

# 지진조기경보를 위한 신속 진앙위치 결정

## Rapid Earthquake Location for Earthquake Early Warning

김광희\* · Paul A. Rydelek\*\* · 석봉출\*\*\*

Kwang-Hee Kim, Paul A. Rydelek, and Bong-Chool Suk

### Abstract

Economic growth, industrialization and urbanization have made society more vulnerable than ever to seismic hazard in Korea. Although Korea has not experienced severe damage due to earthquakes during the last few decades, there is little doubt of the potential for large earthquakes in Korea as documented in the historical literature. As we see no immediate promise of short-term earthquake prediction with current science and technology, earthquake early warning systems attract more and more attention as a practical measure to mitigate damage from earthquakes. Earthquake early warning systems provide a few seconds to tens of seconds of warning time before the onset of strong ground shaking. To achieve rapid earthquake location, we propose to take full advantage of information from existing seismic networks; by using P wave arrival times at two nearest stations from the earthquake hypocenter and also information that P waves have not yet arrived at other stations. Ten earthquakes in the Korean peninsula and its vicinity are selected for the feasibility study. We observed that location results are not reliable when earthquakes occur outside of the seismic network. Earthquakes inside the seismic network, however, can be located very rapidly for the purpose of earthquake early warning. Seoul metropolitan area may secure 10~50 seconds of warning time before any strong shaking starts for certain events. Carefully orchestrated actions during the given warning time should be able to reduce hazard and mitigate damages due to potentially disastrous earthquakes.

**Key words** : Earthquake early warning, Seismic hazard, Rapid earthquake location

### 요 지

경제규모의 증가, 산업화, 도시화 등은 결과적으로 우리국민의 잠재적 지진 위험 증가를 야기하였다. 최근에는 비록 우리나라에서 지진으로 인한 인명과 재산의 손실이 미비했지만, 과거 문헌 기록을 보면 우리나라에서도 대규모 피해를 야기한 지진이 발생한 바 있었으므로, 향후 피해를 유발할 수 있는 지진발생 가능성을 간과할 수는 없다. 현재의 과학기술력으로는 단기 지진 예보가 불가능함을 고려할 때 지진재해 저감을 위하여 취할 수 있는 대비책의 하나로써 지진조기경보체계 확립의 중요성이 점차 증가하고 있다. 지진조기경보체계 확립의 취지는 지진발생 후 강진동이 시작하기 전 수 초 혹은 수십 초의 지진대비시간을 확보하고 미리 계획된 조치를 취함으로써 지진재해를 저감하는 것이다. 본 논문에서는 신속한 지진 발생위치 결정을 위하여 진원 부근 2개의 지진 관측소에서 확보한 초동 도착시간과 주변의 다른 관측소에서는 아직 초동이 관측되지 않았다는 사실을 이용한다. 우리나라 내륙 및 주변해역에서 발생한 주요 지진의 신속한 진앙 위치결정에 이 기술을 적용하였다. 관측소 외부에서 지진이 발생할 경우 이 기술로는 효과적인 지진위치의 결정이 어렵지만, 관측망 내부에서 지진이 발생할 경우 본 기술을 이용하여 지진의 위치를 신속히 결정 할 수 있다. 수도권인 경우 10~50초의 지진대비시간을 확보할 수 있을 것으로 예상되며, 주어진 시간 내에 사전 준비된 조치를 취함으로써 유사시 지진재해저감에 크게 기여할 것이다.

**핵심용어** : 지진조기경보, 지진재해, 신속진원위치결정

### 1. 서 론

진원에서 지진의 시작부터 종결까지의 시간, 즉 단층의 이동 시작부터 종결까지의 시간은 수 초 혹은 수 분으로 매우 짧지만, 인명피해, 재산손실 등의 1차적 재해와 더불어 화재, 주요시설물의 가동 불능, 공공서비스의 중단, 사회적 혼란 등의 2차적 재해를 수반할 수 있으므로 지진으로 인한 피해

규모는 다른 어떤 자연재해보다 커질 가능성이 크다. 한반도에서는 최근 수십여 년 동안 큰 피해를 유발한 지진이 발생한 바 없지만, 지난 이천여 년간의 역사문헌은 한반도에서도 많은 피해 지진이 발생하였음을 기록으로 전하고 있다. 역사 지진 발생위치와 규모 결정에 있어서 지진학자 간에 견해 차이가 있기는 하지만, 한반도에서 규모 6.8이상의 지진이 발생한 바 있음을 여러 연구 결과에서 밝히고 있다(Chiu 등,

\*정회원 · 한국해양연구원 선임연구원 (E-mail: kwanghee@kordi.re.kr)

\*\*한국해양연구원 초빙연구원

\*\*\*한국해양연구원 남해연구소 소장

2004; Lee 등, 2006). 최근에는 2007년 1월 20일 규모 4.8 (기상청, 2007)의 지진이 오대산지역에서 발생하여 한반도에서 지진의 위험성에 관한 관심을 불러 일으킨바 있다.

지진으로 인한 피해를 효과적으로 최소화하기 위해서는 장·단기적 대응책이 함께 마련되어야 한다. 장기적으로는, 각 시설물에 대한 내진설계 기준 보완, 지진발생 시 재난관리 및 안전관리를 포함한 재난대응태세 확립 등을 통하여 향후 발생할 수 있는 지진으로 인한 피해를 최소화하기 위한 노력이 필요하다(강수영 등, 2008). 지진발생 후 실제 강진동이 시작되기 이전 혹은 강진동이 발생하는 동안에는 주요시설의 안전확보를 위한 긴급조치를 취할 수 있어야 한다. 또한, 지진 발생 이후에는 효과적 구조활동을 포함한 신속한 지진재해 대응태세가 가동될 수 있어야 한다. 단기적으로는 임박한 지진의 발생 시간, 위치, 규모를 정확히 예보하고 대비하는 것이 바람직하지만, 복잡한 지구내부구조, 지진의 발생원인 및 진화과정 등에 관한 전반적인 이해 부족으로 인하여 정확한 지진의 발생시간과 위치, 규모 등을 예측하기란 현재의 과학 기술로는 불가능한 상태이다(Geller, 1997). 이런 상황 하에서 지진으로 인한 피해를 최소화하기 위한 가장 실현 가능성 있는 대안은 지진신속통보체계(Rapid Reporting System, RRS) 혹은 조기경보체계(Early Warning System, EWS)를 갖추는 것이다. 여기에서 언급한 두 체계(지진신속통보와 지진조기경보)에는 목적과 방법에 차이가 있다. 지진신속통보에서는 지진발생 후 수 분 이내에 지진발생사실, 지진의 발생위치, 규모, 해당지역에서의 진도 등 중요 정보를 관계기관과 이해당사자에게 신속히 제공한다. 제공된 정보를 토대로 위기상황에서의 매뉴얼 가동 등의 조치를 취하도록 함으로서 효율적인 사후조치가 가능하도록 하는 것이 지진신속통보의 목적이다. 반면에 지진조기경보에서는 지진발생사실을 포함한 주요 정보를 재해 위험성 있는 지역에 강한 지진동이 시작되기 수 초 혹은 수십 초 이전에 제공함으로써 미리 계획된 사전조치를 취하도록 하여 지진으로 인한 재해를 저감한다. 따라서 지진조기경보에서 가장 중요한 것은 지진발생을 인지하고 그 발생 시간, 위치, 그리고 규모를 신속히 결정하는 것이다. 이러한 지진조기경보를 포함한 일련의 행위들은 *real-time seismology*라고 알려져 있기도 하며, 주요 지진이 발생한 후 자료획득, 분석, 필요 시 경보 발령 및 긴급 대응/복구 시스템의 가동 등을 총괄하는 것으로서, 지진학 연구 분야 중 그 연구가 가장 활발히 진행되고 있는 분야 중의 하나이다(Lee 등, 2003; Kanamori, 2005).

지진조기경보체계에서 지진 발생을 인지한 후 가장 먼저 수행되어야 할 일이 지진의 발생위치와 규모를 결정하는 것이다. 일반적으로 지진의 규모와 관심지역의 진도 결정에 앞서 지진의 발생위치를 결정한다. 지진의 발생위치는 지진위험성 평가, 지하구조연구 등을 위한 가장 기초적인 정보를 제공하기 때문에 그 정확성 향상에 관한 연구는 비교적 활발히 진행되어 왔다. 지진 발생 위치와 시간을 결정하기 위해서는 최소 4개의 도착시간 관측이 필요하며, 지진파의 관측된 도착시간과 이론적 도착시간 사이의 차이를 최소화 시키도록 지진의 발생 위치와 시간을 조정함으로써 그 값을 구하게 된

다(Lee 등, 1981). 이론적 도착시간 계산을 위해서는 대상지역의 지진파 전파 속도 구조에 관한 사전 정보가 필요하다. 계산에 사용된 지진파 전파 속도 모델이 실제 지하구조와 유사하고, 관측된 도착시간에 오류가 없다면, RMS (root-means-square)는 0에 가까워야 한다. 그러나 일반적으로 사용되는 1-D 속도 모델은 실제 지하구조의 횡적 변화를 충분히 반영하지 못한다. 모델에러(Model Error)라고 총칭되는 실제 속도구조와 계산에 사용된 모델 사이의 차이는 지진발생위치를 잘못 결정하게 하는 가장 큰 원인이 되기도 한다. 모델에러를 최소화하기 위해서는, 즉 1-D 속도모델의 한계를 극복하기 위해서는, 실제 지구구조를 보다 현실적으로 묘사하는 3차원 속도구조의 사용이 바람직하다. 이 밖에도 지진발생 위치의 상대적 정확성을 확보하기 위하여 JHD(Joint Hypocenter Determination) 방법(Pujol, 1988; Kim 등, 2005)과 파형의 유사성을 이용하기도 한다(Waldhauser 등, 2002).

앞에서 언급한 세 가지 방법 모두 정확한 지진 발생위치를 구할 때 효과적인 방법이지만, 계산상에 많은 시간이 필요하므로 신속성이 가장 중요한 지진조기경보를 위하여 사용하기에는 적절치 않다. 정확한 지진발생위치 결정이 중요하지만, 지진조기경보에서는 신속하게 지진의 발생위치를 결정하는 것이 보다 중요할 수 있다. 황의홍 등(2007)은 이러한 노력의 일환으로 단일 관측소에 기록된 P파의 초기 2초~3초 동안의 파형을 분석하여 진앙거리를 구하는 방법을 소개한 바 있다. 본 연구에서는 진원위치 신속결정 방법으로 P파를 가장 먼저 관측한 2개 관측소로부터의 정보를 사용하여 지진 발생위치를 일정 범위로 추정한 후, 주변의 다른 관측소에서는 아직 P파가 도착하지 않았다는 정보를 이용하여 지진위치를 한정한다(Rydelek 등, 2004; Cua, 2005; Horiuchi 등, 2005). 본 연구의 범위를 벗어나지만, 지진조기경보를 위하여 신속히 결정하여야 할 또 하나는 지진의 규모, 혹은 관심지역에서의 진도이다. 지진조기경보를 위한 신속 규모 결정의 방법으로서 초동 도착 후 2초~3초간의 파형 분석과 경험식을 바탕으로 규모를 추정하는 기술을 고려해 볼만하다(Allen 등, 2003; Wu 등, 2005). 황의홍(2007)은 P파 초기 파형 분석을 통하여 국내에서 발생하는 지진의 규모 추정이 가능함을 제시한 바 있다. 비록 이러한 기술이 초보 발전 단계에 있기는 하지만, 이 기술을 통하여 신뢰성 높은 지진 규모의 신속한 결정이 가능하다고 가정하고 본 연구에서 소개하는 방법을 지진조기경보에 함께 적용할 경우 확보할 수 있는 지진조기경보시간에 관하여 살펴본다. 이 방법으로 구한 지진 발생위치는 지진학 심화연구를 위해서 사용될 수는 없지만, 지진조기경보를 위해서는 짧은 시간 내에 유용한 정보를 제공함으로써 대규모 지진으로 인한 지진재해대응책 마련에 크게 기여할 수 있을 것이다.

## 2. 본 론

### 2.1 지진 발생위치 신속 결정의 필요성

앞에서 언급한 바와 같이 지진조기경보에서는 대상지역에 필요한 정보를 신속히 제공함으로써 피해를 유발할 수 있는

강한 지진동 시작 이전에 사전 조치를 취하여 지진으로 인한 피해를 최소화 시키는 것이 목적이다(Heaton, 1985; Wu 등, 2002). 다시 말하면, 대상지역에서 피해를 유발시킬 수 있는 강한 진동 도착에 앞서 아주 짧은 시간을 확보할 수 있는지 여부가 지진조기경보의 성패를 가름한다. 지진조기경보시간 (경보시간, warning time)을 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$T_w = T_s - T_d - T_p - T_t \quad (1)$$

여기서  $T_w$ : 경보시간,  $T_s$ : S파 전파시간,  $T_d$ : 지진관측망을 이용하여 지진의 발생을 인지하는데 걸리는 시간,  $T_p$ : 지진의 위치와 규모 결정에 필요한 시간,  $T_t$ : 지진관측소로부터 중앙 자료처리시설로 필요정보를 전송하고, 일정 수준 이상일 경우 필요한 정보를 중앙 자료처리 시설로부터 각 지역으로 전송하는데 필요한 시간을 의미한다. 여기에서 강진동 도착시간으로서 S-wave 도착시간을 사용하는 것은 경보시간 측정에 있어서 발생할 수 있는 상황을 신중히 고려한 것으로서, 일반적으로 최대 지진동을 유발하는 파는 S-wave 도착 후 몇 초 후에 도착한다 (Kim 등, 2007).  $T_t$  (정보의 전달 시간)는 지진파의 전파 시간과 비교할 때 무시할 수 있을 정도로 작다. 그러므로 가능한 긴  $T_w$ (경보시간)을 확보하기 위해서는  $T_d$ 와  $T_p$ 를 최소화 하여야 한다.  $T_p$ (계산시간)의 경우, 빠르게 발전하고 있는 컴퓨터 관련 기술로 필요한 시간이 점차 짧아지고 있다. 이와 함께, 짧은 시간 내에 필요한 해를 구하는 알고리즘의 개발 또한 병행되어야 한다. 그러나 가능한 짧은  $T_d$ 를 확보하는 것은 쉽지 않다. 일반적인 지진위치 결정방법을 사용한다면, 최소 4개 이상의 관측소에서 지진의 발생이 감지되어야 하며, 결정된 지진위치의 신뢰성 확보를 위하여 7개 이상의 관측소에서 지진이 관측될 때까지 기다리기도 한다. 본 연구에서는 지진인자 결정에 필요한 시간을 최소화하기 위한 노력과 함께 2개의 관측소에서 관측된 P파의 도착 시간을 이용하여 지진의 위치를 추정함으로써, 가능한 긴 경보시간을 확보할 수 있다.

## 2.2 초동관측 시간차를 이용한 지진 발생위치 추정

본 연구에서 사용하는 방법은 Horiuchi 등(2005)과 Rydelek 등(2004)에 의하여 소개되었고, 일본 방재연구소(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)에서 개발 운영하고 있는 REIS(Real-time Earthquake Information System)에 사용되고 있다. 이 방법은 또한 미국 캘리포니아 주의 ElarmS(Earthquake Alarm System)에서 사용하고 있는 지진위치 결정 방법과 매우 유사하다(Cua, 2005). 지진 조기경보에서 지진 발생 지역과 가장 근접한 두 개의 관측소에 P파 초동이 도착하였고, 주변의 다른 관측소에는 아직 P파가 도착하지 않았다는 정보를 이용하여 진원위치를 추정하는 방법이 그림 1에 표시되어 있다. 지진이 발생하고 지진으로부터의 거리가  $d_1$ ,  $d_2$ 인 관측소  $R_1$ ,  $R_2$ 에서 시간  $t_1$ ,  $t_2$ 에 P파의 도착이 관측되었다고 하면, 각 관측소에서 다음과 같은 관계가 성립한다.

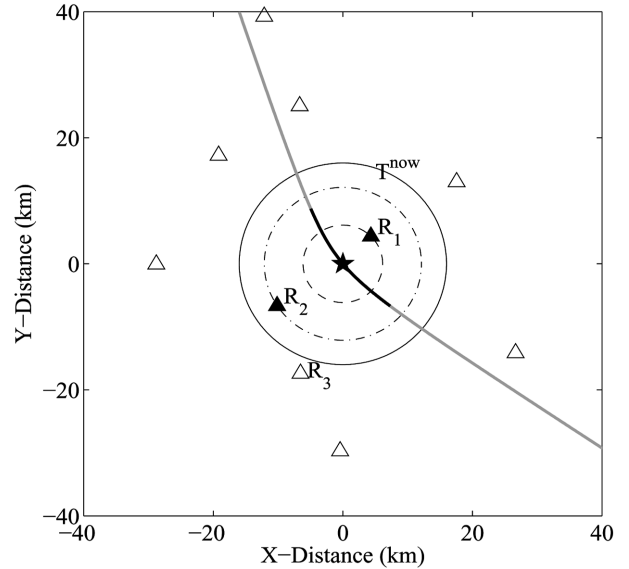


그림 1. 지진조기경보를 위한 지진발생위치 신속추정 결정방법(After Rydelek, 2004)

$$d_1 = V(t_1 - T_0); \quad d_2 = V(t_2 - T_0) \quad (2)$$

여기서,  $V$ 는 P파의 전파속도,  $T_0$ 는 진원시간이다. 그러므로 식(2)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d_2 - d_1 = V(t_2 - t_1) \quad (3)$$

선행연구로부터 대상지역의 속도구조에 관한 정보가 있고, 초동 관측으로부터  $t_2 - t_1$ 을 알고 있으므로, 식(3)의 우항은 상수이다. 그러므로 지진은 두 관측소로부터의 거리 차가 일정한 곳에서 발생하였다. 이는 쌍곡선의 정의로서, 지진발생 위치가 관측소의 위치(초점)로부터의 거리 차가 일정한 점의 자취, 즉 쌍곡선, 위에 있음을 의미한다(그림 1의 gray line). 또한, 지진발생으로부터 일정 시간이 지난 후( $T^{now}$ )에 아직 세 번째 관측소에서는 P파의 초동이 관측되지 않았다는 사실을 이용하여 지진의 발생 가능 위치를 쌍곡선 상의 특정 구간으로 한정할 수 있다. 진앙으로부터 관측소  $R_3$ 까지의 거리를  $d_3$ 라고 할 때,  $d_3$ 는  $d_1$ 보다 커야만 한다. 쌍곡선 상에 위치한 점 중 진하게 표시되어 있는 부분에 위치한 점들만이 이 조건을 만족 시키므로, 지진의 위치를 쌍곡선 상의 진하게 표시된 구간을 벗어나 발생했었다면, P파의 초동을 관측하는 순서가 바뀌고, 쌍곡선의 모양 또한 바뀌었을 것이다. 이렇게 한정되는 지진발생 가능구간의 길이는 관측망의 분포와 관측소 간의 거리에 따라 달라질 것이다.

## 2.3 초동관측 시간차를 이용한 한반도 지진 발생위치 조기 결정

이 논문에서 소개하는 방법을 사용하여 지진의 발생위치를 추정함에 있어서 그 타당성을 알아보기 위하여 최근 한반도에서 발생한 중규모 이상의 지진에 적용하였다. 1978년부터 2007년 사이에 한반도 및 그 주변해역에서 발생한 지진 중

기상청 지진센터 홈페이지(기상청, 2008) 규모별 현황에 수록된 규모 4.7 이상의 지진 10개를 선택하였으며(표 1), 대부분의 선택된 지진에서 정확한 진원 깊이 정보를 제공하지 않고 있으므로, 지표면에서 발생하였음을 임의로 가정하였다. 지진파의 전파 속도는 깊이에 따라서 그리고 지역적으로 변화하므로 정확한 주파시간 계산을 위해서는 실제 지하구조를 현실적으로 반영하는 1차원 혹은 3차원 속도 모델의 개발 및 활용이 필요하지만, 본 연구에서는 이정모 등(2008)이 제안한 지각에서 P파와 S파의 전파 속도 5.95 km/sec와 3.45 km/sec를 사용하였다. 기상청에서 운영하고 있는 지진관측소만을 고려할 때, 타당성 조사를 위하여 선택된 10개의 지진 중 3개는 지진관측망 내부에서, 6개는 관측망 외부 해저에서, 그리고 마지막 하나는 북한내륙지역에서 발생하였다.

관측망 내부에서 발생한 지진 3개의 경우 모두 초동 관측 시간차를 이용하여 결정된 지진의 위치와 실제 지진이 발생한 위치 사이의 거리가 매우 작다(그림 2). 그림 2 (a)에서 별표는 진앙위치, 흰색 원은 지진관측소의 위치, 그리고 검정 원은 지진발생 후 처음으로 지진파형을 관측하는 두 개의 관측소 위치를 표시한다. 그림 2 (b)에서는 (a)의 사각형 지역을 확대하여 표시하였다. 속리산 지역에서 지진(표 1, Event Number 3)이 발생할 경우 지진 발생으로부터 3초 이내에 2개의 관측소에서 P파 초동을 관측하게 되어, 지진의 위치를 빠르게 추정할 수 있다. 이 경우, 지진의 위치는 실제 지진이 발생한 위치로부터 14.4 km의 오차 범위 내에서 결정될 것이다(그림 2, a와 b). 이 오차 범위는 본 연구에서 고려한 지진관측망 내부에서 발생한 3개 지진의 결과 중 그 오차가 가장 큰 것이다. 홍성 지역에서 지진이 발생할 경우(표 1, Event Number 5), 지진발생으로부터 6초 이내에 2개의 관측소에서 P파의 초동을 관측하게 되며, 그 진원위치는 약 5.5 km의 오차 범위 내에서 결정될 것이다. 관측소 내부에서 발생한 지진의 마지막 경우로서 오대산 지역에서 지진이 발생한다면, 지진 발생으로부터 5초 내에 2개의 관측소에서 P파의 관측이 이루어지고, 실제 지진이 발생한 곳과 초동 시간차를 이용하여 결정된 지진의 위치 사이에는 최고 7.5 km의 오차가 있을 수 있다.

지진관측망 외부에서 지진이 발생하면(그림 3, 그림 4), 대

표 1. 지진요소 (기상청, 2008)

번호	규모	발생년월일	진원시	진앙	
				위도	경도
1	5.3	1980. 01. 08	08:44:13.3	40.2	125.0
2	5.2	2004. 05. 29	19:14:24.0	36.8	130.2
3	5.2	1978. 09. 16	02:07:05.8	36.6	127.9
4	5.0	2003. 03. 30	20:10:52.8	37.8	123.7
5	5.0	1978. 10. 07	18:19:52.2	36.6	126.7
6	4.9	2003. 03. 23	05:38:41.0	35.0	124.6
7	4.9	1994. 07. 26	02:41:46.3	34.9	124.1
8	4.8	2007. 01. 20	20:56:53.0	37.68	128.59
9	4.8	1981. 04. 15	11:47:00.0	35.9	130.1
10	4.7	1982. 03. 01	00:28:02.1	37.2	129.8

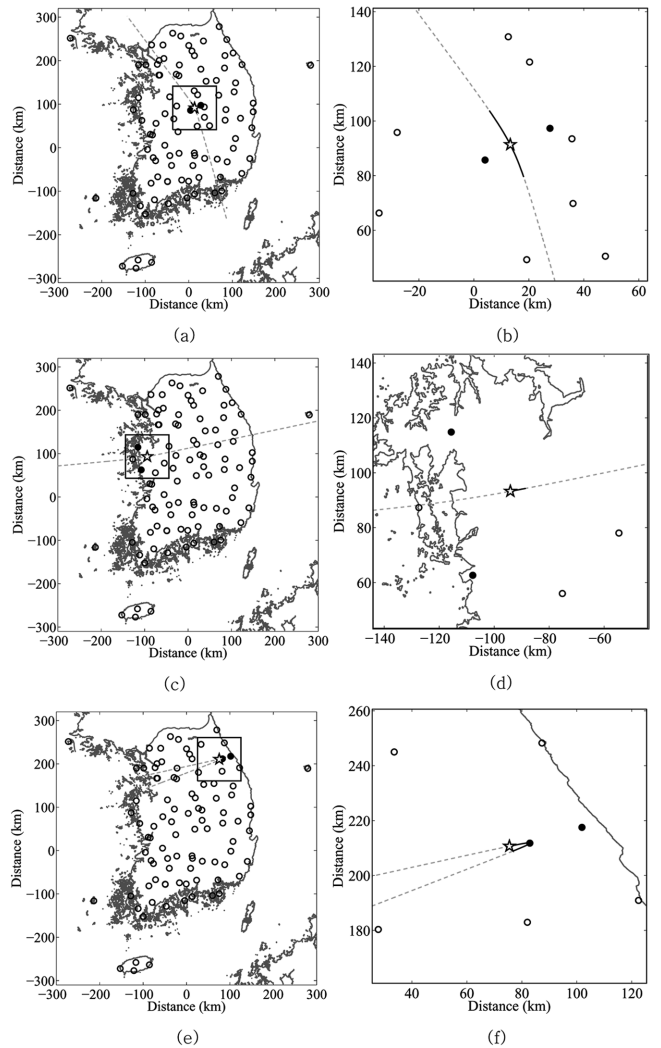


그림 2. 지진관측망 내부에서 발생한 지진의 신속진앙결정

부분의 경우 본 논문에서 고려하고 있는 초동관측 시간차를 사용하여 결정한 지진의 위치와 실제 지진의 발생 위치 사이에는 큰 오차가 발생할 수 있다. 이 경우 대부분의 지진은 한반도 주변 해저에서 발생하는 경우로써, 본 연구에서 사용하는 방법과 육상에 분포하는 관측소만으로는 쌍곡선의 한쪽 방향을 효과적으로 한정할 수 없기 때문이다.

### 3. 결론 및 토론

본 연구에서 소개하는 방법을 이용하여 지진의 발생위치를 결정함에 있어서 가장 먼저 고려되어야 하는 것, 그리고 가장 먼저 던져야 할 질문은 계산된 지진발생위치의 정확성과 신속성에 관한 것이다. 즉, 두 관측소 초동관측 시간차를 이용하여 결정된 지진의 발생위치는 그 정확성이 지진조기경보를 위하여 사용되기에 충분한가? 이 방법을 사용할 경우 대규모 피해유발 지진 발생 시 충분한 지진대비시간을 확보할 수 있는가? 두 질문 중에서 우선 정확성에 관하여 언급한다. 지진의 규모에 관계없이 지진조기경보를 발령하는 방안도 고려할 수 있지만, 지진경보로 인한 사회적 불안 심리 초래, 일상생활의 불연속성 등을 고려한다면, 일반적으로 지진조기

경보의 대상이 되는 지진은 대규모 피해를 유발할 수 있는 규모 6.5이상의 강진일 것이다. Wells 등(1994)의 지진 규모와 단층 파쇄 길이의 경험적 관계식에 의하면, 규모 6.5와 7.0 지진의 평균 단층 파쇄 길이는 각각 약 26 km와 57 km

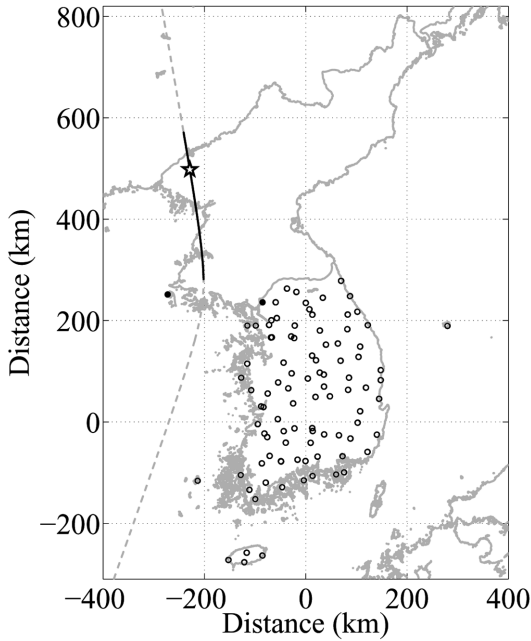


그림 3. 지진관측망외부에서 발생한 지진의 신속지진위치결정

이다. 앞 절에서 지진관측망 내부에서 발생한 지진의 위치를 결정할 때, 지진관측소의 분포와 지진의 위치에 따라 최대 15 km의 오차 범위 내에서 지진의 위치를 결정할 수 있음을 보였다. 이 오차 범위는 지진조기경보의 대상이 되는 지진의 단층 파쇄길이와 지진위치 결정시 신속성의 중요성을 고려할 때 허용범위 안에 위치한다고 생각된다.

다음은 충분한 지진대비시간을 확보할 수 있는가에 관한 것이다. 본 논문의 서론에서 초동 도착 후 2~3초간의 파형 분석을 통하여 규모를 추정하는 최근 연구동향을 간단히 언급하였다. 이러한 방법을 통하여 지진의 규모를 신속히 결정할 수 있다는 가정 하에 본 연구에서 소개하는 방법을 적용할 경우 확보할 수 있는 지진조기 경보시간에 관하여 살펴본다. 이를 위하여 한반도 내부에서 발생한 지진 중 1978년 속리산 지진이 발생한 위치, 1978년 홍성 지진이 발생한 위치, 그리고 2007년 오대산 지진이 발생한 위치에서 한반도 전역에 피해를 유발할 수 있는 지진이 발생하였음을 가정하였다. 지진의 위치는 본 연구에서 제시한 방법으로 결정하였고, 지진의 규모 결정을 위하여 2개의 관측소에서 4초간의 초기 P파 파형이 필요하다고 가정하였다. 또한, 자료처리와 정보 전달을 위하여 2초의 시간이 필요하다고 가정하였다. 우리나라 인구분포와 주요도시의 위치를 참고하기 위하여 인구 밀도 분포도 위에 확보 가능한 지진대비시간을 표시하였다(그림 5). 속리산지역에서 지진이 발생할 경우(그림 5, a), 지

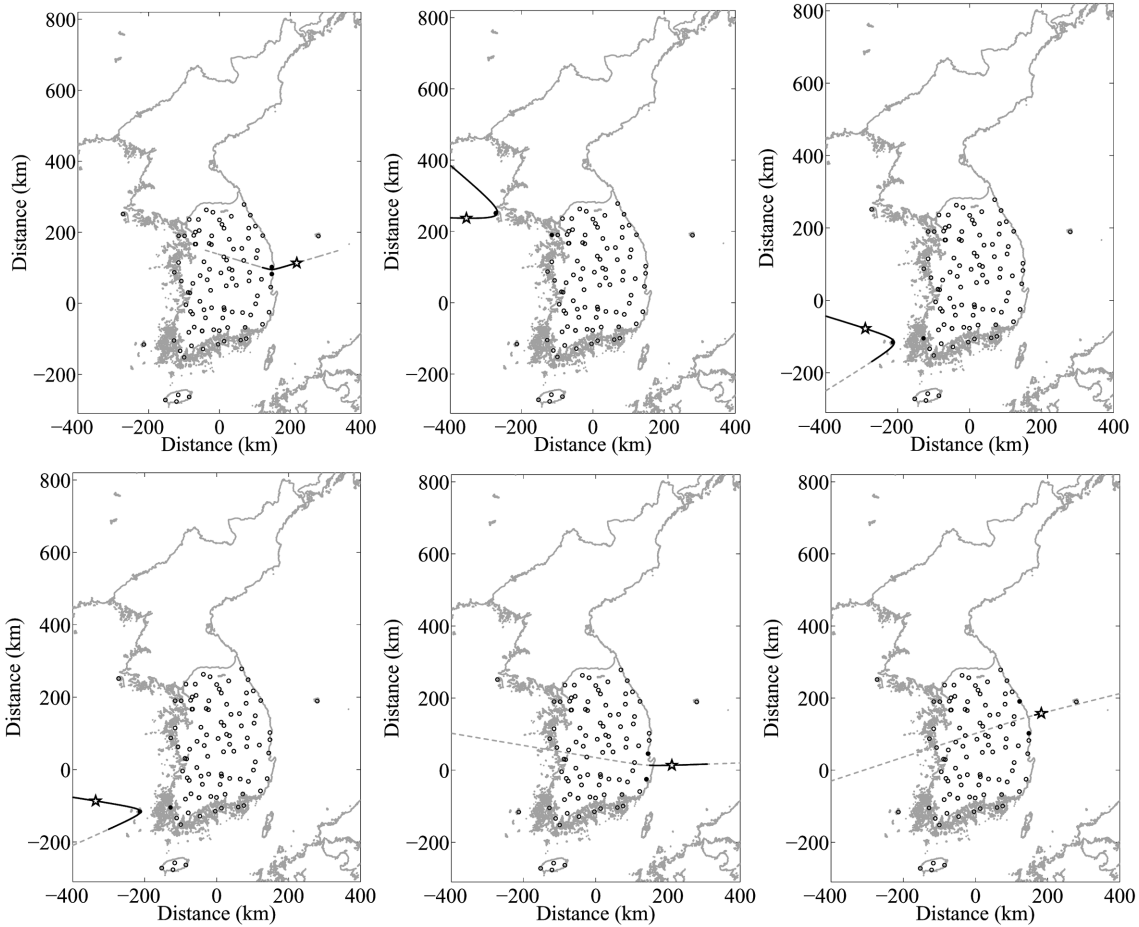


그림 4. 지진관측망외부 해저에서 발생한 지진의 신속지진위치결정

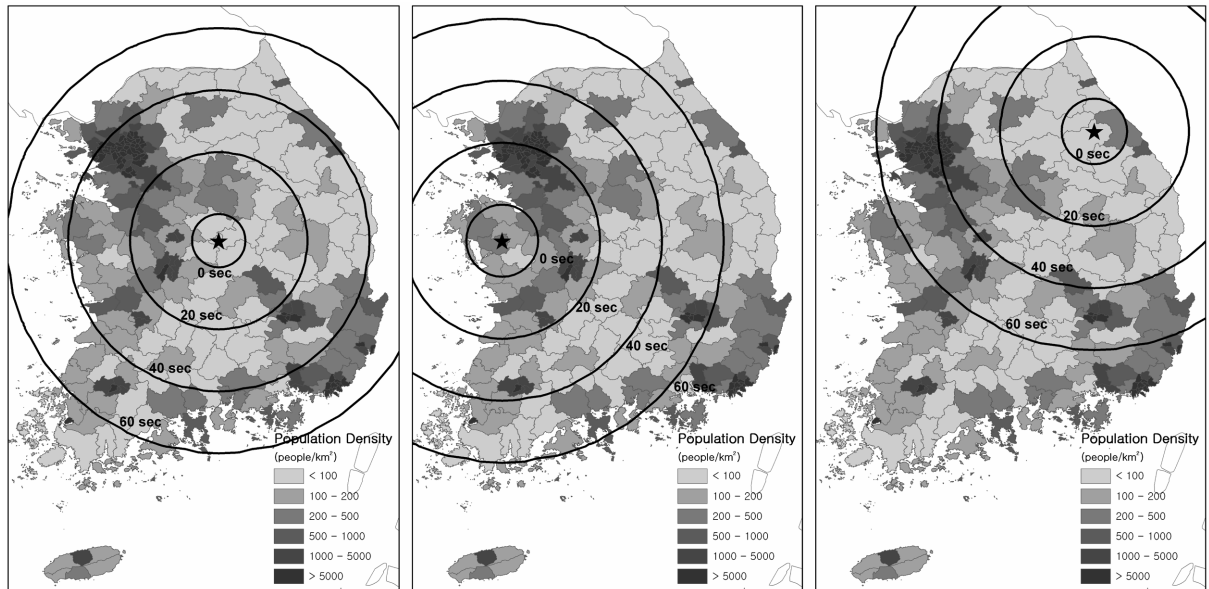


그림 5. 대규모 지진 발생시 확보 가능한 지진대비시간.

진 발생위치로부터 반경 30 km 내에 위치한 지역에서는 지진 대비시간을 전혀 가질 수 없을 것이다. 그러나 수도권에서는 피해를 유발시킬 수 있는 강한 지진동이 시작하기 이전에 약 20~50초의 시간을 확보하여 사전에 준비된 조치를 취할 수 있을 것이라고 생각된다. 그림 5의 (b)와 (c)는 홍성지역과 오대산지역에서 지진이 발생할 때, 진앙지 주변 약 40 km 반경과 36 km 반경 내에서는 지진대비시간을 확보하지 못할 것이다. 그러나 수도권의 경우 지진경보 후 파괴적인 지진동이 시작하기 까지 약 10~30초의 시간과 약 30~50초의 시간을 확보할 수 있을 것으로 예상되므로, 심한 지진동이 시작되기 전 미리 프로그램된 조치를 취함으로써 재해를 저감할 수 있을 것이라 생각된다.

가장 중요하면서도 흔히 간과되는 지진재해 저감 노력 중 하나가 지진발생시 개인, 기업, 지역사회, 지방정부, 그리고 중앙정부의 행동요령을 포함한 교육/홍보 활동과 지진재해 대응태세 확립이다. 정부 혹은 관련 기관의 노력으로 이룩할 수 있으며, 본 논문에서 다루고 있는 지진신속통보 혹은 지진조기경보 시스템은 지진 재해 저감을 위한 많은 노력 중 하나에 불과하다. 아무리 잘 갖추어진 재해경감 프로그램을 확립하여도 일반 대중이 이를 이해하고 유사시 대응 능력을 갖추고 있지 못하다면, 그 실효를 기대하기 어렵다. 실제로 대규모 지진발생시 일반 대중의 위기상황 대처능력 부족은 대규모 인명손실의 주요 원인이 되어왔다(Esteva, 1988). 일반대중, 기관, 정부의 위기 상황 대처와 함께 본 연구에서 소개한 기술을 사용한 지진조기경보시스템 및 대응종합 프로그램이 갖추어진다면 지진재해를 저감하는 효과를 기대할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

원고를 읽어주시고 조언을 주신 기상청 이덕기 박사님과 류용규 박사님께 감사 드립니다. 논문의 심사과정에서 보완점

을 지적해주신 세분 익명의 심사위원께도 감사 드립니다. 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-5101)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

강수영, 김광희, 석봉출, 유해수 (2008) 경주지역 발생 지진에 대한 지진손실예측 시뮬레이션, 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제8호, pp. 95-103.

기상청 (2007) 2007년 1월 20일 강원지역 지진관련 정보. 기상청 보도자료.

기상청 (2008) 규모별 지진현황, [http://www.kma.go.kr/gw.jsp?to=weather\\_main.jsp](http://www.kma.go.kr/gw.jsp?to=weather_main.jsp), assessed on 2008년 9월 6일.

이정모, 문우일, 박창엽, 정희옥, 김기영 (2008) Crustal Velocity Structure of the Korean Peninsula. 2008.

황의홍 (2007) P파를 이용한 신속한 지진 규모 결정, 박사학위논문, 전북대학교.

황의홍, 이우동, 조봉곤 (2007) 단일 관측소에 기록된 P파형을 이용한 진앙거리 신속 결정에 관한 연구. 지질학회지, 지질학회, 제43호, pp. 99-106.

Allen, R. M., and H. Kanamori (2003) The Potential for Earthquake Early Warning in Southern California. *Science*, Vol. 300, pp. 786-789.

Chiu, J.-M., and S. G. Kim (2004) Estimation of Regional Seismic Hazard in the Korean Peninsula Using Historical Earthquake Data between A.D. 2 and 1995. *Bulletin: Seismological Society of America*, Vol. 94, pp. 269-284.

Cua, G. (2005) *Creating the Virtual Seismologist: Developments in Ground Motion Characterization and Seismic Early Warning*, Ph.D. thesis, California Institute of Technology.

Esteva, L. (1988) The Mexico Earthquake of September 19, 1985 Consequences, Lessons and Impact on Research and Practice. *Earthquake Spectra*, Vol. 4, pp. 413-426.

Geller, R. J. (1997) Earthquake prediction: a critical review. *Geophysical Journal International*, Vol. 131, pp. 425-450.

Heaton, T. H. (1985) A Model for a Seismic Computerized Alert Network. *Science*, Vol. 228, pp. 987-990, DOI: 10.1126/science.228.4702.987.

- Horiuchi, S., H. Negishi, K. Abe, A. Kaminura, and Y. Fujinawa (2005) An Automatic Processing System for Broadcasting Earthquake Alarms. *Bulletin: Seismological Society of America*, Vol. 95, pp. 708-718.
- Kanamori, H. (2005) Real-Time Seismology and Earthquake Damage Mitigation. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, Vol. 33, pp. 195-214.
- Kim, K.-H., J.-M. Chiu, J. Pujol, and K.-C. Chen (2005) Earthquake Relocations, Fault Zone Geometry and Constraints on Lateral Velocity Variations using the Joint Hypocenter Determination Method in the Taiwan Area. *Earth, Planets and Space*, Vol. 57, pp. 809-823.
- Kim, K.-H., S. Y. Kang, D.-J. Min, H. S. Yoo, B.-C. Suk, and Y.-G. Ryoo (2007) Enhanced Ground Motions and Seismic Hazards due to Crustal Structures in Korea. *American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, CA, USA.
- Lee, K., and W.-S. Yang (2006) Historical Seismicity of Korea. *Bulletin: Seismological Society of America*, Vol. 96, pp. 846-855, doi:10.1785/0120050050.
- Lee, W. H. K., and J. M. Espinosa-Aranda (2003) Earthquake Early Warning Systems: Current Status and Perspectives, in *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*, J. Zschau and A. N. Koppers (Editors), Springer, pp. 409-423.
- Lee, W. H. K., and S. W. Stewart (1981) *Principles and Applications of Microearthquake Networks*. Academic Press.
- Pujol, J. (1988) Comments on the Joint Determination of Hypocenters and Station Corrections. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, pp. 1179-1189.
- Rydelek, P., and J. Pujol (2004) Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray. *Bulletin: Seismological Society of America*, Vol. 94, pp. 1546-1550.
- Waldhauser, F., and W. L. Ellsworth (2002) Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, 2054, doi:10.1029/2000JB000084.
- Wells, D. L., and K. J. Coppersmith (1994) New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, pp. 974-1002.
- Wu, Y.-M., and H. Kanamori (2005) Experiment on an On-site Early Warning Method for the Taiwan Early Warning System. *Bulletin: Seismological Society of America*, Vol. 95, pp. 347-353.
- Wu, Y.-M., and T.-L. Teng (2002) A Virtual Subnetwork Approach to Earthquake Early Warning. *Bulletin: Seismological Society of America*, Vol. 92, pp. 2008-2018.

© 논문접수일 : 08년 09월 08일  
 © 심사의뢰일 : 08년 09월 10일  
 © 심사완료일 : 08년 11월 17일