

박판 음향방출 위치 표정의 오차해석 Error Analysis for Modal Acoustic Emission Source Localization in Thin Plates

박경조*†
Kyung-Jo Park*†

(Received 15 March 2021, Revision received 7 June 2021, Accepted 8 June 2021)

Abstract : This paper demonstrates how consideration of the modal nature of AE signals can be used to reduce the number of sensors needed in AE source localization. To this end, the theory of the chirplet transform and modal acoustic emission are used to analyze the propagation of elastic waves in thin plates. First, the chirplet transform and the dispersion curves of the fundamental Lamb wave modes are utilized to separate the first-arrived modes and to estimate the distance between a source and a sensor. Then an analytical model is developed to simulate their late-arrived wave packets. Finally, the correlation between the experimental and the simulated waveform is used to estimate the location of AE source. To validate the proposed source localization algorithm, experiments were performed on a steel plate using the Hsu-Nielsen pencil lead break (PLB) test. Results show that the proposed algorithm can effectively localize AE source regardless of the location of the sources.

Key Words : Modal acoustic emission, Source localization, Chirplet transform, Correlation imaging

1. 서 론

선박의 선체나 비행기의 동체, 교량의 거더(girder) 등은 해양구조물이나 항공 산업, 토목공학 등에 자주 쓰이는 평판 형태의 구조물이다.^{1,2)} 이러한 구조물에서 발생하는 부식, 피로균열 등은 안전에 위협을 초래하는 가장 빈번한 위험 요인으로 평가받고 있다. 또한 이러한 결함들은 음향방출(acoustic emission)의 음원(source)이 되기 때문에 오랜 기간에 걸쳐 음향방출에 기반한 검출방법이 제안되어 왔다. 이는 여러 개의 신호변환기

(transducer)에 도착한 신호들의 도달시간차와 전파되는 파동의 속도를 알면 음원의 위치를 계산할 수 있기 때문이다.

최근 한 개 또는 두 개의 신호변환기를 이용하여 음향방출의 위치표정을 수행하려는 연구들이 꾸준히 진행되고 있다. 이는 구조물에서 전파되는 모드들의 특성이 측정신호에 나타나고 이를 이용하면 작은 수의 신호변환기를 사용해도 위치표정을 정확하게 수행할 수 있기 때문이다.³⁻⁵⁾ 그러나 작은 수의 신호변환기를 사용할 경우 모드분리가 어렵고, 도착시간 측정에 오차가 발생할 가능성이

*† 박경조(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2957-3342>)
교수, 전남대학교 기계설계공학부
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221

*† Kyung-Jo Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2957-3342>)
: Professor, Department of Mechanical Design Engineering,
Chonnam National University.
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221

크며 나중에 도착하는 신호들에서 유용한 정보를 얻기 어려운 문제점이 발생한다. 이를 해결하기 위해 경계에서 반사된 신호를 이용하는 방법,⁶⁾ 모드음향방출(MAE, Modal Acoustic Emission) 기반 위치표정,⁷⁾ 파동수-주파수 매핑에 의한 시간-거리 영역 변환 방법⁸⁾ 등이 개발되었다.

이러한 연구결과에도 불구하고 단일 신호변환기를 이용하여 단순한 구조물의 음원 위치를 표정하는 것조차 많은 양의 데이터수집과 처리에 장시간이 소요되는 문제로 인해 아직까지 어려움을 겪고 있는 실정이다. 단일 신호변환기를 이용한 위치표정 연구의 한 가지 방법으로 신호해석을 이용한 모드분리 방법이 사용되고 있는데 최근 저자들은 첩릿변환(chirplet transform)을 이용한 모드분리 방법을 제안하였다.⁹⁾

이 연구에서는 앞서 제안한 세 단계로 구성된 위치표정 알고리즘을 이용하여 위치표정 오차에 대한 해석을 수행하고자 한다. 이를 위해 먼저 위치표정 알고리즘을 요약하여 설명하고 실험장치 및 실험방법에 대해 설명한 다음 오차해석을 통해 제안된 방법의 정확성 및 효율성을 검증한다.

2. 위치 표정 알고리즘

제안된 알고리즘은 Fig. 1에 보인 바와 같이 크게 세 단계로 구성되어 있다. 먼저 단일 신호변환기를 이용하여 측정된 신호에서 첫 번째 모드(평

판의 경우 S_0 모드와 A_0 모드)를 분리하고 음원에서 신호변환기까지의 도달시간을 추정하기 위해 첩릿변환과 분산선도(dispersion curves)를 이용한다. 두 번째 단계에서는 다중경로 모델(multi-path model)을 이용하여 전 단계에서 분리한 첫 번째 모드가 경계에서 반사될 때의 신호들을 해석적으로 구한다. 마지막으로 해석적으로 계산한 파동과 실험에서 측정된 신호 사이의 상관관계를 구하고 이를 활용하여 음원의 위치를 표정한다.

각 단계별로 자세한 설명을 기술하면 다음과 같다. 첫 번째 단계에서 첩릿변환에 의해 분리된 음향방출 신호에 두 개 이상의 모드가 존재하면 두 모드의 도달시간 차는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta t = t_{A_0} - t_{S_0} = \frac{d_0}{c_{gA_0}} - \frac{d_0}{c_{gS_0}} \quad (1)$$

여기서, d_0 는 음원에서 신호변환기까지의 직선 거리, t_{A_0} 와 t_{S_0} 는 첩릿변환으로부터 구한 A_0 모드와 S_0 모드의 도달시간이고 c_{gA_0} 와 c_{gS_0} 는 A_0 모드와 S_0 모드의 군속도(group velocity)이다. 식 (1)을 다시 정리하면 음원에서 신호변환기까지의 직선거리를 구할 수 있다.

$$d_0 = \frac{(t_{A_0} - t_{S_0})}{(c_{gS_0} - c_{gA_0})} c_{gA_0} \cdot c_{gS_0} \quad (2)$$

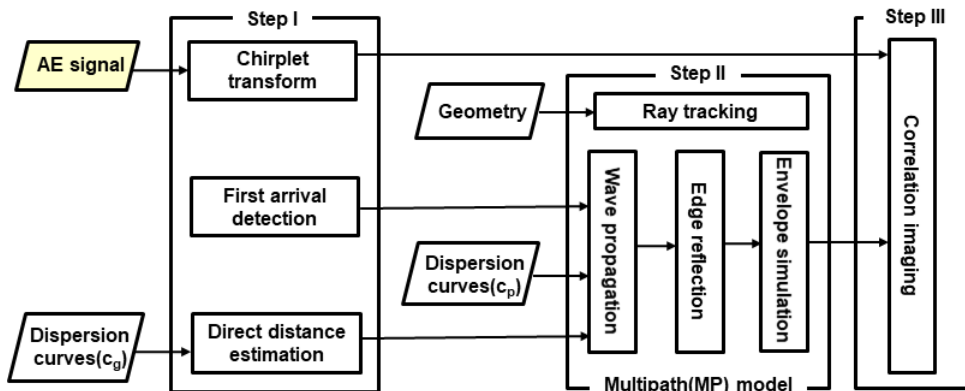


Fig. 1 Flowchart of the source localization algorithm

두 번째 단계의 다중경로 모델은 경계에서 반사된 신호를 모사하기 위한 해석적 모델이다. 이 모델은 칩릿변환으로 분리된 첫 번째 도착신호를 이용하여 경계에서 반사되어 신호변환기에 나중에 도착하는 신호들을 재구성한다. 그 과정은 음선추적(ray tracking), 파동전파와 경계반사 신호 모사 그리고 신호의 포락선(envelope) 계산으로 구성되어 있다. 이 중 음선추적은 음원에서 신호변환기까지 직선으로 구성되는 최단 경로와 평판의 경계에서 한 번 이상 반사된 뒤 신호변환기에 도착하는 파동들의 경로를 계산한다. 경계에서 반사된 후 파동의 경로를 예측하기 위해 거울반사(specular reflection)와 스넬의 법칙(Snell's law)을 이용한다. 이와 같은 과정을 거쳐 구한 모사신호와 실험으로부터 측정된 음향방출 신호 사이의 상관관계는 힐버트변환(Hilbert transform)을 통해 구한 포락선 비교를 통해 구할 수 있다. 마지막으로 사전기반(dictionary-based) 알고리즘을 통해 모사 신호와 측정 신호 사이의 유사성을 비교한다. 이 기법에서는 픽셀 위치에 음원이 놓여 있다고 가정하여 모사 신호를 구하고, 이를 측정 신호와 비교하여 상관 계수를 구한 다음 상관계수의 크기에 따라 영상으로 표현하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증한다.

3. 실험장치 및 분산선도

위치 표정 알고리즘의 타당성을 검토하기 위해 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 3.12\text{ mm}$ 강판에 대한 음향방출 실험을 수행하였다. 실험장치의 개요는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 평판을 지지하기 위해 네 모서리 밑에 스티로폼을 놓았고, 음향방출 신호를 발생시키기 위해 Hsu-Nielsen이 제안한 연십파단 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 연필은 0.3 mm 2H이고 연십은 파단 전 3 mm 가공하였다. 평판에서 발생할 수 있는 파동의 종류는 입사파의 입사각에 따라 달라지므로, 대칭, 비대칭 모드를 모두 발생시키기 위해 연십을 45°로 부러뜨렸다.

음향방출 신호를 측정하기 위해 하나의 광대역 압전식 음향방출 신호변환기를 위치(60 mm, 190 mm)

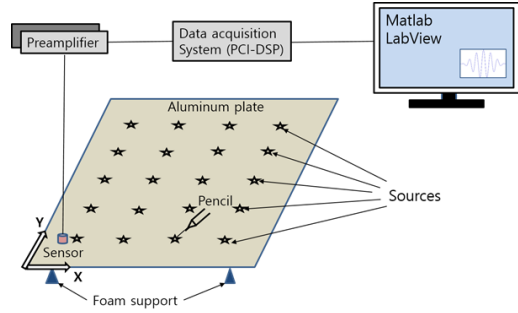


Fig. 2 Experimental Setup

에 설치하였다. 신호는 PCI-DSP 보드를 이용하여 수집하였는데, 보드에 들어오기 전에 예증폭기(pre-amplifier)에서 40 dB 증폭되고, 보드에서 추가로 40 dB이 증폭되어 측정 신호는 총 80 dB 증폭되었다. 샘플링 주파수는 2 MHz이고 획득한 신호는 Matlab을 사용하여 후처리를 수행하였다.

평판의 모드 특성을 이용하여 음원의 위치표정을 수행하기 위해서는 특정 주파수에서의 평판 파동의 군속도(group velocity)를 알아야 한다. 평판에서 전파되는 파동은 기본적으로 분산성(dispersion)을 가지며 동시에 여러 모드의 파동이 존재하는 것으로 알려져 있다. Disperse^{®10}를 이용하여 구한 대상 평판의 분산선도를 Fig. 3에 나타내었다. 주파수범위 0~540 kHz(평판 A_1 모드의 차단 주파수(cut-off frequency))에서 존재하는 모드는 S_0 (대칭모드)와 A_0 (비대칭모드) 뿐이다. 차단주파수에서 A_1 모드의 군속도는 0에 접근하고 따라서 위상속도(phase velocity)는 무한대에 접근한다. 따라

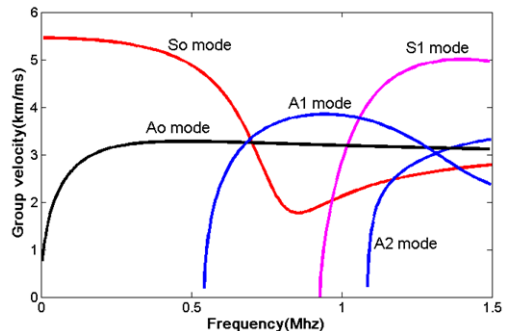


Fig. 3 Dispersion curves for a 3.12 mm plate

서 음향방출 신호를 수신할 때 필터대역을 A_1 모드의 차단주파수 이하로 설정하면 A_1, S_1, A_2, \dots 와 같은 고차 모드들이 신호에 나타나지 않게 되어 위치표정 알고리즘의 성능이 크게 개선되는 효과를 거둘 수 있다.

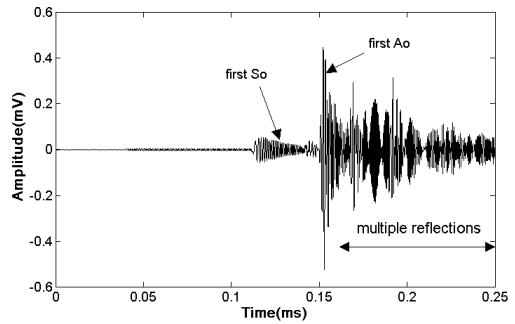
4. 실험결과

연심파단 시험을 수행하여 측정된 음향방출 신호를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 그림에 나타난 결과는 파단시험을 위치(650 mm, 320 mm)에서 수행하여 얻은 결과이다. 이 위치에서 신호변환기 위치(60 mm, 190 mm)까지의 직선거리는 604 mm이다. 실험으로부터 구한 음향방출 신호에 칩릿변환을 적용하여 신호변환기에 첫 번째로 도달한 S_0, A_0 모드를 분리하고 각 모드의 도달시간(t_{S_0}, t_{A_0})을 계산한 결과를 Fig. 4(b)에 제시하였다. 그리고 분리된 모드들의 스펙트로그램도 Fig. 4(c)에 표시하였다. 스펙트로그램으로부터 진폭과 기울기(시간/주파수)를 제외한 두 모드의 특징이 매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 스펙트로그램의 기울기는 모드의 비대칭성을 나타내는 칩릿변환의 매개변수로 이 값이 클수록 비대칭성이 크게 나타난다. 분리된 두 모드의 칩릿 매개변수 즉 진폭, 시간위치, 주파수 위치 및 칩변화율, 지속시간 등을 Table 1에 나타내었다. 표에서 칩변화율의 단위는 주파수/시간으로 스펙트로그램 기울기의 역수에 해당된다.

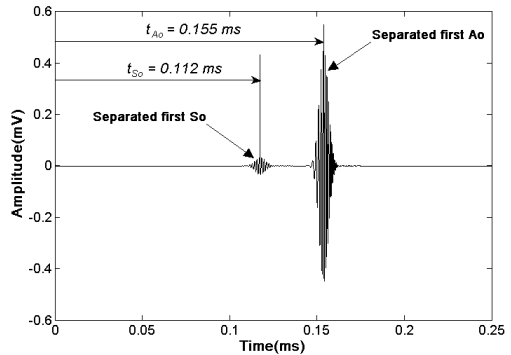
S_0 모드의 군속도는 주파수 390 kHz에서 5,183 m/ms이다. 따라서 음원에서 신호변환기까지의 직선거리 640 mm를 전파하기 위해서 0.116 ms가 소요된다. 이 값은 Table 1에 제시한, 칩릿변환에 의해 구한 도달시간 0.112 ms와 매우 유사한(3% 오차) 결과를 보인다. 반면에 A_0 모드의 군속도는 주파수 428 kHz에서 3,281 m/ms로 직선경로를 전파하는데 0.173 ms가 소요되는데, 측정 신호로부터 구한 결과에서는 좀 더 빠른 0.155 ms만에 신호변환기에 도착하는 것으로 나타났다(9.8% 오차). 이는 A_0 모드의 분산성에 기인하는 것으로 생각할

Table 1 Parameters for first-arrival S_0, A_0 modes

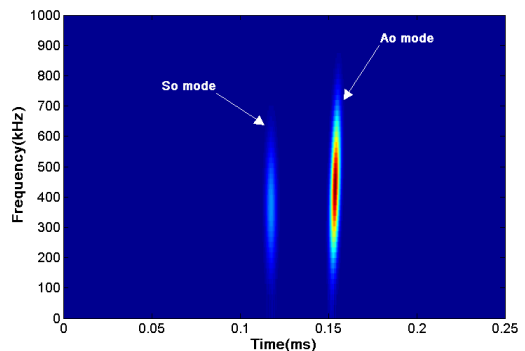
Mode	Amp.	Time loc.(ms)	Freq. loc.(kHz)	Chirp rate.(kHz/ms)	Time dur.(ms)
S_0	0.032	0.112	390.4	1.69	0.0140
A_0	0.441	0.155	428.6	-12.85	0.0158



(a) Measured AE signals by lead break tests



(b) Separated S_0 and A_0 modes



(c) Spectrogram of the separated modes

Fig. 4 Measured AE signals and separated modes

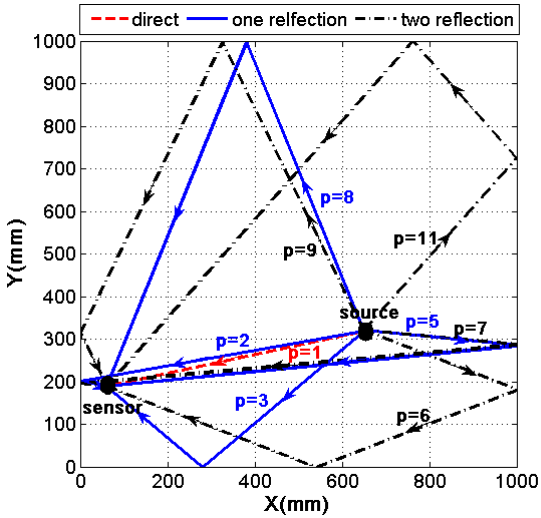


Fig. 5 Multiple paths for up to two reflections

수 있는데, 파동이 분산 특성을 가지면 진폭이 감소하고 지속시간이 길어지는 효과를 유발하여 파동이 서로 중첩되도록 만들기 때문이다. A_0 모드의 분산성은 Fig. 3의 분산선도에서 확인할 수 있는데 주파수 변화에 따른 군속도 변화가 클수록 분산성이 심한 특성을 갖는다.

두 모드 S_0 와 A_0 의 도달시간을 이용하여 구한 음원에서 신호변환기까지의 직선거리와 해석적 모델을 이용하면 나중에 도착하는 신호들을 계산할 수 있다. 이를 위해 먼저 음선추적을 수행하였는데, 음원이 (650 mm, 320 mm)에 놓여 있고 센서가 (60 mm, 190 mm)에 위치하는 경우에 대한 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 알고리즘을 이용하면 한 개의 직접 경로와 한 번 또는 두 번의 반사를 갖는 열두 개의 경로를 구할 수 있지만, 그림의 명확성을 위해 그 중 몇 개의 경로만 나타내었다.

음향방출 신호는 20개 위치에서 측정하였는데, 그 중 대표적인 위치(650 mm, 320 mm)에서의 상관 계수를 영상으로 표시한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 실제 음원 위치와 제안된 방법을 이용하여 추정된 음원을 그림에서 확인할 수 있다. 상관 계수가 높은 점들은 신호변환기에 중심을 둔 원호에 주로 위치하는 것을 알 수 있으며, 이 원호들은 실제 음원과 교차한다. 따라서 상관 계수가

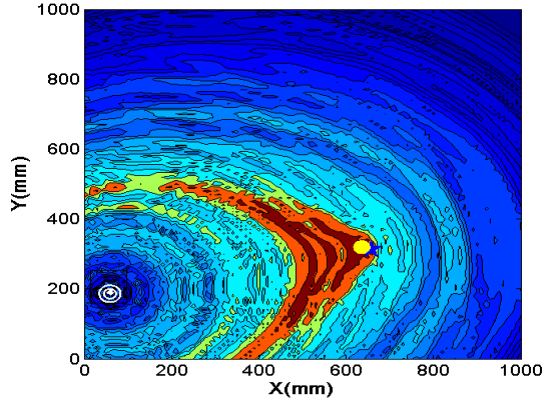


Fig. 6 Correlation images for lead break tests (⊙ sensor, ● estimated source, ★ source)

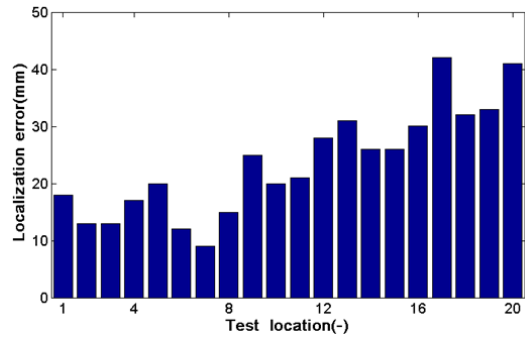


Fig. 7 Histogram of the localization errors

높은 점들은 원호의 반경방향보다는 접선방향으로 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 실제 음원과 추정 음원 사이의 거리는 각각 12 mm로 계산되었다.

20개 위치에서의 위치표정 오차를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 가로축은 파단시험의 위치를 나타내고 세로는 위치표정 오차를 나타낸다. 오차는 실제 음원-신호변환기 사이의 직선거리에서 위치표정 알고리즘을 이용하여 추정한 거리를 뺀 값이다. 전체적으로 오차의 크기가 50 mm(평판 폭의 5.5%)를 넘지 않는 것을 알 수 있다. 최대 오차는 42 mm, 평균 오차는 24 mm이다. 따라서 제안된 위치표정 알고리즘에 의해 평판 음향방출의 위치를 정확하게 표정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 다중 모드로 구성되어 있고 분산성을 갖는 음향방출 신호의 모드 특성을 이용하여 음원의 위치 표정을 수행할 수 있는 방법을 제시하고 오차해석을 수행하였다. 제안된 알고리즘은 세 단계로 구성되어 있다. 먼저 칩릿변환을 이용하여 첫 번째 도달 모드들을 분리하고 음원과 신호 변환기 사이의 직선거리를 추정하였다. 두 번째 단계로, 분리된 첫 번째 모드들과 직선거리를 이용하여 경계에서 반사하는 파동을 재구성하였다. 마지막으로 모사 신호와 측정 신호 사이의 상관관계를 해석하여 음향방출 음원의 위치를 표정하였다.

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 강판에 연심파단 실험을 수행하였다. 실험 결과의 오차해석을 통해, 전체적으로 오차의 크기가 평균 폭의 5.5%를 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 제안된 방법을 사용하면 음원의 위치에 상관없이 위치 표정을 효과적으로 수행할 수 있음을 알 수 있었다. 기존의 위치 표정 방법들은 평판의 테두리나 모서리와 같이 블라인드 존(blind zone)에 음원이 있을 경우 위치 표정 오차가 매우 크게 증가하는 단점이 있기 때문에 제안된 방법의 효용성이 높다고 할 수 있다.

References

1. T. Kundu, 2014, "Acoustic source localization", *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 1, pp. 25-38. (<http://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.06.009>)
2. L. Yu, S. Momeni, V. Godinez, V. Giurgiutiu, P. Ziehl and J. Yu, 2012, "Dual mode sensing with low-profile piezoelectric thin wafer sensors for steel bridge crack detection and diagnosis", *Advances in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 167-175. (<https://doi.org/10.1155/2012/402179>)
3. R. Ernst, F. Zwimpfer and J. Dual, 2016, "One sensor acoustic emission localization in plates", *Ultrasonics*, Vol. 64, No. 2, pp. 139-150. (<http://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.08.010>)
4. A. Ebrahimkhanlou and S. Salamone, 2017, "Acoustic emission source localization in thin metallic plates: A single-sensor approach based on multimodal edge reflections", *Ultrasonics*, Vol. 78, No. 2, pp. 134-145. (<http://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.03.006>)
5. M. Ruzzene, 2007, "Frequency-wavenumber domain filtering for improved damage visualization", *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 5, pp. 2116-2129. (<http://doi.org/10.1088/0964-1726/16/6/014>)
6. F. Ciampa and M. Meo, 2011, "Acoustic emission localization in complex dissipative anisotropic structures using a one-channel reciprocal time reversal methods", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 130, No. 1, pp. 168-181. (<http://doi.org/10.1121/1.3598458>)
7. J. Jiao, C. He, B. Wu, R. Fei and X. Wang, 2004, "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, No. 5, pp. 427-431. (<http://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2004.03.009>)
8. K. Grabowski, M. Gawronski, I. Baran, W. Szychalski et al., 2016, "Time-distance domain transformation for acoustic emission source localization in thin metallic plates", *Ultrasonics*, Vol. 68, No. 2, pp. 142-149. (<http://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.02.015>)
9. K. J. Park, 2019, "Modal acoustic emission source localization in thin plate with one sensor", *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 39-47. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2019.23.6.039>)
10. B. N. Pavlakovic and M. S. Lowe, 2001, *Disperse User's Manual*, NDT Lab, Imperial College, UK.