

낮은 신호 대 잡음비 특성을 지닌 탄성과 신호에 적합한 P파 도달시간 결정 알고리즘 연구

이경수^{1),2)*}, 김진섭¹⁾, 이창수²⁾, 윤찬훈¹⁾, 최종원¹⁾

A Study on the P Wave Arrival Time Determination Algorithm of Acoustic Emission (AE) Suitable for P Waves with Low Signal-to-Noise Ratios

K.S. Lee, J.S. Kim, C.S. Lee, C.H. Yoon, J.W. Choi

Abstract This paper introduces a new P wave arrival time determination algorithm of acoustic emission (AE) suitable to identify P waves with low signal-to-noise ratio generated in rock masses around the high-level radioactive waste disposal repositories. The algorithms adopted for this paper were amplitude threshold picker, Akaike Information Criterion (AIC), two step AIC, and Hinkley criterion. The elastic waves were generated by Pencil Lead Break test on a granite sample, then mixed with white noise to make it difficult to distinguish P wave artificially. The results obtained from amplitude threshold picker, AIC, and Hinkley criterion produced relatively large error due to the low signal-to-noise ratio. On the other hand, two step AIC algorithm provided the correct results regardless of white noise so that the accuracy of source localization was more improved and could be satisfied with the error range.

Key words Acoustic emission (AE), P wave arrival time determination algorithm, amplitude threshold picker, Akaike Information Criterion (AIC), two step AIC, Hinkley criterion, Location Uncertainty (LUCY)

초 록 본 연구에서는 방사성폐기물처분장에서 발생하는 탄성과와 같이 낮은 신호 대 잡음비로 인하여 P파의 식별이 어려운 신호에 적합한 P파 도달시간 결정 알고리즘에 대한 연구를 수행하였다. 사용된 알고리즘은 임계전압법, Akaike Information Criterion(AIC), Two step AIC, Hinkley criterion이며 샤프심 압절법에 의하여 생성된 탄성과 신호에 white noise를 적용하여 신호 대 잡음비를 낮추었다. 실험결과 임계전압, AIC, Hinkley criterion 알고리즘의 경우 배경잡음 수준이 증가함에 따라 P파 도달시간의 정확성은 감소하였으나 Two step AIC 알고리즘의 경우 1차적으로 결정된 P파의 도달시간 주변의 신호를 중심으로 특성함수와 AIC 알고리즘을 반복적으로 적용함에 따라 배경잡음 수준에 관계없이 정확한 결과를 나타냈다.

핵심어 음향방출법, P파 도달시간 결정 알고리즘, 임계전압법, Akaike Information Criterion(AIC), two step AIC, Hinkley criterion, Location Uncertainty(LUCY)

1. 서 론

음향방출법(acoustic emission : AE)은 균열 발생 시 생성되는 탄성과(elastic wave)를 이용한 비파괴시험의 일종으로써 결함의 성장과 거동을 파악하는데 탁월

한 시험법이다. 따라서 석유 화학 설비에서의 압력 용기 및 저장탱크에서의 결함검출, 원자로 설비에 대한 연속적 감시, 교량과 같은 토목 구조물의 건전성 평가 등에 널리 응용되고 있다(주영상 외, 2003). 암석분야의 경우 1930년 미국광무국에서 수행된 광산의 음파 실험을 시작으로 터널, 석유 비축기지, 방사성폐기물 처분장 및 암반사면 등의 균열 발생에 따른 암반의 안정성 평가 등에 이용되고 있다(Kim et al., 2011, Plouffe, 1990, Young et al., 1989, Olsson and Winberg, 1996, Martin and Read, 1996, Emsley et al., 1997, Falmagne et al., 1998).

¹⁾ 한국원자력연구원

²⁾ 서울시립대학교

* 교신저자 : lks@kaeri.re.kr

접수일 : 2011년 9월 19일

심사 완료일 : 2011년 10월 13일

게재 확정일 : 2011년 10월 24일

그러나 방사성폐기물처분장은 발파와 굴착으로 형성되었기 때문에 처분장 주변의 암반은 무수히 많은 불연속면이 존재한다. 이는 균열 발생 시 생성되는 탄성파의 산란과 분산 그리고 반사파 등의 간섭을 일으키는 주요 원인이 되며 이에 따라 P파 이외의 신호는 식별이 어렵게 된다. 따라서 음향방출법에서는 P파의 도달시간차를 이용하여 발생한 음원에 대한 위치정보를 분석하고 수행하고 있다(Lokajíček and K. Klíma, 2006). 하지만 음향방출법은 미세균열의 성장과 거동 분석에 초점을 두고 있기 때문에 관심 주파수대역은 수십 kHz~수 MHz이다(Hensman et al, 2010). 따라서 무수히 많은 불연속면이 존재하는 구간에서 탄성파가 발생할 경우, 신호의 감쇠는 더욱 가속화 되어 P파를 구분하는 것은 매우 어렵다.

이에 Landis et al.(1992)는 연구자가 수동적 방법을 이용하여 P파의 도달시간을 결정하는 것이 가장 정확한 결과를 획득할 수 있는 방법이라고 하였다. 그러나 음향방출실험 시 물체에서 발생하는 탄성파의 양은 방대하기 때문에 수동으로 탄성파의 도달시간을 결정하는 것은 상당한 시간이 소요될 뿐만 아니라 연구자의 주관적 판단이 개입될 수 있다(Sedlak et al., 2009).

이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 불연속면과 풍화대 등의 영향으로 탄성파가 발생하더라도 파의 산란과 분산 그리고 감쇠 등에 의하여 P파의 식별이 어려운 신호에 적합한 도달시간 결정 알고리즘에 대한 연구를 수행하였다. 암석시료는 한국원자력연구원 내에 위치한 지하처분연구시설인 KAERI Underground Research Tunnel(KURT)에서 채취한 직사각형 형태의 복운모 화강암을 이용하였으며 시료 표면에 샤프심 압절법을 이용하여 탄성파를 발생시켰다. 따라서 수행된 위치표정은 2차원적 형태이다. 신호 대 잡음비를 인위적으로 낮추기 위하여 샤프심 압절법에 의하여 발생된 탄성파 신호에 P파 진폭 수준의 white noise를 주입하였다. 마지막으로 탄성파 성분 중 P파의 도달시간은 임계전압법(Maji and Shah, 1988), Akaike information criterion(AIC)(Maeda, 1985), Two step AIC(Sedlak et al., 2009), Hinkley criterion(Reinhardt and Grosse, 2004, Grosse, 2000)에 의하여 자동으로 결정되었다. 위 결과를 이용하여 위치표정을 수행하였으며 실제 결과와 위치표정 결과와의 오차 그리고 위치표정의 정확성을 판단하는 Location Uncertainty(LUCY)를 이용하여 처분장의 특성에 맞는 P파 도달시간 결정 알고리즘을 제안하였다.

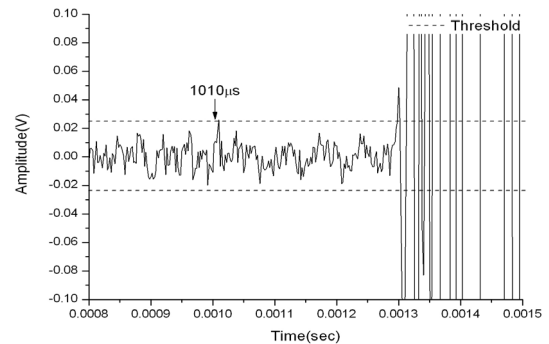
2. 이론적 배경

2.1 P파의 도달시간 결정 알고리즘

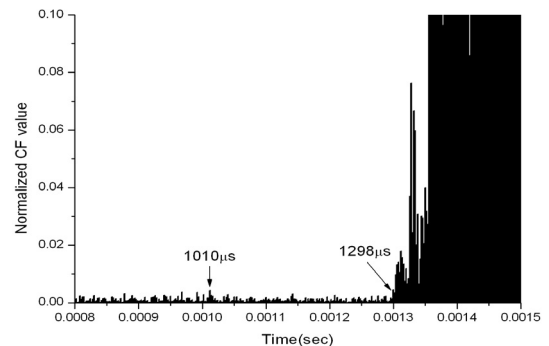
2.1.1 임계전압법

임계전압법은 음향방출법에서 사용되는 P파 도달시간 결정법 중 가장 단순한 방법으로써 연구자가 배경잡음보다 높은 임계전압을 임의로 결정한 뒤 임계전압을 최초로 넘는 신호를 P파로 간주한 뒤 도달시간을 결정하는 것으로 특정 알고리즘의 적용 없이 결정된 임계전압만을 이용하여 발생한 P파의 도달시간을 결정할 수 있는 장점이 있다(이상은, 1999). 그러나 연구자의 주관에 따라 임계전압을 높게 설정하면 검출되어야 할 탄성파의 초동신호가 검출되지 않을 수 있다(Kurz et al., 2005). 이에 Maji and Shah(1988)는 탄성파의 배경잡음의 시작부터 결정된 임계전압까지의 70% 신호에 대한 평균과 표준편차를 이용하여 임계전압을 결정하여 P파의 도달시간을 결정할 것을 제안하였으며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m \pm A\sigma \quad (1)$$



(a) elastic wave generated by Pencil Lead Break



(b) amplified elastic wave by characteristic function

Fig. 1. P wave arrival time error determined from amplitude threshold picker caused by noise.

여기서, m 은 배경잡음의 시작부터 결정된 임계전압까지의 70% 신호에 대한 평균, σ 는 배경잡음의 시작부터 결정된 임계전압까지의 70% 신호에 대한 표준편차이다. A 는 상수로써 Maji and Shah(1988)는 A 를 3으로 결정하여 P파의 도달시간을 측정하였다.

그림 1(a)는 샤프심 압절에 의하여 생성된 탄성파 신호로써 Maji and Shah(1988)가 제안한 식 (1)의 임계전압법을 이용한 결과 임계전압과 P파 도달시간은 각각 $\pm 0.024V$, $1010 \mu s$ 인 것으로 해석되었다. 그러나 $1010 \mu s$ 에 발생한 신호는 주변의 배경잡음과 비교할 때 특별한 차이점이 없기 때문에 Sedlak et al.(2009)가 제안한 특성함수(characteristic function : CF)를 이용한 결과 그림 1(b)와 같이 배경잡음인 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 배경잡음에 의하여 발생 가능한 오차를 최소화하기 위하여 식 (1)의 실험을 통하여 획득되는 상수 A 를 trial and error법을 이용하여 4로 결정하여 P파의 도달시간을 획득하였다.

2.1.2 AIC(Akaike information criterion)

Sleemen and Eck(1999)은 탄성파의 성분 중 P파와 S파의 도달시간을 결정하기 위하여 식 (2)의 Autoregressive-Akaike information criterion(AR-AIC) 알고리즘을 제안하였다. AR-AIC는 발생한 탄성파 신호의 분산을 이용하여 도달시간을 결정하는 알고리즘으로써 이를 위해서는 발생한 탄성파 신호를 그림 2와 같이 time window를 이용하여 두 구간으로 나눈 뒤 각각의 구간에 AR계수를 적용하여 AIC가 최소가 되는 구간의 시간을 P파의 도달시간으로 결정한다.

$$AIC(k) = (k - M) \log(\sigma_{1,max}^2) + (N - M - k) \log(\sigma_{2,max}^2) + C_2 \quad (2)$$

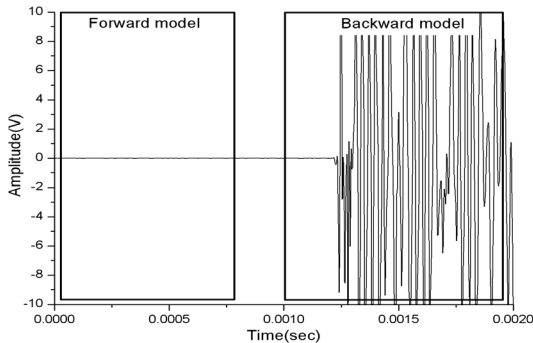


Fig. 2. Visual description of AR-AIC algorithm

여기서, k 는 신호의 순서, M 은 AR 계수, N 은 신호 길이, C_2 는 상수, $\sigma_{1,max}^2$, $\sigma_{2,max}^2$ 는 구간별 신호의 분산을 뜻한다.

그러나 AR-AIC 알고리즘의 정확성은 실험을 통하여 결정되어지는 AR 계수에 좌우된다. 따라서 각각의 재료적 특성에 맞게 AR 계수는 새로이 결정되어야 하는 어려움이 있다. 이에 Maeda(1985)는 식 (3)과 같이 AR 계수를 생략한 새로운 형태의 AIC 알고리즘을 제안하였다. 그러나 이 알고리즘 역시 AR-AIC와 같이 발생한 신호를 time-window를 이용하여 신호를 두 구간으로 나눈 뒤 각각의 구간내에 있는 신호에 식 (3)을 대입하여 P파의 도달시간을 결정하기 때문에 time-window의 적용범위에 따라 결과의 정확성은 상당한 차이를 보인다.

$$AIC(k) = k \log(\text{var}(x[1, k]) + (N - k - 1) \log(\text{var}(x[k + 1, N])) \quad (3)$$

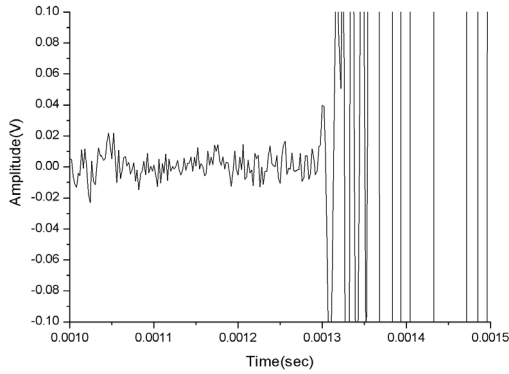
여기서, k 는 신호의 순서, N 은 신호의 길이, $\text{var}(x[1, k])$ 는 신호의 시작부터 신호 k 까지의 분산, $\text{var}(x[k + 1, N])$ 은 $k + 1$ 에서부터 N 까지 신호의 분산을 뜻한다.

2.1.3 Two-step AIC

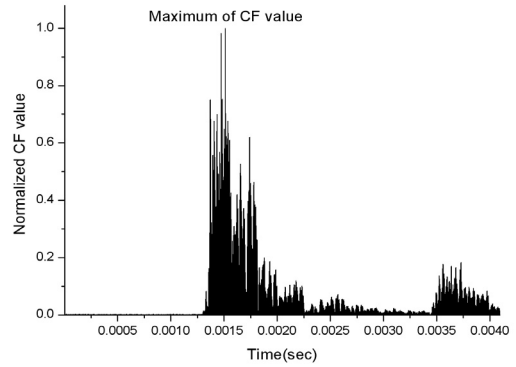
Zhang et al.(2003)는 배경잡음이 큰 신호에 AIC 알고리즘을 적용할 경우 여러 극소점의 발생에 따라 결과의 정확성은 감소한다고 보고하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Sedlak et al.(2009)는 특성함수(characteristic function)를 이용하여 발생한 탄성파 신호를 증폭한 뒤 AIC 알고리즘을 적용하는 Two step AIC 알고리즘을 제안하였으며 아래와 같은 순서로 진행된다.

첫 번째로 식 (4)에 있는 특성함수를 이용하여 발생한 탄성파 신호를 증폭한다. 이후 증폭된 신호를 AIC 알고리즘에 대입하여 1차적인 도달시간(t_{min})을 결정한다. 이때 특성함수에 대한 AIC 알고리즘의 적용 범위는 특성함수의 최대값에 Δt 를 더한 시간(Δt_{AM})이며 Δt_{AM} 는 실험을 통하여 결정된다. 이후 발생 가능한 오차를 최소화하기 위하여 t_{min} 을 중심으로 Δt_{FA} 와 Δt_{FB} 만큼의 time window를 작성하고 time window 범위 내에 있는 신호에 특성함수와 AIC 알고리즘을 적용하면 최종적인 P파 도달시간을 결정할 수 있다.

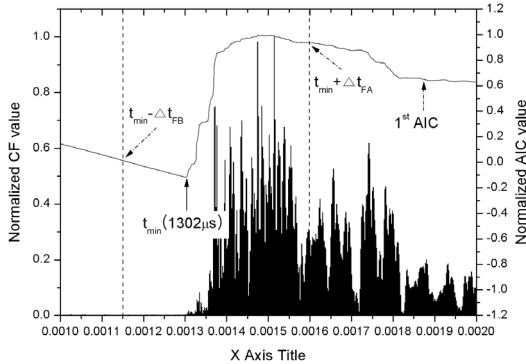
본 연구에서는 Sedlak et al.(2009)가 수행한 방법과 동일하게 재료적 특성에 따라 결정되어야 하는 상수 R 은 4, Δt_{AM} 은 $30 \mu s$, 1차 도달시간 전 후를 의미하는 Δt_{FA} , Δt_{FB} 는 각각, $10 \mu s$, $30 \mu s$ 로 결정하였으며 그림 3은 Two-step AIC 알고리즘을 이용한 P파 도달시



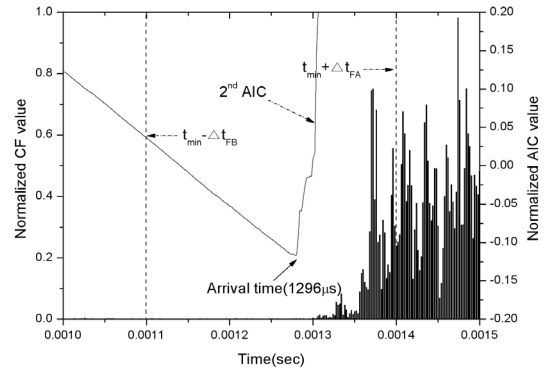
(a) elastic wave generated by Pencil lead Break test



(b) amplified signals by characteristic function



(c) first attempt to determine P wave arrival time using two-step AIC



(d) determination of final arrival time

Fig. 3. Determination of P wave arrival time using two-step AIC

간 결정방법을 나타낸 것이다.

$$CF(i) = |x(i) + R(x(i) - x(i-1))| \quad (4)$$

여기서, $x(i)$ 는 탄성파 신호 중 i 번째의 진폭, R 은 실험을 통하여 획득되는 상수이다.

2.1.4 Hinkley criterion

고체 내부에 국부적으로 형성되어 있는 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파인 음향방출은 물체 표면에 설치되어 있는 AE 센서에 의하여 검출되며 전압(Voltage)의 형태로 표시된다. 따라서 탄성파의 발생 유무는 배경잡음과의 전압 차이를 통하여 식별이 가능하다. 그러나 신호 대 잡음비가 낮거나 배경잡음이 큰 신호가 발생할 경우 진폭의 크기를 이용한 도달시간 결정은 상당한 어려움이 있다. 이에 Goose(2000)는 AE energy를 식 (5)의 Hinkley criterion에 적용하여 P파 도달시간을 결정할 것을 제안하였다.

$$S'_i = S_i - i\delta \quad (5)$$

여기서 S_i 는 i 번째 에너지에 대한 누적값, δ 는 $S_N/(\alpha N)$

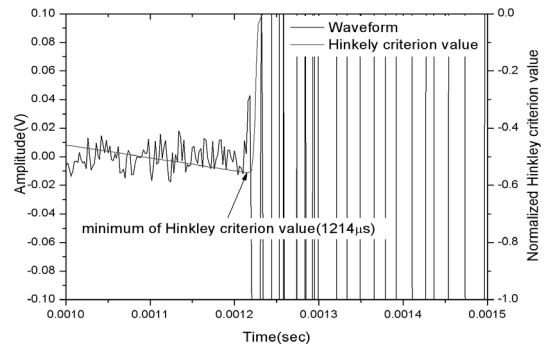


Fig. 4. Determination of P wave arrival time using Hinkley criterion algorithm

으로 S_N 은 신호 전체 에너지, N 은 신호의 길이, α 는 실험을 통하여 결정되는 상수이다.

본 연구에서는 AIC 알고리즘과 같이 Hinkley criterion 값이 최소가 되는 지점의 시간을 P파의 도달시간으로 결정하였다. 또한 실험을 통하여 식 (5)의 상수 α 은 20으로 결정하였으며 이는 Groose(2000)가 제안한 범위를 만족하는 결과이다. 그림 4는 Hinkley criterion 알고리즘을 이용하여 탄성파의 도달시간을 결정하는 것을 나타낸 것이다.

2.2 최소자승법을 이용한 음원의 위치 결정 알고리즘

본 연구에서는 탄성파의 성분 중 P파의 도달시간 차를 이용하여 위치표정을 수행하였다. 이 때 탄성파가 발생하는 매질을 균질한 탄성체라고 가정하면, 매질내로의 모든 방향에 대하여 탄성파속도는 동일하기 때문에 탄성파가 발생한 음원과 각각의 AE 센서와의 거리는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\sqrt{(X_i - X_0)^2} + \sqrt{(Y_i - X_0)^2} + \sqrt{(Z_i - X_0)^2}}{\Delta t_i} = V \quad (6)$$

여기서, X_i, Y_i, Z_i 와 X_0, Y_0, Z_0 는 i 번째 AE 센서의 좌표와 가상의 음원의 위치, Δt_i 는 각각의 센서에서 측정된 P파의 도달시간 차, V 는 탄성파속도의 평균을 의미한다.

일반적으로 탄성파 속도는 실내시험 결과에 의하여 결정된다. 그러나 발생한 탄성파는 균열의 패턴에 따라 다양하기 때문에 본 연구에서는 도달시간 결정 알고리즘을 통하여 획득되는 P파의 도달시간 차와 센서의 좌표 정보를 최소자승법에 적용하여 발생한 탄성파의 속도를 추정하였다(Shiotani et al., 2001). 최소자승법은 비선형 방정식으로써 해는 일반적인 계산식으로는 구할 수 없기 때문에 $N-1$ 개의 쌍곡면 교점을 이용한다. 이 때 계속 오차가 없으면 정확한 해를 획득 할 수 있으나 이는 현실적으로 어렵다(Kurz et al., 2005). 따라서 위치표정 수행 시 최소한의 오차는 발생하게 된다. 최소자승법을 이용하여 각각의 센서에 도달된 탄성파속도가 결정되면, 위 결과를 식 (6)에 대입하여 음원의 위치 X_0, Y_0, Z_0 를 획득할 수 있다.

2.3 위치표정의 정확도 분석

P파의 도달시간 차를 이용하여 위치표정을 수행할 경우, 결과의 오차는 탄성파의 분해능, 발생한 탄성파의 속도차, 센서 크기 등과 같은 여러 가지 원인에 의하여

발생할 수 있다. 이에 Schumacher et al.(2007)는 식 (7)에 나타낸 LUCY(Location Uncertainty)를 이용하여 위치표정의 정확도에 대한 분석을 수행하였다.

$$LUCY = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_j (V\Delta t_{ij} - |S_i - S_j|)^2} \quad (7)$$

여기서, N 은 센서의 개수, V 는 탄성파 속도, Δt_{ij} 는 각각의 센서에서 측정된 P파의 도달시간 차, S_i 와 S_j 는 각각의 센서와 위치표정의 결과를 의미한다.

LUCY의 값이 작으면 위치표정의 정확도는 상대적으로 높아지며 LUCY의 값이 크면 정확도는 상대적으로 낮아진다. 따라서 수행한 위치표정의 정확성에 대한 평가는 LUCY를 이용할 경우 가능할 것으로 판단된다.

3. 실험방법

3.1 암석시료

본 연구에서는 한국원자력연구원 내에 위치한 지하처분연구시설인 KURT에서 채취한 직사각형 형태(가로 50 cm, 세로 20 cm, 높이 5 cm)의 화강암 시료를 이용하였으며 구성광물은 석영, 사장석, 흑운모, 백운모와 미량의 제어론, 금홍석, 인회석 등이며 광물의 크기는 세립질 또는 중립질이다.

3.2 음원 발생

음향방출법에서 널리 이용되는 탄성파 발생 기구로는 샤프심 압절법이 있다. 이에 본 연구에서는 샤프심 압절법을 이용하여 탄성파를 발생시켰으며 각각의 구간마다 3회씩 실시하였다. 또한 P파 진폭 수준만큼의 white noise를 발생한 탄성파 신호에 적용하여 신호 대 잡음비를 인위적으로 낮게 하였다. 표 1은 샤프심 압절법에 의하여 탄성파가 발생한 구간을 나타낸 것이다.

3.3 AE 측정법

AE 센서의 감도는 표면에 부착된 상태에 매우 민감하기 때문에 본 연구에서는 고진공접착제를 이용하여 표 2 나타낸 좌표에 AE센서(AE 603-SW)를 단단하게 부

Table 1. Positions of source location

Source location	X (cm)	Y (cm)
1	12.5	10
2	25.0	10.0
3	37.5	10.0

Table 2. Positions of AE sensor

AE sensor	X (cm)	Y (cm)
sensor 1	0.0	20.0
sensor 2	0.0	0.0
sensor 3	25.0	20.0
sensor 4	25.0	0.0
sensor 5	50.0	20.0
sensor 6	50.0	0.0

착시했다. 또한 샤프심 압절 시 생성되는 음향방출 신호는 매우 미세하기 때문에 신호 획득을 위하여 프리엠프에서 40 dB 증폭, 메인엠프에서 20 dB를 증폭하여 신호를 탐지하였다. 마지막으로 발생한 탄성파의 중첩 및 산란 등을 최소화하기 위하여 결정되는 peak definition time(PDT), hit locking time(HLT)의 경우 실험을 통하여 50 μ s, 100 μ s, 500 μ s로 결정하였다.

4. 실험결과

4.1 white noise의 영향이 없는 탄성파 신호를 이용한 위치표정

표 3은 white noise가 존재하지 않는 탄성파 신호를 P파 도달시간 결정 알고리즘에 적용하여 위치표정, 탄성파속도, LUCY 분석 등을 수행한 평균 결과이다. 각각의 알고리즘마다 결과의 차이는 있으나 실제 음원과

각각의 알고리즘에 의하여 추정된 결과와는 최대 0.7 cm의 오차가 발생하였다. 또한 LUCY를 이용하여 알고리즘의 정확도를 분석한 결과, AIC, Hinkley criterion 알고리즘을 이용한 위치표정 결과가 6.5로 가장 정확한 것으로 해석되었다. 그러나 이는 가장 높은 결과를 보인 Two step AIC 알고리즘과 0.1만의 오차를 보이는 수치로써 각각의 알고리즘은 서로 다른 방법을 통하여 도달시간을 결정하지만 획득되는 결과는 유사한 것으로 나타났다.

음향방출법에서 탄성파 성분 중 P파의 도달시간차를 이용한 위치표정을 수행할 경우, 앞에서 언급한 바와 같이 위치표정의 오차는 여러 가지 원인에 의하여 발생하지만 직접적인 영향을 주는 요소는 탄성파 신호에 대한 시간 분해능과 각각의 센서에 도달되는 탄성파속도 차 그리고 사용되는 센서의 크기이다.

본 연구에 사용된 AE 장비의 경우 파형 샘플링 주파수는 500 kHz이며 탄성파속도는 해석결과 약 3100~3700 m/s이기 때문에 신호 분해능에 의해서만 발생 가능한 오차는 최대 0.74 cm이다. 또한 암석은 동탄성학적 관점(elastodynamics)에서는 균질한 탄성체로 간주되지만 재료적 관점에서는 광물, 공극, 미세균열 등으로 이루어진 비균질성 물체(heterogeneity)이기 때문에 각각의 센서에 도달된 탄성파는 약간의 속도 차이가 발생하게 된다(Groose and Ohtsu, 2008). 따라서 도달시간 결정 알고리즘에 의하여 발생한 0.7 cm의 위치표정 오차는 탄성파 신호 분해능에 의하여 발생 가능한 범위를

Table 3. Result of source localization, P wave velocity and LUCY determined from P wave arrival time determination algorithms using elastic waves without white noise

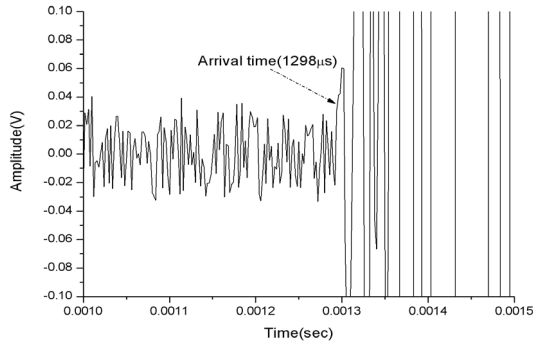
Algorithm	Source location	Averaged source localization (cm)		Error (%)		P wave velocity (m/s)	LUCY
		X	Y	X	Y		
Amplitude threshold	1	12.3	9.93	1.6	0.7	3600	5.7
	2	25.7	10.4	2.8	4.0	3600	7.2
	3	37.5	10.7	0.0	7.0	3100	6.7
AIC	1	12.1	9.9	3.2	1.0	3700	5.9
	2	25.7	10.2	2.8	2.0	3400	7.0
	3	37.5	10.6	0.0	6.0	3100	6.6
Two step AIC	1	12.0	9.7	4.0	3.0	3700	6.3
	2	25.7	10.3	2.8	3.0	3400	7.2
	3	37.5	10.5	0.0	5.0	3100	6.4
Hinkley criterion	1	12.5	9.9	0.0	1.0	3600	5.5
	2	25.7	10.4	2.8	4.0	3500	7.4
	3	37.6	10.5	0.3	5.0	3100	6.7

만족하기 때문에 각각의 알고리즘에 의하여 획득된 도달시간은 정확한 것으로 판단된다.

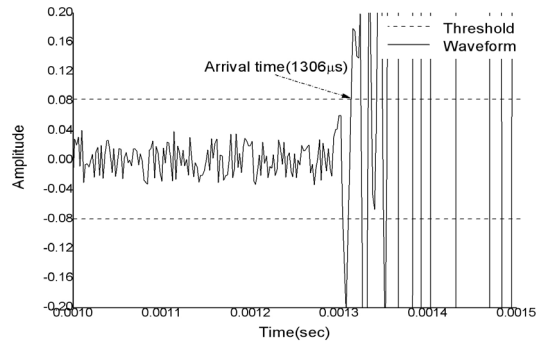
4.2 white noise의 영향을 받는 탄성파 신호를 이용한 위치표정

그림 5(a)는 발생한 탄성파에 white noise를 적용한 신

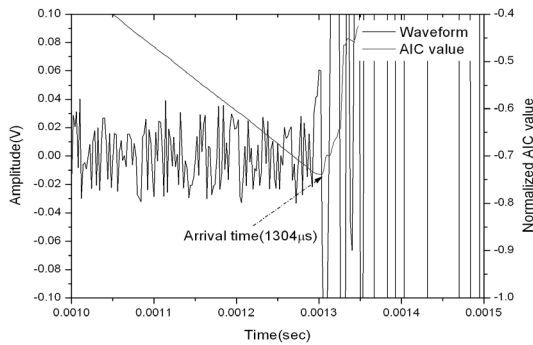
호로써 P파의 도달시간은 $1298 \mu s$ 이다. Maji and Shah가 제안한 식 (1)을 이용하여 P파의 도달시간을 결정할 결과, 임계전압은 $\pm 0.08 V$ 이기 때문에 실제 P파의 진폭인 $0.06 V$ 를 초과하였다. 따라서 P파의 도달시간은 $1306 \mu s$ 로 원래의 도달시간과 약 $8 \mu s$ 가 차이가 발생하는 것으로 해석되었다. AIC, Hinkley criterion 알고리



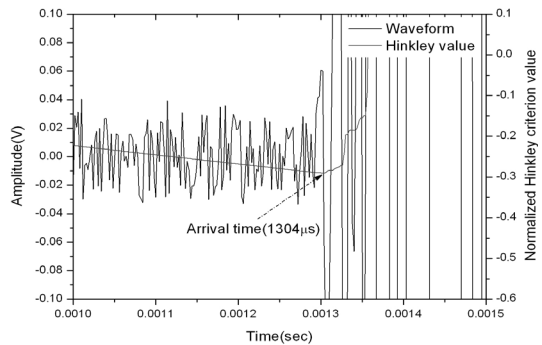
(a) elastic waves mixed with white noise



(b) result of amplitude threshold picker

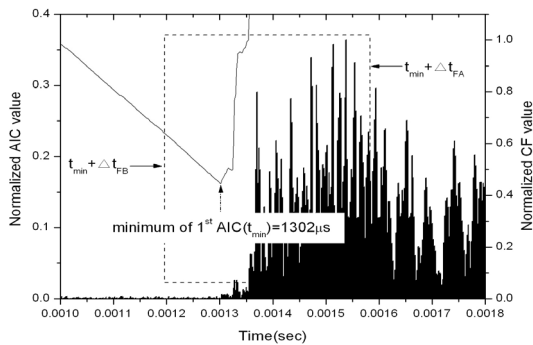


(c) result of AIC

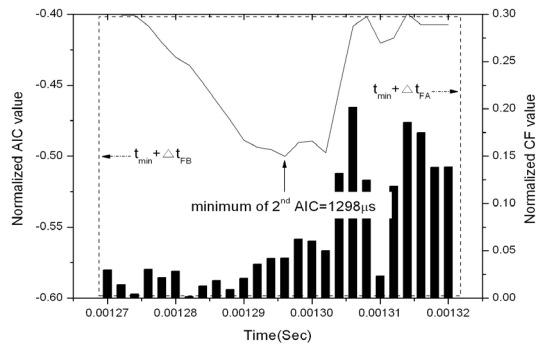


(d) result of Hinkley criterion

Fig. 5. P wave arrival time error determined from amplitude threshold picker, AIC, Hinkley criterion



(a) first attempt to determine P wave arrival time using two-step AIC



(b) determination of final P wave arrival time

Fig. 6. P wave arrival determination by two step AIC for low-signal-to-noise ratios

음을 이용한 결과 또한 그림 6(b), (c)와 같이 신호 대 잡음비가 낮아짐에 따라 P파의 도달시간을 1304 μ s로 결정하였다.

Two step AIC 알고리즘을 이용한 결과 또한 그림 6(a)와 같이 1차적으로 결정된 도달시간은 1302 μ s로써 다른 알고리즘의 결과와 유사하였다. 그러나 1차적으로 결정된 도달시간 주변 신호에 대하여 특성함수와 AIC 알고리즘을 반복적으로 적용한 결과 최종적인 P파의 도달시간은 그림 9(b)와 같이 1298 μ s이며 이는 white noise를 주입하기 전과 동일한 결과이다.

표 4는 white noise가 포함된 탄성파 신호를 각각의 알고리즘에 적용하여 획득한 위치표정 평균 결과이다. Two step AIC 알고리즘을 제외한 모든 알고리즘을 이용한 위치표정의 결과에서 발생한 오차범위는 1 cm 이상으로 탄성파의 분해능에 의하여 발생 가능한 오차범위(0.74 cm)를 초과하였으며 LUCY 또한 약 7.3으로 white noise를 주입하기 전의 결과(약 6.5)보다 정확성이 감소하였다.

이와 달리 Two step AIC 알고리즘을 이용하여 위치표정을 수행한 결과를 검토해 보면, 발생한 최대 오차는 약 0.7 cm, LUCY는 6.8로써 white noise를 주입하기 전과 유사한 것으로 나타났다. 그러나 Two step AIC 알고리즘의 결과 또한 그림 6(b)와 같이 신호 대 잡음비가 명확하지 않은 신호에 적용할 경우 여러 극소점을 나타내기 때문에 결과의 정확성을 향상시키기 위해서는 재료적 특성에 따라 time window와 특성함수의 상수 R 을 결정해야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 발파와 굴착의 영향으로 P파의 식별이 어려운 신호에 적합한 P파 도달시간 결정 알고리즘에 대한 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. white noise가 포함되지 않은 탄성파 신호를 P파 도달시간 결정 알고리즘에 적용하여 음원에 대한 위치표정과 LUCY 분석을 수행한 결과, 실제 음원과 위치표정 결과는 약 0.7 cm의 오차가 발생하였다. 이는 탄성파 분해 신호능에 의하여 발생 가능한 오차범위인 0.74 cm를 만족하는 결과이다. 또한 위치표정의 정확성을 결정하는 LUCY는 AIC, Hinkley criterion 알고리즘을 이용한 결과가 6.5로 가장 낮은 수치를 나타냈으나 이는 가장 높은 결과와 0.1의 차이만을 나타낸다. 따라서 각각의 알고리즘은 서로 다른 방법을 통하여 도달시간을 결정하지만 획득되는 결과는 유사하며 결과 또한 정확한 것으로 나타났다.
2. white noise에 의하여 신호 대 잡음비가 낮은 탄성파 신호를 P파 도달시간 결정 알고리즘에 적용하여 음원에 대한 위치표정과 LUCY 분석을 수행한 결과, Two step AIC 알고리즘을 제외한 모든 알고리즘의 결과에서 발생한 오차는 약 1 cm 이상, LUCY 또한 0.8 증가한 7.3으로 결과의 정확성은 모두 감소하였다. 이와 달리 Two step AIC 알고리즘을 이용한 결과는 white noise의 유무에 관계없이 발생 오차와

Table 4. Result of source localization, P wave velocity and LUCY determined from P wave arrival time determination algorithms using elastic waves with white noise

Source location	Algorithm	Averaged source localization(cm)		Error(%)		LUCY
		X	Y	X	Y	
1	Amplitude threshold	13.1	10.3	4.8	3.0	7.5
	AIC	12.9	9.7	3.2	3.0	6.6
	Two step AIC	13.0	10.	4.0	0.0	6.8
	Hinkley criterion	13.6	10.4	8.8	4.0	7.6
2	Amplitude threshold	26.3	9.6	5.2	4.0	7.1
	AIC	26.3	9.6	5.2	4.0	7.1
	Two step AIC	25.7	9.3	2.8	7.0	6.3
	Hinkley criterion	26.7	9.3	6.8	7.0	7.8
3	Amplitude threshold	38.0	10.6	1.3	6.0	7.4
	AIC	38.5	11.0	2.7	10.0	8.2
	Two step AIC	37.9	10.6	1.1	6.0	7.3
	Hinkley criterion	38.7	10.8	3.2	8.0	8.4

LUCY는 각각 0.7 cm와 6.6인 것으로 해석되었다.

3. 위 결과를 종합해 볼 때, 임계전압법, AIC, Hinkley criterion 알고리즘은 신호 대 잡음비 수준에 따라 결과의 차이는 상당한 것으로 해석되었다. 그러나 Two step AIC 알고리즘은 1차적으로 결정된 도달시간 주변 신호에 대하여 특성함수와 AIC 알고리즘을 반복적으로 적용한 결과 발생 가능한 오차를 최소화 할 수 있었던 것으로 판단된다. 따라서 무수히 많은 불연속면의 영향으로 신호의 왜곡과 감쇠 등이 빈번히 발생하는 처분장에서 결합 분석을 위하여 Two step AIC 알고리즘의 적용은 결과의 정확성을 더욱 향상시킬 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부에서 주관하는 원자력기술 개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

- 이상은, 1999, A Study on the determination of source location and source mechanism by acoustic emission in rock materials, 공학박사학위논문, 강원대학교.
- 주영상 외, 2003, 음향방출시험기술과 응용, 한국원자력연구원, KAERI/AR-690/2003.
- Emsley, S., Olsson, O., Stenberg, H.J., Alheid and Falls, S., 1997, ZEDEXF a study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring,” Technical Report 97-30, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Falmagne, V., Kaiser, and Martin, C.D., 1998, Microseismic monitoring and rock mass degradation,” Proceedings of the 100th Canadian Institute of Mining and Metallurgy Annual General Meeting, Montreal, pp. 1-8.
- Grosse, C. U. and Ohtsu, M., 2008, Acoustic Emission Testing, pp. 149, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Grosse, C. U., 2000, Winpecker version 1.2. Instruction manual, University of Stuttgart, Stuttgart.
- Hensman, K., Mills, R., Pierce, S. G., Worden, L. and Eaton, M., 2010, Locating acoustic emission sources in complex structures using Gaussian Processes, Mechanical Systems and Signal Processing, 24, pp. 211-223.
- Kim, J. S., Kwon, S., Sanchez, M., and Cho, G. C., 2011, “Geological storage of high level nuclear waste”, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 15, pp. 721-737.
- Kurz, J. H., Grosse, C. U. and Reinhardt, H. W., 2005, Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete, Ultrasonics, 43, pp. 538-546.
- Landis, E., Ouyang, C. and Shah, S. P., 1992, Automated “determination of first P-wave arrival and acoustic emission source location”, Z Acoust. Emission, 10:\$97-S103.
- Lokajiček, T. and Klíma, K., 2006, “A first arrival identification system of acoustic emission(AE) signals by means of a high-order statistics approach”, Measurement Science and Technology, 17, pp. 2461-2466.
- Maeda, N., 1985, “A method for reading and checking phase times in auto-processing system of seismic wave data”, J. Seismol. Soc. Jpn., 38, pp 365-379.
- Maji, A. and Shah, S.P., 1988, Process zone and acoustic emission measurements in concrete”, Exp Mech, 28, pp. 27-33.
- Martin, C.D. and Read, R.S., 1996, “AECL's Mine-by experiment: a test tunnel in brittle rock”, Proceedings of the Second North American Rock Mech. Symposium, Vol. 2, pp. 13-24.
- Olsson, O. L., and Winberg, A., 1996, Current understanding of extent and properties of the excavation disturbed zone and its dependence of excavation method, Proceedings of the International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, pp. 101-112.
- Plouffe, M., 1990, A local seismic survey at Creighton mine. CANMET, Energy, Mines and Resources, Canada, Division Report MRL 90-076.
- Reinhardt, H. W. and Grosse, C. U., 2004, Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete, Construction and Building Materials, 18, pp. 145-154.
- Schumacher, T., Higgins, C., Glaser, S. and Grosse, C. U., 2007, Demand on Flexural Tension Steel Reinforcement Anchorage Zones in Full-Scale Bridge Bent Caps Quantified by Means of Acoustic Emission, Journal of Acoustic Emission, Vol. 25, pp. 316-323.
- Sedlak, P., Hirose, Y., Khan, S. A., Enoki, M. and Sikula, J., 2009, New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates, Ultrasonics, 49, pp. 254-262 (2009).
- Shiotani, T., Ohtsu, M. and Ikeda, K., 2001, “Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation”, Construction and Building Materials, 15, pp. 235-246.
- Sleeman, R. and Eck, T. V., 1999, “Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings”, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 113, pp. 265-275.
- Young, R. P., Hutchins, D. A., McGaughey, J., Towers, J., Jansen, D. and Bostock, M., 1988, “Geotomographic imaging in the study of mining induced seismicity”, Pure and Applied Geophysics, Vol. 129, pp. 571-596.
- Zhang, H., Thunber, C. and Rowe, C., 2003, “Automatic P-Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single-Component Recordings”, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 93, No. 5, pp. 1904-1912.



이 경 수

2005년 안동대학교 지구환경과학과 이
학사
2007년 서울시립대학교 토목공학과 석사
2010년 서울시립대학교 토목공학과 박
사수료

Tel: 042-868-2874
E-mail: lks@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
기술개발부 석사수료 후 연수생



이 창 수

1976년 고려대학교 토목공학과 공학사
1978년 고려대학교 토목공학과 공학석사
1990년 고려대학교 토목공학과 공학박사

Tel: 02-2210-2428
E-mail: csll@uos.ac.kr
현재 서울시립대학교 토목공학과 정교
수



최 중 원

1984년 한양대학교 공과대학 원자력공
학과 공학사
1986년 한양대학교 대학원 공과대학 원
자력 공학과 공학석사
1992년 한양대학교 대학원 공과대학 원
자력 공학과 공학박사

Tel: 042-868-2041
E-mail: njwchoi@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
기술개발부 책임연구원



김 진 섭

1999년 고려대학교 토목환경공학과 공
학사
2004년 고려대학교 토목환경공학과 공
학석사

Tel: 042-868-2874
E-mail: kverity@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
기술개발부 선임연구원



윤 찬 훈

2002년 인하대학교 자원공학과 공학사
2004년 인하대학교 자원공학과 공학석사
2011년 인하대학교 환경공학과 공학박사

Tel: 042-868-2874
E-mail: chyoon@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
기술개발부 박사 후 연수생