

시간-주파수 누적 변화량과 가변 임계값을 이용한 지진 이벤트 자동 검출 알고리즘

Earthquake Event Auto Detection Algorithm using Accumulated Time-Frequency Changes and Variable Threshold

최 훈*
(Hun Choi)

Abstract - This paper presents a new approach for the detection of seismic events using accumulated changes on time-frequency domain and variable threshold. To detect seismic P-wave arrivals with rapidness and accuracy, it is that the changes on the time and the frequency domains are simultaneously used. Their changes are parameters appropriated to reflect characteristics of earthquakes over moderate magnitude (\geq magnitude 4.0) and microearthquakes. In addition, adaptively controlled threshold values can prevent false P-wave detections due to low SNR. We tested our method on real earthquakes those have various magnitudes. The proposed algorithm gives a good detection performance and it is also comparable to STA/LTA algorithm in computational complexity. Computer simulation results shows that the proposed algorithm is superior to the conventional popular algorithm (STA/LTA) in the seismic P-wave detection.

Key Words : Earthquake event, Seismic P-wave detection, Triggering, STA/LTA

1. 서 론

최근 아이티와 일본 동북부에서 발생한 대규모 지진으로 많은 인명피해와 경제적 피해가 발생함에 따라 국내외의 지진에 대한 관심이 증가하고 있다. 지진은 그 자체만으로도 큰 피해를 입히지만 화재, 폭발, 누수, 누진, 그리고 원전사고 등과 같은 추가적인 2차 재해를 유발한다. 현재 과학 기술로는 지진발생 예측이 불가능하기 때문에 예측보다는 지진 발생 시 신속한 통보 및 대처를 통해서 지진에 대한 피해를 줄여야 한다. 따라서 미국, 일본, 대만을 비롯한 선진국에서는 지진조기경보시스템의 개발을 통해 지진 피해를 감소시키려는 노력을 하고 있다[1-5]. 일반적으로 지진 발생 시 종파인 P파(7~8 Km/s)가 가장 빨리 전파되며 뒤이어 피해가 큰 횡파인 S파(3~4Km/s)가 전파된다[6]. 지진조기경보시스템은 전파 속도가 가장 빠른 P파를 검출하여 S파가 도달하기 전 지진 발생 여부를 신속히 통보하고 주요 시설물을 제어함으로써 지진에 의한 피해를 줄이는 시스템이다. 이와 같은 지진조기경보시스템 개발에 있어 신속·정확한 지진 이벤트를 검출하는 것은 매우 중요하다[1].

지진 이벤트(event) 검출을 위한 기존의 연구들은 간단하게 진폭과 에너지 임계값(threshold value)을 이용한 검출방법[7,8], 주파수 영역에서 주된 고유값(eigen value)을 이용한 검출 방법[9], 복잡한 패턴인식, 적응형 인공 신경망 기반(adaptive artificial neural network)의 지진 검출 방법[10],

3축(E-W, N-S, U-D)에 대한 웨이블릿(wavelet)을 이용한 검출방법[11,12], 한 축성분에 대한 멀티 스케일 웨이블릿(multi-scale wavelet) 방법을 적용한 검출방법[13] 등 다양한 연구결과가 발표되었다. 현재 국내외에서 운영 중인 지진정보시스템은 수백여 곳에 설치된 관측소에서 측정된 자료를 중앙의 자료분석센터로 전송받아 진앙지 파악 및 규모 산정을 위해 정확한 지진 발생 시점을 분석하게 된다. 따라서 엄청난 량의 데이터를 동시에 처리해야 하므로 P파 검출 알고리즘의 복잡도는 대단히 중요한 문제이다. 앞에서 언급한 다양한 고급 분석기법이 적용된 알고리즘들은 좋은 검출 성능을 보이지만 실제 현장에서는 복잡한 동작 파라미터의 설정과 무엇보다도 방대한 계산량의 문제로 적용이 곤란하다. 따라서 대부분의 운영 중인 조기경보시스템에서는 다양한 검출 알고리즘 중 비교적 적은 복잡도를 갖는 STA/LTA 알고리즘을 적용하고 있다[14].

STA/LTA 검출 알고리즘(Triggering Algorithm)은 측정된 신호의 절대값 혹은 포락선으로부터 각각의 다른 길이의 구간 평균 비를 이용하여 지진파와 배경잡음을 구별한다. 즉, STA와 LTA의 비는 지진파와 배경잡음의 에너지비로서 신호 대 잡음비(SNR; signal to noise ratio)를 의미하며 이 에너지 비의 크기가 미리 정해 놓은 임계값을 초과하면 지진 이벤트가 검출(triggering)된다. STA/LTA 알고리즘은 시간축의 크기 변화량의 평균의 비를 이용하는 방식으로 배경잡음과 비슷한 크기의 진폭을 갖는 중규모 이하 지진의 경우 에너지 비가 낮아 알고리즘의 검출성능이 현저히 저하된다. 또한 힐버트 변환(hilbert transform)을 이용할 경우 신호의 전처리 과정으로 많은 계산량이 요구되는 단점이 있다. 무엇보다 STA 윈도우 길이, LTA 윈도우 길이(window duration), STA/LTA 검출 임계값 등의 파라미터 값의 선택

* 정 회 원 : 동의대학교 전자공학과 조교수

E-mail : hchoi@deu.ac.kr

접수일자 : 2012년 3월 29일

최종완료 : 2012년 7월 17일

에 따라 검출 성능이 영향을 받게 된다. 최근 이러한 STA/LTA형 검출 알고리즘의 단점을 개선한 수정 에너지 비(modified energy ratio: MER) 검출 알고리즘이 제안되었다[15]. MER 검출 알고리즘은 에너지 비(Energy ratio)의 세제곱을 사용하여 STA/LTA 알고리즘에 비해 검출 성능을 향상시켰지만 여전히 지진파와 배경잡음의 에너지 비가 낮을 경우 검출 성능이 저하된다. 또한 에너지 비(Energy ratio)의 세제곱을 이용하므로 추가 계산량이 많은 단점이 있다.

본 논문에서는 지진 이벤트 자동 검출 시 알고리즘의 복잡성과 파라미터 선택 문제점을 해결하기 위해 계측된 지진 신호의 주파수 변화와 진폭 변화를 동시에 고려하는 지진 이벤트 자동 검출 방법을 제안한다. 제안한 방법은 낮은 SNR을 갖는 지진파 신호에 대한 검출 성능 향상이 가능하며, 기존 지진 이벤트 검출 알고리즘에 비해 적은 계산량과 구현이 간편한 장점이 있다. 제안한 방법의 성능은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. ATFC 알고리즘

2.1 기존 STA/LTA형 알고리즘

STA/LTA형 알고리즘은 신호 대 잡음비 (SNR; signal to noise ratio) 기반의 검출방법으로 측정된 신호의 절대값 혹은 포락선으로부터 각각의 다른 길이의 구간 평균 비를 이용하여 지진파와 배경잡음을 구별한다. STA/LTA 알고리즘에서의 중요 파라미터인 에너지 비는 다음과 같다.

$$STA/LTA = \frac{\frac{1}{L_{STA}} \sum_{i=1}^{L_{STA}} |X(n-i)|}{\frac{1}{L_{LTA}} \sum_{j=1}^{L_{LTA}} |X(n-j)|} \quad (1)$$

여기서 L_{STA} 와 L_{LTA} 는 각각 단구간 데이터 길이 (Short-term data length)와 장구간 데이터 길이(Long-term data length)이며, $X(n)$ 는 지진센서에 의해 수집된 신호에서 DC 및 부가잡음을 제거하기 위해 적절히 설계한 디지털 필터를 이용하여 전처리한 신호이다. $|X(n)|$ 는 포락선을 구하기 위해 힐버트(Hilbert) 변환된 결과를 사용하기도 한다. 식 (2)는 MER 알고리즘에서의 에너지 비를 나타낸다.

$$er3(n) = \left(|X(n)| \times \frac{\sum_{i=0}^{\infty} X(n-i)^2}{\sum_{i=0}^{\infty} X(n+i)^2} \right)^3 \quad (2)$$

여기서 ne 는 정해진 데이터 길이(fixed data length)이며 i 와 j 는 시간 인덱스(time index)를 나타낸다.

식 (1)에서 STA(short time average)는 $X(n)$ 에 대해 민감하게 변하는 값으로 지진 발생 시 감지되는 진동을 표현하기 위한 단기간 평균값이며, LTA(long time average)는 지진 센서가 설치된 지역(site)에서의 배경잡음에 해당하는 진동을 표현하기 위한 장기간 평균값이다. 즉, 지진파와 배

경잡음의 에너지 비인 STA/LTA가 미리 정해 놓은 임계값을 초과하면 지진파가 검출(triggering)된다. 반면 (2)의 MER 검출 알고리즘에서는 에너지 비의 세제곱을 사용함으로써 배경잡음에 대한 지진파 검출 성능이 향상된다. 그러나 우측변의 분수 항으로 표현되는 에너지 비(Energy ratio)의 세제곱에 의존하여 $er3(n)$ 을 구하므로 계산량이 많은 단점이 있다.

2.2 시간-주파수 누적변화량을 이용한 지진 이벤트 검출 알고리즘

STA/LTA형 알고리즘의 취약점과 파라미터 선택 문제점을 해결하기 위해 계측된 신호의 시간영역과 주파수 영역에서의 변화를 동시에 고려하는 지진파 자동 검출 방법을 제안한다. 제안한 지진 P파 검출 방법은 낮은 SNR신호에 대한 검출 성능 향상이 가능하며, 기존 STA/LTA형 검출 알고리즘에 비해 계산량이 적은 장점이 있다. 일반적으로 중규모 이하 지진의 경우 지진파 신호는 5Hz 이상의 주파수 성분을 가지며 규모가 증가할수록 스펙트럼의 범위가 늘어난다[16,17]. 따라서 지진 P파 자동검출을 위해 배경 잡음(상시 관측신호)과 지진 이벤트에 의한 지진파 신호를 구분함에 있어 진폭과 더불어 주파수의 변화를 이용하는 것이 유리하다. 센서로부터 수집된 신호의 임의의 데이터 구간(data segment)에 대해 누적 시간-주파수 변화(ATFC; Accumulated Time-Frequency Change)를 이용하는 제안한 지진 P파 검출 알고리즘은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$ATFC(n) = Q_i(n) + Q_f(n) \quad (3)$$

$$Q_i(n) = \sum_{i=0}^{L-1} |X(n-i)| \quad (4)$$

$$Q_f(n) = \alpha \sum_{i=0}^{L-1} ||X(n-i)| - |X(n-i+1)|| \quad (5)$$

여기서 $ATFC(n)$ 는 시간-주파수 영역의 누적 변화량이다. $Q_i(n)$ 와 $Q_f(n)$ 는 각각 시간 영역 변화량과 주파수 영역 변화량, $X(n)$ 는 전처리된 지진 신호, 그리고 L 은 데이터 세그먼트의 길이, α 는 스케일링 파라미터(scaling parameter)이다.

식 (4)는 시간 영역 변화량을 나타내며 중규모 이상의 지진 발생 시 나타나는 진폭의 급격한 증가를 나타낼 수 있도록 임의의 데이터 구간(Data Segment)내에서 진폭의 절대값을 누적한 양으로 정의할 수 있다. 식 (5)는 주파수 영역 누적 변화량을 나타내며 중규모 이상의 지진뿐만 아니라 비교적 작은 중규모 이하의 미세 지진에서 주로 나타나는 주파수 변화(주파수 증가)를 검출하기 위한 파라미터이다. 주파수 증가는 주기적인 신호에서 단위시간 당 신호의 변화가 큰 것으로 볼 수 있으므로 임의의 길이(L)를 갖는 데이터 구간 내에서 데이터 샘플간 거리 즉, 변화량을 누적한 양으로 정의할 수 있다. 식 (3) ~ 식 (5)에 정의한 $Q_i(n)$ 와 $Q_f(n)$ 의 변화를 이용하여 배경 잡음과 지진 신호를 구별할 때 기준이 되는 임계값 설정이 중요하다. 기존 STA/LTA 알고리즘에서는 신호 대 잡음비가 고정된 임계값을 초과할 때 P파가 검출된다. 그러나 이 경우 관측소별로 사전 측정

을 통해 배경잡음을 분석해야 하고 임계값 설정 시 오검출 방지를 위해 배경잡음에 비해 비교적 높게 설정해야 한다. 이처럼 시행오차(trial and error)를 통해 높게 설정된 임계값은 검출시점의 지연을 유발하게 된다. 제안한 방법에서는 매 시간 측정 장소의 배경잡음에 따라 능동적으로 조절되는 임계값을 사용한다. 임계값 조정 기법이 적용된 제안한 ATFC 알고리즘의 단계별 설명은 다음과 같다.

- 시작(Start) : 지진과 검출 센서(가속도 또는 속도 센서)로부터 검출된 아날로그 신호들은 아날로그-디지털변환기(ADC)를 거쳐 디지털신호로 변환되어 수집된다. 이때 DC 성분과 신호추정 및 변환 시 부가된 각종 잡음 신호를 제거하기 위해 IIR 대역통과필터(Band Pass Filter: BPF)를 이용한 전처리(pre-processing)를 한다.

- ATFC 계산(Calculation of ATFC(n)) : 전처리된 신호 $X(n)$ 으로부터 임의의 길이(L)를 갖는 데이터 구간에서 시간영역 변화량 $Q_i(n)$ 과 주파수 영역 변화량 $Q_f(n)$ 을 계산하고, 이로부터 시간-주파수영역 변화량인 $ATFC(n) = Q_i(n) + Q_f(n)$ 를 구한다.

- 파라미터 초기화(Parameter Initialization) : 시스템의 파라미터 초기화는 주기적으로 실행되며, 이때 위 단계에서 계산된 $ATFC(n)$ 를 사용하여 식 (6)과 같이 고정 파라미터(fixed parameter)인 기준 임계값(TH_{REF})구한다. 이때 일정 시간(초기화 시간)인 T 구간의 $ATFC(n)$ 의 평균을 구하고 그 값의 2배를 TH_{REF} 로 설정한다.

$$TH_{REF} = \frac{2}{T} \sum_{i=0}^{T-1} ATFC(n-i) \quad (6)$$

그림 1과 그림 2는 식 (6)의 기준 임계값 설정의 타당함을 평가하기 위한 실험 결과이다. 배경잡음 구간의 $ATFC(n)$ 은 정현파 형태를 가지며 일정 시간동안 $ATFC(n)$ 평균값의 2배로 기준 임계값(TH_{REF})으로 정의하면, 이상적으로 $ATFC(n) > 0$ 이므로 기준 임계값(TH_{REF})은 배경잡음의 최대값보다 큰 값으로 설정된다. 그러므로 식 (6)의 기준 임계값 설정은 타당함을 알 수 있다.

- 임계값 조정(Threshold Value Control) : 초기화(Initialization)단계에서 설정된 $TH(0) = TH_{REF}$ 를 초기값으로 하는 $TH(n)$ 는 식 (7)과 같은 방법에 의해 조정된다.

$$TH(n+1) = \begin{cases} TH(n) + \Delta TH & \text{if } ATFC(n) \neq TH(n) \\ TH(n) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta TH = \beta [ATFC(n) - TH(n)]$$

여기서 β 는 조정 이득(adjustment gain) 파라미터를 의미한다. 그림 3은 실 지진 신호에 대한 기준 임계값 설정 및 임계값 변화를 보이고 있다. 임계값 $TH(n)$ 은 파라미터 초기화 단계에서 추정된 기준 임계값 TH_{REF} 를 초기값으로 설정된 후 측정장소의 배경잡음의 에너지 변화에 따라 식 (7)에 의해 조정 된다.

- 검출 조건 확인(Check Conditions for Detection) : 시간-주파수영역 변화량이 임계값이상 ($ATFC(n) \geq TH(n)$) 이면 카운터 파라미터 PreTRG가 1씩 증가하고 그렇지 않으면 0으로 리셋(reset)된다. 동시에 같은 방법으로 시간-주파수영역 변화량이 기준 임계값 이상 ($ATFC(n) \geq TH_{REF}(n)$)이

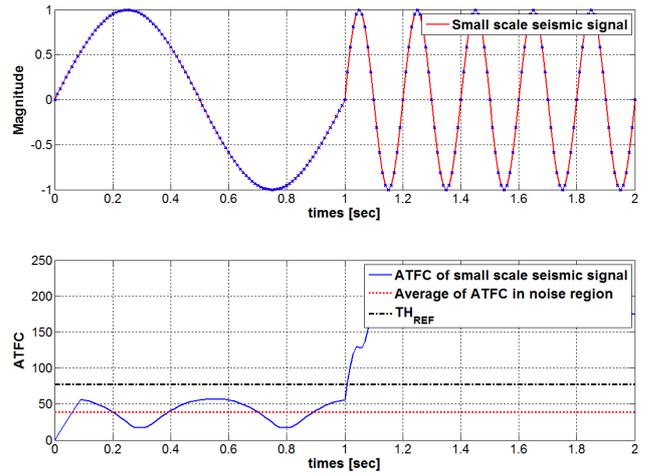


그림 1 중규모이하 지진 신호의 기준 임계값 설정 유효성 평가

Fig. 1 result of the validation for reference threshold of seismic signal whose magnitudes are below medium

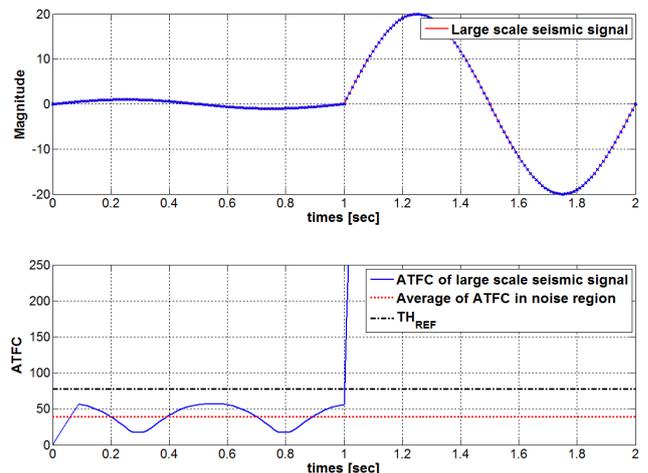


그림 2 중규모이상 지진 신호의 기준 임계값 설정 유효성 평가

Fig. 2 result of the validation for reference threshold of seismic signal whose magnitudes are above medium

면 카운터 파라미터 TRG가 1씩 증가하고 그렇지 않으면 0으로 리셋(reset) 된다. 각각의 카운터 파라미터(시간-주파수 변화량이 연속적으로 임계이상의 값을 가진 횟수를 나타내는 파라미터)인 PreTRG와 TRG가 각각 양의 정수인 N과 M이상의 값을 갖게 되면 즉, $PreTRG \geq N$, $TRG \geq M$ 이 되면 지진 P파의 도달이 결정된다. 위의 과정은 식 (8) ~ 식 (10)과 같이 표현된다.

$$Pre\ TRG = \begin{cases} Pre\ TRG + 1 & \text{if } ATFC(n) \geq TH(n) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$TRG = \begin{cases} TRG + 1 & \text{if } ATFC(n) \geq TH_{REF} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$Detection = \begin{cases} ON & \text{if } Pre\ TRG \geq N \text{ and } TRG \geq M \\ OFF & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

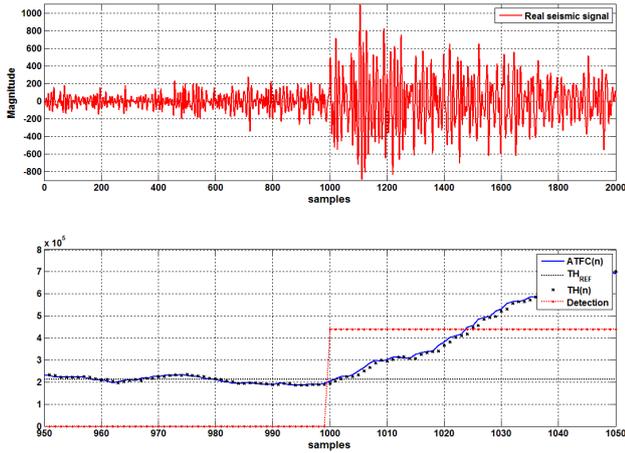


그림 3 실 지진 신호에 대한 기준 임계값 설정 및 가변 임계값 조정
 Fig. 3 Setting of the reference threshold value and controlling of the variable threshold value for real seismic signal

지진 P파 검출 시 오검출 발생은 사회적 혼란과 경제적 손실을 유발할 수 있으므로 신속성과 더불어 정확성이 매우 중요하다. 식 (8)의 PreTRG와 식 (9)의 TRG는 각각 신속한 검출과 오검출 방지를 위해 사용되는 카운터 파라미터이다. 배경잡음에 강인한 신속한 지진파 검출을 위해 PreTRG는 $ATFC(n)$ 이 연속적으로 임계값 $TH(n)$ 이상일 때 카운트되며 카운트된 PreTRG 값이 파라미터 N 이상이 되었을 때 예비 P파 검출이 이루어지게 된다. 신속성을 위해 PreTRG에 의한 예비 검출된 결과는 배경잡음에 의한 오검출일 수 있다. 따라서 이러한 오검출을 방지하기 위해 시간-주파수 변화량인 $ATFC(n)$ 이 검출장소의 기본 배경잡음에 대해 설정된 TH_{REF} 의 이상이 되는지를 PreTRG와 더불어 동시에 감시한다. 일반적으로 짧은 시간동안 에너지가 증가하다 감소하게 되는 배경잡음과 달리 지진 신호의 에너지는 일정시간동안 증가한다. 따라서 PreTRG에 의한 예비 검출과 $TRG \geq M$ 이 만족되었을 때 최종 지진파 검출이 이루어진다.

▪ 검출 시간 보정(Decision Time Compensation) : 식 (10)에서 정확한 검출을 위해 사용된 파라미터 M 은 지연에 해당하므로 지진 P파 도착이 결정되면 최종적으로 도착시각의 정확도를 높이기 위해 $T_s \times M$ (실험에서 $T_s = 0.01$ ($f_s = 100Hz$)) [sec]의 결정시각 보정을 한 후 정확한 P파 검출시각이 확정된다. 그림 4는 제안한 ATFC 알고리즘의 순서도 (Flowchart)이다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

제안한 ATFC 지진 P파 자동 검출 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 실제 발생한 지진 데이터를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 모든 지진 신호는 중규모 이하 지진(MMI 2.5)과 중규모 이상 지진(MMI 4.9), 대규모 지진인 일본 고베지진(MMI 7.2) 및 니가타 지진(MMI 6.8)에 대해 속도계로 취득된 신호이다. 신

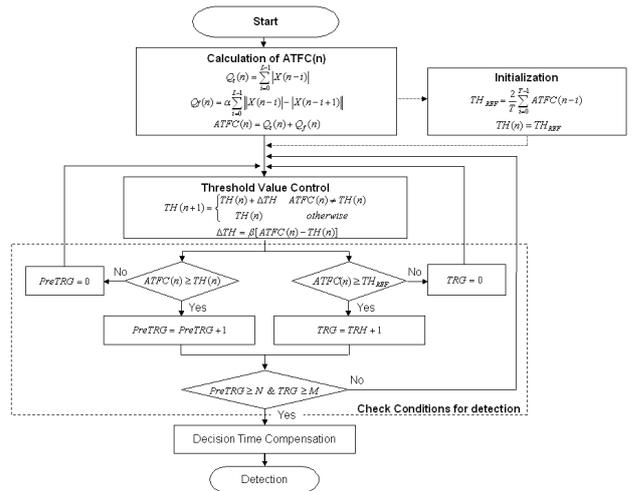


그림 4 ATFC 검출 알고리즘의 순서도
 Fig. 4 Flowchart of the ATFC triggering algorithm

호 취득에 사용된 샘플링 주파수는 100Hz이며 배경잡음 및 부가잡음 제거를 위해 통과대역이 0.075 ~ 15Hz인 IIR Butterworth 4차 대역 통과 필터(Band Pass Filter)를 설계하여 전처리(pre-processing)하였다. 제안한 알고리즘의 검출 성능을 평가하기 위해 현장에서 가장 널리 사용하는 STA/LTA 알고리즘과 제안한 ATFC 알고리즘의 검출 성능을 비교하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용한 지진파 신호들과 각 지진 신호들에 대한 STA/LTA 알고리즘과 제안한 ATFC 알고리즘의 검출 성능을 보이고 있다. 모든 실험에서 STA/LTA 알고리즘을 위한 파라미터 L_{STA} 와 L_{LTA} 는 각각 2초 (200 샘플)와 5초 (500 샘플)이며 고정 임계값은 5를 사용하였다. 제안한 ATFC 알고리즘을 위한 파라미터 L 과 α 는 각각 50과 100을 사용하였다.

표 1 시뮬레이션에 사용한 지진파 및 각 알고리즘의 검출 성능

Table 1 Seismic signals used in simulation and triggering performance of each algorithm

분 류	진원지	규 모	발생시간	관측소 (신호 번호)	그림 번호	검출성능	
						STA/LTA	ATFC
중규모 이하	울진 동남 54km 해역	MMI 2.5	2006년 4월 29일	ULJ (울진) (1)	그림 5	○	◎
				BUS (부산) (2)	그림 6	△	◎
				KWJ (광주) (3)	그림 7	×	◎
중규모 이상	강원도 평창군 도암면	MMI 4.9	2007년 1월 20일	DGY (대관령) (4)	그림 8	○	◎
				BUS (부산) (5)	그림 9	○	◎
				POR (보령) (6)	그림 11	×	◎
대규모	일본 고베	MMI 7.2	1995년 7월 17일	일본 방재청 (7)	그림 12	○	◎
	일본 니가타	MMI 6.8	2004년 10월 23일	일본 방재청 (8)	그림 13	△	◎

Sampling rate: 100Hz
 ※ ◎ : 매우 양호, ○ : 양호, △ : 불량, × : 검출 불가

신호 1(그림 5), 신호 2(그림 6), 신호 3(그림 7)은 진앙지가 해저인 중규모 이하 지진 신호이다. 신호 1은 중규모 이하의 지진 신호이지만 진앙지와 관측소의 거리가 비교적 가까워 관측된 지진 신호의 크기가 배경잡음과 구별이 가능한 SNR이 양호한 경우이다. 그러나 신호 2(그림 6)의 경우는 진앙지와 관측소의 거리는 가깝지만 지진 규모가 작아 SNR이 비교적 낮은 경우이다. 특히 신호 3(그림 7)은 관측소의 위치가 진앙지에서 멀리 떨어져 있으므로 지진 신호와 배경잡음의 구별이 쉽지 않은 SNR이 매우 낮은 경우이다. 신호 2와 신호 3에 대해 STA/LTA 알고리즘은 낮은 SNR로 인하여 P파 검출에 지연이 생기거나 검출이 이루어지지 않는다. 반면 제안한 AFTC 알고리즘은 시간-주파수 변화를 모두 사용하므로 SNR이 낮은 경우도 정확히 P파 도달시점을 검출할 수 있다.

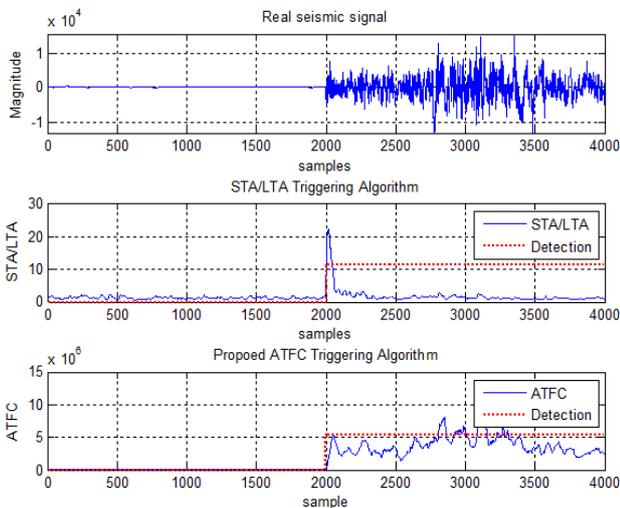


그림 5 2004.04.29 울진 지진, MMI 2.5 (울진 관측소)
 Fig. 5 2004.04.29 Ulsan, MMI 2.5 (Ulsan observatory)

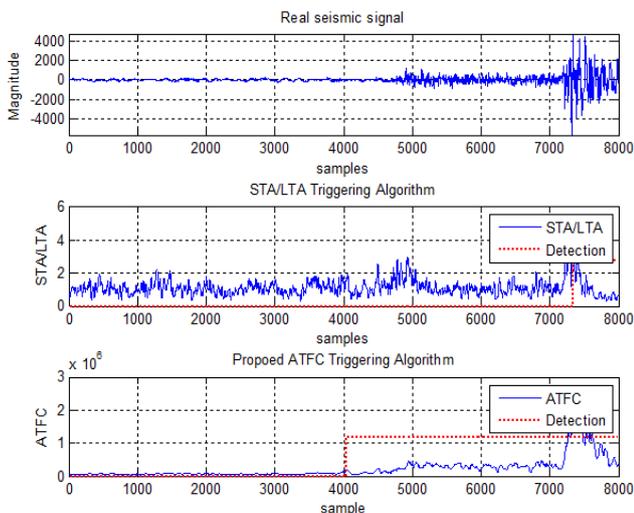


그림 6 2004.04.29 울진 지진, MMI 2.5 (부산 관측소)
 Fig. 6 2004.04.29 Ulsan, MMI 2.5 (Busan observatory)

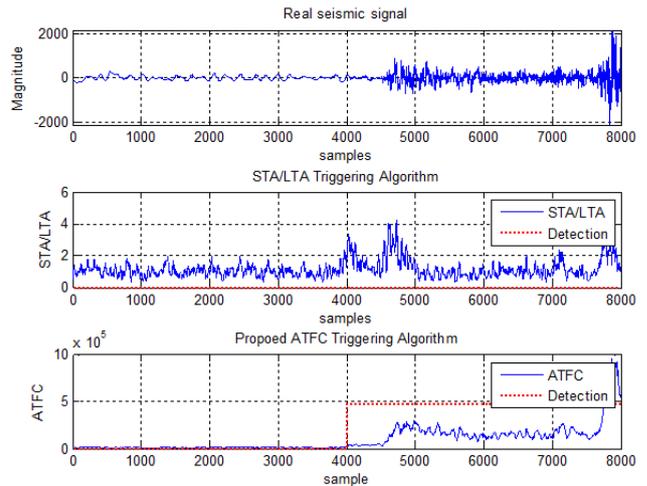


그림 7 2004.04.29 울진 지진, MMI 2.5 (광주 관측소)
 Fig. 7 2004.04.29 Ulsan, MMI 2.5 (Gwangju observatory)

신호 4(그림 8), 신호 5(그림 9, 그림 10), 신호 6(그림 11)은 배경잡음에 비해 지진신호의 크기가 비교적 큰 중규모 지진 신호이다. 신호 4(그림 8)의 경우 지진 신호와 배경잡음이 확연히 구별되는 SNR이 매우 양호한 경우로 STA/LTA와 제안한 AFTC 알고리즘은 동일 시점에서 P파를 검출하였다. 신호 5(그림 9)의 경우 STA/LTA 및 제안한 AFTC 알고리즘 모두 P파 검출을 하였으나 제안한 AFTC가 STA/LTA에 비해 먼저 P파를 검출하였다. 이러한 이유는 그림 10의 두 번째 그림에서 AFTC 알고리즘이 P파를 검출한 시점부터 선행 P파가 관측소에 도달하여 진폭은 배경잡음과 동일한지만 주파수 성분이 변하게 되는데 STA/LTA와 달리 AFTC 알고리즘은 진폭 변화뿐만 아니라 이러한 주파수 변화도 검출할 수 있기 때문이다. 즉, 제안한 AFTC는 P파 검출 시 진폭 변화뿐만 아니라 주파수 변화를 동시에 고려하므로 STA/LTA 보다 검출 성능이 우수하다. 신호 6(그림 11)은 중규모 지진 신호이지만 진앙지와 관측소 거리가 멀리 떨어져 있어 다른 두 신호들에 비해 SNR이

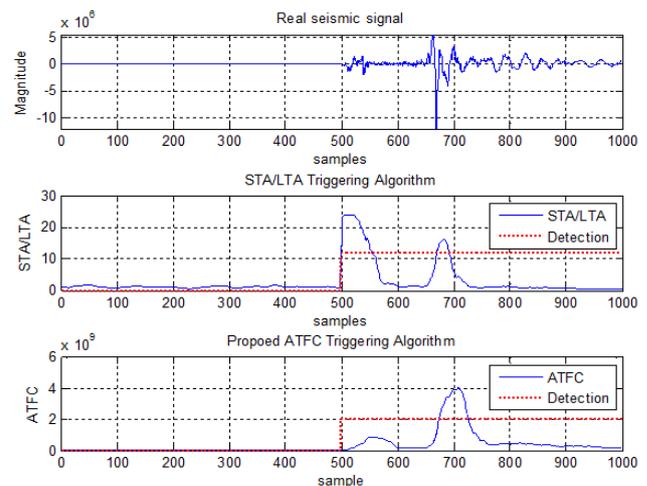


그림 8 2007.01.20 도암 지진, MMI 4.9 (대관령 관측소)
 Fig. 8 2007.01.20 Do-am, MMI 4.9 (daegwanryeong observatory)

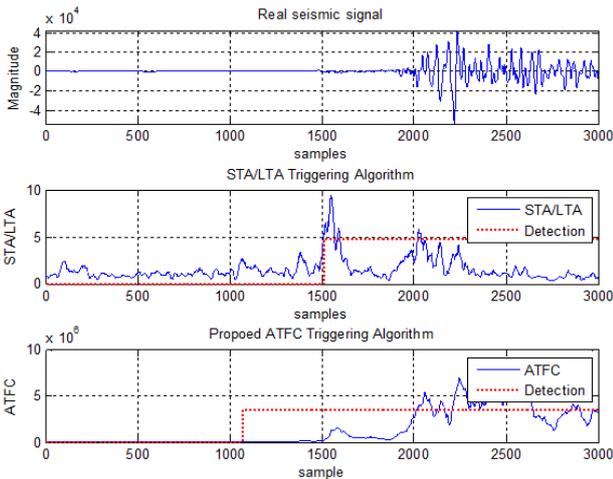


그림 9 2007.01.20 도암 지진, MMI 4.9 (부산 관측소)
 Fig. 9 2007.01.20 Do-am, MMI 4.9 (busan observatory)

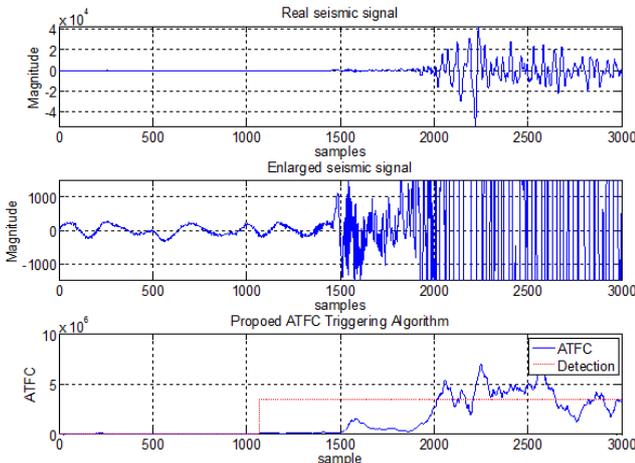


그림 10 그림 9의 확대 파형 및 ATFC 알고리즘
 Fig. 10 Enlarged waveform of Fig. 9 and ATFC Algorithm

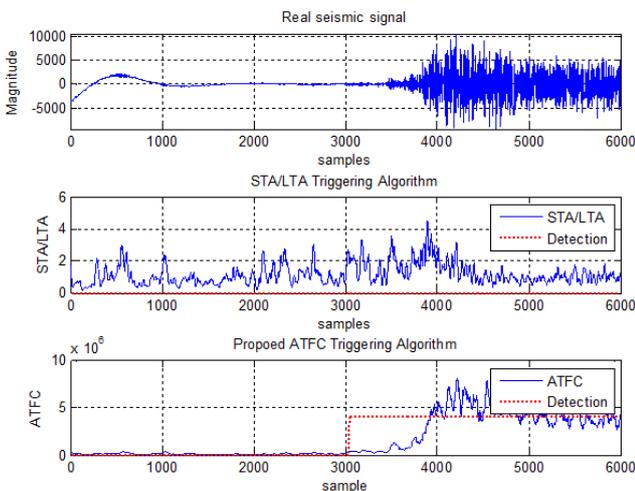


그림 11 2007.01.20 도암 지진, MMI 4.9 (보령 관측소)
 Fig. 11 2007.01.20 Do-am, MMI 4.9 (boryeong observatory)

낮은 경우이다. 이처럼 SNR이 낮은 경우 STA/LTA 알고리즘은 P파를 검출하지 못하지만 제안한 알고리즘은 정확히 P파 도달 시점에 검출이 이루어진다.

신호 7(그림 12)과 신호 8(그림 13)은 일본에서 발생한 대규모 지진인 고베 지진과 니가타 지진 신호이다. 신호 7의 고베 지진신호에 대해 STA/LTA와 제안한 ATFC 알고리즘은 모두 동일 시점에 지진 P파를 검출하였지만 신호 8의 니가타 지진 신호에 대해서는 ATFC 검출 알고리즘이 STA/LTA에 비해 보다 정확한 검출 성능을 보인다. 따라서 대규모 지진에 대해서도 제안한 ATFC 알고리즘은 STA/LTA에 비해 P파 검출 성능이 우수함을 알 수 있다.

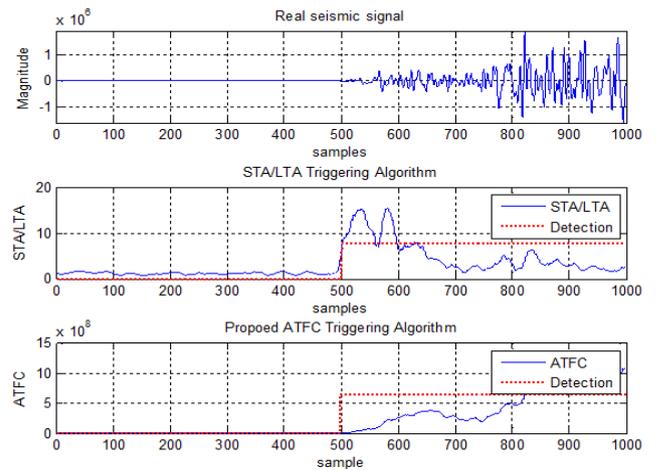


그림 12 1995.07.17 일본 고베 지진, MMI 7.2
 Fig. 12 1995.07.17 Kobe, Japan, MMI 7.2

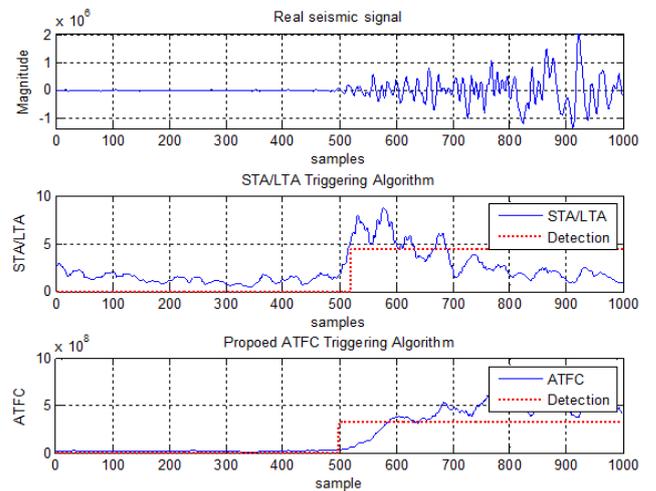


그림 13 2004.10.23 일본 니가타 지진, MMI 6.8
 Fig. 13 2004.10.23 Nigata, Japan, MMI 6.8

4. 결 론

본 논문은 지진조기경보시스템에 필수적인 지진 P파 자동 검출 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은 지진 발생 시 관측소에 빠르게 도달하는 지진 P파의 신속한 검출을 위

해 지진 센서로부터 취득된 신호의 시간 영역과 주파수 영역에서의 변화량을 동시에 고려한다. 상시 관측되는 배경잡음보다 큰 진폭을 갖는 중규모 이상 지진 신호의 특성을 반영하는 시간 영역의 누적변화량과 배경잡음에 비해 높은 주파수 성분을 갖는 중규모 이하 미세 지진 신호의 특성을 반영하는 주파수 영역의 누적변화량이 동시에 사용하여 P과 검출이 이루어진다. 또한 SNR이 낮은 관측환경에서 오검출 방지를 위해 측정 장소 잡음환경에 능동적으로 조절되는 임계값을 사용한다. 제안한 알고리즘은 지진 P과 자동 검출 알고리즘에서 필수적인 안정성과 작은 계산량 면에서 현재 현장에서 가장 널리 사용되는 STA/LTA 알고리즘과 비교할 만하다. 제안한 알고리즘에 사용되는 중요 파라미터들의 이론적 타당함을 실험적으로 보였으며 다양한 규모의 실제 지진에 대해 진앙으로부터 관측거리가 다른 취득 신호를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 우수한 검출 성능을 보였다.

감사의 글

“이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2012-0003223)”

참 고 문 헌

[1] J. Aschau and A. N. Koppers, Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction, Springer, 2003.

[2] Y. M. Wu and H. Kanamori, "Development of an earthquake early warning system using real-time strong motion signals," Sensors, vol. 8, pp. 1-9, 2008.

[3] R. M. Allen and H. Kanamori, "The potential for earthquake early warning in southern California," Science, vol. 300, pp. 786-789, May 2003.

[4] R. M. Allen, P. Gasparini, O. Kamigaiichi and M. Bose, "The status of earthquake early warning around the world : an introductory overview," Seismological Research Letters, vol. 80, pp. 682-693, Sep. 2009.

[5] H. C. Chi et al, Designing of the National Earthquake Early Warning System and Expanding of Realtime Data Sharing, KIGAM, 2010.

[6] S. G. Kim, Theoretical Seismology, HUMHAN Book, 2010.

[7] P. Earle and P.M. Shearer, "Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm," Bull. Seismol. Soc. Am., pp. 366 - 376, 1994.

[8] C. Tong and B. L. N. Kennett, "Automatic seismic event recognition and later phase identification for broadband seismograms," Bull. Seismol. Soc. Am., pp. 1896 - 1909, 1996.

[9] M. Withers, R. Aster, C. Young, J. Beiriger, M.

Harris, S. Moore and J. Trujillo, "A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event location," Bull. Seismol. Soc. Am., pp. 95 - 106, 1998.

[10] A. Hidani and H. Yamanaka, "Automatic picking of seismic arrivals in strong motion data using an artificial neural network," Environ. Sci. Technol., 2003.

[11] K.S. Anant and F.U. Dowla, "Wavelet transform methods for phase identification in three-component seismograms," Bull. Seismol. Soc. Am., pp. 1598 - 1612, 1997.

[12] O. H. Colak, T. C. Destici, S. Ozen, O. Cerezci and N. Ary, "P phase and S phase detection using the Daubechies wavelet transform (DWT) to minimize the noise at three component seismograms displacement records," 13th European Signal Processing Conference, 2005.

[13] H. Zhang, C. Thurber and C. Rowe, "Automatic p-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings," Bull. Seismol. Soc. Am., pp. 1904 - 1912, 2003

[14] M. Baer and U. Kradolfer, "An automatic phase picker for local and teleseismic events," Bull. Seismol. Soc. Am., vol. 77, pp. 1437-1445, 1987.

[15] J. Wong, L. Han, J. C. Bancroft and R. R. Stewart, "Automatic time-picking of first arrivals on noisy microseismic data," Proc. CSEG, 2009 CSPG CSEG CWLS Convention, 2009.

[16] J. H. Lee, J. B. Kyung, "A Study on Response Spectrums and Characteristics of Time-Frequency Domain of Microearthquakes in the Central Part of South Korea," Jour. of EESK, pp. 72-79, Sep. 1999.

[17] J. S. Shin, T. S. Kang, "Distance Dependency of Corner Frequencies for Earthquakes in and around the Korean Peninsula," Jour. of EESK, vol. 63, pp. 39-45, Oct. 2008.

저 자 소 개



최 훈 (崔 薰)

1996년 충북대학교 전자공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전자공학과 석사, 2006년 동 대학원 전자공학과 박사, 1995년 ~ 1998년 LG반도체, 2006년 ~ 2008년 한국표준과학연구원 Post-Doc., 2008년 3월 ~ 현재 동의대학교 전자공학과 조교수
Tel : 051-890-1673