

가변창문함수를 이용한 미소파괴음의 P파 도달시간 결정 알고리즘 개발

이경수¹ · 조성하¹ · 이창수² · 최영철³ · 유보선^{1*}

¹(주)다산이엔지, ²서울시립대학교, ³한국원자력연구원

Development of an Algorithm for P-wave Arrival Time determination Using Amoving Window Function

Kyung-Soo Lee¹, Seong-Ha Cho¹, Chang-Soo Lee², Young-Chul Choi³, and Bo-Sun Yoo^{1*}

¹Geotechnical R&D Center, DASAN Engineering Co., Ltd.

²Department of Civil Engineering, The University of Seoul

³Korea Atomic Energy Research Institute

Received 28 February 2015; received in revised form 4 March 2015; accepted 6 March 2015

본 연구에서는 신호 대 잡음비가 낮은 미소파괴음 신호에 대한 진원 위치표정 결과의 정확성 향상을 위하여 가변창문 함수를 이용한 P파 도달시간 결정 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 기존 P파 도달시간 결정 알고리즘과 함께 신호 대 잡음비(SNR)가 각기 다른 가상의 미소파괴음 신호에 적용하여 정확성을 검토하였다. 실험결과 기존 P파 도달시간 결정 알고리즘은 SNR이 낮아질수록 결과의 정확성이 낮아지며 특히 SNR이 2.14에서는 모든 알고리즘에서 오류가 발생하였다. 반면에, 제안된 알고리즘은 신호의 분산을 고려한 가변창문함수를 신호에 적용하기 때문에 신호의 주파수특성과 신호의 증폭을 동시에 고려하였다. 따라서 SNR 2.14 이하의 신호에서도 제시된 알고리즘은 정확한 결과를 제시하였다.

주요어: 미소파괴음, 진원 위치표정, P파 도달시간 결정 알고리즘, 가변창문함수, 신호 대 잡음비

This study presents a novel algorithm for determining the P-wave arrival time using amoving window function to improve source localization in low-SNR (signal-to-noise ratio) acoustic emissions. The proposed algorithm was applied to low-SNR signals to verify the accuracy of measurements against existing algorithms. When other algorithms were applied, the test results revealed that SNR decreased and accuracy was reduced, especially where SNR was less than 2.14. The proposed algorithm using amoving window function considers the frequency characteristic and signal amplitude simultaneously, and produced reliable results where SNR was 2.14.

Key words: acoustic emission, source localization, P-wave arrival time determination algorithm, moving window function, signal-to-noise ratio

*Corresponding author: obst5@naver.com

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

방사성폐기물은 핵연료를 재처리할 때의 폐 용액 또는 사용 후 핵연료로 구성되어 있기 때문에 다량의 방사성독성과 붕괴열을 방출하므로 인간 생활권과 영구적으로 격리되어야한다. 이에 Tang and Sailig (1990)은 기술성, 안정성, 경제성 등을 고려한 환경평가 결과 지하 심부 신선한 암반에 터널을 건설하여 폐기물을 처분하는 것이 가장 합리적인 방법이라고 제시하였다. 그러나 지하 심부에 터널을 건설할 경우 공동 형성에 의한 응력교란과 응력재분배로 터널 주변 암반에서 채취한 암석시료의 일축압축강도, 탄성계수, 탄성과 속도는 손상받지 않은 구간에서 채취한 암석보다 각각 50%, 35%, 23% 감소하며 암반 투수계수의 경우는 $10\sim 10^6$ m/s 이상 증가한 것으로 보고된다(Sato et al., 2000; Tsang et al., 2005).

방사성폐기물 관련 선진국에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 균열 발생 시에 생성되는 미소과파음(Acoustic Emission, AE) 신호를 처분장과 유사한 지하 처분연구시설에 적용하여 지반거동과 균열발생을 모니터링하고 있다. AE는 미세균열 발생 시 생성되는 수십 kHz대역의 고주파 성분의 탄성파로서 균열에 대한 다양한 정보를 내포하기 때문에 발생한 신호를 이용하여 균열 발생구간을 예측 가능한 장점이 있다.

AE 분야에서 가장 널리 이용하고 있는 균열 진원위치표정기법은 지진파 탐사법에서 널리 적용되는 P파와 S파의 도달시간 차를 이용한 방법이다. 그러나 AE는 지진파와 달리 발생속도에 비하여 경계조건이 상대적으로 협소하므로 시료의 기하학적 형상과 경계조건 등에 의한 영향으로 P파를 제외한 S파, 표면파, 반사파 등은 중첩되어 센서에 도달된다(Lee, 1999; Grosse and Ohtsu, 2008). 따라서 AE 분야에서는 P파 도달시간 차를 이용한 방법이 가장 널리 적용되고 있다.

그러나 고주파 성분인 AE가 암반내부에서 발생할 경우 센서와 균열발생 지점과의 거리가 증가할수록 기하학적 감쇠와 재료 감쇠 그리고 불연속면 등의 영향으로 신호는 급격히 감소하며 그 결과 낮은 신호 대 잡음비(Signal to Noise ratio, SNR)로 진폭이 상대적으로 작은 P파는 주변잡음과 유사한 수준으로 센서에 전달된다. Landis et al. (1992)는 연구자의 경험적 판단에 의하여 P파 도달시간을 결정하는 것이 균열 진원위치표정(Source Localization Method)의 정확성을 향상시키는 가장 정확한 방법이라고 제시하였다. 그러나 AE는 지진

파와 달리 균열 발생 시 생성되기 때문에 손상이 진행될수록 막대한 양의 신호가 짧은 시간에 방출되기 때문에 수동적 방법으로 이를 결정하는 것은 상당한 시간이 필요하며 특히 연구자의 주관적 판단은 결과에 큰 영향을 줄 수가 있다(Sedlak et al., 2009).

본 연구에서는 국내·외에서 널리 사용되고 있는 P파 도달시간 결정 알고리즘에 대한 소개와 실내실험을 통한 각 알고리즘의 정확성에 대하여 분석하였다. 또한 제시된 실험결과를 토대로 신호 대 잡음비가 낮은 신호에 효과적인 가변창문함수를 이용한 P파 도달시간 결정 알고리즘을 제시하였다.

이론적 배경

AE 정의

AE는 비파괴시험(Non-Destructive Testing, NDT)의 일종으로 고체 내부에 국부적으로 형성되었던 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파, 탄성파의 물리적 현상, 탄성파를 이용한 시험법 또한 AE로 정의된다(ASTM-E610, 1982). X선, 초음파시험법과 달리 자발적 방출에 의하여 발생하는 수십 kHz 이상의 탄성파가 센서에 계측되기 때문에 구조물의 가동 중단 없이 실시간 모니터링을 수행할 수 있는 장점이 있다.

AE 신호형태

AE는 Fig. 1과 같이 돌발형과 연속형으로 분류된다(Pollock, 1989). 돌발형 신호는 균열, 변형 등에 의하여 발생하며 감쇠가 빨리 일어나는 특징을 보인다. 연속형 신호는 누수, 마찰, 노이즈 등에 의하여 발생하며 돌발형 신호와 달리 신호와 노이즈 구분이 명확하지 않고 신호의 지속시간이 긴 특징을 나타낸다. 균열, 손상과 관련된 연구에서는 돌발형 신호만을 AE로 간주하며 연속형 신호는 노이즈로 취급한다(Heo, 2001).

P파 도달시간 결정 알고리즘

기존 물리탐사기법은 인공적으로 발생한 신호를 이용하여 매질의 특성 변화를 분석한다. 반면에 AE는 균열 발생 시의 탄성파 성분을 탐지하여 위치정보를 추정하기 때문에 수동적 비파괴시험법(Passive NDT)으로 분류된다.

한편, AE는 기존 물리탐사기법과 달리 결합 발생 시의 신호를 계측하여 결합에 대한 정보를 유추하기 때문에 다수 센서를 이용할 경우 결합 발생구간에 대한 진

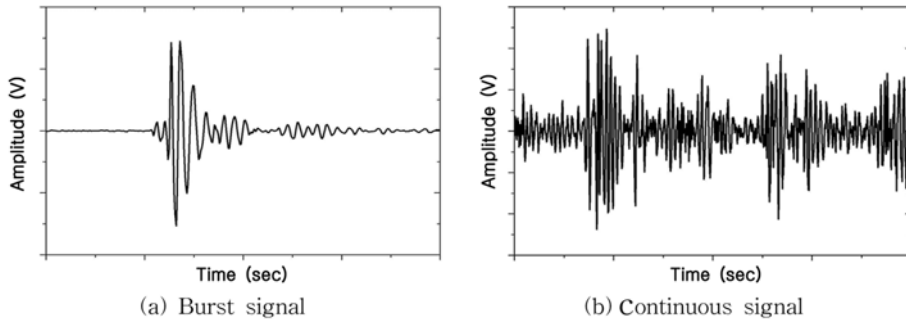


Fig. 1. Example of burst and continuous AE signals.

원위치표정이 가능한 장점이 있다. 따라서 항공, 정밀기계 분야에서는 AE기법을 이용하여 결함발생 구간 탐지를 위하여 널리 이용되고 있다.

AE분야에서 가장 널리 이용되는 균열 진원위치표정 기법은 P파 도달시간차를 이용하는 방법이다. 이는 지진파와 달리 AE는 발생속도에 비하여 경계조건이 험소하고 시료의 기하학적 형상과 경계조건 등에 의한 영향으로 P파를 제외한 S파, 표면파, 반사파 등은 중첩되어 센서에 도달된다(Lee, 1999; Grosse and Ohtsu, 2008).

한편, 균열 발생 시에 생성되는 AE는 막대한 양이 짧은 시간에 방출되기 때문에 P파 도달시간을 수동적 방법에 의존할 경우 막대한 시간이 소요되며 결과는 주관적 판단이 개입될 수 있다. 따라서 국내·외에서는 검출한계법, Akaike Information Criterion (AIC), Hinkley criteria, Two step AIC 등을 이용하여 P파 도달시간을 결정하고 있다.

검출한계법

검출한계법(Threshold picker)은 AE 분야에서 사용되는 P파 도달시간 결정법 중 가장 일반적 방법이다. 연구자가 검출한계(Threshold)를 결정한 뒤 초과하는 최초의 신호를 P파로 간주하여 도달시간을 결정하는 방법으로 특정 알고리즘의 적용 없이 결과를 도출할 수 있는 장점이 있다.

식 (1)은 Maji and Shah (1988)가 제안한 검출한계법으로 이는 P파 도달시간 이전에 도달된 노이즈 신호 70%의 진폭 평균과 표준편차 그리고 경험상수를 토대로 결정되는 검출한계를 초과하는 최초의 진폭을 P파로 간주한다. 그러나 검출한계법의 결과를 결정짓는 연구자의 주관적 판단과 재료적 특성에 좌우되기 때문에 노이즈가 큰 신호에 취약한 단점이 있다(Kurz et al., 2005).

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

여기서, m : 배경잡음의 시작부터 검출한계까지의 70% 신호에 대한 평균

σ : 배경잡음의 시작부터 검출한계까지의 70% 신호에 대한 표준편차

AIC

Sleeman and Eck (1999)은 지진파의 P파, S파 도달시간을 결정하기 위하여 식 (2)의 AR-AIC 알고리즘을 제안하였다. AR-AIC는 탄성과 신호에 시간에 따른 신호의 분산 결과를 토대로 결정되는 창문함수(window function)를 적용하여 주파수 변화에 의한 P파 도달시간을 결정하는 알고리즘이다.

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

여기서, k : 1, 2, 3 ... k번째 신호

M : AR 계수

N : N번까지의 신호번호(신호 종료시 번호)

$\sigma_{1,\max}^2, \sigma_{2,\max}^2$: 구간별 신호분산

그러나 AR-AIC 알고리즘의 결과 정확성은 재료적 특성에 따라 결정되는 AR 계수에 좌우된다. 따라서 Maeda (1985)는 AR-AIC를 AE 분야에 적용하기 위하여 AR 계수를 생략한 AIC 알고리즘을 제안하였으며 이는 식 (3)과 같다.

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

여기서, k : 신호 전체 번호

A : $S - k$

$\text{var}(x[1, k])$: 신호시작부터 신호 k 까지 분산

$\text{var}(x[k+1, S])$: $k+1$ 에서부터 S 까지 신호 분산

Hinkley criteria

식 (4)는 Reinhardt and Grosse (2004)에 의하여 제안된 Hinkley criteria으로 SNR이 낮은 신호에 대한 적용성을 강화하기 위하여 진폭을 에너지 성분으로 변환하여 신호와 노이즈의 구분을 용이하게 하였다. 결과의 정확성은 검출한계법과 같이 경험상수에 의하여 좌우된다.

$$S'_i = S_i - i\delta \tag{4}$$

여기서, S'_i : Hinkley criteria 결과

S_i : 번째 에너지에 대한 누적값

δ : $S(\alpha P)$ 으로 S_p 은 신호 전체 에너지

P : 신호 전체 길이

α : 경험상수

Two step AIC

AIC 또한 SNR이 낮은 신호에서는 P파와 노이즈와의 진폭 차이가 크지 않기 때문에 여러 극소점이 발생하며 그 결과 알고리즘의 정확성은 감소한다(Zhang et al., 2003). Sedlak et al. (2009)은 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 식 (5)의 특성함수를 이용하여 신호를 증폭한 뒤 AIC에 결과를 적용하는 Two step AIC 알고리즘을 제안하였다.

$$CF(i) = |x(i)| + R|x(i) - x(i-1)| \tag{5}$$

여기서, $CF(i)$: i 번째 신호에서의 진폭크기

$x(i)$: 탄성과 신호 중 i 번째의 진폭

R : 실험을 통하여 획득되는 상수

P파 도달시간 결정 알고리즘의 정확성 검토

가상의 AE 신호

본 연구에서는 SNR이 낮은 AE 신호에 대한 기준 P

파 도달시간 결정 알고리즘의 정확성 분석을 위하여 Fig. 2에 제시한 노이즈가 없는 가상의 AE 신호에 백색 잡음(white noise)을 주입하여 SNR을 인위적으로 낮게 한 뒤 이를 기존 P파 도달시간 결정 알고리즘에 적용하여 각 알고리즘의 정확성을 검토하였다. P파 도달시간과 주파수는 2,000 μ sec, 10 kHz로 설정하였으며 본 연구에서는 식 (6)을 이용하여 SNR을 결정하였다 (Lexington, 1987). Fig. 3은 백색잡음이 주입된 가상의 AE로서 SNR은 12.29, 5.33, 3.45, 2.14로 설정하였다.

$$SNR = 20 \log \frac{A_p}{A_n} \tag{6}$$

여기서, A_n : 노이즈 진폭

A_p : P파 진폭

기준 P파 도달시간 결정 알고리즘 정확성 검토

Fig. 4는 백색잡음이 없는 가상의 AE에 대한 기준 P파 도달시간 결정 알고리즘을 적용하여 분석한 결과이다. 노이즈 구간과 AE 구간의 진폭은 뚜렷한 차이를 보이므로 모든 알고리즘은 P파 도달시간은 원 결과(2,000 μ sec)와 유사한 2,002~2,004 μ sec의 결과를 제시하였다. 그러나 Fig. 5와 같이 SNR이 12.29로 낮아짐에 따라 제시되는 결과는 오차가 2,002~2,006 μ sec로 증가하기 시작하며 특히 AIC와 Hinkley는 P파 도달시간 이후 신호 진폭이 증가하는 3,000 μ sec 구간에서 변곡점이 발생하는 것으로 나타났다.

SNR이 낮은 신호에 대한 기준 P파 도달시간 결정 알고리즘에 대한 적용성을 검토하기 위하여 SNR을 12.29에서 5.33으로 낮춘 결과 AIC는 3,000 μ sec에 도달된 신호를 P파로 결정하는 오류가 발생하였다. 이후 SNR이 3.45로 낮아지면서부터 검출한계법 또한 2,060 μ sec에 도달된 신호를 P파로 결정하는 것으로 해석되었다. 마지막으로 SNR이 2.14인 경우 모든 알고리즘에서

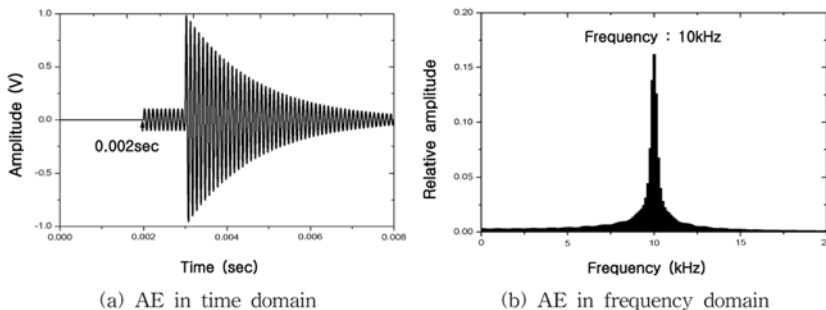


Fig. 2. Simulated AE waveform (without white noise).

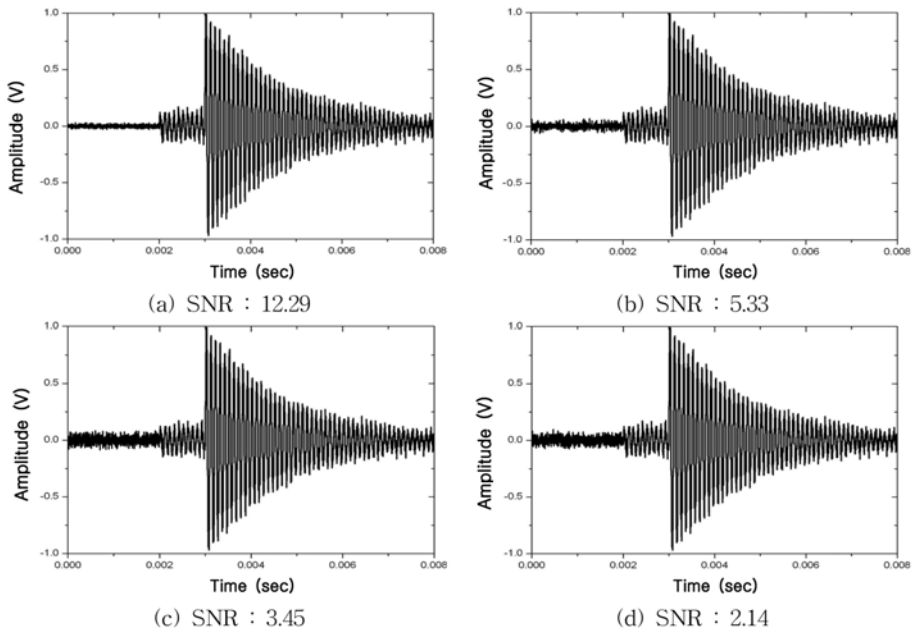


Fig. 3. Simulated AE waveform (with white noise).

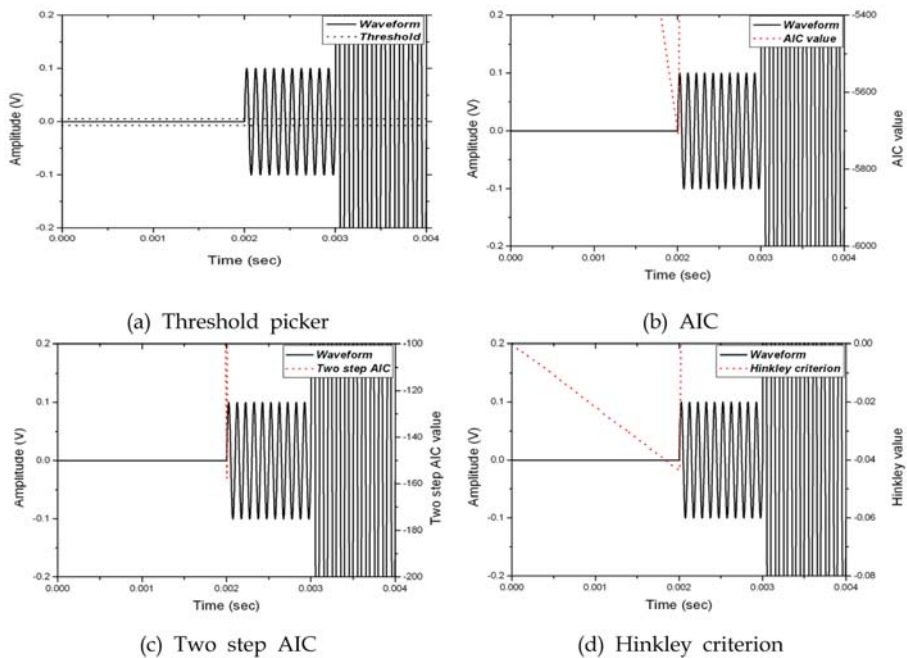


Fig. 4. P-wave arrival time determined by existing algorithms (without white noise).

제시한 결과는 약 2,770 μsec , 3,000 μsec 에서 발생한 신호를 P파로 간주하는 오류가 발생하였다. Fig. 6은

SNR이 2.14인 경우에 대한 기존 P파 도달시간 결정 알고리즘에 대한 결과를 나타낸 것이다.

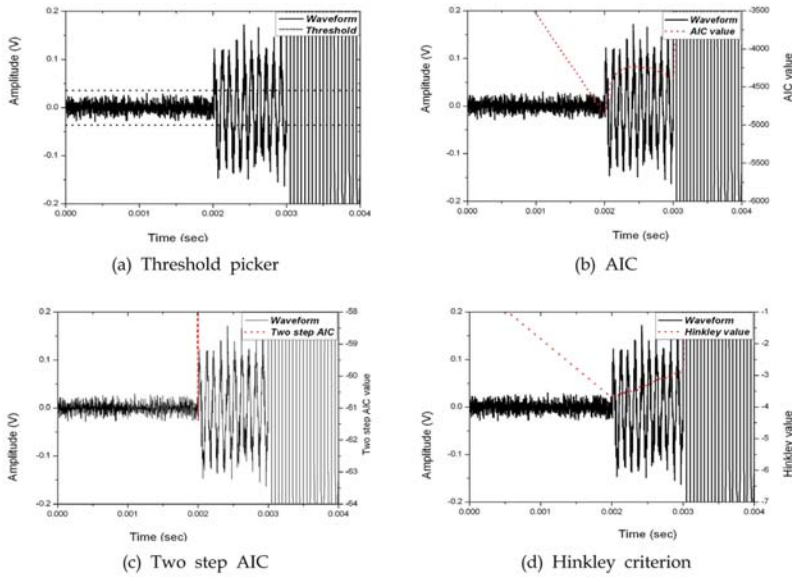


Fig. 5. P-wave arrival time determined by existing algorithms (SNR = 12.29).

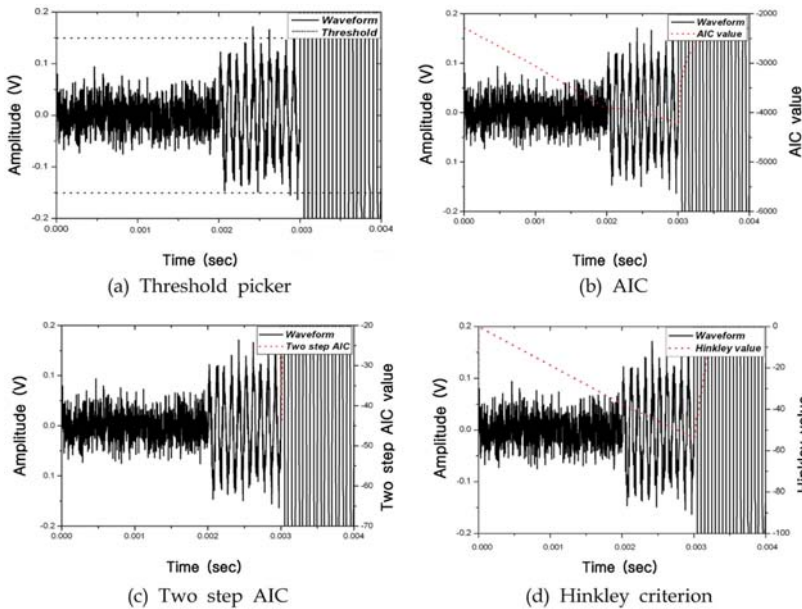


Fig. 6. P-wave arrival time determined by existing algorithms (SNR = 2.14).

가변 창문함수를 이용한 P파 도달시간 결정 알고리즘

가변 창문함수를 이용한 P파 도달시간 결정 알고리즘 기본 개념

Fig. 2에 제시한 바와 같이 AE는 Time domain과

Frequency domain으로 분류되며 각각은 노이즈 구간의 평균 진폭이 P파 진폭을 초과하는 경우를 제외하고는 P파 도달시간을 기점으로 주파수와 진폭은 차이가 존재한다. 따라서 이론적으로는 P파의 경우 주파수, 진폭 또는 주파수와 진폭 차를 이용하여 노이즈와 신호 구간에서 분류 가능하다(Sedlak et al., 2009). 그러나 기존 P

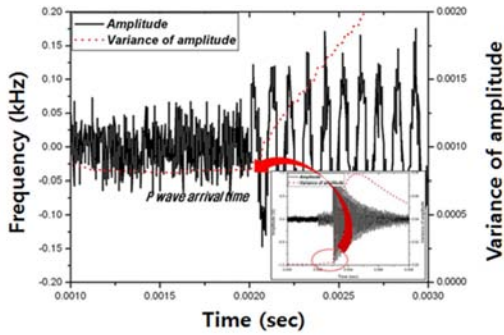


Fig. 7. Dramatic change in amplitude variance in the AE waveform.

파 도달시간 결정 알고리즘의 경우 SNR이 낮아질수록 결과의 정확성은 낮아지는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제안하는 P파 도달시간 결정 알고리즘

Fig. 6의 SNR이 2.14인 신호 또한 P파 도달시간을 기점으로 노이즈와 P파의 진폭 차이는 구분된다. 따라서 SNR이 2.14인 신호에 가변 창문함수를 적용한 뒤 신호 시작 구간부터 2 μsec 씩 증가시켜 가면서 이를 시간 도메인 형태의 신호에 대한 평균과 분산을 분석한 결과 Fig. 7과 같이 노이즈 구간 진폭은 평균과 분산이 각각 $-1.11e^{-18}$ 과 $8.0e^{-4}$ 이며 P파 도달시간을 기점으로 분산 기울기는 급격히 증가하기 시작하였다. 그러나 검출한계법, Hinkly criterion은 단순히 신호의 진폭을 증폭시켜 노이즈와 P파를 구분하려고 하였다. AIC, Two step AIC는 창문함수를 적용하여 신호 증폭과 주파수 특성을 동시에 고려하여 P파 도달시간을 결정하였으나 신호의 증폭이 상대적으로 미약함에 따라 낮은 SNR에 알고리즘을 적용할 경우 변곡점 발생에 의하여 효과적인 결과를 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 노이즈와 AE의 진폭, 주파수 특성을 동시에 고려하기 위하여 time-domain 신호에 신호 분산을 고려한 창문함수를 적용하여 P파 도달시간을 결정하였다. 따라서 기존 알고리즘과 달리 창문함수에 의하여 신호는 증폭됨과 동시에 주파수 특성을 동시에 고려하여 P파 도달시간을 효율적으로 결정하였다. 제안된 알고리즘은 식 (7)과 같이 주파수범위가 각기 다른 창문함수를 적용한 뒤 신호의 분산이 급격히 증가하는 구간을 P파 도달시간으로 결정한다.

$$f_k(\tau, T) = \frac{1}{M \cdot T} \int_{k\tau}^{k\tau+T} W(t-k\tau) \cdot f(t) dt \quad (7)$$

$k = 0, 1, 2, \dots, N$

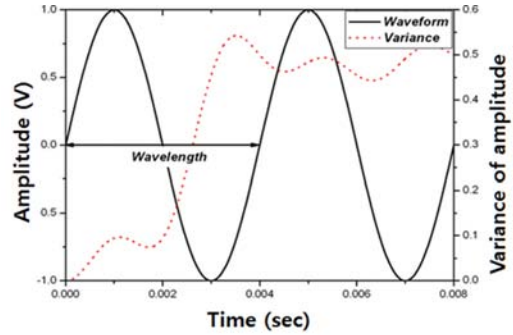


Fig. 8. Frequency range of the moving window function.

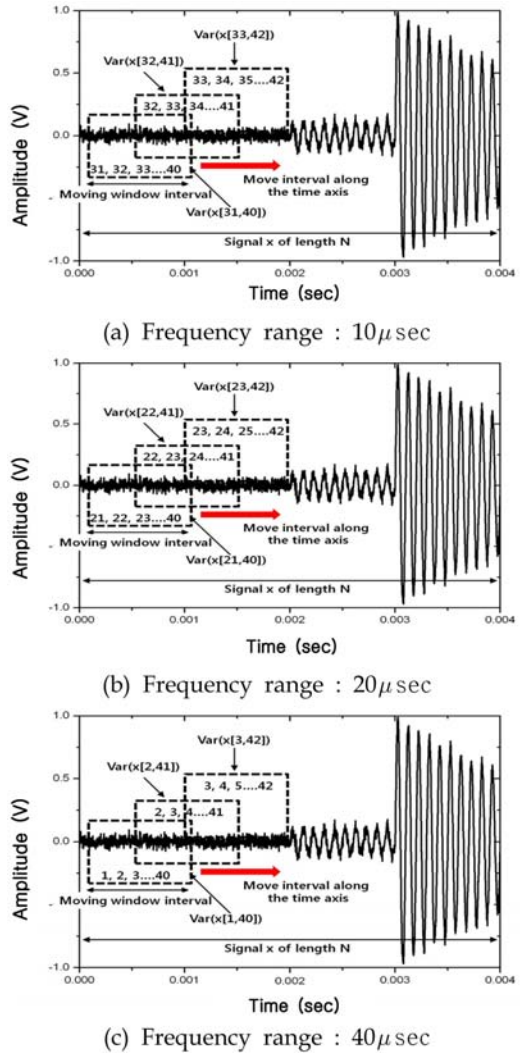


Fig. 9. Basic concept of the P-wave arrival determination algorithm using amoving window function.

여기서, $W(t)$: 창문함수

T : 창문함수 크기

$k\tau$: 시간 t 에서 창문함수

$$M: \int_0^T W(t)dt$$

N : 신호 전체 길이

여기서, 균열 발생 시의 미소파괴음은 노이즈와 신호의 합으로 구성되어 있다. 따라서 노이즈 구간의 평균은 0이며 P 파 도달시간 이후 구간부터는 급격히 증가하기 때문에 본 연구에서는 통계적 기법을 적용하여 신호의 분산식에 식 (7)의 창문함수를 적용하여 분산이 갑작스럽게 증가하는 구간을 P 파 도달시간으로 결정하였다.

$$MV(k, T) = \frac{1}{M^2 A^4} \left[T \int_0^T \left\{ \int_{k\tau}^{k\tau+T} W(t-k\tau)f(t)dt \right\}^2 d\tau - \left\{ \int_0^T \int_{k\tau}^{k\tau+T} W(t-k\tau)f(t)dt d\tau \right\}^2 \right] \quad (8)$$

한편, 식 (9)의 주파수 ω 를 가지는 사인파를 식 (8)의 창문함수에 적용하면 식 (9)는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 식 (10)과 같이 신호의 분산과 창문함수를 이용한 알고리즘은 창문함수 크기인 T 에 대한 함수이므로 창문함수 크기에 따라 분산은 달라진다. 따

라서 SNR이 낮은 신호일지라도 제안된 방법을 적용하여 창문함수 크기를 변화시켜 분산을 구하면 P 파 도달시간을 기점으로 신호의 분산은 노이즈 구간과 비교할 때 상대적으로 커지는 것을 확인할 수 있다.

$$f(t) = \sin\omega t \quad (9)$$

$$MV(k, T) = \frac{1}{4M^2 T^4 \omega^2} (2\omega^2 - \omega T \sin 2\omega T - 2\cos 2\omega T + 8\cos \omega T - 6) \quad (10)$$

본 연구에서는 SNR이 낮은 신호에 대한 결과의 정확성 향상을 위하여 창문함수의 크기를 각기 달리한 가변 창문함수를 신호에 적용하였다. 창문함수의 크기는 P 파 도달시간을 결정하는데 가장 중요한 인자이다. 따라서 Fig. 8의 사인파를 P 파로 가정 한 뒤 신호의 분산을 분석한 결과 한 파장 이내에서 변화량은 가장 큰 변화를 나타냈다. 이에 본 연구에서는 창문함수 크기를 한 파장 이내로 제한하여 결과를 획득하였다.

제안된 알고리즘의 정확성 검토

본 연구에서는 창문함수 크기를 Fig. 9와 같이 10, 20, 40 μ sec로 설정하였다. 따라서 각기 다른 주파수대역을 가지는 세 개의 창문함수가 각각의 미소파괴괴음 신호에 적용되며 창문함수는 신호 시작부터 종료까지 2 μ sec 씩 이동하여 결과를 획득하였다.

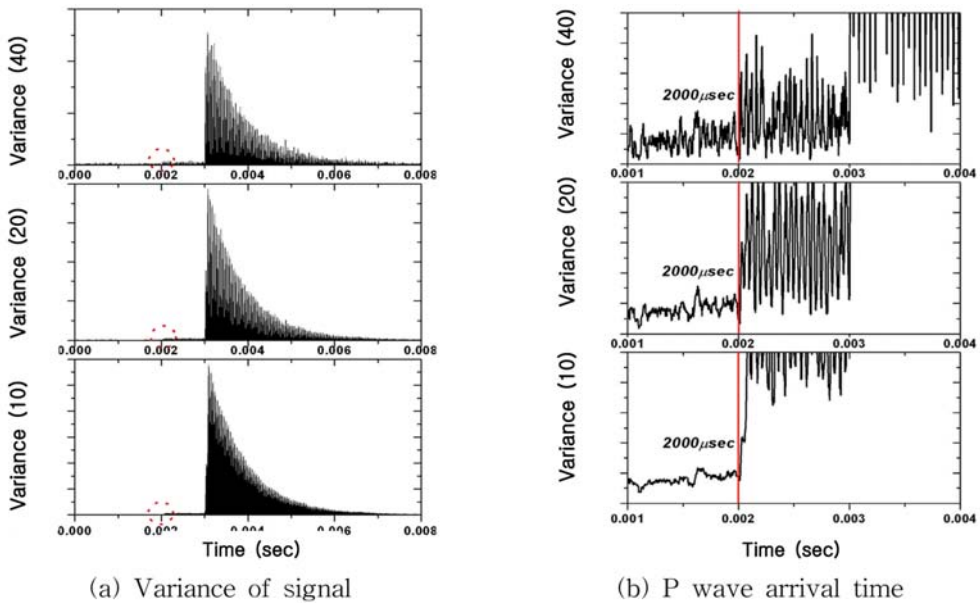


Fig. 10. P-wave arrival time determined by the moving window algorithm (SNR = 2.14).

Fig. 10은 SNR이 2.14인 가상의 AE에 제안된 알고리즘을 적용한 결과이다. 신호의 분산은 P파 도달시간인 2000 μsec 를 시작으로 노이즈 구간에서의 결과와 달리

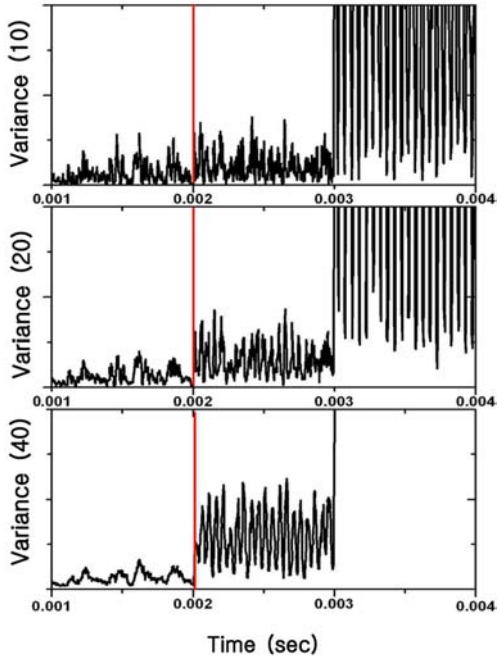


Fig. 11. P-wave arrival time determined by the moving window algorithm (SNR = 1.56).

리 증가하기 시작하며 창문함수의 크기가 커질수록 분산은 더욱 뚜렷이 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

제시된 알고리즘의 적용성을 보다 명확히 검토하기 위하여 가상 AE의 SNR을 1.56로 낮춘 뒤 이를 제안된 알고리즘에 적용하였다. 해석결과 Fig. 11과 같이 주파수 범위가 10 μsec 인 창문 함수를 이용한 결과는 낮은 SNR에 의하여 노이즈와 신호 구간의 분산 결과가 뚜렷한 차이를 보이지 않지만 이를 제외한 주파수대역이 큰 다른 두 창문 함수를 이용한 결과는 P파 도달시간인 2000 μsec 를 기점으로 분산은 급격히 증가하는 것으로 해석되었다.

이 외에도 본 연구에서는 제안된 알고리즘의 정확성을 검토하기 위하여 화강암반에서 발생한 AE 신호를 제안된 알고리즘에 적용하였다. Fig. 12는 발생한 신호와 제안된 알고리즘에 의한 신호의 분산을 주파수 범위 10 μsec , 20 μsec , 40 μsec 로 분류한 결과로서 신호의 분산이 2770 μsec 에서부터 0.0004에서 두 배이상인 0.0008로 증가하는 것을 관찰할 수 있다(Lee, 2013).

결론

본 연구에서는 AE 분야에서의 균열 진원위치표정에 대한 정확성 향상을 위하여 가변 창문함수를 이용한 P파 도달시간 결정 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고

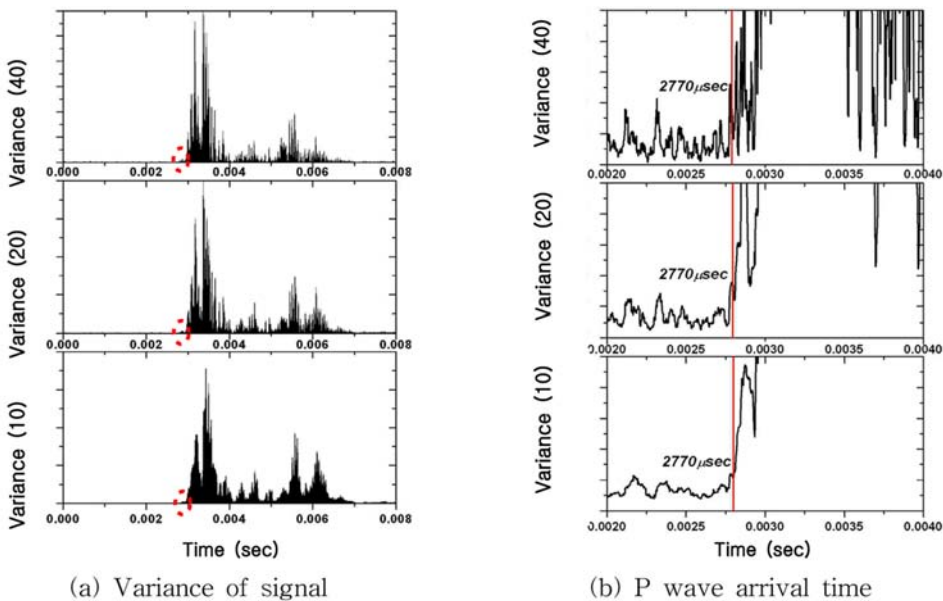


Fig. 12. P wave arrival time determined by moving window algorithm (AE signal generated from Granite rockmass).

리즘에 대한 주요 결론은 아래와 같이 요약된다.

1. 국내 · 외에서 널리 이용되고 있는 P파 도달시간 결정 알고리즘인 검출한계법, AIC, Hinkley criteria, Two step AIC의 경우 SNR이 높은 신호에 적용할 경우 결과의 정확성은 뛰어난 것으로 나타났다. 그러나 SNR이 낮아질수록 결과의 정확성은 낮아지며 2.14 이하의 신호에는 모든 알고리즘에서 결과의 오류가 발생하는 것으로 나타났다.

2. 기존 P파 도달시간 결정 알고리즘의 경우 진폭의 크기만을 증폭시킴에 따라 SNR이 낮은 신호에 대해서는 결과의 정확성이 낮아지는 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 주파수 특성과 진폭을 동시에 고려한 P파 도달시간 결정 알고리즘을 개발하기 위하여 신호의 분산을 고려한 가변창문함수를 신호에 적용하여 결과를 도출하였다. 해석결과 기존 알고리즘과 달리 SNR 2.14 이하의 신호에서도 정확한 결과를 제시하며 특히 가변창문함수의 크기가 10 μsec 에서 40 μsec 로 커질수록 결과의 정확성은 뛰어난 것으로 나타났다.

3. 신호의 경우 SNR은 재료의 손상정도, 기계적 · 주변 환경적 특성에 좌우된다. 기존 P파 도달시간 결정 알고리즘의 경우 SNR이 낮은 신호에 대해서는 결과의 정확성이 상대적으로 낮아지는 단점이 있다. 반면에 가변창문함수를 이용한 알고리즘은 주파수 특성을 고려하며 신호의 진폭을 동시에 증폭시킴에 따라 낮은 SNR의 신호에서도 탁월한 정확성을 제시하였다. 따라서 제시된 알고리즘은 AE 분야에서 균열 진원위치표정 정확성 향상 이외에도 지진학 및 탄성과 신호를 이용한 다양한 분야에 적용 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호#14CTAP-C078006-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Grosse, C. U. and Ohtsu, M., 2008, Acoustic emission testing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 500p.
- Heo, J. S., 2001, Measurement of acoustic emission and the characteristics of deformation and fracturing of rock under triaxial compression, PhD Thesis, Seoul National University, 142p (in Korean with English abstract).
- 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(7), 538-546.
- Landis, E., Ouyang, C., and Shah, S. P., 1992, Automated determination of first P wave arrival and acoustic emission source location, Journal of Acoustic Emission Testing, 10(1-2), 97-103.
- Lee, K. S., 2013, Prediction of damaged zone and damage assessment using acoustic emission at granite underground, PhD Thesis, The University of Seoul, 161p (in Korean).
- Lee, S. E., 1999, A study on the determination of source location and source mechanism by acoustic emission in rock, PhD Thesis, Kangwon National University, 193p (in Korean).
- Lexington, K., 1987, Civil engineering applications of acoustic emission, 58p.
- Maeda, N., 1985, A method for reading and checking phase times in auto processing system of seismic wave data, Journal of the Seismological Society of Japan, 38(3), 365-379.
- Maji, A. and Shah, S. P., 1988, Process zone and acoustic emission measurements in concrete, Experimental Mechanics, 28(1), 27-33.
- Pollock, A. A., 1989, Acoustic emission inspection, Technical Report TR-103-96-12/98. Physical Acoustics Corporation.
- Reinhardt, H. W. and Grosse, C. U., 2004, Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete, Construction and Building Materials, 18(3), 145-154.
- Sato, T., Kikuchi, T., and Sugihara, K., 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary-rock at Tono mine, central Japan, Engineering Geology, 56(1-2), 97-108.
- 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(2), 254-262.
- 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(1-4), 265-275.
- Tang, Y. S. and Sailing, J. H., 1990, Radioactive waste management, Hemisphere publishing co, New York, 460p.
- Tsang, C., Bernier, F., and Davies, C., 2005, Geohydro-mechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays-in the context of radioactive waste disposal, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42(1), 109-125.
- Zhang, H., Thunber, C., Rowe, C., 2003, Automatic P-Wave arrival detection and picking with multiscale avelet analysis for single-component recordings, Bulletin of Seismological Society of America, 93(5), 1904-1912.

이경수

(주)다산이엔지, 지반기술연구소, 차장
서울특별시 관악구 관악로 37길 56 다산빌딩 2층
Tel: 02-870-7857
Fax: 02-888-0192
Email: zzangomar@gmail.com

조성하

(주)다산이엔지, 지반기술연구소, 전무
서울특별시 관악구 관악로 37길 56 다산빌딩 2층
Tel: 02-870-7852
Fax: 02-888-0192
Email: shacho88@gmail.com

이창수

서울시립대학교, 토목공학과, 정교수
서울특별시 동대문구 서울시립대로 163 건설공학관
3층
Tel: 02-6490-5563
Fax: 02-6490-5586
Email: csll@uos.ac.kr

최영철

한국원자력연구원, 방사성폐기물처분연구부,
선임연구원
대전광역시 유성구 덕진동 150-1
Tel: 042-868-4870
Fax: 042-868-8313
Email: cyc@kaeri.re.kr

유보선

(주)다산이엔지, 지반기술연구소, 대리
서울특별시 관악구 관악로 37길 56 다산빌딩 2층
Tel: 02-870-7856
Fax: 02-888-0192
Email: obst5@naver.com