

**해양영토내 해저기인 자연재해 및 환경자료 구축
Technology Managing Seabed-Derived Hazards in
the Marine Territory**

2008. 12.

한 국 해 양 연 구 원

제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 “ 해양영토내 해저기인 자연재해 및 환경자료구축에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2008. 12.31.

총괄연구책임자 : 석봉출

참 여 연 구 원 : 정갑식, 김성렬, 김한준
이상훈, 이용국, 정백훈
장남도, 신동혁, 권수재
장 석, 주형태, 박영길
박건태, 김광희, 조진형
이은혜, 금병철, 강수영
이준호, 한상준, 이수환
김동춘, 문흥수, 최보람
김윤정, 이승용, 유찬호
정일지, 이철구, 이상영
김종선

요 약 문

I. 제목: 해양영토내 해저기인 자연재해 및 환경자료 구축

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 필요성

● 기술적 측면

- 최후빙하기 이후 해수면 상승의 결과, 우리나라의 주요 하천을 통해 바다로 배출되는 퇴적물들은 인접한 연안과 대륙붕에 집적되고 있다. 대부분의 조립질 퇴적물들은 강하구에 퇴적되는 반면 세립질 퇴적물들은 조류와 연안류에 의해 내 대륙붕으로 운반되어 연안을 따라 평행하게 나타나는 대상의 홀로세 니질 퇴적체들을 형성하였다. 이 니질 퇴적체들은 그 두께가 최대 수십 m에 달하여 홀로세 동안의 해수면 변동, 기후변동, 지각변형, 해양순환의 변화, 해양 생태계 변화, 쇄설성 퇴적물 공급의 변화 등 육지-해양-대기 시스템의 상호 연계된 변화를 고해상도로 기록하고 있으며 다량의 천부가스를 포함하고 있다. 천부가스는 망울의 형태로 존재하는데 해저면 퇴적물의 지질공학적 물성을 상당히 변화시킬 수 있으므로 지질음향분석과 구조물의 건설에 중요한 변수가 된다. 특히 천부가스는 퇴적물 입자내 공극의 압력을 높여서 퇴적물의 액화현상을 초래할 수 있으므로 지질재해의 측면에서 매우 중요하므로 그 분포와 특성 그리고 매장량을 아는 것이 필요하다.

● 경제·산업적 측면

- 홀로세 니질대에 대한 지질학적 연구는 부유퇴적물에 흡착되어 운반되는 오염물질의 장기적 퇴적 경로를 밝히고, 이 지역에 광범위하게 분포하는 천부 가스

의 산업적 이용과 이로부터 유발될 수 있는 지질학적 재해 방지에 대한 중요한 기본 정보를 제공하게 된다.

● 사회·문화적 측면

2. 목적

- 동해 남동 대륙붕에 KSSM(KSSM: Korea Shelf Strait Mud)으로 불리우는 홀로세 니질퇴적체내 천부가스의 분포와 특성 그리고 매장량 계산
- 제 4기후기 동안의 동해 남서부 사면에서의 해저사면 붕괴의 발생 및 특성 변화
 - 경주지역의 지진재해 예측

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 홀로세 퇴적작용 해석
- 천부 가스의 분포와 특성분석
- 해저사면 붕괴의 발생 및 특성 변화
- 황해의 지각구조
- HAZUS를 이용한 경주지역의 지진재해 예측

IV. 연구개발결과

천부 가스의 분포와 특성

KSSM의 중앙부에서 천부가스는 연구지역의 약 60%에 걸쳐서 분포하는 acoustic blanking, acoustic turbidity, 분출, 그리고 수층내 plume으로서 존재한다. Acoustic blanking은 약 102 m의 깊이에서 급작스럽게 사라진다. 분출과 plume은 대부분 acoustic blanking 지역의 가장 얇은 육지쪽 경계에서 보인다. 이러한 사실은 수심

이 깊어짐에 따라 압력이 증가하고 수온이 감소하여 102 m 깊이보다 더 깊은 곳에서 자유가스가 형성되지 못하게 하는 것으로 해석된다. 반면에, acoustic blanking 지역의 육지쪽 경계를 따라서 더 낮아진 압력에 의해 가스의 용해도가 감소함에 따라 퇴적물내 자유가스의 양이 증가되어 가스분출이 촉진된다.

시추퇴적물로부터 얻은 가스는 거의 전적으로 생물기원 메탄가스로 이루어져 있다. Acoustic blanking 지역이 바다쪽으로 가면서 급작스럽게 사라지는 것은 102 m 깊이에서 메탄이 완전히 용해됨을 지시한다. 이 깊이에서 용해된 메탄의 양이 평균적인 메탄의 양을 나타내고 mud의 공극률 평균이 75% 라고 가정할 때 용해되거나 방울형태로 존재하는 메탄의 전체 양은 1 기압 15°C에서 $6.23 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로 계산된다.

Acoustic blanking 아래 전체 mud층이 가스로 충전되었다고 가정하면 가스의 속도효과로부터 가스로 충전된 퇴적물의 속도가 950에서 1200 m/s 이상까지의 값을 가진다. 반면에, 가스로 충전된 퇴적물의 속도가 800 m/s 로 일정하다고 가정하면 acoustic blanking 아래에서 퇴적물의 30-70%가 가스로 충전되었다고 볼 수 있다.

제 4기후기 동안의 동해 남서부 사면에서의 해저사면 붕괴의 발생 및 특성 변화

울릉분지 남서부 분지평원에 나타난 저탁암의 자세한 퇴적특성과 퇴적시기를 분석하여 29.4 cal kyr BP에서 현재까지 울릉분지 남서부 사면에서 발생한 해저사면 붕괴의 빈도, 규모와 붕괴지역에 대한 변화를 규명하였다. 29.4 ~ 19.1 cal kyr BP 사이에 나타나는 다양한 두께의 저탁암 퇴적층은 마지막 빙하기에 다양한 규모의 해저사면 붕괴가 일어났음을 지시한다. 해수면이 가장 낮았던 20.0 ~ 19.1 cal kyr BP 시기에는 큰 규모의 해저사면 붕괴가 일어나 두꺼운 저탁암 퇴적층의 연속적인 집적이 일어났다. 해수면이 상승하기 시작한 19.1 cal kyr BP 이후에 저탁암의 분포와 두께가 감소하는데 이는 해저사면 붕괴의 빈도와 규모가 감소하였음을 암시한다. 21.4 cal kyr BP 이전에 잘 발달된 니질 저탁암 퇴적층은 상부로 가면서 모래질 저탁암으로 변화하는 양상은 해저사면 붕괴 지역이 니질의 상부 ~ 중부 사면에서 모래질의 최상부 사면으로 확장되었음을 지시한다. 울릉분지 남서부 사면에서 가스수화물의 광범위한 분포와 마지막 빙하기 동안에 활발한 해저사면 붕괴는 해

수면 하강에 따른 가스수화물의 분해에 의해 해저사면 붕괴가 발생하였음을 뒷받침해준다.

수신합수를 통해 구한 황해의 지각구조

한국의 지체구조는 선캠브리아기 3개의 육괴(남립육괴, 영남육괴, 경기육괴)와 2개의 습곡벨트(Imjingang Belt, Ogcheon Belt)로 분리되었다. 최근 북중국대륙과 남중국대륙의 충돌 봉합대가 한국의 임진강대로 연장되었을 것이라는 가설이 제기되었고, 뿐만아니라 이 연장선이 옥천대로 연장되었을 것이라는 가설까지 제기되면서 그 논란은 가중되었다. 본 연구에서는 한국해양연구원, 중국 지질지구물리연구원, 국립 공주대학교가 함께하는 국제공동연구를 추진하였으며, 이에 2007년 9월 이후 광대역 임시지진관측소(11개 관측소)를 중국과 한국의 황해 주변에 설치하여 광대역 지진자료를 수신 중에 있다. 이를통해, 황해주변의 지각구조 및 동북아시아의 광역 지구구조를 밝히는데 그 목적이 있다. 수신합수는 시간영역에서의 반복 디콘볼루션을 사용하여 40Hz 샘플링 주파수의 광대역 지진자료로부터 계산되었다. 경기육괴의 Crust-Mantle Transition(CMT)는 30~34km 깊이에서 관측되었으며, 옥천대는 34km 깊이에서 관측되었다. 옥천대의 CMT는 경기육괴의 CMT에 비해 상대적으로 깊은 곳에 위치해 있으며, CMT 층의 두께는 경기육괴의 것이 두껍게 나타났다. Sulu Belt에 속하는 완관관측소의 CMT는 32~34km 깊이에서 관측되었으며, 지아오난관측소의 CMT는 36~38km에서 관측되었다. 이는 양쯔지괴에 속하는 구안관측소의 CMT에 비해 상대적으로 깊고 두꺼운 CMT를 나타낸다. 이러한 특성은 남중국대륙과 북중국대륙이 충돌 합쳐지면서 생성된 Sulu Belt의 특성으로 보여진다.

HAZUS를 이용한 경주지역의 지진재해 예측

미국의 FEMA와 NIBS에서 개발한 HAZUS-MH는 GIS를 기반시스템으로 하는 자연재해 전후의 피해정도를 평가 및 분석하는 재해정보시스템이다. 한반도 지진관련 연구자료 및 역사지진자료를 토대로 경상남북도 특히 경주지

역을 연구지역으로 선정하였다. 서기 779년 경주에서 발생한 규모 6.7의 지진을 선택하여, HAZUS의 여러 방법을 이용하여 이 지진에 대한 피해규모를 예측하였다. 이번 연구로 이 지진은 경상도 특히 경주지역에 방대한 물리적, 경제적, 그리고 사회적 피해가 예상된다. 이러한 연구를 통하여 미국의 HAZUS가 한반도에서도 적용이 가능하다는 것을 알 수 있었으며, 한반도 전 지역에서 발생하는 모든 자연재해에 대하여 HAZUS를 적용한다면 우리나라의 자연재해에 의한 피해를 예측하고 대응하는데 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

V. 연구개발결과의 활용계획

SUMMARY

I. Title:

Technology Managing Seabed-Derived Hazards in the Marine Territory

II. Necessity and Objectives of the Study

1. Necessity

● Technical aspects

- As a result of the recent postglacial sea-level rise, coastal and continental shelf areas adjacent to the Korean major river systems are presently receiving riverine sediments discharged into the marine environment. Most coarse-grained sediments derived from the rivers are trapped in the river mouth, while the fine-grained sediments are transported offshore, forming Holocene mud belts under the combined influence of tidal and coastal currents. The mud belts are up to a few tens of meters in thickness and preserve high-resolution records of interactions between land, ocean, and atmosphere during the Holocene such as sea level changes, variations in ocean and atmospheric circulations, marine ecosystems, and supply of terrestrial materials. The mud belts is also chracterized by a high content of shallow gas. Shallow gas, in a bubble phase, can significantly alter the geotechnical properties of surficial sediments and is an important factor to

geoacoustic studies and construction of structures on the sea bottom. In particular, shallow gas can increase pore pressure in sediments, resulting in liquefaction. These features, in terms of geohazards, point to the importance of the distribution and characteristics, and volume.

- Economic and industrial aspects

- Geological study of the Holocene mud belts will provide important basic information on long-term sedimentary processes of contaminated materials which are transported with suspended sediments and exploration and geologic hazard of shallow gas which are widely distributed within the mud belts.

- Social and cultural aspects

2. Objectives

The objectives of this study are:

- Evaluation of the distribution, characteristics and volume of shallow gas in KSSM (KSSM: Korea Shelf Strait Mud).

III. General Scope of the Study

- High-resolution multichannel seismic survey in the coastal area
- Analysis of distribution and properties of shallow gas in KSSM

IV. Results of the Study

Distribution and characteristic of shallow gas

Shallow gas in the central part of KSSM is characterized by acoustic blanking, which covers about 60% of the survey area, acoustic turbidity, seepages, and plumes in the water column. The acoustic blanking terminates abruptly at depth of about 102 m. The seepages and plumes are seen mostly along the shallowest landward edge of the acoustic blanking zone. We propose that the increase in pressure and decrease in water temperature with the water depth increases the solubility of gas, limiting the formation of free gas beyond about 102 m depth in the study area. On the other hand, along the landward edge of the acoustic blanking zone the decreased gas solubility, caused by the lowered pressure, increases the volume of free gas in the sediments, facilitating the gas escape. Gas samples from the cored sediments consist almost exclusively of biogenic methane. The abrupt seaward termination of the acoustic blanking suggests that the methane is dissolved at 102 m depth. Assuming that the amount of methane dissolved at this depth represents the average concentration of methane and that the average porosity of the mud is 75%, the total volume of combined dissolved and gas-phase methane in the study area estimated to be $6.23 \times 10^6 \text{ m}^3$ at 15°C and 1 atm.

Assuming that the entire mud column below the acoustic blanking is gas-charged, the velocity of gas-charged, the velocity effect of gas predicts that the velocities of the gas-charged sediments range from about 950 to over 1200 m/s. Alternatively, assuming that the velocity of gas-charged sediments is constant (800 m/s), about 30–70% of the sediments below the acoustic blanking are gas-charged.

The Korean peninsula consists of Precambrian tectonic blocks (Nangrim, Gyeonggi, and Yeongnam massifs) that are bounded by fold belts (Imjingang Belt and Ogcheon Fold Belt). A recent review of the tectonic evolution of the Korean Peninsula suggests that the Imjingang Belt represents an early Triassic collision zone between the North China Block and the South China Block. A somewhat controversial hypothesis is that the Ogcheon fold belt forms a boundary between the North and South China blocks and a careful investigation of the Yellow Sea region may help to resolve this controversy. Scientists from Korea and China have teamed up to resolve the long standing question of tectonic history of the region. Temporary broadband seismic stations (11 total) are now installed around the Yellow Sea to monitor seismicity in the region and to collect teleseismic waveform data. Here we present the preliminary results of the China-Korea international collaboration in the Yellow Sea area. The receiver functions are obtained from broadband (CMG-3ESP) seismic channels of the 40 Hz archived data stream using an iterative deconvolution technique in the time-domain. The crust-to-mantle transition (CMT) for the Gyeonggi massif is estimated to extend from 30 to 34 km deep and Ogcheon belt transition exists at 34 km depth. There is a distinct transition for the Ogcheon belt that is deeper than the transition for the Gyeonggi massif but the former is found to have a thicker transition zone. The Sulu belt transition, which lies in the targeted collision zone, is found to have the deepest transition zone, estimated to range from 32-34 km deep (Wangcun station) and from 36-38 km deep (Jiaonan station).

Changes in characters and occurrences of the latest Quaternary (<29.4 cal kyr

BP) slope failures in SW Ulleung Basin, East Sea

Detailed analysis of depositional characters and ages of turbidites from the southwestern Ulleung Basin reveals changes in frequency, failing area and dimension of slope failures after 29.4 cal kyr BP. Abundant thin- to thick-bedded turbidites between 29.4 and 19.1 cal kyr BP indicate that various-scale slope failures occurred frequently during the last glacial period. When sea level was lowest (20.0–19.1 cal kyr BP), larger-scale slope failures occurred, forming very thick turbidites. Occurrence and thickness of turbidites decreased after 19.1 cal kyr BP when sea level began to rise, reflecting decrease in frequency and dimension of slope failures. The upward change from muddy to sandy turbidites around 21.4 cal kyr BP indicates that failing areas retrograded upslope from the upper–middle muddy slope to the uppermost sandy slope when sea level was nearly lowest. In the southwestern slope of the basin, extensive gas hydrates with frequent slope failures during the last glacial period suggest that slope failures were mostly triggered by decomposition of gas hydrate during sea-level lowering.

The Korean peninsula consists of Precambrian tectonic blocks (Nangrim, Gyeonggi, and Yeongnam massifs) that are bounded by fold belts (Imjingang Belt and Ogcheon Fold Belt). A recent review of the tectonic evolution of the Korean Peninsula suggests that the Imjingang Belt represents an early Triassic collision zone between the North China Block and the South China Block. A somewhat controversial hypothesis is that the Ogcheon fold belt forms a boundary between the North and South China blocks and a careful investigation of the Yellow Sea region may help to resolve this controversy. Scientists from Korea and China have teamed up to resolve the long standing question of tectonic history of the region. Temporary broadband seismic stations (11 total) are now

installed around the Yellow Sea to monitor seismicity in the region and to collect teleseismic waveform data. Here we present the preliminary results of the China–Korea international collaboration in the Yellow Sea area. The receiver functions are obtained from broadband (CMG-3ESP) seismic channels of the 40 Hz archived data stream using an iterative deconvolution technique in the time-domain. The crust-to-mantle transition (CMT) for the Gyeonggi massif is estimated to extend from 30 to 34 km deep and Ogcheon belt transition exists at 34 km depth. There is a distinct transition for the Ogcheon belt that is deeper than the transition for the Gyeonggi massif but the former is found to have a thicker transition zone. The Sulu belt transition, which lies in the targeted collision zone, is found to have the deepest transition zone, estimated to range from 32–34 km deep (Wangcun station) and from 36–38 km deep (Jiaonan station).

Loss Estimation of Gyeongju area using HAZUS

HAZUS-MH is a GIS based systematic and informative system developed by FEMA and NIBS for natural hazard loss estimations. Gyeongsang province, especially Gyeongju city, has been selected for the test after careful reviews of previous studies including historical and modern seismicity in the peninsula. The scenario earthquake with magnitude 6.7 in Gyeongju area is used to estimate the loss through several methods in HAZUS. The results show that the study area may experience significant physical, economic, and social damages. Detailed study in the future will provide efficient and crucial information to the decision makers and emergency agents to mitigate any disaster posed by natural hazards.

목 차

요약문	ii
목 차	xiv
그림 및 표 목차	xx
제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 연구개발의 목적 및 범위	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
제 1 절 국내 연구동향	5
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	7
제 1 절 한국 남동해역의 천부가스와 탄성과 특성	9
1. 서 론	9
2. 지질환경	13
가. 자료	13
3. 연구결과 및 토의	14
가. 음향이상과 가스분출 형태	14
나. KSSM의 하부경계면 구조와 두께	19
다. 가스충진 퇴적물의 분포와 가스용해도 고찰	22
라. 가스의 조성과 기원	24
마. 가스충진 퇴적물의 정량적 특성	25
4. 결 론	30

제 2 절 제 4기 후기동안의 동해 남서부 사면에서의 해저사면 붕괴의 발생 및 특성 변화	33
1. 서 론	33
2. 해양지질 배경	34
3. 연구재료 및 방법	36
4. 연구결과 및 토의	37
가. 음향특성	37
나. 반원양성 퇴적물	38
다. 저탁암	39
라. 저탁암 퇴적층 형태	43
마. 저탁암 퇴적층의 퇴적시기	44
바. 토의	46
5. 결 론	49
제 3 절 수신함수를 통해 구한 황해의 지각구조	50
1. 서 론	50
가. 연구배경 및 목적	50
나. 한국과 중국의 지각구조 연구	50
2. 방 법	54
가. 수신함수분석법	54
나. 자료 획득	68
3. 결과 및 토의	85
4. 결 론	98
제 4 절 HAZUS를 이용한 경주지역의 지진재해 예측	99
1. 서 론	99
가. 자연재해 및 지진재해예측 시스템	99
2. 방 법	100
가. 연구목적과 방법	100
나. HAZUS	101
다. 우리나라의 지진	102
3. 결과 및 토의	104
가. ShakeMap	104

나. 결정론적 방법	114
4. 결 론	131
제 4 장 참고문헌	136

Contents

Summary	ii
Contents	xiv
List of Figures and Tables	x
Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Status of technological development domestic and overseas ..	5
Section 1. Domestic	5
Chapter 3. Content and results of the study	7
Section 1. Distribution of characteristics of shallow gas	9
1. Introduction	9
2. Geological setting	3
A. Data	13
3. Results and discussion	4
A. Acoustic anomalies and type of gas occurrence	4 1
B. Lower boundary structure and thickness of KSSM	9 1
C. Distribution of gas-charged sediments and gas solubility	2 2
D. Composition and origin of gas	24

E. Quantitative analysis of gas-charged sediments	5. 2
4. Summary and Conclusions	3
Section 2. Changes in characters and occurrences of the latest Quaternary (<29.4 cal kyr BP) slope failures in SW Ulleung Basin, East Sea	33
1. Introduction	33
2. Geological setting	4
3. Materials and methods	3
4. Results and discussion	7
A. Acoustic characters	7
B. Hemipelagic sediments	3
C. Turbidites	39
D. Types of turbidite sequences	3
E. Depositional time interval of turbidite sequence	44
F. Discussion	46
5. Conclusions	49
Section 3. Crust and Upper-mantle structure beneath the Yellow Sea using Receiver function analysis	5
1. Introduction	50
A. Background and Purpose	5
B. Geology of the South Korea and China	6
2.. Methodology	54
A. Receiver function analysis	4
B. Data	68
3. Results and Discussion	8
4. Conclusion	98

Section 4. Loss Estimation of Gyeongju area using HAZUS	99
1. Introduction	99
A. Natural Hazard and Earthquake Loss Estimation System	99
2. Methodology	100
A. Purpose and Methodology	100
B. HAZUS	101
C. Earthquakes in Korea	102
3. Results and Discussion	104
A. ShakeMap	104
B. Deterministic Method	114
4. Conclusion	131
Chapter 4. References	136

그림 및 표 목차

그림 1-1. 대한해협 대륙붕 점토대 (KSSM: Korea Strait shelf mud)의 분포(KIGAM (2000) 에서 인용) 와 자료측선의 위치. 등심선은 m로 표기된 수심	11
그림 1-2. 음향이상으로부터 확인된 천부가스의 분포. Acoustic blanking은 조사지역 의 약 60%에 존재한다. Acoustic blanking 지역의 바다쪽 경계는 대체로 100 m 등수심선과 일치한다. Seepage와 plume은 acoutic blanking 지역의 육지쪽 경계를 따라서만 보인다. 굵은 실선과 숫자는 탄성과 프로파일의 위치와 번호 이다	12
그림 1-3. (A), (B) Chirp 프로파일에서 보이는 acoustic blanking. (C) 스파커 프로 파일에서 보이는 acoustic blanking과 acoustic turbidity	6
그림 1-4. 매우 불규칙하고 확산되는 반사신호를 갖는 acoustic turbidity를 보여주는 chirp 프로파일. 위치는 그림 3-2-2에 표시	8
그림 1-5. 수직방향으로 흐려지거나 혼탁한 해저면 반사신호로 나타나는 seepage를 보여주는 chirp 프로파일. 위치는 그림 3-2-2에 표시	8
그림 1-6. 거의 수직인 어두운 흐름으로 나타나는 수층내 plume	19
그림 1-7. 속도의 pull-down에 의해 야기된, KSSM의 아래경계면상에 나타나는 하 도같은 구조를 보여주는 스파커 프로파일	20
그림 1-8. KSSM의 두께와 단층의 분포. 등치선은 m 단위	2
그림 1-9. KSSM의 m단위 두께. 굵은 실선은 단층의 위치	2
그림 1-10. KSSM내 acoustic blanking, gas seepage, 그리고 plume을 나타내는 도식 적인 지질단면	23
그림 1-11. (A)와 (B) Acoustic blanking과 속도 pull-down을 보여주는 스파커 프로 파일 및 해석. (C) 가스에 의한 시간지연. 위치는 그림 3-2-2에 표시	2
그림 1-12. (A)와 (B) Acoustic blanking과 속도 pull-down을 보여주는 스파커 프로 파일 및 해석. (C) 가스에 의한 시간지연. 위치는 그림 3-2-2에 표시	2

그림 1-13. 해저면 반사신호로부터 추출한 스파커의 파형요소	28
그림 1-14. (A)와 (B) 그림 3-2-11과 3-2-12에 나온 스파커 프로파일에서 가스충진된 퇴적물의 추정된 속도	29
그림 1-15. (A)와 (B) 가스충진 퇴적물의 속도를 800 m/s라 가정하였을 때 그림 11과 12에 나온 스파커 프로파일에서 acoustic blanking 아래의 가스충진 퇴적물 (%13	
그림 1-16. 전형적인 심해환경에서 (수심 2000 m) PCScore를 사용하여 구한 메탄 용해도와 열동역학적 모델 (Zatsepina and Buffet, 1998)로부터 구한 메탄 용해도와 비교	32
그림 2-1. 울릉분지와 주변의 해저지형과 획득된 시추퇴적물 위치	35
그림 2-2. (a) 시추퇴적물 주변 퇴적층의 고해상 음향 특성. (b) 시추퇴적물 구간에 해당되는 고해상 음향특성	39
그림 2-3. 퇴적상의 X-방사선 사진과 코어사진	40
그림 2-4. 시추퇴적물 주상도	42
그림 2-5. 저탁암 퇴적층의 퇴적 에피소드의 퇴적시기, 반원양성 퇴적물의 퇴적시기와 해수면 변동 곡선	46
그림 3-1. 한반도 주변의 지각구조	53
그림 3-2. 직접 P파와 지각반사파형의 도시적 그림	56
그림 3-3. 한국과 중국에 위치한 임시지진관측소	71
그림 3-4. 수신함수분석법에 사용된 원격지진의 진앙지	75
그림 3-5. 공주관측소에서 관측된 남태평양에서 발생한 원격지진의 전형적인 3성분	80
그림 3-6. 초동 P파의 220초. 도착 전 20초, 도착 후 200초	18
그림 3-7. 남태평양지진으로부터 계산된 수신함수의 Z, R, T 성분	82
그림 3-8. 공주관측소의 수신함수와 수신함수 중첩	83
그림 3-9. 공주관측소에서의 관측 및 이론 수신함수와 관측소 하부의 지각속도구조 모델	84
그림 3-10. 수신함수분석법을 통해 구한 안산관측소 하부의 지각속도구조모델	89

그림 3-11. 수신함수분석법을 통해 구한 평택관측소 하부의 지각속도구조모델	90
그림 3-12. 수신함수분석법을 통해 구한 공주관측소 하부의 지각속도구조모델	91
그림 3-13. 수신함수분석법을 통해 구한 부안관측소 하부의 지각속도구조모델	92
그림 3-14. 수신함수분석법을 통해 구한 진도관측소 하부의 지각속도구조모델	93
그림 3-15. 수신함수분석법을 통해 구한 완주관측소 하부의 지각속도구조모델	94
그림 3-16. 수신함수분석법을 통해 구한 지아오난관측소 하부의 지각속도구조모델	95
그림 3-17. 수신함수분석법을 통해 구한 구안관측소 하부의 지각속도구조모델	96
그림 4-1. 우리나라의 지진발생 분포도	103
그림 4-2. ShakeMap 사례	106
그림 4-3. 거주지 내 건물피해	109
그림 4-4. 지진발생 7일후 학교의 피해가능성 및 기능	111
그림 4-5. 교량 피해가능성	112
그림 4-6. 경주지역 내 사상자와 이재민 발생	113
그림 4-7. 규모 4.9 오대산지진으로 인한 강진동 감쇠식의 비교	119
그림 4-8. 경상도에서 발생한 규모 3.0 지진으로 인한 강진동 감쇠식의 비교	120
그림 4-9. 규모 6.7 지진으로 인한 강진동 감쇠식의 비교	122
그림 4-10. 2005년도 연구지역의 인구와 주택	124
그림 4-11. 규모 6.7 지진에 대한 Sadigh et al.(1997)의 감쇠식과 지반분류 B, C, D 의 조건에서 경주의 주택 피해 가능성	125
그림 4-12. 규모 6.7 지진에 대한 Sadigh et al.(1997)의 감쇠식과 지반분류 B와 C의 조건에서 경주의 병원 피해 가능성	127
그림 4-13. 새벽 두시에 발생하는 규모 6.7 지진으로 인한 Sadigh et al.(1997)의 감 쇠식과 지반분류 B의 조건에서 이재민과 사상자 발생 가능성	129
그림 4-14. 규모 6.7 지진과 Sadigh et al.(1997) 감쇠식을 사용한 사상자 발생 가능 성	131

표 1-1. 음역지역의 해양정보	17
표 1-2. 시료의 탄화수소함량 및 동위원소	24
표 2-1. 반원양성 퇴적물의 유공층의 ^{14}C 절대연령	38
표 2-2. 저탁암 퇴적층의 퇴적 에피소드의 퇴적 시기 및 구성된 저탁암 퇴적층의 형태	45
표 3-1. 한국과 중국 임시지진관측소의 위치	71
표 3-2. 수신함수분석법에 사용된 원격지진의 지진요소	76
표 4-1. 경주지역에서 발생하는 건물 피해	108
표 4-2. 응급시설물 피해	110
표 4-3. 경주지역 내 사상자 발생 가능성	113
표 4-4. 규모 6.7 지진으로 인한 경주지역의 학교, 경찰서, 소방서의 피해	118

List of Figures and Tables

Fig. 1-1. Location of the Korea Strait shelf mud (KSSM) (adapted from KIGAM, 2000) and data distribution. Contours are water depths in meters	1
Fig. 1-2. Distribution of shallow gas revealed by acoustic anomalies. Acoustic blanking covers about 60% of the survey area. The seaward edge of the acoustic blanking zone generally coincides with 100-m depth contour. Seepages and plumes are seen only along the landward edge of the acoustic blanking zone. Heavy lines and respective numbers represent locations of seismic profiles	2
Fig. 1-3. (A), (B) Acoustic blanking on Chirp profiles. (C) Acoustic blanking and acoustic turbidity on sparker profiles	6
Fig. 1-4. A Chirp profile showing acoustic turbidity characterized by a very irregular or diffuse top reflection. See Fig. 3-2-2 for location	8
Fig. 1-5. A Chirp profile showing seepages characterized by vertical smearing and disrupted or disturbed seafloor reflection. See Fig. 3-2-2 for location ..	11
Fig. 1-6. A chirp profile showing plumes in the water column that are represented as nearly vertical dark smearings	9
Fig. 1-7. A sparker profile showing channel-like structure on the lower boundary of KSSM that is caused by the velocity pull-down	10
Fig. 1-8. Thickness of KSSM and location of faults. Contours are in meters	11
Fig. 1-9. Thickness of KSSM in meters. Thick lines are locations of faults	12
Fig. 1-10. Schematic cross section showing the distribution of acoustic blanking, gas seepages, and plumes in the KSSM	13
Fig. 1-11. (A) and (B) A sparker profile showing acoustic blanking and velocity pull-down and its interpretive line drawings. (C) Time delay caused by gas. See Fig. 3-2-2 for location	16
Fig. 1-12. (A) and (B) A sparker profile showing acoustic blanking and velocity	17

pull-downs and its interpretive line drawings. (C) Time delay caused by the presence of gas. See Fig. 3-2-2 for location	7	2
Fig. 1-13. The sparker source wavelet extracted from sea floor reflection	8	2
Fig. 1-14. (A) and (B) Estimated velocities of gas-charged sediments across the sparker profile shown in Figs. 3-2-11 and 3-2-12, respectively	9	2
Fig. 1-15. (A) and (B) Gas-charged sediments (%) below acoustic blanking across the sparker profile shown in Figs. 3-2-11 and 3-2-12, respectively, assuming that velocity of gas-charged sediments is 800 m/s	1	3
Fig. 1-16. Comparison of methane solubility computed using PCScore and that computed from thermodynamic model (Zatsepina and Buffet, 1998) for a typical deep marine setting (2000 m water depth)	23	
Fig. 2-1. Physiographic map of the Ulleung Basin and adjacent areas	5	3
Fig. 2-2. (a) A Chirp (2 ~ 7 kHz) profile showing acoustic characters of sedimentary sequence near core 07-01. (b) Detailed acoustic characters of the uppermost sedimentary sequence penetrated by core 07-01	9	3
Fig. 2-3. X-radiographs and photographs of sedimentary facies from core 07-01	40	
Fig. 2-4. Columnar sections of core 07-01	2	4
Fig. 2-5. Time interval (or age) of twelve episodes of turbidite deposition and depositional period of hemipelagic units with ice-volume equivalent sea-level curve	4	
Fig. 3-1. Tectonic map of the Korean Peninsula and adjacent area.(modified from Min and Cho., 1998; Chough et al., 2000). NM, Nangrim massif; GM, Gyeonggi massif; YM, Yeongnam massif; OB, Ogcheon belt	35	
Fig. 3-2. Schematic diagram showing direct P(labeled Pp) and the dominant crustal reverberations, where, except for mantle P, lowercase and uppercase indicate up-going and down-going rays, respectively, and the associate receiver function; after Ammon et al.(1990)	6	5
Fig. 3-3. Concertion of Temporary broadband seismic stations in Korea and		

China	71
Fig. 3-4. Map showing epicentres of the selected teleseismic events (solid circles) used in this study. Earthquakes are selected based on consideration of epicentral distance ($30^{\circ} \sim 90^{\circ}$), magnitude (> 6.5), and high signal-to-noise ratio on observed seismograms	7
Fig. 3-5. typical 3-component teleseismic broadband seismogram for a deep South Pacific earthquake recorded at Kongju	8
Fig. 3-6. 220 second around the P-wave arrival. 20 seconds before onset, 200 seconds after onset	8
Fig. 3-7. Receiver functions of vertical (Z), radial (R) and transverse (T) components calculated from the seismograms in South Pacific	8
Fig. 3-8. Receiver functions used for Kongju and representative (stacked) receiver function	83
Fig. 3-9. (a) Observed and calculated receiver function for the station Kongju. The number in the lower right corner is the cross-correlation coefficient between observed receiver function and calculated receiver function. (b) Resultant P and S-wave velocity models	48
Fig. 3-10. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Ansan station	8
Fig. 3-11. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Pyuntaek station	9
Fig. 3-12. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Kongju station	9
Fig. 3-13. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Buan station	2
Fig. 3-14. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Jindo station	3
Fig. 3-15. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Wangcun station	4
Fig. 3-16. Estimated velocity model and corresponding receiver function with	

observed ones at Jiaonan station	59
Fig. 3-17. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Guanyun station	60
Fig. 4-1. Distribution map of earthquake in Korea	80
Fig. 4-2. Examples of ShakeMap(Instrumental Intensity and PGA, provided by USGS)	106
Fig. 4-3. Building damage in the residential area	109
Fig. 4-4. Damage probability and functionality of schools on the 7th day after the proposal earthquake	111
Fig. 4-5. Probability of bridge damage on road and railroad	121
Fig. 4-6. Casualties by occupancy and short term shelter needs in Gyeongju area	113
Fig. 4-7. Comparisons of observed strong motions due to the Odaesan earthquake with different attenuation functions for M 4.9	91
Fig. 4-8. Comparisons of observed ground motions due to the earthquakes in the Gyeongsang provinces with different attenuation functions for M 3.0	92
Fig. 4-9. Ground shaking with different attenuation functions at magnitude 6.7	121
Fig. 4-10. Population and houses of the study area in 2005	421
Fig. 4-11. Potential house damage in the Gyeongju area by M 6.7 earthquake with the attenuation relation proposed by Sadigh et al.(1997) for site classes B, C, and D	125
Fig. 4-12. Estimated damage of hospitals in Gyeongju area by M 6.7 earthquake with the attenuation relation proposed by Sadigh et al.(1997) for site classes B and C	127
Fig. 4-13. Short term shelter needs and causality probability occurring M 6.7 earthquake at 2 A.M. with the attenuation relation proposed by Sadigh et al.(1997) for site class B	92
Fig. 4-14. Casualties occurring M 6.7 earthquake with Sadigh et al.(1997) attenuation relation	131

Table 1-1. Water depths, subsurface depths, and total depths of the seaward edge of the acoustic blanking zone.	7
Table 1-2. Hydrocarbon components and $\delta^{13}\text{C}$ values of gas samples from sediment cores	2
Table 2-1. AMS ^{14}C ages of planktonic foraminifera from hemipelagic sediments	38
Table 2-2. Time interval (or age) of twelve episodes of turbidite deposition and types of turbidite sequence in each episode	54
Table 3-1. Korea and China stations location	7
Table 3-2. Seismic parameters of teleseismic events for receiver function analysis	76
Table 4-1. Building damage by occupancy in the Gyeongju area. Multi-family homes include apartment complexes, duplexes, triplexes, multiplex homes, and others	108
Table 4-2. Damage of essential facilities	11
Table 4-3. Casualty estimates in the Gyeongju area. Multi-family homes include apartment complexes, duplexes, triplexes, multiplex homes, and others. By manual note, Severity Level 1 indicates injuries requiring basic medical aid without requiring hospitalization; Severity Level 2 indicates injuries requiring a greater degree of medical care and hospitalization, but not expected to progress to a life threatening status; Severity Level 3 indicates injuries that pose an immediate life threatening condition if not treated adequately and expeditiously. The majority of these injuries are a result of structural collapse and subsequent collapse or impairment of the occupants; Severity Level 4 indicates instantaneously killed or mortally injured	113
Table 4-4. Damages estimated to the schools, the police stations, and the fire stations in the Gyeongju area due to M=6.7 earthquake	2

제 1 장 서 론

대륙주변부(continental margin)는 대륙이 바다로 연장된 지역으로 지질학적으로는 대륙지각과 해양지각이 맞닿는 경계부분이다. 대륙주변부는 퇴적물의 집적이 일어나는 주된 장소이며 기후변동, 대양순환, 지화학적 순환, 유기물질의 생산력, 그리고 퇴적물공급에 관한 기록을 가장 잘 보존하고 있다. 또한 대륙주변부는 지각의 형성 및 변형, 그리고 소멸이 발생하는 주된 지역으로 지구상에서 인간의 활동이 가장 활발한 지역이다. 한반도 남동부 연안은 대륙붕과 대륙사면이 잘 발달해 있으며 바로 울릉분지와 같은 심해분지로 연결된다. 따라서 한반도의 남동 대륙주변부는 판구조적으로 태평양판과 수렴경계를 형성하는 일본열도의 뒤에 발달한 후열도해(back-arc sea)의 환경이지만 한반도의 대륙지각에서 울릉분지의 해양지각으로 변해가는 비활성 주변부의 특징도 가지고 있는 독특한 지역이다.

지난 빙하기 이후 해수면이 상승함에 따라 한반도의 남동연안에는 낙동강으로부터 유입되는 퇴적물이 쌓여서 해안을 따라 mud belt를 형성하고 있다. 이 지역은 또한 난류와 한류가 만나는 지역으로 표층의 1차 생산력이 매우 높은 특징을 보여 주고 있다. 한국 남동의 내대륙붕 내 분포하는 mud belt에는 천부가스와 관련된 음향이상이 광범위하게 분포한다. 천부가스는 방울의 형태로 존재하는데 해저면 퇴적물의 지질공학적 물성을 상당히 변화시킬 수 있으므로 지질음향분석과 구조물의 건설에 중요한 변수가 된다. 특히 천부가스는 퇴적물 입자내 공극의 압력을 높여서 퇴적물의 액화현상을 초래할 수 있으므로 지질재해의 측면에서 매우 중요하므로 그 분포와 특성 그리고 매장량을 아는 것이 필요하다. 이 보고서에서는 Chirp 및 다중채널 스파커 프로파일을 분석하여 mud belt의 중앙부에서 천부가스와 관련된 음향이상을 설명하고 그 아래의 구조를 해석하였다. 가스의 속도효과를 고려하여 mud belt 하부경계면의 구조와 두께를 파악하였으며, 가스의 속도효과를 분석하여 가스충진 퇴적물의 속도를 구하고 가스충진 범위가 얼마나 되는지를

분석하였다. 또한 음향이상의 깊이와 가스의 용해도로부터 용해된 가스와 방울 가스의 전체양을 추정하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구동향

1970년대 이후 해양 지구물리분야의 연구는 주로 연안과 근해에서 표층 퇴적구조를 대상으로 단채널 음파탐사 장비를 사용하여 수행되어 왔다. 하지만 한반도의 연안은 홀로세이후 해수면의 상승과 함께 퇴적되기 시작한 니질 현생퇴적체가 분포한다. 특히 한반도의 남동부 연안은 한류와 난류가 만나는 환경에서 증대된 일차생산력과 관련하여 현생퇴적체내에 다량의 천부 가스가 존재한다. 통상적으로 사용하는 단채널 음파탐사 장비로써는 천부 가스층 아래의 지층구조를 얻을 수 없다. 이를 해결하기 위해서는 에어 건과 같은 강력한 파워를 이용하는 다중채널 탄성과 탐사가 필요하지만 해운과 어업활동이 활발하고 연안에 양식장과 같은 시설이 밀집한 우리나라의 환경에서 조사선의 사용에 많은 제약을 받으므로 그러한 탐사가 곤란하다. 이의 대안은 스파커를 파워원으로 그리고 일반적인 다중채널 탄성과 탐사를 위한 스트리머보다 훨씬 짧은 작은 스트리머를 이용하는 연안역 다중채널 탄성과 탐사장비를 구축하는 것이다. 한국해양연구원에서는 2000년 이후 이러한 장비를 조합하여 신기 지각변형을 연구하기 위해 연안역에서 다중채널 탄성과 탐사를 수행한 바 있다.

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 한국 남동해역의 천부가스와 탄성과 특성

1. 서론

한국 남동의 내대륙붕 내 분포하는 KSSM (Korea Strait shelf mud)이라 불리는 mud belt는 지난 5000년에서 6000년 사이에 퇴적된 것으로 알려져 있다 (Park et al., 1999; KIGAM, 2000) (Figs. 1-1 and 1-2). 특히 KSSM에는 천부가스와 관련된 음향이상 (e.g., acoustic blanking, acoustic turbidity, pock mark) 광범위하게 분포하는 것으로 보고된 바 있다 (Choi et al., 1997; Park et al., 1999). 주상시추기에 달린 Acoustic Lance (Fu et al., 1996)을 이용하여 KSSM의 중앙부에서 직접 측정한 퇴적물의 음속은 해저면에서 약 1450 m/s 이지만 음향이상대의 최상부에 해당하는 해저면에서 2.5 m 아래에서 800 m/s 이하로 급격히 감소한다 (Seo et al., 2001; Gorgas et al., 2003). 이 곳에서 회수된 퇴적물의 x radiograph는 많은 수의 미세균열을 보여주는데 이들은 가스방울의 팽창 때문에 생긴 것으로 해석된다 (Seo et al., 2001; Gorgas et al., 2003). KSSM의 남쪽부분에서 얻은 퇴적물을 실험실에서 분석한 결과도 가스의 존재를 확인하였다.

Park et al. (1999)은 KSSM 내의 가스가 생물기원으로서, 유기물의 박테리아 분해에 의해 생긴 것으로 제시하였다. 한국 남동연안에서 발생하는 용승 (Lee and Na, 1985; Lee and Kim, 2003; Lee et al., 2003)은 KSSM 내 유기물의 주된 근원이 될 수 있다.

천부가스는 방울의 형태로 존재하는데 해저면 퇴적물의 물성을 상당히 변화시키며 지질음향분석과 구조물의 건설에 매우 중요하다 (Missiaen et al., 2002). 하지만 가스충진 퇴적물의 두께와 속도 그리고 가스의 농도와 같은 정량적인 자료는 매우 드물다. 현재 사용하고 있는 주상시추기로는 가스충진 퇴적물의 전체를 다 회수할 수 없으며 심부시추도 비용이 많이 든다. 가스 방울에 의해 탄성과 에너지가 많이 감소하므로 고해상 탄성과 탐사로는 가스충진 퇴적층의 기저부분을 보기가 어렵다. 스피커와 에어 건과 같은 고 에너지의 파원을 사용하여 탄성과 탐사를 할 경우 가

스충진 퇴적물은 단일층으로 나타나는 경우가 많으므로 (Carlson et al., 1985; Lee and Watkins, 1998) 역시 기저를 파악하기 힘들다.

이 보고서에서는 Chirp 및 다중채널 스파커 프로파일을 분석하여 KSSM의 중앙부에서 천부가스와 관련된 음향이상을 설명하고 그 아래의 구조를 해석하였다. 가스의 속도효과를 고려한 KSSM의 하부경계면의 구조도와 KSSM의 층후도를 완성하였으며, 가스의 속도효과를 분석하여 가스충진 퇴적물의 속도를 구하고 KSSM 내에 가스충진범위가 얼마나 되는지를 분석하였다. 또한 음향이상의 깊이와 가스의 용해도로부터 용해된 가스와 방울 가스의 전체양을 추정하였다. 시추퇴적물 시료로부터 모은 가스의 조성과 동위원소 특성을 분석하여 가스의 기원을 결정하였다.

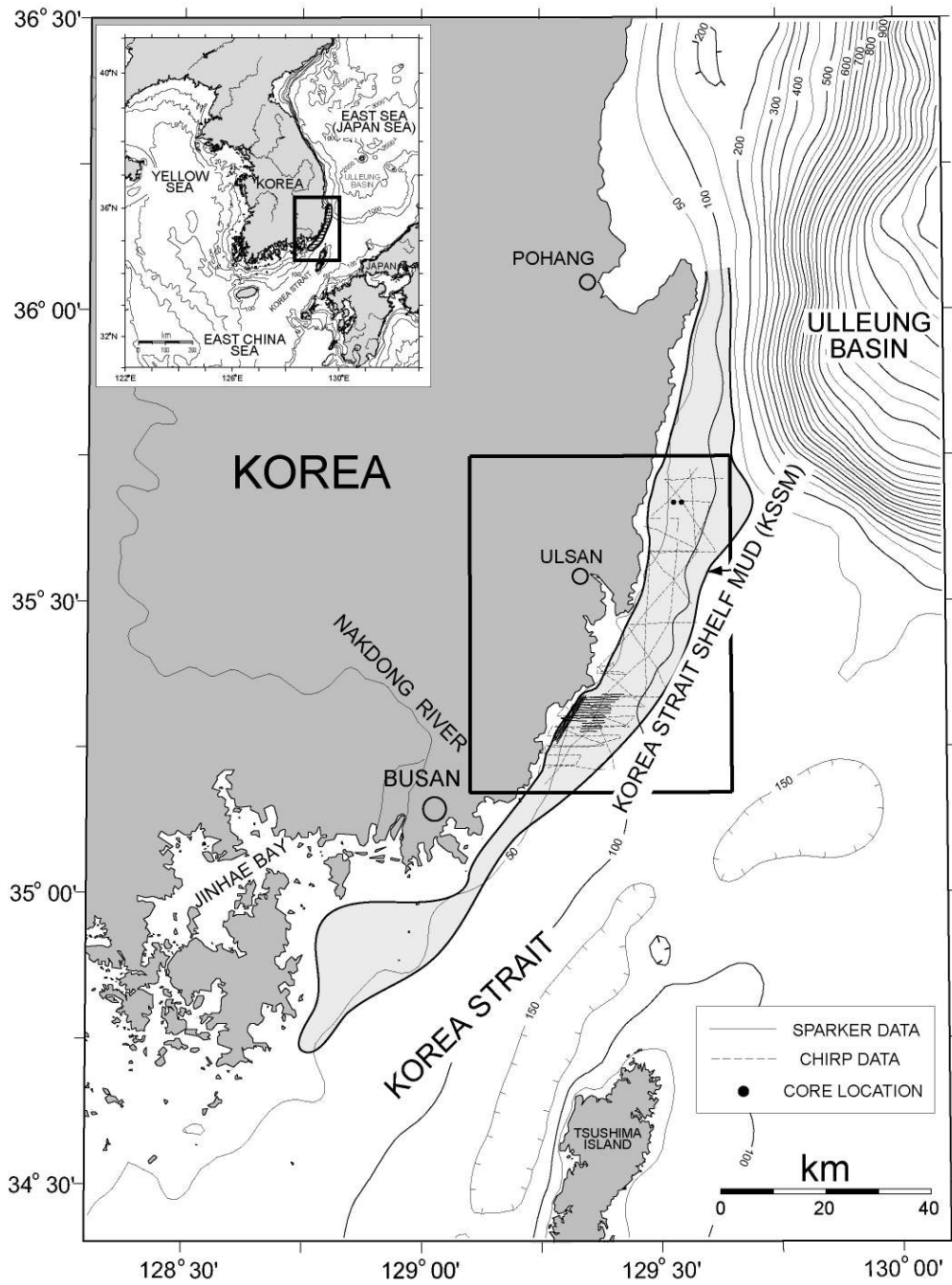


Fig. 1-1. Location of the Korea Strait shelf mud (KSSM) (adapted from KIGAM, 2000). Contours are water depths in meters.

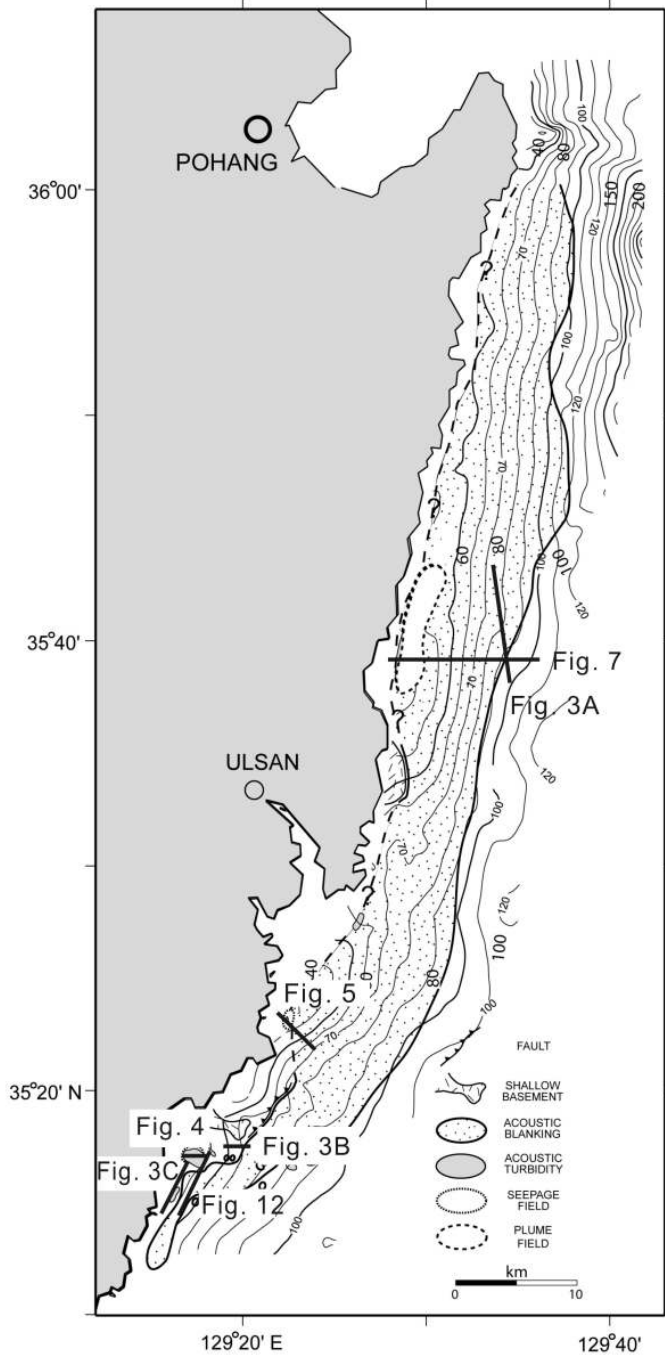


Fig. 1-2. Distribution of shallow gas revealed by acoustic anomalies. Acoustic blanking covers about 60% of the survey area. The seaward edge of the acoustic blanking zone generally coincides with 100-m depth contour. Seepages and plumes are seen only along the landward edge of the acoustic blanking zone. Heavy lines and respective numbers represent locations of seismic profiles.

2. 지질환경

한국 남동대륙붕은 대한해협을 통해 얕은 동중국해와 깊은 동해를 연결한다 (Fig. 1-1). 이 지역의 외 대륙붕(수심 100 m 이상)은 잔류 사질 퇴적물로 덮혀 있다 (Park et al., 1999). KSSM은 수심 100 m 이하의 내 대륙붕 지역에 해안선에 평행하게 분포하며 (Park et al., 1999) (Figs. 1-1 and 1-2) 약 1900 km²의 면적을 갖는다 (KIGAM, 2000). KSSM은 두 개의 층서단위로 이루어져 있다: (1) 빙하기이후의 해침동안 (ca. 15,000 - ca. 6,000 yr B.P.) 형성된 얇은 (두께 2-3 m 이하) 해침퇴적물 (transgressive deposits) (2) 중기 홀로세 (ca. 5,000 - 6,000 yr B.P.) 이후 퇴적된 훨씬 더 두꺼운 (~ 40 m) 현생 mud (Park et al., 1999). 해침 퇴적물은 모래와 약간의 점토 및 진흙으로 이루어져 있으며 현생 mud는 거의 전적으로 평균 입도가 8 φ (0.004 mm)인 mud로 이루어져 있다 (KIGAM, 2000). 현생 mud는 KSSM의 중앙부에서 가장 두꺼우며 북쪽과 동쪽으로 가면서 점차 얇아 진다 (KIGAM, 2000).

한국의 남동부에서 가장 큰 하천시스템인 낙동강은 KSSM의 주된 퇴적물 공급원이다. 낙동강으로부터 나오는 세립질 퇴적물의 약 2/3가 강한 대륙붕 해류에 의해 북동방향으로 운반되어 KSSM을 형성하였다 (Park et al., 1999). 여름동안 남동방향에서 부는 몬순은 한국의 남동해안을 따라 용승을 일으키는데 (Lee and Na, 1985; Lee and Kim, 2003; Lee et al., 2003) 이 용승이 KSSM의 중앙부와 북쪽 지역에 많은 양의 유기물을 제공한다 (Park et al., 1999). KSSM 유기물의 C/N비는 3.0-30.0 으로서 해양기원 (ca. 6.0)에서 육상기원 (>20.0)까지의 값을 가지는데 두 가지 기원이 혼합된 것으로 해석된다 (Nakai et al., 1982).

가. 자료

이 연구에서 사용한 지구물리자료는 155 km의 스파커 프로파일과 280 km이상의 Chirp (2-7 KHz) 프로파일이다 (Fig. 1-1). 스파커 프로파일을 얻기 위해서는 4500 joule의 에너지와 12 채널 스트리머를 스트리머를 사용하였다. Chirp 프로파일은 부경대의 탐양호에서 얻은 것이다. 시추퇴적물은 부경대의 탐양호를 이용하여 5 m 이상의 깊이까지 얻었다. 시추퇴적물에서 모은 가스에 대해서는 미국의 Isotech Laboratories Inc.에서 조성과 탄소동위원소 측정을 하였다.

3. 결과와 토의

가. 음향이상과 가스분출 형태

Chirp 프로파일에서 확인된 가스와 가스분출과 관련된 음향이상은 (1) acoustic blanking 혹은 wipeout, (2) acoustic turbidity, (3) 교란된 해저면, 그리고 (4) 수층내 플룸이다. 이중 acoustic blanking과 acoustic turbidity는 스파커 프로파일에서도 확인된다. Fig. 1-2는 음향이상의 분포와 가스의 분출특성을 보여 준다.

Chirp 프로파일에서 acoustic blanking의 특징은 강한 상부반사와 그 아래 자료의 완전한 wipeout이다 (Fig. 1-3a). Acoustic blanking은 연속된 지역으로 나타나며 조사지역의 상당부분을 차지한다. 일부 지역에서는 acoustic blanking의 상부가 매우 날카로운 반사를 보여 준다. Acoustic blanking의 하부깊이는 약 2 m에서 20 m 범위이다. Acoustic blanking의 양 쪽은 일반적으로 급한 경사를 가지는데 chirp 프로파일에서는 약간 둥글게 나타난다. 연구지역의 acoustic blanking은 Hovland and Judd(1988)가 설명한 acoustic masking과 비교된다. 그리고 연구지역의 남쪽에는 돔 모양의 acoustic blanking도 보인다 (Fig. 1-3B). 이 좁은 acoustic blanking은 Taylor(1992)와 Garcia-Gil et al.(2002)가 설명한 acoustic curtain과 비교된다.

스파커 프로파일에서, acoustic blanking은 양쪽이 가파른 강한 진폭의 극성이 반전된 반사신호로 나타난다 (Fig. 1-3C). Acoustic blanking의 아래에 있는 퇴적층은 스파커 프로파일에서 인식할 수 있다. 스파커 프로파일에서는 가스가 충전된 퇴적물의 낮은 음속 때문에 생기는 velocity pull-down을 acoustic blanking 아래에서 명백히 볼 수 있다.

Acoustic blanking은 육지쪽으로 30 m 수심 이내까지 연장된다. 하지만 어장 때문에 탄성과 자료를 연안의 안쪽까지 얻지 못했으므로 acoustic blanking이 얇은 기반이나 기반단층에 의해 끝나는 곳을 제외하면 acoustic blanking의 자세한 육지쪽 경계는 확인할 수 없다. Acoustic blanking의 바다쪽 경계는 chirp 프로파일과 스파커 프로파일에서 매우 급작스럽게 나타나며 90 - 100 m 수심에 존재한다 (Fig. 1-2). KSSM은 수심 130 m 이상까지 연장되지만 바다쪽으로 acoustic blanking의 경계까

지의 수심은 90 m 이하에서 약 110 m 로서 평균 102 m의 수심값을 가진다. Acoustic blanking의 수심, 지하깊이, 그리고 전체 깊이는 Table 1-1에 기재되어 있다. 퇴적물의 음속은 1550 m/s로 (Kim et al., 1992)로 가정하였다.

Acoustic turbidity (Fig. 1-4)는 chirp 프로파일에서 어두운 번짐상으로 나타나며 아주 불규칙한 혹은 확산된 반사신호뿐만 아니라 다양한 정도의 혼탁상을 보인다. 부분적으로 acoustic turbidity를 통하여 혹은 그 아래에서 퇴적층을 볼 수 있다. Acoustic turbidity의 경우 확산하는 특성 때문에 쉽게 분포를 그릴 수 없다. 스파커 프로파일에서 acoustic turbidity는 불규칙한 상부 반사면을 갖는 강한 반사신호로 나타난다 (Fig. 1-3c). 전체적으로 acoustic turbidity의 반사계수는 acoustic blanking에 비해 chirp 혹은 스파커 프로파일에서 약하다. 스파커 프로파일에서 acoustic turbidity 아래에서 탄성과 에너지는 acoustic blanking 아래에서만만큼 심하게 감소하지 않는다. Acoustic blanking 아래에 나타나는 반사면의 pull-down 역시 acoustic blanking 아래에서 만큼 심하지 않다.

가스의 분출은 chirp 프로파일에서 특징적으로 수직방향의 smearing와 교란된 해지면 반사를 보인다 (Fig. 1-5). 가스의 분출은 acoustic blanking지역의 육지쪽 경계부를 따라서만 나타난다. Acoustic blanking의 위에서 가스의 분출이 발생할 때 acoustic blanking이 확산되게 만들며 때로는 acoustic blanking을 acoustic turbidity와 구분되지 못하게도 한다. 각각의 가스분출은 확산되는 특성과 강도가 약하므로 분포지역을 그리기 힘들다. 스파커 프로파일에서는 가스분출을 인지하지 못 하였다.

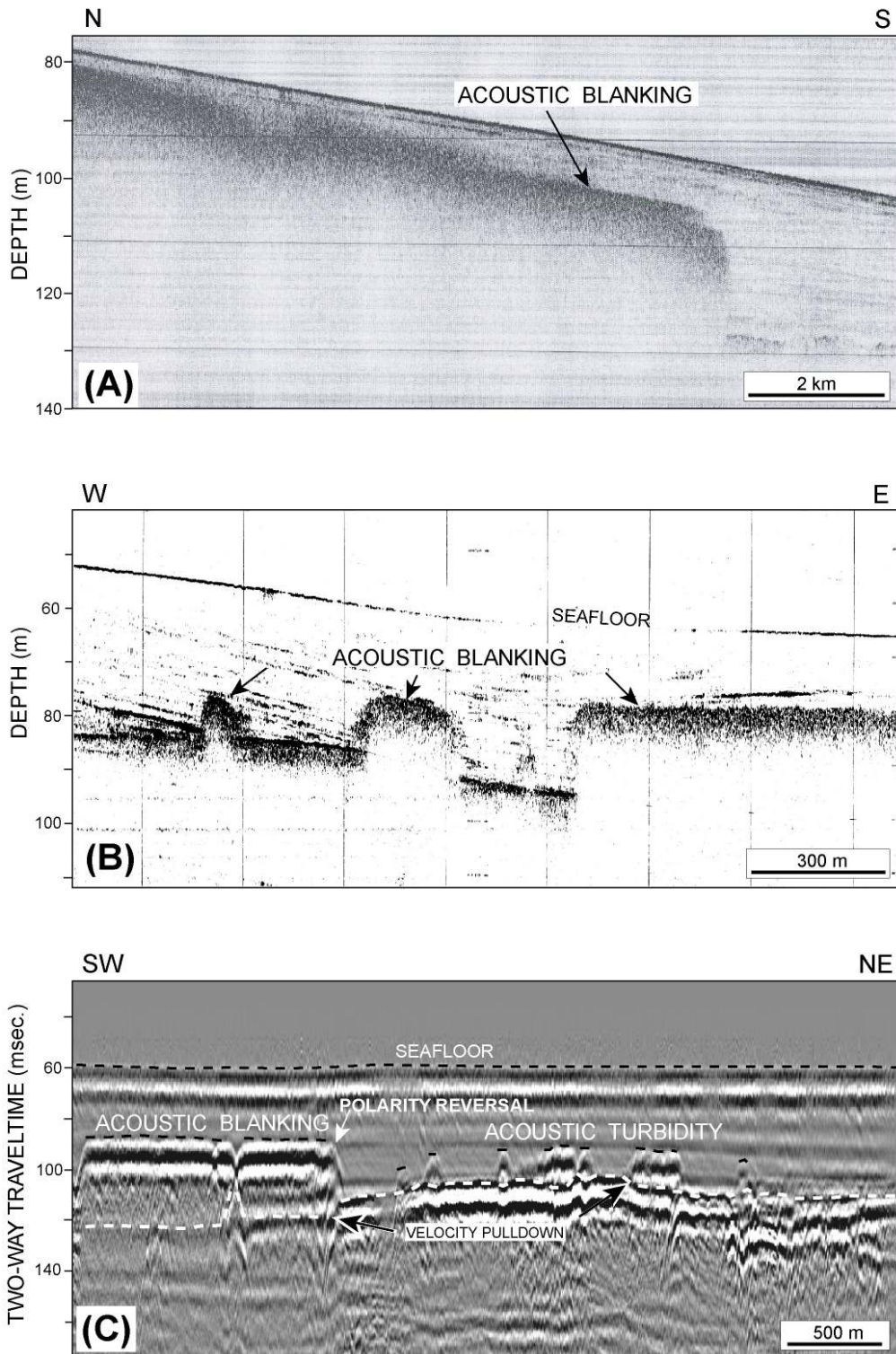


Fig. 1-3. (A), (B) Acoustic blanking on Chirp profiles. (C) Acoustic blanking and acoustic turbidity on sparker profiles.

Table 1-1. Water depths, subsurface depths, and total depths of the seaward edge of the acoustic blanking zone.

Line no	Data type	Anomaly type	Water depth (m)	Subsurface depth (m)	Total depth (m)
01-02	Chirp	AB	77	14	91.66216
01-03	Chirp	AT	93	8.5	101.902
01-04	Chirp	AT	96.5	8.3	105.1926
01-05	Chirp	AB	97	8.3	105.6926
01-06	Chirp	AB	98	7.5	105.8547
01-07	Chirp	AB	99	7	106.3311
01-08	Chirp	AB	92	7	99.33108
01-T1	Chirp	AB	77	11	88.52027
01-T2	Chirp	AB	102	8	110.3784
01-T3	Chirp	AB	94	7	101.3311
01-T4	Chirp	AB	96	13	109.6149
01-Y2	Chirp	AB	100	7	107.3311
01-Y3	Chirp	AB	100	10	110.473
01-Y4	Chirp	AB	95	9	104.4257
02-07-08	Chirp	AB	96	7	103.3311
02-08	Chirp	AB	95	7	102.3311
02-08-09	Chirp	AB	96	12	108.5676
03-01	Chirp	AB	68	18.5	87.375
02-G-04	Sparker	AB	80.66	13.95	94.61
				Average depth (m): 102	

AB: acoustic blanking; AT: acoutic turbidity.

Sound velocity of sediment was assumed to be 1550m/s (Kim et al., 1992).

수층내 plume은 chirp 프로파일에서 거의 수직이며 어두운 smearing 특성을 보인다 (Fig. 1-6). Plume은 지역적으로 아래의 탄성과 자료를 가리는데 연구지역의 북쪽에서 acoustic blanking 지역의 육지쪽 경계부를 따라 모여서 발생하여 plume field를 형성한다. 스파커 프로파일에서는 plume을 인식할 수 없다.

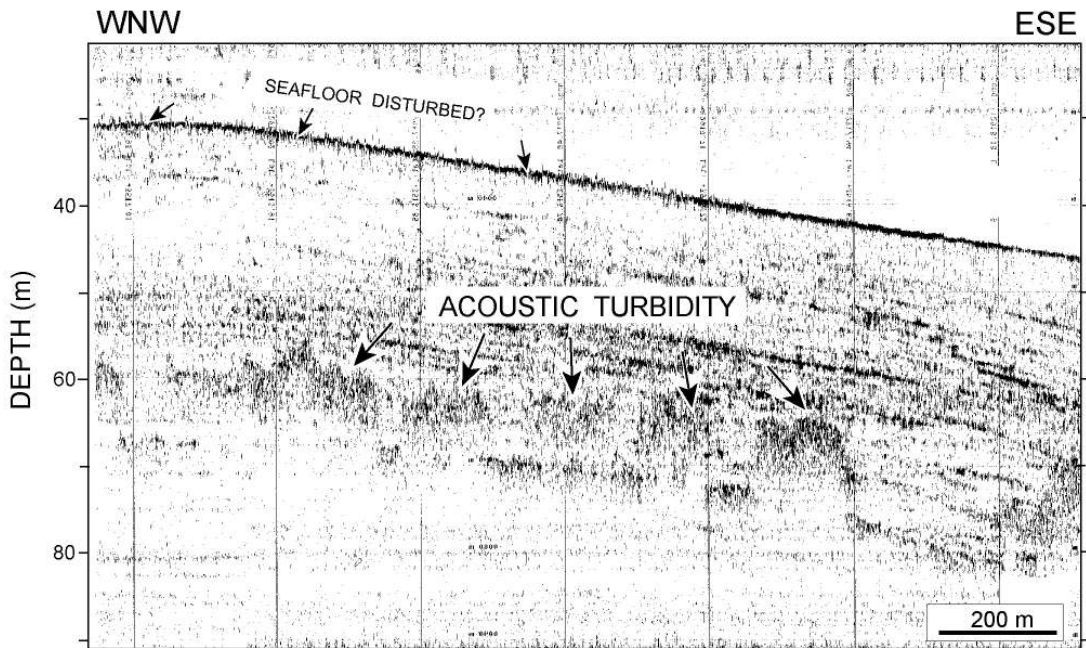


Fig. 1-4. A Chirp profile showing acoustic turbidity characterized by a very irregular or diffuse top reflection. See Fig. 3-2-2 for location.

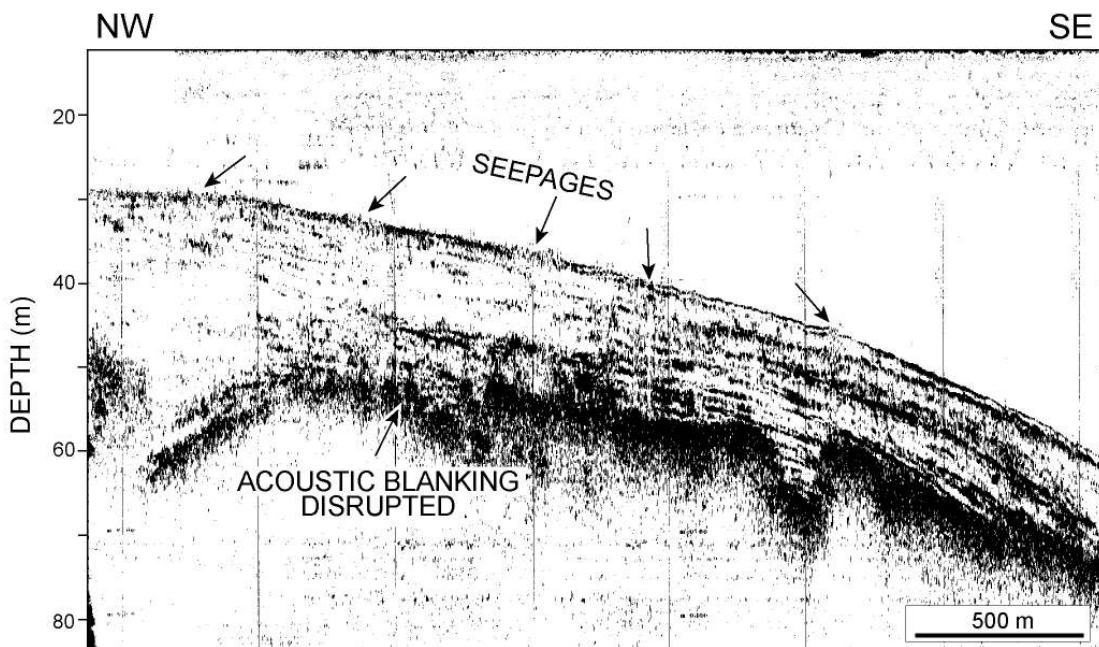


Fig. 1-5. A Chirp profile showing seepages characterized by vertical smearing and disrupted or disturbed seafloor reflection. See Fig. 1-2 for location.

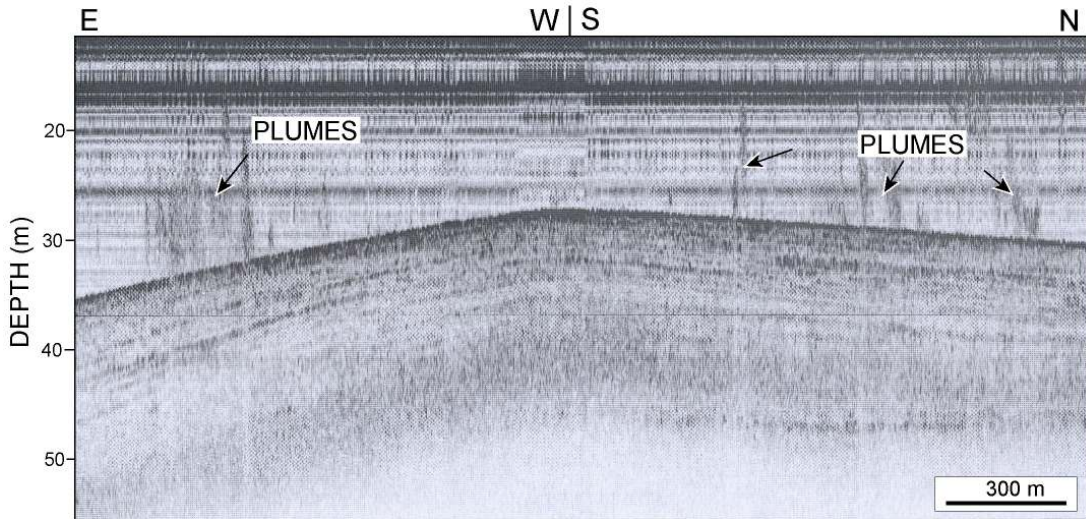


Fig. 1-6. A chirp profile showing plumes in the water column that are represented as nearly vertical dark smearings.

나. KSSM의 하부경계면 구조와 두께

Fig. 1-7의 경우는 니질퇴적체 하부면이 마치 하도 (channel)와 같은 구조가 관찰된다. 니질퇴적체 하부면은 최근의 빙하기에 해수면 하강동안에 침식되었던 해저면으로서 해수면 상승과 함께 조립질퇴적물이 집적된 해침면 (transgressive surface)이다. 따라서 비교적 평탄하여 하도와 같은 구조를 예상할 수 없다. 그러므로 니질퇴적체 하부면의 하도와 같은 구조도 두꺼운 가스층이 음파 전달시간을 지연시키면서 탄성과 단면에서 velocity pull-down을 야기 시켰기 때문이다. 니질퇴적체의 실제 시간 깊이는 가스층의 영향을 받지 않는 평탄한 니질퇴적체 하부반사면을 육지방향으로 연장하여 추정할 수 있다.

Fig. 1-8은 추정한 니질퇴적체 하부반사면을 이용하여 완성한 니질퇴적체 하부반사면의 구조도이다. 해수의 음파속도는 1,480 m/s, 니질퇴적체의 속도는 1550 m/s (Kim et al., 1992)로 가정하였다. 전체적으로 깊이는 육지와 인접한 지역에서

관찰되는 단층의 서쪽에서 약 50 m 정도이고 바닷쪽으로 가면서 서서히 증가하여 조사지역 북쪽에서 160 m 이상에 이른다. 단층을 경계로 비교적 뚜렷한 깊이 차이가 관찰되는 것은 단층 형성 후에 니질퇴적체가 퇴적되었기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

니질퇴적체의 두께 (Fig. 1-9)는 연구지역 북쪽의 단층 인접지역에서 60 m 이상이며 바닷쪽으로 가면서 점진적으로 감소하여 탄성파자료의 해상도 이하의 두께에 이른다. 50 m 이상의 두께를 보이는 지역은 니질퇴적체의 방향을 따라서 발달하고 있다.

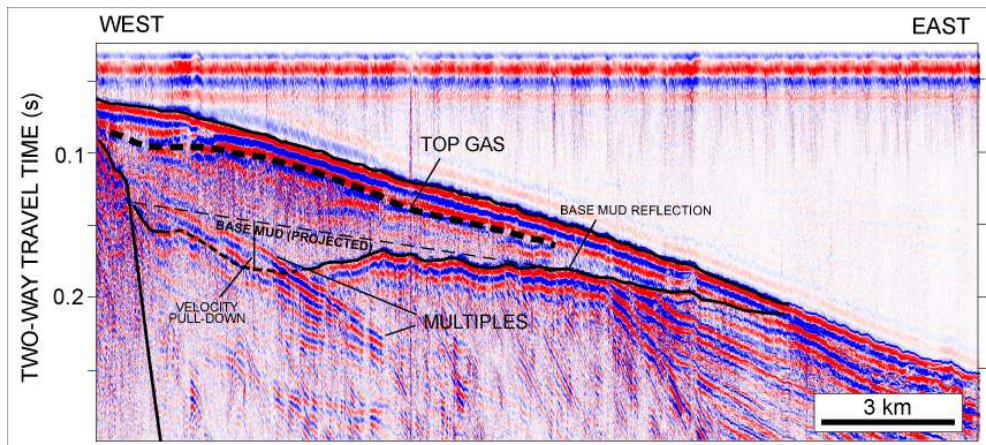


Fig. 1-7. A sparker profile showing channel-like structure on the lower boundary of KSSM that is caused by the velocity pull-down.

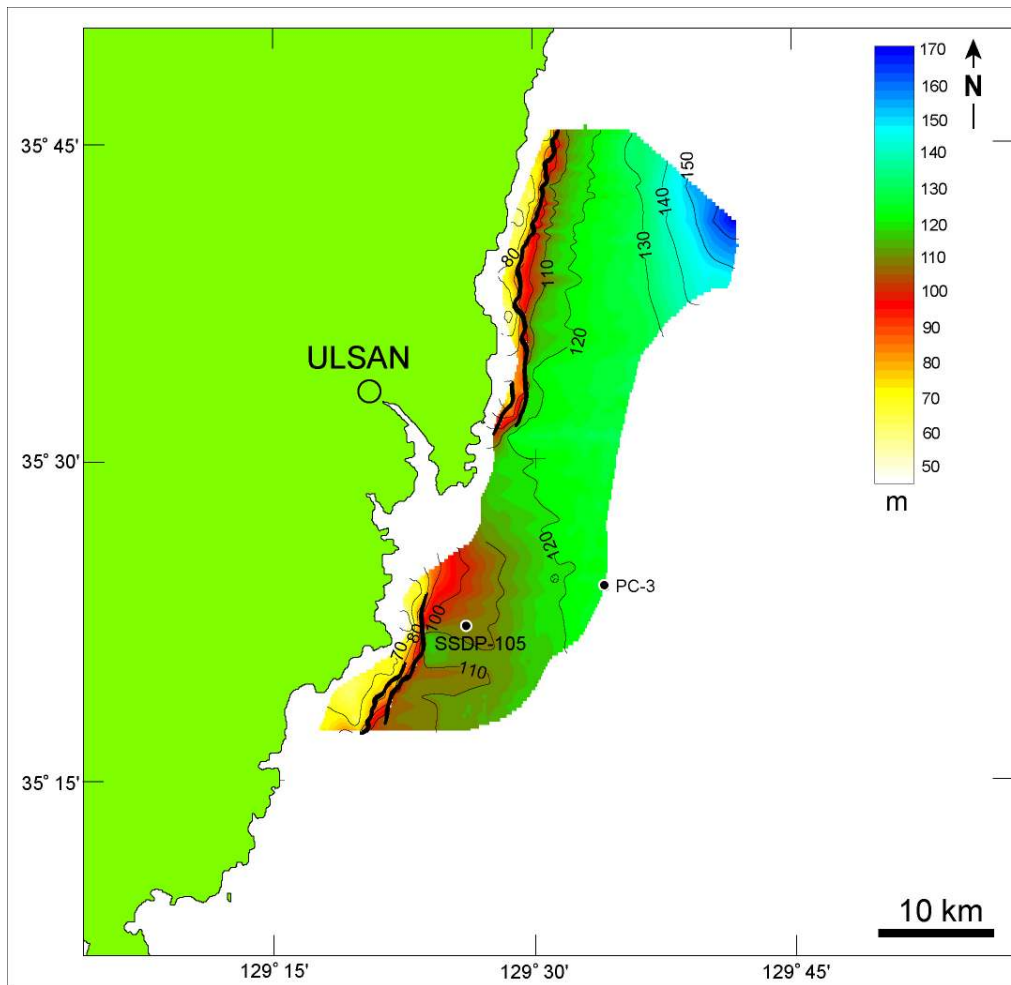


Fig. 1-8. Thickness of KSSM and location of faults. Contours are in meters.

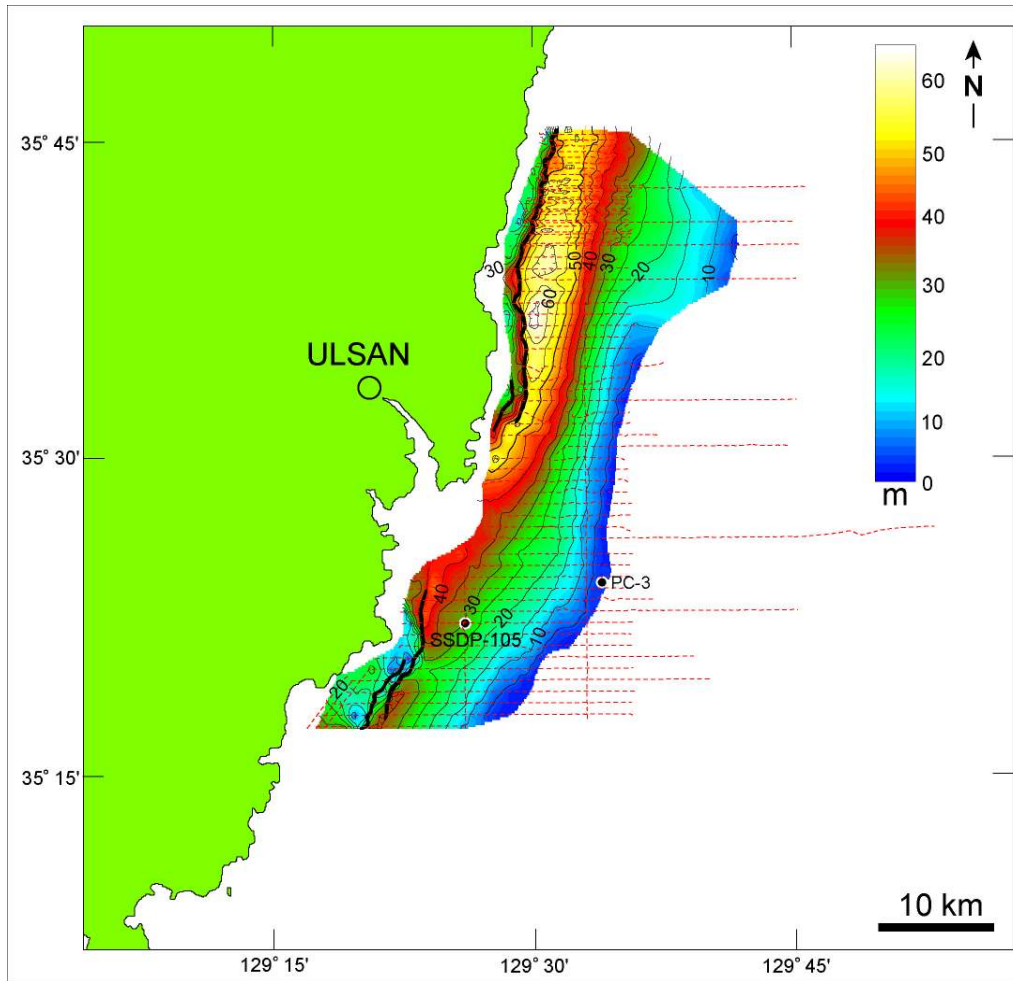


Fig. 1-9. Thickness of KSSM in meters. Thicks lines are locations of faults.

다. 가스충진 퇴적물의 분포와 가스용해도 고찰

연구지역에서 음향이상과 가스분출 특성의 분포에 관해 가장 흥미있는 관찰은 다음과 같다 : (1) acoustic blanking이 급작스럽게 바다쪽으로 끝남 (2) acoustic blanking 지역의 육지쪽 가장 얇은 경계를 따라 가스 분출이 발생. Kim et al. (2004)는 KSSM의 북쪽 지역의 육지쪽 경계를 따라 매우 광범위한 가스분출지역을 보고한 바 있다. 그들은 KSSM내 천부 가스의 분포는 수심에 따라 결정되며 따라서 온도와 함께 압력이 공극수내에 가스의 용해를 결정하는 주 된 요인이라고 제시하였다. 연구지역의 acoustic blanking 지역의 육지쪽과 바다쪽 경계부 사이에서 압력

의 차이는 약 7 atm 이며 물의 온도 차이는 5°C 이하이다 (Lee et al., 2003). 수온의 차이는 여름동안 10°C 까지도 될 수 있다. 가스의 용해도에 대한 압력차이의 영향은 온도차이에 비해 배 이상 되기 때문에 압력이 훨씬 더 중요한 요인이다 (Lide, 1995). Wever and Fiedler (1995) 그리고 Hagen and Vogt (1999)는 공극내 가스의 온도에 좌우되는 용해도에 의해 acoustic turbidity의 깊이가 계절적으로 변동함을 보고하였다, KSSM 내 acoustic blanking 지역의 깊이 또한 계절적 변화를 보인다 (Seo and Kim, 2003) 하지만 그 변화폭은 1 m 미만으로 작게 나타난다.

Fig. 1-10은 KSSM 내 acoustic blanking과 gas 분출 그리고 plume의 분포를 도식적으로 나타낸 것이다. 수심이 깊어짐에 따른 압력의 증가와 수온의 감소가 공극수내 가스의 용해도를 증가시키며 퇴적물내 자유가스의 양을 감소시킨다고 볼 수 있다. 따라서 가스 용해도의 증가는 연구지역에서 약 100 m 수심보다 더 깊은 곳에서 자유가스의 발생을 제한한다. 반면에 수심이 감소함에 따라 압력이 감소하고 수온이 증가하는 것은 가스의 용해도를 감소시켜서 acoustic blanking지역의 육지쪽 경계를 따라 퇴적물내 자유가스의 양을 증가시킨다. 따라서, acoustic blanking 지역의 가장 얇은 육지쪽 경계를 따라 가스방울이 수층으로 분출될 수 있다. 얇은 수심에서 압력이 감소되는 것은 또한 퇴적물의 덮는 효과를 감소시키므로 가스분출을 더 촉진할 수 있다.

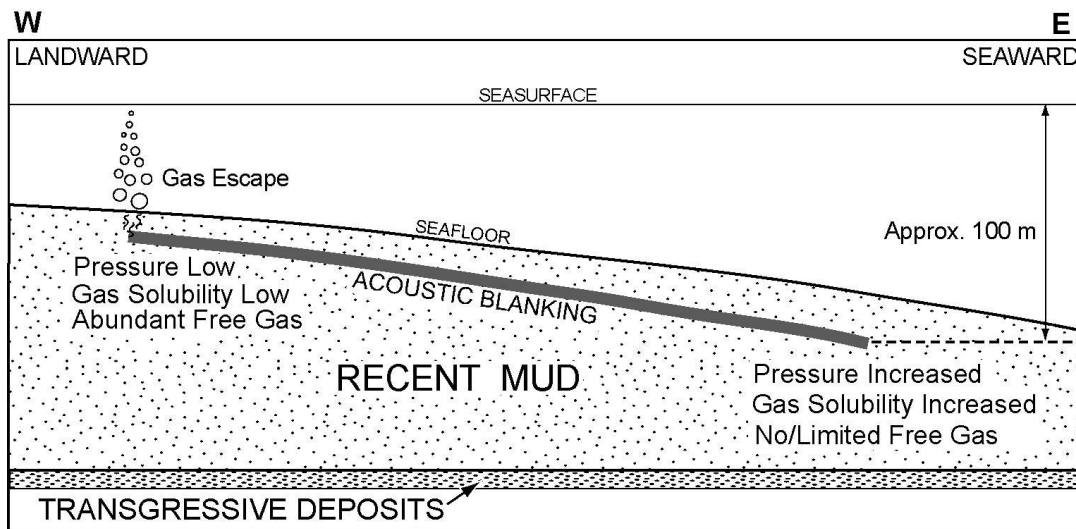


Fig. 1-10. Schematic cross section showing the distribution of acoustic blanking, gas seepages, and plumes in the KSSM.

라. 가스의 조성과 기원

해저 퇴적물내에 존재하는 천부 가스는 생물기원 (biogenic) 이거나 비생물기원 (열기원: thermogenic) 이다. 생물기원 가스는 저온에서 유기물이 박테리아에 의해 분해되어 생기며 열기원의 가스는 상당히 깊은 매물 심도에서 유기복합물의 고온 열분해(cracking)에 의해 생긴다. 생물기원 가스는 건조하며 특징적으로 메탄으로 이루어 진다. 반면에 열기원의 가스는 더 무거운 탄화수소(에탄, 프로판 등)로 이루어 진다. 생물기원의 메탄내에 탄소는 동위원소적으로 가벼워서 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값이 큰 음수이다. 반면에 열기원의 메탄 탄소는 동위원소적으로 무거워 $\delta^{13}\text{C}$ 이 작은 음수이다 (Bernard et al., 1977; Faber et al., 1992).

연구지역에서 채취한 두 개의 퇴적물 시료는 해저면 아래 약 3 m에 있는 acoustic blanking대를 통과하여 얻은 것으로 전적으로 메탄으로 이루어져 있다 (Table 1-2). 이들 시료의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -76.6에서 -83.7 per mil 로서 열기원의 메탄의 최대 $\delta^{13}\text{C}$ 값 (ca. -50 per mil) (Bernard et al., 1977)보다 음수값에서 더 크다. 따라서, KSSM내 가스는 생물기원일 것이다. 이것은 또한 깊은 곳에 있는 열기원의 가스가 얕은 곳의 KSSM내로 이동하기에 용이하도록 하는 탄화수소의 이동통로 (투과성이 좋은 층, 부정합, 그리고 단층)가 별로 없음을 지시한다. KSSM 내에는 단층활동의 증거가 존재하지 않는다.

Table 1-2. Hydrocarbon components and $\delta^{13}\text{C}$ values of gas samples from sediment cores.

Core	Depth below seafloor (cm)	C ₁ (ppm) methane	C ₂ (ppm) ethane	C ₂ H ₄ (ppm) ethylene	C ₃ + (ppm) propane and heavier	$\delta^{13}\text{C}_1$ (per mil)
1	389	59800	0	2	2	Not analyzed
1	429	312500	0	0	0	-78.4
1	449	302800	0	0	0	Not analyzed
1	469	226000	0	0	0	Not analyzed
1	489	660600	0	0	0	-77.6
2	354	870600	0	0	0	Not analyzed
2	374	743200	0	0	0	Not analyzed
2	414	684700	0	0	0	Not analyzed
2	434	784500	0	0	0	-83.7
2	474	232500	1300	0	0	-82.4
2	494	858600	0	0	0	-83.4

마. 가스충진 퇴적물의 정량적 특성

1) 가스의 속도효과

Figs. 1-11과 1-12는 속도의 pull-down이 나타나는 스파커 프로파일과 해석결과이다. Acoustic blanking 아래 전체 mud 층이 가스로 충전되어 있으며 pull-down이 전적으로 가스의 존재때문이라고 가정하여 가스의 속도효과를 이용하여 가스충진 퇴적물의 속도를 구하였다. 먼저, 가스충진된 퇴적물의 상부경계와 mud의 바닥을 정확히 해석하기 위해 해저면 반사신호로부터 스파커의 파형요소(source wavelet)을 추출하였다 (Fig. 1-13).

가스충진 지역 외부에서 보이는 mud의 기저를 가스충진 퇴적물 아래로 연장하여 mud의 왕복주사 두께와 속도의 pull-down에 의한 시간지연을 추정하였다. 시간지연의 값은 왕복주사로 4 - 15 ms이다. 가스가 없을 경우 mud의 속도가 1550 m/s (Kim et al., 1992)라고 가정하여 mud의 두께를 계산하였다. 시간지연과 mud의 두께를 이용하여 가스충진 퇴적물의 속도를 계산하였다 (Fig. 1-14). 이렇게 구한 속도값은 950에서 1200 m/s 이상으로 수평방향으로 큰 편차를 보인다. 이것은 mud 내 미세한 조직의 변화에 따른 공극률의 변화와 관련된 가스함량의 변화일 가능성이 크다. 퇴적물 내에 가스의 함량이 조금만 변하여도 가스 충전 퇴적물의 속도는 상당히 변한다 (Wilkins and Richardson, 1998).

가스충진 퇴적물의 속도는 현장에서 측정된 것처럼 800 m/s로 (Gorgas et al., 2003) 일정하다고 가정할 수도 있다. 이 경우 음향이상대 아래의 30 - 70 %가 가스로 충전되어 있다고 추정할 수 있다 (Fig. 1-15). 가스충진 퇴적물의 분포는 수평방향의 속도변화를 반영한다.

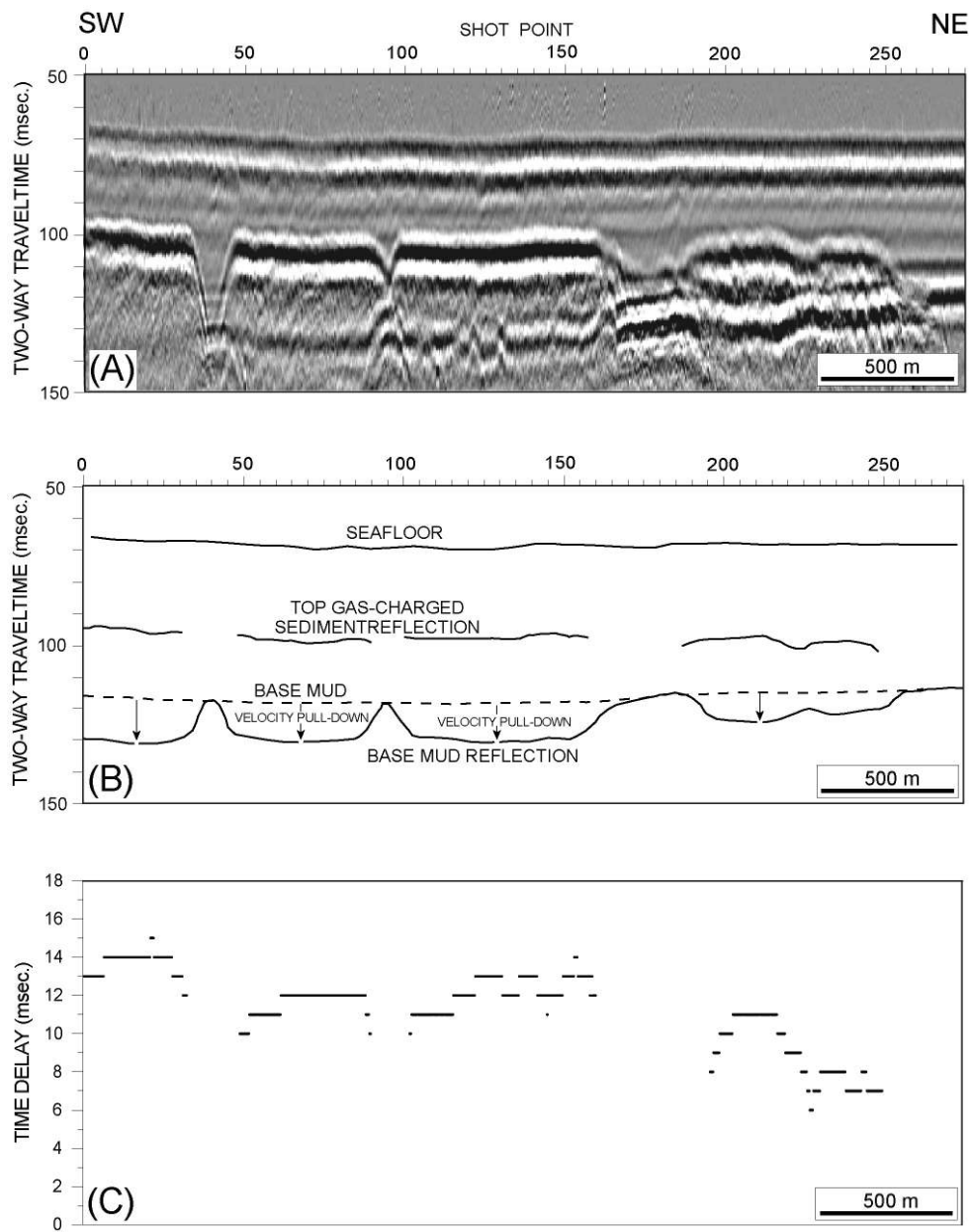


Fig 1-11. (A) and (B) A sparker profile showing acoustic blanking and velocity pull-down and its interpretive line drawings. (C) Time delay caused by gas. See Fig. 1-2 for location.

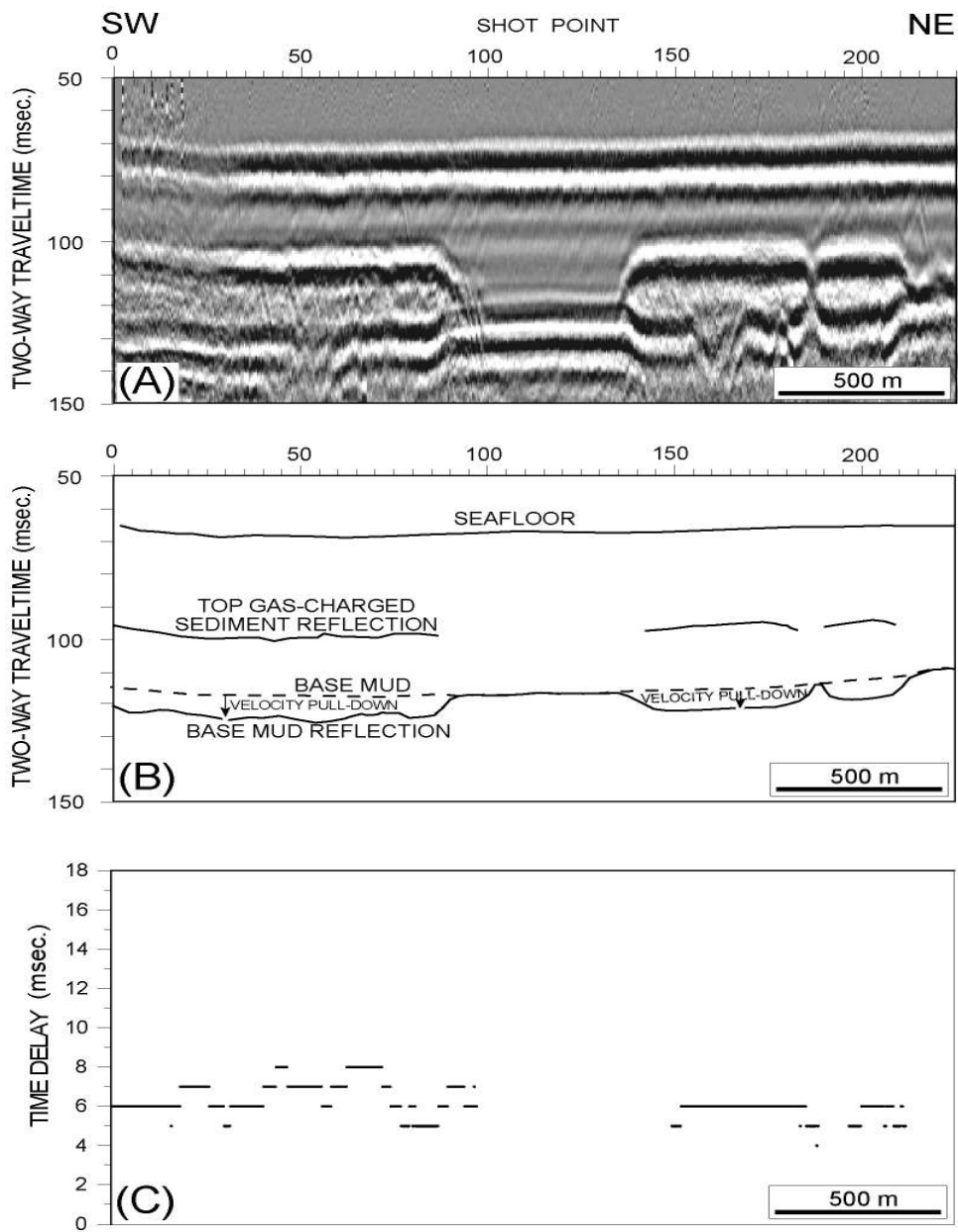


Fig. 1-12. (A) and (B) A sparker profile showing acoustic blanking and velocity pull-downs and its interpretive line drawings. (C) Time delay caused by the presence of gas. See Fig. 1-2 for location.

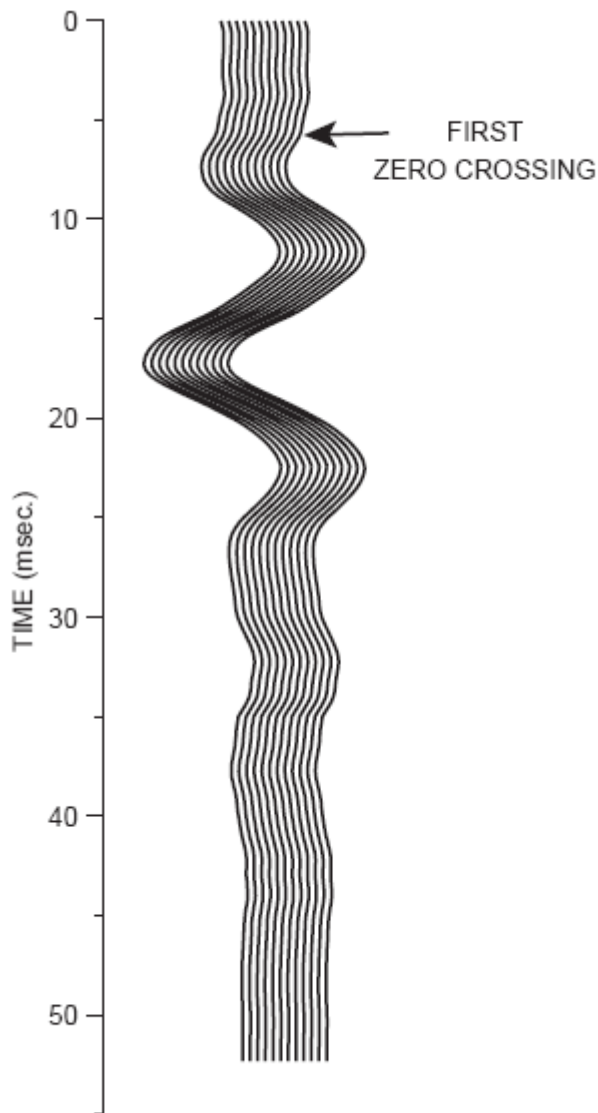


Fig. 1-13. The sparker source wavelet extracted from sea floor reflection.

2) 가스의 양

Acoustic blanking이 약 102 m깊이에서 급작스럽게 끝나는 것으로 미루어 이 깊이에 해당하는 압력과 온도에서 공극수가 메탄을 완전히 용해한다고 볼 수 있다. 중국 지질지구물리연구소의 X. Wu에 의해 개발된 PCScore를 이용하면 102 m 깊이에서 메탄의 용해도는 2.56×10^{-4} kg/kg (2.88×10^{-4} mol/mol) 으로 계산된다. PCScore는 소프트웨어로부터 계산된 메탄의 용해도를 전형적인 심해환경에 (2000 m 수심) 대한 열동역학적 모델로부터 (Zarsepina and Buffett, 1998) 계산된 용해도와 비교함으로써 검증하였다 (Fig. 3-16). 수화물의 존재가 알려진 여러 곳에서 메탄

의 용해도가 변한 범위를 고려할 때 (Davies et al., 2004; their Fig. 4) 두 가지 계산의 결과는 매우 작은 차이를 보였다. PCScore의 입력 변수는 온도, 압력, 그리고 염분도이다. 온도는 두 개 퇴적물 시료의 위와 아래에서 측정된 값의 평균치 (10.5°C)를 사용하였다. 압력값으로는 acoustic blanking 지역의 바다쪽 경계의 평균 깊이 (102 m)에 해당하는 1,01 Mpa를 사용하였다. 염분도의 값 0.034 kg/kg은 CTD측정으로부터 구한 것이었다.

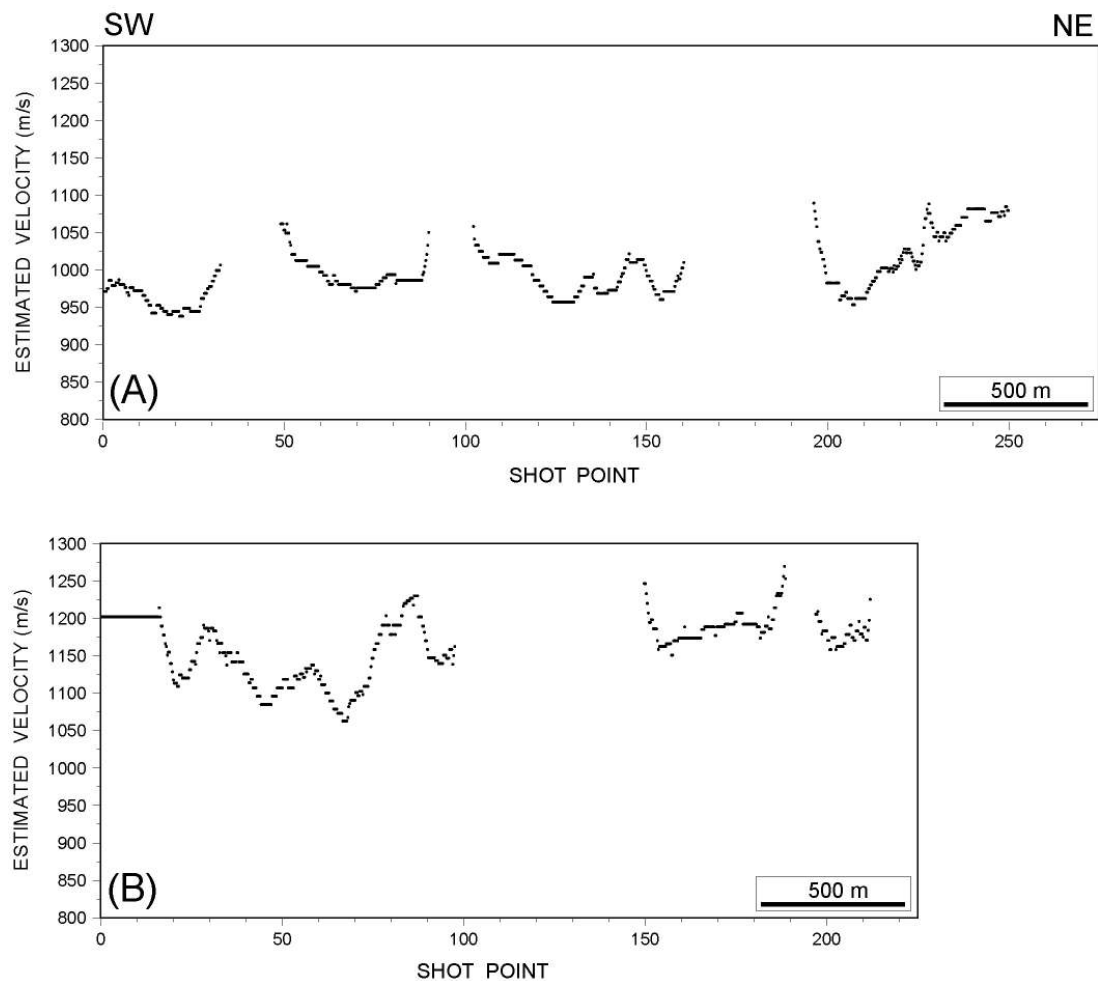


Fig. 1-14. (A) and (B) Estimated velocities of gas-charged sediments across the sparker profile shown in Figs. 1-11 and 1-12, respectively.

용해된 메탄과 방울상태의 메탄의 평균농도가 2.56×10^{-4} kg/kg이며 KSSM의 공극률은 일정하다고 가정하면 연구지역에서 메탄의 전체양을 계산할 수 있다. 퇴적물시료에서 측정된 공극률은 78% (Seo et al., 2001) 이다. 해저면에 있는 전형적

인 세립질의 육상기원 퇴적물의 공극률은 약 72%이며 해저면에서 50 m 깊이에서는 68%까지 감소한다 (Hamilton, 1976). KSSM의 평균두께는 20 m이므로 현생 mud의 평균공극률은 75%로 가정하였다. 면적-깊이 방법(Jahn et al., 1998)을 사용하여 KSSM의 두께분포(KIGAM, 2000)로부터 35°N과 36°N사이에 있는 KSSM의 전체부피(V_m)를 계산하면 $2.2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 이 된다. 면적-두께 방법은 석유지질학에서 저류암의 부피계산을 위해 흔히 사용한다. 따라서 KSSM내 공극수의 전체부피(V_{pw})는 다음과 같다:

$$V_{pw} = V_m \times \text{fractional porosity} (0.75) = 1.65 \times 10^{10} \text{ m}^3 .$$

메탄의 전체양 (M_t)은

$$M_t = V_{pw} \times 2.56 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$$

이 된다. 따라서 약 $4.22 \times 10^6 \text{ kg}$ 의 용해되거나 방울상의 메탄이 35°N과 35.7°N사이에 있는 KSSM 내에 존재한다. 이것은 1 기압 15°C에서 $6.23 \times 10^6 \text{ m}^3$ 에 해당한다.

4. 요약 및 결론

KSSM의 중앙부에서 천부가스는 연구지역의 약 60%에 걸쳐서 분포하는 acoustic blanking, acoustic turbidity, 분출, 그리고 수층내 plume으로서 존재한다. Acoustic blanking은 약 102 m의 깊이에서 급작스럽게 사라진다. 분출과 plume은 대부분 acoustic blanking 지역의 가장 얇은 육지쪽 경계에서 보인다. 이러한 사실은 수심이 깊어짐에 따라 압력이 증가하고 수온이 감소하여 102 m 깊이보다 더 깊은 곳에서 자유가스가 형성되지 못하게 하는 것으로 해석된다. 반면에, acoustic blanking 지역의 육지쪽 경계를 따라서 더 낮아진 압력에 의해 가스의 용해도가 감소함에 따라 퇴적물내 자유가스의 양이 증가되어 가스분출이 촉진된다.

시추퇴적물로부터 얻은 가스는 거의 전적으로 생물기원 메탄가스로 이루어져 있다. Acoustic blanking지역이 바다쪽으로 가면서 급작스럽게 사라지는 것은 102 m 깊이에서 메탄이 완전히 용해됨을 지시한다. 이 깊이에서 용해된 메탄의 양이 평균적인 메탄의 양을 나타내고 mud의 공극률 평균이 75% 라고 가정할 때 용해되거나 방울형태로 존재하는 메탄의 전체 양은 1 기압 15°C에서 $6.23 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로 계산된다.

Acoustic blanking 아래 전체 mud층이 가스로 충전되었다고 가정하면 가스의

속도효과로부터 가스로 충전된 퇴적물의 속도가 950에서 1200 m/s 이상까지의 값을 가진다. 반면에, 가스로 충전된 퇴적물의 속도가 800 m/s 로 일정하다고 가정하면 acoustic blanking 아래에서 퇴적물의 30-70%가 가스로 충전되었다고 볼 수 있다.

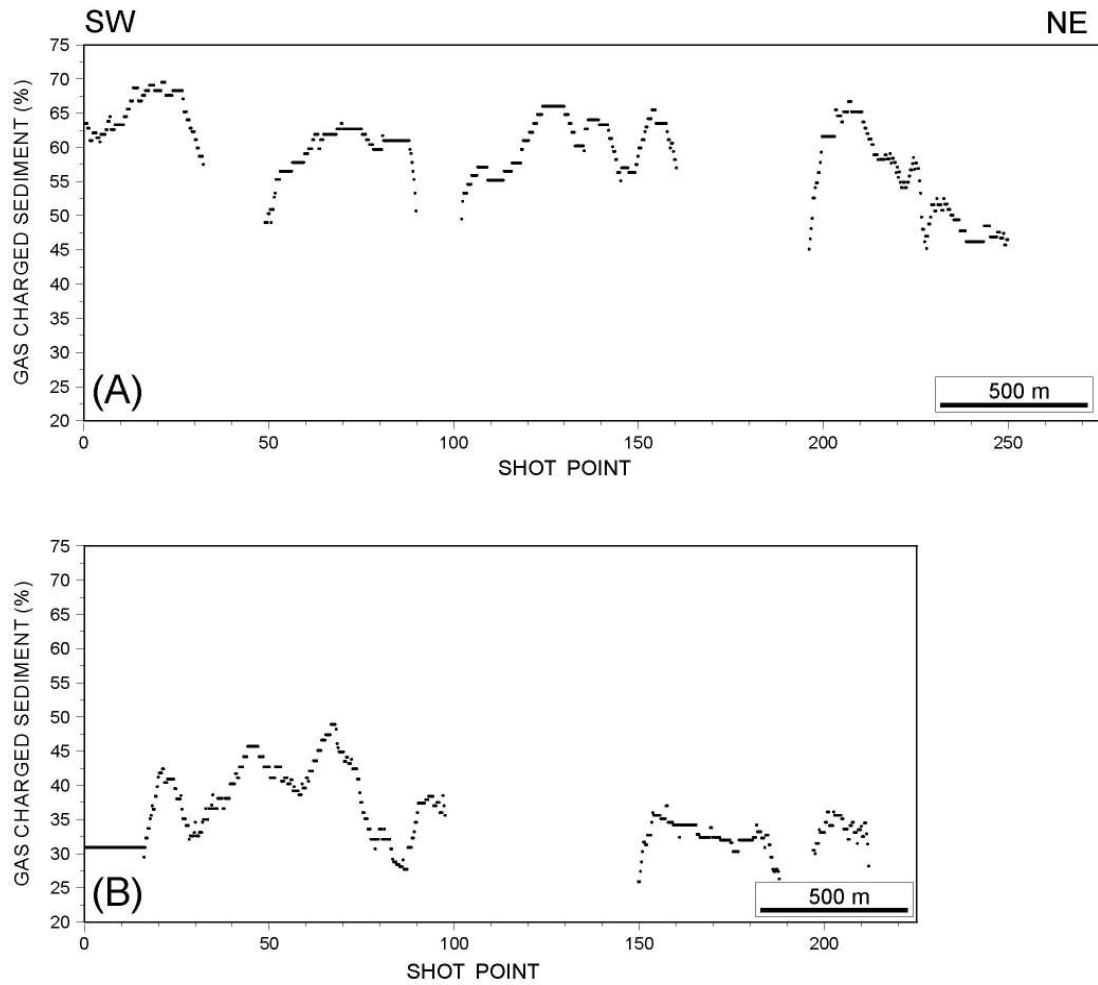


Fig. 1-15. (A) and (B) Gas-charged sediments (%) below acoustic blanking across the sparker profile shown in Figs. 1-11 and 1-12, respectively, assuming that velocity of gas-charged sediments is 800 m/s.

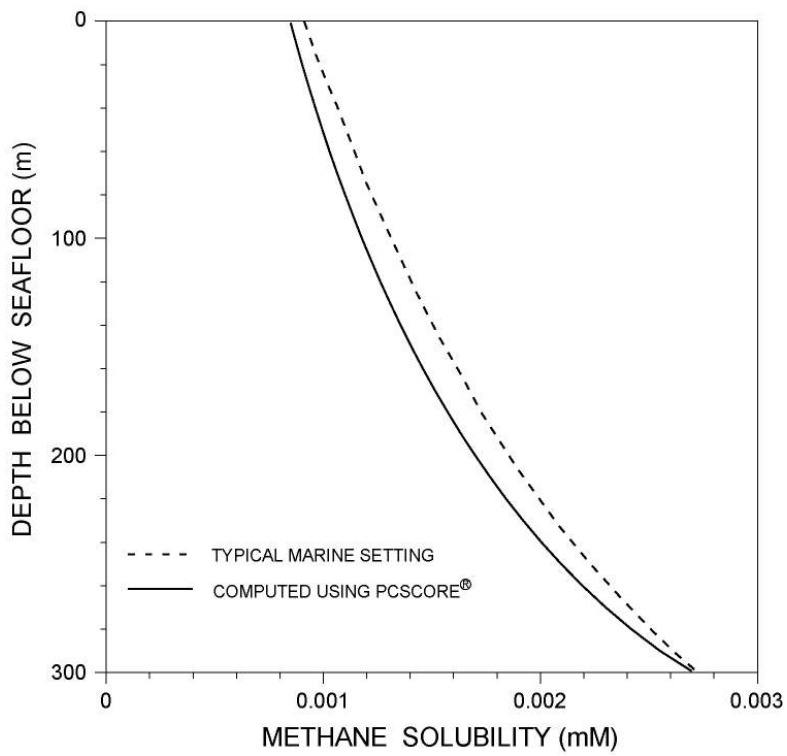


Fig. 1-16. Comparison of methane solubility computed using PCScore and that computed from thermodynamic model (Zatsepina and Buffet, 1998) for a typical deep marine setting (2000 m water depth).

제 2 절 제 4기 후기동안의 동해 남서부 사면에서의 해저사면 붕괴의 발생 및 특성 변화

1. 서 론

해저사면 붕괴는 대륙사면, 해저협곡, 화산섬 사면, 삼각주 사면, 피오르드 사면 등 다양한 퇴적환경에서 일어난다(Locat and Lee, 2002; Canals et al., 2004; Hampton et al., 1996; Masson et al., 2002; Piper et al., 1985, 1999). 해저사면 붕괴에서 발생한 사면사태는 경사 하부방향으로 퇴적물 중력류(mass flows), 즉 암설류(debris flows) 및 저탁류(turbidity currents)로 전이한다(Mulder and Cochonat, 1996; Canals et al., 2004; Chough et al., 1985; Hampton et al., 1996; Lastras et al., 2004; Piper et al., 1999; Tripsanas et al., 2008a). 최근 발전된 고해상 해양 지질 및 지구물리 장비로 인해 중력류 퇴적물의 암상, 형태, 내부 및 외부 구조, 이동 거리와 분포는 경사상부 지역에서 일어난 해저사면 붕괴의 발생 형태, 발생 원인, 발생 기작, 붕괴된 퇴적물 부피, 구성물질과 빈도에 의해 결정되는 것이 밝혀졌다(Locat and Lee, 2002; Canals et al., 2004; Hampton et al., 1996; Rothwell et al., 1998; Tripsanas et al., 2008b).

동해 울릉분지에서 해저사면 붕괴흔적은 상부와 중부 사면을 따라 광역적으로 분포하고 있다(Chough et al., 1985; Lee et al., 1999; 그림 2-1). 사면에서 붕괴된 퇴적물은 경사하부 방향으로 중력류로 전이되면서 하부경사지역에 암설류 퇴적물(debris-flow deposits)과 저탁암(turbidites)을 형성시켰다(Chough et al., 1997; Lee et al., 2004; 그림 2-1). 울릉분지의 분지평원에 분포하는 후기 플라이스토세와 홀로세의 저탁암에 대한 자세한 퇴적시기와 퇴적특성은 마지막 빙하기에서부터 현재까지 발생한 해저사면 붕괴의 특성과 발생 시기를 규명할 수 있는 중요한 단서들이다. 제 4절에서는 울릉분지 남

서부 평원에 분포하는 제 4기 후기(<29.4 cal kyr BP) 저탁암의 두께, 구성 성분, 형태와 고해상 퇴적시기를 매우 자세하게 분석한다. 이들 결과를 이용해 29.4 cal kyr BP 부터 현재까지의 울릉분지 남서부 사면에서 발생된 해저사면 붕괴의 빈도, 규모 및 붕괴지역에 대한 변화를 규명하고, 이들 해저사면 붕괴를 발생시킨 원인을 밝히고자 한다.

2. 해양지질 배경

울릉분지는 수심이 깊고 거의 닫혀있는 형태의 후열도 분지이다(Yoon and Chough, 1995; 그림 2-1). 울릉분지는 한반도 대륙주변부, 한국대지, 오키뱅크, 일본 열도와 접하고 있다. 울릉분지 서쪽에 있는 한반도 대륙붕은 폭이 25 km 이내로 매우 좁고, 매우 급한(4~10°) 대륙사면에 접하고 있다. 이 대륙붕에는 남-북 방향의 후포 뱅크와 후포 협곡이 분포하고 있다. 울릉분지의 남쪽과 동쪽으로는 대륙붕 폭이 30~150 km로 매우 넓고, 사면은 경사가 1~2° 정도로 완만하다(그림 2-1). 울릉분지의 북동쪽에는 화산섬(울릉도와 독도)과 화산해저산이 분포한다(그림 2-1). 울릉분지 평원은 북동쪽으로 수심이 깊어지다가 울릉분지간 수로(Ulleung Interplain Gap)을 통해 일본분지와 연결된다.

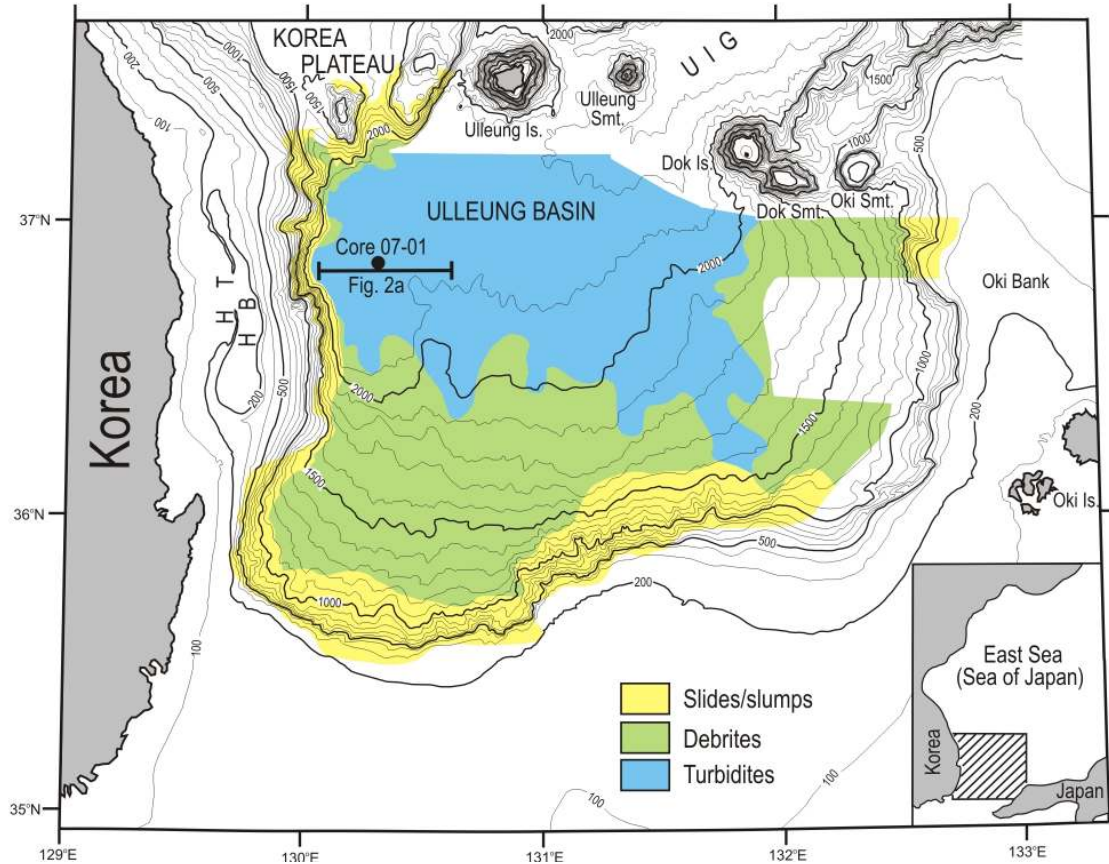


그림 2-1. 울릉분지와 주변의 해저지형과 획득된 시추퇴적물 위치. 고해상 Chirp (2~7 kHz) 천부지층 탄성과 자료를 통해 파악된 해저사면 사태, 암설류 퇴적물 및 저탁암의 분포는 수심에 거의 평행하다(Lee et al., 1999, 2004). 수심은 미터이다. HP = 후포뱅크; HT = 후포해곡; Smt. = 해저산; UIG = 울릉분지간 수로.

울릉분지의 최상부(약 30~70 m 두께) 퇴적층은 주로 해저사면사태와 중력류 퇴적물로 구성되어 있고, 두께 1~2 m의 홀로세 반원양성 퇴적물이 이들 퇴적물을 덮고 있다(Chough et al., 1985; Lee et al., 1996). 남부와 동부 사면에는 수심 300~1000 m 사이에 해저사면사태 퇴적물이 광범위하게 분포하고 있다 (Chough et al., 1997; Lee et al., 2004). 남부 사면의 상부와 중부 지역에는 큰 규모의 수많은 해저계곡과 붕괴흔적(scar)이 나타난다(그림 2-1). 남부와 동부 사면에 분포하는 해저사면사태 퇴적물은 경사 하부방향으로 암설류 퇴적물로 전이하는데 이 암설류 퇴적물은 약 수심 2000 m까지 분포한

다(Lee et al., 1999; 2004). 남부와 동부 사면과 비교할 때, 후포뱅크 동쪽에 있는 서부 사면에는 작은 규모의 해저사면사태 퇴적물, 붕괴흔적이 약 수심 600 m 아래에 분포하며, 암설류 퇴적물은 사면기저부에 제한적으로 나타난다(Chough et al., 1991; Lee et al., 2004).

동해에서 심층수 순환은 심하게 변동하면서 저층수의 산소농도에 영향을 미쳤다(Gamo, 1999; Kim et al., 1999). 마지막 빙하기 이후, 동해의 저층수 농도는 급격한 변화를 겪었다. 시추퇴적물의 지화학 및 고생물 증거들은 해수면이 현재보다 약 120~130 m 정도 낮아진 마지막 빙하기에는 저층이 무산소 환경임을 보여준다(Oba et al., 1991; Yokoyama et al., 2007). 마지막 빙하기에 고립된 동해에 민물이 계속 유입되면서 표층 염분이 낮아져 강하게 수층이 층리화되면서 저층이 무산소환경으로 변했다(Gorbarenko and Southon, 2000; Yokoyama et al., 2007). 약 16~17 cal kyr BP 이후에 활발한 심층수 순환에 의해 저층에는 산소농도가 높아졌다(Bahk et al., 2000; Yokoyama et al., 2007). 이러한 저층수의 산소농도 변화는 반원양성 퇴적과정에 영향을 미쳤다(Bahk et al., 2000; Tada et al., 1999; Yokoyama et al., 2007).

3. 연구 재료 및 방법

2007년 울릉분지 서부 분지평원(약 수심 2,150 m)에서 943 cm 길이의 시추퇴적물을 획득하였다(그림 2-1). 코어를 절개하여 퇴적물 색상, 퇴적구조를 기술하였다. 자세한 미세 퇴적구조를 관찰하기 위하여 1-cm 두께의 아크릴 슬랩에 퇴적물을 담아서 X-방사선 촬영을 하였다. 모래 퇴적물은 표준체질을 이용하고, 니질 퇴적물은 Micrometric Sedigraph5100을 이용하여 입도를 분석하였다. 시추퇴적물의 퇴적시기는 탄소절대연령 방법을 이용하여 추정하였다. 저탁암 사이에 있는 반원양성 퇴적물에서 유공충인 *Globigerina bulloides* 종만을 추출하여 뉴질랜드 Rafter Laboratory에 ^{14}C 절대연령 분석

을 의뢰하였다(표 2-1). 획득된 ^{14}C 절대연령 결과는 CALIB rev. 5.0 (Stuiver et al., 2005) 프로그램을 이용하여 캘린더(calendar) 연령으로 변환하였다. 국립해양조사원에서 획득한 고해상 Chirp (2~7 kHz) 천부지층 탄성과 자료를 이용하여 시추퇴적물 주변 퇴적층의 음향 특성을 관찰하였다. 자료획득시 해상 위치는 정밀도가 수 미터 이내인 Differential Global Positioning System (모델 Trimble 4000RS/DS) 장비를 이용하였다

4. 연구결과 및 토의

가. 음향특성

고해상 Chirp (2~7 kHz) 천부지층 탄성과 자료에서 시추퇴적물 주변의 퇴적층은 연장성이 매우 좋은 여러 개의 지층내부 반사파를 보이고 있다(그림 2-2a). 이 퇴적층은 동-서 방향의 단면에서 지형이 낮은 지역을 채우는 형태를 보인다(그림 2-2a). 획득된 시추퇴적물의 남쪽 지역, 즉 상부 경사방향의 지역에는 암설류 퇴적물이 광범위하게 분포한다(Lee et al., 1999; 그림 2-1). 동-서방향의 단면에서 보이는 채움형태의 여러 개의 지층내부 반사파와 경사상부지역에 광범위하게 분포하는 암설류 퇴적물은 시추퇴적물 주변 퇴적층이 주로 울릉분지 남서부 사면에서 기인한 저탁암으로 구성되어있음을 지시한다(Damuth, 1980; Chough et al., 1985).

획득된 시추퇴적물의 길이에 해당되는 약 10 m 두께의 최상부 퇴적층은 3개의 층으로 구분된다: 1) 상부 투명층, 2) 층리를 보이는 중부 층리층 및 3) 하부 투명층(그림 2-2b). 상부 투명층은 하부퇴적층을 균일하게 덮고 있는 특성을 보인다(그림 2-2a). 반면 중부 층리층과 하부 투명층은 횡적으로 두께가 얇아지면서 주변의 고도가 높은 지역에 접하고 있다(그림 2-2a).

표 2-1. 반원양성 퇴적물의 유공층의 ¹⁴C 절대연령

Sample Depth (cm)	Materials	Laboratory Number	AMS ¹⁴ C ages (yr BP)	Calendar ages (cal yr BP)
286	<i>G bulloides</i>	NZA 29407	14037±65	16219±199
339	<i>G bulloides</i>	NZA 29406	14822±65	17314±226
343	<i>G bulloides</i>	NZA 29494	15172±50	17926±108
400	<i>G bulloides</i>	NZA 29493	16246±55	19013±64
650	<i>G bulloides</i>	NZA 30034	17635±65	20347±105
667	<i>G bulloides</i>	NZA 29548	18024±95	20767±191
742	<i>G bulloides</i>	NZA 29551	18488±100	21479±266
751	<i>G bulloides</i>	NZA 30033	18705±75	21822±205
770	<i>G bulloides</i>	NZA 30051	19780±100	23016±252
808.5	<i>G bulloides</i>	NZA 29567	21109±80	24799±191

나. 반원양성 퇴적물

반원양성 퇴적물은 생물교란 니(bioturbated mud; BM)와 희미한 층리 니(crudely laminated mud; CLM) 퇴적상으로 구성된다. 퇴적상 BM은 다양한 두께를 보이며 생물교란 흔적을 가진다(그림 2-3a 및 4). 이 퇴적상은 하부에 균질 니(homogeneous mud) 퇴적상이 놓이며 상부로는 층리 니(laminated mud) 퇴적상과 명확한 접촉관계를 보인다. 시추퇴적물의 최상부 220 cm 구간은 주로 퇴적상 BM으로 이루어져 있는데 이것은 고해상 Chirp (2~7 kHz) 천부지층 자료에서 상부 투명층 구간에 해당된다(그림 2-2b). 퇴적상 BM은 약 16~17 cal kyr BP 이후 산소농도가 높은 저층환경에서 반원양성 침전작용에 의해 퇴적되었다(Lee, 2007; Bahk et al., 2000).

퇴적상 CLM은 X-방사선 사진에서 희미한 층리를 보인다(그림 2-3b). 층리의 명확성과 두께는 수직적으로 뚜렷한 변화를 보이지 않는다. 후산란 전자 영상자료에서 분급이 좋지 않은 규조성 기질(diatomaceous matrix)안에 실트와 규조 입단(aggregate)이 불규칙하고 희미하게 층을 이루면서 희미한 층리를 형성한다(Bahk et al., 2000). 모래크기 입자들은 주로 보존이 잘 되어 있는 유공층으로 구성되어 있으며, 이 유공층은 탄소 절대연령 분석에 이용

되었다. 이 퇴적상은 두께가 1~6 cm 정도이다. 퇴적상 CLM은 주로 338 cm 구간 이하에서 저탁암들과 교호하면서 나타나는데(그림 2-4), 이는 고해상 천부지층 자료에서 중부 층리층과 하부 투명층에 해당된다(그림 2-2b). 이 퇴적상은 마지막 빙하기 동안 해수면이 낮아져서 저층이 무산소 환경이었을 때 반원양성 침전작용에 의해 형성되었다(Bahk et al., 2000; Yokoyama et al., 2007).

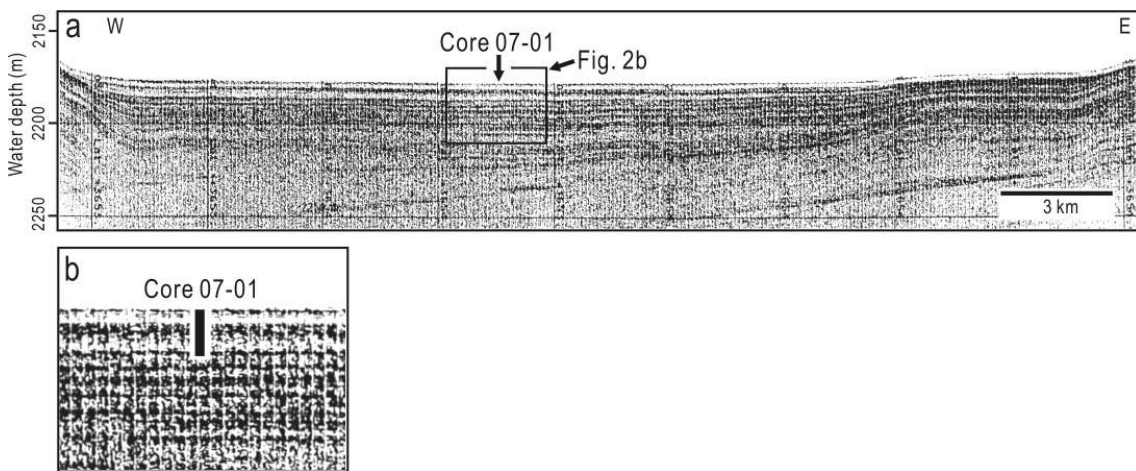


그림 2-2. (a) 시추퇴적물 주변 퇴적층의 고해상(2~7 kHz) 음향 특성. 퇴적층은 지형이 낮은 지역을 채우고 있으며, 여러 개의 지층내부 반사파를 갖는다. 탄성과 단면 위치는 그림 2-1에 있다. (b) 획득된 시추퇴적물의 길이에 해당되는 최상부 퇴적층의 고해상 음향 특성. 최상부 퇴적층은 상부 투명층, 중부 층리층 및 하부 투명층으로 구성되어 있다.

다. 저탁암

저탁암은 균질 니(homogeneous mud; HM), 층리 니(laminated mud; LM), 층리 모래(laminated sand; LS) 및 괴상 모래(massive sand; MS)으로 구성되어 있다. 퇴적상 HM은 X-방사선 사진에서 퇴적구조가 잘 보이지 않지만, 간혹 매우 희미한 평행 층리와 사층리가 나타나기도 한다(그림 2-3b). 이 퇴적상의 두께는 수 cm에서 90 cm까지 매우 다양하다. 퇴적상 HM의 최상부에는 간혹 매우 두께가 얇은 층리가 보인다. 이 퇴적상은 하부에 주로 퇴적상 LM이 나타난다(그림 2-4). 퇴적상 HM은 세립질 저탁류의 침전 퇴적

작용에 의해 형성되었다(Piper, 1978; Chough et al., 1984).

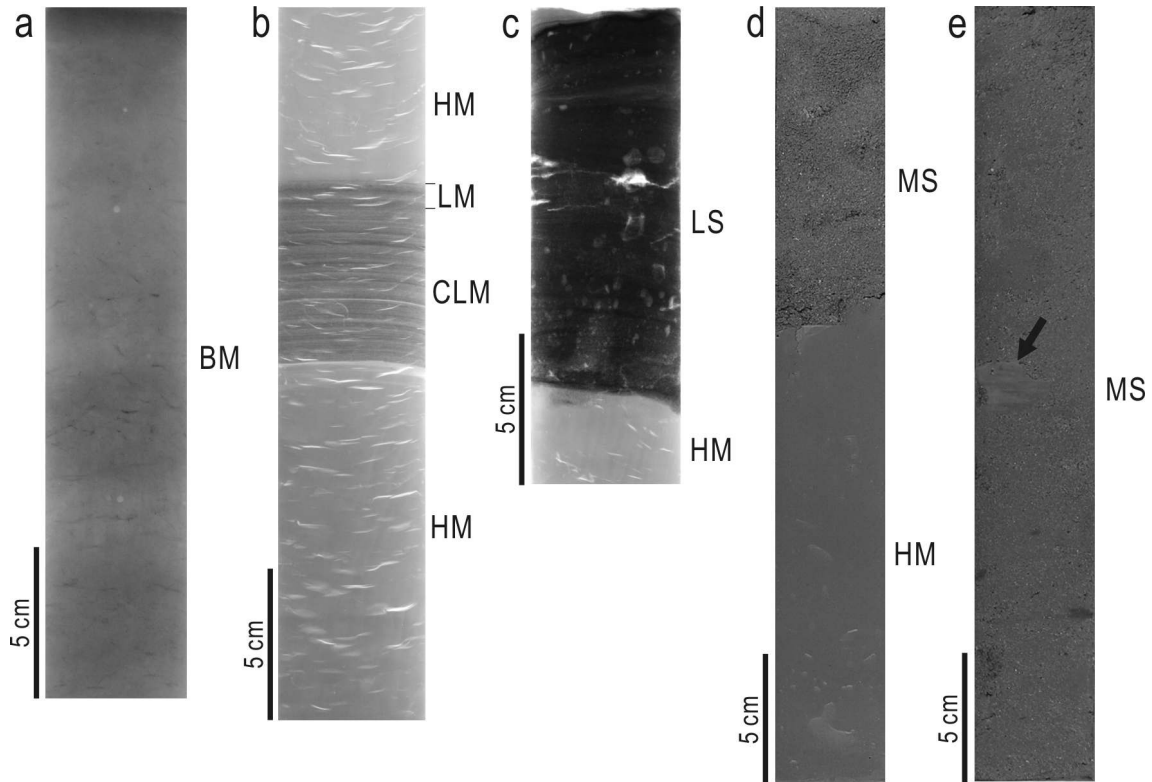


그림 2-3. 퇴적상의 X-방사선 사진(a ~ c)과 코어사진(d 및 e). 층리 니와 괴상 모래 퇴적상은 명확한 침식면을 보이는 하부 경계면을 갖는다(c 및 d). 그림 e에 보이는 화살표는 괴상 모래 퇴적상 안에 떠 있는 니질 역을 지시한다. 오른쪽의 코드는 퇴적상을 표시함: BM = 생물교란 니; CLM = 희미한 층리 니; HM = 균질 니; LM = 층리 니; LS = 층리 모래; MS = 괴상 모래. 시추 퇴적물 위치는 그림 2-1에 있다.

퇴적상 LM은 희미하거나 명확한 평행 층리와 사층리를 보인다(그림 2-3b). 층리의 두께는 수 mm 이하이며, 실트와 점토층이 교호되면서 층리를 형성한다. 실트 층리의 두께와 빈도는 위로 가면서 줄어드는 경향을 보인다. 간혹 하나의 실트 층리가 나타나기도 한다. 이 퇴적상의 두께는 수 mm에서 7 cm 이다. 퇴적상 LM 하부에는 주로 퇴적상 BM, HM 및 CLM이 놓이는데, 간혹 퇴적상 LS가 놓이기도 한다. 이 퇴적상은 Piper (1978)의 세립질 저탁암 퇴적상 모델의 E₁ (층리 니) 구간에 해당된다.

층리 모래(LS)은 주로 니질 모래 또는 사질 실트로 구성되어 있다. 모래 입자들은 주로 육성기원 물질, 유공충, 깨진 조개껍질로 이루어져 있다. 층리는 평행하거나 약간 경사져 있다(그림 2-3c). 모래 층리는 위로 가면서 두께와 빈도가 감소하면서 점이층리(normal grading)를 보이기도 한다(그림 2-4). 이 퇴적상의 두께는 3~13 cm 정도이며, 하부 경계면은 명확한 침식면을 보인다. 퇴적상 LS 하부에는 주로 퇴적상 CLM 및 HM이 놓인다. 이 퇴적상은 Bouma (1962)의 T_c 및 T_d 구간에 해당된다.

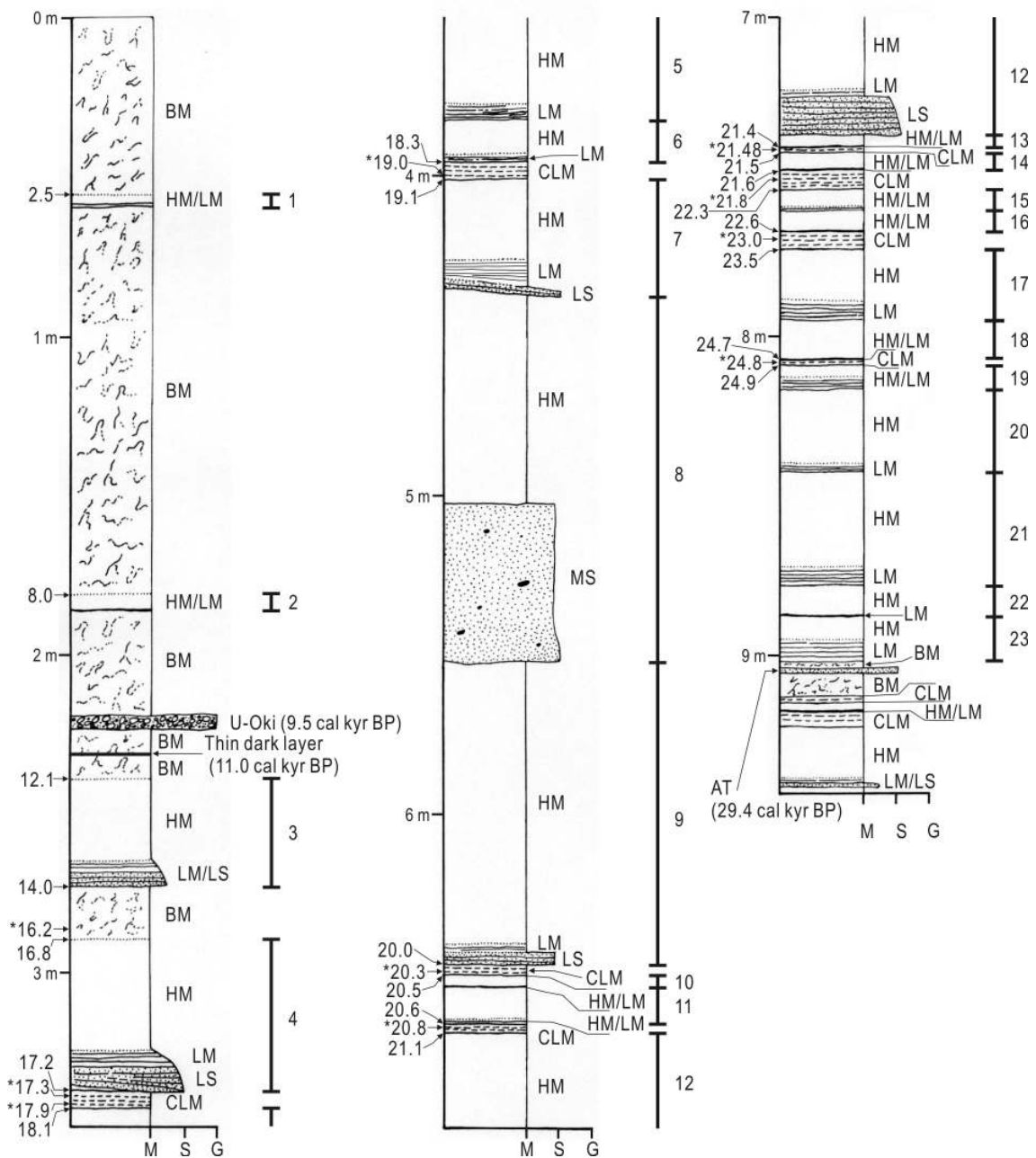


그림 2-4. 시추퇴적물 주상도. 주상도 왼쪽에 별표가 있는 화살표는 분석된 캘린더 연령(cal kyr BP)이며, 별표가 없는 화살표는 반원양성 퇴적물의 퇴적율을 이용하여 계산된 캘린더 연령(cal kyr BP)이다. 오른쪽에 있는 두꺼운 막대가 있는 숫자는 저탁암 퇴적층을 지시한다. 오른쪽의 퇴적상 코드 설명은 그림 2-3에 있다. 주상도 하부에 있는 M, S 및 G은 각각 니, 모래 및 자갈을 지시한다.

괴상 모래(MS) 퇴적상은 분급이 불량한 괴상의 모래(67~89% 함량)로 구성되어 있다(그림 2-3d, e). 하부에 점이층리가 보인다(그림 2-4). 모래 입자는 주로 세립질 크기이며 깨진 조개껍질이 많이 함유되어 있다. 길이가 3 cm 이하인 여러 개의 니질 역들이 떠 있는 상태로 나타난다(그림 2-3e). 이 퇴적상의 두께는 52 cm 이고, 하부 경계면은 명확한 침식 특성을 보인다(그림 2-3d). 퇴적상 MS는 비지속적인 고농도 저탁류가 빠르게 붕괴되면서 형성되었다(Lowe, 1982).

라. 저탁암 퇴적층 형태

시추퇴적물에는 23개의 저탁암 퇴적층(turbidite sequence)이 분포한다(그림 2-4). 이들 퇴적층은 저탁암 퇴적상의 수직적인 조합에 의해 3개 형태로 구분된다. A 형태는 하부에 퇴적상 LM이 나타나고 상부에 퇴적상 HM이 분포한다(그림 2-4). 이 형태의 두께는 4~39.2 cm 이다. 퇴적상 HM의 두께는 3~32 cm 정도로 A 형태 퇴적층의 대부분을 차지한다. 이 형태는 시추퇴적물에서 17개 나타나며, 연속적으로 분포하는 편이다(그림 2-4).

B 형태의 저탁암 퇴적층은 하부에서 상부방향으로 퇴적상 LS, LM 그리고 HM으로 구성되어 있다(그림 2-4). 이 형태의 두께는 34~97 cm 이다. B 형태의 퇴적층 대부분은 퇴적상 HM(24~90 cm 두께)이 차지하고 있다(그림 2-4). 이 형태는 시추퇴적물에서 5개가 나타난다(그림 2-4).

저탁암 퇴적층 C 형태는 하부에 퇴적상 MS, 상부에 퇴적상 HM이 나타난다(그림 2-4). 이 형태는 시추퇴적물에서 1개가 나타나며, 두께가 117 cm로 저탁암 퇴적층 중에서 가장 두껍다(그림 2-4). 이 형태는 B 형태의 저탁암 퇴적층과 접하고 있다.

마. 저탁암 퇴적층의 퇴적시기

저탁암 퇴적층의 고해상 퇴적시기는 11개의 반원양성 퇴적물 퇴적시기와 2개(U-Ok이 및 AT)의 화산재층의 분출시기를 이용하여 계산하였다. U-Ok이 화산재층과 AT 화산재층의 분출시기는 각각 9.3 ka (Machida, 1999)과 29.4 cal kyr BP (Miayiri et al., 2004; Yokoyama et al., 2007). 울릉분지 남부 사면에 서 계산된 U-Ok이의 캘린더 연령은 9.5 cal kyr BP 이다(Lee, 2007). U-Ok이 화산재층 바로 아래에는 두께가 얇은 검은색의 반원양성 니 퇴적층(TDHM)이 분포하는데 이 층은 울릉분지와 오키제도 주변에서 광범위하게 나타나며, 10.9~11.1 cal kyr BP의 시간지시층으로 이용된다.

U-Ok이 화산재층의 분출시기와 TDHM층의 퇴적시기를 이용하여 시추퇴적물 최상부 290 cm 구간에 나타나는 생물교란 반원양성 퇴적물의 퇴적율을 계산하였다. U-Ok이 화산재층 위의 구간에서 반원양성 퇴적율은 약 21.5 cm/kyr이며 U-Ok이 화산재층과 TDHM층 사이의 반원양성 퇴적율은 약 5.73 cm/kyr이다. 338 cm 이하(하부) 구간에 나타나는 희미한 층리를 보이는 반원양성 퇴적물(퇴적상 CLM)의 퇴적율은 하나의 퇴적상 CLM 구간에서 획득한 두개(339 cm 및 343 cm)의 연령을 이용하여 계산되었고 약 6.54 cm/kyr 정도이다. 이 퇴적율은 울릉분지 남부사면과 오키뱅크 주변에서 약 17~30 cal kyr BP 동안에 형성된 반원양성 퇴적물의 퇴적율인 5~7 cm/kyr와 잘 일치하고 있다(Lee, 2007; Yokoyama et al., 2007). 분석된 반원양성 퇴적물의 퇴적연령, U-Ok이와 AT 화산재층의 분출연령, 그리고 계산된 반원양성 퇴적물의 퇴적율을 이용하여 저탁암 퇴적층 사이에 있는 반원양성 퇴적구간의 시기를 구하였다(그림 2-4). 시추퇴적물 07-01에서 퇴적상 CLM에서 퇴적상 BM으로 전이하는 계산된 시기는 약 16.8~17.2 cal kyr BP (290~338 cm 구간)로 울릉분지 남부 사면의 시추퇴적물에서 처음으로 나타나는 퇴적상 CLM의 퇴적시기(약 17 cal kyr BP)와 거의 일치한다(Lee, 2007). 반원양성 퇴적물의 상부 경계면은 상부에 놓이는 저탁암에 의해 침식당하기 때문에 상부 경계면의 퇴적시기는 상부에 있는 저탁암의 퇴적시기를 지시하지 않는

다. 반면에 반원양성 퇴적물의 하부 경계면의 퇴적시기는 하부에 있는 저탁암 퇴적층의 퇴적이 바로 끝난 시기를 암시한다.

반원양성 퇴적물 구간의 계산된 시기를 이용하여 저탁암 퇴적층이 퇴적된 12개의 퇴적 에피소드를 파악하였다(표 2-2 및 그림 2-5). 에피소트 I~IV 과 IX에서는 하나의 저탁암 퇴적층만이 나타나고 이들 저탁암 퇴적층의 퇴적시기는 상부에 있는 반원양성 퇴적구간의 하부 경계면 시기와 거의 일치한다. 각 에피소드에 구성된 저탁암 퇴적층의 형태와 각 에피소트의 퇴적시기는 표 2-2에 자세하게 기술되어 있다.

표 2-2. 저탁암 퇴적층의 퇴적 에피소트의 퇴적 시기 및 구성된 저탁암 퇴적층의 형태. 저탁암 퇴적층의 번호는 그림 2-4에 있고 형태(A~C)는 본문에 자세하게 기술되어 있다.

Episode of turbidite deposition	Time interval or age (cal kyr BP)	Number and type of turbidite sequences
I	ca 2.5	1 (A)
II	ca. 8.0	2 (A)
III	ca. 12.1	3 (B)
IV	ca. 16.8	4 (B)
V	18.1 ~ 18.3	5 (A), 6 (A)
VI	19.1 ~ 20.0	7 (B), 8 (C), 9 (B)
VII	20.5 ~ 20.6	10 (A), 11 (A)
VIII	21.1 ~ 21.4	12 (B), 13 (A)
IX	ca. 21.5	14 (A)
X	22.3 ~ 22.6	15 (A), 16 (A)
XI	23.5 ~ 24.7	17 (A), 18 (A)
XII	24.9 ~ 29.1	19 (A), 20 (A), 21 (A), 22 (A), 23 (A)

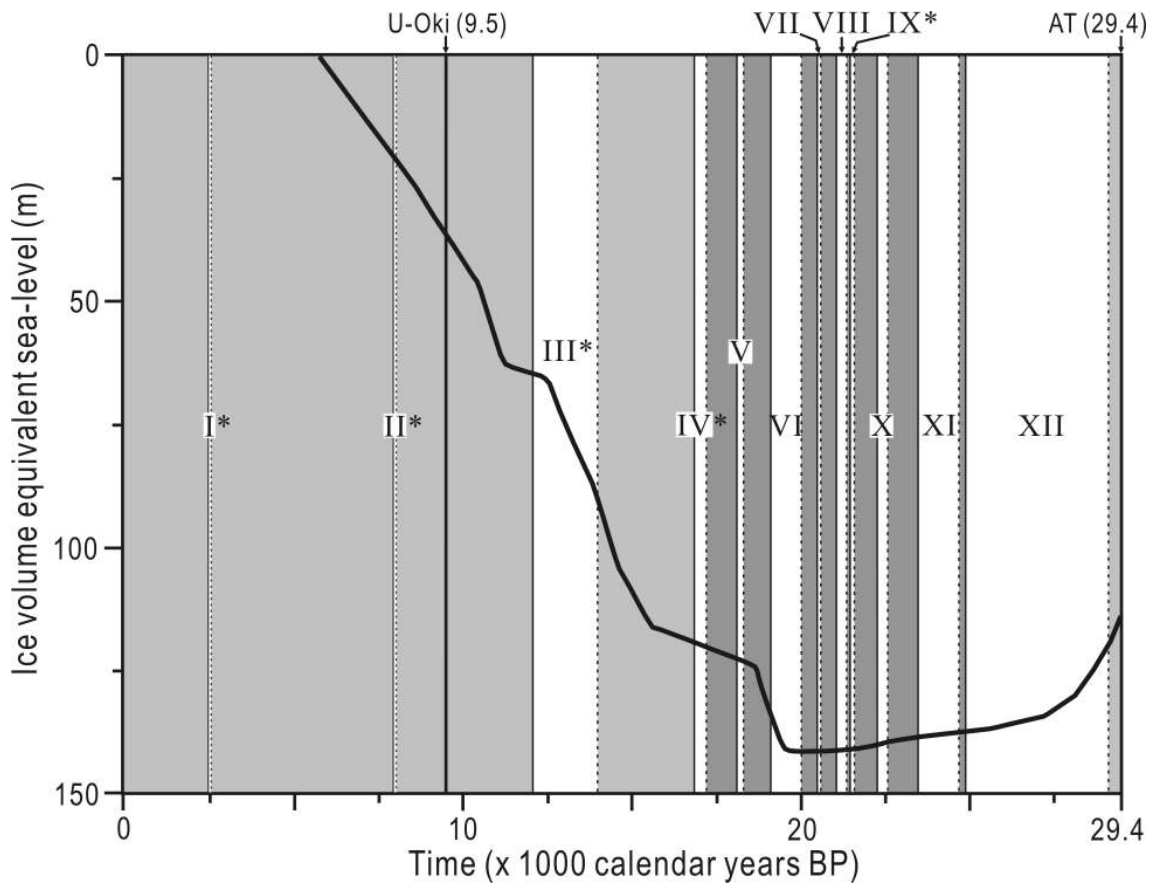


그림 2-5. 저탁암 퇴적층의 퇴적 에피소드의 퇴적시기, 반원양성 퇴적물(열은 회색: 퇴적상 BM, 짙은 회색: 퇴적상 CLM)의 퇴적시기와 해수면 변동 곡선 (Yokoyama et al., 2007). 수직 실선은 반원양성 퇴적구간의 하부 경계면 퇴적시기를 지시하며 수직 점선은 상부의 저탁암 퇴적층에 의해 침식되고 남은 반원양성 퇴적구간의 상부 경계면 퇴적시기를 지시한다. 별표가 있는 에피소드의 퇴적시기는 상부 반원양성 퇴적구간의 하부경계면 퇴적시기와 거의 일치한다.

바. 토의

저탁류는 크게 강의 홍수와 폭풍과 같은 큰 규모의 유체흐름 사건과 사면에서 일어난 해저사면 붕괴로부터의 전이에 의해 발생한다(Normark and Piper, 1991; Mulder et al., 2001). 울릉분지의 남부와 남서부를 따라 마지막 빙하기 이후 현재까지 큰 규모의 강이 존재하지 않는다. 해수면이 현재보다 약 120~130 m 낮아진 마지막 빙하기 시기에도 대륙붕단과 최상부 사면은 수심 170 m 이하로 해수에 잠겨 있었으며, 대륙붕의 폭도 매우 넓었다. 울릉

분지의 남부와 남서부 사면에 큰 규모의 해저 협곡(submarine canyon)과 심해 선상지가 분포하지 않은 특성으로 볼 때 광범위하게 나타나는 해저사면 사태와 암설류 퇴적물은 남부와 남서부에서 발생한 해저사면 붕괴는 광역적인 사면 불안정성에 기인하였다(Chough et al., 1985; Lee et al., 2004). 이러한 특징들은 시추퇴적물 07-01에 나타나는 저탁암이 울릉분지 남부와 남서부 사면에서 일어난 해저사면사태에서 전이된 저탁류에 의해 형성되었음을 지시한다. 따라서 시추퇴적물 07-01에 나타나는 저탁암의 퇴적특성과 퇴적시기는 울릉분지 남부와 남서부 사면에서 발생한 해저사면 붕괴의 빈도, 규모 및 붕괴지역을 추정하는데 중요한 정보를 제공한다.

29.4 ~ 19.1 cal kyr BP 동안에, 즉 동해에서 마지막 빙하기에 해당되는(Yokoyama et al.) 시기에, 17개(7 ~ 23)의 저탁암 퇴적층이 분포한다(표 2-2; 그림 2-4 및 2-5). 이들 저탁암 퇴적층은 두께가 얇거나 매우 두꺼운 편으로 매우 다양하다(그림 2-4). 이 기간 동안에 저탁암 퇴적층은 평균 약 605년 간격으로 퇴적되었으며, 2개 ~ 5개의 저탁암 퇴적암이 연속적으로 집적되었다. 해수면이 가장 낮았던 시기인 20.0 ~ 19.1 cal kyr BP 동안에 매우 두꺼운(최대 117 cm 두께) 3개의 저탁암 퇴적층이 연속적으로 집적되었다(표 2-2; 그림 2-4 및 2-5). 해수면 상승이 시작된 19.1 cal kyr BP 이후에는 6개(1 ~ 6)의 저탁암 퇴적층이 형성되었다(표 2-2; 그림 2-5). 이들 저탁암 퇴적층은 상부로 가면서 두께가 얇아진다(그림 2-4). 에피소드 I ~ IV에는 1개의 저탁암 퇴적층이 분포한다(표 2-2; 그림 2-4). 19.1 cal kyr BP 이후에 저탁암 퇴적층은 평균 약 3,183년 간격으로 집적되었다. 특히, 12.1 cal kyr BP 이후에 분포하는 매우 얇은 2개의 저탁암 퇴적층(표 2-2; 그림 2-4)은 약 6,050년 간격으로 퇴적되었다. 이러한 저탁암 퇴적층의 분포 양상은 마지막 빙하기(29.4 ~ 19.1 cal kyr BP)동안 내려간 해수면으로 인해 울릉분지의 남부 및 남서부 사면에서 다양한 규모의 해저사면 붕괴가 활발하게 일어났음을 지시한다. 20.0 ~ 19.1 cal kyr BP 사이에 연속적으로 집적된 매우 두꺼운 저탁암 퇴적층은 해수면이 가장 낮았을 때 매우 큰 규모의 해저사면 붕괴가 일어났음을 암시한다(그

림 2-4 및 2-5). 해수면이 상승한 이후에 저탁암 퇴적층의 분포와 두께가 감소하는데, 이는 해저사면 붕괴의 빈도와 규모가 감소함을 지시한다. 특히 12.1 cal kyr BP 이후 현재까지 울릉분지 남부와 남서부 사면은 매우 안정화되었으며, 분지평원에는 반원양성 퇴적작용이 우세하게 되었다.

시추퇴적물 07-01에서 저탁암 퇴적층의 형태는 시간에 따라 달라진다. 29.4~21.4 cal kyr BP 동안에는 퇴적상 LM과 HM으로 구성된 A형태의 저탁암 퇴적층이 나타나며, 21.4~12.1 cal kyr BP 사이에는 퇴적상 MS와 LS가 포함되어 있는 B와 C 형태의 저탁암 퇴적층이 A형태의 저탁암 퇴적층 또는 반원양성 퇴적물과 교호하며 나타난다(표 2-2; 그림 2-4). A형태가 상부로 가면서 B와 C 형태로 전이하는 양상은 해저사면 붕괴 지역의 변화를 의미한다. 울릉분지의 남부 및 남서부 사면에서 수심이 350 m보다 깊은 지역의 교란되지 않은 퇴적물은 주로 점토가 70%이상 함유된 생물교란 니로 구성되어 있다(Lee et al., 1993; 2004). 반면 수심이 약 300~350 m 구간의 최상부 사면 지역의 퇴적물은 세립질 모래와 깨진 조개껍질로 이루어져 있다(Chough and Lee 1987; Lee et al., 1993). 깨진 조개껍질은 B와 C 형태의 저탁암 퇴적층을 구성하는 퇴적상 MS와 LS에 많이 함유되어 있다. 따라서 약 21.4 cal kyr BP 근처에서 A형태의 저탁암 퇴적층이 상부로 가면서 B와 C 형태의 저탁암 퇴적층으로 변화하는 것은 해수면이 거의 가장 낮은 위치에 가까워졌을 때 해저사면 붕괴지역이 니질의 상부-중부 사면에서 모래질의 최상부 사면지역으로 확장되었음을 암시한다.

시추퇴적물 07-01에 나타나는 저탁암 퇴적층의 특성과 분포 양상은 울릉분지 남부 및 남서부 사면에 일어난 해저사면 붕괴의 빈도, 규모 및 붕괴 지역이 마지막 빙하기부터 현재까지의 해수면 변화와 밀접한 관련이 있음을 지시한다(그림 2-5). 마지막 빙하기(29.4~19.1 cal kyr BP)동안의 활발한 해저사면 붕괴는 해수면 하강이 해저사면의 불안정성을 증가시킨 중요한 원인임을 암시한다. 빙하에 따른 해수면 하강은 해저면 퇴적물에 직접적으로 정수압을 줄이게 함으로써 퇴적물 내에 과다공극압력을 증가시킨다(Hampton et

al., 1996; Lee et al., 1996). 이러한 공극압력의 증가는 퇴적물의 전단응력을 감소시켜서 해저사면 붕괴를 일어날 가능성을 증가시켰다.

퇴적물의 전단응력을 감소시키는 다른 하나의 원인은 해수면 하강시기 동안에 일어나는 가스수화물의 분해이다(Canals et al., 2004; Hampton et al., 1996; Rothwell et al., 1998). 해수면이 하강으로 인해 정수압이 감소하면서 가스수화물의 평형상태는 교란되어 메탄가스나 유체로 분해된다(Kvenvolden, 1993; Kennett et al., 2000). 이러한 분해는 퇴적물 내에 과다공극 압력을 야기한다. 증가된 과다공극 압력은 사면퇴적물의 안정성을 감소시켜 사면붕괴를 발생시킨다. 최근 3차원 다중채널 탄성과 자료와 길이가 수십 미터 이상인 시추퇴적물 자료를 통해 가스수화물이 울릉분지 남부 및 남서부 사면에 광범위하게 분포하고 있음이 알려졌다(Lee et al., 2005; Yoo et al., 2008). 이들 지역에는 특이음향 특성(예, acoustic chimney, acoustic blanking)과 표면함몰 흔적(pockmark)이 탄성과 자료와 측면주사 영상자료에서 상부 퇴적층과 해저표면에 잘 발달되어 나타난다(Gardner et al., 1998; Lee et al., 2005; Yoo et al., 2008). 동해의 동부 사면(일본쪽)에는 가스수화물 분해에서 야기하는 메탄누출이 해수면이 낮았던 마지막 빙하기에 활발하게 일어났고, 특히 해수면이 가장 낮았던 시기에 메탄누출이 가장 강했던 것으로 알려져 있다(Watanabe et al., 2008). 이러한 특징은 울릉분지의 남부와 남서부 사면에서도 마지막 빙하기동안 가스수화물의 분해로 인한 메탄누출이 활발하였음을 지시한다. 또한 울릉분지의 남부와 남서부 사면에서 큰 규모의 해저사면 붕괴가 일어난 시기는 해수면이 가장 낮았던 시기로 동해 동쪽 주변사면에서 가장 활발한 메탄누출이 있었던 시기와 잘 일치하고 있다. 이러한 특성들은 해수면 하강시기 동안에 일어난 가스수화물의 분해가 울릉분지 남부와 남서부 사면에서 해저사면 붕괴를 일으킨 중요한 원인들 중 하나였음을 암시한다.

5. 결론

울릉분지 남서부 분지평원에서 나타나는 저탁암의 퇴적특성, 분포 양상과 퇴적시기를 이용하여 29.4 cal kyr BP부터 현재까지 울릉분지 남부와 남서부 사면에 발생한 해저사면 붕괴의 빈도, 규모와 붕괴지역에 대한 변화를 규명하였다. 29.4~19.1 cal kyr BP 동안에 두께가 다양한 저탁암 퇴적층이 잘 발달되어 있다. 이는 해수면이 하강하는 마지막 빙하기 동안 다양한 규모의 해저사면 붕괴가 활발하게 일어났음을 지시한다. 20.0~19.1 cal kyr BP 동안에 연속적으로 집적된 매우 두꺼운 저탁암 퇴적층은 해수면이 가장 낮았던 시기에 발생한 큰 규모의 해저사면 붕괴에 기인한다. 해수면이 상승하기 시작한 19.1 cal kyr BP 이후에는 저탁암 퇴적층의 분포와 두께가 감소하는데, 이는 울릉분지 남부와 남서부 사면에서 해저사면 붕괴의 발생빈도와 규모가 감소하였음을 암시한다. 특히 12.1 cal kyr BP 이후에 저탁암 퇴적층이 거의 나타나지 않은 점은 울릉분지 남부와 남서부 사면이 매우 안정화되었음을 지시한다. 29.4~21.4 cal kyr BP 동안에는 니질(A 형태) 저탁암 퇴적층이 나타나다가 21.4~12.1 cal kyr BP 시기에는 모래질(B와 C 형태) 저탁암 퇴적층이 교호한다. 이러한 형태의 변화는 해수면이 가장 낮았던 시기에 근접했을 때 붕괴지역이 니질의 상부-중부 사면에서 모래질의 최상부 사면으로 확장되었음을 암시한다. 울릉분지 남부와 남서부 사면에 광범위하게 분포하는 가스수화물과 마지막 빙하기 동안 활발한 해저사면 붕괴는 해수면 하강으로 인한 가스수화물의 분해에 의해 울릉분지 남부 및 남서부 사면의 해저사면 붕괴가 발생되었음을 지시한다.

제 3 절 수신합수를 통해 구한 황해의 지각구조

1. 서 론

가. 연구배경 및 목적

한국과 중국은 매년 꾸준한 경제성장을 이루며 국제사회에서 차지하는 경제적·사회적 비중과 영향력이 급속도로 증가하고 있다. 특히 황해를 통한 물류의 이동은 황해 주변 도시의 산업화·도시화에 지대한 영향을 미치고 있다. 그러나 빠른 고도화·밀집화를 이루며 발전한 도시는 그 만큼의 자연재해에 대한 위험에 노출되었다고 볼 수 있다. 2008년 발생한 쓰촨성 지진의 경우 한반도 2배 넓이 지역을 강타함으로써 7만명이 숨지고, 무려 1000만명이 집을 잃는 대참사였다. 이렇게 지진에 의한 자연재해는 그 규모가 우리의 상상을 초월한다. 만약 이러한 지진이 황해주변에 발생한다면, 이 지역에 집중되어 있는 산업·물류시설 등을 고려할 때 그 파장은 우리의 상상을 초월할 것임에는 틀림없다. 이러한 잠재적 위험성이 있는 황해는 한국과 중국 사이에 위치해 있지만 양국 간 자료의 공유 및 지진활동성 규명 등의 연구는 미흡한 실정이다. 이러한 지진에 의한 재해를 방지하기 위해선 지진을 예측하고 지진에 의해 발생할 수 있는 피해를 사전에 준비하는 것이 필요하다. 이를 위해 진앙위치를 정확히 파악하고, 지반진동을 예측하는 한편 지진이 발생하여 전달하는 경로를 파악하기 위한 지각구조를 밝히는 연구가 필요하며 지진의 발생에 중요한 영향을 미치는 광역 지체구조를 이해하기 위한 연구가 필요하다.

나. 한국과 중국의 지각구조 연구

한국과 중국은 지리적으로 매우 가까이 위치해있으며 지체구조적으로도

밀접한 관계를 가지고 있다. 1980년대 중반까지 한반도는 북중국 대륙의 일부로서 하나의 덩어리로 움직여 왔을 것이라는 견해가 지질학계의 일반적인 학설이었다(정봉일, 1980). 그러나 1980년대 후반 중국 대륙이 남중국과 북중국 대륙이 서로 충돌해 합쳐진 결과라는 사실이 밝혀지면서 한반도와 중국의 지체구조관계에 대해서 많은 가설이 제시되었다.

한국의 지체구조는 약 5억년전 고생대기 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴의 3개 육괴로 분리되었으며 이중 한국의 낭림육괴는 북중국 대륙과 중-한지괴를 형성하며, 한국의 경기육괴는 남중국 대륙과 함께 중국의 양쯔지괴를 형성하고 있다. Qinling-Dabie belt에서 Sulu Belt로 이어지는 북중국 대륙과 남중국 대륙의 충돌·융합대가 한반도의 임진강대(Imjingang Belt)로 이어질 가능성이 제기되면서 한국과 중국의 지체구조를 밝히기 위한 연구가 본격적으로 시작되었다.(Figure. 1)

Ernst & Liou., 1995; Ree et al., 1996; Liu et al., 1992; Yin & Nie., 1993; Lee et al., 1998; Teraoka et al., 1998; Ishiwatari & Tsujimori., 2003; 등의 많은 연구논문에서 가설이 제기 되었으며 중국의 Qinling-Dabie belt에서 Sulu Belt로 이어지는 두 충돌 융합대가 중국에서 한국으로 연장된 것뿐만 아니라 중국에서 일본으로 연장 되어있다는 가설까지 제기되면서 그 논란은 가중되었다. 그 같은 충돌대일 가능성을 뒷받침하는 증거들이 발견되고 있지만, 이를 확정지을 수 있는 증거인 다이아몬드나 코어사이트 같은 초고압광물(Ultra-high pressure type)이 한반도에서는 아직 발견되지 않아 논란의 여지가 남아있다. 또한 중국, 한국, 일본 세 나라 자료를 모두 이용한 고지자기, 퇴적학, 고기후 및 지구조분야 등의 확정 지을만한 자료 및 증거가 없는 실정이다.

본 연구에서는 한국해양연구원, 중국 지질지구물리연구원, 국립 공주대학교가 함께하는 국제공동연구를 추진하게 되었으며, 이에 광대역 임시지진 관측소를 중국과, 한국의 황해 주변에 설치하였다. 광대역 임시지진관측소에서 획득한 광대역 지진자료는 양국 간의 교환을 통해 과학적 교류를 활

성화하는 한편, 수신함수분석법을 통해 각 관측소 하부의 지각구조를 계산한다. 이를 통해, 황해주변의 지각구조 및 동북아시아의 광역 지구구조를 밝히는데 그 목적이 있다.

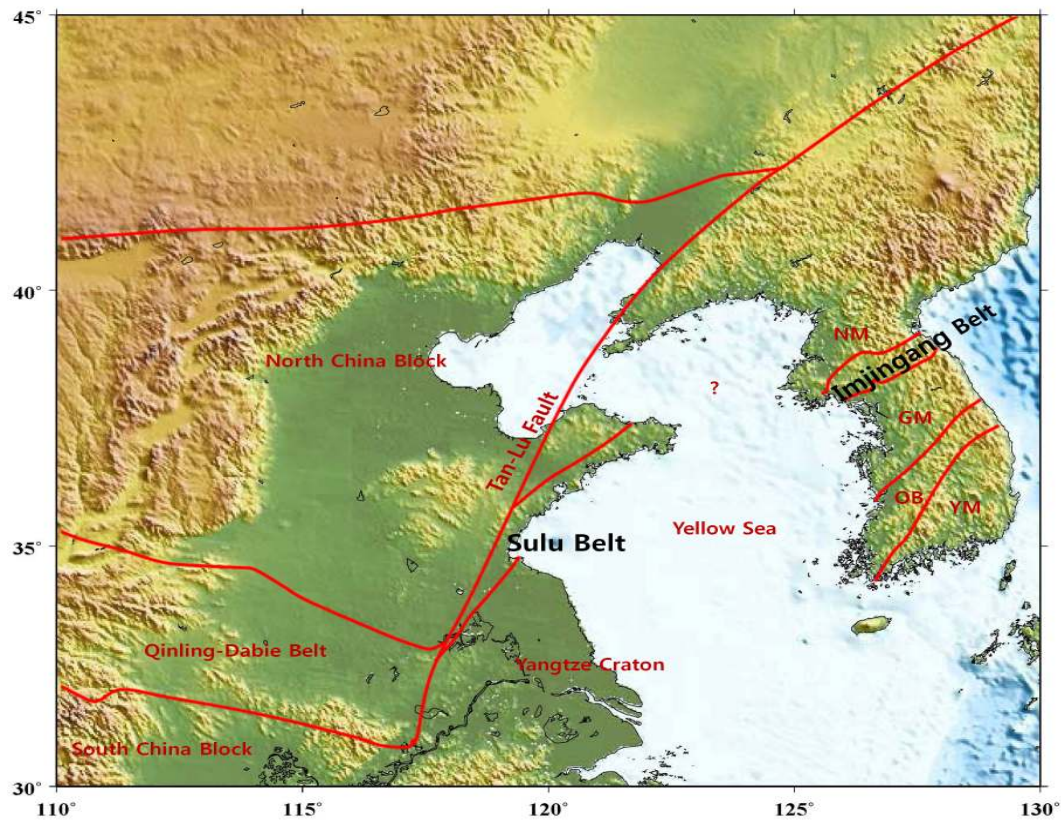


Figure 1. Tectonic map of the Korean Peninsula and adjacent area.(modified from Min and Cho., 1998; Chough et al., 2000). NM, Nangrim massif; GM, Gyeonggi massif; YM, Yeongnam massif; OB, Ogcheon belt.

2. 방 법

가. 수신함수분석법(Receiver function analysis)

수신함수분석법은 원격(teleseismic distance)지진을 이용하여 지각구조를 계산하며 한반도에서처럼 지진의 발생빈도가 낮고 규모가 크지 않은 곳에서 지진파를 이용하여 지각구조를 밝히는데 효과적으로 적용될 수 있다. 지각구조를 계산하는 방법으로 대규모의 굴절법 탐사나 반사법 탐사 또한 적용 할 수 있지만 이 두 가지 방법에 비해 비용을 줄일 수 있어 한반도 남부의 지각구조를 계산함에 있어 가장 유용하고 실용적인 방법이라 할 수 있다.

수신함수에 대한 기본적인 생각은, 관측소 하부를 통과하여 도착한 지진 파는 관측소 하부 불연속면과 지진파가 통과한 경로의 정보를 포함하고 있다는 것이다. 예를 들면, 관측소 하부 불연속면에서 전달된 P 파형뿐만 아니라 Ps 전환파는 원격지진들로부터 흔히 관측되고, 수신함수로부터 전환파(Ps)의 도달 시간과 에너지(진폭)크기를 이용하여 관측소 하부의 불연속면의 깊이와 수직 속도분포를 결정하며 최종적으로 수평적인 1차원 지각구조를 해석하는 것이다

지각구조 연구를 위한 원격 P파는 직접적인 선형모델링의 방법과 비교해 볼 때, 수신함수분석은 복잡한 진원을 피할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 각 후방위각에 따라 수신 함수들을 분석하면 불연속면의 수평적인 깊이 변화 또는 불연속면의 경사를 계산할 수 있는 장점이 있다. (Langston,1977 a, b; Lee and Langston, 1983; Owens and Crosson, 1988)

(1). 수신함수의 정의

수신함수의 정의는 많은 연구자들에 의해 정의 되었으며, 본 연구에서는 Ammon(1991)의 정의를 사용하였다.

- Time series corresponding to the complex spectral ratio of the radial response to the vertical response (Ammon, 1991)

- A scaled version of the radial component of displacement with the removal of the P multiples (Ammon, 1991)

이러한 정의를 바탕으로, 광대역 임시관측소 하부의 Radial성분 수신함수들이 지각과 상부 맨틀 구조를 조사하기 위해 연구되었다.

전통적인 수신함수분석법에서는 하나의 큰 지진으로부터 3성분 광대역 지진기록들을 사용하여 수신함수를 계산했었다.(e.g Langston, 1979; Owen et al.,1987)

그러나 이와 같이 하나의 지진으로부터 얻은 자료는 충분히 믿을 수 있는 양질의 자료를 얻기 힘들뿐만 아니라, 대표적인 경로를 통해 수신되었고 보기 어렵다. 때문에 본 연구에서는 다양한 방향을 통해 수신된 3성분 광대역 지진자료를 사용함으로써 관측소하부의 수신함수 해석의 정확성을 향상 시켰다.

(2). 진원 균일화(Source Equalization)

원격지진이 지각 기저면을 평면 P파로 입사할 때 발생하는 전환파 및 다중 반사파들의 성질을 이용한다면 진원함수와 경로효과, 지진계기 반응효과 등을 제거한 관측소 하부의 수신구조응답(receiver structure response)을 계산할 수 있다. 이를 일반적으로 수신함수(receiver function)라 부른다.

다.

진원 균일화 과정이란 3성분 광대역 지진 자료로부터 복잡한 진원함수 (seismic source)와 파선 경로(ray path), 지진 기록 장비에 의한 효과 (instrument response)를 제거하여 순수한 관측소 하부의 지각 수신 함수를 계산한 것을 말한다.

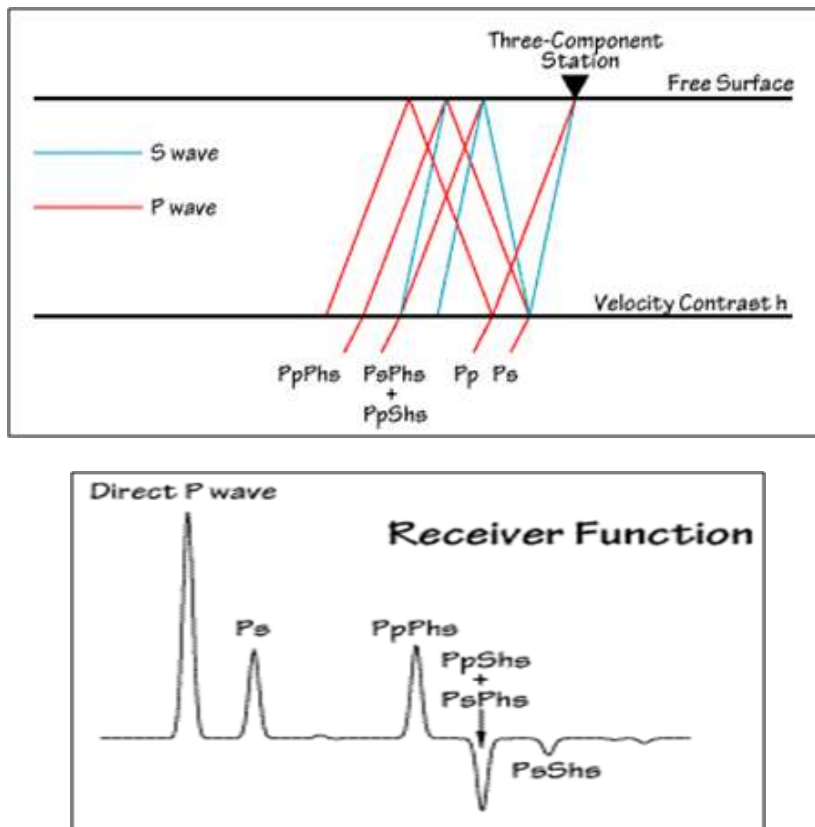


Figure 2. Schematic diagram showing direct P(labeled Pp) and the dominant crustal reverberations, where, except for mantle P, lowercase and uppercase indicate up-going and down-going rays, respectively, and the associate receiver function; after Ammon et al.(1990)

본 연구에서는 Langston(1979)이 제안한 진원 효과와 파선 경로 효과를 제거해 주는 진원 및 경로의 균일화 과정(source and path equalization)을 사용하였다.

관측소에서 관측된 지진파는 후방위각(back-azimuth)에 의해 Vertical, Radial, Transverse의 3성분으로 변환될 수 있으며 시간영역(Time domain)에서 수평구조 혹은 경사경계면 속에서 충격 P파(impulsive P-wave)의 파선응답은 다음과 같이 기록될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 D_V(t) &= I(t) * S(t) * E_V(t) \\
 D_R(t) &= I(t) * S(t) * E_R(t) \\
 D_T(t) &= I(t) * S(t) * E_T(t)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$I(t)$: 계기 반응에 의한 함수 (Impulse response of the recording instrument)

$S(t)$: 진원 함수 (Seismic source function)

$E(t)$: 경로 함수 (Impulse response of near receiver earth structure)

* : Convolution operator

수신함수 분석을 사용하기 위해서는, 반드시 진원함수와 파선경로에 의한 효과를 제거하여야만 한다. 예를 들면 위상변화는 관측소 하부에서 발생한다(Figure 2). 원격 지진파가 지각 기저면에서 P 파가 거의 수직 입사각을 가지면 입자운동은 편파되며 P파는 거의 대부분이 수직성분에 S파는

거의 대부분이 수평성분에 나타나게 될 것이다(Ammon, 1991). 그러므로 P-to-S 전환파의 진폭은 거의 수직 입사하는 직접 P파의 진폭보다도 훨씬 작기 때문에 수직 성분에는 S파의 에너지는 거의 나타나지 않게 된다.

원격지진의 P 파형들로부터 수신함수를 분리시키기 위해, 디콘볼루션 방법을 적용하였다. 관측된 심발 지진 데이터의 공통된 특징은, 지반운동의 수직성분이 지진 계기장비에 의한 응답을 가진 유사펄스 시간함수(time function)로 여겨질 수 있다는 것이다(Burdick and Langston, 1977). 이와 같이 불연속 경계면에서 P파에서 SV파로의 전환은 거의 수평적으로 편파되며, 이는 Radial 성분에 탁월하게 나타나게 된다.

그러나 임펄시브 초동파는 매우 빠른 속도로 불연속면을 지나면서 파의 전환과 반사를 일으키며 감쇠되기 시작한다.($> 2 \text{ km/sec}$)(Langston,1979) 다음과 같이 $S(t)$ 의 근사값을 구할 수 있다.

$$I(t) * S(t) \approx D_V(t) \quad (2)$$

계기응답이 모든 성분들에 동일하다고 가정한다면, $E_R(t)$ 와 $E_T(t)$ 는 $D_R(t)$ 와 $D_T(t)$ 으로부터 $I(t) * S(t) (\approx DV(t))$ 로 디콘볼루션 함으로써 얻어질 수 있다. 주파수 영역에서 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$E_R(\omega) = \frac{D_R(\omega)}{I(\omega)S(\omega)} \approx \frac{D_R(\omega)}{D_V(\omega)}$$

$$E_T(\omega) = \frac{D_T(\omega)}{I(\omega)S(\omega)} \approx \frac{D_T(\omega)}{D_V(\omega)} \quad (3)$$

그런후, $E_R(\omega)$ 와 $E_T(\omega)$ 는 시간영역으로 다시 전환되어진다. 그 결과

발생하는 시계열은 시간진폭으로 하여금 상대적으로 명백한 방법으로 고찰될 수 있도록 함으로써 지진기록으로서 직접적으로 설명될 수 있다.(Langston, 1979)

식 (3)은 수직함수에 대한 Radial 함수의 복합 스펙트럼 비율에 상응하는 시계열인 수신함수를 정의한 것이다. 그러나 지금까지의 관계식은 수신함수에서 이상적인 사례에서만 적용되는 간단한 과정이었다. 실제로으로는 분모항이 작은 값일 경우 몇몇 문제들이 발생할 수 있다. 계기 반응에 의한 응답들이 모든 성분에 동일하다는 가정을 가진 분모를 피하기 위해 Clayton and Wiggins(1976)에 의해 제시된 최소진폭 디콘볼루션 방법이 Langston(1979)에 의해 채택되었다. 이 최소진폭 디콘볼루션(Water level deconvolution)은 다음과 같이 설명될 수 있다.

$$E'_R(\omega) = \frac{D_R \overline{D}(\omega)}{\Phi(\omega)} G(\omega) \quad (4)$$

$$\Phi(\omega) = \max\{D_V(\omega) \overline{D}_V(\omega), c \cdot \max\{D_V(\omega) \overline{D}_V(\omega)\}\}$$

$$G(\omega) = \xi e^{-\frac{\omega^2}{4a^2}}$$

$E'_R(\omega)$ 는 최소진폭 디콘볼루션을 가진 디콘볼루션 된 Radial 함수이다. 상수 c 는 허용할 수 있는 최소 진폭을 결정하는 것이며, $\overline{D}_V(\omega)$ 는 $D_V(\omega)$ 의 공액 복소수를 나타낸 것이다. 상수 c 는 분모에서 허락된 최소 크기를 결정하며 상수 ξ 시간영역에서 단위 진폭(Unit amplitude)으로

Gaussian 필터를 정규화 하는 것이다. 그리고 a 는 고주파 잡음을 제거하기 위한 Gaussian 필터의 폭(beam width)을 나타낸다. 위 관계식에서 스펙트럼 홀의 채우기(filling of spectral holes)는 분모항이 아주 작은 값으로 되어 분자 항을 나누게 되면 그 결과는 매우 불안정한 결과를 초래하므로 안정된 디콘볼루션을 위해서는 최적의 Water-level(c)을 찾아야 한다. 따라서 진원 균일화 과정의 c 와 a 값에 따라 수신함수의 진폭 및 파형은 변화될 것이다.

(3). 수신함수 진폭(Receiver Function Amplitudes)

디콘볼루션 할 때 잡음으로 인해 발생하는 다양한 Peak Amplitude의 제거 방법으로 수신함수를 단위 진폭으로 정규화(normalization)하여 사용하였다.

수직성분 자체에 의해 디콘볼루션을 했을 경우 Water-level은 수평 성분에서 사용한 것과 마찬가지로 같은 값을 사용하여 원래의 Radial 성분과 Vertical 성분의 진폭 비로 동일하게 재현시켰다. 특히 r_0/z_0 는 표면근처(near-surface)의 지각 속도와 함수관계가 되며, 더욱이 수신 함수 모델링에서 이들 정보는 아주 유리한 결과를 가져올 수 있다. 만일 표면근처의 속도가 일정하다고 가정하면 입사 P파와 관련하여 자유 표면 변위의 식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다(Aki and Richards, 1980).

여기서 p 는 평면파의 Horizontal Slowness, η_β 는 수직 성분의 Shear-wave Slowness 이다. 그리고 β 는 표면 근처의 횡파 속도이다. 따라서 훨씬 복잡한 표면 근처에서의 속도 구조에 대한 것은 식 (7)은 저주파의 진폭과 평균 속도의 관계를 나타내게 된다.

$$\frac{r_0}{z_0} = \frac{2p\eta_\beta}{\beta^{-2} - 2p^{-2}} \quad (5)$$

(4). 중첩(Stacking)

중첩의 기본 생각은 잡음이 임의적이고 관측소하부 구조로부터의 신호가 간섭성이라는 것이다. 중첩을 함으로써, 수신함수들 사이 간섭성신호들의 유사성은 관측소 하부의 대표적인 수신 함수의 정확성을 향상시킬 수 있다. 수신 함수의 중첩은 다음의 두 가지 환경에서 추천된다. (1) 어떠한 경사구조나 복합구조의 환경이 있을시 유사한 그룹의 후방위각 내에서의 중첩, (2) 층상구조나 수신함수들의 큰 방위각의 차이가 없다면 모든 방향에 걸친 중첩. 비록 수신 함수에서 일반적으로 명확한 차이점이 발견되더라도, 평균 추정치를 제공하기 위하여 다른 후방위각에 걸친 중첩이 허용된다. 경사층이 있는 환경에서는, 수신함수들의 중첩은 진앙거리차이와 후방위각이 10° 내의 지진들로부터 행해져야 한다. 대역필터(bandpass filter)는 고주파 잡음과 불량한 감도의 저주파 신호를 제거하기 위해 중첩을 실행하기 전, 수신함수에 적용할 수 있다.

(5). 수신 함수의 최대 가능성 추정(Maximum Likelihood Estimation of Receiver Function)

진원 균일화는 수신 구조가 단순하고 평탄할 때 유효하다. 상부 지각에 뚜렷한 불연속면들이 있을 때, 수신 함수의 수직성분은, 광대역 지진관측에서 더 이상 단순한 δ 함수로서 여겨질 수 없다. 게다가, 식 4에서의 c 는 선정된 주파수 범위 내에서 상수가 될 수 있다. 상수 c 의 이러한 임의적인 선택은 수신 함수의 감도 한계와 신호 대 잡음 비율에 영향을 미칠 수 있다. 경험적으로 지진파들의 진폭 스펙트럼은 보통 높은 주파수에서 더 빨리 감쇠한다. 이러한 이유 때문에, 보다 낮고 보다 높은 주파수 범위에

서 스펙트럼 부분을 위해 두 가지의 다른 허용 가능한 최소 진폭들을 사용하는 것이 합리적이다.

뚜렷한 불연속면과 허용 가능한 최소 진폭 하에서의 무효력을 포함하는 스펙트럼 부분의 문제들을 해결하기 위해, Liu et al. (1996)은 수신 함수의 최대가능성 추정(Maximum Likelihood Estimation of Receiver Function) 제안했다. 그 방법은 아래와 같이 간단히 설명된다.

3성분 수신 함수들은 서로로부터 독립적인 것으로 간주 된다. 잡음이 존재하는 경우에, 3성분 원격 P파들의 복합 스펙트럼은 식 (1)에 의해 주어진 것보다 더 일반적인 선형모델로서 표현될 수 있다.

$$Y_{lk}(\omega) = X_k(\omega)R_l(\omega) + N_{lk}(\omega) \quad (6)$$

$k=1, 2, \dots, n$, n is total number of events.

$l = 1, 2, 3$ 즉 수직, 남북 그리고 동서의 성분들에 대해, 각각, $Y(\omega)$ 와 $R(\omega)$ 은 각각 그 관측소 하부 수신 함수와 원격 P파들의 복합 스펙트럼들이다. $X_k(\omega)$ 은, 진원함수, 수신영역을 제외한 경로함수, 그리고 계기 반응에 의한 함수로 구성되어 있는 k -th 지진을 위한 함수로서 정의된다. 단 순화를 위해, 계기 반응에 의한 함수는 모든 성분들에 대해 동일한 것으로 가정된다. N_{lk} 는 k -th 지진에 대한 l -th 성분과 관련된 잡음을 나타낸다. 식 (5)는 다음과 같이 시간영역에서 표현될 수 있다.

$$y_{lk}(t) = r_l(t)*x_k(t) + n_{lk}(t) \quad (7)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

$$l = 1, 2, 3$$

$$r_{lt}(t) * x_k(t) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} r_l(u) x_k(t-u) \quad (8)$$

식 (6)에서 가능도함수(likelihood function)의 사용에 있어서의 기본적인 원리는 아래와 같이 설명된다. 식 (6)의 $X_k(w)$ 함수는 확률함수로, 수신 함수 $R_l(w)$ 를 미지의 불변함수로 간주함으로써, $R_l(w)$ 는 주파수 영역을 가능도(likelihood)에 근사치로 최대화시킴으로써 추정되어질 수 있다.

식 (6)을 풀기 위해서, Shamway and Del(1985)은 최소한의 변화와 최대가 능도 추정량(maximum likelihood estimators)을 사용하는 진원 요인들 $X_k(k=1, 2, \dots, 7)$ 과 수신요인들 $R_l(l=1, 2, 3)$ 을 추정하기 위한 Multi-channel Maximum Likelihood Deconvolution (MMLD)알고리즘을 제안했다. 식 6에서 미지의 매개변수를 추정하고, 수신 함수들의 디콘볼루션화 된 시계열을 결정하기 위해, Shamway and Del (1985)이 제안한 계산 절차들을 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 수신함수들에 대한 초기추정치를 명시한다. 보통, 단순델타함수는 첫 반복에서 가정되기 때문이다.
2. 신호 대 잡음 비율의 역인 잡음 대 신호 비율(θ_k)과 잡음 주파수(f_v)를 초기화 한다.

$$\theta_k = \frac{f_v}{f_{xk}} \quad (9)$$

f_v 은 모든 관찰 된 성분들에 걸쳐 평균화된 잡음이다. 그것은 Maximal entropy

spectrum analysis (Burg, 1972)을 사용함으로써 Onset전에 배경잡음으로부터 초기화 되어질 수 있다.

3. Conditional mean(\hat{X}_j)과 평균 제곱 오차(σ_k^2)를 계산한다.

$$\hat{X}_j = D_k^{-1} \sum_{l=1}^3 \overline{R}_l Y_{lk} \quad (10)$$

$$\hat{R}_l = C_l^{-1} \sum_{k=1}^3 \overline{X}_k Y_{lk} \quad (11)$$

$$D_k = \sum_{l=1}^3 |\overline{R}_l|^2 + \theta_k \quad (12)$$

$$C_l = \sum_{k=1}^3 |\overline{X}_k|^2 + \sigma_k^2 \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}_k^2 = f_v D_k^{-1} \quad (14)$$

4. 평균 수신함수 (\hat{R}_l)를 계산한다.

5. 신호 스펙트럼(\hat{f}_{xk})과 잡음 스펙트럼(\hat{f}_v)을 계산한다.

$$\hat{f}_{xk} = |\hat{X}_k|^2 + \hat{\sigma}_k^{-2} \quad (15)$$

$$\hat{f}_v = (3n)^{-1} \sum_l k |Y_{lk} - \hat{R}_l \hat{X}_k|^2 + |\hat{R}_l|^2 \sigma_k^2 \quad (16)$$

6. DFT(Discrete Fourier Transform)로 시간 영역에서 Conditional mean (\hat{X}_j)과 평균 수신 함수(\hat{R}_l)를 구하고, 다음 반복을 위해 3번째 절차로 돌아간다.

이러한 반복은 $X_k(w)$ 의 최소분산식과 수신함수 $R_l(w)$ 의 Conditional maximal likelihood estimation으로 이끌 것이다. 그러한 반복과정이 수신 함수들의 가능성을 항상 증가 시킨다는 것이 이론적으로 입증되었다 (Dempster et al., 1977). 시간영역에서 수신함수의 Vertical 성분들과 Radial 성분들 사이의 Onset 진폭비는 동시에 얻어질 수 있다.

(6). 비선형 복합 스펙트럼 역산

주파수 영역에서, 목적함수는 식 (17)처럼 표현될 수 있다.

$$S(m) = \frac{1}{2} \{ (g(m) - d_{obs})^t C_D^{-1} (g(m) - d_{obs}) - (m - m_{prior})^t C_m^{-1} (m - m_{prior}) \} \quad (17)$$

$g(m)$: predicted data vector

- d_{obs} : observed data vector
- C_D : covariance matrix of the data space
- D_M : covariance matrix of the model space
- m : model vector
- t : transpose.

아래에 기입한 Prior은 Priori estimation을 나타낸다. 목적 함수는 Conjugate gradient method 에 의해 최적화 될 수 있다(Tarantola, 1987). Conjugate gradient method 알고리즘을 위한, 요점들 중의 하나는 목적 함수의 최대상승 방향을 계산하는 것으로 식 (18), 식 (19)과 같다.

$$\hat{\gamma}_N = \left[\frac{\delta S_\alpha}{\delta m_i} \right]_N \quad (18)$$

$$\gamma_N = C_M \hat{\gamma}_N = C_M \left[\frac{\delta S_\alpha}{\delta m_i} \right]_N$$

$$= C_M \overline{RG}_N^T C_D^{-1} Re(g(m) - d) + C_M \overline{IG}_N^T C_D^{-1} Im(g(m) - d) + (m_N - m_p) \quad (19)$$

$$\overline{RG}_N = Re\left(\frac{\delta g^\alpha}{\delta M_i}\right)_N$$

$$\overline{IG}_N = Im\left(\frac{\delta g^\alpha}{\delta M_i}\right)_N$$

여기의 $\hat{\gamma}_N$ 와 γ_N 는 각각 S의 기울기와 최대상승방향으로 불리며 N 은 반복 횟수를 나타낸다. α 와 i 는 데이터와 모델 공간들에서 각각 성분과 벡터를 나타낸다. Conjugate gradient method는 연립해를 구하는 최적화 방법의 하나로 반복에 의하여 해를 구하는 방법이다. 초기모델로부터 오차와 수렴을 반복을 통하여 모델은 Upgrade 시키면서 최적화모델을 구하는 방법이다.

나. 자료 획득

(1). 관측소 선정

본 연구에서는 한국과 중국의 사이에 위치해 있는 황해를 중심으로 황해의 지각구조 및 상부맨틀을 연구하기 위해 한국측에 6개소 중국측에 5개소의 광대역 임시지진관측소를 2007년 9월부터 설치 운영 중에 있다 (Figure 3, Table 4).

각 관측소는 중국 지질지구물리연구소와 한국해양연구원의 세심한 사전답사 및 선정과정을 거쳐 선정되었으며, 일부 관측소에선 약 2개월의 테스트 기간을 걸쳐 지진관측부지로서 부적합 판정을 받은 곳은 위치를 재조정하였다. 지진관측소의 위치선정은 Signal-To-Noise Ratio, 전원공급상태, 관측소 관리의 편리성, 접근의 용이성 및 기타 다른 기관에서 운영하고 있는 주변 지진관측소의 분포현황을 고려하여 선정하였다. 한국측에서는 경기도 안산시 한국해양연구원, 경기도 평택시 신영분교, 충남 공주시 공주대학교, 전북 부안군 전북대학교 학술림, 전남 진도군 진도기상대 그리고 제주시 제주대학교에 설치하였으며, 중국측에서는 완쿤(Wangcun), 지아오난(Jiaonan), 구안윤(Guanyun), 쉘양(Sheyang), 안첵(Yancheng)이 선정되었다.

안산관측소

경기도 안산시 한국해양연구원 내에 위치해 있으며, 지진계 전용부지를 만들어 운영 중에 있다. 부지의 특성으로는 관측소 주변이 산으로 둘러쌓여 소음이 적으며 관측소 관리의 편리성과 전원공급상태, 인터넷 등의 시설들이 고루 갖추어진 장소이다(Figure 3. a).

평택관측소

경기도 평택시 내기초등학교 신영분교로 학생은 약 20여명 정도가 있으

며, 주위는 농경지로 이루어져 있는 관측소이다. 현재 학교의 창고를 빌려 관측소로 사용 중에 있다(Figure 3. b).

공주관측소

충남 공주시 공주대학교에 위치해 있으며 건물 건축시 지진계 설치를 고려하여 건물과 분리되어 있는 지진계 부지가 만들어져있으며, 현재 국가 지진관측망사업의 일환으로 가속도 지진계가 설치되어 있다. 광대역 임시 지진계 역시 이곳에 설치되어있으며 기반암위에 설치 한 것과 같은 효과를 볼 수 있다(Figure 3. c).

부안관측소

전라북도 부안군 전남대학교 학술림에 위치한 관측소로 주변이 산으로 둘러싸여 있으며, 차량과 인적이 드문 곳이다. 또한 바다와 상당거리 떨어져 조수의 영향을 받지 않는 곳이다(Figure 3. d).

진도관측소

전북군 진도 기상대에 위치해 있으며 공주관측소와 같이 지진계전용부지에 설치되어있다. 기상청의 가속도 지진계와 함께 설치되어있다. 해발고도 약 509m 의 산 정상에 위치해 있다(Figure 3. e).

제주관측소

제주시 제주대학교에 위치해 있다. 처음 선정한 제주관측소의 경우 해안과 약 10 km 떨어진 곳에 설치한 결과 조수와 지하수의 영향으로 생각되는 잡음이 발생하여 현재 기존부지보다 내륙에 위치해 있는 제주대학교 내로 위치를 재조정하여 운영 중에 있다(Figure 3. f).

관측소의 데이터는 중국측에서는 2개월 혹은 4개월마다 1회씩 관측소를

방문하여 자료를 회수하고 있으며 한국측에서는 2008년 6월 이후 인터넷을 이용한 실시간 지진모니터링 시스템을 구축하여 한국해양연구원에서 실시간으로 자료를 수신 중에 있다.

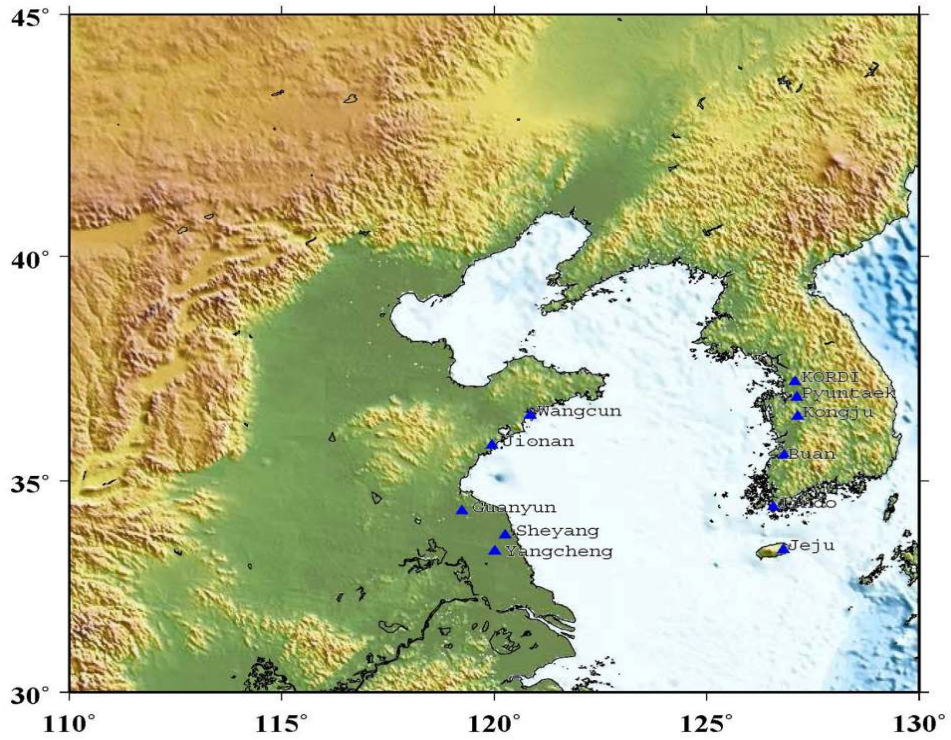


Figure 3. Concertion of Temporary broadband seismic stations in Korea and China.

Table 1. Korea and China stations location.

Station	Locaton		Elavation(m)
	Latitude(N)	Longitude(E)	
Wangcun	36.4906	120.8547	54
Jiaonan	35.8107	119.9480	214
Guanyun	34.3065	119.2401	30
Sheyang	33.7586	120.2516	5
Yancheng	33.3755	120.0193	5
ANSAN	37.2881	126.8350	49
Pyungtaek	36.9561	126.8780	52
Kongju	36.4708	127.1450	109
Buan	35:3558	126:3476	102
Jindo	34.4725	126.3240	509
Jeju	33.4588	126.5630	320



Figure 3. (a) Ansan station



Figure 3. (b) Pyungtaek station



Figure 3. (c) Kongju station

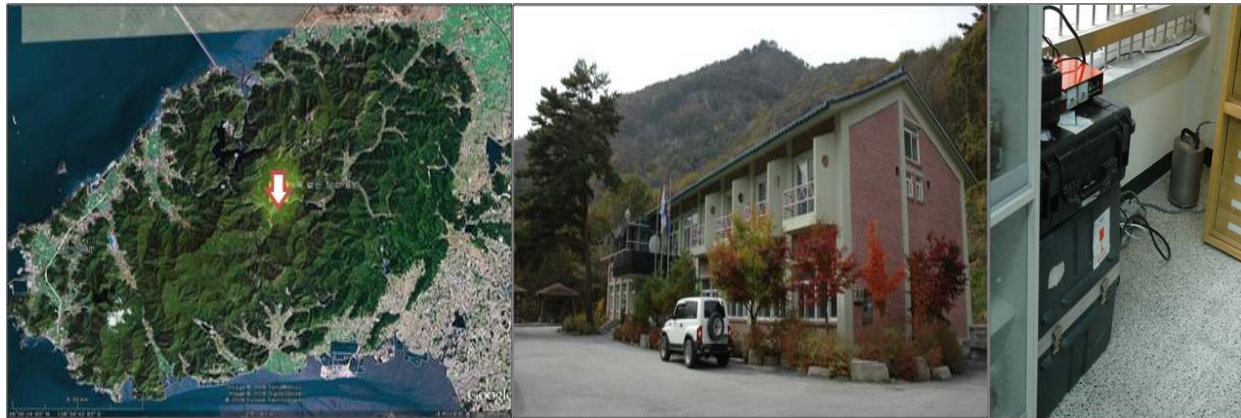


Figure 3. (d) Buan station



Figure 3. (e) Jindo station



Figure 3. (f) Buan station

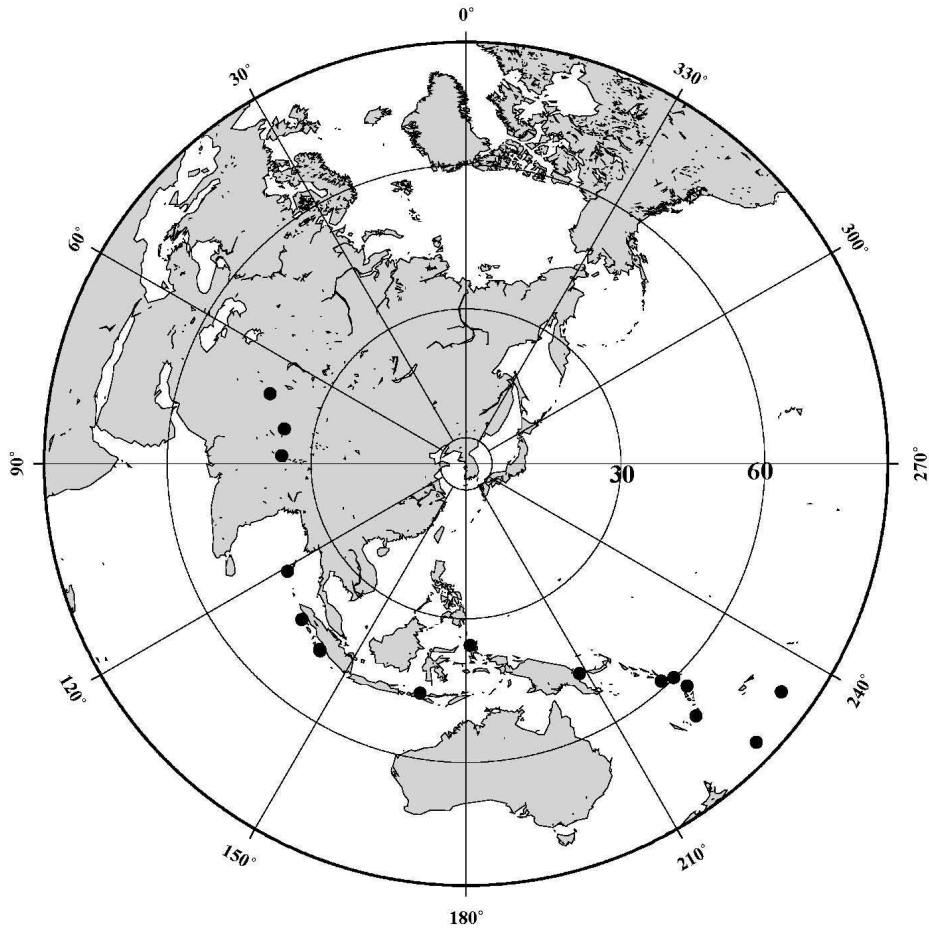


Figure 4. Map showing epicentres of the selected teleseismic events (solid circles) used in this study. Earthquakes are selected based on consideration of epicentral distance ($30^{\circ} \sim 90^{\circ}$), magnitude (> 6.5), and high signal-to-noise ratio on observed seismograms.

Table 2. Seismic parameters of teleseismic events for receiver function analysis.

NO.	DATE year:mo:day	TIME hh:mm:sec	Lat (°)	Lon (°)	Depth (km)	Mag	BAZ (°)	DIST (°)
1	2007:11:21	08:48:27	147.10	-5.76	53	6.8	15.66	45.58
2	2007:11:24	16:02:15	118.37	-8.29	20	6.5	191.66	44.49
3	2008:02:24	14:46:21	99.97	-2.49	25	7.2	219.00	45.44
4	2008:02:25	08:36:33	99.81	-2.24	25	6.7	219.37	45.31
5	2008:02:25	21:02:18	81.47	35.49	10	7.2	283.36	36.40
6	2008:06:28	22:32:57	91.82	11.01	17	6.6	240.81	39.92
7	2008:08:25	11:40:13	83.52	30.90	12	6.7	275.11	36.06
8	2008:09:08	13:21:58	166.97	-13.50	110	6.9	134.38	62.14
9	2008:09:11	18:52:06	127.36	1.88	96	6.6	178.57	33.68
10	2008:10:05	00:00:02	73.82	39.52	27	6.6	291.73	41.44
11	2008:10:19	15:52:49	-173.81	-21.86	29	6.9	125.49	80.43

(2). 데이터 분석

원거리 지진의 수신함수를 분석하기 위하여 진앙위치(위, 경도), 심도 및 발생시간에 대한 정보가 정확한 USGS(U. S. Geological Survey)의 지진정보를 사용하였다. 임시지진관측망의 자료는 2007년 11월부터 2008년 11월까지의 데이터를 사용하였다. 사용범위는 규모 6.5 이상, 관측소로부터 진앙까지의 거리는 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 사이의 데이터를 사용하였다. 진앙거리가 30° 이상의 지진파는 관측소 하부에서 초동 P파가 거의 수직으로 입사하기 때문이다. 이보다 짧은 거리에서 입사를 할 경우 많은 노이즈를 수반하며 반대로 90° 이상의 거리에서 입사 할 경우 지진파는 맨틀과 핵의 경계면인 P shadow zone을 지나기 때문이다. 또한 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio)의 값이 비교적은 좋은 자료를 선별 사용하였으며 광대역지진계는 초당 40 Hz 샘플링을 사용하였다 (Table 2).

수신함수분석을 위한 지진자료의 선택은 매우 중요한 과정 중 하나이다. Figure 5는 공주관측소의 광대역 임시지진관측소에서 관측된 지진기록으로 2008년 9월 9일 남태평양 바누아투 산토 북쪽 229km 해역에서 발생한 지진이다. 규모 7.0, 깊이 110 km에서 발생한 지진으로 비교적 심도가 깊은 곳에 발생한 지진이다. 심도가 깊은 곳에서 발생한 지진의 경우 위상 변화 적은 지각내부의 심부경로를 통해 전파되기 때문에 표면파의 영향이 적고 초동 P파가 강하게 기록된다. Figure 6는 초동 P파가 도착하기 20초 전, 도착 후 200초로 자료를 선별해놓은 것이다. 지진기록 시 대부분의 중요정보는 처음 도착하는 초동 P파와 S파에 내포하고 있기 때문이며, 복잡한 파선경로를 따라 도달된 다중반사파형으로부터 해석상의 오류를 없애기 위한 일종의 시간창이다. Figure 7는 남북, 동서, 수직 방향의 관측 지진기록을 회전 이동시켜 Radial, Transverse, Vertical 성분으로 변환 시킨 것이다.

앞서 수신함수를 설명했듯이 관측소 하부의 속도 불연속면과 투과·반사하

면서 생긴 P-to-S 전환과 등의 많은 하부지각의 정보가 수신함수 Radial 성분에 포함 기록되어 있다. Figure 8은 Figure 5번부터 Figure 7번까지의 과정을 거쳐 선별된 지진자료들로서 신호 대 잡음비 또한 좋은 자료들만을 선별하여 수신함수 Radial성분을 stacking 한 그림이다.

앞서 설명한 비선형 복합 스펙트럼 역산은 수신응답 역산에서 반대로 수신응답구조에 적용할 수 있다(e.g. Liu et al., 1996). 지각과 상부맨틀의 1차원 속도 구조 규명을 위한 역산의 초기모델로서 PREM 모델 (Preliminary Reference Earth Model., Dziewonski and Anderson, 1981)을 사용하였다. Figure 9는 선행모델방법에 의해 구한 지각 속도 구조 모델을 작성한 것으로 공주관측소로부터 관측된 원격 수신함수를 이용하여 초동 P파로부터 각 불연속면에서의 전환과 Ps의 도달 시간 및 진폭을 고려하여 최종 지각 속도 모델을 작성하였다. 역산모델을 통해 산출된 수정 속도 지각 모델(modified crustal velocity structure model)을 이용하여 이론 수신함수를 계산하였으며 지각 속도 구조 모델, 관측 및 이론 수신함수를 보여주고 있다. 이는 관측 수신 함수의 초동 P파와 Moho Ps 전환파의 주행시간 및 진폭이 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

(b)는 S파 속도를 통해 깊이에 따른 S파의 속도 모델링이며, $V_p = \sqrt{3} V_s$ 를 사용하여 P파에 대한 깊이에 따른 속도모델을 계산하였다.

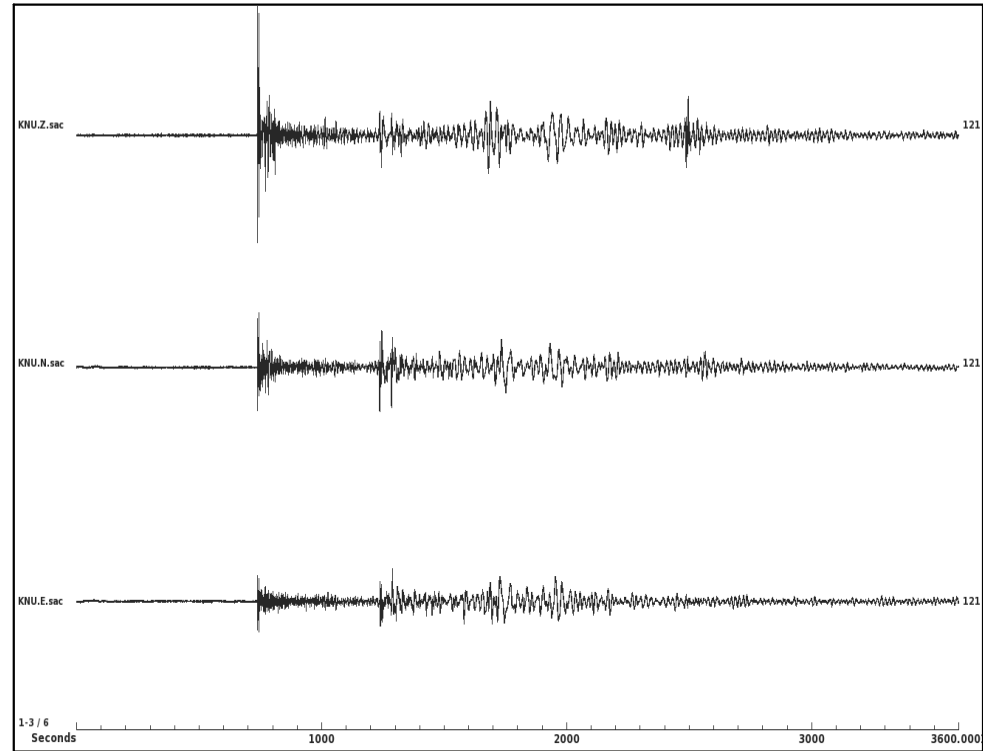


Figure 5. A typical 3-component teleseismic broadband seismogram for a deep South Pacific earthquake recorded at Kongju

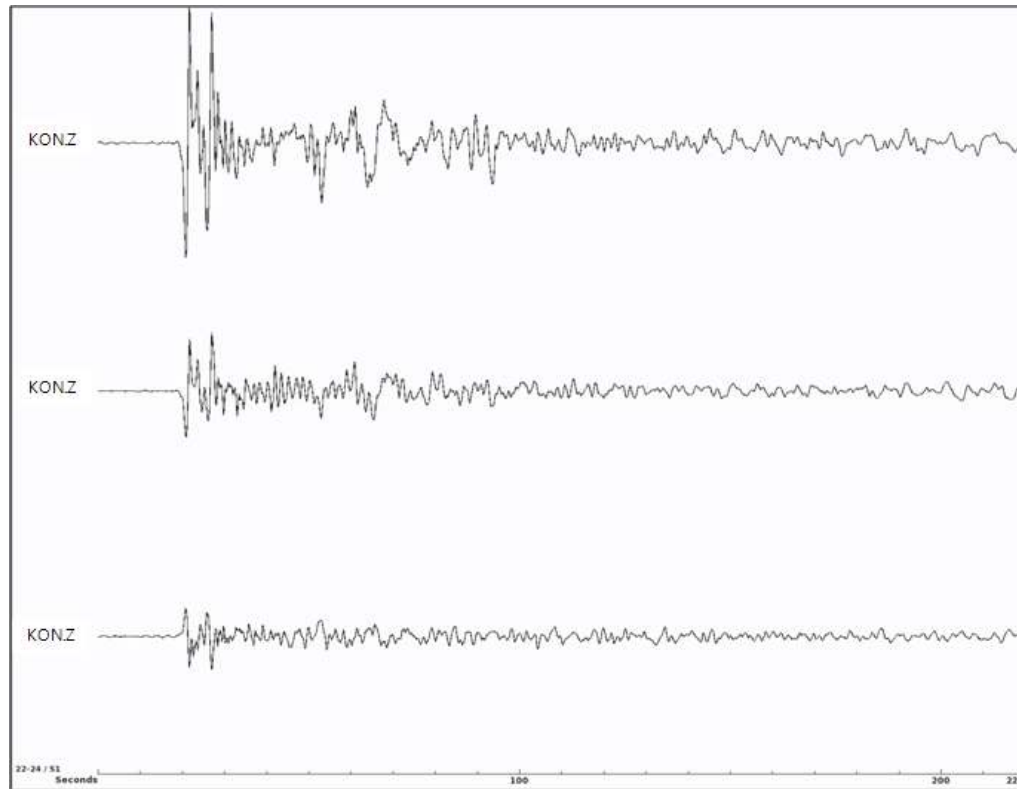


Figure 6. 220 second around the P-wave arrival. 20 seconds before onset, 200 seconds after onset

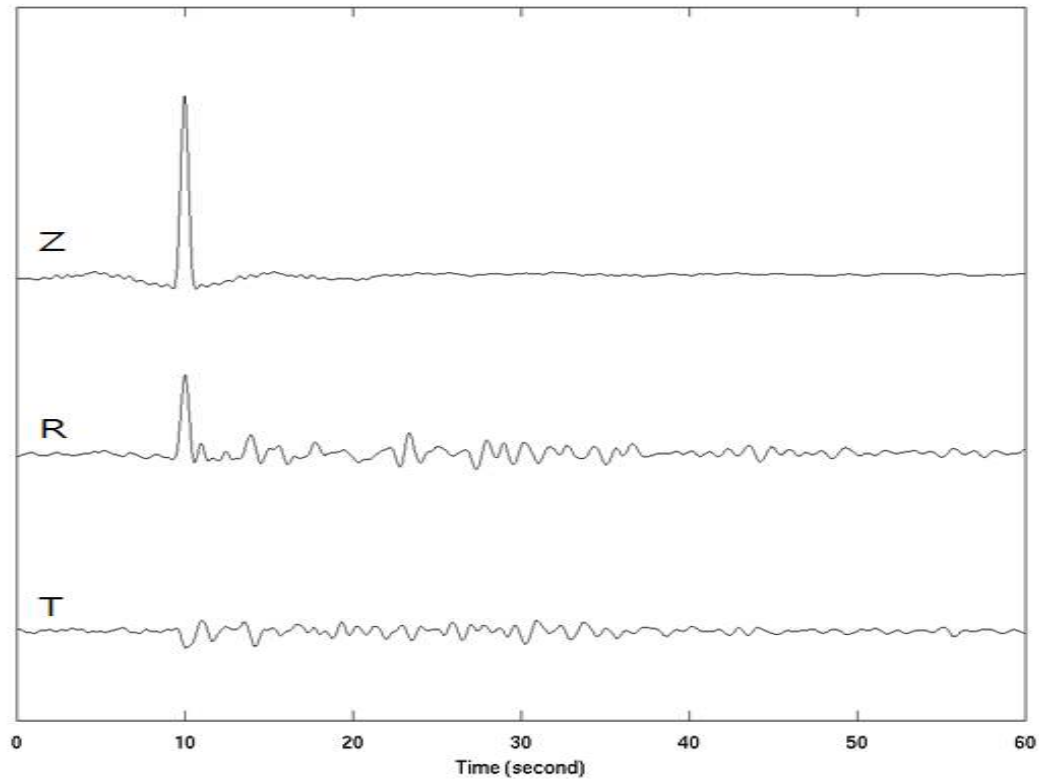


Figure 7. Receiver functions of vertical (Z), radial (R) and transverse (T) components calculated from the seismograms in South Pacific

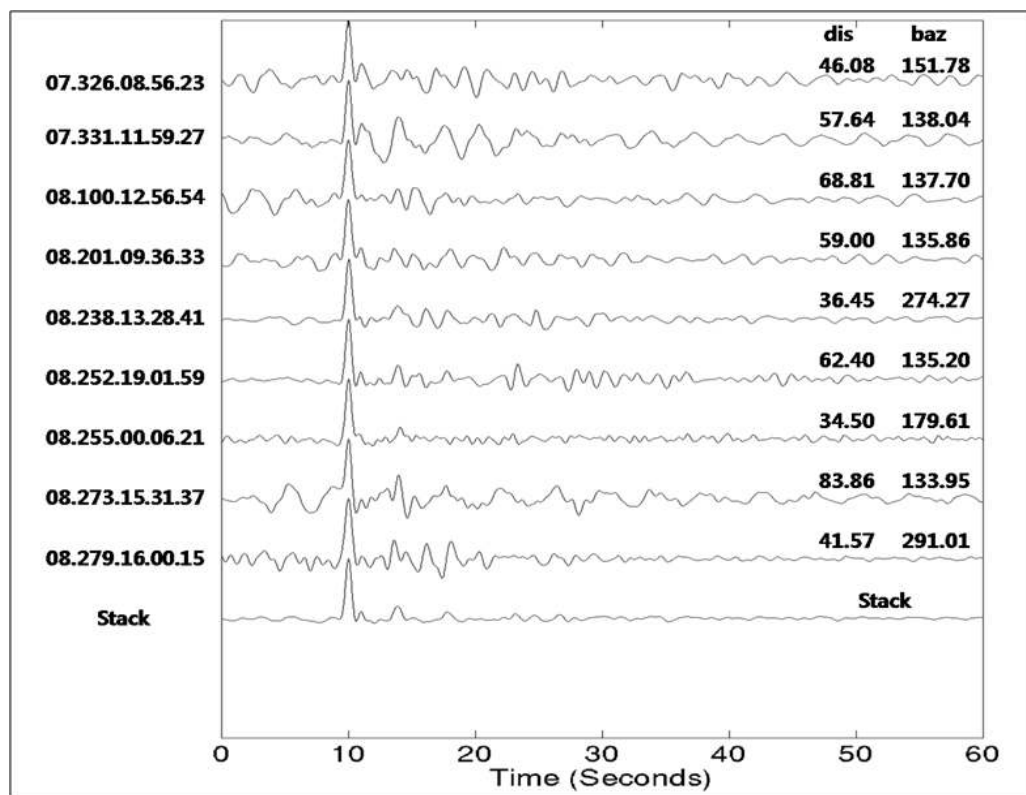


Figure 8. Receiver functions used for Kongju and representative (stacked) receiver function

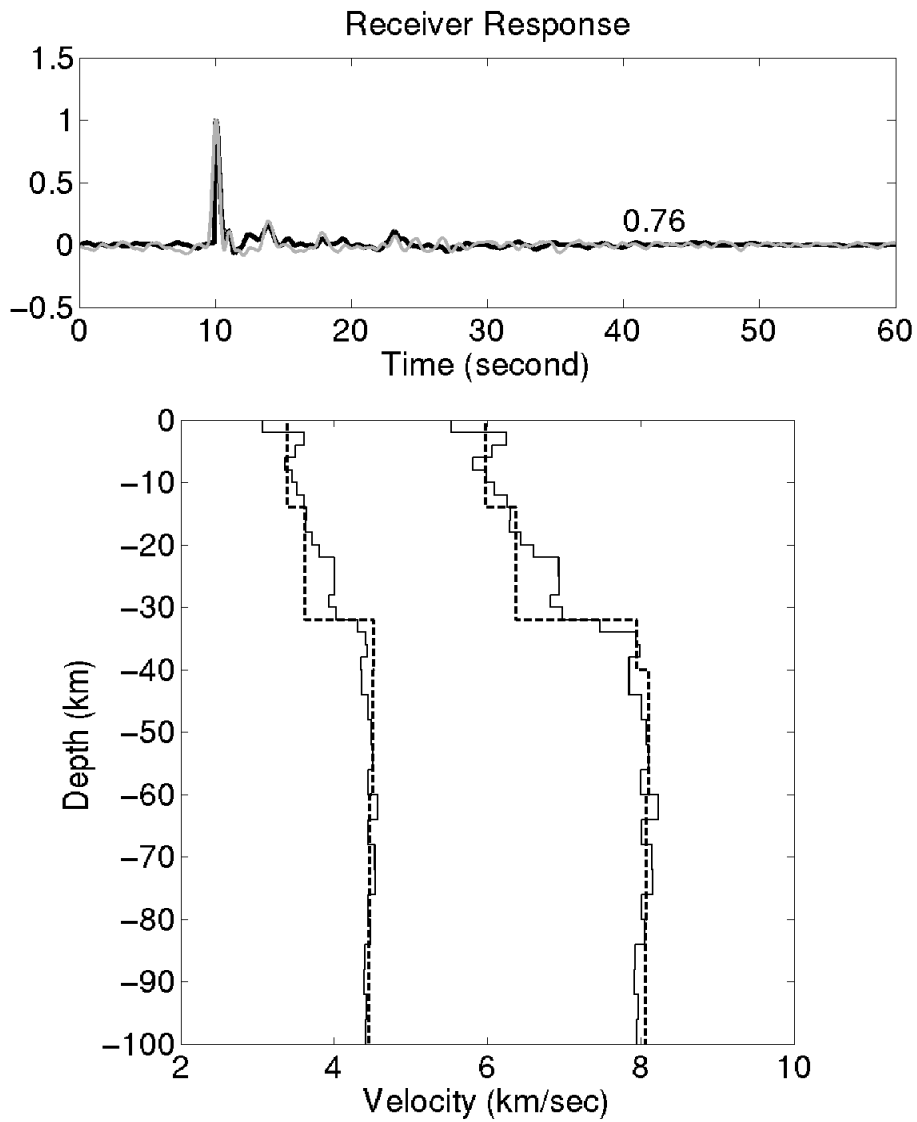


Figure 9. (a) Observed and calculated receiver function for the station Kongju. The number in the lower right corner is the cross-correlation coefficient between observed receiver function and calculated receiver function.
 (b) Resultant P and S-wave velocity models

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 수신함수 분석법을 이용하여 총 8개 관측소 하부 지각 및 상부맨틀 구조를 분석하였으며, 각 관측소에서 Stacking 한 Radial 수신함수와 선형 모델링 방법에 의하여 계산한 초기 속도 모델을 이용하여 수신함수 역산을 수행하였다. 다음은 수신함수 역산에서 적용한 역산 인자들이다.

1) 주어진 속도모델을 이용하여 이론 수신함수를 계산할 때 P파의 속도는 $V_p = \sqrt{3} V_s$ 로 가정하여 사용하였다.

2) 지층의 두께는 깊이가 증가함에 따라 0~32 km에서 2 km의 두께, 32~40 km 깊이까지 3km 두께, 40~60km 깊이까지 4km의 두께, 60~100 km 깊이까지 4km의 두께로 총 45개의 층으로 이루어진 속도모델을 사용하였다.

3) Max iteration 30회 그리고 Variance 변화가 일정한도 조건을 만족할 때까지 관측소 하부의 지각 및 상부맨틀 속도모델을 제시하였다.

4) CMT(Crust-Mantle Transition)는 최대속도가 7.5 km/sec 이상이 되는 급격한 속도변화를 보여주는 깊이로 설정하였다.

안산관측소의 수신함수 역산 결과

안산 관측소는 경기도 안산시 한국해양연구원내에 위치해 있으며 지체구조는 경기육괴에 속한다.

총 7개의 지진을 사용하여 관측소 하부의 지각구조를 계산하였다. 수신함

수 역산결과 20km 깊이 부근에서 P파의 속도가 6.8 km/sec로 증가하는 불연속면이 존재함을 알 수 있었으며 CMT(Crust-Mantle Transition)는 약 30km에서 관측되었다. 이때 P파의 속도는 약 6.9 km/sec에서 7.8 km/sec로 변화하였다(Figure. 10).

평택관측소의 수신함수 역산 결과

평택 관측소는 경기도 평택시 신영분교에 위치해 있으며 지체구조는 경기육괴에 속한다.

총 6개의 지진을 사용하여 관측소 하부의 지각구조를 계산하였다. 수신함수 역산 결과 약 18 km 깊이에서 불연속면이 관찰되었다. CMT(Crust-Mantle Transition)는 30 km에서 34 km 깊이에서 관측되었으며, 이때 P파의 속도는 약 7 km/sec에서 8.18 km/sec로 변화하였다(Figure. 11).

공주관측소의 수신함수 역산 결과

공주 관측소는 충청남도 공주시 공주대학교에 위치해 있으며, 지체구조는 경기육괴에 속한다.

총 9개의 지진을 사용하여 관측소 하부의 지각구조를 계산하였다. 수신함수 역산 결과 약 22km 깊이에서 P파의 속도가 6.8 km/sec로 급격히 증가하는 불연속면이 관측되었다. CMT(Crust-Mantle Transition)는 30km에서 32 km의 깊이에서 관측되었으며 이때 P파의 속도는 약 7.0 km/sec에서 7.9 km/sec로 변화하였다(Figure. 12).

부안관측소의 수신함수 역산 결과

부안 관측소는 전라북도 부안군에 위치해 있으며 옥천대에 속한다.

총 12개의 지진을 사용하여 관측소 하부의 지각구조를 계산하다. 수신함수 역산 결과 약 18 km 깊이 부근에 Mid-crustal discontinuity로 판단되는 강한 불연속면이 관측되었다. CMT(Crust-Mantle Transition)는 34 km 깊이에서 관측되었으며, 이때 P파의 속도는 7.4 km/sec에서 8 km/sec로 변화하였다(Figure. 13).

진도관측소의 수신함수 역산 결과

진도 관측소는 전라남도 진도군의 진도기상대에 위치해 있으며, 지체구조는 옥천대에 속한다.

총 10개의 지진을 사용하여 관측소 하부의 지각구조를 계산하였으며, 수신함수 역산 결과 CMT(Crust-Mantle Transition)는 34 km의 깊이에서 관측되었다. 이때 P파의 속도는 7.2 km/sec에서 8 km/sec로 변화하였다(Figure. 14).

완관관측소의 수신함수 역산 결과

완관관측소의 지체구조는 Sulu belt에 속한다. 총 5개의 지진을 사용하여 관측소 하부의 지각구조를 계산하였다. 수신함수 역산결과 18 km 깊이에서 불연속면이 관측되었다. CMT(Crust-Mantle Transition)는 32 km에서 34 km의 깊이에서 관측되었으며, 이때 P파의 속도는 7.55 km/sec에서 8.1 km/sec로 변화하였다(Figure. 15).

지아오난관측소의 수신함수 역산 결과

지아오난관측소의 지체구조는 Sulu belt에 속한다. 총 6개의 지진을 사용

하여 지각구조를 계산하였으며, 수신함수 역산결과 CMT(Crust-Moho Transition)는 36 ~ 38 km에서 관측되었다. 이때 P파의 속도는 6.9 ~ 8.2 km/sec를 보였다. (Figure. 16)

구안관측소의 수신함수 역산 결과

구안관측소의 지체구조는 양쯔지괴에 속한다. 총 6개의 지진을 사용하여 지각구조를 계산하였다.

수신함수 역산 결과 20 km에서 22 km의 깊이에서 불연속면이 관측되었으며, CMT(Crust-Moho Transition)는 30 km에서 관측되었다. 이때 P파의 속도는 7.13 km/sec에서 8.2 km/sec로 변화하였다(Figure. 17).

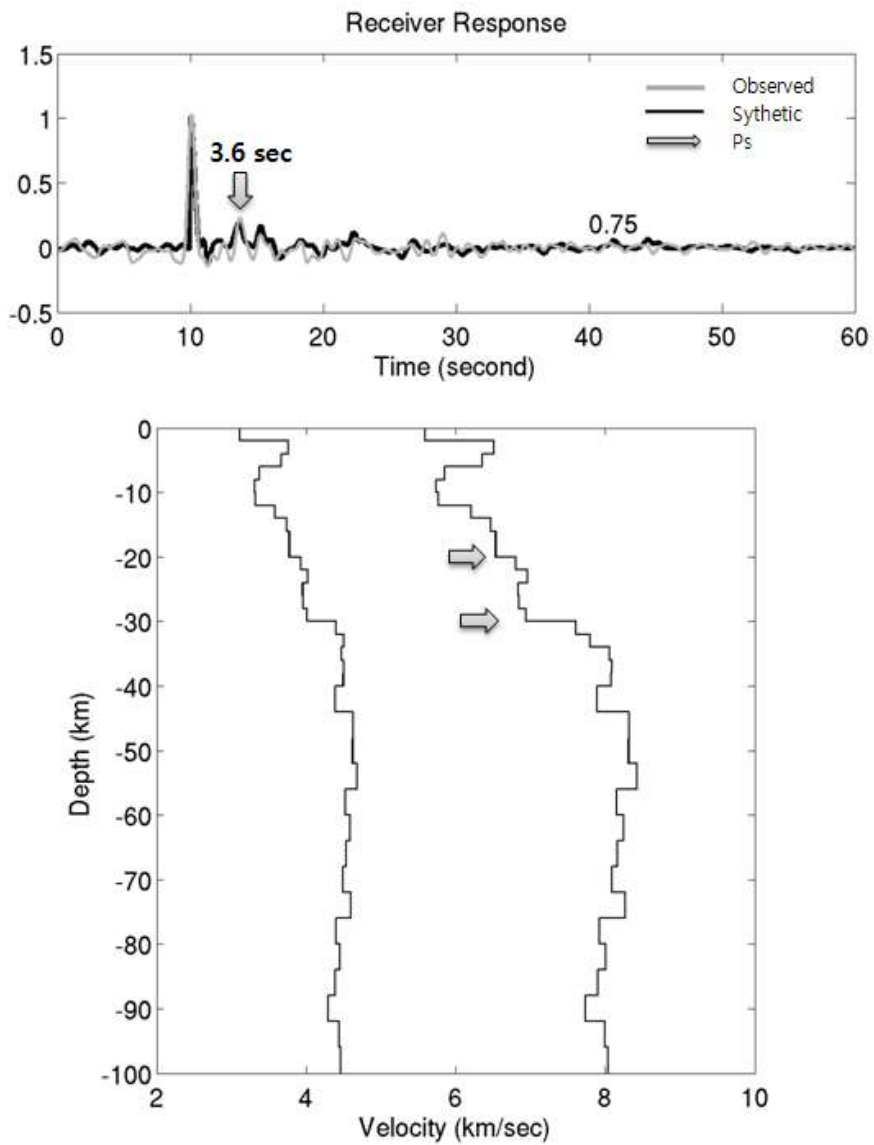


Figure 10. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Ansan station

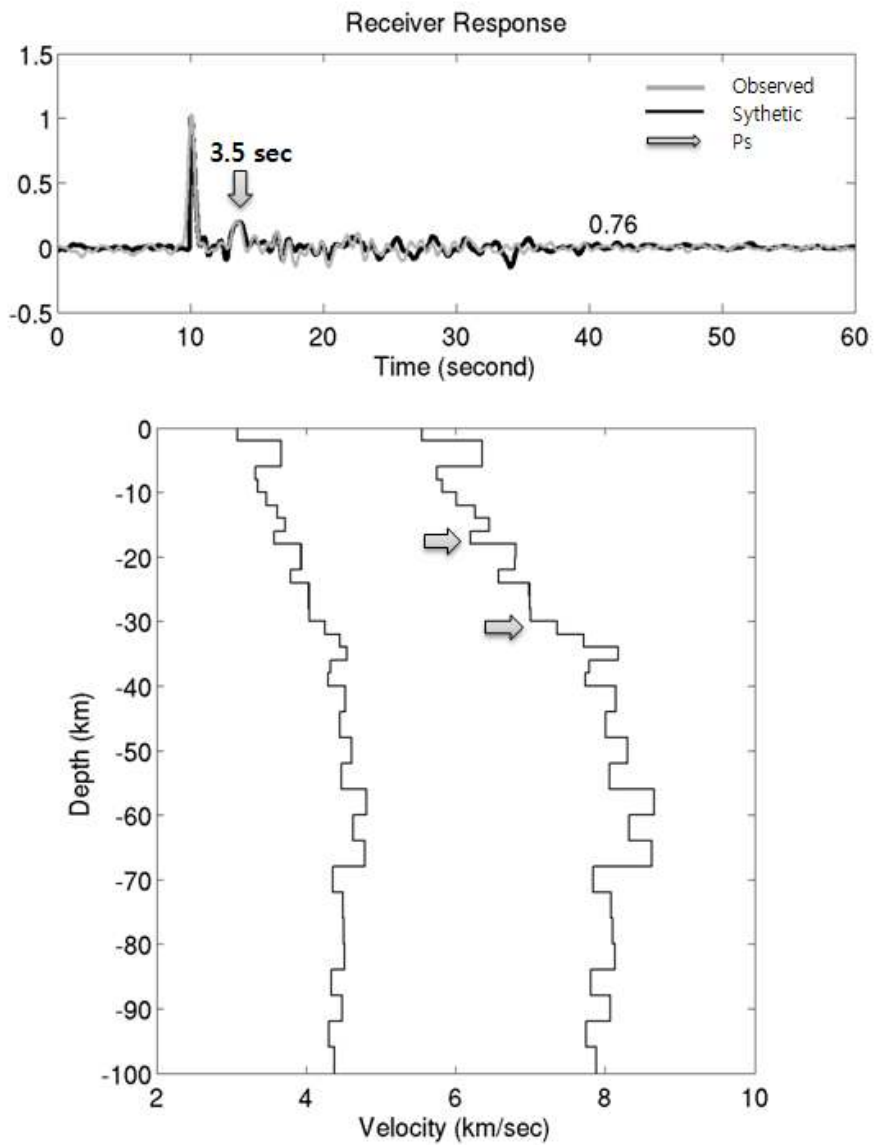


Figure 11. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Pyuntaek station

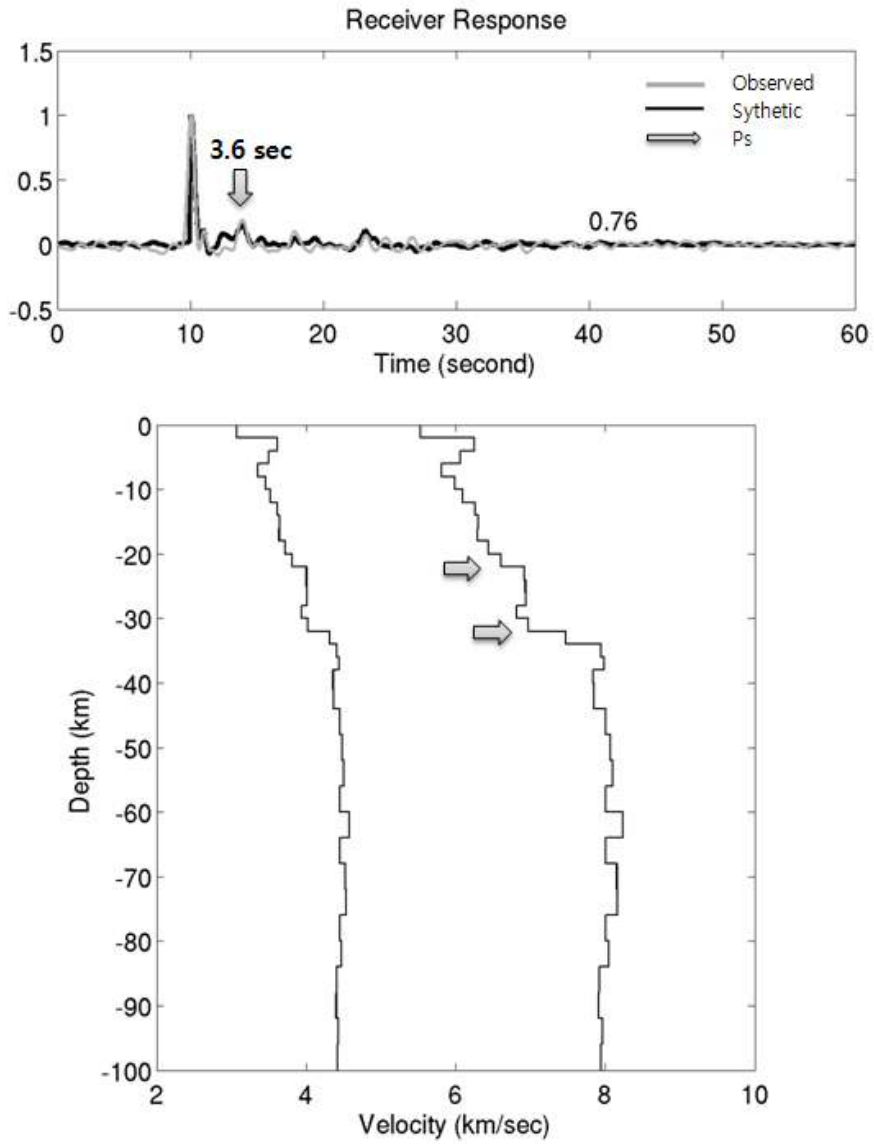


Figure 12. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Kongju station

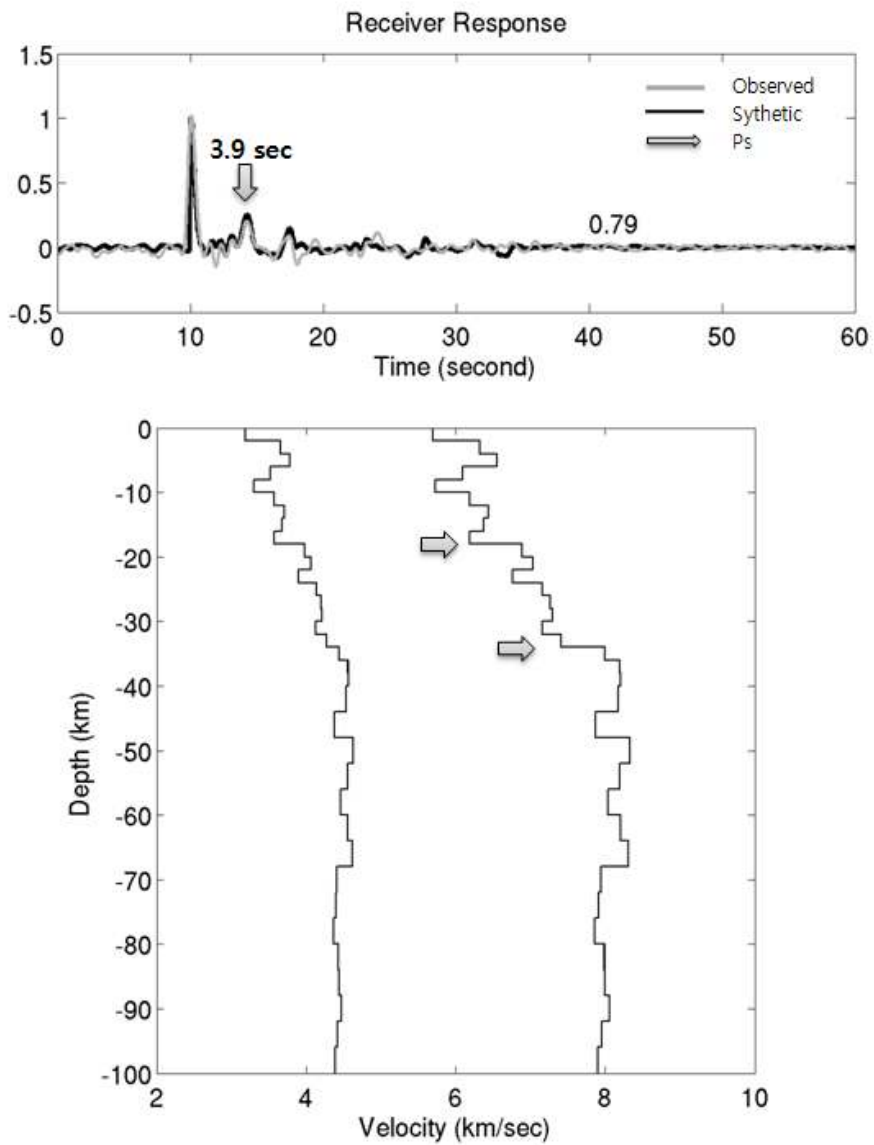


Figure 13. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Buan station

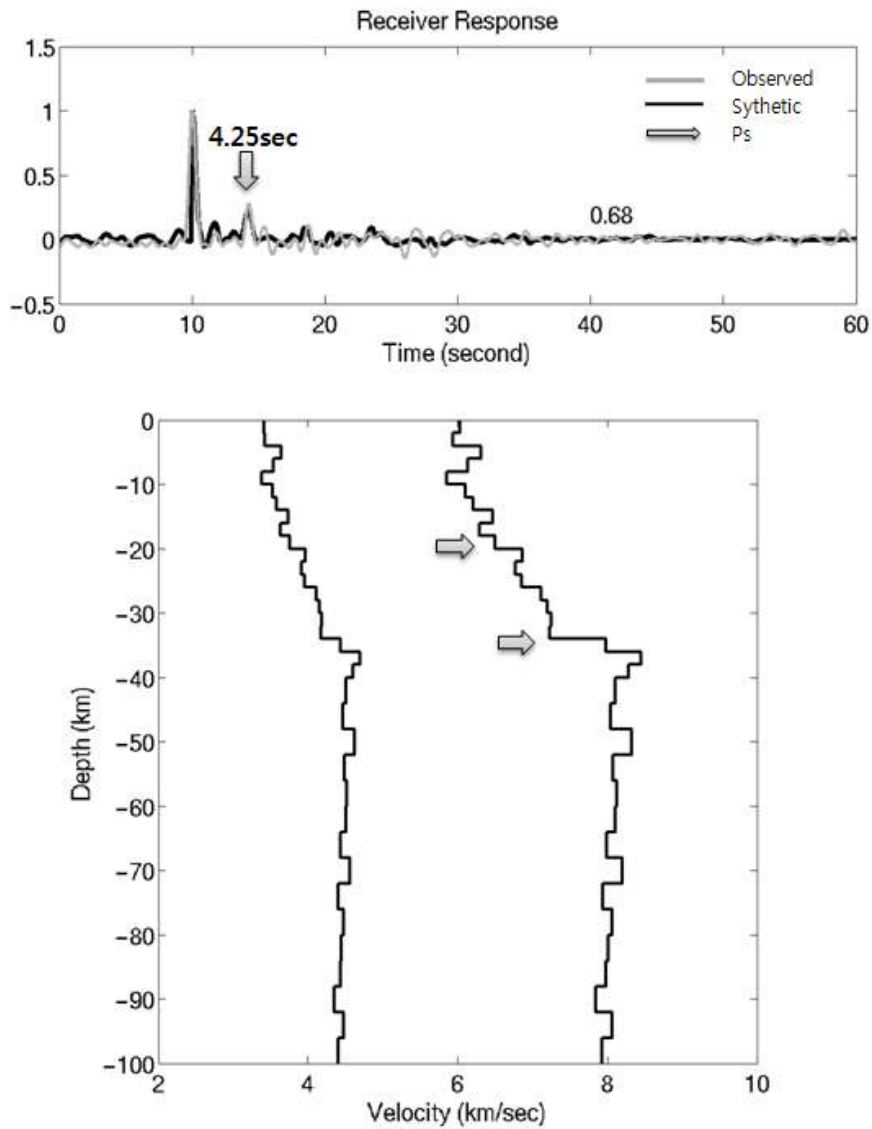


Figure 14. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Jindo station

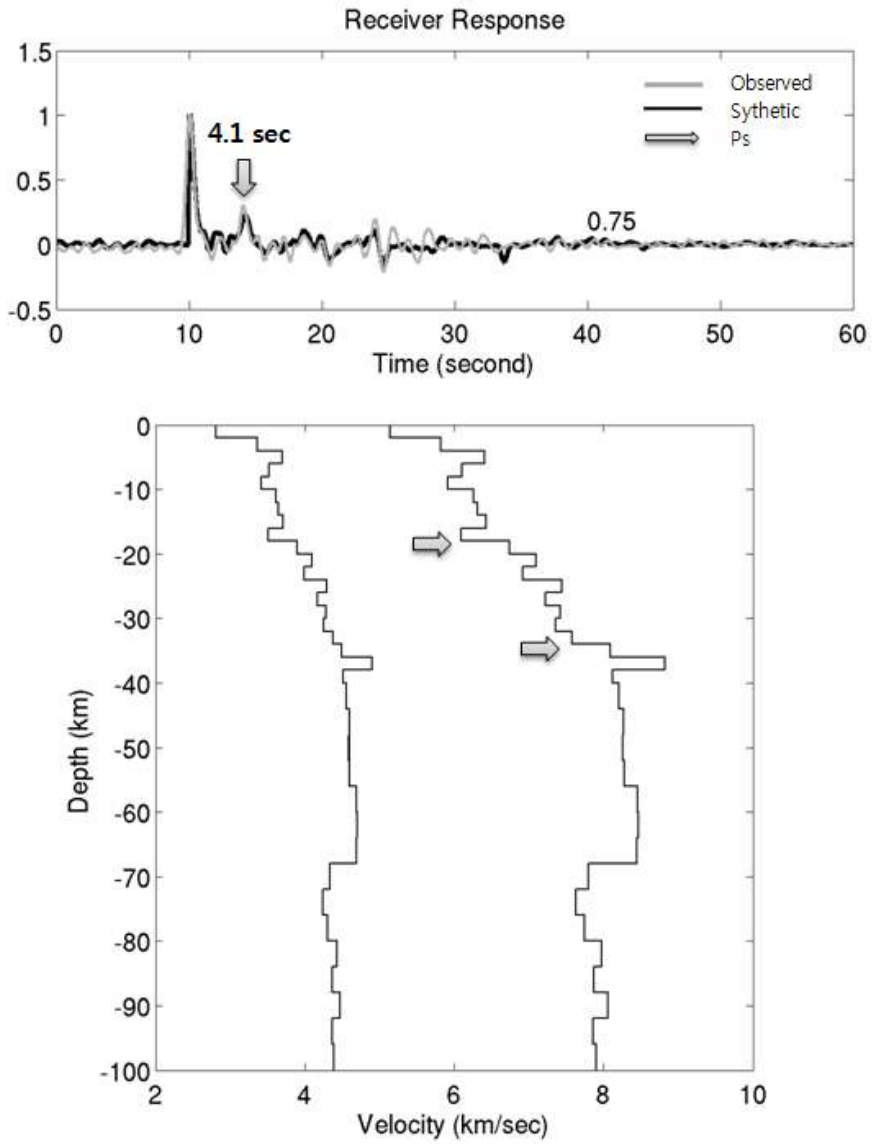


Figure 15. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Wangcun station

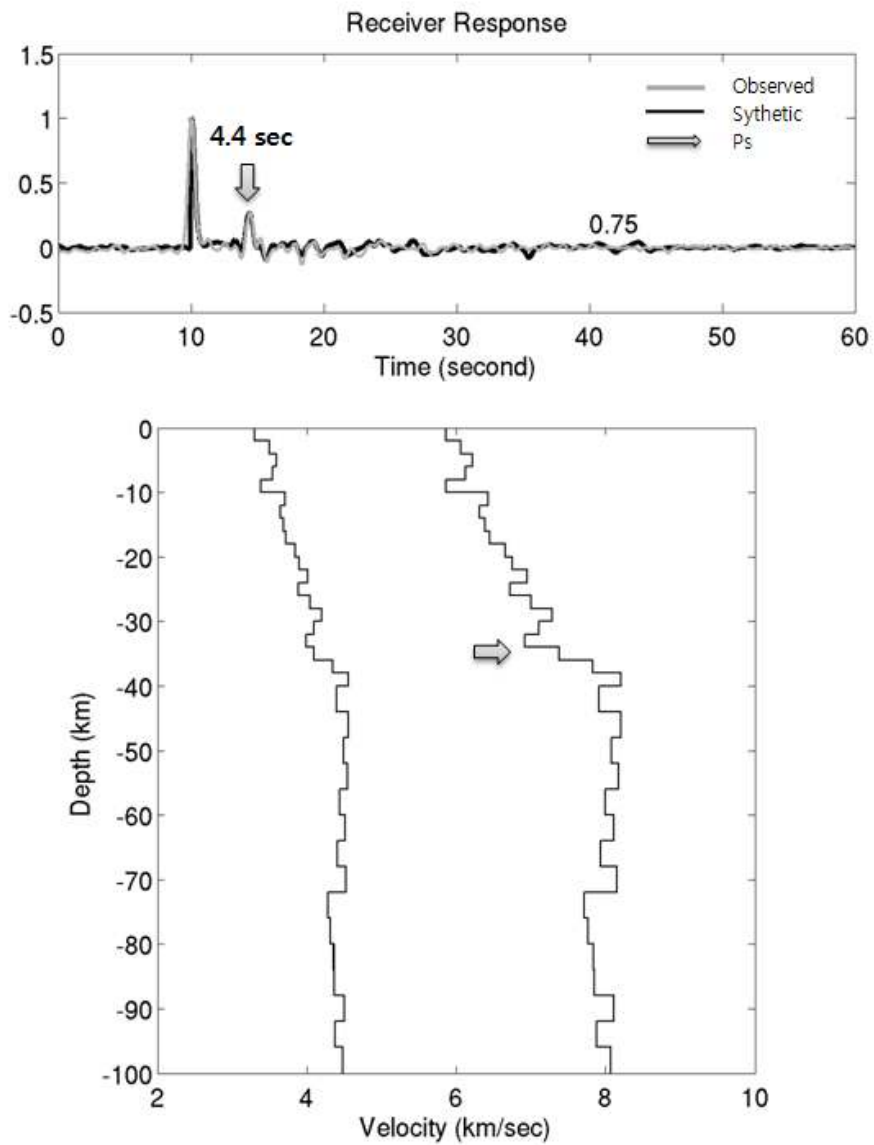


Figure 16. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Jiaonan station

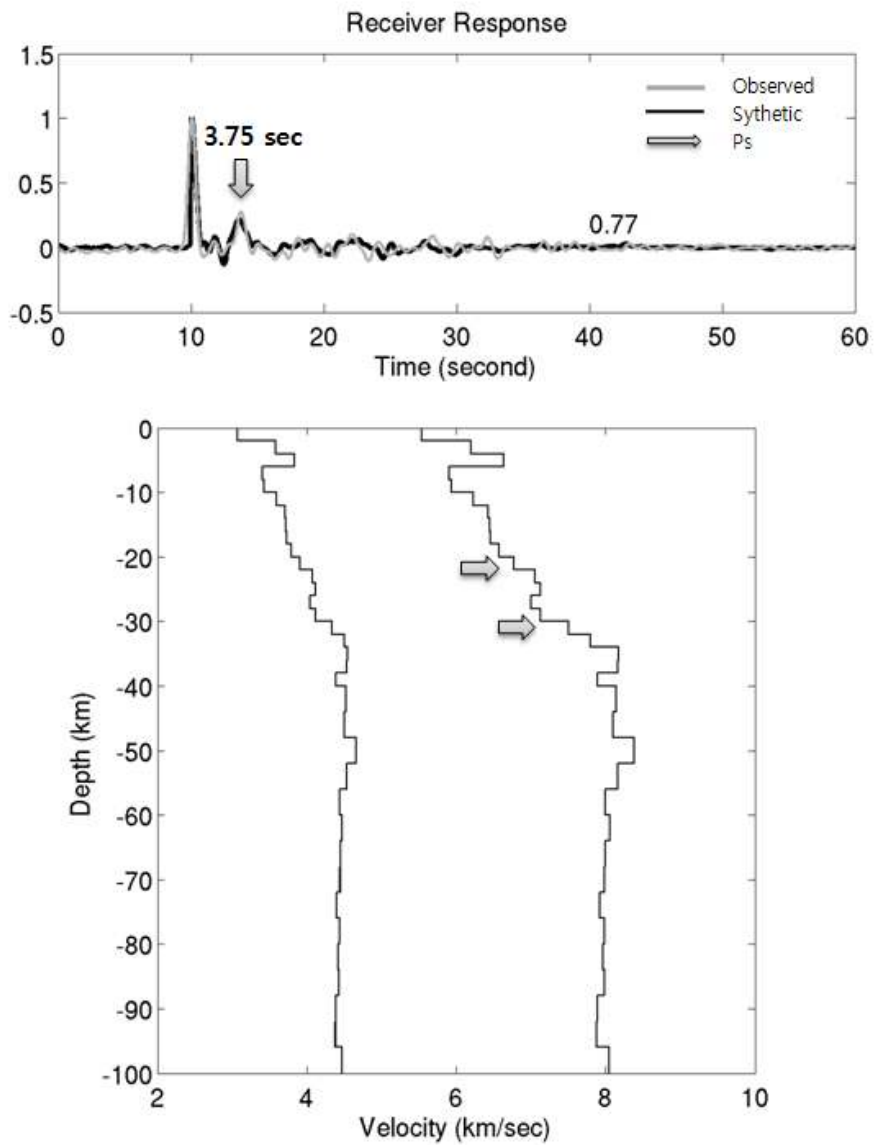


Figure 17. Estimated velocity model and corresponding receiver function with observed ones at Guanyun station

4. 결 론

본 연구에서는 한-중 국제공동연구의 일환으로 광대역 임시지진계를 황해 주변에 설치·운영 중에 있다. 이를 통해 획득한 원격지진자료를 이용하여, 각 관측소 하부의 지각구조를 계산하였다.

총 11개의 관측소 중 8개 관측소의 지각구조를 계산하였으며, 관측소는 한국측 5개 관측소, 중국측 3개 관측소의 자료를 사용하였다. 관측소의 지체구조는 한국의 경기육괴 3개, 옥천대 2개, 중국의 Sulu belt 2개, 양쯔지괴 1개에 위치해 있다. 관측소 하부의 불연속면의 깊이와 수직 속도분포를 계산하기 적합한 수신함수분석법을 사용하여 수평적인 1차원 지각구조를 해석하였으며 다음과 같은 것을 알 수 있었다.

첫째, 각 관측소의 수직분포 모델을 통하여 관측소 하부의 불연속면의 깊이와 CMT(Crust-Mantle Transition)를 구할 수 있었다.

둘째, 한국 옥천대의 CMT는 경기육괴의 CMT에 비해 상대적으로 깊은 곳에 위치해 있었으면 반대로 CMT 층의 두께는 경기육괴의 것이 두껍게 나타났다.

셋째, CMT 층에서의 P velocity의 차이는 경기육괴의 경우 하부지각과 상부맨틀 사이의 속도차가 0.9 km/sec에서 1.18 km/sec로 비교적 큰 차이를 보여주고 있으며, 옥천대의 경우 0.6 km/sec로 경기육괴에 비해 상대적으로 낮은 속도변화를 확인할 수 있었다.

넷째, 중국의 Sulu belt의 CMT는 양쯔지괴에 비해 상대적으로 깊은 곳에서 확인할 수 있었으며, CMT 층의 두께 또한 양쯔지괴에 비해 두껍게 계산되었다.

다섯째, Sulu belt의 CMT에서의 P파 속도 차이는 1.3 km/sec 로 양쯔지괴보다 비교적 큰 차이를 확인할 수 있었다.

여섯째, Sulu belt 에서의 비교적 두껍고 깊은 CMT는 이 지역이 남중국과 대륙과 북중국 대륙이 충돌 합쳐지면서 생성된 Sulu belt의 특성으로 보여

진다.

보다 정확한 지체구조를 밝혀내기 위해서는 중국 임시지진관측망 자료와 중국 지방지진국의 자료 확보를 통한 양적, 질적 자료의 우월성확보 및 분석이 필요하다. 또한 추후 획득한 자료를 이용하여 정확도를 높일 예정에 있으며 중국의 SSE, BJT, MDJ와 한국의 BAR의 지진자료를 추가함으로써 연구범위를 확대할 계획에 있다.

제 4 절 . HAZUS를 이용한 경주지역의 지진재해 예측

1. 서 론

가. 자연재해 및 지진재해예측 시스템

지진·태풍·홍수 등 자연현상에 의해 발생하는 재해를 자연재해라 하며, 이 같은 재해는 발생시기와 규모를 정확히 예측할 수 없고 대책수립에도 어려움이 따른다(노명현과 김연중, 1996; Huppert와 Sparks, 2006). 여러 자연재해 중 지진은 일단 발생하면 인명피해는 물론 건물 및 공공시설물의 파괴와 화재 같은 이차적인 재해를 동반하는 복합적인 재난으로 나타난다(경재복, 1995; 김재관, 1997; 정길호 등, 2002). 이러한 재난에 효과적으로 대응하기 위해서는 유관기관간의 신속하고 효율적인 재해정보교류와 재해요소에 대한 사전·사후 영향을 분석하고 평가할 필요가 있다. 이를 지원하는 과학적이며 체계적인 통합재해정보시스템의 구축 및 운영이 재해의 규모를 줄이는 중요한 요소로 작용할 수 있다(백민호와 홍혜연, 2003; Miyatake와 Nunomura, 2006).

지진에 따른 사전 또는 사후의 피해규모를 예측하기 위해 많은 국가에서 자국의 실정에 맞는 지진재해예측시스템을 개발하여 이용하고 있다. 대표적인 예가 미국의 HAZUS(HAZARD U.S.)로서 주로 지진의 지진동에 따른 직접적·간접적인 피해를 예측하는 시스템이며, 홍수와 허리케인에 의한 자연재해도 예측한다(FEMA, 2006). 유사한 지진재해예측시스템으로 일본에서는 1995년 고베지진(효고현 남부대지진) 이후 DIS(Disaster Information System)라는 통합적인 지진피해 조기평가시스템을 개발하여 재해발생시 관련된 기관들과 신속하게 정보를 교환함으로써 재해에 조속히 대응한다(Miyatake와 Nunomura, 2006). 이 시스템은 실시간으로 재해를 산정하는 조기평가시스템(Early Estimation System)과 응급상황 시 도로, 상하수도, 전기 등 공급처리 시설의 피해를 계산하는 긴급조치지원시

시스템(Emergency Measures Support System)등의 부시스템을 포함한다(National Land Agency of Japan, 2006). 이밖에 캐나다에는 NHEMATIS(Natural Hazards Electronic Map and Assessment Tools Information System), 대만에는 TELES(Taiwan Earthquake Loss Estimation System), 그리고 러시아에는 EXTREMUM이라는 유사한 시스템들이 있는데, 이들은 앞서 언급한 시스템들과 같은 목적으로 운영되고 있다(강익범, 2005; Gulati, 2006).

국내에서는 GIS나 기타 분석기법을 이용하여 방재시스템과 재해위험도 평가에 대한 연구 사례들이 있다. 그 예로, 지질학적·지역적 정보를 GIS에 적용하여 지질상의 재해, 특히 산사태의 위험도를 추정하는 GHIS(Geological Hazard Information System)를 한국지질자원연구원에서 개발하였다(Lee와 Choi, 2003). 이밖에 태풍 후 GIS나 GPS를 이용하여 사빈지형의 변화를 분석하거나(홍현정 등, 2006), GIS와 수리모형을 통해 홍수지역을 예측한 사례가 있다(김석규 등, 2006). 이처럼 GIS를 이용한 여러 분석기법을 사용하여 재해 또는 재해위험지역을 예측하는 사례들은 있으나, 재해지역의 피해규모를 예측하여 평가할 수 있는 우리나라의 대표적인 재해예측시스템은 아직까지 알려진 바 없다. 그러나 현재 이러한 통합적인 지진재해예측 시스템의 설계나 구축에 관한 관심이 점차 증가하고 있는 실정이다.

2. 방 법

가. 연구목적과 방법

현재 우리나라는 재해위험 예측과 피해저감계획을 위한 의사결정 지원 수단이 필요하므로 널리 사용되어지고 있는 국외의 통합적인 재해평가 시스템을 적용하여, 이가 우리나라에서도 사용이 가능한지 그 적합성을 알아보고자 하였다. 현재 미국지역뿐만 아니라 세계 여러 국가에서는 시

험적 단계를 거쳐 이미 사용하고 있거나, 자국의 실정에 맞게 시스템을 변형하여 널리 사용하고 있는 HAZUS를 이용하여 본 연구에서는 어떤 한 지진이 발생함으로써 피해를 입을 수 있다고 판단되는 일정 범위의 지역에 대한 지진재해를 예측해보고자 하였다.

우선은 HAZUS란 어떤 시스템인지 살펴본 후, 연구지역을 선정하기 위해 우리나라의 역사지진과 근래 관찰된 지진을 고려하여 가장 발생 가능성이 높은 지진과 연구지역을 선정하였다. 연구지역의 통계자료를 구축한 후 지진자료와 함께 이 시스템에 적용하여 연구지역의 피해가능성을 살펴보았다. 이때 이 시스템에서 사용이 가능한 방법들을 적용하여보았다.

나. HAZUS

미국지역의 자연재해를 예측하고 평가하는 대표적인 시스템인 HAZUS(HAZARD U.S.)는 FEMA(Federal Emergency Management Agency)와 NIBS(National Institute of Building Science)에 의해 1997년에 처음 개발되었고, GIS(Geographic Information Systems) 기술을 토대로 구축된 시스템으로서 그 성능이 꾸준히 향상되고 있다(FEMA, 2006). HAZUS는 지진자료와 지역별 기본 입력자료를 이용하여 대상지역의 지진 피해를 예측하여 산출하고, 재해위험예측과 피해저감계획 수립에 있어 의사결정 지원수단으로 중요한 역할을 하고 있다(Kircher et al., 2006). 현재, 미국지역뿐만 아니라 세계 여러 국가에서는 이 시스템을 시험적 단계를 거쳐 이미 사용하고 있거나, 자국의 실정에 맞게 시스템을 변형하여 사용하고 있다(e.g. Colombia(Carmen, 2006), Switzerland(FEMA, 2005), Turkey(Kaplan and Yilmaz, 2007), etc.).

HAZUS는 우리 생활에 영향을 주는 자연재해 중 특히 많은 영향을 끼치는 지진, 홍수 그리고 강풍(허리케인)에 의한 재해를 예측함으로써 국토개발, 도시계획, 건설·환경 법규, 공공 교육, 위기상황 대응 매뉴얼구축 등의 재난 대비 및 저감에 도움을 주기위한 목적으로 개발되고 있다.

HAZUS의 장점으로는 지진·홍수·태풍에 대한 자연재해를 평가할 수 있는 기능이 있고, 다수 시설물을 동시에 재해를 평가할 수 있다는 점이다. 또한 결과물로서는 물리적/경제적/사회적 손실을 분리하여 산정할 수 있다.

이 시스템은 지역별 기본 입력 자료와 각각의 재해발생관련 자료를 입력하여 그 지역별, 구조물별 등 피해유형별로 재해 규모를 예측한다. 지진재해 예측을 위한 HAZUS earthquake은 지진자료와 미리 갖추어진 지역별 기본 입력 자료를 이용하여 크게 세 가지 방법으로 지진재해를 예측할 수 있다. 첫째, 결정론적 방법은 지진자료를 이용하여 계산된 최대지반가속도 값을 이용하는 방법이며, 둘째 확률론적 방법은 재래주기별 확률로 최대지반가속도 값을 계산하여 적용하는 방법이다. 마지막으로 사용자 지정 방법은 지진동의 최대지반가속도, 최대지반속도, 스펙트럼가속도를 적용하여 제작한 지진동 지도(ShakeMap)를 이용하는 방법이다. 이러한 방법들을 통해 얻어진 각각의 재해예측 결과는 물리적, 경제적, 사회적 재해로 구별하여 산정되며, 이는 재해위험을 예측하고 재해저감 계획을 수립할 때 반영될 수 있다(FEMA, 2006).

다. 우리나라의 지진

과거 2000년 동안의 역사지진 기록을 보면, 그 규모 추정에 있어 이견이 있지만 주로 한반도의 남동부 일대(경주와 울산 지역)에 집중적으로 발생하였으며, 이는 활성단층으로 알려진 양산단층과 밀접한 관계가 있을 것이라 추정된다(Lee와 Jin, 1991; 경재복과 이희욱, 1998; 이기화 등, 1998; Chiu와 Kim, 2004). 그 예로, 서기 779년 4월에 부산에서 북동쪽으로 약 60km 떨어진 곳에서 발생하여 한반도 역사상 가장 큰 인명피해를 유발했던 지진과, 1643년 7월 울산에서 발생한 한반도에서 가장 큰 규모로 추정되는 지진이 있다(Lee와 Jin, 1991; 이기화, 1998; 이기화와 김정기, 2000; Chiu와 Kim, 2004). 최근에는 1997년 6월 규모 4.3의 경주지역 지진발생으로 한반도 내 지진위험성이 부각되어 국내 지진 관측망이 확대 증설되는

계기가 되기도 하였다(노명현, 2003).

최근에도 크고 작은 지진이 자주 발생하고 있는 경상남북도에는 안전성이 중요한 원자력발전소가 부산·경주·울진 3곳에 위치해있으며, 인구와 건물의 밀집도가 높고 주요 산업기반 시설물을 포함하는 부산·대구·울산 3개의 광역시를 포함하고 있다. 특히 경주를 포함하는 경상북도에는 2000년도 기준으로 전국에서 가장 많은 문화재를 보유(전국의 19%, 535점, 통계청, 2006)하고 있기 때문에, 지진재해로부터 이지역의 안전성을 확보하기 위한 꾸준한 노력이 계속되고 있다.

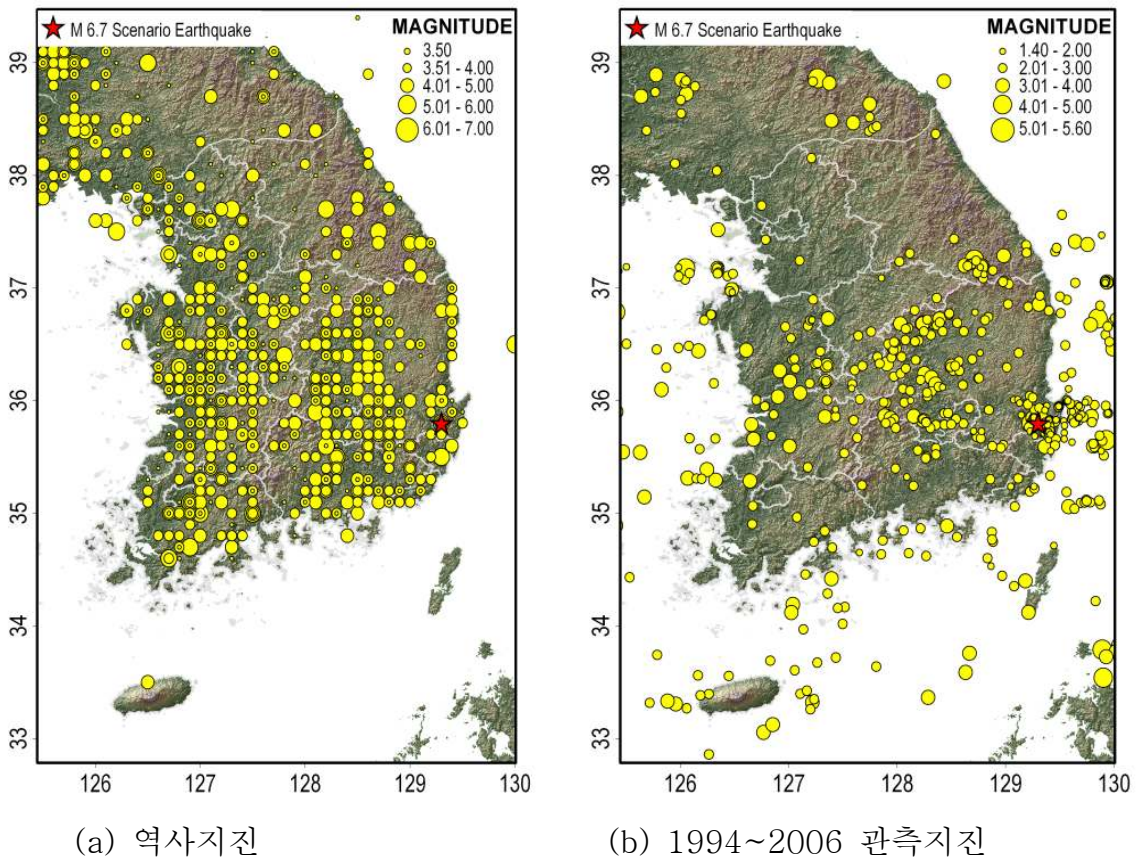


Figure 1. 우리나라의 지진발생 분포도

Figure 1의 (a)는 역사지진을 지도로 나타낸 것이다. Figure 1의 (b)는 한국지질자원연구원에서 지진파의 도착시간을 이용하여 결정한 자료로 1994년 12월부터 2006년 4월까지 국내에서의 지진발생분포를 나타낸 것으로

로서, 한반도 남동부 지역에서 지진활동이 활발함을 알 수 있다. 이들의 지도에는 문헌상 가장 많은 인명피해가 기록되어있는 서기 779년 규모 6.7로 추정되는 경주지진의 위치를 표시하였다(Lee와 Yang, 2006). 이 지진은 본 연구에서 HAZUS에 적용할 가상지진으로 사용되었다.

3. 결과 및 토의

가. ShakeMap

USGS에서 제작하는 ShakeMap은 단층위치 등을 포함한 지질자료와 지진자료, 관측 또는 계산된 지역별 진동의 강약을 표시한 지도로서 HAZUS의 사용자지정 재해추정방법에 사용된다(Wald 등, 1999; Kircher 등, 2006; Wald 등, 2006). ShakeMap에는 계기진도(Instrumental Intensity)와 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration), 최대지반속도(Peak Ground Velocity), 응답스펙트럼(Response Spectrum at 0.3, 1.0, and 3.0 second periods) 등이 포함되어 있다. 진도(Intensity)는 한 지점에서 지진을 느낀 정도를 표시하는 반면, 최대지반속도 또는 최대지반가속도는 관측장비(속도지진계 혹은 가속도지진계)에 기록된 한 지점에서 정확한 지반의 흔들림을 표시한다. 또한, 응답스펙트럼은 고유주파수와 감쇠비에 따른 지반 혹은 구조물의 반응을 표시한다. 계기진도 지도(Instrumental Intensity Map)는 지진으로 인한 진동의 분포를 신속하게 규명하는데 유용하지만 재해 세부내역을 추정할 수 없으므로, ShakeMap을 HAZUS에 적용하여 재해 세부내역을 추정한다(Kircher, 2003).

USGS에서는 규모 5.0 이상의 지진이 발생하면 지진동의 정도를 표시하는 ShakeMap을 자동적으로 생산하고, 가상지진에 대해서는 선택적 관계식을 통하여 생산하기도 한다. ShakeMap을 HAZUS에서 사용함으로써 단지 최대지반가속도나 최대지반속도만을 이용하여 얻어진 지진재해 산정보다 더 명확하게 재해를 묘사할 수 있다는 장점이 있다(Wald 등, 1999;

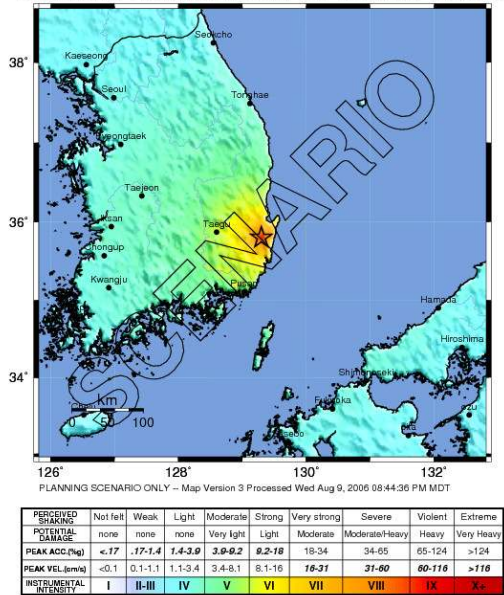
Kircher 등, 2006).

(1) 적용방법

본 연구에서는, 2000년도 경상남북도의 데이터베이스와 경주지역 규모 6.7의 가상지진으로 생성된 ShakeMap을 이용하여 HAZUS의 사용자지정 재해추정방법을 적용하였다. 우선 재해연구지역이 선정되면 HAZUS를 통해 기본 입력 자료를 행정구역별로 취합하고, GIS 내에서 HAZUS 기능도구들이 포함된 시스템으로 형성되어 하나의 GIS 프로젝트로 실행된다. 이 시스템에서 지진시나리오 구성도구를 통해 ShakeMap의 최대지반가속도, 최대지반속도, 최대응답스펙트럼 지도와 지진 규모를 지정하여 실행하면, 이 지역에서의 피해유형에 따른 결과를 산출한다.

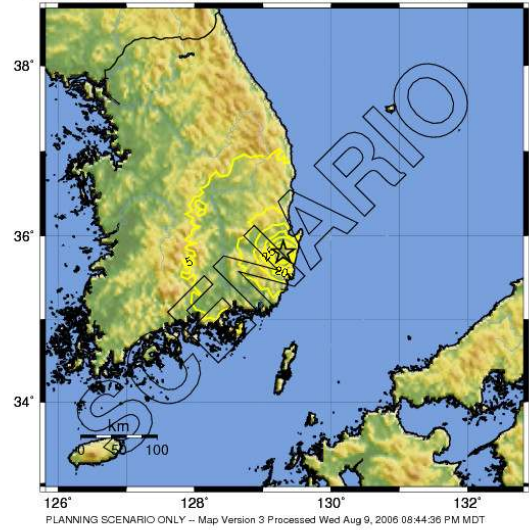
재해 결과에 영향을 미치는 Inventory Data와 적용 가중치는 시스템 내에서 변경할 수 있는데, 경상남북도의 경우에는 행정구역 시단위로 이들을 HAZUS 시스템 내의 기본 형태로 적용하여 실행하였다. 경주시/포항시 남구의 경우에는 입력 자료를 행정구역 동단위로 세분화하여 자세히 입력하고, 시스템 상에서 지원하는 기본 적용 가중치(예, 건축 재료와 인종 등)를 우리나라의 실정에 맞도록 조정하였다. 따라서 전자보다 후자의 재해추정 결과가 신뢰성이 더 높다. ShakeMap의 경우에는 한반도 내의 역사지진이나 실측지진으로 생성된 사례가 없으므로, 경주지역의 규모 6.7 역사지진 정보로 USGS에 의뢰하여 지진동자료를 제공받았다(Personal Communication with Wald, 2006). 이 지도는 단층자료가 포함되지 않은 지진의 위치와 규모만을 고려하였으며, Boore 등(1997)의 감쇠전달식을 사용하였다(Figure 2).

-- Earthquake Planning Scenario --
 ShakeMap for Korea_m6.7 Scenario
 Scenario Date: OCT 1 2000 01:02:00 PM MDT MDT M 6.7 N35.80 E129.30 Depth: 10.0km



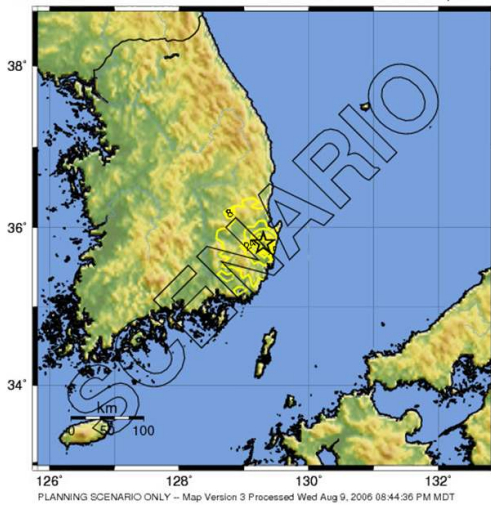
(a) Instrumental Intensity

-- Earthquake Planning Scenario --
 Peak Accel. Map (in %g) for Korea_m6.7 Scenario
 Scenario Date: OCT 1 2000 01:02:00 PM MDT MDT M 6.7 N35.80 E129.30 Depth: 10.0km



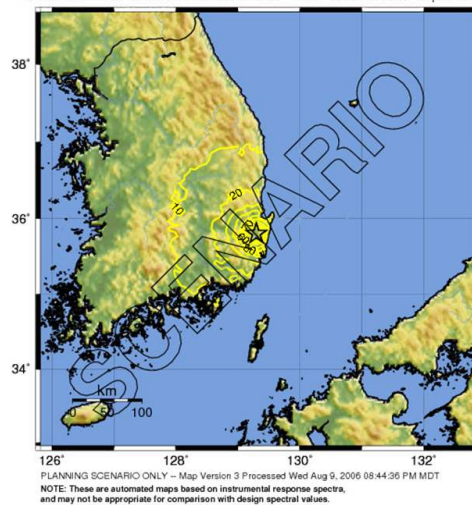
(b) Peak Ground Acceleration

-- Earthquake Planning Scenario --
 Peak Velocity Map (in cm/s) for Korea_m6.7 Scenario
 Scenario Date: OCT 1 2000 01:02:00 PM MDT MDT M 6.7 N35.80 E129.30 Depth: 10.0km

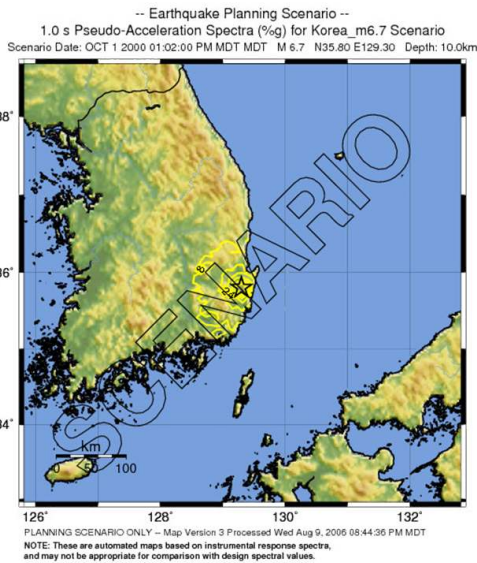


(c) Peak Velocity

-- Earthquake Planning Scenario --
 0.3 s Pseudo-Acceleration Spectra (%g) for Korea_m6.7 Scenario
 Scenario Date: OCT 1 2000 01:02:00 PM MDT MDT M 6.7 N35.80 E129.30 Depth: 10.0km



(d) 0.3s Pseudo-Acceleration Spectra



(e) 1.0s Pseudo-Acceleration Spectra

Figure 2. Examples of ShakeMap (Instrumental Intensity and PGA, provided by USGS)

(2) 결과

(가) 주거지역과 주요건물의 피해예측

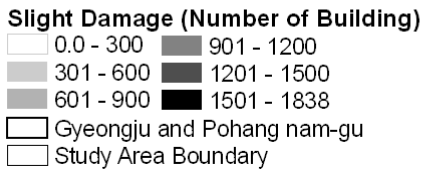
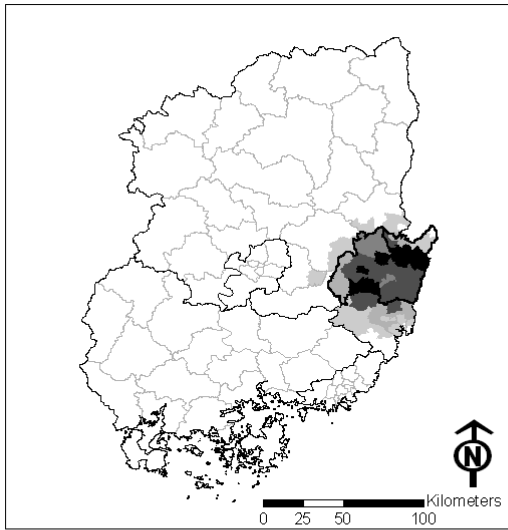
정길호 등(2002)은 지진으로 인한 피해유형과 공간적 특성의 분석연구를 통하여 건물과 인구의 밀집도가 높으며 화기사용이 많은 주거지역에서의 피해규모가 상업지역에서 보다 높다고 보고하였다. 2000년도에 규모 6.7의 지진이 경주지역에서 재발생하였다면, 경상남북도의 전체 주거건물(3,282,298 동) 중 약 2% 이상은 중간규모 이상의 피해가 있었을 것으로 나타난다. 경주시와 포항시 남구의 경우는 전체 주거건물(149,915 동) 중 약 43% 정도가 중간규모 이상의 피해가 발생했을 것이다. 중간규모(Moderate) 이상의 피해란 건물의 벽이나 문에서 대각선으로 크게 금이 생성되는 정도 이상의 피해현상이 나타난다(FEMA, 2006).

Table 1은 경주시와 포항시 남구 주거지역에서의 지진피해 크기를 None, Slight, Moderate, Extensive, 그리고 Complete로 분류하여 점유형 태별 피해결과를 나타내는데, 이들의 결과는 이해가 쉽도록 지도로 각각

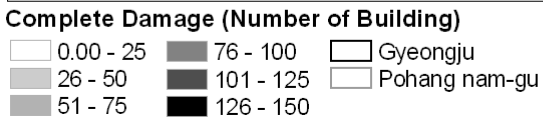
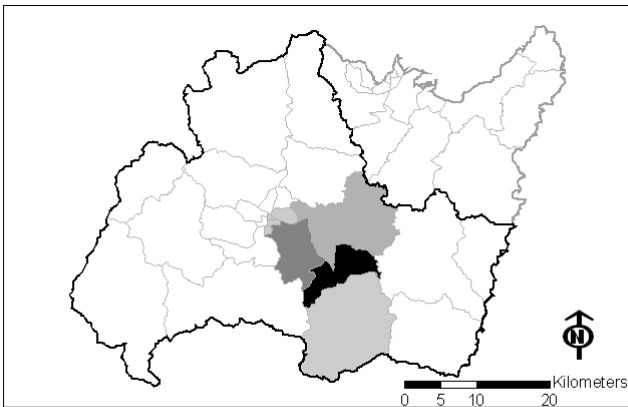
표현될 수 있다. Figure 3은 주거지역 재해 상황의 두 가지 예로 경상남북도 목조건물에서 벽이나 천정에 가볍게 금이 생기는 정도(Slight)의 피해와 경주지역에서 완전히 붕괴(Complete) 가능성이 높은 콘크리트 건물들을 점유형태별 주택 수(Count) 단위로 보여주고 있다.

Table 1. Building damage by occupancy in the Gyeongju area. Multi-family homes include apartment complexes, duplexes, triplexes, multiplex homes, and others.

	Number of Houses				
	None	Slight	Moderate	Extensive	Complete
Multi-family Homes	28,944	18,788	23,304	8,266	433
Single-family Homes	20,743	16,421	23,300	9,205	511
Total	49,687	35,209	46,604	17,471	944



(a) Building Type - Wooden



(b) Building Type -

PC1

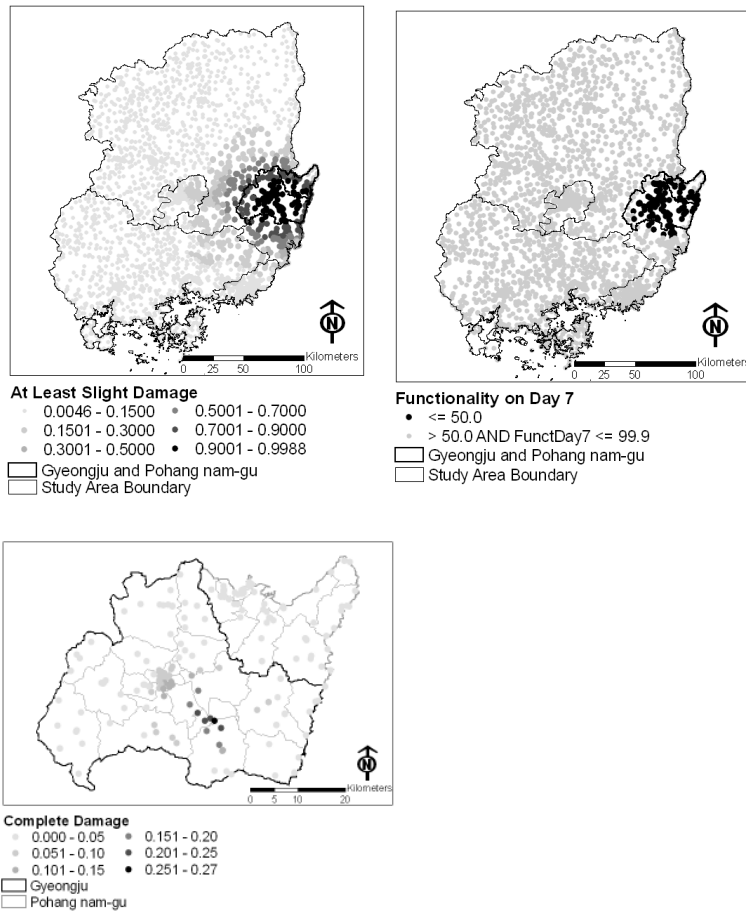
Figure 3. Building damage in the residential area

주요 건물의 역할은 일반적으로 재해에 따른 응급상황에 긴급구조나 안전에 중요한 역할을 하는 매개체로서, 이들의 피해와 손실은 이재민이나 인명피해를 더 높일 수 있다(FEMA, 2006; Gulati, 2006). 이 지진의 발

생으로 경상남북도의 전체 병원 2,538곳 중 약 2%정도가 중간 규모의 피해를 입고, 지진발생 하루 후에는 전체 병원의 95.3%가 정상적으로 운영이 가능할 것으로 보인다. 학교의 경우는 89.9%, 경찰서는 88.8%, 소방서는 90.4%가 지진발생 하루 후에 정상운영이 가능할 것으로 추정된다 (Table 2). 반면에 경주시와 포항시 남구의 경우, 전체병원 80곳 중 약 66%가 중간규모 이상의 피해를 입어, 지진발생 하루 뒤에도 단지 12곳에서만 정상운영이 가능할 것으로 보이며 적어도 30일이 지나야 82%가 회복 될 것으로 보인다. 약 49%의 학교, 34%의 경찰서, 그리고 50%의 소방서 또한 중간규모 이상의 피해를 입을 것으로 추정된다(Table 2). Figure 4는 학교 피해예측상황 결과의 예로서, 경상남북도 학교의 최소피해 확률과 지진발생 7일 이후의 운영상태, 그리고 경주지역 학교의 붕괴가능성을 나타낸다.

Table 2. Damage of essential facilities

Classification	Total	Number of Facilities		
		At Least Moderate Damage > 50%	Complete Damage > 50%	With Functionality > 50% on Day 1
Gyeongsang-nam do and Gyeongsang-buk do				
Hospitals	2,538	54	0	2,420
Schools	4,020	95	0	3,616
Police Stations	783	13	0	696
Fire Stations	177	5	0	160
Gyeongju and Pohang-nam gu				
Hospitals	80	53	0	12
Schools	189	92	0	10
Police Stations	38	13	0	3
Fire Stations	10	5	0	2



(a) Probability of school damage (at least slight damage)
 (b) Functionality on day 7
 (c) Probability of school damage, Gyeongju area (complete damage)
Figure 4. Damage probability and functionality of schools on the 7th day after the proposal earthquake.

(나) 주요시설물과 기타 피해예측

주요 시설물에는 도로나 철도 교통망, 항구·공항, 전기·통신망, 상하수도, 가스파이프 등 교통망과 공급처리 시설물이 포함된다 (FEMA, 2006). 특히 이 시설물들의 재해예측을 위해 HAZUS는 토질, 액상화, 산사태 등의 생성을 고려한 지질정보를 통하여 Ground Failure Map이 형성되어야 예측이 가능하다. 이번 연구에서는 지질정보의 부족으로 Ground Failure Map의 형성에 신뢰성이 떨어지는 결과물이 산출되었다. 따라서 Figure 5

는 교량의 최소피해 가능성을 지도상으로 표시했다.

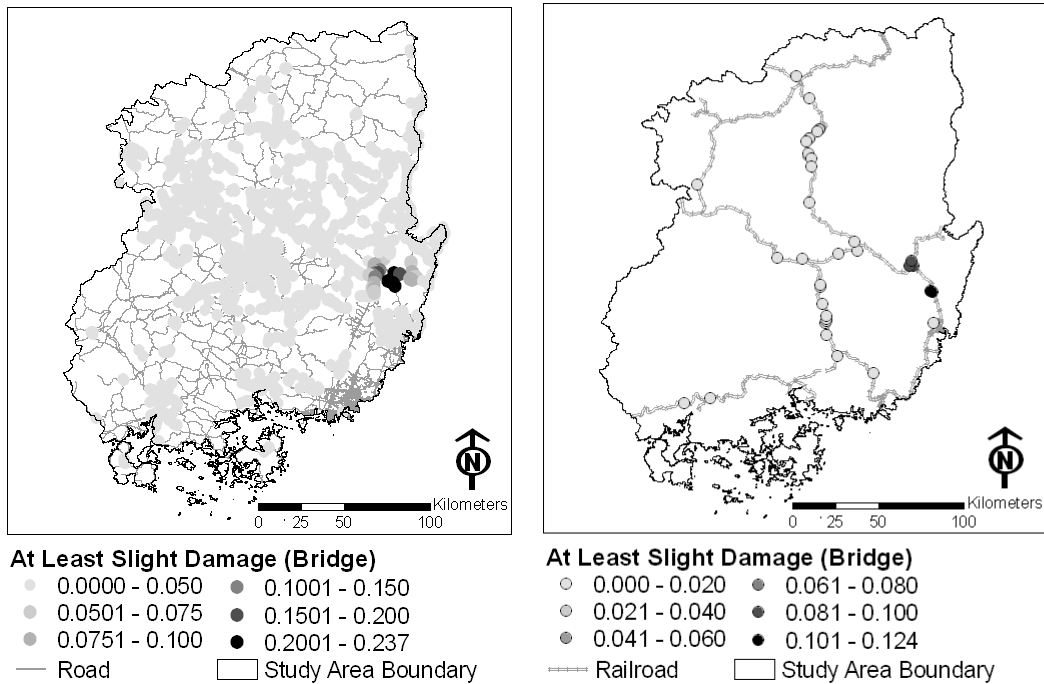
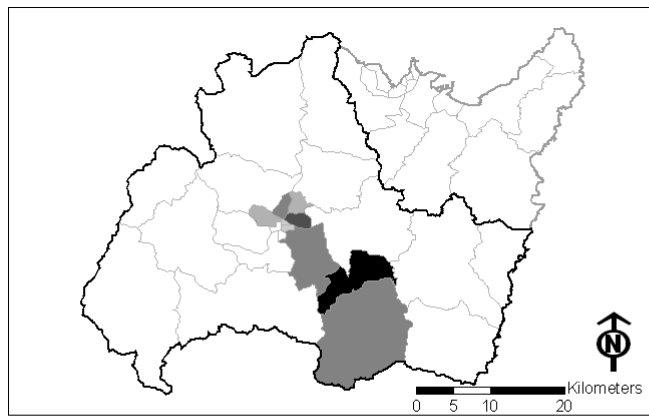


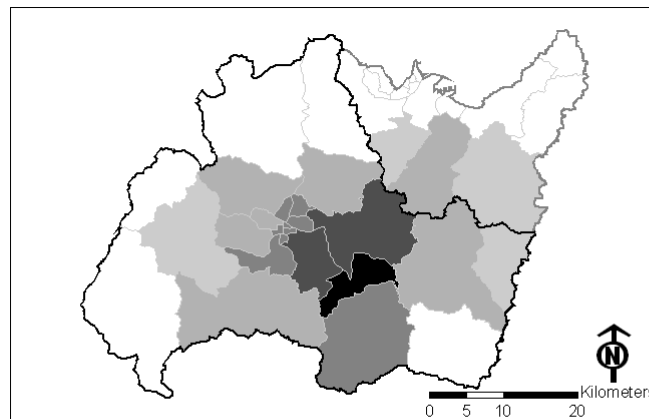
Figure 5. Probability of bridge damage on road and railroad

경주와 포항시 남구에서는 이 지진으로 13,958 가구가 피해를 입어 4,949(0.9%)명의 이재민이 발생할 것으로 추정된다(Figure 6). 이 지역에서 발생 가능한 화재는 949 건 정도이며, 이로 인하여 31,549(5.84%) 명이 화재위험에 노출될 것으로 추정된다. 사망자를 포함하여 병원에서 치료를 받아야 할 정도(Severity Level 2 이상)의 부상자수는 지진이 오전 2시에 발생할 경우는 150명, 오후 2시에는 90명, 출퇴근시간에는 67명 정도로 예측된다(Table 3). 마지막으로 경제적인 피해는 건물과 사업상의 손실로 나눠지는데, 본 연구에서는 피해로 인한 건물 임대비용을 포함하는 건물관련 경제적인 피해를 예측하였다. 경주지역의 피해로 주민들의 건물관련 피해액은 약 101,427,740,000원 정도로 예상된다.



Total Level 4 Injuries (Single Family Homes, 2AM)

0.000 - 0.35	1.001 - 1.50	Gyeongju
0.351 - 0.50	1.501 - 2.00	Pohang nam-gu
0.501 - 1.00	2.001 - 2.18	



Short Term Shelter Needs

0.0 - 50	201 - 300	Gyeongju
51 - 100	301 - 400	Pohang nam-gu
101 - 200	401 - 462	

Figure 6. Casualties by occupancy and short term shelter needs in Gyeongju area

Table 3. Casualty estimates in the Gyeongju area. Multi-family homes include apartment complexes, duplexes, triplexes, multiplex homes, and others. By manual note, Severity Level 1 indicates injuries requiring basic medical aid without requiring hospitalization; Severity Level 2 indicates injuries requiring a greater degree of medical care and hospitalization, but not expected to progress to a life threatening

status; Severity Level 3 indicates injuries that pose an immediate life threatening condition if not treated adequately and expeditiously. The majority of these injuries are a result of structural collapse and subsequent collapse or impairment of the occupants; Severity Level 4 indicates instantaneously killed or mortally injured.

		Number of People			
		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
2 AM	Multi-family Homes	342	53	5	9
	Single-family Homes	408	65	6	12
	Total	750	118	11	21
2 PM	Multi-family Homes	203	31	3	6
	Single-family Homes	243	39	4	7
	Total	446	70	7	13
5 PM	Commuting	1	3	2	1
	Multi-family Homes	133	21	2	4
	Single-family Homes	159	26	3	5
	Total	293	50	7	10

나. 결정론적 방법

HAZUS의 결정론적 방법을 사용하여 지진재해를 예측하기 위해서는 HAZUS에서 지원하는 강진동 감쇠식을 먼저 선정해주어야 한다. HAZUS는 미국지역을 위한 시스템으로 감쇠식 또한 미국지역의 지질조건을 반영하여 유도된 식만을 지원한다. 따라서 우리나라의 지질조건과 가장 비슷한 미국의 강진동 감쇠식을 선별하는 것이 이번 연구에서 우선시 된다.

(1) 강진동 감쇠식

지진이 발생하면 특정지역의 지반과 지질의 특성에 따라 지진동이 다른 양상으로 발생하는데, 이는 일반적으로 진원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 감쇠되고 이밖에도 지질, 지각구조, 지역별 지반특성 등의 여러 변수에 따라 다르게 나타난다(김성균 등, 1999). 이렇게 지역에 따라 상이하게 반응하는 지진동의 감쇠특성을 식으로 표현한 것이 강진동 감쇠식이며, 일반적으로 최대지반가속도, 최대지반속도, 그리고 응답스펙트럼을 분석하여 거리에 따른 식으로 작성한다(FEMA, 2006).

미국의 경우에는 Rocky 산맥을 중심으로 서부(Western United States, WUS)와 중동부(Central and Eastern United States, CEUS)로 나누고 각 지역특성을 고려하여 여러 강진동 관계식을 제시하였다. HAZUS-MH MR2를 이용하여 지진재해를 산출할 때에는 서부의 경우에는 8개의 강진동 감쇠식을, 중동부의 경우에는 5개의 관계식을 적용할 수 있다(FEMA, 2006). 또한 지역별로 구분한 각각의 식에 가중치를 주고 조합하여 새롭게 도출한 강진동 감쇠식을 적용할 수도 있다. 이러한 관계식을 같은 조건의 지진에 적용하였을 때, 일반적으로 미국 중동부 지역의 지진동 크기가 서부보다 강하게 나타난다(FEMA, 2006).

본 연구에서는 HAZUS에서 지원하는 여러 감쇠식 중에서 가중치를 주어 조합한 식과 미국의 특정지역을 위한 감쇠식을 제외하고, 서부식은 Boore et al.(1997), Campbell and Bozorgnia(2003), Sadigh et al.(1997), Abrahamson and Silva(1997)를 고려하고, 중동부식은 Atkinson and Boore(1995), Toro et al.(1997), Campbell(2003)을 중점으로 고려한다. 서부지역을 대상으로 개발된 식에서 Boore et. al(1997)의 식은 천부지진을 대상으로 개발되었고, National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP)에서 상부 30 m 지반의 전단파 속도를 고려하여 분류한 Site Classes에 따라 서로 다르게 적용할 수 있다. Campbell and Bozorgnia(2003)의 식은 모멘트 규모 5.0 이상의 지진과 거리 60 km 이상

의 조건에서 적용하는 것이 가장 적절하고, NEHRP의 Site Classes를 고려하였다. Sadigh et al.(1997)과 Abrahamson and Silva(1997)의 식은 Soft Rock과 Deep Firm Soil로 구분하여 적용할 수 있고, 규모 4.0 이상의 지진에서 사용하는 것이 좋다.

중동부지역의 경우, Atkinson and Boore(1995)의 감쇠식은 Rock Site의 강진동, 응답스펙트럼과 비교할 수 있는 지진동 데이터를 이용하여 추계학적인 지진동 모델에서 유도되었고, 0.5~1.0 Hz의 응답주파수와 규모 5.5 이상의 지진 조건에서 감쇠커브의 형상이 가장 잘 표현된다. 이 식에서 작은 규모의 지진은 15~30 km의 거리에서 가장 적절하게 표현된다(Atkinson and Boore(1995)). Toro et al.(1997)감쇠식 또한 추계학적인 지진동 모델에서 유도된 식으로서, 두 지역(Midcontinent, Gulf)과 두 규모 단위(moment magnitude, Lg-wave magnitude)로 세분화되었다. 이 식은 1.0~35.0 Hz의 주파수와 1~500 km의 거리, 지진 규모 5.0~8.0의 지진에 적용하는 것이 가장 적합하다(Toro et al.(1997)). Campbell(2003)의 식은 미국 서부지역 지진의 경험식을 이용하여 중동부의 최대지반가속도와 가속응답스펙트럼을 계산하도록 조합한 식으로서, 규모 5.0 이상, 70 km 이상의 거리에서 적용하는 것이 가장 좋다. 중동부 또는 서부지역을 위한 감쇠식은 일반적으로 규모 5.0 이상과 주파수 1.0 Hz 이상에 적용하는 것이 가장 적합하고, 근거리와 원거리에서는 감쇠현상이 과소 또는 과대평가되는 경향이 있다.

한반도의 지진동 관계식은 지진자료와 부지특성을 이용하여 식을 유도한 사례가 있다. 본 연구에서 고려하는 감쇠식 중 노명현과 이기화(1995)의 연구에서는 한반도 남동부지역의 지진요소를 이용하여 최대지반가속도 및 의사속도응답스펙트럼에 관한 예측공식을 무작위진동이론을 적용하여 유도하였다. 박동희 등(2001)의 연구에서는 한반도 남동부일대에서 발생하는 지진자료를 분석하고, 발생 가능한 지반진동과 주파수에 따른 특성을 추계학적인 모사법을 통하여 유추한 후 거리에 따른 식을 도출하

였다. 또한 연관희 등(2005)의 연구발표에서는 원전부지를 대상으로 실측된 지진의 특성을 이용하여 응답스펙트럼을 도출한 후 강진동 감쇠식을 유도하였다. 이 밖에 조남대와 박창엽(2003)의 연구에서는 한반도 남동부에서 관측된 지진기록을 이용하여 스펙트럼 감쇠상수와 응력강하상수를 계산한 후 추계학적 모사법을 이용하여 진원거리에 따른 지진동 감쇠공식을 유도하였다.

(2) 지진요소의 설정과 적용방법

지진재해는 지진동 및 주파수 특성, 지진의 규모와 거리에 따라 달라지므로(박동희 등(2005)), 본 연구에서는 감쇠식 적용에 필요한 지진의 규모, 거리, 주파수, 진원의 깊이를 고려하였다. 우선, 지진의 규모설정은 강진($M=6.7$), 중진($M=4.9$), 약진($M=3.0$)으로 구분하였다. 지진파는 거리가 증가함에 따라 감쇠가 되고, 감쇠는 보통 주파수에 의존한다(김성균과 김명수(2003)). 실제 지진파의 중심주파수는 약 10 Hz까지 이고(이덕기 등(2002)), 미국의 일부 감쇠식은 1.0 Hz 이상의 지진에 적절함을 고려하여, 이번 연구에서 고려하는 주파수는 1.0, 5.0, 10.0 Hz로 임의 설정하였다. 거리는 대부분 지진피해가 약 100 km 안에서 발생하므로(노명현과 이기화(1995)), 120 km까지 참고하였다. 진원의 깊이와 지반 또는 지질의 특성은 감쇠식에서 적용하도록 분류되어 있을 경우, 진원의 깊이는 10 km로 설정하고 지질은 Site B(Rock)와 Site D(Deep Firm Soil)를 적용하였다.

강진 규모 6.7의 설정 근거로서 삼국사기에 따르면, 서기 779년 경주에서 발생했던 지진은 역사상 가장 큰 인명피해를 유발하였고, 규모는 약 6.7 정도로 추정된다(이기화와 진영근, 1991; 이기화, 1998; 이기화와 김정기, 2000; Chiu and Kim, 2004). 중간규모($M=4.9$)는 최근 발생한 2007년 1월 20일 강릉으로부터 서남쪽 29 km 떨어진 지점, 깊이는 약 10~15km, 규모 4.9의 유감지진(오대산 지진)을 한국지질자원연구원에서 분석한 지진 자료를 고려하였다(한국지질자원연구원, 2007). 약진($M=3.0$)의 경우는 2001

년부터 2005년까지 발생한 지진 중 경상남북도 내륙에서 발생한 지진을 토대로 하였다(기상청, 2002; 기상청, 2003; 기상청, 2004; 기상청, 2005; 기상청, 2006). 이들의 실측자료는 최대지반가속도 값을 수직성분(U-D), 두 개의 수평성분(E-W와 N-S)으로 나누어 기록하였는데, 본 연구에서는 두 개 수평성분을 기하평균(Geometric Mean)하여 최대지반가속도를 구하였다.

적용방법은 중진과 약진의 실측자료를 토대로 주파수별로 우리나라의 감쇠현상을 적절하게 잘 표현한 국내 강진동 감쇠식을 먼저 선별한다. 비록 중간규모나 약진의 실측자료를 토대로 선별한 감쇠식이지만, 강진에서도 잘 부합한다는 가정으로 미국의 감쇠식과 비교하여 가장 유사한 유형으로 나타나는 미국의 강진동 감쇠식을 선별한다.

(3) 강진동 감쇠식 선정결과

(가) 규모 4.9의 지진(2007년 1월 오대산 지진)

강원도 평창군 도암면 지역에서 2007년 1월 20일 규모 4.9(기상청, 규모 4.8)의 지진이 발생하였는데, 인명피해는 없었지만 전국에서 감지할 수 있는 정도로 큰 유감지진이었다(한국지질자원연구원, 2007; 기상청, 2007). 이 오대산 지진과 같은 지진규모를 국내 강진동 감쇠식에 적용하여 얻은 최대지반가속도 또는 응답스펙트럼의 값을 비교하여 보았다. 그 결과, 최대지반가속도는 네 가지 국내 강진동 감쇠식에서 모두 비슷한 양상을 보였고, 또한 실측자료와도 적절히 부합하였다. 1.0 Hz의 주파수에서는 박동희 등(2001)의 식 적용에서 실측자료와 비슷하였다. 그러나 주파수가 증가함에 따라 연관희 등(2005)과 박동희 등(2001), 조남대와 박창업(2003)의 식 적용에서 실측자료와 유사하고, 특히 연관희 등(2005)의 식 적용이 가장 잘 부합하였다.

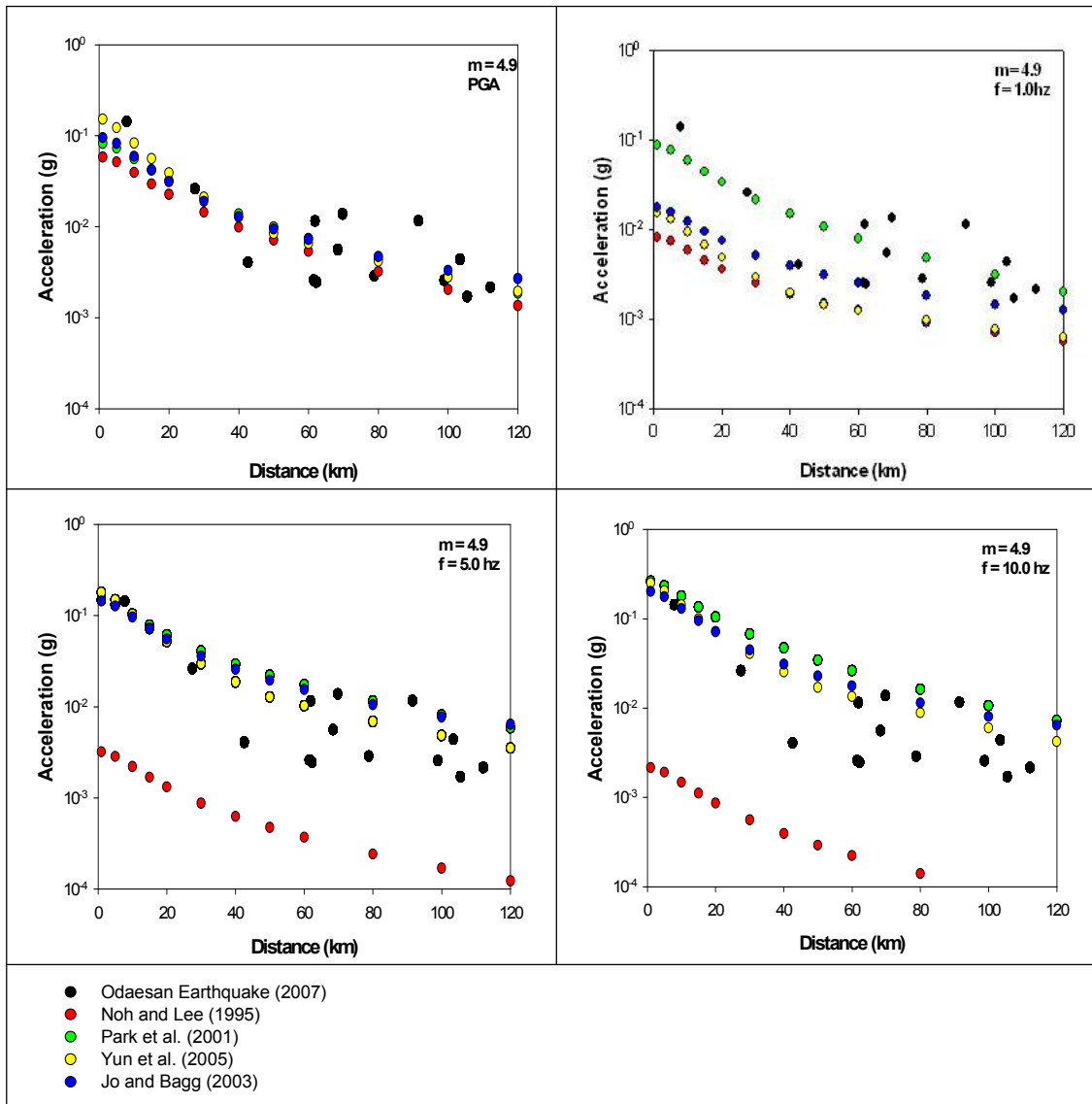


Figure 7. Comparisons of observed strong motions due to the Odaesan earthquake with different attenuation functions for M 4.9

(나) 규모 3.0의 지진(2002~2003년 경상남북도 지진)

최근 2001년부터 2005년 사이에 발생한 지진은 경상남북도에서 가장 많이 발생하였고, 본 연구에서는 2003년 3월 1일 지진(경주 남동쪽 약 10 km, 규모 3.0)과 2002년 10월 20일 지진(경남 하동 북서쪽 약 15 km, 규모 3.0)을 고려하였다 (기상청, 2003; 기상청, 2004). 이들의 지진과 같은 지진규모를 기존의 국내 감쇠식에 적용하여 얻은 최대지반가속도 또는 응

답스펙트럼 값을 실측치와 비교하였다. 최대지반가속도에서는 네 가지 식에서 모두 실측자료와 유사한 유형으로 나타났다. 그러나 1.0 Hz의 주파수에서는 박동희 등(2001)의 식 적용에서만 실측자료와 유사하였고, 주파수가 증가함에 따라 연관희 등(2005)과 조남대와 박창업(2003)의 식 적용에서, 특히 연관희 등(2005)의 식을 적용하였을 때 가장 유사함을 발견할 수 있다.

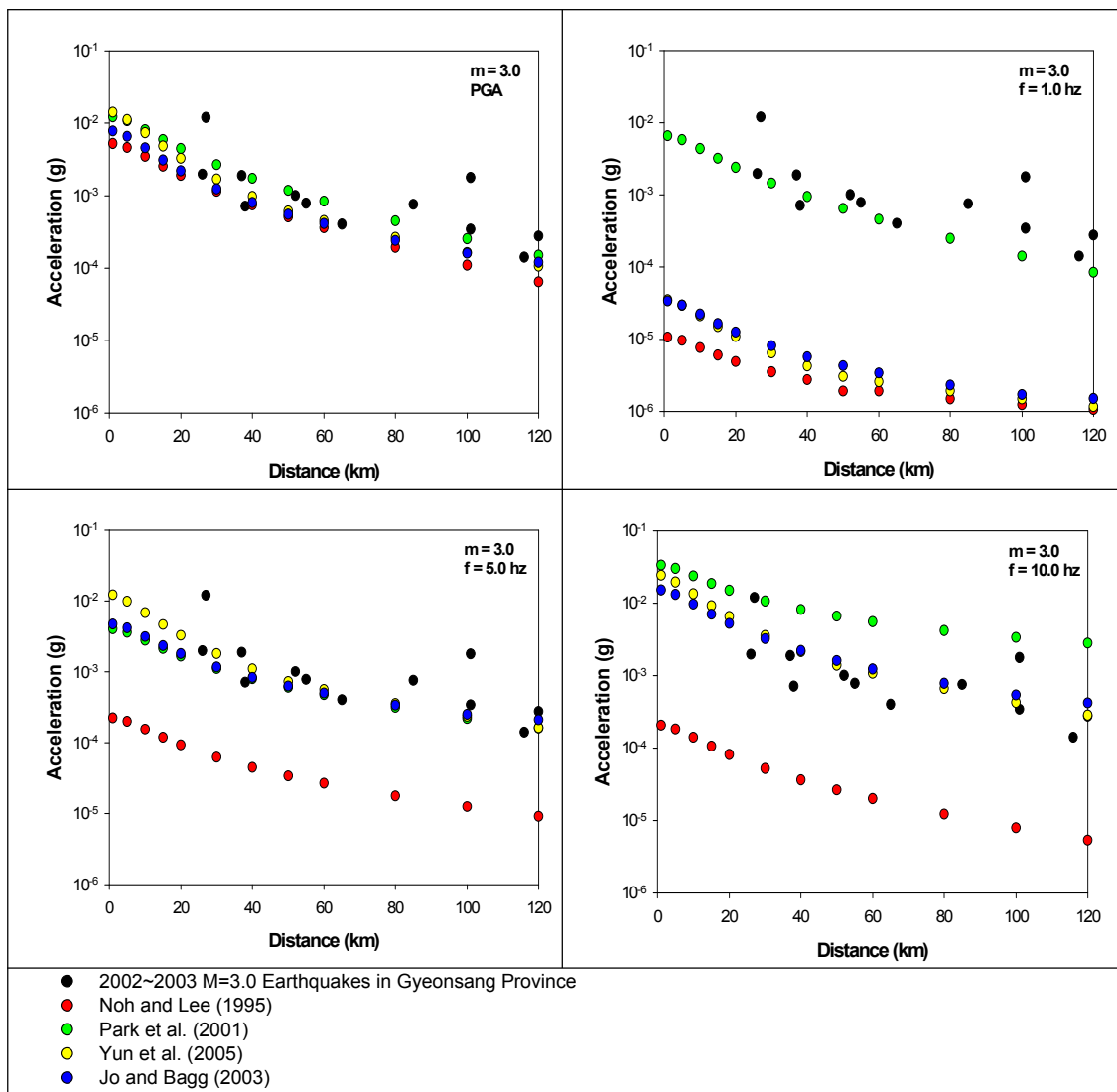


Figure 8. Comparisons of observed ground motions due to the earthquakes in the Gyeongsang provinces with different attenuation functions for M 3.0

(다) 규모 6.7의 지진(서기 779년 경주지진)

강진의 경우에는 미국과 국내의 강진동 감쇠식에 규모 6.7을 적용하여 보았다. 앞의 결과에 따르면, 최대지반가속도의 경우 네 가지 식에서 모두 실측자료와 유사하였다. 주파수가 1.0 Hz일때는 박동희 등(2001)의 식이 실측자료와 유사하였고, 주파수가 증가함에 따라 연관희 등(2005)과 조남대와 박창업(2003)의 식에서 비슷한 유형으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 낮은 주파수에서는 박동희 등(2001)의 감쇠식을, 높은 주파수에서는 연관희 등(2005)과 조남대와 박창업(2003)의 감쇠식을 중점으로 살펴 보았다.

규모 6.7 지진의 최대지반가속도를 살펴보면, 연관희 등(2005)과 노명현과 이기화(1995)의 식과 유사한 미국의 감쇠식은 없다. 반면에 박동희 등(2001)의 식은 Sadigh et al.(1997)의 Site B(Rock)를 적용하였을 때 거리에 따라 가장 비슷한 최대지반가속도 유형을 보였다. 조남대와 박창업(2003)의 식 적용에서는 Sadigh et al.(1997)의 Site D(Deep Soil)을 적용하였을 때 가장 유사한 유형을 보인다. 1.0 Hz에서 박동희 등(2001)의 식 적용과 가장 유사한 미국의 감쇠식을 살펴보면 Sadigh et al.(1997)의 Site B(Rock)를 적용하였을 때 가장 근사하였다. 주파수 증가에 따른 연관희 등(2005)의 식과 조남대와 박창업(2003)의 식 적용과의 관계를 살펴보면, 5.0 Hz에서 연관희 등(2005)의 식 적용결과와 유사한 관계식이 없다. 그러나 10.0 Hz에서는 연관희 등(2005)의 식 적용 결과는 Sadigh et al.(1997)의 Site B(Rock)와 Site D(Deep Soil) 적용에서 가장 비슷하였고, 조남대와 박창업(2003)의 식에서는 Sadigh et al.(1997)의 Site D(Deep Soil) 적용한 결과와 가장 유사함을 나타냈다.

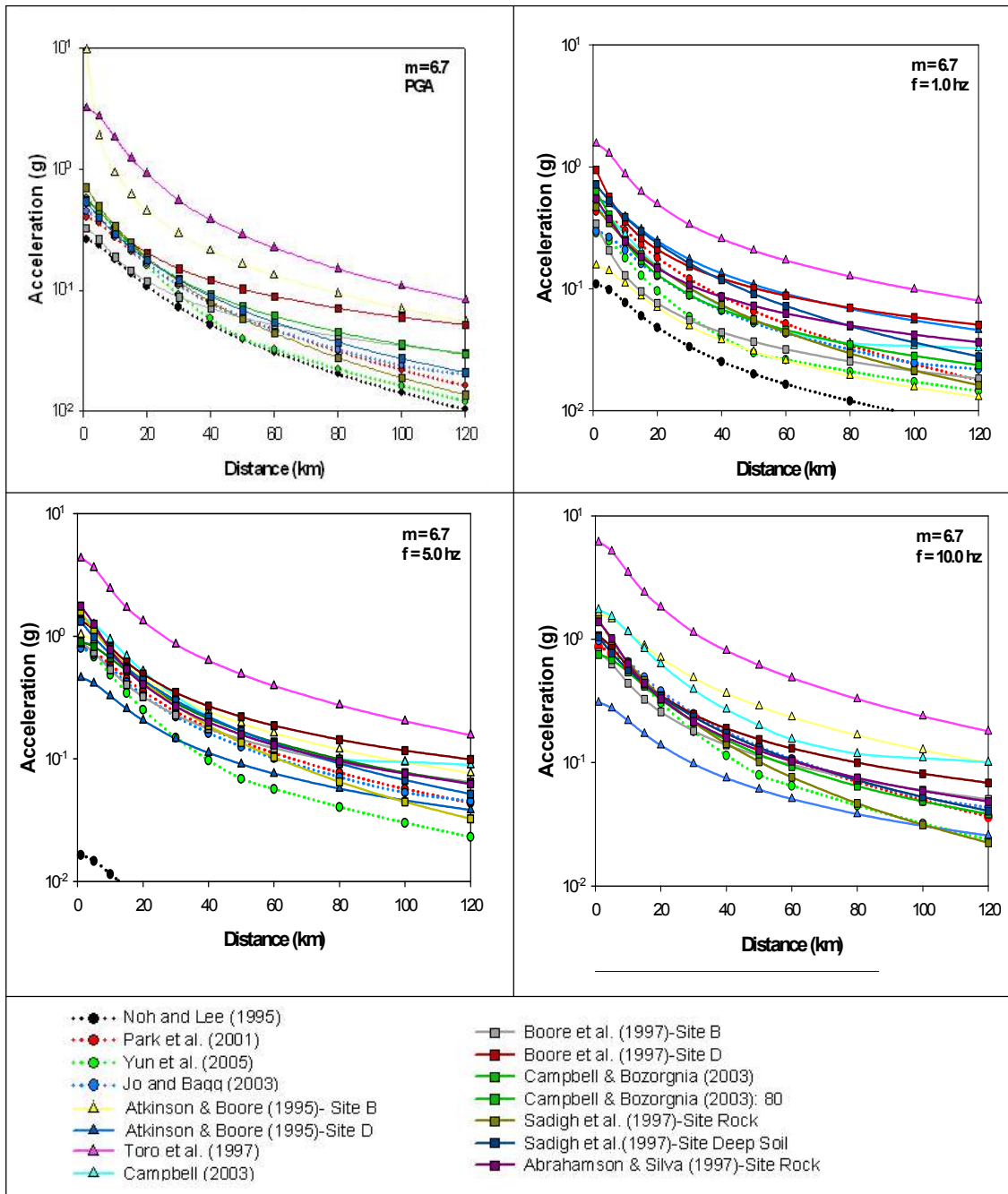


Figure 9. Ground shaking with different attenuation functions at magnitude 6.7

(라) 결론

본 연구의 궁극적인 목적은 HAZUS의 결정론적 방법을 이용하여 지진재해를 예측할 때 미국의 여러 강진동 감쇠식 중에서 우리나라의 지진

동 유형과 가장 유사한 관계식을 살펴봄으로써 신뢰성 높은 결과생산에 도움을 주고자 하는 것이다. 이번 연구에서 고려한 여건아래에서, 우리나라 강진에 의한 지진재해를 예측할 때 HAZUS의 결정론적 방법을 이용하기 위해서는 미국 서부식인 Sadigh et al.(1997)식의 Site Class B(Rock) 또는 Site Class D(Deep Soil)를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 또한 앞서 언급한 이번 연구의 취약점을 보완하기 위해서는 미국의 감쇠식 중에서 선별된 국내 관계식과 비교적 유사한 더 많은 관계식을 적용하여 피해를 범위로 표현하는 방법도 생각할 수가 있겠다. 이 방법은 지진피해를 감소시키기 위해 수립해야 하는 재해저감계획에 현실적으로 그리고 효과적으로 지원할 것으로 사료된다.

(3) 연구지역

최근 2001년부터 2005년 사이에 발생한 지진은 경상남북도 지역에서 가장 많이 발생하였고(기상청, 2002; 기상청, 2003; 기상청, 2004; 기상청, 2005; 기상청, 2006), 삼국사기에 따르면 역사상 가장 큰 인명피해를 유발시켰던 지진은 서기 779년 경주에서 발생했던 규모 6.7의 지진으로 추정된다(이기화 등, 1991; 이기화, 1998; 이기화 등, 2000; Chiu와 Kim, 2004). 또한 최근 1997년 6월 경주지역에서 규모 4.3의 지진발생으로 한반도 내 지진위험성이 부각되기도 하였다(노명현, 2003). 따라서 본 연구의 가상지진은 서기 779년 경주지역에서 발생하였던 규모 6.7의 지진을 가정하였고, 지진의 깊이는 10 km, 주향이동단층(Strike slip fault)에 의해 지진이 발생하였음을 가정하였다. 강진동 감쇠식은 강수영 등(2007)의 연구에서 우리나라 감쇠현상과 가장 유사하다고 밝힌 Sadigh 등(1997)의 식을 사용하였다. 지질특성은 같은 연구에서 제시하였던 지반분류 B(보통암)와 D(단단한 토사)를 기본적으로 적용하였고, Sun(2004)에 의해 제시된 경주 일부지역의 일반적인 지반특성을 보인 지반분류 C(연암) 또한 이 감쇠식에 적용하였다. 이 밖에 HAZUS에서 사용이 가능한 또 다른 여러 감쇠식을 이용하

여 연구지역의 지진재해도 예측하여 보았다. 연구지역의 기본 자료는 수집이 가능한 가장 최신의 통계자료인 2005년도의 자료로 데이터베이스를 구성하였다(통계청, 2007).

지진피해 예측 연구지역은 경상북도 경주시, 포항시 남구, 울산광역시(중구, 남구, 서구, 북구, 울주군)로 제한하였다. 이 지역의 2005년도 총 인구는 1,564,765 명이었고(Figure 10), 총 가구 수는 521,367 가구였다. 또한 상가와 산업시설을 제외한 주택은 단독주택, 다가구주택, 연립주택, 아파트와 영업용 건물 내 주택으로 분류하여 시스템에 입력하였는데, 같은 해에 전체 주택은 436,282 동이었다(Figure 10). 이들의 건축 재료는 자료수집이 가능한 1990년의 통계자료로 유추하였으며, 약 78 %의 철근콘크리트, 10 %의 벽돌, 12 %의 목재 건물로 구성되었음을 가정하였다(통계청, 2007). 환자를 돌볼 수 있는 병원, 의원 또는 보건소 등은 같은 해 이 지역에 총 396 곳이 존재하였고, 재해발생 시 이재민을 수용할 수 있는 장소로 사용되는 학교는 초등학교부터 고등학교까지 약 352 곳이 존재하였다. 이 밖에 비상사태에 긴급출동 할 수 있는 경찰서와 소방서는 각각 76 곳과 32 곳이 있었다. 이들의 통계정보는 GIS를 이용한 위치정보와 함께 HAZUS에서 연구지역의 지진재해를 예측하기 위한 기본 입력 자료로 사용된다.

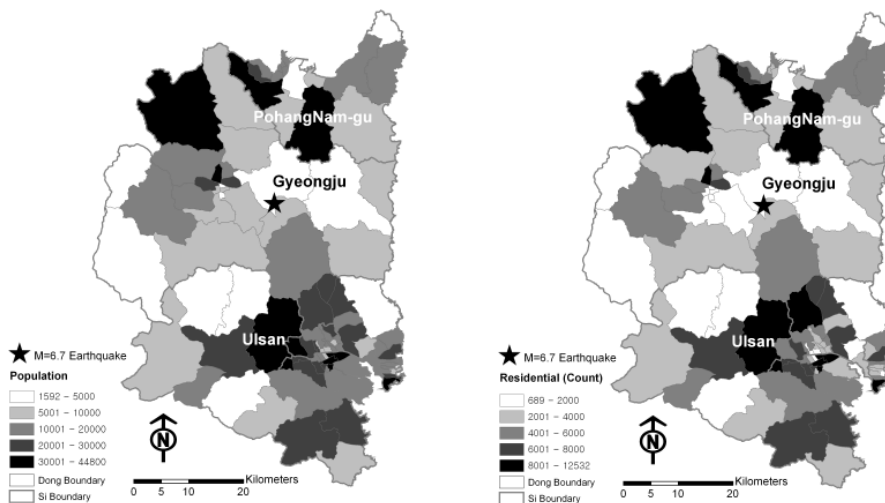


Figure 10. Population and houses of the study area in 2005.

(4) 결과

(가) 주택의 피해

연구지역 내 주택은 2005년도에 전체 436,282 동이었다. 이들의 주택이 모두 보통암인 지반분류 B 지반에 위치하였을 경우, 전체 주택수의 약 16 %인 68,176 동의 주택에서 중간규모 이상의 피해가 발생할 수 있다. 이 중에서 1,668 동의 주택은 완전히 붕괴될 수도 있다. 지반분류 C(연암) 지반에 모든 주택이 위치하였을 경우에는 약 26 %의 주택에서 중간규모 이상의 피해가 발생할 수 있고, 이 중 6,524 동은 완전히 붕괴될 가능성이 높다. 반면에 지반분류 D(단단한 토사) 지반에 주택들이 위치하였을 경우에는 전체 주택의 약 36 %인 156,743 동에서 중간규모 이상의 피해가 발생할 수 있다. 이 수치는 완전히 붕괴될 수 있는 15,080 동을 포함하고 있다(Figure 11).

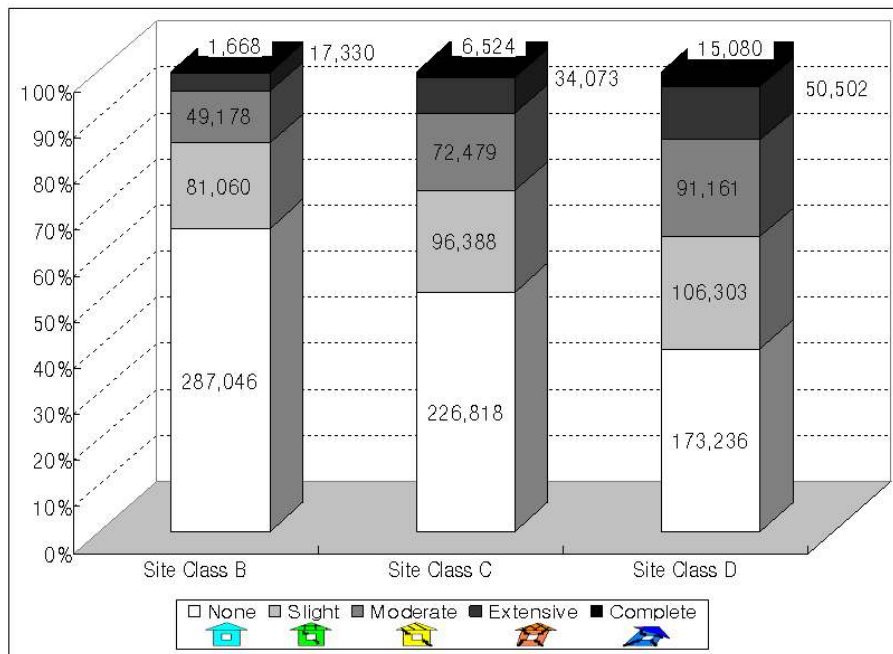


Figure 11. Potential house damage in the Gyeongju area by M 6.7 earthquake with the attenuation relation proposed by Sadigh et

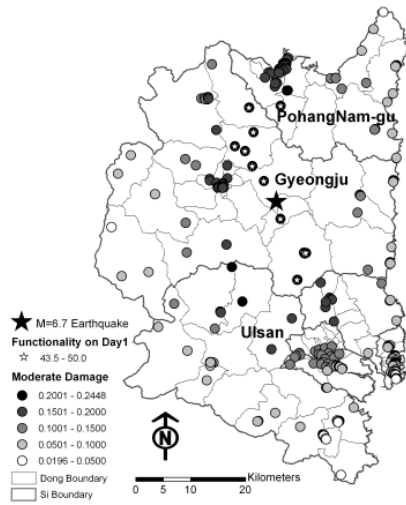
al.(1997) for site classes B, C, and D.

(나) 주요건물의 피해

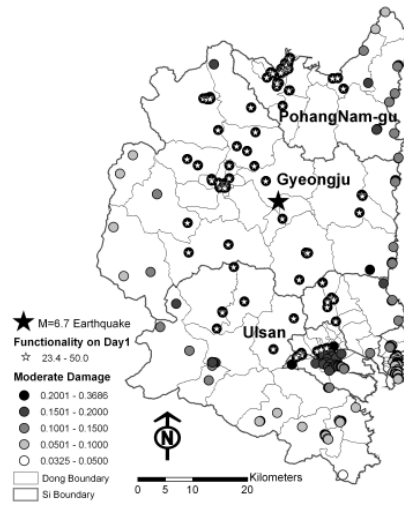
① 의료기관

재해발생시 가장 신속히 응급상황에 대처해야하는 주요한 기관 중 하나인 의료기관은 2005년도 연구지역 내에 396 곳이 있었다. 의료기관의 경우에는 시설의 피해수준과 기능상실 정도로 나누어서 응급상황 시 대응력을 평가할 수 있다. 우선 규모 6.7의 지진으로 연구지역의 모든 의료기관이 완전히 붕괴되거나 혹은 기능을 완전히 상실할 정도의 피해는 없을 것으로 예측된다. 그러나 지반특성에 따라 피해수준과 기능상실정도에 있어서는 차이가 있다.

의료기관이 지반분류 B(보통암) 지반에 위치하였을 경우, 이 지진으로 인해 중간규모 이상의 피해가 나타나는 기관은 없고, 지진발생 하루 후에는 전체 기관 중 약 380(전체의 96 %) 곳에서 50 % 이상의 정상적인 운영 가능성을 보인다(Figure 12). 지반분류 C(연암) 지반에 위치한 경우에는 적어도 2 곳에서 중간규모 이상의 피해를 입을 수 있는 확률이 50 % 이상이며, 약 265(전체의 67 %) 곳에서 지진발생 하루 후에 50 % 이상의 정상적인 운영 가능성으로 응급상황에 대처할 수 있다(Figure 12). 이러한 기관들이 지반분류 D(단단한 토사) 지반에 위치하면 적어도 57 곳은 중간규모 이상의 피해를 입고, 지진발생 하루 후에도 약 161(전체의 41 %) 곳에서만 정상적인 운영 가능성이 50 % 이상으로서 응급환자를 돌보는데 차질이 있을 수 있겠다.



(a) Site Class B



(b) Site Class C

Figure 12. Estimated damage of hospitals in Gyeongju area by M 6.7 earthquake with the attenuation relation proposed by Sadigh et al.(1997) for site classes B and C.

② 학교, 경찰서와 소방서

학교는 재해발생 시 주민들이 대피할 수 있는 피난처로 사용할 수 있기 때문에 주요 건축물 중의 하나로 분류된다. 2005년도 연구지역 내 학교는 전체 352 곳이 있었다. 이들의 학교가 지반분류 B(보통암)나 C(연암) 지반에 존재한다면 지진발생 하루 후에는 모든 학교에서 정상적인 기능을 제공함으로써 많은 이재민을 수용할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 학교가 지반분류 D(단단한 토사) 지반 위에 위치한다면, 지진발생 하루 후에 적어도 68 곳에서는 50 % 이상의 기능상실로 이 지역에서 발생하는 이재민을 충분히 수용할 수 없을 수도 있다(Table 4).

연구지역 내 경찰서와 소방서는 각각 76 곳과 32 곳이 존재하였다. 이 기관들이 지반분류 B(보통암) 또는 C(연암) 지반위에 존재하면 지진발생 하루 후에 100 % 모든 기관에서 비상사태에 대비할 수 있다. 그러나 학교의 경우와 마찬가지로, 지반분류 D(단단한 토사) 지반 위에 이들이 위치하고 있다면 지진발생 하루 후에 경찰서는 60 곳에서, 소방서는 23

곳에서 응급상황에 대처할 수 있는 가능성이 50 % 이상이다(Table 4).

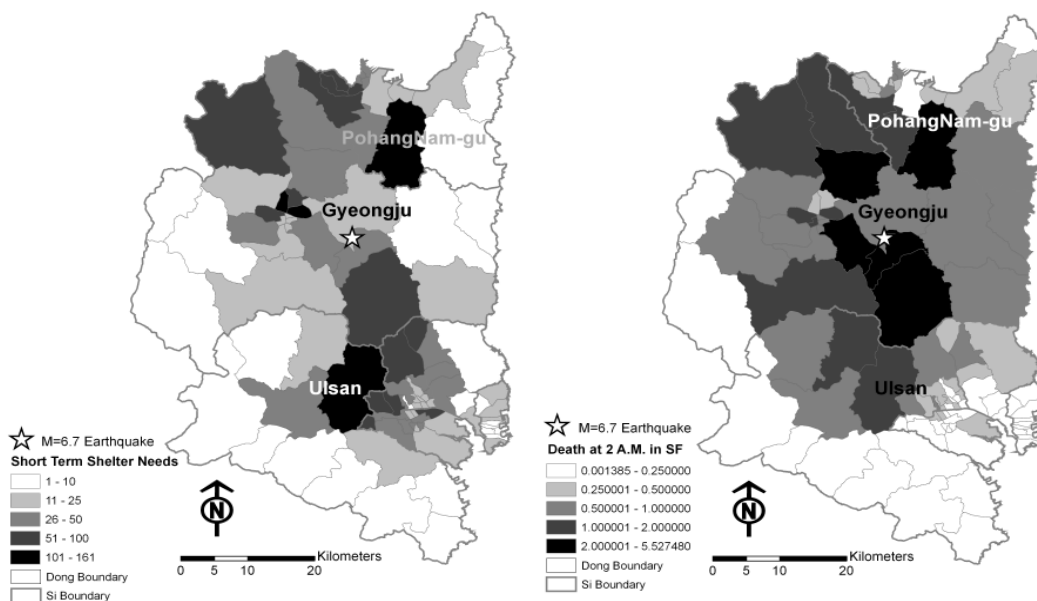
Table 4. Damages estimated to the schools, the police stations, and the fire stations in the Gyeongju area due to M=6.7 earthquake.

With Functionality >50% on day 1		Number of Facilities								
		School			Police Station			Fire Station		
		Total	Site Class B	Site Class D	Total	Site Class B	Site Class D	Total	Site Class B	Site Class D
Central and Eastern	Toro et al. (1997)	352	341	270	76	73	67	32	29	24
	Sommerville et al.(2002)		352	286		76	68		32	24
	Frankel et al. (1996)		288	153		68	38		24	15
	CEUS Event		345	251		73	62		30	22
	CEUS Characteristic Event		348	254		75	62		31	22
	Campbell (2003)		348	277		75	67		31	24
	Atkinson & Boore (1995)		352	280		76	67		32	24
Western	Young et al. (1997)	352	352	335	76	76	73	32	32	29
	WUS Shallow Crustal Event - Non Extensional		352	274		76	60		32	23
	WUS Shallow Crustal Event - Extensional		352	319		76	66		32	26
	WUS Deep Event		352	352		76	76		32	32
	Spudich et al. (1999)		352	324		76	67		32	27
	Sadigh et al. (1997)		352	284		76	60		32	23
	Campbell & Bozorgnia (2003)		352	326		76	68		32	27
	Boore et al. (1997)		346	310		75	65		31	26
	Atkinson & Boore (2003) -Global		352	352		76	76		32	32
	Atkinson & Boore (2003)		352	352		76	76		32	32
	Abrahamson & Silva(1997) -Hanging Wall		352	339		76	73		32	29
	Abrahamson & Silva (1997) - Foot Wall		352	352		76	76		32	32

③ 화재, 이재민, 사상자

연구지역이 지반분류 B(보통암) 지반으로 이루어진 곳에 위치한다면 999 건의 화재발생 가능성이 있고, 이로 인해 65,108 명이 화재에 노출될 것으로 보인다. 연구지역이 지반분류 C(연암) 지반에 위치한다면 약 1,013 건의 화재발생으로 66,362 명이 화재에 노출될 수 있다. 반면에 연구지역이 지반분류 D(단단한 토사) 지반에 위치하고 있다면 이보다 많은 화재발생으로 약 70,965 명의 인구가 화재에 노출될 가능성을 보여 가장 큰 피해가 예상된다.

이 지진으로 인해 이재민도 발생할 수 있는데, 연구지역이 지반분류 B(보통암) 지반에 위치하고 있다면 약 7,132 가구가 피해를 입어 2,939 명의 이재민이 발생할 수 있다(Figure 13). 지반분류 C(연암) 지반에 위치한 연구지역에서는 약 21,488 가구 피해로 8,797 명이 임시 피난처가 필요하다. 반면에 연구지역이 지반분류 D(단단한 토사) 지반으로 이루어져 있다면 43,386 가구의 피해로 17,692 명의 이재민이 발생할 수 있겠다. 만약 이들을 수용할 수 있을 정도의 학교가 충분히 준비되지 않는다면, 마을회관 또는 노인정 같은 새로운 대피소를 모색해야 할 것이다.



(a) Short term shelter needs (b) Death probability at 2 A.M. in
single family houses(SF)

Figure 13. Short term shelter needs and causality probability occurring M 6.7 earthquake at 2 A.M. with the attenuation relation proposed by Sadigh et al.(1997) for site class B.

본 연구에서는 시간대별 유동인구 변화를 반영한 재해규모 산정을 위하여 새벽, 출퇴근시간, 그리고 대부분의 지역주민이 생업 혹은 학업에 종사하는 시간대에 지진이 발생하였을 상황을 가정하여 재해정도를 추정하여 보았다. HAZUS의 모사결과, 지진이 새벽 2시에 발생하였을 때가 활동시간이 많은 낮이나 출퇴근시간에 발생하였을 때보다 사상자 발생률이 훨씬 높다(Figure 14). 사상자 피해수준은 병원치료가 필요하지 않은 가벼운 경상(Level 1), 병원치료가 필요한 부상(Level 2), 생명이 위험한 중상(Level 3), 그리고 사망자(Level 4)로 나뉜다(FEMA, 2006a). 새벽 두시에 지진이 발생할 경우, 연구지역이 지반분류 B(보통암) 지반일 경우에는 75 명의 사망자가 발생하고, 지반분류 C(연암) 지반일 경우에는 296 명의 사망자가 발생할 수 있다. 또한 연구지역이 지반분류 D(단단한 토사)지역일 경우에는 685 명의 사망자가 발생할 수 있을 정도로 큰 인명피해가 있겠다(Figure 14).

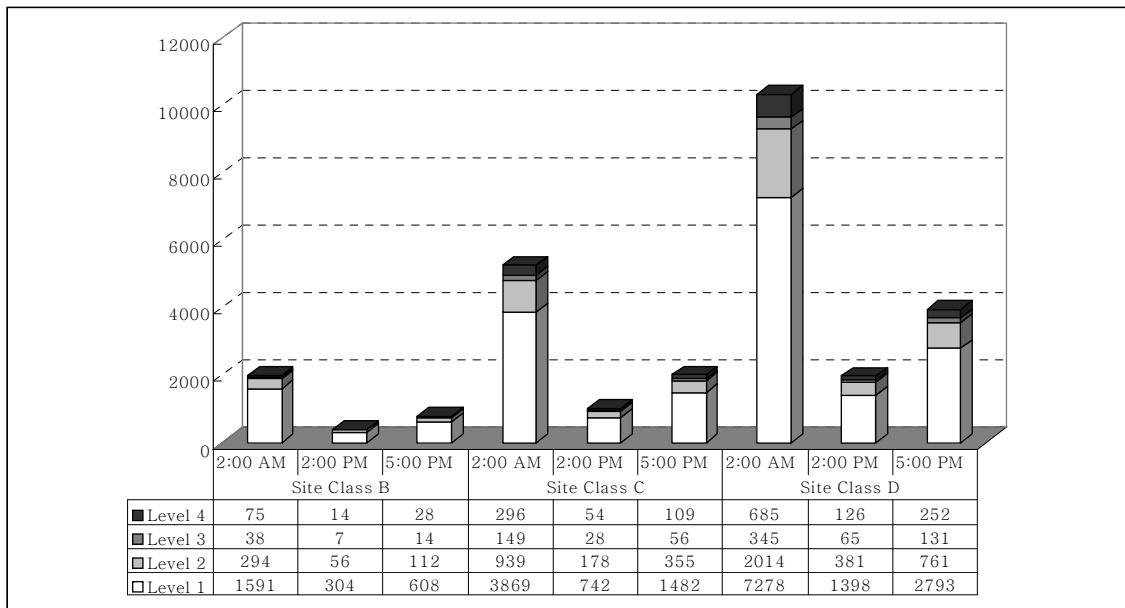


Figure 14. Casualties occurring M 6.7 earthquake with Sadigh et al.(1997) attenuation relation.

④ 경제적 손실

건물관련 경제적인 손실은 건물피해액과 임대비용으로 나뉠 수 있다. 건물 피해액은 주택수리비용이나 재건축 비용을 포함하고, 임대비용은 주택손상으로 인해 임대를 할 경우에 발생한다. 이번 연구에서는 임대비용을 예측하여 보았다. 주택이 지반분류 B(보통암) 지반으로 이루어진 곳에 있을 경우에는 약 1,130억 원가량의 임대비용이 발생할 수 있으며, 지반분류 C(연암) 지반의 경우에는 약 2천2백억 원정도가 발생할 수 있겠다. 또한 연구지역 내 주택들이 지반분류 D(단단한 토사) 지역에 위치할 경우에는 약 3천6백억 원정도가 임대비용으로 필요할 수 있겠다. 이 밖의 경제 관련 피해액은 건물 내의 시설물과 구조물, 물품, 건축공법, 건축 재료비, 인건비 등 더욱 풍부하고 자세한 자료수집이 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 미국의 통합적인 자연재해정보시스템인 HAZUS의 두 가지 방법을 이용하여 시스템의 국내 적용가능성과 효율성 및 경주지역의 규모 6.7 지진에 대한 재해예측결과를 알아보았다. HAZUS의 사용자지정 방법 ShakeMap을 이용할 때에는 연구지역을 경상남북도와 특히 경주시와 포항시 남구의 2000년 통계자료를 바탕으로 재해를 예측하였다. 또 이 시스템의 결정론적 방법을 적용할 때에는 우리나라의 강진동 감쇠식과 관측된 지진자료를 바탕으로 HAZUS에서 지원하는 미국의 감쇠식 중 가장 유사한 식인 Sadigh et al.(1997)의 강진동 감쇠식을 선별하여 HAZUS에 적용하였다. 이때 경주시, 포항시 남구 및 울산광역시를 연구지역으로 선정한 후 2005년 통계자료를 바탕으로 재해를 예측하였다.

이들의 결과에서 ShakeMap을 이용하였을 경우, 경상남북도처럼 연구지역이 큰 경우에는 주거건물이 약 2%정도가 중간규모 이상의 피해를 얻고, 경주시와 포항시 남구와 같이 연구지역이 작은 경우에는 43%정도가 같은 피해를 입을 수 있다. 반면에 결정론적 방법을 사용한 경우, 연구지역 내 주거건물은 약 16~36 %까지 지반조건에 따라 피해상황은 달라질 수 있다. 또한 전자는 이재민이 0.9%, 후자는 0.18~1.13%까지 발생할 수 있다. 이들의 수치는 2006년 강원도 지역의 태풍 “에위니아”와 집중호우로 2,490 동의 가옥피해(강원도 전체의 약 0.1%)(강원도청, 2006), 높은 인명피해와 비교하여 그 피해가 적다고 할 수 없으며, 또한 미국의 같은 지진규모 6.7인 1994년 Northridge에서 발생한 지진으로 57명의 사망자와 25,000 여명의 이재민이 발생한 재해(FEMA, 2008)와 비교하여 그 피해가 작다할 수 없으므로, 규모 6.7 경주의 가상지진으로 인한 재해는 국가적 차원의 사상 최대의 재난이 될 수도 있겠다.

본 연구 결과는 경주 인근지역에 지진재해가 발생할 경우를 대비해 빠른 시간 내 피해최소화를 위한 재난관리 및 안전관리 계획수립에 효과적인 정보를 제공할 수 있다는데 의미가 있다. 예를 들면, 본 연구의 피해예측 결과는 재난예방 목적의 사전점검관리를 위하여 사용될 수 있으며, 위기상황

하에서는 손상 혹은 파괴된 기능과 시설을 사전 선정된 우선순위에 의거 신속히 그리고 체계적으로 원상복구 시키고, 응급시설과 지원인력 확보 등 인명 및 주요시설 피해를 최소화하기 위한 초기 재난관리계획 및 안전관리계획 수립에 효율적인 정보를 제공할 수 있을 것이다. 또한 본 연구의 재해예측 결과는 신속하면서 계획적이고 지속적인 사회기능 회복을 위한 대책수립 및 시행에 도움이 될 수 있을 것이다. 이러한 일련의 의사결정 지원시스템은 결과적으로 재해특성에 맞는 효율적인 재해저감 정책수립을 가능케 할 것이다.

지진재해 저감을 위하여 새로운 기술 도입 혹은 기존 개발된 시스템의 성능 향상을 위한 지속적인 관심과 투자도 필요하겠다. 보다 효율적인 재해저감연구를 위하여 유관기관 간의 정보교류 활성화를 비롯한 협력체계 구축과 홍보 차원의 대국민 정보제공 서비스가 필요하다. 이를 위해서는 본 연구에서 적용한 HAZUS의 적극적인 활용도 생각해 볼 수 있겠다. 본 연구를 통해 우리나라에서도 이 시스템사용이 가능하다는 것을 알았고, 지진재해뿐만 아니라 홍수와 태풍으로 인한 재해 또한 이 시스템을 이용하여 예측이 가능하므로 기존의 특정재해예측 혹은 단일재해예측 시스템보다 그 활용도 면에서 우수하다. 또한 이 시스템을 이용하여 재해를 예측함에 있어서 가장 큰 장점은 공공기관뿐만 아니라 관심이 있는 지역 혹은 민간부문에서도 사용이 가능하다는 것이다. 비록 현재까지는 우리나라 적용에 있어서 약간의 기술적 제약이 있으나, 향후 지속적인 관심과 연구를 통하여 우리나라 실정에 맞게 시스템 개선을 추진한다면 우리나라의 체계적인 통합재해예측 시스템으로 활용할 수도 있을 것이다.

제 4 장 참고문헌

- 강수영, 김광희, 석봉출, 유해수 (2007) 한반도 지진재해예측을 위한 HAZUS의 강진동 감쇠식 비교연구. 한국지진공학회 논문집. 제11권, 제6호, pp. 15-21
- 강원도청. 2006. 06년 7월 집중호우 피해 복구계획 자료. 건설방재국.
Date Accessed Nov.10.2006. <http://www.provin.gangwon.kr/dep/part10/page/main.html>
- 강익범. 2005. 2005년 3월 20일 일본 후쿠오카지진의 교훈. 환경지질연구정보센터.
- 경제북. 1995. 지진발생과 지진재해와의 관계-1995년 일본 효고현 남부지진(M=7.2)의 재해유형. 한국지구과학회지. 16(6):500-510.
- 경제북, 이희욱. 1998. 1997년 6월 26일 경주지진의 진도분석 및 지진 지질학적 의의. 지질공학. 8(1):13-24.
- 기상청. "2001 지진연보". 기상청, 2002, 53pp
- 기상청. "2002 지진연보". 기상청, 2003,111pp
- 기상청. "2003 지진연보". 기상청, 2004,115pp
- 기상청. "2004 지진연보". 기상청, 2005,102pp
- 기상청. "2005 지진연보". 기상청, 2006,103pp
- 기상청. "2007년 1월 20일 강원지역 지진관련 정보". 기상청 2007.
- 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 광산지질, 16, 31-61
- 김석규, 송인호, 김철. 2006. GIS와 수리모형을 이용한 홍수지역예측 비교. 한국지리정보학회지. 9(3):183-192.
- 김성균, 1995, 한반도의 지각구조에 관한 연구, 지질학회지, 31, 393-403
- 김성균, 김명수. "주파수 영역에서의 인공지진과 자연지진의 식별". 자원환경지질, Vol. 36, No. 3, 2003, pp201-212.

- 김성균, 전명순, 김준경. "경상분지에서의 P파 감쇠". 지질학회지, Vol. 35, No. 3, 1999, pp223-228.
- 김재관. 1997. 지진 재해. 제13차 공동학술강연회. 대한지질학회. 대한자원환경지질학회.
- 노명현. 2003. 우리나라의 지진특성. 2003 대한지질공학회 정기총회 및 학술 발표회. 원자력안전기술원.
- 노명현, 김연중. 1996. 한국의 지진재해도 곡선의 민감도 분석. 대한지질학회. 32(3):199-207
- 노명현, 이기화. "한반도 남동부 지역에서의 최대 지반운동치의 추정(II): 예측공식의 개발". Jour. Geol. Soc. Korea, Vol.31, No.3, 1995, pp175-187.
- 박동희, 이정모, 박창업, 김준경. "한반도 동남부의 강진동 모사와 감쇠식". 지질학회지, Vol. 37, No. 1, 2001, pp21-30.
- 박동희, 연관희, 장천중, 최원학, 이대수. "후쿠오카 지진('05.3.20, M=7.0)의 지진동 감쇠특성 분석". 지구물리, Vol. 8, No. 3, 2005, pp109-113.
- 백민호, 홍혜연. 2003. GIS를 이용한 재난관리체계 구축에 관한 연구. 정책연구과제. 행정자치부. 국립방재연구소. 201-241쪽
- 연관희, 박동희, 최원학, 장천중, 이대수. "원전부지고유 지진동감쇠식 개발 및 비교평가연구". 한국지진공학회, 한국지진공학회 2005년도 Workshop, 2005.
- 이기화. 1998. 한반도의 역사지진자료. 지구물리. 1(1):4-22.
- 이기화, 김정기. 2000. 한반도 주요 지체구조구별 지진학적 특성. 지구물리. 3(2):91-98.
- 이기화, 이전희, 경재복. 1998. 양산단층계 지진활동의 통계적 분석. 대한지질공학회. 8:99-114.
- 이기화, 진영근. "양산단층의 구역화: 경상분지내 주요 단층대의 지구물리학적 연구". 지질학회지, Vol. 27, No. 4, 1991, pp434-449.
- 이덕기, 오석훈, 윤용훈, 양준모. "광대역 관측소 하부 암석의 고주파수 탄성

- 과속도 및 감쇠상수에 대한 연구". 지구물리, Vol. 5, No. 3, 2002, pp165-174.
- 이승규, 김소구, 1998, 원격 수신함수를 이용한 서울과 인천 관측소 하부의 지각 속도구조와 Moho 불연속면 특성 연구, 자원환경지질, 31, 339-347
- 정길호, 김현주, 박병철. 2002. 지진에 대한 지역위험도 분석 연구. 정책연구 과제. 행정자치부. 국립방재연구소. 1-120쪽
- 조남대, 박창업. "한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇠상수 추정 및 강지진동의 추계학적 모사". 한국지진공학회, Vol. 7, No. 6, 2003, pp59-70.
- 통계청 (2007) <http://www.kosis.kr/> visited in April. 2007.
- 한국지질자원연구원, 지진연구센터. "2007년 1월 20일 월정사 지진 자료". 한국지질자원연구원, 대전, 2007.
- 홍현정, 최철웅, 전성우. 2006. GPS·GIS 기법을 활용한 태풍 후 해운대 해변 지형의 3차원 변화 탐지 및 분석. 한국지리정보학회지. 9(3):82-92.
- Abrahamson, N.A., Silva, W.J., "Empirical Response Spectral Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes". Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, 1997, pp94-127.
- Ammon, C.J., 1991. The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms, Bull. seism. Soc. Am., 81, 2504-2510.
- Ammon, C.J., Randall, G.E. & Zandt, G., 1990. On the nonuniqueness of receiver function inversions, J. geophys. Res., 95(B10), 15303-15318.
- Atkinson, G.M., Boore, D.M., "Ground-Motion Relations for Eastern North America". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.85, No.1, 1995, pp17-30.
- Bahk JJ, Chough SK, Han SJ (2000) Origins and paleoceanographic significance of laminated muds from the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). Mar Geol 162:459-477

- Baker, G.E., Minster, J.B., Zandt, G. & Gurrola, H., 1996. Constraints on crustal structure and complex Moho topography beneath Pinon Flat, California, from teleseismic receiver function, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1830–1844.
- Boore, D.M., W.B. Joyner and T.E. Fumal. 1997. Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Accelerations from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work. *Seism. Res. Lett.* 68:128–153.
- Bouma AH (1962) *Sedimentology of Some Flysch Deposits*. Elsevier, Amsterdam
- Burdick, L.J. & Langston, C.A., 1977. Modeling crustal structure through the use of converted phases in teleseismic body-wave forms, *Bull. seism. Soc. Am.*, 67, 677–691.
- Campbell, K.W., "Prediction of Strong Ground Motion Using the Hybrid Empirical Method and Its Use in the Development of Ground-Motion(Attenuation)". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.3, 2003, pp 1012–1033.
- Campbell, K.W., Bozorgnia, Y., "Updated Near-Source Ground-Motion (Attenuation) Relations for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No.1, 2003, pp 314–331.
- Canals M, Lastras G, Urgeles R, Casamor JL, Mienert J, Cattaneo A, De Batist M, Haflidason H, Imbo Y, Laberg JS, Locat J, Long D, Longva O, Masson DG, Sultan N, Trincardi F, Bryn P (2004) Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project. *Mar Geol*

213:9–72

- Carmen, S.D., "Earthquake Risk Assessment of Quibdo City, Northwestern Colombia using HAZUS: It is the HAZUS Methodology Applicable in other Countries?". AGU Fall Meeting 2006, San Francisco, December, 2006
- Cassidy, J.F., 1992. Numerical experiments in broad-band receiver function analysis, *Bull. seism. Soc. Am.*, 82, 1453–1474.
- Chen, J.H. & Liu, Q.Y., 1999. Lithospheric receiver function in 3-D laterally inhomogeneous media using Maslov asymptotic theory, *Acta Geophysica Sinica*, 42, 84–93.
- Chiu, J.M. and S.G. Kim. 2004. Estimation of Regional Seismic Hazard in the Korean Peninsula Using Historical Earthquake Data between A.D.2 and 1995. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 94(1):269–284.
- Clayton, R.W. & Wiggins, R.A., 1976. Source shape estimation and deconvolution of teleseismic bodywaves, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 47, 151–177.
- Chough SK, Lee HJ (1987) Stability of sediments on the Ulleung Basin slope. *Mar Geotechnol* 7:123–132
- Chough SK, Lee GH, Park BK, Kim SW (1984) Fine structures of turbidite and associated muds in the Ulleung (Tsushima) basin, East Sea (Sea of Japan). *J Sediment Petrol* 54:1212–1220
- Chough SK, Jeong KS, Honza E (1985) Zoned facies of mass-flow deposits in the Ulleung (Tsushima) basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar Geol* 65:113–125.
- Chough SK, Yoon SH, Lee, HJ (1991) Submarine Slides in the Eastern Continental Margin, Korea. *Mar Geotechnol* 10:71–82

- Chough SK, Lee SH, Kim JW, Park SC, Yoo DG, Han HS, Yoon HS, Oh SB, Kim YB, Back GG (1997) Chirp (27 kHz) echo characters in the Ulleung Basin. *Geosci J* 1:143–153
- Damuth JE (1980) Use of high-frequency (3.512 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: a review. *Mar Geol* 38:51–75
- Dziewonski, A.M. & Anderson, D.L., 1981. Preliminary Reference Earth Model, *Phys. Earth planet. Inter.*, 25, 297–356.
- FEMA, "HAZUS Annual Progress and Utilization Report for Fiscal Year 2004", FEMA 493, Federal Emergency Management Agency, January, 2005, pp66
- FEMA. 2006. Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model, HAZUS-MH MR2 User Manual. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. 2006. Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model, HAZUS-MH MR2 Technical Manual. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency.
- FEMA (2008) Northridge earthquake, <http://www.fema.gov/hazard/earthquake/usquakes.shtm>, <http://www.fema.gov/kids/north5.htm>, <http://www.fema.gov/hazard/topten.shtm>, accessed on Jan. 14. 2008.
- Gamo T (1999) Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea. *Geophys Res Lett* 26:3141–3144
- Gardner JM, Shor AN, Jung WY (1998) Acoustic imagery evidence for methane hydrates in the Ulleung Basin. *Mar Geophys Res* 20:495–503
- Gorbarenko SA, Southon JR (2000) Detailed Japan Sea paleoceanography

during the last 25 kyr: constraints from AMS dating and $\delta^{18}\text{O}$ of planktonic foraminifera. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 156:177–193

Gulati, B. 2006. Earthquake Risk Assessment of Buildings: Applicability of HAZUS in Dehradun, India. Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation Dehradun. International Institute of Geo-information Science and Earth Observation. 109pp.

Hampton MA, Lee HJ, Locat J (1996) Submarine landslides. *Rev Geophys* 34:33–59

Huppert, H.E. and R.S.J. Sparks. 2006. Extreme natural hazards: population growth, globalization and environmental change. *Phil. Trans. R. Soc. A(364)*:1875–1888

Jenner KA, Piper DJW, Campbell DC, Mosher DC (2007) Lithofacies and origin of late Quaternary mass transport deposits in submarine canyons, central Scotian Slope, Canada. *Sedimentology* 54:19–38

Kaplan, H., Yilmaz, S., "Preliminary Seismic Risk Assessment of Urban Building Stocks: A Case Study for Denizli-Turkey", *Journal of Science and Technology*, Vol. 1, No. 1, 2007, pp106–124.

Kennett JP, Cannariato KG, Hendy IL, Behl RJ (2000) Carbon isotope evidence for methane hydrate instability during Quaternary Interstitials. *Science* 288:128–133

Kim K, Kim YG, Cho YK, Takematsu M, Volkov Y (1999) Basin-to-basin and Year-to-year Variation of Temperature and Salinity Characteristics in the East Sea (Sea of Japan). *J Oceanogr* 55:103–109

Kircher, C.A. 2003. Near-Real-Time Loss Estimation Using HAZUS and SHAKEMAP Data. SMIP03 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data. pp.59–66.

- Kircher, C.A., R.V. Whitman and W.T. Holmes. 2006. HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods. *NATURAL HAZARDS REVIEW*, 7(2):45-59.
- Kvenvolden KA (1993) Gas hydrates-geological perspective and global change. *Rev Geophys* 31:173-187
- Kwang-Hee Kim, Jer-Ming Chiu, Honn Kao, Qiyuan Liu & Yih-Hsiung Yeh., 2004. A preliminary study of crustal structure in Taiwan region using receiver function analysis, *Geophys. J. Int.*, 146-164
- Lastras G, Canals M, Urgeles R, De Batist M, Calafat AM, Casamor JL (2004) Characterisation of the recent BIG'95 debris flow deposits on the Ebro margin, Western Mediterranean Sea, after a variety of seismic reflection data. *Mar Geol* 213:235-255
- Lee, K. and Y.G. Jin. 1991. Segmentation of the Yangsan Fault System: Geophysical Studies on Major Faults in the Kyeongsang Basin. *Jour. Geol. Soc. Korea*. 27(4):434-449.
- Lee KE (2007) Surface water changes recorded in Late Quaternary marine sediments of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 247:18-31
- Lee HJ, Chun SS, Yoon SH, Kim SR (1993) Slope Stability and Geotechnical Properties of Sediment of the Southern Margin of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar Geol* 110:31-45
- Lee HJ, Chough SK, Yoon SH (1996) Slope-stability change from late Pleistocene to Holocene in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Sediment Geol* 104:39-51
- Lee, K. and W.S. Yang. 2006. Historical Seismicity of Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 96(3):846-855.
- Lee, S. and U. Choi. 2003. Development of GIS-based geological hazard

- information system and its application for landslide analysis in Korea. *Geoscience Journal*. 7(3):243–252.
- Lee SH, Chough SK, Back GG, Kim YB, Sung BS (1999) Gradual downslope change in high-resolution acoustic characters and geometry of large-scale submarine debris lobes in Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), Korea. *Geo-Mar Lett* 19:254–161
- Lee SH, Bahk JJ, Chough SK (2004) Late Quaternary sedimentation in the eastern continental margin of the Korean Peninsula. In: Cift P, Kuhnt W, Wang P, Hayes D (eds) *Continent-Ocean Interactions within East Asian Marginal Seas*. Am Geophys Union Geophys Monogr 149:205–233
- Lee JH, Baek YS, Ryu BJ, Riedel M, Hyndman RD (2005) A seismic survey to detect natural gas hydrate in the East Sea of Korea. *Mar Geophys Res* 26:51–59
- Liu, Q.Y. & Kind, R., 1986. Lateral variation of the structure of the crust-mantle boundary from conversions of teleseismic P waves, *J. Geophys.*, 60, 149–156.
- Liu, Q.Y., Kind, R. & Li, S.C., 1996. Maximal likelihood estimation and nonlinear inversion of the complex receiver function spectrum ratio, *Acta Geophysica Sinica*, 39, 531–543.
- Liu, Q.Y., Li, S.C., Shen, Y. & Chen, J.H., 1997. Portable broad-band seismic array study of the crustal and upper mantle structure beneath the Yanhui Basin and its neighbor region, *Acta Geophysica Sinica*, 40, 763–772.
- Liu, Q.Y., Kind, R. & Li, S.C., 1998. Receiver function at the stations of the Chinese digital seismic network (CDSN) and their nonlinear inversion, *Chinese Journal of Geophysics*, 40, 373–385.

- Locat J, Lee HJ (2002) Submarine landslides: advances and challenges. *Can Geotech J* 39:193–212
- Lowe DR (1982) Sediment gravity flows: II. depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *J Sediment Petrol* 52:279–297
- Machida H (1999) The stratigraphy, chronology and distribution of distal marker-tephras in and around Japan. *Glob Planet Change* 21:71–94
- Masson DG, Canals M, Alonso B, Urgeles R, Huhnerbach V (1998) The Canary debris flow: source area morphology and failure mechanisms. *Sedimentology* 45:411–432
- Masson DG, Watts AB, Gee MJR, Urgeles R, Mitchell NC, Le Bas TP, Canals M (2002) Slope failures on the flanks of the western Canary Islands. *Earth-Sci Rev* 57:1–35
- Miayiri Y, Yoshida K, Miyazaki Y, Matsuzaki H, Kaneoka I (2004) Improved ¹⁴C dating of a tephra layer (AT tephra, Japan) using AMS on selected organic fractions. *Nucl Instr Meth B* 223–224:555–559
- Miyatake, H. and A. Nunomura. 2006. General overviews and future perspectives of disaster information systems in Japan. Disaster Prevention Bureau, Date Accessed Oct.10.2006. <http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/joint/35/paper/51miyata.pdf>
- Mulder T, Cochonat P (1996) Classification of Offshore Mass Movements. *J Sediment Res* 66:43–57
- Mulder T, Migeon S, Savoye B, Faugeres JC (2001) Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean: a record of deposits from flood-generated turbidity currents? *Geo-Mar Lett* 21:86–93
- Normark WR, Piper DJW (1991) Initiation processes and flow evolution of

- turbidity currents: implications for the depositional record. In: Osborne RH (ed) *From Shoreline to Abyss: Contributions in Marine Geology in Honor of Francis Parker Shepard*. SEPM Spec Publ 46:207–230
- Oba T, Kato M, Kitazato H, Koizumi I, Omura A, Sakai T, Takayama T (1991) Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanography* 6:499–518
- Peng, X. & Humphreys, E.D., 1997. Moho dip and crustal anisotropy in Northwestern Nevada from teleseismic receiver functions, *Bull. seism. Soc. Am.*, 87, 745–754.
- Piper DJW (1978) Turbidite muds and silts in deep-sea fans and abyssal plains. In: Stanley DJ, Kelling G (eds) *Sedimentation in Submarine Fans, Canyons, and Trenches*. Dowden, Hutchison and Ross Inc, Stroudsburg, pp 163–176
- Piper DJW, Farre JA, Shor A (1985) Late Quaternary slumps and debris flows on the Scotian slope. *Bull Geol Soc Am* 96:1508–1517
- Piper DJW, Cochonat P, Morrison ML (1999) The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity current inferred from sidescan sonar. *Sedimentology* 46:79–97
- Regnier, M., 1988. Lateral variation of upper mantle structure beneath New Caledonia determined from P-wave receiver function: evidence for a fossil subduction zone, *Geophys. J.*, 95, 561–577.
- Rothwell RG, Thomson J, Kahler G (1998) Low-sea-level emplacement of a very large Late Pleistocene 'megaturbidite' in the western Mediterranean Sea. *Nature* 392:377–380
- Sadigh, K, Chang, C.Y., Egan, J, Makdisi, F., Youngs, R.R., "Attenuation

- Relationships for Shallow Crustal Earthquakes based on California Strong Motion Data". *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, 1997, pp180–189.
- Stuvier M, Reimer PJ, Reimer RW (2005) CALIB 5.0–Manual. <http://www.calib.org>.
- Sun, C.G. (2004) Geotechnical information system and site amplification characteristics for earthquake ground motions at inland of the Korean peninsula, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
- Sung–Joon Chang & Chang–Eob Baag., 2007. Moho Depth and Crustal V_p/V_s Variation in Southern Korea from Teleseismic Receiver Functions: Implication for Tectonic Affinity between the Korean Peninsula and China, *Bull. seism. Soc. Am.*, Vol. 97, No. 5, pp. 1621–1631
- Tada R, Irino T, Koizumi I (1999) Land–Ocean linkage over orbital and millennial timescales record in late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography* 14:236–247
- Tarantola, A., 1987. *Inversion Problem Theory, Method for Data Fitting and Model Parameter Estimation*, Elsevier, Amsterdam.
- Toro, G.R., Abrahamson, N.A., Schneider, J.F., "Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: best estimates and uncertainties". *Seismological Research Letter*, Vol.68, 1997, pp41–57.
- Tripsanas EK, Piper DJW, Jenner KA, Bryant WR (2008a) Submarine mass–transport facies: new perspective on flow processes from cores on the eastern North American margin. *Sedimentology* 55:97–136
- Tripsanas EK, Piper DJW, Campbell DC (2008b) Evolution and depositional structure of earthquake–induced mass movements and gravity flows:

- Southwest Orphan Basin, Labrador Sea. *Mar Petrol Geol* 25:645–662
- Wald, D.J. 2006. Earthquake Planning Scenario; Shake Map for Korea M 6.7 Scenario, Personal Communication. Aug. 09~16. 2006
- Wald, D.J., V. Quitoriano, T.H. Heaton, H. Kanamori, C.W. Scrivner and C.B. Worden. 1999. TriNet "ShakeMaps": Rapid Generation of Instrumental Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California. *Earthquake Spectra*. 15(3):537–556.
- Wald, D.J., B.C. Worden, V. Quitoriano and K.L. Pankow. 2006. ShakeMap Manual, Technical Manual, Users Guide, and Software Guide version 1.0. pp.1–156. Date Accessed Aug.09. 2006 <http://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/pdf/508TM12-A1.pdf>
- Watanabe Y, Nakai S, Hiruta A, Matsumoto R, Yoshida K (2008) U-Th dating of carbonate nodules from methane seeps off Joetsu, eastern margin of Japan Sea. *Earth Planet Sci Lett* 272:89–96
- Yokoyama Y, Kido Y, Tada R, Minami I, Finkel, RC, Matsuzaki H (2007) Japan Sea oxygen isotope stratigraphy and global sea-level changes for the last 50,000 years recorded in sediment cores from the Oki Ridge. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 247:5–17
- Yoo DG, Kang DH, KooNH, Kim WS, Kim GY, Kim BY, Chung SH, Kim YJ, Lee HY, Park KP (2008) Geophysical evidence for the occurrence of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea. *J Geol Soc Korea* 44:645–655 (in Korean with English Abstract)
- Yoon SH, Chough SK (1995) Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Bull Geol Soc Am* 107:83–97
- Zhang, J. & Langston, C.A., 1995. Dipping structure under Dourbes, Belgium, determined by receiver function modeling and inversion,

Bull. seism. Soc. Am., 85, 254–268.

Zhu, L., and H. Kanamori (2000). Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions, *J. Geophys. Res.* 105, 2969–2980.

주 의

1. 이 보고서는 한국해양연구원에서 수행한 기본사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양연구원에서 수행한 기본사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.