 나타낸다. Fig. 2에서 (a)는 파형

(Waveform), (b)는 주파수 스펙트럼(Power spectrum), (c)는 시간-주파수 분석(Time-frequency analysis)을 나타낸다. Fig. 2~4의 과정은 두께에 따라서 다르게 나타난 것을 알 수 있다. 이것은 두께가 얇은 것은 extensional mode의 영향이 대부분을 차지하지만, 두꺼워지면 extensional mode 외에 flexural mode의 영향이 점차 많아지기 때문이라 판단된다.^{13,14)}

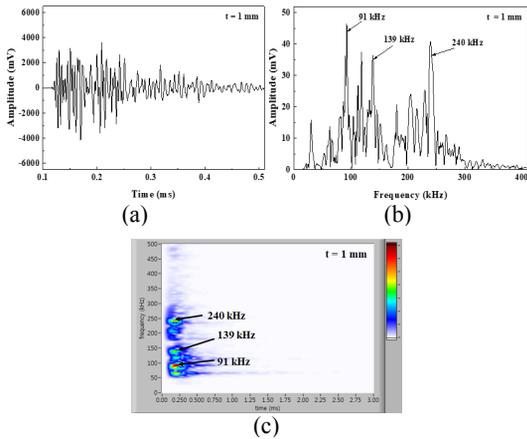


Fig. 2 Elastic wave detected from Hsu-Nielsen source using 1mm of specimen thickness. (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis

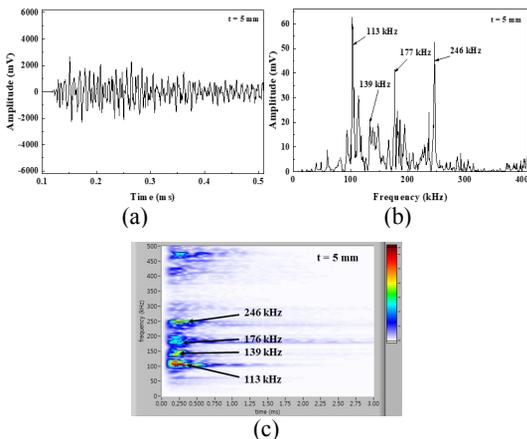


Fig. 3 Elastic wave signal detected from Hsu-Nielsen source using 5mm of specimen thickness. (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis

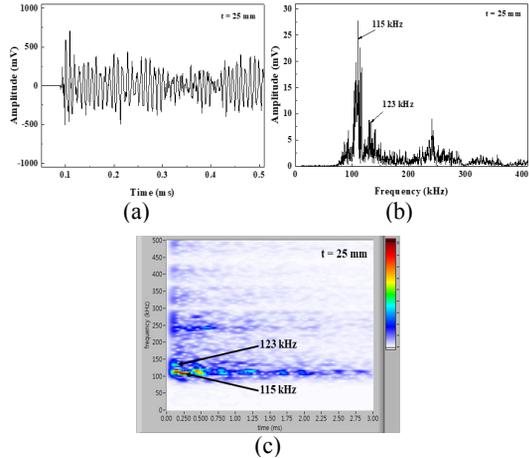


Fig. 4 Elastic wave signal detected from Hsu-Nielsen source using 25mm of specimen thickness. (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis

Fig. 2~4와 같은 그림에서 탁월주파수를 구하였다. 가장 높은 주파수의 스펙트럼 밀도는 탄성과 신호 Fig. 2~4(a)를 웨이브렛 해석한 결과 Fig. 2(c)의 91 kHz, 139 kHz 및 240 kHz 부근, Fig. 3(c)의 113 kHz, 139 kHz, 176 kHz 및 246 kHz 부근, Fig. 4(c)의 115 kHz 및 123 kHz 부근에 위치하고 있음을 알 수 있으며, 주파수 분석 Fig. 2~4(b)의 성분과 일치하였다. Fig. 2~4(b)의 91 kHz에서 139 kHz 범위는 Fig. 2~4(c)의 주파수 스펙트럼 밀도에서 화살표로 나타난 가장 높은 탁월주파수 성분이다. 일반적으로 이러한 주파수 성분은 돌발형 탄성과 신호의 발생 초기에 포함되어 있다.

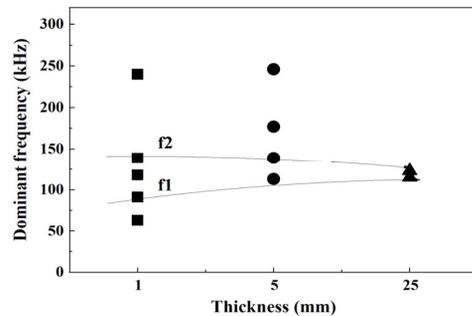


Fig. 5 Relationship of dominant frequency and specimen thickness

Fig. 5는 웨이브릿 분석 결과에서 두께에 따른 탁월주파수 성분을 나타낸 것이다. Fig. 5는 대표적인 탁월주파수 대역인 f_1 및 f_2 를 나타내었다. Fig. 5에서 두께 1 mm 시험편은 91~139 kHz, 두께 5 mm 시험편은 113~139 kHz, 두께 25 mm 시험편은 115~123 kHz 주파수 대역 범위를 각각 나타내었다. 주파수 대역은 시험편 두께가 두꺼워질수록 하부 주파수 대역은 증가하고, 상부 주파수 대역은 감소하는 경향을 나타내었다.

3.2 용접 방법에 따른 탄성과 특성

레이저 및 TIG 용접은 우수한 품질의 접합부를 형성하는 조건을 선정하여 실시하였다. Fig. 6은 용접부의 외관 및 단면을 나타낸다. 레이저 용접은 용접부의 전면(Face) 및 후면(Root)에서 모재 영역의 변색이 나타나지 않았으며, 단면에서 폭/깊이 비(ratio)가 큰 용입부가 관찰된다. 레이저 빔의 에너지 밀도가 매우 높기 때문에, 용융금속의 증발을 동반하는 키홀 기구로 용입이 일어난 것으로 판단된다.¹²⁾ 반면 TIG 용접은 용접부의 전면 및 후면 비드의 약 10 mm 이내 모재영역에서 변색이 나타났으며, 열의 전도가 많이 발생한 것을 알 수 있다. TIG 용접부의 단면은 폭/깊이 비가 상대적으로 큰 반구형 용입부가 관찰된다. 아-크의 에너지 밀도가 상대적으로 낮아 전도기구로 용입이 일어난 것으로 판단된다.¹⁵⁾

Fig. 7~9는 두께 6mm의 강판을 사용하여, 모재

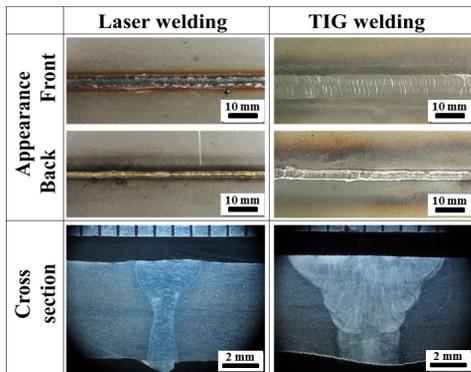


Fig. 6 Cross-section of laser welding and TIG welding

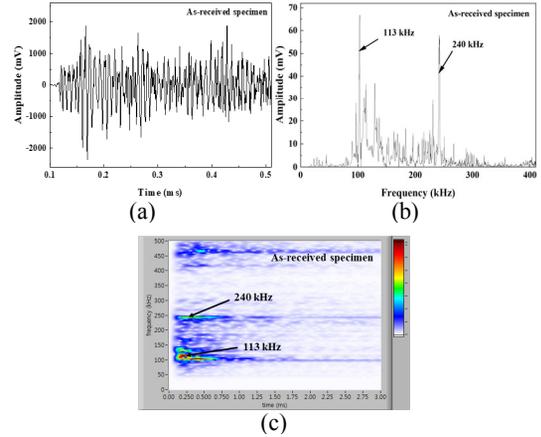


Fig. 7 Elastic wave signal detected from Hsu-Nielsen source using as-received specimen. (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis

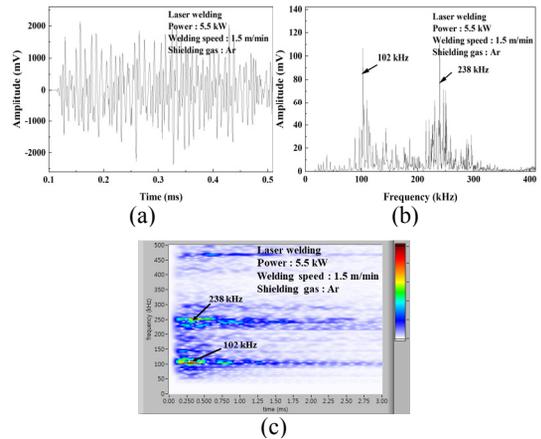


Fig. 8 Elastic wave signal detected from Hsu-Nielsen source using laser welding specimen (welding condition; power 5.5 kW, welding speed 1.5 m/mm, shielding gas Ar). (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis

시험편, 레이저 용접시험편 및 TIG 용접시험편에서 얻어진 파형, 주파수 스펙트럼 및 시간-주파수 분석을 결과를 나타낸다. Fig. 7은 모재시험편, Fig. 8은 Jung 등의 연구¹⁶⁾에서 최적 조건인 용접 전력 5.5 kW, 용접 속도 1.5 m/min, 보호가스 Ar를 사용한 레이저 용접시험편, Fig. 9는 용접 전압

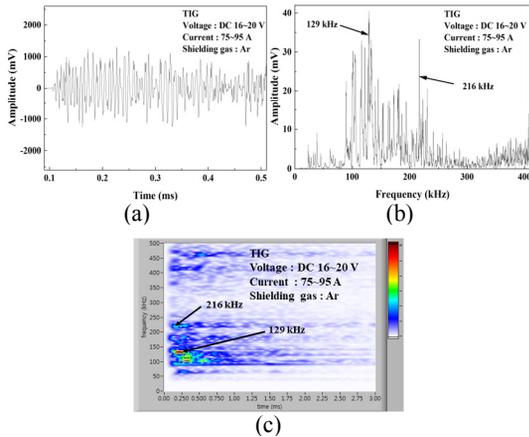


Fig. 9 Elastic wave signal detected from Hsu-Nielsen source using TIG welding specimen (welding condition; DC 16~20V, 75~95A, shielding gas Ar). (a) Waveform, (b) Power spectrum, (c) Time-frequency analysis

DC 16~20 V, 용접 전류 75~95 A, 보호가스 Ar 을 사용한 TIG 용접시험편이다. Fig. 7-9의 모재 및 용접재의 파형은 Fig. 2의 1mm 두께에서 얻어진 파형과 달리 extensional mode 외에 flexural mode의 영향이 많은 것을 알 수 있다.^{13,14)}

Fig. 7-9와 같은 그림에서 탁월주파수 성분을 구하였다. 가장 높은 주파수의 스펙트럼 밀도는 탄성과 신호 Fig. 7-9의 (a)를 웨이브릿 해석한 결과 Fig. 7(c)의 113, 240 kHz 부근, Fig. 8(c)의 102, 238 kHz, Fig. 9(c)의 129, 216 kHz에 위치하고 있음을 알 수 있으며, 주파수 분석 Fig. 7(b), Fig. 8(b) 및 Fig. 9(b)의 성분과 일치하였다. Fig. 7(b), Fig. 8(b) 및 Fig. 9(b)의 113, 102 및 129 kHz는 Fig. 7(c), Fig. 8(c) 및 Fig. 9(c)의 주파수 스펙트럼 밀도에서 화살표로 나타난 가장 높은 탁월주파수 성분으로 나타났다. 일반적으로 이러한 주파수 성분이 돌발형 탄성과 신호의 발생 초기에 포함되어 있다.

Fig. 10은 용접조건에 따라서 웨이브릿 분석 결과의 특성 성분을 조사하여 나타난 것이다. Fig. 10은 대표적인 탁월주파수 대역인 f_1 , f_2 를 평활제시험편①의 결과를 기준으로 용접 조건에 따라서 나타내었다. 또한 비교하기 위하여 TIG

용접시험편⑤도 같이 나타내었다. Fig. 10(a)는 일정한 용접 전력 5.2 kW에서 용접 속도를 다르게 한 것이다. Fig. 10(b)는 일정한 용접 속도 1.5 m/min에서 용접 전력을 다르게 한 것이다.

Fig. 10(a)의 탁월주파수 f_2 는 모재시험편① 102~129 kHz, 레이저용접시험편② (용접 속도 2 m/min) 63~162 kHz, 레이저용접시험편③ (용접 속도 1.5 m/min) 89~145 kHz, 레이저용접시험편④ (용접 속도 1 m/min) 64~152 kHz, TIG 용접시험편⑤ 62~133 kHz를 나타내었다. Fig. 10(b)의 탁월주파수 f_2 는 모재시험편① 102~129 kHz, 레이저용접시험편② (용접 전력 5.8 kW) 89~161 kHz, 레이저용접시험편③ (용접 전력 5.5 kW) 89~139 kHz, 레이저용접시험편④ (용접 전력 5.2 kW) 89~145 kHz, TIG 용접시험편⑤ 62~133 kHz를 나타내었다. Fig. 10에서 탁월주파수의 분산은 모재 시험편①이 가장 작았다. Fig. 10(a) 레이저용접 시험편③은 용접 속도 1.5 m/min의 분산이 가장 작았으며, 레이저용접시험편②와 ④의 분산은 비슷한 정도를 나타내었다.

Fig. 10(b) 레이저용접시험편③은 용접 전력 5.5 kW의 분산이 가장 작았으며, 레이저용접시험편 ②와 ④는 ③보다 분산이 많았다. TIG 용접시험편⑤의 탁월주파수 f_2 는 레이저용접보다 약간 낮게 나타났다. 반면 Fig. 10(a)와 (b)의 모재시험편 ① 및 레이저용접시험편②-④ 탁월주파수 f_1 는 약 240 kHz로 비슷하게 나타났으나, TIG 용접시험편 ⑤는 약 180 kHz 정도였다. 탁월주파수 대역은 재료의 균질성을 나타낸다고 판단된다. 레이저용접 시험편은 큰 에너지가 용착부에 한 번에 집중되어, 용착부의 폭이 비교적 작고 열영향부가 적게 형성되었다. 레이저 용접 속도 및 전력에 따라서 분산이 다른 것은 Jung 등의 연구 결과¹⁶⁾에서 기계적 특성이 다르기 때문이며, 기계적 특성이 가장 우수한 용접 전력 5.5 kW, 용접 속도 1.5 m/min의 분산이 가장 작게 나타났다. 한편, TIG 용접시험편은 다층 용접에 의하여 용착부에 에너지의 공급이 다르며, 용착부가 넓고 영향부도 레이저용접보다 크게 형성되어, 분산이 많으며, flexural mode가 많아서 탁월주파수 대역이 낮게 나타난 것이라 판단된다. Hsu-Nielsen source에

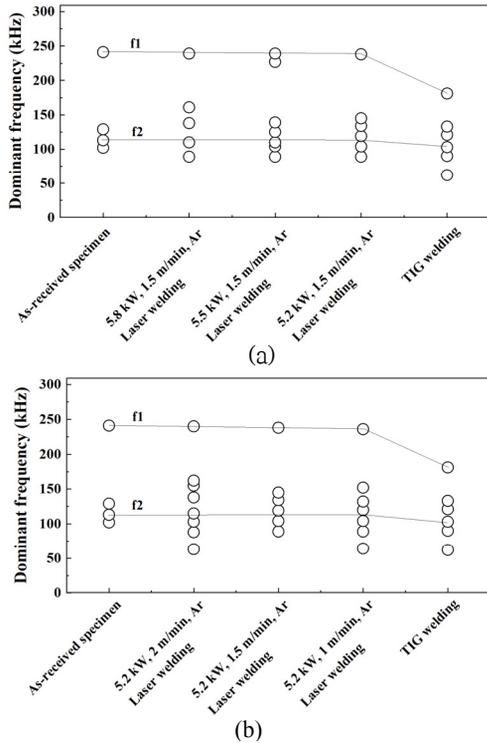


Fig. 10 Relationship of dominant frequency and welding conditions. (a) laser welding of 5.2 kW and TIG welding, (b) laser welding of 1.5 m/min and TIG welding

의한 탄성파는 레이저용접의 용접 전력 및 용접 속도에 영향을 받는 것으로 판단되며, 용접 방법에 따른 영향도 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 두께가 다른 1, 5 및 25 mm의 스테인리스강판 및 두께 6 mm의 용접한 스테인리스강관을 사용하여, Hsu-Nielsen source로 탄성파를 발생시켰다. 검출된 신호는 랩뷰를 활용한 시간-주파수 해석으로 탄성파 특성을 분석하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) Hsu-Nielsen source에서 검출한 탄성파는 Labview를 활용한 시간-주파수 해석으로 특성을 분석할 수 있었다.

2) 두께에 따른 탁월주파수 대역은 시험편 두께가 두꺼워질수록 하부 주파수 대역은 증가하고, 상부 주파수 대역은 감소하는 경향을 나타내어, 두께의 영향이 있었다.

3) Hsu-Nielsen source에 의한 탁월주파수는 용접 전력, 용접 속도 및 용접 방법에 영향을 받았다. 레이저용접시험편은 용접 전력 5.5 kW 및 용접 속도 1.5 m/min의 조건에서 분산이 가장 작게 나타났다.

Author contributions

G. Y. Kim; Writing-review & editing, K. S. Lee & Y. J. Tak; Investigation & Methodology, K. W. Nam; Supervision

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, Issues 2-3, 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, Issue 2, 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, Issue 1, 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, No. 6, 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, Issue 12, pp. 1829-1838.
([https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90073-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90073-7))
 7. K. Y. Kim, B. S. Kim, M. H. Kim, J. E. Paeng and K. W. Nam, "Elastic Wave Characteristics of STS316L with Degree of Different Cold Rolling", *Journal of the Korea Society For Power System Engineering* (under submitting).
 8. N. N. Hsu and F. R. Breckenridge, 1981, "Characterization and calibration of acoustic emission sensors", *Materials Evaluation*, Vol. 39, No. 1, pp. 60-68.
 9. M. G. R. Sause, 2011, "Investigation of Pencil-Lead Breaks as Acoustic Emission Sources", *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 29, pp. 184-196.
 10. S. H. Ahn and K. W. Nam, 2003, "The Determination of J_{Ic} Using the Time-Frequency Analysis Method", *Journal of testing and evaluation*, Vol. 31, No. 4, pp. 347-351.
(<https://doi.org/10.1520/JTE12176J>)
 11. 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, No. 2, pp. 89-92.
 12. 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, No. 3, pp. 46-51.
 13. M. Surgeon, M. Wevers, 1999, "One sensor linear location of acoustic emission events using plate wave theories", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 265, pp. 254-261.
([https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01142-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01142-3))
 14. K. W. Nam and C. K. Moon, 2002, "AE Signal Characteristics from Fracture by Type of CFRP Stacking Structure", *J. Ocean Engineering and Technology*, Vol. 16, pp. 67-71.
 15. J. Xu, J. Chen, Y. Duan, Ch. Yu, J. Chen and H. Lu, 2017, "Comparison of residual stress induced by TIG and LBW in girth weld of AISI 304 stainless steel pipes", *Journal of Materials Processing Tech*, Vol. 248, pp. 178-184.
(<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.014>)
 16. S. M. Jung, I. D. Park, K. H. Lee, J. Suh, G. Y. Kim and K. W. Nam, 2020, "Study on mechanical properties of austenitic stainless steel depending on heat input at laser welding", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 34, pp. 117-126.
(<http://doi.org/10.1007/s12206-019-1211-3>)