Research Paper

Structural Geometry, Kinematics and Microstructures of the Imjingang Belt in the Munsan Area, Korea

Hyunseo Lee^{1,2}, Yirang Jang^{3,*}, Sanghoon Kwon¹

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

²SK innovation Co., Ltd., Seoul 03188, Republic of Korea

³Department of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

*Corresponding author : yirang@jnu.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 18 February 2021

Received in revised form 18 April 2021

Manuscript accepted 19 April 2021

Available online 28 April 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.2.271>

Research Highlights

- Tectonic structures preserved in the Imjingang belt are re-examined by detailed structural analyses in the Munsan area.
- The prominent structures are the regional-scale thrust and the map-scale flexural folds, showing opposite shear sense on each limb.
- The existence of the crustal-scale collision related shear zone that was interpreted to be formed during collapsing stage of the Imjingang Belt might be overestimated at least in the Munsan area.

ABSTRACT

The Imjingang Belt in the middle-western Korean Peninsula has tectonically been correlated with the Permo-Triassic Qinling-Dabie-Sulu collisional belt between the North and South China cratons in terms of collisional tectonics. Within the belt, crustal-scale extensional ductile shear zones that were interpreted to be formed during collapsing stage with thrusts and folds were reported as evidence of collisional events by previous studies. In this study, we tried to understand the nature of deformation along the southern boundary of the belt in the Munsan area based on the interpretations of recently conducted structural analyses. To figure out the realistic geometry of the study area, the down-plunge projection was carried out based on the geometric relationships between structural elements from the detailed field investigation. We also conducted kinematic interpretations based on the observed shear sense indicators from the outcrops and the oriented thin-sections made from the mylonite samples. The prominent structures of the Munsan area are the regional-scale ENE-WSW striking thrust and the N-S trending map-scale folds, both in its hanging wall and footwall areas. Shear sense indicators suggest both eastward and westward vergence, showing opposite directions on each limb of the map-scale folds in the Munsan area. In addition, observed deformed microstructures from the biotite gneiss and the metasyenite of the Munsan area suggest that their deformation conditions are corresponding to the typical mid-crustal plastic deformation of the quartzofeldspathic metamorphic rocks. These microstructural results combined with the macro-scale structural interpretations suggest that the shear zones preserved in the Munsan area is mostly related to the development of the N-S trending map-scale folds that might be formed by flexural folding rather than the previously reported E-W trending crustal-scale extensional ductile shear zone by Permo-Triassic collision. These detailed examinations of the structures preserved in the Imjingang Belt can further contribute to solving the tectonic enigma of the Korean collisional orogen.

Keywords : Imjingang Belt, ductile shear zone, collisional orogeny, collapsing stage, deformation condition

Citation: Lee, H., Jang, Y., Kwon, S. (2021) Structural Geometry, Kinematics and Microstructures of the Imjingang Belt in the Munsan Area, Korea. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.54, p.271-283, doi:10.9719/EEG2021.54.2.271.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

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.
pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2021 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

임진강대 문산지역의 구조기하, 키네마틱스 및 미세구조 연구

이현서^{1,2} · 장이랑^{3,*} · 권상훈¹

¹연세대학교 지구시스템과학과

²SK이노베이션

³전남대학교 지구환경과학부 지질환경전공

*책임저자 : yirang@jnu.ac.kr

요 약

한반도 중서부에 위치한 임진강대는, 페름기-트라이아스기에 북중국판과 남중국판이 충돌하여 형성된 친링-다비-술루 대륙충돌대와 지구구조적으로 대비되고 있는 지역으로, 지각규모의 전단대, 트러스트 및 습곡 등의 충돌조산운동 관련 지질구조들이 보존되어 있는 것으로 알려져 왔다. 본 연구는 경기육괴와 접하는 임진강대의 남쪽 경계지역인 문산지역에서 수행한 구조지질 연구 결과를 종합하고, 이를 바탕으로 기존에 이 지역에서 일부 연구자들에 의해 대륙충돌로 형성된 조산대 후기 붕괴 단계에 형성된 것으로 제안되었던 지각규모 신장성 경기전단대의 존재와 변형 특성에 관해 검토하고자 하였다. 이를 위해, 야외조사를 통해 획득한 지질요소 자료를 바탕으로 문산지역의 구조기하학적 형태를 해석하였고, 노두 및 박편 상에서 확인한 전단감각 지시자로부터 암석 이동과 관련된 키네마틱스를 해석하였다. 이 지역의 가장 주된 지질구조는 동북동-서남서 주향의 광역규모 임진강단층의 상반 및 하반에 발달한 대략 남-북 주향의 힌지를 가지는 지질도규모의 습곡이다. 이 습곡에 대한 키네마틱스 해석 결과는 전단감각들이 습곡의 힌지를 중심으로 양쪽 익부에서 서로 반대 방향으로 대략 동쪽 내지 서쪽을 향함을 지시한다. 또한 문산지역 흑운모편마암과 변성섬강암의 광물 미세변형구조 관찰 결과로부터 유추한 암석의 변형조건은 전형적인 석영-장석질 암석들의 중부지각 소성변형조건에 해당한다. 따라서 본 연구를 통해 획득한 문산지역의 구조기하, 키네마틱스 및 미세구조 분석 결과는 이 지역에 발달한 전단대가 기존 연구들에서 제안된 대륙충돌 후기에 형성된 지각규모의 신장성 경기전단대보다는, 요굴습곡작용에 의한 지질도규모 습곡의 발달과 관련된 전단운동의 결과일 가능성이 높은 것으로 제안한다. 이와 같은 임진강대 내 대륙충돌의 증거들에 대한 상세한 구조지질학적 검증은 향후 한반도 충돌조산운동에 있어 임진강대의 지구구조적 역할에 대한 난제들을 해결하는데 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 임진강대, 연성전단대, 충돌조산운동, 조산대의 붕괴, 변형조건

1. 서 론

중국의 북중국 및 남중국 지괴의 충돌 산물인 트라이아스기 친링-다비-술루 대륙충돌대(Qinling-Dabie-Sulu collisional belt)가 정의된 이래로, 이 충돌대의 한반도 직접 연장 여부를 포함한 중국대륙과 한반도의 지구구조적 연관성 및 차별성에 관한 주제는 동아시아 지체구조 발달사 연구에 있어서 중요한 이슈가 되어 왔다(e.g. Yin and Nie, 1993; Ernst and Liou, 1995; Ree *et al.*, 1996, 2001; Metcalfe, 2006; Kwon *et al.*, 2009; Sajeev *et al.*, 2010; Isozaki *et al.*, 2010; Omori and Isozaki, 2011). 특히 대륙과 대륙(continent vs. continent), 미소대륙과 대륙(micro-continent vs. continent) 또는 호와 대륙(arc vs. continent) 등의 지구조적인 충돌운동에 의해 형성된 봉합대(suture zone)가 존재할 가능성이 높은 한반도 내 지역으로 임진강대가 제안되면서(e.g. Cho *et al.*, 1995), 지

난 30여 년간 이 지역을 포함한 서부 경기지괴를 중심으로 암석학, 지화학 및 지구연대학적 자료들이 축적되었고, 이를 바탕으로 다양한 지구조 모델들이 제시되었다(e.g. Cho *et al.*, 1995, 2007; Ree *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2000; Chwae and Choi, 2009; Sajeev *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2019). 이러한 연구들로부터 임진강대와 경기육괴의 경계부에서 고온/고압 변성작용의 산물인 백립암상의 변성염기성암체(Sajeev *et al.*, 2010)와 대륙충돌로 형성된 조산대의 후기 붕괴 단계에 형성된 것으로 제안된 지각규모의 신장성 연성전단대(e.g. Cho *et al.*, 1995; Chwae *et al.*, 1996; Choi *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2000; Kee *et al.*, 2005, 2008) 등이 보고되었고, 한반도 내 충돌대의 존재를 지지하는 간접증거로서 제시되었다. 하지만 충돌을 지지하는 직접적인 증거가 부재하며, 임진강대 이외 서부 경기육괴 지역에서도 고압의 변성작용을 경험한 암석들과 습곡단층대가 보고됨에 따라, 현재까지도 한반도 내

충돌대의 존재 여부 및 구체적인 봉합대의 위치와 충돌 조산운동의 특성에 대해서는 여러 이견이 존재한다(e.g. Ishiwatari and Tsujimori, 2001; Oh *et al.*, 2005; Kim, S.W. *et al.*, 2006, 2011; Zhai *et al.*, 2007; Chang and Zhao, 2012; Park, S.-I., 2017; Kim, H.S. *et al.*, 2018; Kim, I. *et al.*, 2019). 일부 모델에서는 충돌조산운동의 후기 봉과 단계에 형성된 신장성 연성전단대의 위치를 임진강대와 경기육괴의 경계부로 제안한 바 있다(e.g. Cho *et al.*, 1995). 따라서 본 연구에서는 일부 지구조 모델에서 충돌 봉합대와 연관된 신장성 연성전단대가 존재하는 것으로 제안된 임진강대와 경기육괴 경계부의 문산지역에 대한 구조지질학적 접근을 통하여, 기 보고된 연성전단대의 특성 및 대륙충돌 사건과의 지구조적 연관성에 관해 검토해 보고자한다. 야외조사 및 실내 박편 관찰을 통해 문산지역 내 지질구조들의 기하학적인 형태(structural geometry)와 키네마틱스(kinematics)를 해석하고 미세변형구조로부터 암석의 변형조건(deformation condition)을 유추하여, 연성전단대를 포함하는 문산지역 내 지질구조들의 구조 지질학적 특성을 종합적으로 이해하고자 하며, 이를 바탕으로 이 지역 연성전단대의 지구조적 역할에 대해 고찰하고자 한다.

2. 지질개요

한반도 중앙부에 동-서 방향으로 발달하고 있는 임진강대는 북쪽으로 낭림육괴 및 남쪽으로 경기육괴와 접하며, 단층 및 전단대에 의해 구조적으로 분리된 지역으로 나타난다(Fig. 1a). 본 연구의 대상지역은 임진강대 남부에 위치한 문산지역으로 한국지질자원연구원에서 발간한 1:5만 문산도폭에 해당하고, 포천도폭의 일부 지역을 포함한다(Fig. 1b). 연구지역에는 규암, 석회규암염암 및 흑운모편마암으로 이루어진 경기변성암복합체와, 이를 관입하고 있는 신원생대 감악산변성섬장암 및 쥐라기 대보 화강암류가 주로 분포하며, 후기 트라이아스기-전기 쥐라기에 퇴적된 적성층도 일부 지역에 나타난다(Fig. 1b). 연구지역 북부의 고생대 연천층군은 경기변성암복합체와 전곡단층을 경계로 접하며, 그 남쪽에는 적성층 상위로 선캄브리아기 경기변성암복합체를 북에서 남으로 충상시키는 임진강단층이 발달한다(Fig. 1b).

대륙충돌과 관련된 동아시아 지체구조 발달사를 이해하는데 있어서 한반도 임진강대가 지구조적으로 중요한 역할을 하는 지역임에도 불구하고, 임진강대의 분포 범위에 대해서는 현재까지도 정확하게 정의되지 않고 있다.

Fig. 1. (a) Regional tectonic map of the Korean Peninsula (modified after the 1:1,000,000 tectonic map of Korea; KIGAM, 2001). Inset box indicates location of (b). (b) Detailed geological map showing the major structures in the Munsan areas of the Imjingang Belt (modified after Chwae *et al.*, 1996; Choi *et al.*, 1998; Kee *et al.*, 2005, 2008).

특히, 임진강대 일대에서 조산대의 후기 붕괴 단계에 형성된 것으로 제안된 지각규모의 신장성 연성전단대는 충돌에 의한 봉합대를 정의하는 주요 증거가 되므로, 한반도 충돌조산운동에 관한 연구를 위해서는 그 위치와 분포를 명확히 하는 것이 필수적으로 요구된다. 그러나 북한 내지 민간인 출입제한지역인 소위 DMZ (Demilitarized Zone) 지역에 대한 지정학적 접근의 한계성 때문에 그동안의 국내 연구들은 대부분 전단대의 남측 경계를 밝히는 데에만 집중되었고, 이마저도 연구자들 사이에 다양한 주장이 제기되어 일지된 경계를 정의하지 못하였다. Cho *et al.* (1995)이 임진강대의 남측 경계에 해당하는 연천층군과 경기변성암복합체의 경계를 동-서 방향의 연성전단대로 제시한 이후, Chwae *et al.* (1996)은 철원-마진리 도폭지역에서 북쪽의 연천층군을 포함하는 지역까지 넓게 분포하는 연성전단대를 ‘임진강전단대’로 명명하였으며, Choi *et al.* (1998)은 문산도폭에서 임진강단층대를 따라 발달하고 있는 적성전단대를 언급하고 이를 임진강전단대에 포함하였다. 이후 Kim *et al.* (2000)은 임진강대 남측에 발달하고 있는 연성전단대를 ‘경기전단대’로 개칭하고, 적어도 4-5 km의 폭을 갖는 조산대의 붕괴 단계에 형성된 지각규모의 신장성 연성전단대로 정의하였다. 이들이 제시한 전단대의 남측 경계는 파주-문산-전곡 일대에 독립적으로 산재하는 중생대 퇴적분지들의 북측 경계에 발달된 단층인 Kim (1973)의 임진강단층과 거의

같은 자취를 가진다. 그러나 Kee *et al.* (2005)은 기존에 제안된 경기전단대의 남측 경계 보다 더 이남 지역인 경기변성암복합체 내에서도 압쇄암이 인지됨을 근거로 전단대의 남측 경계는 기존보다 4-5 km 더 남쪽까지 확장될 수 있음을 제안하였으며, 포천도폭 내 중생대 퇴적분지들을 규제하는 트러스트 단층을 ‘초성트러스트’로 명명하기도 하였다. 본 논문에서는 임진강대 남부 지역에서 중생대 퇴적분지들의 북측 경계에 발달한 단층을 최초 제안자가 사용한 임진강단층(Kim, 1973)으로 사용하기로 한다.

기존 연구자들이 제안한 임진강대 연성전단대의 남-북 경계에 대한 주장을 종합하면 다음과 같다. 1) 연천층군에 해당하는 변성퇴적암에서도 전단작용에 의한 압쇄암들이 다수 관찰되지만, 북부로 갈수록 구조 발달이 미약해져서 전단대의 뚜렷한 북측 경계는 확인할 수 없다 (Chwae *et al.*, 1996; Kee *et al.*, 2008). 2) 이러한 이유로 연천층군을 제외한 선캠브리아기 암체 내에 발달한 전단대만 고려하더라도, 전단대의 남측 경계는 전곡단층을 기준으로 남쪽으로 4-5 km 지점(임진강단층 위치)에서부터 10-12 km 지점에 이르기까지 다양하게 제안된다(Kim, 1973; Cho *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 2000; Kee *et al.*, 2005).

3. 구조기하 해석

임진강대 문산지역에 분포하는 지질구조들의 기하학적

Fig. 2. Equal-area plots of poles to foliations from the folds and their profiles constructed by down-plunge projection, showing map-scale anticline in the hanging wall (a) and (b), and map-scale anticline-syncline pairs in the footwall (c) and (d) of the Imjingang fault of the Munsan area, respectively. The projection directions for (b) and (d) are selected from π -pole to the folds from (a) and (c), respectively.

인 형태를 해석하기 위해 1:5만 문산도폭(Choi *et al.*, 1998) 및 포천도폭(Kee *et al.*, 2005)을 기본 지질도로 하여 야외조사를 수행하였다. 기 발간된 지질도폭 상에서 인지되는 지층들의 분포 위치를 확인 및 수정하고, 각 지층 간의 관계와 경계를 확인하여 구조적인 해석이 반영 되도록 기존의 지질도를 수정·보완 하였다(Fig. 1b). 이렇게 업데이트 된 지질도를 바탕으로 하향투영해석(down-plunge projection; Marshak and Mitra, 1988)을 수행하였고, 얻어진 단면(profile)을 통해 연구지역 내 지질구조들의 기하학적인 형태를 해석하였다(Fig. 2).

지질도 및 하향투영 단면 상에서 인지되는 연구지역 내 가장 주된 지질구조는 동북동-서남서 방향으로 발달한 광역규모의 임진강단층과, 이의 상반과 하반에 발달한 지질도규모의 습곡들이다(Figs. 1b and 2). 임진강단층은 상반의 경기변성암복합체와 하반의 적성층이 북쪽으로 경사진 단층을 경계로 접하는 것으로부터 인지되며, 단층의 상·하반에 발달한 습곡들은 동-서 방향에 따른 층/암상의 경계와 유사한 방향의 엽리의 자세 변화로부터 인지된다.

산을 장산리의 초평도에서부터 동쪽으로 경기도 연천군 청산면 백의리까지 연장되는 동북동-서남서 주향의 북쪽 경사를 가지는 단층으로, 전곡읍 부근에서 남-북 주향을 가지는 우수향 주향이동성 동두천단층에 의해 약 3 km 정도 분절된 양상을 보이며(Fig. 1b), 포천지역에서는 초성트러스트로 명명되기도 하였다(Kee *et al.*, 2005, 2008). 단층의 상반에는 경기변성암복합체가 분포하고, 하반에는 후기 트라이아스기에서 초기 쥐라기 사이에 퇴적된 적성층이 경기변성암복합체 위에 부정합으로 놓이며, 단층을 경계로 상반의 경기변성암복합체가 북에서 남으로 이동하여 하반의 적성층 상위로 충상된 것으로 해석된다(Kee *et al.*, 2005). 전곡읍 양원리 일대, 연천군 청산면 일대 및 파주시 적성면 일대 등 임진강단층을 따라 다수의 지역에서 1.5 m에서 10 m까지 다양한 폭으로 발달하는 단층대 노두가 관찰되며, 심하게 마모되어 구형 내지 타원형을 이루는 단층각력암 및 단층비지가 혼재하는 양상과 함께 상반이 남쪽으로 이동한 소규모 트러스트 단층들이 발달한다(Choi *et al.*, 1998; Kee *et al.*, 2005, 2008; Fig. 3).

3.1. 임진강단층

임진강단층(Kim, 1973)은 서쪽으로 경기도 파주시 문

3.2. 임진강단층 상·하반의 습곡 구조

야외조사에서 취득한 엽리의 자세 변화 등으로부터 연

Fig. 3. Detailed outcrop sketch, looking west, and corresponding route map of the Jeokseong Formation, showing south-directed thrust faults with related folds in the footwall area of the Imjingang fault.

구지역 전역에 걸쳐 지질도규모의 배사 및 향사가 발달한 것을 확인할 수 있으며, 이는 경기변성암복합체 내에 협재하는 규암층 및 석회규산염암층의 반복 양상에 의해서도 지질도 상에서 쉽게 인지된다(Fig. 1b). 임진강단층의 상반에 해당하는 지역에서는 전체적으로 지질도규모의 배사가 발달하며, 하반에서는 배사-향사 쌍구조(antiform-synform pair form)가 반복되는 형태로 발달한다(Figs. 1b and 2).

임진강단층의 상반에 발달한 습곡은 분포하는 지층들의 반복 양상 등이 명확하지 않고, 힌지의 자취도 뚜렷하게 나타나지 않아 그 형태를 지질도 상에서 파악하는 것이 쉽지 않다. 그러나 임진강단층 상반에 해당하는 지역에서 야외조사를 통해 획득한 지질요소 정보(규암층의 층리 및 엽리면의 자세 등)가 동-서 방향을 따라 주향 방향이 변하는 양상을 보여 습곡이 존재함을 지시하며, 이를 하반구 입체투영법을 이용하여 등면적투영한 결과는 이 습곡이 북서쪽 방향으로 완사(16° , 309°)하는 힌지를 가지는 것으로 해석된다(Fig. 2a). 이러한 힌지의 방향을 고려하여 하향투영 단면으로부터 복원된 습곡은 전체적으로 배사 형태를 보이며, 130° 정도의 익간각을 가지는 완만습곡으로 해석된다(Fig. 2b). 배사의 동익부는 지질도규모의 배사 보다 규모가 작은 이차습곡구조들에 의해 습곡된 형태를 가지는 것으로 해석되며, 본 연구의 대상 지역은 주로 이 동익부에 해당한다. 배사의 서익부는 서쪽 경사를 가지는 엽리의 자세 변화로부터 해석되었지만, 북한과의 접경지역에 위치하여 정확한 구조의 형태는 파악할 수 없다.

임진강단층 하반지역에 발달한 습곡은 지질도 상에서 경기변성암복합체 내에 협재하는 규암층 및 석회규산염암층이 대칭적으로 반복되는 것에 의해 우선 인지된다(Fig. 1b). 또한 이들 지층의 분포와 평행하게 엽리 내지 지층의 주향이 변하며, 동-서 방향을 따라 경사 방향이 변하는 것 역시 이 지역에 지질도규모의 습곡이 존재함을 지시한다. 습곡의 각 익부에서 취득한 지질요소인 엽리면 및 층리면 자세 등을 바탕으로 하반구 입체투영을 실시하고 하향투영 단면을 작성한 결과, 힌지가 북쪽으로 완사(13° , 358°)하는 완만습곡 형태의 배사-향사 쌍구조로 해석되었다(Fig. 2c, d). 중앙의 향사를 중심으로 동쪽으로는 배사 구조가 발달하는데, 향사의 동익부이자 배사의 서익부에 해당하는 부분에서는 임진강단층 상반지역 배사의 동익부에서와 마찬가지로 이차습곡구조가 발달한다(Fig. 2d). 향사의 서쪽으로는 또 다른 향사가 접하며 발달하고 있는데, 이 두 향사 사이의 관계는 현재까지의 조사결과로는 정확한 파악이 불가하여, 본 연구에서는 중앙의 향사와 서쪽의 향사 사이에 존재하던 배

사구조가 단층에 의해 중첩된 후 침식되어 현재는 인지되지 않는 것으로 해석하였다(Figs. 1b and 2d).

4. 키네마틱스 해석

문산지역 내 광역 지질구조 발달과 관련된 암석의 운동학적 특성에 대한 정보를 얻기 위하여 연구지역에 분포하는 지질구조들에 대한 키네마틱스 연구를 수행하였다. 노두 및 박편 상에서 관찰되는 비대칭 구조 및 전단감각 지시자를 통해 해당 지질구조의 형성과 관련된 암석의 상대적인 이동방향을 해석하였다. 모든 전단감각은 엽리에 수직하고 광물 신장 선구조에 평행한 방향에서 관찰되었으며, 노두규모의 비대칭 습곡(asymmetric folds; 's'-fold and 'z'-fold)에서부터 박편 상에서 관찰되는 입자 꼬리 반상쇄정(grain tail porphyroclast), 운모피쉬(mica fish), S-엽리, C-엽리 관계 및 C'-엽리에 의한 신장파랑 엽리(Extensional Crenulation Cleavage; ECC) 등에 이르기까지 다양한 규모의 지시자로부터 해석되었다. 서술상의 용이성을 위해 전단감각을 확인한 노두 및 시료의 위치를 임진강단층을 기준으로 상반 및 하반지역으로 나누어 기술하였다.

4.1. 임진강단층 상반지역의 키네마틱스

임진강단층 상반지역에 발달한 지질구조의 형성과 관련된 암석의 상대적인 이동방향을 유추하기 위하여, 연구지역 북부의 파주-연천 일대에서 노두 상에 보존된 소규모 비대칭 구조들과 정향시료의 박편 관찰을 통해 키네마틱스 분석을 수행하였다. 파주시 진서면 백학산(IM866) 내 압쇄암의 정향박편에서는 상부가 남서쪽으로 올라가는 전단감각(top-up-to-the-southwest shear sense)을 지시하는 입자 꼬리 반상쇄정이 관찰된다(Fig. 4a). 이보다 남동쪽의 파주시 진동면 용산리(IM877) 노두에서는 엽리에 수직한 단면 상에서 (55° , 150°)으로 침강하는 광물 신장 선구조의 방향을 따라 우수향 전단감각이 관찰되었고, 이는 해당 노두의 암석들이 상부가 북서쪽으로 올라가는 전단감각(top-up-to-the-northwest shear sense)을 가지는 것으로 해석될 수 있다. 임진강 북부의 연천군 장남면 자작리(IM845)에서는 북동 경사를 가지는 엽리 사이에서 소규모 's'형 습곡구조('s'-fold)가 관찰되며(Fig. 4b), 엽리면 상에서 관찰되는 광물 신장 선구조(70° , 050°)의 방향과 비대칭 습곡의 남서 방향 회전향을 고려하면, 이 노두의 암석은 상부가 남서쪽으로 올라가는 전단감각(top-up-to-the-southwest shear sense)을 가지는 것으로 해석된다. 임진강단층 상반에 해당하는 지역에서의 키네마틱스 증거에 따르면, 대부분의 암석들이 상부가 북서 내지 남

Fig. 4. Photomicrograph and field photographs from the hanging wall and footwall areas of the Imjingang fault, showing observed shear-sense indicators. See text for detail.

서 방향을 포함하는 대략 서쪽 방향으로 올라가는 전단 감각을 가지는 것으로 해석된다. 그러나 파주시 진동면 서곡리(IM871)의 정향박편에서는 상부가 동쪽으로 내려가는 전단감각(top-down-to-the-east shear sense)을 지시하는 흑운모 및 백운모에 의한 운모피쉬가 관찰된다(Fig. 5d).

4.2. 임진강단층 하반지역의 키네마틱스

임진강단층 하반지역에 발달한 지질도규모 배사-향사 쌍구조의 형성 및 기존 연구에서 제안된 지각규모 연성 전단대의 발달과 관련된 암석의 상대적인 이동방향을 유추하기 위하여, 연구지역 중남부의 파주-문산 일대의 다양한 위치에서 노두 상에 보존된 비대칭 구조 및 전단감각 지시자들을 관찰하고, 이를 바탕으로 키네마틱스 분석을 수행하였다.

연구지역 서쪽의 파주시 문산읍 임진리(IM855)에서 얻은 정향 시료에서 비대칭적으로 발달하고 있는 엽리의 방향을 인지하고, 이의 시편(hand specimen) 상에서 신장 파랑엽리의 방향을 확인한 결과, 해당 노두의 암석은 상부가 동북동 방향으로 내려가는 전단감각(top-down-to-the-east-northeast shear sense)을 보이는 것으로 해석된다(Fig. 4c). 그러나 북동쪽에 인접한 파주시 파평면 두포리(IM131)의 노두에서는 서쪽으로의 회전향을 보이는 소규모 's'형 습곡구조가 관찰되어, 이 노두의 암석들이 서쪽으로의 이동성을 가졌음을 지시한다. 이로부터 더 남쪽에 위치하는 파주시 파주읍 연풍리(IM204)에서는 반상쇄

정의 비대칭적 형태로부터 상부가 서쪽으로 이동하는 전단감각(top-up-to-the-west shear sense)이 관찰된다(Fig. 4d). 더 동쪽의 파주시 법원읍 법원리(IM132) 일대에서는 지역적인 소규모 켜기단층들이 발달함과 동시에 'z'형 습곡구조('z'-fold)들이 관찰되는데(Fig. 4e), 노두가 드러난 위치의 방위를 고려할 때 이 소규모 비대칭 습곡의 북동쪽으로의 회전향은 일대 암석들이 상부가 북동쪽으로 이동하는 전단감각을 가짐을 지시한다. 이로부터 더 동쪽에 위치하는 파주시 적성면 마지리(IM878)의 비대칭의 엽리를 가지는 안구상 편마암에서는 반상쇄정과 주변 엽리의 비대칭적 형태로부터 상부가 북서쪽으로 이동하는 전단감각(top-up-to-the-northwest shear sense)이 관찰된다(Fig. 4f). 종합하자면, 임진강단층 하반에 해당하는 지역에서 해석된 암석의 키네마틱스 증거들은 대략적으로 서쪽 내지 동쪽으로의 이동방향을 지시하며, 노두의 위치에 따라 다양하게 나타난다.

5. 미세변형구조와 변형조건

문산지역에 분포하는 암석들의 변형조건에 관한 정보를 획득하기 위하여 연구지역에 가장 넓게 분포하는 경기변성암복합체의 흑운모편마암 및 감악산변성섬장암을 대상으로 박편 관찰을 통해 광물의 미세변형구조를 확인하였다. 특히 암석 내 석영 및 장석이 간직하고 있는 미세변형구조를 지시 인자로 활용하여, 이들이 어떤 조건

Fig. 5. Representative photomicrographs showing deformed microstructures from the biotite gneiss (a)-(d) and from the Gamaksan metasyenite (e)-(h) in the Munsan area. Observed microstructures from the deformed quartz and feldspar grains and their deformation conditions are summarized in Table 1. Abbreviation: DT, Deformation twinning; GBM, Grain boundary migration; Grt, Garnet; Kfs, K-feldspar; Ms, Muscovite; Px, Patch extinction; Qtz, Quartz; RFs, Recrystallized feldspar; RQtz, Recrystallized quartz; SG, Subgrain; Ux, Undulose extinction.

Table 1. Summary of microstructures and deformation conditions from the biotite gneiss and Gamaksan metasyenite samples in the Munsan area of the Imjingang Belt

Rock	Sample#	Classification	Microstructures		Deformation conditions	
			Quartz	Feldspar	Quartz	Feldspar
Biotite gneiss	IM952	mylonite	undulose extinction, subgrain, quartz ribbon (Fig. 5a)	deformation twinning, subgrain, marginal recryst. (Fig. 5a)	300 - 400°C Lower greenschist facies	450 - 600°C Amphibolite facies
	IM961	mylonite	undulose extinction, grain boundary migration, recryst. (Fig. 5b)	subgrain, marginal recryst., transgranular fracture (Fig. 5b)	300 - 500°C Greenschist facies	450 - 600°C Amphibolite facies
	IM777	mylonite	undulose extinction, grain boundary migration, recryst., ECC (Fig. 5c)	subgrain, marginal recryst., intracrystalline fracture (Fig. 5c)	300 - 500°C Greenschist facies	450 - 600°C Amphibolite facies
	IM871	(annealed) mylonite	recryst. (Fig. 5d)	deformation twinning (Fig. 5d)	300 - 400°C Lower greenschist facies	300 - 400°C Lower greenschist facies
Gamaksan metasyenite	IM843	protomylonite	undulose extinction, recryst. (Fig. 5e)	intracrystalline fracture (Fig. 5e)	300 - 400°C Lower greenschist facies	300 - 400°C Lower greenschist facies
	IM775	protomylonite	undulose extinction, grain boundary migration, recryst, basal <a> slip (Fig. 5f)	sericitization (Fig. 5f)	300 - 500°C Greenschist facies	
	IM831	mylonite	recryst., subgrain (Fig. 5g)	subgrain, patchy extinction, marginal recryst., intracrystalline fracture, intergranular fracture (Fig. 5g)	300 - 400°C Lower greenschist facies	300 - 600°C Greenschist to amphibolite facies
	IM948	mylonite	undulose extinction, grain boundary migration, recryst. (Fig. 5h)	subgrain, patchy extinction, deformation twinning, kink twinning (Fig. 5h)	300 - 500°C Greenschist facies	300 - 600°C Greenschist to amphibolite facies

References: deformation conditions are from Debat *et al.* (1978), Mitra (1978), Hanmer (1982), Simpson (1985), Behrmann and Mainprice (1987), Tullis and Yund (1987), Bell and Johnson (1989), Hirth and Tullis (1992), and Stipp *et al.* (2002a, b).

Abbreviation: recryst.-recrystallization, ECC-ExtensionalCrenulationCleavage

하에서 변형되었는지를 기 보고된 변형 메커니즘 (deformation mechanism) 연구결과와 비교하여 유추하였다(e.g. Debat *et al.*, 1978; Mitra, 1978; Hanmer, 1982; Simpson, 1985; Behrmann and Mainprice, 1987; Tullis and Yund, 1987; Bell and Johnson, 1989; Hirth and Tullis, 1992; Stipp *et al.*, 2002a, 2002b). 체계적인 결과의 해석을 위하여 채취한 압쇄암 시료들을 모암의 원래 입자가 많이 남아 있는 변형의 정도가 적은 원압쇄암(protomylonite), 압쇄암(mylonite) 및 변형이 많이 진행되어 원래 입자를 거의 가지고 있지 않은 초압쇄암(ultramylonite)으로 구분하고, 각 시료의 석영과 장석 입자에서 관찰되는 변형구조의 종류 및 이들이 지시하는 변형조건을 정리하여 Table 1에 정리하였다.

6. 토 의

6.1. 문산지역 지질도규모 습곡의 구조지질학적 해석

문산지역의 기하학적 형태는 북쪽으로 경사하는 동북동-서남서 주향의 임진강단층을 기준으로 상반과 하반에 전체적으로 남-북 방향의 힌지를 가지는 지질도규모의 습곡이 주된 구조를 이루는 것으로 해석된다(Fig. 2). 기존의 문산도폭(Choi *et al.*, 1998)에서는 남-북 방향의 배사-향사가 임진강단층 하반에만 나타난다고 보고하였지만, 본 연구 결과 임진강단층 상반과 하반지역 모두에서 지질도규모의 습곡이 존재하는 것이 확인되었다. 이들 습곡은 공통적으로 동근 힌지를 가지며, 익간각이 완만한 형태로 서로 유사한 기하학적 특징을 가진다(Fig. 2). 또

한 야외 노두 및 박편 상에서 관찰한 다양한 전단감각 지시자들 역시 대부분 엮리면에 수직한 단면 상에서 대략 동-서 방향의 광물 신장 선구조의 방향을 따라 움직인 전단감각을 보인다(Fig. 4). 임진강단층 상반지역 배사구조의 동익부에서는 상부가 남서 혹은 북서쪽으로 올라가는 전단감각이 관찰된다. 임진강단층 하반지역 습곡구조의 중앙부 향사 서익부에서는 상부가 서쪽으로 올라가는 전단감각이 관찰되는 반면, 이 향사의 동익부이자 동쪽 배사의 서익부에서는 상부가 북동쪽으로 이동한 전단감각이 확인된다. 배사의 동익부에서는 상부가 북서쪽으로 올라간 전단감각이 관찰된다. 이와 같이 시료의 위치에 따라 전단감각이 동쪽과 서쪽으로 변화하는 것을 그 공간적 분포 양상을 고려하여 해석하기 위해 하향투영을 통해 해석한 단면 상의 배사-향사 구조의 기하학적 형태와 비교해 본 결과, 습곡의 힌지를 중심으로 양쪽 익부에서 서로 반대 방향의 전단감각을 지시하는 것이 확인된다(Fig. 6).

문산지역에서 확인된 이러한 전단감각 방향성의 변화는 남-북 방향의 힌지를 가지는 지질도규모의 습곡이 만들어질 당시의 요굴습곡작용(flexural folding)과 관련된 것으로 해석할 수 있다. 요굴습곡작용은 습곡된 층리면 또는 엮리면에 평행하며, 힌지에 수직한 방향으로 전단이 일어나는 습곡작용으로, 힌지 부분에서는 전단이 일어나지 않지만 힌지를 기준으로 양쪽 익부에서는 서로

반대방향의 전단감각을 보이는 것이 특징이다(Ramsay and Huber, 1987; Marshak and Mitra, 1988). 실제로 임진강단층 하반의 중앙부 향사의 힌지에 해당하는 위치에 노출된 노두에서 전단작용에 의한 비대칭 구조가 확인되지 않았고, 임진강단층의 상반 및 하반의 습곡에서 힌지를 기준으로 양쪽 익부에서 동쪽 내지 서쪽 방향으로의 서로 다른 전단감각이 관찰되는 것은 요굴습곡의 일반적인 특징과 잘 일치한다(Fig. 6). 따라서 문산지역의 지질도규모 습곡은 노두 및 박편 상의 키네마틱스 증거를 고려할 때, 요굴습곡작용에 의해 형성된 것으로 해석될 수 있다. 다만, 연구지역 내 몇몇의 위치에서(IM871 및 IM855) 하향투영 단면 상에 해석된 지질도규모 배사-향사의 기하학적인 형태와 요굴습곡으로의 해석에 의한 전단감각이 일치하지 않는 것은, 이들 전단감각이 노두규모에서 관찰되는 소규모 습곡과 관련된 전단감각이거나 습곡을 절단하는 후기의 단층에 의해 영향 받았을 가능성 등을 고려할 수 있으며, 이에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

한편, 미세변형구조 관찰을 통해 유추한 암석의 변형 조건은 같은 암석 내에서도 장석과 석영이 서로 상이한 변형조건을 지시할 수 있다(Passchier and Trouw, 2005). 본 연구에서 문산지역의 시료로부터 관찰된 장석과 석영의 미세변형구조는 약 300-600°C의 변형조건을 지시하며, 이는 전형적인 석영-장석질 암석들의 중부지각 소성변형

Fig. 6. Profiles of the map-scale folds in the hanging wall (a) and footwall (b) of the Imjingang fault, showing locations with observed sense of shears interpreted by kinematic analyses.

조건에 해당한다. 또한 임진강단층의 상반과 하반의 변형조건 차이는 크지 않은 것으로 보인다(Table 1).

상술한 내용을 바탕으로 본 연구에서 수행한 문산지역에 대한 구조지질학적 연구 결과를 종합하면, 임진강단층을 기준으로 상반과 하반지역에 나타나는 지질도규모의 습곡은 그 기하학적 형태, 키네마틱스 경향성 및 변형조건에 있어서 서로 큰 차이를 보이지 않으며, 구조기하학적인 형태와 키네마틱스 해석에 의한 전단감각의 공간적 분포를 고려할 때 요굴습곡작용에 의해 형성된 것으로 해석된다. 또한 박편 상에서 관찰된 광물의 변형구조로부터 유추한 대부분의 장식과 정적 재결정작용(static recrystallization)을 겪지 않은 석영이 지시하는 변형조건은 공통적으로 소성변형(crystal plastic deformation)에 해당하는 조건을 지시하므로, 문산지역의 지질도규모 습곡은 요굴습곡작용 중에서도 요굴슬립(flexural slip)보다는 요굴유동(flexural flow)에 의한 습곡작용에 의해 형성되었을 가능성이 높은 것으로 해석할 수 있다(Stallard and Hickey, 2001).

6.2. 임진강대 연성전단대에 관한 고찰

본 연구의 연구지역인 문산지역은 중국의 페름기-트라이아스기 대륙충돌대의 한반도 연장부에 해당한다고 여겨졌던 연성전단대(경기전단대; Kim *et al.*, 2000)의 남쪽 경계를 포함한다. 다수의 기존 연구들에서 이 전단대는 북쪽 경사의 정단층 내지 정경사이드(normal-slip)의 신장성 전단감각을 가지는 지각규모의 연성전단대로 제안되어 왔다(e.g. Cho *et al.*, 1995; Chwae *et al.*, 1996; Choi *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2000; Kee *et al.*, 2005, 2008). 실제로 본 연구에서도 문산지역 전역에 걸쳐서 전단작용을 받아 형성된 압쇄암이 발달하고 있는 것이 확인되었고, 이들의 미세변형구조 관찰을 통해 연구지역 내 대부분의 암석들이 소성변형 조건 하에서 변형되었음도 확인하였다. 그러나 노두 및 정향박편 관찰을 통해 수행한 키네마틱스 해석 결과는 기존에 제안되었던 연성전단대의 북쪽 이동감각과는 불일치하는 전단감각을 지시한다. 문산지역의 경기변성암복합체 및 감악산섬장암에서 본 연구를 통해 확인된 대부분의 전단감각은 거의 동-서 방향을 따라 움직인 암석의 이동을 지시할 뿐만 아니라, 위치에 따라 동쪽으로의 이동과 서쪽으로의 이동이 반복적으로 변화하는 양상을 보인다(Fig. 6). 이는 기존에 제안된 동-서 주향 및 북쪽 경사를 가지는 연성전단대와 관련된 전단감각이라기 보다는 문산지역에 발달한 남-북 방향의 힌지를 가지는 지질도규모 습곡구조의 형성과 관련된 요굴유동작용에 의한 전단감각으로 해석하는 것이 더 타당하다. 따라서 문산지역 연성전단대에서 확인된 전단

감각들은 기존에 대륙충돌과 관련하여 제안되었던 연성전단대의 이동감각과 그 방향이 일치하지 않을 뿐만 아니라, 지각규모의 충돌을 대변할 만큼 일관된 방향을 지시하지는 못하는 것으로 판단된다. 게다가 이 지역에는 페름기-트라이아스기 충돌 사건에 의한 지질구조뿐만 아니라, 충돌 전, 후 기간을 포함한 오랜 지질시대 동안의 다중변형작용에 의한 지질구조들이 중첩되어 발달하고 있음을 고려하면(Chwae *et al.*, 1996; Choi *et al.*, 1998; Kee *et al.*, 2005, 2008), 임진강대 문산지역에 발달한 연성전단대 전체를 중국의 대륙충돌 이후의 신장변형에 의한 지각규모 전단대로 해석하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 그러므로 한반도 충돌조산운동과 관련하여 임진강대의 연성전단대가 하는 지구조적 역할에 대해 정확하게 이해하기 위해서는, 임진강대에서 기 보고된 대륙충돌의 증거들에 대한 상세한 구조지질학적 검증이 필요할 것으로 생각되며, 이를 통해 향후 한반도 대륙충돌대의 위치, 규모 및 특성 등 그동안 풀지 못한 난제들을 해결하는데 중요한 정보를 얻을 수 있길 기대한다.

사 사

본 논문은 이현서의 연세대학교 석사학위 연구내용의 일부를 포함하고 있으며, ‘한국연구재단 중견연구과제(2019R1A2C1002211)’의 지원으로 수행되었습니다. 석사학위 논문지도에 많은 도움을 주신 박영도 박사님께 감사드립니다. 또한 본 연구결과의 정리 및 보완과 원고의 작성은 ‘한국연구재단 우수신진연구과제(2021R1C1C101057011)’의 지원으로 수행되었습니다. 본 논문을 심사해 주신 두분의 심사위원과 책임편집위원께 감사드립니다.

Reference

- Behrmann, J.H. and Mainprice, D. (1987) Deformation mechanism in a high temperature quartz-feldspar mylonite: evidence for superplastic flow in the lower continental crust. *Tectonophysics*, v.140, p.297-305. doi: 10.1016/0040-1951(87)90236-8
- Bell, T.H. and Johnson, S.E. (1989) The role of deformation partitioning in the deformation and recrystallization of plagioclase and K-feldspar in the Woodroffe thrust mylonite zone, Central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, v.7, p.151-168. doi: 10.1111/j.1525-1314.1989.tb00582.x
- Chang, K.-H. and Zhao, X. (2012) North and South China suturing in the east end: What happened in Korean Peninsula?. *Gondwana Research*, v.22, p.493-506. doi: 10.1016/j.gr.2011.12.010
- Cho, M., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Nakamura, E. (1995) High-pressure amphibolite of the Imjingang belt in the Yeoncheon-Cheongok area. *The Journal of Petrological Society of Korea*, v.4, p.1-19 (in Korean with English abstract).

- Cho, M., Kim, Y. and Ahn, J. (2007) Metamorphic evolution of the Imjingang Belt, Korea: implications for Permo-Triassic collisional orogeny. *International Geology Review*, v.49, p.30-51. doi: 10.2747/0020-6814.49.1.30
- Choi, S.-J., Lee, S.R., Kim, K.B., Kim, J.R. and Kim, B.C. (1998) Explanatory text of the Geological map of Munsan sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 79p. (in Korean with English summary)
- Chwae, U. and Choi, S.-J. (2009) Stratigraphic and Structural Review of Yeoncheon Group and Imjingang Fold Belt, and Its Edge of Distribution. *Economic and Environmental Geology*, v.42, p.627-634 (in Korean with English abstract)
- Chwae, U., Choi, S.-J., Park, K.H. and Kim, K.B. (1996) Explanatory text of the Geological map of Cheolwon-Majwonri sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 31p. (in Korean with English summary)
- Debat, P., Soula, J.C., Kubin, L. and Vidal, J.L. (1978) Optical studies of natural deformation microstructures in feldspars (gneiss and pegmatites from Occitania, Southern France). *Lithosphere*, v.11, p.133-145. doi: 10.1016/0024-4937(78)90004-x
- Ernst, W.G. and Liou, J.G. (1995) Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling – Dabie – Sulu and Franciscan metamorphic belts. *Geology*, v.23, p.353-356. doi: 10.1130/0091-7613(1995)023<0353:cptsot>2.3.co;2
- Hanmer, S.K. (1982) Microstructure and geochemistry of plagioclase and microcline in naturally deformed granite. *Journal of Structural Geology*, v.4, p.197-213. doi: 10.1016/0191-8141(82)90027-X
- Hirth, G. and Tullis, J. (1992) Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Journal of Structural Geology*, v.14, p.145-159. doi: 10.1016/0191-8141(92)90053-Y
- Ishiwatari, A. and Tsujimori, T. (2001) Late Paleozoic High-Pressure Metamorphic Belts in Japan and Sikhote-Alin. Possible oceanic extension of the Chinese Dabie – Su – Lu Suture detouring Korea. *Gondwana Research*, v.4, p.636-638. doi: 10.1016/s1342-937x(05)70439-1
- Isozaki, Y., Aoki, K., Nakama, T. and Yanai, S. (2010) New insight into a subduction-related orogen: A reappraisal of the geotectonic framework and evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Research*, v.18, p.82-105. doi: 10.1016/j.gr.2010.02.015
- Kee, W.-S., Cho, D.-L., Kim, B.C. and Jin, K. (2005) Geological report of the Pocheon Sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 69p. (in Korean with English summary)
- Kee, W.-S., Lim, S.-B., Kim, H., Kim, B.C., Hwang, S.K., Song, K.-Y. and Kihm, Y.-H. (2008) Geological report of the Yeoncheon Sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 83p. (in Korean with English summary)
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (2001) 1:1,000,000 Tectonic Map of Korea.
- Kwon, S., Sajeev, K., Mitra, G., Park, Y., Kim, S.W. and Ryu, I.C. (2009) Evidence of Triassic collision in Far East Asia: the Korean collisional orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, v.279, p.340-349. doi: 10.1016/j.epsl.2009.01.016
- Kim, H.S., Kwon, S., Kim, S.W. and Santosh, M. (2018) Permo-Triassic high-pressure metamorphism in the central western Korean Peninsula, and its link to Paleo-Tethyan Ocean closure: Key issues revisited. *Geoscience Frontiers*, v.9, p.1325-1335. doi: 10.1016/j.gsf.2018.01.007
- Kim, I., Kim, A.-J., Woo, H. and Park, S.-I. (2019) Geological Structures of the Taean Formation in the Gomseom Area, Southwestern Gyeonggi Massif. *Economic and Environmental Geology*, v.52, p.159-168 (in Korean with English abstract). doi: 10.9719/EEG.2019.52.2.159
- Kim, J.-N., Ree, J.-H., Kwon, S.T., Park, Y., Choi, S.-J. and Cheong, C.-S. (2000) The Kyeonggi shear zone of the central Korean peninsula: Late orogenic imprint of the North and South China collision. *The Journal of Geology*, v.108, p.469-478. doi: 10.1086/314412
- Kim, O.J. (1973) The Stratigraphy and Geologic Structure of the Metamorphic Complex in the Northwestern Area of the Kyonggi Massif. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, v.6, p.201-218 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I. S., Rubbato, D., Ryu, I.-C., Rajesh, V.J., Kim, C.-B., Guo, J. and Zhai, M. (2006) Phanerozoic high-pressure eclogite and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi Block, South Korea: implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithosphere*, v.92, p.357-377. doi: 10.1016/j.lithos.2006.03.050
- Kim, S.W., Santosh, M., Park, N. and Kwon, S. (2011) Forearc serpentinite melange from the Hongseong suture, South Korea. *Gondwana Research*, v.20, p.852-864. doi: 10.1016/j.gr.2011.01.012
- Lee, B.Y., Oh, C.W., Cho, D.L., Zhai, M., Lee, B.C., Peng, P. and Yi, K. (2019) The Devonian back-arc basin and Triassic arc-continent collision along the Imjingang belt in the Korean Peninsula and their tectonic meaning. *Lithos*, v.328-329, p.276-296. doi: 10.1016/j.lithos.2019.01.011
- Marshak, S. and Mitra, G. (1988) *Basic Methods of Structural Geology*. Prentice Hall, New Jersey, 446p.
- Metcalfe, I. (2006) Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution and paleogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context. *Gondwana Research*, v.9, p.24-46. doi: 10.1016/j.gr.2005.04.002
- Mitra, G. (1978) Ductile deformation zones and mylonites: the mechanical processes involved in the formation of crystalline basement rocks. *American Journal of Science*, v.278, p.1057-1084. doi: 10.2475/ajs.278.8.1057
- Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.G., Zhai, M., Guo, J. and Sajeev, K. (2005) First finding of eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie – Sulu collision belt in China. *Journal of Geology*, v.113, p.226-232. doi: 10.1086/427671
- Omori, S. and Isozaki, Y. (2011) Paleozoic Japan and the Eastern Extension of the collisional suture between the North and South China Cratons. *Journal of Geography*, v.120, p.40-51. doi: 10.5026/jgeography.120.40
- Park, S.-I. (2017) A Preliminary Study on the Exhumation Mechanism of the Paleozoic Gwangcheon Gneiss in the Southwestern Margin of the Gyeonggi Massif. *Economic and Environmental Geology*, v.50, p.525-535 (in Korean with English

- abstract). doi: 10.9719/EEG2017.50.6.525
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J. (2005) *Microtectonics*. Springer – Verlag, Berlin, 366p.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I. (1987) *The Techniques of Modern Structural Geology*. vol. 2: Folds and Fractures, Academic Press, London, 700p.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T. and Nakamura, E. (1996) Possible eastward extension of Chinese collision belt in South – Korea: the Imjingang belt. *Geology*, v.24, p.1071-1074. doi: 10.1130/0091-7613(1996)024<1071:peeoc>2.3.co;2
- Ree, J.-H., Kwon, S.-H., Park, Y., Kwon, S.-T. and Park, S.-H. (2001) Pre-tectonic and post-tectonic emplacements of the granitoids in the south central Okcheon belt, South Korea: Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, v.20, p.850-867. doi: 10.1029/2000tc001267
- Sajeev, K., Jeong, J., Kwon, S., Kee, W.-S., Kim, S.W., Komiya, T., Itaya, T., Jung, H.-S. and Park, Y. (2010) High P-T granulite relicts from the Imjingang Belt, South Korea: tectonic significance. *Gondwana Research*, v.17, p.75-86. doi: 10.1016/j.gr.2009.07.001
- Simpson, C. (1985) Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition. *Journal of Structural Geology*, v.7, p.503-511. doi: 10.1016/0191-8141(85)90023-9
- Stallard, A. and Hickey, K. (2001) Fold mechanisms in the Carton Schist: Constraints on the contribution of flexural flow. *Journal of Structural Geology*, v.23, p.1865-1881. doi: 10.1016/s0191-8141(01)00032-3
- Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R. and Schmid, S.M. (2002a) The eastern Tonale fault zone: a ‘natural laboratory’ for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C. *Journal of Structural Geology*, v.24, p.1861-1884. doi: 10.1016/s0191-8141(02)00035-4
- Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R. and Schmid, S.M. (2002b). Dynamic recrystallization of quartz: correlation between natural and experimental conditions. In: De Meer, S., Drury, M.R., De Bresser, J.H.P., Pennock, G.M. (Eds.), *Deformation Mechanism, Rheology and Tectonics: Current Status and Future Perspectives* vol. 200, Special Publications of the Geological Society of London: London, UK, p.171-190. doi: 10.1144/gsl.sp.2001.200.01.11
- Tullis, J. and Yund, R.A. (1987) Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspar: Mechanisms and microstructure, *Geology*, v.15, p.606-609. doi: 10.1130/0091-7613(1987)15<606:tfctd>2.0.co;2
- Yin, A. and Nie, S. (1993) An indentation model for the north and south China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, v.12, p.801-813. doi: 10.1029/93tc00313
- Zhai, M.G., Guo, J., Li, Z., Chen, D., Peng, P., Li, T., Hou, Q. and Fan, Q. (2007) Linking the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula: evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. *Gondwana Research*, v.12, p.388-403. doi: 10.1016/j.gr.2007.02.003