

경상분지 의성지괴에 발달하는 단층계의 기하와 운동학적 특성 그리고 분지진화 동안의 역할

천영범 · 하상민 · 손 문*

부산대학교 지질환경과학과

요 약

경상분지 의성지괴에 발달하는 단층들의 기하와 운동학적 성격을 밝히고 경상분지의 진화에 있어 그 역할을 규명하기 위해 지표에 노출된 단층대의 변형특성을 기재하고 다양한 변형요소들을 수집하여 종합 분석하였다. 의성지괴 전반에 걸쳐 발달하는 가음단층계는 다양한 규모의 서북서 방향 단층들로 구성된 좌수향 횡압축성 주향이동단층계로서, 대규모 단층들의 경우에는 수십 km의 연장과 1 km 내외의 좌수향 수평변위를 가진다. 각 단층 주변에는 좌수향 횡압축성 주향이동운동에 수반된 변형이 압도적으로 관찰되지만, Y-전단면에서는 정이동성 내지 우수향 주향이동감각의 단층조선이 인지되기도 한다. 안동시 길안면에서 확인되는 안동단층계의 구성 단층들은 서북서 내지 북서 방향으로 의성지괴의 북동쪽 경계를 이룬다. 확인된 단층들은 미약한 좌수향 감각을 포함하는 정이동운동 이후 좌수향 횡압축성 사교이동운동을 겪었으며, 일부 단층활면에는 우수향 주향이동감각이 인지되기도 한다. 가음단층계와 안동단층계의 유사한 기하와 운동감각은 두 단층계가 동일한 운동사를 겪었음을 시사한다. 낙동단층계는 의성지괴 북서편 일원에 발달하는 북북동 방향의 단층들로 구성되며, 각 단층들은 대부분 좌수향 주향이동감각을 보이지만 일부 단층활면에서는 우수향 주향이동감각이 확인된다. 서북서 내지 북북동 방향의 단층대 내에서 확인되는 퇴적층 자세는 주 단층면에 가까워질수록 단층의 자세와 거의 평행하게 배열되거나 교란되고, 특히 서북서 방향의 단층대 내에서는 북서 방향의 습곡축을 가지는 다양한 규모의 원통형의 습곡으로 발달하여 단층의 좌수향 운동을 지시한다. 이러한 변형은 사암층에 비해 이방성이 우세한 셰일층에서 집중되어, 퇴적암의 연성도의 차이에 따른 차별적인 변형 정도를 시사한다. 또한 고각으로 경동된 셰일층간의 전단은 망상의 단층비지대를 형성하며, 상대적으로 변형을 적게 받은 렌즈상의 사암체를 포획하기도 한다. 의성지괴에서 확인되는 구조요소들은 연구지역이 순차적으로 ① 북북동-남남서 인장응력, ② 북서-남동 압축응력 그리고 ③ 북동-남서 압축응력환경 하에 놓여 있었으며, 각 응력환경에서 주요 단층들이 다른 운동감각으로 운동하였음을 지시한다. 특히 서북서 내지 북서 방향의 단층들은 초기의 북북동-남남서 인장환경 하에서 정단층으로 운동하여 경상분지의 확장 및 침강에 중요한 역할을 하였으며, 이후 43~25 Ma의 북동-남서 압축환경 하에서는 대규모 좌수향 횡압축성 주향이동운동으로 재활하여 단층대 내에 뚜렷한 압축변형을 남긴 것으로 해석된다.

주요어: 가음단층계, 안동단층계, 낙동단층계, 북북동-남남서 인장응력, 북동-남서 압축응력

Youngbeom Cheon, Sangmin Ha and Moon Son, 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. v. 53, no. 2, p. 241-264

ABSTRACT: Field description of fault zones and analysis of various structural elements were carried out to determine the geometries and kinematics of major faults in the Uiseong block of the Gyeongsang Basin, and to reveal their roles on the basin evolution. The Gaeum Fault System is composed of various-scale WNW-striking sinistral transpressional strike-slip faults, and major faults of which are traced for tens of kilometers with ~1 km horizontal offset. Deformations associated with sinistral transpressional strike-slip faulting are frequently observed along each fault zone, although normal-slip and dextral strike-slip senses are occasionally observed on their Y-shear surfaces. The constituent faults of the Andong Fault System situated in Gilan-myeon, Andong-si, strike northwest and west-northwest, and acted as northeastern marginal faults of the Uiseong block. They underwent earlier normal-slip with small sinistral strike-slip component and later sinistral transpressional strike-slip, although some

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

fault surfaces show dextral strike-slip senses. The geometries and kinematics of these fault systems imply that they have a similar movement history. The Nakdong Fault System, located in the northwestern area of the Uiseong block, is mostly composed of NNE-striking sinistral strike-slip faults, although dextral senses on some fault surfaces are observed. Sedimentary strata tend to be re-oriented nearly parallel to the strike of fault, which often made NW-trending cylindrical folds close to the WNW-striking faults. The stratal tilting and folding are mainly observed in shale layers rather than massive sandstones due to their high ductility contrast. The resultant preferential shearing produced anastomosing gouge layers in the shales, which contain less deformed lenses of sandstone protolith. Paleostress fields calculated from various structural elements indicate that the Uiseong block had been situated under the sequential stress fields of ① NNE-SSW tension, ② NW-SW compression, and ③ NE-SW compression. We interpret that the WNW- or NW-striking normal faults are intimately related to the extension and subsidence of the Gyeongsang Basin under the NNE-SSW tension during the Cretaceous, and then these faults were reactivated as sinistral transpressional strike-slip faults under the NE-SW compression between 43 and 25 Ma.

Key words: Gaeum fault system, Andong fault system, Nakdong fault system, NNE-SSW tension, NE-SW compression

(Youngbeom Cheon, Sangmin Ha and Moon Son, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea)

1. 서 언

한반도 내에는 다양한 규모의 백악기 육성퇴적분지가 도처에 분포한다. 그 중 경상분지는 남-북 방향의 장축이 약 200 km, 동-서 방향의 단축이 약 120 km에 달하는 국내 최대의 백악기 퇴적분지로서 한반도 남동쪽에 위치하며, 그 외의 소규모 퇴적분지들(<50×50 km²)은 주로 북북동 방향의 추가령단층계, 공주단층계, 광주단층계를 따라 형성되어 있다(그림 1a, 1b). 소규모 백악기 퇴적분지들은 좌향 스텝(left-stepping) 또는 좌향 굴곡(left-bending)되는 경계단층의 기하와 분지충전물의 분포 및 자세에 근거하여 북북동 방향의 좌수향 주향이동단층에 의한 당겨열림분지(pull-apart basin)로 해석되는 반면(e.g., Lee, 1999; Chough *et al.*, 2000; Chough and Sohn, 2010; Kim, S.W. *et al.*, 2012; Yang, 2013), 경상분지는 사교섭입하는 고태평양판과 섭입당하는 유라시아 판의 약한 결합력(weak coupling)에 의해 배호(back arc)지역에 인장 또는 횡인장력이 발생하여 형성된 분지로서 해구의 퇴각(trench roll-back)에 의해 분지의 열개(rifting)가 동쪽으로 확장되었음이 제안되었다(Chough and Sohn, 2010). 하지만 경상분지의 명확한 확장형식(extension mode)은 아직 밝혀지지 않은 상태이다.

분지의 진화사를 이해하기 위해서는 지질학 다양한 분야들의 종합적인 해석이 이루어져야 하며, 특히 지질구조의 분포, 기하, 운동 특성과 같은 실제적인

구조지질학적 연구는 필수적이다. 따라서 이 논문은 경상분지 의성지괴의 경계와 내부에 발달하는 단층들의 기하와 운동학적 특성을 밝혀, 경상분지 형성과 발달사 이해를 위한 핵심적인 정보를 제공하는데 목적이 있다. 우선 의성지괴에 발달하는 서북서와 북북동 방향의 단층들을 추적하여, 노출된 단층대의 변형양상을 상세히 기재하고, 야외에서 확인되는 운동감각 지시자(sense indicator)와 단층암의 자기미세구조(magnetic fabric) 분석을 이용하여 단층의 운동감각을 결정하였다. 그리고 각종 변형요소들의 기하와 운동감각을 이용하여 고응력 환경을 복원하고 상대적인 선후관계를 설정하였다. 이를 바탕으로 토의에서는 의성지괴에 발달하는 단층들의 변형특성과 진화사를 살펴보도록 하겠다.

2. 지질학적 배경

경상분지의 분지충전물은 육성 퇴적물과 섭입관련 화산물질들로 구성되는데, 이들은 포함된 화산물질의 양에 따라 화산물질을 거의 포함하지 않는 신동층군, 화산물질을 일부 포함하는 하양층군, 주로 화산물질로 구성된 유천층군 그리고 이들을 관입하는 불국사화강암류로 구분된다(Chang, 1975; Choi, 1986; Chang *et al.*, 2003; 그림 1c).

신동층군과 하양층군의 퇴적물은 역암, 역질사암, 사암, 이암, 세일 탄산염암으로 구성되며, 이들은 분지 경계를 따라 형성되는 층적선상지 또는 하성-호성

환경 하에서 퇴적되었다(e.g., Choi, 1986; Jo *et al.*, 1997; Rhee *et al.*, 1998; Jo and Chough, 2001; Jo, 2003a, 2003b; Paik and Kim, 2006). 의성지괴 북서쪽 일원

의 층서/ 퇴적학적 연구들은 신동층군의 퇴적 당시 환경이 구조적 영향과 관련이 있을 것으로 해석하였으며(Rhee *et al.*, 1998; Chough *et al.*, 2000; Jo and

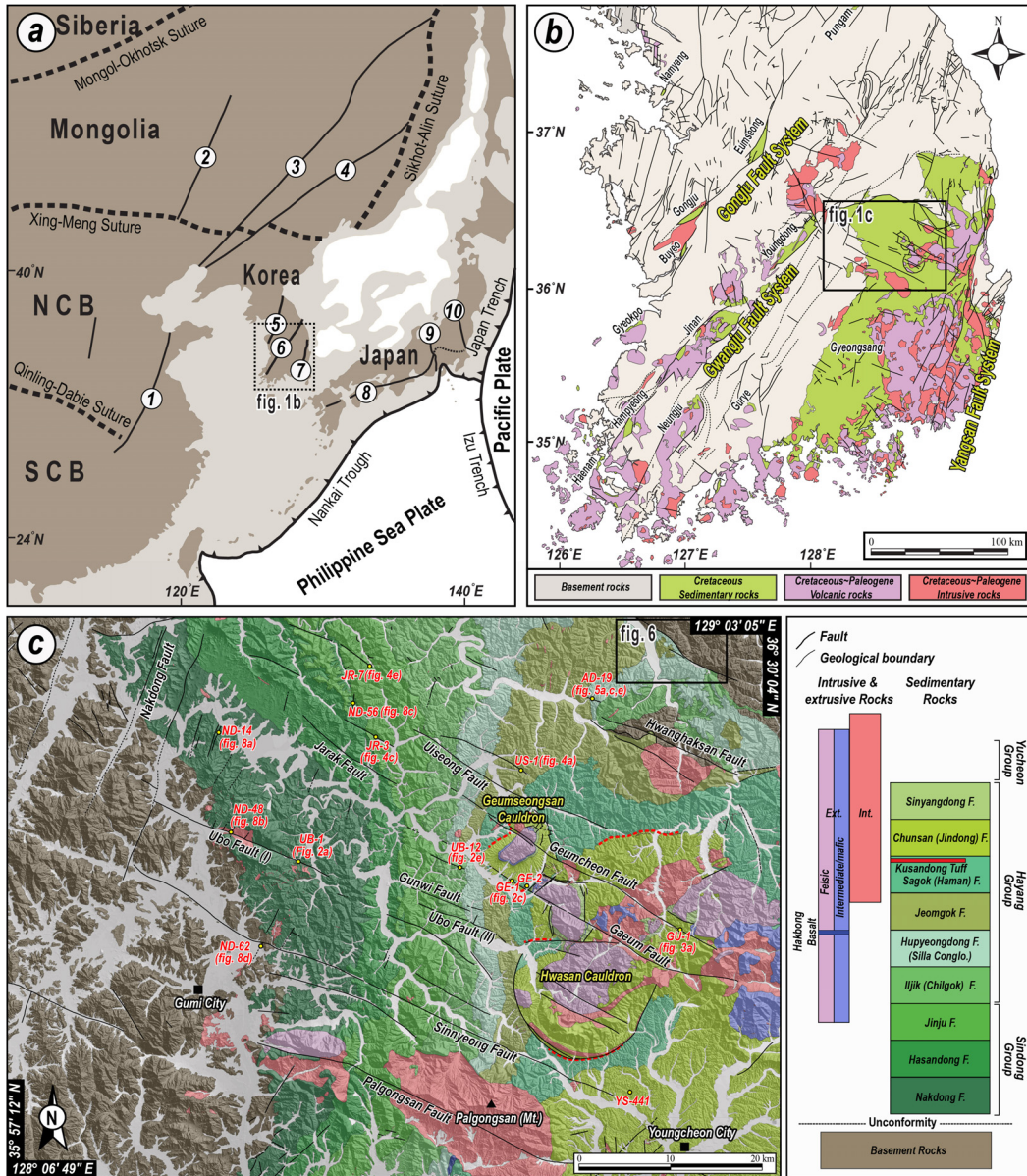


Fig. 1. (a) Tectonic outline of the eastern Eurasian margin (modified after Xu *et al.*, 1987; Ren *et al.*, 2002; Itoh *et al.*, 2006), ① Tan-Lu Fault, ② Nenjiang Fault, ③ Yilan-Yitong Fault Zone, ④ Fushan-Mishan Fault, ⑤ Chugaryeong Fault System, ⑥ Gongju Fault System, ⑦ Yangsan Fault System, ⑧ Median Tectonic Line, ⑨ Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, ⑩ Tanakura Tectonic Line. (b) Distribution of the major faults and the Cretaceous-Paleogene rocks (modified from Korea Institute of Geology, Mining, and Materials, 1995). (c) Detailed geological map of the Uiseong block (modified after Chang *et al.*, 1977, 1978, 1981; Kim *et al.*, 1977, 1981; Won *et al.*, 1980; Cheong *et al.*, 1989) showing the distribution of basin-fills and major faults (modified after Chang *et al.*, 1977, 1981; Won *et al.*, 1980; Kim *et al.*, 1981; Choi *et al.*, 2004; Hwang *et al.*, 2008a, 2008b).

Chough, 2001; Jo, 2003a, 2003b), Jeon and Sohn (2008)은 하양층군의 층 경계를 따라 협재된 분출 기원의 화산암류에 근거하여 경상분지의 층서 발달이 기후 변화와 함께 구조운동의 제어를 받은 것으로 해석하였다. 이러한 퇴적층을 관입 또는 피복하고 있는 유천층군의 산성질 내지 중성질 화산암복합체는 주로 경상분지의 남동부 일원에 집중적으로 분포하며(그림 1c), 도처에 다양한 규모의 화산 함몰 구조(caldera)를 형성하고 있다(Chough and Sohn, 2010 and references cited therein). 다수의 지화학적 연구들은 유천층군 화산암복합체를 대륙연변부 섭입 환경에서 기원된 전형적인 칼크-알칼리 화산암류로 보고하고 있다(Kim *et al.*, 1991; Hwang and Kim, 1994; Jeong and Jwa, 2000; Yun *et al.*, 2000). 백악기말-고신생기의 불국사화강암류는 동근 저반 또는 압주상의 심성암체로서 전형적인 I-type, 자철석 계열의 광물/암석학적 특징을 가지며, 전술한 경상분지 층전물을 모두 관입하고 있다(그림 1b, 1c). 암석학/지화학 연구들은 이들 화강암류가 천소 관입(Lee, 1992; Cho and Kwon, 1994) 이후, 급속한 냉각을 겪었던 것으로 보고하고 있으며(Shin and Nishimura, 1993; Lee *et al.*, 1995), 섭입환경과 밀접한 관련이 있음을 제시하였다(e.g., Jwa *et al.*, 1990; Kim, J.-S. *et al.*, 2012; Kim, S.W. *et al.*, 2012).

최근 Chough and Sohn (2010)은 이러한 화산암류(유천층군)와 심성암류(불국사화강암류)가 하나의 화산호를 이루고 있음을 제안하고, 이를 경상화산호(Gyeongsang Volcanic Arc)로 새로이 명명하였다. 그리고 경상화산호의 서편에 분포하는 신동층군과 하양층군을 경상배호분지(Gyeongsang Backarc Basin)로 새롭게 명명하고, 기존에 통용되던 '경상분지'를 경상배호분지의 개념에 국한하기로 제안하였다.

경상분지는 지구구조적으로 북에서부터 영양지괴, 의성지괴, 밀양지괴로 구분되는데(Chang, 1975), 영양지괴와 의성지괴의 경계는 안동단층계(Won *et al.*, 1978)와 청송용기부(Chang, 1975, 1977; Kang and Lee, 2008)이며, 의성지괴와 밀양지괴는 팔공산화강암 또는 팔공산단층에 의해 구분된다(Chang, 1977; Chang *et al.*, 1997; 그림 1c). 안동단층계는 신동층군의 퇴적 당시 운동한 퇴적동시성 단층(Choi *et al.*, 1982), 팔공산단층은 하양층군의 퇴적과 동시에 운동한 단층으로 해석되었으나(Chang, 1977; Chang

and Park, 1997; Chang *et al.*, 1997), Chough and Sohn (2010)은 팔공산단층의 퇴적동시성 운동에 대해 의문을 제기하기도 하였다.

의성지괴 내에 형성된 가음단층계는 서북서 방향의 좌수향 주향이동단층계로서, 북쪽에서 남쪽으로 황학산, 의성, 금천, 자락, 가음(수기령), 군위, 우보, 신령(백학동), 팔공산단층으로 구성되며, 백악기 퇴적암류와 화성암류 그리고 칼데라 구조들을 모두 좌향 절단하고 있다(Chang *et al.*, 1977, 1978, 1981; Kim, Y.G. *et al.*, 1977; Won *et al.*, 1980; Kim, B.G., 1981; Cheong *et al.*, 1989; Choi *et al.*, 2004; Hwang *et al.*, 2008a, 2008b). Choi *et al.* (2004)는 가음단층계의 좌수향 주향이동운동이 플라이오세(Pliocene)의 동-서 방향의 압축환경 하에서 발생하였으며, 일부 구성 단층들은 플라이오세의 좌수향 주향이동운동 이전에 우수향 내지 좌수향 주향이동운동을 겪었음을 보고하였다. 전반적으로 동-서 방향으로 발달하는 안동단층계는 의성지괴의 북쪽 경계단층계로서(그림 1c), 경상분지의 확장 초기에 전이단층(transfer fault)으로 운동하였으나, 이후 우수향 감각이 포함된 역단층으로 재활동한 것으로 보고되어 있다(Choi *et al.*, 2002).

3. 의성지괴에 발달하는 주요 단층의 기하와 운동학적 특성

대규모 단층은 지표에서 현생퇴적물에 의한 피복 또는 도심화에 의해 극히 일부 지점에서만 단층대가 확인 가능하며, 노두가 노출되었다 하더라도 풍화/변질을 상당히 겪은 경우에는 단층대의 내부 구조를 관찰하기 쉽지 않다. 이번 연구에서는 의성지괴 내에 발달하는 단층들의 기하와 운동감각을 포함하는 변형양상을 이해하기 위해 기존 1:5만 지질도폭에서 보고된 단층들뿐만 아니라 항공사진, 지형도, 음영기복도에서 뚜렷하게 인지되는 선형구조를 추적하여, 지표에 노출된 주요 단층대를 상세하게 기재하였다. 단층암을 포함하는 단층핵을 확인할 수 없더라도 주요 선형구조 인근에서 확인되는 퇴적층의 습곡 및 경동 또는 부차 단층(subsidiary fault)들의 분포, 기하, 운동감각 등에 근거하여 단층의 존재를 인지하고 연장을 설정하였다.

이 논문에서는 개념의 혼동을 피하기 위해 “단층”

이라는 용어를 육안 상으로 수 cm 이상의 변위가 인지되거나 또는 단층압(단층비지 또는 단층각력)이 발달하는 경우에 사용하였으며, “전단단열”이라는 용어는 단열면에서 전단을 지시하는 증거가 확인되지만 변위가 거의 인지되지 않을 경우에 국한하여 사용하였다(Davis and Reynolds, 1996; Twiss and Moore, 2007).

야외조사를 통해 확인된 단층들은 (1) 분지 내부의 서북서 방향 단층들인 가음단층계, (2) 분지 북쪽 경계단층인 안동단층계 그리고 (3) 분지 북서쪽에 집중적으로 발달하는 북북동 방향의 낙동단층계로 구분하여 다음과 같이 기술하고자 한다.

3.1 가음단층계의 야외기재학적 특성

Cheon *et al.* (2013, 2014)의 연구를 통해 보고된 신령단층을 제외한 가음단층계의 구성 단층들(우보단층, 군위단층, 가음단층, 금천단층, 의성단층 등; 그림 1c)에 대하여 추적 및 기재를 실시하였다. 기존에 보고된 각 단층들의 제반 특징과 이번 연구에서 새롭게 발견된 주요 노두에 대한 야외 기재학적 특성은 다음과 같다.

3.1.1 우보단층

선산도폭(Cheong *et al.*, 1989)에서 보고된 우보단층과 군위도폭(Chang *et al.*, 1981)에서 보고된 우보단층은 항공사진과 음영기복도 상에서 서북서 방향의 동일 선상에 위치하지만 선형구조가 10 km 이상의 간격을 보이며 연결되지 않고 야외조사에서도 단층에 의한 지표의 변형이 전혀 인지되지 않아, 이번 연구에서는 연결되지 않는 별개의 단층들로 판단하여 우보단층(I)과 우보단층(II)로 구분하여 기재하였다(그림 1c).

우보단층(I)은 경북 군위군 소보면과 구미시 도개면을 지나 서북서 방향으로 약 20 km 연장되며, 백악기 흑운모화강암과 신동층군 낙동층을 절단하고 있다(그림 1c). UB-1 지점($36^{\circ} 15' 20.79''N$, $128^{\circ} 27' 37.95''E$; 그림 1c)에서 확인되는 단층은 $N50^{\circ}W/84^{\circ}NE$ 의 자세로 낙동층의 조립질 사암(남쪽지괴)과 셰일(북쪽지괴)의 경계를 이루고 있다(그림 2a). 고각의 단층활면에서 확인되는 찰흔자국(chatter mark)과 10° 이내의 선주각(rake)을 보이는 단층조선은 미세한 역이동성 감각이 포함된 좌수향 주향이동운동을 지시하며(그림 2b), 3 cm 이내 폭의 단층비지대 내에

확인되는 S-C 조직의 S면은 전단면(C면)에서 시계 방향으로 $10\sim 15^{\circ}$ 회전된 방향으로 배열을 보여 단층의 좌수향 운동을 지시한다. 북쪽지괴에 분포하는 셰일층은 단층핵에 가까워질수록 주향이 단층의 주향과 거의 평행하게 배열되고 경사각이 고각이 되는 경향이 인지되며(그림 2a), 고각이 된 지층의 층간에도 전단이 발생하여 전단열리와 함께 수 cm 두께의 단층비지대가 망상으로 형성되어 있다. 반면, 단층면 남쪽에 위치하는 조립질 사암층 내에는 전단단열이 밀집되고 풍화·변질의 정도가 단층의 영향에서 벗어난 노두들에 비해 심하지만, 노두 단위에서의 지층 자세변화는 인지되지 않는다(그림 2a).

우보단층(II)는 경북 군위군 의흥면과 우보면을 지나 서북서 방향으로 약 10 km 이상 연장되며(그림 1c), 상부 신동층군과 하부 하양층군의 사암, 미사암, 셰일을 절단하고 있다. 군위도폭(Chang *et al.*, 1981)에서는 절단된 지층경계에 근거하여 이 단층이 0.7 km 이상의 좌수향 수평변위를 가짐을 보고하였다. 항공사진과 음영기복도에서 뚜렷하게 인지되는 서북서 방향의 선형구조를 추적한 결과, 단층핵은 현생 퇴적물에 피복되어 확인되지 않지만 단층 인접부에서 지층의 주향이 단층의 주향과 아평행하게 배열되고 경사각이 증가하는데, 이러한 변형양상은 엽층이 발달하는 세립질 지층일수록 비교적 뚜렷하게 인지된다.

한편, 우보단층(II)의 약 3 km 남서쪽에는 기존에 보고되지 않은 약 8 km 이상의 서북서 방향 선형구조가 항공사진과 음영기복도 상에서 인지된다(그림 1c). 상세 야외지질조사 결과 선형구조를 따라 기존 퇴적층의 자세가 교란되고 서북서~동북동 방향의 소규모 단층 내지 전단단열이 집중되는 단층손상대가 확실히 관찰되지만 주 단층면을 포함하는 단층핵은 현생퇴적물의 피복에 의해 확인되지 않는다.

3.1.2 군위단층

군위단층은 경북 군위군 우보면과 군위읍 일원의 신동층군 진주층과 하양층군 일직층을 가로질러 약 7 km 연장된다(그림 1c). 선산도폭(Cheong *et al.*, 1989)에서는 단층의 운동에 따른 변위가 미미함을 보고하였으며, 이번 연구에서도 항공사진과 음영기복도에서 인지되는 선형구조를 추적한 결과, 내부변형을 인지할만한 단층핵은 확인하지 못하였다. 하지만 선형구

조를 따라 자세가 급격히 교란된 지층이 연속적으로 관찰되며, 서북서 방향의 소규모 부차 단층 내지 전단단열이 다수 확인된다. 우보단층(II) 주변부와 함께 근위단층 인근에는 서북서와 북북동 방향의 전단단열들이 가장 우세하게 발달하며, 동북동 내지 동-서 방향의 전단단열들도 비교적 빈번하게 인지된다. 단열면에서 확인되는 단층조선, 홈(groove), 찰흔자국

들은 서북서~동북동 방향의 단열이 좌수향 주향이동, 북북동 방향의 단열이 우수향 주향이동으로 운동하였음을 지시한다.

3.1.3 가음단층

가음단층은 경북 의성군 봉양면, 금성면, 가음면과 영천시 화북면 일대의 하양층군 퇴적암, 유천층군

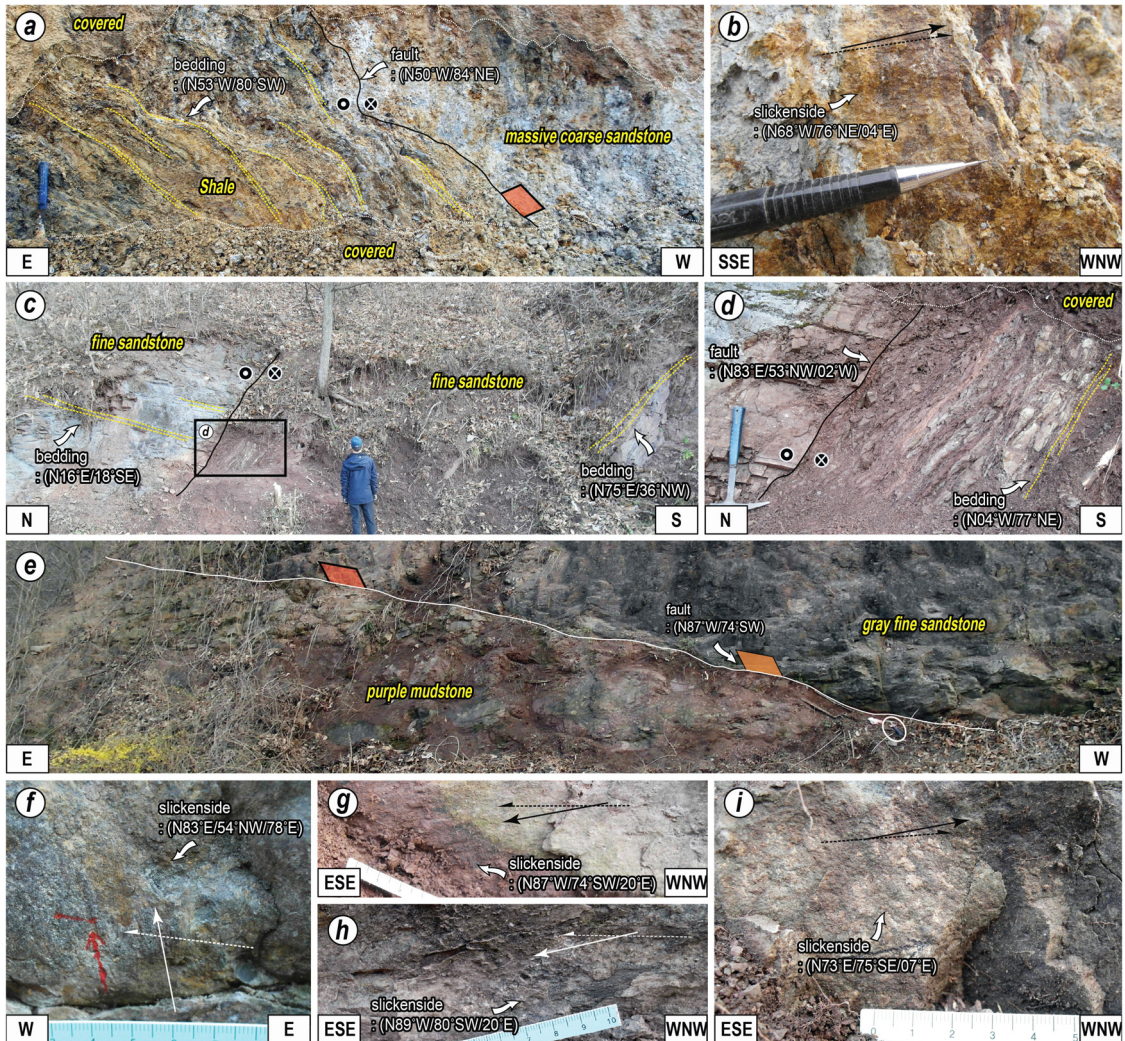


Fig. 2. Outcrop photographs showing the major features of the Ubo and Gaeum faults. (a) A photograph of an exposure of the Ubo Fault (I) at the *UB-1*. Shale layers are re-oriented similar with fault attitudes within northern block of the fault. (b) Sinistral strike-slip sense with small reverse component on main fault surface. (c) An exposure of the Gaeum Fault (*GE-1*) cutting fine sandstone of the Hayang Group, and (d) close-up view of the fault core showing vertically tilted strata and their interlayer shearing. (e) An outcrop of *UB-12* showing that WNW-striking fault offsets purple mudstone and dark gray fine sandstone. Various slip senses are observed on the fault surface, such as (f) normal slip, (g, h) dextral strike-slip, and (i) sinistral strike-slip. All orientation data are described in quadrant notation and third component indicates the rake of slickenside on fault surfaces.

화산암류 및 불국사화강암류를 가로질러, 약 40 km 이상 연장된다(그림 1c). 절단된 화산암과 퇴적암의 부정합 경계는 이 단층이 좌향으로 최대 2.3 km의 수평변위를 가짐을 지시한다(Chang *et al.*, 1977). 화산칼데라 남쪽의 GE-1 지점($36^{\circ} 14' 39.29''N$, $128^{\circ} 42' 24.32''E$; 그림 1c)에서 확인되는 단층은 하양층군 사암 내지 미사암을 절단하고 있다(그림 2c, 2d). 노출된 단층면의 자세는 지형도와 음영기복도 상에서 뚜렷하게 인지되는 서북서 방향과는 다소 차이를 보이는 $N83^{\circ}E/53^{\circ}NW$ 이며, 단층활면에서 인지되는 조선은 좌수향 주향이동감각을 지시한다. 단층면을 기준으로 북쪽과 남쪽의 암상이 모두 미사암이지만 단층의 남쪽지괴 지층들에서만 단층면에 가까워질수록 주향이 단층의 주향과 거의 평행하게 배열되고 경사각이 고각이 되는 경향이 인지되며(그림 2c), 단층면 인접부에서 고각으로 경동된 지층들의 층간에는 전단이 빈번하게 발생하여 전단엽리와 함께 2 cm 이내의 좁은 단층비지가 수 매 발달한다(그림 2d). 가음저수지 서편에 노출된 남-북 방향 사면(GE-2; $36^{\circ} 13' 55.57''N$, $128^{\circ} 44' 21.38''E$; 그림 1c)은 가음단층의 북쪽지괴에 해당하는데, 수 cm 폭의 단층비지를 가진 서북서 방향의 부차 단층들이 다수 확인된다. 고각($>70^{\circ}$)의 경사를 가지는 부차 단층면에서는 20° 이내의 선주각을 보이는 단층조선이 인지되어 좌수향 횡압축성 사교이동감각을 지시하며, 저각($<40^{\circ}$)의 경사를 가진 단층면에서의 단층조선은 50° 이상의 선주각을 보여, 유사한 주향의 단층들인 경우에도 단층면의 경사가 저각일수록 역이동성 감각이 우세하다. 또한, 일부 서북서 방향의 단층활면에서는 정이동성 운동감각이 인지되기도 한다. 한편, 북북동 방향의 소규모 단층면에서는 대부분 우수향 주향이동감각을 지시하는 단층조선이 확인된다.

GE-1 지점에서 서쪽으로 약 3.4 km 떨어진 지점(UB-12; $36^{\circ} 14' 39.95''N$, $128^{\circ} 40' 08.92''E$; 그림 1c)에서도 서북서 방향의 단층 노두가 확인된다(그림 2e). 주 단층면은 $N87^{\circ}W/74^{\circ}SW$ 의 자세로 북쪽지괴의 자색 이암과 남쪽 지괴의 담회색 미사암을 경계하고 있으며, 단층면을 따라 확인되는 3 cm 이내 두께의 자색 단층비지대는 물성이 상대적으로 약한 북쪽지괴의 자색이암 기원으로 추정된다. 단층활면에서 확인되는 단층조선과 결정 섬유(crystal fiber)들은 정이동, 우수향 주향이동, 좌수향 주향이동감각들을

다양하게 보이지만(그림 2f, 2g, 2h, 2i), 이들의 선후 관계는 지시할 만한 증거는 인지하기 어렵다.

3.1.4 금천단층

금천단층은 경북 의성군 의성읍, 금성면, 춘산면과 청송군 현서면 일대의 하양층군 퇴적암류, 유천층군 화산암류, 불국사화강암류를 절단하며 약 35 km 이상 연장된다(그림 1c). 군위도폭(Chang *et al.*, 1981)과 구산동도폭(Chang *et al.*, 1977)에서 보고된 암상 경계는 이 단층이 좌향으로 약 0.5 km 내외의 변위를 가짐을 지시한다. 특히, 이 단층은 금성산칼데라와 보현산현무암(52 Ma; Kim, J.-S. *et al.*, 2012)을 좌향 절단하고 있어, 가음단층계의 좌수향 운동 시기를 한정하는데 중요한 역할을 한다. 또한, 구산동도폭에서는 산성질 내지 중성질 암맥군들이 금천단층과 평행하게 발달하며 이들 암맥이 단층작용을 받은 것에 근거하여, 단층운동과 동시에 산성질암이 관입하였으며 이후에도 단층운동이 있었음을 보고하였다.

GU-1 지점($35^{\circ} 11' 31.56''N$, $128^{\circ} 55' 24.24''E$; 그림 1c, 3)에서는 금천단층의 부차 단층에 해당하는 고각의 서북서 방향 소규모 단층들이 호온펠스화된 퇴적층을 절단하고 있다. 각 단층에서는 단층비지와 각력으로 구성된 약 10 cm 이내 폭의 단층핵이 관찰되지만, 단층운동에 의한 주변 지층의 경동이나 습곡은 전혀 인지되지 않는다. 각 단층활면에서 확인되는 단층조선은 우수향 주향이동감각이 우세하지만(그림 3c, 3d), 일부 단층활면에서는 좌수향 주향이동감각이 인지되는데(그림 3e, 3f), 동일한 방향의 Y-전단면에서 체계적으로 확인되는 서로 다른 주향이동운동감각은 응력환경의 변화에 따른 단층의 재활성을 지시한다.

3.1.5 의성단층

의성단층은 항공사진과 음영기복도에서 약 20 km의 연장으로 경북 의성군 의성읍과 사곡면 일대의 하양층군 퇴적암류를 절단한다(Choi *et al.*, 2004; 그림 1c). 야외조사 결과, 단층암을 포함하는 단층핵은 인지할 수 없지만, 단층으로 추정되는 선형구조에 인접할수록 지층의 자세 변화가 확인된다. 하지만 이러한 지층자세의 변화는 추정 단층선에서 불과 십여 m만 벗어나도 인지하기 어렵다. 한편 의성단층에서 북쪽으로 약 6 km 떨어진 지점(US-1; $36^{\circ} 20' 52.51''N$,

128° 43' 53.75"E; 그림 1c)에는 기존에 보고되지 않은 서북서 방향의 단층이 확인된다. 고각으로 경동된 지층이 남-북 방향의 사면을 따라 노출되는데(그림 4a, 4b), 특히 주 단층면 인접부의 세일층 내에는 서북서 내지 북서 방향의 전단면을 따라 미약한 역이동성 감각이 수반된 좌수향 주향이동감각의 단층조선이 확인되며, 북서 방향의 습곡축을 가지는 수 cm 내지 수십 cm 진폭의 습곡이 관찰되어(그림 4b), 단층의 좌수향 횡압축성 운동을 지시한다.

3.1.6 의성지괴 북서편 일원에서 확인되는 서북서 방향 단층군

자락단층(Choi *et al.*, 2004; 그림 1c)은 경북 의성군 비안면 일대에 약 7 km 연장의 뚜렷한 서북서 방향 선형구조를 보이지만, 이번 야외조사에서는 단층의 존재를 지시할 만한 구조요소는 인지하지 못하였다. 한편, 자락단층에서 북북동 방향으로 약 3 km 떨어진 지점에서 약 6 km의 연장을 가지는 서북서 방향의 선형구조(그림 1c)를 추적한 결과, 새로운 단층 노두(JR-3; 36° 22' 47.19"N, 128° 33' 13.80"E; 그림 1c)

를 확인하였다. 이 노두에는 두 매의 북서 방향의 단층면이 2 m 간격을 가지며 발달하는데(그림 4c, 4d), 남쪽의 단층면은 N49°W/59°SW, 북쪽의 단층면은 N51°W/ 66°NE의 자세로 서로 다른 경사 방향을 보인다. 두 단층면 사이에는 괴상의 조립질 사암체가 위치하며, 사암체의 남쪽과 북쪽에는 세일층이 분포한다(그림 4c). 조립질 사암체 내에는 부차 단층, 전단단열, 광맥 등의 구조들이 거의 확인되지 않고, 양쪽으로 분포하는 세일층 내에는 일정하게 북서 방향의 축을 가지는 다양한 규모의 습곡들이 확인된다(그림 4d). 이러한 습곡 또는 지층의 경동 양상이 인지되는 구간은 조립질 사암체를 기준으로 남쪽과 북쪽으로 각각 5 m 이내이다. 야외에서는 단층대의 단면 부분만 노출되어 삼차원적인 단층대의 내부 구조를 해석하는데 한계가 있으나, 이러한 특징은 망상으로 발달하는 단층대 내에 렌즈상의 모암(lenses of protolith)이 포획되어 있는 구조일 가능성이 높으며, 층상규산염광물이 풍부한 모암을 절단하는 단층대의 특징적인 내부 구조로 널리 보고되어 있다(e.g., Faulkner *et al.*, 2003, 2008; Kim, C.-M. *et al.*, 2016;

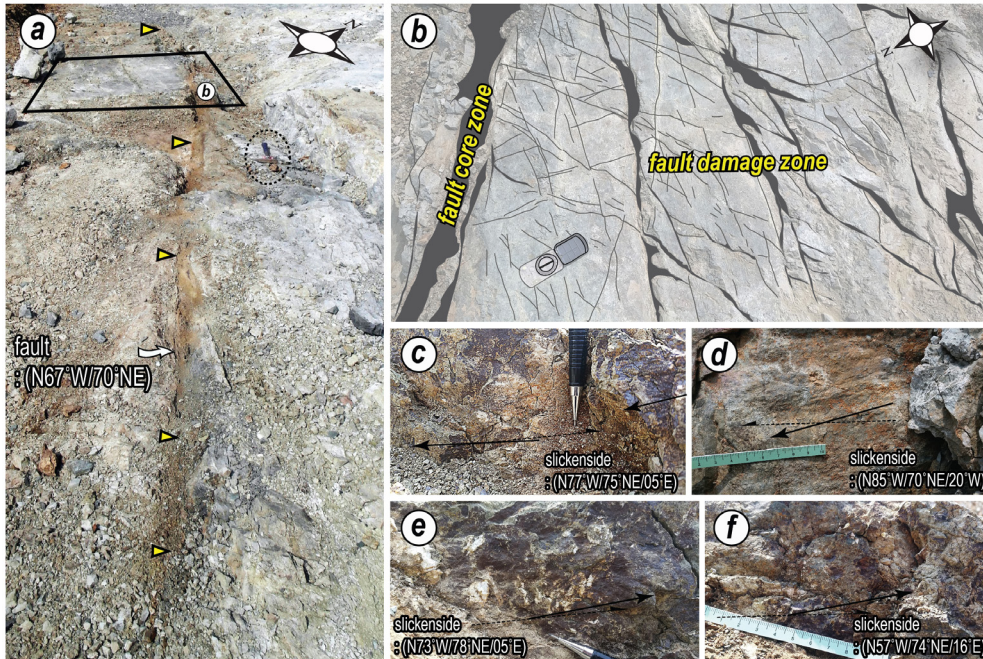


Fig. 3. Outcrop photographs showing the subsidiary faults adjacent to the Geumcheon Fault at the *GU-1*. (a) A WNW-striking fault showing ca. 10 cm-thick fault core composed of fault gouge and breccia, and (b) a sketch of fracture distributions within the damage zone. (c, d) Dextral strike-slip senses and (e, f) sinistral strike-slip senses observed on the WNW-striking minor fault surfaces.

Cheon *et al.*, 2017).

경북 의성군 신평면 일원에는 약 18 km 이상의 연장을 가지는 북서 내지 서북서 방향의 단층이 신동층군의 사암, 미사암, 셰일을 절단하고 있으며(그림 1c). Choi *et al.* (2004)은 이 단층을 우향 굴곡(right-bending)하는 의성단층으로 해석하였다. JR-7 (36° 26' 40.05''N, 128° 33' 28.19''E; 그림 1c) 지점에서 확인되는 단층은 N62°W/80°NE의 자세와 최대 5 cm의 단층비지

대를 가진다(그림 4e). 단층면의 북쪽지괴는 비교적 괴상의 사암이 위치하는 반면, 단층면의 남쪽지괴는 서북서 주향을 가지는 고각의 셰일과 사암이 분포하는데 셰일층 내에서는 습곡이 관찰된다. 또한 단층대 내에서 확인되는 Y-전단단열면에서는 주로 우수향 주향이동감각(그림 4f, 4g)을, 남-북 방향의 전단단열면에서는 좌수향 주향이동감각을 체계적으로 보여 북서-남동 방향의 압축력이 작동하였음을 지시

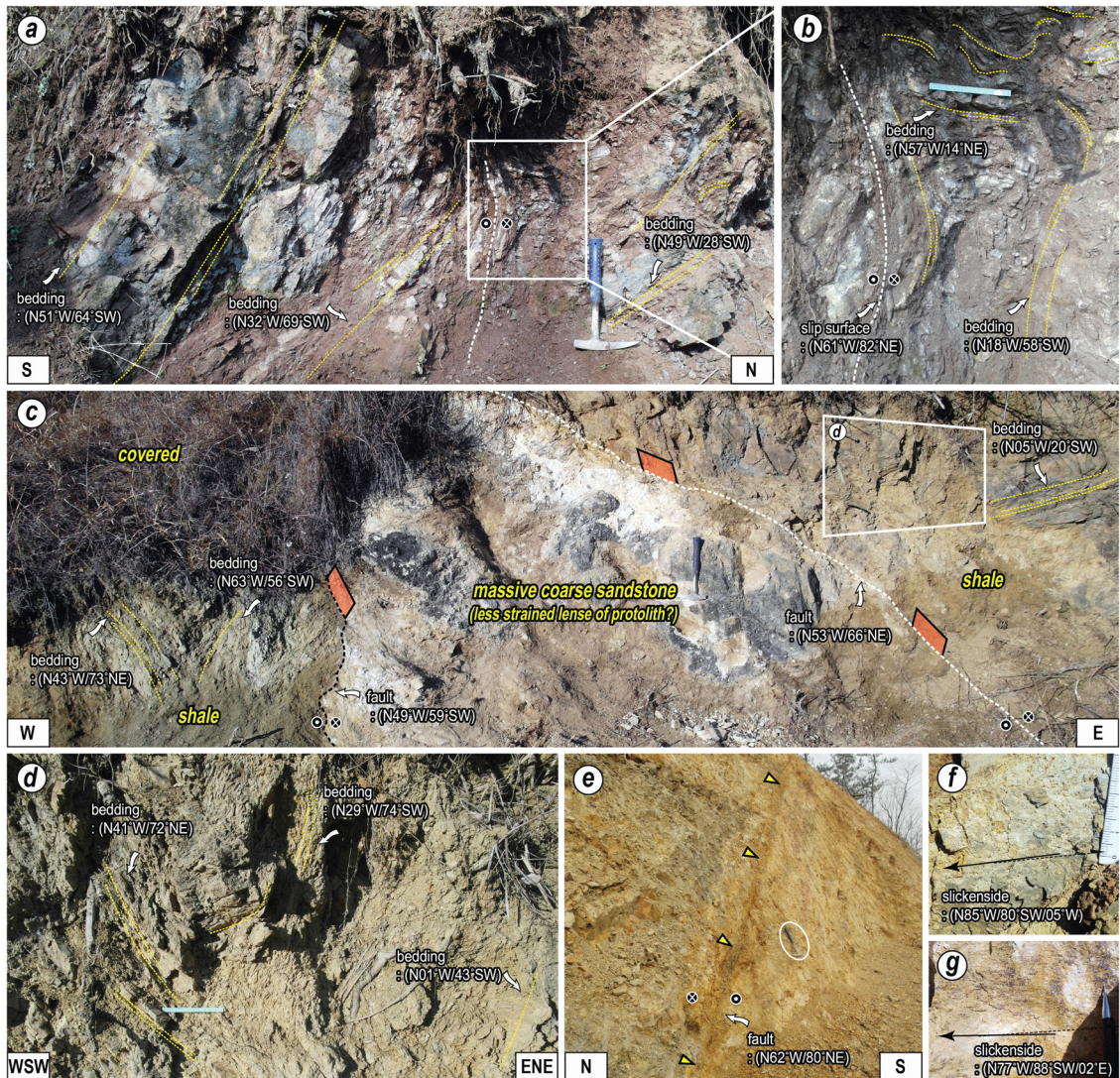


Fig. 4. Outcrop photographs showing the major features of WNW-striking faults in the northwestern part of the Uiseong block. (a) A WNW-striking fault at *US-1* and (b) flexure of sedimentary strata nearby the fault surface. Note that folds show NW-trending fold axes with low plunges. (c) An exposure of *JR-3* showing juxtaposed shale and coarse sandstone. They are bounded by NW-striking faults. (d) NW-trending folds within the shale. (e) An outcrop of a WNW-striking fault at *JR-7*, and (f, g) dextral strike-slip senses on subsidiary shear surfaces.

하며, 이러한 운동감각은 서북서 방향의 가음단층계 전반에 걸쳐 확인되는 좌수향 주향이동감각과는 뚜렷한 차이를 보인다.

3.1.7 의성군 옥산면 신계리 일원의 서북서 방향 주향이동단층군

경북 의성군 옥산면 신계리 일원을 가로지르는 북동-남서 방향의 상주-영덕간 고속도로 건설 현장(AD-19; 36° 25' 11.95"N, 128° 49' 10.82"E; 그림 1c) 절개사면에서는 2 m 이내 폭의 단층손상대를 가지는 20여 매 이상의 서북서 방향 단층들이 점곡층과 후평동층의 회백색 사암 내지 자색 이암을 절단하고 있는 양상이 확인된다(그림 5a, 5c, 5e). 단층비지와 단층각력으로 구성된 각각의 단층핵은 50 cm 이내의 폭을 가지며, 단층비지대는 수 cm 이내이다. 이들 단층면에서 확인되는 운동감각은 주로 좌수향 주향이동감각을 보이지만(그림 5a, 5b), 일부 단층면에서는 우수향 주향이동감각이 인지되기도 하며(그림 5c, 5d), 두 감각을 모두 가지는 단층활면도 관찰된다(그림 5e, 5f, 5g). 한편 자색 이암이 노출된 절개

사면에서는 단층 내지 단열면을 따라 망상으로 암석의 색상 변화가 인지되는데(그림 5e), 이는 약대를 따라 주입된 열수의 영향으로 추정된다.

3.2 안동단층계 동편(안동시 길안면 일원)의 단층들의 야외지재학적 특성

안동단층계는 의성지괴의 북쪽 경계단층으로 전반적으로는 동-서 방향으로 발달한다(그림 1b; Choi et al., 2002). 이번 연구에서는 안동단층계의 동편에 해당하는 경북 안동시 길안면 일원의 북서 내지 서북서 방향의 단층들을 추적하여 기재하였다(그림 1c, 6).

안동시 길안면 상주-영덕간 고속도로 건설 현장(사일산 터널)에 위치하는 AD-2 지점(36° 26' 32.33"N, 128° 58' 18.71"E; 그림 6)에서는 쥐라기 화강암과 일직층 역암을 구분하는 북서 방향의 분지경계단층(안동단층)이 확인된다(그림 7a, 7b). 단층면은 N53°W/68°SW의 자세를 보이며, 단층핵은 약 0.2 m 폭을 가지는 단층비지와 단층비지의 남쪽에만 분포하는 약 1 m 폭의 단층각력대로 구성된다. 주 단층면에서 확

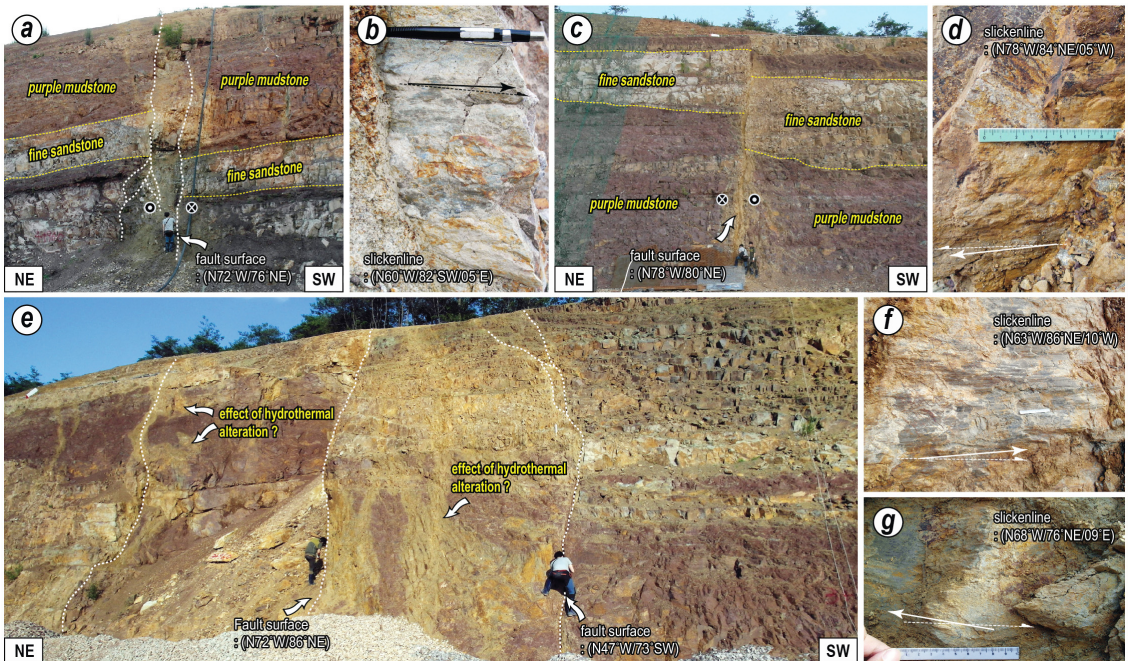


Fig. 5. Outcrop photographs showing the features of WNW-striking faults observed at AD-19. Each fault shows ~0.5 m-thick core (a, c, e) and slip senses on their fault surfaces indicating sinistral (b) and dextral strike-slip movements (d) or both (f, g). Note that color of sedimentary rocks changes from purple to yellow brown (a, c, e) because of effect of hydrothermal alteration.

인되는 두 방향의 중첩된 단층조선들은 미약한 좌수향 감각을 포함하는 정이동성 운동 이후에 좌수향 횡압축성 사교이동운동이 있었음을 지시하며(그림 7c, 7d), 단층의 하반에 해당하는 쥐라기 화강암 내에도 좌수향 주향이동감각을 가지는 서북서 방향의 전단 단열들이 흔하게 인지된다(그림 7e). AD-3 지점($36^{\circ} 27' 34.80''N$, $128^{\circ} 55' 58.18''E$; 그림 6)에서 확인되는 단층 노두는 $N77^{\circ}W/60^{\circ}NE$ 의 자세를 가지며, 후평동층 적색 이암을 절단하고 있다(그림 6, 7f). 약 1 m 폭의 단층핵은 자색 내지 담청색 단층비지와 단층각력으로 구성되어 있으며, 단층손상대 내 퇴적암은 단층핵에 가까워질수록 고각의 경사를 보인다. 야외에서는 운동감각을 지시할만한 구조요소들을 확인할 수 없었으며, 대자율이방성 방법을 통하여 복원된 운동감각은 3.4절에서 소개하도록 하겠다. AD-4 지점($36^{\circ} 29' 45.47''N$, $128^{\circ} 52' 52.96''E$; 그림 6)에는 $N47^{\circ}W/48^{\circ}NE$ 의 자세로 선캄브리아 변성암을 절단하는 주 단층(그림 6, 7h)과 이 단층의 북쪽에 $N29^{\circ}W/88^{\circ}NE$ 의 자세를 가지는 부차 단층이 확인된다. 주 단층의 단층핵은 주로 약 1 m 폭의 단층각력대로 구성되며(그림 7i), 2 cm 이내 폭의 단층비지

대가 단층핵과 북쪽 손상대의 경계를 이룬다. 주 단층면에는 우수향 횡압축성 사교이동감각이 확인된다(그림 7j).

안동시 길안면 일원의 백악기 퇴적층의 자세는 대체로 북서 방향으로 경사져 있지만, 안동단층계의 구성단층 인접부에서는 가음단층계의 각 단층들 인접부에서 확인되는 습곡과 유사하게 북서 방향의 축을 가지는 습곡들이 인지된다(그림 6). 또한 안동단층계를 구성하는 단층들의 기하와 운동학적 특성은 분지 내부의 가음단층계와 유사하게 최소 세 번 이상의 응력환경 변화에 수반된 변형을 포함하고 있으며, 특히 좌수향 횡압축성 사교이동운동에 의한 변형이 가장 우세하게 남아있음을 지시한다.

3.3 낙동단층계의 야외기재학적 특성

의성지괴 북서쪽 일원의 항공사진과 음영기복도 상에는 북북동 방향의 뚜렷한 선형구조들이 인지되지만(그림 1c), 낙동단층(Kim *et al.*, 1977)을 제외하면 이러한 선형구조에 대한 보고가 전무하다. 낙동단층은 경북 예천군 지보면에서 경북 김천시 감문면까지 북북동 방향으로 약 45 km 이상 연장되는 단층

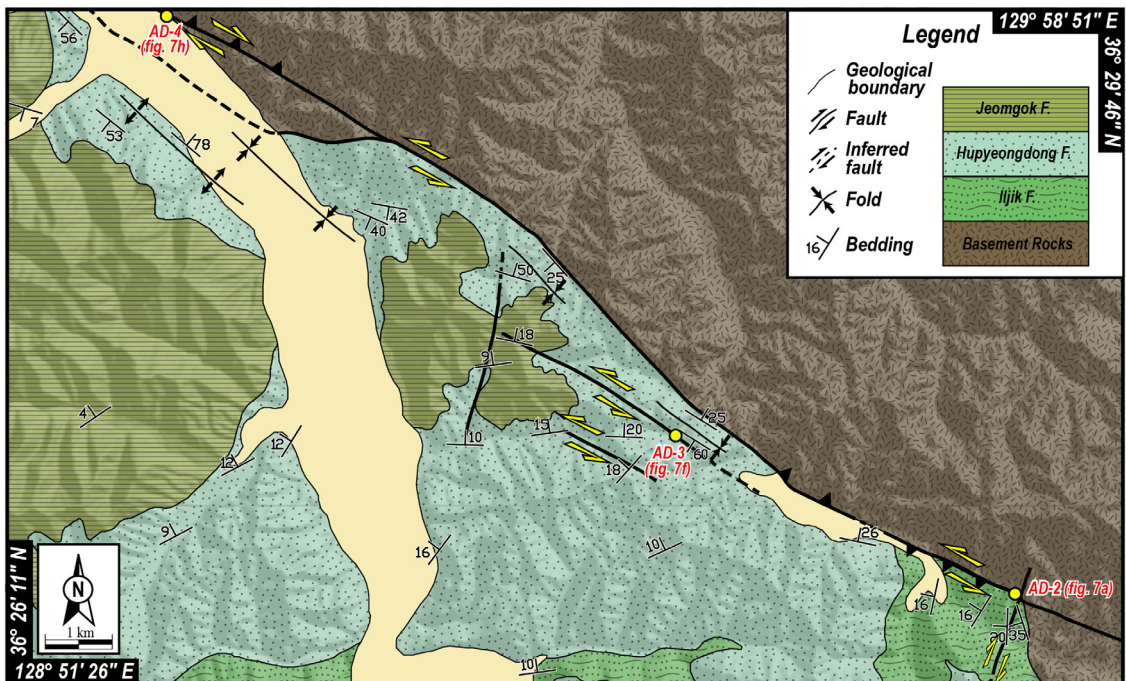


Fig. 6. Detailed geological map of Gilan-myeon, Andong-si area. It is notable the NW- or WNW-striking marginal and intrabasinal sinistral strike-slip faults with reverse component and NW-trending folds (modified after Chang *et al.*, 1978).

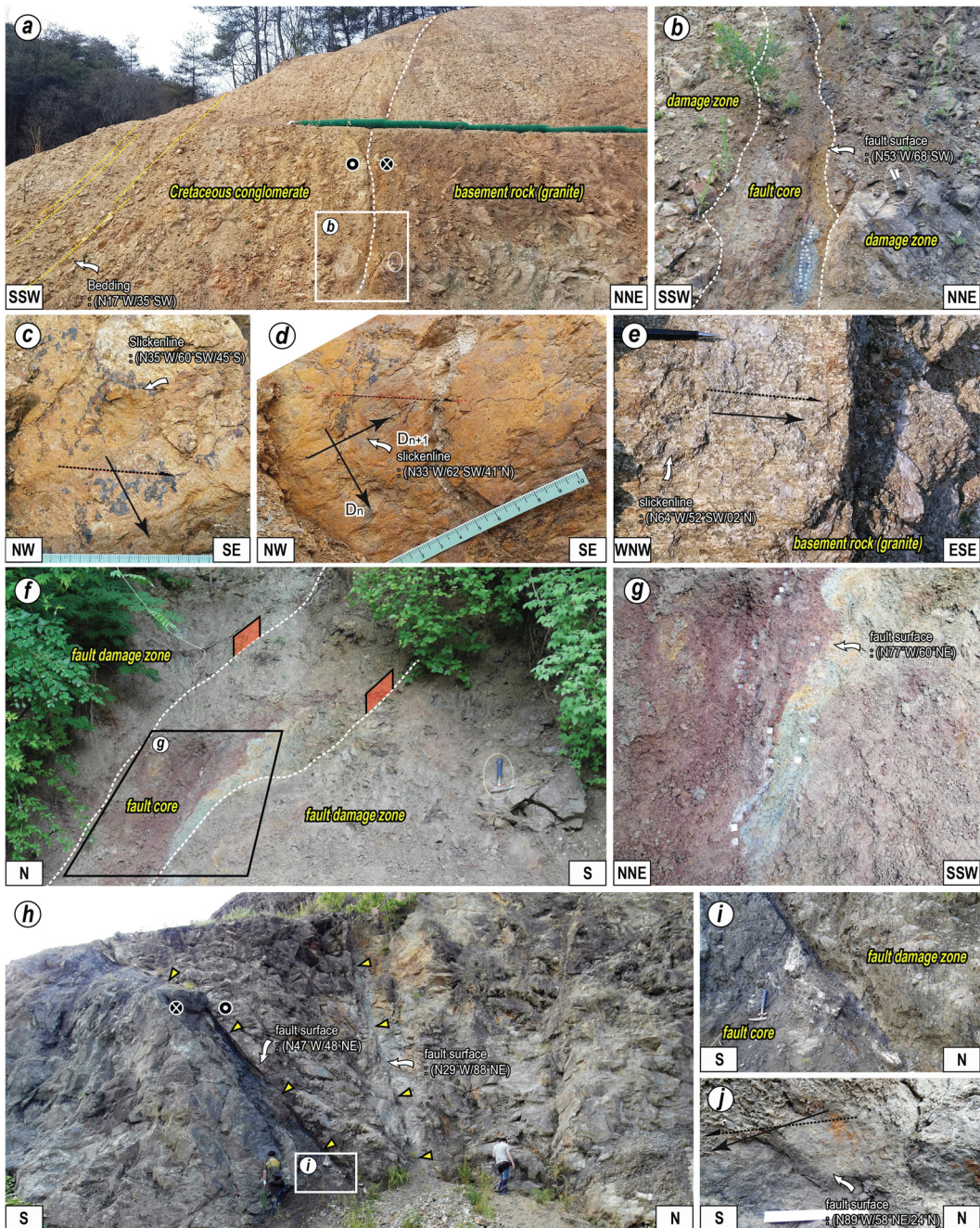


Fig. 7. Outcrop photographs showing the major features of the Andong Fault System in the northwestern margin of the Uiseong block. (a) An exposed outcrop of the Andong Fault at AD-2 (Fig. 6) showing that the fault offsets granite and conglomerate, and (b) close-up view of ca. 1 m-thick fault core composed fault gouge and breccia. Plastic-encapsulated cubes (2×2×2 cm in size) are used for AMS sampling. (c, d) Sinistral normal oblique-slip sense is overwhelmed by sinistral contractional oblique-slip sense. (e) Sinistral strike-slip sense on the WNW-striking fracture surfaces within granite. (f) The WNW-striking intrabasinal fault transecting purple mudstone at AD-3 (Fig. 6), and (g) close-up view of fault core consisting of purple and pale green gouges. (h) An outcrop of AD-4 (Fig. 6) showing that two faults offset the Precambrian metamorphic rocks, and (i) a close-up photograph of the fault core. (j) Dextral strike-slip sense with small reverse component on the main fault surface.

으로 기반암인 선캄브리아 편마암, 쥐라기 화강암, 경상분지 낙동층을 절단하고 있다. 낙동도폭(Kim *et al.*, 1977)에서는 낙동단층이 고각의 경사를 가지며 동쪽지괴가 상대적으로 침강한 단층으로 보고하고 있다.

이번 연구에서 낙동단층 일원의 뚜렷한 선형구조를 따라 단층을 추적한 결과, 북북동 방향의 단층들이 다발을 이루어 단층계를 형성하고 있음이 확인되어(그림 1c), 이 단층계를 ‘낙동단층계’로 명명하기를 제안한다. 수십 km의 선형구조가 뚜렷하게 인지되는 대규모 단층들은 대부분 현생 퇴적물에 피복되어 단층핵을 확인할 수 없지만, 인접부로 갈수록 주변 지층들이 교란된 양상이 확인된다. 또한 수 m 폭의 단층손상대를 가지는 남-북 내지 북북동 방향의 중-소규모 단층들이 다수 확인되는데(그림 8), 이들의 단층활면에는 대부분 좌수향 주향이동감각이 우세하게 관찰되지만, 일부 단층들은 우수향 주향이동감각이 인지되기도 한다. 한편 좌수향 주향이동감각을 가지는 북북동 방향의 단층들은 서북서 방향의 단층들에 의해 좌수향 감각으로 절단되는 양상이 뚜렷하게 인지되어, 북북동 방향의 좌수향 주향이동운동이 서북서 방향 단층의 좌수향 주향이동운동 이전

에 발생한 운동임을 지시한다.

요약하자면 낙동단층계는 의성지괴 북서편 경계부 일원에 집중적으로 발달하는 북북동 방향의 좌수향 주향이동단층계로 정의되며, 경상분지의 기반암과 신동층군을 모두 절단하는 반면 서북서 방향의 단층들에 의해 좌수향으로 절단되어 있다. 하지만 단층계를 구성하는 단층들의 내부 구조와 운동 시기 그리고 경상분지 진화사에서의 역할에 대해서는 보다 상세한 연구가 요구된다.

3.4 대자율이방성을 이용한 단층의 운동감각 해석

대자율이방성 연구(자기미세구조, magnetic fabrics)는 암석의 자기학적 성질 중의 하나인 대자율(magnetic susceptibility, k)을 이용하는 방법으로서, 대자율은 암석시료에 외부자기장(H)을 작용했을 때 물질이 자화되는 정도를 의미하는 물질의 고유한 특성이다. 대자율이방성(방향에 따른 대자율 크기의 차이)은 암석을 구성하는 개별 입자(혹은 광물)의 모양과 관련된 형태 이방성(shape anisotropy)과 결정학적 특징과 관련된 결정 이방성(crystalline anisotropy)에 의해 표현된다(Hrouda, 1982; Borradaile, 1988; Rochette *et al.*, 1992). 이 방법으로 도출된 자

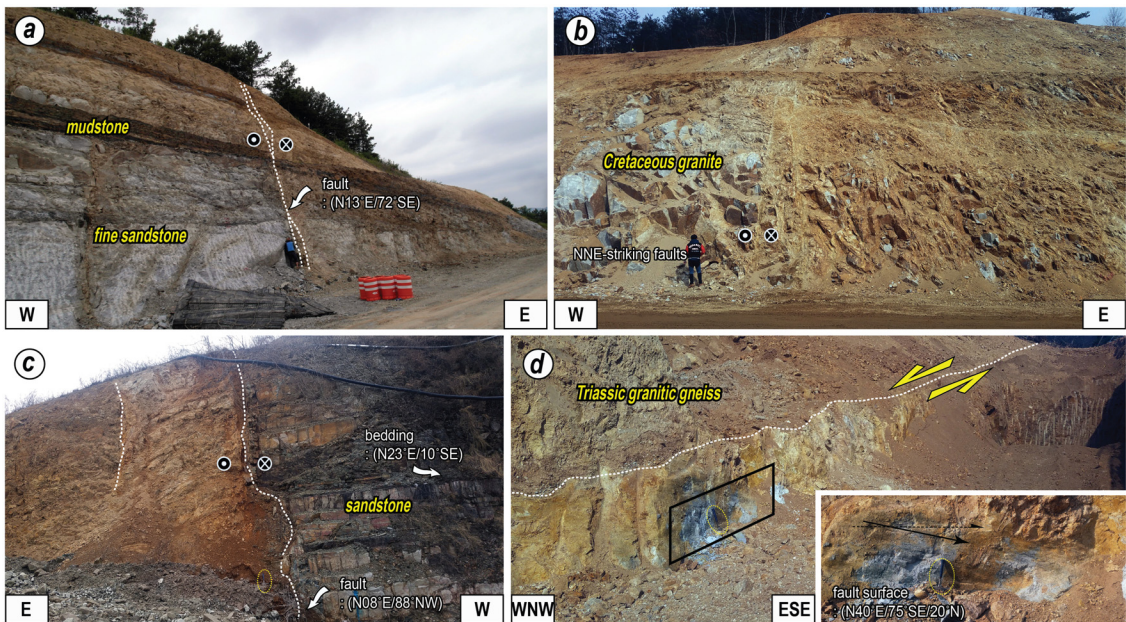


Fig. 8. Outcrop photographs showing the major features of the Nakdong Fault System in the northwestern area of the Uiseong block. The NNE-striking sinistral strike-slip faults are exposed due to road construction.

기미세구조는 타원체를 복원할 수 있으므로($k_1 > k_2 > k_3$), 이번 연구에서는 단층의 전단작용에 의해 입자의 배열이 뚜렷하게 남아있는 단층비지의 대자율이방성을 이용하여 단층의 운동감각을 밝히고자 하였다(e.g.,

Cho *et al.*, 2014; Ha *et al.*, 2016; Cheon *et al.*, 2017). 시료들은 무자성 플라스틱 큐빅 박스를 이용하여 안동단층계 두 노두(AD-2, AD-3)의 여덟 지점에서 총 89개를 채취하였으며(그림 9), 대자율이방성의 측정

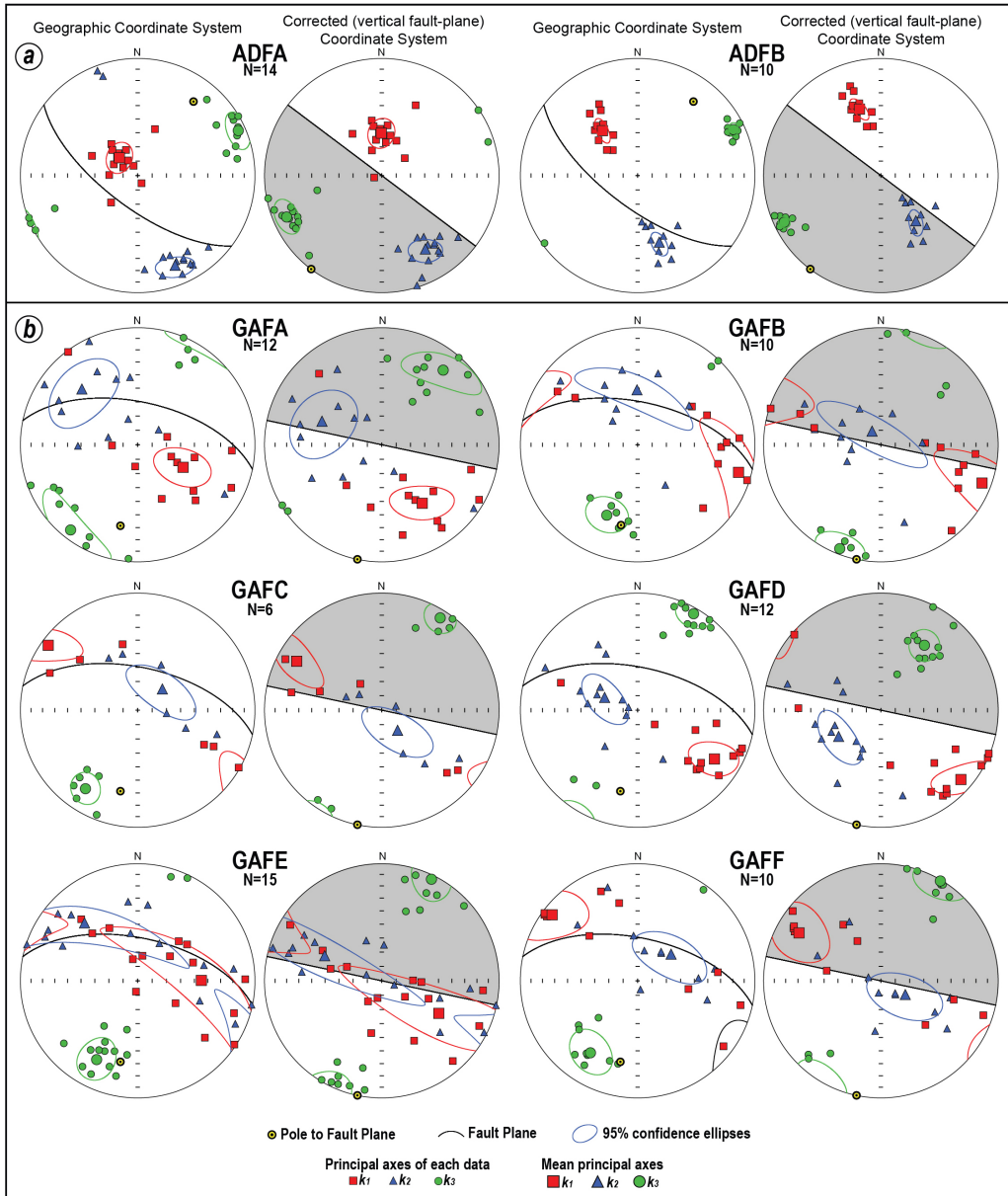


Fig. 9. AMS results from the fault gouges of (a) AD-2 (ADFA~B) and (b) AD-3 (GAFA~F). Left equal-area lower hemisphere projections show the AMS principal axes (k_1 , k_2 and k_3), their 95% confidence ellipse and fault attitude. Right equal-area projections in which fault surfaces are corrected to be vertical dip for convenience of interpretation show that mean eigenvectors of k_3 axes are mainly plotted on the hanging walls (Gray color area represents hanging walls). The AMS ellipsoids are overall oblate and can be described as ‘sinistral strike-slip movement with reverse component’.

Table 1. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) data from the fault gouges.

Site	n	k _{mean} (μ SI)	Mean Eigenvectors			AMS Parameters				FSA
			k ₁	k ₂	k ₃	L	F	P ₁	T	
ADF										
ADFA	14	210	314/72	158/16	066/07	1.006	1.008	1.014	0.195	127/68
ADFB	10	309	322/50	163/38	064/10	1.006	1.028	1.037	0.647	127/68
GAF										
GAFA	12	75	146/39	138/55	040/06	1.003	1.024	1.009	0.797	282/60
GAFB	10	107	105/12	359/53	204/35	1.001	1.003	1.004	0.529	282/60
GAFC	6	85	306/06	052/68	214/21	1.002	1.005	1.006	0.495	282/60
GAFD	12	81	122/23	288/66	030/05	1.002	1.007	1.009	0.569	282/60
GAFE	15	94	090/45	316/35	208/25	1.000	1.006	1.007	0.935	282/60
GAFF	10	113	308/09	054/61	213/27	1.002	1.011	1.014	0.664	282/60

n: number of specimens; k_{mean}: mean magnetic susceptibility, (k₁+k₂+k₃)/3; **mean eigenvectors**: site-mean directions, declination/inclination of k₁ (maximum), k₂ (intermediate), k₃ (minimum); L: lineation, k₁/k₂, after Balsley and Buddington (1960); F: foliation, k₂/k₃, after Stacey *et al.* (1960); P₁: corrected anisotropy degree, $\exp[2\{(n_1-n_m)^2+(n_2-n_m)^2+(n_3-n_m)^2\}]^{1/2}$, n₁=lnk₁, n₂=lnk₂, n₃=lnk₃, n_m=(n₁+n₂+n₃)/3, after Jelínek (1981); T: shape parameter, [(2ln(k₂/k₃)/ln(k₁/k₃))-1], after Jelínek (1981) and Hrouda (1982). **FSA**: Fault Surface Attitude.

은 AGICO사의 Kappabridge KLY-4S을 사용하였다.

AD-2 노두(그림 7b; ADFA, ADFB)의 대자율이 방성 세 주축 방향들은 상당히 양호한 균집도를 보이며, 확인되는 대자율이방성 타원체들은 모두 편평형(oblate shape)의 영역(T>0.195)에 분포한다(그림 9a; 표 1). ADFA와 ADFB 두 지점에서의 k₃는 모두 저각의 선경사와 동북동 방향의 선주향을 보이며, 단층면을 수직으로 보정하였을 때 상반(hanging wall)에 k₃가 집중되어 분포하는 양상이 확인된다. k₁과 k₂의 방향은 전반적으로 북북서 방향의 면상에 각각 균집성 있게 분포하며, 특히 ADFA의 k₁은 지표에 거의 수직하게 배열되는 특징을 가진다. 이러한 실험 결과는 주 단층면에서 확인된 단층조선(D_{n+1})과 함께 북서 방향의 안동단층이 좌수향 횡압축성 사교이동 운동을 하였음을 지지하며, 앞선 정이동성 감각의 변형(D_n)이 후기 변형에 의해 압도당하였음을 시사한다.

AD-3 노두(그림 7g; GAFA~F)의 대자율이방성 세 주축 방향들은 양호한 균집도를 보이며, 확인되는 대자율이방성 타원체들 역시 모두 편평형의 영역(T>0.495)에 분포한다(그림 9b; 표 1). k₁과 k₂의 방향은 고각의 북서 방향 면을 따라 뚜렷한 대원을 이루어, S-C 조직에서의 S면을 지시한다. 입자들의 단축 방향을 지시하는 k₃는 단층면의 수직 보정 후, 북동 내지 남서 방향의 선주향과 저각의 선경사를 보

이지만 GAFB 지점을 제외한 모든 지점에서 k₃가 상반에 놓이는 경향이 확인된다. k₁과 k₂가 뚜렷한 대원을 이루며 분포하는 것과 k₃가 저각의 선경사를 가지며 상반에 분포하는 경향은 이 단층이 미약한 역이동성 감각을 포함하는 좌수향 주향이동단층으로 운동하였음을 지시한다(see figure 6 in Cho *et al.*, 2014). 이러한 특징은 가음단층계를 구성하는 단층들의 운동감각과 일치하며, 신령단층의 단층비지에서 실시한 대자율이방성 연구결과와도 유사하다(our unpublished data).

3.5 방향에 따른 단층군(fault group) 분류와 운동 감각

의성지괴에 분포하는 단층 및 전단단열들은 방향성에 따라 서북서(Set 1), 동북동(Set 2) 그리고 남-북 방향(Set 3)으로 구분 가능하다(그림 10a). 서북서 방향의 단층군은 수 km에서 수십 km의 연장으로 의성지괴 전반에 걸쳐 분포하며, 분지 내부의 가음 단층계와 분지의 북쪽 경계인 안동단층계를 구성하는 일부 단층들이 이에 해당한다. 단층활면에서 전반적으로 인지되는 운동감각은 역이동성 감각이 미약하게 포함된 좌수향 주향이동감각이지만, 다수의 단층면에서 우수향 주향이동감각 역시 발달할 뿐 아니라 정이동성 감각의 단층조선도 일부 확인된다(그

림 10b). 동북동 방향의 단층군은 지질도 규모의 서북서 방향의 단층대 내에서 확인되는 소규모 단층들로서, 일부 우수향 주향이동감각이 인지되지만 전반적으로 좌수향 주향이동감각이 우세하다(그림 10c). 즉, 이 단층군은 서북서 방향의 단층이 좌수향으로 운동하는 동안 같은 감각의 부차 단층으로 운동한 것으로 판단된다. 남-북 방향 단층군의 단층활면에

서 확인되는 감각들은 역이동성 감각을 포함한 우수향 주향이동감각이 가장 우세하다(그림 10d). 하지만 의성지괴 북서편에서 확인되는 낙동단층계 단층들의 경우에는 주로 좌수향 주향이동감각이 확인되어, 유사한 방향성의 단층인 경우에도 지역에 따른 차별적인 운동사를 겪었음을 암시한다.

이러한 단층군의 방향에 따른 운동감각 패턴은

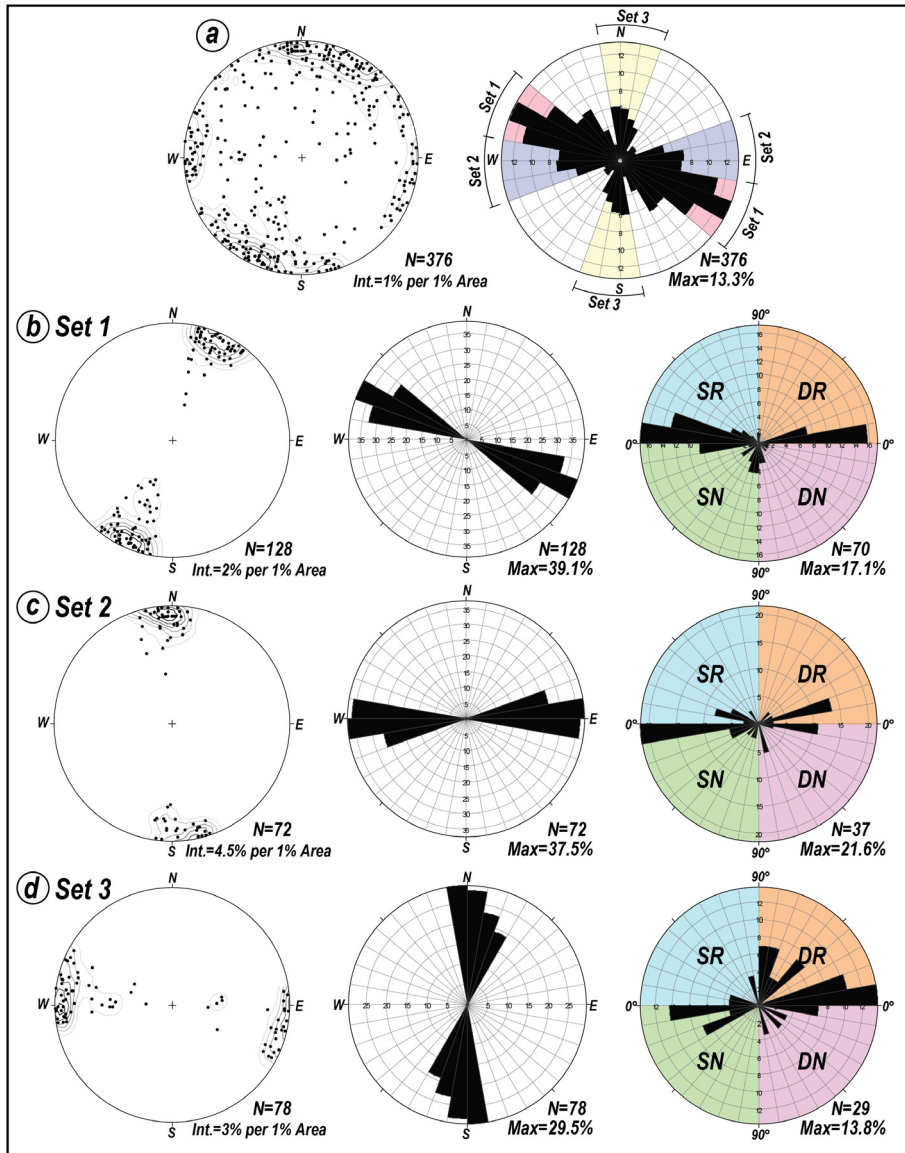


Fig. 10. Attitudes of all faults and shear fractures observed in the Uiseong block and their kinematics. (a) Contour (left) and rose (right) diagrams showing the three groups of faults and shear fractures based on their strikes. (b) Set 1: WNW-striking faults. (c) Set 2: ENE-striking faults. (d) Set 3: N-S-striking faults. See text for detailed explanation.

연구지역의 단층들이 응력환경의 변화에 따른 다중 변형을 겪었으며, 특히 북동-남서 압축환경 하에서 서북서 및 동북동 방향 단층들의 좌수향 주향이동운동과 남-북 방향 단층들의 우수향 주향이동운동에 의한 변형이 주로 남아있음을 의미한다.

4. 고응력 복원과 선후관계

여러 노두에서 확인된 단층 및 전단단열자료와

원통형 습곡(cylindrical fold)의 기하를 이용하여 고 응력장을 복원하고, 전단단열 간의 선후관계 또는 습 곡과 전단단열의 선후관계에 근거하여 고응력장의 상대적인 연대(relative chronology)를 설정하였다(그림 11). 해당 자료들은 의성지괴 전반에 걸쳐 체계성이 뚜렷하게 인지되어 지구조 응력이 수반되어 형성 되었다고 판단되는 구조요소들에서 습곡하였다. 전단 단열자료를 이용한 고응력 복원은 Delvaux and Sperner (2003)에 의해 제공된 Wintensor S/W (v.5.8.5)

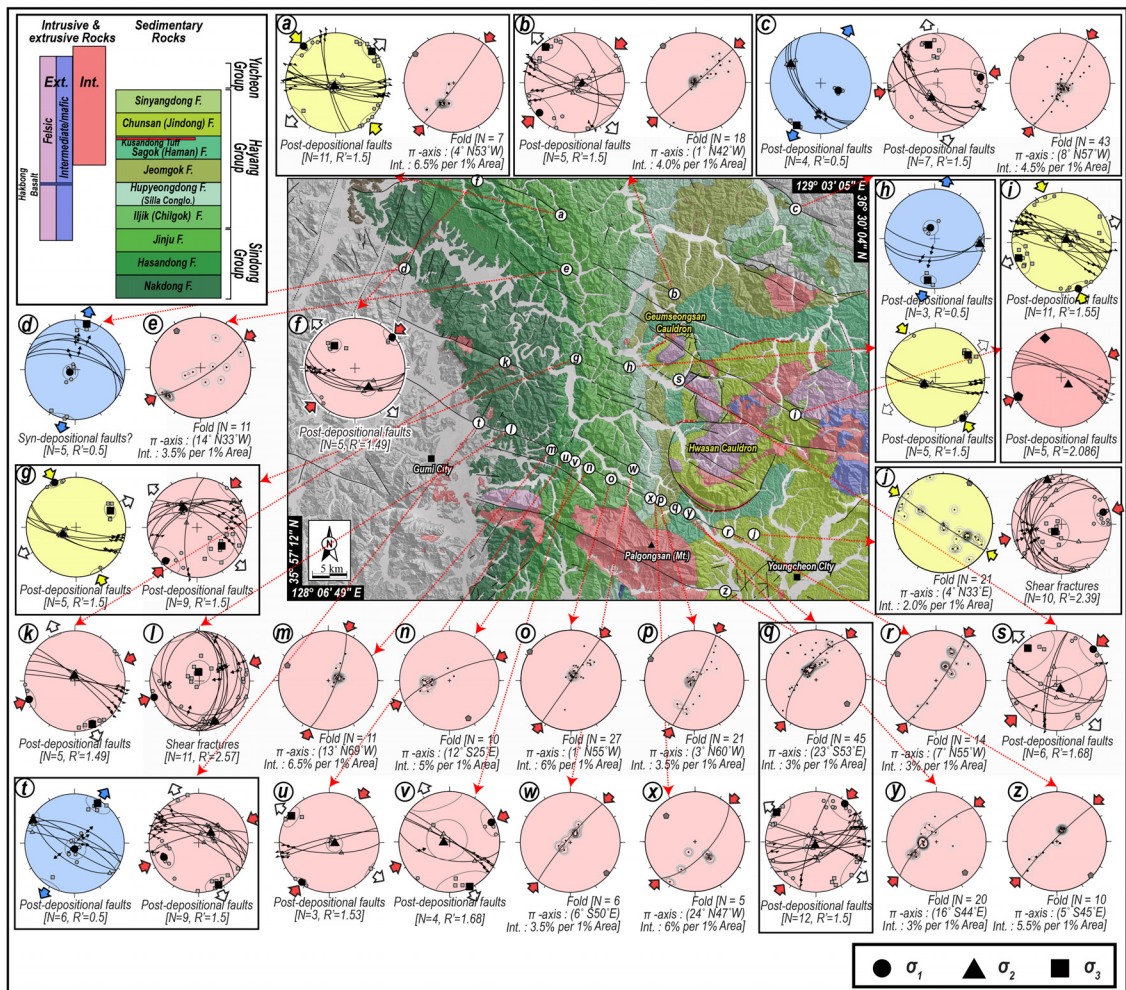


Fig. 11. Slip data obtained from the fault zone and fold axes estimated from best-fitting π -circle of various attitudes of fold limbs (lower-hemisphere, equal-area projection). Convergent and divergent arrow heads represent contraction (σ_{Hmax}) and horizontal stretching (σ_{Hmin}) direction, respectively. When determined, the principal stress axes σ_1 (pentagon), σ_2 (squares), σ_3 (triangles) are also projected. Based on relative chronologies at the outcrops, reconstructed paleostress regimes are roughly divided into (1) NNE-SSW tension, (2) NW-SE compression, and (3) NE-SW compression, in ascending order. $R^2 = R(\sigma_1 \text{ is vertical})$, or $2-R(\sigma_2 \text{ is vertical})$, or $2+R(\sigma_3 \text{ is vertical})$ [Delvaux *et al.*, 1997; $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$].

가 활용되었다.

야외에서 인지되는 고응력장은 상대적인 연대순으로 (1) 북북동-남남서 인장(D_1), (2) 북서-남동 압축(D_2) 그리고 (3) 북동-남서 압축(D_3)의 세 번의 사건(event)으로 구분된다(그림 11). 각 사건별 선후관계를 결정할 수 있는 노두가 몇몇 인지되며, 대표적인 노두는 다음과 같다. 우선, 3.3절에서 전술하였듯이 낙동단층계를 구성하는 북북동 방향의 좌수향 주향이동단층(D_2)들이 서북서 방향의 좌수향 횡압축성 주향이동단층(D_3)들에 의해 절단되어 있어, 뚜렷한 변형의 선후관계를 지시한다. 또한 영천시 북서부 YS-441 지점($N35^\circ 59' 55.21''$, $E128^\circ 57' 37.12''$; 그림 1c, 11j)에서는 상부 하양층군의 세일이 2 m 이내 진폭으로 원통형 습곡화되어 있으며, 습곡축은 서북서 방향의 단층인접부에서 확인되는 북서 방향의 것들과 달리 거의 수평의 침강각과 북동의 선주향을 보인다. 반면 세일의 층간에서 확인되는 전단감각(bedding slip)은 모두 역이동성 사교이동감각을 보이며 북동-남서 내지 동북동-서남서 방향의 압축응력을 지시한다(그림 11j). 층간 전단감각을 통해 복원된 고응력은 습곡의 기하를 통해서 복원된 고응력(북서-남동 압축)과 일치하지 않으므로, 이러한 층간전단은 습곡의 형성과 동시에 만들어지기 보다는 습곡의 형성(D_2) 이후 북동-남서 방향의 압축응력에 의한 결과(D_3)로 판단된다. 따라서 습곡을 형성시킨 북서-남동 압축응력은 다음단층계의 좌수향 주향이동운동을 야기한 북동-남서 방향의 압축응력 보다 앞선 사건임을 지시한다.

한편 서북서 내지 북서 방향의 소규모 정단층들은 의성지괴 도처에 발달하는데(그림 10b), 특히 서편 경계부를 따라 다수 인지된다. 이들 단층에서는 단층비지 또는 단층각력이 거의 인지되지 않고, 일부 단층활면에만 정이동감각의 단층조선이 확인된다. 낙동층 지층들이 주로 층적선상지 환경에서 퇴적되어 비교적 조립질 퇴적층의 분포가 우세한 까닭에 지층 내부에 발달하는 서북서 내지 북서 방향 단층의 퇴적동시성 운동에 대한 증거를 야외조사만으로 명확하게 인지하기 어려우나, 분지 경계 인접부에서 분지 층전물의 주향 및 분지 경계의 방향과 유사한 방향으로 발달하는 다수의 정단층들은 분지의 확장(D_1)과 관련이 있을 가능성이 높다. 이러한 특징은 분지 경계가 부정합일지라도 분지의 확장을 주도

한 단층 운동이 분지 내부에서 활발하였으며, 숨겨진 단층(burial fault)이 분지 내부에 존재할 가능성을 제시한다. 또한 서북서 내지 북서 방향의 대규모 단층의 단층활면에서도 정이동성 감각의 단층조선들이 흔히 인지되며 이들 중 일부는 좌수향 내지 우수향 주향이동 단층조선에 의해 지워지는 양상이 확인된다(그림 7d). 즉, 서북서 내지 북서 방향의 단층들이 정이동성 감각으로 운동한 북북동-남남서 방향의 인장응력이 연구지역에서 확인되는 가장 초기 응력이며, 이후 응력환경의 변화 동안에 적절하게 배향된 일부 단층들이 선택적으로 재활동하면서 대규모 단층으로 성장한 것으로 풀이된다.

5. 토 의

5.1 단층대의 내부변형 특성

가음단층계를 구성하는 단층들은 수 km~수십 km의 연장과 약 1 km 내외의 좌수향 수평변위를 가지며, 백악기 퇴적암 및 백악기말-고신생기의 화산암과 화강암을 절단하고 있다. 이번 연구에서는 다양한 암상에서 기원된 단층암이 병치되어 분포하는 단층대를 확인할 수 없었으며, 노출된 주요 단층대는 모두 퇴적암을 절단하고 있다.

야외에서 확인된 단층들은 수 cm 두께의 단층비지를 가지는 소규모 단층대에서부터 단층비지와 단층각력으로 구성된 수 m 폭의 단층핵과 수십 m 폭의 손상대로 구성된 대규모 단층대까지 다양한 규모로 발달하며, 동일한 단층인 경우에도 위치에 따라 단층대의 폭이 변화한다. 세일과 조립질 사암이 단층면을 기준으로 접하고 있는 노두에서는 양쪽 지괴간의 차별적인 변형양상이 확인되는데, 단층 인접부의 세일층 내에는 수 cm~수 m의 진폭을 가지는 습곡, 단층면의 자세와 거의 유사하게 경동된 지층 그리고 경동된 층간에서의 전단엽리 또는 단층비지가 빈번하게 관찰되는 반면, 조립질 사암층 내에는 지층의 경동, 습곡, 층간전단을 인지하기 어렵다. 세일층 내에서 확인되는 습곡들은 다양한 진폭과 익간각(interlimb angle), 원통형의 기하, 저각으로 경사진 북서 방향의 습곡축을 보여, 단층의 좌수향 주향이동운동에 수반된 안행상 습곡(en-echelon fold)으로 해석된다. 고각으로 경동된 세일층의 층간에서 확인되는 운동감각은 주 단층면의 것과 동일하며, 전단

이 집중된 층간에 형성된 전단엽리와 수 cm 내지 수십 cm 두께의 단층비지대는 망상으로 발달하기도 한다. 또한 일부 노두의 단면에서는 변형을 상대적으로 적게 받은 렌즈상의 조립질 사암이 고각의 셰일층 내에 둘러싸여 있는 양상이 확인된다.

이러한 변형양상은 충상규산염광물이 다량 포함된 모암을 절단하는 단층대의 주요 특징이며(e.g., Faulkner *et al.*, 2003, 2008; Lee and Kim, 2005), 특히 연성(ductility)이 상대적으로 우세한 셰일에서 조립질 사암에 비해 변형이 집중적으로 관찰된다(Cheon *et al.*, 2017). 셰일층은 처음 형성된 전단면과 고각으로 경동된 층간의 강도 차이가 크지 않아, 기존에 움직인 전단면이 더 이상 움직이지 않고 층간에서 새로운 전단이 발생하는 현상이 반복적으로 발생하면서 망상의 단층비지대를 형성하였을 가능성이 높으며, 이러한 특징은 퇴적암 기원의 단층암으로 구성된 양산단층대 남부(언양 일원)의 단층핵 지점에서 흔히 확인된다(Cheon *et al.*, 2017). 충상규산염광물로 구성된 단층비지의 전단실험 결과 역시 일반적인 환경에서 단층암의 속도강화(velocity strengthening) 거동을 보고하고 있어(e.g., Faulkner *et al.*, 2008; Ikari *et al.*, 2011; Woo *et al.*, 2016), 연구지역과 같이 셰일과 사암이 호층을 이루는 지층을 절단하는 단층대 내에서의 망상의 단층비지대 형성을 지지한다.

5.2 단층계의 진화사

앞서 제시한 바와 같이 의성지괴 일원에 발달하는 구조요소들(전단단열, 단층, 습곡)의 선후관계를 이용하여 연구지역에서 확인되는 고응력장을 상대적인 연대순으로 (1) 북북동-남남서 인장, (2) 북서-남동 압축 그리고 (3) 북동-남서 압축의 세 번의 사건으로 구분하였다. 이번 장에서는 가장 초기 응력으로 해석되는 북북동-남남서 인장력과 가장 큰 변형을 남긴 북동-남서 압축력의 분지 진화동안의 역할과 시기에 대해 토의하고자 한다.

연구지역의 가장 초기 응력으로 판단되는 북북동-남남서 인장환경에서는 서북서 내지 북서 방향의 단층들이 주로 정이동성 감각으로 운동하였다. Chang (1977)은 서북서 방향의 팔공산단층(또는 팔공산화강암)과 안동단층(또는 청송용기부)을 경계로 각 구조선의 남쪽과 북쪽지괴간의 지층의 층후가 급격히 변화할 뿐만 아니라 대비가 어려운 점에 근거하여,

이들이 하부 하양층군의 퇴적 동안 각각 남쪽지괴가 상대적으로 침강하여 차별적인 지괴운동을 야기한 성장단층으로 보고하였다. 이후 Chang and Park (1997)과 Chang *et al.* (1997)의 연구에서도 팔공산화강암의 북쪽에 위치하는 후평동층, 점곡층 그리고 남쪽에 위치하는 칠곡층, 신라역암층, 학봉현무암이 퇴적 및 분출될 당시에 팔공산단층이 퇴적동시성 단층으로 운동하였으며, 함안층과 진동층의 퇴적과 화성활동 이후에 약 5.5 km 변위를 가지는 좌수향 주향이동운동이 있었음을 보고한 바 있다. 특히, 백악기 화성암체가 팔공산단층의 연장선을 따라 분포하고 있는 것에 근거하여, 이들이 팔공산단층을 분출통로로 사용한 것으로 해석하였다. 한편 의성지괴 북서부 일원의 퇴적학적 연구들은 북서 방향으로 연속성 있게 발달하는 퇴적단위와 동쪽으로의 퇴적심(depocenter) 이동을 보고하였으며(Rhee *et al.*, 1998; Jo and Chough, 2001; Jo, 2003a, 2003b), Rhee *et al.* (1998)은 이러한 퇴적작용이 인장 내지 횡인장환경하의 북서 방향의 정단층 운동과 밀접한 관련이 있음을 제안하였다. 또한 Yang and Jo (2011)은 의성지괴 북동부 일원(안동시 길안면 지역)에 분포하는 북서 주향의 길안역암체(일직층 하부에 대비)의 퇴적학적 연구를 통해 이 역암체가 경상분지 북쪽 경계에서 남서쪽으로 발달하는 충적선상지 기원이며, 신동층군의 퇴적 이후 경상분지의 확장이 동쪽으로 확대되는 동안 단속적인 분지침강의 결과물임을 보고하였다. 최근 Choi *et al.* (2013)의 구조지질학적 연구 또한 의성지괴에 발달하는 서북서 방향의 퇴적동시성 구조요소들에 근거하여 신동층군과 하양층군의 퇴적 당시 응력이 북북동-남남서 내지 남-북 방향의 인장응력임을 제시하였다. 이러한 기존 연구들과 이번 연구결과는 경상분지의 확장 및 침강이 서북서 방향의 정단층 운동과 밀접한 관련이 있음을 지시한다.

이후 판구조 환경의 변화에 따른 응력 변화는 경상분지의 확장을 종결시킴과 더불어 기존에 존재하는 단층들이 다른 감각으로 재활동하며 대규모 단층계로 성장하는데 결정적인 역할을 하였을 것이다. 가음단층계와 안동단층계 동편에 발달하는 일부 단층들은 우수향 주향이동운동과 관련된 변형이 주로 확인되며, 앞선 정이동 내지 우수향 주향이동에 의한 변형을 압도한다. 이러한 좌수향 횡압축성 주

향이동감각을 지시하는 단층조선들은 저각의 단층 활면에서 고각의 선주각을 보이고 고각의 단층활면에서는 저각의 선주각을 보여, 북동-남서 압축환경 하에서 저각의 단층일수록 역이동성 감각이 우세한 횡압축성 사교이동운동을 하였음을 지시한다.

가음단층의 운동에 의해 좌수향 변위를 보이는 보현산 일원의 화강암 연대는 약 52 Ma (Kim, S.J. *et al.*, 1997; Kim, J.-S. *et al.*, 2012)로서 절단된 암석 중에 가장 젊은 암석에 해당하여 가음단층계의 좌수향 횡압축성 주향이동운동 시기를 한정할 수 있다. 한편, Kim *et al.* (2005)와 Son *et al.* (2007)은 경상분지 남동부 일원에 분포하는 체계적인 방향성을 가지는 암맥군의 Ar^{40}/Ar^{39} 절대연령에 근거하여, 64~52 Ma의 서북서 방향 암맥군이 북상하는 태평양판의 사교 섭입에 의해 한반도 남동부에 발생하였던 광역적인 북북서 방향 좌수향 전단력의 이차적인 인장절리를 따라 형성되었음을 제안하였으며, 51~44 Ma의 남-북 방향의 암맥군은 지판 경계의 강력한 흡입력(suction force)으로 동-서 내지 서북서-동남동의 인장력이 광범위하게 작동된 결과로 해석하였다. 한편, 최근의 마이오세 퇴적분지들에 관한 연구들(Son, 1998; Son *et al.*, 2000, 2005, 2013, 2015; Cheon *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2015)은 25~16 Ma에 북북서 방향의 우수향 전단환경 하에서 이차적으로 유도된 서북서-동남동 방향의 인장응력에 의해 한반도 남동부의 동해안을 따라서 퇴적분지들이 형성되었으며, 이들이 동해의 확장과 밀접한 관련이 있음을 보고하였다. 이러한 마이오세 분지충전물은 대부분 양산단층과 울산단층에서 2~5 km 동쪽에 위치하는 북북동 내지 북동 방향의 정단층과 북북서 방향의 우수향 주향이동단층에 의해 규제되어 분포하며, 분지충전물을 절단하는 서북서 방향의 대·중규모 주향이동단층은 인지하기 어렵다. 이상의 연구결과들에 근거할 때 가음단층계의 좌수향 횡압축성 주향이동운동을 야기할 만한 북동-남서 압축응력은 43~25 Ma 사이에 놓일 가능성이 높으며, 양산단층계의 광역적인 우수향 주향이동운동 역시 이 시기에 발생한 것으로 해석된다(Cheon *et al.*, 2017). 하지만 가음단층의 단층비지를 이용한 ESR 연대측정 결과는 560 ± 50 ka의 운동 시기를 보고하고 있을 뿐만 아니라(Choi *et al.* 2012), 현생 동-서 내지 동북동-서남서 방향의 압축응력환경 하(e.g., Kim, M.-C. *et al.*, 2016)에서도 서북서 방향

단층들의 좌수향 주향이동운동이 충분히 가능함으로, 가음단층계를 구성하는 일부 분절들의 제4기 좌수향 주향이동운동의 가능성도 배제할 수 없다.

6. 결론

이번 연구는 경상분지 의성지괴에 분포하는 분지 내부단층(가음단층계, 낙동단층계)과 경계단층(안동단층계 동편)의 기하와 운동학적 특성을 기재 및 분석하고 단층계의 진화사를 정립하여, 경상분지의 형성과 발달을 이해하는데 기여하고자 하였다. 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 가음단층계는 의성지괴 전반에 걸쳐 발달하는 서북서 방향의 좌수향 횡압축성 주향이동단층계로서, 구성단층들 중 대규모의 단층들은 수십 km의 연장과 1 km 내외의 좌수향 수평변위를 가지며 좌수향 주향이동운동 이전에 정단층과 우수향 주향이동단층으로 운동하였다. 안동시 길안면에서 확인되는 안동단층계의 구성단층들은 북서 내지 서북서 방향으로 의성지괴의 경계부에 발달한다. 가음단층과 유사하게 좌수향 횡압축성 사교이동운동에 따른 변형이 압도적으로 확인되지만, 이전의 단층운동으로 판단되는 정이동감각과 우수향 주향이동감각 또한 인지된다. 가음단층계와 안동단층계의 기하, 운동감각의 선후관계는 두 단층계가 각각 분지 내부단층과 경계단층의 역할을 하였지만 동일한 운동사를 겪었음을 지시한다. 한편, 낙동단층계는 의성지괴 북서편 일원에 발달하는 북북동 방향의 단층계로서, 구성단층들은 대부분 좌수향 주향이동단층으로 운동하였지만 일부 단층에서는 우수향 주향이동감각이 인지되기도 한다.
- 2) 주요 단층대 내에서 확인되는 퇴적층들은 주 단층면에 가까워질수록 지층의 주향이 단층의 주향과 평행하게 배열되고 경사각이 커지며, 일부 지점에서는 저각으로 침강한 북서 방향의 습곡축을 가지는 다양한 진폭의 원통형의 습곡으로 발달하기도 한다. 이는 괴상의 사암체에 비해 이방성이 발달하는 셰일층에서 집중적으로 확인된다. 고각으로 경동된 셰일층간의 전단은 전단엽리와 함께 망상으로 발달하는 수십

cm 이내의 두께를 가지는 단층비지대를 형성하며, 일부 지점에서는 비교적 변형을 받지 않은 렌즈상의 사암이 포함되어 있는 양상이 관찰된다. 이러한 변형특성은 퇴적층 간 연성도의 상대적인 차이에 따른 것으로 해석된다.

- 3) 의성지괴 일원에서 확인되는 구조요소(단층, 전단단열, 습곡의 기하, 단층암의 자기미세구조) 들을 이용하여 복원된 고응력장은 순차적으로 ① 북북동-남남서 인장응력, ② 북서-남동 압축응력 그리고 ③ 북동-남서 압축응력으로 구분되며, 각 응력환경에서 주요 단층들이 서로 다른 운동감각으로 운동하였음을 지시한다. 특히, 북북동-남남서 인장환경 하에서의 북서 내지 서북서 방향의 정단층 운동은 경상분지의 확장 및 침강과 밀접한 관련이 있는 것으로 해석된다. 이후 의성지괴 일원 전반에 걸쳐 가장 뚜렷한 변형을 남긴 북동-남서 압축응력은 기존 연구들과 종합하여 해석할 때, 43~25 Ma (에오세말~올리고세)로 시기가 한정된다.

사 사

이 논문은 2014년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2014R1A2A1A11053102)의 연구결과이다. 심사과정에서 건설적이고 유익한 조언과 비평을 해주신 황재하 박사님과 김유홍 박사님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Balsley, J.R. and Buddington, A.F., 1960, Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and ortho-gneisses. *American Journal of Science*, 258-A, 6-20.
- Borradaile, G.J., 1988, Magnetic susceptibility, petrofabric and strain-a review. *Tectonophysics*, 206, 203-218.
- Chang, G.H., Lee, Y.J. and Park, B.G., 1981, Explanatory Text of the Geological Map of Gunwi Sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 20 p.
- 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., Ko, I.S., Lee, J.Y. and Kim, S.W., 1977, Explanatory Text of the Geological Map of Gusandong Sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 25 p.
- 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, 20 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., Park, S.O. and Kim, H.-S., 1997, Cretaceous stratigraphy and geologic history of medial Kyongsang Basin: Tectonics and volcanism. *Geosciences Journal*, 1, 2-9.
- Chang, K.-H., Suzukib, 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., Ha, S., Lee, S., Cho, H. and Son, M., 2017, Deformation features and history of the Yangsan Fault Zone in the Eonyang-Gyeongju area, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 95-114 (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.
- Cheon, Y., Song, C.W., Kim, J.-S., Lee, S.K. and Son, M., 2014, Late Paleogene reactivation of the Sinnyeong Fault in the Gyeongsang Basin, SE Korea and its tectonic implications. 2014 AGU Fall Meeting (Abstracts), San Francisco, December 15-19.
- Cheon, Y., Song, C.W., Lee, S.K., Kim, J.-S. and Son, M., 2013, Intraplate Strike-Slip Reactivation of the Sinnyeong Fault in the Cretaceous Gyeongsang Basin, Korea, Due to the Concentration of Later Compressional Stress. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 1, 12-17.
- Cheong, C.H., Koh, I.S., Kim, S.W. and Kim, H.M., 1989, Explanatory Text of the Geological Map of Sonsan Sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 26 p.
- Cho, D.-L. and Kwon, S.-T., 1994, Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoids in South Korea and the evolution of crustal thickness. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 41-61.
- Cho, H., Kim, M.-C., Kim, H. and Son, M., 2014, Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) of the Quaternary Faults, SE Korea: Application to the Determination of

- Fault Slip Sense and Paleo-stress Field. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 75-103 (in English with Korean abstract).
- Choi, H.I., 1986, Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. *Journal of the Geological Society*, 143, 29-40.
- Choi, H.I. *et al.*, 1982, Geological, Geochemical and Geophysical studies on the Gyeongsang Supergroup in the Euseong area. Korea Institute of Energy and Resources, 50 p (in Korean with English abstract).
- 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, P.Y., Lee, S.R., Ko, I.-S. and An, G.-O., 2004, Movement history of the GFS. In: Lee, Y.S., Kihm, Y.H., Choi, P.Y., Reedman, A., Kim, S.-Y., Kim, I.-J., Lee, S., Shin, H.-J. and Shin, D. (ed.), *Cenozoic Stratigraphy and Tectonics of Korea. The 3rd and 4th Symposiums on the Geology of Korea, Special Publication No.2*, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 211-228.
- Choi, S.J. *et al.*, 2012, Active Fault Map and Seismic Hazard Map. National emergency Management Agency, 953 p.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-back-arc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.
- 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-Science Reviews*, 52, 175-235.
- Davis, G.H. and Reynolds, S.J., 1996, *Structural Geology of Rocks and Regions*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 776 p.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V. and San'kov, V., 1997, Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282, 1-38.
- 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.
- Faulkner, D.R., Lewis, A.C. and Rutter, E.H., 2003, On the Internal Structure and Mechanics of Large Strike-Slip Fault Zones: Field Observations of the Carboneras Fault in Southeastern Spain. *Tectonophysics*, 367, 235-251.
- Faulkner, D.R., Mitchell, T.M., Rutter, E.H. and Cembrano, J., 2008, On the Structure and Mechanical Properties of Large Strike-Slip Faults. In: Wibberley, C.A.J., Kurz, W., Imber, J., Holdsworth, R.E. and Collettini, C. (eds) *The Internal Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-Flow Properties*. Geological Society of London Special Publication, 299, 139-150.
- Ha, S., Cheon, Y., Kang, H.-C., Kim, J.-S., Lee, S.-K. and Son, M., 2016, Geometry and kinematics of the subsidiary faults of the Ilgwang fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 31-50 (in Korean with English abstract).
- Hrouda, F., 1982, Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys*, 5, 37-82.
- Hwang, B.H., Ernst, W.G., McWilliams, M. and Yang, K., 2008a, Geometric model of conjugate faulting in the Gyeongsang Basin, southeast Korea. *Tectonics*, 27, TC6015.
- Hwang, B.H., Son, M., Yang, K., Yoon, J. and Ernst, W.G., 2008b, Tectonic evolution of the Gyeongsang Basin, southeastern Korea from 140 Ma to the present, based on a strike-slip and block-rotation tectonic model. *International Geology Review*, 50, 343-363.
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994, Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Milyang-Yangsan area, Korea: Petrotectonic setting. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 229-241 (in Korean with English abstract).
- Ikari, M., Marone, C. and Saffer, D.M., 2011, On the relation between fault strength and frictional stability. *Geology*, 39, 83-86.
- Itoh, Y., Uno, K. and Arato, H., 2006, Seismic evidence of divergent rifting and subsequent deformation in the southern Japan Sea, and a Cenozoic tectonic synthesis of the eastern Eurasian margin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27, 933-943.
- Jelinek, V., 1981, Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79, 63-67.
- Jeon, Y.M. and Sohn, Y.K., 2008, Characteristics, emplacement processes, and stratigraphic implications of the basalts intercalated in the Hayang Group, Cretaceous Gyeongsang Basin, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 707-727 (in Korean with English abstract).
- Jeong, J.O. and Jwa, Y.J., 2000, Volcanic stratigraphy and

- petrology of Cretaceous volcanic rocks in the eastern part of the Euseong Basin. *Journal of Petrological Society of Korea*, 9, 238-253 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Jo, H.R., Rhee, C.W. and Chough, S.K., 1997, Distinctive characteristics of a streamflow-dominated alluvial fan deposit: Sanghori area, Kyongsang Basin (Early Cretaceous), southeastern Korea. *Sedimentary Geology*, 110, 51-79.
- Jwa, Y.-J., Nakajima, T., Uchiumi, S. and Shibata, K., 1990, Geochronology and cooling history of Mesozoic granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. *Geochemical Journal*, 24, 93-103.
- 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., Cheong, C.H., Kim, S.J. and Yang, S.Y., 1981, Explanatory Text of the Geological Map of Daeyul Sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 29 p.
- Kim, C.-M., Han, R., Jeong, G.Y., Jeong, J.O. and Son, M., 2016, Internal structure and materials of the Yangsan fault, Bogyongsan area, Pohang, South Korea. *Geosciences Journal*, 20, 759-773.
- Kim, J.-S., Kim, K.-K., Jwa, Y.-J. and Son, M., 2012, Cretaceous to Early Tertiary Granites and Magma mixing in South Korea: Their Spatio-temporal Variations and Tectonic Implications (Multiple Slab Window Model). *Journal of the Petrological Society of Korea*, 21, 203-216 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-S., Son, M., Kim, J.-S. and Kim, J., 2005, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Tertiary dike swarm and volcanic rocks, SE Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 14, 93-107 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-C., Jung, S., Yoon, S., Jeong, R.-Y., Song, C.W. and Son, M., 2016, Neotectonic Crustal Deformation and Current Stress Field in the Korean Peninsula and Their Tectonic Implications: A Review. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 25, 169-193 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.J., Lee, H.K. and Itaya, T., 1997, K-Ar ages and Geochemistry for Granitic and Volcanic Rocks in the Euseong and Shinryeong Area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 30, 603-612.
- Kim, S.W., Kwon, S., Ryu, I.-C., Jeong, Y.-J., Choi, S.-J., Kee, W.-S., Yi, K., Lee, Y.S., Kim, B.C. and Park, D.W., 2012, Characteristics of the Early Cretaceous Igneous Activity in the Korean Peninsula and Tectonic Implications. *Journal of Geology*, 120, 625-646.
- Kim, S.W., Lee, J.Y., Kim, Y.K. and Koh, I.S., 1991, Petrology of the Cretaceous volcanic rocks in southern Yuchon minor basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 24-39 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.G., Cha, M.S. and Ko, I.S., 1977, Explanatory Text of the Geological Map of Nakdong Sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 23 p.
- Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 1995, Geologic Map of Korea (1:1,000,000).
- Lee, D.W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. *Island Arc*, 8, 218-231.
- Lee, H.-K. and Kim, H.S., 2005, Comparison of Structural Features of the Fault Zone Developed at Different Protoliths: Crystalline Rocks and Mudrocks. *Journal of Structural Geology*, 27, 2099-2112.
- Lee, J.I., 1992, Mineralogy and petrology of the shallow-depth emplaced granitic rocks distributed in the southern part of the Kyeongsang basin, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 13, 176-199.
- Lee, J.I., Kagami, H. and Nagao, K., 1995, Rb-Sr and K-Ar age determination of the granitic rocks in the Southern part of the Kyeongsang basin, Korea: Implications for cooling history of granitic magmatism during late Cretaceous. *Geochemical Journal*, 29, 363-376.
- Paik, I.S. and Kim, H.J., 2006, Playa lake and sheetflood deposits of the Upper Cretaceous Jindong Formation, Korea: Occurrences and palaeoenvironments. *Sedimentary Geology*, 187, 83-103.
- Ren, J., Tamaki, K., Li, S. and Junxia, Z., 2002, Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344, 175-205.
- Rhee, C.W., Jo, H.R. and Chough, S.K., 1998, An allostratigraphic approach to a non-marine basin: The northwestern part of Cretaceous Kyongsang Basin, SE Korea. *Sedimentology*, 45, 449-472.
- Rochette, P., Jackson, M. and Aubourg, C., 1992, Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Review of Geophysics*, 30, 209-226.
- Shin, S.C. and Nishimura, S., 1993, Thermal and uplift his-

- tories of Mesozoic granites in Southeast Korea: New fission track evidences. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 2, 104-121 (in Korean with English abstract).
- Son, M., 1998, Formation and evolution of the Tertiary Miocene basins in southeastern Korea: Structural and paleomagnetic approaches. Ph.D. Thesis, Pusan National University, Busan, 233 p (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., Kim, J.-S., Hwang, B.-H., Lee, I.-H., Kim, J., Song, C.W. and Kim, I.-S., 2007, Paleogene dyke swarms in the eastern Geoje Island, Korea: Their absolute ages and tectonic implications. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 16, 82-99 (in Korean with English abstract).
- 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., Son, M., Sohn, Y.K., Han, R., Shinn, Y.J. and Kim, J.C., 2015, A study on potential geologic facility sites for carbon dioxide storage in the Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 53-66 (in Korean with English abstract).
- Stacey, F.D., Joplin, G. and Lindsay, J., 1960, Magnetic anisotropy and fabric of some foliated rocks from S.E. Australia. *Geofisica Pura Applicata*, 47, 30-40.
- Twiss, R.J. and Moores, E.M., 2007, *Structural Geology*, 2nd Edition. W.H. Freeman and Company, New York, 736 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).
- Won, C.K., So, C.S. and Yun, S., 1980, Explanatory Text of the Geological Map of Sinryeong Sheet (1:50,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 21 p.
- Woo, S., Han, R., Kim, C.-M., Jeong, G.Y., Jeong, J.O. and Lee, H., 2016, Relation between temporal change of fault rock materials and mechanical properties. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 847-861 (in Korean with English abstract).
- Xu, J.W., Zhu, G., Tong, W.X., Cui, K.R. and Lin, Q., 1987, Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 134, 273-310.
- Yang, I.H. and Jo, H.R., 2011, Depositional processes and model of Giran conglomerate body, northern part of the Gyeongsang Basin. *Journal of the Geological society of Korea*, 47, 569-584 (in Korean with English abstract).
- Yang, W.-H., 2013, Characteristics of strike-slip basin formation and sedimentary fills and the Cretaceous small basins of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 31-45 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.-H., Lee, M.-W., Koh, J.-S., Kim, Y.-L. and Han, M.-K., 2000, Petrology of the Bokyeongsa Volcanics in the northeast Gyeongsang Basin. *Journal of Korean Earth Science Society*, 21, 595-610 (in Korean with English abstract).

Received : March 2, 2017

Revised : March 27, 2017

Accepted : March 29, 2017