



Article

한반도 남동부 백악기 의성소분지 북부 분지 충전물의 경사 분석

임혜원, 한종원, 이선주, 김규리, 손 문*

부산대학교 지질환경과학과

Dip analysis of the basin-fills in the northern part of the Cretaceous Uiseong Subbasin, SE Korean peninsula

Hyewon Lim, Jong-Won Han, Seonju Lee, Kurie Kim, Moon Son*

Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

Received: October 3, 2024 / Revised: November 6, 2024 / Accepted: November 27, 2024

*Corresponding author: +82-51-510-2248 / E-mail: moonson@pusan.ac.kr

요약: 백악기 경상분지는 층서별 혹은 소분지별로 차별적인 구조운동을 경험하며 진화하였을 것으로 해석되어 왔지만, 시·공간적으로 분지의 성장과 발달을 규제한 구조에 관한 연구는 부족하다. 이번 연구에서는 화성활동에 의한 교란을 비교적 적게 받았으며 분지 북쪽 경계가 기반암과 대부분 단층으로 접하고 있는 의성소분지 북부를 대상으로 지층의 경사 분석을 실시하였으며, 이를 통해 분지의 구조 진화사를 복원하였다. 의성소분지 북부의 신동층군은 동북동-서남서 방향의 지각 확장에 의해 형성된 북북서 방향의 비대칭 지구 내에 퇴적되었다(D₁). 이후 지각 변형과 침강의 중심이 동쪽으로 이동하고 확장 방향이 서북서-동남동 내지 북서-남동 방향으로 변화함으로써, 북북동 내지 북동 방향의 지구-지루 시스템이 형성되었고 하양층군이 퇴적되었다(D₂). 충전물이 모두 퇴적된 이후, 분지 북쪽 경계부 일원에서 안동단층계의 광역적인 충상단층 운동이 발생하였고(D₃), 이에 따라 분지 내부가 파괴되어 기존의 의성소분지의 북쪽 경계가 보다 남쪽으로 이동하였다.

주요어: 의성소분지, 경사 분석, 퇴적 동시성, 안동단층계, 구조 진화사

ABSTRACT: The Cretaceous Gyeongsang Basin has been interpreted to have differential structural evolution depending on stratum and/or subbasins. Although the structures that controlled the growth and development of the basin likely varied across time and space, there is a lack of studies addressing how these structures evolved. This study aims to reconstruct the structural evolution using dip analysis in the northern Uiseong Subbasin, an area relatively undisturbed by magmatism and mostly bordered by faults with basement rocks along its northern boundary. The Sindong Group was deposited in a NNW-trending asymmetric graben formed by ENE-WSW crustal extension (D₁). As the focus of subsidence migrated eastward, the extension direction changed to WNW-ESE or NW-SE, resulting in the formation of NNE- to NE-trending graben-and-horst systems and the deposition of the Hayang Group (D₂). After deposition and consolidation of basin fills, regional thrusting along the Andong Fault System occurred at the northern boundary of the Uiseong Subbasin (D₃), leading to the destruction of the basin interior and a southward shift of the northern boundary of the subbasin.

Key words: Uiseong Subbasin, dip analysis, syndepositional, Andong Fault System, structural evolution

1. 서언

지속적인 지각의 침강으로 퇴적 공간을 제공하는 퇴적 분지는 지구조 환경, 화성활동, 생물권의 진화, 지표환경의 변화 등의 정보를 기록하며, 분지 진화와 관련된 일련의 지각 변형과 구조발달 과정에 대한 기록을 보존하는 저장소이다(Busby and Ingersoll, 1995). 분지의 구조 진화사를 복원하기 위해 시·공간적으로 층리의 자세를 분석하는 경사 분석법(dip analysis)은 특히 정단층 운동에 의한 열개분지(rift basin) 또는 주향이동단층 운동에 의한 당겨열림분지(pull-apart basin)와 같은 확장형 분지 해석에 매우 유용하다(Lucchitta and Suneson, 1993; Schlische, 1993; Son and Kim, 1994; Copper, 1995; Son *et al.*, 2000, 2005; Grimaldi and Dorobek, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Seong *et al.*, 2013). 대표적으로 Scott *et al.* (1992, 1994)는 분지 확장을 주도한 단층과 충전물의 경사 사이의 기하학적 관계를 분석하여 지층의 평균 경사 방향이 확장 방향과 거의 평행함을 밝힌 바 있다.

분지 충전물의 자세 즉, 지층의 경사 방향과 크기는 분지를 확장시킨 경계단층의 기하와 운동감각을 알아내는데 중요하다(Schlische, 1993; Moustafa, 1996, 2002; Faulds and Varga, 1998; Son *et al.*, 2000, 2005, 2013; Schlische and Withjack, 2009; Cho *et al.*, 2016; Muravchik *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2022). 경사 방향과 크기의 변화를 토대로 구조구역(structural domain)을 나누는 작업은 시·공간적으로 변화하는 분지 기저의 경동(tilting) 양상을 이해하며(Faill, 1973; Wise, 1992) 구역별 지괴 거동과 분지 전체의 지각 변형을 특성화하고 나아가 거시적 지구조 모델을 수립하는데 활용된다. 또한 분지가 성장하며 기저가 경동되는 경우, 하위층이 상위층에 비해 분지의 확장을 주도한 단층의 영향을 오랫동안 받기 때문에 하위층일수록 경사각이 커지는 경향을 보인다(Scott *et al.*, 1994; Gawthorpe *et al.*, 1997; Cheon *et al.*, 2012; Son *et al.*, 2013, 2015; Lewis *et al.*, 2015; Cho *et al.*, 2016; Muravchik *et al.*, 2018). 따라서 시간에 따른 지층의 경사 크기의 변화는 퇴적동시성 구조 운동의 특성을 해석하는 데 유용하다.

확장형 환경의 분지 내에서 퇴적과 단층운동이 동시에 발생할 때, 기저의 정단층을 피복하는 미고결 퇴적층에서 습곡이 형성될 수 있다(Coleman *et al.*, 2019). 단층의 변위가 누적됨에 따라 습곡이 성장하는 성장습곡은 퇴적층의 구조(architecture)와 상 분포에 영향을 미치며(Jackson and Leeder, 1994; Maurin and Niviere, 1999; Corfield and Sharp, 2000; Sharp *et al.*, 2000; Corfield *et al.*, 2001; Ford *et al.*, 2007; Lewis *et al.*, 2015, 2017), 습곡 날개를 이루는 지층의 경사가 상위층으로 갈수록 작아지는 특징을 보인다(Gawthorpe

et al., 1997; Lewis *et al.*, 2015). 퇴적동시성 성장습곡의 기하와 규모는 주로 기저 정단층의 기하와 운동학적 특징 그리고 이를 피복하는 미고결 퇴적층의 두께에 의해 좌우된다(Horsfield, 1977; Withjack *et al.*, 1990; Withjack and Callaway, 2000; Miller and Mitra, 2011; Coleman *et al.*, 2019). 최근 Coleman *et al.* (2019)은 성장습곡이 작게는 수십 cm에 달하는 것부터 크게는 수십(10~64) km의 파장을 가지며, 이들이 퇴적분지 내에서 흔하게 발달할 수 있음을 제안하였다.

백악기 한반도 일원의 지구조 환경과 경상분지의 확장 모델은 학자들에 따라 차이를 보이지만, 대부분 경상분지를 확장형 분지로 해석하고 있다(Choi, 1986; Rhee *et al.*, 1998; Lee, 1999; Choi *et al.*, 2002; Ryu *et al.*, 2006; Chough and Sohn, 2010; Lee, T.-H. *et al.*, 2018a; Cheon *et al.*, 2020; Lee, Y.I. *et al.*, 2023). 경상분지는 초기에 신동층군이 퇴적된 낙동곡분으로 시작하여 하양층군이 퇴적되는 동안 동쪽으로 퇴적중심이 이동하고 빠른 확장을 겪었으며, 이후 화산활동이 활발히 진행되어 유천층군이 쌓인 것으로 알려져 있다(Chang, 1975, 1977, 1988; Choi, 1985, 1986; Lee, 1999; Ryu *et al.*, 2006; Chough and Sohn, 2010; Lee *et al.*, 2023). 그러나 경상분지 확장에 관한 연구들은 퇴적층 서학 기반이 대부분으로, 시·공간적으로 분지 성장을 규제한 구조에 대한 이해는 아직 명확하게 정립되지 못하였다(Choi, 1986; Rhee *et al.*, 1998; Jo and Chough, 2001; Jo, 2003a, 2003b; Chough and Sohn, 2010). 취성변형요소로 복원된 일부 고응력장 연구는 층서 혹은 소분지별로 구분되지 않은 경우가 많아(Hwang, 1994; Choi *et al.*, 2002; Choi, 2013; Cheon *et al.*, 2020), 시·공간에 따른 차이를 반영한 분지의 형성과 진화에 관한 해석이 필요하다.

수십 년 동안 다양한 분야의 연구가 수행되었음에도 불구하고 후기 지층의 피복, 화성암체의 관입 등의 이유로 경상분지의 확장을 주도한 단층의 직접적인 관찰 기제가 이루어지지 못하였다(Chang *et al.*, 1977; Cheon *et al.*, 2020). 경사 분석은 분지 기저부의 구조를 간접적으로 알아내는데 효율적인 방법으로, 경상분지와 같은 성숙(mature)되고 고기(ancient)에 확장된 분지에 특히 유용할 수 있다. 이번 연구는 분지 충전물에서 관찰되는 일부 퇴적동시성 성장단층 자료와 함께 층리의 경사 분석을 통해 백악기 경상분지 의 성소분지 북부 지역의 구조 진화사를 해석하는 데 주목적 이 있다. 연구지역은 신동층군과 하양층군의 퇴적암류가 연속적으로 분포하고, 대규모 심성암체의 관입이나 칼데라와 같은 화산활동에 의한 지층 교란을 비교적 적게 받은 지역이다(그림 1). 또한 연구지역의 분지 충전물은 기반암인 영남육괴 선캄브리아 변성암류 그리고 쥐라기 화강암류와 북쪽에서 대부분 단층으로 접하고 있어 경사분석을 통해

분지의 진화와 변형사를 복원하기에 유리한 조건을 갖추고 있다. 따라서 이번 연구는 의성소분지, 나아가 경상분지 전체의 확장과 이후 변형사를 해석하는 데도 중요한 자료를 제공할 것으로 기대된다.

2. 지질학적 배경

백악기 동안 유라시아판 아래로 이자나기판이 사교섭입하는 섭입대 환경에서 형성된 것으로 알려진 경상분지의 지구조 환경은 화산호와의 상대적인 위치에 따라 대표적으로 세 가지 모델로 구분된다. Lee *et al.* (2023)은 부력이 큰 해양고원의 섭입에 의해 지각이 용기하며 전호(forearc)지역에 열개(rift)가 발생하였으며, 이때 서북서-동남동 방향의 확장에 의해 초기 경상분지가 형성된 것으로 해석하였다. 반면, 경상분지를 배호분지(backarc basin)의 관점에서 해석한 연구들은 경상분지는 이자나기판이 유라시아판 아래로 사교섭입하는 동안 판들의 약한 결합력 때문에 형성된 인장 내지 횡인장 환경에서 형성되었으며(Chouch and Sohn, 2010), 이자나기판의 사교섭입에 의해 북북동 방향의 단층이 좌수향 주향이동운동을 하였고 이에 수반되어 2차적으로 형성된 서북서 방향의 정단층 운동이 경상분지를 확장시켰음을 제안하였다(Cheon *et al.*, 2020). Lee (1999)는 경상분지를 호 내부(intra-arc) 환경에서 평행사변형꼴(rhomboid) 혹은 안행상(en-echelon)으로 배열된 여러 개의 북북동 방향 좌수향 주향이동단층에 의해 형성된 분지들이 병합되어 형성된 하나의 큰 분지로 해석하였다.

경상분지는 북북동 방향으로 길쭉한 형태의 낙동곡분에서 처음 열개된 것으로 알려져 있는데, 현재 낙동곡분 충전물은 분지의 서쪽에서 기반암과 대부분 부정합의 경계를 이룬다(Chang, 1975). 그러나 경상분지 서편 경계부의 분지 충전물은 충적선상지(alluvial fan) 퇴적물이 주를 이루며

(Choi, 1986), Cheon *et al.* (2020)은 낙동곡분의 북부에 해당하는 소위 대구지괴의 분지 서쪽 경계에서 암설류 퇴적층이 북북동과 북서 방향의 단층들에 의해 기반암과 직접 접하고 있음을 보고하였다. 일반적으로 충적선상지는 구조 운동에 의해 형성된 급경사지와 관련이 깊으며, 암설류 퇴적층과 기반암이 단층 접촉하는 양상으로 미루어 보아 경상분지의 확장 초기에는 낙동곡분의 서편이 부정합이 아닌 단층으로 기반암과 접했을 가능성이 높다. 낙동곡분에 퇴적물이 퇴적된 이후 분지가 동쪽으로 확장되고 차별적인 지괴 운동으로 경상분지는 3개의 소분지, 즉 밀양, 의성, 영양소분지로 나누어졌다(Chang, 1975, 1977). 밀양과 의성소분지는 팔공산단층(Chang, 1977; Chang and Park, 1997) 그리고 의성과 영양소분지는 안동단층계(Won *et al.*, 1978) 혹은 청송령(Chang, 1975; Kang and Lee, 2008)으로 경계된다(그림 1a).

경상분지 충전물은 화산물질의 함량에 따라 하부로부터 신동층군, 하양층군, 유천층군으로 구분되며, 이들은 불국사화강암류에 의해 관입되었다(Chang, 1975; Choi, 1986; Chang *et al.*, 2003). 신동층군은 밀양과 의성소분지의 서쪽 경계부인 낙동곡분을 따라 분포하나 영양소분지에는 산출되지 않는다. 하양층군은 세 소분지에 모두 분포하나, 소분지별로 암상의 차이가 있어 암층서가 다르다. 의성소분지 북부에는 신동층군의 낙동층, 하산동층, 진주층과 하양층군의 일직층, 후평동층, 점곡층이 분포한다(그림 1b). 신동층군은 연구지역의 서부에 분포하며 동쪽으로 가면서 지층이 순차적으로 젊어지지만, 하양층군은 연구지역의 중앙과 동부에 분포하며 동쪽으로 가면서 구성 지층들이 반복 출현하는 특징을 보인다.

경상분지의 확장과 이후 변형과 관련된 고응력장은 취성 변형 자료들로부터 응력텐서를 이용해 복원되었다. Hwang

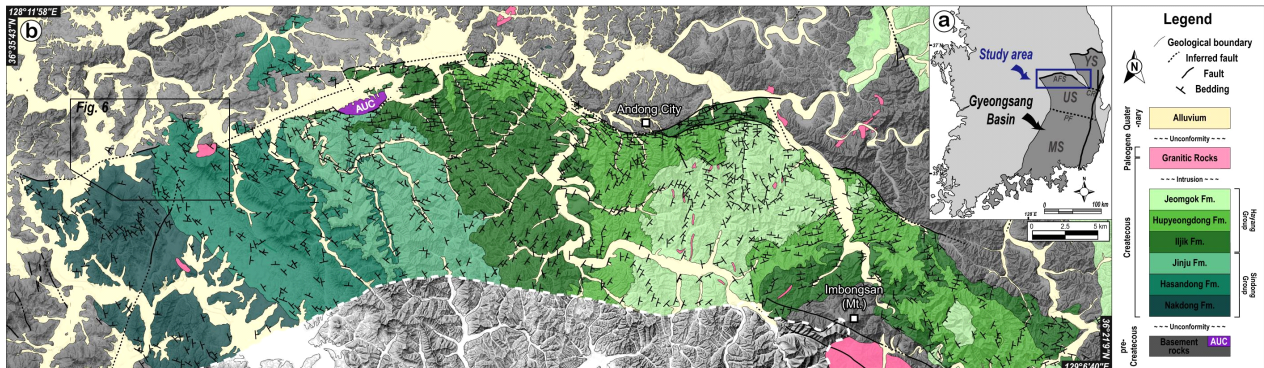


Fig. 1. (a) Location map of the study area and (b) geological map with stratal attitudes in the northern part of the Uiseong Subbasin (modified from Lee and Kim, 1968; Won and Kim, 1969; Kim and Lee, 1970; Kim, B.G. *et al.*, 1977a; Kim, Y.G. *et al.*, 1977b; Chang *et al.*, 1978; Kim, B.K. *et al.*, 1988; Yun *et al.*, 1988). (a) MS=Miryang Subbasin, US=Uiseong Subbasin, YS=Yeongyang Subbasin, PF=Palgongsan Fault, AFS=Andong Fault System, CR=Cheongsong Ridge. (b) AUC=Andong Ultramafic Complex.

(1994)은 신동층군의 퇴적 동안 경상분지의 전역에서 남북 방향의 인장응력 그리고 이후에는 동-서 방향의 인장응력이 작동하였음을 제안하였으나, Choi (2013)은 의성소분지의 신동층군이 퇴적되는 동안 동-서 방향의 압축 혹은 남-북 방향의 인장응력이 지배하였음을 보고하였다. 이후, Cheon *et al.* (2020)은 서북서 방향으로 배열된 밀양소분지 신동층군에서 관찰된 퇴적동시성 정단층군과 의성소분지 낙동층에서 관찰된 정단층들의 기하를 근거로 북북동-남남서 방향의 인장응력을 도출하였다. 한편, 북북동 방향의 낙동곡분과 이음단층(transfer fault)으로 해석된 안동단층계의 기하를 바탕으로 고응력장을 복원한 연구(Choi *et al.*, 2002; Ryu *et al.*, 2006)는 경상분지가 초기에 동-서 방향으로 확장된 것으로 해석하였다.

의성소분지에서 수행된 쇄설성 저어콘 U-Pb 연대 연구는 신동층군의 낙동층, 하산동층, 진주층이 각각 약 127 Ma, 118±2.6 Ma, 112.4±1.3 Ma (Lee, Y.I. *et al.*, 2010; Lee, T.-H. *et al.*, 2018a, 2018b) 그리고 하양층군의 점곡층이 103.2±0.3 Ma (Chae *et al.*, 2021)의 최대퇴적시기를 가지는 것으로 보고하였다. 일직층에서는 백악기 저어콘이 발견되지 않았으며 후평동층에서는 진주층의 최대퇴적시기보다 오래된 저어콘 연대가 도출되어, 이들의 연대는 제한되지 못하였다(Choi and Gwon, 2019; Chae *et al.*, 2021). 한편, 의성소분지 서부에서는 고수류가 주로 동쪽 혹은 남동쪽으로 흘렀지만, 의성소분지 북동부의 일직층, 후평동층, 점곡층의 고수류는 서 혹은 서북서 방향임이 보고되었다(Chang, 1988; Koh *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2000; Chough and Sohn, 2010). 이후 이러한 연구 결과와 함께 쇄설성 저어콘의 기원지 분석을 통해, 퇴적물의 기원지가 위치와 층에 따라 상당한 변화가 있었음이 제안되었다(Choi and Gwon, 2019; Chae *et al.*, 2021). 또한 Chang *et al.* (1978)은 의성소분지 북동부에서 퇴적암의 산상과 공급지, 층후, 지층의 경사 등을 고려하여 하양층군 각 층의 퇴적 동안 침강 속도가 변화하였으며, 특히 구계동층(후평동층) 퇴적 당시 의성소분지 북동부의 지각이 주변보다 빠른 차별적인 침강을 경험하였던 것으로 해석하였다.

의성소분지의 북쪽 경계에서는 충전물이 안동단층계에 의해 기반암과 접촉하는 것으로 알려져 있으나(Choi *et al.*, 2002), 대부분이 층적층으로 피복되어 있어 단층접촉을 실제 관찰하기는 쉽지 않다(그림 1b). 안동단층계는 전반적으로 동-서로 달리나, 위치에 따라 북서 내지 북동 방향의 범위 내에서 자취(trace)가 변화한다. 분지 경계부에서 안동단층계와 거의 평행한 퇴적동시성 정단층이 보고된 바는 없으나, 대부분의 기존 연구는 안동단층계가 분지 형성 초기에 정단층 혹은 이음단층으로 운동한 이후 역단층 혹은 횡압축성 단층(transpressional fault)으로 재활한 것으로 해

석하였다(Kim, 1975; Chang, 1977; Choi *et al.*, 2002; Kang and Lee, 2008; Cheon *et al.*, 2017). Choi *et al.* (2002)는 안동단층계의 운동감각 역전 시기를 안동시 풍천면에 분포하는 안동초고철질암복합체(Andong Ultramafic Complex; AUC)의 관입 이후(98.2±3.2 Ma)로 제안하였지만, 이후 수행된 연구들은 안동초고철질암복합체의 관입시기를 쥐라기 혹은 트라이아스기 후기로 보고한 바 있다(Whattam *et al.*, 2011; Jeong *et al.*, 2014). 한편, Egawa *et al.* (2006)은 의성소분지 북서부 신동층군의 암석학적 연구를 통해 퇴적암 내에 포함된 압쇄암 역들이 예천전단대 주변 기반암에서 기원하고 있어, 신동층군이 퇴적되는 동안 낙동곡분의 북쪽 경계는 안동단층계가 아닌 예천전단대에 속하는 동북동 방향의 호명단층으로 해석하기도 하였다.

3. 구조 분석

이번 연구에서는 지층의 경사 방향 또는 크기가 지도상(그림 2a)에서 뚜렷이 변화하는 곳을 시각적으로 판독해 먼저 구조구역을 나누어 공간적 변화를 분석하였다. 지층의 공간적 변화가 습곡을 지시하는 경우 습곡의 기하를 분석하였으며, 다음으로 각 구조구역 내 층위를 달리하는 지층들의 평균 경사와 표준편차를 구해 시간에 따른 자세 변화를 분석하였다. 마지막으로 퇴적동시성 단층의 기하학적 및 운동학적 특징을 분석하는 순서로 구조분석을 수행하였다.

성공적인 경사 분석을 위해 분지 충전물 중 초기 경사(initial dip)가 큰 조립질 암석은 제외하고 퇴적 당시의 고수평면을 지시하는 데 효과적인 이암과 세립~중립질 사암을 대상으로 층리의 자세를 측정하였다. 또한 자료의 공간적 균질성을 높이기 위해 500 m × 500 m의 격자를 설정하고 격자 내에 최소 한 지점 이상에서 지층의 자세를 측정하였다. 이와 함께 한국지질자원연구원의 1:50,000 지질도(Lee and Kim, 1968; Won and Kim, 1969; Kim and Lee, 1970; Kim, B.G. *et al.*, 1977a; Kim, Y.G. *et al.*, 1977b; Chang *et al.*, 1978; Kim, B.K. *et al.*, 1988; Yun *et al.*, 1988)에서 추출한 연구지역의 406개 층리 자세를 포함한 총 1,524개의 자료를 분석에 사용하였다.

3.1. 구조구역 구분

구조구역은 지도상에 동일하거나 유사한 구조적 특성을 가지는 단위 영역을 의미하며, 구조발달의 공간적 변화를 체계적으로 분석하기 위해서는 분지를 적절하게 구조구역으로 나누는 것이 필요하다. 지층의 경사 방향과 경사각의 변화를 고려해 연구지역을 총 5개 구조구역으로 구분하였다(그림 2a). 먼저 구조구역 A는 분지의 북쪽 경계에서 경사 방향과 경사각에 뚜렷한 변화를 보이는 구역으로 불연

속적인 3개의 소구역으로 나누어져 최대 약 3 km 폭으로 안동단층계의 자취를 따라 좁게 분포한다. 이곳 지층은 북쪽과 남쪽으로 경사진 것들로 나누어지는데, 북쪽으로 경사진 것들이 우세하다(그림 2b). 지층의 경사각은 평균 51°로 수평에 가까운 것부터 수직인 것까지 넓은 범위를 보인다. 등적투영망에 도시된 구조구역 A에서 측정된 전체 지

층 자세는 동서로 거의 수평의 π -축을 가진 하나의 대원(습곡) 분포를 보인다.

구조구역 A의 남쪽 분지 내부는 경사각에 뚜렷한 변화를 보이지 않기 때문에, 지층의 경사가 거의 반대 방향으로 변화되는 곳들을 연결하여 구조구역 B, C, D의 경계를 설정하였다(그림 2a). 연구지역에서 가장 넓은 지역을 차지하

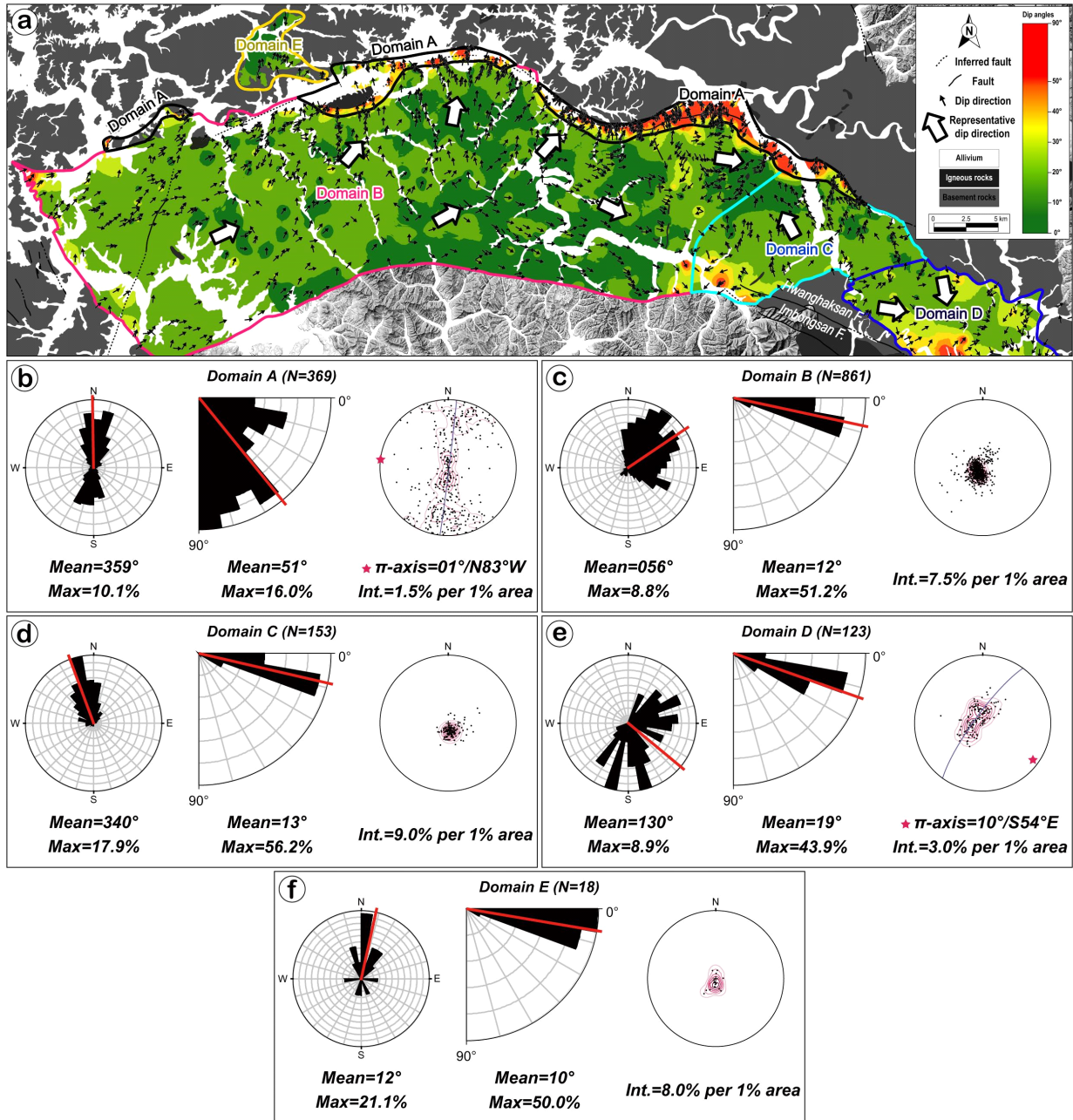


Fig. 2. Results of dip analysis in the northern part of the Uiseong Subbasin. (a) Structural map showing the colored iso-dip contours and dip directions of strata. The smaller black arrow and bigger white arrow indicate the stratal dip direction at each location and the dip direction that represents the stratal attitudes of the surrounding area, respectively. Five structural domains are divided based on the abrupt changes in dip direction and/or dip angle. (b-f) Rose and contoured π -diagrams (lower hemisphere, equal-area projection) showing the distribution of stratal attitudes with mean dip direction and dip angle for each domain.

는 구조구역 B에는 신동층군 낙동층에서부터 하양층군 점곡층까지 차례로 모두 분포한다(그림 1). 이곳 지층은 평균 12°의 각을 가지며 북동쪽으로 경사지지만, 서쪽의 신동층군은 체계적으로 북동 내지 동북동 방향으로 경사지는 반면, 하양층군은 동쪽으로 갈수록 북북동에서 동남동으로 경사 방향이 회전된다(그림 2a와 2c).

연구지역 동부에 위치한 구조구역 C와 D에는 하양층군 지층들이 분포하며 두 구역 경계 주변에 기반암이 노출되어 있다(그림 2a). 이중 구조구역 C의 분지층전물은 평균 13°의 경사각을 가지며 북북서 방향으로 일관되게 경사진다(그림 2d). 한편, 구조구역 D의 경우에는 지층들이 남쪽의 기반암(선캄브리아 편마암과 쥐라기 화강암) 인근에서 동북동 내지 동쪽으로 경사지지만 북쪽 기반암(쥐라기 화강암) 주변에서는 대체로 남쪽으로 경사지고 있어, 내부에 북서-남동 방향의 거의 수평한 축을 가지는 향사 또는 골(trough)의 기하를 나타낸다(그림 2e). 이 구조구역 지층의 평균 경사각은 19°로 남동쪽으로 향한다. 구조구역 E는 연

구지역 북동부 안동단층계 북쪽의 기반암 내에 백악기 퇴적층이 고립되어 분포하는 곳(그림 2a)으로 주로 역질 사암 내지 역암으로 이루어져 고수평면을 지시하는 층리의 측정이 제한적이라 총 18개의 지층 자세만 수집되었다(그림 2f). 평균 경사각은 10°의 저각으로 북쪽으로 경사진 층리가 우세하다.

3.2. 습곡 분석

3.2.1. 구조구역 A에 발달하는 습곡

구조구역 A는 안동단층계의 자취를 따라 띠 모양을 이루며 남쪽의 구조구역 B와 C와의 경계에서 지층의 경사 방향과 크기가 급격한 변화를 보여준다(그림 3). 이는 구역 A의 지층 경동이 안동단층계의 운동과 밀접히 관련됨을 알려준다. 안동단층계의 자취는 전체적으로 동-서 방향이지만 동-서와 함께 동북동과 서북서로 측방 변화한다. A 구역 전체 층리 자료로 인지된 동-서 방향의 습곡(그림 2b)과 안동단층계의 관련성을 보다 자세히 알아보기 위해 단층 자

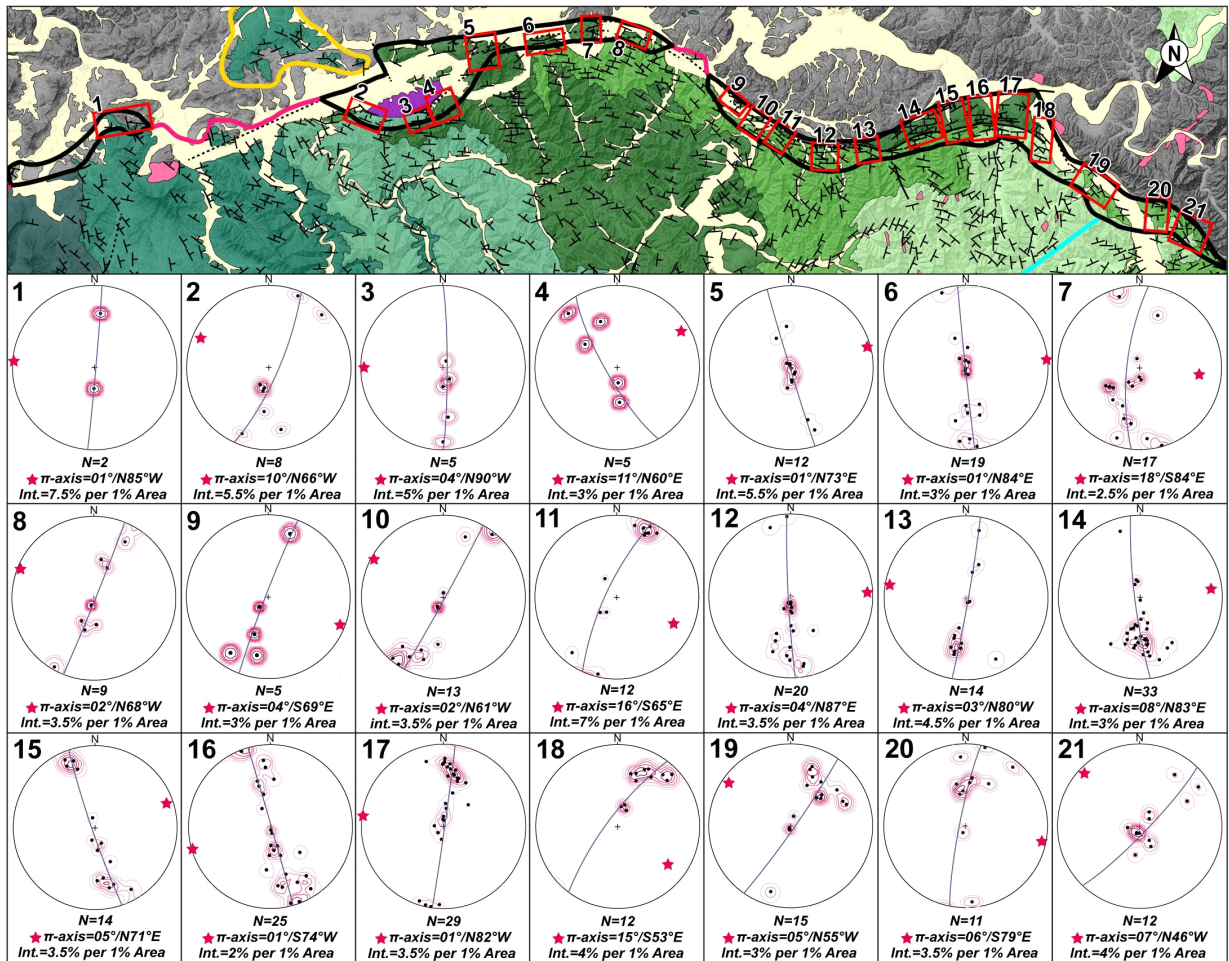


Fig. 3. π-diagrams (lower hemisphere, equal-area projection) showing fold axes and best-fit circles in each segmented small sectors of Domain A.

취를 따라 구역을 다시 총 21개로 나누어 층리 자세를 등적투영망에 투영하였다. 세분된 구역의 층리 자세들은 모두 수평에 가까운 침강각을 가진 습곡(대원)을 이루는데, 습곡 축은 동-서 9개, 서북서-북서 8개 그리고 동북동-북동 방향인 것이 4개이다(그림 4). 특징적으로 이들 습곡의 축 방향은 인접한 안동단층계의 자취 방향과 거의 평행하게 축 방향으로 변화된다(그림 3과 5).

기존에 선캄브리아 편마암이 분포하는 곳으로 알려진 안동단층계의 북쪽 외곽(경북 예천군 풍양면 낙상리; 그림 1)에서 백악기 퇴적암 노두가 이번 연구에서 새롭게 발견되었다(그림 6). 이곳 퇴적암은 편마암 역을 함유하는 백색 또는 자색 역암과 회색 또는 자색을 띠는 중립질 내지 세립질 사암이 호층을 이루고 있다. 층리는 부분적으로 휘어지나 전체적으로 북쪽을 향해 60° 내외의 고각으로 경사지며, 최대 1.3 cm 폭의 단층비지를 가지는 층리와 평행한 북서

주향의 단층 4매도 관찰되었다. 이곳에서 남쪽으로 약 40 m 떨어진 지점에는 층리의 자세가 급격히 변해 N80°W/08°SW로 경사가 얕아진다. 이들 지점에서 관찰된 지층의 자세들을 함께 등적투영망에 도시하면, 이곳에도 북서로 저각 침강하는 습곡이 발달함을 알 수 있다(그림 6의 삽입 등적투영망).

3.2.2. 구조구역 B 내부에 발달하는 습곡

연구지역 지층들의 자세 변화를 지도상에 가시화하기 위해 주향을 조화롭게 이은 자취도(trace map)를 작성하였으며, 그 결과 구조구역 B에서 방향성이 다른 3매의 습곡이 인지되었다(그림 7a-c). 북서 방향의 축을 가지는 습곡 1과 3은 구조구역 A와 인접한 북동부와 북서부에서 국지적인 지층 경사 방향 변화로 인지되는 반면, 북동 방향의 습곡 2는 상대적으로 큰 규모로 중앙부에서 경사 방향이 북동에서 동쪽으로 변화되는 것으로 인지되며 구조구역 B를 통과서로 분할한다(그림 7a).

3.2.3. 구조구역 경계를 이루는 습곡

구조구역 B와 C의 경계부에서 구역 B의 지층은 동쪽으로 경사지는 반면, C의 지층은 북서쪽으로 경사지고 있어 두 구역의 경계부에는 향사가 형성되어 있음을 알 수 있다(그림 7a-b). 또한 북서쪽으로 경사지던 C의 지층 자세가 D 구역에서는 동쪽 또는 남동쪽으로 경사 방향이 급격히 변화하고 있어, C와 D의 경계부에는 배사가 예상된다. 구조구역 B의 습곡 3에 의해 국지적으로 회전된 층리와 구조구역 C와 D의 남쪽 기반암과의 부정합 경계를 따라 회전하는 층리를 제외한 자세들을 등적투영망에 투영하면(그림 7d), 구조구역 B와 C 그리고 C와 D의 경계부를 따라 각각 북동과 동북동 방향의 축을 가진 습곡이 도출된다.

구조구역 경계부에 발달하는 습곡은 지질도 상에서 지층이 반복되는 연구지역 층서의 이유를 설명해 준다(그림

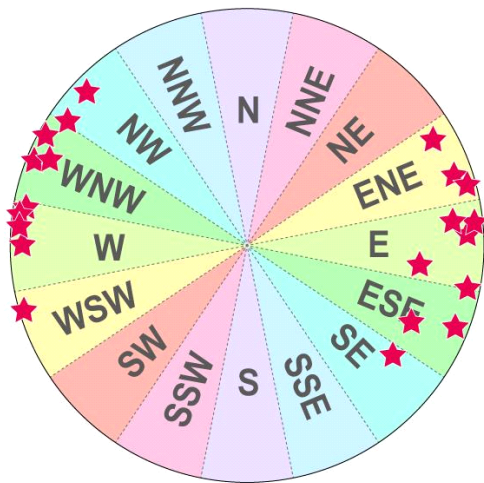


Fig. 4. Twenty one fold axes in Fig. 3 plotted on the stereograph divided into 16 directions. Nine, eight, and four fold axes are arranged in E-W, WNW~NW, and ENE directions, respectively.

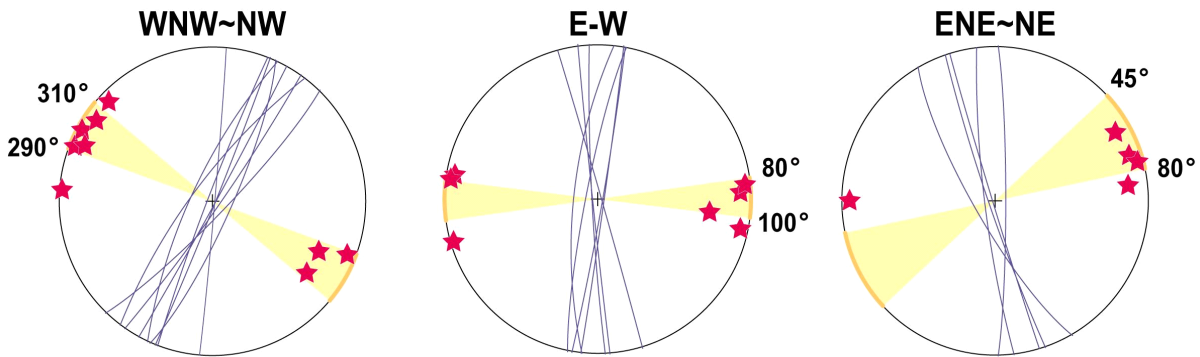


Fig. 5. Three groups of the folds in Domain A reclassified according to the trace directions of Andong Fault System showing a tendency of fold axis parallel to adjacent fault trace.

7a-b). 향사가 형성되어 있는 구조구역 B와 C의 경계를 중심으로 양편으로 하양층군 점곡층, 후평동층, 일직층이 차례로 반복 출현하며, 배사구조를 이루는 구조구역 C와 D 경계부를 따라 분포하는 하양층군 일직층을 중심으로 양편으로 보다 신기의 후평동층과 점곡층이 차례로 출현한다. 한편 연구지역에서 얻어진 자력이상(Park *et al.*, 2019)의 공간적 변화를 살펴보면(그림 7a), 구조구역 B에서는 서편 분지 경계에서 높은 자력이상(빨간색~노란색)이 동쪽으로 가면서 점진적으로 낮아지는(초록색~파란색) 양상이 뚜렷이 관찰되며, 구조구역 B와 C의 경계에 이르러서는 다시 빠르게 동쪽에서 자력 이상이 커지는 특징을 보인다. 또한 구조구역 C와 D의 경계부에서 다시 자력 이상 값이 감소하다가 D 구역 내에서 증가한다. 이는 연구지역의 자력 이상 값이 북동 방향 습곡의 경첩부(hinge zone)를 따라 크게 변화하고 구조구역별로 차이를 가짐을 보여주는 결과이다. 따라서 의성소분지 북부는 구조구역별로 기저 바닥의 깊이 또는 구조가 확연한 차이를 가지며, 이러한 차이는 북동 방향의 습곡 형성 과도 밀접히 관련되는 것으로 판단된다.

3.3. 층별 경사각 분석

경상분지 충전물의 층서는 암석학적인 특성을 기준으로

층을 나누는 암층서를 사용하고 있다. 암층서는 본래 시간 개념을 포함하지는 않으나, 최근 연대학적 연구들은 최대 퇴적연령을 지시하는 수치연대가 하위층에서 상위층으로 갈수록 좁아지는 경향이 뚜렷해 경상누층군 암층서가 시간 개념이 일정 부분 포함된 것으로 본다(Kang and Paik, 2013; Lee *et al.*, 2018a). 또한 연구지역인 의성소분지 북부의 암층서 또한 상위층으로 갈수록 연대가 젊어지고 있어(Choi and Gwon, 2019; Chae *et al.*, 2021), 이곳 분지 충전물이 퇴적동시기적인 지괴 경동을 경험하였다면 지층별 평균 경사의 변화는 시간에 따른 분지 기저 지괴의 경동사를 이해하는 데 유용할 것이다. 한편, 퇴적 이후 안동단층계의 운동에 의해 분지 북쪽 가장자리를 따라 국지적인 변형을 받은 곳으로 의심되는 구조구역 A와 안동단층계 북쪽 외곽에서 소규모로 하산동층만 분포하는 구조구역 E는 제외하고, 분지 내부의 구조구역 B, C, D를 대상으로 지층별 경사각 분석이 실시되었다(그림 8).

각 구조구역의 지층별 경사각 분석 결과(그림 8a), 경사각의 변화가 체계적이지 않고 일부 층의 경우 평균값을 신뢰하기 힘든 표준편차가 도출되었다. 그러나 경사 분석은 각 구조구역의 전반적인 지층 자세를 제어한 대규모 지하 구조를 추론하는 연구로써, 다음의 세 가지 기준을 적용하

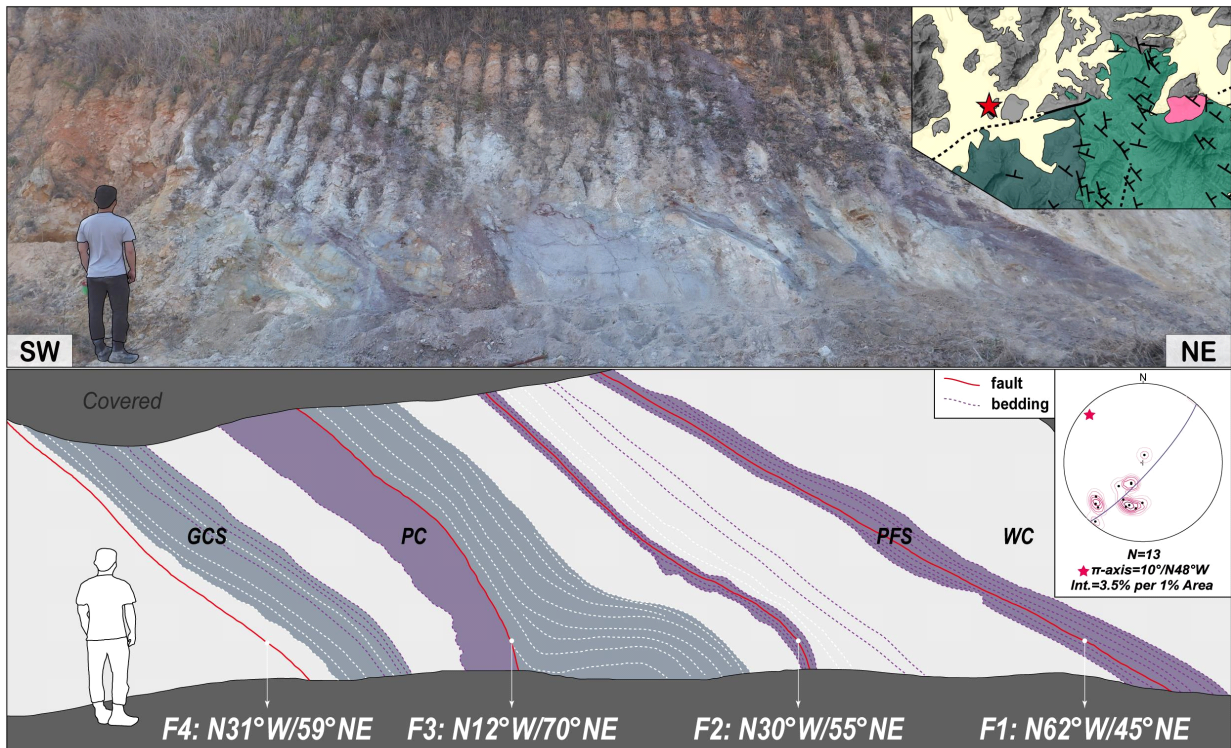


Fig. 6. Newly observed outcrop photograph of isolated Cretaceous sedimentary rocks north of inferred Andong Fault System in the northeastern part of the study area and its sketch, which shows faults parallel to high-angle beddings and forms a NW-trending fold (inset in the lower right) together with adjacent outcrop to the south. WC = white-matrix conglomerate, PC = purple-matrix conglomerate, GCS = grey coarse sandstone, PFS = purple fine sandstone.

여 국지적인 변형에 의해 교란된 지층자세를 제거하였다: ① 임봉산단층과 황학산단층(그림 2a)의 인근에서 40° 이상의 경사를 가지는 지층, ② 등경사도에서 주변 지층의 경사와 조화를 이루지 못하고 40° 이상의 경사를 가지는 지층, ③ 국지적인 규모의 습곡1과 습곡3을 구성하는 지층(그림 7a).

세 가지 기준을 근거로 선별된 지층 자세를 사용하여 지층별 경사 자료를 재분석하였다(그림 8b). 신동층군과 하

양층군이 모두 분포하는 구조구역 B의 경사각 분석 결과를 살펴보면, 하부의 일직층보다 0.7° 큰 경사를 보이는 후평동층을 제외하면 상위로 갈수록 16.25°에서 8.12°로 평균 경사각이 점차 작아지는 경향을 보인다. 또한 하양층군의 일직층, 후평동층, 점곡층이 분포하는 구조구역 C와 D의 지층별 평균 경사각도 상위층으로 갈수록 작아지는 경향이 뚜렷해 의성소분지 북부가 퇴적동시성 지괴 경동운동을 겪은 것으로 판단된다. 하위 일직층에서 상위 점곡층으로 가

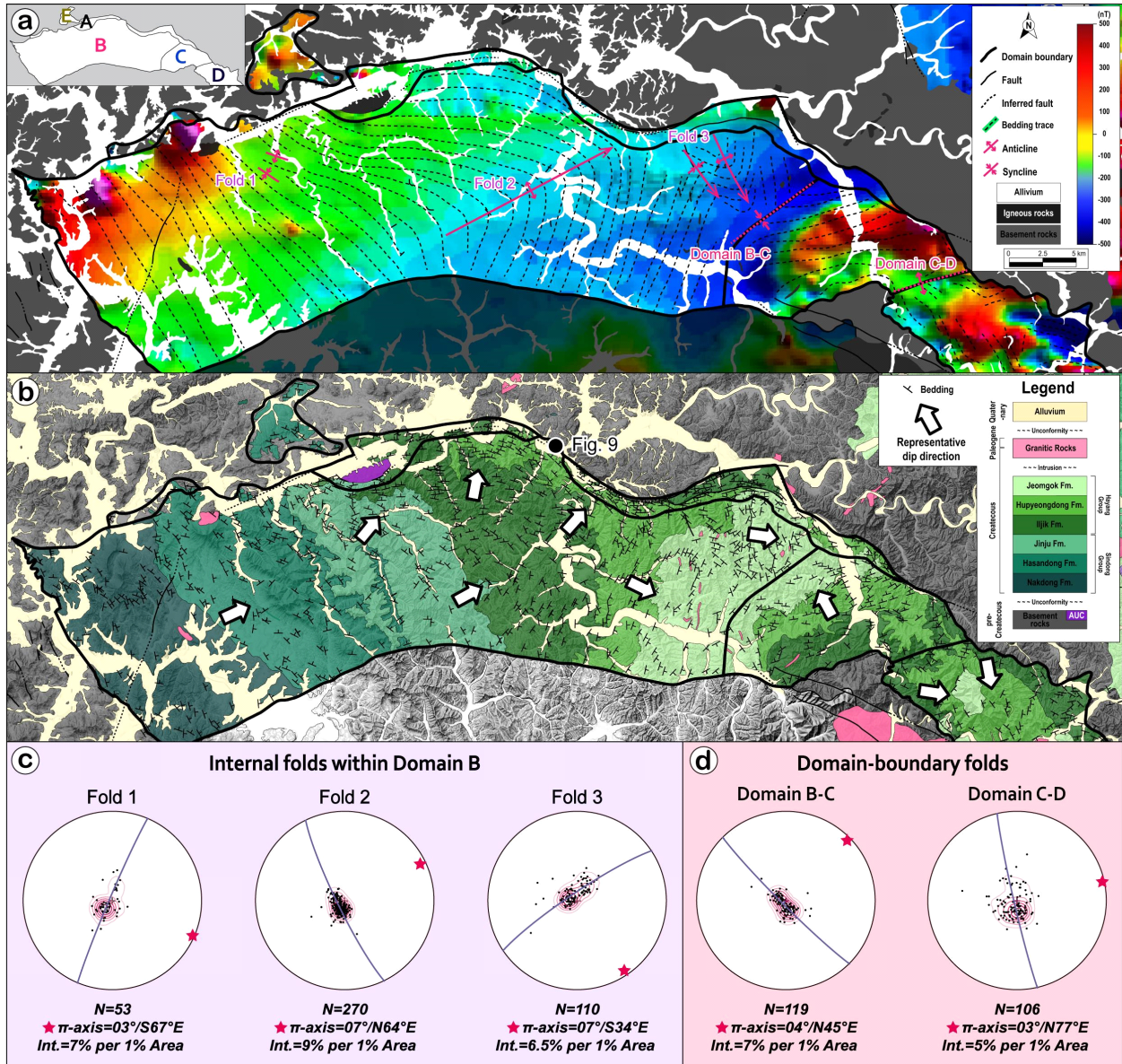


Fig. 7. Analysis results of the folds developed in Domains B, C, and D. (a) Bedding traces (black dashed lines) on a magnetic anomaly color map (from Park *et al.*, 2019). The bedding traces show relatively small NW-trending folds adjacent to Domain A and relatively large NE-trending folds almost parallel to the magnetic anomalies. (b) Geological map with the bedding attitudes and representative dip directions of the basin fills. Note the Jeomgok and Iljik formations distributed along the boundaries of Domains B-C and C-D, respectively, and stratigraphic repetition pattern. (c-d) π -diagrams (lower hemisphere, equal-area projection) showing the π -axes and great circles of folds in Domain B (c) and along the domain boundaries (d).

면서 구조구역 C와 D에서 각각 14.7°에서 10.83° 그리고 19.73°에서 13.0°로 변화되었다. 한편, 세 구조구역의 하양층군 각 층의 평균 경사각을 서로 비교해 보면, 일직층은 5~10°, 후평동층은 약 6~7°, 점곡층은 2~5° 범위의 차이를 보인다. 이러한 결과는 구조구역들이 분지 진화 과정에서 차별적인 퇴적동시성 지괴 경동을 겪었을 가능성을 지시한다.

한편, 분지 내에 퇴적동시성 경동이 발생할 때, 특정 층군 전체가 동일한 크기의 경동을 겪는 것이 아니라, 기저 단층의 분포와 지괴 분할 양상에 따라 시·공간적으로 다양한 크기와 방향의 경동을 경험한다. 연구지역 지층들의 평균 경사의 표준편차는 측정 오차와 함께 이러한 과정들로 인한 경사각의 공간적인 변화를 보여주는 수치이다(그림 8b).

3.4. 퇴적동시성 단층

연구지역 중부의 분지 북쪽 경계 인접부에 해당하는 경북 안동시 풍산읍 계평리(그림 7b)의 인공절개 사면에서 후평동층의 역암과 협재된 자색 사암층을 절단하는 정이동성 공역상 단층들이 다수 관찰되었다(그림 9a). 이 노두에서 약 1.6 m의 겹보기 수직변위로 하도형 퇴적층을 절단하는 규모가 가장 큰 단층은 북북서 방향의 주향을 가지고 북

동 방향으로 경사지는데, 이 단층의 상반에는 소규모의 공역상 정단층들이 지구-지루(graben and horst) 구조를 형성하고 있다(그림 9b). 이들 단층은 동쪽으로 경사지는 북북서 내지 남-북 주향의 단층들과 북서 혹은 남동쪽으로 경사지는 북동 주향의 단층들로 구성된다(그림 10a). 단층으로 절단된 역암 내에 얇게 협재된 자색 사암층은 정단층을 지시하는 겹보기 변위와 끌림습곡을 보여주며, 단층 상반의 지층 두께가 대비되는 하반의 것보다 두껍고 상부로 갈수록 단층의 변위가 작아지는 퇴적동시성 성장단층의 특징을 보여준다(그림 9b).

일반적으로 퇴적동시성 단층은 지층의 경동 이전에 만들어지므로, 노두에서 측정된 층리를 이용해 지층의 경동 이전으로 단층면의 자세를 경사 보정하였다(그림 10a). 보정 이후에 단층면들이 보다 군집되며 북북동 주향의 뚜렷한 공역상 기하를 보여주고 있어 이들 단층이 퇴적동시성 단층임을 지지해 준다. 경사 보정된 공역상 단층들의 기하를 이용해 고응력장을 복원하면, 최대주응력축(σ_1)이 거의 수직이고 중간주응력축(σ_2)이 북북동 방향으로 수평한 서북서-동남동 방향의 최소수평응력(σ_{Hmin})이 도출되었다. 한편, 공역상 단층들 중 북북서 주향의 두 단층면에서 우수향

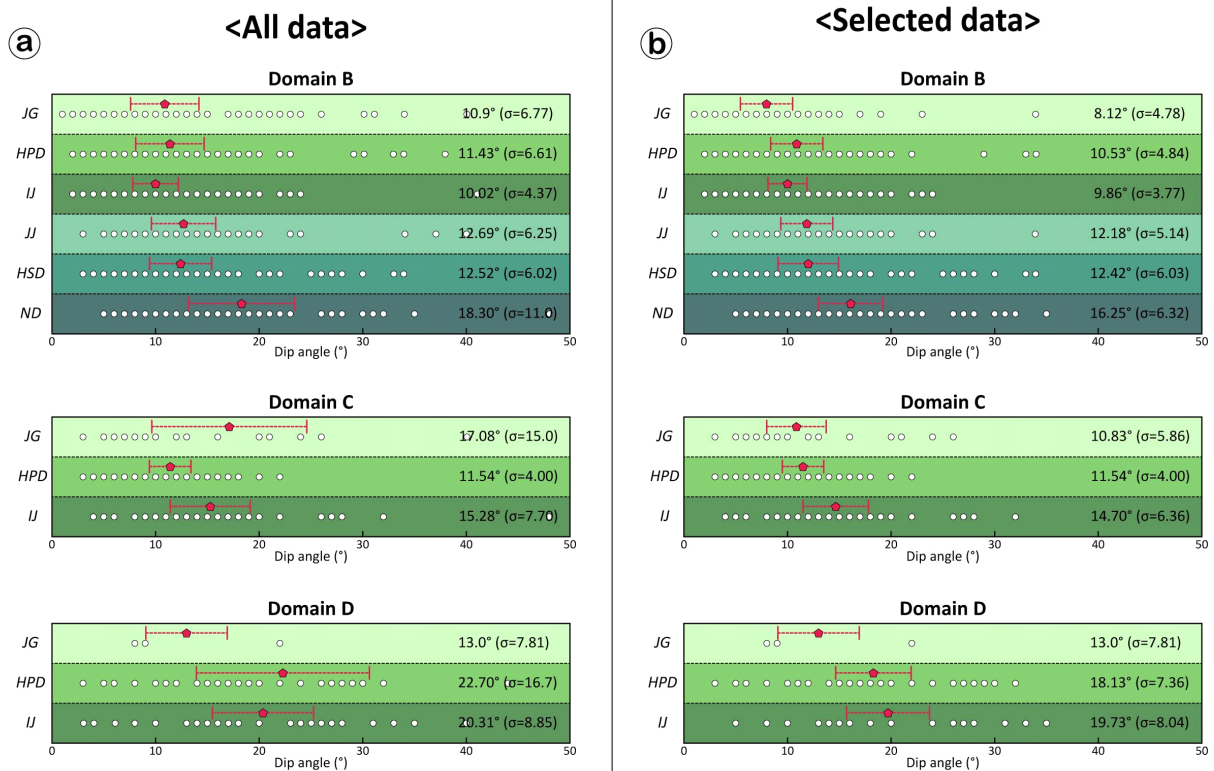


Fig. 8. Mean stratal dip angles and their standard deviations of each domains using all data (a) and selected data (b). In the selected data, the stratal attitudes that were locally deformed by faults and small-scale folds and that have dip angles greater than 40° were excluded. The mean stratal dip angles calculated from the selected data show a gradual decrease upward. JG=Jeomgok Formation, HPD=Hupyongdong Formation, IJ=Iljik Formation, JJ=Jinju Formation, HSD=Hasandong Formation, ND=Nakdong Formation.

정이동성의 각각 60°와 50°의 선주각(rake)을 가지는 단층 조선이 확인되었다(그림 9c). 이를 Delvaux and Sperner (2003)의 Wintensor S/W (v.5.9.0)을 사용하여 고응력장을

복원하면, 서북서-동남동 방향의 최소주응력축(σ_3)이 도출된다(그림 10b). 단층조선의 개수가 적어 복원된 고응력장의 신뢰도는 낮다 할 수 있으나 단층의 공역상 기하를 통해

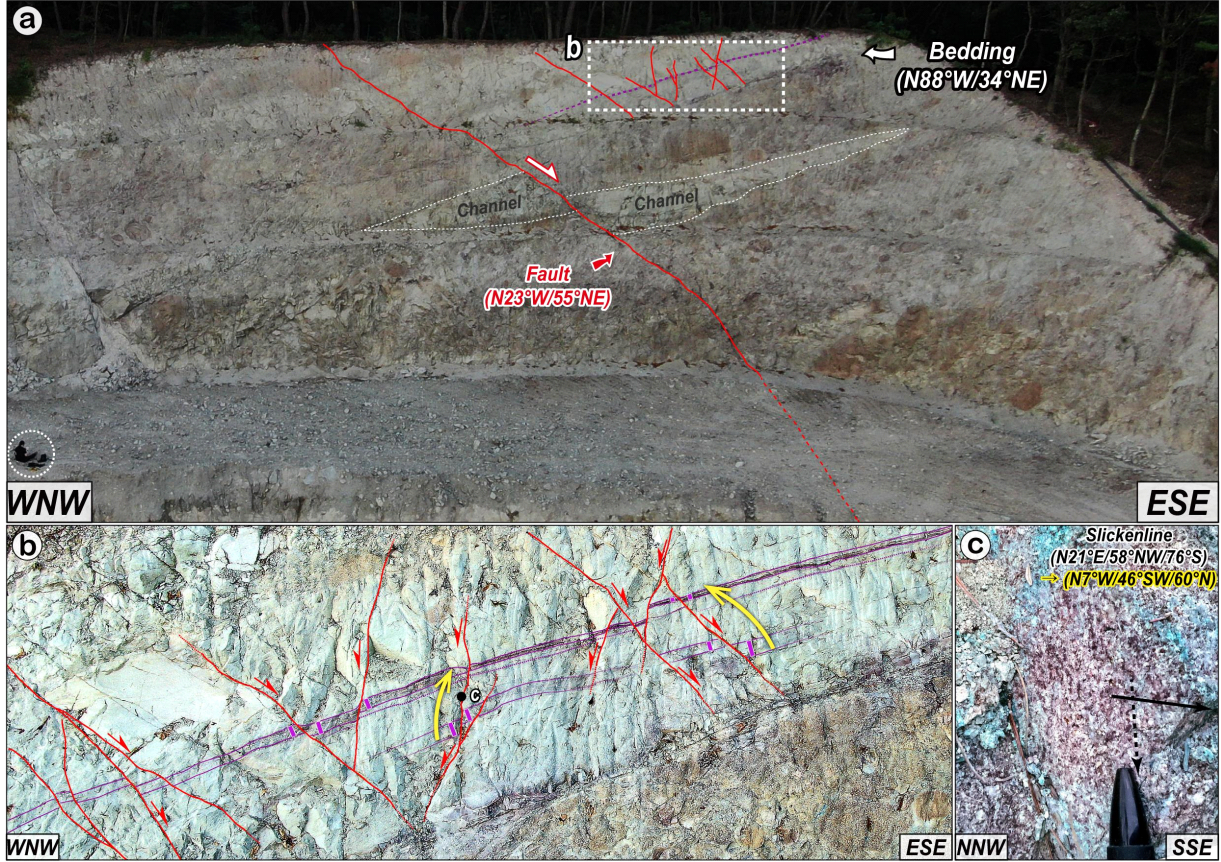


Fig. 9. (a) Outcrop photograph showing the normal faults observed in the Hupyeongdong Formation in Gyepyeong-ri, Pungsan-eup, Andong city. (b) Close-up view of tilted conjugate normal faults cutting thin purple sandstone layers, which show the features of syndepositional growth faulting. Note yellow arrows and purple bars indicating upward decrease of fault displacement and thicker layers in hanging wall compared to adjacent footwall, respectively. (c) Slickensides with a high-angle rake on the fault surface.

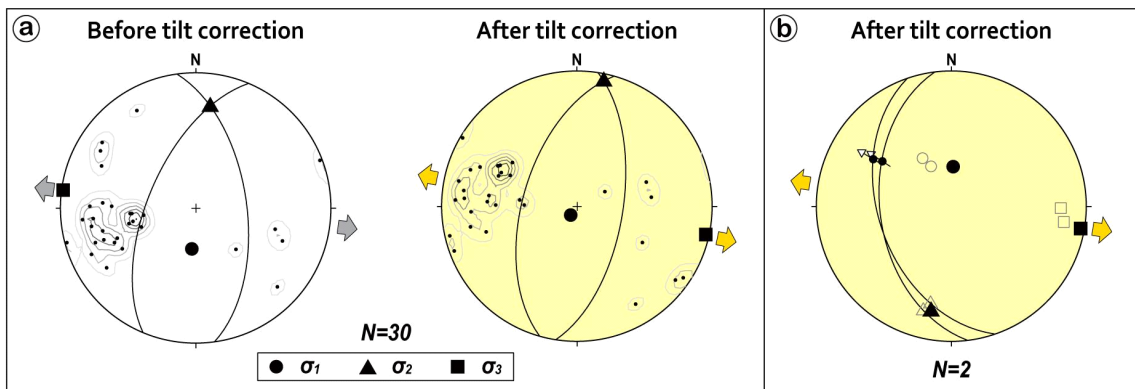


Fig. 10. Paleostress reconstruction (lower hemisphere, equal-area projection) using (a) the geometry of the syndepositional conjugate normal faults and (b) their slip data shown in Fig. 9. Divergent arrow heads represent horizontal stretching directions (σ_{Hmin}). N: number of data.

복원된 고응력장과 거의 동일한 방향성을 보여주고 있어, 이곳 퇴적동시성 공역상 단층들은 서북서-동남동 방향의 인장응력을 지시한다.

4. 토 의

4.1. 습곡의 기하에 따른 분류와 성인

연구지역에서 확인된 다양한 규모와 방향을 가지는 습곡들은 분지 북쪽 경계와의 기하학적 관계를 근거로 1) 분지 경계와 평행 또는 아평행한 습곡과 2) 분지 경계와 고각도로 사교하는 습곡으로 분류된다. 분지 경계와 거의 평행한 습곡에는 구조구역 A와 D 내 발달하는 습곡이 해당되며, 분지 경계와 사교하는 습곡은 구조구역 B 내부의 습곡, 구조구역 B와 C 그리고 C와 D의 경계를 이루는 습곡이 해당된다. 이번 장에서는 연구지역에서 확인된 습곡을 유형별로 분류하여 이들의 형성 기작에 관해 논의하도록 하겠다.

4.1.1. 분지 경계와 평행 또는 아평행한 습곡

안동단층계를 따라 띠 모양을 이루는 구조구역 A의 지층들은 전체적으로 동-서 방향 수평축을 가진 습곡을 이루지만(그림 2b), 습곡축이 위치에 따라 동북동과 북서 사이에서 변화한다(그림 3과 4). 한편, 변화하는 안동단층계 자취를 세 방향 즉, 서북서~북서, 동-서 그리고 동북동~북동으로 나누고 이들과 인접한 구조구역 A의 소구역 21개에서 얻어진 습곡축과 대원을 함께 등적투영망에 투영하면(그림 5), 단층 인접부에는 단층 자취와 유사한 방향의 축을 가진 습곡들이 발달하고 있어 단층과 습곡이 매우 밀접히 관련됨을 보여준다. 따라서 구역 A의 습곡들은 기존에 알려진 안동단층계의 기하와 운동감각 즉, 북쪽으로 경사지고 상반이 남쪽으로 이동(top-to-the-south)하는 충상단층 운동에 의해 주변에 형성된 끌림습곡(drag fold)으로 해석된다. 이와 함께 A 구역이 의성소분지 북쪽 경계 전체를 따라 연장되지 않으며 단속적인 모양을 보이는 점(그림 2a), 선캄브리아 편마암 분포지로 알려진 분지 북쪽 외곽에서 주변 지층들과 함께 북서 축의 습곡을 만드는 고경사의 백악기 퇴적암 노두가 새로이 발견된 점(그림 6), 분지 북서부 외곽에 하산동층에 대비되는 퇴적암이 기반암 내에 고립되어 산출되는 점(구조구역 E; 그림 2a) 등은 현재 의성소분지 북쪽 전체가 단층으로 경계하지는 않으며 일부 지역은 안동단층계의 주 단층이 현 분지 경계보다 더 북쪽에 존재함을 지시한다. 또한 백악기 의성소분지가 확장되고 퇴적이 발생할 당시의 분지 경계의 최소 일부는 현 경계보다 북쪽에 위치하였고 안동단층계는 충전물이 모두 퇴적된 이후에 활동한 분지 내부를 파괴하는 단층으로 해석된다.

북서-남동 방향으로 길쭉한 형태의 구조구역 D 내에는

이와 거의 평행한 남동 방향으로 저각 침강하는 축을 가진 향사가 형성되어 있다(그림 2e). D 구역의 북동쪽은 분지 충전물이 쥐라기 화강암류를 그리고 남서쪽에는 선캄브리아 변성암 기반암을 부정합으로 피복하며, 구역 내부에는 진주층, 후평동층, 점곡층의 순서로 중심부로 갈수록 젊은 지층이 분포한다(그림 1). 또한 이곳 층들의 평균 경사각이 상위로 갈수록 점차 작아지는 경향을 보여주고 있어(그림 8b), 구조구역 D에는 분지 중심부로 향하는 퇴적동시성 지괴 경동이 발생해 북서-남동으로 길쭉한 골 형태의 퇴적공간이 만들어졌을 가능성이 있다. 그러나 보다 자세하고 확정적인 구역 D의 구조 해석은 현재까지 획득된 자료만으로는 한계가 있으며, 이곳의 퇴적 동시성과 후기 구조 그리고 경계 특성에 관한 향후 추가적인 조사가 요구된다.

4.1.2. 분지 경계와 고각도로 사교하는 습곡

분지 경계와 사교하는 습곡은 구조구역 B에서 관찰되는 북서-남동 방향의 습곡과 구조구역 B 내부와 구조구역 B와 C 그리고 C와 D의 경계를 따라 발달하는 북동-남서 방향의 습곡으로 구분된다(그림 7). 북서-남동 방향의 습곡은 구조구역 A와 인접한 구조구역 B에서만 국지적으로 출현하는 반면, 북동-남서 방향의 습곡들은 분지 내부에서 더 큰 규모로 수십 km의 파장을 가지며 발달하고 있다. 북서-남동 방향 습곡의 형성은 현재로선 확정하기 어려우나 국지적인 지하 단층운동이나 마그마의 관입이 원인이 될 수 있다. 그러나 분지의 북쪽 경계 인근에서만 이 습곡들이 출현하고 있어 안동단층계의 운동에 수반된 구조로도 해석될 수 있다. 즉, 동-서 방향의 안동단층계가 역이동과 함께 좌수향의 주향이동 성분을 포함하는 횡압축성 운동을 하였다 고 가정하면, 단층을 따라 인근 퇴적암 내에 북서-남동 방향의 안행상 습곡이 국지적으로 만들어질 수 있다. Cheon *et al.* (2019, 2020)은 고진기(Paleogene) 동안 한반도에 북동-남서 방향의 압축력이 작동하여 연구지역 남쪽의 의성소분지에 발달하는 서북서 방향의 가음단층계가 좌수향 횡압축성 사교이동단층(oblique-slip fault) 운동을 하였으며, 이에 따라 특히 신령단층을 따라 주변에 북서-남동 방향의 수평축을 가진 습곡들이 안행상으로 만들어졌음을 보고한 바 있다.

북동-남서 방향의 습곡들은 분지의 확장 동안 만들어진 퇴적 동시성 구조로 판단된다. 분지 충전물 내 습곡구조는 퇴적 후기의 압축력뿐만 아니라 분지의 확장 과정과 침강 과정 동안 퇴적과 동시에 흔히 만들어진다(Schlische, 1992, 1993; Scott *et al.*, 1994; Gawthorpe *et al.*, 1997; Son *et al.*, 2000, 2001; Lewis *et al.*, 2015; Coleman *et al.*, 2019). 이러한 퇴적 동시성 습곡의 형성은 대부분 분지 바닥의 지괴 경동을 수반하는 단층운동의 결과로 해석되고 있으나 화산활

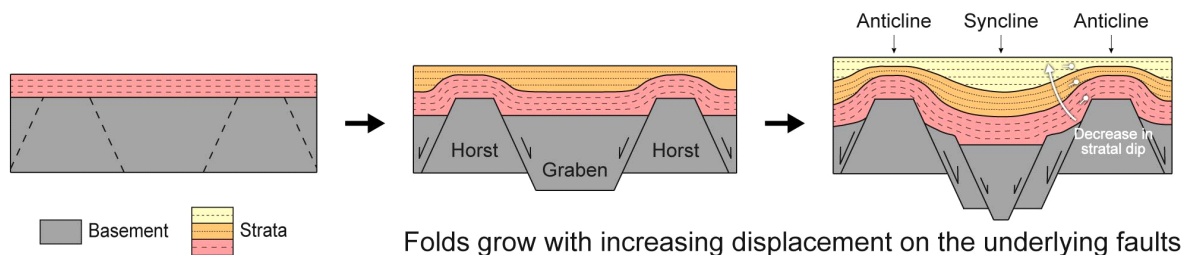
동, 슬럼핑(slumping)과 같은 다른 지질학적 변수에 의해서도 만들어질 수 있다(Son *et al.*, 2001). 그러나 연구지역에는 화산체나 화산기원 퇴적물이 관찰되지 않으며, 중력에 의한 슬럼프 습곡으로 해석하기 위해서는 퇴적물의 이동방향 및 이와 관련되어 형성되는 확장 또는 압축 환경을 고려하는 과정에서 많은 가정이 필요할 뿐만 아니라 층별 경사각의 점진적인 변화를 기대하기 어렵다(Ortner, 2007). 한편, 북동-남서 방향의 습곡들은 수십 km의 파장과 5 km 이상의 긴 연장성을 보이고 분지 기저의 심도 변화나 단층과 같은 주요 지하구조의 존재를 반영하는 자력이상대(Park, 2006)와 기하학적으로 잘 부합한다. 또한, 분지 내 지층의 반복 출현과도 밀접한 관련성을 보이고(그림 7) 습곡축의 방향이 후평동층 내에서 관찰된 퇴적동시성 성장단층의 주향과 유사하다는 점을 근거하면, 이들 습곡은 분지의 침강과 함께 기저를 경동시키는 대규모 심부 구조의 규제를 받아 형성되었을 것으로 해석된다. 또한 북동-남서 방향의 습곡이 존재하는 구조구역 B, C, D의 지층들은 상부로 갈수록 경사각이 약아지는 경향이 뚜렷하다는 점(그림 8b)도 이곳 지층의 경동과 습곡이 퇴적과 동시에 형성되었음을 지지한다. 결론적으로 북동-남서 방향의 습곡들은 단층의 변위가 누적됨에 따라 습곡이 성장하여 날개부를 구성하는 지층의 경사가 상위층일수록 작아지는 성장습곡의 모델로 설명 가능하다(그림 11).

4.2. 의성소분지 북부의 구조발달과 진화

일반적으로 확장형 분지에서 지층의 평균 경사 방향은 분지 기저의 지괴 경동 및 확장 방향과 거의 일치한다(Wernicke, 1981; Wise, 1992; Lucchitta and Suneson, 1993; Schlische, 1993; Scott *et al.*, 1994). 구조구역 B에는 신동층군 낙동층부터 하양층군 점곡층까지 모든 지층이 동북동 혹은 동남동 방향으로 경사지며 동쪽으로 갈수록 지층이 젊어지고 젊은 지층일수록 경사각이 작아지는 특징을 보인다(그림 1-2와 8). 이는 분지의 침강과 퇴적중심이 서쪽에서 시작되어 점차 동쪽으로 이동하여 기저가 동쪽으로 경동되며 분지가 성장

하였음을 지시한다(Chang, 1975, 1977, 1988; Choi, 1986; Koh *et al.*, 1996; Chough and Sohn, 2010). 한편, 구조구역 B 서부의 신동층군 지층은 동북동 방향으로 경사지지만, 동부의 하양층군 지층은 동남동 방향으로 경사진다(그림 7b). 이는 하양층군 퇴적과 함께 구조구역 B 동부에 지각변형과 침강이 집중되고 동북동에서 동남동 방향으로 지괴 경동의 시·공간적 변화가 발생하였음을 지시한다. 이 때문에 구조구역 B 내부에 북동 방향의 완만한 배사습곡 2가 만들어진 것으로 해석된다(그림 7a). 구조구역 C의 하양층군 지층들은 일관되게 북북서 방향으로 경사지고 상부 지층일수록 경사각이 감소한다(그림 2와 8). 이는 구조구역 C에 북북서 방향의 퇴적 동시성 지괴 경동이 발생하였으며, 구조구역 B와 C의 경계부에 지구(graben)와 같은 북동-남서 방향의 상대적 저지가 형성되고 이곳이 점진적으로 침강함으로써 퇴적 동시성 향사구조가 형성되었음을 알려준다. 한편, 하양층군 층들이 다시 반복 출현하는 구조구역 D에는 지층들이 동북동-동과 남쪽으로 경사지며 이곳에서도 상위층으로 갈수록 경사각이 작아지는 경향을 보여주고 있어, 평균적으로 남동향의 퇴적 동시성 지괴 경동이 발생하였음을 알 수 있다(그림 2e). 이로 인해 구조구역 C와 D의 경계부에 지루(horst)와 같은 북동 방향의 상대적 고지가 형성되고 이를 피복하는 지층에 퇴적 동시성 배사구조가 만들어진 것으로 판단된다. 구조구역 C와 D의 경계부 남쪽의 임봉산 지역(그림 1b)에 실제 쥐라기와 선캄브리아 기반암이 지표에 노출되고 있어 이러한 해석을 뒷받침한다.

구조구역 B에서 신동층군은 체계적으로 동북동 방향으로 경사진 반면, 하양층군에서 동남동으로 경사 방향이 바뀌고 더 동편에는 북동 방향의 습곡을 경계로 하여 구조구역 C와 D에서 하양층군 지층의 경사가 각각 평균 북북서와 남동으로 바뀌는 양상은 시·공간적으로 변화된 의성소분지 확장 방향에 대한 정보도 제공한다(그림 7). 먼저, 신동층군이 퇴적될 당시에는 분지 서부 지역에서 동북동-서남서 방향의 지각 확장으로 침강이 발생한 것으로 판단된다. 이러한 해석은 낙동층 내에서 북서 방향의 정단층이 다수 관



Folds grow with increasing displacement on the underlying faults

Fig. 11. A simplified model of fault-related growth folds in an extensional setting (modified from Coleman *et al.*, 2019). Normal faulting and deposition occur simultaneously, resulting in the development of growth folds (anticlines and synclines) over the horst-graben structures. The dip of the tilted strata above the fault progressively decreases upward.

찰되고(Cheon *et al.*, 2020) 의성소분지 북서부 충전물의 퇴적이 북서-남동 방향의 구조적 침강과 관련되었다(Rhee *et al.*, 1998; Chough and Sohn, 2010)는 기존 연구 결과와 잘 부합한다. 또한 신동층군의 체계적인 동북동 방향 경사는 북북서 방향의 비대칭 지구(asymmetric graben) 혹은 한쪽 경계가 부정합인 반지구(half graben)의 존재를 시사한다(Cloos, 1968; Wernicke and Burchfiel, 1982; Corver *et al.*, 2011). 신동층군이 퇴적될 당시 낙동곡분의 서쪽 경계가 단층이며(Choi, 1986; Cheon *et al.*, 2020) 고수류가 일관되게 동쪽을 지시한다는 기존 연구결과(Chang, 1988; Koh *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2000; Chough and Sohn, 2010)를 함께 고려하면, 낙동곡분은 반지구가 아니라 서쪽 경계 단층에 비해 동쪽 경계단층의 수직 변위가 더 큰 비대칭 지구였을 가능성이 높다. 한편, 구조구역 B 동부와 구조구역 C와 D에 분포하는 하양층군 지층들의 동남동, 북서, 남동 방향 경사는 적어도 이들이 퇴적되는 동안에는 의성소분지 기저가 서북서-동남동 내지 북서-남동 방향으로 확장하였을 가능성을 시사한다(그림 2와 7). 이러한 해석은 구조구역 B의 후평동층 내에서 관찰된 서북서-동남동 방향의 인장응력을 지시하는 북북동 주향의 퇴적동시성 정단층군에 의해 지지된다(그림 9).

이상의 경사 분석을 통해 해석된 분지 기저부의 퇴적 동시성 구조와 확장 방향, 지층의 분포와 퇴적학적 특징, 자력 이상도(그림 7a) 등을 종합하여 의성소분지 북부의 지하 구조모식도를 복원하면 그림 12와 같다. 일반적으로 자력 값은 퇴적암에서 낮고 화성암에서 높은 경향을 보이기 때문에, 자력이상도를 통해 분지 기반암의 심도와 기저의 형태를 추정할 수 있다(Park, 2006). 구조구역 B의 자력이상 값은 동쪽으로 갈수록 점차 낮아져 구조구역 B와 C의 경계부에서 가장 낮은 자력이상 값을 보인다(그림 7). 또한 구조구역 B와 C의 경계부에 최상부층인 점곡층이 분포하며 북동 방향의 향사가 만들어져 있다. 따라서 구조구역 B 기반암 심도는 동쪽으로 갈수록 점점 깊어져 구조구역 B와 C의

경계부에서 가장 깊은 것으로 모식도를 작성하였다. 이와 함께 신동층군의 퇴적 시기에 동북동-서남서 방향 그리고 하양층군의 퇴적 시기에 서북서-동남동 혹은 북서-남동 방향의 지각 확장이 발생한 것으로 해석하여 구조구역 B의 서부는 북북서 방향의 정단층군이 그리고 동부는 북북동 내지 북동 방향의 정단층군이 분지 기저에 발달하는 것으로 도시하였다. 구조구역 C에서 자력이상 값이 양의 이상으로 급격히 증가하며 구조구역 C와 D의 경계부에서 다시 약간 감소하다 구조구역 D에서 증가하는 양상이다. 또한 구조구역 C와 D의 경계부에서 북동 방향 배사구조와 함께 하양층군 최하부층인 일직층이 지표에 노출되며 그 동편과 서편에는 다시 후평동층, 점곡층으로 점차 얕은 층이 반복 출현하고 있어 이곳 지하에 지루와 같은 분지 내 고지(basin high)가 존재하는 것으로 모식도를 작성하였다(그림 12).

이상의 논의들을 종합하여 백악기 의성소분지 북부에서의 구조발달과 진화과정을 요약하면, 분지 형성 초기에 분지 서부 지역에서 발생한 동북동-서남서 방향의 지각 확장에 의한 북북서 방향의 비대칭 지구의 형성과 신동층군의 퇴적(D₁), 이후 지각 변형과 침강의 중심이 동쪽으로 이동하고 확장 방향이 서북서-동남동 내지 북서-남동 방향으로 바뀌며 북북동 내지 북동 방향의 지구-지루 시스템의 형성과 하양층군의 퇴적(D₂), 그리고 분지 충전물의 충전 이후 압축응력장으로의 지구조 반전에 의한 분지 북쪽 경계부 일원에서의 안동단층계의 광역적인 역단층 또는 횡압축 운동에 의한 끌림습곡 형성(D₃)의 순으로 분지의 확장과 파괴가 순차적으로 발생한 것으로 결론지어진다.

5. 결론

이번 연구는 의성소분지 북부 분지 충전물의 경사 분석을 통하여 분지의 시·공간적인 구조발달과 진화과정을 복원하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 의성소분지 북부는 지층의 경사방향과 크기에 근거하

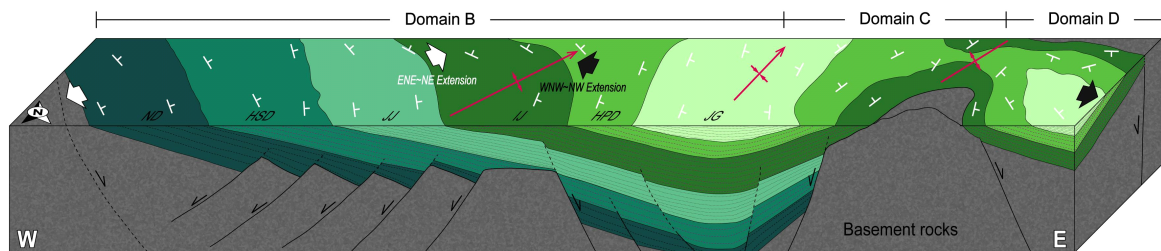


Fig. 12. Schematic block diagram showing the geometry and structure of the basin floor and fills in the northern part of the Uiseong Subbasin. Note the Sindong Group deposited in an asymmetrical graben, while the Hayang Group over a repeated graben and horst structure in the eastern part of the study area. The white and black arrows represent the extension directions during the deposition of the Sindong and Hayang groups, respectively. See the text for a detailed explanation. ND=Nakdong Formation, HSD=Hasandong Formation, JJ=Jinju Formation, IJ=Iljik Formation, HPD=Hupyeongdong Formation, JG=Jeomgok Formation.

여 총 5개의 구조구역으로 구분된다. 구조구역 A는 최대 약 3 km의 폭을 가지는 불연속적인 3개의 소구역으로 나누어져 분지 북부 경계를 따라 띠 모양으로 분포한다. 구역 A의 지층은 북쪽과 남쪽으로 경사지며 평균 경사각은 51°이다. 구조구역 B, C, D는 지층의 경사가 거의 반대 방향으로 변화되는 곳들을 연결하여 구역을 구분하였다. 구조구역 B의 전체 지층은 평균 12°의 경사각을 가지며 신동층군은 체계적으로 동북동 방향으로 경사진 반면, 하양층군은 동쪽으로 갈수록 북북동에서 동남동으로 경사방향이 회전된다. 구조구역 C의 지층은 평균 13° 경사각을 가지며 체계적으로 북북서 방향으로 경사진다. 구조구역 D의 지층은 19°의 평균 경사각을 가지며, 북서 방향의 축을 가지는 향사 또는 골의 기하를 나타낸다. 구조구역 E는 안동단층계 북쪽의 기반암 내 백악기 퇴적층이 고립되어 분포하는 곳으로, 평균 10°의 각으로 북쪽으로 경사진 층리가 우세하다.

2) 의성소분지 북부의 암층서는 상위층으로 갈수록 수치 연대가 젊어져 시간 개념을 일부분 포함한다. 구조구역 B, C, D 모두 상위층으로 갈수록 지층의 평균 경사각이 작아지는 경향을 보이고 있어 의성소분지 북부가 퇴적동시성 지괴 경동운동을 경험하였음을 지시한다.

3) 구조구역 A의 분포와 구역 내 습곡들의 기하는 안동단층계가 상반이 남쪽으로 이동하는 충상단층 운동을 하였음을 지시한다. 이와 함께 분지 북쪽 외곽의 기반암 분포지에서 북서 축의 습곡을 만드는 고경사의 백악기 퇴적암 노두가 새로이 발견된 점, 구조구역 E가 기반암 내에 고립되어 산출되는 점 등을 통해 안동단층계는 충전물의 퇴적 이후 분지 내부를 파괴한 단층으로 해석된다.

4) 구조구역 B 내부와 구역 B와 C 그리고 C와 D의 경계를 따라 북동 방향의 습곡이 발달한다. 이 습곡들은 수십 km의 파장과 5 km 이상의 긴 연장성을 보이고 자력이상대와 기하학적으로 부합하며 지괴 내 지층의 반복 출현과 밀접한 관련성을 가지므로, 북동 방향의 습곡들은 분지의 확장 동안 만들어진 퇴적 동시성 구조로 해석된다.

5) 의성소분지 북부는 동북동-서남서 방향의 지각 확장에 의한 북북서 방향의 비대칭 지구의 형성과 신동층군의 퇴적(D₁), 지각 변형과 침강의 중심이 동쪽으로 이동하고 확장 방향이 서북서-동남동 내지 북서-남동 방향으로 바뀌며 북북동 내지 북동 방향의 지구-지루 구조의 형성과 하양층군의 퇴적(D₂), 그리고 분지 북쪽 경계부 일원에서의 안동단층계의 광역적인 충상단층 운동에 의한 끌림습곡 형성(D₃)의 순으로 분지의 확장과 파괴를 경험하였다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여

연구되었다. 심사과정에서 세심하고 건설적인 조언과 비평을 해주신 익명의 심사위원님들께 감사드린다.

REFERENCES

- Busby, C.J. and Ingersoll, R.V., 1995, Tectonics of sedimentary basins. Blackwell Science, 579 p.
- Chae, Y.-U., Choi, T., Paik, I.S., Kim, J.-S., Kim, H.J., Jeong, H.Y. and Lim, H.S., 2021, Detrital zircon U-Pb ages of the Cretaceous Iljik, Jeomjok, and Sagok formations in the Cheongsong Global Geopark, Korea: Depositional age and provenance. *Journal of Korean Earth Science Society*, 42, 11-38 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1-23.
- Chang, K.H., 1977, Late Mesozoic stratigraphy, sedimentation and tectonics of southeastern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 13, 76-90 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1988, Cretaceous Stratigraphy and Paleocurrent Analysis of Kyongsang Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 194-205.
- Chang, K.H., Koh, I.S., Park, H.I., Chi, J.M. and Kim, H.M., 1978, Explanatory text of the geological map of Cheonji sheet, 1:50,000. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 47 p.
- Chang, K.H. and Park, S.O., 1997, Aspects of tectonics and volcanism recorded in Cretaceous medial Kyongsang Basin, SE Korea. *Economic and Environmental Geology*, 30, 143-151 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.-H., Suzuki, K., Parka, S.-O., Ishida, K. and Uno, K., 2003, Recent advances in the Cretaceous stratigraphy of Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 937-948.
- Cheon, Y., Cho, H., Song, C.W. and Son, M., 2019, Development of the intracontinental, continuous, narrow transpressional zone along the Sinnyeong Fault in the Cretaceous Gyeongsang Basin, SE Korea. *Geosciences Journal*, 23, 21-36.
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S. and Son, M., 2020, Tectonic evolution of the Cretaceous Gyeongsang Back-arc Basin, SE Korea: Transition from sinistral transtension to strike-slip kinematics. *Gondwana Research*, 83, 16-35.
- Cheon, Y., Ha, S. and Son, M., 2017, Geometry and kinematics of fault systems in the Uiseong block of the Gyeongsang Basin, and their roles on the basin evolution. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 241-264 (in Korean with English abstract).
- Cheon, Y., Son, M., Song, C.W., Kim, J.-S. and Sohn, Y.K., 2012, Geometry and kinematics of the Ocheon Fault System along the boundary between the Miocene Pohang and Janggi basins, SE Korea, and its tectonic implications. *Geosciences Journal*, 16, 253-273.
- Cho, H., Son, M., Cheon, Y., Sohn, Y.K., Kim, J.-S. and Kang, H.-C., 2016, Evolution of the Late Cretaceous Dadepo Basin, SE Korea, in response to oblique subduction of the proto-Pacific (Izanagi/Kula) or Pacific plate. *Gondwana Research*, 39, 145-164.
- Choi, H.-I., 1985, Sedimentology and its implications for strati-

- graphic classifications of the Cretaceous Gyeongsang Basin. *Journal the Geological Society of Korea*, 21, 26-37.
- Choi, H.I., 1986, Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. *Journal of the Geological Society of London*, 143, 29-40.
- Choi, P.Y., 2013, Depth dependency of stress ratios during the sedimentation of NW Gyeongsang Basin (Cretaceous), southeast Korea: Estimate of stress parameters and timing of tectonic episodes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74, 71-85.
- Choi, P.-Y., Lee, S.R., Choi, H.-I., Hwang, J.-H., Kwon, S.-K., Ko, I.-S. and An, G.-O., 2002, Movement history of the Andong Fault System: Geometric and tectonic approaches. *Geosciences Journal*, 6, 91-102.
- Choi, T. and Gwon, M.G., 2019, Depositional age and provenance of the sandstones in the Cretaceous Euseong subbasin inferred by detrital zircon U-Pb age dating. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 551-581 (in Korean with English abstract).
- Coleman, A.J., Duffy, O.B. and Jackson, C.A.-L., 2019, Growth folds above propagating normal faults. *Earth-Science Reviews*, 196, 102885.
- Corfield, S. and Sharp, I., 2000, Structural style and stratigraphic architecture of fault propagation folding in extensional settings: a seismic example from the Smørbukk area, Halten Terrace, Mid-Norway. *Basin Research*, 12, 329-341.
- Corfield, S., Sharp, I., Hager, K.-O., Dreyer, T. and Underhill, J., 2001, An integrated study of the Garn and Melke formations (Middle to Upper Jurassic) of the Smørbukk area, Halten Terrace, mid-Norway. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 10, 199-210.
- 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.
- Cloos, E., 1968, Experimental analysis of Gulf Coast fracture patterns. *AAPG Bulletin*, 52, 420-444.
- Coleman, A.J., Duffy, O.B. and Jackson, C.A.-L., 2019, Growth folds above propagating normal faults. *Earth-Science Reviews*, 196, 102885.
- Copper, G.T., 1995, Seismic structure and extensional development of the eastern Otway Basin-Torquay Embayment. *The APEA Journal*, 35, 436-450.
- Corver, M.P., Doust, H., van Wees, J.-D. and Cloetingh, S., 2011, Source-rock maturation characteristics of symmetric and asymmetric grabens inferred from integrated analogue and numerical modeling: The southern Viking Graben (North Sea). *Marine and Petroleum Geology*, 28, 921-935.
- Delvaux, D. and Sperner, B., 2003, New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: *New Insights into Structural Interpretation and Modelling* (Nieuwland, D.A. Ed.). Geological Society, London, Special Publications, 212, 75-100.
- Egawa, K., Cheon, D. and Otoh, S., 2006, Structural and provenance analyses of a newly defined major fault: The Homeong Fault as a northern boundary fault of the Cretaceous Nagdong Trough, South Korea. *Geosciences Journal*, 10, 249-262.
- Faill, R.T., 1973, Tectonic development of the Triassic Newark-Gettysburg basin in Pennsylvania. *Geological Society of American Bulletin*, 84, 725-740.
- Faulds, J.E. and Varga, R.J., 1998, The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes. *Geological Society of America, Special Paper* 323, 1-45.
- Ford, M., Le Carlier de Veslud, C. and Bourgeois, O., 2007, Kinematic and geometric analysis of fault-related folds in a rift setting: the Dannemarie basin, Upper Rhine Graben, France. *Journal of Structural Geology*, 29, 1811-1830.
- Gawthorpe, R.L., Sharp, I., Underhill, J.R. and Gupta, S., 1997, Linked sequence stratigraphic and structural evolution of propagating normal faults. *Geology*, 25, 795-798.
- Grimaldi, G.O. and Dorobek, S.L., 2011, Fault framework and kinematic evolution of inversion structures: Natural examples from the Neuquén Basin, Argentina. *AAPG Bulletin*, 95, 27-60.
- Horsfield, W., 1977, An experimental approach to basement-controlled faulting. *Geologie en Mijnbouw*, 56, 363-370.
- Hwang, J.H., 1994, Reconstitution of paleostress in the southeastern Korean Peninsula since the Early Cretaceous. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 27-34 (in Korean with English abstract).
- Jackson, J. and Leeder, M., 1994, Drainage systems and the development of normal faults: an example from Pleasant Valley, Nevada. *Journal of Structural Geology*, 16, 1041-1059.
- Jeong, G.Y., Cheong, C.-S., Yi, K., Kim, J., Kim, N., Kwon, S.-K., Geng, J.-Z. and Li, H.-K., 2014, Mineral ages and zircon Hf isotopic composition of the Andong ultramafic complex: implications for the evolution of Mesozoic subduction system and subcontinental lithospheric mantle beneath SE Korea. *Geological Magazine*, 151, 765-776.
- Jo, H.R., 2003a, Depositional environments, architecture, and controls of Early Cretaceous non-marine successions in the northwestern part of Kyongsang Basin, Korea. *Sedimentary Geology*, 161, 269-294.
- Jo, H.R., 2003b, Non-marine successions in the northwestern part of Kyongsang Basin (Early Cretaceous): Fluvial styles and stratigraphic architecture. *Geosciences Journal*, 7, 89-106.
- Jo, H.R. and Chough, S.K., 2001, Architectural analysis of fluvial sequences in the northwestern part of Kyongsang Basin (Early Cretaceous), SE Korea. *Sedimentary Geology*, 144, 307-334.
- Kang, H.-C. and Paik, I.S., 2013, Review on the geological ages of the formations in the Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 17-29 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H. and Lee, D.-S., 2008, Geological structure around Andong Fault System, Pungcheon-myeon, Andong, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 17, 83-94 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.G., Lee, Y.D. and Yang, S.Y., 1977a, Explanatory text of the geological map of Eui Seong sheet, 1:50,000. *Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 41 p.
- Kim, B.K., Lee, H.Y., Kim, S.J. and Cheong, J.G., 1988, Geological report of the Andong sheet, 1:50,000. *Korea Institute of Energy and Resources*, 43 p.

- Kim, N.J. and Lee, H.K., 1970, Explanatory text of the geological map of Jungpyeong Dong sheet, 1:50,000. Geological Survey of Korea, 41 p.
- Kim, O.J., 1975, Granites and tectonics of South Korea. *Economic and Environmental Geology*, 8, 223-230.
- Kim, Y.G., Cha, M.S. and Ko, I.S., 1977b, Explanatory text of the geological map of Nag Dong sheet, 1:50,000. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 47 p.
- Koh, I.S., Lee, Y.T. and Shin, Y.S., 1996, Paleocurrent analysis of the Cretaceous Hayang Group in the northeastern part of Euisong Subbasin, Southeast Korea. *The Korean Journal of Petroleum Geology*, 4, 12-19 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. *Island Arc*, 8, 218-231.
- Lee, M.S. and Kim, S.W., 1968, Explanatory text of the geological map of Hamchang sheet, 1:50,000. Geological Survey of Korea, 58 p.
- Lee, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2018a, Nature and evolution of the Cretaceous basins in the eastern margin of Eurasia: A case study of the Gyeongsang Basin, SE Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166, 19-31.
- Lee, T.-H., Park, K.-H. and Yi, K., 2018b, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons from the Early Cretaceous Nakdong Formation, South East Korea: Timing of initiation of the Gyeongsang Basin and its provenance. *Island Arc*, 27, 12258.
- Lee, Y.I., Choi, T., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2010, Detrital zircon geochronology of the Cretaceous Sindong Group, Southeast Korea: Implications for depositional age and Early Cretaceous igneous activity. *Island Arc*, 19, 647-658.
- Lee, Y.I., Lee, J.I. and Choi, Y.S., 2023, Provenance analysis of the Cretaceous Gyeongsang Basin, SE Korea: A synthesis and tectonic implications for active continental margin in East Asia. *Earth-Science Reviews*, 238, 104334.
- Lee, Y.J., Lee, Y.T., Kim, S.W., Shin, Y.S., Kim, J.W., Hayashi, M. and Koh, I.S., 2000, Zircon morphology of the Pre-Cretaceous basement rocks and Cretaceous Hayang Group sandstones in the northeastern part of Gyeongsang Basin and its implication to provenance of the sandstones. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 9, 40-50 (in Korean with English abstract).
- Lewis, M.M., Jackson, C.A.-L. and Gawthorpe, R.L., 2017, Tectono-sedimentary development of early syn-rift deposits: the Abura Graben, Suez Rift, Egypt. *Basin Research*, 29, 327-351.
- Lewis, M.M., Jackson, C.A.-L., Gawthorpe, R.L. and Whipp, P.S., 2015, Early synrift reservoir development on the flanks of extensional forced folds: A seismic-scale outcrop analog from the Hadahid fault system, Suez rift, Egypt. *AAPG Bulletin*, 99, 985-1012.
- Lucchitta, I. and Suneson, N.H., 1993, Dips and extension. *Geological Society of America Bulletin*, 105, 1346-1356.
- Maurin, J.C. and Niviere, B., 1999, Extensional forced folding and decollement of the pre-rift series along the Rhine graben and their influence on the geometry of the syn-rift sequences. *Geological Society of London, Special Publication*, 169, 73-86.
- Miller, J.F. and Mitra, S., 2011, Deformation and secondary faulting associated with basement-involved compressional and extensional structures. *AAPG Bulletin*, 95, 675-689.
- Moustafa, A.R., 1996, Internal structure and deformation of an accommodation zone in the northern part of the Suez rift. *Journal of Structural Geology*, 18, 93-107.
- Moustafa, A.R., 2002, Controls on the geometry of transfer zones in the Suez rift and northwest Red Sea: Implications for the structural geometry of rift systems. *AAPG Bulletin*, 86, 979-1002.
- Muravchik, M., Gawthorpe, R.L., Sharp, I.R., Rarity, F. and Hodgetts, D., 2018, Sedimentary environment evolution in a marine hangingwall dip slope setting. *EI Qaa Fault Block, Suez Rift, Egypt. Basin Research*, 30, 452-478.
- Ortner, H., 2007, Styles of soft-sediment deformation on top of a growing fold system in the Gosau Group at Muttekopf, Northern Calcareous Alps, Austria: Slumping versus tectonic deformation. *Sedimentary Geology*, 196, 99-118.
- Park, Y.-S., 2006, A review of magnetic exploration in Korea. *Economic and Environmental Geology*, 39, 403-416 (in Korean with English abstract).
- Park, Y.-S., Rim, H., Lim, M. and Shin, Y.H., 2019, The magnetic anomaly map of Korea. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 22, 29-36.
- Rhee, C.W., Jo, H.R. and Chough, S.K., 1998, An allostratigraphic approach to a non-marine basin: the north-western part of Cretaceous Kyongsang Basin, SE Korea. *Sedimentology*, 45, 449-472 (in Korean with English abstract).
- Ryu, I.-C., Choi, S.-G. and Wee, S.-M., 2006, An enquiry into the formation and deformation of the Cretaceous Gyeongsang (Kyongsang) Basin, southeastern Korea. *Economic and Environmental Geology*, 39, 129-149 (in Korean with English abstract).
- Schlische, R.W., 1992, Structural and stratigraphic development of the Newark extensional basin, eastern North America: evidence for the growth of the basin and its bounding structures. *Geological Society of America Bulletin*, 104, 1246-1263.
- Schlische, R.W., 1993, Anatomy and evolution of the Triassic – Jurassic continental rift system, eastern North America. *Tectonics*, 12, 1026-1042.
- Schlische, R.W. and Withjack, M.O., 2009, Origin of fault domains and fault-domain boundaries (transfer zones and accommodation zones) in extensional provinces: Result of random nucleation and self-organized fault growth. *Journal of Structural Geology*, 31, 910-925.
- Scott, D.L., Braun, J. and Etheridge, M.A., 1994, Dip analysis as a tool for estimating regional kinematics in extensional terranes. *Journal of Structural Geology*, 16, 393-401.
- Scott, D.L., Etheridge, M.A. and Rosendahl, B.R., 1992, Oblique-slip deformation in extensional terrains: A case study of the lakes Tanganyika and Malawi Rift Zones. *Tectonics*, 11, 998-1009.
- Seong, C., Cheon, Y., Son, M., Sohn, Y.K. and Kim, J.-S., 2013, Formation and evolution of the Miocene Ipcheon Subbasin in Yangbuk-myeon, Gyeonju, SE Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 22, 19-34 (in Korean with English abstract).
- Sharp, I.R., Gawthorpe, R.L., Underhill, J.R. and Gupta, S., 2000, Fault-propagation folding in extensional settings: examples of

- structural style and synrift sedimentary response from the Suez rift, Sinai, Egypt. *Bulletin of the Geological Society of America*, 112, 1877-1899.
- Son, M. and Kim, I.-S., 1994, Geological structures and evolution of the Tertiary Chongja basin, southeastern margin of the Korean Peninsula. *Economic and Environmental Geology*, 27, 65-80 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim, I.-S. and Ock, S.-S., 2001, A nested cauldron structure in the Tertiary Miocene Eoil Basin, Southeastern Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 10, 121-131 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim, I.-S. and Sohn, Y.K., 2005, Evolution of the Miocene Waup basin, SE Korea, in response to dextral shear along the southwestern margin of the East Sea (Sea of Japan). *Journal of Asian Earth Sciences*, 25, 529-544.
- Son, M., Seo, H.J. and Kim, I.-S., 2000, Geological structures and evolution of the Miocene Eoil basin, southeastern Korea. *Geosciences Journal*, 4, 73-88.
- Son, M., Song, C.W., Kim, M.-C., Cheon, Y., Cho, H. and Sohn, Y.K., 2015, Miocene tectonic evolution of the basins and fault systems, SE Korea: dextral, simple shear during the East Sea (Sea of Japan) opening. *Journal of the Geological Society*, 172, 664-680.
- Son, M., Song, C.W., Kim, M.-C., Cheon, Y., Jung, S., Cho, H., Kim, H.-G., Kim, J.S. and Sohn, Y.K., 2013, Miocene Crustal Deformation, Basin Development, and Tectonic Implication in the southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 93-118 (in Korean with English abstract).
- Song, C.W., Kim, M.-C., Lim, H. and Son, M., 2022, Geological structures and extension mode of the southwestern part (Bomun area) of the Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 35, 235-258 (in Korean with English abstract).
- Wernicke, B., 1981, Low-angle normal faults in the Basin and Range province: nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, 291, 645-648.
- Wernicke, B. and Burchfiel, B.C., 1982, Modes of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 4, 105-115.
- Whattam, S.A., Cho, M. and Smith, I.E.M., 2011, Magmatic peridotites and pyroxenites, Andong Ultramafic Complex, Korea: Geochemical evidence for supra-subduction zone formation and extensive melt-rock interaction. *Lithos*, 127, 599-618.
- Wise, D.U., 1992, Dip domain method applied to the Mesozoic Connecticut Valley Rift Basins. *Tectonics*, 11, 1357-1368.
- Withjack, M.O. and Callaway, S., 2000, Active normal faulting beneath a salt layer: an experimental study of deformation patterns in the cover sequence. *AAPG Bulletin*, 84, 627-651.
- Withjack, M.O., Olson, J. and Peterson, E., 1990, Experimental models of extensional forced folds. *AAPG Bulletin*, 74, 1038-1054.
- Won, C.G. and Kim, K.T., 1969, Explanatory text of the geological map of Sangju sheet, 1:50,000. Geological Survey of Korea, 72 p.
- Won, C.K., Kang, P.C. and Lee, S.H., 1978, Study on the tectonic interpretation and igneous pluton in the Gyeongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 14, 79-92 (in Korean with English abstract).
- Yun, S., Cha, M.S., Kim, J.J. and Lee, J.D., 1988, Geological report of the Yechon sheet, 1:50,000. Korea Institute of Energy and Resources, 33 p.