

<Short Note>

콜롬비아 동부 비차다(Vichada) 지역의 지질구조 발달사

진광민* · 유장한 · 고상모
한국지질자원연구원 광물자원연구본부

요 약

연구지역인 동부 콜롬비아 비차다(Vichada) 지역은 중원생대 파르파자 또는 라파키비 화강암으로 구성되어 있으며, 제4기 충적층이 넓게 피복하고 있다. 이 지역에는 특징적인 습윤한 기후에 의해 형성된 inselberg, spheroidal weathering, runnel, mushroom rock, gnamma, rock basin 등의 화강암 풍화 지형이 발달한다. 연구지역에 발달하는 단층, 단열, 세맥 및 암맥 등의 지질구조를 이용하여 연구지역의 지질구조 발달사를 수립하였다. 단열군들은 북동-남서 방향의 인장단열과 이를 채운 산성암맥 → 북북동-남남서 방향의 인장단열과 이를 채운 석영맥 → 동북동-서남서 방향의 페그마타이트, 북동-남서 방향의 우수향 및 서북서-동남동 방향의 좌수향 주향이동단층 → 남-북 방향의 좌수향 주향이동단층의 순서로 발달한다. 일부 특정한 방향의 단열 및 단층을 따라 발달한 세맥 및 암맥은 각 시기의 유체유동과 세맥 및 암맥의 형성에 중요한 요인으로 작용한 것으로 생각된다.

주요어: 라파키비 화강암, 단층, 단열, 지질구조 발달사, 유체유동, 화강암 지형

Kwangmin Jin, Jang-Han Yoo and Sang-Mo Koh, 2015, Study on the developing history of geological structures in the Vichada area, eastern Colombia. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 3, p. 333-342

ABSTRACT: The study area, Vichada, eastern Colombia, is composed of Mesoproterozoic Parguaza or Rapakivi granite, which is covered by Quaternary alluvium. Some granite landforms such as inselberg, spheroidal weathering, runnel, mushroom rock, gnamma, rock basin are developed by distinct climate in the study area. The sequence of the development of geological structures was established based on the analysis of geological structures, such as faults, fractures, veinlets and dykes in Mesoproterozoic granite within the study area. The deformation history in the study area has the following sequence; NE-SW trending extensional fractures and aplite, NNE-SSW trending extensional fractures and quartz veins, ENE-WSW trending pegmatite, NE-SW trending right-lateral and WNW-ESE trending left-lateral faults, N-S trending left-lateral strike-slip fault. Some distinctive veinlets and dykes intruded the specific trending fractures act as critical controlling factors for contributing of fluid flow, veinlets and dykes.

Key words: Rapakivi granite, fault, fracture, developing history of the geological structures, fluid flow, granite landform

(Kwangmin Jin, Jang Han Yoo and Sang-Mo Koh, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea)

1. 서 론

콜롬비아는 남아메리카 대륙의 북서부에 위치하는 나라로 북부 안데스산맥의 최북단에 위치한다(그림 1). 주변국으로는 동쪽으로 베네수엘라와 브라질, 남쪽으로는 페루와 에콰도르, 북쪽으로는 카리브해 그리고 북서쪽으로는 파나마와 인접하고 있다. 연구

지역인 비차다(Vichada) 지역은 콜롬비아의 수도인 보고타(Bogota)로부터 동쪽으로 약 700 km 떨어진 지역으로 베네수엘라와 접하고 있다(그림 1). 해발 고도 약 2,600 m인 수도 보고타와는 달리 연구지역은 해발고도가 평균 약 100-200 m이며, 열대밀림, 하천, 늪지, 초원 등 습윤한 열대기후의 특성을 보인다. 연구지역은 중원생대(Mesoproterozoic)의 파르

* Corresponding author: +82-42-868-3926, E-mail: maxgarion@kigam.re.kr

과자 또는 라파키비 화강암(parguaza or rapakivi granite)이 솟아 올라와 있는 암주 형태로 발달한다. 그리고 이들 화강암 내에는 단층, 단열, 석영맥, 산성 암맥 그리고 페그마타이트 등의 지질구조가 발달한다. 이번 연구에서는 연구지역에 분포하는 파르과자 또는 라파키비 화강암체에 발달하는 단층, 단열, 세맥 및 암맥 등의 지질구조들에 대한 절단관계나 2차적인 단열들의 발달양상을 이용하여 구조발달사를 연구하였다.

2. 지질 및 화강암 지형

2.1 연구지역의 지질

콜롬비아가 위치하는 남아메리카의 지구조적 환경은 중부 안데스산맥을 따라 남-북 내지 북북동-남남서 방향의 카우카-알마구에르(Cauca-Almaguer), 실비아-피하오(Silvia-Pijao)와 산 헤로니모(San Jerónimo) 단층대들에 의해 분류되며, 이들 단층대를 기준으로 동부지역은 원생대 변성암류, 서부 지역은 백악기

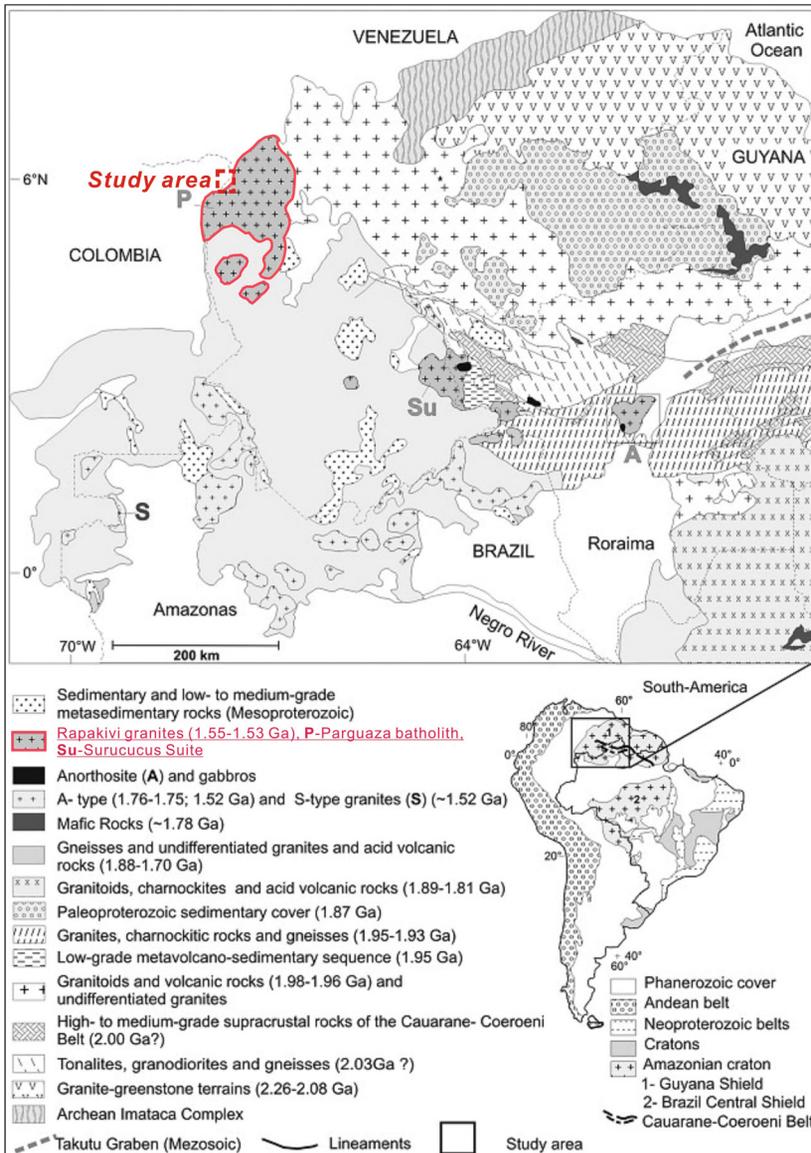


Fig. 1. Tectonic, geological and location maps of the study area (modified from Fraga *et al.*, 2009).

및 제3기 화성암류로 구성된다(Koh *et al.*, 2011).

동부 원생대 변성암류는 리오-후루에나대(Rio Negro-Juruena Province), 그렌빌리안대(Grenvillian Colombian Province)와 아르퀴아대(Arguia Province)등 크게 3개의 구역으로 나뉜다(Koh *et al.*, 2011). 리오-후루에나대는 과야나 순상지(Guayana Shield)의 일부로서 저도(low grade), 중도(medium grade), 고도(high grade) 변성암, 라파키비 화강암, 화산쇄설암류, 알칼리 반력암 등으로 구성되고, 저지대를 중심으로 오르도비스기의 해양성 퇴적암이 피복하고 있다. 그

렌빌리안대는 각섬암과 백립암으로 구성된다. 아르퀴아대의 동쪽은 실비아-피아호 단층으로 경계를 이루며 서쪽으로는 카우카-알마구에르 단층에 의해 경계지워진다. 아르퀴아대는 오르도비스기-실루리아기의 석영-견운모 편암 및 각섬석 편암류가 분포하며, 일부 고생대 퇴적암이 협재한다(Koh *et al.*, 2011).

연구지역인 비차다 주변의 지질은 선캄브리아시대 중원생대 라파키비 화강암이 고원생대와 중원생대 지층들을 따라서 발달하고 있다(그림 1, 2). 이 화강암은 아마존 대륙괴(Amazonian Craton) 내의 파

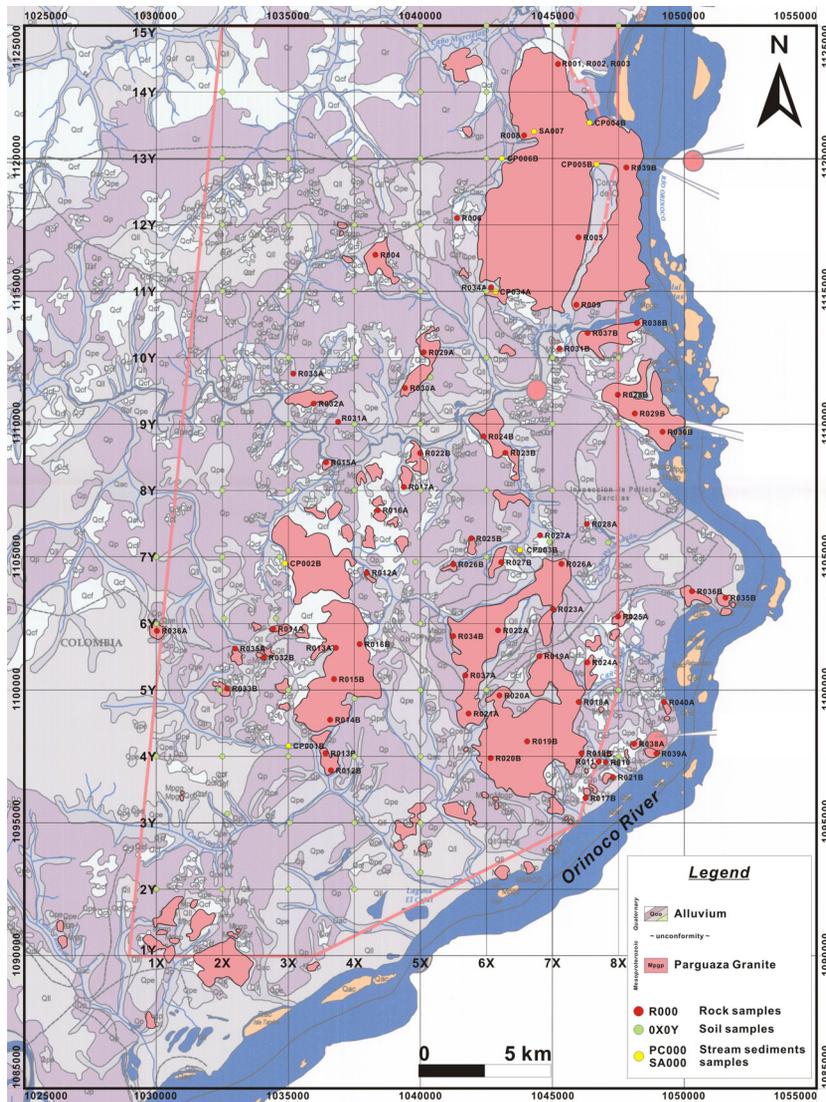


Fig. 2. Distribution map of Rapakivi granite and sampling sites in the study area (modified from SGC, 2012).

르과자 저반(Parguaza batholith)에 속하는 암석이다. 파르과자 저반은 북서-남동 방향으로 약 900 km에 걸쳐 분포하고 있다(그림 1). 연구지역은 이 저반의 북서쪽 끝에 위치한다. 이 화강암에 대한 기존 연구자들의 U/Pb 저어콘의 연대는 약 $1,500 \pm 25$ Ga로 측정되었으며(Gaudette *et al.*, 1978), 이 암석은 라파키비 조직이 잘 발달되어 라파키비 화강암으로 불린다(Hatch *et al.*, 1984; Haapala and Rämö, 1992). 라파키비 조직은 백색의 Na-장석이 붉은색 정장석을 얇게 에워싸는 반정질 미세화강암류(poprphyritic microgranites)에서 관찰되는 조직이다. 결정작용에서 제일 먼저 정장석이 풍부하게 정출되며, 이후 온도가 떨어짐에 따라 석영과 Na-사장석류가 정출되어 이러한 조직이 형성된다(Hatch *et al.*, 1984). 라파키비 화강암 내에서 관찰되는 장석 반정의 크기는 약 수 cm에서 최대 10 cm의 크기로 원형 내지 타원형의 형태로 발달하며, 유색광물로는 흑운모와 각섬석이 관찰된다(그림 3). 연구지역 내 라파키비 화강암의 실질적인 조직과 구성광물을 확인하기 위하여 암석박편을 제작하여 현미경하에서 관찰을 하였다(그림 4). 박편 상에서 관찰되는 광물은 분화 말기 산물인 석영, 퍼사이트, 미사장석 등으로 구성되며, 부수광물로는 사장석류, 흑운모 등이 관찰된다. 그리고 간혹 자철석 및 갈철석 등의 불투명광물이 일부 관찰되었다.

2.2 연구지역 내 화강암 지형

지하에 존재하던 화강암은 지표에 노출되면서 지

각변동, 기후, 시간, 지질구조, 암석조직 등의 다양한 인자들로 인하여 다양한 지형을 형성한다(Cho and Jwa, 2005). 화강암의 표면 형태는 크게 외인성(exogenous)과 내인성(endogenous)의 요인들로 결정된다(Vidal Romaní and Twidale, 2010). 외인성의 요인은 기후 및 화강암의 노출과 직접적으로 관련되며, 내인성 요인은 화강암이 관입한 이후 형성된 지질구조의 영향을 받는다(Vidal Romaní and Twidale, 2010).

연구지역에서 관찰되는 화강암 지형의 종류는 inselberg, spheroidal weathering, runnel, mushroom rock, gnamma, rock basin 등이다(그림 5). Inselberg는 평평한 평지에 높이 솟은 둥근 형태의 지형을 말하며, 연구지역 전체에 걸쳐 발달한다(그림 5a). 이 지형은 건조 또는 반건조 지역들에서 나타나는 침식 윤회의 마지막 단계에 형성되는 특징적인 지형이다(Vidal Romaní and Twidale, 2010). Spheroidal weathering은 화강암에 발달한 절리들을 따라서 화강암 면이 화학적 풍화에 의해 둥근 형태로 발달하는 것으로 연구지역 내에서 흔하게 관찰된다(그림 5b). Runnel은 화강암체의 표면에 물이 지속적으로 흐르며 형성된 물길 형태를 의미하며, 물에 의한 화학적 풍화에 의해 형성된다(그림 5c). Mushroom rock은 일반적으로 사막과 같은 건조한 환경에서 바람에 의해 날아다니는 모래와 먼지 등에 의해 암석의 아래 부분을 중심으로 풍화가 진행되어 형성되거나 물에 의해 형성되는 지형이다(그림 5d). 우기인 4월에서 10월 사이에는 많은 비가 내려 저지

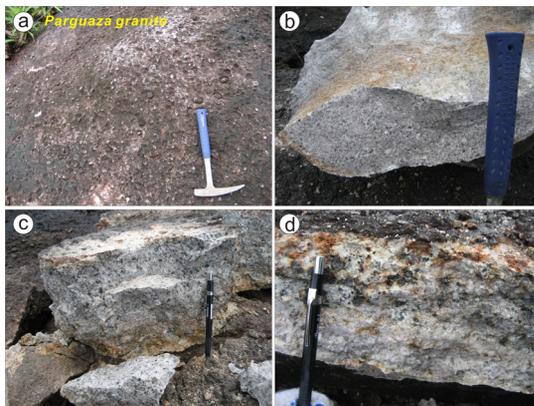


Fig. 3. Photographs of the Rapakivi granite in the study area. a) Weathering surface of the Rapakivi granite, b) Medium grained Rapakivi granite, c) & d) Coarse grained Rapakivi granite.

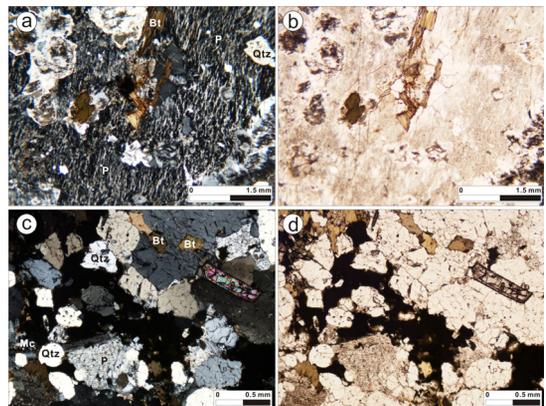


Fig. 4. Microscopic textures of the Rapakivi granite in the study area (Qtz: quartz, P: perthite, Bt: biotite, Mc: microcline). a) & c) Cross nicols, b) & d) Open nicols.

대인 초원의 경우 물에 의해 침수되기도 한다. 따라서 연구지역 내에 발달하는 이런 버섯바위들은 물에 의한 화학적 풍화에 의해 형성된 것으로 생각된다. Gnamma는 풍화혈(weathering pit)의 일종으로 암석의 수평면에서 동결 및 융해, 또는 습윤 및 건조 등이 반복되는 환경에서 형성된다(그림 5e; Cho and Jwa, 2005). 반건조 기후인 연구지역에서의 Gnamma의 형성은 이끼류 식물의 성장과 고사 그리고 바람에 의해 이끼류가 제거되는 과정이 반복됨으로서 형성되는 것으로 해석된다. Rock basin의 형태는 Gnamma와 비슷한 원형을 보이거나 분포에 있어서 다르게 발달한다(그림 5f). 즉 Gnamma의 분포는 불규칙적이거나 rock basin의 경우는 발달하는 단열을 따라 배열하는 형태를 보인다(그림 5f). 이는 Rock basin이 Gnamma와 달리 구조적 요인에 의해 형성된다는 것을 지시한다.

연구지역인 비차다 지역은 열대밀림, 하천, 늪지, 초원 등 습윤한 기후가 특징적이며, 연중 4월에서 10월까지의 우기로 많은 강우량이 기록되지만, 11월부터 3월까지의 매우 건조한 기후인 건기의 특징을 나타낸다. 연구지역의 평균강수량은 약 2,200 mm이다(Servicio Geologico Colombiano, 2012). 따라서

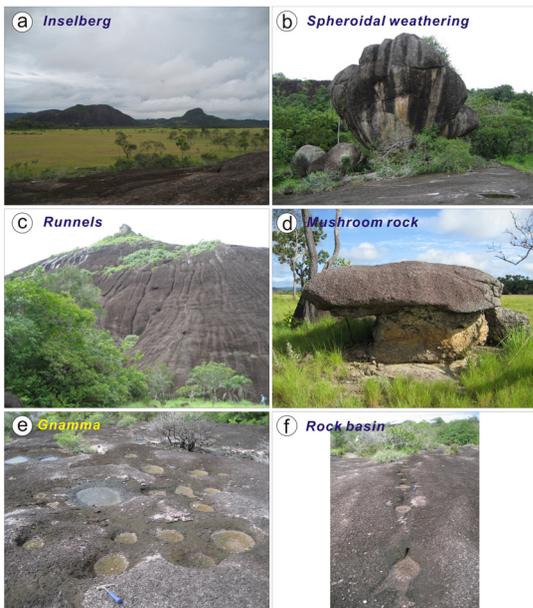


Fig. 5. Various granite landforms in the study area. a) Inselberg, b) Spheroidal weathering, c) Rinnels, d) Mushroom rock, e) Gnamma, f) Rock basin.

앞서 언급한 특징적인 화강암 지형은 우기와 건기의 반복으로 인해 화강암의 풍화가 빠르게 진행되어 발달하는 것으로 해석된다.

3. 지질구조 및 단열발달사

연구지역 내에 분포하는 라파키비 화강암 내에는 여러 번의 변형작용에 의해 다양한 지질구조요소들이 발달한다. 특히 연구지역 내의 화강암에는 취성 변형작용(brittle deformation)에 의해 형성된 단층 및 단열 그리고 이들을 충전하고 있는 산성암맥, 석영맥, 페그마타이트맥 등이 발달한다(그림 6). 이러

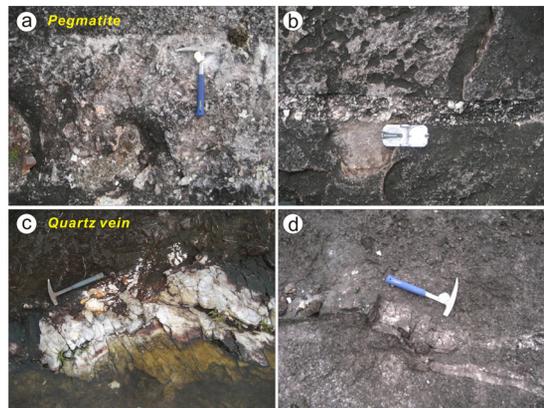


Fig. 6. Photographs of the pegmatite and quartz veins in the study area. a) & b) Pegmatites in the Rapakivi granite, c) & d) Quartz veins in the Rapakivi granite. Note that previous fractures are filled with pegmatite and quartz veins.

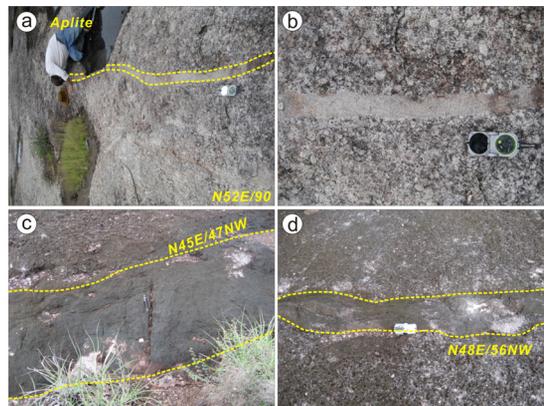


Fig. 7. Photographs of the NE-SW trending fractures and aplites developed during 1st phase of deformation in the study area.

한 지질구조요소들의 발달 특성, 절단관계 및 2차적인 단열의 발달양상 등을 이용하여 연구지역 내의 지질구조발달사를 수립하였다.

3.1 첫 번째 변형작용(D₁) 및 지질구조

연구지역에 발달하는 산성암맥의 경우 수 cm에서 수십 cm의 폭으로 발달한다(그림 7). 주로 관찰되는 단열과 이를 채운 산성암맥의 방향은 N52°E/90°, N48°E/56°NW, N45°E/47°NW이며, 이런 방향의 단열과 산성암맥은 연구지역 내의 라파키비 화강암 내에 다수 발달한다(그림 7). 따라서 연구지역 내 첫 번째 변형작용(D₁)은 북동-남서 방향의 압축력에 의해 형성된 단열과 이를 채운 산성암맥으로부터 인자된다.

3.2 두 번째 변형작용(D₂) 및 지질구조

북북동-남남서 방향의 단열들은 수 mm에서 수 cm의 폭으로 연구지역 내에 발달한다. 그리고 이를 채운 석영맥의 경우 수 cm에서 수십 cm의 두께로 북북동-남남서 방향으로 발달한다(그림 8). 특히 이 방향의 단열과 이를 채운 석영맥은 첫 번째 변형작용에 의해 형성된 단열과 이를 채운 산성암맥을 관통하며 발달한다(그림 8c, 8d). 이는 첫 번째 변형작용 이후 두 번째 변형작용에 의해 이들이 형성된 것을 지시한다. 따라서 두 번째 변형작용(D₂)은 북북동-남남서 방향의 압축력에 의해 형성된 단열과 이를

채운 석영맥으로 특징된다(그림 8).

3.3 세 번째 변형작용(D₃) 및 지질구조

연구지역 내에 관찰되는 페그마타이트는 동북동-서남서 방향의 단열을 따라서 관입하여 발달하며 약 수 cm에서 수십 cm의 두께로 발달한다(그림 9a, 9b). 그리고 서북서-동남동 방향의 좌수향 운동감각의 주향이동단층은 기존에 발달하고 있던 북북동-남남서 방향의 석영맥을 절단하며 발달한다(그림 9c, 9d). 또한 북동-남서 방향의 우수향 운동감각의 주향이동단층들이 발달한다. 이 단층들은 단층계단열결부(fault step-over)나 단층이 굴곡(fault bend)되는 부분에서 특징적인 해방굴곡(releasing bend)의 형태로 발달하며, 이 부분에는 석영맥들이 충전하거나 소규모의 분지들이 발달한다(그림 10). 이는 이 부분이 우수향 운동감각의 주향이동단층운동 시 확장되며 발달한 것을 지시한다. 또한 단층말단부(fault tip)에서는 말꼬리구조(horsetail structure)가 우수향 운동감각의 주향이동단층을 지시하며 발달한다(그림 10c). 이와 같이 단층계단열결 부분의 확장 및 단층말단부의 말꼬리구조들은 이 단층이 우수향 운동감각의 주향이동단층으로 발달한 것을 지시한다. 또한 화강암의 일부 암체에서는 기존에 발달하고 있던 산성암맥을 세 번째 변형작용에 의해 형성된 북동-남서 방향의 우수향 운동감각의 주향이동단층이 관통하거나 절단하는 것을 보여준다(그림 11b). 또한 이 단층의 말



Fig. 8. Photographs of the NNE-SSW trending fractures and quartz veins during 2nd phase of deformation in the study area. a) & b) NNE-SSW trending quartz veins, c) & d) NNE-SSW trending fractures penetrates previous aplites developed during 1st phase of deformation.

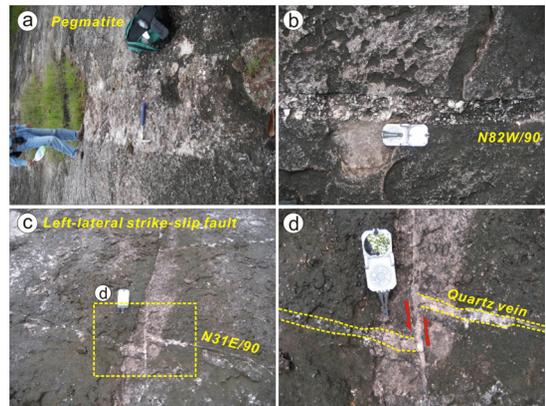


Fig. 9. Photographs of the ENE-WSW trending pegmatite developed during 3rd phase of deformation. a) & b) ENE-WSW trending pegmatites. c) & d) The WSW-ENE trending left-lateral strike-slip fault developed during 3rd phase of deformation, which cross-cuts previous quartz veins.

단부에서도 우수향 운동감각의 주향이동단층을 지시하는 말꼬리구조가 발달한다(그림 11d). 그러나 연구지역에서는 서북서-동남동 방향의 좌수향 운동감각의 주향이동단층과 북동-남서 방향의 우수향 운동감각의 주향이동단층 간의 상호 선후관계를 명확하게 지시하는 지질구조들이 관찰되지 않아, 이 연구에서는 두 방향의 단층들의 발달은 동시기에 형성될 수 있는 공액상단층(conjugate fault)으로 가정하여 단열발달사를 수립하였다. 따라서 연구지역 내 세

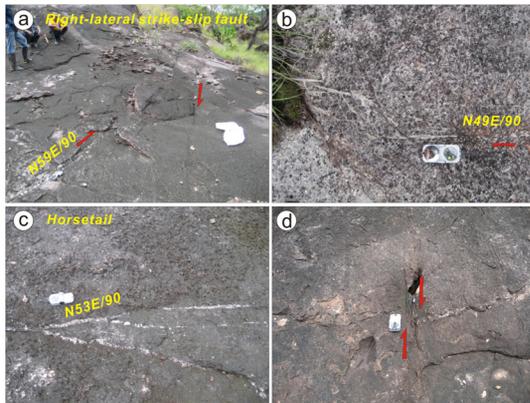


Fig. 10. Photographs of the NE-SW trending right-lateral strike-slip fault developed during 3rd phase of deformation. a) & b) Right-lateral strike-slip movement showing releasing bends. c) Horsetail structure developed at the fault tip indicates right-lateral movement sense. d) Right-lateral movement cross-cuts previous quartz veins.

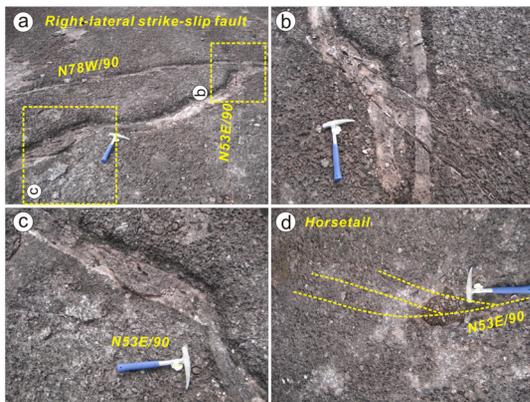


Fig. 11. Photographs of NE-SW trending right-lateral strike-slip faults a), b) & c) The NE-SW trending quartz veins penetrate previous WNW-ESE trending aplite. d) Horsetail structure at the tip of a fault indicates right-lateral movement sense.

번째 변형작용(D₃)은 동북동-서남서 방향의 압축력에 의해 형성된 단열 및 이를 채운 페그마타이트와 석영맥, 서북서-동남동 방향의 좌수향 운동감각의 주향이동단층과 북동-남서 방향의 우수향 운동감각의 주향이동단층들로 특징지어 진다(그림 9, 10, 11).

3.4 네 번째 변형작용(D₄) 및 지질구조

연구지역 내 최후기 변형작용(D₄)은 북북서-남남동 방향의 압축력에 의해 형성된 좌수향 운동감각의 주향이동단층으로 인지된다(그림 12). 이 단층은 세 번째 변형작용에 의해 형성된 동북동-서남서 방향의 단열 및 이를 채운 석영맥과 페그마타이트를 절단하며 발달한다(그림 12).

3.5 연구지역의 지질구조발달사

연구지역 내에 발달하는 단층, 단열, 산성암맥, 석영맥, 페그마타이트 등 라파키비화강암 노두에서 관찰되는 지질구조들의 절단관계 및 2차적인 단열의 발달양상 등을 이용하여 상호관계를 분석한 결과 총 4번의 변형작용이 인지되었다(표 1).

첫 번째 변형작용에 의해 형성된 북동-남서 방향의 단열 및 산성암맥 등(그림 7)은 두 번째 변형작용에 의해 형성된 북북동-남남서 방향의 단열 및 석영맥에 의해 관통된다(그림 8c, 8d). 그리고 두 번째 변형작용에 의해 형성된 단열 및 이를 채운 석영맥 등은 세 번째 변형작용인 동북동-서남서 방향의 최대 압축력에 의해 형성된 서북서-동남동 방향의 좌수향



Fig. 12. Photographs of the N-S trending left-lateral strike-slip fault developed during the last phase of deformation. Note that it cross-cuts previous pegmatites developed during 3rd phase of deformation.

Table 1. Developing sequence of the geologic structures in the study area.

Developing sequence of the geologic structures		
Relative sequence	Principal stress	Structural deformation inferred from outcrops
4		NNW-SSE trending compression (?) - N-S trending left-lateral strike-slip faults (?)
3		ENE-WSW trending compression - WNW-ESE and NE-SW trending strike-slip faults (conjugate fault?) - WNW-ESE trending quartz and pegmatite veins - reactivation of pre-existing fractures
2		NNE-SSW trending compression - NNE-SSW trending fractures and calcite veins
1		NE-SW trending compression - NE-SW trending fractures and aplites

주향이동단층 및 북동-남서 방향의 우수향 주향이동 단층들에 의해 각각 변위되었다(그림 9, 10, 11). 특히 이 두 방향의 단층들은 단층계단연결부나 단층말단부 등에서 좌수향 및 우수향 운동감각을 뚜렷하게 지시하는 말꼬리구조가 발달한다(그림 10, 11). 그러나 이 두 방향의 주향이동단층들 상호간의 절단관계 및 선후관계는 관찰되지 않는다. 따라서 이 두 단층은 공액상단층으로 가정하여 해석하였다. 마지막으로 연구지역 내 최후기 변형작용은 북북서-남남동 방향의 최대압축력하에서 기존에 발달하는 모든 지질구조를 남-북 방향의 좌수향 주향이동단층이 절단하는 것이다(그림 12).

4. 토 론

4.1 지질구조와 열수유체의 관계

석유나 지하수와 같은 유체의 유동은 주로 단층 및 단열 등에 의해 제어된다는 연구들이 많이 보고되고 있다(e.g., Randolph and Johnson, 1989; Scholz, 1990; Smith *et al.*, 1990; Caine *et al.*, 1993; Antonellini and Aydin, 1994; Forster *et al.*, 1994; Newman and Mitra, 1994; Goddard and Evans, 1995; Caine *et al.*, 1996; Dholakia *et al.*, 1998). 그리고 단층 및 단

열은 다양한 규모에 걸쳐 암석의 투수성에 영향을 준다(Leckenby *et al.*, 2005). 따라서 이런 단층과 단열을 따른 투수성에 대한 연구(e.g., Gudmundsson, 2001; Wibberly, 2002) 및 모델링을 통한 연구(e.g., Zhang and Sanderson, 1995; Jourde *et al.*, 2002)들이 활발히 수행되고 있다. 그러나 야외에서 관찰되는 단층과 단열의 기하학적 형태는 간단한 모델링으로 묘사하기에는 훨씬 복잡하고 상호 유기적으로 연관되어 있다. 특히 유체의 유동은 특정한 방향의 단층 및 단열을 따라서 높게 나타난다(Barton *et al.*, 1995). Zhang and Sanderson (1995, 1998)은 단층 및 단열망 내에서 단층의 변위와 국부적인 응력변화의 결과로 형성된 응력은 단층 및 단열을 제어하고 이런 단층과 단열을 따라 유체의 유동이 제어된다고 보고하였다.

연구지역 내에 발달하는 세맥 및 암맥은 산성암맥, 석영맥 그리고 페그마타이트가 있다. 각각의 세맥 및 암맥은 각 변형단계의 특정한 방향을 따라 관입하며 발달한다. 산성암맥의 경우 첫 번째 변형작용에 의해 형성된 북동-남서 방향의 단열을 따라 발달하고, 석영맥은 두 번째와 세 번째 변형작용에 의해 형성된 북북동-남남서 방향과 서북서-동남동 방향의 단열을 따라 발달한다. 그리고 페그마타이트의

경우 세 번째 변형작용에 의해 발달한 서북서-동남 동 방향의 단열을 따라 발달한다. 이는 특정한 시기의 세맥 및 암맥들이 각각의 시기에 형성되어 있는 특정한 방향의 단열 및 단층들을 따라 형성된 것을 지시한다. 따라서 각각의 단층 및 단열의 발달 시기와 세맥 및 암맥의 형성시기를 상호 비교연구함으로써 단층 및 단열 등의 지질구조와 유체유동의 상호 유기적인 연관성을 이해할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

콜롬비아 동부 비차다 지역에 발달하는 단층, 단열, 세맥 및 암맥 등의 지질구조에 대한 분석을 통하여 지질구조 발달사를 연구하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 연구지역의 지질은 중원생대의 라파키비 화강암이며, 압추 형태로 솟아 올라와 있다. 그리고 저지대를 중심으로 제4기 충적층이 분포한다.
- 2) 연구지역에서 관찰되는 화강암 지형의 종류는 inselberg, spheroidal weathering, runnel, mushroom rock, gnamma, rock basin 등이며, 이들은 우기와 건기가 반복되는 연구지역의 기후에 의해 형성되었다.
- 3) 연구지역 내에 발달하는 단층, 단열, 세맥 및 암맥 등의 지질구조 연구를 통하여 총 4번의 변형작용이 인지되었다. 단열군들은 북동-남서 방향의 인장단열과 이를 채운 산성암맥 → 북북동-남남서 방향의 인장단열과 이를 채운 석영맥 → 동북동-서남서 방향의 페그마타이트, 북동-남서 방향의 우수향 운동감각 및 서북서-동남동 방향의 좌수향 운동감각의 주향이동단층 → 남-북 방향의 좌수향 운동감각의 주향이동 단층의 순서로 발달한다.
- 4) 연구지역 내에 발달하는 세맥 및 암맥은 각 변형단계에서 형성된 특정한 방향을 따라 관입하며 발달하는 것으로 각 변형단계 이후에 특정 열수유체들이 특정한 방향의 단열을 따라 이동 및 배대되며 발달한 것으로 해석된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 주요사업으로

수행 중인 “해외/북한/북극권 광물자원 탐사 및 부존잠재성 평가(15-3217)” 과제의 일환으로 수행되었다. 이 논문이 더욱 다듬어질 수 있도록 꼼꼼하게 검토하고 문제점을 지적해 주신 강원대학교의 이희권 교수님과 익명의 심사위원님, 그리고 편집위원이신 부경대학교 김영석 교수님께 진심으로 감사를 드린다.

REFERENCES

- Antonellini, M. and Aydin, A., 1994, Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 78, 355-377.
- Barton, C.A., Zoback, M.D. and Moos, D., 1995, Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23, 683-686.
- Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028.
- Caine, J.S., Forster, C.B. and Evans, J.P., 1993, A classification scheme for permeability structures in fault zones. *American Geophysical Union*, 74, 677.
- Cho, K.-M. and Jwa, Y.-J., 2005, Study on the Source Area of the Stones from Stone-cultural Properties -Geomorphology and Petrological Approach for the Iksan Area-. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, Vol. 14, 24-37.
- Dholakia, S.K., Aydin, A., Pollard, D.D. and Zoback, M.D., 1998, Fault-controlled hydrocarbon pathways in the Monterey formation, California. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 82, 1551-1574.
- Forster, C.B., Goddard, J.V. and Evans, J.P., 1994, Permeability structure of a thrust fault, in the mechanical involvement of fluids in faulting. *U.S. Geological Survey Open-file Report 94-228*, 216-223.
- Fraga, L.M.B., Dall'agnol, R., Costa, J.B.S. and Macambira, M.J.B., 2009, The mesoproterozoic Mucajaí anorthosite-magnetite-rapakivi granite complex, Amazonian Craton, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, 47, 1469-1492.
- Gaudette, H.E., Mendoza, V., Hurley, P.M. and Fairbairn, C.A.V., 1978, Geology and age of the Parguaza rapakivi granite, Venezuela. *Geol. Soc. Am., Bull.*, 89, 1335-1340.
- Goddard, J.V. and Evans, J.P., 1995, Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, USA. *Journal of Structural Geology*, 17, 533-547.
- Gudmunsson, A., 2001, Fluid overpressure and flow in fault zone: field measurements and models. *Tectonophysics*,

- 336, 183-197.
- Haapala, I. and Rämö, O.T., 1992, Tectonic setting and origin of the Proterozoic rapakivi granites of southeastern Fennoscandia. *Trans. R. Soc. Edinburg, Earth Sci.*, 83, 165-171.
- Hatch, F.H., Wells, A.K. and Wells, M.K., 1984, Petrology of the ingenous rocks. CBS Publishers & Distributors, India, 551 p.
- Jourde, H., Cornaton, F., Pistre, S. and Bidaux, P., 2002, Flow behavior in a dual fracture network. *Journal of Hydrology*, 266, 99-119.
- Koh, S.-M., Lee, G. and You, B.W., 2011, Geology and Mineral Resources of Colombia. *J. Miner. Soc. Korea*, 24, 245-252 (in Korean with English Abstract).
- Leckenby, R.J., Sanderson, D.J. and Lonergan, L., 2005, Estimating flow heterogeneity in natural fracture systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148, 116-129.
- Newman, J. and Mitra, G., 1994, Fluid-influenced deformation and recrystallization of dolomite at low temperatures along a natural fault zone, Mountain City window, Tennessee. *Geological Society of America Bulletin*, 106, 1267-1280.
- Randolph, L. and Johnson, B., 1989, Influence of faults of moderate displacement on groundwater flow in the Hickory sandstone aquifer in central Texas. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 21, 242.
- Scholz, C.H., 1990, *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge University Press, 439.
- Servicio Geologico Colombiano, 2012, Report of Technical Cooperation Project Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) and Servicio Geologico Colombiano (SGC). 38 p.
- Smith, L., Forster, C.B. and Evans, J.P., 1990, Interaction of fault zones, fluid flow, and heat transfer at the basin scale in hydrogeology of permeability environments. *International Association of Hydrogeologists*, 2, 41-67.
- Vidal Romani, J.R. and Twidale, C.R., 2010, Structural or climatic controlling in granite landforms? The development of sheet structure, foliation, boudinage, and related features. *CAD. LAB. XEOL. LAXE* 35, 189-208.
- Wibberly, C.A.J., 2002, Hydraulic diffusivity of fault gouge zones and implications for thermal pressurization during seismic slip. *Earth, Planets and Space*, 54, 1153-1171.
- Zhang, X. and Sanderson, D.J., 1995, Anisotropic features of geometry and permeability in fractured rock masses. *Engineering Geology*, 40, 65-75.
- Zhang, X. and Sanderson, D.J., 1998, Numerical study of critical behavior of deformation and permeability of fractured rock masses. *Marine and Petroleum Geology*, 15, 535-548.

Received : March 30, 2015

Revised : May 6, 2015

Accepted : May 11, 2015