

한국 동쪽 대륙주변부의 구조적 진화와 동해의 형성

김한준^{1*} · 주형태¹ · 이광훈² · 유해수¹ · 박건태¹

¹한국해양연구원 해저환경연구사업단, ²부경대학교 환경탐사공학과

Structural Evolution of the Eastern Margin of Korea: Implications for the Opening of the East Sea (Japan Sea)

Han-Joon Kim^{1*}, Hyeong-Tae Jou¹, Gwang Hoon Lee², Hai-Soo Yoo¹ and Gun-Tae Park¹

¹Korea Ocean R & D Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea

²Bukyoung University, Korea

We interpreted marine seismic profiles in conjunction with swath bathymetric and magnetic data to investigate rifting to breakup processes at the Korean margin leading to the separation of the Japan Arc. The Korean margin is rimmed by fundamental elements of rift architecture comprising a seaward succession of a rift basin and an uplifted rift flank passing into the slope, typical of a passive continental margin. In the northern part, rifting occurred in the Korea Plateau, a continental fragment extended and partially segmented from the Korean Peninsula, that provided a relatively broader zone of extension resulting in a number of rifts. Two distinguished rift basins (Onnuri and Bandal Basins) in the Korea Plateau are bounded by major synthetic and smaller antithetic faults, creating wide and symmetric profiles. The large-offset border fault zones of these basins have convex dip slopes and demonstrate a zig-zag arrangement along strike. In contrast, the southern margin is engraved along its length with a single narrow rift basin (Hupo Basin) that is an elongated asymmetric half-graben. Rifting at the Korean margin was primarily controlled by normal faulting resulting from extension in the west and southeast directions orthogonal to the inferred line of breakup along the base of the slope rather than strike-slip deformation. Although rifting involved no significant volcanism, the inception of sea floor spreading documents a pronounced volcanic phase which seems to reflect slab-induced asthenospheric upwelling as well as rift-induced convection particularly in the narrow southern margin. We suggest that structural and igneous evolution of the Korean margin can be explained by the processes occurring at the passive continental margin with magmatism intensified by asthenospheric upwelling in a back-arc setting.

Key words : Multichannel seismic profiles, Korean margin, Back-arc rifting, Pronounced volcanic phase, Passive continental margin

해양탄성파 프로파일을 정밀수심 및 자력자료와 함께 해석하여, 일본열도가 분리되어 동해가 형성된 한반도의 대륙 주변부에서 진행된 리프팅과 지각의 분리 과정을 연구하였다. 한반도의 주변부는 바다쪽으로 리프트분지와 융기된 리프트 측면부, 그리고 경사가 급한 대륙사면이 연속된, 비활성 대륙주변부에서 전형적으로 볼 수 있는 기본적인 리프트구조로 이루어져 있다. 북쪽지역에서는 한반도로부터 연장되고 부분적으로 분절된 대륙지각인 한국대지에서 리프팅이 발생하였다. 한국대지는 상대적으로 넓은 신장지역을 제공하여 많은 수의 리프트를 형성하였다. 한국대지 내에서 두 개의 눈에 띄는 리프트 분지(온누리와 반달 분지)는 주된 synthetic 단층과 더 작은 규모의 antithetic 단층에 의해 형성되어 넓고 대칭적인 구조를 갖는다. 이들 분지에서 변위가 큰 경계단층지역은 불룩한 경사면을 가지며 주향방향으로 지그재그 모양을 보인다. 대조적으로, 남쪽 주변부에는 비대칭적인 반지구로서 하나의 좁은 리프트분지(후포 분지)가 길게 형성되어 있다. 한반도 주변부의 리프팅은 주향이동 운동에 의한 변위가 아니라 대륙사면의 기저부를 따라 발생하였다고 유추되는 지각의 분리에 수직하는 서쪽 및 남동방향의 신장의 결과인 정단층작용에 의해 주로 유도되었다고 해석된다. 리프팅 동안에는 화산작용이 거의 없었으나 해저면 확장의 초기단계에서는 상당한 화산작용이 수반되었으며 이것은 특히 남쪽지역에서 리프트에 의해 유도되는 맨틀대류뿐만 아니라 슬랩에 의해 유도되는 약권의 상

*Corresponding author: hanjkim@kordi.re.kr

승을 반영한다고 보여 진다. 동해의 생성과 관련된 한반도 주변부의 구조 및 화산운동은 후열도 환경에서의 약권 상승에 의해 영향을 받는 화산작용을 수반한 비활성 대륙주변부에서 일어나는 과정으로 설명할 수 있다고 해석된다.

주요어 : 다중채널 탄성과 프로파일, 한반도 주변해역, 후열도 리프팅, 화산작용, 비활성 대륙주변부

1. 서 론

일본열도 뒤에 위치하는 동해는 서태평양의 복잡한 판 경계 지역에서 형성된 후열도해(back-arc sea)이다 (Fig. 1). ODP (Ocean Drilling Program) Leg 127과 128을 통해서 얻은 자료와 육상 및 해상에서 얻은 자료를 분석한 결과는 동해는 후기 올리고세에서 초기 마이오세동안 단층운동에 의한 지각의 신장과 후열도 분지의 형성을 통해 열리기 시작하였으며 (Tamaki *et al.*, 1992) 중기 마이오세까지 확장되었음을 제시한다 (Jolivet *et al.*, 1994). 동해의 열림과 관련하여 한반도

(의 가까이)로부터 일본열도가 분리된 방식을 설명하기 위해 많은 연구가 수행된 바 있다. 그 중 가장 많이 인용되는 것은 ‘부채꼴 열림(fan-shaped opening)’ 모델 (Otofujii, 1996)과 ‘당겨열림(pull-apart)’ 모델 (Jolivet *et al.*, 1994)이다. 부채꼴 열림 모델에서는 15 Ma를 정점으로 북동일본과 남서일본이 각각 반시계 및 시계 방향으로 회전하여 일본 열도가 꺾인 모양으로 한반도로부터 멀어졌음을 제시한다. 당겨열림 모델에서는 인도-아시아가 충돌한 반응으로서 생겨난 일련의 주향 이동 단층을 따라 일본열도가 남쪽으로 평행이동한 당겨열림작용을 중심으로 동해의 형성과정을 설명한다.



Fig. 1. Physiography of the East Sea (Japan Sea). JB, YB, and UB = Japan, Yamato, and Ulleung Basin, respectively, YF = Yangsan fault. The hatched areas represent continental fragments (YB = Yamato Bank, OB = Oki Bank, NKP and SKP = North and South Korea Plateaus). The dotted line (Pb-Zn/Cu-W) in SE Korea and SW Japan is a metallogenic belt formed prior to 46 Ma.

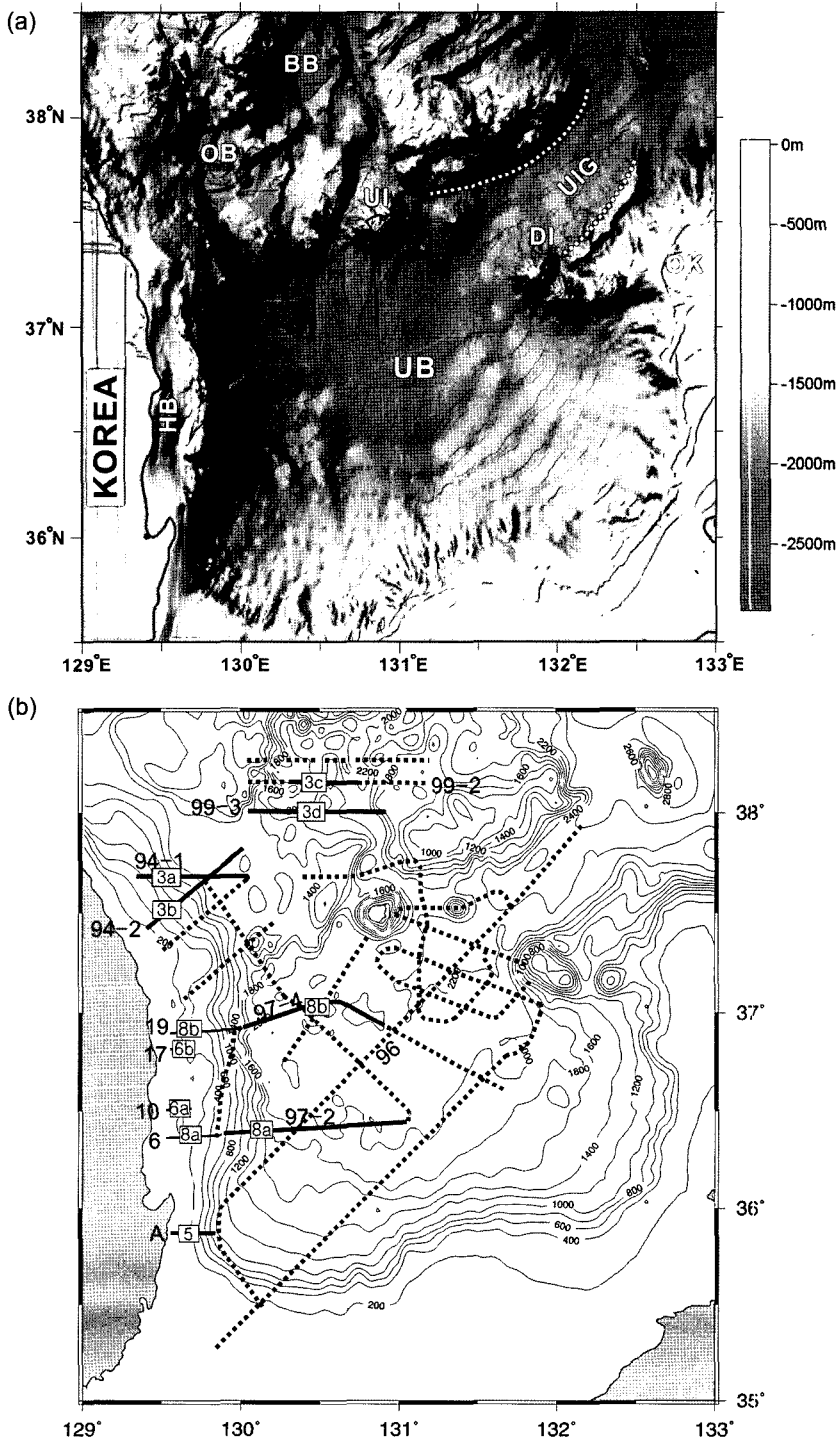


Fig. 2. (a) Shaded bathymetry of the SW East Sea. Three rift basins (BB, OB, and HB = Bandal, Onnuri, and Hupo Basins) are outlined. UI and DI = Ulleung and Dok Islands; UIG = Ulleung Interplain Gap. (b) Locations of seismic profiles superposed with bathymetric contour lines. Heavy and thin lines indicate multi- and single channel seismic profiles shown in this study with respective figure numbers in boxes. Contour interval in meters.

하지만 동해의 형성과 진화에 있어 가장 근본적인 문제는 동해 형성초기에 대륙지각의 리프팅과 분리가 발생한 한반도의 대륙주변부의 구조적 진화 및 화산작용에 대한 연구가 미비한 것이다. 한반도와 울릉분지 사이에 있는 한반도의 대륙주변부는 대륙붕과 대륙사면으로 이루어져 있는데 매우 복잡한 지형을 보인다; 한국대지(Korea Plateau)와 후포뱅크(Hupo Bank)와 같은 고지형 구조와 반달, 온누리, 그리고 후포분지와 같은 리프트분지도 동시에 존재한다(Fig. 2a). 해저면지진계를 사용한 최근의 연구에서는 한반도의 대륙주변부에서 일어난 지각의 분리시 화산작용이 두드러져서 울릉분지 아래에 정

상보다 두꺼운 해양지각이 형성되었을 뿐만 아니라(Kim *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 1999) 대륙붕과 대륙사면 아래에 마그마 집적(magmatic underplating)이 존재함을(Kim *et al.*, 2003) 제시한다. 이러한 특성은 한반도의 주변부에서 일본열도가 떨어져 나갈 때 마그마의 공급 또한 매우 중요한 역할을 하였음을 지시한다.

이 연구에서는 한반도 주변부와 울릉분지에서 2000 km 이상의 다중채널 탄성과 자료를 획득하여(Fig. 2b) 다중빔 측심자료 및 자력자료와 연계 해석하여 기반구조와 화성층서 그리고 동해의 열림과 관련된 대륙의 리프팅과 지각의 분리 과정을 해석하였다.

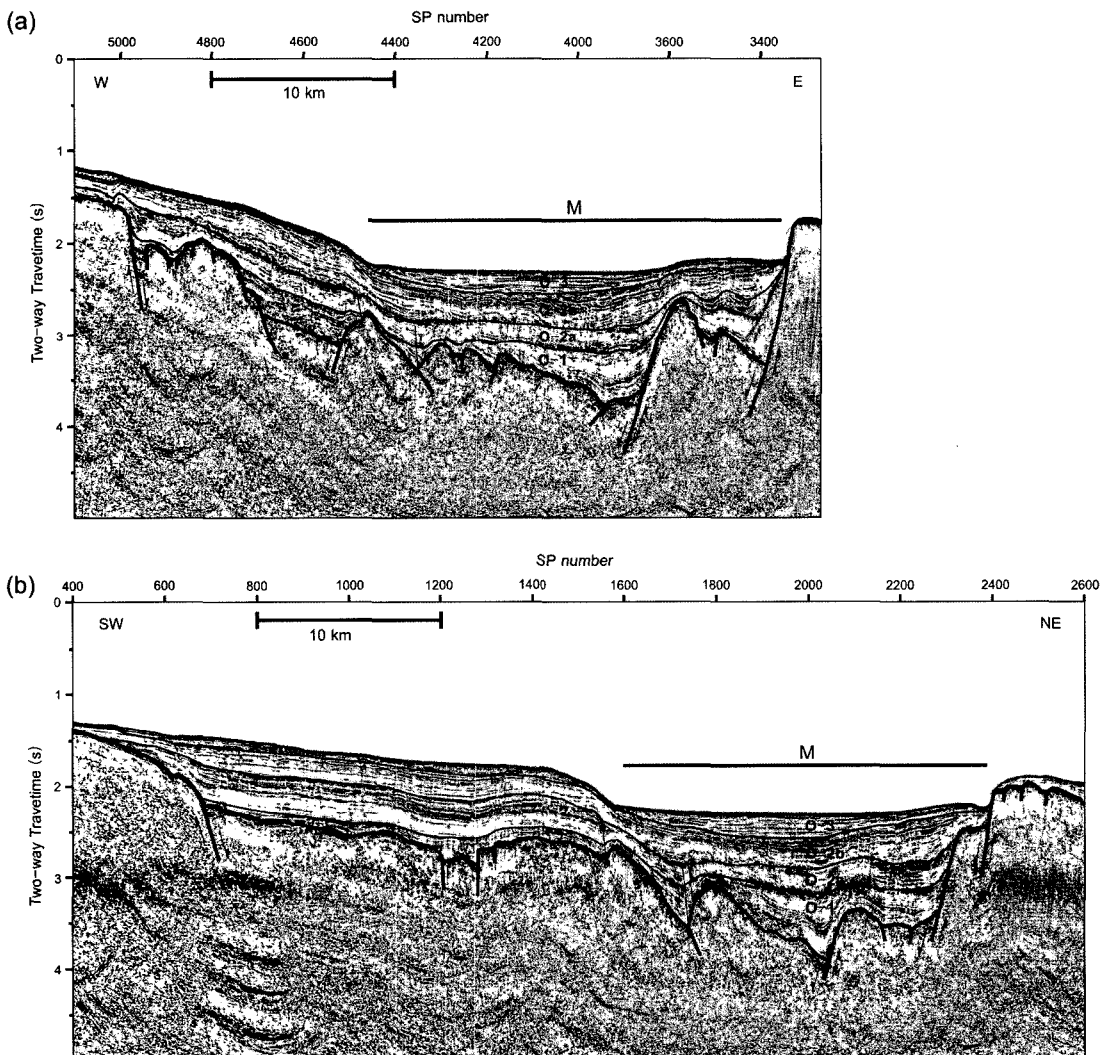


Fig. 3. (a), (b), (c), and (d) MCS profiles 94-1, 94-2, 99-2, and 99-3, respectively, acquired in the Korea Plateau (See Fig. 2b for location).

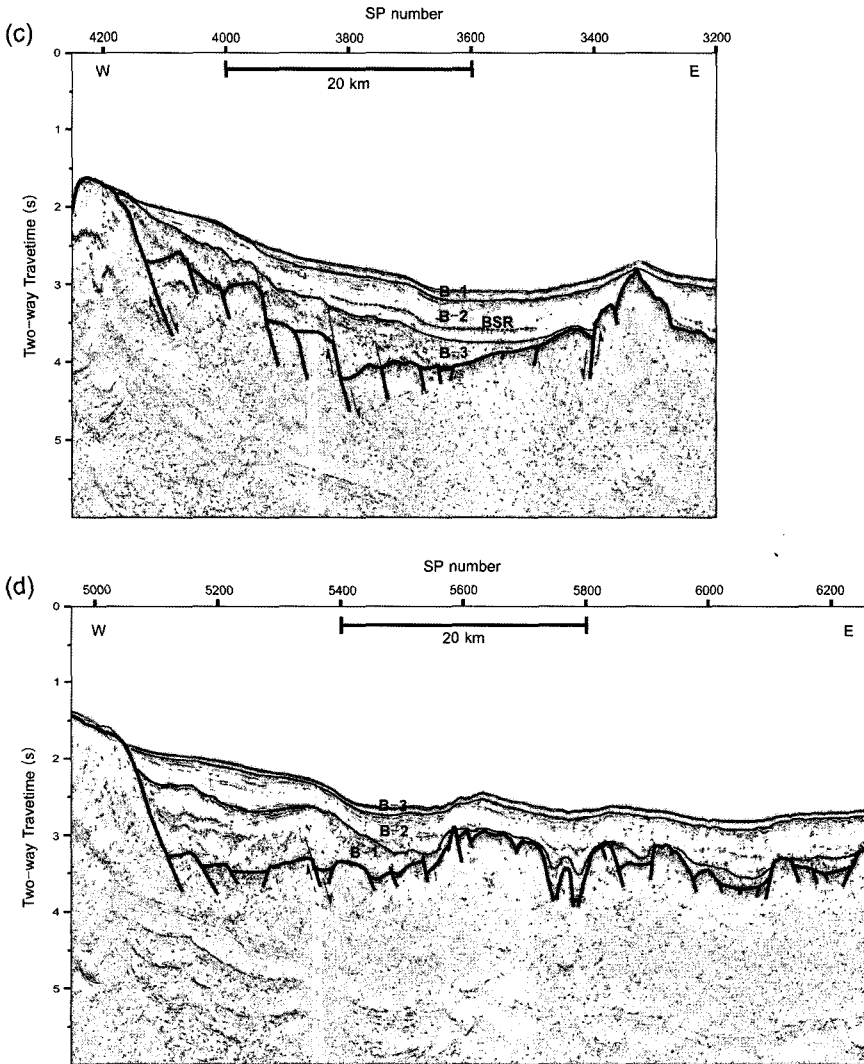


Fig. 3. Continued.

2. 자료획득 및 처리

이 연구에서 사용된 다중채널 탄성파(MCS: multichannel seismic) 자료는 1994년부터 1999년까지 온누리호를 이용하여 획득하였다. 자료획득시 사용된 음원은 690 m³의 에어 건 배열이었다. 1994년에는 25 m 간격으로 발파하고 96 채널 스트리머를 사용하여 중첩도 48의 자료를 획득하였다. 그 외는 50 m 간격으로 발파하고 56 채널 스트리머를 사용하여 중첩도 14의 자료를 획득하였다. 획득된 자료는 한국해양연구원 에서 처리하였으며 처리시 예측 디컨볼루션, 필터링, 그리고 45° 유한차분 구조보정 등을 수행하였다. MCS

프로파일 94-1에서 94-4, 그리고 99-1에서 99-3은 각각 온누리 분지와 반달분지의 퇴적 및 기반구조를 보여준다(Fig. 3). 프로파일 96은 한국대지의 남쪽끝을 지나서 북동-남서 방향으로 울릉분지를 가로질러 한반도의 남동 대륙붕으로 연장된다. 프로파일 97-1에서 97-4는 대륙붕에서 울릉분지 중앙부까지 연장되어 있다 (Fig. 4). 이 연구에서 사용된 MCS 프로파일에는 한반도 남동대륙붕에서 얻은 A를 (Fig. 5) 포함하는데 이것은 중첩도가 48로서 1971년에 Prakla-Seismos Inc. 가 한국석유공사와의 계약에 의해 얻은 것이다. Yoon(1994)에 나오는 단채널 에어건 탄성파 프로파일도 사용하였는데 (Fig. 6) 이들 단면은 Geological

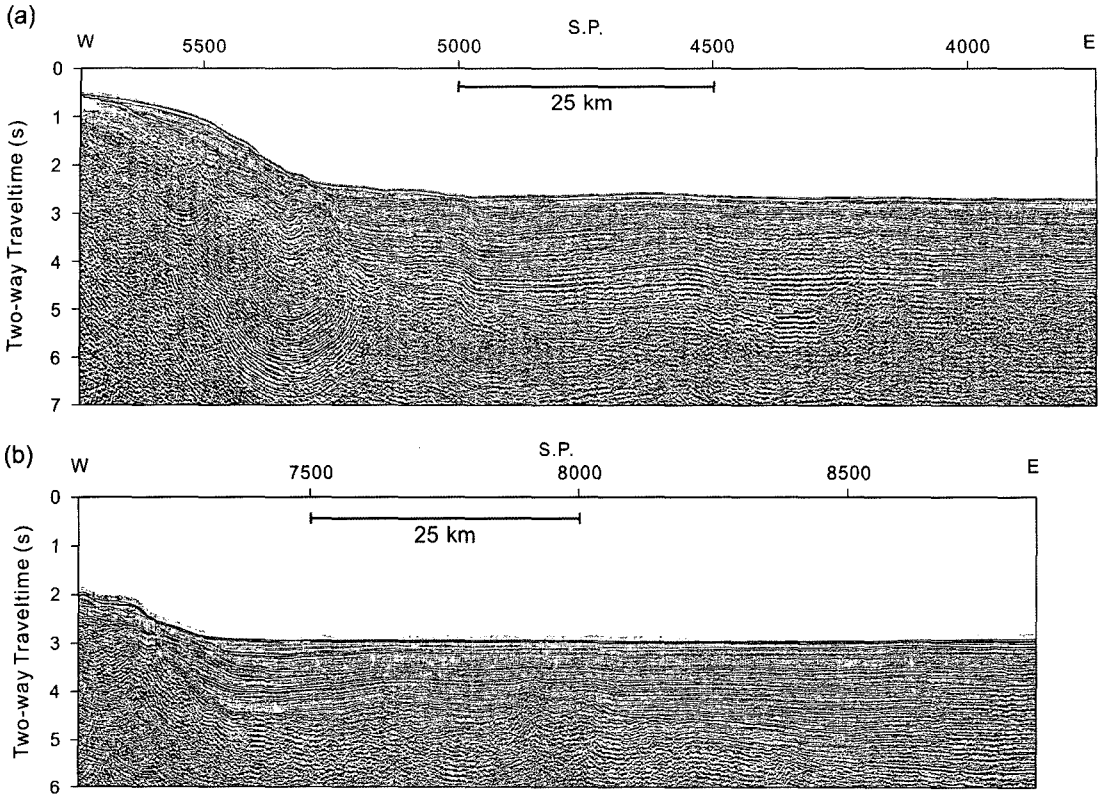


Fig. 4. (a) and (b) MCS profiles 97-2 and 97-4, respectively, acquired from the continental slope to the center of the Ulleung Basin (See Fig 2b for location). Interpretive line drawings are in Fig. 8.

Survey of Germany가 300 in³의 에어 건을 이용하여 안쪽 주변부에서 얻은 것들로서 한국대지 남쪽의 후포 분지와 그 경계단층 지역의 구조를 보여준다.

자력자료(Fig. 7)는 Geological Survey of Japan으로부터 얻은 것이다.

3. 주변부의 구조

3.1. 한국대지

한국대지는 한반도 주변부의 북부에 있는 고지형대로서 가파른 경사면을 거쳐 울릉분지로 연결된다(Figs. 1 and 2a). 한국대지는 북쪽의 NKP(North Korea Plateau)와 SKP(South Korea Plateau)로 나뉘어 지며 동해의 열림이 일어난 시기에 리프팅이 발생한 대륙지각의 조각으로 해석된다(Tamaki, 1988). 한국대지에서 채취한 암석샘플의 연대와 암상은 선캠브리아 변성암, 고생대 화강암과 퇴적암으로서 가까운 한반도의 지질구성과 동일하다(Ryu and Han, 1996). SKP는 좁은 트러프에 의해 다시 동쪽 및 서쪽 블록으

로 나뉘어 지는데 서쪽 블록에 두 개의 규모가 잘 드러나는 리프트분지인 온누리 및 반달분지가 위치한다.

온누리분지는 남북으로 조금 길고 동서방향으로 볼록한 최대 폭 50 km 정도의 트러프(trough)로서 동쪽에 주 경계단층지역이 있다(Figs. 2, 3a and 3b). "M"으로 표시된 수심 약 1600 m의 주함몰지역에는 최대 1.5 초(왕복주사) 이상 두께의 퇴적층이 쌓여있다. 오른쪽에 있는 주경계단층지역내 두 개의 변위가 큰 synthetic 단층들을 따라 상반침강의 대부분이 일어났다. 경계단층지역의 반대편에 있는 왼쪽에는 더 작은 규모의 antithetic 단층들이 분포하고 있으므로 온누리 분지는 전체적으로 대칭적인 지구(graben) 모양을 이룬다. 온누리 분지에서 상반을 붕괴시킨 리프트에 평행한 단층작용의 결과로서 기반암은 굴곡을 가진다. MCS 프로파일과 수심자료는 주함몰지역이 중앙부에서 상당히 넓어지면 기반의 변형은 정단층작용에 의한 것임을 보여 준다.

퇴적특성에 의해 MCS 단면에서 퇴적층을 아래에서 위 방향으로 3 개의 퇴적단위(O-1, O-2, 그리고 O-3)

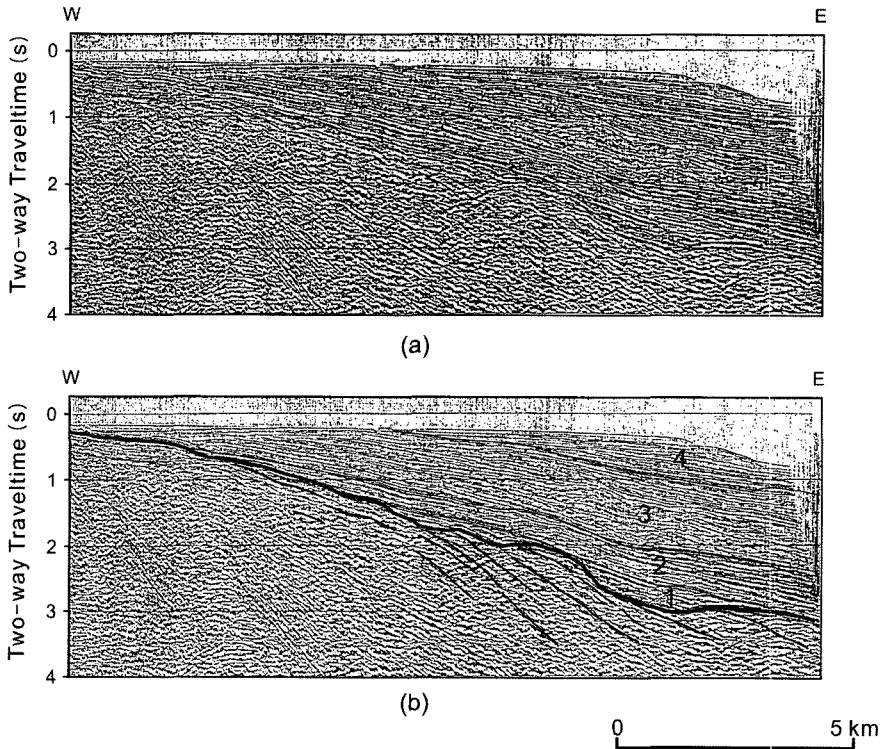


Fig. 5. MCS profile A acquired on the SE margin of the Korean Peninsula.

로 나눌 수 있다(Figs. 3a and 3b). 최상부 단위 O-3은 연결성이 좋은 강한 반사신호로 이루어져 있다. 분지 중앙부에서 최대 약 300 m의 두께를 갖는 단위 O-3은 그 아래의 퇴적단위 O-2를 덮고(drape) 있는데 이것은 아마 후기 플라이오세부터 현재까지 지구조 활동이 없던 시기에 (Lee *et al.*, 2001) 퇴적된 것임을 제시한다. 퇴적단위 O-2는 꽤 강한 진폭의 연결성이 좋은 반사신호로 이루어져 있다. 이 단위는 기반의 상반이 지속적으로 기울어지는 것과 관련되어 나타나는 확장형 모양을 보여주지 않으므로 리프트 후기(post-rift)에 퇴적된 것으로 보인다. 퇴적단위 O-2는 O-2a와 O-2b로 나뉘어 진다. 퇴적단위 O-2와 O-1은 지역적으로 침식되어 있는, 뚜렷한 윗걸침(onlap)하는 경계로 구분된다. 퇴적단위 O-1은 전체적으로 쉼기모양을 이루는데 리프트가 일어난 시기(syn-rift)의 퇴적상을 보여주며 울릉분지의 열림 이전에 한반도의 주변부에서 지각이 신장된 것으로 알려진 후기 올리고세에서 초기 마이오세로 (e.g., Jolivet *et al.*, 1994) 해석된다. 지역적으로 기반암은 용기, 동쪽으로 경사진 역단층, 그리고 습곡과 같이 지각이 축소된 양상을 보여준다. 퇴적단위 O-2a는 몇 개의 역단층에 의해 최상부까지 잘려있지만 O-2b는 상대적으로 덜 변형되어

있다. 동해의 열림은 중기 마이오세의 마지막 무렵에(ca 12 Ma) 멈추어진 것으로 알려져 있는데 이 때 Bonin Arc가 일본 중부와 충돌한 결과로서(Matsuda, 1979) 변형이 신장성에서 압축성으로 바뀌었다(Jolivet *et al.*, 1994). 온누리 분지에서 관찰되는 약한 압축성 운동은 그러한 사건과 관련되었을 가능성이 있다. 후기 마이오세에 지구조 활동이 둔화되었으므로 상대적으로 변형이 덜 된 퇴적단위 O-2b는 중기 마이오세 이후, 그리고 O-2a는 중기 마이오세 및 그 이전으로 해석된다.

온누리 분지의 북동쪽으로 또 다른 리프트 분지인 반달 분지가 위치한다. 반달분지의 동쪽에 있는 용기된 리프트 측면부(rift flank)는 위에서 봤을 때 호상을 이룬다(Figs. 2, 3c and 3d). 반달 분지에서 퇴적층은 온누리 분지에서의와 유사하게 아래에서부터 퇴적단위 B-1, B-2, 그리고 B-3으로 나뉘어 지며 이들은 각각 리프트 시기 (올리고세에서 초기 마이오세), 리프트 후기(초기 마이오세 이후), 그리고 후기 플라이오세에서 현재로 해석된다. 특별히, 퇴적단위 B-2는 아랫 부분에는 강한 진폭의 BSR (Bottom Simulating Reflector) 이 잘 나타난다. 이 BSR은 극성이 양으로서 규소의 축적작용에 의해 생긴 opal-A/opal-CT 상경계를 나타

넌다 (Lee *et al.*, 2003). 가까운 아마토 분지에 있는 ODP 797 지점에서 채취된 퇴적층의 분석결과 BSR 모양의 연대는 14-8 Ma로 알려져 있는데 (Kuramoto *et al.*, 1992) 한국대지에 있는 리프트분지내 퇴적단위 2의 추정된 연대와 일치한다. 반달 분지의 기반은 굴곡이 있으며 하나 이상의 반사신호로 이루어진 반사면이다. 기반암은 많은 수의 정단층에 의해 잘려있는데 이것은 아마 리프팅의 초기 단계에서 예상되는 블록단층 작용(block faulting)과 기울어짐 때문일 것이다. 반달 분지의 경우 대부분의 함몰이 일어난 주 경계단층지역이 서쪽에 있으나 융기된 리프트 측면부는 바깥에 해당하는 동쪽에 있다.

3.2. 후포 분지

한국대지 남쪽 한반도의 동쪽 대륙붕은 평탄하고 좁으며(폭 <20 km) 급작스럽게 가파른 대륙사면으로 연결되는데 리프팅과 해저면 확장까지의 구조적 단위들인 리프트분지(후포 분지), 고지형대(후포 뱅크), 그리고 심해분지(울릉 분지)가 해안에 평행하게 바다쪽으로 연속적으로 나타난다(Fig. 2a). 후포 분지는 남북방향으로 연장된 좁은 트러프로서 전형적으로 15-20 km 정도의 폭을 가지며 동쪽에 큰 변위의 경계단층인 후포 단층이 있다(Fig. 6). 후포 단층은 위에서 봤을 때 부분적으로 곡선을 이루며 길게 뻗어 있으며 두 개 이상의, 바깥쪽으로 볼록한 호상 단위로 구성되어 있다(Fig. 2a). 분지의 침강은 대부분 후포 단층을 따라서만 진행되었으므로 후포 분지는 비대칭적인 반지구를 이룬다. 후포 분지에서 진폭이 크고 연결성이 좋은 세 개의 층서 H-1, H-2, H-3을 인식할 수 있다. 가장 아래에 있는 퇴적 단위 H-1은 기반암 위에 윗걸침 형태로 분포하는데 후포단층 쪽으로 넓어지는 쉼기모양을 보인다. 이러한 확장형은 퇴적당시 상반이 계속 기울어진 결과로 해석되며 후기 울리고세에서 초기 마이오세로 추정되는 리프트 시기를 나타낸다고 볼 수 있다. 퇴적단위 H-2와 H-3은 단위 H-1보다 더 연결성이 좋으며 평행한 반사신호로 이루어져 있다. 평행한 퇴적상은 리프트 후기에서 퇴적작용에 지구조운동의 영향이 감소됨을 제시한다. 퇴상부의 퇴적단위 H-3은 온누리 분지와 반달 분지에서처럼 지구조활동이 없는 기간에 해당하는 후기 플라이오세에서 현재까지로 해석된다. 하반의 단층면 바로 앞에 혼란한(chaotic) 탄성과 상은 사태와 붕괴에 의해 입자가 굵은 암석이나 쇄설물이 떨어져 내린 것을 지시할 수 있다. Fig. 6의 단면들은 단채널 자료이므로 탄성과 층서에 대한 속도정

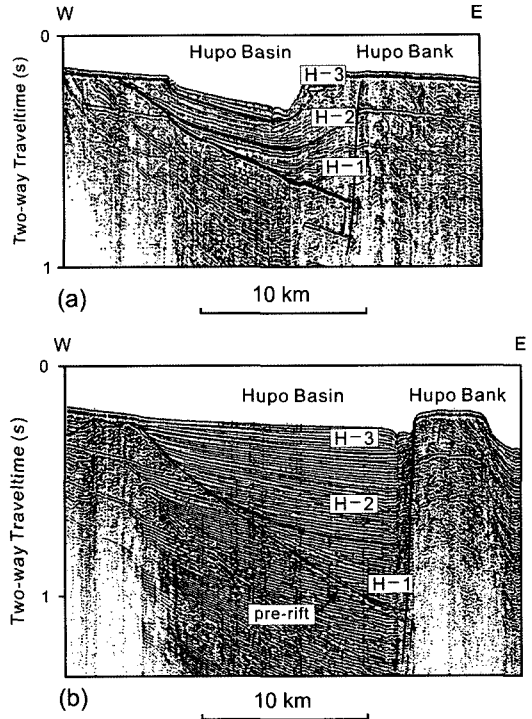


Fig. 6. (a) and (b) Single-channel profiles 10 and 17, respectively, acquired at the inner margin (From Yoon, 1995).

보를 얻을 수 없다.

후포 뱅크는 물에 잠긴 리지(ridge)로서 길이가 약 100 km 이고 폭은 1-14 km 사이이다(Figs. 2a and 2b). 후포 뱅크는 외견상으로 안쪽으로 후포 분지를 감싸는 융기된 리프트 측면부이며 그 바깥 사면은 폭이 30 km 이하로서 울릉분지쪽으로 급경사를 이룬다. 후포 뱅크의 수심은 132-135 m로서 지난 빙하기때 해수면이 내려간 값(Suk, 1989)과 정확히 일치한다. 따라서 후포 뱅크의 꼭대기는 지난 빙하기(last glacial age)때 해수면에 해당하는 침식한계로 해석된다.

진폭이 큰 반사신호로 나타나는 후포 분지의 기반은 비교적 평탄하다(Fig. 6b). 기반 아래에는 국지적으로 리프트 이전(pre-rift) 단계와 관련된 내부 반사면이 나타난다. 후포분지의 평탄한 기반은 가까운 한반도에 노출된 슈라기 및 백악기 화강암이 관입한 선캠브리아기 편암과 고생대 퇴적암으로 이루어진 암석복합체의 연장일 것으로 해석된다(Yoon and Chough, 1995).

3.3. 바깥 주변부 - 울릉 분지

프로파일 97-2와 97-4을 각각 단채널 프로파일 6과

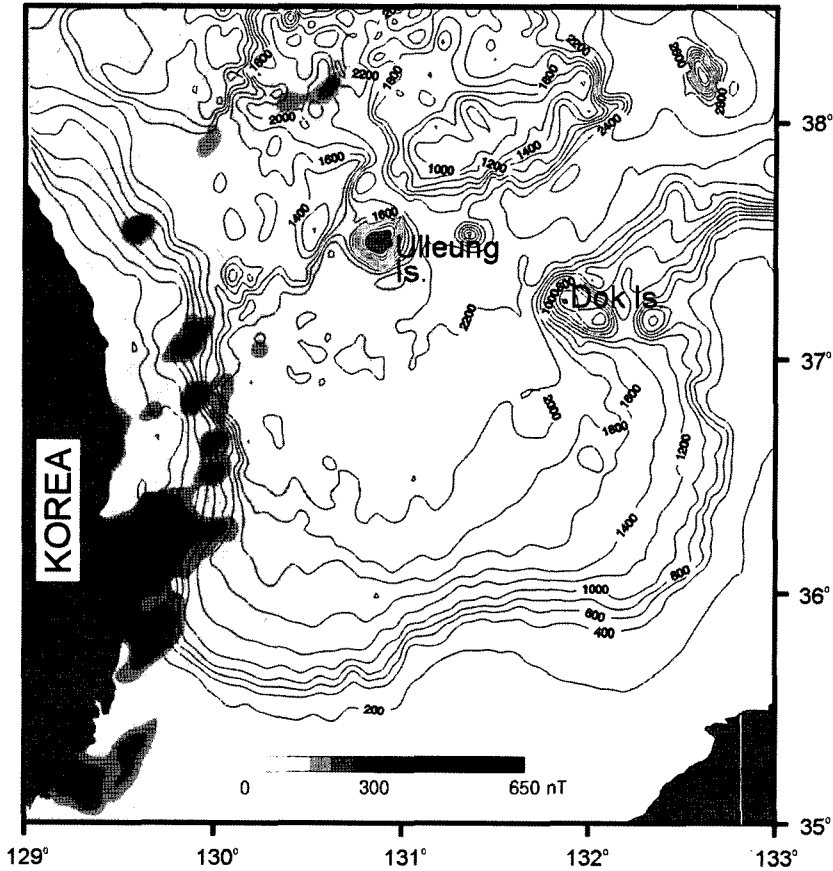


Fig. 7. The positive magnetic anomaly at the Korean margin.

9(Yoon, 1994)과 연결함으로써(Fig. 8) 세 개의 서로 다른 구조적 단위인 안쪽의 리프트분지(후포분지), 고지형대(후포뱅크), 그리고 심해분지(울릉분지)를 가로지르는 한반도 동쪽 주변부의 전형적인 지질단면을 볼 수 있다. 후포뱅크의 바깥쪽 사면에서 기반은 급경사의 단애를 이룬다. 후포뱅크 측면의 단애에서 기반은 2 km 만큼 떨어진다. Fig. 8의 단면에서, 분출된 화산 암체가 사면의 측면 기반위에 형성되어있음을 볼 수 있다. Kim *et al.* (2003)은 이 화산구조가 지각의 분리시 발생된 대규모의 화산작용에 의해 형성되었다고 해석하였다. 단애에서 바다쪽으로 기반은 화산분출암의 반사특징을 보여 준다.

사면의 기저부에서 바다쪽으로 울릉분지에서 해저면은 평탄하며 북동쪽으로 완만히 경사져서 UIG(Ulleung Interplain Gap)를 거쳐 일본분지와 연결된다 (Fig. 2). 탄성파단면을 울릉분지 남부에 있는 석유시추공자료로부터 얻은 층서자료와 대비하여 Chough and Lee

(1992)는 울릉분지내 퇴적층을 Fig. 8의 U-1에서 U-4에 해당하는 네 개의 단위로 나누었다. 간단하게, U-1에서 U-4의 연대는 각각 중기 마이오세와 그 이전 (16.2 (or earlier) - 11.2 Ma), 후기 마이오세(11.2-5.3 Ma), 플라이오세 (5.3-1.6 Ma), 그리고 플라이스토세에서 홀로세(<1.6 Ma)이다. 울릉분지에서 기반은 약 6 km의 깊이에 존재하는데 이 깊이는 일본분지의 기반 심도와 거의 동일하다. 기반을 이루는 지각은 정상적인 해양지각보다 더 두꺼운 10 km 정도이지만 해양지각의 단위 2B, 2C, 그리고 3의 존재를 분명히 보여주며 지각내 속도-깊이의 분포는 정상적인 해양지각의 특성을 잘 보여준다(Kim *et al.*, 1998). 맨틀의 온도와 해양지각의 두께간의 관계를 분석해 보면 울릉분지의 정상보다 두꺼운 해양지각은 정상보다 뜨거운 맨틀영역에서 형성되었다고 해석된다(Kim *et al.*, 1998). 하지만 서 태평양에 있는 일부 후열도해에서처럼(Keary and Vine, 1990) 울릉분지 내에서 자력이상은 분명히

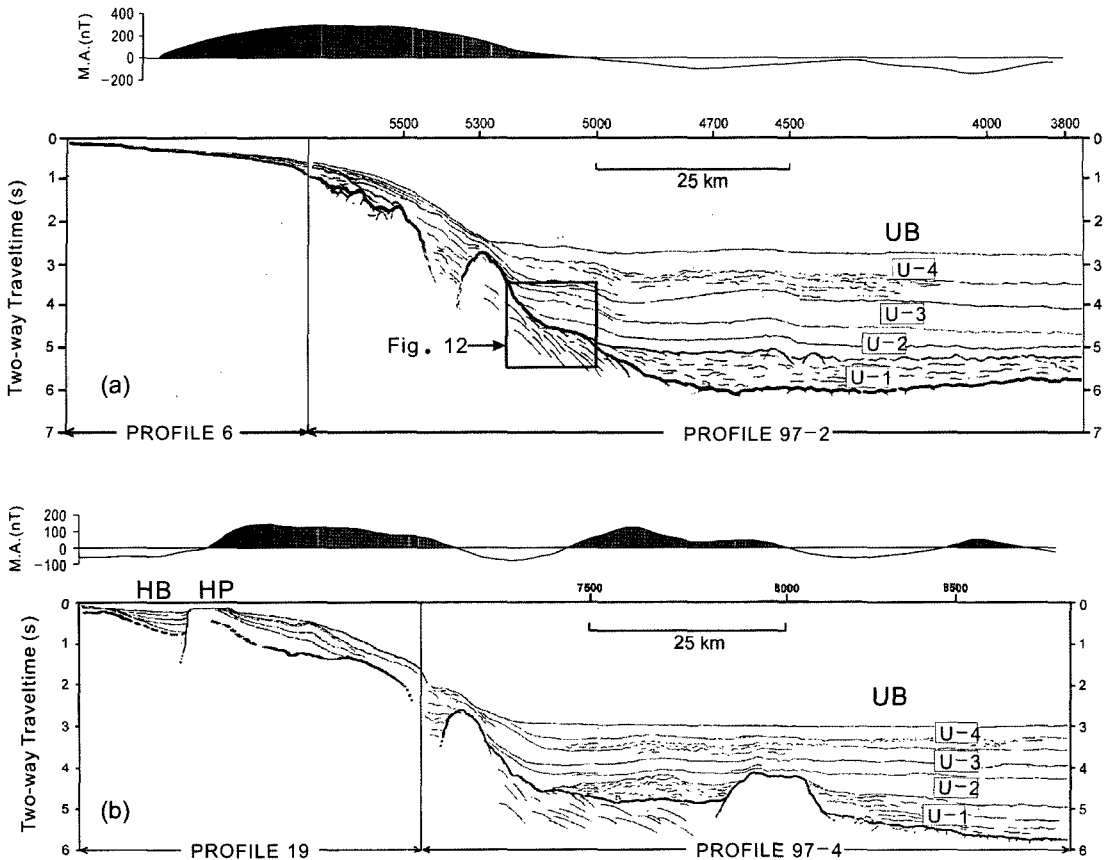


Fig. 8. MCS profiles combined with single channel profiles and their interpretive line drawings to delineate geologic sections from the Hupo to the Ulleung Basins (See Fig. 2b for location). Magnetic anomaly profiles are also shown. (a) 97-2 and 6. (b) 97-4 and 19. HB and UB = Hupo and Ulleung Basins, HP = Hupo Bank.

나타나지 않는다. 후열도하는 육지에 둘러싸여 있으므로 두꺼운 퇴적물이 집적된다. 두꺼운 퇴적물은 분출된 현무암을 치밀하게 덮어서 풍부한 공극내에서 열수 순환을 강화한다. 열수순환동안 Fe-Ti 산화물 내에 존재하는 대부분의 철은 제거되어 비자성의 철산화물로서 재침전되어 매우 낮은 자화와 대자율값을 가지게 된다(Currie and Davis, 1994). 이 과정은 두꺼운 퇴적물 때문에 공극이 물리적으로 축소되는 작용과 함께 해양지각 2A 층의 속도를 5 km/s 이상으로 증가시키는 것으로 알려져 있다(Purdy, 1986). 이러한 작용은 울릉분지에서 자력이상이 분명하지 않고 2A 층이 존재하지 않는 이유를 설명한다. 울릉분지가 정상보다 뜨거운 맨틀위에서 형성되었음을 고려하면 지각의 식는 속도가 느리고 뜨거웠음을 생각할 수 있는데 이러한 작용 역시 자력 이상을 약화시킨다. 울릉분지에서 가장 아래의 퇴적층(U-1)은 화산 맥/류-퇴적물 복합체

(volcanic sill/flow-sediment complexes)로서 기반암이 형성되고 난 이후 중기 마이오세까지 지속된 화산작용의 결과 퇴적된 것으로 해석된다(Chough and Lee, 1992). 해저면 확장 이후 이렇게 오랫동안 지속된 화산작용은 여러 번 관입하고 분출한 화산암을 생성함으로써 자력이상을 가렸을 가능성도 있다.

4. 토 의

4.1. 리프트 구조와 복원

한반도 대륙주변부에서 리프트 구조의 주된 특징은 정단층작용에 의해 지각의 상부가 신장된 것이다. 지각의 리프팅은 대륙내에서, 초기 해저확장지역에서, 그리고 비활성 대륙주변부에서 상당히 유사한 과정으로 일어난다 (Wright, 1997). 더욱 구체적으로, Klaus *et al.* (1992)은 서태평양의 Izu-Bonin arc system에서

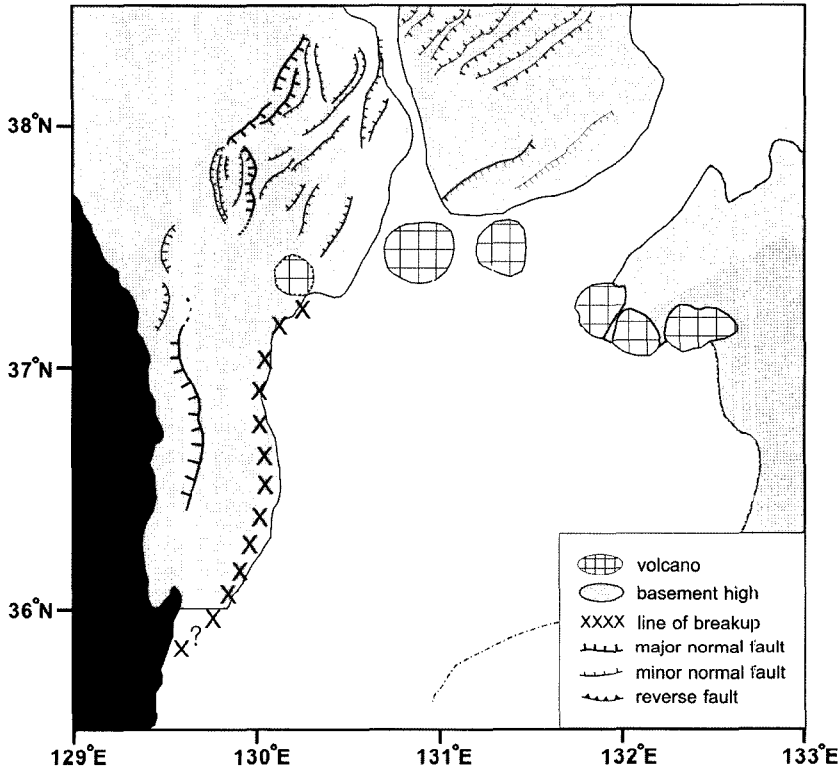


Fig. 9. Structural map of the eastern Korean margin and the Ulleung Basin.

얻은 탄성파자료를 해석하여 후열도 리프트에 대한 두 단계의 진화과정을 제시하였다: (1) 첫 번째는 반지구 (half-graben) 단계로서 변위가 큰 단층지역쪽으로 반지구를 형성한다, (2) 두 번째는 완전지구(full-graben) 단계로서 상반이 하강하고 리프트와 평행한 화산작용이 수반되어 궁극적으로 해저면 확장으로 발전한다. 이렇게 볼 때 전형적인 비대칭 반지구로서 폭이 좁은 후포분지는 첫 번째 단계에서 형성되었으며 이와 대조적으로 상대적으로 폭이 넓고 대칭적인 온누리와 반달분지는 더 진행된 리프팅 단계에서 형성되었다고 볼 수 있다. 온누리와 반달분지는 Rosendahl(1987)이 정의한 대로 리프트 구조의 기본적인 단위로 이루어져 있다; 이들 두 분지에서 주 경계 및 그 반대편의 antithetic 단층은 블록한 경사면을 가지며 주향방향으로 지그재그 모양으로 나타 난다(Fig. 9). 비록 경계단층이 엇갈려서 나타나지만 융기된 리프트 측면부는 바깥쪽에 위치한다. 후포분지에서 약간 곡선을 이루는 경계단층은 지그재그 배열을 가지지 않는 대신 한쪽으로 길게 연장되며 바깥쪽으로 블록한 두 개(이상)의 호상의 부분으로 이루어진 것처럼 보인다. 이러한 현상은 한국대

지 이남에서 경계단층이 지그재그배열을 이룰 만큼 리프트지역의 폭이 좁은 반면 한국대지는 상대적으로 더 넓은 신장지역을 제공하였기 때문으로 해석된다.

고지자기 연구결과 한반도로부터 남서일본열도가 분리된 방식에 대해 다음과 같이 두 개의 다른 해석이 제시되었다: (1) 15 Ma를 중심으로 시계방향의 빠른 회전 (Otofuji, 1996) (2) 17 Ma 이전에 남동쪽으로 평행이동 (Hayashida *et al.*, 1991). Tamaki *et al.* (1992)에 의해 육상과 해상 그리고 ODP 층서자료의 분석으로부터 제시된 바 있는 동해의 주 열람 시기 23 - 19 Ma는 Hayashida *et al.* (1991)을 지지한다. Jolivet *et al.* (1994)과 Lee *et al.* (1999)은 남서 일본이 시계방향으로 회전한 것은 한반도로부터 분리되면서 이루어진 것이 아니라 도미노 블록처럼 구성된 각각의 지역적인 회전 혹은 약 17 Ma에 필리핀판이 남서일본열도와 충돌한 결과라고 제시하였다.

분명히, 한국대지 동쪽 블록의 남쪽 사면은 오키뱅크의 북쪽 사면과 지형적으로 잘 들어맞는데 이것은 남서 일본이 남동쪽으로 분리되었음을 지시한다 (Fig. 2b). 야마토 뱅크와 같이 동해에서 대륙지각이 떨어져

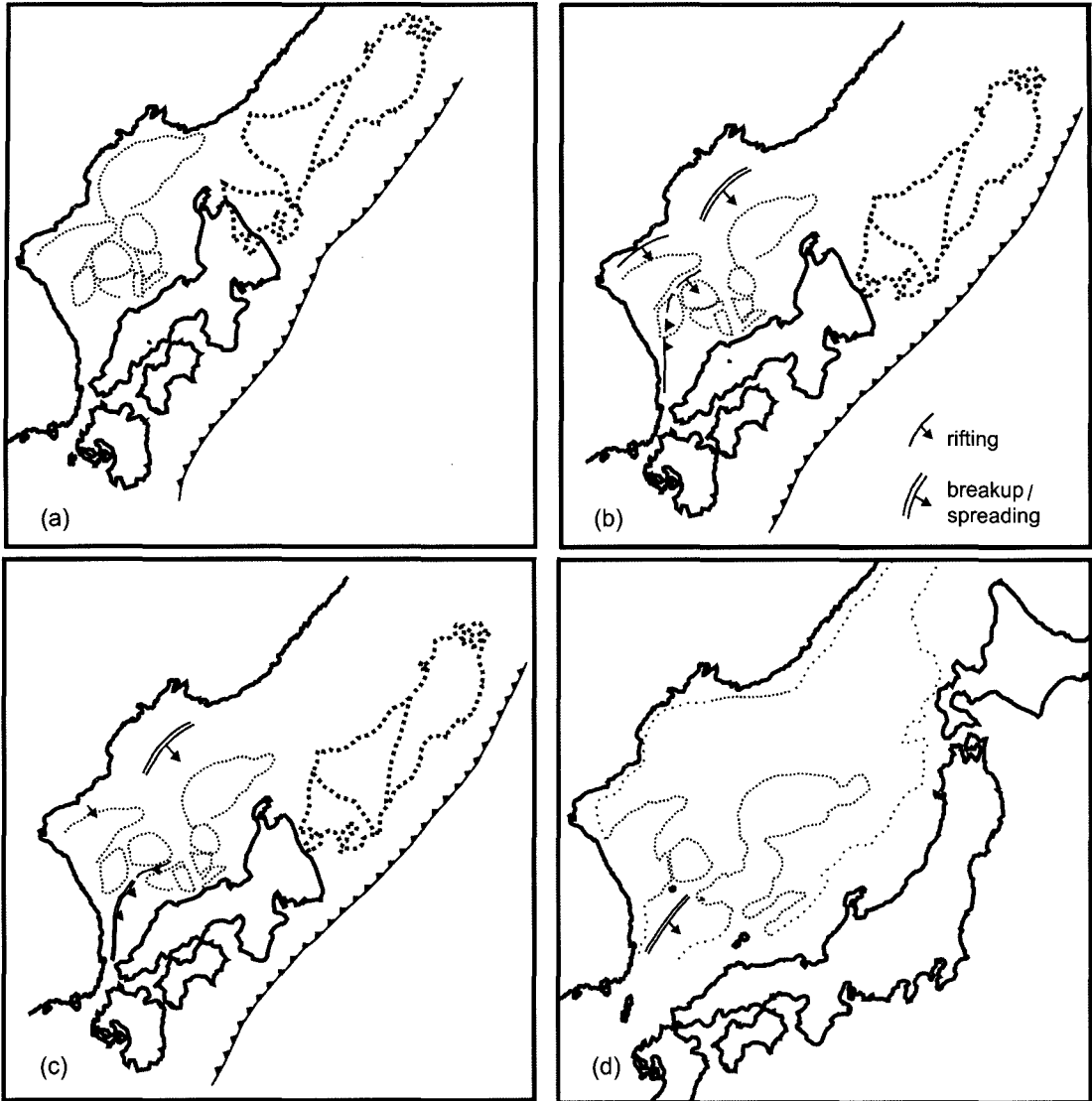


Fig. 10. (a) Positions of tectonic units before the separation of the Japan Arc from the Korean Peninsula. (b) While the Japan Basin widened by seafloor spreading, the rift propagated (south)westward through the Korea Plateau. The rift would have been incapable of penetrating the strong lithosphere of the Korean Peninsula, and so would have turned its direction southward and induced east-west extension at the Korean margin. (c) Rifting to spreading occurred at the eastern Korean margin. (d) The present positions of tectonic units. The initial position of northeast Japan was estimated from Otsuki (1992) and Lee *et al.* (1999).

나간 조각으로 해석되는 모든 고지형대는 남동쪽 혹은 남남동쪽으로 이동한 것으로 보인다(Fig. 1). 이들 고지형대를 주로 북서 혹은 북북서 방향으로 거꾸로 움직임으로써 리프팅과 해저면 확장 이전의 것으로 추정되는 위치를 얻을 수 있다(Fig. 10a). 논란이 많은 동해의 열림모델과 달리 후열도의 리프팅과 해저면 확장은 후기 올리고세에 동해의 북쪽 주변부에서 시작되었다

는 사실은 많은 사람들이 동의하고 있다. 거의 같은 시기에 남서일본(26-20 Ma)과 한반도의 남동부에서(23-19 Ma) 후열도 리프팅과 밀접히 관련된 화산활동이 발생하였다(Kim *et al.*, 1998; Kimura *et al.*, 2003). 특히 한반도 남동부의 화산암은 현무암-안산암 조성을 보이는데(Yoon, 1992) 섭입과 관련된 기원임을 지시한다. 따라서, 일본분지가 해저면 확장에 의해 넓

어지고 있을 동안 후기 올리고세에서 초기 마이오세 동안 한반도의 동쪽 주변부에서 지각의 리프팅과 분리가 일어났다고 생각된다(Fig. 10b). 지각이 늘어난 방향은 반달 분지에서 북서-남동이지만 온누리 분지와 후포분지에서는 동-서가 우세하다(Fig. 9). 이러한 사실은 일본분지의 확장이 진행된 다음(혹은 진행과 동시에) 인장력을 일으키는 리프팅이 남서쪽으로 전파하면서 한국 대지의 중앙부를 지나서 한반도에 가까이 왔을 때 상대적으로 강한 한반도의 지각내로 전파하지 못하고 남쪽으로 방향을 바꾸어 그 결과 한반도 대륙주변부에서 관찰되는 동서방향의 리프팅을 일으켰음을 지시한다(Fig. 10b). 그 후 한반도의 대륙사면의 기저에서 해저면 확장이 남동방향으로 발생하고 진행되면서 울릉분지가 형성되고(Fig. 10c) 남서 일본이 회전함으로써 현재의 상태가 되었다(Fig. 10d). 온누리과 후포분지의 리프팅 동안에는 동서방향의 신장이 우세하였지만 그 이후 지각의 분리와 울릉분지의 열림은 주로 남동방향으로 진행되었다고 해석된다. 해양지각이 남동방향으로 확장되어 울릉분지가 열린 것은 북서방향으로 섭입하는 태평양판의 운동과 직접적인 관련이 있을 것으로 생각된다.

Jolivet *et al.* (1994)은 초기 마이오세에 한반도의 남동부에 있는 양산 단층을(Fig. 1) 따라 남서 일본이 우수향으로 평행이동 하여 그 결과 울릉분지의 당겨열림이 발생하였다고 제시하였다. 한반도 남동부와 일본 열도의 남서부는 46 Ma 이전에 형성된 광화대(metallogenic belt)가 존재한다(Fig. 2a) (Sillitoe, 1977). 이 광화대의 이격거리는 250-300 km로서 남서 일본열도가 남쪽으로 이동한 거리에 해당할 것이다 (Yoon and Chough, 1995). 그러나 육상 층서조사 결과 양산단층을 따라 발생한 우수향 이동은 35 km를 넘지 않는다 (Chang *et al.*, 1990). 울릉분지의 당겨열림 모델을 보완하기 위해 Yoon and Chough (1995)는 초기 마이오세에 후포뱅크의 바깥사면을 따라 나머지 이격거리 215-265 km에 해당하는 우수향 이동이 있었으며 이러한 전단운동이 양산단층을 포함하는 2차 전단지역을 활성화시켜 후포분지가 형성되었다고 제시하였다. 하지만 한반도 대륙주변부의 진화는 이러한 당겨열림 모델에 의해 설명되기 힘들다. 먼저, 양산단층의 비지 시료로부터 측정된 운동시기는 58.7-37.3 Ma로서(Chang and Choo, 1999) 양산단층이 초기 마이오세보다 훨씬 이전부터 활동하였음을 알 수 있다. 한반도 동남부의 육상분지에서 채취한 화산암의 고지자기 분석결과 양산단층이 17.3 Ma 직전에 운동을 하였음도 제시되었지

만(Lee *et al.*, 1999) 양산단층의 전체 이동거리와 이 동시기를 고려하면 울릉분지의 열림과 관련해서는 극히 제한적으로 운동하였다고 보여 진다. 두 번째로, 한반도의 주변부에서 일어난 리프팅과 대륙조각의 이동 방향은 주로 남동쪽인데(Figs. 1, 9 and 10) 이동 방향이 남쪽임을 가정하는 당겨열림 모델로써 설명하기 힘들다. 세 번째로, 지각의 리프팅 이후에 분리가 발생하는 것이 타당하다. 즉, 후포 분지가 리프팅에 의해 형성되고 그 다음 해저면 확장에 의해 울릉분지가 형성되었다고 볼 수 있다. 또한, 후포뱅크의 바깥사면을 가로질러 얻은 탄성과 단면에서는(Fig. 8) 급경사의 단층이나 꽃구조(flower structure)와 같이 대규모 주향 이동과 관련된 분명한 구조를 보여주지 않는다.

한반도의 동쪽 주변부에서 주향이동 변형의 직접적인 증거가 나타나진 않지만 지각의 분리와 그 이후 해저면 확장과 관련된 신장이 한반도의 남동부 쪽으로 전파하면서(Fig. 9) 한반도의 남동부에 남동 혹은 남남동 방향의 우수주향 전단운동을 유도했을 가능성이 있다. 이 지역에는 동해의 후열도 확장과 동시에 생긴 것으로 알려진 일련의 작은(폭 5 km 이하) 3기 육상분지들이 분포하고 있다. 최근의 연구결과에 의하면 이중 하나인 와읍분지에 대해서는 다음이 밝혀졌다; 와읍분지는 22 - 17 Ma 동안 북서-남동 방향의 신장성 응력에 의해 형성되었으며 북북서-남남동 방향의 우수주향 주향이동 단층이 그 경계를 형성하고 있다; 분지내 퇴적물은 북동부에서 남서부 방향으로 연대가 젊어진 다(Son *et al.*, 2005). 한반도 남동부의 고지자기 조사에서 마이오세 초기에 상당한 시계방향의 편이가 발생하였음이 알려져 있는데 남동(혹은 남남동) 방향으로 울릉분지를 형성시킨 해저 확장에 따른 우수전단력의 결과로서 해석할 수 있다(Lee *et al.*, 1999).

5.2. 한반도 주변부의 화산작용

Fig. 8b는 한반도 주변부에서 지각의 구성이 변함에 따른 자력 이상치의 변화를 제시한다. 후포분지에서 진폭이 약한 음의 자력이상은 화산관입이 거의 없는 대륙기원 지각을 나타낸다고 해석된다. 반면에, 후포뱅크에서 보이는 강한 진폭의 양의 자력이상은 상당한 세기의 화산관입 때문으로 해석된다. 육지쪽의 후포분지에 비해 후포뱅크의 기반은 거친 지형을 보이는데 화산 기원임을 제시한다(Fig. 8). 후포뱅크에서 짧은 파장의 진동성분이 없는 부드러운 자력이상은 대자율의 차이가 크지 않음을 제시한다. 즉, 자화강도는 바다 쪽으로 가면서 대륙지각이 심하게 관입됨에 따라 서서히

증가한다고 볼 수 있다. Cho *et al.* (2004)는 강하게 자화된 대륙지각뿐만 아니라 그 아래 마그마 집적도 한반도 연안의 자력 이상의 원인이 됨을 보였다. 사면의 기저부에 있는 화산암체 위에서 자력이상의 극성이 변하는 것은 기반이 해양지각 기원으로 전이됨을 지시한다.

자력이상에서 알 수 있듯이 안쪽 주변부에서의 초기 리프팅시 화산작용은 거의 발생하지 않았을 것으로 보인다. 후포분지의 매끄러운 기반은 화산관입의 흔적을

보이지 않는다. 상대적으로 더 넓은 온누리 및 반달분지의 경우에도 1-2 초(t.wt.) 두께의 퇴적물 때문에 기반의 암상을 추정하기 힘들지만, 다음의 이유 때문에 리프트와 평행한 화산 관입과 분출이 발생하지 않았다고 판단된다: (1) 불규칙한 반사면을 보임에도 불구하고 매끄러운 기반은 화산기원이 아님을 지시한다 (2) 퇴적물은 퇴적당시와 퇴적후 화산 작용작용에 의한 것으로 해석되는 내부 반사특성을 보여주지 않는다 (3) 리프트 이후 침강이 두드러지게 보이지 않는다 (4) 리

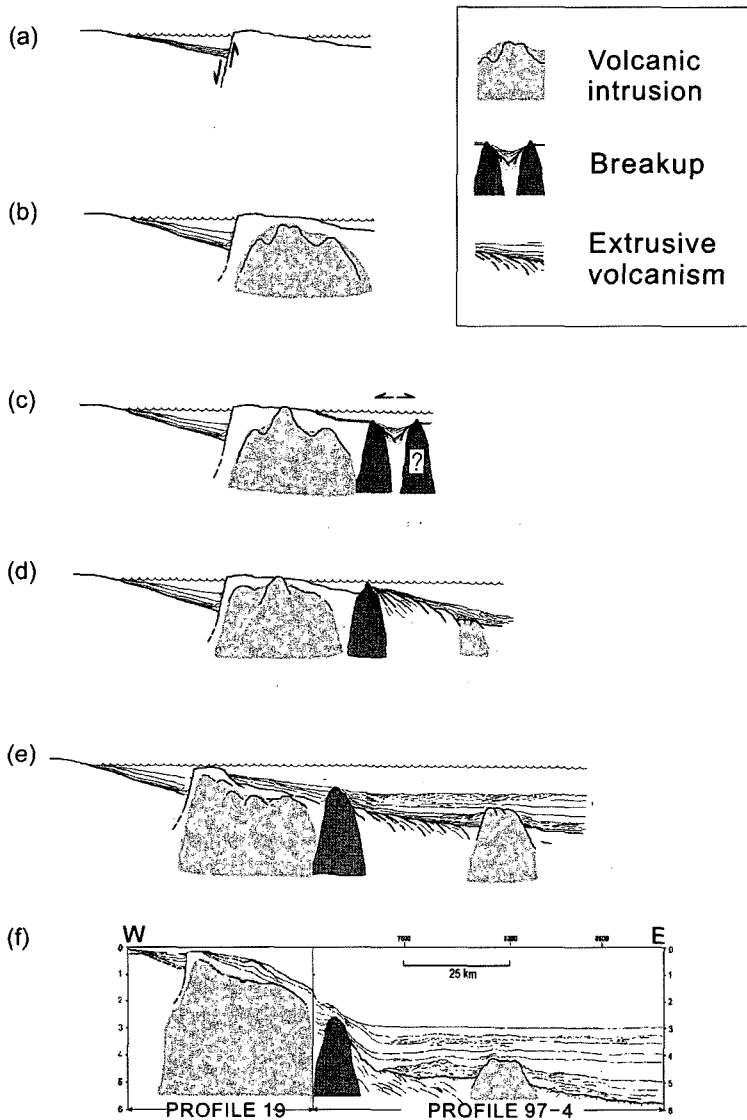


Fig. 11. Schematic diagram showing the evolution stages of the eastern Korean margin from the early Miocene to the present. (a) Rifting at an inner margin, (b) volcanic intrusion at an uplifted marginal high, (c) breakup, (d) extrusive volcanism, (e) subsidence with sediment accumulation, and (f) present geologic structure pertaining to Fig. 8b.

프트와 평행한 자력이상이 존재하지 않는다. 그러므로 한반도의 대륙주변부에는 지각의 조성의 변화와 관련된 두 개의 중요한 지질경계가 존재한다. 첫째, 후포단층과 같은 리프트 분지의 바깥쪽 경계단층은 화산작용이 거의 발생하지 않은 리프트된 대륙지각의 경계를 표시한다. 둘째, 대륙시면의 측면하부는 대륙지각이 분리되고 해저면 확장이 발생한 곳이다. 이들 둘 사이의 지역은 상당한 양의 화산 관입이 해저면 확장의 시작 직전에 발생한 대륙 지각으로 볼 수 있다.

Fig. 11는 약 23 Ma에서 현재까지 Fig. 8b의 단성과 단면을 이루기까지의 과정을 도식적으로 그린 것이다. 한반도 대륙주변부에서 리프팅은 용기된 경계단층 지역 (후포뱅크) 쪽으로 경사진 반지구(후포분지)의 형성과 함께 시작하였다(Fig. 11a). 이후에 후포 뱅크 내에 강열한 화산관입이 일어났다(Fig. 11b). 화산작용이 계속되고 강화됨에 따라 대륙지각은 분리되고 후포뱅크의 기저부에서 해저면 확장이 시작되었다(Fig. 11c). 이에 상응하는 남서 일본의 주변부가, 자료가 없으므로, 비슷한 구조적 진화와 화산활동을 겪었는지는 불명확하다. 노르웨이의 주변부에서 대륙이 분리된 선은 지각이 최대로 얇아진 지역인 Voring 분지에 존재하는 것이 아니라 그 바깥에 위치하는 고지형대인 Voring Plateau의 바다쪽 측면에 존재한다(Skogseid and Eldholm, 1987). 이러한 사실은 비활성 대륙주변부에서 판의 경계는 대륙지각의 상대적으로 두껍지만 약한 부분에서 형성됨을 의미한다(Mutter *et al.*, 1988). 이에 대한 적절한 기계적 작용은 많은 사람들이 제시한 바 있다(e.g., England, 1983); 얇아진 대륙지각 내에서 상대적으로 강한 맨틀이 그 아랫부분을 채우므로 전체적으로 더 강도가 높은 압권을 형성한다. 마찬가지로, 한반도의 주변부에서 대륙지각의 분리는 후포분지 내에서가 아니라 후포뱅크의 바깥 측면부에 존재한 압권이 약한 부분을 따라 일어났다고 유추할 수 있다(Fig. 11c). 대륙지각의 분리 이후 용암이 분출하였으며(Fig. 11d) 이 단계 혹은 그 직전에 안쪽 주변부에서의 확장은 멈추고 바깥 쪽에서 해저면 확장이 시작 되어 울릉분지를 형성하였다. 해저면 확장과 침강이 계속되는 동안 저탁류와 쇄설류로 이루어진 퇴적물이 쌓이고 해양지각의 형성이후에도 화산활동이 지속되어서(Fig. 11e) 현재의 구조를 이루고 있다(Fig. 11f).

동중국과 동해에서 있는 대규모의 신생대 리프팅은 맨틀플룸의 활동 때문으로 가끔 설명된다(e.g., Liu, 1987; Kim *et al.*, 1998). 하지만, 육상에서 발생한 화산활동의 양이 상대적으로 적고(Smith, 1998) 지진파

토모그래피에서 맨틀 내에 깊숙하게 자리 잡은 저속도 이상대가 존재하지 않는 것은(Anderson *et al.*, 1992) 플룸 모델을 지지하지 않는다. 한반도 주변부에서 다른 가능성은 리프팅과 관련된, 국부적으로 강화된 작은 규모의 약권 용승(asthenospheric upwelling)이라 할 수 있다. Mutter *et al.*(1988)은 리프팅과 해저면 확장의 초기동안 수평방향의 열 분포 차이가 상부맨틀 내에서 대류를 유도하는 모델을 제시하였다. 이 모델에서 압권이 늘어나는 것은 빈 공간을 만들어서 약권이 대류를 유도할 뿐만 아니라 수평방향으로 온도 차이를 일으킨다. 리프트 지역이 좁고 리프팅이 빨리 일어나는 것은 용융물질이 양이 많기 위한 필수 조건이다(Mutter *et al.*, 1988; Keen and Potter, 1985). 대륙붕과 후포분지, 그리고 사면을 포함하여 추정된 리프트 지역은 매우 좁다(폭 60 km 이하). 따라서 한반도 대륙주변부의 경우 좁은 리프트 지역이 수평방향의 온도차이를 증가시킴으로써 과도한 마그마작용을 촉진시켰을 가능성이 있다.

과도한 마그마의 생성으로부터 기인하는 분출성 현무암 화산작용은 MCS 프로파일에서 SDR (seaward dipping reflector)로서 나타나는 두꺼운 용암류(lava flow)를 생성한다(Mutter *et al.*, 1988). 프로파일 A는 남동대륙붕의 퇴적 및 기반구조를 보여 준다(Fig. 5). 여기에서 퇴적층 아래의 기반은 바다방향으로 전진구축되는 양상을 가지며 깊어질수록 경사가 증가하는 1-2 초(t.wt) 길이의 반사면으로 이루어져 있는데 Hutton 뱅크나 노르웨이의 대륙주변부와 같은 리프트된 화산성 주변부에서 얻는 MCS 프로파일에서 볼 수 있는 SDR과 (White *et al.*, 1987; Skogseid and Eldholm, 1987) 유사하다. Voring Plateau에 위치한 ODP 지점 642의 연구결과는 이렇게 경사진 층서가 톨라이트(tholeiite) 용암이 퇴적물과 교호한 것으로 이루어져 있으며 대기중에 노출되었거나 얇은 환경에서 형성되었음을 지시한다(Eldholm and Grue, 1994). 한반도의 남동 주변부의 대륙붕에서 약 250 km 정도 북쪽으로 뻗어있는 양의 자력이상은 (Fig. 7) 북미 대륙 주변부에 있는 ECMA (East Coast Magnetic Anomaly) (Keen and Potter, 1995) 보다 훨씬 짧지만 그 최대 세기(>400 nT)는 ECMA의 그것 (200-300 nT)보다 크다. ECMA와 같은 강한 자력이상의 상당 부분은 SDR 때문인 것으로 알려져 있다(Keen and Potter, 1995). 마찬가지로, 한반도의 주변부에서 나타나는 강한 자력이상은 분출성 화산작용의 범위를 반영한다고 볼 수 있다. 프로파일 A에서 상부퇴적층에서 2 km/s를

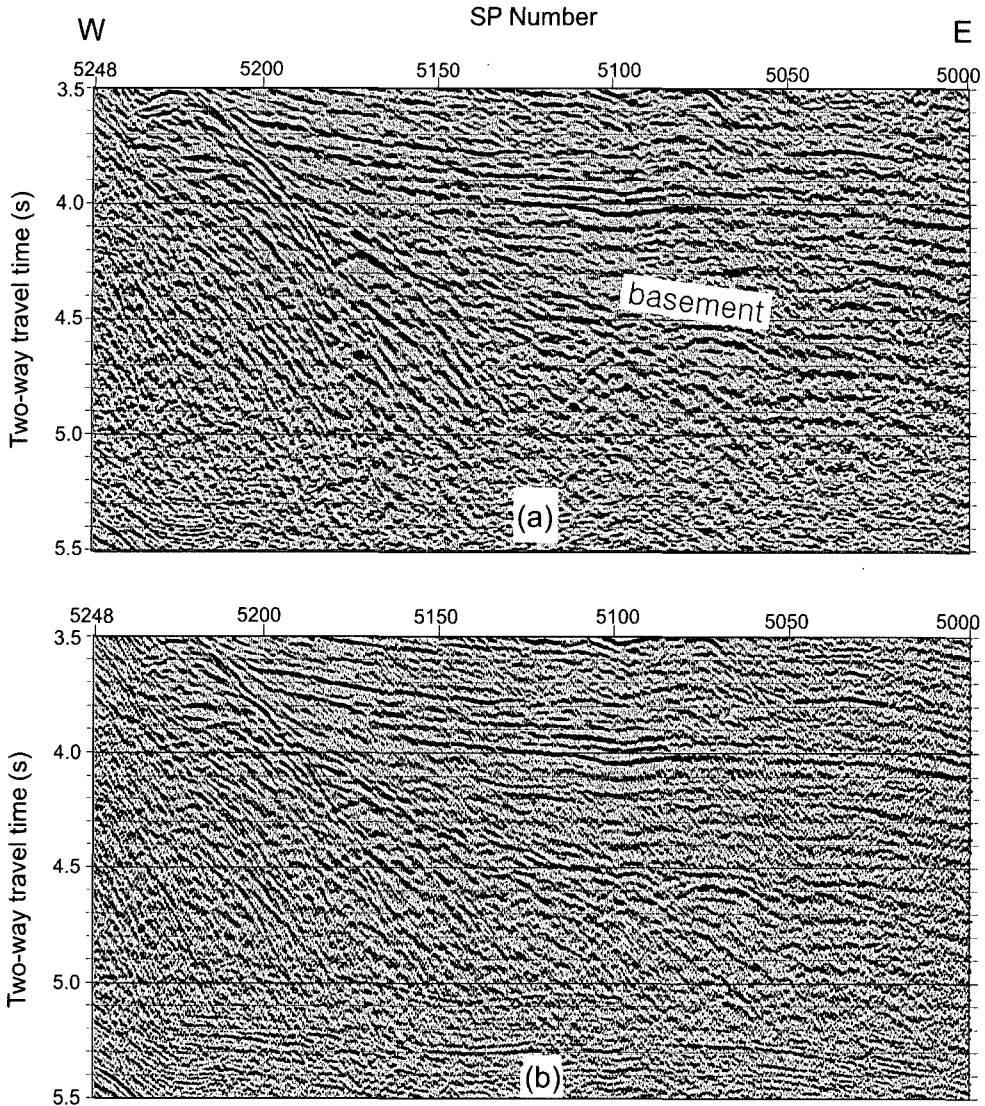


Fig. 12. Part of MCS profile 97-2 in Fig. 8 (a) before and (b) after tau-g HVF.

넘지 못하는 구간 속도는 하부퇴적층에서 3 km/s 이상으로 증가하며 기반 바로 아래에서 5 km/s 이상으로 급격히 증가한다. 이것은 기반이 윗부분에 퇴적물이 혼재된 화산암으로 이루어져 있음을 제시한다. 하지만 후포뱅크 바깥의 사면 기저부에서 SDR은 남동대륙붕에서와는 달리 잘 드러나지 않는데(Fig. 4) 아마도 화성기반을 투과할 수 있을 만큼 강한 펄스를 생성시키지 못한 작은 용량(690 in³)의 에어 건 파원 때문일 수도 있으며 아니면 이 곳에서 해저면 확장과 관련된 화산작용이 남동대륙붕에서의 규모에 미치지 못했을 수도 있다. MCS 자료를 t-g HVF (t-g hyperbolic velocity

filtering) (Jou *et al.*, 1996)로써 처리한 결과는 일반적인 처리후의 결과보다 더 나은 기반구조의 영상을 보여주는데(Fig. 12) 회절신호를 상당히 감소시켰을 뿐만 아니라 기반아래의 반사신호를 드러낸다. 다른 화산성대륙주변부(e.g., Mutter *et al.*, 1988)에서 관찰되는 것만큼 뚜렷하지는 않지만 자료처리후 기반아래의 반사신호는 SDR의 특징으로서 굽어지고 off-lap하는 층서를 보여준다.

후열도 지역에서, 약권의 용승은 또한 섭입하는 슬랩(slab)에 의해서도 유도된다. 라우 분지(Lau Basin)에 대한 최근의 지진파 연구와(Zhao *et al.*, 1997) 수

치모델링에서(Conder *et al.*, 2002) arc의 반대편인 서쪽에 용승과 용융이 더 많이 일어나서 맨틀대류가 비대칭적임을 볼 수 있다. 이 결과는 부분적으로 한반도의 주변부에서 많은 양의 용융이 발생하였음을 설명할 수 있다. 약권의 용승결과 울릉분지의 지각이 정상보다 더 두껍게 맨틀온도가 정상보다 더 뜨거워졌을 수 있다. 동해에서 화산암의 지화학 분석이 많이 수행된 바는 없지만 S'edin and Sato (1996)의 결과는 울릉분지가 동해 전체에서 피크라이트 현무암(picritic basalts)이 채취된 유일한 곳임을 보여 준다. 이 현무암은 동해에서 MgO(>10%)의 함량이 가장 높고 Na₂O (>2.5%)의 함량이 가장 낮는데 약권의 온도가 높음을 지시한다; 반면에 일본분지와 야마토분지, 그리고 야마토 뱅크와 같이 다른 곳에서 얻은 화산암은 전형적으로 후열도 분지 솔라이트 및 island-arc형 화산암으로 분류된다. 울릉분지의 화산작용은 기반이 형성된 후 중기 마이오세까지 지속되었으므로 그 위에 화산맥/류-퇴적물 복합체를 두껍게 퇴적시켰다(Lee *et al.*, 2001). 리프팅에 의해 유도되는 대류는 정상보다 뜨거운 맨틀온도를 필요로 하지 않으며 상대적으로 지속되는 기간이 짧다. 따라서 한반도의 주변부와 울릉분지에서 발생한 화산작용을 설명하기 위해서는 슬랩에 의해 유도되는 약권의 대류가 지역적으로 강화된 것 역시 고려해야 한다고 본다.

6. 결 론

탄성파 프로파일, 수심자료, 그리고 자력자료를 분석하여 한반도의 동쪽 대륙주변부에서 리프팅과 해저면 확장 그리고 동해의 형성에 대한 과정을 해석하였다. 한반도의 주변부를 따라서 리프트 분지, 융기된 리프트 측면부, 그리고 가파른 대륙사면이 연속적으로 나타난다. 하지만 북쪽과 남쪽지역간에 대조적인 리프팅 양상을 인지할 수 있다. 북쪽 지역의 경우 한국대지가 상대적으로 넓은 지각의 신장지역을 제공하여 다수의 리프트가 형성되었다. 한국대지에 형성된 두 개의 잘 드러나는 리프트분지로서 온누리과 반달 분지는 그 경계가 큰 변위를 갖는 synthetic 단층과 더 작은 규모의 antithetic 단층으로 이루어져 대칭적인 구조를 갖는다. 이들 분지의 주 경계단층지역은 주향방향으로 지그재그 배열방식으로 형성되어 있지만 융기된 리프트 측면부는 바다방향의 바깥쪽에 나타난다. 이에 반해, 한국대지의 남쪽에서 리프팅은 좁은 지역에서 발생하여 하나의 길고 좁은 비대칭적인 반지구의 리프트 분

지인 후포분지가 형성되었다. 리프팅동안 화산작용은 거의 발생하지 않은 것으로 해석되지만 이후 지각의 분리와 해저면 확장초기에는 강렬한 화산작용이 수반되었다. 이러한 화산작용은 리프팅에 의해 유도되는 맨틀내 대류와 약권의 상승에 의해 형성되는 과도한 용융물질의 영향을 반영한다고 볼 수 있다. 한반도(의 가까이)로부터 일본열도는 주로 남동방향으로 떨어져 나갔는데 일본열도 아래로 북서방향으로 섭입하는 태평양판의 운동과 관련된 것으로 해석된다. 한반도 주변부의 구조적 진화와 화산작용은 비활성대륙주변부의 진화과정과 잘 부합되며 화산작용은 후열도 환경에서 약권의 용융에 의해 영향을 받았다고 볼 수 있다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원의 기본사업(PE97006)과 해양수산부 사업(PM37500)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- Anderson, D.L., Tanimoto, T., and Zhang, Y.-S. (1992) Plate tectonics and hot spots: the third dimension. *Science*, v. 256, p. 1645-1650.
- Chang, K.H., Woo, B.G., Lee, J.H., Park, S.O., and Yao, Y. (1990) Cretaceous and early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang Basin, S. Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 26, p. 471-487.
- Chang, T.W. and Choo, C.O. (1999) Faulting processes and K-Ar ages of fault gouges in the Yangsan fault zone. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, v. 20, p. 25-37.
- Cho, H.M., Kim, H.J., Jou, H.T., Hong, J.K., and Baag, C.E. (2004) Transition from rifted continental to oceanic crust at the southeastern Korean margin in the East Sea (Japan Sea). *Geophys. Res. Lett.*, v. 31, GL019107.
- Chough, S.K. and Lee, K.E. (1992) Multi-stage volcanism in the Ulleung back-arc basin, East Sea (Sea of Japan). *Island Arc* v. 1, p. 32-39.
- Conder, J.A., Wiens, D.A., and Morris, J. (2002) On the decompression melting structure at volcanic arcs and back-arc spreading centers. *Geophys. Res. Lett.*, v. 29, GL015390.
- Currie, R.G. and Davis, E.E. (1994) Low crustal magnetization of the middle valley sedimented rift inferred from sea-surface magnetic anomalies. *Proc. Ocean Drill. Prog. Sci. Res.*, v. 139, p. 19-127.
- Eldholm, O. and Grue, K. (1994) North Atlantic volcanic margins: Dimension and production rates. *J. Geophys. Res.*, v. 99, p. 2955-2968.
- England, P. (1983) Constraints on extension of continental lithosphere. *J. Geophys. Res.*, v. 88, p. 1145-1152.
- Jolivet, L., Tamaki, K., and Fournier, M. (1994) Japan Sea,

- opening history and mechanism: A synthesis. *J. Geophys. Res.*, v. 99, p. 22,237-22,259.
- Hayashida, A., Fukui, T., and Torii, M. (1991) Paleomagnetism of the early Miocene Kani Group in southwest Japan and its implications for the opening of the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, v. 18, p. 1095-1098.
- Jou, H.T., Kim, H.J., Suh, J.H., and Youn, O.K. (1996) A new slant-stack technique based on hyperbolic statistics. *J. Seism. Explor.*, v. 5, p. 203-212.
- Keary, P. and Vine, F.J. (1990) *Global tectonics*. Blackwell Sci. Publishers, 302p.
- Keen, C.E. and Potter, D.P. (1995) The transition from a volcanic to a nonvolcanic rifted margin off eastern Canada. *Tectonics*, v. 14, p. 359-371.
- Kim, H.J., Han, S.J., Lee, W.H., and Huh, S. (1999) Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea (Japan Sea). *Marine Geophys. Res.*, v. 20, p. 219-237.
- Kim, H.J., Jou, H.T., Cho, H.M., Bijwaard, H., Sato, T., Hong, J.K., Yoo, H.S., and Baag, C.E. (2003) Crustal structure of the continental margin of Korea in the East Sea (Japan Sea): evidence for rifting affected by the hotter than normal mantle. *Tectonophysics*, v. 364, p. 25-42.
- Kimura, J.-I., Kunikiyo, T., Osaka, I., Nagao, T., Yamauchi, S., Kakubuchi, S., Okada, S., Fujibayashi, N., Okada, R., Murakami, H., Kusano, T., Umeda, K., Hayashi, S., Ishimaru, T., Ninomiya, A., and Tanase, A. (2003) Late Cenozoic volcanic activity in the Chugoku area, southwest Japan Arc during back-arc basin opening and reinitiation of subduction. *Island Arc*, v. 12, p. 22-45.
- Kluas, A., Taylor, B., Moore, G.F., Murakami, F., and Okamura, Y. (1992) Back-arc rifting in the Izu-Bonin Island Arc: Structural evolution of Hachijo and Aoga Shima Rifts. *Island Arc*, v. 1, p. 16-31.
- Kuramoto, S., Tamaki, K., Langseth, M.G., Nobes, D.C., Tokuyama, H., Pisciotto, K.A., and Taira, A. (1992) Can Opal-A/Opal-CT BSR be an indicator of the thermal structure of the Yamato Basin, Japan Sea? *Proc. Ocean Drill. Prog. Sci. Results*, v. 127/128, pp. 1145-1151.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Han, S.J., and Kim, D.C. (2001) Seismic stratigraphy of the deep Ulleung Basin in the East Sea (Japan Sea) back-arc basin. *Marine and Petroleum Geology*, v. 18, p. 615-634.
- Lee, G.H., Kim, H.J., Jou, H.T., and 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). *Geophys. Res. Lett.*, v. 30, GL018670.
- Lee, J.S. and Poulet, A. (1988) Tectonic evolution of the Asian margin since Cretaceous: implication from the geochemistry and the geochronology of volcanism in the Korean Peninsula. *C.R. Acad. Sci. Paris*, v. 307, p. 1405-1411.
- Lee, Y.S., Ishikawa, N., and Kim, W.K. (1999) Paleomagnetism of Tertiary rocks on the Korean Peninsula: tectonic implications for the opening of the East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, v. 131, p. 131-149.
- Liu, G.D. (1987) The Cenozoic rift system on the North China Plain and the deep internal processes. *Tectonophysics*, v. 133, p. 277-285.
- Matsuda, K. (1979) Collision of the Izu-Bonin Arc with central Honshu: Cenozoic tectonics of the Fossa Manga, In Uyeda, S. *et al.* (eds.) *Geodynamics of the western Pacific*, Center for Acad. Pub., Japan, p. 409-421.
- Mutter, J.C., Buck, W.R., Zehnder, C.M. (1988) Convective partial melting: I. A model for the formation of thick basaltic sequences during the initiation of spreading. *J. Geophys. Res.*, v. 93, p. 1031-1048.
- Otofujii, Y. (1996) Large tectonic movement of the Japan Arc in late Cenozoic times inferred from paleomagnetism: Review and synthesis. *Island Arc*, v. 5, p. 229-249.
- Purdy, G.M. (1986) Seismic structure of the oceanic crust. In Vogt, P.R. and Tucholke, B.E. (eds.) *The Western North Atlantic Region*, Geol. Soc. Am., p. 313-330.
- Rosendahl, B.R. (1987) Architecture of continental rifts with special reference to East Africa. *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. Lett.*, v. 15, p. 445-503.
- Ryu, J.M., Han, C.S., 1996, Marine geology - stratigraphy. In Paek, R.J. *et al.* (eds.) *Geology of Korea*. The Institute of Geology, State Academy of Sciences, DPR of Korea, p. 391-408.
- S'edin, V.T. and Sato, H. (1996) Volcanic rocks. In Isezaki, N. *et al.* (eds.) *Geology and geophysics of the Japan Sea*. Japan-USSR Monograph Series, v. 1, p. 353-368.
- Sillitoe, R.H. (1977) Metallogeny of an Andean type continental margin in South Korea: Implications for opening of the Japan Sea. In Talwani, M. and Pitman, W.C. (eds.) *Island Arcs, deep sea trenches and back arc basins*. Am. Geophys. Union, Maurice Ewing Series, v. 1, p. 303-310.
- Skogseid, K. and Eldholm, O. (1987) Early Cenozoic evolution crust at the Norwegian continental margin and the conjugate Jan Mayan Ridge. *J. Geophys. Res.*, v. 92, p. 11,471-11,491.
- Smith, A.D. (1998) The geodynamic significance of the DUPAL anomaly in Asia. In Flower, M.F.J. *et al.*, (eds.), *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*. Am. Geophys. Union, Washington D.C., p. 89-105.
- Son, M., Kim, I.S., and Sohn, Y.K. (2005) Evolution of the Miocene Waup Basin, in response to dextral shear along the southwestern margin of the East Sea (Sea of Japan). *J. Asian Earth Sciences*, v. 25, p. 529-544.
- Su, W., Mutter, C.Z., Mutter, J.C., and Buck, W.R. (1994) Some theoretical predictions on the relationships among spreading rate, mantle temperature, and crustal thickness. *J. Geophys. Res.*, v. 99, p. 3215-3227.
- Suk, B.C. (1989) Quaternary sedimentation processes, structures and sea level changes in the East China Sea, the Yellow Sea and the Korea-Tsushima Strait regions. Ph.D. Thesis, Univ. of Tokyo, 246p.
- Tamaki, K. (1988) Geological structure of the Japan Sea and its tectonic implications. *Bull. Geol. Surv. Japan*, v. 39, p. 269-365.
- Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle Jr., J.C., and Pisciotto, A. (1992) Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP Drilling. *Proc. Ocean Drill. Prog. v.*

- 127/128, p. 1333-1348.
- White, R.S., Westbrook, G.K., Fowler, S.R., Spence, G.D., Barton, P.J., Joppen, M., Bowen, A.N., Prestcott, C., and Bott, M.H.P. (1987) Hatton Bank (northwest U.K.) continental margin structure. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 89, p. 265-272.
- Wright, I.C. (1997) Morphology and evolution of the Remnant Colville and Active Kermadec Arc Ridge south of 33°30'S. *Marine Geophys. Res.*, v. 19, p. 177-193.
- Yoon, S. (1992) Geology of the Tertiary Yangnam and Pohang Basins, Korea. *Bull. Mizunami Fossil Museum*, v. 19, p. 13-31.
- Yoon, S.H. (1994) The eastern continental margin of Korea: seismic stratigraphy, geologic structure and tectonic evolution. Ph.D. Thesis, Seoul Nat'l Univ, Korea. 235p.
- 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). *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 107, p. 83-97.
- Zhao, D., Xu, Y., Wiens, D.A., Dorman, L., Hildebrand, J. and Webb, S., 1997. Depth extent of the Lau back-arc spreading center and its relation to subduction processes. *Science*, v. 278, p. 254-257.

2005년 10월 21일 원고접수, 2006년 6월 19일 게재승인.