

독도 주변해역의 지구구조와 퇴적환경

허식¹⁾, 박찬홍¹⁾, 유해수¹⁾, 한상준¹⁾

¹⁾한국해양연구원 해저환경 · 자원연구본부, sikhuh@kordi.re.kr

Geological Structure and Depositional Environments in the Dok Island, East Sea

Sik Huh¹⁾, Cha-Hong Park¹⁾, Hai-Soo Yoo¹⁾, Sang-Joon Han¹⁾

¹⁾Marine Geoenvironment & Resources Research Division, KORDI

요약 : 독도 주변 해역에는 최대 3 km 두께의 퇴적층이 화산활동에 의해 변형된 기반암 위에 집적되어 있다. 지질구조로는 기반암에 분지 형성 시기에 생성된 정단층이 우세하게 나타나는 반면, 퇴적층 내에는 화산활동에 의한 정단층, 화산돔 및 화산수평맥 등이 우세하게 관찰된다. 이들의 각 시대별 분포로부터 울릉분지에서는 북동쪽(독도 방향)으로 가면서 화산활동이 활발했음을 알 수 있다. 퇴적층이 집적되기 전인 초·중기 마이오세 이전에 조사지역은 확장성 지각변형이 우세했으며, 후기 마이오세 말기 이후에는 지하내부의 화산체 활동 및 분지의 침강 등의 지구구조 운동에 의해 변형되어 현재와 같은 복잡한 구조의 분지를 형성하였다.

주요어 : 동해, 울릉분지, 독도, 탄성파 층서, 화산활동, 정단층.

Abstract : A maximum of 3 km thickness of sediments were deposited above basement deformed by volcanic activities around the Dok Island. As the geological structure, the tension caused the basement-involved normal faults in the early stage of basin formation, whereas the sediment layers showed normal faults, volcanic domes and sills caused by volcanic activities. From the distribution of volcanics in order of age at the Ulleung Basin, volcanic activities were increased toward the northeastern direction(toward Dok Island). The study area is characterized by extensional crustal deformation before sediment deposition during the Early or Middle Miocene age. After the Late Miocene age, the basin was deformed by deep buried volcanics or subsidence of basin, in consequence, became complex geological structures.

Keywords : East Sea, Ulleung Basin, Dok Island, seismic stratigraphy, volcanic activity, normal fault.

1. 서론

동해는 평균 수심 2,000 m 이상의 대수심 해역으로서 한국, 일본, 러시아로 둘러싸여 있는 지역으로 지정학적으로는 배타적 200 해리 경제수역(EEZ) 경계 설정과 관련되어 첨예한 대립이 현안으로 남아있다. 아울러 지질학적으로는 활발한 지각운동이 일어나고 있

는 환태평양 화산 및 지진대에 접한 전형적인 후열도분지(back-arc basin)이다. 한국해양연구원은 “한국 대수심 해역의 지구적 해저환경 연구” (한상준 등, 1996), “동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구” (한상준 등, 1997) 및 “배타적 경제 수역 해양자원조사” (유해수 등, 1997, 1998) 등의 사업을 통해서 한반도 주변해역과 울릉분지를 대상으로 지질·지구물리학적인 연구가 체계적으로 수행하여, 동해의 지형, 퇴적 및 지구조적 진화, 제4기 고환경변화 등을 규명하였다.

독도는 울릉도와 함께 약 460만년~250만년전 사이에 알칼리 화산활동에 의해서 형성된 것으로 해석된다(손영관, 박기화, 1994). 울릉도와 제주도의 성인은 지각판의 섭입에 의해서 형성된 호상열도와는 구별되는 열점(hot spot)에 의한 화산활동결과 형성된 것으로 알려져 있다. 해수면상에 노출된 독도의 생성 시기가 신생대 제3기 플라이오세 전기부터 후기로서, 화산활동 시기는 독도가 울릉도보다 백만년~이백만년 앞서 일어난 것을 알 수 있다. 울릉도는 후기 플라이스토세와 홀로세 동안에도 폭발적인 화산분출이 일어난 것이 보고 되었으나 독도의 폭발적인 화산분출의 증거는 아직 관찰되지 않고 있다. 울릉도와 독도는 화산체의 규모가 거의 유사하나(박찬홍 등, 2000), 독도는 울릉도의 육지 부분만큼의 면적 차이를 보이거나 독도는 해수면하의 화산체의 규모가 울릉도와 거의 동일하다. 독도 근해의 중요성은 다양한 해저 지하자원 매장, 조업 어선의 보호처(태풍의 피항지, 어선의 보급, 휴식처), 관광지, 청정 수역인 독도 어장의 풍부한 어획량 때문이다.

본 연구에서는 다중채널 탄성과 탐사에 의한 독도 주변 해역의 심부 지층구조와 퇴적층의 연대, 구조 및 층서 해석을 통해 시대별 퇴적환경을 분석하여 화산체의 형성과 진화 과정을 해석하였다. 또한 일본측 대륙사면의 자료가 부족하기는 하지만 독도 주변 해역의 대륙붕 형성 및 독도 해저 기반암의 연장성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 내용

독도 주변 해저분지의 기반암 위에 퇴적된 복잡한 지층의 형성연대를 추정하기 위해 울릉분지 남동쪽 제 6-1광구 돌고래 시추공에서 설정된 시간층서에 대비하였다. 또한 오키뱅크에서 수행된 심해저 굴착자료(ODP)를 이용하여 기반암의 연대 및 탄성과 층서에 관한 자료를 수집하였다. 탄성과 자료간의 대비에는 한국석유공사가 1987년에 획득한 11개 축선 및 한국해양연구원에서 1994년부터 취득한 축선자료를 사용하여 독도 주변부의 지체 및 지질구조를 밝혔다.

울릉분지에는 두꺼운 퇴적층 및 간헐적으로 퇴적층내에 관입 혹은 분출되어 협재된 화산체들이 특징이다. 음향기반암 상부의 퇴적층후는 울릉분지 중앙부에서 약 2.5-3.0초의 두께로 일본분지(약 2.2초)나 야마토분지(약 1.6초) 보다 훨씬 두껍다. 퇴적층은 울릉분지 해저 확장축으로 예상되는 북동-남서 방향의 중심을 따라 남서부에서 북동부 쪽으로 가면서 점차 얇아진다. 또한 기반암이 거의 노출되어 있거나 얇은 퇴적층으로 피복되어 있는 후포뱅크 등의 동해연안, 한국대지, 독도, 울릉도, 울릉해저화산, 울릉분지간 통로 화산, 오키뱅크 부근으로 가면서 퇴적층은 1.0초 이하로 얇아진다. 반면에 울릉분지간 통로 쪽으로는 1.5초 이상으로 다시 두꺼워지고, 특히 울릉분지 남동부의 대륙사면에서 3.5초 이상으로 두꺼워진다. 이와 같이 울릉분지 중심부에서의 두꺼운 퇴적층은 분지가 확장되면서 급속히 침강할 때 울릉분지 주변에서 사태 등에 의해 퇴적물이 급속히 유입되어 형성된 것으로 추정된다. 울릉분지 중앙부에는 해저확장과 연관되어 있으리라 추정되는 화산활동에 의한 기반암 상승부가 북동-남서 방향으로 발달되어 있는데 이 축을

중심으로 좌우측의 분지가 서로 다르게 나타난다. 이 기반암 상승부는 울릉분지 확장시 새로운 해저지각의 형성과 관련이 있으며, 확장 초기에 선형의 구조선을 따라 일어난 화산활동의 결과이다.

퇴적층의 각 시대별 분포로부터 울릉분지에서는 북동쪽으로 가면서(독도 방향) 화산활동이 활발했음을 알 수 있다. 퇴적층이 두껍게 쌓인 퇴적물 집적지는 독도 남부 해역, 울릉분지간 통로, 울릉도-독도 사이의 해역에 위치하는데, 이곳에서는 다수의 현생 해저수로 및 고해저수로 구조와 질량류에 의한 퇴적상을 보인다. 이와 같이 울릉분지내에서는 기원요소에 따라서 쇄설성 퇴적물이 비대칭적으로 분포함을 알 수 있는데, 남쪽 대륙 연변부에서의 퇴적작용은 해양분지의 비활성 대륙주변부(passive margin)의 특징을 보여주는 반면에 북쪽 분지에서는 화산작용에 의해 유래된 퇴적작용이 활발하다. 울릉분지 북동부에서는 해저화산이 화산기원 퇴적물의 중요한 기원이다. 이러한 연차적 진화 과정은 북쪽으로 화산관입 운동이 이동하였음을 보여주며, 결과적으로 화산작용이 북쪽으로 가면서 젊어지고 있음을 잘 설명해 준다. 따라서 남쪽의 화산암류와 화산수평맥은 해저확장 과정으로부터 야기되어 북동-남서 방향의 분절된 균열을 통해 공급되었으리라 추정할 수 있다(Lee, 1992).

독도 북서부 해역(울릉도와 독도 사이 해역)에는 최대 3 km 두께의 퇴적층이 화산활동에 의해 변형된 불규칙한 기반암 위에 집적되어 있다(Fig. 1). 이 지역은 많은 화산체 활동 증거가 탄성과 단면도에 나타남으로써, 이로 인한 동해 생성 후 퇴적환경 변화를 규명하고 퇴적구조를 파악하는데 도움을 주고 있다. 기반암에는 분지 형성 시기에 생성된 정단층이 우세하게 나타나는 반면, 퇴적층내에는 화산활동에 의한 정단층, 화산돔 및 화산수평맥 등이 우세하게 관찰된다. 또한, 중기 마이오세를 경계로 하여 상층부와 하층부가 서로 다른 정단층 형태를 보여줌으로써 울릉분지의 발달사에 중요한 단서를 제공하고 있다. 조사지역은 퇴적층이 집적되기 전인 초·중기 마이오세 이전에 확장성 지각변형이 우세했으며, 후기 마이오세 말기 이후에는 지하내부의 화산체 활동 및 분지의 침강 등의 지구조 운동에 의해 변형되어 현재와 같은 복잡한 구조의 분지를 형성하였다. 또한, 고화된 상태의 퇴적물들은 화산암의 분출 및 관입에 의해 열변질작용을 받아 상당히 변성되어 있을 것으로 추정된다.

독도 주변 해역에는 화산활동에 의한 화산수평맥, 화산둔덕 및 화산돔 등이 발달되어 있다. 특히 조사 해역의 해저화산들은 대체적으로 플라이오세 이후에 형성된 것들이다. 화산체 형태로는 기반암 상승부(basement high)를 형성하는 화산체의 수직운동과 관련된 화산돔, 기반암 생성시 형성된 화산수평맥, 그리고 각 지층에 존재하는 화산둔덕 등이다. 이러한 화산체 활동은 제4기까지의 거대한 운동으로, 이후에 퇴적된 퇴적물을 상승시키거나 채움의 형태로 퇴적시키는 데에 중요한 역할을 했다. 특히 이 탄성과 단면도상에는 3번의 화산수평맥이 협재되어 있음을 알 수 있다.

독도 주변의 해저화산들은 화산 상부 퇴적물들의 불규칙적인 형태로 보아 해저화산이 생성될 당시의 퇴적층들을 보존하고 있다. 열적 침강에 따른 퇴적암의 퇴적과 그 이후의 화산활동에 의해 퇴적암 내에 무수한 정단층들이 형성되었다. 제4기까지 계속되는 화산활동에 의한 퇴적물 상승 및 화산수평맥의 운동, 퇴적물 하중에 의한 침강 등에 의해 복잡한 기반암 구조를 가진 분지를 형성하였다.

독도 남부 및 북서부 해역의 정단층은 기반암 상승부 근처에서 많이 관찰되고, 퇴적물의 하중에 의해 대륙붕과 대륙사면 근처에서 생성되었다. 또한 대부분의 단층들은 플라이오세 초기나 말기까지 재활성되었다. 퇴적층의 두께가 두껍게 나타나는 것은 대규모 고해

저수로와 질량류에 의해 많은 퇴적물이 울릉분지 중심부로 이동하며 한국 남동 대륙붕과 대륙사면에 퇴적되었기 때문이다. 특히 퇴적층의 두께가 동쪽으로 급격히 두껍게 나타나는 것은 대규모 고해저수로와 질량류에 의해 많은 퇴적물이 울릉분지 남동 대륙붕과 일본으로부터 유입되어 울릉분지 중심부에 퇴적되었음을 암시한다.

독도 북동 해역에는 정단층과 여러 종류의 화산체 및 소규모의 완만한 배사구조 등이 특징적으로 관찰된다. 정단층은 퇴적층이 집적되기 전에 기반암을 변형시키거나, 퇴적층 내에서 화산활동에 의해 기반암 상승부 경계를 따라 후기 마이오세에 형성된 것들이다. 가장 큰 정단층들은 퇴적분지 하부에 발달한 것으로서, 단층의 낙차는 크지 않고, 북동-남서의 연장성을 갖을 것으로 추정된다. 연구지역내 퇴적분지는 분지의 하부를 이루는 여러 화산체 사이에도 다수의 정단층들이 발달하여 전체적으로는 확장성 분지의 특징을 갖고 있다. 분지의 퇴적암 내에 발달되어 있는 정단층들은 대부분 작은 낙차를 갖고 수평연장성이 짧은 소규모의 단층들로서, 주로 마이오세에 형성되어 일부는 플라이오세 초기나 말기까지 재활성된 증거를 보이기도 한다. 소규모의 배사구조는 화산활동에 의한 화산돔 위의 퇴적층 내에서 관찰되는 것으로서, 후기 마이오세에서 플라이오세 말기까지 형성된 것들이다. 단층과 화산체 분포는 대부분 퇴적분지 중앙에서 양쪽 방향으로 집중되어 있으며, 특히 기반암에 발달되어 있는 정단층은 화산활동과 분지의 침강 등에 의해 재활성화되면서 형성된 것으로 추정된다. 울릉도와 독도 사이에 있는 단층들은 대체로 기반암 형성 시기에 생성되어 후에 여러 소규모 지운동에 의해 재활성되었다. 분지의 남쪽으로 가면서 기반암은 단층보다는 화산활동에 의해 영향을 받아 기반암에 작용한 단층은 거의 보이지 않는다.

독도 주변의 해저화산들은 화산 상부 퇴적물들의 불규칙적인 형태로 보아 해저화산이 생성될 당시의 퇴적층들을 보존하고 있다. 특히 독도와 독도 남부의 해저화산 상부는 울릉도와 달리 평평한 해저면을 보이고 있어 기요(guyot)의 형태를 띄고 있다. 이는 제4기 해수면 변화를 반영하는 것으로서, 최근세 최빙기 동안에 해저화산이 해수면 위에서 침식되었거나 혹은 동일한 시기동안 해수면 아래에서 파도 등의 영향으로 침식되었을 것으로 추정된다.

독도 주변 해역에는 다양한 해저 지하자원 매장되어 있으리라 추정되는데, 동해 울릉분지에는 수심 1,500 m 해역에 6억톤 가량이 매장돼 있는 것으로 알려졌다. 특히, 경계선 확정에 매우 중요한 한국 남동 대륙붕부터 독도 주변 해역까지는 가스 하이드레이트의 부존 가망성이 매우 높다. 한국해양연구원에서는 독도에서 남서쪽으로 100 km 정도 떨어진 울릉분지 남동부에 부존되어 있으리라 추정되는 가스 하이드레이트층은 해저면하 200 m의 깊이(수심 2,050 m)에서 확인했다(허식 등, 2004). 또한 수심 1,970 m의 해저면 하부 5~15 m에 부존된 천부가스를 12 m 피스톤 코아러로 직접 채취했다.

3. 결론 및 토의

독도 주변 해역에는 최대 3 km 두께의 퇴적층이 화산활동에 의해 변형된 기반암 위에 집적되어 있는데, 돌고래 1 시추공과의 대비 결과 중기 마이오세 및 그 이후에 형성된 층으로 추정된다. 불규칙한 기반암 위에 퇴적된 퇴적층의 형성연대는 초기, 중기 및 후기 마이오세, 플라이오세, 그리고 제 4기의 5개 층으로 구분하였다. 이 지역은 많은 화산체 활동 증거가 탄성과 단면도에 나타남으로써, 이로 인한 동해 생성 후 퇴적환경 변화를 규명하고 퇴적구조를 파악하는데 도움을 주고 있다. 지질구조로는 기반암에 분지 형성 시기에 생성된 정단층이 우세하게 나타나는 반면, 퇴적층 내에는 화산활동에 의한 정단

층, 화산뚝 및 화산수평맥 등이 우세하게 관찰된다. 또한, 중기 마이오세를 경계로 하여 상층부와 하층부가 서로 다른 정단층 형태를 보여줌으로써 울릉분지의 발달사에 중요한 단서를 제공하고 있다. 퇴적층이 집적되기 전인 초·중기 마이오세 이전에 조사지역은 확장성 지각변형이 우세했으며, 후기 마이오세 말기 이후에는 지하내부의 화산체 활동 및 분지의 침강 등의 지구조 운동에 의해 변형되어 현재와 같은 복잡한 구조의 분지를 형성하였다. 또한, 고화된 상태의 퇴적물들은 화산암의 분출 및 관입에 의해 열변질작용을 받아 상당히 변성되어 있을 것으로 추정된다.

현재 현안이 되고 있는 EEZ 경계 설정과 관련시켜 독도의 영토적 기원관계를 살펴보면 독도는 울릉분지내의 북쪽에 형성되어 있는 화산섬이다. 따라서 독도화산체는 울릉분지내에서 일어난 플라이오세 이후의 화산활동에 의해 생성된 것으로 일본의 대륙붕이나 오키섬 생성 원인과는 무관한 독립적인 지구조 운동으로 볼 수 있다. 현재까지의 연구에 의하면 시대순으로 독도 동쪽의 해저화산체가 형성된 이후 독도화산체 다음에 울릉도가 생성되었다. 이와 같이 울릉분지내의 북쪽 화산체들은 하와이의 화산섬 연결체(volcanic chain)처럼 울릉분지내에서 일어난 일련의 판 내부의 확장에 따른 화산작용의 결과라고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 “배타적 경제수역 해양자원조사”와 “독도 생태계등 기초 조사 용역 보고서” 사업 결과의 일부이다. 자료처리와 정리에 힘써 주신 한국해양연구원 해저환경·자원연구본부 참여자들, 그리고 온누리호 선장의 전 승조원들에게 감사드린다.

참고문헌

- 박찬홍 등, 2000, 독도 생태계 등 기초 조사 용역 보고서, 해양수산부.
손영관, 박기화, 1994, 독도의 지질과 진화, 지질학회지, 30, 242-261.
유해수 등, 1997, 97 배타적 경제수역 해양자원조사, 해양수산부.
유해수 등, 1998, 98 배타적 경제수역 해양자원조사, 해양수산부.
한상준 등, 1996, 한국 대수심 해역의 지구적 해저환경 연구(II-III), 한국해양연구소.
한상준 등, 1997, 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화연구(1차년도), 해양수산부.
허식, 유해수, 김한준, 한상준, 이용국, 2004, 동해 울릉분지에 분포하는 가스 하이드레이트 층의 특성 연구, 한국석유지질학회, 10, 18-22.
Lee, K.E., 1992, Geological structure of Ulleng back-arc basin, East Sea, MSc Thesis, Seoul National Univ., Seoul, 121p.

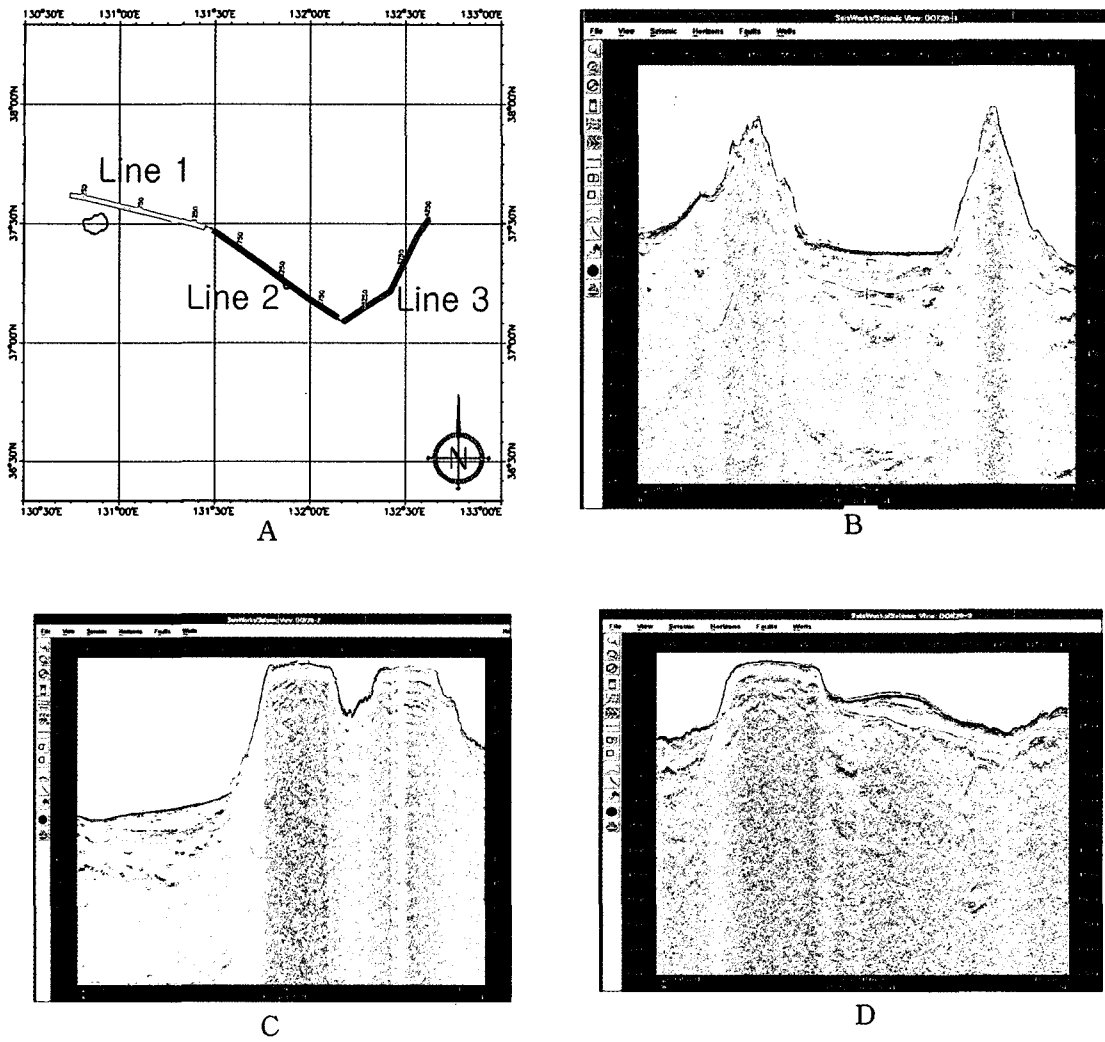


Fig. 1. The tracks of seismic lines(a), and interpreted migrated seismic section of Lines 1(b), 2(c) and 3(d).