

# 충격 추진력 변화를 이용한 지진 P파 자동 검출 알고리즘

## Automatic Seismic P-wave Detection Algorithm Using Variations of Impact Momentum

최 훈\*  
(Hun Choi)

**Abstract** - In this paper, we propose an automatic earthquake P-wave detection algorithm based on the variations of the impact momentum derived from the seismic acceleration signals. The amount of change in the impact momentum induced by the acceleration refers to the influence of buildings or facilities on the earthquake, The proposed algorithm can effectively detect the seismic P-wave by simultaneously considering the amplitude and the frequency change of the seismic wave when the earthquake occurs. Computer simulations using the observed seismic signals were performed to evaluate the validity of the induced impact momentum variation and the superiority of the proposed algorithm.

**Key Words** : Earthquake, EEWS, P-wave detection, Jerk, Impact momentum

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 대규모 인명피해와 경제적 피해를 유발하는 대규모 지진이 빈번하게 일어남에 따라 지진재해에 대한 안전성 확보 문제가 사회적 이슈로 등장하였다. 지진발생이 빈번한 국가들은 오래전부터 지진 발생을 사전에 예측하여 지진동에 의한 도로파손과 건물붕괴와 같은 1차적인 지진재해로부터 경제·사회적 피해를 줄이고자 하는 많은 노력을 기울여 왔으나, 현대 과학기술 수준으로 지진 발생의 사전 예측은 불가능하다고 알려져 있다. 최근 우리나라를 비롯하여 일본, 미국, 대만 등 세계 여러 각국은 지진재해대책의 현실적인 방안으로 지진조기경보시스템(EEWS: Earthquake Early Warning System)을 개발하여 구축 및 운영 중이다. EEWS는 지진 발생 시 가장 빠르게 전파하는 종파인 P파(7~8 Km/s)를 검출하여 피해가 큰 횡파인 S파(3~4Km/s)가 도달하기 전 지진 발생 여부와 진앙, 규모, 진도 등에 관한 정보를 신속히 통보하고 주요 시설물을 제어함으로써 지진에 의한 피해를 줄이는 시스템이다. 이와 같은 EEWS 개발에 있어 신속·정확히 지진 P파를 검출하는 것은 지진 발생 여부를 판단하기 위해 필요한 핵심기술이다[1, 2].

그동안 많은 연구자들에 의해 EEWS를 위한 다양한 P파 검출 방법이 제시되었다[3-11]. 가장 널리 사용되는 신호 대 잡음비(SNR)기반의 P파 검출방법[3, 4] 뿐만아니라 보다 신속하고 정확한 검출을 위해 시간영역, 주파수 영역, 또는 시간-주파수 표현에서 지진파를 특성화하는 일부 특성(예를 들어 에너지, 분산,

포락선, 높은 수준의 통계 등)의 급격한 변화를 찾는 것을 기반으로 하는 다양한 연구결과들[5-9]이 발표되었다. 이와 같은 다양한 고급 분석기법이 적용된 P파 검출 알고리즘들은 좋은 검출 성능을 보이지만 실제 현장에서는 복잡한 동작 파라미터의 설정과 무엇보다도 방대한 계산량의 문제로 실제 EEWS에 적용하는데 어려움 있다. 따라서 대부분의 운영 중인 조기경보시스템에서는 다양한 검출 알고리즘 중 비교적 적은 복잡도를 갖는 STA/LTA 알고리즘[4]을 적용하고 있다. 그러나 STA/LTA 알고리즘은 신호 대 잡음비(SNR)가 고정값으로 설정된 임계값을 초과할 때 P파를 검출한다. 따라서 관측소별 배경잡음에 대한 사전 분석이 필요하고 임계값 설정 시 오검출 방지를 위해 배경잡음에 비해 비교적 높게 설정해야 한다. 이처럼 시행오차를 통해 높게 설정된 임계값은 검출시점의 지연을 유발하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 적은 계산량으로 시간영역의 진폭 변화량 및 주파수 영역의 변화의 누적 변화량과 가변 임계값을 사용하는 ATFC P파 검출 알고리즘이 발표되었다[11]. ATFC 알고리즘은 지진계로 취득한 속도 데이터로부터 시간-주파수의 누적 변화량과 가변 임계값을 사용하여 효과적으로 P파 검출할 수 있다.

본 논문에서는 지진 가속도계로부터 취득한 가속도 데이터로부터 구한 충격 추진력(impact momentum) 변화량을 이용하는 지진 P파 자동 검출 방법을 제안한다. 제안한 방법은 대상체에 가해지는 지진동의 충격 추진력 변화량을 정의하고, [11]에서 사용한 시간-주파수 누적 변화량을 대체하여 지진 P파를 검출한다. 새롭게 정의된 충격 추진력 변화량은 시간-주파수 누적변화량과 마찬가지로 시간영역의 진폭 변화와 주파수 영역의 변화를 동시에 고려한다. 제안한 방법의 성능은 실제 측정된 지진파를 입력 신호로 사용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

\* Corresponding Author : Dept. of Electronic Engineering, Dongeui University, Korea.  
E-mail: hchoi@deu.ac.kr

Received : June 5, 2018; Accepted : June 5, 2018

## 2. IMAV 알고리즘

### 2.1 충격 추진력 변화량(Impact Momentum Variations)

지진관측소로부터 수집된 신호에 포함된 배경잡음은 바람, 파도, 기압의 변화 등에 의한 0.01~0.05Hz 대역의 저주파 잡음과 인간의 활동에 의한 1Hz 이상의 고주파 잡음으로 구성된다. 이러한 배경잡음은 시간에 따라 통계적 특성(statistical characteristics)이 변화하는지 여부에 따라 정상 진동(stationary vibration)과 비정상 진동(non-stationary vibration)으로 구분할 수 있으며, 파일 함타, 발파, 또는 핵실험 등에 의한 진동과 지진 이벤트 발생에 의한 지진동은 평균값이나 표준편차가 시간에 따라 급격히 변화하는 비정상 진동으로 충격(shock)에 해당한다. 일반적으로 충격량  $\vec{I}$ 은 운동량의 변화  $\Delta\vec{P}$ 를 의미하며, 가해진 힘과 시간의 곱으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\vec{I} &= \Delta\vec{P} \\ &= \vec{F} \cdot \Delta t\end{aligned}\quad (1)$$

여기서  $\vec{F}$ 는 시간 구간  $\Delta t$ 에서 진동에 의해 가해진 힘이다.

식 (1)에서  $\vec{F}$ 은 질량  $m$ 과 가속도  $\vec{a}$ 의 곱이므로 시간 구간  $\Delta t$ 에서의 충격량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{I} = m\vec{a} \cdot \Delta t \quad (2)$$

지진 가속도계(accelerometer)를 사용하여 수집된 지진 가속도 신호는 다음과 같이 정현파 함수들의 조합으로 모델링 될 수 있다.

$$\vec{a}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i e^{j(\omega_i t + \phi_i)} \quad (3)$$

여기서  $A_i$ 는 가속도의 진폭,  $\omega_i$ 는 각주파수,  $\phi_i$ 는 위상이다.

임의의 시간 구간에서의 가속도의 시간에 대한 변화를 가가속도(jerk)라 하며 식 (3)으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\vec{j}(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{a}}{\Delta t} \\ &= \frac{d\vec{a}(t)}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} \left\{ \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i e^{j(\omega_i t + \phi_i)} \right\} \\ &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \omega_i A_i e^{j(\omega_i t + \phi_i + \pi/2)}\end{aligned}\quad (4)$$

식 (4)에서 가가속도는 식 (3)의 가속도에서 진폭이  $\omega_i$ 만큼 증폭 또는 감소되고 위상이  $\pi/2$ 만큼 변화한 것으로 볼 수 있다.

임의의 시간 구간을  $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ 라 정의하고 동일한 시간구간  $\Delta t_k = \Delta t_{k-1}$ 에 대한 충격량의 변화(충격 추진력 변화량)  $\Delta\vec{I}(t_k)$ 를 식 (2)로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta\vec{I}(t_k) &= \vec{I}(t_k) - \vec{I}(t_{k-1}) \\ &= m[\vec{a}(t_k)\Delta t_k - \vec{a}(t_{k-1})\Delta t_{k-1}] \\ &= m[\vec{a}(t_k) - \vec{a}(t_{k-1})]\Delta t_k\end{aligned}\quad (5)$$

여기서  $\vec{I}(t_k)$ 는  $t_k$ 에서의 충격량이다.

식 (5)의 연속시간 충격 추진력 변화량은  $T_s = \frac{1}{f_s}$ 의 간격으로 샘플링한 이산시간 표현을 사용하여 시간구간  $\Delta t_k = T_s$ 에 대한 이산 충격 추진력 변화량을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta\vec{I}(n) &= \vec{I}(n) - \vec{I}(n-1) \\ &= m[\vec{a}(n) - \vec{a}(n-1)]\Delta n \\ &= m \left[ \frac{\vec{a}(n) - \vec{a}(n-1)}{\Delta n} \right] (\Delta n)^2\end{aligned}\quad (6)$$

여기서  $n = kT_s$ 이고  $\Delta n = T_s$ 이다.

식 (4)에 나타난 연속시간 가가속도의 시간구간  $\Delta t_k = T_s$ 에 대한 이산시간 표현을 사용하여 식 (6)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta\vec{I}(n) &= m \left[ \frac{\vec{a}(n) - \vec{a}(n-1)}{\Delta n} \right] (\Delta n)^2 \\ &= m(\Delta n)^2 \vec{j}(n)\end{aligned}\quad (7)$$

식 (7)로부터 질량  $m$ 인 대상체가 일정한 단위 시간( $\Delta n = T_s$ ) 동안 받는 충격 추진력 변화량의 크기는 가가속도를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$|\Delta\vec{I}(n)| = \alpha |\vec{j}(n)| \quad (8)$$

여기서 파라미터  $\alpha = m(\Delta n)^2$ 이다.

위의 결과들로부터 지진 가가속도로부터 유도된 식 (8)의 충격 추진력 변화량은 각 주파수 성분별 지진동의 진폭 변화와 해당 주파수 변화(진폭의 증폭 또는 감소)를 동시에 반영함을 알 수 있다.

### 2.2 충격 추진력 변화량을 이용한 지진 P파 검출 알고리즘

ATFC 알고리즘[11]에서는 지진 P파 자동검출을 위해 배경잡음(상시 관측신호)과 지진 이벤트에 의한 지진파 신호를 구분함에 있어 진폭과 더불어 주파수의 변화를 이용하였다. 지진 P파 검출하는데 있어 충격 추진력 변화량의 크기를 사용하는 것은 ATFC 알고리즘과 마찬가지로 진폭 및 주파수의 변화를 동시에 반영하는 것으로 볼 수 있다.

지진 가속도계로부터 수집된 가속도 신호로부터 구한 가가속도(jerk)에 대해  $L$ 의 크기를 갖는 데이터 구간의 충격 추진력 평균 변화량(IMAV; Impact Momentum Average Variations)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 IMAV(n) &= \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} |\Delta \vec{I}(n-i)| \\
 &= \frac{\alpha}{L} \sum_{i=0}^{L-1} |\vec{j}(n-i)|
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기서  $L$ 은 데이터 구간의 길이,  $\alpha$ 는 스케일링 파라미터로서 간단한 구현을 위해  $\alpha=1/f_s$ 을 사용할 수 있다.

가속도(acceleration)는 속도(velocity)의 시간에 대한 변화, 즉  $\vec{a}(n) = [\vec{v}(n) - \vec{v}(n-1)]/\Delta n$ 이므로 식 (9)의 가속도  $\vec{j}(n)$ 은 지진 데이터 수집에 사용한 센서 유형에 따라 가속도 또는 속도 데이터로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \vec{j}(n) &= \frac{\Delta \vec{a}(n)}{\Delta n} \\
 &= f_s [a(n) - a(n-1)] \\
 &= f_s^2 [\vec{v}(n) - 2\vec{v}(n-1) + \vec{v}(n-2)]
 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서  $\vec{a}(n)$ 와  $\vec{v}(n)$ 는 각각 지진 가속도계와 속도계로부터 취득한 가속도 신호와 속도 신호이다.  $f_s$ 는 샘플링 주파수로  $f_s = 1/\Delta n$ 이다.

제안한 방법은 ATFC 알고리즘[11]에서 사용한 임계값 조정 및 검출 방법의 수정된 버전을 사용하여 지진 P파를 검출한다. 먼저 기준 임계값( $TH_{REF}$ ) 설정을 위해 일정 시간(초기화 단계)인  $T$  구간의  $IMAV(n)$ 의 평균을 구하고 그 값의 2배를  $TH_{REF}$ 로 설정한다.

$$TH_{REF} = \frac{2}{T} \sum_{i=0}^{T-1} IMAV(n-i) \tag{11}$$

초기화 단계에서 설정된  $TH(0) = TH_{REF}$ 를 초기값으로 하는  $TH(n)$ 는 식 (12)와 같은 방법에 의해 조정된다.

$$TH(n+1) = TH(n) + \Delta TH \tag{12}$$

$$\text{for } \Delta TH = \begin{cases} \gamma_1 [IMAV(n) - TH(n)] & \text{if } IMAV(n) \geq TH(n) \\ \gamma_2 [IMAV(n) - TH(n)] & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서  $\gamma_1$ 과  $\gamma_2$ 는 조정 이득(adjustment gain) 파라미터로서 시뮬레이션에서는  $\gamma_1 = 2$ ,  $\gamma_2 = 1$ 을 사용하였다.

$\gamma_1$ 을 크게 설정할 경우 배경잡음에 대한 오검출률을 낮출 수 있으나 에너지가 작은 지진에 대한 검출 성능 저하가 발생할 수 있다. 반면 작게 사용할 경우 오검출률은 높아지지만 작은 지진에 대한 검출 성능이 향상된다.  $\gamma_2$ 는 설정값에 따라  $\gamma_1$ 과 반대의 영향을 가져온다.

임계값  $TH(n)$ 은 파라미터 초기화 단계에서 추정된 기준 임계값  $TH_{REF}$ 를 초기값으로 설정 후 측정장소의 배경잡음의 에너지 변화에 따라 식 (12)에 의해 조정된다.

식 (9)의 충격 추진력 평균 변화량을 이용하여 식 (11)과 식 (12)의 기준 임계값과 가변 임계값기반의 P파 검출 시 배경잡음에 의한 오검출 방지를 위해 다음과 같은 추가적인 검출조건을

사용한다.

$$CNT_{REF} = \begin{cases} CNT_{REF} + 1 & \text{if } IMAV(n) \geq TH_{REF} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{13}$$

$$CNT_{INST} = \begin{cases} CNT_{INST} + 1 & \text{if } IMAV(n) \geq TH(n) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{14}$$

$$Detection = \begin{cases} ON & \text{if } CNT_{REF} \geq N \text{ and } CNT_{INST} \geq M \\ OFF & \text{otherwise} \end{cases} \tag{15}$$

식 (13)의  $CNT_{REF}$ 와 식 (14)의  $CNT_{INST}$ 는 각각 신속한 검출과 오검출 방지를 위해 사용되는 카운터 파라미터이다. 배경잡음에 강인하며 신속한 지진과 검출을 위해  $CNT_{REF}$ 는 연속적으로  $IMAV(n) \geq TH_{REF}$ 일 때 카운트되며 카운트 된  $CNT_{REF}$ 값이 파라미터  $N$ 이상이면 예비 P파 검출이 이루어진다. 그러나 기본 배경잡음에 대해 사전 설정된 상수인 기준 임계값( $TH_{REF}$ )을 충격

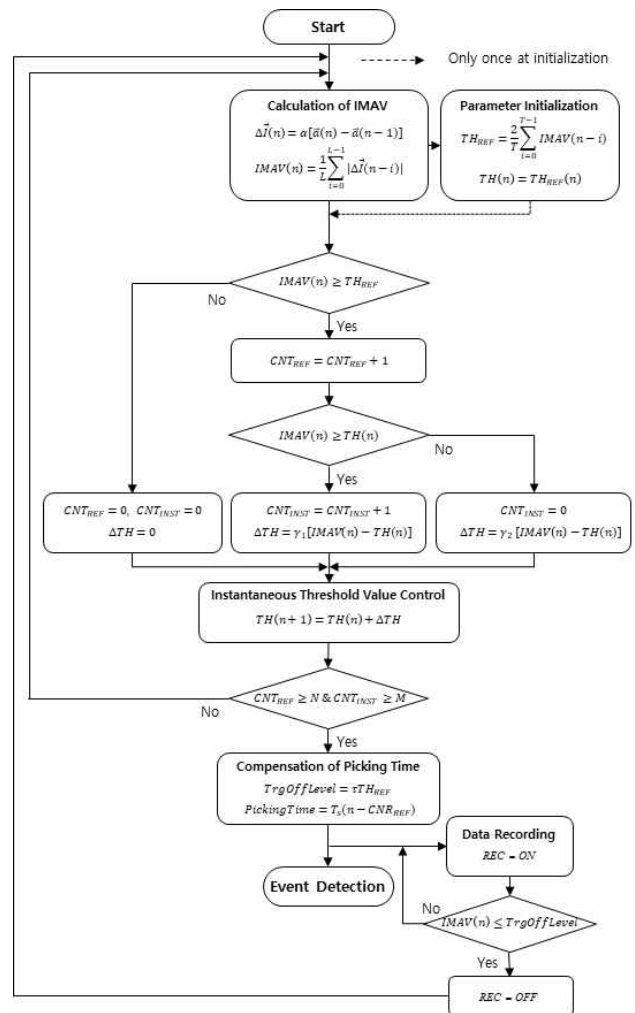


그림 1 제안한 IMAV P파 검출 알고리즘의 순서도  
 Fig. 1 Flow chart of the proposed IMAV P-wave detection algorithm

추진력 평균 변화량( $IMAV(n)$ )의 초과 여부를 확인하는  $CNT_{REF}$ 에 의한 예비 검출 결과는 배경잡음에 의한 오검출일 수 있다. 이러한 오검출을 방지하기 위해 충격 추진력 평균 변화량인  $IMAV(n)$ 이 기준 임계값 외 지속적인 지진 에너지 증가를 동시에 감지할 필요가 있다. 일반적으로 짧은 시간동안 에너지가 증가하다 감소하게 되는 배경 충격 잡음과 달리 지진 신호의 에너지는 비교적 긴 시간동안 증가한다. 따라서  $IMAV(n)$ 이 가변하는 임계값  $TH(n)$ 을 연속적으로 초과(즉,  $IMAV(n) \geq TH(n)$ )하는지 여부를 확인하는 카운터  $CNT_{INST}$ 를 추가로 사용하여  $CNT_{REF} \geq N$ 에 의한 예비 검출과  $CNT_{INST} \geq M$ 이 만족되었을 때 최종 지진과 검출을 하게 된다. 최종 검출 이후 저장되는 데이터는 진앙, 진앙 시, 규모 등 지진분석의 정확도를 위해 예비 검출 파라미터  $N$ 과 오검출 방지용 파라미터  $M$ 에 대한 시각 보정(최대 지연  $\leq T_s \times (N+M)$ sec)을 하게 된다. 지진이 발생하고 P파 검출 이후 지진파에 의한 충격 추진력 평균 변화량이 일정 수준( $TrgOffLevel$ )이상이 되면 지진파 소멸에 따른 데이터 저장 이 중지 된다. 이때  $TrgOffLevel$ 은  $TrgOffLevel = \tau TH_{REF}$ (여기서  $0 < \tau \leq 1$ )이다.

그림 1은 제안한 IMAV 알고리즘의 순서도(flow chart)이다.

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션

제안한 지진 P파 자동 검출 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 실제 발생한 지진 데이터를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 지진 신호는 내륙에서 발생한 비교적 작은 규모의 지진과 중규모 이상의 지진에 대해 기상청의 지진 관측망에서 수집한 가속도계 신호이다. 시뮬레이션에 사용된

**표 1** 시뮬레이션에 사용한 지진파 및 각 알고리즘의 검출 성능  
**Table 1** Seismic signals used in simulation and triggering performance of each algorithm

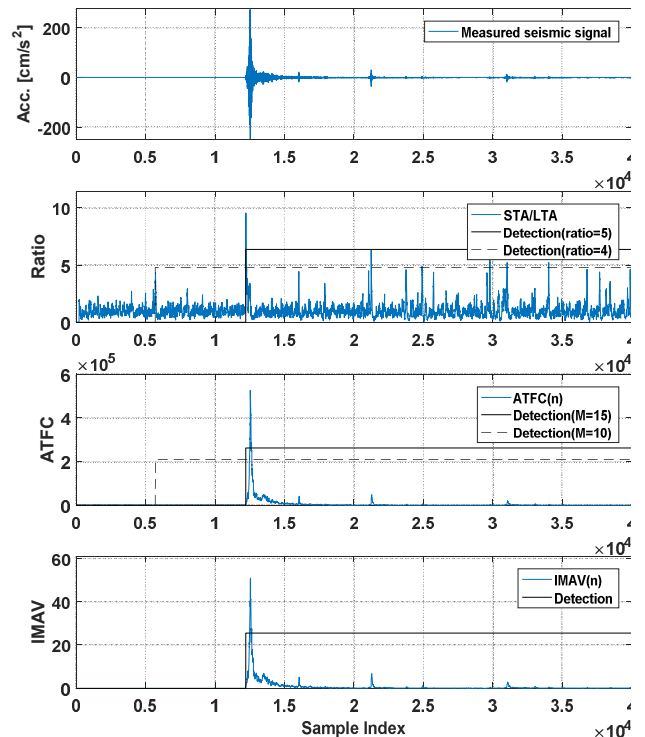
분류	진원지	규모 (MI)	발생 일자	관측소	그림 번호	검출성능		
						STA/LTA	ATFC	IMAV
중규모 이상	경주 남남서 8.7km	5.8	2016. 09.12	USN (울산)	그림2	◎( $\kappa=5$ ) △( $\kappa=4$ )	◎( $M=15$ ) △( $M=10$ )	◎
					그림3	×( $\kappa=4$ ) ◎( $\kappa=3$ )	◎( $M=10$ ) ◎( $M=5$ )	◎
	포항 남해읍 남송리	5.4	2017. 11.15	BUS (부산)	그림4	◎( $\kappa=5$ ) ◎( $\kappa=4$ )	◎( $M=10$ ) ◎( $M=5$ )	◎
					그림5	×( $\kappa=4$ ) ◎( $\kappa=3$ )	◎( $M=15$ ) △( $M=10$ )	◎
				DAU (대구)	그림7	◎( $\kappa=5$ ) ◎( $\kappa=4$ )	◎( $M=15$ ) △( $M=10$ )	◎
중규모 이하	충남 보령 북북동 4km	3.5	2016. 11.13	ANM (안면도)	그림6	◎( $\kappa=5$ ) ◎( $\kappa=4$ )	◎( $M=15$ ) △( $M=10$ )	◎
				DAU (대구)	그림7	×( $\kappa=4$ ) ◎( $\kappa=3$ )	◎( $M=10$ ) △( $M=5$ )	◎
	광주 북구 북북동 7km	2.5	2017. 02.18	JIN (진주)	그림8	◎( $\kappa=5$ ) ◎( $\kappa=4$ )	◎( $M=10$ ) ◎( $M=5$ )	◎
				GIC (김천)	그림9	△( $\kappa=4$ ) ◇( $\kappa=3$ )	◎( $M=10$ ) ◎( $M=5$ )	◎

※ ◎ 매우 양호, ○ 양호, ◇ 불량 △ 오검출, × 검출 불가

신호의 샘플링 주파수는 100Hz이며 배경잡음 및 부가잡음 제거를 위해 통과대역이 0.075~15Hz인 IIR Butterworth 4차 대역통과 필터를 설계하여 전처리하였다. 표 1은 현장에서 가장 널리 사용하는 STA/LTA 알고리즘과 ATFC 알고리즘[11]을 제안한 방법과 검출 성능을 비교한 결과이다.

모든 실험에서 제안한 IMAV 알고리즘을 위한 파라미터는 다음과 같이 설정하였다. 충격 추진력 평균 변화량 산출에 사용된 스케일링 파라미터  $\alpha=1$ , 기준 임계값 설정을 위한 파라미터  $T=500$ , 데이터 블록 길이  $L=50$ , 순시 임계값 조정에 필요한 이득조정 파라미터  $\gamma_1=2$ ,  $\gamma_2=1$ , 그리고 P파 예비검출 및 최종 검출에 사용한 파라미터는 각각  $N=50$ ,  $M=5$ 이다. 제안한 방법과 검출 성능을 비교한 ATFC 알고리즘[11]에서 사용한 파라미터는 데이터 블록 길이  $L=50$ , 기준 임계값 설정에 사용한  $T=500$ , 시간-주파수 누적변화량 산출에서 사용한 스케일링 파라미터  $\alpha=100$ , P파 예비검출을 위해 사용한 파라미터는 각각  $N=50$ , 및 최종 검출에 사용한 파라미터  $M$ 은 배경잡음 수준(SNR)에 따라  $M=5, 10, 15, 20$ 을 선택적으로 사용하였다. 또한 STA/LTA 알고리즘을 위한 파라미터  $L_{STA}$ 와  $L_{LTA}$ 는 각각 0.2초(20 샘플)와 5초(500 샘플)이며 고정 임계값인 STA/LTA 비(ratio)는  $3 \leq \kappa \leq 5$  범위에서 정수를 선택적으로 사용하였다.

그림 2~그림 9의 실험결과에서 짝수 번호 그림(그림 2, 그림 4, 그림 6, 그림 8)은 진앙지와 비교적 근거리의 관측소에서 수집된 지진 가속도 신호에 대한 성능 평가 결과이며, 홀수 번호의 그림(그림 3, 그림 5, 그림 7, 그림 9)은 진앙지에서 비교적 멀리



**그림 2** 2016.09.12. 경주 지진 (MI 5.8, 울산 관측소)

**Fig. 2** 2016.09.12. Gyeongju quake (MI 5.8, USN)

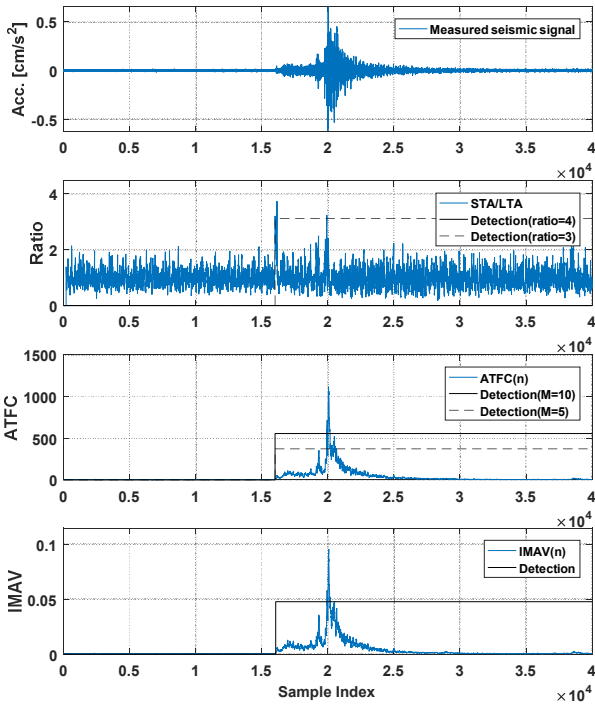


그림 3 2016.09.12. 경주 지진 (MI 5.8, 서울 관측소)

Fig. 3 2016.09.12. Gyeongju quake (MI 5.8, SEO2)

떨어진 관측소에서 수집된 신호에 대한 성능 평가 결과이다.

그림 2는 중규모이상의 경주 지진(MI 5.8)에 대한 울산관측소 데이터에 대한 검출 성능을 비교한 결과이다. STA/LTA 알고리즘의 검출 결과에서 STA/LTA의 비율  $\kappa=5$ 로 높게 설정하면 정확한 P파 검출이 가능하지만  $\kappa=4$ 로 낮게 설정할 경우 오검출이 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 울산 관측소는 진앙지(경주)와 가까운 관측소로서 지진파 존재 구간에서의 SNR은 높지만, 짧은 충격(임펄스성) 잡음으로 인해 기본적인 배경잡음 수준이 높다고 볼 수 있다. SNR에 비교적 강인한 검출성능을 보이는 ATFC 알고리즘의 경우  $M=15$  ( $T_s \times M=0.15\text{sec}$  시간지연)으로 설정했을 경우 오검출 없이 정확히 P파 검출이 이루어지지만, 신속한 P파 판정을 위해  $M=10$  ( $T_s \times M=0.1\text{sec}$  시간지연)로 설정했을 때는 배경잡음에 의한 오검출이 발생하게 된다. 반면 제안한 IMAV 알고리즘은  $M=10$  ( $T_s \times M=0.1\text{sec}$  시간지연)로 설정했을 때에도 오검출 없이 신속한 P파 검출이 가능하다.

그림 3은 경주 지진(MI 5.8)에 대해 진앙지와 비교적 원거리의 서울 관측소 데이터에 대한 검출 성능을 비교한 결과이다. 배경잡음의 수준은 그림 2의 울산 관측소의 경우와 비슷하지만 진앙으로부터 원거리 관측소에서 측정된 데이터이므로 지진파가 존재하는 구간의 SNR이 울산 관측소 데이터에 비해 낮다. 따라서 STA/LTA 알고리즘에서 STA/LTA의 비율  $\kappa=4$ 이하로 낮게 설정해야 P파 검출이 가능하다. 그러나 실제 상황에서는 지진 발생 위치를 알 수 없으며, 지진이 발생했을 때의 SNR을 추정하는 것이 불가능하다. 따라서 STA/LTA의 비 설정함에 있어 오검출 발생을 피하기 위해 평상 시 관측된 배경잡음의 수준보다 높게 설

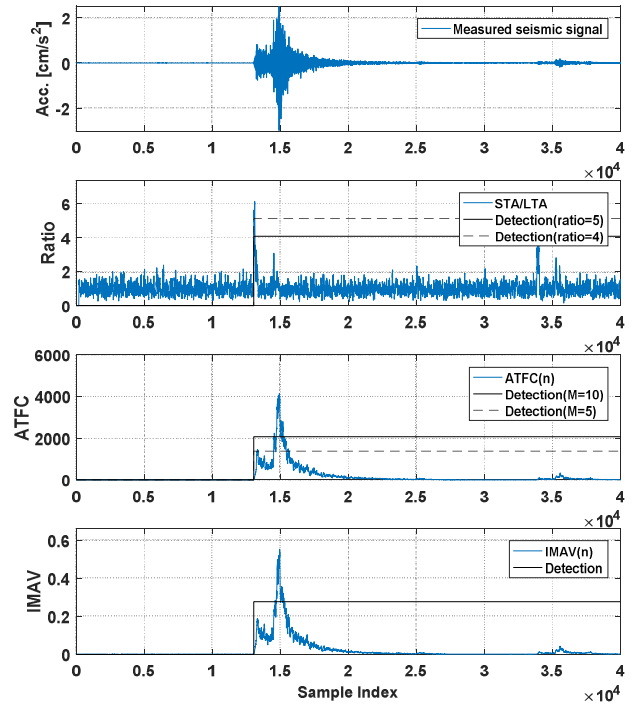


그림 4 2017.11.15. 포항 지진 (MI 5.4, 부산 관측소)

Fig. 4 2017.11.15. Pohang quake (MI 5.4, BUS)

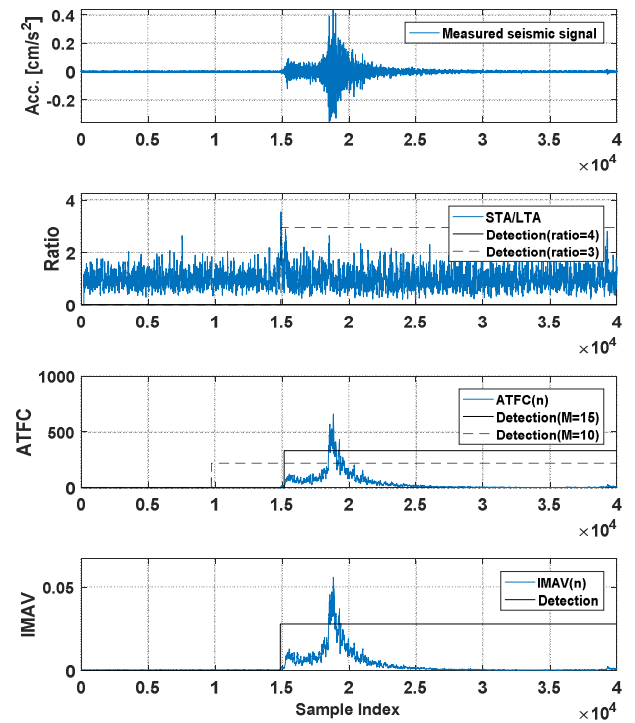


그림 5 2017.11.15. 포항 지진 (MI 5.4, 서울 관측소)

Fig. 5 2017.11.15. Pohang quake (MI 5.4, SEO2)

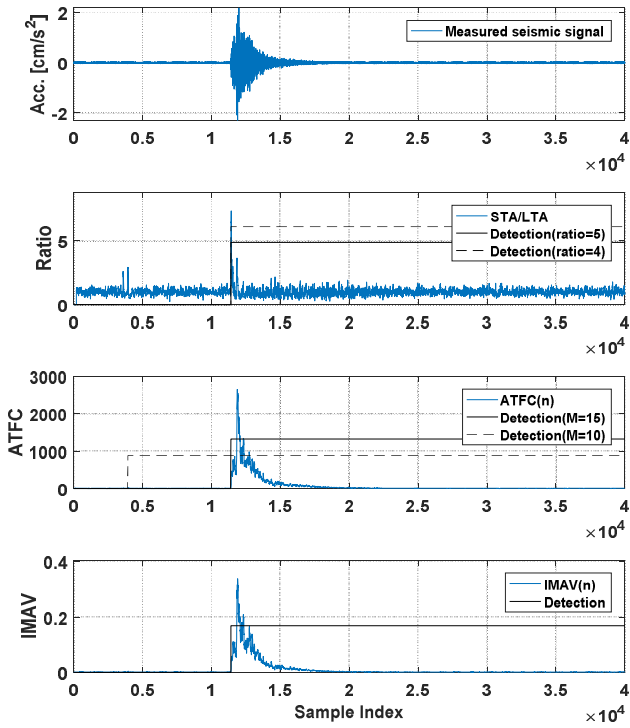


그림 6 2017.11.13. 보령 지진 (MI 3.5, 안면도 관측소)  
Fig. 6 2017.11.13. Boryeong quake (MI 3.5, ANM)

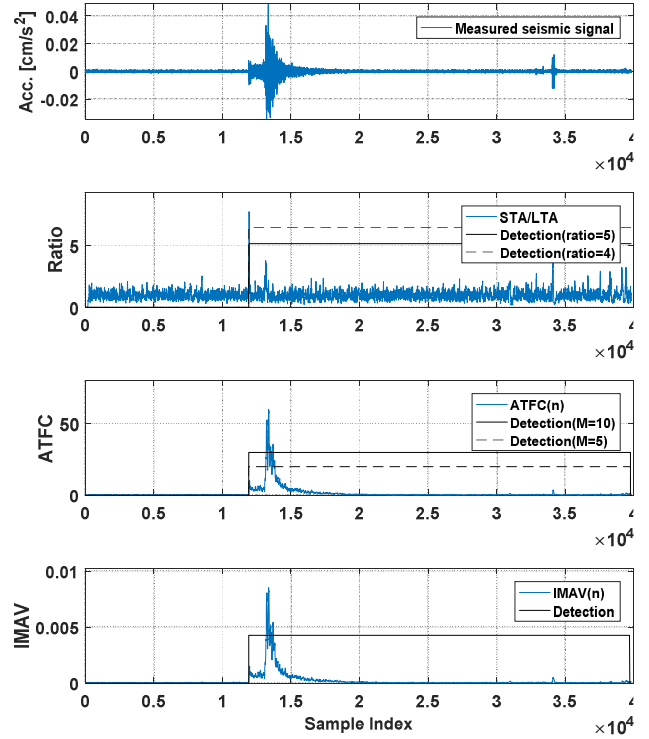


그림 8 2017.02.18. 광주 지진 (MI 2.4, 진주 관측소)  
Fig. 8 2017.02.18. Gwangju quake (MI 2.4, JIN)

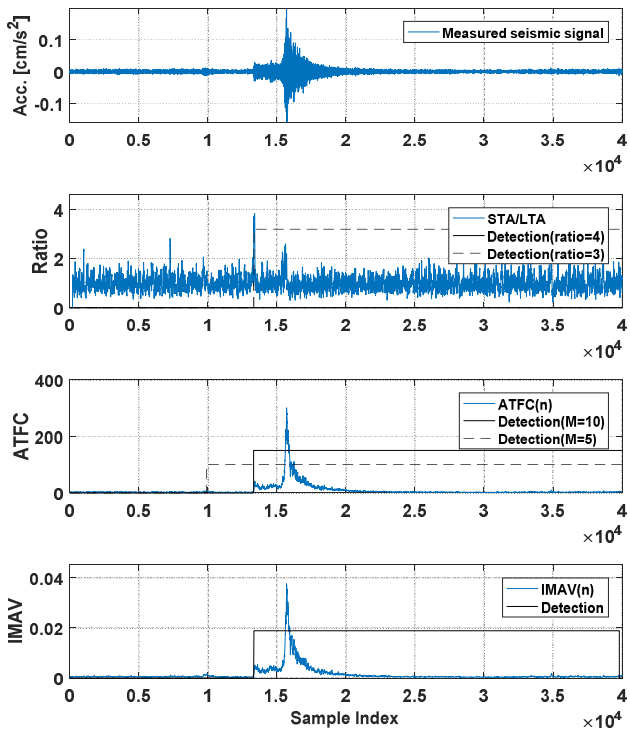


그림 7 2017.11.13. 보령 지진 (MI 3.5, 대구 관측소)  
Fig. 7 2017.11.13. Boryeong quake (MI 3.5, DAU)

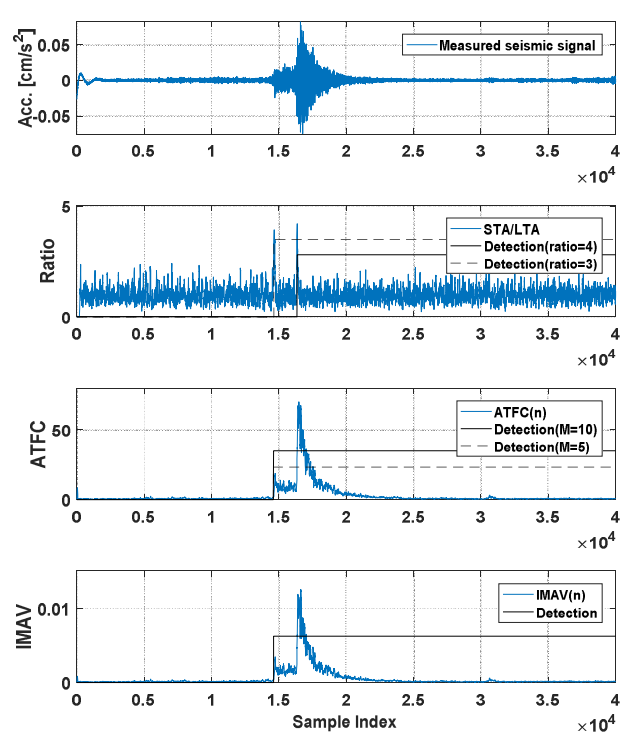


그림 9 2017.02.18. 광주 지진 (MI 2.4, 김천 관측소)  
Fig. 9 2017.02.08. Gwangju quake (MI 2.4, GIC)

정해야만 한다. 반면 ATFC 알고리즘과 제안한 IMAV 알고리즘의 경우는 배경잡음의 수준에 따라 능동적으로 가변하는 임계값을 사용함으로써 이러한 문제를 해결할 수 있다.

그림 4~그림 9의 결과에서 STA/LTA 알고리즘은 STA/LTA의 비를  $\kappa=4$  이상으로 설정할 경우 진앙지에서 비교적 가까운 관측소 데이터(그림 4, 그림 6, 그림 8)에 대해 양호한 검출 성능을 보이지만 진앙지에서 멀리 떨어진 관측소 데이터에 대해서는 검출이 불가능함을 알 수 있다. ATFC 알고리즘은 오검출 방지를 위해 사용한 파라미터를  $M \geq 15$ 로 높게 설정할 경우, 모든 관측소에서 검출이 가능하지만  $N=50, M=15$ 로 설정할 경우 P파 판정을 위해 0.65초( $Delay\ Time = T_s \times (N+M)$ )이상의 시간 지연이 발생하게 된다. 반면, 제안한 IMAV 알고리즘은  $M=5$ 로 설정했을 때 모든 실험 결과에서 0.55초 이내의 시간지연으로 오검출 없이 정확히 지진 P파 검출이 가능하다.

그림 10은 포항 지진의 가속도 신호에 대한 제안한 IMAV 알고리즘에서의 충격 추진력 변화량  $IMAV(n)$ , 기준 임계값  $TH_{REF}$ , 가변 임계값  $TH(n)$ 의 변화를 보이고 있다. 그림 10 (a)는 서울 관측소(SEO2)에 수집된 가속도 신호(EW)이며, 그림 10 (b)는 충격 추진력 변화량과 임계값들의 변화이다. 그림 10 (c)는 그림 10 (b)의 확대 결과이다. 그림 10에서 충격 추진력 변화량 ( $IMAV(n)$ )이 사전에 설정된 기준 임계값( $TH_{REF}$ )을 초과함에 따라 식 (12)의  $\Delta TH$ 에 의해 임계값  $TH(n)$ 이 조정됨을 알 수 있다. 이때 충격 추진력 변화량  $IMAV(n)$ 이 증가함에 따라  $\Delta TH$ 는  $\Delta TH > 0$ 가 되어 충격 추진력 변화량과 임계값의 차에 비례하여

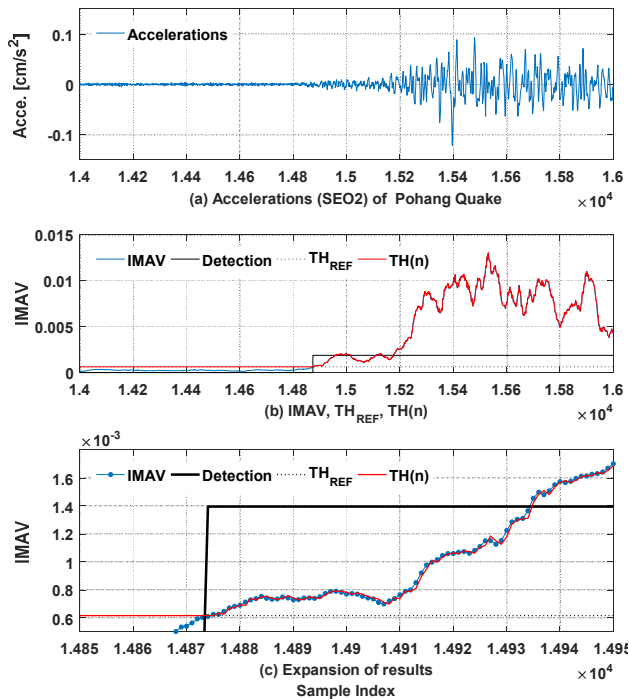


그림 10 제안한 방법에서  $IMAV(n), TH_{REF}, TH(n)$ 의 변화  
**Fig. 10** Variations of  $IMAV(n), TH_{REF}, TH(n)$  in the proposed method

다음 임계값  $TH(n+1)$ 은 현재 임계값  $TH(n)$ 에 비해 증가하게 된다. 반면  $IMAV(n)$ 가 감소하게 되면 유사한 방법으로  $TH(n+1)$  또한 감소하게 된다. 이러한 임계값 조정방법은 지진 P파 검출을 위해 상시 관측되는 배경잡음에 비해 급격히 증가하는 지진파의 특성을 반영하는데 적절하다고 볼 수 있다.

지진파의 규모와 진앙지와 관측소간 거리가 서로 다른 실제 관측 지진 신호들에 대한 시뮬레이션 결과로부터 STA/LTA 알고리즘 및 ATFC 알고리즘의 경우 신호의 SNR에 따라 검출 성능의 저하가 발생할 수 있으나 제안한 IMAV 알고리즘은 SNR에 강인하며 정확하고 신속한 P파 검출이 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 지진 가속도 신호로부터 건물 또는 시설물에 영향을 주는 충격 추진력 변화량을 정의하고 이를 사용한 지진 P파 자동 검출 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 적은 계산량으로 지진 이벤트 발생 시 나타나는 진폭과 주파수의 변화를 동시에 고려함으로써 상시 관측되는 배경잡음으로부터 지진파를 효과적으로 구분할 수 있다. 또한 가변하는 임계값을 사용함에 따라 SNR에 강인한 검출 성능을 보이며, 지속적으로 에너지가 증가하는 지진파의 특성을 반영할 수 있도록 추가적인 P파 검출 조건을 사용함으로써 배경잡음에 의한 오검출을 방지할 수 있다. 다양한 규모의 실제 지진에 대해 진앙으로부터 관측거리가 다른 취득 신호를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션에서 STA/LTA 알고리즘 및 ATFC 알고리즘과의 성능 비교를 통해 제안한 방법의 우수한 검출성과 유효성을 보였다.

#### References

- [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", *Journal of Sensors*, vol. 8, pp. 1-9, 2008.
- [3] E. Akhouayri, D. Agliz, M. Fadel, and A. Ait Ouahman, "Automatic detection and indexation of seismic events", *AMSE Periodicals, Advances in Modeling and Analysis. S. C.*, vol. 56, no. 3, pp. 59-67, 2001.
- [4] R. V. Allen, "Automatic earthquake recognition and timing from single trace", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 68, no. 5, pp. 1521-1532, Feb. 1978.
- [5] J. Wang and T. Teng, "Artificial neural network-based seismic detector", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 85, no. 1, pp. 308-319, Feb. 1995.
- [6] S. Gentili and A. Michelini, "Automatic picking of P and S phases using a neural tree", *Journal of Seismology*, vol. 10(1), pp. 39-63, Jan. 2006.



- [7] A. G. Hafez, M.T.A. Khan, and T. Kohda, "Clear P-wave arrival of weak events and automatic onset determination using wavelet filter banks", *Digital Signal Processing, Elsevier*, vol 20(1), pp. 715-723, May 2010.
- [8] C. Panagiotakis, E. Kokinou, and F. Vallianatos, "Automatic P-phase picking based on local-maxima distribution", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 8, pp. 2280-2287, Aug. 2008.
- [9] L. Küperkoch, T. Meier, J. Lee, and W. Friederich, "Automated determination of P-phase arrival times at regional and local distances using higher order statistics", *Geophysical Journal International*, vol. 181(2), pp. 1159-1170, May 2010.
- [10] K. M. Taylor, M.J. Procopio, C.J. Young, and F.G. Meyer, "Estimation of arrival times from seismic waves: a manifold-based approach", *Geophysical Journal International*, vol. 185(1), pp. 435-452, Feb. 2011.
- [11] H. Choi, "Earthquake Event Auto Detection Algorithm using Accumulated Time-Frequency Changes and Variable Threshold," *Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 61, no. 8, pp. 1179-1185, Aug. 2012.

저 자 소 개



**최 훈(Hun Choi)**

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 전자공  
 학과 부교수  
 Tel : 051-890-1673