

국내에서의 지진현장경보 기술 고도화 및 적용

Advanced and Application of Onsite EEW Technology in Korea

이호준¹ · 전인찬^{2*} · 서정범³ · 이진구⁴Ho Jun Lee¹, Inchan Jeon^{2*}, Jeong Beom Seo³, Jin Koo Lee⁴¹Director, KIT Valley Co., Anyang, Republic of Korea²Senior Research Engineer, KIT Valley Co., Seoul, Republic of Korea³Director, KIT Valley Co., Uijeongbu, Republic of Korea⁴Principal Research Engineer, KIT Valley Co., Seoul, Republic of Korea

*Corresponding author: Inchan Jeon, kitv@raychani.net

ABSTRACT

Purpose: This study aims to derive a PGV prediction equation and to enhance the application of the Onsite EEW technology which has developed through previous studies. **Method:** The prediction equation for the Onsite EEW derived from earthquake data $M \geq 3.0$ and $MMI \geq II$ over the past four years. Local seismic risk is estimated using M and PGV deduced from P wave properties. **Result:** The improved PGV prediction equation estimated the MMI with an average accuracy of 94.8% and the $\tau_c : Pd$ method also showed valid performance for alerting local seismic risks. **Conclusion:** Onsite EEW technology is successfully applied to Korea, and becomes to reduce the blind zone to about 14km.

Keywords: Onsite EEW, Prediction Equation, $\tau_c : Pd$ Onsite EEW, Seismic Blind Zone

요약

연구목적: 본 연구는 기존 지진현장경보 연구를 통해 단일 지진계에서 관측한 P파로부터 PGV 값을 예측하기 위한 예측식을 제시하고, 예측 결과를 현장경보에 이용하기 위한 기술적 접근 방안들을 도출하기 위한 것이다. **연구방법:** 과거 4년간 규모 3.0 이상의 지진 가운데 진도등급 II 이상의 데이터를 이용하여 P파로부터 PGV를 예측하기 위한 수식을 도출하고, 진원 정보 추정 없이 지진의 규모와 PGV의 크기를 상대적으로 비교하여 지진위험을 알려줄 수 있는 기술을 적용하였다. **연구결과:** 개선한 PGV 예측식은 평균 94.8%의 정확도로 MMI를 추정하였고, $\tau_c : Pd$ 방법 역시 로컬 지진위험을 경보하기 위한 유효한 성과를 보여주었다. **결론:** 현장경보기술을 국내에 성공적으로 적용하였으며, 경보공백역을 약 14km 까지 줄일 수 있는 방안을 제시하였다.

핵심용어: 지진현장경보, 현장경보 예측식, $\tau_c : Pd$ 현장경보, 경보공백역

Received | 31 July, 2020

Revised | 12 October, 2020

Accepted | 23 October, 2020

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

개요

지진으로부터 인명과 재산을 보호하기 위해서는 사전예방준비능력이 매우 중요하며 이 능력을 향상시키기 위한 방법 중 하나로 지진조기경보(Earthquake Early Warning)가 있다

(Youn, 2020). Jennifer et al.(2016)에 따르면, 캘리포니아 Shake Alert의 연간 운영비용은 1천 6백만 불로, 노스리지 지진 당시 전체 부상피해자 손실비용의 10%인 2천만 불에 미치지 못한다. 또한, Meguro et al.(2007)에 따르면 강진동 5초 전의 조기경보가 학생들의 부상을 방지하는데 효과적이라 알려지고 있다. 대만의 경우는 진앙 인근의 공백역(Blind Zone)을 최소화하기 위한 현장경보 기술을 개발하고 학교 등 실제 환경에서 시험하여 공백역 단축의 효과를 얻었다(Wu et al, 2017, Lin, 2019).

국내에서 발생 가능한 최대급 지진 규모를 6.5로 가정한다면 그로 인한 피해는 진앙 인근에 집중된다. 현재 기상청의 지진 조기경보가 가진 진앙 인근 경보 공백역을 보완하기 위해 현장경보를 활용하는 것은 진앙인근에 집중되는 피해를 경감하는데 효과적이다. 네트워크 경보와 달리 지진현장경보는 하나 또는 최소의 관측소 정보만으로 해당 지점의 진도를 예측하기 때문에 상대적으로 성과의 신뢰성이 낮아 일부 정부기관이 시험운영을 하는 외에 자가 지진계를 가진 민간의 수요자들이 선택적 기준에 따라 경보를 운영하는 것이 일반적이다. 현장경보가 수요자의 요구에 따라 순발력 있게 맞춤형 경보를 가능하게 하고 진앙 인근의 경보 공백역을 최소화할 수 있는 강점을 갖기 때문이다. Lee et al.(2018, 2020)은 타이완, 이탈리아, 일본 등 지진현장경보에 관한 해외 선행연구(Wu et al., 2005, 2008; Colombelli et al., 2015)를 바탕으로 국내의 단일 관측소 정보로부터 진도를 예측하기 위한 데이터의 처리 방법을 이용하여 한국형 지진 현장경보를 위한 예측식을 제시하였으며, 예측 기술에 대한 시범 적용 결과로부터 국내에서의 지진 현장경보 활용 가능성을 제시한 바 있다. 그러나 분석된 데이터의 90%를 차지하고 있는 규모 3.0 이하의 지진은 피해를 유발할 가능성이 매우 낮아 현장경보에 적합하지 않은 정보이고, 데이터 내에 혼입되어 있는 노이즈를 구분하기 위한 지진과 비지진을 구분하는 기술(Ross et al., 2018; Zhu et al., 2019; Seo, 2020)을 요구한다. 정확도 높은 현장경보 예측식 및 이를 현장에 적용하기 위한 기술 전략적 방안 또한 강구할 필요가 있다.

본 연구에서는 한정적인 과거의 국내 지진관측 데이터와 향후 추가적인 관측이 이루어짐에 따른 데이터 처리 및 안정적이고 정확도 높은 현장경보 예측식을 유도하기 위한 방안을 소개하고자 한다. 그리고 이를 국내에서 최근 발생한 주요 지진에 적용하여 지진현장경보의 정확성을 평가하고 이를 바탕으로 기술 활용에 대한 전략적 접근방법을 제시하고자 한다.

지진현장경보를 위한 예측식 도출

지진현장경보는 단일 관측소에서 탐지된 P파 정보로부터 관측소가 위치한 지점에서의 PGV(Peak Ground Velocity)를 예측함으로써 진동 전에 경보를 발령함을 목적으로 한다. 경보발령을 위해 P파 진폭의 수직방향 최대값과 PGV 사이의 관계를 설명하는 예측식 도출을 위해서는 과거의 지진관측 데이터에서 얻은 P파의 수직방향 성분에 대한 시간이력 데이터와 해당 지점에서의 PGV를 사용한다. Wu et al.(2005)는 타이완, 남 캘리포니아 및 일본의 Mw 6.0 이상의 지진기록을 이용하여 P파 수직변위 최대값과 PGV의 관계를 도출하였고, Colombelli et al.(2015)은 일본 동북지방에서 발생한 $4.0 \leq M \leq 7.5$ 의 지진기록을 이용하여 수직방향 P파 최대 가속도, 최대 속도 및 최대 변위와 PGV와의 관계를 도출했다. 이들은 P파 탐지 후 3초 동안 성장한 P파의 수직방향 최대 진폭을 이용하여 예측식을 회귀식을 도출했다. 그와 비교하여 Lee et al.(2020)은 국내에서 발생한 $2.0 \leq M \leq 5.8$ 의 과거 지진데이터를 이용하여 탐지 후 2초의 PTW(P-wave Time Window) 동안 성장한 P파 수직방향 최대 진폭을 이용하여 예측식을 회귀함으로써 국내에 우세한 중약진에 S파의 간섭 없는 예측식을 제시한 바 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 이하에 제시된 방법에 따라 예측식을 유도하는데 있어 기존의 데이터로부터 순수한 지진파 정보만을 포함하는 양질의 관측 데이터를 선별 분석함으로써 예측식의 신뢰도를 제고하였다.

지진기록 수집 및 선별

지진현장경보를 위해서는 실시간으로 P파를 탐지하는 탐지 기술과 탐지된 P파 정보로부터 실제 진동을 동반하는 PGV를 예측하기 위한 예측기술이 필요하다. 본 연구에서는 P파 정보로부터 PGV를 예측하기 위한 회귀식을 도출하기 위해 2015년 6월부터 2019년 5월까지 4년간 규모 2.0 이상의 총 627개 지진 이벤트를 대상으로 전국의 관측소로부터 얻은 관측 데이터를 수집했다.

Fig. 1은 수집한 지진 이벤트의 진앙과 규모(a), 지진에 따른 전국 관측소에서의 계기진도 분포(b) 및 규모별 이벤트 수(c)를 나타낸다. 진앙은 북한 및 해역을 포함한 한반도 전역에 분포하고 전체의 89.5%가 규모 3.0 이하이며, 관측 진도 V 이상의 기록은 2.8%에 불과하다. 일반적으로 지진 현장정보 예측을 위한 분석 대상이 되는 지진 규모가 7.0 이상인데 대하여 우리나라의 경우는 상대적으로 낮은 규모와 진도로 선택의 범위가 한정된다. 그런데, 소규모 지진데이터를 사용할 경우 노이즈에 따른 신뢰성 저하 우려가 있어 기록의 선별이 필요한데, 그 방법으로 먼저 유효 진원거리를 설정했다. 지진파의 단주기 성분은 전파거리가 멀어지면서 빠르게 감쇠되는데, Wu et al.(2008)는 P파 정보가 유효한 거리를 약 120km라고 제안한 바 있다. 특히 소규모 지진일수록 지진파의 주기는 짧아지고 근거리를 이동하더라도 감쇠되어 사라지는 경우가 많기 때문에 이를 고려하여 본 연구에서는 규모 3.0 미만 또는 진앙거리 100km 이후의 관측값을 분석 대상에서 제외하고, 전체 37,254개 데이터 가운데 총 2,518개 데이터만 활용하였다.

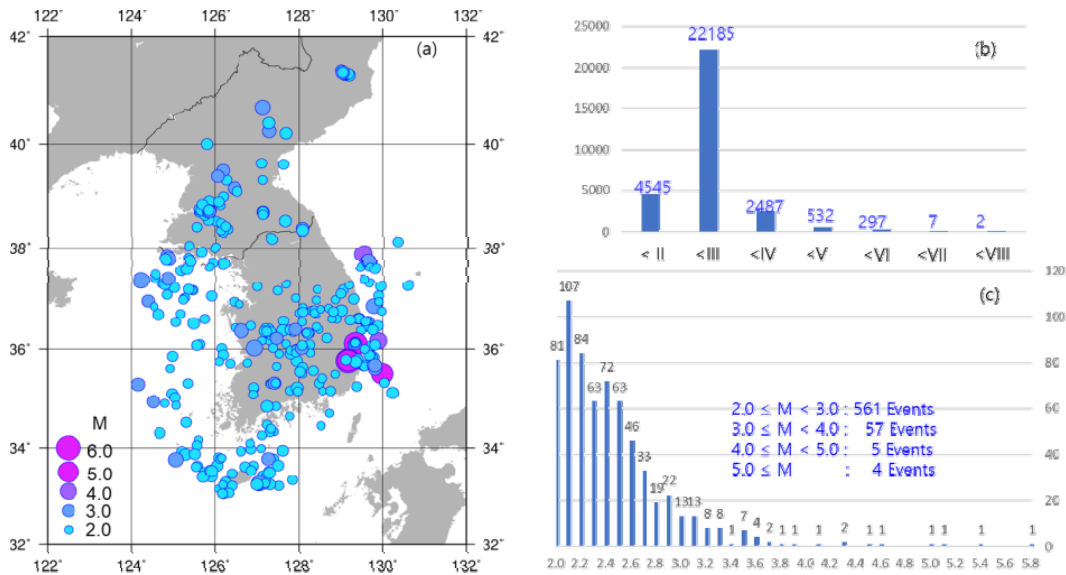


Fig. 1. Seismic data (a) Epicenter of seismic events and magnitude(2015.6~2019.5); (b) Observed MMI distribution at each station; (c) Distribution of magnitude

지진 규모는 지진파의 우세주기에 영향을 주는 요소 중 하나로 사용될 수 있다. 국내에서 관측되는 중약진의 경우 1초 미만의 단주기 성분들이 대부분이며, Gu et al.(2018)에 따르면 2016년 경주에서 발생한 M5.8 지진의 탁월 주기는 약 0.05 ~ 0.14 초로 극히 짧은 주기의 성분들이 우세하게 나타났다. Caruso et al.(2017)은 이탈리아에서 발생한 M3.5 ~ 5.9 지진 기록을 이용한 현장정보 기술을 개발함에 있어 상과의 품질을 확보하기 위해 0.075 및 1.0 Hz 필터를 이용하여 현장정보 분석에 필요

한 P파의 정보를 추출했다. 본 연구에서는 국내에 우세한 극히 짧은 주기를 가진 P파 정보를 취득하기 위해 1.0 Hz의 하이패스 필터를 적용하여 1초 이상의 장주기 성분들을 제거하여 데이터 품질의 일관성을 확보했다. 결과적으로 관측 기록으로부터 배제된 규모 3.0 미만의 지진은 진도 IV 이하가 되어 정보대상이 되지 않고, 진원거리 100km 이상의 관측 데이터는 감쇠로 인하여 상대적으로 부정확한 결과를 얻을 수 있어서 현장정보에는 적합하지 않다. 또한, 원거리까지 진동이 전파되지까지는 시간적 여유가 있어 네트워크 방식의 지진조기경보가 유리할 것으로도 판단된다.

P파 정보 및 PGV를 이용한 예측식 도출

지진 관측기록에서 트리거된 P파의 최대진폭을 추출하기 위한 방법으로 Lee et al.(2020)가 국내 관측 데이터에 적용하여 성공적인 결과를 얻었던 Filter Picker(Lomax et al., 2012)를 $M \geq 3.0$ 로 구성된 국내 지진의 파형 데이터에 적용하였다. Lee et al.(2018)은 국내 중소규모의 지진의 P파 탐지를 위해 2초의 PTW를 제안한 바 있으며 이를 준용하여 P파 수직 방향의 최대 가속도(P_a), 속도(P_v) 및 변위(P_d)와 평균주기(τ_c)와 PGV를 추출했다. 국내 기상청이 운영하는 지진 관측소는 지표에 분포하기도 하지만 시추공 내 기반암에 설치된 경우들이 있는데 같은 위치에서 관측된 기록일지라도 지표 토양층에서 관측된 기록은 파동이 크게 증폭될 수 있다. 따라서 지표 관측소의 데이터로부터 관측된 PGV는 Ministry of Public Safety and Security (2017)가 제공하는 지반 응답특성에 따른 지진파 증폭보정기법을 이용하여 기반암에서의 값으로 보정하여 현장정보 예측을 위한 분석에 사용하였다.

선별된 2,518개의 데이터셋으로부터 추출한 P파 정보와 PGV를 각각 로그값으로 치환한 뒤, 두 변수 사이의 선형 1차 회귀식을 도출하였다. 사용된 데이터의 분포를 보면 진도 I 구역의 총 데이터가 1,635개인 반면 진도 V는 63개, VI는 20개 및 VII는 8개에 그쳤다. 진앙 인근의 관측소에만 집중되는 높은 진도의 데이터 수는 극히 적은 반면, 진앙으로부터 원거리로 전파되면서 넓게 분포하는 낮은 진도 기록들이 관측되었기 때문이다. 데이터가 분포하는 형태대로 낮은 진도 등급의 갯수가 많은 채로 회귀식을 도출할 경우 낮은 진도 대역이 과다하게 영향을 미치며, 회귀식을 통해 PGV값을 예측할 경우 정보를 필요로 하는 높은 진도 대역에서 큰 오차가 나타나게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 각 진도 등급이 포함하는 데이터 수를 동일하게 조절하는 데이터 균등화를 수행했다. 즉, 진도 V 이상의 데이터 수가 부족한 것을 고려하여 V 미만의 데이터를 최대한 포함할 수 있도록 각 진도 등급에 포함되는 데이터 수를 200개로 제한하였다. 진도 V미만의 등급에서는 각 등급별 전체 데이터 가운데 200개의 데이터만 추출하였으며 V 이상의 진도 등급에서 부족한 데이터는 동일한 데이터를 반복 입력하여 200개로 수를 증가시켰다. 데이터 균등화를 통해 얻은 진도 I부터 VII 까지 총 1,400개 P_a , P_v , P_d 와 그에 상응하는 관측소에서의 PGV에 각각 로그를 취하여 선형 회귀 분석한 결과로 예측식(식) 1~3을 얻을 수 있었다.

$$\log PGV = 1.011(\pm 0.010)\log P_a - 1.038(\pm 0.010), \sigma = 0.354, R^2 = 0.872 \quad (1)$$

$$\log PGV = 1.032(\pm 0.009)\log P_v + 0.765(\pm 0.014), \sigma = 0.314, R^2 = 0.899 \quad (2)$$

$$\log PGV = 0.905(\pm 0.010)\log P_d + 1.855(\pm 0.028), \sigma = 0.365, R^2 = 0.864 \quad (3)$$

도출한 예측식의 표준편차 σ 는 약 0.314 ~ 0.365이며, R^2 는 0.864 ~ 0.899로 나타나 Lee et al.(2018, 2020)의 기존 연구결과보다 오차 및 선형분포에 있어 개선된 결과를 보여주었다.

지진현장경보의 정확도 평가

지진현장경보의 정확도 평가를 위해 예측PGV와 관측PGV를 비교하여 Fig. 2에 제시하였다. 즉, (식) 1~3에 P_a, P_v, P_d 를 입력하여 구한 예측PGV들의 평균값을 그래프의 x축에, 2,518개 데이터셋이 가진 관측PGV값을 y축에 표시했다. 그래프 내의 격자는 각 PGV에 상응하는 진도 구간을 나타내며, 짙은 음영은 예측진도와 관측진도가 일치하는 범위를, 옅은 음영은 해당 진도 ± 1 의 오차범위를 나타낸다. 각 진도 등급별로 진도 ± 1 오차범위 내에서의 정보 적중률을 Table 1에 제시하였다.

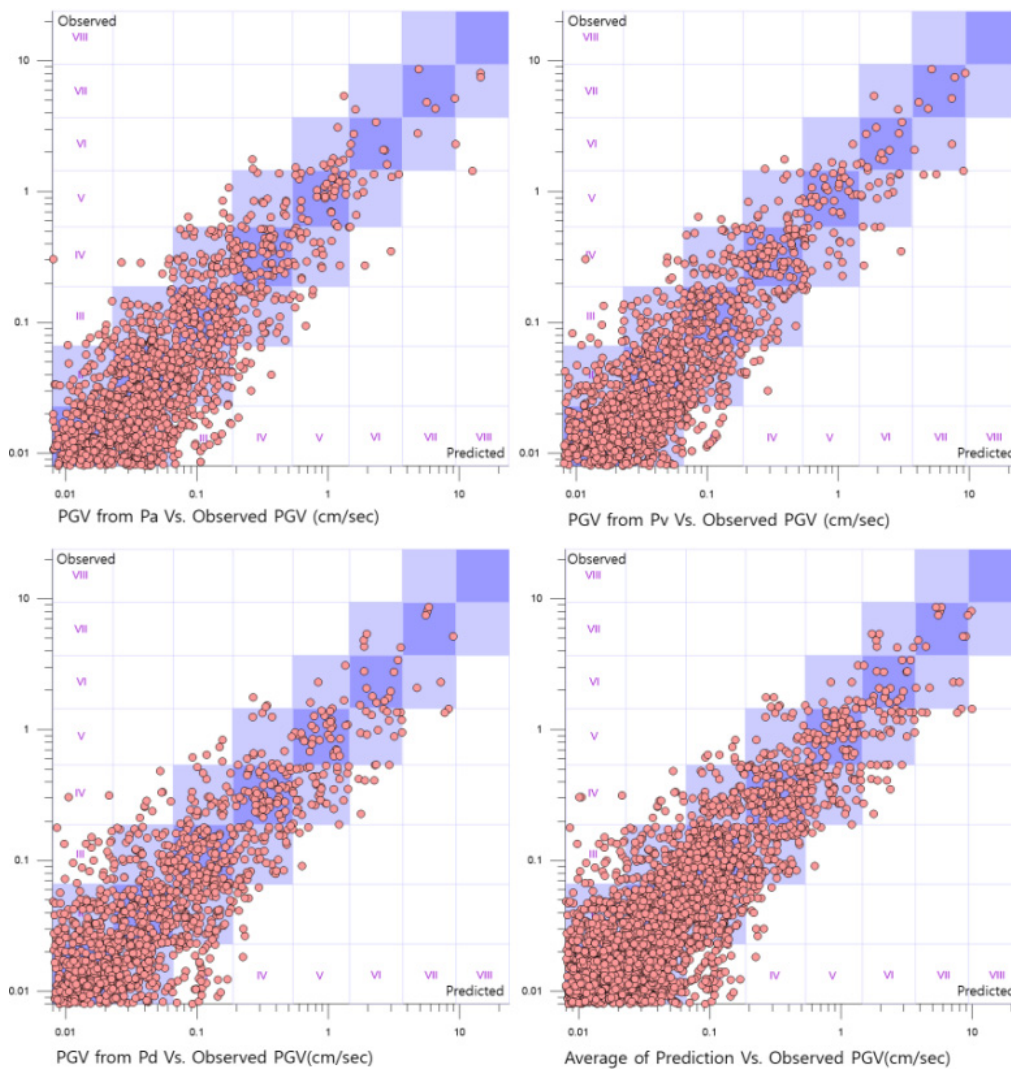


Fig. 2. Successful ratio of onsite alarm in range of MMI ± 1

Table 1. Number of Successful and False Onsite Alarm in range of MMI±1

MMI estimated from Pa					MMI estimated from Pv				
MMI	False	Success	Total	Suc.Ratio	MMI	False	Success	Total	Suc.Ratio
I	54	1,581	1,635	96.7	I	19	1,616	1,635	98.8
II	12	394	406	97.0	II	8	398	406	98.0
III	19	220	239	92.1	III	12	227	239	95.0
IV	10	137	147	93.2	IV	10	317	147	93.2
V	7	56	63	88.9	V	6	57	63	90.5
VI	3	17	20	85.0	VI	2	18	20	90.0
VII	1	7	8	87.5	VII	0	8	8	100.0

MMI estimated from Pa					MMI estimated from averaged PGV				
MMI	False	Success	Total	Suc.Ratio	MMI	False	Success	Total	Suc.Ratio
I	38	1,597	1,635	97.7	I	27	1,608	1,635	98.3
II	11	395	406	97.3	II	5	401	406	98.8
III	25	214	239	89.5	III	9	230	239	96.2
IV	17	130	147	88.4	IV	8	139	147	94.6
V	7	56	63	88.9	V	6	57	63	90.5
VI	3	17	20	85.0	VI	3	17	20	85.0
VII	0	8	8	100.0	VII	0	8	8	100.0

결과를 보면 P_a , P_v , P_d 로 부터 얻은 예측 PGV와 그 평균값의 적중률은 각각 91.5%, 95.1%, 92.4% 및 94.8%로 나타났다. Lee et al.(2020)의 이전 연구에서는 진도 I-II에서 97% 이상의 적중률을 보였으나, 경보 대상이 되는 VI 에서 평균 75%에 그치던 적중률이 본 연구를 통해 평균 87%로 높아진 것을 알 수 있다. 즉, 낮은 진도 구간에 집중된 데이터로 인하여 전체 예측식이 편향되었던 것이 대역별로 균등화를 거치면서 상대적으로 높은 진도 구간의 예측 정확도를 높이고 전체적인 균형을 유지한 것을 알 수 있다. P파의 세 성분 중 가장 적중률이 높은 것은 P_v 의 경우로 평균 95.1%, 진도 VI 이상에서도 95%의 적중률을 보였다. 관측 기록 수가 20개 이하인 진도 VI 이상에서는 하나의 오경보만으로도 적중률을 5% 이상 하락시키는 결과로 이어지는 평가 방식의 한계도 볼 수 있어, 향후 적합한 정확도를 파악하기 위해서는 데이터의 확충이 필요하다.

τ_c : Pd지진현장경보

전술한 현장경보기술에서는 지진의 규모나 진원거리 등 진원정보가 생성되지 않는다. 그러나, 구체적이고 정량적인 진원 정보가 아니더라도 경보 수신자가 요구하는 진앙 거리와 규모의 상대적 크기를 추측함으로써 피해가 발생할 것으로 예상되는 지진파 도달 시간 내에 필요한 비상대응에 도움을 줄 수 있다. 즉, 수직방향 P파의 최대 진폭이 PGV의 크기와 비례하는 조건에 더해, P파의 평균주기인 τ_c 가 지진 규모에 비례한다는 사실을 동시에 이용하면 지진에 따른 영향정도를 보다 구체적으로 설명할 수 있게 된다(Kanamori, 2005). 관측지점에서 P파 진폭이 큰 지진은 대부분 규모 역시 높게 나타날 수 있다. 그러나 P파 진폭이 큰 경우라도 반드시 지진 규모가 크지는 않은데, 작은 지진에서 발생한 지진파일지라도 거리에 따른 감쇠가 발생하기 이전에는 큰 진동을 유발할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 1.0 Hz High Pass Filter를 통과하여 지진파형의 장주기

성분을 제거한 P파의 평균주기 τ_c 와 지진 규모 M의 관계를 통해 국내 지진이벤트들에 대한 $\log\tau_c$ 와 M 사이의 관계식을 도출했다. 이를 위해 P파 탐지 후 0.5초부터 2초 사이의 τ_c 최대값을 동일 지진 이벤트 내에서 평균하여 해당 이벤트의 τ_c 로 보고 M과의 관계를 (식) 4 및 Fig. 3과 같이 얻을 수 있었다.

$$\log\tau_c = 0.1714M - 1.2136 \tag{4}$$

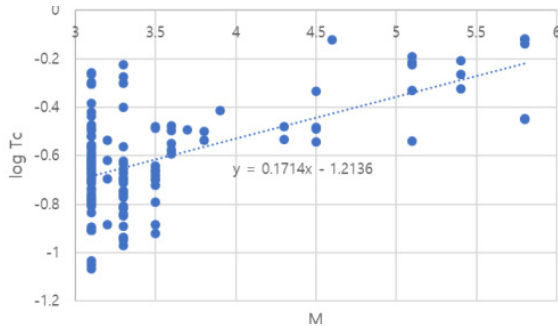
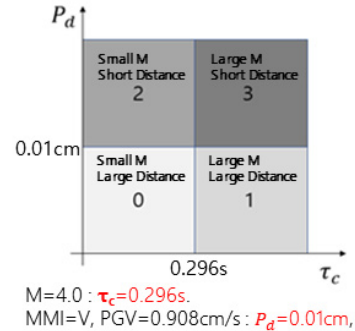


Fig. 3. $\log\tau_c$ vs M



M=4.0 : $\tau_c=0.296s$,
MMI=V, PGV=0.908cm/s : $P_d=0.01cm$,

Fig. 4. τ_c : Pd Onsite warning

지진 관측소에서 P파를 감지하게 되면 PTW내에서 P_d 와 τ_c 를 탐지할 수 있다. 이를 (식) 3 과 4에 대입하면 PGV와 M의 크기를 추정할 수 있고, 그 값들이 경보 수신자가 원하는 기준에 부합할 경우 경보를 발령하는 방식을 이용할 수 있다. 즉, P파 트리거 이후 τ_c 와 P_d 를 탐지를 통해 지진 규모와 PGV를 파악할 수 있고, 두 값을 사용하여 Fig. 4와 같이 4 종류의 현장경보 발령이 가능해진다. Fig. 4의 각 경보구역은 지진이 미치는 영향 거리와 진동의 크기로 구분하여 설명할 수 있다. 즉, 경보 기준 한도 내에서 구역 0은 영향이 미치는 구역이 없고, 구역 1은 먼 지점에서 큰 규모의 지진이 발생한 것이므로 관측소로부터 먼 지점에도 영향이 있으며, 구역 2는 관측소 인근에는 영향이 있지만 작은 지진이므로 관측소에서 먼 지점에는 영향이 적고, 구역 3은 큰 지진이므로 관측소 인근은 물론 원격지까지 영향을 줄 수 있다고 해석이 가능하다(Carusio et al., 2017). 이를 실제 적용하기 위해 M4.0과 진도 V에 해당하는 PGV 0.908cm/sec를 현장경보 기준으로 보고 2016년 M5.8, 2017년 M5.4 지진에 시험 적용하였고, 그 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

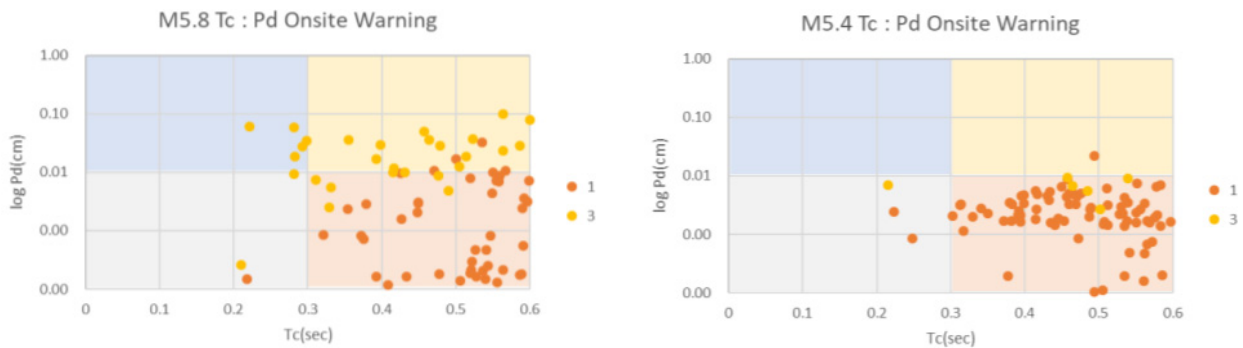


Fig. 5. τ_c : Pd Onsite warning for M5.8 and M5.4 Events

결과를 보면 지진 규모가 4.0 이상이므로 경보 영역은 Fig. 4의 1과 3에만 국한되며, 진원거리에 따라 1구역은 주황색 점 이, 3구역에는 황색점이 표시되어야 하지만, 일부 해당 영역을 벗어난 관측점들이 나타났고 오류를 보인 데이터는 규모나 PGV를 다소 과소평가한 것으로 나타났다. 향후 발생할 지진을 대상으로 분석에 사용될 데이터를 늘여 예측식의 정확도를 높임으로서 보다 신뢰성 있는 경보 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

현장경보 시뮬레이션

본 연구에서는 Fig. 2 및 Table 1에 제시한 바와 같이 진도 구간별 정확도를 평가하였지만, 단일 관측소를 이용하는 정보의 한계를 고려할 때 3장에서 제시된 바와 같이 지진 현장경보기술은 예상되는 진동이 특정 진도 등급을 넘는지 여부에 따라 경 보를 발령하는 방식이 적합하다. 특히 국내의 경우 지진발생 후 첫 관측소에 지진파가 도착한 후 빠르면 7초 후 경보가 발령 되기 때문에 진앙으로부터 약 35km 이후는 신뢰성 높은 네트워크 방식의 경보가 유효하다(Hwang, 2018). 현 기상청의 관측 망을 활용한다는 가정에서 진앙 인근 최초 관측소에 P파가 탐지될 때 35km이내에만 현장경보를 발령하게 되면, 이후는 네 트워크 경보를 통한 보다 정확한 경보를 발령할 수 있게 된다. 현장경보의 정확도를 판정하는 방법으로는 수요자의 체감 정 도에 따라 진도±1의 여유를 주는 유연한 판정방법(Fig. 6(b))과 기기 등 정밀한 제어가 필요한 경우 절대 평가(Fig. 6(a))하는 방법을 이용할 수 있다. 이는 경보운영자의 목적이나 경보 정확도에 대한 수요자 민감도에 따라 결정될 수 있다.

본 연구결과의 실무 적용 가능성을 파악하기 위해 먼저 과거에 발생한 지진 이벤트를 대상으로 Fig.6(b)의 진도 VI±1을 판 정 기준으로 하여 전국 또는 진앙 인근에서의 경보결과를 시뮬레이션 하였다. 먼저 Fig. 7은 2016년 M5.8 지진을 대상으로 예측PGV의 평균값과 관측PGV를 이용하여 전국 관측소에서의 관측진도와 예측진도를 비교 판정한 결과로각 관측소 위치 에 나타낸 숫자는 관측진도/예측진도를 의미한다. 또한 숫자를 표시한 색이 청색일 경우는 성공적인 경보를, 녹색은 진도가 낮아 경보를 발령하지 않은 성공적인 미경보를, 황색은 경보가 필요함에도 발령하지 않은 경보 누락을 적색은 실제보다 큰 값을 예측한 오경보를 각각 의미한다. 결과를 보면 진앙 인근에서는 성공적인 경보가 발령되고 인근지역에서 예측진도 III~IV 대비 관측진도가 V로 과다 평가되어 오경보가 우세하며, 진앙지에서 먼 곳에서는 성공적인 미경보가 나타나고 있다. 진앙 인근에서 오경보가 우세한 지역의 경우에는 현장경보가 아닌 정확도 높은 네트워크 경보가 먼저 도착하므로 오차를 만 회할 수 있는 기회가 있을 것으로 예상된다.

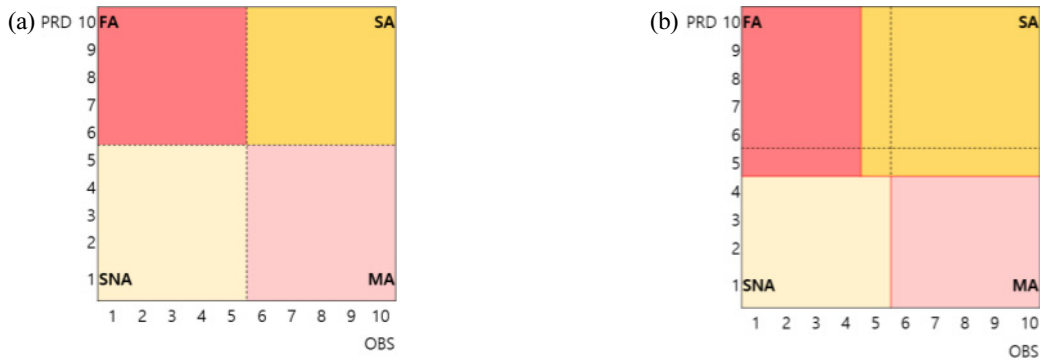


Fig. 6. Judgement of Alarm (SA:Successful Alarm, SNA:Successful No Alarm, MA:Missed Alarm, FA:False Alarm)

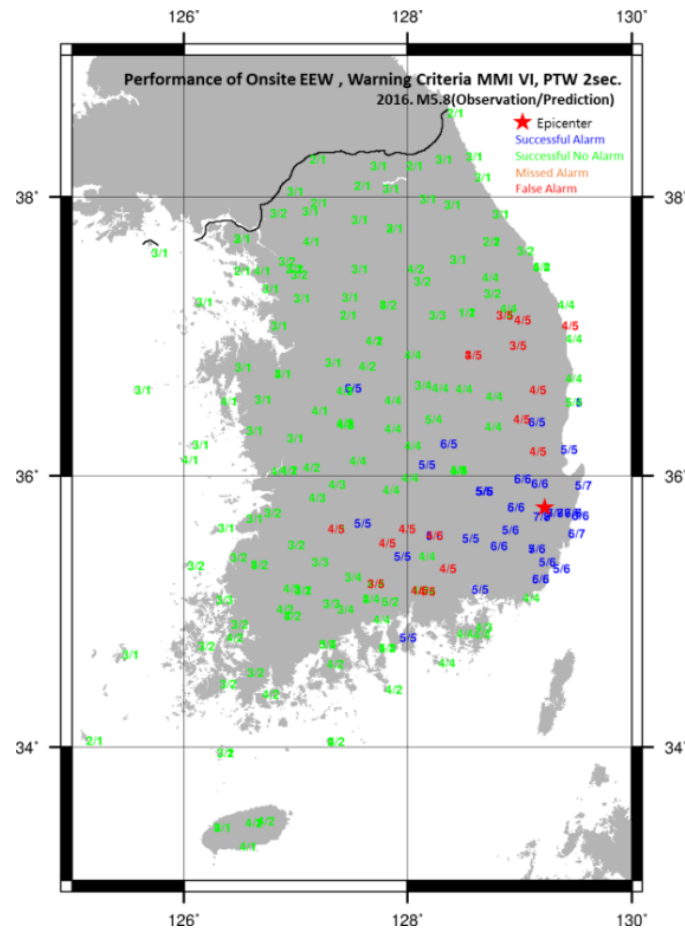


Fig. 7. Results of onsite EEW for M5.8 earthquake in 2016 with warning criteria of $MMI VI \pm 1$

이러한 오경보 성과를 최대한 줄이기 위하여 현장경보방식을 진앙 인근으로 국한하여 Fig. 8과 같이 운영할 수 있다. Fig. 8은 Fig 7의 예측 PGV를 진앙 인근에서 진도 1 오차의 여유를 부여하지 않고 진도 VI를 기준으로 성패를 판정한 사례를 보여준다. 특히, 단일관측소에서의 지진 탐지오차를 줄이기 위해 진앙으로부터 첫 두 관측소 정보를 이용하여 오탐지 여부를 확인하고, 적색 원으로 그려진 진앙 45km 반경에 현장경보를 발령하는 방식을 설명하고 있다. Fig. 7에서처럼 판정에 기준 $VI \pm 1$ 로 진도 1의 여유를 둔 경우와 비교하여 오경보가 다소 증가한 것을 알 수 있다. 본 경보방식에 필요한 경보절차를 설명하면, 진원을 출발한 P파가 첫 관측소에 도달한 이후 PTW 2초와 경보를 위한 분석시간 0.5초를 지날 무렵, P파는 두 번째 관측소에 도달한다. 두 번째 관측소에서는 오경보 방지를 위해 탐지된 진동이 지진에 의한 것인지 여부를 식별하게 되며, 지진에 의한 진동임이 판명된 즉시 진도 VI를 넘었는지 여부에 따라 경보를 발령할 수 있다. 현장경보가 발령되는 범위는 기상청 지진관측망이 평균 20km 간격인 점과, 두 관측소 중심점에 진앙을 둔 상황을 고려하면 기상청 지진조기경보의 공백역인 35km와 그로부터 첫 관측소까지의 최대거리 10km를 더한 총 45km에 경보가 필요하다. 이 때, 첫 현장경보가 발령되기까지 P파가 초속 약 6.5km로 전파되어 첫 관측소에 도착하기까지 1.5초와 현장경보가 발령되기까지 2.5초를 합한 4초가 소요된다. S파가 초속 3.5km로 전파됨을 가정하면 지진발생으로부터 4초 후 진원으로부터 14km 반경에 도착하는데 이 거리가 현장경보의 공백역이 되며, 지진조기경보가 가진 35km보다 좁아짐을 알 수 있다.

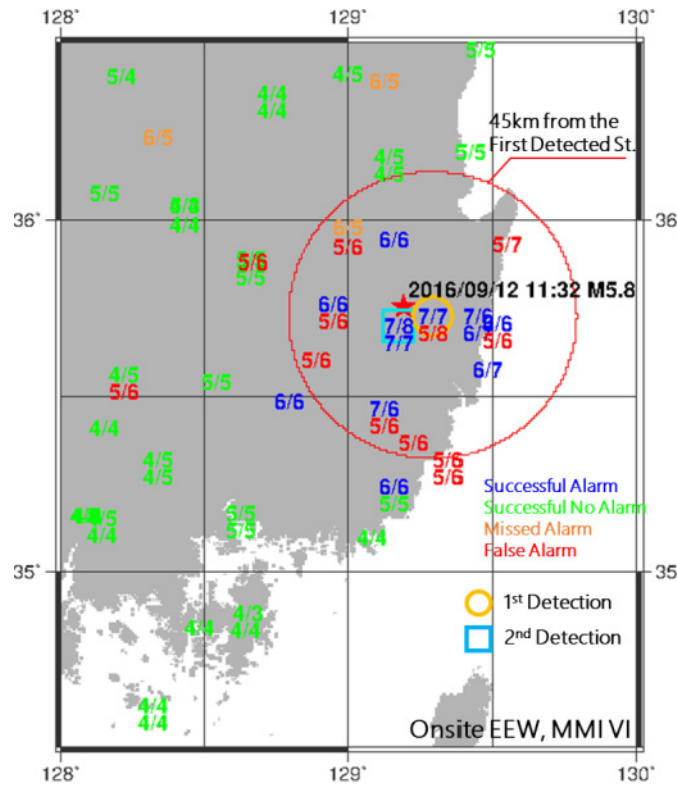


Fig. 8. Results of onsite EEW near the epicenter of M5.8 earthquake in 2016 with warning criteria of $MMI VI \pm 0$

결론

단일 관측소의 P파 정보만으로 해당 지역에 지진현장경보를 발령하는 기술은 네트워크 정보와 비교하여 안정적으로 정확성을 높이지 못하는 한계를 갖지만, 정보 공백역을 축소하는데 기여할 수 있다. 지진조기경보를 필요로 하는 $MMI V$ 이상인 관측기록의 수는 적지만 제한된 수의 국내 지진기록과 이전 연구(Lee et al., 2018, 2020)의 결과를 바탕으로 지진현장경보를 수행하기 위한 개선된 예측식을 도출하고, 이를 과거의 실제 지진에 적용하여 경보 성과를 평가했다. 또한, 해외 연구에서 제안하고 있는 현장경보 기법들을 적용함으로써 국내에서의 지진현장경보 운영의 가용성을 확인했으며 이들로부터 이하의 결론을 얻을 수 있었다.

가. 불필요한 노이즈를 제거하는 방법으로 과거 4년간 국내 지진기록 가운데 전체의 10%에 해당하는 $M > 3.0$ 의 중규모 지진들만으로 정도 높은 현장경보 예측식을 얻을 수 있었다.

나. $M > 3.0$ 이상의 과거 지진 2,518개 데이터 셋에 대한 진도 $VI \pm 1$ 기준 현장경보시물레이션 결과 각 진도 등급별로 평균 94.8%의 적중률을 나타내었다.

다. 지진 규모와 PGV 정보를 동시에 사용하는 $\tau_c : P_d$ 현장경보 시물레이션 결과, 지진 규모와 PGV를 과소평가하는 소수의 오경보가 발견되었지만 진앙을 알 수 없는 특정 지역에서 소수 관측점 정보들을 이용하여 지진의 규모와 예상되는 PGV가 수요자가 바라는 기준에 부합하는지 여부를 추정할 수 있었다. 이 기술을 이용하면 수요자가 선택하는 진원거

리 및 진동의 도달시간과 크기에 따라 현장경보를 제공할 수 있을 것으로 예상된다.

라. 현장경보 기술을 과거 지진에 적용하기 위해 첫 두 관측소 정보를 이용하여 반경 45km에 경보를 발령할 경우 약 14km의 현장경보 공백역이 발생하며, 이로부터 현 기상청의 네트워크 경보가 가진 35km의 공백역을 줄여줄 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 지진현장경보를 운영하기 위한 기술 가운데 관측된 P파 정보들로부터 PGV를 예측하기 위한 분석 기술에 국한된다. 제시된 성과를 이용하면 진앙지 인근의 경보 공백역을 줄여 지진 경보에 대한 골든타임을 추가적으로 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 다만, 본 연구 성과가 효과적으로 사용되기 위해서는 탐지된 지진신호에 대한 정확한 오탐지 제어가 선행되어야 한다. 특히 P파의 초동은 자동차 진동, 사람의 발걸음 등 생활 진동과 유사하여 지진에 따른 진동과 이들을 구분하기 위한 탐지기술이 개발되고 순수한 P파가 관측될 때 예측기술의 성공적인 적용이 가능해진다. 또한, 예측기술 고도화를 위해서는 중진 이상의 지진으로부터 진도 V 이상의 지진기록을 확보하여 경보대상 구간에서의 예측식 정확도를 높일 필요도 있다. 완성된 지진 현장경보기술을 활용하면 진앙 인근의 치명적 인명 피해를 효과적으로 회피할 수 있으며, 경보 신호를 방재시스템에 연동할 경우 2차 재해를 예방하는 부가적인 사회가치 창출의 기회를 부여할 수도 있을 것으로도 예상된다. 즉, 진동이 도착하기 전에 가스를 차단하거나 위험물 공급을 중단하는 등 화재나 폭발을 예방하기 위한 추가적인 기능의 적용이 가능해진다.

Acknowledgement

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

References

- [1] Caruso, A., Colombelli, S., Elia L., Picozzi M., Zollo A. (2017). "An on-site alert level early warning system for Italy." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, pp. 2106-2118, doi:10.1002/2016JB013403.
- [2] Colombelli, S., Caruso, A., Zollo, A., Festa, G., Kanamori, H. (2015). "A P wave-based, on-site method for earthquake early warning." *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 5, pp. 1390-1398.
- [3] Hwang, E.H. (2018). "Analytical performance and realtime operation result of earthquake early warning system in Korea." *Proceeding of International Seminar on Earthquake Policy Development*, pp.229-241.
- [4] Jennifer, A.S., Richard, M.A. (2016). "Benefits and costs of earthquake early warning." *Seismological Research Letters*, Vol. 87, No. 3, pp.765-772, doi: 10.1785/0220150149.
- [5] Kanamori, H. (2005). "Real-time seismology and earthquake damage mitigation." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 33, pp. 195-214.
- [6] Lee, H.J., Jeon, I., Seo, J.B., Lee, J.K. (2018). "Application of the onsite earthquake early warning technology using the seismic P-wave in Korea." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 14, No. 4, pp. 440-449. doi: 10.15683/kosdi.2018.12.31.440.
- [7] Lee, H.J., Jeon, I, Seo, J.B., Lee, J.K. (2020). "Application of the onsite EEW technology using the P-wave of

- seismic records in Korea.” *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 1, pp. 133-143, doi: 10.15683/kosdi.2020.3.31.133.
- [8] Lin, P.-Y. (2019). “A successful approach to earthquake early warning systems.” *Impact*, Vol. 2019, No. 9, pp. 18-20.
- [9] Lomax, A., Satriano, C., 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.
- [10] Meguro, K., Fujinawa, Y. (2007). *Earthquake Early Warning*. Todai Seisan Gijutu Institute, Japan.
- [11] Ministry of Public Safety and Security (2017). *Common Application of Seismic Design Standards*, Korea.
- [12] Ross, Z.E., Meier, M.A., Hauksson, E., Heaton, T.H. (2018). “Generalized seismic phase detection with deep learning.” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 108, No. 5A, pp. 2894-2901.
- [13] Seo, J.B. (2020). “Status and prospects of onsite earthquake early warning using machine learning.” *Information & Communications Magazine*, Vol. 37, No. 4, pp. 46-53.
- [14] Wu, B.R., Hsiao, N.C., Lin, P.Y., Hsu, T.Y., Chen, C.Y., Huang, S.K., Chiang, H.W. (2017). “An integrated earthquake early warning system and its performance at schools in Taiwan” *Journal of Seismology*, Vol. 21, pp. 165-180, doi: 10.1007/s10950-016-9595-3.
- [15] Wu, Y.M., 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.
- [16] Wu, Y.M., Kanamori, H. (2008). “Development of an earthquake early warning system using real-time strong motion signals.” *Sensors*, Vol. 8, pp.1-9.
- [17] Wu, Y.M., Shieh, J.T., Huang, W.T., Zhao, W.A. (2008). *Development of earthquake early warning system using initial P waves (II)*, Department of Geosciences, National Taiwan University, RG9902-0123, Central Weather Bureau, Taiwan.
- [18] Youn, S.M. (2020). “The impact of the government's earthquake disaster response capabilities and the legal and institutional appropriateness of the disaster management system on the operational performance of disaster management : Focused on fire officer’s consciousness.” *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol.16, No. 2, pp. 318-330.
- [19] Zhu, W., Beroza, G.C. (2019). “Phasenet: A deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method.” *Geophysical Journal International*, Vol. 216, No. 1, pp. 261-273.