

## 횡등방성 매질의 음원추적기법에 대한 실험적 연구

최승범, 전석원\*

Experimental Study on Source Locating Technique for  
Transversely Isotropic Media

Seung-Beum Choi, Seokwon Jeon\*

**Abstract** In this study, a source locating technique applicable to transversely isotropic media was developed. Wave velocity anisotropy was considered based on the partition approximation method, which simply enabled AE source locating. Sets of P wave arrival time were decided by the two-step AIC algorithm and they were later used to locate the AE sources when having the least error compared with the partitioned elements. In order to validate the technique, pencil lead break test on artificial transversely isotropic mortar specimen was carried out. Defining the absolute error as the distance between the pencil lead break point and the located point, 1.60 mm ~ 14.46 mm of range and 8.57 mm of average were estimated therefore it was regarded as thought to be 'acceptable' considering the size of the specimen and the AE sensors. Comparing each absolute error under different threshold levels, results showed small discrepancies therefore this technique was hardly affected by background noise. Absolute error could be decomposed into each coordinate axis error and through it, effect of AE sensor position could be understood so if optimum sensor position was able to be decided, one could get more precise outcome.

**Key words** Source locating, Partition approximation method, Transverse isotropy, Pencil lead break test

**초 록** 본 논문에서는 횡등방성 매질에 적용 가능한 음원추적기법을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다. 분할근사법을 바탕으로 매질의 속도 이방성을 고려하였으며 이 방법은 단순한 계산을 통하여 음원추적을 가능하게 한다. AE 측정 결과로부터 P파 도달시간을 결정할 때 Two-step AIC 알고리즘을 적용하였고 이 실험결과와 분할된 요소를 비교하여 최소 오차 요소를 음원의 위치로 결정하였다. 개발된 알고리즘의 적용성을 검증하기 위하여 시멘트 모르타르를 이용한 인공 횡등방성 시험편을 제작하고 연필심 압절을 음원으로 하는 일련의 시험을 수행하였다. 연필심 압절 위치와 음원추적 결과 간의 거리를 절대오차로 정의할 때, 1.60 mm ~ 14.46 mm의 오차범위와 8.57 mm의 평균오차가 측정되었고 이는 시험편과 AE 센서의 크기를 고려할 때 수용할 만한 수준인 것으로 판단되었다. 또한, 서로 다른 검출한계 수준에 따른 음원추적 결과를 비교했을 때 비슷한 수준의 오차가 측정되어 본 기법은 실험 시 배경잡음의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다. 측정된 절대오차를 각 축방향 오차로 분해하여 AE 센서 부착위치의 영향을 파악할 수 있었으며 센서의 최적 위치를 결정하면 더 정밀한 음원추적 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심어** 음원추적, 분할근사법, 횡등방성, 연필심 압절시험

Received: Jan. 30, 2015

Revised: Feb. 17, 2015

Accepted: Feb. 18, 2015

\*Corresponding Author: Seokwon Jeon

Tel) +8228808807, Fax) +8228718938

E-Mail) sjeon@snu.ac.kr

1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 151-744, Korea

## 1. 서 론

미소파괴음(AE, Acoustic Emission) 신호는 균열의 생성, 전파 등 재료손상에 의해 에너지가 방출될 때 발생하는 탄성파로서 대개 압전소자 센서에 의해 측정 가능하다. 이는 대표적인 비파괴시험의 일종으로 재료 내부의 균열거동을 파악하는 데 장점이 있으며 다수의 센

서로 동시에 미소파괴음을 측정할 경우 음원추적(source locating), 모멘트 텐서 해석(moment tensor analysis) 등을 통해 미시적인 균열의 성장, 종류, 진행방향 등을 파악할 수 있다<sup>[1]</sup>.

AE 센서를 통하여 측정된 파형들의 도달시간 차이와 매질에서의 탄성과 전파속도로부터 음원의 위치를 결정할 수 있다. 이를 음원추적이라 하며 매질 내 탄성과 전파속도가 미지변수가 아닌 경우 4개 이상의 AE 신호를 동시에 측정하면 3차원 상의 음원위치가 추측된다. 다양한 음원추적기법들이 제안되어왔으나 이들 중 다수는 매질을 통하여 전파되는 탄성과 속도를 일정한 값으로 가정한다.

암석은 입자 또는 조직의 배열에 따라 방향성을 갖고 이 방향에 따라 역학적, 열적, 수리적 특성이 다른 이방성을 나타내는 경우가 대부분이다. 특히 층리, 엽리 등 평면구조가 발달한 암석은 횡등방성(transverse isotropy) 매질로 분류할 수 있으며 탄성과 속도 역시 진행방향과 시험편 내 등방평면 사이 방향에 의존적이다. 따라서 일정한 탄성과 속도를 가정하는 음원추적기법을 이러한 횡등방성 매질에 적용할 경우 신뢰성 있는 결과를 기대하기 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 횡등방성 매질에 적합한 음원추적기법을 개발하였다. 분할근사법(partition approximation method)을 바탕으로 매질의 속도 이방성을 반영하였으며 탄성과 도달시간 결정 시 two-step AIC(Akaike Information Criterion) 알고리즘을 적용하여 실험적 오차 및 배경잡음의 영향을 최소화하였다. 개발된 기법의 검증을 위하여 등방평면 구조를 지닌 인공 이방성 시험편을 제작하였고 이에 대한 연필심 압절 시험을 수행하여 제안된 기법의 오차수준 및 특성을 파악하였다.

## 2. 배경이론

### 2.1 횡등방성 매질에 적합한 음원추적기법

시험편 내 균열의 생성 및 전파는 미소파괴음을 발생시키며 이는 매질을 따라 탄성파의 형태로 전파되어 간다. 이 미소파괴음을 복수의 센서로 측정하여 각 센서간 탄성파의 도달 시간차( $\Delta t$ )를 계산하면 음원의 위치를 결정할 수 있다. 음원의 위치를 결정하는 알고리즘으로는 최소자승법(least square method), 차분근사법(difference approximation method), 격자법(table look-off method), 분할근사법(partition approximation method) 등이 알려져 있다<sup>[2]</sup>. 탄성파의 전파 방향에 관계없이 일정한 전파 속도를 가정할 수 있는 등방성 매질의 경우,

상기 알고리즘 모두 만족할 만한 음원추적 결과를 보인다. 그러나 횡등방성 매질은 탄성파의 전파방향과 매질 내 등방평면 사잇각에 의하여 전파속도가 결정되므로 상기 알고리즘 중 일부는 적용이 불가능하거나 매우 복잡한 방정식의 풀이를 요구한다.

최소자승법과 차분근사법은 미지의 음원위치 ( $x, y, z$ )를 독립변수로 하여 일련의 목적함수를 정의하고 이 목적함수의 잔차를 최소화하는 방식으로 해를 구한다. 이를 등방성 매질에 적용할 경우, 일정한 탄성과 속도를 적용할 수 있기 때문에 목적함수 및 연립방정식 구성이 단순하여 적은 계산량으로 음원의 위치를 특정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이 연립방정식은 비선형이기 때문에 적절한 초깃값을 대입하지 않으면 좋은 해를 얻을 수 없다는 단점이 존재하고 또한 횡등방성을 고려할 경우 미지의 음원에서 각 센서 방향으로의 탄성과 속도가 모두 다르기 때문에 미지수의 개수가 증가하여 함수 및 방정식의 구성이 매우 복잡해진다.

격자법과 분할근사법은 매질을 다수의 격자(node) 혹은 요소(element)로 분할하여 이를 잠재적인 음원으로 가정한다. 잠재 음원의 좌표와 센서의 좌표를 바탕으로 거리를 구하고 이를 탄성과 속도로 나누어 잠재적 음원에서 각 센서까지의 탄성과 도달 시간차를 계산한다. 분할된 모든 요소에 대하여 각 센서 별 도달 시간차( $\Delta t$ )를 계산할 수 있으므로 이를 실험결과와 비교하여 최소 오차를 갖는 요소의 위치를 음원의 위치로 결정한다<sup>[3]</sup>. 분할된 요소가 많을수록 계산량이 증가한다는 단점이 존재하나 알고리즘이 매우 단순하고 전파 방향에 따른 P파 속도 프로파일을 알 수 있다면 횡등방성 매질에도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 사각형 형태의 요소를 적용할 경우, 격자법은 각 요소의 모서리를 잠재 음원으로 가정하고 분할근사법은 각 요소의 중심을 음원의 위치로 가정하므로 분할근사법의 계산량이 상대적으로 적으며, 요소를 충분히 작게 분할하면 그 차이는 크지 않다. 따라서 본 논문에서는 분할근사법을 적용하여 횡등방성 매질에서의 음원추적을 수행하였으며 그 과정은 Fig. 1과 같다.

### 2.2 횡등방성 매질의 탄성과 속도 결정

음원추적을 위해서는 음원에서 각 센서까지의 탄성과 도달시간을 계산하는 것이 필수적이다. 이는 탄성파의 속도로부터 얻어지며 P파와 S파 모두 음원추적에 적용 가능하다. 횡등방성 매질을 따라 전파되는 탄성파는 P파( $V_p$ ), 등방평면에 수직하게 진행하는 S파( $V_{SV}$ ), 등방평면에 평행하게 진행하는 S파( $V_{SH}$ )로 구별된다. 일반적으로 S파는 P파에 비하여 진폭이 크기 때문에 배경잡

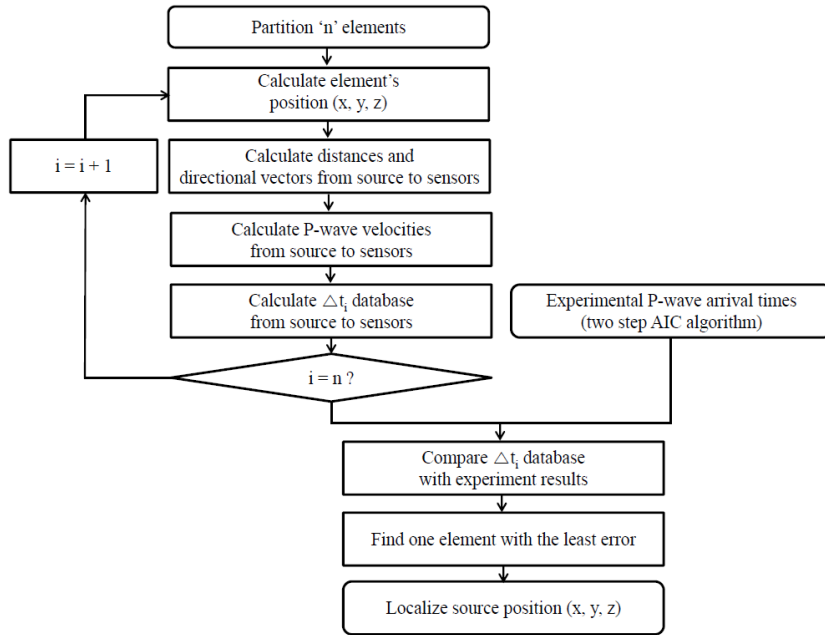


Fig. 1. Flow chart of partition approximation method used in this study

음의 영향을 적게 받는 것으로 알려져 있으나<sup>4)</sup> AE 센서를 이용한 측정으로는 두 S파의 구분이 어렵기 때문에 본 논문에서는 P파( $V_p$ )를 이용한 음원추적을 수행하였다.

파의 진행방향과 등방평면의 수직벡터 사이각을  $\alpha$ 로 정의할 때, 이에 따른 각 탄성파 속도는 식 (1)과 같다<sup>5,6)</sup>.

$$\begin{aligned} \rho V_p^2(\alpha) &= \frac{1}{2} [C_{33} + C_{44} + (C_{11} - C_{33})\sin^2\alpha + D(\alpha)] \\ \rho V_{SV}^2(\alpha) &= \frac{1}{2} [C_{33} + C_{44} + (C_{11} - C_{33})\sin^2\alpha - D(\alpha)] \\ \rho V_{SH}^2(\alpha) &= \frac{1}{2} (C_{11} - C_{12})\sin^2\alpha + C_{44}\cos^2\alpha \\ D(\alpha) &= \sqrt{[C_{33} - C_{44}]^2 + 2[2(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})]\sin^2\alpha} \\ &\quad + [(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})^2 - 4(C_{13} + C_{44})^2]\sin^4\alpha} \end{aligned} \quad (1)$$

$\rho$ 는 매질의 밀도이며  $D(\alpha)$ 는 매질의 독립상수에 의해 결정되는 식이다. 독립상수  $C_{ij}$ 는 특정 각도에서의 탄성파 속도와 매질의 밀도로 계산되며 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} C_{11} &= \rho V_p^2(90^\circ) & C_{12} &= C_{11} - 2\rho V_{SH}^2(90^\circ) \\ C_{33} &= \rho V_p^2(0^\circ) & C_{44} &= \rho V_{SH}^2(0^\circ) = \rho V_{SV}^2(0^\circ) = \rho V_{SV}^2(90^\circ) \\ C_{13} &= -C_{44} + \sqrt{4\rho^2 V_p^4(45^\circ) - [2\rho V_p^2(45^\circ) \times (C_{11} + C_{33} + 2C_{44})]} \\ &\quad + [(C_{11} + C_{44})(C_{33} + C_{44})]} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서  $\alpha$ 가  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  일 때의 P파 속도와  $\alpha$ 가  $0^\circ$  일 때의 S파 속도를 측정하면 임의의  $\alpha$ 에 대한 P파 속도 프로파일을 얻을 수 있다. 시험편의 크기, 등방평면의 방향, 요소의 크기 등 횡등방성 시험편의 기하학적 구조가 결정되면 요소(잠재 음원)에서 각 센서까지의 거리와 진행 방향에 따른  $\alpha$ 를 계산할 수 있다. 이를 식 (1)에 적용하면 방향에 따른 탄성파 속도를 얻을 수 있어 각 센서까지의 도달시간 차이( $\Delta t$ )를 계산할 때 매질의 속도 이방성을 알고리즘 내에 반영할 수 있다.

### 2.3 AE 측정을 통한 P파 도달 시간 결정

상술한 것처럼 분할근사법은 2.2절을 통해 계산한 요소-센서 간 도달시간 차이와 실험을 통해 측정한 P파 도달시간 차이를 비교하여 오차가 가장 작은 요소를 음원으로 결정한다. 따라서 정밀한 P파의 도달시간 결정이 매우 중요하다. 본 논문에서는 two-step AIC 알고리즘을 적용하여 P파 도달시간을 결정하였으며 알고리즘의 적용 순서는 다음과 같다<sup>7)</sup>.

특성함수(CF, Characteristic Function)를 식 (3)과 같이 정의한 후 이를 Fig. 2(a)와 같이 탄성파 신호에 적용하여 신호를 증폭시킨다.

$$CF(i) = |x(i)| + R|x(i) - x(i-1)| \quad (3)$$

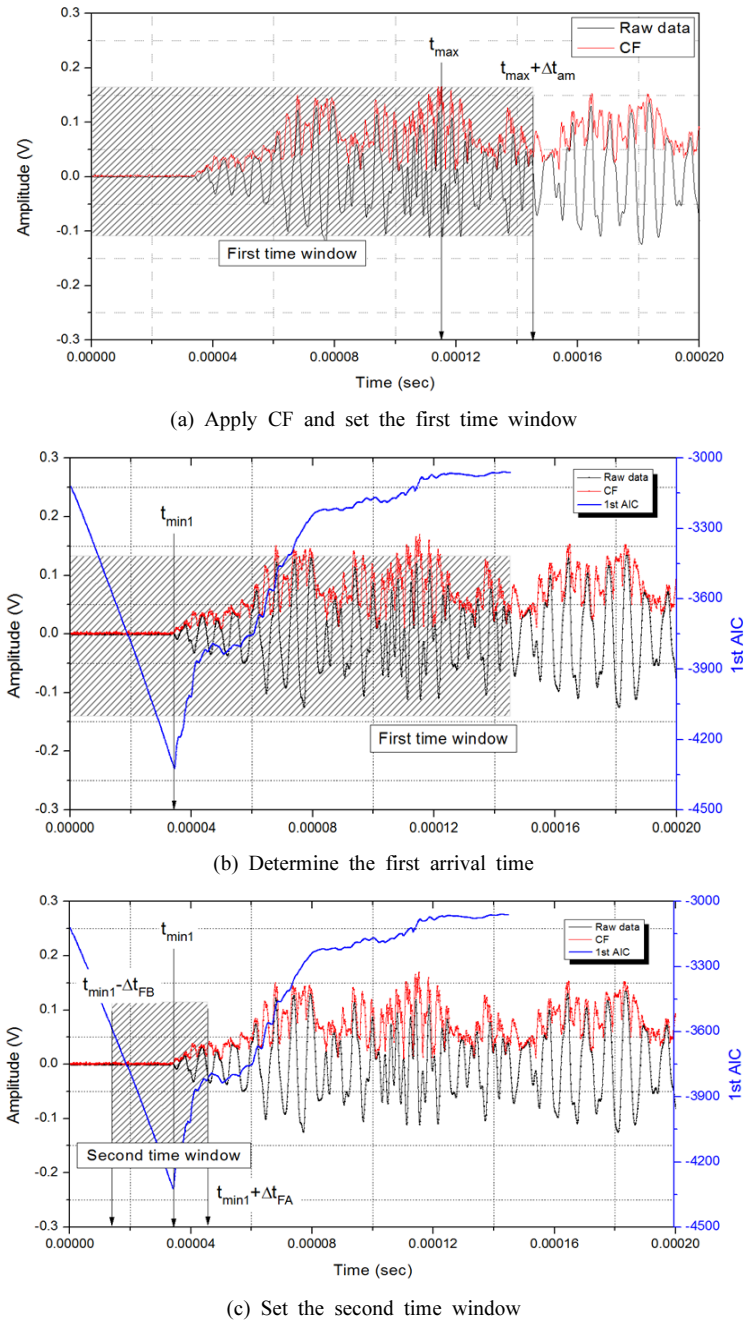
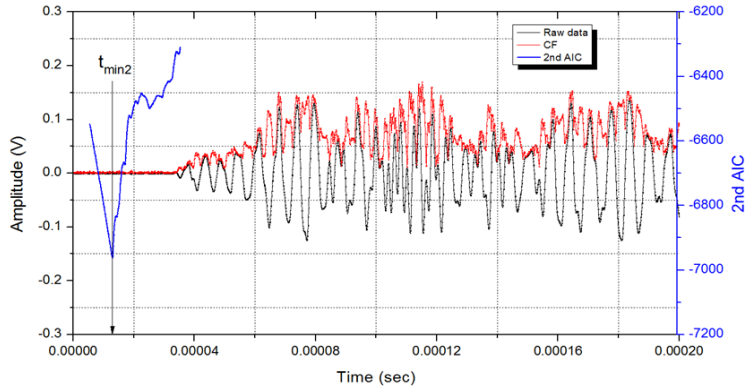


Fig. 2. Sequence of two step AIC algorithm

$x(i)$ 는 취득된 파형의  $i$ 번째 신호,  $R$ 은 특성함수에 적용된 상수로서 매질의 특성을 반영한다. 시행착오(trial and error) 방법을 통해 실험적, 경험적으로 결정되며 본 논문에서는  $R=4$ 를 적용하였다.

정확한 도달 시간을 결정하기 위하여 적절한 알고리즘 적용범위(time window) 설정이 중요하다. Two-step AIC 알고리즘의 첫 번째 단계에서는 특성함수  $CF$ 의 최댓값( $t_{max}$ )에  $\Delta t_{am}$ 을 더한 만큼만 적용범위(first time



(d) Determine the final arrival time

Fig. 2. Continued.

window)로 사용하는데 이는 배경잡음 및 반사파의 영향을 최소화하기 위함이다.  $\Delta t_{am}$  역시 시행착오 방법으로 결정되며 본 논문에서는  $\Delta t_{am} = 20 \mu s$ 을 적용하였다. 이 범위의 증폭신호에 대하여 식 (4)의 AIC 함수를 적용한다. Fig. 2(b)에 표시한 바와 같이 계산된 AIC 함수의 최솟값이 첫 번째 도달시간( $t_{min1}$ )을 의미한다.

$$AIC(k) = k \log(\text{var}(x[1:k])) + (N - k - 1) \log(\text{var}(x[k+1:N])) \quad (4)$$

$k$ 는 신호의 순서,  $\text{var}(x[1:k])$ 는 첫 번째부터  $k$  번째 신호까지의 분산,  $N$ 은 신호의 길이이다.

초동의 진폭이 상대적으로 매우 작은 경우, AIC 함수의 결과가 부정확할 수 있다<sup>[7]</sup>. 이러한 한계를 보완하기 위하여  $t_{min1}$ 을 기준으로 전후에 각각  $\Delta t_{FB}$ ,  $\Delta t_{FA}$  만큼의 범위를 두 번째 적용범위 (second time window)로 지정하여(Fig. 2(c)) 다시 한 번 AIC 함수를 적용한다. 이때 계산된 최솟값이 최종적인 탄성파의 도달 시간( $t_{min2}$ )에 해당한다(Fig. 2(d)).  $\Delta t_{FB}$ ,  $\Delta t_{FA}$ 는 두 번째 적용범위 설정을 위해 도입된 상수로서 앞의 상수들과 같이 경험적으로 결정된다. 본 논문에서는 각각  $30 \mu s$ ,  $10 \mu s$  적용하였다.

Two-step AIC 알고리즘을 통한 P파의 도달시간 결정은 배경잡음(noise) 수준에 관계없이 비교적 일관적인 결과를 도출하는 것으로 알려져 있으며<sup>[8]</sup>, AE 측정 시 설정하는 측정의 검출한계(threshold)의 영향을 받지 않는다.

### 3. 실내시험

#### 3.1 시료

매질의 불균질성을 최소화하기 위하여 시멘트 모르타르를 이용한 층상구조의 인공 횡등방성 시험편을 제작하였다. 유니온 사의 초속경 모르타르 그라우트 JM을 사용하였고 매질의 이방성 정도를 극대화하기 위하여 서로 다른 시멘트/물 배합비를 갖는 두 개의 층이 교대하도록 시험편을 제작하였다. 각 층의 시멘트/물 배합비는 100:20, 100:16이며 높이는 10 mm이다. 직육면체 형태의 시험편은 그 크기가 170.0 mm x 171.5 mm x 170.0 mm이며, 5일 양생 후 실내시험을 수행하였다. 제작된 시험편의 형상은 Fig. 3(a)와 같다.

또한, 매질의 P파 속도를 측정하기 위하여 동일한 직육면체의 시험편을 다수 제작한 후 방향 코어링을 실시하였다.  $\theta$ 가  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 에 해당하는 원주형 시험편을 제작하여(Fig. 3(b)) 양 끝단을 연마하고 5일 양생 후 탄성파 속도를 측정하였다.

#### 3.2 실험장비

매질의 P파 속도 프로파일을 얻기 위하여 특정 각에서의 탄성파속도가 필요하며 OYO사의 Sonic Viewer SX(Model 5251)을 이용하여 이를 측정하였다(Fig. 4(a)). Sonic Viewer는 본체, 케이블, 트랜스듀서로 구성되며 이를 이용하여 식 (2)의 독립상수와 연관된  $\theta$ 가  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  일 때의 P파 속도,  $\theta$ 가  $0^\circ$  일 때의 S파 속도를 측정하였다.

음원추적을 위하여 Physical Acoustics Corporation(PAC)

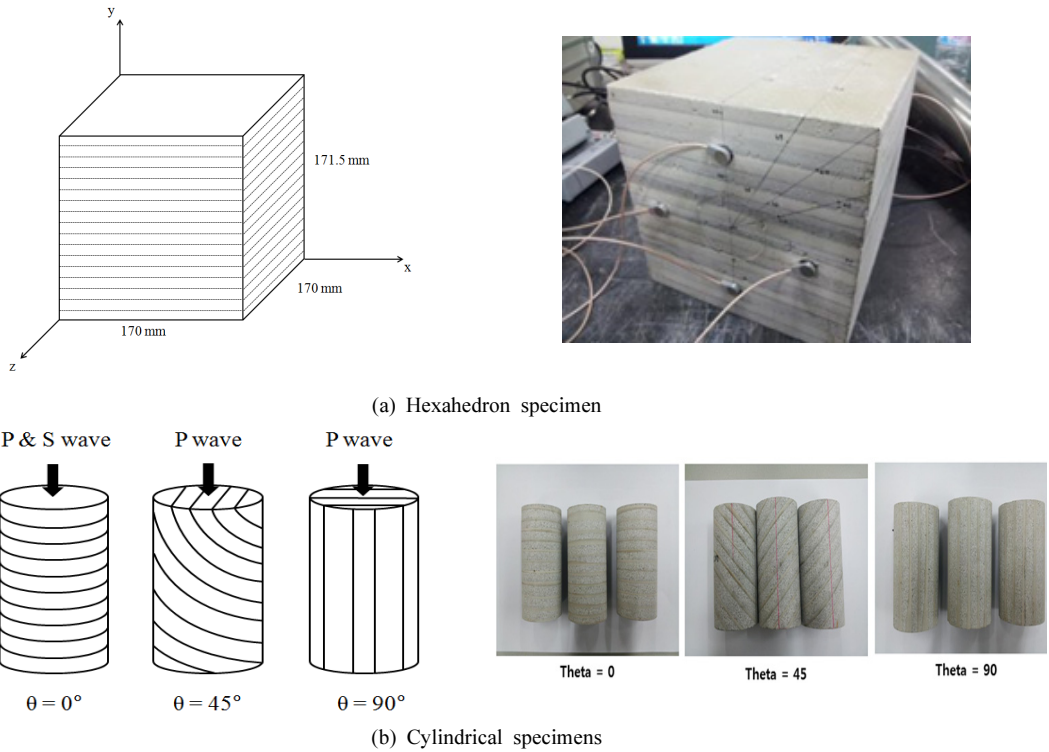


Fig. 3. Specimen preparation

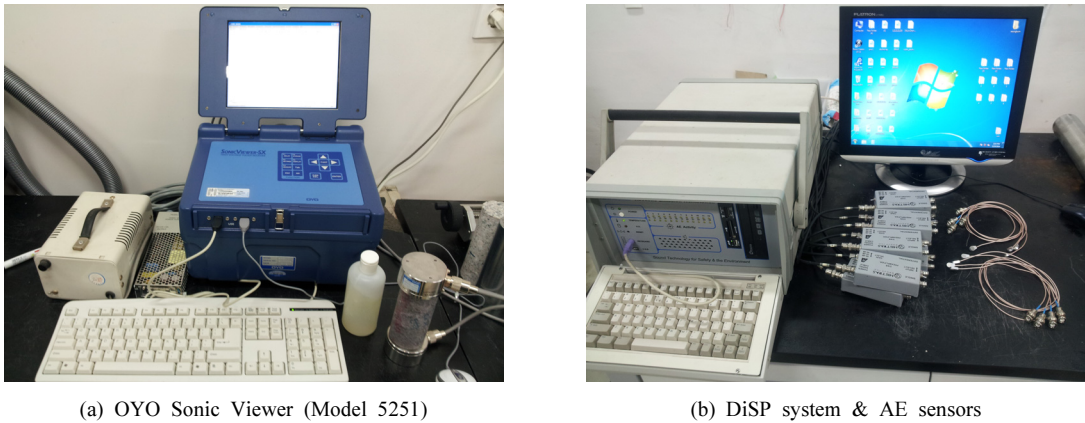


Fig. 4. Photographs of testing apparatus

사의 DiSP 시스템과 HAGISONIC 사의 AE-SC 센서를 사용하였다(Fig. 4(b)). DiSP 시스템은 본체, 케이블, 전치증폭기(pre-amplifier)로 구성되며 AE 센서에서 측정되어 변환된 전기신호를 증폭한 후 본체에 저장한다. 총 8개의 채널을 설정하여 실험하였으며 음원정의시간(Event Definition Value) 내에 6개 이상의 채널에서 신

호를 검출하면 하나의 음원에서 발생한 신호로 결정하였다.

AE 센서의 측정부 직경은 8.25 mm이며 공진주파수는 150 KHz, 주파수 대역은 50~1000 kHz 이다. 에폭시 접착제를 이용하여 8개의 센서를 시험로 표면에 부착하였고 센서에서 검출된 신호는 전치증폭기를 통해

60 dB로 증폭하였다.

신호의 적절한 취득을 위해서 AE 검출한계(threshold), PDT(Peak Definition Time), HDT(Hit Definition Time), HLT(Hit Locking Time) 등의 채널 설정이 중요하다. AE 검출한계는 채널의 감도를 결정하는 기본변수로서 잡음 수준에 따라 결정하며, 파형측정 과정에서 사용되는 PDT, HDT, HLT는 매질의 특성을 반영하며 충분히 긴 파형이 기록되도록 설정하였다. 실험환경 상, 약 30~35 dB 수준이 배경잡음의 한계였으므로 이를 감안하여 본 연구에서는 검출한계를 30 dB, 35 dB, 40 dB로 달리 적용하였다. PDT, HDT, HLT는 장비 사용설명서와 시행착오적 방법을 통하여 본 실험에 적합한 값을 설정했으며 각각 50  $\mu$ s, 150  $\mu$ s, 300  $\mu$ s로 설정하였다. 정밀한 파형 취득을 위하여 10 MHz의 신호취득속도(sampling rate)를 적용하였고, 1~3000 kHz 사이의 주파수 대역을 갖도록 아날로그 필터를 적용하였다. 또한, 40  $\mu$ s의 트

리거 이전 시간(pre-trigger time)과 1024  $\mu$ s의 신호 길이를 설정하여 충분한 길이의 파형을 취득하였다.

### 3.3 실험방법

개발된 음원추적기법을 검증하기 위하여 연필심 압절 시험(pencil lead break test)을 수행하였다. 이 시험에서는 특정 위치에 연필심을 압절하여 신호를 발생시킨 후, 이 신호를 AE 센서로 취득하고 알고리즘으로 처리하여 압절 위치를 역추적하였다. 연필심 압절 위치와 음원추적 결과 사이의 차이를 바탕으로 알고리즘의 적용성을 검증할 수 있다. 센서의 부착위치는 Table 1과 같다.

음원에서 각 센서까지 전파되는 탄성파가 다양한 사잇각  $\alpha$ 를 가질 수 있도록 다수의 음원을 시료 표면에서 발생시켰으며 그 발생위치는 Table 2와 같다.

또한, 알고리즘에 대한 검출한계(threshold)의 영향을

Table 1. Position of AE sensors

AE sensor number	x coordinate (mm)	y coordinate (mm)	z coordinate (mm)
sensor 1	85.0	140.0	170.0
sensor 2	30.0	85.0	170.0
sensor 3	140.0	75.0	170.0
sensor 4	85.0	30.0	170.0
sensor 5	85.0	150.0	0.0
sensor 6	150.0	85.0	0.0
sensor 7	20.0	85.0	0.0
sensor 8	85.0	20.0	0.0

Table 2. Position of AE sources

Hit number	x coordinate (mm)	y coordinate (mm)	z coordinate (mm)
Hit 1	85.0	85.0	170.0
Hit 2	125.0	85.0	170.0
Hit 3	165.0	85.0	170.0
Hit 4	119.6	105.0	170.0
Hit 5	154.3	125.0	170.0
Hit 6	113.3	113.3	170.0
Hit 7	141.6	141.6	170.0
Hit 8	105.0	119.6	170.0
Hit 9	125.0	154.3	170.0
Hit 10	85.0	125.0	170.0
Hit 11	85.0	165.0	170.0
Hit 12	170.0	85.0	120.0
Hit 13	170.0	85.0	60.0
Hit 14	170.0	134.1	120.0
Hit 15	170.0	134.1	60.0
Hit 16	134.9	171.5	120.0
Hit 17	134.9	171.5	60.0
Hit 18	85.0	171.5	120.0
Hit 19	85.0	171.5	60.0

파악하기 위하여 동일한 실험을 30 dB, 35 dB, 40dB 대하여 세 번 반복하였다. 이는 30~35 dB 사이에서 측정되는 실험환경 상 배경잡음 한계를 고려하여 설정하였다.

#### 4. 시험결과

##### 4.1 P파 속도 프로파일

Fig. 3(b)의 시편에 대하여 P파와 S파 속도를 측정하였고 그 결과를 Table 3에 정리하였다. 각  $\theta$ 는 시료의 형상, 즉 시료 내부 등방평면의 방향에 따라 결정되며 본 논문에서는 이를 식 (1), 식 (2)의  $\alpha$ 와 동일하도록 설정하였다. 측정된 탄성과 속도를 식 (1), 식 (2)에 대입하여 얻은 P파 속도 프로파일은 Fig. 5와 같다.

탄성과 속도 측정 결과, P파 속도의 최댓값은 탄성과의 진행방향과 매질의 등방평면이 평행한 경우인  $\theta=0^\circ$ 에서 측정되었다. 최댓값은 4,441 m/s이며 최솟값은  $\theta=90^\circ$ 의 경우로 3,996 m/s이다. 따라서, 속도 이방성비 ( $V_{max}/V_{min}$ )는 약 1.11로 해당 매질은 낮은 속도 이방성비를 갖는 것으로 측정되었다. 이러한 속도 이방성은 분할근사법의 각 요소에서 센서까지의 P파 도달시간 차를 계산할 때 반영된다.

##### 4.2 음원 결정

음원에서 발생된 탄성파는 매질을 따라 이동하여 각

Table 3. P-wave and S-wave velocities

Angle ( $\theta$ )	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
P wave velocity (m/s)	3996	4212	4441
S wave velocity (m/s)	3002	-	-

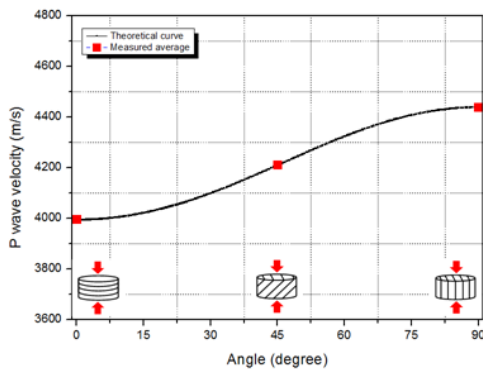


Fig. 5. P wave velocity profile

센서에서 측정된다. 센서에서 측정된 신호들은 일정 시간 내에 취득되어야 동일한 음원(이벤트)에서 발생한 신호로 간주되며 이를 음원정의시간(Event Definition Value)이라 한다. 본 논문에서는 분할된 각 요소에서 센서까지 도달하는 시간차 중 최댓값을 기준으로 음원정의시간을 설정했으며, 시험편 자체의 이방성과 불균질성을 고려하여 약  $57 \mu s$ 의 값을 적용하였다. 즉, 측정된 모든 신호에 대해 two-step AIC 알고리즘을 적용하여 P파 도달시간을 계산하고,  $57 \mu s$  이내에 최소 6개 이상의 센서에서 측정된 신호들은 한 음원에서 발생한 신호로 간주하여 그 위치를 추적하였다.

Fig. 6은 검출한계 30 dB, Hit 13의 예이다. 연필심 압절에 의해서 발생된 탄성파 중 6번 센서가 가장 빠르게 신호를 취득했으며 2번 센서가 가장 나중에 신호를 취득하였다. 도달시간 차이가 약  $26.93 \mu s$ 이므로 위의 8개의 센서가 취득한 신호들을 하나의 음원에서 발생한 것으로 간주하여 그 위치를 추적하였다.

##### 4.3 음원추적결과

170.0 mm × 171.5 mm × 170.0 mm 크기의 시료를 x, y, z 방향으로 각각 170 등분하여 총 4,913,000개의 요소로 분할하였다. 정밀한 결과를 얻기 위하여 각 요소가 약 1 mm 길이를 갖는 직육면체가 되도록 분할하였으며 각 요소의 중심을 잠재 음원의 위치로 가정했다. Table 2에 표기된 위치에서 연필심을 압절하여 신호를 발생하였고 음원정의시간 내 취득된 신호에 대하여 상

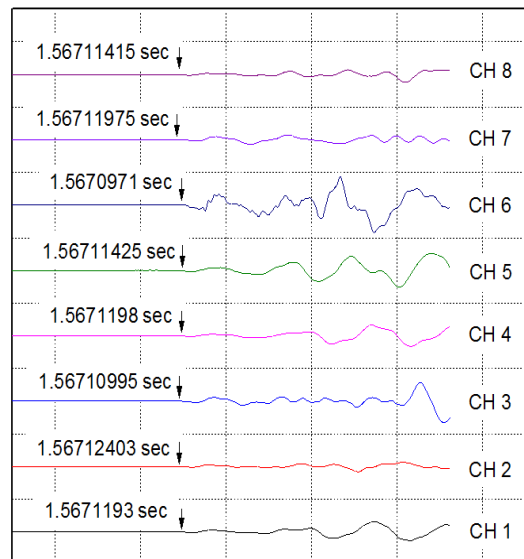


Fig. 6. Determination of an AE source



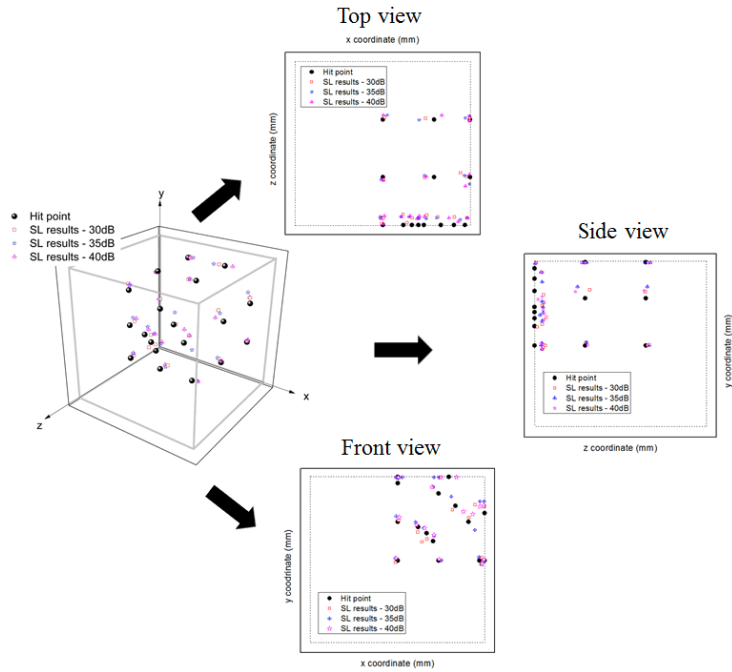


Fig. 7. Results of source locating

Table 4. Coordinates of the located AE sources

Hit number	Threshold = 30 dB				Threshold = 35 dB				Threshold = 40 dB			
	x (mm)	y (mm)	z (mm)	error (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	error (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	error (mm)
Hit 1	82.5	83.2	161.5	<b>9.03</b>	82.5	87.3	162.5	<b>8.22</b>	83.5	87.3	163.5	<b>7.04</b>
Hit 2	127.5	85.3	159.5	<b>10.80</b>	127.5	85.2	163.5	<b>6.97</b>	125.5	86.3	161.5	<b>8.61</b>
Hit 3	166.5	81.2	162.5	<b>8.54</b>	167.5	81.2	162.5	<b>8.77</b>	167.5	81.2	162.5	<b>8.77</b>
Hit 4	113.5	107.5	162.5	<b>10.01</b>	120.5	110.5	162.5	<b>9.34</b>	120.5	111.5	160.5	<b>11.53</b>
Hit 5	154.5	129.6	161.5	<b>9.68</b>	160.5	116.5	164.5	<b>11.87</b>	158.5	132.8	166.5	<b>9.54</b>
Hit 6	108.5	104.4	167.5	<b>10.38</b>	110.5	118.5	161.5	<b>10.37</b>	111.5	118.5	160.5	<b>11.00</b>
Hit 7	138.5	137.6	161.5	<b>9.85</b>	137.5	151.0	162.5	<b>12.72</b>	149.5	135.6	162.5	<b>12.46</b>
Hit 8	104.5	114.6	158.5	<b>12.55</b>	102.5	124.7	161.5	<b>10.18</b>	103.5	121.7	161.5	<b>8.86</b>
Hit 9	119.5	161.0	162.5	<b>11.47</b>	119.5	161.0	163.5	<b>10.84</b>	118.5	161.0	163.5	<b>11.38</b>
Hit 10	85.5	126.7	162.5	<b>7.71</b>	83.5	130.7	162.5	<b>9.54</b>	86.5	129.7	160.5	<b>10.71</b>
Hit 11	83.5	171.0	168.5	<b>6.36</b>	85.5	170.0	169.5	<b>5.04</b>	85.5	171.0	168.5	<b>6.20</b>
Hit 12	166.5	88.3	119.5	<b>4.82</b>	164.5	88.3	118.5	<b>6.57</b>	169.5	85.2	117.5	<b>2.56</b>
Hit 13	169.5	85.2	58.5	<b>1.60</b>	169.5	85.2	56.5	<b>3.54</b>	169.5	86.3	56.5	<b>3.75</b>
Hit 14	160.5	142.8	115.5	<b>13.68</b>	169.5	146.0	127.5	<b>14.09</b>	165.5	140.7	129.5	<b>12.44</b>
Hit 15	169.5	140.8	60.5	<b>6.78</b>	165.5	146.0	58.5	<b>12.83</b>	169.5	141.9	61.5	<b>7.96</b>
Hit 16	125.5	171.0	120.5	<b>9.47</b>	125.5	171.0	118.5	<b>9.57</b>	127.5	171.0	119.5	<b>7.47</b>
Hit 17	126.5	171.0	58.5	<b>8.59</b>	120.5	171.0	60.5	<b>14.46</b>	142.5	171.0	55.5	<b>8.81</b>
Hit 18	85.5	171.0	122.5	<b>2.60</b>	83.5	171.0	122.5	<b>2.96</b>	85.5	171.0	123.5	<b>3.57</b>
Hit 19	86.5	171.0	57.5	<b>2.96</b>	89.5	171.0	55.5	<b>6.38</b>	85.5	171.0	55.5	<b>4.56</b>

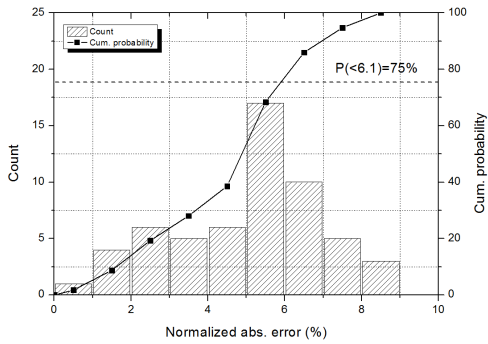
기 알고리즘을 적용한 결과, 추적된 음원의 위치는 Fig. 7 과 Table 4에 정리된 바와 같다.

제안된 기법의 적용성을 검증하기 위하여 위치 오차

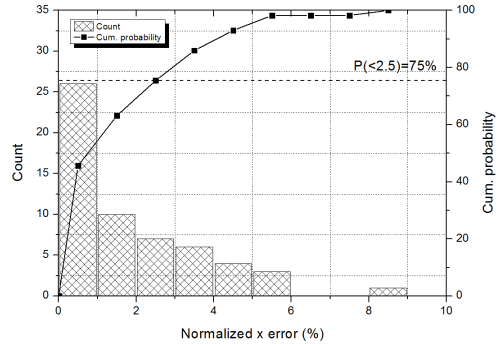
를 계산하였다. 연필심의 압철 위치와 음원추적 결과 사이의 거리를 절대오차(absolute error), 각 축방향 거리를 축방향 오차로 정의하면 식 (5)와 같다.

**Table 5.** Algorithm errors

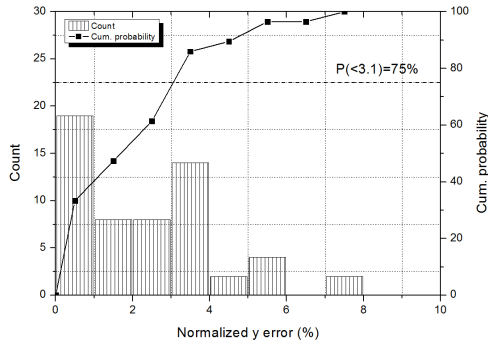
		30 dB	35 dB	40 dB	Total
Abs. error (mm)	Range	1.60 ~ 13.68	2.96 ~ 14.46	2.56 ~ 12.46	1.60 ~ 14.46
	Average	<b>8.26</b>	<b>9.17</b>	<b>8.28</b>	<b>8.57</b>
x error (mm)	Range	0.22 ~ 9.50	0.50 ~ 14.44	0.50 ~ 7.93	0.22 ~ 14.44
	Average	<b>3.29</b>	<b>3.81</b>	<b>2.70</b>	<b>3.27</b>
y error (mm)	Range	0.25 ~ 8.87	0.25 ~ 11.92	0.25 ~ 7.81	0.25 ~ 11.92
	Average	<b>3.49</b>	<b>4.56</b>	<b>3.70</b>	<b>3.91</b>
z error (mm)	Range	0.50 ~ 11.50	0.50 ~ 8.50	0.50 ~ 9.50	0.50 ~ 11.50
	Average	<b>5.03</b>	<b>5.08</b>	<b>5.72</b>	<b>5.27</b>



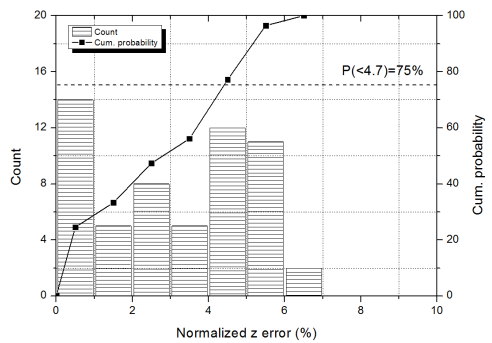
(a) Normalized abs. error (%)



(b) Normalized x error (%)



(c) Normalized y error (%)



(d) Normalized z error (%)

**Fig. 8.** Distribution and cumulative probability of each normalized value

$$abs. error = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (5)$$

$$x error = |x - x_i| \quad y error = |y - y_i| \quad z error = |z - z_i|$$

식 (5)에 따라 계산된 알고리즘의 평균오차는 Table 5와 같다.

x 축방향 오차의 범위는 0.22~14.44 mm이며, 평균 오차는 3.27 mm이다. y 축방향 오차 범위는 0.25~

11.92 mm이며 평균 3.91 mm, z 축방향 오차 범위는 0.50~11.50 mm, 평균 5.27 mm로 측정되었다. 절대오차는 범위는 1.60~14.46 mm이며 평균값은 8.57 mm로 측정되었다.

검출한계값에 따른 절대오차 평균은 각각 8.26 mm, 9.17 mm, 8.28 mm로 큰 차이가 없었다. 이는 P파 도달시간 결정 알고리즘인 two-step AIC 알고리즘이 검

출한것값에 독립적이기 때문인 것으로 판단되며 임계 전압법 등 검출한계 설정값에 큰 영향을 받는 알고리즘을 적용하는 경우에 비해 일관적인 결과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

시편을 한 변의 길이가 170.0 mm인 정육면체로 가정하고, 오차를 한 변의 길이로 정규화 후 백분율(normalized error)로 나타내면 Fig. 8과 같다. 절대오차는 정규분포와 유사한 분포를 나타냈으며(Fig. 8(a)) 그 평균은 5.04%이다. 이 경우, 음원추적결과가 시편 길이의 5% 정도로 측정되므로 시료 자체의 불균질성, 센서의 측정부 직경(8.25 mm) 등을 고려하면 공학적으로 수용할만한 수준으로 판단할 수 있다. 그러나 이는 크기로 정규화된 수치이기 때문에 이보다 작은 시편의 경우는 주의할 필요가 있다.

x, y 축 방향 정규오차는 유사한 분포를 보이며(Fig. 8(b), (c)) 그 평균은 각각 1.92 %, 2.30 %이다. 작은 수준의 오차 빈도가 높으며 누적확률 0.75를 기준으로 각각 2.5 %, 3.1 % 이하의 정규오차가 측정되었다. 반면에 z 방향 정규오차는 분포양상이 상이하며(Fig. 8(d)) 평균값은 3.10 %, 누적확률 0.75 기준 4.7 %의 정규오차가 측정되었다. z 방향 오차가 가장 크게 측정된 원인을 명확하게 규명할 수 없으나 본 논문에서 설정한 z 방향 센서 좌표(0 mm, 170 mm)에 기인하는 것으로 추정된다. x, y 방향 센서 배열에 비하여 단순한 배열을 설정하기 때문에 정확도가 낮은 것으로 추정되며 최적 센서위치 선정한다면 더욱 정밀한 결과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 횡등방성 매질에 적용 가능한 음원추적기법을 개발하였다. 진행 방향에 따라 탄성과 속도가 변화하는 횡등방성 매질의 특성을 반영하기 위하여 음원추적기법 중 분할근사법을 적용하였으며 실험적 오차 및 배경잡음의 영향을 최소화하여 P파의 도달시간을 결정하였다. 이 방법은 다른 기법에 비하여 계산량이 많아질 수 있으나 방향에 따른 탄성과 속도 프로파일을 알 수 있다면 단순한 계산을 통하여 음원의 위치를 특정할 수 있다는 장점이 있다.

개발된 기법의 검증을 위하여 연필심 압절 시험을 수행하였다. 층상구조를 갖는 인공 횡등방성 시험편을 제작하고 설정된 위치에서 연필심을 분절하여 음원을 발생하였다. 이를 알고리즘 적용결과와 비교하여 제안된 기법의 적용성을 평가하였다.

연필심 압절 위치와 음원추적 위치 사이의 거리를 절

대오차로 정의할 때, 평균적으로 8.57 mm의 절대오차가 측정되었으며 시편의 크기로 정규화시킬 경우, 약 5% 정도의 오차에 해당한다. 이는 실험환경 및 시편의 크기를 고려할 때 수용할 만한 수준인 것으로 판단되나 작은 시편을 사용할 경우 정규오차가 증가할 것으로 사료되니 주의할 필요가 있다.

측방향 오차의 경우 z 방향 오차가 5.27 mm으로 가장 크게 측정되었으나 이는 실험 시 설정한 센서 위치에 의한 것으로 추정되며, 최적 센서위치를 설정한다면 더욱 정밀한 결과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 개발된 기법은 검출한계 설정값에 큰 영향을 받지 않는 것으로 파악되었는데 이는 본 기법에 적용된 P파 도달시간 결정 알고리즘의 특성으로 파악된다.

## 사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원 지식경제 기술혁신 사업(과제번호 : 20123010110010)의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- Ohtsu, M., 1995, Acoustic emission theory for moment tensor analysis, *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*, 6(3): p. 169-184.
- Heo J., 2001, Measurement of Acoustic Emission and the Characteristics of Deformation and Fracturing of Rock under Triaxial Compression, Seoul National University, Department of Civil Engineering Doctorial thesis.
- Debecker, B. and Vervoort A., 2011, Localization by Acoustic Emission in Transversely Isotropic Slate, *Advances in Acoustics and Vibration*, 2011: p.1-10.
- Chang S., 2002 Characterization of Stress-Induced Damage in Rock and Its Application on the Analysis of Rock Damaged Zone Around a Deep Tunnel, Seoul National University, Department of Civil Engineering Doctorial thesis.
- Daley PF, Hron F., 1977, Reflection and transmission coefficients for transversely isotropic media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67: p. 661-675.
- Song I, Suh M, Woo Y-K, Hao T., 2004, Determination of the elastic modulus set of foliated rocks from ultrasonic velocity measurements, *Engineering Geology*, 72: p. 293-308.
- Sedlak, P., Hirose Y., Khan S., Enoki M., Sikula J., 2009, New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates, *Ultrasonics*, 49(2): p. 254-262.
- Lee K.S., Kim J.S., Lee C.S., Yoon C.H., Choi J.W., 2011, A Study on the P Wave Arrival Time Determination Algorithm of Acoustic Emission (AE) Suitable for P Waves with Low Signal-to-Noise Ratios. *Tunnel and Underground Space*, 21(5): p. 349-358.



**최승범**

2009년 서울대학교 공과대학 지구환경  
시스템공학부 공학사

Tel: 02-880-9304  
E-mail: chbum092@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템  
공학부 박사과정



**전석원**

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1991년 (미)캘리포니아 주립대학 대학  
원 공학석사  
1996년 (미)아리조나 주립대학 공학박사

Tel: 02-880-8807  
E-mail: sjeon@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템  
공학부 교수

---