



단일 센서와 모드해석을 이용한 박판 음향방출의 위치 표정

Modal Acoustic Emission Source Localization in Thin Plates with One Sensor

박경조*†
 Kyung-Jo Park*†

(Received 16 September 2019, Revision received 04 December 2019, Accepted 04 December 2019)

Abstract: It was investigated how to take into account the modal nature of AE (Acoustic Emission) signals 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 correlations between the experimental and the simulated waveform are used to estimate the location of AE source. To validate the proposed source localization algorithm, experiments were performed on a steel plate using 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

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

정에 대한 연구는 최소 개수의 센서로 음향방출을 측정하여 위치표정을 수행하는 방향으로 진행되고 있다.¹⁾ 즉, 음향방출은 대부분 기계구조물에서 측정되기 때문에 구조물에서 전파되는 모드들의 특성이 측정신호에 나타나고 따라서 이러한 특성을 이용하면 작은 수의 센서를 사용해도 위치 표정을 정확하게 수행할 수 있다.²⁻⁴⁾

구조물의 모드 특성을 이용한 음향방출 기법을 적용할 때 나타날 수 있는 문제점은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 먼저 측정된 신호에는 다양한 반사 신호들이 중첩되어 나타나기 때문에 모드를

*† 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

분리하기 어렵다는 점이다.⁵⁾ 다음으로 위치 표정 불확실성의 가장 큰 원인이 되는 도착 시간(arrival time) 추정 오차가 발생할 확률이 높다는 점이다.⁶⁾ 마지막으로, 위치표정에 사용되는 대부분의 알고리즘은 센서에 가장 먼저 도착하는 신호만 사용할 뿐 나중에 도착하는 신호나 반사된 신호는 전혀 사용하지 않는다는 점을 들 수 있다. 그러나 나중에 도착하는 신호들에는 구조물의 모드 특성에 대한 많은 정보가 포함되어 있기 때문에 작은 수의 센서를 이용하여 위치표정을 수행할 때 유용하게 활용할 수 있다.⁷⁾

이 논문에서는 단일 센서를 사용하여 음향방출 위치 표정을 수행하는 새로운 방법을 제시한다. 제시하는 방법은 크게 세 단계로 구성되어 있다. 먼저 첩릿변환(chirplet transform)^{8,9)}과 분산선도(dispersion curves)를 이용하여 첫 번째 도착 모드를 분리하고 이를 이용하여 음원과 센서 사이의 직선거리를 추정한다. 다음으로 평판의 파동 전파를 모사할 수 있는 해석적 모델을 개발하고, 전 단계에서 분리한 첫 번째 모드를 이 모델에 적용하여 나중에 도착하는 모드들을 계산한다. 마지막으로 해석적으로 계산한 파동과 실험에서 측정된 신호 사이의 상관관계를 구하고 이를 활용하여 음원의 위치를 표정한다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 강판에 연심파단(pencil lead break, PLB) 시험을 수행하여 음향방출을 모사하고, 측정된 방출 신호에 제안된 위치 표정 기법을 적용하여 유용성을 입증한다.

2. 위치 표정 알고리즘

이 장에서는 세 단계로 구분하여 위치 표정을 수행하는 방법에 대해 기술한다.

2.1 신호분리와 직선거리 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 논문

의 저자들은 최근 모드 추출을 효과적으로 수행할 수 있는 방법을 개발하였고, 이를 음향방출 신호의 모드 분리에 이용하고자 한다.⁸⁾

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. 그 과정은 먼저 신호의 전체 영역에서 첩변화율(chirp rate)과 지속시간(duration)을 추정하는 과정부터 시작된다. 이 과정은 다의함수(ambiguity function)을 이용하여 수행하는데, 계산의 편의를 위해 첩변화율과 지속시간을 중립화할 수 있는 값으로 선택한다.

두 번째 단계에서는 추정된 첩변화율과 지속시간을 이용하여 시간, 주파수영역에서의 위치를 추정한다. 세 번째 단계에서는 국부적인 영역에서 첩변화율과 지속시간을 다시 추정한다. 추정된 첩변화율과 지속시간이 완벽한 것이라면 이 값은 최대가능추정자(maximum likelihood estimator)가 될 것이다. 마지막으로 해가 수렴할 때까지 시간과 주파수영역에서 두 번째, 세 번째 단계를 반복한다.

첩릿변환에 의해 분리된 음향방출 신호에 두 개 이상의 모드가 존재하면 두 모드(평판의 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 첩릿변환으로부터 에서 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.

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

2.2 다중경로 모델

다중경로 모델은 경계에서 반사된 신호를 모사하기 위한 해석적 모델이다. 이 모델은 첩릿변환으로 분리된 첫 번째 도착신호를 이용하여 경계에서 반사되어 센서에 나중에 도착하는 신호들을 재구성한다. 그 과정은 음선추적(ray tracking), 파동전파와 경계반사 신호 모사 그리고 신호의 포락선(envelope) 계산으로 구성되어 있다.

음선추적은 매체를 통해 전파되는 파동의 전파 경로를 계산하는데 널리 사용되는 방법이다.^{10,11)} 평판과 같은 물체의 Lamb파를 추적하는데도 자주 사용되고 있다. 평판에서 전파되는 음향방출 파동은 크게 하나의 최단 경로와 여러 개의 간접 경로로 나눌 수 있다. 최단 경로는 음원에서 센서까지 직선으로 구성되는 경로이다(Fig. 1의 적색선). 간접 경로는 평판의 경계에서 한 번 이상 반사된 뒤 센서에 도착하는 파동들의 경로를 말한다. Fig. 1의 흑색선은 한 번의 반사, 녹색선은 두 번의 반사가 발생한 후 센서에 도착하는 파동의 경로를 표시하고 있다.

음선추적 알고리즘에서 가진 주파수는 평판의 첫 번째 차단주파수 이하로 설정하였다. 이 주파수범위에서 전파될 수 있는 모드는 첫 번째 대칭 모드(S_0), 첫 번째 비대칭 모드(A_0)와 전단수평(SH_0 , shear horizontal) 모드뿐이다. 평판의 경계에 S_0 모드가 입사되면 S_0 와 SH_0 모드가 반사되지만 A_0 모드가 입사되면 오로지 A_0 모드만 반사된다.¹⁰⁾ 이때 모드변환(mode conversion)은 발생하지 않는다. 음향방출 센서는 SH_0 모드에 대한 민감도가 매우 낮기 때문에 본 연구에서는 이 모드의 반사에 의한 영향은 무시한다.

경계에서 반사 후 파동의 경로를 예측하기 위해 스넬의 법칙(Snell's law)을 이용한다. 모드변환이 발생하지 않으면 입사 모드의 파동수(wavenumber)는 반사 모드의 파동수와 같다. 즉, 평판의 경계는 Fig. 1에 보인 바와 같이 거울처럼 작용한다. 그림에서 흑색선은 경계에서 반사가 한 번만 발생한 후 센서에 도달한 간접 경로를 나타낸다. 이 경로를 계산하는 과정은 다음과 같다. 먼저 음

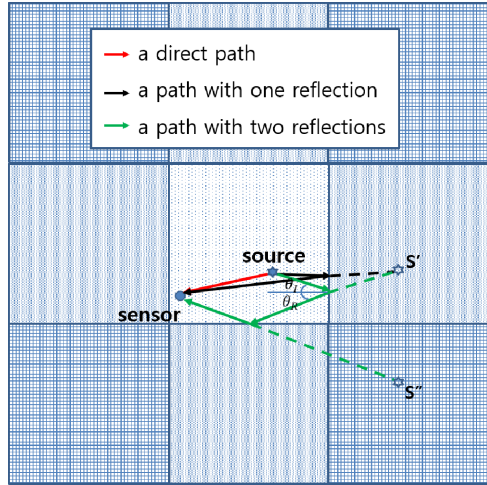


Fig. 1 Ray tracking from a source to a sensor

원을 반사 경계면에 대해 대칭 이동시킨다(그림의 S'). 그리고 센서와 대칭 이동된 음원을 직선으로 연결한다. 이 직선은 경계에서 하나의 교차점을 형성한다. 이 교차점을 원래의 음원과 연결하면 경로의 나머지 부분을 계산할 수 있다. 즉, 음원에서 방출된 파동은 교차점에서 한번 반사된 후 센서에 도착하는 간접 경로를 형성한다.

대칭 이동된 음원을 다른 경계에 대해 다시 한번 대칭이동하면 두 번째 모사 음원(그림의 S'')을 구할 수 있다. 두 번째 모사 음원과 센서를 직선으로 연결하면 하나의 교차점이 형성된다. 이 교차점과 첫 번째 모사 음원을 직선으로 연결하면 또 다른 교차점이 발생한다. 두 번째 교차점과 음원을 직선으로 연결하면 나머지 경로를 계산할 수 있다. 즉, 음원에서 방출된 신호는 첫 번째, 두 번째 교차점에서 각각 반사된 후 센서에 도착하는 간접 경로를 형성한다. 이에 대한 예를 Fig. 1의 녹색선으로 표시하였다.

음원에서 방출된 모드가 거리 d 만큼 전파된 후 발생하는 면외(out-of-plane) 변위 $u_p(d,t)$ 는 다음 식으로 계산할 수 있다.⁴⁾

$$u_p(d,t) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} \{ u_0(t) \} E(k,\omega) H_0^{(1)}(kd) \} \quad (3)$$

여기서 $u_0(t)$ 는 음원의 면외 변위, $E(k,\omega)$ 는

변위를 계산하고자 하는 모드의 가진함수 (excitation function), $H_0^{(1)}(kd)$ 는 제1종 0차 Hankel 함수, d 는 전파 거리, k 는 파동수, ω 는 각주파수이다. 또한 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 와 $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 는 각각 후리에변환, 역후리에변환을 나타내는 기호이다. 식 (3)을 이용하면 가진되는 모드에 대한 평판 Lamb파의 면외 변위를 계산할 수 있지만 음향방출의 경우 가진 변위($u_0(t)$)가 알려져 있지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 음원에서 센서까지 최단 경로로 도달하는 최초 도달신호를 이용하는 방법이 최근 제안되었다.¹¹⁾ 이를 이용하여 식 (3)을 재정리하면 다음과 같다.

$$u_p(d,t) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\left(\frac{d}{d_0}\right)^{-0.5} \mathcal{F}\{u_0(t)\} \exp\left(\frac{j2\pi f(d-d_0)}{c_p(f)}\right)\right\} \quad (4)$$

여기서 d_0 는 음원에서 센서까지의 직선거리, f 는 주파수이고 c_p 는 고려 대상 모드의 군속도이다. 따라서 식 (2)를 이용하여 직선거리 d_0 를 구하고 이를 식 (4)에 대입하면 첫 번째 도달신호 $u_p(d_0,t)$ 가 거리 d 만큼 전파하였을 때의 변위를 구할 수 있다.

식 (4)에서 구한 변위는 평판 경계에서의 반사를 고려하지 않고 구한 결과이다. 즉, 파동이 무한 평판을 전파하는 경우에 대한 해석이다. 그러나 실제 음향방출 시험에서 측정되는 파동은 센서에 도달하기 전에 경계에 부딪히고 되돌아오는 경우가 많다. 일반적으로 반사 파동의 특성은 입사각과 경계의 형태에 따라 달라진다. 경계에서 반사가 일어나면 국부적인 진동뿐만 아니라 위상변이 (phase shift)가 발생할 수 있다. 국부적인 진동은 센서까지 전달되지 않고 대부분 중간에서 소멸되므로 고려하지 않는다. 또한 위상변이에 의해 두 모드의 보강, 소멸간섭이 생길 수 있지만 위상변이의 크기가 작고 주파수에 무관하므로 이 연구에서는 이를 무시한다. 따라서 경계에서의 반사 파동을 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$u(d,t) = (\gamma)u_p(d,t) \quad (5)$$

여기서 γ 는 각 모드의 음향 감쇠계수이다.

경계에서 반사된 신호를 모두 합하면 센서에 도달하는 음향방출 신호를 모사할 수 있다. 즉, 모사 신호는 음선추적으로부터 구한 다중경로를 따라 전파되는 모든 S_0 모드와 A_0 모드를 합하여 구할 수 있다.

$$u_r(x,y) = \sum_{i=1}^q (u_{S_0}(d_i,t) + u_{A_0}(d_i,t)) \quad (6)$$

여기서 $u_{S_0}(d_i,t)$ 와 $u_{A_0}(d_i,t)$ 는 음원이 (x,y) 위치에 놓여 있을 때 나중에 도달하는 i 번째 S_0 모드와 A_0 모드의 변위를 나타내고, q 는 음선추적에서 고려하는 경로의 총 개수를 나타낸다.

위치 표정은 식 (6)으로부터 구한 모사 신호와 실험으로부터 측정된 음향방출 신호 사이의 상관관계 해석을 통해 달성할 수 있다. 즉, 시간영역에서 두 신호의 유사성을 비교하여 음원의 위치 (x,y) 를 표정할 수 있는데, 유사성 비교를 위한 지표로 신호의 포락선이 자주 이용된다. 비교 지표로 포락선을 사용하면 배경잡음을 제거할 수 있고 고주파수 해석이 필요 없는 장점이 있다. 모사 신호의 포락선은 힐버트 변환(Hilbert transform)을 이용하여 구할 수 있다.

$$S_s(x,y) = \left| u_r(x,y) + j\tilde{u}_r(x,y) \right| \quad (7)$$

여기서 $\tilde{u}_r(x,y)$ 는 $u_r(x,y)$ 의 힐버트 변환이고 j 는 허수변환자이다. 식 (7)을 이용하여 음원이 (x,y) 에 놓여 있을 때 반사 신호의 포락선을 구할 수 있다. 식 (7)을 계산하는데 사용된 위치가 실제 음원의 위치와 일치하면 모사 신호의 포락선과 실험 신호의 포락선 사이의 상관관계수는 매우 크게 나타날 것이다. 따라서 상관관계 해석을 통해 정확한 위치 표정을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

2.3 상관관계 영상화

상관관계 영상화 기법은 사전기반(dictionary-based) 알고리즘으로 모사 신호와 측정 신호 사이

의 유사성을 비교한다. 이 기법에서는 픽셀 위치 (x,y) 에 음원이 놓여 있다고 가정하여 모사 신호를 구하고, 이를 측정 신호와 비교하여 상관 계수를 다음과 같이 계산한다.

$$r(x,y) = \frac{\sum_{m=1}^p (S_S(x,y) - \bar{S}_S(x,y))(S_E - \bar{S}_E)}{\sqrt{\sum_{m=1}^p (S_S(x,y) - \bar{S}_S(x,y))^2 \sum_{m=1}^p (S_E - \bar{S}_E)^2}} \quad (8)$$

여기서 $S_S(x,y)$ 는 음원이 (x,y) 에 놓여 있다고 가정하고 구한 모사 신호의 포락선, S_E 는 측정 신호의 포락선이고 p 는 $S_S(x,y)$ 와 S_E 의 데이터 개수이다. 측정 신호의 포락선도 식 (7)을 이용하여 모사 신호와 동일한 방법으로 구할 수 있다. 각 신호의 평균은 다음과 같이 주어진다. $\bar{S}_S(x,y)$ 와 \bar{S}_E 는 모사신호와 측정신호의 평균이다.

3. 실험장치 및 결과분석

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

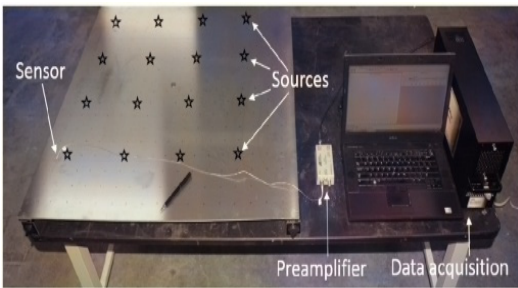
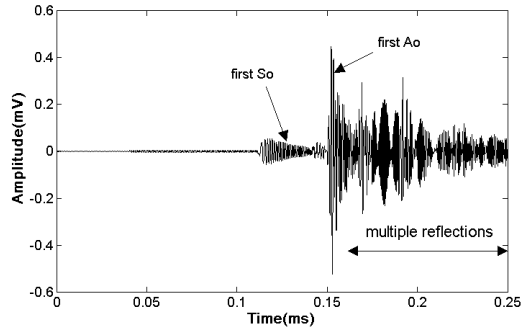
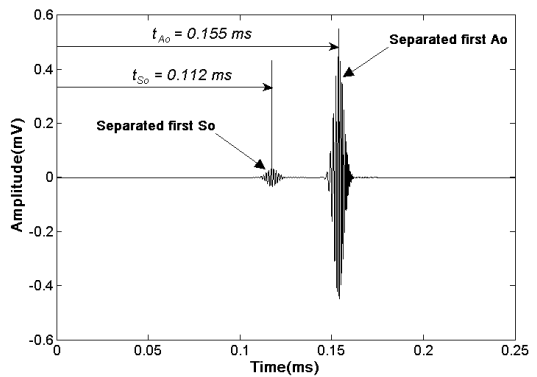


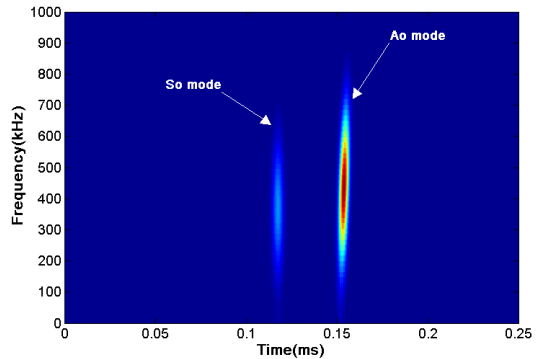
Fig. 2 Experimental Setup



(a) Measured AE signals by lead break tests



(b) Separated S_0 and A_0 modes



(c) Spectrogram of the separated modes

Fig. 3 Measured AE signals and separated modes

음향방출 신호를 측정하기 위해 하나의 광대역 압전식 음향방출 센서를 위치(60 mm, 190 mm)에 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 dB 증폭되었다. 샘플링 주파수는 2 MHz이고 획득한 신호는 Matlab을 사용하여 후처리를 수행하였다.

연심파단 시험을 수행하여 측정된 음향방출 신호를 Fig. 3(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. 실험으로부터 구한 음향방출 신호에 첩릿변환을 적용하여 센서에 첫 번째로 도달한 S_0 , A_0 모드를 분리하고 각 모드의 도달시간(t_{S_0} , t_{A_0})을 계산한 결과를 Fig. 3(b)에 제시하였다. 그리고 분리된 모드들의 스펙트로그램도 Fig. 3(c)에 표시하였다. 스펙트로그램으로부터 진폭과 기울기(시간/주파수)를 제외하면 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 매개변수 즉, 진폭, 시간위치, 주파수 위치 및 첩변화율, 지속시간 등을 Table 1에 나타내었다.

S_0 모드의 균속도는 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_0 모드의 균속도는 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 지속 시간이 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. 3(c)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.

두 모드 S_0 와 A_0 의 도달시간을 이용하여 구한 음원에서 센서까지의 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. 4에 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.

식 (7)을 이용하여 구한 모사 신호의 포락선과 측정 신호의 포락선을 비교하여 Fig. 5에 나타내

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 |

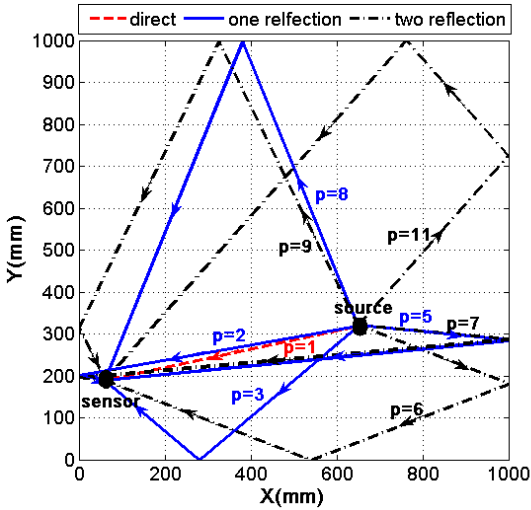


Fig. 4 Multiple paths for up to two reflections

었다. 그림으로부터 두 신호의 포락선이 잘 일치하는 것을 알 수 있으며(유사도 91.2%), 이로부터 첫 번째 도달 모드를 분리하고 분리된 모드들에 음선추적 알고리즘을 적용하면 나중에 도달하는 모드들을 정확하게 재구성할 수 있음을 확인할 수 있다. 두 포락선의 차이는 피크 부근에서 두드러지게 나타나는데, 이는 위상변이와 실제 평판의 불규칙한 모서리 형상에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 이 논문에서 경계에서 반사되는 파동의 감쇠계수는 $\gamma_{S_1} = 0.5$, $\gamma_{A_0} = 0.8$ 을 사용하였다.

두 군데의 다른 음원 위치에서 연신판단 실험을 수행하고 식 (8)을 이용하여 모사 신호와의 상관 계수를 구하여 이를 영상으로 표시한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 실제 음원 위치와 제안된 방법을 이용하여 추정된 음원을 그림에서 확인할 수 있다. 상관 계수가 높은 점들은 센서에 중심을 둔 원호에 주로 위치하는 것을 알 수 있으며, 이 원호들은 실제 음원과 교차한다. 따라서 상관 계수가 높은 점들은 원호의 반경방향보다는 접선방향으로 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 실제 음원과 추정 음원 사이의 거리는 각각 9, 21 mm로 계산되었다.

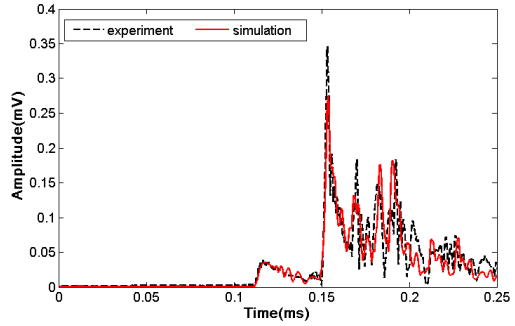
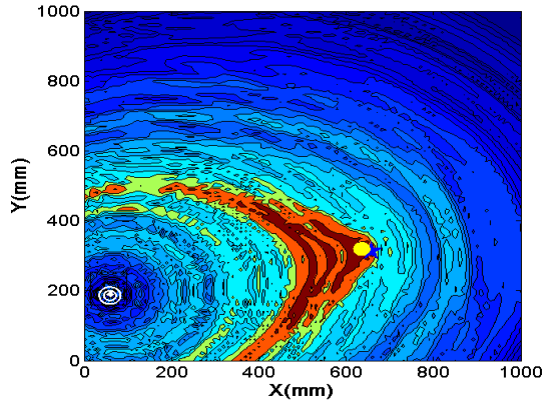
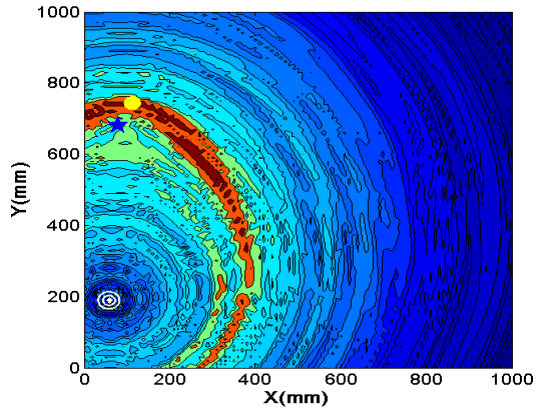


Fig. 5 Envelopes of the experimental data and the simulated signal



(a) Source at (650 mm, 320 mm)



(b) Source at (100 mm, 680 mm)

Fig. 6 Correlation images for lead break tests

(⊙ sensor, ● estimated source, ★ source)

4. 결 론

이 논문에서는 다중 모드로 구성되어 있고 분산성을 갖는 음향방출 신호의 모드 특성을 이용하여 음원의 위치 표정을 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 세 단계로 구성되어 있다. 먼저 칩릿변환을 이용하여 첫 번째 도달 모드들을 분리하고 음원과 센서 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 결과와의 비교를 통해, 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.

후 기

이 연구는 2019년 전남대학교 학술연구비 지원 사업(과제번호 2018-3340)의 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

References

1. T. Kundu, 2014, "Acoustic source localization", *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 1, pp. 25-38. (<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.06.009>)
2. 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. 4, pp. 427-431. (<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2004.03.009>)
3. R. Ernst, F. Zwimpfer and J. Dual, 2016, "One sensor acoustic emission localization in plates", *Ultrasonics*, Vol. 64, No. 2, pp. 139-150. (<https://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. (<https://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. (<https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/6/014>)
6. J. H. Kurz, C. U. Grosse and H. W. Reinhardt, 2005, "Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete", *Ultrasonics*, Vol. 43, No. 5, pp. 538-546. (<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.005>)
7. E. B. Flynn, M. D. Todd, P. Wilcox, B. W. Drinkwater and A. J. Croxford, 2011, "Maximum-likelihood estimation of damage location in guided-wave structural health monitoring", *Proceeding of Royal Society London Series A*, Vol. 467, No. 7, pp. 2575-2596. (<https://doi.org/10.1098/rspa.2011.0095>)
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. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.4.026>)
9. 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. (<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.04.006>)

박경조

10. J. S. Hall and J. E. Michaels, 2015, "Multipath ultrasonic guided wave imaging in complex structures", *Structural Health Monitoring*, Vol. 14, No. 4, pp. 345-348.
(<https://doi.org/10.1177/1475921715578316>)
11. J. B. Harley and J. F. Moura, 2013, "Sparse recovery of the multimodal and dispersive characteristics of Lamb waves" *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 133, No. 5, pp. 2732-2745.
(<https://doi.org/10.1121/1.4799805>)