

동해 한국대지 내 지각분리 부정합면의 존재와 지구조적 의미

김한준^{1*} · 이광훈² · 주형태¹

¹한국해양과학기술원 해양방위센터

²부경대학교 에너지자원공학과

The Presence of the Breakup Unconformity in the Korea Plateau in the East Sea and its Tectonic Implications

Han-Joon Kim^{1*}, Gwang Hoon Lee², and Hyeong-Tae Jou¹

¹Matime Security Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology

²Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

서 론

한국대지(Korea Plateau)는 울릉분지의 북쪽에 위치한 고지형대로서 동해가 후열도해로서 형성되기 시작할 때 한반도의 대륙주변부에서 리프팅이 발생한 대륙지각의 조각이다(Fig. 1) (Kim *et al.*, 2007). 한국대지는 리프트분지들과 이들을 둘러싸고 있는 고지형대로 이루어져 있다. 한국대지에서 가장 두드러진 리프트분지는 반달분지(Bandal Basin)인데 용기된 리프트 측면부가 북동-남서 방향으로 발달한 것은 이 분지가 북서-남동 방향으로 확장되었음을 지시한다(Fig. 1). Kim *et al.* (2007)은 다중채널 탄성과 자료로부터 한국대지의 리프트구조가 동해의 열림과 관련되어 형성되었다고 해석하였다. 그들은 특히 반달분지의 북서-남동방향의 확장이 울릉분지의 열림 직전에 진행된 대륙지각 리프팅의 최종단계를 나타내며 한반도의 대륙주변부는 후열도해에 속하지만 그 지구적 진화과정은 비활성 대륙주변부에서 발생하는 것과 매우 유사하다고 제시하였다. 대륙지각이 분리되고 새로운 해양지각이 형성된 비활성 대륙주변부의 경우 리프트가 일어난 시기(syn-rift)에 쌓인 퇴적층의 상부 경계면이 용기에 의해 대기에 노출된 후 침식을 받아서 부정합을 이루고 있는 것이 보고되고 있다(e.g., Braun and Beaumont, 1989). 이러한 부정합은 지각분리 부정합(breakup unconformity)으로 불리며 비활성 대륙주변부의 특징 중 하나로서 인식된다(e.g., Falvey, 1974).

이 연구에서는 한국대지 내 반달분지에 쌓인 퇴적층내에 존재하는 지각분리 부정합을 설명하고 이와 관련한 지구조적 운

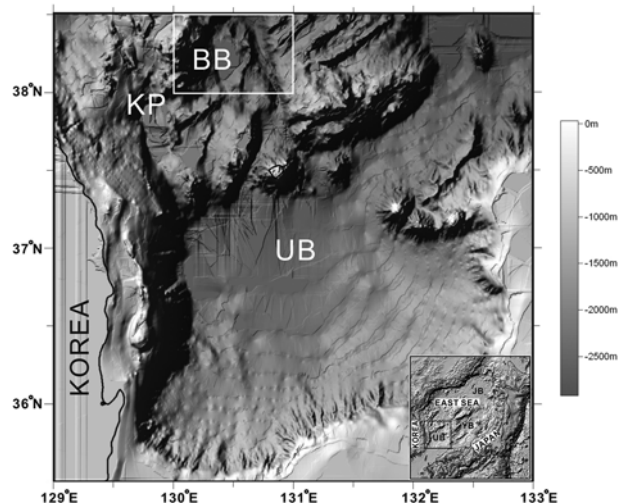


Fig. 1. Shaded bathymetry of the eastern margin of Korea in the East Sea. UB = Ulleung Basin, KP = Korea Plateau, and BB = Bandal Basin. The rectangle at the KP shows the area where MCS data were obtained (see Fig. 2). The physiography of the East Sea is shown in the inset in the lower right corner.

동을 해석하였다.

자 료

이 연구에서 사용한 다중채널 탄성과 자료는 한국해양과학기술원이 1999년에 56 채널의 스트리머와 690 in³의 에어 건을 이용하여 반달분지의 구조를 파악하기 위해 획득한 것이다(Fig. 2). 발파간격과 채널간격은 각각 50 m와 25 m이므로 중합도는 14이다. 자료의 처리과정은 편집, 속도분석, 중합, 주파수 필터링, 그리고 45° 유한차분법을 이용하는 구조보정까지 일반적인 방법으로 구성하였다.

2012년 10월 18일 접수; 2012년 11월 08일 수정; 2012년 11월 14일 채택;
*Corresponding author

E-mail: hanjkim@kiost.ac

Address: Korea Institute of Ocean Science and Technology,
Ansan P.O. Box 29, 425-600 Korea

자료해석 및 토의

반달분지내의 지각분리 부정합면

반달분지의 기반은 많은 수의 정단층에 의해 잘려 있지만 전체적으로는 동쪽과 서쪽에서 마주보면서 형성된 여러 개의 정단층으로 이루어진 대칭적인 구조를 보여 준다(Fig. 2). 음향기반위에 쌓인 퇴적층은 주된 부정합면과 퇴적특성에 따라 아래로부터 층서단위 3, 2, 그리고 1의 세 개로 구분할 수 있다.

층서단위 3은 전체적으로 썩기모양을 이루고 있으므로 하반이 기울어지고 내려 앉을 때 퇴적된, 즉, 리프트와 동시에 퇴적된 단위임을 알 수 있다. 층서단위 3을 구성하는 반사신호들은 연결성이 낮거나 불량하며 진폭의 변화도 클 뿐만 아니라 부분적으로 울퉁불퉁하며 내부구조를 볼 수 없는 카오틱(chaotic)한 특징을 보여 준다. 이러한 것은 층서단위 3이 주로 토설류(debris flow)와 사태(slide)/함몰(slump)로 이루어져 있으며 용기된 리프트 측면부로부터 떨어져 나온 퇴적물이 혼합되어 있기 때문으로 해석된다. 층서단위 3과 달리 층서단위 2는 수평방향으로 연결성이 매우 좋은 반사신호로 구성되어 있는데 이것은 일반적인 해양환경에서의 균질한 퇴적작용에 의해 형성되었음을 지시한다. 층서단위 2는 반달분지 전체에서 쌓여있으며 아래의 층서단위 3과 달리 단층에 의해 잘려진 변위를 잘 보여주지 않는다. 이것은 층서단위 3이 퇴적될 때는 단층작용을 야기한 리프팅이 계속 진행하였으나 층서단위 2의 퇴적시기에는 단층작용이 매우 약하거나 거의 발생하지 않았음을 지시한다. 리프팅과 동시에 쌓인 퇴적층의 전형적인 모양은 한 쪽이 두꺼운 썩기모양인데 층서단위 3은 왼쪽이 두꺼운 썩기모양을 분명히 보여주고 있다. 따라서 반달분지의 왼쪽 경계를 이루는 단층이 가장 변위가 큰 주경계단층이며 층서단위 3은 리프팅시기 동안 쌓인(syn-rift) 퇴적층으로 해석할 수 있다. 단층에 의한 변위가 거의 존재하지 않는 층서단위 2는 리프팅 이후 형성된(post-rift) 단위로서 탄성파상으로 미루어 저에너지의 저탁류(turbidite)와 반원양성 퇴적물로 구성되어 있을 것으로 해석한다. 가장 상부의 층서단위 1은 아래의 층서단위 3과 2를 덮고 있는데 이것은 에너지가 매우 낮은 심해 퇴적작용의 특징적인 예이다.

지구조적 의미

1980년대까지 울릉분지의 하부에 존재하는 지각이 늘어난 대륙지각인지 새로 형성된 해양지각인지는 대해서는 연구가 수행되지 않았다. 동해의 열림에 대한 우세한 설명은 당겨열림(pull-apart opening)모델로서 일본열도가 아시아대륙에서 남쪽 방향으로 병진함으로써 동해가 열렸다고 보는 것이다(Fournier 외 1994). 이 모델에서는 울릉분지는 일본열도 아래의 대륙지각이 늘어나서 형성되었다고 가정하였다. 하지만, 1990년대에 해저면 지진계를 이용한 심부탄성파를 울릉분지와 한반도의 대륙붕/대륙사면 아래의 지각을 대상으로 수행한 결

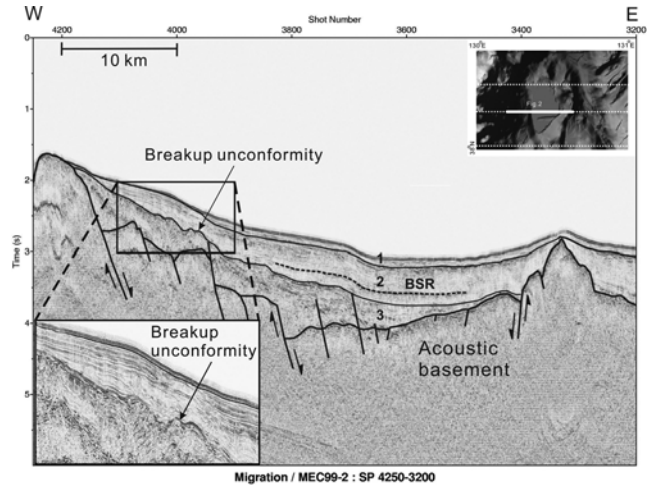


Fig. 2. Multichannel seismic profile of 99-3. The location of the profile is shown in the inset in the upper right corner. See Fig. 1 for location. The inset in the lower left corner is the enlarged portion of the profile in the rectangle.

과는 울릉분지 하부의 지각이 정상적인 해양지각 보다 2~3 km 더 두꺼우나 그 특성상 분명히 해양지각임을 제시하였다(Kim et al., 2003). 즉, 오늘날 한반도의 주변부에서 대륙지각의 리프팅과 해저면 확장이라는 두 가지의 단계를 통해 일본열도의 지각이 분리되어 새로운 울릉분지를 구성하는 해양지각이 형성되고 일본열도는 한반도로부터 떨어져 나갔다고 볼 수 있다. 정상보다 더 두꺼운 해양지각은 맨틀의 온도가 정상보다 더 높을 때에 생겨난다(Su et al., 1994). Kim et al. (2007)은 한반도의 대륙주변부에서 약권의 용승(upwelling)과 리프팅에 의해 유도된 대류 때문에 맨틀의 온도가 정상보다 더 높아서 울릉분지의 해양지각이 정상보다 더 두꺼운 것으로 제시하였다. 후열도해에서 섭입하는 판 위에서 약권의 용승은 쉽게 발생한다. 더욱이, 섭입하는 해양지각의 암권으로부터 많은 양의 물이 맨틀내로 유입되는데 그에 따라 맨틀 내의 대류가 더 강화되고 후열도해에서 해양지각이 상대적으로 얇은 곳에서 형성됨으로써 해양지각의 두께도 증가시킨다(Kelley et al., 2006). 따라서 울릉분지와 같은 후열도분지에서 해양지각은 정상보다 2~3 km 더 두꺼울 수 있다.

지각분리 부정합은 대륙지각의 리프팅과 분리 그리고 해양지각의 형성을 동반하는 해저면 확장이 일어난 비활성 대륙주변부의 여러 곳에서 보고된 바 있다(e.g., Falvey, 1974). 반달분지내에서 층서단위 3과 층서단위 2의 경계는 침식면의 상태로 나타나는 지각분리 부정합이며(Fig. 2) 이것은 반달분지의 기반이 용기하여 침식을 받았음을 지시한다. 기반의 용기는 일반적으로 암권이 얇아지고(necking) 쪼개지는 동안 질량이 재배치되는 것을 보상하려는 지각평형의 결과로 해석된다(Braun and Beaumont, 1989). 이러한 지각평형은 리프트분지의 측면부를 용기시킬 수도 있다. 반달분지의 경우, 위에서 봤을 때 측면부가 분명히 바다쪽으로 볼록한 호상으로 용기된 것을 볼

수 있는데 이것은 Rosendahl (1987)이 정의한 바대로 신장력에 의해 대륙지각에서 형성되는 리프트구조의 기본적인 유형이다. 한국대지에서 대륙지각의 리프팅에 의해 형성된 리프트 분지인 반달분지에서 지각분리 부정합면이 존재한다는 사실은 리프팅 이후 지각의 분리가 발생하고, 이어서 해양지각이 생겨나기 시작하여 울릉분지가 형성되었음을 의미하며 Kim *et al.* (2007)이 제시한 동해의 열림모델이 타당함을 나타낸다. 섭입대에서 후열도해를 형성시키는 신장력은 매우 다양하게 발생하지만 해구의 후퇴(trench rollback)가 주 원인으로 간주된다.

결 론

다중채널 탄성과 프로파일은 한국대지내 리프트 분지인 반달분지의 퇴적층내에 침식면이 있음을 보여 준다. 이 침식면의 아래는 정단층 작용을 일으키는 리프팅과 동시에 쌓인 퇴적층이 존재하고 그 위에는 리프팅이 완료된 후 쌓이는 퇴적층이 존재한다. 리프팅후 대륙지각이 분리되어 새로운 해양지각이 생기기 직전에 리프팅에 의해 얇아진 대륙지각에서 발생하는 지각평형 때문에 반달분지의 기반이 융기되어 침식되었음을 추론할 수 있다. 따라서 반달분지에서 발견된 부정합은 지각분리 부정합에 해당하며 동해가 열릴 때 리프팅은 오늘날 한국대지를 비롯한 한반도 주변부의 대륙지각내에서만 발생하였고 그 이후 일본열도와 한반도의 대륙지각이 분리되어 새로운 해양지각이 형성되어 일본열도가 한반도에서 멀어졌음을 지시한다. 리프트구조와 지각분리 부정합이 보존되어 있는 한반도의 대륙주변부는 비록 후열도환경에서 지구조적 운동을 받았지만 전형적인 비활성 대륙주변부의 형성과정에 의해 진화하였다고 볼 수 있다.

감사의 글

이 연구는 기상기술개발관리단의 지원(CATER 2012-8100)

으로 수행되었다.

참고문헌

- Braun, J. and Beaumont, C., 1989, A physical explanation of the relation between flank uplifts and the breakup unconformity at rifted continental margins, *Geology*, **17**, 760-764, doi: 10.1130/0091-7613 (1989).
- Falvey, D. A., 1974, The development of continental margins in plate tectonic theory, *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, **14**, 95-106.
- Fournier, M., Jolivet, L., Huchon, P., Sergeev, K. F., and Osorbin, L. S., 1994, Neogene strike-slip faulting in Sakhalin and the Japan Sea opening, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 2701-2725.
- Kelley, K. A., Plank, T., Grove, T., Stolper, E. M., Newman, S., and Hauri, E., 2006, Mantel melting as a function of water content beneath back-arc basins, *J. Geophys. Res.*, **111**, doi: 10.1029/2005JB003732.
- Kim, H. J., Jou, H. T., Cho, H. M., Harmen, B., 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) 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., 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.
- Rosendahl, B. R., 1987, Architecture of continental rifts with special reference to East Africa, *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. Lett.*, **15**, 445-503.
- Su, W., Mutter, C. Z., and Buck, W. R., 1994, Some theoretical predictions on the relationships among spreading rate, mantle temperature, and crustal thickness, *J. Geophys. Res.*, **99**, 3215-3227.