

단일 지진관측소의 지반가속도 구간 누적값 및 최대값 파라미터를 이용한 실시간 지진규모 추정 연구

Real-time Estimation of the Earthquake Magnitude Using the Bracketed Cumulative and Peak Parameters of the Ground-motion Acceleration of a Single Station

연관희^{1)*}

Yun, Kwan Hee^{1)*}

¹⁾한전 전력연구원

¹⁾KEPCO Korea Electric Power Research Institute

/ A B S T R A C T /

In industrial facilities sites, the conventional method determining the earthquake magnitude (M) using earthquake ground-motion records is generally not applicable due to the poor quality of data. Therefore, a new methodology is proposed for determining the earthquake magnitude in real-time based on the amplitude measures of the ground-motion acceleration mostly from S-wave packets with the higher signal-to-noise ratios, given the V_{s30} of the site. The amplitude measures include the bracketed cumulative parameters and peak ground acceleration (A_s). The cumulative parameter is either CAV (Cumulative Absolute Velocity) with 100 SPS (sampling per second) or BSPGA (Bracketed Summation of the PGAs) with 1 SPS. The arithmetic equations to determine the earthquake magnitude are derived from the CAV(BSPGA)- A_s - M relations. For the application to broad ranges of earthquake magnitude and distance, the multiple relations of CAV(BSPGA)- A_s - M are derived based on worldwide earthquake records and successfully used to determine the earthquake magnitude with a standard deviation of $\pm 0.6M$.

Key words: Real-time earthquake magnitude determination, Bracketed summation, Peak ground acceleration per second, Cumulative absolute velocity, Single station

1. 서론

지진이 발생할 경우 산업시설물 및 구조물의 손상 및 인명피해 등이 수반되는데, 피해정도는 지진의 에너지 특성인 규모에 의해 결정된다. 또한 일반적으로 지진파의 에너지는 지진발생 지점(지진원)과의 거리가 멀어질수록 감쇠하면서 약화되는 특성이 있어, 지진피해 정도는 거리와도 긴밀한 관계가 있다. 따라서 지진이 발생할 경우, 지진의 규모/거리를 최대한 신속, 정확하게 결정하는 과정이 광역적인 지진피해 대응에 있어 매우 중요하다.

일반적인 지진의 규모, 거리 추정방법은 지진파 중 가장 먼저 도달하는 P파나 후반부에 도달하면서 큰 크기를 갖는 S파의 도착시간 혹은 크기를 이

용하여 지진의 규모 혹은 거리 중 하나를 먼저 계산하고, 나머지 특성 값을 대상 지역에 대해 개발된 지진파의 규모-거리에 따른 지진파크기의 감쇠식을 이용하여 추정하게 된다. 기존에 제시된 지진의 규모와 거리를 추정하는 방법은 크게 다음과 같은 두 가지 방법으로 구분할 수 있다.

- (1) 지진파의 P파와 S파의 도착시간 간의 차이(S-P 시간)를 이용하여 지진원까지의 거리를 계산하고, 기 개발된 지진파의 규모-거리 감쇠식을 이용하여 관측된 S파의 크기를 지진원에서의 크기로 환산한 후, 지진원에서의 지진파 크기를 이용하여 지진의 에너지 척도인 지진규모를 추정할 수 있다. 이 방법은 지진의 규모와 거리를 추정하기 위해 전통적으로 적용되는 방법으로서 P파와 S파의 도착시간을 결정하는 과정을 포함하는데, 이 과정은 P파와 S파를 자동으로 구분하는 방법의 적용시 오류의 가능성이 많아 수동 확인과정을 대개 필요로 하며, 특히 지진파형 자료의 품질이 좋지 않을 경우 P파와 S파의 구분이 쉽지 않아 자동화하기에는 어려움이 있어, 이 방법을 이용한 신속한 지진규모-거리 추정이 어렵다.

*Corresponding author: Yun, Kwan Hee

E-mail: kyun@kepri.re.kr

(Received 23 September 2013; Accepted 30 October 2013)

(2) 지진피해를 유발하는 정도의 큰 크기를 갖는 S파 도달 이전에 도착하는 P파의 지진파를 이용하여 지진규모를 추정하고 기 개발된 지진파의 규모-거리 감쇠식에 관측된 S파의 크기를 입력하여 지진원까지의 거리를 추정하는 방법으로, 지진조기경보(earthquake early warning) 개념이다. 이 방법은 P파를 이용하여 지진피해와 직결된 지진규모를 보다 빠르게 추정할 수 있는 장점이 있으나 지진규모 추정의 오차가 방법 1보다는 상대적으로 높고, P파를 자동적으로 분류하는 단계에서 오류가 발생할 수 있으며, 진동잡음 수준이 높을 경우 P파의 구분이 어려워 P파를 이용한 지진규모 추정이 어려운 단점이 있다.

이상에서 언급한 지진규모-거리 추정의 전통적인 방법은 진동잡음 신호가 클 경우 자동화하거나 실시간으로 구현하기 어려움을 알 수 있다. 일반적으로 지진관측소는 양질의 지진파를 관측하기 위해 인근에 진동잡음이 없고, 진동잡음의 영향이 제거될 수 있는 기반암이 노출된 노두 상에 설치해야 한다. 진동잡음은 주거지 내의 다양한 인간활동 및 회전기기(터빈, 전동기 등)의 동작, 차량이동에 의해 상시적으로 혹은 불규칙하게 발생할 수 있다.

한편 최근 시행된 지진재해대책법(NEMA[1])에 따르면 전력시설물(발전소 및 변전소)을 포함한 대부분의 주요 국가시설물에는 실시간 지진감시를 위해 부지내에 지진계를 설치하여 운영해야 하는데, 부지 내에서는 진동잡음의 원인 요소가 다양하게 있고, 그 진동 수준도 매우 커 양호한 지진계 설치 지점을 발견하기 힘들다. 부지 내에 양호한 지진계 설치지점이 없을 경우에는 지하 기반암까지 시추를 수행하고 시추공 내에 지진계를 설치하여야 한다. 이 경우 시추비용이 추가로 필요하며 대부분의 시추공 지진계가 고가이기 때문에 많은 비용이 수반되며, 설치한 이후에도 유지보수가 어려운 단점이 있다. 지진계가 양호한 지점에 설치되지 않을 경우 해당 지진 관측자료에는 인근 진동잡음 신호가 큰 영향을 주어, 실시간으로 자동화된 지진감시기능을 구현하기 어렵다.

또한 다수의 지진계 공급업체의 출현으로 지진계 시장에 본격적인 납품 경쟁체제가 도입되어 저가 지진계 도입이 일반화될 것으로 예상된다. 부지 내에 저가의 지진계가 도입되어 운영될 경우, 지진계 내의 A/D(Analog to Digital) 변환시 높은 수준의 시스템 잡음이 나타날 수 있는데, 이 경우에도 높은 수준의 잡음신호가 지진관측자료에 포함될 수 있다.

이상에서와 최근 구축되거나 향후 구축되어야 할 주요 시설물 부지 내의 지진계는 지반환경 혹은 인근 잡음으로 인해 관측환경이 열악해지며, 지진계 시스템의 성능 또한 하향 평준화하는 추세에 있다. 이 경우 지진관측소에서 관측된 지진파의 잡음수준이 높을 것으로 예상되며, 잡음 수준이 높을 경우 지진 발생시 실시간으로 자동화된 지진의 규모, 거리 통보의 신뢰성이 낮아져, 신속한 지진피해대응이 어려워진다.

실시간 관측된 지진파형에 높은 수준의 잡음신호가 섞일 경우나, 지진파형 신호가 미약하여 신호대잡음비(S/N비)가 낮을 경우에는 지진파의 P파와 S파를 자동으로 실시간 구분할 수 없으며, P파가 잡음신호와 섞이기 때문에 P파를 이용한 지진규모 추정이 어려워지기 때문에, 상기한 방법으로는 지진의 규모와 거리를 신속하게 추정할 수 없게 된다. 또한 잡음이 없다 하더라도 대규모의 지진피해가 예상되는 지진원까지의 거리가 가까운 경우 P파의 크기나 P파와 S파를 구분하기는 과정은 매우 어렵다. 본 연구에서는 P파를 이용하지 않고 잡음이 존재할 경우에도 신호 추출이 가능한, 상대적으로 큰 크기를 갖는 S파의 크기 정보인, 최대지반가속도 및 지반가속도의 특정 구간의 시간누적값을 이용하여 신속한 지진의 규모를 추정하는 방

법을 제시하고자 한다.

2. 지반가속도의 구간 누적값 및 최대값 파라미터를 이용한 지진규모 추정 방법론

본 연구에서는 인근 잡음신호에 의해 P파의 분별이 어려운 경우, S파의 지진파형특성만을 이용하여 지진의 규모를 추정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. S파의 지진파형특성으로는 지진파형 절대값의 최대값(As)과 누적절대속도(CAV, Cumulative Absolute Velocity) 값이 사용된다.

CAV는 다양한 방법으로 정의될 수가 있는데 본 연구에서는 식(1)과 같이 실시간으로 이동하는 특정 시간윈도우 구간에 대한 CAV값을 의미하는 BCAV(Bracketed Cumulative Absolute Velocity)를 정의하고, 이하 CAV와 동일한 개념으로 사용코자 한다. 식(1)은 단위시간당 n_s 개의 디지털 입력자료인 $a_i(t)$ 의 절대값에 대한 면적을 매초 구간 사다리꼴 공식을 이용하여 계산한 후 윈도우 시간구간 N 초에 대하여 적산함을 나타낸다. 이때 윈도우 시간구간은 인덱스 k 에 따라 시간이동하게 되며, 시간이동 간격은 $1/n_s$ sec에 대한 임의의 배수 값을 가진다. $a_i(t)$ 는 3성분(수평 2성분, 수직 1성분) 지진계에 감지되는 특정 성분 지반가속도 시간이력으로서, 지반속도 자료를 계측하는 경우에는 미분을 통해 지반가속도로 환산되어야 한다.

$$BCAV_k = \sum_{is=k}^{N+k-1} p_{is} \cdot F(is) \tag{1}$$

$$F(is) = \sum_{j=i}^{i+n_s-2} (|a_j(t)| + |a_{j+1}(t)|) \cdot 0.5/n_s \cdot dt$$

$$i = (is - 1) \cdot n_s + 1$$

식(1)에서 $p_{is} = H(\max|a_{is}(t)| - a_{th})$ 으로 p_{is} 는 is 로 결정되는 1초 구간의 입력 지반가속도 절대값의 최대값인 $\max|a_{is}(t)|$ 이 특정값 a_{th} 보다 크면 1이고 작거나 같으면 0을 갖는 heavyside step 함수이다. $a_{is}(t)$ 는 식(2)와 같이 1초 구간내의 지반가속도 자료를 성분으로 하는 벡터자료로서 정의된다.

$$a_{is}(t) = (a_i, a_{i+1}, \dots, a_{i+n_s-1}) \tag{2}$$

식(1)의 계산에 필요한 a_{th} 는 CAV 계산에 포함되기 위해 지반가속도의 초당 최대값이 가져야 하는 최소값을 의미한다.

한편 지진파형 절대값의 최대값(As)과 누적절대속도(CAV, Cumulative Absolute Velocity) 값을 이용하여 지진규모(M) 추정이 가능한 이유는 식(3)과 같이 CAV와 As, M과의 경험적인 관계식(이하 CAV-As-M 경험식) 도출이 가능하기 때문이다(EPRI[2]). 식(3)이 물리적으로 의미하는 바는 As와 관련 있는 지진파의 최대크기와 CAV와 관련 있는 파형의 폭을 알면 지진규모 추정이 가능하다는 점이다. 식(3)에서의 V_{S30} 은 지진계가 설치된 지표로부터 지하 30m까지의 평균 전단파 속도를 의미하며, 다양한 지구물리방법으로 추정되어 사전에 결정될 수 있는 값이다. 식(3)의 계수인 $d1-d7$ 와 파라미터인 M_0 는 지진관측자료를 이용하여 경험적으로 도출되는 값이

다. 식(3)에서의 수치 '2.31'은 인용 문헌인 EPRI[2]의 식에서 제시된 수치인 '2.5'와는 다른데, 이 값은 동일 문헌에 수록된 Fig. 2-39의 그림 내용과 부합하도록 재조정하여 얻어진 값이다.

$$\ln(\text{CAV}) = d1 + d2 \cdot (\ln(\text{As}) + 2.31) + d3 / (\ln(\text{As}) + d4) + d5 \cdot (M - M_0) + d6 \cdot (M - M_0)^2 + d7 \cdot (\ln(\text{Vs}_{30}(\text{m/sec})) - 6.0) \quad (3)$$

식(3)을 재정렬하면 식(4)와 같은 규모(M)의 2차함수를 도출할 수 있고 이 식의 이론적인 해인 식(5)로부터 규모를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} a \cdot M^2 + b \cdot M + c &= 0 \\ a &= d6, b = -d6 \cdot 2 \cdot M_0 + d5 \\ c &= d6 \cdot M_0^2 - d5 \cdot M_0 + d1 + d2 \cdot (\ln(\text{As}) + 2.31) \\ &\quad + d3 / (\ln(\text{As}) + d4) + d7 \cdot (\ln(\text{Vs}_{30}) - 6.0) - \ln(\text{CAV}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M &= (-b + \sqrt{b^2 - 4ac}) / 2a \\ &= f_M(\text{As}, \text{CAV}, \text{Vs}_{30}, \vec{D}) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)의 \vec{D} 는 $d1 \sim d7$ 와 파라미터인 M_0 를 성분으로 갖는 벡터를 의미한다. 한편 식(3)의 CAV는 관련 논문(Yun[3])에 의해 지반가속도의 초당 최대값 구간적산(BSPGA; Bracketed Summation of Peak Ground Acceleration per second)과 밀접한 관계가 있는 지진크기 파라미터이므로, 식(6)과 같이 CAV는 BSPGA로 대체될 수 있다. 식(6)의 BSPGA는 식(7)과 같이 정의된다.

$$\ln(\text{BSPGA}) = d1 + d2 \cdot (\ln(\text{As}) + 2.31) + d3 / (\ln(\text{As}) + d4) + d5 \cdot (M - M_0) + d6 \cdot (M - M_0)^2 + d7 \cdot (\ln(\text{Vs}_{30}(\text{m/sec})) - 6.0) \quad (6)$$

$$\text{BSPGA}_k = \sum_{i=s=k}^{N+k-1} p_{i,s} \cdot \max |a_{i,s}(t)| \quad (7)$$

식(6)의 관계식(이하 BSPGA-As-M)을 활용하면 BSPGA를 이용하여 지진규모를 추정할 수 있다. 또는, BSPGA를 CAV로 환산하여 식(3), (5)로부터 지진규모를 추정할 수도 있다. 각각의 경우 지진규모를 결정하는 식은 식(8)과 같이 표현될 수 있다. 식(8)은 식(5)와 함수가 동일하나, 입력 변수가 CAV에서 BCAV_k^* 혹은 BSPGA로 대체된 형태이다.

$$\begin{aligned} M &= f_M(\text{As}, \text{BSPGA}, \text{Vs}_{30}, \vec{D}) \\ &= f_M(\text{As}, \text{BCAV}_k^*(\text{BSPGA}), \text{Vs}_{30}, \vec{D}) \end{aligned} \quad (8)$$

BSPGA를 이용한 CAV 추정값인 $\text{BCAV}_k^*(\text{BSPGA})$ 는 식(9)와 같이 제시된 바 있다(Yun[3]).

$$\begin{aligned} \text{BCAV}_k^* &= 10^{(A + B \cdot \log_{10}(\text{BSPGA}_k))} \\ (A &= -0.45127, B = 0.97325) \end{aligned} \quad (9)$$

초당 100샘플링 이상의 자료를 필요로 하는 CAV 대신 BSPGA를 활용할 경우의 장점은, BSPGA는 초당 최대값의 시계열 정보만을 이용하여 계산되기 때문에 다수의 지진관측소와 실시간으로 연계된 지진감시서버에서 가능 구현을 할 경우 지진의 규모를 보다 경제적이고 신속 계산할 수 있게 된다.

3. CAV(BSPGA)-As-M 경험식 도출

EPRI가 제시한 식(3)의 CAV-As-M 경험식의 장점은 지진학적인 환경(active 혹은 stable 지역)과는 무관하게 임의의 지역에 보정 없이 활용할 수 있다는 점이다(EPRI[2]). 이로 인해, 식(3)의 경험식은 지진활동이 활발한 미국 서부 지역 뿐만 아니라 지진활동이 안정되었고, 지각 특성도 다른 미국 중동부 지역에도 적용되어 활용되고 있다. 이러한 사실은 역으로 세계 여러 지역의 지진자료를 조합하여 이용 하더라도 전 지역에 적용할 수 있는 CAV-As-M 관계식을 도출할 수 있음을 의미한다. 한편 식(3)의 EPRI 경험 관계식은 $a_{th} = 0.025g$ 에 대해 계산되었으며, 진앙거리 200km 이하 및 규모 4.0 이상의 중규모 이상의 지진에 대한 경험식이다. 또한 식(3)의 EPRI 경험 관계식을 이용한 지진규모 계산식의 단점은 계산식(식(5))에서 제곱근 내의 값인 $b^2 - 4ac$ 가 0보다 작을 경우 허수부가 되거나, 해당 시간 구간 내의 지진파 크기가 a_{th} 보다 작아 계산된 CAV가 0일 경우에는 $\ln(\text{CAV})$ 가 계산되지 않아, 식(5), (8)의 방법으로는 지진규모를 계산할 수 없다는 점이다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 a_{th} 값을 작게 하여 제곱근 내의 값을 0보다 크게 조절하거나, 시간 구간 내의 지반가속도 최대값 보다 작은 a_{th} 를 선택하여 0보다 큰 CAV 값을 얻어 동일한 방법으로 지진규모를 계산할 수 있는데, 이를 위해서는 0.025g 보다 작은 a_{th} 에 대한 식(3)의 계수인 $d1 \sim d7$ 와 파라미터인 M_0 를 지진관측자료 DB를 이용하여 별도로 도출해야 한다.

이를 위해서는 EPRI의 경험 관계식 도출에 활용된 원 지진파형 자료 DB(EPRI[2])를 동일하게 이용하여 관련 계수를 도출하는 방법이 가장 이상적이거나, 관련 파형 자료를 확보할 수 없어, 본 연구에서는 대체 자료로서 Vs_{30} 정보가 포함된 미국 Pacific Engineering and Analysis 사가 제공한 지진자료(이하 PA DB, Yun and Park[4])를 이용하였다. 참고적으로 PA DB 자료에는 지각 내에서 발생한 전세계 주요 강지진(crustal earthquakes) 32개에 대한 지진자료가 포함되어 있으며, 미국의 NGA 감쇠식(PEER[5]) 개발에 활용된 DB 자료의 일부로도 활용되었다.

한편 EPRI DB 자료는 최대지반가속도가 0.025g보다 큰 중규모 ($M > 4.0$) 이상의 지진자료만을 활용하였기 때문에 중규모 미만의 지진만이 발생하는 국내에서는 이상의 지진규모 계산 방법의 적용성이 낮다. 따라서 본 연구에서는 이상의 지진규모 계산방법의 국내 적용을 위해, 기존 연구에서 활용된 국내 유감 지진에 대한 지진계측자료를 이용하여 CAV (BSPGA)-As-M 관계식을 도출하였다.

국내 유감 지진자료는 중규모 이하의 지진에 대해 MMI I 이상으로 보고된 지역의 지진관측자료를 부지중폭특성이 일관되게 변환한 보정된 지진관측자료이다(이하 Korea DB, 참고 문헌(Yun et al.[6])의 부록 Table 2의 지진목록(580개 지진)). 부지중폭특성을 일관되게 하기 위해 지진관측 자료의 시간파형자료를 푸리에 변환한 후 주파수별 위상정보는 유지하고 주파수별 부지중폭율을 Class A 관측소의 주파수별 부지중폭율로 대체한 후 역 푸리에 변환하여 시간파형을 도출한 자료를 이용하였다. 한편 Class A

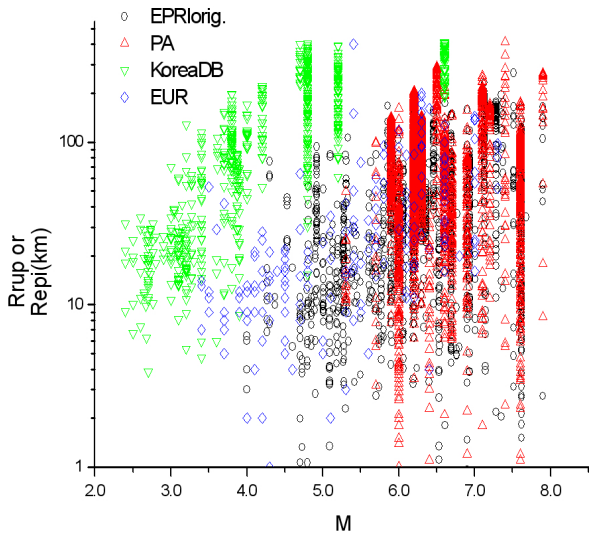


Fig. 1. Distribution of earthquake magnitude(M) and distance according to the earthquake DBs(EPRI, PA, Korea) of recorded data used to estimate the coefficients of Eqs. (3), (6) for magnitude determination. EUR DB is used for comparative error analysis in M determination

Table 1. CAV(BSPGA)-As- M models fitted to local and worldwide earthquake DBs (EPRI, PA, Korea) in Fig. 1. The resultant values of the coefficients for the models are provided in Table 2

M est. models	condition for coefficients			coef. vector in Table 2
	CAV model	cumulative parameters of ground-motion acc.	DB	
Fa1	CAV1 (g-sec)	$a_{th}(g)=0.025$ $N(sec)=30$	EPRI	\vec{D}_{a1}
Fa2	CAV2 (gal-sec)	$a_{th}(g)=0.0001$ $N(sec)=30$	PA	\vec{D}_{a2}
Fa3	CAV2 (gal-sec)	$a_{th}(g)=0.0001$ $N(sec)=30$	Korea DB	\vec{D}_{a3}
Fb1	BSPGA1 (gal)	$a_{th}(g)=0.025$ $N(sec)=30$	PA	\vec{D}_{b1}
Fb2	BSPGA2 (gal)	$a_{th}(g)=0.0001$ $N(sec)=30$	PA	\vec{D}_{b2}
Fb3	BSPGA2 (gal)	$a_{th}(g)=0.0001$ $N(sec)=30$	Korea DB	\vec{D}_{b3}

Table 2. Earthquake data-driven coefficients of CAV(BSPGA)-As- M models in Table 1. The values in the shaded cell are fixed for inversion. The coefficient vector, \vec{D}_{a1} , represent the original values of the coefficients for the EPRI equation (EPRI[2])

coef. vector	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	$M0$
\vec{D}_{a1}	-0.405	0.509	-2.11	4.25	0.667	-0.0947	-0.266	6.5
\vec{D}_{a2}	0.72114	0.73592	3.04856	386.49251	0.5265	-0.19042	-0.31095	6.5
\vec{D}_{a3}	2.07713	0.28395	-12.27003	4.77472	1.4712	-0.34372	-0.31095	2.88
\vec{D}_{b1}	108.839	-3.49351	-1279.607	11.79419	0.50781	-0.13871	-0.12596	6.5
\vec{D}_{b2}	1.54006	0.7657	-6.19277	-2811.3423	0.43226	-0.16018	-0.20082	6.5
\vec{D}_{b3}	1.48591	0.51961	-3.79722	3.4501	0.7758	-0.09401	-0.31095	2.6

에 대한 지반의 전단파 속도는 대략 $V_{s30}=1.5\text{km/sec}$ 로 추정되었으므로 (Yun et al.[6]) 국내 지진자료를 이용한 CAV(BSPGA)-As- M 관계식 도출시에는 $V_{s30}=1.5\text{km/sec}$ 로 가정하였다.

Fig. 1은 이상에서 언급한 EPRI 경험 관계식 추정에 사용된 지진의 규모, 거리 분포 및 PA DB와 Korea DB의 지진규모, 거리 분포를 나타낸다. Fig. 1에 지진의 규모, 거리 분포가 표시된 또 다른 지진자료 DB로는 유럽의 강진자료 DB(Fig. 1의 EUR, Ambraseys et al.[7])가 있다. EUR DB는 본 논문의 후반부에서 정량적인 V_{s30} 정보 대신 정성적인 지질학적인 지반 분류 정보를 활용할 경우의 본 연구의 지진규모 추정 방법의 적용성을 평가하기 사용되었다. DB별 규모 분포는 대략 $PA \approx EPRI > EUR > Korea$ DB 순이며, 거리는 400km 이내부터 근거리까지 분포한다. Fig. 1에서 거리의 종류로는 PA, EPRI DB인 경우는 Rupture distance(R_{rup})이고, Korea, EUR DB는 진앙거리(epicentral distance, R_{epi})로서, 지진규모가 커지면 거리 종류 간의 차이가 발생할 수 있으나 본 연구의 분석시에는 이들 차이를 고려하지 않았다.

Table 1은 Fig. 1의 지진자료 DB(PA DB, Korea DB) 및 지반가속도 누적 파라미터인 CAV 혹은 BSPGA 계산에 사용된 최소 지진동값 a_{th} 에 따른 다양한 CAV(BSPGA)-As- M 관계식 모델을 나타내며, Table 2는 다양한 CAV(BSPGA)-As- M 관계식 모델에 대한 계수 추정 결과를 나타낸다. Table 1의 Fa1 모델은 EPRI의 원 관계식을 이용한 지진규모 추정모델을 의미하며, Fa2, Fa3, Fb2, Fb3 모델은 $a_{th}=0.0001g$ 로 하향 조정하여, 최대 지반가속도가 0.025g 이하인 원거리 및 미소 지진 파형에 대한 지진규모 추정이 가능한 모델이다. Table 2의 CAV(BSPGA)-As- M 모델 계수값은 관련 DB를 사용하여 Levenberg-Marquardt 비선형역산 방법(Marquardt[8])을 사용하여 도출하였다. 한편 M_0 는 PA DB를 사용할 경우는 EPRI DB를 활용한 계수 추정에서처럼 규모 6.5로 고정시켰으나, 국내 지진자료를 사용할 경우는 고정시키지 않고 관측자료로부터 역산하여 추정하였다.

이상에서와 같이 도출된 규모추정 관계식은 대체적으로는 사용된 DB의 지진규모, 거리 범위 내에서 적용될 수 있다. 따라서 Table 1의 Fa1, Fa2, Fb1, Fb2는 중규모 이상의 지진자료에 적용이 가능하며, Fa3, Fb3은 중규모 이하의 유감지진에 대한 규모 추정에 적합할 수 있다.

4. CAV(BSPGA)-As- M 관계식을 이용한 지진 규모 추정 절차

이상에서는, 먼저 EPRI CAV-As- M 관계식으로부터 지진규모를 추정

하는 식(식 (5))을 제시하였다. 아울러 EPRI 관계식을 확장하여 CAV 대신 BSPGA를 이용한 지진규모 추정이 가능하게 하는 BSPGA-As-M 관계식을 도출하였다. 또한, CAV나 BSPGA를 계산할 때 사용하는 최소 지반가속도값인 a_{th} 를 하향 조정하여, 큰 규모 지진 뿐만 아니라 국내에서 발생할 수 있는 중 소규모 지진에 대한 지진규모를 추정할 수 있는 CAV(BSPGA)-As-M 관계식을 추가로 제시하였다.

본 연구에서는 이상의 여러 지진규모 관계식으로부터 최적 지진규모를 도출하기 위해서, Fig. 2와 같은 절차를 채택하였다. Fig. 2(a)에는 지진계로부터 수신되는 특정 수평성분 지진파의 CAV 및 As를 이용하여 지진규모를 추정하는 방법에 대한 흐름도이며, Fig. 2(b)는 지진계로부터 수신되는 특정 수평성분 지진파의 BSPGA 및 As를 이용하여 지진규모를 추정하는 방법에 대한 흐름도이다. 이러한 절차와 관련된 주요 고려사항은 다음과 같다.

- (1) EPRI의 CAV-As-M 관계식(Table 1의 Fa1 모델)은 가장 많은 자료를 이용하여 도출된 관계식으로서, EPRI 관계식을 이용한 지진규모 추정 방법에 가장 높은 신뢰도를 부여하였다.
- (2) BSPGA를 이용한 지진규모 추정 방법이 있어서도, BSPGA를 식(9)를 이용하여 CAV로 환산한 후 EPRI 관계식을 이용한 지진규모에 가장 높은 우선순위를 부여하였다.

- (3) $a_{th}=0.025g$ 에 대한 EPRI 관계식으로부터 지진규모 추정이 불가능할 경우, $a_{th}=0.0001g$ 에 대한 CAV(BSPGA)-As-M 관계식으로부터 지진규모를 추정한다.
- (4) 한편 국내 지진자료로부터 $a_{th}=0.0001g$ 에 대해 도출된 CAV (BSPGA)-As-M 관계식(Table 1의 Fa2, Fb2)을 이용한 지진규모와 PA 지진자료 DB를 이용한 CAV(BSPGA)-As-M 관계식(Table 1의 Fa3, Fb3)으로부터 도출된 지진규모 중, 작은 값을 택할 경우, 지진규모 추정 오차가 줄어들었다.
- (5) 본 방법의 적용을 위해서는 지반 30m까지의 평균 전단파 속도인 V_{s30} 정보가 사전에 입력되어야 한다.

Fig. 2의 지진규모 계산 과정은, 먼저 시간구간 $N=30$ 초 시간에 대한 As 및 CAV 혹은 BSPGA 값에 대해 Table 1의 다양한 지진규모 계산모델의 관련 계수를 순차적으로 이용하여 식(5),(8)로부터 지진규모 계산이 가능한 지를 순차적으로 확인하고, 계산이 가능하면 계산된 지진규모를 최종 지진규모값으로 선정하게 된다.

As, CAV에 대해서는 Table 2에 있는 Table 1의 Fa1, Fa2, Fa3의 관련 계수값을 식(5)에 순서대로 적용하여 관련 지진규모인 $M(Fa1)$, $M(Fa2)$, $M(Fa3)$ 를 계산하고, As, BSPGA를 이용할 경우에는 역시 Table 2에 있는

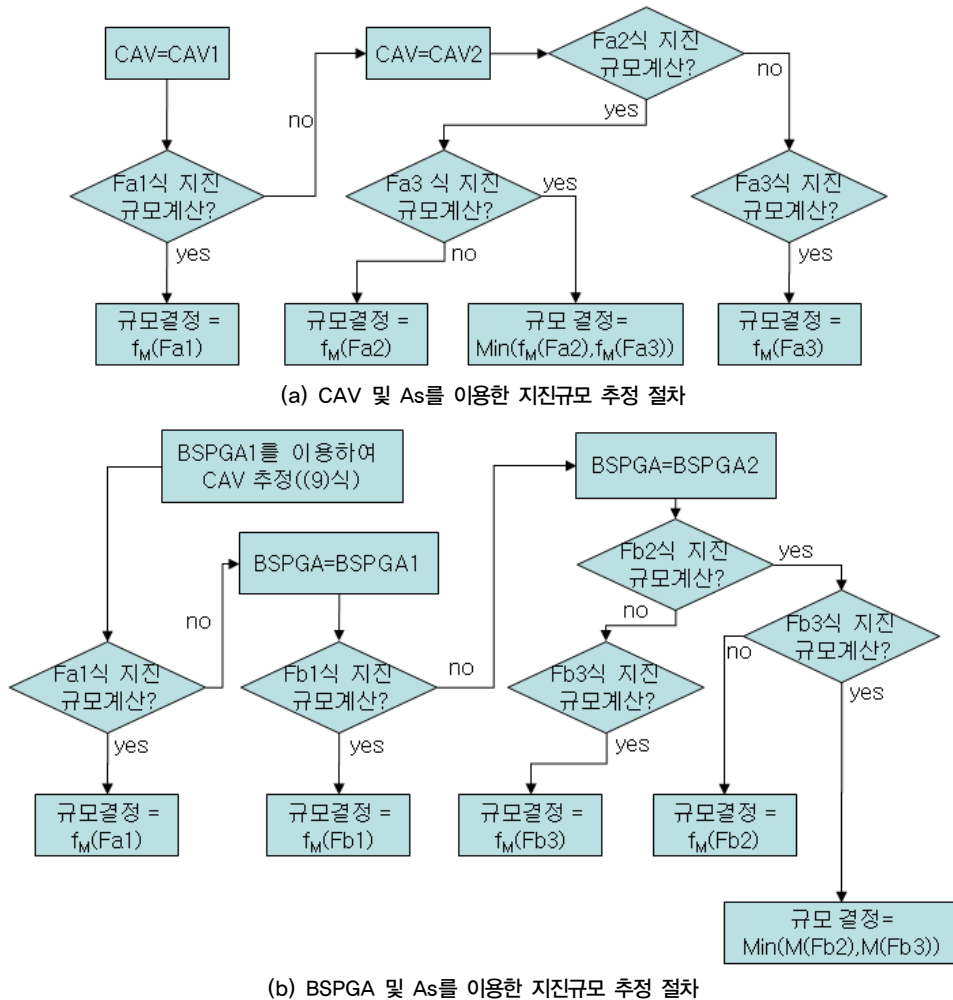
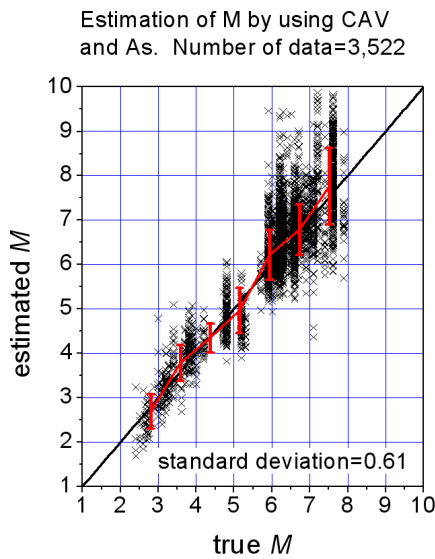


Fig. 2. Procedures to determine the earthquake M by using the cumulative parameters (CAV or BSPGA) and peak value (As) of the ground-motion acceleration. Reference for CAV1, CAV2, BSPGA1, and BSPGA2 in the figures are in Table 1

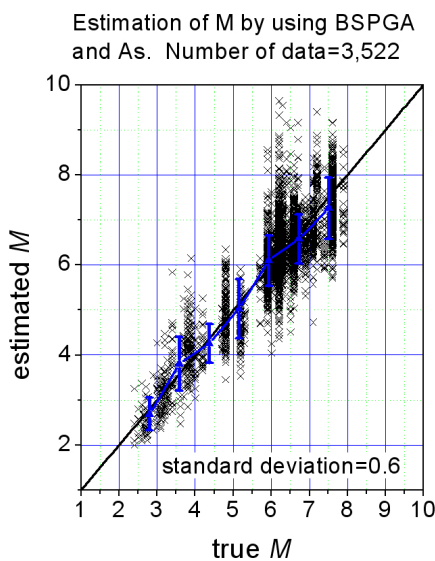
Fa1, Fb1, Fb2, Fb3의 관련 계수값을 식(8)에 순서대로 적용하여 관련 지진 규모인 $M(Fa1)$, $M(Fb1)$, $M(Fb2)$, $M(Fb3)$ 를 계산한다. 이때 Fig. 2의 $M(Fa1)$ 는 식(5)의 함수 $f_M(CAV1, A_s, V_{S30}, \vec{D}_{a1})$ 를 이용한 지진규모 계산결과를 의미하며, $M(Fb3)$ 는 식(8)의 함수 $f_M(BSPGA2, A_s, V_{S30}, \vec{D}_{b3})$ 를 이용한 지진규모 계산결과를 의미한다. 한편 Fig. 2에서 Fa2와 Fa3 그리고 Fb2와 Fb3의 계수에 대한 지진규모가 동시에 계산될 수도 있는데, 이 경우에는 계산된 두 개의 규모 중 최소값(Fig. 2의 $\text{Min}(M(Fa2), M(Fa3)), \text{Min}(M(Fb2), M(Fb3))$)으로 최종 규모를 선정한다.

5. 지진규모 추정 결과 및 토의

본 연구에서는 이상에서 제시한 지진규모 추정 방법의 타당성을 평가하



(a) Error in M estimation by using CAV



(b) Error in M estimation by using BSPGA

Fig. 3. Error comparison of the earthquake magnitudes determined through the procedures in Fig. 2 by using the geometric means of CAV(or BSPGA) and A_s for the two horizontal components

기 위해 국내 지진자료(Korea DB) 및 국외 지진자료(PA D/B)에 대해 CAV, BSPGA와 A_s 를 계산하고 Fig. 2의 절차에 따라 추정된 지진규모와 실제 지진규모를 비교하였다. 한편 상기 국내외의 지진자료에 대한 지진규모는 2.5~8.0, 거리는 400 km 이내로서, 본 연구에서 제시된 방법이 적용될 수 있는 지진자료의 범위이다. Fig. 2의 CAV 혹은 BSPGA, A_s 값은 이상의 지진파형 자료에 대해 2개의 수직인 수평성분 각각에 대해 계산할 수 있다. 따라서 Fig. 2의 지진규모 절차는 2개의 수평성분에 대한 CAV 혹은 BSPGA, A_s 각각에 적용되어 2개의 지진규모를 추정할 수도 있고, 2개의 수평성분에 대한 CAV 혹은 BSPGA, A_s 의 조합인 기하평균을 이용하여 지진규모를 추정할 수도 있다.

Fig. 3은 수평성분 2개의 기하평균 CAV(혹은 BSPGA)와 A_s 를 이용하여 추정된 지진규모와 실제 규모와의 오차를 보여 주는 그림이다. 지진규모 추정 오차 평가 결과, CAV 대신 조당 최대값만을 이용하여 계산한 BSPGA를 지진규모 추정에 활용하더라도 지진규모를 표준편차 0.6 정도로(Fig. 3(b)참조) 신뢰성 있게 지진규모를 추정함을 알 수 있다.

이 정도의 오차를 갖는 지진규모 정보는, 신속히 추정될 경우, 피해지진 발생시 즉각적인 후속조치를 취하기 위해 필요한 기본 정보로서 충분한 가치가 있다. 일반적으로 지진관측자료의 품질이 양호하고, 20 샘플링 이상의 P파 지진파 자료를 이용하여 추정된 지진조기경보(earthquake early warning) 용도로 의미 있게 활용되는 지진규모 추정의 오차 표준편차는 $\pm 0.5M$ 이다(Wurman et al.[10]). 한편 수평성분 2개의 기하평균 CAV(혹은 BSPGA)와 A_s 대신 단일성분에 대한 CAV 혹은 BSPGA와 A_s 를 이용한 지진규모 추정 결과는 0.65 정도로 오차가 0.05 증가하였다.

또한 다수의 지진관측소로 구성된 지진 관측망을 운영할 경우에는, 각 관측소별로 지진규모가 얻어지기 때문에 다수의 관측소별로 도출된 여러 개의 지진규모에 대해 관측망 평균값(network average)을 취할 수 있는데, 이 경우에는 Fig. 4와 같이 지진규모의 추정 오차가 $\pm 0.6M$ 에서 $\pm 0.37M$ 로

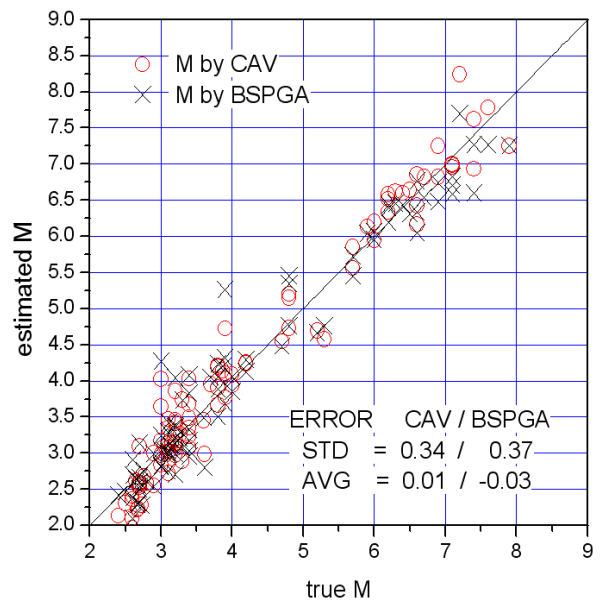


Fig. 4. Comparison of real earthquake M with the network average of the estimated M based on the DBs of records from local felt earthquakes (Korea DB) and worldwide major crustal earthquakes (PA DB)

40%정도 낮아짐을 확인할 수 있었다.

한편 지반의 V_{s30} 정보가 없고 정성적인 지질학적인 정보만이 있는 경우가 많을 수 있는데, 이 경우에도 지진규모가 의미 있게 추정되는 지를 검토함은 매우 의미가 있다. 이를 위해 본 연구의 지진규모 추정방법을 Fig. 1의 유럽 강지진자료 DB(Ambraseys et al.[7])에 적용하여 보았다. 유럽 강지진자료의 관측소 정보에는 V_{s30} 값이 없고 지반을 Eurocode 8(European Committee[9])에 따라 ‘rock(A type)’, ‘stiff soil(B type)’, ‘soft soil(C type)’, ‘very soft soil(D type)’의 4가지로 지질학적인 분류를 하였다. 본

연구에서는 상기 ‘rock’, ‘stiff soil’, ‘soft soil’, ‘very soft soil’의 지반에 대하여, 해당 지반에 대해 주어진 전단파속도(m/sec) 범위(각각, > 800m/sec, 360~800m/sec, 180~360m/sec, < 180m/sec, European Committee[9])의 평균값으로 1,000m/sec, 520m/sec, 254m/sec, 127m/sec를 선택하고, 해당 지반의 V_{s30} 값으로서 일괄 부여하였다.

Fig. 5는 유럽 강지진자료에 대해 주어진 지진관측자료 조건(적용된 지질학적인 지반분류에 개략적인 V_{s30} 값을 부여하고, 단일 수평성분 가속도자료) 하에서, BSPGA를 이용하여 추정한 지진규모와 실제 지진규모를 비교한 결과이다. 이 경우 Fig. 5에 나타난 바와 같이 지진규모 추정의 오차가 표준편차가 $\pm 0.77M$ 로 증가함을 알 수 있다. 한편 Fig. 5의 지진관측자료 조건을 갖는 특정 관측망 내의 지진관측소 수는 일반적으로 매우 많을 것으로 예상되며, 다수의 지진관측자료에 본 연구의 지진규모 추정 방법을 적용한 후, 결과를 평균할 수 있다. 이 경우 단일 관측소 활용 결과(Fig. 3)와 동일 관측망의 다수 관측소 활용 결과(Fig. 4)의 비교에서 확인된 40% 정도의 오차 감소로 인해 표준편차 $\pm 0.46(=0.77 \times 40\%)$ 정도의 신뢰성 있는 지진관측망 평균 지진규모를 예상할 수 있다.

본 연구에서 제시한 방법의 장점은 P파와 S파의 구분 없이 실시간으로(CAV의 경우는 샘플링시간 간격마다, BSPGA의 경우에는 매초마다) Fig. 2의 절차에 따라 지진규모 계산이 가능하다는 점이다. 실시간으로 계산이 가능하다는 점은 지진규모 추정시, 입력 정보로서 매 시각 갱신되는 현재 시점에서의 구간 최대값 및 구간누적값 만이 필요하고, 이전 시점에서의 별도 정보가 필요하여 과거 시점으로 회귀할 필요가 없는 feedforward 계산이 가능함을 의미한다. Fig. 6(a)는 일본 Tottori 지진($M=6.6$)에 대한 특정 지진파형 기록에 대해 매 시각 계산되는 지진규모를 도시한 그림이며, Fig. 6(b)는 국내에서 발생한 미소지진($M=3.7$) 지진파형 기록에 대한 매초 실시간 지진규모 계산 결과를 나타내는 그림이다. 해당 그림에는 실제 지진규모가 함께 도시(수평 실선)되어 있다. 본 방법론을 실시간으로 적용할 경우의 최종 규모는 실시간으로 계산된 값 중 최대값으로 결정되는데, Fig. 6의 예제에서 일본 Tottori 지진에 대한 최종 규모는 $M=7.18$, 국내 미소지진에 대

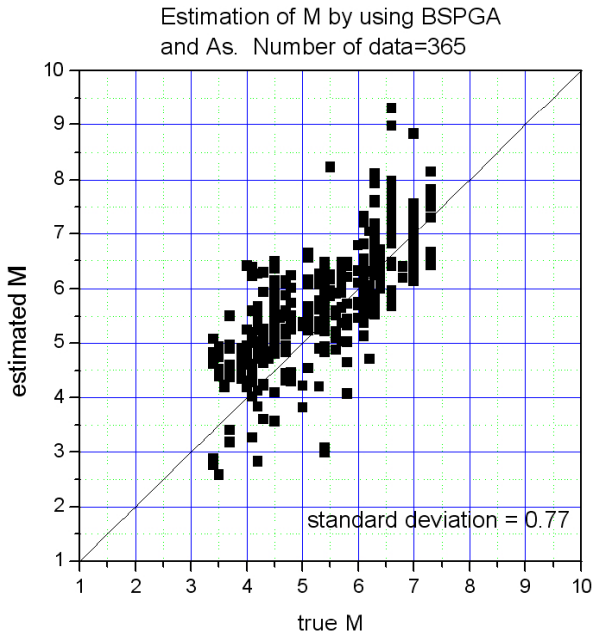
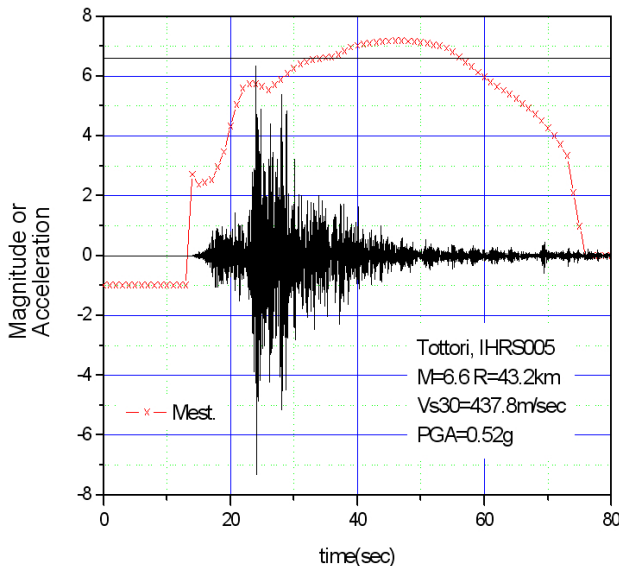
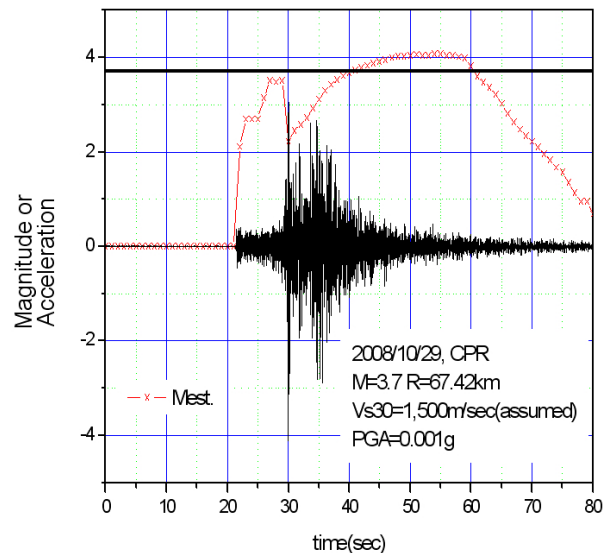


Fig. 5. Error in M determination through the procedure of Fig. 2(b) by using the BSPGA of one horizontal component based on the European earthquake DB in Fig. 1, for which the geological classification of the sites is given without V_{s30} values



(a) Record of IHRS005 station for Tottori Earthquake, Japan



(b) Record of KMA CPR station for a local microearthquake

Fig. 6. Example of comparison of real M (solid) with the estimated M determined in real-time by 1sec through the procedure of Fig. 2(b)

해서는 $M=4.07$ 로 최종규모가 계산되었다. 한편 본 연구의 지진규모 추정 방법론 및 관련 식은 S파 지진파형 관측자료를 이용한 결과이나, Fig. 6에 나타난 바와 같이 지진규모를 부정확하게 추정하기는 하나 P파에 대해서도 민감하게 반응하고 있으며, 실제 지진규모가 지진파형의 최대값 도달 시간 전후 10초 이내에서 유사하게 추정됨을 알 수 있다.

6. 결론

지진발생시 지진피해대응을 효과적으로 수행하고, 피해를 최소화하기 위해서는 지진의 규모, 거리를 신속하게 평가하고 통보해야 한다. 일반적으로 지진파형의 신호대 잡음비가 낮은 경우에는, P파와 S파의 위상정보 및 P파의 크기를 이용하는 기존의 전통적인 방법을 적용할 경우에는 신속하게 자동으로 지진의 규모, 거리를 추정하는 데에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 지진파형 중 에너지가 가장 큰 S파의 크기정보만을 이용하여, 잡음이 있는 경우에도 지진규모를 신뢰성 있게 실시간으로 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

지진파의 크기정보로는 시간파형의 구간최대값(A_s) 및 구간 누적값인 CAV(Cumulative Absolute Velocity) 혹은 BSPGA(Bracketed Summation of the PGAs)가 활용되었다. 지진규모 추정에는 지진파의 크기정보 뿐만 아니라 지진관측소의 기반정보인 V_{S30} 정보도 동시에 필요하다. A_s 및 CAV(혹은 BSPGA)의 값으로서 2개의 수평성분 평균값을 사용할 경우, 국내 유감 지진자료(Korea DB) 및 전세계 주요 강지진의 자료(PA DB)의 지진규모를 $\pm 0.6M$ 의 표준편차 오차 이내에서 추정하였으며, 단일 성분에만 대한 지진파 크기를 정보를 이용할 경우는 지진규모 추정 오차가 $\pm 0.65M$ 으로 오차가 다소 증가하였다. 한편 동일 지진에 대한 다수의 지진관측소 자료에 대해 본 연구의 지진규모 추정 방법을 적용한 후 평균값을 취하면, 오차 표준편차가 $\pm 0.37M$ 로 크게 개선되었다. 또한 V_{S30} 에 대한 정량적인 정보가 부재하여 지질학적인 정보만을 이용할 경우에는 규모추정 오차의 표준편차가 $\pm 0.77M$ 정도로 추정됨을 유럽 강지진자료(Fig. 1의 EUR DB)를 이용하여 간접적으로 평가하였다.

본 방법은 지진파형 중 주변 잡음에 크게 왜곡되지 않는 S파의 지진파 크기를 이용하기 때문에 양호한 지진계 설치 환경이 아닌 발전소, 변전소 등과 같이 주요 산업시설물이나 주거 지역에 인근에 설치된 지진관측소의 관측 자료에도 적용하여 지진의 규모를 신속하게 통보할 수 있게 한다.

또한 이상의 방법은 초당 100 샘플링 이상의 많은 지진파형 디지털 자료가 아닌 초당 1 샘플링 자료(BSPGA)만을 이용하여 지진의 규모를 계산할 수 있기 때문에, 다수의 지진관측소가 통신망으로 연계된 지진서버에서 지진규모를 추정할 경우, 통신망에 대한 통신 부하가 거의 없어, 고가의 통신망 구축 비용 및 통신비 절감 효과가 있으며, 지진 규모 계산 시간의 단축효과도 기대할 수 있다.

아울러 본 연구에서 제시된 관계식은 지질-지진학적인 환경에 관계 없이 전 세계적으로 범용적으로 활용될 수 있으며, 이러한 특징은 기존의 일반적

인 지진규모 방법이 특정 지역에 적용될 경우 관련 계수값을 보정해야 하는 것과는 차별화된 장점이다.

최근 국내를 비롯한 피해 지진이 자주 발생하고 있는 지역을 중심으로 지진조기경보 및 신속통보를 국가적으로 혹은 주요 산업시설에 대해 확충하는 추세에 있으며, 본 방법은 지진조기경보가 오동작 없이 완벽하게 구현되기까지의 전단계에서 보조적인 방법으로 활용될 수 있다.

/ REFERENCES /

1. National Emergency Management Agency(NEMA). Guideline for installation and operation of strong ground-motion seismic instrumentation [Government Legislation of NEMA No.2010-30]. c2010.
2. EPRI. Program on Technology Innovation: Use of Cumulative Absolute Velocity (CAV) in Determining Effects of Small Magnitude Earthquakes on Seismic Hazard Analyses(TR-1014099). Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Germantown: Electric Power Research Institute; c2006. 190p.
3. Yun KH. Study on the Use of Bracketed Summations of the Peak Ground-motion Acceleration Per Second for Rapid Earthquake Alert Notifications: Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2012 Feb;16(1):37-45.
4. Yun KH, Park DH. International Cooperative Project with Pacific Engineering and Analysis on Evaluating the modeling uncertainty in strong ground-motion simulation(TM, 05SP03, T2005.677). Daejeon: KEPRI; c2005 Sep. 184p.
5. PEER. NGA Strong Motion Database [Internet]. 2005; Available from: <http://peer.Berkeley.edu/NGA>
6. Yun KH, Park DH, Park SM. The Statistical Model of Fourier Acceleration Spectra according to Seismic Intensities for Earthquakes in Korea: Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2009 Dec; 13(6):11-25.
7. Ambraseys N, Smit P, Sigbjornsson R, Suhadolc P, Margaris B. CD-ROMs for European Strong-Motion Data. European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme; c2002.
8. Marquardt DW. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters: Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1963;11:431-441.
9. European Committee for Standardization, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings(Tech. Rept. Doc CEN/TC250/SC8/N317). rue de Stassart 36, B1050 Brussels: Central Secretariat: 2002.
10. Wurman G, Allen RM, Lombard P. Toward Earthquake Early Warning in Northern California. 2007 Aug;112:B08311,1-19.