

제 출 문

기상청장 귀하

이 보고서를 “기상지진기술개발사업” 과제 (세부과제 “관측소 보정과 파형의 유사성을 이용한 한반도 지진의 진원위치 향상에 관한 연구”)의 보고서로 제출합니다.

2009. 3 20.

주관연구기관명 : 한국해양연구원

주관연구책임자 : 김 광 희

연 구 원 : Paul A. Rydelek

” : 유 해 수

” : 강 수 영

” : 유 찬 호

보고서 요약서

과제관리번호	CATER2006-5101	해당단계 연구기간	2006.04.01-2009.01.31	단계 구분	1단계 / 총2단계
연구사업명	사업명	지진기술개발사업			
	세부사업명	지진파 분석			
연구과제명	과제명				
	세부(단위)과제명	관측소 보정과 파형의 유사성을 이용한 한반도 지진의 진원위치 향상			
연구책임자	김광희	해당단계 참여연구원수	총 : 8 명 내부 : 3 명 외부 : 5 명	해당단계 연구비	정부 : 188,000 천원 기업 : 천원 계 : 188,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양연구원 해양위성·관측기술연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약					보고서 면수
<ol style="list-style-type: none"> 1. 불확실한 속도모델 하에서 상대적으로 향상된 지진발생위치 결정 <ul style="list-style-type: none"> - 관측소 보정(JHD)과 파형의 유사성(HypoDD)을 사용 2. 국내 파형자료 수집 및 도착시간 측정 <ul style="list-style-type: none"> - 국내에서 1997 - 2007 사이에 관측된 파형자료 수집 - 2003 - 2007 지진파 도착시간 직접 측정 - 기존 지진파 도착시간 측정 자료 활용 (2002년 이전) 3. 국내에서 생산된 지진자료를 활용한 단일 지진 발생위치 재결정 <ul style="list-style-type: none"> - 국내에서 관측된 모든 자료 사용 4. 관측소 보정을 사용한 진원요소 결정 (Joint Hypocenter Determination Method) <ul style="list-style-type: none"> - 한반도 내륙에서 발생하는 지진군에 대하여 진원요소 정밀 재결정 - P파 관측소 보정과 천부 지질구조의 상관관계 5. 파형의 유사성을 사용한 지진위치 재결정 (HypoDD Method) <ul style="list-style-type: none"> - 주파시간 차이 및 파형의 유사성 측정 알고리즘 개발 - 2006년 울진 앞바다에서 발생한 군지진에 대하여 지진 발생위치를 재결정한 결과, 기존 보다 향상된 지진발생위치 획득. 기존 진원 메커니즘 연구와 비교하여 두개의 가능 단층면 중 실 단층면 구분. 6. 진앙위치 신속 결정 <ul style="list-style-type: none"> - 두개의 관측소에서 관측된 자료를 사용하여 진앙위치 추정 - 우리나라 관측망 내부에서 발생한 지진에 적용할 경우 10-50초의 지진경보시간 확보 가능 - 유사시 지진재해 저감에 크게 기여할 것으로 기대 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	지진, 지진위치 재결정, 관측소보정, 파형의 유사성, 단층, 진원신속결정			
	영어	Earthquake, Earthquake Relocation, Station Corrections, Waveform Similarity, Faults, Rapid Earthquake Location			

요 약 문

I. 제 목

관측소 보정과 파형의 유사성을 이용한 한반도 지진의 진원위치 향상

II. 연구개발의 목적 및 필요성

지진의 발생 사실을 인지하고 가장 먼저 수행되는 일이 진원요소(지진의 발생 위치와 시간) 규명이다. 이렇게 결정된 진원요소의 시간/공간적 분포, 지질구조와의 연관성 등은 우리나라 지진위험성, 지진재해대책, 지하속도구조 등의 연구에 기초자료로 사용된다. 그러므로 정확한 진원요소 결정은 지진학 연구 중 가장 우선적으로 수행되어야 하는 연구이다. 진원요소는 몇 가지 요인으로 인하여 오차를 가질 수 있는데, 이러한 오차를 일으키는 주된 요인에는 도착시간 측정의 오차, 속도모델의 부정확성, 지진관측소의 부적절한 분포, 진원요소 결정 알고리즘의 부정확성 등이 있다. 이중 가장 큰 오차의 원인은 도착시간 측정의 오차와 속도모델의 부정확성으로 부터 기인한다. 본 연구에서는 지진발생위치 결정시의 오차 가능성과 그 원인을 인지하고 현재의 관측소 분포와 지하속도 구조에 관한 정보의 부정확성 하에서 보다 정확한 지진발생위치를 결정하기 위한 연구를 수행한다. 지진재해저감 노력의 일환으로 고려되고 있는 지진조기경보체계에서는 지진위치결정의 신속성 또한 매우 중요하다. 본 연구에서는 우리나라에서 활용 가능한 진앙위치 신속결정 방법을 활용하여 지진의 위치를 신속결정 함으로서 확보 가능한 지진조기경보시간에 관하여 고찰하였다. 본 연구에서 수행한 지진 발생 위치 결정의 정확성 향상과 신속성 확보연구는 지진학 기초 및 심화 연구 전반에 걸쳐서 그리고 대규모 지진 발생 시 지진재해 저감에 크게 기여할 것으로 기대된다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

불확실한 속도모델과 도착시간 측정의 오류 가능성 하에서 지진발생위치 결정의 정확성 향상을 위하여 관측소 보정과 파형의 유사성을 이용하여 지진발생위치의 상대적 정확성을 향상시키고자 한다. 두 방법 모두 공간적으로 비슷한 지역에서 발생하는 균지진에 대하여 적용이 가능하다. 관측소보정을 사용하는 지진위치 재결정방법(JHD, Joint Hypocenter Determination Method)에서는 파선 경로상의 실제 속도 구조와 속도모델 사이의 차이를 관측소 보정 값으로 취급하여 지진위치 결정 시 함께 결정함으로써 지진발생위치 결정의 정확성을 향상시킨다. 파형의 유사성을 이용한 방법에서는 두 지진이 아주 가까이 위치할 때 파형이 유사하다는 점을 이용

하여 지진발생위치 결정의 정확성을 향상시킨다. 이 두 방법을 사용하여 우리나라에서 발생하는 지진 발생 위치를 결정하기 위하여 파형자료 수집 및 지진파 도착시간 측정, 국내에서 생산된 모든 관측망 자료를 활용한 지진 발생 위치 결정을 우선 수행한다. 진앙위치결정의 신속성 확보를 위한 연구에서는 두개의 관측소에서 관측된 자료를 사용하여 진앙위치를 추정하고, 주변의 다른 관측소에서는 아직 초동이 도착하지 않았다는 정보를 사용하여 지진의 발생가능 영역을 한정한다. 우리나라 관측망에서 이 방법의 적용가능성을 알아보기 위하여 우리나라 관측망 내부에서 지진이 발생할 경우 확보 가능한 지진경보시간을 알아본다.

IV. 연구개발결과

기존 연구 자료 수집과 현황 파악을 위하여 기상청과 한국지질자원연구원에서 획득/보급하는 파형자료와 지진목록을 수집하였다. 두 기관은 지진요소 결정에 있어서 각 기관에서 운영 중인 관측소 자료와 속도모델, 운영체계를 사용함으로써 발표되는 지진목록에도 차이가 있다. 두 기관에서 1997년에서 2007년 사이에 생산한 파형자료를 수집한 후, 2003년에서 2007년 사이의 자료에 대한 지진파 도착시간을 수동으로 측정하였다. 2002년 이전 지진의 도착시간 자료는 선행연구 결과를 사용하였다. 지진파 도착시간을 측정한 후 지진 발생 당시 국내에 운영 중인 모든 지진 관측소 자료를 이용하여 지진발생위치를 결정하였다. 그 결과가 기상청과 지질자원연구원의 결과와 약간의 차이가 있다. 향후 초동 도착시간 측정 자동화를 위하여 AIC (Akaike Information Criteria) picker 활용을 고려하였다.

우리나라에서 발생하는 지진은 넓은 지역에 걸쳐 산만하게 발생하지만 일부 지역에서는 지진이 반복적으로 발생하고 있다. 이 중 6개의 지진군을 임의로 선택하고 관측소보정을 사용한 진원요소 재결정을 수행하였다. 관측소 보정값에 의하면 우리나라 남서부는 다른 지역에 비하여 지진파 전파 속도가 낮게 나타난다. 제주도 등의 일부 지역에 위치한 관측소는 육지에 위치한 관측소와는 크게 다른 관측소 보정치를 나타내는데, 지역적으로 상이한 지질조건에 기인한다고 생각된다.

우리나라에서 발생하는 군지진에 대하여 HypoDD 방법을 사용하여 지진의 위치를 정밀 재결정하였다. 지진위치 재결정의 대상으로 선정된 지진군은 영월지역, 2004년 동해지진지역, 2006년 동해지진지역, 경주지역 양산단층시스템 부근 등에 위치한다. 이 중 2006년 동해지진군의 경우 기존에 발표된 지진 목록상의 자료로는 진원위치와 지하 구조와의 연관성 파악이 어렵다. 본 연구에서 재결정된 진원위치와 지진원 메커니즘을 함께 분석한 결과, 2006년 지진군은 동쪽으로 경사진 해저 단층면을 따라서 정단층 운동을 하며 발생한 것으로 판단된다.

경제규모의 증가, 산업화, 도시화 등은 결과적으로 우리나라민의 잠재적 지진 위험 증가를 야기하였다. 비록 최근에는 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 과학 기술력으로는 단기 지진예보가 불가능함을 고려할 때 지진재해 저감을 위하여 취할 수 있는 대책의 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 발생 위치 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. 수도권의 경우 10 - 50 초의 지진대비시간을 확보할 수 있을 것으로 예상되며, 주어진 시간 내에 사전 준비된 조치를 취함으로써 유사시 지진재해저감에 크게 기여할 것이다.

V. 연구개발결과의 활용계획

한반도 및 그 주변에서 발생하는 지진의 위치 결정의 정확성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 또한 지진조기경보를 위한 진앙위치 신속결정 방법을 고찰함으로써 향후 현업적용가능성에 관한 연구를 일부 수행하였다. 2006년 울진 앞바다 지진 발생위치의 재결정 결과와 지진메커니즘 결과를 함께 분석한 결과, 진원 메커니즘에서 제시한 두개의 단층해 중 단층면이라고 생각되는 단층해를 찾을 수 있었다. 본 연구에서 수행한 보다 정확한 지진발생위치 결정 혹은 보다 신속한 진앙위치 추정 방법 연구 결과는 다음과 같은 분야에 활용이 가능하다.

- 지진재해저감계획의 기초자료로 활용
- 한반도 주요 지구조선과의 연관성 규명에 활용
- 한반도 주요 단층과의 관계 규명에 활용
- 지역적 지진재해 연구에 활용
- 지진 공백역 존재 확인 및 지진 다발지역 확인에 활용
- 지진조기경보를 위한 신속진앙위치 결정에 활용

○ 지진재해도 작성에 기초 자료로 활용

S U M M A R Y

I. Title:

Improving Earthquake Locations in the Korea Peninsula
Using Station Correction Terms and Waveform Similarity Measurements

II. Necessity and Objectives of the Study

Determination of earthquake source parameters (earthquake locations and origin times) is a routine once earthquake occurs. Temporal and spatial distribution of earthquake parameters and their relation with the subsurface geological structures provide fundamental information for studies of seismic hazards, earthquake hazard mitigation plan, subsurface velocity structure and others. Precise determination of earthquake parameters, thus, is the first step before any seismological studies. Earthquakes can be mislocated due to poor phase arrival readings, errors in the velocity model, bad station distributions, and inefficient location algorithms. Poor phase picking and lack of information on the velocity structure are the major source of errors in the earthquake location. Current study addresses the improvement of earthquake locations when proper velocity models for the study area are not available.

In the earthquake early warning for seismic hazard mitigation effort, the rapid determination of earthquake location is crucial. The study also addresses the feasibility of rapid earthquake location under the current configuration of seismic network and the warning time for potential earthquakes in Korea. Results of the study, improving earthquake locations and faster location determinations, provide basic information for detailed studies of seismology and seismic hazard mitigation for the potentially disastrous earthquakes.

III. General Scope of the Study

Assuming reliable velocity model is not available and initial arrival time measurements include some errors, relative earthquake locations are improved using station correction terms and waveform similarity. Both methods, JHD and HypoDD, are used to relocate earthquake clusters. Assuming there is a cluster of earthquakes, the effect of model deviations near the hypocenters will be almost identical, which can be ignored. In JHD, errors arising from deviations from the model near the station and along the ray path from the earthquake to the receiver can be lumped together into a single effect, termed "station correction." Assuming focal mechanism of two nearby earthquakes are same, it is observed that two waveforms registered

at a single station are very similar to each other since they share almost same ray path from the earthquake to the station. The similarity is used to improve the relative earthquake location. Earthquake waveforms in Korea are collected. P-wave and S-wave arrival times are measured. Then earthquake clusters are relocated to obtain better relative locations.

For rapid determination of earthquake location, the two earliest P-wave arrivals from an earthquake are used to construct a hyperbolic curve such that the epicenter of the earthquake will be a point on the curve. The information that other nearby stations have not yet recorded arrivals constrains the epicenter to lie along a segment of this curve. The method has been applied to earthquakes in the Korean seismic network to estimate warning time for potential earthquakes.

IV. Results of the Study

Earthquake catalogs and waveforms by Korea Meteorological Administration (KMA) and Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM) are collected. Earthquake parameters listed in catalogs are different due to the number of stations, velocity models and operating systems. Collected earthquake waveforms are earthquake data occurred between 1997 and 2007. P and S arrival times are manually picked for earthquake occurred between 2003 and 2007. Arrival times measured during the previous studies were also used. Arrival times from two seismic network are combined to locate earthquakes. There are differences among the new single earthquake locations, KMA locations, and KIGAM locations. An automatic phase picking routine using Akaike information criteria (AIC) is developed for further phase picking.

Although earthquakes in Korea occur over the large area without any general consistency, multiple earthquakes occur at several regions. Six earthquake clusters were selected for earthquake relocation using JHD method. Distribution of station corrections indicates relatively low velocity is expected in southwestern Korea. In a few remote areas, including Jeju and other remote islands, station corrections are extremely positive or negative. The observations may indicate different geologic settings in islands from those in land.

A few earthquake clusters are also relocated using HypoDD method. Select earthquake clusters are located in Youngwol region, 2004 East Sea earthquake region, 2006 East Sea earthquake region, and along the Yangsan fault system in Gyeongju area. The relationship between subsurface structure beneath the sea bottom and earthquake catalog locations in the 2006 East Sea earthquake cluster is not clear. Relocated earthquake hypocenters, however, indicate earthquakes in the

cluster occurred along the east-dipping normal fault beneath the ocean bottom.

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.

V. Suggestions for Applications

Earthquakes in Korea peninsula and its vicinity are relocated to obtain better relative locations. Rapid earthquake location method for earthquake early warning is also reviewed for site-operation. Using relocation results as well as the focal mechanism of the 2006 Uljin offshore earthquakes reveal the rupture plane. Results of the study, can provide basic for the following studies.

- **earthquake hazard mitigation**
- **correlation with the tectonic boundaries**
- **relation with major faults**
- **local seismic hazard investigations**
- **rapid earthquake location for earthquake early warning**
- **seismic hazard map**

목 차

요약문	1
목 차	8
그림 및 표 목차	12
제 1 장 연구개발과제의 개요	15
제 2 장 국내외 기술개발 현황	17
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	19
3.1. 국내 지진관측망 현황	19
3.1.1 기상청	19
3.1.2 한국지질자원연구원	20
3.1.3 그 밖의 기관에서 운영 중인 지진관측망	21
3.1.4 파형수집 및 도착시간 측정 자료	22
3.2. 지진목록	22
3.2.1 기상청 지진목록 현황	22
3.2.2 한국지질자원연구원 지진목록 현황	24
3.2.3 지진목록 비교	28
3.3. 단일 지진발생위치 결정	30
3.3.1 단일 지진발생위치 결정 소개	30
3.3.2 SEL, KMA, KIGAM 비교	33
3.3.3 초동도착시간 자동 측정 기술	37
3.4. 관측소 보정을 이용한 진원 인자 재결정	39

3.4.1 JHD 소개	39
3.4.2 JHD 적용 및 결과	40
3.5. Double-difference 방법을 이용한 진원인자 재결정	50
3.5.1 Double-difference 소개	50
3.5.2 Double-difference 적용 및 결과	51
3.5.3 파형의 유사성 및 시간차 추정 기술	55
3.6. 2개의 관측소를 이용한 지진조기경보를 위한 진앙 위치 신속 결정 방법	58
3.6.1 서론	58
3.6.2 본론	60
3.6.2.1 지진 발생위치 신속 결정의 필요성	60
3.6.2.2 초동관측 시간차를 이용한 지진 발생위치 추정	61
3.6.2.3 초동관측 시간차를 이용한 한반도 지진 발생위치 조기결정	62
3.6.3 결론 및 토론	63
제 4 장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도	71
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	72
제 6 장 참고문헌	73

CONTENTS

Summary	1
Contents	8
List of Figures and Tables	12
Chapter 1 Outline of study	15
Chapter 2 Status of technological development domestic and overseas	17
Chapter 3 Contents and results of the study	19
3.1. Seismic networks in Korea	19
3.1.1 KMA seismic network	19
3.1.2 KIGAM seismic network	20
3.1.3 Other seismic networks	21
3.1.4 Waveforms and arrival time measurements	22
3.2. Earthquake Catalogs	22
3.2.1 KMA earthquake catalog	22
3.2.2 KIGAM earthquake catalog	24
3.2.3 Comparisons	28
3.3. Single earthquake location	30
3.3.1 Introduction to the single earthquake location	30
3.3.2 SEL, KMA, and KIGAM locations	33
3.3.3 Automatic phase picking	37

3.4. Earthquake relocation using station corrections	39
3.4.1 Introduction to JHD method	39
3.4.2 Application and results of JHD	40
3.5. Earthquake relocation using double-difference method	50
3.5.1 Introduction to double-difference method	50
3.5.2 Application and results of double-difference method	51
3.5.3 Estimation of waveform similarity and delay	55
3.6. Rapid earthquake location for earthquake early warning- 2 station method	58
3.6.1 Introduction	58
3.6.2 Method	60
3.6.2.1 Why rapid location?	60
3.6.2.2 Rapid earthquake location using the two station method	61
3.6.2.3 Rapid earthquake location in Korea using the two station method	62
3.6.3 Results and discussions	63
Chapter 4 Objective achievement and external contribution ...	71
Chapter 5 Plan for applications	72
Chapter 6 References	73

그림 및 표 목차

그림 3.1.1 기상청 지진관측망 현황(2007년말 현재, 기상청 2007)	20
그림 3.1.2 한국지질자원연구원 지진관측망 현황 (2008, 한국지질자원연구원)	21
그림 3.2.3 기상청 발표 지진발생현황	23
그림 3.2.4 한국지질자원연구원 발표 지진발생현황	23
그림 3.2.5 기상청과 한국지질자원연구원에서 공통으로 발표한 지진인자의 기상청 지진발생현황	25
그림 3.2.6 기상청과 한국지질자원연구원에서 공통으로 발표한 지진인자의 지질자원연구원 지진발생현황	26
그림 3.2.7 기상청과 한국지질자원연구원에서 발표한 지진발생현황의 진앙위치 차이	26
그림 3.2.8 기상청과 한국지질자원연구원에서 발표한 지진발생현황의 규모 차이	27
그림 3.2.9 기상청과 한국지질자원연구원에서 지진위치 결정을 위하여 사용하는 지각 및 상부맨틀에서의 지진파 전달 속도모델	28
그림 3.2.10 기상청 발표 1978-2007 지진발생 추이 (기상청 지지연보, 2008)	30
그림 3.3.1 본 연구에서 결정한 지진 분포	33
그림 3.3.2 기상청 발표 지진위치와 본 연구 SEL 지진위치 간의 차이	34
그림 3.3.3 한국지질자원연구원 지진연구센터 발표 지진위치와 본 연구 SEL 지진위치 간의 차이	35
그림 3.3.4 한국지질자원연구원 지진연구센터 발표 진원깊이와 본 연구 SEL 진원깊이 간의 차이	36
그림 3.3.5 한국지질자원연구원 지진연구센터 발표 진원시간과 본 연구 SEL 진원시간 간의 차이	37
그림 3.3.7 AIC picker를 이용한 지진파 초동 도착시간 측정의 예 ...	39

그림 3.4.1 한반도 남부에서 발생한 지진 중 공간적으로 군집을 이루며 발생하는 지진군.	42
그림 3.4.2 P와 JHD station correction	43
그림 3.4.3 지역적 속도 변화에 따른 관측소 보정	43
그림 3.4.4 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G1 - map view	44
그림 3.4.5 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G1 - Cross sectional view	44
그림 3.4.6 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G2 - map view	45
그림 3.4.7 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G2 - cross sectional view	45
그림 3.4.8 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G3 - map view	46
그림 3.4.9 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G3 - cross sectional view	46
그림 3.4.10 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G4 - map view ...	47
그림 3.4.11 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G4 - cross sectional view	47
그림 3.4.12 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G5 - map view ...	48
그림 3.4.13 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G4 - cross sectional view	48
그림 3.4.14 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G6 - cross sectional view	49
그림 3.4.15 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G6 - cross sectional view	49
그림 3.5.1 본 연구의 SEL 지진위치. 2006년 4월 발생한 울진앞바다 지진의 진앙위치	52
그림 3.5.2 2006년 울진 앞바다 지진의 재결정 결과	53
그림 3.5.3 재결정된 2006년 울진 앞바다 군 지진의 진원위치와 진원 메커니즘 그리고 이를 통해 해저 단층면 해석	54
그림 3.5.4 파형의 유사성 및 시간차 측정	57
그림 3.6.1 지진조기경보를 위한 지진발생위치 신속추정 방법	66

그림 3.6.2 지진관측망 내부에서 발생한 지진의 신속진앙결정	67
그림 3.6.3 지진관측망 외부에서 발생한 지진의 신속지진위치결정. ...	68
그림 3.6.4 지진관측망 외부 해저에서 발생한 지진의 신속지진위치결정.	69
그림 3.6.5 대규모 지진 발생시 확보 가능한 지진대비시간	70
표 3.6.1 지진요소 (기상청,2008)	70

제 1 장 연구개발과제의 개요

지구상에서 발생하는 대부분의 지진은 판과 판의 경계에서 판의 섭입 및 충돌작용에 의하여 발생한다. 우리나라 주변의 일본·대만에서 발생하는 대규모의 지진이 이 경우에 해당되며, 이들 대규모 지진으로 인하여 많은 피해가 발생하고 있다. 우리나라에서 지진활동이 많지 않은 이유는 우리나라가 이러한 판의 경계로부터 떨어져 있기 때문이다. 그러나 판 내부에서도 대규모의 지진이 발생하고 피해를 유발하기도 하는데, 1976년 규모 7.9의 중국 당산지진, 1811 - 1812년 규모 8.0의 미국 중부 New Madrid 지진 등이 판 내부에서 대규모 지진이 발생하여 큰 피해를 야기한 예이다(Johnston and Schweig, 1996). 우리나라는 지난 수 십 년간 지진으로 인한 피해가 매우 미비하였지만 역사문헌 검토에 의하면 우리나라에서도 많은 피해 유발 지진이 여러 차례 발생한 바 있으므로 지진으로 인한 피해 가능성을 항상 고려하여야 한다(Chiu and Kim, 2004; Lee and Yang, 2006). 특히 우리나라 오대산 지역에서 2007년 1월 20일 발생한 지진은 우리나라 대부분의 지역에서 지진감지가 보고되기도 하여, 지진위험성 및 지진관련연구의 필요성을 일깨우기도 하였다(기상청 2007; Kyung et al., 2007; Kim et al., 2008).

진원에서의 지진 지속시간은 매우 짧지만 현재의 과학 기술 수준으로는 정확한 단기 예보가 불가능하고, 인명손실, 재산손실 등의 1차적 재해와 더불어 화재, 주요시설의 가동 불능, 공공서비스의 중단, 사회적 혼란 야기 등의 2차적 재해를 수반할 수 있으므로 지진으로 인한 피해 규모는 다른 어떤 자연재해보다 커질 가능성이 크다(강수영 등, 2008). 지진은 일반적으로 기존에 존재하는 단층면을 따라서 오랜 기간에 걸쳐 축적된 응력의 임계한도에 도달하여 발생한다. 과거 발생 지진의 위치를 살펴보면 우리나라에서는 한반도 동남부에 위치한 양산단층 시스템을 따라서 비교적 많은 수의 지진이 발생하고 있으며, 육상에서 발견된 양산단층 시스템의 해저 연장선상에 위치하는 동해 해저에서도 비교적 많은 수의 지진이 꾸준히 발생하고 있다. 이 지역은 또한 우리나라 경제 성장의 근간이 되는 각종 산업 시설과 우리나라 전력소모량의 상당 부분을 생산하는 원자력 발전소를 비롯한 사회간접자본 시설이 다수 위치하고 있어 국민의 재산과 안녕을 확보하기 위해서 이 지역에서 발생하는 지진의 정확한 위치를 파악하고 원인을 규명함으로써 혹시 발생할 수 있는 지진으로 인한 위험성을 인지하고 사전에 대비하는 연구가 매우 시급하고 절실하다.

지진이 발생하고 지진관측망에 의하여 지진의 발생을 인지하면 지진의 발생

위치와 시간, 규모 그리고 관심지역에서 이 지진으로 인한 진도 추정 등이 가장 우선적으로 수행된다. 이중 지진의 발생위치 결정을 위해서는 최소 4개의 도착시간 관측이 필요하며, 지진파의 관측된 도착시간과 이론적 도착시간 사이의 차이를 최소화 시키도록 지진의 위치와 발생시간을 조정함으로써 그 값을 구하게 된다. 이론적 도착시간 계산을 위해서는 대상지역의 지진파 전파 속도 구조에 관한 사전 정보가 필요하다. 실제 지진의 위치를 구하는 과정에서는 우선 진원 위치와 시간의 초기치를 가정하고 이론적 지진파 도착시간을 계산하여 관측된 지진파 도착시간과의 차이를 구한다. 구해진 차를 이용하여 초기치를 수정하고, 수정된 초기치를 다시 진원 위치와 시간 추정을 위한 초기값에 사용하는 반복적 방법(iterative way)을 사용한다. 이런 반복은 미리 정해진 조건을 충족시킬때 종결되며, 일반적으로 관측치와 이론치의 RMS(root-mean-square)를 최소화 시키는 값에 도달 할 때까지 반복된다 (Lee and Stewart, 1981).

정확한 지진 발생위치를 결정하기 위해서는 대상 지역의 지하 매질에서의 지진파 전파 속도 구조에 관한 자세한 정보가 필요하다. 우리나라의 경우 많은 연구자에 의하여 1차원 혹은 3차원 지하 속도 구조에 관한 연구가 진행된 바 있고, 현재도 활발히 진행되고 있지만, 연구자에 따라서 다른 결과를 제공하고 있어 한반도 전체를 대표할 수 있는 지하 속도 구조 모델에 관한 추가 연구가 필요하다. 또한 우리나라의 지질학적 특성을 고려할 때 일반적으로 지진위치 결정을 위하여 사용하는 1차원 속도 구조로 우리나라의 지하구조를 표현하기에는 많은 한계가 있을 수 있다. 이러한 상황에서 보다 정확하고 신뢰성있는 지진의 발생위치를 결정하기 위하여, 본 연구에서는 속도구조모델에 의한 민감성이 비교적 적은 JHD (Joint Hypocenter Determination) 방법과 파형의 유사성 (Waveform Similarity)를 사용하여 지진의 위치를 결정하였다.

지진예보의 불가능을 인정한 후 지진재해저감을 위하여 고려되고 있는 가장 실현 가능성 있는 방안중의 하나가 지진조기경보이다(Kanamori, 2005). 지진조기경보에서도 가장 먼저 지진의 발생위치에 관한 정보가 필요한데, 기존의 방법을 사용할 경우, 지진 발생위치 결정에 많은 시간이 필요하므로 지진조기경보의 목적 달성을 기대하기 어렵다. 지진조기경보를 위해서는 기존의 방법과는 다른, 즉 가능한 신속히 지진 발생위치를 결정할 수 있는 새로운 방법이 필요할 것이다. 본 연구에서는 지진발생위치 결정의 정확성 향상 연구와 함께 지진조기경보를 위하여 사용가능한 지진위치 결정 방법을 고찰하였으며, 그 내용을 우리나라에서 발생한 지진에 적용함으로써 향후에 지진이 발생할 경우 우리나라 주요 지역에서 확보 가능한 지진 대비 시간을 살펴보았다.

제 2 장 국내외 기술 개발 현황

지진관측망을 사용하여 지진의 발생 사실을 인지하고 가장 먼저 수행되는 과정이 지진의 발생위치, 시간 그리고 규모의 결정이다. 정확한 지진의 발생현황 정보는 관심 지역 내의 지하에 분포하는 활단층의 분포 및 활동도에 대한 가장 기초적인 정보를 제공함으로써 지진위험성 평가의 기초 자료로 사용된다. 지진발생위치는 또한 판과 판의 경계에서 상호 작용, 지구내부구조 연구, 진원 기작, 내진 설계, 지진재해도 연구를 비롯한 기타 지진관련 연구의 기초정보를 제공하며, 사용된 지진 발생위치 정보에 따라 관련연구의 신뢰도를 크게 좌우한다. 이러한 이유로 정확한 지진 발생위치 결정에 관한 연구는 지진학 연구의 근간이 되어 왔으며, 지금도 그 연구가 매우 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 사용하는 지진발생위치 결정방법은 P파와 S파의 도착시간을 지진 기록으로부터 읽고, 기존 연구로부터 확보한 지하 지진파 전달 속도 모델을 사용하여 역산으로 지진발생위치를 결정한다. 지진발생위치는 초동 도착시간 판독의 오류, 사용된 속도모델과 실제 지구구조 사이의 차이, 지진위치 결정에 사용된 알고리즘의 문제, 적절치 못한 지진관측소 분포 등에 의하여 잘못 결정될 수 있다.

관측소의 수가 많지 않을 때에는 현업 종사자 혹은 지진기록 판독 경험이 있는 사람이 수작업으로 지진파 도착시간을 판독하는 것이 일반적이었으나, 지진관측소의 수가 증가하고 생산되는 자료의 양이 증가하여 지진기록을 판독하는데 많은 시간과 노력이 필요하게 되고, 지진신속통보 혹은 지진조기경보의 필요성에 따라 신속성의 중요도가 커짐에 따라 이 작업을 자동화 하는 경우가 많다. 지진발생위치의 정밀결정을 위해서는 현업종사자의 수작업에 의한 도착시간 확인 과정이 필요하지만, 자동 지진파 도착시간으로부터 제공된 정보는 수작업자에게 어느 정도의 가이드라인을 제공할 수 있다(Allen, 1982; Withers, 1998; Zhang et al., 2003).

진원위치 결정에 사용되는 모델로 인한 오차는 일반적으로 모델에러라고 불리며 지진 발생위치를 잘못 결정하게 하는 가장 큰 원인이 되기도 한다. 속도모델로 인한 오차를 줄이기 위하여 여러 개의 지진을 동시에 결정하는 Joint Hypocenter Determination (JHD) 방법(Douglas, 1967; Pujol, 2004; Kim et al., 2005)과 파형의 유사성을 사용하는 HypoDD 방법이 사용되어 지진발생위치를 정밀재결정하기도 한다(Waldhauser, 2002). 국내에서는 유전자 조작법을 사용하여 주어진 속도범위 안에서 수많은 속도모델을 무작위로 생성하고 통계적인 방법을 적용하여 사용된 각 파형의 주행시간에 대한 관측값과 계산값의 차이가 가장 적은 속도구

조를 찾아서 진원요소를 정확히 결정하는 GA-MHYPO 방법을 사용하여 악조건 하에서 진원요소를 결정하는 방법이 사용되기도 한다(Kim, 2006).

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1 국내지진관측망 현황

국내에서는 기상청, 한국지질자원연구원, 한국전력연구원, 한국원자력안전기술원, 한국해양연구원과 일부 대학에서 지진관측망을 운영하며 상시지진관측업무를 수행하고 있다. 이 중 우리나라의 주된 지진감시 및 통보 업무는 기상청에서 담당하고 있으며, 그 밖의 기관에서는 기관고유의 목적을 달성하기 위하여 지진관측망을 상시체제 혹은 임시체제로 운영하고 있다. 본 절에서는 현재 국내에서 운영되고 있는 지진관측망의 현황을 기상청 국가지진관측망 현황, 한국지질자원연구원 지진관측망, 그리고 그 밖의 기관에서 운영하고 있는 지진관측망 현황으로 나누어 개략적으로 정리하였으며, 이를 위하여 지진관측망 현황을 상세히 기술한 류용규(2006)와 김성균 등(2006)의 연구, 2002년부터 2008년 까지 발행된 기상청 지진연보를 상당량 인용하였다(기상청, 2002; 기상청, 2003; 기상청, 2004; 기상청, 2005; 기상청, 2006; 기상청, 2007; 기상청, 2008).

3.1.1 기상청 지진관측망

우리나라에서 1905년 계기지진이 시작된 이래 수 차례의 발전 단계를 거쳐 현재의 지진관측망에 이르고 있다. 1963년 미국지질조사소(United States Geological Survey)의 세계지진관측망(WWSSN: World-Wide Standardized Seismograph Network) 사업, 1978년 규모 5.0의 홍성지진, 1996년 영월지진, 1997년 경주지진 등이 현재의 기상청 지진관측망을 구축하도록 동기를 부여한 사건 중 일부이다.

기상청에서 2007년 말 현재 운영하고있는 지진관측장비는 초광대역지진계 1대, 광대역지진계 12대, 단주기지진계 23대, 가속도계 75대로 전국 75개 관측소에 7종 387점에 대하여 상시지진감시망을 설치/운영하고 있다(그림 1, 기상청, 2007). 또한, 기상청에서는 지진관측 강화사업의 일환으로 지진관측망을 신설하고 지진관측 환경개선사업을 실시하고 있다.

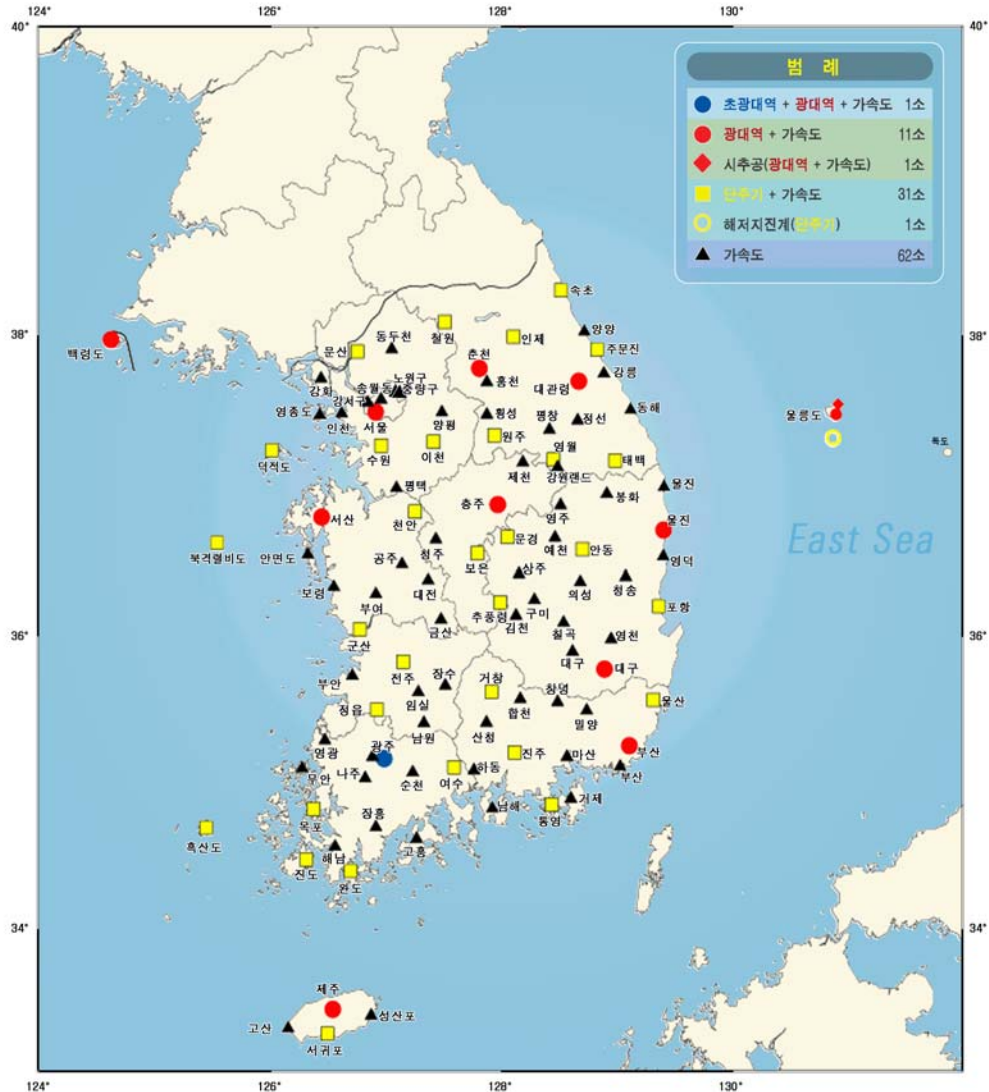


그림 3.1.1 기상청 지진관측망 현황 (2007년말 현재, 기상청 2007).

3.1.2 한국지질자원연구원 지진관측망

한국지질자원연구원은 1982년 한반도 남동부에 위치한 양산단층일원의 지진 활동도 정밀규명을 위하여 이동식 임시지진관측망을 설치/운영하기 시작하였으며, 2005년 11월 현재 국내에 광대역관측소 14개소 (시추공형 4개소, 지표형 9개소), 단주기지진계 15개, 가속도계 16개, 초광대역 1개 및 배열식관측망 3개소를 운영하고 있다. 한국지질자원연구원의 지진관측망 역시 우리나라 전역에서 발생하는 지진을 감시하기에 충분하며, 기상청 지진관측망과 비교하여 특히 사항은 특수 목적의 지진관측망을 설치/운영 하고 있다는 것이다. 특히 양산단층의 활동성을 규명하고 이 지역 지진발생감시, 지진위험성 연구 등을 위하여 이 지역에 8개 이상의 지진관측

소를 설치하여 비교적 고해상의 지진관측망을 운영하고 있다. 또한, 원주 KSRS (Korea Seismic Research Stations) 운영, 배열식 관측망, 인프라사운드 관측망 등을 구축하여 연구 목적의 지진관측망을 운영하고 있다.

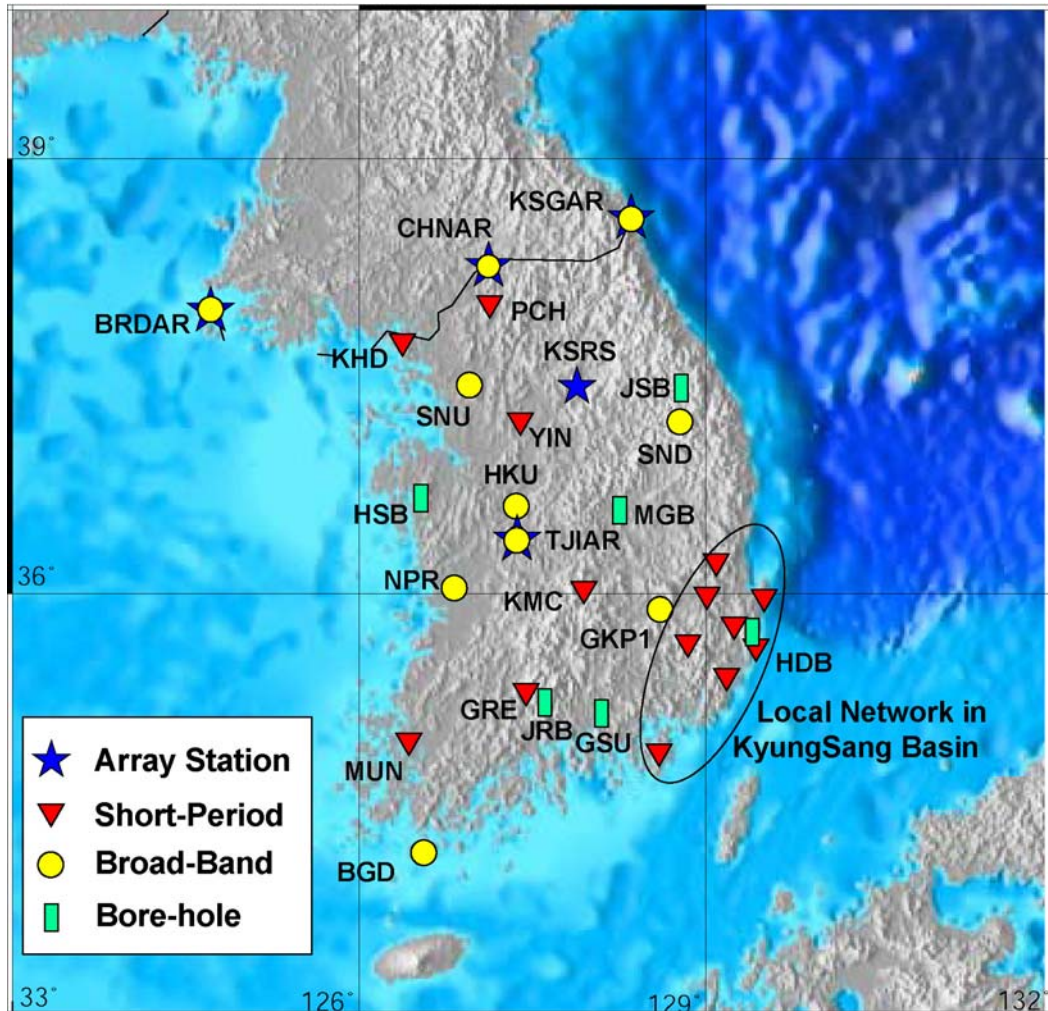


그림 3.1.2 한국지질자원연구원 지진관측망 현황 (2008, 한국지질자원연구원)

3.1.3 그 밖의 기관에서 운영 중인 지진관측망

한국원자력안전기술연구원, 한국전력연구원, 철도공사, 도시가스공사, 한국해양연구원 등에서도 각 기관의 고유 목적을 달성코자 지진관측망을 운영하고 있다. 한국원자력안전기술연구원과 한국전력연구원은 원자력발전소 부지의 지진안정성 평가를 위해서 원전 부지 및 그 주변지역에 지진관측소를 설치/운영하고 있다. 철도공사는 고속철도 등의 안전성 확보를 위하여 고속선로 주변에 지진관측소를 설치 운영하고 있다. 도시가스공사 또한 주요 가스 공정시설 및 보급 선로의 안전성을 확

보호기 위하여 지진관측망을 설치 운영하고 있다. 한국해양연구원에서는 황해 및 그 주변에서 발생하는 지진의 위험성을 규명코자 황해주변에 국립공주대학교, 중국 과학원 지질지구물리연구소와 함께 임시지진관측망을 설치/운영하고 있다.

3.1.4 파형수집 및 도착시간 측정 자료

본 연구를 위하여 1997년부터 2007년 사이에 한반도 내부 및 주변해역에서 발생한 지진으로 기상청, 한국지질자원연구원, 한국원자력안전기술원, 및 한국전력 연구원에서 운영하고 있는 지진관측망에 기록된 파형 자료를 수집하였다. 지진관측망을 운영하고 있는 기관 중 기상청과 한국지질자원연구원에서 각 기관에서 실시간 지진감시를 통하여 관측된 자료를 바탕으로 지진의 발생위치, 발생시간, 규모를 발표한다. 기관마다 운영하고 있는 관측소의 분포와 수가 상이함으로 지진발생 발표 내용에도 차이가 있다. 본 연구에서는 각 기관에서 공개하는 지진 파형자료를 수집한 후 P파와 S파의 도착시간을 측정하였으며, 국내의 모든 관측망 자료를 이용하여 지진의 위치를 재결정하였다. 지진발생 위치 및 시간 결정에 사용된 지하 지진파 속도 전파 모델의 불확실성을 최소화하기 위하여 JHD 방법과 HypoDD방법을 사용하여 지진의 위치를 정밀 재결정하였다. 2003년 이전의 P파와 S파의 도착시간의 경우 경상대학교에서 지진 발생 위치 정확성 향상을 위한 연구 수행 과정에 측정된 자료를 일부 활용하였다(함인경, 2006).

도착시간 측정은 지진 파형자료로 부터 직접 측정 되었으며, 향후 지진파 도착시간 측정의 자동화를 이루기 위한 연구를 수행하여 그 연구 결과를 3.3.3 초동 도착시간 자동 측정 기술에 수록하였다.

3.2 지진목록 (Earthquake Catalogs)

우리나라 지진 발생 현황의 정확한 이해는 지진재해저감연구와 지하구조연구 등의 지구물리 연구의 기초가 된다. 지진활동 자료는 역사지진자료와 계기지진 자료로 나눌 수 있으며 본 연구에서는 계기지진자료 중 1997년 이후의 지진 발생 현황을 중심으로 살펴본다.

3.2.1 기상청지진목록과 한국지질자원연구원 지진목록

기상청과 한국지질자원연구원에서는 각 기관에서 운영하고 있는 지진관측망으로부터 생산된 지진자료를 바탕으로 지진 발생을 실시간 감시하고, 그 발생 사실을 발표하고 있다. 각 기관이 운영하고 있는 지진관측소의 분포와 수가 다르기 때

문에, 발표하는 지진발생 현황에도 차이가 있다.

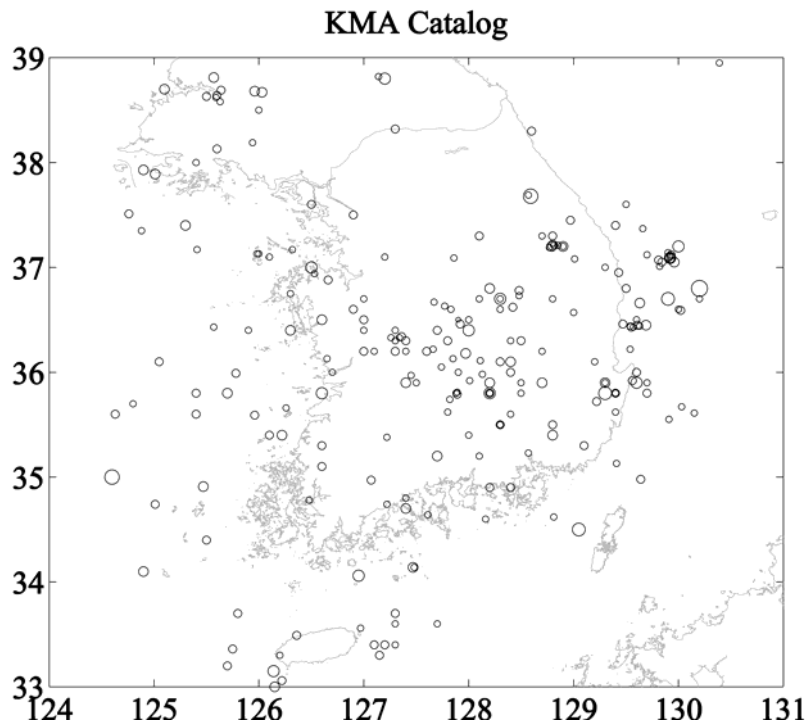


그림 3.2.3 기상청 발표 지진발생현황

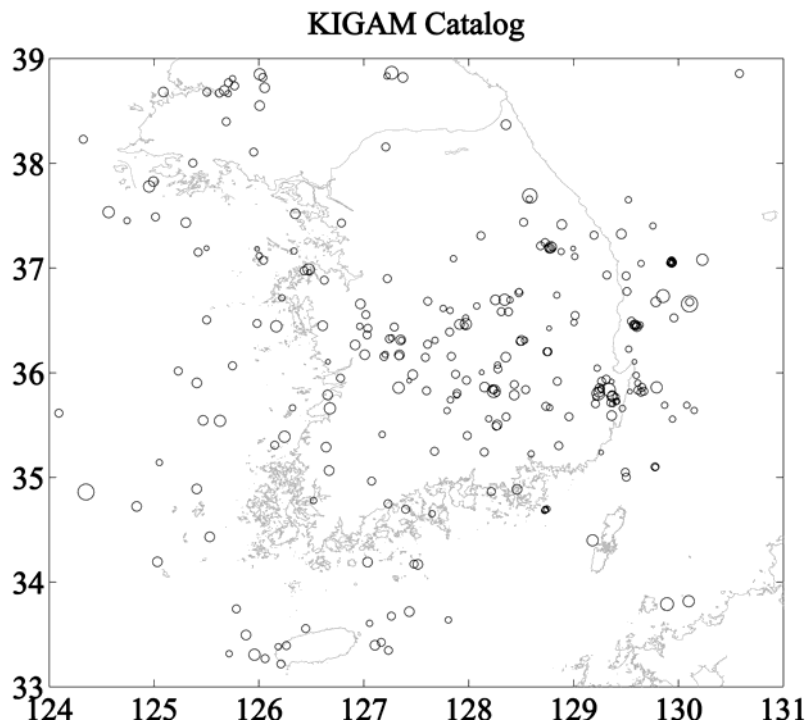


그림 3.2.4 한국지질자원연구원 발표 지진발생현황

3.2.2 지진목록상의 진원인자 차이 비교

본 연구에서는 기상청과 한국지질자원연구원에서 수집한 파형 자료를 수집하여 P파와 S파의 도착시간을 측정된 후 두기관의 자료 모두를 사용하여 진원인자를 재결정 하였다. 본 연구의 단일지진 진원인자 결정 결과 분석에 앞서 기상청과 한국지질자원연구원에서 발표한 지진발생현황의 차이를 우선 살펴본다. 기상청에서는 진원요소 중 진원깊이를 발표하지 않으므로 깊이는 고려하지 않았다. 두 기관의 발표 결과는 진앙위치의 차이는 10km 이내이고, 규모의 경우 0.5 이내의 차이를 보였다. 규모 발표에 있어서도 약간의 차이가 있는데, 지질자원연구원의 발표 규모가 기상청 발표 규모보다 큰 경향이 있다. 최근 연구에 의하면 두 기관의 진원인자 차이는 내륙에서 발생한 지진의 경우 보다 해저에서 발생한 지진의 경우 그 차이가 크며, 해역에 따라서는 동해보다 서해에서 발생한 지진에 있어서 발표 지진의 규모와 진앙의 차이가 크다고 보고하였다(김옥, 2007).

일반적으로 진원인자 결정에 중요한 영향을 끼치는 요인에는 진원인자 결정에 사용되는 자료, 관측소의 분포, 속도모델, 그리고 진원인자를 결정하는 프로그램 등이 있다. 기상청과 한국지질자원연구원에서 발표한 진원인자의 차이 또한 이러한 원인에 기인할 수 있다. 진원인자 결정 시 각 기관의 자료만을 사용함에 따른 사용된 지진 자료의 차이에 기인할 수 있다. 또한 지진위치 결정을 위해서는 우리나라 지하구조를 반영하는 속도 구조 모델을 사용하는데, 기상청의 경우 전지구모델인 IASPEI (International Association of Seismology and Physics and Earth's Interior) 91 1-D 속도모델을 사용하고 있고, 한국지질자원연구원의 경우 지각 및 상부 맨틀의 경우 기존연구에 의하여 제시된 1-D 속도모델을 사용함으로 속도모델의 차이 또한 두기관의 발표에 차이를 발생시킬 수 있다(그림 3.2.9).

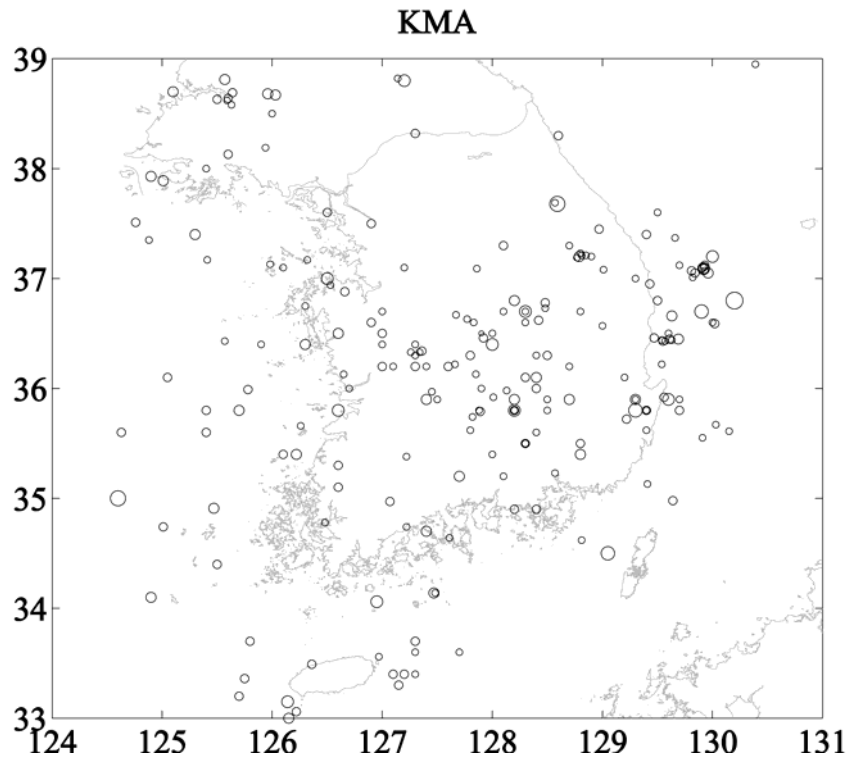


그림 3.2.5 기상청과 한국지질자원연구원에서 공통으로 발표한 지진 인자의 기상청 지진발생현황

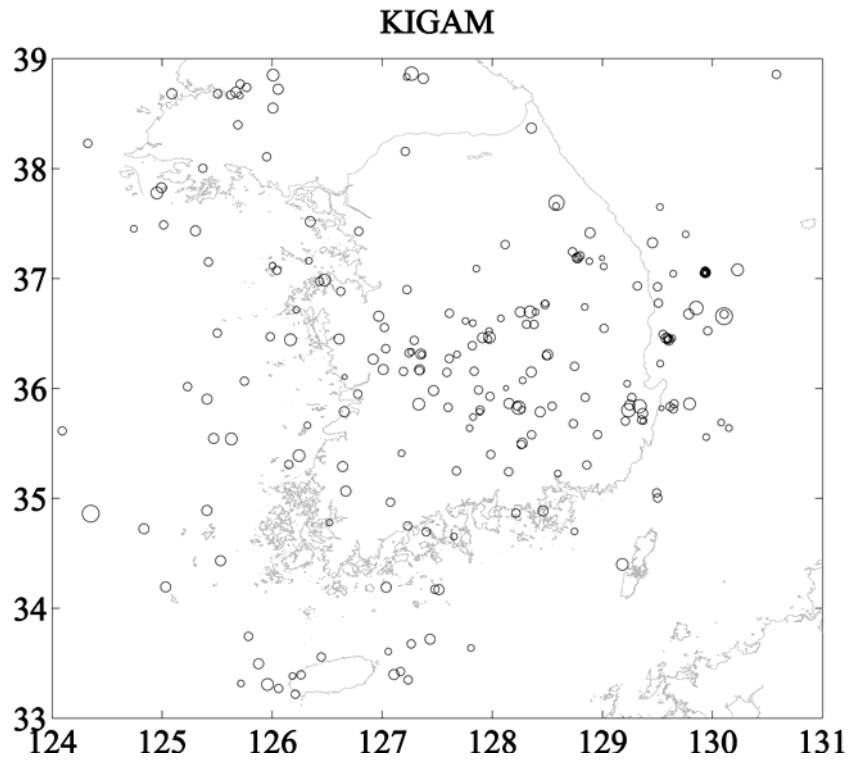


그림 3.2.6 기상청과 한국지질자원연구원에서 공통으로 발표한 지진 인자의 지질자원연구원 지진발생현황

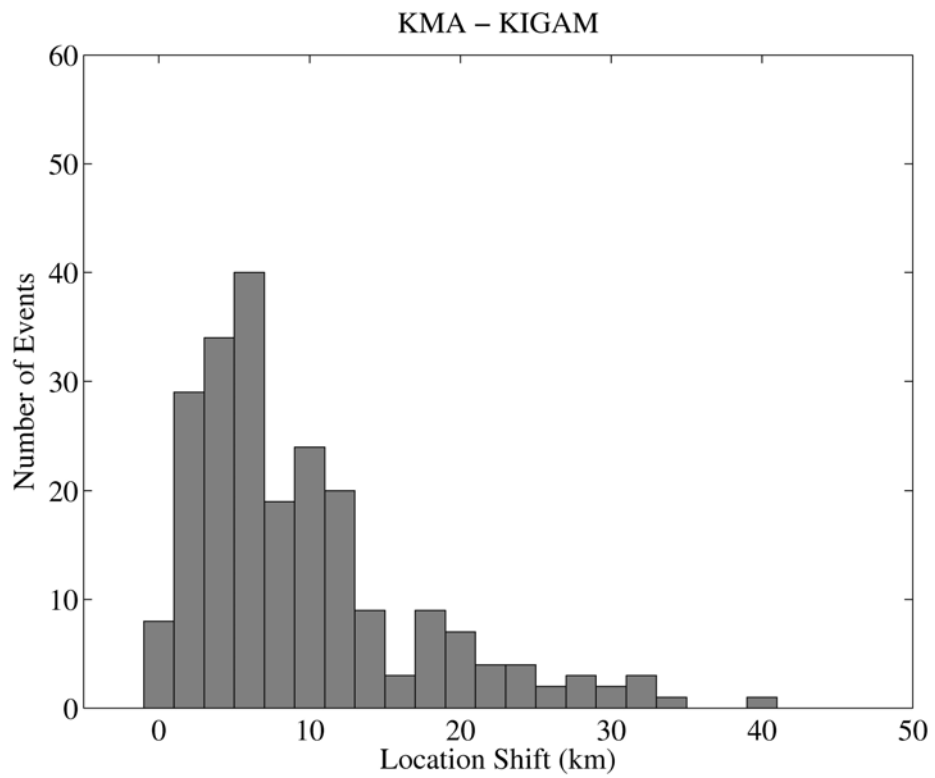


그림 3.2.7 기상청과 한국지질자원연구원에서 발표한 지진발생현황의 진앙위치 차이

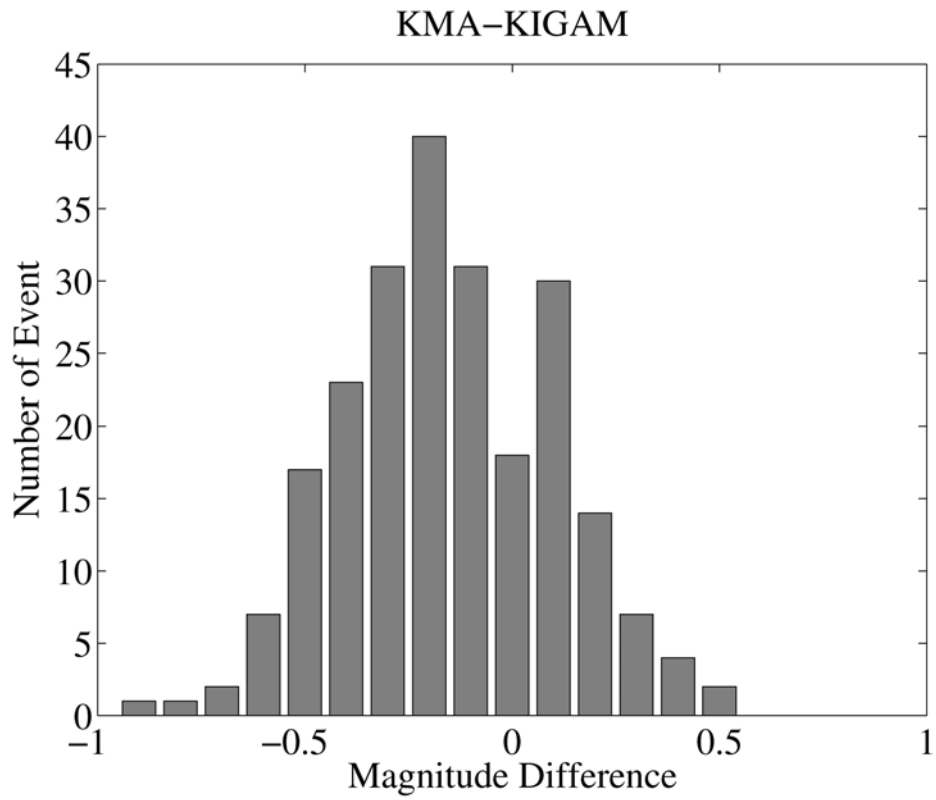


그림 3.2.8 기상청과 한국지질자원연구원에서 발표한 지진발생현황의 규모 차이

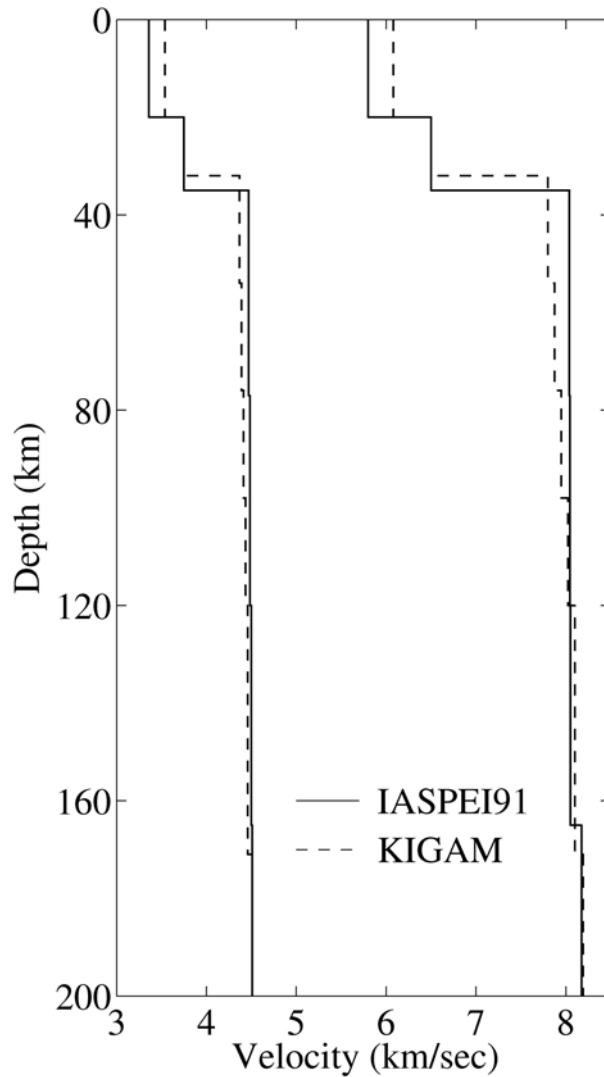


그림 3.2.9 기상청과 한국지질자원연구원에서 지진위치 결정을 위하여 사용하는 지각 및 상부맨틀에서의 지진파 전달 속도모델

3.2.3 지진활동

인구 과밀화 및 도시집중이 가속화 되고 있는 우리나라에서 지진으로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 지진방재관련 정책결정을 위해서는 과거 지진의 발생 이력에 관한 상세한 조사와 평가가 반드시 필요하다. 특히 원전, 공항, 항만 등의 국가 경제와 산업의 근간이 되는 주요 시설물 입지 지역에 대한 지진의 장·단기에 걸친 시·공간적 분포 특성 규명은 대상 지역의 지진 안정성 확보를 위하여 선결되어야 할 과제이다. 기상청, 한국지질자원연구원, 원자력안전기술연구원, 한전기술연

구원, 한국해양연구원 등의 국내 지진관련 연구기관에서는 기관 고유의 목적에 부응하기 위하여 지진관측망을 구축 운영하고 있으나, 우리나라에서의 효과적이고 실질적인 계기 지진 관측 역사는 30년 미만으로 구축된 자료의 양이 매우 빈약한 실정이다. 우리나라에서 발생하는 지진은 전형적인 판 내부 지진으로서 그 재래주기가 매우 길어 현재까지 축적된 계기지진자료로는 한반도의 지진위험성을 적절히 평가할 수 없으므로 오랜 시간동안 기록되어온 문헌에 남아 있는 자료를 활용해야한다. 국내 역사지진 자료의 발굴 및 평가 등은 1980년대 이후 여러 기관에서 수행되어 왔다(Chiu and Kim, 2004; Lee and Yang, 2006). 일부 역사지진 자료 해석 및 평가(진도, 규모, 감진구역 설정, 진앙위치 결정 등)에 대한 기관 및 학자들 간의 이견 조정이 필요한 실정이다. 이미 발표된 자료를 실수요자가 쉽게 이용할 수 있도록 데이터베이스를 구축하는 작업도 필요하다. 우리나라 일부 단층대의 경우(예: 양산 단층대), 지표 혹은 노두에서 여러 차례에 걸친 단층활동이 있었음이 관측되었고, 일부는 논문 혹은 보고서 형식으로 학계/연구계에 보고되고 있다. 과거 대규모 지진의 경험이 있거나 항만시설에 영향을 끼칠 수 있어 주목해야할 단층대에 대한 과거 지진이력의 정리 및 목록화 또한 필요하다.

역사지진자료와 계기지진자료를 통한 우리나라 지진활동에 관한 선행 연구 결과에 의하면, 우리나라의 지진은 넓고 산만하게 분포하며 주요 지체 구조선과의 뚜렷한 상관관계를 찾기 어렵다. 공간상으로 보면, 경기육괴에서의 지진발생빈도가 상대적으로 낮아 보이며 우리나라 주변해역에서의 지진활동도가 높아 보인다. 내륙에서 발생하는 지진의 경우 비교적 조밀한 지진관측망의 분포로 인하여 작은 규모의 지진까지도 비교적 정확히 관측할 수 있지만, 해저에서 발생하는 지진의 경우 일반적으로 지진관측소까지의 거리가 멀어 지진관측의 신뢰성과 정확성에 많은 불확실성이 내포되어있다. 이러한 상황 하에서 동해와 서해의 상대적으로 높은 지진활동도를 근접 정밀감시하기 위한 체제가 필요하다.

과거 30년간의 지진발생 빈도를 보면 지진발생 총 횟수가 꾸준히 증가하고 있는 것처럼 보인다(그림 3.2.10). 그러나 규모 3.0 이상의 지진발생 빈도수와 연간 유감지진 발생빈도에는 큰 변화가 없다. 연간 지진발생 총 횟수의 증가는 지난 30년간 지진관측소의 수와 지진관측 계기의 성능 향상의 결과, 소규모 지진의 관측능력 향상에 의한 것이라 생각된다.

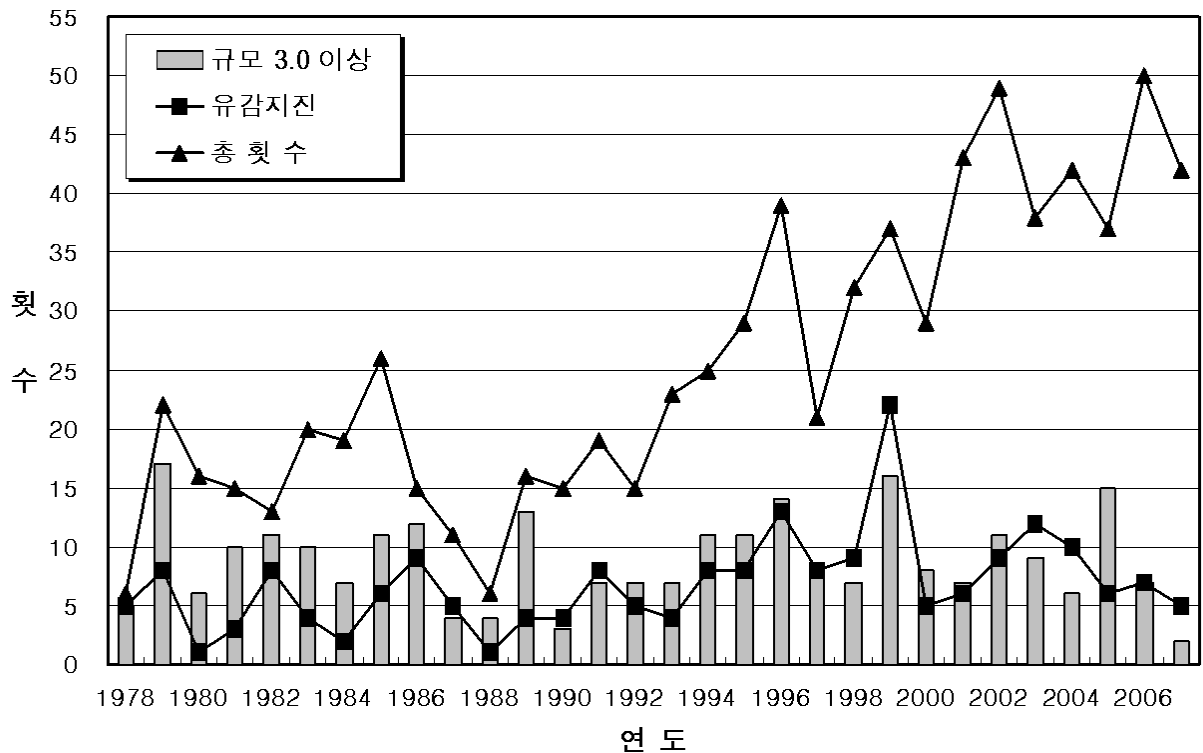


그림 3.2.10 기상청 발표 1978-2007 지진발생 추이 (기상청 지진연보, 2008)

3.3 단일지진인자 결정 (SEL, Single Event Location)

3.3.1 지진인자결정

지진의 발생을 인지하고 가장 먼저 수행되는 과정이 지진의 발생위치를 추정하는 것이다. 지하매질에서의 지진파 전파속도를 1-D 혹은 3-D 모델로 구현 가능하다 가정하고, 진앙 부근 관측소에서 측정된 P파와 S파의 도착시간을 이용하여 지진의 발생위치를 결정한다. 지진 발생 위치와 시간을 결정하기 위해서는 최소 4개의 도착시간 관측이 필요하며, 지진파의 관측된 도착시간과 이론적 도착시간 사이의 차이를 최소화 시키도록 지진의 위치와 발생시간을 조정함으로써 그 값을 구하게 된다. 이론적 도착시간 계산을 위해서는 대상지역의 지진파 전파 속도 구조에 관한 사전 정보가 필요하다. 실제 지진의 위치를 구하는 과정에서는 우선 진원 위치와 시간의 초기치를 가정하고 이론적 지진파 도착시간을 계산하여 관측된 지진파 도착시간과의 차이를 구한다. 구해진 차를 이용하여 초기치를 수정하고, 수정된 초기치를 다시 진원 위치와 시간 추정을 위한 초기값에 사용하는 반복적 방법 (iterative way)을 사용한다. 이런 반복은 미리 정해진 조건을 충족시킬때 종결되며,

일반적으로 관측치와 이론치의 RMS (root-mean-square)를 최소화 시키는 값에 도달 할 때까지 반복된다(Lee and Stewart, 1981).

계산에 사용된 지진파 전파 속도 모델이 실제 지하구조와 유사하고, 관측된 도착시간에 오류가 없다면, RMS는 0에 가까워야 한다. 그러나, 일반적으로 사용되는 1-D 속도 모델은 실제 지하구조의 횡적 변화를 충분히 반영하지 못한다. Model error라고 총칭되는 실제속도구조와 계산에 사용된 모델의 차이는 지진위치를 잘못 결정하게 하는 가장 큰 원인이 되기도 한다. Model error를 최소화하기 위해서는, 즉 1-D 속도모델의 한계를 극복하기 위해서는, 실제 지구구조를 보다 현실적으로 묘사하는 3차원 속도구조의 사용이 바람직하다(Kim et al., 2006; Chen et al., 2006). 또 한가지 주목할 만한 것은, 일반적인 지진위치 결정의 과정은 지진파 도착시간의 측정치와 이론치 사이의 RMS를 최소화 시키는 과정으로서, 작은 RMS가 실제로 지진위치의 정확성을 의미하지는 않는다(Pujol, 2004; Kim et al., 2007).

어느 지점에서 발생한 지진으로 부터 N개의 관측소에서 지진파 도착시간이 관측되었다. 정확한 지진의 발생위치를 모르는 상태에서 초기 지진 위치(위도, 경도, 깊이)와 지진발생 시간을 가정하고 그 지역의 지진파 전달 속도구조를 가정하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_i = \tau^0 + T_i$$

여기서 τ^0 는 지진의 진원시간, T_i 는 지진으로부터 관측소 i까지 지진파가 전달되는 데 필요한 시간, t_i 는 초기지진위치와 지하 속도구조의 가정하에 계산된 관측소 i에 지진파가 도착하는 시간을 표시한다. 관측소 i에서 관측된 지진파 도착시간과 계산된 지진파 도착시간의 차이는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} r_i &= (t_i)_{obs} - (t_i) \\ &= (t_i)_{obs} - (\tau^0 + T_i) \end{aligned}$$

계산치(t_i)를 임의의 초기치(τ^0, x^0, y^0, z^0)와 Taylor series를 사용하면 관측치와 계산치 사이의 차이를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} r^i &= (t_i)_{obs} - (\tau^0 + T_i) \\ &\cong d\tau + \frac{\partial T}{\partial x} dx + \frac{\partial T}{\partial y} dy + \frac{\partial T}{\partial z} dz \end{aligned}$$

여기서, $d\tau = \hat{\tau} - \tau^o$,

$$dx = \hat{x} - x^o,$$

$$dy = \hat{y} - y^o,$$

$$dz = \hat{z} - z^o \text{ 이다.}$$

이 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 1 & \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_1 & \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_1 & \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_1 \\ 1 & \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_2 & \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_2 & \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_N & \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_N & \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial\tau \\ \partial x \\ \partial y \\ \partial z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_N \end{pmatrix}$$

matrix notation을 사용하여 다시 쓰면 다음과 같다,

$$\vec{Ax} = \vec{y}$$

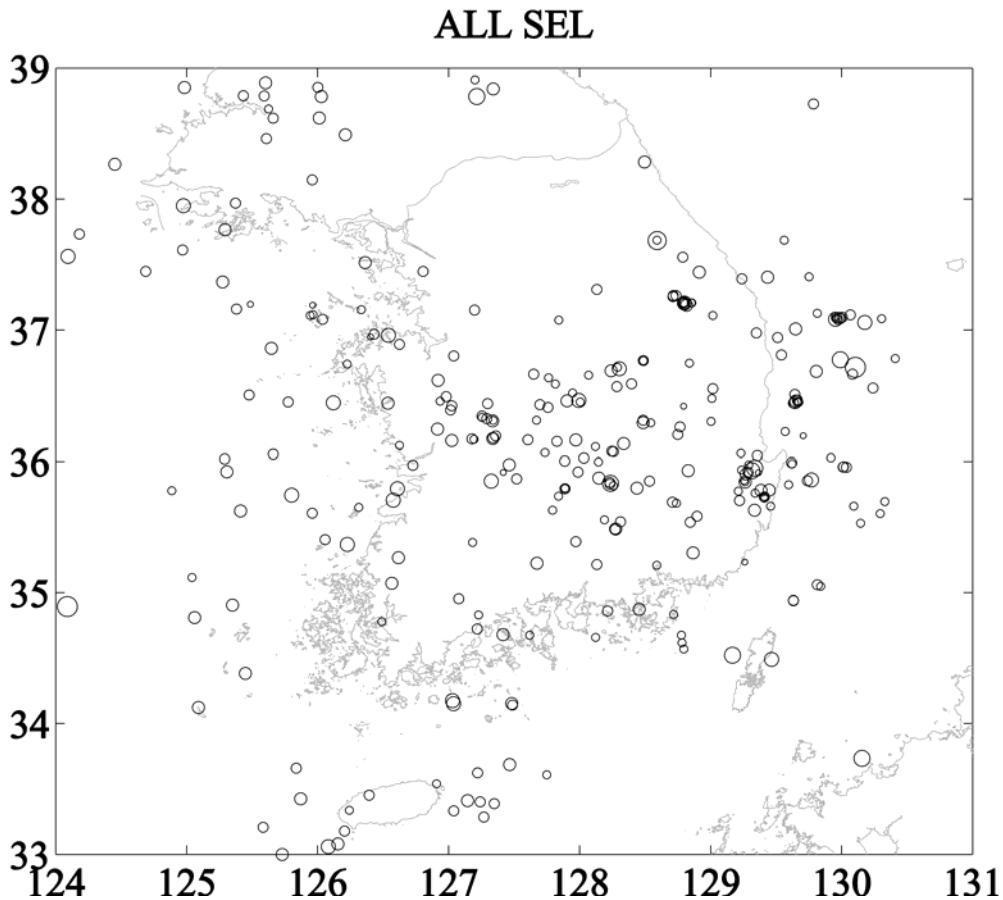


그림 3.3.1 본 연구에서 결정한 지진 분포

3.3.2 SEL, KMA 지진인자, KIGAM 지진인자 비교

본 연구를 위해서 1997년부터 2007년까지 기상청과 한국지질자원연구원 지진관측망에 기록된 자료를 수집하여 P파와 S파의 도착 시간을 측정 한 후 두 기관 자료를 모두 사용하여 지진의 발생위치와 발생시간을 계산하였다. 2003년 이전에 발생한 일부 지진의 경우 경상대학교에서 수행한 선행연구 과정에서 수집된 자료 일부를 사용하였다(함인경, 2006). 총 303개 지진에 대한 지진파 도착시간 측정 혹은 기존 도착시간 자료를 수집한 후, 지진 발생시 운영중인 국내의 모든 지진관측 자료를 사용하여 지진위치를 결정하였다. 진원요소 결정을 위하여 HYPOELLIPSE(Lahr, 1984)를 사용하였으며, 1차원 속도 모델은 한국지질자원연구원 모델을 사용하였다.

그림 3.3.2는 기상청 발표와 본 연구에서 결정한 SEL 간의 진앙위치 차이이며 두 목록간의 차이가 대부분 진앙위치에 대하여 15 km 이하이다. 진앙위치 차이

가 상대적으로 크게 나타나는데 그 원인은 사용된 속도모델의 차이에 기인한다고 생각된다. 그림 3.3.3은 KIGAM 발표와 SEL의 차이를 보여주는 것으로 KMA의 경우와 비교하여 상대적으로 작은 변화를 보이는데, 이는 KIGAM과 이 연구 모두에서 같은 속도 모델을 사용 했으므로 어느 정도 예상된 결과이다. 그러나 평균 2.05 km 정도 진앙위치가 이동 하였는데 이것은 기상청 지진관측자료와 KIGAM 지진관측자료가 모두 사용되었기 때문이라고 생각된다. 그림 3.3.3의 로즈 다이어그램은 진앙 위치 변화의 방향성을 표시한다. 동서 방향으로 그 이동 방향이 약간 편중되어 있으나 전반적으로 어떤 규칙적인 변화의 양상을 발견하기는 힘들다. 진원 깊이에도 약간의 변화가 있다. 전반적으로 본 연구에서 결정한 진원 깊이가 평균 2.32 km 더 깊게 결정되었다(그림 3.3.4). 그림 3.3.5에서는 진원시간 차이의 분포를 표시 하였는데, 약 0.5 초 정도의 차이가 있다.

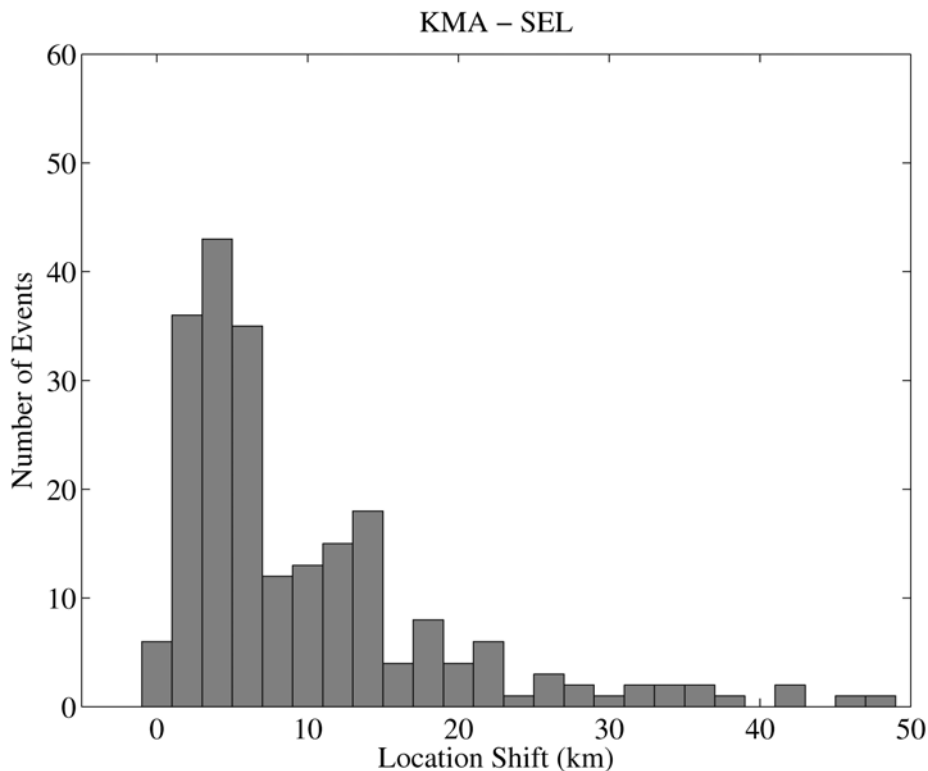


그림 3.3.2 기상청 발표 지진위치와 본 연구 SEL 지진위치 간의 차이

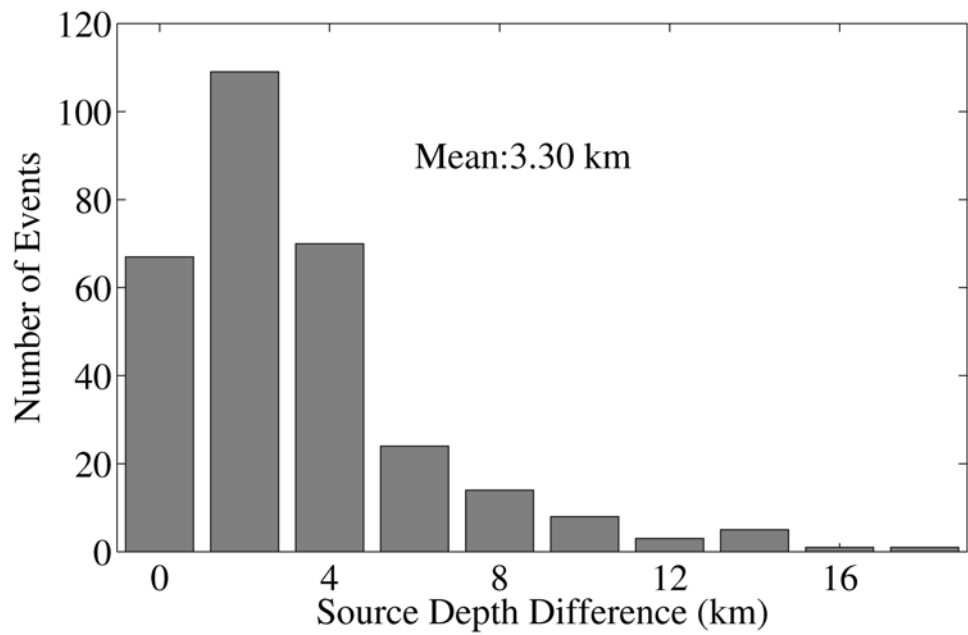
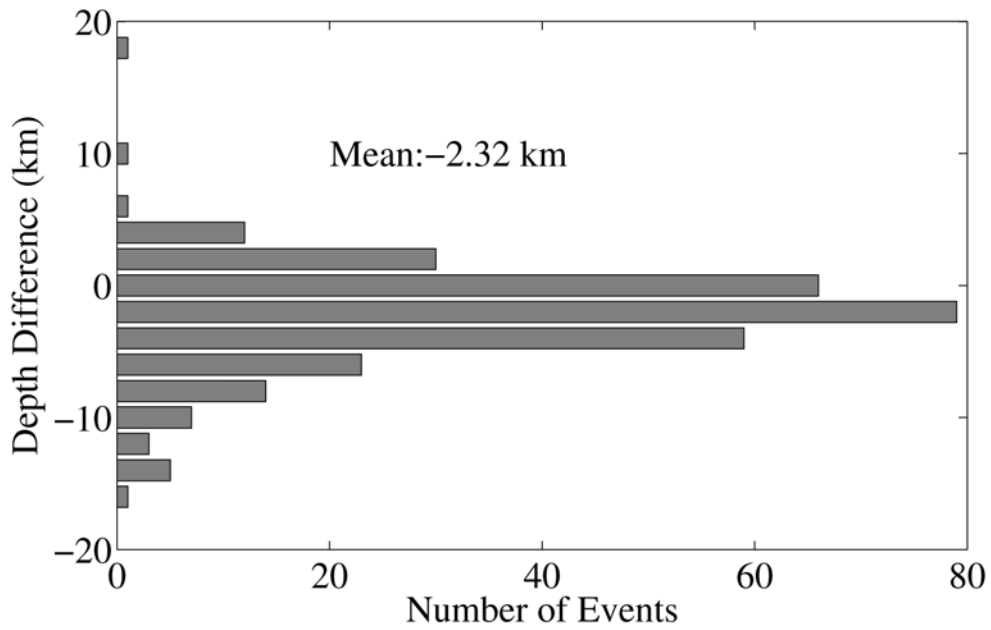


그림 3.3.4 한국지질자원연구원 지진연구센터 발표 진원깊이와 본 연구 SEL 진원깊이 간의 차이

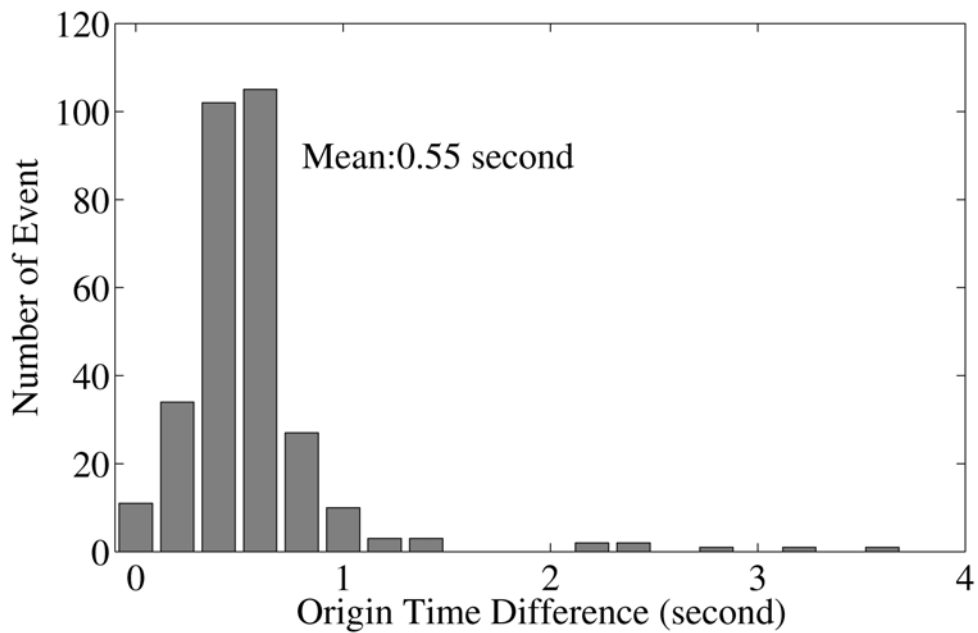
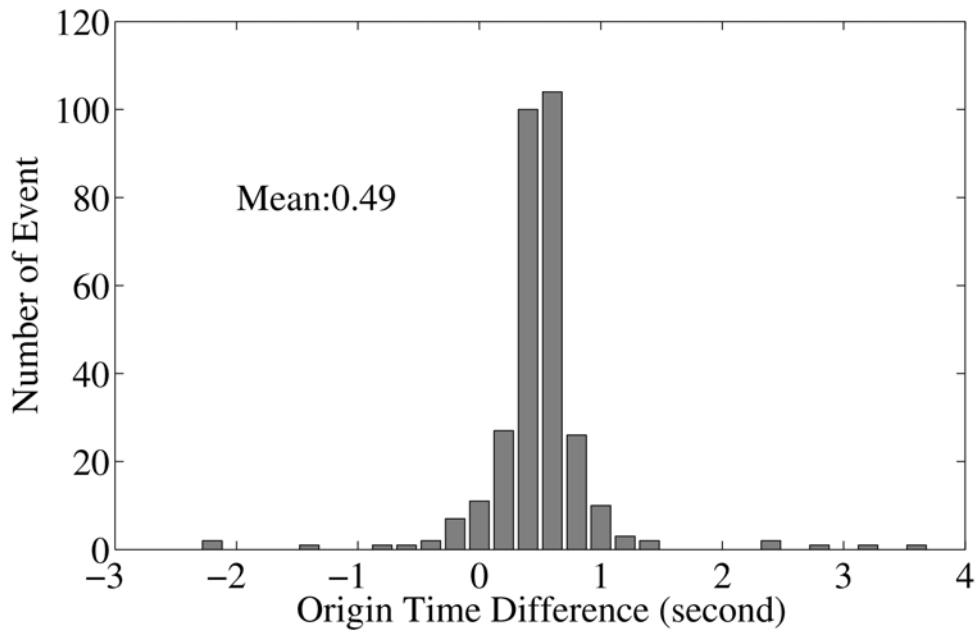


그림 3.3.5 한국지질자원연구원 지진연구센터 발표 진원시간과 본 연구 SEL 진원시간 간의 차이

3.3.3. 초동 도착시간 자동 측정 기술 - AIC picker

지진관측소의 수와 센서의 종류가 지속적으로 증가함에 따라 초동 도착시간

을 현업담당자가 수동 측정하기란 쉬운 일이 아니다. 특히 신속 지진통보 혹은 조기 지진정보의 과정에서 수동 측정에 의존하는 것은 바람직하지 않다. 지진 자료로부터 초동 도착 시간을 자동 측정하기 위한 기술이 꾸준히 개발되어 왔으나, 각 기술마다 어느 정도의 장·단점을 가지고 있다. 가장 많이 사용되는 기술에는 STA/LTA (Short Term Average/Long Term Average) 방법, AR (Autoregressive) Model 등이 있다. 현재 기상청에서 운영 중인 국가지진정보시스템 (NEIS, National Earthquake Information System)에서는 STA/LTA 알고리즘에 의한 지진파 도착시간 측정을 수행하고 있으나 배경 잡음이 높은 단주기관측소와 가속도 관측소에서 잘못된 P파 측정으로 지진요소 결정의 큰 오차를 가져오는 경우도 있다(류용규, 2006). 따라서 본 연구에서는 최근 개발된 초동 도착시간 측정 방법의 하나인 AIC (Akaike information criteria) picker를 활용하여 우리나라에서 관측된 지진파의 도착시간 측정을 시도 하였다(Allen, 1982; Withers, 1998; Zhang et al., 2003).

AIC picker를 시험하기 위하여 우선 2007년 1월 오대산에서 발생한 지진 기록에 적용하였고, 그 결과를 수동 측정의 결과와 비교하였다.

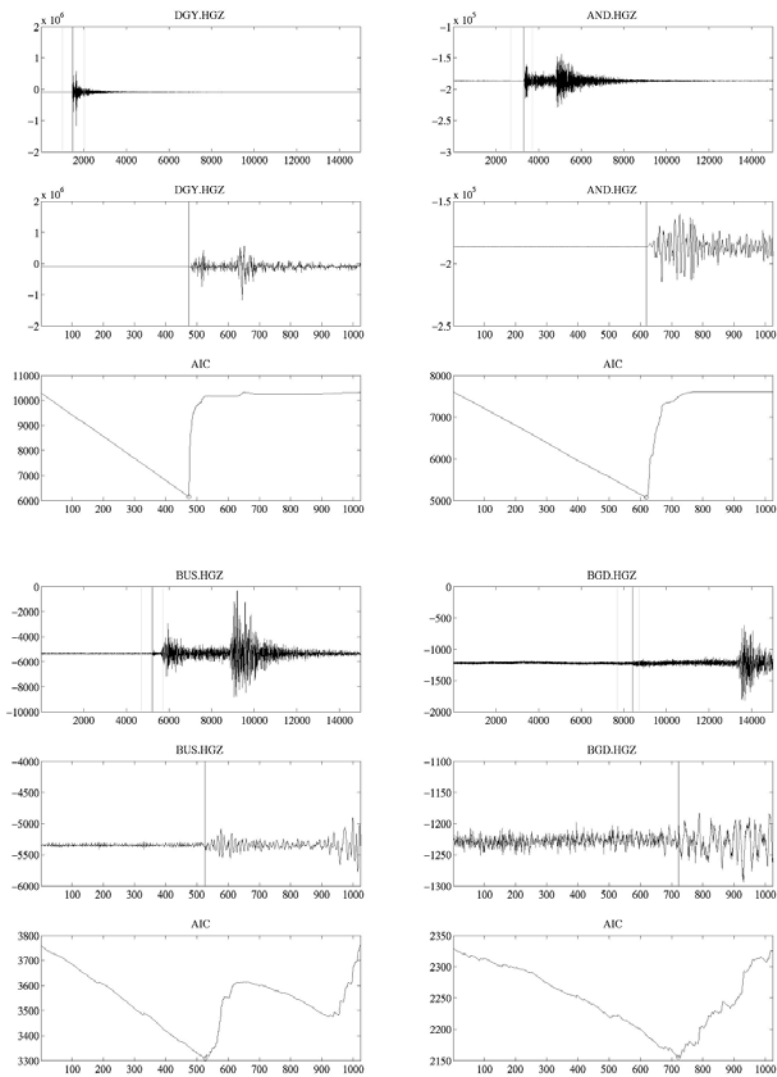


그림 3.3.7 AIC picker를 이용한 지진파 초동 도착시간 측정의 예

3.4 관측소 보정을 이용한 진원 인자 재결정

3.4.1 JHD 방법

본 연구에서는 지진 발생위치 결정의 상대적 정확성을 향상시키고 천부지각 물질 특성의 횡적변화를 알아보기 위하여 Joint Hypocenter Determination (JHD) 방법을 사용하였다. 이 방법에서는 지진요소(진원 위치와 시간)와 관측소보정(station correction)을 동시에 결정한다. 이 방법은 Douglas(1967)에 의하여 그 효과가 제안되었으며 Pavlis와 Booker(1983) 그리고 Pujol(1988)에 의하여 발전된 형태의 기술이 소개되었다. 지진의 발생위치를 결정하기 위하여 진원에서 관측소까지

지진파의 주파시간을 계산할 때 여러 가지 요인으로 인하여 에러가 발생할 수 있다. 이 중 속도모델에 의하여 발생하는 에러는 1. 진원부근의 속도모델과 실제 속도구조 차이, 2. 관측소 부근의 속도모델과 실제 속도구조 차이, 그리고 3. 그 밖의 파의 전파경로 상의 속도모델과 실제 속도구조 사이의 차이에 의하여 발생한다. 여러 개의 지진이 균집을 이루어 발생할 경우, 관측소 하부의 속도모델과 파의 전파경로 상의 불확실성에 기인한 오차를 관측소 보정 (station corrections)으로 표현할 수 있다. 관측소보정 사용을 통하여 보다 정확한 상대적 지진발생위치를 결정할 수 있다. 여러 개의 지진발생 위치를 동시에 결정 할 때, 관측소 보정 상수를 추가하면

$$t_{ij} = \tau^o + T_{ij} + s_i \quad i = 1, \dots, N(\text{stations})$$

$$j = 1, \dots, M(\text{events})$$

여기서, τ_j^o 는 지진(j)의 진원시간, T_{ij} 는 지진(j)으로 부터 관측소(i)까지 지진파가 전달되는데 필요한 시간, t_{ij} 는 초기지진위치와 지하 속도구조의 가정 하에 계산된 관측소(i)에 지진파(j)가 도착하는 시간, s_i 는 관측소보정(station correction)을 표시한다.

$$r_{ij} = (t_{ij})_{obs} - (t_{ij})_{cal}$$

$$= (t_{ij})_{obs} - (\tau^o + T_i + s_i)$$

$$\cong d\tau_j + \frac{\partial T}{\partial x} dx_j + \frac{\partial T}{\partial y} dy_j + \frac{\partial T}{\partial z} dz_j + ds_i$$

이 식을 다시 쓰면 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & s_1 \\ 0 & A_2 & 0 & \dots & 0 & s_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A_M s_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{R_1} \\ \overline{R_2} \\ \vdots \\ \overline{R_M} \end{pmatrix}$$

3.4.2 JHD 적용 및 결과

우리나라에서 발생하는 지진은 넓은 지역에 걸쳐 산만하게 발생하지만 그 분포를 살펴보면 몇몇의 지역에서는 다른 지역에 비하여 지진이 자주 발생하고 있다. 한반도 남부에서 발생하는 지진 중 6개의 지진군을 임의로 선택한 후 JHD 방

법을 사용하여 지진 발생위치를 재결정하였다(그림 3.4.1). 선택된 균지진 중 G1은 경주지역 양산단층시스템 주위에 발생한 지진균이며, G2는 영월 부근, G5는 2006년 울진앞바다 지진균, G6는 2004년 동해지진균이다. JHD 적용에 있어 속도모델은 KIGAM 속도모델을 사용하였다. 가능한 많은 관측소와 지진을 사용하려 하였으나 제주도에 위치한 관측소의 경우 육지에 위치한 관측소로부터 많이 떨어져 있고, 관측소 보정치가 육지 관측소의 보정치와 많은 차이가 있어 본 연구의 분석에서는 제외하였다. 제주도의 지질이 육상의 지질과는 상이하여 이러한 현상이 나타난다고 생각되며 향후 보다 자세한 연구를 필요로 한다.

여러 개의 지진균에서 비교적 일관된 관측소 보정치의 성향이 보인다. 한반도 서남부에 위치한 관측소에서 양의 관측소 보정치가 주로 관측되었으며, 동북부의 관측소에서 음의 관측소 보정치가 주로 관측되었다(그림 3.4.2). 관측소 보정치는 파선 경로상의 실제 지구 속도 구조와 지진요소 결정을 위하여 사용된 속도 모델의 차이를 표시하는 것으로서 일반적으로 양의 관측소 보정값은 실제 속도구조가 모델보다 낮음을 의미하고, 음의 관측소 보정치는 실제 속도구조가 모델보다 높음을 의미한다(그림 3.4.3). 본 연구의 결과와 연관하여 설명하면, 한반도 남서부는 상대적으로 그 속도가 다른 지역에 비하여 낮음을 의미한다.

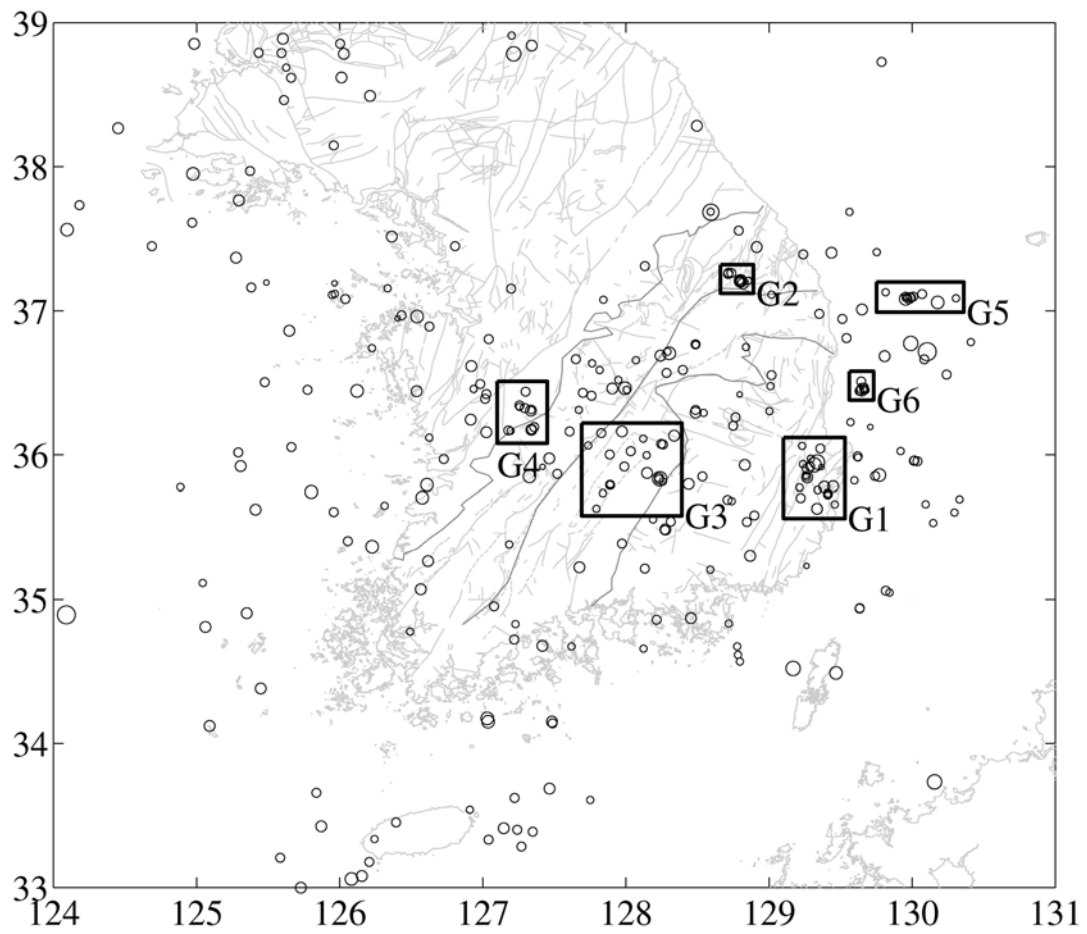


그림 3.4.1 한반도 남부에서 발생한 지진 중 공간적으로 군집을 이루며 발생하는 지진군

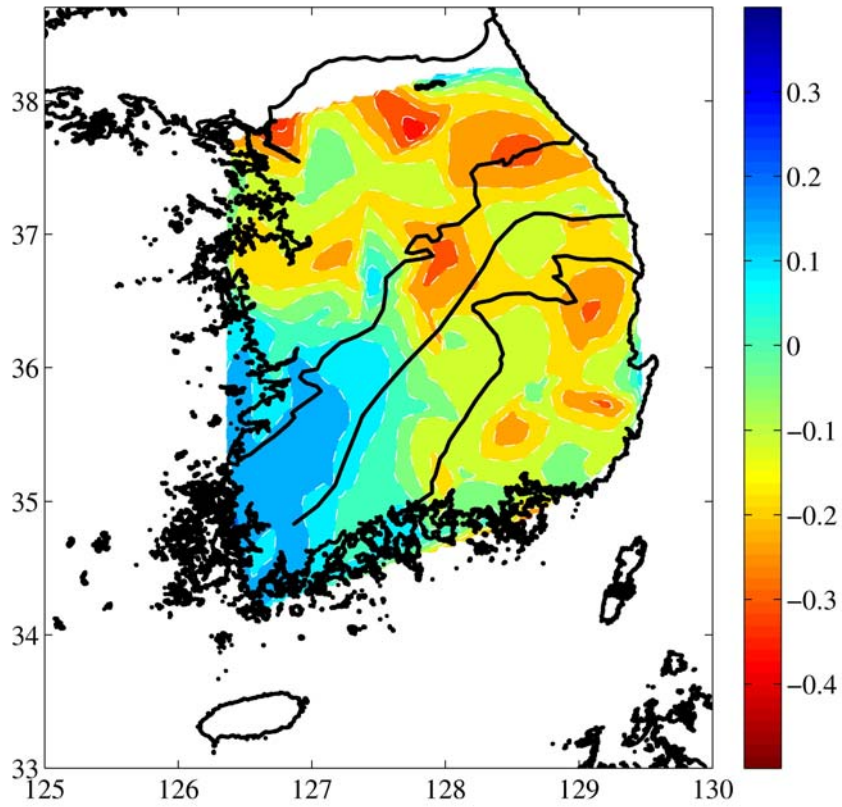


그림 3.4.2 P과 JHD station correction

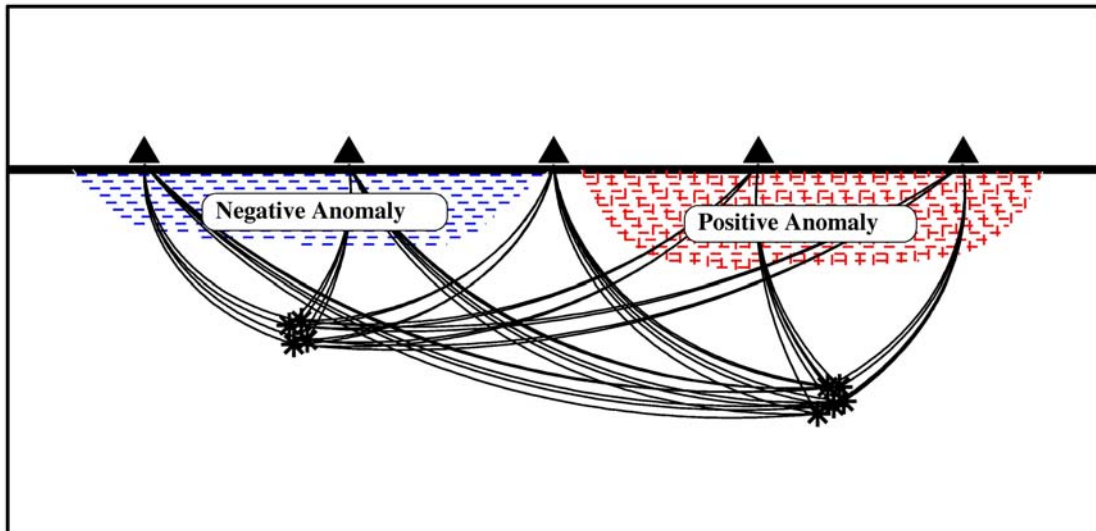


그림 3.4.3 지역적 속도 변화에 따른 관측소 보정

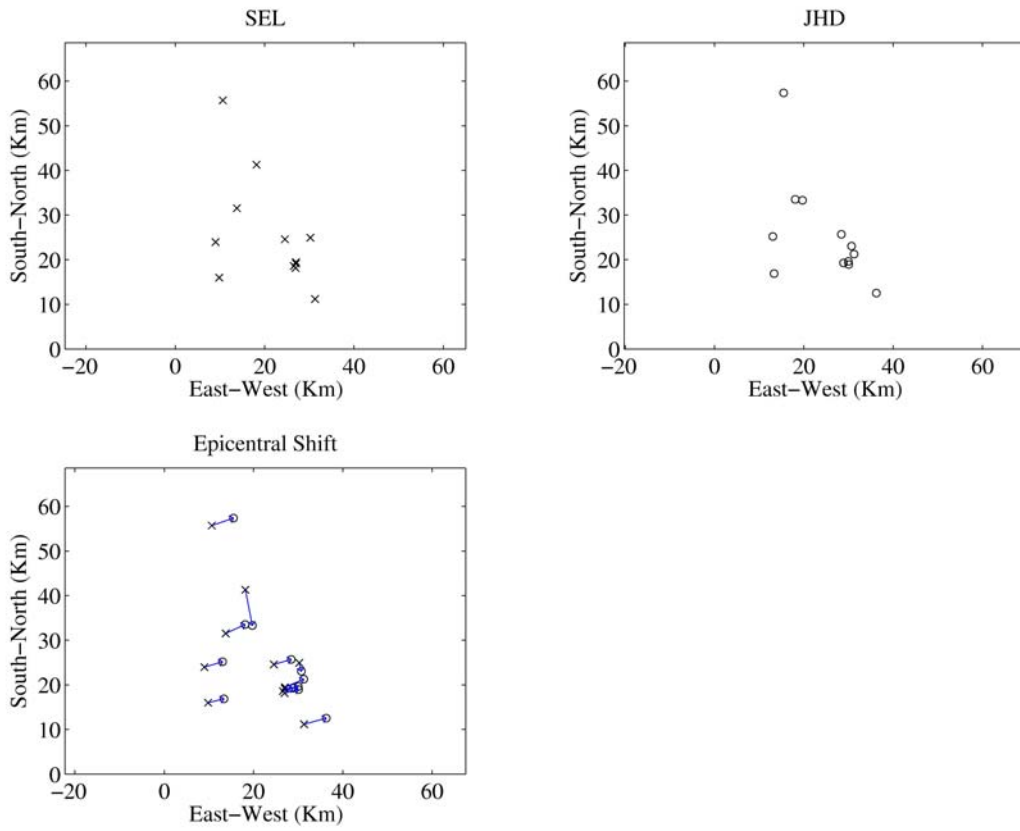


그림 3.4.4 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G1 - map view

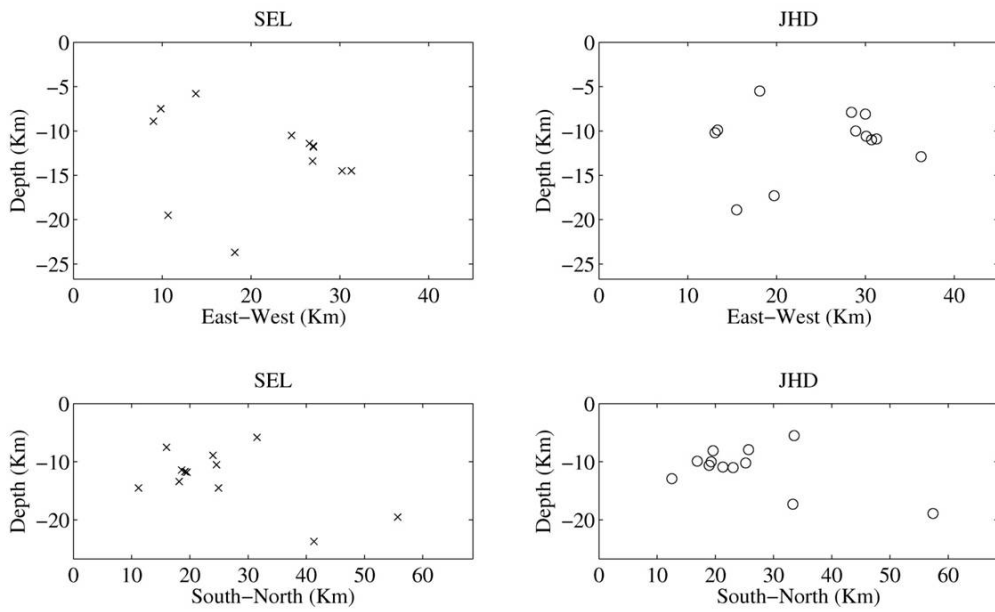


그림 3.4.5 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G1 - Cross sectional view

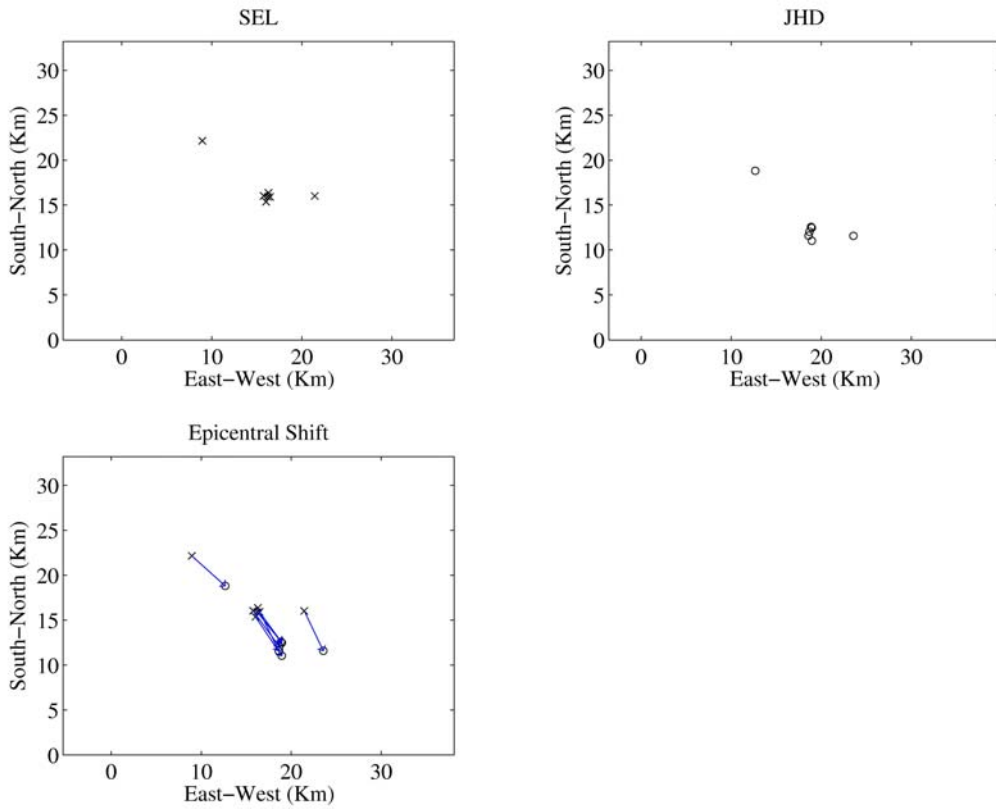


그림 3.4.6 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G2 - map view

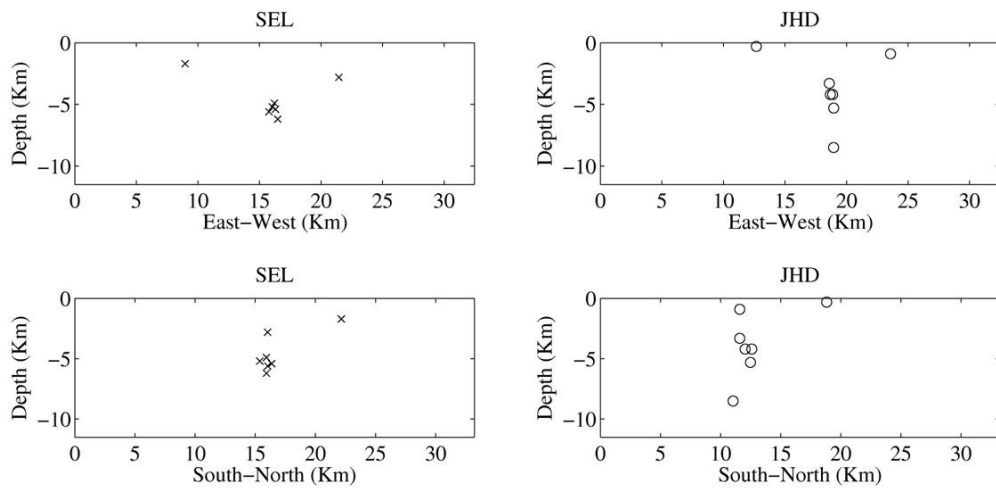


그림 3.4.7 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G2 - cross sectional view

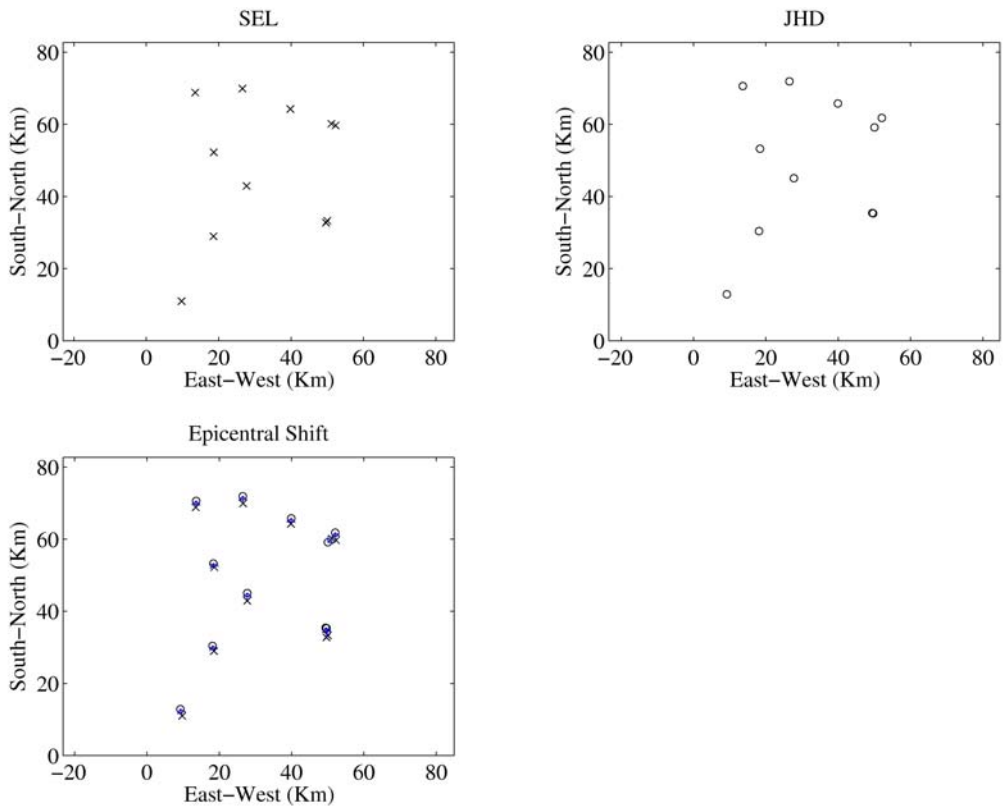


그림 3.4.8 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G3 - map view

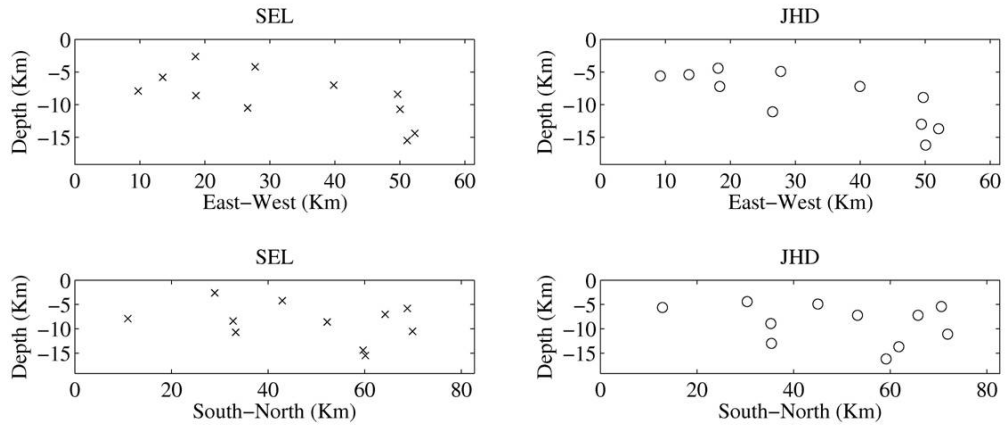


그림 3.4.9 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G3 - cross sectional view

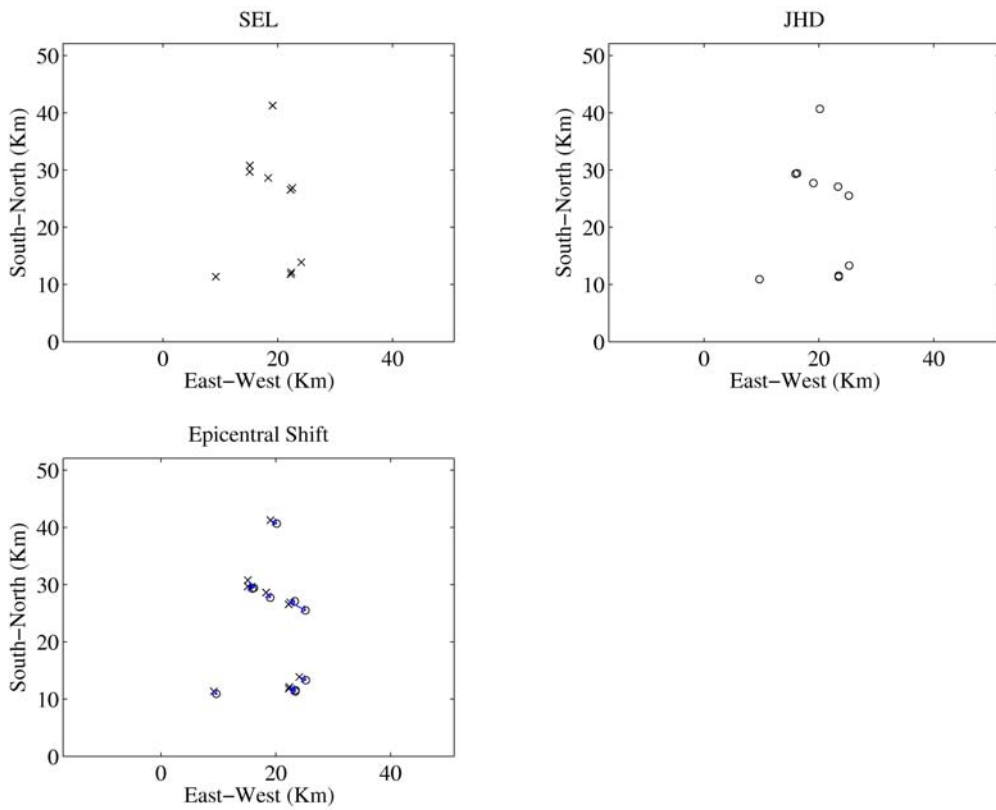


그림 3.4.10 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G4 - map view

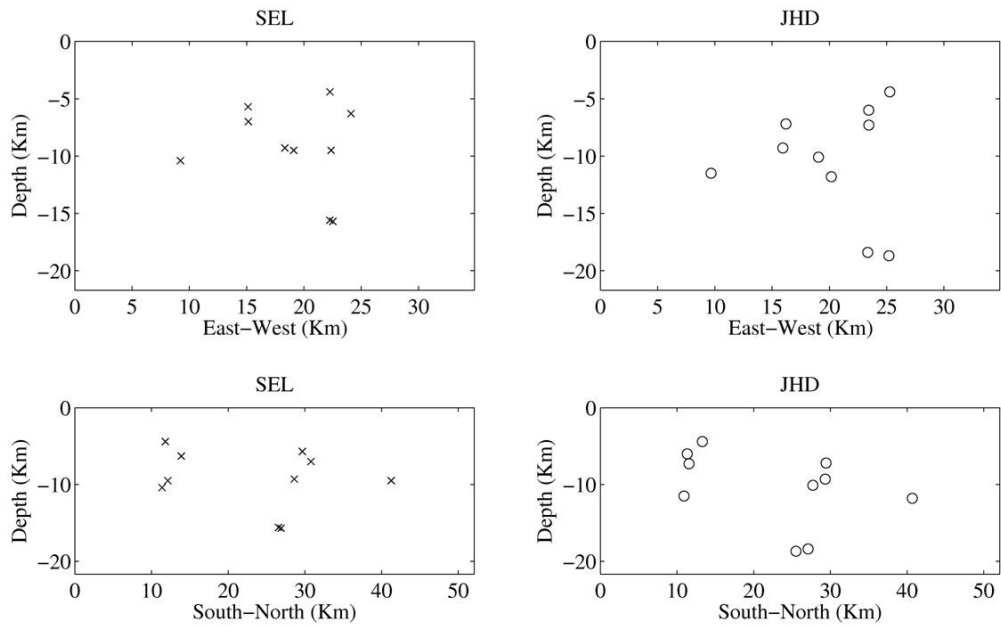


그림 3.4.11 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G4 - cross sectional view

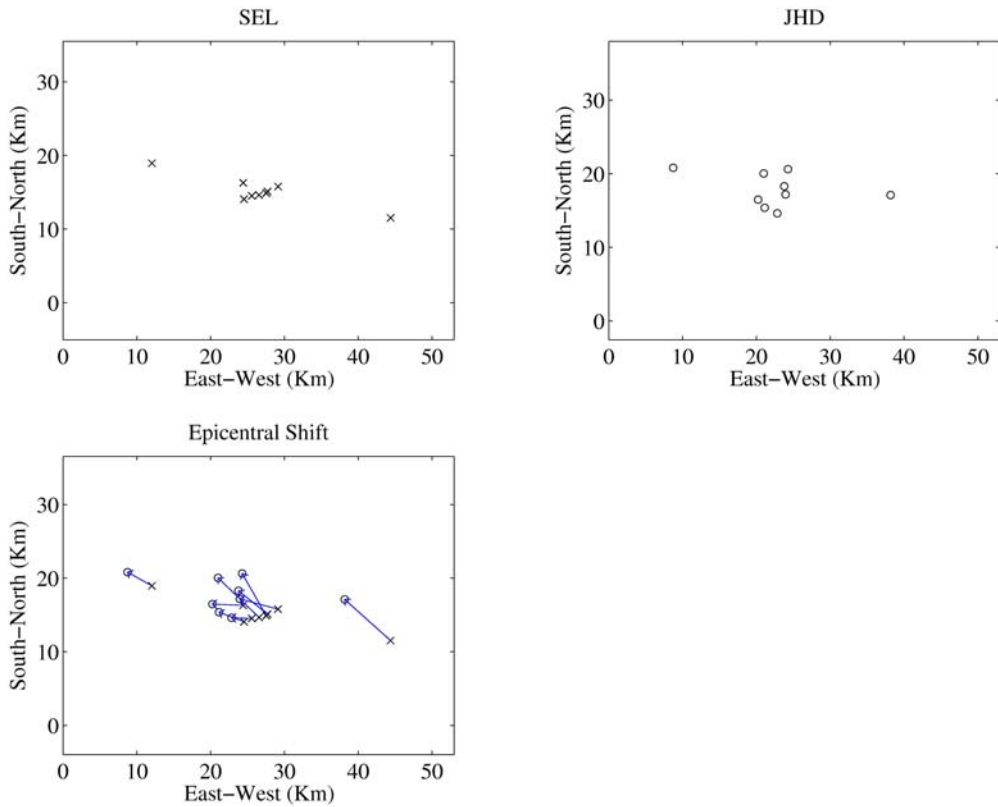


그림 3.4.12 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G5 - map view

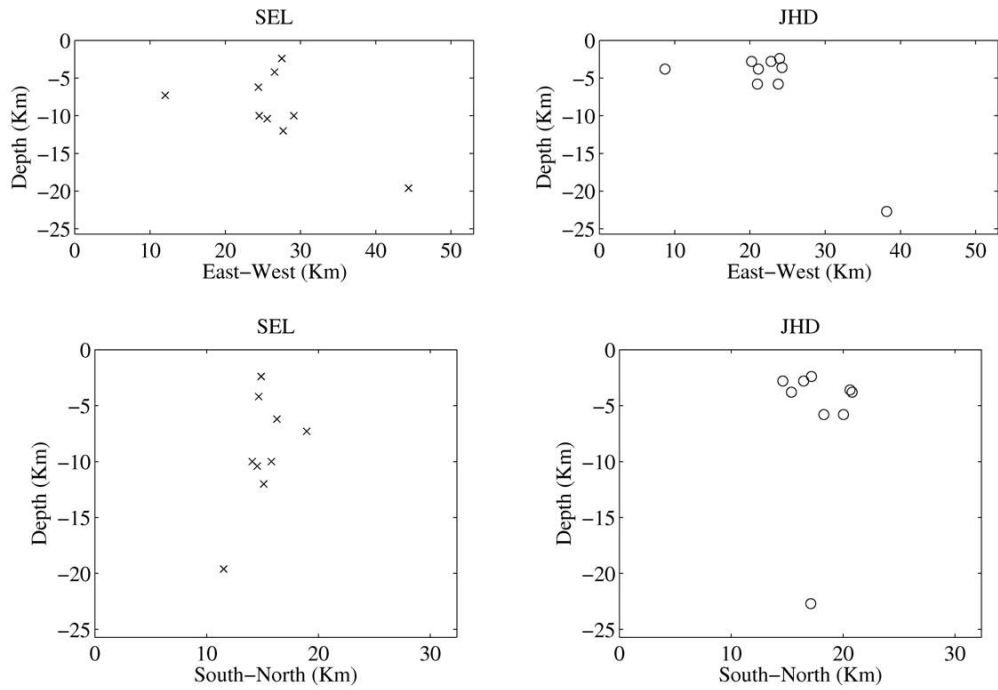


그림 3.4.13 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G5 - cross sectional view

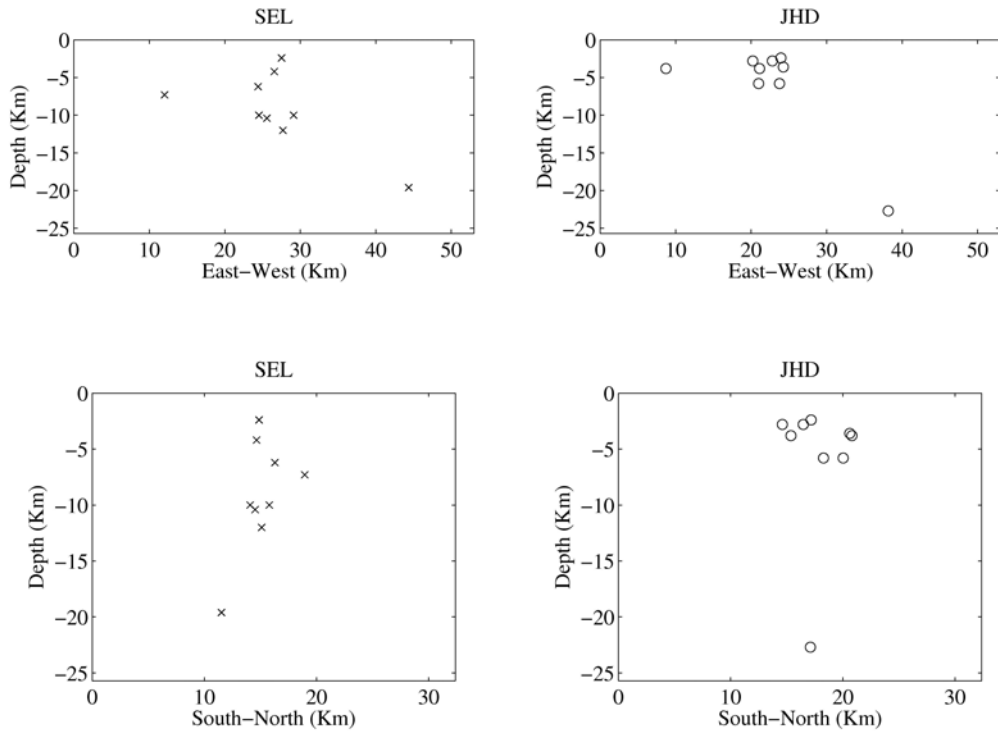


그림 3.4.14 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G6 - cross sectional view

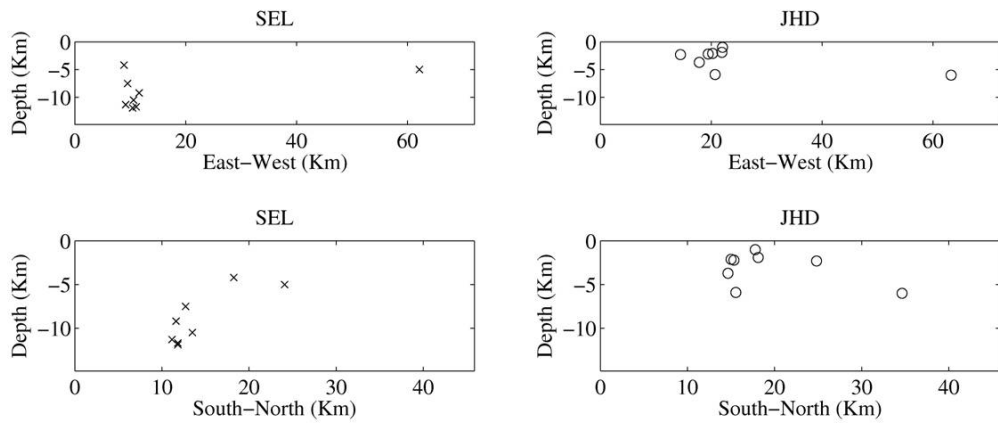


그림 3.4.15 JHD 방법을 사용한 지진위치 재결정 G6 - cross sectional view

3.5 Double-difference 방법을 이용한 진원인자 재결정

3.5.1 Double-difference 방법

지진은 넓은 지역에 걸쳐 일정한 규칙 없이 산만하게 발생하는 것처럼 보이지만 같은 장소 혹은 비슷한 장소에서 반복적으로 발생하는 경우가 많다. 다르게 말하면 지진은 지하에 새로운 단층을 형성하면서 발생하기 보다는 기존에 존재하는 단층면을 따라서 발생하는 것이 일반적이다. 지진이 같은 장소에서 같은 단층작용에 의하여 발생하고 하나의 지진관측소에서 관측된다면, 지진관측소에서 기록한 파형은 동일할 것이다. 만약 지진의 발생위치에 작은 차이가 있다면 관측소에서 기록한 파형에도 지진의 발생위치 차이에 비례하여 아주 작은 차이가 있을 것이다. 이러한 파형의 유사성 정도를 측정하여 지진발생위치 결정에 활용함으로써 결정된 지진발생위치의 정확성을 향상시킬 수 있다(Got et al., 1994; Waldhauser and Ellsworth, 2002; Schaff et al., 2002; Schaff et al., 2004).

진원에서 시간 τ 에 발생한 지진이 관측소 i 에 도착하는 시간 T 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds$$

여기에서 u 는 slowness field이고, ds 는 element of path length이다.

$r_k^i = (t_k^{obs} - t_k^{cal})^i$ 라고 할 때, Taylor Serise를 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i$$

여기에서 $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)$ 이다. cross-correlation method에서는 두 지진간의 주파시간차($(t_k^i - t_k^j)^{obs}$)를 측정하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

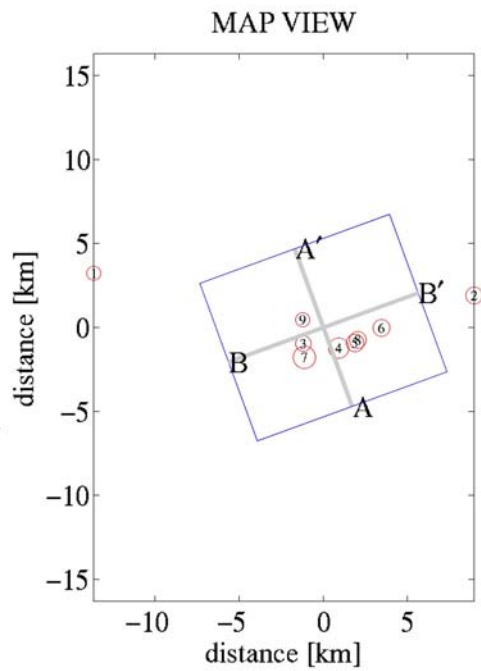
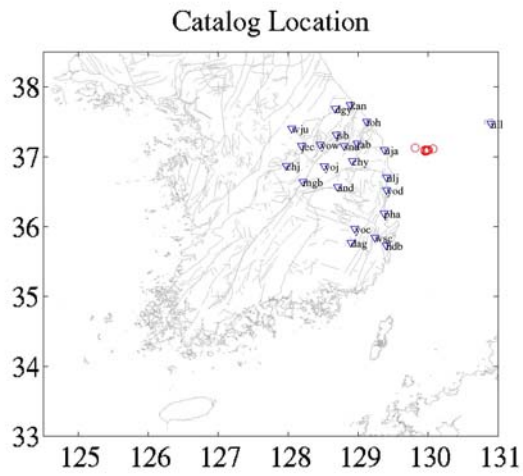
$$\frac{\partial t_k^{ij}}{\partial m} \Delta m^{ij} = dr_k^{ij}$$

여기에서 $\Delta m^{ij} = (\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}, \Delta z^{ij}, \Delta \tau^{ij})$ 이다. 그리고, 관측주파시간차와 이론적인 주파시간차의 잔차를 다음과 같이 나타내며, 이는 또한 double-difference의 정의이기도 하다.

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal}$$

3.5.2 Double-difference 적용 및 결과

우리나라에서 발생하는 균지진에 대하여 HypoDD 방법을 사용하여 지진의 위치를 정밀 재결정하였다. 지진위치 재결정의 대상으로 선정된 지진군은 영월지역, 2004년 동해지진지역, 2006년 동해지진지역, 경주지역 양산단층시스템 부근 등에 위치한다. 이중 2006년 동해지진군의 경우 기존에 발표된 지진 목록상의 자료로는 진원위치와 지하 구조와의 연관성 파악이 어려웠으나, 재결정된 진원위치와 지진원 메커니즘을 함께 분석한 결과 2006년 지진군은 동쪽으로 경사진 해저 단층면을 따라서 정단층 운동을 하며 발생한 것으로 판단된다.



001|187|37.1280|129.8135|07.3|2.1|2005/08/31 03:58:10.97
 002|220|37.1160|130.0680|01.0|2.4|2006/04/19 01:57:54.34
 003|221|37.0902|129.9537|00.9|2.3|2006/04/19 07:01:32.52
 004|223|37.0877|129.9775|04.2|2.9|2006/04/28 14:47:55.14
 005|224|37.0905|129.9883|02.4|2.5|2006/04/28 14:54:57.42
 006|225|37.0985|130.0060|10.0|2.4|2006/04/28 16:01:00.25
 007|226|37.0828|129.9545|10.0|3.2|2006/04/29 02:01:13.00
 008|227|37.0922|129.9902|12.0|2.4|2006/04/30 00:50:02.03
 009|250|37.1030|129.9533|06.2|2.1|2006/12/19 16:18:20.38

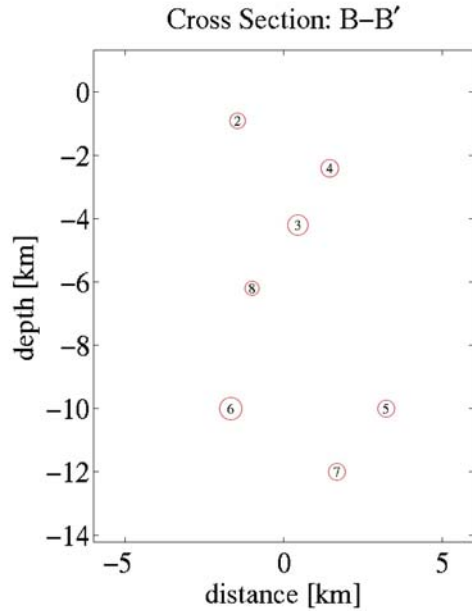
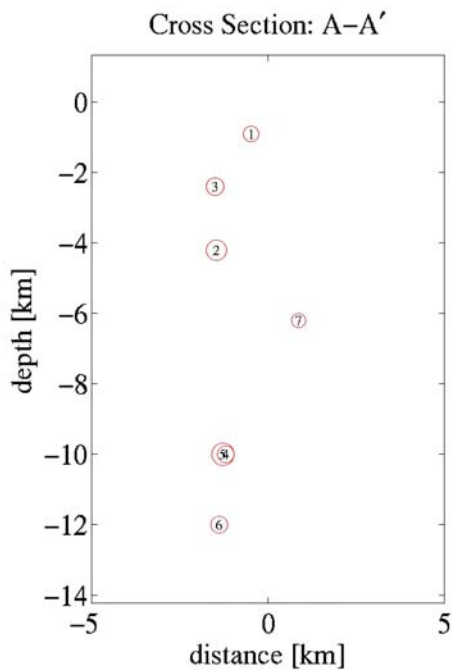
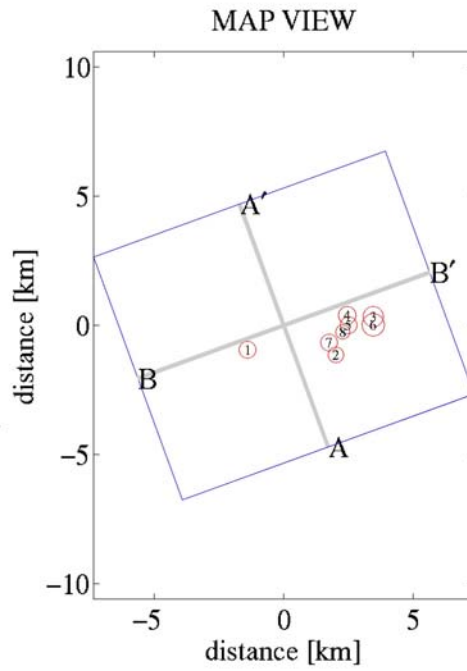
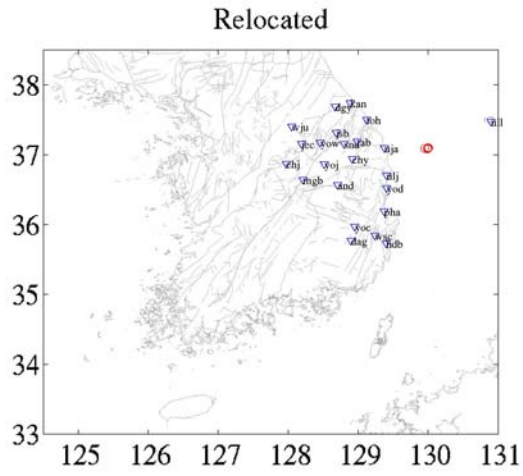


그림 3.5.1 본 연구의 SEL 지진위치. 2006년 4월 발생한 울진앞바다 지진의 진앙위치



001|220|37.0903|129.9514|04.7|2.4|2006/04/19 01:57:54.34
 002|221|37.0885|129.9898|04.6|2.3|2006/04/19 07:01:32.52
 003|223|37.1018|130.0061|04.2|2.9|2006/04/28 14:47:55.14
 004|224|37.1024|129.9947|05.6|2.5|2006/04/28 14:54:57.42
 005|225|37.0989|129.9953|06.3|2.4|2006/04/28 16:01:00.25
 006|226|37.0990|130.0061|06.9|3.2|2006/04/29 02:01:13.00
 007|227|37.0929|129.9868|05.5|2.4|2006/04/30 00:50:02.03
 008|250|37.0965|129.9928|05.3|2.1|2006/12/19 16:18:20.38

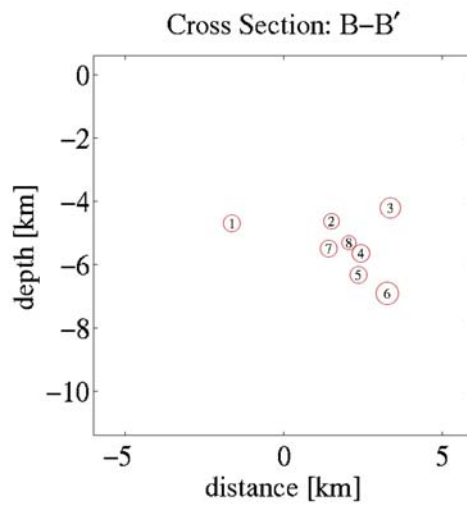
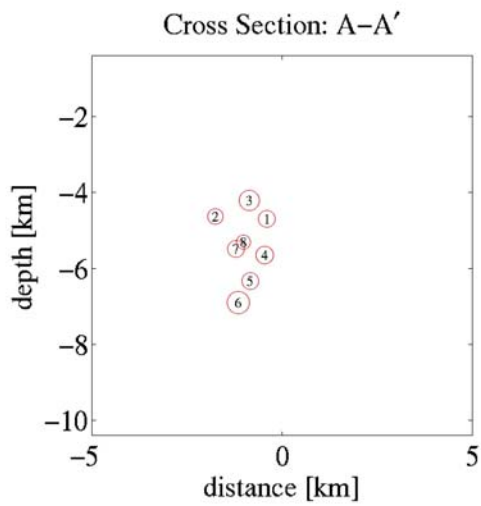


그림 3.5.2 2006년 울진 앞바다 지진의 재결정 결과

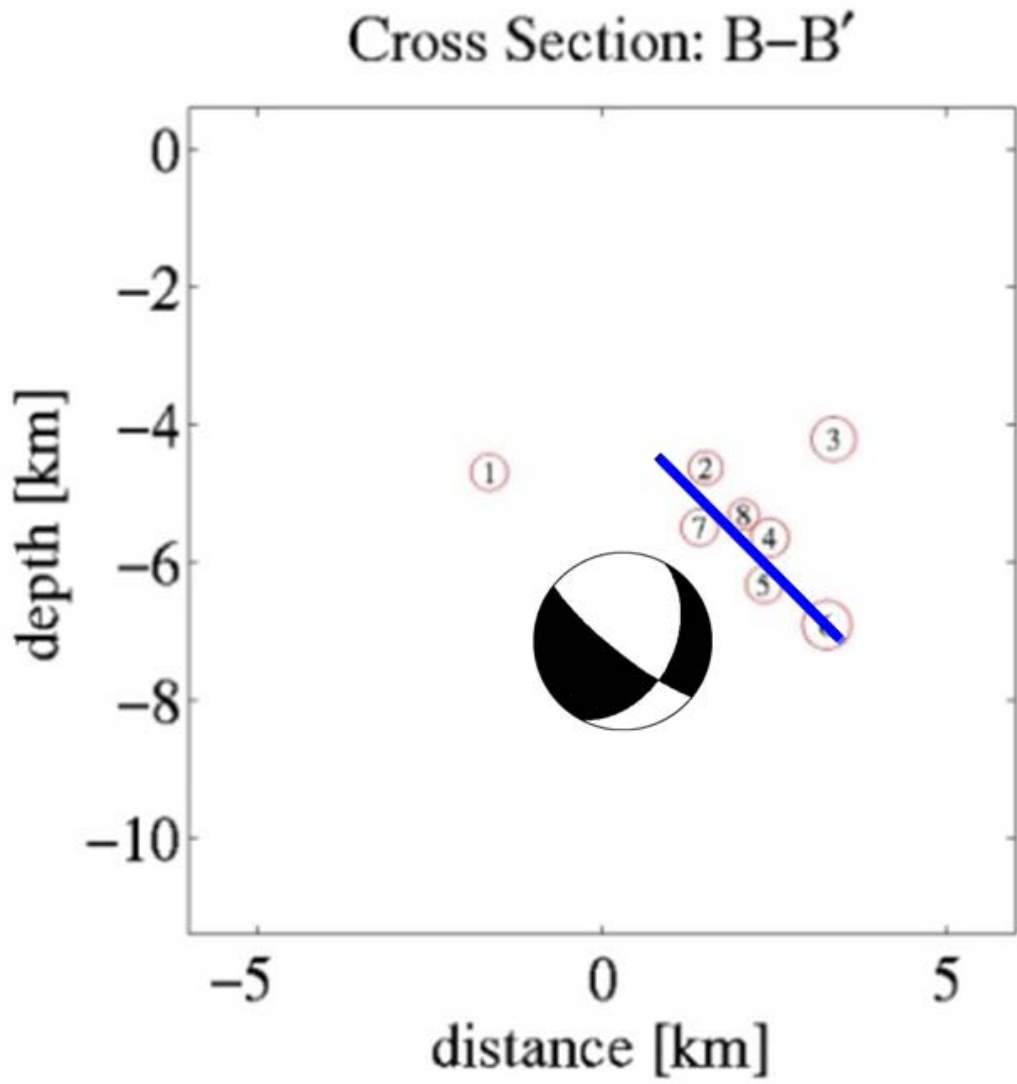


그림 3.5.3 재결정된 2006년 울진 앞바다 균지진의 진원위치와 진원메커니즘 그리고 이를 통한 해저 단층면 해석

3.5.3 파형의 유사성과 주파시간차 측정기술

진원이 비슷한 곳에서 발생한 두 개의 지진으로부터 발생한 지진파가 하나의 관측소에서 관측될 때 이 두 파형의 유사성과 두 파형의 주파시간 차이는 여러 가지 방법을 사용하여 측정될 수 있다. 그 중 가장 일반적인 방법은 시간영역에서 파형의 유사성 (CC, Cross-correlation) 정도를 측정하는 것이다. 간단한 설명을 위하여 두 개의 파형을 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$x(t) = S(t) + W_x(t)$$

$$y(t) = S(t - D) + W_y(t)$$

여기서 $x(t)$ 와 $y(t)$ 는 시간 D 만큼의 차이가 있는 유사한 두 신호이다. 여기서 $W_x(t)$ 와 $W_y(t)$ 는 규칙성이 없는 잡음이라고 가정하자. 파형의 유사성과 주파 시간 차 D 를 찾기 위한 가장 일반적인 방법은 $x(t)$ 를 시간 τ 만큼씩 이동시키면서 $y(t)$ 와의 상관계수, $R_{xy}(\tau)$,를 계산하여 $R_{xy}(\tau)$ 가 최대값을 가질때의 τ 가 주파 시간차이고 이때의 $R_{xy}(\tau)$ 가 파형의 유사성을 나타내는 것이다. 두 파형의 유사성(CC)은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{xy}(\tau) = AR_{SS}(\tau - D) + R_{W_x W_y}(\tau)$$

앞에서의 경우처럼 잡음에 어떤 연관성이 없을 경우, $\tau = D$ 일때 $R_{xy}(\tau)$ 는 최대값이 된다. 실제 파형에서는 파형의 길이가 제한되어 있고, 잡음이 존재하기 때문에 peak가 뚜렷하지 않을 수도 있다. 이런 경우 파형의 유사성을 측정하기 전에 신호의 성격을 알고 있다면, 필터를 거친 후 적용하기도 한다. 경우에 따라서는 window function을 사용하기도 하는데, 가장 많이 사용되는 것이 maximum-likelihood window 이다. 두 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 의 cross-spectrum을 $S_{xy}(f)$ 라고 할 때, $S_{xx}(f)$ 와 $S_{yy}(f)$ 는 $x(t)$ 와 $y(t)$ 의 autospectrum이다. Squared coherence function.은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$C_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}$$

이때 optimal-maximum-likelihood window는 $W(f) = \frac{1}{S_{xy}(f)} \frac{C_{xy}(f)}{(1 - C_{xy}(f))}$ 이고,

windowed cross-correlation($R_{xy}(m)$)은 $W(f)S_{xy}(f)$ 의 IFT이다.

잡음 $W_x(t)$ 와 $W_y(t)$ 에 일관성이 있을 경우에는 잡음의 유사성이 신호의 유사성 보다 중요하게 판단되어 실제 신호의 유사성이 최대치를 이루는 값을 찾지 못하는 경우가 있다. 본 연구에서는 Du et al. (2004)의 방법을 사용하여 시간차와 이때 파형의 유사성 정도를 사용하였다.

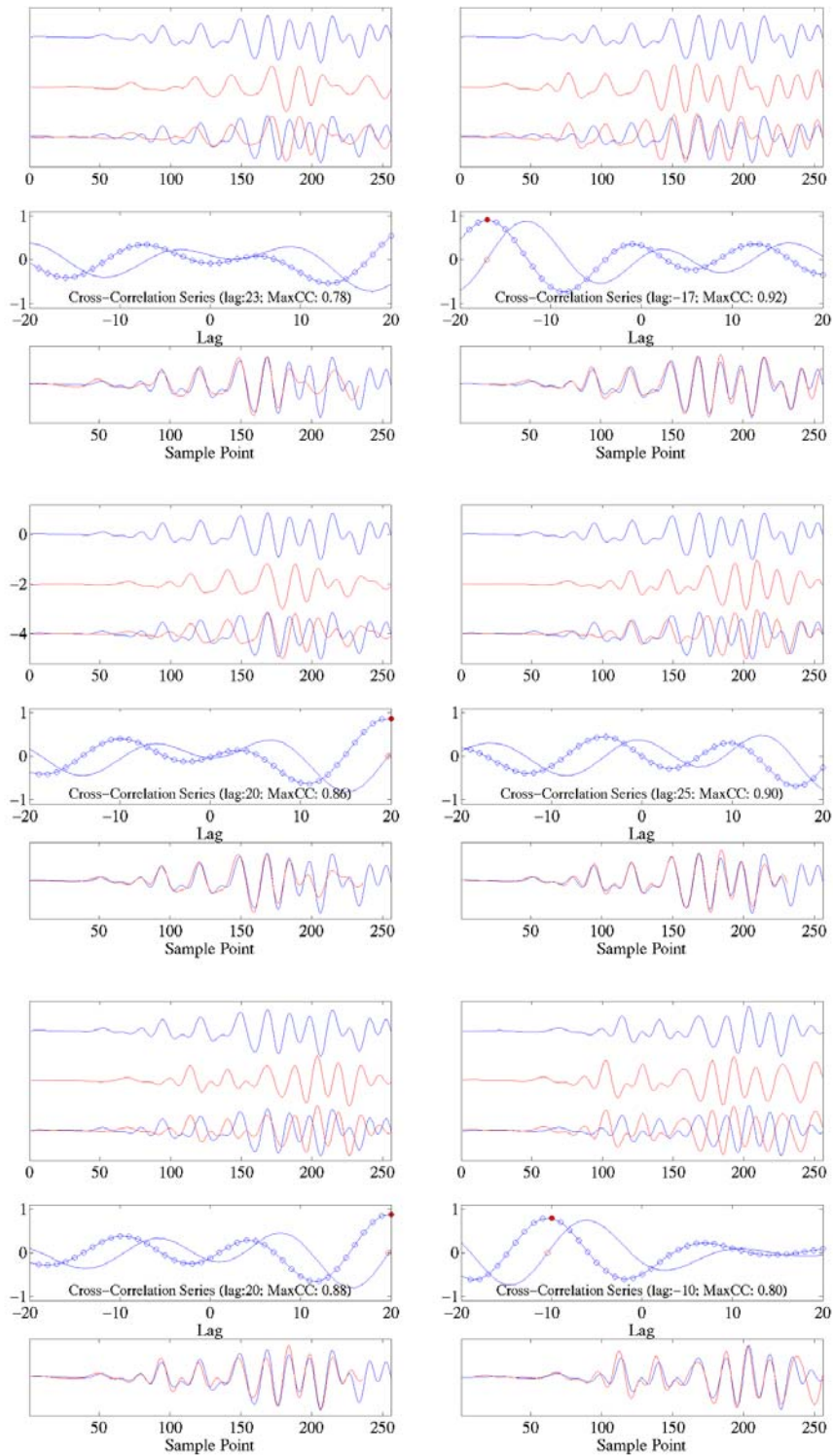


그림 3.5.4 파형의 유사성 및 시간차 측정

3.6 2개 관측소를 이용한 지진조기경보를 위한 진앙위치 신속 결정 방법

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 지진예보가 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 연구의 일환으로 지진조기경보 체계에서 활용 가능한 진앙위치 추정 방법을 고찰하여 한국방재학회지에 게재한 내용을 일부 수정하여 본 보고서에 수록한다(김광희 등, 2008).

3.6.1 서론

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 이천여년간의 역사문헌은 한반도에서도 많은 피해 지진이 발생하였음을 기록으로 전하고 있다. 역사지진 발생위치와 규모 결정에 있어서 지진학자 간에 견해 차이가 있기는 하지만, 한반도에서 규모 6.8 이상의 지진이 발생한바 있음을 여러 연구 결과에서 밝히고 있다(Chiu 등, 2004; Lee 등, 2006). 최근에는 2007년 1월 20일 규모 4.8 (기상청, 2007)의 지진이 오대산지역에서 발생하여 한반도에서 지진의 위험성에 관한 관심을 불러일으킨바 있다.

지진으로 인한 피해를 효과적으로 최소화하기 위해서는 장·단기적 대응책이 함께 마련되어야 한다. 장기적으로는, 각 시설물에 대한 내진설계 기준 보완, 지진 발생 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 과학기술로는 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 수분 이내에 지진발생사실, 지진의 발생위치, 규모, 해당지역에서의 진도 등 중요 정보를 관계기관과 이해 당사자에게 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 seismology라고 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 된다(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 실제속도구조와 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 2 ~ 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 추정된 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 2 - 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 지진의 규모를 신속히 결정 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.

3.6.2 본 론

3.6.2.1 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 중앙자료처리시설로 필요정보를 전송하고, 일정 수준 이상일 경우 필요한 정보를 중앙 자료처리 시설로부터 각 지역으로 전송하는데 필요한 시간을 의미한다. 여기에서 강진동 도착시간으로서 S파 도착시간을 사용하는 것은 경보시간 측정에 있어서 발생할 수 있는 상황을 신중히 고려한 것으로서, 일반적으로 최대 지진동을 유발하는 파는 S파 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_t (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 도착시간을 이용하여 지진의 위치를 추정함으로써, 가능한 긴 경보시간을 확보할 수 있다.

3.6.2.2 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 캘리포니아주의 ElarmS(Earthquake Alarm System)에서 사용하고 있는 지진위치 결정 방법과 매우 유사하다(Cua, 2005). 지진 조기 경보에서 지진 발생 지역과 가장 근접한 두 개의 관측소에 P파 초동이 도착하였고, 주변의 다른 관측소에는 아직 P파가 도착하지 않

았다는 정보를 이용하여 진원위치를 추정하는 방법이 그림 3.6.1에 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.

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

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 3.6.1의 gray line). 또한, 지진발생으로부터 일정 시간이 지난 후(T^{now})에 아직 세 번째 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 표시되어 있는 구간으로 한정할 수 있다. 만약 지진이 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.

3.6.2.3 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 3.6.1), 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 북한 내륙지역에서 발생하였다.

관측망 내부에서 발생한 지진 3개의 경우 모두 초동 관측 시간차를 이용하여 결정된 지진의 위치와 실제 지진이 발생한 위치 사이의 거리가 매우 작다(그림 3.6.2). 그림 3.6.2 (a)에서 별표는 진앙위치, 흰색 원은 지진관측소의 위치, 그리고 검정 원은 지진발생 후 처음으로 지진파형을 관측하는 두 개의 관측소 위치를 표시한다. 그림 3.6.2 (b)에서는 (a)의 사각형 지역을 확대하여 표시하였다. 속리산 지역에서 지진(표 3.6.1, 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 3.6.2, a와 b). 이 오차 범위는 본 연구에서 고려한 지진 관측망 내부에서 발생한 3개 지진의 결과 중 그 오차가 가장 큰 것이다. 홍성 지역에서 지진이 발생할 경우(표 3.6.1, 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 3.6.3, 그림 3.6.4), 대부분의 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.

3.6.3 결론 및 토론

본 연구에서 소개하는 방법을 이용하여 지진의 발생위치를 결정함에 있어서 가장 먼저 고려되어야 하는 것, 그리고 가장 먼저 던져야 할 질문은 계산된 지진발

생위치의 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 지진조기경보의 대상이 되는 지진은 대규모 피해를 유발할 수 있는 규모 6.5 이상의 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 km이다. 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 보았다. 이 오차 범위는 지진조기경보의 대상이 되는 지진의 단층 파쇄 길이와 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 하에서 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 인구밀도 분포도 위에 확보 가능한 지진대비시간을 표시하였다(그림 3.6.5). 속리산지역에서 지진이 발생할 경우(그림 3.6.5, a), 지진 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 - 50 초의 시간을 확보하여 사전에 준비된 조치를 취할 수 있을 것이라고 생각된다. 그림 3.6.5의 (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 - 30 초의 시간과 약 30 - 50

초의 시간을 확보할 수 있을 것으로 예상되므로, 심한 지진동이 시작되기 전 미리 프로그램 된 조치를 취함으로써 재해를 저감할 수 있을 것이라 생각된다.

가장 중요하면서도 흔히 간과되는 지진재해 저감 노력 중 하나가 지진발생 시 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.

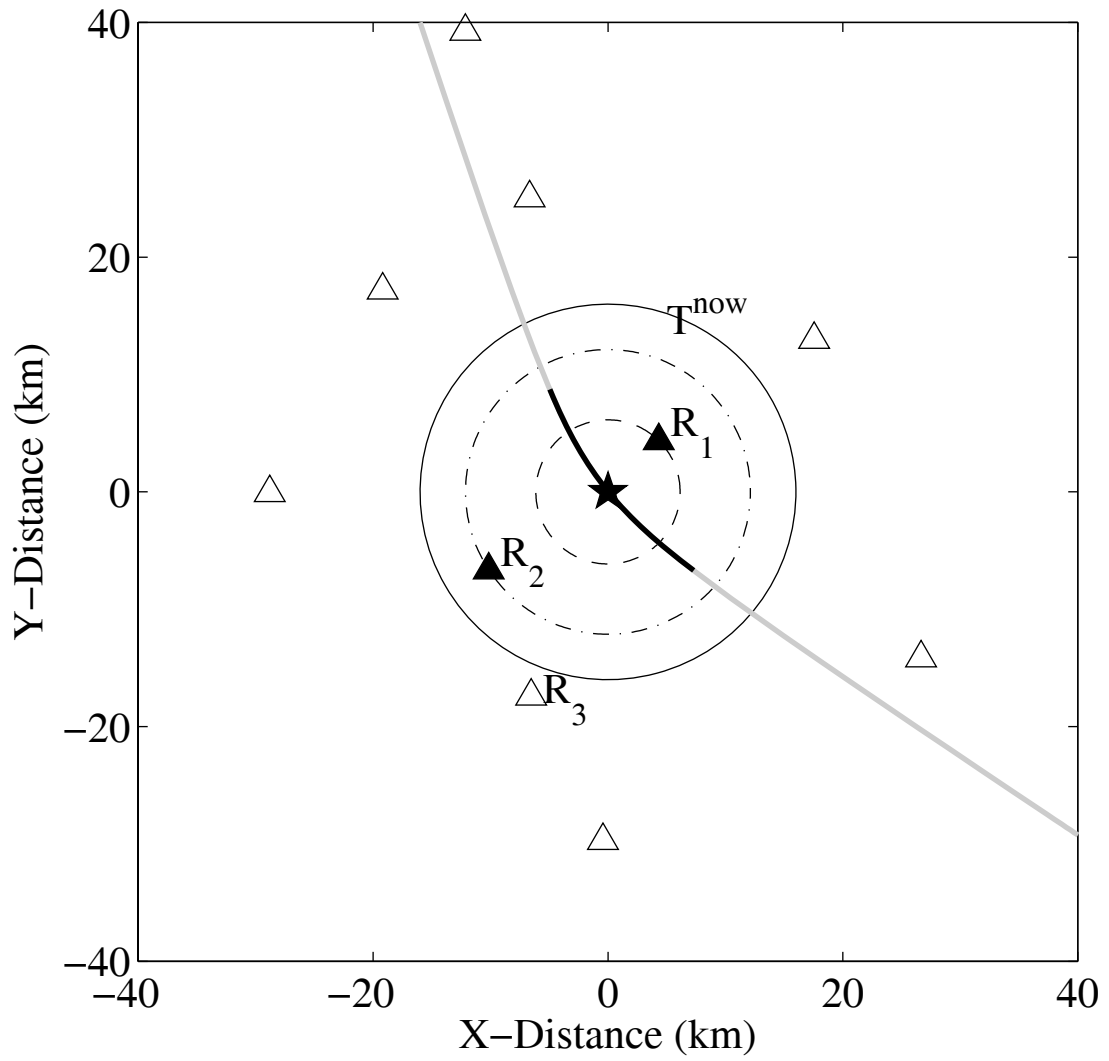


그림 3.6.1 지진조기경보를 위한 지진발생위치 신속추정 방법

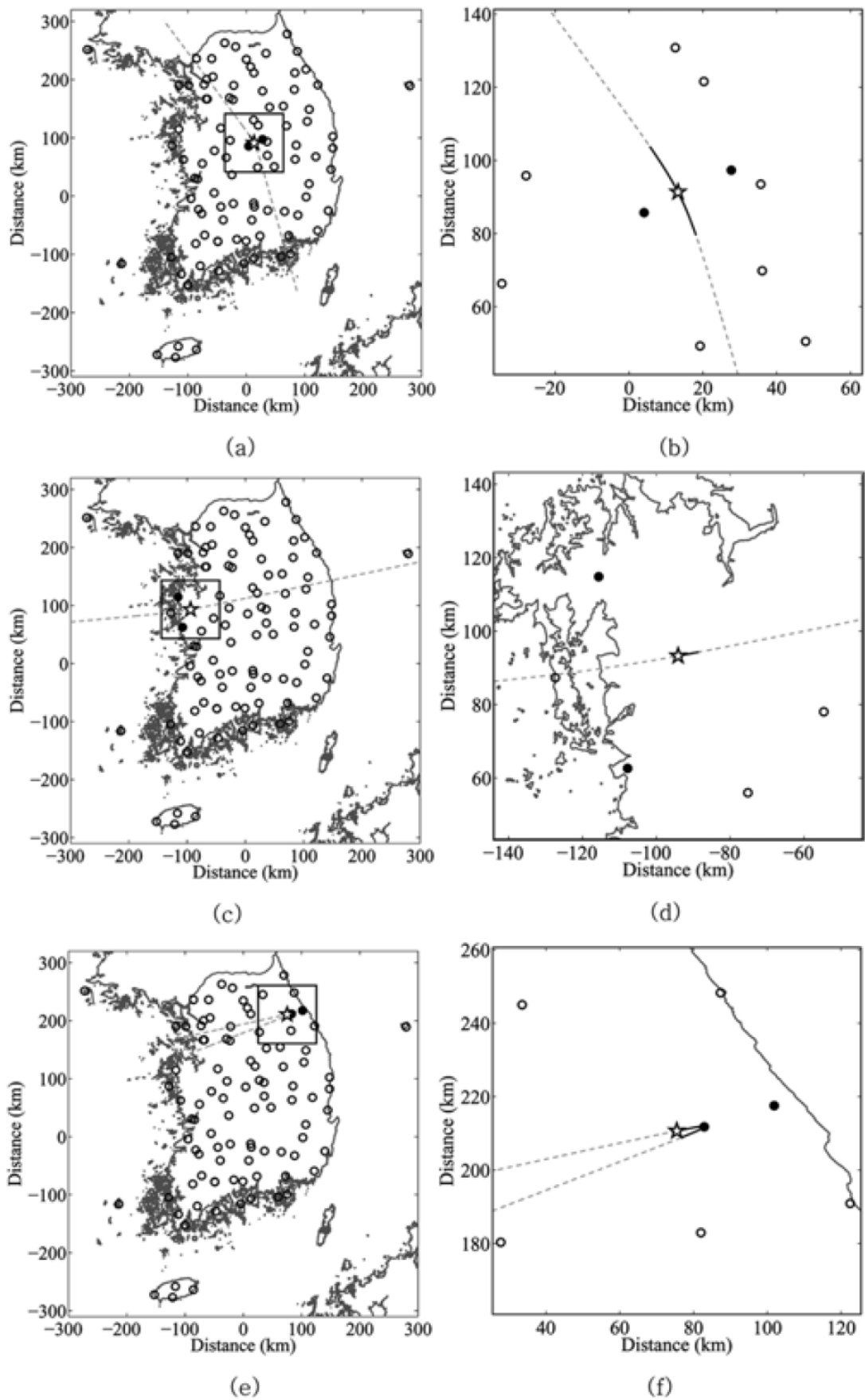


그림 3.6.2 지진관측망 내부에서 발생한 지진의 신속진앙결정

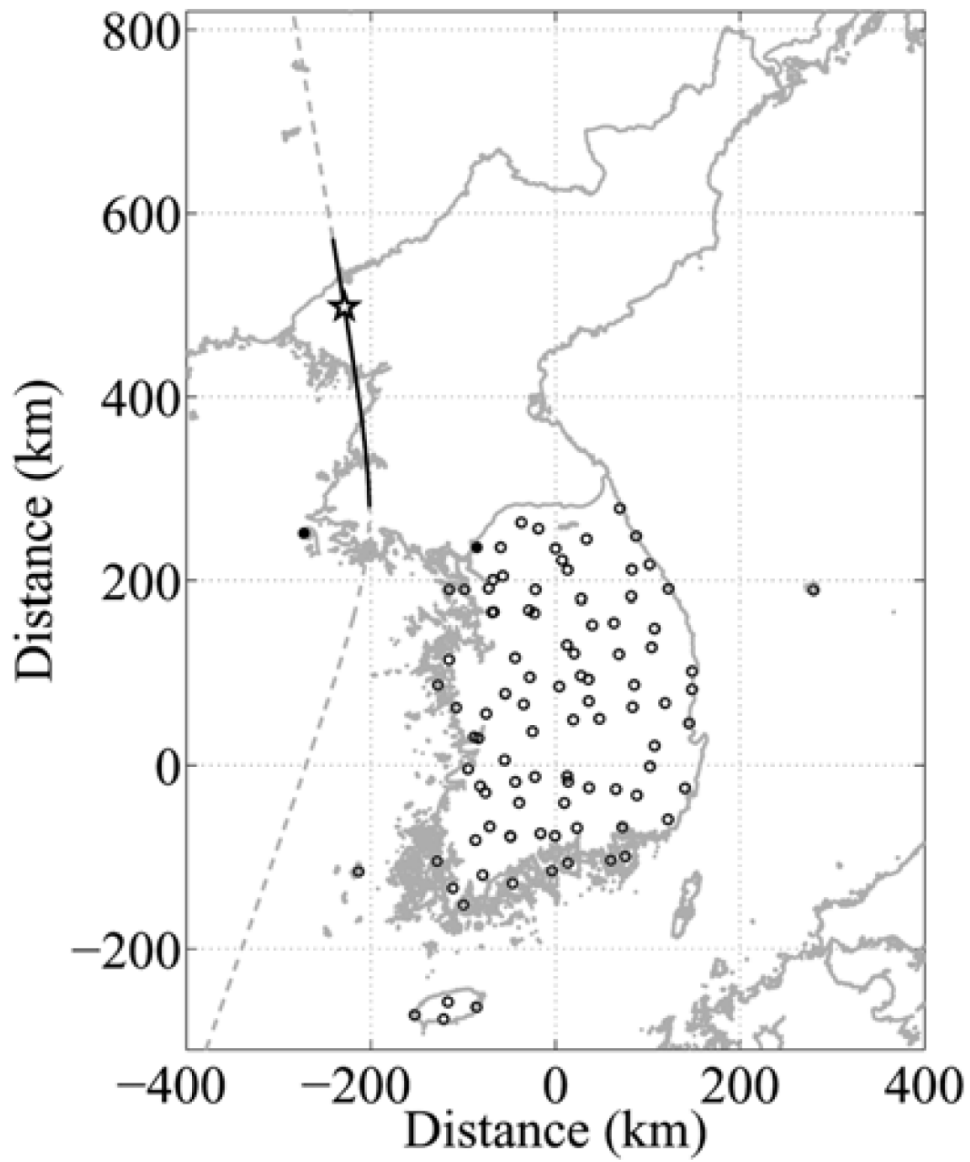


그림 3.6.3 지진관측망 외부에서 발생한 지진의 신속지진위치결정.

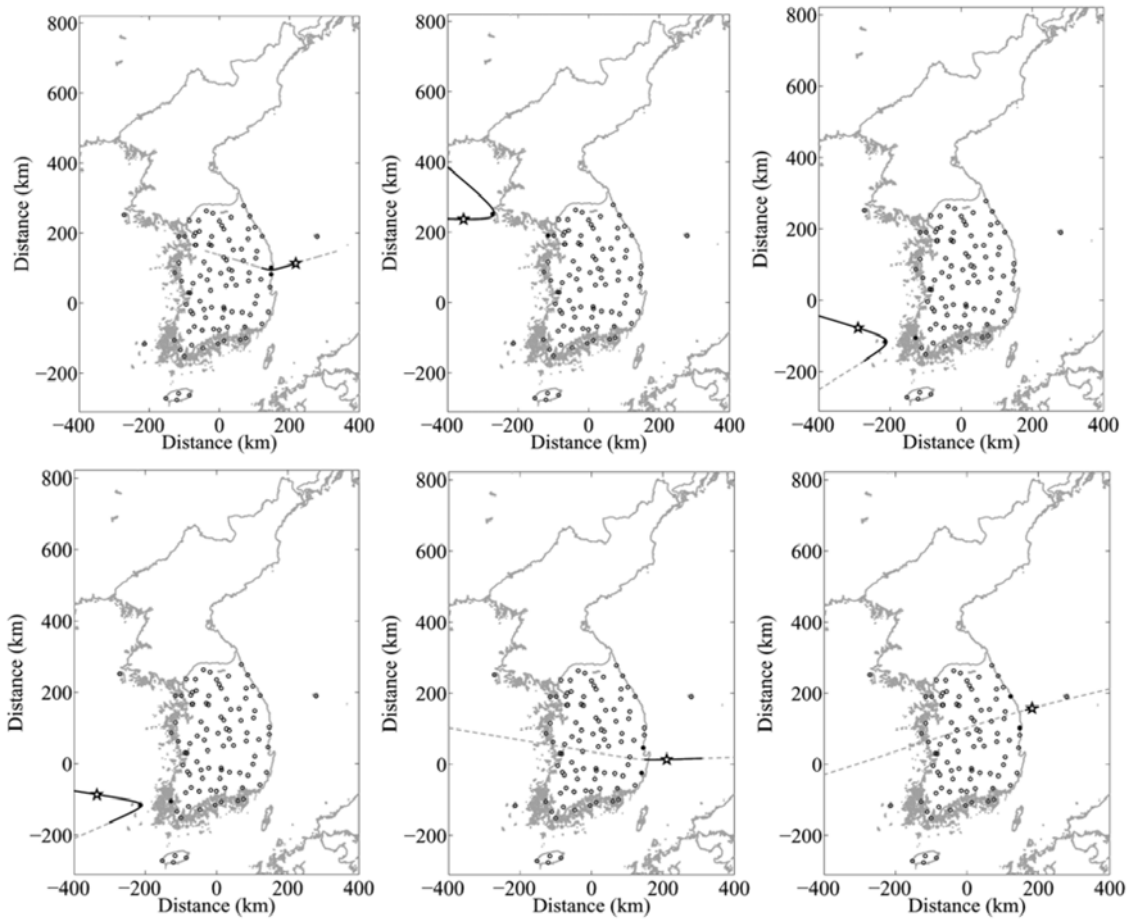


그림 3.6.4 지진관측망 외부 해저에서 발생한 지진의 신속지진위치결정.

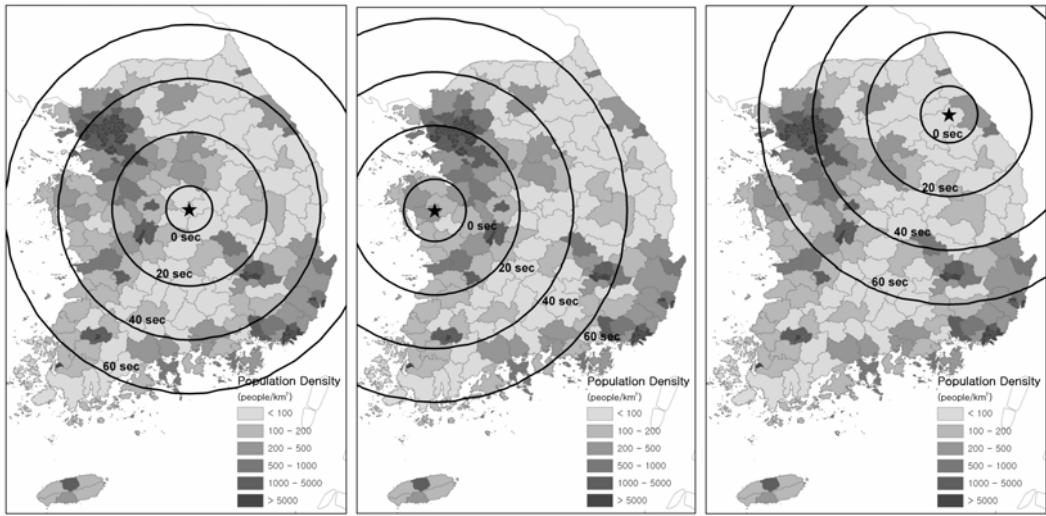


그림 3.6.5 대규모 지진 발생시 확보 가능한 지진대비시간.

표 3.6.1 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	37.7	128.6
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

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

번호	세부연구목표	달성내용	달성도 (%)
1	지진파형수집	- 2001-2007 지진파형자료 수집	100
2	지진파(P파, S파) 도착시간 측정	- 2003-2007 지진파 도착시간 직접 측정 - 1997-2000 기존 도착시간측정자료 일부사용	100
3	도착시간 측정을 위한 알고리즘 개발	- 무작위 잡음, 일관성 있는 잡음이 포함된 신호의 도착시간 측정 알고리즘 개발 - 주파시간 차이 및 파형의 유사성 측정 알고리즘 개발	100
4	관측소보정을 고려한 지진위치 재결정	- JHD 방법을 사용한 6개 군지진의 지진발생위치 재결정 - 관측소 보정치와 천부 지하구조 연관 가능성 검토	100
5	파형의 유사성을 이용한 지진위치 재결정	- HypoDD방법을 사용한 지진위치 재결정 - 진원위치를 활용한 실 단층면 구분	100

- 지진재해저감계획의 기초자료로 활용
- 한반도 주요 지구조선과의 연관성 규명에 활용
- 한반도 주요 단층과의 관계 규명에 활용
- 지역적 지진재해 연구에 활용
- 지진공백역 존재 확인 및 지진 다발지역 확인에 활용
- 지진조기경보를 위한 신속진앙위치 결정에 활용
- 지진재해도 작성에 기초 자료로 활용
- 관측소 외부에서 발생하는 지진 발생위치 결정의 정확성 향상

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

한반도 및 그 주변에서 발생하는 지진의 발생위치 결정의 정확성을 향상시키기 위한 노력을 수행하였다. 또한 지진조기경보를 위한 진앙위치 신속결정 방법을 고찰함으로써 향후 현업적용가능성에 관한 연구를 일부 수행하였다. 2006년 울진앞바다 지진 발생위치의 재결정 결과와 지진메커니즘 결과를 함께 분석한 결과, 지원 메커니즘에서 제시한 두개의 단층해 중 단층면이라고 생각되는 단층해를 찾을 수 있었다. 본 연구에서 수행한 보다 정확한 지진발생위치 결정 혹은 보다 신속한 진앙위치 추정 방법 연구 결과는 다음과 같은 분야에 활용이 가능하다.

- 지진재해저감계획의 기초자료로 활용
- 한반도 주요 지구조선과의 연관성 규명에 활용
- 한반도 주요 단층과의 관계 규명에 활용
- 지역적 지진재해 연구에 활용
- 지진공백역 존재 확인 및 지진 다발지역 확인에 활용
- 지진조기경보를 위한 신속진앙위치 결정에 활용
- 지진재해도 작성에 기초 자료로 활용

제 6 장 참고문헌

- 강수영, 김광희, 석봉출, 유해수, 경주지역 발생 지진에 대한 지진손실예측 시뮬레이션, 한국방재학회논문집, 8, 95 103, 2008.
- 기상청, 2001 지진연보. 서울, 기상청, 59, 2002.
- 기상청, 2002 지진연보. 서울, 기상청, 117, 2003.
- 기상청, 2003 지진연보. 서울, 기상청, 121, 2004.
- 기상청, 2004 지진연보. 서울, 기상청, 110, 2005.
- 기상청, 2005 지진연보. 서울, 기상청, 140, 2006.
- 기상청, 2006 지진연보. 서울, 기상청, 163, 2007.
- 기상청, 2007년 1월 20일 강원지역 지진관련 정보, 기상청 보도자료, 2007.
- 기상청, 2007 지진연보. 서울, 기상청, 148, 2008.
- 기상청, 규모별 지진현황, 2008.
- 김광희, P. A. Rydelek, 석봉출, 지진조기경보를 위한 신속 진앙위치 결정, 한국방재학회논문집, 8, 73 79, 2008.
- 김성균, 전명순, 전정수, 국내 지진활동 및 지각구조 연구동향, 자원환경지질, 39, 369 384, 2006.
- 김옥, 우리나라 지진자료의 규모와 진앙에 대한 정도 평가, 지구과학교육과. 청원, 한국교원대학교, 석사, 86, 2007.
- 류용규, 국내지진관측망의 효율적인 운영방안 및 실시간 지진자료 분석에 관한 연구, 지구환경과학과. 광주, 전남대학교, 박사학위논문, 166, 2006.
- 이정보, 문우일, 박창엽, 정희욱, 김기영, Crustal Velocity Structure of the Korean Peninsula, 2008, 2008.
- 함인경, A New Algorithm (GA MHYPO) to Determine the Hypocentral Parameters: Application to the Earthquakes Occurred in the Gyeongsang Basin, Korea, 지질학과. 진주, 경상대학교, 박사학위논문, 112, 2006.
- 황의홍, P파를 이용한 신속한 지진 규모 결정, 전북대학교, 박사학위논문, 172, 2007.
- 황의홍, 이우동, 조봉곤, 단일 관측소에 기록된 P파형을 이용한 진앙거리 신속 결정에 관한 연구, 지질학회지, 43, 99 106, 2007.
- Allen, R., Automatic Phase Pickers: Their Present Use and Future Prospects, Bulletin Seismological Society of America, 72, S225 S242, 1982.

- Allen, R. M., and H. Kanamori, The Potential for Earthquake Early Warning in Southern California, *Science*, 300, 786–789, 2003.
- Chen, H., J. M. Chiu, J. Pujol, K. H. Kim, K. C. Chen, B. S. Huang, Y. H. Yeh, and S. C. Chiu, A Simple Algorithm for Local Earthquake Location using 3D Vp and Vs Models: Test Examples in the Central United States and in Eastern Taiwan, *Bulletin: Seismological Society of America*, 96, 288–305, 2006.
- Chiu, J. M., and S. G. Kim, Estimation of Regional Seismic Hazard in the Korean Peninsula Using Historical Earthquake Data between A.D. 2 and 1995, *Bulletin: Seismological Society of America*, 94, 269–284, 2004.
- Cua, G., Creating the Virtual Seismologist: Developments in Ground Motion Characterization and Seismic Early Warning, Division of Geological and Planetary Sciences. Pasadena, CA, USA, California Institute of Technology, Ph.D. thesis, 371, 2005.
- Douglas, A., Joint epicentre determination, *Nature*, 215, 47–48, 1967.
- Esteve, L., The Mexico Earthquake of September 19, 1985 Consequences, Lessons and Impact on Research and Practice, *Earthquake Spectra*, 4, 413–426, 1988.
- Geller, R. J., Earthquake prediction: a critical review, *Geophysical Journal International*, 131, 425–450, 1997.
- Got, J. L., J. Frechet, and F. W. Klein, Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea, *Journal of Geophysical Research*, 99, 15375–15386, 1994.
- Heaton, T. H., A Model for a Seismic Computerized Alert Network, *Science*, 228, 987–990, DOI: 10.1126/science.228.4702.987, 1985.
- Horiuchi, S., H. Negishi, K. Abe, A. Kaminura, and Y. Fujinawa, An Automatic Processing System for Broadcasting Earthquake Alarms, *Bulletin: Seismological Society of America*, 95, 708–718, 2005.
- Johnston, A. C., and E. S. Schweig, The Enigma of the New Madrid Earthquakes of 1811–1812, *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 24, 339–384, 1996.
- Kanamori, H., Real Time Seismology and Earthquake Damage Mitigation,

- Annual Review of Earth and Planetary Science, 33, 195–214, 2005.
- Kim, K. H., C. H. Chang, K. F. Ma, J. M. Chiu, and K. C. Chen, Modern Seismic Observations in the Tatun Volcano Region of Northern Taiwan: Seismic/Volcanic Hazard Adjacent to the Taipei Metropolitan Area, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16, 579–594, 2005.
- Kim, K. H., and K. C. Chen, High resolution Vp and Vs Models for the Mw 7.6 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake Source Region: Implication to the Seismogenic Structures in the Western Taiwan, Manuscript in Preparation, 2006.
- Kim, K. H., J. M. Chiu, J. Pujol, and K. C. Chen, 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*, 57, 809–823, 2005.
- Kim, K. H., S. Y. Kang, D. J. Min, B. C. Suk, and Y. G. Ryoo, Large Ground Motion Related to Crustal Structure in Korea, *Journal of Korean Earth Science Society*, 29, 559–566, 2008.
- Kim, K. H., S. Y. Kang, D. J. Min, H. S. Yoo, B. C. Suk, and Y. G. Ryoo, American Geophysical Meeting, San Francisco, CA, USA, Enhanced Ground Motions and Seismic Hazards due to Crustal Structures in Korea, 2007.
- Kim, W., I.-K. Hahm, S. J. Ahn, and D. H. Lim, Determining hypocentral parameters for local earthquakes in 1-D using a genetic algorithm., *Geophysical Journal International*, 166, 590–600, 2006.
- Kyung, J. B., S. Y. Huh, J. Y. Do, and D. Cho, Relation of Intensity, Fault Plane Solutions and Fault of the January 20, 2007 Odaesan Earthquake (ML=4.8), *Journal of Korean Earth Science Society*, 28, 202–213, 2007.
- Lahr, J. C., Description of the weighted regression and quality estimation used in the earthquake location program HYPOELLIPSE, U. S. Geological Survey, 1984.
- Lee, K., and W. S. Yang, Historical Seismicity of Korea, *Bulletin: Seismological Society of America*, 96, 846–855, doi:10.1785/0120050050, 2006.
- Lee, W. H. K., and J. M. Espinosa Aranda, Earthquake Early Warning Systems: Current Status and Perspectives, in *Early Warning Systems for*

- Natural Disaster Reduction, edited by J. Zschau and A. N. Koppers, 409–423, Springer, 2003.
- Lee, W. H. K., and S. W. Stewart, Principles and Applications of Microearthquake Networks, Academic Press, 1981.
- Pavlis, G. L., and J. R. Booker, Progressive multiple event location (PMEL), Bulletin of the Seismological Society of America, 73, 1753–1777, 1983.
- Pujol, J., Comments on the Joint Determination of Hypocenters and Station Corrections, Bulletin of the Seismological Society of America, 78, 1179–1189, 1988.
- Pujol, J., Earthquake Location Tutorial: Graphical Approach and Approximate Epicentral Location Techniques, Seismological Research Letter, 75, 63–74, 2004.
- Rydelek, P., and J. Pujol, Real Time Seismic Warning with a Two Station Subarray, Bulletin: Seismological Society of America, 94, 1546–1550, 2004.
- Schaff, D. P., G. H. R. Bokelmann, W. L. Ellsworth, E. Zanker, F. Waldhauser, and G. C. Beroza, Optimizing Correlation Techniques for Improved Earthquake Location, Bulletin Seismological Society of America, 94, 705–721, 2004.
- Schaff, D. P., G. z. H. R. Bokelmann, G. C. Beroza, F. Waldhauser, and W. L. Ellsworth, High resolution image of Calaveras Fault seismicity, Journal of Geophysical Research, 107, 2186, doi:10.1029/2001JB000633, 2002.
- Waldhauser, F., and W. L. Ellsworth, Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double difference earthquake locations, Journal of Geophysical Research, 107, 2054, doi:10.1029/2000JB000084, 2002.
- Wells, D. L., and K. J. Coppersmith, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 974–1002, 1994.
- Withers, M., R. Aster, Y. Christoper, J. Beiriger, M. Harris, S. Moore, and J. Trujillo, A comparison of Select Trigger Algorithms for Automated Global Seismic Phase and Event Detection, Bulletin Seismological Society of America, 88, 95–106, 1998.

- Wu, Y. M., and H. Kanamori, Experiment on an On site Early Warning Method for th Taiwan Early Warning System, Bulletin: Seismological Society of America, 95, 347 353, 2005.
- Wu, Y. M., and T. L. Teng, A Vritual Subnetwork Approach to Earthquake Early Warning, Bulletin: Seismological Society of America, 92, 2008 2018, 2002.
- Zhang, H., C. H. Thurber, and C. Rowe, Automatic P Wave Arrival Detection and Picking with Multiscale Wavelet Analysis for Single Component Recordings, Bulletin Seismological Society of America, 93, 1904 1912, 2003.