

**지진기술개발사업**

Research Program for Earthquake

**기상청 지진관측망에 관측된 지진원 위치 결정의 오차 평가  
및 GT 수준 지진 카탈로그 작성 II**

Quantitative Evaluation of KNSN Earthquake Location  
Quality and Ground Truth Earthquake Catalog

한국해양과학기술원

기 상 청

## 제 출 문

기상청장 귀하

이 보고서를 “지진기술개발사업” 과제 (세부과제 “기상청 지진관측망에 관측된 지진원 위치 결정의 오차 평가 및 GT 수준 지진 카탈로그 작성에 관한 연구 II”) 의 보고서로 제출합니다.

2014 년 3 월 30 일

주관연구기관명: 한국해양과학기술원

주관연구책임자: 김 광 희

연구 원 : 김 한 준

" : 정 갑 식

" : 강 수 영

자 문 위 원 : 박 용 철

## 보고서 요약서

과제고유번호	CATER 2012-8140	해당 단계 연구 기간	2012.3.15 ~ 2014.2.28	단 계 구 분	1/1
연구 사업 명	사업 명	기상씨앗기술개발사업			
	세부사업명	지진 발생 환경 해석 연구			
연구 과제 명	대 과제 명				
	세부과제명	기상청 지진관측망에 관측된 지진원 위치 결정의 오차 평가 및 GT 수준 지진 카탈로그 작성 II			
연구 책임자	김 광 희	해당단계 참여 연구원수	총: 10 명 내부: 8 명 외부: 2 명	해당단계 연구비	정부: 210,000 천원 기업: 천원 계: 210,000 천원
		총연구기간 참여 연구원수	총: 10 명 내부: 8 명 외부: 2 명	총연구비	정부: 210,000 천원 기업: 천원 계: 210,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 관할해역지질연구단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁 연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내로 작성합니다)				보고서 면수: 181	
<p><b>1. GT0 지진카탈로그 작성</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 활용 가능한 기존 GT0 자료 수집</li> <li>- 임시지진관측소 운영(11개 지역)을 통한 GT0 지진자료 수집</li> <li>- 기존 및 신규 획득 GT 자료 활용 가능성 분석</li> </ul> <p><b>2. 국가지진관측망 지진발생위치 결정 정확성 분석의 정량적 평가요소 및 운용기준 제시</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 GT 자료와 임시지진관측소 운영을 통해 수집한 자료를 이용한 GT2 수준 지진발생위치 정확성 평가기준 제시</li> </ul> <p><b>3. GT2 및 GT5 수준 이벤트 관측자료 선별 및 목록화</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 국가지진관측망 지진발생위치 결정의 정량적 운용 기준을 2004-2012 기상청에서 관측하고 발표한 지진목록 적용</li> <li>- KGT2 및 KGT5 기준 만족하는 지진목록 작성</li> </ul> <p><b>4. 오차 분포도 작성 및 오차 높은 지역 선별</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- KGT 운용기준을 적용시 한반도 내륙 및 주변해역에서 발생하는 지진의 발생위치 결정시 오차가 클 것으로 예상되는 지역 선별 및 제시</li> </ul>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	오차평가, 진원위치, 지진관측망, 지진카탈로그, GT (Grond Truth)			
	영 어	Error estimation, Earthquake location, Seismic network, Earthquake catalog, GT			

## 요 약 문

### I. 제 목

기상청 지진관측망에 관측된 지진원 위치 결정의 오차 평가 및 GT 수준 지진 카탈로그 작성 II

### II. 연구개발의 목적 및 필요성

기상청에서는 1996년 영월지진, 1997년 경주지진을 계기로 디지털 지진관측망을 확충하면서 2013년 1월 1일 현재 1 개소의 초광대역 관측소, 32 개소의 광대역 관측소, 32 개소의 단주기 관측소, 125 개소의 가속도 관측소를 확충하여 2011년 1월 기준으로 총 127 개소로 이루어진 국가지진관측망(Korea National Seismic Network, KNSN)을 운영하고 있다.

정확한 진원 위치와 이에 대한 불확실성 연구는 지진발생과 핵실험 여부, 그리고 다양한 발파에 의한 지진과 진원 연구에 있어서 기초자료를 제공하기 때문에 매우 중요하다. 지진은 지하 깊은 곳에서 발생하므로 진원요소의 참 값을 알지 못하는 경우가 일반적이다. 진원요소를 결정하기 위해서는 지표면에서 관측되는 자료만을 이용하여 진원 인자를 결정하며, 이 과정에 일부 불확실한 정보가 사용될 수 있으므로, 그 결과 또한 어느 정도의 오차를 포함할 수밖에 없다. 이러한 불확실 요인으로 인하여 기상청뿐만 아니라 전 세계 대부분의 지진관측망에서 발표하는 진원요소 정보의 정확성을 평가하기란 매우 어려운 일이다. 지진관련분야 종사자들이 진원 인자 결정의 정확성을 향상시키고, 그 신뢰성의 정량화를 위하여 지속적으로 노력해 왔으나, 그 모든 노력은 상당히 주관적일 수밖에 없었다. 본 연구에서는 정확히 알고 있는 인공 지진 정보를 사용하여 기상청 국가지진관측망의 관측역량과 발표하는 진원요소 정보의 정확성을 객관적으로 평가한다. 또한 지진 정보 대국민 서비스의 초기 단계에서 활용할 수 있는 진원요소 정확성의 정량적 지표와 그 운용기준을 제시하고자 한다.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

GT(Ground Truth) 개념의 진원위치 정확성 평가 방법을 사용하여 기상청 국가지진관측망의 관측역량과 신뢰성을 평가한다. 향후 기상청 지진정보 대국민 서비스에 활용할 수 있도록 제공하는 지진정보의 정확성 평가를 위한 정량적 지표와 그 운용기준을 제시한다. 1차 연구에서는 기존의 GT0 및 GT1 자료의 확보 및 활용가능성을 검토하였으며, 2차 연구에서는 GT0 자료의 추가확보, 확보된 GT0 자료를 이용한 GT2 수준 진원요소 결정 정확성 판단의 정량적 지표와 그 운용기준을 수립하였으며, 2차 연구보고서는 1차 연구보고서에 2차 연구 내용을 추가하여 작성하였다.

본 연구에서는 기존에 존재하는 GT0를 충분히 활용하기 위하여 노력하였고, 전국에 분포하는 발파자료를 수집하여 활용하였다. 특히 기상청 국가지진관측망에 기록된 2002년, 2004년, 그리고 2008년에 수행된 한반도 지각구조 연구(Korea Crust Research Team, KCRT)의 발파가 기상청 국가지진관측망에 기록된 자료를 사용하였다. 또한, 전국에 걸쳐 고르게 분포하는 GT0 및 GT1 자료 확보를 위하여 노력하였으며, 2011년 수행된 선행연구를 포함한 관련 연구 결과를 충분히 활용하기 위하여 노력하였다.

#### IV. 연구개발결과

수집된 기존 GT 자료와 임시지진관측소 운영을 통해 획득한 새로운 GT 자료를 분석하였다. 지진발생위치 결정을 위하여 전지구 1차원 속도 모델 2 개와 선행연구에서 제시된 한반도 1차원 속도모델 5 개를 사용한 후 그 결과를 비교·분석하여 가장 적절하다고 생각되는 1차원 속도모델을 선정하였다.

기존 GT 자료 수집, 임시지진관측소 운영을 통한 새로운 GT 자료 수집을 통하여 2차년도 연구의 기초자료를 확보하였다. 2004년부터 2006년까지 기상청에서 발표한 지진에 대하여 선행연구에서 제시한 KGT5기준을 적용하여 기준을 만족하는 지진을 목록화하였다. 기상청 국가지진관측망 관측자료를 사용하여 결정된 지진발생위치의 정확성을 고찰하기 위하여 Peter and Crosson(1972)이 제안한 방법을 사용하여 기상청 지진발생위치 결정의 오차를 추정하였다.

KCRT-2008의 8개 발파지점에서 관측된 300 개 이상의 P파 초동을 사용하여 기상청 지진관측망에 맞는 KGT5 연구를 수행하였다. 그 결과, 초동 P파가 관측된 관측소의 수가 8개 이상, 진앙거리 30 km이하인 곳에서 최소한 1 개 이상의 지진관측소가 존재하는 경우, primary azimuthal gap에 대한 축적된 확률론적 밀도함수(accumulated density function)를 계산하여 신뢰도가 95% 이상인 경우와 같은 조건에서 secondary azimuthal gap의 값에 대한 관계를 도출하였다. 그 결과를 정리하여 지진 혹은 다른 지진원에 의하여 지진파가 관측되었고, 관측된 자료가의 조건을 모두 만족하는 경우에 대하여 결정된 진앙의 위치는 오차범위 5 km 이하로 95%의 신뢰도를 가지는 결정값이라 할 수 있는 기상청 국가지진관측망에 대한 GT5 기준을 정립하였다.

Grid search방법 중에서 Oct-tree 방법을 이용하여 기상청에서 발표한 지진원의 위치와 진원시를 재결정하였다. 기상연구소에 발표한 재결정 결과와 비교해 보면, 관측망 내에서 발생한 지진에 대해서는 수평적인 변화와 깊이의 변화가 5km 매우 적은 것을 알 수 있다. 이들 지진원에 대한 정보는 표A1에 초록색으로 표시되어 있다. 하지만 해안에서 혹은 북한에서 발생한 지진들은 지진관측망 밖에서 발생한 것으로 지진원 위치의 오차가 매우 높음을 알 수 있다. 이들 지진들은 광범위하게 퍼져있는 확률론적 밀도 함수를 보이며, 오차 타원체도 굉장히 큰 값을 보이고 있다.

GT2 수준의 정확성 평가기준 수립을 위하여 본 연구에서 수집한 자료와 기존 자료, KCRT2008 발파가 기록된 국가지진관측망 관측자료를 사용하였다. GT5의 기준 수립을 위해서는

사용가능한 모든 도착시간을 사용하였다. GT2 수준의 정확성 평가기준 수립을 위해서 도착시간 측정 작업을 다시 수행하였으며, weight 0 혹은 1의 도착시간이 비교적 정확한 자료만을 사용하였다. GT2 수준의 정확성 평가기준 수립을 위하여 지진관측 위치 분포의 방향성을 고려한 Network Metric 개념을 도입하였다. 조건별 오차분포 현황을 관찰하여 primary azimuthal gap이  $221^\circ$ 이하, secondary azimuthal gap이  $270^\circ$ 이하, 초동을 관측한 관측소의 수가 5개 이상, network metric 0.60 이하를 각 조건별 GT2 기준으로 설정하였다.

## V. 연구개발결과의 활용계획

현재 기상청 국가지진관측망으로 한반도 내륙 지역에서 지진이 발생할 경우 대부분 지역에서 GT2 정확성을 가진 진원위치 결정이 가능함을 알 수 있다. 그러나 우리나라 주변해역에서는 비교적 큰 규모의 지진이 꾸준히 발생하고 있지만, 현재의 지진관측망 구성으로는 GT2 수준의 지진발생위치 정확성 확보가 어려움 또한 확인 할 수 있다. 우리나라 주변해역에서 발생하는 지진에 대한 감시능력 제고를 위하여 관측망 가장자리에 추가로 지진관측소를 설치할 경우 기대되는 지진감시능력 향상을 보기위하여, 10개의 지진관측소가 한반도 주변 도서지역과 내륙의 부산, 포항 지역에 추가 관측소가 설치한다는 가정하에 GT2 수준 분포를 조사해본 결과 현재의 지진관측소 분포 상황과 비교했을 때 서해와 남해에서 지진관측능력이 현저히 향상될 것으로 기대된다.

## SUMMARY

### I. Title:

Quantitative Evaluation of KNSN Earthquake Location Quality and Ground Truth Earthquake Catalog II

### II. Necessity and Objectives of the Study

Korea Meteorological Administration (KMA) is maintaining a nation-wide earthquake monitoring system. The system has been modernized mostly due to the moderate earthquakes at Yeongwol in 1996 and Gyeongju in 1997. The network is composed of a very-broadband seismic station, 32 broadband seismic stations, 32 short-period seismic stations, and 125 strong-motion stations. As of January 2013, there are 127 seismic stations in the Korea National Seismic Network (KNSN) including those co-sited.

Determination of precise earthquake locations and their uncertainty evaluation are critical to monitor natural earthquakes, nuclear tests, and other explosions. The study provide useful information to discriminate the natural earthquakes from man-made ones. Source parameters of natural earthquakes are not well known since they occur at depth. Determination of an earthquake source is solely dependent on the observed data at surface, which may include some errors. Consequently, the results are also expected to have errors. Due to the uncertainties in the data used for earthquake location, it is challenging to evaluate the reliability of parameters in earthquake bulletin published not only by KMA but also by any other earthquake monitoring agencies in the world. Although they are quite subjective by nature, we are trying our best to improve the locations and to evaluate their quality. This study take advantage of precisely known earthquake source parameters to evaluate the capability of KNSN and precision of their earthquake bulletin. It is also the purpose of the study to provide a quantitative criteria to measure their reliability.

### III. General Scope of the Study

The detection capability of KNSN and the reliability of its earthquake reports are assessed using GT-based (Ground Truth-based) criteria. Final results of the project provide a quality index for an earthquake location announcement available to the network operators in KMA.

The study has used large amount of GT0 data readily available. Some of them are

collected in the previous study. GT0 and GT1 events collected in the first year of the project included data recorded by KNSN when large explosions were made by the Korea Crust Research Team (KCRT) in 2002, 2004, and 2008. They generated man-made earthquakes using large explosives to study the crustal structure beneath the Korea peninsula. The study also use GT0 and GT1 data available from the previous study.

#### IV. Results of the Study

GT data collected during the first year of the project have been analyzed. We tried two 1-D velocity models for global earth and five 1-D velocity models tailored and proposed for Korea. We chose one of them for the further analysis.

We report a list of earthquakes occurring between 2004 and 2006 that satisfy KGT5 criteria. Errors in the earthquake locations reported by KNSN are also examined using the method proposed by Peter and Crosson (1972).

More than 300 first arrival time readings from KCRT-2008 explosions are used to develop KGT5 criteria for KNSN. Results indicates earthquake locations with first arrival time readings from more than 8 seismic stations, prescribed conditions of primary and secondary azimuthal gaps, and at least one station at epicentral distance less than 30 km are expected to have less than 5 km error. They are also expected to lie within 95% confidence interval.

Precise earthquake source parameters are determined by Octa-tree technique (a grid search method). Results are compared with those announced by National Institute of Meteorological Research to reveal there are less than 5 km difference in their locations. It is also noticed those located outside the seismic network including those in north Korea and oceans are subject to large errors.

The study also established a criteria for GT2 using records during the KCRT-2008. First arrival times are fine-tuned to provide improved estimation of travel time from sources to receivers. We also select data with high arrival time reading weight. In order to develop GT2 criteria, we introduce Network Metric. Careful examination indicates that primary azimuthal gap with less than 221, secondary azimuthal gap with less than 270, more than 5 arrival time readings, and network metric less than 0.60 are required to determine the source parameters with less than 2 km error.

## V. Suggestions for Applications

The GT2 criteria in the study are suggested for use during the routine earthquake monitoring and announcement. We also propose to use the criteria, to improve the seismic network. Under the current configuration of KNSN, most earthquakes occur inland of southern Korea peninsula are expected to satisfy GT2 criteria. In the mean time, many moderate size earthquake are happen in the surround oceans, which are subject to large errors. In order to improve the monitoring capability for earthquakes in the ocean, we suggest to install 10 additional seismic stations mostly located at the pheriphery of current seismic network. According to the simulation with addition stations, significant improvements are expected in the precision of earthquake location in the West and South Sea. Thus, the criteria also provide information to choose future seismograph sites.

# CONTENTS

Summary .....	6
I. Title .....	6
II. Necessity and Objectives of the Study .....	6
III. General Scope of the Study .....	6
IV. Results of the Study .....	7
V. Suggestions for Applications .....	8
Contents .....	9
Chapter 1. Outline of the study .....	19
Chapter 2. Status of technological development in domestic and overseas .....	21
Chapter 3. Contents and results of the study .....	23
3.1 Quantitative evaluation of KNSN earthquake location quality and Ground truth earthquake catalog .....	23
3.1.1 Introduction .....	23
3.1.2 Earthquake location .....	24
3.1.3 Collecting GT data .....	25
3.1.4 Operation of temporary seismic stations .....	51
3.1.5 GT5 event selection and catalog .....	57
3.1.6 Earthquake detectability of KNSN .....	61
3.1.7 Quarry of hypocenter parameter .....	62
3.1.8 Results and discussions .....	64
3.1.9 References .....	87
3.2 Estimation of local earthquake location Error using a resampling method .....	89
3.2.1 Introduction .....	89
3.2.2 Method, data, and analysis .....	91
3.2.3 Conclusions .....	115
3.3 Relocation of earthquakes between 1999 and 2010 recorded by KMA KNSN .....	117
3.3.1 KMA KNSN .....	117
3.3.2 Seismicity between 1999 and 2010 .....	117
3.3.3 Earthquake location Method .....	120
3.3.4 Inversion .....	122
3.3.5 Grid Search .....	122
3.3.6 Earthquake relocation using Octa-tree method .....	126
3.3.7 Conclusions .....	139
3.3.8 References .....	141
3.4 GT2 Criteria .....	142

3.4.1 Introduction .....	142
3.4.2 Network metric and KGT2 .....	142
3.4.3 Results and discussions .....	144
3.4.3 References .....	148
Chapter 4. Achievements and external contributions .....	149
Chapter 5. Plan for applications .....	150
Chapter 6. Overseas research information .....	154
Chapter 7. Research facilities registered at NTIS .....	155
Supplement .....	156
Appendix 2. Security level of the research results .....	177

# 목 차

요 약 문	3
I. 제 목	3
II. 연구개발의 목적 및 필요성	3
III. 연구개발의 내용 및 범위	3
IV. 연구개발결과	4
V. 연구개발결과의 활용계획	5
목 차	11
제 1 장 연구개발과제의 개요	19
제 2 장 국내외 기술개발 현황	21
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	23
3.1 GT 이벤트 자료 수집 및 국가지진관측망 지진관측 역량 평가	23
3.1.1 GT 자료획득 및 목록작성을 위한 임시지진관측소 선정	23
3.1.2 진원결정방법	24
3.1.3 GT 자료수집	25
3.1.4 GT 자료수집을 위한 임시지진관측소 운영	51
3.1.5 국내 GT5 수준 이벤트 관측자료 선별 및 목록화	57
3.1.6 기상청 국가지진관측망 지진관측 역량	61
3.1.7 진원요소 결정의 정확성	62
3.1.8 결과 및 고찰	64
3.1.9 참고문헌	87
3.2 재표본 방법을 이용한 지진원 위치 오차분석 방법	89
3.2.1 서 론	89
3.2.2 본 론	91
3.2.3 결 론	115
3.3 Grid search 방법을 이용하여 1999-2010년도 기상청에서 발표한 지진원 위치 재결정 및 목록 작성	117
3.3.1 기상청 지진관측망	117
3.3.2 1999-2010 지진 발생 현황	117
3.3.3 지진원 위치 결정 방법	120
3.3.4 역산 방법	122
3.3.5 Grid Search	122
3.3.6 Oct-tree 방법을 이용한 지진원 위치 재결정 결과	126
3.3.7 결론	139
3.3.8 참고문헌	141
3.4 GT2 수준 정확성 평가기준 수립	142
3.4.1 서론	142

3.4.2	본론	142
3.4.3	결론	144
3.4.4	참고문헌	148
제 4 장	목표달성도 및 관련분야에의 기여도	149
제 5 장	연구개발결과 활용계획	150
제 6 장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	154
제 7 장	연구시설·장비 현황	155
부 록		156
[붙임 2]	연구개발결과의 보안등급	177

## 그림 및 표 목차

### <표 차례>

Table 2.1 Global GT5 criteria .....	21
Table 2.2 EBG3 criteria.....	22
Table 3.1.1 Information of KCRT2002 explosion sites.....	27
Table 3.1.2 Information of KCRT2004 explosion sites.....	27
Table 3.1.3 Information of KCRT2008 explosion sites.....	27
Table 3.1.4 Information of D experiment site.....	29
Table 3.1.5 Information of Wanju quarry site.....	31
Table 3.1.6 Information of Haenam quarry site.....	33
Table 3.1.7 Blasts in Pocheon quarry site.....	34
Table 3.1.8 Blasts Pocheon temporary seismic station.....	35
Table 3.1.9 Blasts Yeongju temporary seismic station.....	36
Table 3.1.10 Blasts in Yeongju quarry.....	36
Table 3.1.11 Blasts in Ulsan quarry.....	38
Table 3.1.12 Blasts Ulsan temporary seismic station.....	38
Table 3.1.13 Blasts Yeoncheon temporary seismic station.....	40
Table 3.1.14 KMA temporary seismic station.....	42
Table 3.1.15 Blasts SCH temporary seismic station.....	44
Table 3.1.16 Blasts HYS temporary seismic station.....	45
Table 3.1.17 Blasts of JJM temporary seismic station.....	45
Table 3.1.18 List of Danyang underground blasts.....	47
Table 3.1.19 Blasts Danyang temporary seismic station .....	47
Table 3.1.20 Blasts Iksan temporary seismic station.....	49
Table 3.1.21 Temporary seismic station at Jangsung quarry site.....	51
Table 3.1.22 Temporary seismic station at Gochang quarry site.....	55
Table 3.1.23 KGT5 earthquake catalogue for 2004-2006 .....	59
Table 3.1.24 Quality based on error estimates defined in Hypoellipse .....	62
Table 3.1.25 Quality based on many parameters used in SQD-HYPO71 quality.....	62
Table 3.1.26 Station distribution quality as defined in HYPO71. Dmin is the distance to the nearest station .....	63
Table 3.1.27 Summary of the results for the KCRT2008 GT0 events using HYPOELLIPSE.....	77
Table 3.2.1 Global GT5 criteria.....	89

Table 3.2.2 EBG criteria for the Kaapvaal Craton	90
Table 3.2.3 Detailed information of KCRT-2008 explosion sites	93
Table 3.2.4 Summary of the inversion results for the KCRT-2008 GT0 events using HYPOELLIPSE	107
Table 3.2.5 KGT5 earthquake catalogue for 2007-2008	114
Table 3.3.1 One-dimensional velocity model used for computing travel time	120
Table 3.4.1 The numbers of available first arrival picks and tried realizations for KCRT-2008 explosion data	145

<그림 차례>

Figure 1.1 Location of the KMA seismic stations	20
Figure 3.1.1 Location of temporary seismic stations and KMA seismic stations	24
Figure 3.1.2 KCRT2008 explosion sites and location of the KMA seismic stations	26
Figure 3.1.3 Waveforms by KCRT2008 at the explosion site 1. Waveforms are recorded by KNSN and vertical components are shown	28
Figure 3.1.4 Waveforms by KCRT2008 at the explosion site 4. Waveforms are recorded by KNSN and vertical components are shown	28
Figure 3.1.5 Boring and explosive charge for borehole blasting	29
Figure 3.1.6 Borehole test blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	30
Figure 3.1.7 Blasting site in Wanju quarry	31
Figure 3.1.8 Satellite image of the Wanju quarry and quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	32
Figure 3.1.9 Wanju quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	32
Figure 3.1.10 Satellite image of the Haenam quarry and waveforms recorded at KMA seismic stations	33
Figure 3.1.11. Haenam quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	34
Figure 3.1.12 Pocheon temporary seismic station, satellite image of the quarry and quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	35
Figure 3.1.13 Yeongju temporary seismic station, satellite image of the Yeongju quarry and quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	37
Figure 3.1.14 Ulsan temporary seismic station, satellite image of the Ulsan quarry and quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	39
Figure 3.1.15 Yeoncheon temporary seismic station, satellite image of the Yeoncheon quarry and quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	40
Figure 3.1.16 Yeoncheon quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	41
Figure 3.1.17 Hoengseong quarry and quarry blasting waveforms recorded KMA seismic stations	42
Figure 3.1.18 Blasting site in Hoengseong quarry	43
Figure 3.1.19 Hoengseong quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	44

Figure 3.1.20	Temporary seismic stations installed around Hoengseong quarry	46
Figure 3.1.21	Danyang temporary seismic station, satellite image of the Danyang quarry and blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	48
Figure 3.1.22	Danyang quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	49
Figure 3.1.23	Iksan temporary seismic station, satellite image of the Iksan quarry and blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	50
Figure 3.1.24	Iksan quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	50
Figure 3.1.25	Jangsung quarry site	52
Figure 3.1.26	Explosion at Jangsung quarry site	53
Figure 3.1.27	Waveforms recorded at KMA seismic station after the Jangsu quarry blast	54
Figure 3.1.28	Gochang quarry site	55
Figure 3.1.29	Explosion at Gochang quarry site	56
Figure 3.1.30	Waveforms recorded at KMA seismic station after the Jangsu quarry blast	57
Figure 3.1.31	1-D P-wave velocity model	65
Figure 3.1.32	Map view of the result for the D test site using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985)	70
Figure 3.1.33	Map view of the result for the Wanju quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985)	71
Figure 3.1.34	Map view of the result for the Haenam quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985)	72
Figure 3.1.35	Map view of the result for the Yeoncheon quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985)	73
Figure 3.1.36	Map view of the result for the Heongseong quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985)	74
Figure 3.1.37	Map view of the result for the Danyang quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985)	75
Figure 3.1.38	Map view of the result for the Iksan quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985)	76
Figure 3.1.39	Hypocenters of man-made earthquake from this study	79
Figure 3.1.40	Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 10 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded only P-wave arrivals.	80
Figure 3.1.41	Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 10 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded both P- and S-wave arrivals.	81
Figure 3.1.42	Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 30 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km	

to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded only P-wave arrivals. ....	82
Figure 3.1.43 Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 30 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded both P- and S-wave arrivals. ....	83
Figure 3.1.44 Index map showing that the location in Figure 3.1.45 and Figure 3.1.46 is marked by a solid rectangle.....	84
Figure 3.1.45 Distribution of epicentral errors in the center of KNSN seismic network. In this simulation test, earthquakes are assumed to occur at 10 km depth and P-waves are recorded by 6 nearby stations. ....	85
Figure 3.1.46 Distribution of epicentral errors in the center of KNSN seismic network. In this simulation test, earthquakes are assumed to occur at 10 km depth and P- and S-waves are recorded by 6 nearby stations.....	86
Figure 3.2.1 Location of the KMA seismic stations and KCRT-2008 explosion sites.....	92
Figure 3.2.2 P-wave 1-D velocity used for locating GT0 events.....	94
Figure 3.2.3 Inversion results for the shot #1 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	98
Figure 3.2.4 Inversion results for the shot #2 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	99
Figure 3.2.5 Inversion results for the shot #3 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	100
Figure 3.2.6 Inversion results for the shot #4 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	101
Figure 3.2.7 Inversion results for the shot #5 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	102
Figure 3.2.8 Inversion results for the shot #6 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	103
Figure 3.2.9 Inversion results for the shot #7 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	104
Figure 3.2.10 Inversion results for the shot #8 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	105
Figure 3.2.11 Locating errors related with a number of stations, primary azimuthal gaps, secondary azimuthal gaps, a number of stations within epicentral distances less than 30 km, a number of stations within epicentral distances less than 50 km, and a number of stations within epicentral distances less than 100 km.....	109
Figure 3.2.12 Locating errors sorted with at least a station existing within epicentral distances less than 30 km and primary azimuthal gaps, and secondary azimuthal gaps.....	110
Figure 3.2.13 The relationship between primary azimuths and accumulated density function for the	

number of station is 8, 9, 10, 11, and 12 respectively.....	111
Figure 3.2.14 The relationship between secondary azimuths and accumulated density function for the number of station is 8, 9, 10, 11, and 12 respectively.....	112
Figure 3.2.15 Summary cartoon of KGT5 criteria.....	116
Figure 3.3.1 Locations of the KNSN stations.....	118
Figure 3.3.2 Locations of earthquakes occurring between 1999 and 2010, and they were relocated by NIMR seismological group.....	119
Figure 3.3.3 One dimensional velocity model used in this study from Kim and Jung, 1983, computed travel times, and computed propagating ray angles.....	121
Figure 3.3.4 Schematic view of the Oct-tree method.....	123
Figure 3.3.5 Systematic vies for finding PDF using oct-tree method.....	124
Figure 3.3.6 A example of 2D projection from the oct-tree structure and compact representation of the PDF.....	124
Figure 3.3.7 The status of cells for the initial grid search.....	125
Figure 3.3.8 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2000.....	128
Figure 3.3.9 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2001.....	129
Figure 3.3.10 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2002.....	130
Figure 3.3.11 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2003.....	131
Figure 3.3.12 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2004.....	132
Figure 3.3.13 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2005.....	133
Figure 3.3.14 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2006.....	134
Figure 3.3.15 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2007.....	135
Figure 3.3.16 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2008.....	136
Figure 3.3.17 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2009.....	137
Figure 3.3.18 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2010.....	138
Figure 3.3.19 A 3D view for the earthquakes occurring in 2009.Red dots indicate probability density, sky blue ellipsoieds represent confidential boudary, and green bars show P wave residuals for each station.....	140
Figure 3.4.1 Location error with the number of available phase readings.....	145
Figure 3.4.2 Location error with primary azimuthal gap. Cumulative distribution of mislocations for all realizations. Errors with 3 km and 2 km are shown by solid and dotted lines, respectively.....	146
Figure 3.4.3 Location error with the number of secondary azimuthal gap. Cumulative distribution of mislocations for all realizations. Errors with 3 km and 2 km are shown by solid and dotted lines, respectively.....	146
Figure 3.4.4 Location error with the network metric. Cumulative distribution of mislocations for all realizations. Errors with 3 km and 2 km are shown by solid and	

dotted lines, respectively ..... 147

Figure 3.4.5 Cumulative distribution of mislocations for all realizations satisfying GT2 criteria established in this study ..... 147

Figure 3.4.6 GT2 coverage under current KNSN and GT2 coverage with 10 additional stations (marked by blue rectangles) at the periphery of seismic network. .... 148

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

장기간에 걸쳐 판과 판의 경계 혹은 판 내부의 단층대를 따라 축적된 에너지가 갑작스럽게 방출되는 현상이 지진이다. 우리나라에서 계기지진 관측을 시작한 이래 1978년 충청남도 홍성군에서 발생한 규모 5.0의 홍성지진, 1996년 영월지진(규모 4.5), 1997년 경주지진(규모 4.3), 2007년 오대산지진(규모 4.8), 그리고 2010년 시흥지진(규모 3.0) 등이 발생하여 많은 사람들이 지진동을 느꼈으며, 더 이상 우리나라가 지진재해로부터 안전지대가 아니라는 경각심을 일깨워주기에 충분했다.

기상청에서는 1978년 홍성지진, 1996년 영월지진, 1997년 경주지진을 계기로 디지털 지진관측망을 확충하면서 2013년 1월 1일 현재 1 개소의 초광대역 관측소, 32 개소의 광대역 관측소, 32 개소의 단주기 관측소, 125 개소의 가속도 관측소를 확충하여 2011년 1월 기준으로 총 127 개소로 이루어진 국가지진관측망(Korea National Seismic Network, KNSN)을 운영하고 있다(Figure 1.1). 지진의 무서운 점 중 하나는 그 발생시점과 발생위치를 예측할 수 없다는데 있다. 따라서 지진예측 및 지진전조현상을 찾기 위한 연구(e.g. Geller, 1997)가 진행 중에 있지만 현재의 기술력으로 단기지진예측은 많은 노력에도 불구하고 불가능한 상황이다.

지진 발생 후 신속·정확한 지진정보의 분석은 경제적·인명적 손실에 대비하고 그 피해를 최소한으로 줄일 수 있는 기틀을 마련해 준다. 미국, 일본과 같이 일부 선진국에서는 현재 지진조기경보시스템(Earthquake Early Warning System)을 개발 운영 중에 있으며, 이들 나라에서는 지진조기경보시스템을 이용하여 지진발생 시 고속철도, 항공기 운항 중지 및 발전소 가동 중단을 실행함으로써 피해를 최소한으로 줄이기 위한 노력을 기울이고 있다. 현재 우리나라 기상청에서는 추정규모 3.5 이상의 내륙지진 또는 4.0 이상의 해역지진에 대해 지진속보를 발표하고 있으며, 규모 2.0 이상의 내륙 또는 해역지진에 대하여 대국민 지진통보 서비스를 제공 하고 있다. 향후 기상청에서는

### ◎ 2015년 - 지진속보·통보 체제 고도화

신속성 : 지진관측 후 50 초 이내 지진정보 발표

정확성 : 진앙위치 검정오차  $\pm 10$  km, 규모오차  $\pm 0.5$

### ◎ 2020년 - 지진조기경보체제 확립

신속성 : 지진관측 후 10 초 이내 지진정보 발표

정확성 : 진앙위치 검정오차  $\pm 5$  km, 규모오차  $\pm 0.5$

와 같은 신속성 및 정확성 향상을 위한 목표로 국가 지진조기경보시스템 구축을 추진하고 있다(기상청, 2011). 이처럼 지진의 발생시각, 발생위치, 규모산정과 같은 진원요소정보는 지진조기경보의

기초정보를 제공 할뿐만 아니라, 지진관련 연구와 지진학 연구의 가장 기본적인 정보이면서 가장 중요한 정보이다. 현재 기상청의 지진관측소는 35 km 간격의 조밀한 분포로 관리·운영하고 있으며, 지진발생 시 빠르고 정확한 진원요소 정보를 제공하고 있다. 그러나 현재 이러한 진원요소 정보에 관한 정량적 평가는 아직까지 수행되지 않고 있다.

본 연구에서는 전지구 혹은 국지규모의 지진발생위치 결정의 정확성 및 신뢰성 평가를 위하여 일반적으로 많이 사용되는 방법 중 하나인 GT(Ground Truth)개념의 지진관측망 능력 평가를 통하여 기상청 발표자료의 정확성을 판단할 수 있는 정량적 평가요소 및 운용기준을 제시할 것이다. 이를 통해 향후 신설되는 지진관측망의 최적부지 선정에 있어 그 근거를 마련할 것으로 기대되는 등 지진관측 현업 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

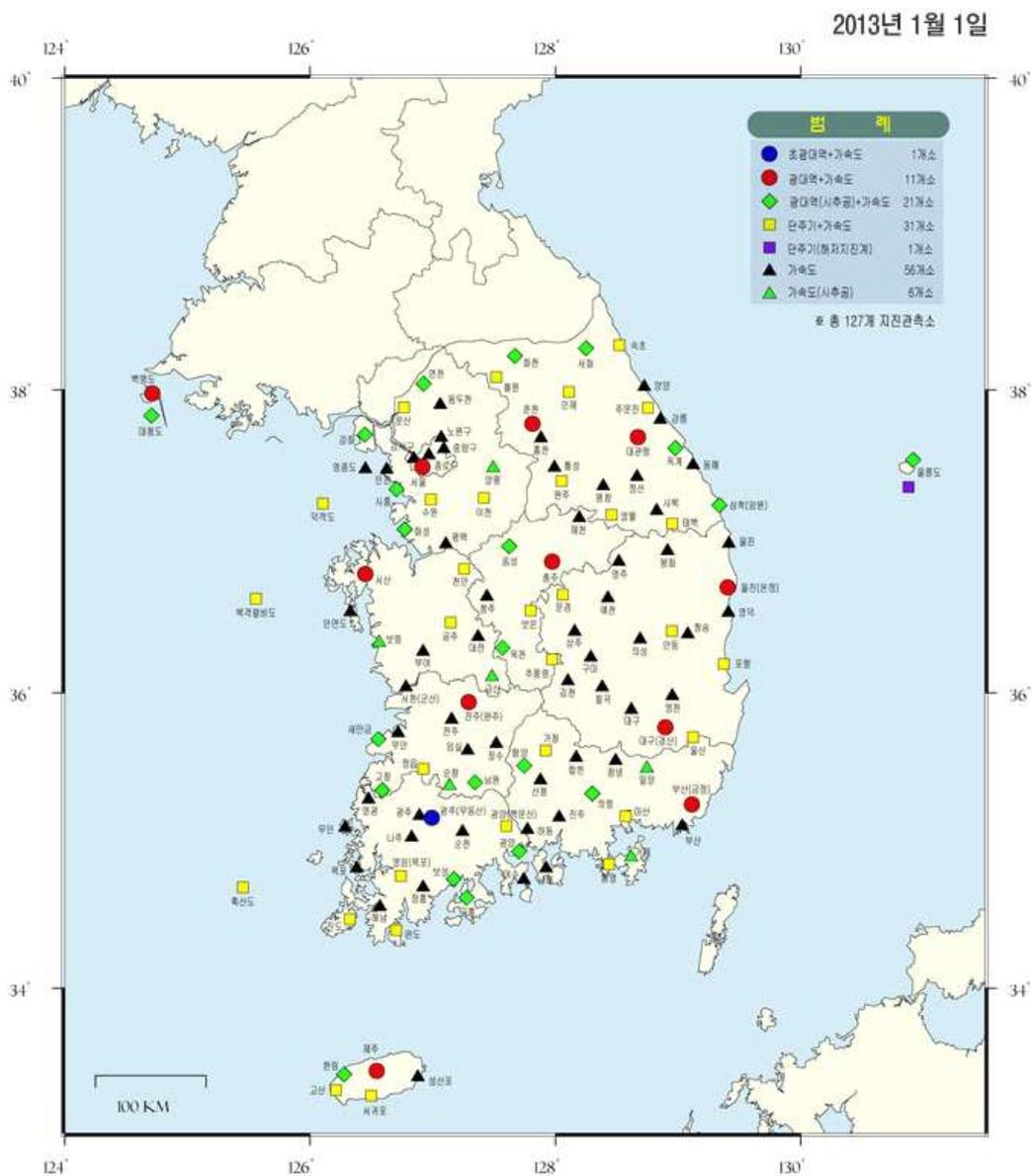


Figure 1.1. Location of the KMA seismic stations (2014, KMA).

## 제 2장 국내외 기술개발 현황

정확한 지진원의 위치가 밝혀진 자료에 대하여 Bondár et al. (2001)는 ‘Ground Truth (GT)’라는 개념을 소개하였다. 일반적으로 GTX라고 사용되는데, 여기서 ‘X’는 진앙의 위치가 X km 이내의 오차로 결정된 것임을 의미한다. 이러한 의미에서 GT0라 함은 정확하게 진앙의 위치와 시간을 알고 있는 것을 의미하며, 일반적으로 국지지역(Local)에서의 GT5는 진앙의 위치가 5 km 이내의 오차로 결정된 지진을 의미한다. Bondár et al. (2004)는 중동, 북아프리카, 유럽, 서유라시아의 진원위치를 향상시키기 위하여 200,000 개 이상의 초동 P파를 이용하여 약 2,000 개 이상의 지진 위치를 분석하여 국지, 원격 지진관측망의 진원위치 결정에 대한 신뢰도를 분석하였으며 전지구적 GT5의 기준을 다음과 같이 제시하였다. 이벤트는 1) 최소한 10 개의 관측소가 진앙거리 250 km 이내에 위치하며, 2) primary azimuthal gap이  $110^\circ$  이내이고, 3) secondary azimuthal gap이  $160^\circ$  이내이며, 4) 최소한 1 개 이상의 지진관측소가 진앙거리 30 km 이내에 존재할 경우이다(Table 2.1).

Table 2.1 Global GT5 criteria (Bondár et al., 2004)

Network	Distance Range (degree)	Primary Azimuthal Gap	Secondary Azimuthal Gap	Number of Stations within Specified Distance			GT level
				Between 250 km and 1000 km	<250 km	<30 km	
Local	$0^\circ - 2.5^\circ$	$110^\circ$	$160^\circ$	-	10	1	GT5 <sub>95%</sub>
Near Regional	$2.5^\circ - 10^\circ$		$120^\circ$	10	-		GT20 <sub>90%</sub>
Teleseismic	$28^\circ - 91^\circ$		$120^\circ$	-	-		GT25 <sub>90%</sub>

Boomer et al. (2010)는 남아프리카에 위치한 SASE (Southern African Seismic Experiment) 지진관측망을 이용하여 GT 지진목록을 연구하였으며, 이를 통해 새로운 기준의 진앙의 정확성을 지닌  $EBGT3_{95\%}$  (Empirically Based Ground Truth)를 마련하였다.  $EBGT3_{95\%}$ 의 기준에 따르면 1) 최소 8 개 이상의 관측소가 진앙거리 215 km 이내에 위치하며, 2) primary azimuthal gap이  $202^\circ$  이하라고 하였다. 또한, 9 개 이상의 관측소가 진앙거리 79 km 이내에 있을 경우, 진원의 깊이는 4 km 깊이 범위 내에서 95%의 신뢰성을 가지며, 8 개의 지진관측소가 있을 경우, 진원깊이 6 km 깊이범위 내에서 95%의 신뢰성을 가진다고 하였다(Table 2.2).

Table 2.2 EBG3 Criteria (Boomer et al., 2010)

	Number of stations within 215 km	One-Sided 95% Confidence Interval(km)		Primary Azimuthal Gap Maximum	Maximum Distance to Nearest Station(km)
		Epicentral Change	Depth Change		
GT3 <sub>95%</sub>	11	[0, 2.2)	[0, 0.4)	202°	79
GT3 <sub>95%</sub>	10	[0, 1.9)	[0, 1.8)		
GT3 <sub>95%</sub>	9	[0, 2.0)	[0, 3.8)		
GT3 <sub>95%</sub>	8	[0, 2.2)	[0, 5.7)		

박용철 등(2009)은 정확한 시간과 위치를 알고 있는 KCRT2008 발파실험을 이용하여 기상청 지진관측망의 진원위치 결정력에 대한 연구를 실시하였다. 이를 위해 기상청 기상연구소에서 설치한 임시지진관측소 3 개소와 기상청 지진관측망을 통해 획득한 KCRT발파실험 8 개 발파지점의 발파자료를 통해 한국형 GT5 (Korea Ground Truth 5 : KGT5)를 정의하였다. 2007년과 2008년 기상청의 지진관측소에서 관측하고 발표한 87 개의 지진에 대해 KGT5의 기준을 적용하여 KGT5 기준을 만족하는 38 개 지진에 대하여 지진관측망의 진원위치결정력에 대한 신뢰도를 분석하였다.

김광희 등(2011)은 본 과제의 선행연구를 수행하여 국내의 GT0자료를 수집 분석하였다. 기상청 국가지진관측망 관측자료를 사용하여 결정된 지진발생위치의 정확성을 고찰하기 위하여 Peter and Crosson(1972)이 제시한 방법능 사용하여 기상청 지진발생위치 결정의 오차를 추정하여 내륙지역 대부분의 지역에서 진앙오차 1 km 이내의 정확성을 가지고 지진발생위치를 결정할 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 박용철 등(2009)와 김광희 등(2011)의 선행 연구결과를 충분히 활용하기 위하여 노력하였다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 3.1 GT 이벤트 자료 수집 및 국가지진관측망 지진관측 역량 평가

#### 3.1.1 GT 자료획득 및 목록작성을 위한 임시지진관측소 선정

기상청에서는 지난 15년간 국가지진관측망의 현대화 및 관측환경 개선을 위하여 많은 노력을 기울여 왔으며, 그 결과 관측소간 평균 이격거리 35 km의 비교적 조밀한 국가지진관측망을 구축하였다. 이러한 노력의 결과로 국가지진관측망은 상당 수준의 지진 관측능력과 정확성 및 신속성을 갖추게 되었지만 아직까지 기상청 지진분석에 관한 객관적/정량적 평가 방법은 없는 실정이다. 이에 본 연구는 전 지구 혹은 국지 규모의 지진발생위치 결정 정확성 및 신뢰성 평가를 위하여 일반적으로 많이 사용되는 방법 중 하나인 GT(Ground Truth)를 사용하여 기상청에서 발표하는 지진발생위치의 정확성과 신뢰성을 알아보는 한편, GT 수준의 지진 카탈로그를 작성하고자 한다. GT 이벤트의 진앙지로 사용되기 위해서는 발생위치와 시간을 정확히 알고 있어야 하며, 인근 지진관측소에서 감지 가능할 정도의 에너지가 발생되어야 한다. GT 이벤트의 진앙으로 사용될 수 있는 곳은 전국에 걸쳐 분포하고 있는 도로공사, 터널공사 및 채석장 등과 같은 곳에서의 화약발파를 대표적으로 꼽을 수 있다. 그러나 대부분의 도로공사 및 터널공사현장은 공사 및 차량소통으로 인한 소음과 공사현장 주변의 열악한 환경으로 인해 임시지진관측소 선정에 있어 많은 문제점이 따른다. 이에 따라 본 연구에서는 전국적으로 분포하고 있는 채석장을 중심으로 임시지진관측소 후보지를 선정하였으며, 현장답사를 통해 과거 발파양과 발파횟수 등의 발파자료정보를 조사하는 한편 앞으로의 발파현황 등을 고려하여 GT 자료 수집을 위한 임시지진관측소 후보지를 선정하였다. 또한 채석장과 임시관측소까지의 거리, 인근 기상청 지진관측소와의 거리 및 분포현황, 임시지진관측소의 잠입요소, GPS 수신 상태, 지진계의 전원공급 등을 고려하여 임시지진관측소의 관측능력을 최대한으로 발휘할 수 있는 곳을 최종 선정하였다.

효율적인 GT 목록작성을 위해 한 지역에 임시지진관측소가 편중되지 않도록 선정하였다 (Figure 3.1.1). 임시지진관측소에 사용된 지진계는 Nanometrics의 광대역지진계 Trillium 240 3-Component Seismometer, Trillium Compact를 설치하였으며, 자료기록과 저장은 QUANTERRA의 Q330과 BALER44를 사용하였다. 지진자료는 초당 100 샘플로 자료를 획득하였으며 기록계는 GPS와 연결하여 정확한 시간정보를 획득하였다. 장비운영에 필요한 전원은 임시지진관측소 내의 상용전기와 부수적으로 배터리와 배터리 충전기를 연결하여 보조전원으로 이용하였다. 일부 상용전기를 사용할 수 없을 경우에는 정기적인 방문을 통해 배터리 점검 및 충전을 통하여 임시지진관측소를 운영하였다.

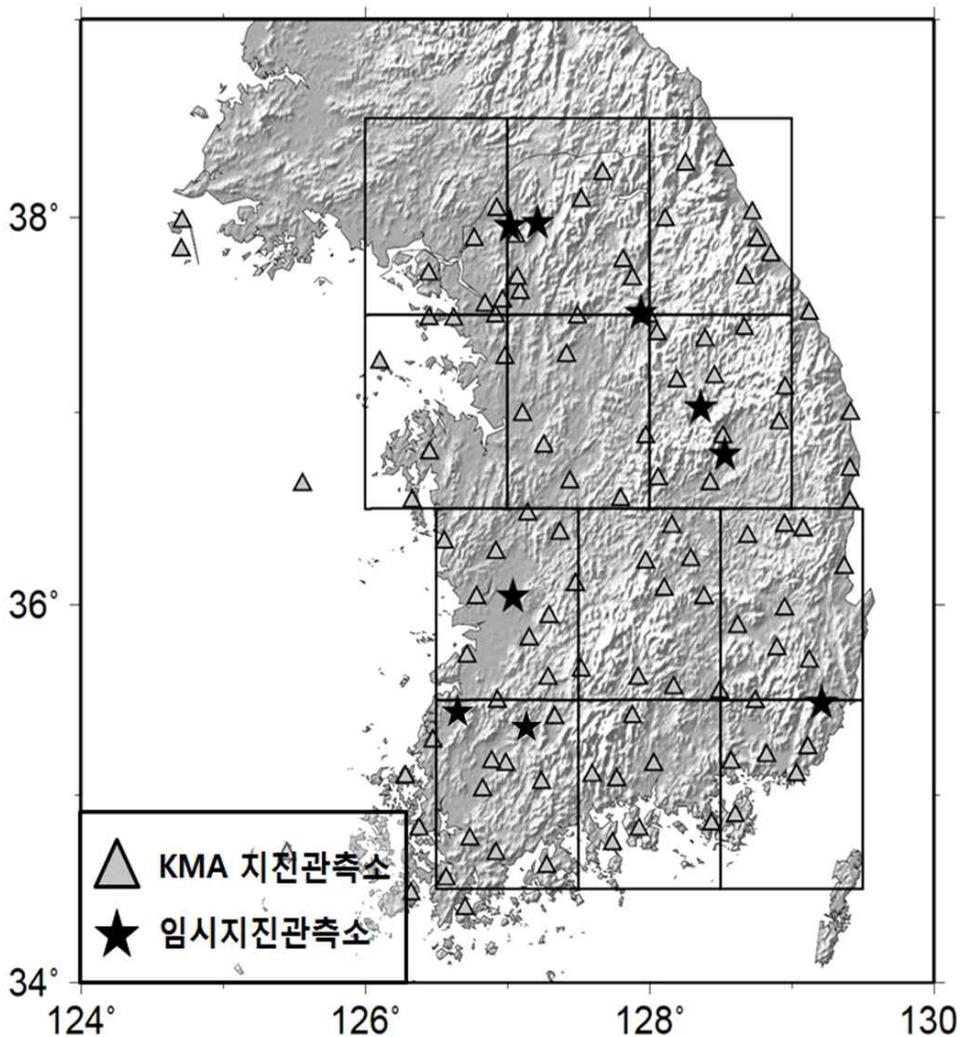


Figure 3.1.1 Location of temporary seismic stations and KMA seismic stations.

### 3.1.2 진원결정방법

본 연구에서는 GT 이벤트 분석을 위하여 단일 지진발생위치 결정(Single Event Location, SEL) 프로그램(Hypoellipse, Lahr, 1999)을 사용하여 진원위치를 결정하였다. 지진의 발생을 인지하고 가장 먼저 수행되는 과정이 지진의 발생위치를 결정하는 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 4 개의 도착시간 관측이 필요하며, 지진파의 관측된 도착시간과 이론적 도착시간 사이

의 차이를 최소화 하도록 지진의 위치와 발생시간을 조정함으로써 그 값을 구하게 된다. 진원인자를 구하기 위해서는 구하는 과정에서는 우선 진원의 위치와 시간의 초기치를 가정하고 이론적 지진파 도착시간을 계산하여 관측된 지진파 도착시간과의 차이를 구한다. 구해진 차를 이용하여 초기치를 수정하고, 수정된 초기치를 다시 진원위치와 시간 추정을 위한 초기값에 사용하는 반복적 방법(iterative way)을 사용한다. 이런 반복은 미리 정해진 조건을 충족시킬 때 종결되며, 일반적으로 관측치와 이론치의 RMS(root-mean-squares)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 속도구조모델은 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, 묘사하는 3차원 속도구조의 사용이 바람직하다(Kim et al., 2006; Chen et al., 2006). 또 측정치와 이론치 사이의 RMS를 최소화시키는 과정으로서, 작은 RMS가 실제로 지진위치의 정확성을 의미하지는 않는다(Pujol, 2004; Kim et al., 2007).

### 3.1.3 GT 자료수집

본 연구에서는 활용가능한 GT0 자료 수집을 위하여 선행연구 결과를 활용하였으며, 필요시 추가로 국내 채석장 등에서 수행되고 있는 발파자료를 수집하였다. GT0 자료로 사용되기 위해서는 정확한 발생시간과 발생위치를 알고 있어야하며, 인근 지진관측소에서 관측 가능할 정도의 에너지가 발생하여야 한다. 이러한 GT0 조건을 만족하는 기존 자료로는 한국지각구조연구팀에서 수행한 KCRT 발파실험이 있으며, 기존 GT 자료 중 비교적 정확한 시간과 위치를 알고 있는 자료로는 D 시험장에서의 시추공 발파시험과 완주 채석장, 해남 채석장에서의 발파작업이 있다.

#### 3.1.3.1. KCRT

한국지각구조연구팀(Korea Crust Research Team, KCRT)에서는 한반도 지각속도 구조 규명을 위한 실험의 일환으로 2002년 서산-영동-경주, 2004년 연천-증평-영동-고성, 2008년 강화-영주-단양-영덕에 이르는 축선에서 대규모 발파를 이용하여 인공적으로 지진파를 발생시키는 실험을 수행하였다(Figure 3.1.2). 2002년 12월 수행된 KCRT2002의 실험에서는 서산-영동-경주 300 km 구간에서 이동식지진계 195 대를 평균 1.5 km 간격으로 관측구간에 설치한 후 서산과 영동지역에서 각각 폭약 1 톤과 0.5 톤을 발파하는 지각규모 굴절과 실험을 수행하였다(Table

3.1.1)(이정모 등, 2002). 2004년 10월 수행된 KCRT2004의 경우 연천-증평-영동-고성의 축선 340 km 구간에서 197 대의 이동식지진계를 1.7 km 간격으로 설치하고 연천과 고성지역에 각각 폭약 1 톤, 증평 0.5 톤, 영동 0.7 톤의 폭약을 사용하여 발파하는 제 2차 지각규모 탄성과 실험을 수행하였다(Table 3.1.2)(이정모 등, 2006). 2008년에 수행된 KCRT2008의 경우, 강화-영주-단양-영덕의 축선구간 총 8 개 지점에서 발파실험을 수행하였다. 이 중 발파 1 지점인 강화와 발파 4 지점인 영덕에서는 KCRT2008 실험 중 가장 많은 1 톤의 폭약을 사용하여 발파실험을 수행하였다(Table 3.1.3, Figure 3.1.3, 3.1.4)(이정모 등, 2009).

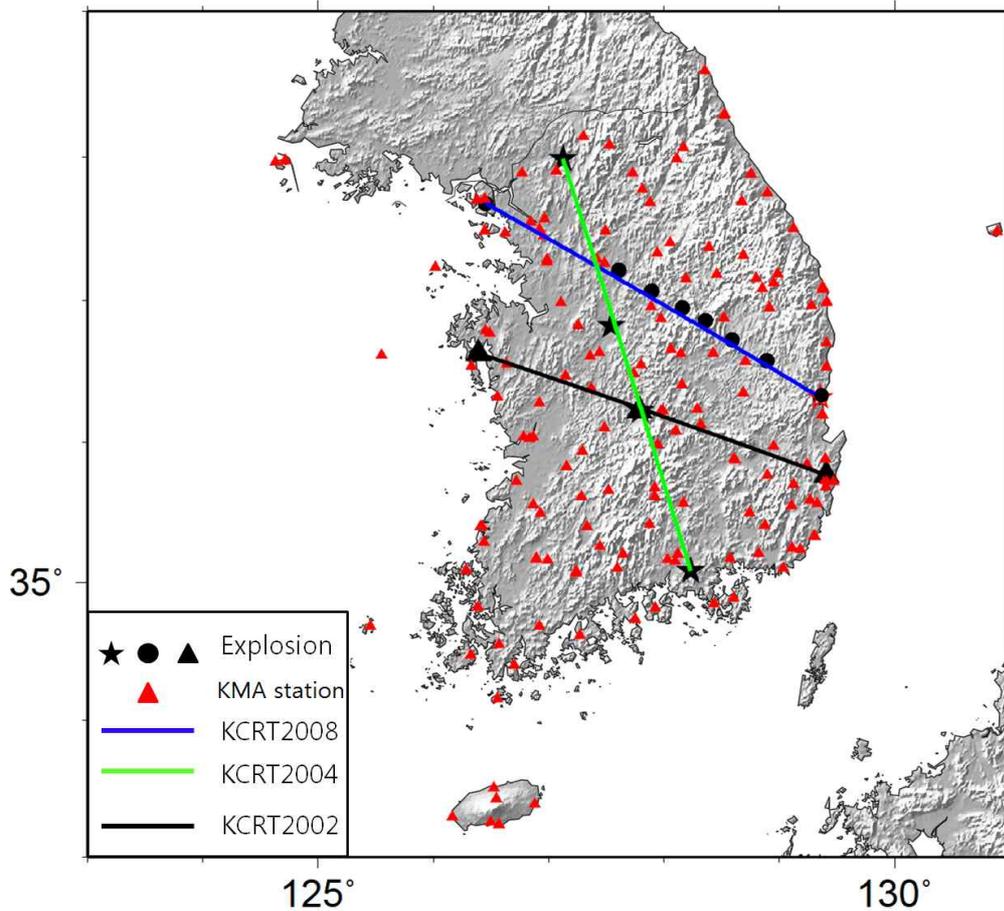


Figure 3.1.2 KCRT2008 explosion sites and Location of the KMA seismic stations.

Table 3.1.1. Information of KCRT2002 explosion sites (Lee et al., 2003)

Shot no.	Date	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth(m)	Load(ton)
1	2002/12/15	03:59:00	36.6290	126.3927	100	1.00
2	2002/12/15	04:14:30	36.2270	127.7870	100	0.50

Table 3.1.2. Information of KCRT2004 explosion sites (Lee et al., 2006)

Shot no.	Date	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth(m)	Load(ton)
1	2004/10/05	00:59:00	37.9864	127.1239	-	1.00
2	2004/10/05	01:14:30	36.8243	127.5430	-	0.50
3	2004/10/05	01:29:30	36.2239	127.7950	-	0.70
4	2004/10/05	01:44:30	35.0818	128.2325	-	1.00

Table 3.1.3. Information of KCRT2008 explosion sites (Park et al., 2009)

Shot no.	Date	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth(m)	Load(ton)
1	2008/11/02	04:59:59.968	37.6786	126.4531	90	1.50
2	2008/11/02	05:15:01.269	37.2114	127.6078	90	1.00
3	2008/11/02	05:30:26.207	36.8613	128.3618	85	1.00
4	2008/11/02	06:52:01.304	36.3188	129.3557	85	1.50
5	2008/11/02	06:00:00.806	37.0654	127.8951	49	0.25
6	2008/11/02	06:14:49.968	36.9508	128.1589	48	0.25
7	2008/11/02	06:30:01.541	36.7240	128.5894	48	0.25
8	2008/11/02	06:45:01.378	36.5776	128.8914	48	0.25

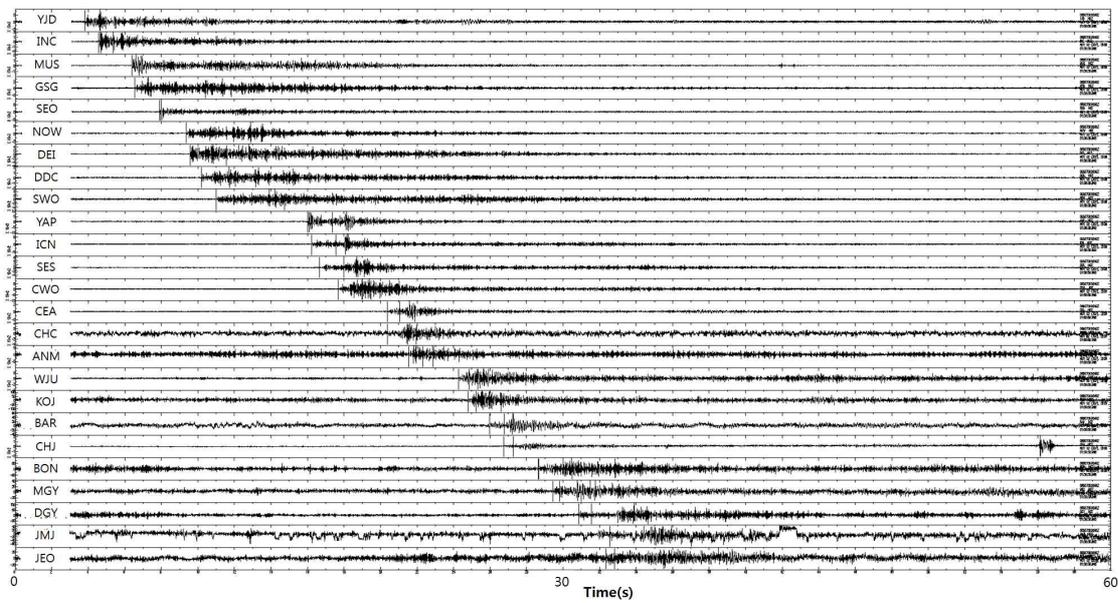


Figure 3.1.3 Waveforms by KCRT2008 at the explosion site 1. Waveforms are recorded by KNSN and vertical components are shown.

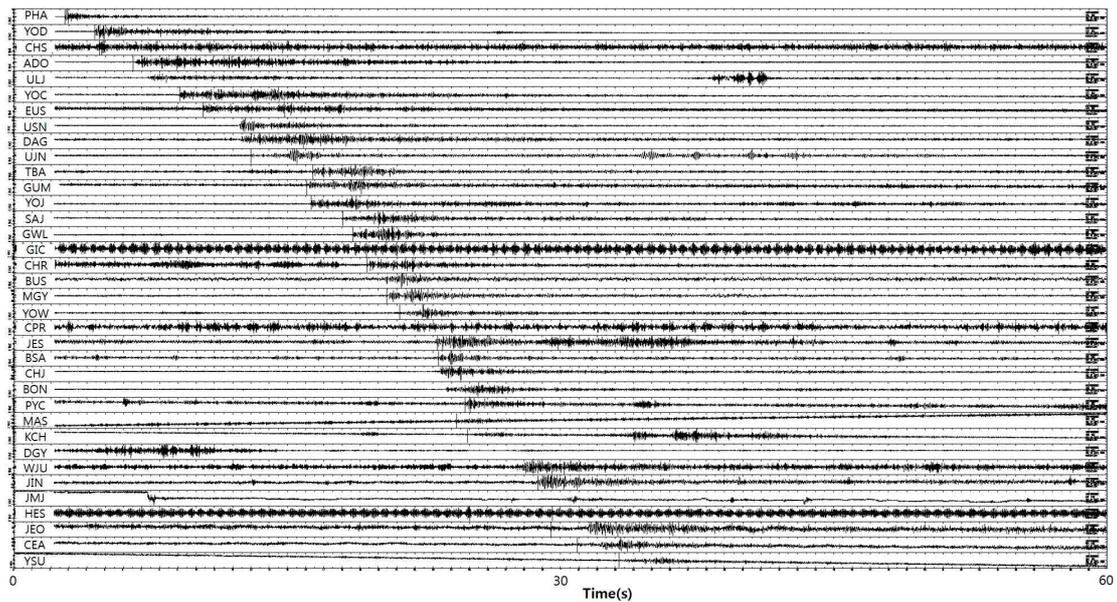


Figure 3.1.4 Waveforms by KCRT2008 at the explosion site 4. Waveforms are recorded by KNSN and vertical components are shown.

### 3.1.3.2 시추공 시험발파

정주환 등(2009)은 2008년 5월 2일 경기도에 위치한 D 시험장에서 ‘인공지진 발생을 위한 대규모 시추공 시험발파 사례연구’를 위한 발파시험을 수행하였다. 이 실험은 인공지진 발생을 위한 발파의 적정 장약량을 결정하기 위하여 대구경의 시추공을 천공하고 1 개소에 폭약을 집중으로 장약하여 발파하는 집중장약 방식으로 실행되었다(Table 3.1.4). 발파공의 직경은 356 mm로 하였고, 천공의 깊이는 70 m로 하여 강철과 PVC 파이프로 된 성형 장약통에 총 400 kg의 고성능 다이너마이트와 골재를 사용하여 전색한 후 시험발파를 실시하였다(Figure 3.1.5). 기상청의 지진관측소 중 가장 가까운 곳에 위치한 철원 지진관측소를 비롯하여 동두천, 노원구, 춘천, 인제 지진관측소에서 인공지진이 관측되었다(Figure 3.1.6).

Table 3.1.4 Information of D experiment site (Jeong et al., 2009)

Code	Date	Time (UTC)	Lon.(°E)	Lat.(°N)	Depth(m)	Load(kg)
D 시험장	2008/05/02	07:30	127.10	38.00	70	400

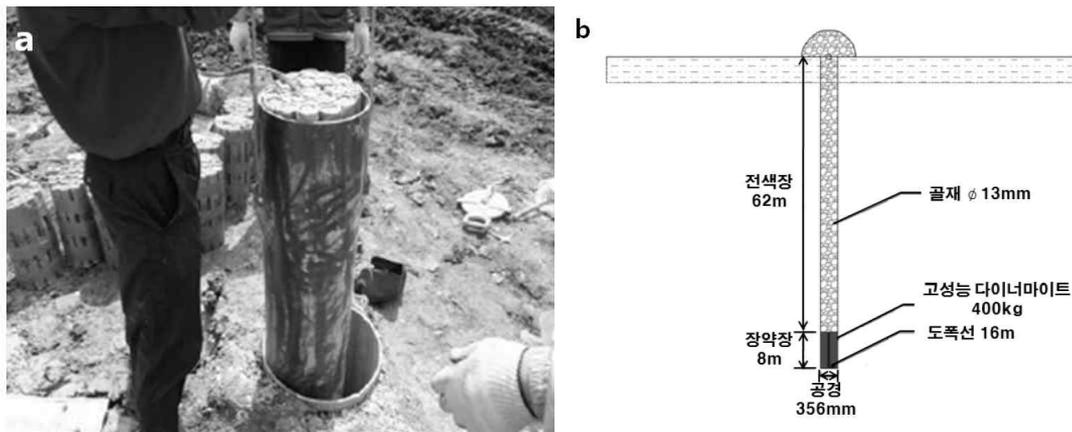


Figure 3.1.5 (a) Boring and (b) explosive charge for borehole blasting (Jeong et al., 2009).

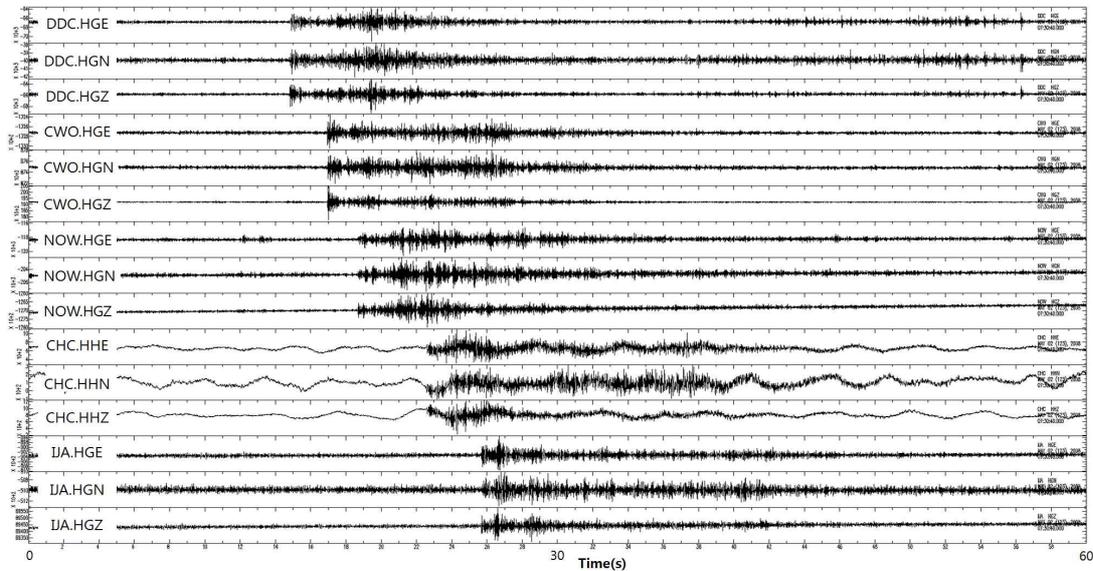


Figure 3.1.6 Borehole test blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

### 3.1.3.3 채석장 발파

우리나라에서는 채석, 채광을 하기 위한 채석장과 채석단지가 전국에 분포하고 있으며, 광석과 암석채취를 위해 폭약을 사용한 발파작업도 함께 이루어지고 있다. 1 톤 이상의 폭약을 사용하였고, 비교적 정확한 발파시간과 발파위치를 알 수 있는 발파작업으로 2009년 5월 전라북도 완주군과 2010년 11월 전라남도 해남군에서 이루어졌던 발파작업이 GT 이벤트 자료로 활용 가능하다. 또한, 기존 선행연구에서 수집한 포천 임시지진관측소 수집자료, 영주 임시지진관측소 수집자료, 울산 임시지진관측소 수집자료, 연천 임시지진관측소 수집자료, 횡성 주변 8개 임시지진관측소 수집자료, 단양 임시지진관측소 수집자료, 익산 임시지진관측소 수집자료를 활용 할 수 있다.

#### 3.1.3.3.1 완주채석장

2009년 5월 6일 12시 12분경, 전라북도 완주군에 위치한 채석장에서 있었던 발파작업으로 사용된 화약의 양은 약 1 톤으로 비교적 많은 양의 화약이 사용되었다(Table 3.1.5, Figure 3.1.7). 관측된 발파신호의 파형은 인근에 위치한 전주관측소(9 km)를 비롯하여 군산(41 km), 정읍(51 km), 남원(57 km), 거창(72 km), 광주(85 km), 보은(90 km) 지진관측소에서 그 신호가 감지되었다(Figure 3.1.8, 3.1.9).

Table 3.1.5 Information of Wanju quarry site

Code	Date	Time (UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Elev.(m)	Load(ton)
완주 채석장	2009/05/06	03:12	35.8990	127.2015	130	1.02



Figure 3.1.7 Blasting site in Wanju quarry.

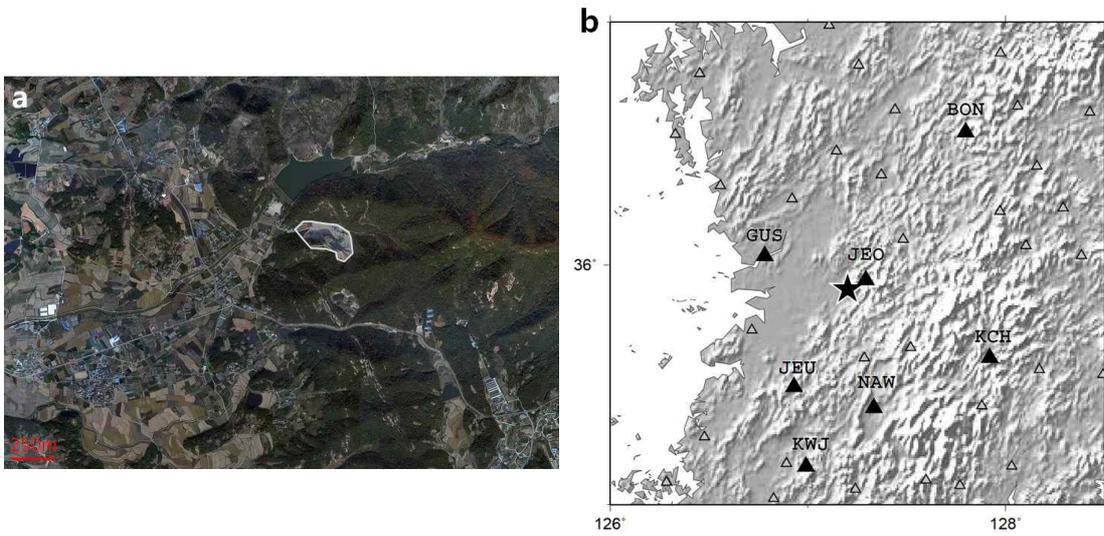


Figure 3.1.8 (a) Satellite image of the Wanju quarry and (b) quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

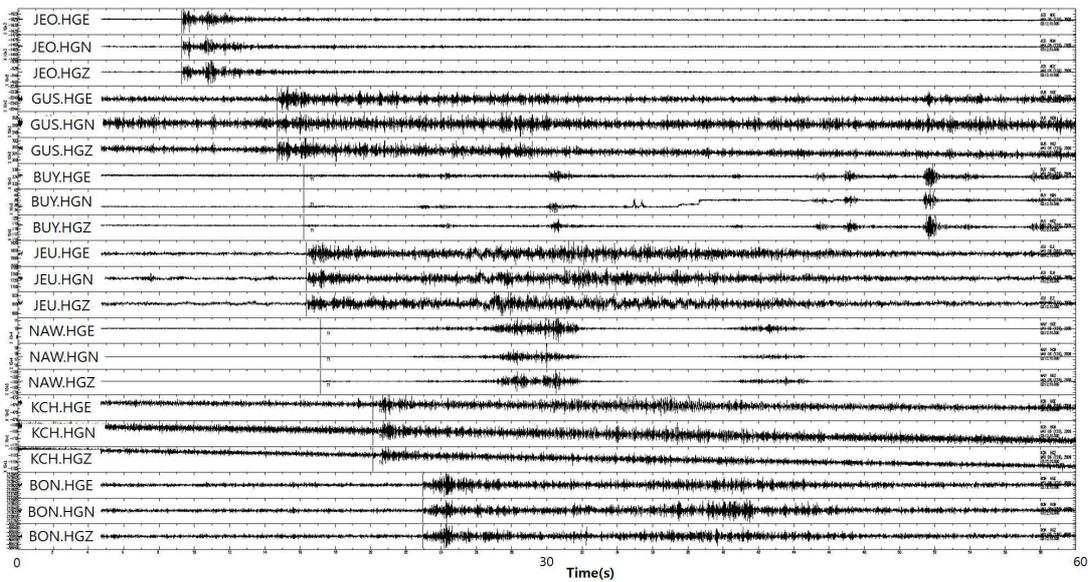


Figure 3.1.9 Wanju quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

### 3.1.3.3.2 해남채석장

2010년 11월 15일 18시 37분경, 전라남도 해남군에 위치한 채석장에서 있었던 발파작업은 인근 기상청의 해남관측소(5 km)를 비롯하여 완도(16 km), 진도(25 km), 고흥(64 km), 광주(79 km), 여수(108 km), 정읍(114 km) 지진관측소에서 그 신호가 감지되었으며(Figure 3.1.10), 이때

기상청 지진관측소를 통해 산출된 발파작업의 인공지진 규모는 1.36을 기록하였다(Table 3.1.6, Figure 3.1.11).

Table 3.1.6 Information of Haenam quarry site

Code	Date	Time (UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Elev.(m)	$M_L$
해남 채석장	2010/11/15	09:37	34.504	126.590	99	1.36

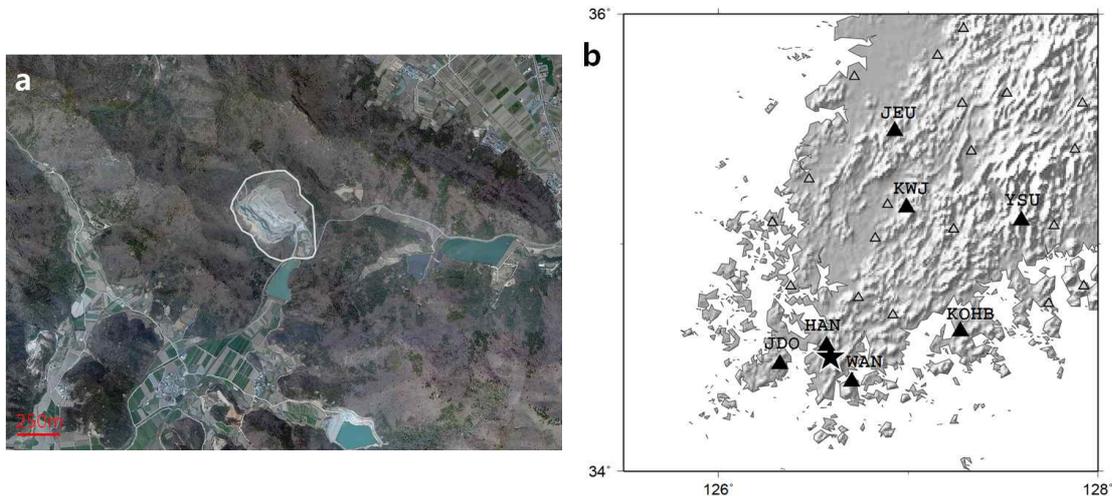


Figure 3.1.10 (a) Satellite image of the Haenam quarry and (b) waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

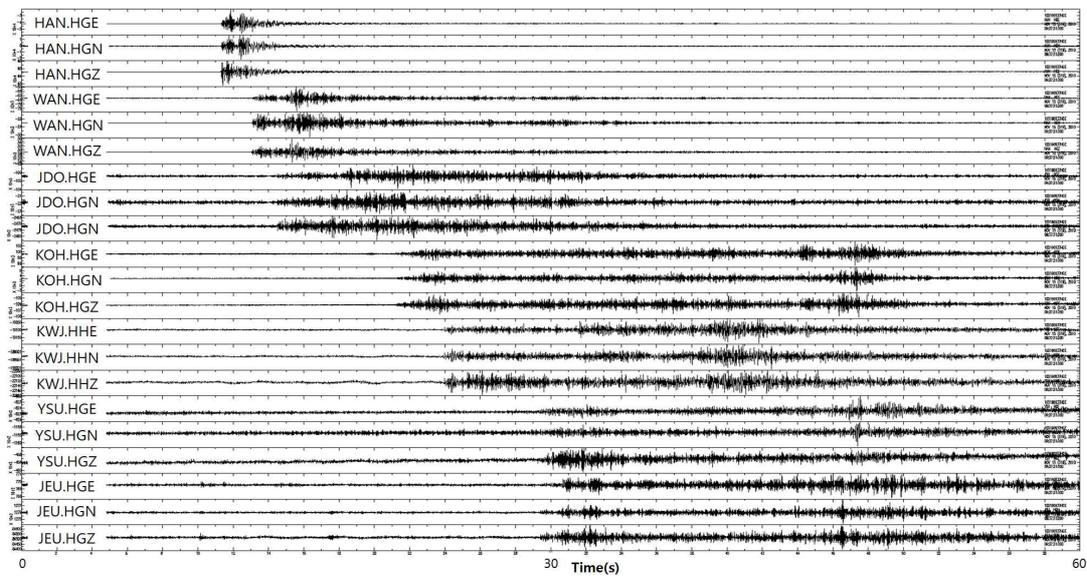


Figure 3.1.11 Haenam quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

### 3.1.3.3.3 포천 임시지진관측소

경기도 포천시 영주면에 3 개의 채석장이 모여 이루어진 채석단지 부근에 임시지진관측소를 설치·운영하였다. 임시지진관측소와 가장 가까이 있는 채석장과의 거리는 약 600 m이며, 2011년 4월 1일부터 4월 19일까지 이 채석장에서의 과거 발파작업 날짜와 발파량은 Table 3.1.7와 같다. 발파시간은 오후 16시에서 18시 사이로 2010년까지 1 톤 이상의 발파를 하였지만, 분진 및 소음 등의 이유로 현재는 1 톤 미만의 발파를 하고 있다.

Table 3.1.7 Blasts in Pocheon quarry site

Date	Weight (kg)
2011. 4. 1.	800
4. 4.	500
4. 5.	800
4. 8.	800
4. 11.	800
4. 14.	800
4. 19.	800

포천 임시지진관측소는 채석장 인근에 위치한 농가의 창고를 빌려 사용하였다(Table 3.1.8, Figure 3.1.12.a, b). 인접한 지진관측소로는 기상청에서 운영 중인 연천(YOC), 철원(CWO), 동두천(DDC) 지진관측소가 위치해 있으며, 거리는 각각 26 km, 13 km, 16 km 떨어져있다(Figure 3.1.12.c, d).

Table 3.1.8 Blasts Pocheon temporary seismic station

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
PCY	위도	경도	2011. 5. 3 ~ 6. 14	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	37.9701	127.2142			

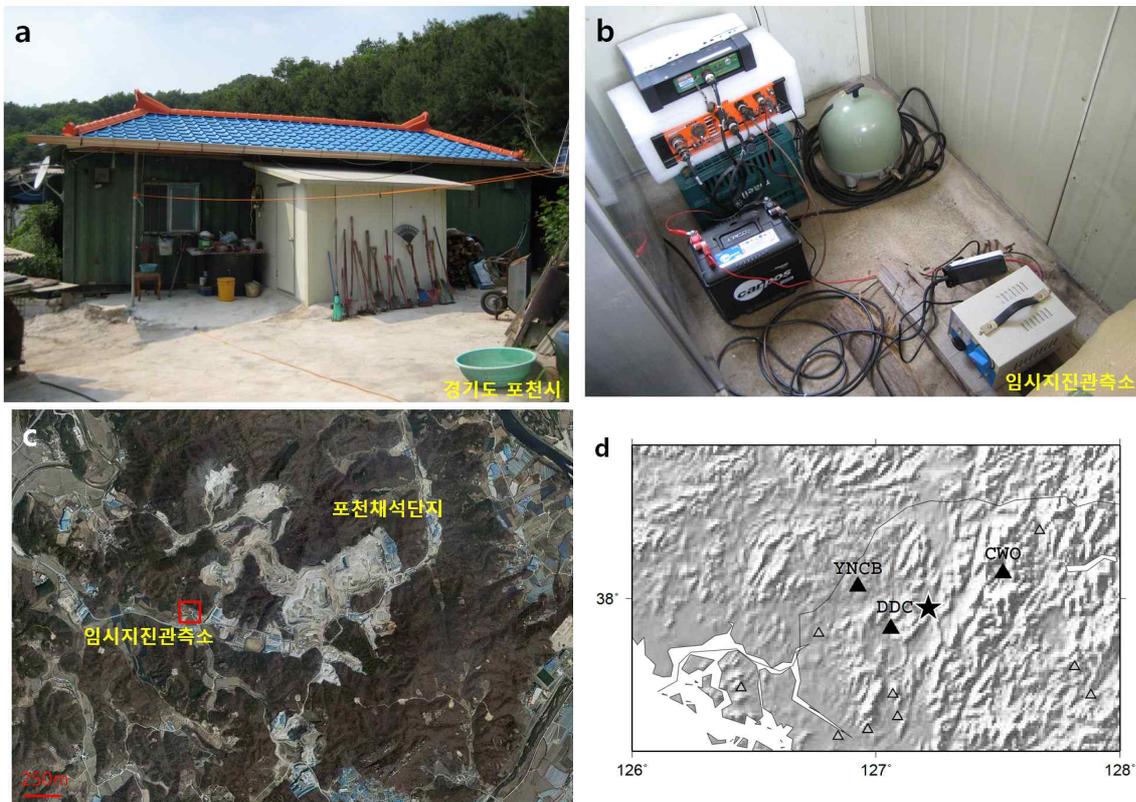


Figure 3.1.12 (a, b) Pocheon temporary seismic station, (c) satellite image of the quarry and (d) quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

#### 3.1.3.3.4. 영주 임시지진관측소

경상북도 영주시 장수면 성곡리에는 4 개의 채석장이 모여 채석단지를 이루고 있다. 4 개의 채석장 중 가장 큰 규모의 발파현황과 발파시간은 Table 3.1.10과 같으며 발파시간은 오후 12 시경으로 비교적 일정한 시간에 발파를 하고 있다. 임시지진관측소는 가장 가까운 채석장으로부터 약 1 km 떨어진 곳에 위치해 있으며, 현재 폐교를 개조한 어린이집에서 사용하지 않는 창고를 협조 받아 2011년 5월 2일부터 6월 23일까지 약 2 개월에 걸쳐 설치·운영하였다(Table 3.1.9). 임시지진관측소와 인접한 지진관측소로는 기상청에서 운영하는 영주(YOJ), 예천(YCH), 봉화(CHY), 충주(CHJ), 문경(MGY) 관측소가 위치해 있으며, 거리는 각각 10 km, 19 km, 38 km, 50 km, 44 km 떨어져있다(Figure 3.1.13).

Table 3.1.9 Blasts Yeongju temporary seismic station

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
YJS	위도	경도	2011. 5. 2 ~ 6. 23	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	36.7807	128.5311			

Table 3.1.10. Blasts in Yeongju quarry

Date	Time (UTC)	Weight (kg)	Date	Time (UTC)	Weight (kg)
2011. 4. 13	02:05	247	3. 26	03:00	300
4. 13	03:05	248	3. 26	03:05	200
4. 6	02:54	400	3. 12	02:50	580
4. 6	03:10	320	3. 12	03:00	285
4. 1	02:53	280	2. 12	03:00	686
4. 1	02:56	285	2010. 11.13	04:00 ~ 06:00	1100
3. 30	00:10	295	2010. 11.14	02:50	1160
3. 30	02:55	275	2010. 11. 1	02:50	990
3. 30	02:59	275			
3. 29	02:54	260			
3. 28	00:00	277			
3. 28	00:30	300			
3. 28	01:10	88			
3. 28	03:00	300			

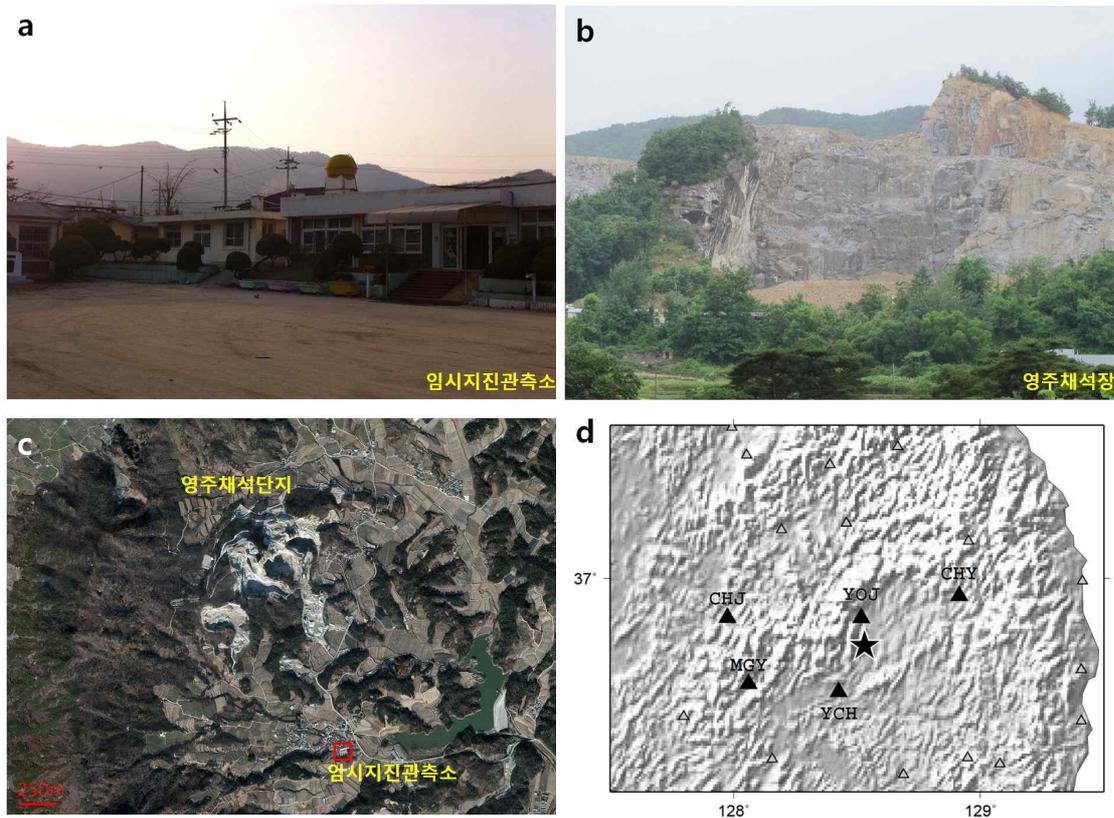


Figure 3.1.13 (a) Yeongju temporary seismic station, (b, c) satellite image of the Yeongju quarry and quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

### 3.1.3.3.5 울산 임시지진관측소

울산광역시 울주군 용촌면은 현재 2 개의 채석장이 운영 중에 있다. 임시지진관측소는 채석장 두 곳과 비교적 인접한 곳에서 설치하였고, 채석장에서의 과거 발파양은 Table 3.1.11와 같으며 발파시간은 현장실정에 맞춰 발파를 하여 일정치 않다.

Table 3.1.11. Blasts in Ulsan quarry

Date	Time (UTC)	Weight (kg)
2011. 4.18	06:31	150-200
4.18	06:03	
4.20	02:53	
4.26	05:54	
4.28	05:28	

임시지진관측소는 울산광역시 울주군 웅촌면 대북리에 위치한 농가의 창고로 도로와 비교적 떨어져 있으며, 농가에서 약 300 m 떨어진 곳에 채석장이 위치해 있다(Table 3.1.12). 인접한 지진관측소로는 기상청에서 운영하는 울산(USN), 부산(BUS), 밀양(MIY) 관측소가 위치해 있으며, 거리는 각각 25 km, 28 km, 42 km 떨어져있다(Figure 3.1.14).

Table 3.1.12 Blasts Ulsan temporary seismic station.

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
ULS	위도	경도	2011. 5. 13 ~ 6. 22	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	35.4863	129.2086			

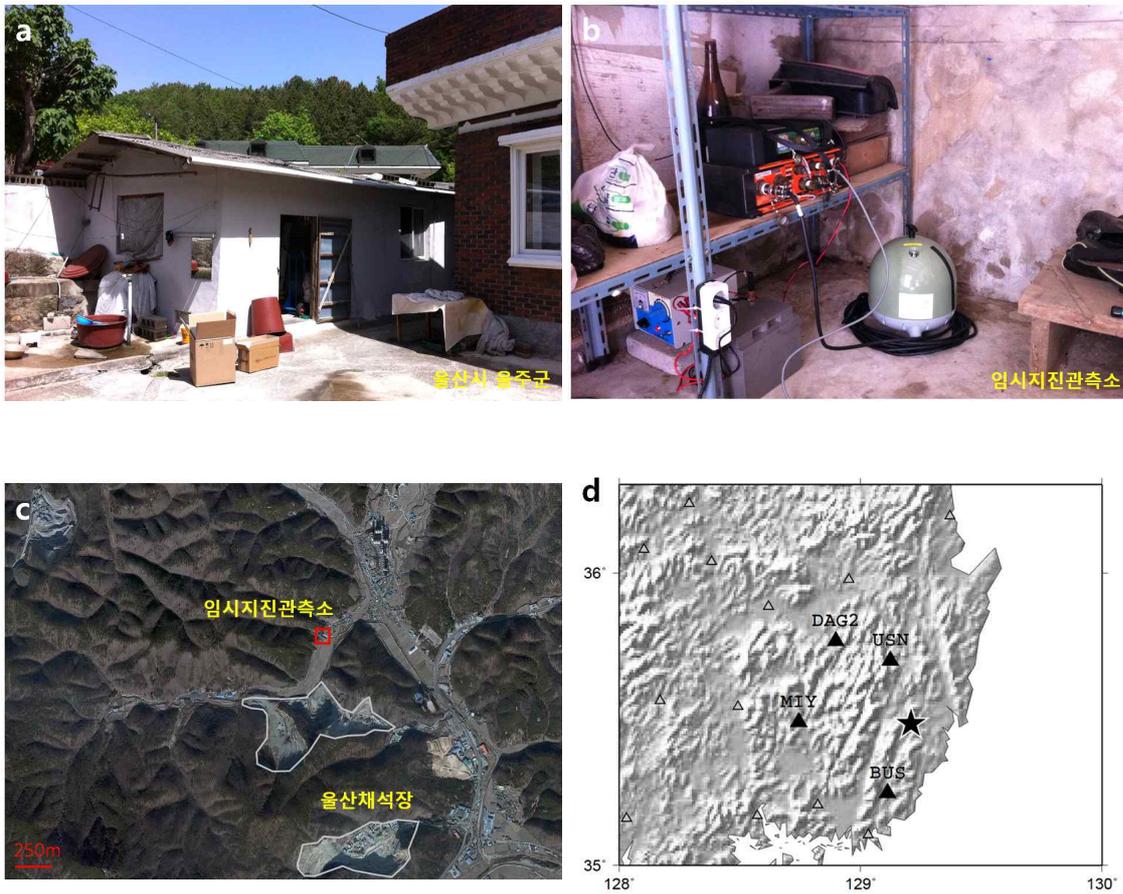


Figure 3.1.14 (a, b)Ulsan temporary seismic station, (c) satellite image of the Ulsan quarry and (d) quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

### 3.1.3.3.6 연천 임시지진관측소

경기도 연천군 전곡읍 간파리에 위치한 채석장은 임시지진관측소와 약 500 m 떨어진 곳에 위치해 있으며, 임시지진관측소는 인근 농가의 협조를 얻어 운영하였다(Table 3.1.13, Figure 3.1.15). 연천채석장은 연천군에 위치한 세 곳의 채석장 중 가장 규모가 큰 곳으로 발파시간은 오후 16시경으로 비교적 일정한 시간에 발파를 하는 곳이다. 임시지진관측소는 2011년 6월 15일부터 6월 24일까지 운영하였으며 강원도 횡성군 횡성채석장의 발파작업 일정에 따라 약 2 주간 철수한 뒤 7월 12일 재설치하여 7월 30일까지 운영하였다. Figure 3.1.16은 임시지진관측소 운영기간 중 6월 22일 12시 22분경 연천채석장에서 있었던 발파파형으로 인근 기상청의 동두천 지진관측소

(8 km)를 비롯하여 연천(13 km), 철원(19 km), 문경(24 km), 노원구(30 km), 중랑구(38 km) 지진관측소에서 발파파형이 관측되었다(Figure 3.1.15.d).

Table 3.1.13 Blasts Yeoncheon temporary seismic station

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
YOC	위도	경도	2011. 6.15 ~ 6.24, 7.12 ~ 7.30	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	37.9546	127.0202			

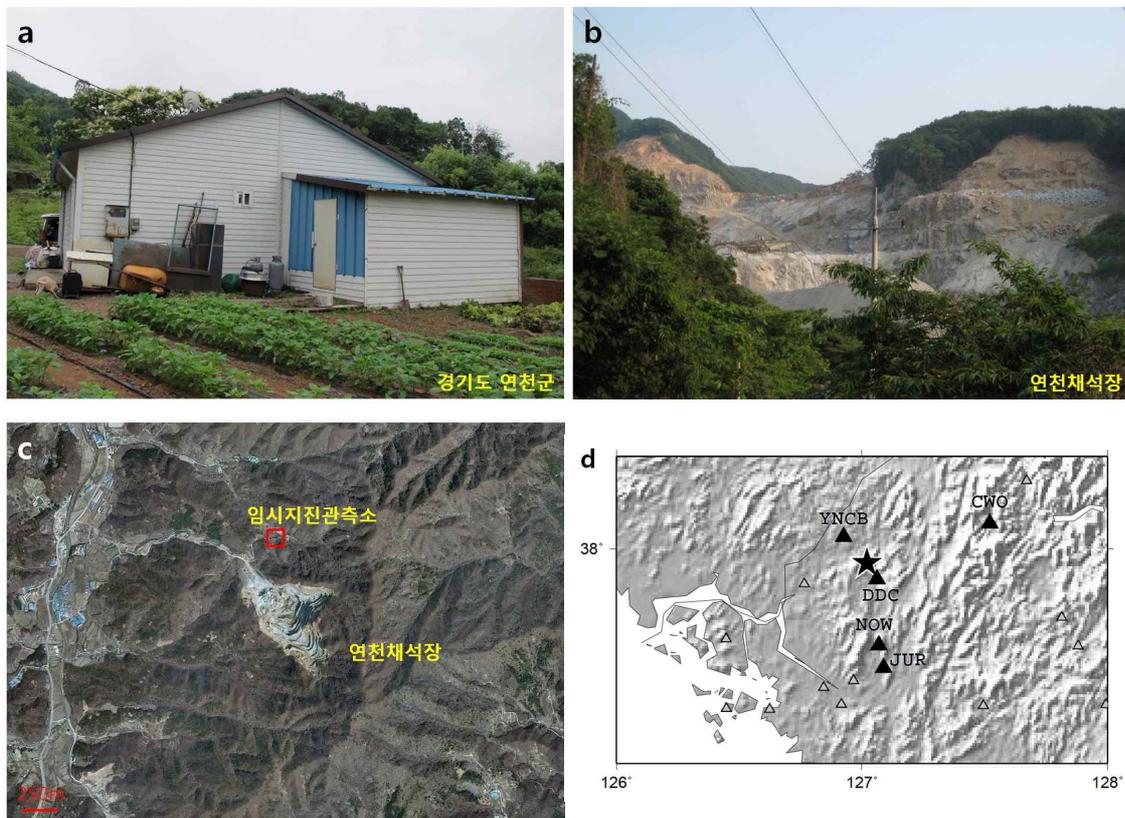


Figure 3.1.15 (a) Yeoncheon temporary seismic station, (b, c) satellite image of the Yeoncheon quarry and (d) quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

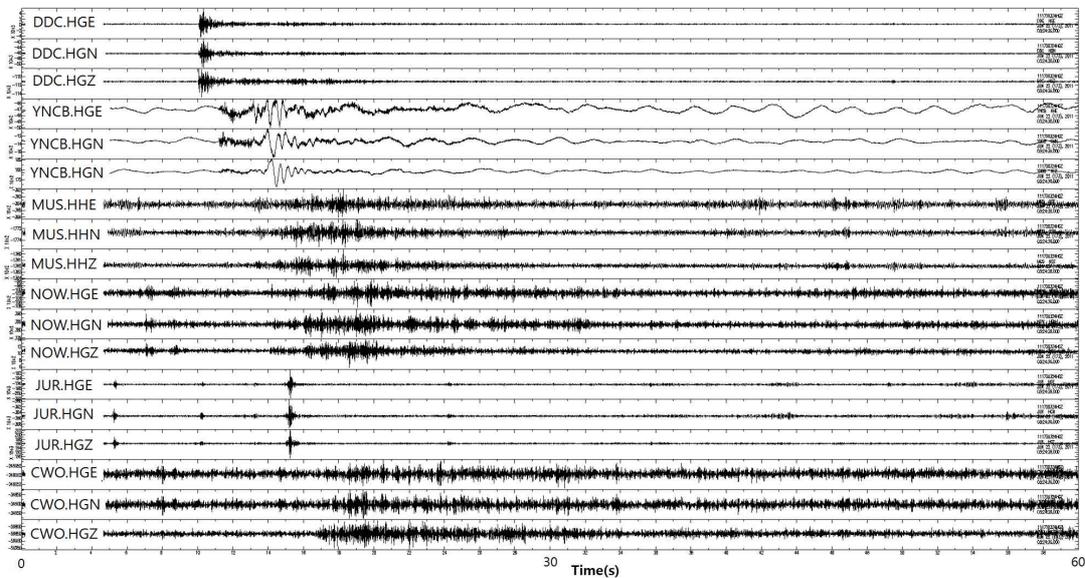


Figure 3.1.16 Yeoncheon quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

### 3.1.3.3.7 황성 임시지진관측소

강원도 황성군 황성읍에 위치한 채석장에서 실시한 2011년 6월 29일 약 1 톤 가량의 발파작업에 맞춰 채석장 부근에 임시지진관측소를 설치하였다. 이번 발파작업을 위해 한국해양연구원에서는 임시지진관측소 3 곳을 운영하였으며 더불어 기상청 기상연구소의 협조를 얻어 5 곳의 임시지진관측소를 추가 설치하여 총 8 곳의 임시지진관측소를 운영하였다. 기상청의 임시지진관측소인 MRI5의 경우 채석장의 협조를 얻어 발파작업현장과 약 200 m 떨어진 곳에 임시지진관측소를 설치하였다(Table 3.1.14). 나머지 임시지진관측소 또한 인근의 기상청 지진관측소와의 거리 및 배치사항을 고려하여 설치·운영하였다(Figure 3.1.17).

채석장에서의 발파작업은 6월 29일 17시 46분경과 17시 56분경 두 차례에 걸쳐 이루어졌으며(Figure 3.1.18), 1차 발파작업에 사용된 화약의 양은 약 1 톤 가량 사용되었다. 1차 발파작업의 경우 기상청의 황성(HES), 원주(WJU), 춘천(CHC), 이천(ICN), 대관령(DGY2) 지진관측소에서 그 신호가 감지되었으며(Figure 3.1.19), 거리는 각각 6 km, 15 km, 31 km, 52 km 떨어진 곳에 위치해 있다(Figure 3.1.17). 2차 발파작업의 경우 화약양이 적은 관계로 그 신호가 감지되지 않았다. 또한 임시지진관측소 운영 기간 중 4 개 이상의 지진관측소에서 발파파형이 관측된 경우로는 7월 1일과 5일, 7일, 11일이며 총 4 회에 걸쳐 관측되었다.

Table 3.1.14 KMA temporary seismic station

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
MRI5	위도	경도	2011. 6.28 ~ 7.12	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	37.5074	127.9394			

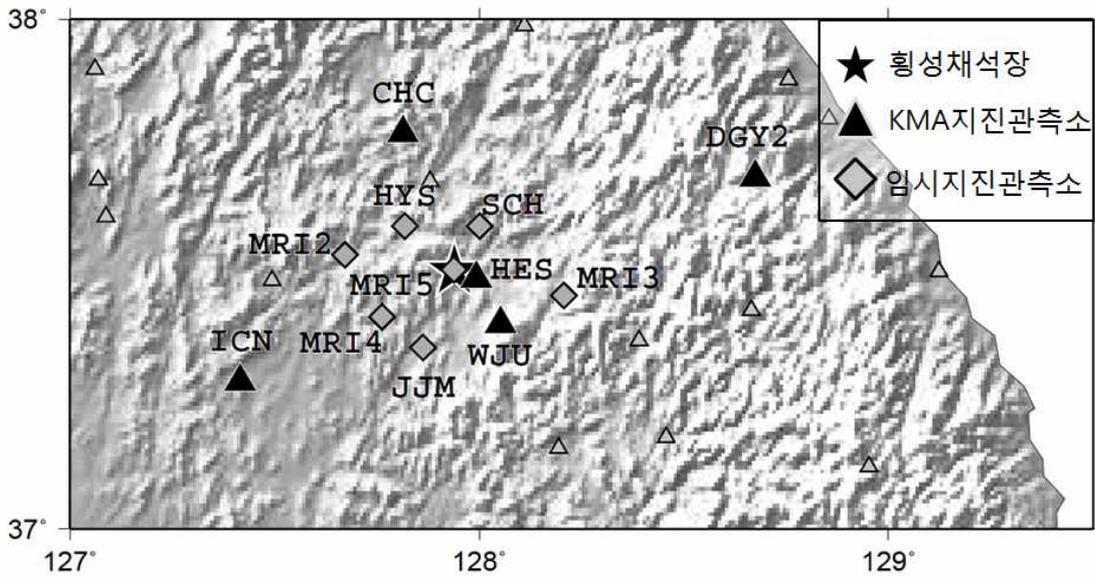


Figure 3.1.17 Hoengseong quarry and quarry blasting waveforms recorded KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations, ◇ : temporary seismic stations).



Figure 3.1.18 Blasting site in Hoengseong quarry.

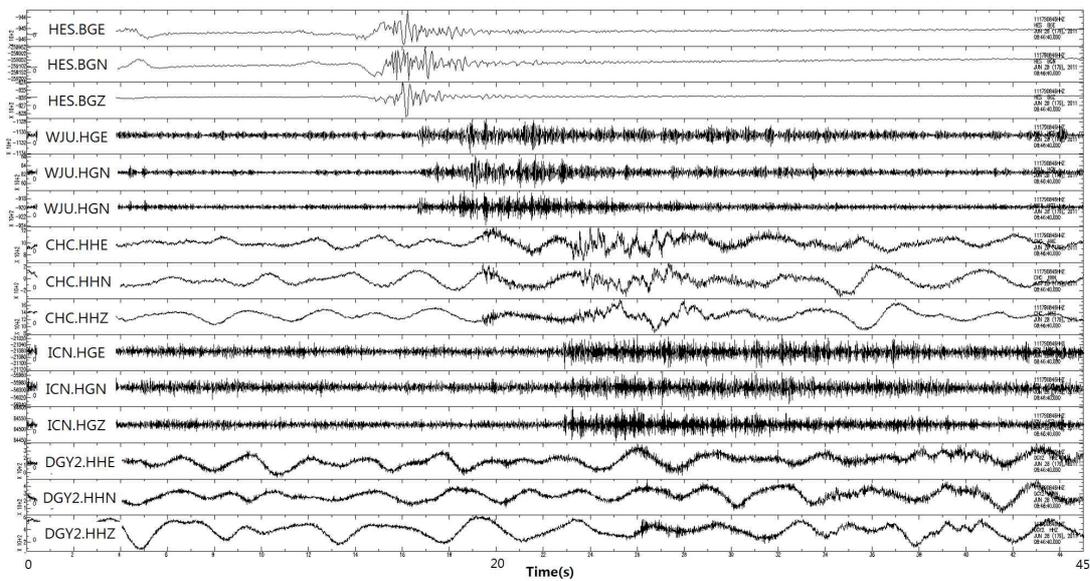


Figure 3.1.19 Hoengseong quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

#### 3.1.3.3.7.1 임시지진관측소 현황

한국해양연구원에서 운영한 임시지진관측소는 횡성채석장을 중심으로 기상청의 지진관측소와의 거리 및 분포현황을 고려하여 강원도 횡성군의 상창초교(폐교), 강원도 홍천군의 협신초교, 원주시 지정면의 농가의 협조를 받아 설치·운영하였다.

#### ◎ 상창초교 임시지진관측소

강원도 횡성군 공근면에 위치한 폐교인 상창초등학교는 현재 향토식품산업화센터로 사용되고 있으며, 사용하지 않는 창고를 협조 받아 임시지진관측소를 운영하였다. 횡성채석장과는 약 14 km 떨어진 곳에 위치해 있다(Figure 3.1.20.a, Table 3.1.15).

Table 3.1.15 Blasts SCH temporary seismic station

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
SCH	위도	경도	2011. 6. 28 ~ 7. 11	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	37.5951	128.0018			

◎ 협신초교 임시지진관측소

강원도 홍천군 남면에 위치한 협신초등학교 내 현재 사용하지 않는 관사에 임시지진관측소를 설치하였다. 채석장과는 약 11 km 떨어져 있다(Figure 3.1.20.b, Table 3.1.16).

Table 3.1.16 Blasts HYS temporary seismic station

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
HYS	위도	경도	2011. 6. 28 ~ 7. 11	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	37.5960	127.8190			

◎ 지정면 임시지진관측소

강원도 원주시 지정면에 위치한 전원주택의 지하실에 임시지진관측소를 설치하였으며, 황성 채석장과는 약 18 km 떨어진 곳에 위치해 있다(Figure 3.1.20.c, Table 3.1.17).

Table 3.1.17 Blasts of JJM temporary seismic station

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
JJM	위도	경도	2011. 6. 28 ~ 7. 11	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	37.3572	127.8626			



Figure 3.1.20 Temporary seismic stations installed around Hoengseong quarry (a : Sangchang elementary school, b : Hyubshin elementary school, c : farm).

### 3.1.3.3.8 단양 임시지진관측소

충청북도 단양군에 위치한 석회석 채석단지는 과거 석회석산업 특화사업단지로 지정되었을 만큼 그 사업 규모가 매우 큰 지역에 위치해 있다. 단양군에 위치한 석회석 채굴채석장은 노천채굴을 하는 3 곳의 채석장과 갱내채굴을 하는 갱내채굴채석장 한 곳이 있다. 갱내채굴을 하는 곳의 경우, 임시지진관측소와는 약 5 km 떨어진 곳에 위치해 있으며, 지표면에서 약 200 m 깊이의 갱내에서 발파작업을 하고 있다. 발파작업은 오후 12시와 17시경으로 비교적 일정한 시간에 발파작업을 하고 있으며, 화약량은 약 200~300 kg 으로 지발당 장약량은 20~30 kg으로 발파작업을 하고 있다(Table 3.1.18). 노천채굴을 하고 있는 채석장 3 곳의 경우 그 규모가 한국 시멘트 생산량의 상위권을 차지하고 있을 만큼 규모가 매우 크며 발파양 또한 큰 편이다. 이 중 임시지진관측소와 가까운 채석장 두 곳의 경우, 매 오후 12시경 약 1 톤 가량의 폭약을 사용하여 발파작업을 하고 있다.

임시지진관측소는 단양군 가곡면 여천리에 위치한 마을창고로서 노천 채석사업장과는 약 500 m 떨어져 있으며, 갱내채굴장과는 약 5 km 떨어진 곳에 위치해 있다(Figure 3.1.21.a, b, Table 3.1.19). 임시지진관측소 운영기간은 7월 12일부터 9월 5일까지 약 2개월간 운영되었다. 임시지진

관측소 운영기간 중 관측된 채석장의 발파작업으로 7월 25일 12시경 있었던 발파작업이 있으며, 기상청의 영월 지진관측소(22 km)를 비롯하여 제천(21 km), 영주(22 km), 충주(38 km), 예천(44 km) 문경(49 km), 원주(50 km) 지진관측소에서 발파파형이 관측되었다(Figure 3.1.22).

Table 3.1.18 List of Danyang underground blasts

underground blasts		
Date	Time (UTC)	Weight (kg)
2011. 8. 5	08:00	235
8. 8	08.:20	205
8. 10	03:20	245
8. 12	03:50	295
8. 13	08:00	265
8. 19	07:30	220
8. 24	02:20	215
8. 25	03:40	330
8. 26	03:00	235
8. 30	03:10	280
8. 31	08:40	310

Table 3.1.19 Blasts Danyang temporary seismic station

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
DAY	위도	경도	2011. 7. 12 ~ 9. 5	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	37.0247	128.3584			

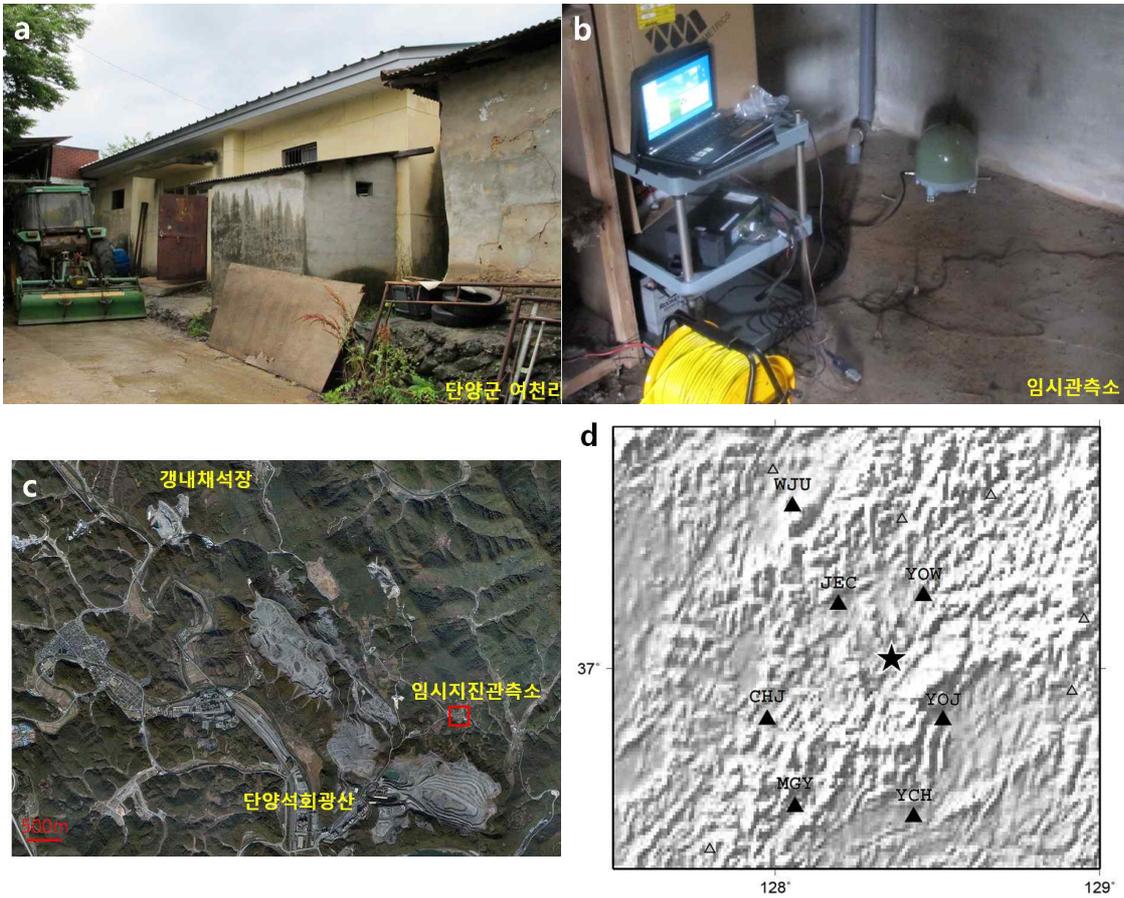


Figure 3.1.21 (a, b) Danyang temporary seismic station, (c) satellite image of the Danyang quarry and (d) blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

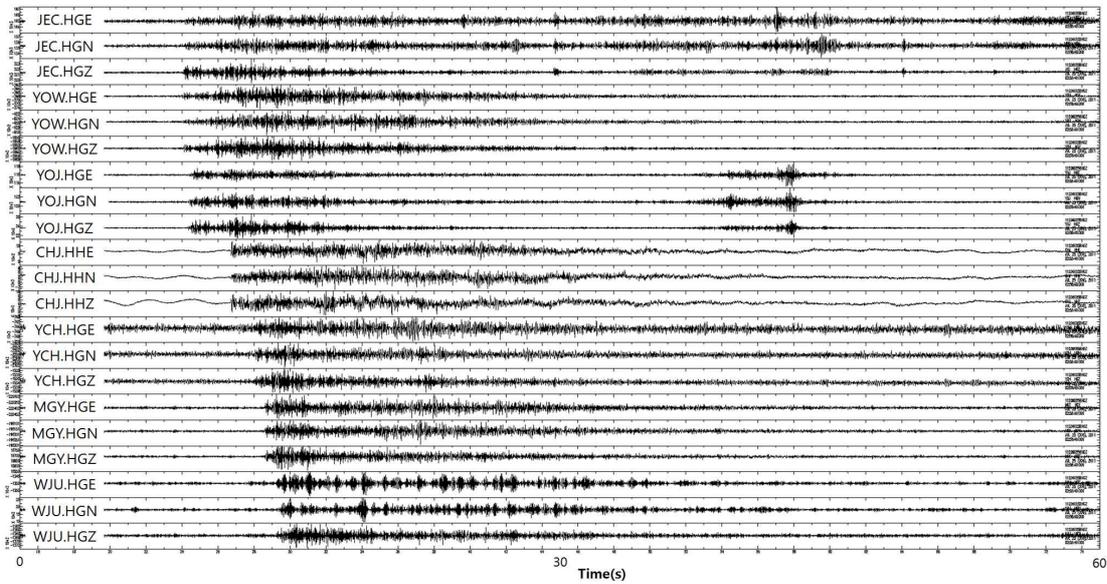


Figure 3.1.22 Danyang quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

### 3.1.3.3.9 익산 임시지진관측소

전라북도 익산시 낭산면 낭산리에 4 개의 채석장이 모여 채석단지를 이루고 있다. 임시지진 관측소는 인근 낭사리 마을에 위치한 마을회관에 설치하였다(Table 3.1.20, Figure 3.1.23.a). 임시지진관측소는 2011년 7월 12일부터 9월 6일에 걸쳐 운영하였으며, 임시지진관측소 운영기간 중 관측된 발파작업으로 7월 22일 12시경 있었던 발파작업이 있다. 기상청의 군산 지진관측소(23 km)를 비롯하여, 전주(27 km), 부여(27 km), 대전(47 km), 정읍(62 km) 지진관측소에서 발파파 형이 관측되었다(Figure 3.1.24).

Table 3.1.20 Blasts Iksan temporary seismic station

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
IKS	위도	경도	2011. 7. 12 ~ 9. 6	Trillium 240 3-component seismometer	Q330
	36.0431	127.0406			

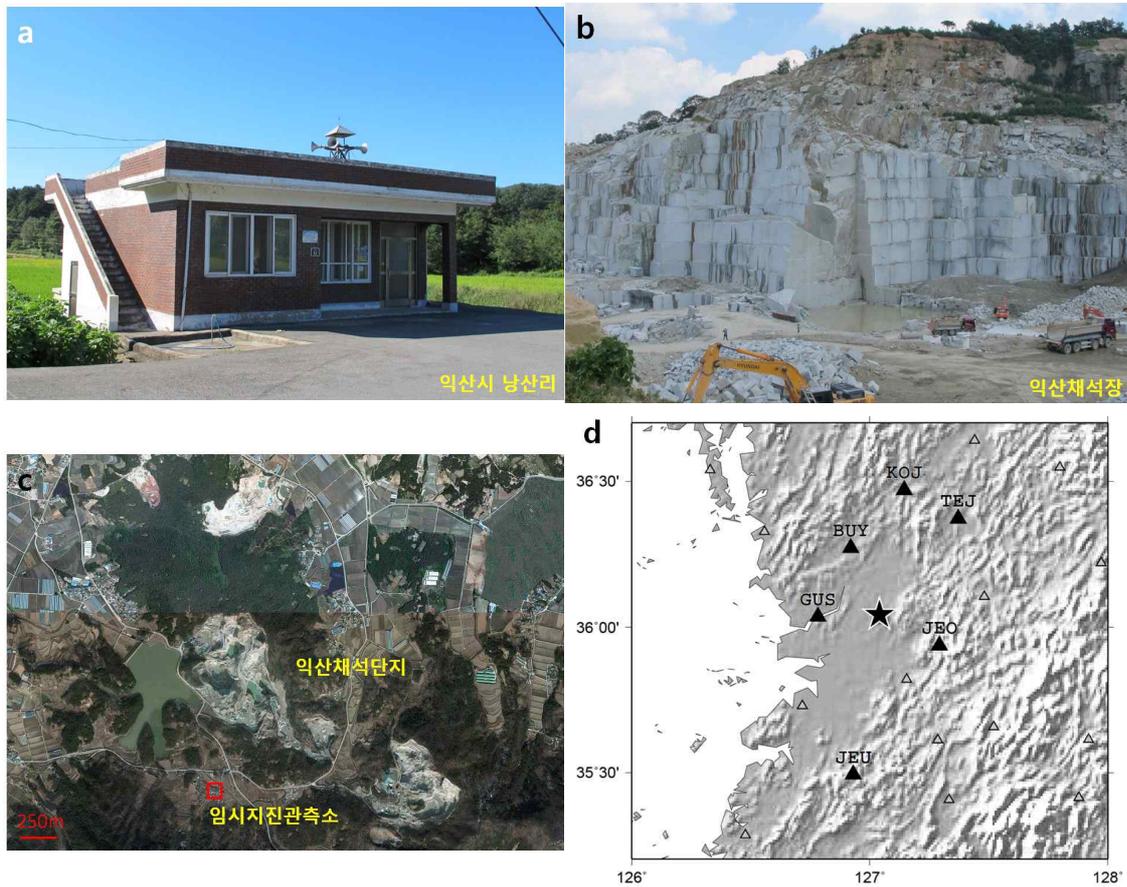


Figure 3.1.23 (a) Iksan temporary seismic station, (b, c) satellite image of the Iksan quarry and (d) blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

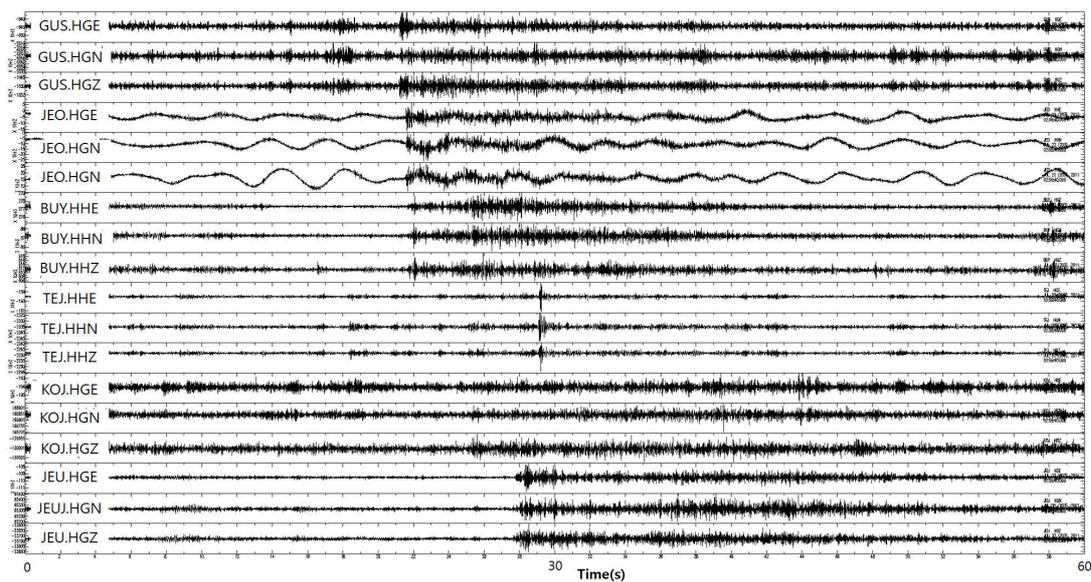


Figure 3.1.24 Iksan quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

### 3.1.4 GT 자료수집을 위한 임시지진관측소 운영

이미 언급한 바와 같이 GT0 자료로 사용하기 위해서는 정확한 시간과 위치 정보를 알고 있어야 한다. 그러나 일반적으로 GT0 자료로 사용하기 위해 정확한 발파시간정보를 현지의 채석장에서 획득 하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 채석장 인근에 임시지진관측소를 설치·운영함으로써 비교적 정확한 발파시간과 발파파형을 획득하였다. 이를 위하여 전국에 분포해 있는 채석장 중 비교적 규모가 크고, 발파양과 발파횟수가 많은 곳을 선정하여 2013년 10월 23일부터 10월 24일까지 전남 장성, 2013년 11월 2일 전북 고창에 임시지진관측소를 설치 운영하였다.

#### 3.1.4.1 장성 임시지진관측소

전라남도 장수군에 위치한 채석장에 임시지진관측소를 설치하였다. 이 채석장은 1톤 이상의 화약 발파가 비교적 자주 수행되는 곳이며, 발파 2주일 전 채석장을 방문, 발파계획 정보를 확보하고, 발파 당일 오전 발파 현장 부근에 임시지진관측소를 설치하였다(Table 3.1.21, Figure 3.1.25~3.1.27). 임시지진관측소는 2013년 10월 23일부터 10월 24일까지 운영하였으며, 임시지진관측소 운영기간 중 관측된 발파작업으로 10월 23일 02시 58분 13.98초에 수행된 발파작업에는 약 170kg의 비교적 적은 양의 화약이 사용되어 기상청 지진관측망에 관측기록이 좋지 않다. 2013년 10월 24일 02시 55분 53.35초에 수행된 발파작업에는 약 1톤의 화약이 사용되어 주위의 기상청 지진관측소 고창(GOCB), 정읍(JEO2), 광주(KWJ), 남원(NAWB)에서 발파파형이 관측되었다(Figure 3.1.24).

Table 3.1.21 Temporary seismic station at Jangsung quarry site

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
GTJS	위도	경도	2013. 10. 23 ~ 10.24	Nanometrics Trillium Compact	Taurus
	35.3624	126.8739			



Figure 3.1.25 Jangsung quarry site.

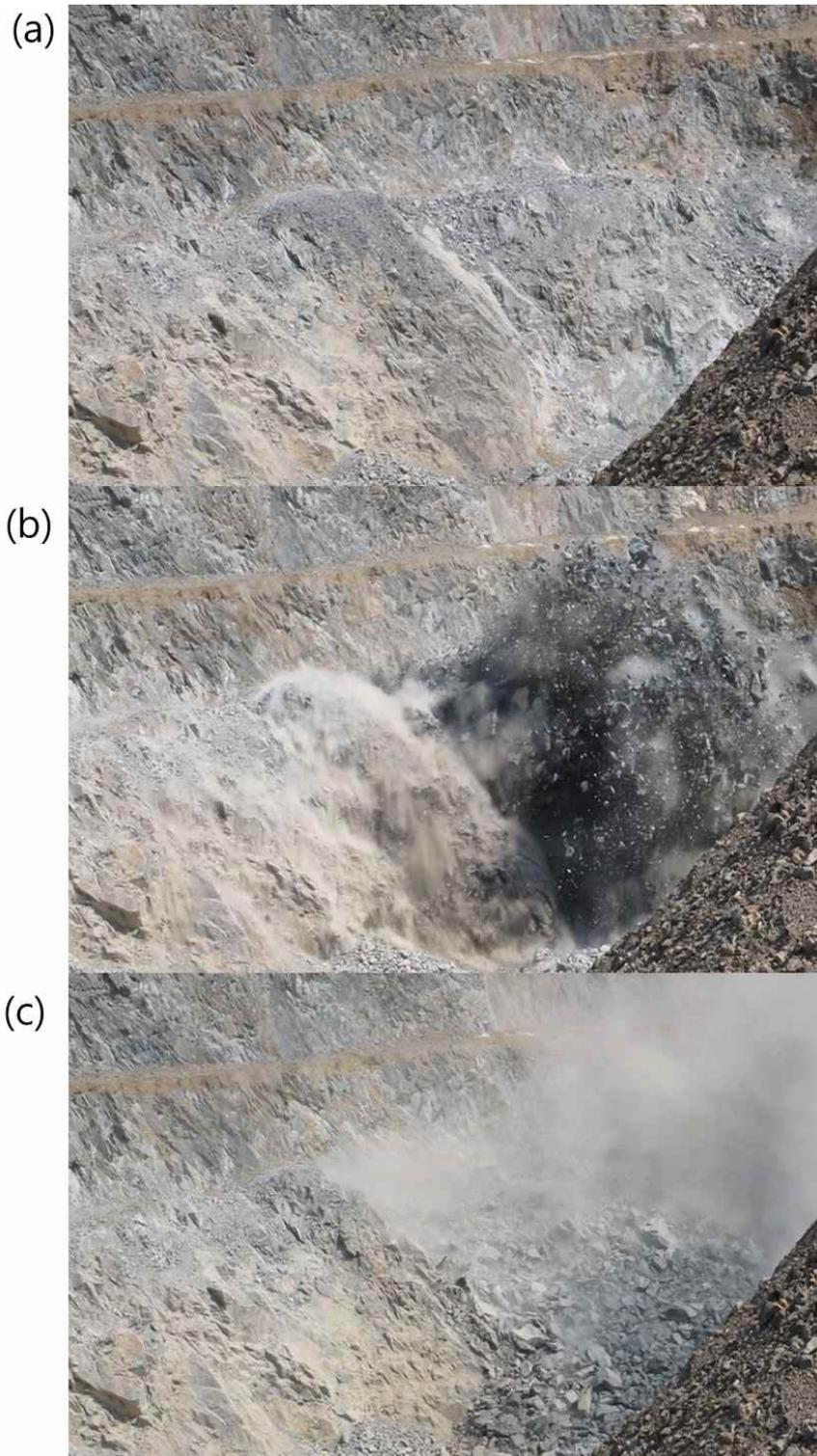


Figure 3.1.26 Explosion at Jansung quarry site.

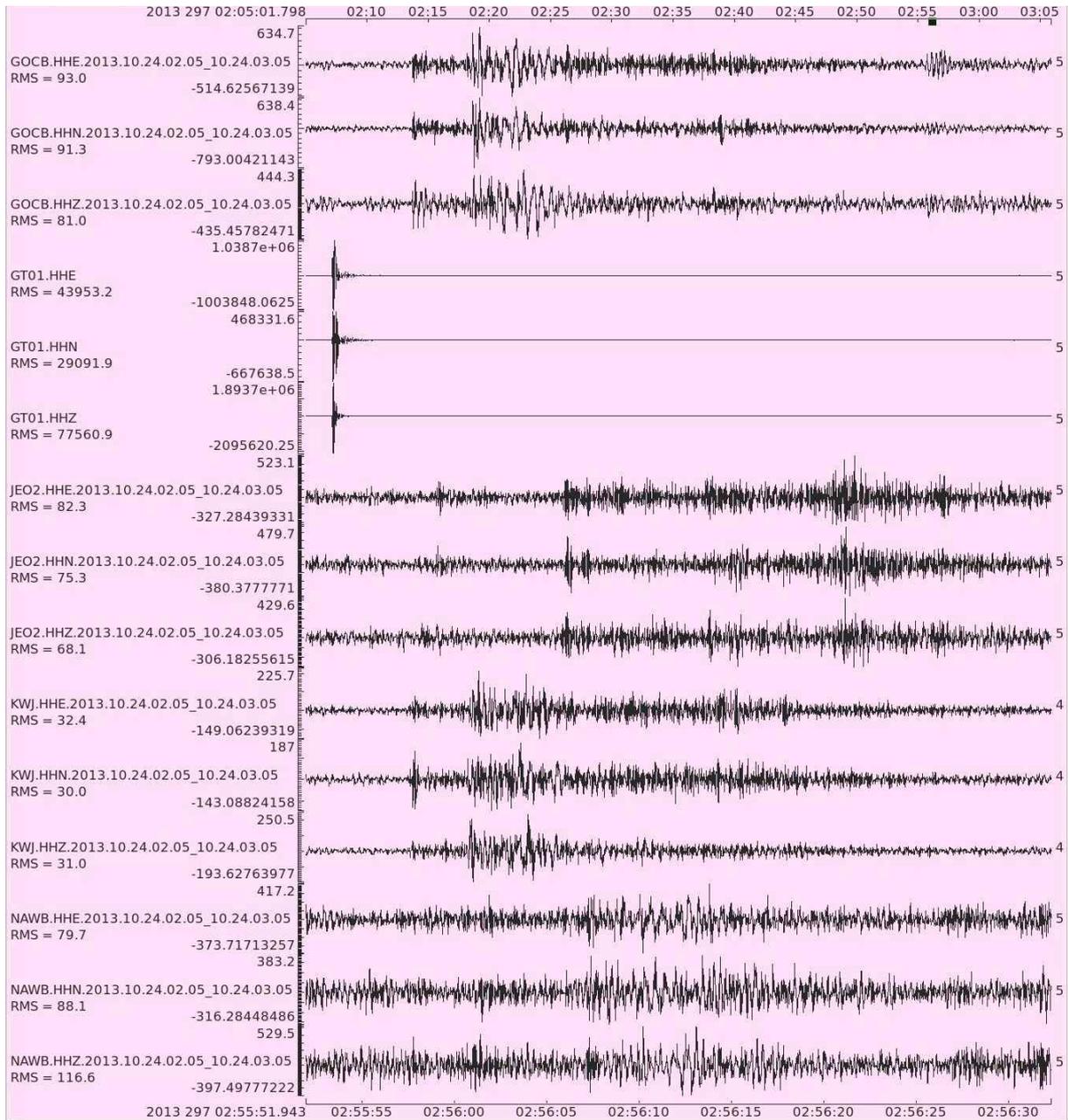


Figure 3.1.27 Waveforms recorded at KMA seismic station after the Jangsu quarry blast.

### 3.1.4.2 고창 임시지진관측소

전라북도 고창군에 위치한 채석장에 임시지진관측소를 설치하였다. 이 채석장은 대규모 화약 발파가 비교적 자주 수행되는 곳이며, 발파 관측 전 채석장을 방문, 1톤 이상의 발파계획이 수립될 경우 정보를 제공해 줄 것을 요청하였다. 채석장측에서는 2013년 11월 2일 발파예정을 통보해 왔으며, 당일 새벽 발파 현장 부근에 임시지진관측소를 설치하였다(Table 3.1.22, Figure 3.1.23.a). 2013년 11월 2일 01시 56분에 수행된 발파작업에는 약 1.5톤의 화약이 사용되어 주위의 기상청 지진관측소 BOSB, GOCB, JEO2, JEU, JWJ, SMKB, SUCA에서 발파파형이 관측되었다(Figure 3.1.24).

Table 3.1.22 Temporary seismic station at Gochang quarry site

CODE	위치		운영일시	센서	기록계
GTGC	위도	경도	2013. 11. 02	Nanometrics Trillium Compact	Taurus
	35.5339	126.6402			



Figure 3.1.28 Gochang quarry site

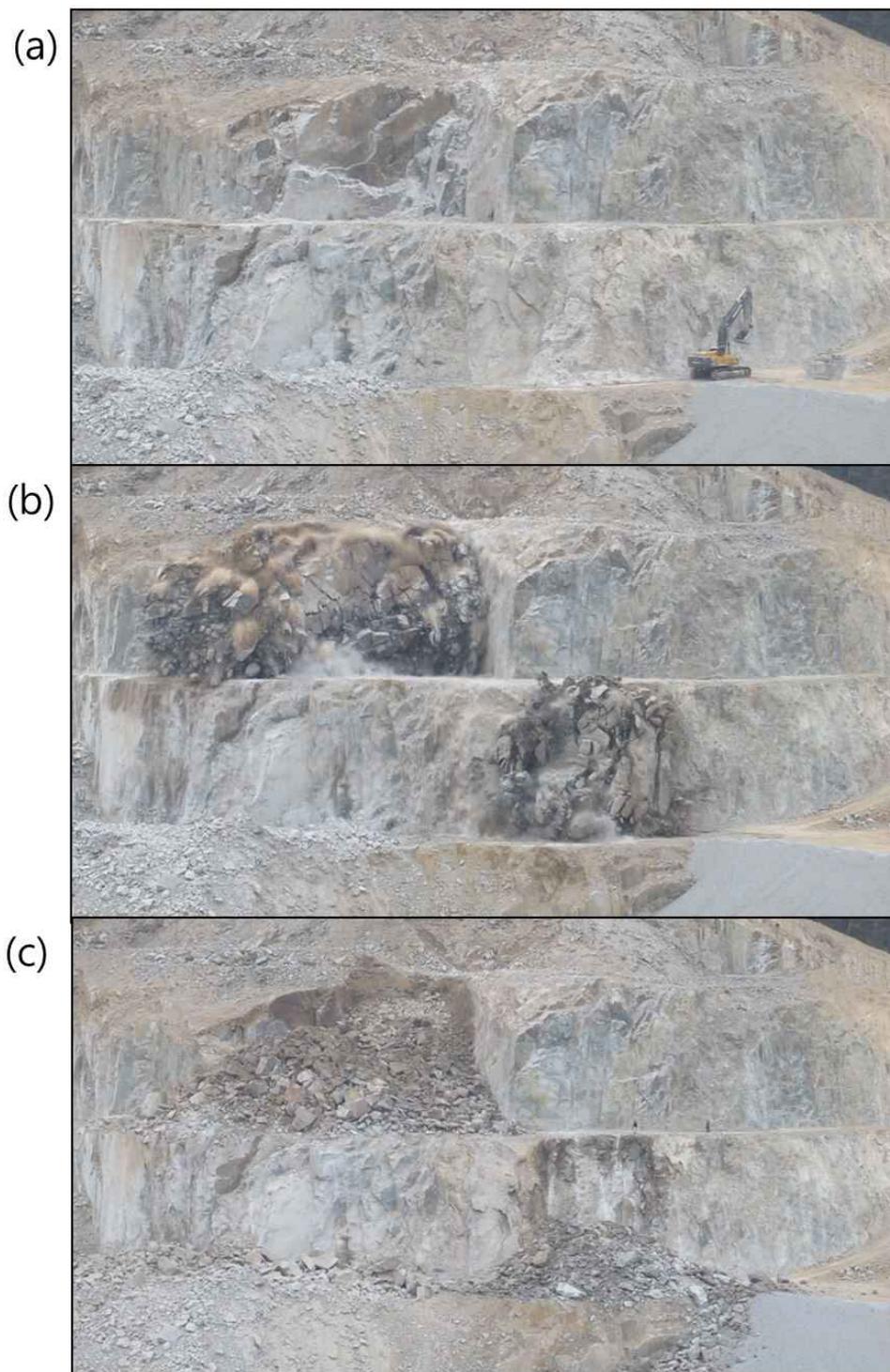


Figure 3.1.29 Explosion at Gochang quarry site.

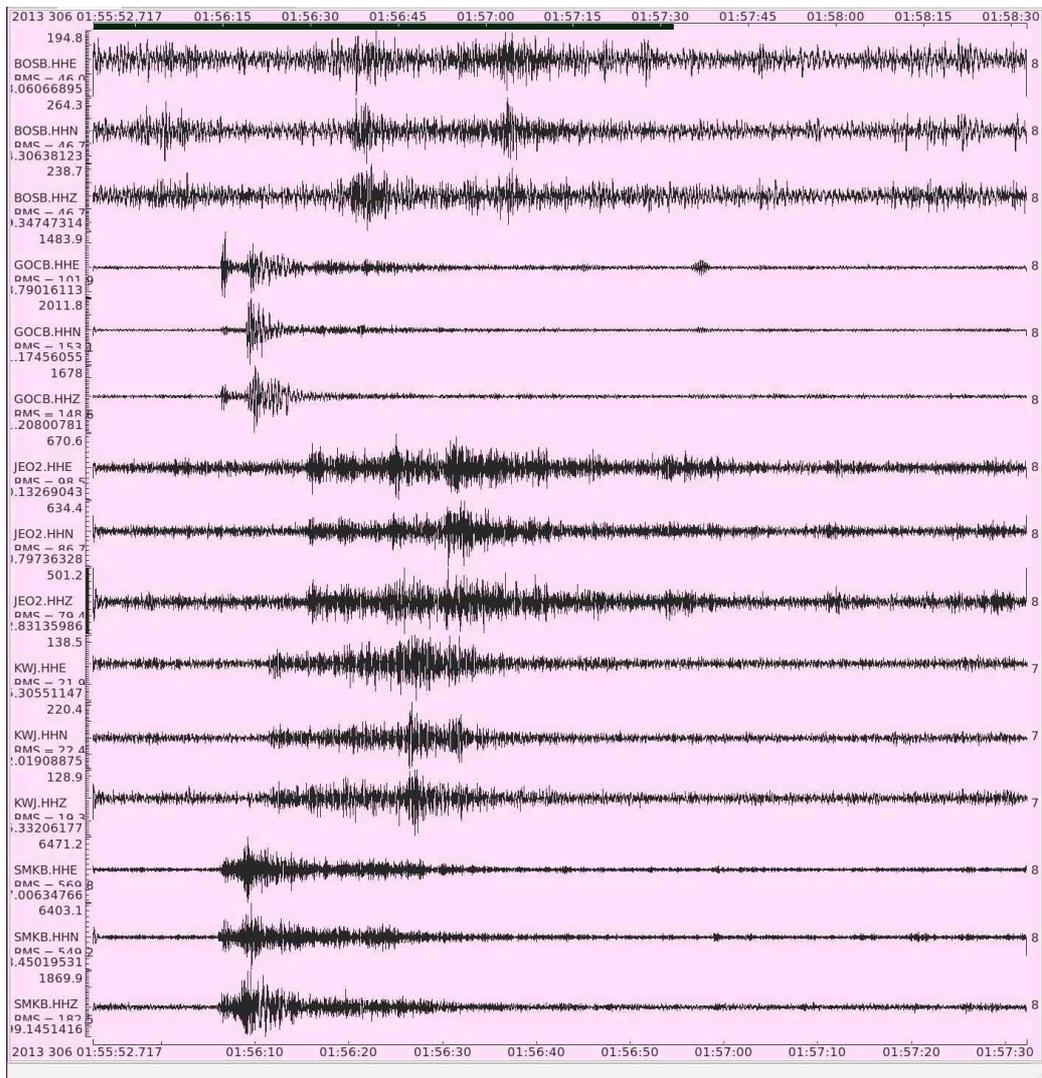


Figure 3.1.30 Waveforms recorded at KMA seismic station after the Jangsu quarry blast.

### 3.1.5 국내 GT5 수준 이벤트 관측자료 선별 및 목록화

우리나라에서는 1905년 계기지진이 시작된 이래, 1963년 미국지질조사소(United States Geological Survey)의 세계지진관측망(WWSSN: World-Wide Standardized Seismograph Network) 구축사업과 1978년 규모 5.0의 홍성지진, 1996년 영월지진, 1997년 경주지진 발생을 계기로 현대적 디지털 지진관측망 구축사업이 시작 및 추진되었다. 꾸준한 지진관측환경 개선사업의 수행결과, 현재 기상청에서는 1 개소의 초광역 관측소, 18 개소의 광지역 관측소, 32 개소의 단주기 관측소, 112 개의 가속도 관측소로 이루어진 국가지진관측망(Korea National Seismic Network, KNSN)을 운영하고 있다. 현재 기상청에서는 지진발생 시 빠르고 정확하게 지진의 발생사실을 감지하고, 빠른 시간 내에 지진의 발생시간, 발생위치, 규모와 같은 지진원에 대한 정보

를 제공하고 있다. 하지만 아직까지 이러한 진원요소 정보에 대한 정량적 평가는 수행되지 않고 있다. 이에 박용철 등(2009)에서는 2008년 수행된 KCRT2008의 인공발파실험에서 관측된 인공지진자료를 사용하여 진원위치 재결정을 수행하였다. 분석된 자료를 이용하여 진원위치의 오차가 진원위치 5 km 이내의 한국형 GT5(Ground Truth 5 : 진앙의 위치가 5 km 이내의 오차로 결정된 것) 기준을 마련하였다. 박용철 등(2009)은 다음과 같은 조건을 만족할 경우 결정된 진앙의 위치는 오차범위 5 km 이하로 95%의 신뢰도를 가지는 결정값이라 정의하였다.

- 지진원이 관측된 관측소의 숫자가 최소한 8 개 이상.
- 진앙거리 30 km 이내에 최소한 1 개 이상의 관측소가 존재.
- primary azimuth gap이  $218^\circ$  이하이거나
- secondary azimuth gap이  $253^\circ$  이하.

이에 본 절에서는 2004년부터 2006년까지 기상청에서 발표한 지진목록 129 개에 대해 P파와 S파의 도착시간을 정밀하게 측정하여 박용철 등(2009)에서 제시한 KGT5의 기준을 만족하는 지진자료를 선별 및 목록화 하였다(Table 3.1.23).

Table 3.1.23 KGT5 earthquake catalogue for 2004–2006 (Pri. Azi : primary azimuthal gap, Sec. Azi. : secondary azimuthal gap, No. of Sta. : number of station)

Date	Time (UTC)	$M_L$	Lat.(°E)	Lon.(°N)	Pri. Azi.(°)	Sec. Azi.(°)	No. of Sta.
2004-01-05	6:11	2.9	36.20	127.00	61	87	40
2004-01-23	5:27	2.0	35.40	128.00	44	51	27
2004-01-29	20:22	2.4	35.90	128.50	48	72	23
2004-02-26	5:51	2.1	37.20	128.90	158	191	11
2004-04-26	13:29	3.9	35.80	128.20	57	65	43
2004-04-30	23:43	2.8	35.80	129.40	198	208	24
2004-05-30	21:45	2.2	37.00	129.30	202	230	9
2004-06-11	16:25	2.1	37.30	128.70	133	186	9
2004-07-14	20:37	2.1	36.40	127.30	89	103	21
2004-08-06	5:32	3.3	35.90	127.40	29	30	46
2004-08-13	22:42	2.7	37.60	126.50	120	198	22
2004-09-15	7:47	2.5	37.50	126.90	128	168	13
2004-09-24	1:40	2.5	33.40	127.10	232	242	10
2004-09-27	18:47	2.5	35.50	128.30	44	48	26
2004-10-04	6:24	2.0	35.50	128.30	88	91	14
2005-02-05	11:27	2.5	33.49	126.36	97	134	9
2005-05-15	7:22	2.6	38.13	125.60	190	197	11
2005-06-10	21:14	2.5	36.78	128.48	65	74	22
2005-06-10	12:49	2.4	36.73	128.48	69	76	27
2005-08-25	19:33	2.2	36.75	126.30	211	229	11
2005-09-07	17:11	2.1	37.09	127.86	76	87	15
2005-10-03	19:18	2.1	35.62	129.40	218	233	8
2005-10-23	1:02	2.5	34.97	127.07	77	85	30
2005-11-06	12:52	2.2	35.98	128.13	130	143	9
2005-11-15	9:10	3.0	37.20	128.79	128	141	28
2005-12-07	18:02	2.2	36.63	127.77	57	66	18
2005-12-25	3:58	2.4	34.74	127.22	82	100	18

Date	Time (UTC)	$M_L$	Lat.(°E)	Lon.(°N)	Pri. Azi.(°)	Sec. Azi.(°)	No. of Sta.
2006-01-19	22:53	2.0	37.19	128.77	90	92	31
2006-01-19	12:35	3.2	37.21	128.8	95	122	31
2006-01-21	11:29	2.1	36.33	127.26	59	98	17
2006-02-14	3:32	3.0	38.67	126.03	215	291	19
2006-02-28	18:52	2.3	36.22	127.66	64	95	22
2006-02-28	0:11	2.3	35.81	127.89	75	143	15
2006-03-11	4:52	2.1	37.13	126	212	253	15
2006-03-15	4:36	2.4	38.19	125.94	192	294	18
2006-03-19	14:03	2.0	36.33	127.34	91	133	29
2006-03-19	13:59	2.9	36.34	127.36	51	67	29
2006-03-23	7:42	2.5	38.32	127.3	220	241	15
2006-04-02	0:04	2.0	35.38	127.22	55	105	20
2006-05-08	6:59	2.4	36.22	129.54	214	277	12
2006-07-18	14:49	2.0	36.13	126.65	162	175	16
2006-07-25	23:29	2.5	35.79	127.89	44	61	36
2006-07-26	2:50	2.0	35.8	127.88	46	61	32
2006-08-01	12:57	2.0	35.74	127.82	60	76	13
2006-08-26	7:44	2.2	37.21	128.81	75	84	15
2006-10-04	5:29	2.2	36.67	127.67	25	43	33
2006-11-11	1:16	2.4	35.97	127.45	32	56	48
2006-12-04	0:51	2.7	36.46	127.92	22	30	39
2006-12-28	9:44	2.2	36.11	128.11	52	60	23

### 3.1.6 기상청 국가지진관측망 지진관측 역량

진원요소는 지진이라는 갑작스러운 에너지 방출 사건이 발생한 장소와 시간, 그리고 그 크기를 구체적이고 정량적으로 표시하는 것으로서, 지진의 가장 중요한 정보를 간단하고 정확하게 표시한다. 일반적으로 지진은 지하 깊은 곳에서 발생하기 때문에 그 발생위치를 추정하기 위해서는 지진 발생위치로부터 멀리 떨어져서 관측된 자료를 사용해야만 하고, 관측소가 지표면에만 분포하므로 진원위치로부터 한쪽으로 치우친 방향에서 관측된 자료만을 사용하게 된다. 지진 발생위치와 관측위치를 기하학적으로 보면 그 분포가 상당히 비정상적으로 분포하게 되며, 이러한 양호하지 않은 지진-관측소간의 불균형 분포는 지진발생위치 결정에, 특히 진원깊이 추정에 많은 어려움을 야기하게 된다. 진원요소(지진 발생위치와 시간)는 일반적으로 P파와 S파의 도착시간 관측값과 예상 도착시간 간의 차이를 최소화함으로써 결정된다. 이때 P파와 S파의 도착시간을 예상하기 위하여 대상지역 지하에서의 지진파 전달속도를 알고 있다고 가정한다. 즉, 진원요소는 지진파 도착시간 관측치와 예상치 간의 차를 최소화 시키는 위치와 시간이다.

진원요소결정에 영향을 끼칠 수 있는 가장 큰 오차원인에는 지진파 도착시간 측정의 오류, 지진파 전파시간 예측의 오류, 지진발생위치 결정의 비선형성 등이 있다. 지진파 도착시간 측정의 오류는 신호 대 잡음 비, 도착과형의 주된 주파수 대역, 자료 처리자의 숙련도 등에 기인할 수 있다. 지진파 전파시간 측정의 오류는 계산의 정확성(precision) 등에 영향을 받기도 하지만, 거의 전적으로 사용하는 속도모델에 기인한다고 할 수 있다. 마지막으로 언급하는 비선형성에 기인한 오차는 일반적으로 대부분의 지진발생위치 결정에 적용되지만, direct-search 방법을 사용할 경우에는 해당되지 않는다.

도착시간 측정의 오차를 정량화 하기위하여 최초에 도착시간 측정의 신뢰도에 따른 가중치를 부여하여 사용한다. 일반적으로 0부터 4까지 가중치 코드를 사용하는 것이 일반적인데, 도착시간을 0.1 초 신뢰 구간 내에서 측정가능하면 가중치코드 0, 0.5 초 신뢰 구간 내에서 측정가능하면 1, 1.0 초 신뢰 구간 내에서 측정가능하면 2, 2.0 초 신뢰 구간 내에서 측정가능하면 가중치코드 3을 부여한다. 신뢰구간이 2.0 초 이상이 되면 가중치 코드 4를 부여하며, 이 경우에는 지진발생위치 결정 자료로 사용하기에는 부적절하다고 간주한다.

실제 지진이 발생한 위치와 시간을 정확히 알 수 없으므로 결정된 진원요소 정확성 표시에는 상당히 주관적인 판단이 개입되는 경우가 많다. 그러므로 본 연구에서는 선행 연구자들이 주로 사용해온 방법을 정리하고 그 한계를 인식하며, 새로운 기준의 필요성을 제시하는 것을 목적으로 연구를 수행하였다.

### 3.1.7 진원요소 결정의 정확성

결정된 진원요소의 정확성을 표시하기 위하여 사용되는 방법에는, SEH (the horizontal 68% confidence limit in the least-well constrained direction), SEZ (the 68% confidence limit for depth) 등 오차추정치 (Error estimation), RMS (Root-means-squared of residuals between observed and calculated arrival times), Azimuthal Gap, Dmin (진앙과 가장 가까운 관측소 간의 거리) 등을 그 판단기준으로 사용한다. 이 기준은 사용자가 달리 적용할 수 있으며, 하나 혹은 그 이상의 방법을 복합적으로 사용하기도 한다. 이 기준 중 많이 사용되는 기준 일부를 표에 소개하였다(Table 3.1.24, 3.1.25, 3.1.26).

Table 3.1.24 Quality based on error estimates defined in Hypoellipse (Lahr, 1999)

Solution Quality	Larger of SEH and SEZ
A	$\leq 1.34$
B	$\leq 2.67$
C	$\leq 5.35$
D	$> 5.35$

Table 3.1.25 Quality based on many parameters used in SQD-HYPO71 quality (USGS, 1975)

Solution Quality	RMS	SEH	SEZ
A	$< 0.15$	$\leq 1.0$	$\leq 2.0$
B	$< 0.30$	$\leq 2.5$	$\leq 5.0$
C	$< 0.50$	$\leq 5.0$	
D	Others		

Table 3.1.26 Station distribution quality as defined in HYPO71. Dmin is the distance to the nearest station (USGS, 1975)

D	No.	Gap	Dmin
A	$\geq 6$	$\leq 90$	$\leq \text{Depth or } 5 \text{ km}$
B	$\geq 6$	$\leq 135$	$\leq 2 * \text{Depth or } 10 \text{ km}$
C	$\geq 6$	$\leq 180$	$\leq 50 \text{ km}$
D	Others		

### 3.1.8 결과 및 고찰

본 연구에서는 기존 GT 자료를 수집하는 한편 채석장을 중심으로 임시지진관측소를 운영하여 GT 자료를 확보하였다. 수집된 GT 자료의 경우 대부분 채석장에서의 발파작업과 인공지진을 발생시키기 위한 발파실험으로 자연지진에 비해 그 규모가 매우 작아, GT 자료로 활용하기 위한 검토가 필요하다. 이를 위해 HYPOELLIPSE 방법을 사용하여 진원위치를 결정하고, 기존 GT 자료 중 정확한 발파시간과 발파위치를 알고 있는 자료를 사용하여, 진원결정 시 가장 적합한 속도구조모형을 선별하였다.

기존 GT 자료 중 정확한 발파시간과 발파위치를 알고 있는 자료로는 한국지각구조연구팀(Korea Crust Research Team, KCRT)에서 2002년, 2004년과 2008년도에 수행한 한반도 지각 속도 구조 규명을 위한 실험의 일환으로 대규모 발파를 이용하여 인공적으로 지진파를 발생시키는 실험이 있다. 그 중 2008년 강화-영주-단양-영덕 축선에서 수행되었던 KCRT2008의 경우, KCRT 실험 중 가장 많은 8 개 지점에서 발파실험을 수행하였으며, 이때 사용한 화약의 양은 250 kg~1,500 kg에 이른다. HYPOELLIPSE 방법을 사용하여 8 개의 발파지점에 대하여 진원위치를 결정하였다. 사용된 속도구조모형은 김성균과 정부홍(1985), 김성균(1995), Chang and Baag (2005), 김상조와 김소구(1983), Lee (1979), IASP91, AK135로 총 7 개의 속도구조모형을 사용하였다. Lee (1979) 속도구조모형은 1936년 발생한 지리산지진( $M_L=5.0$ )의 P파와 S파의 도착시간을 이용하여 두 개의 층을 가진 단순한 지각모형을 제시하였다. 김상조와 김소구(1983)의 속도구조모형의 경우, 지리산지진(1936년), 홍성지진(1978년), 포항지진(1981년), 사리원지진과 울산지진(1982년)의 아날로그 자료를 이용하여 지각을 포함한 상부맨틀까지 세분화된 속도구조모형을 제시하였다. 김성균과 정부홍(1985)의 속도구조모형의 경우 경상분지를 포함한 남부지역에서 발생한 자연지진과 건설현장에서 발생하는 인공발파에 의한 주시자료를 사용하여 속도구조모형을 결정하였다. 김성균(1995)의 속도구조모형의 경우 중력, 지진파 주시자료 및 표면파 분산자료를 사용하여 한반도의 지각과 상부맨틀의 속도구조를 결정하였다. IASP91은 1987년 the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI)에 의해 지구내부의 지진위치와 위상식별 구분을 위하여 도출해낸 전지구적 속도구조모형이다. AK135 속도구조모형은 Kennett et al. (1995)에서 IASP91 모델을 개선한 모델로서 속도 구배(velocity gradient : 지구의 중심부에서 거리가 멀어짐에 따라 속도가 감소하는 정도)에서 S파 주행시간의 기준선을 향상시킨 전지구적 참조모형(global reference model)이다(Figure 3.1.25).

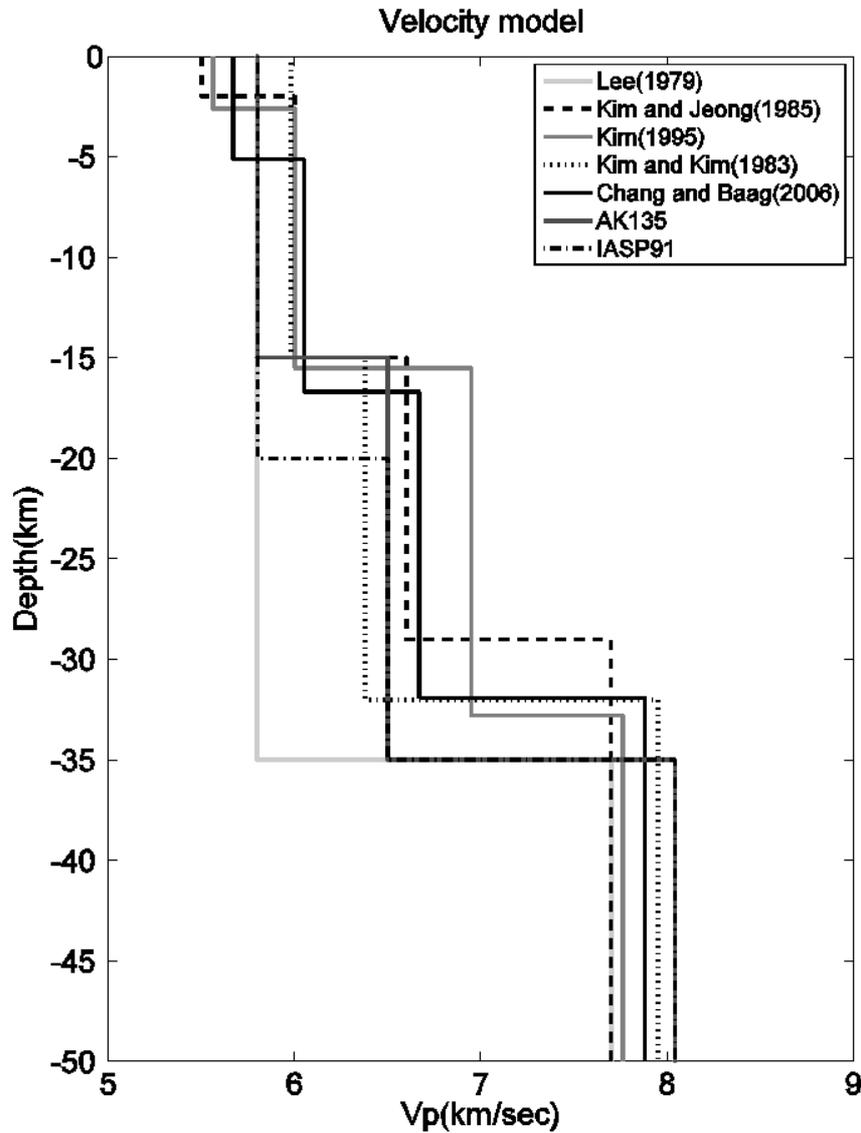


Figure 3.1.31 1-D P-wave velocity model.

발파 1의 경우, 총 26 개의 지진관측소에서 관측되었으며, primary azimuth gap (관측소와 관측소의 방위각 중 가장 큰 방위각)과 secondary azimuth gap (관측소와 관측소의 방위각 중 두 번째로 큰 방위각)은 각각 126°와 196°를 보였다. 진원위치 오차의 경우 Chang and Baag (2005) 모델이 약 500 m로 가장 작은 오차를 보였으며, 진원깊이 오차는 약 1.2 km를 보여주고 있다. 김성균과 정부홍(1985) 속도모델의 경우 1 km 미만의 진원위치 오차와 진원깊이 오차를 보여 비교적 정확한 결과를 보여주었다.

발파 2의 경우 총 32 개의 지진관측소에서 관측되었으며, primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각 32° 와 45° 로 발파파형이 관측된 지진관측소의 분포가 가장

조밀한 분포를 보여주었다. 진앙위치 오차와 진원위치 오차의 경우 김성균과 정부홍(1983), Chang and Baag (2005), 김상조와 김소구(1983)의 속도모델 모두 1 km 미만의 오차를 보였다.

발파 3의 경우 15 개의 지진관측소에서 관측되었으며, primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각  $62^\circ$ 와  $89^\circ$ 를 보였다. 진앙위치 오차의 경우 7 개 모델 모두 약 600 m 미만의 오차를 보여주었으며, 진원위치 오차의 경우 김성균과 정부홍(1985), 김성균(1995), 김상조와 김소구(1983)의 모델 모두 약 600 m의 오차로 비교적 정확한 결과를 보여주었다.

발파 4는 총 36 개 지진관측소에서 관측되었으며, primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각  $155^\circ$ 와  $179^\circ$ 를 보여주었다. 진원위치 오차의 경우 Chang and Baag (2005)의 속도모델에서 약 300 m의 오차로 비교적 정확한 결과를 보여주었으며, 이를 제외한 나머지 6 개 속도모델의 경우 1.6 km 이상의 진원위치 오차를 보여주었다. 다른 발파지점에 비해 큰 azimuthal gap과 진원위치 오차 결과의 이유로는 발파 4의 발파지점이 경상북도 영덕군으로 동해와 인접한 곳에 위치해 있어, 관측된 지진관측소가 서쪽방향으로만 치우쳐 위치해 있기 때문이다.

발파 5의 경우 총 18 개의 지진관측소에 관측되었으며, primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각  $54^\circ$ 와  $94^\circ$ 를 보여주었다. 진앙위치 오차와 진원위치 오차 결과 김성균과 정부홍(1985), Chang and Baag (2005)의 속도모델에서 약 200 m의 오차로 8 개 발파지점 중 가장 정확한 진원위치 결정의 결과를 보여주었다.

발파 6의 경우 총 21 개의 지진관측소에서 관측되었으며, primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각  $58^\circ$ 와  $65^\circ$ 로 발파파형이 관측된 지진관측소의 분포가 비교적 조밀한 편이다. 그러나 진앙거리 오차의 경우 평균 약 1.06 km로(7 개 속도구조모델 진앙거리 평균 오차의 값) KCRT2008 중 가장 큰 진앙거리 오차를 보여주었다. 이는 발파 6의 발파지점이 충청북도 제천시로 조밀한 지진관측소 내에 위치해 있지만 250 kg의 적은 발파양으로 인해 진원위치 결정 시 사용된 자료 중 P파의 시간이 명확치 않은 가중치코드 3의 자료가 다수 진원위치 결정 시 사용되었기 때문이다.

발파 7의 경우 총 28 개의 지진관측소에서 관측되었으며, primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각  $42^\circ$ 와  $69^\circ$ 로 관측된 지진관측소의 분포가 조밀한 편이다. 진앙위치 오차와 진원위치 오차 모두 김성균(1985)의 속도모델에서 약 650 m로 가장 작은 오차를 보여주었으며, 김성균과 정부홍(1983), Chang and Baag (2005)의 속도모델에서 진앙위치 오차와 진원위치 오차 모두 1 km 미만의 오차를 보여주었다.

발파 8의 경우 가장 적은 250 kg의 화약이 사용되었음에도 불구하고 가장 많은 37 개의 지진관측소에서 관측되었다. 진앙위치와 진원위치 오차결과, 김성균과 정부홍(1985), 김상조와 김소구(1983)의 속도모델 모두 600 m의 이하의 오차를 보여주었다.

7 개의 속도구조모델을 사용하여 진원위치를 결정한 결과, 김성균과 정부홍(1985) 속도모델의 진앙위치 오차와 진원위치 오차는 평균 770 m와 800 m로 7 개의 속도구조모델 중 가장 정확

한 결과를 보였으며, 발파시간 오차 또한 평균 0.065 초로 가장 작은 오차를 보여주었다. Lee (1979)의 속도구조모델의 경우, 진앙위치 오차와 진원위치 오차는 평균 802 m와 12.4 km이며, 발파시간 오차는 평균 0.406 초로 7 개 속도구조모델 중 가장 큰 오차를 보여주었다. HYPOELLIPSE 방법을 사용하여 진원위치를 결정할 경우 김성균과 정부홍(1985)의 속도구조모델을 사용하는 것이 가장 적합하다고 사료된다. 따라서 기존 GT 자료와 임시지진관측소 운영을 통해 수집한 자료를 사용하여 진원위치 결정시 김성균과 정부홍(1985)의 속도구조모델을 사용하여 진원위치를 결정하였다. 7 개 속도구조모델을 사용한 진원위치 결과는 Table 3.1.26에 정리하였다.

GT 이벤트 자료로 사용할 수 있는 기존 자료 중 경기도의 D 시험장에서 수행되었던 시추공 시험발파의 경우, 발파실험을 통해 관측된 발파파형은 인근의 철원 지진관측소를 포함하여 총 5 개의 지진관측소에서 관측되었다. primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각 224°와 232°이며, 진원위치결과 진앙위치 오차는 3 km의 오차를 보여주었다(Figure 3.1.26).

또한 전라북도 완주군에 위치한 채석장에서의 발파작업으로 이때 발생한 발파파형은 전주 지진관측소를 포함하여 총 7 개 지진관측소에서 관측되었다. primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각 84°와 188°이며, 진앙위치 오차는 800 m의 오차를 보여주었다(Figure 3.1.27).

전라남도 해남군에 위치한 채석장에서의 발파작업으로 총 7 개의 지진관측소에서 발파파형이 관측되었다. primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각 138°와 226°이며, 진앙위치오차는 3 km의 오차를 보여주었다(Figure 3.1.28).

본 연구에서는 2011년 5월 3일부터 9월 6일까지 총 4 개월 동안 전국에 걸쳐 분포하는 채석장과 채석장을 중심으로 임시지진관측소를 설치·운영하였다. 이를 위해 한반도를 총 12 개로 구역화(1° × 1°)하여 보다 효율적인 임시지진관측소 운영이 되도록 하였다. 임시지진관측소는 경기도 포천군, 경기도 연천군, 강원도 횡성군, 충북 단양군, 경북 영주시, 울산광역시 울주군과 전북 익산시로 총 7 개 지역이며, 12 개 구역화 중 5 개 구역에서 운영되었다. 울산광역시, 영주시, 포천시에서 설치·운영한 임시지진관측소의 경우 GT0 자료로 사용하기 위한 발파파형이 지진관측소에서 관측이 되지 않았다. 이들 채석장의 경우, 비교적 규모가 큰 발파작업을 하고 있지만, 한번에 많은 양의 화약을 발파하는 집중장약 방식의 발파가 아닌 많은 양의 화약을 분산하여 발파하는 분산 발파식의 발파로 인해 그 파형이 관측되지 않은 것으로 사료된다. 또한 발파파형이 관측된 연천채석장, 횡성채석장, 단양채석장과 익산채석장의 경우 모두 4 개 이상의 지진관측소에서 발파파형이 관측되었지만, 채석장에서 인접한 몇몇 지진관측소의 경우 발파파형이 관측이 되지 않은 곳이 있다. 이는 대부분의 발파작업이 낮동안의 시간에 이루어져 지진관측소 주변에서 발생하는 잡음에 의해 발파파형이 관측되지 않은 것으로 사료된다.

경기도 연천군에 위치한 연천채석장에서 관측된 발파작업으로는 2011년 6월 22일 12시 22분경 있었던 발파작업으로 총 6 개의 지진관측소에서 발파파형이 관측되었다. primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각 110°와 177°이다. 진앙위치 오차는 약 500 m로 비교적

정확한 진앙위치 결과를 보여주었다(Figure 3.1.29).

강원도 횡성군에 위치한 횡성채석장의 경우 발파지점으로부터 약 200 m 떨어진 곳에 임시지진관측소를 설치 운영하여 정확한 발파시간과 발생위치를 관측하였다. 발파작업은 2011년 6월 29일 17시 46분경 약 1 톤 가량의 화약이 사용되었으며 총 5 개 지진관측소에서 발파파형이 관측되었다. primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각  $103^\circ$ 와  $116^\circ$ 이다. 진앙위치 오차는 약 100 m로 비교적 정확한 진앙위치 결과를 보여주었다(Figure 3.1.30).

충청북도 단양군에 위치한 단양채석장의 경우 매 12시경 1 톤 가량의 발파작업이 이루어지는 곳이다. 임시지진관측소 운영기간 중 관측된 발파파형으로는 2011년 7월 25일 12시경 있었던 발파작업이 있으며, 이때 관측된 발파파형은 7 개의 지진관측소에서 관측되었다. primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각  $108^\circ$ 와  $139^\circ$ 이며 진앙위치 결과 채석장 내의 진앙위치를 보여주고 있으나 단양채석장의 규모가 방대함을 고려하여 진앙위치 오차의 범위는 1 km로 결정하였다(Figure 3.1.31).

전라북도 익산시에 위치한 익산채석장에서 관측된 발파작업으로는 2011년 7월 22일 12시경 있었던 발파작업이 있으며, 6 개의 지진관측소에서 발파파형이 관측되었다. primary azimuthal gap과 secondary azimuthal gap은 각각  $78^\circ$ 와  $155^\circ$ 이며 진앙위치오차는 약 500 m로 비교적 정확한 진앙위치를 보여주었다(Figure 3.1.32).

기존 GT 이벤트 자료와 임시지진관측소를 통해 수집된 GT 이벤트 자료의 활용가능성을 검토하였다(Table 3.1.26). 그 결과, 정확한 시간과 위치를 알고 있는 KCRT2008의 발파지점과 횡성채석장의 경우 GT0 자료로 활용 가능한 것으로 나타났다. 또한 임시지진관측소를 통해 획득한 GT 자료 중 연천채석장, 단양채석장, 익산채석장의 경우 채석장과 가까운 곳에 임시지진관측소를 운영하여 발파시간을 관측하였으나, 실제 발생시간과 관측시간의 오차를 고려하여 GT1 자료로 선별하였다. 마찬가지로 기존 GT 자료에 해당하는 완주채석장과 해남채석장의 경우 또한, 발생시간 오차를 고려하여 GT1 자료로 선별하였으며, D시험장의 경우 시험장의 방대한 규모를 고려하여 GT3 자료로 선별하였다(Figure 3.1.33).

2004년부터 2006년까지 기상청에서 관측하고 발표한 지진에 대해 P파의 도착시간을 정밀하게 수동으로 측정하였다. 측정한 지진자료에 박용철 등(2009)에서 제시한 KGT5의 기준을 만족하는 지진에 대해 선별 및 목록화하였다. 그 결과 기상청에서 발표한 129 개의 지진 중 49 개의 지진만이 KGT5 기준을 만족하였다. 2004년부터 2006년까지 우리나라 해역에서 발생한 지진 개수는 총 94 개이며 이 중 4 개의 해역지진만이 KGT5를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 북한에서 발생한 지진의 경우 총 11 개의 지진이 발생하였으며 이 중 3 개의 지진만이 KGT5를 만족하였다. 내륙에서 발생한 지진의 경우 49 개의 지진이 발생하였으며, 이 중 2 개의 지진을 제외한 내륙지진의 95%가 KGT5를 만족하는 것으로 나타났다.

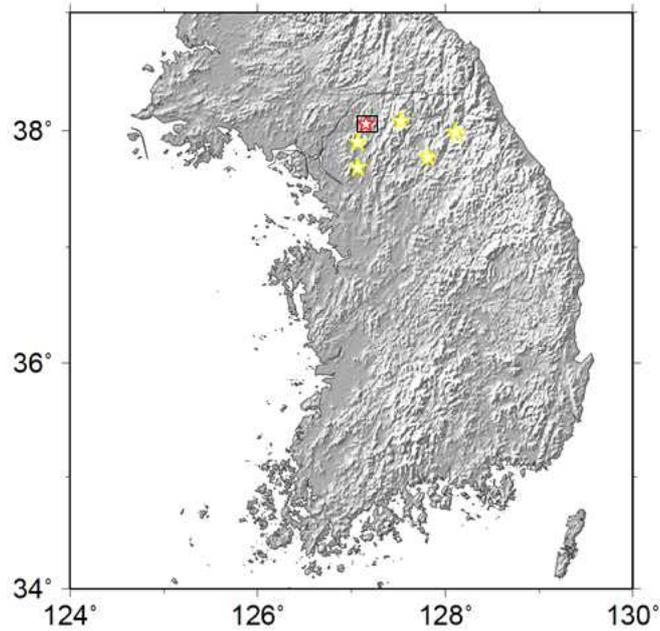
본 연구에서는 기상청 국가지진관측망 관측자료를 사용하여 결정된 지진발생위치의 정확성을 고찰하기 위하여 Peter and Crosson (1972)이 제안한 방법을 사용하였다. 이 방법에서는 비선형

최소 제곱 역산법(a non-linear least-squares inversion)을 사용한 지진발생위치 산정 결과는 진원위치와 진원시간 변화에 따른 주파시간 변화의 편미분방정식에 따라 변한다는 점에 착안하여 진원요소 결정의 오차를 산정한다. 본 사례에서 사용한 속도모델은 김성균과 정부홍(1985)의 연구에서 제시한 1차원 속도구조 모델을 사용하였다. 관측망의 지진탐지능력을 정확히 반영하기 위해서는 대상지역의 지진파 감쇠구조, 각 관측소의 배경잡음 수준 등의 관측환경에 관한 정보가 필요하지만, 본 사례에서는 진원위치로부터 가까운 10 개의 관측소에서 P파만의 도착시간이 관측된 경우와 P파와 S파 모두의 도착시간을 측정하였다고 가정하였다. 한반도에서 발생하는 대부분의 지진이 얇은 깊이에서 발생하고 있음을 고려하여 진원 깊이 10 km와 20 km의 경우에 한정하여 지진발생위치 오차를 추정하였다. 먼저 지진이 기상청 국가지진관측망 관측관할구역 내부 10 km 깊이에서 0.05° 간격으로 발생했다고 가정하고 지진발생위치에 따른 오차를 계산하여 결과를 Figure 3.1.34과 Figure 3.1.35에 표시하였다. 기상청 국가지진관측망 내부에서 발생하는 대부분의 지진은 진앙오차 5 km 내에서 그 위치가 결정될 것으로 예상된다. Figure 3.1.34과 Figure 3.1.35을 비교하면, P-파 도착시간 정보에 추가하여 S-파 도착시간 정보를 진원요소 결정에 사용함으로써 상당한 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대된다. Figure 3.1.36와 Figure 3.1.37에는 발생 심도가 30 km인 지진들에 대하여 같은 조건에서 진앙오차를 계산 및 표시하였다. 전반적인 오차 형태는 Figure 3.1.34 및 Figure 3.1.35과 유사하며, 관측망 주변부에서 오차가 다소 커짐을 확인할 수 있다.

현재 기상청 국가지진관측망은 평균 관측소간 이격거리 35 km 이하로서 상당히 조밀한 지진 관측소 분포를 보이고 있다. 지진발생위치 정확성을 평가하는 대부분의 기존 연구들이 지역지진 혹은 원거리지진(regional or teleseismic distance)에 대하여 수행되었으므로, 기상청 지진관측망의 관측능력과는 매우 다를 수 있다. 기상청 지진관측망과 같이 조밀한 지진관측망의 경우 지진 발생위치 결정의 정확성을 보기위하여 Figure 3.1.38과 같이 지진관측망 중앙부에서 발생하는 지진에 대한 오차를 측정하여 Figure 3.1.39와 Figure 3.1.40에 표시하였다. 이는 지진과 관측소가 위도 36.0° -37.0°, 경도 127.3° -128.3° 사이에 위치한 경우만을 고려하였고, 앞의 경우와 마찬가지로 지진이 10 km 깊이에서 0.01° 간격으로 발생했다고 가정하고 지진발생위치에 따른 오차를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 이와 같이 조밀한 지진관측망 하에서는 대부분의 지역에서 진앙오차 1 km 이하의 신뢰성을 가지고 지진발생위치를 결정할 수 있을 것이라 생각된다. 한반도 전체의 경우와 마찬가지로 S파 도착시간 정보를 포함하여 지진발생위치를 결정함으로써 진원요소, 특히 진원깊이를 보다 정확하게 결정할 수 있을 것으로 생각된다.

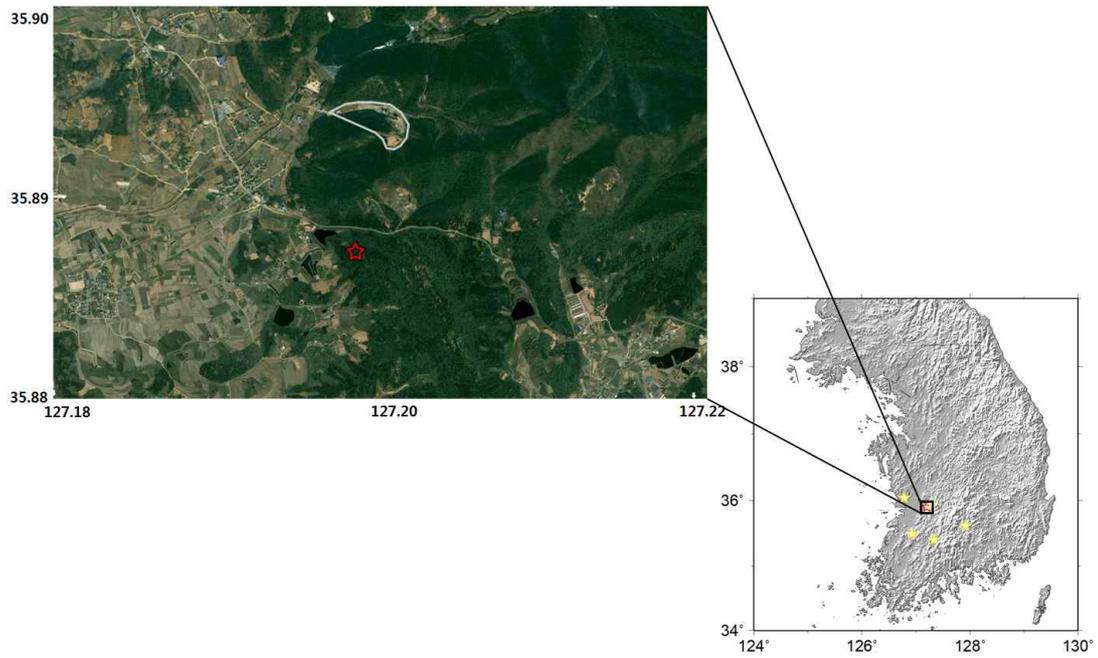
이미 언급한 바와 같이 발표되는 많은 지진목록에는 지진위치의 정확성 혹은 오차에 관한 정보가 충분치 않은 경우가 많아서 일반 연구자들은 오랫동안 관측소 분포, 지진관측 상황 등에 기초하여 지진발생위치 결정의 정확성을 추정하려는 노력을 기울여 왔다. 또한 이러한 연구들은 주로 지역지진 혹은 원거리지진의 경우에 대하여 수행되어 왔다. 기상청 지진관측망의 경우 관측소간의 이격 거리가 짧고, 비교적 좁은 지역 내에 많은 수의 지진관측소가 분포하므로, 기존의 연구보다 작은 오차범위 내에서 지진발생위치를 결정할 수 있을 것으로 사료된다. 최근 Bondár et al. (2004)가 제시한 Ground Truth (GTX) 개념의 진앙위치 정확성 측정이 시도되고 있지만, 이 기

준에는 진원깊이에 대한 기준이 포함되어 있지 않다. 향후 기상청 지진관측망의 관측력 평가에서는 진원깊이의 정확성을 포함하면서 2 km 혹은 3 km 오차 범위내 (GT2 or GT3)에서 결정되는 진원위치결정 정확성 평가를 위한 기준을 확립할 수 있을 것이다.



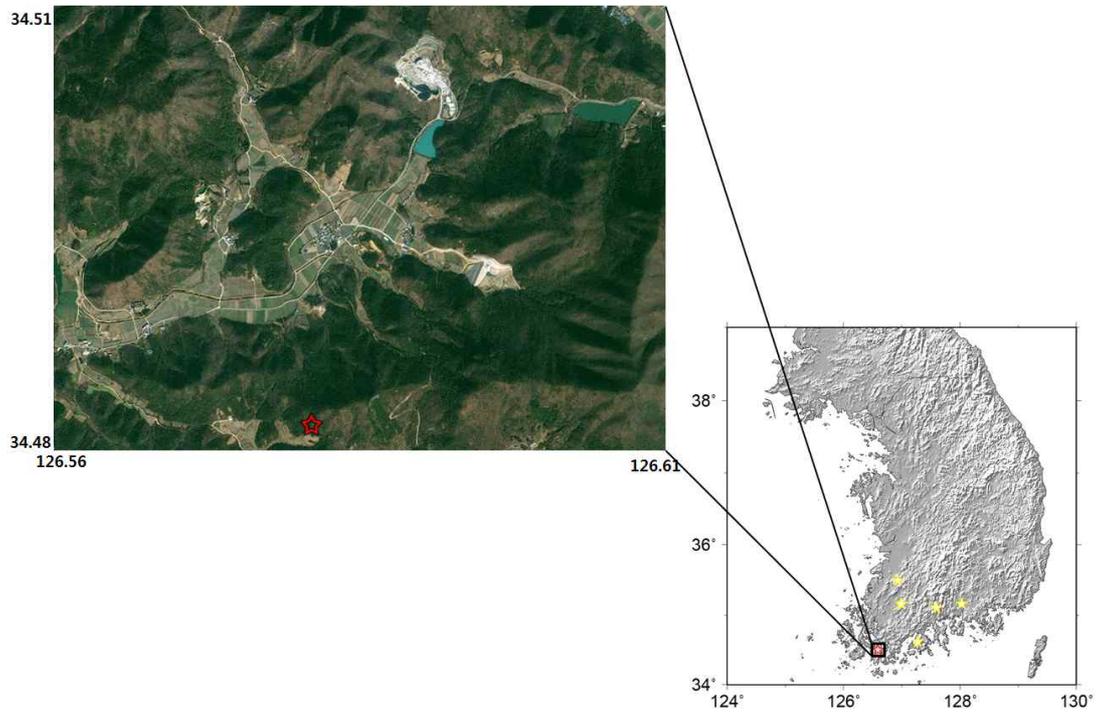
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	$\Delta$ Epi (km)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
D test site	07:30:50.75	38.0	127.1	0.00	0.036	3	224	232	5

Figure 3.1.32 Map view of the result for the D test site using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985). Red star is a located man-made earthquake epicenter and yellow stars indicate locations of recorded KMA seismic stations.



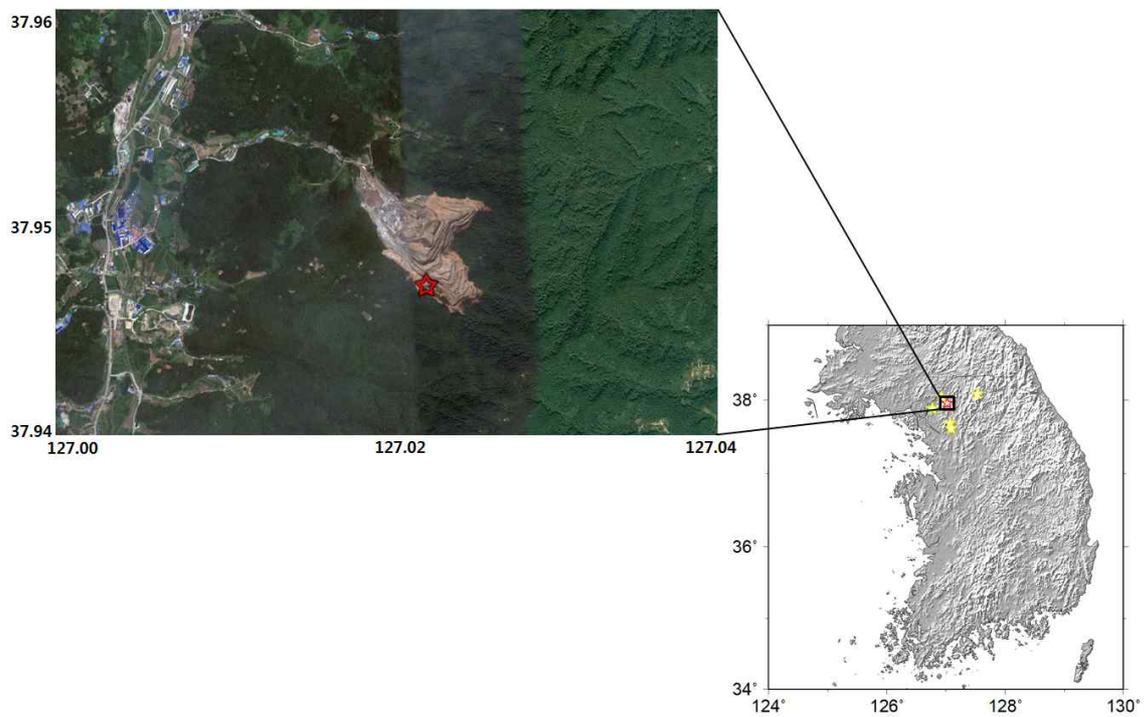
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	$\Delta$ Epi. (m)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Wanju quarry	03:12:17.65	35.8925	127.1990	0.06	0.0970	800	84	188	7

Figure 3.1.33 Map view of the result for the Wanju quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985). Red star is a located man-made earthquake epicenter and yellow stars indicate locations of recorded KMA seismic stations.



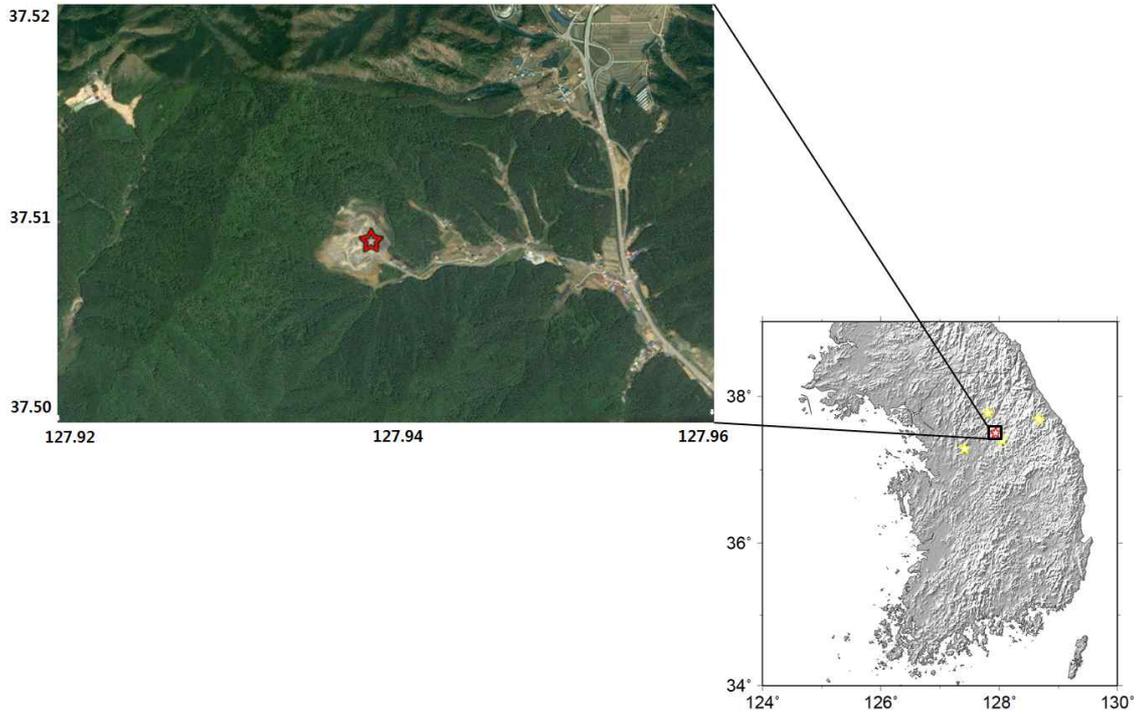
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	$\Delta$ Epi (km)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Haenam quarry	09:37:40.65	34.4809	126.5811	4.47	0.0109	3	138	226	7

Figure 3.1.34 Map view of the result for the Haenam quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985). Red star is a located man-made earthquake epicenter and yellow stars indicate locations of recorded KMA seismic stations.



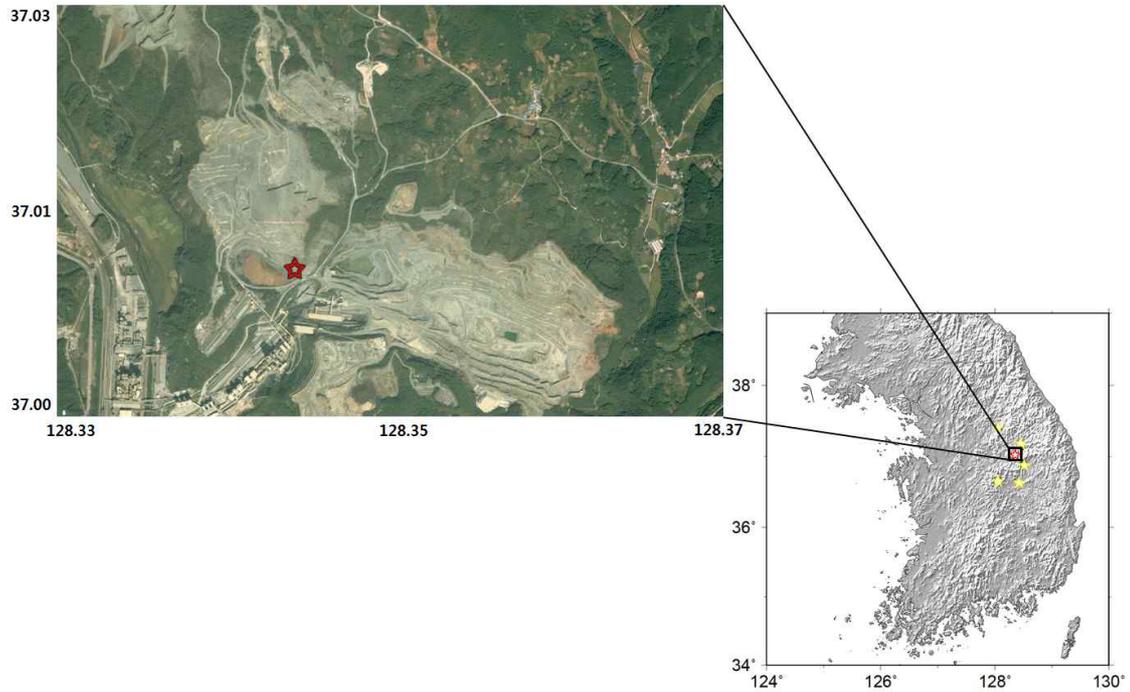
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	$\Delta$ Epi (m)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Yeoncheon quarry	03:24:44.82	37.9470	127.0222	0.02	0.1012	500	110	177	6

Figure 3.1.35 Map view of the result for the Yeoncheon quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985). Red star is a located man-made earthquake epicenter and yellow stars indicate locations of recorded KMA seismic stations.



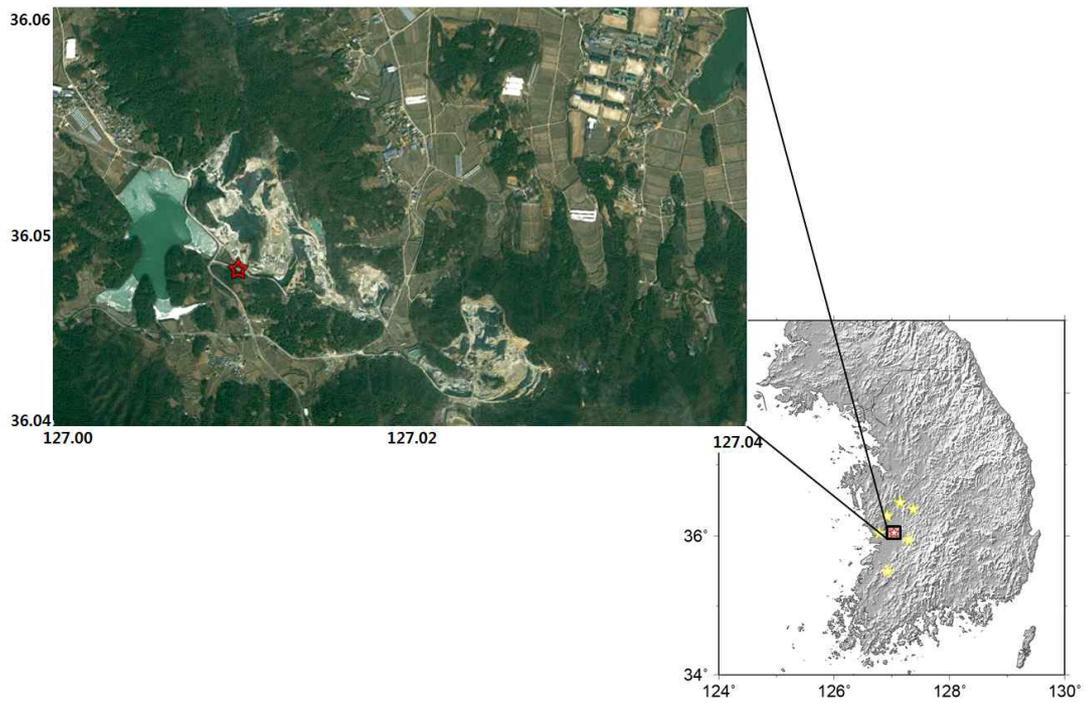
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	$\Delta$ Epi (m)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Heongseong quarry	08:46:53.80	37.5087	127.9388	0.01	0.0340	200	103	116	5

Figure 3.1.36 Map view of the result for the Heongseong quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985). Red star is a located man-made earthquake epicenter and yellow stars indicate locations of recorded KMA seismic stations.



ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	$\Delta$ Epi (km)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Danyang quarry	02:59:00.47	37.0173	128.3442	1.20	0.1176	1	108	139	7

Figure 3.1.37 Map view of the result for the Danyang quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985). Red star is a located man-made earthquake epicenter and yellow stars indicate locations of recorded KMA seismic stations.



ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	$\Delta$ Epi (m)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Iksan quarry	02:56:57.10	36.0474	127.0406	4.69	0.0553	500	78	155	6

Figure 3.1.38 Map view of the result for the Iksan quarry using Hypoellipse with the velocity model proposed by Kim and Jeong (1985). Red star is a located man-made earthquake epicenter and yellow stars indicate locations of recorded KMA seismic stations.

Table 3.1.27 Summary of the results for the KCRT2008 GT0 events using HYPOELLIPSE

Velocity Model		A : Kim and Jeong (1985), B : Kim (1995), C : Chang and Baag (2005), D : Kim and Kim (1983), E : Lee (1979), F : IASP91, G : AK135						
ID	Date	Time	Lat(°N)	Lon(°E)	Depth (km)	Azi. (°)	2nd Azi.(°)	Obs. Sta.
발파시간	2008/11/02	01:59:59.968	37.6789	126.4531	0.090	126	196	26
발파1	A	02:00:00.00	37.6703	126.4541	0.040			
	B	02:00:00.02	37.6698	126.4542	0.050			
	C	01:59:59.88	37.6737	126.4530	1.110			
	D	02:00:00.20	37.6698	126.4543	5.290			
	E	01:59:59.47	37.6670	126.4528	15.990			
	F	01:59:59.88	37.6670	126.4603	8.950			
G	01:59:59.92	37.6693	126.4557	7.510				
발파시간	2008/11/02	02:15:01.269	37.2114	127.6078	0.090	32	45	32
발파2	A	02:15:01.32	37.2172	127.6115	0.040			
	B	02:15:01.35	37.2217	127.6145	0.020			
	C	02:15:01.16	37.2165	127.6152	0.050			
	D	02:15:01.56	37.2153	127.6108	0.050			
	E	02:15:00.89	37.2143	127.6092	13.480			
	F	02:15:01.13	37.2123	127.6150	6.960			
G	02:15:01.21	37.2157	127.6148	5.620				
발파시간	2008/11/02	02:30:26.207	36.8613	128.3618	0.085	62	89	15
발파3	A	02:30:26.23	36.8605	128.3553	0.020			
	B	02:30:26.19	36.8600	128.3552	0.010			
	C	02:30:26.15	36.8615	128.3557	1.820			
	D	02:30:26.48	36.8623	128.3592	0.030			
	E	02:30:26.15	36.8638	128.3605	5.280			
	F	02:30:26.15	36.8638	128.3605	5.200			
G	02:30:26.16	36.8633	128.3603	5.240				
발파시간	2008/11/02	03:52:01.304	36.3188	129.3557	0.085	155	179	36
발파4	A	03:52:01.42	36.3185	129.3410	1.000			
	B	03:52:01.39	36.3197	129.3523	0.010			
	C	03:52:01.45	36.3183	129.3492	4.120			
	D	03:52:01.52	36.3162	129.3462	2.840			
	E	03:52:00.72	36.3123	129.3488	15.130			
	F	03:52:01.13	36.3160	129.3387	7.850			
G	03:52:01.25	36.3150	129.3510	6.990				
발파시간	2008/11/02	03:00:00.806	37.0654	127.8951	0.048	54	94	20
발파5	A	03:00:00.84	37.0643	127.8930	0.020			
	B	03:00:00.96	37.0713	127.8938	0.040			
	C	03:00:00.69	37.0658	127.8928	0.090			
	D	03:00:01.02	37.0632	127.8925	0.030			
	E	03:00:00.38	37.0603	127.8945	13.390			
	F	03:00:00.56	37.0632	127.8922	11.160			
G	03:00:00.78	37.0655	127.8957	4.810				

발파시간	2008/11/02	03:14:49.968	36.9508	128.1580	0.048	58	65	21
발파6	A	03:14:49.90	36.9525	128.1472	0.040			
	B	03:14:49.89	36.9517	128.1492	0.050			
	C	03:14:49.81	36.9522	128.1480	1.190			
	D	03:14:50.16	36.9523	128.1472	0.230			
	E	03:14:49.69	36.9538	128.1467	9.140			
	F	03:14:49.71	36.9542	128.1468	8.400			
	G	03:14:49.80	36.9513	128.1457	7.430			
발파시간	2008/11/02	03:30:01.541	36.7240	128.5894	0.048	42	69	28
발파7	A	03:30:01.46	36.7285	128.5950	0.010			
	B	03:30:01.50	36.7218	128.5963	0.040			
	C	03:30:01.35	36.7278	128.5972	0.010			
	D	03:30:01.66	36.7318	128.5935	1.970			
	E	03:30:00.88	36.7323	128.5897	15.780			
	F	03:30:01.27	36.7340	128.5963	6.760			
	G	03:30:01.38	36.7285	128.5965	3.690			
발파시간	2008/11/02	03:45:01.379	36.5776	128.8914	0.048	68	122	39
발파8	A	03:45:01.49	36.5758	128.8977	0.000			
	B	03:45:01.57	36.5777	128.9075	0.010			
	C	03:45:01.39	36.5725	128.8835	0.030			
	D	03:45:01.64	36.5732	128.8878	0.040			
	E	03:45:01.01	36.5742	128.8822	11.580			
	F	03:45:01.22	36.5748	128.8768	0.720			
	G	03:45:01.31	36.5750	128.8818	0.030			

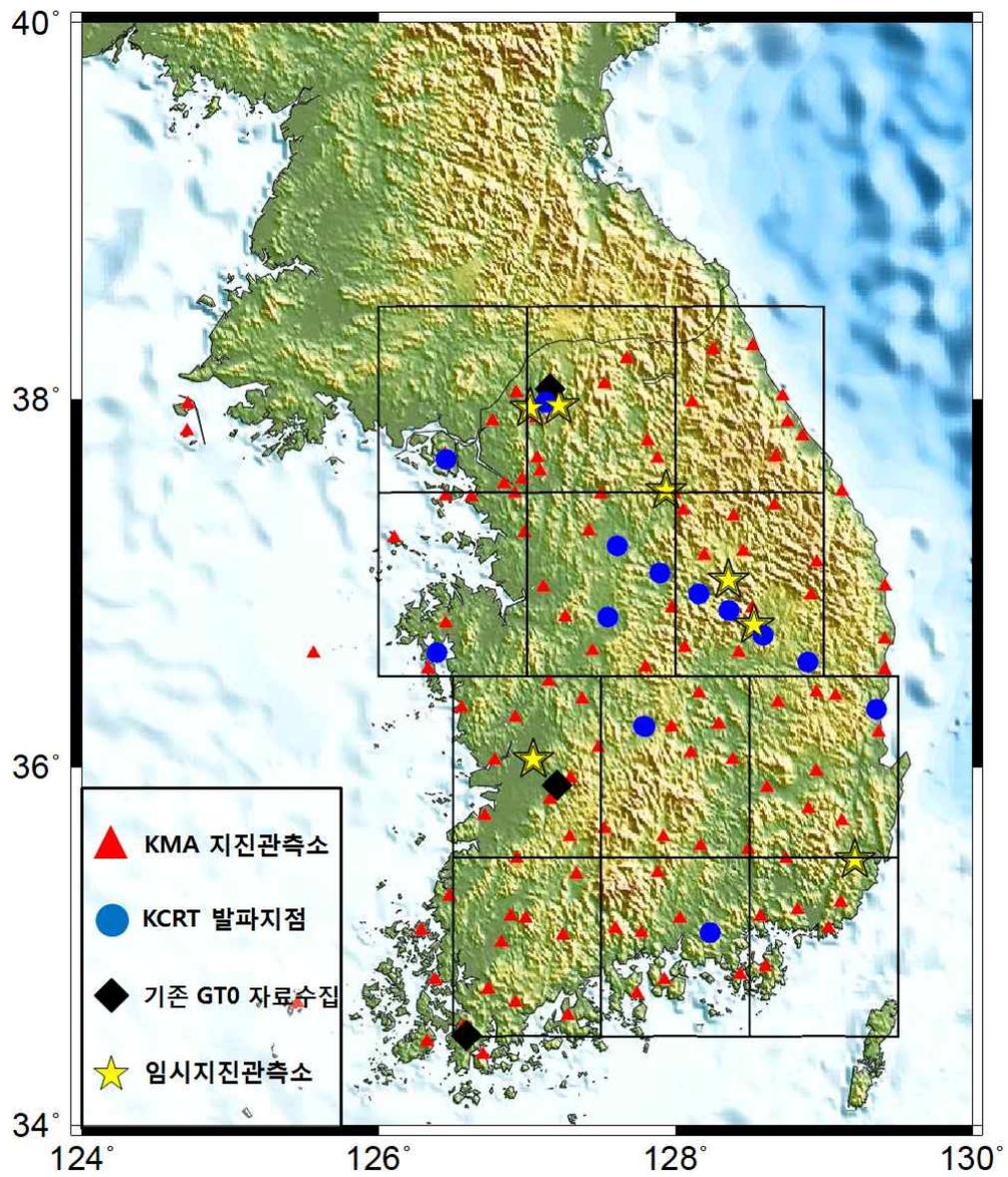


Figure 3.1.39 Hypocenters of man-made earthquake from this study.



Figure 3.1.40 Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 10 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded only P-wave arrivals. A 1-D velocity model proposed by Kim and Chung (1985) has been used to calculate travel times. Red triangles indicate locations of KNSN stations.



Figure 3.1.41 Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 10 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded both P- and S-wave arrivals. Significant improvement in the earthquake location is expected by including S-wave arrival time information. A 1-D velocity model proposed by Kim and Chung (1985) has been used to calculate travel times. Red triangles indicate locations of KNSN stations.



Figure 3.1.42 Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 30 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded only P-wave arrivals. A 1-D velocity model proposed by Kim and Chung (1985) has been used to calculate travel times. Red triangles indicate locations of KNSN stations.



Figure 3.1.43 Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 30 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded both P- and S-wave arrivals. Significant improvement in the earthquake location is expected by including S-wave arrival time information. A 1-D velocity model proposed by Kim and Chung (1985) has been used to calculate travel times. Red triangles indicate locations of KNSN stations.



Figure 3.1.44 Index map showing that the location in Figure 3.1.45 and Figure 3.1.46 is marked by a solid rectangle. Triangles denote the location of KNSN stations operated by KMA. Small dots are earthquake location recorded and reported by KNSN between 2007 and 2010 including micro-earthquakes ( $M < 2.0$ ).



Figure 3.1.45 Distribution of epicentral errors in the center of KNSN seismic network. In this simulation test, earthquakes are assumed to occur at 10 km depth and P-waves are recorded by 6 nearby stations. Both stations and earthquakes in 36°N to 37°N and 127.3°E to 128.3°E are considered. Note locations are less constrained for depth.  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$ ,  $\Delta_z$ , and  $\Delta$  represent errors in North-South direction, East-West direction, depth, and hypocentral distances.



Figure 3.1.46 Distribution of epicentral errors in the center of KNSN seismic network. In this simulation test, earthquakes are assumed to occur at 10 km depth and P- and S-waves are recorded by 6 nearby stations. Both stations and earthquakes in 36°N to 37° N and 127.3°E to 128.3°E are considered. Note the depth of earthquake locations are well constrained using S-wave arrival times.  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$ ,  $\Delta_z$ , and  $\Delta$  represent errors in North-South direction, East-West direction, depth, and hypocentral distances.

### 3.1.9 참고문헌

- 기상청, 한반도 지진 및 지진해일, 어떻게 대응할 것인가?. 기상청 보도자료, 2011. 5. 11
- 국립기상연구소, 2008, 지진자료 통합관리 기술개발 및 정밀분석기법 연구, 기상지진기술개발사업 연구보고서, pp. 185.
- 국립기상연구소, 2008, 지진자료 통합관리 기술개발 및 정밀분석기법 연구, 기상지진기술개발사업 연구보고서, pp. 185.
- 국립기상연구소, 2009, 지진감시기술 지원 및 활용 연구, p. 1100.
- 국토해양부, 골재공급량관련 정보, 국토해양부 보도자료, 2010.12.22.
- 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 제 16권, pp. 51-61.
- 김성균, 정부홍, 1985, 한반도 남부지역의 지각구조, 광산지질, 제 18권, pp. 151-167.
- 김성균, 1995, 한반도의 지각구조에 관한 연구, 지질학회지, 제 31권, pp. 393-403.
- 박용철, 박민규, 서기원, 이원상, 송지석, 2009, 발파자료를 이용한 기상청 지진관측망 탐지능력 평가, 지진기술개발사업 보고서.
- 이정모, 문우일, 박창엽, 정희욱, 김기영, 2006. 한반도 지각 속도구조 연구, 기상지진기술개발사업 보고서. p 120.
- 이정모, 박창엽, 정희욱, 김기영, 2009. 탄성과 실험에 의한 지각 속도구조 연구, 지진기술개발사업 보고서. p 127.
- 정주환, 최병희, 류창하, 민형동, 최형빈, 인공지진 발생을 위한 대규모 시추공 시험발파 사례연구, 대한화약발파공학회지 제 27권 제2호, pp. 48-55.
- 한국지질자원연구원, 2010, 국가 지진조기경보시스템 구축 설계 및 실시간 지진자료 공유기반 연구. 기상청 기상지진기술개발사업, p. 210.
- Bondár I., Myers, S. C., Engdahl, E. R., and Bergman, E. A., 2004. Epicentre accuracy based on seismic network criteria, *Geophys. J. Int.* 156, pp. 483-496.
- Bondár I, and K. L. McLaughlin,, 2002, A new ground truth data set for seismic studies *Geophys. Res. Lett.*, 80, pp. 465-472.
- Bondár I, Yang XP, North RG et al, 2001, Location calibration data for CTBT monitoring at the Prototype International Data Center. *Pure and Applied Geophysics* 158: pp. 19-34.
- Bondár I and McLaughlin K, 2009. A new ground truth data set for seismic studies.

Seismological Research Letters 80: 465–472. doi: 10.1785/gssrl.80.3.465.

Chang, S. J. and Baag, C. E. (2005) Crustal Structure in Southern Korea from Joint Analysis of Teleseismic Receiver Function and Surface-Wave Dispersion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 1516–1534

Geller, R. J., 1997, Earthquake prediction: a critical review, *Geophys. J. Int.*, 131, pp. 425–450.

KAYAL J.R., 2008, *Microearthquake Seismology and Seismotectonics of South Asia*, Springer, pp. 117.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R. and Buland R., 1995, Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times. *Geophys. J. Int.*, 122, pp. 108–124.

Kim, W.H., 1998, The P-wave velocity structure of upper crust around Yangsan fault, 2nd International Symposium on Seismic Hazards and Ground Motion in the Region of Moderate Seismicity, pp. 166–177.

Lahr, J.C., Hypoellipse, 1993, A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude and first motion pattern, U.S. Geological Survey Open-File Report pp. 89–116.

McLaughlin, K., I. Bondár, X. Yang, J. Bhattacharyya, H. Israelsson, North, V. Kirichenko, R. Engdahl, M. Ritzwoller, A. Levshin, N. Shapiro, E. Bergman, M. Antolik, A. Dziewonski, G. Ekstro "m, H. Ghalib, I. Gupta, R. Wagner, W. Chan, W. Rivers, A. Hofstetter, A. Shapira, and G. Laske, 2002, Seismic location calibration in the Mediterranean, North Africa, Middle East and Western Eurasia, in *Proc. 24th Seism. Res. Rev.*, Ponte Vedra Beach, Florida, October 2002, pp. 340–350.

USGS, HYPO71 (Revised): A Computer Program for Determining Hypocenter, Magnitude, and First Motion Pattern of Local Earthquakes, Open-File Report 75-311, 1975, Menlo Park, CA, 113p, USA.

## 3.2 재표본 방법을 이용한 지진원 위치 오차 분석 방법

### 3.2.1 서론

#### 3.2.1.1 관측망 지진원 결정력 연구

정확한 진원 위치와 이에 대한 불확실성 연구는 지진발생과 핵실험 여부, 그리고 다양한 발파에 의한 지진파 진원 연구에 있어서 기초자료를 제공하기 때문에 매우 중요하다. 국제 감시회(International Monitoring Community)는 일반적으로 GT5 레벨의 지진자료를 선별하여 사용하고 있다(Boomer et al., 2010). GT5란 지진원 위치의 신뢰도에 대한 것으로, 일반적으로 GT<sub>x</sub>라고 쓰며 x는 진원의 최대 오차를 가리킨다. 따라서 GT5라 함은 결정된 진원의 위치가 오차범위 5 km 이내인 경우를 나타낸다. Bondár et al. (2004)은 중동, 북미, 유럽, 그리고 서유라시아에서 관측되는 지진원의 위치에 대한 정확도 평가와 오차를 줄이기 위한 연구를 수행하였다. 이들은 200,000 개 이상의 초동 P파를 이용하여 약 2,000 개의 지진원 위치 분석을 통하여 국지, 광역, 그리고 원격 지진관측망에 대한 신뢰도 분석을 실시하였다. Table 3.2.1은 Bondár et al. (2004)이 연구한 GT5 지진원의 기준을 나타낸다.

Table 3.2.1 Global GT5 criteria (Bondár et al., 2004)

Network	Distance Range (degrees)	Primary Azimuthal Gap	Secondary Azimuthal Gap	Number of stations within specified distance			GT level
				Between 250km and 1000km	< 250km	< 30km	
Local <sup>[a]</sup>	0°-2.5°	110°	160°		10	1	GT5 <sub>95%</sub>
Near Regional <sup>[a]</sup>	2.5°-10°		120°	10			GT20 <sub>90%</sub>
Teleseismic <sup>[a]</sup>	28°-91°		120°				GT25 <sub>90%</sub>

Table 3.2.1을 보면 국지 지진(진앙거리가 2.5°(~278 km, 1°≈111.19 km) 이하인 경우)의 경우, primary azimuthal gap이 110° 이하인 경우, secondary azimuthal gap이 160° 이하, 진앙거리 250 km이내에 관측된 지진관측소가 10 개 이상일 경우, 진앙거리 30 km이하이내에 관측된 지진관측소가 최소 1 개 이상 존재할 경우 95%의 신뢰도를 지닌 GT5 이벤트로 정의하고 있다(Table 3.2.1에서 붉은 박스로 표시되어 있음).

위와 같이 포괄적인 GT 지진원에 대한 정의는 일반적으로 정의되고 있으나, 어느 특정한 관

측망은 관측소의 분포와 속도구조의 불확실성 등에 의해서 그 기준이 변화할 수 있다. Boomer et al. (2010)은 남아프리카에 1997년부터 1999년 까지 운영된 SASE (Southern African Seismic Experiment) 지진관측망에 대한 GT 지진목록을 연구하였다. 이들은 EBGT (Empirically Based Ground Truth)라는 이름으로 SASE 관측망에 최적화된 GT3 기준을 마련하였다. Table 3.2.2를 보면 GT3 지진원 중에서 진앙거리가 215 km 이하인 관측소의 개수가 11, 10, 9, 그리고 8 개인 경우와 primary azimuthal이 202° 이하, 그리고 secondary azimuthal gap이 79° 이하인 경우 진앙과 진원 깊이의 변화를 km 단위로 나타내고 있다.

Table 3.2.2 EBGT Criteria for the Kaapvaal Craton(Boomer et al. 2010)

GT Level	Number of Stations within 215 km	One-Sided 95% Confidence Interval (km)		Primary Azimuthal Gap Maximum	Maximum Distance to Nearest Station (km)
		Epicentral Change	Depth Change		
GT3 <sub>95%</sub>	11	[0, 2.2)	[0, 0.4)	202°	79
GT3 <sub>95%</sub>	10	[0, 1.9)	[0, 1.8)		
GT3 <sub>95%</sub>	9	[0, 2.0)	[0, 3.8)		
GT3 <sub>95%</sub>	8	[0, 2.2)	[0, 5.7)		

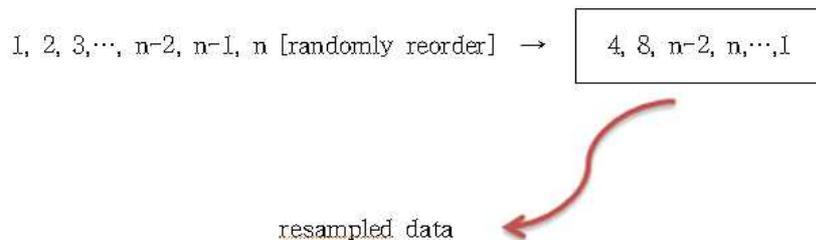
이와 같이 각 관측망에 따라서 GT 기준이 조금씩 변화할 수 있기 때문에 한반도에 설치되어 있는 지진관측망 또한 이와 같은 연구를 수행할 필요성이 있다. 진원결정에 있어서 발생할 수 있는 오차를 정량화하여 체계적인 지진목록 작성에 기본이 되는 GT 기준 마련이 요구된다.

### 3.2.2. 본 론

#### 3.2.2.1 재표본 방법 (Resampling method)

앞장에서 열거한 국지 지진관측망의 탐지능력 평가를 위해서 일반적으로 발파(핵실험 포함)와 같이 정확한 위치와 진원시간을 알고 있는 자료를 GT0로 정의하고, 각 관측소에 관측된 GT자료는 재표본(resampling) 방법을 이용하여 관측망의 진원 위치 결정력을 평가하고 있다(Bondár et al., 2001; Bondár et al., 2004; Bondár and McLaughlin, 2009; Boomer et al., 2010). 본 연구에서 사용된 자료는 2008년도에 수행된 Korean Crustal Research Team (KCRT-2008)의 발파 자료를 GT0의 기준 자료로 사용하였고, KCRT-2008의 자세한 설명은 다음 장에서 기술될 것이다.

재표본 방법은 어떠한 연구에서 이용된 자료의 정확성을 측정하기 위해서 사용가능한 자료의 일부분을 사용하거나(jackknife), 이용된 자료를 불특정하게 취하는 방법(bootstrap)을 주로 사용하고 있다. 본 연구는 jackknife방법을 이용하여 GT0 진원에 대한 지진관측망의 개수와 분포에 따른 위치 결정의 오차를 측정하였다. 사용된 모든 자료에서 일부분만을 이용하여 똑같은 연산을 조직적으로 반복함으로써 자료에 대한 신뢰도를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 GT0 자료를 관측한 관측소의 개수를 최소 3 개부터 시작하여 총 관측소를 이용한 관측 오차를 분석하였다. 표본을 추출하기 위해서 정수 1부터  $n$  (총 관측소 숫자)를 임의로 정렬하여 관측소 번호를 앞에서 부터 재연산에 필요한 표본 개수( $k$ ) 만큼을 추출하여 사용하였다.



#### 3.2.2.2 KCRT-2008 발파 자료

한반도 지각 속도구조를 규명하기 위한 KCRT-2008 실험은 2008년 11월 2일에 경기도 강화

와 경상북도 영덕을 잇는 축선을 따라 593 개의 단주기 지진계가 평균 500 m 간격으로 설치되었고, 강화(S1)를 시작으로 여주(S2), 단양(S3), 충주(S4), 제천(S5), 영주(S6), 안동(S7), 마지막으로 영덕(S8) 순으로 발파가 진행되었다(Figure 3.2.1과 Table 3.2.3)(Kim et al., 2010).

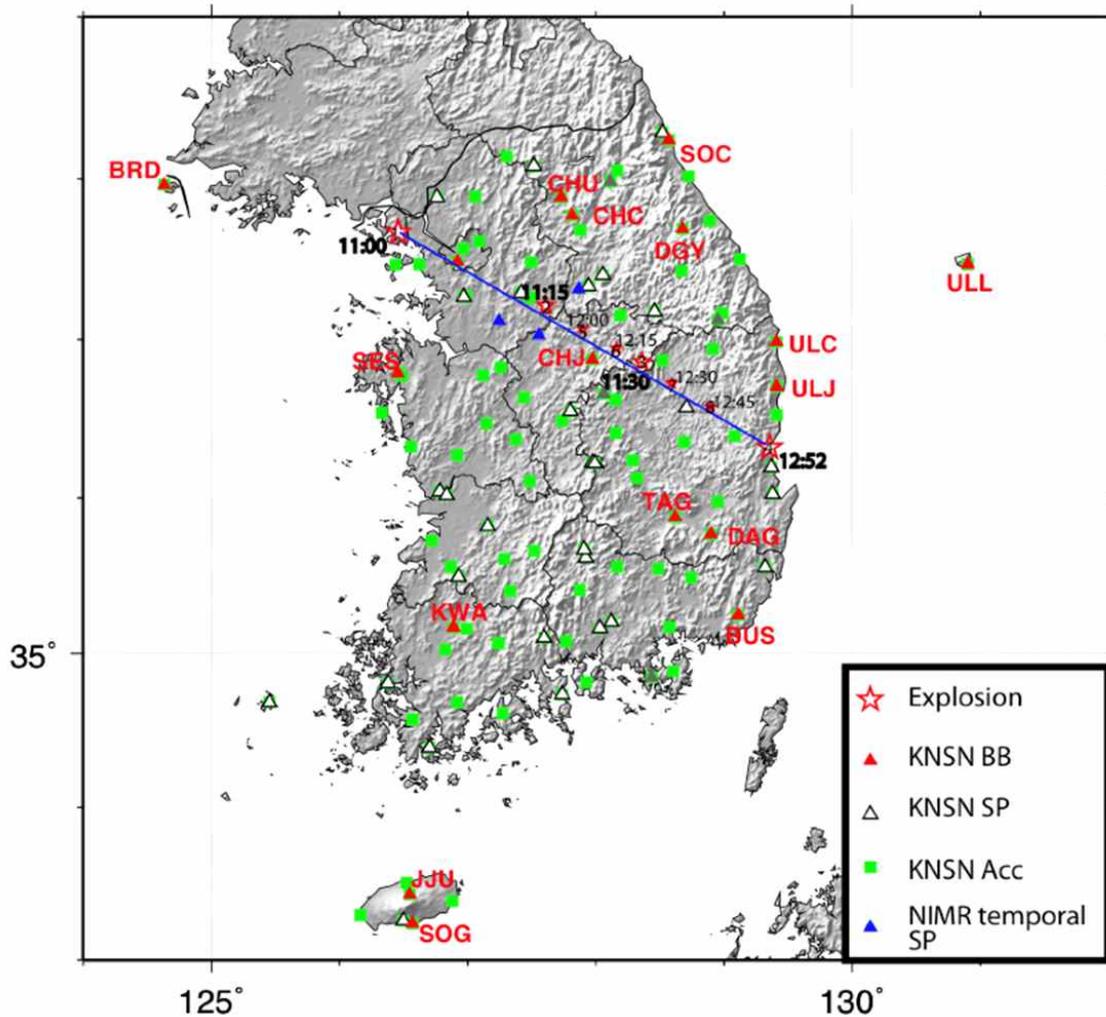


Figure 3.2.1. Location of the KMA seismic stations and KCRT-2008 explosion sites (see Table 3.2.3 for detail information of explosions).

Table 3.2.3 Detailed information of KCRT-2008 explosion sites

shot no.	date	time	Lon.(°E)	Lat.(°N)	depth (m)	Load(ton)
1	2008/11/02	13:59:59.968	126.4531	37.6786	90	1.50
2	2008/11/02	14:15:01.269	127.6078	37.2114	90	1.00
3	2008/11/02	14:30:26.207	128.3618	36.8613	85	1.00
4	2008/11/02	15:52:01.304	129.3557	36.3188	85	1.50
5	2008/11/02	15:00:00.806	127.8951	37.0654	49	0.25
6	2008/11/02	15:14:49.968	128.1589	36.9508	48	0.25
7	2008/11/02	15:30:01.541	128.5894	36.7240	48	0.25
8	2008/11/02	15:45:01.378	128.8914	36.5776	48	0.25

KCRT-2008은 약 50-100 m의 시추공에서 발파를 수행하였고 주파수 분석에 의하면 5-15 Hz 대역에서 가장 높은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 보였다. 본 연구에서 사용된 지진파형은 5-15 Hz의 Butterworth 필터를 적용한 것이다. 진원을 결정하기 위해서는 HYPOELLIPSE (Lahr, 1989) 프로그램이 사용되었고, 1차원 속도 모델은 전지구 평균 속도 모델인 IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991)과 수신합수를 이용한 한반도 평균 1차원 속도 모델인 Chang and Baag (2006) 모델을 사용하였다(Figure 3.2.2). 지진관측 자료는 기상청이 운영하고 있는 광대역 및 단주기 관측소, 가속도 관측소, 그리고 KCRT-2008 기간에 국립기상연구소에서 설치한 임시지진관측소 3 곳(Figure 3.2.1의 파란 삼각형)을 포함한 자료를 이용하였다.

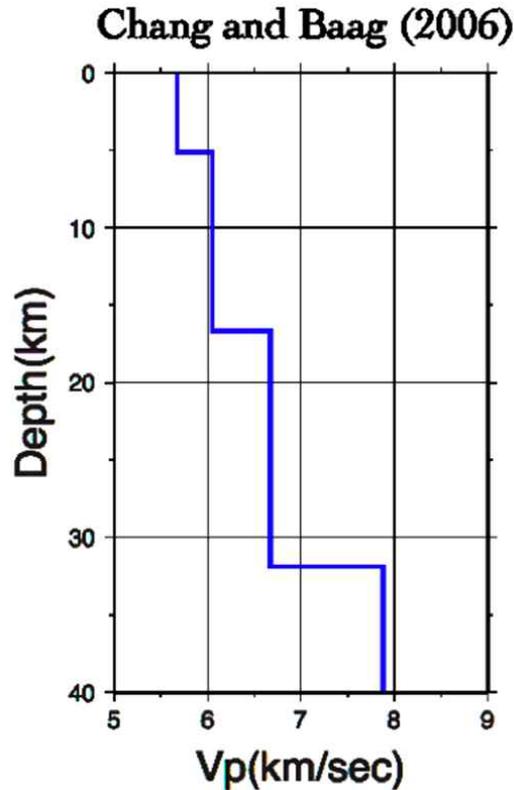


Figure 3.2.2 P-wave 1-D velocity used for locating GT0 events.

### 3.2.2.3 HYPOELLIPSE

HYPOELLIPSE는 국지지진 (local earthquake)과 근접한 광역지진(near regional earthquakes)의 진원 위치에 대한 역산을 위해서 미국의 로렌스 버클리 연구소 (the Lawrence Berkeley Laboratory)에서 개발하였다. 첫 개발 후에 HYPOELLIPSE는 미국 지질 조사소 (U. S. Geological Survey: USGS)와 스탠포드 대학의 선형 가속도 연구 센터 (Stanford Linear Accelerator Center)에서 여러 컴퓨터 시스템에 맞게 개량되었고, 현재는 USGS에서 연구자들에게 무료로 배포하고 있다. HYPOELLIPSE는 P파와 S파의 주행시간을 이용하여 각 관측소에 도달한 지진파의 시간에 대한 오차가 최소가 되는 진원 위치와 진원 시간을 역산한다.

지진이 발생하고  $n$  개의 관측소에서 관측이 되었을 경우, 지진발생 후  $i$ 번째 관측소 ( $x_i, y_i, z_i$ )에서 관측된 지진파의 도달시간을  $\tau_i$ 라 가정하고,  $x_i, y_i, z_i$ 는 관측소의 위도, 경도, 고도를 나타낸다. 첫 번째 시험해에서 역산된 지진원 시간을  $t$ , 그리고 진앙의 위치를  $x, y, z$ 이라고 가정하면, 시험해에 대한 오차(time residual:  $R_i$ )는

$$R_i \equiv \tau_i - t_i \quad (1)$$

위 식을 테일러 전개를 이용하면

$$R_i = dt + \frac{\partial t_i}{\partial x} dx + \frac{\partial t_i}{\partial y} dy + \frac{\partial t_i}{\partial z} dz + e_i \quad (2)$$

지진파의 주행시간과 주행시의 오차는 입력된 지각 속도 모델을 이용하여 계산할 수 있기 때문에, 최소 자승법을 이용하여 조정 오차(adjustment vector: dt, dx, dy, dz)의 최소값을 계산한다.

$$\sum e_i^2 = \text{minimum} \quad (3)$$

여기서  $\Sigma$ 는 모든 관측망의 합( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )을 의미한다. 식 (3)의 조건을 식 (2)에 적용하여 얻어진 수직함수의 미분방정식은 아래와 같다.

$$ndt + \sum a_i dx + \sum b_i dy + \sum c_i dz = \sum R_i$$

$$\sum a_i dt + \sum a_i^2 dx + \sum a_i b_i dy + \sum a_i c_i dz = \sum a_i R_i$$

$$\sum b_i dt + \sum a_i b_i dx + \sum b_i^2 dy + \sum b_i c_i dz = \sum b_i R_i$$

$$\sum c_i dt + \sum a_i c_i dx + \sum b_i c_i dy + \sum c_i^2 dz = \sum c_i R_i \quad (4)$$

여기서,

$$a_i \equiv \frac{\partial t_i}{\partial x}; b_i \equiv \frac{\partial t_i}{\partial y}; c_i \equiv \frac{\partial t_i}{\partial z} \quad (5)$$

식 (4)를 이용하여 재계산된 진원 발생 시간과 위치는 다음과 같이 구해진다.

$$t + dt, (x + dx, y + dy, z + dz) \quad (6)$$

반복 역산법의 다음 시험해(2nd trial solution)는 식 (6)이 되며, 위의 과정을 반복하여 오차가 최소가 되는 지점까지 계산하여 지진원의 위치와 진원시를 결정한다.

#### 3.2.2.4 기상청 지진관측망을 이용한 KCRT-2008 발파자료 진원 결정

Figure 3.2.1과 Table 3.2.3에 나타난 KCRT-2008의 발파 자료는 발파 주변의 기상청 지진 관측망 중 진앙거리가 약 150 km 이하인 지역에서는 초동 P파(Pg phase)가 잘 관측되었다. SNB가 큰 진앙거리 80 km 이하인 관측소에서 초동 P파는 선명하게 관측이 되었으나 진앙거리가 100 km 이상인 관측소에서는 저주파 잡음이 많아서 필터링을 수행하였다. 관측된 발파 자료에서 초동 P파는 5-15 Hz 대역에서 높은 신호를 보였고, 이에 해당하는 Butterworth 필터 적용하여 초동 P파를 선별하였다. Figure 3.2.3에서 Figure 3.2.10까지는 HYPOELLIPSE을 이용하여 1-D 속도 모델을 Chang and Baag (2006) 모델과 IASP91 모델(Kennett and Engdahl, 1991)을 이용했을 경우의 위치 역산 결과를 가장 가까운 거리의 관측소와 그 파형을 함께 보여주고 있다. 각 그림에서의 지진관측파형은 가장 가까운 관측소에서 관측된 파형을 표현한 것이며 관측소 이름과 진앙거리를 함께 나타내었다. 비교적 축척이 작은 지도는 진원위치(붉은 별)와 그 위치로부터 50 km 등간격의 거리(노란 원)와 초동 P파가 관측된 관측소 중 Chang and Baag (2006) 모델에 의한 계산보다 관측된 P파가 빠르게 도달한 관측소를 파란색 마름모 형태, 그리고 느리게 도달한 관측소를 붉은 원으로 표시했고, 심벌의 크기에 따라 다른 스케일로 보여주고 있다. 붉은 박스는 진원의 위치를 확대한 곳으로 축척이 작은 지도에서와 같이 붉은 별은 진원위치를 나타내고 검은 원은 진원에서 1 km 등간격의 거리를 나타내고 있다. 파란 별은 Chang and Baag (2006) 모델의 경우, 그리고 검은 별은 IASP91 모델(Kennett and Engdahl, 1991)을 사용했을 경우에 따른 HYPOELLIPSE의 진원위치 역산 결과를 보여주고 있다. 우측하단은 HYPOELLIPSE의 역산 결과를 정리한 것이다. 붉은색 문자는 GT0의 정보, 검은색 문자는 IASP91 모델(Kennett and Engdahl, 1991), 파란색 문자는 Chang and Baag (2006) 모델에 의한 위치결정 결과를 나타낸다.

두 모델에 대한 위치결정의 오차는 발파 4에서 Chang and Baag (2006)모델이 3.33 km, IASP91 모델이 3.54 km로서 진앙 위치의 오차가 가장 컸으나(Figure 3.2.4), 지진관측망의 서해

와 동해에서 수행된 발파 1과 4를 제외한 모든 발파에 대하여 Chang and Baag (2006) 모델은 0.5 km 미만의 진앙위치 오차를 보였다(Figure 3.2.4, 3.2.5, 3.2.7, 3.2.8, 3.2.9 그리고 3.2.10). 진원 깊이는 IASP91 모델에서는 평균 7 km로 깊게 관측되었으나 Chang and Baag (2006) 모델에서는 평균 1 km 깊이로 비교적 정확한 결과를 보여주고 있다.

# Shot#1:Kangwha

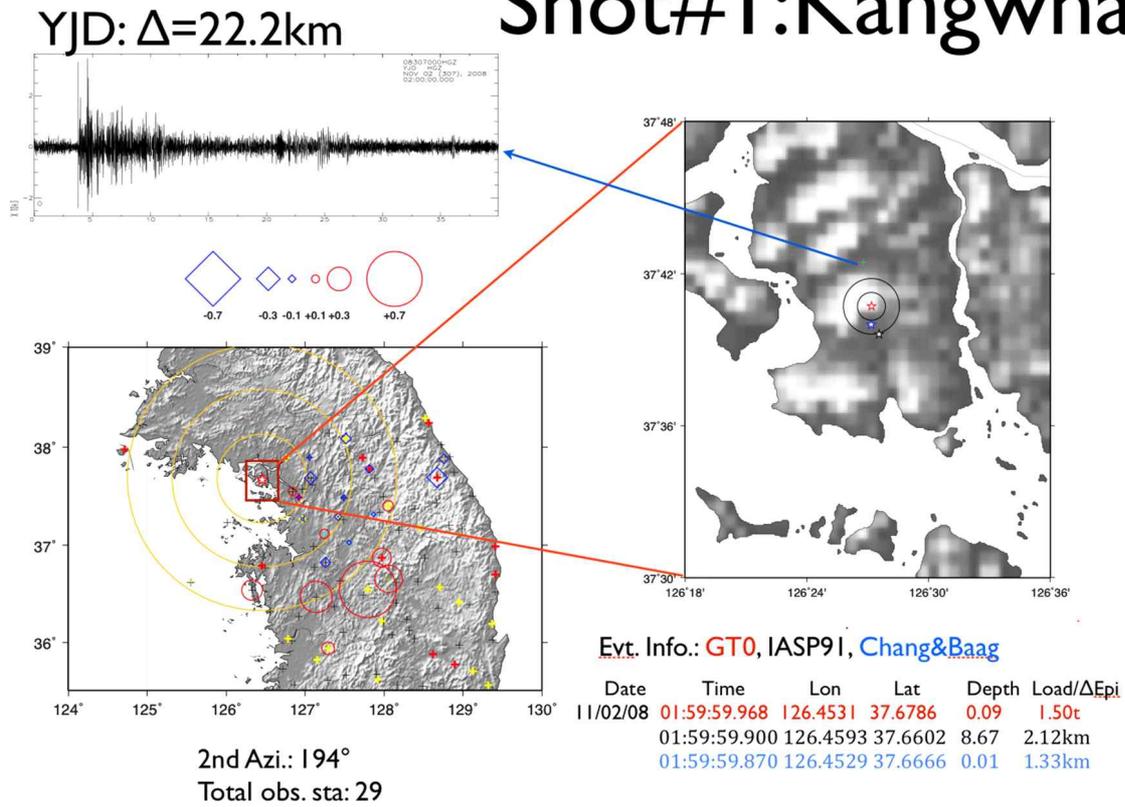


Figure 3.2.3 Inversion results for the shot #1 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

ICN:  $\Delta=19\text{km}$

# Shot#2:Yeoju

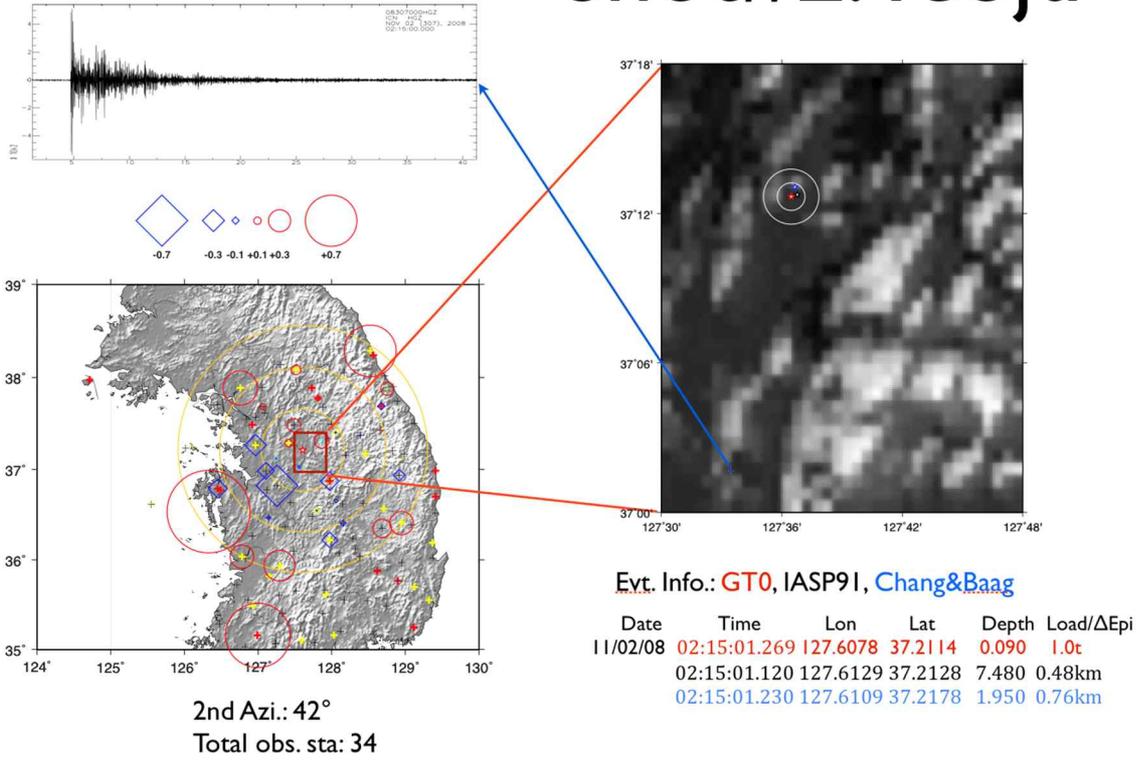


Figure 3.2.4 Inversion results for the shot #2 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

YOJ:  $\Delta=14.3\text{km}$

# Shot#3:Danyang

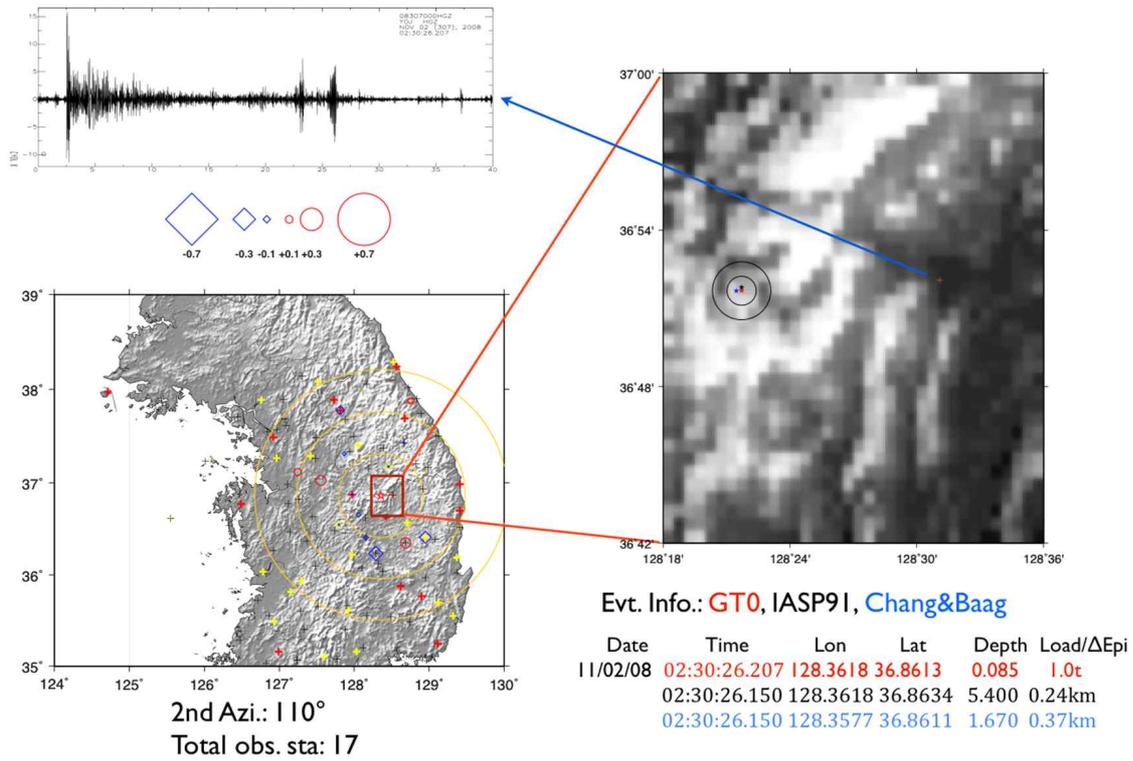


Figure 3.2.5 Inversion results for the shot #3 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

PHA:  $\Delta=14.5\text{km}$

# Shot#4: Youngduk

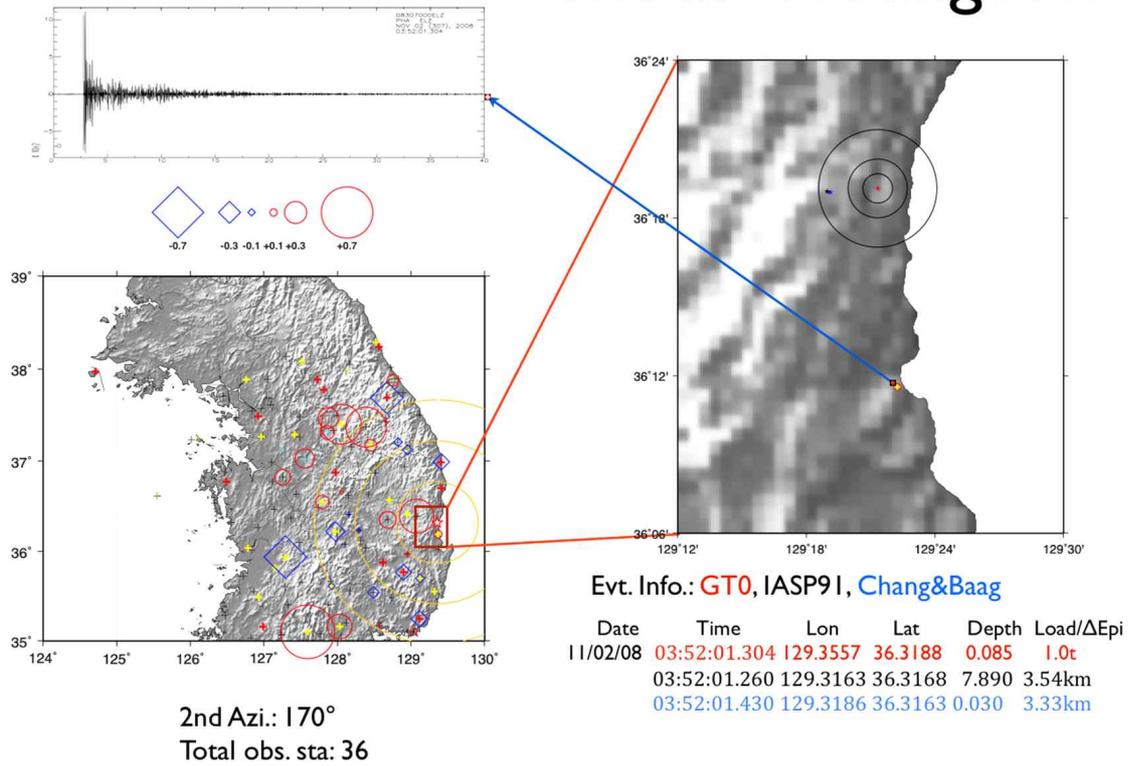


Figure 3.2.6 Inversion results for the shot #4 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

CHJ:  $\Delta=22.5\text{km}$

# Shot#5: Chungju

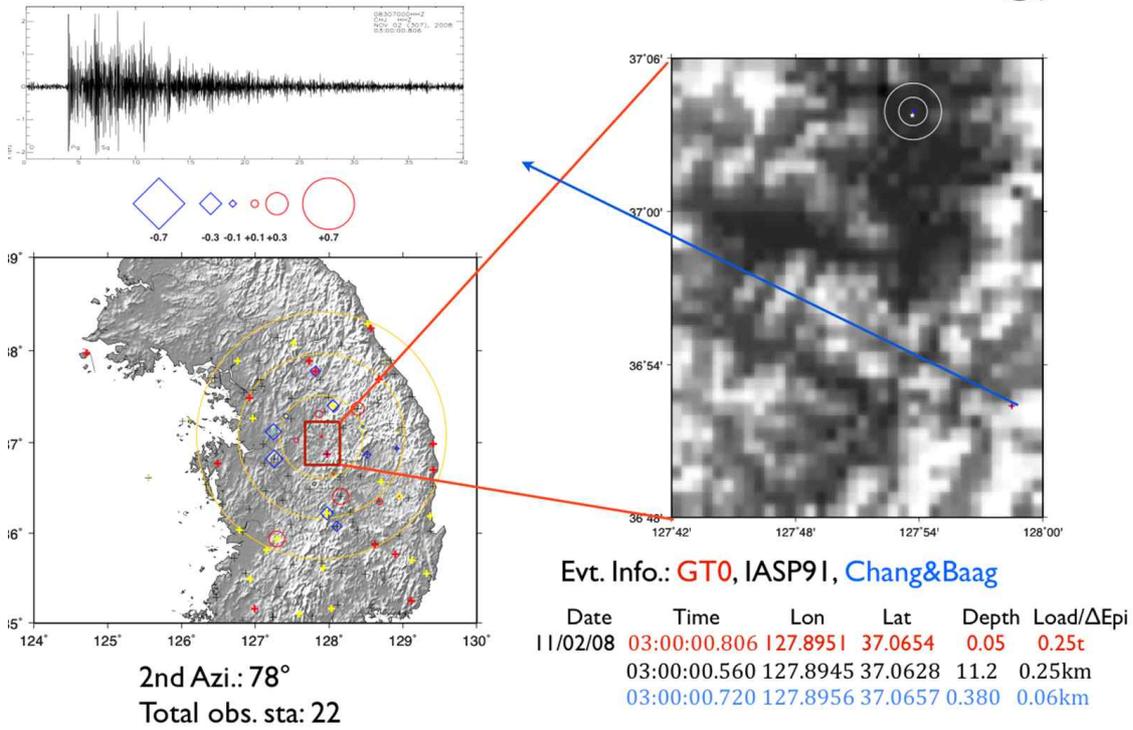


Figure 3.2.7 Inversion results for the shot #5 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

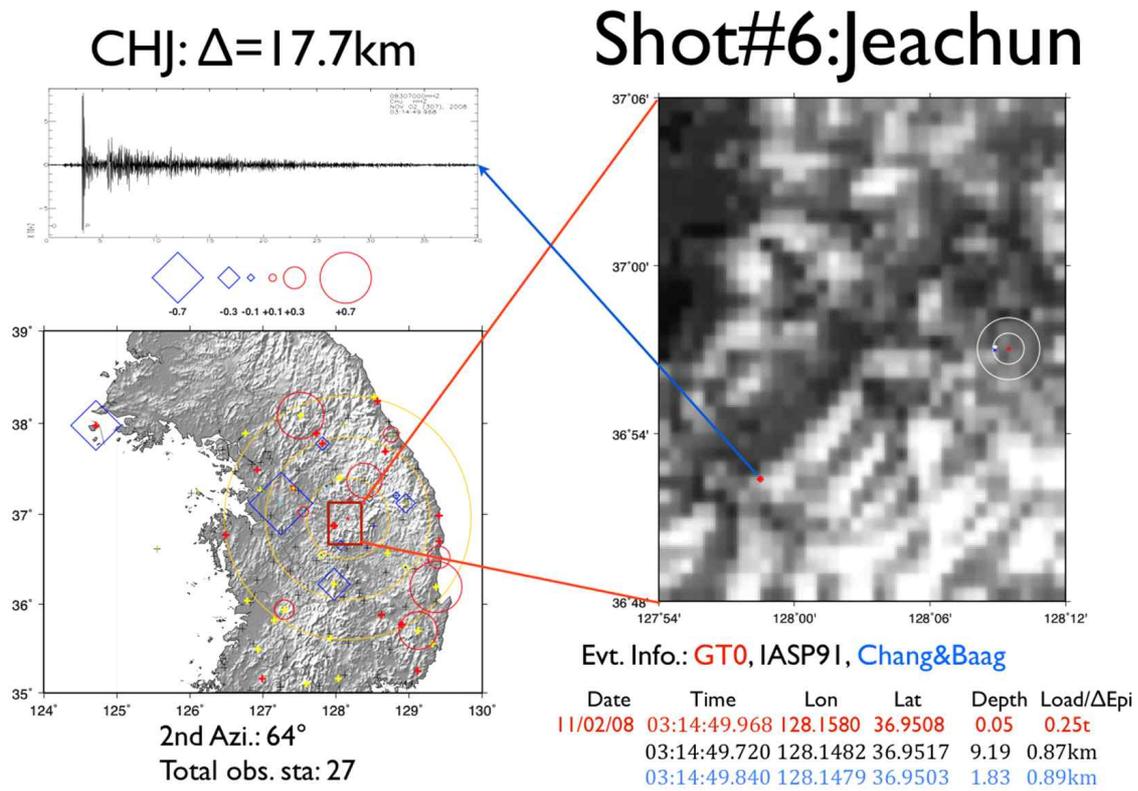


Figure 3.2.8 Inversion results for the shot #6 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

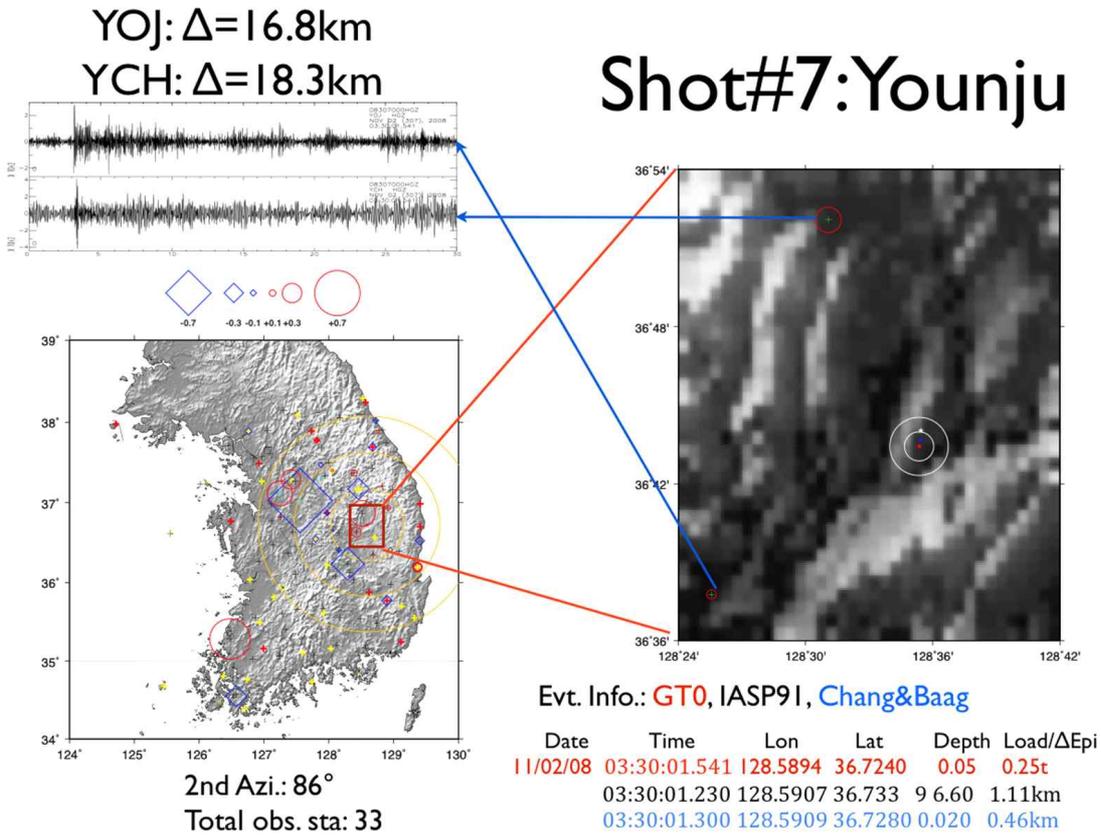


Figure 3.2.9 Inversion results for the shot #7 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

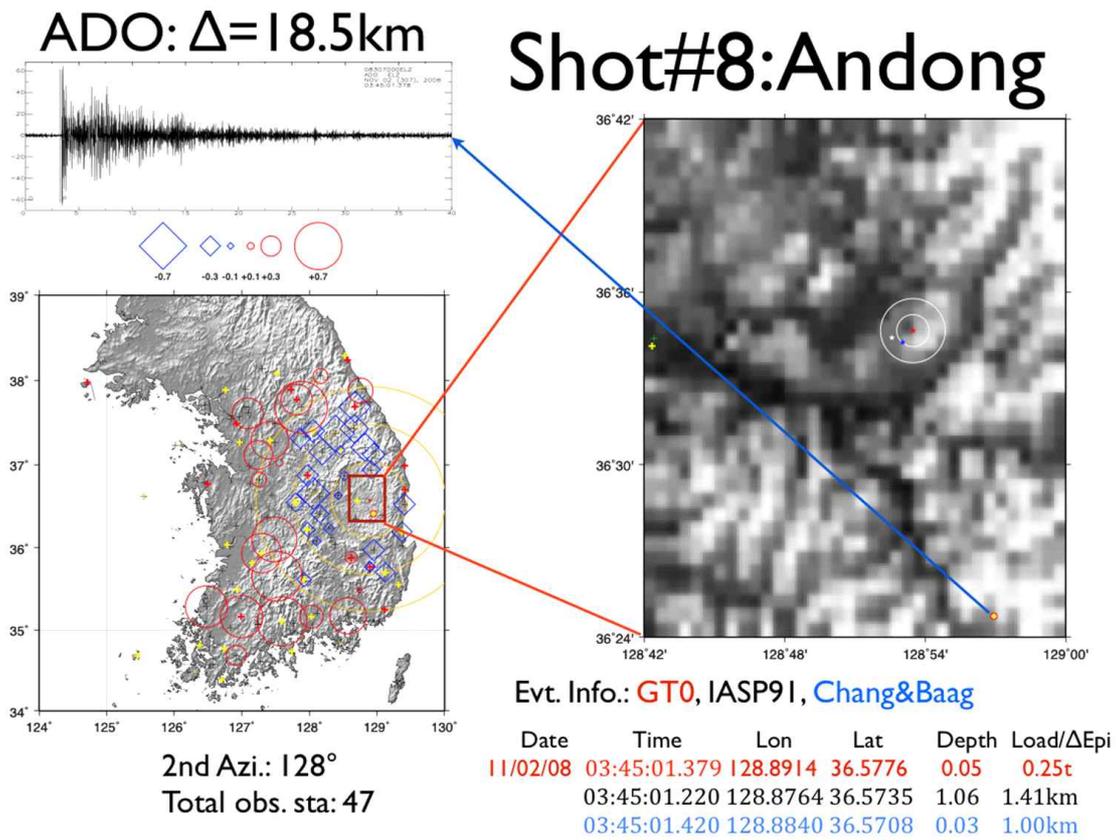


Figure 3.2.10 Inversion results for the shot #8 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

KCRT-2008을 이용한 진원위치 결정 결과는 Table 3.2.4에 요약하였다. Table 3.2.4는 Figure 3.2.3에서 Figure 3.2.10까지와 마찬가지로 GT0의 정보는 붉은 색 문자, IASP91 모델과 Chang and Baag (2006) 모델을 이용하여 역산된 결과를 각각 검은색과 파란색 문자로 기술되어 있다. 발파 1은 기상청과 기상연구소에서 설치한 임시 지진관측소 3 곳(Figure 3.2.1)을 포함한 29 개의 관측소에서 관측이 되었고, secondary azimuth gap(각 관측소에서 가장 가까운 관측소를 건너뛰고 2번째 관측소와 관측소간의 간격 각도)은  $194^\circ$ 를 보였다(Figure 3.2.3과 Table 3.2.4). 여주에서 수행된 발파 2는 34 개 관측소에서 관측이 되었고 secondary azimuthal gap은  $42^\circ$ 로 관측소가 가장 조밀한 분포를 보여주고 있다(Figure 3.2.4와 Table 3.2.4). 발파 3과 4는 각각 17 개 36 개의 관측소, 두 번째 방위각은 각각  $110^\circ$  와  $170^\circ$  의 값을 보였다(Figure 3.2.5, 3.2.6, 그리고 Table 3.2.4). 발파 2와 3번 사이 그리고 발파 3과 4번 사이에서 각각 두 차례 수행된 발파 5~8의 화약량은 250 kg 비교적 적은양이 사용되었다(Figure 3.2.1). 하지만 화약의 양이 적은 발파임에도 불구하고 한반도에 잘 분포되어 있는 기상청 지진관측망 내에서 수행이 되었기 때문에 관측된 관측소의 숫자는 4 개의 발파 모두 20 개 이상이었으며, 두 번째 방위각도 모두  $130^\circ$  이내의 값을 보였다. KCRIT-2008에서 수행한 발파 중에 발파 1과 4는 강화도와 영덕, 남한의 서북쪽 해안선과 중동부 해안선에서 수행된 것이다. 기상청 지진관측망은 울릉도의 해저지진계를 제외하고 모든 관측소가 내륙 혹은 섬에 설치되어 있기 때문에 발파 1과 발파 4는 첫 장에서 언급하였듯이 예시한 Bondár et al. (2004)의 전지구적 GT5 범위에는 들지 않았다.

다음 장에서는 KCRIT-2008 GT0 자료를 활용하여 재표본 방법을 이용한 한국형 GT5의 기준을 마련하는 연구에 대한 결과를 보여줄 것이다.

Table 3.2.4 Summary of the inversion results for the KCRT-2008 GT0 events using HYPOELLIPSE

Evt information: <b>GT0</b> , determined with IASP91, and <b>Chang &amp; Baag</b> .						
Id	Date	Time	Lon	Lat	Depth	Load/ $\Delta$ epi.
1	Nov. 2, 2008	<b>01:59:59.968</b>	<b>126.4531</b>	<b>37.6786</b>	<b>0.090</b>	1.50
		01:59:59.90	126.4593	37.6602	8.670	2.12
		01:59:59.870	126.4529	37.6666	0.010	1.33
2	Nov. 2, 2008	<b>02:15:01.269</b>	<b>127.6078</b>	<b>37.2114</b>	<b>0.090</b>	1.00
		02:15:01.120	127.6129	37.2128	7.480	0.48
		02:15:01.230	127.6109	37.2178	1.950	0.76
3	Nov. 2, 2008	<b>02:30:26.207</b>	<b>128.3618</b>	<b>36.8613</b>	<b>0.085</b>	1.00
		02:30:26.150	128.3618	36.8634	5.400	0.24
		02:30:26.150	128.3577	36.8611	1.670	0.37
4	Nov. 2, 2008	<b>03:52:01.304</b>	<b>129.3557</b>	<b>36.3188</b>	<b>0.085</b>	1.50
		03:52:01.260	129.3163	36.3168	7.890	3.54
		03:52:01.430	129.3186	36.3163	0.030	3.33
5	Nov. 2, 2008	<b>03:00:00.806</b>	<b>127.8951</b>	<b>37.0654</b>	<b>0.049</b>	0.25
		03:00:00.560	127.8945	37.0628	11.20	0.29
		03:00:00.720	127.8956	37.0657	0.380	0.06
6	Nov. 2, 2008	<b>03:14:49.968</b>	<b>128.1580</b>	<b>36.9508</b>	<b>0.048</b>	0.25
		03:14:49.720	128.1482	36.9517	9.19	0.87
		03:14:49.840	128.1479	36.9503	1.830	0.89
7	Nov. 2, 2008	<b>03:30:01.541</b>	<b>128.5894</b>	<b>36.7240</b>	<b>0.048</b>	0.25
		03:30:01.230	128.5907	36.7339	6.600	1.11
		03:30:01.300	128.5909	36.7280	0.020	0.46
8	Nov. 2, 2008	<b>03:45:01.379</b>	<b>128.8914</b>	<b>36.5776</b>	<b>0.048</b>	0.25
		03:45:01.220	128.8764	36.5735	1.060	1.41
		03:45:01.420	128.8840	36.5708	0.030	1.00

### 3.2.2.5 KGT5 수립을 위한 재표본 연구

기상청 지진관측망에 관측된 KCRT-2008 GT0 자료와 3.2.2.1절에서 언급한 잭나이프(jackknife) 방법을 이용하여 진원위치 결정에서 오차가 5 km 이하로 결정할 수 있는 경우에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구는 KCRT-2008 의 8 개 발파 자료를 이용하여 각 발파에 대한 관측소의 개수와 분포에 따라 지진원 위치 결정에서 발생할 수 있는 오차를 계산으로서 기상청 지진 관측망에 최적화된 KGT5 (Ground Truth 5 for Korea National Seismic Network)의 기준을 마련하는 것이다.

KCRT-2008 발파에 대한 평균 관측소 개수는 31 개로 만일 재표본 연구를 위하여 지진파 위치결정을 위한 관측소의 개수를 3 개부터 시작하여 31 개 관측소에 관한 모든 조합(combination)에 대한 경우의 수는  $\sum_{i=3}^{31} C_{31}^i$ 로 계산된다. 이는 2.66 Ghz Quad-core Intel Xeon processor로 계산을 할 경우 6 개월 이상이 소요되는 연산으로 모든 경우에 대한 연산을 수행하는 것은 연구 시간을 매우 많이 소모하는 작업이다. 따라서 Jackknife 방법을 이용하여 확률론적으로 분포되어 있는 분석오차에 대한 대체 모델링을 수행하였고, 통계학적으로 이러한 방법은 보편적으로 수행되는 것으로 많은 다른 연구자들도 적용하고 있다(Bondár et al., 2001; Bondár et al., 2004; Bondár and McLaughlin, 2009; Boomer et al., 2010). 8 개의 KCRT-2008 발파에 대하여 재표본을 무작위로 실시하였고, 그 결과 559,876 개의 재결정 자료를 560,000 개의 표본을 통하여 얻었다. 이 과정을 수행한 포트란 소스코드는 부록에 수록되어 있다.

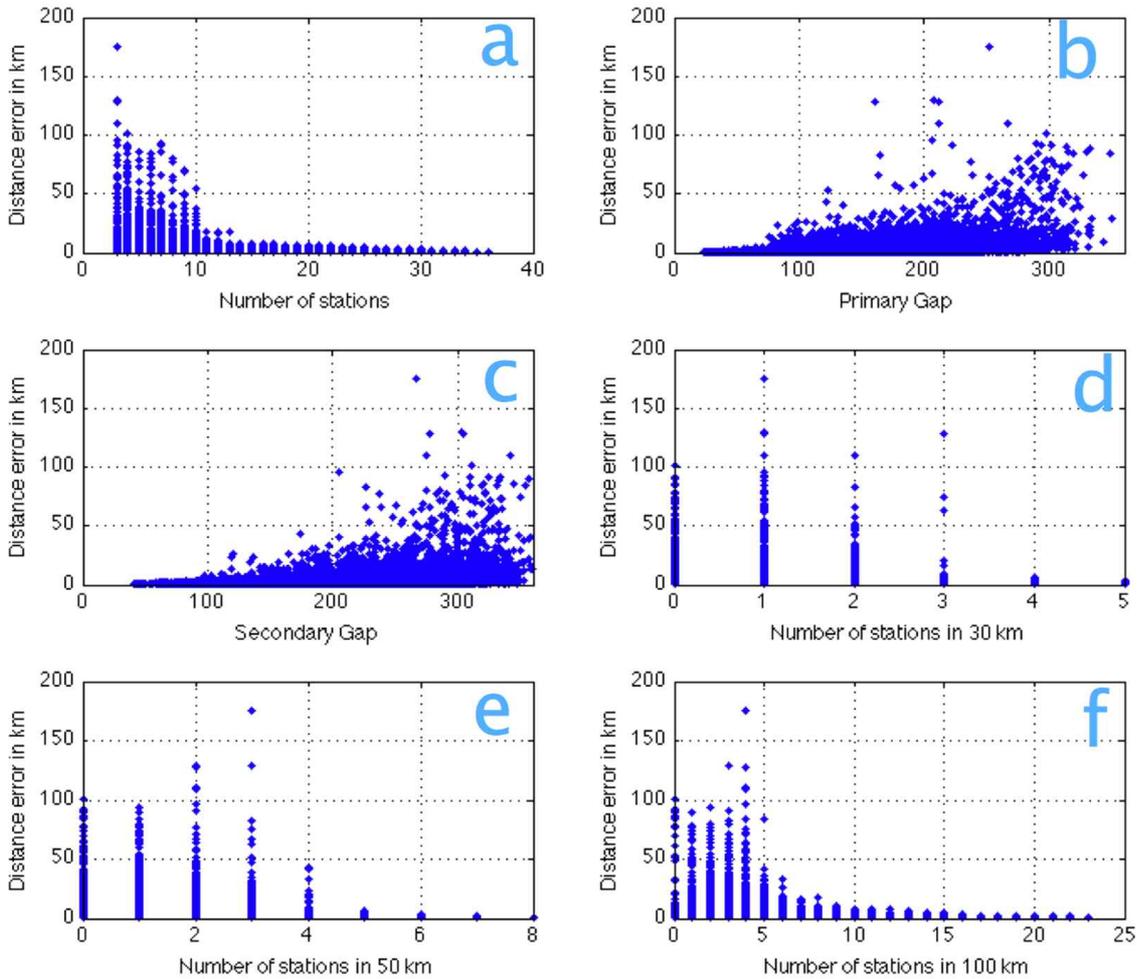


Figure 3.2.11 (a) Locating errors related with a number of stations, (b) primary azimuthal gaps, (c) secondary azimuthal gaps, (d) a number of stations within epicentral distances less than 30 km, (e) a number of stations within epicentral distances less than 50 km, and (f) a number of stations within epicentral distances less than 100 km.

Figure 3.2.11은 각 표본에 대한 진원의 재결정 결과가 총 관측된 관측소의 개수(a), primary azimuthal gap의 범위(b), secondary azimuthal gap 범위(c), 진앙거리 30 km이내에 관측된 관측소의 개수(d), 진앙거리 50 km이내에 관측한 관측소의 개수(e), 그리고 마지막으로 진앙거리 100 km이내에 관측한 관측소의 개수(f)에 따른 진앙거리 재결정 오차를 나타낸다. 총 관측된 관측소의 개수에 따른 오차는 관측소의 개수가 10 개 이상인 경우에 진앙위치 결정에서의 최대 오차가 57 km에서 20 km이하로 급변하는 것을 보여주고 있다(Figure 3.2.11.a). 관측소간의 방위각 범위에 따른 오차, 즉 발파를 관측한 관측소의 분포에 따른 진앙위치의 오차를 보면 primary azimuthal gap보다는 secondary azimuthal gap의 값에 더 민감함을 알 수 있다 (Figure 3.2.11.b와 3.2.11.c). 이는 KGT5 결정에 있어서 secondary azimuthal gap 분포에 중점을 두고

기준을 정해야 함을 보여주고 있다. 관측소의 위치가 진앙에서 가까울수록 P파의 속도구조의 불확실성 때문에 발생하는 오차는 줄어들고, 진원결정에 있어서 깊이 제한도 매우 높게 발생한다. 따라서 관측소가 진앙에서부터 30 km, 50 km, 100 km 이내에 존재하는 개수에 따른 진원 결정 오차도 분석하였는데(Figure 3.2.11.d-f), 30 km 이내에 관측소가 5 개 이상 존재하는 경우는 azimuthal gap 분포와는 거의 무관하게 그 오차가 5 km 이내임을 보여주고 있다(Figure 3.2.11.d).

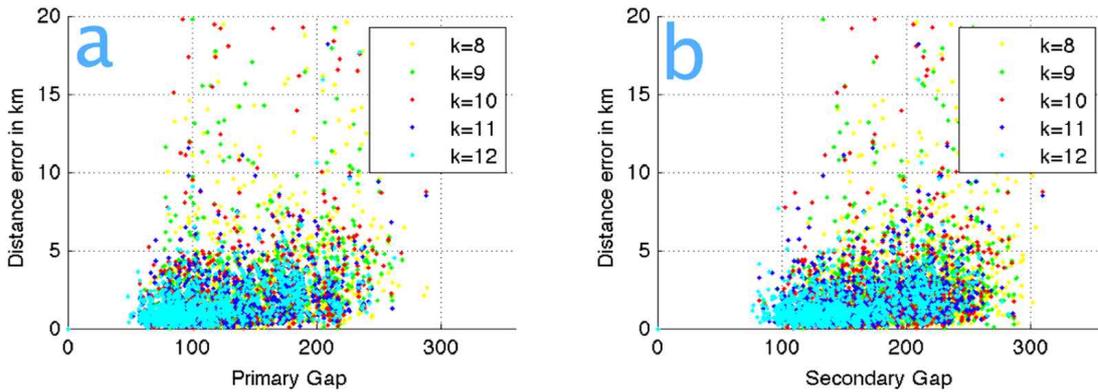


Figure 3.2.12 (a) Locating errors sorted with at least a station existing within epicentral distances less than 30 km and primary azimuthal gaps, and (b) secondary azimuthal gaps .

Figure 3.2.12는 관측된 지진관측소 중 최소한 1 개 이상의 지진관측소가 진앙거리 30 km 이내에 존재하며 primary azimuthal gap(a)의 값과 secondary azimuthal gap의 값에 따른 진앙 위치 재결정의 오차(b)를 보여주고 있다. Figure 3.2.12에서 각 점의 색깔은 총 관측소의 개수가 8 개부터 12 개까지 범위에서의 오차를 나타낸다. 최소한 1 개 이상의 관측소가 진앙거리 30 km 이내 존재하고 총 관측소의 개수가 각각 8, 9, 10, 11, 12 개일 경우에 대한 primary azimuthal gap 분포와 secondary azimuthal gap 분포에 의하여 위치 결정 오차가 5 km 이하로 결정되는 경우를 확률론적 밀도 함수로 계산을 하였다(Figure 3.2.13과 Figure 3.2.14).

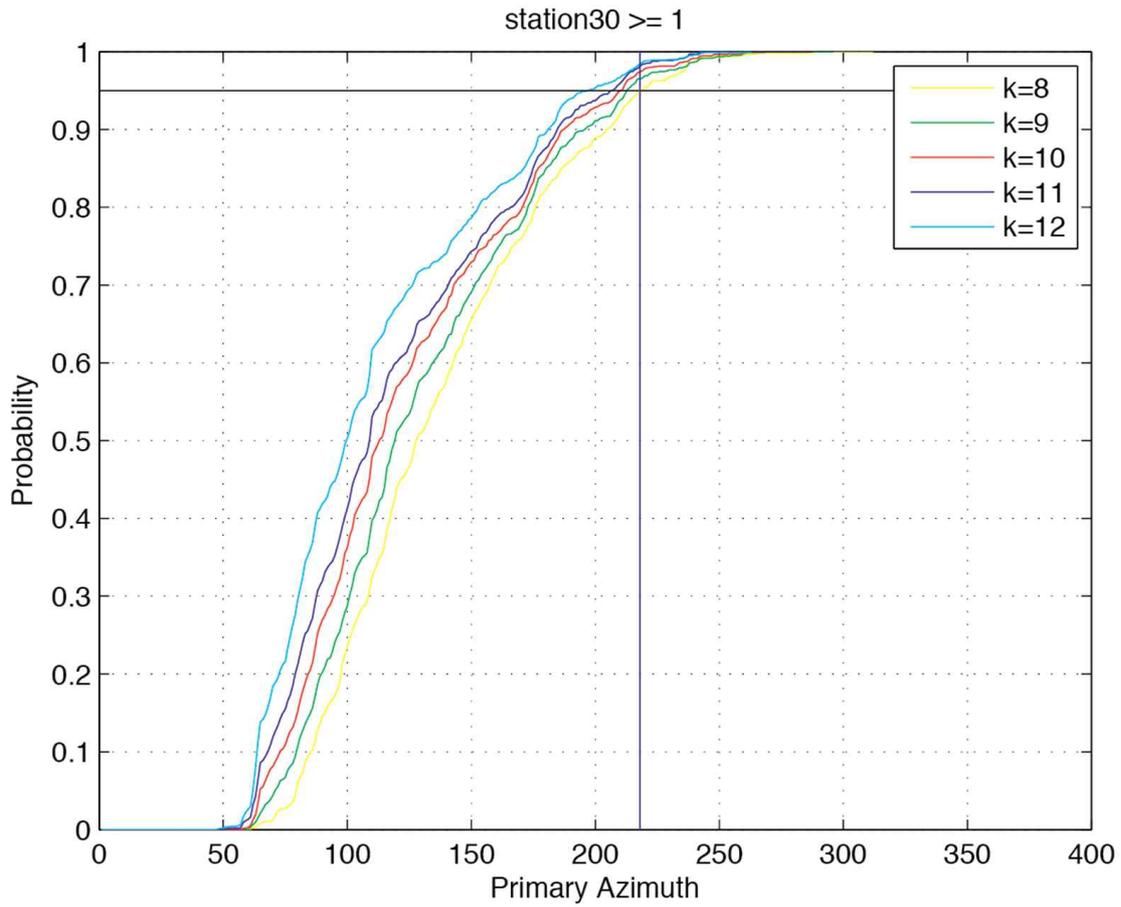


Figure 3.2.13 The relationship between primary azimuths and accumulated density function for the number of station is 8, 9, 10, 11, and 12 respectively.

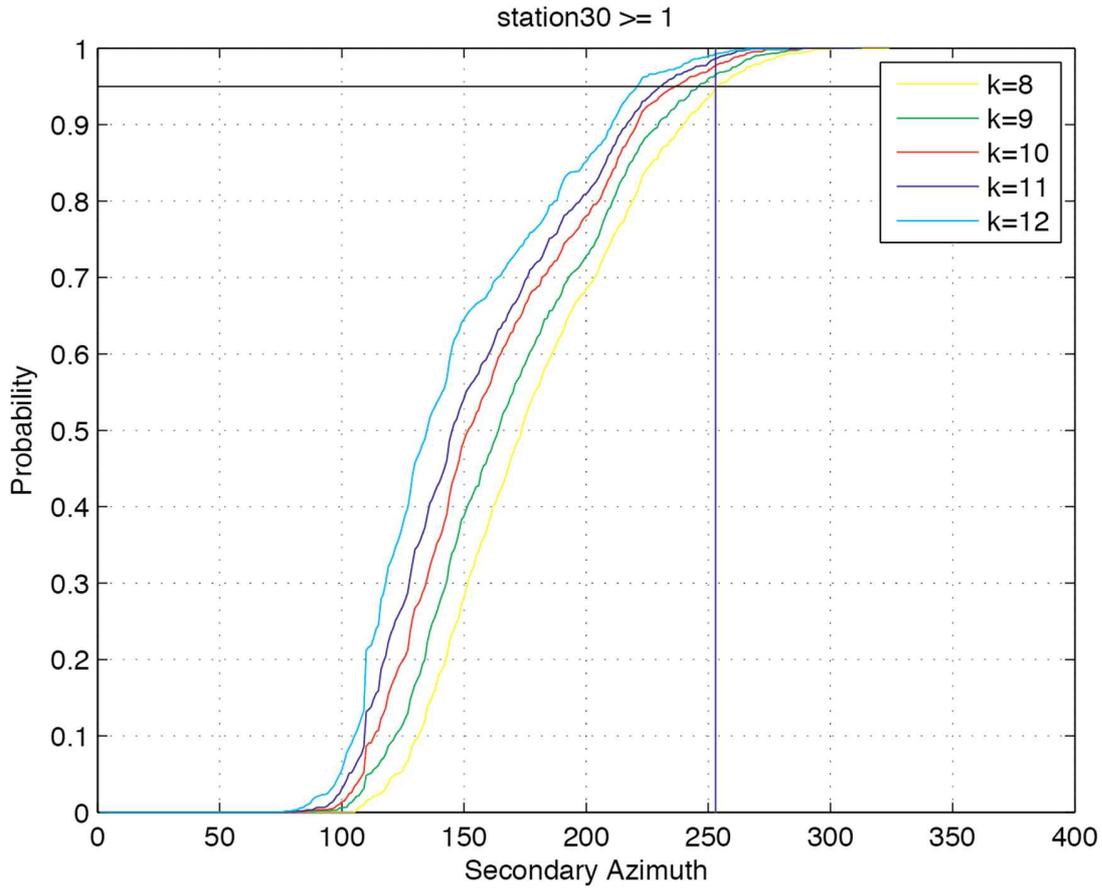


Figure 3.2.14 The relationship between secondary azimuths and accumulated density function for the number of station is 8, 9, 10, 11, and 12 respectively.

primary azimuthal gap에 대한 확률론적 밀도 함수가  $218^\circ$  이하이고 총 관측소의 개수가 8 개 이상 그리고 최소 1 개 이상의 관측소가 진앙거리 30 km 이내에 존재하는 경우는 95%의 신뢰도를 가지고 결정된 지진의 위치가 5 km 이내임을 보여주었다. 같은 조건에서 총 관측소의 개수가 많을수록 신뢰도는 향상되고 12 개의 관측소를 이용했을 경우는  $\sim 98\%$ 의 신뢰도를 나타낸다.

secondary azimuthal gap과 확률론적 밀도 함수와의 관계를 보면, 8 개의 관측소와 secondary azimuthal gap이  $253^\circ$  이하인 경우 역산된 지진의 위치 오차는 5 km 이하로 95%의 신뢰도를 갖는다. 같은 조건에서 관측소의 개수가 12개일 경우는  $\sim 99\%$ 의 신뢰도를 보이며, 지진원 위치결정 오차는 5 km 이하로 결정된다(Figure 3.2.14).

### 3.2.2.6 KGT5 기준을 적용한 2007-2008 KGT5 지진목록

지각/맨틀 속도구조 연구, 지진원의 단층면해 연구, 지진/발파 구별 등 지진학에서 대부분의 연구는 신뢰성 있는 지진원 정보, 즉 지진원의 정확한 위치와 발생시간이 반드시 필요하다. 이번 절에서는 지진연구에 기본이 되는 지진목록, 즉 진원의 위치 결정에 있어서 그 오차가 5 km 미만인 KGT5 (신뢰성 95% 이상) 목록 작성을 하였다. 사용된 자료는 2007년 기상청 기상연구소에서 실시한 진원위치 재결정 자료, 그리고 본 연구에서 재결정한 2008년 지진목록 자료를 이용하였다. 위치결정을 위해서 초동 P파만을 정밀하게 수동으로 선택하였다.

기상청은 2007년 총 42 개의 지진을 발표하였으며, 1월 20일에 발생한 오대산 지진을 포함하여 24 개의 지진이 KGT5의 기준을 만족하였다. 2008년도에 45 개의 지진이 발표되었고 이 중 14 개의 지진이 KGT5의 기준을 만족하였다. 2007-2008년 기상청에서 발표한 지진 중 총 38 개의 지진이 95%의 신뢰도를 가지며, 진원 결정 오차 5 km 이하의 지진이라 할 수 있다(Table 3.2.5).

Table 3.2.5 KGT5 earthquake catalogue for 2007-2008 (time is in UTC, hr=hour, mn=minute, the units of primary and secondary azimuthal gaps are in degrees, and rms is in second).

Date	hr&mm	sec.	lat.	lon.	dep.	no. of. sta.	Primary gap	2nd. gap	rms
20070120	1156	53.21	37.699	128.5786	7.72	20	84	100	0.1223
20070310	918	41.07	37.2082	128.8597	0.04	32	153	172	0.255
20070314	2030	12.53	36.1507	127.9745	6.03	98	22	30	0.658
20070424	2336	39.65	36.9806	126.4464	0	46	183	197	0.1857
20070503	324	8.51	36.1513	127.8201	5.1	51	38	37	0.2541
20070503	924	2.17	36.5866	127.8119	16.03	43	28	42	0.1764
20070513	722	47.48	35.9168	127.9905	0.03	34	28	50	0.2773
20070515	1956	8.63	35.7164	129.2186	0.86	39	138	176	0.6767
20070518	2253	26.82	36.5573	129.0124	8.98	41	76	97	0.3622
20070527	1551	58.57	35.2179	128.5887	0.04	55	110	113	0.2217
20070719	12 1	11.63	37.1231	129.1358	34.32	28	175	175	1.9228
20070722	449	27.57	36.8901	126.6253	5.18	49	71	132	0.2453
20070807	939	50.54	37.205	128.793	5.07	33	134	146	0.4966
20070811	1952	32.26	36.0633	127.728	5.15	55	26	39	0.2875
20070911	2150	57.72	36.47	129.6486	9.48	40	229	223	0.2506
20070916	1616	32.15	36.4366	129.6479	0.68	61	223	229	0.9244
20070923	1524	8.8	36.4384	129.6367	4.69	52	218	222	0.3796
20070930	16 2	43.18	36.4482	129.6556	6.11	39	229	244	0.299
20071004	1456	6.88	36.4388	129.6176	4.91	81	216	216	0.5172
20071012	1913	35.57	36.4478	129.6572	4.65	41	229	222	0.3041
20071016	559	4.17	37.426	128.8482	0.04	37	104	165	0.6898
20071017	11 6	24.52	36.4468	129.6898	0.13	23	225	238	0.6729
20071028	1732	1.44	36.5988	128.3963	11.95	78	32	62	0.2489
20071118	2051	22.74	34.7639	126.5092	16.02	14	108	193	0.1796
20080114	9 3	14.44	36.2139	127.5069	8.48	34	51	91	0.1392
20080226	1422	48.92	35.9867	126.5376	3.55	51	128	140	0.3619
20080228	2037	53	33.5331	126.6005	16.71	17	165	170	0.1124
20080309	9 5	0.05	35.6433	128.7493	8.11	44	99	99	0.2363
20080328	729	20.95	37.8041	126.3534	14.08	45	155	155	0.276
20080622	1430	12.77	35.5527	128.5568	0.4	27	88	103	0.3124
20080702	732	51.02	35.5321	128.815	4.37	34	83	102	0.2888
20080914	3 5	8.25	35.617	127.0199	1.15	58	76	94	0.2926
20081009	2 4	34.18	38.1198	127.0977	0.02	11	212	240	0.4008
20081030	26	14.57	36.3428	127.2463	0.07	52	34	75	0.3392
20081106	912	30.83	37.0739	129.1469	1.33	45	153	150	0.3568
20081207	1728	6.48	36.4637	129.6448	2.87	34	239	238	0.3159
20081219	1438	14.32	36.4767	129.6113	3.04	29	232	215	0.2987
20081220	853	41.19	36.4731	129.6021	3.26	37	237	237	0.2908

### 3.2.3 결 론

본 연구에서는 KCRT-2008의 8개 발파지점에서 관측된 300 개 이상의 P파 초동을 사용하여 기상청 지진관측망에 맞는 KGT5 연구를 수행하였다. 그 결과, 초동 P파가 관측된 관측소의 수가 8~12 개이고 진앙거리 30 km이하인 곳에서 최소한 1 개 이상의 지진관측소가 존재하는 경우, primary azimuthal gap에 대한 축적된 확률론적 밀도함수(accumulated density function)를 계산하여 신뢰도가 95% 이상인 경우와 같은 조건에서 secondary azimuthal gap의 값에 대한 관계를 도출하였다. 각각의 확률론적 분석에 대한 결과를 정리하면,

1. 지진원 발생 시 관측된 관측소의 개수가 최소 8 개 이상.
2. 진앙거리 30 km 이하에서 최소한 1 개 이상의 관측소가 존재.
3. primary azimuthal gap이  $218^{\circ}$  이하이거나, secondary azimuthal gap이  $253^{\circ}$  이하인 경우.

만일 지진 혹은 다른 지진원에 의하여 지진파가 관측되었고, 관측된 자료가 위의 조건을 모두 만족하는 경우에 대하여 결정된 진앙의 위치는 오차범위 5 km 이하로 95%의 신뢰도를 가지는 결정값이라 할 수 있다. 이를 기상청의 국가지진관측망에 대한 GT5의 기준이라 정의할 수 있다 (Figure 3.2.15).

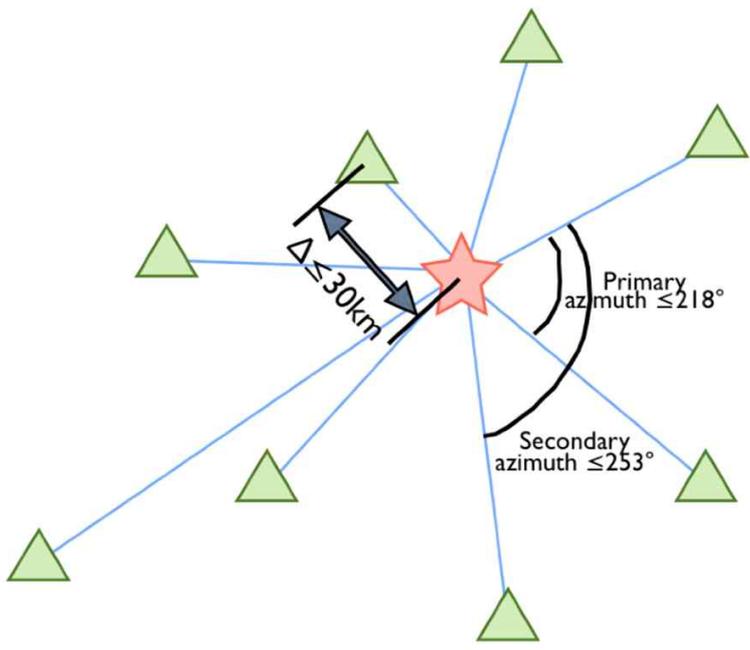


Figure 3.2.15 Summary cartoon of KGT5 criteria.

### 3.3 Grid search 방법을 이용하여 1999-2010년도 기상청에서 발표한 지진원 위치 재결정 및 목록 작성

#### 3.3.1 기상청 지진관측망

한반도에서의 지진관측은 1996년 영월지진(ML=4.5)과 1997년 경주지진(ML=4.2) 발생 이후, 1998년도 부터 기상청에서 아날로그 방식의 지진관측장비를 디지털방식의 지진계로 교체하여 현재 국가 지진관측망(Korea National Seismic Network: KNSN)을 구축하여 준 실시간으로 지진을 감시하고 있다. 현재 국가지진관측망은 초광대역 1개 관측소, 광대역+가속도 11개 관측소, 시추공 광대역+가속도 11개 관측소, 단주기+가속도 31개 관측소, 가속도 59개 관측소, 단주기 해저 지진계 1개 관측소, 그리고 시추공 가속도 3개 관측소로 총 117 개의 관측소를 구성되어 있다. Figure 3.3.1은 기상청에서 운영중인 관측소를 센서의 특성별로 나누어 2012년 1월 1일까지의 관측소 정보와 위치를 나타내고 있다.

#### 3.3.2 1999-2010 지진 발생 현황

기상연구소에서는 2008년 이후로 기상청에서 발표한 국지지진들(local earthquakes)을 P파와 S파의 주행시간을 결정하고 이를 역산하여 지진원 위치를 재결정하고 있다. 부록에 있는 표 A1과 Figure 3.3.2 1999년부터 2010년 까지 기상청에서 관측되고 발표한 자료중에서 기상연구소에서 진원의 위치를 재결정한 484개의 지진 위치 정보를 보여주고 있다. 년도별 지진분포는 2009년에 60개의 지진으로 가장 많이 관측되었고, 2007년도에 19개로 가장 적은 지진이 재결정에 사용되었다. 또한 Figure 3.3.2에서 보여주는 것과 같이 재결정된 지진의 약 50%가 해저에서 발생하였고, 이는 기상청의 국가 지진관측망 밖에서 관측된 것으로 지진의 위치결정에 있어서 많은 오차가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 Grid search 방법을 이용하여 지진원의 위치를 있어서 확률론적으로 분포도를 지도에 표시하고, 이를 바탕으로 진원 위치를 계산하고자 한다.

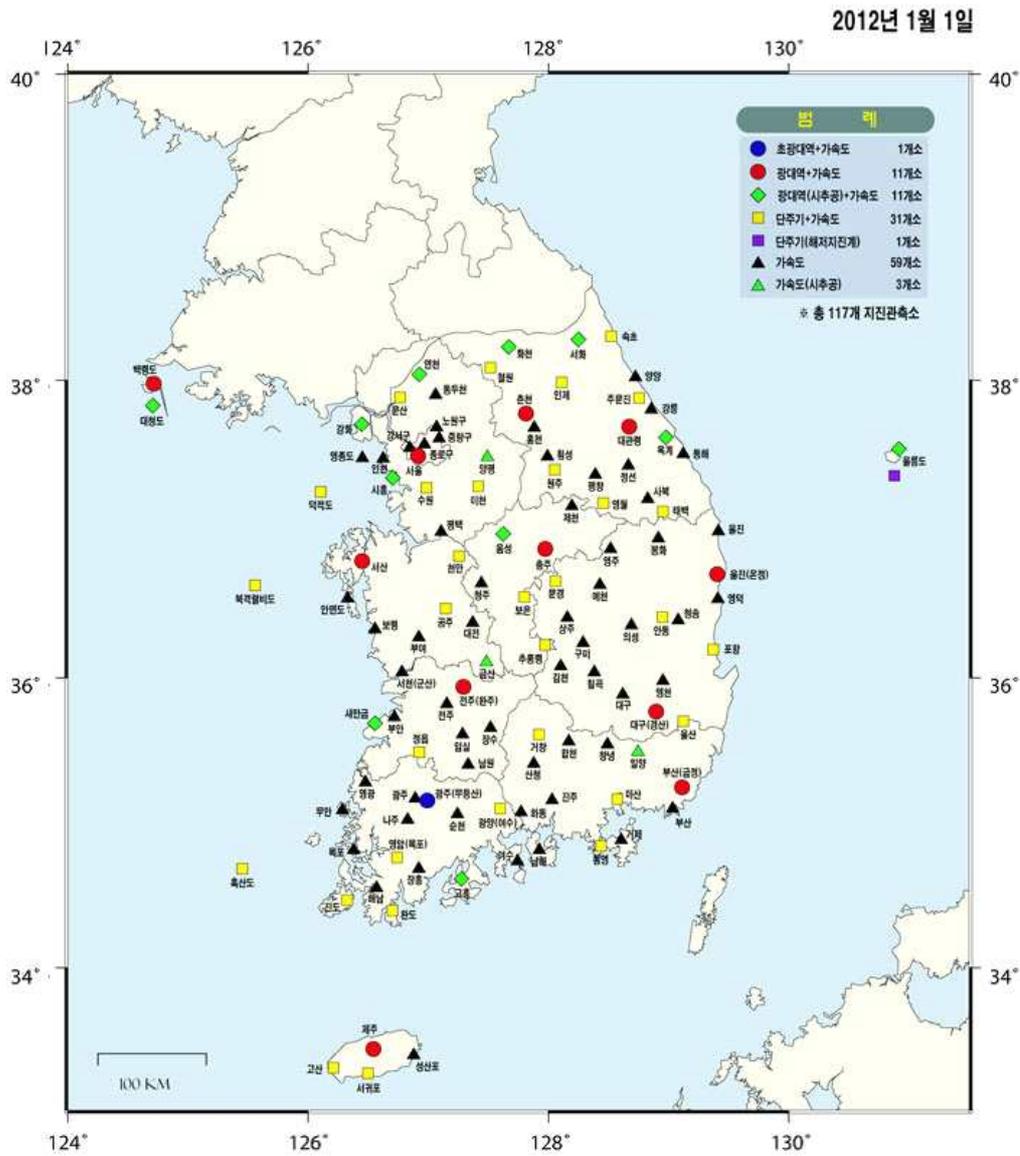


Figure 3.3.1 Locations of the KNSN stations (from the KMA homepage "http://web.kma.go.kr/aboutkma/biz/earthquake01.jsp").

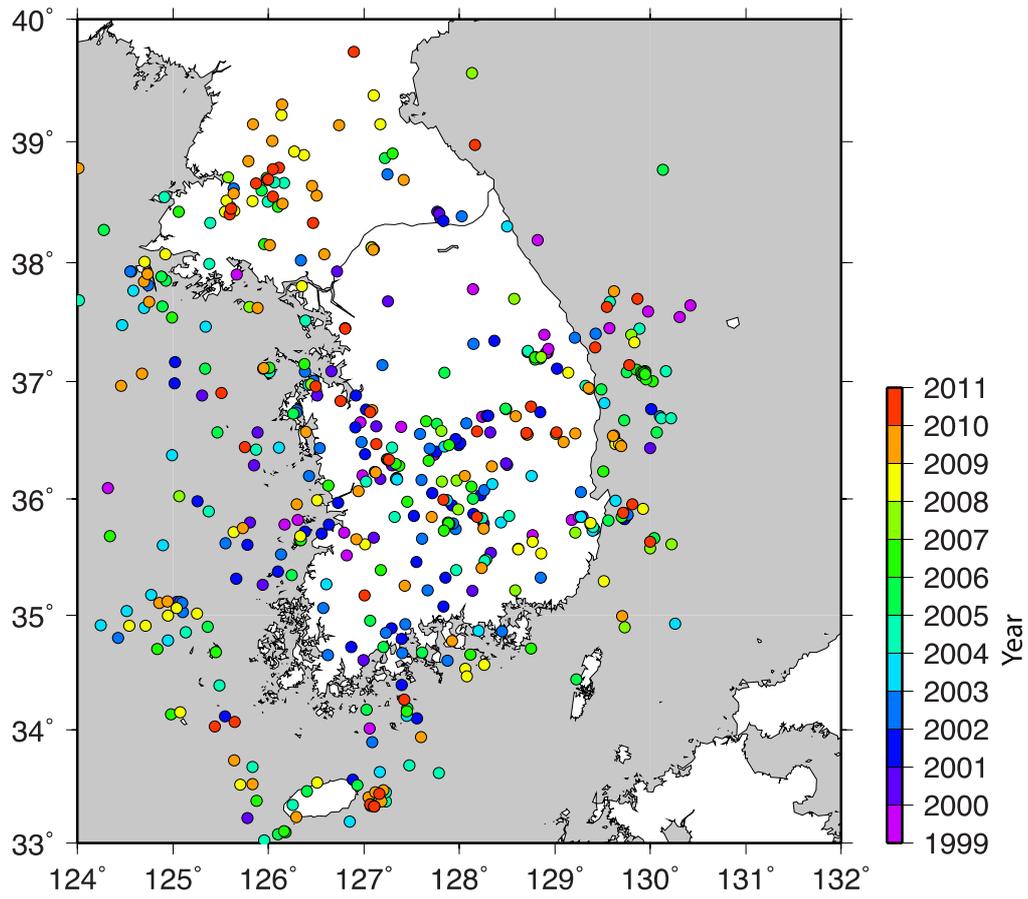


Figure 3.3.2 Locations of earthquakes occurring between 1999 and 2010, and they were relocated by NIMR seismological group.

### 3.3.3 지진원 위치 결정 방법

본 연구에서는 지진원 위치를 결정하기 위해서 “Non-linear, earthquake location program (NLLoc)” 소프트웨어를 사용하였다. NLLoc 프로그램은 속도 모델, 지진파의 주행 시간, 그리고 확률론적 분포와 비선형 지진원 위치 결정을 수행하여 3차원으로 진원의 위치와 그 오차 범위를 나타낼 수 있는 패키지로 구성되어 있다. 기본적으로 Grid search 방법을 이용하여 지진원의 위치와 진원시를 역산한다. 지진파의 도달 시간에 대한 오차 분석과 지진파의 주행시간은 Gaussian 분포로 가정하여 수행하고, 관측된 지진파의 도달시간과 계산된 주행시간간의 maximum likelihood 방법으로 진원시간을 역산하는 방법을 이용하고 있다. 주행 시간을 계산하기 위해서 사용된 속도 모델은 1983년도에 발표된 Kim and Jung 모델을 사용하였다. 표 1과 그림 3은 Kim and Jung의 속도 모델(Figure 3.3.3a)과 이를 이용하여 계산된 P파의 진원과 관측거리에 따른 주행시간(Figure 3.3.3b)과 지진파의 전파각(Figure 3.3.3c)를 계산한 결과를 보여주고 있다.

Table 3.3.1 One-dimensional velocity model used for computing travel time (Kim and Jung, 1983)

Number of layer	Depth ranges	Vp (km/sec)	Vs (km/sec)
1	0 - 2 km	5.5	3.3
2	2 - 15 km	6.0	3.5
3	15 - 29 km	6.6	3.7
4	29 - km	7.7	4.3

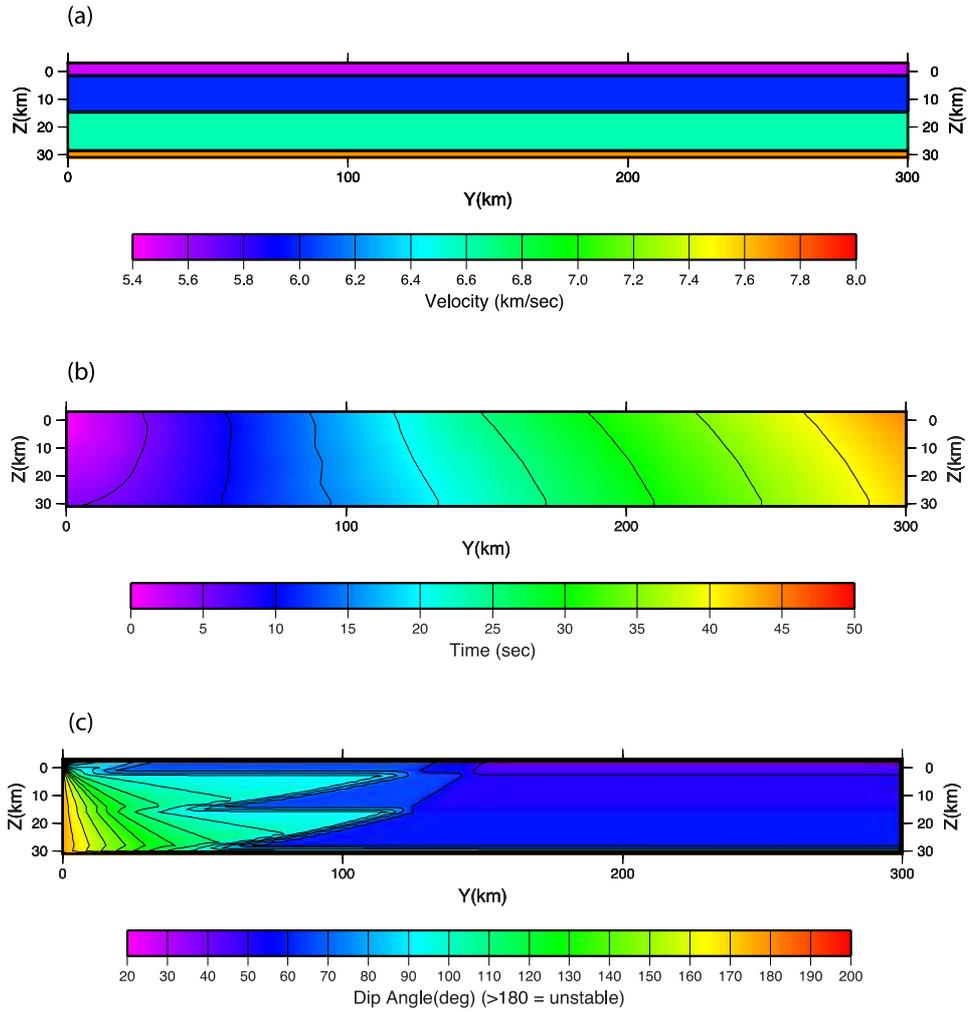


Figure 3.3.3 (a) One dimensional velocity model used in this study from Kim and Jung, 1983, (b) computed travel times, and (c) computed propagating ray angles.

### 3.3.4 역산 방법

NLLoc 소프트웨어는 Tarantola and Valette (1982)과 Tarantola (1987)이 소개한 확률론적 분포를 이용한 역산방법으로 지진원의 위치를 결정한다 [Tarantola and Valette, 1982; Moser et al., 1992; Lomax et al., 2000]. 진원의 위치 와 진원시 는 알 수 없는 인자로, 관측된 지진파의 도달 시간 () 그리고 속도모델을 이용하여 이론적으로 계산된 주행시간을 로 표시 한다. Tarantola and Valette (1982)는 만일 이론적인 주행시간과 관측된 지진파 도달시간이 covarian matrices 와 를 가지는 Gaussian 불확실성을 갖는다면, PDF (Probability Density Function)은 진원시 T에 대하여 적분함으로써 진원위치인자에 대한 오차 PDF 을 구할 수 있다.

$$\sigma(\mathbf{x}) = K\rho(\mathbf{x}) \exp \left[ -\frac{1}{2}g(\mathbf{x}) \right],$$

$$g(\mathbf{x}) = [\hat{\mathbf{t}}_0 - \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x})]^T [(\mathbf{C}_t + \mathbf{C}_T)]^{-1} [\hat{\mathbf{t}}_0 - \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x})]$$

여기에서 는 normalization factor, 는 모델 인자에 대한 전단계의 밀도 함수, 그리고 는 L2 misfit function를 나타낸다. 는 관측된 시간에서 weighted mean를 제거한 벡터, 그리고 는 이론적인 주행시간에서 해당하는 weight mean을 제거한 벡터를 나타낸다. Weight 는 아래와 같이 표시된다.

$$w_i = \sum_j w_{ij} ; w_{ij} = [(\mathbf{C}_t + \mathbf{C}_T)^{-1}]_{ij}$$

NLLoc 소프트웨어는 Grid search 방법을 이용하여 진원 위치에 대한 PDF를 계산 하는데, Grid search 방법은 계산하는 시간을 많이 소요되지만, 진원 위치가 될 수 있는 모든 경우를 계산하기 때문에 다중의 진원 위치에 대한 해를 계산할 수 있다.

### 3.3.5 Grid search

본 연구에서는 진원 위치를 역산하는 Grid search 방법으로 Oct-tree sampling algorithm를 사용하였다. Oct-tree 방법은 초기 grid 갯수를 작게 시작하여 계산된 에라가 가장 작은 cell에 대하여 반복으로 grid를 세분화하여 PDF값이 가장 높은 지점(x,y,z)를 구하는 방법이

다. Figure 3.3.4에서 보여주는 것과 같이 지진원의 위치가 확률론적 분포로 cell i로 수렴되면 이는 대략적으로 나타낼 수 있으며, 여기서 는 cell의 부피 그리고 는 cell 중앙의 좌표를 나타낸다.

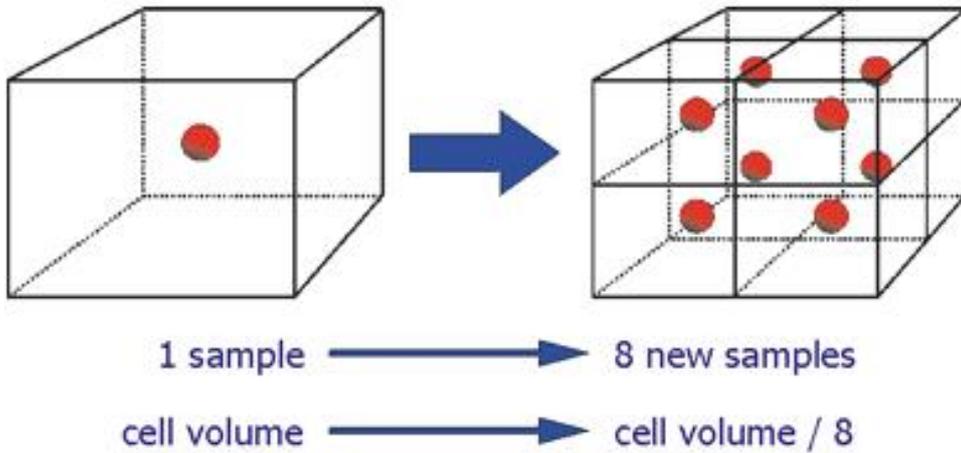


Figure 3.3.4 Schematic view of the Oct-tree method

Figure 3.3.5는 실제 PDF가 9개의 cell 중앙에 존재하는 경우 (Figure 3.3.5A) oct-tree방법으로 어떻게 PDF값에 도달하는지를 보여주고 있다. 일단 각 cell에 대하여 개산을 하고 세부적으로 나누어 지는 과정이 Figure 3.3.5(B) - Figure 3.3.5(F)으로 나타내고 있다.

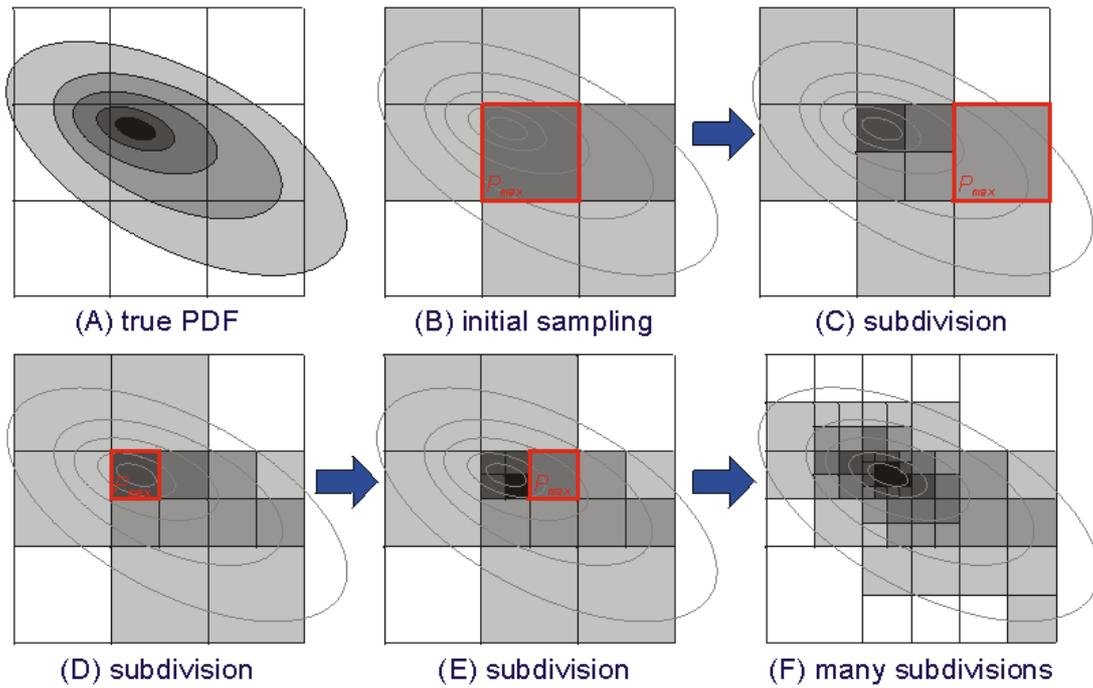


Figure 3.3.5 Systematic vies for finding PDF using oct-tree method.

Figure 3.3.6은 실제 각 cell에서 계산된 잠재적인 PDF위치를 지도상에 나타내는 과정을 보여주고 있고, PDF 분포를 이용하여 가장 밀도가 높은 지역이 지진원의 위치로 결정하였다.

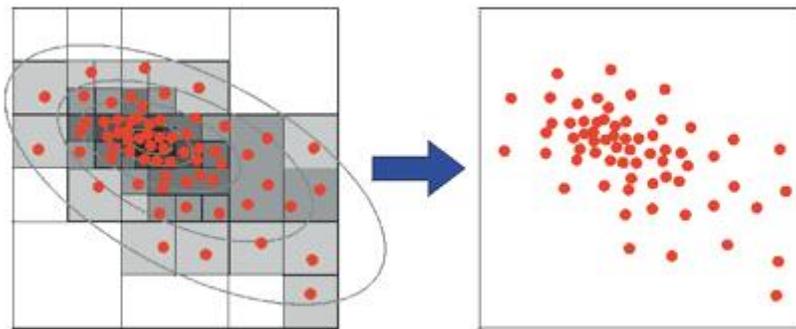


Figure 3.3.6 A example of 2D projection from the oct-tree structure and compact representation of the PDF.

이번 연구에서는 한반도에서 grid search 방법을 수행하기 위해서 위도 31도와 123도를 기준으로 위도 방향을 y, 경도 방향을 x, 그리고 깊이를 z방향으로 지정하여, 초기 grid 갯수를 x, y, z 방향으로 20개로 지정하였다. Figure 3.3.7은 본 연구에서 사용된 초기 grid의 분포도를 보여주고

있다. Figure 3.3.7과 같이 grid search를 시작하여 최초 L2 norm를 이용하여 관측된 지진파의 도달시간과의 오차를 최소화하는 cell을 찾고 이를 다시 세분화하여 grid의 값이 0.01km가 될때까지 반복적으로 수행하여 지진파의 최소 값을 결정하였다.

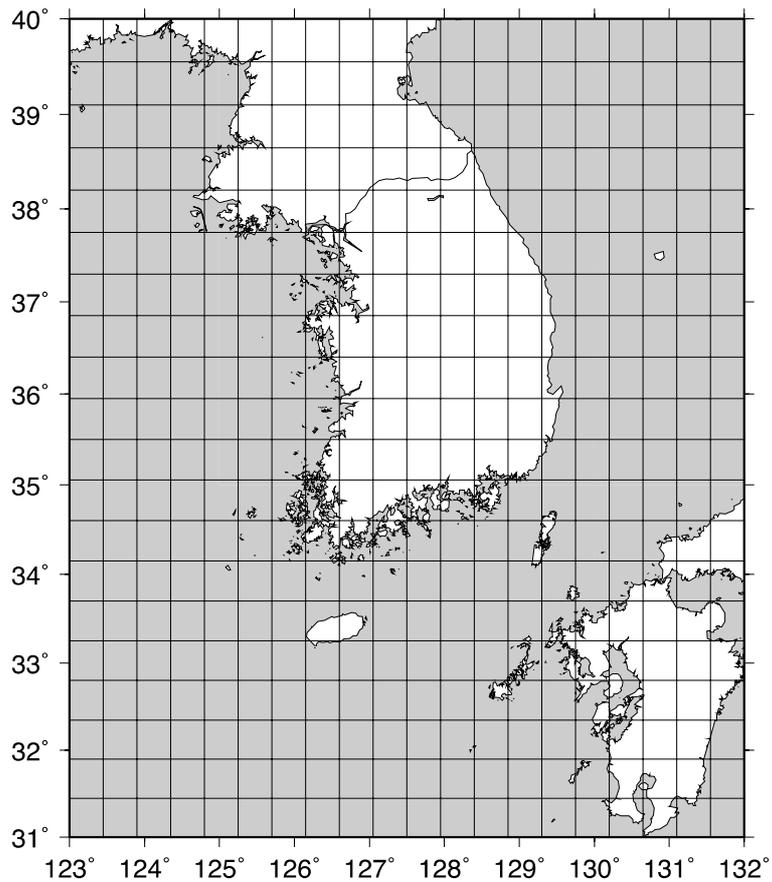


Figure 3.3.7 The status of cells for the initial grid search.

### 3.3.6 Oct-tree 방법을 이용한 지진원 위치 재결정 결과

1999년부터 2010년 동안 기상청 지진관측망에 관측되어 기상청이 발표한 지진들 중에서 기상연구소에서 재결정한 지진들을 oct-tree 방법을 이용하여 진원의 위치를 다시 결정 하였다. 본 연구에서 결정된 지진원의 위치는 년도별로 정리를 하여 Figure 3.3.8부터 Figure 3.3.19으로 진원의 위치를 확률론적 밀도 분포를 붉은 점으로, 그리고 확률밀도함수의 최대값을 갖는 지점, 즉 결정된 지진원의 위치를 푸른 점으로 표시하였다. 또한 기상연구소에서 결정한 위치를 검은 색 원으로 지도에 나타내었다. 표 A1은 Oct-tree 방법을 이용한 결과와 기상연구소 (National Institute of Meteorological Research, NIMR)에서 재결정한 결과를 보여주고 있다. 1열은 1999년 1월 부터 2010년 12월 까지, 지진이 발생한 시간적 순서대로 1부터 483개의 지진의 번호, 2열은 지진이 발생한 년, 월,일, 그리고 진원시에 대하여 3열과 4열은 시간, 분, 그리고 초단위를 각각 나타낸다. 5열부터 7열은 본 연구에서 결정된 지진의 위치(위도, 경도, 깊이), 그리고 8열부터 10열은 기상연구소에서 결정한 지진원 위치(NIMR LAT, NIMR LON, NIMR DEP)를 나타내고 있다. 11열의 “Hori Diff”와 12열의 “Dep Diff”는 본연구에서 결정된 위치와 기상연구소에서 결정한 위치와의 수평방향과 깊이에서 나타나는 위치의 변화를 각각 보여준다. 13열(NO)은 관측된 지진원의 위치를 결정하기 위하여 사용된 관측소의 갯수를 나타내고, 14열(GAP)은 가가 관측소의 분포에서 관측소 간의 최대 방위각을 나타낸다. 관측소의 위치가 균일하게 분포되어 있을수록 이는 작은 값을 갖는다. 마지막 열(RMS)은 관측된 지진파가 도달한 시간과 결정된 위치를 이용하여 이론적으로 지진파의 주행시간과의 오차를 보여준다.

1999년도에는 28개의 지진이 재결정에 사용되었다. 1999년도에는 상대적으로 작은 숫자의 지진이 관측되었는데, 이는 기상청의 국가지진망이 아날로그 방식에서 디지털 방식으로 바뀌고 있는 과도기로 관측소의 숫자도 현재보다 매우 낮기 때문으로 사료된다. 1999년도에 관측된 지진의 평균 최대 지진관측소간의 방위각은 약  $210^{\circ}$ 로 지진원 위치를 결정할때 정확도가 매우 낮음을 알 수 있다. 그림 8을 보면 한반도 안에서 발생한 지진, 즉 지진이 관측망 내에서 발생할 경우를 보면 확률밀도 함수가 좁은 지역에 밀도있게 분포함을 알 수 있다.

2000년에는 29개의 지진이 관측되었다. 이중 16개의 지진이 관측망 내에서 발생하였고, 매우 높은 밀도함수의 분포를 보여주고 있다 (Figure 3.3.9). 또한 이 지진들은 깊이에 대한 확률밀도함수의 범위가 매우 작기 때문에 결정된 지진원의 깊이도 매우 신뢰성이 높다. 해양에서 발생한 지진들은 국가지진망의 밖에서 관측된 지진으로 기상연구소에서 결정된 자료와 비교를 해 보면 수평으로 최대 19km 그리고 깊이에서 21km의 차이를 보이고 있다.

2001년에는 43개의 지진이 관측되었는데, 이는 2001년부터 기상청 지진관측망의 관측소 갯수와 그 분포가 꾸준히 늘어나고 있기 때문에 미소 지진 발생시 관측망의 탐지 능력의 향상으로 기인된 것으로 보인다. 특히, 2001년도에는 남한의 중남부 지역에서 지진이 많이 관측되었는데, 이들 지진은 대략 15km의 깊이에서 발생하였다.

2002년부터 2010년도에 발생한 지진들중에서 지진관측망 내에서 발생한 지진들은 이

전에 발생한 지진들 보다 좋은 관측망 분포를 보여주고 있다. 최대 방위각은 평균적으로 약 100° 이내의 값을 보이고 있고, 이는 KGT5 기준을 만족하는 지진원 위치 및 진원시 결정에 있어서 높은 신뢰도를 보이고 있다.

KGT5는 2011년도 보고서에 도출한 결과로 만일 지진이 발생하고 기상청 지진관측망에 관측되었을 경우, 관측된 관측소의 위치와 분포, 그리고 관측된 갯수에 따라서 결정된 지진원의 위치가 95%의 신뢰도를 가지고 오차 5km이내로 결정될 수 있는 지진으로 그 기준은 아래와 같다.

1. 지진원 발생시 관측된 관측소의 갯수가 최소 8개 이상.
2. 진앙거리 30 km 이하에서 최소한 1개 이상의 관측소가 존재.
3. 최대 관측소간 첫번째 방위각이 218° 이하이거나, 최대 관측소간의 두번째 방위각이 253° 이하인 경우.

EQ 2000 Cata

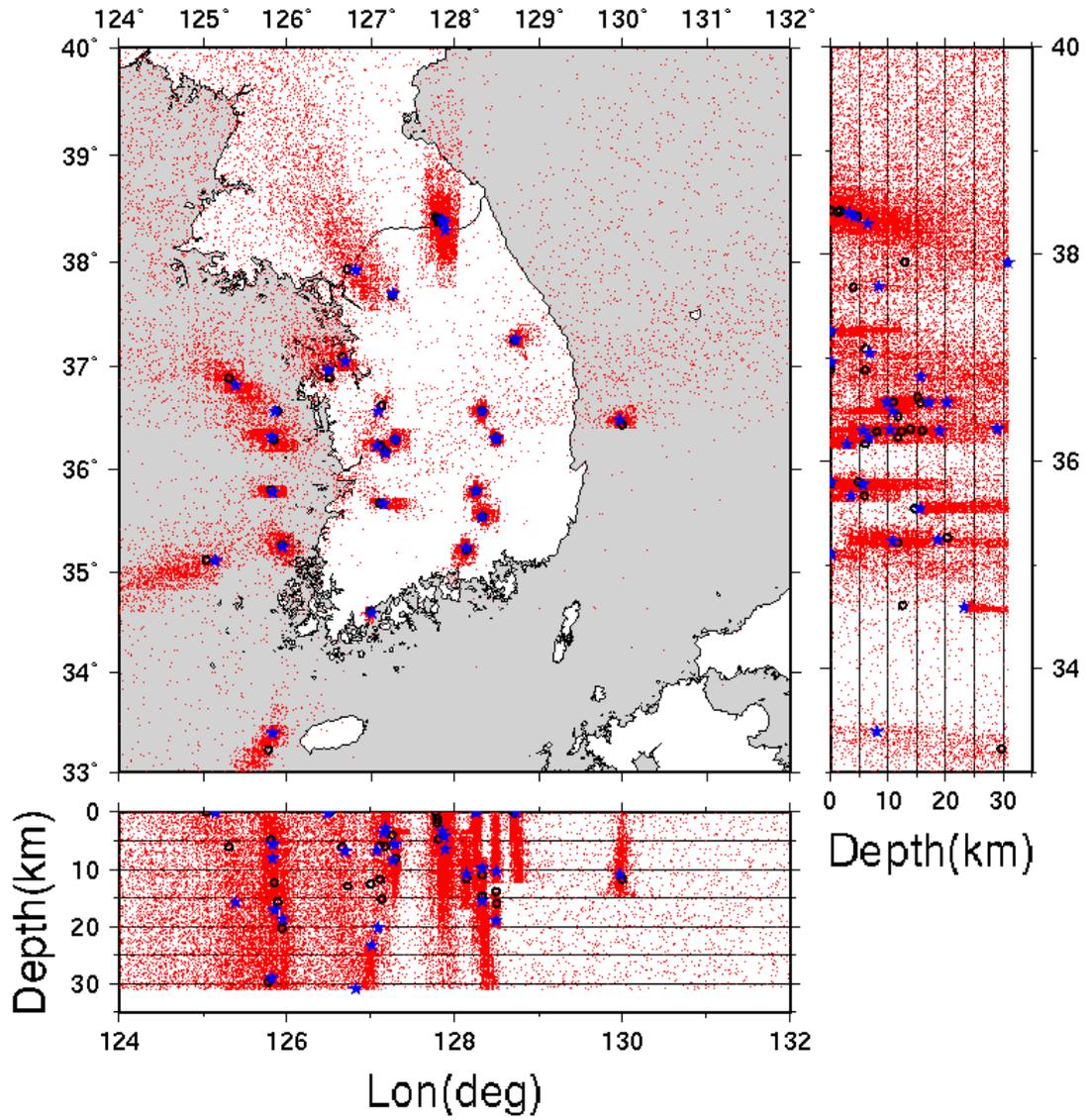


Figure 3.3.8 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2000

### EQ 2001 Cata

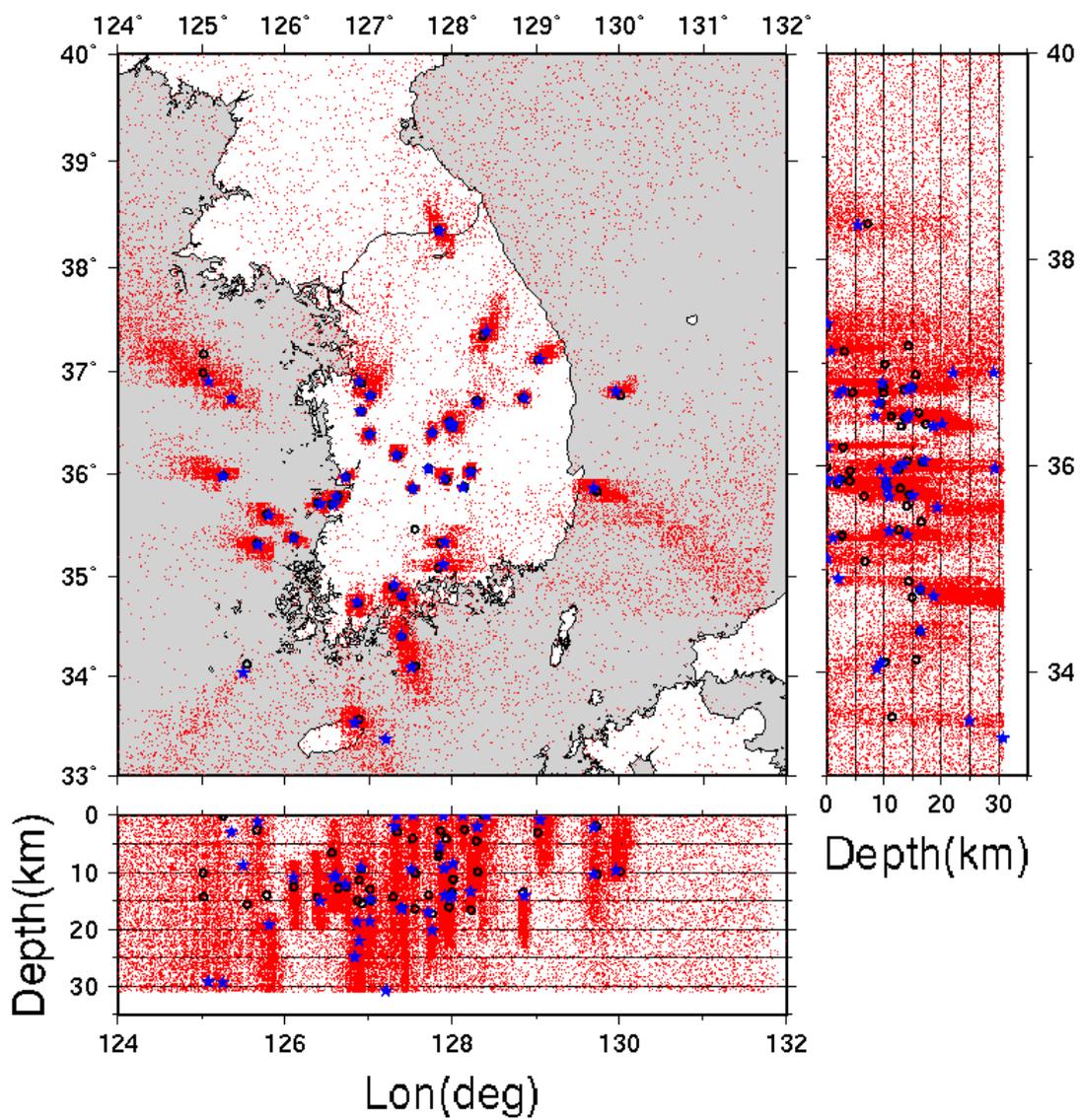


Figure 3.3.9 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2001.

### EQ 2002 Cata

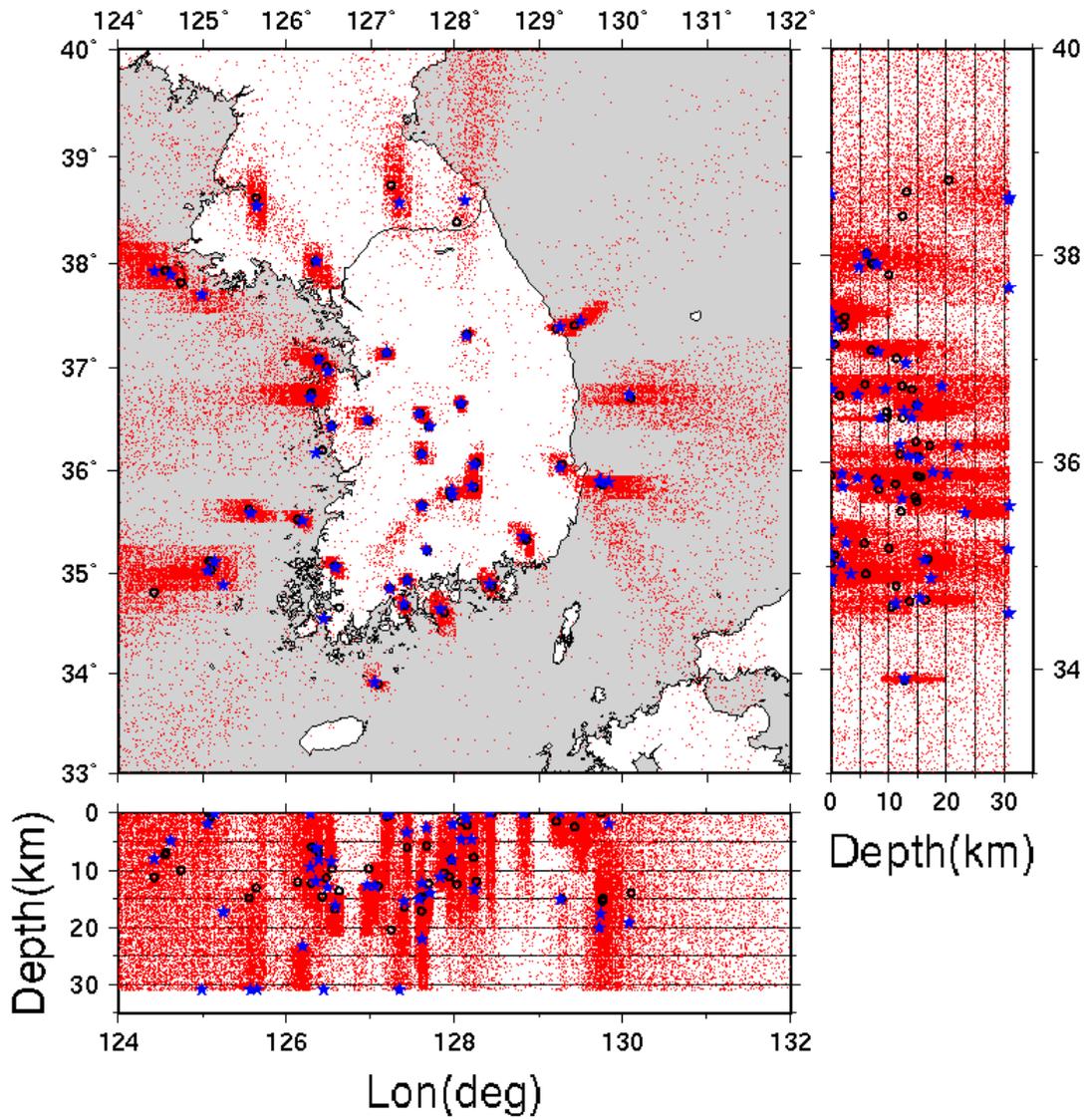


Figure 3.3.10 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2002.

### EQ 2003 Cata

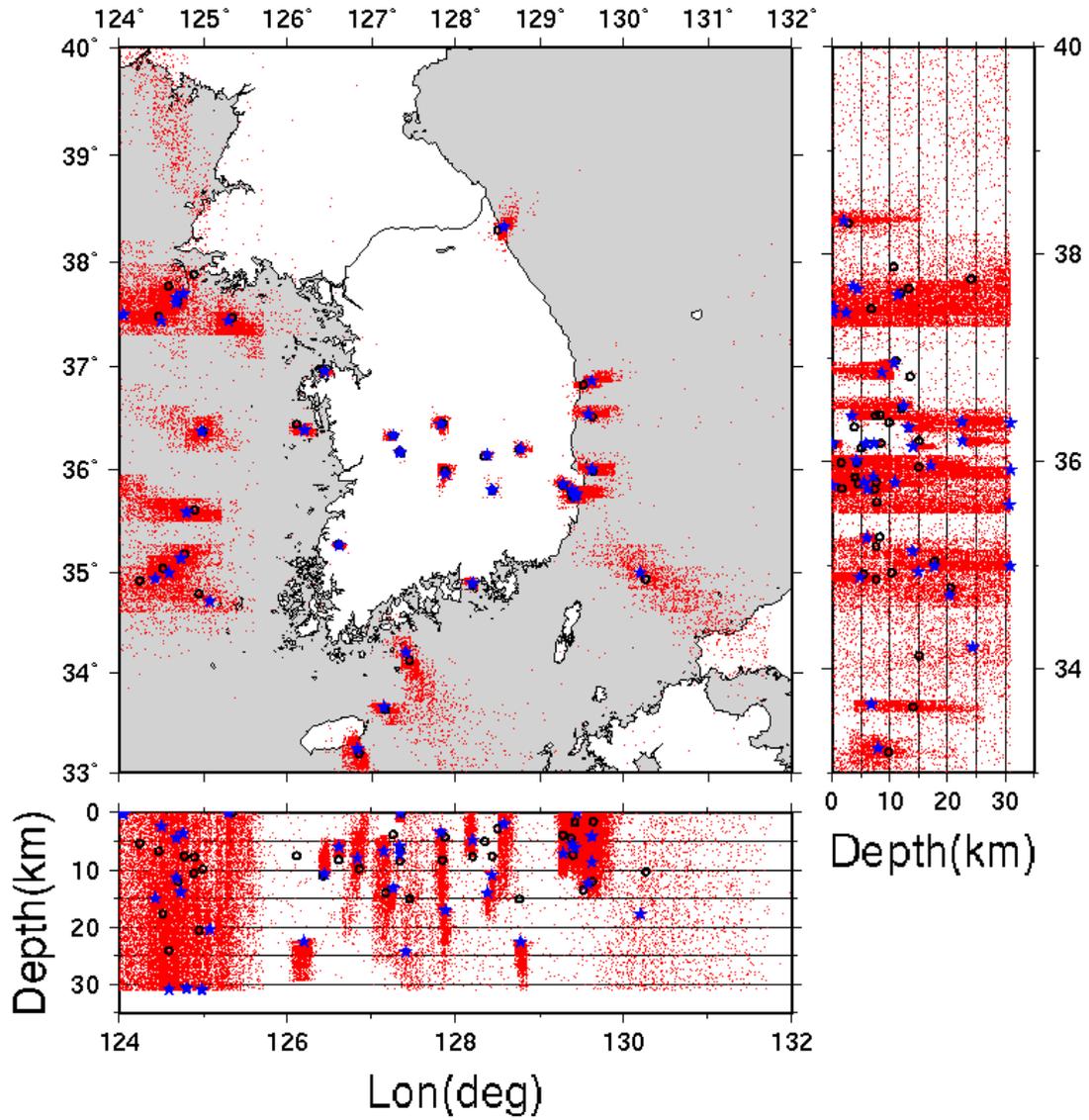


Figure 3.3.11 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2003.

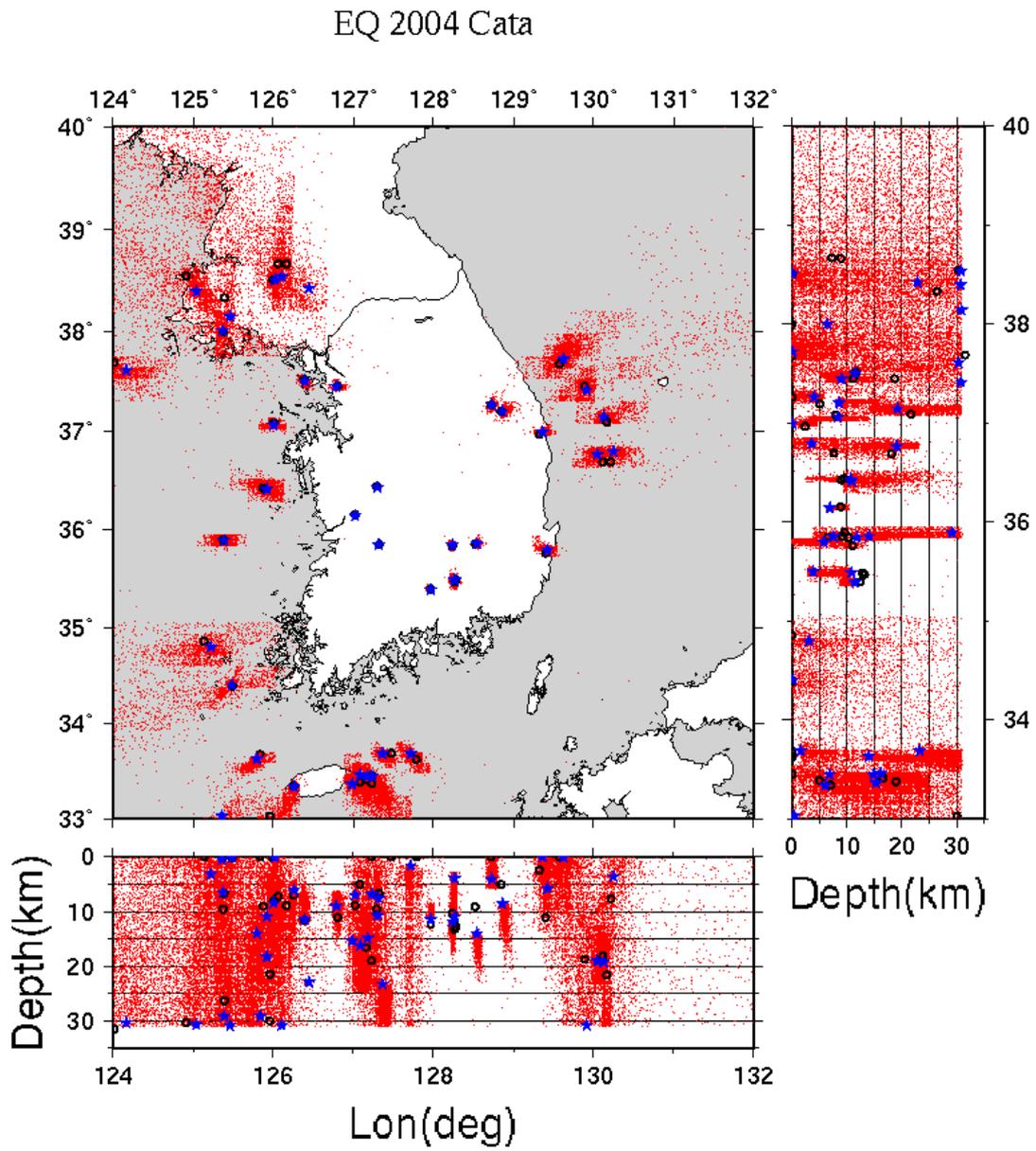


Figure 3.3.12 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2004.

### EQ 2005 Cata

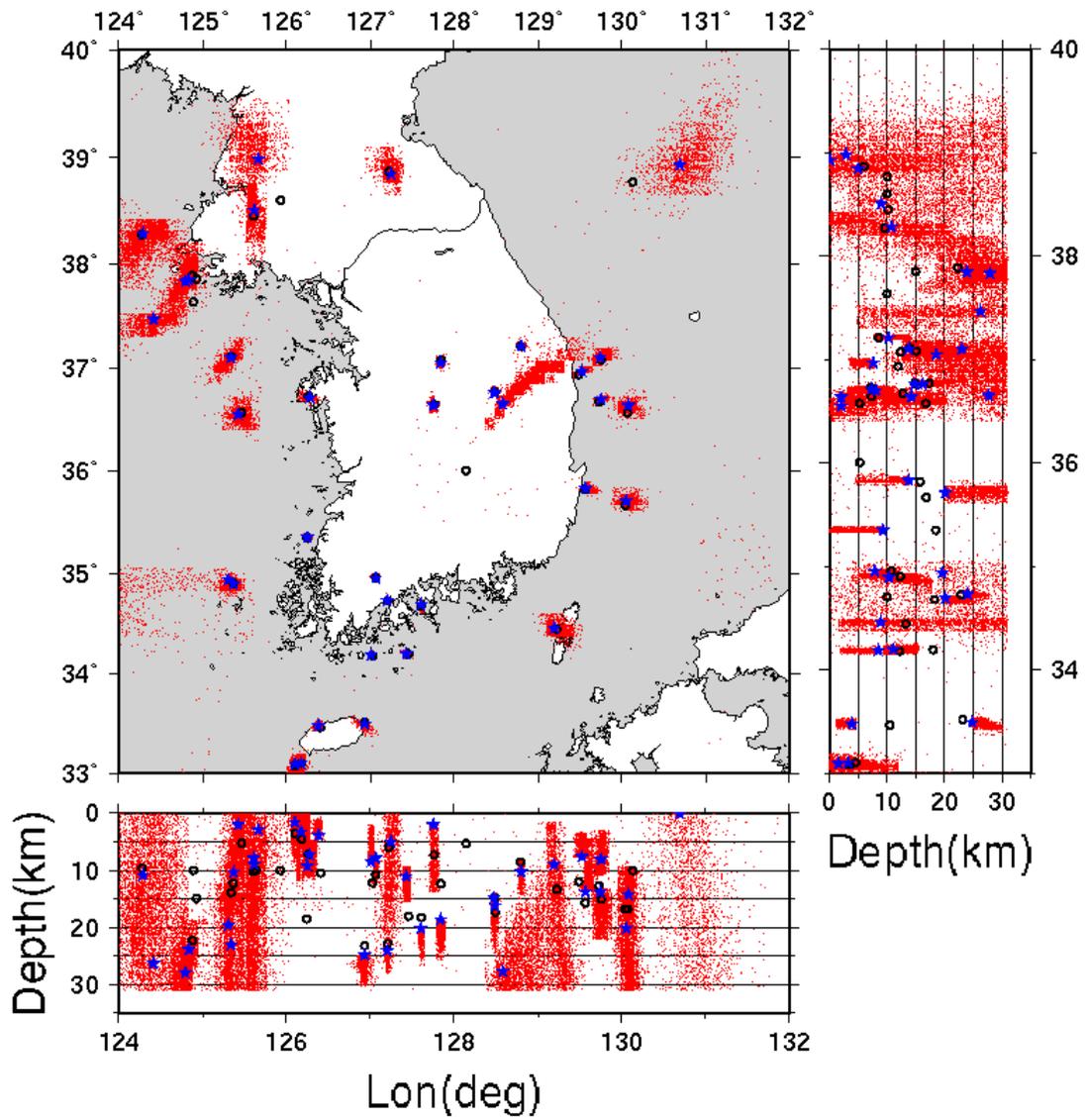


Figure 3.3.13 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2005.

### EQ 2006 Cata

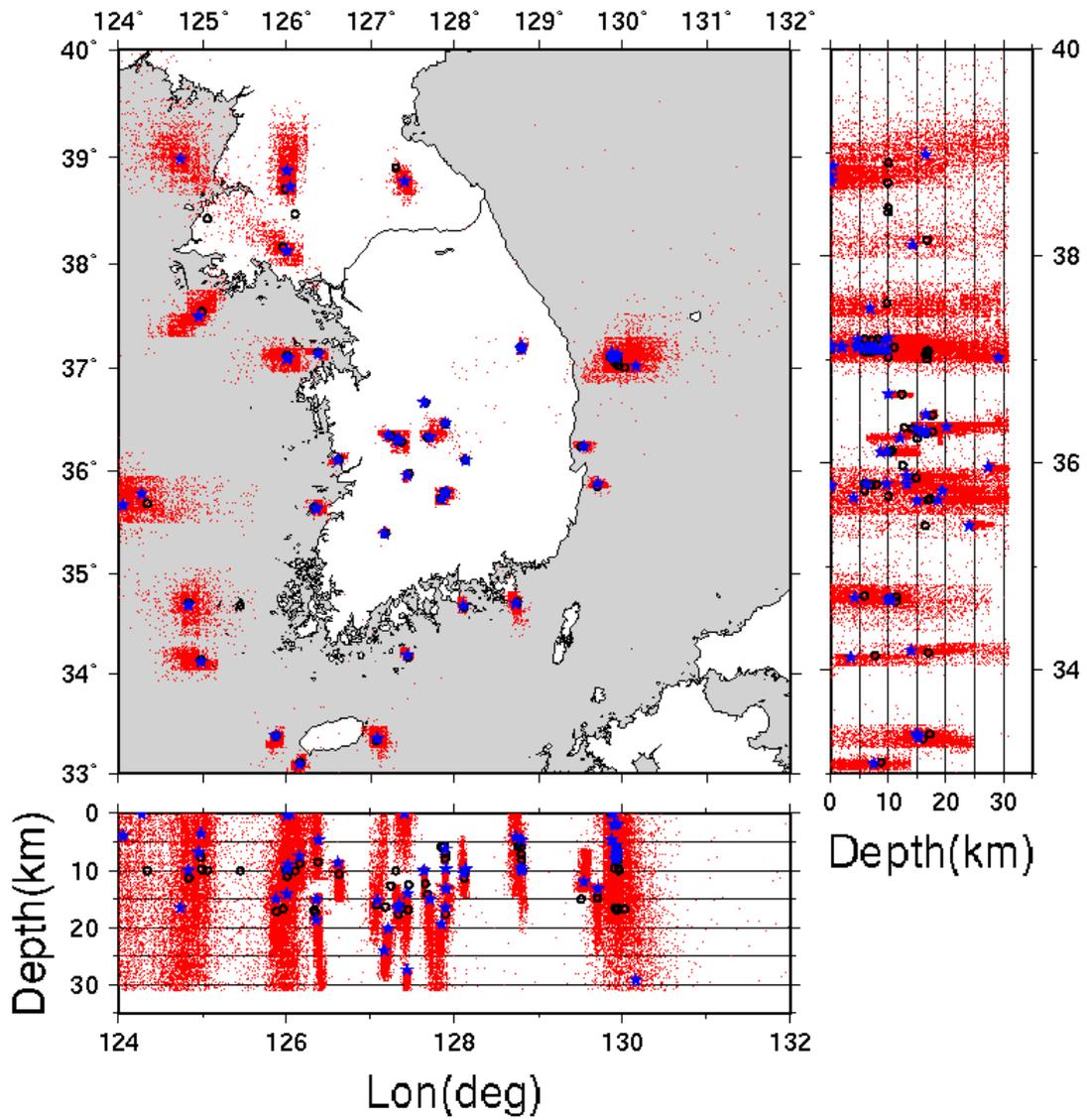


Figure 3.3.14 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2006.

EQ 2007 Cata

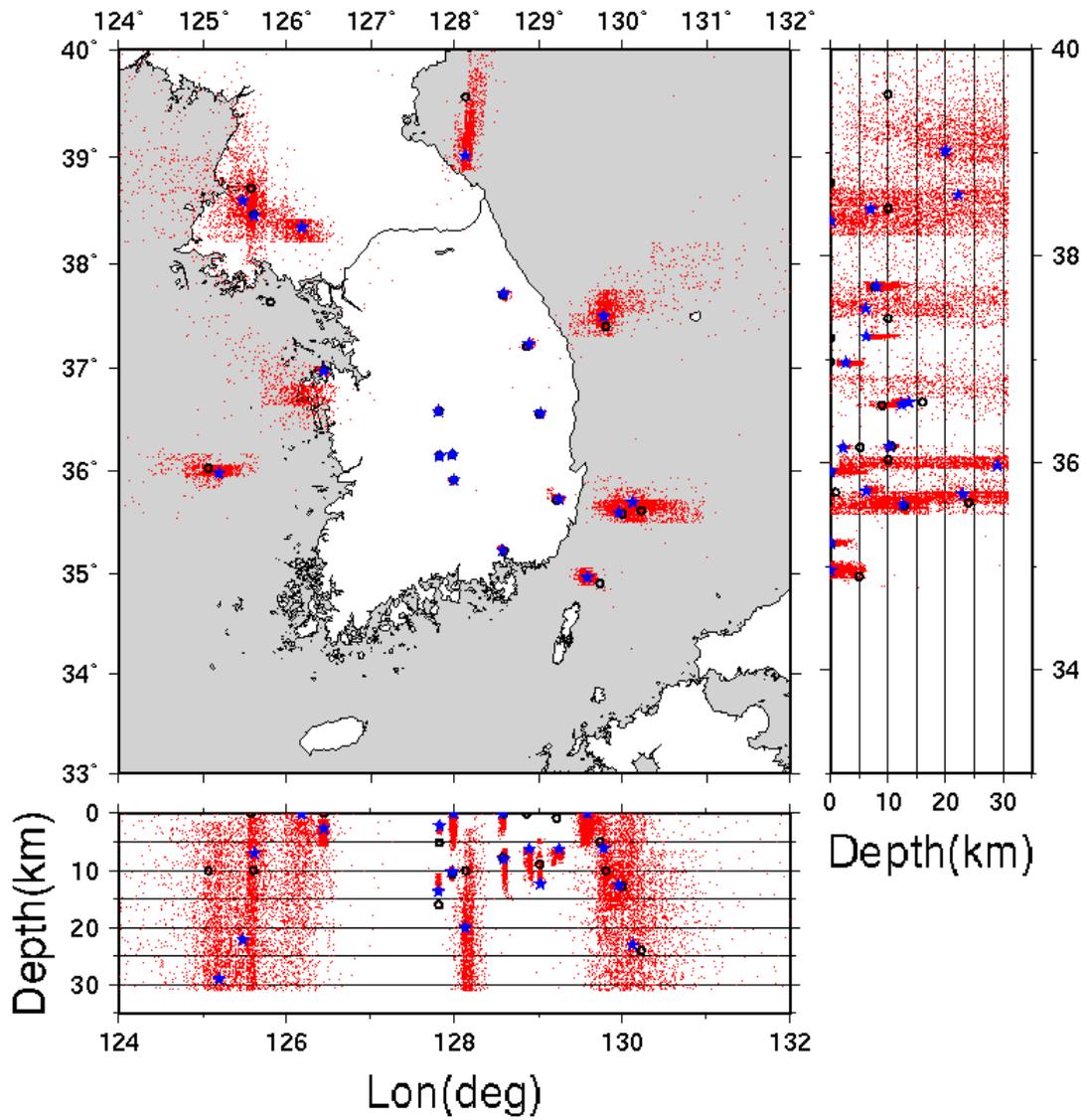


Figure 3.3.15 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2007.

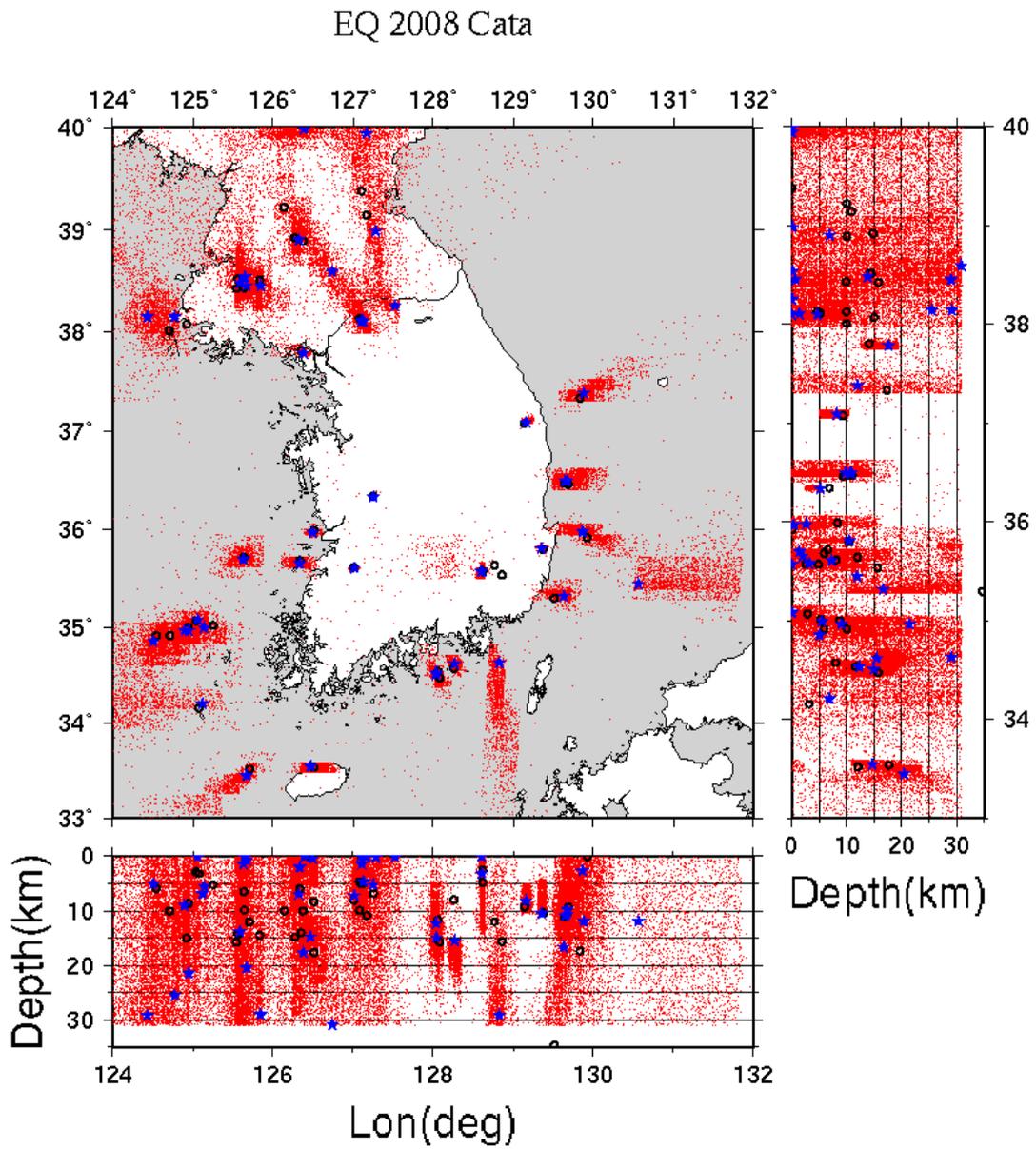


Figure 3.3.16 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2008.

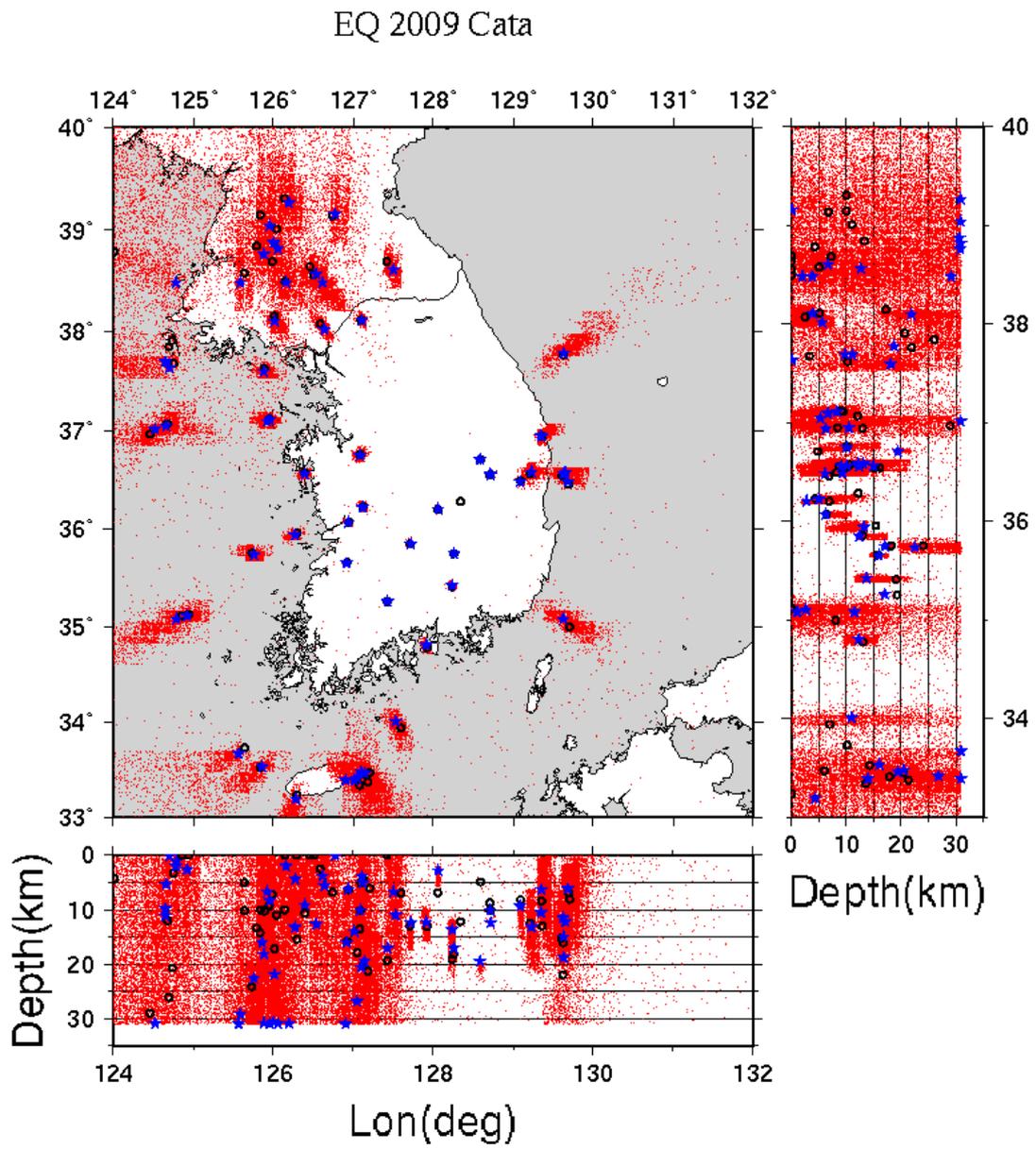


Figure 3.3.17 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2009.

### EQ 2010 Cata

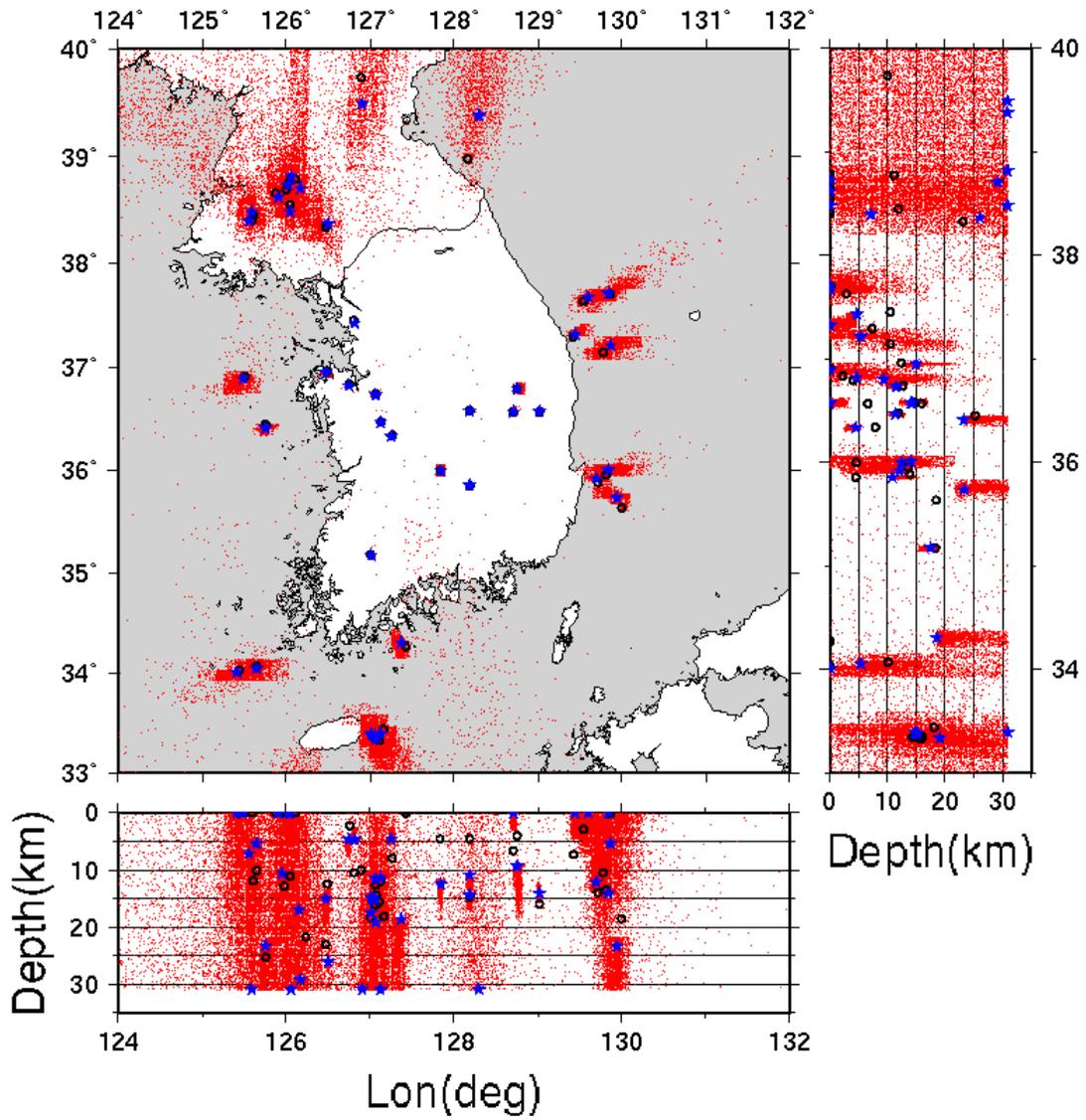


Figure 3.3.18 Relocating results using the "NLLoc" for earthquakes occurring in 2010.

### 3.3.7 결론

본 연구는 Grid search방법중에서 Oct-tree방법를 이용하여 기상청에서 발표한 지진원의 위치와 진원시를 재결정하였다. 기상연구소에 발표한 재결정 결과와 비교해 보면, 관측망 내에서 발생한 지진에 대해서는 수평적인 변화와 깊이의 변화가 5km 매우 적은것을 알 수 있다. 이들 지진원에 대한 정보는 표A1에 초록색으로 표시되어 있다. 하지만 해안에서 혹은 북한에서 발생한 지진들은 지진관측망 밖에서 발생한 것으로 지진원 위치의 오차가 매우 높음을 알 수 있다. 이들 지진들은 광범위하게 퍼져있는 확률론적 밀도 함수를 보이며, 오차 타원체도 굉장히 큰 값을 보이고 있다. 그림 19는 가장 많은 지진이 관측된 2009년도에 발생한 지진의 재결정 결과를 JAVA program “seismicity viewer”를 이용하여 3차원으로 표현한 것이다. 각 지진에 대한 P파의 이론적인 도달시간과 관측된 도달시간 간의 차이를 보면 PTK 관측소가 가장 큰 값을 보이고 있다. 이는 관측소 특성이 반영된 것으로 사료된다.

본 연구에서 결정된 지진원 위치와 진원시를 통계적인 처리를 위해서 KGT5에 부합되는 지진원에 대한 목록을 작성할 계획이다. 이 목록은 한반도의 정확한 지진파 속도 모델을 위한 3D 토모그래피 기법에 보다 정확한 지진원의 정보를 제공하여 향상된 속도 모델을 확보하는데 결정적인 기초 자료를 생산할 것으로 기대된다.

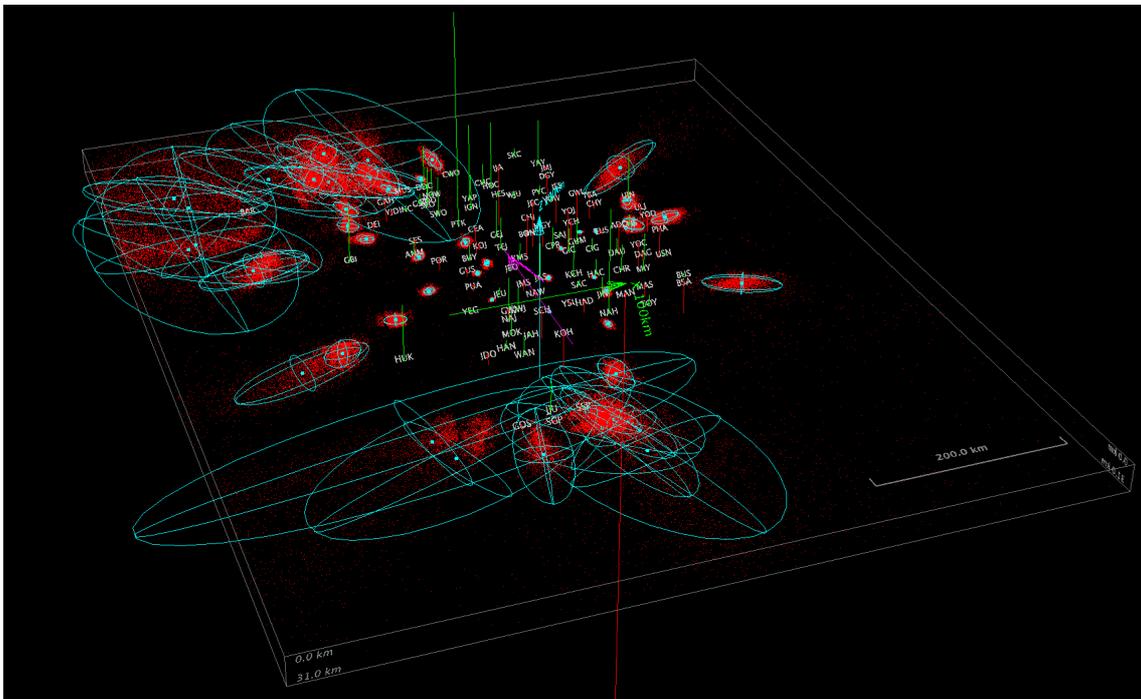


Figure 3.3.19 A 3D view for the earthquakes occurring in 2009.Red dots indicate probability density, sky blue ellipsoieds represent confidential boudary, and green bars show P wave residuals for each station.

### 3.3.8 참고문헌

Lomax, A., J. Virieux, P. Volant and C. Berge, 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in *Advances in Seismic Event Location* Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134.

Mosegaard, K., and Tarantola, A., 1995, Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems, *J. Geophys. Res.*,100,12431-12447.

Tarantola, A. and Valette, B., 1982, Inverse problems = quest for information., *J. Geophys.*, 50, 159-170.

Tarantola, A., 1987, *Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation*, Elsevier, Amsterdam, 613p.

## 3.4 GT2 수준 정확성 평가기준 수립

### 3.4.1 서론

이미 기술한 바와 같이 정확한 지진원의 위치가 밝혀진 자료에 대하여 ‘GT (Ground Truth)’라는 개념이 도입되었고, GTX라고 하면 진앙의 위치가 X km 이내의 오차로 결정된 것임을 의미한다. Bondar et al.(2004)는 진앙거리에 따른 지진의 진앙 정확성 판단기준을 수립함에 있어 다음 네 가지 거리 구간에 따른 기준을 제시하였다. 원거리(teleseismic, 진앙거리 28°-91°) 지진 및 지역거리(regional distance, 2.5°-20°)의 경우 GT25에 대한 기준, 준지역거리(2.5준지역거리(near-regional distance, 2.5°-20°) 및 준지역거리(near-regional distance, 2.5°-20°)지진의 경우 GT20에 대한 기준을, 준지역거리(near-regional distance, 2.5°-20°) GT20의 결정 기준, 그리고 국지(local distance, 0-2.5)지진의 경우 GT5의 결정 기준을 제시하였다. 우리나라 국가지진관측망의 경우 관측소와 관측소 간의 평균 이격거리가 35km 이하이며, 2013년 1월 현재 총 127개 관측소에서 지진감시가 이루어지고 있으므로, 상당히 조밀한 관측소 분포를 보이고 있으며, 전 세계에서 일반적으로 사용하는 기준보다 향상된 기준의 도입이 가능하다.

GT2 수준의 정확성 평가기준 수립을 위하여 본 연구에서 수집한 자료와 기존 자료, KCRT2008 발파가 기록된 국가지진관측망 관측자료를 사용하였다. GT5의 기준 수립을 위해서는 사용가능한 모든 도착시간을 사용하였다. GT2 수준의 정확성 평가기준 수립을 위해서 도착시간 측정 작업을 다시 수행하였으며, weight 0 혹은 1의 도착시간이 비교적 정확한 자료만을 사용하였다. 새로 측정된 도착시간과 양질의 자료의 수는 GT5 기준에서 사용된 수보다 많이 적다. 국가지진관측망의 지진감시 및 통보 과정을 보면 1차 발표는 자동측정 자료에 근거하여 지진발생위치가 결정되고 발표되지만, 2차 발표에서는 현업근무자의 수작업을 통해 입력자료 질의 향상시키고 결과적으로 정확성이 향상된 지진발생위치를 통보할 수 있다. 그러므로 양질의 자료만을 선정하여 결정된 지진 발생위치 정확성 평가를 위해서도 적절할 것이다.

### 3.4.2 본론

Primary Gap, Secondary Gap, 지진발생위치 결정에 사용된 도착시간 자료의 수에 관한 것은 이미 설명된 바 있으므로 더 이상의 기술은 생략하기로 한다. 다만, GT2 기준 설립을 위하여 새로이 도입된 network metric에 관한 개념만을 설명한다.

GT5 이벤트 선정을 위하여 도착시간 측정자료를 제공하는 관측소의 수 8개 이상, 진앙거리 30 km 이내에 최소한 1개 이상의 관측소가 존재, primary azimuthal gap 218° 이하, secondary azimuthal gap 253° 이하라는 기준을 제시하였다. 이러한 기준에는 두가지 문제점이 존재할 수 있다. 첫 번째는 진원으로부터 비교적 먼 거리에 위치한 관측소 까지 포함하였고, 어떤 관측소에서는 Pn/Pg cross-over distance (임계거리)를 넘어서는 곳에서 관측 및 측정된 초동의 도착시간

까지 포함하고 있다. 따라서, 임계거리 부근과 그 이상의 거리에서 측정된 초동 도착시간의 초동에 오차가 포함되어 있을 수 있다. 두 번째는 유사한 ray path를 통해 전파된 자료가 사용되어 미흡한 속도모델로 인한 모델 오차가 진앙결정에 작용할 수 있다는 것이다. 우리가 진원 결정을 위해 사용하는 대부분의 프로그램은 가우스분포의 무작위 오차를 가정하지만, 만약 사용되는 자료에 편향된 오차가 존재한다면, 진앙을 잘 못 결정할 수도 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 GT2 이벤트 선정기준을 설립하는데 있어서는 진앙거리 120km 이내에서 측정된 초동의 도착시간만을 사용하고, 초동 도착시간 자료를 제공하는 관측소의 분포를 정량적으로 표현하는 network metric을 도입 사용하였다.

### 3.4.2.1 Network Metric

진앙결정에 사용되는 지진관측소가 진앙으로부터 고르게 분포하는 것이 가장 이상적인 것이다. 관측소가 한쪽 방향으로 편향된 경향이 크면 클수록 진앙결정에 바라지 않는 오차원인이 포함될 가능성이 크다. Bondar and McLaughlin(2009)는 지진관측소 방향 분포를 정량적으로 측정하기 위하여 다음과 같은 Network Metric을 제안하였다.

$$\Delta U = \frac{4 \sum_{i=0}^{N-1} |esazi_i - (unif_i + b)|}{360N}, 0 \leq \Delta U \leq 1$$

N은 진원결정에 사용된 관측소 수, esazi는 i번째 이벤트-관측소간의 방위각(azimuth), unif<sub>i</sub>=360i/N, 그리고 b=avg(esazi)-avg(unif<sub>i</sub>)이다. 이벤트-관측소 간의 방위각은 증가하는 쪽으로 재정렬하여 사용한다. ΔU는 진앙위치로부터 방위각이 고르게 분포하면 0의 값을 갖고, 모든 관측소들이 한 방향으로만 위치해 있으면 1의 값을 갖는다.

### 3.4.2.2 KGT2 수립을 위한 연구

기상청 지진관측망에 관측된 GT0 자료를 진원위치 결정 오차 2 km 이하로 결정할 수 있는 경우에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 KCRT-2008의 발파자료를 이용하여 각 발파에 대한 관측소의 개수와 분포에 따라 진원위치 결정에서 발생할 수 있는 오차를 계산하고 그 오차 경향을 관찰함으로써 KGT2의 기준을 제시한다.

KGT5와 다르게 진앙거리 70km 이내의 자료만을 사용하고, 도착시간을 보다 정확하게 측정된 자료를 사용하였다. KCRT-2008의 경우 사용가능한 초동시간 자료는 발파위치와 발파량에 따라 11개부터 17개 관측소까지 비교적 정확한 초동 읽기가 가능하였다. 진원 발생위치 결정에 사용되는 초동자료를 4개부터 사용가능한 모든 자료까지 가능한 모든 조합에 대하여 연산을 수행하였다. 각 발파별 사용가능한 초동자료의 수와 진원결정이 가능한 모든 조합의 수는 표 3.4.1과 같다.

Figure 3.4.1부터 Figure 3.4.4까지는 모든 조합에 대한 진앙 결정 결과가 관측소의 수

(Figure 3.4.1), primary azimuthal gap (Figure 3.4.2), secondary azimuthal gap (Figure 3.4.3), 그리고 network metric (Figure 3.4.4)에 따라 어떻게 분포하는지를 보여준다. 각 그림에 각 구간별 중간값은 점선으로, 95% 신뢰구간의 값은 실선으로 표시하였다. 95% 신뢰구간의 의미는 해당 구간 점들의 95%가 95%신뢰구간 값 아래에 있음을 의미한다. 각 그림에 표시되어 있는 조건별 오차분포 현황을 관찰하여 primary azimuthal gap이  $221^\circ$ 이하, secondary azimuthal gap이  $270^\circ$ 이하, 초동을 관측한 관측소의 수가 5개 이상, network metric 0.60 이하를 각 조건별 GT2 기준으로 설정하였다. 이 4가지 조건을 모두 만족하는 조합들의 오차 분포는 Figure 3.4.5와 같다. 모든 조건을 만족하는 경우 2.0 km 이하의 오차를 보일 확률이 약 97.8%이다.

### 3.4.3 결론

기상청 지진관측망의 조밀한 관측소 분포를 충분히 활용하기 위하여 기존 국외 연구 사례보다 세분화된 진원위치 정확성 평가기준을 제시하였다. 국외 연구사례의 경우 GT30, GT25, GT5 혹은 GT3 (Bondar et al., 2004; Bondar and McLaghlin, 2009; Boomer et al., 2010) 기준 설립 연구가 진행된바 있다. 본 연구에서는 국외 지진관측망 상황에 비하여 관측소 분포가 조밀한 점과 국가지진관측망의 미소규모 지진 감지 능력 등을 감안하여 GT2 이벤트의 평가 기준을 제시한다 (Kim and Park, 2010; Kim and Kim 2014).

현재 기상청 국가지진관측망으로 한반도 내륙 및 주변해역에서 지진이 발생할 경우 GT2 정확성을 가지고 지진발생위치를 결정할 수 있는 지역을 Figure 3.4.6의 왼쪽에 표시하였다. 내륙 대부분 지역에서 지진이 발생할 경우 GT2 정확성을 가진 진원위치 결정이 가능함을 알 수 있다. 그러나 우리나라 주변해역에서는 비교적 큰 규모의 지진이 꾸준히 발생하고 있지만, 현재의 지진 관측망 구성으로는 GT2 수준의 지진발생위치 정확성 확보가 어려움 또한 확인 할 수 있다. 우리나라 주변해역에서 발생하는 지진에 대한 감시능력 제고를 위하여 관측망 가장자리에 추가로 지진 관측소를 설치할 경우 기대되는 지진감시능력 향상을 보기위하여, 10개의 지진관측소가 한반도 주변 도서지역과 내륙의 부산, 포항 지역에 추가 관측소가 설치한다는 가정하에 GT2 수준 분포를 Figure 3.4.6의 오른쪽에 표시하였다. 현재의 지진관측소 분포 상황과 비교했을 때 서해와 남해에서 지진관측능력이 현저히 향상될 것으로 기대된다.

Table 3.4.1 The numbers of available first arrival picks and tried realizations for KCRT-2008 explosion data. Note extremely large errors with epicentral error with greater than 100 km are excluded for study.

발파	사용가능한 초동자료 수	조합의 수
1	15	32111
2	17	130190
3	11	3737
4	11	3750
5	14	15905
6	12	7808
7	12	3794
8	14	15910

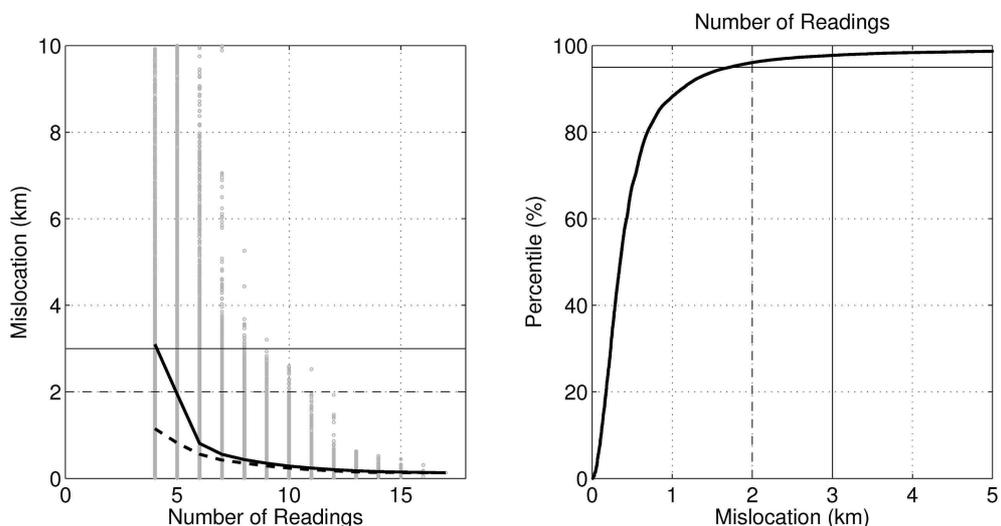


Figure 3.4.1 (Left) Location error with the number of available phase readings. Gray dots represent the location errors from some 170,000 realizations. Dotted and solid lines show median and 95% quantile curves, respectively. For instance, 95% of the crosses are below the 95% quantile curve. Mislocation of 2 km and 3 km are shown by broken and solid lines for reference. (Right) Cumulative distribution of mislocations for all realizations. Errors with 3 km and 2 km are shown by solid and dotted lines, respectively.

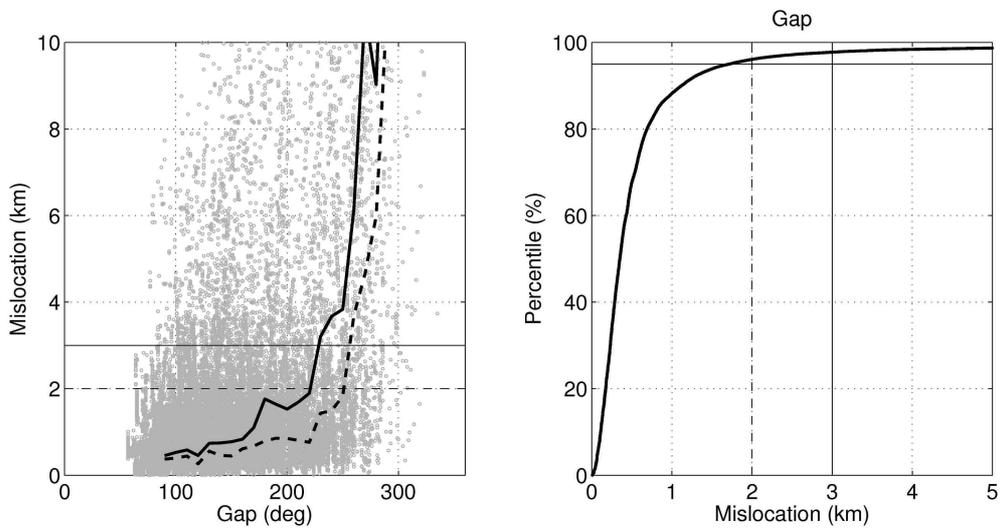


Figure 3.4.2 (Left) Location error with primary azimuthal gap. (Right) Cumulative distribution of mislocations for all realizations. Errors with 3 km and 2 km are shown by solid and dotted lines, respectively.

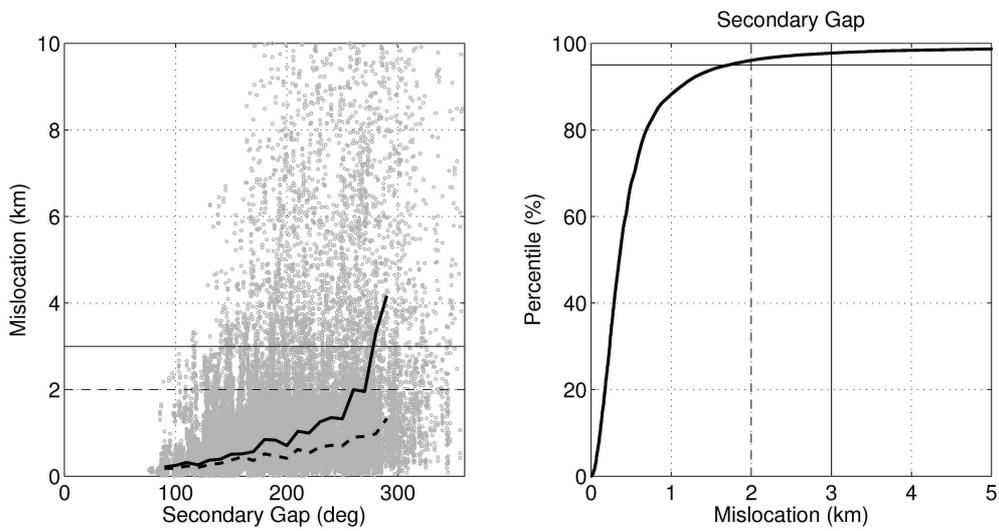


Figure 3.4.3 (Left) Location error with the number of secondary azimuthal gap. (Right) Cumulative distribution of mislocations for all realizations. Errors with 3 km and 2 km are shown by solid and dotted lines, respectively.

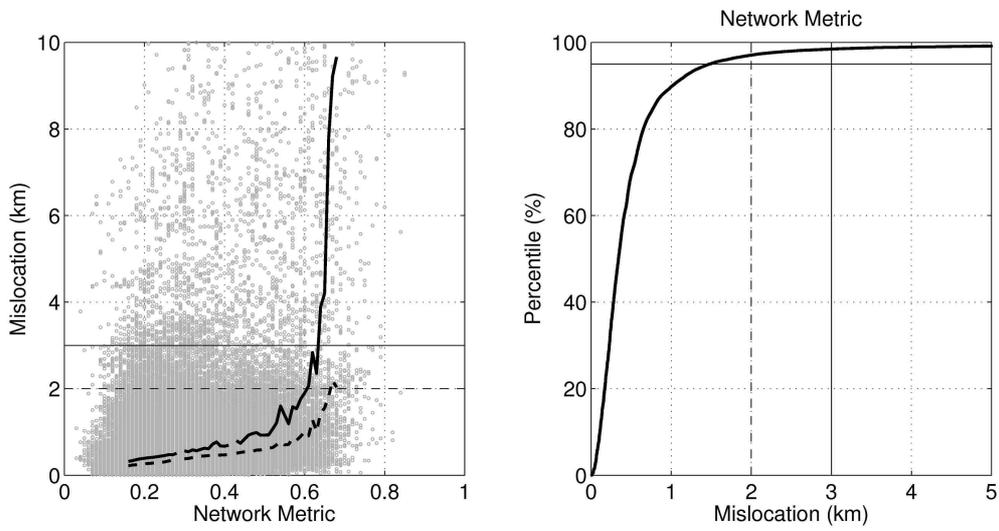


Figure 3.4.4 (Left) Location error with the network metric. (Right) Cumulative distribution of mislocations for all realizations. Errors with 3 km and 2 km are shown by solid and dotted lines, respectively.

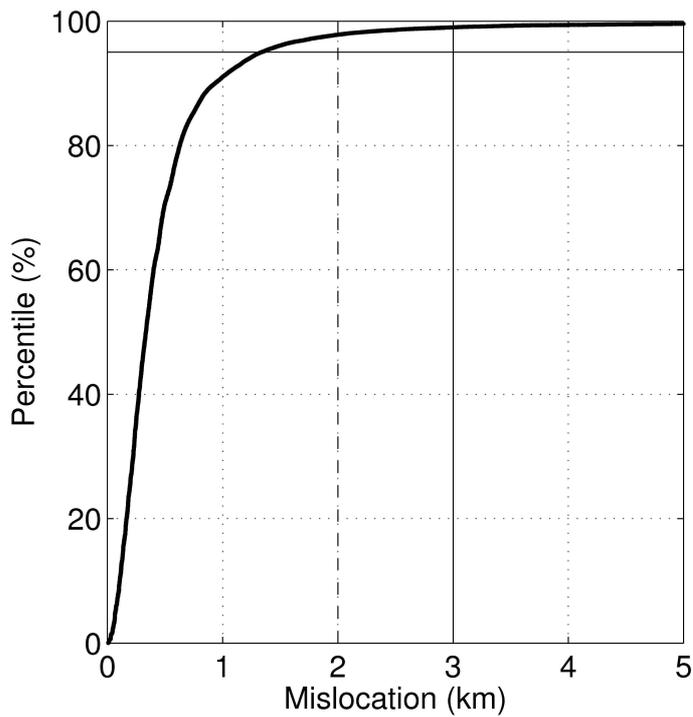


Figure 3.4.5 Cumulative distribution of mislocations for all realizations satisfying GT2 criteria established in this study.

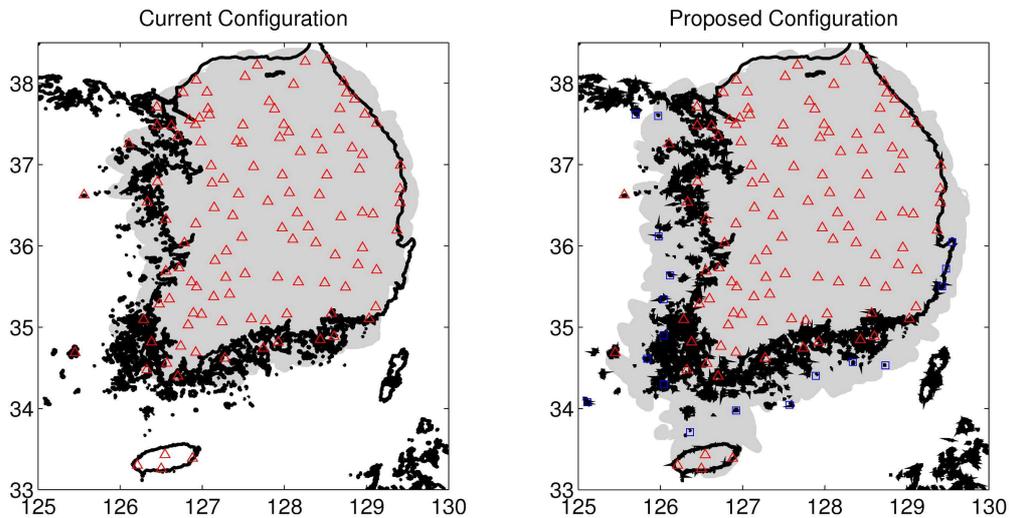


Figure 3.4.6 (Left) GT2 coverage under current KNSN and (Right) GT2 coverage with 10 additional stations (marked by blue rectangles) at the periphery of seismic network.

#### 3.4.4 참고문헌

Bondár, I., et al. (2004), Collection of a reference event set for regional and teleseismic location calibration, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(4), pp. 1528–1545.

Bondár, I., and K. McLaughlin (2009), A new ground truth data set for seismic studies, *Seismological Research Letters*, 80(3), 465–472, doi: 10.1785/gssrl.80.3.465.

Boomer, K. B., et al. (2010), Empirically Based Ground Truth Criteria for Seismic Events recorded at Local Distances on Regional Networks with Application to Southern Africa, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(4), 1785–1791, doi: 0.1785/0120090237.

Kim, W.-Y. and K.-H. Kim (2014), The February 2010 Siheung, Korea, Earthquake Sequence: Repeating Earthquakes in a Stable Continental Region, *Bulletine of the Seismological Society of America*, 104(1), 551–559, doi:10.1785/012013019.

Kim, K.-H. and Y. Park (2010), The 20 January 2007 M4.8 Odaesan Earthquake and Its Implications for Regional Tectonics in Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(3), 1395–1405, doi:10.1785/0120090234.

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

번호	세부연구목표	달성내용	달성도 (%)
1	GT0 지진카탈로그 작성	GT0 지진카탈로그 작성	100%
2	GT2 (또는 GT3), GT5 수준 지진목록 작성	GT2 및 GT5 카탈로그 작성	100%
3	국가지진관측망 지진발생위치 결정 정확성 분석의 정량적 평가요소 및 운용기준 제시	GT2 및 GT5 운용기준 제시	100%
4	오차 분포도 작성 및 오차 높은 지역 선별	오차분포도 작성 GT2 Coverage Map 작성 국가지진관측망 해역지진 감시역량 제고를 위한 제언	100%

## 제 5 장 연구개발결과 활용계획

### 1. 연구목표 및 내용

- GT0 지진카탈로그 작성
  - 국가지진관측망 내부에 분포하는 GT0 이벤트 database 작성
  
- GT2, GT5 수준 지진목록 작성
  - 기존지진관측자료 중 GT2 및 GT5 수준 지진목록 작성
  
- 국가지진관측망 지진발생위치 결정 정확성 분석의 정량적 평가요소 및 운용기준 제시
  - 지진발생위치 결정 정확성 평가의 정량적 평가요소 및 운용기준 제시
  
- 오차 분포도 작성 및 오차 높은 지역 선별

### 2. 연구수행결과 현황

- KCRT2002, KCRT2004 및 KCRT2008 발파의 기상청 국가지진관측망 자료 수집
- 국가지진관측망의 진원위치 결정력 평가
- 진원위치 결정력 평가시 고려요소: 지진파 감지 관측소의 수, 진앙거리, primary zaimuth, secondary azimuth, network metric
- 수집한 자료의 P파 및 S파 도착시간 측정 및 Grid Search 방법, 단일 지진위치 결정 방법을 이용한 지진발생위치결정
- 정량적 평가요소 운용 기준 제시 및 운용 기준을 적용한 GTX 목록화

#### 가. 특허(실용신안) 등 자료목록

해당사항 없음

#### 나. 프로그램 등록목록

해당사항 없음

#### 다. 노하우 내역

해당사항 없음

라. 발생품 및 시작품 내역

해당사항 없음

바. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
Disaster Advances	Developing a seismic site classification map of Korea using geologic and topographic maps	2012년 5월 30일	5(2)	Disaster Advances	인도	SCIE
Geophysical Journal International	Three-dimensional structure of Vp, Vs and Vp/Vs beneath the active collision boundary of eastern Taiwan	2014년 1월 30일	196	The Royal Astronomical Society	영국	SCI
Bulletin of the Seismological Society of America	The 9 February 2010 Siheung, Korea, Earthquake Sequence: Repeating Earthquakes in a Stable Continental Region	2014년 2월 1일	104	Seismological Society of America	미국	SCI
계: 3 건						

○ 학술회의 발표 실적

학술회의 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명
Seismological Society of America	Microseismicity in the Seoul Metropolitan Area, Korea, and its implications for the seismic hazards	2013.4.16.~ 2013.4.21.		Seismological Society of America	미국
American Geophysical Union Fall Meeting	Pilot Experiment to Observed Earthquakes in the Eastern Offshore of the Korean Peninsula using Ocean Bottom Seismometers	2012.12.03.~ 2012/12/07		American Geophysical Union	미국
American Geophysical Union Fall Meeting	Microseismicity in the Seoul Metropolitan Area, Korea, and its implications for the seismic hazards	2012.12.03.~ 2012/12/07		American Geophysical Union	미국
Seismological Society of America	Micro-Seismicity in the Seoul Metropolitan Area, Korea	2013.4.16.~ 2013.4.21.		Seismological Society of America	미국
한국방재학회 학술발표대회	HAZUS를 이용한 경주지역 지진손실예측에서 지반특성분류도의 중요성	2012.2.26		한국방재학회	한국
계: 5건					

### 3. 연구성과

본 연구사업은 기존 자료를 수집 및 분석하고 필요시 추가 GT0 자료를 수집하여 지진 발생위치 결정 결과의 정확성 평가를 목적으로 하는 기초연구 단계 연구사업으로서 기술이전 또는 기업화 해당사항은 없음.

기존 GT 이벤트 자료 및 임시지진관측소 운영을 통해 수집한 GT 이벤트 자료의 분석을 통해 진원위치결정시 가장 적합한 1차원 속도구조모델을 선별, 2004-2006년 국내발생지진을 분석 GT2 및 GT5 기준을 만족하는 지진을 선별 및 목록화, 국가지진관측망 관측력 평가요소 제시, 향후 국가지진관측망 관측역량 향상을 위한 지진관측소 추가 설치 시 부지 선정 등에 활용 가능 함.

### 4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

#### 가. 당해연도 활용계획

- GT자료를 활용하여 기상청 국가지진관측망의 진원요소(진앙위치, 진원깊이, 진원시간) 결정 정확성 평가 지표 제시, 운용기준 제시 및 그 적용
- 신설되는 지진관측망의 최적부지 선정에 있어 근거를 제시

#### 나. 활용방법

- 진원위치 결정시 선별된 속도구조모델을 사용하여 보다 정확한 진원위치 결정
- 기상청 지진 발생 통보의 정확성 평가요소 및 운용 기준을 제시

#### 다. 차년도이후 활용계획

- 신설 지진관측소 부지 선정 적설성 시뮬레이션
- 향후 진행 예정인 한반도 및 주변해역 3차원 지하구조 연구에 진원위치 정확성 평가 기준 제시
- 논문 작성 및 국가 과학기술 역량 제고

### 4. 기대효과

- 기상청 국가지진관측망에 최적화된 GT0, GT2, GT5 기준 제시
- 신설 지진관측소의 최적의 위치선정 근거마련
- 기상청 현업에 사용 될 수 있는 1차원 속도구조모델의 개발
- 향후 한반도 지각속도구조 연구, 지진발생위치 정밀 재결정 연구 등에 중요 기초자료 제공

5. 문제점 및 건의사항

전국적 분포의 GT0 이벤트 자료 수집, 목록 작성, 전국 발파현황 모니터링을 위한 후속연구를 추진하여야 함.

## 제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해당사항 없음

## 제7장 연구시설·장비 현황

해당사항 없음

# 부 록

Table A1. Relocating results using the “NLLoc” and differences from the locations determined by the NIMR.

no	DAT E Year md	OT hrr i	OT sec	LAT (°N)	LON (°E)	DEP	NIMR LAT	NIMR LON	NIMR DEP	Hori Diff	Dep Diff	To Diff	NO	GAP	RMS
1	1999 0305	144 2	16.27	38.031 3	128.1988	16.37	37.778 7	128.141 8	0.00	28.79	16.37	33.12	4	228	0.2
2	1999 0314	113 1	12.85	37.440 7	129.4895	4.89	37.452 2	129.572 2	7.34	9.28	-2.45	9.60	4	243	0.17
3	1999 0315	711	12.84	37.693 8	130.5637	0.10	37.547 5	130.306 8	17.65	32.87	-17.5 5	37.26	5	303	0.97
4	1999 0328	339	38.32	37.693 8	130.1087	0.10	37.591 7	129.978 2	6.23	18.42	-6.13	19.42	5	295	0.4
5	1999 0404	230	2.36	35.781 3	126.2727	2.23	35.784 8	126.169 0	6.35	11.54	-4.12	12.25	4	248	0.17
6	1999 0407	144 3	18.29	37.286	129.0377	29.43	37.243 3	128.921 0	15.49	13.82	13.94	19.62	5	151	0.2
7	1999 0407	154 0	22.87	37.286	129.0095	26.96	37.243 3	128.909 3	15.50	12.11	11.46	16.67	6	147	0.31
8	1999 0407	160 9	28.84	37.328 2	129.027	26.59	37.243 0	128.912 2	15.75	15.90	10.84	19.24	4	198	0.29
9	1999 0409	114 8	11.13	37.525	129.128	27.51	37.397 3	128.889 0	12.47	30.13	15.04	33.68	4	197	0.65
10	1999 0421	224	9.13	36.568 8	126.754	21.22	36.657 0	126.964 5	20.78	25.38	0.44	25.38	4	274	0.12
11	1999 0421	162 7	6.72	36.006 3	127.8397	10.95	35.994 7	127.867 0	0.03	3.30	10.92	11.40	5	106	1.06
12	1999 0423	341	37.69	37.328 2	129.027	18.26	37.278 2	128.931 2	11.39	12.02	6.87	13.84	5	154	0.25
13	1999 0423	163 5	14.56	35.823 5	129.1465	28.12	35.824 2	129.179 5	26.58	3.67	1.54	3.98	7	177	0.21
14	1999 0425	935	56.08	35.696 8	126.9065	7.70	35.714 8	126.795 8	15.12	12.47	-7.42	14.51	4	208	0.05
15	1999 0508	231 1	43.94	37.721 8	130.4242	25.82	37.642 5	130.421 8	31.96	8.82	-6.14	10.75	5	207	0.06
16	1999 0508	231 7	45.19	35.781 3	126.6055	6.68	35.824 3	126.311 2	32.25	33.07	-25.5 7	41.80	4	248	0.22
17	1999 0515	541	54.13	35.443 8	126.5903	22.57	35.519 8	126.820 2	4.32	26.92	18.25	32.53	6	241	0.52
18	1999 0602	912	22.22	35.851 5	129.2875	4.43	35.853 2	129.288 0	1.58	0.20	2.85	2.86	6	191	0.25
19	1999 0608	171 5	12.27	37.862 5	125.622	29.26	37.902 7	125.668 0	10.00	6.79	19.26	20.42	4	313	0.09
20	1999 0617	133 3	22.66	34.037 5	127.0185	2.13	34.014 7	127.060 0	10.00	5.26	-7.87	9.47	4	296	0.21
21	1999 0619	115 8	21.58	36.386	127.7653	3.12	36.383 0	127.741 0	7.12	2.72	-4.00	4.84	6	89	0.36
22	1999 0717	622	3.14	36.203 2	126.9873	9.45	36.204 0	126.988 5	10.90	0.16	-1.46	1.46	6	195	0.09
23	1999 0910	181 7	52.49	36.062 5	124.4473	29.26	36.097 0	124.319 2	10.00	14.75	19.26	24.26	12	265	0.4
24	1999 0911	205 6	51.16	35.865 7	129.247	12.74	35.848 0	129.254 5	12.43	2.14	0.31	2.16	9	152	0.31
25	1999	165	48.67	38.256	128.9027	8.23	38.187	128.818	11.35	12.09	-3.12	12.48	6	271	0.33

	0923	9		3			3	7							
26	1999 1214	54€	57.59	36.639	127.3883	29.33	36.617 3	127.393 5	33.55	2.48	-4.22	4.90	7	90	0.19
27	1999 1220	42€	42.98	35.696 8	128.7905	13.90	35.692 5	128.766 3	15.23	2.73	-1.33	3.04	9	141	0.33
28	1999 1227	32€	20.25	36.709 3	128.2483	3.34	36.703 3	128.242 3	0.03	0.94	3.31	3.44	11	95	0.39
29	2000 0118	60€	51.98	38.368 7	127.8787	4.17	38.369 0	127.802 0	4.64	8.53	-0.47	8.54	7	268	0.16
30	2000 0220	16€	30.95	35.795 3	128.2567	0.02	35.792 7	128.256 3	0.01	0.29	0.01	0.29	8	88	0.44
31	2000 0314	161 0	52.64	36.315 7	125.8203	29.01	36.292 2	125.853 3	12.40	4.50	16.61	17.21	7	220	0.14
32	2000 0321	443	53.89	36.568 8	125.8575	17.15	36.572 0	125.889 0	15.65	3.52	1.50	3.83	4	240	0.09
33	2000 0411	194 4	3.44	36.821 8	125.3892	15.74	36.883 5	125.308 5	6.07	11.30	9.67	14.87	10	242	0.23
34	2000 0414	23€	19.46	36.568 8	128.3228	9.78	36.573 2	128.323 3	10.96	0.49	-1.18	1.27	10	65	0.2
35	2000 0428	23€	27.48	35.781 3	125.829	5.72	35.802 0	125.808 0	4.81	3.28	0.91	3.40	15	193	0.25
36	2000 0508	21€	36.46	35.232 8	128.1373	10.78	35.215 5	128.140 5	11.70	1.96	-0.92	2.16	8	104	0.18
37	2000 0511	151	15.82	33.390 7	125.8295	8.09	33.223 0	125.779 5	29.68	19.46	-21.5 9	29.06	6	241	0.46
38	2000 0511	601	4.41	38.396 8	127.8518	3.34	38.424 2	127.769 0	0.00	9.70	3.34	10.26	7	276	0.08
39	2000 0511	70€	31.81	38.396 8	127.8518	3.25	38.417 3	127.784 0	1.76	7.88	1.49	8.01	7	276	0.15
40	2000 0518	164 4	23.85	36.294 5	128.4925	19.00	36.297 5	128.502 5	15.97	1.16	3.03	3.24	15	64	0.22
41	2000 0526	124 1	41.27	36.168	127.1737	2.82	36.173 3	127.174 3	5.97	0.59	-3.15	3.20	16	52	0.27
42	2000 0723	22€	4.95	38.298 5	127.8882	6.42	38.407 2	127.791 7	1.22	16.16	5.20	16.98	16	242	0.27
43	2000 0805	12€	1.2	35.106 3	125.1452	0.10	35.116 2	125.040 0	0.00	11.75	0.10	11.75	8	244	0.23
44	2000 0806	10€	9.57	36.308 7	128.4935	10.35	36.308 5	128.492 3	13.91	0.14	-3.56	3.56	12	90	0.34
45	2000 814	16€	31.41	35.246 8	125.948	18.65	35.264 3	125.942 7	20.28	2.03	-1.63	2.61	6	160	0.08
46	2000 0821	104 4	1.89	37.918 8	126.8218	30.90	37.926 2	126.722 5	12.95	11.07	17.95	21.09	7	261	0.17
47	2000 0913	113 8	23.17	35.668 8	127.1543	3.58	35.673 0	127.104 5	5.93	5.56	-2.35	6.03	5	182	0.15
48	2000 0923	107	45.21	35.542 2	128.323	15.52	35.543 0	128.329 0	14.64	0.67	0.88	1.11	8	95	0.39
49	20001 002	15€	39.61	36.568 8	127.0902	20.25	36.624 2	127.130 7	15.20	7.63	5.05	9.15	5	162	0.12
50	2000 1007	224 6	36.12	37.257 8	128.7245	0.02	37.254 8	128.714 3	0.05	1.18	-0.03	1.18	8	104	0.36
51	2000 1023	235	41.32	36.962 5	126.4917	0.19	36.884 5	126.509 8	0.00	8.90	0.19	8.91	6	292	0.47
52	2000 1027	221 0	12.56	37.046 8	126.693	6.83	37.089 2	126.660 7	6.05	5.93	0.78	5.98	6	194	0.17
53	2000	123	41.98	36.231	127.0725	6.68	36.236	127.112	11.74	4.46	-5.06	6.74	5	132	0.28

	1105	9		3			8	2							
54	2000 1114	842	9.69	37.693 8	127.2652	8.43	37.677 8	127.251 7	4.00	2.33	4.43	5.00	5	189	0.42
55	2000 1202	753	38.03	34.593	127.011	23.26	34.612 5	126.996 3	12.55	2.72	10.71	11.05	14	107	0.44
56	2000 1209	951	1.06	36.484 3	129.9682	10.80	36.438 5	130.001 0	11.78	6.26	-0.98	6.34	19	172	0.22
57	2000 1221	231	38.09	36.294 5	127.2922	5.68	36.293 3	127.296 5	8.06	0.50	-2.38	2.43	16	69	0.34
58	2001 0129	244	7.79	35.703 8	126.5812	10.86	35.707 0	126.559 5	6.51	2.44	4.35	4.99	15	131	0.36
59	2001 0208	755	52.53	38.340 7	127.848	5.47	38.349 7	127.835 3	7.15	1.73	-1.68	2.41	4	241	0.16
60	2001 0210	847	40.89	36.906 3	126.8832	21.99	36.886 2	126.915 2	15.46	4.20	6.53	7.77	5	214	0.39
61	2001 0213	160	8.18	36.020 3	128.216	13.35	36.037 3	128.221 8	16.61	2.00	-3.27	3.83	11	78	0.27
62	2001 0218	232	8.34	37.384 3	128.4085	0.05	37.346 7	128.369 5	0.02	6.02	0.03	6.02	8	211	0.45
63	2001 0228	346	34.43	35.331 2	127.9092	14.05	35.328 5	127.856 0	2.71	5.92	11.34	12.79	8	92	0.82
64	2001 0305	152	4.31	35.303 2	125.6743	1.11	35.319 8	125.664 3	2.64	2.15	-1.53	2.64	12	186	0.22
65	2001 0306	232	20.28	35.106 3	127.8955	0.10	35.076 8	127.833 8	6.66	7.60	-6.56	10.04	6	266	0.07
66	2001 0319	131	58.45	36.737 5	125.3585	2.91	37.167 3	125.022 7	14.28	60.65	-11.3 7	61.70	5	270	0.28
67	2001 0416	135	32.52	35.865 7	129.6912	2.08	35.833 3	129.725 5	1.87	5.25	0.21	5.25	6	231	0.19
68	2001 0416	174	50.78	35.373 5	126.1043	10.92	35.381 8	126.100 8	12.63	1.00	-1.71	1.98	12	153	0.21
69	2001 0420	173	47.45	35.978 2	125.2522	29.31	35.985 2	125.256 5	0.04	0.91	29.27	29.28	8	238	0.41
70	2001 0505	221	28.87	36.906 3	125.0822	29.16	36.985 8	125.019 0	10.15	11.29	19.01	22.11	4	257	0.17
71	20010 505	102	46	34.403 2	127.3905	16.42	34.396 8	127.399 0	16.28	1.18	0.14	1.19	6	241	0.09
72	2001 0515	160	4.11	35.971 2	126.7185	12.12	35.973 0	126.731 7	12.58	1.48	-0.46	1.55	16	120	0.19
73	2001 0524	150	25.53	33.531 3	126.8328	24.90	33.565 8	126.882 7	11.46	6.75	13.44	15.04	8	186	0.39
74	2001 0527	625	37.48	34.093 7	127.5102	9.40	34.102 0	127.556 0	10.17	5.18	-0.77	5.23	5	275	0.12
75	2001 0527	112	3.01	35.865 7	129.6912	10.32	35.833 3	129.732 7	10.35	5.85	-0.03	5.85	9	231	0.2
76	2001 0527	222	5.82	36.407 5	127.7597	20.16	36.407 8	127.760 0	17.29	0.10	2.87	2.87	12	70	0.37
77	2001 0608	153	12.28	36.744 5	128.8615	14.16	36.744 7	128.847 7	13.53	1.53	0.63	1.66	12	85	0.26
78	2001 0613	453	35.77	34.909 3	127.3077	1.99	34.886 8	127.292 3	14.33	3.03	-12.3 4	12.71	5	131	0.2
79	2001 0616	122	2.83	35.964	127.9065	9.32	35.950 0	127.924 3	4.13	2.52	5.19	5.77	13	85	0.44
80	2001 0616	160	26.84	35.711	126.4222	14.99	35.722 3	126.382 5	14.42	4.59	0.57	4.62	14	143	0.28

81	2001 0629	221	8.51	35.781 3	126.6055	10.56	35.785 8	126.635 2	12.83	3.34	-2.27	4.04	16	162	0.17
82	2001 0715	110 1	46.8	36.765 7	127.0163	14.77	36.764 7	127.023 2	14.93	0.78	-0.16	0.79	6	172	0.14
83	2001 0723	825 3	14.69	36.463 3	128.0008	13.96	36.466 0	127.994 0	13.56	0.81	0.40	0.91	35	35	0.34
84	2001 0726	105 5	13.42	36.189	127.3352	0.02	36.181 7	127.346 0	2.89	1.45	-2.87	3.21	10	92	0.28
85	2001 0727	104 3	39.13	36.484 3	128.0092	8.48	36.481 5	128.009 7	11.28	0.32	-2.80	2.82	6	168	0.45
86	2001 0806	144 6	43.84	36.702 3	128.297	2.00	36.713 5	128.286 8	4.51	1.68	-2.51	3.02	14	73	0.25
87	2001 820	120 4	22.55	34.037 5	125.498	8.72	34.119 7	125.548 8	15.67	10.74	-6.95	12.80	4	285	0.12
88	2001 0824	212	3.41	35.872 7	128.1298	0.01	35.875 0	128.148 5	2.48	2.09	-2.47	3.24	26	37	0.3
89	2001 0906	234 2	32.88	34.811	127.3983	16.30	34.797 0	127.398 5	16.23	1.56	0.07	1.56	6	128	0.18
90	2001 0912	210 7	14.87	36.386	127.0107	18.62	36.385 0	127.014 3	13.00	0.42	5.62	5.64	16	59	0.55
91	2001 0914	173 2	42.09	35.598 5	125.8087	19.25	35.611 0	125.778 7	14.00	3.61	5.25	6.38	14	186	0.26
92	20010 918	234 7	57.7	36.614 5	126.9068	9.12	36.615 2	126.912 2	9.52	0.61	-0.40	0.72	20	73	0.15
93	2001 0924	33	3.3	33.362 5	127.2025	30.81	35.460 8	127.551 0	16.50	236.5 1	14.31	236.9 4	9	322	1.33
94	2001 0930	183 5	52.5	36.052	127.7137	17.06	36.052 2	127.716 2	14.00	0.28	3.06	3.07	36	31	0.43
95	2001 1028	132 7	4.36	37.117 2	129.0525	0.75	37.113 2	129.023 8	3.02	3.22	-2.27	3.94	12	190	0.19
96	2001 1109	454 7	46.52	34.740 7	126.8607	18.65	34.726 8	126.869 0	14.95	1.80	3.70	4.11	4	98	0.21
97	2001 1112	211 5	20.19	36.498 5	127.9682	14.41	36.517 3	127.960 8	16.09	2.25	-1.68	2.81	20	59	0.28
98	2001 1121	149	11.78	36.702 3	128.297	2.00	36.713 8	128.304 3	9.94	1.51	-7.94	8.09	33	35	0.39
99	2001 1124	710 8	31.17	36.807 8	129.9553	9.62	36.769 0	130.010 5	9.90	7.50	-0.29	7.51	26	152	0.3
100	2001 1130	218 7	31.96	35.858 7	127.5322	0.01	35.858 3	127.523 7	4.05	0.95	-4.04	4.15	19	42	0.43
101	2002 0103	153 3	23.32	34.846 2	127.2288	0.01	34.847 8	127.232 3	0.02	0.43	-0.01	0.43	16	64	0.34
102	2002 0107	810	0.78	35.359 3	128.8213	0.05	35.328 8	128.855 3	0.00	5.08	0.05	5.08	9	191	0.25
103	2002 0107	231 8	31.37	35.851 5	128.2048	4.63	35.839 0	128.232 0	7.76	3.33	-3.13	4.57	10	135	0.22
104	2002 0116	212 8	27.94	36.175	126.3448	12.01	36.200 7	126.427 8	14.69	9.66	-2.68	10.03	4	189	0.24
105	2002 0117	111 6	24.6	35.106 3	125.1452	0.10	35.116 3	125.079 7	0.00	7.37	0.10	7.37	14	243	0.41
106	2002 0203	134 4	8.58	35.021 8	125.0607	1.89	35.029 2	125.104 7	0.00	4.96	1.89	5.31	12	256	0.39
107	2002 0207	31	16.57	36.034 3	129.2603	15.06	36.063 8	129.276 7	14.99	3.75	0.07	3.75	6	161	0.37
108	2002 0228	132 6	49.41	36.653 2	128.0763	4.60	36.649 7	128.074 0	1.51	0.47	3.09	3.13	17	68	0.2

109	2002 0307	143 0	54.8	36.435 2	126.5308	8.51	36.438 5	126.536 3	9.71	0.71	-1.20	1.39	27	166	0.21
110	2002 0307	170 9	34.25	35.514	126.1927	23.27	35.529 3	126.135 7	12.14	6.56	11.13	12.92	15	152	0.38
111	2002 0312	110 4	37.5	34.923 5	127.4318	3.42	34.923 8	127.436 2	6.06	0.49	-2.65	2.69	15	91	0.36
112	2002 0317	26	38.64	37.890 7	124.6252	4.80	37.927 0	124.563 3	7.01	7.98	-2.22	8.28	10	195	0.33
113	2002 0322	228	54.08	37.918 8	124.426	8.04	37.928 5	124.557 3	7.30	14.64	0.74	14.66	5	291	0.21
114	2002 0324	203 1	5.47	37.391 3	129.2515	0.01	37.373 2	129.210 5	1.40	4.98	-1.39	5.17	18	201	0.37
115	2002 0325	910	26.33	37.145 3	127.1917	0.02	37.142 0	127.194 2	0.63	0.46	-0.61	0.76	11	88	0.3
116	2002 0331	224 6	2.55	37.307	128.1413	0.98	37.322 7	128.148 0	2.21	1.90	-1.23	2.26	16	77	0.26
117	2002 0414	330	4.05	34.881 3	125.249	17.34	34.804 8	124.428 5	11.26	91.63	6.08	91.83	6	279	0.23
118	2002 0416	225 3	7.69	38.593 7	128.1242	0.10	38.384 7	128.026 0	12.47	25.68	-12.3 7	28.50	4	297	1.07
119	2002 0529	922	18.12	34.642 2	127.827	11.21	34.606 3	127.876 3	10.54	6.78	0.67	6.81	9	195	0.3
120	2002 0607	132 4	17.6	38.537 5	125.6463	30.81	38.615 7	125.637 0	13.11	8.76	17.70	19.74	7	216	0.36
121	2002 0623	212	55.44	34.543 8	126.4418	30.90	34.657 5	126.622 2	13.61	23.71	17.29	29.35	4	222	0.57
122	2002 0701	164 9	7.49	35.767 2	127.9775	2.01	35.747 7	127.962 5	8.27	2.74	-6.26	6.83	33	34	0.28
123	2002 0708	190 1	50.87	35.907 8	129.7365	17.66	35.861 7	129.762 0	15.50	5.86	2.16	6.24	33	237	0.32
124	2002 0711	231 7	37.23	35.893 7	129.8325	1.84	35.878 8	129.744 8	0.00	9.89	1.84	10.06	9	246	0.31
125	2002 0716	215 0	30.58	37.693 8	124.9905	30.90	37.813 3	124.739 3	10.00	30.93	20.90	37.33	11	285	0.51
126	2002 0805	223 2	39.77	34.691 3	127.3988	15.51	34.672 2	127.402 8	16.44	2.17	-0.93	2.36	18	126	0.28
127	2002 0806	123 7	58.13	35.654 7	127.6105	12.28	35.663 5	127.609 0	14.64	0.99	-2.36	2.56	13	86	0.25
128	2002 0810	124 7	37.32	35.162 5	123.5505	30.81	35.170 3	123.403 3	10.00	16.39	20.81	26.49	13	287	0.41
129	2002 0813	707	16.81	35.106 3	125.1452	0.10	35.109 3	125.096 2	0.64	5.46	-0.54	5.49	5	267	0.23
130	2002 0915	740	1.05	35.893 7	129.7213	20.05	35.868 7	129.765 0	14.98	5.60	5.07	7.55	7	236	0.19
131	2002 0915	223 6	7.17	36.062 5	128.2327	13.37	36.081 3	128.263 2	12.01	3.98	1.36	4.21	7	189	0.3
132	2002 0918	181 0	17.32	35.584 3	125.573	30.95	35.623 8	125.550 0	14.82	5.08	16.13	16.91	23	231	0.32
133	2002 1003	170 6	31.78	38.017 2	126.3558	6.13	38.018 8	126.340 0	6.26	1.77	-0.13	1.77	9	194	0.23
134	2002 1016	104 8	59.68	36.554 7	127.5797	14.99	36.559 0	127.591 2	14.82	1.37	0.17	1.38	13	69	0.3
135	2002 1019	123 1	55	36.161	127.6122	22.02	36.166 5	127.605 3	17.08	0.98	4.94	5.03	9	94	0.12
136	2002 1019	192 2	8.36	35.225 8	127.6618	2.56	35.219 5	127.668 5	5.75	1.02	-3.20	3.35	27	77	0.22

137	2002 1023	130	53.87	34.895 3	128.4178	0.02	34.862 3	128.448 8	0.02	5.03	0.00	5.03	21	193	0.32
138	2002 1024	190 6	49.09	33.911	127.0532	12.76	33.894 5	127.086 0	12.72	4.08	0.04	4.08	15	181	0.22
139	2002 1028	250 3	53.34	35.057	126.5802	16.19	35.066 3	126.574 3	16.81	1.22	-0.62	1.37	12	122	0.1
140	2002 1106	124 8	7.64	36.435 2	127.7053	13.96	36.434 8	127.693 2	12.36	1.35	1.60	2.09	26	34	0.37
141	2002 1113	124 6	27.3	35.809 3	127.9663	8.19	35.795 2	127.934 2	11.18	3.90	-2.99	4.92	6	147	0.16
142	2002 1205	105 3	46.52	36.709 3	126.2837	0.05	36.758 7	126.297 3	5.91	5.70	-5.86	8.17	5	234	0.25
143	2002 1205	201 3	16.14	36.709 3	126.2837	9.45	36.739 8	126.291 2	12.32	3.49	-2.88	4.52	6	246	0.07
144	2002 1207	743 7	37.43	37.454 7	129.5048	0.02	37.406 5	129.430 0	2.44	9.89	-2.42	10.18	12	252	0.35
145	2002 1209	224 2	57.16	38.565 7	127.3452	30.95	38.733 7	127.248 3	20.43	21.56	10.52	23.99	16	277	0.52
146	2002 1212	124 2	21.51	37.075	126.3842	8.14	37.087 2	126.381 8	7.02	1.38	1.12	1.78	14	191	0.18
147	2002 1216	921 5	38.75	36.737 5	130.0753	19.18	36.708 2	130.100 8	14.03	4.32	5.15	6.72	7	273	0.38
148	2002 1216	234 4	57.47	36.962 5	126.4917	12.98	37.010 2	126.476 3	11.33	5.57	1.65	5.81	6	223	0.41
149	2002 1226	144 1	50.14	36.498 5	126.9605	12.67	36.489 8	126.976 0	9.69	1.98	2.98	3.57	7	115	0.25
150	2003 0109	833 7	19.44	37.440 7	124.502	2.37	37.478 5	124.467 7	6.73	5.68	-4.36	7.15	13	207	0.58
151	2003 0109	225 6	4.56	35.858 7	129.2812	7.16	35.850 2	129.273 2	4.00	1.30	3.16	3.41	20	149	0.37
152	20030 113	130 3	24.61	35.767 2	129.4472	0.02	35.741 5	129.418 7	1.75	4.27	-1.73	4.60	14	227	0.38
153	2003 0116	502 8	59.8	33.657 8	127.1493	6.81	33.631 0	127.167 0	14.00	3.57	-7.20	8.03	9	196	0.23
154	2003 0208	144 6	33.73	35.264 5	126.6133	5.96	35.272 3	126.608 7	8.28	1.01	-2.32	2.53	26	115	0.22
155	2003 0209	132 8	45.88	35.964	127.8787	17.07	35.991 3	127.870 2	4.29	3.18	12.78	13.17	12	57	0.52
156	2003 0214	742 7	43.29	37.665 7	124.677	4.41	37.767 2	124.587 7	24.14	15.03	-19.7 3	24.81	6	185	0.28
157	2003 0301	120 7	20.61	37.693 8	124.763	3.58	37.880 0	124.883 0	10.66	24.63	-7.08	25.63	5	204	0.44
158	2003 0301	143 3	28.55	35.802 3	129.3877	5.53	35.783 7	129.378 2	4.54	2.32	0.99	2.53	34	192	0.47
159	2003 0304	344 5	25.71	38.326 5	128.5785	2.01	38.301 0	128.503 2	2.80	8.84	-0.79	8.87	12	212	0.25
160	2003 0309	182 8	4.03	36.146 8	128.3777	14.00	36.131 8	128.347 7	5.09	3.73	8.91	9.66	47	45	0.65
161	2003 0313	190 6	11.96	36.203 2	128.7718	22.52	36.199 5	128.758 8	15.10	1.50	7.42	7.57	27	87	0.54
162	2003 0319	140 5	19.22	36.540 7	129.5812	12.35	36.514 5	129.625 7	12.05	5.74	0.30	5.75	18	228	0.25
163	2003 0322	203 8	44.6	34.993 7	124.593	30.90	35.036 8	124.517 7	17.71	9.65	13.19	16.34	47	223	0.34
164	2003	111	56.85	37.496	124.0493	0.34	37.671	123.865	13.28	28.21	-12.9	31.04	25	247	0.51

	0330	0		8			7	5	4						
165	2003 0401	132 6	38.22	36.442 2	127.8247	3.42	36.452 7	127.842 8	8.35	2.33	-4.94	5.46	12	72	0.36
166	2003 0404	152 5	8.68	36.173 2	127.336	7.20	36.174 2	127.339 7	8.41	0.43	-1.21	1.29	39	40	0.34
167	2003 0404	153 1	32.92	36.176 8	127.3362	5.82	36.172 8	127.340 7	6.36	0.67	-0.54	0.86	43	33	0.33
168	2003 0404	154 6	10.07	36.171 5	127.3447	0.01	36.171 8	127.350 0	0.10	0.59	-0.09	0.60	28	85	0.39
169	2003 0415	175 5	26.02	36.386	126.2002	22.50	36.440 8	126.111 8	7.55	11.56	14.95	18.90	42	170	0.64
170	2003 0603	183 4	6.21	35.134 3	124.7333	13.90	35.179 7	124.771 3	7.66	6.58	6.24	9.07	15	230	0.25
171	2003 0607	170 7	57.21	36.371 8	124.984	30.95	36.376 5	124.991 3	9.91	0.97	21.04	21.06	11	183	0.36
172	2003 0609	114 3	3.39	35.921 8	123.639	30.95	35.946 2	123.585 5	15.00	6.54	15.95	17.24	20	245	0.55
173	2003 0629	253 3	54.18	35.584 3	124.7983	30.76	35.606 8	124.897 2	7.80	11.28	22.96	25.58	5	259	0.32
174	2003 0705	318 7	29.31	37.440 7	125.2953	0.05	37.464 5	125.343 7	0.02	6.00	0.03	6.00	11	138	0.5
175	2003 0709	620 3	10.73	34.888 3	128.2048	4.78	34.866 7	128.201 5	7.63	2.43	-2.85	3.74	16	145	0.2
176	2003 0718	805 5	26.35	34.937 5	124.4272	14.92	34.913 7	124.244 2	5.45	20.52	9.47	22.60	7	294	0.2
177	2003 0727	211 3	2.45	34.712 5	125.0802	20.34	34.784 5	124.951 7	20.54	16.38	-0.20	16.38	5	298	0.21
178	2003 0807	204 2	19.09	36.864 2	129.623	8.60	36.820 2	129.521 3	13.51	12.31	-4.91	13.26	12	231	0.2
179	2003 0811	162 5	57.99	34.993 7	130.1958	17.73	34.929 3	130.259 7	10.38	10.09	7.35	12.48	8	298	0.41
180	2003 0919	114 8	30.35	37.609 3	124.6757	11.38	37.624 8	124.700 8	11.98	3.28	-0.60	3.33	10	187	0.52
181	2003 0923	182 6	56.3	35.802 3	128.4305	10.86	35.803 2	128.434 8	7.59	0.49	3.27	3.31	39	43	0.32
182	2003 0925	624 3	17.52	36.006 3	129.6197	4.17	35.988 8	129.639 0	1.52	2.90	2.65	3.92	17	223	0.34
183	2003 1003	195 9	22.88	33.236	126.8333	7.97	33.194 3	126.855 5	9.82	5.25	-1.85	5.57	12	250	0.23
184	2003 1004	200 3	53.24	36.329 7	127.2592	13.20	36.334 5	127.258 0	3.82	0.55	9.38	9.40	30	39	0.56
185	2003 1013	912 5	5.42	36.952 5	126.4455	10.76	36.974 5	126.421 7	11.03	3.64	-0.27	3.65	48	107	0.29
186	2003 1013	164 4	39.48	34.206 2	127.4073	24.32	34.124 0	127.452 7	15.08	10.44	9.24	13.94	7	262	0.13
187	2003 1017	255 7	57.12	35.739 7	129.4172	6.18	35.734 7	129.397 8	7.41	2.21	-1.23	2.53	7	205	0.23
188	2004 0104	211 1	51.67	36.143 3	127.0227	6.90	36.153 5	127.022 8	8.84	1.13	-1.94	2.25	42	63	0.21
189	2004 0105	164 9	47.5	38.396 8	125.0383	30.76	38.544 7	124.910 3	30.31	21.75	0.45	21.75	15	237	0.7
190	2004 0117	47 7	40.25	33.629 7	125.7968	13.97	33.677 8	125.834 5	0.03	6.80	13.94	15.51	9	207	0.25
191	2004 0122	202 7	9.67	35.387 5	127.9678	11.43	35.394 2	127.970 0	12.40	0.78	-0.97	1.25	27	55	0.27
192	2004	112	25.1	35.858	128.5455	13.96	35.859	128.521	9.07	2.67	4.89	5.57	29	41	0.45

	0129	2		7			3	5							
193	2004 0205	223 0	36.19	38.425	126.4465	22.86	38.662 8	126.164 0	8.97	41.06	13.89	43.34	5	294	0.17
194	2004 0225	205 1	15.76	37.201 5	128.8615	8.55	37.195 3	128.847 0	5.05	1.75	3.50	3.91	18	124	0.3
195	2004 0307	115 8	7.22	35.893 7	125.3885	29.16	35.898 3	125.375 5	9.54	1.53	19.62	19.68	26	166	0.33
196	2004 0402	304	14.96	38.537 5	126.1067	30.81	38.666 7	126.066 0	7.25	15.06	23.56	27.96	5	228	0.72
197	2004 0415	142 5	50.24	34.796 8	125.2193	3.15	34.853 5	125.135 5	0.00	11.25	3.15	11.68	7	303	0.19
198	2004 0426	425	25.71	35.844 5	128.2392	11.83	35.839 0	128.242 5	10.37	0.71	1.46	1.63	46	39	0.43
199	2004 0429	831	20.22	37.609 3	124.1645	30.37	37.687 5	124.013 5	31.48	18.91	-1.11	18.94	6	246	0.25
200	2004 0430	144 3	56.51	35.795 3	129.4217	5.79	35.763 8	129.405 3	11.05	3.95	-5.26	6.58	32	201	0.44
201	2004 0504	160 7	57.71	33.446 8	127.1797	14.87	33.371 8	127.234 0	19.00	10.30	-4.13	11.09	10	234	0.25
202	2004 0504	171 5	36.82	33.446 8	127.2337	6.83	33.451 2	127.232 0	0.02	0.52	6.81	6.83	10	237	0.38
203	2004 0505	322	34.35	32.856 3	125.8392	29.16	33.027 2	125.956 7	29.99	23.06	-0.83	23.08	9	290	0.34
204	2004 0506	141 0	13.7	37.412 5	129.9118	30.81	37.447 3	129.885 7	18.71	4.84	12.10	13.03	5	160	0.58
205	2004 0517	605	42.82	36.414	125.9217	10.87	36.424 3	125.870 5	8.99	5.81	1.88	6.10	10	216	0.56
206	2004 0525	908	27.03	38.143 7	125.4603	30.90	38.331 2	125.390 8	26.34	22.23	4.56	22.70	6	197	0.65
207	2004 0529	101 4	26.43	36.765 7	130.0498	19.04	36.691 8	130.117 8	18.16	11.17	0.88	11.20	57	161	0.36
208	2004 0529	194 5	38.04	36.793 8	130.249	3.58	36.694 0	130.220 5	7.59	11.54	-4.01	12.22	9	281	0.26
209	2004 0530	124 5	54.27	36.994 2	129.3632	0.01	36.965 5	129.324 5	2.41	5.36	-2.40	5.87	18	199	0.16
210	2004 0601	112 2	18.86	37.145 3	130.1273	19.21	37.090 8	130.163 5	21.63	7.27	-2.43	7.67	25	138	0.3
211	2004 0611	725	40.71	37.264 8	128.7322	4.08	37.263 3	128.721 0	0.02	1.26	4.06	4.25	10	144	0.16
212	20040 713	120 8	50.9	38.509 3	126.0192	0.05	38.507 3	125.993 2	0.02	2.90	0.03	2.90	10	226	0.45
213	2004 0714	444	15.13	33.461	127.086	16.15	33.410 7	127.162 7	16.59	10.20	-0.44	10.21	6	225	0.09
214	2004 0714	113 7	55.95	36.435 2	127.2998	10.74	36.443 2	127.293 7	9.51	1.12	1.23	1.66	29	38	0.26
215	2004 0805	203 2	53.66	35.851 5	127.3165	7.53	35.851 0	127.325 0	6.61	0.95	0.92	1.32	55	38	0.27
216	2004 0810	192 9	49.32	33.334 3	126.2587	6.06	33.340 8	126.254 5	6.98	0.86	-0.93	1.26	10	132	0.17
217	2004 0813	134 2	3.45	37.503 8	126.3963	11.52	37.516 0	126.389 3	11.64	1.56	-0.12	1.57	32	107	0.28
218	2004 0914	224 7	33.6	37.447 7	126.7905	9.00	37.451 0	126.805 8	11.12	1.74	-2.12	2.75	18	154	0.19
219	2004 0923	164 0	21.61	33.362 5	126.987	15.31	33.385 0	127.081 0	4.99	10.75	10.32	14.90	12	233	0.4
220	2004	947	34.7	35.494	128.2663	3.87	35.485	128.281	12.85	2.02	-8.98	9.20	42	35	0.52

	0927			7			2	8								
221	2004	212	22.33	35.486	128.264	10.83	35.469	128.268	13.23	1.86	-2.40	3.04	21	57	0.35	
	1003	4					8	3								
222	2004	101	32.61	38.003	125.37	6.44	37.991	125.382	0.00	1.94	6.44	6.73	9	181	0.23	
	1011	9		2			3	8								
223	2004	180	2.67	33.686	127.367	23.27	33.687	127.475	0.03	12.03	23.24	26.17	19	192	0.54	
	1013	2					7	2								
224	2004	512	35.44	34.403	125.4815	0.05	34.390	125.489	0.05	1.71	0.00	1.71	7	263	0.2	
	1020			2			3	8								
225	2004	162	46.15	37.061	126.0028	8.40	37.083	126.011	8.04	2.66	0.36	2.69	24	206	0.23	
	1104	5					3	5								
226	2004	415	4.46	37.721	129.6278	0.05	37.673	129.581	0.00	7.46	0.05	7.46	12	181	0.74	
	1128			8			5	2								
227	2004	451	16.7	33.025	125.3615	0.39	32.986	125.387	6.68	5.15	-6.29	8.13	7	285	0.29	
	1130						3	0								
228	2004	104	6.77	32.828	125.9187	18.26	32.840	125.955	21.47	4.28	-3.21	5.35	8	292	0.18	
	1210	1		2			3	2								
229	2004	180	10.87	33.686	127.7185	1.57	33.622	127.786	0.01	10.31	1.56	10.43	18	212	0.31	
	1211	0					7	3								
230	2005	224	30.59	38.931	130.6938	0.10	38.770	130.132	10.00	64.96	-9.90	65.71	8	302	0.94	
	0202	8		2			8	0								
231	2005	227	28.29	33.478	126.382	3.87	33.463	126.404	10.47	3.05	-6.60	7.27	13	102	0.3	
	0205			5			2	8								
232	2005	111	3.47	36.639	130.0802	14.22	36.573	130.067	16.77	7.39	-2.55	7.82	12	290	0.22	
	0207	6					7	8								
233	2005	131	39.62	35.352	126.2483	9.29	35.350	126.246	18.52	0.28	-9.23	9.24	18	170	0.2	
	0220	8		3			3	8								
234	2005	256	48.1	38.846	127.2468	4.99	38.868	127.219	5.97	3.87	-0.98	4.00	8	279	0.26	
	0312			8			2	3								
235	2005	143	49.34	32.406	125.6117	7.85	32.635	125.639	10.00	25.64	-2.15	25.73	7	315	0.17	
	0317	9		3			2	5								
236	2005	103	39.52	36.554	125.4228	2.01	36.573	125.468	5.20	5.46	-3.19	6.32	9	205	0.69	
	0331	2		7			8	0								
237	2005	151	20.05	33.496	126.9325	24.81	33.517	126.935	23.17	2.34	1.64	2.86	14	188	0.25	
	0331	5		2			0	7								
238	2005	101	0.57	37.103	125.3415	23.01	37.111	125.340	13.90	0.97	9.11	9.16	6	186	0.26	
	0409	4		2			8	3								
239	2005	140	51.09	35.711	130.0523	20.17	35.668	130.045	16.83	4.79	3.34	5.84	10	273	0.1	
	0409	4					5	3								
240	2005	337	32.96	34.895	125.3728	10.34	34.902	125.366	12.31	1.07	-1.97	2.24	9	263	0.15	
	0421			3			3	2								
241	2005	727	35.65	34.937	125.3055	19.57	34.705	123.325	10.00	221.6	9.57	221.8	6	266	0.17	
	0501			5			3	5		6		7				
242	2005	222	29.48	38.509	125.6167	8.96	38.447	125.613	10.22	6.85	-1.26	6.96	8	234	0.58	
	0514	2		3			8	2								
243	2005	150	27.07	37.468	124.4175	26.25	37.635	124.893	10.00	56.02	16.25	58.33	8	265	0.34	
	0607	7		7			2	0								
244	2005	346	55.56	36.762	128.4872	16.17	36.771	128.489	17.38	1.04	-1.21	1.59	17	58	0.2	
	0610			2			2	7								
245	2005	121	36.94	36.765	128.4768	14.77	36.773	128.483	14.82	1.09	-0.05	1.09	20	58	0.27	
	0610	4		7			0	3								
246	2005	220	1.86	33.095	126.102	1.57	33.079	126.103	3.50	1.73	-1.93	2.59	12	276	0.38	
	0614	7		3			8	3								
247	2005	223	49.45	33.102	126.1762	3.28	33.099	126.183	4.52	0.88	-1.24	1.52	16	278	0.37	
	0614	7		3			3	5								

248	2005 0620	631	46.39	38.987 5	125.6632	2.91	38.601 3	125.930 7	10.00	52.24	-7.09	52.72	14	319	1.31
249	2005 0629	141 8	4.74	34.459 3	129.1945	8.96	34.443 3	129.227 3	13.28	4.06	-4.32	5.93	9	291	0.15
250	2005 0629	152 5	3.14	36.702 3	129.7563	8.10	36.673 0	129.727 2	12.72	4.59	-4.62	6.51	18	251	0.19
251	2005 0729	180 1	38.84	34.199 2	127.4275	11.01	34.192 8	127.455 5	18.07	3.19	-7.06	7.75	14	191	0.11
252	2005 0823	200 6	25.02	34.188 7	127.0087	8.50	34.180 5	127.029 2	12.18	2.45	-3.69	4.43	24	156	0.28
253	2005 0825	103 3	48.33	36.716 3	126.277	7.30	36.728 8	126.259 8	7.27	2.36	0.03	2.36	14	239	0.16
254	2005 0831	358 2	11.84	37.103 2	129.7425	13.81	37.083 2	129.755 7	15.07	2.66	-1.27	2.95	14	251	0.42
255	2005 0907	811	11.74	37.053 8	127.8422	18.61	37.075 7	127.845 7	12.37	2.47	6.24	6.71	18	74	0.41
256	2005 1003	101 8	34.86	35.830 5	129.5703	13.74	35.818 2	129.565 3	15.73	1.48	-1.99	2.47	10	222	0.11
257	2005 1009	235 1	9.29	37.834 3	124.7948	27.95	37.852 5	124.927 2	14.92	14.86	13.03	19.76	9	207	0.23
258	2005 1013	222	30.71	36.969 5	129.5265	7.64	36.938 0	129.486 7	11.94	5.64	-4.30	7.09	13	230	0.29
259	2005 1021	300 5	32.51	37.848 5	124.8378	23.86	37.883 7	124.882 0	22.30	6.28	1.56	6.47	10	177	0.41
260	2005 1022	160 2	47.3	34.955	127.0663	7.85	34.954 3	127.066 7	10.77	0.09	-2.92	2.92	23	87	0.19
261	2005 1106	352	38.73	36.653 2	128.581	27.66	36.005 0	128.145 7	5.27	86.82	22.39	89.66	9	152	0.26
262	2005 1115	10	50.55	37.212 2	128.8023	10.25	37.211 3	128.794 3	8.57	0.90	1.68	1.90	14	103	0.17
263	2005 1127	247 3	8.13	38.284 3	124.2898	10.80	38.272 2	124.279 5	9.62	1.77	1.18	2.13	7	315	0.25
264	2005 1207	902	12.58	36.639	127.7528	2.01	36.645 2	127.764 8	7.31	1.50	-5.30	5.51	7	118	0.2
265	2005 1217	150 0	3.74	34.691 3	127.6042	20.16	34.679 2	127.611 7	18.29	1.58	1.87	2.45	18	176	0.14
266	2005 1224	185 8	50.32	34.73	127.2058	24.03	34.727 2	127.206 0	22.84	0.31	1.19	1.23	21	83	0.18
267	2006 0119	335 2	35.35	37.212 2	128.8023	10.00	37.200 0	128.801 7	8.15	1.36	1.85	2.29	17	103	0.3
268	2006 0119	135 3	30.91	37.184	128.793	9.50	37.188 0	128.792 2	7.27	0.45	2.23	2.28	16	89	0.21
269	2006 0121	229 8	50.71	36.350 8	127.2113	20.16	36.344 7	127.243 3	12.77	3.62	7.39	8.23	10	112	0.29
270	2006 0213	183 1	50.99	38.720 3	126.0425	0.02	38.704 8	125.983 7	9.95	6.76	-9.93	12.01	20	243	0.79
271	2006 0227	151 1	23.52	35.795 3	127.896	13.20	35.790 0	127.897 3	7.04	0.61	6.16	6.19	14	84	0.41
272	2006 0228	952	38.98	36.329 7	127.706	14.99	36.332 5	127.682 0	14.15	2.69	0.84	2.82	8	100	0.24
273	2006 0309	205 7	18.47	33.348 5	127.0807	15.23	33.332 5	127.074 2	15.99	1.92	-0.76	2.06	11	238	0.13
274	2006 0310	195 2	24.12	37.103 2	126.0187	8.96	37.118 0	126.006 7	11.05	2.12	-2.09	2.98	8	241	0.19
275	2006 0314	193 6	57.65	38.115 7	126.0028	14.19	38.157 3	125.956 8	16.76	6.90	-2.57	7.36	6	314	0.16

276	2006 0319	455	48.01	36.301 5	127.3413	15.91	36.286 7	127.371 3	16.63	3.72	-0.72	3.79	12	140	0.15
277	2006 0319	503	47.57	36.308 7	127.3208	16.55	36.305 7	127.331 7	17.66	1.26	-1.11	1.67	17	105	0.23
278	2006 0322	224 2	47.74	38.776 5	127.4013	0.02	38.906 2	127.298 8	10.00	18.38	-9.98	20.91	17	263	0.46
279	2006 0325	225 4	51.55	35.633 7	126.3567	14.98	35.648 7	126.330 2	16.85	3.39	-1.87	3.87	18	145	0.38
280	2006 0325	225 4	51.37	35.640 7	126.35	18.65	35.649 7	126.338 7	17.32	1.61	1.33	2.08	17	141	0.31
281	2006 0401	150 4	38.58	35.394 5	127.1608	24.04	35.392 2	127.180 3	16.41	2.18	7.63	7.93	20	71	0.3
282	2006 0403	914	3.12	38.875	126.0057	0.39	38.465 8	126.101 5	10.00	46.73	-9.61	47.71	12	250	1.18
283	2006 0412	160 9	47.52	34.684 3	124.8333	9.93	34.707 7	124.838 7	11.32	2.67	-1.39	3.01	8	294	0.25
284	2006 0419	49	34.84	37.103 2	129.9118	5.67	37.087 5	129.933 5	16.86	2.98	-11.1 9	11.58	11	138	0.3
285	2006 0419	157	55.95	37.145 3	129.8733	0.02	37.104 5	129.857 5	0.00	4.86	0.02	4.86	16	261	0.59
286	2006 0419	35	8.76	37.018 7	130.1577	29.16	37.005 5	130.027 3	16.73	14.57	12.43	19.15	6	276	0.86
287	2006 0419	49	34.8	37.117 2	129.899	2.01	37.073 3	129.948 2	16.67	7.33	-14.6 6	16.39	14	136	0.3
288	2006 0419	157	55.6	37.131 3	129.9425	6.49	37.051 3	129.915 8	16.60	9.38	-10.1 1	13.79	9	265	0.47
289	2006 0419	701	32.75	37.103 2	129.9118	7.99	37.023 5	129.956 0	10.00	10.13	-2.01	10.33	7	138	0.33
290	2006 0419	718	11.39	37.131 3	129.9425	1.84	37.078 5	129.933 8	7.17	5.95	-5.33	7.99	9	265	0.49
291	20060 428	144 7	55.44	37.117 2	129.9272	6.95	37.089 3	129.949 0	8.20	3.94	-1.25	4.13	21	138	0.44
292	2006 0428	145 4	57.75	37.117 2	129.9272	7.29	37.080 5	129.950 8	9.58	4.85	-2.29	5.36	22	138	0.38
293	2006 0428	160 1	0.9	37.117 2	129.9272	7.87	37.082 5	129.901 5	9.58	4.80	-1.71	5.10	10	257	0.28
294	2006 0429	201	13.51	37.117 2	129.8707	4.67	37.075 2	129.919 8	5.88	7.18	-1.21	7.28	17	134	0.47
295	2006 0430	50	2.7	37.117 2	129.899	0.02	37.076 5	129.935 8	6.67	6.10	-6.65	9.02	15	136	0.42
296	2006 0507	215 9	15.5	36.245 3	129.5422	11.99	36.241 7	129.510 8	15.00	3.51	-3.01	4.63	13	208	0.23
297	2006 0601	258	4.11	34.677 3	128.1095	10.50	34.659 5	128.115 7	11.37	2.10	-0.87	2.27	18	199	0.19
298	2006 0718	545	54.08	36.111 7	126.6137	8.66	36.120 7	126.628 3	10.65	1.91	-1.99	2.76	11	175	0.15
299	2006 0723	174 4	17.94	37.138 3	126.3798	4.64	37.149 5	126.377 3	8.57	1.28	-3.93	4.13	12	220	0.2
300	2006 0725	142 9	19.66	35.798 8	127.8858	6.21	35.800 2	127.884 2	5.85	0.24	0.36	0.43	24	63	0.31
301	2006 0725	175 0	39.67	35.795 3	127.896	9.71	35.792 5	127.888 5	7.92	0.89	1.79	2.00	32	84	0.32
302	2006 0801	357	37.87	35.732	127.8437	19.39	35.731 0	127.839 2	5.88	0.51	13.51	13.52	13	76	0.54
303	2006 0807	518	23.47	35.668 8	124.0525	3.97	35.683 5	124.342 0	10.00	32.23	-6.03	32.79	5	289	0.28

304	2006 0808	231 6	20.23	35.781 3	124.2758	0.10	34.683 8	125.451 8	10.00	178.8 6	-9.90	179.1 3	8	282	1.4
305	2006 0825	224 4	17.59	37.194 5	128.7973	4.66	37.204 5	128.792 7	5.93	1.22	-1.27	1.76	17	87	0.28
306	2006 0919	150 3	11.67	35.879 7	129.7063	13.25	35.851 8	129.700 5	14.87	3.17	-1.62	3.56	21	235	0.27
307	2006 0920	515 5	35.68	34.698 5	128.7333	4.24	34.714 7	128.750 8	5.83	2.65	-1.59	3.09	13	261	0.21
308	2006 0929	140 7	54.3	34.121 8	124.984	3.54	34.137 8	124.980 3	7.72	1.83	-4.18	4.57	14	264	0.36
309	2006 1003	202 9	23.85	36.670 7	127.6392	10.00	36.666 0	127.651 2	12.40	1.43	-2.40	2.80	20	94	0.23
310	2006 1016	512	59.07	37.496 8	124.9568	6.83	37.542 5	124.993 2	9.80	6.50	-2.97	7.14	7	160	0.29
311	2006 1022	505	17.88	37.089	126.004	9.71	37.121 2	126.012 0	10.98	3.69	-1.27	3.90	13	242	0.23
312	2006 1025	914	29.31	33.376 5	125.8695	14.94	33.376 3	125.877 8	17.16	0.92	-2.22	2.40	12	235	0.18
313	2006 1110	161 6	1.85	35.964	127.434	27.34	35.980 0	127.458 3	12.50	3.24	14.84	15.19	26	55	0.55
314	2006 1111	231 9	29.46	38.987 5	124.7368	16.47	38.426 2	125.062 0	10.00	72.13	6.47	72.42	10	293	2.09
315	2006 1125	180 5	35.33	34.185 2	127.4403	14.01	34.165 3	127.450 7	16.95	2.50	-2.94	3.86	20	188	0.14
316	2006 1203	155 1	43.95	36.466 8	127.8927	16.48	36.462 8	127.893 0	17.69	0.45	-1.22	1.29	25	63	0.24
317	2006 1209	163 9	52.64	33.095 3	126.1557	7.44	33.105 7	126.166 8	8.76	1.69	-1.33	2.15	10	278	0.22
318	2006 1219	161 8	20.57	37.117 2	129.9272	7.97	37.063 5	129.946 2	16.84	6.33	-8.87	10.90	15	138	0.33
319	2006 1228	44	50.96	36.111 7	128.1315	9.70	36.109 3	128.126 2	10.26	0.65	-0.56	0.86	17	74	0.27
320	2007 0105	204 7	19.26	39.015 7	128.1257	20.01	39.566 5	128.135 3	10.00	61.25	10.01	62.06	12	292	0.46
321	2007 0119	6	24.22	37.711 3	128.5852	7.97	37.699 0	128.578 5	7.72	1.56	0.25	1.58	12	91	0.23
322	2007 0124	731	58.46	38.593 7	125.4757	22.18	37.633 2	125.802 5	126.61	112.8 1	-104. 43	153.7 2	4	343	0.25
323	2007 0205	153 4	59.47	34.958 7	129.582	0.01	34.898 3	129.735 3	5.00	18.32	-4.99	18.99	29	265	0.81
324	2007 0310	918	41.12	37.229 7	128.892	6.22	37.208 2	128.859 7	0.04	4.31	6.18	7.54	20	158	0.34
325	2007 0314	203 0	12.76	36.161	127.9745	10.25	36.163 5	127.972 3	10.62	0.37	-0.38	0.53	62	21	0.32
326	2007 0327	174 7	23.33	38.340 7	126.1842	0.05	38.708 3	125.581 3	0.02	78.51	0.03	78.51	16	199	0.59
327	2007 0401	131 6	5.87	38.453 2	125.6145	7.02	38.461 2	125.607 5	10.00	1.18	-2.98	3.20	6	224	0.39
328	2007 0424	233 6	39.98	36.969 5	126.4428	2.63	36.980 5	126.446 5	0.00	1.29	2.63	2.93	28	183	0.23
329	2007 0503	324	8.54	36.148 7	127.8222	2.17	36.151 3	127.820 0	5.10	0.38	-2.94	2.96	34	37	0.25
330	2007 0503	924	2.19	36.586 3	127.8092	13.70	36.586 7	127.812 0	16.03	0.31	-2.33	2.35	26	26	0.28
331	2007	205	51.75	35.598	129.9593	12.57	35.581	129.998	12.87	4.72	-0.30	4.73	8	268	0.22

	0510	1		5			8	3								
332	2007	722	47.6	35.914	127.9937	0.01	35.916	127.990	0.03	0.42	-0.02	0.42	24	27	0.34	
	0513			8			8	5								
333	2007	195	8.57	35.728	129.2467	6.21	35.716	129.218	0.86	3.42	5.35	6.34	29	150	0.45	
	0515	6		5			3	5								
334	2007	225	26.88	36.565	129.0265	12.39	36.557	129.012	8.98	1.79	3.41	3.85	28	76	0.28	
	0518	3		2			3	5								
335	2007	105	26.65	35.978	125.1965	29.01	36.027	125.065	10.00	15.54	19.01	24.56	9	241	0.28	
	0526	9		2			7	8								
336	2007	155	59.01	35.225	128.5707	0.01	35.217	128.588	0.04	2.19	-0.03	2.19	41	88	0.3	
	0527	1		8			8	7								
337	2007	150	24.67	35.696	130.1203	23.01	35.615	130.224	24.00	14.70	-0.99	14.73	18	270	0.47	
	0625	1		8			5	5								
338	2007	102	30.25	37.496	129.7778	6.15	37.397	129.801	10.00	11.32	-3.85	11.96	12	164	0.64	
	0708	8		8			8	7								
339	2007	213	44.78	39.943	127.1673	0.10	39.380	127.102	0.00	63.02	0.10	63.02	13	319	1.94	
	1231	3		8			8	0								
340	2008	135	54.83	34.965	124.8945	9.06	34.999	124.950	8.75	7.25	0.31	7.26	11	284	0.39	
	0110	1		7			5	3								
341	2008	106	15.48	38.453	125.8443	29.01	38.511	125.837	14.46	6.56	14.55	15.96	8	212	0.52	
	0205			2			7	0								
342	2008	915	39.51	35.809	129.3535	10.51	35.797	129.377	10.42	2.99	0.09	3.00	16	196	0.19	
	0223			3			7	8								
343	2008	10	58.95	38.143	124.4305	29.16	38.008	124.704	10.00	33.98	19.16	39.01	19	303	2.06	
	0226			7			3	5								
344	2008	142	48.61	35.971	126.496	0.35	35.992	126.510	8.35	2.88	-8.00	8.50	15	141	0.29	
	0226	2		2			5	7								
345	2008	203	52.93	33.545	126.469	14.70	33.536	126.512	17.68	4.95	-2.98	5.78	11	149	0.23	
	0228	7		3			8	7								
346	2008	653	8.21	38.593	126.7423	30.90	38.891	126.373	10.00	52.76	20.90	56.75	13	284	0.42	
	0301			7			7	0								
347	2008	653	0.11	38.903	126.325	6.93	38.923	126.273	14.86	6.10	-7.93	10.01	12	257	0.6	
	0301			2			0	8								
348	2008	904	47.62	34.628	128.8242	29.11	35.638	128.765	11.99	112.4	17.12	113.7	11	277	0.62	
	0309			2			2	5		9		9				
349	2008	163	0.92	38.108	127.1105	1.37	38.112	127.102	5.13	0.98	-3.76	3.89	13	210	0.27	
	0315	8		7			5	5								
350	2008	145	35.84	34.965	124.9493	21.46	34.912	124.712	10.00	27.04	11.46	29.36	6	231	0.2	
	0322	7		7			7	0								
351	2008	729	21.17	37.785	126.3808	17.67	37.804	126.353	14.08	3.72	3.59	5.17	29	152	0.23	
	0328			2			2	3								
352	2008	201	8.61	35.978	129.8675	2.66	35.921	129.926	0.04	9.07	2.62	9.45	7	271	0.1	
	0527			2			3	0								
353	2008	125	31.2	33.446	125.6697	20.49	33.521	125.706	12.06	9.30	8.43	12.55	7	240	0.12	
	0601	9		8			8	8								
354	2008	143	12.43	35.570	128.6015	0.02	35.575	128.619	2.56	2.02	-2.54	3.24	15	69	0.26	
	0622	0		3			2	0								
355	2008	143	12.67	35.577	128.6088	3.19	35.570	128.621	4.80	1.57	-1.62	2.25	13	97	0.21	
	0622	0		3			8	3								
356	2008	183	7.11	34.853	124.508	5.09	34.910	124.545	5.91	7.60	-0.82	7.64	5	336	0.09	
	0630	4		2			2	7								
357	20080	702	31.3	35.443	130.5673	11.92	35.536	128.859	15.64	190.1	-3.72	190.1	17	304	1.69	
	702			8			8	7		5		9				
358	20080	114	49.73	38.987	127.2842	0.19	39.146	127.174	10.86	21.46	-10.6	23.97	7	287	0.51	
	705	8		5			2	3			7					
359	20080	141	27.18	35.317	129.6317	16.64	35.294	129.513	34.68	13.36	-18.0	22.45	7	273	0.31	

	723	1		2			7	7		4					
360	20080	102	58.03	34.529	128.039	12.28	34.535	128.061	11.69	2.61	0.59	2.68	11	235	0.13
	724	9		7			3	8							
361	20080	813	45.49	38.256	127.5272	0.10	39.222	126.136	10.00	188.3	-9.90	188.5	5	291	0.07
	728			3			5	3		1		7			
362	20080	124	50.56	34.508	128.0445	14.96	34.472	128.079	15.71	5.66	-0.76	5.71	15	222	0.12
	728	8		7			0	8							
363	20080	545	26.82	35.696	125.632	1.41	35.719	125.639	6.51	2.59	-5.11	5.72	9	201	0.1
	821			8			0	0							
364	2008	154	30.51	35.078	125.062	0.05	35.065	125.039	2.84	2.89	-2.79	4.02	7	300	0.22
	0904	4		2			5	3							
365	2008	635	5.76	34.621	128.27	15.51	34.573	128.263	7.90	5.32	7.61	9.28	18	216	0.5
	0909			2			8	7							
366	2008	146	10.54	38.101	127.1317	4.67	38.131	127.084	4.65	6.27	0.02	6.27	14	207	0.23
	0912			5			5	0							
367	2008	305	8.45	35.609	127.0163	7.20	35.616	127.011	8.12	0.97	-0.92	1.34	25	118	0.19
	0914						3	5							
368	2008	224	4.6	34.206	125.122	6.88	34.155	125.077	3.19	7.51	3.69	8.37	6	266	0.39
	0921			2			2	7							
369	2008	204	34.32	38.101	127.103	0.02	38.126	127.085	9.95	3.41	-9.93	10.50	9	210	0.33
	1009			5			5	2							
370	2008	26	14.83	36.336	127.2525	5.22	36.341	127.253	6.85	0.57	-1.63	1.73	24	41	0.17
	1030			7			7	8							
371	2008	912	30.77	37.089	129.163	8.16	37.077	129.142	9.32	2.67	-1.16	2.91	21	158	0.26
	1106						0	2							
372	2008	122	54.75	38.453	125.672	0.63	38.432	125.644	9.84	3.79	-9.21	9.96	10	240	0.25
	1112	0		2			8	7							
373	2008	123	2.61	38.537	125.6463	0.19	38.422	125.545	15.79	17.00	-15.6	23.07	11	248	0.22
	1112	0		5			5	5			0				
374	2008	143	56.84	38.481	125.5868	13.85	38.517	125.563	14.34	4.73	-0.49	4.75	5	259	0.15
	1112	7		3			0	7							
375	20081	172	6.36	36.498	129.6755	10.58	36.461	129.691	9.34	4.43	1.24	4.60	14	233	0.15
	207	8		5			8	0							
376	2008	902	13.06	38.143	124.7738	25.48	38.069	124.925	15.00	18.71	10.48	21.45	3	265	0.11
	1208			7			8	0							
377	2008	234	50.52	34.993	125.1423	5.52	35.015	125.251	5.19	12.34	0.33	12.35	5	262	0.67
	1208	9		7			3	2							
378	2008	103	23.71	39.986	126.3917	0.02	40.481	126.410	0.00	55.13	0.02	55.13	8	324	1.24
	1212	1					5	0							
379	2008	143	13.95	36.498	129.6475	10.87	36.470	129.638	11.08	3.23	-0.21	3.24	14	229	0.18
	1219	8		5			8	7							
380	2008	853	40.58	36.498	129.6755	9.81	36.470	129.675	10.66	3.08	-0.85	3.20	12	252	0.2
	1220			5			8	5							
381	2008	125	49.61	37.384	129.881	11.96	37.334	129.835	17.34	7.52	-5.38	9.24	10	262	0.08
	1220	3		3			3	5							
382	2008	205	16.34	35.654	126.3367	2.01	35.683	126.337	5.91	3.18	-3.90	5.03	11	234	0.14
	1229	1		7			3	5							
383	2009	658	10.94	36.487	129.0903	9.31	36.491	129.093	8.17	0.52	1.14	1.25	34	59	0.21
	0101			8			5	2							
384	2009	231	56.2	34.009	127.5328	11.00	33.939	127.599	7.00	10.72	4.00	11.44	12	194	0.26
	0101	5		3			2	0							
385	2009	180	1.86	33.475	127.1002	20.54	33.468	127.203	6.09	11.51	14.45	18.47	11	224	0.35
	0104	0					7	5							
386	2009	115	19.95	39.043	125.955	30.90	39.147	125.839	10.00	17.20	20.90	27.07	17	256	0.67
	0109	3		8			0	8							

387	2009 0113	100 7	0.76	36.484 3	129.6883	6.15	36.457 5	129.694 8	6.83	3.07	-0.68	3.14	27	224	0.29
388	2009 0212	846	16.97	35.259 2	127.4312	17.05	35.256 2	127.431 2	19.28	0.33	-2.23	2.26	36	51	0.21
389	2009 0215	357	5.91	35.848	127.7223	12.37	35.851 5	127.712 3	13.01	1.18	-0.64	1.34	25	45	0.26
390	2009 0215	134 1	57.41	35.739	125.7582	22.55	35.753 3	125.731 8	24.10	3.34	-1.55	3.68	17	177	0.24
391	2009 0218	150 1	46.33	39.156 3	126.7722	0.10	39.136 5	126.743 7	6.76	3.86	-6.66	7.70	5	260	0.56
392	2009 0223	124 7	15.88	37.096 2	125.9267	6.67	37.112 5	125.948 2	9.42	3.00	-2.75	4.07	25	158	0.25
393	2009 0226	603	55.69	35.078 2	129.626	11.48	34.993 8	129.707 8	8.07	13.07	3.41	13.51	13	266	0.23
394	2009 0226	115 3	4.91	36.948 5	129.3487	10.54	36.940 0	129.367 5	13.01	2.29	-2.48	3.37	21	117	0.3
395	2009 0302	520	27.4	37.046 8	124.6632	5.28	36.968 2	124.457 5	29.00	24.48	-23.7 2	34.09	22	241	0.31
396	2009 0325	173 2	15.86	33.390 7	127.0153	14.00	33.338 0	127.082 3	13.57	9.48	0.43	9.49	10	239	0.23
397	2009 0326	132 1	25.17	38.108 7	127.1105	3.86	38.109 0	127.098 7	5.15	1.31	-1.29	1.84	26	209	0.24
398	2009 0329	205 8	17.8	36.206 7	128.0645	2.77	36.202 5	128.057 7	6.89	0.89	-4.12	4.22	42	23	0.26
399	2009 0402	112 7	59.73	37.595 3	125.8823	18.09	37.621 5	125.888 3	10.26	2.99	7.83	8.38	31	135	0.37
400	2009 0413	195 1	34.7	38.481 3	125.5868	29.16	38.577 0	125.639 3	5.04	12.14	24.12	27.00	6	243	0.31
401	2009 0418	111 9	2.75	33.390 7	126.9075	30.95	33.408 0	127.050 2	17.86	15.98	13.09	20.66	7	232	0.24
402	2009 0421	844	57.73	35.422 7	128.2392	13.72	35.411 3	128.232 5	19.17	1.47	-5.45	5.64	26	49	0.23
403	2009 0429	315	44.85	33.461	127.1398	19.45	33.452 7	127.117 8	20.41	2.61	-0.96	2.79	11	228	0.25
404	2009 0501	225 8	28.16	36.563 5	128.7163	10.08	36.556 0	128.712 0	8.68	0.96	1.40	1.70	52	31	0.26
405	2009 0502	328	29.46	36.556 5	128.7193	12.40	36.554 2	128.712 8	10.22	0.77	2.18	2.31	36	31	0.22
406	2009 0514	115 0	12.78	36.224 2	127.1208	5.05	36.230 3	127.123 0	4.36	0.72	0.69	1.00	27	50	0.31
407	2009 0515	134 1	31.56	36.561 7	126.3965	9.09	36.574 5	126.397 3	10.64	1.43	-1.55	2.10	30	85	0.33
408	2009 0525	912	31.06	36.941 3	129.3552	6.29	36.948 8	129.353 8	8.43	0.85	-2.15	2.31	22	126	0.25
409	2009 0526	955	2.33	36.582 8	129.2345	13.15	36.563 3	129.217 8	12.44	2.85	0.71	2.94	14	132	0.28
410	2009 0530	151 0	58.84	33.531 3	125.8612	15.98	33.525 8	125.834 5	14.24	3.03	1.74	3.50	6	226	0.15
411	2009 0531	624	10.53	38.481 3	126.6215	3.78	38.558 3	126.507 8	0.00	15.27	3.78	15.73	12	290	0.37
412	2009 0603	656	1.67	33.193 8	126.2803	4.36	33.235 2	126.292 3	0.00	4.79	4.36	6.48	8	244	0.31
413	2009 0603	110 9	39.12	38.565 7	126.5395	12.64	38.639 2	126.456 0	0.01	12.37	12.63	17.68	21	213	0.6
414	2009 0605	154 9	43.34	38.607 8	127.5062	6.71	38.687 8	127.419 7	0.02	13.10	6.69	14.71	27	250	0.3

415	2009 0605	165 6	35.62	35.078 2	124.7872	1.11	35.109 3	124.857 8	0.00	8.58	1.11	8.65	12	259	0.34
416	2009 0619	190 5	50.51	37.018 7	124.5217	30.90	37.070 5	124.677 5	12.09	18.26	18.81	26.21	11	236	0.36
417	2009 0620	121 4	52.76	38.017 2	126.6413	5.60	38.071 0	126.585 3	2.48	8.63	3.12	9.18	22	237	0.26
418	2009 0625	406 8	8.82	38.818 8	126.0612	30.90	39.009 0	126.043 5	11.03	21.24	19.87	29.09	5	251	0.52
419	2009 0628	130 7	48.11	35.751 3	128.259	17.05	35.748 5	128.258 0	18.21	0.33	-1.16	1.20	49	29	0.27
420	2009 0629	252 2	53.18	37.110 2	125.9553	8.34	37.115 2	125.953 8	9.11	0.58	-0.77	0.96	23	99	0.3
421	2009 0630	235 5	1.89	37.637 5	124.7048	0.19	37.674 2	124.753 2	3.27	6.75	-3.08	7.42	5	215	0.26
422	2009 0714	190 4	48.11	35.106 3	124.9252	2.62	35.121 7	124.942 7	0.03	2.59	2.59	3.66	30	215	0.37
423	2009 0717	414 3	4.93	38.481 3	126.1617	2.03	38.492 8	126.150 2	0.00	1.81	2.03	2.72	17	219	0.48
424	2009 0730	27 8	37.38	35.943 8	126.2725	13.26	35.957 8	126.296 8	15.43	3.16	-2.17	3.84	21	112	0.31
425	2009 0814	181 8	12.2	36.561 7	129.632	14.96	36.544 5	129.624 0	16.10	2.11	-1.15	2.40	32	220	0.23
426	2009 0817	624 8	21.95	36.582 8	129.6548	12.18	36.541 0	129.608 0	15.28	6.98	-3.10	7.63	22	231	0.25
427	2009 0821	140 2	25.01	38.762 5	125.8855	30.81	38.843 3	125.793 2	13.38	13.64	17.43	22.13	24	242	0.6
428	2009 0825	140 8	29.44	37.693 8	124.6492	11.14	37.844 5	124.697 7	26.04	17.60	-14.9 0	23.06	4	247	0.13
429	2009 1001	123 0	6.08	38.101 5	126.0165	21.87	38.146 0	126.016 3	17.19	4.95	4.68	6.81	29	181	0.41
430	2009 1004	300 7	7.31	39.268 7	126.1968	30.90	39.307 5	126.142 5	10.00	7.42	20.90	22.18	14	257	0.49
431	2009 1016	412 8	26.64	33.418 8	127.0435	26.83	33.373 0	127.181 8	21.35	16.20	5.48	17.10	5	237	0.16
432	2009 1104	193 1	25.09	38.481 3	124.782	2.03	38.783 2	124.009 7	4.24	92.20	-2.21	92.23	8	274	0.28
433	2009 1113	202 8	43.11	35.654 7	126.9182	15.91	35.660 2	126.920 5	15.80	0.66	0.11	0.67	46	62	0.24
434	2009 1114	122 7	56.94	34.803 8	127.9118	12.32	34.777 5	127.925 3	13.06	3.29	-0.75	3.37	27	163	0.33
435	2009 1116	203 8	49.29	36.073 5	126.9355	6.21	36.071 5	126.942 3	6.41	0.77	-0.20	0.80	37	59	0.27
436	2009 1127	134 2	39.97	37.778 2	129.6328	18.75	37.762 7	129.622 0	21.90	2.10	-3.16	3.79	11	262	0.2
437	2009 1203	201 4	52.95	36.709 3	128.5852	19.42	36.710 5	128.589 5	4.87	0.50	14.55	14.56	43	24	0.54
438	2009 1211	413 8	32.3	33.671 8	125.5683	30.95	33.732 3	125.640 0	10.22	10.43	20.73	23.21	5	236	0.21
439	2009 1214	221 9	55.07	38.875	126.0057	30.61	38.686 8	125.988 0	7.21	21.02	23.40	31.46	4	248	0.18
440	2009 1215	2	13.59	36.751 5	127.0858	10.15	36.760 3	127.086 5	10.22	0.98	-0.07	0.98	16	91	0.27
441	2009 1226	155 8	48.31	37.693 8	124.6492	9.78	37.907 2	124.737 8	20.66	25.69	-10.8 8	27.90	4	280	0.34
442	2010 0105	111 2	10.97	36.948 5	126.477	14.99	36.961 5	126.498 3	12.41	2.77	2.58	3.79	39	112	0.28

443	2010 0110	258	17.76	38.368 7	126.5012	26.06	38.330 2	126.468 8	23.09	5.59	2.97	6.33	6	276	0.26
444	2010 0123	854	13.9	36.579 3	128.187	14.37	36.582 3	128.187 3	14.72	0.34	-0.35	0.49	38	28	0.25
445	2010 0131	200	14.12	33.376 5	127.0282	14.99	33.343 2	127.070 3	14.36	5.97	0.63	6.00	16	218	0.36
446	2010 0131	214	20.3	33.390 7	127.0153	14.77	33.345 0	127.067 0	16.09	7.67	-1.32	7.78	9	239	0.35
447	2010 0203	115	8.46	33.334 3	127.0665	19.13	33.328 7	127.109 5	15.69	4.82	3.44	5.92	12	226	0.23
448	2010 0209	908	14.15	37.428 3	126.8162	4.65	37.450 0	126.805 7	10.53	2.68	-5.88	6.46	61	40	0.38
449	2010 0216	953	33.37	35.739	129.9438	23.37	35.635 7	130.000 0	18.54	13.08	4.83	13.94	53	255	0.42
450	2010 0221	121	2.06	36.734	127.0673	11.50	36.742 8	127.066 0	12.70	0.99	-1.20	1.56	46	55	0.26
451	2010 0222	142	32.61	33.376 5	127.055	15.23	33.325 8	127.108 0	15.65	8.16	-0.42	8.17	29	214	0.32
452	2010 0301	125	4.14	38.396 8	125.5552	7.12	38.405 3	125.593 7	0.00	4.38	7.12	8.36	4	224	0.15
453	2010 0309	350	14.98	36.414	125.754	23.27	36.449 0	125.756 5	25.31	3.90	-2.04	4.40	50	136	0.36
454	2010 0404	345	50.79	38.481 3	126.0467	0.10	38.551 3	126.047 2	0.00	7.78	0.10	7.78	7	225	0.34
455	2010 0411	161	26.75	34.051 5	125.6477	5.40	34.071 2	125.648 0	10.11	2.19	-4.71	5.19	15	207	0.21
456	2010 0412	171	20.75	34.009 3	125.4157	0.05	34.029 8	125.441 3	0.04	3.65	0.01	3.65	13	232	0.32
457	2010 0416	105	12.2	38.734 3	126.0287	0.05	38.692 0	125.999 8	0.00	5.70	0.05	5.70	7	239	0.58
458	2010 0427	102	16.67	36.800 8	128.7533	9.31	36.789 0	128.754 3	4.06	1.32	5.25	5.41	24	38	0.29
459	2010 0428	542	0.4	36.572 3	128.7118	0.01	36.567 0	128.704 3	6.59	1.02	-6.58	6.66	25	61	0.27
460	2010 0515	544	59.99	35.999 2	127.8462	12.41	35.998 7	127.833 2	4.56	1.45	7.85	7.98	28	47	0.41
461	2010 0526	622	14.52	37.707 8	129.8398	0.02	37.699 3	129.867 3	0.27	3.20	-0.25	3.21	16	268	0.42
462	2010 0611	402	11.95	38.706 2	126.1717	29.16	38.787 7	126.113 7	0.00	11.12	29.16	31.21	3	243	0.38
463	2010 0622	132	3.4	38.481 3	125.5868	30.90	38.447 7	125.613 3	11.88	4.76	19.02	19.61	6	230	0.32
464	2010 0625	195	19.55	32.968 7	125.95	10.56	32.934 2	125.980 0	12.85	5.08	-2.29	5.58	5	288	0.14
465	2010 0628	315	0.92	38.818 8	126.0612	30.90	38.776 5	126.046 2	11.09	4.99	19.81	20.43	11	234	0.85
466	2010 0705	184	13.85	36.466 8	127.1233	11.39	36.474 7	127.132 3	11.99	1.33	-0.60	1.46	72	34	0.25
467	2010 0727	932	42.06	36.336 7	127.2525	4.49	36.339 0	127.261 5	7.97	1.03	-3.48	3.63	24	64	0.18
468	2010 0823	185	45.29	38.621 8	125.9087	0.05	38.657 0	125.873 3	0.02	5.55	0.03	5.55	17	224	0.72
469	2010 0827	223	48.96	32.743 7	126.1567	16.95	32.935 7	126.236 5	21.69	23.12	-4.74	23.60	12	312	0.31
470	2010	103	43.22	36.575	129.0168	14.06	36.570	129.017	15.95	0.58	-1.89	1.98	38	42	0.22

	0906	2		8			7	7							
471	2010	170	39.63	33.390	127.123	30.95	33.438	127.164	18.15	7.02	12.80	14.60	11	240	0.31
	0929	7		7			0	8							
472	20101	142	15.75	37.672	129.602	0.01	37.630	129.547	2.87	7.70	-2.86	8.21	24	239	0.28
	004	4		7			0	5							
473	2010	173	42.08	35.921	129.696	12.16	35.885	129.715	13.95	4.54	-1.79	4.88	30	227	0.26
	1006	3		8			8	2							
474	2010	906	22.26	37.215	129.8655	5.38	37.142	129.780	10.49	12.53	-5.11	13.54	12	259	0.24
	1014			7			0	2							
475	2010	259	11.42	35.858	128.1845	10.86	35.851	128.184	4.49	0.78	6.37	6.42	45	26	0.3
	1022			7			7	5							
476	2010	144	47.96	39.493	126.907	30.90	39.738	126.895	10.00	27.23	20.90	34.33	9	289	0.46
	1023	3		7			3	2							
477	2010	336	58.75	34.304	127.3717	18.62	34.268	127.424	0.04	7.09	18.58	19.89	18	159	0.57
	1025			7			7	3							
478	2010	111	49.59	39.381	128.298	30.90	38.974	128.166	36.90	47.58	-6.00	47.96	11	321	0.6
	1107	1		3			0	7							
479	2010	150	17.73	36.825	126.749	4.66	36.839	126.755	2.25	1.66	2.41	2.92	45	44	0.3
	1119	7		3			0	0							
480	2010	225	35.87	36.006	129.8422	14.05	35.956	129.813	13.51	6.39	0.54	6.41	15	249	0.3
	1126	1		3			7	2							
481	2010	115	28.32	35.173	127.0153	17.50	35.172	127.009	18.39	0.67	-0.89	1.11	25	75	0.17
	1128						8	3							
482	2010	11	26.21	37.321	129.4437	0.01	37.292	129.422	7.34	3.96	-7.33	8.33	23	217	0.31
	1219			2			7	3							
483	2010	215	6.57	36.892	125.4898	0.02	36.907	125.511	0.00	2.94	0.02	2.94	18	163	0.57
	1219	6		2			7	2							

[붙임 1]

연구개발결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

○ GT0 지진카탈로그 작성

- 국가지진관측망 내부에 분포하는 GT0 이벤트 database 작성

○ GT2, GT5 수준 지진목록 작성

- 기존지진관측자료 중 GT2 및 GT5 수준 지진목록 작성

○ 국가지진관측망 지진발생위치 결정 정확성 분석의 정량적 평가요소 및 운용기준 제시

- 지진발생위치 결정 정확성 평가의 정량적 평가요소 및 운용기준 제시

○ 오차 분포도 작성 및 오차 높은 지역 선별

2. 연구수행결과 현황

○ KCRT2002, KCRT2004 및 KCRT2008 발파의 기상청 국가지진관측망 자료 수집

○ 국가지진관측망의 진원위치 결정력 평가

○ 진원위치 결정력 평가시 고려요소: 지진파 감지 관측소의 수, 진앙거리, primary azimuth, secondary azimuth, network metric

○ 수집한 자료의 P파 및 S파 도착시간 측정 및 Grid Search 방법, 단일 지진위치 결정 방법을 이용한 지진발생위치결정

○ 정량적 평가요소 운용 기준 제시 및 운용 기준을 적용한 GTX 목록화

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

해당사항 없음

나. 프로그램 등록목록

해당사항 없음

다. 노하우 내역

해당사항 없음

라. 발생품 및 시작품 내역

해당사항 없음

바. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI게재여부
Disaster Advances	Developing a seismic site classification map of Korea using geologic and topographic maps	2012년 5월 30일	5(2)	Disaster Advances	인도	SCIE
Geophysical Journal International	Three-dimensional structure of Vp, Vs and Vp/Vs beneath the active collision boundary of eastern Taiwan	2014년 1월 30일	196	The Royal Astronomical Society	영국	SCI
Bulletin of the Seismological Society of America	The 9 February 2010 Siheung, Korea, Earthquake Sequence: Repeating Earthquakes in a Stable Continental Region	2014년 2월 1일	104	Seismological Society of America	미국	SCI
계: 3 건						

○ 학술회의 발표 실적

학술회의 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명
Seismological Society of America	Microseismicity in the Seoul Metropolitan Area, Korea, and its implications for the seismic hazards	2013.4.16.~ 2013.4.21.		Seismological Society of America	미국
American Geophysical Union Fall Meeting	Pilot Experiment to Observed Earthquakes in the Eastern Offshore of the Korean Peninsula using Ocean Bottom Seismometers	2012.12.03.~ 2012/12/07		American Geophysical Union	미국
American Geophysical Union Fall Meeting	Microseismicity in the Seoul Metropolitan Area, Korea, and its implications for the seismic hazards	2012.12.03.~ 2012/12/07		American Geophysical Union	미국
Seismological Society of America	Micro-Seismicity in the Seoul Metropolitan Area, Korea	2013.4.16.~ 2013.4.21.		Seismological Society of America	미국
한국방재학회 학술발표대회	HAZUS를 이용한 경주지역 지진손실예측에서 지반특성분류도의 중요성	2012.2.26		한국방재학회	한국
계: 5건					

### 3. 연구성과

본 연구사업은 기존 자료를 수집 및 분석하고 필요시 추가 GT0 자료를 수집하여 지진 발생위치 결정 결과의 정확성 평가를 목적으로 하는 기초연구 단계 연구사업으로서 기술이전 또는 기업화 해당사항은 없음.

기존 GT 이벤트 자료 및 임시지진관측소 운영을 통해 수집한 GT 이벤트 자료의 분석을 통해 진원위치결정시 가장 적합한 1차원 속도구조모델을 선별, 2004-2006년 국내발생지진을 분석 GT2 및 GT5 기준을 만족하는 지진을 선별 및 목록화, 국가지진관측망 관측력 평가요소 제시, 향후 국가지진관측망 관측역량 향상을 위한 지진관측소 추가 설치 시 부지 선정 등에 활용 가능 함.

#### 가. 당해연도 활용계획

- GT자료를 활용하여 기상청 국가지진관측망의 진원요소(진앙위치, 진원깊이, 진원시간) 결정 정확성 평가 지표 제시, 운용기준 제시 및 그 적용
- 신설되는 지진관측망의 최적부지 선정에 있어 근거를 제시

#### 나. 활용방법

- 진원위치 결정시 선별된 속도구조모델을 사용하여 보다 정확한 진원위치 결정
- 기상청 지진 발생 통보의 정확성 평가요소 및 운용 기준을 제시

#### 다. 차년도이후 활용계획

- 신설 지진관측소 부지 선정 적설성 시뮬레이션
- 향후 진행 예정인 한반도 및 주변해역 3차원 지하구조 연구에 진원위치 정확성 평가 기준 제시
- 논문 작성 및 국가 과학기술 역량 제고

### 4. 기대효과

- 기상청 국가지진관측망에 최적화된 GT0, GT2, GT5 기준 제시
- 신설 지진관측소의 최적의 위치선정 근거마련
- 기상청 현업에 사용 될 수 있는 1차원 속도구조모델의 개발
- 향후 한반도 지각속도구조 연구, 지진발생위치 정밀 재결정 연구 등에 중요 기초자료 제공

### 5. 문제점 및 건의사항

전국적 분포의 GT0 이벤트 자료 수집, 목록 작성, 전국 발파현황 모니터링을 위한 후속연구를 추진하여야 함.

[붙임 2]

**연구개발결과의 보안 등급**

(「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조)

보안등급 분류		일반과제 ■ 보안과제 □ (I급비밀, II급비밀, III급비밀 중 택 1)
보안과제 분류 기준		
연구과제의 보안성 검토	연구책임자의 의견	보안성 검토결과 보안등급 분류 해당 사항 없음
	연구기관 자체의 검토결과	보안성 검토결과 보안등급 분류 해당 사항 없음

※ 보안과제 분류 기준 : 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의 4(분류기준) 1호 중 한가지 항목에 해당되어야 함

<p>제24조의 4(분류기준) 1호</p> <p>가. 세계 초일류 기술제품의 개발과 관련되는 연구개발과제</p> <p>나. 외국에서 기술이전을 거부하여 국산화를 추진 중인 기술 또는 미래핵심기술로서 보호의 필요성이 인정되는 연구개발과제</p> <p>다. 「산업기술의 유출방지 및 보호에 관한 법률」 제2조제2호의 국가핵심기술과 관련된 연구개발과제</p> <p>라. 「대외무역법」 제19조제1항 및 같은 법 시행령 제32조의2에 따른 수출허가 등의 제한이 필요한 기술과 관련된 연구개발과제</p> <p>마. 그 밖에 중앙행정기관의 장이 보안과제로 분류되어야 할 사유가 있다고 인정하는 과제</p>
--

※ 보안과제로 분류시 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의 4(분류기준) 1호 중 한가지 항목 선택(기상업무 연구개발사업 보안관리지침에 의거 분야별 평가위원회에서 보안성여부를 검토한 후 보안과제로 분류)

[붙임 3]

## 자체평가의견서

### 1. 과제현황

		과제코드	CATER 2012-8140		
부처사업명	기상씨앗기술개발사업				
세부사업명	기상청 지진관측망에 관측된 지진원 위치 결정의 오차 평가 및 GT 수준 지진 카탈로그 작성 II				
부처 기술분류	A	A07	A0709	국가기술지도 (NTRM)	B030308
국가과학기술 표준분류체계	ND	ND02	ND0202		
총괄과제			총괄책임자(기관)		
과제명			연구단계		
연구기관	한국해양과학기술원		연구책임자	김광희	
연구기간 연구비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차연도	2012.3.15 ~2013.2.28	105,000,000		105,000,000
	2차연도	2013.2.28. ~2014.2.28	105,000,000		105,000,000
	3차연도				
	계				210,000,000
참여기업					
상대국			상대국 연구기관		

2. 평가일 : 2014.5.22

### 3. 평가자

소속	직위	성명	서명
한국해양과학기술원	책임연구원	김광희	

### 4. 평가자 확인

본인은 평가대상 과제의 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을  
확약하며, 이 자료가 전문가 및 전문기관 평가시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	김 광 희 
----	---

## I. 연구개발실적

### 1. 연구개발결과의 우수성 및 창의성

기상청에서는 국가지진관측망을 운영하고 있으며, 지진발생시 지진의 발생위치과 크기, 그리고 규모에 관한 정보를 국민들에게 제공하고 있다. 지진은 지하 깊은 곳에서 발생하므로 진원요소의 참 값을 알지 못하는 경우가 일반적이지만 제공하는 지진관련 정보의 정확성에 관한 정보를 제공할 필요가 있다. 본 연구에서는 정확히 알고 있는 인공 지진 정보를 사용하여 기상청 국가지진관측망의 관측역량과 발표하는 진원요소 정보의 정확성을 객관적으로 평가할 수 있는 기준요소와 그 운용 기준을 제시하였다.

### 2. 연구개발결과의 파급효과

정확한 발생위치를 알 수 없는 자연지진 위치 결정 결과의 정확성을 객관적으로 평가할 수 있는 기준을 제시함으로써, 지진 위치 정보 통보의 질을 관리 할 수 있을 것이다. 또한 기상청 지진정보를 활용하는 측에서는 기상청 발표의 정확성을 정확히 이해할 수 있을 것이다.

### 3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

기상청에서 제공하는 지진발생위치 정보의 정확성 정보를 제공하는 연구 결과로서, 향후 기상청의 지진통보에 활용 될 수 있다.

### 4. 연구개발 수행노력의 성실도

연구계획서에 제시한 연구내용을 성실히 수행하였으며, 세부연구목표를 달성하였다.

### 5. 공개발표된 연구개발성과(논문·지적재산권·발표회 개최 등)

#### 연구논문1

제목: The 9 February 2010 Siheung, Korea, Earthquake Sequence: Repeating Earthquakes in a Stable Continental Region

저자: W.Y. Kim and K. H. Kim

학술지명: Seismological Society of America (SCI)

게재일: 2014년 2월 1일

#### 연구논문2

제목: Three-dimensional structure of  $V_p$ ,  $V_s$  and  $V_p/V_s$  beneath the active collision boundary of eastern Taiwan

저자: K. H. Kim, K.-C. Chen and J. M. Chiu,

학술지명: Geophysical Journal International (SCI)

게재일: 2014년 1월 1일

#### 연구논문3

제목: Developing a seismic site classification map of Korea using geologic and topographic maps.

저자: W.-Y. Kim and K.-H. Kim

학술지명: Disaster Advances (SCIE)

게재일: 2012년 5월 30일

## II. 연구목표 달성도

번호	세 부 연 구 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
1	GT0 지진카탈로그 작성	GT0 지진카탈로그 작성	100%
2	GT2 (또는 GT3), GT5 수준 지진목록 작성	GT2 및 GT5 카탈로그 작성	100%
3	국가지진관측망 지진발생위치 결정 정확성 분석의 정량적 평가요소 및 운용기준 제시	GT2 및 GT5 운용기준 제시	100%
4	오차 분포도 작성 및 오차 높은 지역 선별	오차분포도 작성 GT2 Coverage Map 작성 국가지진관측망 해석지진 감시역량 제고를 위한 제언	100%

## III. 종합의견

### 1. 연구개발결과에 대한 종합의견

본 연구에서는 기상청에서 운영하는 국가지진관측망에 관측된 지진의 발생위치 결정의 정확성을 평가하기 위하여 고려사항을 제시하였으며, GT2 및 GT5 판단 기준을 제시하였음. 또한 지진발생위치 결정 결과의 오차가 클것으로 예상되는 지역에 대한 관측역량 제고의 방안을 제시하여 기상청 지진업무 역량 향상에 기여할 것으로 생각됨.

### 2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

본 연구에서 제시한 지진발생위치 오차 판단기준은 향후 지진통보, 지진조기경보 등의 대국민 서비스에 활용 가능성이 높은 연구결과임.

### 3. 연구개발결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

본 연구의 기상청 현업 적용을 위한 추가 연구가 필요.

## IV. 보안성 검토

### 1. 연구책임자의 의견

연구책임자는 본 과제의 보안성을 검토하였으며 보안상의 문제가 없을 것으로 판단.

### 2. 연구기관 자체의 검토결과

보안성 검토 결과 해당 사항 없음.