

충남분지 성주리향사의 구조기하학적 해석

노정래¹ · 박승익^{2*} · 권상훈¹

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²경북대학교 지구시스템과학부

Structural Geometry of the Seongjuri Syncline, Chungnam Basin

Jungrae Noh¹, Seung-Ik Park^{2*} and Sanghoon Kwon¹

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

²School of Earth System Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea

(Received: 8 September 2018 / Revised: 28 October 2018 / Accepted: 5 November 2018)

Chungnam Basin has been known as one of the largest Mesozoic basins in Korea, filled mainly with so-called Daedong Supergroup. The basin has evolved as the Early to Middle Jurassic intra-arc volcano-sedimentary basin developed on top of the Late Triassic to Early Jurassic post-collisional basin in this area, recording evolutionary history of the Mesozoic tectonics in the southwestern Korean Peninsula. This study carries out the geometric interpretations of the Seongjuri syncline and its surroundings in the central part of the Chungnam Basin, based on detailed structural field survey. Based on its doubly-plunging fold geometry, the Seongjuri syncline could be subdivided into the southwestern and northeastern domains. On the down-plunge profiles of the southwestern domain of the Seongjuri syncline as well as the underlying Okma fold, the Okma fault shows typical geometry of a basement-involved reverse fault that propagated up to the sedimentary cover. The profiles illustrate that the Seongjuri syncline occurs in front of the tip of the Okma fault, likely implying its origin as a part of the fault-related fold system. The result of this study will provide better insight into the structural interpretation of the Chungnam Basin, and will further provide useful information for the Mesozoic organic events of the southwestern Korean Peninsula.

Key words : Chungnam Basin, Seongjuri syncline, Okma fault, down-plunge projection, basement-involved fault

후기 트라이아스기~전기 쥐라기의 후 충돌 분지 상위에 전기 및 중기 쥐라기의 호 내부 분지가 중첩되어 나타나는 충남분지는 대동누층군의 분포 지역으로 잘 알려져 있으며, 중생대 퇴적분지의 진화와 지구조 운동과의 상관관계를 규명하는데 매우 중요한 지역이다. 본 연구에서는 충남분지에 발달하고 있는 지질구조 연구의 일환으로서 분지 중앙부에 위치하는 성주리향사 및 주변 지역에 대한 지표 지질조사를 통해 구조기하학적 해석을 수행하였다. 연구지역에 발달하는 대표적인 지질구조로는 성주리향사와 더불어 옥마단층, 옥마습곡, 백운사단층이 있다. 연구의 대상인 성주리향사는 층리 자세의 변화에 따라 크게 남서부 및 북동부의 두 영역으로 나뉘며, 각 영역의 횡지가 저점으로 모이는 이중침강습곡의 형태를 보인다. 성주리향사 남서부 및 옥마습곡에 대한 하향 투영을 통해 작성된 단면을 해석한 결과, 옥마단층 및 옥마습곡은 기반암 내의 단층이 상위의 퇴적암으로 전파하면서 발달한 구조로 판단되며, 성주리향사는 옥마단층의 단층말단 상부에 형성된 배사 및 향사의 일부로 해석된다. 본 연구의 결과는 충남분지 및 더 나아가 중생대 조산대로서 한반도 남서부에 기록되어 있는 변형사를 밝히는 데에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

주요어 : 충남분지, 성주리향사, 옥마단층, 하향 투영, 기반암 수반 단층

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: psi@knu.ac.kr

1. 서 언

전기~중기 중생대에 퇴적된 것으로 보고되어온 대동누층군(Shimamura, 1931; Yu, 1983; Chun *et al.*, 1990; Yu and Lee, 1992; Yu *et al.*, 1992; Egawa and Lee, 2006, 2009, 2011)은 중생대 이후 한반도의 지각 변형사를 보존하고 있는 대표적인 퇴적층이다 (Fig. 1; Cluzel *et al.*, 1990; Cluzel, 1992a, b; Kim, 1996; Chough *et al.*, 2000). 대동누층군에 속하는 남포층군이 넓게 분포하는 충남분지 (Fig. 2)는 후기 트라이아스기~전기 쥐라기의 후 충돌 분지(post-collisional basin) 상위에 전기 및 중기 쥐라기의 호 내부 분지 (intra-arc basin)가 중첩되어 있는 양상을 보이며, 최근 한반도 남서부의 중생대 분지 진화와 지구조 환경 변화의 상호관계에 대한 연구가 시작된 지역이다 (Park *et*

al., 2018). 그 간 대동누층군의 퇴적 및 변형 모델을 수립하기 위해 다수의 구조지질학적 연구가 충남분지에서 진행된 바 있으나 (Cluzel, 1992a, b; Lim and Cho, 2012; Park and Noh, 2015; Park *et al.*, 2018), 현재의 분지 형태를 제어한 지질구조의 형성기작에 대한 기초적인 연구는 아직 부족한 것이 사실이다. 충남분지 지질구조의 기원에 대한 이해 부족은 한반도 남서부에 기록되어 있는 중생대 조산운동의 지구조 모델을 수립하는데 어려움을 야기한다.

충남분지 중앙부에 발달하는 성주리향사 (Figs. 2 and 3)는 비원통형의 분지형 습곡으로서 충남분지의 압축 변형의 특성을 이해하는데 중요한 대상으로 간주되어 왔다 (e.g. Fletcher *et al.*, 1976; Lim and Cho, 2012). 특히 성주리향사 주변으로 단층과 습곡에 의해 분포가 규제되는 기반암과 퇴적층이 함께 분포하기 때문에 (Fig. 3), 이 지역은 기반암과 퇴적층의 상호작용에 의한 변형특성을 인지할 수 있는 자연적인 실험실로서의 의미를 가진다. 본 연구에서는 충남분지에서 압축변형

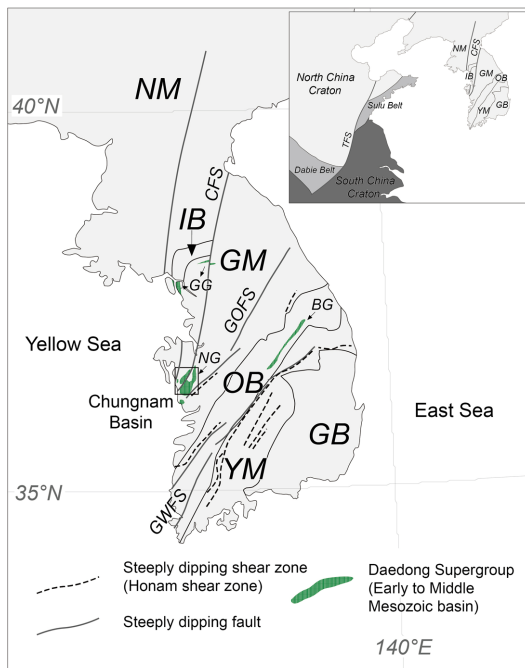


Fig. 1. General tectonic map of the Korean Peninsula, showing the distribution of the Early to Middle Mesozoic Daedong Supergroup, and East Asia. The black box in the southwestern Gyeonggi Massif indicate the area of Fig. 2. Modified from Cluzel (1992a), Han *et al.* (2006), and Park *et al.* (2018). NM: Nangrim Massif, GM: Gyeonggi Massif, YM: Yeongnam Massif, IB: Imjingang Belt, OB: Okcheon Belt, GB: Gyeongsang Basin, TFS: Tan-Lu Fault System, CFS: Chugaryeong Fault System, GFS: Gongju Fault System, GWFS: Gwangju Fault System, NG: Nampo Group, BG: Bansong Group, GG: Gimpo Group.

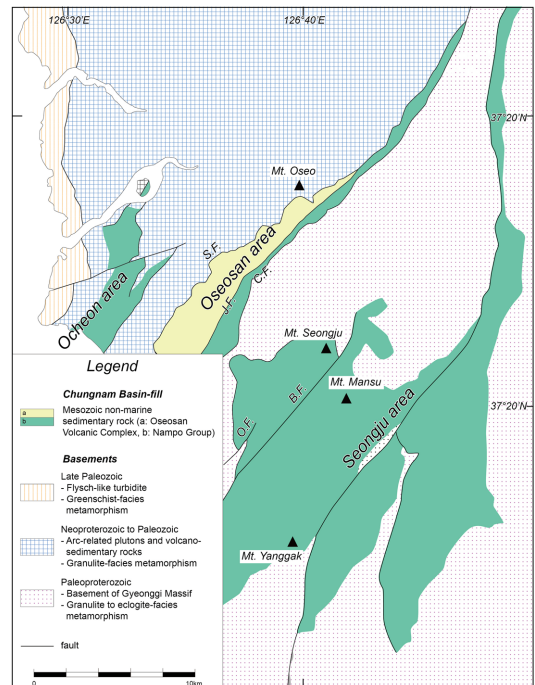


Fig. 2. Simplified geologic map of the Chungnam Basin. Modified after Lim and Cho (2012), Kim *et al.* (2014), and Park *et al.* (2018). The Chungnam Basin consists of the isolated sediment packages of Ocheon, Oseosan, and Seongju areas. The basement comprises Paleoproterozoic to Paleozoic rocks. S.F.: Seongyeon fault, J.F.: Jangsan fault, C.F.: Cheongla fault, O.F.: Okma fault, B.F.: Baegunsan fault.

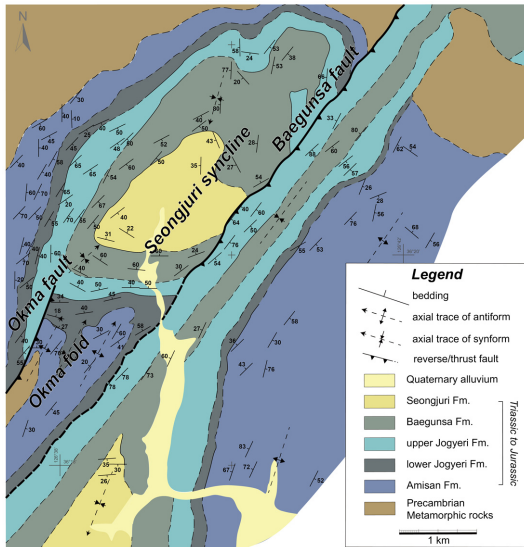


Fig. 3. Detailed geologic map of the Seongjuri syncline and adjacent area. Modified after Choi *et al.* (1987).

시 발생된 지질구조의 발달 기작을 파악하기 위해 성주리향사와 주변 지질구조에 대한 지표 조사 및 구조 분석을 수행하였다. 구조 분석에는 정밀 지표 지질조사 결과 및 하향 투영을 통해 작성된 단면도가 활용되었으며 이를 통해 인지된 연구 지역 지질구조의 기하

학적 형태와 그 형성 기작 해석은 기존에 알려진 모델과의 비교를 통해 논의되었다. 본 논문에서 제시하는 성주리향사의 구조지하학적 해석 결과는 충남분지의 변형 및 진화 모델을 수립하고, 분지의 압축변형을 야기한 조산운동의 구조적 성격을 이해하는데 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

2. 지질개요

충청남도 보령과 청양 일대에 발달하는 충남분지는 경기육괴의 기반암과 접한다(Figs. 1 and 2). 이들 기반암은 서로 다른 모암연대, 변성 및 변형 특성에 따라 1) 고원생대 편마암 영역, 2) 신원생대와 고생대의 화성활동 및 화산-퇴적작용을 기록하는 고변성암 영역, 3) 후기 고생대 저변성 퇴적암 영역으로 구분된다(Kim *et al.*, 2014 and references therein).

기반암을 피복하며 성주, 오서산, 오천지역에 독립적으로 분포하는 충남분지의 퇴적물은 대부분 남포층군으로 동일하게 명명되어 왔다(Choi *et al.*, 1987; Egawa and Lee, 2006, 2009; Lim and Cho, 2012; Egawa, 2013). 하천-삼각주-호수 환경에서 퇴적된 남포층군은 하부로부터 하조층, 아미산층, 조계리층, 백운사층, 그리고 성주리층으로 세분된다(Choi *et al.*, 1987; Egawa and Lee, 2009). 이 중 아미산층과 백

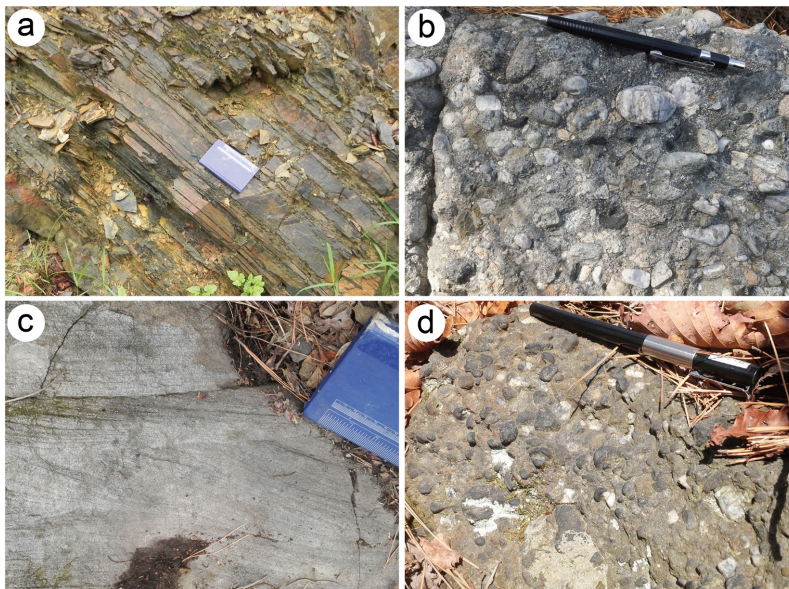


Fig. 4. Outcrop Photographs of main lithologies of the Nampo Group distributed in the study area. (a) Gray shale of the Amisan Formation. (b) Conglomerate of the Jogyeri Formation. (c) cross-bedded light gray sandstone of the Baegunsa Formation, (d) Conglomerate of the Seongjuri Formation.

운사층의 경우 사암과 셰일이 주를 이루며, 하조, 조계리, 성주리층은 대부분 역암과 사암으로 구성된다(Fig. 4; Choi *et al.*, 1987; Egawa and Lee, 2006). 다만, 본 연구 지역인 성주리향사와 주변 지역에는 남포층군의 최하부 지층인 하조층이 분포하지 않는다(Fig. 3). 이는 분지 내에서 하조층의 연장성이 좋지 않으며, 연구 지역의 경우 하조층이 아닌 아미산층이 기반암 위의 부정합을 피복하였음을 의미할 수 있다.

남포층군의 퇴적시기는 고생물 및 고지자기 연구를 통해 후기 트라이아스기~전기 쥐라기로 제한되어 왔다(e.g. Chun *et al.*, 1990; Min *et al.*, 1992). 또 다른 의견으로서 일부 연구자들은 분지의 북측 경계부에 국부적으로 분포하는 화산쇄설암에서 보고된 약 172 Ma의 U-Pb 저어콘 연령(Koh, 2006)을 근거로 남포층군의 퇴적시기를 전기~중기 쥐라기로 해석하기도 하였다(e.g. Jeon *et al.*, 2007; Egawa and Lee, 2009). 하지만 근래 이 지역에서 수행된 구조지질학적, 고생물학적 연구(Park and Noh, 2015; Park *et al.*, 2018)는 충남분지에 발달하는 화산쇄설암 및 관련된 퇴적층이 층서적으로 후기 트라이아스기~전기 쥐라기 남포층군 상위에 놓이는 독립적인 암상단위임을 밝히고 이들을 전기~중기 쥐라기의 오서산 화산암 복합체로 제안하였다. 즉, 후기 트라이아스기에 후 충돌 환경에서 처음으로 형성된 충남분지의 침강이 한반도가 대륙 화

산호 환경에 놓여 있었던 중기 쥐라기까지 지속된 것으로 해석된 것이다(Park *et al.*, 2018).

3. 성주리향사 주변의 지질구조

연구 지역에서 인지되는 지질도 규모의 지질구조로는 성주리향사와 더불어 옥마단층, 옥마습곡, 백운사단층이 있다(Fig. 3). 이들 구조들은 남포층군과 더불어 변성 기반암을 함께 변형시키고 있다. 백운사단층과 옥마단층은 북서-남동 방향으로 서로 아평행하며, 성주리향사 및 옥마습곡에서 인지되는 헨지들의 방향과도 아평행하다. 즉, 연구지역에 발달하는 지질도 규모의 지질구조들은 기하·운동학적 상호 연관성을 가진다. 상세 지표지질조사 결과를 통해 인지한 각 지질구조의 특성은 다음과 같다.

3.1. 성주리향사

성주리향사는 성주산 주변으로 발달하는 습곡으로(Fig. 2), 아미산, 조계리, 백운사 및 성주리층의 타원형 분포로 정의된다(Fig. 3). 성주리향사의 북서측 날개부에서는 지층이 전반적으로 남동쪽으로 경사하며(Fig. 5a), 남동측 날개부에서는 북서쪽, 서쪽, 남서쪽으로 경사한다(Fig. 5b). 이러한 광역적인 습곡의 형태에도 불구하고 노두 규모에서의 기생습곡 및 습곡과 관

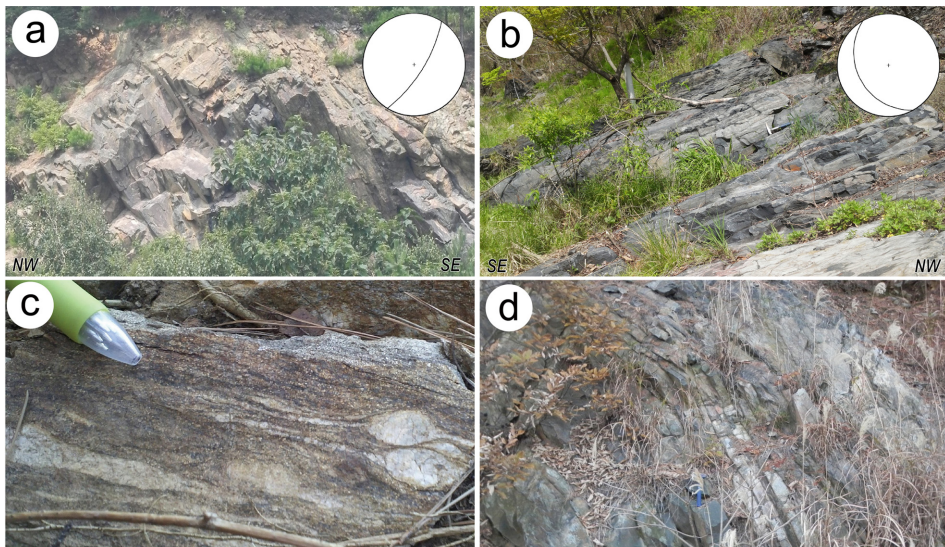


Fig. 5. Outcrop Photographs in the Seongju syncline and adjacent area. (a) Southeast-dipping sandstone layers in the northwestern limb of the Seongjuri syncline. (b) Southwest-dipping sandstone layers in the southeastern limb of the Seongjuri syncline. (c) Augen gneiss showing elongated feldspar porphyroclasts, located in the hanging wall basement block of the Okma fault. (d) Gently folded shale and sandstone layers, located in the footwall of the Okma fault.

련된 벽면은 잘 발달하지 않는다. 성주리향사의 남서부 영역은 두 날개부가 각기 남동쪽과 북서쪽으로 경사하는 완사(open) 습곡의 형태를 보이며, 힌지는 북동 방향으로 완만하게 침강한다(Fig. 3). 반면, 성주리향사의 북동부는 두 날개부가 각기 남동 방향과 남서-남서남서 방향으로 경사하는 완사 습곡 형태를 보이며, 힌지는 남서-남남서 방향으로 완만하게 침강한다(Fig. 3). 즉, 성주리향사의 전체적인 형태는 서로 다른 두 방향의 힌지가 저점(low point)으로 모이는 비원통형의 이중침강습곡(doubly-plunging fold)으로 특징지어진다.

3.2. 옥마단층

옥마단층은 성주리향사의 남서쪽에 발달한다(Fig. 3). 옥마단층에 의해 절단되어 있는 지층은 기반암을 포함하여 아미산층, 하부 조계리층 및 상부 조계리층의 일부이며, 그 상부 지층으로는 단층이 연장되지 않는다. 아미산층과 하부 조계리층의 상-하부 경계면이 단층과 만나 정의되는 절단각(cutoff angle)은 비교적 고각이며, 이는 하반에서보다 상반에서 더욱 크다. 비교적 고각의 절단각과 더불어 상반의 기반암(Fig. 5c)과 하반의 아미산층-조계리층(Fig. 5d)이 서로 접하는 점을 고려하였을 때, 옥마단층은 기반암을 수반하는 역단층으로 간주된다.

3.3. 옥마습곡

옥마습곡은 옥마단층의 상반에 발달한다. 이 습곡은 아미산층과 하부 조계리층이 남동쪽 및 북서쪽으로 경사하며 이루는 완만(gentle) 내지 완사(open) 형태의 배사-향사 쌍(anticline-syncline pair)으로 정의된다(Fig. 3). 습곡의 힌지는 전반적으로 북동쪽으로 완만하게 침강한다. 옥마습곡의 후방날개(backlimb)부에 분포하는 아미산층과 하부 조계리층은 남동쪽으로 고각 경사하며, 하부 조계리층을 절단하는 백운사단층에 의해 습곡의 남동측 끝이 제한된다.

3.4. 백운사단층

백운사단층은 연구지역을 가로지르는 가장 큰 단층으로서, 상술한 옥마단층과 옥마습곡, 그리고 성주리향사는 이 단층의 하반에 발달한다(Fig. 3). 성주리향사를 가로지르는 단층의 북동부에서 하반 절단각(footwall cutoff)은 비교적 고각이며, 따라서 이 구간에서는 기반암에서부터 남포층군의 모든 지층이 백운사단층과 접촉한다. 반면 옥마습곡의 후방날개부와 접하는 남서측 연장부에서는 하부 조계리층과 아평행하게 단층이 발달함에 따라 하반 절단각이 매우 작다. 백운사단층의

상반의 경우 횡적으로 일관되게 상부 조계리층이 절단된다. 단층이 상부 조계리층과 아평행하게 발달함에 따라 모든 구간에서의 상반 절단각(hanging wall cutoff)은 매우 작다.

4. 하향 투영(down-plunge projection)을 통한 구조 관찰

연구 지역에 발달하는 단층 및 습곡 구조의 사실적인 형태(realistic geometry)를 파악하기 위하여 단면도(profile)를 작성하였다. 단면도의 작성은 상세 지질조사를 통해 수집한 층리 정보를 활용하여 하향 투영(down-plunge projection)을 통해 이루어졌다. 하향 투영을 위해 우선 습곡 힌지의 방향 변화, 단층에 의한 지층의 절단 양상 등을 고려하여 구조 영역(structural domain)을 분대하였다(Fig. 6). 성주리향사의 남서부와 북동부, 그리고 옥마습곡 지역을 각각 영역 1-1, 1-2, 2로 정의하였으며, 이 중 성주리향사, 옥마단층, 옥마습곡, 백운사단층의 상호관계를 모두 인지할 수 있는 영역 1-1과 2에 대해 하향 투영 및 구조단면도 작성이 수행되었다. Fig. 7은 최종적으로 작성된 단면도를 나타낸 것이다. 단면에서 모든 지층들은 두께가 거의 일정하게 유지되는데, 이는 하향 투영을 통해 작성된 단면도의 왜곡이 적음을 의미한다. 단면 해석을 통해 인지할 수 있는 구조적 특징은 다음과 같다.

(1) 옥마단층은 상반의 기반암이 하반의 남포층군(아미산층, 하부 조계리층) 위에 위치하는 역단층의 형태를 명확히 보여준다. 옥마단층의 분리량(separation)은 단층을 따라 상부로 갈수록 점점 감소하여 상부 조계리층 내에서 0이 된다. 이는 단층말단(fault tip)이 상부 조계리층 내에 발달함을 의미한다.

(2) 기반암을 수반한 옥마단층은 경사가 하부로 갈수록 증가하는 반점완단층(anti-listric fault)의 형태를 보인다. 옥마단층 하반의 지층들은 남동쪽으로 비교적 일관되게 경사하는 반면, 옥마단층 상반의 지층들의 자세 변화는 북서 방향으로의 버전스(vergence)를 가지는 비대칭형의 옥마습곡을 잘 정의한다.

(3) 성주리향사는 옥마단층 및 옥마습곡의 구조적 상위에 위치한다. 특히 성주리향사의 힌지부가 옥마단층의 말단 앞에 위치하는 점은 주목할 만하다. 성주리향사의 북서측 날개부는 옥마단층 하반의 지층과 동일하게 남동쪽으로 경사한다. 성주리향사의 남동측 날개부는 옥마습곡의 북서측 날개부와 동일 습곡의 일부로서 자연스럽게 연결된다.

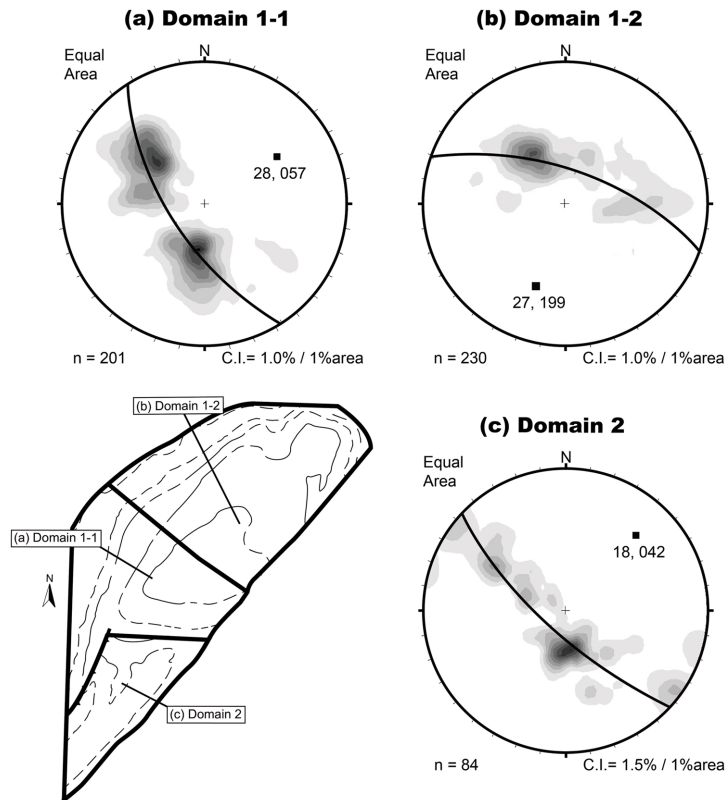


Fig. 6. Structural domain map of the study area and equal area plots of poles to bedding from each domain. (a) domain 1-1 showing a fold axis of $28^{\circ}/057^{\circ}$ (b) domain 1-2 showing a fold axis of $27^{\circ}/199^{\circ}$, (c) domain 2 showing a fold axis of $18^{\circ}/042^{\circ}$.

5. 토 의

5.1. 성주리향사의 기원

상세 야외조사를 기반으로 작성된 지질도 및 하향 투영을 통해 작성된 단면도를 바탕으로 확인된 성주리향사와 주변 지질구조의 기하학적 특성은 이들 지질구조의 기원에 대한 중요한 정보를 제공한다. 우선 옥마습곡의 경우 옥마단층의 발달에 수반된 상반 배사(hanging wall anticline)로서 전형적인 기하학적 특징을 보인다(Fig. 7). 상반이 북서쪽으로 이동하는 옥마단층의 운동 성격은 비대칭적인 옥마습곡에서 인지되는 북서쪽에서의 버전스와 조화롭다. 한편 옥마습곡의 북서측 날개부와 성주리향사의 남동측 날개부가 자연스럽게 연결되는 점(Fig. 7)은 이 두 습곡의 기원적으로 상호 연결되어 있다는 점을 강하게 지시한다. 이러한 논리적 흐름에서 성주리향사의 기원은 옥마단층의 형성과 매우 밀접한 관련이 있음이 해석 가능하며, 이러한 해석은 성주리향사의 힌지부가 옥마단층의 말단 바로

앞에서부터 발달한다는 사실에 의해 뒷받침될 수 있다.

전파하는 단층의 말단 앞에서 블록의 이동에 의한 변형을 흡수하기 위해 형성되는 습곡은 일반적으로 단층 전파 습곡(fault-propagation fold)이라 불린다(Jamison, 1987; Mitra, 1990; Suppe and Medwedeff, 1990; Mercier *et al.*, 1997; Brandes and Tanner, 2014). Fig. 8의 예와 같이 분리단층에서부터 전파되는 충상단층 뿐 아니라 고각의 역단층의 경우에도 단층이 전파하고 블록이 경사면을 따라 이동함에 따른 지층의 구부러짐(bending)이 발생된다(Narr and Suppe, 1994; Mitra and Miller, 2013). 일반적으로 단일 단층에 의한 단층 전파 습곡의 전형적인 모델은 급경사 혹은 역전된 전면날개부(forelimb)를 가지는 비대칭 배사형 습곡의 형태에 의해 특징지어진다(Fig. 8). 연구지역에 발달하는 성주리향사의 경우 비록 옥마단층의 말단 앞에 발달하고 있기는 하지만, 상술한 전형적인 단층 전파 습곡의 형태와는 차이를 보인다. 하지만 다음의 정황적 근거를 통해 본 연구에서는 성주리향사를 옥마단층의

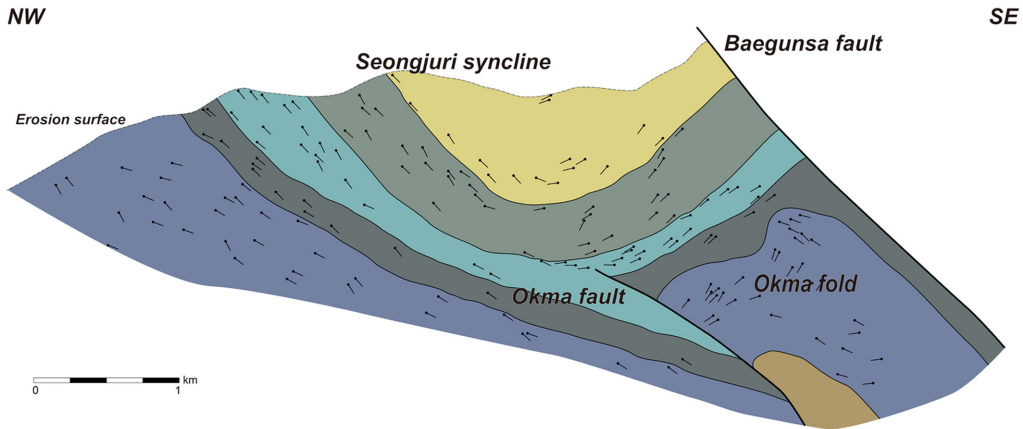


Fig. 7. Composite profile of the southwestern part of the Seongjuri syncline and the Okma fold, constructed through down-plunge projections using axis orientations in the domain 1-1 and 2. Black sticks on the section indicate the projected bedding orientations.

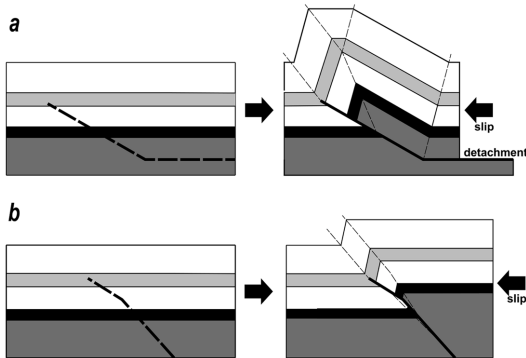


Fig. 8. Simple schematic diagrams showing the geometry of fault-propagation fold, modified from Brandes and Tanner (2014), Mitra and Miller (2013). (a) Fault-propagation fold developed in front of a tip of a basement-involved thrust. (b) Fault-propagation fold developed in front of a tip of a basement-involved reverse fault. Dark gray area: basement, White/light gray/black layers: sedimentary cover.

단층 전파 습곡의 일부로서 해석할 수 있음을 주장한다.

앞서 기술한 바와 같이 성주리향사의 남동측 날개부는 비대칭 배사형 옥마습곡의 전면날개부에 해당하는 북서측 날개부와 연결된다(Fig. 7). 이는 비록 현재에는 백운사단층에 의해 잘려있지만, 옥마습곡의 후방날개부(backlimb), 즉 남동측 날개부와 연결되는 상부 구간 역시 존재해야 함을 의미한다. 옥마단층의 남동측 날개부처럼 남동쪽으로 경사하는 상부 구간을 고려한다면 성주리향사 남동쪽에는 배사형 습곡이 복원되어야 한다. 하지만 백운사단층이 역이동성분을 가지는 단층

임을 고려할 때, 이러한 배사형 습곡의 힌지부는 백운사단층에 의해 절단되어 위로 이동한 후 침식되어 현재 관찰되지 않는다.

성주리향사의 기원과 관련하여 단층 전파 습곡 모델을 연구지역에 적용하기 위해서는 현재 옥마단층의 말단이 배사형 습곡이 아닌 향사형 습곡(성주리향사) 하부에 발달되어 있는 점 역시 설명되어야 한다. 현재 성주리향사의 북서측 날개부에서 인지되는 퇴적암 및 그 하부의 부정합면은 남동쪽으로 경사한다. 부정합면이 경사하고 있음은 기반암의 변형이 회전 요소를 포함하고 있음을 지시한다. 본 연구에서는 제한된 정보에 기인하여 기반암의 회전이 어떠한 요인에 의해 발생되었는지 설명할 수 없지만, 이러한 기반암의 회전 요소는 퇴적층 내에 형성되어 있던 기존의 단층과 습곡 역시 회전시킨다. 압축변형이 점진적으로 진행됨에 따라 기존의 단층 전파 습곡이 회전되었을 시, 단층의 말단이 배사형 습곡이 아닌 향사형 습곡 하부에 놓이는 점은 자연스럽게 설명된다(e.g., Poblet and Lisle, 2011).

한편 성주리향사와 더불어 옥마습곡의 형성을 제어한 옥마단층의 경우 하부로 갈수록 경사가 증가하는 반점완단층의 형태를 보인다. 옥마단층과 같이 압축된 퇴적분지 내에 발달하는 기반암을 수반한 역단층은 많은 경우 기반암 내에 기존에 존재하던 고각의 정단층을 따른 재활성에 의해 형성된다(Lacombe and Bellahsen, 2016 and references therein). 분지의 역전 중 기반암에 발달하던 고각의 정단층이 역단층으로 재활성되어 상부로 전파되면, 퇴적암 내로 연장되어 새롭게 만들어진 압축성 단층(contractural fault)의 각도는 단

층역학적 이론(Anderson, 1905)에 따라 저각으로 바뀌는 경향이 있다(e.g., Williams *et al.*, 1989; Pace and Calamita, 2013). 따라서 반점완단층의 형태를 보이는 옥마단층은 분지역전 중 기반암 내 정단층이 재활성됨에 따라 발달된 기반암 수반 역단층일 가능성이 높다(Fig. 8b).

5.2. 기존 구조적 모델과의 비교

과거 제시된 모델들(Cluzel, 1992a; Kim, 1996; Lim and Cho, 2012)에 따르면 충남분지는 분지 형성 이후 북서-남동 방향과 남-북 방향의 압축(shortening)을 차례로 경험하였다. Lim and Cho (2012)는 이러한 순차적인 압축변형에 따라 북동-남서 방향과 동-서 방향의 습곡들이 서로 중첩되어 형성된 돔과 분지(dome-and-basin) 구조가 충남분지 안에서 인지된다고 보고하였다. 즉, 본 연구의 대상인 성주리향사의 경우 분지형태의 중첩습곡구조로 해석된 것이다.

하지만 본 연구에서 수행한 상세 지표 지질조사 결과 성주리향사 내에는 동-서 방향의 습곡구조가 인지되지 않는다. Fig. 3과 Fig. 6에서 확인되는 바와 같이 성주리향사 내에서 인지되는 습곡의 축적적(axial trace) 혹은 힌지의 방향은 북동-남서 혹은 북북동-남남서 방향으로 놓인다. 북동-남서 방향의 습곡에 동-서 방향의 습곡이 중첩되어 분지형태의 성주리향사가 형성되었다는 기존 모델은 재고려할 필요가 있다.

대안적으로 본 연구에서는 성주리향사의 형성에 단층 전과 습곡의 모델을 적용하였다. 하지만 단층 전과 습곡의 일부로서 성주리향사가 비원통형 습곡의 형태를 보이는 이유는 현재로서 명확하게 제시되기 힘들다. 다만 역단층의 변위 및 상반 물질 이동의 정도가 주향에 따라 달라지거나 단층의 방향과 물질의 이동방향이 사교하는 경우 힌지의 방향이 변화하는 비원통형 습곡은 어렵지 않게 발달할 수 있다(e.g. Casas *et al.*, 1992; Vannuchi and Bettelli, 2002; Bayona *et al.*, 2003; Jacques *et al.*, 2014). 연구 지역에서 이에 대한 명확한 설명이 가능하기 위해서는 좀 더 넓은 지역에 대한 추가적인 구조지질학적 연구가 필요하다.

6. 결 론

본 연구에서는 충남분지 중앙부에 발달하는 성주리향사 및 주변 지질구조에 대한 상세 지표 지질조사와 하향 투영을 통한 단면도 분석이 수행되었다. 이를 통해 성주리향사는 옥마단층의 전파에 수반된 변형의 산물로 해석되었다. 성주리향사의 형성을 제어한 옥마단

층은 분지의 압축변형 시 기존의 기반암 정단층이 재형성되어 형성된 기반암 수반 역단층의 기하학적 성격을 보인다. 본 연구에서 제시된 성주리향사의 형성 모델은 기존에 제안되었던 중첩습곡구조 모델이 가지는 단점을 설명할 수 있는 대안적 해법이며, 후속 연구를 통해 이에 대한 추가적인 검증이 필요하다.

사 사

이 논문은 한국연구재단 신진연구지원사업(2018R1C1B6003851)에 의해 지원되었으며, 일부는 연세대학교에서 수행한 노정래의 석사학위 논문의 내용임을 밝힌다. 논문의 질적 향상을 위해 건설적인 비평을 해주신 두 익명의 심사위원과 편집위원께 깊은 사의를 표한다.

References

- Anderson, E.M. (1905) The dynamics of faulting. Trans. Edinburgh Geol. Soc., v.8, p.387-402.
- Bayona, G., Thomas, W.A. and Van der Voo, R. (2003) Kinematics of thrust sheets within transverse zones: a structural and paleomagnetic investigation in the Appalachian thrust belt of Georgia and Alabama. J. Struct. Geol., v.25, p.1193-1212.
- Brandes, C. and Tanner, D.C. (2014) Fault-related folding: A review of kinematic models and their application. Earth-Sci. Rev., v.138, p.352-370.
- Casas, A.M., Simon, J.L. and Seron, F.J. (1992) Stress deflection in a tectonic compressional field: a model for the northeastern Iberian Chain, Spain. J. Geophys. Res., v.97, p.7183-7192.
- Choi, H.I., Kim, D.S. and Seo, H.G. (1987) Stratigraphy, depositional environment and basin evolution of the Daedong strata in the Chungnam Coalfield. KR-87-B-3, Korea Institute of Energy and Resources, 97p. (in Korean with English abstract).
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K. (2000) Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. Earth-Sci. Rev., v.52, p.175-235.
- Chun, H.Y., Choi, Y.S., Choi, S., Kim, Y.B., Kim, B.C., Lee, B.S. and Bong, P.Y. (1990) Fossil floral and faunal assemblages and Paleoenvironmental modeling study (II) on the Cretaceous sedimentary basins scattered in/near the Ogcheon Belt. KR-94(T)-11, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 101p.
- Cluzel, D. (1992a) Formation and tectonic evolution of Early Mesozoic intramontane basins in the Ogcheon Belt (South Korea): A Reappraisal of the Jurassic "Daeboro Orogeny". J. Southeast Asian Earth Sci., v.7, p.223-235.
- Cluzel, D. (1992b) Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon belt (South Korea): intracontinental rift-related volcanic activity. J. Southeast Asian Earth Sci., v.7, p.195-209.

- Cluzel, D., Cadet, J.P. and Lapierre, H. (1990) Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, v.183, p.41-56.
- Egawa, K. (2013) East Asia-Wide Flat Slab Subduction and Jurassic Synorogenic Basin Evolution in West Korea. In Itoh, Y. (ed.) *Mechanism of sedimentary Basin Formation-Multiplinary Approach on Active Plate Margin*. InTech.
- Egawa, K. and Lee, Y.I. (2006) Stratigraphy of the Nampo Group in the Ocheon and Oseosan areas: significance of conglomerates of the Jogyeri Formation for unconformity. *J. Geol. Soc. Korea*, v.42, p.635-643 (in Korean with English abstract).
- Egawa, K. and Lee, Y.I. (2009) Jurassic synorogenic basin filling in western Korea: sedimentary response to inception of the western circum-Pacific Orogeny. *Basin Res.*, v.21, p.407-431.
- Egawa, K. and Lee, Y.I. (2011) K-Ar dating of illites for time constraint on tectonic burial metamorphism of the Jurassic Nampo Group (West Korea). *Geosci. J.*, v.15, p.131-135.
- Fletcher, C.J.N., Thomas, L.P. and Park, S.W. (1976) The geological structure of the Chungnam coalfield and its bearing on the location of off-shore coal reserves. *Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources*. 32p.
- Han, R., Ree, J.-H., Cho, D.-L., Kwon, S.-T. and Armstrong, R. (2006) SHRIMP U-Pb zircon ages of pyroclastic rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea and their implication for the Mesozoic tectonics. *Gondwana Res.*, v.9, p.106-117.
- Jacques, D., Derez, T., Muchez, P. and Sintubin, M. (2014) Regional significance of non-cylindrical folding in the northwestern part of the High-Ardenne slate belt (Redu-Daverdisse, Belgium). *Geol. Belg.*, v.17, p.252-267.
- Jamison, W. (1987) Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *J. Struct. Geol.*, v.9, p.207-219.
- Jeon, H., Cho, M., Kim, H., Horie, K. and Hidaka, H. (2007) Early Archean to Middle Jurassic Evolution of the Korean Peninsula and Its Correlation with Chinese Cratons: SHRIMP U-Pb Zircon Age Constraints. *J. Geol.*, v.115, p.525-539.
- Kim, J.H. (1996) Mesozoic tectonics in Korea. *J. Southeast Asian Earth Sci.*, v.13, p.251-265.
- Kim, S.W., Park, S.-I., Ko, K., Lee, H.-J., Koh, H.J., Kihm, Y.H. and Lee, S.R. (2014) 1:100,000 Tectonostratigraphic map of the Hongseong area, map 1: solid geology interpretation. *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*.
- Koh, H.-J. (2006) Tectonic implication of the Mungyeong-Jeongseon tectonic line, the Yeongweol Nappe and the Bansong Group in the Ogcheon belt. In Kee, W.-S. (ed.), *Mesozoic Crustal Evolution of Northeast Asia*, Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources, p.228-259 (in Korean).
- Lacombe, O. and Bellahsen, N. (2016) Thick-skinned tectonics and basement-involved fold-thrust belts: insights from selected Cenozoic orogens. *Geol. Mag.*, v.153, p.763-810.
- Lim, C. and Cho, M. (2012) Two-phase contractional deformation of the Jurassic Daebo Orogeny, Chungnam Basin, Korea, and its correlation with the Early Yanshanian Movement of China. *Tectonics*, v.31, TC1004, doi:10.1029/2011TC002909.
- Mercier, E., Outtani, F. and De Lamotte, D.F. (1997) Late-stage evolution of fault-propagation folds: principles and example. *J. Struct. Geol.*, v.19, p.185-193.
- Min, K.D., Um, J.-G., Kim, D.W., Choi, Y.H., Lee, Y.S. and Nishimura, S. (1992) Paleomagnetic Study of the Daedong Group in the Choongnam Coal Field. *Jour. Korean Ins. Mining Geol.*, v.1, p.87-96 (in Korean with English abstract).
- Mitra, S. (1990) Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, v.74(6), p.921-945.
- Mitra, S. and Miller, J.M. (2013) Strain variation with progressive deformation in basement-involved trishear structures. *J. Struct. Geol.*, v.53, p.70-79.
- Narr, W. and Suppe, J. (1994) Kinematics of Basement-involved Compressive Structures. *Am. J. Sci.*, v.294, p.802-860.
- Pace, P. and Calamita, F. (2013) Push-up inversin structures v. fault-bend reactivation anticlines along oblique thrust ramps: examples from the Apennines fold-and-thrust belts (Italy). *J. Geol. Soc.*, v.171, p.227-238.
- Park, S.-I. and Noh, J. (2015) Jangsan fault: Evidence of structural inversion of the Chungnam Basin. *J. Geol. Soc. Korea*, v.51(5), p.451-469 (in Korean with English abstract).
- Park, S.-I., Kwon, S., Kim, S.W., Hong, P.S. and Santosh, M. (2018) A Mesozoic orogenic cycle from post-collision to subduction in the southwestern Korean Peninsula: New structural, geochemical, and chronological evidence. *J. Asian Earth Sci.*, v.157, p.166-186.
- Poblet, J. and Lisle, R. (2011) Kinematic Evolution and Structural Styles of Fold-and-Thrust Belts. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, v.349, p.1-24.
- Shimamura, S. (1931) *Geological Atlas of Chosen*, no.13: Seiyo, Daisenri, Fuyo, Ranpo sheets (1:50,000). Geological Survey of Chosen, 4 maps (in Japanese).
- Suppe, J. and Medwedeff, D.A. (1990) Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae geol. Helv.*, v.83, p.409-454.
- Vannucchi, P. and Bettelli, G. (2002) Mechanism of subduction accretion as implied from the broken formations in the Apennines, Italy. *Geology*, v.30, p.835-838.
- Williams, G.D., Powell, C.M. and Cooper, M.A. (1989) Geometry and kinematics of inversion tectonics. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, v.44, p.3-15.
- Yu, K.M. (1983) Sedimentological study on the early Jurassic shallow marine facies in southwest Japan and the comparison with Daedong Supergroup in South Korea. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University, Series of geology and mineralogy*, XLIX, 62p.
- Yu, K.M. and Lee, Y. (1992) Sedimentary petrology of the sandstones of the Daedong Group in western part of the Chungnam coalfield. *J. Geol. Soc. Korea*, v.28, p.284-297.
- Yu, K.M., Kwon, Y.I. and Chun, H.Y. (1992) Stratigraphy and mineral composition of sandstones from the Daedong Group in Yeoncheon area. *J. Geol. Soc. Korea*, v.28, p.152-166.