과거지진 시뮬레이션과 시험운영 비교 분석 연구

Comparative Analysis of Past Earthquake Simulation and Test Operation

임도윤* · 안재광** · 이지민***

Lim, Doyoon*, Ahn, Jae-Kwang**, and Lee, Jimin***

Abstract

The Korea Meteorological Administration (KMA) provides an earthquake early warning (EEW) service by issuing prompt earthquake information for the public to prepare for severe earthquakes. The KMA has established high-quality seismic stations to provide prompt and precise EEW service and has been monitoring observed seismic waves in real time. The ambient signal exhibits characteristics of small repeated amplitudes owing to the background noise near the seismic station. If seismic waves from earthquakes or explosions are observed in seismic stations, their detected amplitudes are higher than those of background noise and possess specific features. Thus, the methods for differentiating between the observed signal and any signal attributed to earthquakes or noise can be the starting of EEW and the main technique. Because this technique is based on the empirical relationship derived using postprocessed data or specific criteria as the standard, it can have more advantages for optimizing the criteria or standards through observing several seismic events in seismic stations operated in real time. However, fewer earthquakes have occurred in the Korean Peninsula compared to the West of the United States, Japan, and Taiwan. It is difficult to set up the optimal criteria and validate it for seismic stations operating in Korea. In this study, we applied simulated methods to validate the possibility of setting up the optimal criteria. For the simulated results, the analyzed data did not include any delayed waveforms under the ideal condition. We compared the analyzed results observed in detail during the EEW-testing periods. Even though differences between the simulation and EEW-testing results were observed, it was proven that there was no problem in analyzing the earthquake information. In addition, we could design the optimization of module for detecting the P-wave in the Korean Peninsula.

Key words : EEW, Earthquake, Simulation, Initial P-wave

요 지

기상청에서는 지진발생 시 국민들에게 신속하게 대비할 수 있도록 지진조기경보 서비스를 제공하고 있다. 신속하고 정확한 서비스를 위해 전국에 고성능 센서의 지진 관측망을 구축하고, 실시간으로 기록되는 진동 신호들을 감시하고 있다. 상시 감지되는 진동은 배경잡음으로 관측소 주변에서 발생하는 진폭이 크지 않고 반복적인 특성을 가진다. 만약 지진이나 폭발 등의 진동이 관측소에 전파된다면, 상시기록되는 배경잡음보다 진폭이 크고 불규칙적인 파형이 기록될 것이다. 이때 기록된 진동이 지진파인지 신속하게 판별하는 것이 지진조기경보의 시작이며 핵심 기술이다. 이 기술은 과거 데이터 기반의 경험적 관계식 혹은 임계값을 기준으로 사용하고 있기에 운영중인 관측망에 기록된 이벤트 수가 많을수록 최적화에 유리하다. 하지만, 국내의 경우 미국 서부, 일본, 대만 등에 비해 지진 이벤트 수가 현저히 적어 관측 환경에 최적화된 기준 설정과 검증이 쉽지 않다. 따라서, 본 연구에서는 시뮬레이션기법을 활용해 최적화 기준 설정의 가능성을 검증하고자 하였다. 시뮬레이션은 데이터 지연 등이 없는 이상적인 조건에서의 결과이므로, 시험운영기간에 분석된 결과와의 비교가 필요하다. 분석결과, 지진정보 생산 시 시뮬레이션과 시험운영간의 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한, 시뮬레이션을 통해 한반도에 적용 가능한 P파 탐지 최적 모듈 설계가 가능하다.

핵심용어 : 지진조기경보, 지진, 지진 시뮬레이션, P파 초동

*정회원, 기상청 지진화산연구과 연구원(E-mail: aserop@korea.kr)

Member, Researcher, Earthquake and Volcano Research Division, KMA

**교신저자, 정회원, 기상청 지진화산연구과 기상연구사(Tel: +82-2-2181-0070, Fax: +82-2-841-7664, E-mail: propjk@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Research Officer, Earthquake and Volcano Research Division, KMA

***기상청 지진화산연구과 기상연구관(E-mail: jiminlee@korea.kr)

Senior Research Officer, Earthquake and Volcano Research Division, KMA

1. 서론

지진 발생시 국민들에게 신속히 위험성을 알리기 위해 기상청에서는 지진조기경보서비스를 운영 중이다. 지진조기경보시스템에서 생산된 지진 정보(ex. 진원 위치, 규모)의 경우 행정안전부 혹은 공공기관에 전달되어 지진에 대한 대응 및 복구의 신속한 의사결정이 가능하도록 제공된다. 이때 의사결정의 기초자료는 지진재해대응시스템을 통해 산출되며, 계산된 피해 예상 지역 및 손실 비용을 바탕으로 신속한 대응 계획이 수립된다. 따라서 지진 재해에 대비, 대응 및 복구를 위해서는 지진조기경보에서 생산되는 지진 정보의 정확도와 지진재해시스템의 정밀도가 중요하다. 그렇다면, 우리는 ‘시스템의 정확도와 정밀도는 어떻게 평가해야 할 것인가?’란 질문을 던질 수 있다. 지진조기경보 및 재해시스템의 경우 제품의 성격이 아니라 수학적 해법을 통해 산출되는 시스템이기에 내구성, 계측의 정밀도 등의 성능 평가인 검정 혹은 인증은 불가능하고, 과거 피해 사례를 기반으로 한 검정(validation)만이 가능하다. 지진의 빈도가 높지 않은 한반도의 경우 지진으로 발생한 피해 지역 및 사례수가 제한적이라 시스템의 정확도 판정이 쉽지 않은 실정이다. 결국, 개발된 시스템이 현업에 적용되고 지진피해가 발생하기 전까지 완성도는 과거지진 재현결과에 의존할 수밖에 없다.

Brown et al. (2011)은 지진조기경보 알고리즘의 개발하고자 과거 일본 지진 84 event ($4.0 \leq M_w \leq 8.0$)를 대상으로 지진 시뮬레이션을 수행하고 진원정보 산출의 정확도를 비교하였다. 수행된 결과 바탕으로 미 서부지역에 제안된 모델 사용의 적합성을 판단하였다. Colombelli et al. (2012)은 지진정보 생산이 아닌 진도 기준의 경보 알고리즘을 개발하였으며, 이에 대한 검증을 위해 일본의 지진 관측망 정보인 KIK-net과 K-NET의 자료를 재구성하여 시스템에 적용하였다. 이때 회귀분석 기준으로 개발된 진도 추정 경험모델은 완벽하지 않지만, 진도 기반의 경보 가능성을 확인할 수 있었다. Hoshiba and Aoki (2015)는 파형 전파 이론(Sato et al., 2012)과 관측자료 기반 학습기법을 활용한 실시간 정밀 진도 정보 생산 연구를 수행하였다. 이때 산출되는 결과 도출은 시뮬레이션기법을 이용하였고 실제 진도와 비교하여 활용 및 확장 가능성을 제안하였다. 이 밖에도 지진조기경보의 관측망의 효용성 분석에도 시뮬레이션 기법이 이용되고 있다(Colombelli et al., 2015; Nof and Allen, 2016; Chung et al., 2019).

앞서 언급된 연구들은 충분한 시뮬레이션을 통해 성능이 입증되었지만, 관측된 지진파는 지형 및 지질 등의 지역적 환경의 영향을 크게 받기에 검증되지 않는 지역에서의 도입은 오경보의 위험에 노출 될 수 있다. 또한, 시뮬레이션 기법은 완벽한 시스템 환경으로 실제 운용환경과는 다를 수 있음을 인지해야 한다. 실제 지진이 발생할 경우 여러

관측소에서 보내오는 신호에 트래픽 잼, 통신환경에 따른 신호 지연, 시스템 상의 버그 등의 문제점이 발생할 수 있고, 이를 고려하는 것은 현업 운영시 오경보 및 부정확한 정보생산 방지를 위해 반드시 필요하다. 이와 같은 문제점을 해결하고자, USGS에서 개발된 ShakeAlert의 경우 개발된 알고리즘을 개방하여 다양한 실험을 수행할 수 있는 테스트 및 검정 플랫폼(Testing and Certification Platform, 이하 TCP)을 구축하였다(Cochran et al., 2018). TCP를 통해 연구자들은 캘리포니아주, 오리곤주, 워싱턴주 등의 지역의 지진에 대한 실시간 조기경보시스템을 실험 할 수 있고, 이를 기반으로 최적화 알고리즘을 제안하고 있다(Chung et al., 2019; Cochran et al., 2019).

본 연구에서는 지진조기경보시스템의 알고리즘과 시험 운영의 한계를 극복하기 위해 사용되는 시뮬레이션방법을 분석하였다. 최종적으로는 시뮬레이션과 시험운영 결과를 비교하여 성능을 점검과 한계점을 분석하였다.

2. 관측자료 기반의 지진 정보 생산 방법

지진조기경보는 관측된 P파의 정보를 통해 분석된 지진 크기가 설정된 기준보다 클 경우 발동되며, 이 시스템은 위해 4가지의 모듈로 구성되어 있다. 구성된 모듈은 Triggering Module (TM), Association Module (AM), Location and Magnitude Analysis Module (LMAM), Decision Module (DM)이다. TM에서는 관측된 신호를 지진의 P파인지 판별하고, AM은 일정시간 동안 지진으로 식별된 TM신호를 취합하는 단계이다. TM과 AM을 거쳐 수집된 자료는 LMAM을 통해 지진의 규모와 위치를 결정하게 된다. 이때 계산된 규모가 일정 수준을 초과하게 되면 경보가 발동하게 되며, DM단계에서 최종경보 통보여부를 결정한다.

지진관측소의 기록되는 신호는 지진뿐만 아니라 온도 변화, 대기조건, 바람, 강과 바다의 유체 흐름 등으로 야기된 약 1 Hz 미만의 진동들도 수집된다(McNamara and Buland, 2004). 또한, 관측소 주변의 인간 또는 동물의 활동으로 발생하는 충격도 진동으로 지진계에 기록되며, 1 Hz 이상의 고주파수 특성을 가진다. 앞서 설명된 두 가지 진동들을 노이즈 혹은 배경잡음(ambient noise)이라 불린다. 이와 같은 배경잡음은 지진관측소에 항상 전달되며, 지진이 발생하여 전파될 때도 지진계에 함께 기록된다. 따라서 지진시상시 기록되는 신호에서 지진파를 신속·정확하게 검출해야 한다.

상시 기록되는 배경잡음은 진폭이 크지 않은 반면 지진 혹은 충격으로 발생하는 진동은 진원지와 가까울수록 큰 진폭이 전파된다. 이와 같은 현상을 근거로 TM에서는 지진파의 검출시 배경잡음과의 차이를 이용한다(Allen, 1982; Baer and Kradolfer, 1987; Earle and Shearer, 1994). 실시간 기록은 긴 시간영역 평균 진폭(Long Term Average, LTA)과

Fig. 1. STA, LTA and SNR for Earthquake Waveforms: (a) MKL (b) MOPB

Table 1. Quality Control for Initial P-wave

Previous Version	Present Version
TauP > 0	Min Pa : -2.5 < Log (Pa)
-0.9 < Log (TauP) < 1.0	NEtoZ :
-5.5 < Log (Pd) < 3.5	Range-Post Trigger : 2.2×10^{-3} cm/s ² (Acc) or 2.2×10^{-6} cm/s (Vel)
-5.5 < Log (Pv) < 3.0	Zero Crossing : Check zero Crossing rate + Previous version

짧은 시간영역 평균 진폭(Short Term Average, STA)의 비(이하 SNR)로 분석 대상 신호로 분류되며, 본 연구에서는 STA를 0.05초 LTA를 5초로 설정하고, 분석 대상 신호 선별 기준의 SNR을 20으로 적용하였다. Fig. 1은 2016 경주 전진(2016-09-12 19:44:32)으로 MKL관측소에 기록된 파형과 2020-05-03에 발생한 지진의 MOPB관측소에 기록된 파형의 STA, LTA 및 SNR을 도시하였다. 초기 지진파가 감지되면 SNR값이 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 큰 규모의 지진일수록 SNR 크게 계산되는 것으로 나타났다.

지진조기경보는 SNR을 통해 지진파의 P파 초동을 감지하고, 설정된 기준값보다 큰 진폭의 진동이 오면 지진분석이 시작된다. 탐지 민감도를 높이기 위해 SNR을 낮게 설정할 수 있지만 비(非)지진까지 분석에 사용될 수 있는 문제점이 내포한다. 따라서 STA/LTA 기법만으로 실시간 감지되는 진동을 지진으로 완벽히 분류할 수 없다. 예를 들면 관측소 주변의 발파, 핵실험, 인공적으로 생겨난 큰 충격파 및 신호 교란의 스파이크(Spike) 등도 SNR 기준을 충분히 넘을 수 있다.

지진조기경보 시스템에서는 비지진을 걸러내기 위해 지진파의 고유 특징을 기준으로 한 검출기능이 추가로 사용된다. 이 기능에서는 STA/LTA 법을 통해 탐지된 신호를 일정 시간동안 수집하여 이에 대하여 주파수, 진폭 등을 계산한다. 이때 일정시간은 P파 초동에 대한 분석 길이로 P-wave Time Window (이하 PTW)라 한다. 검출기능은 지진과 비지진의 경험적으로 분류를 통해 지진분석에 사용되므로 이를

Quality control (이하 Qc)이라 한다.

Earthquake Alarm System (ElarmS)는 미국 UC Berkeley에서 개발한 네트워크 기반의 지진 조기경보 시스템(Allen, 2007)이며 버전에 따라 ElarmS2 및 ElarmS3이 사용된다. 국내의 경우 ElarmS2를 한반도조건에 맞춘 2.5 버전을 사용중이며, 캘리포니아는 최신버전인 ElarmS3를 사용중이다. ElarmS2.5에서는 P파 초동의 주파수와 진폭기준의 4가지만 사용되었지만 ElarmS3.1에서는 스파이크 및 이상 신호 제거를 위해 4가지가 검출기준이 추가되었다(Chung et al., 2019). Table 1에 ElarmS2.5와 3.1의 Qc 기능을 정리하였다. 개선된 ElarmS3.1에서는 P파 초동 검출 강화를 위한 최소 지진 가속도(이하 min Pa) 기준과 S파 트리거링을 방지하기 위한 수평-수직 진폭비(이하 NEtoZ)가 추가되었다. 또한, 낙뢰 또는 데이터 수신 오류 등의 신호와 비정상적인 충격 신호의 제거는 각각 Range- Post와 Zero Crossing을 통해 가능해 졌다. Range-Post의 경우 S파 혹은 Rayleigh파를 초기 P파로 오인하지 않는데 크게 기여하는 것으로 확인되었다. Fig. 2는 국내에 발생한 실제 지진에 대하여 검출 결과를 도시하였다. Fig. 2(a), (b)는 확실하게 초기 P파를 인지한 경우이고, Fig. 2(c)는 S파영역의 진동을 Range-Post로 걸러낸 경우이다.

TM에서 검출된 P파 초동은 AM을 단계에서 최종적으로 지진정보 생산 관측소가 결정되며, 이때 기준은 Table 2에 정리하였다. AM의 초기 기준은 간단한 시간과 위치를 체크

Fig. 2. Range-Post Trigger Check of M_L 2.5 Event: (a) NAWB (b) OKCB (c) YEYB

Table 2. Association Rules

Order	Section	Function Setting
1	Trigger time checking	$Ts_i - Ts_{i+1} \leq 16.67 \text{ s}$
2	Location checking	$LS_i - LS_{i+1} \leq 0.9^\circ$ Distance between stations: $S_i - S_{i+1} \leq 100 \text{ km}$
3	Binder stacking	Station's Trigger Count, Travel time curve, Split check

Ts = Time observed at the seismic station, S = station, i = observed order, LS = Latitude at the seismic station

이고, 마지막단계에서는 주시곡선(Travel Time Curve, TTC)을 통해 관측소를 선별하여 통합한다. 이 단계에서는 초기에 관측된 2-3개지점의 시간 정보를 통해 임의의 진원 위치를 추정하고, 추정된 위치에서 이격거리에 따라 초기 P파가 전파될 주시곡선을 생성한다. 주시곡선을 통해 최종적으로 사용될 관측소 자료가 결정되며, 이를 Association (이하 Assoc.)이라 한다.

Assoc.을 통해 사용할 관측소가 결정되면 LMAM에서 위치 결정과 규모를 계산한다. ElarmS에서는 진원의 심도를 8 km로 고정한 후 2차원 그리드를 통해 진앙을 찾는다(Allen et al., 2009). 관측소 정보가 늘어날수록 진앙 위치 결정이 정확해진다. 규모 계산은 초기 P파의 진폭과 규모와의 경험적 상관관계식을 적용하며, 식을 통해 계산된 값은 M_L 이다. 관측소가 추가될 때 마다 계산되는 규모와 위치 정보가 계산되며, 사용자에게 의해 정해진 DM의 기준에 따라 정보가 발송된다.

3. 시뮬레이션 방법

관측소별 과거 지진의 진동을 시뮬레이션하기 위해 Linux 서버 기반의 Earthworm의 오픈소스 소프트웨어 tankplayer (Johnson et al., 1995)를 사용할 수 있다. 이 소프트웨어는

Earthworm센터(<http://www.earthwormcentral.org/>)를 통해 개방형 소스코드로 제공된다. tankplayer를 실행하기 위해 miniSEED로 저장된 지진 기록을 하나의 tankfile로 파일 생성해야한다. 이때 miniSEED란 관측소 및 채널 등은 제외하고 시계열 진동 데이터만을 암호화하여 저장하는 파일로, 국제 지진데이터 표준인 Standard for the Exchange of Earthquake Data (SEED)의 하위 파일이다(<https://ds.iris.edu>).

생성된 tankfile은 기록된 파형이 실시간처럼 ElarmS 혹은 ShakeAlert 등의 소프트웨어에서 재생된다. 탱크파일의 1초 데이터 패킷 혹은 샘플들은 wavering에 배치되어 마치 실시간으로 수신되는 것처럼 처리된다. 실제 운영상 발생할 수 있는 지연시간 등의 문제는 고려되지 않으며, 최적 운용조건에서 시스템 동작을 완벽하게 재생하는 것이다. 하지만 재생을 통해 지진정보 실시간으로 계산되는 지진정보의 정확도를 분석할 수 있기에 시뮬레이터는 유용하다. 또한 변경된 파라미터를 적용하였을 때 이전 데이터를 통해 변경전 결과와 비교 할 수 있다는 장점도 있다.

과거지진 시뮬레이션을 위해서는 이벤트별 기록을 동시에 처리할 수 있도록 데이터를 결합 및 생성해야 하며, 이와 같이 생성된 데이터를 tankfile이라 한다. tankfile은 Earthworm (Johnson et al., 1995)기반의 입력된 자료를 기록 및 재생할 수 있는 파일로 tankplayer 모듈에서 사용된다.

Fig. 3. Procedure of Simulation Tool

Fig. 3은 시뮬레이션 절차도를 도시하였다. tankplayer를 통해 읽어진 데이터들은 기존에 설정해놓은 개수의 wavering에 저장되고 wavering에 저장된 데이터들을 ElarmS의 파형처리 모듈인 EWP2로 전송되어 P와 초동의 최대 변위(Pd), 최대 속도(Pv), 최대 가속도(Pa) 및 우세주기(τ_c) 등의 파라미터를 계산한다. 계산된 값들은 다시 ring에 저장되고 해당 정보들은 위치 및 규모를 계산하는 ElarmS의 E2로 전송되어 AM단계를 거친다. AM을 통해 사용되는 관측소의 P와 파라미터를 통해 진원 위치 및 규모 정보를 계산한 후 데이터 중계서버인 ActiveMQ에 저장된다. 추가된 관측소 정보는 다시 앞선 과정을 거쳐 저장된 후 ActiveMQ 서버에 저장된다. 계산된 이벤트는 버전(Version)으로 분류되어 초기 결정 이벤트(Version = 0) 부터 재계산 될 때 마다 버전이 업데이트 된다. 최종적으로 초기 버전 지진 정보부터 계산이 종료될 때 까지 모든 버전의 정보가 중계서버에 기록된다. 시뮬레이션의 과정은 실시간 구동되는 시스템 절차와 동일하다. 각 단계별 산출된 정보를 통해 분석 능력을 실시간 결과와 비교할 수 있다.

4. 시뮬레이션 설정

본 연구에서는 ElarmS3.1의 실시간 구동과 시뮬레이션구동의 차이를 분석하였다. 분석된 지진은 9개이고(Fig. 4), Table 3에 정리하였다. 검토된 자료는 기상청에서 통보된 지진만을 사용하였으며, 진원시를 기준으로 tankfile을 생성하였다. 분석용 tankfile 생성시 데이터 안정성 및 여러 관측소에서 충분히 파형이 기록 될 수 있도록 진원시를 기준으로 이전 10분부터 이후 15분까지 총 25분 자료를 생성하였다. 단, 본 검토에서는 통보되지 않은 지진과 상시상태에 대한 시뮬레이션을 수행되지 않았다.

ElarmS3.1의 시험운영에서는 추가된 기능 Min-Pa, NEtoZ, Zero Crossing, Range-Post를 다양하게 조합하여 점검하였기에 시뮬레이션도 이와 동일한 Qc 설정을 적용하였다.

새롭게 추가된 Qc기능은 조합에 따라 분석의 결과가 달라질 수 있다. Qc 기능을 사용함에 따라 때로는 정상적인 파형을 분석에서 제외시킬 수 있기 때문에 사용에 유의해야 한다. 이상 파형을 검출하는 모듈인 NEtoZ 모듈과 Zero-

Crossing 모듈을 위주로 분석하였으며, 사용된 Qc조합을 Table 4에 정리하였다. Table 4에 정리된 표현은 기능별 앞의 약자를 따 각 M, N, Z, R의 순서로 정의하였으며, O는 해당 기능을 사용하지 않았음을 의미한다. 예를 들면 MOOO는 Min-Pa의 기능만 사용한 경우이고, OOOO는 새로운 기능을 사용하지 않았다는 것을 의미한다.

Fig. 4. Event Location Map

Table 3. Event Information

No.	Event Time	Lat.	Lon.	M _L
1	2019-08-20 10:34:52	33.57	124.81	2.8
2	2019-08-23 19:50:48	37.96	124.69	2.7
3	2019-09-19 18:19:05	33.65	124.99	2.6
4	2019-10-04 03:57:23	35.47	128.86	2.6
5	2019-10-27 15:37:26	35.41	128.49	3.4
6	2019-12-04 17:19:20	33.94	124.70	2.6
7	2019-12-30 00:32:08	35.56	128.90	3.5
8	2020-01-30 00:52:52	36.59	128.12	3.2

Table 4. Quality control (Qc) Combination

No.	Section	Using Qc
Q0	OOOO	None (only Previous Version Qc)
Q1	OOOR	Range-Post Trigger
Q2	OOZO	Zero Crossing
Q3	ONOO	NEtoZ
Q4	MOOO	Min Pa
Q5	MNZR	Min Pa, NEtoZ, Zero Crossing, Range-Post Trigger
Q5	MOZO	Min Pa, Zero Crossing
Q6	ONOR	NEtoZ, Range-Post Trigger
Q7	MOZO	Min Pa, Zero Crossing

5. 분석결과

5.1 시뮬레이션 분석 결과 확인

Fig. 5는 2019년 10월 27일 이벤트에 대해 WP에서의 분석 결과를 도시하였다. 여기서 WP란 waveform processor를 나타내며 입력된 파형을 처리하여 파라미터를 추출하는 역할을 수행한다. 각 관측소에서 계산된 각 Qc 항목의 값은 Table 1에 제시된 기준을 통과하는지 여부를 파악하고, 설정된 모듈을 통과한 관측소만이 최종 지진정보 생산에 사용된다. 본 연구에서는 시뮬레이션과 시험운영 모두 지진을 식별하여 100%의 감지 성공율을 보였다.

MinPa				NEtoZ			
STA	Log(Pa)	P/F		STA	Ratio	P/F	
YJD2	-0.83156	Pass	→	YJD2	0.44	Pass	
CLSA	0.620505	Pass		CLSA	0.15	Pass	
CHRB	0.587937	Pass		CHRB	0.26	Pass	
EURB	0.366702	Pass		EURB	0.87	Pass	
MIYA	-0.10917	Pass		MIYA	0.36	Pass	
:	:	:		:	:	:	
↓							
Zero-Crossing				Range-Post			
STA	Count	P/F		STA	Vel	Acc	P/F
YJD2	37	Pass	→	YJD2	2.42E-03	1.76E-01	Pass
CLSA	20	Pass		CLSA	4.80E-03	7.26E-01	Pass
CHRB	22	Pass		CHRB	4.60E-02	5.75E+00	Pass
EURB	15	Pass		EURB	1.38E-02	2.90E+00	Pass
MIYA	24	Pass		MIYA	5.93E-03	3.76E-01	Pass
:	:	:		:	:	:	:

Fig. 5. Calculated Qc Parameter Value of Event No. 5 (Date: 2019-10-27)

5.2 시뮬레이션 시험운영 결과비교: 진원위치와 규모

Qc를 제외하고 설정된 값들은 기준에 한반도를 대상으로 사용하던 설정 값이기에 시뮬레이션과 시험운영은 0000을 우선 비교하였다. 비교시 각 단계별 계산된 규모와 진앙위치의 차이를 대상으로 하였으며, 관측소 사용 10개소 이하에 대하여 최종 통보된 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 이때 통보된 결과는 조기경보를 통해 계산된 규모와 진앙이 아닌 기상청의 지진 분석관의 수동분석을 통해 계산된 최종 값이다. Fig. 6(a), (b)는 위치 분석의 차이 값으로 (b)에는 첫 분석시 10 km 이상의 차이를 보인 결과만을 분류하였다. (c)와 (d)는 규모 분석의 차이이며, (c)와 (d)는 각각 (a)와 (b)에 사용된 이벤트에 대한 결과이다. (a)는 내륙에서 발생했던 지진들로

Fig. 6. Comparison of Local Magnitude and Epicentre with Official Announcement

통보된 결과와 큰 차이를 보이지 않는 반면 (b)의 경우 해역에서 발생했던 지진들로 내륙지진보다 위치 결정의 편차가 큰 것으로 나타났다. 이는 관측망의 영향으로 진원을 중심으로 사방에 관측소가 존재할 경우 신속하고 정확한 위치결정이 가능하기 때문이다. 해역에서 발생한 지진의 경우 편향된 관측소만 사용하여 지진 정보를 생산하다 보니 적은 수의 관측소만 사용할 경우 진원 결정의 오차가 커질 수 있다. 규모 역시 위치 오차가 클수록 편차가 높은 경향을 확인할 수 있다.

시험운영시 발생한 위치결정 오차범위의 원인을 파악하고자 Fig. 7에는 해역과 내륙지진의 관측소 사용 순서에 따른 진앙 위치의 결정 결과를 지도에 도시하였다. Event 1과 Event 2지진은 해역에서 발생한 지진으로 진원을 중심으로 비교적 위치 산출 초기버전부터 발생한 진원위치와 큰 차이를 보였다(Fig. 7(a), (b)). 이때 실시간에서 초반에 반영

Fig. 7. Association Order of Seismic Stations: (Left) Simulation Result, (Right) Testing Operation

되지 않은 관측소 정보로 인해 시뮬레이션보다 시험운영시 오차가 더 커질 수 있음을 확인하였다. Fig. 7(c)의 경우 내륙발생지진으로 해역보다 비교적 오차가 크지 않음을 확인할 수 있다. 이때 사용되는 시뮬레이션과 시험운영에 사용된 순서에 차이가 발생하여도 오차에 영향을 줄 정도는 아닌 것으로 나타났다. 이는 관측소가 진원을 중심으로 사방

에 고르게 반영되면서 진원위치 결정에 정확도를 향상시켰기 때문이다.

5.3 Qc 기능 사용에 따른 결과 비교

Qc 기능 사용에 따른 성능비교를 위해 Event 5, 6, 7을 대상으로 기능별 위치 오차를 분석하여 Fig 8에 도시하였다.

Table 5. The Excluded Stations by Qc Function

	Simulation							Testing Operation							
Station	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q0	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7
CLSA															
CHRB															
EURB	+2	+1				+1	+1	+2	+1						
MIYA	-1	-1				-1	-1	-1	-1			-1			
JNYA	-1							-1	+1		●	-1	●	●	
CGWB					+1				-1		-1	+2	-1	-1	
CGDA		+2			-1				+2	+2	-1			-1	+2
CGD	+4		+2		+2	+2			+4	+4	-1		-2	+1	+4
HCNA	-1	-2	-1		-1	-1		+1	-1	-2	-1	+1	-3	-2	-2
HACA	-1		-1		-1	-1		+2	+1		-1	+2	-2	-2	
JUCA	-1		●		●	●	+2		-1		●		●	●	
GACA	-1		●		●	●	-1	-3	-5	-4	●	-3	●	●	-4

●: excluded station, $\pm n$: difference in order from simulation Q0

Fig. 8. Comparison of Local Magnitude and Epicentre with Official Announcement

Qc 기능 사용에 따라 위치결정이 달라지는 것을 확인할 수 있다. Table 5는 Qc에 대한 영향이 가장 작은 Event 5에 대하여 정리하였다. 시뮬레이션 결과만을 비교하면 OOOO(시뮬레이션 Q1)에서 관측소 사용에 따른 위치 차이가 발생하였는데, 이는 EURB관측소의 Assoc.이 다른 관측

소보다 늦었기 때문이다. 즉, AM 단계에서 관측소 사용여부 결정은 앞서 언급된 Assoc. 기준 통과 여부에 따라 달라지는 점을 인지해야 한다. Event 5의 Q3, Q5, Q6 결과를 살펴보면 JUCA, GACA, JNYA의 관측소 정보가 AM단계로 넘어가지 못한 것을 확인할 수 있다. 이는 NEtZ의 조건을 충족하지 못 하였기 때문이다. 하지만 누락된 관측소가 있음에도 불구하고 진앙 위치에는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 초기 Assoc.에 사용된 관측소가 편향되지 않기에 진원 위치 결정이 정확했고, 정보가 추가되며 분석 반복(iteration)에서도 큰 변화가 없었기 때문이다. 그래도 실제 분석대상 이벤트에서 3개의 관측소 정보는 지진의 P파 초동으로 식별되었기에 분석시 오경보 문제가 발생하지 않았다.

6. 결 론

본 연구에서는 지진조기경보시스템의 국내 환경 최적화를 위해 시험운영 결과를 분석하였다. 이때 지진 정보가 생산된 이벤트에 대해서 시뮬레이션을 추가로 수행하였고, 이를 통해 시험운영의 특정도 함께 분석하였다. 본 논문을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 지진조기경보의 경우 P파 초동 관측이 중요하다. 실시간으로 전송되는 진동이 지진의 초동인지 파악하는 것은 지진정보 생산에 영향을 미치기에 Qc기능을 활용한 신속한 식별이 필요하다. 하지만, 지역의 지진환경을 고려하지 않은 Qc 사용은 오경보(false alarm) 혹은 경보실패(miss alarm)의 가능성을 높일 수 있다. 따라서, 지진조기경보 사용시 Qc 값 설정은 다양한 시뮬레이션 검토와 시험운영을 통한 최종 점검이 요구된다.

- (2) 내륙에서 발생하는 지진의 경우 진원을 중심으로 사방에서 지진의 초동이 관측되므로 신뢰도 있는 진앙 위치와 규모 계산이 가능하다. 반면, 해역에서 발생하는 지진의 경우 일정 방향에서만 관측된 초동 값을 사용하기에 적은 수의 관측소 사용은 진앙의 오차가 크게 발생할 수도 있다. 따라서, 해역지진의 경우 적은 수의 관측소 자료를 기반으로 생산된 지진정보는 신뢰도 문제가 야기될 수 있다.
- (3) 과거 지진 시뮬레이션의 경우 데이터 지연 및 누락이 없는 완벽한 조건에서의 분석이라 시험운영과 다른 결과를 산출할 수 있다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 살펴보면, 내륙에서 발생한 지진에서는 두 분석간의 차이가 크지 않고, 신뢰하는 결과가 생산되는 것으로 나타났다. 따라서, 환경설정 최적화 및 사용성 검증은 내륙 발생 지진의 시뮬레이션을 통해 수행이 가능할 것으로 파악된다.
- (4) Qc 기능에 따른 시뮬레이션 및 실시간 분석결과 내륙에서 발생한 지진이라면 어떤 모듈을 사용하더라도 $nS = 6$ (관측소 6개) 조건에서는 경보용 지진 탐지가 가능한 것으로 나타났다. 이때 트리거 된 관측소의 P와 초동 Qc기준에 따라 Assoc. 이 달라질 수 있으며, 정상 트리거 된 관측소도 제거 될 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, P와 초동의 모듈은 오경보 및 경보 실패가 발생하지 않도록 충분한 검토가 필요하다.
- (5) 본 연구에서는 시험운영과 시뮬레이션의 결과만으로 Qc기능의 사용여부를 검토하였다. 본 분석에서는 100%의 감지 성공률을 보였지만 검토에 사용된 사례가 많지 않기에 시뮬레이션에 대한 감지능력과 최적화 도출에는 한계가 있었다. 따라서, 다수의 지진자료를 사용한 시험운영과의 비교실험이 필요하고, 그 결과를 바탕으로 다양한 매개변수 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 「지진·지진해일·화산감시 및 예측기술 개발 과제(과제번호: KMA2018-00820)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Allen, R. (1982). Automatic phase pickers: Their present use and future prospects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 72, No. 6B, pp. S225-S242.
- Allen, R.M. (2007). The ElarmS earthquake early warning methodology and application across California. In P. Gasparini, G. Manfredi, and J. Zschau (Eds.), *Earthquake early warning systems* (pp. 21-43), Berlin, Heidelberg: Springer.
- Allen, R.M., Brown, H., Hellweg, M., Khainovski, O., Lombard, P., and Neuhauser, D. (2009). Real-time earthquake detection and hazard assessment by ElarmS across California. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, No. 5, L00B08. doi:10.1029/2008GL036766
- Baer, M., and Kradolfer, U. (1987). An automatic phase picker for local and teleseismic events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 4, pp. 1437-1445.
- Brown, H.M., Allen, R.M., Hellweg, M., Khainovski, O., Neuhauser, D., and Souf, A. (2011). Development of the ElarmS methodology for earthquake early warning: Realtime application in California and offline testing in Japan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 188-200.
- Chung, A.I., Henson, I., and Allen, R.M. (2019). Optimizing earthquake early warning performance: ElarmS-3. *Seismological Research Letters*, Vol. 90, No. 2A, pp. 727-743.
- Cochran, E.S., Bunn, J., Minson, S.E., Baltay, A.S., Kilb, D.L., Kodera, Y., et al. (2019). Event detection performance of the PLUM earthquake early warning algorithm in southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 109, No. 4, pp. 1524-1541.
- Cochran, E.S., Kohler, M.D., Given, D.D., Guiwits, S., Andrews, J., Meier, M.A., et al. (2018). Earthquake early warning ShakeAlert system: Testing and certification platform. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 1, pp. 108-117.
- 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.
- Colombelli, S., Zollo, A., Festa, G., and Kanamori, H. (2012). Early magnitude and potential damage zone estimates for the great Mw 9 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, No. 22, L22306. doi:10.1029/2012GL053923.
- Earle, P.S., and Shearer, P.M. (1994). Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 2, pp. 366-376.
- Hoshiba, M., and Aoki, S. (2015). Numerical shake prediction for earthquake early warning: Data assimilation, real-

- time shake mapping, and simulation of wave propagation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 3, pp. 1324-1338.
- Johnson, C.E., Bittenbinder, A., Bogaert, B., Dietz, L., and Kohler, W. (1995). Earthworm: A flexible approach to seismic network processing. *IRIS Newsletter*, Vol. 14, No. 2, pp. 1-4.
- McNamara, D.E., and Buland, R.P. (2004). Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 4, pp. 1517-1527.
- Nof, R.N., and Allen, R.M. (2016). Implementing the ElarmS earthquake early warning algorithm on the Israeli seismic network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 5, pp. 2332-2344.
- Sato, H., Fehler, M.C., and Maeda, T. (2012). *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth* (2nd ed.). Springer Science & Business.

Received	■	July 27, 2020
Revised	■	July 27, 2020
Accepted	■	August 12, 2020