

지진기술개발사업

해상 탄성파 탐사를 이용한 동해연안의 신기 지진활동 분석

Analysis of earthquake activity in the East Sea using the
high-resolution seismic survey method

한국해양연구원

기 상 청

제 출 문

기상청장 귀하

이 보고서를 “고해상 탄성과 탐사를 이용한 동해연안의 신기 지진활동 분석” 과제의 보고서로 제출합니다.

2012. 1.

주관연구기관명 : 한국해양연구원

주관연구책임자 : 김한준

연 구 원 : 주형태 이상훈 박건태
장남도 이은혜 손우현
기진석 이정민 유이선

보고서 요약서

과제고유번호	CATER 2008-5403	해당단계 연구기간	2008.2.1. - 2009.1.31.	단계 구분	2
연구사업명	사업명	지진기술개발사업			
	세부사업명	지진지체구조환경 및 지진원			
연구과제명	대과제명	지진기술개발사업			
	세부과제명	고해상 탄성과 탐사를 이용한 동해연안의 신기 지진활동 분석			
연구책임자	김한준	해당단계 참여연구원수	총 : 10 명 내부 : 5 명 외부 : 5 명	해당단계 연구비	정부: 230,000 천원 기업: 천원 계: 230,000 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 명 내부 : 명 외부 : 명	총 연구비	정부: 230,000 천원 기업: 천원 계: 230,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양연구원 해양위성 관측기술 연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약				보고서 면수	56
<p>천부지질과 기반암의 변형을 파악하기 위해 37°N을 중심으로 울진에 가까운 동해의 후포분지 연안에서 약 650 km 의 고해상 탄성과 자료를 획득하여 천부와 기반암의 변형을 조사하였다. 조사지역에서 리프트분지는 오른쪽과 왼쪽에서 각각 후포단층과 이에 대조되는(antithetic) 단층에 의해 경계지어졌음을 보여준다. 하지만, 후포단층은 변위가 매우 큰 반면 대조단층은 후포단층에 비해 수직변위뿐만 아니라 수평범위에서도 훨씬 작다. 후포분지의 충진퇴적물은 리프트와 동시(올리고세 후기-마이오세 초기), 리프트 후기(마이오세 중기-홀로세) 퇴적단위로 구성되어 있다. 후포단층과 그 외의 단층들은 주로 북쪽방향성분을 가지며 정단층변위를 보여 준다. 동해가 마이오세 중기이후 압축력의 지배를 받고 있음을 고려하면, 이들 단층이 올리고세 후기에서 마이오세 전기 동안 진행된 대륙지각의 리프팅 동안 형성되었다고 해석된다. 현재 아무리아판의 움직임과 관련하여 한반도와 그 주변에서 관측되는 ENE방향의 최대 주압축력 때문에 후포분지내 단층들이 재동될 경우 역단층 및 우수주향의 주향이동운동을 한다고 해석한다. 후포단층에서 발생한 최근의 지진은 연</p>					

구지역 및 그 외의 한반도 대륙주변부에서 지진이 제3기에 진행된 대륙지각의 리프팅을 유도한 단층에서 발생하고 있음을 지시한다.

색 인 어	한 글	탄성과 탐사, 단층, 울진, 지진, 아무리아판
	영 어	Seismic survey, fault, Uljin, earthquake, Amurian Plate

요 약 문

I. 제목:

고해상 탄성과 탐사를 이용한 동해연안의 신기 지진활동 분석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 필요성

● 기술적 측면

- 우리나라의 원자력 발전소 부지 4개 중 월성, 고리, 그리고 울진의 3개가 분포하는 동해남부는 신생대에 들어와 동해의 형성이라는 가장 큰 지구조 운동이 일어난 지역으로 현재 이 지역에서 활성의 논란이 되고 있는 양산단층도 동해의 형성과 관련되어 생겨난 것이다. 더욱이 동해의 맨틀구조는 정상보다 용융성이 있는 물질의 양이 많으며 근래에 이 지역에서 지진의 발생이 증가하고 있음은 지구조적 활동이 활발할 가능성을 지시한다.
- 지각내에서 응력과 변형의 분포는 일차적으로 단층에 의해 지배되므로 지각변형을 해석하기 위해서는 단층들이 어떻게 전파하고 자라며 서로 간에 작용을 하는 지를 이해하는 것이 지진재해를 평가하는 데에 필수사항이다. 해양은 침식환경이 육상과 달리 퇴적환경이므로 퇴적층이 잘 보존된다. 따라서 해양탄성과 탐사를 통해 연구해역내 단층의 기하학적 모양과 특성을 파악할 수 있으며 층서연구결과를 결합함으로써 단층활동의 활동연대도 파악할 수 있다.

● 경제·산업적 측면

- 경제발전으로 인해 환경문제의 중요성이 부각되고 있고 화석에너지원의 사용과 관련한 이산화탄소의 규제활동이 본격화될 것으로 전망되고 있는 상황에서 청정 에너지인 원자력의 사용은 계속 증대될 것이다. 따라서 지진과 관련하여 원전부지의 안전성을 평가하는 것은 원전의 안전성 제고에 기여함으로써 국내 산업의 성장을 유도할 수 있으며 이로 인한 경제, 산업적 파급효과는 매우 클 것으로 판단된다.
- 현재 우리나라의 전력생산량 중에서 40% 이상을 원자력에 의존하고 있음을 고려해 보면,

원자력 산업의 안전성은 국가차원에서 확보되어야 하므로 원전과 핵폐기물 저장 부지의 안전성을 평가하고 확인하는 것은 매우 중요하다.

● 사회·문화적 측면

- 우리나라는 인접한 일본과는 달리 지진안전지대로 알려져 왔으나 학계에서 제기한 양산단층대의 활동성 논란 등으로 인근에 위치한 월성, 고리 및 울진 원전부지와 대규모 주요 산업단지의 지진안전성에 대한 국민적 우려가 있다. 최근에 대만, 터키, 미국, 그리고 일본 등지에서 심각한 지진피해가 났으며 우리 나라에서도 중간규모의 지진이 자주 발생하고 있는 상황은 아직 원자력에 관한 우리나라 국민들의 불안을 해소시키지 못하고 있다. 또한 미디어, 관련기관, 그리고 학계에서조차도 지진에 대해 민감한 반응과 우려를 표시하고 있지만 과학적인 조사를 통한 결과를 제시하지 못하고 있다. 따라서 원전시설이 밀집해 있는 한반도 남동부의 지진특성을 정밀 분석하고 단층의 활동성을 평가하는 것은 가장 기본적이면서 필수적인 연구가 될 것이다.

2. 목적

- 동해 연안의 신기 지각변형과 관련된 단층의 분포와 특성 파악
- 한반도 동해쪽 대륙주변부의 지구조적 진화과정을 구명함으로써 단층의 형성 과정을 해석

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 울진 연안의 고해상 다중채널 탄성과 탐사
- 울진 연안의 퇴적층서, 단층의 분포와 특성 해석
- 시추퇴적물의 분석

IV. 연구개발결과

1. 울진연안의 고해상 탄성과 탐사

천부지질과 기반암의 변형을 파악하기 위해 37°N을 중심으로 동해의 후포분지 연안에서 약 650 km 의 고해상 탄성과 자료를 획득하여 천부와 기반암의 변형을 조사하였다. 탄성과 단면은 조사지역내에서 주된 퇴적중심이 오른쪽과 왼쪽에 각각 후포단층과 이에 대조되는 (antithetic) 단층에 의해 경계지어졌음을 보여준다. 하지만, 후포단층은 변위가 매우 큰 반면 대조단층은 후포단층에 비해 수직변위뿐만 아니라 수평범위에서도 훨씬 작다. 후포분지의 충진 퇴적물은 리프트와 동시(올리고세 후기-마이오세 초기), 리프트 후기(마이오세 중기-홀로세) 퇴적단위로 구성되어 있다. 후포단층과 그 외의 단층들은 주로 북쪽방향성분을 가지며 정단층 변위를 보여 준다. 동해가 마이오세 중기이후 압축력의 지배를 받고 있음을 고려하면, 이들 단층이 올리고세 후기에서 마이오세 전기 동안 진행된 대륙지각의 리프팅 동안 형성되었다고 해석된다. 현재 아무리아판의 움직임과 관련하여 한반도와 그 주변에서 관측되는 ENE방향의 최대 주압축력 때문에 후포분지내 단층들이 재동될 경우 역단층 및 우수주향의 주향이동운동을 한다고 해석한다. 후포단층에서 발생한 최근의 지진은 연구지역 및 그 외의 한반도 대륙주변부에서 지진이 제3기에 진행된 대륙지각의 리프팅을 유도한 단층에서 발생하고 있음을 지시한다.

V. 연구개발결과의 활용계획

한반도의 동해연안은 원전시설이 밀집해 있으며 증가하는 지진의 발생빈도와 관련하여 활성단층의 존재여부가 관심사가 되고 있다. 지금까지 이 지역에서 육상조사를 통해 활성단층의 분포와 특성을 연구하고 있으나 제4기 단층의 위치만 추정하는 정도의 결과밖에 얻지 못하고 있다. 이 연구에서는 연구지역으로 울진원전 연안역에서 고해상 다중채널 탄성과 탐사를 수행하여 단층의 분포를 구명하였으며 그 특성을 해석하였다. 이 결과는 한반도 동부의 지각변형을 설명하고 예측하는 신기지체구조 모델의 개발에 직접 활용될 것이다. 또한 한반도의 지질과 지진특성에 적합한 원전 등 산업시설 부지의 안정성 평가기술의 개발에 도움을 줄 것이다.

연안역에 적합한 방법으로 구성한 고해상 탄성과 탐사시스템은 현재 수요가 증가하고 있는 교량과 항만 등 연안역의 건설사업에 필수적인 기반구조의 탐사에 매우 효과적으로 적용될 것이다.

SUMMARY

I. Title:

Analysis of earthquake activity in the East Sea using the high-resolution seismic survey method

II. Necessity and Objectives of the Study

1. Necessity

● Technological aspects

- The maritime eastern Korean Peninsula hosts three nuclear power plant facilities at Wolsung, Gori, and Uljin. Its geology marks the most vigorous tectonism associated with the opening of the East Sea since the Cenozoic. There are a number of faults in this region subject to debate over whether they are active or not. Moreover, global earthquake tomography shows that this area is underlain by the hotter than normal mantle, suggesting the possibility of considerable tectonic activity to occur.
- Distribution of stress and deformation within the crust is primarily controlled by faults. Therefore, the correct understanding of crustal deformation necessitates the need to investigate how the faults propagate, grow, and react to each other. Any investigation for this purpose cannot be performed without the marine seismic survey technology that provides the detailed structure of the subsurface and the geometry of the faults. Information on the distribution of faults and their characters could be used to estimate the characteristics of geology and earthquakes of the southeastern margin of Korea.

● Economic and industrial aspects

- Under the circumstances that public attention is now being directed to the importance of the environment with economic development, and the regulations on the emission of atmospheric carbon dioxide caused by burning of fossil fuels are expected to be set

into motion, the use of atomic energy as a clean energy source will be increased. Therefore, the evaluation of the safety of nuclear power plant sites in relation to earthquakes will contribute to the improvement of the reliability of those facilities and consequently promote the growth of industry.

- Considering that more than 40% of electricity is produced by atomic power in Korea, the safety of atomic industry should be assured by the government. In this respect, evaluation and confirmation of the safety of the sites of nuclear power plants and waste storage are very important.

● Social and cultural aspects

- Although Korea is known to be a seismically safe zone unlike neighbouring Japan, academic circles brought into debate the activity of the Yangsan fault system. As a result, a public concern has been raised as to the safety of the sites of nuclear power plants of Wolsung, Gori, and Uljin and other industrial complexes in the vicinity. Taiwan, Turkey, the U.S., and Japan recently experienced significant damage from earthquakes. Because earthquakes of middle intensity are reported more frequently than before in Korea, public anxiety for earthquakes has grown. The press, agencies involved, and the academic circle expressed concerns and sensitive reactions, however, any scientific result has yet to be presented. It would thus be the most fundamental and essential research to analyze the earthquake characteristics and evaluate activity of faults in the eastern and southeastern Korean Peninsula where nuclear power facilities are densely located

2. Objectives

The objectives of this study are:

- Evaluation of distribution and characteristics of faults associated with neotectonism in the nearshore of the East Sea.
- Interpretation of fault distribution addressed by tectonic evolution of the eastern Korean margin.

III. General Scope of the Study

- High-resolution multichannel seismic survey in the inshore area off Uljin
- Interpretation of stratigraphy, distribution and properties of faults
- Analysis core sediments

IV. Results of the Study

1. High-resolution seismic survey offshore of Uljin

We acquired and interpreted more than 650 km of high-resolution seismic reflection profiles in the Hupo Basin, offshore east coast of Korea at 37 °N in the East Sea (Japan Sea) to image shallow and basement deformation. The seismic profiles reveal that the main depocenter of the Hupo Basin in the study area is bounded by the large offset Hupo Fault on the east and an antithetic fault on the west; however, the antithetic fault is much smaller both in horizontal extension and in vertical displacement than the Hupo Fault. Sediment infill in the Hupo Basin consists of syn-rift (late Oligocene – early Miocene) and post-rift (middle Miocene – Holocene) units. The Hupo Fault and other faults newly defined in the Hupo Basin strike dominantly north and show a sense of normal displacement. Considering that the East Sea has been subjected to compression since the middle Miocene, we interpret that these normal faults were created during continental rifting in late Oligocene to early Miocene times. We suggest that the current ENE direction of maximum principal compressive stress observed in and around the Korean peninsula associated with the motion of the Amurian Plate induces the faults in the Hupo Basin to have reverse and right-lateral, strike-slip motion, when reactivated. A recent earthquake positioned on the Hupo Fault indicates that in the study area and possibly further in the eastern Korean margin, earthquakes would occur on the faults created during continental rifting in the Tertiary.

V. Suggestions for Applications

The eastern coast of Korea hosts close-set nuclear power plant facilities that draw escalating concerns about active faulting with the increasing frequency of earthquakes. Although distribution and characteristics of active faults have been investigated so far on land, little has been obtained except the estimation of the loci of Quaternary faults. In this study we performed a high-resolution multichannel seismic survey in the inshore of the Uljin nuclear power plant that is part of inner Hupo Basin created at the early tectonic stage of the opening of the East Sea. We mapped faults and analyzed their characteristics and activity. The results of this survey can be directly utilized in the development of a neotectonic model of the eastern Korean Peninsula and its vicinity that explains and predicts crustal deformation. In addition, they will help develop the earthquake hazard evaluation technique for the sites of industrial facilities including the nuclear power plants in a manner well suited for geology and earthquakes peculiar to the Korean peninsula.

In Korea demands for coastal construction such as bridges and harbours are increasing. The high-resolution seismic survey system will be effectively used as a prerequisite means of mapping the basement structure for these construction works.

CONTENTS

Summary	4
Contents	10
List of Figures	15
Chapter 1. Outline of study	16
Chapter 2. Status of technological development domestic and overseas	19
1. New Zealand	
2. Canada	
3. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)	
Chapter 3. Content and results of the study	22
1. Introduction	
2. Tectonic environment	
3. Acquisition and processing of data	
4. Interpretation and discussion	
4-1. Basement deformation associated with rifting	
4-2. Seafloor deformation	
5. Discussion and conclusions	
Chapter 4. Objective achievement and external contribution	41
1. Objective achievement	
2. External contribution	
Chapter 5. Plans for application	42
1. Application to science and technology	
Chapter 6. Overseas research information	43
1. Application to science and technology	

Chapter 7. References 45

Appendix. Sparker seismic profiles

목 차

요약문	4
목차	10
그림 및 표목차	15
제 1 장 연구개발과제의 개요	16
제 2 장 국내외 기술개발 현황	19
1. 뉴질랜드	
2. 캐나다	
3. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)	
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	22
1. 서론	
2. 지구조 환경	
3. 연구자료 획득	
4. 해석과 토의	
4-1. 리프팅과 관련된 기반암의 변형	
4-2. 해저면 변형	
5. 토의 및 결론	
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	41
1. 목표 달성도	
2. 대외 기여도	
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	42
1. 과학기술 분야 및 산업계의 활용성	
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보	43
제 7 장 참고문헌	45

부록 1. 탄성과 중합단면

그림 및 표목차

List of Figures

- Fig. 1-1. Distribution of earthquakes in the East Sea and the adjacent Korean Peninsula. The grey area represents the rifted continental crust (Kim et al., 2007).
- Fig. 2-1. Interpretation map of the Whakatane Graben showing the major active faults and the positions of the multichannel seismic and 3.5 KHz profiles.
- Fig. 3-1. (a) Physiography of the East Sea (Japan Sea). KP = Korea Plateau and UB = Ulleung Basin. (b) Shaded bathymetry of the eastern margin of Korea from swath bathymetry data. The Hupo Basin and the Hupo Bank are outlined. HP = Hupo Basin and HB = Hupo Bank.
- Fig. 3-2. Locations of seismic profiles. Heavy lines indicate seismic profiles shown in this study with respective figure numbers in boxes. Black dots represent the locations of sediment sampling using a piston corer.
- Fig. 3-3. (a) Sparker seismic profile U10-01. (b) Sparker seismic profile U08-22.
- Fig. 3-4. (a) Sparker seismic profile U08-12 and (b) its interpretive line drawings.
- Fig. 3-5. Geologic map showing N-, NNE-, and NNW-trending faults discussed in the text. The dashed part of Fault F1 is from Kim et al. (2007).
- Fig. 3-6. (a) Sparker seismic profile U10-18 and (b) its interpretive line drawings.
- Fig. 3-7. (a) Sparker seismic profile U10-05. (b) Chirp sonar profile U10-05. "A" denotes the unconformity discussed in the text.

제 1 장 연구개발과제의 개요

한반도는 이웃하는 일본과 대만과 달리 지진학적으로 안정된 지역으로 간주되고 있다. 하지만 최근에 한반도의 동부와 인근 해역에서 자주 발생하는 지진 때문에 이러한 생각에 대한 검토가 있어야 한다는 의견이 대두되고 있다. 한반도의 남동연안은 인구가 밀집할 뿐만 아니라 중요 산업시설과 원자력 발전소가 위치하고 있으므로 지진과 관련한 재해의 특성을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 어느 지역의 지진재해의 특성을 규명하기 위한 중요한 한 가지 요소는 부근에서 지진을 발생시킬 수 있는 지하구조를 확인하고 설명하는 것이다 (Williams et al., 2001). 특히 단층은 상부지각내에서 변형율(strain)을 배치하는 역할을 하므로 단층시스템 내에서 단층들이 어떻게 전파하고 자라고 상호작용을 하는지를 파악하는 것은 매우 중요하다 (Lamarche, 2000). 단층들의 공간적인 분포를 구명하고 활동성을 평가하고 연결작용을 파악하고 성장률을 추정하는 것은 지진재해의 평가에서 매우 중요한 부분이다.

동해에서 관측되는 지진은 특히 연안에서 많이 발생하고 있다 (Fig. 1-1). 이들 지진은 지구조적 힘에 의해 발생하므로 동해의 지구조적 환경을 이해하는 것이 중요하다. 동해의 경우 지진의 대부분은 한반도의 대륙주변부에서 대륙지각내에서 발생하는 것으로 보이며 특히 대륙지각과 해양지각의 경계부를 따라서 어느 정도 집중되는 것으로 해석된다. 동해 연안의 지체구조는 지질학적으로 가장 최근에 발생한 거대한 지구조 운동인 동해의 형성과 관련하여 형성된 것이다. 따라서 동해연안에서 발생하는 지진의 특성을 연구하기 위해서는 동해형성에 따른 단층과 지구조적 경계를 파악하고 그 발달과정을 해석하는 것이 중요하다.

지진위험성의 평가에 있어 두 가지 주된 단계는 (1) 주어진 지역내에서 모든 활성단층을 찾고 (2) 각 단층에서 주어진 규모의 지진이 일어날 가능성을 결정하는 것이다. 이러한 정보에 광역적인 지진의 감쇠특성과 지역적인 증폭특성을 보충한 후 확률론적인 지진재해도(probabilistic hazard map)을 만든다. 이 재해도는 주어진 기간내에 어느 수준 이상의 강진동이 발생할 확률을 보여 주며 건물이나 다른 구조들의 수명동안 일어날 가능성이 있는 지질의 영향을 견디도록 구조물을 설계하는 데에 이용된다.

1970년대 말부터 한반도의 동해 해안 지역에 원전이 건설되기 시작하였으며 원전부지의 안정성을 정량적으로 파악하기 위해 한반도의 지각변형과 지진활동에 대한 해석이 요구되고 있다. 이와 관련하여 지금까지 항공사진 및 인공위성사진 판독을 통한 지질구조선의 해석, 육상 지표조사 및 트렌치 조사를 이용한 단층활동 해석, 그리고 육상물리 탐사를 이용한 단층의 존재와 특성파악 등이 수행되어 왔다. 인공위성자료를 이용하는 원격탐사는 광역적인 지질구조를

보여줄 수는 있어도 지질구조를 형성한 지각운동 및 각 지질구조의 활동성을 보여주지는 못한다. 육상은 침식환경이며 특히 우리나라에서와 같이 경작과 건설처럼 사람에 의해 지표가 보존되지 못하는 상황에서 지표조사의 성과도 의문시된다.

상대적으로 해양은 퇴적구조가 그대로 보존되는 지역이므로 현생단층이 존재할 경우 탄성과 탐사에 의해 그 모양을 명확히 얻을 수 있다. 더욱이 주요 산업 시설물이 연안에 위치하는 점을 감안하면 연안지역의 지진 안정성을 파악하는 데에는 해양조사가 육상조사보다 훨씬 유리하다. 하지만 연안지역은 수심이 얇고 육지가 가까이 위치하며 양식장 등의 장애물이 많으므로 대형 조사선을 이용하는 다중채널 탄성과 탐사가 곤란하다. 또한 음원으로서는 에어 건을 사용할 경우 음파의 주파수가 대개 100 Hz 미만이므로 두께가 얇지만 층서를 명백히 파악해야 하는 현생퇴적층의 구조를 보여주는 고해상 자료를 얻기가 힘들다. 음원으로서는 스파커를 사용할 경우 1 KHz까지의 높은 주파수를 갖는 파를 발생시키므로 에어 건을 사용하였을 때보다 훨씬 해상도가 높은 자료를 얻을 수 있다.

이 연구에서는 먼저 동해 연안의 신기 지각변형의 이해를 돕기 위해 한반도의 동해 대륙주변부에서 얻은 다중채널 탄성과 프로파일을 중심으로 해석하여 동해의 열림과정에서 일어난 대륙 지각의 리프팅, 분리, 해저면 확장에 따른 울릉분지의 형성, 그리고 이와 관련된 단층의 형성과정을 검토하였다. 다음에 울진 연안에서 스파커를 음원으로 이용하는 12채널 고해상 다중채널 탄성과 탐사를 수행하여 단층의 분포와 특성을 파악하여 신기 지각 변형을 해석하고자 하였다.

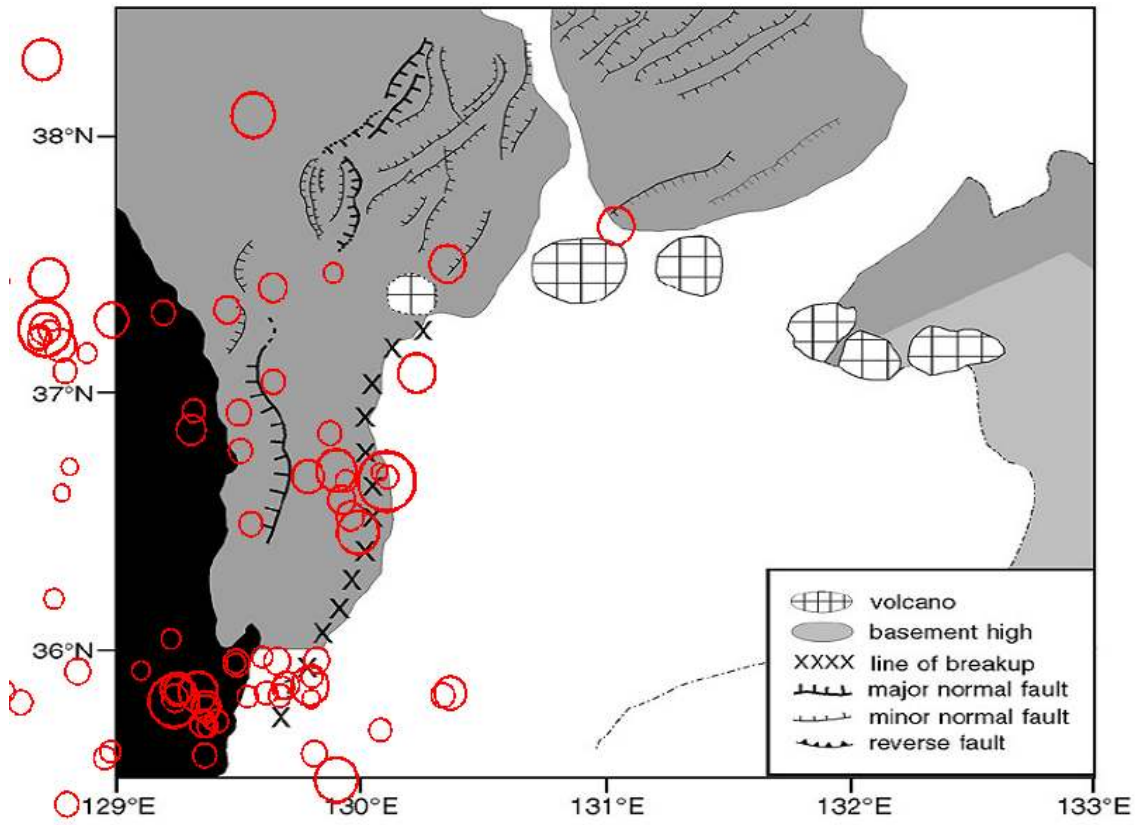


Fig. 1-1. Distribution of earthquakes in the East Sea and the adjacent Korean Peninsula. The grey area represents the rifted continental crust (Kim et al., 2007).

제 2 장 국내외 기술개발 현황

많은 나라에서 연안에서 지진위험성을 파악하기 위해 탄성파탐사를 중심으로 연구를 수행하고 있다. 특히 선진국의 경우 연안과 대륙붕, 대륙사면 그리고 심해분지를 포함하는 대륙주변부의 구조와 진화에 관한 연구를 체계적으로 수행하고 있다. 미국과 유럽은 미국과학재단(NSF)이 지원하고 여러나라가 참여하는 프로그램으로서 수행되는 MARGINS가 대표적인데 대륙주변부의 형성과 진화에 대한 연구뿐만 아니라 물질교환과 기후 등 여기에서 발생하는 복잡한 상호작용까지를 다룬다. 즉, 대륙주변부를 단순히 발산형 내지는 수렴형으로 정의하는 지질학적 연구대상으로 보지 않고 여러 가지 영향에 종속되는 복잡한 물리적, 화학적, 그리고 생물학적 시스템으로 다루어 지각의 변형, 화산 작용, 물질이동, 퇴적작용, 그리고 유체운동과 같은 과정들을 연구한다. MARGINS에 관한 정보는 web site인 <http://www.ldeo.columbia.edu/margins/Home.html>에서 얻을 수 있다.

1. 뉴질랜드

태평양판과 호주판이 만나는 경계지역내에 위치하므로 지진활동이 심하고 활성단층활동이 발생하며 침강이 급격히 일어나는 Whakatane 지구대의 탄성과 탐사를 NIWA (National Institute of Water and Atmosphere)가 1999년 이후 수행하고 있다 (Lamarche et al., 2000). Whakatane 지구대는 섭입대와 관련된 후열도 확장의 결과로서 형성된 것이며 확장에 수반되는 지각신장에 의해 계속 변형을 받고 있다. 1987년 Wakatane 지구대가 육상으로 연장된 곳에서 진도 6.3의 지진이 발생하여 육상시설들에 손상을 입힌 바 있다. 따라서 Whatakane 지구대의 바닷쪽 내에서 수행되는 이 조사의 목적은 다음의 의문에 대한 답을 구하기 위해서이다: (a) 단층들이 어떻게 상호작용을 하고 연결되어 단층계 (fault system)를 형성하는가? (b) 단층의 전파와 연결이 시간에 따라 어떻게 변하는가? (c) 단층이 어떻게 어떤 비율로 성장하는가?

이 조사에서는 다중채널 탄성과 단면과 고해상 (3.5 KHz) 천부 퇴적단면, 그리고 시추퇴적물 자료를 종합하여 각각의 정단층과 전체 지구대를 통해 단층의 변위와 확장율을 정량적으로 측정하였다. 그 결과 해저면의 천부구조에서 나타나는 단층활동이 기반구조의 변형과 어떻게 연관되어 있는 가를, 그리고 활성 단층이 어떻게 전파하고 어느 시기에 활

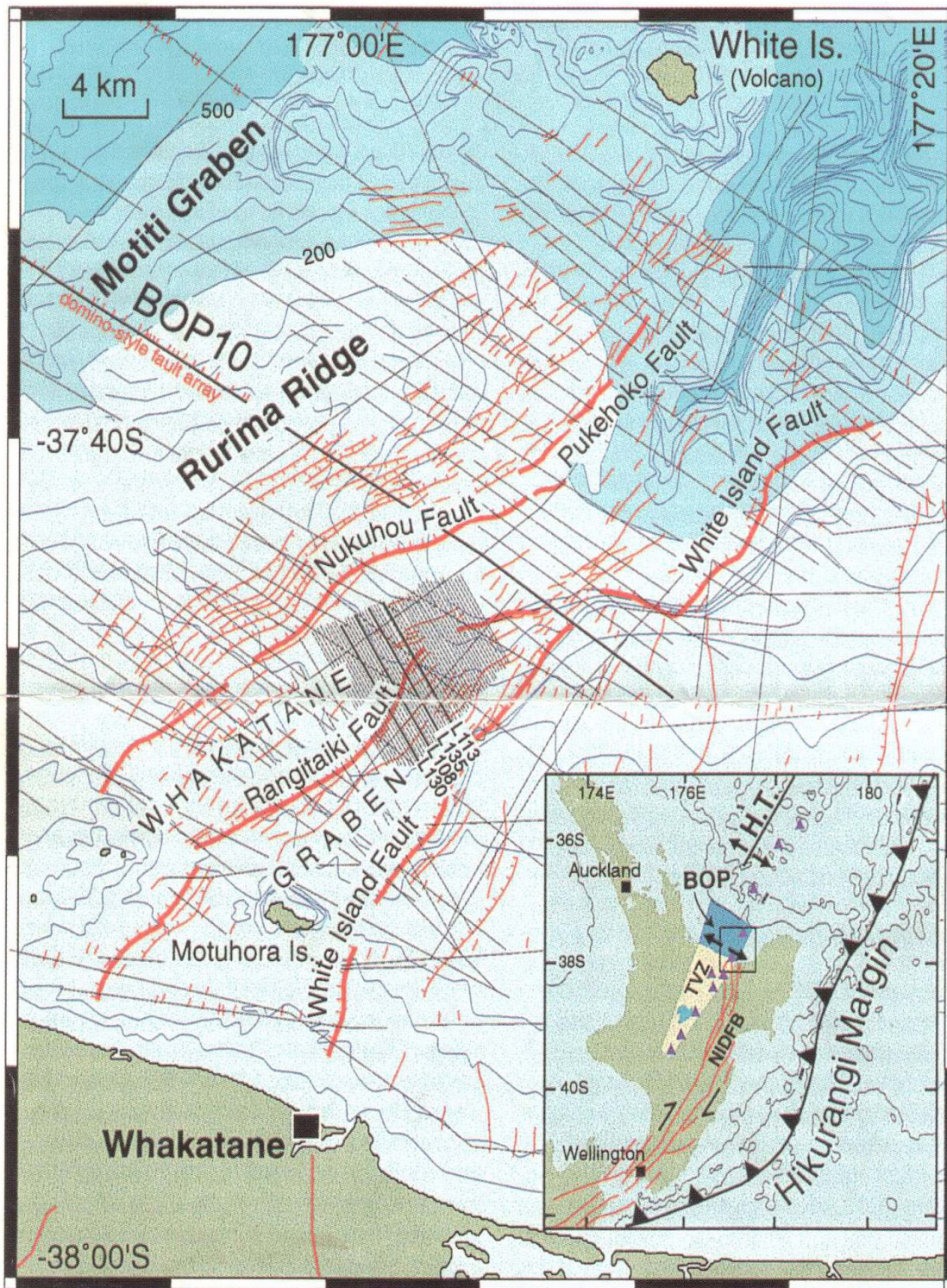


Fig. 2-1. Interpretation map of the Whakatane Graben showing the major active faults and the positions of the multichannel seismic and 3.5 KHz profiles.

동하기 시작했는지를 보여 주는 데에 중점을 두고 있다 (Fig. 2-1).

2. 캐나다

British Columbia의 서남부와 미국의 북서부는 역사적으로 많은 수의 크고 파괴적인 지진이 빈번하게 발생하는 지역이다. 이 곳에서 지진 위험도를 이해하기 위해 미국과 캐나다의 연구소와 대학들이 공동으로 SHIPS (Seismic Hazard Investigations in Puget Sound)라는 연구프로그램을 만들어서 연구하고 있다. 이 프로그램의 목적은 단채널 및 다중채널 탄성과 탐사자료로부터 고해상도 지질정보를 얻는 것으로 주된 관심사는 1997년 6월 24일 Vancouver의 30 km 서쪽인 Strait of Georgia의 아래에서 발생한 진도 4.6 지진의 진앙지역이다. 현재까지의 결과로서 다음 사실이 확인되었다: (a) 이 지역에서 변형대가 확인되었으며 확인된 단층들은 많은 수의 천부 지진위치와 잘 일치하고 있다 (b) 1997년 6월 24일 지진은 북쪽으로 약 50° 경사지고 동쪽으로 기울어진 단층면상에서 발생한 천부 (2-4 km) reverse thrust와 관련된다.

3. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)

UN은 자연재해가 인간의 목숨과 개발에 대한 주된 위험요소로 인식하여 1990-1999의 기간을 International Decade for Natural Disaster Reduction으로 설정하였다. 이 기간동안 GSHAP을 실행하여 지진의 발생과 관련된 위험을 경감시키기 위해 지진 위험성 산정을 전세계적으로 수행하였다. 이 과정에서 다음과 같은 네 가지의 연구과제를 선정하였다:

- 1) 지진의 분류와 데이터베이스 - 역사지진(선사시대-1900), 초기의 계기지진 기간(1900-1964), 그리고 현대적인 계기로 관측된 기간(1964-현재) 동안 지진활동을 분류하고 데이터베이스화함.
- 2) 지진원의 특성과약 - 분류된 지진, 지진지체구조학, 고지진학, 지형학, 활성단층의 mapping, 지각변형의 측지적 추정, 원격탐사와 지구동역학적 모델을 이용하여 지진의 공간적-시간적 분포를 설명하기 위한 지진원 모델의 확립.
- 3) 강진동 - 서로 다른 지체구조 및 구조적 환경에서 전파효과를 고려하고 지진에 의해 야기된 파손을 직접 측정하여 지진의 크기와 거리의 함수로서 진동을 계산.
- 4) 지진 위험성의 계산 - 주어진 기간내에 지진동(ground shaking)의 발생확률을 계산하여 seismic hazard map을 작성.

GSHAP과 관련된 자료는 <http://seismo.ethz.ch/GSHAP/>에서 얻을 수 있다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 서론

한반도의 연안역에는 많은 사람들이 살고 있으며 원자력발전소와 같은 중요 산업시설들이 분포하고 있다. 37°N를 중심으로 한반도의 동쪽 연안에는 원자력발전소가 있는 울진시가 위치한다. 울진의 연안에서 최근 발생하는 지진은 대부분 진도가 4를 넘지 않으나 자주 발생하는 특성 때문에 지진재해를 정확히 구명할 필요가 있다. 지진위험을 분석하는 중요 사항은 단층들의 공간적 분포를 확인하는 것, 이들의 활동성을 정량화하는 것, 그리고 상호간의 연결작용을 구명하는 것 등이다(Lamarche, 2000). 한반도의 동쪽 대륙주변부는 후열도해의 열림과 관련하여 격렬한 신생대 지구조활동이 발생한 지역이다(Kim et al., 2007). 따라서, 지구조활동과 관련된 구조와 현재의 지진활동 사이의 관계가 명확히 구명되는 것이 중요하다.

신기 지체구조학(neotectonics)은 최근에 일어나서 현재까지 지속되고 있는 지각의 운동을 연구하는 것이다 (Keller and Pinter, 1996). 이러한 운동은 지구적인 규모의 지각 판의 움직임에 의해 직간접적으로 유도되며 지표면에 수직,수평방향의 비틀림 혹은 단층운동을 야기시킨다. 대개의 경우 지판의 움직임은 지각에 느리면서 점진적인 변형을 일으키는데 이것의 효과는 수십 년간 정밀하게 공중이나 지상에서 관측함으로써 찾을 수 있다. 하지만 지진과 화산분출처럼 이러한 움직임이 갑자기 일어나는 지역에서는 눈으로도 직접 관찰할 수 있다

근대식 장비가 갖추어지기 전 최근의 지체구조운동에 대해 인간이 기록한 것은, 비록 이러한 기록의 지속기간과 신뢰성이 비록 지역에 따라 매우 변하지만, 역사 및 고고학적 기록을 통해 찾을 수 있다. 하지만 점진적이고 순간적인 지구조 운동은 지표의 형상과 퇴적기록으로부터 인간의 기록이전까지 재구성되어야 한다. 과거 지구조 운동의 이러한 증거가 수백만 년을 거슬러 올라가지만 이들이 보여주는 역사는 일반적으로 부정확하며 모호하고 주관적이다. 그럼에도 불구하고 어느 특정지역에 대해 시간과 공간적인 신기 지체구조적 운동의 특성을 완전히 이해하기 위해서는 지형적 분석에 지진학적 분석을 결합하여야 한다. 그러므로 신기 지체구조학은 여러 분야가 참여하는 연구과제이다.

신기 지체구조학은 현재까지 지속되는 지각의 운동을 다루므로 그 주된 연구대상은 활성단층이다. 활성단층(active fault)을 비활성(inactive) 혹은 죽은(dead) 단층과 구분하는 것은 신기 지구조연구에서 가장 어려운 문제 중 하나이다. 1950년대 이전에는 대부분의 사람들이 비활성 단층과 달리 활동할 위험이 있으며 지진과 관련되는 활성단층을 따로 구분하지 않았으나 지금은 이러한 구분이 필수적이다.

현재까지의 연구결과 활성단층을 정의하는 기준이 여러 가지가 있으나 대부분의 기준은 제한적인 활용성을 가진다. 일반적으로는 지질학적, 역사적 (고고학적인 것을 포함), 그리고 지진학적 관점을 따르는 기준을 사용한다. 지질학적인 기준은 주로 연대가 오래되지 않은 다음과 같은 지형적 특징이다: 젊은 단층면, 지구조적 단구, Plio-Quaternary 퇴적층내의 층서적 변위 등. 하지만 지질학적 기준을 따라 활성단층을 정의하는 것은 단지 “최근의 지질시기동안 가장 활성이었던 단층이 앞으로 활동할 가능성이 있다”는 사실만 지시할 뿐이다. 역사적 기준으로서 는 과거 지진에 대한 기록 및 문헌에 나오는 유사한 현상을 들 수 있다. 지진학적 기준은 정확성이 높은 계기로 결정되는 강진동과 미세지진 그리고 지진군집(earthquake swarms)으로서 활성단층 운동과 관련시킬 수 있다.

위에서 언급한 기준을 이용하여 단층은 다음과 같은 세 가지의 유형으로 나뉘어 진다: (1) 활성단층 (2) 잠재적 활성단층 (potentially active fault) (3) 비활성 단층. 비록 활성단층이라는 용어가 널리 채택되고 있으나 이것에 대한 정의는 세계적으로 통일되지 못하고 있다. 그 결과 지질학적, 공학적, 그리고 규제차원에서 법적인 어려움이 야기된다. 단층의 활성을 정하기 위해 통상 사용되는 정의는 미국의 NRC (U.S. Nuclear Regulatory Commission) 와 IAEA (International Atomic Energy Commission)을 따르는데 특정한 단층작용의 발생빈도를 기준으로 삼는다. 따라서 많은 학자들과 연구기관들이 10,000 년 동안, 혹은 35,000 년 동안, 혹은 100,000 년 동안, 혹은 150,000 년 동안 움직인 적이 있었는 지 혹은 500,000 만년 동안 두 번 이상 움직인 적이 있었는 지와 같이 가장 최근의 변위가 일어난 시간을 기준으로 활성 단층을 정의한다. 경우에 따라서는 홀로세 동안 혹은 제4기 전체 동안 그리고 Plio-Quaternary 동안 움직인 것을 활성으로 정의한다. 반면에 일본에서는 시간의 단위로 나타나는 변위량, 단층을 따른 creep, 그리고 예상되는 운동에 따라 활성단층을 평가한다. 중국에서는 활성단층을 세 가지로 분류하는데 첫 번째가 제4기 이후 (혹은 최소한 후기 Pliocene 이후), 두 번째가 후기 Tertiary 이후, 그리고 세 번째가 신생대(Cenozoic) 이후 움직인 단층이다. 단층활동을 더욱 명확한 정의하기 위해 고지진학적 연구에서는 10,000 년을 기준으로 할 수도 있는데 이 경우는 홀로세 이후에 해당하며 이에 관계된 단층은 "new active fault"로 부른다 (Ding et al. 1985). 지질환경에 따라 활성단층의 정의도 달라질 수 있으므로 지질학적인 의미와 지진공학적 의미에서 “활성”을 고려하는 것이 필요하다. 하지만 신기 지체구조 연구의 최근 자료와 이를 근거로 얻은 개념들로부터 “활성 지역”과 “안정 지역”을 쉽게 구분할 수 없음을 알 수 있다. 활성인 것처럼 보이는 모든 지역 역시 그 활성의 정도는 서로 다르다. 따라서 변형율이 높은 지, 중간 수준인 지, 혹은 낮은 지를 기초로 서로 다른 지질환경을 구분할 수 있다.

신기 단층의 모양에 대한 최근의 연구는 지진이 발생한 지표면에 대한 자세한 조사와 마찬가지로 지층의 파열은 자주 복잡한 단층구조와 관련됨을 지시한다 (Slemmons & DePolo

1986). 이렇게 복잡한 단층구조(steps, oversteps, flower structures, duplexes, imbricate fan 등)는 전형적으로 strike-slip 단층지역에서 나타나지만 서로 다른 단층지역이 결합할 경우 모든 종류의 단층(normal, reverse 그리고 oblique-slip 단층 지역)을 따라 나타날 수도 있다. 어느 지역에서 신기 지체구조와 관련된 응력과 변형율의 상태를 결정하는 것은 지진을 발생시키는 구조뿐만 아니라 단층의 기하학적 모양을 정의하는 데에 있어서 그리고 암권의 동적인 진화를 이해하는 데에 매우 중요하다. 비교적 짧은 시간 간격내에서 발생하는 신기 지체구조와 관련된 변형을 측정하여 분석함으로써 물리적인 변형과 응력간의 관계를 더 잘 이해할 수 있다.

단층계를 구분화하기 위해서는 연결성, 특성, 그리고 방향에 따라 각각의 단층구역을 정의하여야 한다; 이 경우 어느 구역이 하나의 단위로서 파악됨을 지시한다. 각각의 단층구역은 확인할 수 있는 불연속성에 의해 인접하는 구역과는 다른 특성을 갖는다. 불연속성은 기하학적이거나 불균질성으로 나타난다. 기하학적 불연속성은 분기된 단층, 교차단층에 의한 절단, 각각의 단층지역 특성 등을 들 수 있으며 불균질한 불연속성은 단층폭의 변화, 지역적인 응력상태, 그리고 변위율 등을 들 수 있다 (Slemmons & DePolo, 1986). 이들 모두는 신기 지체구조학에서 최근에 연구되는 과제들이다. 또한, 신기 지체구조 운동은 엄격히 말해 현재의 지형적 배치 및 발달과 관련되며 이 이유 때문에 지형구조와 함께 조사된다.

이 연구에서는 울진 연안에서 지질구조를 구하기 위해 고해상 탄성파탐사자료를 획득하였다. 이 연구의 주된 목표는, 지진재해를 분석하기 위해 천부와 기반암의 단층과 관련된 지구조적 변형을 찾고 그 특성을 구명하는 것이다.

2. 지구조 환경

한반도는 유라시아판의 동쪽경계부에 위치하며 그 동쪽과 남동쪽으로는 태평양판과 필리핀판이 일본열도 아래로 섭입한다(Fig. 3-1a). 한반도는 캄브리아전부터 신생대까지 형성된 다양한 지질로 구성되어 있다. 에오세 말기부터 동아시아는 광역적인 신장운동을 겪었으며 마이오세 때 절정에 달해 후열도해로서 동해가 열리게 되었다(Ree et al., 2003). 따라서 한반도의 동쪽 대륙주변부는 동해의 열림과 관련하여 대륙지각의 리프팅부터 해저면 확장까지 격렬한 신생대의 지구조 운동이 발생한 지역이다(Kim et al., 2007).

한반도의 동쪽 대륙주변부는 복잡한 지형특성을 보여 준다. 북쪽 지역에서 해저면은 거친 지형의 한국대지로 이루어져 있다. 한국대지는 동해의 열림과정에서 현재의 위치로 이동한 리프트된 대륙지각의 조각으로 해석된다. 반면에 남쪽 지역은 전형적인 비활성 대륙주변부에서 볼 수 있듯이, 안쪽 리프트(후포분지), 융기된 리프트 측면부(후포뱅크), 그리고 해양분지(울릉

분지)가 바다쪽으로 연속해서 나타난다(Fig. 3-1b). 후포분지는 해안에서 바다쪽으로 경사져 있으며 동서방향으로 15-20 km의 폭을 가지며 남북방향으로 길게 발달한 좁은 트러프(trough)이다. 변위가 큰 정단층인 후포단층이 후포분지의 동쪽 경계를 이룬다. 후포분지의 침강은 대부분 경계단층을 따라서만 발생하였으므로 후포분지의 지형은 비대칭적인 반지구의 모양을 보인다. 후포분지의 기반암은 한반도의 가까운지역을 따라 노출된 캄브리아전기 편마암과 고생대의 퇴적암, 그리고 주라기에서 백악기까지 관입한 화강암으로 구성되는 결정질 혹은 고화된 암석 복합체가 연장되었을 것으로 해석한다(Yoon and Chough, 1995). 후포분지는 동해의 해저면 확장 이전에 올리고세 말기부터 진행된 대륙지각의 리프팅에 의해 형성되었다(Kim et al., 2007). 후포뱅크는 물에 잠긴 리지(ridge)로서 길이가 약 100 km이고 폭은 1-14 km로 변한다. 후포뱅크는 안쪽으로 후포분지를 감싸는 융기된 리프트 측면부로 보이며 그 바깥쪽 사면은 울릉분지로 급격히 낮아진다. 후포뱅크의 수심은 132-135 m인데 지난 최대빙하기때 해수면이 하강한 깊이에 해당한다. 따라서, 후포뱅크의 최상부는 이 시기동안 침식한계를 나타낸다.

3. 연구자료 획득

이 연구에 사용된 자료는 (1) 전체 390 km 길이의 고해상 다중채널 탄성과 반사 프로파일 (Profiles U08-01 to U08-24 in Fig. 3-2)과 (2) 전체 260 km의 고해상 단채널 탄성과 반사 프로파일 (Profiles U10-01, 10-05, and U10-08 to U10-19 in Fig. 3-2)이다. 다중채널 탄성과 탐사자료는 이 연구의 1단계 3차년도에서 획득한 것이며 단채널 탄성과 탐사자료는 이 연구의 2단계 2차년도인 당해 연도에 해당하는 2010년에 획득하였다.

다중채널 탐사시 전극이 세 개 달린 EG&G 스파커를 이용하여 4500 joule로 방전시켜 탄성파를 발생시켰다. EG&G 스파커에서 발생한 탄성파의 주파수 대역은 200-400 Hz이다. 수신기로는 그룹간격이 6.25 m인 12채널 스트리머를 사용하였다. 탄성파탐사시 조사선이 5 knot의 속도로 이동하였으며 4초마다 스파커를 터뜨렸으므로 다중채널 자료의 중합도는 3-4이다. 자료 처리는 통상적인 방법으로 중합까지 수행하였다.

단채널 자료를 얻기 위해, SIG 2mille 스파커시스템을 사용하였다. 이 때 발생하는 탄성파의 주된 주파수는 1 KHz이다. 스파커는 1000 joule의 에너지로써 2초마다 터뜨렸다. 단채널 자료는 필요할 경우 1500 m/s의 속도로써 Stolt 방법을 이용하여 구조보정하였다. 단채널 자료의 획득시, Chirp 소나 시스템과 EM 710 다중빔 음향측심기를 사용하여 천부음향탐사자료와 해저지형자료를 획득하였다. Chirp 소나 시스템은 2-7 KHz 대역의 음향펄스를 발생시키므로 천부의 해저지층구조에 대해 더 높은 해상도로 자료를 얻을 수 있다. 단채널 자료의 획득시, Chirp 소나 시스템과 EM 710 다중빔 음향측심기를 사용하여 천부음향탐사자료와 해저지형자

료를 획득하였다. Chirp 소나 시스템은 2-7 KHz 대역의 음향펄스를 발생시키므로 천부의 해저지층구조에 대해 더 높은 해상도로 자료를 얻을 수 있다.

당해 연도에 획득한 측선별 지질단면은 부록 1에 수록하였다.

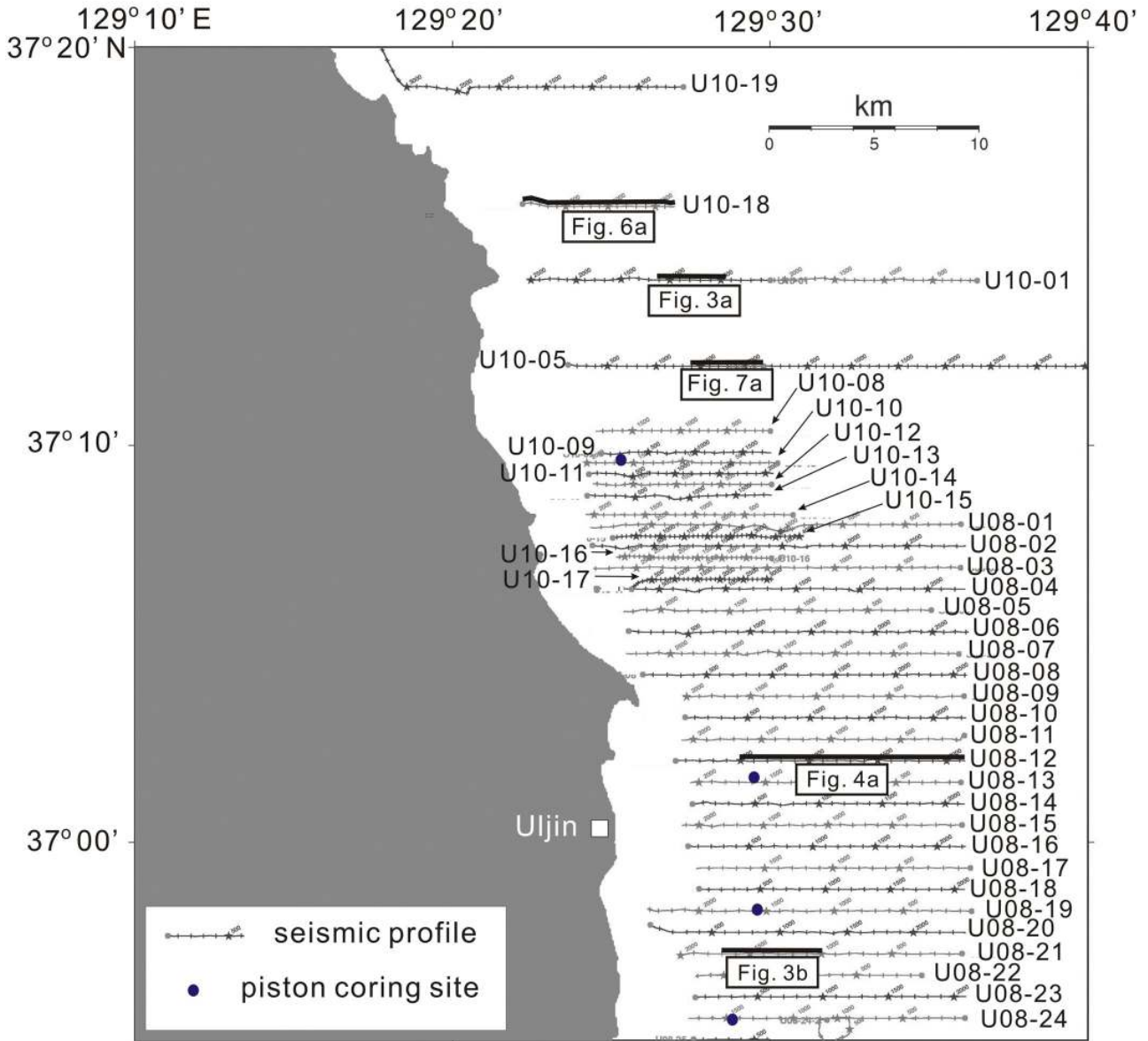


Fig. 3-2. Locations of seismic profiles. Heavy lines indicate seismic profiles shown in this study with respective figure numbers in boxes. Black dots represent the locations of sediment sampling using a piston corer.

4. 해석과 토의

4-1. 리프팅과 관련된 기반암의 변형

조사가 수행된 지역은 울진을 중심으로 하는 연안으로 후포분지에 해당한다. 후포분지는 마이오세 초기에 울릉분지가 열리기 전에 대륙지각에서 발생한 리프팅에 의해 형성된 남북방향으로 길게 발달한 리프트 분지로서 폭이 좁다. 따라서 후포분지의 기반암은 마이오세 초기보다 더 오래된 것으로 볼 수 있다.

탄성과 프로파일들은 퇴적층과 그 아래에 꽤 강한 진폭의 연결성이 좋은 부정합면의 반사 신호가 나타나는데 이 반사면을 음향기반으로 해석하였다. 음향기반 아래에서 보이는 반사 신호는 음향기반 아래로 최대 100 ms TWTT(two-way travel time)까지 나타난다. 일부 지역에서 음향기반은 층서구조가 잘 보이지 않거나 내부 반사신호가 드러나지 않는 불투명한 반사 신호의 특징을 보인다(Fig. 3-3a). 연안에 가까운 그 외의 지역에서 음향기반은 층서를 이루고 있다(Fig. 3-3b); 조사지역과 가까운 해안지역에서 노출된 암석에서 유추하듯이(Yoon and Chough, 1995) 이 음향기반은 고생대의 퇴적암으로 해석된다.

음향기반은 대체적으로 바다쪽으로 경사져 있으며 변위가 큰 후포단층(F1)을 따라 최대 깊이가 된다(Fig. 4). 후포단층은 후포분지내에서 최대변위가 1 s TWTT 이상되는 가장 큰 구조이다. Kim et al.(2007)은 F1이 올리고세 후기에서 마이오세 초기사이에 진행된 대륙지각의 리프팅 과정으로 생겼다고 해석했다. 그들은 또한 후포분지내 침강은 F1을 따라서만 발생했다고 제시하였다. 하지만, 이번 조사에서 새로 획득한 프로파일들은 F1과 반대되는 경사를 갖는 새로운 단층(F2)이 있음을 보여 준다(Figs. 3-4 and 3-5). 이 단층은 동쪽으로 매우 급하게 경사져 있으며 단층면에서 반사를 발생시키지 않는다. F2의 누적된 경사이동(dip-slip)은 최대 0.25 s TWTT로서 퇴적층의 탄성과 속도를 1500 m/s로 가정할 경우 약 180 m이다. F2는 F1에 대략 평행하며 F1의 대조단층(antithetic fault)으로 해석된다. F1과 F2는 후포분지의 주퇴적중심을 정의한다. 하지만 F2는 길이가 매우 제한적이며 F1에 비해 변위도 훨씬 작아 음향기반의 프로파일은 전체적으로 비대칭적인 반지구(half-graben)형태를 보인다. Klaus et al.(1992)은 Izu-Bonin 열도에서 발생하는 후열도 리프트에 대해 두 단계의 진화이론을 제시하였다. 이 이론에 따르면 첫째 단계에서 큰 변위를 갖는 단층대쪽으로 경사진 반지구가 형성되며 둘째 단계에서 상반이 침강하여 완전지구(full-graben)를 형성하며 리프트와 평행하게 화산관입과 분출이 발생하여 궁극적으로 해저면 확장이 시작될 수도 있다. 폭이 좁은 반지구 형태의 단면을 보이는 후포분지는 리프트분지의 진화에서 두 번째 단계로 진행되지 못했음을 지시한다. 즉, 대조단층을 따라 발생한 상반의 침강이 두 번째 단계가 시작할 때 멈추었다. 음향기반의 상부

에서 퇴적층은 바다쪽으로 두꺼워진다. 특히, 왼쪽의 F2와 오른쪽의 F1 사이에 형성된 퇴적중심에는 F1을 따라 최대 1 s TWTT에 달하는 두꺼운 퇴적물이 쌓여있다. Kim et al. (2007)은 이 두꺼운 퇴적층서를 오래된 순서로 H-1, H-2, 그리고 H-3으로 나누었다. 가장 하부의 퇴적단위 H-1은 전체적으로 썩기모양(즉, 발산형)으로 음향기반 위에 쌓여있는데 올리고세 후기부터 마이오세 초기에 진행된 리프트 시기 동안 형성된(syn-rift) 것으로 해석된다. 퇴적단위 H-2는 층서가 잘 발달된 평행한 반사신호로 구성되고 동쪽으로 경사지는 H-1에 윗걸침(onlap)하는데 마이오세 초기부터 중기까지의 리프트 후기(post-rift)를 나타낸다. H-3은 아래의 퇴적단위를 덮고 있으며 눈에 띄는 지구조운동이 없는 플라이오세 후기부터 현재까지의(Lee et al., 2001) 시기에 해당한다.

조사지역의 북서쪽으로 육지에 가까이 크기가 훨씬 작은 또 다른 리프트가 퇴적중심을 형성한다(Fig. 3-6). 음향기반과 퇴적구조는 위에서 설명한 후포분지의 주된 퇴적중심에서 관찰하는 것과 매우 비슷하다. 이 작은 리프트에서 음향기반은 동쪽으로 경사져서 비대칭적인 반지구를 이루며(Fig. 3-6) 경계단층(F3a와 F3b)이 음향기반의 하강 대부분을 수용하였으며 동쪽경계를 이룬다. 퇴적물은 이들 단층을 따라 최대 0.16 s TWTT까지 두꺼우며 H-1, H-2, 그리고 H-3의 세 층서단위로 이루어지는데 이들의 퇴적양상과 탄성과상(seismic facies)은 앞에서 설명한 F1에 의해 경계되는 것들과 유사하다. 따라서 이들은 각각 리프트와 동시(올리고세 말기에서 마이오세 초기), 리프트후기(초기 마이오세이후에서 마이오세 중기), 그리고 지구조적 운동이 없는(플라이오세 후기에서 현재) 시기에 해당한다. 리프트후기 단위인 H-2는 내부적으로 평행한 층서로 이루어져 있으며 그 최상부까지 F3b에 의해 잘려져 있다. 하지만, H-2의 층내 변위는 F3b를 따라 위로 갈수록 상당히 감소하고 층의 두께도 거의 변하지 않는다. 따라서, H2의 변위는 리프트 후기 단계에서 일시적이었다고 해석한다. H-3은 평탄하고 평행하며 상당히 약한 반사신호로 이루어져 있다. 이러한 특성은 H-3이 저에너지의 대륙붕환경에서 균질한 세립질 퇴적물(silt와 mud)로 구성되어 있음을 제시한다.

이들 두개의 퇴적중심을 제외하면 퇴적물은 얇게 쌓여 있거나 육지쪽으로 침멸(pinch out)한다.

4-2. 해저면 변형

스파커 프로파일들에서 해저면상에 가장 눈에 띄는 변형은 R1과 R2인 한 쌍의 기복(relief)이다(Fig. 3-7a); 프로파일 U10-05에서 R1은 발파점 1650부근 그리고 R2는 발파점 2160부근에서 나타난다. R1의 경우 해저면의 수직변위는 약 2.3 m이다. R1 부근 발파점 1600의 왼쪽에서 보이는 음향기반은 서쪽으로 급하게 경사진 내부반사신호를 보이는데 퇴적암으로 구성

되어 있음을 지시할 수 있다. R1을 경계로 동쪽의 음향기반에서는 내부반사면이 보이지 않는다. 이러한 음향기반의 변화가 암석의 유형이 달라져서 발생하는 것인지 혹은 동일한 유형의 음향기반이 R1의 서쪽에서 상당한 변형을 받았기 때문인지는 불분명하다. R2에서 수직변형은 1 m 미만이다. R2의 왼쪽 침강한 부분에서 R2를 따라 깊어지면서 퇴적층의 두께가 증가하는데 이것은 R2의 정단층작용이 퇴적시기동안 발생하였음을 제시할 수 있다. 탄성파단면 U10-05와 U10-09를 대비해보면 R1의 방향이 NNE(Fig. 3-5)이다; R2는 프로파일 U10-08 남쪽에서 잘 나타나지 않으므로 그 방향이 불확실하다. R1은 그 형태가 R2와 비슷하므로 정단층으로 해석되며 R1과 R2는 서쪽의 상반이 침강한 변위를 가지며 급한 경사를 이루는 것으로 보인다.

Chirp 소나 프로파일들은 고해상의 천부구조를 보여 준다. 이들 프로파일에서 매우 뚜렷한 부정합면(Fig. 3-7b의 A)을 볼 수 있다. 이 부정합면은 투명한 음향특성을 갖는 상부층과 혼탁한 음향특성을 갖는 하부층을 나눈다. 부정합면은 아마도 빙하기 이후 해수면이 상승하기 이전에 기반암 혹은 잔류퇴적물이 대기에 노출되었기 때문에 형성되었을 것이다. 상부의 투명한 퇴적층에서 채취한 퇴적물시료를 분석한 것은 퇴적물이 피스톤코아에 의해 쉽게 투과되는 silt와 mud로 이루어져 있음을 보여 준다. 그러므로 이 투명한 음향특성을 보이는 상부층은 홀로세기 원으로 추정된다. 홀로세 퇴적물은 R1의 침강된 왼쪽에만 쌓여 있다. 융기한 오른쪽에 홀로세 퇴적물이 보이지 않는 것은 단층활동이 홀로세 퇴적물의 형성 이전에 발생하였으며 하반이 홀로세 퇴적물이 바다쪽으로 이동하지 못하도록 막은 댐과 같은 작용을 하였음을 지시한다.

연구지역에서 chirp 소나 프로파일들은 홀로세 퇴적물내에 변위나 변형이 존재하지 않음을 보여준다. 따라서, 홀로세 동안 R1과 R2의 운동과 관련하여 규모가 크거나 얕은 깊이에서 발생한 지진이 없었다고 볼 수 있다.

5. 토의 및 결론

아시아의 운동과 이에 따른 변형은 오랫동안 논의의 주제가 되어 왔다(e.g., Flesch et al., 2001). 많은 사람들은 동아시아가 몇 개의 미소지각판(micro plate)으로 구성되어 있으며 이들이 인도판과 유라시아판간의 충돌결과로서 시베리아에 상대적으로 약 1 cm/yr의 평균속도로 동쪽으로 이동한다는 것을 제시했다(e.g., Petit and Fournier, 2005). 여기에서 아무리아판은 가장 북쪽의 미소지각판으로 설명된다. 한반도와 그 주변부는 아무리아판에 속해 있다(Barth and Wenzel, 2010). 아무리아판의 응력장은 ENE - WSW 방향의 최대수평 압축력에 의해 설명된다(Barth and Wenzel, 2010). 4기 단층자료와 지진자료의 분석에 따르면 한반도와 그 주변에서 평균 최대 응력의 방향은 ENE-WSW로 제시되고 있으며(Park et al., 2006; 전명순과 전정수,

2010), 이 결과는 아무리아판의 응력장과 일치한다. 동해는 마이오세 중기에 시작된 후열도 단 힘 이후 현재 압축력의 지배하에 있으며 응력장은 신장영역에서 압축영역으로 전환되었다(Lee et al., 2001). 아무리아판이 동쪽으로 이동하는 것은 한반도의 동쪽 주변부에서 압축력을 강화시킬 수 있다. F1, F2, 그리고 F3 단층들은 마이오세 중기 이전에 한반도의 대륙주변부에서 대륙지각이 동-서 방향의 신장력을 받아서 리프트됨으로써 기반암 침강이 발생한 퇴적중심의 경계단층들이다. 그러므로 이들은 정단층으로 형성되었으며 남-북방향을 가진다. 실제로, 이들 단층과 R1 및 R2를 포함하는 모든 단층들은, 부분적으로 곡선으로 이루어져 있지만, 그 방향이 북, NNE, 혹은 NNW로서 남-북방향이 우세하다(Fig. 3-5). 현재 한반도와 그 주변에서 ENE 방향의 최대 주압축력은, 이들 단층이 활성화 할 경우, 역단층 및 우수주향의 주향이동 운동을 유도할 것으로 해석한다. 조덕래와 경재복 (2006)은 2003년부터 2006년까지 후포분지의 연안에서 발생한 지진의 단층면해를 계산하여 지진이 주향이동운동과 관련됨을 제시한 바 있다.

연구지역내에서 2007년 규모가 작은($M=1.65$) 지진이 천부(<3 km)에서 발생하였다. 지진의 규모가 작으므로 지표면의 변형은 발생하지 않았을 것이다. 이 지진은 정확히 F1에 위치하므로(Fig. 3-5) 연구지역을 중심으로 한반도 주변부에서 지진은 3기에 진행된 대륙지각의 리프팅 동안 형성된 단층들에서 발생한다고 해석된다.

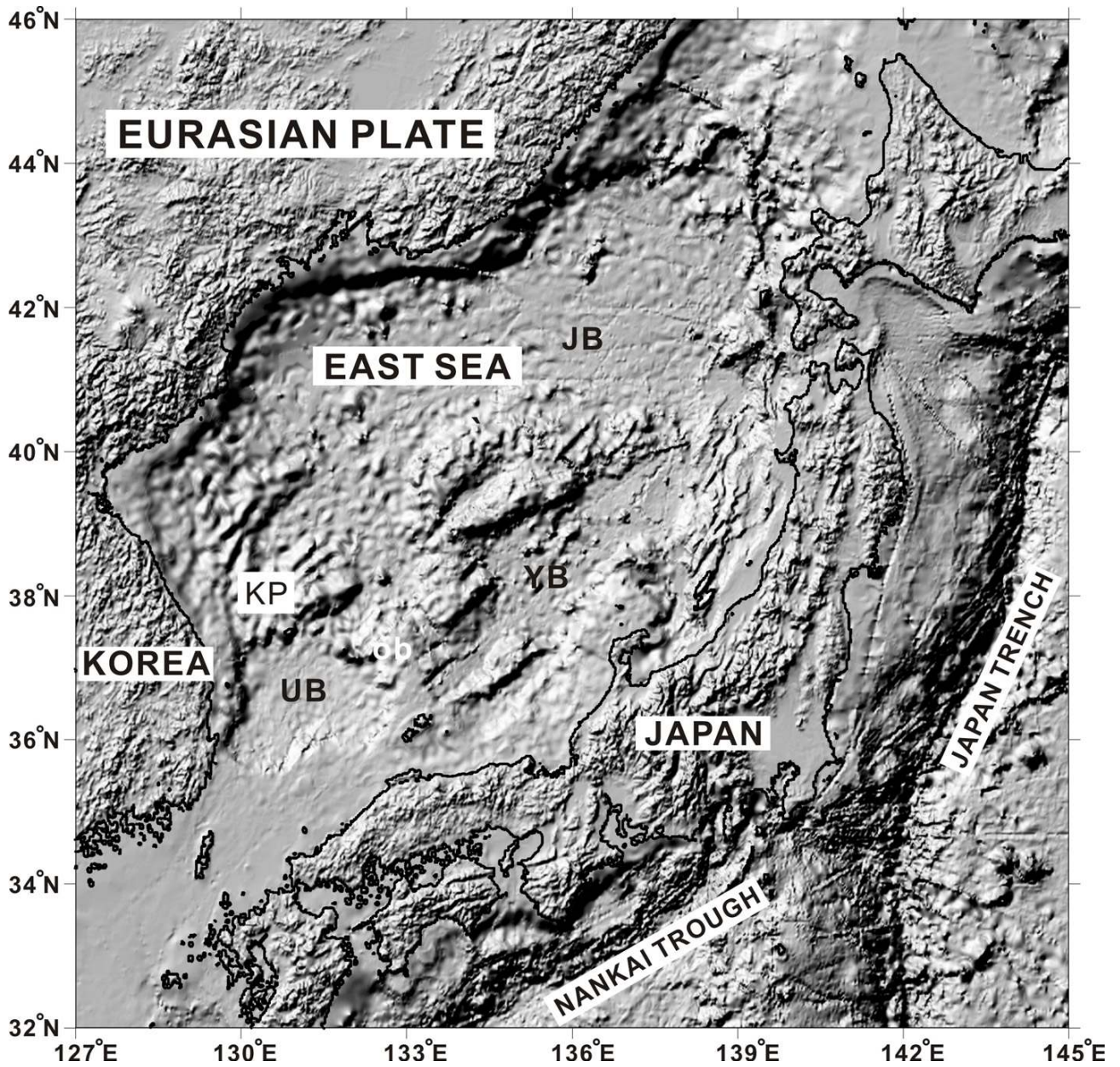


Fig. 3-1. (a) Physiography of the East Sea (Japan Sea). KP = Korea Plateau and UB = Ulleung Basin. (b) Shaded bathymetry of the eastern margin of Korea from swath bathymetry data. The Hupo Basin and the Hupo Bank are outlined. HP = Hupo Basin and HB = Hupo Bank.

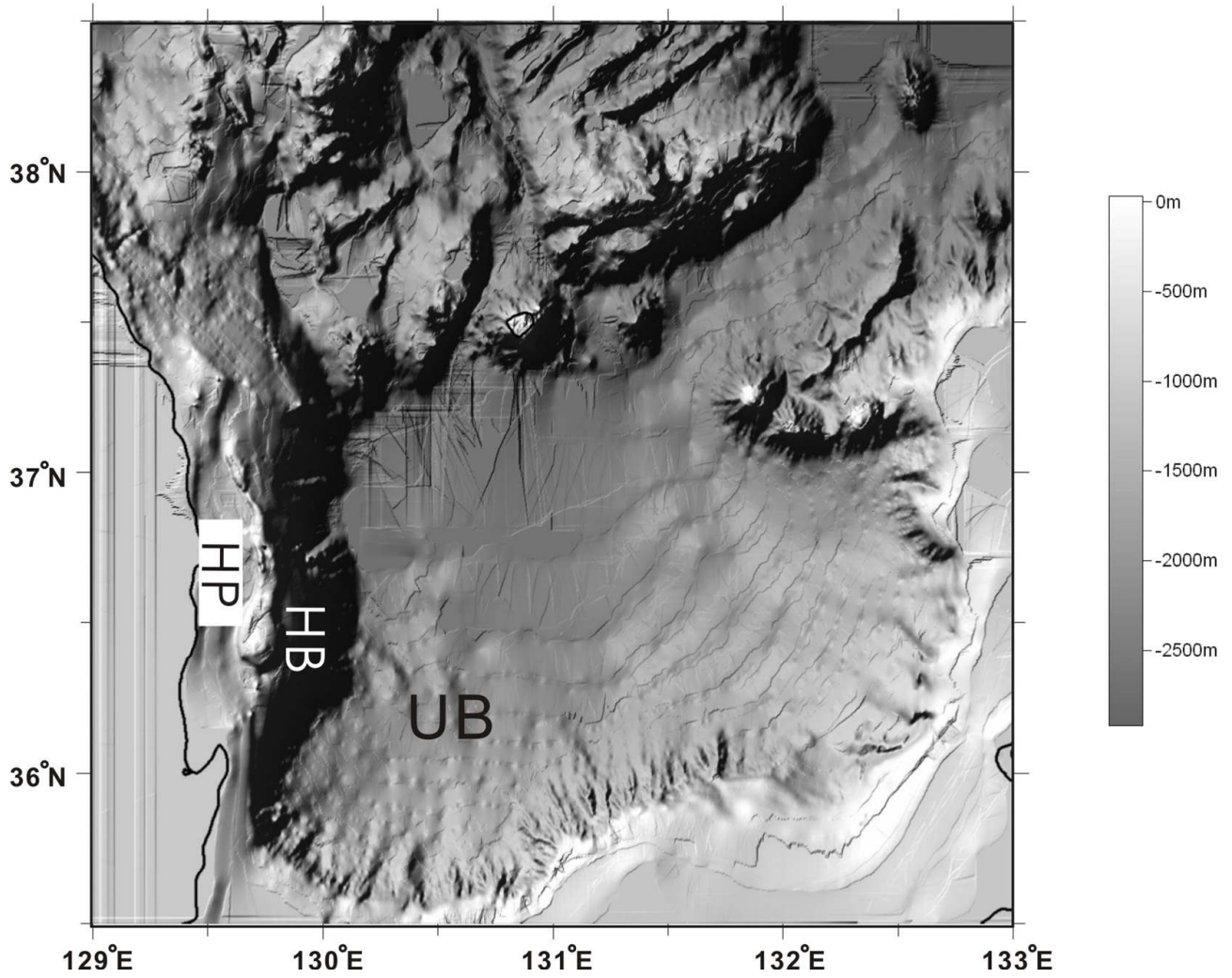


Fig. 3-1. (b) Shaded bathymetry of the eastern margin of Korea from swath bathymetry data. The Hupo Basin and the Hupo Bank are outlined. HP = Hupo Basin and HB = Hupo Bank.

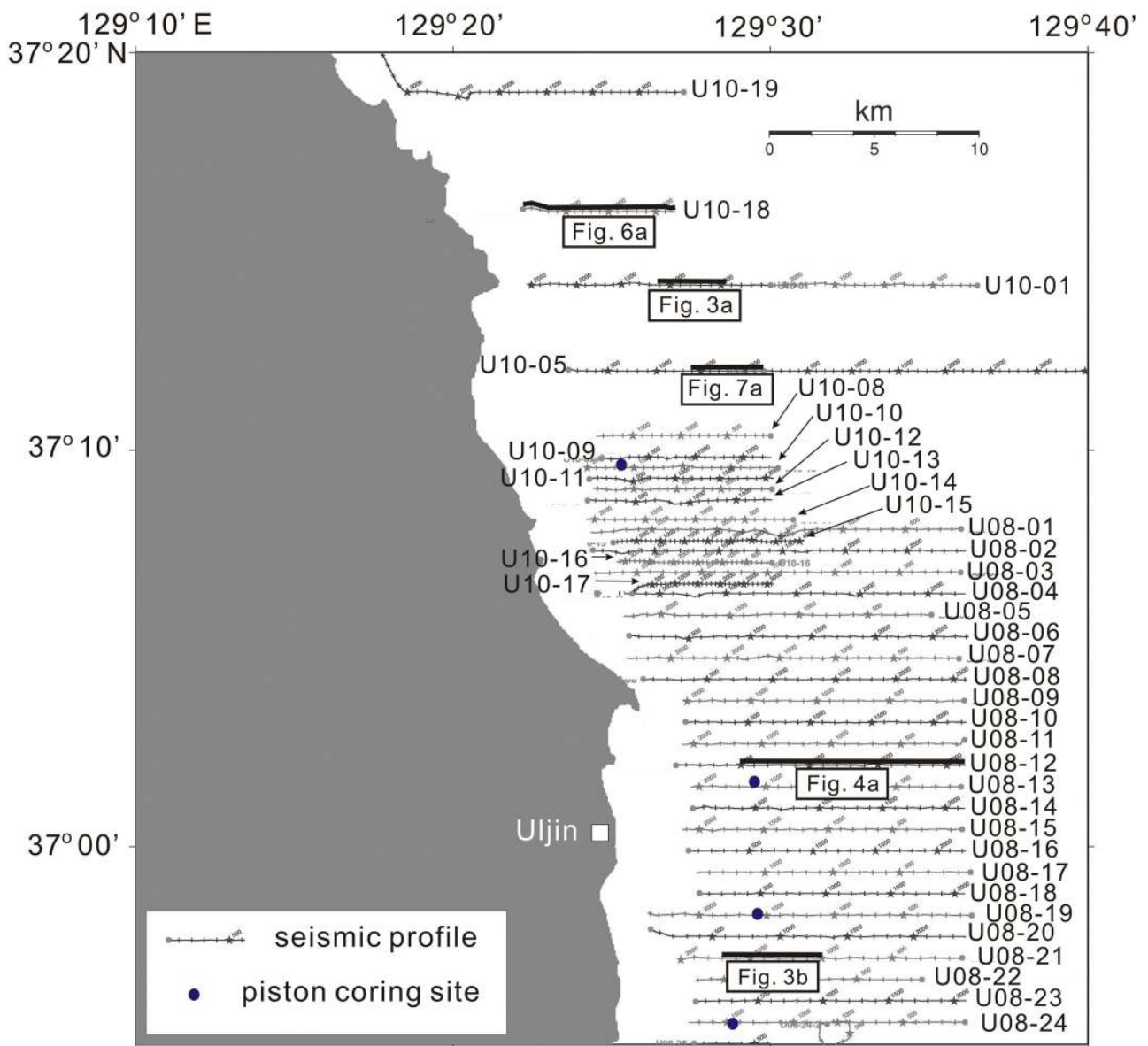


Fig. 3-2. Locations of seismic profiles. Heavy lines indicate seismic profiles shown in this study with respective figure numbers in boxes. Black dots represent the locations of sediment sampling using a piston corer.

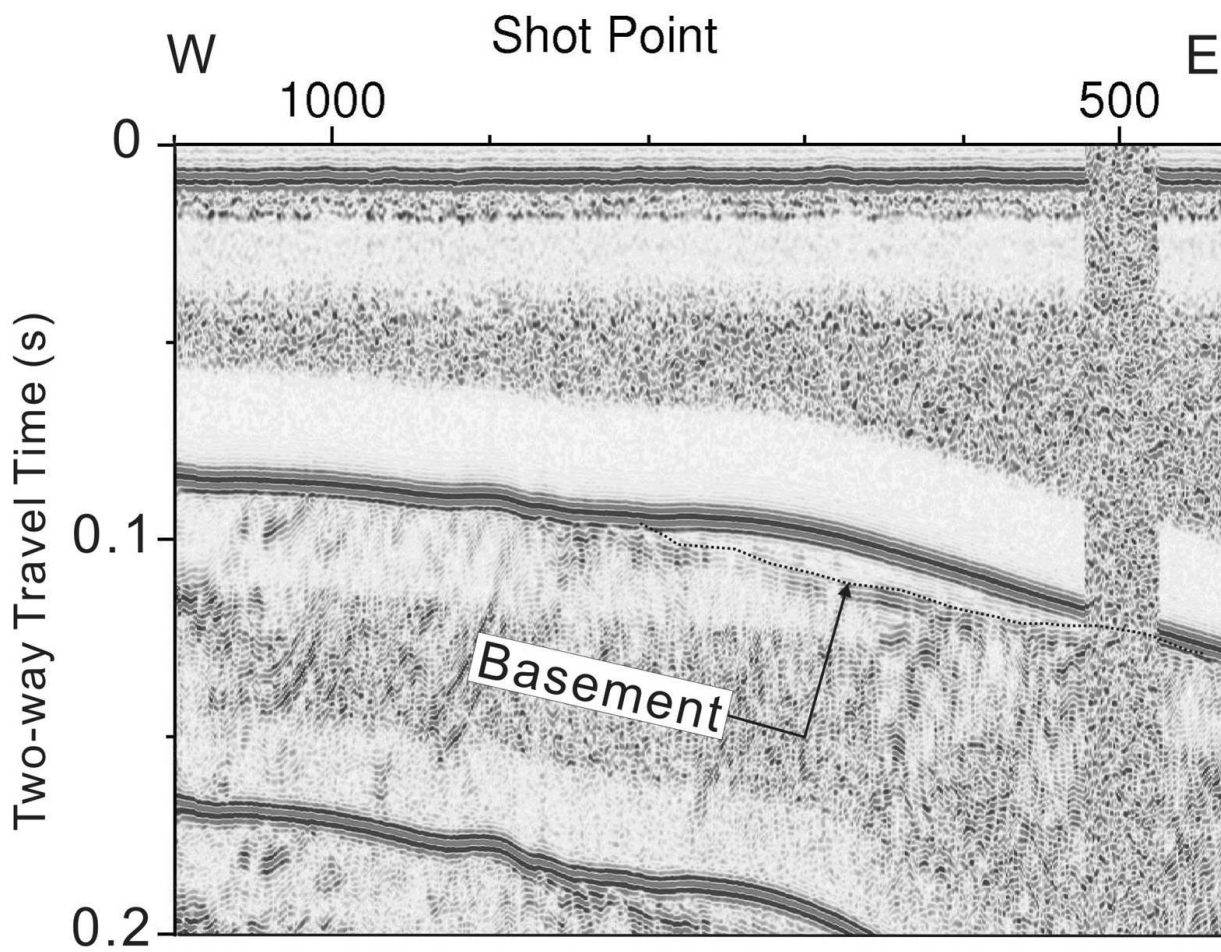


Fig. 3-3. (a) Sparker seismic profile U10-01.

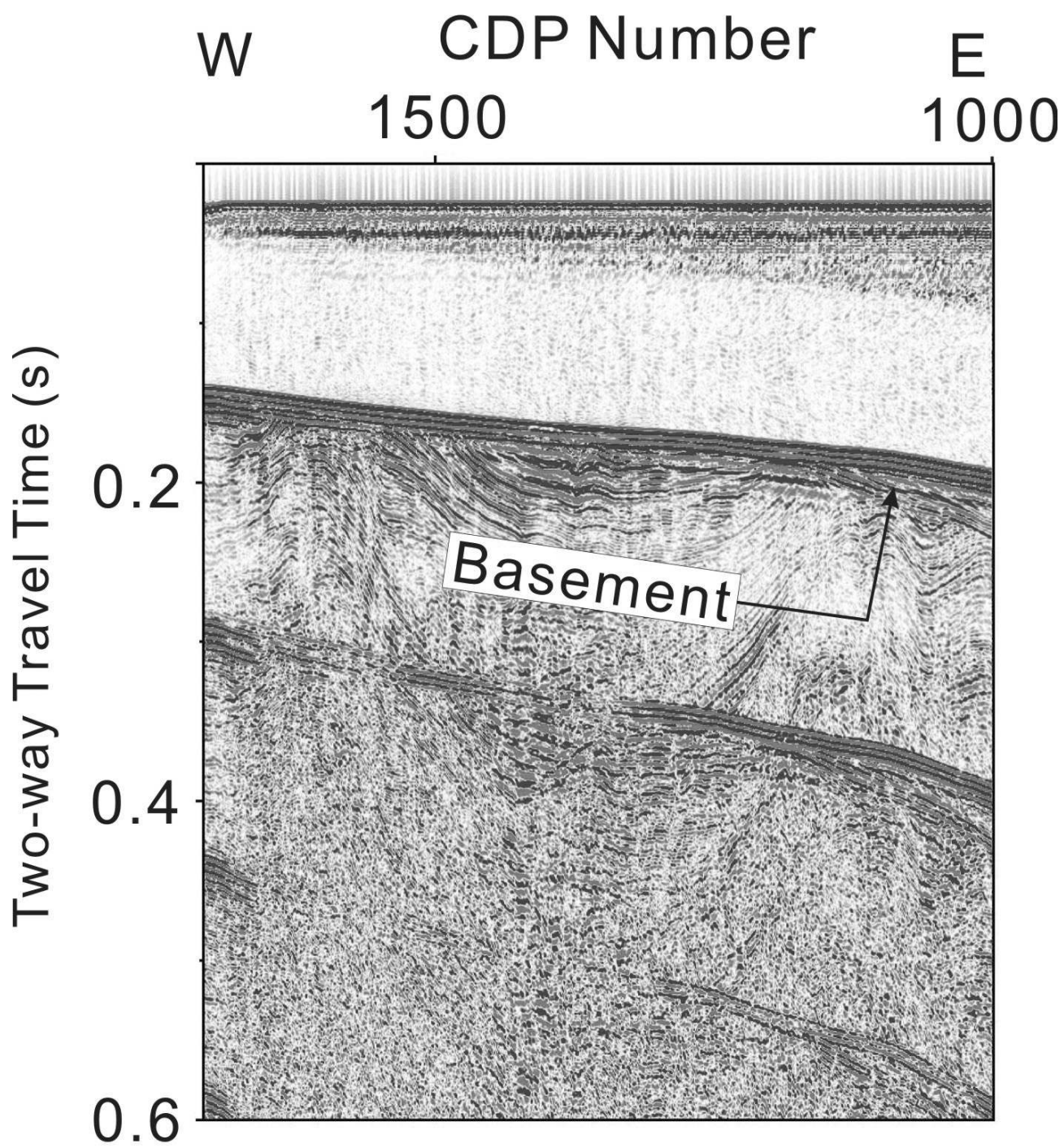


Fig. 3-3. (b) Sparker seismic profile U08-22.

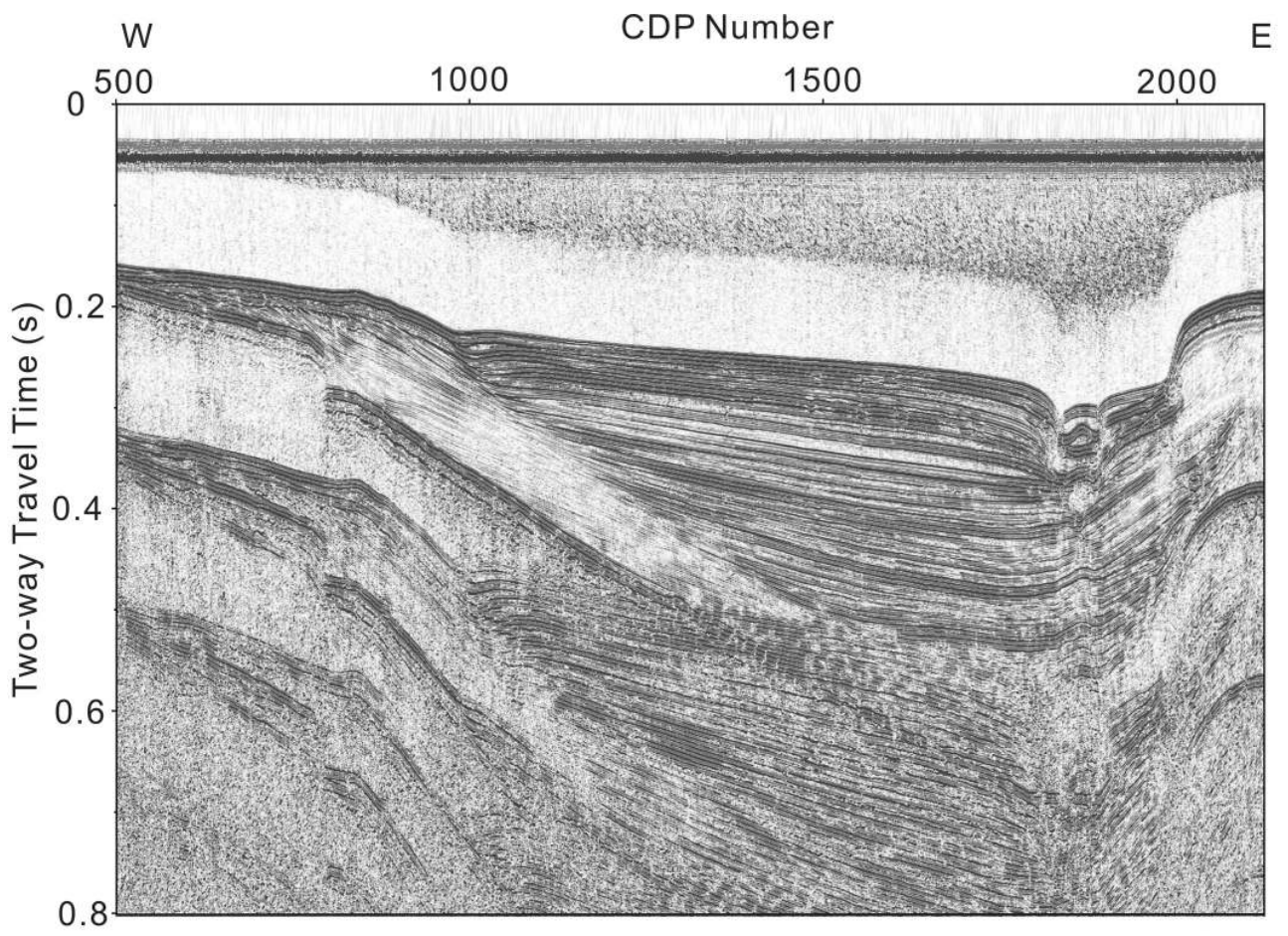


Fig. 3-4. (a) Sparker seismic profile U08-12.

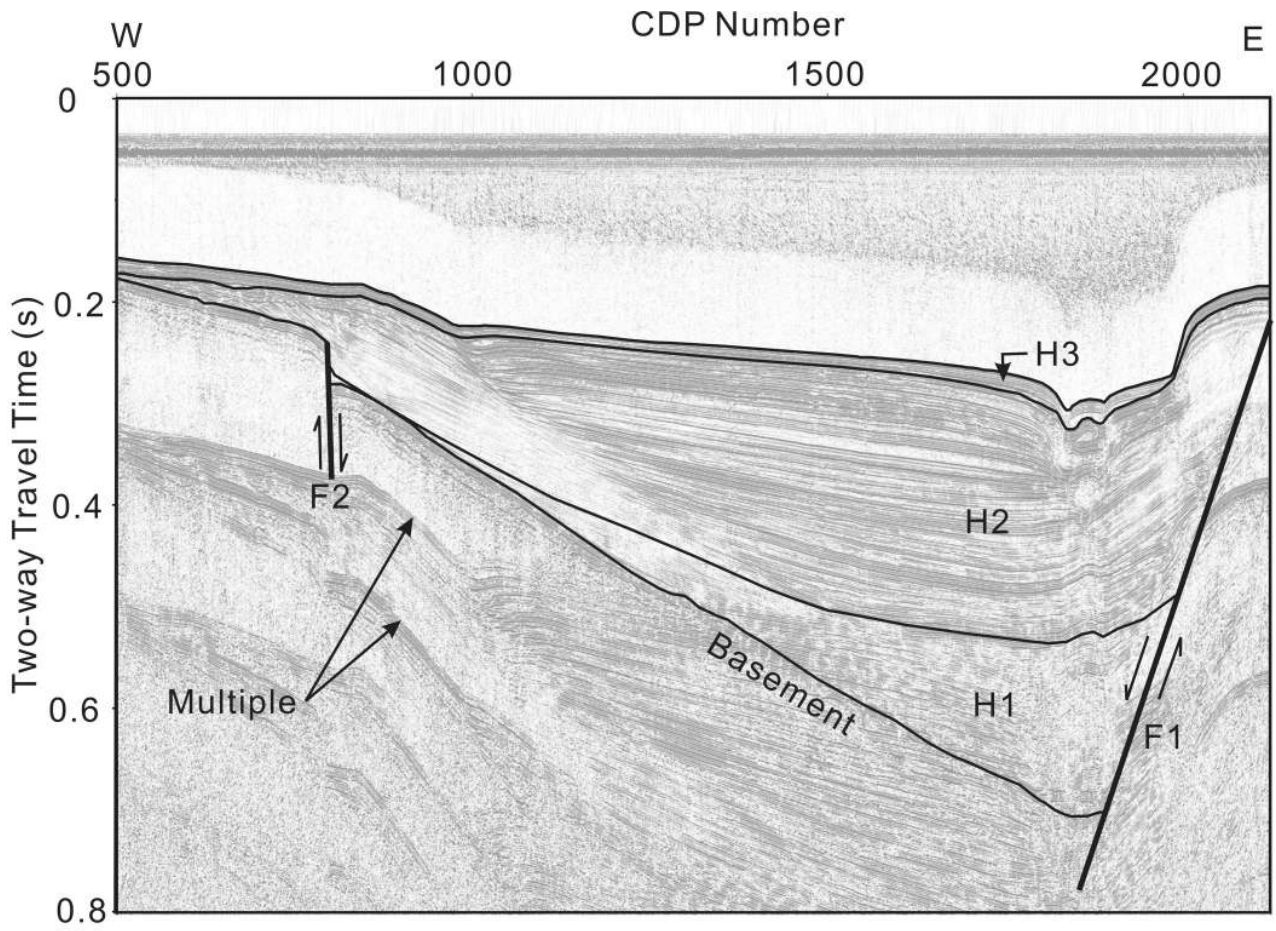


Fig. 3-4. (b) Interpretive line drawings.

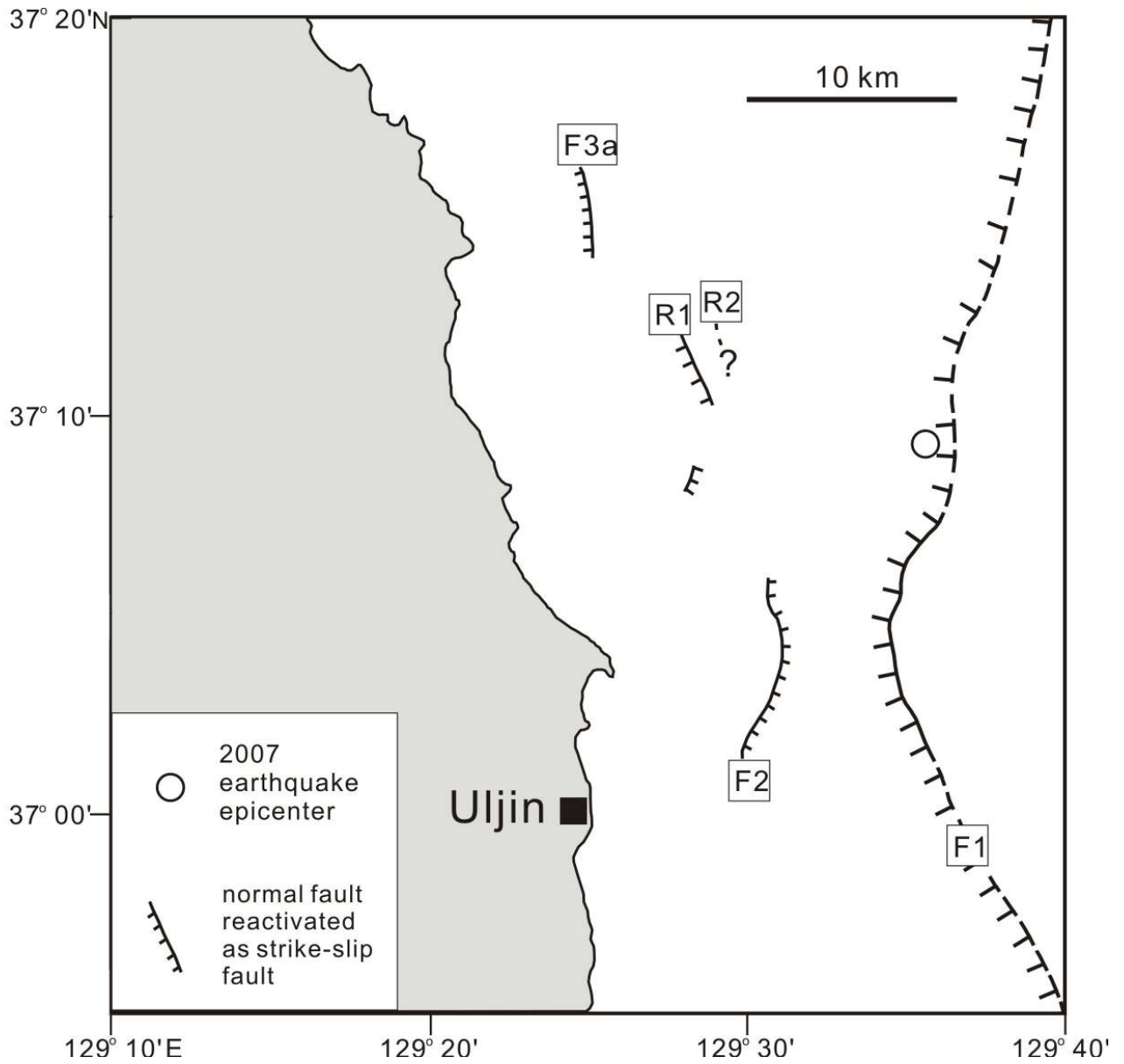


Fig. 3-5. Geologic map showing N-, NNE-, and NNW-trending faults discussed in the text. The dashed part of Fault F1 is from Kim et al. (2007).

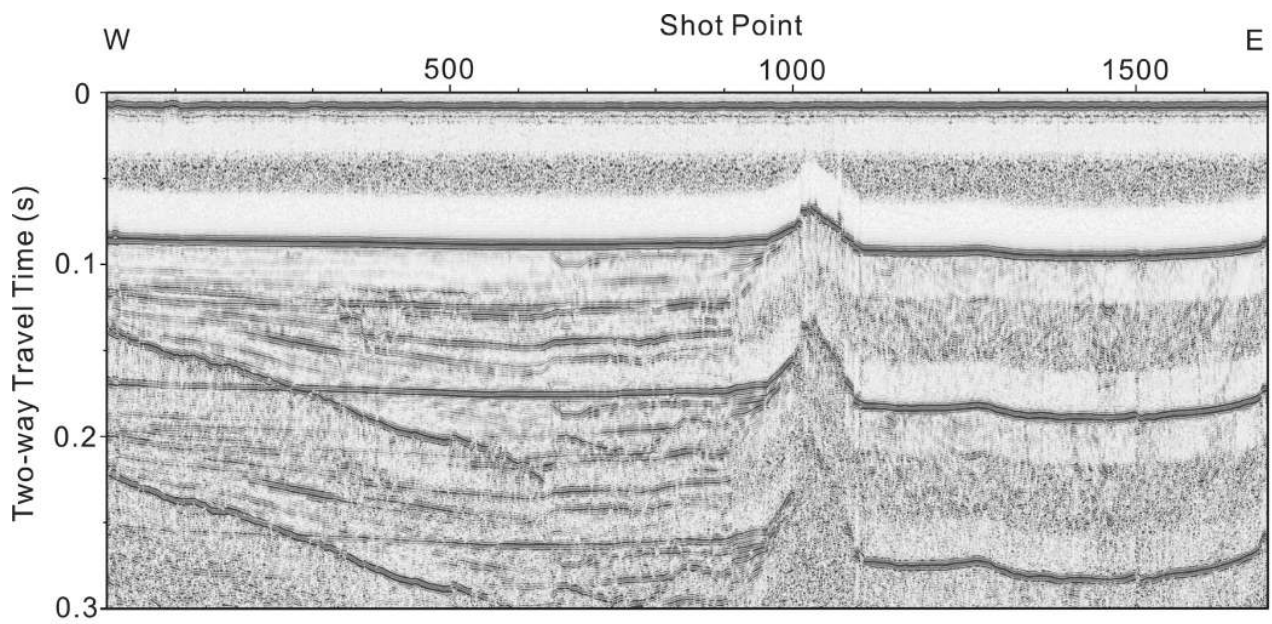


Fig. 3-6. (a) Sparker seismic profile U10-18.

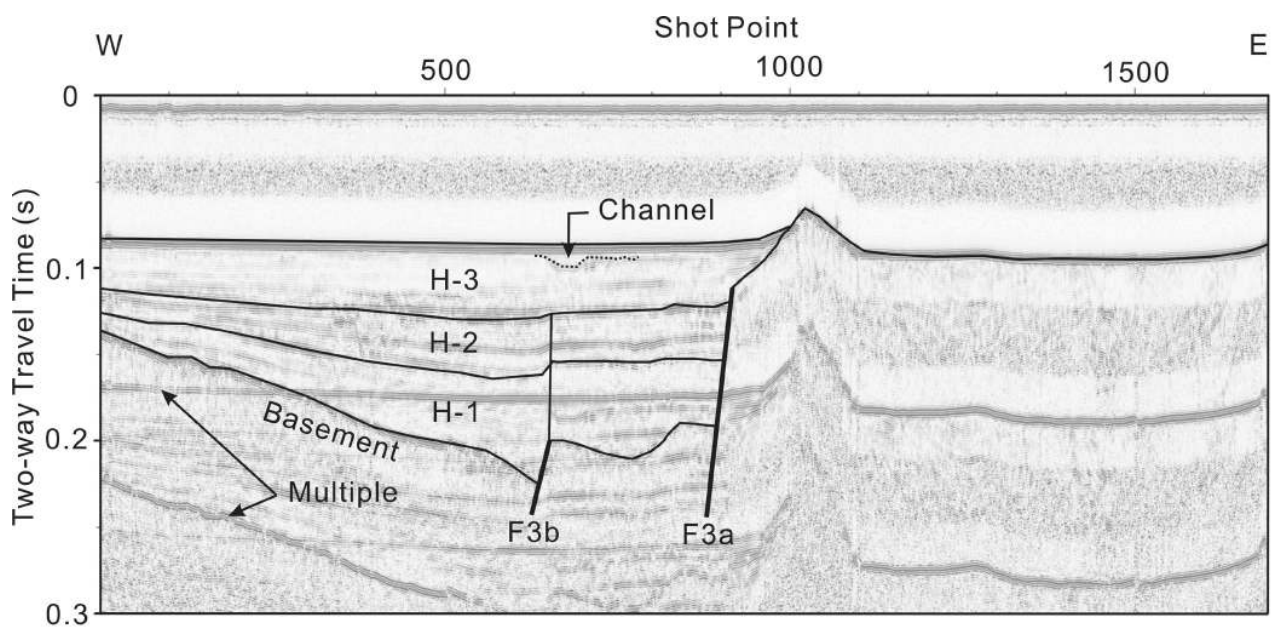


Fig. 3-6. (b) Interpretive line drawings.

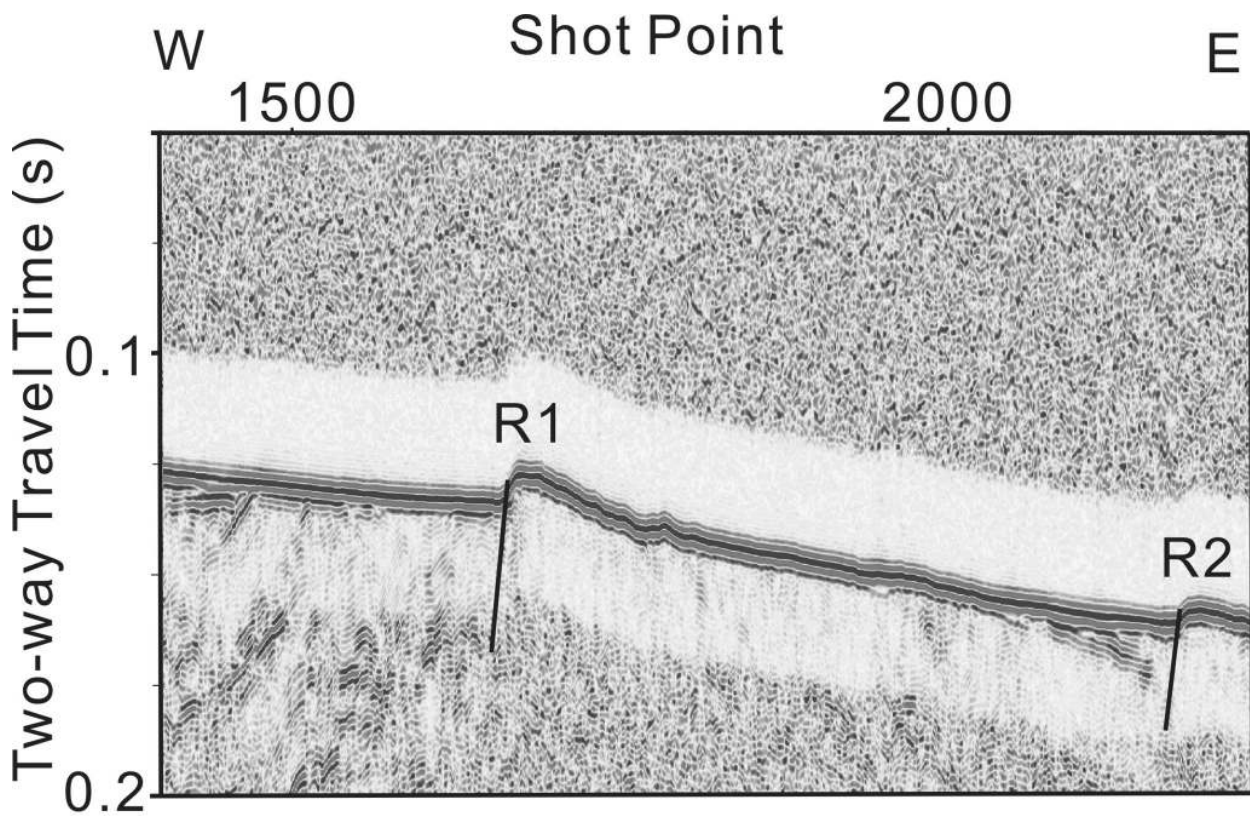


Fig. 3-7. (a) Sparker seismic profile U10-05.

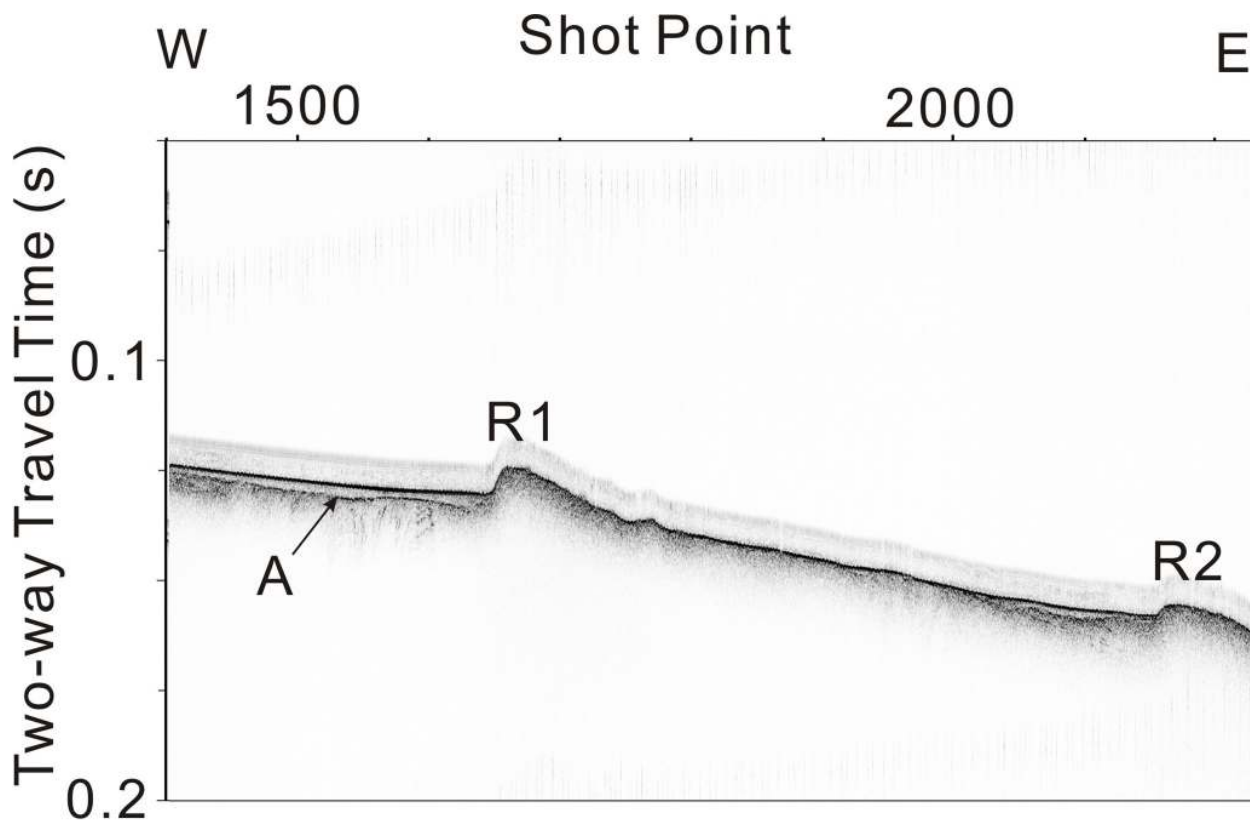


Fig. 3-7, (b) Chirp sonar profile U10-05. "A" denotes the unconformity discussed in the text.

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

1. 목표 달성도

연구개발의 범위	연구개발 방법 및 내용	달성도 (%)
고해상 탄성과 탐사시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> - 스파커와 12채널 스트리머를 이용하는 고해상 탐사시스템을 구축 - 온누리호 대신 이어도호를 조사선으로 활용하는 연안역 탐사 기술 개발 	100
울진 연안의 신기 지진활동 조사	<ul style="list-style-type: none"> - 약 400 km 길이의 측선 26개에 대한 고해상 탄성과 자료 획득 - 단층의 분포와 특성 해석 - 단층과 지진활동의 연계 해석 	100

2. 대외 기여도

원전이 분포하는 한반도의 동남부에서는 단층활동과 관련된 지진안전성의 정확한 해석이 시급하다. 지금까지 육상조사를 통해 현생단층의 분포와 특성을 연구해오고 있으나 육상조사가 갖는 한계성 때문에 그 성과는 미미하다고 할 수 있다. 이 연구에서는 육상조사의 문제점을 해결할 수 있는 대안으로서 고해상 탄성과탐사를 해양에서 수행하여 현생단층의 분포를 명확히 제시하였다.

이러한 방법의 연구를 한반도의 동남부 해역에서 권역별로 수행함으로써 신기 지체구조운동의 체계적이고 정확히 해석할 수 있을 것으로 기대되며 그 성과는 궁극적으로 국내의 지질과 지진특성에 적합한 원전부지의 지진안전성 평가에 직접적으로 이용 할 수 있을 것이다.

현재 연안역에서 교량과 항만 등의 건설사업이 계속되고 있으며 앞으로 더 증대될 추세를 보인다. 이 연구에서 구축한 고해상 탐사시스템은 연안역의 건설사업에 필수적으로 요구되지만 기존의 방법으로는 어려웠던 기반구조의 탐사를 정확히 수행하는 강력한 수단이 될 것이다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 과학기술분야 및 산업계의 활용성

1. 한반도의 동해쪽 대륙주변부의 진화와 형성과정을 해석함으로써 동해의 열림과 관련한 지각운동의 정확한 구명을 위한 기초자료로서 활용될 수 있다.
2. 한반도의 동해 연안은 원전과 산업시설이 밀집해 있지만 단층활동과 관련하여 부지의 지진안전성을 평가하는 것이 국가적 연구과제이다. 이 연구에서 고리원전연안에서 현생단층의 분포와 특성, 그리고 활동성을 밝힘으로써 한국의 지질특성에 적합한 지진안전성 평가를 체계적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.
3. 현생단층의 특성을 지진자료로부터 구한 단층면해 등과 결합함으로써 한반도의 지진특성을 구명할 있을 것이다.
4. 스파커와 12채널 스트리머, 그리고 휴대용 기록기로 고해상 해양 다중채널 탄성과 탐사시스템을 구성하였다. 스파커는 에어 건보다 훨씬 높은 주파수의 음파를 발생시키므로 에어건을 사용하는 기존의 탐사보다 해상도가 높은 자료를 얻을 수 있다.
5. 이 연구에서 구성한 탄성과 탐사시스템은 이어도호와 같은 중형 조사선에 쉽게 탑재할 수 있으므로 온누리호가 활동하기 곤란한 연안역에서 사용할 수 있다. 따라서 현재 수요가 증가하는 교량과 항만시설 등 연안역의 건설사업에서 필요한 기반구조의 조사에 활용할 계획이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 최근 일본의 활성단층 database의 개정

일본의 경우 활성단층에 대한 database는 활동 단위(behavioral segment)의 개념(McCalpin, 1996)으로 분류된 활성단층의 완전한 정보를 담고 있다 (http://www.aist.go.jp/RIODB/activefault/cgi-bin/index_e.cgi). 각각의 단층은 지표에 나타나는 지하학적 모양과 고지진 연구에 의해 결정된 균열 역사를 기반으로 활동 단위로 세분된다. Index map에 나타난 단층들은 활동 구간의 database에 연결되는데 여기에는 slip rate, 각 지진의 slip, 재활동 주기, 그리고 미래에 파열이 일어날 확률 등을 포함하는 지질학적 그리고 고지진학적 변수들에 대한 정보가 포함된다. 활동 구간들은 단층의 이름이나 단층변수들의 조합에 의해 검색될 수 있다. 이 모든 자료들은 학술지의 논문, 학위 논문, 그리고 다른 연구결과들로부터 취합한 것이다.

자료입력방법의 문제

Database는 2002년에 최초로 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)의 Geological Survey of Japan의 Active Fault Research Center가 구축하였다. 이 database의 최초본은 2005년 3월에 온라인으로 개통되었다. Database 관리시스템을 통해 많은 사용자들이 웹 브라우저를 사용하여 여러 가지 정보를 검색할 수 있었다. 하지만 복잡한 주요어를 이용하는 정보검색은 불가능하였다. 또한 복합적인 속성을 이용하여 자료의 순서를 바꾸는 것도 어려웠다. 이러한 단점은 자료입력방법에 의해 초래되었다. MS-Excel spread-sheet software를 이용하여 자료를 입력하였다. 입력된 자료들은 2차원 spread-sheet에서 일련번호로 지정된 자료에 대해 정의되는 pseudo data model로 재구축되었다. 하지만 이 모델도 자료의 중복문제를 해결하지 못하였다. 자료의 중복이 심하고 표준화가 제대로 되지 않았기 때문에 database의 최초본에서 융통성이 있는 검색은 불가능하였다.

Database의 재정의된 자료 모델

자료 모델을 재정의하여 실제 관련있는 database를 공식화하였다. 자료 모델의 재정의는 활성단층에 대해 연구된 학술지의 논문을 기초로 하였다. 따라서 구성요소로서 조사, 지역, 변위,

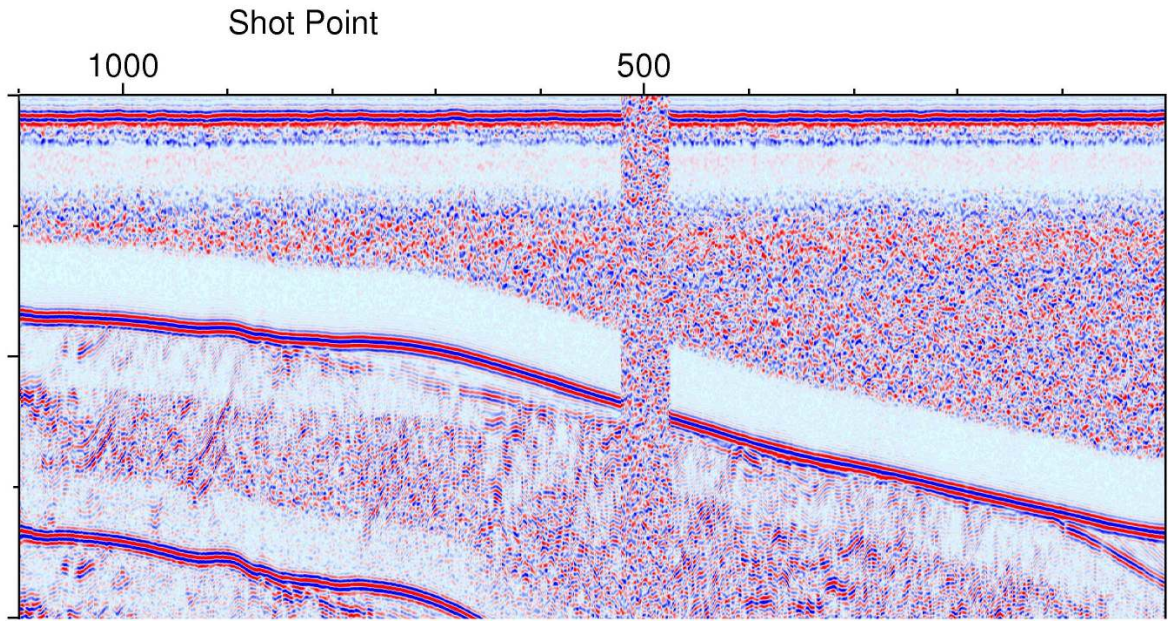
사건, 토의 그림, 그리고 참고문헌을 활용하였다. 활성단층에 대한 많은 특징과 자료유형, 그리고 다른 설명들을 정의하여 64개의 표로 정리하였다. 이러한 모든 표는 표준화하여 상관관계에 따라 결합된다. 이렇게 재구축된 database는 주요어를 복합적으로 사용하거나 자료의 순서를 바꾸어서도 검색이 가능하다. 여기에 시간 층서학과 기타 더 자세한 정보까지 추가하였다. 새로운 database는 지리정보시스템(GIS)을 활용할 수도 있다.

제 7 장 참 고 문 헌

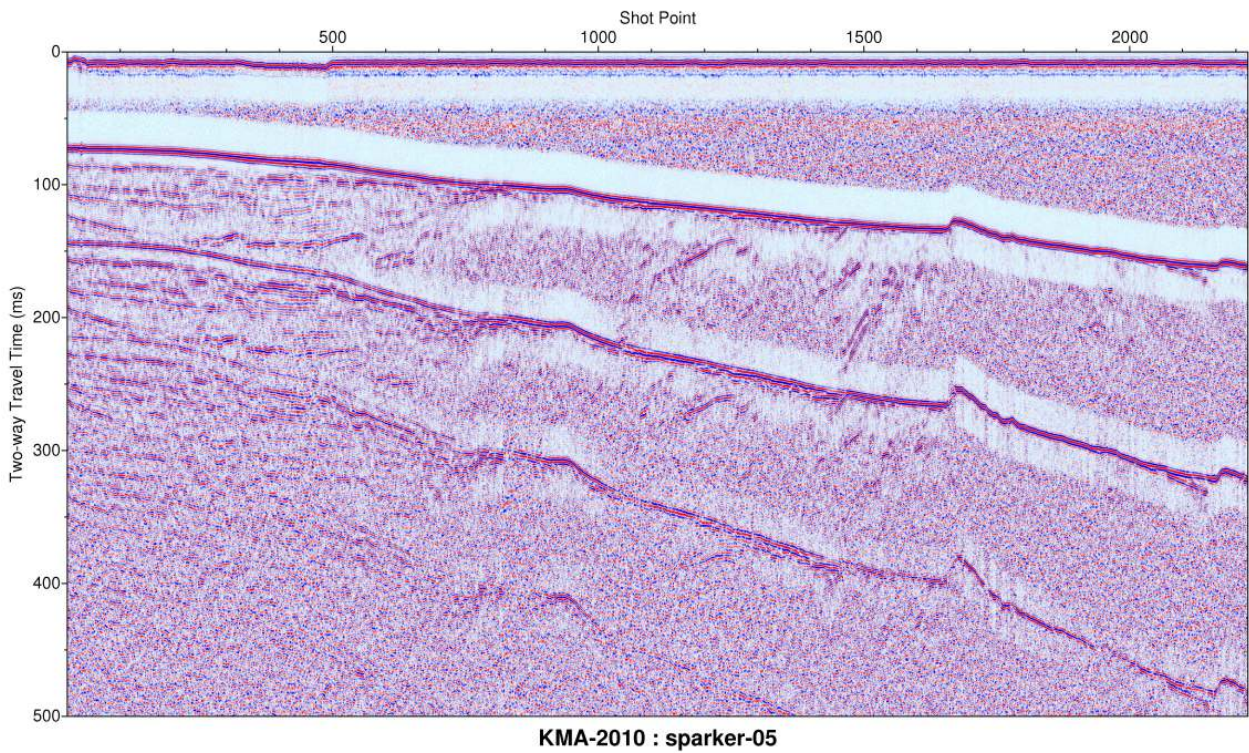
- 전명순, 전정수, 2010, 한반도 및 주변의 지진 메카니즘 특성, 지구물리와 물리탐사, **13**, 198–202.
- 조덕래, 경제복, 2006, 최근 동해에서 발생한 지진의 진원기구해 분석, 한국지구과학회 2006년 추계학술발표회, 236–239.
- Barth, A., and Wenzel, F., 2010, New constraints on the intraplate stress field of the Amurian Plate deduced from light earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, **482**, 160–169.
- Flesch, L.M., Holt, W.E., and Haines, A.J., 2001, Dynamics of the India–Asia collision zone, *Journal of Geophysical Research*, **106**, 16435–16460.
- Kim, H.J., Lee, G. H., Jou, H.T., Cho, H.M., Yoo, H.S., Park, G.T., and Kim, J.S., 2007, Evolution of the eastern margin of Korea: Constraints on the opening of the East Sea (Japan Sea), *Tectonophysics*, **436**, 37–55.
- Klaus, A., Taylor, B., Moore, G.F., Murakami, F., and Okamura, Y., 1992, Back–arc rifting in the Izu–Bonin Island Arc: structural evolution of Hachijo and Aoga Shima Rifts, *Island Arc*, **1**, 16–31.
- Lamarche, G., 2000, Constraining fault growth rates and fault evolution in New Zealand, *EOS*, **81**, 481
- Lee, G. H., Kim, H.J., Han, S.J., and Kim, D.C., 2001, Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the East Sea (Japan Sea) back–arc basin, *Marine and Petroleum Geology*, **18**, 615–634.
- Park, Y., Ree, J.H., and Yoo, S.H., 2006, Fault slip analysis of Quaternary faults in southeastern Korea, *Gondwana Research*, **9**, 118–125.
- Petit, C., and Fournier, M., 2005, Present–day velocity and stress fields of the Amurian Plate from thin–shell finite–element modeling, *Geophysical J. International*, **160**, 357–369.
- Ree, J.H., and Lee, Y.J., 2003, Quaternary reactivation of Tertiary faults in the southeastern Korean Peninsula: Age constraints by optically simulated luminescence dating, *Island Arc*, **12**, 1–12.
- Yoon, S.H., and Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin

of Korea and its tectonic implications for the evolution of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Bulletin of Geological Society of America*, **107**, 83–97.

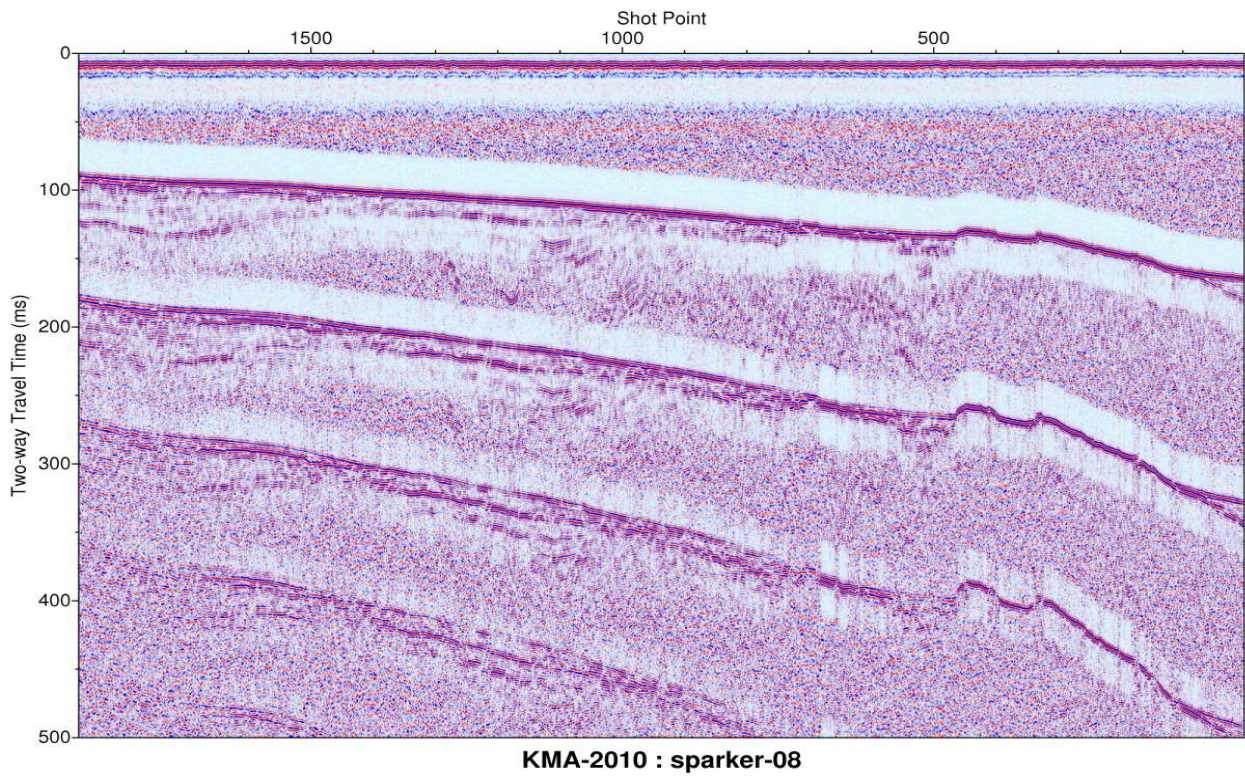
부록. 탄성과 단면



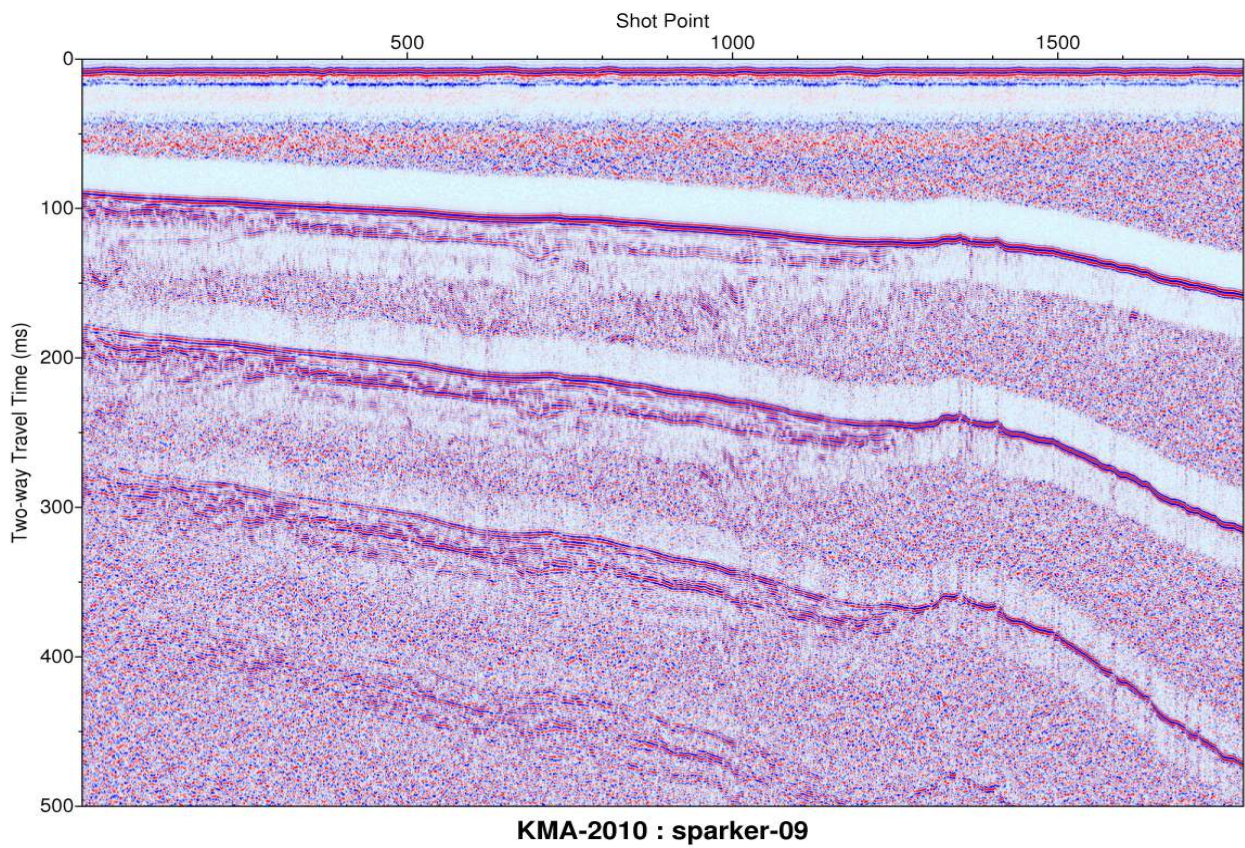
Sparker seismic profile U10-01.



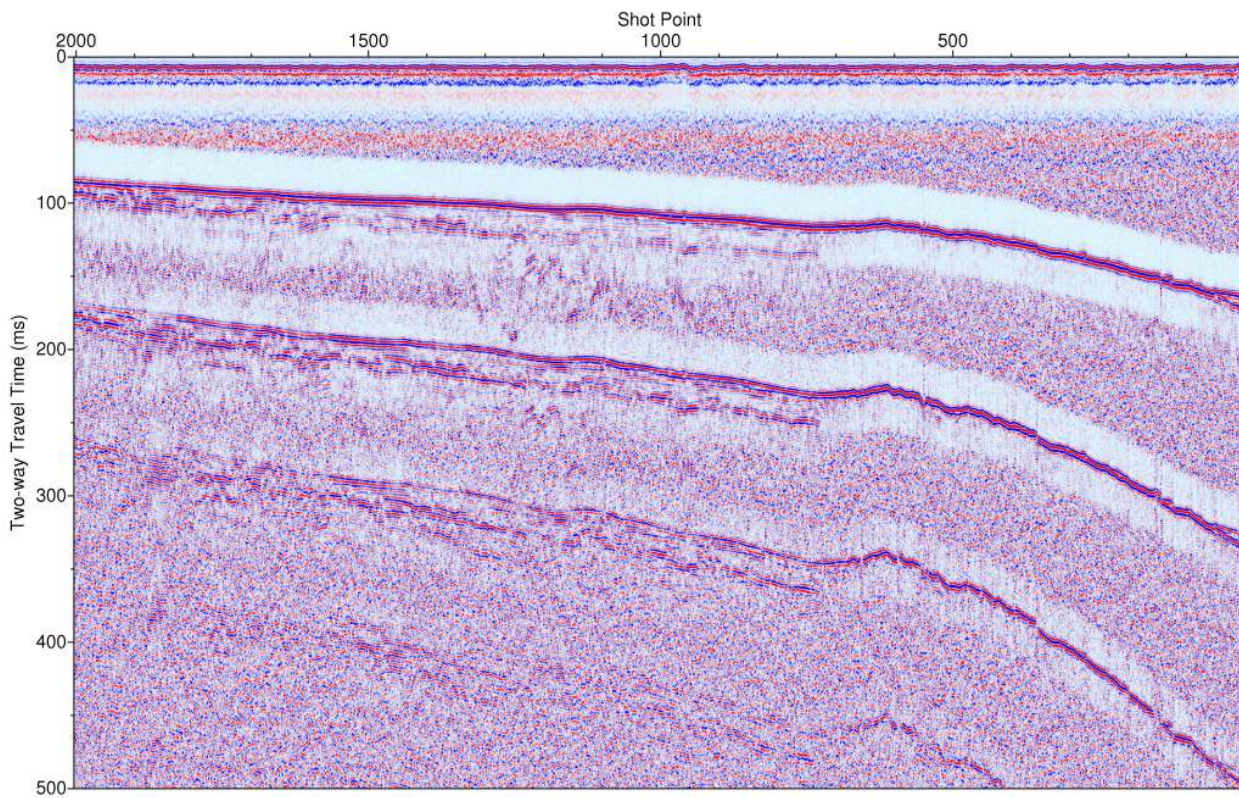
Sparker seismic profile U10-05.



Sparker seismic profile U10-08.

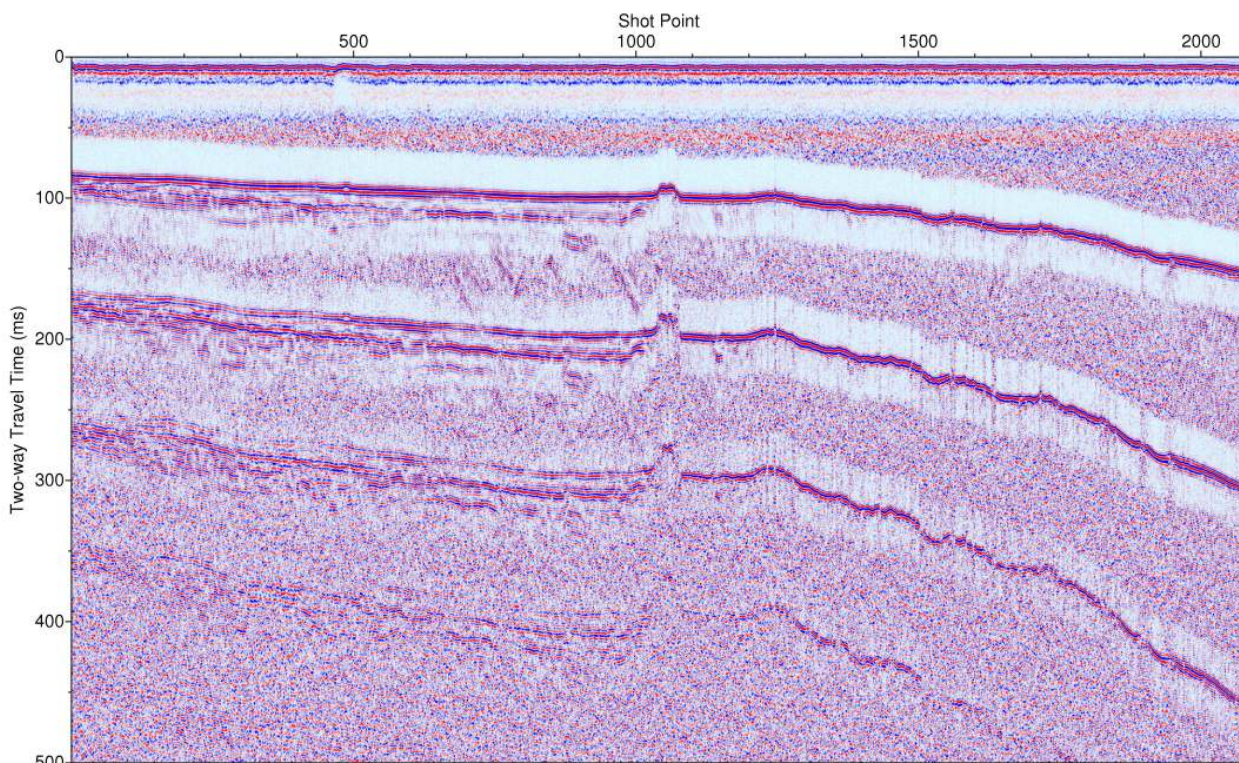


Sparker seismic profile U10-09.



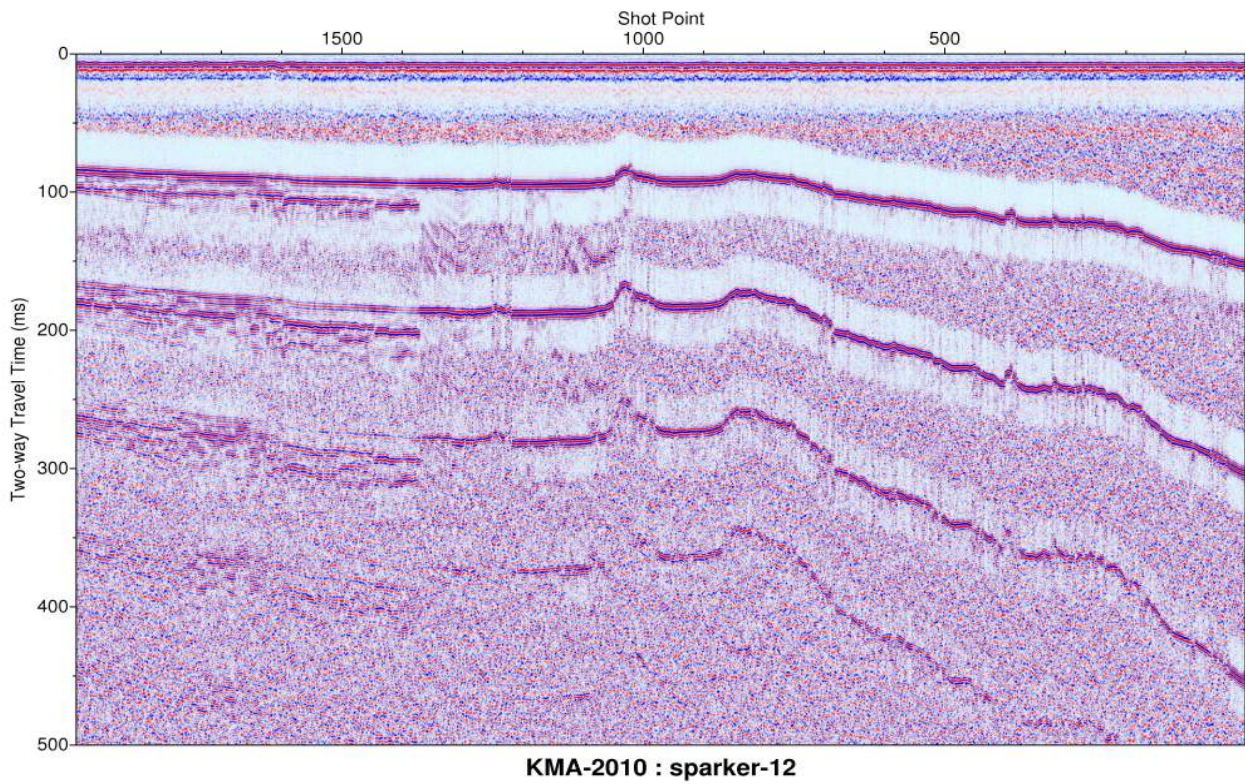
KMA-2010 : sparker-10

Sparker seismic profile U10-10.

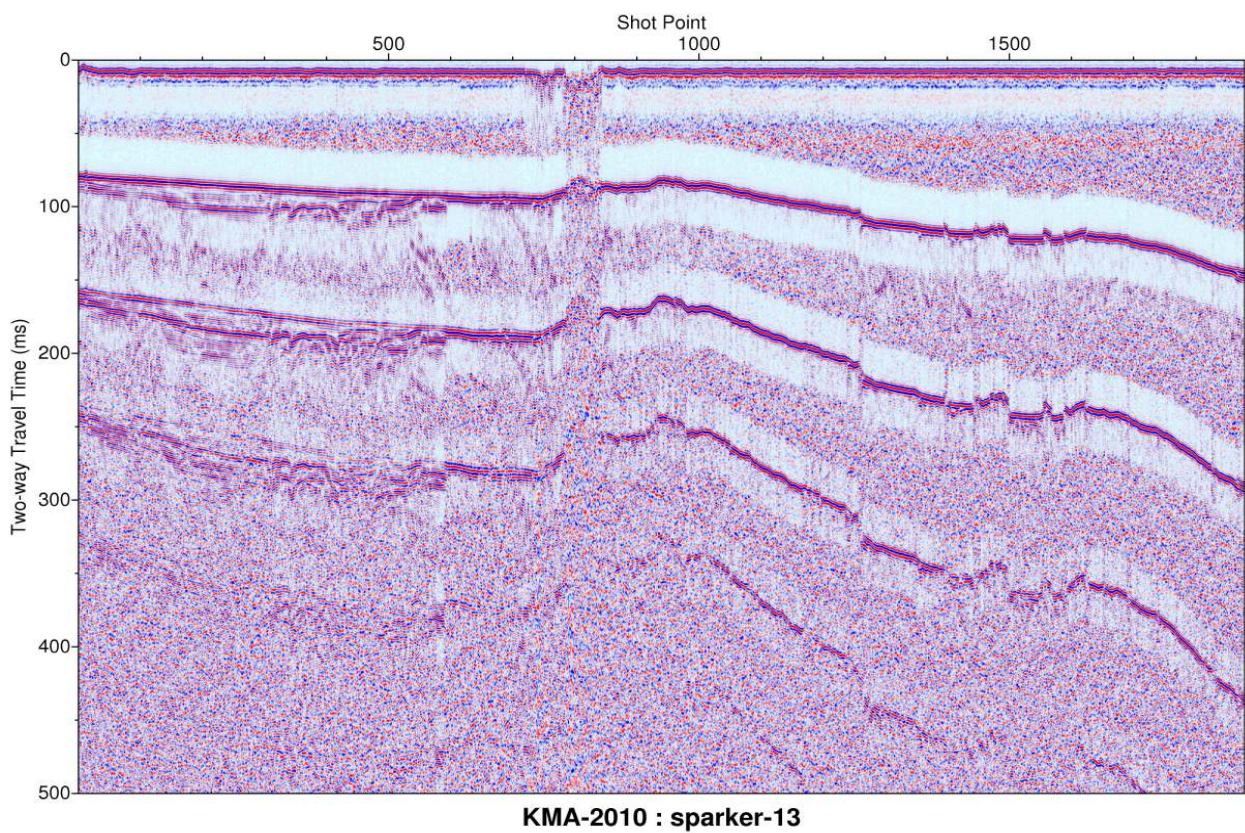


KMA-2010 : sparker-11

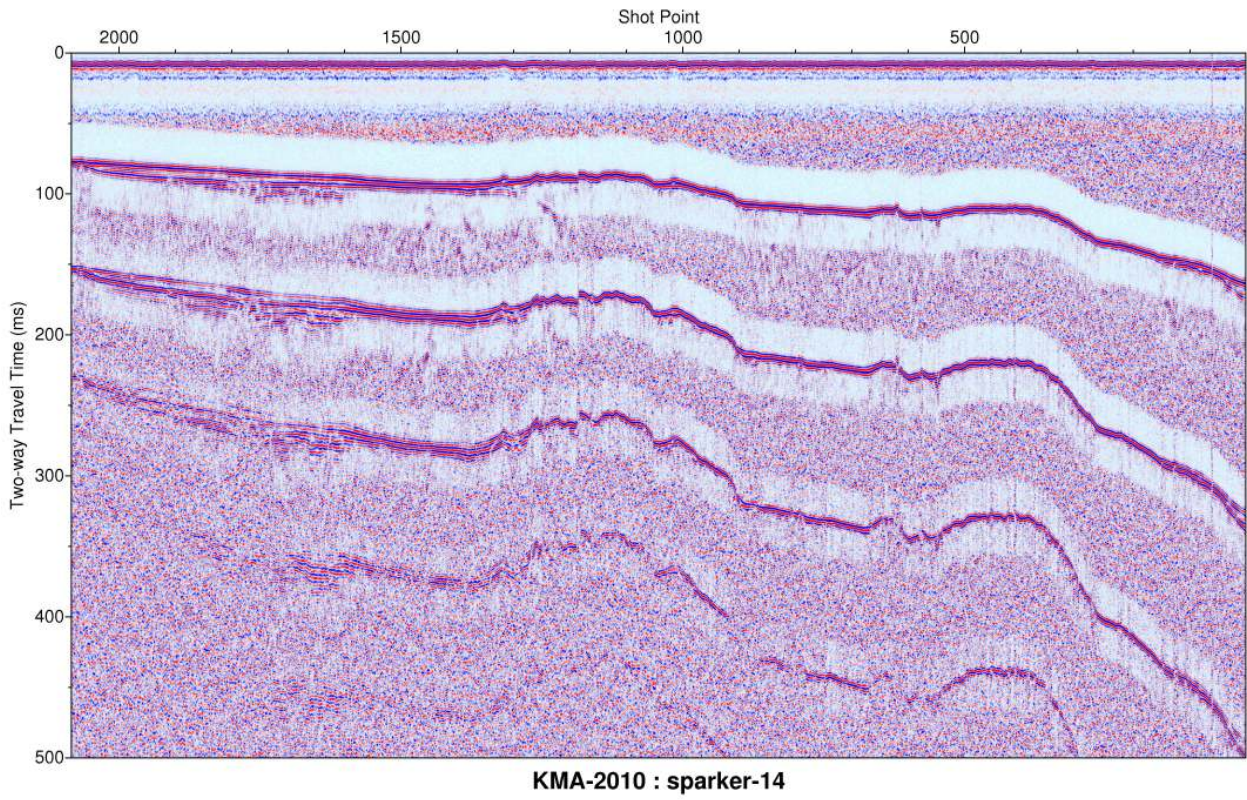
Sparker seismic profile U10-11.



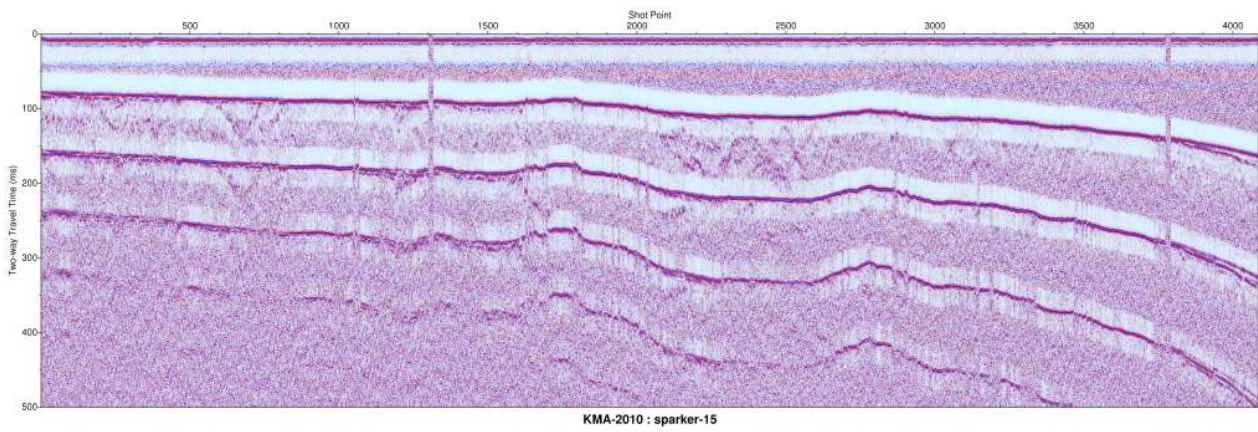
Sparker seismic profile U10-12.



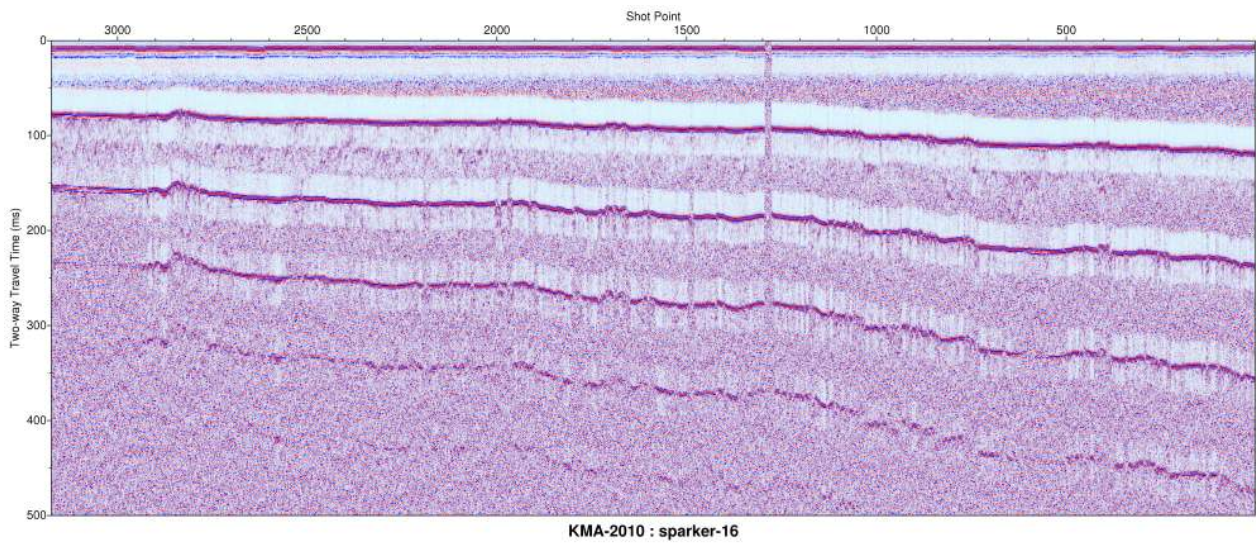
Sparker seismic profile U10-13.



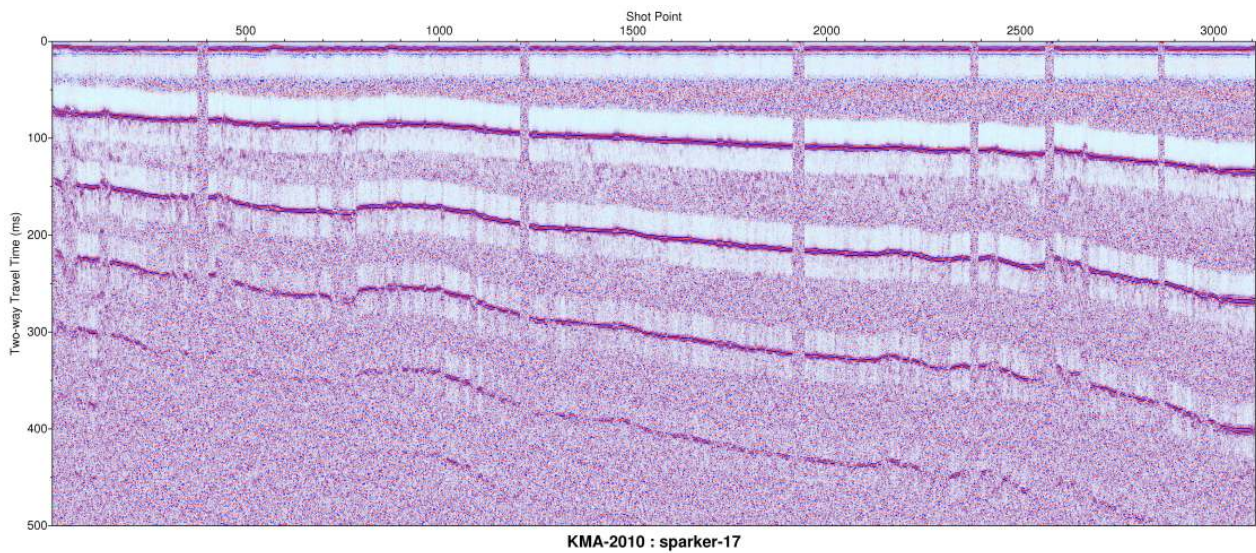
Sparker seismic profile U10-14.



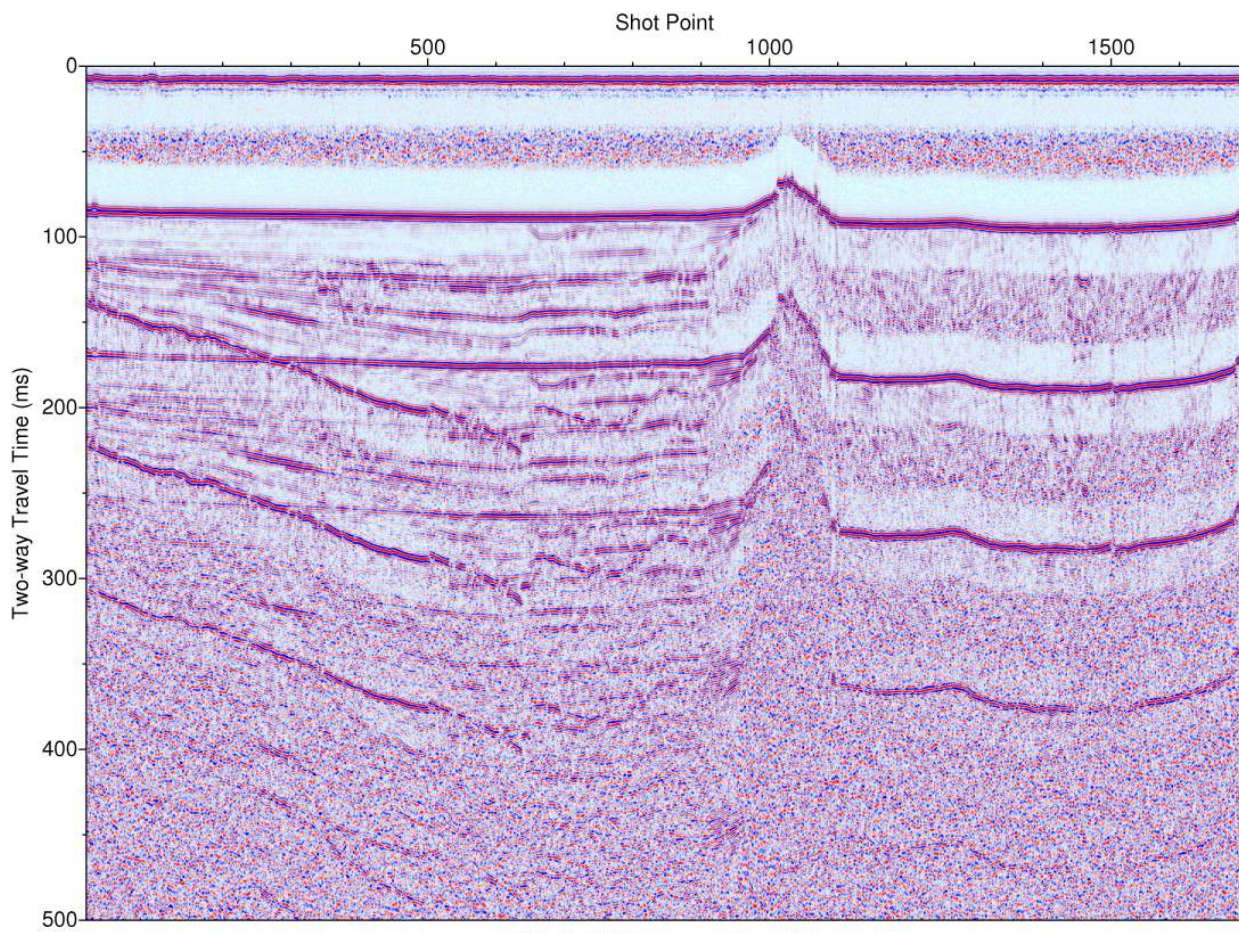
Sparker seismic profile U10-15.



Sparker seismic profile U10-16.

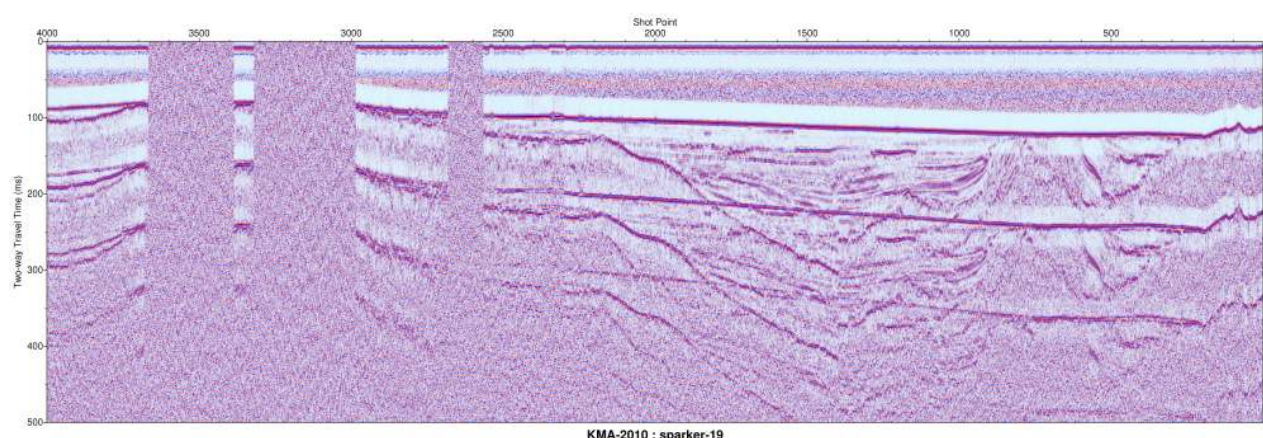


Sparker seismic profile U10-17.



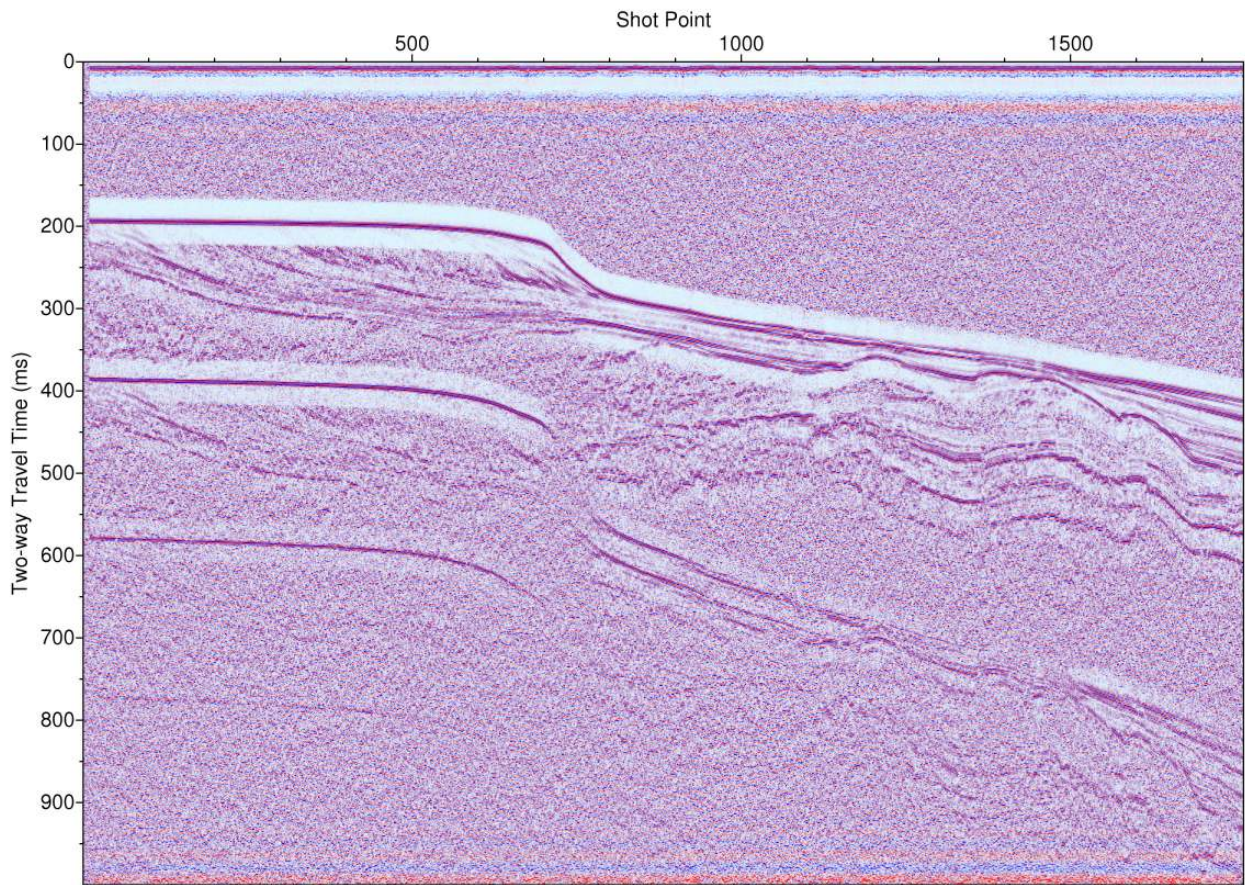
KMA-2010 : sparker-18

Sparker seismic profile U10-18.



KMA-2010 : sparker-19

Sparker seismic profile U10-19.



KMA-2010 : sparker-20-2

Sparker seismic profile U10-20.

주 의

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