

해남 모이산 천열수 금은 광화대의 지질구조와 광화작용 당시의 지구조환경

강지훈^{1*} · 이덕선¹ · 류충렬² · 고상모² · 지세정²

¹안동대학교 지구환경과학과, ²한국지질자원연구원 광물자원연구본부

Geological Structure of the Moisan Epithermal Au-Ag Mineralized Zone, Haenam and its Tectonic Environment at the Time of the Mineralization

Ji-Hoon Kang^{1*}, Deok-Seon Lee¹, Chung-Ryul Ryoo², Sang-Mo Koh² and Se-Jung Chi²

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

²Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

An Epithermal Au-Ag mineralized zone is developed in the Moisan area of Hwangsan-myeon, Haenam-gun, Jeollanam-do, Korea, which is located in the southwestern part of the Ogcheon metamorphic zone. It is hosted in the Hwangsan volcanoclastics of the Haenam Formation of the Late Cretaceous Yucheon Group. This research investigated the characteristics of bedding arrangement, fold, fault, fracture system, quartz vein and the time-relationship of the fracture system to understand the geological structure related to the formation of the mineralized zone. On the basis of this result, the tectonic environment at the time of the mineralization was considered. Beds mainly trend east-northeast and gently dip into north-northwest or south-southeast. Their poles have been rearranged by subhorizontal-upright open fold of (east)-northeast trend as well as dip-slip fault. Fracture system was formed through at least 6~7 different deformation events. D1 event; formation phase of the main fracture set of EW (D1-1) and NS (D1-2) trends with a good extensity, D2 event; that of the extension fracture of NW trend, and conjugate shear fracturing of the EW (dextral) and NS (sinistral) trends, D3 event; that of the extension fracture of NE trend, and conjugate shear refracturing of the EW (sinistral) and NS (dextral) trends, D4 event; that of the extension fracture of NS trend showing a poor extensity, D5 event; that of the extension fracture of NW trend, and conjugate shear refracturing of the EW (dextral) and NS (sinistral) trends, D6 event; that of the extension fracture of EW trend showing a poor extensity. Frequency distribution of fracture sets of each deformation event is D1-1 (19.73 %)> D1-2 (16.44 %)> D3=D5 (14.79 %)> D2 (13.70 %)> D4 (12.33 %) > D6 (8.22 %) in descending order. The average number of fracture sets within 1 meter at each deformation event is D6 (5.00)> D5 = D4 (4.67)> D2 (4.60)> D3 (4.13)> D1-1 (3.33)> D1-2 (2.83) in descending order. The average density of all fractures shows 4.20 fractures/1 m, that is, the average spacing of all fractures is more than 23.8 cm. The frequency distribution of quartz veins at each orientation is as follows: EW (52 %)> NW (28 %)> NS (12 %)> NE (8 %) trends in descending order. The average density of all quartz veins shows 4.14 veins/1 m, that is, the average spacing of all quartz veins is more than 24.2 cm. Microstructural data on the quartz veins indicate that the epithermal Au-Ag mineralization (ca. 77.9~73.1 Ma) in the Moisan area seems to occur mainly along the existing D1 fracture sets of EW and NS trends with a good extensity not under tectonic stress but non-deformational environment directly after epithermal rupture fracturing. The D1 fracturing is considered to occur under the unstable tectonic environment which alternates compression and tension of NS trend due to the oblique northward subduction of the Izanagi plate resulting in the igneous activity and deformation of the Yucheon Group and the Bulguksa igneous rocks during Late Cretaceous time.

Key words : Moisan area, Hwangsan volcanoclastics, Epithermal Au-Ag mineralized zone, fracture system, quartz vein

*Corresponding author: jhkang@andong.ac.kr

육천변성대 남서부에 위치하는 전남 해남군 황산면 모이산 지역에는 백악기 말 유천층군 해남층의 황산 화산쇄설암을 모암으로 하는 천열수 금-은 광화대가 발달한다. 본 연구는 광화대의 형성과 관련된 지질구조를 파악하기 위해 모이산 지역의 층리배열, 습곡, 단층, 단열계, 석영맥의 특성, 단열계의 상대적인 발달순서 등을 조사하였고, 이를 바탕으로 광화작용이 발생할 당시의 지구조환경을 고찰해 보았다. 층리는 동북동 주향 방향이 우세하며 북북서 내지 남남동 방향의 저각 경사를 보이고 분산된 층리 배열은 경사-이동 단층 이외에 (동)북동 방향의 준수평-직립 개방습곡에 의해 규제되어 있다. 단열계는 적어도 6~7회의 변형단계를 걸쳐 형성되었다. D1 단계; 연장성이 우세한 동서(D1-1)와 남북(D1-2) 방향의 주 단열조 형성기, D2 단계; 북서 방향의 인장단열 형성기, 동서(우수향)와 남북(좌수향) 방향의 공액 전단단열 운동기, D3 단계; 북동 방향의 인장단열 형성기, 동서(좌수향)와 남북(우수향) 방향의 공액 전단단열 재활동기, D4 단계; 연장성이 미약한 남북 방향의 인장단열 형성기, D5 단계; 북서 방향의 인장단열 재형성기, 동서(우수향)와 남북(좌수향)방향의 공액 전단단열 재활동기, D6 단계; 연장성이 미약한 동서 방향의 인장단열 형성기. 변형단계별 단열조의 출현빈도는 D1-1(19.73 %) > D1-2(16.44 %) > D3=D5(14.79 %) > D2(13.70 %) > D4(12.33 %) > D6(8.22 %) 순으로 우세하게 나타나고 평균개수/1 m는 D6(5.00개) > D5 = D4(4.67개) > D2(4.60개) > D3(4.13개) > D1-1(3.33개) > D1-2(2.83개) 순으로 높게 나타난다. 전체 단열조의 평균 조밀도는 4.20개로서 모이산 지역의 단열조는 평균 23.8 cm 간격 이상으로 발달한다. 석영맥의 방향성별 출현빈도는 동서 방향(52 %) > 북서 방향(28 %) > 남북 방향(12 %) > 북동 방향(8 %) 순으로 우세하게 나타난다. 전체 석영맥의 평균 조밀도는 4.14개로 나타나고 모이산 지역의 석영맥은 평균 24.2 cm 간격 이상으로 발달한다. 석영맥에 대한 미구조 연구결과, 천열수 금-은 광화작용(약 77.9~73.1 Ma)은 지구조적 응력이 아닌 천열수 파괴 단열작용과 직후의 정적인 지구조환경 하에서 기존에 형성된 연장성이 우세한 D1 단계의 동서 방향과 남북 방향의 단열조를 따라 발생한 것으로 보인다. 모이산 지역의 D1 단열작용은 유천층군과 불국사 화성암류의 화성활동과 변형을 초래하는 후기 백악기 이자나기판의 북향-사교 섭입작용과 관련하여 남북 방향의 압축력과 인장력이 교호하는 불안정한 지구조환경 하에서 발생하였던 것으로 고찰된다.

주요어 : 모이산 지역, 황산 화산쇄설암, 천열수 금-은 광화대, 단열계, 석영맥

1. 서 론

육천변성대 남서부에 위치하는 전남 해남군 황산면 모이산 지역(Fig. 1)에는 백악기 말 유천층군 해남층의 황산 화산쇄설암을 모암으로 하는 천열수 변질작용에 의한 금-은 석영맥 광화대가 발달한다. 모이산 광화대가 위치하는 해남지역에서 지체구조적 환경(Lee, 1999; Chough *et al.*, 2000; Koh *et al.*, 2000; Bowden, 2007; Chough and Sohn, 2010), 구성암류(Chun and Chough, 1995; Koh, 1996; Koh and Chang, 1997; Koh *et al.*, 2009), 열수변질작용(Kim and Nagao, 1992; Koh *et al.*, 2000; Choi *et al.*, 2005; Bowden, 2007; Koh *et al.*, 2009), 열수변질작용의 시기 및 주변암의 절대연령(Kim and Nagao, 1992; Choi *et al.*, 2005; Bowden, 2007; Kim and Choi, 2009), 열수변질작용과 관련된 주요 응력체계(Bowden, 2007)와 선상구조 및 석영맥을 포함하는 단열계(Koh *et al.*, 2009) 등에 대한 연구는 지금까지 많은 연구자들에 의해 수행된 바가 있다. 또한, 해남지역의 주요 구성암류가 다량 분포하는 한반도 동남부에서 신생대 동안에 발생한 지구조사건 및 변형단계별 응력체계에 관한 연구는 Choi *et al.*(2002b, 2002c)와 Son *et al.*(2002, 2007) 등에 의해 수행되었다.

본 연구는 해남지역의 모이산 광화대에서 광맥과 광화작용을 규제하는 지질구조를 파악하기 위해 모이산 지역에서 발달하는 층리, 습곡, 단층, 단열계, 석영맥 등의 특성과 단열계의 상대적인 발달순서 등을 조사하고 분석하였다. 여기서는 지금까지의 연구결과를 보고하고 그 연구결과를 기존 연구결과와 비교하고 종합하여 모이산 지역에서 광화작용의 발생시기와 광화작용이 발생할 당시의 지구조환경을 고찰해 보고자 한다.

2. 광역지질

전라남도 해남군 황산면에 있는 모이산 광산은 지체구조적으로 육천변성대 남서부의 해남 백악기 퇴적분지 내에 위치한다(Fig. 1). 육천변성대는 북으로 좌수 주향-이동 공주-음성 단층계에 의해 경기육괴와 남으로는 좌수 주향-이동 영동-광주 단층계에 의해 영남육괴와 분리되어 있다. 해남 퇴적분지는 전기 백악기 좌수 주향-이동 영동-광주 당겨열림(pull-apart)형 퇴적분지군의 남서단에 위치하고 그 서부와 동부는 각각 좌수 주향-이동 전주와 광주 단층들에 의해 경계져 있으며 전기 백악기 동안에 이자나기판(Izanagi plate)의 북향-사교 섭입운동과 관련된 북동-남서 방향의 대규모 좌수 주향-이동 단층운동의 횡인장성 지구조체계(transensional

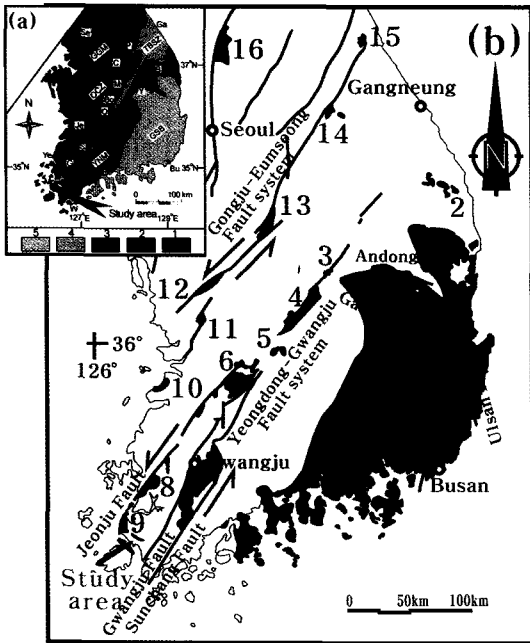


Fig. 1. (a) Index map showing the tectonic locality of study area (arrow mark). 1: Yeongnam massif (YNM), 2: Gyeonggi massif (GGM), 3-4: Ogcheon belt [3: Ogcheon zone (OCZ), 4: Taebaeksan zone (TBSZ)], 5: Gyeongsang basin (GSB). B: Bonghwa, Bo: Boeun, Bu: Busan, G: Gwangju, Ga: Gangneung, Je: Jeonju, M: Mungyeong, Mo: Mokpo, O: Ogcheon, P: Pyeongchang, S: Sunchang, Se: Seoul, W: Wando, Y: Yecheon, Ye: Yeongkwang. (b) Cretaceous basins in the South Korea and study area. 1: Gyeongsang Basin, 2: Tongni Basin (undefined), 3: Jungsori Basin, 4: Yeongdong Basin, 5: Muju Basin, 6: Jinan Basin, 7: Neungju Basin, 8: Hampyeong Basin (undefined), 9: Haenam Basin, 10: Kyokpo Basin (undefined), 11: Puyeon Basin, 12: Gongju Basin, 13: Eumseong Basin, 14: Pungam Basin, 15: Misiryeong Basin (undefined), 16: Cheorwon Basin (undefined) (compiled from Lee, 1999; Choi and Choi, 2007).

tectonic regime) 하에서 형성되었다(cf. Maruyama *et al.*, 1997; Lee, 1999; Chough *et al.*, 2000).

해남지역은 선캠브리아기 편암 및 편마암과 페름기 퇴적암류 그리고 이들을 관입하는 쥬라기 화강암류와 이들을 부정합으로 피복하는 후기 백악기 유천층군과 이들을 관입하는 후기 백악기~고제3기 불국사 화성암류 등으로 구성되어 있다(Koh, 1996; Koh and Chang, 1997)(Fig. 2). 대륙연변부의 섭입대에서 형성된 전형적인 칼크-알카리 계열의 유천층군과 불국사 화성암류(Jeong and Jwa, 2000)는 후기 백악기 동안에 이자나 기관이 아시아 대륙판 밑으로 북향-사교 섭입하는 과정에서 발생한 인장성 내지 횡인장성 대륙호 응력체계 하에서 분출 내지 관입하여 화산호 대지를 형성하였다.

이들 화산호 대지의 구성산물은 한반도 동남부에 위치한 경상분지에 다량으로 광범위하게 산출하고 해남지역을 포함하는 남서부에서는 소량으로 분산되어 산출한다(Chough and Sohn, 2010).

해남지역의 유천층군은 하부로부터 화원층, 우항리층, 해남층으로 구분된다(Chun and Chough, 1995; Koh, 1996; Koh and Chang, 1997)(Fig. 2). 이들의 주요 구성암류와 $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ 연대측정치(Kim and Nagao, 1992)는 다음과 같다. 화원층은 주로 안산암질의 화산쇄설암으로 구성되어 있으며 안산암, 현무암(103.4 ± 2.5 Ma), 적갈색 실트암 등을 부분적으로 협재한다. 우항리층은 하천 혹은 호소환경에서 형성된 퇴적암으로 주로 석회질의 실트암, 응회암질 사암, 흑색 셰일, 처트 등으로 구성되어 있고 부분적으로 화산기원의 안산암류(95.4 ± 2.9 Ma)를 협재한다. 해남층은 석영안산암질 또는 유문암질의 화산쇄설암과 이를 부정합으로 피복하는 산성질 용암(75.4 ± 1.7 Ma~ 72.5 ± 1.3 Ma)으로 구성되어 있으며 화산쇄설암은 하부로부터 황산응회암(열수 비변질암: 86.4 ± 1.8 Ma~ 84.5 ± 1.3 Ma, 열수 변질암: 83.9 ± 1.4 Ma), 해남응회암, 서호응회암, 용당응회암 등으로 구분된다. 유천층군을 관입하는 불국사 화성암류(81.5 ± 4.0 Ma~ 71.8 ± 3.6 Ma)는 주로 불국사 조산운동 동안에 2~3 km 이하의 깊이에서 정치된 섬록암, 흑운모 화강암, 반상 화강암, 석영 및 화강반암 등으로 구성되어 있다.

해남지역에는 고황화작용(high-sulfidation)과 저황화작용(low-sulfidation) 천열수계(epithermal systems)에 의한 2회의 변질작용이 보고된 바가 있다. Kim and Nagao(1992)에 의하며 고황화작용 천열수계에 의한 열수작용의 시기($81.4 \sim 78.1$ Ma)는 모암인 백악기 화산암류($86.4 \sim 81.4$ Ma)의 정치와 관련이 없고 이후의 백악기 화강암류의 관입작용($81.5 \sim 77.1$ Ma)과 관련되어 있다. 고황화작용 천열수 변질작용이 활동적인 섭입대의 대륙 연변부 화산호에 형성된 고-칼륨 칼크-알카리 계열의 화성암류와 관련되어 있음은 Koh *et al.*(2000)에 의해 언급된 바가 있다. 저황화작용 금은 천열수 변질작용은 Choi *et al.*(2005)과 Bowden(2007)에 의해 보고된 바가 있다. Bowden(2007)은 지표조사, 향내노두, 시추자료, 구조등고선 등으로부터 해남지역에 2회의 천열수 변질작용과 관련된 2개의 주요 응력체계를 설정한 바가 있다. 그에 따르면 1단계 압축성 응력체계(σ_1 : 북북동~북동 방향, σ_2 : 수직 방향, σ_3 : 북서~서북서 방향) 하에서는 해남지역에 발달하는 동북동 단층과 남북 단층은 각각 좌수 주향이동과 우수



Fig. 2. Regional geological map of Haenam area and the locality of study area (modified from Choi *et al.*, 2002a).

주향-이동의 공액 단층운동과 서북서 단층의 북쪽-블러이 상승하는 좌수향 경사-이동 단층운동이 발생하였으며, 2단계 인장성 응력체계(σ_1 : 수직 방향, σ_2 : 동북동~서북서 방향, σ_3 : 북북동~북서 방향) 하에서는 해남 지역에 발달하는 동북동, 서북서, 남북 단층들의 정 경사-이동 단층운동이 발생하였다. 또한, 그는 해남지역에서 발생한 2회 천열수 변질작용 중에 고-황화작용 천열수계는 82.4~79.7 Ma 동안에 열수 각력압과 동북동 방향의 고각의 좌수 주향-이동 단층(1단계 압축성 응력체계)을 따라서 마그마 기원의 열수용액 유입에 의해 형성되었으며 저-황화작용 천열수계는 고-황화작용에 의한 천열수 변질대가 형성된 이후 2.7~1.3 Ma (약 2 Ma)가 지난 79.7~78.4 Ma 동안에 이전에 형성된 고각단층의 부분적인 재활동과 정 경사-이동 단층운동(2단계 인장성 응력체계) 동안 천수(meteoric) 기원의 용액 유입에 의해 형성되었음을 보고한 바가 있다.

3. 지질개요

전남 해남군 황산면 부곡리에 위치하는 모이산 광산은 백악기 말 유천층군 해남층의 황산용회암을 모암으로 하는 저-황화작용 천열수 변질대내에 배태된 함 금-은 석영 세맥상 광상이다(Choi *et al.*, 2005; Bowden,

2007). 황산용회암은 용결용회암, 라필리 용회암 및 화산각력암으로 구성된 화산쇄설암으로서 이러한 화산쇄설암내에는 화산활동의 일시적인 증거를 지시하는 호상 용회암질 퇴적암류가 협재되어 있고 이들 퇴적암류는 화산쇄설암과 함께 모두 열수 변질되어 있다(Koh *et al.*, 2009). 모이산 지역의 천열수 변질대는 고기 형성 순으로 스�멕타이트±녹니석 변질대(propylitic alteration), 석영-일라이트 변질대(phyllitic alteration), 규화변질대(siliceous alteration), 후기 석영-고령석 변질대(argillic alteration) 등으로 구분되며, 이들은 서북서 방향의 동심원상 대상 분포를 보인다(Bowden, 2007)(Fig. 3). 모이산 금-은 천열수 광화작용은 규화변질대 형성 동안의 2단계 맥-각력화 사건(2nd vein-breccia event)과 관련하여 주로 발생하였고 후기 천성 부화작용(supergene enrichment)에 의한 석영-고령석 변질대 형성 동안에 부분적으로 발생하였다(Bowden, 2007). 중성의 열수유체에 의한 변질작용의 결과로 석영-일라이트 변질작용이 규화 변질작용과 함께 우세하게 나타난다(Koh *et al.*, 2009). 모이산 천열수 함 금-은 석영맥을 배태하고 있는 모이산 화산암체에 대한 지구화학적 분석 결과, 이들은 대체적으로 칼크-알카리 계열의 석영안산암 내지 유문암질 조성을 보인다(Kim *et al.*, 2011).

모이산 지역에는 서북서 방향과 동서 내지 동북동

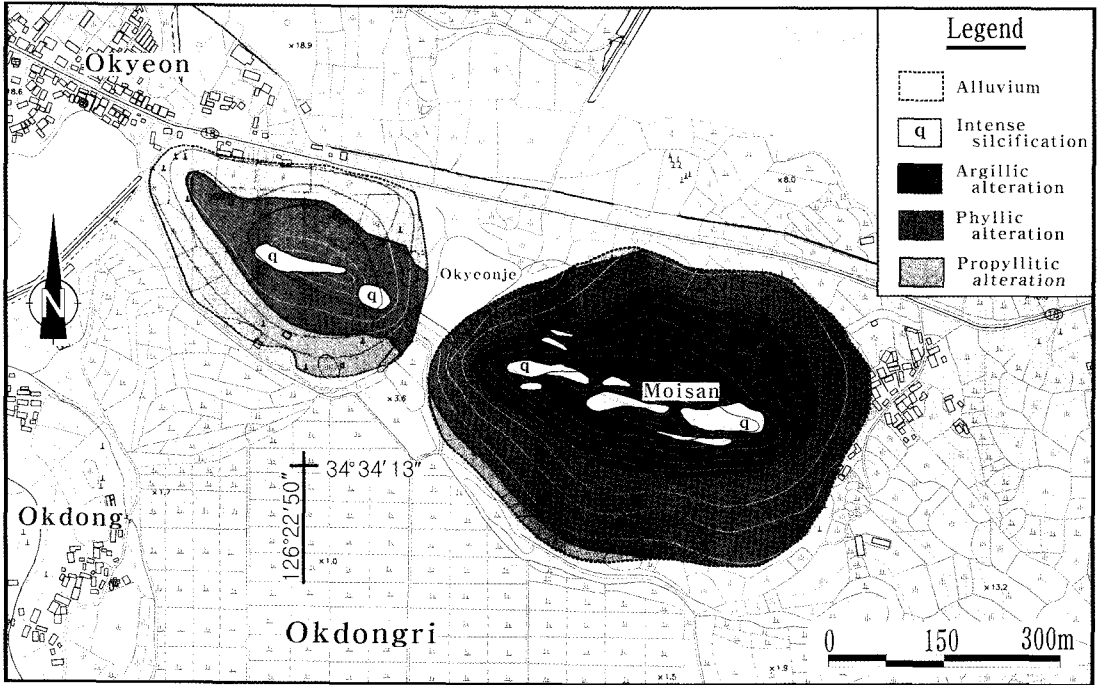


Fig. 3. Alteration zones of the Moisan area, Haenam (after Bowden, 2007).

방향으로 구성된 모이산 단층대가 발달하고, 모이산 단층대를 따라서는 해남지역의 1단계 압축성 응력체계 하에서 남쪽 블록이 소량 상승하는 역 경사-이동을 수반하는 좌수 주향-이동 단층운동과 2단계 인장성 응력 체계 하에서 남쪽 및 북쪽 블록이 하강하는 정 경사-이동 단층운동이 발생하였다(Bowden, 2007). 모이산 지역의 천열수 광화작용은 2단계 인장성 응력체계 하에서 모이산 단층대의 정 경사-이동 단층운동 동안에 발생하였고, 광화작용은 맥, 각력화된 맥, 모이산 단층대내 주요 단층에 의해 제어되어 발생하였다(Bowden, 2007). 모이산 지역에는 다양한 방향의 인장단열과 전단단열이 발달하며 모이산 광화대는 주로 서북서 내지 북서 방향의 단층 내지 단열들을 충전하는 세맥을 따라 주로 발달한다(Koh *et al.*, 2009).

모이산 지역의 빙장석(adularia)의 형성시기(77.4 ± 0.5 Ma: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령측정치 / Bowden, 2007)는 일부 불국사 화성암류[월출산 화강암($81.2 \pm 4.0 \sim 77.0 \pm 1.2$ Ma), 월강두 석영반암($77.9 \pm 3.8 \sim 75.0 \pm 2.8$ Ma): $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ 연대측정치 / Kim and Nagao, 1992]의 관입시기와 동일하다. 최근 Kim and Choi(2009)는 모이산 지역의 빙장석 (75.1 ± 1.6 Ma) 및 견운모(74.7 ± 1.6 Ma)에 대한 $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ 절대연령 측정치로부터 모이산 지역의 저-황화작용 천열수 변질작용은 주변 성산 및

옥매산 광산의 고-황화작용 천열수 변질작용(81.4~78.1 Ma: Kim and Nagao, 1992) 보다 약 5 Ma 이후에 발생하였음을 보고한 바가 있다.

4. 암상기재

모이산 지역은 백악기 말 유천층군 해남층의 황산용회암으로 주로 구성되어 있다. 황산용회암은 산성 화산활동으로 형성된 산성암질 화산쇄설물로서 주로 용결용회암, 라필리용회암, 화산각력암 등으로 구성되어 있으며 용결용회암과 라필리용회암 내에는 호성 퇴적 환경에서 형성된 응회질 퇴적암류가 여러 매 협재되어 있다(Koh *et al.*, 2009). Bowden(2007)에 의해 작성된 모이산 지역의 지질도에 의하며 모이산 지역의 황산용회암은 세립으로 엽층된 담회색 내지 암회색의 화산회암질 퇴적암류(HVIm)를 주로 포함하는 미분화된 황산 화산쇄설암(HV)과 이에 협재된 세립 내지 극세립질 엽층의 흑색 내지 회색의 황산 이암과 실트암(Hms) 등으로 구분되고 Hms의 연장성은 서북서 방향의 주 단층과 동북동 내지 동서 방향의 부 단층에 의해 단절된다. 황산 화산쇄설암과 이에 협재된 호상응회암질 퇴적암류에는 용결조석과 층리가 잘 관찰된다(Fig. 4).

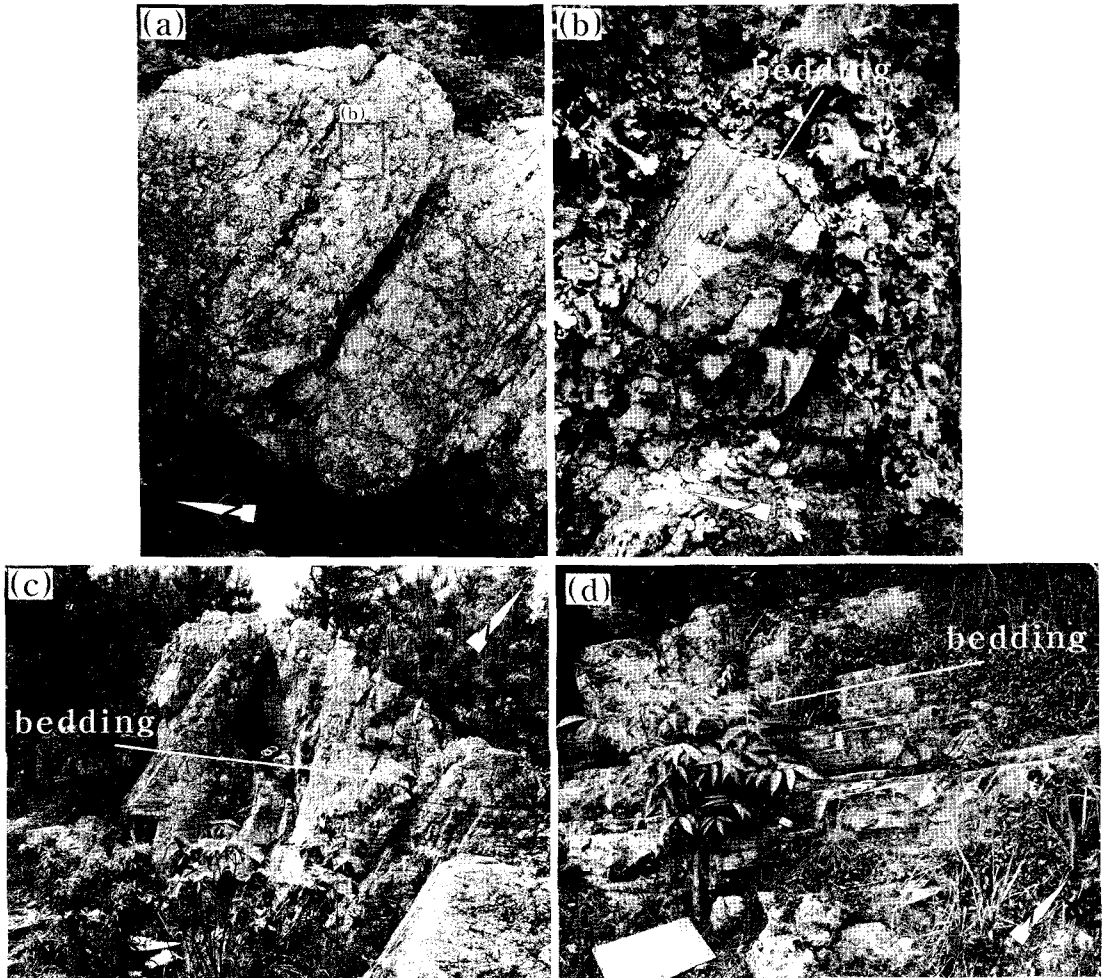


Fig. 4. (a-b) Subvertical and (c-d) subhorizontal bedding developed in the (c) Hwangsan tuff and (a, b, d) Hwangsan mudstone and siltstone of the Moisan area, Haenam.

황산 화산쇄설암의 일차적인 광물조합은 석영, 사장석, 흑운모 그리고 소량의 화산암편과 탄산암편으로 구성되어 있다. 그러나 모이산 지역의 황산 화산쇄설암은 대부분이 열수 변질되어 일차적인 광물조합을 관찰하기 힘들다(Fig. 5a). 모이산 지역의 천열수 변질대는 전술한 바와 같이 고기 형성 순으로 스�멕타이트±녹니석 변질대, 석영-일라이트 변질대, 규화변질대, 후기 석영-고령석 변질대 등으로 구분된다(Fig. 3). 초기 생성의 변질대로 인지되는 스�멕타이트±녹니석 변질대는 천열수 변질대의 가장 주변부에 위치하고 중심부에 위치하는 규화 변질대는 후기 천성부화작용에 의해 생성된 석영-고령석 변질대 내에 잔류되어 보존된 형태를 취한다.

편광현미경 하에서 석영-일라이트 변질대에 속하는 황산 화산쇄설암의 특징은 흑운모 반정의 조립질 일라이트질 점토로 교대작용과 석기 물질의 세립질 일라이트질 점토로 교대작용이 인지된다(Fig. 5b). 규화변질대에서는 점토를 거의 함유하지 않고 SiO_2 의 첨가에 의한 규화작용이 인지된다(Fig. 5c). 규산질 석영은 잔류 석영결정 내부에서 극세립으로 성장한 짙막한 결정으로 관찰된다. 반응 성분의 손실 이후에 잔류된 석영이 소량의 용탈작용과 함께 조직적으로 파괴된 규화작용도 관찰된다. 후기 석영-고령석 변질대에 속하는 황산 화산쇄설암의 기질부는 일반적으로 극세립 석영, 고령석으로 구성되어 있다(Fig. 5d). 그러나 원암에 존재하는 화산쇄설암적인 일차적 조직은 거의 관찰되지 않는다.

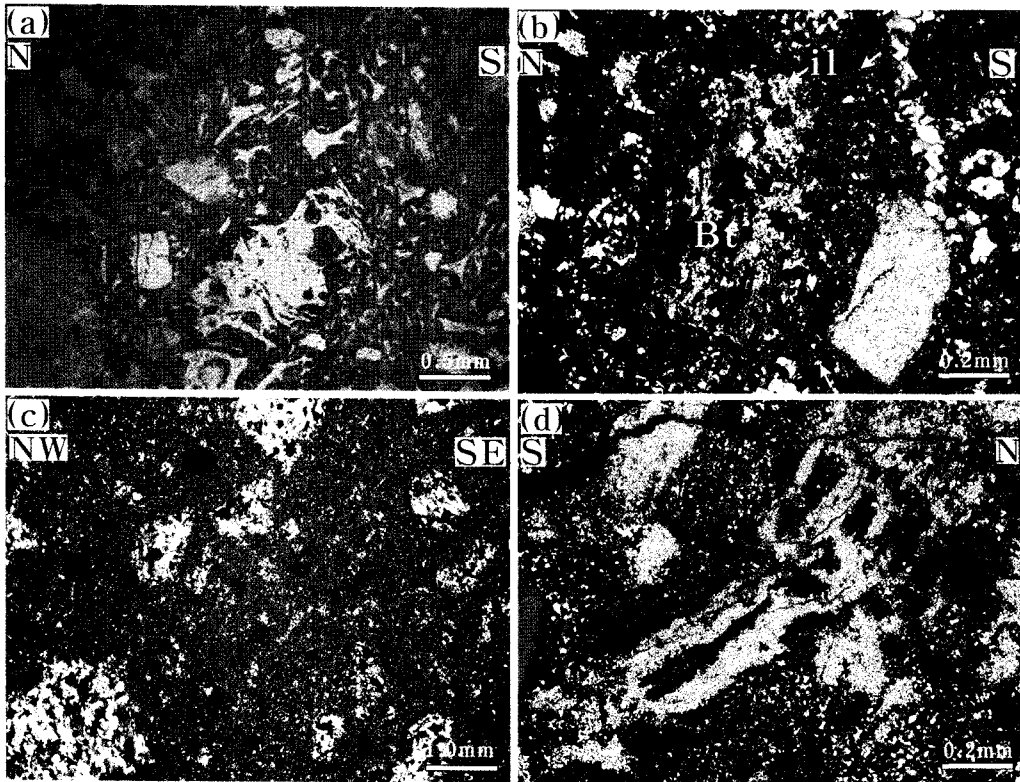


Fig. 5. (a) Hydrothermal alteration texture recognized by irregular grain boundary of feldspar (open nicol). (b) Phyllic alteration texture. Coarse-grained illitic clay (il) replacement of a biotite phenocrysts (Bt) in the central part (crossed nicols). (c) Siliceous alteration texture by very fine-grained recrystallized siliceous quartz with little or no clays (crossed nicols). (d) Argillic alteration texture by fine-grained quartz and kaolinite mineral assemblage (crossed nicols).

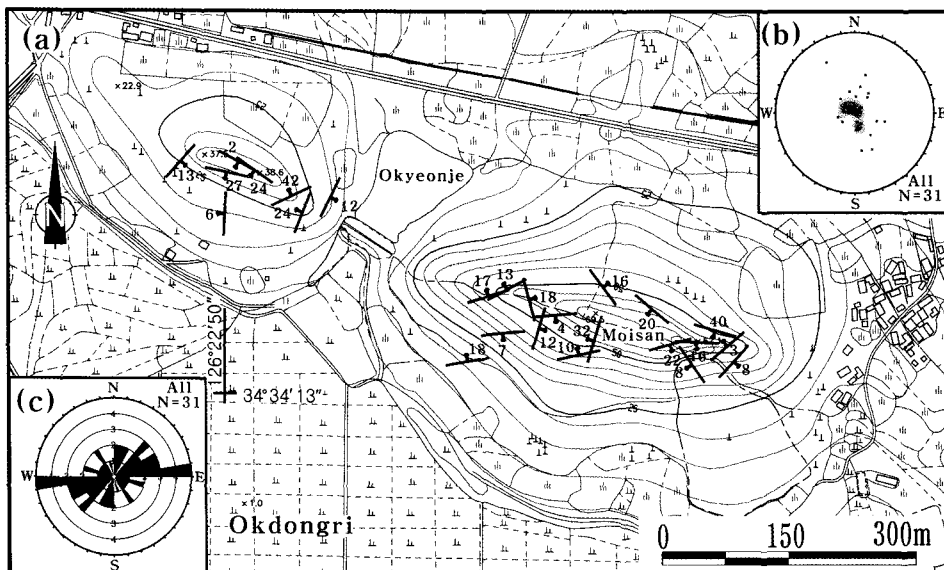


Fig. 6. (a) Orientation of bedding, and (b) stereogram (density map) of its poles (lower-hemisphere equal-area projection, contours: 4-8-12-16 % per 1 % area), and (c) rose diagram to its orientation.

5. 지질구조

5.1. 층리, 습곡, 단층

황산응회암과 황산 이암과 실트스톤에 발달하는 모이산 지역의 층리는 50° 이하의 저각 내지 중각으로 경사하는 다양한 방향성을 보이고 동북동 주향에 남북 방향으로 저각 경사하는 집중된 방향성을 보인다(Figs. 4 and 6). No. 908번 노두에서 N65°E/84°NW 방향의 습곡축면과 09°N68°E 방향의 습곡축을 갖는 준수평-직립 개방습곡(subhorizontal-upright open fold)이 관찰된다(Fig. 7a). 습곡된 층리의 극점들은 준수평-직립 습곡축의 방향과 거의 일치하는 11°N67°E 방향의 파이-축(π -axis)을 갖는 파이-원(π -circle) 상에 배열되고

(Fig. 7b), 이러한 극점배열은 모이산 지역에서 인지되는 분산된 층리의 극점 배열과 유사하다(Fig. 6b). 이는 모이산 지역의 층리 배열은 (동)북동 방향의 준수평-직립 개방습곡에 의해 규제되어 있음을 의미한다. 정단층과 역단층은 노두 및 시료 그리고 박편 규모에서 종종 관찰된다(Fig. 8).

5.2. 단열

규칙 단열조의 배열 방향, 우세 방향성, 공간적 분포 등을 조사하기 위해 각각의 노두에서 2~6개의 규칙적인 우세한 단열조를 선정하여 총 43개소 노두에서 각 단열조의 대표적인 방향성을 총 154개 측정하였다(Fig. 9). 이들 단열조의 선후관계 및 운동성은 다수 단열조

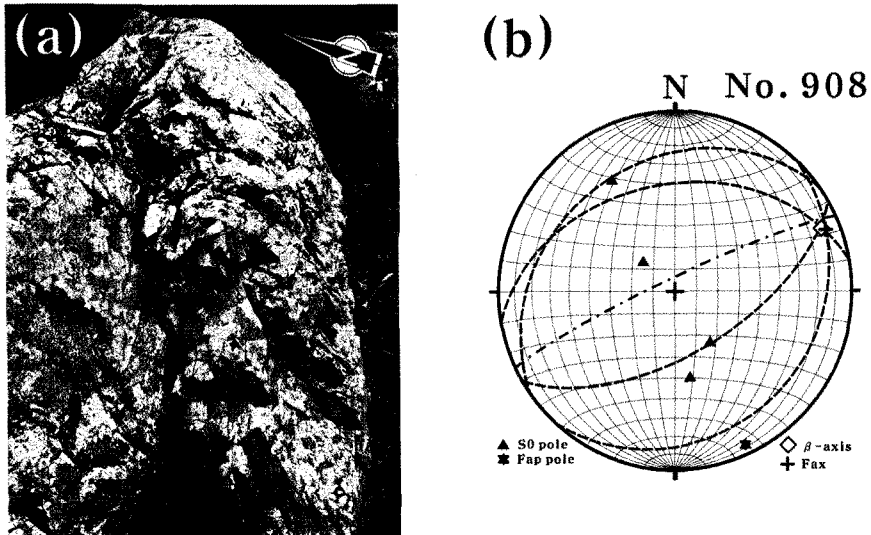


Fig. 7. (a) Outcrop photograph of (E)NE trending subhorizontal-upright open fold taken in the No. 908 outcrop site, and (b) stereogram showing the orientation of poles to the bedding dispersed by the folding.

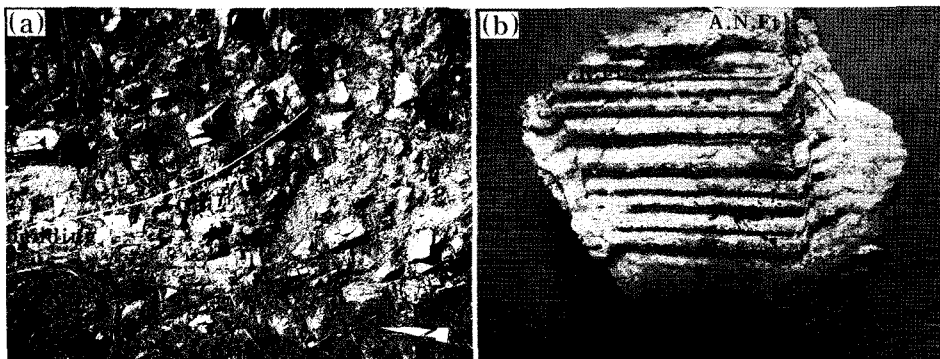


Fig. 8. (a) East-west trending normal fault showing that the northern block is down. (b) Rock specimen showing apparent normal (A.N.Ft) and reverse (A.R.Ft) faults (rollover rock near No. 224 outcrop site).

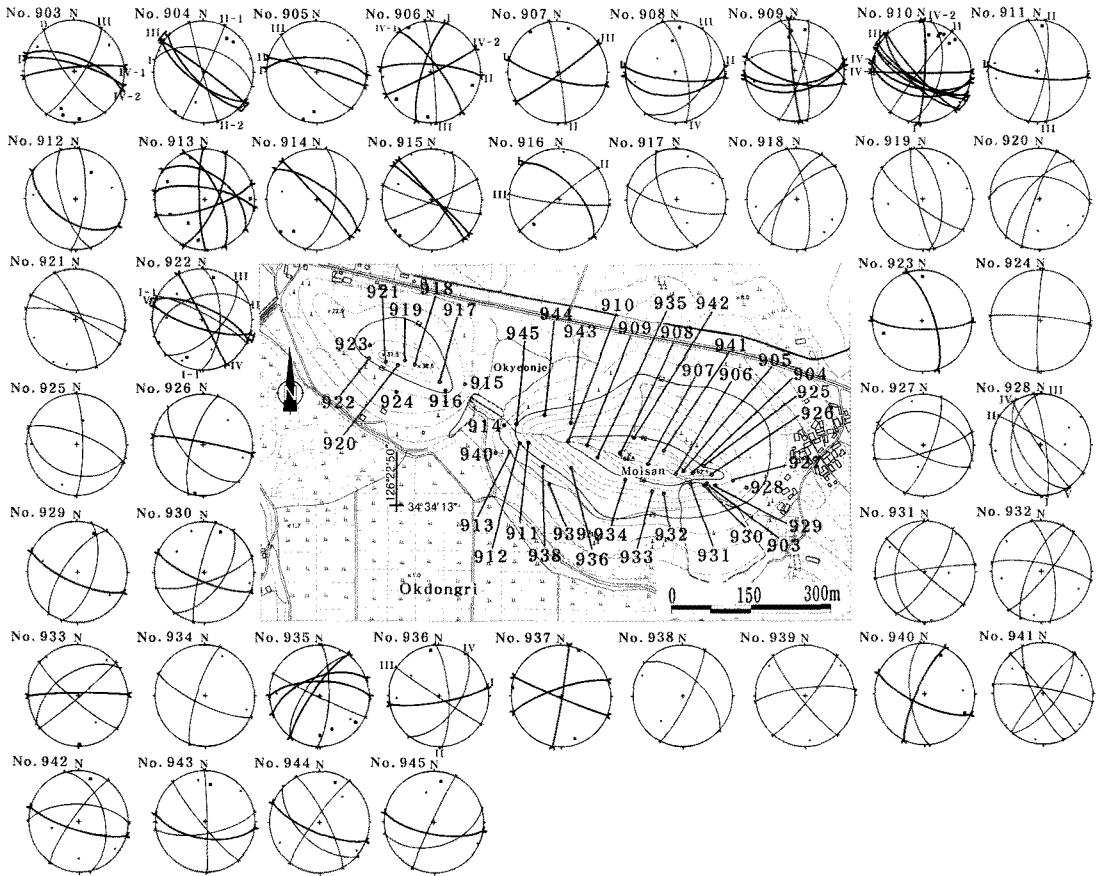


Fig. 9. Stereograms of poles (lower-hemisphere equal-area projection) illustrating the orientations and the relative timing of fracture sets (I-1, I-2, II, III, ...) determined from the geometries of fracture termination, intersection, and cutting-relationship in each outcrop (numbers: outcrop numbers) of the Moisan area, Haenam. Thicker solid great circles: fracture sets filled with quartz minerals (quartz veins).

의 연결, 종료, 교차 형상 및 절단관계와 단열조 사이의 통시적 시간관계 등에 대한 기존 연구결과(e.g. Hancock *et al.*, 1984; Pollard and Aydin, 1988; Eyal *et al.*, 2001; Peacock, 2001)를 바탕으로 결정되었다.

5.2.1. 방향성별 단열계의 특성

출현빈도: 후술한 단열조의 상대적인 발달순서로부터 구분된 단열조의 방향성을 그룹 경계로 하여 모이산 지역의 단열계를 총 4개의 그룹으로 구분하고 출현빈도가 높은 구간을 순서대로 I 그룹, II 그룹, III 그룹, IV 그룹으로 표기하여 모이산 지역 단열계의 출현빈도를 분석하였다. 그 결과 모이산 지역의 단열계는 N60°E-EW-N60°W 범위의 동서 방향 단열조(I 그룹), N20°W-NS-N20°E 범위의 남북 방향 단열조(II 그룹), N60°-20°W 범위의 북서 방향 단열조(III 그룹)와

N20°-60°E 범위의 북동 방향 단열조(IV 그룹) 순으로 우세하게 나타났다(Fig. 10). 50° 구간의 I 그룹을 II, III, IV 그룹과 같이 40° 구간으로 표준화하여 분석된

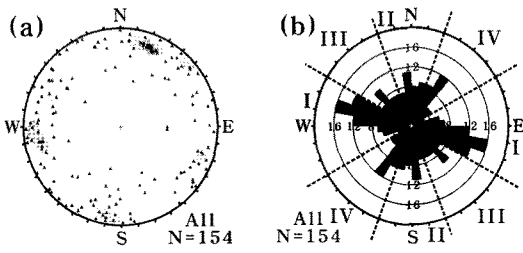


Fig. 10. (a) Stereogram (density map) of poles (lower-hemisphere equal-area projection) and (b) rose diagram to all fracture sets measured in the Moisan area, Haenam and their grouping (I, II, III, IV) in descending predominant order of frequency.

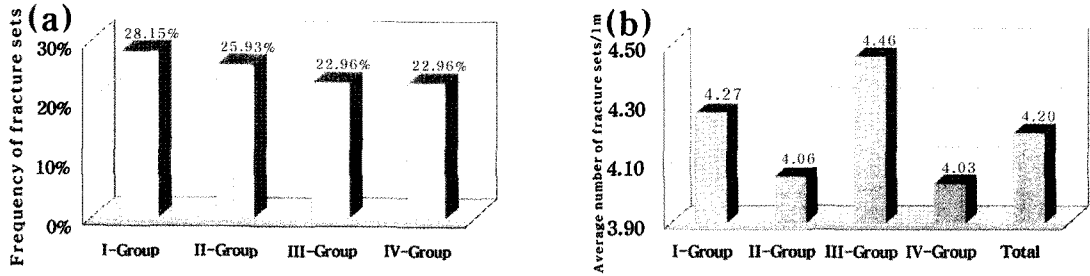


Fig. 11. Diagrams showing the (a) frequency distribution of fracture sets of each group, and (b) average number of fracture sets of each group within one meter.

그룹별 출현빈도는 I (28.15 %) > II (25.93 %) > III = IV (22.96 %) 그룹 순으로 우세하게 나타났다(Fig. 11a).

평균개수/1 m (=평균 조밀도): 단열조의 주향에 수직인 방향으로 1 m내에 출현하는 그룹별 평균개수는 북서 방향(III)(4.46개) > 동서 방향(I)(4.27개) > 남북

방향(II)(4.06개) > 북동 방향(IV)(4.03개) 순으로 높게 나타나고 전체 단열조의 평균 조밀도는 4.20개로서 모이산 지역의 단열조의 간격은 평균 23.8 cm 이상으로 발달되어 있다(Fig. 11b).

(a)

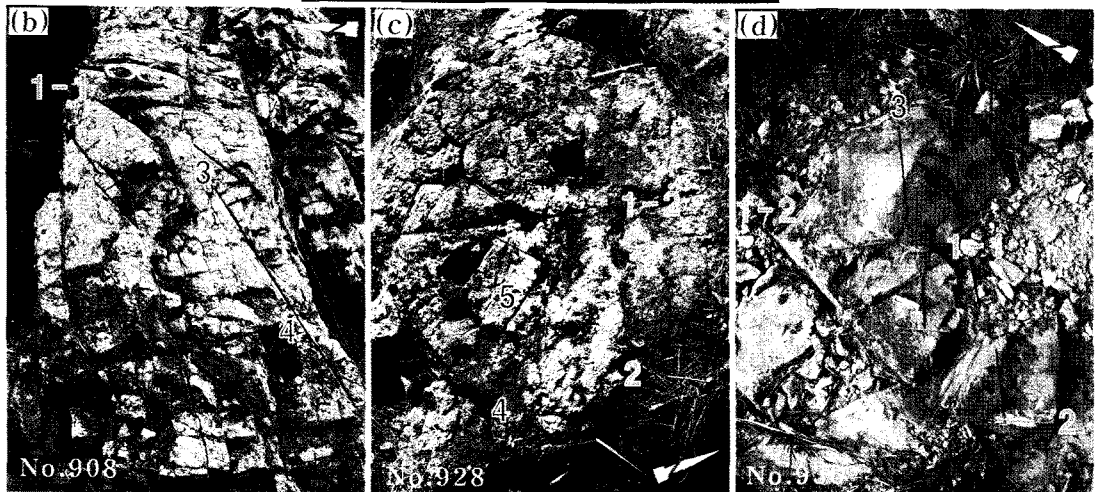
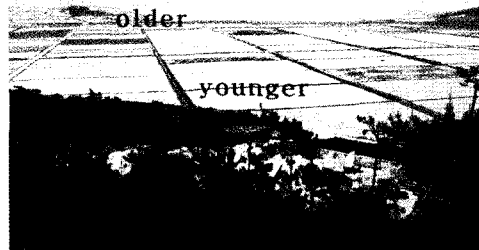


Fig. 12. Schematic landscape photo (a) (looking from Moisan to Eunsan) and outcrop photos (b-d) showing the relative development sequence of extension fracture sets (e.g. 1-1, 1-2, 2, 3, ...) determined from the geometries of fracture termination, intersection, and cutting-relationship.

5.2.2. 변형단계별 단열계의 특성

발달순서 및 운동성: 단열조의 발달순서 및 운동성은 Kang and Ryoo(2006)와 Lee and Kang(2009)에서 이미 기재된 인장단열과 전단단열 사이의 상대적 시간관계에 대한 기존 연구자들의 연구결과(e.g. Hancock *et al.*, 1984; Pollard and Aydin, 1988; Eyal *et al.*, 2001; Peacock, 2001)를 종합적으로 참조하여 수행하였다. 인장단열의 발달순서는 후기에 형성된 인장단열은 이전에 형성된 인장단열에 접경하거나 단절된다는 다수 인장 단열조의 상대적인 발달순서는 I, II, III, ... 등으로 표기하고 선후관계가 명

확하지 않을 경우 I-1, I-2 등으로 표기하였다(Fig. 9). 이전의 인장단열은 이후에 다른 방향의 인장단열을 형성시키는 최대 주응력 σ_1 에 의해 전단단열(전단된 인장단열)로 변화하는데, 전단단열의 운동성은 이들 인장 단열 사이의 방향성 관계로부터 결정하였다. 전단단열의 운동성 표기는 좌수향일 경우 좌상 대각선 그리고 우수향일 경우 우상 대각선으로 하였으며 전단단열의 발달순서는 화살표의 개수로 표현하였다. 분석 결과, 모이산 지역의 단열계는 적어도 6~7회의 변형단계를 걸쳐 형성되었으며 이들은 발달순서에 따라 70°~300° 범위의 동서 방향(D1-1)과 350°~20° 범위의 남북 방향(D1-2), 300°~330° 범위의 북서 방향(D2), 10°~60°

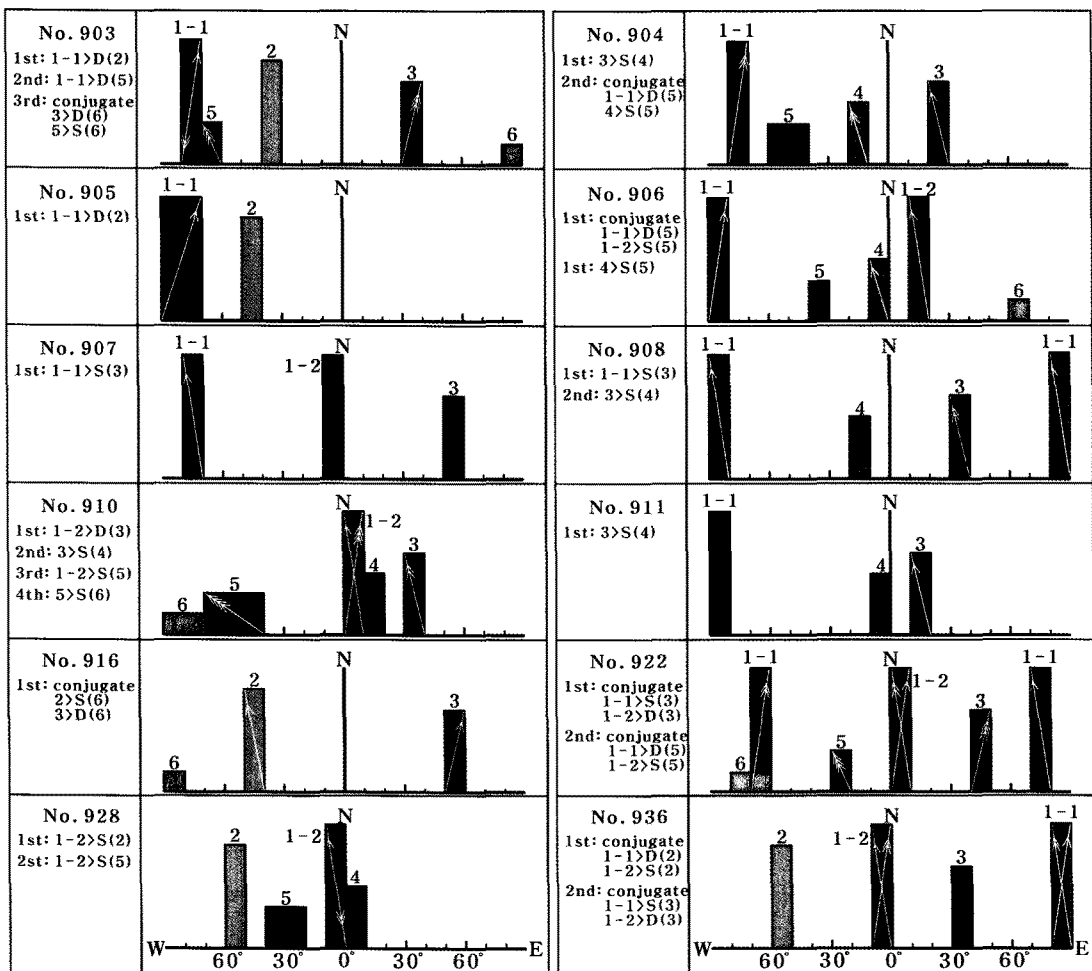


Fig. 13. Diagram representing the development sequence (fracturing events) of extension fracture sets (e.g. 1-1, 1-2, 2, 3, ...) measured in the Moisan area, Haenam (extracted from data of Fig. 9). The number of arrow mark: single (1st phase of deformation), double (2nd phase of deformation), ... and half arrow marks: left-up and right-down (sinistral movement sense), right-up and left-down (dextral movement sense) of shear fracture sets in each outcrop. D: dextral, S: sinistral. For detailed explanation see text.

범위의 북동 방향(D3), 340°~20° 범위의 남북 방향(D4), 290°~340° 범위의 북서 방향(D5), 60°~300° 범위의 동서 방향(D6) 등의 단열조로 구분된다(Figs. 12, 13 and 14).

출현빈도 및 평균개수/1 m: 구간범위가 표준화된

변형단계별 단열조의 출현빈도는 D1-1(19.73 %) > D1-2(16.44 %) > D3=D5(14.79 %) > D2(13.70 %) > D4(12.33 %) > D6(8.22 %) 순으로 우세하게 나타난다(Fig. 14b, 14d). 단열조의 주향에 수직인 방향으로 1 m 내에 출현하는 변형단계별 단열조의 평균개수는

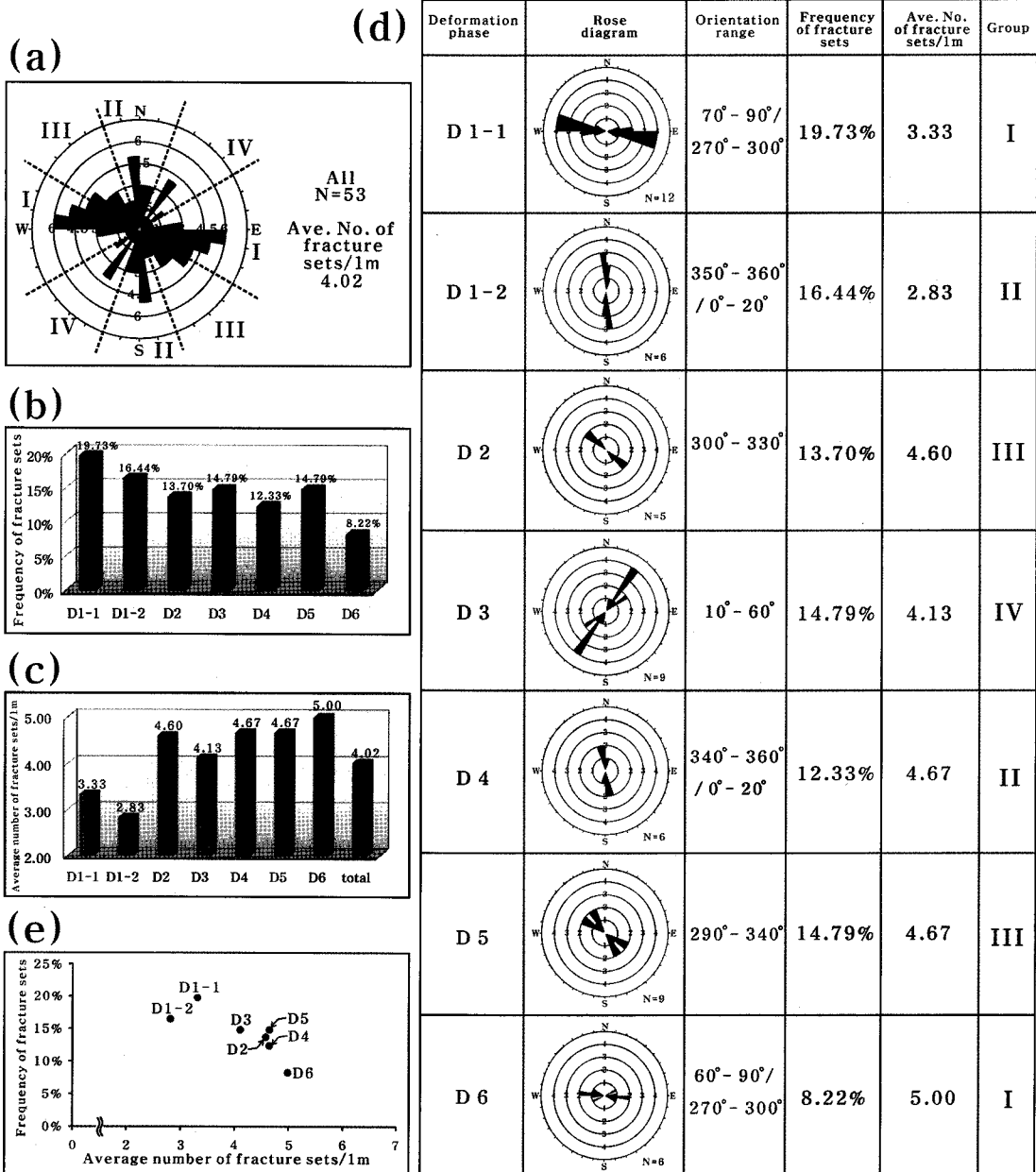


Fig. 14. Diagrams illustrating the characteristics of the fracture sets known on their relative timing in the Moisan area, Haenam. (a) Rose diagram. (b) Frequency distribution, (c) average number of fracture sets within one meter, and (d) characteristics of fracture sets which belong to each fracturing event (D1-1, D1-2, D2, ...). (e) Average number of fracture sets within one meter vs. frequency of fracture sets in each fracturing event.

D6(5.00개)> D5 = D4(4.67개)> D2(4.60개)> D3(4.13개)> D1-1(3.33개)> D1-2(2.83개) 순으로 높게 나타나며(Fig. 14c, 14d) 변형단계별 단열조의 출현빈도와 반비례적인 관계를 보인다(Fig. 14d, 14e). 이는 이전에 형성된 단열조일수록 연장성이 우수하고 광범위하게 산출하여 출현빈도가 높은 반면에 단열조의 간격은 넓게 나타남을 지시한다.

5.3. 석영맥

5.3.1. 산출상태

43개소 노두에서 총 63개의 석영맥이 조사 및 분석

되었다. 석영맥의 산출상태는 연결형, 분기형, 교차형, 망상형, 타원 고리형, 공동 충전형 등으로 다양하게 나타난다(Fig. 15). 천열수 광상의 특징적인 산출상인 타원 고리형 석영맥의 크기는 수 cm에서 최대 200 cm 까지 다양하게 나타나고 평균 35.2 cm로 나타난다(Fig. 16a). 타원 고리형 석영맥의 종횡비는 평균 6.2로 나타나고 최대 30이 넘는 것도 관찰되고 타원 고리형 석영맥의 크기가 작을수록 종횡비가 비교적 증가하는 경향을 보인다(Fig. 16). 방향성은 70°~80° 범위의 동북동 방향과 270°~300° 범위의 서북서 방향 그리고 0°~20° 범위의 북북서 방향이 우세하게 나타나고 동서

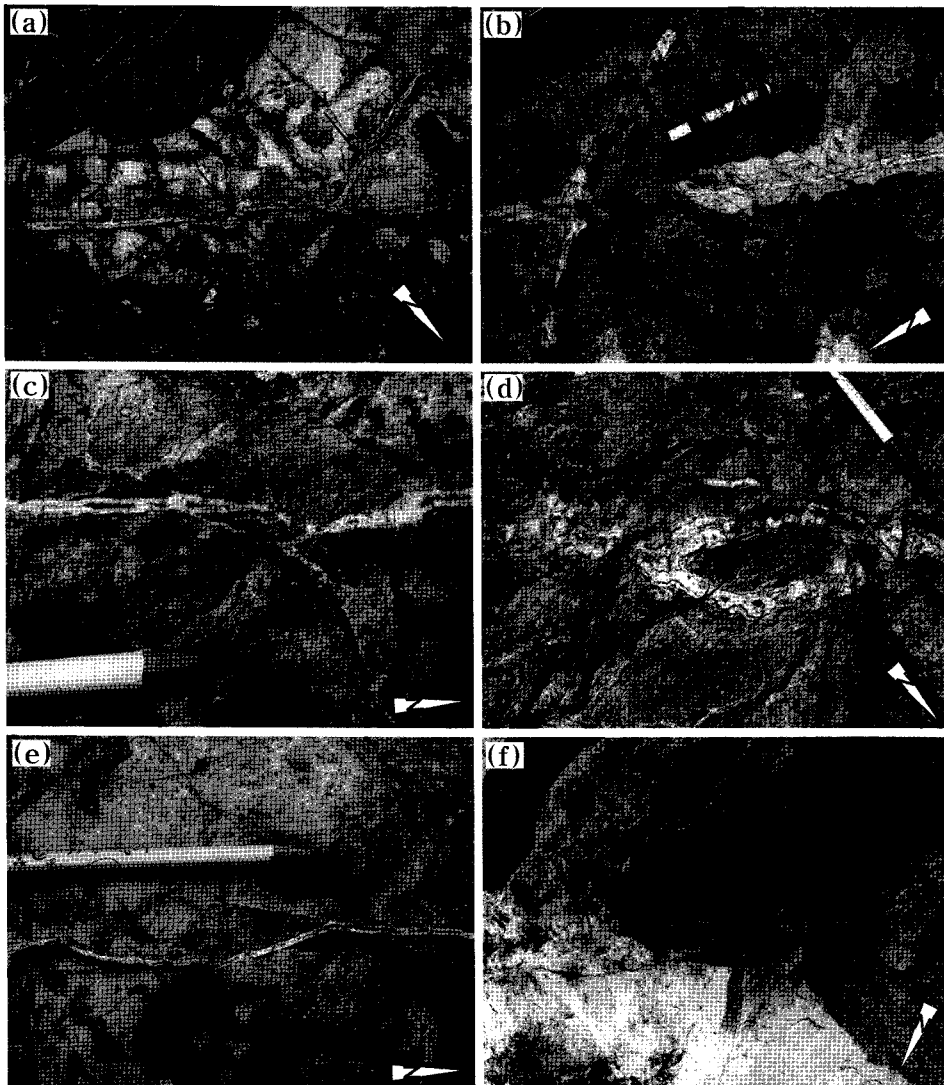


Fig. 15. Outcrop photos showing various occurrences of quartz veins in the Moisan area, Haenam. (a) Relay (R) and branch (H), (b) intersection, (c) network, (d-e) oval ring, and (c, e, f) cavity filling types.

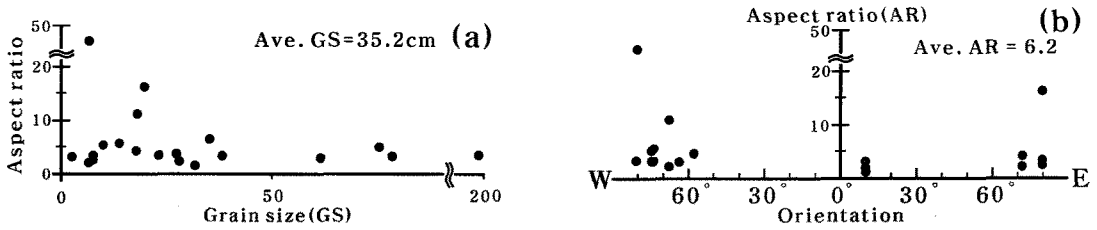


Fig. 16. Diagrams representing (a) aspect ratio vs. grain size, and (b) aspect ratio vs. orientation of oval ring type of quartz veins.

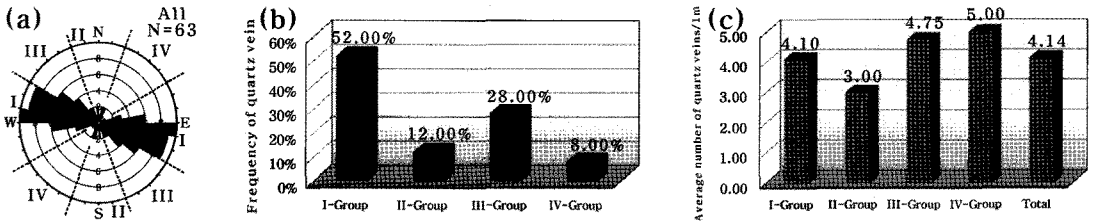


Fig. 17. (a) Rose diagram to all quartz veins. Diagrams showing the (b) frequency distribution of quartz veins of each group, and (c) average number of quartz veins of each group within one meter.

계열이 남북 계열 보다 중횡비가 비교적 크게 나타난다(Fig. 16b).

5.3.2. 출현빈도

모이산 지역 전체 석영맥의 방향성은 동서 내지 (서)북서 방향이 우세하게 나타나고(Fig. 17a), 노두 위치별 석영맥의 방향성은 Fig. 9c와 같다. 석영맥의 그룹별 방향성 구간을 전술된 단열조의 그룹별 방향성 구간과 동일하게 설정하고 역시 50° 구간의 I 그룹을 II, III, IV 그룹과 같이 40° 구간으로 표준화하여 분석된 석영맥의 방향성별 출현빈도는 동서 방향(I)(52%), 북서 방향(III)(28%), 남북 방향(II)(12%), 북동 방향(IV)(8%) 순으로 우세하게 나타났다(Fig. 17b). 이는 역시 단열계의 동서와 (서)북서 방향은 모이산 광화대의 주요 방향임을 지시한다.

5.3.3. 평균개수/1 m (= 평균 조밀도)

석영맥의 방향성별 평균개수/1 m는 북동 방향(IV)(5.00개) > 북서 방향(III)(4.75개) > 동서 방향(I)(4.10개) > 남북 방향(II)(3.00개) 순으로 높게 나타난다(Fig. 17c). 이는 모이산 지역에서 동서와 남북 방향의 석영맥은 연장성이 우수하여 광범위하게 산출하고 출현빈도가 높은 반면에 석영맥의 간격은 넓게 나타남을 지시한다. 또한, 전체 석영맥의 평균 조밀도는 4.14 개로서 모이산 지역 석영맥의 평균 간격은 24.2 cm

이상으로 발달되어 있음을 알 수 있다(Fig. 17c).

5.3.5. 미구조

편광현미경 하에서 석영맥은 피각형(crustiform) 내지 콜로폼(colloform)(Fig. 18a), 무질서형(Fig. 18b), 공동충진형 내지 동심원형(Fig. 18c), 신장형(Fig. 18d, 18e) 조직 등으로 다양하게 나타난다. 이들 중 가장 일반적으로 관찰되는 신장형 석영맥 조직은 비직선형 모암과 석영맥의 경계면에 수직한 방향으로 성장된 석영맥(Fig. 18d)과 석영맥 형성과 관련된 인장 내지 전단 단열작용 동안에 전단인장응력에 평행한 방향으로 성장된 석영맥(Fig. 18e)으로 구분된다. 그리고 전자는 모이산 지역의 석영맥에서 일반적으로 관찰된다. 전자의 경우 후자에 비해 석영맥의 폭이 넓은 경향이 있으며 후자의 경우는 결정질 석영으로만 구성된 경우가 많다. 신장형 석영맥에는 반복된 균열작용에 의해 맥의 내부에 모암의 포획물(균열작용 당시에 분리된 미소한 암편) 자취를 남기는 균열과 회복(crack and seal) 조직이 가끔 관찰된다. 모이산 지역의 석영맥에는 모암기원의 가력암을 포함하는 경우가 흔히 관찰된다(Fig. 18f). 본 조직에서 가력암은 단열작용과 함께 단열된 부분에는 석영들이 충전되어 있다. 기질부는 은미정질 및 소결정질 내지 중결정질 호상 석영, 콜로폼 호상 석영 그리고 괴상의 석영 등으로 구성되어 있다. 가력암은 이러한 기질부의 충전물질을 바탕으로 유동

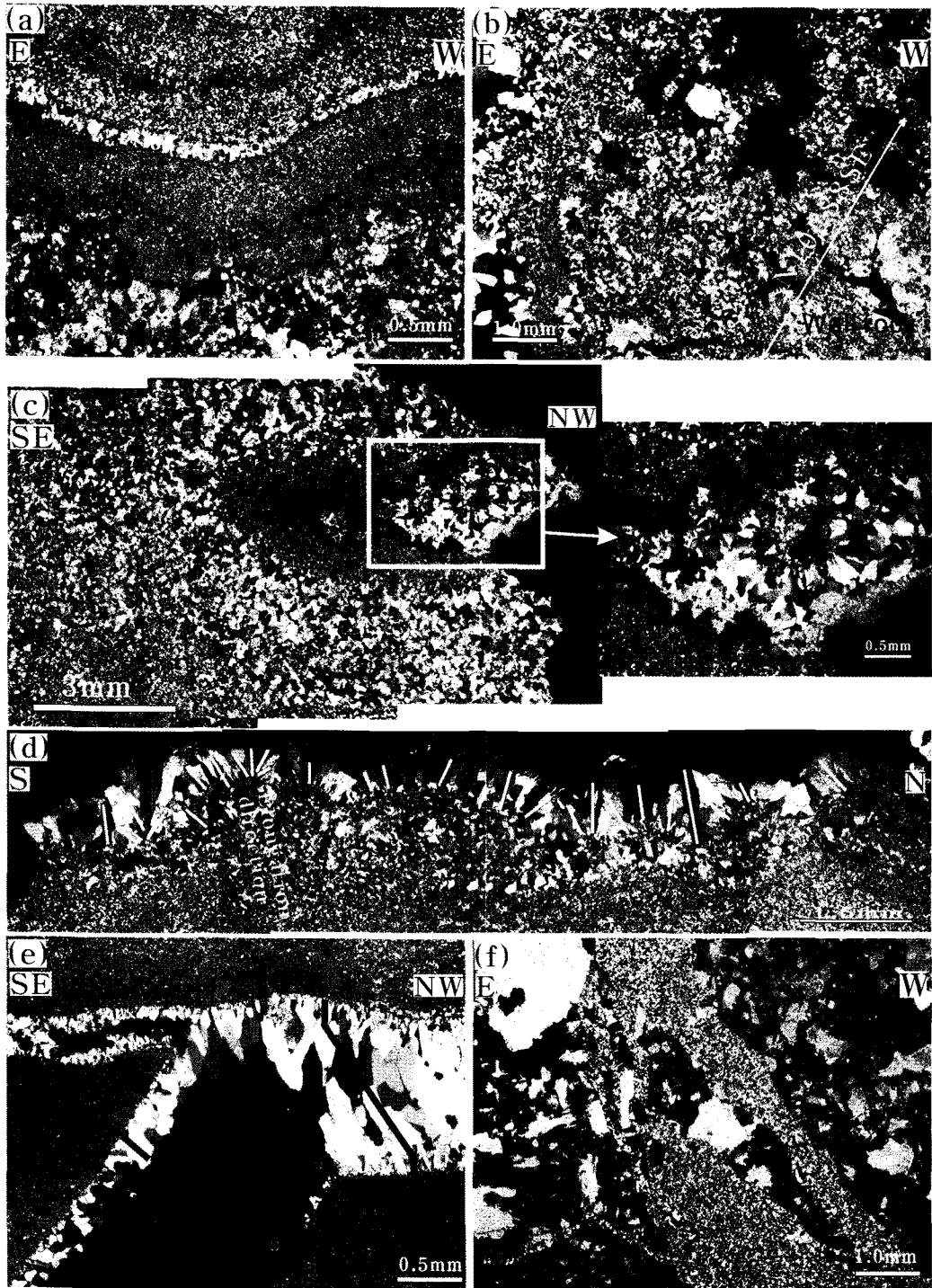


Fig. 18. Characteristic microstructures related to quartz growth in vein. (a) Colloform texture. (b) Random growth of quartz in vein. (c) Oval ring and cavity filling types of quartz veins. (d) Growth of blocky and elongate quartz perpendicular to the irregular boundary of vein and wall rock. (e) Tectonic quartz veins. Oblique quartz vein is extension tectonic vein. Horizontal quartz vein is shear tectonic vein as syntaxial vein. Elongation direction of quartz in the horizontal vein is normal to the boundary of vein and wall rock in the walls and is oblique to that in the middle. This means that the horizontal fracture was opened by shear after extension. (f) Brecciated vein. All are taken under crossed nicols.

화된 조직을 보인다.

6. 고 찰

Bowden(2007)은 모이산 단층대의 1단계 압축성 역 이동 운동에 의한 층리의 경사각 변화와 2단계 인장성 정이동 운동에 의한 수평 층리의 어긋남을 제시한 바가 있다. 본 연구결과에 의하면 노두 및 시료 규모에서 Bowden(2007)의 의견상 정이동과 역이동의 증거가 역시 관찰되며 이로 인한 층리의 방향성 변화가 국부적으로 인지된다(Fig. 8). 그러나 No. 908번 노두에서 관찰된 동북동 방향의 준수평-직립 개방습곡에서 측정된 층리의 극점 배열은 모이산 전체지역에서 측정된 층리의 극점 배열과 유사하고 전체 극점 배열이 준수평-직립 개방 습곡축의 방향과 거의 일치하는 파이-축을 갖는 파이-원상에 배열되는 점을 고려해 볼 때 (Figs. 6 and 7) 모이산 지역의 층리 배열은 (동)북동 방향의 준수평-직립 개방습곡에 의해 부분적으로 규제되었을 가능성을 제시한다.

Koh *et al.*(2009)는 위성영상 분석을 통하여 모이산 지역의 선상구조를 북서와 북동 그리고 남북 방향의 군과 서북서와 동서 방향의 군으로 구분하고 전지는 백악기와 제3기초 동안에 남북 방향의 압축응력에 의해 그리고 후자는 제3기 동안 또는 그 이후에 동서 방향의 압축응력에 의해 각각 형성되었으며, 남북 방향과 동서 방향의 부수적인 단열은 각각 북서 및 북동 방향과 서북서 방향의 주 단열에 비해 연장이 짧은 반면에 평균개수/1 m는 높게 나타난다고 보고한 바가 있다. 또한 그들은 해남 모이산-은산 광화대에 발달하는 단열계는 북서 방향, 남북 방향, 그리고 동북동 내지는 동서 방향의 압축응력 등 적어도 세 번의 변형이 중첩된 결과로 형성되었음을 보고한 바가 있다.

그러나, 본 연구결과와 모이산 지역의 단열계는 보다 다양한 방식으로 적어도 6~7회의 변형단계를 걸쳐 형성되었음이 인지된다(Figs. 13 and 14). 거의 모든 단열은 초기에 인장단열로서 형성되고 이후 응력장 변화와 함께 기존의 인장단열은 전단단열로 재활동한다는 기존의 연구결과(Petit, 1988; Reches and Lockner, 1994)를 바탕으로 해남 모이산 광화대에 발달하는 단열계의 발달사와 운동성을 요약해 보면 다음과 같다. D1 단계; 동서 방향과 남북 방향의 압축응력에 의한 연장성이 우세한 동서 방향(D1-1 단계)과 남북 방향(D1-2 단계)의 인장단열 형성, D2 단계; 북서 방향의 압축응력에 의한 북서 방향의 인장단열 형성과 동서(우

수향)와 남북(좌수향) 방향의 공액 전단단열 운동, D3 단계; 북동 방향의 압축응력에 의한 북동 방향의 인장단열 형성과 동서(좌수향)와 남북(우수향) 방향의 공액 전단단열의 재활동, D4 단계; 남북 방향의 압축응력에 의한 연장성이 미약한 남북 방향의 인장단열 형성, D5 단계; 북서 방향의 압축응력에 의한 북서 방향의 인장단열 재형성과 동서(우수향)와 남북(좌수향)방향의 공액 전단단열의 재활동, D6 단계; 동서 방향의 압축응력에 의한 연장성이 미약한 동서 방향의 인장단열 형성. 그리고 본 연구결과 변형단계별 단열조의 평균개수/1 m(간격)는 변형단계별 단열조의 출현빈도(연장성)와 반비례적인 관계를 보이는 데(Fig. 14e), 이는 이전에 형성된 단열조일수록 연장성이 우세하고 광범위하게 산출하여 어느 노두에서도 관찰되는 즉 출현빈도가 높은 반면에 단열조의 간격이 넓게 나타나 단열조의 평균개수/1 m는 적게 나타남을 의미한다. 이러한 연구결과는 최고기의 단열조는 가장 길고 연속성이 우세하며 후기에 형성된 단열조일수록 기존의 단열조에 접경하기 때문에 일반적으로 짧게 나타난다는 기존 연구결과(cf. Rawnsley *et al.*, 1998; Park *et al.*, 2010)와도 일치한다. 또한, 모이산 지역에서 방향성별 출현빈도는 동서 방향(I 그룹)과 남북 방향(II 그룹)이 우세하게 나타나는데(Figs. 10 and 11), 이는 D1 단열조의 연장성이 우세하고 나타나고 이들 단열조는 두 번의 변형단계를 걸쳐 형성되었기 때문이며 Koh *et al.*(2009)의 연장성이 짧고 평균개수/1 m가 높은 남북 방향과 동서 방향의 단열은 각각 D4 단계와 D6 단계에 형성된 단열조인 것으로 해석된다.

지금까지 보고된 동위원소 절대연령 측정치에 따르면 모암인 황산وه회암은 88.2~83.2 Ma ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$; Kim and Nagao, 1992)을 나타내고 모이산 지역의 빙장석 [77.4 ± 0.5 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; Bowden, 2007), 75.1 ± 1.6 Ma ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$; Kim and Choi, 2009)] 및 견운모 [74.7 ± 1.6 Ma ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$; Kim and Choi, 2009)]의 형성시기로부터 저-황화작용 천열수 변질작용은 약 77.9~73.1 Ma 사이에 발생하였음을 알 수 있다. 유천층군, 불국사 화성암류, 그리고 제3기 화성 및 퇴적암류가 다량 분포하는 한반도 동남부에서 신생대 동안에 발생한 지구조사건 및 변형단계별 응력체계는 Choi *et al.*(2002b, 2002c)와 Son *et al.*(2002, 2007) 등에 의해 보고된 바가 있다. 본 연구결과(Fig. 14d)를 황산وه회암이 형성된 후기 백악기 Coniacian~Santonian 이후의 이들 연구결과와 비교해 보면 D1-2 단계는 후기 백악기 Cenomanian~Campanian (약 99~70 Ma) 동

안에 하양층군의 동서 방향의 습곡 형성과 관련된 남북 방향의 압축응력 발생기, D2 단계는 백악기말~고제3기초 동안에 옥천대의 (북)북서 방향의 암맥군의 관입과 인동단층계의 역 경사-이동성 활동과 관련된 북서 방향의 압축작용, D3 단계는 올리고세~중기 마이오세(약 25~16 Ma) 시기에 동해확장과 이에 수반된 신제3기 마이오세 분지 형성과 관련된 북동 방향의 압축작용, D5 단계는 중기~후기 마이오세(약 15~12 Ma) 동안에 마이오세 분지 확장 중단과 마이오세 지층의 북동 방향의 지각구조물 형성과 관련된 북서 방향의 압축작용 그리고 D6 단계는 플라이오세~현재(약 5 Ma~현재)까지 제3~4기 지층의 남북 방향의 지각구조물 형성과 관련된 동서 내지 동북동 방향의 압축작용 등에 각각 대비되며, 이들 연구결과를 D4 단계의 부재를 제외하고 모이산 지역의 단계별 응력체계와 거의 일치한다(Fig. 14).

해남지역에는 2회의 천열수 변질작용이 보고된 바가 있다. 이들 중에 저 황화작용에 의한 천열수 변질작용은 고 황화작용 보다 약 2~5 Ma 이후에 발생하였으며(Kim and Nagao, 1992; Choi *et al.*, 2005; Bowden, 2007), 후자는 1단계 압축성 응력체계 하에서 그리고 전자는 2단계 인장성 응력체계 하에서 각각 발생하였고 모이산 지역에서 1단계 압축응력 방향과 2단계 인장응력 방향은 각각 남북 방향을 나타낸다(Bowden, 2007의 Fig. 2-36). 이는 해남지역에서의 천열수 변질작용은 약 2~5 Ma 동안에 압축성과 인장성이 교호하는 불안정한 지구조환경 하에서 발생하였음을 의미한다.

모이산 지역의 황산화회암에는 D1-2 단계의 남북 방향의 인장단열과 선후관계가 명확하지 않고 D2 단계 보다는 이전에 형성된 D1-1 단계의 연장성이 우세한 동서 방향의 인장단열이 발달한다. 이들 D1-2와 D1-1 단계의 인장단열의 방향은 약 2~5 Ma의 시간적 차이를 두고 발생된 모이산 지역에서 Bowden(2007)의 1단계 남북 방향의 압축응력 방향과 2단계 동서 방향의 압축응력(남북 방향의 인장응력) 방향과 각각 일치한다. 이는 모이산 지역에서 D1-1 단계의 인장단열작용은 약 99~70 Ma의 D1-2 단계의 인장단열작용 보다 약 2~5 Ma 이후에 발생하였으며 이들 D1 단계의 인장단열작용은 모이산 지역에서 약 77.9~73.1 Ma의 저 황화작용 천열수 변질작용의 발생시기(Bowden, 2007; Kim and Choi, 2009)와 시기적으로 밀접한 관련성이 있음을 의미한다. 또한 남북 방향의 압축력과 인장력이 발생하는 지구조환경 하에서 발생한 이러한 D1 단계 인장단열작용은 후기 백악기 동안에 이어나기권이

아시아 대륙판 밑으로 북향-사교 섭입작용과 관련하여 남북 방향의 압축력이 작용하는 활동적 대륙연변부의 섭입대 환경과 남북 방향의 인장력이 작용하는 판내부 환경이 교호하는 불안정한 지구조환경 하에서 발생하였음을 의미하고, 이러한 지구조환경은 한반도 동남부의 대륙호(화산호)의 생성환경과 일치한다(Koh *et al.*, 2000; Chough and Sohn, 2010).

Bowden(2007)은 모이산 광화작용은 2단계 인장성 응력체계 하에서 모이산 단층대의 정 경사-이동 단층 운동 동안에 발생한 것으로 해석한 바가 있다. 한편, Koh *et al.*(2009)는 서북서 방향의 주단열과 이들 내부에 인리형 연결대를 만드는 북서 방향 단열들의 선상구조로부터 모이산 지역의 광화대는 그들의 첫 번째 변형단계에 해당하는 북서 방향의 압축응력에 의한 서북서 단열의 우향이동과 북서 방향의 인장단열작용 동안에 이들 배태공간을 따라 열수가 유입됨으로써 형성된 것으로 판단한 바가 있다. 본 연구결과, 모이산 지역의 석영맥은 천열수 광상의 특징적인 산출상인 타원 고리형 석영맥이 우세하게 관찰되며 그 크기는 수 cm에서 최대 200 cm까지 다양하고 그 방향성은 70°~80° 범위의 동북동 방향과 270°~300° 범위의 서북서 방향 그리고 0°~20° 범위의 북북서 방향 등으로 나타난다(Fig. 16). 편광현미경 하에서 석영맥은 석영결정이 인장응력 내지 전단 횡인장 응력 방향에 평행하게 하나의 방향으로 성장한 폭이 좁은 석영맥(Fig. 18e) 보다는 비직선형 모양과 맥의 경계면에 수직한 방향으로 모양의 석영을 뿌리로하여 다양한 방향으로 성장한 폭이 넓은 석영맥이 우세하게 나타난다(Fig. 18d). 또한, 석영맥의 내부조직은 파괴형 내지 콜로폼(Fig. 18a), 무질서형(Fig. 18b), 공동충진형 내지 동심원형(Fig. 18c) 등의 천열수 석영 성장상을 보여 주고 석영맥 내부에는 파괴작용과 관련된 모양기원의 각력암을 포함한다(Fig. 18f). 이러한 특징적인 미조직은 석영맥이 지구조적 응력과 관련하여 동시기적으로 형성하였다기 보다는 지구조적 응력에 의해 이미 형성된 단열계를 배경으로 후기에 천열수 공급과 관련된 파괴작용이 중첩된 결과로 형성되었음을 지시한다. 즉 모이산 지역에서 석영 세맥을 통한 광화작용은 지구조적 응력과 관련하여 동시에 발생하였다기 보다는 천열수 파괴작용과 관련된 불규칙한 단열작용과 직후의 정적인 지구조환경 하에서 기존에 형성된 연장성이 우세한 D1 단계의 동서 방향과 남북 방향의 단열조를 따라 발생한 것으로 고찰되며 이러한 광화작용은 후자보다 전자의 방향으로 우세하게 진행된 것으로 판단된다. 그러나 이러한 결

론을 도출하기 위해서는 이후 석영맥 형성과 석영맥 내부에 석영들의 성장과 관련된 보다 체계적인 미구조 연구가 요구된다.

7. 결 론

육천변성대 남서부에 위치하는 전남 해남군 황산면 모이산 지역에서 백악기 말 유천층군 해남층의 황산용 회암을 모암으로 하는 천열수 금-은 석영맥 광화대가 발달한다. 모이산 광화대에서 광맥과 광화작용을 규제하는 지질구조, 광화작용의 발생시기, 그리고 발생당시의 지구조환경에 대한 연구결과는 다음과 같다.

(1) 층리는 동북동 주향 방향이 우세하며 북북서 내지 남남동 방향의 저각 경사를 보이고 분산된 층리 배열은 경사-이동 단층 이외에 (동)북동 방향의 준수평-직립 개방습곡에 의해 규제되어 있다.

(2) 단열계는 적어도 6~7회의 변형단계를 걸쳐 형성되었다. D1 단계; 연장성이 우세한 동서(D1-1 단계)와 남북(D1-2 단계) 방향의 주 단열조 형성기, D2 단계; 북서 방향의 인장단열 형성과 동서(우수향)와 남북(좌수향) 방향의 공액 전단단열 운동기, D3 단계; 북동 방향의 인장단열 형성과 동서(좌수향)와 남북(우수향) 방향의 공액 전단단열 재활동기, D4 단계; 연장성이 미약한 남북 방향의 인장단열 형성기, D5 단계; 북서 방향의 인장단열 재형성과 동서(우수향)와 남북(좌수향) 방향의 공액 전단단열 재활동기, D6 단계; 연장성이 미약한 동서 방향의 인장단열 형성기. 변형단계별 단열조의 출현빈도(연장성)는 변형단계별 단열조의 평균 개수/1 m(조밀도, 간격)와 일반적으로 반비례적인 관계를 보이고, 이전에 형성된 단열조일수록 연장성이 우세하고 광범위하게 산출하며 단열조의 간격이 넓게 나타난다. 전체 단열조의 평균 조밀도는 4.20개로서 모이산 지역의 단열조는 평균 23.8 cm 간격 이상으로 발달한다.

(3) 모이산 지역의 저-황화작용 천열수 변질작용의 발생시기(약 77.9~73.1 Ma)는 남북과 동서 방향의 D1 단계 인장단열작용(후기 백악기 Cenomanian~Campanian)과 시기적으로 거의 일치하며, D1 단계 인장단열작용은 유천층군과 불국사 화성암류의 형성 및 변형을 초래하는 후기 백악기 이자나기판의 북향사고 섭입작용과 관련하여 남북 방향의 압축력과 인장력이 교호하는 불안정한 지구조환경 하에서 발생하였다.

(4) 모이산 지역의 석영맥은 천열수 광상의 특징적인 산출상인 타원 고리형 석영맥이 우세하게 관찰되며 그

방향성은 동서와 남북 방향으로 나타난다. 모이산 지역에서 석영 세맥을 통한 광화작용은 지구조적 응력과 관련하여 동시에 발생하였다기 보다는 천열수 파괴작용과 관련된 불규칙한 단열작용과 직후의 정적인 지구조환경 하에서 기존에 형성된 연장성이 우세한 D1 단계의 동서 방향과 남북 방향의 단열조를 따라 발생하였으며 이러한 광화작용은 후자보다 전자의 방향으로 보다 우세하게 진행되었다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 2010년도 “천열수 금광화대 및 열수변질 점토광화대 확보를 위한 전주기술개발” 과제에서 지원되었습니다. 이 논문의 개선을 위해 여러 가지 건설적인 의견을 주신 심사위원님들께 깊은 감사를 보냅니다.

참고문헌

- Bowden, C.D. (2007) Epithermal systems of the Seongsan district, South Korea; an investigation on the geological setting and spatial and temporal relationships between high and low sulfidation systems. Ph.D. thesis, James Cook University, Australia, 334p.
- Choi, P.-Y. and Choi, Y.S. (2007) Stress Model of the Opening of the Cretaceous Eumseong Basin. KIGAM Bulletin, v.11, p.3-16.
- Choi, P.-Y., Choi, H.-Y., Hwang, J.-H., Kee, W.-S., Choi, Y.S., Lee, B.-J. and Kim, Y.B. (2002a) Explanatory note of the Mokpo and Yeosu sheets (1:250,000). KIGAM, 25p.
- Choi, P.-Y., Kwon, S.-K., Lee, S.R., Hwang, J.-H., Angelier, J. and An, G.-O. (2002b) Late Mesozoic-Cenozoic tectonic sequence of Southeast Korea. In Jin, M.-S., Lee, S.R., Choi, H.-I., Park, K.-H., Koh, S.-M. and Cho, D.-L.(ed.) Mesozoic sedimentation, igneous activity and mineralization in South Korea. KIGAM, p.52-88.
- Choi, P.-Y., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.-H., Kwon, S.-K., Ko, I.-S. and An, G.-O. (2002c) Movement history of the Andong Fault System: Geometric and tectonic approaches. Geosciences Journal, v.6, p.91-102.
- Choi, S.-G., Ryu, I.-C., Pak, S.J., Wee, S.-M., Kim, C.S. and Park, M.-E. (2005) Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. Ore Geology Reviews, v.26, p.115-135.
- 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, v.101, p.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, v.52, p.175-235.

- Chun, S.S. and Chough, S.K. (1995) The Cretaceous Uhangri Formation, SW Korea: lacustrine margin facies. *Sedimentology*, v.42, p.293-322.
- 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*, v.23, p.279-296.
- 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*, v.3, p.27-43.
- Jeong, J.O. and Jwa, Y.J., (2000) Volcanic stratigraphy and petrology of Cretaceous volcanic rocks in the eastern part of the Euseong Basin. *Jour. Petrol. Soc. Korea* v.9, p.238-253.
- Kang, J.-H. and Ryoo, C.-R. (2006) 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. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.15, p.180-193.
- Kim, C.S. and Choi, S.G. (2009) Potassium-Argon ages of the epithermal gold-silver mineralization in the Haenam-Jindo area, southwestern Korea. *Resource Geology*, v.59, p.415-421.
- Kim, E.-J., Hong, Y.-K. and Chi, S.-J. (2011) Geochemical Variation of Hwangsan Volcanic Complex by Large Hydrothermal Alteration. *Econ. Environ. Geol.*, v.44, p.95-107.
- Kim, I.J. and Nagao, K. (1992) K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in southwest Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.1, p.58-70.
- Koh, S.M. (1996) Geochemical characteristics of the Cretaceous volcanic rocks and Bukok hydrothermal deposits in the Haenam volcanic field, Chollanamdo, Korea. Unpublished Ph.D. thesis, Seoul National University, Korea, 181p.
- Koh, S.M. and Chang, H.W. (1997) Geological and geochemical characteristics of the Bukok hydrothermal clay deposits in the Haenam area, Korea. *Resource Geology*, v.47, p.29-40.
- Koh, S.M., Kim, H.-S., Kim, C.K., Yi, M.-J., Jo, Y.-D., Yoo, J.H., Jeong, S.-B., Ryoo, C.-R., Kim, Y.-D., Heo, C.-H., Kim, Y.U., Park, S.-G., Lee, D.K., Son, J.-S., Kim, T.-K., Hong, Y.-K., Park, S.-W., Yang, D.H., Park, J.-T., Kim, S.K., Sohn, J.-S., Lee, J.H., Chi, S.-J., Seo, J.-R., Ko, I.-S., Lee, H.Y., Kim, I.J., Kim, D.-O. and Lee, T.-S. (2009) Technical development on the life cycle of the Haenam epithermal gold mineralized area and hydrothermal clay resources. *MKE*, GP2009-003-2009(1), 182p.
- Koh, S.M., Takagi, T., Kim, M.Y., Hong, S.S. and Sudo, S. (2000) Geological and geochemical characteristics of the hydrothermal clay alteration in South Korea. *Resource Geology*, v.50, p.229-242.
- Lee D.-S. and Kang, J.-H. (2009) Movement History of Faults Considered from the Geometric and Kinematic Characteristics of Fracture System in Gilan-cheongsong Area, Gyeongsang Basin, Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.18, p.293-305.
- Lee, D.W. (1999) Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. *The Island Arc*, v.8, p.218-231.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M. (1997) Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *The Island Arc*, v.6, p.121-142.
- Park, S.-I., Kim, Y.-S., Ryoo, C.-R. and Sanderson, D.J. (2010) Fractal analysis of the evolution of a fracture network in a granite outcrop, SE Korea. *Geosciences Journal*, v.14, p.201-215.
- Peacock, D.C.P. (2001) The temporal relationship between joints and faults. *Journal of Structural Geology*, v.23, p.329-341.
- Petit, J.-P. (1988) Can natural fractures propagate under mode II condition?. *Tectonics*, v.7, p.1243-1256.
- Pollard, D.D. and Aydin, A. (1988) Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*, v.100, p.1181-1204.1: 50,000.
- 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*, v.20, p.1641-1661.
- Reches, Z. and Lockner, D.A. (1994) Nucleation and growth of faults in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research*, v.99, p.18159-18174.
- Son, M., Chong, H.-Y. and Kim, I.-S. (2002) Geology and geological structures in the vicinities of the southern part of the Yonil tectonic line, SE Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.38, p.175-197.
- Son, M., Kim, J.-S., Chong, H.-Y., Lee, Y.H. and Kim, I.-S. (2007) Characteristics of the Cenozoic crustal deformation in SE Korea and their tectonic implications. *Korean Jour. of Petrol. Geol.*, v.13, p.1-16.