

국내 지진관측기록의 P파를 이용한 지진현장경보기술 적용

Application of the Onsite EEW Technology Using the P-Wave of Seismic Records in Korea

이호준¹ · 전인찬^{2*} · 서정범³ · 이진구⁴HoJun Lee¹, Inchan Jeon^{2*}, JeongBeom Seo³, JinKoo 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 predictive empirical equation for PGV prediction from P-wave using earthquake records in Korea and to verify the reliability of Onsite EEW. **Method:** The noise of P wave is removed from the observations of 627 seismic events in Korea to derive an empirical equation with PGV on the base rock, and reliability of Onsite alarms is verified from comparing PGV's predictions and observations through simulation using the empirical equation. **Result:** P-waves were extracted using the Filter Picker from earthquake observation records that eliminated noises, a linear regression with PGV was used to derive a predictive empirical equation for Onsite EEW. Through the on-site warning simulation we could get a success rate of 80% within the $MMI \pm 1$ error range above $MMI IV$ or higher. **Conclusion:** Through this study, the design feasibility and performance of Onsite EEWS using domestic earthquake records were verified. In order to increase validity, additional medium-sized seismic observations from abroad are required, the mis-detection of P waves is controlled, and the effect of seismic amplification on the surface is required.

Keywords: Onsite EEW, P-wave, PGV, MMI, PGV Amplification, P-wave Noise

요약

연구목적: 본 연구는 국내에서 발생한 지진관측기록의 P파 성분으로부터 PGV를 예측하기 위한 예측식을 도출하고 지진현장경보(Onsite EEW)신뢰성을 검증함을 목적으로 한다. **연구방법:** 국내에서 발생한 627개 지진 이벤트에 대한 관측기록으로부터 P파 외의 잡음을 제거하여 기반암에서의 PGV와의 예측식을 도출하고, 이를 이용한 지진현장경보 시뮬레이션을 통해 PGV의 예측치와 관측치 비교로부터 신뢰성을 검증한다. **연구결과:** P파 잡음을 제거한 지진 관측기록으로부터 Filter Picker를 사용하여 P파를 추출하고, PGV와의 회귀분석을 통해 지진현장경보를 위한 예측식을 도출했다. 현장경보 시뮬레이션 결과 경보대상 구간인 $MMI IV$ 이상 구간에서 $MMI \pm 1$ 오차범위 내 80%의 성공률을 얻었다. **결론:** 본 연구를 통해 국내 지진기록을 이용한 지진현장경보의 설계 가능성과 성능을 확인하였다. 유효성을 높이기 위해, 해외 지진다발지역의 중규모지진의 관측기록을 분석기록으로 추가하고, 오답지 제어 및 지표에서의 지진파 증폭에 효과 구현이 필요하다.

핵심용어: 지진현장경보, P파, 지반최대속도, 진도, PGV 증폭, P파 잡음

Received | 9 December, 2019

Revised | 26 December, 2019

Accepted | 25 March, 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 any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

개요

6.0 이하의 중규모 지진이 우세한 한국의 지진발생 환경을 고려할 때 대부분의 피해는 진앙지에 집중된다. 사회 인프라와 건축물 및 부속된 시설에 대한 내진화는 지진 피해를 줄일 수 있는 중요한 대책이지만, 강한 진동의 5초 전 지진조기경보가 발령되는 경우 인명피해는 사망 100%의 확률이 20%로 대폭 감소하는 효과가 있고, 근거리 대피가 가능한 것으로도 알려져 있다(Meguro et al., 2007). Lee et al.(2019)이 조사한 신문기사들에서도 신속한 경보에 대한 국민들의 관심과 요구가 나타난다. 최근 기상청은 지진조기경보기술을 이용하여 규모 5.0 이상의 지진에 대해 P파 첫 관측 후 7~25초 내에 경보를 발령할 수 있음을 발표하였다. 지진조기경보를 위한 국내 지진관측소 설치 밀도를 평균 20km, S파의 전파속도 3.5km/sec을 고려할 때, 첫 관측에 걸리는 시간이 평균적으로 약 3초, 분석 소요 시간 최소 7초이므로 약 35km의 경보 공백이 발생할 수 있다. Zhao et al.(2006)의 감쇠식을 이용할 경우, 규모 6.0의 지진으로 인해 진앙거리 35km 지역의 MMI는 V로 추정되고, 그 내측 지역은 피해가 집중될 수 있어 보다 신속한 지진경보를 필요로 하게 되는데, 지진현장경보는 이를 보완할 수 있는 수단이 된다. 다만, 진앙지 인근에서 단일 관측소 또는 최소 관측소 정보만으로 관측 지점의 최대 진도를 예측하는 기술인 지진현장경보는 현재 기상청이 운영하고 있는 지진조기경보와 비교하여 극소수의 관측소 정보를 사용하기 때문에 상대적으로 정확성은 낮다. 그러나 P파 관측 후 3초 정도의 짧은 시간에 수요자 맞춤형의 경보를 제공할 수 있다는 강점이 있다.

Colombelli et al.(2015)은 과거 일본 동북지방에서 발생한 규모 7.0 이상의 강진 기록을 분석하여 P파 성분 즉, 변위, 속도 및 가속도의 수직방향 최대진폭과 PGV 사이의 예측식을 제시하였다. 이 식을 이용하여 본 연구의 선행연구로 Lee et al.(2018)은 국내에서 발생한 단일 지진관측기로부터 P파 변위, 속도 및 가속도의 최대진폭을 추출하여 PGV를 추정하는 지진현장경보 기법을 소개하였다. 그 결과 국내 지진기록을 이용하여 경보의 가능성을 확인하였다. Colombelli et al.(2015)이 분석에 이용한 일본 동북지방의 과거 지진이 암반 파괴면이 넓고 파괴양상의 불균질성이 강한테 비하여, 한국의 중약진은 소규모 점 지진으로 단순한 거동을 나타낸다. 이에 국내 지진환경에 적합한 현장경보를 위해서는 P파를 탐지하는 시간창(time window)를 1.5~2초를 선택함을 선행연구에서 규명한 바 있다.

본 연구에서는 국내에서 과거에 발생한 627개 지진 이벤트에 대한 관측기록의 P파 성분과 PGV의 관계를 분석하였다. 이를 위해 관측기록으로 부터 잡음을 제거하고, 지표 토양층에서의 PGV 증폭을 제거하여 기반암에서의 기록으로 보정하여 순수한 지진기록을 추출하기 위한 필터링을 수행하였으며, 이로부터 국내형 지진현장경보를 위한 예측식을 도출하였다. 또한, 도출된 예측식과 Colombelli et al.(2015)의 예측식을 이용한 현장경보 시뮬레이션을 통해 경보의 신뢰성을 비교 분석하였다.

국내형 지진현장경보를 위한 경험식 도출

국내형 지진현장경보를 위한 경험식 도출

현장경보를 위한 P파 속성과 PGV 사이의 예측식 도출을 위한 첫 단계 연구로 과거 국내에서 발생한 기상청의 지진기록을 수집하여 파형 데이터를 가공하였다. 분석에 사용된 지진 기록은 2015년 6월 16일부터 2019년 5월 17일까지 4년간 규모 2.0 이상의 총 627개 지진 이벤트(Fig. 1)로 전국의 관측소로부터 관측된 기록을 지진 규모별로 구분하면 Table 1과 같다. 기상청 등이 관리하는 전국 지진관측소의 속도계 및 가속도계에서 동기간 관측된 지진 기록이 분석에 사용되었으며, 각 지진 이벤트

마다 해당 시점에 운영 중인 모든 관측소의 채널 데이터를 탱크파일 형태로 저장하였다. 탱크 파일은 USGS에서 개발한 Earthworm프레임워크에서 사용하는 지진 데이터 저장 형식으로 tankplayer를 이용한다면 실시간 지진발생 당시와 유사한 환경에서 지진 시계열 데이터를 재현 할 수 있다. 탱크 데이터 내의 총 지진기록의 수는 37,254개 세트로 0.01초 간격으로 샘플링되었다.

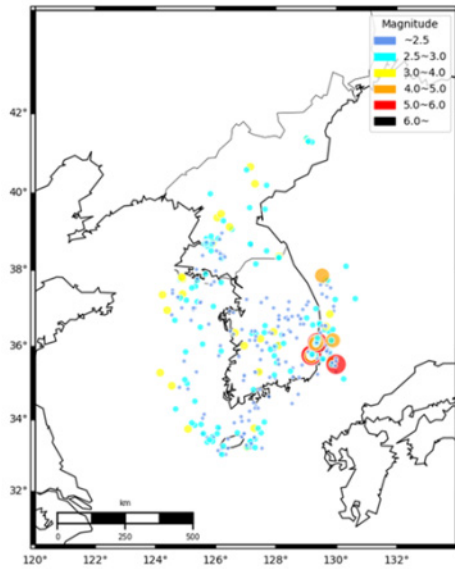


Fig. 1. Distribution of Seismic Events and their Magnitude(2015.6.16.~2019.5.17.)

Table 1. Dataset for Onsite EEW analysis

Earthquake Magnitude	No. of Event	No. of Records
2.0≤M<3.0	561	28,156
3.0≤M<4.0	57	4,179
4.0≤M<5.0	5	1,153
5.0≤M	4	747

P파 속성 및 PGV 추출

탱크파일로부터 P파를 인지하고 이를 추출하는 방법으로 Lomax et al.(2012)이 제안한 Filter Picker의 pick_FP모듈을 이용하여 과거 국내의 규모 3.5 이상 12개 이벤트가 시범 적용된 바 있다(Lee et al., 2018). 본 연구에서는 이 모듈을 확장 개선하여 P파 도달 이후 최대 4초 구간까지 샘플단위의 탱크파일에 저장된 각 데이터 셋으로부터 P파 속성값을 자동 추출할 수 있도록 변형하였다. P파의 속성은 기존 연구에서 파악한 P파의 가속도, 속도 및 변위의 최대 진폭에 더하여 시간에 따라 연속적으로 연결되어 있는 지진기록으로부터 P파를 감지하기 위한 특성함수를 포함한다. 또한, Wu et al.(2005)이 제안한 P파의 평균주기 τ_c 를 계산하여 출력하는 기능도 추가하였다. 시간 순으로 나열된 전체 관측 레코드들로부터 P파를 식별하고 P파의 속성값들과 PGV를 추출하는 일련의 작업은 본 연구에서 개선된 Filter Picker를 이용하여 단일 시뮬레이션을 통해 이루어지

게 된다. 향후 지진 기록이 늘어나게 되더라도 이를 자동적으로 처리할 수 있는 환경을 마련하였으며, 이는 지진현장정보에도 역시 사용될 수 있도록 조정되었다.

관측기록 내 잡음 제거

지진현장정보는 해당 지점의 P파 최대 진폭과 PGV의 관계로부터 최대 진동을 예측하게 되며, 이를 위해서 두 변수 사이의 상관관계에 대한 예측식을 사용한다. Table 1의 국내 지진기록을 개선된 Filter Picker를 사용하여 P파 최대 진폭과 각 관측소에서의 PGV를 추출하고, 두 값 사이의 예측식을 도출하기 위해서는 먼저 관측기록 내 잡음을 식별 분류 및 균질화 과정이 필요하다. 실제로, 관측 기록 내에 P파로 인식되는 데이터 성분에는 여러 잡음과 불균질성이 혼입되어 있다. Fig. 2의 좌측 그래프는 각 관측점에서의 P파의 최대변위 $\log P_d$ 와 최대지반속도인 $\log PGV$ 값의 관계를 나타내는데, 선형회귀를 위해서는 데이터들이 선형 분포를 보여야 하지만 정량적인 측정을 수행하지 않더라도 혼입된 잡음에 의해 둥근 산포 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 우측 그래프는 원시데이터를 선형 회귀 분석하여 얻은 예측식을 통해 $\log P_d$ 에 대한 $\log PGV$ 의 예측치와 관측치를 비교한 결과이다. 비교 결과 역시 광범위한 산포를 보이고 있어 잡음과 불균질성이 다량 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 문제해결을 위해 원시 데이터의 보정을 수행하였으며, Fig. 2의 그래프 상에서 나타나는 이상치들을 수작업으로 확인하고 포함된 잡음의 성격과 불균질성을 크게 이하의 4가지 종류로 분류하여 제거하였다.

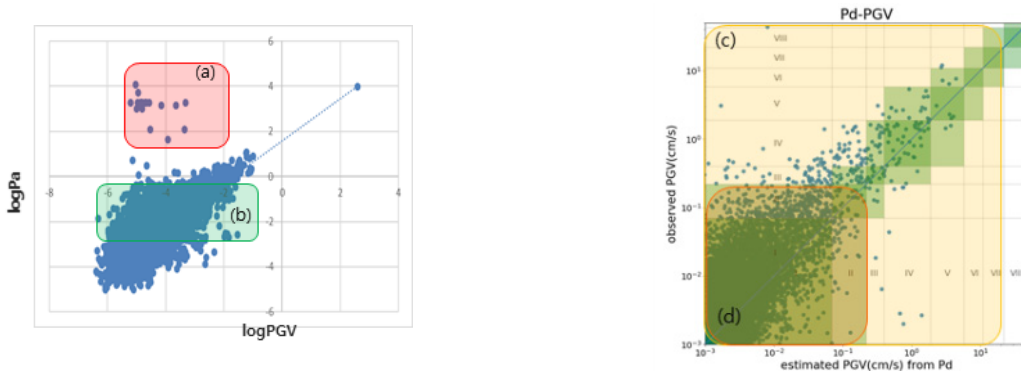


Fig. 2. Elimination of Noises and VS30 Correction

진앙거리가 먼 관측기록의 제거

현장정보가 유용하게 활용되는 지역은 진앙 인근에 한정되어 있다. 또한, 지진파가 진앙으로부터 원거리에서 크게 감쇠되어 순수한 지진의 영향은 사라질 수 있다. Gu et al.(2018)에 따르면 2016년 경주지진의 가속도 응답스펙트럼에서 구한 탁월 주기는 약 0.05~0.14초로 극단주기가 지배적이며, 이는 국내 지진의 대표적인 특성으로서 단주기 파동은 원거리를 전파하는 과정에서 감쇠되어 사라지고, 관측소의 혼입된 백색 잡음 등과 미소한 지진파의 구분이 어려워진다. 관측기록에서 이러한 잡음들은 주로 Fig. 2(a) 영역에 나타나는 것을 확인하였으며, 진앙거리 150km 이상의 지역은 현장정보 대상지역이 아니며, 미세한 작은 진동이 우세하기 때문에 관측기록에서 배제하였다.

지반에서의 장주기성 진동 제거

진앙거리 150km 이하의 지역에서는 지반 내 진동이 혼입되어 P파로 오탐지되고 있음을 확인하였다. 이러한 데이터들은 Fig. 2(b)영역에 주로 분포하고 있으며, Table 1의 관측기록으로부터 이러한 잡음을 식별하기 위한 방법으로 본 연구에서는 P파의 평균주기 τ_c 와 지진 규모 M의 관계를 이용하였다. Wu et al.(2005)에 따르면 지진의 슬립 운동은 복잡한 양상을 보이는데 P파의 초동이 짧은 주기의 운동으로 시작되더라도 긴 주기의 파동이 따라올 수 있기 때문에 지진의 규모를 결정하기 위해서는 그 평균주기를 파악함이 중요함을 강조하였다. 지진의 크기를 결정하기 위해서는 해당 이벤트의 슬립 운동이 중단되었는지 아니면 지속되고 있는지를 파악하는 것이 중요하며, 이는 지진 P파의 평균주기와 관련지어 설명할 수 있다. 이러한 물성에 따라 Wu et al.(2008)은 P파의 평균주기 τ_c 를

$$\tau_c = \frac{2\pi}{\sqrt{r}} \quad (1)$$

$$r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt} \quad (2)$$

로 제시하였다. 여기서, $u(t)$ 는 지진동의 연직방향 변위, $\dot{u}(t)$ 는 연직방향 속도를 나타내며 τ_0 는 시간으로 약 3초를 사용한 다. 그들은 일본 및 캘리포니아에서 발생한 규모 4~8의 지진으로부터 P파의 평균주기 τ_c 와 지진 규모 M의 관계를 제시하였다. 본 연구에서는 관측기록으로부터 개선된 Filter Picker를 이용하여 지진기록으로부터 이벤트 당 3초간 평균주기 τ_c 를 식 (3)과 같이 도출하였다.

$$\log \tau_c = 0.2438 (\pm 0.0069) M - 1.3739 (\pm 0.0178) \pm 0.0723 \quad (3)$$

이와 같이 P파의 평균주기 τ_c 와 지진 규모 M은 비례관계에 있으며, P파의 주기가 길수록 지진 규모가 커지는 것을 알 수 있다. 식 (3)을 이용하여 원시 데이터로부터 P파의 잡음을 식별하기 위해 P파 평균 주기와 표준편차의 합을 초과하는 진동을 잡음으로 간주하여 제거하였다. 제거된 기록들은 진앙거리가 비교적 먼 곳의 기록으로 단주기 지진파 성분들은 감쇠되어 사라진 대신 장주기 잡음들이 P파로 오탐지된 것으로 판단된다. 이들은 피해를 동반하는 지진현장정보발령 기준과 비교하여 상대적으로 작은 운동을 보이는 구간의 값들이기 때문에 무시할 수 있을 것으로 예상된다.

지표 인근 토양에서의 PGV 보정

Table 1의 관측기록은 시추공을 통해 기반암에 설치되어 기반암에서의 지진파 거동을 관측하는 경우와, 지표면에 설치되어 기반암으로부터 토양에서의 증폭 효과를 포함하고 있는 기록들이 혼재되어 있어 관측된 PGV는 지진파 증폭에 관한 보정을 필요로 한다. USGS의 ShakeMap(Worden et al., 2016)은 지반에서의 지진파거동을 증폭 또는 감쇠시키기 위한 방법으로 평균 전단파 속도(VS30)값을 사용하여 지표면 부근 증폭의 효과를 제거하고 기반암 조건에서 균일한 격자에 보간하는

Borcherdt(1994)의 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 이와 같은 방법을 적용하여 지표면에 위치하고 있는 기상청 관측소에서 얻은 PGV값을 보통암으로 하향 보정하여 감쇠될 수 있도록 관측기록의 보정을 수행하였다. 즉, 지표면으로부터 기반암으로의 PGV 감쇠 계수 $F_v(v)$ 를 지표 관측소의 평균 전단파 속도를 이용하여 식 (4)로 추정할 수 있다.

$$F_v(v) = (v_0/v)^{m_v} \quad (4)$$

여기서, v 는 토층에서의 평균전단파 속도(VS30), v_0 는 보통암 부지 상부 30m에 대한 평균전단파 속도로 1,000m/sec을 사용하였다. m_v 는 입력되는 지반운동레벨에 따라 0.45에서 0.65까지 변화한다. Borcherdt(1994)는 지반의 운동레벨 즉, PGA 구간에 따라 m_v 를 부여하였으며, 보정을 수행함에 있어서는 이를 선형으로 구간 내삽한 값을 수식에 반영하였다. 이 방법을 Fig. 2(c) 모든 관측된 지진파의 PGV 값 가운데 지표면에 위치한 관측소 기록들에 적용하여 기반암에서의 값으로 감쇠 보정되었고, 기반암에서의 P파와 PGV 사이의 예측식을 회귀할 수 있도록 하였다.

낮은 PGV의 관측기록 제거

지진현장경보를 활용하는 경우는 정도 높은 정량적 지진크기 예측보다는 수요자에게 민감하거나 피해를 유발할 수 있는 지진의 발생을 사전에 파악하는데 의미가 있다. 또한 네트워크 방식의 지진조기경보를 발령함에 있어서도 사람이 느끼지 못하거나, 피해를 주지 않는 지진 또는 진도 대역에서는 경보를 발령하지 않는다. 따라서 Fig. 2(d) 영역에 해당하는 MMI 1.5이하 즉 PGV 0.023 이하의 지진 관측기록을 사전에 제거하였다.

P파 최대진폭과 PGV 사이의 예측식 도출

상기 2.3의 4 종류의 방법을 통해 총 37,254개 기록 가운데 잡음을 제거한 순수 지진 기록은 5,510개로 감소하였다. 이들 유효 기록을 이용하여 P파 감지한 이후 2초 시점에서의 P파의 수직방향 최대 변위(P_d), 속도(P_v) 및 가속도(P_a) 값과, 해당 관측소 기반암에서의 PGV 값을 각각 로그로 치환하여 두 값을 비교하였는데(Fig. 3), 잡음이 제거되고 균질화된 두 변수들 간의 상관은 선형성이 강함을 알 수 있다. 선형 회귀분석을 통해 식 (5)~(7)과 같이 $\log P_a$, $\log P_v$ 및 $\log P_d$ 값과 $\log PGV$ 사이의 예측식을 얻었다. 이는 Table 1의 국내 지진기록을 이용하여 도출한 P파와 PGV의 관계를 보여주는 예측식으로 규모 6이하의 중약진을 대상으로 도출한 결과이다. 예측식의 표준오차의 평균은 0.44로 Colombelli et al.(2015)에서 보인 0.52보다 작았으며, R^2 의 평균 역시 0.69로 그들의 0.55보다 선형적인 관계를 보였다.

$$\log PGV = 1.5297(\pm 0.0828) + 0.7944(\pm 0.0196)\log Pd, \text{ stdv} = 0.4294, R^2 = 0.6968 \quad (5)$$

$$\log PGV = 0.5404(\pm 0.0576) + 0.9343(\pm 0.0225)\log Pv, \text{ stdv} = 0.4218, R^2 = 0.7075 \quad (6)$$

$$\log PGV = -1.2503(\pm 0.0219) + 0.9563(\pm 0.0257)\log Pa, \text{ stdv} = 0.4548, R^2 = 0.6599 \quad (7)$$

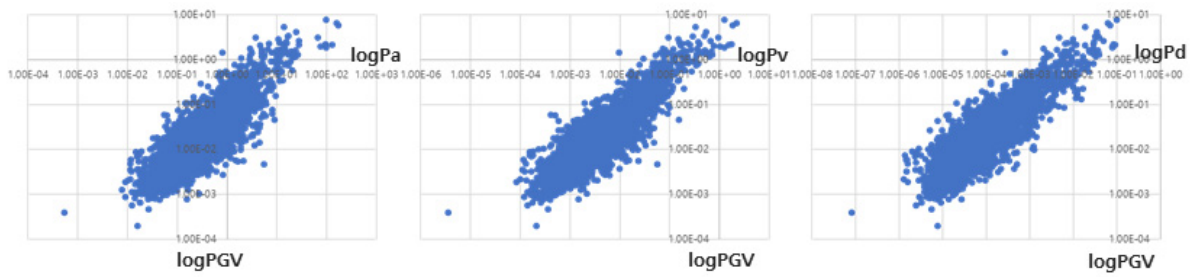


Fig. 3. Relation between P wave Properties(Pd, Pv and Pa) and PGV

Fig. 4에는 두 연구결과에서 도출된 예측식을 비교하였으며, Colombelli et al.(2015)의 결과를 실선으로, 본 연구의 결과를 점선으로 비교표시하였다. 직선의 분포는 본 연구의 예측 PGV가 다소 과소평가되고 있음을 알 수 있다. 이는 P파를 추출하는 시간창과 분석된 지진기록들의 규모의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, Colombelli et al.(2015)은 과거 일본 동북지방에서 발생했던 규모 7 이상의 강진을 분석한 결과로 P파를 추출한 시간창을 3초로 설정하고 있다. 그러나 규모 7 이상의 강진 경우 3초 시점에서는 P파가 완전히 성장하지 않기 때문에 실제보다 작은 P파 속성값과 PGV의 관계를 회귀했을 것으로 판단된다. 따라서 이 결과를 강진에 적용할 경우는 적합한 결과를 나타낼 수 있지만, 국내의 규모 6.0 이하의 지진현장 정보에 직접 활용할 경우 결과가 다소 과다 평가될 수 있음을 알 수 있다.

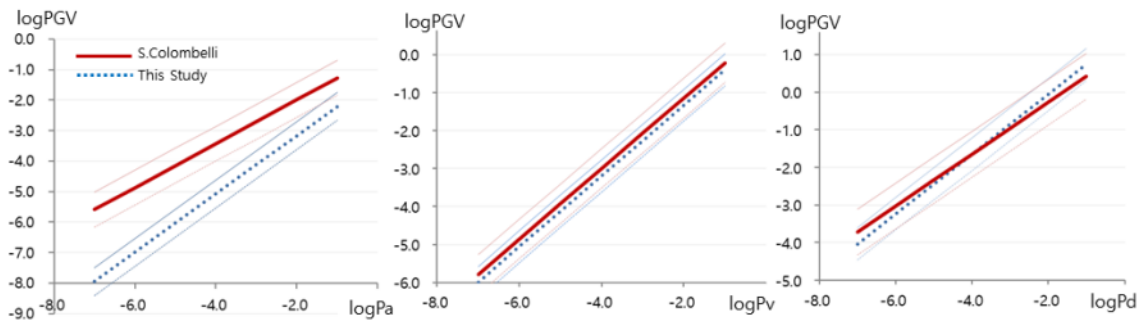


Fig. 4. Comparison of Regression Equation between this study and Colombelli et al.(2015)

현장정보 시뮬레이션

식 (5)~(7)의 예측식을 이용하여 P 파 속성값들로부터 PGV를 예측한 결과를 관측된 값과 서로 비교하였으며, 각 그래프의 축을 MMI 에 따라 진도등급으로 구분하고 예측된 값이 관측된 값과 진도 등급 사이에서 어느 정도 오차를 갖는지를 비교하였다. 실제 현장에서는 잡음이 탐지되는 경우가 많기 때문에 오탐지를 식별해 내는 별도의 수단이 없을 경우 모든 신호가 P 파로 인식될 수 있다. 따라서 실질적인 현장정보의 오차를 파악하기 위해 Table 1의 기록 가운데 지진현장정보가 유효한 진앙거리 80km 구간 내의 기록들을 선택하여 정보시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 Fig. 5의 좌측 그래프에는 본 연구 결과에서 도출된 예측식을, 우측 그래프는 Colombelli et al.(2015)가 제안한 예측식을 각각 사용하여 P_a , P_v 및 P_d 로부터 예측한 PGV와 관측치를 로그 스케일로 변환하여 비교, 도식화 하였다. 그래프의 짙은 음영은 해당 PGV의 MMI로 그 값을 그리스

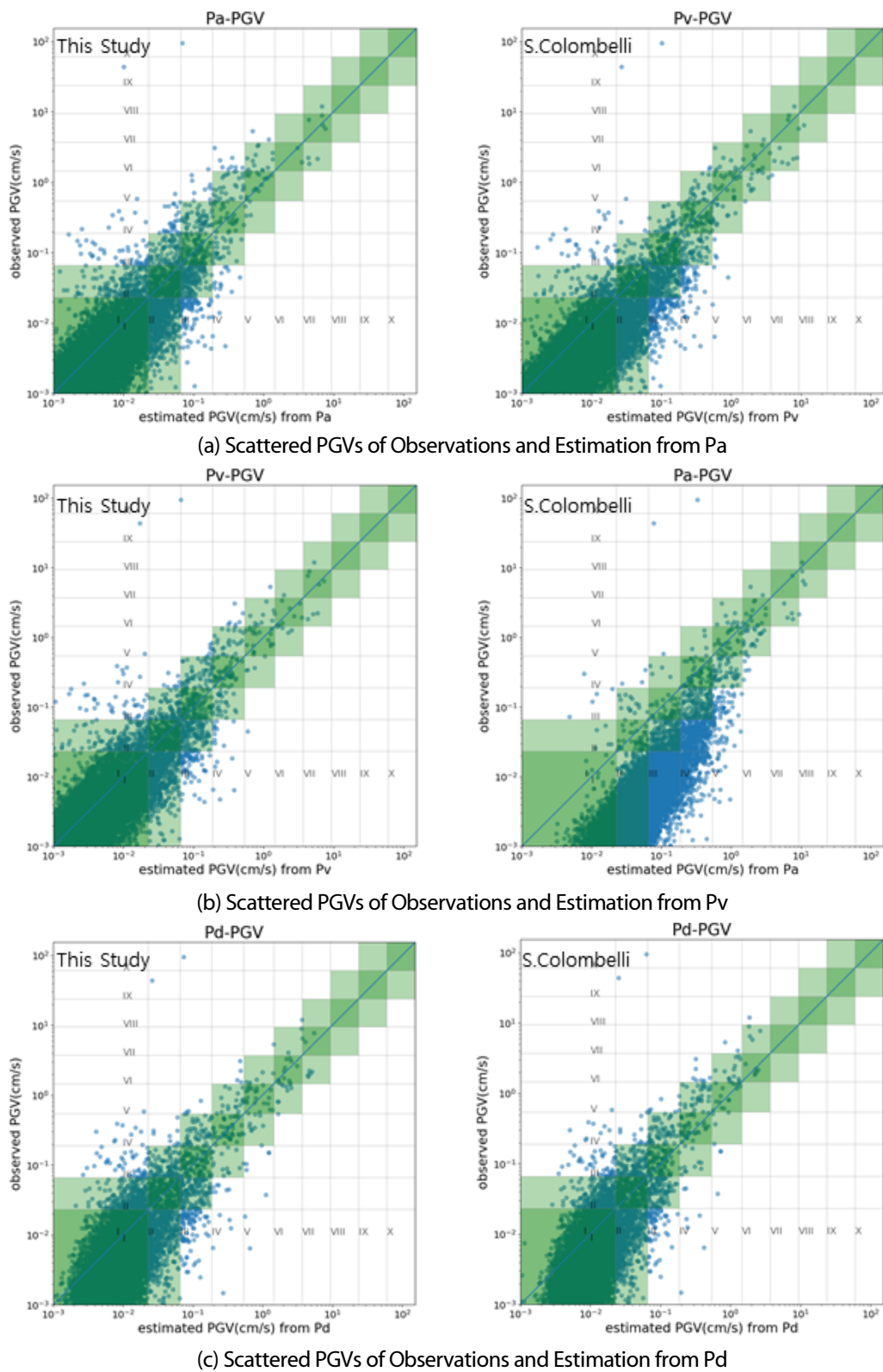


Fig. 5. Comparison of Observed and Estimated MMI using empirical equation from this study and S.Colombelli's

문자로 표기하였고, 옅은 음영은 MMI±1의 오차범위를 나타내었으며, 경보의 판정에 있어서는 음영 범위 안에 들어간 경우를 성공으로 판단하였다. 결과를 보면, 작은 지반 운동이 지배적인 MMI I 과 II대역에서는 다소 편향된 분포가 나타나지만, MMI가 증가하면서 점차 선형 분포를 보이고 성공적인 경보의 비율이 높아짐을 알 수 있다. 특히, Colombelli et al.(2015)의 식은 낮은 MMI 영역에서 과다하게 경보되는 경우가 많아 큰 오차를 보이는데, 이는 그들이 분석 대상으로 했던 지진 규모가 7.0 이상인 경우이기 때문인 것으로 판단된다. 반면, MMI IV 이상의 영역에서는 본 연구의 분석에 사용된 원시데이터 수가 절대 부족한 이유로 예측 정확성은 다소 떨어지고 있다. 시뮬레이션의 정확성을 평가하기 위해 본 연구와 Colombelli et al.(2015)에 의한 결과 중 MMI ±1 오차범위 내에서 경보의 성공과 실패 횟수를 측정하여 Table 2에 비교 제시했다.

비교 결과 모든 MMI 대역에 대한 성공률은 유사한 것으로 보이지만, 실제 경보가 필요한 MMI IV 이상의 대역에서는 P_a, P_v 의 경우는 Colombelli et al.(2015)의 결과가, P_d 의 경우는 본 연구결과가 양호했다. 본 연구에서 분석된 기록들의 약 90%가 규모 3 이하의 지진인 것을 고려하면 낮은 진도 대역에서 도출된 회귀식을 상향 외삽한 값이 예측치로 산출되는 결과이며, 비교 대상이 되는 데이터 수가 작기 때문에 경보 성공 확률의 정량적 평가는 유의미하지 않을 것으로 판단된다. 다만, 규모 4~6 구간 간의 중규모 지진에 대한 기록을 충분히 사용하지 않은 두 연구결과를 통해 해당 지진에 우세한 MMI 대역의 PGV를 예측하는 데는 양측의 결과에서 모두 한계를 보임을 알 수 있었다. 그러나 해당 진도대역에서 평균 80% 이상의 성공률 보이고 있고, P파 성분과 PGV의 관계가 선형성을 가지는 것이 확인한 바, 향후 일본 큐슈 등 국내 지진환경에 가까운 지역의 중규모 지진 지진 기록을 분석에 추가하여 각 MMI 대역 내 기록 수를 균질하게 보충하면 경보 성공률을 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

Table 2. Ratio of Successful Alarm in range of MMI ±1 error

(a) Ratio of Successful Alarm in case PGV estimated from P_a (Left : This study, Right : S.Colombelli)

MMI	False	Success	Total	Success Ratio	MMI	False	Success	Total	Success Ratio
1	79	11665	11744	99.33	1	2388	9356	11744	79.67
2	13	679	692	98.12	2	383	309	692	44.65
3	49	226	275	82.18	3	49	226	275	82.18
4	35	88	123	71.54	4	8	115	123	93.50
5	11	45	56	80.36	5	1	55	56	98.21
6	9	17	26	65.38	6	1	25	26	96.15
7	2	4	6	66.67	7	0	6	6	100.00
8	0	1	1	100.00	8	0	1	1	100.00
Total	198	12725	12923	98.47	Total	2830	10093	12923	78.10

(b) Ratio of Successful Alarm in case PGV estimated from P_v (Left : This study, Right : S.Colombelli)

MMI	False	Success	Total	Success Ratio	MMI	False	Success	Total	Success Ratio
1	67	11677	11744	99.43	1	186	11558	11744	98.42
2	12	680	692	98.27	2	47	645	692	93.21
3	38	237	275	86.18	3	29	246	275	89.45
4	16	107	123	86.99	4	10	113	123	91.87
5	7	49	56	87.50	5	2	54	56	96.43
6	6	20	26	76.92	6	2	24	26	92.31
7	1	5	6	83.33	7	0	6	6	100.00
8	0	1	1	100.00	8	0	1	1	100.00
Total	147	12776	12923	98.86	Total	276	12647	12923	97.86

Table 2. Ratio of Successful Alarm in range of MMI ± 1 error (Continue)

(c) Ratio of Successful Alarm in case PGV estimated from Pd (Left : This study, Right : S.Colombelli)

MMI	False	Success	Total	Success Ratio	MMI	False	Success	Total	Success Ratio
1	93	11651	11744	99.21	1	65	11679	11744	99.45
2	7	685	692	98.99	2	3	689	692	99.57
3	51	224	275	81.45	3	50	225	275	81.82
4	18	105	123	85.37	4	22	101	123	82.11
5	5	51	56	91.07	5	8	48	56	85.71
6	4	22	26	84.62	6	7	19	26	73.08
7	1	5	6	83.33	7	2	4	6	66.67
8	1	0	1	0.00	8	1	0	1	0.00
Total	180	12743	12923	98.61	Total	158	12765	12923	98.78

결론

중약진으로 인한 지진 피해가 진앙인근에 집중되는 것과, 피해지역의 MMI가 V 이상이 될 수 있음을 볼 때, 국내 지진환경에서 신뢰성 있는 수요자 중심의 맞춤형 지진현장정보는 피해를 줄일 수 있는 중요한 수단이 될 것으로 기대된다. 본 연구에서는 국내에서 지진현장정보를 수행하기 위한 예측 기술의 확보를 위해 4년간 발생한 규모 2 이상 627건의 과거 지진 기록을 이용하여 P파 변위, 속도 및 가속도의 수직방향 최대 진폭으로부터 PGV를 추정하기 위한 지진현장정보 예측식을 도출하였고, 이를 이용하여 현장정보 시뮬레이션을 수행하였다.

분석에 사용된 37,254개 관측 기록 가운데 90%를 차지하는 규모 1~3 지진에는 진도 2 이하의 지진파와 구분하기 어려운 진동들이 포함되어 있어 신뢰성 높은 예측식을 도출하기 위해 P파의 평균주기 τ_c 와 지진 규모의 관계를 이용하여 불필요한 저주파 성분을 제거하였다. 또한, 시추공과 지표면에서 관측된 PGV는 표층 토양에서의 지진파 증폭 효과를 제거하여 기반암에서의 값으로 치환함으로써 관측기록의 성격을 균질화 하였으며, 진앙으로부터 원거리의 기록과 MMI 1.5이하의 미진동 성분도 제외하였다. 잡음 제거와 균질화를 거친 지진관측기록을 이용하여 P파 성분들과 PGV에 관한 예측식을 도출했으며, 이를 통해 현장정보 모의 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 과거의 선행연구로서 Colombelli et al.(2015)가 도출한 예측식을 이용한 정보 시뮬레이션을 병행하였으며, 두 결과를 비교한 결과 정보 기준이 되는 MMI IV 이상의 대역에서 MMI ± 1 오차 범위 내에서 평균 80%의 신뢰성을 얻을 수 있었다. 이로서, 국내에서의 적용 가능성을 기존보다 향상시켰지만, 데이터 분석 과정에서 두 연구에서 모두 누락된 중약진의 관측기록의 부족은 PGV 또는 진도 예측의 신뢰성을 떨어뜨리는 주요한 요인이 되었음을 판단할 수 있었다.

단일 관측기를 사용한 지진현장정보는 태생적으로 신뢰성의 한계를 갖고 있으며, 정보 기준이 되는 PGV 또는 MMI 대역의 특성을 반영할 만큼 국내의 지진 관측기록은 충분하지 못하다. 이러한 환경에서 향후 현장정보의 실제 활용을 위해서는 일본 큐슈 지역 등 국내와 유사한 지진환경을 가진 지역에서 관측된 규모 4~6 사이의 중규모 지진기록들을 수집하여 분석에 더할 필요가 있다. 또한, 관측기록의 사후 분석이 아닌 실시간 현장정보에 있어서도 P파로 오탐지되어 포함된 많은 잡음들이 기술적 장치를 통해 제어될 필요가 있지만, 미동 내에서 고주파 성분만을 추출 또는 보정하기는 어려울 것으로 예상된다. 이에 대한 대책으로 분석에 사용될 관측기록 수를 늘려 기계학습이나 딥러닝 기술을 접목한다면 진앙지에서 먼 곳에서의 오탐지 확률을 크게 경감시킬 수 있을 것으로 기대된다. 수신자 중심의 정보를 위해서는 지표에서의 PGV를 예측하는 것이 타당

하다. 이를 위해 수요자가 지표에서 고품질의 관측 기록을 얻기 위한 관측기 운영 환경에 대한 기준이 필요하며, 시추공 관측소 내 지진 기록의 경우 지표에서 증폭된 값으로 상향 보정할 수 있는 국내에 적합한 기술개발 연구와 적용 또한 필요하다.

Acknowledgement

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

References

- [1] Borchardt, R.D. (1994). "Estimates of site-dependent response spectra for design (Methodology and Justification)." *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No. 4, pp. 617-654.
- [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] Gu, J.-Y., Yoon, M.-H. (2018). "A Study on the Energy Response Characteristics of Gyeong-Ju Earthquakes." *Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 2018, No. 4, pp. 89-93.
- [4] Lee, H.-J., Lee, J.-K., Jeon, I.-C. (2018). "Application of the Onsite Earthquake Early Warning Technology Using the Seismic P-Wave in Korea." *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, Vol. 14, No. 4, pp. 440-449.
- [5] Lee, Y., Jeon, H.-S., Lee, K., Min, B., Choi, Y.-S. (2019). "A Review on Disaster Response through Critical Discourse Analysis of Newspaper Articles - Focused on the November 2017 Pohang Earthquake." *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 2, pp. 223-238.
- [6] Meguro, K., Fujinawa, Y. (2007). *Earthquake Early Warning*. Todai Seisan Gijutu Institute(in Japanese), Japan.
- [7] Worden, C.B., Wald, D.J. (2016). *ShakeMap Manual Online: technical manual, user's guide, and software guide*. U. S. Geological Survey.
- [8] 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.
- [9] Wu, Y.-M., Kanamori, H. (2008). "Development of an Earthquake Early Warning System Using Real-Time Strong Motion Signals." *Sensors*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-9.
- [10] Zhao, X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Hong, K., Thio, Somerville, P., Fukushima, Y., Fukushima, Y. (2006). "Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp. 898-913.