

변산반도 일원의 지질구조 분석을 통해 도출된 고응력장 변화

고경태^{1,2} · 최진혁³ · Paul Edwards² · 김영석^{2,*}

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부

²부경대학교 지구환경과학과

³파리 지구물리연구소

요 약

변산반도 일원의 해안가 및 인근 도서지역에 나타나는 다양한 지질구조들의 발달특성을 조사하여 연구지역의 고응력장 변화를 밝히고자 하였다. 먼저 선형구조 분석결과, 내륙지역에서는 북동-남서 방향이 우세하지만, 해안 및 인근 도서지역에서는 북북서-남남동 내지 북서-남동 방향의 선형구조가 비교적 뚜렷하고 명확하게 인지되었다. 야외조사를 통해 북서-남동 방향의 좌수향 주향이동단층 그리고 동-서 방향의 정단층은 동-서 방향의 압축력 조건하에서 생성된 것으로 여겨진다(Event 1). 또한 북북서-남남동 방향의 정단층 및 서북서-동남동 방향의 우수향 주향이동단층은 북북서-남남동 방향 압축력으로의 응력 변화를 지시해준다(Event 2). 그리고 북서-남동 내지 북북서-남남동 방향의 단층들은 일부 지점에서 좌수향 주향이동으로의 재활성 단층운동이 인지되었으며, 이는 현재 한반도에 작용하는 동북동-서남서 방향의 일반적인 압축력과 일치한다(Event 3). 이러한 불안지역 취성지질구조요소들의 분석을 통한 고응력장 해석에서 이 지역은 최소 3회의 응력변화를 겪었던 것으로 해석되며, 최후기의 구조운동은 현재의 응력장하에서 발생했던 것으로 해석된다.

주요어: 변산반도, 선형구조분석, 단층, 연안재해, 응력조건

Kyoungtae Ko, Jin-Hyuck Choi, Paul Edwards and Young-Seog Kim, 2015, Paleostress changes based on analysis of geological structures around the Byeonsan peninsula area. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 2, p. 157-170

ABSTRACT: Paleostress analysis is carried out based on various structural elements and their characteristics around the Byeonsan peninsula, western Korea. In a regional-scale lineament analysis, the NE-SW trending set is dominant in land but NNW-SSE or NW-SE trending sets are obviously recognized along coastal line and in islands. Field observations show that two different fault sets (NW-SE trending left-lateral, and E-W trending normal faults) are formed under a stress regime which is represented by E-W trending compression stress regime (Event-1). Other two fault sets (NNW-SSE trending normal and WNW-ESE trending right-lateral faults) are assumed as a result of NNW-SSW trending compression stress regime (Event-2). One interesting result is that fault reactivation with left-lateral slip sense is also observed along the NW-SE and NNW-SSE trending faults. This may be a result of the present stress regime which is estimated as ENE-WSW trending compression stress regime (Event-3). Therefore, our study imply that the study area underwent at least three different tectonic events, and the last event has occurred in the present tectonic regime.

Key words: Byeonsan peninsula, Lineament analysis, Fault, Coastal hazard, Stress condition

(Kyoungtae Ko, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea & Pukyong National University, Busan 608-737, Republic of Korea; Paul Edwards and Young-Seog Kim, Pukyong National University, Busan 608-737, Republic of Korea; Jin-Hyuck Choi, Institut de Physique du Globe de Paris, 1 Rue Jussieu, 75005, France)

1. 서 론

연구지역인 부안 변산반도 일원은 지체구조구상

옥천대 서남부에 해당된다. 한반도에는 옥천대 주변을 따라 백악기 퇴적분지들이 많이 발달하고 있다. 이 전 연구자들에 의해 백악기 퇴적분지들의 분포 및 진

* Corresponding author: +82-51-629-6633, E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

화는 북동-남서 방향의 대규모 주향이동 단층계의 형성 및 발달과 밀접한 관련이 있다는 것이 알려져 왔다 (Kim *et al.*, 1994, 1997; Choi, 1996; Lee, 1998; Lee and Kim, 2003; Kee *et al.*, 2006; Ryang, 2013).

이 지역에 대한 연구는 주로 백악기 소규모 퇴적분 지인 격포분지를 대상으로 이루어져 왔다. 격포분지에 대한 연구는 원자력시설관련 부지조사를 위해 처음 실시된 바 있으며(KIER, 1981), 이후에는 주로 퇴적학적인 연구가 집중적으로 수행되었다(Chun, 1990; Chun and Lee, 1991; Chun and Chough, 1992; Chun and Kim, 1995; Kim *et al.*, 1995). 그러나 이 지역에 대한 구조지질학적 연구는 상대적으로 빈약한 실정이며, 이 분지는 Lambiase and Bosworth (1995)에 의해 후기 백악기에 인리형분지의 형태로 형성되었다는 주장이 제기 되었지만 많은 논란이 있어 왔다. 최근에 Lee (2011)에 의해 격포분지는 후기 백악기 동서방향의 압축력 하에서 형성된 북동 방향의 우수향 주향이동단층에 수반된 썬기형 분지라는 주장이 제기된 바 있다.

하지만 연구지역에 위치하는 격포분지를 비롯한 일부 백악기 소분지들에 대한 분지형성 및 진화에 대해서는 아직까지 논란이 있는 실정이다. 또한 최

근 서해안에서 빈번하게 지진이 발생하고 있기 때문에 연안지질재해 차원에서 연구지역의 지질구조적 특성을 이해하고 백악기 및 그 이후의 고응력장 변화를 규명하는 것은 매우 의미가 있다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 변산반도 일원 및 인근 도서지역에서 관찰되는 지질구조들의 발달특성을 조사하고 해석하여 연구지역의 백악기 및 그 이후의 변형작용 특성을 밝히고자 하였다. 이를 위해 기 발간된 지질도 및 문헌자료를 이용하여 연구지역의 지질정보를 수집하고 분석하였다. 또한 위성사진과 항공사진을 이용한 선형구조분석을 통하여 단층의 존재 가능성이 있는 지역을 분석하였다. 이를 바탕으로 야외지질조사를 실시하여 노두에서 관찰되는 지질구조들의 기하학적·운동학적 자료를 수집하고 분석하였으며, 최종적으로 연구지역의 고응력장 변화 및 신기단층의 존재 가능성에 대한 고찰을 시도하였다.

2. 연구지역의 지질

연구지역인 부안군 변산반도 일원은 고원생대 편마암, 주라기 화강암, 백악기 부안화산암과 이들을

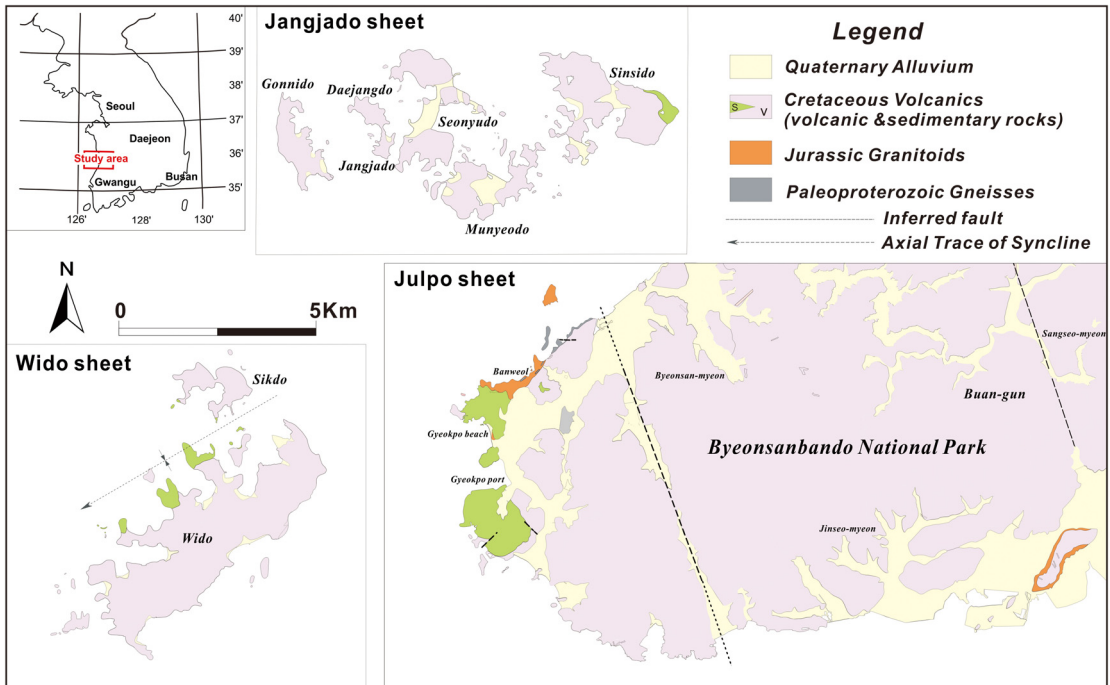


Fig. 1. Locality and geological maps of the studied areas; Byeonsan peninsula, Gogunsan islands, and Wido island (modified and combined from Lee *et al.*, 1997; Choi and Hwang, 2013; Koh *et al.*, 2013).

관입한 염기성 암맥 및 제4기 퇴적층으로 구성되어 있다(Lee, 2011; Koh *et al.*, 2013; 그림 1). 연구지역내 편마암은 운산리 일대의 해안가를 따라 소규모로 분포하며, 정편마암과 준편마암이 혼재한다(Koh *et al.*, 2013). Lee and Lee (2001)은 이 암체의 생성시기를 원생누대로 간주하였으나, 최근 발간된 1:50,000 지질도(Koh *et al.*, 2013)에서는 고원생대로 보고하고 있어서 본 논문에서도 고원생대로 간주하였다.

쥬라기 화강암은 연구지역내에서는 반월 해안가 일대와 채석강 북쪽에 소규모로 분포한다. 채석강 해안 일부에 산출되는 흑운모화강암은 괴상의 조립질 암체로 주로 석영, 장석, 흑운모로 구성되며 정장석 반정이 관찰되기도 한다. 반월 해안가 일대에 분포하는 반상화강암은 주로 정장석, 석영, 사장석으로 구성되어 있다. 반상화강암은 특징적으로 직경 1 cm 이상의 정장석 반정을 포함하며, 정장석 반정의 함유량과 빈도는 위치에 따라 다양하게 산출된다. Lambiase and Bosworth (1995)는 연구지역내 화강암에 대한 K/Ar 절대연령측정을 통해 약 128 Ma의 연대를 구해 백악기로 보고하였으나, Koh *et al.* (2013)은 화강암내 분리된 저어콘의 U-Pb 절대연령측정을 통해 흑운모화강암은 약 170 Ma, 반상화강암은 168 Ma의 연대결과를 바탕으로 쥬라기로 보고하였다.

연구지역에 가장 넓게 분포하는 백악기 암석은 주로 화산력응회암과 퇴적암 그리고 이들을 관입한 유문암 및 화강암으로 구성되어 있다. Koh *et al.* (2013)은 변산반도 일원의 최대 직경 20 km의 화산암체를 부안화산암이라 명명하였고, 화산쇄설암을 구성하는 광물의 조합, 암편의 종류 및 산상 등을 바탕으로 층서단위를 세분화하였다. 백악기 퇴적층인 격포리층은 주로 격포리 일대 해안가를 따라서 분포하며, 역암, 역질 사암, 사암 그리고 암회색 이암 등으로 주로 구성되어 있으며, 화산력응회암과 응회각력암이 협재하기도 한다(Chun and Kim, 1995; Kim *et al.*, 1995, 1997; Lambiase and Bosworth, 1995; Koh *et al.*, 2013). 격포리층은 선편브리아 시대의 편마암과 백악기 화강암을 부정합적으로 덮고 있으며, 산성 화산암류에 의해서 정합적으로 덮힌다. 격포리층은 대체로 호수 밑바닥에 형성된 급경사 삼각주 혹은 선상지 및 그 인접환경에서 응집력이 약한 암설류, 저탁류 등에 의해서 퇴적된 것으로 해석되고 있으나(Chun and Kim, 1995; Kim *et al.*, 1995; Lambiase

and Bosworth, 1995), 퇴적 깊이 및 퇴적 메커니즘에 대해서는 아직 연구자에 따라 약간의 논란이 있다(Kim *et al.*, 1997). 이들은 후기에 다양한 암맥류에 의해 관입되었으며, 대부분의 해안가와 계곡부는 제4기 충적층으로 피복되어 있다.

3. 지질구조 분석

3.1 선형구조 분석

선형구조의 분석은 조사지역의 단층연구를 위한 가장 기초적인 조사방법 중 하나로, 선형의 뚜렷한 지형적 특성을 조사하여 단층활동에 대한 중요한 정보를 얻을 수 있다(O'Leary *et al.*, 1976). 선형구조는 일반적으로 지질경계뿐만 아니라 단층, 단열 및 절리와 같은 지질구조와 밀접한 관련이 있으며, 특히 신기단층의 경우 상대적으로 최근에 지형변위 및 변형을 유발하였기 때문에 상대적으로 직선적이고 명확한 지형적 특성을 보인다(Chernicoff *et al.*, 2002; Holdsworth *et al.*, 1997). 이번 연구에서는 변산반도를 중심으로 한 단층의 분포특성 및 존재여부를 확인하기 위하여, 위성사진과 항공사진을 이용한 선형구조 분석을 실시하였다.

연구지역 주변 내륙지역에 대한 선형구조 분석결과, 기존에 보고된 추가령단층대와 같은 대규모 단층대의 방향인 북북동-남남서 방향으로 연장성이 양호한 선형구조가 확인된다(그림 2b). 또한 북동-남서 방향의 선형구조가 우세하게 관찰되며, 이는 부여분지의 경계단층인 십자가단층 및 함열단층의 방향과 일치하기 때문에 이들 대규모 단층대의 연장부에 해당하는 것인지 확인할 필요가 있다. 하지만 이러한 대규모 선형구조들의 연장성은 도서지역까지 뚜렷하게 인지되지 않고 불명확해지는 특성이 있다.

한편 변산반도 일대의 연안 및 도서지역에서는 북북서-남남동 방향의 선형구조들이 가장 우세하게 발달하고 있으나, 비교적 다양한 방향의 선형구조들이 관찰된다(그림 2c). 특히, 도서지역에서는 연장성이 비교적 양호하고 서로 평행한 북북서-남남동 방향의 선형구조들이 발달하고 있으며, 동-서 내지 서북서-동남동 방향의 선형구조들도 일부 관찰된다. 하지만 연안지역에서는 내륙지역의 선형구조분석결과와 유사하게 북북동-남남서 내지 북동-남서 방

향이 우세하고 발달하고 있으며, 이들은 기존의 연구자들에 의해 보고된 대규모 단층의 방향성과도 비교적 잘 일치하고 있다(Lee, 2011). 반면 연안지역에서는 북북서-남남동 내지 북서-남동 방향과 동-서 방향의 선형구조들은 발달빈도수가 적으나 비교적 뚜렷하고 명확하게 발달하고 있어, 이들 선형구조들을 따른 단층의 존재여부 확인 및 단층 발달특성 분석

에 중점을 두었다. 특히 연구지역의 내륙지역과 비교하여 연안 및 도서지역에서 집중적으로 관찰되는 북북서-남남동 방향의 선형구조들은 해양으로의 연장성뿐만 아니라 해안에 발달하고 있는 단층과 밀접한 관련이 있을 수 있으므로, 이들에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단되어 이들을 중심으로 정밀 야외지질조사를 실시하였다.

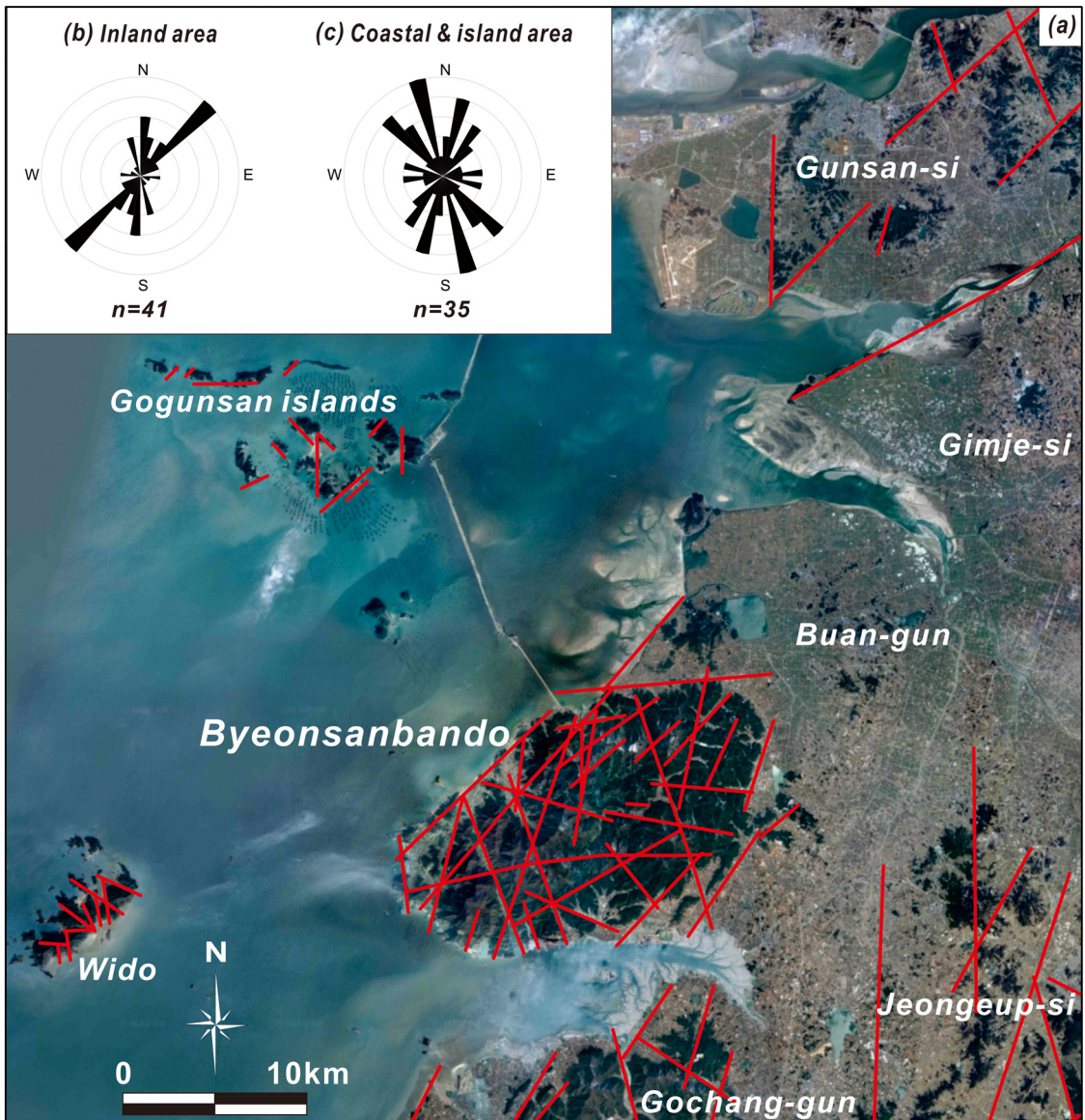


Fig. 2. (a) Result of lineament analysis for the study area. (b) In the inland area, the lineaments of NE-SW to N-S orientation are dominant. (c) In contrast, lineaments of NW-SE to NNW-SSE direction are predominantly developed in the coastal and island areas.

3.2 야외조사

조사지역인 변산반도와 주변지역은 백악기 화산 암류가 넓게 분포하고, 서쪽 연안을 따라 격포리층이 국지적으로 분포한다(그림 1). 선행 연구자들의 조사 지점들과 선형구조 분석결과를 바탕으로 해안노두를 따라 집중적인 야외조사를 수행하여 다양한 방향과 운동감각을 지시하는 단층들을 확인하였으며, 이는 비교적 단속적이지만 다양한 방향의 선형구조가 관찰되는 결과와 매우 유사한 것으로 해석된다. 또한 단층이 발달한 노두 주변은 연안에서 비교적 내륙으로 만입된 지형학적 특성을 보이는데, 이러한 원인은 단층과쇄대와 모암 사이의 차별적인 풍화침식에 의한 것으로 판단되며, 선형구조를 통한 지형분석 및 단층발달 유망지역 분석의 유용함을 보여준다.

3.2.1 격포해수욕장 일대

변산 대명리조트의 앞쪽 연안을 따라 노출되는 해변노두에서는 주로 격포리층이 분포하고 있으며, 퇴적분지의 형성과 밀접한 관련이 있는 동-서 방향에 가까운 정단층들이 발달하고 있음이 보고된 지점이다(Lee, 2011). 그림 3은 이 지역에 발달하고 있는 정단층들의 전형적인 특성을 보여주는 것으로, 이들 정단층은 주로 N20°~25°W의 주향과 60°~65°NE의 경사를 보인다(그림 3a, 3b). 이들은 서로 평행한 방향의 단층들 또는 반대로 경사하는 단층들로 이루어져 있으며, 단층주변에는 수직에 가까운 인장단열들이 비교적 높은 밀도로 발달한다. 이는 이러한 단층 및 단열들이 하나의 동일한 확장변형 환경에서 형성되었음을 지시한다. 그러나 일부 다른 방향을 보이

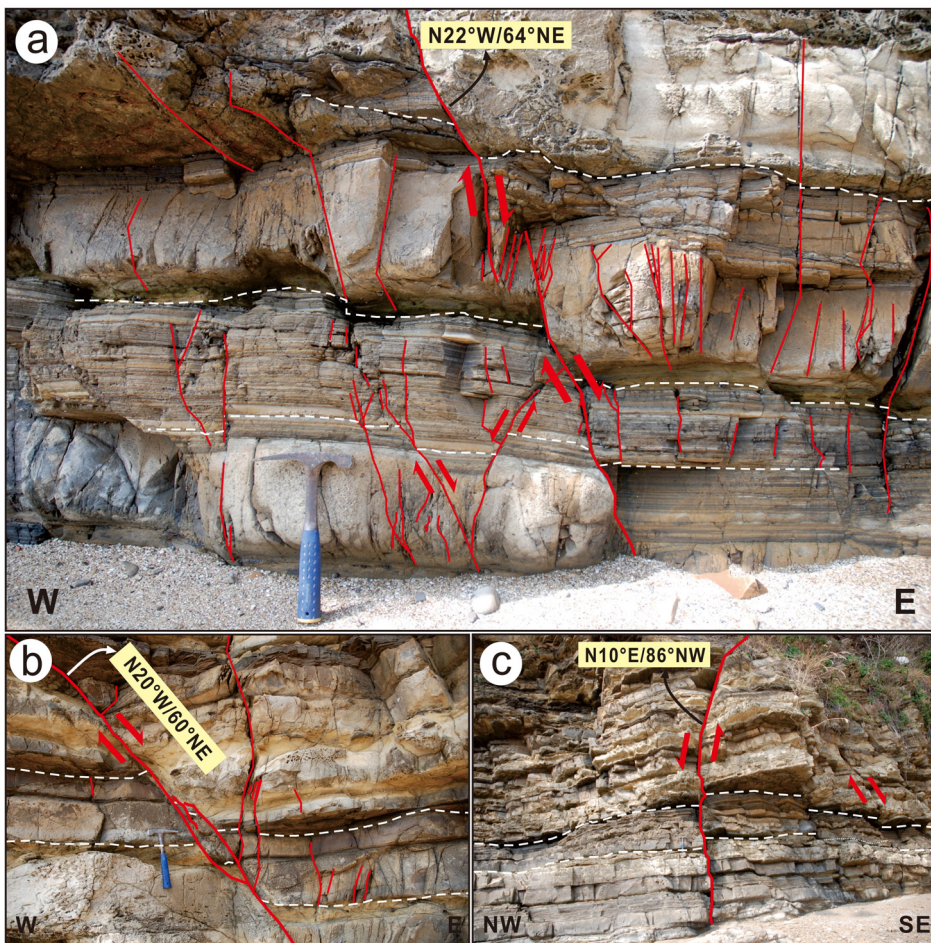


Fig. 3. NN-striking normal faults are frequently observed around the Gyeokpo beach (a & b). (c) NE-striking faults are rarely observed. Vertical joints are developed around these faults indicating normal faulting movement.

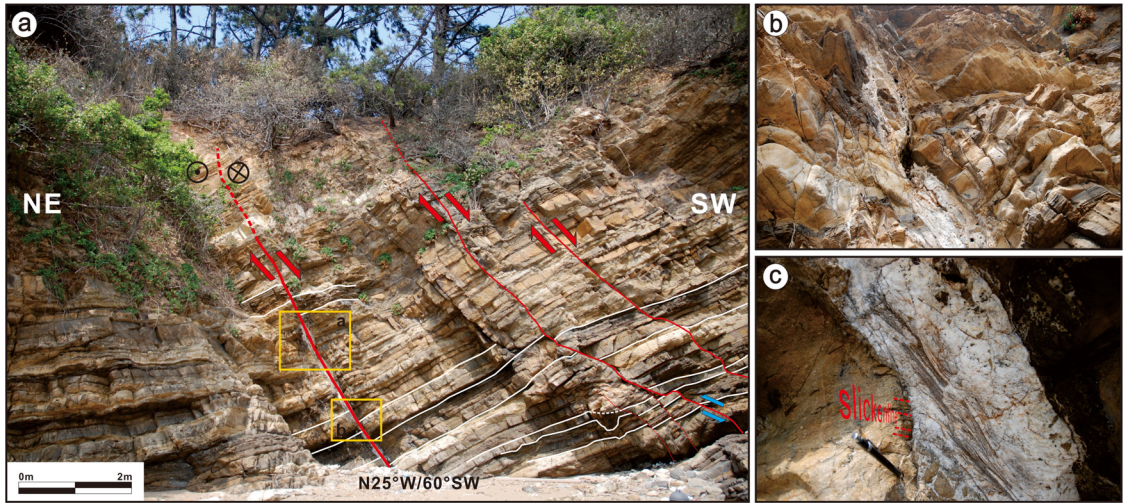


Fig. 4. (a) Some parts of the NW-striking left-lateral fault and normal faults show reverse slip sense, which is interpreted as a selective reactivation along existing faults. The occurrence of vein and breccia is interpreted as an evidence of fluid flow along fault cores (b, c).

거나 인장단열에서 진화한 것으로 보이는 수직에 가까운 정단층이 관찰되기도 한다(그림 3c).

또한 일부지점에서는 비교적 큰 규모의 단층(N25°W/60°SW)이 관찰되며, 지층의 상대적인 겹보기 변위는 정단층의 운동감각을 지시해 주고 있다(그림 4a). 주 단층면에서 확인한 단층조선은 좌수향 주향이동 운동감각도 함께 지시하고 있으며(그림 4c), 단층핵에서는 폭의 변화가 심한 변형대가 확인된다(그림 4b). 이 변형대의 특징은 각력들을 포함하고 있다는 점과 탄산염 세맥이 발달하고 있다는 것으로, 단층각력을 포함한 단층대를 따른 이후의 유체 이동에 의한 침전의 결과로 해석된다. 또한 이 노두에서의 흥미로운 점 중 하나는 단층대 내 일부 소규모 단층이 역단층의 겹보기 변위를 지시한다는 것이다(그림 4a). 이러한 결과의 원인 중 하나는 층리, 절리, 단층 및 단열과 같은 기존의 불연속면을 따른 선택적인 재활성 단층운동으로 해석할 수 있다(Kelley *et al.*, 1999).

그림 5는 이 지역에서 높은 밀도로 발달하고 있는 동-서 내지 동북동-서남서 방향의 정단층 중 하나이다. Lee (2011)는 이와 같은 동-서 내지 동북동-서남서 방향의 정단층은 격포분지를 형성한 주 단층인 북동-남서방향의 우수향 주향이동단층 작용에 수반되어 형성되었다고 보고 하였다. 이번 연구에서 역시 이와 평행한 방향성을 보이는 정단층을 다수 확인할



Fig. 5. ENE-WSW striking and subvertical dipping normal fault is developed around the Gyeokpo beach.

수 있었으나, 일부지점에서는 일반적인 정단층의 경사(60°~ 65°)보다 저각이거나 고각인 정단층이 관찰되는 특성을 보인다(그림 5). 이는 단층이 발달한 이후, 습곡과 같은 재변형작용에 의해 전체적인 지층의 경동이 발생하였거나 응력의 변화에 의해 기존의 단층들이 재활성 단층운동을 받은 결과로 해석된다.

3.2.2 격포항 일대

격포항 남쪽의 봉화봉 서쪽 해안노두에 발달된 지질구조의 특성은 크게 북북서-남남동 방향의 정단층, 비대칭 습곡 그리고 남-북 방향의 역단층으로 구분된다. 정단층은 주로 북북서-남남동의 주향이 가

장 우세하게 발달하고 있으며, 주로 남서쪽으로 60°~75° 경사하고 있다(그림 6). Lee (2011)는 이 지역에서의 정단층은 동-서 방향이 우세하고, 이 정단층계가 상부의 퇴적층을 절단하지 않는 점과 이들 방향성의 단층들이 격포리층 내에서만 관찰된다는 증거를 바탕으로 퇴적분지 형성당시의 응력장을 동-서 방향의 압축력으로 주장하였다. 하지만 이번 조사에서 우세하게 관찰된 북북서-남남동 방향의 정단층은 상부 퇴적층까지의 발달 연장성이 좋으며 격포 분지 형성당시의 응력조건에서는 형성되기 힘들기 때문에 격포분지 형성 이후에 이루어진 북북서-남남동 방향으로의 압축력 변화에 의한 변형으로 판단하였다.

또한 이 지점에서는 습곡 및 역단층과 같은 압축력에 의한 지질구조 또한 관찰된다(그림 7). 우선 대부분의 습곡은 비대칭적으로 특정 퇴적층 내에서만 발달하고 있으며, 대부분의 습곡측면은 남-북 내지 북북동 방향의 주향을 보인다. 습곡의 기하학적인

형태는 습곡측면의 경사가 30°내외인 경사습곡의 형태를 보이며, 일부 습곡은 습곡측면이 10°이하의 경사를 보이는 횡외습곡의 형태를 보인다. 그리고 습곡을 절단하는 역단층의 경우 습곡층 상부의 퇴적층 내에서는 발달하지 않으며 습곡이 발달한 특정층 내에서만 단속적으로 발달하는 특징을 보인다(그림 7b). 또한 그림 8은 이 지점에서 관찰되는 역단층 중 하나로 이 역단층 주변에는 단층운동에 수반된 습곡, 끌림습곡, 정단층 등 다양한 형태의 2차 지질구조들이 발달한다. Lee (2011)은 남-북 방향의 역단층과 습곡(그림 8b) 그리고 동-서 방향의 정단층은 이 지역에서 가장 주요한 단층으로 인지되는 북동-남서 방향의 우수향 주향이동단층 운동에 수반된 켜기형 분지형성과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고한 바 있으며, 격포리층 내에 관찰되는 퇴적 동시성구조들은 분지의 진화과정에서 서에서 동으로 작용한 횡압력에 의해 형성된 것으로 해석한 바 있다.

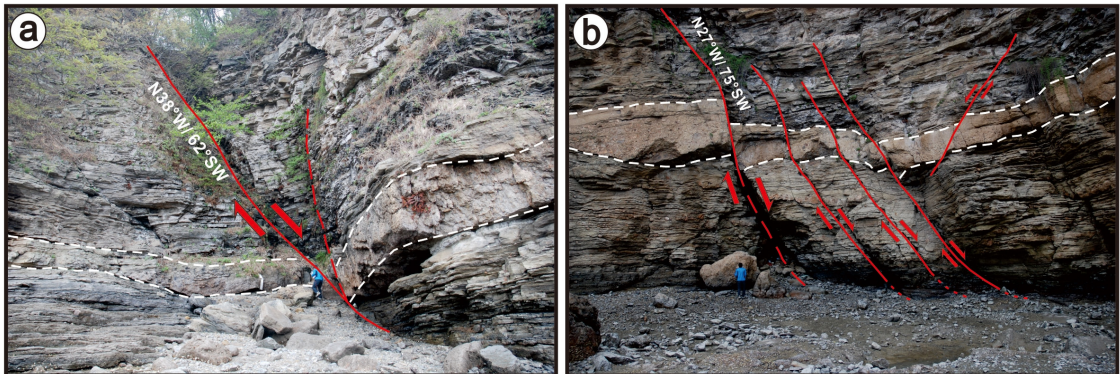


Fig. 6. NW-striking normal faults are developed around the Gyeokpo port.

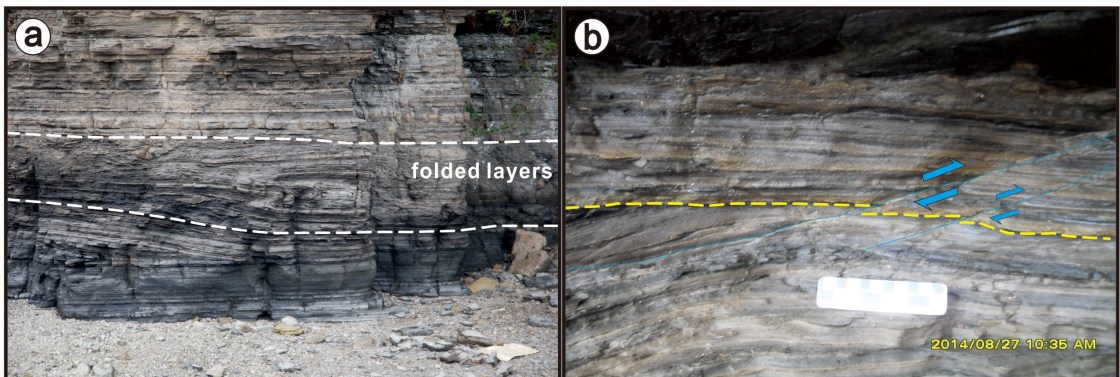


Fig. 7. Asymmetrical fold layers (a) cut by minor thrust faults (b) developed in the Gyeokpori Formation.

격포항 일대에서 관찰되는 동-서 방향의 정단층 및 남-북 방향의 역단층과 습곡의 발달은 격포분지 형성과정에서 작용한 동-서 방향의 압축력과 남-북 방향의 신장변형에 의해 동시에 형성될 수 있다. 그러나 이번 조사에서 뚜렷하게 관찰된 북북서-남남동 방향의 정단층은 동-서 방향의 압축력에 의해 형성되기 어려우며, 동-서 방향의 정단층과는 다르게 상부 퇴적층까지의 연장성이 좋은 것으로 보아 분지형성 이후의 응력변화에 의해 발달된 것으로 판단된다.

3.2.3 주변 도서 지역

변산반도 주변에는 고군산군도, 위도 및 식도를 비롯한 크고 작은 섬들이 위치해 있다(그림 1). 선형 구조 분석을 통해 대규모 지질구조가 존재할 것으로 판단되는 몇 개의 지점에 대한 야외조사를 수행하였다.

먼저 첫 번째 조사지점은 위도의 벌금항 북쪽 해안노두로 주로 화산쇄설암이 분포하고 있으며(그림 1), 층리의 방향은 주로 북동-남서 방향으로 약 10° ~ 20° 서쪽으로 경사하고 있다. 이 지점에서는 단사형 습곡구조를 관찰할 수 있으며, 습곡의 양쪽 날개부에서 측정된 자료를 투영분석을 실시한 결과 습곡축면의 방향은 북동-남서이다(그림 9). 흥미로운 점은 위

도에서는 대부분의 화산쇄설암 지층의 경사가 동쪽으로 관찰되는 반면 식도에서는 지층의 경사가 서쪽으로 경사되어 있다. 이는 위도와 식도 사이에 대규모 습곡구조의 존재가능성을 지시해 준다.

또한 위도와 식도에서 관찰된 습곡구조는 변산반도에 분포하는 격포리층 내에서 관찰되는 교란지층 내의 습곡구조와는 다른 변형 메카니즘으로 생각된다. 변산반도 내에서 발달하는 남-북 내지 북북동-남남서 방향의 습곡축면을 보이는 습곡구조는 특정 층군 내에서만 발달하는 반면, 위도와 식도에서 관찰되는 습곡구조는 전체적인 화산쇄설층의 경사방향이 서로 반대로 나타나며 북동-남서 방향의 습곡축면을 보인다. 따라서 위도 및 식도에서 관찰되는 북동-남서 방향의 습곡구조는 격포분지 형성과 관계되는 구조로 해석하기 보다는 분지형성 이후 북서-남동 내지 북북서-남남동 방향의 압축력에 의해 형성된 별개의 변형사건 결과로 판단된다.

식도항 서쪽 해안의 평면노두에서는 서북서-동남동 방향과 북북서-남남동 방향의 소규모 단층들이 관찰된다(그림 10). 우선 서북서-동남동 방향의 우수향 주향이동단층 주변으로는 북북서-남남동 방향의 인장단열들이 발달하고 있으며, 단층 오른쪽으로의

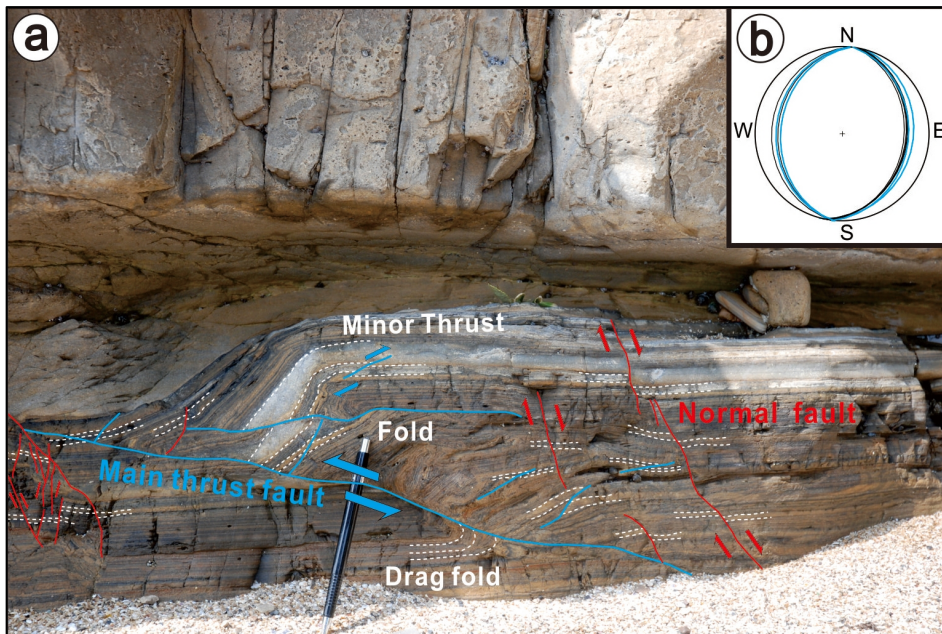


Fig. 8. (a) Various secondary structures are developed associated with the main reverse fault. (b) Stereographic projection of the thrust fault planes (blue line) and the axial planes of the asymmetric folds (black line).

분절부에 소규모 당겨열림 분지가 발달하고 있어, 이들이 우수향 주향이동단층운동을 겪었음을 보여 준다(그림 10a, 10b). 이와는 대조적으로 북북서-남남동 방향의 단열운동감각은 말단부손상대 구조들을 통해 모두 좌수향 주향이동단층을 지시하고 있음을 확인하였다(e.g., Kim *et al.*, 2003, 2004). 또한 흥

미로운 점은 북북서-남남동 방향의 우수향 주향이동 단층의 2차단열인 서북서-동남동 방향의 좌수향 주향이동단층이 관찰되는 것이다(그림 10c, 10d). 이는 앞서 언급한 서북서-동남동 방향의 우수향 주향이동단층과는 서로 상반되는 운동감각을 보이는 것이다. 위와 같이 서로 유사한 방향의 단층대에서 서로 반대방향의 운동감각을 보이는 것은 응력장의 변화로 인한 단층 재활성의 결과로 해석할 수 있다(e.g. Cunningham, 2013). 특히 서북서-동남동 방향의 우수향 주향이동단층의 2차단열인 북북서-남남동 방향의 단열이 일정하게 좌수향 주향이동단층으로 관찰되는 점과 북북서-동남동 방향의 좌수향 주향이동단층 말단부에서 서북서-동남동 방향의 좌수향 주향이동단층이 관찰되는 점은 연구지역에서의 응력장 변화를 지시한다. 위의 사실을 종합하여 상대적인 변형사를 추론해 보면, 북북서-남남동 방향의 압축력에 의한 서북서-동남동 방향의 우수향 주향이동 단층이 먼저 발달하고, 이후 응력장 변화에 의해 좌수향 주향이동단층으로의 재활성이 발생한 것으로

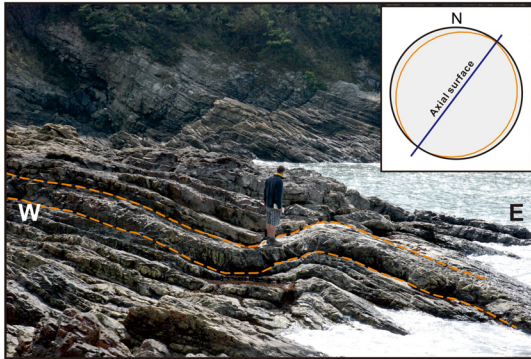


Fig. 9. NE-SW trending axial surface of the major fold observed in the Gyeokpori Formation at Wido.

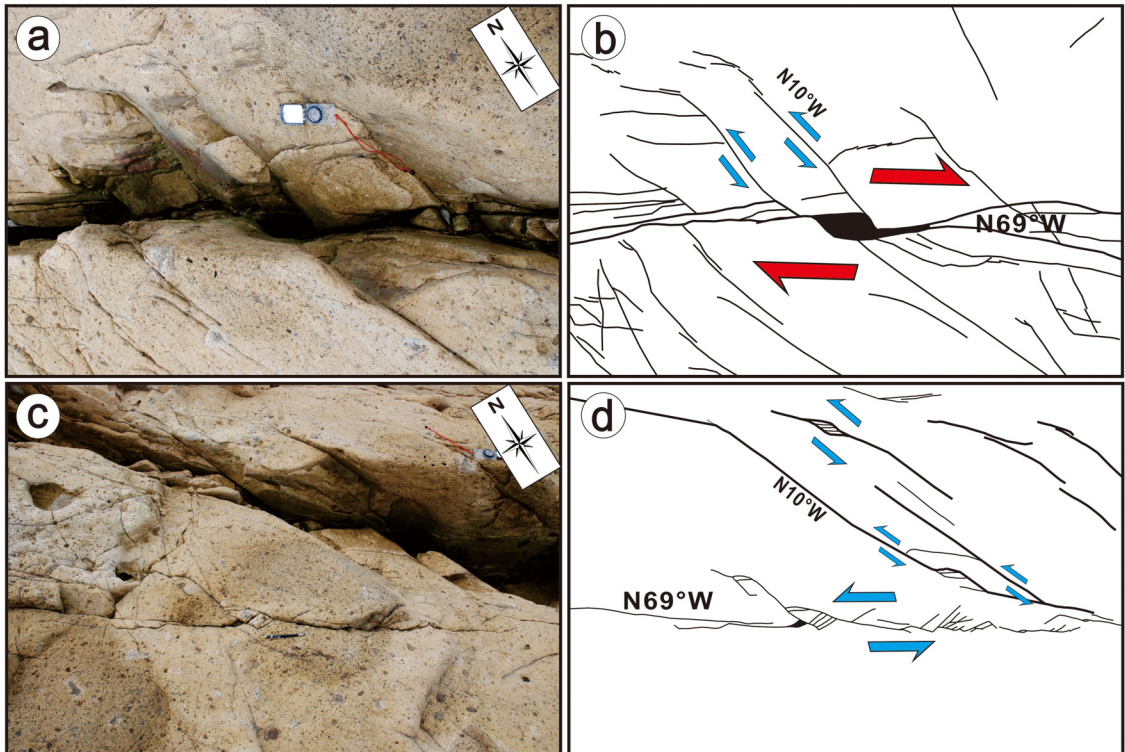


Fig. 10. (a) NNW-SSE trending tension joints are developed at the tip of WNW-ESE striking right-lateral fault. (b) WNW-ESE striking left-lateral fault is interpreted as a reactivation of right-lateral faults.

해석된다.

다음은 위도의 남서쪽 해안노두로 주로 응회암이 분포하고, 북북서-남남동 방향의 선형구조가 매우 뚜렷하게 관찰되는 지점 중 하나이다. 이 해안을 따

라서는 연속적으로 볼록하게 돌출된 형태의 지형적 특성 및 북북서-남남동 방향의 선형구조를 뚜렷하게 관찰할 수 있었다(그림 11a). 야외지질조사를 통하여 북북서-남남동 방향의 선형구조와 가까워지면서

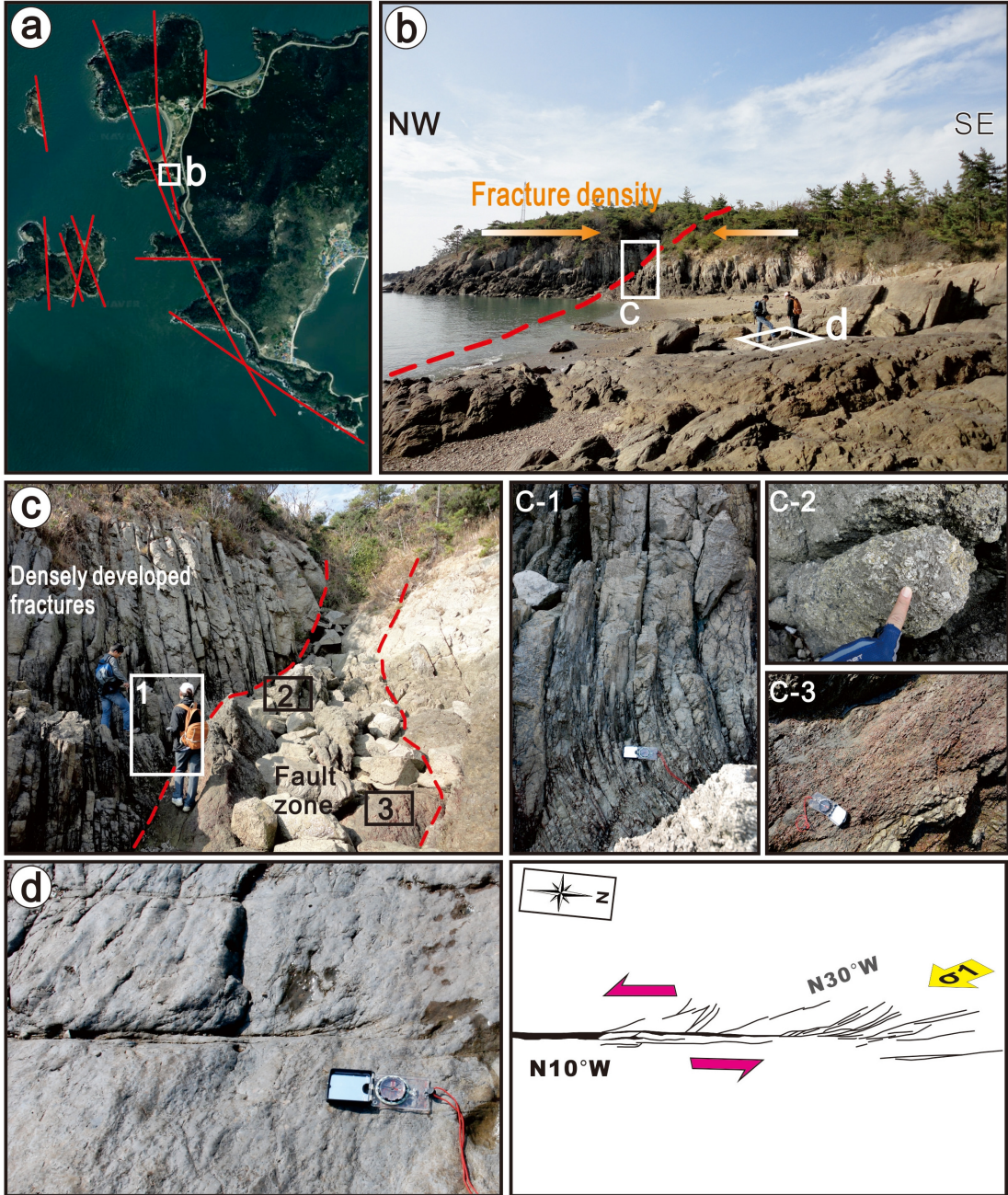


Fig. 11. Left-lateral faults developed along the southwestern Wido. (a) Topographical characteristics is recorded on the detailed lineament analysis. (b) Fracture density tends to increase towards the fault zone. (c) Highly deformed structures are observed in the fault zone. (d) Fault tip damage zone indicates left-lateral fault movement.

주위 모암의 단열밀도가 증가하는 양상 및 선형구조를 따라 습곡된 절리 및 각력암이 관찰되는 것을 확인 하였다(그림 11b, 11c). 주 단층의 단층손상대 내에는 주 단층과 평행한 방향의 2차 단층이 발달하고 있으며, 이들의 말단부손상대에 발달하고 있는 인장 단열은 이 단층이 좌수향 주향이동운동을 겪었음을 지시한다(e.g., Kim *et al.*, 2003, 2004; 그림 11d).

마지막으로 고군산군도 중앙부에 위치하는 선유도의 옥돌해변 서측에는 잘림목 형태로 돌출된 지형이 관찰되고, 이를 따라 비교적 뚜렷한 선형구조가 확인되어 이에 대한 지질조사를 실시하였다(그림 12a). 그 결과 돌출부 입구를 따라 인지된 두 조의 선형구조가 지나가는 지점에서 비교적 큰 규모의 단층이 확인되며, 이들은 선형구조의 방향성과 비교적 잘 일치하는 남-북 내지 북북서-남남동 방향의 주향을 보인다(그림 12b, 12c). 이 단층들은 주변에 수직에 가까운 인장절리들이 높은 밀도로 발달하고 있는 점이 정단층성 단층운동을 간접적으로 지시하나, 단층조선이 관찰되지 않아 뚜렷한 운동감각 및 재활성 여부를 확인할 수 없었다. 다만 단층의 경사가 비교적 고각에 가까운 것은 정단층성 단층운동 이후에 주향이동단층으로 재활성하였을 가능성을 지시하는 것으로 판단된다. 비록 제4기 퇴적층이 발달하지 않아 이들의 신기단층운동에 대한 정보를 획득할 수 없었지만 식도향 부근에서 관찰한 단층이 백악기 지층뿐

만 아니라 이후 관입한 암맥들도 모두 절단하고 있기 때문에 연구지역에서는 상대적으로 후기의 변형에 해당되는 것으로 판단되고, 북북서-남남동 방향의 뚜렷한 선형구조 및 대규모 단층대가 발달하고 있다는 점은 이와 유사한 방향의 신기단층 발달 가능성이 높음을 의미한다.

4. 토 의

4.1 분지 진화 및 고응력장 변화

Lee (2011)는 연구지역내 해안선을 따라 북동-남서 방향으로 발달한 세 개의 주향이동단층을 인지하고 반월단층, 종암단층, 궁항치단층으로 명명한 바 있다. 선형구조 분석결과에서도 부안군 내륙지역에서는 백악기 퇴적분지의 경계단층으로 작용한 북북동-남남서 방향의 대규모 주향이동단층과 관련된 선형구조들이 관찰되었다. 반면 연안 및 도서에서는 비교적 다양한 방향의 선형구조가 확인되고, 특히 내륙지역과 비교하여 북서-남동 내지 북북서-남남동 방향의 선형구조가 우세하게 관찰된다.

비록 본 조사에서는 북동 방향의 대규모 주향이동단층을 인지할 만한 증거를 찾지 못했지만, 북서-남동 방향의 좌수향 주향이동단층 그리고 동-서 방향의 정단층은 Lee (2010)에서 주장된 동-서 방향의 압축력 및 남-북 방향의 인장응력 조건에서의 격포

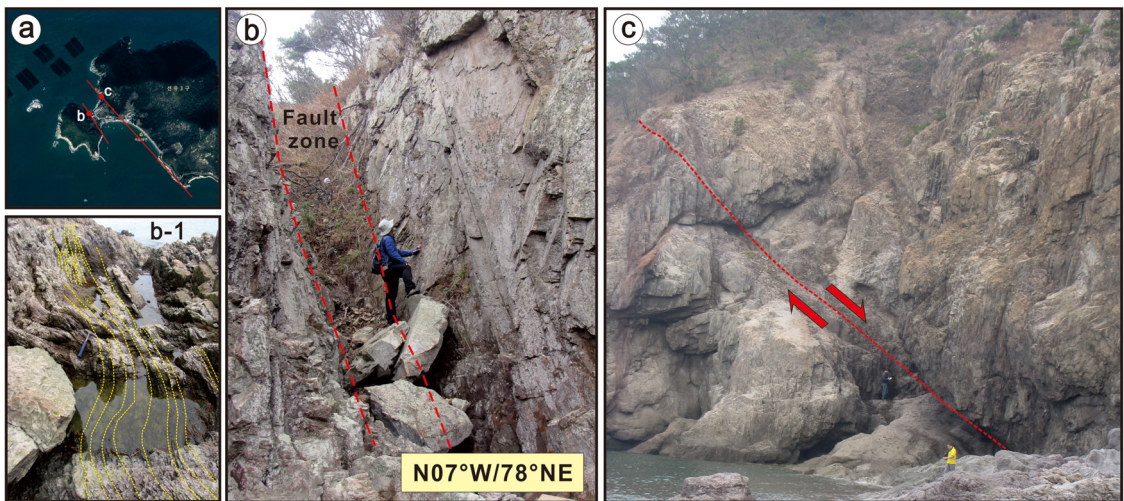


Fig. 12. (a) Two large faults are identified through the lineament analysis in Seonyu island. (b) Vertically dipping fault zone is observed. (c) NNW-striking normal fault is developed along a distinct lineament.

분지 형성 및 진화와 밀접한 관련이 있는 것으로 여겨진다(그림 13a, Event-1).

또한 격포리층은 후기 습곡 및 단층작용에 의한 변형을 겪었음을 확인할 수 있었다. 변산반도 서쪽 해안가의 격포리층을 관통하는 다수의 남-북 내지 북북서-남남동 방향의 정단층이 발달하고, 인근 도서지역에서는 습곡구조와 북북서-남남동 방향의 정단층 및 서북서-동남동 방향의 우수향 주향이동단층이 관찰되었다. 이러한 지질구조들의 발달은 격포분지 형성 이후에 북북서-남남동 또는 남-북 방향의 압축력과 동북동-서남서 또는 동-서 방향의 인장응력에 의한 변형사건이 있었음을 뒷받침해주고 있다(그림 13b, Event-2).

한편 북서-남동 내지 북북서-남남동 방향의 단층들은 일부 지점에서 좌수향 주향이동으로의 재활성 단층 운동을 겪었음이 확인되었다. 비록 최종변위가 여전히 정단층을 지시하고 있으나, 이러한 선택적인 단층면의 태위변화는 이후의 응력장에 의한 단층 재활성에 의해 발생할 수 있다(Kelley *et al.*, 1999). 따라서 이들의 방향성과 좌수향 주향이동단층 주위와 말단부에 발달하고 있는 인장단열들의 방향성은 동북동-서남서 방향의 압축력을 지시한다(그림 13c, Event-3).

하지만 연구지역은 최근 Koh *et al.* (2013)에 의해 타원형의 화산암체가 독립적으로 발달하는 것으로 밝혀졌다. 또한 한반도에 분포하는 백악기 소분지들의 형성 및 진화와 관련하여 대륙호-섬입작용의 결과라는 주장이 제기된 바 있으며(Chough and Sohn, 2010; Kim *et al.*, 2012), 격포리층 내에서도 응회암이 교호하는 점은 격포분지의 형성 및 진화 과정에서 화산활동의 영향을 받았음을 지시한다. 또한 격포분지 뿐만 아

니라 거의 모든 한반도 백악기 퇴적분지에서 응회암이 퇴적층과 같이 교호한다는 점은 백악기 퇴적분지들의 형성 및 진화를 규명하기 위해서는 화산활동과 구조운동의 체계적인 관계규명이 필요함을 의미한다.

4.2 신기구조운동

최근 세계적으로 대규모 지진에 의한 피해가 자주 보고되면서 우리나라에서도 지진에 대한 관심이 높아지고 있다. 지진은 대부분 기존의 단층이 재활동하면서 발생하고, 활성단층의 경우 미래에 다시 재활동할 가능성이 비교적 높기 때문에, 활성단층에 대한 연구가 지진의 재발 가능성을 연구하는데 매우 중요하다고 할 수 있다. 이번 연구지역인 부안군 일원 역시 최근 지진의 발생빈도가 높은 서해안과 접해 있으며, 일부 단층들이 재활된 단층운동의 특성을 보이고 있어 연안재해의 관점에서 신기구조운동 및 활성단층에 대한 더욱 정밀한 연구가 필요하다고 판단된다.

이번 연구에서는 제4기 퇴적층을 절단하는 단층노두를 관찰할 수 없어 활성단층 등과 같은 신기구조운동 및 변형에 대한 직접적인 증거는 찾지 못했다. 그러나 1) 연구지역에서의 최후기 변형사건이 현재 한반도에 작용하는 동북동-서남서 방향의 압축력과 일치한다는 점, 2) 이와 관련된 비교적 뚜렷한 선형구조들이 대규모 단층들과 비교적 잘 일치한다는 점, 3) 최후기 응력장에 의해 재활성된 것으로 추정되는 북서-남동 내지 북북서-남남동 방향의 단층빈도가 연안으로 높아진다는 점, 그리고 4) 이들과 평행한 선형구조 또는 단층이 해안으로 연장된다는 점은 이 지역에서의 보다 면밀한 신기구조운동 연구가 필요함을 의미한다.

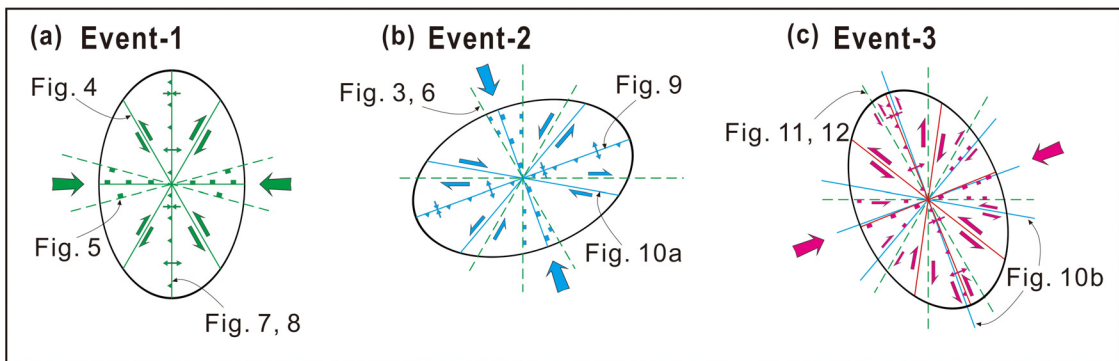


Fig. 13. Deformation history based on the analysis of geological structures of the study area. (a) Event 1 - E-W compression regime, (b) Event 2 - NW-SE compression regime and (c) ENW-WSW compression regime.

하지만 연안을 따른 육상에서의 야외지질조사는 제한적인 노두로 인하여 명확한 연구결과를 도출하는데 한계가 있을 수 있다. 그러므로 야외조사결과가 해양물리탐사와 같은 해양조사결과와 결합된다면, 보다 명확한 구조운동 특성을 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

이번 연구에서는 부안군 일원의 해안 및 도서지역을 대상으로 선형구조분석 및 야외지질조사를 바탕으로 지질구조의 발달특성에 대한 연구를 실시하였으며, 이를 바탕으로 고응력 변화를 유추하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 선형구조 분석결과, 북동-남서 내지 북북동-남남서 방향의 대규모 선형구조 특성을 보이는 내륙지역과 비교하여 해안 및 도서지역은 북서-남동 내지 북북서-남남동 방향의 선형구조가 우세하게 관찰된다.
- 2) 야외지질조사를 통하여 선형연구자들에 의해 격포분지의 분지형성기작과 관련된 동-서 방향의 압축력에 의해 발달한 것으로 해석된 바 있는 북동-남서 방향의 우수향 주향이동단층운동에 수반된 것으로 판단되는 북서-남동 방향의 좌수향 주향이동단층, 동-서 방향의 정단층 그리고 남-북 방향의 역단층 및 습곡을 관찰하였다.
- 3) 이후 동북동-서남서 방향의 습곡구조와 남-북 내지 북북서-남남동 방향의 정단층 및 좌수향 주향이동단층으로 대표되는 북북서-남남동 방향의 압축력과 동북동-서남서 방향의 인장응력에 의한 변형사건이 있었음을 확인하였다. 이는 연안지역의 선형구조 분석결과와도 일치하는 것으로 연안지역에서 가장 우세한 지질구조로 판단된다.
- 4) 북북서-남남동 방향의 일부 단층을 따라 동북동-서남서 방향의 인장단열을 수반하는 재활성 단층운동이 관찰되고, 이 방향의 정단층이 일부 관찰된다. 이는 현재 한반도에 작용하고 있는 동북동-서남서 방향의 압축력 조건하에 발달할 수 있는 지질구조로 비교적 뚜렷하게 발달하고 있는 선형구조와 일치하는 특성을 보이며, 부안군 일원에서 상대적으로 후기의 변형사건을 지지하는 것으로 판단되어 이들에 대한 보다 면밀한 연구가 요구된다.

사 사

이 논문은 해양수산부 과제 “서해 연안지질 위험요소 연구(NP2011-011)”의 위탁과제로 한국지질자원연구원의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

Chernicoff, C.J., Richards, J.P. and Zappettini, E.O., 2002, Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence. *Ore Geology Reviews*, 21, 127-155.

Choi, P.Y. and Hwang, J.H., 2013, Geological Report of the Gunsan-Buan-Bangchukdo-Jangjado Sheets (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 76 p (in Korean with English abstract).

Choi, Y.S., 1996, Structural evolution of the Cretaceous Eumseong Basin, Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 159 p (in Korean with English abstract).

Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean Peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.

Chun, S.S., 1990, Sedimentary processes, depositional environments and tectonic settings of the Cretaceous Uhangri Formation, southwest Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 328 p (in Korean with English abstract).

Chun, S.S. and Lee, H.J., 1991, Basin analysis of the Cretaceous sedimentary basins: depositional environments and depositional mechanisms of the Kyokpo Basin. *KORDI, BSPE 00233-348-5*, 131 p.

Chun, S.S. and Chough, S.K., 1992, Tectonic history of Cretaceous sedimentary basins in the southwestern Korean Peninsula and Yellow Sea. In: Chough, S.K. (ed.), *Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and Adjacent Seas*. Korean Sedimentology Research Group, Special Publication 1, 60-76.

Chun, S.S. and Kim, S.B., 1995, The Cretaceous Kyokpori Formation, SW Korea: sublacustrine steep-sloped delta facies. *Journal of Geological Society of Korea*, 31, 215-236.

Cunningham, D., 2013, Mountain building processes in intracontinental oblique deformation belts: lessons from the Gobi Corridor, Central Asia. *Journal of Structural Geology*, 46, p. 255-282.

Holdsworth, R.E., Butler, C.A. and Roberts, A.M., 1997, The recognition of reactivation during continental

- deformation. *J. Geol. Soc. Lond.*, 154, 73-78.
- Kee, W.S., Kim, B.C. and Lee, Y.N., 2006, Sedimentary environments and structural evolution of the Cretaceous Namyang Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 329-351 (in Korean with English abstract).
- Kelley, P.G., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J. and McGurk, A.C., 1999, Selective reverse-reactivation of normal faults, and deformation around reverse-reactivated faults in the Mesozoic of the Somerset coast. *Journal of Structural Geology*, 21, 493-509.
- KIER, 1981, Report on stability of proposed site for a nuclear power plant (Buan Site). 105 p.
- Kim, J.H., Lee, J.Y. and Kee, W.S., 1994, Structural evolution of the Cretaceous Puyeo Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 182-192 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.B., Chough, S.K. and Chun, S.S., 1995, Bouldery deposits in the lowermost part of the Cretaceous Kyokpori Formation, SW Korea: Cohesionless debris flows and debris falls on a steep-gradient delta slope. *Sedimentary Geology*, 98, 97-119.
- Kim, S.B., Chun, S.S. and Chough, S.K., 1997, Discussion on structural development and stratigraphy of the Kyokpo Pull-Apart Basin, South Korea and tectonic implications for inverted extensional basins. *Journal of Geological Society of London*, 154, 369-372.
- Kim, S.W., Kwon, S., Ryu, I.C., Jeong, Y.J., Choi, S.J., Kee, W.S., Yi, K., Lee, Y.S., Kim, B.C. and Park, D.W., 2012, Characteristics of the Early Cretaceous igneous activity in the Korean Peninsula and tectonic implications. *Journal of Geology*, 120, 625-646.
- Kim, Y.-S., Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J., 2003, Mesoscale strike-slip faults and damage zones at Marsalforn, Gozo Island, Malta. *Journal of Structural Geology*, 25, 793-812.
- Kim, Y.-S., Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J., 2004, Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26, p. 03-517.
- Koh, H.J., Kwon, C.W., Park, S.I., Park, J. and Kee, W.-S., 2013, Geological Report of the Julpo and Wido-Hwangdeungdo Sheets (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 80 p (in Korean with English abstract).
- Lambiase, J.J. and Bosworth, W.P., 1995, Structural development and stratigraphy of the Kyokpo Pull-Apart Basin, South Korea and tectonic implications for inverted extensional basins. In: Duchanan, P.G. (eds.) *Basin Inversion*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 88, 457-471.
- Lee, B.J., 2011, Fault system in the Cretaceous Kyokpo Basin and its basement: Implications for basin formation. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 245-254 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.J. and Kim, B.C., 2003, Geology and structural development of the Cretaceous Gongju Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 161-170 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.J., Kim, J.C., Kim, Y.B., Cho, D.L., Choi, H.I., Chun, H.Y. and Kim, B.C., 1997, Geological report of the Gwangju sheet (1:250,000). Korea Institute of geology, Mining and Materials, 79 p (in Korean with English abstract).
- Lee, B.J. and Lee, S.R., 2001, Geological report of the Gochang sheet (1:50,000). Korea Institute of geology, Mining and Materials, 47 p (in Korean with English abstract).
- Lee, H.K., 1998, Structural analysis of the Cretaceous Pungam Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 122-136 (in Korean with English abstract).
- O'Leary, D.W., Friedman, J.D. and Pohn, H.A., 1976, Lineament, linear, lineation; some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 1463-1469.
- Ryang, W.-H., 2013, Characteristics of strike-slip basin formation and sedimentary fills and the Cretaceous small basins of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 31-45 (in Korean with English abstract).

Received : January 16, 2015

Revised : March 6, 2015

Accepted : March 14, 2015