

동해의 지구조적 연구와 관련한 심부시추의 필요성
제안

Suggestions for deep drilling to investigate tectonic
evolution of the East Sea

한국해양과학기술원

한국지질자원연구원

제 출 문

한국지질자원연구원장 귀하

본 보고서를 “동해의 지구조적 연구와 관련한 심부시추의 필요성 제안” 사업의 최종보고서로 제출합니다.

2012. 7. 27

위탁연구기관명 : 한국해양과학기술연구원

위탁연구책임자 : 김한준

연 구 원 : 주형태

연 구 원 : 나지훈

연 구 원 : 한상준

연 구 원 : 유이선

요 약 문

I. 제 목

동해의 지구조적 연구와 관련한 심부시추의 필요성 제안

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 동해 뿐만 아니라 태평양판이 아시아대륙 아래로 섭입하는 지역에서 형성되는 후열도해의 진화와 발달 그리고 이와 관련된 맨틀의 움직임을 이해하는 데에 크게 도움을 줄 것이다.

이 연구의 목적은 한국대지내 한국대지내 트러프 충전 퇴적물의 부정합과 하부 퇴적단위의 연대를 결정하고 그 결과로서 동해 그리고 해양-대륙의 섭입 환경에서 후열도해의 열림방식을 설명할 수 있는 중요한 정보를 얻기 위해 2013년에 수행될 IODP Expedition 346의 보조 시추 제안서(ancillary project letter: APL)를 작성하는 것이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

IODP Expedition 346의 APL을 작성하는 필요성과 기대효과 그리고 목적을 작성

IV. 연구개발결과

이 연구의 결과로서 IODP Expedition 346의 APL을 작성하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

2013년 동해의 한국 EEZ내에서 수행될 IODP Expedition 346의 Ancillary Project Letter의 작성에 활용될 것이다.

S U M M A R Y

I. Title

Suggestions for deep drilling to investigate tectonic evolution of the East Sea

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 prepare an ancillary proposal for IODP Expedition 346 planned in 2013 to obtain important information with which to determine the age of the breakup unconformity and sedimentary sequences in the trough fill at the Korea Plateau and to explain the opening of a back-arc sea including the East Sea in an ocean-continent subduction setting.

III. Contents and scope of this research development

Compilation of necessity, expected application, and objectiveness of the Ancillary Project Letter for IODP Expedition 346.

IV. Results of this research development

Preparation of the Ancillary Project Letter of IODP Expedition 346.

V. Application plans from this research

The results of this study will be used to the preparation of the Ancillary Project Letter of IODP Expedition 346 planned in the Korea EEZ in the East Sea (Japan Sea) in 2013.

C O N T E N T S

Chapter 1. Outline of research and development

1-1. Objectives

1-2. Necessity of research

Chapter 2. Present status

2-1. Status of domestic technical development

2-2. Status of overseas technical development

Chapter 3. Research and results

3-1. Study area and methods

3-2. Research scope and Results

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. Ancillary Project Letter

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

동해에서 수행될 IODP 시추와 관련하여 Ancillary Project Letter (APL)를 작성

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 리프팅의 경우, 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 (Fig. 1). 더욱이, 한반도의 주변부에서 대륙지각의 리프팅과 분리가 발생하여 일본열도가 떨어져 나가면서 울릉분지가 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 움직임에 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 탄성과 탐사를 수행함으로써 시작되었다. 그 이후 1998년에 한국-러시아-일본이 공동연구로 한반도의 대륙붕에서 울릉분지 중앙부까지의 지각구조를 연구하기 위한 심부 탄성과 탐사가 수행된 바 있다. 그 결과로서 울릉분지 아래의 지각이 정상보다 두꺼운 해양지각임이 구명된 바 있으며 (Kim et al., 1998; Lee et al., 2009) 한반도의 대륙주변부에서 대륙지각과 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 탄성과 탐사이다. 심부 탄성과 탐사를 위해서는 대용량의 에어 건, 해저면 지진계, 그리고 다중채널 탄성과 탐사장비가 사용된다. 국내의 경우 심부 탄성과 탐사를 위한 장비중 해저면 지진계의 숫자가 극히 부족하다. 2007년에 시험적으로 해저면 지진계를 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 에어건을 이용하는 심부 탄성과 탐사가 매우 활발하다. 그 결과로서 아메리카 대륙과 유럽의 대서양 주변부에서 지각의 구조와 대서양의 형성, 아메리카 대륙의 태평양 주변부

에서 태평양판의 섭입에 따른 지진유발 구조, 동중국해, 황해, 그리고 남중국해의 지각구조 등을 구명하고 있다. 이들 나라들은 자체적으로 해저면 지진계를 대량으로 제작하여 심부 탄성과 탐사로써 지각구조뿐만 아니라 퇴적분지에서 석유탐사에도 응용하고 있다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

3-1. 서론

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 (Fig. 1). 더욱이, 한반도의 주변부에서 대륙지각의 리프팅과 분리가 발생하여 일본열도가 떨어져 나가면서 울릉분지가 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. 대륙지각의 리프팅 과정은 후열도해와 대양에서 모두 유사하게 발생하므로 한국대지에서 리프팅 초기의 구조와 연대 그리고 변형을 해석하는 것은 동해와 같은 후열도해뿐만 아니라 대륙지각이 분리되고 태평양 혹은 대서양과 같은 대양의 진화와 발달 그리고 이와 관련된 맨틀의 움직임 이해하는 데에 크게 도움을 줄 것이다.

이 연구의 목적은 IODP 시추를 한국대지에서 수행하는 것에 병행하여 한국대지에서 지구조적 연구를 위한 시추를 제안하는 Ancillary Proposal Letter를 작성하는 것이다.

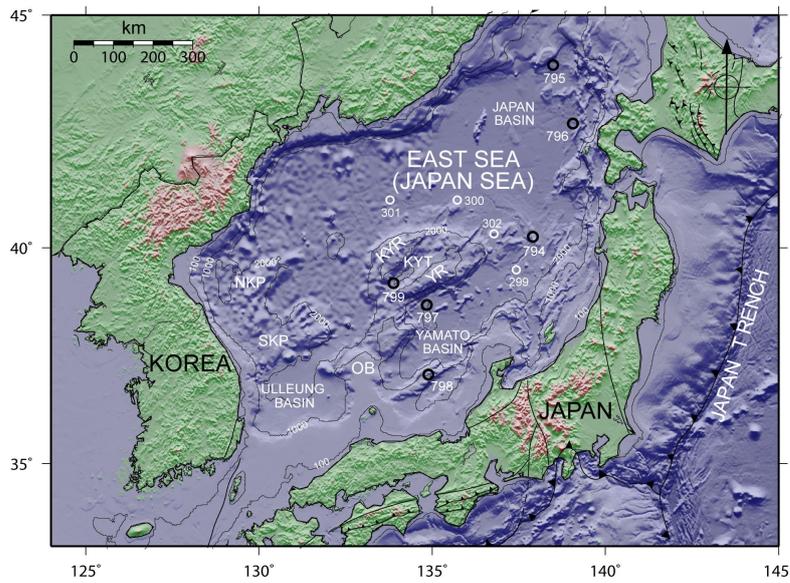


Fig. 1. Physiographic and bathymetric map of East Sea/Japan Sea. White and black open circles represent DSDP and ODP sites, respectively. NKP = North Korea Plateau; SKP = South Korea Plateau; OB = Oki Bank; KYR = Kita-Yamato Ridge; YR = Yamato Ridge; KYT = Kita-Yamato Trough. Contours in meters.

3-2. Ancillary Project Letter

(Active vs. passive rifting for the opening of the back-arc basin in an ocean-continent subduction setting)

후열도해는 수렴성 판 경계부에서 섭입하는 판의 위에 있는 판에서 형성되는 바다이다. 해양-대륙간 섭입대에서 후열도해의 열림은 대륙지각이 가장 약한 곳에서 발생하며 강한 맨틀이 가장 얇으며 후열도해의 열림이 궁극적으로 해양지각을 형성하게 된다는 점에서 대양의 열림과 유사하다. 따라서, 해양-대륙간 섭입대에서 후열도해가 열리는 것은 대륙지각의 분리(continental breakup)라는 주된 연구주제에 대한 해답을 제시할 수 있다. 대륙지각의 분리는 능동적 리프팅과 수동적 리프팅이라는 두 가지 요인에 의한 것으로 파악되고 있다. 이들 두 가지 과정들과 관련된 변형이 시간에 따라 발생하는 순서는 간단해 보일 수도 있지만 실제의 상황에 적용하는 것은 매우 어려우며 (Ruppel, 1995) 많은 수의 리프트에서 능동적 작용과

수동적인 작용이 결합하여 진행된 지구조적 진화과정을 보인다 (Merle, 2011). 대륙 지각의 분리는 원거리에서 유도되는 신장력 (예를 들어, slab pull)에 의해 수동적으로 시작될 수 있는데 (McKenzie and Bickle, 1988) 이 경우에는 약권이 수동적으로 상승한다. 이와 달리 지각 아래 약권의 불안정화에 의해 소규모의 대륙이 발생하여 능동적인 리프팅이 발생할 수도 있다 (Huismans et al., 2001). 대륙지각을 분리하는 능동적 요인은 대륙간 충돌후에 맨틀암권이 형성되는 결과일 수도 있다 (Channel and Mareschal, 1998; Merle and Michon, 2001). 하지만, 맨틀내 움직임이 top-down control을 지지하는 Anderson (2001)과 Hamilton (2007)과 같은 연구자들이 예상하는 대로 지구표면에 있는 판들에 의해 주로 조절되고 생성된다면 능동적 리프팅은 전혀 발생하지 않을 것이며 대륙지각의 분리과정에서 극히 제한적인 역할 밖에 못 할 수도 있다.

후열도해의 열림을 설명하는 여러 가지 작용이 제시된 바 있으며 많은 연구자들이 subduction rollback이 후열도해에 신장력을 제공하는 주된 원인으로 여기고 있다 (Taylor, 1995). 만약 subduction rollback이 원거리 힘으로서 작용해서 후열도해의 확장을 야기한다면 해양-대륙간 섭입대에서 후열도해에서 발생하는 리프팅의 시작은 수동적이고 침강이 우세한 과정일 수 있다. 수동적 리프팅에서 융기나 doming이 조금이라도 일어난다면, 암권에 상당한 열이 가해진 후 리프팅 과정의 후기에만 일어날 것이다 (Ruppel, 1995). 동해는, 과거에 DSDP와 ODP 시추가 행해졌을 뿐만 아니라 지금까지 한국과 일본 등에서 다양한 지질학 그리고 지구물리학적 자료를 상당히 얻은 바 있으므로 (Fig. 1) 해양-대륙간 섭입대에서 후열도해가 열릴 때 수동적 리프팅과 능동적 리프팅의 역할을 연구할 좋은 장소가 될 수 있다.

동해에는 세 개의 심부 퇴적분지(일본분지, 야마토분지, 그리고 울릉분지)가 한국대지, 오키뱅크, 야마토뱅크와 같은 대륙지각의 조각들에 의해 분리되어 있다. 동해의 열림은 올리고세 말기에 일본분지의 북동부에서 시작되어 해저면 확장까지 이어졌다 (Tamaki et al., 1992). 일본분지에서 해저면 확장이 계속될 때 동해의 남쪽에서 대륙지각의 신장이 발생하여 결국 야마토분지와 울릉분지가 열리게 되었다. 마이오세 중기에 일본열도의 동쪽과 남동쪽을 따라 판운동과 섭입모드의 변화가 발생하여 동해는 닫히기 시작하였다 (Lee et al., 2001; Lee et al., 2011).

ODP 시추는 Kita 야마토 트러프의 기반암위에서 부정합면을 형성하면서 쌓인 초기 마이오세 - 홀로세 퇴적물 전부가 아래에서 중간 부분의 반심해성 수심에서

퇴적되었음을 보여주는데 (Fig. 2) 이것은 매우 빠른 침강을 지시한다. 반면에, 남한국대지의 트러프 충전 퇴적물은 눈에 띄는 침식부정합면으로 갈려진 두 개의 구별되는 층으로 이루어져 있는데 (Fig. 3) (Lee et al., 2003) 이것은 융기 혹은 상당한 지구조적 운동이 일어났음을 지시한다. 하부 퇴적단위는 썩기모양을 이루며 내부의 반사신호가 진폭이 불균질하며 연속성이 낮고 불규칙하며 국부적으로 혼란한 퇴적상을 보이는데 퇴적작용이 균일하지 못했음을 알 수 있다. Kita 야마토 리지의 충전 퇴적물의 상부단위는 연속성이 상당히 높으므로 균질한 퇴적, 즉 해양환경에서 퇴적되었을 것으로 해석할 수 있다.

한국대지에서 기반암에서 나타나는 대부분의 단층들은 하부 퇴적단위까지 연결되지만 상부퇴적단위에서는 확연하게 보이지 않는다. 썩기모양으로 나타나는 하부 퇴적단위는 경계단층쪽으로 두꺼워지므로 퇴적과 동시에 진행한 단층작용을 제시한다. 따라서, 한국대지의 트러프 충전 퇴적층내 불연속면은 리프팅의 최종단계로서 하부의 syn-rift 퇴적층과 상부의 post-rift 퇴적층을 나누는 경계면을 나타낸다. 이러한 경계면은 많은 수의 비활성 주변부에서 관찰되는 지각분리 불연속면(Falvey, 1974)에 해당한다. 서태평양에서 이러한 지각분리 불연속면은 전혀 보고된 바 없다. 한국대지에서 나타나는 지각분리 불연속면의 연대는 알려진 바 없다. 한국대지의 트러프지역에서 보이는 기반암의 울퉁불퉁한 특성은 pre-rift 불연속면으로 간주할 수 있다.

Kita 야마토 한국대지의 트러프 충전 퇴적물은 각각 수동적 및 능동적 과정을 제시할 수 있다. 하지만, 리프트 축방향으로 doming이 없어도 리프트 측면부의 융기가 스트레스 해소 혹은 광역적인 지각균형 (Braun and Beaumont, 1989), 지각 하부내 화성물질의 침작 (igneous underplating) (Brodie and White, 1994), 그리고 리프팅 후 압축력에 의한 지각의 축소 및 역전(inversio) 등에 의해 발생할 수 있으므로, 한국대지에서 보이는 지각분리 불연속면은 반드시 리프트지역 전체에서 발생한 doming과 침식을 지시한다고는 할 수 없다. 만약, 능동적 리프팅이 발생하였다면 동해의 중앙부에 가까이 위치하는 Kita 야마토 트러프는 동해의 중심에서 벗어나 있으며 한반도와 완전히 분리되지 않은 한국대지보다 훨씬 더 큰 융기 혹은 doming을 받았을 것이다. 따라서, Kita 야마토 트러프의 충전 퇴적물내에 침식 불연속면이 존재하지 않는 것은 능동적 리프팅이 발생하지 않았음을 지시한다. 이 경우, Kita 야마토 트러프 지역에서 기반암의 상부 경계면은 pre-rift 불연속면을 나타

낸다. 다른 한 편으로, 섭입 rollback이 수동적 리프팅을 야기한 후 doming과 능동적 리프팅이 발생하여 그 결과 트러프 지역 전체에 걸쳐 침식이 발생하고 그 후 급격한 침강과 해저면 확장이 발생하였다고 볼 수 있다. 이 경우에는 한국 대지와 Kita 야마토 트러프의 기반암의 최상부 경계면이 지각분리 부정합면을 나타낼 것이다.

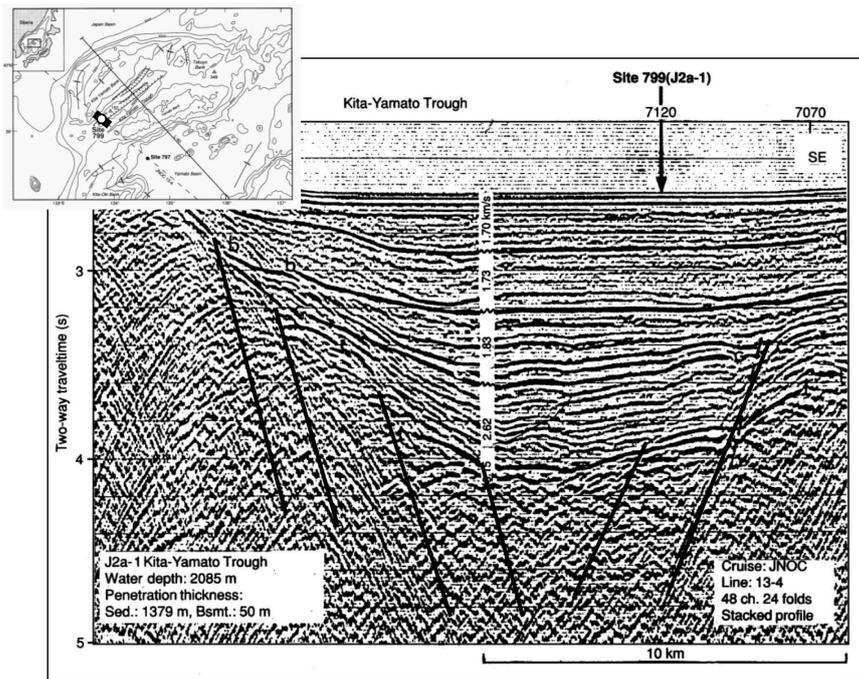


Fig. 2. Seismic profile crossing ODP Site 799 at Kita-Yamato Trough, modified from Shipboard Scientific Party (1990). Entire column of trough fill was deposited at lower to middle bathyal depths, suggesting very rapid subsidence. Inset shows ODP Site 799 and location of profile.

위에서 논의한 관측사항들을 기초로, 동해의 열림을 설명할 수 있는 두 가지의 모델 혹은 시나리오가 있다 (Fig. 4): (1) 수동적 리프팅과 침강 그리고 이후 발생한 리프트 지역의 융기 및 침식과 침강 (즉, 지역적인 지각분리 부정합) (2) 수동적 리프팅과 이후 발생한 능동적 리프팅과 doming, 그리고 지역 전체에 걸쳐 발생한 융기 (즉, 지역적인 지각분리 부정합)와 침강. 동해에서 2013년에 계획된 IODP Expedition 346을 수행하면서 약간의 노력을 더하면 한국대지내 트러프 충전 퇴적물의 부정합과 하부 퇴적단위의 연대를 결정하고 그 결과로서 동해 그리고 해양-대륙의 섭입 환경에서 후열도해의 열림방식을 설명할 수 있는 중요한 정보를 얻을 수

있을 것이다.

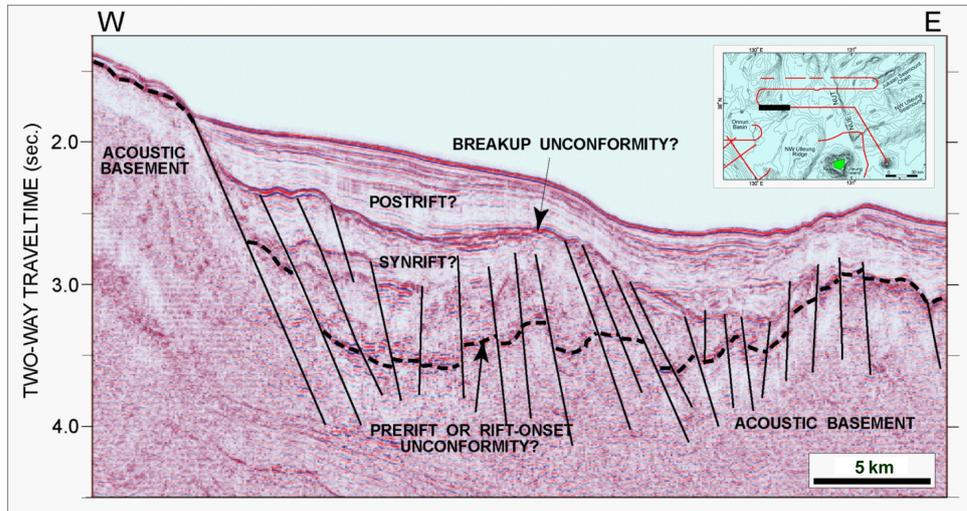


Fig. 3. Seismic profile crossing trough in South Korea Plateau showing prominent unconformity, separating two distinct seismic units. Lower unit is cut by faults extending from acoustic basement and characterized by variable-amplitude, discontinuous and irregular reflections. Upper unit is characterized by moderate-to-very continuous reflections. Inset shows location of profile

과학적 목적

- (1) 한국대지내 트러프 충전 퇴적물과 지각분리 부정합면 그리고 리프트 이전의 부정합면의 연대와 성질을 결정하여 판구조론에서 중요한 과제인 해양-대륙간 섭입환경에서 후열도해의 열림모드와 열림작용을 구명
- (2) 한국대지내 트러프 충전퇴적물을 회수하여 수동적 및 능동적 리프팅에 의해 예측되는 변형의 순서와 연대를 구명
- (3) 해양-대륙간 섭입 환경에서 후열도해의 진화라는 중요한 과정을 설명하는 용기와 침강의 역사를 복원
- (4) 후열도해와 비활성 대륙주변부의 형성과정의 동일성 해석

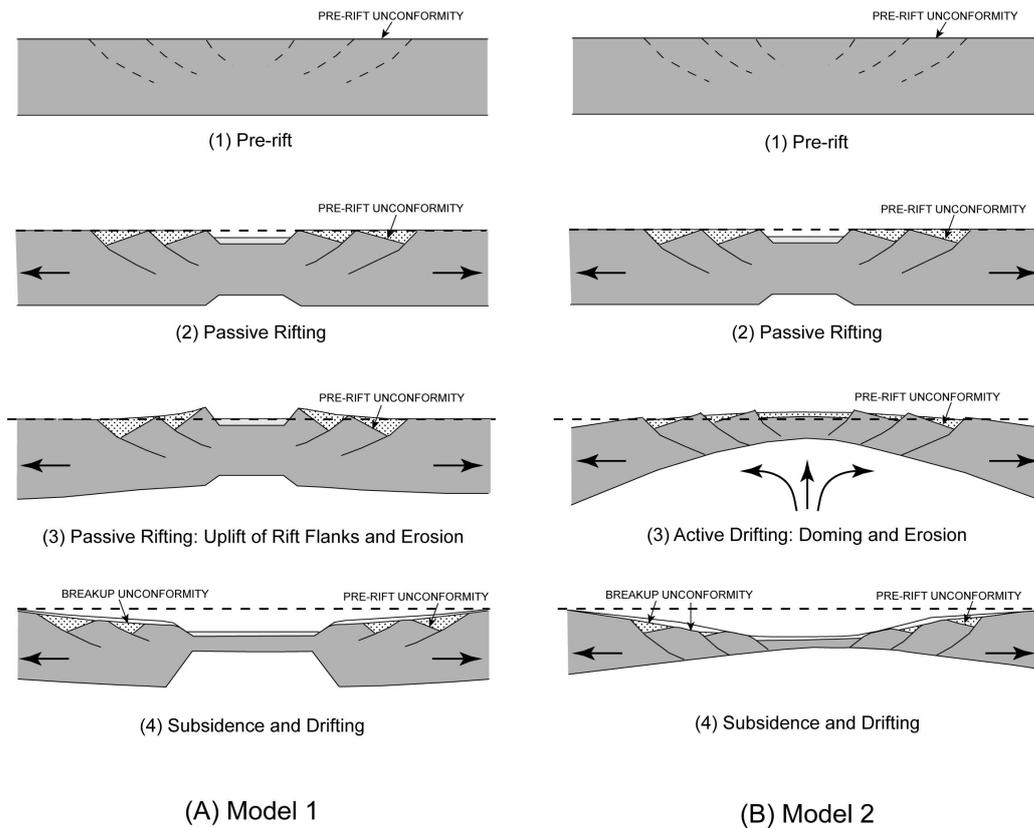


Fig. 4. (A) Model 1: Passive rifting followed by uplift and erosion of rift flanks and subsidence and drifting. Top of basement represents pre-rift unconformity. Breakup unconformity separates synrift and postrift units in rift-flank troughs. (B) Model 2: Passive rifting followed by active rifting and subsidence and drifting. Top of basement near axial zone of rift represents breakup unconformity whereas that in deep trough away from axial zone of rift represents pre-rift unconformity.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4-1. 연구개발 목표 달성도

4-1-1. 연구성과

(1) 논문게재 성과

게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분	SCI구분
		주저자	교신저자	공동저자				

※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	국제

(3) 인력활용/양성 성과

(가) 인력지원 성과

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

(나) 장·단기 연수지원 성과

장기 (2개월 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	기중치	달성치
APL 작성을 위한 필요성 제기	동해에서 IODP 시추 필 요성 제기		1 건	100%	1건
총 계				100%	100%

4-2. 대외기여도

- 동해의 지구조적 형성에 관련한 연구 필요성을 제시함으로써 2013년 동해에서 계획할 IODP Expedition 346의 APL 작성에 이바지 하였음.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

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

제 6 장 참고문헌

- Anderson, D.L., 2001. Top-down tectonics. *Science*, 293, 2016 - 2018.
- Braun, J., Beaumont, C., 1989. A physical explanation of the relation between flank uplifts and the breakup unconformity at rifted continental margins. *Geology*, 17, 760-764.
- Brodie, J., White, N.J., 1994. Sedimentary basin inversion caused by igneous underplating: Northwest European continental shelf. *Geology*, 22, 147 - 150.
- Channel, J.E., Mareschal, J.C., 1989. Delamination and asymmetric lithospheric thickening in the development of the Tyrrhenian Rift. In: Coward, M.P., Dietrich, D., Park, R.G. (Eds.), *Alpine Tectonics*. Geological Society, London, p. 285 - 302.
- Falvey, D.A., 1974. The development of continental margins in plate tectonic theory. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 14, 95-106.
- Hamilton, W.B., 2007. Driving mechanism and 3-D circulation of plate tectonics. In: Sears, J.W., Harms, T.A., Evenchick, C.A. (Eds.), *Whence the Mountains? Inquiries into the Evolution of Orogenic Systems: A Volume in Honour of Raymond A. Price*. Geological Society of America Special Paper. Geological Society of America, p. 1 - 25.
- Huisman, R.S., Podladchikov, Y.Y., Cloetingh, S., 2001. Transition from passive to active rifting: relative importance of asthenospheric doming and passive extension of the lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 106, 11271 - 11291.
- Kim, H.J., Han, S.J., Lee, G.H., Huh, S., 1998. Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea (Japan Sea). *Marine Geophysical Research*, 20, 219-237.
- Kim, H.J., Jou, H.T., Cho, H.M., Bijwaard, H., Sato, T., Hong, J.K., Yoo, H.S., Baag, C.E., 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., Lee, G.H., Jou, H.T., Cho, H.M., Yoo, H.S., Park, G.T., 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.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Suh, M.C., Hong, J.K., 1999, Crustal structure, volcanism, and opening of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Tectonophysics*, 308, 503-525.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Han, S.J., Kim, D.C., 2001. Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the East Sea (Japan Sea) back-arc basin. *Marine and Petroleum Geology*, 8, 615-634.
- Lee, G.H., Kim, H. J., Jou, H T., Cho, H M., 2003. Opal-A/opal-CT phase boundary inferred from bottom simulating reflectors in the southern South Korea Plateau, East Sea (Sea of Japan). *Geophysical Research Letters*, 30, 2238, doi:10.1029/2003GL018670.
- Lee, G.H., Yoon, Y.H., Nam, B., 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.
- McKenzie, D., Bickle, M.J., 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *Journal of Petrology*, 29, 625-679.
- Merle, O., 2011. A simple continental rift classification. *Tectonophysics*, 513, 88-95.
- Merle, O., Michon, L., 2001. The formation of the West European Rift: a new model as exemplified by the Massif Central area. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 172, 213 - 221.
- Ruppel, C., 1995. Extensional processes in continental lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 100, 24187-24215.
- Shipboard Scientific Party, 1990. Site 799. Proc. ODP, Initial Reports 128, p. 237-402.
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle, Jr., J.C. and Pisciotto, K.A., 1992. Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. Proc. ODP,

Sci. Results 127/128, Part 2, p. 1333-1348.

Taylor, B., 1995. Preface. In: Taylor, B. (Ed.), Backarc Basins: Tectonics and Magmatism. Plenum Press, New York and London, ix - xi.

Withjack, M.O., Schlische, R.W., Olsen, P.E., 1998. Diachronous rifting, drifting, and inversion on the passive margin of central eastern North America—an analog for other passive margins. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 82, 817 - 835.

주 의

1. 이 보고서는 한국지질자원연구원에서 국토해양부 해양과학조사 및 예보기술개발 사업인 국제해저지각시추사업에서 수행하는 과제의 위탁연구 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국지질자원연구원에서 수행한 국제해저지각시추사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.