

Quanterra 기록계의 실시간 이벤트 패킷을 이용한 진앙 추정

임인섭^{1*} · 신동훈¹ · 신진수¹ · 정순기²

¹한국지질자원연구원

²충북대학교 공과대학

Epicenter Estimation Using Real-Time Event Packet of Quanterra digitizer

In Seub Lim^{1*}, Dong-Hoon Sheen¹, Jin Soo Shin¹, and Soon-key Jung²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

²Chungbuk National University

요 약: 1999년 국내 지진관측소 표준안이 제안된 이후로, 주요 지진관측 기관 대부분의 관측소에는 Quanterra 기록계가 설치되어 운영되고 있다. Quanterra 기록계에서는 실시간 이벤트 패킷과 데이터 패킷이 생성, 전송된다. 이벤트 패킷의 특성과 각 성분별 데이터 패킷의 데이터 센터 도착 시간을 분석하였다. 초당 100샘플의 속도 자료 기반 실시간 이벤트 패킷의 신호 대 잡음비와 신호 주기를 이용하여 실제 지진의 P파와 연관이 있는 패킷 선택 기준을 도출하였다. 선택된 이벤트 패킷의 시간 정보를 이용, 진앙을 추정하고 분석하였다. 시험 운영 결과 이벤트 패킷은 데이터 패킷에 비해 평균 3~4초 빨리 도착하며, 그 개수도 데이터 패킷에 비해 0.3%에 불과하다. 전체 이벤트 패킷 중 약 5% 만이 실제 지진의 P파와 연관된 이벤트 패킷으로 선택되었다. 선택된 이벤트 패킷을 이용하여 내륙에서 발생한 규모 2.5 이상의 지진에 대해서는 20초 이내에 10 km 이내의 오차로 진앙을 결정할 수 있었다.

주요어: 지진, 진앙추정, 이벤트 패킷, Q4120기록계, Q730기록계, 위상검출

Abstract: A standard for national seismological observatory was proposed on 1999. Since then, Quanterra digitizer has been installed and is operating on almost all of seismic stations which belong to major seismic monitoring organizations. Quanterra digitizer produce and transmit real-time event packet and data packet. Characteristics of event packet and arrival time of each channel's data packet on data center were investigated. Packet selection criteria using signal to noise ratio (hereafter SNR) and signal period from real-time event packet based on 100 samples per second (hereafter sps) velocity data were developed. Estimation of epicenter using time information of the selected event packet were performed and tested. A series of experiment show that event packets were received approximately 3~4 second earlier than data packets and the number of event packet was only 0.3% compare to data packets. Just about 5% against all of event packets were selected as event packet were related P wave of real earthquake. Using the selected event packets we can estimate an epicenter with misfit less than 10 km within 20 sec for local earthquake over magnitude 2.5.

Key words: earthquake, epicenter estimation, event packet, Q4120, Q730, phase detector

서 론

전 세계적으로 인명 및 재산 피해를 유발할 수 있는 중·대 규모 이상의 지진이 빈번히 발생되고 있다. USGS의 발표에 의하면 2000년 이후 연 평균 156건 이상의 피해 유발 가능 지진(규모 6.0 이상)이 발생하고 있다. 지진으로 인한 인명과 재산 피해까지 고려한다면 지진 재해는 가장 짧은 시간에 매우

심각한 피해를 유발할 수 있는 자연 재해로 분류될 수 있다. 조기 예측이 불가능한 지진 발생으로부터 피해를 최소화시키기 위한 많은 연구가 국제적으로 활발히 진행되고 있다. 가장 적극적인 대처방안으로는 구조물의 내진 설계 강화를 들 수 있으나 많은 경제적 부담 때문에 선진국에서도 대형 구조물을 중심으로 내진설계의 기준과 등급만을 제시하고 있을 뿐이다. 구조물에 대한 내진설계 강화 보다는 조기 경보체계 구축을 통하여 후속 지진동에 대한 대비 및 지진 피해 복구지원 체계 마련 등이 현실적인 방안으로 제시되고 있다.

환태평양 지진대에 위치하여 지진이 자주 발생하는 일본, 대만 및 미국 서부지역을 중심으로 지진 조기경보(Earthquake Early Warning) 체계가 구축되어 현재 운영 중이거나 시험 중

2009년 9월 24일 접수; 2009년 11월 13일 채택

*Corresponding author

E-mail: limlhj@kigam.re.kr

Address: KIGAM, 92 Gwahang-no Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

Table 1. Status of national seismic station (기상청, 2008).

구 분	속도계					가속도계
	지표형		단주기	지하형	해저형	가속도계
	초광대역	광대역		시추공형	해저지진계	
기상청	1	12	27	1	1	86
한국지질자원연구원	0	9	15	8	0	18
한전전력연구원	0	0	13	0	0	13
한국원자력안전기술원	0	4	0	0	0	4
계	1	25	55	9	1	121

이다(Wu *et al.*, 2002; Allen *et al.*, 2003; Kamigaichi, 2004; Iglesias *et al.*, 2007; Olivieri *et al.*, 2008). 지진 조기경보 체계란 지진기록계에 의해 감지된 P파로부터 진앙과 규모를 계산하여 지진 발생 시점으로부터 가장 빠른 시간 내에 지진경보를 발령하는 정보시스템을 의미한다. 지진 조기경보 체계를 구축하기 위해서는 광범위한 지역에 걸친 조밀한 지진관측소의 설치, 실시간 데이터 전송체계 구축, 정확한 지진요소의 분석 및 신속한 통보체계의 구축이 필요하다(Mustafa, 2006). 이를 위해 P파를 이용한 진앙 추정(황의홍 등a, 2007; 신동훈 등, 2008), 규모 추정(Wu *et al.*, 1998; 황의홍 등b, 2007)등 많은 연구가 이루어지고 있다. 국가적으로도 지진 조기경보 체계 구축을 위한 로드 맵을 만들어 장기적으로 추진하고 있다.

본 연구에서는 1998년 국가 지진관측소의 표준안 제안(지헌철, 1998; 지헌철 등, 2000) 이후 지진관측 기관에서 설치하여 운영 중인 Q4128이나 Q730 기록계의 실시간 이벤트 패킷을 이용한 진앙 추정 기법을 개발하고 시험하고자 하였다. Q4128, Q730에서 디지털이징된 데이터를 대상으로 작동하는 실시간 이벤트 감지기의 결과물인 이벤트 패킷의 특성을 파악하였고, 여러 관측소에서 수신된 이벤트 패킷으로부터 실제 지진의 P파와 연관된 패킷만을 선택할 수 기준을 도출하였다. 선택된 이벤트 패킷의 시간 정보를 이용하여 진앙을 추정할 수 있는 기법을 개발하고 적용, 실시간으로 시험하였다.

이 론

관측소 분포

지난 1996년 12월 13일 영월 지진과 1997년 6월 26일 경주 지진으로 인해 범국가 차원에서 지진 방재 체제에 대한 전면적인 보강사업 필요성이 제기되었다. 이후 국내 지진관측소에 대한 꾸준한 현대화, 확충 과정을 거쳐 기상청의 경우 2009년 3월 현재 속도관측소 48개소와 가속도관측소 109개소를 운영하고 있다. 한국지질자원연구원은 순수 지진학 분야의 연구를 위하여 40개소의 관측소를 설치, 독자 운영 또는 대학과 공동 운영하고 있다. 또한 국내 수력, 원자력 발전소를 운영하고 있는 한국수력원자력(주)은 전력연구원과 공동으로 원자력 발전소 주변 지역에 총 13개소의 지진관측소를 운영하고 있다. 한

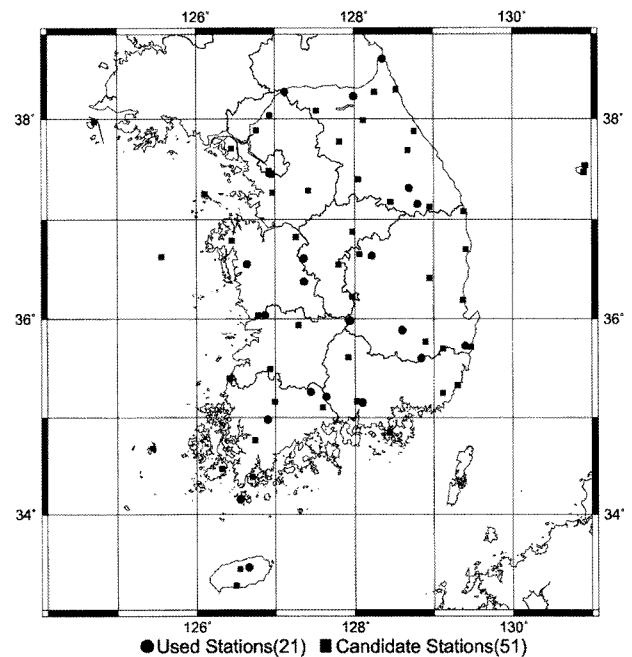


Fig. 1. Distribution of seismic stations. Mark “●” denote stations which were used this study, “■” denote candidate stations belong to other organization.

편 전력연구원에서는 전국의 765 KW급 변전소 주변에도 지진관측소 5개소를 운영하고 있다. 원자력안전기술원에서는 원자력 발전소의 지진 안전대책을 강화하기 위하여 규제전문기관의 독립적인 지진관측을 위해 2002년에 원전부지 지진감시센터를 개소하여 총 4개소의 지진관측소를 운영하고 있다 (Table 1). 또한 특수 및 대형 구조물, 장대 교량, 터널 그리고 가스 정압기지 등 지진에 의한 구조물의 영향을 모니터링하기 위해 많은 기관에서 자체적인 가속도 망을 구축, 운영 중이다.

국내 지진관측망 조밀도는 속도지진계간의 평균거리를 의미하는데(기상청, 2008) 현재 국내 지진관측망의 조밀도는 35 km이며 범국가적으로 격자간격 30 km의 최적 지진관측망 구축에 필요한 130개소의 속도 관측소를 확충하고, 2012년까지 총 257개소의 가속도 관측소 그리고 2012년 이후 최소 15 km 간격을 갖는 최적 가속도 관측망 구축을 위해 전체 450개소를 확보할 계획을 가지고 있다. 다음 Fig. 1은 본 연구에서 사용

된 21개 한국지질자원연구원의 속도 관측소와 향후 활용 가능한 속도 관측소의 위치가 표시되어 있다. 활용 가능한 관측소라 함은 각 관측소 운영 기관의 협조를 얻어 실시간으로 이벤트 패킷을 수신할 수 있는 관측소를 의미한다. 본 연구에서 사용한 관측소의 조밀도는 68.79 km이며 활용 가능한 관측소를 모두 포함할 경우 37.15 km로 줄어들게 된다.

위상 검출

정확한 위상 검출은 진앙추정의 정확성과 직접적으로 관계된다. 지진데이터의 위상검출 기법은 크게 시간 영역, 주파수 영역, 입자움직임 분석 및 패턴 인식 등으로 분류된다(Withers *et al.*, 1998). 시간 영역분석의 위상검출 기법에는 STA/LTA가 광범위하게 사용되고 있으며, Murdock-Hutt 이벤트 감지 기법(Murdock *et al.*, 1983, 이하 MHD) 그리고 직전 지진데이터와의 기울기를 비교하는 방법(류용규 등, 2005) 등이 있다.

Murdock 등(1983)은 Peak-Trough(이하 P-T) 값들을 이용한 MHD를 제안하였다. 연속적인 원시자료에 FIR 필터를 적용한 후 순차적으로 마루 P (peak)와 골 T (trough) 값을 검색하여 각각의 P와 T를 시간 정보와 함께 저장한 것을 P-T 값이라 정의하였다. MHD는 실시간으로 계산되는 P-T 값을 미리 설정된 임계값인 Th1, Th2 그리고 Th3과 비교하여 위상검출을 수행하며, 위상이 검출되면 위상의 시작시점, SNR, 최대 진폭 및 신호 주기 등의 위상정보를 출력한다. 출력되는 SNR 값은 P-T 값의 분산 S'을 기준으로 배경잡음에 해당하는 진폭과 P파가 도달한 후의 진폭과의 비로써 표현된다. 만약 SNR 값이 009999라는 최적 값을 갖는다면 배경잡음과 P파 도달 직후의 진폭이 최소 9배 이상의 차이가 있음을 의미한다. 반면 SNR 값이 11111이라면 배경잡음과 유사한 진폭의 신호가 기록되었음을 의미한다(Fig. 2). 한편 위상검출에 사용되는 임계값과 S' 등은 입력 신호에 따라 적응적으로 변경된다.

다음 Fig. 3은 2007년 1월 20일 강원도 평창군에서 발생한 규모 4.8 지진의 각 관측소별 100 sps 속도 자료와 MHD의 결과 위상이 검출된 현황(M으로 표시)을 나타냈다. 많은 관측소에서 비교적 정확하게 P파를 감지하여 양호한 성능을 보이고 있으나, P파가 감지된 시점 이후로 1분이 경과된 후에 다시 이벤트를 감지되는 것으로 나타나 수신되는 이벤트 패킷으로부터 실제 P파와 연관된 이벤트 패킷만을 선택할 필요가 제기된다.

국내 지진관측소의 대부분 지진기록계에서 작동하는 MHD 위상검출기는 지진동 신호의 U-D성분의 100 sps로 디지털화하여 생성된 원시자료로부터 위상정보를 실시간으로 검출한다. MHD 위상검출기에 의해서 생성된 지진데이터의 위상정보는 mini-SEED 패킷의 데이터 블록에 실려 데이터 센터로 전송된다. 이때 패킷 헤더 필드 중 샘플 개수(number of samples)와 샘플링 주기(sample rate factor)가 0 값으로 설정되어 원시 자료와 구분된다. 이와 같이 위상 정보만을 포함하는 패킷은 이

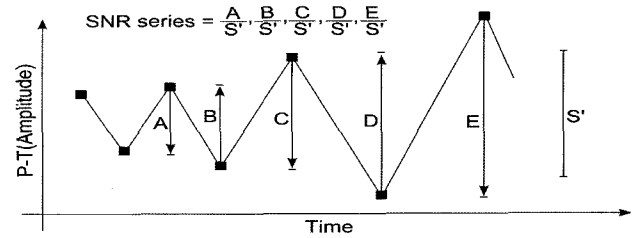


Fig. 2. Schematic diagram of SNR series generation.

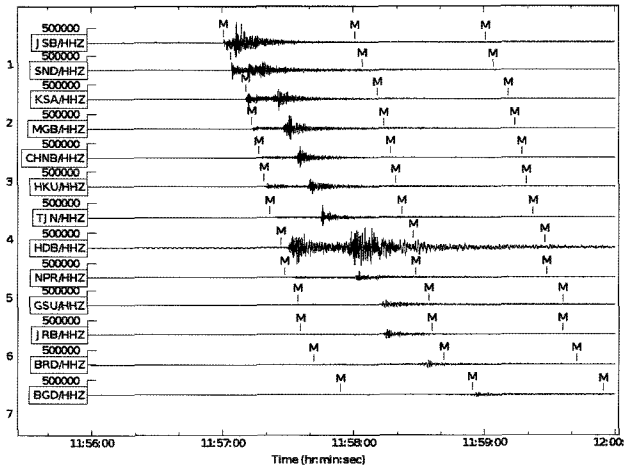


Fig. 3. Application of MHD to the January 20, 2007 earthquake. Mark "M" denotes the picking time of MHD. First "M" of each station showed good result of detecting of 'P' phase, but remains showed the reason why this study define the selection criteria.

벤트 감지 블록(Event Detection Blockette, 이하 Event Packet, EP)이라고 정의되어 있다(IRIS, 2007). EP에는 MHD의 위상 검출 결과가 저장되어 있는데 각 EP는 다음 Table 2와 같은 정보를 포함한다.

이벤트 패킷의 수신

신속한 진앙 추정 등 지진요소 결정에 위해서는 각 관측소로부터의 데이터 수신 지연이 없어야 한다. Quanterra의 Q4128, Q730 기록계는 패킷 전송 시 발생할 수 있는 통신 부하의 최소화 및 패킷 저장매체의 효율성 제고를 위하여 원시 자료를 압축한다. 특정 시점에서의 진폭 값(X_i)과 직전 시점에서의 진폭 값(X_{i-1})의 차이 $Dx = (X_{i-1} - X_i)$ 는 매우 작기 때문에 대부분의 지진 신호는 Dx 값을 이용하여 충분히 저장할 수 있다. 따라서 지진 신호의 진폭 값을 4 바이트 크기로 각각 저장하는 대신에 특정 시점의 진폭 값과 직전 진폭 값의 차이 값 Dx에 따라 저장 공간의 크기를 달리하는 steim-2 압축 방식이 많이 사용되고 있다. steim-2 압축 기법은 최대 6.74배의 압축 효율을 갖는다(IRIS, 2007).

일반적으로 Dx 값이 매우 클 경우는 하나의 패킷에 약 300~500개의 원시 자료가 포함되며, 잡음 수준의 지진동 신호인 경우는 하나의 패킷에 약 700~800개의 원시 자료가 포

Table 2. Sample onset printout from event detector and the meaning (Quanterra, 1999).

구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Z VBB	d	0	00356	1986 168 20:14:14.655	2066	0.425	341	A
2	Z VBB	d	0	10344	1986 168 20:41:27.105	1365	0.500	330	A
4	Z VBB	c	0	11221	1986 168 21:04:16.405	805	0.375	417	A
5	Z VBB	c	2	11122	1986 168 21:05:17.755	1971	0.550	1001	B

1. The component and stream name.
2. Estimate of the direction of the first break (polarity of the initial onset of the signal). The two possibilities are c (compression) or d (dilatation).
3. The number of P-T values that Onsetq () looked back to find the onset of the signal (0, 1 or 2)
4. The quality evaluation of the estimate of the onset.
5. The year, day and time of the estimated onset (year, day of the year, time).
6. The maximum amplitude (digital counts) of the first 4 cycles of the signal
7. The average period (seconds) of the first 4 cycles of the signal
8. The value of the background (digital counts) at the time the signal was detected (it is an estimate of twice the sample standard deviation of the P-T values)
9. The algorithm that produced the detection;
 A : 1 P-T >= th1, 3 P-T >= th2.
 B : n_hits >= P-T th2. (th1, th2 means threshold)

Table 3. Arrival sequence of data packet and event packet on data center (2008/01/01 06:33:33 earthquake, Janjin, Ham-Nam).

관측소 (위치)	패킷 구분	도착시간 (분:초)	패킷 헤더 시작시간 (분:초)	데이터 개수	EP 도착시간과의 차이 (초)
KSA (강원도 고성)	EP	34:06.192	34:04.703	0	-
	100 sps	34:08.343	34:00.842	419	2.2
	20 sps	34:20.712	33:59.237	305	14.6
KHD (경기도 강화)	EP	34:16.702	34:15.396	0	-
	100 sps	34:21.062	34:13.676	412	4.3
	20 sps	34:34.051	34:12.891	318	12.3
SNU (서울 서울대)	EP	34:27.821	34:25.973	0	-
	100 sps	34:31.841	34:25.432	333	4.0
	20 sps	34:34.751	34:11.717	340	6.9
BRD (인천 백령도)	EP	34:31.012	34:28.699	0	-
	100 sps	34:34.371	34:27.969	326	3.3
	20 sps	34:41.871	34:20.634	300	10.8

함된다. 따라서 100 sps 원시 자료의 패킷 생성에는 최대 7~8 초, 최소 3~5초에 해당하는 시간지연이 발생될 수 있다. 또한 20 sps와 1 sps의 경우 패킷 생성에는 더욱 많은 시간지연이 발생된다. Dx 값이 매우 클 경우 각각 15~25초, 300~500초가 지연되며, Dx 값이 작을 경우는 각각 35~40초, 700~800초가 소요된다. 이러한 시간 지연은 신속한 지진요소의 결정과 지진 조기경보 발령 등에 많은 영향을 미치고 있다.

하나의 패킷 단위로 압축된 각 성분별 데이터는 지진기록계에 할당된 우선순위에 따라 전송 순서가 결정된다. Quanterra 기록계에는 이벤트 패킷에 대해 가장 높은 우선순위를 부여하고 있어서 이벤트 패킷이 가장 먼저 데이터 센터로 전송된다. 다음 Table 3은 2008년 1월 1일에 발생한 함경남도 장진 지진의 데이터 패킷과 이벤트 패킷의 도달 시간을 표시하였다. 각 관측소의 기록계에서 생성되는 이벤트 패킷이 다른 데이터 패킷보다 빨리 수집될 수 있기 때문에 이를 이용한 진앙 추정이

가장 빠른 결과를 얻을 수 있다.

대상 이벤트 패킷

임의의 특정일에 특정 지진관측소로부터 24시간 동안 취득된 100 sps U-D 성분의 패킷은 총 17,692개, N-S 및 E-W 성분의 경우는 각각 18,142개, 18,018개로 집계되었다. 패킷 유실이 없다고 가정하면 U-D 데이터 패킷은 평균 4초 데이터를 포함하고 있다. 관측소로부터 취득된 U-D 성분 패킷을 이용하여 위상검출을 시도할 경우 17,692개의 데이터 패킷을 처리(압축 해제, 위상 검출 등)해야 한다. 반면 U-D 성분의 패킷 중에서 감지된 EP의 개수는 단 두 개에 불과하였다.

한편 특정일에 24시간 동안 전체 관측소로부터 수신된 지진 데이터 패킷의 총 개수는 2,481,171개로 집계되었다. 이러한 패킷들에는 각 성분별로, 100 sps, 20 sps 및 1 sps 패킷 등이 있으며 시각정보나 EP도 포함된다. 이들 중 EP는 총 1,104개

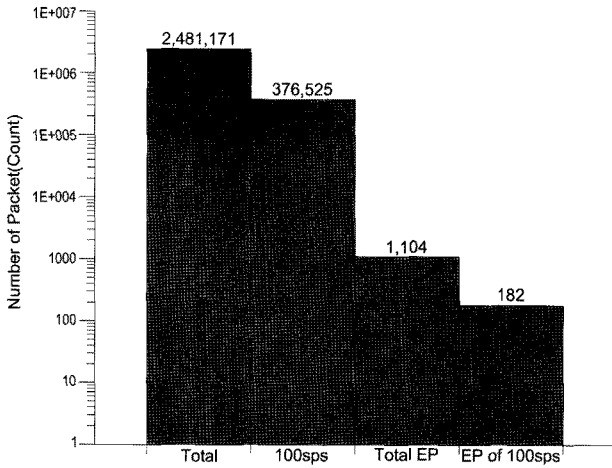


Fig. 4. Comparison of packet counts from all station for one day on data center. The number of event packet is just 182 but number of 100 sps data packet is 376,525.

이며 100 sps 데이터 기반 EP는 182개로 집계되었다(Fig. 4). 이를 통하여 전체 100 sps 데이터 패킷을 대상으로 위상검출을 수행할 경우보다 100 sps 기반 EP를 이용할 경우 보다 효율적인 진앙 추정 가능성이 있음을 알 수 있다.

P파 연관 이벤트 패킷 선택

MHD 위상검출 기법은 각 관측소의 주변 환경과 센서 및 기록계의 특성에 따라 위상검출의 결과가 상이하며, MHD의 임계값 등 다른 파라미터의 영향도 받는다. 따라서 EP를 이용한 진앙추정의 정확도 향상을 위해서는 모든 EP로부터 실제 P파와 연관성을 갖는 EP만을 선택해야 한다. 한국지질자원연구원

데이터 센터에 저장된 과거 지진기록으로부터 28,594개의 EP들을 분석하여 실제 지진의 P파와 연관된 EP의 분류 기준을 결정하였다. 분류를 위해 EP에 포함되어 있는 신호 주기와 SNR을 이용하였다.

수신된 전체 EP로부터 실제 P파 연관 EP를 선택하기 위한 기준을 적용한 결과 5% 미만의 패킷만이 선택되었다(Table 4). 선택률은 선택된 EP와 당일 수신된 전체 EP 개수와의 비를 의미한다.

초동 P파 도달시간을 이용한 진앙 추정

일반적으로 진원 추정을 위해 지진파의 주행시간은 1차원적인 속도구조 모델로부터 파선추적법을 이용해 계산하는데, 본 연구에서는 신동훈과 박창업(2008)에서 사용한 초동 P파 도달시간을 이용한 진앙 추정법을 사용하였다. 이 방법은 기존에 발생한 지진기록들로부터 진앙거리에 따른 P파 도달시간을 경험식으로 얻은 후, 이로부터 주어진 진앙거리에 따른 주행시간을 계산하거나 주행 시간에 따른 진앙거리를 계산한다.

초동 P파 도달시간을 이용한 진앙 추정은 2단계의 과정을 거치는데, 첫 번째 단계에서는 P파의 도달시간을 이용하여 도식적인 방법에 의해 초기 진앙을 추정한다(Fig. 5). 우선 P파를 감지한 여러 관측소 중에서 최초로 P파가 검출된 관측소의 P파 도달시간 보다 1초 앞선 시간을 임의의 진원시간으로 가정한다. 이때 임의의 진원시와 각 관측소의 P파 도달시간의 차이를 이용하여 각 관측소로부터 진앙거리를 계산한다. 각 관측소를 원점으로 하며, 추정된 진앙거리를 반지름으로 하는 원을 그린다. 시간을 거슬러 가면서 임의의 진원시에 대해 각 관측소마다 진앙거리에 따른 원을 그려보면, 각 관측소를 중심으로

Table 4. Result of selection criteria. Only 4.7% of event packet were selected as P wave related event packet.

지진 발생일	규모	당일 수신된 EP 총 개수	선택된 P파 연관 EP	선택률(%)
2007/01/20	4.8	502	55	11.0
2007/03/15	3.0	369	35	9.5
2007/03/28	2.8	594	28	4.7
2007/05/16	2.5	443	16	3.6
2007/05/26	2.5	430	15	3.5
2007/07/22	2.6	430	15	3.5
2007/08/18	2.5	332	20	6.0
2007/08/30	2.9	173	5	2.9
2007/09/12	2.7	343	15	4.4
2007/09/17	3.0	188	11	5.9
2007/09/24	2.6	305	12	3.9
2007/10/04	2.9	280	15	5.4
2007/10/06	2.5	314	9	2.9
2007/10/16	2.9	237	7	3.0
2007/10/29	2.5	298	13	4.4
2007/12/22	2.6	254	10	3.9
2007/12/28	2.7	301	7	2.3
평균				4.7

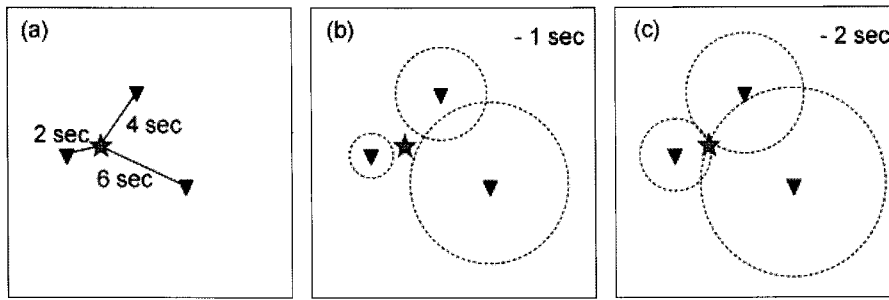


Fig. 5. Schematic diagram for finding initial location of epicenter. Stars and triangles represent epicenters and seismic stations, respectively. Dotted circles denote epicentral circles. (a) P arrival times at each stations. (b) one second before the first P arrival detection. (c) two seconds before the first P arrival detection.

하는 원들이 만나는 지점이 생기게 되는데 이를 초기 진앙이라 가정한다.

두 번째 단계에서는 초기 진앙을 중심으로 격자 검색법을 반복적으로 수행하여 최종적인 진앙의 위치를 결정한다. 첫 번째 단계에서 결정된 초기 진앙을 중심으로 일정 영역을 격자화하고, 각 격자에서 관측소까지의 거리를 진앙거리로 가정했을 때 주행시간을 추정한다. 이렇게 얻은 주행시간들로부터 진원시를 계산한 후 진원시의 표준편차가 제일 작은 격자점을 중심으로 다음 검색 영역을 정의한다. 반복적으로 검색 영역의 크기와 격자 간격을 줄이면서 진앙을 검색하여 최종적인 진앙의 위치를 추정한다.

구현 및 성능 분석

이벤트 패킷을 이용한 진앙추정

한국지질자원연구원의 지진관측소에서 실시간으로 전송되는 EP를 이용하여 다음 Fig. 6과 같은 순서로 실제 지진의 P파와 연관된 EP를 선택하고 진앙을 추정한다. 각 관측소로부터 네트워크 상에서의 시간 지연없이 EP를 수신하고 있는 시스템에서 구현되었으며 Solaris와 Linux 환경에서 각각 컴파일 되고 시험되었다. 현재 한국지질자원연구원의 21개 관측소를 대상으로 실시간으로 작동하고 있으며 진앙이 추정될 경우 Fig. 7과 같은 화면에 표시된다.

실시간 수신되는 EP로부터 실제 지진의 P파와 연관된 EP가 선택되고 그로부터 1분 이내에 4개(2009년 8월 이후 5개) 이상의 관측소에서 P파 연관 EP가 선택되면 이벤트로 간주하여 진앙을 추정하게 된다. 1분이라는 기준치는 기록계에서 작동하는 위상검출기의 작동방식에서 기인하며, 현재의 설정에 의하면 위상이 검출된 후 1분 동안은 위상검출 시도를 중단한 후 다시 재개하게 된다. 따라서 1분이 경과되면 동일한 관측소로부터 서로 다른 EP를 수신할 수도 있다. 이러한 기준치는 향후 각 관측소의 주변 환경을 고려하여 결정될 필요가 있다. Fig. 7에서 EP를 이용한 진앙추정 프로그램의 작동 상태를 표시하기 위해 매 10분마다 수신되는 SOH (Status of Health)의

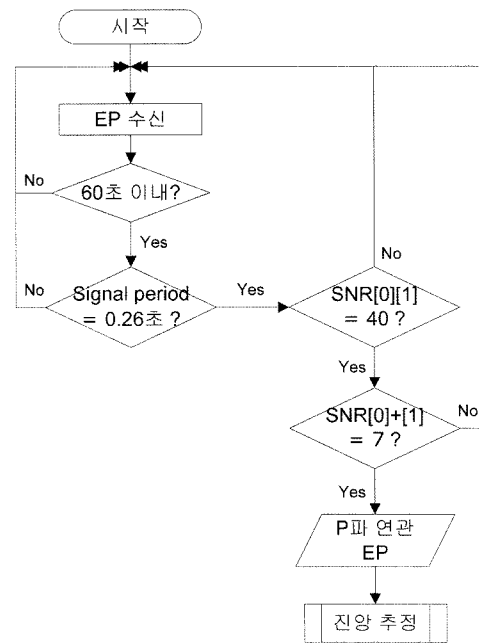


Fig. 6. Flow chart of selection P-wave related EP.

시각이 우측 하단에 표시되며, 진앙이 추정된 지진목록은 우측 상단에, 선택된 지진의 이벤트 패킷 정보(위상 검출시각 등)는 우측 하단에 표시하였다. 특히 추정된 진앙과 각 관측소 간의 거리를 기준으로 정렬하여 표시하고 EP가 수신된 관측소를 다른 색깔로 표시하여 진앙 추정의 오류를 감지할 수 있도록 구성하였다.

성능 분석

EP를 이용한 진앙 추정은 2009년 5월부터 시험하였다. 2009년 5월 이후 2009년 8월까지 기상청에서 발표한 국내 지진 중 규모 2.5이상은 총 12건이었으며 6건이 해역에서, 3건이 북한 지역에서 발생하였다. Table 5는 기상청 지진목록을, Table 6은 각 지진에 대해 EP를 이용한 진앙 추정 결과를 표시하였다. Table 6의 발표시간은 기상청 홈페이지에서 발췌하였다(기상청 홈페이지).

Table 6에서 볼 수 있듯이 국내 내륙에서 발생하는 규모 2.5

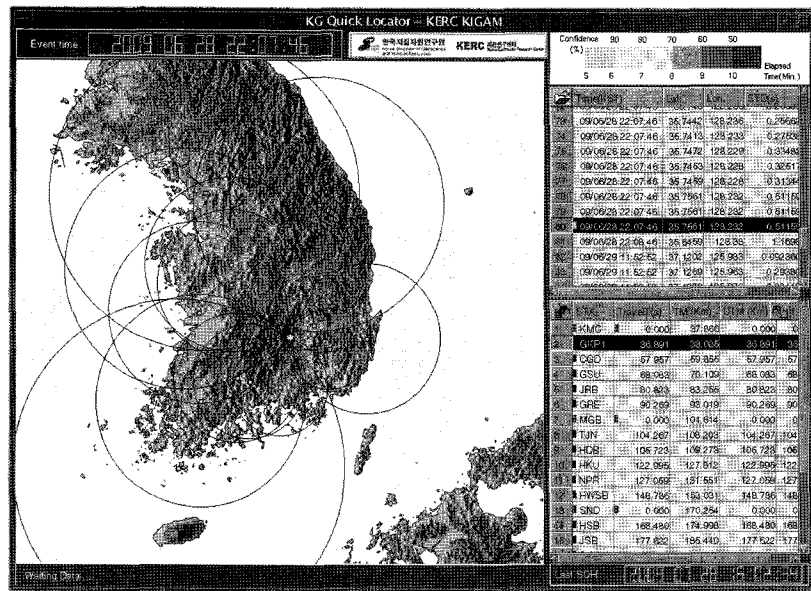


Fig. 7. Screen capture of estimator of epicenter using EP.

Table 5. Earthquake list from KMA since May 2009(기상청 홈페이지).

번호	발생시각(KST)	규모	위도	경도	지역
1	2009/08/21 23:02:22	3.8	38.82	125.79	황해북도 송림 북동쪽 16km 지역
2	2009/07/30 09:27:37	2.6	35.85	126.29	전남 영광군 북서쪽 32km 해역
3	2009/07/15 04:04:50	3.1	35.12	125.12	전남 신안군 흑산면 북북서쪽 61km 해역
4	2009/07/01 08:55:04	2.5	37.75	124.90	인천 백령도 남동쪽 30km 해역
5	2009/06/29 11:52:53	2.5	37.14	126.02	충남 태안군 북북서쪽 51km 해역
6	2009/06/28 22:07:48	3	35.78	128.29	경북 고령군 북북동쪽 7km 지역
7	2009/06/20 04:05:51	2.6	37.09	124.80	충남 태안군 서격렬비열도 북서쪽 85km 해역
8	2009/06/06 00:49:42	2.8	38.63	127.44	강원 회양(북한) 서남서쪽 16km 지역
9	2009/06/03 20:09:38	2.9	38.57	126.50	황해북도 신계 북북서쪽 9km 지역
10	2009/05/31 00:10:58	2.5	33.52	125.85	제주 제주시 서쪽 63km 해역
11	2009/05/02 12:28:29	2.6	36.57	128.71	경북 안동시 서북서쪽 2km 지역
12	2009/05/02 07:58:28	4	36.56	128.71	경북 안동시 서북서쪽 2km 지역

이상의 지진에 대해서는 20초 이내에 최초 진앙 추정이 가능하며, 40초 이내에 10 km 내외의 오차를 갖는 진앙을 추정하였다. 해역과 북한에서 발생한 지진에 대해서는 지진의 발생 위치와 규모에 따라 추정 성능이 달라짐을 알 수 있다. 특히 Table 6의 11번 지진은 4개의 EP가 선택되어 1차 진앙이 추정된 이후로 다른 관측소 기록계로부터 총 15개 EP가 도착하였고 각 EP가 선택될 때마다 진앙이 추정되었다. 최초로 선택된 EP는 JRB 관측소에서 수신된 EP로써 11번 지진과는 무관한 EP였기 때문에 1차 추정의 위치 오차가 매우 커졌으며 총 8개의 EP가 도착하여 계산될 때 JRB 관측소가 제외되어 4 km 이내의 오차로 진앙이 추정되었다. 내륙에서 2.5이상의 지진이 발생할 경우 신속하고 정확한 진앙 추정이 가능함을 확인하였다. Table 6의 4번, 10번 지진은 관측망 외부에서 발생한 규모 2.6 이하의 지진으로 진앙지 주변에 관측소가 드물기 때문에 EP가 감지되지 못한 것으로 보인다. 실시간 운영의 경우에 지

진의 발생 범위의 규모를 신중하게 검토하여 경보 대상을 선정해야 할 것으로 판단된다. 또한 본 실험에서는 한국지질자원 연구원의 속도 관측소의 EP만을 이용했지만 기상청 등 지진 관련 기관의 협조를 얻어 사용 관측소를 늘리게 되면 보다 빠르고 정확한 진앙 추정이 기대된다.

진앙 추정 오류 구분

본 논문에서 제안하는 EP를 이용한 방식에서 진앙 추정이 이루어지는 기준은 1분 이내에 선택된 EP가 4개 이상인 경우이며 이후 1분 이내에 추가되는 EP가 있을 때마다 동일 지진으로 간주하고 연속적으로 진앙을 추정한다. 한편 진앙 추정에 사용되는 EP가 4개 이상이라도 진앙 추정 알고리즘에서 최적 관측소만을 선택하게 되는데 경우에 따라 EP 사용 개수가 달라질 수 있다.

EP를 이용한 진앙 추정방법을 적용하여 실시간 실험한 결과

Table 6. Result of epicenter estimation using EP(기상청 홈페이지).

번호	발생시간 (KST)	기상청 발표시간	소요시간 (초)	1차 진앙추정			최적 진앙추정		
				추정 시간	소요시간 (초)	오차 (km)	추정 시간	소요시간 (초)	오차 (km)
1	2009/08/21 23:02:22	23:16:00	818	23:03:05	43	70.294	23:03:11	49	11.018
2	2009/07/30 09:27:37	09:31:00	203	09:28:00	23	10.278	09:28:02	25	10.170
3	2009/07/15 04:04:50	04:09:00	250	04:05:26	36	34.417	04:05:30	40	19.070
4	2009/07/01 08:55:04	09:25:00	1,796	08:55:48	44	701.528	08:55:48	44	701.528
5	2009/06/29 11:52:53	11:56:00	187	11:53:18	25	3.968	11:53:18	25	3.968
6	2009/06/28 22:07:48	22:13:00	312	22:08:02	14	6.867	22:08:26	28	5.880
7	2009/06/20 04:05:51	04:13:00	429	04:06:44	53	35.640	04:06:44	53	35.640
8	2009/06/06 00:49:42	00:52:00	138	00:50:16	34	10.825	00:50:22	40	8.804
9	2009/06/03 20:09:38	20:25:00	922	20:10:17	39	15.572	20:10:19	41	0.731
10	2009/05/31 00:10:58	00:14:00	182	감지하지 못함					
11	2009/05/02 12:28:29	12:32:00	211	12:28:46	17	363.226	12:29:04	35	3.158
12	2009/05/02 07:58:28	08:05:00	392	07:58:45	17	1.188	07:58:52	24	0.755

Table 7. Comparison between earthquake list from KIGAM and the result of this study since May, 2009. (except earthquakes were listed on Table. 6).

번호	한국지질자원연구원 지진목록				1차 진앙 추정 결과(5개 이상의 EP사용)		
	발생시간(UTC)	규모	위도	경도	추정시간(UTC)	오차(km)	비고
1	2009/05/09 03:34:23	1.59	35.6612	127.0286	2009/05/09 02:34:39	0.813	
2	2009/05/12 01:01:29	2.09	35.3263	127.8157	2009/05/12 01:01:49	13.167	
3	2009/05/14 11:50:12	2.39	36.2325	127.1328	2009/05/14 11:50:27	0.462	
4	2009/05/15 13:41:32	2.60	36.5739	126.4127	2009/05/15 13:41:54	6.555	
5	2009/05/20 17:05:14		33.9360	131.7469	2009/05/20 17:06:18	16.607	일본
6	2009/05/20 22:00:52	2.06	34.8546	127.4294	2009/05/20 22:01:18	73.224	
7	2009/06/05 09:50:01	1.66	35.8186	127.9581	2009/06/05 09:50:31	5.016	
8	2009/06/08 15:19:56	4.22	39.1002	123.3430	2009/06/08 15:21:09	87.989	중국
9	2009/06/11 14:28:36	1.89	36.8415	126.7761	2009/06/11 14:27:41	464.725	
10	2009/06/14 19:48:31	2.21	36.8379	126.7703	2009/06/14 19:48:53	70.309	
11	2009/06/14 20:46:35	1.89	36.8379	126.7708	2009/06/14 20:47:06	5.276	
12	2009/06/20 12:14:52	2.52	38.0420	126.6200	2009/06/20 12:15:29	24.297	
13	2009/06/21 15:02:03	1.83	36.6838	127.7557	2009/06/21 15:02:29	17.642	
14	2009/06/22 13:34:20	2.10	36.1519	127.6221	2009/06/22 13:34:47	0.282	
15	2009/06/23 13:00:18	1.60	37.3022	129.5168	2009/06/23 13:00:51	14.149	
16	2009/06/25 14:03:57	4.14	33.3936	130.7743	2009/06/25 14:04:57	8.131	일본
17	2009/06/28 00:35:29	4.06	33.0227	129.8403	2009/06/28 00:36:31	107.770	일본
18	2009/06/29 16:21:19	3.77	33.0887	129.8873	2009/06/29 16:22:22	36.325	일본
19	2009/07/06 09:11:18	1.78	36.2174	127.5025	2009/07/06 09:11:46	8.044	
20	2009/07/11 14:47:58	1.79	35.6293	127.6633	2009/07/11 14:48:16	0.849	
21	2009/07/16 07:29:26	1.87	36.7934	128.7528	2009/07/16 07:29:59	64.383	
22	2009/07/17 20:16:45		33.4926	131.8720	2009/07/17 20:17:55	31.087	일본
23	2009/07/22 14:51:02	4.42	33.2008	134.0218	2007/07/22 14:52:37	110.582	일본
24	2009/07/29 06:25:10	1.86	35.8308	127.2460	2007/07/29 06:25:36	5.418	
25	2009/08/01 15:57:04		38.2442	138.7834	2009/08/01 15:59:28	801.034	일본
26	2009/08/05 03:02:05	1.51	35.3745	128.0637	2009/08/05 03:02:38	5.408	
27	2009/08/14 18:18:13	2.68	36.5322	129.5649	2009/08/14 18:18:34	4.478	
28	2009/08/16 17:23:52	3.19	33.7634	130.3733	2009/08/16 17:24:55	161.469	일본
29	2009/08/17 11:40:13	3.56	33.8721	130.1658	2009/08/17 11:41:02	394.137	일본
30	2009/08/25 03:19:12	1.80	35.7176	128.1518	2009/08/25 03:19:48	51.747	
31	2009/08/30 19:52:47	1.66	36.8855	127.3869	2009/08/30 19:53:09	3.610	

2009년 5월 1일부터 2009년 8월 31일까지 총 385건의 진앙 추정이 이루어졌다. 이들 중 추정 시간이 1분 이내인 것은 총

151건이 된다. 진앙 추정 과정에서 사용된 EP 개수로 구분하면 5개 이상의 EP를 사용한 경우는 190건, 4개의 EP를 사용

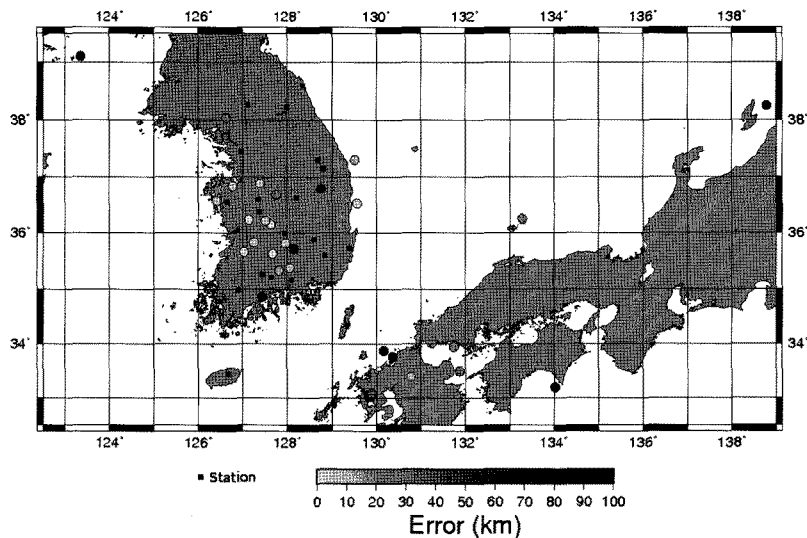


Fig. 8. Distribution map of seismic station and misfit of epicenter estimation.

한 경우는 74건, 3개 이하의 EP를 사용한 경우는 121건으로 집계되었다. 5개 이상의 EP를 사용한 경우에서 1분 이내의 진앙 추정은 총 41건이다. 이들 41건 중 위 Table 6의 12 건 중 4번(EP 3개 사용, 진앙 추정), 10번(감지 못함)을 뺀 10건을 제외한 추정 결과(31건)를 한국지질자원연구원의 지진목록과 비교하였다(Table 7).

총 31건 중 일본에서 9건, 중국에서 1건 그리고 21건이 국내에서 발생한 지진에 대한 진앙 추정으로 확인되었다. 국외 지진의 경우 규모와 발생 위치에 따라 추정된 위치와 지질자원연구원의 지진목록의 위치 오차가 큰 편차를 보이고 있다. 국내에서 발생한 지진에 대한 오차는 지진의 규모의 영향을 받지만 진앙 주변의 관측소 분포와 보다 깊은 연관이 있는 것으로 판단된다(Fig. 8). 규모가 2.6 이하로 작거나 관측망 외부 해역에서 발생한 지진의 경우(예, Table 6의 4번, 10번) 주변 관측소의 SNR이 낮아져서 효과적으로 EP 검출이 어려워 진앙 추정이 불가능하거나 많은 오차를 포함하고 있다.

Table 7의 9번 목록은 충남 합덕에서 발생한 규모 1.89의 지진으로써 사용된 EP가 5개 이지만 오차가 460 km를 넘어서고 있다. 이 지진에 대해서 총 5회의 진앙 추정이 이루어졌으며 처음에는 4개의 EP를 사용하여 56.579 km의 오차로 진앙을 추정했지만 이후 선택된 강원도 고성과 정선 관측소의 EP로 인해 큰 오차가 발생한 것으로 판단된다. 이러한 오류를 구분하기 위해서는 관측소의 공간적 분포를 고려해야 한다. Fig. 7의 화면에 추정 진앙으로부터 각 관측소 거리 순서로 정렬하여 어떤 관측소로부터 EP를 수신했는지를 표시하여 직관적으로 잘못된 진앙 추정임을 알 수 있도록 하였다. Fig. 9에서 상단의 그림의 우측 하단에 진앙 추정에 사용된 관측소가 가깝게 분포하고 있는 것을 알 수 있으나 하단 그림에는 진앙 추정 위치 주변에 EP를 전송하지 않은 많은 관측소가 있음을 확인하여 잘못된 진앙 추정임을 알 수 있다.

EP를 이용한 진앙추정 방법에서 진앙 추정의 신뢰도를 판단할 수 있는 구분자로서 '진앙 추정에 사용한 EP 개수'와 추정 진앙과 EP 전송 관측소의 거리가 유용함을 알 수 있다.

이벤트 감지기의 최적화

EP를 이용한 진앙 추정방법의 정확도 및 신뢰도는 각 관측소의 이벤트 감지기의 성능과 밀접한 연관을 갖고 있다. 다음 Fig. 10은 2007년 한 해 동안 수신된 각 지진관측소별 EP의 일별 평균 개수를 나타낸다. 그림에 나타나듯이 EP의 개수는 각 지진관측소별로 상당한 편차를 보이며 이는 관측소 주변의 잡음에 의한 영향으로 판단된다. 관측소로부터 최소 개수의, 실제 P파와 연관된 정확한 EP를 수신하는 것이 신속한 진앙 결정의 전제 조건이 된다. 따라서 관측소의 설치 위치나 운영 환경을 최적화해야 할 것으로 판단한다. 또한 전체 관측소에 동일하게 적용되고 있는 위상검출기의 파라미터에 대해 관측소 환경에 맞게 최적화하는 작업이 필요하다고 생각된다.

이벤트 패킷 이용의 장단점

P파 연관 이벤트 패킷을 이용한 진앙 추정방법의 장단점을 기술하면 다음과 같다.

우선 MHD에 의해 생성된 EP는 가장 작은 컴퓨팅 자원이 소요된다. 즉 EP를 이용한 진앙추정 방법은 분산 처리(distributed processing) 개념을 도입하여 적은 자원으로 충분한 성과를 얻을 수 있다는 점을 꼽을 수 있다. 진앙추정 등 지진요소 결정 과정의 첫 번째 단계는 위상검출이며 지금까지 운영 중인 대부분의 지진요소 결정 방법에서는 위상검출 단계가 지진데이터가 취합되는 데이터 센터에서 진행된다. 비록 현재까지의 위상검출 프로세스의 부하가 무시할 수 있을 정도로 할지라도 관측소의 확충과 데이터 전송 방식이 매초 전송으로 바뀔 경우 상당한 부하를 예상할 수 있다. 현재 운영 중인 대

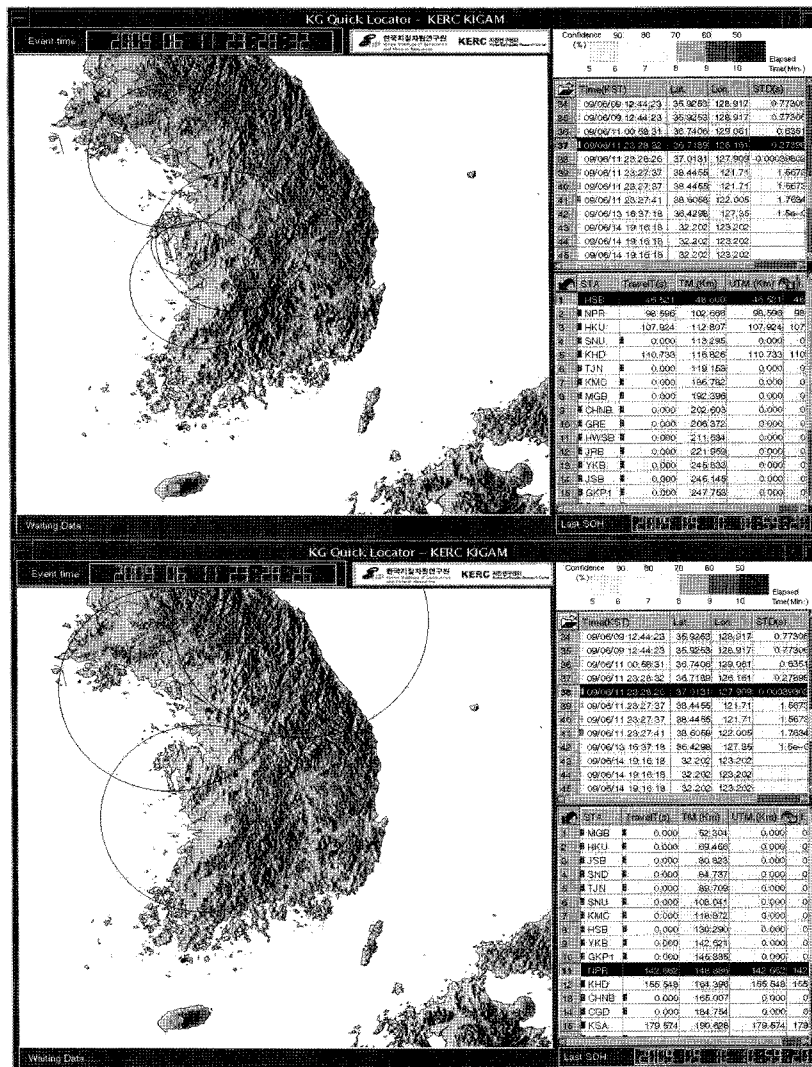


Fig 9. Screen capture of epicenter estimation on the June 11, 2006 earthquake. The false determination case can distinguish using sorted list of station by the distance between estimated epicenter and station.

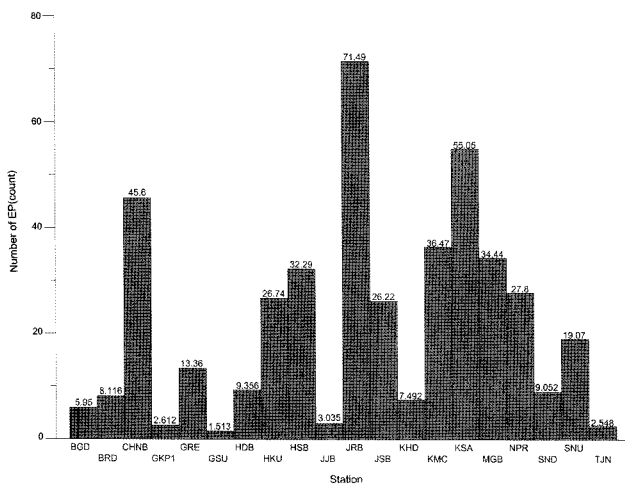


Fig. 10. Averaged count per one day of EP from each station(2007). The parameter of MHD should to adjust environment of seismic operation.

부분의 지진기록계에서 자체적인 위상검출을 수행하고 그 결과를 EP로 만들어 데이터 센터로 전송하고 있으며, 향후 설치될 지진기록계에서도 같은 기능이 지원될 것으로 보인다. 데이터 센터에서는 지진데이터 대상 위상검출 단계를 생략하고 EP에 포함되어 있는 위상정보를 이용하여 지진요소 결정을 수행할 수 있을 것으로 판단한다. 이 과정에서 EP의 생산은 각 지진기록계에서 담당하며, EP는 지진데이터 패킷에 비해 무시할 수 있을 정도의 적은 개수만이 지연 없이 전송되므로 전산 자원 활용 측면에서 매우 효율적이라 판단된다. 이러한 체계는 서로 다른 프로세서가 네트워크로 연결되어 상호 업무를 나누어 진행하고 결과를 통합하는 분산처리 시스템의 하나로 이해할 수 있다(Coulouris *et al.*, 2005). 근래의 지진기록계의 CPU는 디지털이징 및 패킷 관리뿐 아니라 자체적인 위상검출과 유의미한 정보의 추출 및 관리를 할 수 있는 처리 속도를 갖고 있으며 메인 메모리나 디스크 등의 주변기기도 높은 성능

을 보이고 있다. 각 관측소에서 원시 데이터를 대상으로 위상 검출 등의 처리를 거쳐 정보를 생산하고, 그 결과를 데이터 센터로 전송하게 한다면 지진요소 결정 과정에 관여하는 전산 자원을 보다 효율적으로 사용할 수 있다.

그리고 EP는 다른 지진데이터 패킷보다 가장 먼저 전송되고 있다는 장점이 있다. 최근 Q330과 같이 지진동 데이터를 실시간으로 전송하는 지진기록계가 소개되고 도입되고 있지만 전국적 차원에서 보면 극히 일부분의 지역에 한정되어 설치되고 있다. 현재 운영되고 있는 지진기록계를 단 기간 내에 새로운 지진기록계로 바꿀 수 없는 조건에서 지진기록계로부터 EP가 가장 먼저 수신되는 상황은 상당 기간 계속될 것으로 전망된다. 따라서 앞으로 수년 동안은 EP를 사용할 경우 가장 빠른 진앙 추정이 가능하다고 판단된다.

EP 사용에 있어 EP에 포함된 데이터의 부족을 한계로 지적할 수 있다. Quanterra 기록계는 검출된 위상의 시작시점, SNR, 주기, 8 P-T내의 최대 진폭 값 그리고 배경 잡음 등의 데이터만을 EP에 적재하여 제공한다. EP에 포함되어 있는 이와 같은 데이터로부터 추론할 수 있는 정보는 매우 한정될 수밖에 없다. 이를 극복하기 위해서 국내 지진, 방재 유관기관 등에서 새로운 EP 포맷을 제안하고 지진기록계에서 이를 지원하도록 권고하고 있다. 최근 1~2년 사이에 매초 마다 직전 1초의 지진데이터 패킷 전송은 물론 매 초당 각 성분별 최대값, PGA 및 SI값 등 데이터 센터에서의 수신 즉시, 부가적인 분석 없이 사용 가능한 정보를 제공하는 등 새로운 지진기록계 기능을 명세하였고 일부 기록계 제작 회사를 중심으로 점차 이를 지원하고 있는 추세이다.

결 론

이 연구에서는 국내 대부분의 지진기록계를 차지하는 Q4128, Q730에서 작동하는 Murdock-Hutt 이벤트 감지기에서 생산되는 이벤트 패킷을 이용한 신속한 진앙 결정 방법을 구현하고 실시간으로 실험하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 각 관측소에서 전송되는 이벤트 패킷은 다른 데이터 패킷보다 먼저 데이터 센터로 수신되며, 이벤트 패킷에 실린 신호 주기와 SNR을 이용하여 실제 지진의 P파와 연관된 패킷을 선택할 수 있음을 확인하였다.

(2) 선택된 P파 연관 이벤트 패킷의 이벤트 감지 시각을 이용하여 하여 진앙을 추정할 경우 50초 이내에 진앙 결정이 가능하고 관측망 내부에서 발생하는 규모 2.5 이상의 지진의 경우 20초 이내에 10 km 내의 오차를 갖는 진앙이 결정될 수 있음을 알 수 있었다

(3) 실시간으로 이벤트 패킷을 수신할 수 있는 관측소를 확충할 경우 보다 빠르고 작은 오차 범위 내에서 진앙을 결정할 수 있음을 확인하였다.

향후 각 관측소의 특성에 맞는 이벤트 감지기를 선택하고 관련 파라미터를 최적화하는 연구가 진행되어야 하며, 이벤트 패킷에 담겨져 있는 최소 데이터를 이용한 규모 추정 및 지진 조기경보 체계와의 연계에 대해 연구되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본 사업인 '실시간 지진 분석 및 지진재해 정량적 예측 기술 개발' 과제의 지원으로 이루어졌으며 많은 의견과 프로그램 구현에 협조해주신 동료 연구원들께 감사를 드립니다. 또한 논문의 완성도를 높일 수 있도록 귀중한 의견을 주신 익명의 심사자에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- 기상청 홈페이지, 지진·지진해일현황::지진·지진해일정보, <http://www.kma.go.kr>
- 기상청, 2008, 지진·지진해일 감시기술발전을 위한 SAFE(Safety Area From Earthquake) 비전 2012.
- 류용규, 김명수, 2005, 실시간 지진 P파 검출 알고리즘, 한국지진공학회 학술대회 논문집, 62-67.
- 신동훈, 황의홍, 남성태, 전영수, 2007, P파 도달시간을 이용한 도식적 진앙 추정, 한국지진공학회 학술대회 논문집, 23-30.
- 신동훈, 박창업, 2008, 초동 P파 도달시간을 이용한 진앙 추정기법의 적용, 한국지진공학회 학술대회 논문집, 21-26.
- 지현철, 1998, 지진관측 원리 및 관측망 현황, 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 3-15.
- 지현철, 김재관, 신진수, 박정호, 신인철, 2000, 지진계측기 표준 규격에 대한 기본개념, 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 468-476.
- 황의홍, 이우동, 조봉곤, 조범준, 2007, 광대역 지진자료의 P파를 이용한 모멘트 규모 결정, 지구물리, 10, 1-12.
- 황의홍, 조봉곤, 이우동, 2007, 단일 관측소에서 기록된 P파형을 이용한 진앙거리 신속 결정에 관한 연구, 지질학회지, 43, 99-106.
- Allen, R. M. and Kanamori, H., 2003, The potential for earthquake early warning in Southern California, *Science Magazine*, 300, 786-789.
- Coulouris, G, Dollimore, J., and Kindberg, I., 2005, Distributed systems concepts and design, Forth edition, Addison Wesley.
- Erdik, M., 2006, Urban earthquake rapid response and early warning systems, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Keynote Address K4.
- Iglesias, A., Singh, S. K., Ordaz, M., Santoyo, M. A., and Pacheco, J., 2007, The seismic alert system for Mexico City: an evaluation of its performance and a strategy for its improvement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, 1718-1729.
- IRIS, 2007, SEED reference manual: Standard for the exchange of earthquake data, SEED Format Version 2.4, Electronic Release, USGS.
- Kamigaichi, O., 2004, JMA earthquake early warning, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 4, 134-

- 137.
- Murdock, J. N and Hutt, C. R., 1983, A new event detector designed for the seismic research observatories, USGS, Open-File report 83-785.
- Olivieri, M., Allen, R. M., and Wurman, G., 2008, The potential for earthquake early warning in Italy using ElarmS, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**, 495-503.
- Quanterra Inc. 1999, Quanterra MULTI-SHEAR software configuration guide, Quanterra Inc, Harvard, USA.
- Withers, M., Aster R., Young, C., Beiriger, J., Harris, M., Moore, S., and Trujillo, J., 1998, A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 95-106.
- Wu, Y.-M. and Teng, T.-L., 2002, A virtual subnetwork approach to earthquake early warning, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2008-2018.
- Wu, Y.-M, Shin, T.-C., and Tsai, Y.-B., 1998, Quick and reliable determination of magnitude for seismic early warning, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 1254-1259.