

기상지진기술개발사업

Atmospheric Sciences and Earthquake Research

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

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

한국해양연구원

기 상 청

제 출 문

기상청장 귀하

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

2012. 3 20.

주관연구기관명 : 한국해양연구원

주관연구책임자 : 김 광 희

연 구 원 : 이 성 욱

” : 강 수 영

” : 유 찬 호

자 문 위 원 : 박 용 철

보고서 요약서

과제고유번호	CATER 2011-5310	해당단계 연구기간	2011. 3. 1. ~ 2012. 2. 29.	단계 구분	1 / 3
연구사업명	중 사업명	지진기술개발사업			
	세부사업명	지진·화산관측기술			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	기상청 지진관측망에 관측된 지진원 위치 결정의 오차 평가 및 GT 수준 지진 카탈로그 작성			
연구책임자	김 광 회	해당단계 참여연구원수	총 : 5 명 내부 : 4 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 150,000 천원 기업: 천원 계: 150,000 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 명 내부 : 명 외부 : 명	총 연구비	정부: 150,000 천원 기업: 천원 계: 150,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양연구원 해양방위연구센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요 약				보고서 면수	147
<p>1. 기존 GT 자료수집 및 활용 가능성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - GT0 자료를 활용한 최적의 1차원 속도구조모델 선별 <p>2. 임시지진관측소 운영을 통한 GT 자료수집</p> <ul style="list-style-type: none"> - 임시지진관측소 운영(7개 지역) - 임시지진관측소 운영을 통해 획득한 자료의 GT 자료 활용 가능성 분석 <p>3. GT0, GT1, GT3 자료 확보</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기존 GT 자료와 임시지진관측소 운영을 통해 수집한 자료를 이용한 진원위치결정 - 진원위치 결정을 통한 GT0, GT1, GT3 자료 선별 <p>4. 국내 GT5 수준 이벤트 관측자료 선별 및 목록화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2004-2006 기상청에서 관측하고 발표한 지진목록 사용 - 2004-2006 발생한 지진의 도착시간 직접 측정 - KGT5 기준 만족하는 지진목록 작성 <p>5. 진원요소 결정의 정확성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 지진발생위치 오차 계산 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	지진, 지진관측망, Ground Truth, 진원위치, 속도모델			
	영 어	Earthquake, Seismic station network, Ground truth, Hypocenter, Velocity model			

요 약 문

I. 제 목

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

II. 연구개발의 목적 및 필요성

기상청은 국가 지진 및 지진해일 관측시스템의 책임 운영 및 대국민 통보서비스를 담당하는 기관이다. 기상청에서 지진발생시 우선 제공하는 정보에는 지진 발생시간, 발생위치, 규모와 같은 진원요소가 포함되어 있다. 이러한 진원요소정보는 지진발생의 원인이 되는 지하 활단층 분포 및 활동도에 대한 직접적인 정보이다. 이 정보는 지진재해평가, 내진설계, 그 밖의 대부분 지진관련 연구의 주요 기초자료가 되므로, 기상청에서 정확한 진원요소를 결정하고, 그 정보를 대국민 서비스 하는 것은 매우 중요한 기상청 과업 중의 하나이다.

지진은 지하 깊은 곳에서 발생하므로 진원요소의 참 값을 알지 못하는 경우가 일반적이다. 진원요소를 결정하기 위해서는 지표면에서 관측되는 자료만을 이용하여 진원인자를 결정해야하는데, 이 과정에 일부 불확실한 정보가 사용될 수밖에 없으므로, 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 진원인자 결정의 정확성을 향상시키고, 그 신뢰성의 정량화를 위하여 지속적으로 노력해 왔으나, 그 모든 노력은 상당히 주관적일 수밖에 없었다. 본 연구에서는 정확히 알고있는 인공 및 자연 지진 정보를 사용하여 기상청 국가지진관측망의 관측역량과 발표하는 진원요소 정보의 정확성을 객관적으로 평가한다. 또한 지진정보 대국민 서비스의 초기 단계에서 활용할 수 있는 진원요소 정확성의 정량적 지표와 그 운용기준을 제시하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

GT(Ground Truth) 개념의 진앙위치 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. 1차년도 연구에서는 기존의 GT0 및 GT1 자료의 확보 및 활용가능성을 검토하였다.

당해연도에 수집한 기존 GT0 혹은 GT1 자료에는 경기도 D 시험장에서 수행한 시추공 발파실험자료, 전북 완주의 채석장 발파자료, 전남 해남의 채석장 발파자료가 있다. 또한 2002년, 2004년, 그리고 2008년에 수행된 한반도 지각구조 연구팀(Korea Crust Research Team, KCRT)의 발파자료 또한 입수하여 그 활

용가능성을 검토하였다. 전국에 걸쳐 고르게 분포하는 GT0 및 GT1 자료 확보를 위하여 한반도 남부를 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 12개 구역으로 나누어 고려하였다. 기존자료가 존재하지 않는 구역에 대해서는 임시지진관측소를 운영하여 필요한 자료를 확보해야 한다. 당해연도에는 5개 구역(7개 지점)에서 임시지진관측소를 운영하여 GT0 혹은 GT1 자료를 확보하였다. 또한 2004년부터 2006년까지 국내에서 발생한 지진 중 기상청에서 관측하고 발표한 지진에 대하여 박용철 등(2009)에서 제시한 KGT5 기준을 적용하여 기준에 만족하는 지진을 선별하여 목록화하였다.

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 1 개 모델을 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.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구보고서는 당초 계획된 3년간의 연구 중 최초 1년의 연구결과이다. 대부분의 GT 개념에 기반한 지진발생위치 정확성 평가에는 지진발생시간과 깊이에 대한 평가 방안이 포함되지 않는다. 기상청 국가지진관측망과 같은 조밀한 지진관측망의 경우에는 보다 향상된 정확성을 기대할 수 있으므로 기상청 지진관측에 적절한 평가요소 및 운용 기준을 제시할 예정이다. 당해연도 연구에서 수집된 GT자료를 활용하여 기상청 국가지진관측망의 진원요소(진앙위치, 진원깊이, 진원시간)결정 정확성 평가 지표 제시, 운용기준 제시 및 그 적용 연구를 수행할 것이다. 본 연구 결과는 또한 신설되는 지진관측망의 최적부지 선정에 있어 그 근거를 제시할 수 있다.

S U M M A R Y

I. Title:

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

II. Necessity and Objectives of the Study

Korea Meteorological Administration (KMA) is responsible for the operation of the national earthquake and tsunami monitoring system and necessary actions including reporting earthquake information to the public. The rapid earthquake reports provided by KMA include the source time, location, magnitude and other basic earthquake information. Earthquake locations are the direct evidence of subsurface active faults responsible for the observed seismicity. The information is also critical for the seismic hazard assessments, designing and building earthquake resistant structures, and most earthquake related studies. Reporting reliable earthquake information is ,thus, one of the most important tasks in KMA.

Precise earthquake source parameters are generally not available because they occur at great depths. We have to rely on information observed at the surface to determine earthquake locations and times. During the earthquake location procedure, it is inevitable to make reasonable assumptions, although we aware they are not true. Insufficient information may cause errors in the final result of the earthquake location process. Because the true solution is not available and we make many assumptions during the location procedure, it is not straightforward to assess errors in the earthquake catalog reported by KMA and other organizations around the globe. Although we tried to improve the precision of earthquake location, our efforts to quantify the reliability have been always subjective. This study uses exact earthquake source parameters (both man-made and natural earthquakes) to quantify the detection capability of the Korea National Seismic Network (KNSN) and the accuracy of its earthquake catalog. The study will also propose quantitative index to evaluate the quality of reported earthquake source parameters.

III. General Scope of the Study

The detection capability of KNSN and the reliability of its earthquake reports are assessed using GT (Ground Truth)-based criteria. Final results of

the project will provide a quality index for an earthquake location announcement available to the network operators in KMA. In the first year of the project, which is the three-year one, we secured GT0 and GT1 data available for the study and verified that they are suitable for subsequent studies.

GT0 and GT1 events collected in the first year of the project include the explosive experiments in the D sites, Gyeonggi-do, the quarry blast at Wanju, Jeollabuk-do, and the quarry blast in Haenam, Jeollanam-do. We also collected and examined data collected by the Korea Crust Research Team (KCRT) in 2002, 2004, and 2008. They generated man-made earthquakes using large explosives. Twelve regions of $1^\circ \times 1^\circ$ dimension are set to cover the entire southern Korea peninsula. Even distribution of GT0 and GT1 events is desired. For regions without any available GT events, we operated temporary seismic stations to collect GT0 or GT1 data. During the first year of the project, temporary seismic stations at 5 regions (7 sites) are operated to collect reliable GT0 or GT1 events. We also applied the KGT5 criteria (Park et al., 2009) to earthquakes in Korea between 2004 and 2006.

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.

GT data will be used for the further study in the second year of the project. We report a list of earthquakes occurring between 2004 and 2006 and satisfying the KGT5 criteria (Park et al., 2009). Errors in the earthquake locations reported by KNSN are examined using the method proposed by Peter and Crosson (1972).

V. Suggestions for Applications

This report summarizes the results of the first year research for the three-year-long project. Most studies based on GT-criteria do not include any estimates for the focal depth and origin time. KNSN is expected to have better performance in detecting and locating earthquakes. Hence, it would be better to include estimates not only for epicenters but also for the focal depths and source times. It is also required for KNSN to have customized GT criteria suitable for the dense local seismic network. The criteria also provide information to choose future seismograph sites.

CONTENTS

Summary	5
I. Title	5
II. Necessity and Objectives of the Study	5
III. General Scope of the Study	5
IV. Results of the Study	6
V. Suggestions for Applications	6
Contents	7
Chapter 1. Outline of the study	16
Chapter 2. Status of technological development in domestic and overseas	18
Chapter 3. Contents and results of the study	20
3.1 Quantitative evaluation of KNSN earthquake location quality and Ground truth earthquake catalog	20
3.1.1 Introduction	20
3.1.2 Earthquake location	23
3.1.3 Collecting GT data	24
3.1.4 Operation of temporary seismic stations	34
3.1.5 GT5 event selection and catalog	56
3.1.6 Earthquake detectability of KNSN	59
3.1.7 Quarry of hypocenter parameter	60
3.1.8 Results and discussions	62
3.1.9 References	86
3.2 Estimation of local earthquake location Error using a resampling method	88
3.2.1 Introduction	89
3.2.2 Method, data, and analysis	114
3.2.3 Conclusions	116
3.2.4 References	117
Chapter 4. Achievements and external contributions	118
Chapter 5. Plan for applications	119
Chapter 6. Overseas research informations	120
Chapter 7. Security level of the research results	121
Chapter 8. Research facilities registered at NTIS	122
Appendix 1. Application plan of the research results	122
Appendix 1.1 Application plan of the research results	123
Appendix 1.2 Summary of the technology	127

Appendix 2 Security level of the research results	132
Supplement	133

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.....	4
목 차.....	9
제 1 장 연구개발과제의 개요.....	16
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	18
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과.....	20
3.1 기상청 지진관측망에 관측된 지진원 위치 결정의 오차평가 및 GT 수준 지진 카탈로그 작성.....	20
3.1.1 GT 자료획득 및 목록작성을 위한 임시지진관측소 선정.....	20
3.1.2 진원결정방법.....	23
3.1.3 GT 자료수집.....	24
3.1.4 GT 자료수집을 위한 임시지진관측소 운영.....	34
3.1.5 국내 GT5 수준 이벤트 관측자료 선별 및 목록화.....	56
3.1.6 기상청 국가지진관측망 지진관측 역량.....	59
3.1.7 진원요소 결정의 정확성.....	60
3.1.8 결과 및 고찰.....	62
3.1.9 참고문헌.....	86
3.2 재표본 방법을 이용한 지진원 위치 오차분석 방법.....	88
3.2.1 서 론.....	89
3.2.2 본 론.....	90
3.2.3 결 론.....	114
3.2.4 참고문헌.....	116
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도.....	117
제 5 장 연구개발결과의 활용계획.....	118
제 6 장 연구개발과정에서의 수집한 해외과학기술정보.....	119
제 7 장 연구개발결과의 보안등급.....	120
제 8 장 국가과학기술종합정보 시스템에 등록된 연구시설·장비현황.....	121
[첨부 1] 연구개발결과 활용계획서.....	122
[붙임 1] 연구개발결과 활용계획서.....	123
[붙임 2] 기술 요약서.....	127
[첨부 2] 연구개발결과의 보안등급.....	132

부 록..... 133

그림 및 표 목차

<표 차례>

Table 2.1 Global GT5 criteria	18
Table 2.2 EBGT3 criteria.....	19
Table 3.1.1 Quarry and quarry complex report in 2011.....	21
Table 3.1.2 Information of KCRT2002 explosion sites.....	26
Table 3.1.3 Information of KCRT2004 explosion sites.....	26
Table 3.1.4 Information of KCRT2008 explosion sites.....	26
Table 3.1.5 Information of D experiment site.....	28
Table 3.1.6 Information of Wanju quarry site.....	30
Table 3.1.7 Information of Haenam quarry site.....	32
Table 3.1.8 Blasts chart in Pocheon quarry site.....	34
Table 3.1.9 Information of Pocheon temporary seismic station.....	35
Table 3.1.10 Yeongju temporary seismic station.....	36
Table 3.1.11 Blasts chart in Yeongju quarry.....	37
Table 3.1.12 Blasts chart in Ulsan quarry.....	39
Table 3.1.13 Ulsan temporary seismic station.....	39
Table 3.1.14 Yeoncheon temporary seismic station.....	41
Table 3.1.15 KMA temporary seismic station.....	43
Table 3.1.16 SCH temporary seismic station.....	46
Table 3.1.17 HYS temporary seismic station.....	47
Table 3.1.18 JJM temporary seismic station.....	47
Table 3.1.19 List of Danyang underground blasts	49
Table 3.1.20 Danyang temporary seismic station.....	50
Table 3.1.21 Iksan temporary seismic station.....	53
Table 3.1.22 KGT5 earthquake catalogue for 2004-2006.....	57
Table 3.1.23 Quality based on error estimates defined in Hypoellipse	60
Table 3.1.24 Quality based on many parameters used in SQD-HYPO71 quality	61
Table 3.1.25 Station distribution quality as defined in HYPO71. Dmin is the distance to the nearest station (USGS, 1975).....	61
Table 3.1.26 Summary of the results for the KCRT2008 GT0 events using HYPOELLIPSE.....	76
Table 3.2.1 Global GT5 criteria.....	88
Table 3.2.2 EBGT Criteria for the Kaapvaal Craton.....	89
Table 3.2.3 Detailed information of KCRT-2008 explosion sites.....	92
Table 3.2.4 Summary of the inversion results for the KCRT-2008 GT0 events using	

HYPOELLIPSE.....	106
Table 3.2.5 KGT5 earthquake catalogue for 2007-2008.....	113

<그림 차례>

Figure 1.1 Location of the KMA seismic stations.....	17
Figure 3.1.1 Location of temporary seismic stations and KMA seismic stations.....	22
Figure 3.1.2 KCRT2008 explosion sites and location of the KMA seismic stations.....	25
Figure 3.1.3 Waveforms by KCRT2008 at the explosion site 1. Waveforms are recorded by KNSN and vertical components are shown.....	27
Figure 3.1.4 Waveforms by KCRT2008 at the explosion site 4. Waveforms are recorded by KNSN and vertical components are shown.....	27
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.....	29
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.....	31
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 quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.....	33
Figure 3.1.11. Haenam quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations..	33
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.....	38
Figure 3.1.14 Ulsan temporary seismic station, satellite image of the Ulsan quarry and quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.....	40
Figure 3.1.15 Yeoncheon temporary seismic station, satellite image of the Yeoncheon quarry and quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.....	41
Figure 3.1.16 Yeoncheon quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.....	42
Figure 3.1.17 Hoengseong quarry and quarry blasting waveforms recorded KMA seismic stations.....	44
Figure 3.1.18 Blasting site in Hoengseong quarry.....	45
Figure 3.1.19 Hoengseong quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.....	46
Figure 3.1.20 Temporary seismic stations installed around Hoengseong quarry.....	48

Figure 3.1.21	Danyang temporary seismic station, satellite image of the Danyang quarry and blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	51
Figure 3.1.22	Danyang quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	57
Figure 3.1.23	Iksan temporary seismic station, satellite image of the Iksan quarry and blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	54
Figure 3.1.24	Iksan quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations	55
Figure 3.1.25	1-D P-wave velocity model	63
Figure 3.1.26	Map view of the results for the D test site using Hypoellipse with Kim and Jeong (1985) velocity mode	69
Figure 3.1.27	Map view of the results for the Wanju quarry using Hypoellipse with Kim and Jeong (1985) velocity model	70
Figure 3.1.28	Map view of the results for the Haenam quarry using Hypoellipse with Kim and Jeong (1985) velocity model	71
Figure 3.1.29	Map view of the results for the Yeoncheon quarry using Hypoellipse with Kim and Jeong (1985) velocity model	72
Figure 3.1.30	Map view of the results for the Hoengseong quarry using Hypoellipse with Kim and Jeong (1985) velocity model	73
Figure 3.1.31	Map view of the results for the Danyang quarry using Hypoellipse with Kim and Jeong (1985) velocity model	74
Figure 3.1.32	Map view of the results for the Iksan quarry using Hypoellipse with Kim and Jeong (1985) velocity model	75
Figure 3.1.33	Hypocenters of man-made earthquake from this study	78
Figure 3.1.34	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	79
Figure 3.1.35	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	80
Figure 3.1.36	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.....	81
Figure 3.1.37	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.....	82
Figure 3.1.38	Index map showing that the location in Figure 6 and Figure 7 is marked by a solid rectangle. Triangles denote the location of KNSN stations operated by KMA.....	83
Figure 3.1.39	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.....	84
Figure 3.1.40	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.....	85
Figure 3.2.1	Location of the KMA seismic stations and KCRT-2008 explosion sites.....	91
Figure 3.2.2	P-wave 1-D velocity used for locating GT0 events.....	93
Figure 3.2.3	Inversion results for the shot #1 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	97
Figure 3.2.4	Inversion results for the shot #2 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	106
Figure 3.2.5	Inversion results for the shot #3 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	113
Figure 3.2.6	Inversion results for the shot #4 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	100
Figure 3.2.7	Inversion results for the shot #5 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	101
Figure 3.2.8	Inversion results for the shot #6 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	102
Figure 3.2.9	Inversion results for the shot #7 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	103
Figure 3.2.10	Inversion results for the shot #8 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.....	104
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.....	108
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.....	109
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.....	110
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.....	111
Figure 3.2.15	Summary cartoon of KGT5 criteria.....	115

제 1 장 연구개발과제의 개요

지진은 지구내부의 활동에 의해 축적된 에너지가 판과 판의 경계 혹은 판 내부의 단층대를 따라 발생하면서 재산피해와 그에 따른 인명피해를 야기하는 재해이다. 1978년 충청남도 홍성군에서 발생한 규모 5.0의 홍성지진을 비롯하여 1996년 영월지진(규모 4.5), 1997년 경주지진(규모 4.3), 2007년 오대산지진(규모 4.8)과 2010년 경기도 시흥시에서 발생한 시흥지진(규모 3.0)은 많은 사람들이 지진동을 느끼며 더 이상 우리나라가 지진재해로부터 안전지대가 아니라는 경각심을 일깨워주기에 충분했다.

기상청에서는 1978년 홍성지진, 1996년 영월지진, 1997년 경주지진을 계기로 디지털 지진관측망을 확충하면서 현재 1 개소의 초광대역 관측소, 18 개소의 광대역 관측소, 32 개소의 단주기 관측소, 112 개소의 가속도 관측소를 확충하여 2011년 1월 기준으로 총 113 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 지진을 예측하기란 불가능한 상황이다. 그에 따라 지진 발생 후 보다 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 한국의 기상청에서는 추정규모 3.5 이상의 내륙지진 또는 4.0 이상의 해역지진에 대해 지진속보를 발표하고 있으며, 규모 2.0 이상의 내륙 또는 해역지진에 대하여 지진통보를 하고 있다. 향후 기상청에서는

◎ 2015년 - 지진속보·통보 체제 고도화

신속성 : 지진관측 후 50 초 이내 지진정보 발표

정확성 : 진앙위치 검정오차 ± 10 km, 규모오차 ± 0.5

◎ 2020년 - 지진조기경보체제 확립

신속성 : 지진관측 후 10 초 이내 지진정보 발표

정확성 : 진앙위치 검정오차 ± 5 km, 규모오차 ± 0.5

와 같은 신속성 및 정확성 향상을 위한 목표로 국가 지진조기경보시스템 구축을 위해 개발 중에 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 국지구 규모의 지진발생위치 결정의 정확성 및 신뢰성 평가를 위하여 일반적으로 많이 사용되는 방법 중 하나인 GT (Ground Truth) 개념의 지진관측망 능력 평가를 통하여 GT0 및 GT5 이벤트 분석을 통해 기상청 국가지진관측망의 진원위치 결정 능력 평가 시 정량적 평가요소 및 운용 기준을 제시할 것이다. 이를 통해 향후 신설되는 지진관측망의 최적부지 선정에 있어 그 근거를 마련할 것으로 기대되며, GT 이벤트 목록을 활용하여 선행연구에 제시되었던 1차원 속도구조모델 검증 및 지진관측 현업 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

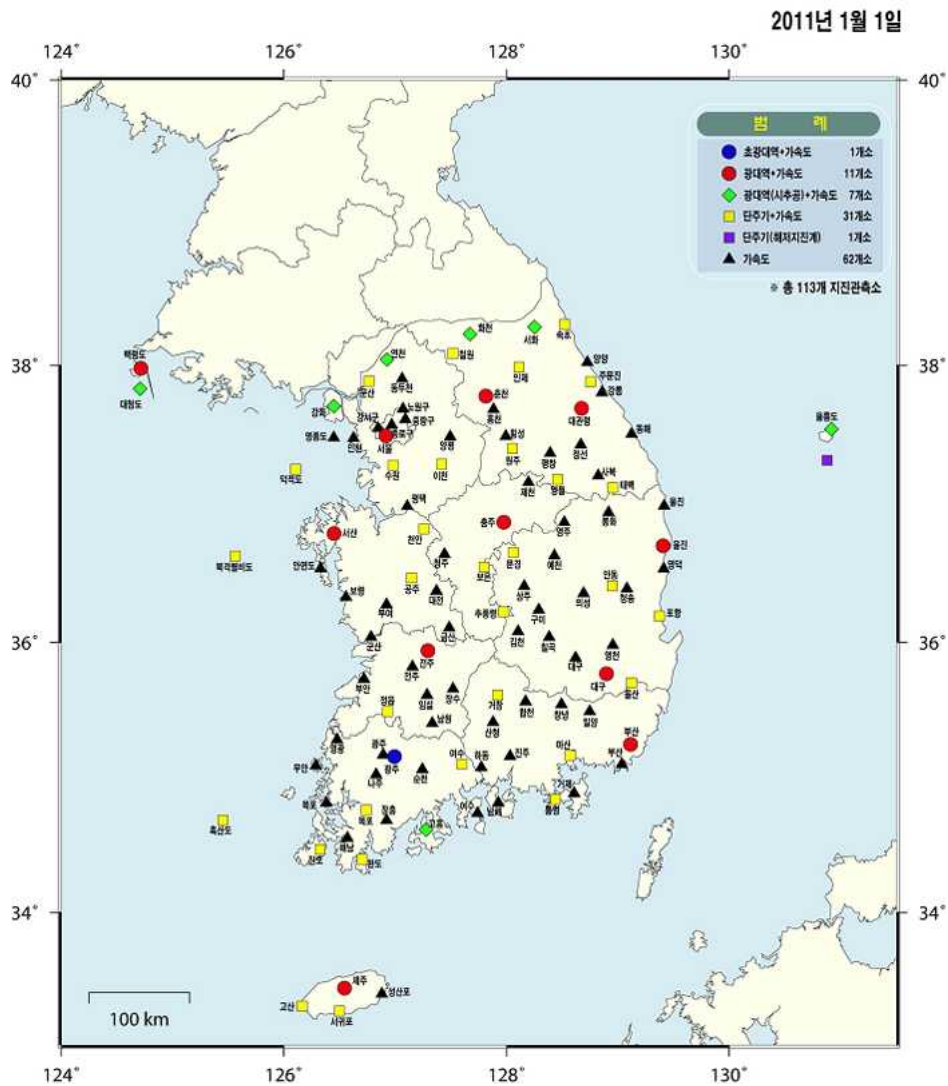


Figure 1.1. Location of the KMA seismic stations (2011, KMA).

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 진원 위치 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° 이내이고, 3) secondary azimuthal gap이 160° 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° - 2.5°	110°	160°	-	10	1	GT5 _{95%}
Near Regional	2.5° - 10°		120°	10	-		GT20 _{90%}
Teleseismic	28° - 91°		120°	-	-		GT25 _{90%}

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° 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 지진 관측소가 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 _{95%}	11	[0, 2.2)	[0, 0.4)	202°	79
GT3 _{95%}	10	[0, 1.9)	[0, 1.8)		
GT3 _{95%}	9	[0, 2.0)	[0, 3.8)		
GT3 _{95%}	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.

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 10년간의 노력으로 국가지진관측망의 현대화 및 관측환경 개선을 실시하여왔고, 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 2010년 국토해양부에서 발표한 채석단지 발표현황(Table 3.1.1)을 참조하여 전국적으로 분포하고 있는 채석장과 여러 채석장이 모여 채석단지를 이룬 곳을 중심으로 임시지진관측소 후보지를 선정하였으며, 현장답사를 통해 과거 발파양과 발파횟수 등의 발파자료정보를 조사하는 한편 앞으로의 발파현황 등을 고려한 후 채석장과 가까운 관공소, 학교 및 농가의 협조를 얻어 임시지진관측소 후보지를 선정하였다. 또한 채석장과 임시관측소까지의 거리, 인근 기상청 지진관측소와의 거리 및 분포현황, 임시지진관측소의 잡음요소, GPS 수신 상태, 지진계의 전원공급 등을 고려하여 임시지진관측소의 관측능력을 최대한으로 발휘할 수 있는 곳을 최종 선정하였다.

Table 3.1.1. Quarry and quarry complex report in 2011 (Ministry of Land's press, 2010)

연번	소재지	지정일	지정면적m ² (기허가)	기간 (년)
1	연천채석단지	2008. 2. 15 (산림청고시 2008-25)	346,449 (279,680)	10
2	거창채석단지	2007. 8. 28 (산림청고시 2007-90)	409,155 (211,864)	30
3	충주채석단지	2008. 1. 2 (산림청고시 2007-148호)	260,847 (89,489)	10
4	영주채석단지	2008. 5. 14 (산림청고시 2008-85)	721,439 (437,332)	30
5	청원채석단지	2009. 1. 9 (산림청고시 2009-1호)	203,813 (97,043)	8
6	경산채석단지	2009. 2. 9 (산림청고시 2009-12호)	279,202 (97,573)	10
7	김천채석단지	2009. 5. 27 (산림청고시 2009-44호)	524,155 (278,171)	22
8	파주채석단지	2009. 10. 27 (산림청고시 2009-118호)	683,795 (169,074)	18
9	영덕채석단지	2010. 1. 22 (산림청고시 2010-10호)	271,984 (104,565)	14
10	포천채석단지	2010. 3. 24 (산림청고시 2010-37호)	210,498 (97,798)	9
11	거제채석단지	2010. 4. 30 (산림청고시 2010-50호)	250,488 (신규)	15
12	춘천신동채석단지	2010. 8. 23 (산림청고시 제2010-80호)	394,133 (176,103)	17
13	강화양사채석단지	2010. 11. 16 (산림청고시 2010-96호)	233,652 (96,162)	10

효율적인 GT 목록작성을 위해 한반도를 총 12 개 구역($1^\circ \times 1^\circ$)으로 구역화 함으로써 한 지역에 임시지진관측소가 편중되지 않도록 선정하였다(Figure 3.1.1). 임시지진관측소에 사용된 지진계는 Nanometrics의 광대역지진계 Trillium 240 3-Component Seismometer를 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.

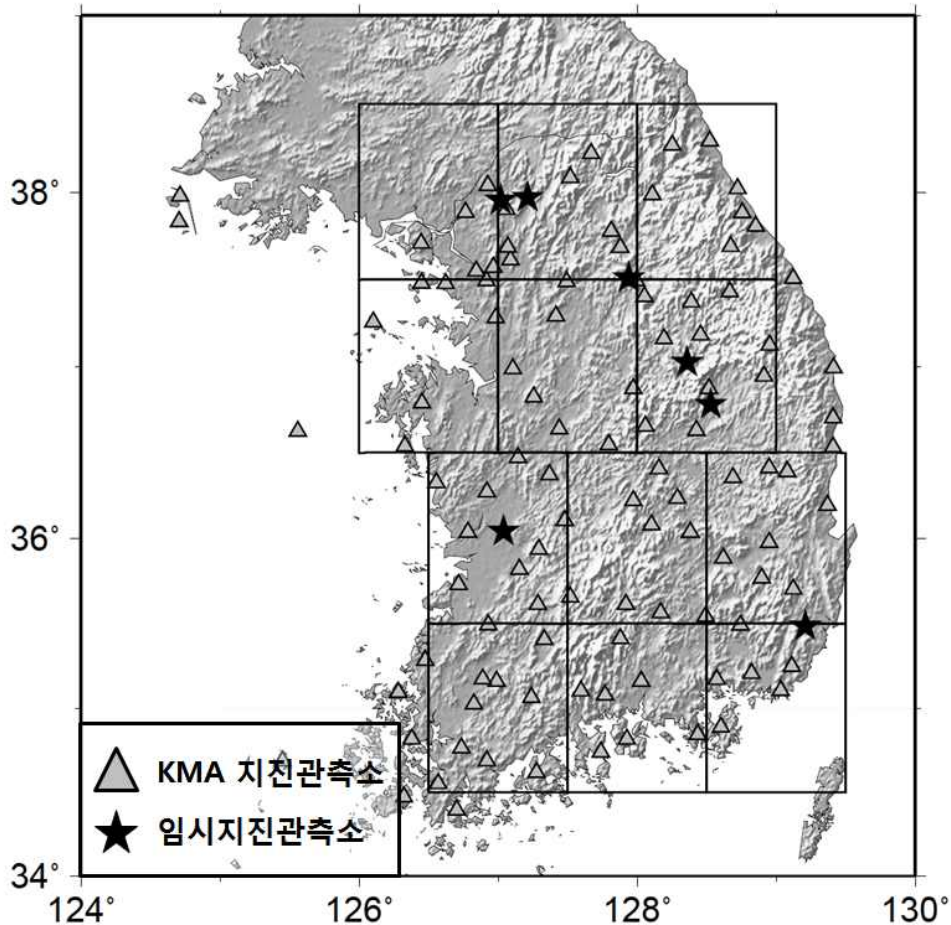


Figure 3.1.1. Location of temporary seismic stations and KMA seismic stations.

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 측정한 P파와 S파의 도착시간을 이용하여 지진의 발생위치를 결정한다. 지진 발생 위치와 시간을 결정하기 위해서는 최소 4 개의 도착시간 관측이 필요하며, 지진파의 관측된 도착시간과 이론적 도착시간 사이의 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

GT0 자료로 사용되기 위해서는 정확한 발생시간과 발생위치를 알고 있어야 하며, 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 3.1.2)(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 3.1.3)(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 3.1.4, Figure 3.1.3, 3.1.4)(이정모 등, 2009).

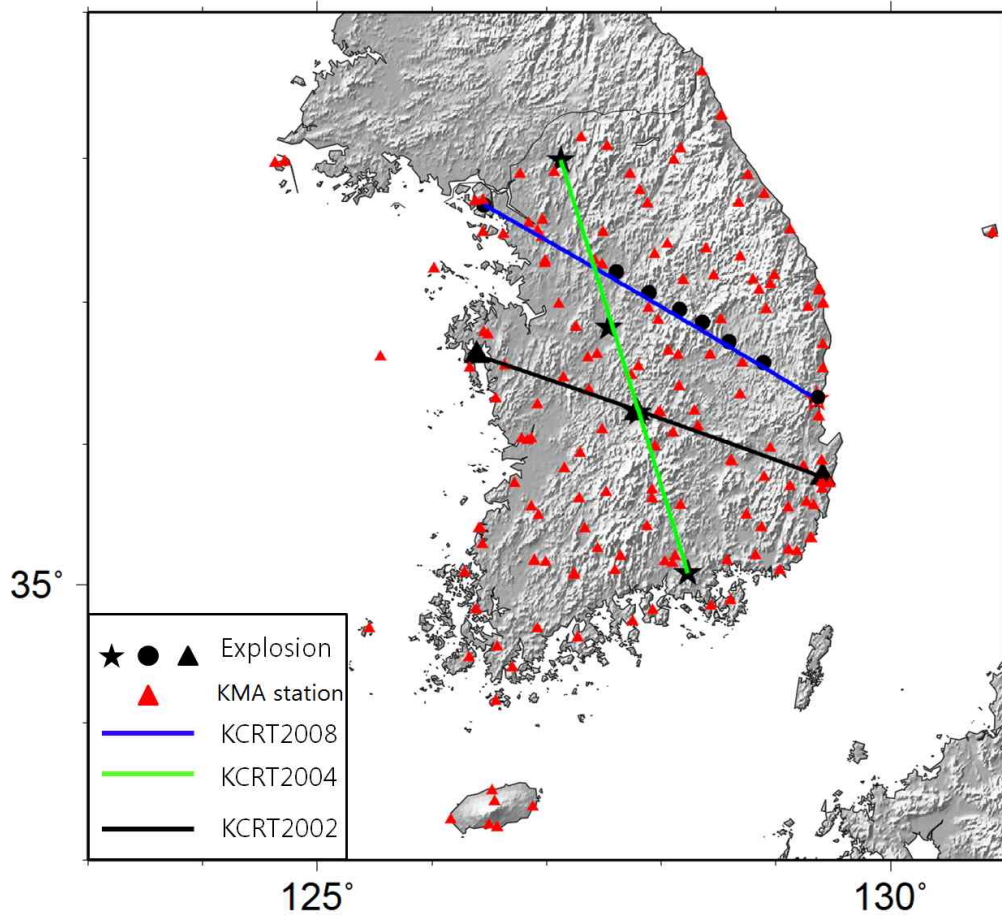


Figure 3.1.2 KCRT2008 explosion sites and Location of the KMA seismic stations.

Table 3.1.2. 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 3.1.3. 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 3.1.4. 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

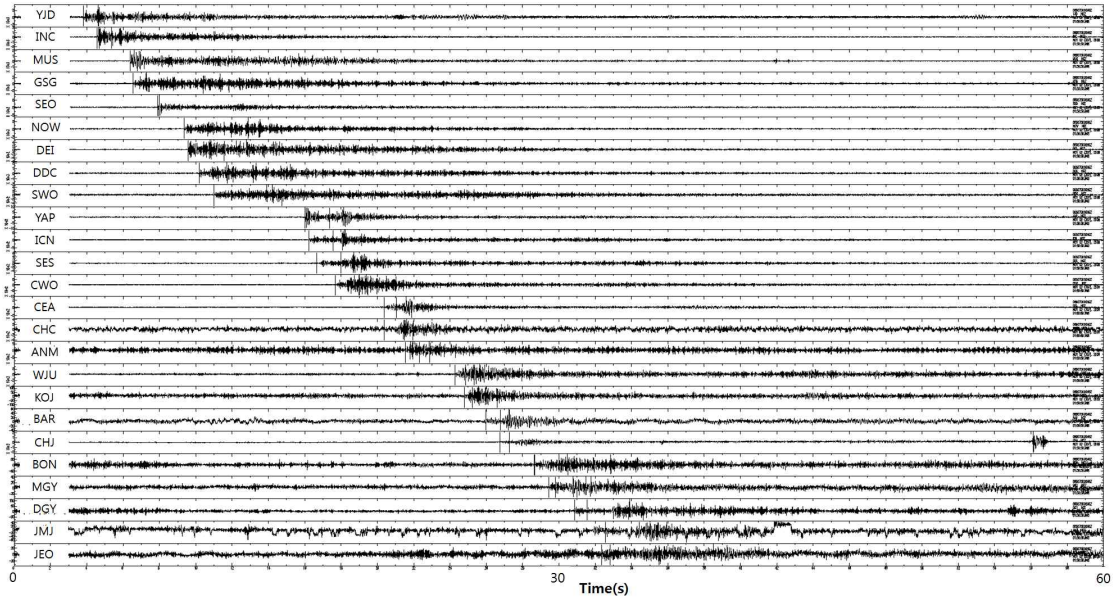


Figure 3.1.3 Waveforms by KCRT2008 at the explosion site 1. Waveforms are recorded by KNSN and vertical components are shown.

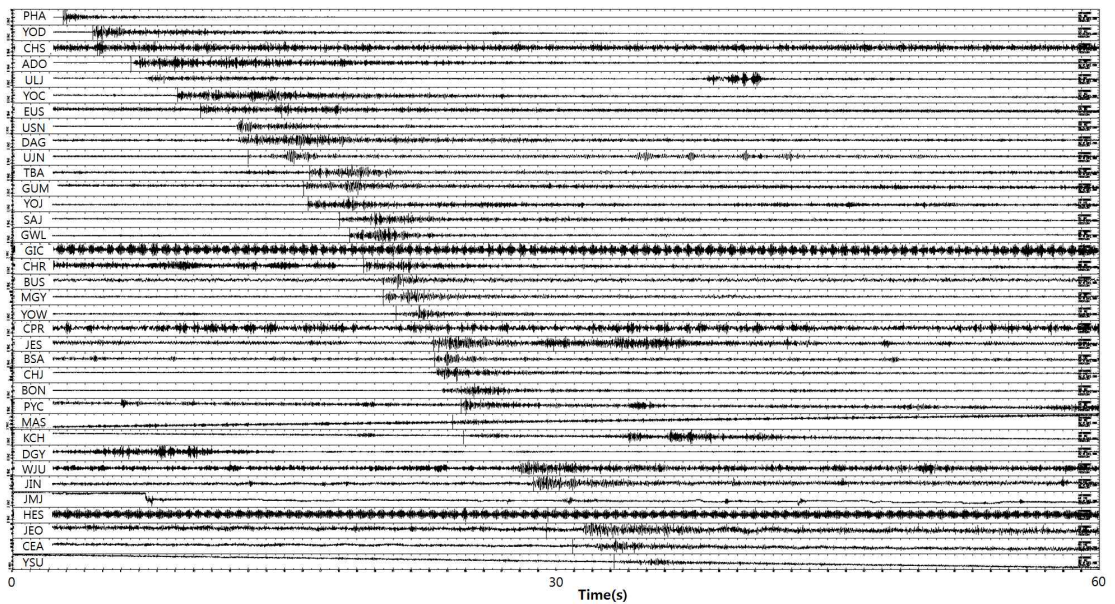


Figure 3.1.4 Waveforms by KCRT2008 at the explosion site 4. Waveforms are recorded by KNSN and vertical components are shown.

3.1.3.2 시추공 시험발과

정주환 등(2009)은 2008년 5월 2일 경기도에 위치한 D 시험장에서 ‘인공지진 발생을 위한 대규모 시추공 시험발과 사례연구’를 위한 발과시험을 수행하였다. 이 실험은 인공지진 발생을 위한 발과의 적정 장약량을 결정하기 위하여 대구경의 시추공을 천공하고 1 개소에 폭약을 집중으로 장약하여 발과하는 집중장약 방식으로 실행되었다(Table 3.1.5). 발과공의 직경은 356 mm로 하였고, 천공의 깊이는 70 m로 하여 강철과 PVC 파이프로 된 성형 장약통에 총 400 kg의 고성능 다이내마이트와 골재를 사용하여 전색한 후 시험발과를 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 3.1.5 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

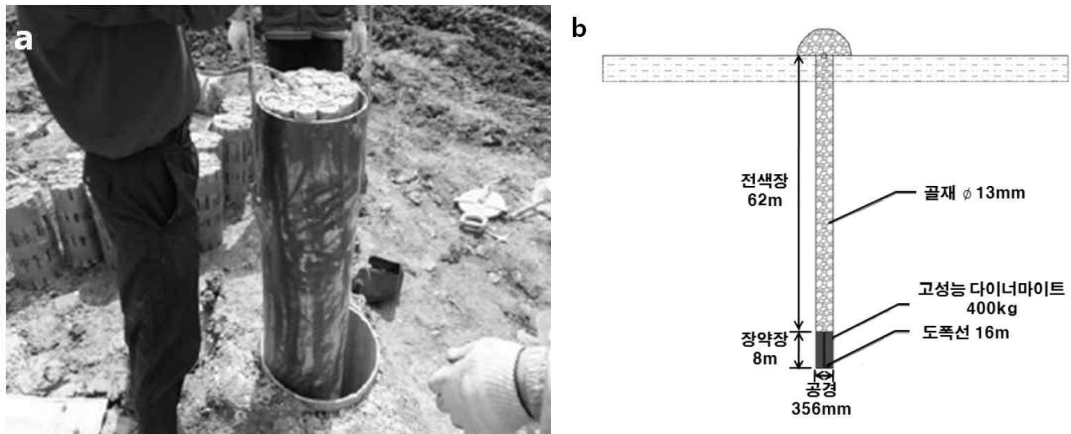


Figure 3.1.5 (a) Boring and (b) explosive charge for borehole blasting (Jeong et al., 2009).

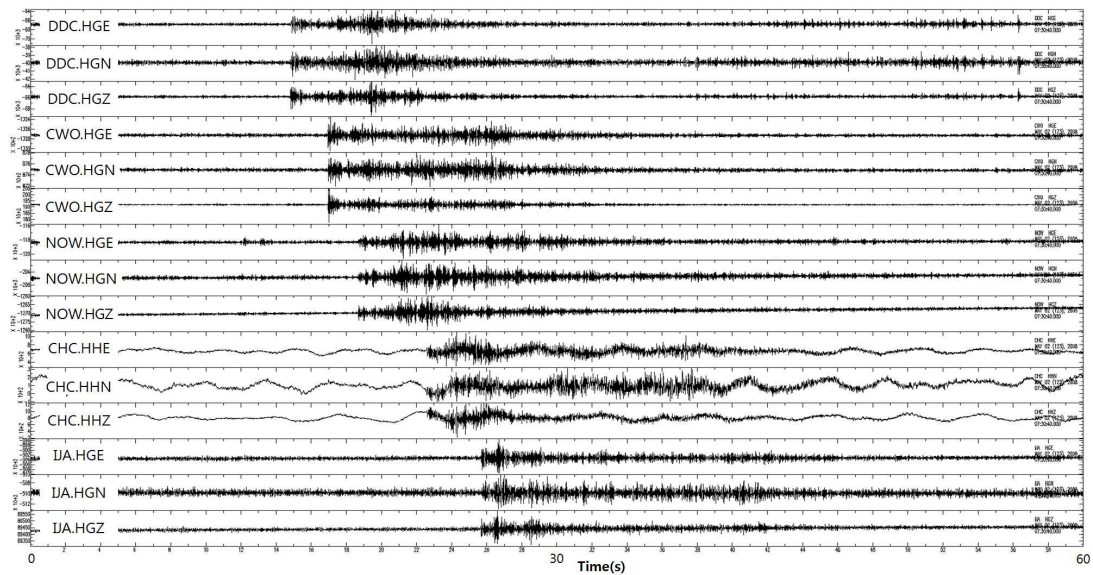


Figure 3.1.6 Borehole test blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

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.

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 3.1.6, 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 3.1.6 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.

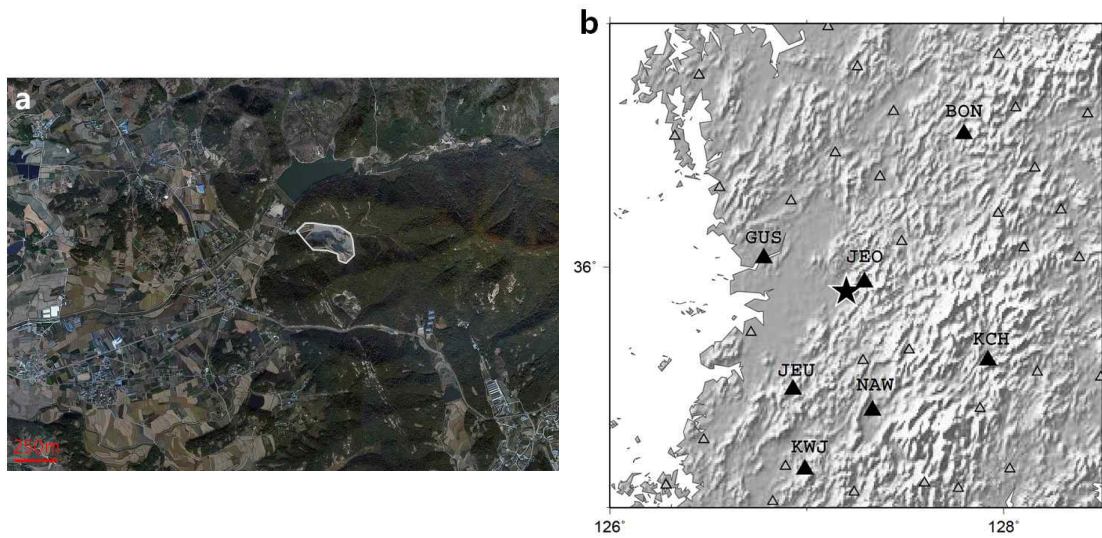


Figure 3.1.8 (a) Satellite image of the Wanju quarry and (b) quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

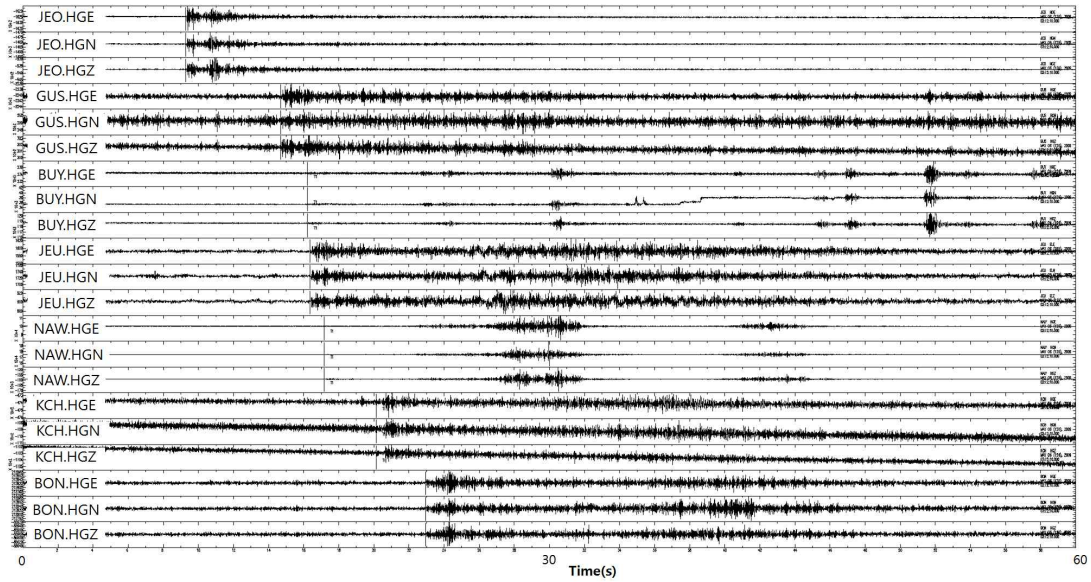


Figure 3.1.9 Wanju quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

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 3.1.7, Figure 3.1.11).

Table 3.1.7 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

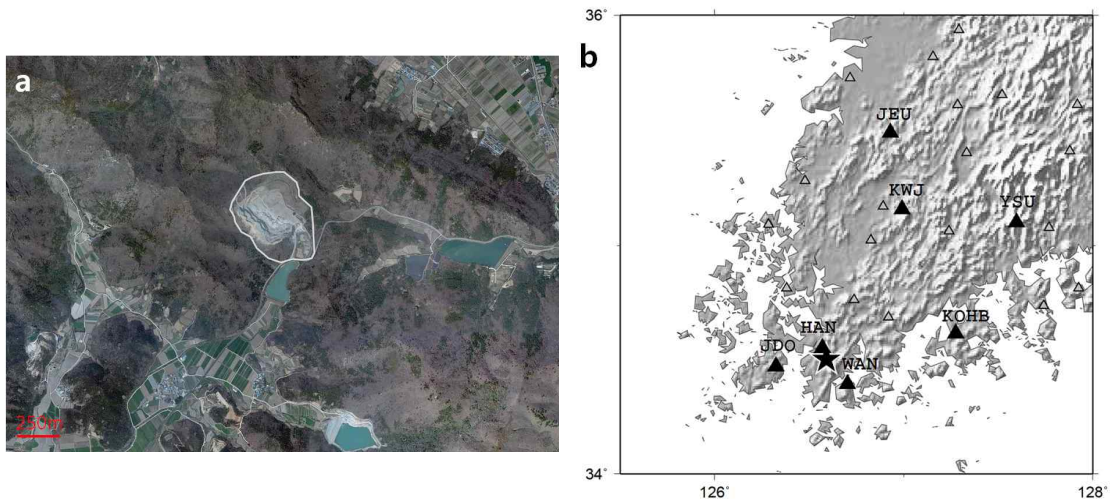


Figure 3.1.10 (a) Satellite image of the Haenam quarry and (b) waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

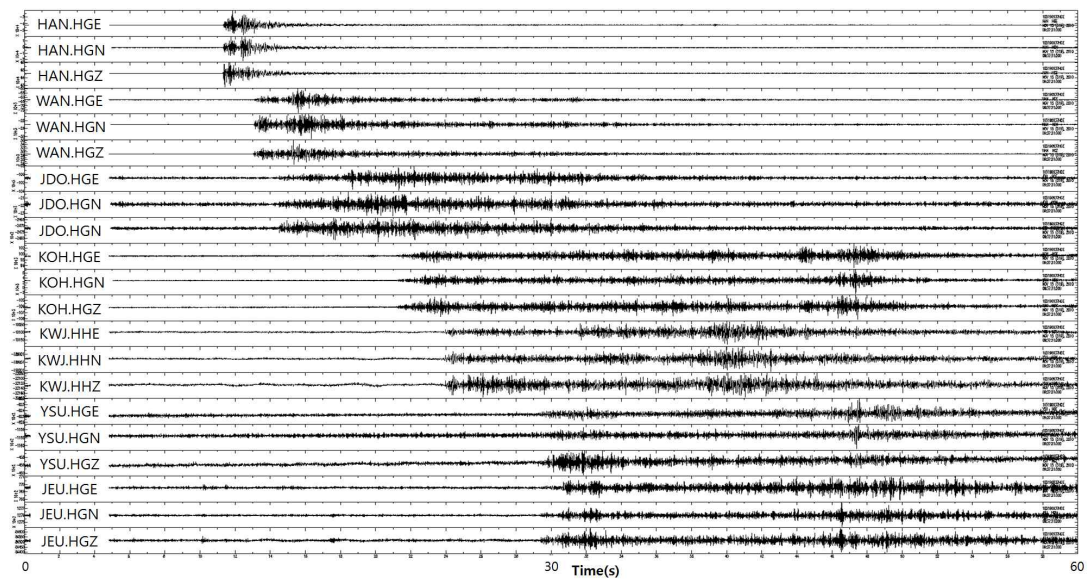


Figure 3.1.11 Haenam quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

3.1.4 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 2011년 4월 1일부터 9월 6일까지 총 6개월에 걸쳐 경기도 포천군, 경기도 연천군, 전라북도 익산시, 강원도 횡성군, 울산광역시 울주군, 충청북도 영주시, 충청북도 단양군의 7 개 지역에 임시지진관측소를 운영하였다.

3.1.4.1 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 발파양은 Table 3.1.8와 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 3.1.8 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 사용하였

다(Table 3.1.9, 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 3.1.9 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			

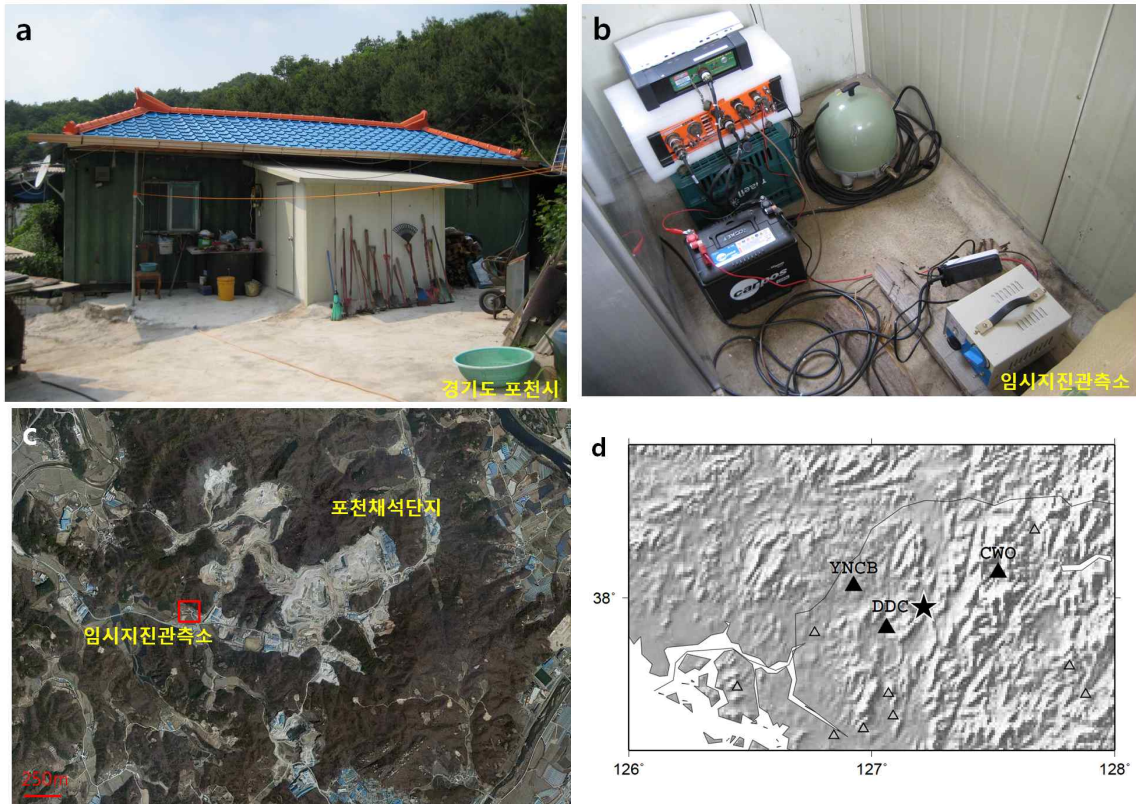


Figure 3.1.12 (a, b) Pocheon temporary seismic station, (c) satellite image of the quarry and (d) quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

3.1.4.2. 영주 임시지진관측소

경상북도 영주시 장수면 성곡리에는 4 개의 채석장이 모여 채석단지를 이루고 있다. 4 개의 채석장 중 가장 큰 규모의 발파현황과 발파시간은 Table 3.1.11 과 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 2011 년 5월 2일부터 6월 23일까지 약 2 개월에 걸쳐 설치·운영하였다(Table 3.1.10). 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 3.1.10 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 3.1.11. 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			

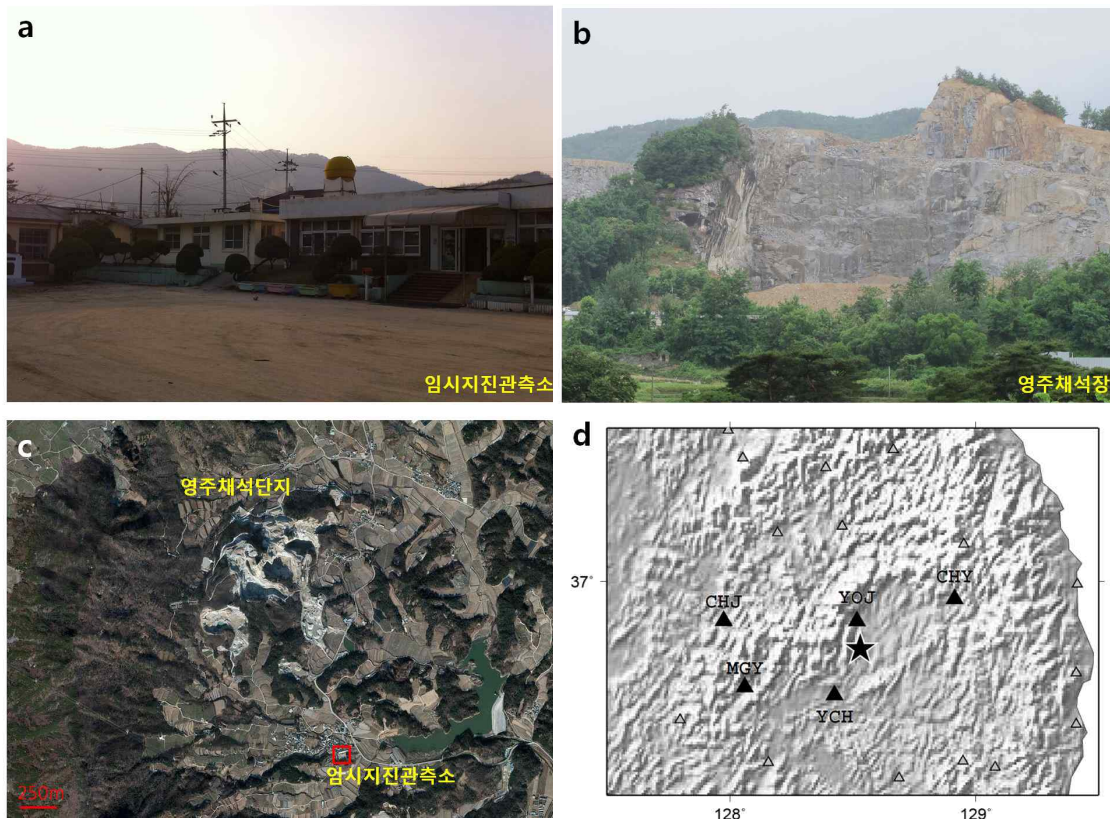


Figure 3.1.13 (a) Yeongju temporary seismic station, (b, c) satellite image of the Yeongju quarry and quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

3.1.4.3 울산 임시지진관측소

울산광역시 울주군 웅촌면은 현재 2 개의 채석장이 운영 중에 있다. 임시지진관측소는 채석장 두 곳과 비교적 인접한 곳에서 설치하였고, 채석장에서의 과거 발파양은 Table 3.1.12와 같으며 발파시간은 현장실정에 맞춰 발파를 하여 일정치 않다.

Table 3.1.12. 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 3.1.13). 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 3.1.13 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			

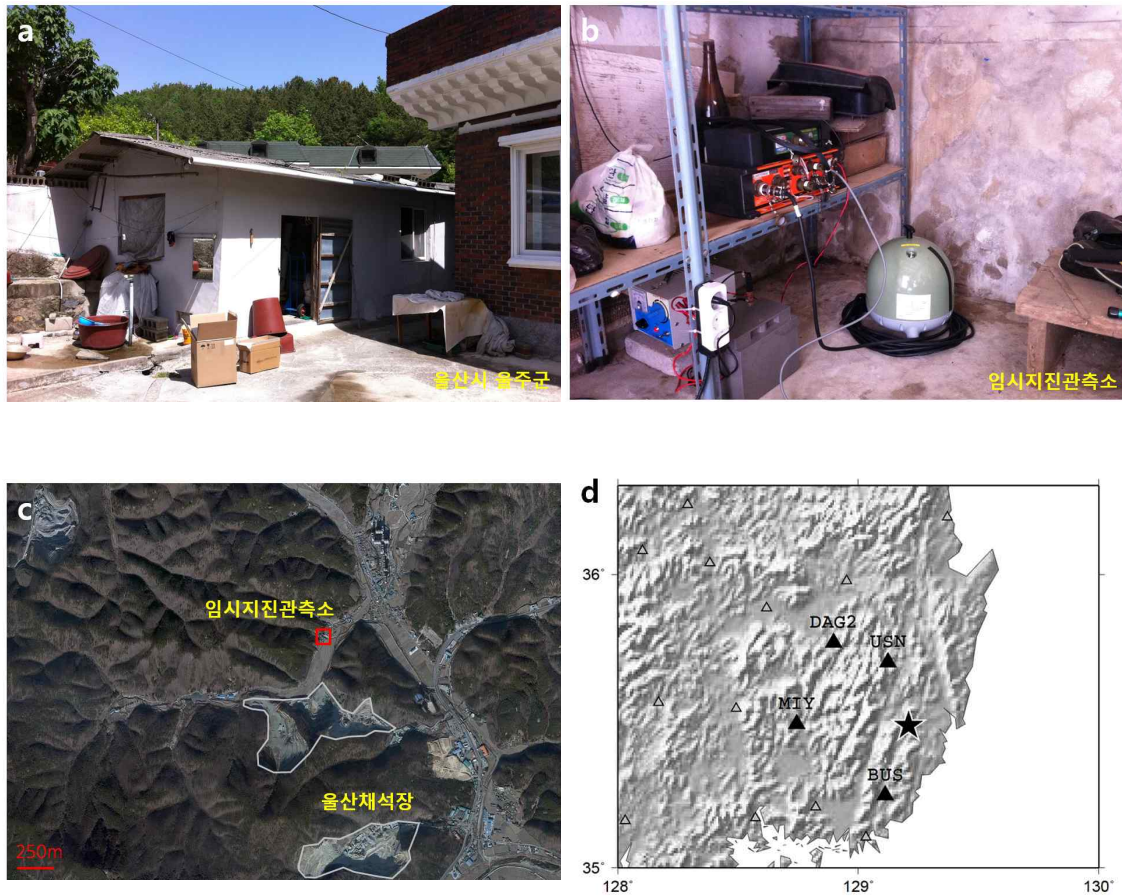


Figure 3.1.14 (a, b)Ulsan temporary seismic station, (c) satellite image of the Ulsan quarry and (d) quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

3.1.4.4 연천 임시지진관측소

경기도 연천군 전곡읍 간파리에 위치한 채석장은 임시지진관측소와 약 500 m 떨어진 곳에 위치해 있으며, 임시지진관측소는 인근 농가의 협조를 얻어 운영하였다(Table 3.1.14, 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 철수

한 뒤 7월 12일 재설치하여 7월 30일까지 운영하였다. Figure 3.1.16은 임시지진 관측소 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 3.1.14 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			

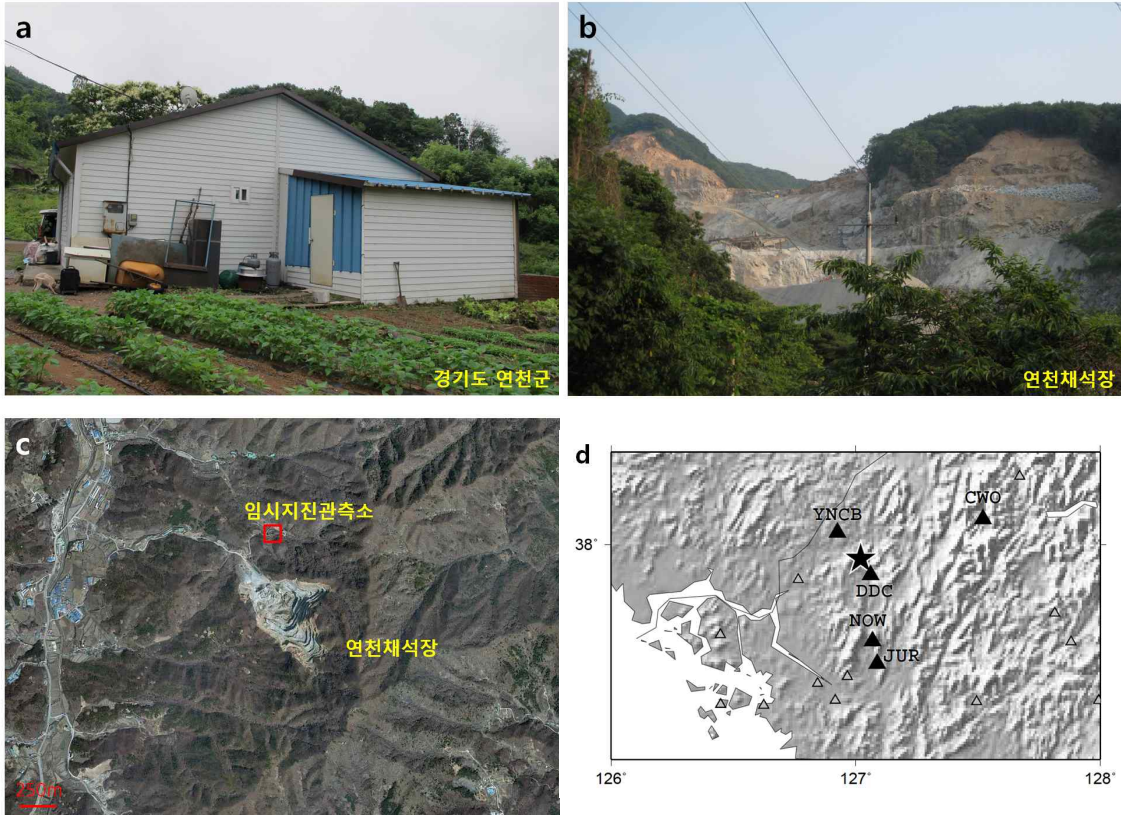


Figure 3.1.15 (a) Yeoncheon temporary seismic station, (b, c) satellite image of the Yeoncheon quarry and (d) quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

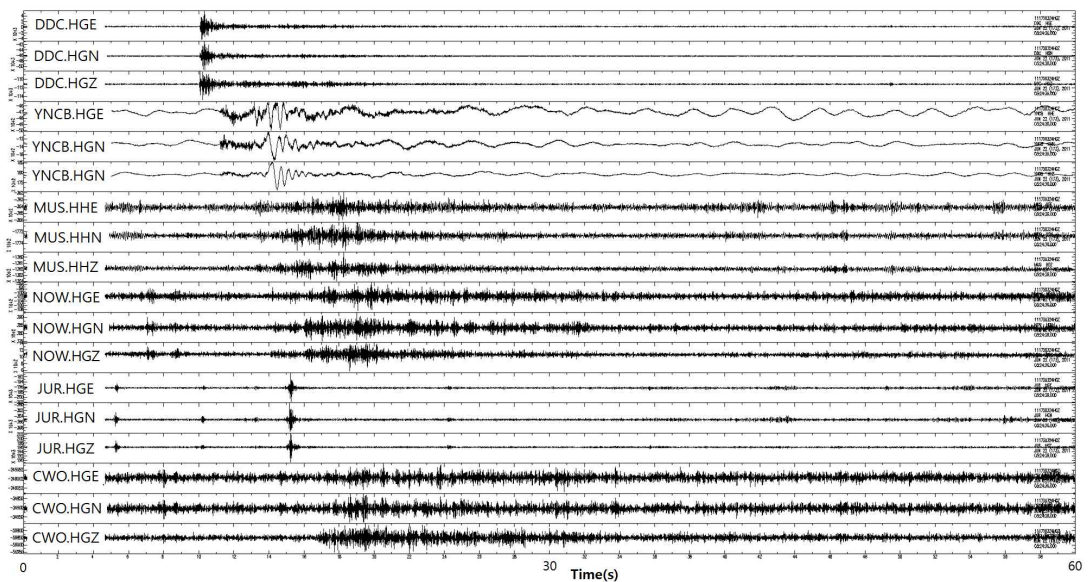


Figure 3.1.16 Yeoncheon quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

3.1.4.5 횡성 임시지진관측소

강원도 횡성군 횡성읍에 위치한 채석장에서 실시한 2011년 6월 29일 약 1톤 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 3.1.15). 나머지 임시지진관측소 또한 인근의 기상청 지진관측소와의 거리 및 배치사향을 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 1톤 가량 사용되었다. 1차 발파작업의 경우 기상청의 횡성(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 3.1.15 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			

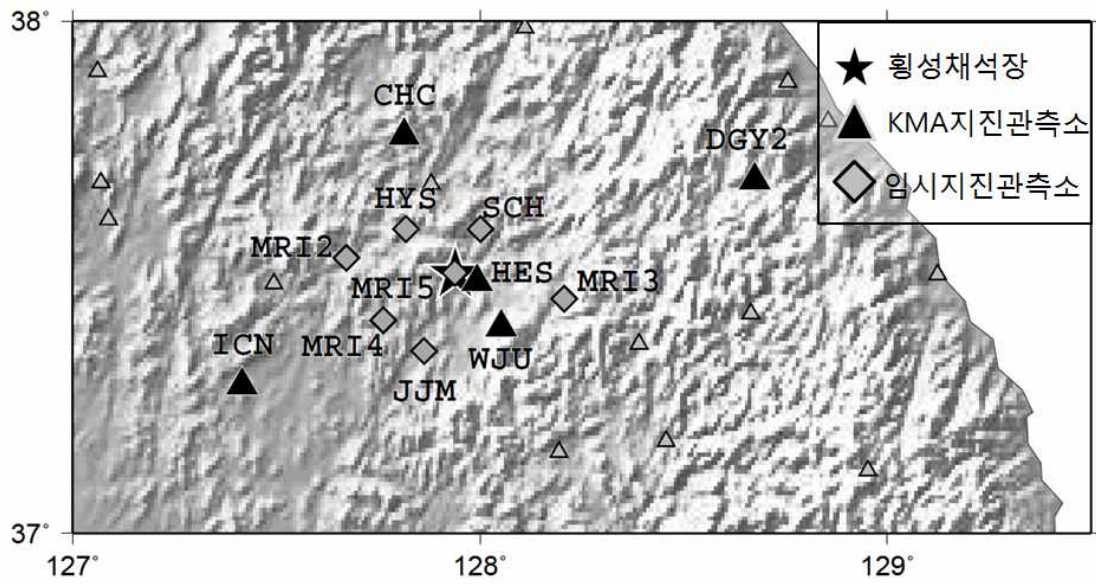


Figure 3.1.17 Hoengseong quarry and quarry blasting waveforms recorded KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations, ◇ : temporary seismic stations).



Figure 3.1.18 Blasting site in Hoengseong quarry.

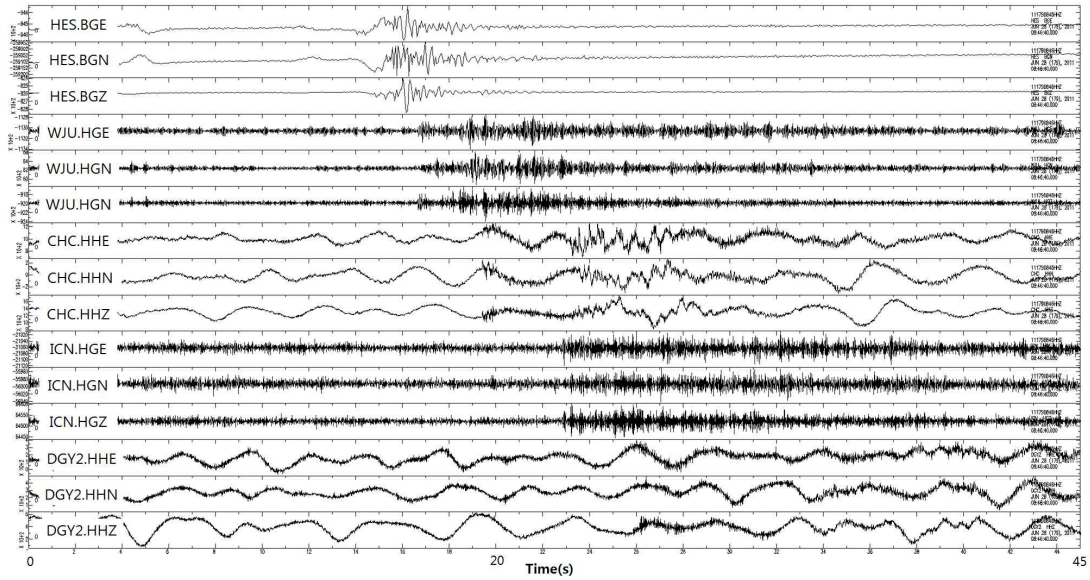


Figure 3.1.19 Hoengseong quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

3.1.4.5.1 임시지진관측소

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 3.1.16).

Table 3.1.16 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 3.1.17).

Table 3.1.17 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, 횡성채석장과는 약 18 km 떨어진 곳에 위치해 있다(Figure 3.1.20.c, Table 3.1.18).

Table 3.1.18 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).

3.1.4.6 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 3.1.19). 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.

Table 3.1.19 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

임시지진관측소는 단양군 가곡면 여천리에 위치한 마을창고로서 노천 채석 사업장과는 약 500 m 떨어져 있으며, 갯내채굴장과는 약 5 km 떨어진 곳에 위치해 있다(Figure 3.1.21.a, b, Table 3.1.20). 임시지진관측소 운영기간은 7월 12일부터 9월 5일까지 약 2개월간 운영되었다. 임시지진관측소 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 3.1.20 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			

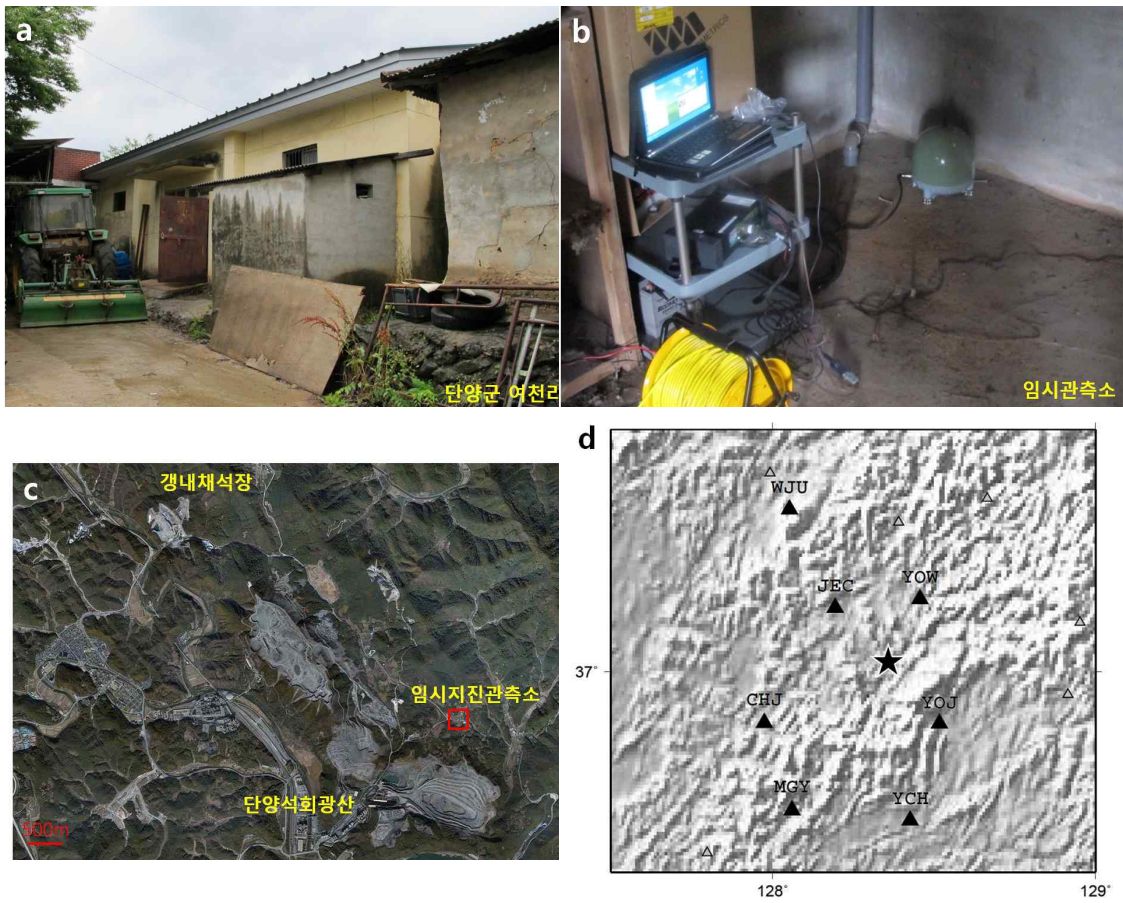


Figure 3.1.21 (a, b) Danyang temporary seismic station, (c) satellite image of the Danyang quarry and (d) blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

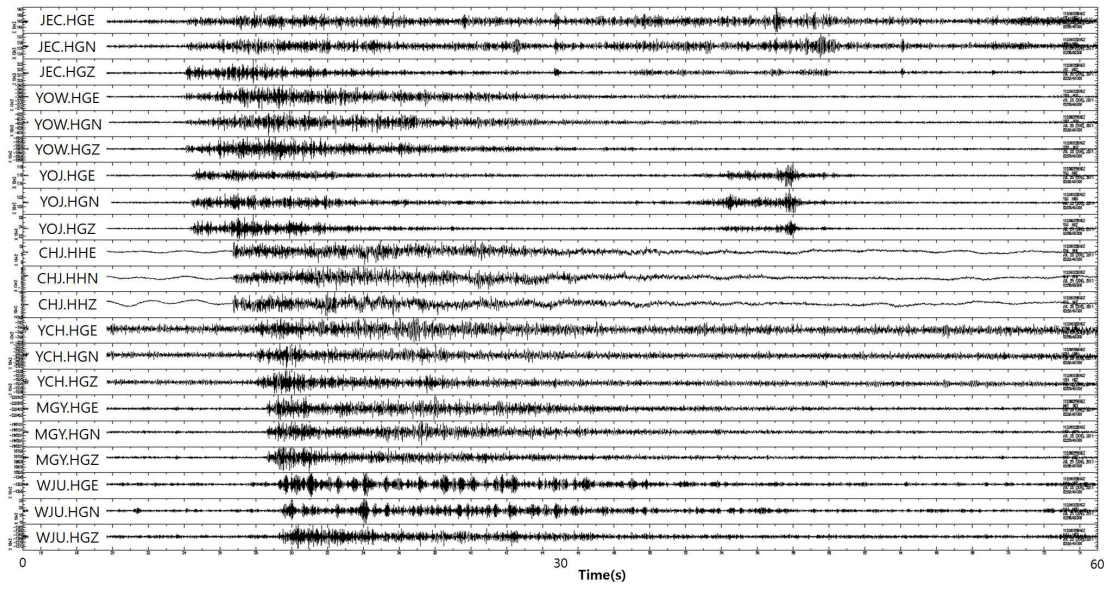


Figure 3.1.22 Danyang quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

3.1.4.7 익산 임시지진관측소

전라북도 익산시 낭산면 낭산리에 4 개의 채석장이 모여 채석단지를 이루고 있다. 임시지진관측소는 인근 낭사리 마을에 위치한 마을회관에 설치하였다 (Table 3.1.21, 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 발파파형이 관측되었다(Figure 3.1.24).

Table 3.1.21 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			

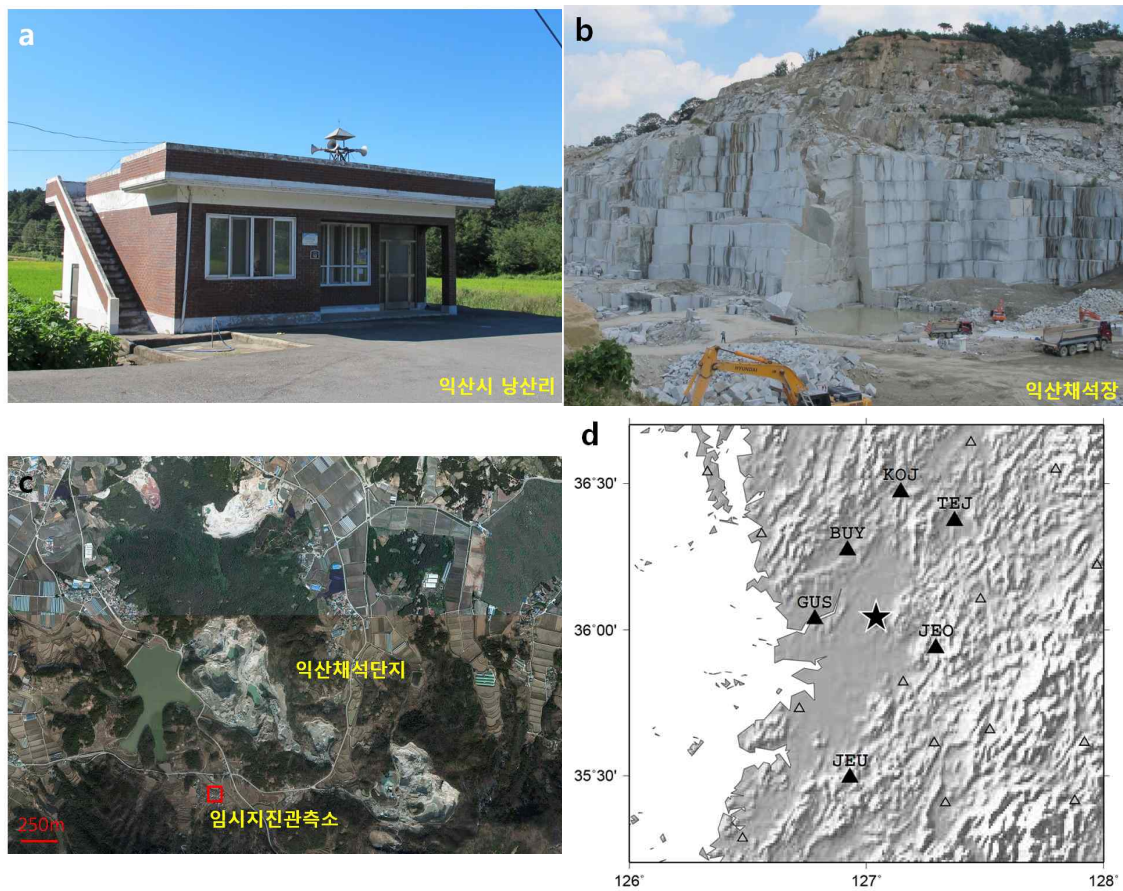


Figure 3.1.23 (a) Iksan temporary seismic station, (b, c) satellite image of the Iksan quarry and (d) blasting waveforms recorded at KMA seismic stations (★ : quarry, ▲ : recorded at KMA seismic stations, △ : KMA seismic stations)(<http://local.daum.net>).

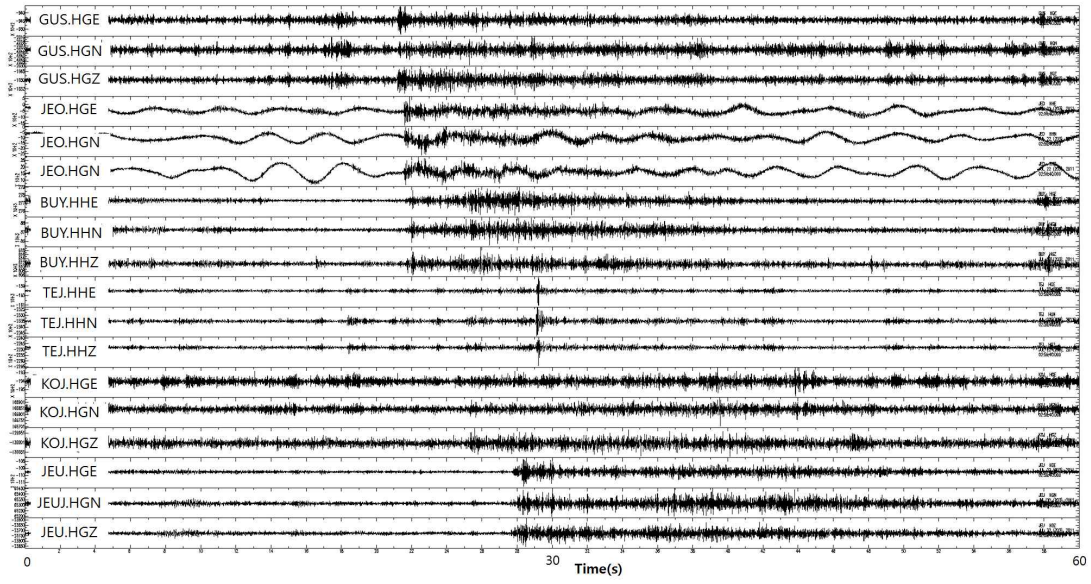


Figure 3.1.24 Iksan quarry blasting waveforms recorded at KMA seismic stations.

3.1.5 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 광대역 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 정보를 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° 이하이거나
- ◎ secondary azimuth gap이 253° 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 3.1.22).

Table 3.1.22 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, 도착파형의 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 최초로 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 지진 발생위치 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 3.1.23, 3.1.24, 3.1.25).

Table 3.1.23 Quality based on error estimates defined in Hypoellipse (Lahr, 1999)

Solution Quality	Larger of SEH and SEZ
A	≤ 1.34
B	≤ 2.67
C	≤ 5.35
D	> 5.35

Table 3.1.24 Quality based on many parameters used in SQD-HYPO71 quality (USGS, 1975)

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

Table 3.1.25 Station distribution quality as defined in HYPO71. Dmin is the distance to the nearest station (USGS, 1975)

D	No.	Gap	Dmin
A	≥6	≤90	≤Depth or 5 km
B	≥6	≤135	≤2*Depth or 10 km
C	≥6	≤180	≤50 km
D	Others		

3.1.8 결과 및 고찰

본 연구에서는 기존 GT 자료를 수집하는 한편 채석장을 중심으로 임시지진 관측소를 운영하여 GT 자료를 확보하였다. 수집된 GT 자료의 경우 대부분 채석장에서 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 속도구조모델을 선별하였다.

기존 GT 자료 중 정확한 발파시간과 발파위치를 알고 있는 자료로는 한국 지각구조연구팀(Korea Crust Research Team, KCRT)에서 2002년, 2004년과 2008년도에 수행한 한반도 지각속도 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 속도구조모델은 김성균과 정부홍(1985), 김성균(1995), Chang and Baag (2005), 김상조와 김소구(1983), Lee (1979), IASP91, AK135로 총 7 개의 속도구조모델을 사용하였다. Lee (1979) 속도구조모델은 1936년 발생한 지리산지진($M_L=5.0$)의 P파와 S파의 도착시간을 이용하여 두 개의 층을 가진 단순한 지각모델을 제시하였다. 김상조와 김소구(1983)의 속도구조모델의 경우, 지리산지진(1936년), 홍성지진(1978년), 포항지진(1981년), 사리원지진과 울산지진(1982년)의 아날로그 자료를 이용하여 지각을 포함한 상부맨틀까지 세분화된 속도구조모델을 제시하였다. 김성균과 정부홍(1985)의 속도구조모델의 경우 경상분지를 포함한 남부지역에서 발생한 자연지진과 건설현장에서 발생하는 인공발파에 의한 주시자료를 사용하여 속도구조모델을 결정하였다. 김성균(1995)의 속도구조모델의 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 속도구조모델이다. AK135 속도구조모델은 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 참조모델(global reference model)이다(Figure 3.1.25).

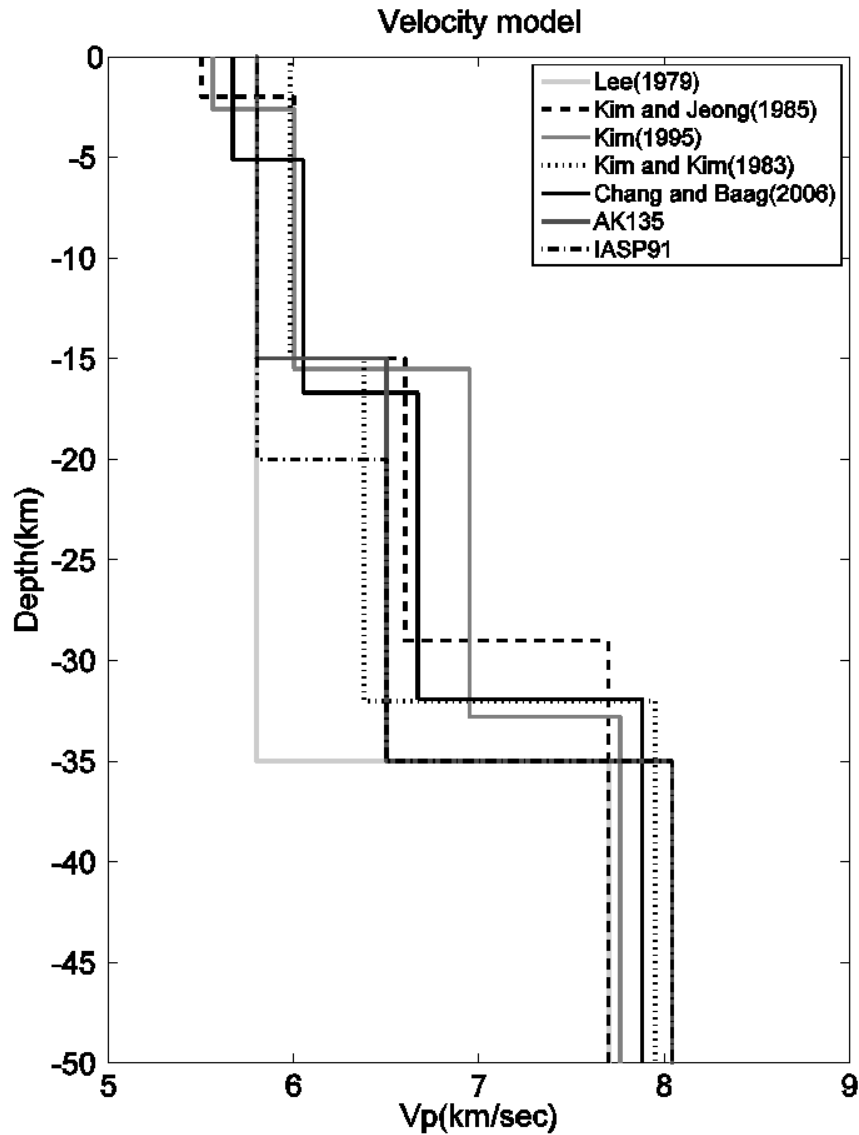


Figure 3.1.25 1-D P-wave velocity model.

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. 진앙위치 오차의 경우 Chang and Baag (2005) 모델이 약 500 m로 가장 작은 오차를 보였으며, 진원깊이 오차는 약 1.2 km를 보여주고 있다. 김성균과 정부흥(1985) 속도모델의 경우 1 km 미만의 진원위치 오차와 진앙깊이 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 관

측된 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° 와 89° 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° 와 179° 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° 와 94° 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° 와 65° 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 진원위치결정 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° 와 69° 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, 김성

균과 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 정확한 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 결정 시 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, 진원위치결과와 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 채석단지와 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 분산발파식의 발파로 인해 그 파형이 관측되지 않은 것으로 사료된다. 또한 발파파형이 관측된 연천채석

장, 황성채석장, 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° 와 116° 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° 와 139° 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° 와 155° 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 황성채석장의 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).

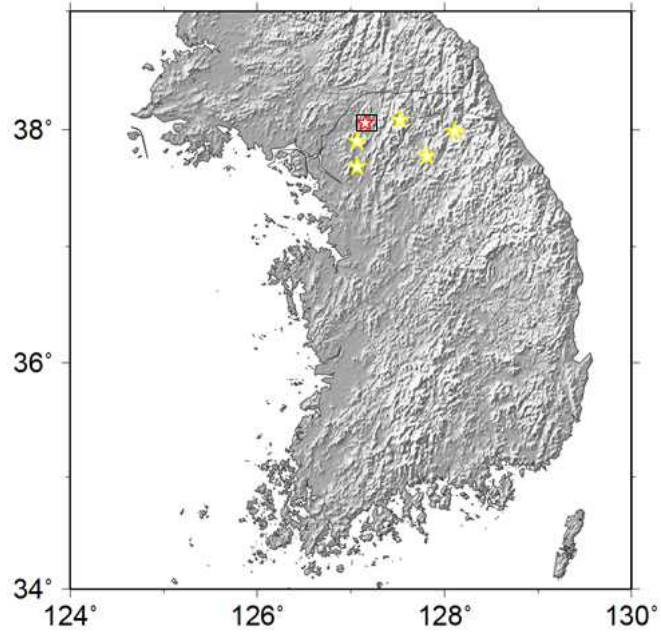
2004년부터 2006년까지 기상청에서 관측하고 발표한 지진에 대해 P파의 도착시간을 정밀하게 수동으로 측정하였다. 측정된 지진자료에 박용철 등(2009)에서 제시한 KGT5의 기준을 만족하는 지진에 대해 선별 및 목록화하였다. 그 결과 기상청에서 발표한 129 개의 지진 중 49 개의 지진만이 KGT5 기준을 만족하였다. 2004년부터 2006년까지 우리나라 해역에서 발생한 지진 개수는 총 94 개이며 이 중 4 개의 해역지진만이 KGT5를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 북한에서 발생한 지진의 경우 총 11 개의 지진이 발생하였으며 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 지진과 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 오차형태는 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 지진관측소 분포를 보이고 있다. 지진발생위치 정확성을 평가하는 대부분의 기존 연구들이 지역지진 혹은 원거리지진(regional or teleseismic distance)에 대하여 수행되었으므로, 기상청 지진관측망의 관측능력과는 매우 다

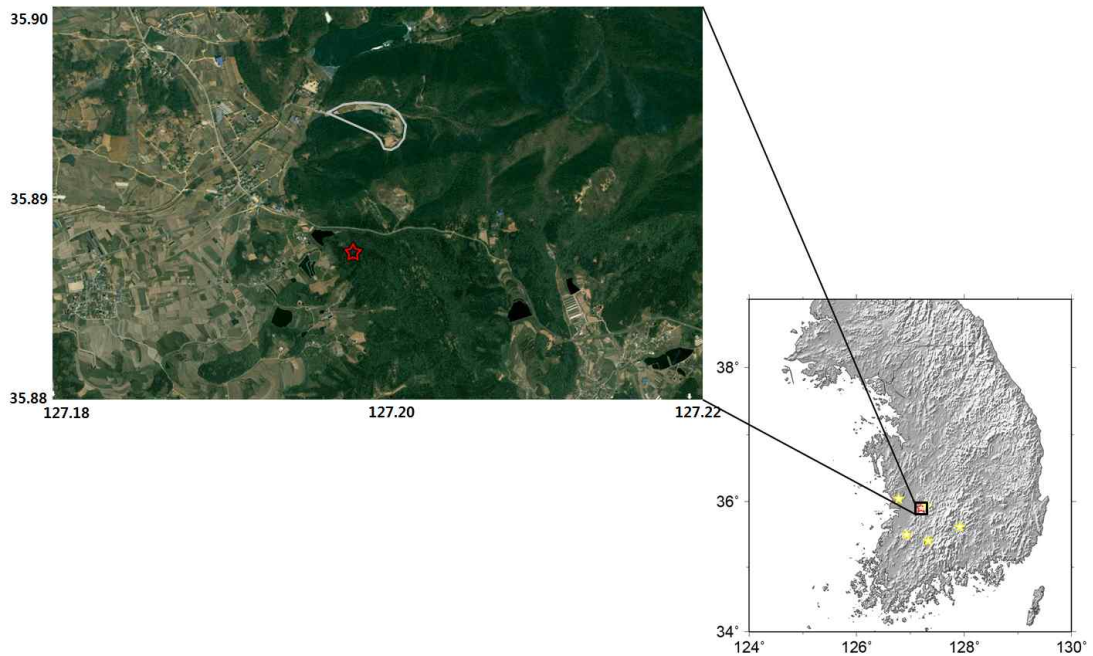
를 수 있다. 기상청 지진관측망과 같이 조밀한 지진관측망의 경우 지진발생위치 결정의 정확성을 보기위하여 Figure 3.1.38과 같이 지진관측망 중앙부에서 발생하는 지진에 대한 오차를 측정하여 Figure 3.1.39와 Figure 3.1.40에 표시하였다. 이는 지진과 관측소가 위도 36.0° - 37.0° , 경도 127.3° - 128.3° 사이에 위치한 경우만을 고려하였고, 앞의 경우와 마찬가지로 지진이 10 km 깊이에서 0.01° 간격으로 발생했다고 가정하고 지진발생위치에 따른 오차를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 이와 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 이격거리가 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 기준에는 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.



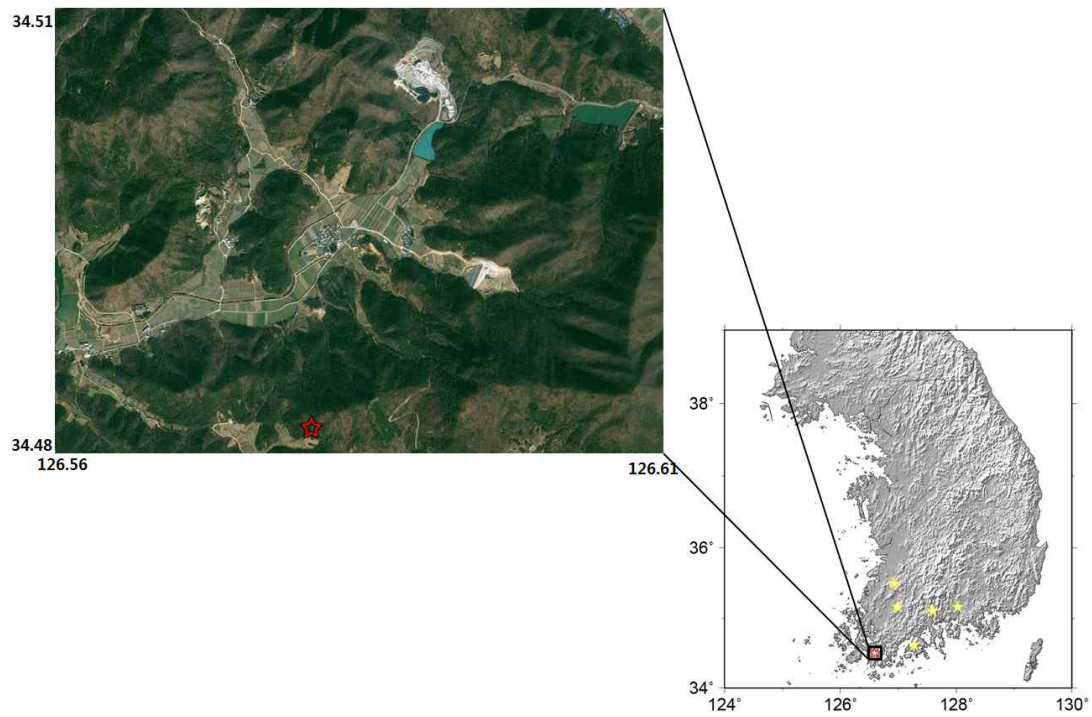
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	Δ Epi. (km)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
D test site	07:30:50.75	38.0	127.1	0.00	0.036	3	224	232	5

Figure 3.1.26 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.



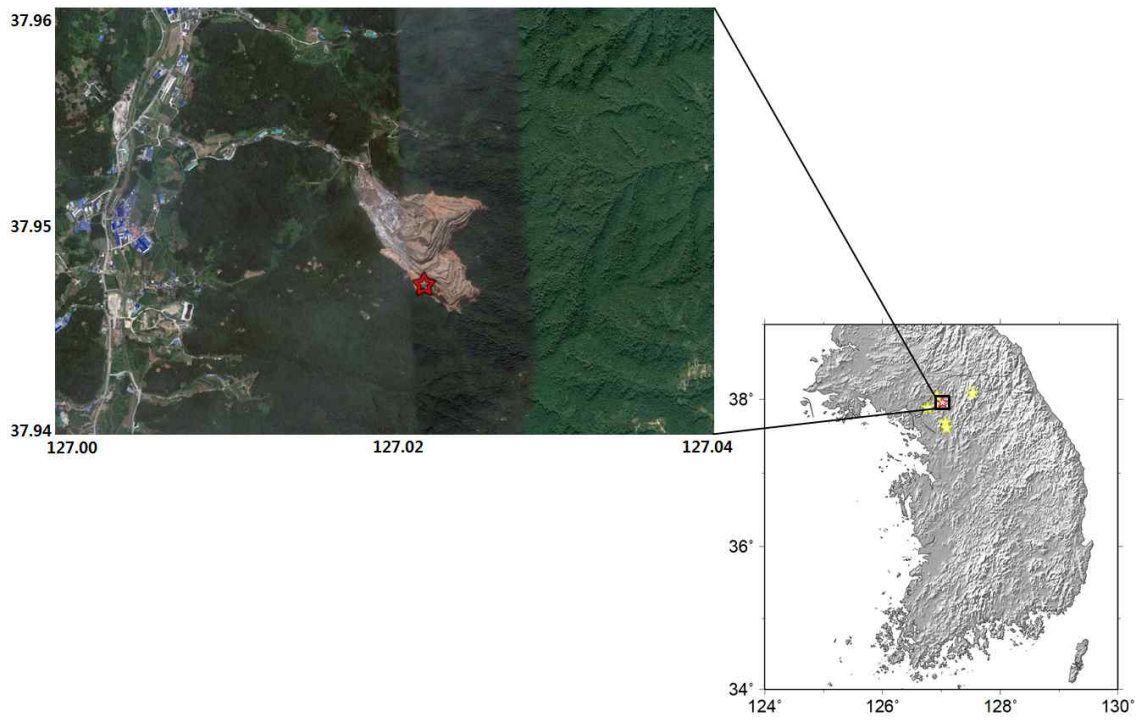
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	Δ Epi. (m)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Wanju quarry	03:12:17.65	35.8925	127.1990	0.06	0.0970	800	84	188	7

Figure 3.1.27 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.



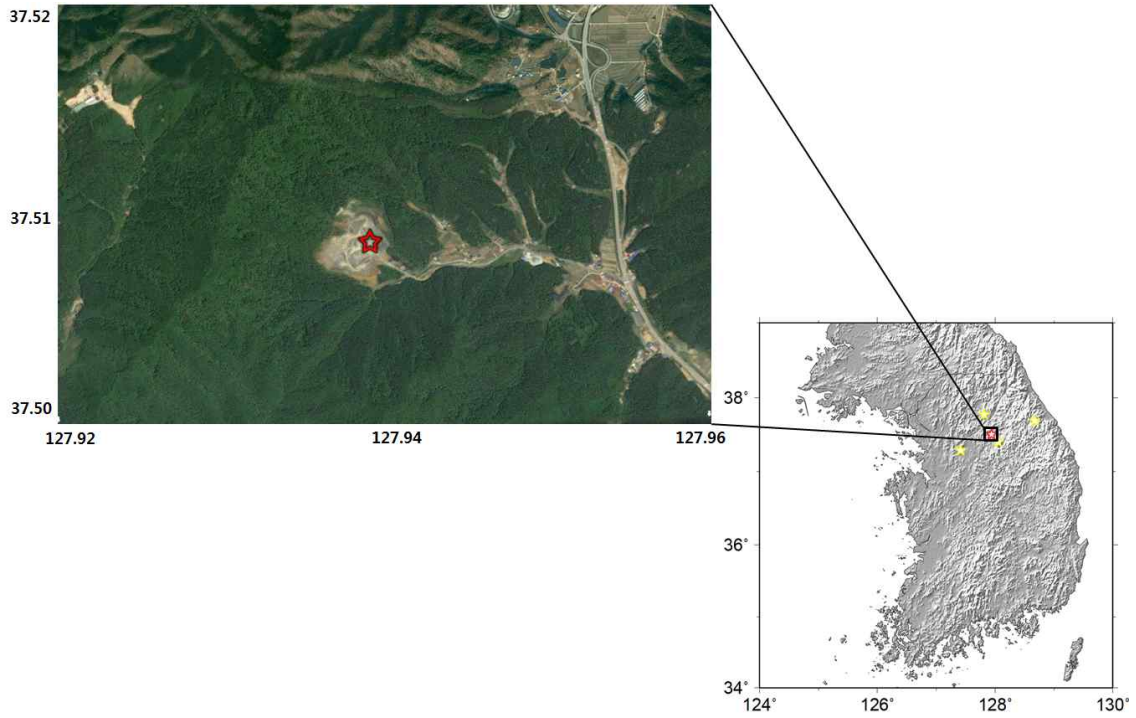
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	Δ Epi. (km)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Haenam quarry	09:37:40.65	34.4809	126.5811	4.47	0.0109	3	138	226	7

Figure 3.1.28 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.



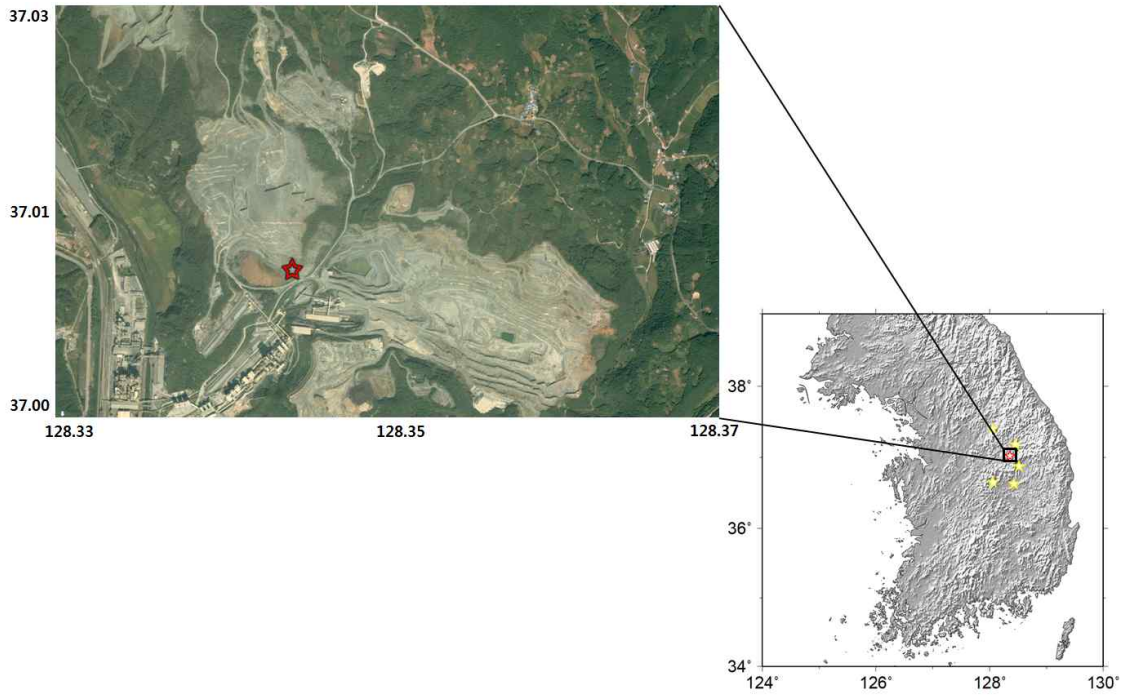
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	Δ Epi. (m)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Yeoncheon quarry	03:24:44.82	37.9470	127.0222	0.02	0.1012	500	110	177	6

Figure 3.1.29 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.



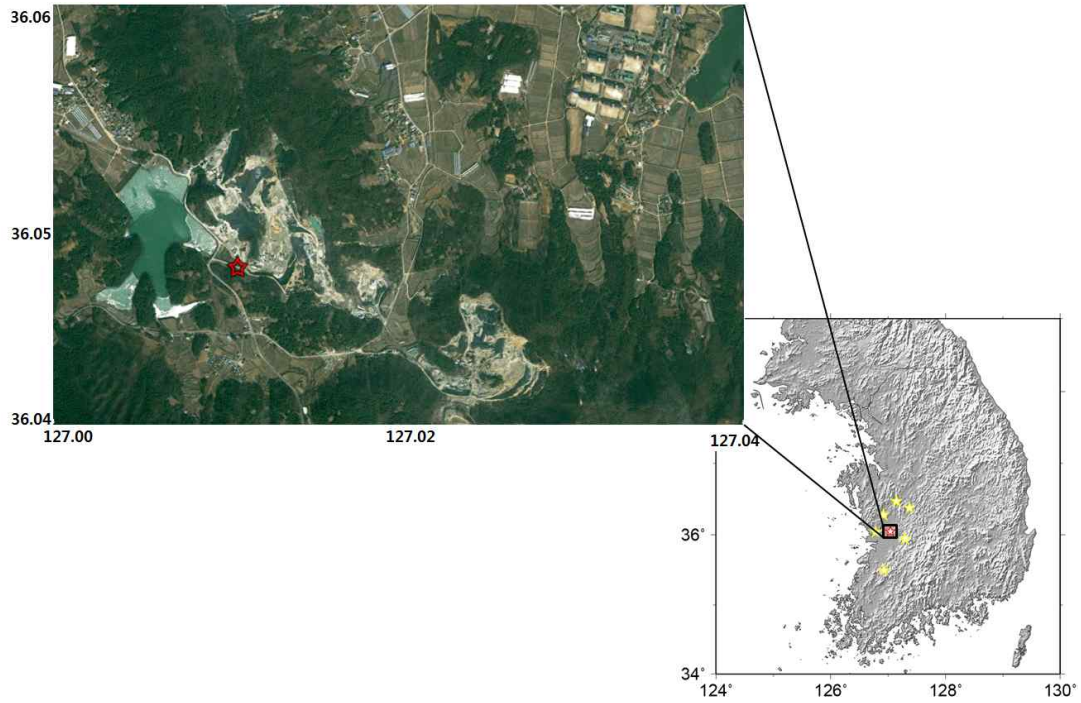
ID	Time(UTC)	Lat.(°N)	Lon.(°E)	Depth (km)	RMS	Δ Epi. (m)	Azi.(°)	2nd Azi.(°)	Obs. station.
Heongseong quarry	08:46:53.80	37.5087	127.9388	0.01	0.0340	200	103	116	5

Figure 30 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	Δ 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 3.1.31 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	Δ 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 3.1.32 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 3.1.26 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				

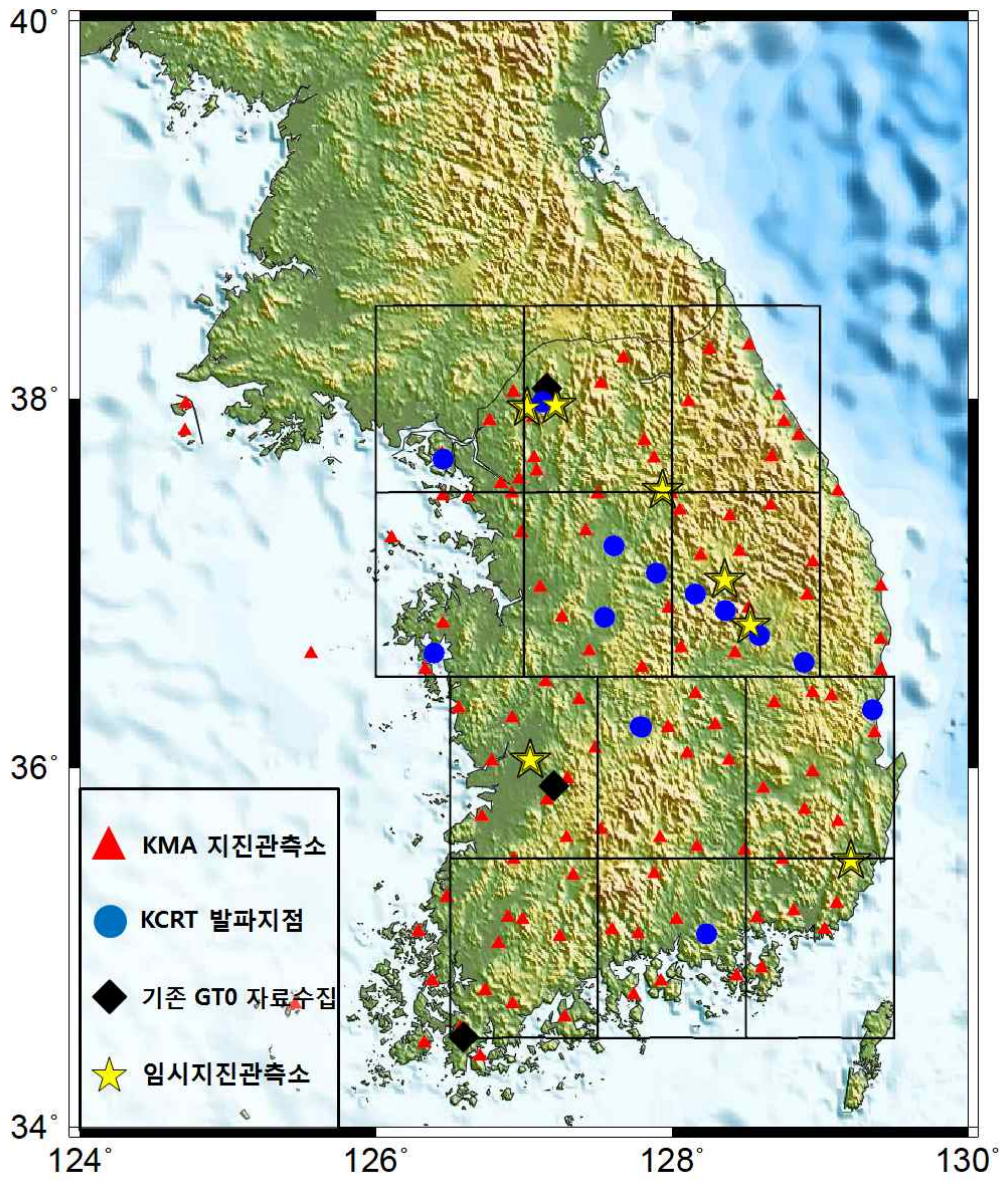


Figure 3.1.33. Hypocenters of man-made earthquake from this study.

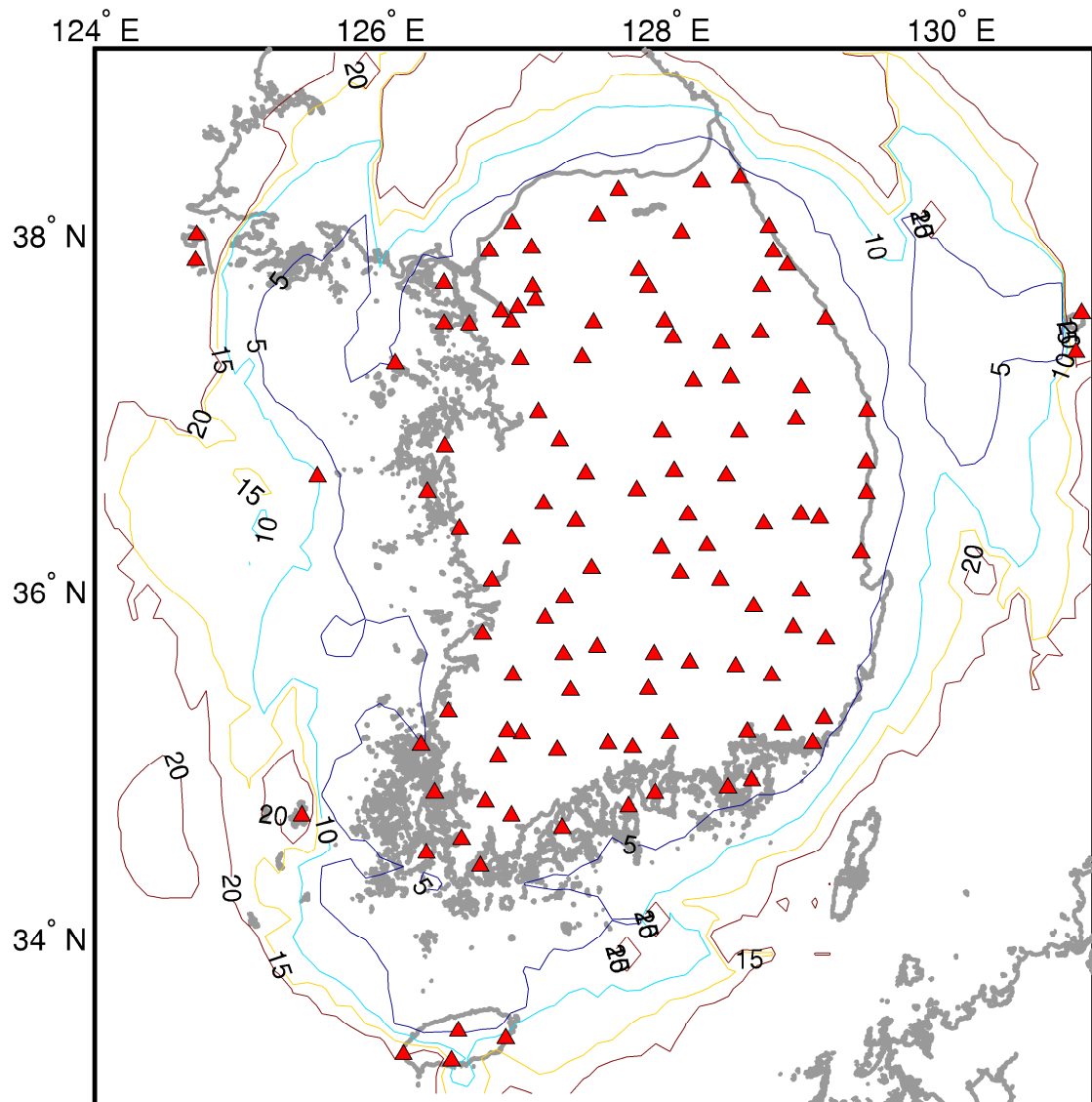


Figure 3.1.34 Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 10 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded only P-wave arrivals. A 1-D velocity model proposed by Kim and Chung (1985) has been used to calculate travel times. Red triangles indicate locations of KNSN stations.

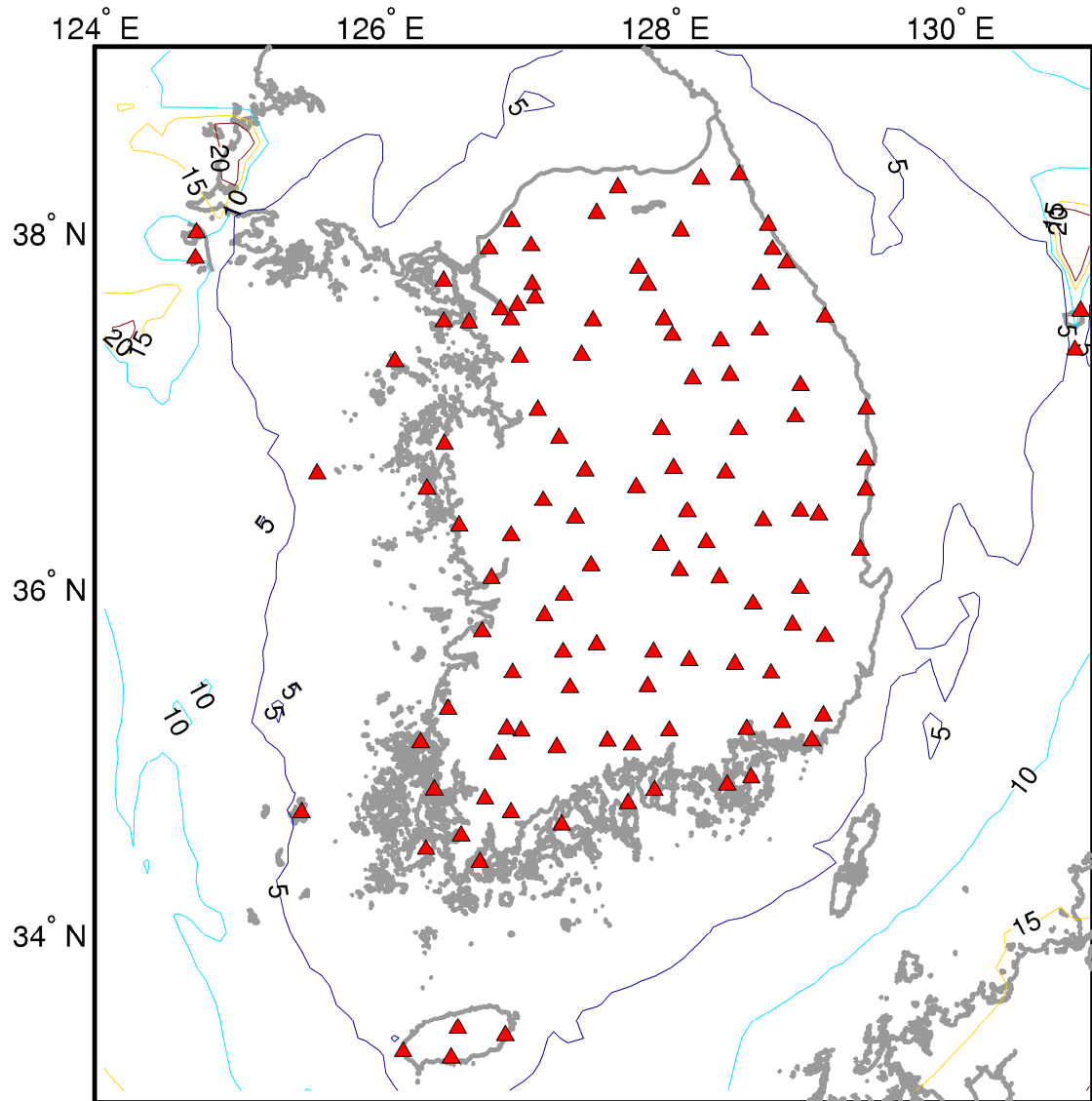


Figure 3.1.35 Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 10 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded both P- and S-wave arrivals. Significant improvement in the earthquake 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.

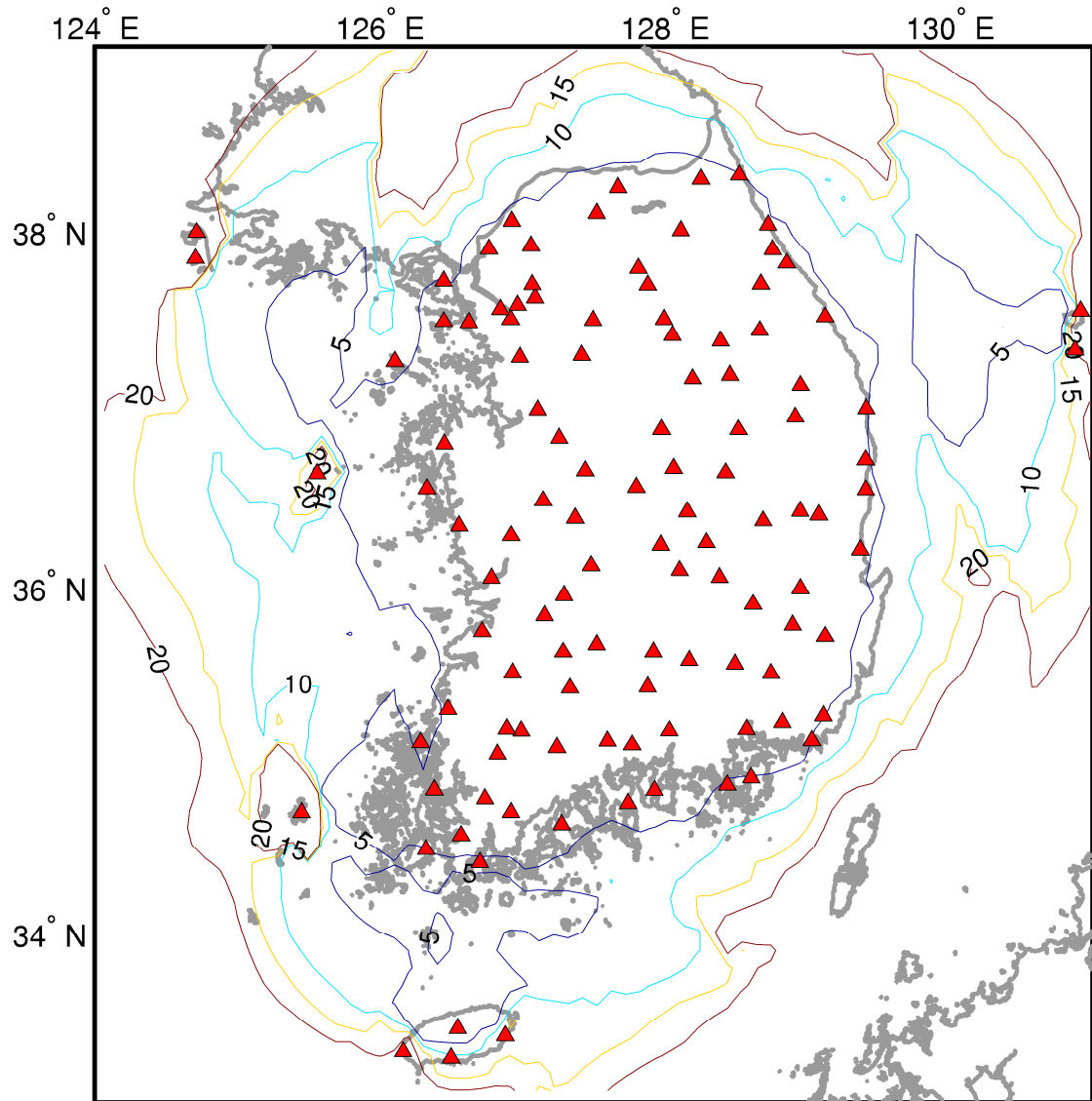


Figure 3.1.36 Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 30 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded only P-wave arrivals. A 1-D velocity model proposed by Kim and Chung (1985) has been used to calculate travel times. Red triangles indicate locations of KNSN stations.

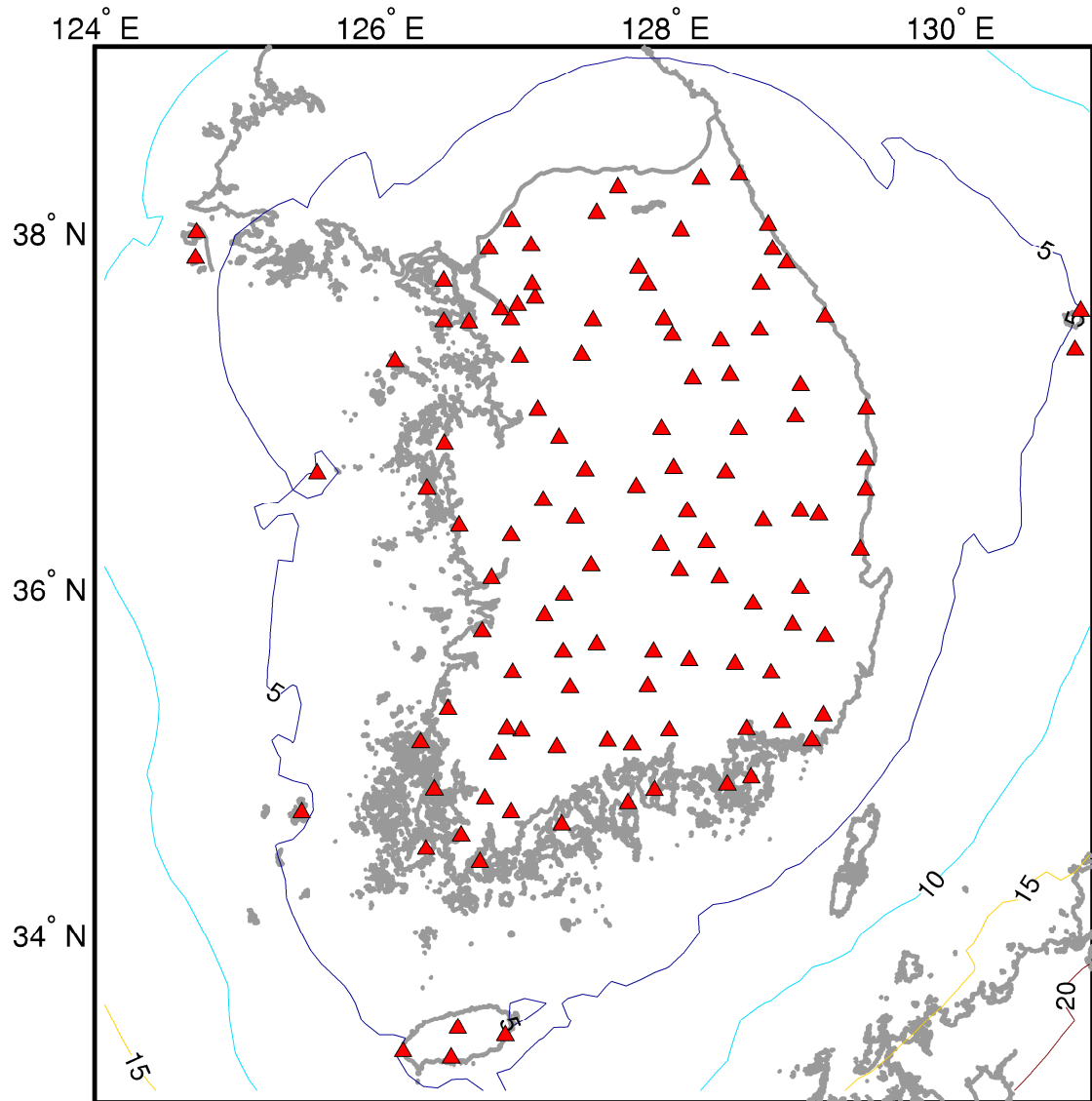


Figure 3.1.37 Map showing the epicentral errors (in km) calculated for the KNSN. Epicentral errors for earthquakes at 30 km depths are calculated and contoured every 5 km from 5 km to 20 km. It is assumed 10 nearby stations recorded both P- and S-wave arrivals. Significant improvement in the earthquake 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.

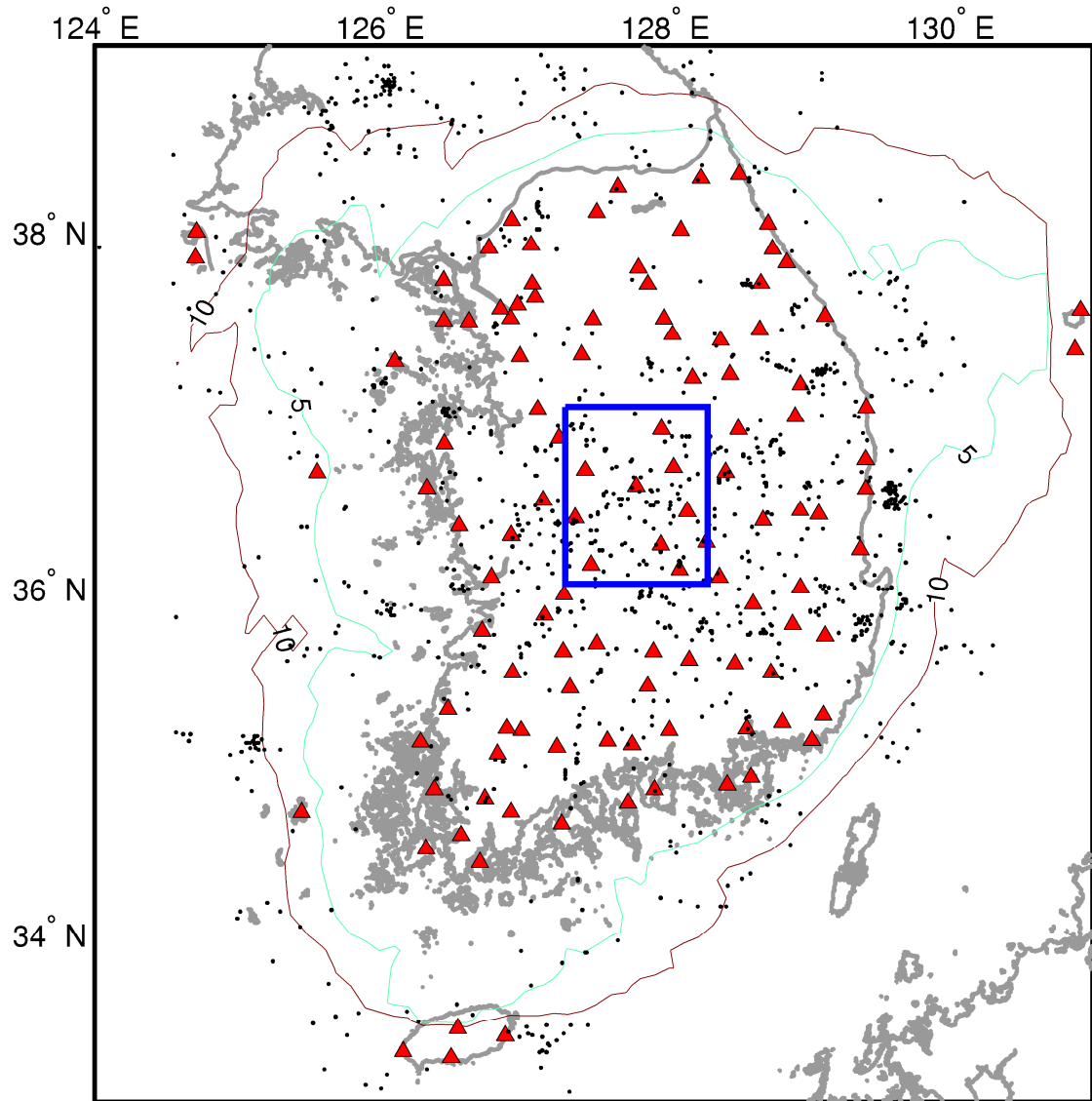


Figure 3.38 Index map showing that the location in Figure 6 and Figure 7 is marked by a solid rectangle. Triangles denote the location of KNSN stations operated by KMA. Small dots are earthquake location recorded and reported by KNSN between 2007 and 2010 including micro-earthquakes ($M < 2.0$).

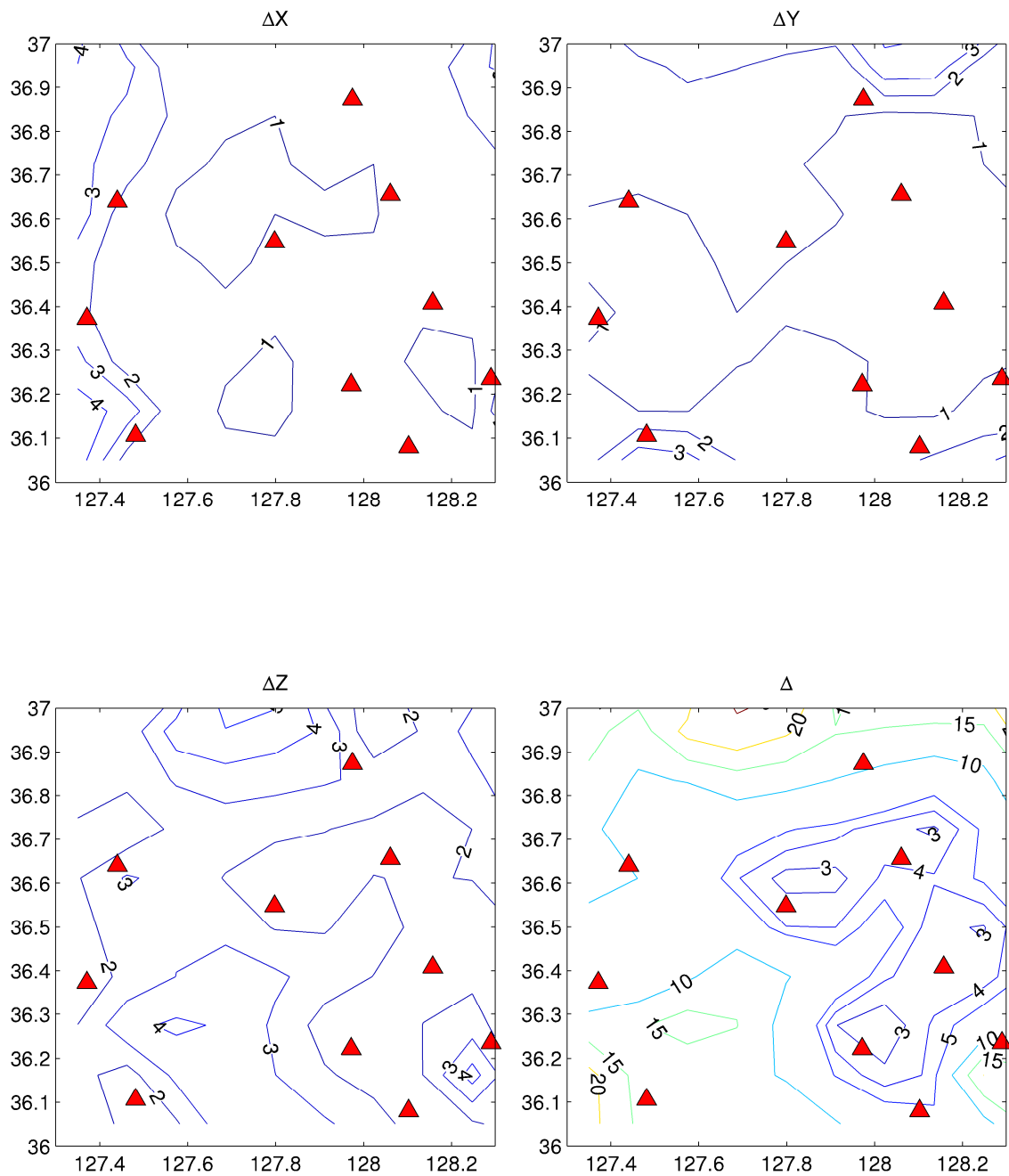


Figure 3.1.39 Distribution of epicentral errors in the center of KNSN seismic network. In this simulation test, earthquakes are assumed to occur at 10 km depth and P-waves are recorded by 6 nearby stations. Both stations and earthquakes in 36°N to 37°N and 127.3°E to 128.3°E are considered. Note locations are less constrained for depth. Δ_x , Δ_y , Δ_z , and Δ represent errors in North-South direction, East-West direction, depth, and hypocentral distances.

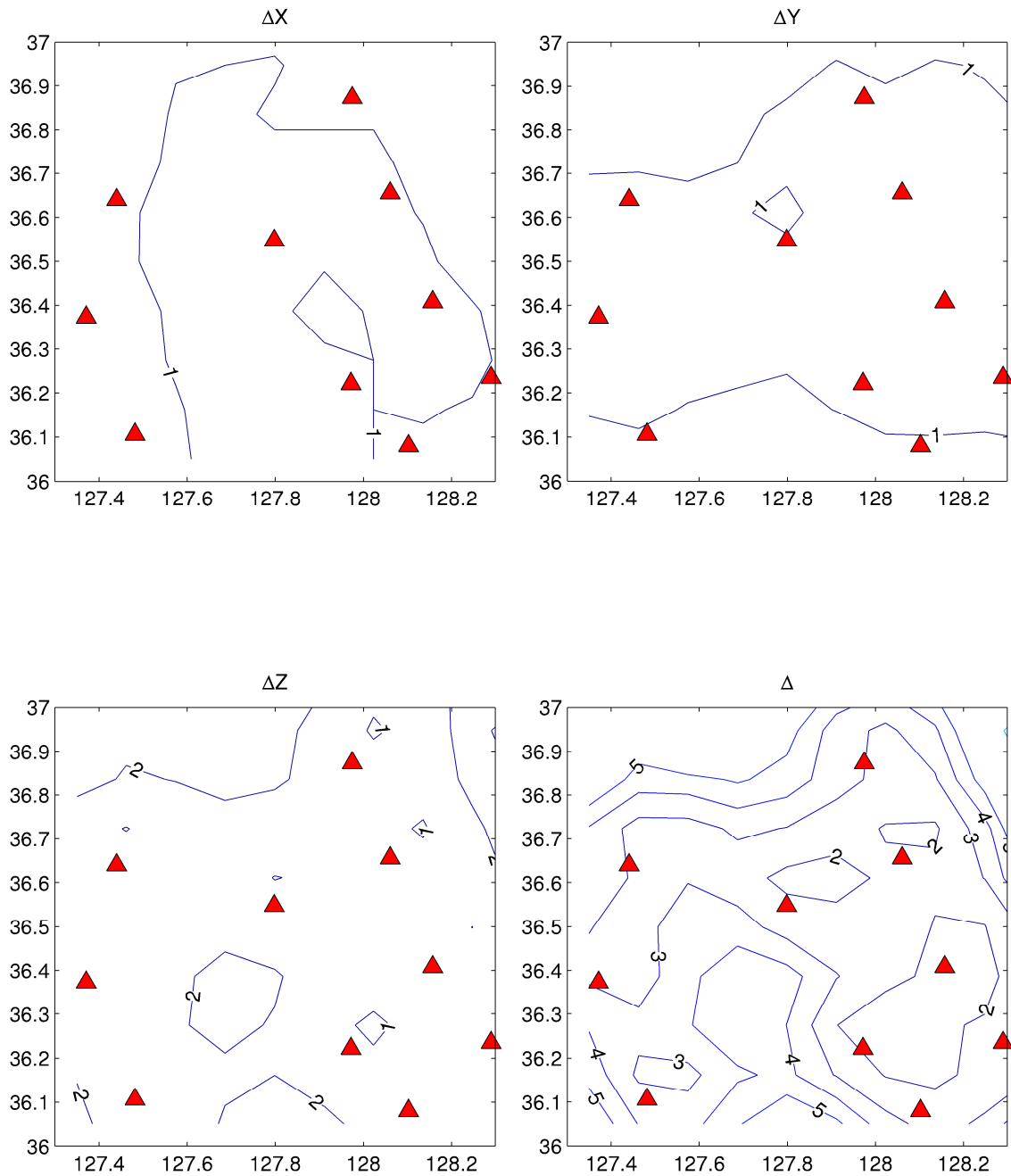


Figure 3.1.40 Distribution of epicentral errors in the center of KNSN seismic network. In this simulation test, earthquakes are assumed to occur at 10 km depth and P- and S-waves are recorded by 6 nearby stations. Both stations and earthquakes in 36°N to 37° N and 127.3°E to 128.3°E are considered. Note the depth of earthquake locations are well constrained using S-wave arrival times. Δx , Δy , Δz , and Δ 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, 기상 지진기술개발사업 연구보고서, pp. 185.
- 국립기상연구소, 2008, 지진자료 통합관리 기술개발 및 정밀분석기법 연구, 기상 지진기술개발사업 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 지진관 측망 탐지능력 평가, 지진기술개발사업 보고서.
- 이정모, 문우일, 박창업, 정희욱, 김기영, 2006. 한반도 지각 속도구조 연구, 기상 지진기술개발사업 보고서. p 120.
- 이정모, 박창업, 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 지진 자료 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 지진과 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_x라고 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	Secondary	Number of stations within specified distance			GT level
		Azimuthal Gap	Azimuthal Gap	Between 250km and 1000km	< 250km	< 30km	
Local ^[a]	0°-2.5°	110°	160°		10	1	GT5 _{95%}
Near Regional ^[a]	2.5°-10°		120°	10			GT20 _{90%}
Teleseismic ^[a]	28°-91°		120°				GT25 _{90%}

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 관측망은 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 _{95%}	11	[0, 2.2)	[0, 0.4)	202°	79
GT3 _{95%}	10	[0, 1.9)	[0, 1.8)		
GT3 _{95%}	9	[0, 2.0)	[0, 3.8)		
GT3 _{95%}	8	[0, 2.2)	[0, 5.7)		

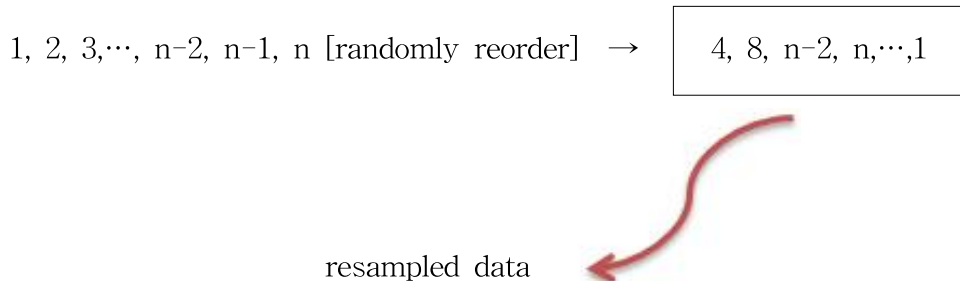
이와 같이 각 관측망에 따라서 GT 기준이 조금씩 변화할 수 있기 때문에 한반도에 설치되어 있는 지진관측망 또한 이와 같은 연구를 수행할 필요성이 있다. 진원결정에 있어서 발생할 수 있는 오차를 정량화하여 체계적인 지진목록 작성에 기본이 되는 GT 기준 마련이 요구된다.

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) 만큼 추출하여 사용하였다.



3.2.2.2 KCRT-2008 발파 자료

한반도 지각 속도구조를 규명하기 위한 KCRT-2008 실험은 2008년 11월 2일에 경기도 강화와 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).

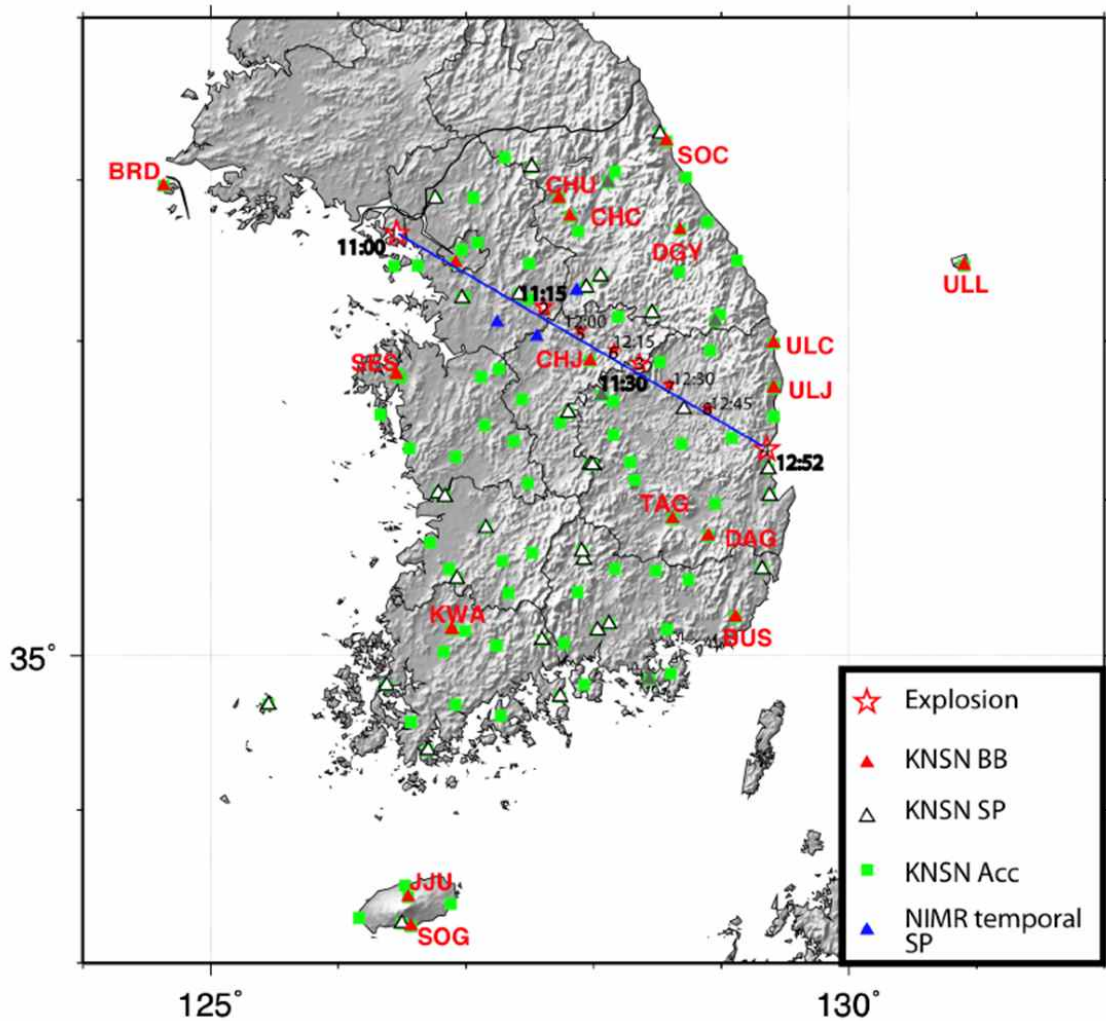


Figure 3.2.1. Location of the KMA seismic stations and KCRT-2008 explosion sites (see Table 3.2.3 for detail information of explosions).

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 수신함수를 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.

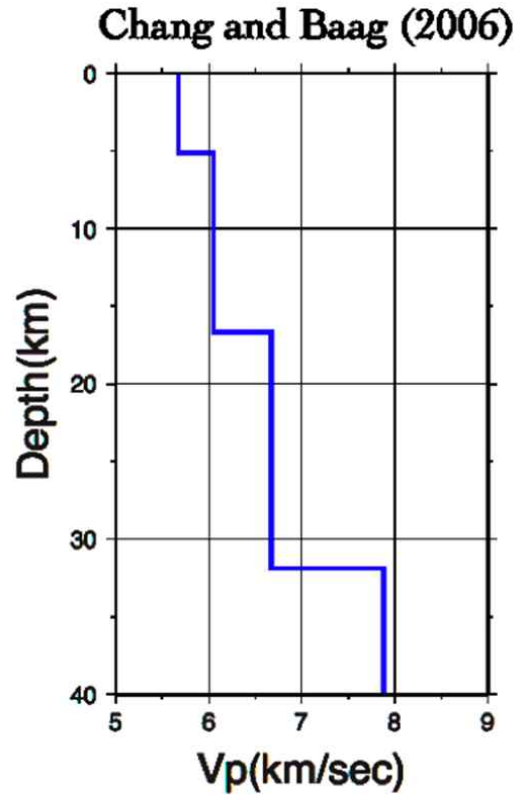


Figure 3.2.2 P-wave 1-D velocity used for locating GT0 events.

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 τ_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 Σ 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.

$$\begin{aligned} ndt + \sum a_i dx + \sum b_i dy + \sum c_i dz &= \sum R_i \\ \sum a_i dt + \sum a_i^2 dx + \sum a_i b_i dy + \sum a_i c_i dz &= \sum a_i R_i \\ \sum b_i dt + \sum a_i b_i dx + \sum b_i^2 dy + \sum b_i c_i dz &= \sum b_i R_i \\ \sum c_i dt + \sum a_i c_i dx + \sum b_i c_i dy + \sum c_i^2 dz &= \sum c_i R_i \end{aligned} \quad (4)$$

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 지진관측망 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 서해와 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

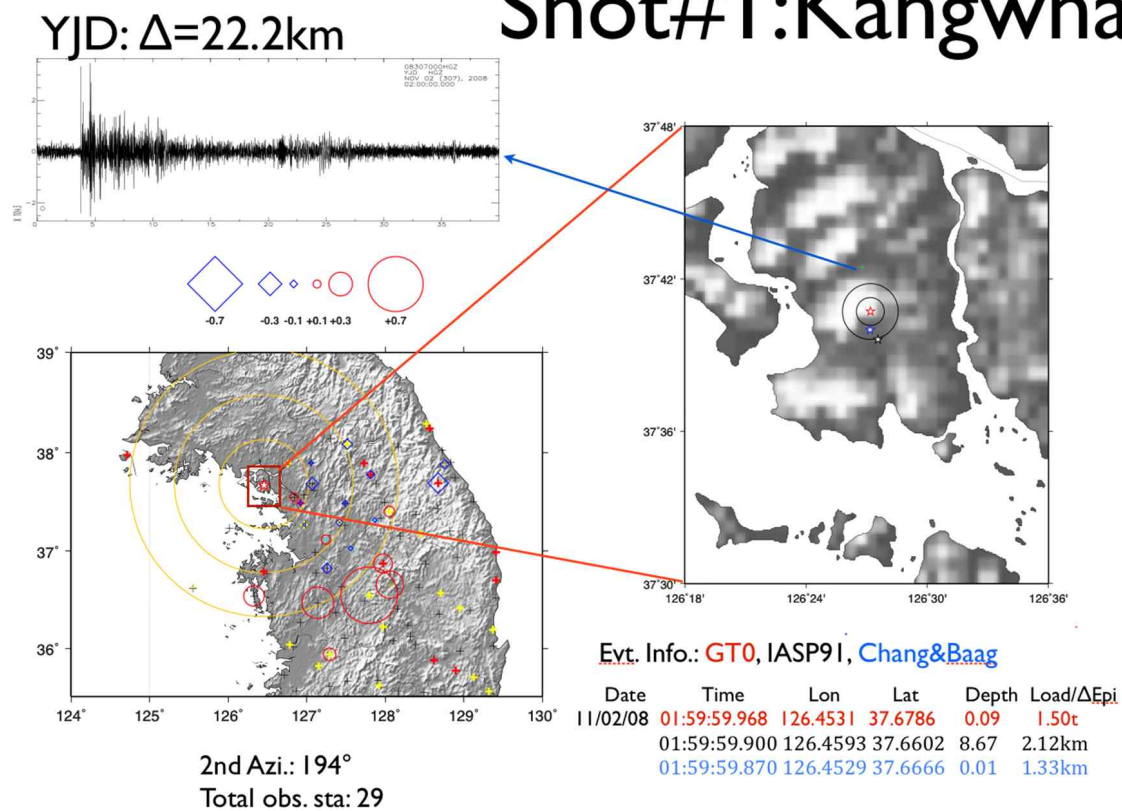
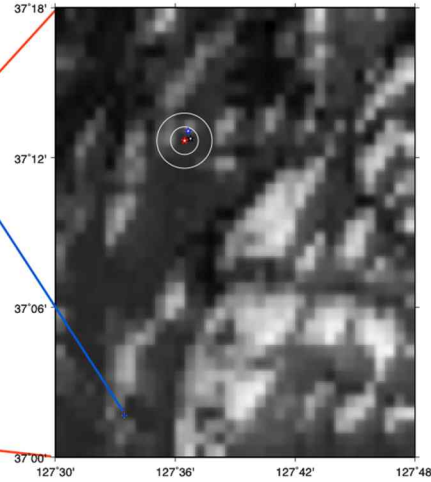
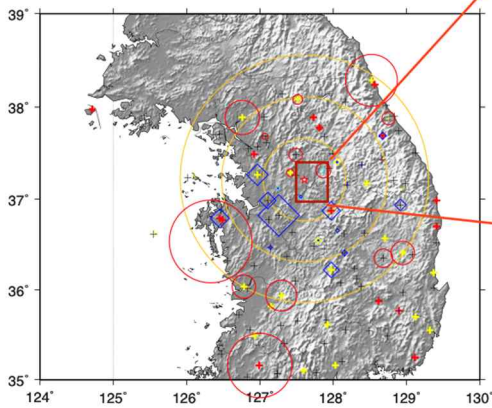
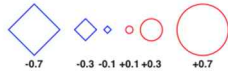
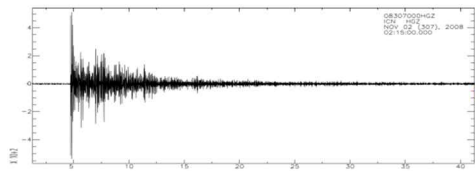


Figure 3.2.3 Inversion results for the shot #1 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

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

Shot#2:Yeoju



Evt. Info.: **GT0**, IASP91, **Chang&Baag**

Date	Time	Lon	Lat	Depth	Load/ Δ Epi
11/02/08	02:15:01.269	127.6078	37.2114	0.090	1.0t
	02:15:01.120	127.6129	37.2128	7.480	0.48km
	02:15:01.230	127.6109	37.2178	1.950	0.76km

2nd Azi.: 42°
Total obs. sta: 34

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

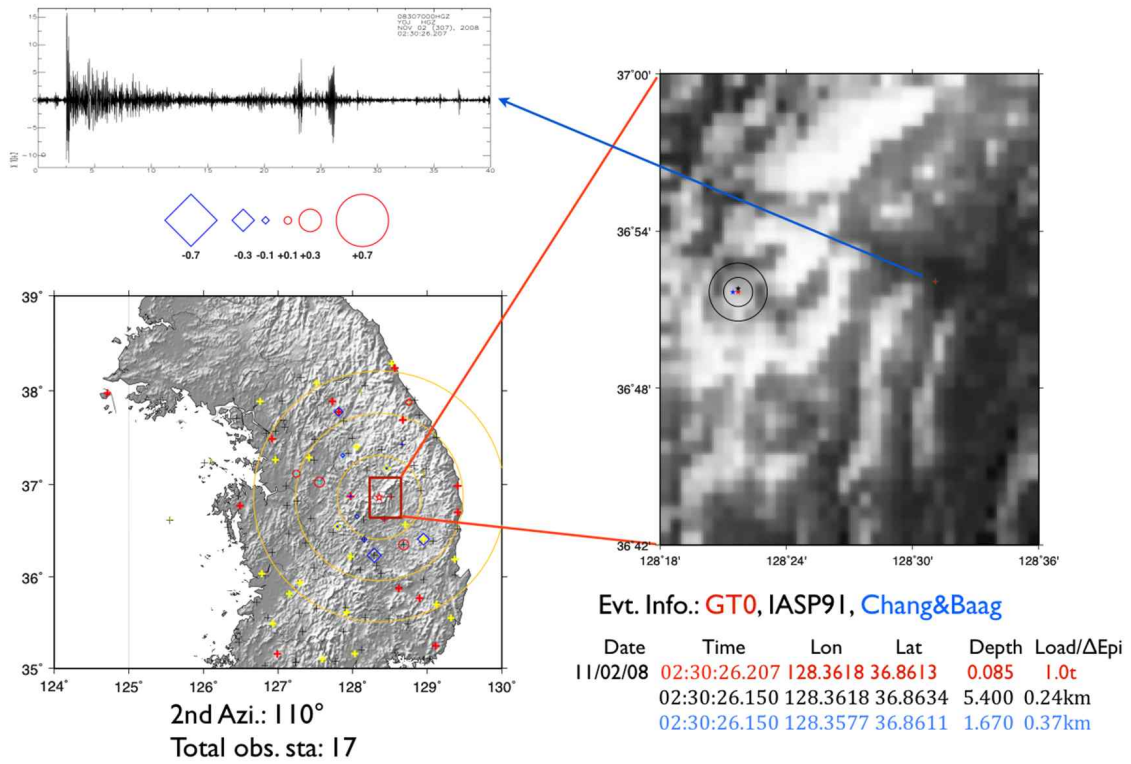


Figure 3.2.5 Inversion results for the shot #3 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

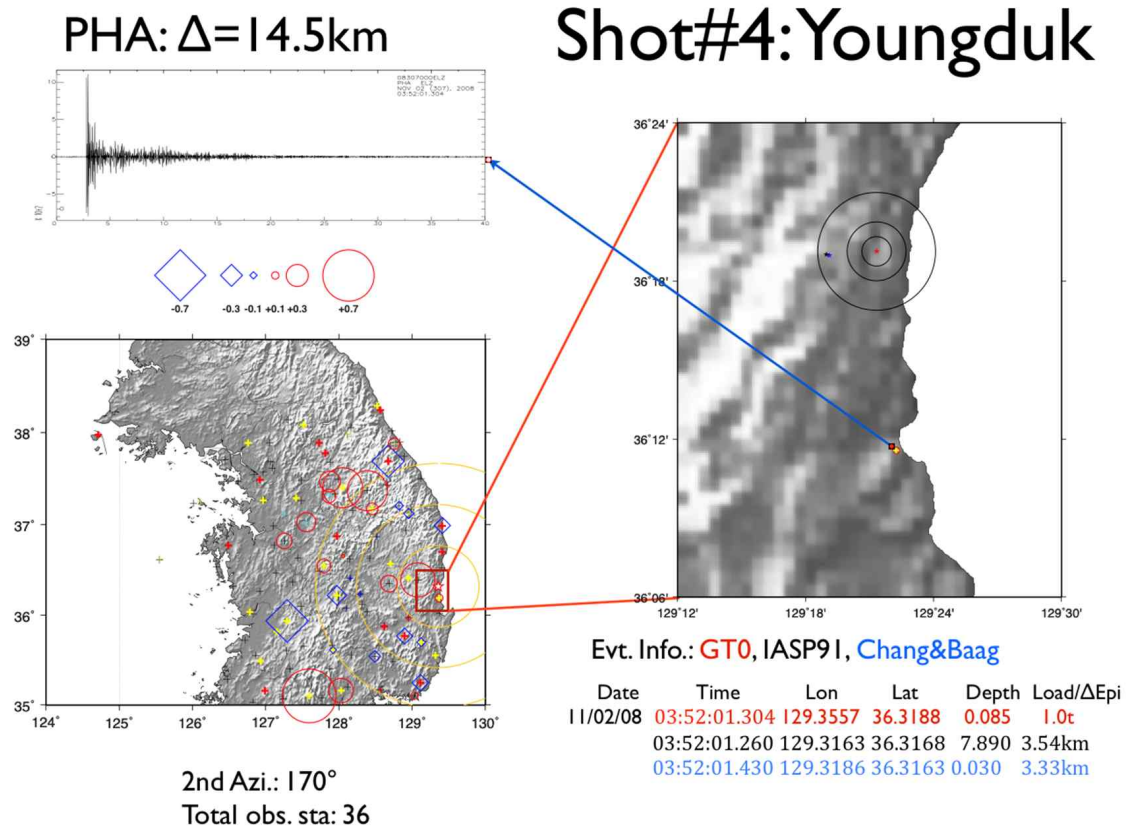


Figure 3.2.6 Inversion results for the shot #4 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

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

Shot#5: Chungju

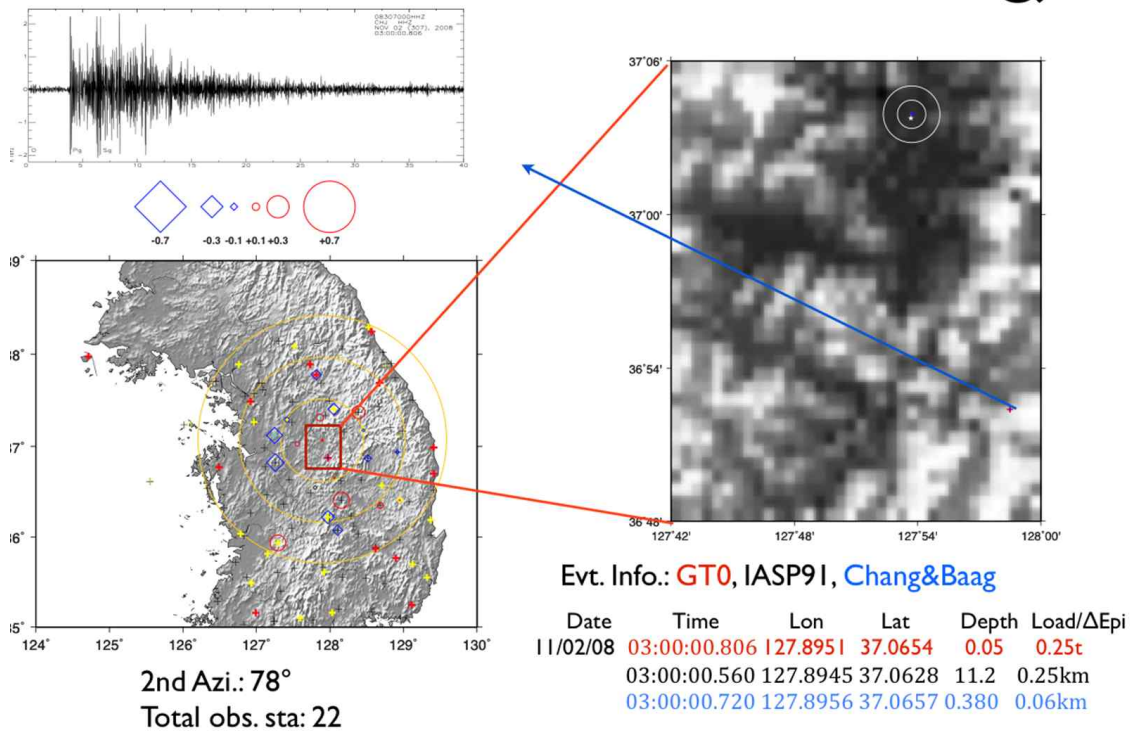


Figure 3.2.7 Inversion results for the shot #5 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

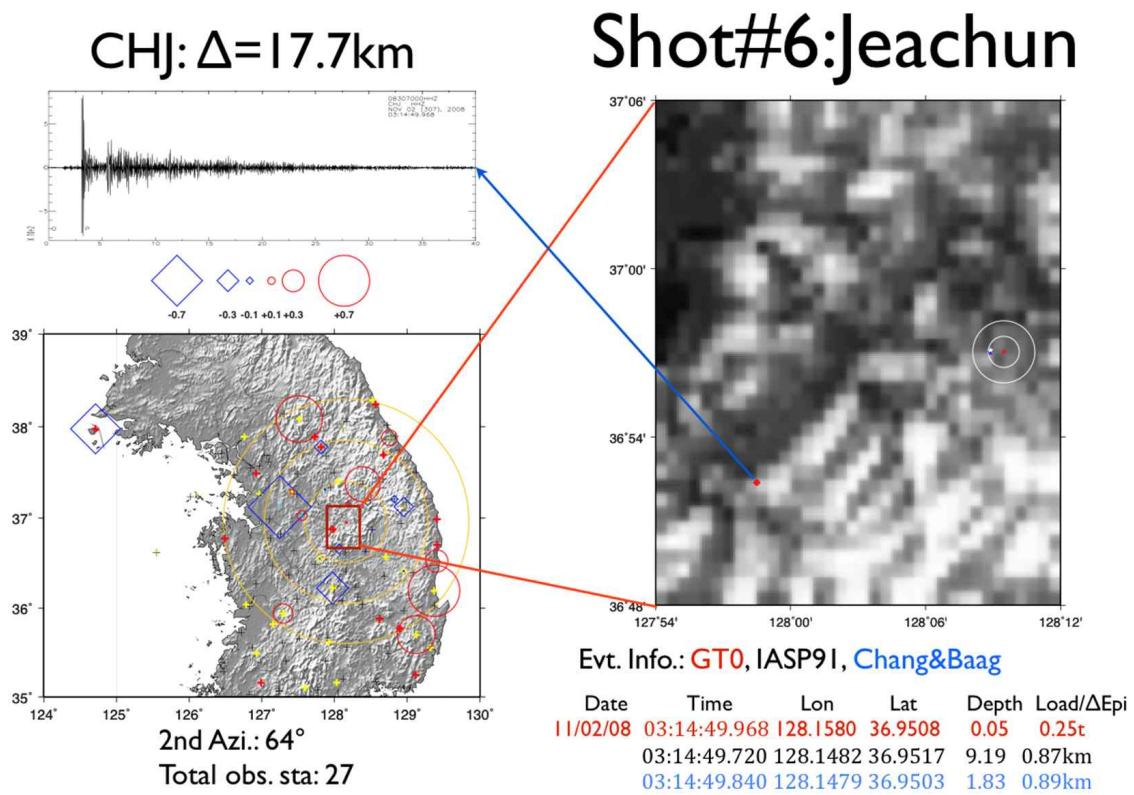


Figure 3.2.8 Inversion results for the shot #6 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

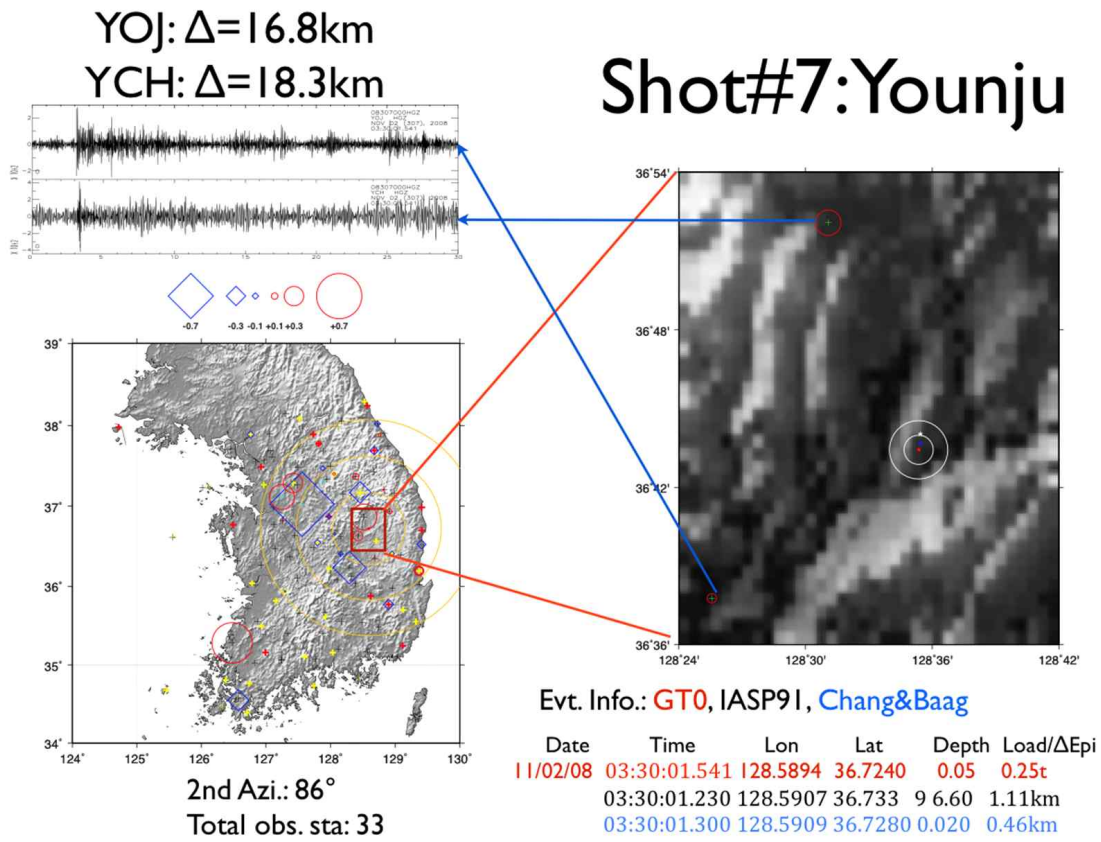


Figure 3.2.9 Inversion results for the shot #7 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

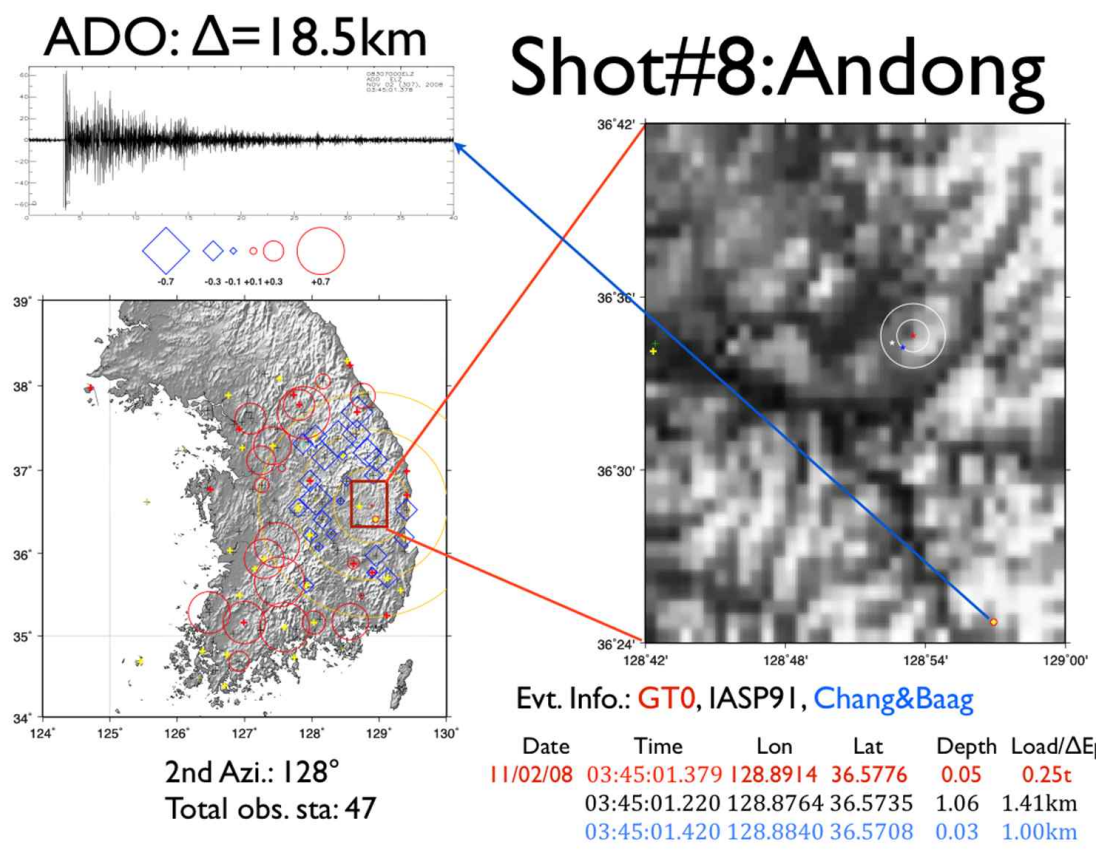


Figure 3.2.10 Inversion results for the shot #8 using HYPOELLIPSE with Chang and Baag (2006) and IASP91 model.

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° 를 보였다(Figure 3.2.3과 Table 3.2.4). 여주에서 수행된 발파 2는 34 개 관측소에서 관측이 되었고 secondary azimuthal gap은 42° 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° 와 170° 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 지진 관측망 내에서 수행이 되었기 때문에 관측된 관측소의 숫자는 4 개의 발파 모두 20 개 이상이었으며, 두 번째 방위각도 모두 130° 이내의 값을 보였다. KCRT-2008에서 수행한 발파 중에 발파 1과 4는 강화도와 영덕, 남한의 서북쪽 해안선과 중동부 해안선에서 수행된 것이다. 기상청 지진관측망은 울릉도의 해저 지진계를 제외하고 모든 관측소가 내륙 혹은 섬에 설치되어 있기 때문에 발파 1 과 발파 4는 첫 장에서 언급하였듯이 예시한 Bondár et al. (2004)의 전지구적 GT5 범위에는 들지 않았다.

다음 장에서는 KCRT-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: GT0 , determined with IASP91, and Chang & Baag ,						
Id	Date	Time	Lon	Lat	Depth	Load/ Δ epi.
1	Nov. 2, 2008	01:59:59.968	126.4531	37.6786	0.090	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
2nd Azi.: 194° Total obs. sta: 29						
2	Nov. 2, 2008	02:15:01.269	127.6078	37.2114	0.090	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
2nd Azi.: 42° Total obs. sta: 34						
3	Nov. 2, 2008	02:30:26.207	128.3618	36.8613	0.085	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
2nd Azi.: 110° Total obs. sta: 17						
4	Nov. 2, 2008	03:52:01.304	129.3557	36.3188	0.085	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
2nd Azi.: 170° Total obs. sta: 36						
5	Nov. 2, 2008	03:00:00.806	127.8951	37.0654	0.049	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
2nd Azi.: 78° Total obs. sta: 22						
6	Nov. 2, 2008	03:14:49.968	128.1580	36.9508	0.048	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
2nd Azi.: 64° Total obs. sta: 27						
7	Nov. 2, 2008	03:30:01.541	128.5894	36.7240	0.048	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
2nd Azi.: 86° Total obs. sta: 33						
8	Nov. 2, 2008	03:45:01.379	128.8914	36.5776	0.048	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
2nd Azi.: 128° Total obs. sta: 47						

3.2.2.5 KGT5 수립을 위한 대표본 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 지진관측망에 최적화된 KGT5 (Ground Truth 5 for Korea National Seismic Network)의 기준을 마련하는 것이다.

KCRT-2008 발파에 대한 평균 관측소 개수는 31 개로 만일 대표본 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 대표본을 무작위로 실시하였고, 그 결과 559,876 개의 재결정 자료를 560,000 개의 표본을 통하여 얻었다. 이 과정을 수행한 포트란 소스코드는 부록에 수록되어 있다.

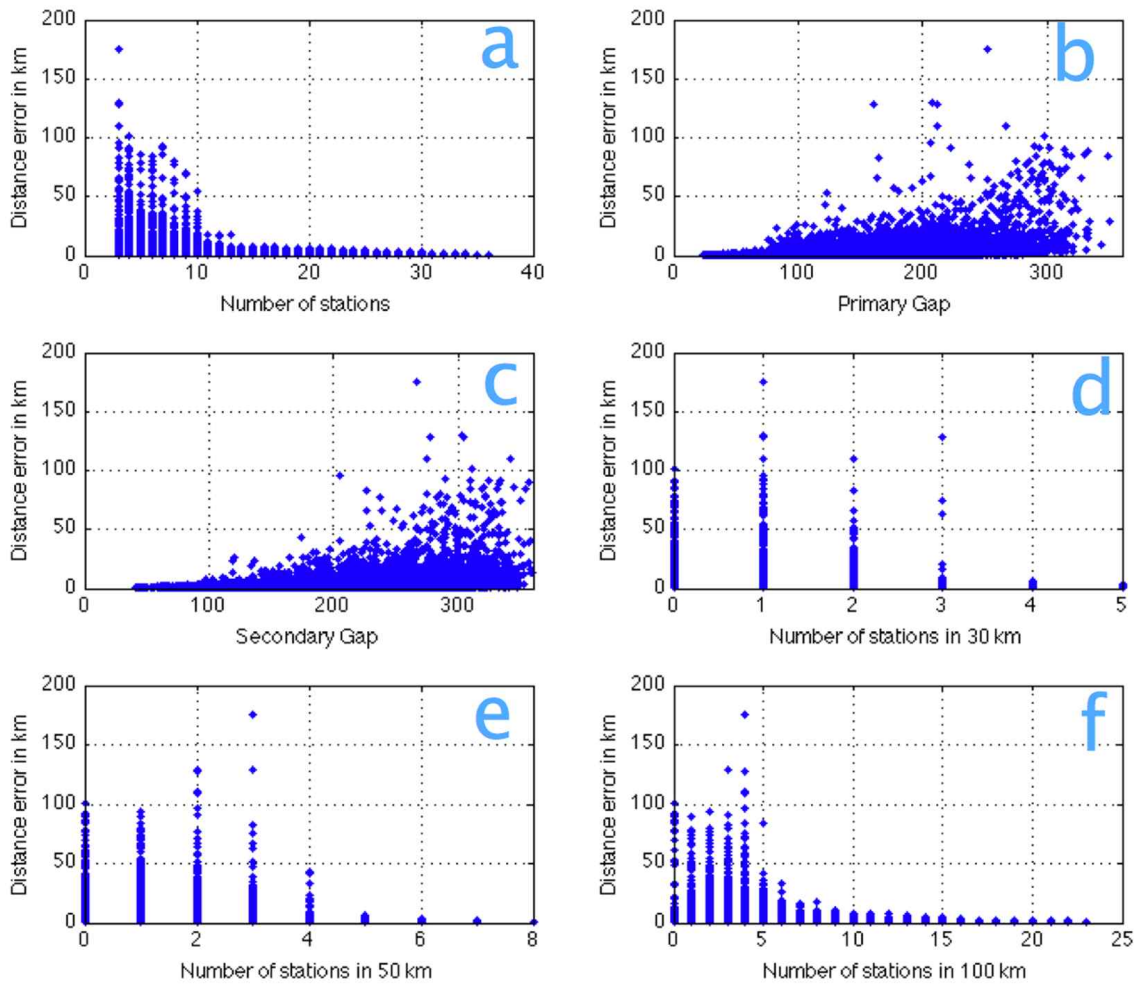


Figure 3.2.11 (a) Locating errors related with a number of stations, (b) primary azimuthal gaps, (c) secondary azimuthal gaps, (d) a number of stations within epicentral distances less than 30 km, (e) a number of stations within epicentral distances less than 50 km, and (f) a number of stations within 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 km이내에 존재하는 개수에 따른 진원 결정 오차도 분석하였는데(Figure 3.2.11.d-f), 30 km이내에 관측소가 5 개 이상 존재하는 경우는 azimuthal gap 분포와는 거의 무관하게 그 오차가 5 km이내임을 보여주고 있다(Figure 3.2.11.d).

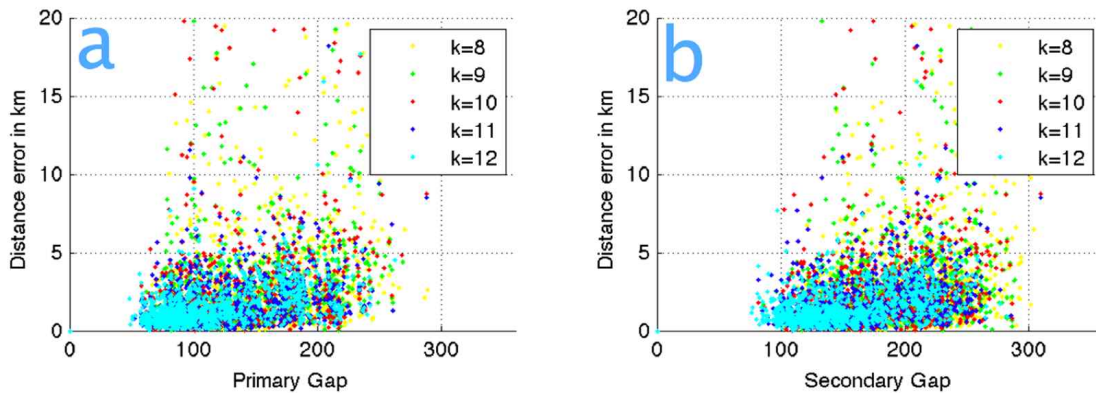


Figure 3.2.12 (a) Locating errors sorted with at least a station existing within epicentral distances less than 30 km and primary azimuthal gaps, and (b) secondary azimuthal gaps .

Figure 3.2.12는 관측된 지진관측소 중 최소한 1 개 이상의 지진관측소가 진앙거리 30 km이내에 존재하며 primary azimuthal gap(a)의 값과 secondary azimuthal gap의 값에 따른 진앙위치 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 km이내 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 km이하로 결정되는 경우를 확률론적 밀도 함수로 계산을 하였다(Figure 3.2.13과 Figure 3.2.14).

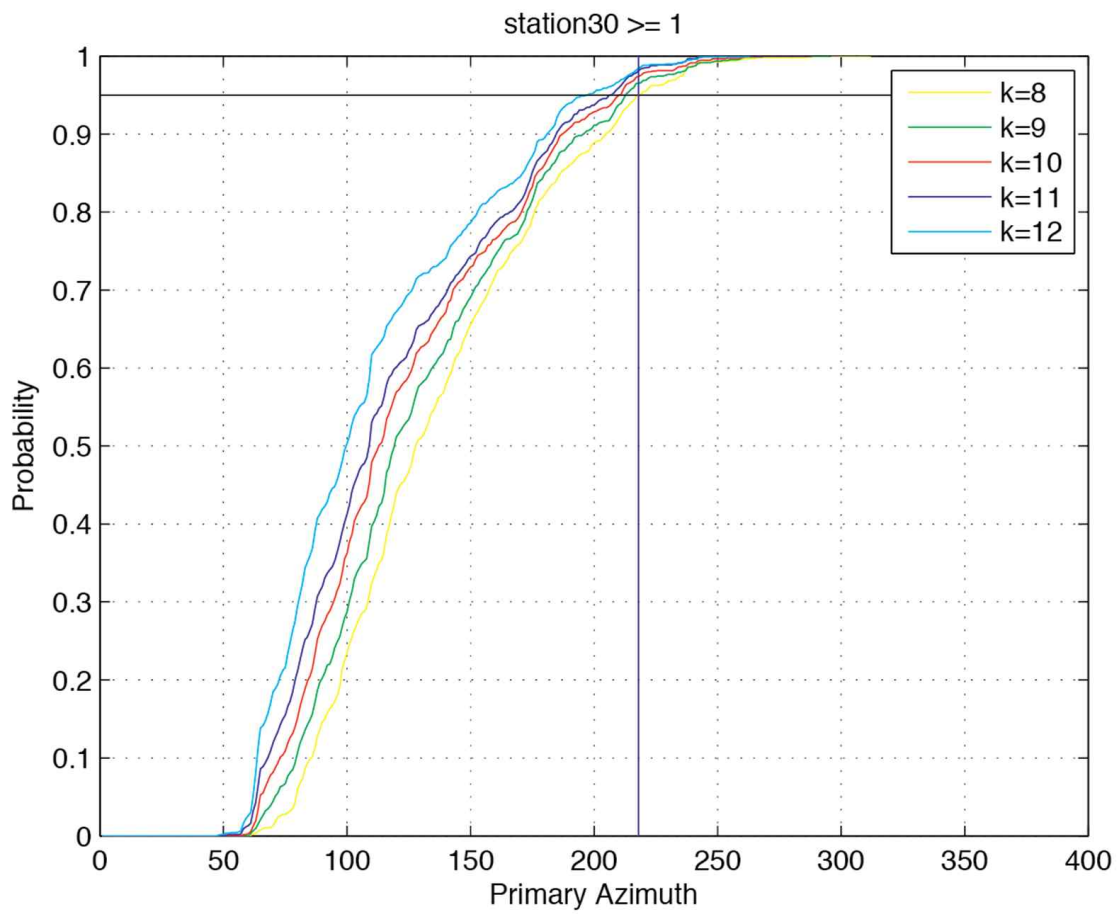


Figure 3.2.13 The relationship between primary azimuths and accumulated density function for the number of station is 8, 9, 10, 11, and 12 respectively.

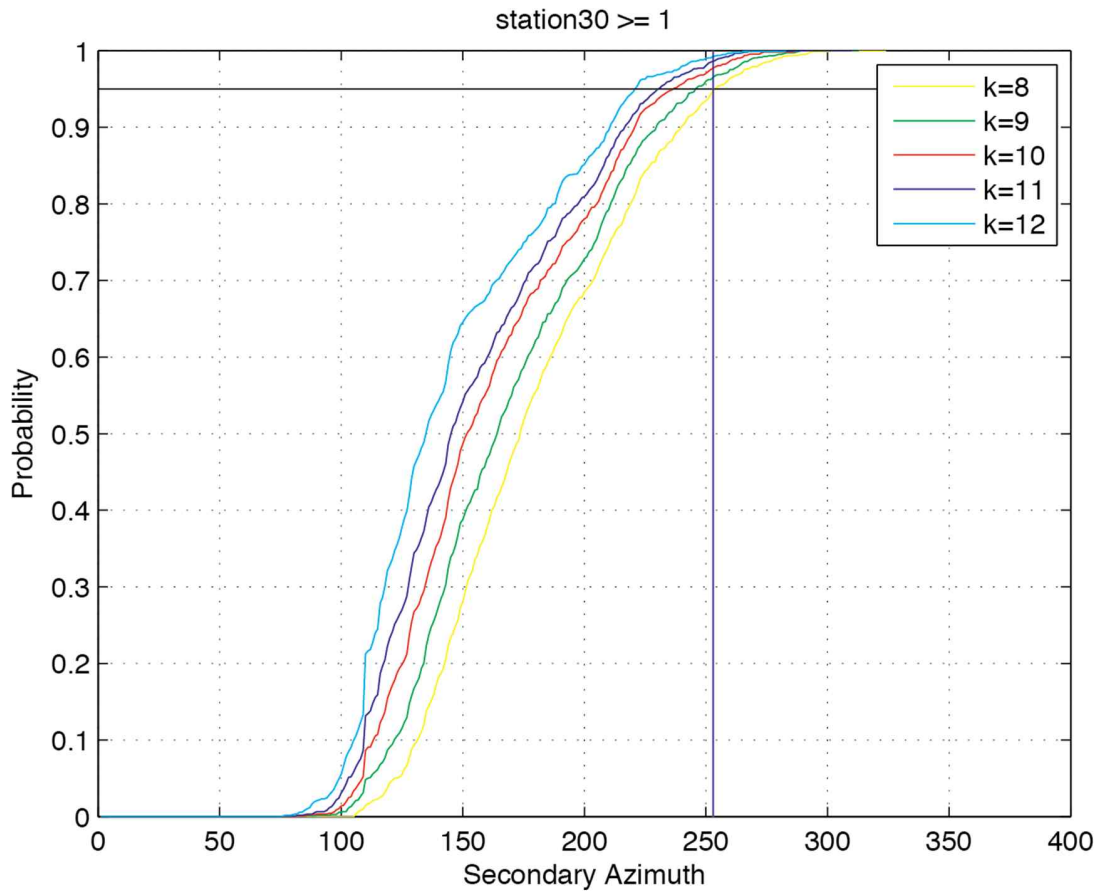


Figure 3.2.14 The relationship between secondary azimuths and accumulated density function for the number of station is 8, 9, 10, 11, and 12 respectively.

primary azimuthal gap에 대한 확률론적 밀도 함수가 218° 이하이고 총 관측소의 개수가 8 개 이상 그리고 최소 1 개 이상의 관측소가 진앙거리 30 km 이내에 존재하는 경우는 95%의 신뢰도를 가지고 결정된 진원의 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° 이하인 경우 역산된 지진원의 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° 이하이거나, secondary azimuthal gap이 253° 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 국가 지진관측망에 대한 GT5의 기준이라 정의할 수 있다(Figure 3.2.15).

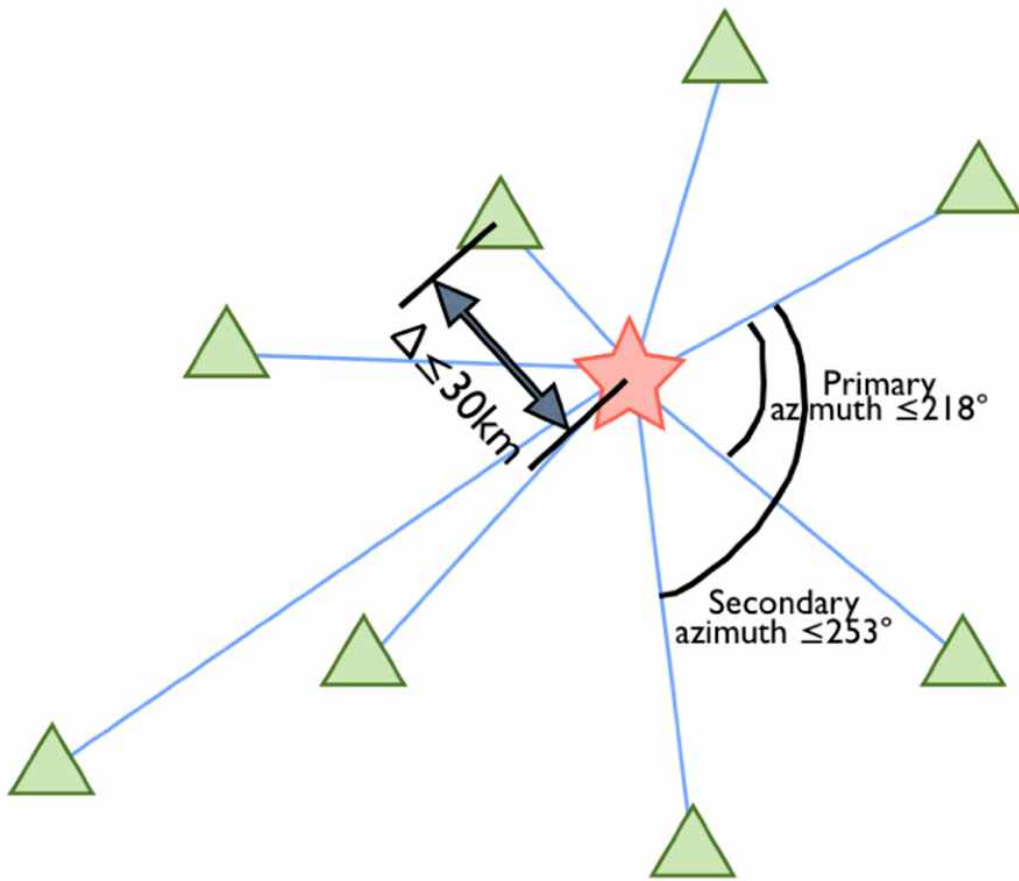


Figure 3.2.15 Summary cartoon of KGT5 criteria.

3.2.4 참고문헌

- Bondár, I., et al. (2001), Location calibration data for CTBT monitoring at the Prototype International Data Center, *Pure and Applied Geophysics*, 158(1-2), pp. 19-34.
- 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.
- Chang, S.-J., and C.-E. Baag (2006), Crustal structure in southern Korea from joint analysis of regional broadband waveforms and travel times, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96(3), pp. 856-870.
- Kennett, B. N. L., and E. R. Engdahl (1991), Travel times for global earthquake location and phase identification, *Geophysical Journal International*, 105, pp. 429-465.
- Kim, K. Y., et al. (2010), Seismic velocity structure along the KCRT-2008 profile using travelttime inversion of first arrivals, *Jigu-Muli-wa-Muli-Tamsa*, 13(2), pp. 153-158.
- Lahr, J. C. (1989), HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern, U.S. Geological Survey Open File Report, 89-116, pp. 92.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

번호	세부연구목표	달성내용	달성도 (%)
1	GT0 문헌조사, 기존자료 수집, 활용가능성 분석 및 목록 작성	기존 GT0 자료수집 및 진원위치 결정을 통한 GT0 자료로서의 활용 가능성 분석 및 목록 작성	100%
2	GT0 자료수집을 위한 이동식 임시 지진관측망 운영	7 개 지역에 대한 임시지진관측소 운영 및 GT0 자료 확보, 수집한 자료를 사용하여 GT0 활용가능성 분석	100%
3	국내 GT5 수준 이벤트 관측자료 선별 및 목록화	2004-2006년 국내발생지진 중 기상청 발표한 자료에 대해 KGT5 기준을 만족하는 지진의 선별 및 목록화	100%
4	국가지진관측망 관측력 평가	진원깊이의 정확성을 포함한 진원위치결정 정확성 평가의 기준 확립	100%

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구보고서는 당초 계획된 3년간의 연구 중 최초 1년의 연구결과이며 다음과 같은 관련분야에 활용할 수 있다.

- 기상청 지진관측소에 대한 관측력의 적절한 평가요소 및 운용 기준 제시
- 수집된 GT자료를 활용한 기상청 국가지진관측망의 진원요소(진앙위치, 진원깊이, 진원시간)결정 정확성 평가 지표 제시 및 운용기준 제시
- 신설되는 지진관측망의 최적부지 선정에 있어 근거를 제시

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

◎ 중동, 북미, 유럽, 서유라시아 지역에서 관측되는 지진원 위치에 대한 정확도 평가 기준

- 1) 최소 10 개의 관측소가 진앙거리 250 km 이내에 위치
- 2) primary azimuthal gap이 110°이내
- 3) secondary azimuthal gap이 160°이내
- 4) 최소한 1 개 이상의 지진관측소가 진앙거리 30 km 이내에 존재할 경우

Table 6.1 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° - 2.5°	110°	160°	-	10	1	GT5 _{95%}
Near Regional	2.5° - 10°		120°	10	-		GT20 _{90%}
Teleseismic	28° - 91°		120°	-	-		GT25 _{90%}

◎ 남아프리카 지역에서의 관측되는 지진원 위치에 대한 정확도 평가 기준

- 1) 최소 8 개 이상의 관측소가 진앙거리 215 km 이내에 위치
- 2) primary azimuthal gap이 202° 이하
- 3) secondary azimuthal gap이 79°이내

Table 6.2 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 _{95%}	11	[0, 2.2)	[0, 0.4)	202°	79
GT3 _{95%}	10	[0, 1.9)	[0, 1.8)		
GT3 _{95%}	9	[0, 2.0)	[0, 3.8)		
GT3 _{95%}	8	[0, 2.2)	[0, 5.7)		

제 7 장 연구개발결과의 보안등급

해당사항 없음.

첨부 연구개발결과의 보안등급 참조

제 8 장 국가과학기술종합정보 시스템에 등록된 연구 시설·장비현황

해당사항 없음.

[첨부 1]

연구개발결과 활용계획서

사업명	사업명	지진기술개발사업		
	세부사업명	지진·화산관측기술		
과제명	기상청 지진관측망에 관측된 지진원 위치 결정의 오차 평가 및 GT 수준 지진 카탈로그 작성			
연구기관	2009. 3. 1. ~ 2012. 2. 29.	연구책임자	김 광 희	
총연구기간	2011년. 3월. 1일. ~ 2012년. 2월. 29일. (12개월)			
총 연구비 (단위 : 천원)	정부출연금	민간부담금	합계	
	150,000		150,000	
기술분야	지진기술(B030308)			
참여기업				
공동연구기관				
위탁연구기관				
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)	1. 기업화 ()	2. 기술이전()	3. 후속연구추진(√)	4. 타사업에 활용()
	5. 선행 및 기초연구()	6. 기타목적활용 (교육, 연구)()	7. 활용중단(미활용) ()	8. 기타()
<p>기상업무연구개발사업 처리규정 제30조(연구개발결과의 보고) 제2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.</p> <p>붙임 : 1. 연구개발결과 활용계획서 1부. 2. 기술요약서 1부</p> <p style="text-align: right;">2012 년 3 월 20 일</p> <p style="text-align: right;">연구책임자 : 김 광 희 연구기관장 : 한국해양연구원장 강 정 극</p> <p style="text-align: right;">(Red Seal: 김광희, 한국해양연구원장)</p> <p>기상지진기술개발사업단장 귀하</p>				

[붙임1]

연구개발결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

- 기존 GT 자료 수집
 - 기존 GT 이벤트 자료수집 및 활용 가능성 검토
 - GT0 자료를 이용한 1차원 속도모델 검증
- 임시지진관측소 운영
 - 임시지진관측소 운영을 통한 GT 이벤트 자료 확보 및 활용가능성 검토
- 국내발생 지진 중 GT5 수준 이벤트 관측자료 선별 및 목록화
 - 2004-2006 국내발생 지진 중 KGT5 기준을 만족하는 지진선별 및 목록화
- 국가지진관측망 지진관측력 평가
 - 진원요소 결정의 정확성

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

해당사항 없음

나. 프로그램 등록목록

해당사항 없음

다. 노하우 내역

해당사항 없음

라. 발생품 및 시작품 내역

해당사항 없음

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적

학술지 명칭	제 목	게재연월일	호	발 행 기 관	국 명	SCI게재 여부
TECTONOPHYSICS	Seismicity, active faults, stress patterns, and rupture processes in the Hualien region, Taiwan, investigated using the 1990 Hualien earthquake sequence	2011년10월17일	511(1-2)	Elsevier	네덜란드	SCI
Journal of Asian Earth Sciences	Significant Contribution of the Shallow Crust to Seismic PKP Travel-Time Residual and Implications: An Example from Taiwan and Nearby Islands	2011년12월30일	42(1)	Elsevier	영국	SCI
계: 2건						SCI: 2건

○ 학술회의 발표 실적

학술회의 명칭	제 목	게재연월일	호	발 행 기 관	국 명
Seismological Society of America 2011	Crustal-Scale Seismogenic Structure of the Major Collision Boundary in the Southeastern Taiwan	2011년4월 13일		Seismological Society of America	미국
Seismological Society of America 2011	Relationship between DEM Resolutions and Site Classification in Korea	2011년04월14일		Seismological Society of America	미국
Asia Oceania Geosciences Society 2011	Seismogenic Structure along the Collision Boundary in the Southeastern Taiwan	2011년 8월12일		Asia Oceania Geosciences Society	대만
지질학회	영덕부근 미소지진 발생 위치재결정	2011년10월27일		지질학회	한국
계: 4건수					

3. 연구성과

본 연구사업은 기존 자료를 수집 및 분석하여 지진발생위치 의 정확성 분석을 목적으로 하는 기초연구 단계 연구사업으로서 기술이전 또는 기업화 해당사항은 없음.

기존 GT 이벤트 자료 및 임시지진관측소 운영을 통해 수집한 GT 이벤트 자료의 분석을 통해 GT0, GT1, GT3 자료 확보, GT0 자료를 활용하여 진원위치 결정시 가장 적합한 1차원 속도구조모델을 선별, 2004-2006년 국내발생지진을 분석 KGT5 기준을 만족하는 지진을 선별 및 목록화, 국가지진관측망 관측력 평가요소 제시 등에 크게 기여함.

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해연도 활용계획

- 수집된 GT0, GT1, GT3 자료를 활용하여 지역적 대표 1차원 속도구조모델 검증 및 제시
- GT자료를 활용하여 기상청 국가지진관측망의 진원요소(진앙위치, 진원깊이, 진원시간)결정 정확성 평가 지표 제시, 운용기준 제시 및 그 적용 연구를 수행
- 신설되는 지진관측망의 최적부지 선정에 있어 근거를 제시

나. 활용방법

- 진원위치 결정시 선별된 속도구조모델을 사용하여 보다 정확한 진원위치 결정
- 기상청 지진관측에 적절한 평가요소 및 운용 기준을 제시할 예정

4. 기대효과

- 기상청 국가지진관측망에 최적화된 GT0, GT1, GT3, 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 등의 중요 기초 자료 제공

5. 문제점 및 건의사항(연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점을 기재)

전국적 분포의 GT0 이벤트 자료 수집 및 목록 작성을 위해 지속적인 후속연구를 추진하여야 함.

[붙임2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

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

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	CATER 2011-5310			
과제명	기상청 지진관측망에 관측된 지진원 위치 결정의 오차 평가 및 GT 수준 지진 카탈로그 작성			
사업명	지진기술개발사업			
세부사업명	지진·화산관측기술			
연구기관	한국해양연구원	기관유형	정부출연연구기관	
참여기관(기업)				
총연구기간	2011년 3월 1일 ~ 2012년 2월 29일			
총연구비	정부(150,000)천원	민간()천원	합계(150,000)천원	
연구책임자 1	성명	김 광 희	주민번호	[REDACTED]
	근무기관 부서	해양방위연구센터	E-mail	[REDACTED]
	직위/직급	[REDACTED]	전화번호	[REDACTED]
연구책임자 2	성명		주민번호	
	근무기관 부서		E-mail	
	직위/직급		전화번호	
실무연락책임자	성명	김 남 훈	소속/부서	한국해양연구원 /연구계약1팀
	직위/직급	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	전화번호	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
	주소	[REDACTED]		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

- 지진 발생시 지진의 발생시간과 발생위치는 가장 기초적인 정보이면서 지진연구에 있어 가장 중요한 자료임
- 정확한 지진원의 위치가 밝혀진 자료에 대하여 Ground Truth(GT) 라는 개념을 사용하며, GT 이벤트 분석을 통해 지진발생위치 결정의 정확성 및 신뢰성 평가 가능
- 지진발생위치 결정에는 많은 오차요인이 있으며, 가장 큰 오차 요인으로는 사용되는 1차원 속도구조모델의 부정확성, 도착시간의 측정 오류 등이 있음
- GT0 이벤트 자료를 분석함으로써 지역적으로 대표할 수 있는 1차원 속도구조모델 선별 가능
- GT0, GT1 GT3등의 GT 이벤트 자료를 분석함으로써 국가지진관측망의 신뢰도 및 정확성 검증 가능

<기술적 특징>

- (1) 비교적 정확한 인공지진의 발생위치와 발생시간 수집가능
- (2) 지진파의 도착시간 오류 보정
- (3) 다양한 속도구조모델을 비교하여 가장 적합한 지역적 대표 속도구조모델 선별가능

[용도·이용분야]

- (1) GT0 이벤트 자료제공
- (2) 지역적 대표 속도구조모델 제시
- (3) 국가지진관측망의 정확성 평가 운용기준 제시

- * 기술이전시 선행요건 : 기술이전을 위한 사전준비사항(필수 설비 및 장비, 전문가 확보 등)을 기술
- * 현업화예상시기 : 기술을 활용한 대표적인 제품이 최초로 생산이 시작되는 시기를 기재

■ 기술의 개발단계 및 수준

[기술의 완성도] (1개만 선택(✓호 표시)하여 주십시오)

	① 기초, 탐색연구단계 : 특정용도를 위해 필요한 신 지식을 얻거나 기술적 가능성을 탐색하는 단계
	② 응용연구단계 : 기술적 가능성의 실증, 잠재적 실용화 가능성의 입증 등 실험실적 확인 단계
✓	③ 개발연구단계 : Prototype의 제작, Pilot Plant Test 등을 행하는 단계
	④ 기업화 준비단계 : 기업화에 필요한 양산화 기술 및 주변 기술까지도 확보하는 단계
	⑤ 상품화 완료단계

[기술의 수명주기] (1개만 선택(✓호 표시)하여 주십시오)

	① 기술개념 정립기 : 기술의 잠재적 가능성만 있는 단계
	② 기술실험기 : 기술개발에 성공했으나 아직 실용성, 경제성 등이 확실치 않은 단계
	③ 기술적용 시작기: 최초의 기술개발국에서만 활용되고 있는 단계
✓	④ 기술적용 성장기: 기술개발국 및 일부 선진국에서 활용되고 있는단계
	⑤ 기술적용 성숙기: 선진국사이에서 활발한 기술이전이 일어나며, 기술의 표준화가 되어가는 단계
	⑥ 기술적용 쇠퇴기: 선진국에서 개도국으로 기술이전이 활발하게 일어나고, 선진국에서는 기술의 가치가 저하되나, 개도국에서는 아직 시장의 가치가 높은 기술

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개만 선택(✓호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
✓	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보된 기술

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[기술을 도출한 과제현황]

과제명			
사업명			
세부사업명			
연구기관		기관유형	
참여기관(기업)			
총연구기간			
총연구비	합계 : ()백만원 - 정부 : ()백만원 민간 : ()백만원		
연구책임자	소속		성명
	전화번호		E-mail
연구개발 주요내용			

연구개발결과의 보안 등급
 (「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조)

보안등급 분류		일반과제 <input checked="" type="checkbox"/> 보안과제 <input type="checkbox"/> (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> <ul style="list-style-type: none"> 가. 세계 초일류 기술제품의 개발과 관련되는 연구개발과제 나. 외국에서 기술이전을 거부하여 국산화를 추진 중인 기술 또는 미래핵심기술로서 보호의 필요성이 인정되는 연구개발과제 다. 「산업기술의 유출방지 및 보호에 관한 법률」 제2조제2호의 국가핵심기술과 관련된 연구개발과제 라. 「대외무역법」 제19조제1항 및 같은 법 시행령 제32조의2에 따른 수출허가 등의 제한이 필요한 기술과 관련된 연구개발과제 마. 그 밖에 중앙행정기관의 장이 보안과제로 분류되어야 할 사유가 있다고 인정하는 과제

※ 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)

부록 초동 P파 자료의 재표본 설정을 위한 프로그램 코드

```

program set_combi
C -----
C re-sampling KMA.ari...
C      coded by Y. Park [March 2011]
C -----
      character*70 line(300),arg(7),in_f,out_f,shot,ari_f
      real evla,evlo,osec,otsec,etsec,dosec
      integer yr,mon,day,hr,min,isec,ilatd,ilatm,ilond,ilonm,idep,
+          gap1,gap2,tsta,ohr,omin,q(300),icnk
      real elat,elon,dep,sec,dist_min,dist_err,cnk
      logical more
      integer X(300),N
      integer SEED(3),iseed
      common/RANDOM/SEED
      character*5 stnm(300),stnm1(300)
      integer istdist(300),istaz(300),iy(300)
      real stdist(300),staz(300),stdist1(300),staz1(300),staz2(300)
c
      if(iargc().ne.7) then
          print *,'USAGE: set_combi KMA.ari.org shot# evla evlo hr min sec'
          stop
      endif
      call getarg(1,arg(1))
      read(arg(1),*) in_f
      call getarg(2,arg(2))
      read(arg(2),*) shot
      call getarg(3,arg(3))
      read(arg(3),*) evla
      call getarg(4,arg(4))
      read(arg(4),*) evlo
      call getarg(5,arg(5))
      read(arg(5),*) ohr
      call getarg(6,arg(6))
      read(arg(6),*) omin
      call getarg(7,arg(7))
      read(arg(7),*) osec
      otsec = ohr*3600. + omin*60. + osec
C
      open(11,file=in_f,status='old')
      i_shot=lenb(shot)
      shot(1:i_shot+4)=shot(1:i_shot)//'.arc'
      open(12,file='combi_hypol.log',status='unknown')
      write(12,456)
456 format('nsta Az1 Az2  evla  evlo  dep
+ dist_err ot_err #<30 <50 <100 <150')

```

```

C
  i=0
100  i=i+1
      read(11,111,end=200) line(i)
      goto 100
200  npt=i-1
111  format(a70)
311  format(i4,4i2,i4,i2,1x,i4,i3,1x,i4,i5,2x,2i3)

351  format('# sta: ',i3,' Ssta: ',i3,' iter: ',i3)
352  format('##### nsta: ',i3)
357  format("#----- can't determine location")
c
c  nsta(# of stations)
      nsta=0;i=0;i2=0
      j=0;k=0
      do nsta=4,npt
c      do nsta=27,27
          call combin(npt,nsta,cnk)
          icnk = int(cnk)
c          write(6,*) 'icnk: ',icnk
          if(icnk.gt.1000) then
              i_iter=int(icnk*0.1) ! take 10% of all combi.
          elseif (icnk.gt.500.and.icnk.le.1000) then
              i_iter=int(icnk*0.5) ! take 50% of all combi.
          else
              i_iter=icnk
          endif
444  format("### ",i2,"C",i2,3x,"i_iter:",i3)
      write(6,444) npt,nsta,i_iter
      do i=1,i_iter
          k=k+1
          if(i.eq.1) then
              iseed = i + omin
          else
              iseed = i + min
          endif
          write(6,*) 'iseed:',iseed,' min:',min
          SEED(1) = MOD((57*iseed+1), 256)
          SEED(2) = MOD((57*SEED(1)+1), 256)
          SEED(3) = MOD((57*SEED(2)+1), 256)
c
          CALL RPERM(X,npt)
          open(13,file='KMA.ari',status='unknown')
          do j=1,nsta
              write(13,111) line(X(j))
          enddo

```

```

        close(13)
C--- run hypoel....
        call system('hypoel < KMA.in')
        open(14,file=shot(1:i_shot+4),status='old')
        read(14,311,err=330) yr,mon,day,hr,min,isec,
+         ilatd,ilatm,ilond,ilonm,idep,tsta,gapl
        sec = real(isec)*0.01
        etsec = hr*3600. + min*60. + sec
        dosec = etsec - otsec
        elat = real(ilatd) + (real(ilatm)*0.01/60.)
        elon = real(ilond) + (real(ilonm)*0.01/60.)
        dep = real(idep)*0.01
        write(6,*) '##### ',elat,elon
        call gcarc(evla,evlo,elat,elon,dist_err)
c read out sta. info.....
        l=0
c300      l=l+1
        do l=1,nsta
            read(14,365) stnm(l),istdist(l),istaz(l)
            stdist(l)=real(istdist(l))*0.1
            staz(l)=real(istaz(l))
            iy(l)=1
c          write(6,*) staz(l),iy(l)
c          goto 300
c.....
c320      lnpt=l-1
        enddo
            lnpt=nsta
        call SSORT (staz,iy,lnpt,1)
            k1=0
        i30=0;i50=0;i100=0;i150=0
            do k1=1,lnpt
                stnm1(k1)=stnm(iy(k1))
                stdist1(k1)=stdist(iy(k1))
                if (stdist1(k1).le.150) i150 = i150+1
                if (stdist1(k1).le.100) i100 = i100+1
                if (stdist1(k1).le.50) i50 = i50+1
                if (stdist1(k1).le.30) i30 = i30+1
            enddo
C compute 2nd az...
            do k1=1,lnpt
                if (k1.lt.lnpt-1) then
                    staz2(k1) = staz(k1)-staz(k1+2)
                elseif (k1.eq.lnpt-1) then
                    staz2(k1) = 360. - (staz(1)-staz(k1))
                elseif (k1.eq.lnpt) then
                    staz2(k1) = 360. - (staz(2)-staz(k1))

```

```

        endif
    enddo
c Search max. 2nd Azi...
    az2_max=0.
    do k1=1,lnpt
        if(staz2(K1).gt.az2_max) then
            az2_max = staz2(k1)
        endif
    enddo
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
    if (elat.ne.0.0.and.elon.ne.0.0) then
        write(12,355) tsta,gap1,az2_max,
+   elat,elon,dep,dist_err,dosec,i30,i50,i100,i150
    else
        write(12,357)
    endif
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
355  format(i3,1x,i3,1x,f4.0,1x,
+   f7.4,1x,f8.4,1x,f5.2,1x,f9.4,1x,f5.2,1x,
+   4(1x,i3))
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
        goto 350
330  write(12,*) "### can't determine location"
350  close(14)
        enddo
    enddo
365  format(a4,20x,i4,i3)
    close(12)
    write(6,*) 'total # of comb: ',k
    stop
    end

cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
    integer function lenb(string)
c finds index of last nonblank character in string
    character*(*) string
    integer i,n
    n=len(string)
    do 10 i=n,1,-1
        if(string(i:i).ne.' ')then
            lenb=i
            return
        endif
    10 continue
    lenb=0
    return
    end

```

```
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
```

```
subroutine gcarc(lat1,lon1,lat2,lon2,gcarc_km)
real lon1,lat1,lon2,lat2,gcarc_km,gcarc_deg,gcarc1
real lo1,la1,lo2,la2
```

```
C
```

```
pi=4*atan(1.0)
lo1=lon1*pi/180.
la1=lat1*pi/180.
lo2=lon2*pi/180.
la2=lat2*pi/180.
```

```
c
```

```
Dlamda=lo1-lo2
A=sqrt( (cos(la2)*sin(Dlamda))**2 +
+(cos(la1)*sin(la2)-sin(la1)*cos(la2)*cos(Dlamda))**2)
B=sin(la1)*sin(la2)+cos(la1)*cos(la2)*cos(Dlamda)
gcarc1=atan2(A,B)
gcarc_deg=gcarc1*180./pi
gcarc_km=gcarc_deg*111.19
```

```
c
```

```
write(6,*) '### GCARC_KM: ',gcarc_km
return
end
```

```
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
```

```
subroutine combin ( n, k, cnk )
```

```
!
```

```
!*****
```

```
!
```

```
!! COMBIN computes the combinatorial coefficient C(N,K).
```

```
!
```

```
!
```

```
! Method:
```

```
!
```

```
! Real arithmetic is used, and C(N,K) is computed directly, via
```

```
! Gamma functions, rather than recursively.
```

```
!
```

```
! Definition:
```

```
!
```

```
! C(N,K) is the number of distinct combinations of K objects
```

```
! chosen from a set of N distinct objects. A combination is
```

```
! like a set, in that order does not matter.
```

```
!
```

```
! Examples:
```

```
!
```

```
! The number of combinations of 2 things chosen from 5 is 10.
```

```
!
```

```
! C(5,2) = ( 5 * 4 * 3 * 2 * 1 ) / ( ( 3 * 2 * 1 ) * ( 2 * 1 ) ) = 10.
```

```
!
```

```
! The actual combinations may be represented as:
```

```

!
!   (1,2), (1,3), (1,4), (1,5), (2,3),
!   (2,4), (2,5), (3,4), (3,5), (4,5).
!
! Formula:
!
!    $C(N,K) = N! / ( (N-K)! * K! )$ 
!
! Modified:
!
!   16 June 1999
!
! Author:
!
!   John Burkardt
!
! Parameters:
!
!   Input, integer N, the value of N.
!
!   Input, integer K, the value of K.
!
!   Output, real CNK, the value of C(N,K)
!
!
!   implicit none
!
!   real arg
!   real cnk
!   real fack
!   real facn
!   real facnmk
!   real gamma_log
!   integer k
!   integer n
!
!   if ( n < 0 ) then
!       cnk = 0.0E+00
!   else if ( k == 0 ) then
!       cnk = 1.0E+00
!   else if ( k == 1 ) then
!       cnk = real ( n )
!   else if ( k > 1 .and. k < n-1 ) then
!       arg = real ( n + 1 )
!       facn = gamma_log ( arg )
!       arg = real ( k + 1 )
!       fack = gamma_log ( arg )
!       arg = real ( n - k + 1 )

```

```

    facnmk = gamma_log ( arg )
    cnk = anint ( exp ( facn - fact - facnmk ) )
    else if ( k == n-1 ) then
        cnk = real ( n )
    else if ( k == n ) then
        cnk = 1.0E+00
    else
        cnk = 0.0E+00
    end if
    return
end

```

```

!*****

```

```

    function gamma_log ( x )

```

```

!

```

```

!*****

```

```

!

```

```

!! GAMMA_LOG calculates the natural logarithm of GAMMA ( X ) for positive X.

```

```

!

```

```

!

```

```

! Discussion:

```

```

!

```

```

! Computation is based on an algorithm outlined in references 1 and 2.

```

```

! The program uses rational functions that theoretically approximate

```

```

! LOG(GAMMA(X)) to at least 18 significant decimal digits. The

```

```

! approximation for X > 12 is from reference 3, while approximations

```

```

! for X < 12.0E+00 are similar to those in reference 1, but are unpublished.

```

```

! The accuracy achieved depends on the arithmetic system, the compiler,

```

```

! intrinsic functions, and proper selection of the machine-dependent

```

```

! constants.

```

```

!

```

```

! Modified:

```

```

!

```

```

! 16 June 1999

```

```

!

```

```

! Authors:

```

```

!

```

```

! W. J. Cody and L. Stoltz

```

```

! Argonne National Laboratory

```

```

!

```

```

! References:

```

```

!

```

```

! # 1)

```

```

! W. J. Cody and K. E. Hillstrom,

```

```

! Chebyshev Approximations for the Natural Logarithm of the Gamma Function,

```

```

! Math. Comp.

```

```

! Volume 21, 1967, pages 198-203.

```



```

!
! # 2)
! K. E. Hillstrom,
! ANL/AMD Program ANLC366S, DGAMMA/DLGAMA,
! May 1969.
!
! # 3)
! Hart, Et. Al.,
! Computer Approximations,
! Wiley and sons, New York, 1968.
!
! Parameters:
!
! Input, real X, the argument of the Gamma function. X must be positive.
!
! Output, real GAMMA_LOG, the logarithm of the Gamma function of X.
! If X <= 0.0, or if overflow would occur, the program returns the
! largest representable floating point number.
!
!*****
!
! Explanation of machine-dependent constants
!
! BETA - radix for the floating-point representation.
!
! MAXEXP - the smallest positive power of BETA that overflows.
!
! XBIG - largest argument for which LN(GAMMA(X)) is representable
! in the machine, i.e., the solution to the equation
! LN(GAMMA(XBIG)) = BETA**MAXEXP.
!
! FRTBIG - Rough estimate of the fourth root of XBIG
!
! Approximate values for some important machines are:
!
!           BETA      MAXEXP      XBIG
!
! CRAY-1      (S.P.)      2          8191      9.62E+2461
! Cyber 180/855
! under NOS   (S.P.)      2          1070      1.72E+319
! IEEE (IBM/XT,
! SUN, etc.) (S.P.)      2          128       4.08E+36
! IEEE (IBM/XT,
! SUN, etc.) (D.P.)      2          1024      2.55D+305
! IBM 3033    (D.P.)      16         63       4.29D+73
! VAX D-Format (D.P.)    2          127       2.05D+36

```

```

! VAX G-Format (D.P.)      2      1023      1.28D+305
!
!
!          FRTBIG
!
! CRAY-1      (S.P.)  3.13E+615
! Cyber 180/855
!   under NOS (S.P.)  6.44E+79
! IEEE (IBM/XT,
!   SUN, etc.) (S.P.)  1.42E+9
! IEEE (IBM/XT,
!   SUN, etc.) (D.P.)  2.25D+76
! IBM 3033    (D.P.)  2.56D+18
! VAX D-Format (D.P.)  1.20D+9
! VAX G-Format (D.P.)  1.89D+76
!
!   implicit none
!
!   real, parameter, dimension ( 7 ) :: c = (/
&      -1.910444077728E-03,
&      8.4171387781295E-04,
&      -5.952379913043012E-04,
&      7.93650793500350248E-04,
&      -2.77777777777681622553E-03,
&      8.3333333333333331554247E-02,
&      5.7083835261E-03 /)
!
!   real corr
!   real, parameter :: d1 = - 5.772156649015328605195174E-01
!   real, parameter :: d2 =  4.227843350984671393993777E-01
!   real, parameter :: d4 =  1.791759469228055000094023E+00
!
!   integer i
!
!   real, parameter :: frtbig = 1.42E+09
!
!   real gamma_log
!
!   real, parameter, dimension ( 8 ) :: p1 = (/
&  4.945235359296727046734888e+00,
&  2.018112620856775083915565e+02,
&  2.290838373831346393026739e+03,
&  1.131967205903380828685045e+04,
&  2.855724635671635335736389e+04,
&  3.848496228443793359990269e+04,
&  2.637748787624195437963534e+04,
&  7.225813979700288197698961e+03 /)
!
!   real, parameter, dimension ( 8 ) :: p2 = (/
&  4.974607845568932035012064e+00,
&      5.424138599891070494101986e+02,
&      1.550693864978364947665077e+04,
&      1.847932904445632425417223e+05,

```

```

&      1.088204769468828767498470e+06,
&      3.338152967987029735917223e+06,
&      5.106661678927352456275255e+06,
&      3.074109054850539556250927e+06 /)
real, parameter, dimension ( 8 ) :: p4 = (/
&      1.474502166059939948905062e+04,
&      2.426813369486704502836312e+06,
&      1.214755574045093227939592e+08,
&      2.663432449630976949898078e+09,
&      2.940378956634553899906876e+10,
&      1.702665737765398868392998e+11,
&      4.926125793377430887588120e+11,
&      5.606251856223951465078242e+11 /)
real, parameter :: pnt68 = 0.6796875E+00
real, parameter, dimension ( 8 ) :: q1 = (/
&      6.748212550303777196073036e+01,
&      1.113332393857199323513008e+03,
&      7.738757056935398733233834e+03,
&      2.763987074403340708898585e+04,
&      5.499310206226157329794414e+04,
&      6.161122180066002127833352e+04,
&      3.635127591501940507276287e+04,
&      8.785536302431013170870835e+03 /)
real, parameter, dimension ( 8 ) :: q2 = (/
&      1.830328399370592604055942e+02,
&      7.765049321445005871323047e+03,
&      1.331903827966074194402448e+05,
&      1.136705821321969608938755e+06,
&      5.267964117437946917577538e+06,
&      1.346701454311101692290052e+07,
&      1.782736530353274213975932e+07,
&      9.533095591844353613395747e+06 /)
real, parameter, dimension ( 8 ) :: q4 = (/
&      2.690530175870899333379843e+03,
&      6.393885654300092398984238e+05,
&      4.135599930241388052042842e+07,
&      1.120872109616147941376570e+09,
&      1.488613728678813811542398e+10,
&      1.016803586272438228077304e+11,
&      3.417476345507377132798597e+11,
&      4.463158187419713286462081e+11 /)
real res
real, parameter :: sqrtpi = 0.9189385332046727417803297E+00
real x
real, parameter :: xbig = 4.08E+36
real xden
real xml

```

```

real xm2
real xm4
real xnum
real xsq
!
! Return immediately if the argument is out of range.
!
if ( x <= 0.0E+00 .or. x > xbig ) then
    gamma_log = huge ( gamma_log )
    return
end if
if ( x <= epsilon ( x ) ) then
    res = - log ( x )
else if ( x <= 1.5E+00 ) then
    if ( x < pnt68 ) then
        corr = - log ( x )
        xm1 = x
    else
        corr = 0.0E+00
        xm1 = ( x - 0.5E+00 ) - 0.5E+00
    end if
    if ( x <= 0.5E+00 .or. x >= pnt68 ) then
        xden = 1.0E+00
        xnum = 0.0E+00
        do i = 1, 8
            xnum = xnum * xm1 + p1(i)
            xden = xden * xm1 + q1(i)
        end do
        res = corr + ( xm1 * ( d1 + xm1 * ( xnum / xden ) ) )
    else
        xm2 = ( x - 0.5E+00 ) - 0.5E+00
        xden = 1.0E+00
        xnum = 0.0E+00
        do i = 1, 8
            xnum = xnum * xm2 + p2(i)
            xden = xden * xm2 + q2(i)
        end do
        res = corr + xm2 * ( d2 + xm2 * ( xnum / xden ) )
    end if
else if ( x <= 4.0E+00 ) then
    xm2 = x - 2.0E+00
    xden = 1.0E+00
    xnum = 0.0E+00
    do i = 1, 8
        xnum = xnum * xm2 + p2(i)
        xden = xden * xm2 + q2(i)
    end do

```



```

        CALL RAND_yp(U,M)
        DO 2 J=1,M
            IPJ=I+J-1
            K=INT(U(J)*(N-IPJ+1))+IPJ
            ITEMP=P(IPJ)
            P(IPJ)=P(K)
2       P(K)=ITEMP
3       CONTINUE
        RETURN
        END
C
        SUBROUTINE IRAND(S,N,LOW,HI)
C===Generate a random integer sequence: S(1),S(2), ... ,S(N)
C such that each element is in the closed interval <LOW,HI> and
C sampled WITH REPLACEMENT.                                HDK, JUNE 1971.
        INTEGER N,S(N),LOW,HI,IX,I
        REAL U(1)
        DOUBLE PRECISION X
        DO 1 I=1,N
            CALL RAND_yp(U,1)
C---Use DP arithmetic to effect a more precise transformation.
            X=DBLE((HI+1)-LOW)*U(1) + DBLE(LOW)
            IX=X
            IF(X.LT.0 .AND. IX.NE.X) IX=X-1.D0
            S(I)=IX
1       CONTINUE
        RETURN
        END
        BLOCK DATA
C=====
C Portable pseudo-random integer generator, especially for
C microcomputers with a limitation of 16 bit integers. Translated from
C original Pascal version(1) to Fortran 77 by H. D. Knoble, PSU.
C
C The supporting paper is:
C (1) B. Wichmann & D. Hill, "Building a Random-Number Generator",
C     BYTE, March, 1987, 12(3):127-128.
C
C Also see the following related works:
C (2) Wichmann, B.A. and Hill, I.D., "An Efficient and Portable",
C     Pseudo-random Number Generator", Applied Statistics,
C     Volume 31, 1982, pages 188-190.
C (3) Haas, Alexander, "The Multiple Prime Random Number Generator",
C     ACM Transactions on Mathematical Software; December,
C     1987, 13(4):368-381.
C (4) L'Ecuyer, Pierre, "Efficient and Portable Combined Random Number
C     Generators", Communications of the ACM; June, 1988,

```

```

C          31(6):742-749,774.
C
C Use...
C      CALL RAND(U,N)
C          To generate a sequence, U, of N Uniform(0,1) numbers.
C          Cycle length is ((30269-1)*(30307-1)*(30323-1))/4 or
C          6953607871644 > 6.95E+12.
C
C      To access the SEED vector in the calling program use statements:
C      INTEGER SEED(3)
C      COMMON/RANDOM/SEED
C
C      The common variable SEED is the array of three current seeds.
C      INTEGER SEED(3)
C      COMMON/RANDOM/SEED
C      DATA SEED(1),SEED(2),SEED(3)/1,10000,3000/
C      END
C=====
SUBROUTINE RAND_yp(U,N)
INTEGER N,X,Y,Z
REAL U(N),V
COMMON/RANDOM/X,Y,Z
IF(N.LE.0) RETURN
DO 1 I=1,N
    X=171*MOD(X,177)-2*(X/177)
    IF(X.LT.0) X=X+30269
    Y=172*MOD(Y,176)-35*(Y/176)
    IF(Y.LT.0) Y=Y+30307
    Z=170*MOD(Z,178)-63*(Z/178)
    IF(Z.LT.0) Z=Z+30323
    V=X/30269.0 + Y/30308.0 + Z/30323.0
1    U(I)=V-INT(V)
RETURN
END
C=====
SUBROUTINE SSORT (X, IY, N, KFLAG)
IMPLICIT NONE
c
c      Example of a Selection Sort Using a Fortran 90 Intrinsic Function
c
C***BEGIN PROLOGUE SSORT
C***PURPOSE Sort an array and make the same interchanges in
C          an auxiliary array. The array is sorted in
C          decreasing order.
C***TYPE SINGLE PRECISION
C***KEYWORDS SORT, SORTING
C

```

```

C  Description of Parameters
C    X - array of values to be sorted  (usually abscissas)
C    IY - array to be carried with X (all swaps of X elements are
C         matched in IY . After the sort IY(J) contains the original
C         position of the value X(J) in the unsorted X array.
C    N - number of values in array X to be sorted
C    KFLAG - Not used in this implementation
C
C***REVISION HISTORY  (YYMMDD)
C  950310  DATE WRITTEN
C  John Mahaffy
C***END PROLOGUE  SSORT
C  .. Scalar Arguments ..
C     INTEGER KFLAG, N
C  .. Array Arguments ..  -----NOTE the 2 new ways of declaring array size
C     REAL X(1:N)
C     INTEGER IY(N)
C  .. Local Scalars ..
C     REAL TEMP
C     INTEGER I, ISWAP(1), ITEMP, ISWAP1
C  .. External Subroutines ..
C     None
C  .. Intrinsic Functions ..
C     INTRINSIC MAXLOC
c
c
c  MAXLOC is a FORTRAN 90 function that returns the index value for the
c  maximum element in the array
C***FIRST EXECUTABLE STATEMENT  SSORT
C
C     DO 200 I=1,N-1
c<a name=1><font color=FF0000>
C         ISWAP=MAXLOC(X(I:N))
c</font>
C         ISWAP1=ISWAP(1)+I-1
C         IF(ISWAP1.NE.I) THEN
C             TEMP=X(I)
C             X(I)=X(ISWAP1)
C             X(ISWAP1)=TEMP
C             ITEMP=IY(I)
C             IY(I)=IY(ISWAP1)
C             IY(ISWAP1)=ITEMP
C         ENDIF
C 200 CONTINUE
C     RETURN
C     END

```


주 의

1. 이 보고서는 기상청에서 시행한 기상지진기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 기상청에서 시행한 기상지진 기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.