

P파를 이용한 지진 현장 경보체계기술의 국내 적용

Application of the Onsite Earthquake Early Warning Technology Using the Seismic P-Wave in Korea

이호준^{a,1}, 이진구^{a,2}, 전인찬^{a,*}

Ho-Jun Lee^{a,1}, Jin-Koo Lee^{a,2}, Inchan Jeon^{a,*}

^a KIT Valley Co., Seoul 08512, Republic of Korea

ABSTRACT

Purpose: This study aims to design and verify an onsite EEWS that extracts the P-wave from a single seismic station and deduce the PGV.

Method: The P-wave properties of Pd, Pv, and Pa were calculated by using 12 seismic waveform data extracted from historic seismic records in Korea, and the PGVs were computed using empirical equation on the P properties - PGV relationship and compared with the observed values.

Results: Comparison of the observed and estimated PGVs within the alarm level shows the error rate of 86.7% as minimum. By reducing the PTW to 2 seconds, the alarm time can be shortened by 1 second and the seismic blind zone near the epicenter can be shortened by 6 Km.

Conclusion: Through this study, we confirmed the availability of the on-site EEWS in Korea. For practical use, it is necessary to develop regression formula and algorithm reflect local effect in Korea by increasing the number of seismic waveform data through continuous observation, and to eliminate the noise from the site.

KEYWORDS

EEWS,
P-wave property,
PGV,
PTW,
Seismic blind zone

연구목적: 본 연구는 단일 지진관측기로부터 P파를 추출하여 PGV를 산출하는 현장지진경보(Onsite EEWS)를 설계와 검증의 목적으로 한다.

연구방법: 국내에서 발생한 12개의 지진파형데이터를 이용하여 적합한 P파 감지 시간(PTW)의 크기를 정하여, P파 물성치인 Pd, Pv 및 Pa를 산출하고, 경험식을 통한 PGV 추정값을 관측치와 비교하였다.

연구결과: PGV 관측치와 추정치의 비교결과를 경보 발령 기준인 진도 등급 내에서 비교하였을 때 오보 비율은 최소 86.7%의 적중률을 보였으며, PTW를 2초로 줄이는 효과로 경보시간은 1초, 공백역은 6Km를 단축할 수 있다.

결론: 본 연구를 통해 국내에서 지진현장경보의 가용성을 확인하였으며, 실제 활용을 위해서는 지속적인 관측을 통해 지진파형 데이터수를 늘이고, 현장 노이즈를 제거하는 기술을 통해 한국형의 회귀식과 알고리즘 개발이 필요하다.

지진조기경보,
P파 물성치,
지반최대속도,
P파 감지시간,
경보공백역

© 2018 Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-2-2624-3550. Email. kitv@raychani.net

1 Tel. 82-2-2624-3550. Email. hozuni94@gmail.com

2 Tel. 82-2-2624-3550. Email. jinguman@gmail.com

ARTICLE HISTORY

Received Nov. 7, 2018

Revised Nov. 8, 2018

Accepted Dec. 6, 2018

1. 개요

지진조기경보(Earthquake Early Warning)는 지진발생 후 인명피해를 줄이는데 크게 기여할 수 있다. 국내외에서는 ISO 22322에서 제시한 공공 경보 프로세스에 따라 지진조기경보시스템을 구축하고 있다(Yun et. al., 2015). 지진의 사전 예지는 불가능하지만, 지진파를 구성하는 P파와 S파의 시간차를 이용하면 최대 진동이 도달하기 전에 그 크기를 예지할 수 있으며, 이를 경보로 발령하는 체제로 일본을 비롯한 미국, 멕시코, 유럽 등 강진지대 국가를 중심으로 활용하고 있다. 현재 기상청이 운영 중인 지진조기경보 역시 진앙 인근에서 다수의 센서에 감지된 P파를 이용하여 진원에서의 규모를 발표하고 있다. 진원에서의 지진 규모를 파악하여 영향권역에 경보를 발령하는 과정 가운데 고속 컴퓨터 네트워킹을 통해 전자적인 속도로 계산을 처리하기 때문에 신속한 경보가 가능한데, 이를 지역 경보(Regional Warning)이라 한다. 그런데 P파와 S파의 전파 속도가 약 두 배 정도로 차이를 갖더라도 진원 인근에서 두 파동의 도달시간은 크게 차이나지 않는다. 고속의 네트워킹과 완성된 자동시스템을 이용한다 해도 지진이 발생한 뒤 최초 관측소에 P파가 도달한 이후 여러 관측소의 관측정보에 근거하여 경보를 발령하기 까지 약 15~25초의 시간이 소요된다. 다수의 관측정보를 사용하기 때문에 정확도가 높은 반면 그 사이 S파가 전파된 진앙 인근의 상대적으로 높은 진동지역에는 경보의 공백이 발생하여 피해 저감의 기회를 잃게 된다.

지역 경보의 넓은 경보 공백지역의 한계를 극복하고자 병행 운영되는 체계로 현장 경보(Onsite Warning)가 있다. 이는 단일 관측소에서 초기 P파를 관측하고 그 정보로부터 수 초 내에 지진의 규모, 관측지점의 진도 등을 추산하여 발령하는 시스템이다. 각 관측지점에서 단일 관측기를 사용한 경보체계이기 때문에 지역 경보와 비교하여 경보 시간은 빠르지만 상대적으로 그 신뢰성은 낮다. 그러나 P파 관측과 동시에 해당 지점에서의 지진동의 크기를 예지하기 때문에 경보의 공백역 역시 지역경보와 비교하여 좁은 이점이 있다. 지역 경보처럼 한 곳에서 데이터를 처리하여 각 지역에 경보를 전달하는 대신, 관측소마다 단독으로 경보체제를 운영하는 독립성을 갖기 때문에 지진 피해를 저감하기 위한 독자적인 체제로도 정착할 수 있다.

과거 30년 간 지진 현장 경보체계는 정확도와 신속성을 향상시키기 위한 다양한 노력을 통해 발전해 왔다. 현장 경보체계의 시초로 Nakamura(1988)는 UrEDAS(Urgent Earthquake Detection and Alarm System)라는 이름으로 초기 단계의 Onsite 경보시스템을 개발하여 P파의 주기와 후방위각(Back Azimuth), 수직 및 수평 비율 및 진폭 크기 등 지진 파라미터를 추산하고 그를 통해 지진의 규모와 위치를 예측하였다. 이후 Nakamura(2003)는 Compact UrEDAS를 통해 지진파 가속도와 속도의 절대 내적 값에 로그를 취한 형태로 파괴강도를 계산함으로써 잠재적인 피해에 대한 간략 피해추정을 가능케 했다. Okada et. al.(2003)은 P파 진폭과 파형들에 대한 회귀함수를 이용하여 규모와 진앙거리 계산을 시도하였다. 또한, Kanamori(2005)는 Nakamura가 지진 규모를 추산하기 위해 제시한 P파 초동 주기를 결정하는 새로운 방법을 제시하였다. 즉, P파의 수직 성분에 대한 초동 주기와 최대 변위를 조합하는 방법으로 일정 크기 이상의 피해 지진을 인식하는 방법을 제안하였다. Blise et. al.(2012)은 가속도, 속도 및 변위에 대한 세 종류의 파형을 이용하여 지진 규모, 진앙 거리 및 PGV를 추정하였다. 온사이트 지진 경보의 실용화 알고리즘으로 가장 알려진 것이 $\tau_c - Pd$ 법(Wu et al., 2008)이다. P파의 초기 평균주기로부터 지진의 규모를 결정하고, Pd 값으로부터 PGV를 추정하는 기술로 타이완과 캘리포니아 등의 사용을 고려하여 개발된 방법이다. 이후 Zollo et al.(2010)은 일본과 타이완, 이탈리아의 진원 깊이 50km 이내의 지각 내 지진의 관측 파형을 분석하여 Pd 값과 τ_c 값을 조합하여 경보를 발령할 수 있는 방법을 제안했다. 또한, Colombelli et al.(2015)은 일본에서 발생한 규모 7.0 이상의 지진을 진앙거리 관측소를 대상으로 Pd, Pv 및 Pa와 PGV의 관계에 대한 경험식을 제시하였다. 이는 P파의 진폭, 속도 및 가속도 성분과 PGV와의 관계를 나타내며, 현장에서 측정된 P파의 물성치로부터 해당 지점의 PGV 추산에 사용될 수 있다.

본 연구에서는 현재까지 알려진 지진 현장 경보 기술을 이용하여 과거에 국내에서 관측된 중규모의 지진을 대상으로 P파를 탐지하고, 선행 연구들이 제안한 P파와 PGV의 관계 및 국내 데이터의 회귀결과를 적용하여 PGV를 수치모의 함으로써 우리나라에서의 지진 현장경보의 가용성을 평가하였다.

2. 한국형 현장경보 수치모의

2.1 국내 주요 지진에 대한 P파 추출

현장경보 수치모의를 위해 2016년 이후 한반도 내륙에서 발생한 규모 3.5이상의 12개 지진(Table 1) 데이터를 사용하였다. 그 가운데 P파와 S파의 시간차에 상대적으로 짧은 진앙 인근의 경보에 유효한 현장경보의 특징을 고려하여 진앙으로부터 60km 이내의 속도계 관측소에서 관측된 P파의 수직성분을 추출했다. 지진 신호로부터 P파를 자동으로 식별, 추출하기 위한 방안으로 Lomax et al.(2012)에 의한 Filter Picker 알고리즘을 적용하였다. Filter Picker는 실시간 지진 모니터링 및 조기 경보에 사용할 수 있는 다목적 위상 검출 알고리즘이다. 실시간 광대역 신호에 대해 감응하여 사전 정의된 주파수 대역에 따라 서로 다른 중심 주파수를 갖는 여러 밴드 세트를 생성하고, 특성화 함수를 계산해 만일 그 값이 사전 정의된 임계치를 넘을 때 파형을 인지한 후 일정시간 동안 파형 검출을 확정하게 된다. 이 Filter Picker의 pick_fp모듈 활용하여 국내에서 발생한 과거 지진파형들로부터 P파를 0.1초 간격으로 자동 추출하였으며, S파의 경우 pick_gm모듈을 이용하여 진원 시 기준 120초 내에 관측된 파형가운데 PGV 최댓값을 추출하였다(Fig. 1).

Table 1. Dataset for P-wave analysis

date(KST)	magnitude	area	max intensity
2015-12-22 4:31	3.9	Iksan	-
2016-09-12 19:44	5.1	Gyeongju	-
2016-09-12 20:32	5.8	Gyeongju	VI
2016-09-19 20:33	4.5	Gyeongju	-
2016-09-21 11:53	3.5	Gyeongju	-
2016-11-13 21:52	3.5	Boryeong	-
2017-11-15 14:22	5.4	Pohang	V
2017-11-15 16:49	4.3	Pohang	V
2017-11-16 9:02	3.6	Pohang	IV
2017-11-19 23:45	3.5	Pohang	III
2017-11-20 6:05	3.6	Pohang	IV
2018-02-11 5:03	4.6	Pohang	V

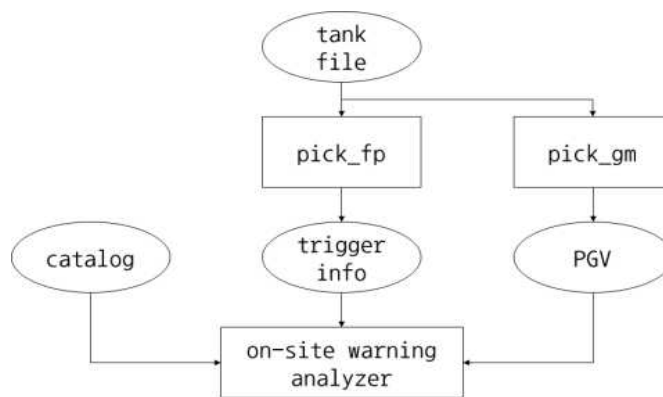


Fig. 1. Diagram of seismic analyzer for on-site warning

2.2 현장경보에 있어서 P파의 측정 시간 윈도우

지진 관측소에서 관측된 P파의 초기 물성을 통해 관측지점의 진동을 예측하기 위해 먼저 P파를 식별해야 한다. Meier et al.(2016)는 지진 규모를 4.0으로부터 8.0까지 총 6단계로 구분하여 P파의 최대 진폭이 성장하는 시간을 분석했다. 그 결과 지진 규모가 클수록 최대 진폭의 성장 시간이 길어짐을 알 수 있었다.

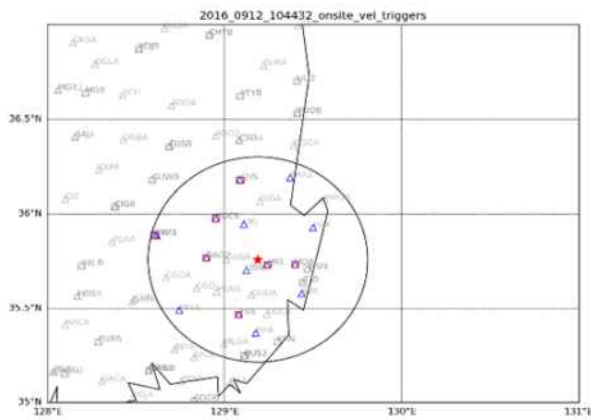


Fig. 2. Stations used for optimal PTW
(The 2016 Gyeongju earthquake)

△ : Accelerometer, □ : Geophone,

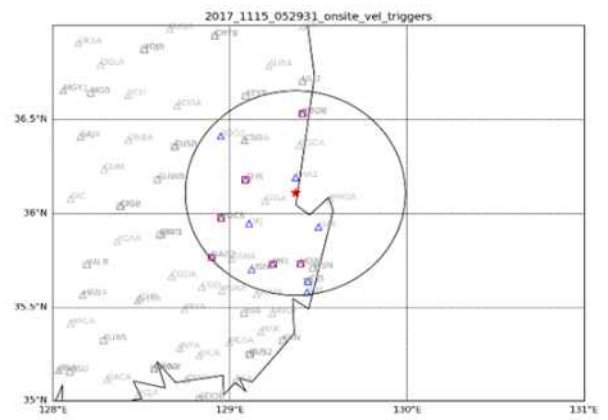


Fig. 3. Stations used for optimal PTW
(The 2017 Pohang earthquake)

Highlighted : Triggered stations

한편, Kanamori(2005)에 따르면, 현장정보를 위한 P파의 측정 시간 윈도우(PTW; P-wave Time Window)를 3초로 권장하고 있으며, Colombelli(2014) 또한, 지진규모 6.5~7.0 사이의 지진의 경우 PTW는 3초가 유효함을 설명하였다. 그러나 P파의 성장 속도가 지진 규모에 따라 다른 점을 고려한다면, 국내의 지진 특성에 있어 규모 6.5이하의 지진의 잠재적 가능성이 높음을 전제로 할 때 실제 PTW로 3초가 유효한지 검증이 필요하다. 만일 PTW가 과다할 경우 연이어 도착하는 S파의 간섭이 노이즈로 작용하여 실제 P파보다 큰 S파를 가 섞일 수 있기 때문이다. 국내의 과거 지진 파형에서 관측된 P파를 식별하기 위해 본 연구에서는 먼저 Table 1의 지진 이벤트 가운데 2016년 경주지진과 2017년 포항지진 이벤트를 대상으로 Fig. 2, 3에 나타난 각 관측소별로 앞서 0.1초 간격으로 추출한 Pd, Pv 및 Pa의 시간변화를 분석하였으며, 그 중 Pd의 추출 결과를 Fig. 4, 5에 제시하였다.

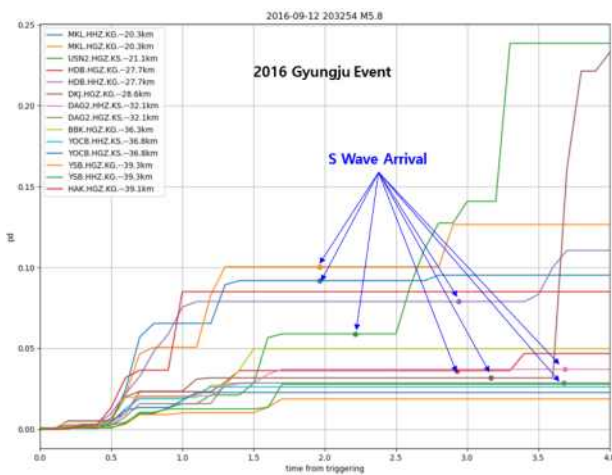


Fig. 4. hypocentral distance and Pd time variant after trigger(The 2016 Gyeongju earthquake)



Fig. 5. hypocentral distance and Pd time variant after trigger(The 2017 Pohang earthquake)

결과를 보면 관측지점별로 트리거된 P파의 진폭 Pd 값은 진원거리에 따른 시간차를 두고 계단을 이루면서 증가하는 양상을 보였다. 진원으로부터 출발하여 관측지점에 도착한 Pd가 성장하는 곡선 상에 S파의 전파속도를 고려한 예상 도착시간을

점으로 표시하였다. 그 결과 2016년 경주 지진의 경우 약 2초 전후로 S파의 간섭이 시작되고 있으며, 2017년 포항지진의 경우에는 3.0초 이후 S파가 도달하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Pd를 본다면 두 지진 모두 2.0초 이전에 이미 성장을 완료했기 때문에 이후 시점을 고려할 필요가 없으며, 과도한 시간을 고려하게 되면 S파의 간섭으로 노이즈를 유발할 수 있다. 이는 전술한 선행 연구과제에서 제시한 지진 규모가 감소함에 따라 소요의 PTW 역시 감소할 수 있음을 의미하며, 중규모의 지진이 우세한 국내의 경우 2.0초의 PTW가 적합하며, 일본, 타이완 등 대규모 지진에서 사용되는 3초의 PTW를 사용할 경우 S파의 간섭 때문에 적합한 P파의 물성을 파악할 수 없음을 알 수 있다. 결과로부터 국내 지진으로부터 P파를 추출하기 위한 PTW를 2초로 설정하였다.

2.3 PGV 및 진도의 추정

지진 현장경보의 목적은 관측된 지점에서의 단일 관측기를 사용하여 진동의 크기를 자가 예지하는데 있다. 이를 위해 종래 타이완 등지에서 사용되던 $\tau_c - Pd$ 법(Wu et. al., 2008)을 사용하면 단일 관측소의 P파 정보를 통해 지진의 규모를 통해 경보 지점의 가속도 또는 진도를 파악할 수 있다. 즉, τ_c 를 이용하여 진앙의 지진규모를 추정하고, 진앙으로부터 다시 경보를 발령하기 위한 경보지점까지의 거리를 구하여 감쇠식을 통해 진동을 예측하는 다단계 과정을 거치기 때문에 규모, 진앙으로부터의 거리 및 감쇠식에 불확실성이 내포되어 있다. 그러나 Pd값으로부터 PGV를 추정할 수 있는 회귀식을 사용하게 되면 보다 빠르고 쉽게 경보지역의 진도를 예측할 수 있으며, 최근 이러한 간편 방식에 따른 선행 연구들이 이루어져 왔다. 그 가운데 Wu et al.(2008)은 일본, 타이완 및 캘리포니아 지역의 진앙거리 30km 이내에 있는 750여 개의 지진기록을 분석하여 PGV와 Pd의 관계에 대한 경험식을 식(1)과 같이 제시하였다.

$$\log(PGV) = 0.920\log(Pd) + 1.642 \pm 0.326 \quad (1)$$

여기서 PGV는 cm/sec, Pd는 cm로 측정하였다. 유사한 방법으로, Colombelli(2015)는 일본 토호쿠 지방에서 발생했던 규모 4.0에서 7.5 사이의 76개 지진 이벤트에 대한 12,792개 데이터 셋을 분석하여 Pa, Pv 및 Pd 와 PGV의 관계에 대한 경험식을 식(2)~식(4)와 같이 제시하였다.

$$\log PGV = 1.11(\pm 0.08) + 0.69(\pm 0.04)\log Pd \quad (2)$$

$$\log PGV = 0.72(\pm 0.06) + 0.93(\pm 0.05)\log Pv \quad (3)$$

$$\log PGV = -0.55(\pm 0.05) + 0.72(\pm 0.05)\log Pa \quad (4)$$

이들은 규모 7.5 이하의 지진과 평균 진앙거리 100km 이내의 지진데이터를 분석한 결과이다. 본 연구에서는 식(1)~(4)를 이용하여 Table 1에 제시된 지진 데이터로부터 추출된 P파가 가진 3종류의 물성치 즉 Pd, Pv 및 Pa를 이용하여 PGV를 추정하였다. 경험식은 모두 오차 범위를 갖지만, Table 1에 제시된 지진 이벤트의 총 154개 세트의 데이터에 원식의 평균값을 적용하여 PGV를 추정하였다(Fig. 6). PGV의 추정 결과를 각 관측점에서의 관측된 실제 PGV와 비교하여 Fig. 7~10에 점으로 도시화하여 두 결과를 비교했다. 또한, 지진경보가 발령되는 기준으로 진도 정보가 사용되는 바, Wald et al.(1999)이 제시한 PGV와 MM진도의 관계에 따라 PGV 크기에 따른 각 진도의 영역을 또한 구분하여 표시했다.

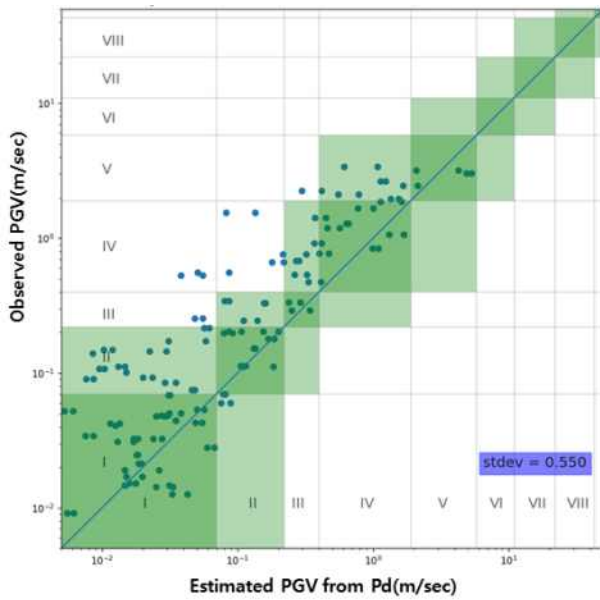


Fig. 6. A scatter plot of PGV of the observed and estimated from Pd using Equation (1).

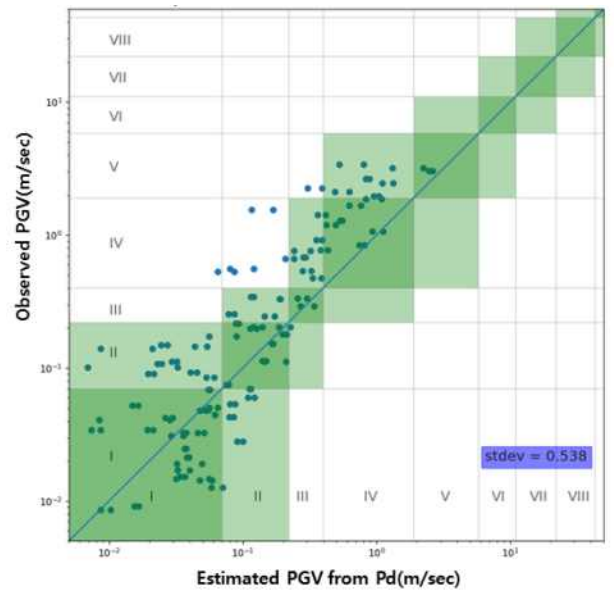


Fig. 7. A scatter plot of PGV of the observed and estimated from Pd using Equation (2).

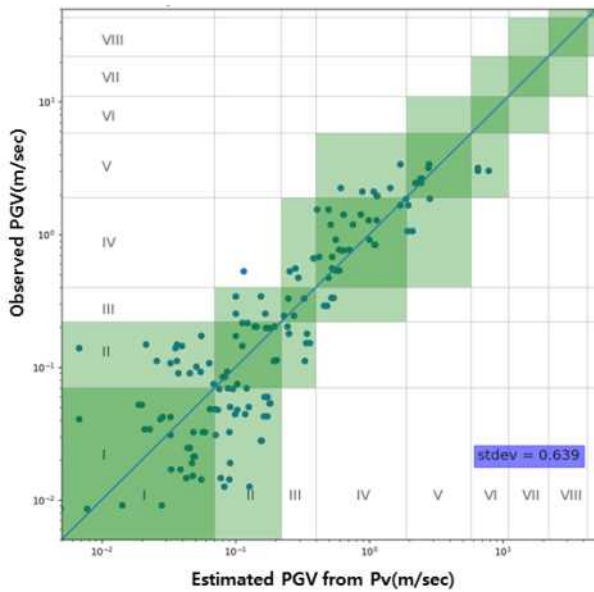


Fig. 8. A scatter plot of PGV of the observed and estimated from Pv using Equation (3).

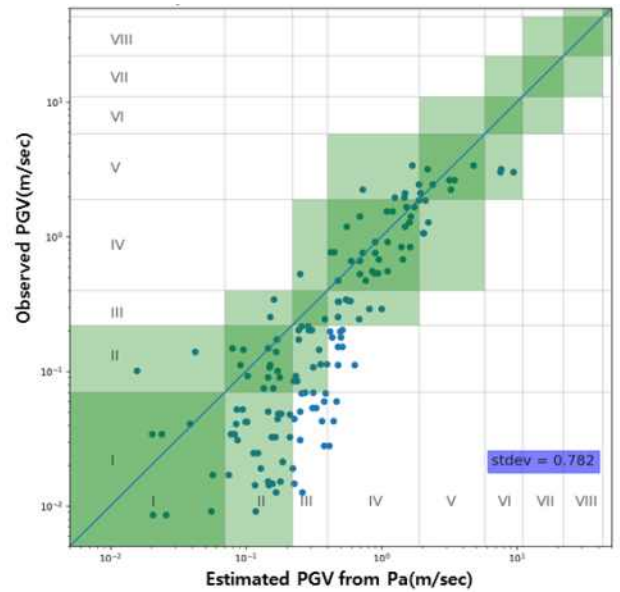


Fig. 9. A scatter plot of PGV of the observed and estimated from Pa using Equation (4).

먼저 Wu et al.(2008)이 제시한 Pd와 PGV의 관계로부터 추정된 결과(Fig. 6)에서는 PGV에 대한 관측치와 추정치의 표준편차를 보면 0.550cm/s로 전체적으로 다소 과소 추정되었지만 높은 정확도로 근사되고 있음을 보인다. 지진 현장경보는 경보를 발령하는 지점에서 경보 이용자가 요구하는 진동 크기의 임계치 즉 진도를 설정하고 P파로부터 예측되는 진도값의 크기가 임계치를 넘는지에 따라 경보를 발령하는 경우가 많다(예를 들어 Hsu 2016). 그에 대한 오차를 평가하는 방법으로 진도등급 ± 1 을 허용오차로 두고 임계값을 기준으로 관측값이 추정치보다 작은 경우를 오보, 관측값이 추정치보다 큰 경우 누락으로 평가하는 방법을 사용한다. 동일한 기준을 본 연구 결과와 비교했을 때, 식(1)을 이용한 결과 총 158개 데이터

셋 가운데 10개의 데이터에서 오류를 보여 93.7%의 적중률을 보였다. 같은 Pd로부터 추정된 결과로 Colombelli et al.(2015)이 제시한 식(2)를 사용한 결과(Fig. 7)를 보면 Fig. 6과 비교하여 유사한 분포를 나타내는 가운데 PGV의 표준편차는 0.538cm/s로 다소 개선된 결과를 보이고 있으며, 7개의 데이터에서 오류를 보여 95.6%의 적중률을 보였다. 같은 방법으로 식(3)에 따라 Pv로부터 추정된 PGV 분포 역시 양호한 결과를 나타내며, 진도등급상의 표준편차는 0.639cm/s, 진도 등급 오차는 1개로 99.4%의 적중률을 보이고 있다. 반면 식(4)에 따라 Pa로부터 추정된 PGV 분포는 진도 II이하 영역에서 산포가 상대적으로 과다하게 나타나고 있으며, 표준편차는 0.782cm/s, 진도 등급 오차는 21개를 보여 86.7%의 적중률을 보였다. Fig. 7~9의 세 결과가운데 Pv와 Pd로부터 추정된 결과가 높은 정확도를 보이는 반면, Pa로부터의 결과가 상대적으로 낮은 정확도를 보이는 이유로, PGV를 비교하기 위해 이용된 속도계 관측소의 P파 관측 결과를 시그널을 통해 적분하는 과정에서 발생하는 저주파 성분의 간섭이 있었을 것으로 예상된다. 이를 제거하기 위해 사용하는 수치 필터의 선택을 통해 간섭을 제거할 필요가 있음을 말해준다. Fig. 10은 식(2)~(4)로부터 추정된 PGV값의 평균과 관측 PGV를 비교한 값을 표시한다. 결과로 나타난 PGV 값의 표준편차는 0.526cm/s로 다소의 개선을 보이고 있다.

3. 한국형 지진현장 경보의 기대효과 및 과제

중약진이 주를 이루는 국내 지진에 있어 현장경보를 위한 PTW가 선행연구결과에서 제시되어 경험적으로 사용되고 있는 3초가 과다하며, 이를 2초로 줄이는 것은 PGV의 오차를 줄이는데 크게 기여함은 동시에 지진 현장 경보의 성능과도 밀접한 관계를 가진다. 진앙 인근의 경우 S파의 도달 시간이 짧기 때문에 P파 초동을 분석함에 있어 PTW가 증가함에 따라 경보시간 소요에 따른 공백역이 증가가 발생한다. Fig. 11은 P파와 S파의 전파속도에 따른 지진 현장경보의 공백역을 모식화한 그림이다. 단순화를 위해 P파와 S파의 전파속도를 각각 6km/s, 3km/s로 가정할 때 3초의 PTW를 사용하는 경우 P파가 진원

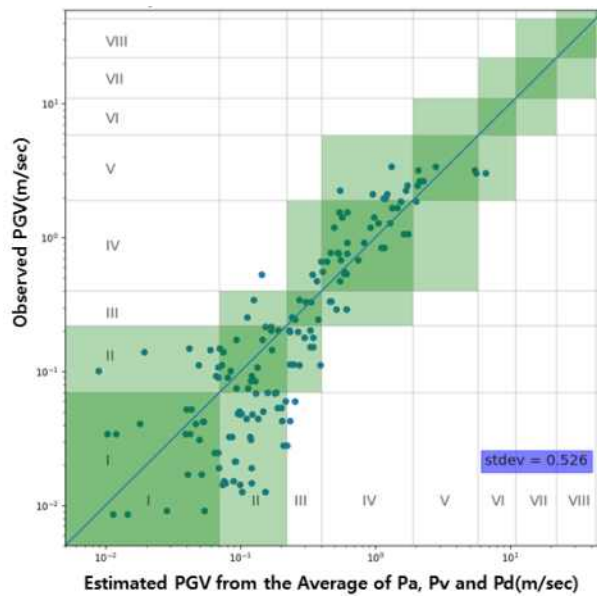


Fig. 10. A scatter plot of PGV of the observed and estimated from Pd using average Equation (2)~(4).

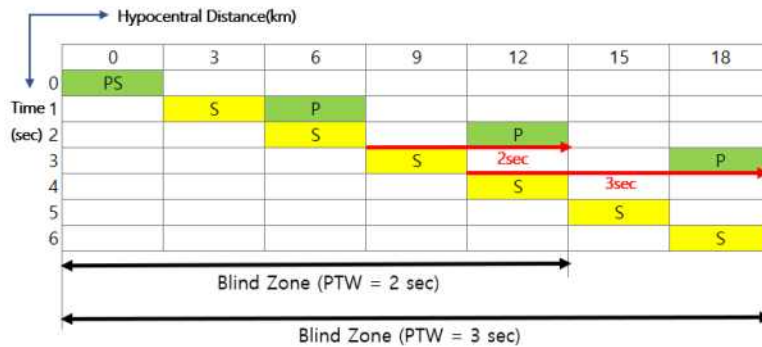


Fig. 11. Blind-zone variant by PTW in onsite warning

으로부터 18km 지점에 도착하여 관측기에 검지된 시점에 S파는 9km 지점에 도착하며, 이로부터 3초간 P파의 물성을 추출한 뒤 S파의 추정이 최초로 가능하게 된다. 따라서 현장경보가 가능한 지역은 18km 이후가 된다. 그러나 2초의 PTW를 사용하게 되면 12km 지점에서 경보가 가능하기 때문에 약 6km의 공백역이 감소함을 알 수 있다. 이렇게, PTW를 줄임으로써 경보 발령 구역을 넓힐 수 있으며, 상대적으로 큰 진동과 피해를 유발하는 진앙인근에서의 공백역을 줄일 수 있게 된다. 지진조기경보 신호는 전자적인 속도로 처리되며, 진동 전의 여유시간 역시 짧기 때문에 인명안전을 위한 즉각적인 대피를 위한 용도 외에, 엘리베이터나 화학 폭발을 유발할 수 있는 위험 시설로의 가스, 전기 차단 등 후속 조치를 위해서는 전자신호를 바탕으로 자동화 시스템이 연동될 필요가 있다. 이때 진앙 인근에서의 1초의 시간 단축과 6km의 정보 공백역을 줄이는 성과는 피해저감 기회를 높이는 중요한 수단이 될 수 있다.

또한, P_v 로부터 P_d 와 P_a 를 계산하는 적분 알고리즘 상에서 불필요한 성분들의 간섭을 줄이기 위한 기술과, P파가 가진 다양한 물성을 동시에 고려하여 오보나 경보 누락을 줄이기 위한 시도로 본 연구에서 시도한 평균값 외에 P파의 3가지 물성을 가장 적합한 PTW에 탐지하여 예측된 PGV를 사용하는 등 다양한 접근방법을 통해 결과의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 선행연구들이 제시한 경험식의 오차범위 내에서 추정 식을 조정하여 정확도를 높일 수 있다. 그러나 한정된 이벤트와 데이터 셋에 기반한 결과로부터 얻은 회귀식의 신뢰성은 1만개 이상의 데이터 셋에 근거하여 제시된 경험식이 가진 신뢰성을 비추어 볼 때 비교할 수 없기 때문에, 규모 3.5 이하의 과거에 발생한 소규모 지진과 앞으로 발생할 수 있는 지진데이터를 축적해 가는 가운데 한국형의 경험식을 도출하는 일도 필요하다. 이를 위해 현장에 적용할 수 있는 시스템 개발과 적용을 통해 이벤트와 데이터 셋의 수를 늘이는 일이 적극 수행될 필요가 있다. 동시에 SVM(Support Vector Machine), ANN(Artificial Neural Network) 등 기계학습 기법을 통해 P파가 가진 다양한 물성에 대한 예측의 신속성과 정확성을 높일 수 있는 연구과제가 필요하다.

본 연구에 사용된 데이터는 순수한 지진 이벤트에 따른 진동 데이터이다. 그러나 실제 현장경보의 적용에 있어서는 다양한 생활 진동이 함께 감지될 수 있으며, 이러한 노이즈를 제거하는 동시에 현장마다 요구하는 특정 임계치를 기준으로 경보를 발령함에 있어 오보를 줄이기 위한 P파 추출 시점을 구하는 방법은 현재 결과가 주는 오차의 크기를 줄이는데 기여할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내의 과거 주요 지진관측데이터를 이용하여 지진 현장경보의 초기 결과를 도출하였다. P파의 주요 물성이 지진이 주는 주진동의 물성 정보를 반영한다는 사실에 기초하여, P_a , P_v , P_d 와 PGV 또는 MM진도의 관계에 대한 선행 연구들의 경험식을 통해, 국내 지진 현장경보에 대한 수치모의를 통해 가용성 여부를 판단하였다. 그 결과, 선행연구들이 제시한 경험식에 근사한 결과를 보여주었으며, 이는 국내에서도 지진 현장경보의 가능성이 높음을 나타낸다.

P파 추출을 위한 Filter Picker 알고리즘을 통해 P_v 를 추출하고 그로부터 다시 P_a 와 P_d 를 적분과 미분을 통해 얻었다.

그 결과 트리거된 파형가운데 P파가 완전히 성장하여 S파의 간섭을 받지 않는 PTW로 2초가 국내의 지진에 적합함을 판단하였다. 추출된 P파의 물성치들을 토대로 일본, 타이완, 캘리포니아 등의 지진데이터를 분석하여 구한 P파 물성치와 PGV 관계를 국내 지진에 적용한 결과 PGV상 표준편차 0.526cm/s ~ 0.782cm/s에 이르는 높은 정확도의 결과를 얻을 수 있었다. P파의 물성에 따라 다소 차이를 보이고 있지만, 피해를 줄이기 위한 목적 또는 미진동 제어를 위한 임계치로 특정 PGV 또는 진도를 선택하고 그 기준에 따라 PGV를 예측하는 방안의 초기결과로서는 충분할 것으로 예상된다.

현재 기상청이 운영하고 있는 지진조기경보는 지역정보체계에 기반하고 있다. 본 과제가 제안하여 산출한 지진현장경보는 지역정보가 가진 넓은 정보 공백역을 해소하는데 공헌할 수 있는가 하면, 정보 수요자가 원하는 진동의 크기를 기준으로 단일 센서를 통해 즉시 지진을 파악할 수 있는 이점을 가진다. 현장경보에 대한 연구가 초기단계로 한정된 소수의 지진파형 데이터를 이용하였지만, 앞으로 발생하는 지진 파형을 지속적으로 수집하여 분석 모집단의 수를 늘여 한국형 현장경보를 위한 회귀식을 보완하고, 현장 진동 노이즈를 제거하는 연구성과를 더하면 지진 현장경보를 통해 인한 인명과 재산피해를 줄이는데 크게 기여할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국기상산업기술원 기상지진 See-At기술개발사업의 연구비 지원(KMI2018-02210)에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Böse, M., Heaton, T. and Hauksson, E. (2012). "Rapid estimation of earthquake source and ground-motion parameters for earthquake early warning using data from a single three- component broadband or strong-motion sensor" *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.102, No.2, pp. 738 - 750. doi: 10.1785/0120110152.
- [2] Colombelli, S., Caruso, A., Zollo, A., Festa, G. and Kanamori, H. (2015). "A P wave-based, on-site method for earthquake early warning" *Geophysical Research Letters*, vol.42, No.5, pp. 1390 - 1398. doi: 10.1002/2014GL063002.
- [3] Colombelli, S., Zollo, A., Festa, G. and Picozzi, M. (2014). "Evidence for a difference in rupture initiation between small and large earthquakes" *Nature Communications*. Nature Publishing Group, vol.5, No.1, p. 3958. doi: 10.1038/ncomms4958.
- [4] Hsu T. Y., Wu S. Y., Huang S. K., Chiang H. W., Lu K. C., Lin P. Y. and Wen K. L.(2016). "Performance of On-site Earthquake Early Warning Systems for Different Sensor Locations." *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, Vol.10, No.8, pp.793-798.
- [5] Kanamori, H. (2005). "Real-Time Seismology and Earthquake Damage Mitigation" *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*. Annual Reviews, vol.33, No.1, pp. 195 - 214. doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122626.
- [6] Lomax, A., Satriano, C. and Vassallo, M. (2012). "Automatic Picker Developments and Optimization: FilterPicker—a Robust, Broadband Picker for Real-Time Seismic Monitoring and Earthquake Early Warning" *Seismological Research Letters*, vol.83, No.3, pp. 531 - 540. doi: 10.1785/gssrl.83.3.531.
- [7] Meier, M. A., Heaton, T. and Clinton, J. (2016). "Evidence for universal earthquake rupture initiation behavior" *Geophysical Research Letters*, vol.43, No.15, pp. 7991 - 7996. doi: 10.1002/2016GL070081.
- [8] Nakamura, Y. (1988). "On the urgent detection and alarm system (UrEDAS)" in *Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 673 - 678. doi: ISBN 4-89580-010-5.
- [9] Nakamura, Y. (2003). "A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System" *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 693 - 699. doi: 10.1007/978-3-642-55903-7_92.
- [10] Odaka T, Ashiya K, Tsukada S, Sato S, Ohtake K, Nozaka D. (2003). "A new method of quickly estimating epicentral

distance and magnitude from a single seismic record." *Bulletin of the Seismological Society of America* 2003, 93(1), pp.526 - 532.

- [11] Wald, D. J., Quitoriano V., Heaton T. H., and Kanamori H. (1999). "Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified mercalli intensity in California" *Earthquake Spectra*, vol.15, No.3, pp. 557 - 564. doi: 10.1193/1.1586058.
- [12] Wu, Y. M. and Kanamori, H. (2005). "Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system" *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.95, No.1, pp. 347 - 353. doi: 10.1785/0120040097.
- [13] Wu, Y. M. and Kanamori, H. (2008). "Development of an earthquake early warning system using real-time strong motion signals" *Sensors*, vol.8, No.1, pp. 1 - 9. doi: 10.3390/s8010001.
- [14] Junyoung Yun, Geumyoung Min, Dukhoon Jung. (2015). "A study of the Domestic Trend in the law and institutions of International Standard Disaster Management - Focusing on ISO/TC 292 -." *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, vol.11 No.2, pp. 287-296.
- [15] Zollo, A., Amoroso, O., Lancieri, M., Wu, Y. M. and Kanamori, H. (2010). "A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks" *Geophysical Journal International*, vol.183, No.2, pp. 963 - 974. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04765.x.