



음향방출 신호의 모드 분리와 도달시간 규명

Mode Separation and Identification of Arrival Times for Acoustic Emission Signals

김정엽* · 박경조**
 Chung-Yeob Kim* and Kyung-Jo Park**

(Received 29 October 2018, Revision received 15 January 2019, Accepted 28 January 2019)

Abstract: Acoustic emissions are elastic waves accompanying damage processes and are therefore used for monitoring the health state of structure. Arrival time estimation is most important to locate the source of acoustic emission caused by damage process or crack growth. This study paper proposes a new method to separate the multimodal and dispersive acoustic emission signals, and to estimate the first arrival times. 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 arrival times. To validate the proposed method, experiments were performed on a steel plate using pencil lead break test. Results show that the proposed algorithm can effectively estimate the first arrival times.

Key Words : Acoustic Emission, Mode Separation, Arrival Time, Chirplet Transform, Dispersion Curves

1. 서 론

선박의 선체, 액화가스 저장탱크나 사장교 등과 같이 하중을 받고 있는 구조물의 건전성 평가나 손상검출을 위해 오랜 기간에 걸쳐 음향방출(acoustic emission) 기법이 널리 사용되어 왔다.^{1,2)} 즉 음향방출을 이용하여 결함의 위치를 표정(source localization)할 수 있는데, 이는 여러 개의 센서에 도착한 신호들의 도달시간차와 전파되는 파동의 속도를 알면 음향 방출의 위치를 계산할 수 있기 때문이다.

구조물의 모드 특성을 이용한 음향방출 기법을

적용할 때 나타날 수 있는 문제점은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 먼저 측정된 신호에는 다양한 반사 신호들이 중첩되어 나타나기 때문에 종파와 횡파(또는 휨파)로 분리하기 어렵다는 점이다. 이는 단일 센서를 이용할 때 특히 심각하게 나타나는 현상이다. 따라서 평판에서 입사파와 반사파를 분리하기 위한 방법의 개발이 필요하다고 할 수 있다³⁾. 다음으로 위치 표정 불확실성의 가장 큰 원인이 되는 도달 시간 추정 오차가 발생할 확률이 높다는 점이다. 신호잡음비가 크면 추정 오차는 더욱 커진다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 많은 시도

* 김경조(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2957-3342>)

교수, 전남대학교 기계설계공학부

E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221

*김정엽 : 교수, 전남대학교 기계설계공학부

** 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

*Chung-Yeob Kim : Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University.

들이 진행되어 왔다. 시간, 공간상에서 분산성을 갖는 신호의 분리를 위한 연구는, 2차원 FFT를 이용한 단일 모드 추출⁴⁾, 실험 모드분리법⁵⁾, 정합추적(matching pursuit)⁶⁾, 첩릿변환(chirplet transform) 방법^{7,8)} 등이 개발되었다. 첫 번째로 도달하는 신호의 도달시간을 결정하는 가장 단순한 방법은 설정된 문턱값(threshold)보다 신호의 진폭이 클 때의 시간을 측정하는 것이다. 이중 널리 사용되는 방법이 AIC(Akaike information criterion)인데 이는 통계적인 척도로 이 값의 전역 최솟값이 가장 빨리 도착하는 모드의 도달시간에 해당 된다.⁹⁾

이 논문에서는 음향방출 신호의 모드를 분리하고 분리된 모드들의 도달 시간을 추정하는 방법을 제시한다. 이를 위해 첩릿변환과 분산선도를 이용하여 첫 번째 도착 모드를 분리하고 이를 이용하여 모드들의 도달 시간 및 음원과 센서 사이의 직선거리를 추정한다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 강판에 연심과단(pencil lead break, PLB) 시험을 수행하여 음향방출을 모사하고, 측정된 음향방출 신호에 제안된 방법을 적용하여 유용성을 입증한다.

2. 모드 분리와 도달 시간 추정

실험을 통해 측정된 신호에는 분산성을 갖는 다양한 신호들이 혼재되어 나타난다. 그러나 첫 번째 모드의 도달시간을 추정하기 위해서는 해당 모드를 측정 신호로부터 반드시 분리해야 하므로 개별 모드를 추출하는 방법이 필요하다. 이 논문의 저자들은 최근 모드 추출을 효과적으로 수행할 수 있는 방법을 개발하였고⁷⁾, 이를 음향방출 신호의 모드 분리에 이용하고자 한다.

첩릿변환은 시간-주파수 표현법을 일반화시킨 개념으로 기저함수는 천이, 전단, 확대 연산자에 의해 조절이 가능하며, 국소후리에변환(시간과 공간의 천이)과 웨이브렛변환(시간 천이와 확대)의 에너지밀도에 의해 표시된다. Fig. 1에 시간-주파수 공간에서 첩릿변환을 표시하는 방법에 대한 예를 나타내었다. 첩릿변환은 먼저 신호의 전체 영역에서 첩변화율(chirp rate)과 지속시간(duration)

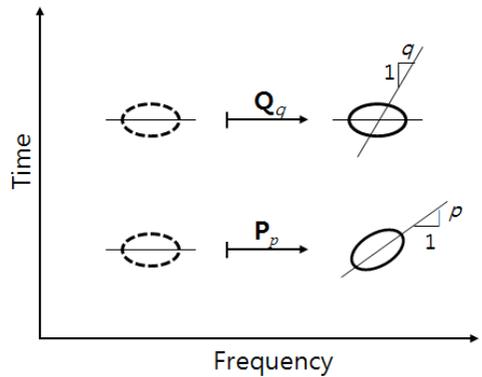


Fig. 1 Representation of chirplet transform

을 추정하는 과정부터 시작된다. 이 과정은 다의 함수(ambiguity function)을 이용하여 수행할 수 있는데, 계산의 편리를 위해 첩변화율과 지속시간을 중립화할 수 있는 값으로 선택한다.

두 번째 단계에서는 추정된 첩변화율과 지속시간을 이용하여 시간, 주파수영역에서의 위치를 추정한다. 그 위치는 현재의 첩변화율과 지속시간이 추정값에 해당하는 창함수(window function)를 갖는 스펙트로그램의 최댓값을 찾으면 알 수 있다. 세 번째 단계에서는 국부적인 영역에서 첩변화율과 지속시간을 다시 추정한다. 추정한 첩변화율과 지속시간이 완벽한 것이라면 이 값은 최대가능추정자(maximum likelihood estimator)가 될 것이다. 시간과 주파수영역에서의 위치를 어느 정도 정확하게 추정하였다면 국부적으로 추정한 첩변화율과 지속시간은 전역에서 추정한 값보다 정확할 것이다. 마지막으로 해가 수렴할 때까지 두 번째, 세 번째 단계를 반복한다.

첩릿변환에 의해 분리된 음향방출 신호에 두 개 이상의 모드가 존재하면 두 모드(평균의 경우 S_0 모드와 A_0 모드)의 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 센서까지의 직선거리,

t_{A_0} 와 t_{S_0} 는 칩릿변환으로부터 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 센서까지의 직선거리를 구할 수 있다.

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

3. 실험장치와 분산선도

제안한 모드 분리 및 도달시간 추정 방법의 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 연심파단 시험을 수행하였다. 평판에서 발생할 수 있는 파동의 종류는 입사파의 입사각에 따라 달라지므로, 대칭, 비대칭 모드를 모두 발생시키기 위해 연심을 45° 로 부러뜨렸다.

음향방출 신호를 측정하기 위해 하나의 광대역 압전식 음향방출 센서를 평판의 왼쪽 아래 모서리에서 오른쪽으로 60 mm, 위쪽으로 190 mm 떨어진 위치에 설치하였다. 신호는 PCI-DSP 보드를 이용하여 수집하였는데, 보드에 들어오기 전에 예증폭기(preamplifier)에서 40 dB 증폭되고, 보드에서 추가로 40 dB이 증폭되어 측정 신호는 총 80

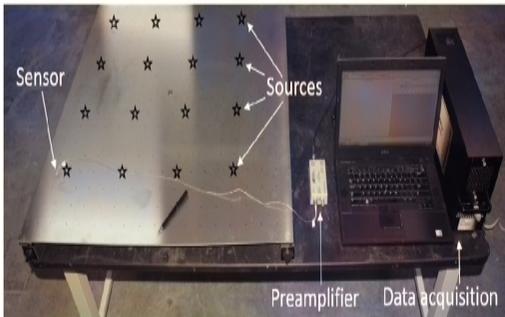


Fig. 2 Experimental Setup

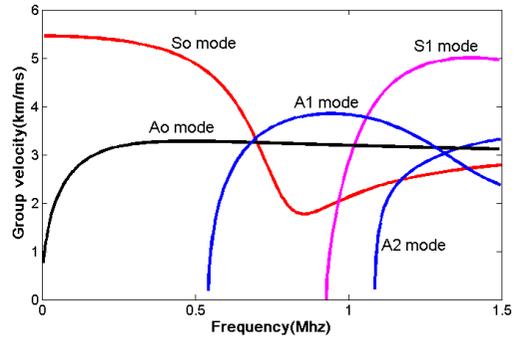


Fig. 3 Group velocity dispersion curves

dB 증폭되었다. 샘플링 주파수는 2 MHz이고 획득한 신호는 Matlab을 사용하여 후처리를 수행하였다.

모달 음향방출 이론에 의하면 실제 음향방출 신호는 분산성이 크고 다양한 모드들이 혼재된 파동으로, 평판에서도 동일한 현상이 관찰되는 것으로 알려져 있다. 따라서 모달 음향방출을 이용하여 평판의 위치 표정을 수행하기 위해서는 분산선도를 계산해야 한다. 대상 평판의 군속도 분산선도를 Disperse라는 프로그램¹⁰⁾을 이용하여 구한 결과가 Fig. 3에 제시되어 있다. 모드 A_1 의 차단 주파수인 540 kHz 이하에서는 S_0 와 A_0 , 두 개의 모드만 존재하는 것을 알 수 있다. 차단주파수 범위상속도는 무한대에 접근하고 군속도는 0에 접근하는 주파수를 말한다. 따라서 모드 A_1 의 차단 주파수 이하에서 음향방출 신호를 측정하면, 상대적으로 음향방출 신호의 에너지 전송 비율이 낮은 고차 모드가 측정 신호에 나타나는 것을 방지할 수 있다. 이는 모사 신호와 실험 신호의 유사성을 비교할 때 두 신호 사이의 상관계수가 향상되는 효과를 유발한다.

4. 실험 결과 검토

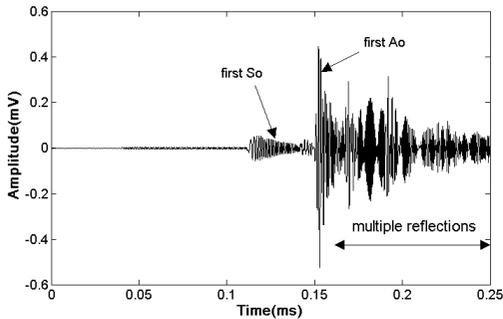
연심파단 시험을 수행하여 측정된 음향방출 신호를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 그림에 나타난 결과는 파단시험을 위치(650 mm, 320 mm)에서 수행하여 얻은 결과이다. 이 위치에서 센서 위치(60

mm, 190 mm)까지의 직선거리는 604 mm이다. Fig. 4(a)의 시간신호에 STFT(Short time Fourier transform)를 적용하여 구한 스펙트로그램을 Fig. 4(b)에 제시하였다. 스펙트로그램은 최댓값에 대한 상대 크기인 dB 단위를 사용하여 색깔로 표시하였다. 시간 신호와 스펙트로그램에서 직접 신호와 반사 신호가 서로 혼재되어 나타나는 것을 볼 수 있고 따라서 측정 신호로부터 첫 번째 도달 모드들을 분리하기 어렵다는 것을 확인할 수 있다. 또한 상대적인 크기로 스펙트로그램을 표시하기 때문에 시간 신호의 0.12 ms 부근에서 나타나는 작은 크기의 S_0 모드를 표시하지 못하는 문제점도 발생하는 것을 알 수 있다. 이 모드는 첫 번째로 측정되는 S_0 모드이므로 이 모드를 감지하지 못하면 정확한 위치 표정이 어려워진다.

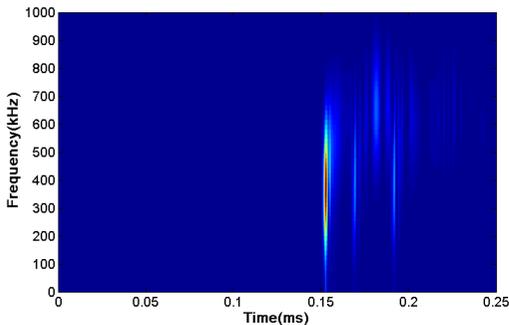
실험으로부터 구한 음향방출 신호에 첩릿변환을 적용하여 센서에 첫 번째로 도달한 S_0 , A_0 모

드를 분리하고 각 모드의 도달시간(t_{S_0} , t_{A_0})을 계산한 결과를 Fig. 5(a)에 제시하였다. 그리고 분리된 모드들의 스펙트로그램도 Fig. 5(b)에 표시하였다. 스펙트로그램으로부터 진폭과 기울기(시간/주파수)를 제외한 두 모드의 특징이 매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 스펙트로그램의 기울기는 모드의 비대칭성을 나타내는 첩릿변환의 매개변수로 이 값이 클수록 비대칭성이 크게 나타난다. 분리된 두 모드의 첩릿 매개변수를 Table 1에 나타내었다.

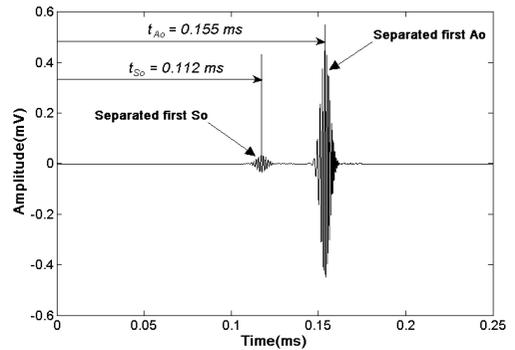
S_0 모드의 군속도는 Fig. 3에 보인 바와 같이 주파수 390 kHz에서 5,183 m/ms이다. 따라서 음원에서 센서까지의 직선거리 640 mm를 전파하기 위해서 0.116 ms가 소요된다. 이 값은 Table 1에 제시한, 첩릿변환에 의해 구한 도달시간 0.112 ms와 매우 유사한(3% 오차) 결과를 보인다. 반면에



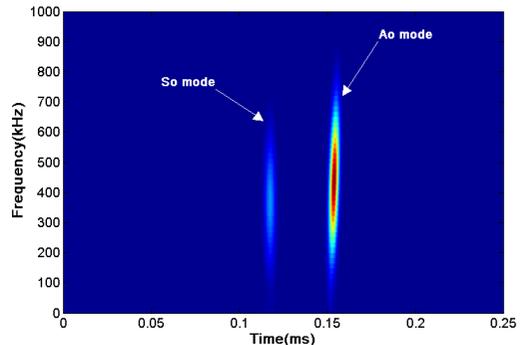
(a) Measured AE signals by lead break tests



(b) Spectrogram of the measured AE signal
Fig. 4 Measured AE signals and spectrogram



(a) Separated S_0 and A_0 mode



(b) Spectrogram of the separated modes
Fig. 5 Separated modes and spectrogram

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 센서에 도착하는 것으로 나타났다(9.8% 오차). 이는 A_0 모드의 분산성에 기인하는 것으로 생각할 수 있는데, 파동이 분산 특성을 가지면 진폭이 감소하고 지속시간이 길어지는 효과를 유발하여 파동이 서로 중첩되도록 만들기 때문이다.

첩변화율은 파동의 시간 진행에 따른 주파수 변화율을 파악할 수 있는 변수로 파동의 순간적인 주파수 변화율로 정의된다. 분산성이 커지면 주파수변조가 발생하고, 따라서 첩변화율도 증가하는 양상을 보인다. 즉 비분산 특성을 갖는 S_0 모드의 첩변화율은 분산성을 갖는 A_0 모드보다 작으며 거의 0에 가깝다. Table 1에서 보듯이 분리된 S_0 모드의 첩변화율은 1.69 kHz/ms로 A_0 모드의 첩변화율 -12.85 kHz/ms보다 매우 작고 거의 0에 가깝다는 것을 알 수 있다. 이러한 특징은 Fig. 5(b)의 스펙트로그램에서 확실히 파악할 수 있는데, 그림에서 S_0 모드의 중심선 경사는 어느 쪽으로도 기울지 않고 수평과 수직을 이루는 반면, A_0 모드의 중심선의 경사는 뒤쪽으로 기울어진 것을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 첩릿변환을 이용하여 모드를 분리하고 이로부터 도달시간을 정확히 구할 수 있을 뿐만 아니라, 분리된 모드들의 특성도 자세히 파악할 수 있다는 것을 알 수 있다. 두 모드의 도달시간을 식 (2)에 대입하면 음원에서 센서까지의 직선거리를 구할 수 있다. 계산 결과는 571 mm로 실제 거리 604 mm와 5.5%의 오차를 보이며, 따라서 추정 결과가 비교적 정확하다는 사실을 확인할 수 있다.

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

5. 결 론

이 논문에서는 다중 모드로 구성되어 있고 분산성을 갖는 음향방출 신호의 모드를 분리하고 첫 번째 도달시간을 추정하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 첩릿변환을 이용하여 첫 번째 도달 모드들을 분리한 후 모드들의 도달시간을 추정하였고, 음원과 센서 사이의 직선거리도 계산하였다. 첩릿변환을 이용하면 기존의 방법들에 비해 모드의 도달시간을 정확하게 결정할 수 있을 뿐만 아니라 분리된 모드들의 특성도 규명할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있었다.

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 강판에 연심파단 실험을 수행하였다. 실험 결과와의 비교를 통해, 제안된 방법을 사용하여 음향방출 신호의 도달 시간을 효과적으로 규명할 수 있음을 알 수 있었다.

References

1. T. Kundu, 2014, "Acoustic source localization", *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 1, pp. 25-38. (DOI:10.1016/j.ultras.2013.06.009)
2. A. Peelli, L. De Marchi, A. Marzani and N. Speciale, 2012, "Acoustic emission localization in plates with dispersion and reverberations using sparse PZT sensors in passive mode", *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, No. 2, pp. 25010.
3. M. Ruzzene, 2007, "Frequency-wavenumber domain filtering for improved damage visualization", *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 5, pp. 2116-2129.
4. T. Hayashi and K. Kawashima, 2003, "Single mode extraction from multiple modes of Lamb wave and its application to defect detection", *JSME International Journal Series A*, Vol. 46, No. 4, pp. 620-626. (DOI:10.1299/jsmea.46.620)
5. N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih and Q. Zhang, 1998, "The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for

- nonlinear and non-stationary time series analysis", *Proceeding of Royal Society London Series A*, Vol. 454, No. 5, pp. 993-995. (DOI:10.1098/rspa.1998.0193)
6. P. Tse and X. Wang, 2013, "Characterization of pipeline defect in guided waves based inspection through matching pursuit with the optimal dictionary", *NDT&E International*, Vol. 54, No. 2, pp. 171-182. (DOI:10.1016/j.ndteint.2012.10.003)
7. C. Y. Kim and K. J. Park, 2015, "Mode separation and characterization of torsional guided wave signals reflected from defects using chirplet transform", *NDT&E International*, Vol. 74, No. 1, pp. 15-23. (DOI:10.1016/j.ndteint.2015.04.006)
8. Y. W. Kim and K. J. Park, 2016, "Detection of axial defects in pipes using chirplet transform", *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 26-31.
9. G. Kitagawa and H. Akaike, 1978, "A procedure for the modeling of non-stationary time series", *Annals of the Institute of Statistical Mathematics (Part B)*, Vol. 30, No. 2, pp. 351-363. (DOI:10.1007/BF02480225)
10. B. Pavlakovic, M. Lowe, D. Alleyne and P. Cawley, 1997, "Disperse: a general purpose program for creating dispersion curves", *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 16, No. 1, pp. 185-192.