

## 반사법 탄성파탐사자료 분석을 통한 동해 한국 대륙주변부 기반암의 기원과 형성과정

윤석훈<sup>1,‡</sup> · 김기범<sup>2</sup> · 조영진<sup>1</sup> · 고창성<sup>1</sup> · 권이균<sup>3</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 지구해양과학과

<sup>2</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>3</sup>공주대학교 지질환경과학과

### 요 약

동해 한국 대륙주변부에서 취득된 다중채널 탄성파탐사자료에 의하면, 동해 한국 대륙주변부의 기반암은 대체로 남-북 내지 북서-남동의 방향성을 보이는 다수의 신장된 능과 곽(ridge and trough) 지형을 이루고 있으며, 기반암 저지대는 대부분 단층운동에 의해 형성된 지구(graben) 혹은 반지구(half-graben) 형태로서 포항-영덕 분지, 후포분지, Mukho 분지 등이 현재의 대륙붕과 대륙사면에 발달한다. 상부와 중부 대륙사면 심부의 기반암 표면의 경사는 해수면 하  $1.4 \sim 2.2$  sec (왕복주시) 깊이를 경계로 하여 약  $5^\circ$ 에서 약  $20^\circ$  이상으로 급격히 증가한다. 한편, 탄성파단면에서 인지되는 지층의 외형과 내부 반사면의 배열형태를 고려하여 3개의 탄성파상(A, B, C)이 기반암층에서 구분되었는데, 대체로 연안에서 외해로 가면서 A→B→C의 순서로 심도에 따라 해안선에 평행한 대상분포를 보인다. 가장 얇은 심도에 분포하는 탄성파상 A는 연장성이 양호한 고진폭의 단일 반사면이 평탄한 기반암 표면을 따라 뚜렷하게 나타나는 특징을 보인다. 이 탄성파상은 울릉분지 형성 후기단계 혹은 단침단계 동안에 대륙주변부가 느린 침강과정을 거치게 되면서 연안해저에 놓인 기반암이 파도에 의해 평탄화(삭박과 퇴적)되어 나타나는 것으로 해석된다. 탄성파상 B는 음향기저의 형태나 내부 반사상 모두 다양하게 변화되는 특성을 보이는데, 대부분 고기의 기반암 잔류암체 및 소규모 열개분지의 기저를 충전한 화산암/화산쇄설층의 복합체로 해석된다. 이들 기반암들은 탄성파상 A를 보이는 기반암들과는 달리 상대적으로 깊은 부분에 위치하기 때문에 빠른 침강이 일어나던 울릉분지 형성초기에 해침을 겪게 되어 평탄화 작용의 영향을 받지 못하였던 것으로 보인다. 울릉분지에 접해있는 중부 및 하부 대륙사면의 심부에 분포하는 탄성파상 C는 중첩되어 나타나는 쌍곡선 반사파(hyperbolic reflector)가 대표적인 특징으로서, 화산기원의 기반암에서 나타나는 불규칙한 지형특성을 반영한다. 이 탄성파상은 본격적인 울릉분지의 열림이 일어나기 전, 대륙지각의 열개(rifting) 과정에서 발생한 틈새분출의 화산활동으로 인하여 울릉분지 주변에 새롭게 형성된 기반암으로 해석된다.

**주요어:** 동해 한국 대륙주변부, 탄성파상, 음향기저, 기반암, 울릉분지

**Seok-Hoon Yoon, Gi-Beom Kim, Young-Jin Joe, Chang-Seong Koh and Yi-Kyun Kwon, 2015, Origin and evolution of geologic basement in the Korean continental margin of East Sea, based on the analysis of seismic reflection profiles. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 1, p. 37-52**

**ABSTRACT:** Based on multi-channel seismic reflection profiles from the Korean continental margin of the East Sea, the basement topography is characterized by complex series of elongated ridges and troughs which generally trend N-S to NW-SE. The irregular topography of the basement delineates some intra-shelf and intra-slope sedimentary basins including Pohang-Youngduk, Hupo, and Mukho basins which occur as fault-bounded grabens or half-grabens. In a cross-view, the basement underneath the upper to mid slope areas gently (less than  $5^\circ$ ) dips downslope to a depth of  $1.4\text{--}2.2$  sec (two-way travel time) below sea level, then it plunges steeply more than  $20^\circ$  into the deep Ulleung Basin. On the other hand, 3 seismic facies (A, B and C) are classified on the basis of external forms and internal reflection configuration of the acoustic basement, and they show overall zonal distribution parallel to the coastline. The shallowest seismic facies A is recognized by fairly even and coherent single reflector with strong reflectivity (high-amplitude reflection), and internally transparent or chaotic to disorganized reflection configuration with subsurface reverberations. This facies is interpreted to reflect pre-rift basement rocks undergoing onshore wave planation (i.e., wave-induced erosion and sedimentation) during the slowed subsidence

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-64-754-3436, E-mail: shyoon@jejunu.ac.kr

of the continental margin in association with later stage of back-arc opening or back-arc closer in the East Sea region. Seismic facies B shows variable surface and subsurface reflections in configuration, amplitude, and continuity. In basement lows, it occasionally involves internally chaotic to crudely stratified reflections. This seismic facies most likely represents pre- to early syn-rift bedrocks of various origin, but they were unaffected by onshore wave planation due to extremely high subsidence rate of the continental margin during the incipient rifting stage of the Ulleung Basin. The seismic facies C generally underlying mid to lower continental slope is characterized by highly-overlapping hyperbolic surface reflectors and internal reflections changing from overlapping hyperbolic to chaotic to disorganized configuration with variable amplitude and poor continuity. It occurs with various external forms including gently-dipping pene-platforms, seamounts, cones, and mounds. Seismic facies C represents volcanogenic basements with very rugged or irregular surface topography, and it is interpreted to have been emplaced through fissure eruption during the rifting and subsequent back-arc opening stages of the Ulleung Basin.

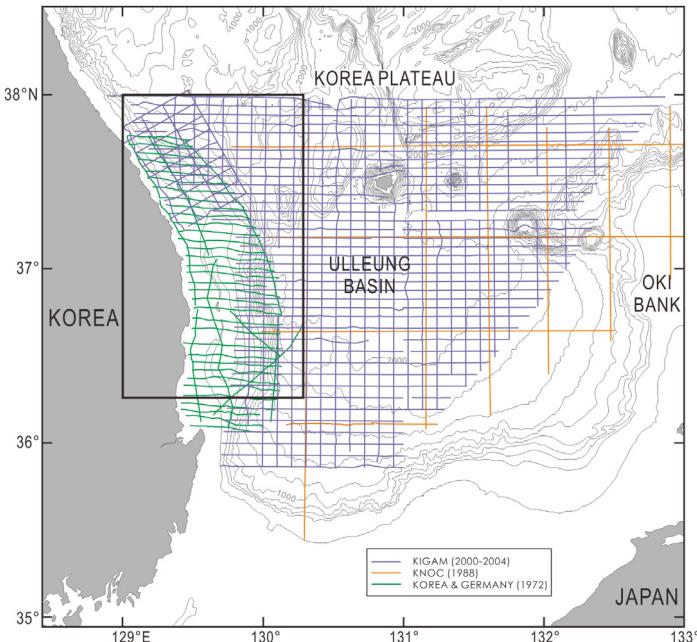
**Key words:** Korean continental margin of the East Sea, seismic facies, acoustic basement, basement rock, Ulleung Basin

(Seok-Hoon Yoon, Young-Jin Joe and Chang-Seong Koh, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 690-756, Republic of Korea; Gi-Beom Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747, Republic of Korea; Yi-Kyun Kwon, Department of Geo-Environment Sciences, Kongju National University, Gongju 314-701, Republic of Korea)

## 1. 서 언

우리나라 동해안에 인접하여 남북으로 발달하고 있는 동해 대륙주변부는 지형 및 지구조적으로 심해 분지(울릉분지)와 육상 대륙자고(한반도)의 경계부에 놓인 전이대로서(그림 1), 후기 올리고세(Oligocene)에 시작된 것으로 알려져 있는 동해 울릉분지의 형성과정을 이해하는데 있어서 매우 중요한 장소 중에

하나이다(Tamaki *et al.*, 1992; Yoon, 1994). 동해 대륙주변부에서는 지난 1972년 한국지질조사소(현 한국지질자원연구원의 전신)와 독일지질조사소(Geological Survey of the Federal Republic of Germany)가 해저자원탐사를 목적으로 포항-강릉 사이의 대륙주변부 해역에서 단일채널탄성파반사법 탐사를 통해 약 2,520 Line-km의 탄성파탐사 단면을 취득함으로써 최초로 기반암과 지층의 분포가 알려지게 되었다(Schlüter



**Fig. 1.** Location of study area and data grid of regional-scale seismic reflection surveys in the Ulleung Basin and its marginal areas. Box shows the location of the map shown in Fig. 2. Bathymetric contour interval is 200 m.

and Chun, 1974; Kim, 1982). 하지만 40년 전에 취득된 이 자료는 단면의 해상도가 낮고, 항행위치장비의 성능과 정확도 문제 등으로 인해 신뢰할만한 해저 지질정보를 제공하기에는 불충분한 점이 많았다. 이후 30여 년간 이 지역에서는 국지적이고 단속적인 지구물리탐사 외에는 체계적인 탐사활동이 수행되지 못하다가, 2000년에 이르러 동해 가스하이드레이트 탐사의 일환으로 5년간에 걸쳐 연차적으로 동해 대륙주변부를 포함하여 울릉분지 전 지역과 한국대지 남부 지역에 대한 다중채널탄성파탐사가 한국지질자원연구원의 주관으로 이루어지게 되었다(KIGAM, 2004). 이 자료에 대한 분석은 지금까지 주로 한국대지와 이에 인접한 동해 대륙주변부 북부해역에서 취득된 자료에 대해서 이루어졌다(Kwon, 2005; Kwon *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011, 2013). 이 연구에서는 아직 까지 분석이 이루어지지 않은 동해 대륙주변부 지역의 2000년, 2001년 및 2002년 한국지질자원연구원의 탄성파 탐사자료(그림 1)를 이용하여 기반암의 심도를 도면화(mapping)하고 탄성파상 분석을 실시함으로써 기반암의 지형과 암상, 그리고 울릉분지 진화과정과 관련된 형성기원을 제시하고 한다.

## 2. 지역 개요

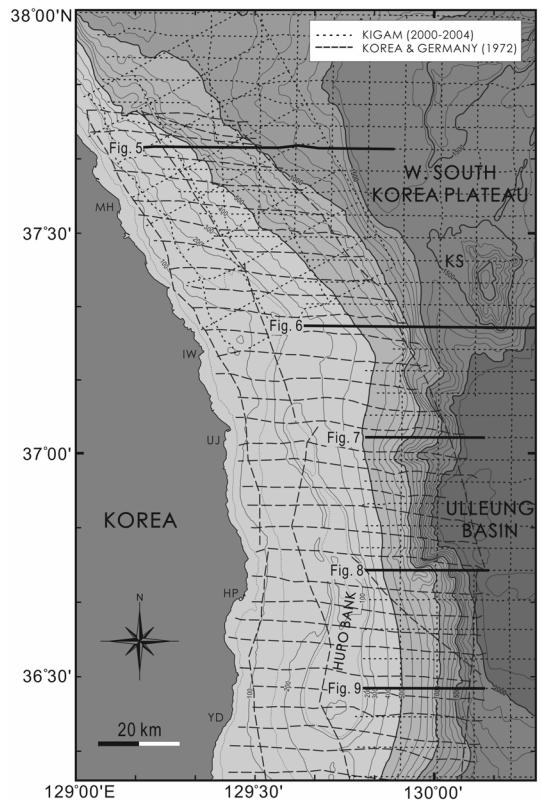
### 2.1 해저지형

주로 대륙붕으로 이루어진 서해나 남해 해저와는 달리 동해 해저는 해안에서부터 대륙붕, 대륙사면 그리고 울릉분지의 심해평원으로의 급격한 해저지형 변화를 보인다(그림 2). 동해 대륙붕은 전반적으로 평탄하지만 폭이 20 km 이하로 좁게 나타나며 수심 130~150 m에서 비교적 경사가 급한 대륙사면으로 이어진다. 북위 36°20'과 37°15' 사이의 상부 대륙사면에는 후포뱅크(Hupo Bank)가 남북으로 약 100 km에 걸쳐 해안선에 거의 평행한 방향으로 형성되어 있다. 상부 대륙사면의 경사는 2° 내외지만, 후포뱅크 동쪽의 중부 및 하부 대륙사면은 수심이 깊어지면서 경사가 점차 증가하여 최대 11°에 이른다. 대륙사면은 수심 1,500~2,100 m에서 비교적 평탄한 울릉분지 평원으로 이어진다. 북위 37°15' 임원항 이북의 대륙주변부는 북북서-남남동의 방향으로 발달하며, 동쪽으로는 복잡한 해령, 해곡, 해저산으로 이루어진 한국대지와 접하고 있다. 남쪽 대륙주

변부에 비해 대륙붕의 폭이 다소 넓어지며, 수심 150 m 내외에서 완경사의 대륙사면으로 이어진다. 대륙사면의 경사는 2° 이하이지만, 북쪽으로 가면서 점차 증가한다. 강릉 외해의 대륙사면에는 소규모의 해저수로와 협곡이 발달하는 것으로 알려져 있다(Chough *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 1991; Yoon and Chough, 1992). 이들 소규모의 수로와 협곡들은 대륙붕단 인근에서 시작되어 수심 800 m의 완만한 대륙사면까지 계속된다.

### 2.2 지질 및 구조

동해 대륙붕과 상부 대륙사면의 기저를 이루고 있는 기반암에 대해서는 시추를 통하여 직접 확인된 바는 없지만, 대부분 한반도 동부지역에 노출되어 있는 지층의 연장으로 추정되고 있다(Kim, 1982).



**Fig. 2.** Physiographic map of the eastern continental margin of Korea showing seismic tracklines analyzed in this study. Also shown are the locations of the profiles in Figs. 5-9. HP: Hupo, IW: Imwon, MH: Mukho, UJ: Uljin, YD: Youngduk, KS: Kiminu Seamount. Bathymetric contours are in meters.

대륙붕과 북위  $37^{\circ}15'$  이북의 북부 대륙사면 지역에는 주로 선캠브리아기 변성암과 쥐라기에서 백악기에 화강암 관입을 받은 고생대 퇴적암이 연장되어 있는 것으로 보이며, 그 이남의 대륙사면 기반암은 복잡한 표면 지형을 보이는 화산암으로 이루어져 있으며, 이 암석은 한반도 남동부 해안지역에 분포하는 중기 에오세와 초기 마이오세에 분출한 화산암대의 연장으로 해석되었다(Yoon, 1994). 동해 한국 대륙주변부의 기반암 위에는 두께 수십 m에서 최대 1,200 m까지의 신제삼기(Neogene) 및 제사기(Quaternary) 퇴적층이 분포한다(Schluter and Chun, 1974). 특히, 신제삼기 퇴적층은 대륙붕에서는 두께가 30 m 이하로 얕지만, 영덕분지(두께 1 km), 후포분지(1.2 km), 묵호분지(1.4 km) 등을 중심으로 두껍게 집적되어 있다(Yoon and Chough, 1992). 이를 종포항의 외해역에 위치한 영덕분지의 신제삼기 퇴적층은 육상 포항분지의 연일층군과 대비되는 것으로 추정되고 있다(Huntec Ltd., 1968).

동해 한국 대륙주변부에서 가장 뚜렷한 지질구조는 후포단층으로서 북위  $36^{\circ}10' \sim 37^{\circ}20'$  사이의 후포뱅크 서쪽 경계부를 따라 남북으로 약 140 km에 걸쳐 발달한다. Yoon (1994)에 따르면, 이 단층은 전기 마이오세에 동해가 형성되는 과정에서 남북방향의 주향이동 혹은 북서-남동방향의 신장성 지각운동에 의해 형성된 신장성 주향이동단층으로 해석된다. 그러나 동해의 형성이 종결되고 열본열도를 따라 동서 혹은 북서-남동 방향의 압축성 지판운동이 일어나면서 후포단층은 후기 마이오세에 압축성 단층으로 역전되어 재활성되었고, 후기 플라이오세에는 울진-영덕 외해의 단층대 일부가 재차 압축성 변형을 겪게 되었다. 한편, 동해 한국 대륙주변부에 분포하는 신장성 정단층들은 대부분 퇴적층은 변형시키지 않고 기반암만을 절단한 기저 단층(basement fault)으로서 전기 마이오세에 후포단층이 신장성 주향이동단층으로 활성될 때 이에 연계하여 발달된 것으로 추정된다(Yoon, 1994). 이들은 주로 대륙붕과 울진 북쪽의 대륙사면에 북동 내지 북서 방향으로 발달하는데, 이 지역에 분포하는 퇴적분지들의 경계단층으로 나타나며, 이들 중 일부는 나중에 압축성 변형으로 인하여 역전되기도 하였다. 압축성 단층 및 습곡 구조들은 주로 영덕분지와 후포 이북의 상부 및 중부 대륙사면 퇴적층 내에서 나타나는데, 대부분 후기

마이오세와 플라이오세에 동해 주변에 가해진 동서 혹은 북서-남동 방향의 압축성 응력에 의해 형성된 것으로 알려져 있다.

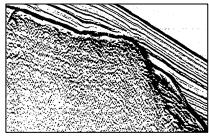
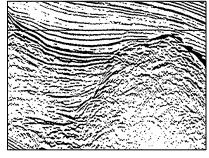
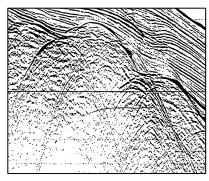
### 2.3 지구조 진화

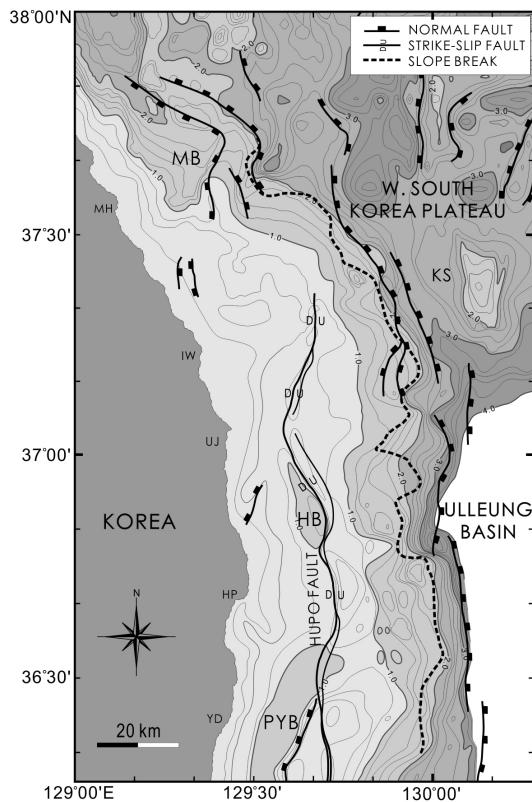
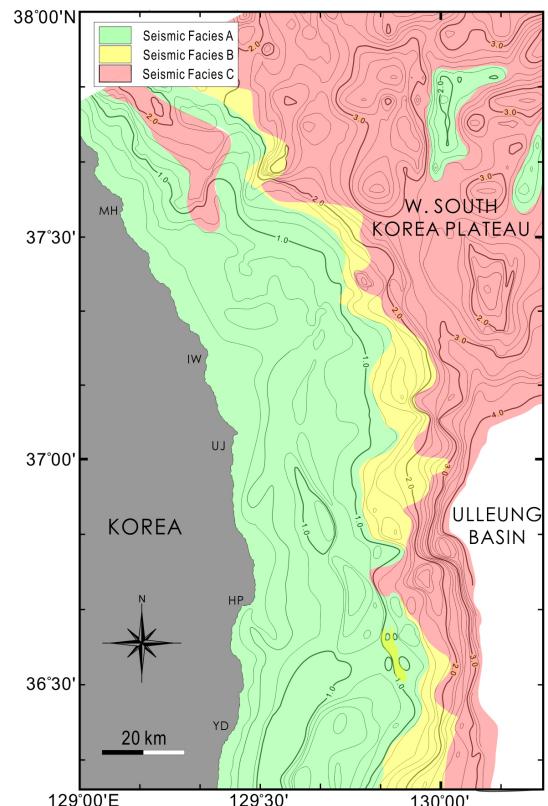
동해의 형성과 지구조적 진화과정에 대해서는 Ocean Drilling Program을 통한 심부시추와 활발한 지구물리탐사 및 충서분석의 결과로 비교적 자세히 알려져 있다(Tamaki *et al.*, 1992). 동해의 생성은 올리고세 중기(약 32 Ma)에 일본분지의 동쪽에서 대륙지각의 확장과 뒤이은 올리고세 말(28 Ma)의 해저 확장에 의해서 시작되었고, 약 16 Ma까지 확장이 진행되다가 16-14 Ma 경 필리핀해판과 일본열도가 충돌하면서 현재까지는 서서히 닫히는 과정인 것으로 알려져 있다(Yoon *et al.*, 2014). 그러나 동해 울릉분지의 지구조적 진화와 이에 관련된 지각변형 양상에 대해서는 두 가지의 서로 다른 가설이 제시되어 있다. 즉, Yoon and Chough (1995)는 울릉분지의 열림이 동아시아 대륙지괴의 일부였던 일본열도가 남쪽 내지 남동쪽으로 이동하면서 대륙지각의 확장(exended continental crust)을 동반한 당겨열림(pull-apart opening)의 형태로 이루어졌고, 이 과정에서 동해 한국 대륙주변부를 따라 남북으로 확장성의 우수향 구조변형이 일어났음을 주장한 바 있다. 반면에 Kim *et al.* (2007)은 울릉분지가 해양지각의 생성을 동반한 동-서 내지 북서-남동 방향으로의 해저확장(seafloor spreading)의 결과로서 형성되었으며, 이 과정에서 동해 한국 대륙주변부는 동서 방향의 확장성 구조운동을 겪었다고 주장하고 있다. 한편, 동해의 응력장은 약 15 Ma를 전후한 중기 마이오세에 인장력에서 압축력으로 역전되어 동해의 확장은 종결되었고 국지적인 압축성 변형이 시작되었다. 그 결과, 울릉분지의 남부와 서부 경계부를 따라 지각단축(crustal shortening)이 야기되어 융기, 드러스트(thrust) 단층운동 및 습곡 변형이 마이오세와 플라이오세 퇴적층에서 광범위하게 발생하였다. 특히, 후포단층은 이 기간 동안에 두 번의 압축성 재동을 겪게 되었고 이 과정에서 후포뱅크가 발달하게 된다.

### 3. 연구자료 및 분석 방법

한국지질자원연구원에서는 동해 가스하이드레이

**Table 1.** Description and interpretation of seismic facies types of acoustic basement.

Seismic facies	Characteristics	Locality	Interpretation	
A		Fairly even and coherent single reflector with strong reflectivity (high-amplitude reflection), and internally transparent or chaotic to disorganized reflection configuration with subsurface reverberations	Shelf to upper slope	Pre-rift bedrocks with wave planation during slow subsidence of continental margin
B		Variable surface and subsurface reflections in configuration, amplitude and continuity; particularly involving internally chaotic to crudely stratified in basement lows	Shelf to mid slope, and basement lows	Pre-to early syn-rift bedrocks of various origin without wave planation due to fast subsidence of continental margin
C		Highly-overlapping hyperbolic surface reflectors and internal reflections changing from overlapping hyperbolic to chaotic to disorganized configuration with variable amplitude and poor continuity; various external forms including gently-dipping pene-platforms, seamounts, cones, and mounds	Mid to lower slope of eastern continental margin of Korea, and basement lows and seamounts in South Korea Plateau	Volcanogenic basements emplaced during the rifting and subsequent back-arc opening stages

**Fig. 3.** Map showing topography and major geologic structures of the acoustic basement. Contour interval is 0.2 sec (two-way travel time below sea level).**Fig. 4.** Map showing the seismic facies types of acoustic basement and their spatial distribution. Contours denote the depth of acoustic basement in sec (two-way travel time).

트 탐사의 일환으로 2000년부터 2004년까지 5년간에 걸쳐 연차적으로 동해 울릉분지와 그 주변 지역에 대해 다중채널 탄성파탐사를 실시하였다(KIGAM, 2004; 그림 1). 이 때 취득된 탐사자료 중에서 측선이 동해 한국 대륙주변부를 지나는 2000년, 2001년 및 2003년 자료의 일부(그림 2)가 이 연구에서 분석되었다. 하지만 이 탐사에서는 후포뱅크를 포함한 그 서쪽 지역은 대상지역에서 제외되었기 때문에 이를 보완하기 위해서 후포뱅크 서쪽 지역은 1972년 취득된 한국지질조사소와 독일지질조사소가 공동으로 취득한 단일채널 탄성파탐사 자료(Schluter and Chun, 1974; 그림 2)를 재해석하였다. 한국지질자원연구원의 신자료는 동연구원의 지구물리조사선인 탐해2호에 장착된 80채널 스트리머(streamer)와 2개의 에어건(airgun) 음원(각각 924 및 1,254 입방인치 용량)을 이용하여 취득되었다. 모든 탄성파단면에서는 Mitchum *et al.* (1977)의 이론에 기초한 탄성파 반사특성(seismic reflection character)에 따라 기반암과 퇴적층의 경계부를 인지하여 도면화하였으며(그림 3), 기반암의 경우에는 탄성파 반사특성과 기반암 표면의 형태(지형)에 따라 3개의 유형을 구분하였다(표 1; 그림 4).

## 4. 연구결과

### 4.1 기반암 지형

일반적으로 탄성파단면에서 인지되는 비교적 측면연장성이 양호한 반사면들 중에서 가장 깊은 곳에 위치한 반사면을 음향기저(acoustic basement)라고 한다(Neuendorf *et al.*, 2005). 지질학적 기반암(geological basement rock)의 상부면이 음향기저와 항상 일치하는 것은 아니지만, 대륙주변부에서와 같이 퇴적층이 두껍지 않은 곳에서는 일반적으로 화성암 혹은 변성암과 같은 결정질암이나 단단하게 고화된 퇴적암으로 구성된 기반암의 표면은 음향기저와 일치한다. 이들 기반암체는 상위에 놓인 퇴적층에 비해 음향임피던스 크기 때문에 그 경계면에 해당하는 음향기반에서 음파신호는 대부분 반사되고 그 하부로 전파되는 에너지는 매우 약하기 때문에 음향기반 하부에서 반사되어 나오는 신호는 거의 없게 된다. 이 연구에서는 탄성파단면에서 음향기저를 도면화(mapping)함으로써 퇴적층 하부에 놓인 기

반암 지형을 파악할 수 있었다.

동해 한국 대륙주변부에서 기반암의 높낮이 변화에 따라 나타나는 기반암의 표면지형은 신장된 다수의 능과 곽(ridge and trough)이 복잡하게 배열되어 있는 특징을 보인다(그림 3). 이와 같은 신장지형의 발달은 북위 37°30'(목호) 이남에서는 대체로 북북서에서 북북동 사이의 방향성을 보이며, 그 이북에서는 북서-남동 방향으로 배열되어 나타난다. 동해 한국 대륙주변부에서 기반암 저지대는 대부분 단층운동에 의해 형성된 지구(graben) 혹은 반지구(half-graben) 형태의 퇴적분지를 형성하고 있는데, 기존에 보고된 바(Kim, 1982; Yoon, 1994)와 같이 포항-영덕분지, 후포분지, 목호분지 등이 현재의 대륙붕과 대륙사면에 걸쳐 분포하고 있다(그림 3). 포항-영덕분지는 포항-후포 사이의 대륙붕 및 상부 대륙사면에 걸쳐 북북동-남남서 방향으로 발달하는 매몰된 퇴적분지로서, 육상의 포항분지는 이 분지의 남부에 해당한다(Yoon and Chough, 1993). 포항-영덕분지의 최심부 기저면은 아직 탄성파단면에서 확인된 적이 없지만 최대 700~1,000 m 두께의 마이오세층이 집적되어 있는 것으로 추정하고 있다(Huntec Ltd., 1968; Yoon and Chough, 1995). 한편, 목호분지와 후포분지의 최심부 기저는 해수면 하 각각 2.0 sec 및 1.2 sec (왕복주시; 이하 동일 적용) 이상에 위치하며, 두 곳 모두 최대두께 1 km 이상의 퇴적층이 집적되어 있다(그림 5).

탄성파단면에서 상부와 중부 대륙사면에 발달하는 불규칙한 기반암의 표면은 대체로 해수면하 2.0 sec 내외의 깊이까지는 약 5° 이하의 완만한 경사로 울릉분지 쪽으로 기울어져 나타나며, 그 이상 깊이에서는 경사가 최대 20° 이상으로 급격히 증가한다. 이와 같은 기반암 표면경사의 급격한 증가로 인해 북위 37°35'~36°35' 사이의 대륙주변부에서는 해저면의 대륙붕단과 같은 지형경사 변곡점(slope break)이 뚜렷하게 나타난다(그림 6, 7, 8). 기반암 경사 변곡점의 깊이는 해수면 하 1.4~2.2 sec 범위를 보이는데, 지역적인 경향이 없이 불규칙한 깊이 변화가 나타난다(그림 3). 경사 변곡점 하부의 급경사 기반암 사면은 이후 큰 경사변화 없이 울릉분지의 음향기저로 연결되며, 탄성파 단면에서 인지되는 표면지형은 국지적으로 기복의 변화가 심한 곳도 있지만 전반적으로는 평坦하게 나타나는 곳이 우세하

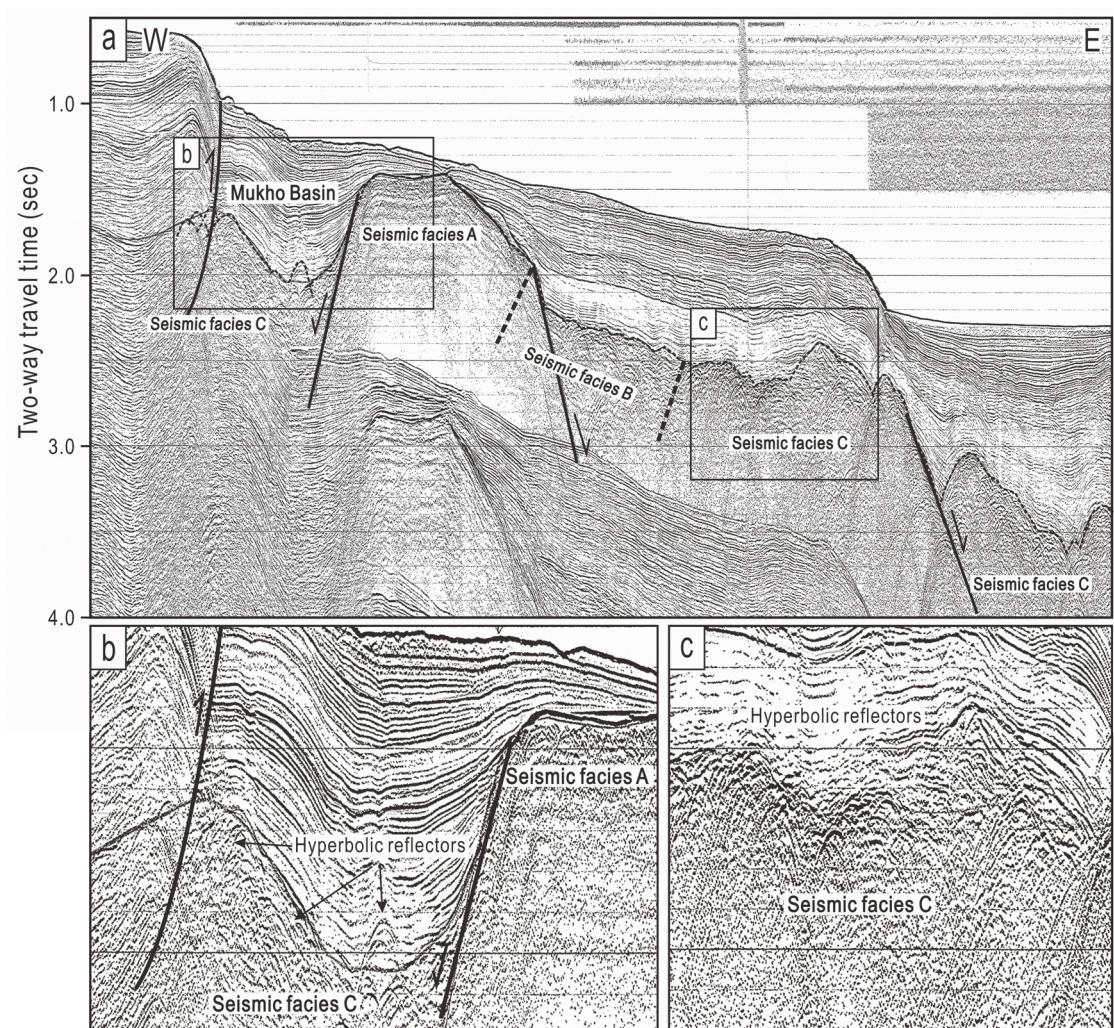
다. Yoon and Chough (1995)는 이러한 급경사의 기반암 사면을 '기반암 단애(basement escarpment)'라 하였고(그림 7, 8, 9), 동해 한국 대륙주변부와 울릉분지의 지구조적 경계부로서 전기 마이오세 동해의 당겨열림(pull-apart opening) 과정에서 주향이 동단충대의 역할을 한 주요구조대(울릉단층)로 해석하였다.

동해 한국 대륙주변부의 북부와 접하여 있는 한국대지의 기반암 지형은 동해 한국 대륙주변부에 비해 더 복잡한 양상으로 나타난다. 기반암의 돌출지형들은 대부분 남북 내지 북북동-남남서의 방향성을 보이며 경계부에는 단층이 발달된 경우가 많다(그림

3). Kwon *et al.* (2009)에 따르면, 이러한 기반암 돌출대 혹은 고지대의 대부분은 한국대지가 열개되면서 분리된 대륙지각의 일부이거나 화산활동의 결과로 형성된 화산체들이다. 특히 화산체들은 원형 내지 타원형의 평면과 원추형(cone) 혹은 정상부가 평탄한 평정해산형의 단면을 갖는 해저산이 다수 발달하는데, 김인우 해산(그림 3)의 경우에는 주변 기저면에서 높이가 1,000 m 이상이며, 그중 하부 약 300 m 정도는 퇴적층에 매몰되어 있다(그림 6a).

#### 4.2 음향기반암의 탄성파적 특성

탄성파단면을 이용하여 지층의 암상이나 퇴적작



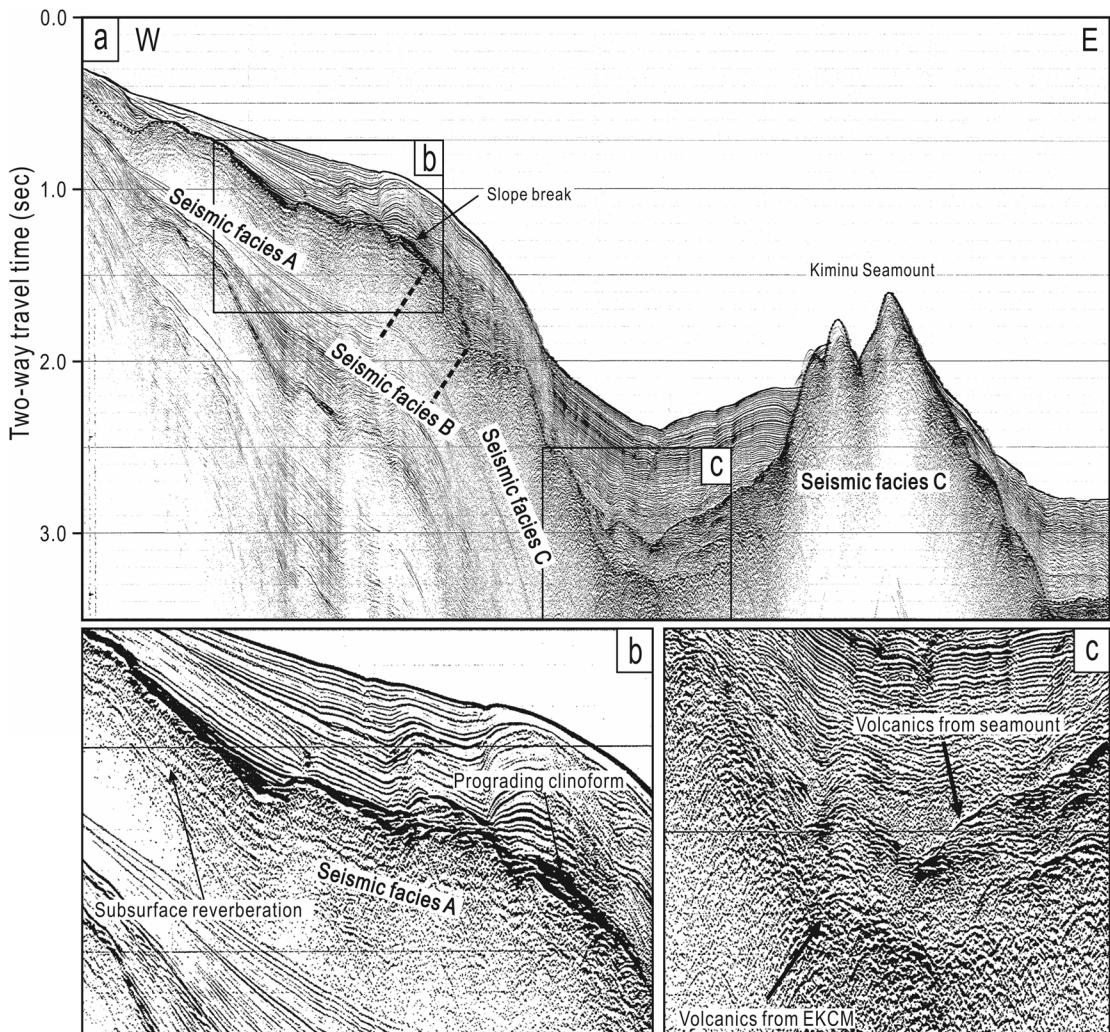
**Fig. 5.** Selected seismic reflection profile showing overall topography (a), and details of acoustic basement (b and c) in the northern part of the eastern continental margin of Korea. For location, see Fig. 2.

용을 해석하기 위해서는 일반적으로 탄성파 반사 요소(seismic reflection parameter)를 종합하여 탄성파상을 분류하고 지질학적 관점에서 해석한다(Vail and Mitchum, 1977). 이때 탄성파 반사 요소로는 반사파의 측면 연속성, 진폭, 주파수, 및 구간속도 등을 포함하는데, 실제적으로는 이들 요소가 탄성파 단면에서 가시화되어 나타나는 지층의 외형(external form)과 내부 반사면의 배열형태(reflection configuration)에 의해 탄성파상이 결정된다(Mitchum *et al.*, 1977). 이 연구에서는 이러한 기준에 따라 3가지 (A, B, C)의 탄성파상을 구분하였다(표 1). 이들 탄

성파상을 지도에 도시해보면, 연안에서 외해로 가면서 A→B→C의 순서로 대체로 해안선에 평행한 대상 분포를 보인다(그림 4).

#### 4.2.1 탄성파상 A

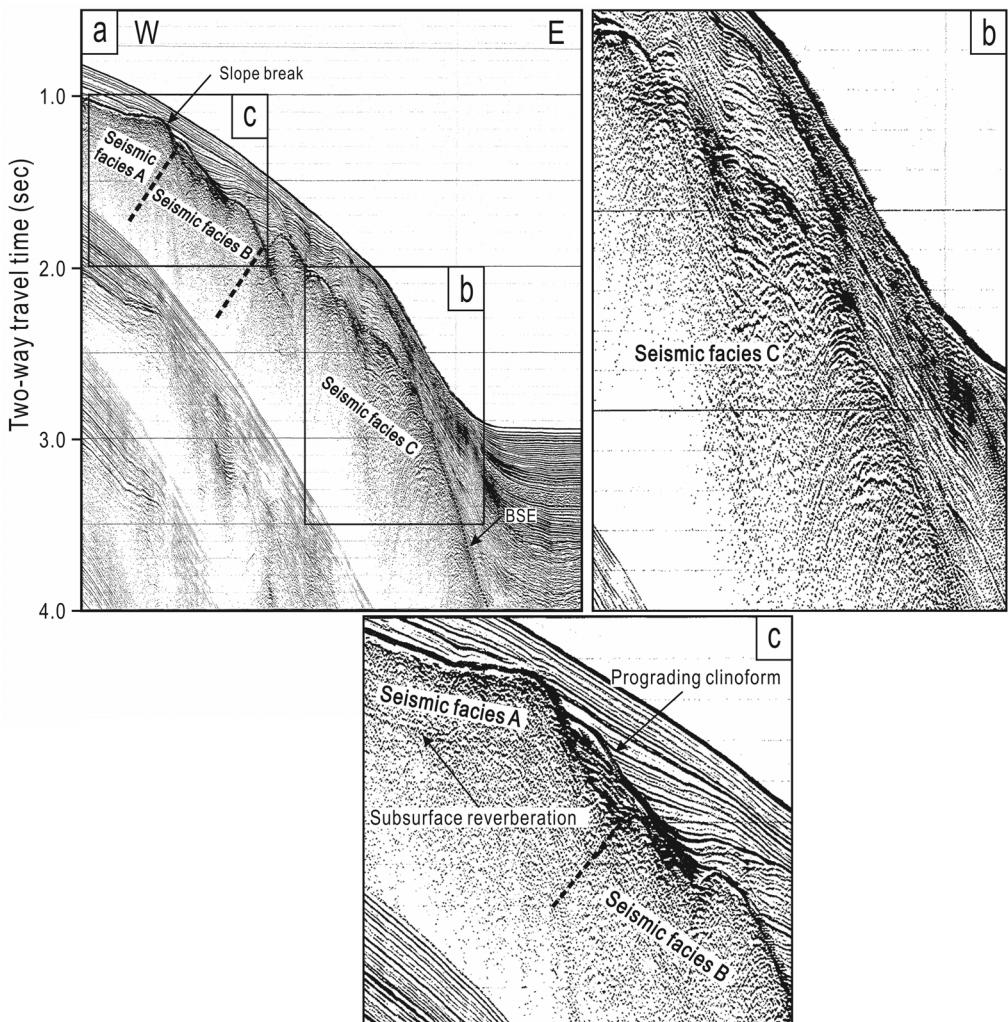
탄성파상 A는 얕은 심도의 기반암에서 우세하게 나타나는데, 가장 큰 특징은 상당히 높은 진폭을 갖는 연장성이 양호한 단일 반사면이 기반암 표면을 따라 비교적 뚜렷하게 나타난다는 것이다(그림 5b, 6b, 7c, 9b). 탄성파상 A가 나타나는 기반암의 표면 지형은 상당히 평坦하거나 매끈하며 외해로 완만하



**Fig. 6.** Selected seismic reflection profile showing overall topography (a), and details of acoustic basement (b and c) in the boundary between the eastern continental margin of Korea and the western South Korea Plateau. For location, see Fig. 2. EKCM: eastern Korean continental margin.

게 경사진 플랫폼(platform) 형태가 일반적이다. 하지만 지역에 따라 기반암의 표면은 약간 기복이 있는(rugged) 불규칙한 지형을 보이기도 하며, 때로는 돔(dome)이나 마운드(mound) 형태의 기반암 돌출부의 상부로 연장되기도 한다. 비교적 명확한 음향기저 반사면과는 대조적으로, 기반암체의 내부에서는 탄성파적으로 투명(transparent)하거나 비조직화(disorganized)되어 있는 반사특성을 보이며, 표면 지형의 굴곡과 평행하게 반향파(reverberation)가 나타나기도 한다. 때로는 하부에 작은 기복의 쌍곡선 반사파가 나타나고 뚜렷한 음향기저 반사면 사이에는 투명한 음향 특성을 보이는 구간(퇴적층으로

추정)이 나타나기도 한다(그림 7c). 동해 한국 대륙주변부에서 탄성파상 A의 음향기저는 대부분 깊이 1.5 sec 이하의 기반암 고지대 혹은 돌출대(대륙붕 및 상부 대륙사면의 심부)에서 나타나며, 외해 쪽으로 가면서 진폭과 연속성이 감소하는 불규칙한 탄성파상 B의 음향기반으로 갑자기 전이된다. 더욱이 흥미로운 것은 고진폭의 탄성파상 A의 외해쪽 경계부에는 대부분의 지역에서 전진형(prograding) 집적양상을 보이는 쇄기형 퇴적체가 나타난다는 점이다(그림 6b, 7c, 9b). 이들 퇴적체의 형태는 정상부(topset)-전면부(foreset)-기저부(bottomset)으로 이루어진 전형적인 단사형(clinoform) 퇴적체에서부터 내부에 발



**Fig. 7.** Selected seismic reflection profile showing overall topography (a), and details of acoustic basement (b and c) in the eastern continental margin of Korea. For location, see Fig. 2. BSE: basement escarpment.

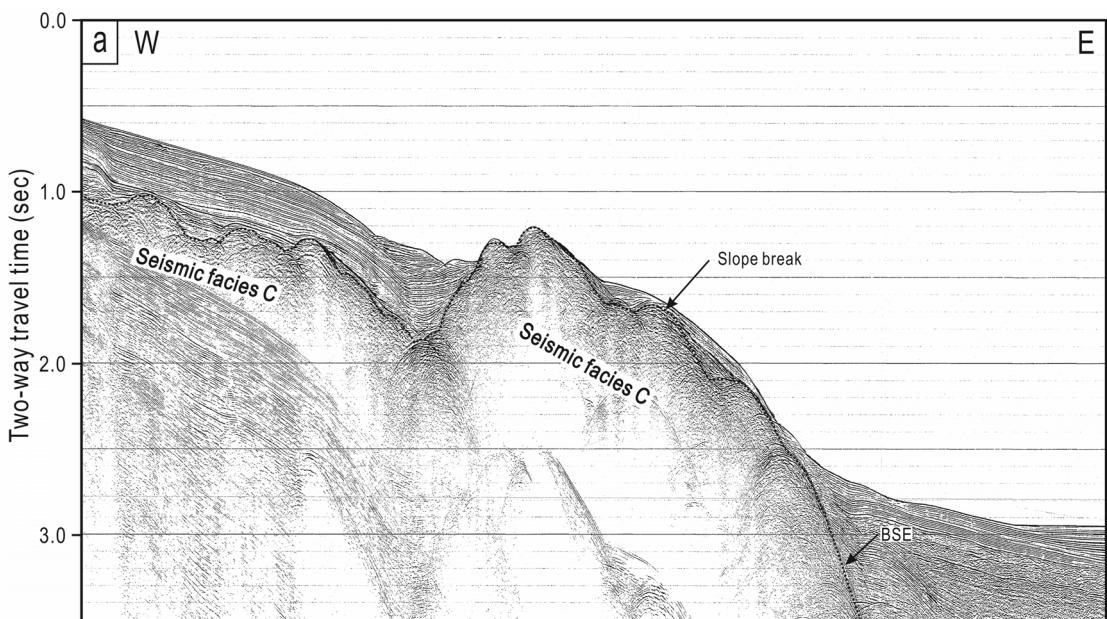
산(divergent)형 지층구조를 보이는 램프형(ramp) 퇴적체까지 다양하게 나타난다. 탄성파상 A가 분포하는 지역의 외해쪽 경계는 대부분 현해수면 하 1.0 ~ 1.5 sec (평균 1,300 m) 깊이, 그리고 현재의 동해안선에서 약 40~50 km 떨어진 곳에 위치하고 있다(그림 4).

탄성파적으로 투명하거나 비조직적 특성을 보이는 음향기반암체는 일반적으로 화성암이나 변성암과 같은 결정질 암체와 관련된 것으로 해석된다(Fountain, 1986; Coffin *et al.*, 1990). Fountain (1986)은 음향기반암의 투명한 반사상은 결정질 기반암 사이에 음향 임피던스의 차이가 크지 않기 때문이라 주장하였다. 반면에 Coffin *et al.* (1990)은 결정질 기반암과 그 상부에 놓인 퇴적층 사이에 음향 임피던스 차이가 매우 크기 때문에 탄성파가 기반암 표면에서 대부분 반사되어 버리고 내부로 침투하지 못하여 기반암 내부의 음향특성이 나타나지 않게(투명하게) 된다고 하였다. 한편, Kim *et al.* (2013)은 한국대지에서 이와 같은 탄성파상의 음향기반을 보고하였는데, 분포깊이가 일정하고 얇은 표층 퇴적층의 존재를 근거로 해안이나 연안의 파도에 의한 삭박과 퇴적에 의해 평탄화된 기반암으로 해석하였다. 따라서 탄성

파상 A의 분포는 과거 해안선의 위치와 관계가 있으며, Kim *et al.* (2013)은 이를 근거로 해서 한국대지 기반암의 중기 마이오세 이후의 침강속도와 해침과정을 재구성하여 제시한 바 있다.

#### 4.2.2 탄성파상 B

탄성파상 B는 다른 두 탄성파상과는 달리 다양한 변화 특성을 보이는 반사상을 보인다. 기반암 표면에 해당하는 음향기저의 형태는 평坦한 것에서부터 쌍곡선, 낙타등(hummocky) 모양과 같이 불규칙하게 나타나는 것까지 다양하게 변화하지만, 표면 기복의 높이는 대체로 탄성파상 C보다는 일반적으로 작게 나타난다(그림 5, 6, 7, 9). 음향기저 하부의 내부반사상 역시 소규모의 중첩하는 쌍곡선 반사파, 혼돈 혹은 비조직성, 준평형 등으로 다양하게 나타난다(그림 7b). 특히 단층에 의해 형성된 소규모 지구형(graben type) 해곡이나 돌출기반암 사이의 저지대에서는 중첩되는 고진폭의 쌍곡선 반사파와 같은 매우 굴곡이 심한 반사면과 혼돈(chaotic) 내지 연속성이 다소 불량한 평坦 반사면으로 성층화(stratification) 된 내부 반사특성을 보인다(그림 9b). 이 탄성파상은 탄성파상 A와 C 중간 지역에 분포하는데, 탄성파상

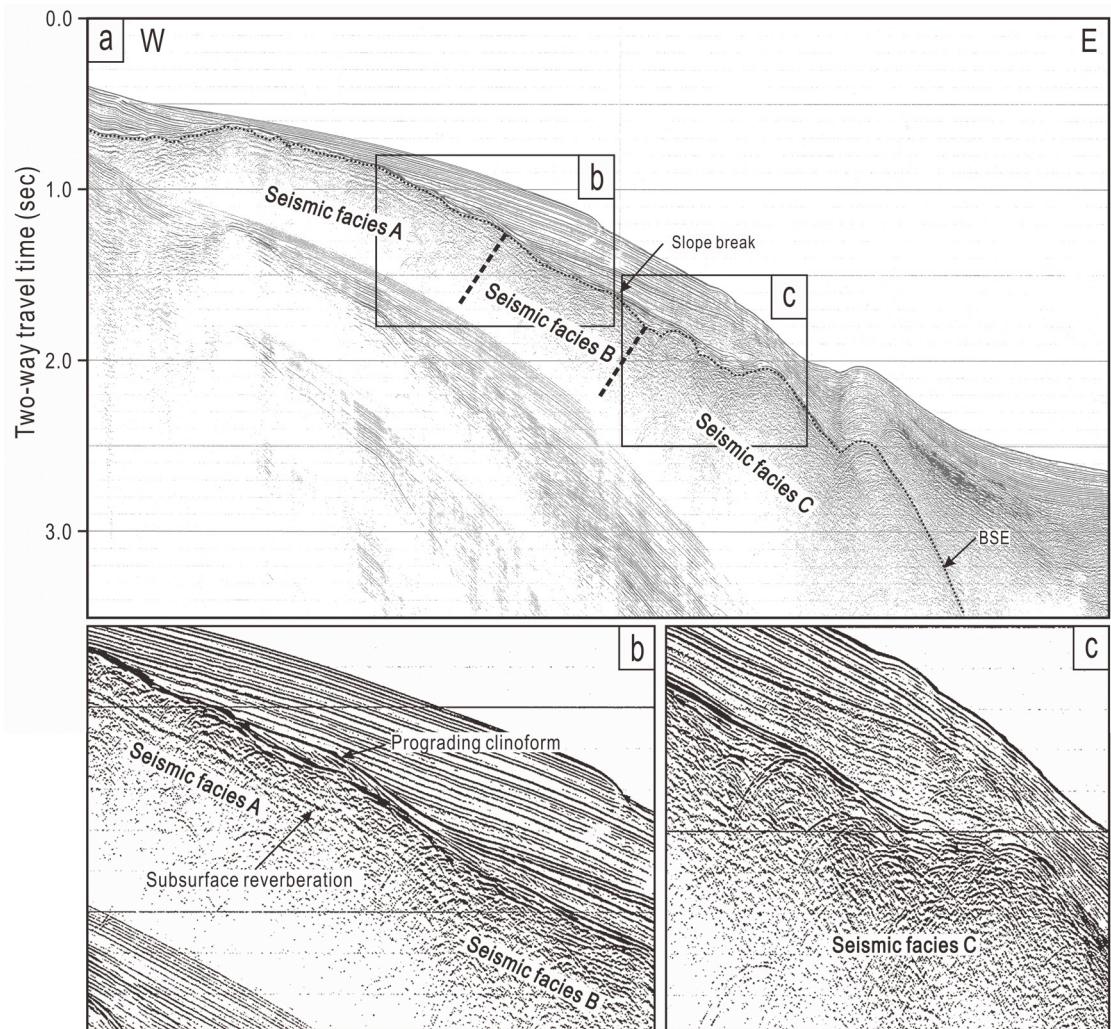


**Fig. 8.** Selected seismic reflection profile showing overall topography of acoustic basement in the eastern continental margin of Korea. For location, see Fig. 2. BSE: basement escarpment.

A와의 경계부는 비교적 뚜렷하게 인지된다. 즉, 고 진폭의 평탄한 탄성파상 A의 음향기저가 갑자기 사라지고 저진폭의 불규칙한 음향기저(탄성파상 B)로 대체되며(그림 9b), 이러한 탄성파상의 경계는 대부분 명확하게 인지된다. 한편, 탄성파상 B에서 C로의 전이는 탄성파상 A에서 B로의 전이보다는 불명확 하지만 대체로 좁은 구간에서 나타난다.

다양한 특성을 보이는 탄성파상 B는 기반암의 다양성을 반영하는 것으로 해석된다. 앞서 탄성파상 A에서 설명한 바와 같이, 혼돈이나 비조직성의 내부 반사파의 특성은 변성암이나 화성암 같은 결정질 기

반암을 반영하며, 쌍곡선 반사파와 함께 희미한 성층화 내지 비조직성 특성이 혼재되어 나타나는 저지대의 기반암은 소규모 열개분지의 기저를 충전한 지층으로서 화산분출에 의한 화산암맥, 용암류 및 화쇄류에 의해 집적된 화산쇄설층의 복합체로 해석된다(Kwon et al., 2009; Kim et al., 2011). 아울러 이 탄성파상에서 주목할 점은 저지대의 기반암을 제외하고는 대부분 표면의 지형 기복이 탄성파상 A와 같이 아주 평탄하지도 않고, 탄성파상 B와 같이 거칠고 불규칙한 기복을 나타내지도 않는다는 것이다. 이에 대한 정확한 해석을 내릴 근거는 미약하지만,



**Fig. 9.** Selected seismic reflection profile showing overall topography (a), and details of acoustic basement (b and c) in the eastern continental margin of Korea. For location, see Fig. 2. BSE: basement escarpment.

탄성파상 B는 대부분 고기의 기반암 잔류암체로 해석된다. 현재 동해 한국 대륙주변부의 기반암층은 대부분 한반도 동해안 지역에 노출되어 있는 지층의 연장으로 추정되는데, 선캠브리아기 변성암과 쥐라기에서 백악기에 화강암 관입을 받은 고생대 퇴적암, 그리고 신생대 초기의 화산암 등 다양한 암상들을 포함한다(Kim, 1982). 이들 지층들은 오랜 기간 육상에 노출되어 있으면서 대규모의 지형 기복은 제거되었지만 국지적인 하천침식이나 기반암 특성 차이로 인한 차별침식 등으로 인해 다소의 지형기복이 남아 있었을 것으로 추정된다. 이러한 기반암 표면 특성은 동해 한국 대륙주변부가 해침 되는 과정에서 일어났을 것으로 보이는 탄성파상 A의 기반암이 받았던 것과 같은 해파에 의한 평탄화 작용이 탄성파상 C에는 영향을 주지 못했음을 반영하는 것으로 해석된다.

#### 4.2.3 탄성파상 C

탄성파상 C는 심도가 깊은 대륙주변부의 동부에서 주로 나타나는데, 이 탄성파상의 음향기저는 중첩되어 나타나는 쌍곡선 반사파(hyperbolic reflector)가 대표적인 특징이다(그림 5~9). 쌍곡선 반사파의 높이는 지역에 따라 다르게 나타나며 국지적으로는 낙타등(hummock) 모양의 낮은 기복을 갖는 불규칙 반사면으로 전이되기도 한다. 음향기저 하부에서는 혼돈(chaotic) 혹은 비조직성(disorganized)의 내부 반사상이 나타나며, 경우에 따라서는 음향기반 하부로 0.1~0.3 sec 깊이까지 쌍곡선 반사파가 불규칙하게 중첩되어 나타나기도 한다. 반사파의 진폭은 지역에 따라 차이가 있지만 보통 내지 높게 나타난다. 이러한 탄성파상은 동해 한국 대륙주변부 말단부의 급경사 사면과 기반암(그림 7, 8, 9)이나 한국대지의 해저산 사면과 말단부, 그리고 주변 기저보다 돌출된 피크(peak), 돔(dome) 등의 소규모의 돌출 기반암체에서 광범위하게 나타난다(그림 5, 6, 8). 분포 깊이는 일부 지역을 제외하고는 해수면 하 1.5 sec 이상의 심부 기반암에서 나타난다. 한국대지 김인우 해저산에서부터 연장되어 나온 탄성파상 C의 음향기저는 동해 한국 대륙주변부에서 연장된 동일한 유형의 음향기저보다 상부에서 퇴적층 사이에 협재되어 나타나기도 한다(그림 6c).

고진폭의 쌍곡선 반사파는 일반적으로 매우 기복이 심한 반사표면에서 일어나는 탄성파의 회절(diffraction)

에 기인한다(Lillie, 1999; Veeken, 2007). 특히, 한국 대지의 화산기원의 해저화산체, 울릉도 및 독도 사면에서 기록되는 탄성파 특성과 매우 유사하기 때문에(Kwon et al., 2009; Kim et al., 2011), 주로 화산기반암에서 나타나는 불규칙한 지형특성을 반영하는 것으로 해석된다. 한국대지에 분포하는 화산체들은 두 종류의 반사상을 보인다(그림 6a). 즉, 화산체의 중앙부와 사면말단부이다. 중앙부는 정상부가 뾰족하고 15° 이상의 급경사 사면을 갖는다. 정상부 인근의 사면에서는 약간 중첩하는 짧은 쌍곡선 반사파가 우세하게 나타나며, 내부는 혼돈이나 무작위의 탄성파상을 보인다. 한편, 화산체의 사면과 말단부에서는 불규칙하게 중첩하는 쌍곡선 표면반사면과 거의 투명 내지 혼돈형의 내부 반사상을 보인다. 이 부분의 사면은 위로 오목하고 비교적 매끈한 표면을 보인다. 화산체의 암상에 관한 연구(Schmincke and Sumita, 1998)에 따르면, 화산체의 주 몸체는 주로 관입 혹은 분출 화산암으로 구성되며, 반면에 화산체 말단의 사면부는 여러 번에 걸쳐 쌓인 분출화산암(용암류)과 화산쇄설성 퇴적층으로 구성된다. 한편, 동해 한국 대륙주변부에서는 지형에 크게 관계없이 주로 후자와 같이 불규칙하게 중첩하는 쌍곡선 반사면이 우세하게 발달한다. 이 지역의 화산체는 주로 용암류나 응회암 같은 화산암으로 구성된 것으로 보인다.

## 5. 토의

### 5.1 해파평탄면

탄성파상 A에서 음향기저는 측면연속성이 양호하고 반사강도가 높은 비교적 평탄하고 매끈한 하나의 반사면으로 나타난다(표 1). 기반암 표면에서 매끈한 면은 일반적으로 침식 혹은 삭박을 받아 형성된 부정합면으로 해석된다. 이 경우 음향기저의 강한 반사강도(고진폭)은 고기의 기반암과 그 상부에 놓은 후기의 퇴적층 혹은 퇴적암 사이에 음향임피던스 차이가 큰 것에 기인하는 것으로 설명할 수 있다. 특히, 한국대지와 동해 한국 대륙주변부 북부 해역의 탄성파탐사 자료를 분석한 Kim et al. (2013)은 기반암 표면의 불규칙한 기복을 얇게 피복한 퇴적층이 고진폭 음향기저 사이에 때로 협재하여 나타나는 것(그림 7c)에 주목하여 이를 해파평탄면(wave-planation surface)로 해석하였다. 현생 대륙주변부에서 침식

성의 평탄면을 생성하는 주요 원인은 파도에 의한 평탄화 작용으로 알려져 있으며, 이와 같은 평탄화 작용은 파도에 의한 삭박이 가능할 만큼 수심이 충분히 얕은 조간대 내에서 주로 일어난다(Trenhaile and Layzell, 1981; Trenhaile, 2002). 평탄화 작용은 돌출된 기반암에 작용하는 파도에 의한 침식작용과 더불어 침식의 결과로 생성된 퇴적물들이 주변 저지대를 채우거나 외해로 운반되어 해저를 평탄하게 회복하는 복합기작으로 설명될 수 있다(그림 10).

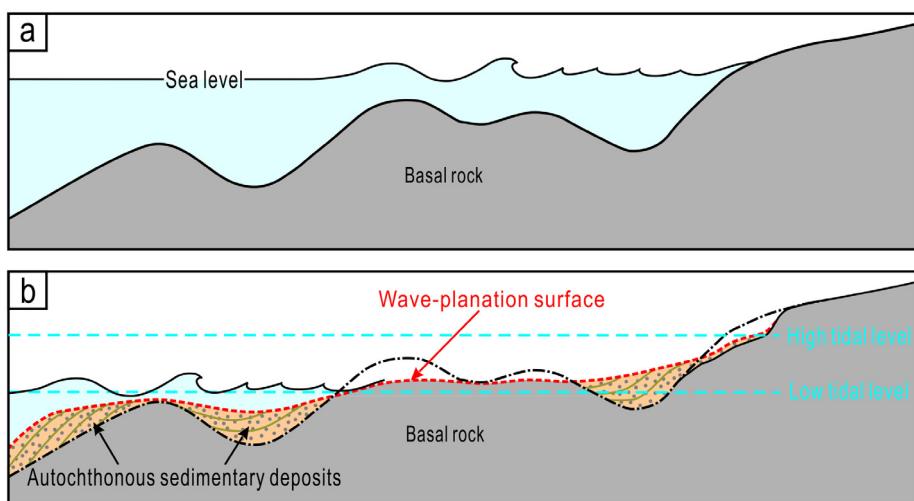
해파평탄면의 형성과정에서 파식대에서의 침식률은 장기적으로 해수면 변동의 영향을 받게 되는데, 해수면의 상승률이 클수록 해저면이 파도의 영향을 받는 수심구간에 머무는 시간이 감소하기 때문에 침식률이 감소하게 된다(Trenhaile, 2002). 즉, 해파평탄면의 최적의 형성조건은 완만한 해수면 상승속도와 관련된다고 할 수 있다. 따라서 동해 한국 대륙주변부에서 탄성파상 A의 외해쪽 경계는 동해 울릉분지가 형성되는 과정에서 초기에 급격한 침강단계가 끝나고 완만한 침강단계로 접어들기 시작할 때의 고해안선의 위치를 지시하는 증거라고 볼 수 있다. 특히, 해파평탄면의 시작 지점 대부분에서 전진퇴적체가 나타나는데, 이는 상대적 해수면의 상승속도가 급격히 감소하였음을 지시하는 또 다른 증거로 해석된다. 상대적 해수면이 빠르게 상승할 때는 퇴적물 공급량이 퇴적물 수용공간(accommodation space)

증가속도에 비해 작게 되므로 대체로 후퇴하는 퇴적체가 판상으로 형성되는데 반해, 상대적 해수면이 감소가 일어나게 되면 퇴적물 수용공간이 감소하고 이로 인해 퇴적중심은 외해로 나아가게 되면서 전진퇴적체가 형성되기 때문이다(Van Wagoner *et al.*, 1988; Emery and Myers, 1996). 동해 한국 대륙주변부에서 고진폭 음향기저의 외해쪽 경계, 즉 대륙주변부의 침강속도가 감소한 시기의 해안선은 현해수면 하 1.0~1.5 sec (평균 1,300 m) 깊이, 그리고 현재의 동해 해안선에서 약 40~50 km 떨어진 곳에 위치하고 있었다.

울릉분지 남서부의 돌고래-I 시추공 자료에 근거한 지질사 분석 결과(Chough and Barg, 1987; Ingle, 1992)에 따르면, 이 지역에서는 동해의 확장이 본격적으로 시작된 23 Ma 이후 900 m/my 이상의 속도로 빠르게 침강하다가 19 Ma에 200 m/my 이하로 급격히 감소되었다. 이후 15 Ma에 다시 빠른 침강이 있었고 약 12 Ma에는 동해의 닫힘의 결과로 융기가 시작되었음을 제시하였다. 따라서 동해 한국 대륙주변부에서 해파평탄면이 형성되기 시작한 시기는 침강속도의 감소가 일어나는 19 Ma 혹은 동해 열림이 종결되어 압축변형이 시작되는 12 Ma 경으로 추정된다.

## 5.2 화산기원 기반암

Kim *et al.* (2011)에 따르면 울릉분지 주변 지역에



**Fig. 10.** Conceptual model explaining combined effects of wave erosion and autochthonous sedimentary processes during the sea-level stillstand. (a) Intact bedrock with irregular surface geometry before wave planation. (b) Surface irregularity decreased by wave planations. After Kim *et al.* (2013).

서는 후기 올리고세(Oligocene)부터 분지가 형성되는 과정에서 3단계에 걸쳐 화산활동이 광역적으로 일어났는데, 한국대지에 인접한 동해 한국 대륙주변부의 화산기원 기반암은 대부분 후기 올리고세-전기 마이오세에 일어난 1단계(23~18 Ma)의 분출로 제시되었다. 아울러 층서적으로 상위에 놓이는 화산기반암을 형성한 김인우 해산(그림 6)은 중기 마이오세말(약 12 Ma)에 일어난 2단계 화산활동의 결과로 해석하였다. 이 시기에 형성된 화산체들은 울릉분지 북부와 한국대지 남부 및 야마토분지 북부에 걸쳐 화산대(volcanic belt)를 형성하는 것으로 제안되었다. 화산기원의 기반암을 지시하는 탄성파상 C가 울릉분지에 인접한 동해 한국 대륙주변부의 동쪽 지역에 우세하게 분포한다는 것은 울릉분지가 형성될 초기에 분지 경계부를 따라 광범위하게 화산활동이 일어났음을 지시한다. 아울러 한국대지에서 와는 달리 용암의 중심분출을 지시할 만한 대규모의 해저산이나 돛, 피크 등이 동해 한국 대륙주변부에서 거의 나타나지 않는 것으로 보아 이 지역 화산기반암은 대부분 틈새분출(fissure eruption)과 관련되어 유출된 용암류가 굳어져 형성된 것으로 추정된다. 이러한 분출양식은 동해 한국 대륙주변부 뿐만 아니라 한국대지 지역에서도 일어난 것으로 제안되고 있다 (Kwon *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011).

### 5.3 동해 한국 대륙주변부의 진화 과정

동해 한국 대륙주변부 기반암의 지형과 탄성파상 분석에 따른 기반암의 지질학적 특징과 기존에 발표된 선행 연구결과들을 종합해보면, 동해 한국 대륙주변부의 진화과정은 울릉분지의 열림과 연계하여 다음과 같이 설명할 수 있다.

후기 올리고세에서 전기 마이오세에 동해의 후열도 확장의 시작과 함께 울릉분지 지역 전반에 걸친 분지열림이 진행되었다. 이와 같은 초기 열림은 대륙지각의 확장성 블록단층운동을 동반한 열개(rifting)를 통해 이루어졌는데, 그 과정에서 틈새분출을 통한 격렬한 화산활동이 동해 한국 대륙주변부 동부지역과 한국대지 지역에 광범위하게 진행되었고 탄성파상 C의 기반암이 형성되었다. 분지형성 초기 단계에서는 대륙주변부와 한국대지 지역의 열개된 대륙지각들이 아직 해수면 아래로 침강되지 못한 상태였으므로 하성 혹은 호성 환경 하에서 퇴적이 이루어졌다.

이후 한국대지 지역에서는 열개작용이 거의 중단되었지만, 울릉분지 지역에서는 본격적으로 확장이 진행되어 심해성 울릉분지가 형성되기 시작하였다.

초기의 울릉분지를 포함한 동해의 확장은 동해동부와 서부 경계부를 따라 일어난 대규모 단층운동을 통해 이루어졌기 때문에(Jolivet and Tamaki, 1992), 기반암의 빠른 지구조적 침강(최대 900 m/my)을 야기하였다(Ingle, 1992). 동해의 계속적인 확장과 분지지역의 급격한 침강으로 해양환경이 시작되었는데, 동해 한국 대륙주변부를 포함한 울릉분지 주변의 기반암 고지대에서도 지구와 지루의 침강과정에서 만들어진 열곡을 따라 해양환경의 범위가 내륙으로 확장되었다. 그러나 초기 해침과정에서는 기반암의 빠른 침강과 이에 따른 급격한 상대적 해수면 상승으로 해저면의 평탄화 작용은 효과적으로 일어나지 않았을 것으로 보인다.

전기 마이오세말에 이르러 울릉분지의 확장은 거의 완성되었고, 이에 따라 주변 지역 기반암은 각각의 열손실(thermal decay)에 따른 열적침강(thermal subsidence)을 겪게 되면서 침강률은 이전에 비해 상당히 감소하게 되었다(Chough and Barg, 1987; Ingle, 1992). 이에 따라 해안역에서는 활발한 파식작용 및 이와 동반된 자생퇴적작용에 의해 후열도 확장 초기 및 그 이전에 형성된 복잡한 지형(탄성파상 B)은 상당부분 평탄화되면서 고진폭의 연속성이 양호한 음향기저(탄성파상 A)가 해안선의 후퇴와 함께 점차 육지쪽으로 형성되었다.

## 6. 결 론

동해 한국 대륙주변부의 기반암은 북서-남동 내지 남북(북북서에서 북북동 사이)의 방향성을 보이는 신장된 다수의 능과 곽(ridge and trough) 지형을 이루고 있으며, 기반암 저지대는 대부분 단층운동에 의해 형성된 지구(graben) 혹은 반지구(half-graben) 형태로서 포항-영덕분지, 후포분지, 묵호분지 등이 현재의 대륙붕과 대륙사면에 발달한다. 한편, 상부와 중부 대륙사면 심부의 기반암 표면의 경사는 해수면 하 1.4~2.2 sec (왕복주시) 깊이를 경계로 하여 약 5°에서 약 20° 이상으로 급격히 증가한다.

탄성파단면에서 인지되는 지층의 외형과 내부 사면의 배열형태를 고려하여 3개의 탄성파상(A, B,

C)이 기반암층에서 구분되었는데, 연안에서 외해로 가면서 A→B→C의 순서로 심도에 따라 해안선에 평행한 대상분포를 보인다.

가장 얕은 심도에 분포하는 탄성파상 A는 연장성이 양호한 고진폭의 단일 반사면이 평탄한 기반암 표면을 따라 뚜렷하게 나타나는 특징을 보인다. 이 탄성파상은 울릉분지 형성 후기단계(19~15 Ma) 혹은 달희단계(<12 Ma) 동안에 대륙주변부가 느린 침강과정을 거치게 되면서 해안지역의 파도에 의한 삑박과 퇴적에 의해 기반암이 평탄화되어 나타나는 것으로 해석된다.

탄성파상 A와 C 사이의 대륙사면에 분포하는 탄성파상 B는 음향기저의 형태나 내부 반사상 모두 다양한 변화 특성을 보이는데, 대부분 고기의 기반암 잔류암체 및 소규모 열개분지의 기저를 채운 화산암/화산쇄설층의 복합체로 해석된다. 이들 기반암들은 탄성파상 A를 보이는 기반암들과는 달리 상대적으로 깊은 부분에 위치하기 때문에 빠른 침강이 일어나던 울릉분지 형성초기에 해침을 겪게 되어 평탄화 작용의 영향을 받지 못하였다.

울릉분지에 접해있는 하부 대륙사면의 심부에 분포하는 탄성파상 C는 중첩되어 나타나는 쌍곡선 반사파(hyperbolic reflector)가 대표적인 특징으로서, 화산기원의 기반암에서 나타나는 불규칙한 지형특성을 반영한다. 이 탄성파상은 본격적인 울릉분지의 열림이 일어나기 전, 대륙지각의 열개(rifting)과정에서 발생한 틈새분출형 화산활동으로 인하여 울릉분지 주변에 새롭게 형성된 기반암으로 해석된다.

## 사 사

이 논문은 2014년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었습니다. 논문의 심사과정에서 유익한 조언을 주신 양우현 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

## REFERENCES

Chough, S.K. and Barg, E., 1987, Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, 15, 45-48.

- Chough, S.K., Yoon, S.H. and Lee, H.J., 1991, Submarine slides in the eastern continental margin, Korea. *Marine Geotechnology*, 10, 71-82.
- Coffin, M.F., Munschy M., Colwell, J.B., Schlich, R., Davies, H.L. and Li, Z.G., 1990, Seismic stratigraphy of the Raggatt Basin, southern Kerguelen Plateau: Tectonic and paleoceanographic implications. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 563-579.
- Emery, D. and Myers, K.J., 1996, *Sequence Stratigraphy*. Blackwell Science Ltd., Oxford, 297 p.
- Fountain, D.M., 1986, Implications of deep crustal evolution for seismic reflection interpretation. In: Barazangi, M., Brown, L., (eds.), *Reflection Seismology: A Global Perspective*. American Geophysical Union Geodynamics Series Volume 13, Washington, D.C., 1-7.
- Huntec Ltd., 1968, Report on the offshore geophysical survey in the Pohang area, Republic of Korea. UN ECAFE/CCOP Technical Bulletin, 1, 1-12.
- Ingle, J.C., Jr., 1992, Subsidence of the Japan Sea: stratigraphic evidence from ODP Sites and onshore sections. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128 (part 2), 1197-1218.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the Northeast Japan Arc. *Proceedings, Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128 (part 2), 1311-1331.
- KIGAM, 2004, Study on the Techniques for Gas Hydrate Exploration and Development. Rep. KR-04(c)-09, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 525 p (in Korean).
- Kim, C.S., 1982, Submarine geology of continental margin of the East Sea, Korea. *Mining Geology*, 15, 65-88 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.J., Lee, G.H., Jou, H.T., Cho, H.M., Yoo, H.S., Park, G.T. and Kim, J.S., 2007, Evolution of the eastern margin of Korea: Constraints on the opening of the East Sea (Japan Sea). *Tectonophysics*, 436, 37-55.
- Kim, G.B., Yoon, S.H., Chough, S.K., Kwon, Y.K. and Ryu, B.J., 2011, Seismic reflection study of acoustic basement in the South Korea Plateau, the Ulleung Interplain Gap, and the northern Ulleung Basin: Volcano-tectonic implications for Tertiary back-arc evolution in the southern East Sea. *Tectonophysics*, 504, 43-56.
- Kim, G.B., Yoon, S.H., Sohn, Y.K. and Kwon, Y.K., 2013, Wave-planation surfaces in the mid-western East Sea (Sea of Japan): Indicators of subsidence history and paleogeographic evolution of back-arc basin. *Marine Geology*, 344, 65-81.
- Kwon, Y.K., 2005, I. Sequence stratigraphy of the Taebaek Group (Cambrian-Ordovician), mideast Korea and II.

- Seismic stratigraphy of the western South Korea Plateau, East Sea. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, 205 p.
- Kwon, Y.K., Yoon, S.H. and Chough, S.K., 2009, Seismic stratigraphy of the western South Korea Plateau, East Sea: implications for tectonic history and sequence development during back-arc evolution. *Geo-Marine Letters*, 29, 181-189.
- Lee, H.J., Chough, S.K., Chun, S.S. and Han, S.J., 1991, Sediment failure on the Korea Plateau slope, East Sea (Sea of Japan). *Marine Geology*, 97, 363-377.
- Lillie, R.J., 1999, Whole Earth Geophysics: An introductory textbook for geologists and geophysicsts. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Mitchum, R.M., Jr., Vail, P.R. and Sangree, J.B., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: Payton, C.E. (ed.), *Seismic Stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, 117-133.
- Neuendorf, K.K.E., Mehl, J.P., Jr. and Jackson, J.A., 2005, *Glossary of Geology*. American Geological Institute, Alexandria, Virginia, 779 p.
- Schluter, H.V. and Chun, W.C., 1974, Seismic survey of the East Coast of Korea. UN ECAFE/CCOP Technical Bulletin, 8, 1-16.
- Schmincke, H.U. and Sumita, M., 1998, Volcanic evolution of Gran Canaria reconstructed from apron sediments: synthesis of Vicap project drilling. In: Weaver, P.P.E., Schmincke, H.-U., Firth, J.V., Duffield, W. (eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 157, 443-469.
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allen, J., Ingle, J.C., Jr. and Pisciotto, K.A., 1992, Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128 (part 2), 1333-1348.
- Trenhaile, A.S., 2002, Modeling the development of marine terraces on tectonically mobile rock coasts. *Marine Geology*, 185, 341-361.
- Trenhaile, A.S. and Layzell, M.G.J., 1981, Shore platform morphology and the tidal duration factor. *Transactions, Institute of British Geographers NS* 6, 82-103.
- Vail, P.R. and Mitchum, R.M., Jr., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 1: overview. In: Payton, C.E. (ed.), *Seismic Stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, 51-52.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Jr., Sarg, J.F., Loutit, T.S. and Hardenbol, J., 1988, An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Posamentier, H.W., Van Wagoner, J., Ross, C.A., and Kendall, C.G.St.C. (eds.), *Sea-level Changes: an Integrated Approach*. SEPM Special Publication No. 42, 39-45.
- Veeken, P.P., 2007, *Seismic stratigraphy, basin analysis, and reservoir characterization* vol. 37. Elsevier, Amsterdam.
- Yoon, S.H., 1994, The eastern continental margin of Korea: seismic stratigraphy, geologic structure and tectonic evolution. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, 232 p.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1992, Tectonic history of eastern continental margin, Korea. In: Chough, S.K. (ed.), *Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and Adjacent Seas*. Special Publication of the Korean Sedimentology Research Group, 22-39.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1993, Evolution of Neogene sedimentary basins in the eastern continental margin of Korea. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 1, 15-27.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Geological Society of America Bulletin*, 107, 83-97.
- Yoon, S.H., Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 2014, Tectonic, sedimentary, and volcanic evolution of a back-arc basin in the East Sea (Sea of Japan). *Marine Geology*, 352, 70-88.

---

Received : January 5, 2015

Revised : January 28, 2015

Accepted : January 28, 2015