

진원지 인근 지진 조기 경보를 위한 선착 P파 다중 탐지 시스템 개발

Development of Earthquake Early Warning System nearby Epicenter based on P-wave Multiple Detection

이태희¹, 노진석², 홍승서³, 김영석^{4*}

Taehee Lee¹, Jinseok Noh², Seungseo Hong³, YoungSeok Kim^{4*}

¹Member, Researcher, Future Infrastructure Research Center, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Gyeonggi-Do, 10223, Republic of Korea

²Research Director, Institute of Technology, Doit Co., LTD., 10-40, Hakhajungang-ro 127beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34210, Republic of Korea

³Member, Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Gyeonggi-Do, 10223, Republic of Korea

⁴Member, Research Fellow, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Gyeonggi-Do, 10223, Republic of Korea

ABSTRACT

In this paper, the P-wave multiple detection system for the fast and accurate earthquake early warning nearby the epicenter was developed. The developed systems were installed in five selected public buildings for the validation. During the monitoring, a magnitude 2.3 earthquake occurred in Pohang on 26 September 2019. P-wave initial detection algorithms were operated in three out of four systems installed in Pohang area and recorded as seismic events. At the nearest station, 5.5 km from the epicenter, P-wave signal was detected 1.2 seconds after the earthquake, and S-wave was reached 1.02 seconds after the P-wave reached, providing some alarm time. The maximum accelerations recorded in three different stations were 6.28 gal, 6.1 gal, and 5.3 gal, respectively. The alarm algorithm did not work, due to the high threshold of the maximum ground acceleration (25.1 gal) to operate it. If continuous monitoring and analysis are to be carried out in the future, the developed system could use a highly effective earthquake warning system suitable for the domestic situation.

요 지

본 논문에서는 진원지 주변에서 빠르고 정확한 지진 조기 경보를 수행하기 위한 선착 P파 다중 탐지 시스템과 이를 구동하기 위한 지진과 초동 탐지 및 경보 알고리즘을 개발하였다. 공용 중인 5개소(포항지역 4개소)의 건축물을 선정하여 개발한 계측 시스템을 설치하였고, 지반 진동을 실시간 모니터링하며 실증시험을 진행하였다. 실증 모니터링 중 2019년 9월 26일 포항 지역에서 규모 2.3의 지진이 발생하였다. 포항지역에 설치된 총 4개소의 시스템 중 3개소에서 P파 초동 탐지 알고리즘이 작동되어 지진동 이벤트로 기록되었다. 진원지로부터 5.5 km로 가장 가까운 계측소는 지진 발생 후 1.2초 후 P파 초동이 감지되었으며, P파 도달 후 약 1.02초 후 S파가 도달하여 다소의 경보시간을 제공해주었다. P파가 탐지된 3곳의 최대 가속도는 각각 6.28gal, 6.1gal, 5.3gal로 기록되었으며, 이벤트 경보 발령을 위한 최대 지반 가속도의 임계값(25.1gal)을 초과하지 않아 경보 알고리즘이 작동하지 않았다. 향후 지속적인 모니터링 및 분석을 통해 추가 검증이 이루어진다면 국내 실정에 맞는 실효성 높은 지진 경보 시스템으로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Earthquake, Early warning, P-wave, Auto picking algorithm, MEMS sensor

Received 12 Nov. 2019, Revised 25 Nov. 2019, Accepted 26 Nov. 2019

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0371; Fax: +82-31-910-0561

E-mail address: kimys@kict.re.kr (Y. Kim)

1. 서론

대부분의 큰 지진은 판의 경계부에서 주로 발생한다고 알려져 있으며, 판의 경계 내부에 위치하고 있는 우리나라는 지진 활동이 비교적 드물고 발생 규모도 크지 않을 것으로 여겨졌다. 그러나 지난 2016년 9월 경주에서 규모 5.8의 지진이 발생하는데 이어 2017년 11월에는 포항에서도 규모 5.4의 지진이 발생하고, 이듬해 2월 규모 4.6의 여진이 이어지며 강진 발생에 대한 불안이 고조되었다. 또한 국내에서 디지털 관측을 시작한 1999년이래로 2018년까지 기록된 규모 2.0이상의 지진은 연평균 70회였지만, 최근 3년(2016년~2018년)간의 기록은 연평균 약 197회에 이르며 지진 발생 빈도가 2.8배가량 급격히 증가하였다. 이전과 다른 활발한 지진활동으로 인하여 보다 고도화된 지진 대응방안이 요구되고 있다.

지진에 대응하기 위해 지진이 언제 어디에서 어느 정도의 규모로 발생할지 정확히 예측하는 것은 현재 불가능에 가까운 일이다. 이미 발생한 지진을 매우 빠르게 감지하여 유해한 지진파 성분이 도심지에 도달하기 전에 일반시민과 관계기관에게 미리 알려 대피 혹은 대응할 수 있는 시간을 제공하는 것이 현재의 지진 대응 기술의 핵심이다. 몇 초에서 몇 분 만에 막대한 피해를 주는 지진을 몇 초 전이라도 사전 인지할 수 있다면 피해를 크게 저감시킬 수 있기 때문에 지진 조기 경보에 대한 연구는 지속적으로 수행되고 있다.

지진 조기 경보(Earthquake Early Warning, EEW)의 개념은 1868년 San Francisco Bay 동쪽의 Hayward 단층에서 지진이 발생한 이후 제안되었다. Cooper(1868)는 지진 진동을 감지하면 전신 케이블(Telegraph cables)을 통하여 도시로 신호를 전달한 후 특정 종소리를 울려 알리는 경보 시스템을 고안하였다. 이 방식은 당시에는 구현되지 못하였지만, 강한 지반 진동을 감지하여 지진 에너지보다 먼저 도시에 신호를 전달한다는 지진 조기 경보의 기초 개념을 제공하였다. 이후 약 100년이 지난 후 1960년대 일본에서 철도 궤도를 따라 지진계를 배치하여 지반 진동의 강도가 일정치를 초과하면 열차의 전원이 자동으로 차단되는 시스템을 개발하면서 지진 조기 경보 시스템이 현실화되기 시작하였다. Nakamura(1984)는 해상에서 발생하는 대규모 지진을 미리 파악 할 수 있도록 해안을 따라 지진계를 배치하여 관측 네트워크를 형성하면 내륙 주요 도시에서 추가적인 경고 시간을 얻을 수 있을 것으로 발표하였다.

멕시코에서 SAS(Seismic Alert System)라는 이름으로 최초로 적용되었고, 해안을 따라 설치한 계측기로부터 멕시코시티로 향하는 지진파를 감지하여 60초 이내의 경보신호를 지속적으로 제공하고 있다(Espinosa-Aranda et al., 1995).

그러나, 지진에 의한 강한 지반 진동을 감지하여 지진 경보를 제공하는 방식은 지진을 감지한 관측소 주변이 이미 사전 경보 없이 강한 지반 진동을 겪는 상태이므로 지진을 사전 경보 할 수 없는 큰 영역(Blind zone)이 필연적으로 발생한다는 근본적인 문제를 가지고 있다. 이 영역을 최소화하기 위한 방안으로 P파 정보를 이용하여 목표 지역의 지진 진도를 예측하고 경보하는 방식이 제안되었다(Nakamura, 1988). 강한 지반 진동은 일반적으로 S파 도달 시점 또는 그 이후에 발생하므로 P파를 이용하여 경고하면 경고 시간을 늘리고 불감지대(Blind zone)의 반경을 줄여 잠재적으로 진원지 인근에서도 다소의 경보 시간을 기대할 수 있게 된다.

국내의 지진은 해상에서 발생한 대규모 지진이 내륙으로 전파되는 지진 다발 국가의 지진 발생 양상과 다르며, 내륙의 임의의 지점에서 지진이 발생하여 주요 도시 저부를 직접 타격하거나 발생 후 수초 내에 주요 도시로 전파되는 양상을 보인다. 특히 남부 해안지대에는 원전 등과 같은 주요 국가 기반 시설이 밀집되어 있기 때문에 진원지 인근에서도 빠르고 정확한 조기 경보 시스템이 필요한 상태이다. 기존 방식을 채용하여 다수의 지진 관측소로 구성된 관측 망에서 얻은 많은 데이터를 분석한 후 지진 경보를 제공하면, 대응을 위한 경보 시간을 제공하지 못할 가능성이 있다. 실제 지난 경주 및 포항 지진 시 발생 지역에서 반경 100km 이내는 긴급 경보를 받기 전, S파가 먼저 도달하여 지진에 대비할 수 없는 상태가 되기도 하였다. 반면 단일 관측점으로 P파를 탐지하면 빠르게 지진 경보를 결정할 수 있지만, 부정확한 알람을 줄 수 있어 주의를 기울여야 한다. 따라서 국내 실정을 고려했을 때, 다수의 관측소를 이용한 기존 지진 경보 시스템에서 경보의 속도 증진을 달성하거나, 혹은 지진 감지 기술의 고도화를 통하여 소수의 관측소에서도 양질의 지진 경보를 제공할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 단일 관측점에서도 빠르고 신뢰할 수 있는 지진 조기 경보를 제공하기 위한 알고리즘과 시스템을 개발하였다. 개발한 알고리즘과 시스템의 성능을 검증하기 위하여 5개의 공용 건축물을 실험 대상으로 선정하였

다. 2019년 9월 26일 포항 지역에서 발생한 규모 2.3의 지진 정보를 바탕으로 현장에 설치한 계측 시스템에 대한 시험 운영을 실시하여 결과를 분석하였다.

2. 지진 사전 경보 알고리즘

단일 관측점에서 양질의 지진 경보 제공하기 위해서는 안정적인 진동 계측 시스템과 정확하고 간결하게 데이터 처리할 수 있는 알고리즘이 동시에 필요하다. 본 연구에서는 지진 및 지진동에 대한 상시 모니터링을 수행하면서 동시에 실시간 분석하여 지진파 도달 여부를 파악하고, 최종적으로 경보를 할지 여부를 결정할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다. 본 연구에서 개발한 지진 사전 경보 알고리즘의 흐름은 Fig. 1과 같다. 우선 지진 사전 경보를 위한 모든 계측 장치의 구성 및 설정을 완료(Start → Device Configuration → Connect to device? → Y → Measurement Configuration → Measurement Start → Configuration Measurement?)하면 실시간 모니터링(Operating)을 시작한다. 실시간 모니터링 데이터는 즉각 분석되어 지진동이 발생했다고 판단되면 이벤트 트리거(Event trigger? → Y)가 작동하여 이벤트 데이터로 저장된다. 저장된 이벤트 데이터는 재분석되며 다시 경보 수위를 결정하기 위해 사용된다. 즉, 실시간 모니터링 중 1) 지진파 초동 탐지, 2) 경보 신호 결정을 위한 세부 데이터 처리과정을 거친다.

2.1 지진 초동 탐지 알고리즘

이상 징후에 대한 판단을 위한 자료처리는 그 과정의 구조적 복잡성으로 인해 해당 분야의 전문가가 아닌 경우에는 수행하기 어렵다. 하지만 지진 사전 경보 시스템을

완성하기 위해서는 실시간 자료 처리를 통해 이상 징후를 포착하는 것이 필수적이다. 이를 위해 P파 사전 경보 알고리즘을 개발하여 복잡한 분석 과정을 자동으로 처리함으로써 신속하게 결과를 도출할 수 있도록 하였다. 이벤트 감지를 위해서는 각 신호의 초동을 정확히 획득해야 하며, 이를 실시간으로 처리하기 위해 자동 피킹(Auto-picking) 과정이 요구된다. 본 연구에서는 STA/LTA(Short Term Average/Long Term Average) 알고리즘으로 자동 피킹을 구현하여 이벤트 신호에 대한 초동을 획득하고, 이를 Amplitude 트리거 및 조기경보 트리거 알고리즘 기법에 적용함으로써 감지한 이벤트의 사전경보 여부를 처리할 수 있게 하였다.

Auto Picking 알고리즘(STA/LTA)을 통한 지진 신호의 자동 감지는 지진자료 처리에서 가장 중요한 단계 가운데 하나이다. 효과적인 자동 감지를 통하여 올바른 지진 발생 기록을 확인할 수 있으며, 후속 자료 처리 과정을 원활하게 한다. 기본적으로 지진 신호 발생을 선언하는 것은 그 이후의 자료를 필요로 하지 않는 어떤 실시간 알고리즘을 사용해도 가능하다. 그러므로 재귀필터를 이용하는 방법이나 파소 변환을 이용하는 방법들은 단순한 STA/LTA 방법보다 정확할 수는 있어도 지진조기경보에는 적절하지 않다. 이러한 이유로 현장조기경보 알고리즘 개발을 위하여 STA/LTA 방법을 채택하였다. STA/LTA 방법의 기본 원리는 연속적인 지진파형의 진폭에 대하여 각각 단기 평균(Short-term average)과 장기 평균(Long-term average) 이동 시간영역을 이용하여 지진 신호를 처리하는 것이다. STA는 신호의 순간 진폭을 측정하여 지진 발생을 감시하기 위하여 사용된다. LTA는 연속적인 지진파형의 잡음수준을 다루기 위하여 사용된다. STA/LTA는 다음과 같은 식을 이용하여 계산된다.

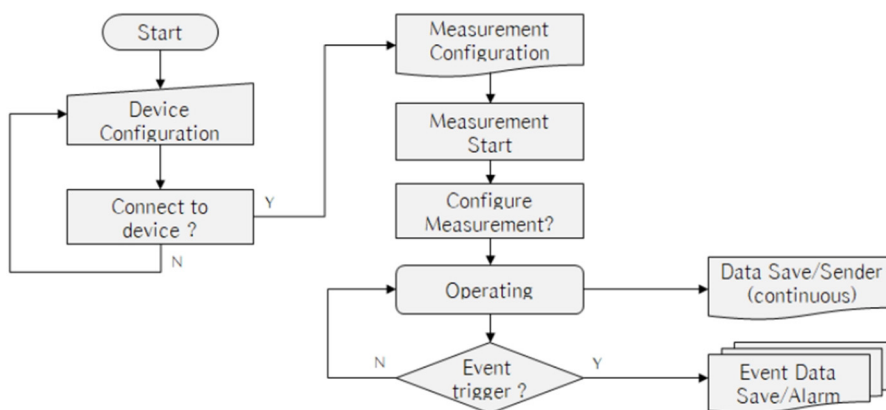


Fig. 1. Flow of p-wave earthquake early warning algorithm

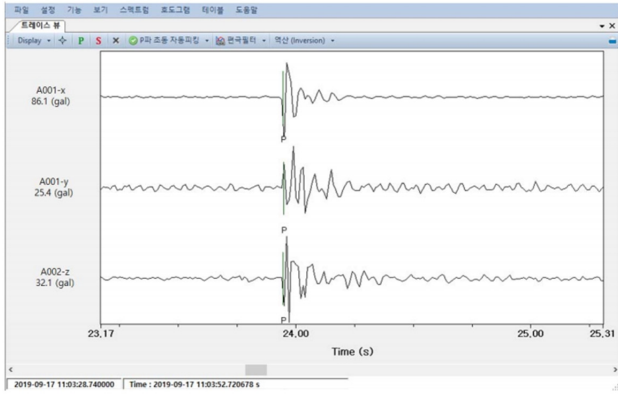


Fig. 2. Initial detection of seismic wave based on STA/LTA method

$$STA = \frac{1}{t_{STA}} \int_t^{t+t_{STA}} |x(t)| dt \quad (1)$$

$$LTA = \frac{1}{t_{LTA}} \int_t^{t+t_{LTA}} |x(t)| dt \quad (2)$$

위 식에서 t_{STA} 와 t_{LTA} 는 각각 STA와 LTA의 시간영역 길이를 나타내며, $x(t)$ 는 임의의 시간 t 에서의 지진파형을 나타낸다. 현장조기경보 신호 도출을 위한 알고리즘은 다음의 자료 처리 절차와 같이 작성되었다. 우선 수직 및 수평 가속도 기록을 이용하여 Mean과 Trend를 제거한 후, Allen (1982)이 제안한 특성함수(CF)를 적용하여 식 (3)의 특성함수 생성한다. 식 (4)의 C_i 는 CF_i 의 균형을 위한 가중치 값이다.

$$CF_i = S_i^2 + C_i(S_i - S_{i-1})^2 \quad (3)$$

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^i |S_j|}{\sum_{j=1}^i |S_j - S_{i-1}|} \quad (4)$$

생성된 특성함수를 이용하여 단기평균과 장기평균의 비를 식 (5)를 이용하여 계산한다. 식 (5)에서 N_{STA} , N_{LTA} 는 각각 STA와 LTA의 시간영역 크기이다. STA/LTA의 비가 한계치(Threshold)를 초과하면 Fig. 2에서 P로 표시된 것과 같이 지진파 초동 탐지를 시작한다.

$$\frac{STA_i}{LTA_i} = \frac{\frac{1}{N_{STA}} \sum_{j=1}^{i+N_{STA}-1} CF_j}{\frac{1}{N_{LTA}} \sum_{j=1-N_{LTA}}^{i-1} CF_j} \quad (5)$$

2.2 지진 경보 신호 결정 알고리즘

지진 신호가 감지되었을 때, 그 신호가 어느 정도 크기의 지진으로부터 야기된 것인지를 계산함으로써 경보 발령 여부를 판단할 수 있다. 이를 위하여 Kanamori(2005)가 개발한 τ_c 방법을 이용한다. 이 방법은 지진의 크기, 즉 규모를 결정하기 위하여 P파 도착 선언 이후 최초 3초 동안의 지진파형 자료를 이용한다. 조기경보의 또 다른 중요한 요소는 τ_c 를 평가하는데 이용한 것과 같은 시간 동안에 해당 지진 관측 지점에서 야기될 S파 진동 수준을 예측하는 것이다. 이것은 P파 도착 선언 이후 최초 3초 동안의 2차 고주파 필터를 통과한 수직 성분 변위의 최대 진폭을 계산하여 얻을 수 있으며, 이를 P_d 라고 한다. P_d 는 해당 지점에서의 최대지반속도를 추정하는데 사용된다. 그러므로 P_d 를 경보 목표 지역에서 지진 진도를 추정하기 위한 기준으로 사용할 수 있다.

이와 같은 τ_c 와 P_d 파라미터를 실시간 연속 파형으로부터 도출하기 위한 알고리즘은 다음의 자료 처리 절차와 같이 작성된다. 우선 적분구간은 P파를 취득한 시점으로부터 이전 5초, 이후 3초로 결정한다. 이후 원시 자료인 가속도 파형에 대하여 P파 이후 1, 2, 3초 범위 내 가장 큰 진폭인 P_u 를 도출하고, 원시 자료를 1차 적분한 속도 파형에 대하여 P파 이후 1, 2, 3초 범위 내 가장 큰 진폭인 P_v 를 구한다. 최종적으로 원시 자료를 2차 적분한 변위 파형에 대하여 P파 이후 1, 2, 3초 범위 내 가장 큰 진폭인 P_d 를 계산한다. τ_c 는 1차 적분 속도(v)와 2차 적분변위(u)자료를 사용하여 다음 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\tau_c = 2\pi \sqrt{\frac{\int_o^{t_o} u^2(t) dt}{\int_o^{t_o} v^2(t) dt}} \quad (6)$$

식 (6)에서 t_o 와 o 는 각각 고정된 시간영역과 P파를 취득한 시점을 의미한다. 본 연구에서는 상기 트리거 알고리즘과 병행하여 단순히 Amplitude Level을 임계값으로 하여 해당 임계값을 초과하는 신호를 감지할 수 있도록 하는 트리거 기능도 추가 적용하였다. 또한, 2 of 3 알고리즘 즉, 3개의 계측기 중 2개 이상에서 트리거 되어야만 경보 발령을 처리할 수 있도록 하여 오경보 방지를 위한 알고리즘도 적용하였다.

Table 1. Descriptions of the phenomena occurred by different earthquake magnitudes

Magnitude	Description	Max. acceleration (%g=9.81cm/sec ²)	Max. acceleration (gal=1cm/sec ²)
I	People can't feel the earthquake, but it is recorded on seismographs.	%g<0.07	0≤gal<0.68
II	It is only felt by a few people, especially, on the higher floors of buildings.	0.07≤%g<0.23	0.68≤gal<2.25
III	It is noticeable indoors, especially for people who are on the upper floors of buildings. But many people do not recognize it as an earthquake.	0.23≤%g<0.76	2.25≤gal<7.45
IV	Many people standing indoors can feel it during the day, but rarely outside.	0.76≤%g<2.56	7.45≤gal<25.11
V	Almost everyone feels an earthquake. Bowls, windows, etc. may break, and in some places plaster is cracked.	2.56≤%g<6.86	25.11≤gal<67.29
VI	All people feels an earthquake. Heavy furniture may move. Lime on the walls may fall, and some smokestacks may be damaged.	6.86≤%g<14.73	67.29≤gal<144.50
VII	Damage is negligible in well-designed and well-built buildings, but some damage usually occurs in buildings.	14.73≤%g<31.66	144.50≤gal<310.58
VIII	Specially designed structures have some damage, and in ordinary buildings they cause considerable damage with partial collapse.	31.66≤%g<68.01	310.58≤gal<667.17
IX	Significant damage to specially designed structures. The framework of a well designed structure is tilted. Inflicts great damage on structures with partial collapse.	68.01≤%g<146.14	667.17≤gal<1433.63
X	Well-built wooden structures may break, and most stone buildings and structures collapse with the foundation. The ground surface is severely cracked.	146.14≤%g<314	1433.63≤gal<3080.34
XI	Very few stone structures remain. Bridges collapse and severe cracks on the ground occur. Underground water pipes are completely destroyed.	314≤%g	3080.34≤gal
XII	Fully damaged. The earthquake wave on the ground surface can be seen with human eyes. The field of view and the plane are distorted. The object pops out into the air.		

Table 2. Plan of the earthquake early alarms embedded in the developed system

Level (Magnitude)	Max. acceleration (gal)	LED colors	Emergency warning broadcast level
1 (V)	25.11 ≤ gal < 67.29	Green	Step 1
2 (VI)	67.29 ≤ gal < 144.50	Yellow	Step 2
3 (VII)	144.50 ≤ gal	Red	Step 3

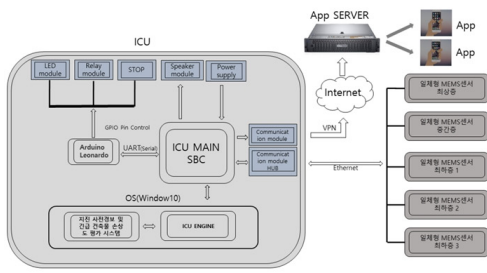
본 연구에서 개발한 시스템은 지진 및 지반거동에 관한 정보를 얻어 실시간 분석한 후 이상 징후가 발생하였을 때 신속한 조치가 이루어지도록 경보하는 기능을 수행한다. 이를 위해 이상 징후에 대한 경보 발령 기준을 정립하는 것은 매우 중요한 사안이며, 추가 연구를 통해 이에 대한 기준 정립이 필요하다고 사료된다.

본 연구에서 개발한 시스템이 상기에 언급한 지진 초동 탐지 알고리즘을 통하여 이상 징후를 포착하면, 위험등급에 따라 단계별로 경보 수위를 결정하여 경보 발령 제어기에서 신호를 출력한다. Table 1은 기상청에서 제공하는 지진 등급별 현상을 나타내며, Table 2는 개발 시스템의 경

보 단계를 나타내고 있다. 지진 등급별 현상을 고려하여 Table 2에서 나타난 바와 같이 진도 5 이상의 이벤트가 발생할 경우 경보를 발령하도록 초기 설정하였으며, 이후 규모가 1씩 증가할 때마다 단계별로 LED 경보색 및 경보 방송을 구분하여 경보를 발령하도록 계획하였다.

3. 지진 사전 경보 시스템 개발

Fig. 3은 본 연구에서 개발한 지진 사전 경보 시스템의 구상도 및 실제 제작한 장치의 사진이다. ICU(Integration Control Unit)는 일체형 계측기(최상층 1대, 중간층 1대 ,



(a) Schematics diagram



(b) ICU (Integration Control Unit)

Fig. 3. Earthquake early warning system



Fig. 4. Seismic wave measuring device to communicate with ICU

최하층 3대)와 Ethernet을 통해 연결된다. 계측 데이터 처리는 ICU ENGINE 즉, 지진 사전 정보 알고리즘에 의해 수행되고, 이벤트 발생 시 ICU ENGINE이 설치된 ICU MAIN SBC(Single-Board Computer)를 통해 제어 S/W인 Arduino Leonardo로 LED 정보와 Relay 제어 정보 음성 등을 출력하며, STOP버튼을 누를 시 모든 정보가 OFF 될 수 있도록 구성하였다. 이외에 서버로 데이터를 전송할 수 있도록 Ethernet 포트를 추가 구성하여 수집 데이터의 처리와 서버 통신 처리를 분리하였고, ICU전원은 제어 장치 및 경보장치 그리고 ICU MAIN SBC가 정상적으로 구동될 수 있게 150W의 전력을 공급하도록 구성하였다.

Fig. 4는 지진 신호를 계측하고 ICU로 전송하는 일체형 지진파 감지 센서를 보여준다. 지진파 감지를 위해 20bit의 분해능을 지닌 3축 디지털 가속도계를 설치하였고, 초당 100개의 데이터를 추출하여 데이터와 시간 정보를 전달할 수 있는 프로그램을 개발하여 탑재하였다. 데이터 전송을 위해 Ethernet 통신이 가능하도록 개발하였으며, 구동 상태를 확인할 수 있는 전원 LED와 상태 LED를 포함하였다.

4. 지진 사전 경보 시스템의 검증 실험

포항지역 4개소(○○대학교, △△도서관, □□병원, ○

△대학교)와 태안지역 1개소(●●발전)에 위치한 공용 구조물을 선정하여 본 연구에서 개발한 지진 사전 경보 시스템을 설치하였다. 일체형 지진파 감지 센서는 인위적 그리고 환경적 노이즈가 가장 작은 위치를 선정하여 직결 볼트 등으로 건축물 내벽에 고정 설치하였다. 설치한 일체형 지진파 센서와 ICU 장치 간의 데이터 전송을 위해 통신 케이블을 포설하였으며, ICU는 인터넷 회선을 통하여 수집 서버로 취득데이터를 전송하도록 구성하였다.

설치된 시스템의 성능 및 운영 결과를 파악하기 위해서 지반 거동을 유발할 수 있는 이벤트가 발생해야 한다. 본 연구에서 개발한 지진 사전 경보 시스템이 설치된 후, 2019년 9월 26일 2시 57분경 발생한 지진에 대한 감지 결과를 바탕으로 현장에 설치한 계측 시스템을 시험 운영하여 검증하였다. 아래의 Table 3과 Fig. 5는 본 연구에서 사용한 지진 정보이다.

Table 3. Information of the earthquake used in this study

Date	2019. SEP. 26. 02:57:31
Magnitude	2.3 (± 0.2)
Location	6 km northwest of Buk-gu, Pohang-si, Gyeongbuk (Latitude: 36.09° N, Longitude 129.3° E, ± 0.8 km)

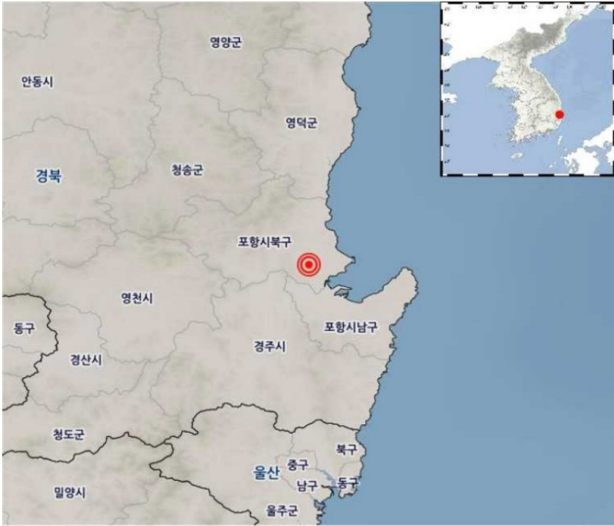


Fig. 5. Location of the earthquake referred in the study

5. 지진 사전 경보 시스템의 검증 실험 결과 및 분석

시험 운영 검증을 위해 경보 시스템을 설치한 개소 중 지진 발생지역으로부터 약 5.5km에 위치한 ○○대학교에서 측정된 지진 자료를 분석에 사용하였다. 본 연구에서 개발한 P파 초동 탐지 알고리즘이 작동하여 Fig. 6과 같이 지진 동 신호가 계측되었다. 해당 자료에 대한 분석 결과, 최대 진폭은 6.28gal, P파 도달 시간을 2019.09.26. 02:57:32.278 이었으며, S파 도달 시간은 2019.09.26. 02:57:33.340으로 기록되었다. P파와 S파의 도달 시간 차이는 1.06초로 계산되었다. 지진이 발생한 시각부터 P파를 탐지하기까지 약 1.2초가 소요되었으므로 지진파(P파) 속도는 $5,500 \text{ (m)} / 1.2 \text{ (초)} \approx 4,500 \text{ (m/s)}$ 이며, S파 속도는 $\approx 2,400 \text{ (m/s)}$ 로 추정되는 결과를 도출할 수 있었다.

지진파 초동 알고리즘이 작동하여 지진파 데이터가 저

장되었지만 경고 발령 알고리즘은 작동하지 않았다. Table 2에 나타난 것과 같이 이벤트 정보 발령을 위한 임계치를 25.1gal로 설정하였으며, ○○대학교에서 계측된 최대 지반 가속도는 6.28gal로 임계치를 초과하지 않아 경보가 발생하지 않았다. 이외 포항관내에 설치한 나머지 실험 개소에서도 기록된 결과가 경보 발생을 위한 지반가속도 임계치를 초과하지 않아 경보 이벤트로 이어지지 않았다. 또한 지진파가 전달되는 과정에서 지진 에너지가 매질의 물성 및 거리에 따라 감쇄되어 지진 발생위치와 거리가 가장 먼 실험 개소인 △△도서관의 경우 지진파 신호가 도달하지 않았다. □□병원, ○△대학교에 설치한 시스템으로부터 각각 최대 지반가속도 6.1gal, 5.3gal의 신호가 탐지되었으며, 지진 정보 이벤트로 기록되지 않았다.

6. 결론

본 논문에서는 진원지 인근의 단일 계측소에서 빠르고 신뢰도 높게 지진을 사전 경보하기 위하여 지진파 초동 탐지 알고리즘과 경보 알고리즘을 개발하고, 이들을 탑재한 지진 사전 경보 시스템을 제작하였다. 실증시험을 위해 5개의 공용 건축물을 선정하여 개발된 장치를 설치하였으며, 이를 운용하여 실시간 모니터링을 진행하였다. 실시간 모니터링 중 2019년 09월 26일 02시 57분경 포항 지역에서 지진을 대상으로 현장에 설치된 계측 시스템의 성능을 검증하여 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 포항 관내에 설치한 4개의 지진 조기 경보 시스템 중 지진이 발생한 위치와 가까운 3곳에서 P파 초동이 감지되어 이벤트 기록으로 저장되었다. 가장 가까운 위치에 놓인 ○○대학교는 지진이 발생한 후 1.2초 후

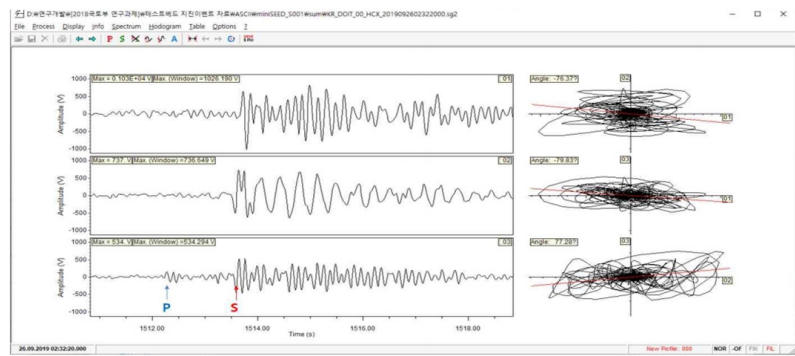


Fig. 6. Seismic signals measured by the developed earthquake warning system

P파 초동이 감지되었으며, P파 도달 후 약 1.02초 후 S파가 도달하여 다소의 정보 시간을 확보하였다.

- (2) P파 초동이 탐지 되지 않은 $\triangle\triangle$ 도서관은 진원지에서 거리가 멀고, 진원지의 지진 에너지가 상대적으로 크지 않아 지진파의 전달과정에서 지진 에너지가 대부분 소산되어 신호를 탐지하지 못한 것으로 판단된다.
- (3) P파 초동이 탐지된 3곳의 최대 지반 가속도는 $\circ\circ$ 대학교, $\square\square$ 병원, $\circ\triangle$ 대학교가 각각 6.28gal, 6.1gal, 5.3gal로 계산되었다. 본 연구에서 이벤트 경보 발령을 위한 최대 지반 가속도의 임계값을 규모 5의 지진을 기준으로 하여 25.1gal로 설정하였다. 따라서 대상 지진이 발생했을 때, LED와 방송을 통한 경보이벤트는 발생하지 않았다.

본 연구에서 개발한 지진 경보 시스템은 향후 지속적인 모니터링 및 데이터 분석을 통한 지진파 초동 탐지 이벤트와 경보 발령에 대한 추가 검증이 필요하다고 판단된다. 또한, 실제 발생한 지진을 대상으로 지반 가속도가 시스템에서 설정한 임계값보다 클 경우 경보 발령이 잘 되는지 평가하기는 현실적으로 매우 어려우므로, 임계값보다 큰 지반 가속도를 인위적으로 시스템에 가하거나 임계값의 수준을 다소 하향 조정하여 시스템 작동을 확인해볼 필요가 있다. 이와 같은 추가 검증이 이루어진다면, 진원지 인근의 주요 구조물에 경보가 가능한 국내 실정에 맞는 실효성이 높은 지진 경보 시스템으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (18TBIP-C144394-01#) from Ministry of Land Transportation Technology Business Support Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

References

1. Allen, R. V. (1982), "Automatic phase-pickers: their present use and future prospects", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.72, No.6B, pp.S225-S242.
2. Cooper, J. D. (1868), *Earthquake indicator*, San Francisco Daily Evening Bulletin, 3rd November.
3. Espinosa-Aranda, J. M., Jimenez, A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Inostroza, M. and Maldonado, S. (1995), "Mexico City Seismic Alert System", *Seismological Research Letters*, Vol.66, pp.42-52.
4. Kanamori, H. (2005), "Real-time seismology and earthquake damage mitigation", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol.33, pp.195-214.
5. Nakamura, Y. (1984), "Development of earthquake early-warning system for the Shinkansen", *Proc. of the Japanese National Committee of the International Association of Earthquake Engineering*, pp.224-238.
6. Nakamura, Y. (1988), "On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS)", *Proc. of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, paper no.2134.