동해의 형성과 관련한 한국대지의 지구조적 진화
Tectonic evolution of the Korea Plateau in relation to the opening of the East Sea (Japan Sea)

한국해양과학기술원

한 국 지 질 자 원 연 구 원

제 출 문

한국지질자원연구원장 귀하

본 보고서를 동해의 형성과 관련한 한국대지의 지구조적 진화 사업의 최종보고서로 제출합니다.

2013. 7. 27

위탁연구기관명 : 한국해양과학기술원

위탁연구책임자 : 김한준

연 구 원:주형태

" : 이상훈

" : 권미홍

요 약 문

I. 제 목

동해의 형성과 관련한 한국대지의 지구조적 진화

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

한반도의 주변부에는 한국대지와 같이, 일본열도가 떨어져 나가면서 동해가 형성될 당시의 지구조적 운동에 의해 형성된 대륙지각의 리프팅구조가 잘 보존되어 있다. 한국대지에서 리프팅 초기의 구조와 연대 그리고 변형을 해석하는 것은 동해뿐만 아니라 태평양판이 아시아대륙 아래로 섭입하는 지역에서 형성되는 후열도해의 진화와 발달 그리고 이와 관련된 맨틀의 움직임을 이해하는 데에 크게 도움을줄 것이다.

이 연구의 목적은 동해가 형성되고 남서 일본열도가 분리되어 떨어져 나갈 때 한반도의 대륙주변부에서 발생한 후열도 리프팅과 해저면 확장과정을 해석하는 것이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- o 한국대지에서 구한 탄성파 프로파일의 해석
- o Ambient noise tomography를 이용한 동해의 주변 육지의 지각구조 계산 및 해석

Ⅳ. 연구개발결과

V. 연구개발결과의 활용계획

동해의 한국대지에서 IODP 심부시추 제안서의 작성을 위해 활용될 것이다.

SUMMARY

I. Title

II. Objectives and justification of this research development

In the Korea Plateau, a continental fragment at the continental margin of Korea, structure of continental rifting associated with the separation of the Japan Arc and subsequent opening is well preserved. Accurate interpretation of structure, age, and deformation of initial continental rifting in the Korea Plateau will provide important constraints to addressing the evolution of a back—arc sea at the ocean—continent subduction zone and the mantle dynamics as a driving force.

The objective of this study is to interpret the processes of back-arc rifting, break-up, and spreading associated with the separation of the southwestern Japan Arc from the Korean margin.

III. Contents and scope of this research development

- o Interpretation of seismic profiles from the Korea Plateau
- o Computation of crustal and upper mantle structure of the East Sea and surrounding land regions using ambient noise tomography

IV. Results of this research development

The South Korea Plateau is a remnant of continental crust at the eastern Korean margin. Multichannel seismic profiles show that the South Korea Plateau preserves fundamental architecture of back-arc rifting associated with the separation of the southwestern Japan Arc in the Neocene. Rift basins in the

plateau are filled with distinct syn- and post-rift sequences divided by a prominent break-up unconformity as an erosional surface. The crustal and upper mantle structure computed by ambient noise tomography indicates that the South Korea Plateau defines the limit of rifted continental crust where rifting occurred with asthenospheric upwelling and depth-dependent stretching. Therefore, the South Korea Plateau underwent the entire sequence of tectonic events typical of a passive continental margin from syn-rift subsidence, uplift, erosion, and break-up prior to the separation of the southwestern Japan Arc. Break-up at the Korean margin may substantiate successive episodes of back-arc spreading toward the arc in response to trench retreat. Directions of extension recognized in the Korean margin and the inferred position of the southwestern Japan Arc before separation suggest that the southwestern Japan Arc moved to its present location with a significant amount of clockwise rotation during back-arc spreading.

V. Application plans from this research

The results of this study will be used to the preparation of the proposal for IODP drilling in the Korea Plateau.

CONTENTS

Chapter 1. Outline of research and development

- 1-1. Objectives
- 1-2. Necessity of research

Chapter 2. Present status

- 2-1. Domestic status
- 2-2. Foreign status

Chapter 3. Research and results

- 3-1. Introduction
- 3-2. Geologic features of the eastern Korean margin
- 3-3. Materials and methods
- 3-4. Structure related to back-arc rifting in the South Korea Plateau
- 3-5. Discussion

Chapter 4. Degree of achievement and contribution to other related areas

- 4-1. Goal and Achievement
- 4-2. Contribution

Chapter 5. Application plan of research results

Chapter 6. References

목 차

- 제 1 장 연구개발과제의 개요
 - 1-1. 연구개발의 목적
 - 1-2. 연구개발의 필요성
- 제 2 장 국내외 기술개발 현황
 - 2-1. 국내 기술 개발 현황
 - 2-2. 국외 기술 개발 현황
- 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과
 - 3-1. 서론
 - 3-2. 한반도 대륙주변부의 지질특성
 - 3-3. 자료와 방법
 - 3-4. 남한국대지에서 리프팅과 관련된 지질구조
 - 3-5. 토의
- 제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도
 - 4-1. 연구개발 목표 달성도
 - 4-2. 대외기여도
- 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌

제 1 장 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발의 목적

동해 한국대지에 대한 시추필요성 정립

1-2. 연구개발의 필요성

암권의 얇아짐, 리프팅, 그리고 대륙지각의 분리는 능동적 리프팅(active rifting)과 수동적 리프팅(passive rifting)의 두 가지 모델로서 설명된다 (Turcotte, 1983). 능동적 리프팅에서 약권의 능동적인 대류성 용승이 리프팅을 야기하고, 암권의 기저부에 도달하는 맨틀플룸이 대륙지각의 분리를 야기한다. 수동적 리프팅의경우, 수평방향에서 작용하는 원거리의 힘이 발생하여 암권의 신장과 리프팅을 야기한다.

리프팅과, 리프트와 관련된 화산작용간의 상대적 시간차이를 이용하여 두 가지 유형중 어떤 것이 작용했는지를 파악한다. Doming과 화산작용이 리프팅 전에 발생하였다면 능동적인 맨틀플룸이 암권의 기저부에 작용했을 것으로 생각한다. 반면에, 화산작용과 doming이 리프팅 이후에 발생하였다면 약권은 수동적으로 움직여서 지역적인 신장에 의해 만들어진 공간을 채운다고 생각할 수 있다.

동해는 서태평양에 분포하는 섭입대에서 형성된 여러 개의 후열도해(back-arc sea)중 하나이지만 복잡한 판경계에서 형성되었으며 일본분지, 울릉분지, 그리고 야마토 분지와 같은 여러 개의 퇴적분지뿐만 아니라 한국대지, 야마토뱅크와 같은 대륙지각의 조각들이 흩어져서 분포하는 복잡한 지형을 보이고 있다. 더욱이, 한반도의 주변부에서 대륙지각의 리프팅과 분리가 발생하여 일본열도가 떨어져 나가면서울릉분지가 형성될 때 맨틀의 온도가 정상보다 더 뜨거워서 화산작용이 활발하였으며 울릉분지를 형성한 해양지각의 두께가 정상보다 더 두꺼운 것으로 해석된다(Kim et al., 2007). 한반도의 주변부에는 한국대지와 같이, 지구조적 변형이 드러나는 대륙지각의 리프팅구조가 잘 보존되어 있다. 한국대지에서 리프팅 초기의 구조와 연대 그리고 변형을 해석하는 것은 동해뿐만 아니라 태평양판이 아시아대륙 아래로 섭입하는 지역에서 형성되는 후열도해의 진화와 발달 그리고 이와 관련된 맨틀의 움직임을 이해하는 데에 크게 도움을 줄 것이다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1. 국내 기술 개발 현황

동해의 지각구조에 관한 연구는 1991년 한국과 러시아가 공동으로 울릉분지에서 해저면지진계와 대용량(60 liter)의 에어건을 이용하여 심부 탄성파 탐사를 수행함으로써 시작되었다. 그 이후 1998년에 한국-러시아-일본이 공동연구로 한반도의대륙붕에서 울릉분지 중앙부까지의 지각구조를 연구하기 위한 심부 탄성파 탐사가수행된 바 있다. 그 결과로서 울릉분지 아래의 지각이 정상보다 두꺼운 해양지각임이 구명된 바 있으며 (Kim et al., 1998; Lee et al., 2009) 한반도의 대륙주변부에서대륙지각과 해양지각간의 전이구조가 존재하며 (Kim et al., 2003) 울릉분지의 형성과 함께 일본열도가 한반도로부터 떨어져 나간 과정을 제시한 바 있다 (Kim et al., 2007).

지각구조를 구명하고 지구조적 해석을 하는 데 있어서 가장 필요한 기술은 심부 탄성파 탐사이다. 심부 탄성파 탐사를 위해서는 대용량의 에어 건, 해저면 지진계, 그리고 다중채널 탄성파 탐사장비가 사용된다. 국내의 경우 심부 탄성파 탐사를 위 한 장비중 해저면 지진계의 숫자가 극히 부족하다. 200?년에 시험적으로 해저면 지 진계를 제작하고 성능을 시험한 바 있으나 그 이후 후속 연구사업이 없어서 제작을 더 이상 못하고 있는 실정이다.

2-2. 국외 기술 개발 현황

미국과 유럽, 일본, 그리고 중국에서는 해저면 지진계와 대용량의 에어 건을 이용하는 심부 탄성파 탐사가 매우 활발하다. 그 결과로서 아메리카 대륙과 유럽의 대서양 주변부에서 지각의 구조와 대서양의 형성, 아메리카 대륙의 태평양 주변부에서 태평양판의 섭입에 따른 지진유발 구조, 동중국해, 황해, 그리고 남중국해의 지각구조 등을 구명하고 있다. 이들 나라들은 자체적으로 해저면 지진계를 대량으로 제작하여 심부 탄성파 탐사로써 지각구조뿐만 아니라 퇴적분지에서 석유탐사에도 응용하고 있다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

3-1. 서론

동해는 서태평양 섭입대에서 형성된 후열도 해이다 (Fig. 1). 동해는 한반도의 대륙주변부로부터 일본 열도가 떨어져 나감으로써 열리게 되었으며 이 때 세 개의 주요 후열도 분지-북쪽의 일본분지, 남동쪽의 야마토분지, 그리고 남서쪽의 울릉분지-도 함께 형성되었다. 일본열도가 떨어져 나간 것은 double-door (혹은 부채꼴)열림 모델 (e.g., Otofuji et al., 1999) 혹은 pull-apart 열림 모델 (e.g., Jolivet et al., 1994)로써 가장 많이 설명되고 있다. Double-door 열림 모델은 고지자기 자료로부터 유추되었으며 마이오세 초기에서 중기동안 일본열도의 북동부와 남서부가 각각반시계방향 및 시계방향으로 40°이상 회전하였음을 제시한다. 이에 반해, pull-apart 열림 모델은 올리고세 후기부터 마이오세 초기동안 동해의 동쪽 및 서쪽 경계를 이루는 남북방향의 주향을 갖는 주향이동단층계를 따라 일본열도가 주로 남쪽으로 병진하였음을 제시한다.

한반도의 동쪽 주변부는 남서 일본열도가 아시아대륙으로부터 떨어져 나간 지역으로 ridge들과 trough들로 이루어진 남한국대지와 북한국대지 등으로 매우 복잡한지형을 보여준다 (Fig. 2). 분명히, 이러한 구조들은 남서 일본열도의 분리와 관련하여 형성되고 변형을 받았다. Kim et al.(2007)은 다중채널 탄성과 프로파일을 해석하여 한반도의 동쪽 주변부가 비록 후열도해내에 위치하지만 비활성 대륙주변부에서 전형적으로 나타나는 리프팅부터 해저면확장까지의 지구조 운동을 받았음을 제시하였다. 비활성 혹은 대서양 타잎의 대륙주변부에는 리프팅을 통해 대륙지각이들어나는 것이 멈추고 새로운 해양지각이 형성되는 지각분리가 있었음이 관찰된다. 탄성과 프로파일에서, 리프팅이 끝나는 사건은 리프트분지 내에 syn-rift 퇴적층과 post-rift 퇴적층을 분리하는 지각분리 부정합이 있음을 인식할 수 있다 (Flavey and Mutter, 1981; Franke, 2013). 지각분리 부정합은 침식면으로 나타나는데 리프트된 지역이 일정기간 동안 융기되었음을 지시한다. 이 연구에서는 한국대지에서

얻은 탄성파 프로파일에 지각분리 부정합이 존재함을 제시하고 남서 일본열도가 한 반도의 대륙주변부에서 떨어져 나간 과정을 설명하고자 한다. 또한 지진자료로부터 동해의 그 주변에서 100 km 깊이까지 s-파 속도를 구하여 일본 열도가 분리될 때의 맨틀운동과 한반도 대륙주변부의 지각 및 상부 맨틀 구조를 해석하고자 한다.

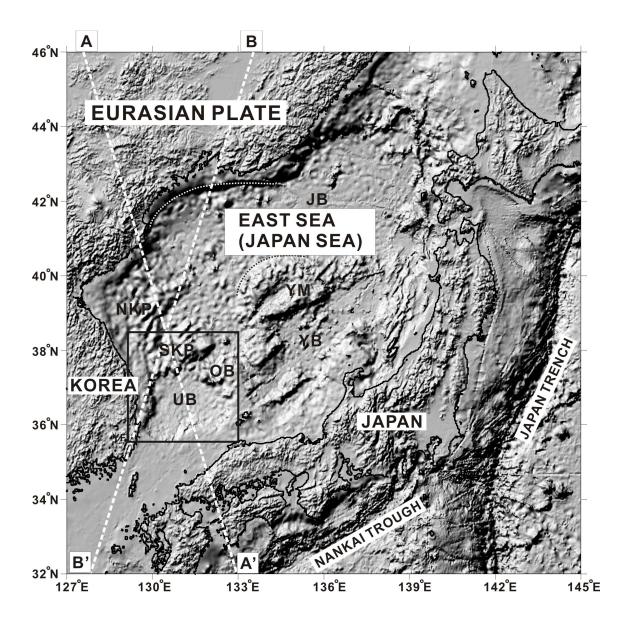


Figure 1. Physiography of the East Sea (Japan Sea). JB, YB, and UB (= Japan, Yamato, and Ulleung Basins, respectively) are back-arc basins. NKP, SKP, OB, and YM (= North Korea Plateau, South Korea Plateau, Oki Bank, and Yamato Bank, respectively) are fragmented continental crust. The rectangle indicates the

area with detailed bathymetry shown in Figure 2. A-A' and B-B' are two transects along which shear wave velocity structure down to 80 km depth is computed (see Figure 6)

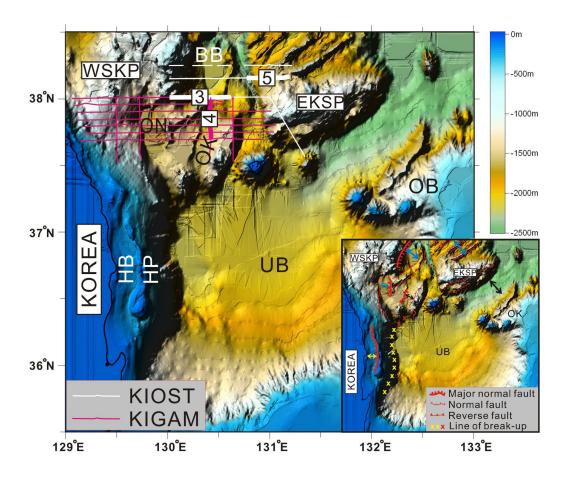


Figure 2. Detailed bathymetry of the eastern margin of Korea. The white and red tracks are reflection seismic lines in the south Korea Plateau shot by the Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST) and the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), respectively. The locations of seismic profile sections that are referred to in the text are highlighted as thick lines and labeled with a figure number. The inset shows the configuration of faults associated with back-arc rifting and the line of break-up (modified after Kim et al. [2007] and Kwon et al. [2009]). The arrows indicate the direction of extension inferred from fault configuration and bathymetry.

WSKP and EKSP are the western and the eastern blocks of the South Korea Plateau. BB (Bandal Basin), ON (Onnuri Basin), and OK (Okgye Basin) are rift basins in the WSKP. HB (Hupo Basin) is a rift basin south of the WSKP. HP (Hupo Bank) is an uplifted rift rim of the Hupo Basin. OB is the Oki Bank of the Southwestern Japan Arc.

3-2. 한반도 대륙주변부의 지질 특성

한반도 주변부는 위도 35°N에서 40°N의 범위로서 남쪽과 북쪽에서 상반된 지형을 보여 준다 (Fig. 1). 37°N의 북쪽 지역은 남한국 대지와 북한국 대지라는 지형 융기대가 주로 분포한다. 반면에, 남한국 대지의 남쪽지역의 주변부는 비교적 단조로운 지형을 보여주는데 좁은 대륙붕과 급경사의 사면, 그리고 울릉분지로 이루어져 있다.

남한국 대지의 기반암은 중생대의 화성암과 캠브리아기 이전의 각섬석, 편암, 그 리고 편마암, 그리고 고생대의 화강암과 퇴적암으로 이루어져 있으며 가까운 한반 도의 한국 순상지가 연결된 것으로 해석하고 있다 (Ryu and Han, 1996). 남한경 대 지는 더욱 세분화되어 동쪽 불록(ESKP)과 서쪽블록(WSKP)로 나뉘어 지며 이들 간에는 약 100 km 길이의 trough가 존재한다. WSKP는 한반도와 연결되어 있으며 다수의 rift와 그 주변을 둘러싸는 지형융기대로 이루어져 있다 (Fig. 2). WSKP에 서 가장 규모가 큰 리프트는 반달분지로서 융기된 리프트 측면부가 평면도상에서 분지 바깥쪽으로 볼록하게 분지를 둘러싸고 있다. 반달분지의 폭은 남동쪽으로 최 대 30 km 이상이다. 반달분지의 바로 남쪽에는 리프트 분지로서 온누리분지와 옥계 분지가 있으며 이들의 폭은 최대 25 km로서 반달분지와 마찬가지로 바깥쪽인 동해 쪽으로 융기된 측면부가 둘러싸고 있다. WSKP내 리프트 분지의 융기된 측면부는 정단층운동에 의해 위로 들여올려진 리프트 바깥쪽 지각의 elastic upbending으로 (Jackson and McKenzie, 1983) 혹은 수동적 리프팅에 의해 유도되는 작은 규모의 대류에 의해 (Buck, 1986) 설명할 수 있다. WSKP내 리프트 분지들은 분명히 다른 확장방향을 보여 준다: 반달분지에서 NW-SE, 온누리분지에서 E-W, 그리고 옥계 분지에서 완전하지 않지만 주로 E-W. ESKP는 사다리꼴로 분리되어 남남동 방향 으로 폭이 넓어지며 길이 방향으로 120 km, 그리고 폭은 70 - 110 km 이다. ESKP에는 좁게 평행한 ridge들이 NE-SW방향으로 늘어서 있으며 그 사이에는 trough가 있으며 이들은 hosrt and graben system을 형성한다.

남한국 대지 남쪽의 한반도 주변부는 N-S의 길이 방향으로 좁고 길게 늘어난 trough인 후포분지에 의해 파여 있다 (Fig. 2). 후포분지는 15 - 20 km 정도의 폭을 가지며 변위규모가 큰 단층인 후포단층이 바깥의 동해쪽으로 경계를 이룬다. 후포분지에서 상반의 침강은 대부분 이 후포단층을 따라 발생하였으므로 후포분지는 비대칭적인 반지구 구조를 이루고 있다. 후포분지는 WSKP내 리프트 분지들과 마찬가지로 후포뱅크라 불리우는 융기된 리프트 측면부에 의해 둘러싸여 있다. 후포 뱅크의 바깥쪽 측면은 급한 대륙사면을 이루어 울릉분지의 심해평원으로 연결된다. 후포분지내 경계단층의 기하학적 분포와 융기된 리프트 측면부는 분명히 후포 단층이 E-W 방향의 신장력에 의해 형성되었음을 지시한다. Kim et al. (2007)은 후포뱅크의 대륙사면 기저부를 따라 지각분리와 함께 큰 규모의 화산작용이 발생한 것으로 해석하였다.

3-3. 자료와 방법

이 연구에서 사용된 다중채널 탄성파 자료는 다음과 같다: (1) 한국해양과학기술 원(KIOST)가 중합도 14로써 획득한 약 450 km의 탄성파 프로파일 (2) 한국지질자 원연구원(KIGAM)이 제공한 중합도 40의 1400 km의 탄성파 프로파일 (Fig. 2). KIOST 자료는 1999년 온누리호에서 얻은 것으로 음원으로 690 in³의 에어건을, 그리고 수신기로 56 채널 스트리머를 사용하였다. 수신기의 채널 간격과 음원 간격은 각각 25 및 50 m 이다. KIGAM 자료는 2001년과 2002년에 탐해 2호에서 얻은 것으로 1254 in³의 에어건과 80 채널 스트리머를 음원과 수신기로 사용하였다. WKSP에서, KIGAM 프로파일은 38°N 남쪽에서 얻은 것이며 KIOST 프로파일은 38°N 북쪽에서 얻은 것이다. 따라서 두 자료를 이용해서 리프팅과 관련한 WSKP의 지질 구조를 종합적으로 해석할 수 있다. KIOST 자료는 트레이스 편집, 디컨볼루션, 공심점 분류, 주파수 필터링, 속도분석, 중합, 다중반사 제거, 그리고 45° 유한차분 구조보정으로 처리하였다. KIGAM 자료는 같은 방식으로 처리하였지만 구조보정을 하지 않았다.

지진자료는 2007년 8월부터 2009년 7월까지 북동 중국과 일본에 설치된 323개의 광대역 지진계에 기록된 연속파형이다. 이 연구에서는 이 자료를 이용하여 동해와 그 주변 육지의 3-D s-파 구조를 100 km 깊이까지 ambient noise tomography로부터 계산하였다. Ambient noise tomography를 위한 자료처리와 방법은 Zheng et al. (2011)에 설명되어 있다.

3-4. 남한국 대지에서 리프팅과 관련된 퇴적구조

WSKP에서 후열도 리프팅과 관련된 퇴적구조는 반달분지내에 쌓인 퇴적물의 층 서에서 잘 인지할 수 있다. 반달분지에서 기반암의 위에 존재하는 퇴적물은 아래의 단위 I과 그 위 단위 II의 두 층서로 구성된다 (Fig. 3). 단위 I은 기반암에 있는 trough들을 충진하며 변화가 큰 진폭의, 연결성이 낮거나 불량한 반사신호로 이루 어져 있다. 반사신호들은 일반적으로 매끄럽지 못하며 혼탁한 양상을 보여 준다. 국 부적으로 진폭이 크고 길게 연결되지 않은 반사신호들은 리프팅과 관련한 화산작용 에 의해 생긴 화산맥(vaocanic sill)을 지시할 수 있다. 단위 I은 전체적으로 쐐기 모 양으로 퇴적되어 있는데 상반의 기울어짐과 침강과 동시에 되적된 svn-rift 퇴적물 로 해석할 수 있다. 반달분지의 기반은 많은 수의 단층에 의해 잘려있으며 북서쪽 에 정단층과 남동쪽의 정단층이 경계를 이루는 다소 대칭적인 단면구조를 보여 준 다. 반달분지의 주 단층지역은 육지쪽의 북서부로서 여기에서 단위 I은 1초 정도로 가장 두꺼우며 많은 수의 정단층들이 참강을 야기하였다. 단위 I은 남동쪽의 융기된 측면부를 향해 첨멸한다. 따라서 남동쪽에 hinge가 있는 상태에서 상반의 침강이 북서쪽에서 시작되고 나중에 hinge가 있는 지역에서 더 작은 antithetic 단층들이 발달되었을 것으로 해석할 수 있다. 단위 I의 매끄럽지 못하고 혼탁한 퇴적상은 단 위 I이 주로 사태/붕괴와 debris fall과 리프트의 측면부에서 유입된 퇴적물이 섞인 것임을 지시한다. 단위 Ⅱ는 특징적으로 infill-to-draping의 양상을 보여주며 최대 두께가 약 1초 정도로 분지의 전체에 쌓여 있다. 단위 Ⅱ의 내부에는 수평층서가 잘 발달해 있으며 반사신호의 연결성이 좋으므로 저에너지의 저탁류와 반원양성 퇴적 물로 구성된 post-rift 층서로 해석할 수 있다. 단위 Ⅱ의 내부에서 강하게 나타나는 반사면은 opal-A/opal-CT의 경계면으로 (Lee et al., 2003) 규소질의 해양 퇴적물의 속성 상변화에 의해 생긴 것이다. WSKP의 남쪽지역에서 기반은 마찬가지로 정단 층에 의해 변형되어 약 25 km 폭의 옥계분지를 형성한다 (Fig. 2). 옥계분지에서 퇴적물은 반달분지와 마찬가지로 하부의 쐐기모양의 단위와 상부단위로 구성되어 있다. 이들은 각각 혼란하고 평행한 퇴적상을 보여주므로 syn-rift와 post-rift 층서라고 볼 수 있다. 옥계분지에서 syn-rift 층서는 반달분지에 비해 얇지만 post-rift 층서의 두께는 거의 비슷하다.

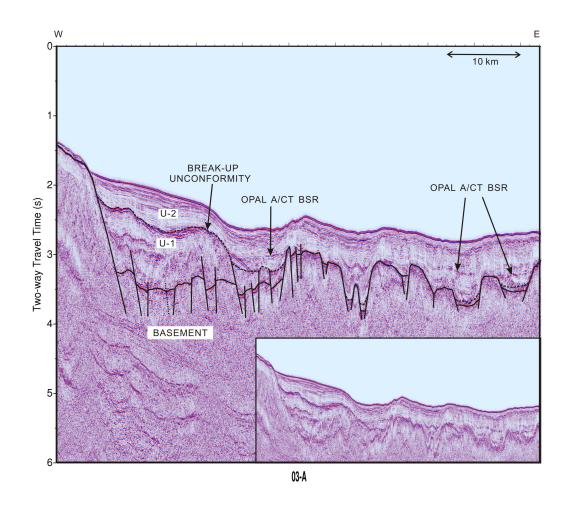


Figure 3. MCS profile showing the layering of sediments in the Bandal Basin in the western block of the South Korea Plateau (WSKP). The inset shows the uninterpreted profile in the range from 1 to 4 s. See Figure 2 for location.

ESKP에서, ridge들은 일반적으로 10 - 20 km 간격으로 분포하며 융기된 정상 부로부터 경사가 급한 사면을 이루어 ridge들 사이에 좁은 trough들을 형성한다. 각 각의 trough들은 갈라지거나 방향이 달라지지 않는다. 다중채널 프로파일들은 ESKP의 일부만 보여주지만 trough들의 경계가 정단층이며 WSKP에서 처럼 syn-rift 및 post-rift 퇴적물을 나타내는 단위 I과 단위 II의 두 층서로 이루어진 퇴적물이 trough들내에 쌓여 있음을 알 수 있다 (Fig. 5).

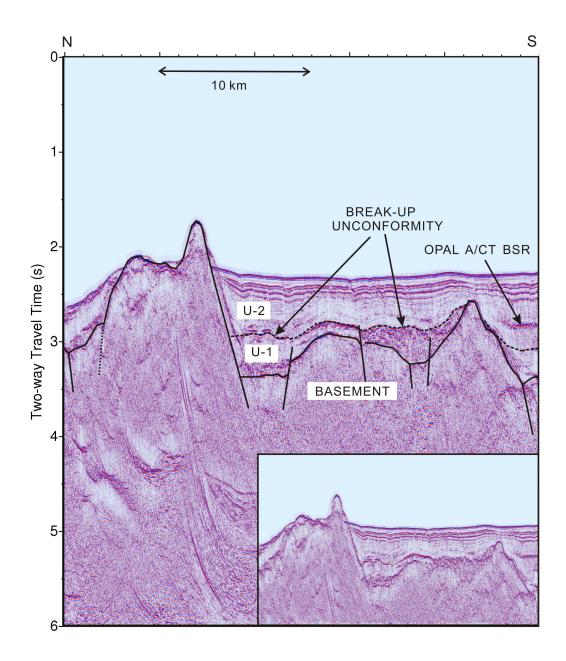


Figure 4. MCS profile showing the layering of sediments in the Okgye Basin in the western block of the South Korea Plateau (WSKP). The inset shows the uninterpreted profile in the range from 1 to 4 s. See Figure 2 for location.

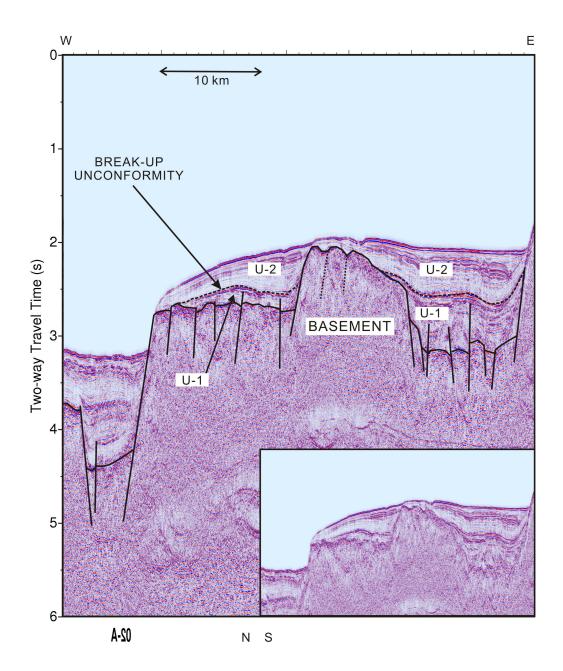
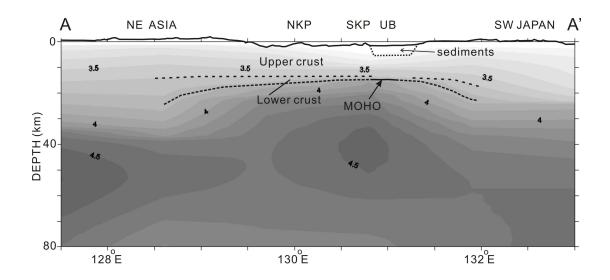


Figure 5. MCS profile showing the layering of sediments in the eastern block of the South Korea Plateau (ESKP). The inset shows the uninterpreted profile in the range from 1 to 4 s. See Figure 2 for location.

3-5. 토의

3-5-1. 한반도 대륙주변부의 지각구조와 지각분리 부정합

한반도의 주변부와 그 일대의 전체적 지각구조는 ambient noise tomography에 의해 계산된 s-파 속도구조로부터 유추할 수 있다 (Fig. 6). 지각의 정확한 두께를 표면파로부터 결정하기 힘들지만 지각의 두께는 두 개의 transect A-A'과 B-B'을 따라 상당히 변함을 알 수 있다. 여기에서 A-A' transect는 동북아시아에서 동해를 거쳐 남서 일본열도를 지나며 B'-B transect는 동북 아시아에서 동해를 지나 한반 도의 남쪽을 지난다. 울릉분지에서 모호 불연속면의 깊이는 이전에 해저면 지진계 (OBS) 탐사로부터 15-16 km의 깊이에서 수평하게 존재한다고 알려져 있다 (Kim et al., 1998). 한반도의 남서부에서 모호 불연속면의 깊이는 평균 28 km로서 동해쪽 으로 가면서 얕아진다 (Cho et al., 2006). 이들 모호 불연속면의 깊이는 Transect A-A'를 따라 구한 s-파 속도 구조의 3.7 - 3.8 km/s contour와 잘 일치한다. 따라 서, 3.7 - 3.8 km/s contour 범위가 동해와 주변 대륙의 모호 불연속면을 나타낸다 고 볼 수 있다. 이 해석은 지구 전체적으로 모호 불연속면을 기준으로 s-파의 속도 가 3.5에서 4.0 km/s로 급격히 변하는 양상과 (e.g., Vuan et al., 2005) 일치한다. Transect B-B'을 따라 3.7 - 3.8 km/s contour 범위는 일본분지 평원의 서쪽지역 에서 12 - 13 km 깊이에서 나타나며 한반도의 남동쪽 끝 아래에서 30 km로 깊어 진다 Seama and Isezaki (1990)은 일본분지의 오른 쪽 부분에서 선형 자력이상을 확인하였다. 이 지역에서 OBS를 이용해서 구한 모호 불연속면으 깊이는 12 - 13 km이다 (Hirata et al., 1992). Transect B-B'을 따라 일본분지의 서쪽 지역에서 3.7 - 3.8 km/s contour 범위에 의해 나타나는 모호 불연속면도 마찬가지로 12 -13 km 깊이에서 나타나므로 이 지역의 지각이 해양지각임을 알 수 있다. S-파 속도 구조 는 지각의 두께가 한반도로부터 한국대지까지 약 15 km로 급격히 얇아짐은 보여준 다 (Fig. 6).



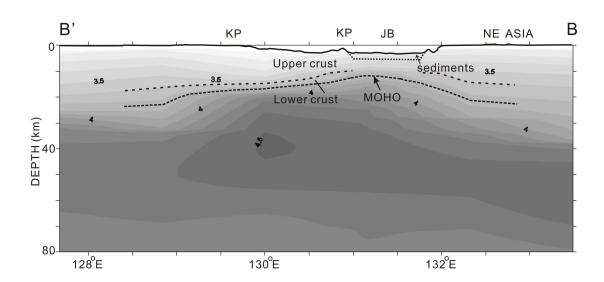


Figure 6. Vertical profiles showing s-wave structure along transects. Upper: (a) A-A' and lower: (b) B'-B. (See Figure 1 for location) NKP and SKP are the North and South Korea Plateaus, respectively. UB and JB are the Ulleung and Japan Basins, respectively. The 3.6 km/s contour is estimated to be the boundary between the upper and lower continental crust (from Cho et al., 2006). The Moho discontinuity in the Ulleung Basin (solid line) occurring at 16 km depth (Kim et al., 1998; 2003) is in agreement with the s-wave velocity of 3.75 km/s. The Moho discontinuity elsewhere (broken line) was inferred to be represented

by the same s-wave velocity. The average thickness of the sediment cover in the Ulleung and Japan Basins is 4 and 2 km, respectively (Kim et al., 1998; Hirata et al., 2002).

OBS를 이용한 심부 탄성파탐사는 울릉분지의 지각이 약 10 km로서 정상적인 해양지각보다 2 - 3 km 더 두꺼운 것을 제시하였다 (Kim et al., 1998; Kim et al., 2003). 하지만 지각은 다음과 같이 그 특성에서 분명히 해양지각이다 (1) 지각은 탄 성파 속도와 속도증가율에서 해양지각단위 2와 3에 해당하는 상부층과 하부층으로 성되어 있으며 (2) 해양지각단위 2와 3의 전이에 해당하는 지각단위 2C가 분지 평 원 전체지역에서 존재한다 (Kim et al., 1998). 특히 지각단위 2C는 1 km의 두께 범 위에서 p-파의 속도가 5.7에서 6.3 km/s까지 급격히 증가하는 것으로부터 잘 나타 난다. 일반적으로 대륙지각의 brittle한 상부층에 속하는 화강암은 10배 이상 늘어날 수 없으므로 울릉분지에서 지각단위 2C는 일본열도의 남서쪽 지역에서 비슷한 속 도분포를 보이는 약 12 km 두께의 화강암층이 늘어나서 생긴 것이 아니라 새로운 해양지각이 형성된 것을 증명한다. 울릉분지에서 정상보다 다소 두꺼운 해양지각이 존재함은 지각의 생성당시 맨틀의 온도가 정상보다 뜨거웠음을 지시한다 (Su et al., 1994). 후열도해에서 약권의 용승은 섭입하는 해양지각 위에서 쉽게 발생한다 (Conder et al., 2002). Kim et al (2007)은 리프팅에 의해 유도되는 대류와 약권의 용승 때문에 한반도의 대륙주변부에서 후열도 해저면 확장 동안 맨틀 상부층의 온 도가 정상보다 뜨거웠음을 제시하였다. 이와 함께, 섭입하는 해양지각으로부터 많은 양의 물이 방출되는데 이 경우 열의 대류를 촉진할 뿐만 아니라 (Currie and Hyndman, 2006) 생성되는 해양지각도 두꺼워진다 (Kelley et al., 2006). Jolivet and Tamaki(1992)는 울릉분지에 선형 자력이상이 부족하다고 언급한 바 있다. 하지만, 그 후 울릉분지와 한반도의 대륙주변부에서 획득한 자력자료에서 (Park, 1998) 전 세계의 대양에서 관측되는 자력 이상보다 그 크기가 작으나 선형 자력이상 M-1과 M-2가 있음을 볼 수 있다 (Fig. 7). 육지에 의해 폐쇄된 후열도 분지는 울릉분지처 럼 두꺼운 퇴적물이 쌓이게 되는데 퇴적물의 sealing에 의해 열수 순환이 강화되어 자력 이상치가 낮아지는 것으로 보고되어 있다 (Currie and Davis, 1994); 열수 순 환 동안 철의 대부분이 제거되어 자성이 없는 황화철로 재침전된다. Kato et al.(2007)은 deep tow 자력계를 사용하여 울릉분지의 중앙부에서 일본분지에서 확인

된 자력이상과 비슷한 크기의 자력이상이 있음을 확인하였다. 그들은 자력이상의 근원이 분출성 현무암이라고 제시하였다. 사실상, 이 자력이상은 Fig. 7에서 M-2로 표시된 선형 자력이상의 일부이다.

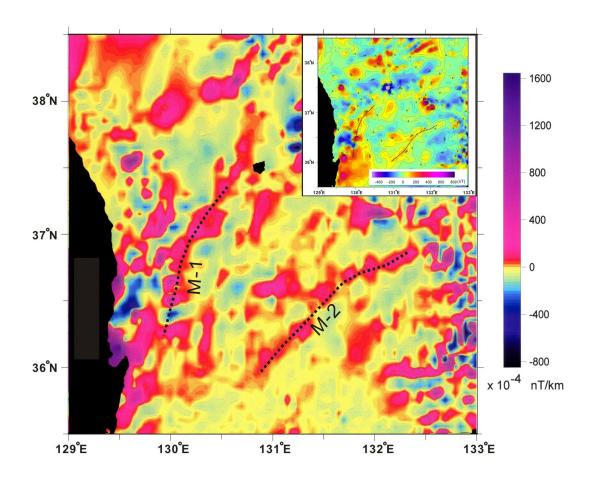


Figure 7. The 1st vertical derivative of total intensity magnetic anomalies at the Korean margin and in the Ulleung Basin (modified from Park, 1998). The inset shows total intensity magnetic anomalies.

Keen(1982)은 화산성 대륙주변부에서 대륙지각이 분리되기 전까지 지탱할 수 있는 최저 두께가 15 km임을 제시하였다. 한반도의 대륙주변부는 해저면 확장 당시 분출성 화산작용과 관입성 화산작용을 포함하여 화산작용이 활발하였다 (Kim et al., 2003). 따라서 지각의 두께가 15 km인 한국대지는 최대한 얇아진 (즉, rift된)

대륙지각의 한계를 나타내며 syn-rift와 post-rift의 경계를 나타내는 부정합면은 지 각분리 부정합으로 해석할 수 있다. 지각분리 부정합은 리프트 단계가 끝나고 해저 면 확장이 시작되면서 바닷물이 들어오는 것을 나타낸다. 지금까지 비활성 대륙주 변부에서 지각분리 부정합이 다수 관찰되었지만 후열도 해에서는 관찰된 적이 없 다. 리프트된 지역에서 침식면으로 나타나는 부정합은 지각의 융기가 리프트의 측 면부에만 국한된 것이 아니라 남한국대지의 리프트된 대부분의 지역에서 발생하였 으며 융기된 지역이 상당 기간 대기중에 노출되어 침식되었음을 지시한다. 지각의 융기는 지각이 얇아지고 쪼개질 때 질량이 재배치하는 결과로서 발생하거나 (Braun and Beaumont, 1989) 약권에 상승에 의해 촉발되는 가열과 열팽창 혹은 깊이에 따 라 달라지는 depth-dependent stretching에 의해 (e.g., Franke, 2013) 발생한다. 한 반도에서 수행된 심부 굴절파 탐사는 (1) 한반도의 지각은 명확하게 상부지각과 하 부지각으로 구성되어 있으며 (2) 상부지각에서 p-와 s-파 속도는 각각 5.4 - 6.1 그 리고 3.1 - 5.5 km/s로 주로 화강암으로 구성되어 있으며 하부지각에서 각각 6.3 -6.8 그리고 3.6 - 3.9 km/s이며 (3) 상부지각은 동쪽으로 가면서 두께가 평균 10 km임을 보여 준다 (Cho et al., 2006). 한국대지는 한반도의 오른쪽과 동일한 지질 로 이루어져 있으으로 Fig. 6에서 3.6 km/s contour가 한국 대지의 하부지각의 위 쪽 경계를 나타낸다고 해석한다. 이 경우, 한국 대지의 하부지각은, 한반도와 비교 했을 때, 2 km 이하로 몹시 얇아진 반면 상부지각은 두께가 크게 변하지 않았음을 알 수 있다. 이 해석은 한국대지의 리프팅이 depth-dependent stretching을 수반하 였으며 이것이 리프트된 지역의 융기에 상당히 기여하였음을 지시한다.

선형 자력이상 M-1은 한반도의 대륙주변부에서 대륙사면의 기저부를 따라 발생한다 (Fig. 7). 한국대지의 남쪽에서 지각분리는 대륙사면에 분출된 화산구조를 형성하면서 규모가 큰 화산작용과 함께 일어 났다 (Kim et al., 2003). M-1은 분출된화산구조와 그 위치가 잘 일치하므로 지각분리와 해저면 확장이 일어난 것을 지시한다고 볼 수 있다 (Fig. 2). M-1은 상당히 남-북 방향으로 발달되어 있지만 M-2는 북동-남서 방향을 가진다. M-2의 방향은 일본분지에서 확인된 선형 자력이상의 방향(N40°E)와 (Seama and Isezaki, 1990) 일치한다. 울릉분지에서의 M-2가 해양지각내 선형 자력이상을 나타내는지 음향기반암위의 열극 분출을 나타내는지는 불분명하지만 그 방향으로 미루어 볼 때 남쪽방향으로 진행된 확장과 관련된 화산작용에 의해 형성되었다고 볼 수 있다. M-1과 M-2 사이의 폭은 북동쪽으로 넓어지는

데 한반도의 대륙 주변부에서 남서 일본열도가 분리될 때 상당한 양의 시계방향 회전이 있었음을 제시한다. M-2의 방향이 태평양판이 섭입하는 북동방향과 수직인점을 고려하면 시계방향의 회전은 태평양판의 섭입에 반응하여 해저면 확장의 방향이 재조정되는 것의 결과일 수 있다. 시계 방향의 회전은 섭입대에서 남서 일본열도가 호상을 이루도록 하는 자연적인 현상이었을 것으로 해석된다.

3-5-2. 한국대지에서 후열도 리프팅의 과정

Van der Werff(2000)는 Jolivet and Tamaki(1992)와 Ingle J.(1992)의 연구를 기초로 일본분지와 야마토분지가 형성된 시기를 정리하였다. 이에 따르면 동해에서 해저면 확장은 올리고세 후기에 북쪽의 일본분지에서 시작되었으며 이 때에 남동쪽에서는 야마토분지의 리프팅이 발생하였다. 울릉분지에서 가장 오래된 퇴적층서는 석유개발을 위한 시추공에서 얻은 생층서자료와 연계했을 때 마이오세 초기(23 Ma)로 해석된다 (Lee et al., 2001). 한반도 대륙주변부에서 대륙지각의 리프팅이 지각분리와 해저면 확장 이전에 일어났음을 고려하면 이곳에서의 리프팅은 마이오세이전 (더 자세히 말하면 올리고세 후기에서 마이오세 초기)에 발생하였을 것이다. 즉, 동해의 북쪽에서 해저면 확장에 의해 일본분지가 형성될 때 동해의 남서쪽 경계에 해당하는 한반도의 대륙주변부에서는 울릉분지가 형성되기 전에 대륙지각의리프팅을 겪었다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 동해의 그 주변의 육지에 대해 70 km 깊이에서의 s-파 속도모델을 보여 준다. 분명히, 한반도와 남서 일본열도의 주변부를 따라 저속도대가 존재한다. 전지구의 토모그래피에 의해 영상화된 태평양판은 (e.g., Kim et al., 2003) 일본열도 아래로 내려가서 울릉분지에서 670 km 깊이의 불연속면에 도달한 후 한반도의 주변부에서 수평방향으로 진행하여 중국 동부까지 뻗어 있다. 섭입한 태평양판이 남서 일본의 주변부보다 한반도의 주변부에서 훨씬 깊이 위치하지만 두 주변부에서 획득한 신생대의 화산암들은 후열도 리프팅에 해당하는 올리고세 후기부터 마이오세 초기까지 동일한 시기의 화산작용이 있었을 보여준다 (Tsoi et al., 1996). 따라서, 저속도대는 남서 일본열도가 분리되기 이전에 리프팅과 지각분리에 관련해서 해양지각 위에서 위에서 유도된 대류에 의해 형성된 약권의 용승이 현재로서 약화된 것을 나타낸다고 볼 수 있다. 두 주변부를 따라서 존재하는 약권의 용승은 두

주변부가 conjugate한 것임을 지시한다.

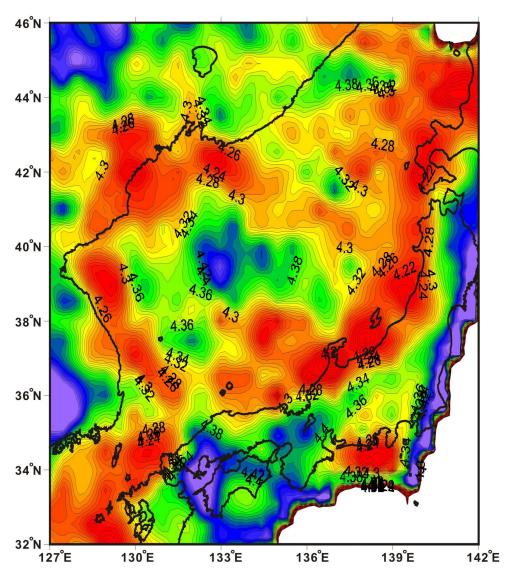


Figure 8. A horizontal slice of s-wave velocity at 70 km depth in the East Sea and surrounding regions.

최근에, 다수의 연구자들이 지화학, 암석학, 연대, 퇴적학, 그리고 고생물학 자료를 이용하여 남서 일본열도가 아시아에서 분리되기 이전의 위치를 추정하였다 (Hisada et al., 2008; Kojima et al., 2008). 그들은 남서 일본열도가 지금보다 훨씬 남북방향으로 배열되어 (Fig. 9a) 있었다고 제시하는데 이것은 한반도의 주변부와 남서 일본열도의 주변부가 conjugate하다는 해석과 일치하며 남서 일본열도가 분리될 때의 지구조적 운동을 정확히 해석하는 단서를 제공한다. 지형자료에서 남서

일본열도에 속하는 Oki Bank가 ESKP로부터 남동방향으로 떨어져 나갔음을 분명히 추론할 수 있다. ESKP의 horst and graben system은 마찬가지로 북서-남동 방향 의 신장을 지시한다. 그러므로, 한반도의 북쪽 주변부에서 올리고세 후기에 시작된 후열도 리프팅과 지각분리에 의해 한국 대지가 한반도의 북쪽에서 남동방향으로 분 리되었다고 생각하는 것이 타당하다 (Fig. 9a). Kim et al.(2007)은 일본분지에서 진 행된 해저면 확장으로부터 리프트가 한반도의 중앙부를 향해 남서쪽으로 전파하여 남한국 대지를 북한국 대지와 분리하였다고 제시하였다. ESKPso horst and graben system은 이때 전파된 리프트의 앞부분에서 형성되는 신장력에 의해 생겨났으며 그 이후 리프트가 북한국대지와 ESKP를 분리하였다고 해석한다. ESKP의 매우 신 장된 하부지각과 horst and graben system은 plastic하게 늘어나는 ductile한 하부 지각위에서 brittle한 상부지각이 fragment된 것에 의해 설명될 수 있다 (Stewart, 1971). 하지만 리프트는 한국순상지라는 강한 암권으로 이루어진 한국대지를 완전히 통과하지 못하고 점차 남쪽으로 방향을 바꾸면서 WSKP내로 진입하면서 반달분지 를 형성하였다 (Fig. 9b). 옥계분지는 반달분지의 융기된 측면부 바깥에 위치하며 그 중심이 반달분지의 주 경계단층으로부터 상당히 벗어나 있으므로 리프트가 더 남쪽으로 전파하여 옥계분지를 리프트시켰을 것으로 보이지는 않는다. 대신, 옥계분 지의 리프팅은 한반도의 남쪽 주변부에서 후포분지의 리프팅을 일으킨 동서 방향의 신장력에 의해 유도되었을 것으로 보인다. 이 동서방향의 리프팅은 남북방향으로 위치한 남서 일본열도에 수직으로 유도되는 신장력과 직접적인 관련이 있을 것이 다. 반달분지의 리프팅이 옥계분지의 리프팅보다 먼저 일어난 것인지는 불확실하지 만 두 분지에서 나타나는 지각분리 부정합은 이들이 동시에 post-rift 융기를 겪었 으며 그 이후 한반도의 주변부에서 지각분리가 발생하였음을 의미한다. 이 해석은 일본분지에서 해저면 확장이 진행될 때 한반도의 주변부에서 후열도 리프팅과 지각 분리가 일어났음을 의미하며 동해의 북부와 남부 사이 형성연대의 관계와 일치한 다. 남서 일본열도가 분리됨과 함께 울릉분지에서 해저면 확장과 시계방향의 회전 이 있었다.

후열도해는 해저면확장이 비대칭적이므로 일반적인 대양의 중앙해렫과 다르다 (Martinez et al., 2000). 수치실험을 통해, Kincaid and Hall(2003)은 후열도 확장축과 트렌치간의 거리가 거의 일정하기 때문에 후열도 확장이 비대칭적으로 일어남을 제시하였다. 일본열도는 마이오세 초기부터 후열도 확장과 관련하여 태평양쪽으로

떨어져 후퇴하였다 (e.g., Miller and Kennett, 2006). 동해의 북부와 남부에서 지각 분리와 해저면 확장이 순차적으로 일어난 것은 트렌치후퇴가 순차적으로 진행되었 음을 지시한다. 이 방식으로 일본열도가 바깥쪽으로 이동함에 따라 지각분리, 즉 후 열도 확장의 시작이 일어난 위치와 트렌치간의 거리가 일정하게 유지되었다고 할 수 있다.

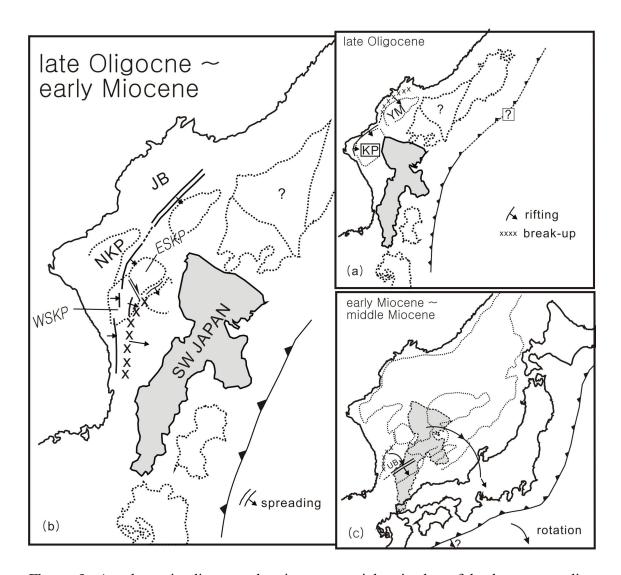


Figure 9. A schematic diagram showing sequential episodes of back-arc spreading from the northern to southern parts at the Korean margin in response to trench retreat that led to the separation of the southwestern Japan Arc. (Modified after Kim et al., 2007) (a) Positions of the southwestern Japan Arc and the fragments

of continental crust when back-arc opening initiated. KP = Korea Plateau; YM = Yamato Bank. (b) From late Oligocene to early Miocene times, extension that propagated from seafloor spreading in the Japan Basin caused rifting in the northwest-southeast direction in the ESKP and the northern part of the WSKP. Meanwhile, the southern part of the WSKP and the Korean margin south of the WSKP experienced rifting and break-up in the east-west direction. JB = Japan Basin; WSKP and ESKP = western and eastern blocks of the South Korea Plateau, respectively. (c) In the early to middle Miocene, the southwestern Japan Arc separated from the eastern Korean margin to its present location with significant clockwise rotation. UB = Ulleung Basin.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4-1. 연구개발 목표 달성도

4-1-1. 연구성과

(1) 논문게재 성과

게재연도	논문명	저자			차스기머	Vol.(No.)	국내외 구뷰	SCI구
		주저자	교신저자	공동저자	역돌시당	VOLUNO.)	구분	분

※논문은 보고서 작성시점에서 게재완료된 건만 작성

(2) 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2012.4.16	Evolution of the eastern margin of Korea associated with the opening of the East Sea (Japan Sea)	김한준	1st Korea-Japan marine geoscience symposium	

(3) 인력활용/양성 성과

(가) 인력지원 성과

지원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별 지역별				
총인원	박사	석사	학사	기타	납	여	수도권	대전	기타지역

(나) 장·단기 연수지원 성과

장기 (2개	월 이상)	단기 (2개월 미만)			
국내	국외	국내	국외		

(다) 산업기술인력 양성 성과

프로그램명	프로그램 내용	교육기관	교육 개최회수	총 교육시간	총 교육인원

4-1-2. 연구개발 목표 및 달성도 (신명조, 13 pt, 줄간격 200%)

연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치	달성치
	학술지 논문 원고 완성		1건	100%	1건
	100%	100%			

4-2. 대외기여도

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

○ IODP Expedition 346의 수행과 관련하여 동해의 지구조적 연구를 위한 APL의 작정에 활용할 계획임.

제 6 장 참고문헌

- Braun, J., and C. Beaumont (1989), A physical explanation of the relation between flank uplifts and the breakup unconformity at rifted continental margins, *Geology*, 17, 760-764.
- Buck, W. R. (1986), Small-scale convection induced by passive rifting: the cause of uplift of rift shoulders, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 77, 362-372.
- Cho, H. M., C. E. Baag, J. M. Lee, W. I. Moon, H. Jung, K. Y. Kim., and I. Asudeh (2006), Crustal velocity structure across the southern Korean Peninsula from seismic refraction survey, *Geophys. Res. Lett.*, 33, GL06307.
- Conder, J. A., D. A. Wiens, and J. Morris (2002), On the decompression melting structure at volcanic arcs and back-arc spreading centers, *Geophys. Res. Lett.*, 29, GL015390.
- Currie, R. G., and E. E. Davis (1994), Low crustal magnetization of the middle valley sedimented rift inferred from sea-surface magnetic anomalies, in *Proc. Ocean Drilling Program*, *Scientific Results*, *139*, edited by M J. Mottl et al., pp. 19-27.
- Currie, C. A., and R. Hyndman (2006), The thermal structure of subduction zone back arcs, *J. Geophys. Res.*, 111, B08404, doi:10.1029/2005JB004024.
- Falvey, A., and J. C. Mutter (1981), Regional plate tectonics and the evolution of Australia's passive continental margins, *BMR J. Aus. Geol. Geophys.*, 6, 1-29.
- Franke, D. (2013), Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magna-poor and volcanic rifted margins, *Mar. Petrol. Geol.*, 43, 63-87.
- Hirata, N., B. Y. Karp, T. Yamaguchi, T., Kanazawa, K. Suyehiro, J. Kasahara,
 H. Shiobara, M. Shinohara, and H. Kinoshita (2002), Oceanic crust in the
 Japan Basin of the Japan Sea by the 1990 Japan-USSR expedition, *Geophys*.

- Res. Lett., 19, 2027-2030.
- Hisada, K.-I., S. Takashima, S. Arai, and Y. I. Lee (2008), Early Cretaceous paleography of Korea and southwest Japan inferred from occurrence of detrital chromian spinels, *Island Arc*, *17*, 471-484.
- Ingle Jr., J. C. (1992), Subsidence of the Japan Sea: stratigraphic evidence from ODP sites and onshore sections, in *Proc. Ocean Drilling Program*, *Scientific Results*, 127/128(part2), edited by K. Tamaki et al., pp. 1197-1218.
- Jackson, J., and D. McKenzie (1983), The geometrical evolution of normal fault systems, *J. Struct. Geol.*, *5*, 471-482.
- Jolivet, L., and K. Tamaki (1992), Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the northeast Japan arc, in *Proc. Ocean Drilling Program, Scientific Results*, v.127/128(part2), edited by K. Tamaki et al., pp. 1311-1331.
- Jolivet, L., K. Tamaki, and M. Fournier (1994), Japan Sea, opening history and mechanism: a synthesis, *J. Geophys. Res.*, 99,22,237-22,259.
- Keen, C.E. (1982), The continental margin of eastern Canada: A review, in *Dynamics of passive margins*, edited by R.A. Scrutton, pp. 45-58, AGU, Washington, DC.
- Kelley, K.A., T. Plank, T. L. Grove, E. M. Stolper, S. Newman, and E. Hauri (2006), Mantle melting as a function of water content beneath back-arc basins, *J. Geophys. Res.*, *111*, B09208, doi:10.1029/2005JB003732.
- Kim, H. J., S. J. Han, G. H. Lee, and S. Huh (1998), Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea (Japan Sea), *Mar. Geophys. Res.*, 20, 219-237.
- Kim, H. J., H. T. Jou, H. M. Cho, H. Bijwaard, T. Sato, J. K. Hong, H. S. Yoo, and C. E. Baag (2003), Crustal structure of the continental margin of Korea in the East Sea (Japan Sea) from deep seismic sounding data:

- evidence for rifting affected by the hotter than normal mantle, *Tectonophysics*, 364, 25-42.
- Kim, H. J., G. H. Lee, H. T. Jou, H. M. Cho, H. S. Yoo, G. T. Park, J. S. Kim (2007), Evolution of the eastern margin of Korea: constraints on the opening of the East Sea (Japan Sea), *Tectonophysics*, 436, 37-55.
- Kincaid, C. and P. S. Hall (2003), Role of back arc spreading in circulation and melting at subduction zones, *J. Geophys. Res.*, 108, 2240, doi:10.1029/2001JB001174.
- Kojima, S., Tsukada, K., Otoh, S., Yamakita, S., Dymovich, A.D., and Eichwald, L.P., 2008, Geological relationship between Anyui metamorphic complex and Samarka terrane, Far East Russia. *IslandArc*, 17, 502-516.
- Kwon, Y. K., S. H. Yoon, and S. K., Chough (2009), Seismic stratigraphy of the western South Korea Plateau, East Sea: implications for tectonic history and sequence development during back-arc evolution, *Geo-marine Lett.*, 29, 181-189.
- Lee, G. H., H. J. Kim, S. J. Han, and D. C. Kim (2001), Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the East Sea (Japan Sea) back-arc basin, *Mar. Petro. Geol.*, 18, 615-634.
- Lee, G. H., H. J. Kim, H. T. Jou, and H. M. Cho (2003), Opal-A/opal-CT phase boundary inferred from bottom-simulating reflectors in the southern South Korea Plateau, East Sea (Sea of Japan), *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1755-1758.
- Martinez, F., P. Fryer, and N. Becker (2000), Geophysical characteristics of the southern Mariana Trough, 11°50N-13°40N, *J. Geophys. Res.*, 105, 16,591-16,607.
- Miller, M. S., and Kennett, B. L. N (2006), Evolution of mantle structure beneath the northwest Pacific: Evidence from seismic tomography and

- paleogeographic reconstructions, *Tectonics*, *25*, TC4002, doi:10.1029/2005TC001909.
- Otofuji, Y.-I., R. Enami, M. Yokoyama, K. kamiya, S. Kimura, H. Saito, and T. Matsuda (1999), Miocene clockwise rotation of southwest Japan and formation of curvature of the Median Teconic Line: paleomagnetic implications, *J. Geophys. Res.*, 104, 12,895-12,907.
- Park, C. H., (1998), Crustal structure and evolution of the Ulleung Basin in the East Sea of Korea (the Japan Sea) by deep penetrating seismic refraction, reflection, and potential field data, Ph. D. thesis, 245 pp., Chiba University, Japan.
- Ryu, J. M., and C. S. Han (1996) Marine geology stratigraphy, in *Geology of Korea*, edited by R.J. Paek et al., pp.391-408, DPR of Korea.
- Seama, N., and N. Isezaki (1990), Sea-floor magnetization in the eastern part of the Japan Basin and its tectonic implications, *Tectonophysics*, *181*, 185-297.
- Stewart, J. H. (1971), Basin and Range structure: a system of horsts and grabens produced by deep-seated extension, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 1019-1044.
- Su, W., C. Z. Mutter, J. C. Mutter, and W. R. Buck (1994), Some theoretical predictions on the relationships among spreading rate, mantle temperature, and crustal thickness, *J. Geophys. Res.*, *94*, 3215-3227.
- Tsoi, I.B., vashencova, N.G., Gorovaya, M.T., Bersenev, I.I., and Ogasawara, K., 1996, Neogene to Quaternary (EoPeistocene) geology of submarine rises of the Japan Sea, in *Geology and Geophysics of the Japan Sea*, edited by N. Isezaki et al., pp.263-281, Tokyo, Japan.
- Van der Werff, W. (2000), Backarc deformation along the eastern Japan Sea margin, offshore northern Honshu, *J.AsianEarthSci.*,18,71-95.
- Vuan, A., S. D. Robertson Maurice, D. A. Wiens, and G. F. Panza (2005), Crustal and upper mantle S-wave velocity structure beneath the Bransfield

Strait (West Antarctica) from regional surface wave tomography, *Tectonophysics*, 397, 241-259.

Zheng, Y., W. Shen, L. Zhou, Y. Yang, Z. Xie, and M. H. Ritzwoller (2011), Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, northeast China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography, *J. Geophys. Res.*, *116*, B12312, doi:10.1029/2011JB008637.

주 의

- 1. 이 보고서는 한국지질자원연구원에서 국토해양부 해양과 학조사 및 예보기술개발 사업인 국제해저지각시추사업에 서 수행하는 과제의 위탁연구 보고서입니다.
- 2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국지질자원연 구원에서 수행한 국제해저지각시추사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
- 3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.