

## 신속 지진피해통보를 위한 지반가속도의 초당 최대값 구간적산 방법의 활용에 관한 연구

### Study on the Use of Bracketed Summations of the Peak Ground-motion Acceleration Per Second for Rapid Earthquake Alert Notifications

연관희<sup>1)</sup>

Yun, Kwan Hee

**국문 요약** >> 지반가속도의 초당 최대값은 최근 제정된 지진재해대책법에 따라 지진기록계로부터 통신망을 통해 소방방재청으로 실시간 제공되어야 한다. 본 연구에서는 현재 PGA를 기반으로 한 신속한 지진피해통보 용도로만 고려되고 있는 지반가속도의 초당 최대값의 추가적인 활용성을 검토하고자, 국내외 강진자료 및 중소규모 지진자료에 대한 초당 100 샘플링된 지반가속도 자료의 1초 구간내 최대 절대값을 30초 동안 적산한 결과(BSPGA<sub>k</sub>)를 CAV(Cumulative Absolute Velocity) 및 진도 등과 비교하였다. CAV는 진도와 높은 상관성으로 지진발생시 원자력발전소의 운전초과기준으로 사용되고 있으나, 계산시 초당 100 샘플링 이상의 많은 양의 지진파형 디지털 자료를 필요로 하는 단점이 있다. 비교 결과 BSPGA<sub>k</sub>는 지진규모에 따른 지진동 수준과 상관없이 CAV와 전 범위에서 높은 상관성을 나타내었으며, 다수의 관측소가 연계된 지진관측망 운영시 유용하게 활용될 수 있는 신속 지진피해평가 지진동 파라미터로 확인되었다. 국내 중소규모 유감지진자료에 대한 지진진도 자료와의 비교결과, BSPGA<sub>k</sub>-진도 상관식을 이용한 진도추정 오차는 CAV-진도 상관식의 진도추정 오차와 유사하였으며, PGA-진도 상관식보다 진도를 신뢰성 있게 추정하였다.

**주요어** 신속 지진피해통보; 지진피해평가 지진동 파라미터; 구간적산; 지반가속도 초당 최대값; 누적절대속도, 진도

**ABSTRACT** >> In an effort to further exploit the peak ground-motion acceleration (PGA) information per second available in real time by the enacted law, bracketed summations of the PGA per second (BSPGA<sub>k</sub>) for 30 seconds based on the records with a rate of 100 samples were compared with the cumulative absolute velocity (CAV) and earthquake intensities based on a worldwide database of records from small-to-large earthquakes. The CAV, currently in use as an earthquake damage indicator for nuclear power plants due to its strong correlation with the earthquake intensity, has the disadvantage of requiring a massive amount of digital data with a rate of more than 100 samples per second. The comparative study shows that the BSPGA<sub>k</sub> is well correlated with the CAV over the wide range of strong ground-motion levels, which suggests that the BSPGA<sub>k</sub> is one of the new promising ground-motion parameters especially useful for rapid earthquake alert notifications through an earthquake monitoring network. Based on the domestic database of records from small-to-moderate earthquakes with felt reports, it is also observed that the BSPGA<sub>k</sub> is comparable to the CAV and better than the PGA in predicting the intensity by using the correlation relation.

**Key words** Rapid earthquake alerts notifications; Ground-motion earthquake damage indicator; Bracketed summation, Peak ground acceleration per second; Cumulative Absolute Velocity; Intensity

## 1. 서론

지진관측망을 이용하여 지진발생에 따른 재해를 경감하

는 두 가지 방법으로는 지진조기경보나 신속지진피해통보가 있다. 지진조기경보는 지진에 피해를 줄 수 있는 S파 도달 이전의 P파를 이용하여 지진대응시스템 등을 가동하여 피해를 줄이는 방법이다. 신속지진피해통보란 지진발생시 주요 시설물의 지진피해 유무 및 피해 정도·범위 등을 신속히 판단하여, 즉각적인 후속조치가 가능하도록 하여 지진피해를 최소화할 수 있는 정보를 제공함을 의미하는 용어이다. 한편 신속지진피해통보에서는 주요 시설물(전력설비, 가스 시설물, 댐 등)이 위치한 부지에 지진계를 설치하고 시설물

<sup>1)</sup> 정회원·한전 전력연구원, 책임연구원  
(교신저자 : kyun@kepri.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 10. 31 / 수정일 1차: 2011. 12. 9, 2차: 2011. 12. 22 / 게재확정일 : 2011. 12. 22)

© 2012EESK www.eesk.or.kr

에 피해를 유발할 수 있는 지진파가 감지되면 지진파의 피해평가 파라미터를 계산하여 즉각 대처에 필요한 정보를 실시간으로 통보하고 있다. 신속지진피해통보 방법을 지진파를 계측하는 지진관측소가 실시간 지진관측망으로 연결된 경우에는, 지진발생 지점의 지진피해평가 파라미터를 원거리 지역에 전송하여 사전 지진대응 준비시간을 제공하는 측면에서 지진조기경보 시스템으로도 활용할 수 있다.

지진관측망을 이용한 신속지진피해통보시 사용되는 감지된 지진파의 지진피해평가 지진동 파라미터의 주요 요건으로는 1) 계산에 필요한 자료의 양이 많지 않아 통신망에 부하가 적고 실시간으로 원격중앙 지진감시서버에서 계산이 가능해야 하며, 2) 오동작의 가능성이 낮아 신뢰성이 높으며, 3) 다양한 지진관측소에서 일관된 정보 취합이 가능하도록 표준화될 수 있는 파라미터이어야 하며, 4) 현재의 지진관측 시스템이 이미 갖고 있는 기능을 최대한 이용하거나 혹은 최소로 수정하여 실제 적용 및 구현시 추가 비용이 최소화 되어야 한다.

전 세계적으로 운영 중인 지진관측망의 지진피해평가 파라미터로는, 지진관측소에서 실시간 제공이 가능하며, 제공된 자료로 인해 통신망 부하가 낮은 지반운동의 최대값(PGA, PGV 등)이 일반적으로 많이 사용되고 있다. (Worden and *et al.*<sup>(1)</sup>; Atkinson and Kaka<sup>(2)</sup>; Kaka and Atkinson<sup>(3)</sup>; Wald and *et al.*<sup>(4)</sup>; Wald and *et al.*<sup>(5)</sup>) 국내의 경우에도 지반운동의 최대값 활용을 위해 2010년 시행된 『지진재해대책법 시행령 및 지진 가속도계측기 설치 및 운영기준』<sup>(6)</sup>에서 향후 국내에 설치되는 가속도 지진계에는 의무적으로 초당 가속도 최대값을 계산하여 소방방재청의 중앙 지진감시서버에 실시간으로 제공하는 기능을 추가하도록 규정하고 있다. 그러나 지반운동의 최대값 정보는 국내와 같이 지진파의 고주파 성분이 상대적으로 강한 지역에서는 오동작의 가능성이 높아 신속지진피해통보를 위한 지진피해평가 파라미터로 사용되기 위해서는 심도 있는 선행 연구가 필요한 상황이며, 현재까지 소수의 연구만이 수행되었다(김우한 등<sup>(7)</sup>).

일반적으로 지진피해평가 파라미터는 추정하고자 하는 지진피해 유형 및 대상 시설물에 따라 여러 가지가 사용되고 있는데, 주요 설비의 손상 및 기능장애를 판별하고자 자주 사용되는 지진피해평가 파라미터의 하나가 CAV (Cumulative Absolute Velocity)이다. 원래 CAV는 원자력발전소의 지진 발생시 운전정지를 결정하는 기준(U.S. NRC<sup>(8)</sup>)의 하나이었으나, 최근에는 일반 산업시설물에도 적용이 확대되고 있다. 국내에서도 최근에는 가동 중인 원전에 대해서 지진발생시 운전초과기준으로 CAV의 지진동파라미터 크기를 도입하

기 위한 연구가 수행된 바 있다(박동희 등<sup>(9)</sup>).

CAV는 1초 기간 중 지진파의 가속도 시간이력의 최대지반가속도가 특정값(예 0.025g)을 초과할 경우, 1초 구간에 대해 가속도의 절대값을 취한 후 지진파의 지속시간 동안 누적한 값이다. 한편 이 값이 특정 값(원자력발전소는 0.165 g-sec)을 초과하는 경우 지진피해가 의심되기 때문에 관련 설비의 운전을 정지시키게 된다. CAV가 별도로 도입된 이유는 지진피해를 유발하지 않는 작은 지진에 의한 불필요한 원전운전정지를 방지하기 위해서 일반 구조물의 피해를 기준으로 미국에서 도입되었다(Reed and Kennedy<sup>(10)</sup>).

한편 CAV를 주요 설비의 지진피해 평가파라미터로 이용하기 위해서는 지진계 자체에 CAV를 계산할 수 있는 기능이 포함되어 있어야 하는데, 현재 국내 지진관측망을 구성하는 지진관측소에 설치된 지진계의 대부분은 CAV를 계산할 수 있는 기능이 없다. CAV는 원래 주요 구조물 부지만을 대상으로 하는 지진감시시스템에 적용을 염두하고 개발된 파라미터로서 원격통신망으로 연계된 지진관측망의 지진피해평가 파라미터로 적합지 않은데, 이유는 원격중앙 지진감시서버에서 CAV 계산시 필요로 하는 지진파의 입력자료의 양으로 인해 통신부하가 많이 걸리기 때문이다.

지진계에 CAV 계산기능은 없으나 해당 지진계가 특정 지진관측망에 연계되어 있는 경우, 원격중앙 지진감시서버에서 지진파를 실시간으로 전송받아 CAV 계산기능을 구현할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 지진감지기의 아날로그 신호를 특정 초당 샘플링된 디지털 값(일반적으로 1초에 100회 샘플링 채택)으로 변환한 다량의 디지털 자료를 실시간으로 전송받을 수 있는 양호한 통신망이 구축되어 있어야 한다. 그러나 품질이 양호한 통신망을 구축할 경우 많은 통신비용이 수반된다. 특히 지진관측소의 수가 많아지면 통신비용 부담은 매우 커지게 된다.

본 연구에서는 CAV 계산기능이 없는 지진관측망에 연계된 지진관측소 지진계의 초당 지반가속도 최대값만을 이용하여 원격중앙 지진감시서버에서 CAV값을 추정할 수 있는 방법을 제안하고 국내의 지진자료를 기반으로 적용성을 평가하고자 한다. 초당 지반가속도 최대값은 지진파의 광대역 주파수 특성값으로 지진기록의 샘플링 수와 관련되어 변화되는데, 본 연구에서는 매초 100샘플링 이상으로 기록된 지반가속도 절대값의 초당 최대값을 의미하며, 지진재해대책법에 따라 소방방재청의 중앙 지진감시서버에 실시간으로 전송되어야 하는 매초 20샘플링 기록의 초당 지반가속도 최대값과는 지진의 규모, 거리에 따라 차이가 있을 수 있다.

본 방법의 적용성이 확인될 경우 지진관측망의 통신용량

이 적은 경우에도 CAV를 추정할 수 있게 되며, 아울러 주요 시설물의 지진관측망 운영에 소요되는 통신비용을 저감하고, 통보시간을 단축할 수 있게 된다. 또한 지진계에 CAV 계산기능이 있다 하더라도 CAV값이 다양한 정의에 따라 계산할 수 있기 때문에 원격중앙 지진감시서버에서 표준화된 CAV를 다시 계산해야 할 필요성도 발생하는데, 이러한 경우에도 활용할 수 있다.

본 연구에서는 이상에서와 같이 기존에 부지내 지진감시시스템에서만 적용되고 있는 신뢰성 있는 지진피해평가 파라미터인 CAV를 다수의 지진관측소가 연계된 지진관측망에 효율적으로 적용하여 CAV 크기를 기준으로 한 신속지진피해통보가 가능해 질 수 있는 방안을 제공하고자 한다.

## 2. 초당 지반가속도 최대값 구간적산을 이용한 누적 절대속도(CAV) 파라미터 추정 방법

특정한 위치에서 발생한 지진은 다수의 임의의 위치에 설치된 지진관측소 지진계에서 계측되고 그림 1과 같이 실시간 통신망을 통해 원격중앙 지진감시서버로 자료가 실시간 전송된다. 원격중앙 지진감시서버는 특정 지점에서 계측된 지진자료로부터 지진피해 유무 및 피해정도를 추정하고 광범위한 지역에 중앙 지진통보 기능을 할 수 있다. 혹은 그림 1에 나타난 바와 같이 특정 지진계의 지진자료만을 이용하여 부지 내에서 신속하게 지역 지진통보 기능을 할 수 있다.

원격중앙 지진감시서버로 전송되는 자료는 각각의 지진관측소에서 특정 방향의 지진감지 센서에 기록된 지진파형

에 대해 단위시간당  $n_s$ 개로 샘플링 되는 디지털 자료와 지진계 내부에서 주기적으로 처리되어 제공되는 가공된 자료의 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 가공자료로는 단위 시간당 시간이력의 최대값(PGA, PGV 등) 및 여러 다른 종류의 계산된 파라미터 정보가 제공되고 있다.

한편 그림 1의 지진관측소에 설치된 지진계의 대부분에서는 가공된 자료로서 CAV를 제공하고 있지 않다. 따라서 CAV 계산 기능은 통신망을 통해 수신된 계측정보를 이용하여 원격중앙 지진감시서버에서 구현해야 한다.

CAV는 다양한 방법으로 정의될 수가 있는데 본 연구에서는 식 (1)에서와 같이 정의된 CAV 계산식을 원래의 CAV 계산식으로 간주한다. 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 정수배수 값을 가진다.  $a_i(t)$ 는 3성분(수평 2성분, 수직 1성분) 지진계에 감지되는 특정 성분 지반가속도 시간이력으로서, 지반가속도 자료를 계측하는 경우에는 미분을 통해 지반가속도로 환산되어야 한다.

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

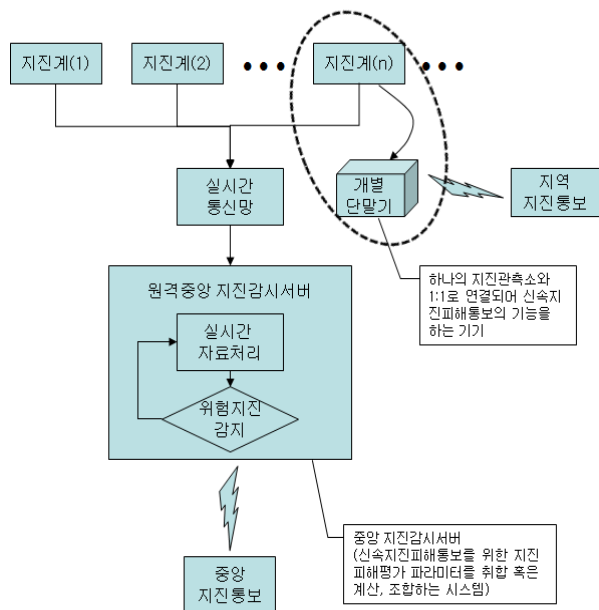
$$F(is) = \sum_{j=i}^{i+n_s-2} (|a_j(t)| + |a_{j+1}(t)|) \cdot 0.5/n_s \cdot dt$$

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

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 지반가속도자료를 성분으로 하는 벡터자료로서 정의된다.

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

본 연구에서는 특정 부지의 지진계에서 제공되는 지반가속도의 초당 지반가속도 최대값 정보만을 이용하여 식 (1) 대신 식 (3), (4)로부터 CAV값의 추정값인  $BCAV^*$ 를 계산하는 방법을 제안하고자 한다. 한편 제안된 방법에 대한 이론적인 논거는 특별히 없으며, 전 세계적인 지진자료를 이용하여 제안된 방법의 타당성을 경험적으로 밖에 확인할 수 없다.



〈그림 1〉 다수의 지진관측소와 실시간 통신망으로 구성된 지진관측망을 통한 지진통보 절차의 개략도

$$\text{BSPGA}_k = \sum_{i_s=k}^{N+k-1} p_{i_s} \cdot \max |a_{i_s}(t)| \quad (3)$$

$$\text{BCAV}_k^* = 10^{(A + B \times \log_{10}(\text{BSPGA}_k))} \quad (4)$$

식 (3), (4)를 통해 알 수 있는 본 방법의 특징은, 식 (1)의 기존 방법에서와 같이 매초 구간 내의 샘플링된 지진파의 디지털 자료를 모두 이용하여 CAV 계산을 수행 하는 대신, 초당 하나의 자료인 지반가속도의 초당 지반가속도 최대 절댓값 적산(BSPAG<sub>k</sub>; Bracketed Summations of PGA)만을 이용하여 간접적으로 CAV값을 추정한다는 점이다. 또한 N초의 길이를 갖는 시간윈도우는 k 인덱스에 따라 1초의 배수 간격으로 시간 이동하게 된다.

식 (3), (4)를 통해 CAV를 간접추정하고 할 때 중요한 파라미터는 A, B, N, a<sub>th</sub>이다. N은 강진시 예상되는 지진파의 지속시간을 포괄할 수 있는 윈도우의 길이로 보통 30~40초를 많이 사용하며, 분석자에 의해 임의로 결정될 수 있다. a<sub>th</sub>는 CAV 계산에 포함되기 위해 지반가속도의 초당 최대값이 가져야 하는 최소값을 의미한다. 식 (4)의 A, B는 N 및 a<sub>th</sub>에 대해 계산되는 값으로, 강진경험자료로부터 경험적으로 도출되는 파라미터이다.

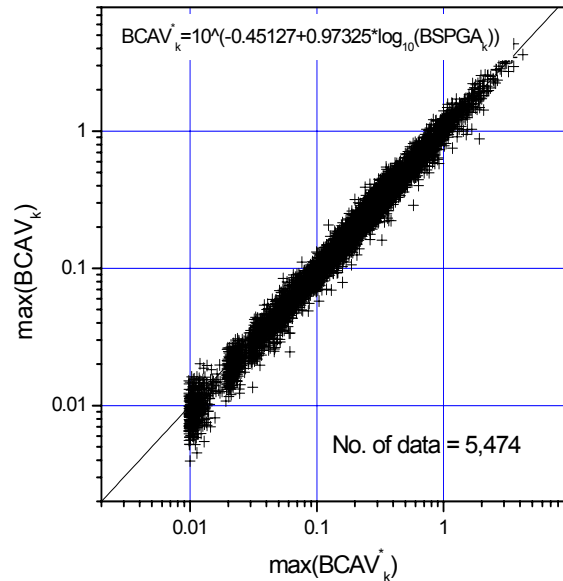
### 3. 강진경험자료를 이용한 초당 최대값 구간적산 결과를 활용한 CAV 추정 방법의 타당성

식 (3), (4)에 따라 초당 지반가속도 최대값 만을 이용하여 초당 100 샘플링 이상 자료로부터 계산되는 CAV 값 추정이 가능한 지를 살펴보기 위해 강진 경험자료로부터 임의의 a<sub>th</sub> 및 N에 대해 계산되는 식 (4)의 A, B 파라미터 값을 도출하고 특정 자료에 적용하여 보았다.

강진 경험자료로는 미국 NGA(Next Generation Attenuation) 거리감쇠식 개발 프로젝트에 활용된 자료(PEER)<sup>(11)</sup>의 3성분 기록이 모두 사용되었으며, a<sub>th</sub>=0.025g, N=30인 경우 식 (4)의 BSPAG<sub>k</sub> 및 BCAV<sub>k</sub><sup>\*</sup>를 계산한 후 로그영역에서 적합하여 평균된 A, B값 및 대수로그 표준편차 σ는 각각 아래와 같이 계산되었다.

$$A = -0.45127, B = 0.97325, \sigma = 0.06142 \quad (5)$$

그림 2는 식 (5)의 파라미터 값을 갖는 식 (4)를 이용하여 추정된 BCAV<sub>k</sub><sup>\*</sup>의 지진기록별 최대값과 식 (1)에 의한 방법으로 계산된 원래의 BCAV<sub>k</sub>의 지진기록별 최대값을 비교한 그림으로 상관성이 매우 높음을 알 수 있다. 또한 식 (5)의 대수로그 표준편차(σ)를 이용하면 보수적이지만 신속지진



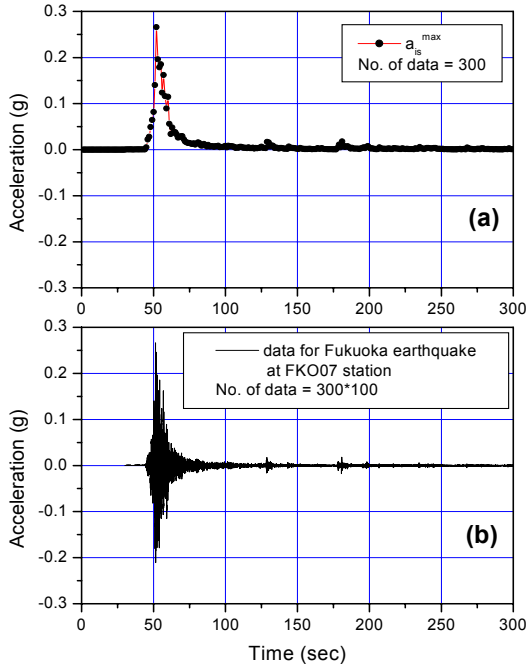
〈그림 2〉 미국 NGA(Next Generation Attenuation) 거리감쇠식 개발 프로젝트에 활용된 강진 자료에 대해 N=30sec와 식 (5)의 파라미터 값을 갖는 식 (4)를 이용하여 추정된 CAV(BCAV<sub>k</sub><sup>\*</sup>)의 지진파 기록별 최대값 결과와 식 (1)에 의한 방법으로 계산된 원래의 CAV(BCAV<sub>k</sub>) 값 결과의 최대값 비교

피해통보를 위한 지진동 크기의 기준으로 활용할 수 있다. 예를 들어 위험지진의 판단기준으로 많이 활용되고 있는 BCAV<sub>k</sub>=0.165g·sec 대신 BCAV<sub>k</sub><sup>\*</sup>=0.165g·sec/10<sup>0</sup>를 위험지진 여부를 판단하는 지진피해평가 파라미터의 크기 기준으로 설정하여 신속지진피해통보에 활용할 수 있다.

본 논문에서 제안한 방법의 보다 구체적인 검토를 위해 2005년 3월 20일 일본 후쿠오카 북서 해안 지역에서 발생한 규모 6.6의 지진에 대한 인근 일본 내륙지역의 지진관측소 FKO07의 EW성분 지진자료를 예를 들어 적용성을 평가하였다.

그림 3은 해당 지진에 대한 300초(5분) 동안 FKO07 일본 지진관측소에서 기록된 초당 100개 디지털 샘플링된 동서(E-W) 성분 지반가속도 기록이다. 이 기록의 경우 식 (1)의 n<sub>s</sub>=100이 된다. 식 (1)을 이용한 기존의 CAV 계산방법에서는 그림 3의 (b)그림처럼 300×100개의 디지털 지진기록을 이용하여 계산되나, 본 연구 방법에서는 그림 3의 (a)처럼 초당 최대값 정보에 해당하는 300개만의 디지털 지진기록만이 필요하다. 따라서 계산에 필요한 자료의 양을 1/n<sub>s</sub>만큼 획기적으로 줄여 통신망의 부하를 줄일 수 있다.

만약 그림 3의 지진기록에 대해 N초의 길이를 갖는 시간윈도우에 대한 CAV값을 윈도우 시간이동에 따라 매초마다 실시간으로 계산해야 한다면, 기존 방법에서는 n<sub>s</sub>×N×300 횟수의 덧셈이 필요하나, 본 연구에서 제안한 방법에서는 N×300 횟수의 덧셈만이 필요하다. 따라서 원격중앙 지진감

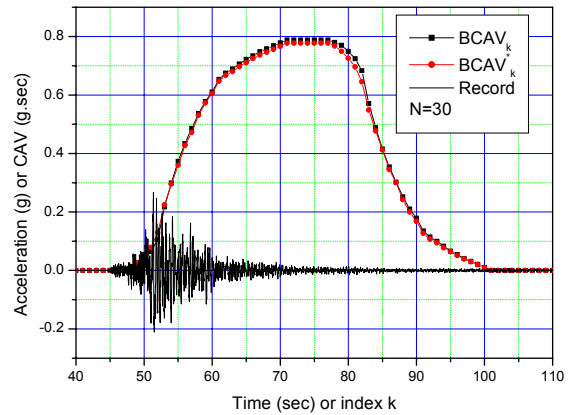


〈그림 3〉 예제로 사용된 입력지진파(b)와 초당 최대 절대값 그래프. 입력지진파(a)로는 2005년 3월 20일 일본 후쿠오카 북서 해안 지역에서 발생한 규모 6.6의 지진에 대한 인근 일본 내륙지역의 지진관측소 FKO07의 EW성분 지진자료가 사용됨

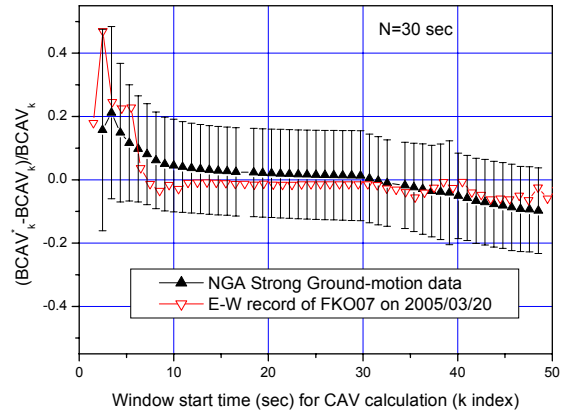
시서버에서 CAV를 실시간으로 계산하기 위한 계산횟수도  $1/n_s$  비율만큼 획기적으로 줄일 수 있어 계산 시간 및 계산 결과를 기반으로 한 통보 소요시간도 단축할 수 있게 된다.

그림 4는 그림 3의 지진파 및 식 (3), (4), (5)를 이용하여 계산된  $BCAV_k$ 와  $BCAV_k^*$ 의 윈도우 시간이동에 따른 변화를 비교한 결과를 나타낸다. 그림 4는 그림 2를 통해 확인된  $BCAV_k^*$ 의 최대값과  $BCAV_k$ 의 최대값 간의 높은 상관성이 윈도우 시간이동에 따라 매초 계산된 두 개의 CAV 값 간에 나타나도록 보여 주고 있다.

그림 5의 기호  $\nabla$ 는 그림 4에서 CAV값이 0 보다 크게 계산되는 윈도우 이동 시간구간에 대해서 계산된 원래의 정의에 따른 CAV값( $BCAV_k$ )과 추정된 CAV값( $BCAV_k^*$ )의 오차( $=(BCAV_k^* - BCAV_k)/BCAV_k$ )를 나타낸다. 한편 이러한 윈도우 이동 시간대별 오차는 식 (5)의 파라미터 값을 추정할 때 사용된 NGA 강진경험자료 전체에 대해 계산될 수 있으며, 동일 윈도우 이동 시간대별로 계산결과 오차 평균과 표준편차를 계산한 결과가 그림 5의 기호  $\blacktriangle$  및 Error Bar이다. 그림 5의 기호  $\blacktriangle$ 로 나타난 오차의 통계특성에 따르면 본 연구에서 제안된 방법을 통해 추정되는 CAV값의 오차는 초기 윈도우 이동시간대에는 크게 나타나고 있으나 후기 시간대에는 오차가 줄어들며 전반적인 윈도우 이동시간 구간에서 원래의 CAV값을 잘 예측함을 알 수 있다. 초기 시간대에 나타나고 있는 높은 오차는  $BCAV_k^* > BCAV_k$



〈그림 4〉 그림 3의 입력 지진파에 대해 식 (5)의 파라미터 값을 갖는 식 (4)를 이용하여 추정된 윈도우 이동시간대별 CAV( $BCAV_k^*$ ) 결과와 식 (1)에 의한 방법으로 계산된 원래의 CAV( $BCAV_k$ ) 값 비교



〈그림 5〉 CAV가 0 보다 큰 시간구간에 대한 CAV 추정값( $BCAV_k^*$ )의 일반적인 오차( $\blacktriangle$ )범위와 그림 3의 입력 지진파에 대한 오차( $\nabla$ ) 비교. 일반적인 오차범위는 미국 NGA(Next Generation Attenuation) 거리감쇠식 개발 프로젝트에 활용된 강진 자료에 대해 시간별로 추정된 CAV의 오차평균과 표준편차임

경향을 의미하는데, 이로 인해 지진피해평가 파라미터로서  $BCAV_k$  대신  $BCAV_k^*$ 의 크기를 이용할 경우에는 위험지진 감지가 다소 조기시점에 이루어 질 것으로 예상된다.

#### 4. 국내 중소규모 유감지진자료에 대한 적용

이상의 검토에서와 같이 초당 지반가속도 최대값 정보만을 이용한 CAV 추정방법( $BCAV_k^*$ )을 국외의 강진( $M > 5$ ) 경험 자료에 적용할 경우, 원래의 CAV 값( $BCAV_k$ )을 매우 높은 신뢰도로 추정함을 확인하였다. 한편 이때 사용된 최저 지진동 수준인  $a_{th} = 0.025g$ 로서 이 값은 국내에서 빈번하게 발생하는 중소규모 지진에서 예상되는 지진동 수준을 크게 상회하는 값이기 때문에 CAV 값 자체가 계산될 수 없고, 따라서 본 연구에서 제안된 CAV 추정 방법이 국내 지진자료



에도 적용될 수 있는 지를 확인할 수 없다.

이에 따라 본 연구에서는  $a_{th}=0.0001g$ 로 낮춘 후, 적산 구간은 30초(식 (3)의  $N=30$ )로 하여 계산된 초당 최대값 기반 CAV 추정 방법이 국내 중소규모 지진기록에 대해서도 적용 가능한 지를 평가하고, 높은 지진진도 범위( $MMI > V$ )에 대해서 보고 된 바 있는 지진진도와 CAV값 간의 높은 상관성(Reed and Kennedy)<sup>(10)</sup>이 중소규모 지진에 대한 낮은 지진진도( $MMI < V$ ) 범위까지도 유효한 지를 평가하였다.

이러한 평가를 위해서는 국내에서 지진진도가 보고된 지역에 관측된 지진기록 자료가 필요하다. 국내 MMI 등진도 구역에 대한 지진파형자료는 기존 연구(연관희 등)<sup>(12)</sup>를 통해 정리된 바 있으며, 본 연구에서는 이후 발간된 기상청 지진연보<sup>(13)</sup>에서 보고된 진도자료로부터 기존 연구와 동일한 방법으로 등진도 구역을 추정하고 진도별 계측자료를 기존 자료에 추가하였다. 한편 기존 연구(연관희 등)<sup>(12)</sup>에서와 같이 관측된 자료는 동일한 부지특성을 갖는 자료로 변환되기 위해 Class D 관측소(연관희와 서정희)<sup>(14)</sup>의 부지응답을 갖도록 스펙트럼 크기는 보정되었으며, 관측자료의 위상정보는 동일하게 사용하였다. 한편 각 지진관측소의 부지특성은 전력연구원 연보(장천중 등)<sup>(15)</sup>에서 구해진 자료를 이용하였다. 사용된 계측자료의 수는 총 646개이다.

이상의 국내 중소규모 유감지진에 대한 수평성분 지진자료를 이용하여 추정된 식 (4)의 파라미터는 식 (6)과 같이 계산되었으며,  $BCAV_k^*$ 와  $BCAV_k$ 를 비교한 결과는 그림 6과 같다. 중소규모 유감지진에 대한 대수로그 표준편차( $\sigma$ )는 큰 규모 지진에 대한 표준편차 보다 약간 높은 값을 나타

내었으나, 여전히 높은 선형성을 나타내었다.

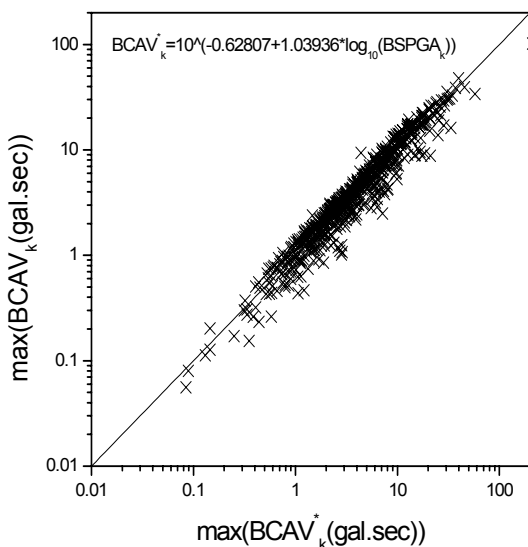
$$A = -0.62807, B = 1.03936, \sigma = 0.117 \quad (6)$$

따라서, 중소규모 지진기록에 대해서도 강진경험자료에 대한 검토에서와 동일하게 낮은 지진동 수준의 지진기록에 대해서도 최대지진동 값만을 이용하여 실제 CAV 추정 가능성을 확인하였다.

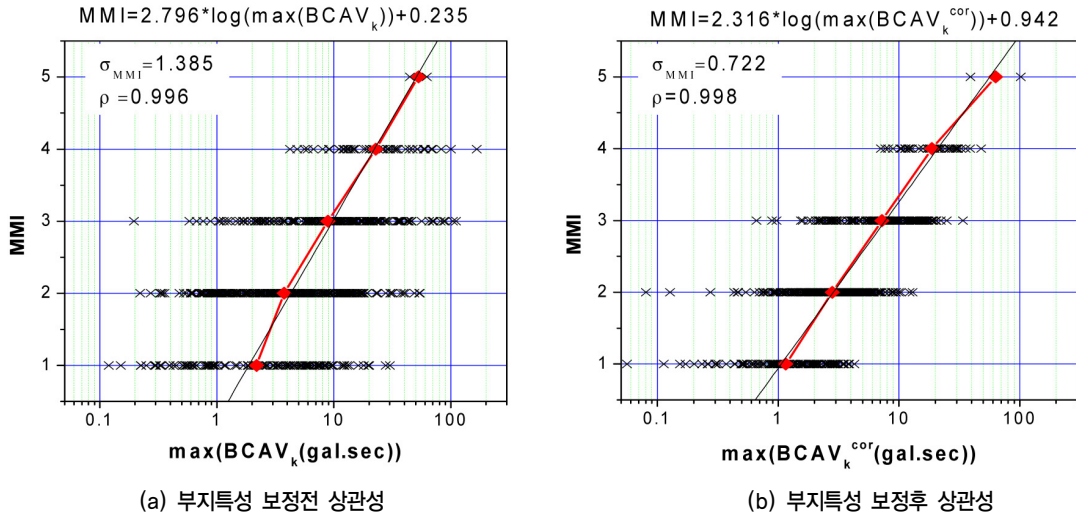
낮은 진도범위( $MMI=I \sim V$ )에 대한 신속한 진도 수준 결정은 유감지진 유무 및 지진취약설비의 피해 가능성 유무를 결정하여 지진피해 후속대응을 위한 지진특성 분석결과를 신속하게 통보하기 위해 필요하다. 현재 국내외에서 일반적으로 고려되고 있는 진도 신속 추정방법은 PGA-진도 관계식을 이용하는 방법이다. 한편 초당 최대값을 이용한 CAV 역시 PGA와 동일하게 신속하게 실시간으로 계산 가능한 값이므로, 본 연구에서는 이를 이용한 진도 추정의 가능성 여부를 검토하였다.

그림 7은 중소규모 지진자료에 대한 낮은 크기 범위의 MMI 진도와  $a_{th}=0.0001g$ ,  $N=30sec$ 에 대하여 Class D의 부지특성으로 보정되기 전 자료 및 보정된 후의 자료에 대해 계산된 두 종류의 CAV 값(수평성분의 기하학적 평균값)을 비교한 그림이다. 그림 7에서 진도추정의 표준편차  $\sigma_{MMI}$ 는 진도별 CAV의 중앙값에 대한 선형회귀식( $\rho$ =상관계수)을 이용하여 CAV로부터 추정된 진도값과 보고된 진도값의 차이로부터 계산되었다. 그림 7로부터 두 종류의 CAV가 모두 높은 진도범위에서와 마찬가지로 낮은 진도범위에서도 진도와 높은 상관성이 있음을 알 수 있으며, 동일한 부지응답을 갖도록 지진자료를 보정할 경우에는 진도추정의 표준편차  $\sigma_{MMI}$ 가 1.385에서 0.722로 현저히 낮아짐을 알 수 있다.

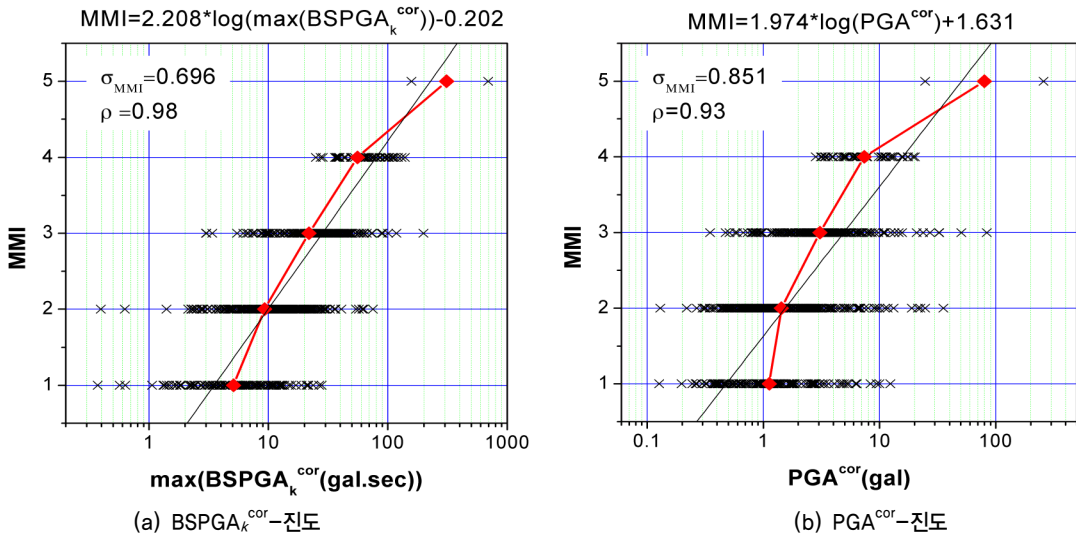
그림 8은 부지특성이 보정된 국내 지진자료에 대한 초당 지반가속도 최대값만으로 추정된 식 (3)의  $BSPGA_k$ 와  $BSPGA_k$  (Bracketed Summations of PGA)와 GA의 수평성분 기하학적 평균값과 관측 진도를 비교한 그림이다. 그림 8로부터 일반적으로 진도추정에 활용되는 PGA-진도 상관관계식 보다는 초당 지반가속도 최대값 적산결과가 진도를 선형성( $\rho$ ) 및 오차측면( $\sigma_{MMI}$ )에서 보다 신뢰성 있게 추정함을 확인할 수 있다. 그림 7(b)와 그림 8(a)의  $\sigma_{MMI}$  비교를 통해 알 수 있는 특이한 사항은 초당 지반가속도 최대값을 적산한 값( $BSPGA_k^{cor}$ )이 지진파형의 전체 디지털 샘플링 자료를 이용하여 계산한 CAV 값( $BCAV_k^{cor}$ )과 유사하게 혹은 더 좋은 정도로 진도를 평가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 원래의 정의에 따른 CAV 대신 지반가속도의 초당 최대값 적산



〈그림 6〉 국내 중소규모 유감지진자료에 대해  $a_{th}=0.0001g$ ,  $N=30sec$ 와 식 (6)의 파라미터 값을 갖는 식 (4)를 이용하여 추정된  $CAV(BCAV_k^*)$ 의 지진파 기록별 최대값 결과와 식 (1)에 의한 방법으로 계산된 원래의  $CAV(BCAV_k)$  값 결과의 최대값 비교



〈그림 7〉 부지특성이 보정되기 전(a)과 보정된 후(b)의 국내 중소규모 유감지진자료에 대해  $N=30\text{sec}$ 와 식 (6)의 파라미터 값을 갖는 식 (4)를 이용하여 계산된 최대 CAV 값( $BCAV_k$ ,  $BCAV_k^{cor}$ )과 관측 진도의 비교 및 진도별 CAV 중앙값에 대해 추정된 선형회귀식



〈그림 8〉 부지특성이 보정된 국내 중소규모 지진자료에 대해  $N=30\text{sec}$  구간 내의 지반가속도 최대값 적산 결과의 최대값(식 (3)의  $BSPGA_k^{cor}$ ) 및 PGA와 진도의 비교 및 진도별  $BSPGA_k^{cor}$  중앙값 및 PGA 중앙값에 대해 추정된 선형회귀식.

으로 계산된  $BSPGA_k$ 를 계측진도 추정에 직접 활용할 수 있는 가능성도 제시한다. 이러한 경우 식 (6)을 통해 원래의 CAV 값으로 변환하기 위한 오차 및 관련 보수성 등을 고려하지 않기 때문에 보다 정확한 진도 추정이 가능하게 된다. 그림 8에서 지진감시서버에서 지진기록 자동저장 기준값으로 주로 사용되는 지진동 작동 수준인  $PGA=1 \text{ gal}$ 은 진도 I~II의 수준에 해당되며 초당 지반가속도 최대값 적산방법으로 계산되는  $BSPGA_k=10 \text{ gal.sec}$ 은 진도 II의 평균에 해당되는 수준임을 알 수 있다.

한편 이상에서와 같이 CAV 값이 진도를 보다 신뢰성 있게 추정할 수 있는 이유는 최대값만을 이용하는 PGA와는 다르게 지속시간까지도 고려하기 때문이다. 한편 CAV는 지속시간을 고려하기 때문에 지진피해 통보시 시간지연이

있는 단점이 있는데, 지진 통보 기준으로 시간지연 발생 문제가 없는 PGA와 CAV를 동시에 조합한 진도 추정 방법의 활용을 통해 보다 신뢰성 있고 신속한 진도 추정이 가능할 것으로 예상된다.

### 5. 활용 효과 및 응용 분야

기존에는 CAV 계산을 위해 아날로그 입력 지진파 신호로부터 샘플링된 모든 디지털 자료를 필요하였으나, 본 연구에서 제안된 방법을 이용하면 지반가속도의 초당 최대값 정보만을 이용하여 경험적인 관계식으로부터 CAV값을 추정할 수 있다. 이에 따른 구체적인 활용 효과 및 응용 분야는 다음과 같다.

1. CAV 계산 기능이 없는 지진관측망과 연계된 지진관측소 지진계가 있는 경우, 지진계에서 제공하는 초당 최대 값 정보만을 통신망을 통해 원격중앙 지진감시서버에 실시간으로 전송하면 CAV값 추정이 가능해진다. 지진관측소 지진계의 통신망을 통한 초당 최대값 정보 제공 기능은 지진재해대책법에 따라 의무적으로 구현되어야 하는 기능으로 되어 있어, 본 방법은 현재 운영 중이거나 향후 구축될 다수의 국내 지진관측망에 적용되어 활용될 수 있다.
2. 초당 최대절대값 정보만을 이용하여 CAV값을 추정함으로써, 기존의 CAV값(식 (1)의  $BCAV_k$ )을 계산할 때 보다 통신 부하가 매우 적다. 기존의 CAV값 계산을 위해서는 지진관측소 지진계에서 샘플링된 지진파의 모든 샘플링 자료가 원격중앙 지진감시서버로 실시간 전송되어야 한다. 따라서 다수의 지진관측소로 구성된 지진관측망과 연계된 원격중앙 지진감시서버에서 기존의 방법으로 CAV 계산 기능을 구현하기 위해서는, 대량의 통신부하를 수용할 수 있는 양호한 기간 통신망이 구축되어야 하기 때문에 많은 비용이 수반된다. 그러나 본 방법에서 제안된 CAV 계산에 필요한 초당 단위정보의 전송은 통신망에 큰 부하가 되지 않으며, 인터넷망과 같은 일반 통신망만으로도 CAV 계산이 가능해진다. 또한 현재 일반 통신망을 이용하여 운영 중인 지진관측망을 이용하여 표준화된 CAV 계산기능을 구현할 수 있어 CAV 신속지진피해통보를 위한 지진피해평가 파라미터 계산에 추가적인 비용이 소요되지 않는다.
3. 초당  $n_s$  개수로 샘플링된 지진자료에 대한 CAV 계산을 위한 덧셈 회수를 이전 방법에 비해  $1/n_s$ 의 비율만큼 줄일 수 있어 빠른 CAV 계산이 가능하며, 계산결과를 신속하게 통보할 수 있게 된다. 만약 3성분 지진파 자료를 제공하는 지진관측소의 수가  $N_{sta}$ 이고 CAV 계산 시간구간이  $N$ 이라고 하면 기존 방법에 비해 CAV 계산을 위한 덧셈회수의 단축효과는  $N \times N_{sta} \times 3 \times (n_s - 1)$ 만큼 발생하며, 관측소의 수가 많을수록 본 방법에 의한 계산시간 단축효과는 비례해서 커지게 된다.
4. CAV값 추정은 지진관측소에서 계측된 지반운동의 모든 성분 (보통, 수직 성분, 2개의 수평성분)에 대해 각각 계산될 수 있으며, 원격중앙 지진감시서버에서 취합된 개별 지진관측소의 성분별 유사 CAV 정보는 다양한 방법으로 조합되어 신속지진피해통보에 활용될 수 있다. 조합의 예로서는 특정 이격거리를 갖는 2개 이상의 지진관측소에서 CAV값이 위험지진 수준을 초과할 경우 지진통보

를 하는 경우이다.

5. CAV와 지진진도의 높은 상관성을 이용하여 초당 지반가속도 최대값만으로 계산된 추정된 CAV의 값(식 (1)의  $BCAV_k$ ) 혹은 구간 적산값(식 (3)의  $BSPGA_k$ )으로부터 진도를 신속하게 추정한 후 통보가 가능하다.
6. 본 연구의 방법은 지진관측망 원격중앙 지진감시서버에서 구현 가능할 뿐만 아니라, 그림 1과 같이 신속지진피해통보의 목적으로 개별 지진관측소와 1:1로 연결된 임의의 기기에서도 S/W 혹은 H/W적으로 구현가능하다.
7. 원자력발전소 인근에서 운영 중인 지진관측망의 초당 최대값 정보만을 이용하여 추정된 CAV를 지진발생시 원자력발전소 운전정지 판단기준으로 이용할 수 있다.
8. 본 방법은 원자력발전소 뿐 아니라 일반 산업시설 인근에 운영 중인 지진관측망을 이용한 신속지진피해통보를 위한 지진동파라미터 계산에도 활용될 수 있다.

## 6. 결론

지진피해 저감을 위해서는 광역 지진관측망이나 부지내 지진감시시스템 등을 통해 지진에 따른 피해유무 및 피해정도를 신속 정확하게 관련자에게 통보하거나 대응시스템을 기동시킬 수 있는 신호를 송출해야 한다. 누적절대속도 (Cumulative Absolute Velocity, 이하 CAV)는 신뢰성 있는 지진피해평가 파라미터로서 최근 전 세계적으로 원자력발전소 및 주요 시설물의 지진감시시스템 운전정지기준으로 점차 사용이 확대된다.

본 논문에서는 기존에 CAV값 계산을 위해 필요했던, 감지된 지진파의 디지털 전체 자료 대신에 지진재해대책법에 의해 지진계로부터 가공되어 의무적으로 제공되는 지반가속도의 초당 최대값 정보만을 이용하여 CAV를 추정하는 방법을 제안하고 국외 강진경험자료 및 국내 중소규모 유감 지진자료를 통해 적용 가능성을 확인하였다. 또한 최대 지반가속도 최대값의 구간 적산 결과로부터 추정된 CAV(식 (4)의  $BCAV^*_k$ )가 중소규모 지진의 진도를 PGA 보다 신뢰성 있게 추정함을 확인하였다. 아울러 초당 지반가속도 최대값을 적산한 값 자체(식 (3)의  $BSPGA_k$ )도 CAV와 유사하게 진도를 추정할 수 있는 지진동 파라미터로 확인되었다. 본 방법을 통해 다수의 지진관측소가 연계된 지진관측망의 지진계측자료에 대한 CAV 계산 시간이 획기적으로 단축되며, 지진관측망의 통신망 용량이 적은 경우에도 신속하고 신뢰성 있는 지진피해통보가 가능해진다. 향후 본 연구 결과를 기반으로 주요 구조물의 정확하고 신속한 실시간 지진



감시망 운영 실무에 적용할 수 있는 지진동의 최대값과 지반가속도의 초당 최대값 적산값의 최적 조합에 대한 추가 연구를 수행할 예정이다.

### 참 고 문 헌

1. Worden, C.B., Wald, D.J., Allen, T.I., Lin, K., Garcia, D. and Cua, G., "A Revised Ground-Motion and Intensity Interpolation Scheme for ShakeMap," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 6, 3083-3096, 2010.
2. Atkinson, G.M., and Kaka, S.I., "Relationships between Felt Intensity and Instrumental Ground Motion in the Central United States and California," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 2, 497-510, 2007.
3. Kaka, S.I., and Atkinson, G.M., "Relationships between Instrumental Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in Eastern North America," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 5, 1728-1736, 2004.
4. Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., Kanamori, H., Scrivner, C.V. and Worden, C.B., "TriNet 'ShakeMaps' : rapid generation of peak ground motion and intensity maps in California," *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 3, 537-556, 1999.
5. Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., and Kanamori, H., "Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California," *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 3, 557-564, 1999.
6. 소방방재청, 지진가속도계측기 설치 및 운영기준 [소방방재청 고시 제2010-30호], 2010.
7. 김우한, 김성균, 박창업, "가속도 관측망 구성 및 계기진도도 최적화 방안 연구," *한국지진공학회/기상청*, 107, 2006.
8. U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Pre-earthquake Planning and Immediate Nuclear Power Plant Operator Postearthquake Actions (Regulatory Guide 1.166)*, 1997.
9. 박동희, 연관희, 장천중, "원전 운전기준지진 초과관정 기준으로 절대누적속도의 활용," *한국지진공학회 춘계학술대회 논문집*, 31-34, 2011.
10. Reed, J.W. and R.P. Kennedy, *A Criterion for Determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake (NP-5939)*, EPRI, 1988.
11. PEER, *NGA Strong Motion Database* (<http://peer.berkeley.edu/NGA>), 2005.
12. 연관희, 박동희, 박세문, "국내 지진의 진도별 가속도 푸리에 스펙트럼 통계모델," *한국지진공학회 논문집*, 제13권, 6호, 11-25, 2009.
13. 기상청, *지진연보*, 2009~2010.
14. 연관희, 서정희, 2007, "지진동모델 파라미터 동시역산을 이용한 지진관측소 분류," *한국지구물리·물리탐사학회지*, 제10권, 3호, 183-190, 2007.
15. 장천중, 최원학, 연관희, 박동희, 2008년 전력연구원 지진관측 연보('09전력연-단0053), *한전전력연구원*, 대전, 370, 2009.