

## 경상분지 의성지괴 길안면지역에서 청송화강암의 단열 발달사 및 운동성에 대한 기하학적 해석

강지훈<sup>1,\*</sup> · 류충렬<sup>2</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 지질기반정보연구부

### Geometrical Interpretation on the Development Sequence and the Movement Sense of Fractures in the Cheongsong Granite, Gilan-myeon Area, Uiseong Block of Gyeongsang Basin, Korea

Ji-Hoon Kang<sup>1,\*</sup> and Chung-Ryul Ryoo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong, Gyeongsangbuk-do 760-749, Korea

<sup>2</sup>Geology and Geoinformation Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 305-350, Korea

**요약:** 경상분지 의성지괴의 중앙 북부에 위치하는 안동시 길안면 지역은 선캄브리아기 변성암류, 트라이아스기 청송화강암, 백악기 초 하양층군, 백악기 말-고제3기 화성암류 등으로 구성되어 있다. 이 지역에는 다양한 방향의 단층(남북 내지 북북서 방향의 옥산단층, 북서 방향의 길안단층, 서북서 방향의 황학산단층, 그리고 동서 방향의 임봉산단층)들이 발달하고, 경상분지의 기반암류에 해당하는 청송화강암내에는 다수 단열조의 상대적 시간관계(선후관계 및 공존관계)와 전단단열의 운동감각을 결정하는데 이용되는 기하학적 지시자가 잘 관찰된다. 본 논문은 이들 단열조의 기하학적 특성(연결, 종료, 교차형상 및 절단관계)에 대한 정밀한 분석을 통하여 경상분지 의성지괴 길안면 지역에 발달하는 인장단열의 발달사와 전단단열의 운동성을 연구하였다. 그 결과, 길안면 지역에 발달하는 단열계는 적어도 7회의 변형단계(Dn 이전 단계에서 Dn+5 단계로 명기)를 걸쳐 형성되었고, 단열조의 우세 방향성은 길안면 주변지역에 발달하는 지질도 규모의 단층 우세 방향성과 거의 일치하는 (서)북서, 북북서, 북북동, 동서, 북동 순서로 나타난다. 단열조의 발달사와 운동성을 요약하면 다음과 같다. (1) Dn 이전 단계: 남북 내지 북북서 또는 서북서 내지 동북동 방향의 인장단열 형성기. 이후 응력장 변화와 함께 남북 내지 북북서 방향의 절리조는 좌수향 → 우수향 → 좌수향 전단단열운동으로 그리고 서북서 내지 동북동 방향의 절리조는 (우수향 →) 좌수향 전단단열운동으로 각각 재활동하였다. (2) Dn 단계: 북서 방향의 인장단열 형성기. 이 단계의 절리조는 이후 좌수향 → 우수향 순서의 전단단열운동을 경험한다. (3) Dn+1 단계: 북북동 내지 북동 방향의 인장단열 형성기. 이후, 좌수향 전단단열운동으로 활동하게 된다. (4) Dn+2 단계: 동북동 내지 동서 방향의 인장단열 형성기. (5) Dn+3 단계: 서북서 내지 북서 방향의 인장단열 형성기. (6) Dn+4 단계: 북북서 방향의 인장단열 형성기. 이후, 우수향 전단단열운동으로 활동하였다. (7) Dn+5 단계: 북북동 방향의 인장단열 형성기.

**핵심어:** 경상분지 의성지괴, 길안면 지역, 청송화강암, 인장단열 발달사, 전단단열 운동성

**Abstract:** The Gilan area in the central-northern part of Uiseong Block of Cretaceous Gyeongsang Basin is composed of Precambrian metamorphic rocks, Triassic Cheongsong granite, Early Cretaceous Hayang Group, and Late Cretaceous-Paleocene igneous rocks. In this area, the faults of various directions are developed: Oksan fault of NS-NNW trend, Gilan fault of NW trend, Hwanghaksan fault of WNW trend, and Imbongsan fault of EW trend. Several fracture sets with various geometric indicators, which determine their relative timing (sequence and coexistence relationships) and shear sense, are well observed in the Cheongsong granite, the basement of Gyeongsang Basin. The aim of this study is to determine the development sequence of extension fractures and the movement sense of shear fractures in the Gilan area

\*Corresponding author: Tel. 82-54-820-5474, E-mail. jhkang@andong.ac.kr

on the basis of detailed analysis of their geometric indicators (connection, termination, intersection patterns, and cross-cutting relations). This study suggests that the fracture system of the Gilan area was formed at least through seven different fracturing events, named as Pre-Dn to Dn + 5 phases. The orientations of fracture sets show (W) NW, NNW, NNE, EW, NE in descending order of frequency. The orientation and frequency patterns are concordant with those of faults around and in the Gilan area on a geological map scale. The development sequence and movement sense of fracture sets are summarized as follows. (1) Pre-Dn phase: extension fracturing event of NS~NNW and/or WNW~ENE trends. The joint sets of NS~NNW trend and of WNW~ENE trend underwent the reactivation histories of sinistral → dextral → sinistral shearing and of (dextral →) sinistral shearing with the change of stress field afterward, respectively. (2) Dn phase: that of NW trend. The joint set experienced the reactivations of sinistral → dextral shearing. (3) Dn + 1 phase: that of NNE~NE trend. The joint set was reactivated as a sinistral shear fracture afterward. (4) Dn + 2 phase: that of ENE~EW trend. (5) Dn + 3 phase: that of WNW~NW trend. (6) Dn + 4 phase: that of NNW trend. The joint set underwent a dextral shearing after this. (7) The last Dn + 5 phase: that of NNE trend.

**Key words:** Gyeongsang Basin, Gilan area, Cheongsong granite, development sequence of extension fracture, movement sense of shear fracture

## 서 론

취성 변형작용에 의해 형성되는 단열의 대표적인 구조물로서는 절리와 단층이 있다. 절리는 최소 주응력  $\sigma_3$ 에 수직하고 최대 주응력  $\sigma_1$ 과 중간 주응력  $\sigma_2$ 가 이루는  $\sigma_1\sigma_2$ 면에 평행하게 작용하는 모드-I 열림작용(mode-I opening)에 의해 형성되는 무변위의 인장단열(extension fracture)로서 이들의 방향성은 고응력의 방향성을 복원하는데 중요한 도구로써 널리 이용되고 있다(Hancock *et al.*, 1984; Dyer, 1988; Pollard and Aydin, 1988). 단층은 모드-II 미끄럼작용(mode-II sliding) 내지 모드-III 가위작용(mode-III scissoring)에 의해 변위를 수반하는 전단단열(shear fracture)이다. 이들은 기존에 형성된 모드-I 인장단열이 이후 응력장 변화와 함께 전단운동(모드-II 미끄럼작용 내지 모드-III 가위작용)을 받아 재활동 할 때 형성된다(Pollard and Aydin, 1988; Martel and Boger, 1998). 따라서 모든 단열은 초기에 모드-I 인장단열로서 형성되며, 이후 응력장 변화와 함께 기존에 형성된 인장단열이 모드-II와 모드-III 전단운동을 받아 재활동할 때 전단단열이 형성된다고 할 수 있다(Petit, 1988; Reches and Lockner, 1994).

절리는 또한 단층과의 동시적 시간관계로부터 단층 이전에 형성된 전단층 절리(pre-faulting joint), 단층과 동시기에 형성된 동단층 절리(syn-faulting joint) 또는 단층된 기존 절리(단층절리)(faulted joint), 단층 이후에 형성된 후단층 절리(post-faulting joint) 등으로 구분된다(Peacock, 2001). 이들 절리의 특징적인 주요 기하(Hancock, 1985; Dyer, 1988; Martel *et al.*, 1988; Martel, 1990; Dunne and North, 1990; Cruikshank *et*

*al.*, 1991; Rawnsley *et al.*, 1992; Engelder and Gross, 1993; Renshaw and Pollard, 1995; Cooke, 1997; Martel and Boger, 1998; Rawnsley *et al.*, 1998; Willemsse and Pollard, 1998; Mollema and Antonellini, 1999; Wilkins *et al.*, 2001)는 다수 절리들의 선후 발생관계와 다수 절리들의 형성과 관련된 고응력장의 방향성을 파악하는데 이용되고 있다.

경상분지 의성지괴의 중앙 북부에 위치하는 안동시 길안면 지역의 트라이아스기 청송화강암에는 기존 절리가 전단된 단층절리, 단층절리에 수반되어 나타나는 동단층 절리인 깃털상 절리(pinnate joint), 접경(abutting) 및 사교 절단관계의 절리, 곡선상의 절리 등 단열의 상대적 시간관계(선후관계 및 공존관계)와 운동감각을 결정하는데 널리 이용되는 기하학적 지시자가 잘 관찰된다. 따라서, 본 논문은 이들 단열의 기하학적 특성(연결, 종료, 교차형상 및 절단관계)에 대한 정밀한 분석을 통하여 길안면 지역에 발달하는 인장단열의 발달사와 전단단열의 운동성을 고찰하였다.

## 지질 개요

한반도 동남부에 위치한 경상분지는 북으로부터 영양지괴, 의성지괴, 밀양지괴 등 분지확장과 함께 차별지괴운동과 관련하여 퇴적양상을 서로 달리하는 3개의 지괴로 구분된다(Chang, 1975; 장가홍, 1977)(Fig. 1). 경상분지의 중앙 북부에 위치하는 의성지괴의 지질은 소규모 선클라브리아기 변성암류와 유라기-트라이아스기 화성암류를 기반암으로 하여 이를 부정합으로 피복하는 백악기 경상누층군(서부 영역: 신동층군, 중앙부 영역: 하양층군, 동부 영역: 유천층군)으로 주로 구성되

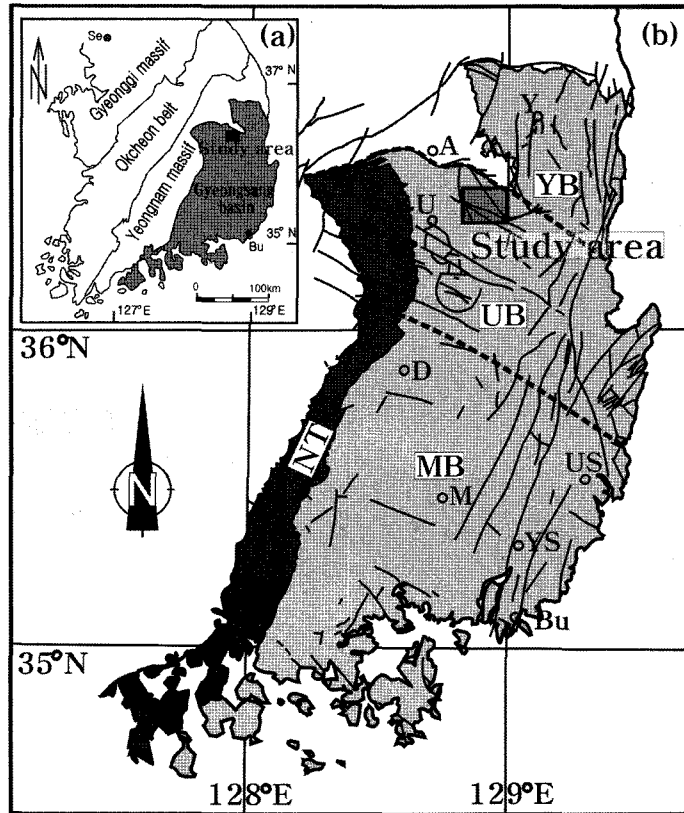


Fig. 1. (a) Index map showing the tectonic locality of study area. (b) Tectonic map showing the subbasin divisions, the distribution of fault systems, and the locality of study area in the Gyeongsang Basin [adapted from Choi *et al.* (1995)]. NT: Nakdong Trough, MB: Milyang Block, UB: Uiseong Block, YB: Yeongyang Block, A: Andong, Bu: Busan, D: Daegu, J: Jinju, M: Milyang, Se: Seoul, U: Uiseong, US: Ulsan, Y: Yeongyang, YS: Yangsan.

어 있으며, 이들을 관입하는 백악기 말-고제3기 화성암류는 중앙부 영역에 분산되어 산출한다(최위찬 외 1995). 동서 방향의 안동단층과 서북서 방향의 팔공산 단층에 의해 그 북부와 남부가 각각 경계 지워지는 의성지괴의 주요 지질구조는 우수향 주향이동성이 우세하게 나타나는 북북동 방향의 양산단층계와 좌수향 주향이동성이 우세하게 나타나는 서북서 방향의 기음단층계 등이 있으며, 이들 단층계는 각각 의성지괴의 동부 영역과 서부 및 중앙부 영역에서 우세하게 발달한다(Fig. 1). 경상분지 의성지괴 북동부에서 이들 단층계의 선후관계 및 고응력장 분석은 이병주와 황재하(1997)에 의해 수행된 바가 있다.

본 연구지역인 길안면 지역은 경상분지 의성지괴의 중앙 북부에 위치한다(Fig. 1). 1: 50,000 천지 지질도폭(장기홍 외, 1978)의 중앙 남부 일부 영역을 점하고 있는 본 연구지역의 지질은 상기된 의성지괴의 주요

층서단위 중에 기반암류에 해당하는 선캠브리아기 변성암류와 트라이아스기 청송화강암, 이를 부정합으로 피복하는 백악기 하양층군, 그리고 이들을 관입하는 백악기 불국사 화성암류 등으로 구성되어 있다(Fig. 2).

선캠브리아기 변성암류는 이질 내지 사질 기원의 변성암류와 호상편마암으로부터 광역변성작용 내지 화강암화작용과 혼성암화작용을 받아 형성된 흑운모 호상편마암과 화강암질 편마암으로 주로 구성되어 있으며, 연구지역의 북동단부와 남동부에서 서북서 방향의 대상 분포를 보이며 소규모 분포한다(Fig. 2). 중립 내지 조립질 흑운모-각섬석 화강암으로 주로 인지되고 홍색장석의 반상조직을 부분적으로 보여주는 청송화강암은 선캠브리아기 변성암류를 관입하며 임봉산을 중심으로 본 역의 중앙부에 광범위하게 분포하고 북동부에 소규모 분포한다(Fig. 2). 본 연구의 주 대상이 되는 청송화강암은 천지도폭에서 슈라기 화강암으로 추정하고

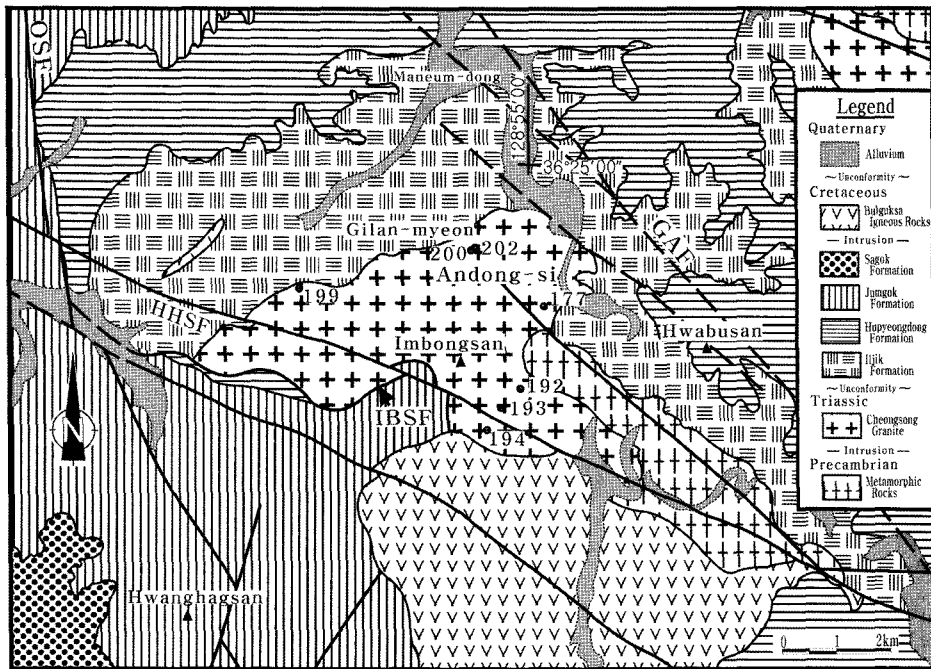


Fig. 2. Geological map of Gilan-myeon area, Andong [modified from Chang *et al.* (1978), Hwang *et al.* (1996), Choi *et al.* (2002)]. Solid circles and numbers: the studied outcrop locations and numbers. GAF: Gilan fault, HHSF: Hwanghaksan fault, IBSF: Imbongsan fault, OSF: Oksan fault.

있으나, 최근의 연대측정 결과에서는 트라이아스기 암체로 보고되고 있다(Cheong *et al.*, 2002; Sagong *et al.*, 2005; 좌용주 외, 2005). 연구지역의 전 역에 광범위하게 분포하는 백악기 하양층군은 주로 쇄설성 퇴적암류와 소량의 응회암류로 구성되어 있으며 하부로 부터 비자색층인 일직층, 자색세일을 협재하며 주로 사암과 잡색역암으로 구성된 후평동층, 실트스톤, 회색세일, 사암으로 구성된 점곡층, 그리고 자색이 우세하며 회녹색과 호층을 이루는 사암과 이질암으로 주로 구성된 사곡층 등으로 구분된다(Fig. 2). 백악기 불국사 화성암류는 석영반암[K-Ar 전암연령:  $57.8 \pm 2.0$  Ma(Choi *et al.*, 2002)]과 암맥류로 구분된다. 하양층군의 퇴적암류를 접촉변성 시키고 있는 석영반암은 연구지역의 남부에 분포한다(Fig. 2). 맥암류는 산성, 중성, 염기성 등 다양한 암종으로 나타나고 기존 구성암류를 지질도에 표시할 수 없는 다양한 규모로 관입하며 산출한다.

연구지역의 주요 지질구조로는 남북 내지 북북서 방향의 옥산단층(Choi *et al.*, 2002), 북서 방향의 길안단층(김남장 외, 1970), 서북서 방향의 황학산단층, 그리고 동서 방향의 임봉산단층 등이 있고, 전자의 두 단층은 연구지역의 북부에서 우세하게 연장성을 갖고 발

달하는 반면에 후자의 두 단층은 연구지역의 남부에서 비교적 우세하게 나타난다(Fig. 2). 연구지역의 서부 주변에 발달하는 옥산단층은 황학산단층에 의해 좌수향 주향이동으로 전위되어 있으며, Choi *et al.*(2002)는 단층플립의 기하학적인 양상과 결정된 이동벡터로부터 길안면 지역에 발달하는 단층의 운동성과 선후관계를 보고한 바가 있다.

### 연구내용 및 방법

길안면 지역에서 경상분지 의성지괴에 발달하는 단열계(fracture system)의 특성을 파악하기 위해 길안, 옥산 단층이 우세하게 발달하고 황학산, 임봉산 단층이 비교적 미약하게 발달하는 청송화강암의 북서부 영역 3개소와 옥산단층을 제외한 길안, 황학산, 임봉산 단층들이 비교적 우세하게 발달하는 남동부 영역 4개소 등 총 7개소의 노두에서 단열들의 우세 방향성, 선후관계, 운동성이 조사 분석되었다(Fig. 2). 이들 우세 방향성은 1개소 노두당 2~5개의 규칙적인 우세한 단열조(fracture set)를 선정하여 각 단열조의 대표적인 방향성을 정밀하게 측정함으로써 조사하였다. 또한, 이들 단

열조의 선후관계 및 운동성은 하상 바닥에 일정한 면적을 갖고 준 수평적으로 노출된 응력-수용-단열구조를 잘 나타내는 노두를 연구노두로 선정하여 이들 노두에 대한 정밀 야외 스케치 작업과 고배율 노두 확대 사진에 대한 실내 정밀 스케치 작업을 통하여 작성된 단열계의 구조도로부터 다수 단열조의 연결, 종료, 교차 형상 및 절단관계 등을 정밀하게 분석하여 조사하였다. 그리고 이들 다수 단열조의 선후관계 및 운동성에 대한 해석은 절리(인장단열)와 단층(전단단열) 사이의 상대적 시간관계에 대한 다음과 같은 기존 연구 결과를 종합적으로 참조하여 수행하였다. 참고로 본 논문에서는 기존 연구결과와 같이 전단단열을 편의상 단층이라 칭하여 기재하고 있으나, 거의 인지할 수 없는 변위를 수반하는 전단단열은 인지할 수 있는 변위를 수반하는 단층과 엄밀한 의미에서 다르다.

### 전단층 절리

(1) 전단운동 동안 열림작용에 의해 물질이 첨가된 광물맥. (2) 전단작용을 받아 전단된 기존 절리. (3) 압력 용해작용으로 형성된 톱니상 절리(styrolitic joint). (4) 전단작용과 압축작용을 받아 형성된 사교성 톱니상 절리(slickolite)(Ramsay and Huber, 1987, p.658; Peacock, 2001, Fig. 2).

### 동단층 절리

(1) 단층절리의 선단부 내지 그 주변부에서 형성되어 단층절리의 분절들을 연결하는 깃털상 절리(Cruikshank *et al.*, 1991; Cooke, 1997; Martel and Boger, 1998; Willemse and Pollard, 1998; Peacock, 2001, Figs. 1, 3). (2) 단층과 기하학적, 운동학적인 상호 관련성을 보이는 안행상 절리(en-echelon joint)(Mollema and Antonellini, 1999; Peacock, 2001, Fig. 6). (3) 깃털상 절리의 점차적인 연결과 함께 연결된 기존 절리(전단층 절리)의 전단운동에 의해 발달하는 단층절리(동단층 절리)(Martel *et al.*, 1988, Fig. 11b; Martel, 1990, Fig. 2).

### 동단층 절리 또는 후단층 절리

(1) 단층에 의해 전위됨이 없이 기존 단층을 절단하거나 기존 단층에 접경하는 절리(후단층 절리)(Hancock, 1985; Dunne and North, 1990; Rawnsley *et al.*, 1992; Renshaw and Pollard, 1995; Peacock, 2001, Figs. 7, 8). (2) 단층 부근에서의 응력장의 교란으로 단층을 향해 곡선으로 굴곡하여 90°로 접경하는 절리(동단층 절리 또는 후단층 절리)(Dyer, 1988; Engelder

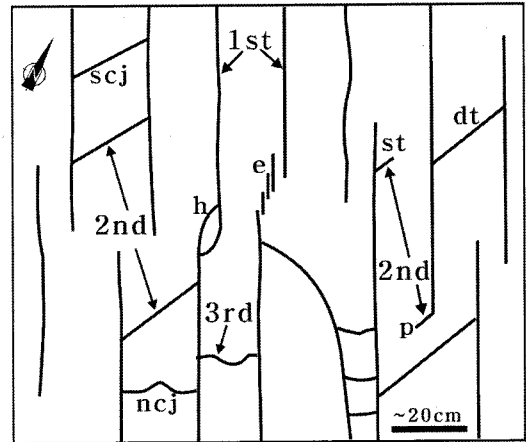


Fig. 3. Sketch of joint termination and intersection geometries (revision from Eyal *et al.*, 2001, Fig. 5). Numbers refer to relative timing of fracture sets. Labeled geometries are systematic cross-joint (scj), non-systematic cross-joints (ncj), en-echelon (e), hooking (h), pin-nate (p), single termination (st), and double termination (dt).

and Gross, 1993; Rawnsley *et al.*, 1998; Peacock, 2001, Fig. 9).

상기된 단열조의 연결, 종료, 교차 형상 및 절단관계 등으로부터 결정될 수 있는 다수 단열조의 상대적인 발생관계를 간단한 모식도로 작성하여 나타내면 Fig. 3과 같다.

### 단열계의 특성

길안면 지역 청송화강암의 단열계 특성은 영역별 상세한 단층의 영향력을 고려하여 남동부 영역(노두번호: 177, 192, 193, 194)과 북서부 영역(노두번호: 199, 200, 202)으로 구분하여 분석하였다(Fig. 2). 그 결과, 청송화강암의 단열계는 적어도 6-7회의 변형단계를 걸쳐 형성되었음이 인지된다. 이들을 편의상 발생순서에 따라  $D_n$  이전,  $D_n$ ,  $D_{n+1}$ ,  $D_{n+2}$ ,  $D_{n+3}$ ,  $D_{n+4}$ ,  $D_{n+5}$  단계 등으로 표기하고, 남동부 영역 No. 192와 북서부 영역 No. 202의 노두 스케치를 중심으로 영역별 단열조의 발달사 및 운동성을 기재하면 다음과 같다.

### 단열조의 방향성

청송화강암에서 측정된 전체 단열조는 해당 주향에서 50° 이상의 고각을 보인다(Fig. 4a, 4b). 출현빈도가 가장 높은 I 그룹은 N40°-70°W 범위의 (서)북서 단열조로서 가장 우세한 방향은 N40°-50°W로 나타난다. II

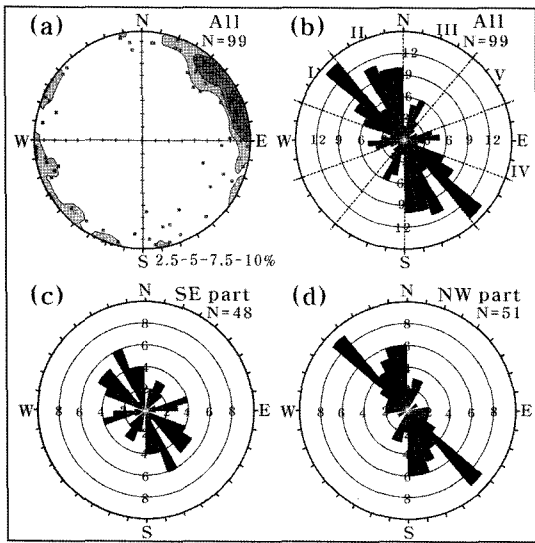


Fig. 4. (a) Stereogram (density map) of poles (lower-hemisphere equal-area projection) and (b) rose diagram to all fracture sets measured in the Cheongsong granite, Gilan-myeon area. (c-d) Rose diagrams to fracture sets in its southeastern (outcrop numbers: 177, 192, 193, 194) and its northwestern (outcrop numbers: 199, 200, 202) parts.

그룹은  $N00^{\circ}40'W$  범위의 북북서 단열조로 나타나고, III 그룹은  $N00^{\circ}40'E$  범위의 북북동 단열조로 나타나며, IV 그룹은  $N70^{\circ}E-EW-N70^{\circ}W$  범위의 동서 단열조로 나타난다. V 그룹은  $N40^{\circ}70'E$  범위의 북동 단열조로서 5개의 그룹 중에서 가장 낮은 출현 빈도를 보인다.

청송화강암의 북서부 영역에서 단열조의 방향성은 북서 방향과 남북 방향이 우세하게 나타나고 서북서 방향과 동서 방향의 단열조가 미약하게 나타나는 반면에 남동부 영역에서의 이들 방향은 비교적 고른 분포를 보이며 청송화강암의 영역별 단열조의 방향성은 남동부에서 북서부 영역으로 갈수록 남북 방향과 북서 방향의 단열조가 상대적으로 우세한 경향을 보인다(Fig. 4c, 4d).

### 단열조의 발달사 및 운동성

#### 남동부 영역

**Dn 이전단계:** 초기의 단열조는 가장 길고 연속성이 탁월하고, 후기에 형성된 단열조는 기존의 단열조에 접경하기 때문에 일반적으로 짧게 나타난다(Rawnsley et al., 1998). 남동부 영역에서 이러한 특성을 갖는 초기 단열조는 동북동 내지 서북서 방향의 단열조로

인지된다(Fig. 5에서 I 인장단열). 192번과 193번 노두에서 첫 번째 형성된 인장단열(I 단계)은 Dn 이전단계의 단열조로 인지되고, 177번과 194번 노두에서 Dn 이전단계의 단열조는 인지되지 않는다(Fig. 6).

**Dn 단계:** 북서 방향의 인장단열 형성기로 인지된다(Fig. 5에서 II). 북서 방향의 단열조는 연장성이 우세하며, 동북동 방향의 단열조(Dn 이전단계)에 의해 절단되고(Fig. 5a), 비교적 연장성이 우세한 북북동 방향의 단열조를 절단시킨다(Fig. 5b, 5c). 177번과 194번 노두에서 I 단계와 192번에서 II 단계의 인장절리는 Dn 단계의 단열조에 해당하고, 193번 노두에서는 인지되지 않는다(Fig. 6).

**Dn + 1 단계:** 비교적 연장성 우세한 북북동 방향의 인장단열 형성기로 인지된다(Fig. 5에서 III). 대부분 북북동 방향의 단열조는 Dn 단계에서 형성된 북서 방향의 인장단열 사이에서 고각 이중 종료형(dt) 사교절리(scj)로 발달한다(Figs. 3, 5b). 192번 노두에서 III 단계와 193번과 194번 노두에서 II 단계의 인장절리는 Dn + 1 단계의 단열조에 해당하고, 177번 노두에서는 인지되지 않는다(Fig. 6).

**Dn + 2 단계:** (동)북동 방향의 인장단열 형성기로 나타난다(Fig. 5에서 IV). (동)북동 방향의 단열조는 Dn 이전 단계에 형성된 동북동 방향의 인장단열 좌측부에 주로 저각 단일 종료형(st) 사교절리로 접경하고, Dn 단계에 형성된 북서 방향의 단열조에 의해 그 연장성이 단절된다(Figs. 3, 5a). 이는 (동)북동 방향의 단열조는 동북동 방향의 인장단열(전단층 절리)이 동서 방향의 압축응력(Dn + 2)에 의해 좌수향 전단단열(Fig. 5a에 (IV)로 표기)로 활동할 때 모드-I 열림작용으로 형성된 인장단열(동단층 절리)이었음을 의미한다. Dn + 2 단계의 단열조는 192번 노두에서 IV 단계와 193번과 194번 노두에서 III 단계의 인장절리로 인지되고, 177번 노두에서는 인지되지 않는다(Fig. 6).

**Dn + 3 단계:** 서북서 방향의 인장단열 형성기로 인지된다(Fig. 5에서 V). 서북서 방향의 단열조는 주로 Dn 단계에 형성된 북서 방향의 인장단열 선단 좌측부에 깃털상(p) 내지 이들 인장단열을 연결하는 갈고리형(h) 사교절리로 비교적 길이가 짧게 나타난다(Figs. 3, 5b, 5c). 이는, 서북서 방향의 단열조는 북서 방향의 전단층 절리가 서북서 방향의 압축응력(Dn + 3)에 의해 좌수향 전단단열(Fig. 5b, 5c에 (V)로 활동할 때 전

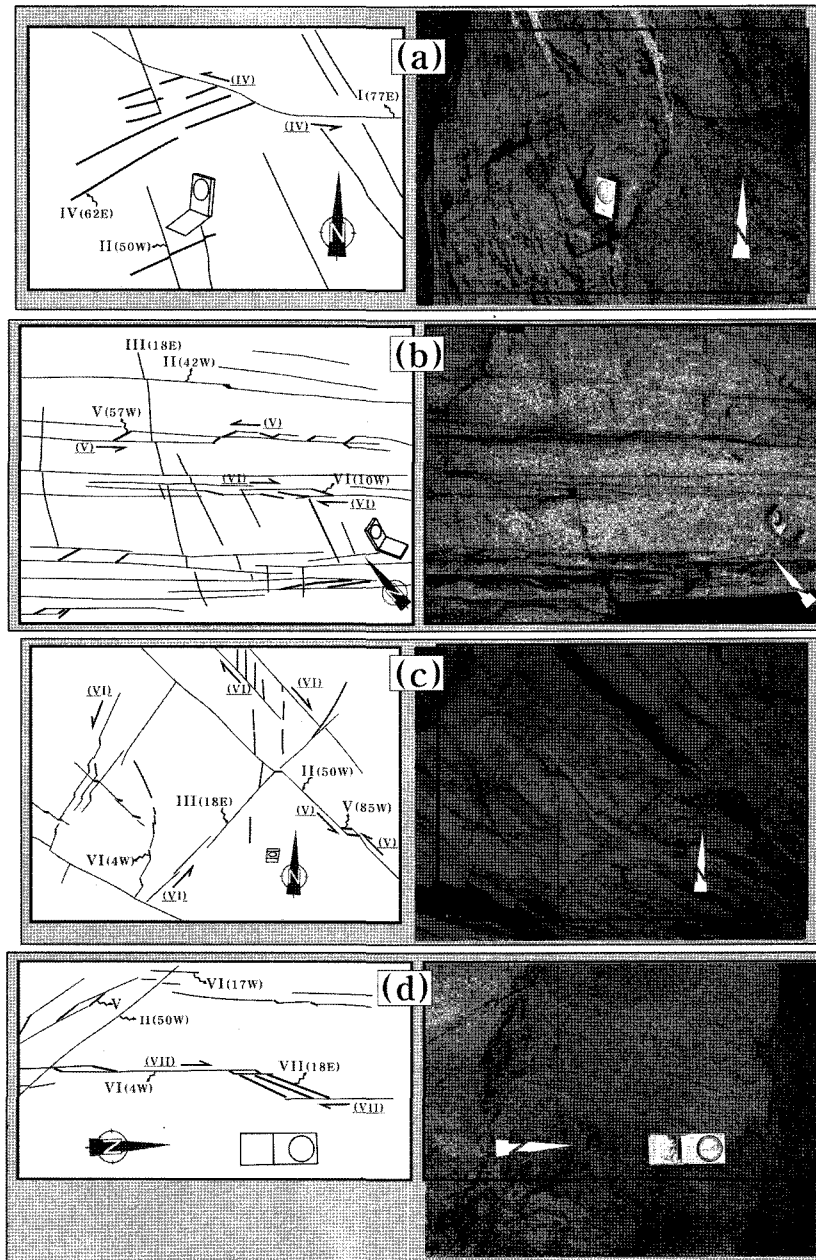


Fig. 5. Outcrop sketches and photographs of No. 192 exposed in the SE part of Cheongsong granite, Gilan-myeon area. Numbers and arrow marks in outcrop sketches represent the orientation (e.g. 62E) and the relative timing of joints (e.g. I, II) and shear fractures (e.g. IV, V), and the sense of shear fracturing determined from the geometries of fracture termination, intersection, and cutting-relationship.

단단열의 선단 좌측부에 깃털상 내지 갈고리형으로 형성된 모드-I 동단층 인장절리이었음을 의미한다. Dn+3 단계의 단열조는 192번 노두에서 V 단계와 193번과

194번 노두에서 IV 단계의 인장절리로 인지되고, 177번 노두에서는 인지되지 않는다(Fig. 6).

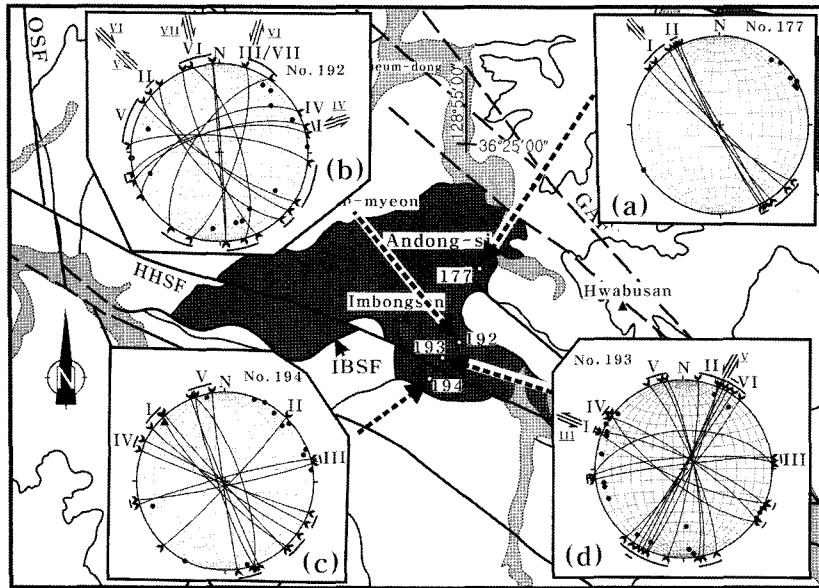


Fig. 6. Lower-hemisphere equal-area projections, the relative timing (I, II, ...), the shear sense of fracture sets measured in each outcrop of the SE part of Cheongsong granite, Gilan-myeon area.

**Dn + 4 단계:** 북북서 방향의 인장단열 형성기로 나타난다(Fig. 5에서 VI). 북북서 방향의 단열조는 비교적 길이가 짧게 나타나고, Dn 단계에 형성된 북서 방향의 단열조 선단 우측부에 깃털상 내지 이들 단열조 사이에 단일 내지 이중 종료형과 갈고리형의 사교절리로 발달한다(Fig. 5b, 5c). 이는, 북북서 방향의 단열조는 북서 방향의 전단층 절리가 북북서 방향의 압축응력(Dn + 4)에 의해 우수향 전단단열[Fig. 5b, 5c에 (VI)]로 재활동할 때 형성된 동단층 절리이었음을 지시한다. 따라서, 북서 방향의 인장단열(Dn 단계)은 이후 응력장 변화와 함께 좌수향(Dn + 3) → 우수향(Dn + 4)으로 재활동하였음을 지시한다.

또한, 북북서 방향의 단열조는 Dn + 1 단계에 형성된 북북동 방향의 단열조 선단 좌측부에 깃털상 내지 갈고리형의 사교절리로 발달하는데(Fig. 5c), 이는, 북북동 방향의 인장단열은 역시 이후에 발생된 북북서 방향의 압축응력(Dn + 4)에 의해 좌수향 전단단열로 활동하였으며, 북북서 방향의 단열조는 북서 방향(Dn)과 북북동(Dn + 1) 방향의 전단층 절리가 북북서 방향의 압축응력(Dn + 4)에 의해 공액성 전단단열로 활동할 때 형성된 동단층 절리이었음을 지시한다. Dn + 4 단계의 단열조는 192년 노두에서 VI 단계와 193년과 194년 노두에서 V 단계의 인장절리로, 177년 노두에서는 II 단계의 인장절리로 각각 인지된다(Fig. 6).

**Dn + 5 단계:** 북북동 방향의 인장단열 형성기로 나타난다(Fig. 5에서 VII). Dn + 5 단계의 단열조는 동일 방향의 Dn + 1 단계의 단열조에 비해 길이가 짧게 나타나고, 주로 Dn + 4 단계에 형성된 북북서 방향의 단열조 선단 우측부에 깃털상 내지 갈고리형의 사교절리로 발달한다(Fig. 5d). 이는, 북북동 방향의 단열조는 북북서 방향의 전단층 절리가 북북동 방향의 압축응력(Dn + 5)에 의해 우수향 전단단열[Fig. 5c에 (VII)]로 활동할 때 형성된 모드-I 동단층 절리이었음을 지시한다. Dn + 5 단계의 단열조는 192년 노두에서 VII 단계와 193년 노두에서 VI 단계의 인장절리로 인지되고, 177년과 194년 노두에서는 인지되지 않는다(Fig. 6).

이상, 언급된 단열조의 기하학적인 특성으로부터 청송화강암 남동부 영역의 인장단열조의 발달사는 동북동 또는 서북서 → 북서 → 북북동 → 동북동 내지 동서 → 서북서 → 북북서 → 북북동 순으로 요약되고(Fig. 7a), 이후 응력장의 변화와 함께 동북동, 서북서, 북북동 방향의 인장단열조는 좌수향 전단단열운동, 북북서 방향의 인장단열조는 우수향 전단단열운동, 그리고 북서 방향 인장단열조는 좌수향 → 우수향 전단단열운동 등으로 각각 (재)활동하였음을 알 수 있다(Fig. 7b).

**북서부 영역**

**Dn 이전단계:** 청송화강암의 북서부 영역에서 가장



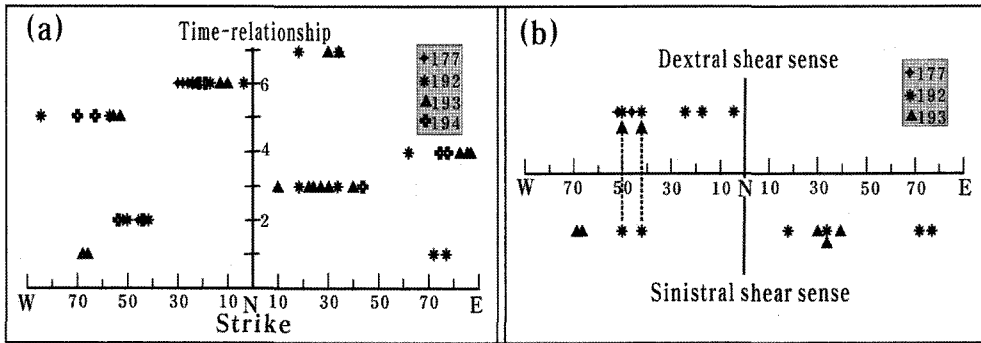


Fig. 7. Plots of relative timing (a) and shear sense (b) versus orientations of all fracture sets studied in the SE part of Cheongsong granite, Gilan-myeon area. Orientations of dotted arrows: movement sequence of reactivated shear fracture sets.

연장성이 탁월한 최고기 단열조는 남북 내지 북북서 방향과 동서 방향의 단열조로 인지되고, 이들은 이후의 모든 단열조의 연장성을 규제한다(Fig. 7에서 I). 이들 사이의 선후관계는 명확하지 않으나 대체로 남북 방향의 단열조가 동서 방향의 연장성을 단절시킴을 고려해 볼 때(Fig. 8a, 8b), 남북, 동서 방향의 순서로 발달하였음이 추정된다. Dn 이전단계의 단열조는 200번과 202번 노두에서 I 단계의 인장단열로 인지된다(Fig. 9).

**Dn 단계:** 비교적 연장성이 우세한 북서 방향의 인장단열 형성기로 인지된다(Fig. 8에서 II). 북서 방향의 단열조는 Dn 이전단계에 형성된 남북 방향과 동서 방향의 단열조 선단부에 깃털상(Fig. 8b) 내지 이들 단열조 사이에 단일 내지 이중 종료형(Fig. 8b-8e)의 사교절리를 이루며 이들과 저각으로 접경한다. 이는, 북서 방향의 단열조는 남북 방향과 동서 방향의 전단층 절리가 북서 방향의 압축응력(Dn)에 의해 각각 좌수향과 우수향으로 공액성 전단단열운동을 할 때 형성된 모드-I 동단층 절리이었음을 지시한다(Fig. 8b, 8e). Dn 단계는 200번과 202번 노두에서 II 단계의 인장단열로 인지된다(Fig. 9).

**Dn + 1 단계:** 북북동 방향의 인장단열 형성기로 인지된다(Fig. 8에서 III). Fig. 8b와 8c에서는 Dn과 Dn + 1 단열조 사이의 절단 및 선후 관계가 관찰되고, 북북동 방향의 단열조(Dn + 1 단계의 모드-I 동단층 절리)는 Dn 이전단계에 형성된 남북 방향의 인장단열(Dn + 1 단계의 우수향 전단단열) 사이에서 단일 내지 이중 종료형의 사교절리를 이루며 저각으로 접경하여 나타난다. 이는, Dn 단계에서 좌수향 전단단열로 활동

한 남북 방향의 인장단열은 Dn + 1 단계에서 우수향 전단단열로 재활용하였음을 지시한다. Dn + 1 단계는 202번 노두에서 III 단계의 인장단열로 인지되나, 200번 노두에서는 인지되지 않는다(Fig. 9).

**Dn + 2 단계:** 동북동 내지 동서 방향의 인장단열 형성기로 나타난다(Fig. 8에서 IV). Dn + 1과 Dn + 2 단열조 사이의 절단 및 선후 관계는 Fig. 8c에서 관찰된다. 동북동 방향의 단열조는 이전에 형성된 북서 방향과 북북동 방향의 단열조와 고각 내지 중각으로 접경한다. 또한, 동북동 방향의 단열조(Dn + 2 단계의 모드-I 동단층 절리)는 Dn 이전단계에 형성된 동서 방향의 단열조(Dn + 2 단계의 좌수향 전단단열)의 선단 좌측부에 깃털상 내지 저각의 단일 종료형 사교절리로 발달한다(Fig. 8e). 이는, Dn 이전단계에 형성된 동서 방향의 인장단열은 Dn 단계에서 우수향 전단단열, Dn + 2 단계에서는 좌수향 전단단열로 각각 활동하였음을 지시한다. Dn + 2 단계는 200번에서 III 단계와 202번 노두에서 IV 단계의 인장단열로 인지된다(Fig. 9).

**Dn + 3 단계:** 서북서 방향의 인장단열 형성기로 인지된다(Fig. 8에서 V). 서북서 방향의 단열조는 동북동 방향의 단열조(Dn + 2)에 고각으로 접경한다(Fig. 8e). 또한, 서북서 방향의 단열조(Dn + 3 단계의 모드-I 동단층 절리)는 Dn 단계에 형성된 북서 방향의 인장단열(Dn + 3 단계의 좌수향 전단단열) 사이에서 단일 내지 이중 종료형의 저각 사교절리로 비교적 길이가 짧게 산출한다(Fig. 8d). Dn + 3 단계는 200번에서 IV 단계와 202번 노두에서 V 단계의 인장단열로 인지된다(Fig. 8).

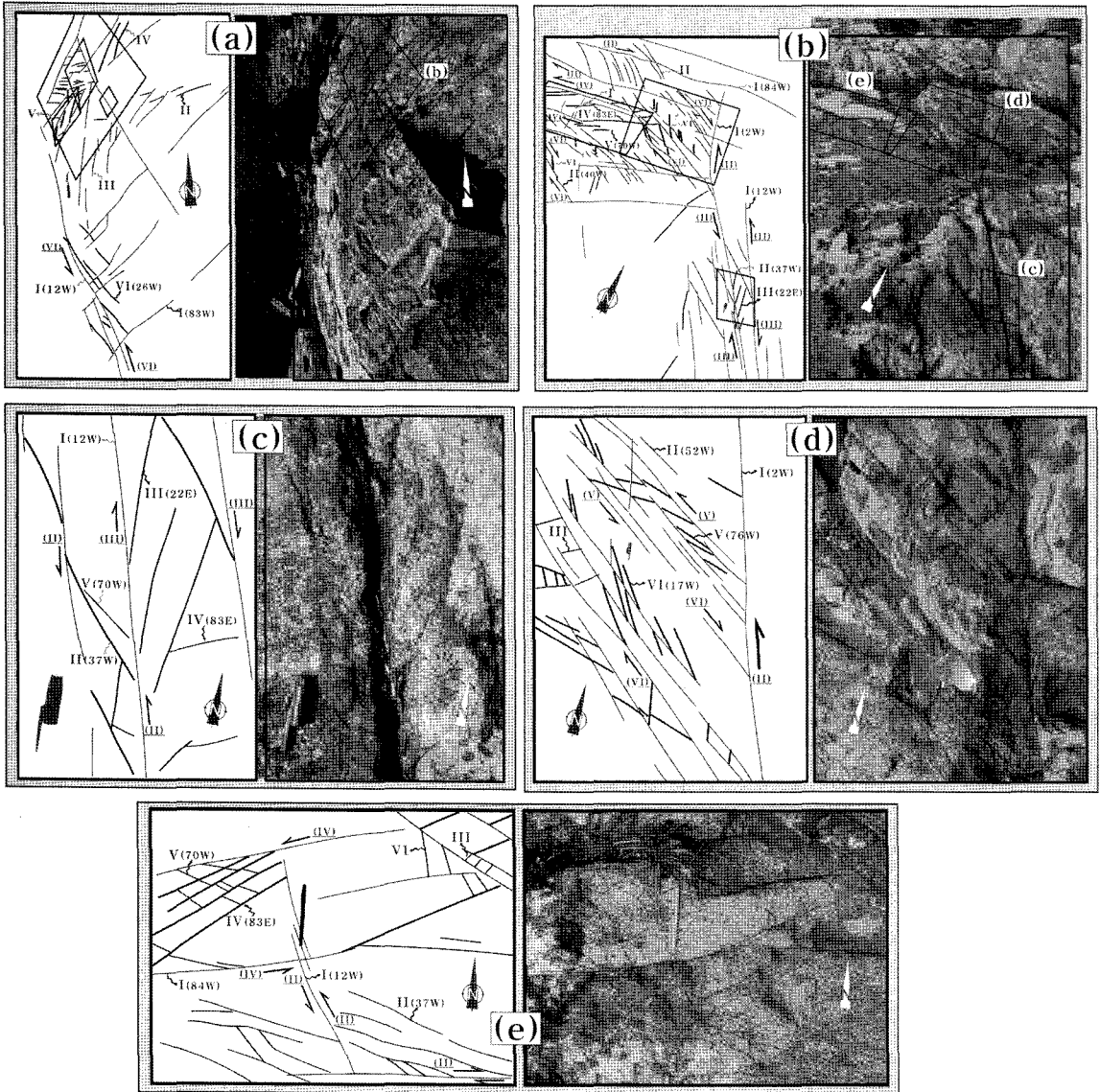


Fig. 8. Outcrop sketches and photographs of No. 202 exposed in the NW part of Cheongsong granite, Gilan-myeon area. Numbers and arrow marks in outcrop sketches refer to the orientation (e.g. 12W) and the relative timing of joints (e.g. I, II) and shear fractures (e.g. II, III), and the sense of shear fracturing.

**Dn + 4 단계:** 북북서 방향의 인장단열 형성기로 나타난다(Fig. 8에서 VI). Dn + 3과 Dn + 4 단열조 사이의 절단 및 선후 관계는 Fig. 8d의 중앙 좌측부에서 관찰된다. 대체로 길이가 짧게 나타나는 북북서 방향의 단열조는 연장성이 있는 남북 방향의 단열조(Dn 이전) 좌측부(Fig. 8a) 또는 북서 방향의 단열조(Dn) 우측부(Fig. 8d)에서 저각의 단일 내지 이중 종료형의 사교절리로 산출한다. 이는, 북북서 방향의 단열조는 남북 방

향(Dn 이전)과 북서 방향(Dn)의 인장단열들이 북북서 방향의 압축응력(Dn + 4)에 의해 각각 좌수향과 우수향 공액성 전단단열로 재활동할 때 모드-I 열림작용에 의해 형성된 인장단열이었음을 지시한다. 그리고, 지금까지의 북서부 영역의 단열사로부터 남북 방향의 인장단열(Dn 이전)은 좌수향(Dn) → 우수향(Dn + 1) → 좌수향(Dn + 4) 전단단열로 각각 활동하였으며, 또한 북서 방향의 인장단열(Dn)은 좌수향(Dn + 3) → 우수향(Dn + 4)

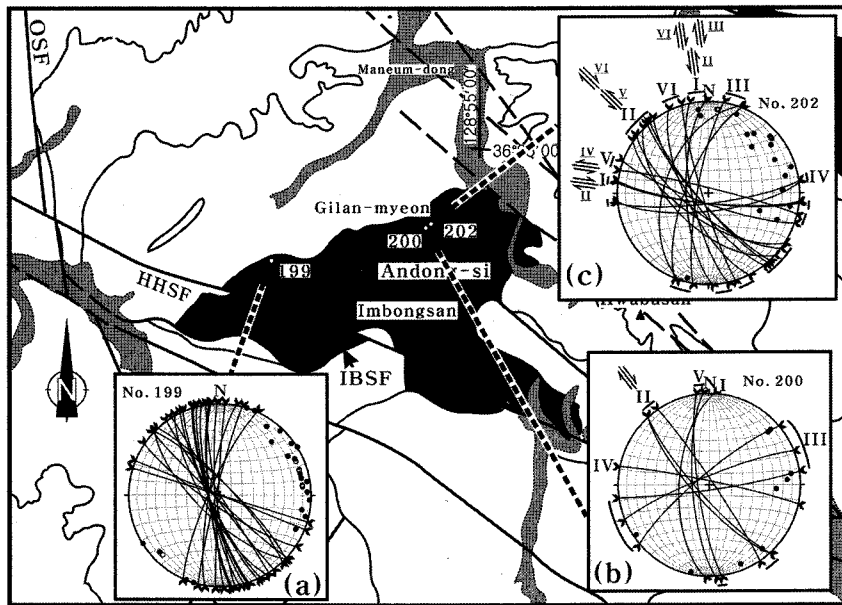


Fig. 9. Lower-hemisphere equal-area projections, the relative timing (I, II, ...), the shear sense of fracture sets measured in each outcrop of the NW part of Cheongsong granite, Gilan-myeon area.

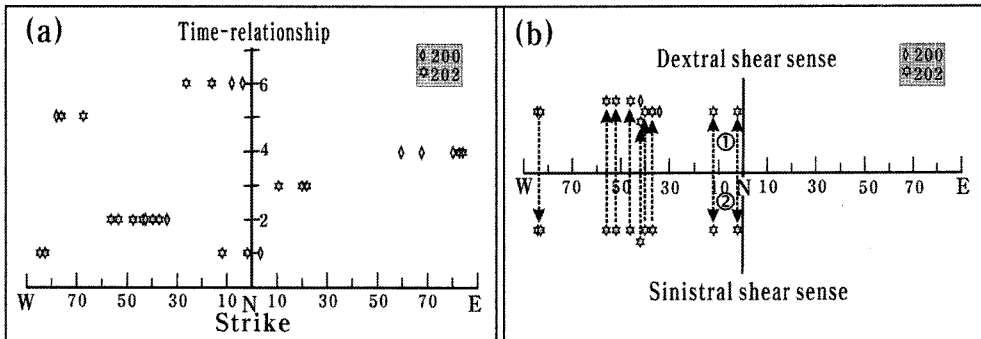


Fig. 10. Plots of relative timing (a) and shear sense (b) versus orientations of all fracture sets studied in the NW part of Cheongsong granite, Gilan-myeon area. Orientations of dotted arrows and circled numbers: movement sequence of reactivated shear fracture sets.

전단단열로 각각 활동하였음을 알 수 있다. Dn+4 단계는 200번에서 V 단계와 202번 노두에서 VI 단계의 인장단열로 인지된다(Fig. 9).

또한, 지금까지 언급된 단열조의 기하학적인 특성으로부터 청송화강암 북서부 영역에서 인장단열조의 발달사는 남북 내지 북북서 또는 (→) 동서 → 북서 → 북북동 → 동북동 → 서북서 → 북북서 순으로 요약되고 (Fig. 10a), 이들 인장단열조의 운동성은 북북서 방향 인장단열조는 좌수향 → 우수향 → 좌수향 전단단열운동, 동서 방향 인장단열조는 우수향 → 좌수향 전단단

열운동, 북서 방향 인장단열조는 좌수향 → 우수향 전단단열운동 등으로 재활동 하였음이 인지된다(Fig. 10b).

### 고찰

경상분지 의성지괴 길안면 지역에 분포하는 청송화강암에서는 북서 방향과 북북서 방향의 단열조가 우세하게 나타나는 반면에 북동 방향의 단열조는 아주 미약하게 발달하는데(Fig. 4a, 4b), 이러한 단열조의 방향성은 길안면 주변지역에서 발달하는 지질도 규모의 단

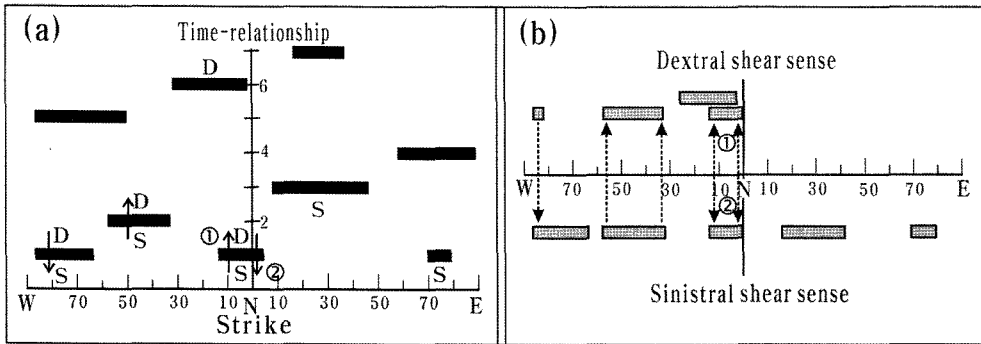


Fig. 11. Schematic diagrams showing the relative timing (a) and the shear sense (b) of all fracture sets studied in the Cheongsong granite, Gilan-myeon area. Arrow orientation and circled numbers: movement sequence of reactivated shear fracture sets. D: Dextral shear sense, S: Sinistral shear sense.

층 방향성과 거의 일치한다(Figs. 1, 2). 또한, 북서 방향의 길안단층과 남북 방향의 옥산단층이 우세하게 발달하고 서북서 방향의 황학산단층과 동서 방향의 임봉산단층이 비교적 미약하게 발달하는 청송화강암의 북서부 영역에서는 이들 단층의 발달 정도와 거의 일치하는 북서 방향과 남북 방향의 단열조가 우세하게 나타나고 서북서 방향과 동서 방향의 단열조가 미약하게 발달한다(Figs. 1, 2, 4). 반면에, 옥산단층을 제외한 길안, 황학산, 임봉산 단층들이 비교적 우세하게 발달하는 남동부 영역에서는 이들 방향의 출현빈도는 비교적 고른 분포를 보인다. 이는, 청송화강암의 영역별 단열조의 우세 방향성은 연구지역의 영역별 단층의 분포 및 발달 정도와 밀접한 관련이 있음을 의미한다.

단열조의 기하학적인 특성으로부터 인지된 청송화강암 남동부 영역의 인장단열조 발달사는 북서부 영역에서의 인장단열조 발달사와 거의 일치하고(Figs. 7a, 10a), 이후의 응력장 변화에 수반되어 나타나는 남동부 영역의 인장단열조의 운동성은 북서부 영역에서의 인장단열조의 운동성(Fig. 10b)과 일치하거나 상호 보완적인 결과를 보여준다. 따라서, 이들 관계를 종합하여 길안면 지역 청송화강암에 발달하는 인장단열조의 발달사와 운동성을 고찰해 보면, 인장단열조의 발달사는 남북 내지 북북서 또는 (→) 서북서 내지 동북동 → 북서 → 북북동 내지 북동 → 동북동 내지 동서 → 서북서 내지 북서 → 북북서 → 북북동 방향 순으로 인지되고(Fig. 11a), 이들 인장단열조의 운동성은 남북 내지 북북서 방향의 인장단열조; 좌수향 → 우수향 → 좌수향 (→ 우수향) 전단단열운동, 서북서 내지 동북동 방향; (우수향 →) 좌수향 전단단열운동, 북서 방향; 좌수향 → 우수향 전단단열운동, 북북동 내지 북동 방향; 좌수

향 전단단열운동으로 각각 재활동 하였음을 알 수 있다(Fig. 11b).

경상분지 의성지괴 및 길안지역의 단층 운동사는 지금까지 몇몇 연구자에 의해 연구된 바가 있다. 이병주와 황재하(1997)은 백악기 말-제3기 말 동안에 남북, 동서, 북동 순서의 주응력장 방향성 변화를 설정하고, 동서 방향의 개방습곡작용, 서북서 방향 가음단층계의 좌수향 주향이동운동과 남북 방향의 개방습곡작용, 북북동 방향 양산단층계의 우수향 주향이동운동 등의 지질구조 및 단층 발달사를 보고한 바가 있다. 한편, 동서 방향의 안동단층계 운동사 연구를 통하여 Choi *et al.*(2002)는 연구지역의 단층 운동사를 백악기 초(T1 후기)-동서 압축에 의한 황학산단층의 초기 좌수향 주향이동운동, 백악기 말(T2 후기)-남북 압축에 의한 동서 방향의 습곡작용, 백악기와 고제3기 경계부근(T3)-북서 압축에 의한 임봉산단층의 우수향 성분의 역이동운동과 길안단층의 우수향 주향이동운동, 올리고세-중기 마이오세(T4)-북동 압축에 의한 양산단층계의 우수향 주향이동운동, 후기 마이오세-플리오세(T6)-동서 압축에 의한 황학산단층의 후기 좌수향 주향이동과 남북 방향의 습곡작용 등으로 제안한 바가 있다.

지금까지의 본 연구결과에 의하면, 청송화강암에 발달하는 단열조의 방향성이 길안면 주변지역에서 발달하는 지질도 규모의 단층 방향성과 거의 일치하고(Figs. 1, 2), 청송화강암에서 측정된 영역별 단열조의 우세 방향성이 연구지역의 영역별 단층의 분포 및 발달 정도와 밀접한 관련이 있음(Figs. 1, 2, 4)을 고려해 볼 때, 단열조의 발달사 및 운동성은 역시 길안면과 주변지역에 발달하는 지질도 규모의 단층 발달사 및 운동성과 밀접한 상관관계를 보이며 다음과 같이 고찰된

다. 남북 내지 북북서 방향의 옥산단층; 좌수향 → 우수향 → 좌수향 (→ 우수향) 단층운동, 서북서 방향의 황학산단층과 동서 방향의 임봉산단층; (우수향 →) 좌수향 단층운동, 북서 방향의 길안단층; 좌수향 → 우수향 단층운동, 그 외 북북동 내지 북동 방향의 좌수향 단층운동. 그러나, 이러한 상관관계 설정을 위해서는 전단단열이 동일 방향의 단층으로 발전하기 위한 변형 조건의 충족 여부에 대한 연구, 단층 선후관계 및 운동성에 대한 야외 단층자료 연구, 단층 발달사와 운동성에 대한 기존 연구결과 등을 추후 종합적으로 검토해 볼 필요가 있다.

## 결 론

경상분지 의성지괴 길안면 지역의 트라이아스기 청송화강암에 발달하는 단열조의 방향성과 기하학적 특성(연결, 종료, 상호 교차형상 및 상호 절단관계)을 정밀하게 분석한 결과, 단열조의 우세 방향성, 발달사, 운동성에 대하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

1. 단열조의 방향성은 (서)북서, 북북서, 북북동, 동서, 북동 방향의 순서로 우세하게 나타난다. 이러한 단열조의 우세 방향성은 길안면 지역과 그 주변지역에서 발달하는 지질도 규모의 단층 우세 방향성과 거의 일치한다.

2. 단열계는 적어도 7회의 변형단계를 걸쳐 형성되었고, 인장단열조는 (1) 남북 내지 북북서 또는 (→) 서북서 내지 동북동 → (2) 북서 → (3) 북북동 내지 북동 → (4) 동북동 내지 동서 → (5) 서북서 내지 북서 → (6) 북북서 → (7) 북북동 방향 등의 순서로 발달하였다.

3. 이후 응력장 변화와 함께, 남북 내지 북북서 방향의 인장단열조는 좌수향 → 우수향 → 좌수향 (→ 우수향) 전단단열운동, 서북서 내지 동북동 방향은 (우수향 →) 좌수향, 북서 방향은 좌수향 → 우수향, 북북동 내지 북동 방향의 인장단열조는 좌수향 전단단열운동으로 각각 (재)활동하였다.

4. 단열조의 발달사 및 운동성과 밀접한 상관관계를 가질 것으로 판단되나, 이러한 상관관계 설정을 위해서는 전단단열의 단층으로 발전 여부, 단층 선후관계에 대한 야외 단층자료 연구, 단층 발달사와 운동성에 대한 기존 연구결과 등을 추후 종합적으로 검토해 볼 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2003년도 안동대학교 학술연구지원사업

에 의하여 연구되었다. 심사과정에 있어서 유익한 지적과 검토 의견을 해주신 부산대학교 손문 교수와 익명의 심사위원님께 감사드린다. 실내작업에 있어서는 안동대학교 구조지질학 실험실 구성원의 도움이 있었다. 이에 감사한다.

## 참고문헌

- 김남장, 강필중, 이흥규, 1970, 한국지질도(1:50,000), 중평동 지질도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 19p.
- 장기홍, 1977, 경상분지 상부중생세의 층서퇴적 및 지구조. 지질학회지, 13, 76-90.
- 장기홍, 고인석, 박희인, 지정만, 김항목, 1978, 한국지질도(1:50,000), 천지 지질도폭 및 설명서. 자원개발연구소, 20p.
- 이병주, 황재하, 1997, 경상분지 북동부에서의 가음단층과 양산단층의 관계. 지질학회지, 33, 1-8.
- 좌용주, 김종선, 김건기, 2005, 우리나라 트라이아스기 화강암의 스위트/슈퍼스워드 분류. 암석학회지, 14, 226-236.
- 최위찬, 김규봉, 홍승호, 이병주, 황재하, 박기화, 황상기, 최범영, 송교영, 진명식, 1995, 한국지질도 1:1,000,000. 한국자원연구소, 성지문화사.
- 황재하, 김동학, 조등룡, 송교영, 1996, 한국지질도(1:250,000), 안동 지질도폭 및 설명서. 과학기술처, 67p.
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous Stratigraphy of Southeast Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 11, 1-23.
- Cheong, C.-S., Kwon, S.-T. and Sagong, H., 2002, Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic investigation of Triassic granitoids and basement rocks in the northern Gyeongsang Basin, Korea: Implications for the young basement in the East Asian continental margin. The Island Arc, 11, 25-44.
- 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.
- Cooke, M.L., 1997, Fracture localization along faults with spatially varying friction. Journal of Geophysical Research, 102, 22425-22434.
- Cruikshank, K.M., Zhao, G. and Johnson, A.M., 1991, Analysis of minor fractures associated with joints and faulted joints. Journal of Structural Geology, 13, 865-886.
- Dunne, W.M. and North, C.P., 1990, Orthogonal fracture system at the limits of thrusting: an example from southwestern Wales. Journal of Structural Geology, 12, 207-215.
- Dyer, R., 1988, Using joint interactions to estimate paleo-stress ratios. Journal of Structural Geology, 10, 685-699.
- Engelder, T. and Gross, M.R., 1993, Curving cross joints and the lithospheric stress field in eastern North America.

- Geology, 21, 817-820.
- Eyal, Y., Gross, M.R., Engelder, T. and Becker, A., 2001, Joint development during fluctuation of the regional stress field in southern Israel. *Journal of Structural Geology*, 23, 279-296.
- Hancock, P.L., 1985, Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 7, 437-457.
- Hancock, P.L., Al Kadhi, A. and Sha'at, N.A., 1984, Regional joint sets in the Arabian Platform as indicators of intraplate processes. *Tectonics*, 3, 27-43.
- Martel, S.J., 1990, Formation of compound strike-slip fault zones, Mount Abbot Quadrangle, California. *Journal of Structural Geology*, 12, 869-882.
- Martel, S.J. and Boger, W.A., 1998, Geometry and mechanics of secondary fracturing around small three-dimensional faults in granitic rock. *Journal of Geophysical Research*, 103, 21299-21314.
- Martel, S.J., Pollard, D.D. and Segall, P., 1988, Development of simple strike-slip fault zones, Mount Abbot quadrangle, Sierra Nevada, California. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1451-1465.
- Mollema, P.N. and Antonellini, M., 1999, Development of strike-slip faults in the dolomites of the sella Group, Northern Italy. *Journal of Structural Geology*, 21, 273-292.
- Peacock, D.C.P., 2001, The temporal relationship between joint and faults. *Journal of Structural Geology*, 23, 329-341.
- Petit, J.-P., 1988, Can natural fractures propagate under mode II condition?. *Tectonics*, 7, 1243-1256.
- Pollard, D.D. and Aydin, A., 1988, Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1181-1204.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1987, The technique of modern structural geology. Volume 2: Folds and Fractures. A academic press INC. (London) LTD., 700p..
- Rawnsley, K.D., Rives, T., Petit, J.P., Hencher, S.R. and Lumsden, A.C., 1992, Joint development in perturbed stress fields near faults. *Journal of Structural Geology*, 14, 939-951.
- Rawnsley, K.D., Peacock, D.C.P., Rives, T. and Petit, J.P., 1998, Jointing in the Mesozoic sediments around the Bristol Channel Basin. *Journal of Structural Geology*, 20, 1641-1661.
- Reches, Z. and Lockner, D.A., 1994, Nucleation and growth of faults in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research*, 99, 18159-18174.
- Renshaw, C.E. and Pollard, D.D., 1995, An experimentally verified criterion for propagation across unbounded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts* 32, 237-249.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24, TC5002, doi:10.1029/2004TC001720.
- Wilkins, S.J., Gross, M.R., Wacker, M., Eyal, Y. and Engelder, T., 2001, Faulted joints: kinematics, displacement-length scaling relations and criteria for their identification. *Journal of Structural Geology*, 23, 315-327.
- Willemsse, E.J.M. and Pollard, D.D., 1998, On the orientation and patterns of wing cracks and solution surfaces at the tips of a sliding flaw or fault. *Journal of Geophysical Research*, 103, 2427-2438.

---

(2006년 9월 22일 접수; 2006년 11월 2일 채택)