지진기술개발사업

고해상 탄성파 탐사를 이용한 한반도 연안의 신기 지진활동 분석

Analysis of earthquake activity in the offshore of the Korean Peninsula using the high-resolution seismic survey method

한국해양과학기술원

기 상 청

제 출 문

기상청장 귀하

이 보고서를 "고해상 탄성파 탐사를 이용한 한반도 연안의 신기 지진활동 분석"의 보고서로 제출합니다.

2015 년 2 월 28 일

주관연구기관명 : 한국해양과학기술원

주관연구책임자 : 김한준

연 구 원:주형태 이상훈

최동림 권미홍

최승민 이수환

전청균 황하기

김진수

보고서 요약서

과제고유번호	CATER 2012-8100	해당단계 연구기간	2014.03		단계	구분		3/1
		보안등급분류	보안(),	일반(O)	공개기 여 ⁵			가
연구사업명	사업명	기상 See-At	기술개발					
	세부사업명	지진기술개발사업						
	대과제명	제명 대과제가 있을 경우에는 기재 (단위과제일 경우에는 아래 기재)						
연구과제명	세부과제명	lg 고해상 탄성파 탐사를 이용한 한반도 연안의 신기 지진활동 분석						
연구책임자	김한준	해당단계 참여연구원수	총 : 내부 : 외부 :	10 명 4 명 6 명	해당(연구		정부: 기업: 계:	105,000 천원 천원 105,000 천원
			총	총연구기간 참여연구원수	총 : 내부 : 외부 :	සo සo සo	총 연구	
연구기관명 및 소속부서명		참여기	업명					
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :							
위 탁 연 구	연구기관명 : 연구책임자 :							
요약						보고	서면수	61

- o 한반도 남동 대륙봉은 양산단층계의 단층들이 연장되었을 것으로 추정되는 해역 이다. 이 연구에서는 한반도 남동 대륙봉에서 고해상 탄성파 탐사를 수행하여 단 층의 존재를 파악하고 층서해석을 통해 4기 단층의 분포와 구조 그리고 활동성을 해석하였다.
- o 조사해역내에 4기 층서를 변형시킨 단층들로 이루어진 단층지역이 존재한다. 이 단층지역은 부산 연안에서 약 13 km 남쪽에 위치하며 포기 4 km 이며 길이가 8 9 km 로서 양산단층계에 속하는 일광단층의 연장으로 해석된다.
- o 단층지역은 플라이오세와 4기 층서를 수직으로 각각 7 m와 3 m 이상 변형시킨 수직단층과 균열로 구성되어 있다.
- o 단층지역내에서 확인된 단층들은 우수주향이동 단층의 releasing bend에서 형성 되는 extensional duplex와 유사한 구조를 가진다.
- o 4기 지층에서 3기 지층까지 깊이에 따라 수직변위가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 단층의 활동이 이 시기동안 지속적으로 발생하였음을 지시한다.
- o 일광단층이 플라이오세와 4기에 활동하여 단층지역을 형성한 것은 한반도에서 발생하는 지진으로부터 유추한 E-W 혹은 ENE-WSW 방향의 응력에 대한 직접적인 반응으로 해석된다.

색 인 어	한	글	양산단층계, 일광단층, 고해상 탄성파탐사, 신장성 듀플레스, 4기 단층
(각 5개 이상)	영	ОН	Yangsan fault system, llgwang fault, high-resolution seismic profiling, Quaternary fault



요 약 문

I. 제목

고해상 탄성파 탐사를 이용한 한반도 연안의 신기 지진활동 분석

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 필요성

- 한반도의 남동부는 우리나라에서 지진활동이 가장 활발한 지역으로 현재 이 지역에서 활성의 논란이 되고 있는 우수주향의 이동성을 보이는 양산단층계가 분포하고 있다.
- 한반도의 남동부는 인구와 산업시설이 밀집한 중요한 지역이지만 육상탄성파 탐사를 체계적으로 그리고 쉽게 수행하지 못 하여 잘 발달된 단층의 존재에도 불구하고 주향이동 운동과 관련한 단층의 발달과정, 단층대의 존재, 단층의 구 조, 그리고 단층활동에 의한 4기 퇴적층의 변형을 파악하지 못하고 있다.
- 지각내에서 응력과 변형의 분포는 일차적으로 단층에 의해 지배되므로 지각변형을 해석하기 위해서는 단층들이 어떻게 전파하고 자라며 서로 간에 작용을하는 지를 이해하는 것이 지진재해를 평가하는 데에 필수사항이다. 해양은 침식환경이 육상과 달리 퇴적환경이므로 퇴적층이 잘 보존된다.
- 양산단층계에 속하는 단층들은 전부 한반도의 남동 대륙붕 해역으로 연장되고 있으므로 해양탄성파 탐사를 통해 연구해역내 단층의 기하학적 모양과 특성을 파악할 수 있으며 층서연구결과를 결합함으로써 단층활동의 활동연대도 파악할 수 있다.
- 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. 최근에대만, 터키, 미국, 그리고 일본 등지에서 심각한 지진피해가 났으며 우리 나라에

서도 중간규모의 지진이 자주 발생하고 있는 상황은 아직 원자력에 관한 우리 나라 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 원전 등 중요 산업시설과 인 구가 밀집해 있는 한반도 남동부의 지진특성을 정밀 분석하고 단층의 활동성을 평가하는 것은 가장 기본적이면서 필수적인 연구가 될 것이다.

2. 목적

- 한반도 남동 대륙붕에서 양산단층계의 운동과 관련된 단층의 분포와 특성 파악
- 해양 퇴적층의 층서해석을 통한 단층의 활동성 해석

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 한반도 남동 대륙붕에서 고해상 다중채널 탄성파 탐사
- 퇴적층서, 단층의 분포, 특성, 그리고 4기 활동성 해석

IV. 연구개발결과

한반도 남동부 대륙붕에서 스파커 시스템을 이용하여 360 km 이상의 고해상 탄성파 프로파일을 획득하여 단층의 분포와 활동성을 해석하였다. 이 연구에서 가 장 중요한 결과는 4기 퇴적층을 변형한 단층운동이 발생한 단층지역을 발견한 것이 다. 이 단층지역은 폭이 4 km, 길이가 8 내지 9 km 로서 NNE 방향으로 발달한 양 산단층계를 구성하는 일광단층의 연장선에 존재한다. 단층지역은 수직에 가까운 단 층과 균열로 이루어져 있으며 이들 단층과 균열은 분명히 플라이오세와 4기에 해당 하는 플라이스토세 퇴적층을 각각 7.5 m와 3.75 m 이상 수직으로 변형시켰다. 단층 지역에서 확인된 단층들은 주향이동단층의 releasing bend에서 형성되는 신장성 duplex와 유사한 구조를 가진다. 4기와 3기의 퇴적층에서 관찰되는 수직 변위는 깊이에 따라 증가하는데 이것은 단층이 4기까지 지속적으로 활동하고 있음을 지시한다. 이러한 특징들로 미루어 보아, 일광단층이 플라이오세와 4기에 계속 활동하고있으며 현재 한반도의 남동부에서 E-W 혹은 ENE-WSW 방향으로 작용하는 응력에대한 반응으로서 신장성 단층지역이 발달한 것으로 해석된다.

V. 연구개발결과의 활용계획

한반도의 남동부는 인구와 산업시설이 밀집해 있으며 양산단층계에서 발생하는 지진과 관련하여 활성단층의 존재여부가 관심사가 되고 있다. 지금까지 이 지역에서 육상조사를 통해 활성단층의 분포와 특성을 연구하고 있으나 단층의 위치만 추정하는 정도의 결과밖에 얻지 못하고 있다. 이 연구에서는 연구지역으로 연안역에서 고해상 다중채널 탄성파 탐사를 수행하여 단층의 분포를 구명하였으며 그 특성을 해석하였다. 이 결과는 한반도 남동부의 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 탄성파 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 offshore of the Korean Peninsula using the high-resolution seismic survey method

II. Necessity and Objectives of the Study

1. Necessity

- The southeastern Korean Peninsula is characterized by frequent occurrences of earthquakes, being structurally dominated by the Yangsan fault system consisting of right-lateral strike-slip faults. As a consequence, the fault system is a subject of debate in terms of current activity
- Although the southeastern Korean Peninsula hosts large population and densely built industrial facilities, land seismic works have not been systematically performed to detect the presence of a fault zone associated with strike-slip movement and to identify fault structure.
- Distribution of stress and deformation within the crust is primarily controlled by faults. The correct understanding of crustal deformation necessitates the need to investigate how the faults propagate, grow, and react to each other. Unlike a land region subjected to erosion, the sea preserves sedimentary structure. Therefore, a marine seismic survey can provide important information of the presence of faults and their structure by delineating the detailed structure of the subsurface consisting of sediments and the geometry of the faults.
- Considering that all the faults belonging to the Yangsan fault system extend offshore the southeastern Korean Peninsula, the distribution of faults and their

geometry, if any, could be defined with the help of marine seismic surveys, which, in turn, can be used to evaluate fault activity by incorporating stratigraphic analysis.

Although Korea is known to be a seismically safe zone unlike neighbouring Japan, academic circles brought into debate the contemporary 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 damages 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 the activity of the Yangsan fault system in the continental shelf area of the southeastern KOrean Peninsula.
- Interpretation of fault activity based on stratigraphic analysis.

IV. Results of the Study

We acquired over 360 km of high-resolution seismic profiles offshore the southeastern Korean Peninsula to investigate deformation by faulting using a sparker system. Our most significant result is the identification of a fault zone on the southeastern continental shelf of the Korean Peninsula that evidences activation in the Quaternary. This fault zone, 4 km wide and 8-9 km lengthwise, is bounded by an offshore extension of the NNE-striking Ilgwang strike-slip fault in the southeastern Korean Peninsula. The fault zone consists of very steep faults and fractures that clearly offset Pliocene and Quaternary sequences vertically, about more than 7.5 and 3.75 m, respectively. The faults identified in the fault zone form a structure similar to an extensional duplex at a releasing bend of a strike-slip fault in plan view. Vertical displacement of the sedimentary sequences increasing with depth from the Quaternary to the Tertiary indicates persistent movement on the faults. In our preferred interpretation, the reactivation of the NNE-trending Ilgwang fault in the Pliocene and the Quaternary development of an extensional fault zone is the direct response to E-W or ENE-WSW compression that is inferred from earthquakes occurring in the Korean Peninsula.

V. Suggestions for Applications

The southeastern coast of Korea hosts large population and close-set industrial facilities that draw escalating concerns about active faulting with the occurrences of earthquakes in the Yangsan fault system. Although distribution characteristics of active faults have been investigated so far on land, little has been obtained except the estimation of the loci of well-known faults. In this study we performed a high-resolution multichannel seismic survey offshore the southeastern Korean Peninsula. We mapped faults and analyzed characteristics and activity. The results of this survey can be directly utilized in the development of a neotectonic model of the southeastern 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 harbour facilities 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	7
Contents	13
List of Figures	17
Chapter 1. Outline of study	19
Chapter 2. Status of technological development domestic and	
overseas ·····	21
1. Research overseas	
1.1. Japan	
1.2. New Zealand	
1.3. U.S.A.	
2. Research in Korea	
Chapter 3. Content and results of the study	27
1. Introduction	
2. Geologic setting	
2.1. Tectonic setting of the southeastern Korean Peninsula	
2.2. Stratigraphic framework of the study area	
3. Data acquisition	
4. Seismic profiles	
4.1. Stratigraphic interpretation	
4.2. Fault structure	
5. Fault zone	
4. Conclusions	
Chapter 4. Objective achievement and external contribution	45
Objective achievement	13

2. External contribution

Chapter 5.	Plans for application	47
Chapter 6.	Overseas research information	51
Chapter 7	Current status of facility and equipment registered in national science and technology information service	53
Chapter 8.	References	55
Appendix A.	Seismic profiles from the study area	59
Appendix B.	Seismic profiles from the estuary of the Nakdong River ···	65

목 차

요약문	5
목차	15
그림 및 표목차	17
제 1 장 연구개발과제의 개요	19
제 2 장 국내외 기술개발 현황	21
1. 국외 연구 현황	
1.1. 일본	
1.2. 뉴질랜드	
1.3. 미국	
2. 국내 연구 현황	
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	27
1. 서론	
2. 지질환경	
2.1. 한반도 남동부의 지구조	
2.2. 연구지역의 층서	
3. 자료획득	
4. 탄성파 프로파일	
4.1. 층서해석	
4.2. 단층구조	
5. 단층지역	
6. 결론	
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	45
1. 목표 달성도	

2. 대외 기여도

제 5 장	연구개발결과의 활용계획	47
제 6 장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보	51
제 7 장	연구시설·장비현황 ·····	53
제 8 장	참고문헌	55
부록 A.	연구지역에서 구한 탄성파 프로파일	59
부록 B.	낙동강 하구역에서 구한 탄성파 프로파일	65

그림 및 표목차

List of Figures and Tables

- Fig. 1–1. Distribution of earthquakes recorded recently in and around the Korean Peninsula.
- Fig. 2-1. Reverse fault along the eastern margin of Japan Sea. (From a PPT file by Yukinobu Okamura, Geological Survey of Japan, downloaded from the internet)
- Fig. 2-2. Interpretation map of geologic structure of the Whakatane Graben, New Zealand, showing the major active faults and the positions of the multichannel seismic and 3.5 KHz profiles (from Lamarche et al., 2000).
- Fig. 2-3. Active faults offshore California (from Fisher et al., 2009).
- Fig. 3-1. Present-day stress field in East Asia (modified from Lee et al., 2011).

 The rectangle indicates the area detailed in Fig. 2. MTL = Median Tectonic Line.
- Fig. 3-2. Geologic map of the southeastern Korean Peninsula (from Ree et al., 2006). The rectangle indicates the area in Fig. 3-4. The solid lines indicate the locations of offshore seismic profiles collected in a reconnaissance mode.
- Fig. 3-3. Schematic diagram representing buildup of the Plio-Quaternary shelf sequences on the southeastern continental shelf of Korea created in response to sea-level fluctuations (from Yoo et al., 2006).
- Fig. 3-4. Locations of seismic profiles collected in the fault zone. The sesimc profiles shown in this study are plotted as thick lines labeled with a figure number.
- Fig. 3–5. (a) Seismic profile of P–02 and (b) its interpretive line drawings. See Fig. 3–4 for location.
- Fig. 3-6. (a) Seismic profile of P-04 and (b) its interpretive line drawings. See Fig. 3-4 for location.
- Fig. 3-7. (a) Seismic profile of K-04 and (b) its interpretive line drawings. See Fig.

- 3-4 for location.
- Fig. 3-8. (a) Seismic profile of K-06 and (b) its interpretive line drawings. See Fig. 3-4 for location.
- Fig. 3-9. Locations of Quaternary faults offshore the southeastern Korean Peninsula.
- Fig. 3-10. Map and cross-sections of a general strike-slip fault system, showing flower structures and duplexes developed at bends (modified from Woodcock and Rickards, 2003).

제 1 장 연구개발과제의 개요

우리 나라의 해안과 이에 가까운 지역은 많은 인구를 수용하고 있을 뿐만 아니라 중요 산업의 중심지이다. 최근 백령도 해역 지진 (규모 4.9), 보령 해역 지진 (규모 3.5), 그리고 흑산도 해역 지진 (규모 4.9)의 예에서 보듯이 지진의 빈도와규모가 증가하고 있음에도 (Fig. 1-1) 지진.지체구조적 연구와 단층의 활동성에 대한연구가 미진하다.

한반도의 주변해가 형성될 당시 상당한 단층작용이 있었으며 현재 발생하는 지진들도 이들 단층 중 일부에서 발생하고 있다 (e.g., Kim et al., 2011). 역사시대, 홀로세, 그리고 후기 플라이오세 동안 활동한 단층을 활성단층이라 정의할 수있다 (Trifonov et al., 1993). 일반적으로, 역사에서 기록된 강한 지진의 약 90%가 활성단층지역에서 발생하였다 (Trifonov et al., 1993). 따라서, 활성단층의 확인, 분석, 그리고 mapping은 seismic zonation과 지진지체구조 연구에서 매우 중요한 부분이며 GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program)에 적용된다. 단층의 분포와 활동성을 구명하기 위해서는 현재 활동할 가능성이 있는 4기 단층의 공간적 분포, 성장률, 활동도, 그리고 단층간의 연결작용을 파악하고 현재 일어나고 있는 지각의 변형을 종합적으로 설명하여야 한다. 이 목적을 위해서는 우리나라 주변해에서 탄성파 탐사를 통해 4기 층을 변형시킨 단층의 분포와 구조 그리고 충서해석을 통한 단층활동의 시기를 밝혀야 한다.

우리나라에서는 양산단층계의 활동성이 가장 큰 논란이 되고 있다. 하지만 육상은 기본적으로 침식환경이며 4기 퇴적층이 극히 제한적으로 분포하거나 교란되어 있으며 지표면은 대부분 풍화를 받았을 뿐만 아니라 양산단층계가 존재하는한반도의 남동부는 인구와 산업시설이 밀집하여 4기 층의 구조와 변형을 자세히파악하는 탄성파 탐사가 불가능하다. 이에 비해 바다는 기본적으로 퇴적환경이므로 4기 퇴적층이 매우 잘 보존되어 있으며 4기 퇴적물이 바닷물에 포화되어 있어서 풍화대가 존재하지 않으며 주파수가 높은 음파를 발생시키는 음원을 이용하여고해상의 지질구조를 얻을 수 있다. 더욱이 양산단층계에 속하는 단층들은 거제와 부산 사이의 해역내로 연장하는 것으로 추정되므로 해양탄성파 탐사를 통해거제와 부산 사이에서 4기 층을 변형시킨 단층의 존재와 활동성을 구명함으로써

양산단층계의 활동을 해석할 수 있다.

이 연구에서는 기상기술개발원 (현재 한국기상산업진흥원) 에서 지원하는 연구비로 2012년 3월부터 2015년 2월까지 3년간 한반도의 남동대륙붕에서 고해상 탄성파탐사를 수행하여 4기 퇴적층을 변형시킨 단층의 분포를 파악하고 4기 층의층서해석을 통해 단층의 활동시기를 해석하고자 하였다. 이 연구를 통해 거제-부산간 해역에서 4기층을 변형시킨 단층을 발견하였다. 발견된 단층은 단층지역을이루고 있으며 양산단층계에 속하는 일광단층의 연장으로서 우수주향의 신장성듀플렉스를 형성한 것으로 해석하였다.

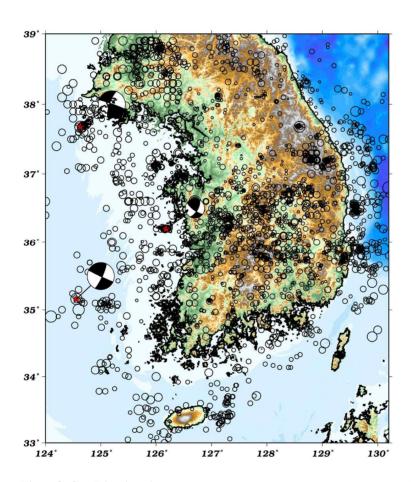


Fig. 1-1. Distribution of earthquakes recorded recently in and around the Korean Peninsula.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

바다는 육지에 비해 더욱 활발한 지구조 운동이 발생한 지역이다. 따라서 많은 나라에서 인접한 바다의 지진위험성을 파악하기 위해 탄성파 탐사를 중심으로 이용하여 지진지체구조를 밝히고 지진의 특성과 발생기구 등의 지진학적 연구를 수행하고 있다. 지체구조를 연구하기 위해 미국과 유럽은 미국과학재단(NSF)이 지원하고 여러나라가 참여하는 프로그램으로서 수행되는 MARGINS 등의 연구과제를 수행하고 있다. 연안에서 단층운동을 구명하기 위한 탄성파 탐사를 수행하는 중요한 연구과제와 수행예를 들어보면 다음과 같다.

1. 국외 연구 현황

1.1 일본

1960년대 이후 지체구조학, 구조지질학, 4기 지질학, 그리고 지진학과 협동으로 활성단 충연구를 수행하고 있다. 특히, 일본열도와 주변해역에서 활성단층의 mapping에 많은 노력을 들이고 있다. 관련연구의 결과는 동경대에서 편집한 Active Faults in Japan이라는 책과 일본활성단층학회 (Japanese Scociety for Active Fault Studies)에서 출판하는 Active Fault Research라는 학술지로 발표된다. 이 연구는 계속 진행중이며 활성단층에 대한 자료는 큰 지진의 장기예측과 강진동 예측에 사용중이다.

1995년 Hyogo-ken Nanbu 지진 (한신대지진)이후 100개 이상의 활성단층을 조사하여 단층활동의 시기를 연구하였지만 연안의 해양조사를 수행하지 못 하였다. 2007년 Noto-Hanto 지진과 Chuetsu-Oki 지진이 알려지지 않은 연안의 활성단층에 의해 발생하여 피해를 입힌 이후 연안의 활성단층에 관심을 가지게 되었다. 이후 해마다 Geological Survey of Japan 등에 의해 해양탄성파 탐사를 통해 연안의 활성단층에 대해 분포와 활동성을 조사하고 있다 (Fig. 2-1).

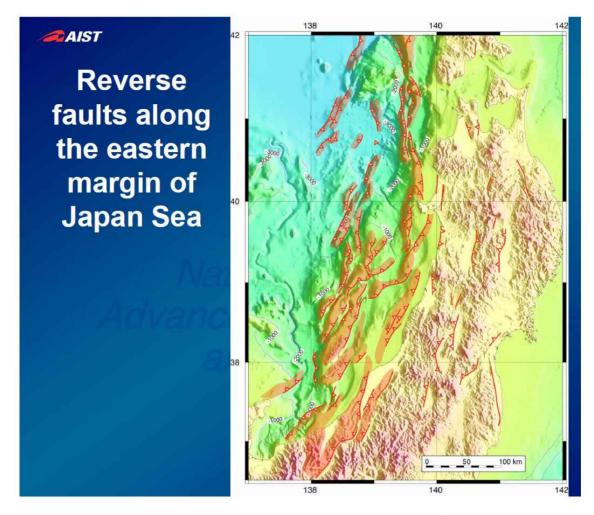


Fig. 2-1. Reverse fault along the eastern margin of Japan Sea. (From a PPT file by Yukinobu Okamura, Geological Survey of Japan, downloaded from the internet)

1.2 뉴질랜드

태평양판과 호주판이 만나는 경계지역내에 위치하므로 지진활동이 심하고 활성단충활동이 발생하며 침강이 급격히 일어나는 Whakatane 지구대의 탄성파 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 탄성파 단면과 고해상 (3.5 KHz) 천부 퇴적단면, 그리고 시추 퇴적물 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 동하기 시작했는지를 보여 주는 데에 중점을 두고 있다 (Fig. 2-2).

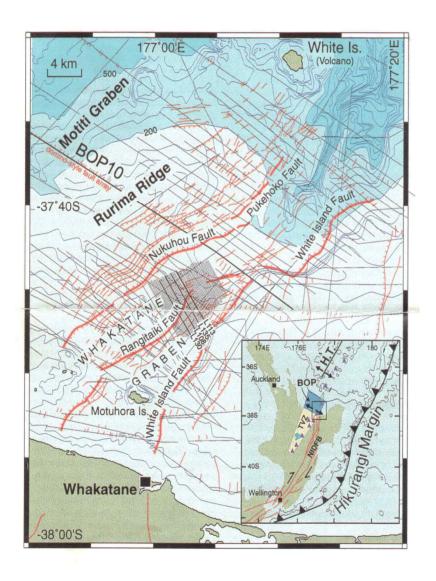


Fig. 2-2. Interpratation map of geologic structure of the Whakatane Graben, New Zealand, showing the major active faults and the positions of the multichannel seismic and 3.5 KHz profiles (from Lamarche et al., 2000).

1.3 미국

San Adreas 단층 등에서 발생하는 지진활동에 의해 많은 피해를 입는 미국은 U.S. Geological Survey와 많은 연구 기관이 연안에서 탄성파 탐사를 수행하여 활성단층의 분포를 조사하고 있다 (Fig. 2-3). 특히 San Andreas단층에 의한 피해가 큰 캘리포니아의 경우, 변형물(strain)의 partitioning과 오래 전에 형성된 지구조에 의해 지진재해의 평가기 매우 어렵다. 이 지역에서 다중채널 탄성파 탐사 등을 통해 단층의 분포와 구조 그리고 지진활동과 관련된 특성을 연구하고 있다 (e.g., Fisher et al., 2009).

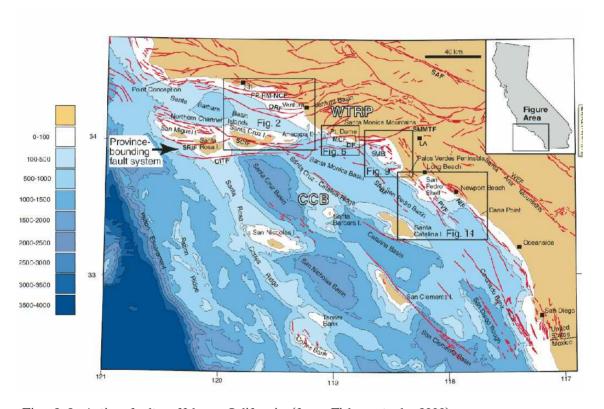


Fig. 2-3. Active faults offshore California (from Fisher et al., 2009).

2. 국내 연구 현황

국내에서 주변해역내 활성단층의 분포를 조사한 것은 원전부지의 지진안정성을 평가하기 위한 일환으로 시작되었다. 한국해양과학원에서 기상청에서 연구비를 지원하여 탄성파 탐사를 통해 단층의 분포와 활동성을 연구하기 위해 2008년 3월부터 2011년 2월까지

"고해상 탄성파 탐사를 이용한 동해연안의 신기 지진활동 분석"을 수행하였다. 이 연구를 통해 후포분지내 일부 지역의 단층분포를 분석하였다. 한국해양과학기술원에서는 2012 년 3월부터 2015년 2월까지 기상청의 지원으로 "고해상 탄성파 탐사를 이용한 한반도 연안의 신기 지진활동 분석"을 수행하고 있다. 이 연구에서는 양산단층군이 연장되어 있을 것으로 예상되는 부산 연안에서 단층구조를 발견하여 구조와 층서해석을 수행함으로써 일광단층이 4기 지층을 변형시켰으며 우수주향 단층의 releasing end에서 단층대를 형성시켰음을 구명하였으며 이 보고서에서 그 내용을 서술하고 있다.



제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 서론

한반도는 일본열도로부터 바다를 사이에 두고 떨어져 있는 유라시아판 내에 위 치한다. 20세기 초부터 기록된 계기지진은 규모 5.0으로 발생하는 경우가 적다. 그 러므로 한반도는 지진발생의 관점에서 안전한 것으로 간주되어 왔다. 하지만, 역사 자료와 계기지진자료는 한반도의 남동부가 한반도에서 가장 지진이 자주 발생하는 지역임을 제시한다 (Kyung, 2010). 한반도의 남동부에서 가장 눈에 띄는 구조는 양 산단층계로서 NNE-방향으로 발달한 밀양, 모량, 양산, 동래, 그리고 일광단층으로 이루어져 있다 (Fig. 3-1). 특히 양산단층은 190 km이상의 길이를 가진다. 이들 상당 히 평행한 단층들은 팔레오세에 만들어진 주향이동 단층들로 알려져 있다 (Ree et al., 2003). 양산단층을 따라 발생한 우수주향운동의 주된 부분은 마이오세 중기 이 전에 발생하였다 (Chang et al., 1999). 하지만, 양산단층계가 4기에 활동했음을 여러 사람들이 보고하였다. Lee and Yang (2005)은 단층암석의 연대측정을 이용하여 일 광단층이 1,300에서 500 kadp 재동하였음을 제시하였다. 따라서 한반도의 남동부에 서 양산단층계의 활동과 관련하여 4기 단층의 특성과 구조를 구명하는 것은 매우 중요하다. 단층들은 상부지각내에 변형율을 배치하는 데에 일차적 요인이 되므로 이들이 하나의 단층계에서 어떻게 전파하고 자라고 연결되는지를 이해하는 것 또한 중요하다 (Lamarche et al., 2000). 탄성파프로파일링은 이러한 목적에 부합하는 영 상을 제공할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 양산단층계가 위치하는 지역의 경우 많은 인구가 살고 산업시설이 발달하여 탄성파 프로파일링이 전체적으로 수행되지 못하 고 있다.

이 연구에서는 한반도의 남동 연안에서 고해상 탄성파 프로파일들을 얻었다. 대륙붕에는 육상기원의 퇴적물들이 쌓이므로 단층작용에 의한 변형이 비교적 잘 보존되어 있다. 바다에서 표층퇴적물은 일반적으로 물로 완전히 포화되므로 비록 미고결상태이지만 육상에서처럼 풍화대를 만들지 않는다. 양산단층계에 속하는 모든 단층들은 한반도의 남동해안까지 연결되어 근해로 연장되는 것으로 보인다 (Fig. 3-2). 그러므로, 해양 탄성파 프로파일은 이들 단층에 의한 변형의 영상화와 특성구명에

적합하다. 이 연구에서는 한반도의 남동연안에서 단층을 확인할 수 있는 지질단면을 획득하여 연구지역내 층서해석을 수행하여 4기 단층의 활동성을 구명하였다.

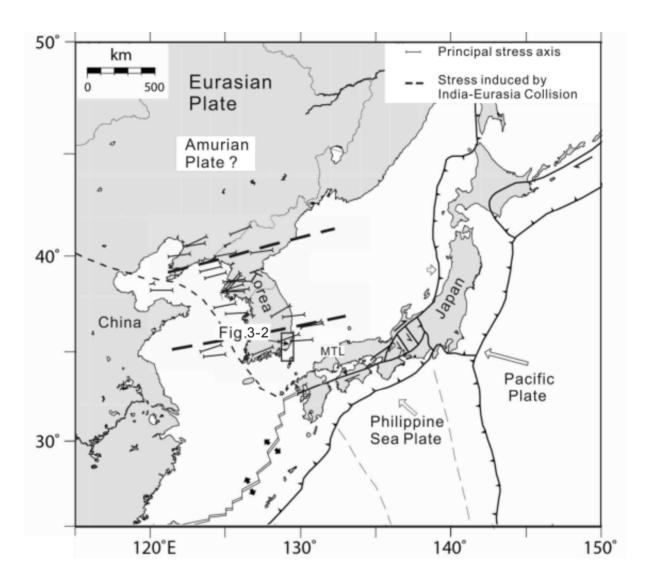


Fig. 3-1. Present-day stress field in East Asia (modified from Lee et al., 2011).

The rectangle indicates the area detailed in Fig. 3-2. MTL = Median Tectonic Line.

2. 지질환경

2.1. 한반도 남동부의 지구조

유라시아판의 동쪽 끝부분에 위치하는 한반도의 주변에는 동쪽으로 일본열도 뒤 에서 후열도해인 동해, 서쪽으로는 서해와 남중국해가 위치한다 (Fig. 3-1). 한반도 의 남동부는 백악기 이후 오랫동안 신장력의 지배를 받아 왔다. 먼저, 백악기 때에 Izanagi 판이 아시아의 대륙주변부 아래로 섭입하여 경상분지를 형성하였다 (Ree et al., 2003). 다음에, 올리고세 후기에서 마이오세 중기까지 큰 규모의 신장력에 의해 남서 일본열도가 한반도의 동쪽 주변부로부터 떨어져 나가 동해를 형성하였다 (Kim et al., 2015). 시코쿠분지의 암권이 북쪽으로 이동하여 약 15 Ma경에 남서 일본열도 와 부딪히면서 동해의 확장은 멈추었다 (Hibbard and Karig, 1990). 한반도의 남동 대륙주변부는 동해의 확장이 멈춘 이후 두 방향의 압축력을 받고 있다: 15 Ma부터 가장 후기 마이오세 전까지 NW-SE 그리고 플라이오세부터 현재까지 ENE-WSW 혹 은 E-W (Lee et al., 2011). 최근의 측지자료와 지진자료는 유라시아판의 남동 끝부 분이 아무리아판이라 불리우는 작은 판으로 분리되었음을 제시한다 (e.g., Zonenshain and Savostin, 1981). 아무리아판의 분리는 유라시아판과 인도판의 충돌 에 의한 결과로 해석된다. 아무리아판은 한반도와 남서 일본열도, 북동 중국, 그리 고 러시아의 극동지역으로 구성되는데 플라이오세 이후 유라시아판에 대해 상대적 으로 동-북동 혹은 동쪽 방향으로 이동하고 있다 (Taira, 2001) (Fig. 3-1). Lee et al. (2011)은 한반도의 남동 대륙붕 지역에서 유추되는 ENE-WSW 혹은 E-W 방향의 압축력이 플라이오세 이후 동쪽으로 이동하는 아무리아판 때문으로 해석하였다. 한 반도 남동부에서 발생한 미소지진의 단층면해는 ENE-WSW 방향의 응력장의 압축 을 지시하는데 (Lee and Chung, 1999) 아무리아판이 동쪽으로 이동하는 현상과 일 치하다.

양산단층계는 경상분지를 가로지르는 NNE 방향으로 분포하는 단층들로 구성된다. 양산단층계는 팔레오세에 만들어져서 주로 SSW 방향으로 우수주향운동을 하며활동하였다 (Chang and Chang, 1998). 양산단층계 중에서 양산단층은 길이가 190km 이상으로 약 35km에 달하는 우수주향 변위를 보인다 (Fig. 3-2). 양산단층은 약45 Ma의 rhyolitic tuff를 자르고 마이오세 중기의 퇴적층에 덮혀 있으므로 40 - 20 Ma 동안 양산단층의 우수주향 이동에서 대부분이 발생했다고 볼 수 있다 (Chang

et al., 1990; Ree et al., 2003). 하지만 양산단층의 경우 넓은 폭의 파쇄대로 인하여 단층면의 지질 구조적인 특징을 인지하기가 쉽지 않다. 따라서 1970년대 초까지는 동편육괴가 하강한 경사이동단층으로 해석하기도 했지만 Reedman and Um (1975)의 연구 이후부터 단층의 동편육괴가 하강한 우수주향 이동단층으로 해석하고 있다. 양산단층에 비해 같은 단층계에 속하는 다른 단층의 경우 연대와 변위가 상대적으로 연구되지 못 하였다. 최근에, 일광단층의 단층암의 electron spin resonance (EPR) 연대측정은 4기에 단층활동이 있었음을 지시한다 (Lee and Yang, 2005).

2.2. 연구지역의 층서

인근 육상의 기반암은 백악기 화산암으로 부분적으로 3기 화강암이 관입해 있다 (Kim et al., 2003). 이 암석은 대륙붕에서 퇴적층 하부의 기반암을 이룬다고 해석된다 (Inoue, 1982).

Yoo et al. (2006)은 한반도의 남동대륙붕에 퇴적된 지층의 층서를 플라이오세부 터 4기로 분류하였다. 전체적으로, 각 단위는 층서가 잘 발달되거나 복잡한 sigmoid-oblique한 전진구축형 (progadational)의 특징을 보이는데 이것은 퇴적층이 해수면 변동에 대한 반응으로서 쌓이면서 바다쪽으로 확장된 것을 반영한다. 가장 아래에 있는 플라이오세 단위는 lowstand systems track으로서 퇴적되었다. 위의 플 라이스토세 단위들은 lowstand, transgressive-to-highstand, 그리고 regressive-to-lowstand systems track들로 이루어 진다. 플라이오세와 플라이스토세 단위들은 외해쪽으로 점차 두꺼워지는 쐐기모양을 가진다. 홀로세 단위들은 두 개 로서 하나는 중간 대륙붕에, 다른 하나는 내만의 대륙붕에 존재한다. 중간 대륙붕에 있는 홀로세 단위는 landward transgression 동안 shorefavce erosion의 결과로서 퇴 적된 transgressive deposits로 이루어져 있다. 내만 대륙붕에 있는 홀로세 단위는 주 로 transgressive-to-highstand systems track으로서 주로 mud로 이루어져 있다. 이들 플라이오세와 4기 층서들은 regression 기간 동안 전진구축하여 쌓인 lowstand wedge모양을 가진다 (Yoo et al., 2006) (Fig. 3-3)

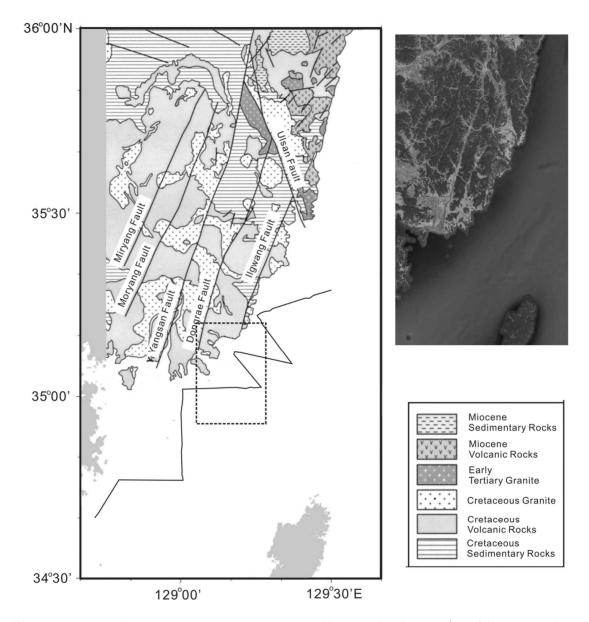


Fig. 3-2. Geologic map of the southeastern Korean Peninsula (modified from Ree et al., 2006). The rentangle indicates the area in Fig. 3-2b. The solid lines indicate the locations of offshore seismic profiles collected in a reconnaissance mode.

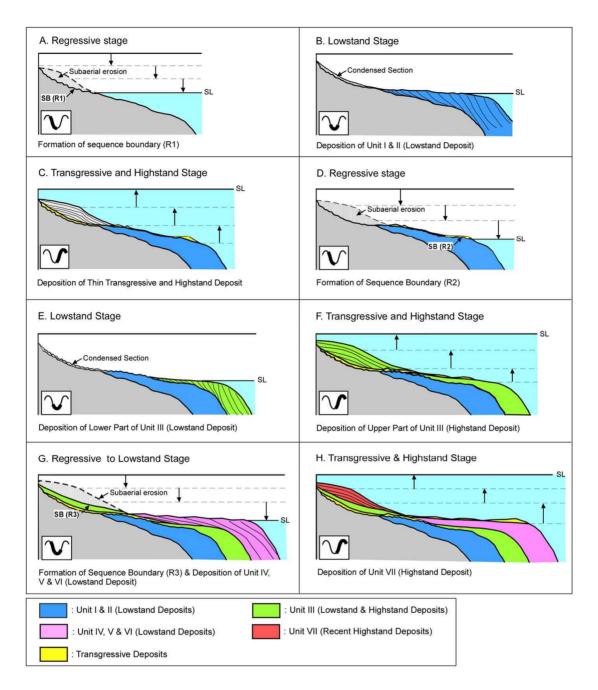


Fig. 3-3. Schematic diagram representing buildup of the Plio-Quaternary shelf sequences on the southeastern continental shelf of Korea created in response to sea-level fluctuations (from Yoo et al., 2006).

3. 자료 획득

3.1. 연구지역 자료

이 연구에서 사용한 자료는 두 set의 고해상 단채널 탄성파 반사 프로파일들이 다. 첫 번째 set의 프로파일들은 전체 길이가 165 km인 9 개로서 양산단층계가 연 장되었을 것으로 추측되는 한반도 남동부 근해에서 단층이 존재하는지 알아보기 위 해 기상지진사업인 "고해상 탄성파 탐사를 이용한 동해연안의 신기 지진활동 분석"에 서 2010년 개략탐사의 개념으로 얻은 것이다 (Fig. 3-4). 첫 번째 set 중 한 프로파일 에서 단층작용에 의해 얕은 곳의 퇴적층이 변형된 것을 발견하였다. 두 번째 set의 자료는 이 변형대를 정밀조사하기 위해 이 연구에서 얻은 약 200 km의 프로파일들 이다. 두 번째 set의 자료는 5개의 N-S 측선과 (Fig. 3-4에서 P-01에서 P-05로 표시) 8개의 E-W 측선으로 (Fig. 3-4에서 K01에서 K08로 표시) 구성된다. N-S 측선과 E-W 측선의 길이는 각각 평균 20 과 10 km 이다. 자료획득을 위해 SIG 2mille 스 파커 시스템을 사용하였다. 이 장비에서 만들어지는 탄성파 펄스의 주 주파수는 500 Hz이다. 스파커는 2초마다 1000 joule의 에너지로 방전하였으며 조사선의 운항 속도는 평균 5 노트였다. 고해상 탐사 신호는 0.1 ms의 샘퓰율로 1초 길이로 수신 하였으며 수신된 신호는 80 - 1200 Hz의 대역으로 밴드패스 필터를 하였다. E-W 측선의 프로파일들은 본 사업의 1차년도 기간 중 2012년 6월에, 그리고 N-S 측선의 프로파일들은 2차년도 기간 중 5월에 획득하였다. 이 보고서의 본문 내용에서 보여 주지 못한 프로파일들은 부록 A에 수록하였다.

3.2. 기타 탐사 자료

양산단층이 연장되었을 것으로 추정되는 낙동강 하구에서 이 연구의 3차년도인 2014년 6월에 스파커 프로파일들을 획득하였다. 기상불량으로 계획된 측선 전체에 대한 자료를 얻지 못 하였으나 약 15 km 길이의 E-W 측선 프로파일 세 개와 N-S 측선 프로파일 세 개를 획득하였다. 이들 프로파일들은 단층에 의해 변형된 것으로 해석할 수도 있는 구조를 보여 주지만 낙동강 하구 델타지역에서 얻은 것이므로 복잡한 층서와 퇴적구조 때문에 정확한 해석이 곤란하다. 따라서 이 연구의 자료로활용은 하지 못하였다. 대신, 부록 B에 측선 위치와 프로파일들을 정리하였다.

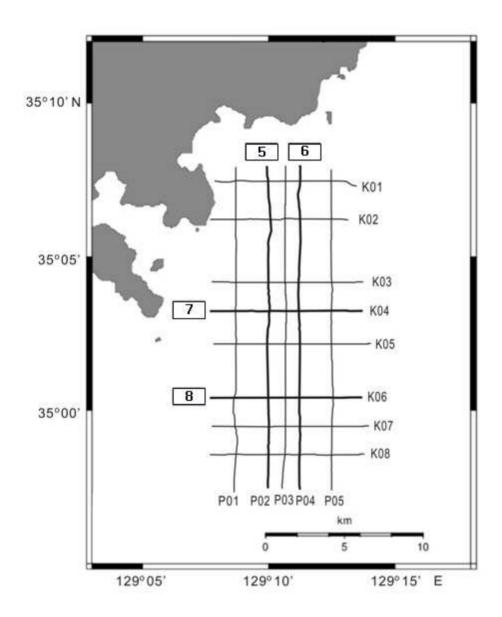


Fig. 3-4. Locations of seismic profiles collected in the fault zone. The sesimon profiles shown in this study are plotted as thick lines labeled with a figure number.

4. 탄성파 프로파일

4.1. 층서해석

연구지역에서 얻은 탄성파 프로파일들에서 보이는 탄성파상(seismic facies)의 외부 및 내부 특징을 기초로 음향기반 상부에 쌓인 퇴적물을 7개의 주요 단위로 구분

하였다 (Figs. 3-5 to 3-8). 이들 단위는 프로파일들에서 일관성있게 연결할 수 있는 반사면에 의해 나뉘어지는 탄성파 층서들이다. 음향기반면은 가장 깊이 위치하면서 연속적으로 관찰되는 반사면에 해당한다. 음향기반은 일반적으로 해저면 다중반사의 위에서 잘 인식된다. 탄성파 층서들은 가장 오래된 순서로 U-1에서 U-7로 표시하였다. Inoue(1982)는 시추자료를 이용하여 대한해협에서 플면이오-4기 층서단위들을 분류한 바 있다. Yoo et al. (2006)은 한반도 남동 대륙붕의 퇴적층을 이 결과와 대비하여 플라이오-4기 층서단위들로 구분하였다. 연구지역에서, 프로파일들에서 보이는 탄성파 단위들을 Yoo et al. (2006)에서 분류된 것들과 대비해 보면 U-1과 U-2는 플라이오세, U-3은 초기 플라이스토세, U-4와 U-5는 후기 플라이스토세, 그리고 U-6와 U-7은 홀로세로 해석된다.

전기 플라이오세 단위로 해석되는 U-1의 탄성파상은 반투명하거나 불규칙하지만 후기 플라이오세 단위인 U-2는 연결성이 낮으면서 진폭이 약하거나 강한 불규칙한 반사신호로 이루어져 있다. 이들 플라이오세 단위들은 전체적으로 쐐기모양을 이루고 있으며 남동쪽의 외해쪽으로 두꺼워진다. 플라이오세 단위들인 U-3에서 U-5는 평행하고 완만히 경사진 연결성이 좋은 반사신호로 이루어져 있으며 외해쪽으로 전진구축하는 양상을 보인다 U-3의 하부 경계면은 플라이오세와 플라이스토신세단위 사이의 경계에 해당하며 매우 구분이 잘 된다. U-4 내부에는 저해수면에 생성된 침식면을 나타내는 것으로 해석된다 (Figs. 3-5 and 3-6).

홀로세 단위인 U-6는 상대적으로 얇으며 경사가 매우 낮은 중간 대륙붕의 넓은 지역을 덮고 있다. 음향특성상, 이 단위는, 부분적으로 바다쪽으로 경사지는 반사면을 포함하고 있으나, 불규칙하거나 혼란한 반사 패턴을 보여 준다 (Fig. 3-5). U-6는 홀로세 이후 해침이 시작한 이후 transgression 동안 육지쪽으로 이동한 shoreface erosion 에 의해 형성된 transgressive systems tract으로 해석된다. U-5와 U-6간 경계는 침식면으로 나타나는데 파도의 에너지가 높은 지역내 해안선이 육지쪽으로 물러나는 동안 대기중에 노출된 퇴적층에서 일어나는 wave erosion에 의해 만들어진 wave-ravinement surface로 (Posamentier and Allen, 1999) 해석된다. U-7은 렌즈모양으로 퇴적되어 있으며 편균입도가 8岁인 mud로 이루어져 있다 (KIGAM, 2000). 이홀로세 mud 단위는 한반도의 남동부에서 가장 큰 강인 낙동강으로부터 공급된다. 낙동강에서 공급되는 세립질 퇴적물은 강한 연안류에 의해 북동쪽으로 운반되어 한반도의 남동연안에 퇴적된다.

Yoo et. (2006)은 연구지역내 플라이오세와 4기 층서들이 주로 regressive-to-lowstand systems tract임을 제시하였다. 해수면의 regressive 및 lowstand 기간 동안 lowstand delta 퇴적물은 바다쪽으로 전진구축하지만 highstand 기간 동안에는 내대륙붕에 highstand 퇴적물로 쌓이게 된다. 이후 regression 기간 동안에 highstand 퇴적물은 심하게 침식되어 연구지역내 퇴적층서는 주로 전진구축하는 lowstand wedge들이 쌓여서 이루어진 것이다 (Fig. 3-3).

4.2. 단층구조

원칙적으로, 반사면들이 어긋나고 연결되지 않고 수평방향으로 층서의 연결이 끊어지는 현상에 의해 단층의 존재를 인식하였다. 이 연구에서 얻은 프로파일들은 단층작용에 의해 변형된 플라이오 및 4기 층서를 보연 준다 (Figs. 3-5 to 3-8). 변형을 일으킨 주 단층들은 세 개의 수직단층임을 알 수 있는데 각각 F1, F2, 그리고 F3로 표기하였다. 각각의 지층들은, 단층에 의해 어긋나더라도 일관된 두께를 가짐을 볼 수 있는데 이런 사실은 차별다짐 (partial compaction)이 변형의 주된 원인이 아님을 지시한다. 하지만, 해저면의 다중반사는 1차 반사신호들을 가리기 때문에 다중반사 아래로 해석은 곤란하다.

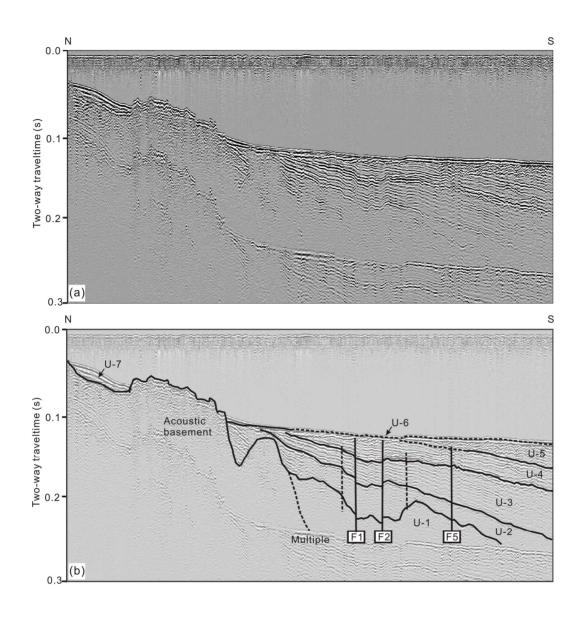


Fig. 3–5. (a) Seismic profile of P–02 and (b) its interpretive line drawings. See Fig. 3–4 for location.

F1은 가장 뚜렷하게 인식되는 단층으로서 연구지역에서 가장 왼쪽에 있다. 4기 충서내에서 F1의 수직변위는 10 ms (t.w.t) 이상이다 (Figs. 3-5 and 3-6). K-03 측선의 북쪽에 해당하는 내만 해역의 경우 4기 충서가 없거나 매우 얇아서 변형을 인지할 수 없으므로 F1뿐만 아니라 다른 단층의 존재는 확인할 수 없었다. F1이 후기 플라이오세 충서(U-5)의 상부 경계면까지 위쪽으로 연장되지만 바로 위에 있는 홀로세의 trangressive 충서단위인 U-6의 탄성파상이 매우 혼탁하므로 이를 변형시켰

는지는 불분명하다. 홀로세의 transgressive 퇴적물의 혼탁한 특성은 ravinement면 상에서 침식되고 재퇴적되는 작용때문일 것이다. F2는 약 5 km의 길이 범위에서 몇개의 프로파일들에서 인지된다. F1과 F2는 반대되는 변위의 sense를 보여주는데 그결과 이 들 사이에서 퇴적 층서가 상당히 침강했음을 알 수 있다. 침강의 범위는 F1을 따라 5 내지 10 ms (t.w.t)로서 퇴적물의 p파 속도를 1500 m/s로 가정하면 3.75 내지 7.5 m에 해당한다.

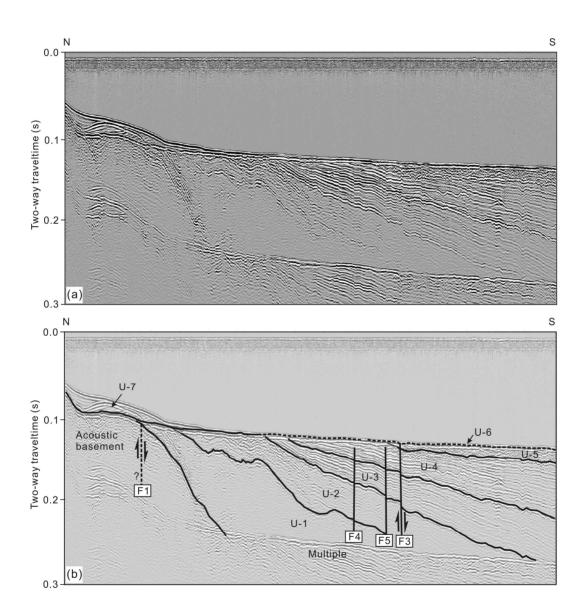


Fig. 3-6. (a) Seismic profile of P-04 and (b) its interpretive line drawings. See Fig. 3-4 for location.

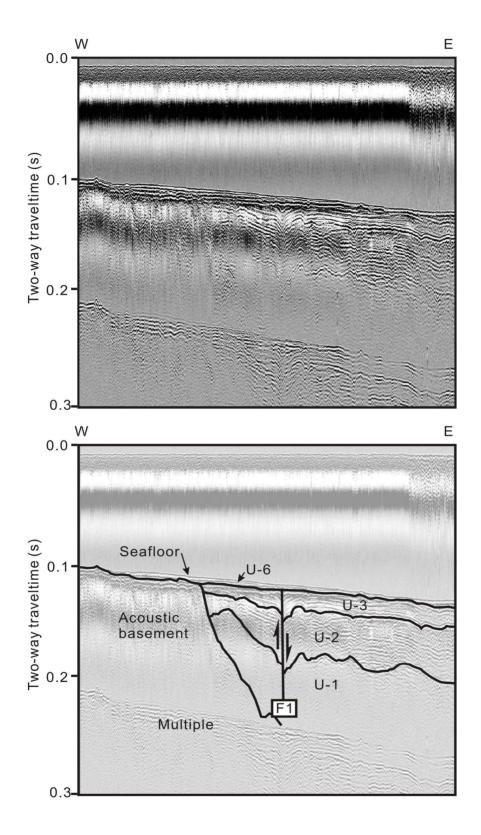


Fig. 3-7. (a) Seismic profile of K-04 and (b) its interpretive line drawings. See Fig. 3-4 for location.

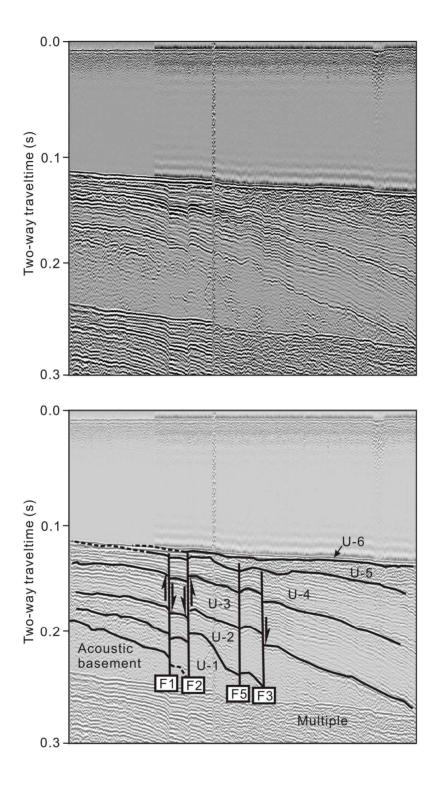


Fig. 3-8. (a) Seismic profile of K-06 and (b) its interpretive line drawings. See Fig. 3-4 for location.

F3는 길이가 상대적으로 제한되어 있지만 4기 층서를 변형시킨 것으로 인지되는 단층 중 가장 오른 쪽에 위치한 단층이다. 이 단층은 남동쪽 방향이 낮아지는 변위를 일으킨다. 플라이오세 층서에서 관찰되는 수직변위는 최대 10 ms 이상이지만 그위의 4기 층서내에서는 거의 보이지 않는다 (Fig. 3-6). F4와 F5는 F2와 F3 사이에 존재하는 소규모 구조로서 4기층을 변형시켰지만 변위의 규모가 작기 때문에 정확한 attitude는 불명확하다.

5. 단충지역

탄성파 프로파일들을 correlate해 보면 연구지역내 단층들이 일반적으로 북동방 향으로 발달해 있음을 알 수 있다. F1을 북쪽으로 연장해보면 이것이 일광단층이 연장된 것임을 시사한다. 전체적으로, F1의 방향은 일광단층과 마찬가지로 NNE이 다; 하지만, 해안에서 13 km 남쪽에서 상당히 NE 방향으로 꺾여져 있다. 연구지역 내에서 꺾여진 F1의 부분과 다른 단층들의 수평분포는 transtensional한 주향이동단 층의 releasing bend내에서 형성되는 fault/fracture network와 유사하다 (Figs. 3-9 and 3-10). 이 경우, F1과 F3는 경계단층으로 간주할 수 있으며 그 사이에 있는 단 충들은 horsetail faults 혹은 imbricate fan으로 볼 수 있다. 이 단충지역이 육상에 있는 일광단층과 같은 시기에 생긴 것인지는 알기 힘들지만 다음의 이유 때문에 transtensional한 환경에서 형성되었을 것으로 유추한다; (1) 일광단층은 우수주향의 주향이동단층이며 (2) 단층에 의해 가장 두드러진 변형은 Fl과 F2 사이에서 나타나 는 함몰이며 (3) F1이 꺾여진 것은 releasing bend에서 우수주향의 주향이동단층이 꺾여진 기하학적 모양과 일치한다 (Figs. 3-9 and 3-10). F3에서 외해쪽으로 지층들 은 상당히 침강하였는데 신장력이 F1과 F3 사이에 형성된 단층지역내에 국한된 것 이 아니고 대륙붕에 광범위하게 일어났음을 지시한다. F4와 F5에서 발생한 수직변 위가 거의 인지할 수 없을 정도로 작은 것은 F4와 F5가 duplex내에서 형성된 en-echelon shear fracture일 수 있음을 제시한다.

단충들을 따라 발생하는 수직변위는 깊이에 따라 증가한다 (Figs. 3-6 and 3-8). 이것은 단충작용이 퇴적과 동시에 진행되었음을 가리킨다. 만약 단충작용이 지층이 퇴적된 이후에 발생하였다면 단층에 의해 잘려진 충들의 수직변위는 동일할 것이 다. 따라서, 일광단층의 활동은 플라이오세에서 4기까지 지속적으로 진행되었다고 해석한다. 이 연구에서 확인된 단층들은 후기 플라이스토세 층서를 자르고 플라이 스토세-홀로세 경계까지 연장된다. 일부 단층들이 홀로세에도 활동을 했는지는 불 명확하다. 가장 중요한 이유로서, 단층지역내 홀로세 transgressive 지층의 탄성파상 이 매우 chaotic하여 내부의 층서구조를 파악할 수 없음을 들 수 있다. 또한, 홀로세 퇴적물이 너무 얇아서 탄성파 프로파일들의 분해능으로써 변위를 확인하기 힘들다 는 것도 생각할 수 있다. F2의 바로 오른쪽에 있는 퇴적층이 약간 위로 굽어진 것 을 볼 수 있다. 물로 포화된 미고결 퇴적물이 편평한 해저면을 형성한다는 것을 골 려하면 이 구조는 홀로세 동안 F2가 운동했을 가능성이 있음을 제시한다. 단층지역 내에서 플라이오세-홀로세 층서내의 반사면들은 약간 위로 볼록한 모양을 보이는데 (Figs. 3-5 to 3-8) 어느 정도까지 압축력이 작용했음을 반영한다. 이것은 플라이오 세부터 한반도의 남동부와 주변 대륙붕에서 작용하는 ENE-WSW 혹은 E-W 방향으 로 작용하는 압축력의 결과일 수 있다. 만약 그렇다면, 현재의 응력장이 한반도의 남동 대륙붕에 변형을 더 야기할 수 있을 것이다. 이 해석은 현재의 응력장이 한반 도의 남동부에서 slip을 더 일으킬 수 있다고 제시한 것과 (Ree et al., 2003)과 일치 한다.

6. 결론

한반도의 남동 연안에서 단층작용에 의한 변형을 조사하기 위해 고해상 탄성파 탐사를 수행하였다. 이 연구에서 가장 중요한 결과는 4기에 단층활동이 있었음을 지시하는 단층지역을 확인한 것이다. 이 단층지역은 폭과 길이가 각각 4 km와 8 - 9 km로서 양산단층계에 속하는 일광단층이 연안으로 진행한 연장선에 붙어서 존재한다. 단층지역은 수직의 (혹은 수직에 가까운) 단층과 균열로 이루어져 있으며 이들 단층은 플라이오세와 4기 퇴적층을 각각 7 m와 3 m 이상 수직방향으로 변위시킨다. 단층지역내에서 확인된 단층과 균열은 우수주향이동단층의 releasing bend에서 형성되는 신장성 듀플렉스와 유사한 구조를 보여준다. 4기부터 3기 지층까지 깊이에 따라 퇴적층의 수직변위가 증가하는 것을 관찰할 수 있는데 이것은 단층이 4기까지 지속적으로 활동했음을 지시한다. 일광단층이 플라이오세와 4기에 활동하여

단층지역을 형성한 것은 한반도에서 발생하는 지진으로부터 유추한 E-W 혹은 ENE-WSW 방향의 응력에 대한 직접적인 반응으로 해석된다.

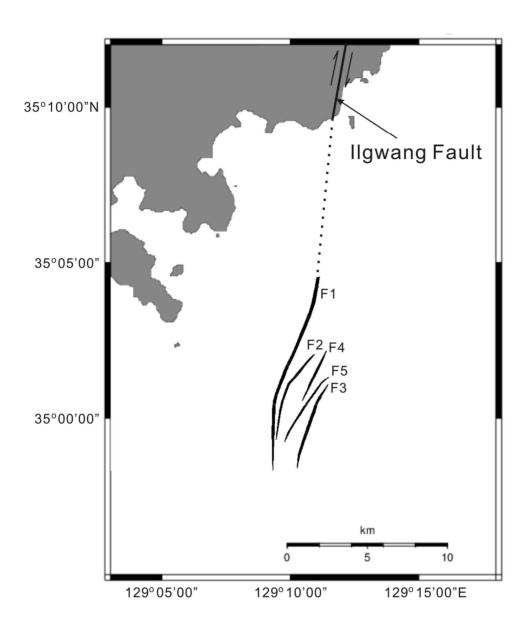


Fig. 3-9. Locations of Quaternary faults offshore the southeastern Korean Peninsula.

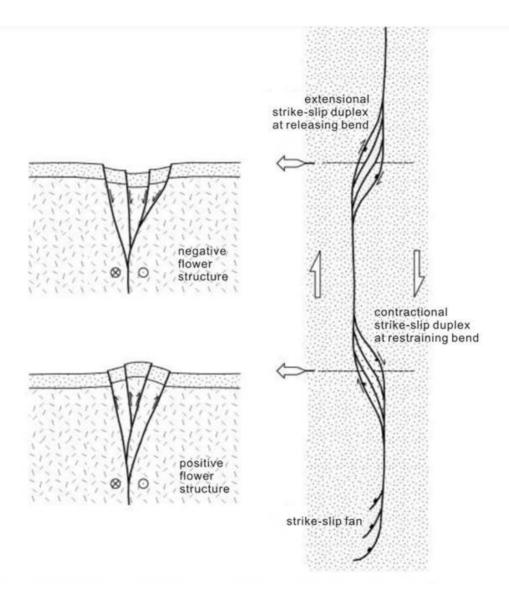


Fig. 3-10. Map and cross-sections of a general strike-slip fault system, showing flower structures and duplexes developed at bends (modified from Woodcock and Rickards, 2003).

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

1. 목표 달성도

연구개발의 범위	연구개발 방법 및 내용	달성도 (%)
한반도 남동 대륙붕 연안의 고해상 탄성피 탐사		100
양산단층계의 활동성 해석	 구조와 층서해석을 통한 양산단층군의 4기 활동성 해석 (1) 주향이동단층의 운동에 의한 것으로 해석 된는 단층지역 확인 (2) 4기 층서를 변형시킨 단층들은 반복적으로 활동하였음을 제시 (3) 단층지역은 일광단층이 연장된 것으로 해 석 	100

2. 대외 기여도

한반도 남동부에서 지진이 자주 발생하는 것과 관련하여 한반도에서 가장 큰 규모의 단층인 양산단층의 활동성이 지진.지체구조학적으로 주요 관심사이지만 육상에서 단층의 구조와 4기 활동에 의한 변형이 정확히 파악되지 못하고 있다. 이 연구에서는 양산단층군이 연장되었을 것으로 파악되는 부산 연안에서 고해상 탄성파탐사를 수행하여 4기 층서를 변형시킨 단층의 존재를 확인하고 이 단층이 일광단층의 연장임을 제시하였다. 육상에서 탐지가 어려운 양산단층의 구조와 4기 활동성을 해석할 수 있었다. 이 연구의 결과는 우리나라의 지진위험도를 정량적으로 해석하는 데에 유용하게 활용될 것이다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 연구목표 및 내용

양산단층군이 연장되었을 것으로 예상되는 거제-부산간 연안에서 스파커를 이용하는 고해상 탄성파 탐사를 수행하여 양산단층계의 운동과 관련된 단층의 분포와 특성을 파악하고 해양 퇴적층의 층서해석을 통해 단층의 활동성을 해석

- 2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)
- 가. 특허(실용신안) 등 자료목록
- 없슴 -
- 나. 프로그램 등록목록
- 없슴 -
- 다. 노하우 내역

탄성파탐사와 층서해석을 통한 양산단층군의 활동성 해석

라. 발생품 및 시작품 내역

바. 논문게재 및 발표 실적

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발 행 기 관	국 명	SCI게재 여부
Tectonophysics	Back—arc rifting in the Korea Plateau in the East Sea (Japan Sea) and the seperation of the southwestern Japan Arc from the Korean margin	2015년	638	Elsevier	네덜란 드	SCI
Marine and Petroleum Geology	Seismic characterization and imaging of a gas hydrate deposit in the western part of the Ulleung Basin, the East Sea (Japan Sea)	2013년 10월1일	47	Elsevier	네덜란 드	SCI
Earth Planets Space	Caldera structure of submarine Volcano #1 on the Tonga Arc at 21°09'S, southwestern Pacific: Analysis of multichannel seismic profiling	2013년 10일19]	65	Terrapub	일본	SCI
Ocean Science Journal	Right-lateral strike-slip movement of the South Korea Plateau associated with the opening of the East Sea (Japan Sea)리 및 지질조사	2013년	48	Springer	독일	SCIE
지구물리와 물리탐사	동해 한국대지 내 지각분리 부정합면의 존재와 지구조 적 의미	2012년 8월1일	15	한국지구물 리물리탐사 학회	한국	-
계: 건수	5					

외국 전문서적 단행본

책이름	제목	게재연월일	발 행 기 관	
Oceanography of	Chapter 16. Physiography and late	2015년	Consider cons	
the East Sea	Quaternary sedimentation	Springer (인쇄중)		
Oceanography of	Chapter 17. Crustal structure and	2015년	Contract	
	tectonic evolution of the East Sea			
계: 건수	2			

- 3. 연구성과
- 4. 기술이전 및 연구결과 활용계획
 - 가. 당해연도 활용계획

한반도 연안의 지진지체구조와 단층활동 특성 연구에 활용

나. 활용방법

한반도 연안에서 권역별로 지진다발지역 및 활성이 논란이 되는 지진의 분 포지역을 중심으로 지진활동과 관련된 지구조운동의 발생을 구명한다.

다. 차년도이후 활용계획

한반도 연안역의 4기 단층 연구에 활용할 것이다.

4. 기대효과

- (1) 한반도의 동해 연안은 원전과 산업시설이 밀집해 있지만 단층활동과 관련하여 부지의 지진안전성을 평가하는 것이 국가적 연구과제이다. 이 연구에서 한반도 남동부 연안에서 4기 단층의 분포와 특성, 그리고 활동성을 밝힘으로써 한국의 지질특성에 적합한 지진안전성 평가를 체계적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.
- (2) 4기 단층의 특성을 지진자료로부터 구한 단층면해 등과 결합함으로써 한반도 의 지진특성을 구명할 있을 것이다.
- (3) 이 연구에서 구성한 탄성파 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.
- 5. 문제점 및 건의사항 (연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점을 기재)



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 최근 일본의 활성단층 database의 개정

일본의 경우 활성단층에 대한 database는 활동 단위(behavioral segment)의 개념으로 분류된 활성단층의 완전한 정보를 담고 있다 (http://www.aist.go.jp/RIODB/activefault/cgi-bin/index_e.cgi). 각각의 단층은 지표에 나타나는 기하학적 모양과 고지진 연구에 의해 결정된 균열 역사를 기반으로 활동 단위로 세분된다. Index map에 나타난 단층들은 활동 구간의 database에 연결되는데 여기에는 sliprate, 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 용통성이 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 연구시설.장비 현황

해당사항 없슴



제 8 장 참고문헌

- Chang, K.-H., Woo, B.-G., Lee, J.-H., Park, S.-O., Yao, A., 1990. Cretaceous and early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang basin, S. Korea. Journal of the Geological Society of Korea 20, 25–37.
- Chang, C.J., Chang, T.W., 1998. Movement history of the Yangsan fault based on Paleostress analysis. Journal of Engineering Geology 8 (1), 35-49.
- Chang, T.W., Choo, C.O., 1999. Faulting processes and K-Ar ages of fault gouges in the Yangsan fault zone. Journal of the Korean Earth Science Society 20, 25–37.
- Fisher, M.A., Greene, G., Normark, W.R., Sliter, R.W., 2005. Neotectonics of the offshore Oak Ridge fault near Ventura, South California. Bulletin of the Seismological Society of America 95, 739-744.
- Inoue, E., 1982. Geological problems on Cretaceous and Tertiary rocks in and around Tsushima-Korea Straits. U.N. ESCAP CCOP Tech. Bull. 15, pp.
- Hibbard, J.P., Karig, D.E., 1990. Alternative plate model for the early Miocene evolution of the southwestern Japan margin. Geology 18, 170-1174.
- Kim, J.-S., Ree, J.-H., Han, S.-H., Kim, H.-S., Lee, Y.-J., Lee, K.-J., Joo, B.-C., 2003. The Ilkwang fault in the southestern Korea revealed by geophysical and trech surveys. Journal of the Geological Society of Korea 39, 211-223.
- Kim, H.J., Jou, H.T., Lee, G.H., Choi, D.L., Yi, B.Y., Yoo, L.S., Lee, S.H., Kim, K.H., Yoo, H.S., 2011, High-resolution seismic imaging of geologic deformation, offshore east coast of Korea at 37°N. Disaster Advances 4, 40-46.
- Kim, H.J., Lee, G.H., Choi, D.L., Jou, H.T., Li, Z., Zheng, Y., Kim, G.Y., Lee, S.H., Kwon, Y.K., 2015. Back-arc rifting in the Korea Plateau in the east Sea (Japan Sea) and the separation of the southwestern Japan Arc from the Korean margin. Tectonophysics 638, 147-157.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2000. Study on quaternary stratigraphy and environmental changes in Korea Sea. Technical

- Report KF-00 (B)-02, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 677p.
- Kyung, J.B., 2010. Paleoseismic study and evaluation of maximum earthquake magnitude along the Yangsan and Ulsan fault zones in the southeastern part of Korea. Journal of the Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists 13 (3), 187–197.
- Lamarche, G., Bull, L.M., Barnes, P.M., Taylor, S.K., Horgan, H., 2000. Constraining fault growth rates and fault evolution in New Zealand. EOS 81, American Geophysical Union.
- Lee, G.H., Yoon, Y., Nam, B.H., Lim, H., Kim, Y.S., Kim, H.J., Lee, K., 2011. Structural evolution of the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and tectonic implications. Tectonophysics 502, 293–307.
- Lee, H.K., Yang, J.S., 2005. ESR dating of the Ilgwang fault. Journal of the Geological Society of Korea 41, 369-384.
- Lee, K.H., 1985. On the seismic activity of the Yangsan fault. Journal of the Geological Society of Korea 21, 369-384.
- Lee, K.H., Chung, T.W., 1999. A composite fault-plane solution of microearthquakes in the Yangsan fault area during 1996. Journal of the Korean Geophysical Society 2, 235–240.
- Posamentier, H.W., Allen, G. P., 1999. Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology no.7, 210p.
- Ree, J.-H., Lee, Y.-J., Rhodes, E.J., Park, Y., Kwon, S.-T., Chwae, U., Jeon, J.-S., Lee, B.J., 2003. Quaternary reactivation of Tertiary faults in the southeastern Korean Peninsula: Age constraint by optically stimulated luminescence dating. The Island Arc 12, 1-12.
- Reedman, A.J., Um, S.H., 1975. The geology of Korea. Geological and Mineral Institute of Korea, 139pp.
- Taira, A., 2001. Tectonic evolution of the Japanese Island arc system. Annual Review of Planetary Science 29, 109-134.

- Trifonov, V.G., Kozhurin, A.I., Lukina, N.V., 1993. Exploring and mapping active faults, in: Ulomov, V.I. (Ed.), Seismicity and Seismic zoning in northern Eurasia. Nauka, Moscow, Issue 1, pp.196-205.
- Yoo, D.G., Lee, C.W., Min, G.H., Han, H.S., park, S.C., Kim, D.C., 2006. Plio-Quaternary seismic stratigraphy and sedimentation of depositional sequences on the southeastern continental shelf of Korea. Journal of the Geological Society of Korea 42, 507-522.
- Zonenshain, L.P. and Savostin, L.S., 1981, Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. Tectonophysics 76, 1-45.
- Woodcock, N.H., and Rickards, B., 2003, Transpressive duplex and flower structure:

 Dent fault system, NE England. Journal of Structureal Geology 25, 1981–1992.

- 58 -

부록 A. 연구지역에서 구한 탄성파 프로파일

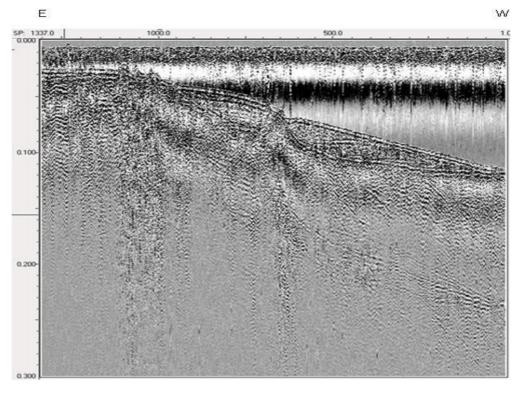


Fig. A-1. High-resolution seismic profile of K01.

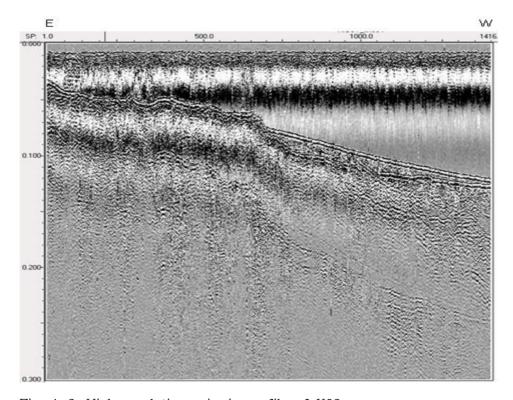


Fig. A-2. High-resolution seismic profile of K02.

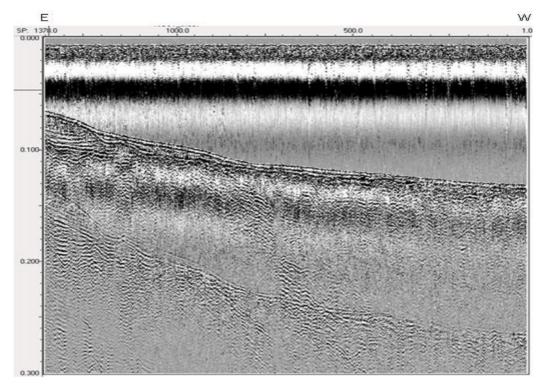


Fig. A-3. High-resolution seismic profile of K03.

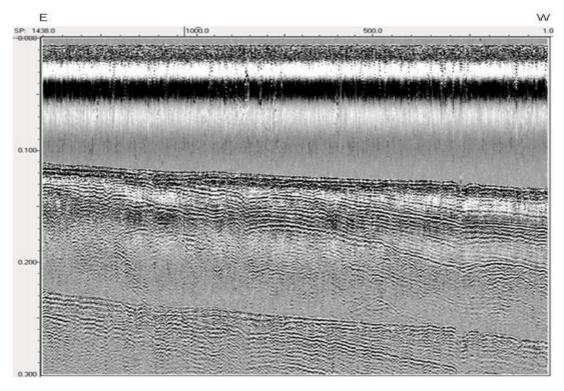


Fig. A-4. High-resolution seismic profile of K05.

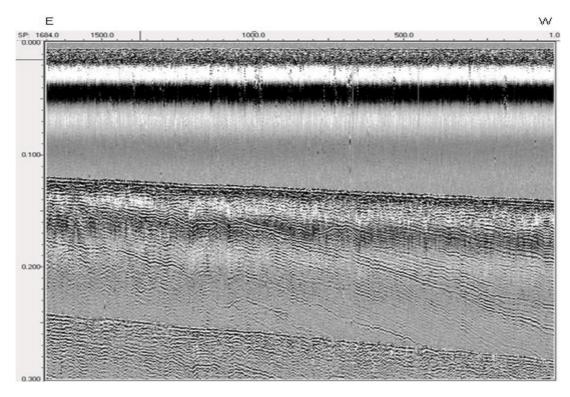


Fig. A-5. High-resolution seismic profile of K07.

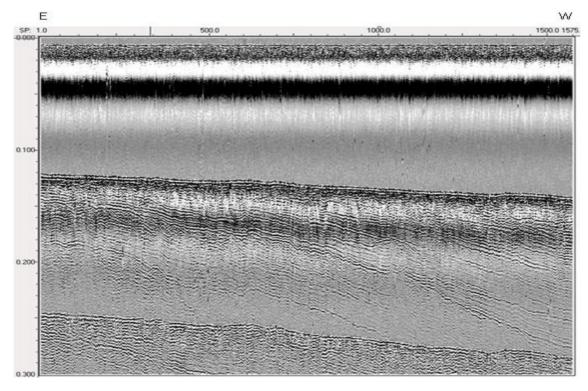


Fig. A-6. High-resolution seismic profile of K08.

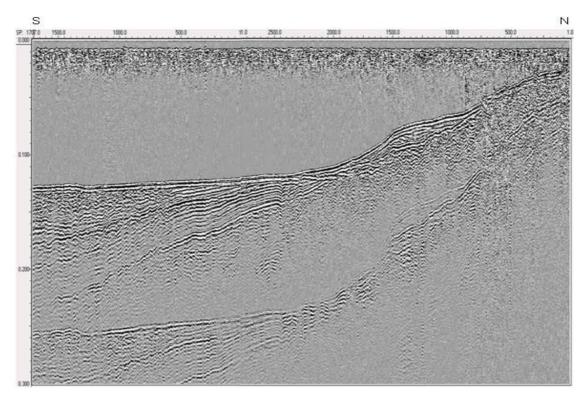


Fig. A-7. High-resolution seismic profile of P01.

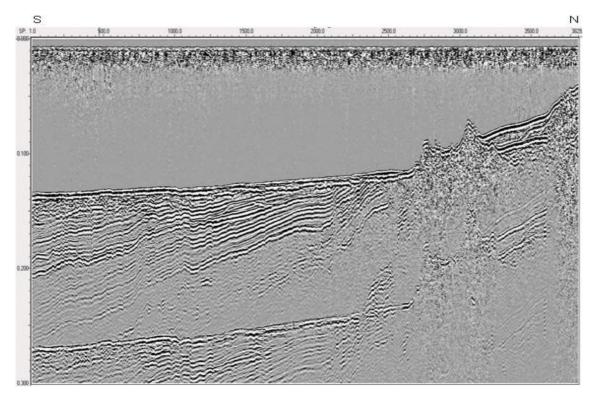


Fig. A-8. High-resolution seismic profile of P03.

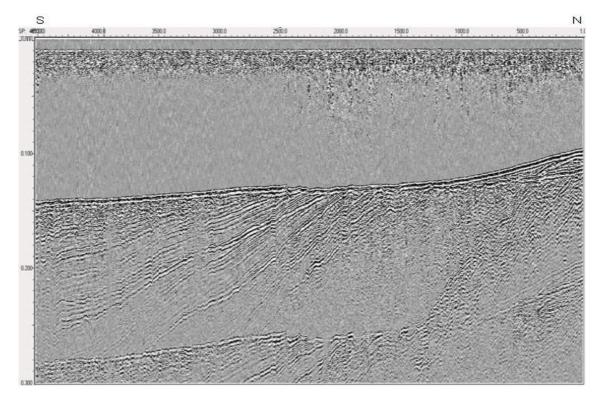


Fig. A-9. High-resolution seismic profile of P05.

부록 B. 낙동강 하구역 탄성파 프로파일

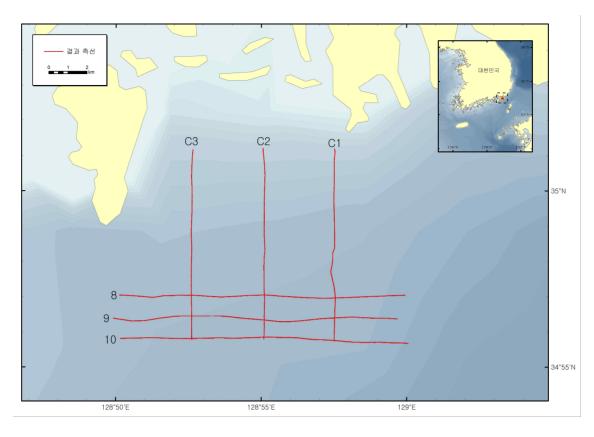


Fig. B-1. Locations of seismic profiles collected in the Nakdong Delta area in 2015.

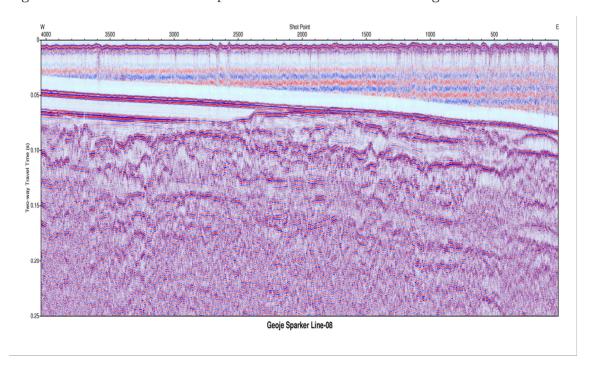


Fig. B-2. High-resolution seismic profile of 08.

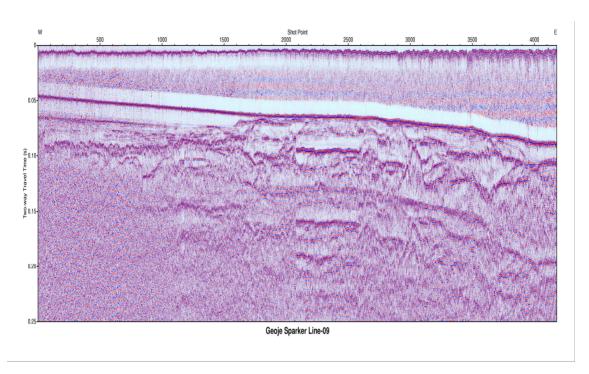


Fig. B-3. High-resolution seismic profile of 09.

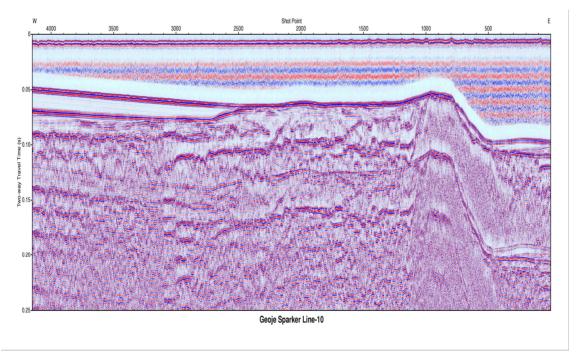


Fig. B-4. High-resolution seismic profile of 10.

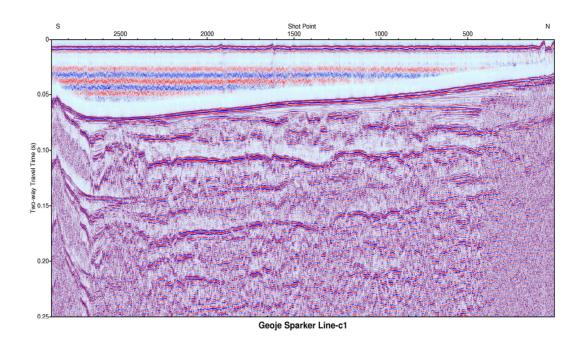


Fig. B-5. High-resolution seismic profile of C1.

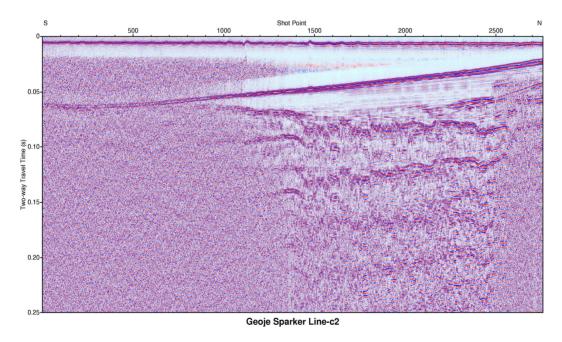


Fig. B-6. High-resolution seismic profile of C2.

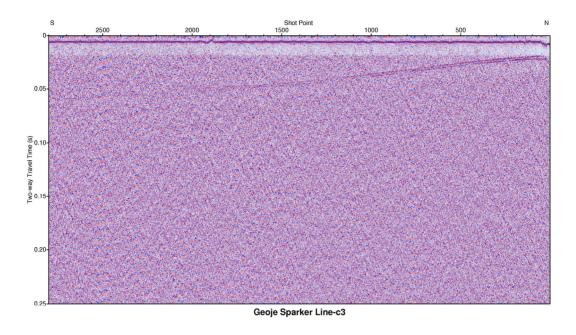


Fig. B-7. High-resolution seismic profile of C3.