

대규모 열수변질작용에 따른 황산 화산암복합체의 지구화학적 변화특성

김의준* · 홍영국 · 지세정

한국지질자원연구원 광물자원연구본부 국내/북한자원연구실

Geochemical Variation of Hwangsan Volcanic Complex by Large Hydrothermal Alteration

Eui-Jun Kim*, Young-Kook Hong and Se-Jung Chi

Domestic/North Korea Mineral Resources Group, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

The Hwangsan volcanic rocks, hosting the Moisan epithermal Au-Ag deposit are widely distributed throughout the Seongsan district, and associated with large hydrothermal alteration. They were analyzed as the Moisan and around volcanic rocks, and most of them show dacitic to rhyolitic compositions. Hydrothermal alteration related to epithermal system causes the host rocks to show the geochemical variation due to high mobility of alkali elements. These features can be applied for quantitative estimates of alteration intensity. Alteration intensity of volcanic rocks from the Moisan ranges from subtle to intense, based on AI vs. Na₂O diagram. The pattern that (CaO+Na₂O) content decrease with increasing K₂O content results from sericitic alteration, in which hydrothermal fluids continually provide K⁺ into country rocks but remove Ca²⁺ and Na²⁺ of feldspars within country rocks. The decrease of (CaO+Na₂O) with decreasing K₂O in some samples from the Moisan may be caused by advanced argillic alteration that all alkali elements are entirely removed from country rocks by acid hydrothermal fluids. Two alteration trends, based on AI and CCPI alteration indices suggest both sericitic alterations of feldspars to illite and sericite+chlorite+epyrrite alteration of high Mg and Fe activities. Trace and Rare Earth Elements patterns show the similar geochemical variation related to hydrothermal alteration. Of LIL elements, strong depletion of Sr²⁺, substituting for Ca²⁺ in feldspars, appears to be resulted from removal of Ca²⁺, during replacement of feldspars to aluminosilicates or phyllo silicates minerals by hydrothermal fluids. Relatively low total REEs contents (Moisan: 119-182 ppm; Seongsan: 111-209 ppm) and gently negative slopes suggest that significant mobility of LREEs appear to occur during hydrothermal alteration.

Key words : Hwangsan volcanic rocks, Moisan epithermal Au-Ag deposit, hydrothermal alteration, geochemical variation, alkali elements

모이산-은산 천열수 금-은광상을 배태하고 있는 황산 화산암들은 성산지구 전반에 걸쳐 널리 분포하며, 대규모 열수변질작용을 수반한다. 열수변질작용에 따른 지구화학적 변화특성을 파악하기 위해 모이산과 주변 화산암으로 구분하여 분석되었으며, 이들은 대체적으로 석영안산암질 내지 유문암질 조성을 갖는다. 천열수계에서 수반되는 열수변질작용은 모암으로부터 알카리원소들을 쉽게 유동시키기 때문에, 일정한 지구화학적 변화를 보인다. 이러한 특성은 열수변질작용의 정도를 정량화하는데 적용될 수 있다. 모이산 화산암들의 AI지수에 따른 Na₂O 함량변화는 미약한 정도에서부터 상당히 강한 변질작용을 수반하는 단계로 정량화 될 수 있다. K₂O 함량의 증가에 따른 CaO+Na₂O 함량의 감소는 열수유체로부터 지속적인 K⁺의 유입과 모암 내 장석류들의 Ca²⁺와 Na²⁺성분들이 제거되는 건운모화작용의 결과로 이해된다. 일부 모이산 화산암들의 선적인 변화는 강산 열수유체로부터 모든 알카리 성분들이 완전히 제거되는 강고령토변질작용의 결과로 이해될 수 있다. 또한 AI지수와 CCPI지수의 변화양상은 합금-은 석영맥을 형성시킨 광화유체의 유입으로 모이산 화산암들의 장석류가 일라이트로 교대되는 건운모변질작용과 Mg와 Fe의 활동도 증가에 따른 건운모+녹니석+황철석 변질작용에 해당하는 두 가지 변질양상을 갖는다. 미량원소 및 희토류원소들에서도 열

*Corresponding author: euijun.kim@kigam.re.kr

수변질작용과 관련된 지구화학적 변화특성을 보인다. 친지각원소인 Sr^{2+} 의 상당한 결핍은 열수변질작용동안 장석류들이 알루미늄 규산염광물 혹은 층상규산염광물들로 변질되는 과정에서 Ca^{2+} 가 제거되면서 이를 치환하고 있는 Sr^{2+} 이 함께 제거된 것으로 보인다. 상대적으로 낮은 총 희토류함량(모이산: 119-182 ppm; 성산지구: 111-209 ppm)과 완만한 부의 기울기는 열수변질작용동안 상당한 LREE원소들이 제거되었음을 지시된다.

주요어 : 황산 화산암, 모이산 천열수 금-은 광상, 열수변질작용, 지구화학적 변화, 알카리원소

1. 서 론

천열수 금-은광상은 일반적으로 전세계 귀금속의 상당량을 공급하는 중요한 광상유형이며, 대규모의 고품위 천열수광상들은 광물자원탐사의 주요 목적이 된다(Cooke and Simmons, 2000; Einaudi *et al.*, 2003). 천열수광상은 화산호 혹은 대륙호 환경에서 화산암내에 흔히 발달하며, 모암으로서의 역할을 하는 화산암 스위트(suite)는 주로 안산암질-석영안산암질-유문암질 조성을 갖는다.

우리나라 전라남도 해남군 황산면 부곡리 일대 성산지구는 천열수 금-은광상과 이와 함께 수반되는 대규모 점토광상들이 분포하는 지역으로 이미 여러 연구자들에 의해서 활발한 연구활동들이 이루어진 바 있다(Moon *et al.*, 1990; Kim *et al.*, 1992; Kim and Nagao, 1992; Kim and Kusakabe, 1993; Yoon 1993, 1995; Koh, 1996; Koh and Chang, 1997; Koh *et al.*, 2000; Bowden, 2007). 연구지역인 성산지구는 초생 황화광물의 황화정도(sulfidation state)에 근거하여 분류되는 고유황(High sulfidation)과 저유황(Low sulfidation) 천열수계가 모두 발달하고 있는 지역이다. 열수변질작용에 따른 점토광물들의 조합 및 열수변질작용 특성에 근거할 때, 은산과 모이산 지역은 성인적으로 저-중유황(Low- and Intermediate-sulfidation system) 천열수계와 관련되며, 이들을 중심으로 주변지역에 위치하는 옥매산, 춘산, 성산지역은 고유황 천열수계와 관련되는 것으로 보고된 바 있다(Bowden, 2007).

성산지구에 배태하는 은산과 모이산 천열수 금-은 광상은 화산암을 모암으로 하는 전형적인 천열수 금-은 광상의 한 유형으로, 이를 배태하는 화산암들은 상대적으로 우수한 투수성을 갖기 때문에, 광화유체의 유동에 상당히 유리하다. 천열수 금-은 광상을 배태하고 있는 이들 화산암들은 지표환경으로 상승하는 열수유체와의 반응을 통해서 물/암석 비, pH, 온도 등의 요인들에 의해 규제되는 특정 광물조합으로 구성된 대규모 열수변질대를 형성한다. 따라서 이러한 열수변질대에 관한 연구는 과거 광상의 형성을 야기 시킨 열수계

의 재구성을 통한 열수유체의 진화특성을 이해하는 동시에 천열수 광상의 탐사의 지침을 제시할 수 있다. 따라서 이번 연구는 성산지구 내에 분포하는 모이산 화산암과 그 주변지역에서 산출하는 화산암들의 지구화학적 특성을 규명하고, 천열수 금-은 광화작용과 함께 수반된 대규모 열수변질작용에 의해 야기되는 지구화학적 변화 특성을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 광역지질

우리나라의 주요한 지구조적 특징은 동아시아의 백악기 좌수향 주향이동 단층과 관련되며, 남한의 지구조적 단위는 남에서 북으로 가면서 경상분지, 영남육괴, 옥천습곡대, 태백분지, 경기지괴로 구분된다(Fig. 1).

선캠브리아기의 결정질 암석들은 현재 사일루리아기에서 데본기에 해당하는 북중국판의 외대성 암층의 대륙 잔류물로서 간주되고 있으며, 이를 전주, 음성, 해남, 공주, 격포, 경상, 무주-진안, 나주, 부평, 영동 분지를 포함하는 백악기 퇴적분지들이 상부를 덮고 있다(Lee, 1999).

우리나라는 크게 송림(후기 페름기에서 초기 트라이아스기)과 대보(초기에서 후기 쥐라기) 조산운동으로 명명되는 두 차례의 조산운동을 받았다. 전자는 경기지괴, 옥천습곡대, 영남육괴 간의 충돌에 의한 것이며, 후자는 아시아 대륙 하부로 이자나기판이 북서방향으로의 섭입으로 인하여 변환압축 지구조체계(transpressional tectonic regime)하에서 쓰러스트와 습곡을 수반한 우수향 전단대의 발달을 야기 시켰다. 이후 이자나기판의 북쪽방향으로 회전하면서 대규모 좌수향 주향이동 단층계와 이와 수반되는 백악기 퇴적분지의 발달을 가져왔다(Chough *et al.*, 2000).

영남지괴와 옥천습곡대의 지속적인 충돌은 두 개의 지구조 단위의 경계부를 따라서 대규모의 주향이동 단층계의 발달을 야기 시켰으나(Cluzel *et al.*, 1991), 호남 연성 전단대는 융합된 연성 전단대로 간주된다. 이는 옥천습곡대와 영남지괴에 영향을 미쳤으며, 중기 쥐라기의 주요 주향이동 기간 동안 두 지구조 단위의 경

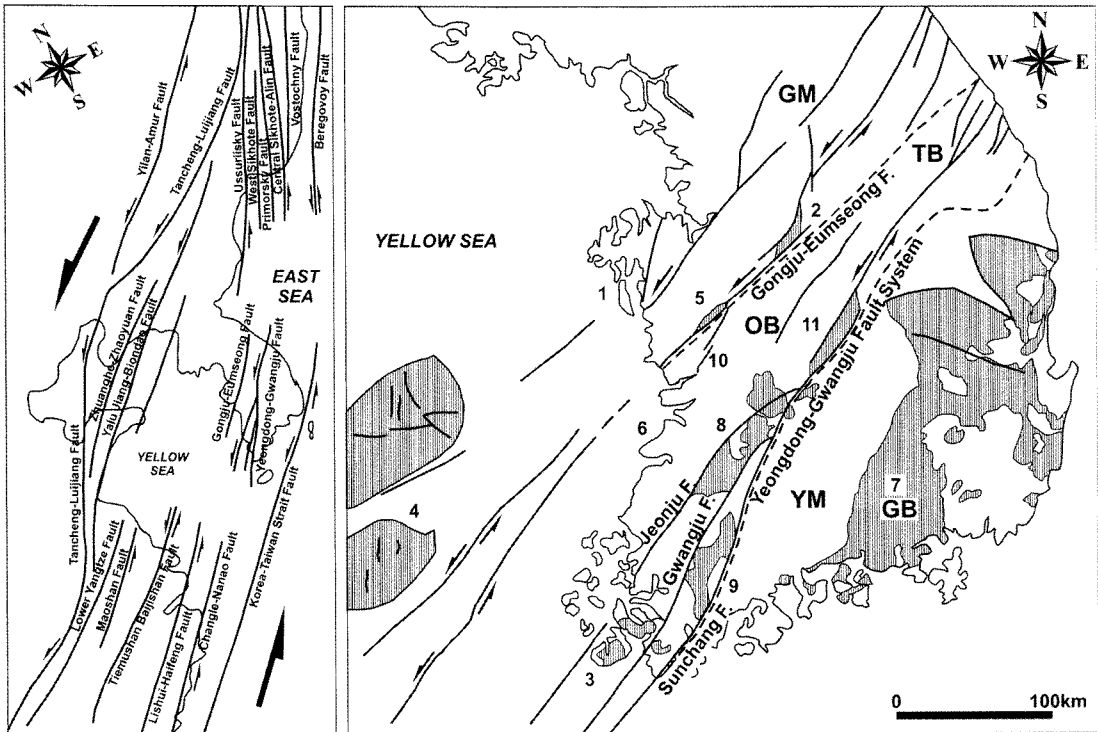


Fig. 1. Cretaceous sinistral strike-slip fault systems in the Far East Asia (left) and major tectonostratigraphic units and Cretaceous sedimentary basins in the South Korea (right). Major tectonostratigraphic units; GM, Gyonggi Massif; TB, Taebaeksan Basin; OB, Okcheon Fold Belt; YM, Yeongnam Massif; GB, Gyeongsang Basin. Numbered area, sedimentary basins; 1, Jonsu; 2, Eumsueong; 3, Haenam; 4, Yellow Sea (Heuksan and Gunsan); 5, Gongju; 6, Gyokpo; 7, Gyeongsang; 8, Muju-Jinan; 9, Neuguju; 10, Buyeo; 11, Yeongdong (modified from Lee, 1999).

계를 절단하였다(Turek and Kim, 1995; Kwon and Ree, 1997; Otoh *et al.*, 1999; Yanai *et al.*, 1985). 초기 트라이아스기에서 중기 쥐라기 동안 우리나라 남부지역의 북동방향 우수향 전단 활동 이후, 섭입과 관련된 화성활동은 후기 쥐라기에서 초기 제 3기까지 이루어졌다.

3. 성산지구

성산지구는 앞서 언급했듯이 저유황 및 고유황 천열 수계와 관련된 광상들이 함께 발달하고 있으며(Fig. 2), 이들 모두를 배태하고 있는 해남분지는 크게 4가지의 암층인 안산암질 응회암, 우항리층, 황산 응회암 및 진도 유문암층으로 구성되어 있다(Chough *et al.*, 2000). 성산지구의 지질은 이미 Bowden(2007)에 의해서 상세히 기술되어 있으며, 크게 산이 화강암, 화원층, 우항리층 및 해남층으로 구성된다. 산이 화강암의 관입 시기는 $144.8 \pm 1.9 \text{ Ma} (^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar})$, Kim and Nagao, 1992)로 연

구지역의 기저를 형성하고 있으며, 주로 조립의 흑운모 화강암과 약간의 중립 내지 조립의 각섬석-흑운모 화강암질 조성을 갖는다. 화원층은 선캠브리아 변성복합체와 트라이아스기와 쥐라기 화강암류의 상부에 놓이며, 안산암질 라필리 응회암, 암편 결정 응회암, 세립의 조면안산암, 현무암 및 안산암질 용암, 적색 내지 갈색 실트암으로 구성되어 있다(Bowden, 2007). 우항리층은 흑색 셰일, 엽상 실트암 및 이암, 응회암질 사암, 처트, 석회질 실트암으로 구성되어 있으며, 층후는 250~300 m에 이른다. 해남층은 미분화된 황산 화산 쇄설암과 협재된 황산 이암 및 실트암, 변질된 화산쇄설류를 포함한다.

성산지구 전반에 걸쳐 나타나는 변형작용은 크게 4가지의 NE-SW, NS, NW, EW 주향의 심부 단층과 관련된다(Bowden, 2007). 주요 지질구조는 첫 번째 변형작용에 의해 형성된 NE 방향의 심부 단층과 보다 후기의 NW 방향의 단층들이 연구지역에서 가장 우세하게 나타나고 있다(Fig. 2). 전자인 NE 방향의 심부

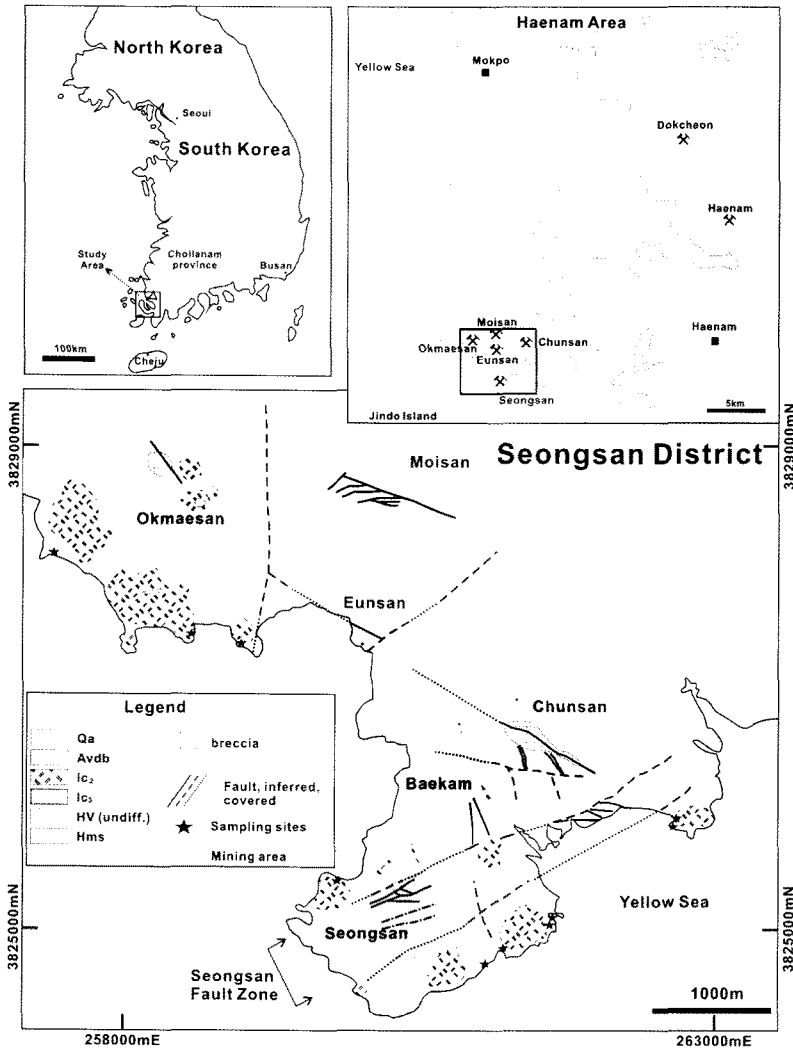


Fig. 2. General geological map showing the high- and low-epithermal deposits within the Seongsan district (after Bowden, 2007) and location of sampling sites for volcanic rocks. Abbreviation. Qa: Quarternary, Avdb: altered volcanic debris flow, IC₂: igneous complex 2, IC₃: igneous complex 3, HV: Hwangsan volcanics, Hms: Haenam Formation.

단층들은 앞서 언급했던 우리나라 전반에 걸쳐 발달하는 NE방향의 광역단층과 일치한다. 모이산, 은산, 춘산일대에 분포하는 석영맥들은 대개 N70°-80°W 방향을 갖으며, 이들 방향은 광역단층과 관련된 NE방향의 단층들에 거의 수직한다(Fig. 2). 이러한 구조적 분포양상은 광역단층에 수반된 인리형 단층연결부(dilational jog)와 관련되는 것으로 이해될 수 있다. 또한 이러한 구조적 환경은 여러 시기에 걸쳐 재활성에 의한 팽창구조의 발달이 용이하므로 광화작용에 상당히 유리하다.

고유황 천열수계와 관련되는 옥매산, 춘산, 성산지역의 대규모 점토변질대는 주로 도석을 대상으로 채광이

이루어지고 있으며, 저유황 천열수계에 해당하는 은산과 모이산 천열수 금-은 광상은 현재 금을 대상으로 가행되고 있다. 대우조선해양 SMC에 의해 현재 개발되고 있는 모이산과 은산 천열수 금-은광상 지역은 과거 1995년 캐나다 Ivanhoe Mines와 코리아 익스플로레이션이 합작으로 공동탐사가 이루어졌다. 이후 은산 광상을 중심으로 개발이 되었으나 2009년 3월을 기점으로 은산광상은 휴광상태이다. 2006년부터 가행이 시작된 모이산은 현재까지 가행중에 있으며, 2002년 이후 2009년까지 은산과 모이산에서 생산된 금은 순금 환산 2,150 kg으로 그 생산량이 매년 점차적으로 증가

하는 추세에 있다.

4. 황산화산암복합체의 산출특성

성산지구에 분포하는 해남층에 관한 암석학적 연구는 이미 여러 연구자들에 의해 이루어졌으며(Kim, 1991; Koh, 1996), 해남분지에 분포하는 화원층, 우항리층, 해남층에 대한 암석학적 분류는 Bowden (2007)에 의해 상세히 이루어진 바 있다. 따라서 이번 연구에 사용된 암석시료의 채취 및 기재는 이들의 연구결

과를 바탕으로 진행되었다.

성산지구 내에 지형학적으로 높은 지역들을 점유하고 있는 화산암복합체들은 그들의 관입 및 분출시기에 따라 IC₁, IC₂, IC₃로 구분하고 있으며(Bowden, 2007), 주로 다양한 크기의 반정을 갖거나, 구과상(spherulitic texture) 조직을 갖는 유문암질 조성의 화산암들이 우세하게 나타난다. 특히 이들 화산암들은 규화된 구과상 단괴들이 잘 보존되어 있으나, 건운모로 변질된 유리질 석기 부분들은 풍화에 의해 이미 제거되었기 때문에 구과상 조직이 부각되어 나타난다(Fig. 3A). 또한

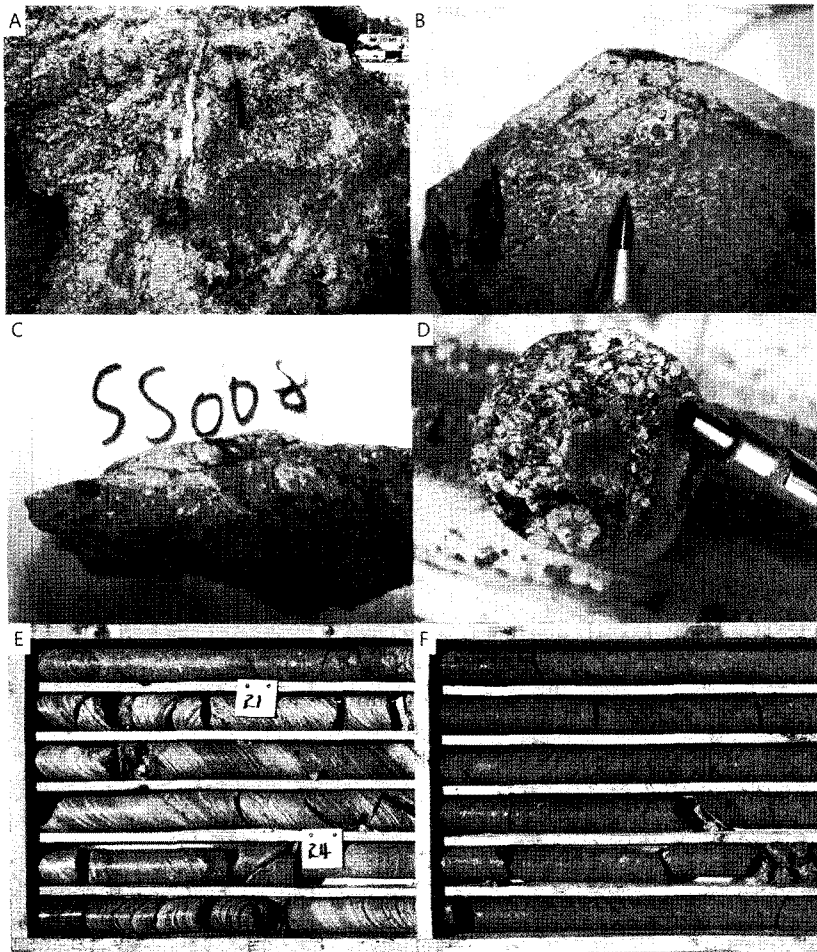


Fig. 3. Photographs showing the representative volcanic rocks of the Seongsan district and drilling core of the Moisan epithermal Au-Ag vein deposits. A. In the spherulitic rhyolite, silicified spherulitic nodules are resident, whereas sericite-altered glass are recessive. B. Rhyolite showing the flow foliation. C. Representative ignimbrite having various size lapilli. D. Rhyolite show the spherulitic texture, consisting of alkali feldspar. Spherical texture, bundles of radiating fibres, indicates the temperature of formation would be low approximately below 400°C. E. Volcanic sedimentary rocks occur at the top of the Moisan epithermal Au-Ag vein deposits (Drilling core MS10-5). F. Welded ignimbrite show the bedding-parallel foliation of fiamme (Drilling core MS10-5).

화산암 내에 수 mm의 반정이 관찰되며, 그 반정을 따라 유체의 유동을 지지하는 유상구조가 잘 관찰되기도 한다 (Fig. 3B). 이외에도 화산쇄설성암의 일종인 용결응회암(ignimbrite)은 다양한 크기를 갖는 라필리(lapilli)들이 모난(angular type) 혹은 환형(rounded type)의 형태로 산출되고 있다(Fig. 3C). 앞에서 언급했던 구과상 조직을 갖는 유문암의 경우, 구과상 조직들은 주로 알

카리 장석의 조성을 갖으며, 이들은 급냉의 결과로써 그 형태에 따라 대략적인 생성 온도를 추정할 수 있다 (Lofgren, 1971). 우선 섬유상의 나비타이형태(Bow-tie shape)의 구과조직은 대개 400-650°C 이상의 고온에서 형성이 되는데 반해서, 성산지구에서 산출되는 구과상 조직을 갖는 유문암질 화산암의 경우는 방사상의 형태로 대략 400°C 이하의 온도에서 결정화작용이 이루어

Table 1. Major, trace, and rare earth element compositions of volcanic rocks from the Moisan epithermal Au-Ag vein deposit

	MS-1	MS-2	MS-3	MS-4	MS-5	MS-6	MS-7	MS-8	MS-9	MS-10
Weight percent										
SiO ₂	70.72	69.12	72.50	79.69	71.07	73.47	67.33	74.56	73.57	71.74
Al ₂ O ₃	15.66	14.74	12.91	11.57	15.47	13.14	16.38	12.23	12.42	13.51
Fe ₂ O ₃ *	1.70	2.59	2.42	1.56	3.08	4.21	4.18	1.29	2.31	2.54
CaO	0.16	1.41	1.32	0.20	0.25	0.16	0.30	0.92	1.01	1.04
MgO	0.74	0.62	0.05	0.36	0.66	0.66	1.22	0.17	0.68	0.56
K ₂ O	5.00	5.19	3.80	3.00	4.18	3.74	5.08	7.63	6.06	5.85
Na ₂ O	1.80	2.38	4.54	0.11	0.13	0.09	0.11	1.11	0.15	2.01
TiO ₂	0.31	0.31	0.27	0.27	0.42	0.40	0.49	0.10	0.27	0.29
MnO	0.03	0.13	0.07	0.02	0.02	0.03	0.06	0.04	0.13	0.11
P ₂ O ₅	0.02	0.10	0.07	0.02	0.10	0.07	0.15	0.04	0.15	0.11
L.O.I	3.52	3.03	1.69	2.83	4.25	4.22	4.85	1.52	2.86	2.12
Total	99.66	99.62	99.64	99.63	99.63	100.19	100.15	99.61	99.61	99.88
Trace and rare earth elements (in mg/kg)										
Ba	689.00	752.00	844.00	511.00	10000.00	81.00	165.00	689.00	1233.00	721.00
Rb	269.00	268.00	138.00	152.00	241.00	231.00	331.00	259.00	308.00	244.00
Th	15.80	12.10	10.70	10.80	10.10	12.00	8.07	13.40	12.50	12.00
K	41507.6	43084.8	31545.7	24904.5	34700.32	31047.7	42171.7	63340.5	50307.2	48563.8
Nb	12.60	13.40	9.95	10.10	6.81	9.61	7.56	12.00	8.02	7.45
Ta	4.45	9.65	8.18	4.94	5.07	13.70	3.50	7.29	4.46	3.55
Sr	110.00	126.00	167.00	37.00	182.00	48.00	43.00	168.00	104.00	130.00
Zr	217.00	163.00	161.00	217.00	143.00	132.00	109.00	89.00	93.00	151.00
Hf	5.15	4.58	3.46	4.57	2.64	3.07	1.43	2.76	2.17	2.32
Ti	1858.4	1858.4	1618.6	1618.6	2517.8	2397.9	2937.5	599.5	1618.6	1738.5
La	39.5	39.2	36.3	34.6	30.8	35.3	49.4	30	35.1	39.1
Ce	66.1	65.9	59	57.5	49.9	61.6	76.2	48.5	57.5	62.6
Pr	8.32	8.37	7.42	6.8	6.15	7.95	8.92	5.83	6.77	7.35
Nd	30.4	31.2	27.7	23.8	23	31.1	31.9	20.7	24.1	25.8
Sm	5.13	5.4	4.68	3.72	3.85	5.43	4.72	3.51	3.93	4.12
Eu	0.91	1.22	1.1	0.76	2.26	1.02	1.05	0.53	0.94	0.93
Gd	4.47	4.72	4.14	3.23	3.65	4.4	4.22	3.11	3.62	3.67
Tb	0.62	0.63	0.58	0.46	0.5	0.54	0.46	0.42	0.48	0.45
Dy	3.74	3.58	2.89	2.83	2.74	2.77	2.28	2.37	2.74	2.54
Ho	0.81	0.76	0.61	0.65	0.57	0.57	0.43	0.51	0.56	0.53
Er	2.32	2.09	1.7	1.91	1.59	1.67	1.15	1.49	1.53	1.5
Tm	0.37	0.34	0.27	0.31	0.25	0.27	0.18	0.25	0.24	0.24
Yb	0.57	0.53	0.42	0.48	0.4	0.41	0.26	0.4	0.38	0.37
Lu	0.39	0.35	0.29	0.32	0.26	0.28	0.17	0.27	0.25	0.24
Y	30.4	28.3	22.6	23.3	20.9	21.5	14.9	18.9	21.6	20

* Total Fe as Fe₂O₃, L.O.I: Loss on ignition

졌음을 지시한다(Fig. 3D). 모이산의 상부는 사암질의 화산성 퇴적암들이 시추코어 MS10-5외에 다른 시추코어에서도 잘 관찰되며(Fig. 3E), 이들 하부는 상당한 충후를 갖는 용결응회암(welded ignimbrite)으로 구성되며 여러 물리적 환경에 의한 피아메(Fiamme)가 층에 평행하게 발달하는 특징을 갖는다(Fig. 3F).

5. 암석화학

연구지역에서 분포하는 화산암들의 지구화학적 특성에 대해 알아보기 위해서, 정산지구 내에 모이산 천열수 금-은광상을 배태한 모이산 화산암 시추코어 시료(n=10)와 주변에 분포하는 화산암(n=10)을 채취하였다. 채취된 화산암들의 주원소, 미량원소, 희토류원소

Table 2. Major, trace, and rare earth element compositions of volcanic rocks from the Seongsan district

	SS-1	SS-2	SS-3	SS-4	SS-5	SS-6	SS-7	SS-8	SS-9	SS-10
Weight percent										
SiO ₂	59.72	75.14	77.22	66.13	75.87	81.02	75.85	76.36	76.51	76.61
Al ₂ O ₃	12.80	13.36	11.75	16.30	13.18	12.69	12.75	12.01	12.66	11.27
Fe ₂ O ₃ *	1.20	1.04	0.68	3.97	1.11	0.83	1.25	1.50	1.24	0.88
CaO	11.27	0.07	0.19	0.63	0.14	0.05	0.13	0.29	0.65	1.92
MgO	0.44	0.06	0.18	0.61	0.06	0.02	0.02	0.26	0.28	0.11
K ₂ O	3.56	5.07	8.02	2.70	4.58	0.41	4.92	5.55	3.25	3.32
Na ₂ O	0.58	3.89	0.52	6.15	3.91	0.10	3.97	1.70	3.60	3.14
TiO ₂	0.06	0.07	0.11	0.88	0.08	0.08	0.07	0.18	0.16	0.12
MnO	0.68	0.05	0.02	0.07	0.07	0.01	0.04	0.03	0.03	0.12
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.04	0.30	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
L.O.I	10.57	0.85	1.28	1.78	0.71	4.71	0.54	1.65	1.33	2.18
Total	100.90	99.62	100.01	99.52	99.72	99.94	99.56	99.55	99.74	99.70
Trace and rare earth elements (in mg/kg)										
Ba	185.00	1226.00	1237.00	978.00	358.00	2718.00	384.00	926.00	1205.00	686.00
Rb	182.00	177.00	257.00	89.00	184.00	29.00	188.00	196.00	111.00	137.00
Th	14.90	16.50	11.50	10.20	17.60	18.50	17.30	13.20	11.10	13.60
K	29553.4	42088.7	66578.1	22414.1	38020.9	3403.6	40843.4	46073.4	26979.9	27561.0
Nb	10.50	11.60	8.35	11.60	10.80	10.20	10.30	8.52	20.40	11.30
Ta	20.00	4.70	1.62	3.49	1.89	2.18	2.37	2.33	9.31	4.71
Sr	167.00	75.00	43.00	186.00	65.00	28.00	53.00	113.00	132.00	133.00
Zr	151.00	126.00	108.00	284.00	156.00	137.00	139.00	116.00	91.00	105.00
Hf	3.39	3.61	2.63	6.40	3.73	3.58	3.46	2.65	3.12	2.84
Ti	359.69	419.64	659.43	5275.46	479.59	479.59	419.64	1079.07	959.18	719.38
La	42.8	36.9	28.6	43.4	40.9	54.8	40.7	35.1	34.8	32.7
Ce	70.7	64.3	45.3	75.3	66.1	79.8	67.1	32.6	40.9	52.8
Pr	8.98	8.03	5.65	10.7	8.18	7.72	7.97	6.56	6.83	6.38
Nd	33.6	28.9	20.3	44.1	28.9	20.4	28	23.5	24.5	22.8
Sm	7.06	4.88	3.48	8.45	4.99	1.87	4.74	3.51	3.96	3.91
Eu	1.08	0.74	0.65	2.19	0.47	0.42	0.43	0.84	0.89	0.77
Gd	7.24	4.33	3.23	7.75	4.45	2.55	4.25	2.84	3.38	3.74
Tb	1.09	0.59	0.45	1.11	0.62	0.27	0.6	0.38	0.5	0.55
Dy	5.9	3.26	2.51	6.54	3.61	1.61	3.36	2.18	3.29	2.99
Ho	1.11	0.68	0.53	1.36	0.77	0.35	0.71	0.47	0.73	0.6
Er	2.75	1.93	1.5	3.6	2.18	1.03	2.01	1.35	2.15	1.63
Tm	0.41	0.31	0.25	0.56	0.35	0.17	0.33	0.22	0.36	0.27
Yb	0.61	0.49	0.38	0.8	0.56	0.26	0.52	0.35	0.56	0.41
Lu	0.4	0.32	0.25	0.53	0.37	0.18	0.35	0.24	0.38	0.28
Y	46.5	26.2	20.2	52	29.6	12.5	27.3	17.7	25.1	23.3

* Total Fe as Fe₂O₃, L.O.I: Loss on ignition

들의 함량을 포함하는 지구화학적 분석 결과는 Table 1과 2에 제시되어 있다.

5.1. 주원소

모이산과 주변 화산암들의 조성은 TAS 다이어그램에 근거할 때, 이들 화산암들은 대부분 칼크알카리 계열의 석영안산암질 내지 유문암질 조성을 갖는다(Figs. 4 and 5). 모이산 화산암들의 화학조성은 대체적으로 석영안산암에서 유문암질까지 일련의 스펙트럼을 형성하지만, 주변 화산암들의 조성은 유문암질 조성에 국한된다(Fig. 5). 모이산과 주변 화산암들의 시료들로부터 SiO₂ 함량에 따른 주원소 양상을 살펴보면, 모이산

으로부터 획득된 시료들은 제한된 조성범위를 갖는 군집의 형태를 보이지만, 주변 화산암들은 일정한 조성적 변화 양상을 보이고 있다. 또한 SiO₂ 함량에 따른 Al₂O₃, MgO, Fe₂O₃, CaO, TiO₂, P₂O₅의 조성은 마그마의 분화과정에서 보이는 일반적인 경향성을 갖지만, Na₂O와 K₂O 성분은 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 정적 상관관계를 갖는 일반적 경향성과 달리 분산 또는 수직적 변화를 보인다(Fig. 6).

5.2. 미량원소 및 희토류원소

성산지구에 분포하는 모이산 및 주변 화산암들에 대한 미량원소 및 희토류원소들의 함량은 Table 1과 2에 제시되어 있다. 이들 화산암들의 희토류원소들을 C1 콘드라이트(Evensen *et al.*, 1978)로 표준화하여 도시되어 있다(Fig. 7).

모이산과 주변화산암들의 La/Th비는 2.2-6.1의 범위를 갖고, 다른 시료에 비해 월등히 높게 나타나는 MS07시료를 제외하고 이들의 Ba/La와 Ba/Th비는 각각 2.3-49.6과 6.8-146.9의 범위로 화산호 환경(Gill, 1981)의 값을 갖는다. 또한 성산지구 화산암들은 Condie(1989)에 의해 제시된 Th/Yb에 따른 La/Yb의 조구조적 해석에 따라 화산호 환경에 해당한다. 이러한 결과는 한반도의 형성과 관련된 기존연구(Chough *et al.*, 2000) 및 해남 주변의 연구결과(Yoon *et al.*, 2007)와 상이하다. 이것은 변질 받지 않은 순수 화산암 조성상과 달리 연구지역의 대규모 열수변질작용으로 인하여 일부 희토류원소들의 지구화학적 변화에 의한 것으로 판단된다.

전체적으로 연구지역 화산암들의 희토류원소들의 양상은 서로 유사하게 나타나며, 경희토류원소들(Light Rare Earth Elements)은 중희토류원소들(Heavy Rare Earth Elements)에 비해 상대적으로 부화된 양상을 갖지만 특정 원소들(Tm, Yb)의 강한 결핍 이외에는 완만한 부의 기울기를 보인다. 일반적으로 Eu 성분은 열수변질작용에 있어서 상당히 이동성을 갖는 것으로 보고되어 있으나, 이번 연구에서는 약간의 결핍이 관찰되기는 하나 오히려 부화되는 특징을 갖는 것들도 관찰이 된다(Fig. 7).

모이산 및 주변 화산암들을 콘드라이트(Thompson, 1982)로 표준화한 결과 고장력원소(HFSE: high field strength elements) 중 Zr, Hf, Ta, Y이 상당히 부화되어 있으나, Nb과 Ti은 상당히 결핍되어 있다(Fig. 8). 일반적으로 열수변질작용동안 높은 이동성을 갖는 친지각원소(LILE: large ion lithophile element)에서 해

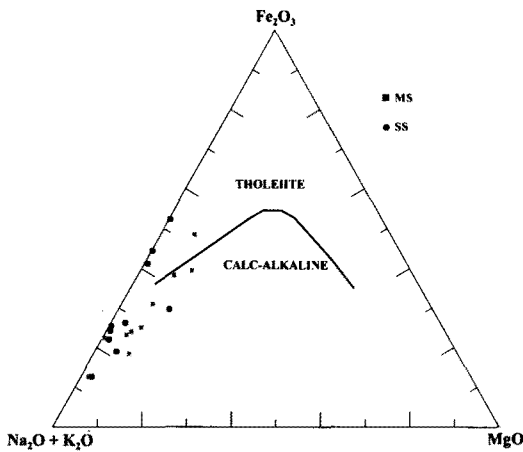


Fig. 4. AFM diagram of the for the Moisan and around volcanic rocks from the Seongsan district showing calc-alkaline trend. MS, Moisan; SS, around volcanic rocks (herein referred to as MS and SS).

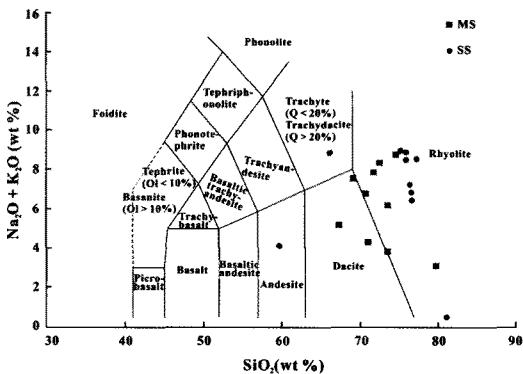


Fig. 5. The chemical classification of for the Moisan and around volcanic rocks from the Seongsan district using the total alkalis versus silica diagram from Le Maitre *et al.* (1989). Q=normative quartz, Ol=normative olivine.

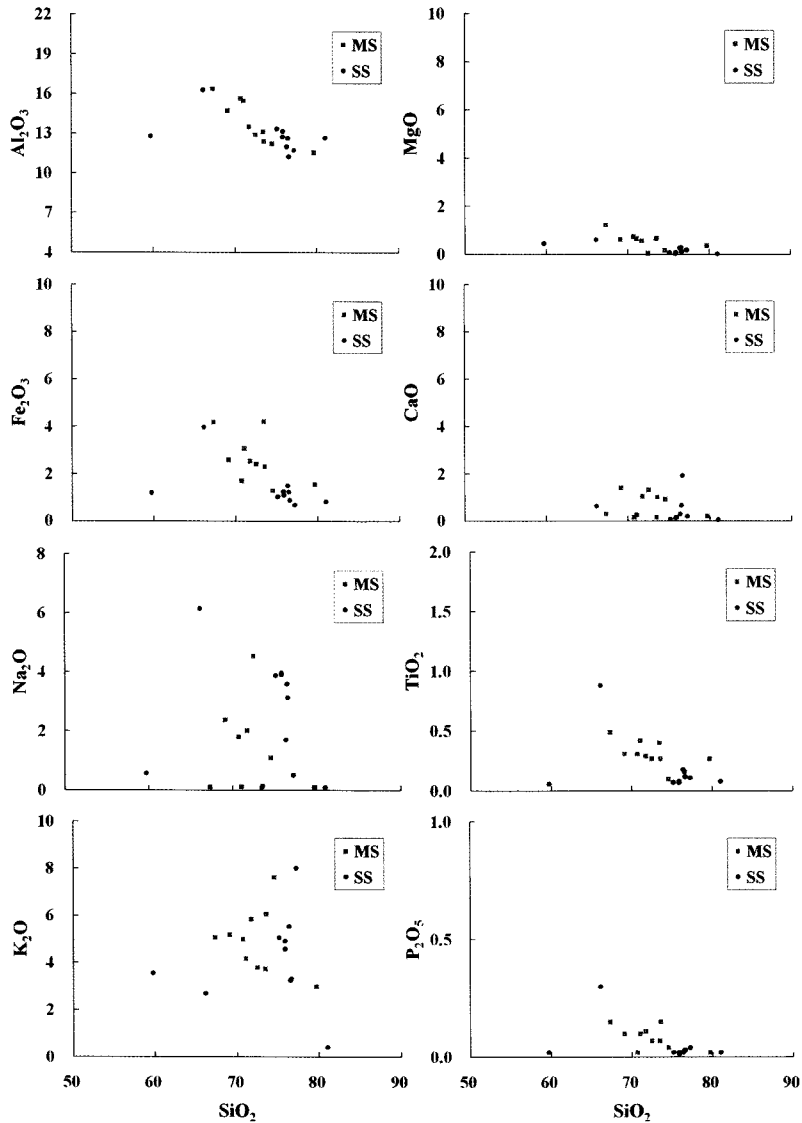


Fig. 6. Harker variation diagrams for the Moisan and around volcanic rocks from the Seongsan district.

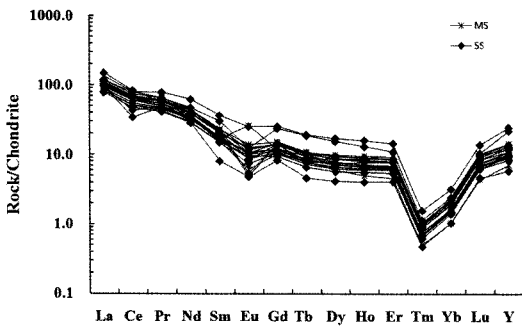


Fig. 7. Chondrite-normalized REE patterns for the Moisan and around volcanic rocks from the Seongsan district.

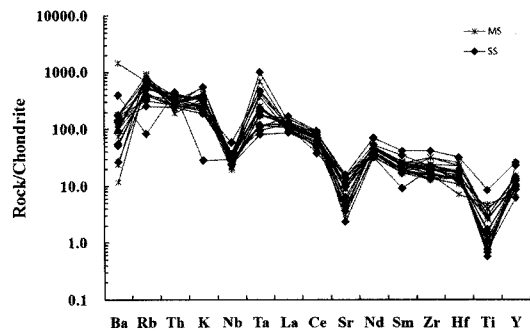


Fig. 8. Chondrite-normalized trace element patterns for the Moisan and around volcanic rocks from the Seongsan district.

당하는 Ba와 Sr 성분들은 상당히 결핍되어 있지만, Rb⁺과 K⁺ 성분들은 오히려 상당히 부화된 특징을 갖는다.

6. 토 의

금-은광화작용과 관련된 천열수계는 크게 저유황과 고유황계로 구분되며, 특정 유망지역을 두 가지 유형 중 하나로 분류하는 것은 상당히 중요하다. 저유황과 고유황 천열수계는 전혀 다른 화학조성을 갖는 열수유체로부터 형성되기 때문에, 완전히 다른 광물조합으로 구성된 열수변질대를 형성한다. 이러한 열수변질대의 발달은 지표환경으로 상승하는 열수유체와 모암간의 상호반응에 의한 결과로 열수유체의 물리·화학적 특성의 변화로 인한 금속광물의 침전과 모암의 화학 조성 변화를 야기 시킨다.

일반적으로 열수변질작용과 관련된 지구화학적 변화는 우선적으로 외부의 자극에 민감하여 상대적으로 높은 유동성을 갖는 알카리 원소들의 변화특성을 통해서 확인될 수 있다. 알카리원소들 중에서 Na⁺, K⁺, Ca²⁺은 열수변질작용동안 열수유체와 모암간의 상호반응으로 마그마 분화과정에 의해 나타나는 일반적인 지구화학적 특성에서 벗어나 분산된 결과를 가져온다(Fig. 6).

이러한 열수변질작용에 의한 변질정도를 정량화하기 위해서 여러 가지 요소들이 이용되지만, Ishikawa *et al.*(1976)에 의해 제안된 AI지수(Ishikawa alteration index)가 대표적이다. 이것은 사장석류들이 파괴되는 열수계로부터 형성되는 여러 유형의 광상들에 적용하는 것이 적합하다. Figure 9의 AI지수와 Na₂O 함량의 변화에 따른 열수변질작용의 정도는 모이산 화산암들이 변질작용의 정도가 상당히 미약한 시료부터 상당히 강

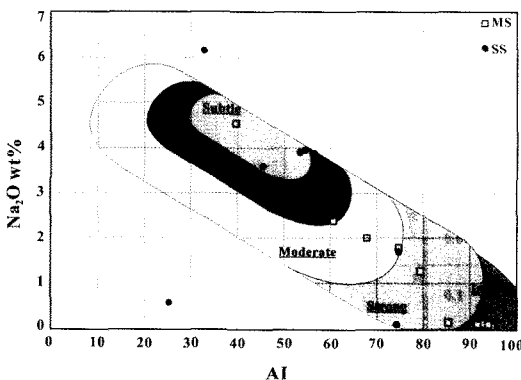


Fig. 9. AI (Ishikawa alteration index) versus Na₂O for the Moisan and around volcanic rocks from the Seongsan district.

한 열수변질작용의 영역 내에 도시되는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 AI지수에 따른 Na₂O 함량이 강한 음의 값을 갖는 것은 열수변질작용동안 모암을 구성하는 장석류들 내에 Na⁺와 Ca²⁺성분들이 제거되었기 때문으로 생각된다.

이와 같은 결과는 모이산 및 주변지역의 변질된 화산암들의 (CaO+Na₂O) 함량과 K₂O 함량간의 상관관계에서도 잘 나타난다(Fig. 10). 성산지구 주변 화산암 중, 일부 시료들이 일정 양상을 벗어나지만 대체적으로 K₂O 함량이 증가함에 따라 (CaO+Na₂O) 함량이 감소하는 경향을 갖는다. 그러나 Fig. 6에서 일정한 조성적 변화양상을 갖던 모이산 시료들은 K₂O 함량에 따라 (CaO+Na₂O) 함량간의 변화에서 두 가지 양상을 갖는다. K₂O 함량에 따른 (CaO+Na₂O) 함량의 변화 양상은 물-암석 반응에 의한 열역학적 조건에서 고려해 볼 수 있다. 우선 K₂O 함량이 증가함에 따라 (CaO+Na₂O) 함량의 감소는 열수유체로부터 수반된 열수변질작용에 의해서 모암 내 장석류들의 Ca²⁺와 Na⁺ 성분이 제거되고, 열수유체로부터 K⁺ 성분이 지속적으로 공급되면서 견운모화작용(Sericitic alteration)에 의한 결과로 이해될 수 있다. 또 다른 변화양상은 K₂O 함량의 감소에 따른 (CaO+Na₂O) 성분의 감소이다. 이는 산성열수유체(acid hydrothermal solution)에 의해서 반응성이 좋은 알카리 원소들이 모두 제거되는 강고령토변질작용(advanced argillic alteration)의 결과로 이해될 수 있다(Fig. 10). 이러한 결과는 Bowden (2007)에 의해 보고된 모이산 지역 상부 카올리나이트+석영±황철석 광물조합으로 구성된 강고령토변질대의 존재로 뒷받침될 수 있다.

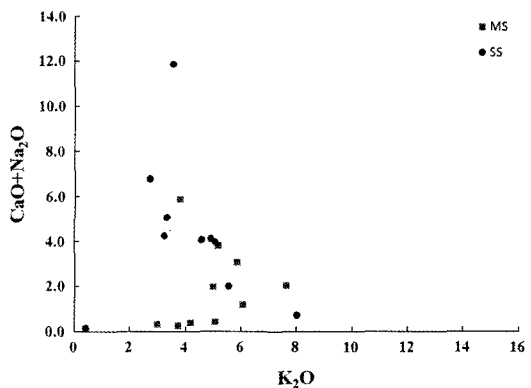


Fig. 10. The relationship between K₂O and CaO+Na₂O contents of the Moisan and around volcanic rocks from the Seongsan district.

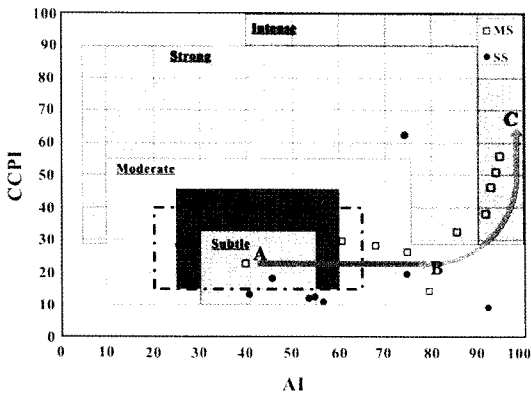


Fig. 11. The AI (Ishikawa alteration index)-CCPI (chlorite+carbonate+pyrite index) alteration box plot showing trends for the Moisan and around volcanic rocks from the Seongsan district. Black dotted line show the least-altered volcanic rock compositions from Mount Read volcanics, Western Tasmania (modified after Large *et al.*, 2001). A-B: Sericitic alteration trend, B-C: Sericite+chlorite+pyrite trend.

앞에서 언급했듯이 모이산 화산암들의 지구화학적 특성은 두 가지 변화양상을 갖는다. 이는 AI지수에 대한 CCPI지수(chlorite+carbonate+pyrite index) 다이어그램에서도 확인된다(Fig. 11). 상대적으로 CCPI지수 값이 일정한데 비해 AI지수 값이 거의 변질 받은 암석의 영역값(dotted box, Fig. 11)으로부터 점차적으로 증가하는 양상은 열수변질작용동안 열수유체로부터 공급된 K⁺가 Na-사장석을 교대하여 견운모를 형성하는 견운모화변질작용(Sericitic alteration)을 지시하며, 이는 모이산 지역 일라이트 변질대의 형성과 관련된다(Point A towards B, Fig. 11). 그에 반해서 일정한 값을 유지하는 AI지수에 비해 CCPI지수의 상승은 열수유체와 모암의 상호반응에 의해 Mg 혹은 Fe 활동도의 증가 혹은 감소에 따른 녹니석+방해석+녹립석+황철석 광물조합을 갖는 녹니석변질작용(Chloritic alteration)과 관련되는 것으로 이해된다(Point B towards C, Fig. 11).

열수변질작용과 관련된 지구화학적 변화특성은 미량원소의 부화 및 결핍정도에서도 잘 관찰된다. Sr²⁺ 성분의 강한 결핍은 열수변질작용 동안 장석류들이 알루미나 규산염광물 또는 층상규산염광물들로 별질되는 과정에서 장석류들 내에 Ca²⁺ 성분이 제거되면서 이를 치환하고 있는 Sr²⁺이 함께 제거된 결과로 보인다. 그러나 Rb⁺과 K⁺ 성분들은 오히려 상당히 부화되어 있으며, 대규모의 열수변질작용동안 열수유체로부터 지속적으로 유입되는 K⁺ 성분의 유입으로 인한 결과로 해

석될 수 있다.

과거 미량원소들은 광물자원탐사 및 암석성인적 연구에서 상당히 유용한 요소로서의 역할을 해왔다. 비유동성의 미량원소들, 특히 희토류원소들은 변질된 암석의 연구에 있어서 상당한 가치가 있다. 일반적으로 Eu을 제외한 희토류원소들은 마그마의 분별정출작용동안 비유동성의 특성을 갖는다. 그러나 광상의 형성과 관련된 열수변질작용동안 중희토류원소들은(Lu과 Yb)은 본질적으로 비유동성의 특성을 갖지만, 경희토류원소들은 상당한 유동성을 갖는다(MacLean and Barrett, 1993). 따라서 경희토류원소인 La에서 중희토류원소로 가면서 열수변질작용에 의한 유동성의 정도는 감소한다.

모이산 화산암 및 주변 화산암들의 총 희토류 함량은 각각 119-182 ppm(평균 149 ppm)과 111-209 ppm(평균 153 ppm) 범위를 갖는다. 모이산 및 주변 화산암들의 희토류 부화양상은 서로 유사하다. 성산지구 화산암들 각각의 (La/Yb)_n과 (La/Lu)_n의 값은 12.3-48.5(평균 20.7)과 81.9-304.4(평균 135.0)으로, HREE에 비해 LREE가 부화되어 있으나, 대체적으로 완만한 부의 기울기를 갖는다. 그러나 일반적인 유문암질 조성의 화산암류들은 LREE가 상당히 부화된 부의 기울기를 갖는다. 따라서 연구지역 화산암들의 희토류원소 부화양상은 열수변질작용동안 물-암석반응에 의해서 유동성이 높은 LREE 원소들의 제거효과로 이해될 수 있다.

열수변질작용이 지속되는 동안, 물-암석비가 증가함에 따라 알카리원소들과 규산염의 활동도 또한 증가한다. 알카리원소들과 규산염 활동도의 증가는 희토류원소들의 함량 증가를 초래하지만, 열수변질작용이 진행되면서 오히려 희토류원소들의 함량은 점차 결핍되는 특징을 갖는다. 이는 파푸아뉴기니 서부에 위치하고 있는 Ok Tedi 반암동 광상에서 열수변질작용의 정도에 따른 희토류원소들의 함량 변화에 관한 연구결과에서도 제시된 바 있다(Dongen *et al.*, 2010). 거의 신선한 시료 내지 약간의 변질시료의 총 희토류 함량(240-115 ppm)은 중간 정도(183-42 ppm) 혹은 상당한 변질작용(175-47 ppm)을 겪은 시료에 비해 총 희토류함량이 상당히 높게 나타나고 있음을 보고한 바 있다. 성산지구에서 산출되는 화산암들의 총희토류함량 또한 변질작용을 수반하는 낮은 총 함량을 갖는 시료들과 상대적으로 유사하다. 실제 열수변질작용을 받지 않은 원암과 변질작용을 수반한 암석시료와의 직접적인 비교 및 대조가 필요하나, 성산지구 전반에 걸쳐 대규모의 열수변질작용을 수반하고 있어 변질 받지 않은 시료의 획득이 거의 불가능하다. 그러나 반암동-금 광화

작용과 관련된 마그마의 최후기 단계에서 열수변질작용과 관련된 총희토류함량의 특징적인 결핍(Ok Tedi 반암동광상; Dongen *et al.*, 2010)과 비교해 볼 때, 모이산 화산암들과 주변 화산암들의 낮은 총 희토류 함량은 대규모 열수유체의 활동에 따른 결과로 이해될 수 있다.

7. 결 론

모이산 천열수 금은 석영맥 광상을 배태하고 있는 모이산 화산암체와 그 주변지역에서 산출되는 화산암들의 지구화학적 분석 결과, 대체적으로 칼크-알카리 계열의 석영안산암 내지 유문암질 조성을 갖는 것으로 나타났다.

열수변질작용동안 유동성이 높은 알카리원소들(e.g., Na, K, Ca)은 모암으로부터 쉽게 제거되기 때문에, SiO₂ 함량에 따른 이들 성분들은 일정한 양상에서 벗어나 분산된 결과를 초래한다. 이러한 특성으로 인하여 모이산 화산암들은 아주 미약한 정도에서부터 상당히 강한 변질작용을 수반하는 단계까지 정량화 될 수 있다.

성산지구 화산암들의 지구화학적 변화(K₂O vs. (CaO+Na₂O))는 열수변질작용동안 열수유체로부터 K⁺ 성분이 지속적으로 모암으로 유입되면서 모암의 장석류들 내에 포함된 Ca²⁺와 Na⁺ 성분들이 제거되는 견운모화작용과 강산의 열수유체로부터 알카리 원소들이 완전히 제거되는 강고령도 변질작용의 효과로 이해될 수 있다. 또한 AI지수에 따른 CCPI지수의 변화양상에서는 대규모 열수유체로부터 K⁺ 성분이 지속적으로 유입되면서 장석류들이 일라이트로 교대되는 견운모변질작용과 Mg 혹은 Fe 활동도의 증가에 따른 견운모+녹니석+황철석 광물조합의 변질작용의 변화양상을 보인다.

미량원소들 중 친지각원소에 해당하는 Sr²⁺의 상당한 결핍과 K⁺과 Rb⁺ 성분들의 상당한 부화양상이 대표적이다. 또한 성산지구 화산암들의 낮은 총 희토류 함량과 완만한 부의 기울기는 열수변질작용동안 유동성이 높은 LREE원소들의 제거에 따른 결과로 이해될 수 있다.

천열수 금은 석영맥을 배태하고 있는 화산암들의 전암분석을 통한 지구화학적 연구는 대규모 열수변질작용에 따른 모암의 지구화학적 변화 양상을 이해하는데 상당히 유용한 것으로 판단된다. 그러나 광화작용과 관련된 광화유체의 지구화학적 진화과정을 이해하기 위해서는 열수유체의 유동을 지시하는 석영맥에서부터 그

와 집측부 및 모암으로 가면서 수평적인 지구화학적 변화 양상을 파악하는 것이 절실히 요구된다. 이러한 추가 연구는 공간적인 개념에서 물-암석반응에 따른 열수변질대의 지구화학적 변화를 이해하고, 그 특성을 규명함으로써 광물자원탐사의 방향을 정의하는데 하나의 지침이 될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이번 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 ‘해남 천열수 금광화대 및 열수변질 점토광화대 확보를 위한 전주기 기술개발(11-3216)’ 과제에서 지원되었습니다. 이 논문의 개선을 위해서 건설적인 비평과 유익한 조언을 주신 익명의 심사위원님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- Bowden, C.D. (2007) Epithermal systems of the Seongsan district, South Korea; an investigation on the geological setting and spatial and temporal relationship between high and low sulfidation systems. Unpublished Ph.D. thesis, James Cook University, Australia, 334p.
- 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.
- Ciuzel, D., Lee, B.J. and Cadet, J.P. (1991) Indosinian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, v.194, p.131-151.
- Condie, K.C. (1989) Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos*, v.23, p.1-18.
- Cooke, D.R. and Simmons, S.F. (2000) Characteristics and genesis of epithermal gold deposits: in Hagemann, S.G., and Brown, P.E., eds., *Gold in 2000: Reviews in Economic Geology*, v.13, p.221-244.
- Dongen, M.V., Weinberg, R.F. and Tomkings A.G. (2010) REE-Y, Ti, and P remobilization in magmatic rocks by hydrothermal alteration during Cu-Au deposit formation. *Economic Geology*, v.105, p.763-776.
- Eilu, P., Mikucki, E.J. and Groves, D.I. (1997) Wallrock alteration and primary geochemical dispersion in lode-gold exploration: 4th biennial meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Turku, Finland, August 11-13, 1997, Short course notes, p.65.
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W. and Inan, E.E. (2003) Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments: in Simmons, S.F., and Graham, I., eds., *Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the*

- Earth, Society of Economic Geologists, Special Publication 10, p.285-313.
- Evensen, N.M., Hamilton, P.J. and O'Nions, R.K. (1978) Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v.42, p.1199-1212.
- Gill, J.B. (1981) *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer-Verlag, Berlin, 336p.
- Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S. and Horiuchi, M. (1976) Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos. *Mining Geology*, v.26, p.105-117.
- Kim, I.J. (1991) *Geochemistry of hydrothermal alteration and clay deposits in the Haenam area, southwestern Korea*. Unpublished Ph.D. thesis, University of Tokyo, Japan, 238p.
- Kim, I.J. and Kusakabe, M. (1993) Oxygen and hydrogen isotope studies of the hydrothermal clay deposits and surrounded rocks in the Haenam area, southwestern part of the Korean Peninsula. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v.26, p.11-20.
- Kim, I.J. and Nagao, K. (1992) K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in southwest Korea. *Journal of Petrological Society of 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., 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.
- Kwon, S.T. and Ree, J.H. (1997) A note on the age of the Honam Shear Zone. *Journal of Geological society of Korea*, v.33, p.183-188.
- Large, R.R., Gemmill, J.B. and Paulick, H. (2001) The alteration box plot - a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and litho-geochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology*, v.96, p.957-972.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R. and Zanettin, B. (1989) *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, Oxford, 254p.
- 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.
- Lofgren G. (1971) Spherulitic textures in glassy and crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, v.76, p.4279-4299.
- MacLean, W.H. and Barrett, T.J. (1993) Lighthochemical techniques using immobile elements. *Journal of Geochemical Exploration*, v.48, p.109-133.
- Moon, H.S., Kim, Y.H., Kim, J.H. and You, J.H. (1990) K-Ar ages of alunite and sericite in altered rocks, and volcanic rocks around the Haenam area, Southwest Korea. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v.23, p.135-131 (in Korean with English abstract).
- Otoh, S., Jwa, Y.J., Nomura, R. and Sakai, H. (1999) A preliminary AMS (anisotropy of magnetic susceptibility) study of the Namwon granite, southwest Korea. *Geoscience Journal*, v.3, p.31-41.
- Thompson, R.N. (1982) British Tertiary volcanic provinces. *Scott. Jour. Geol.*, v.18, p.49-107.
- Turek, A. and Kim, J.B. (1995) U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, v.29, p.243-258.
- Yanai, S., Park, B.S. and Otoh, S. (1985) The Honam shear zone (South Korea): deformation and tectonic implication in the Far East. *Scient. Pap. College Arts Sci., Univ. Tokyo*, v.35, p.181-210.
- Yoon, C.H. (1993) Gold abundance in acid-sulphate alteration zone of the Ogmansan-Seongsan ore deposits in Haenam area, Korea. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v.26, p.155-166.
- Yoon, C.H. (1995) Variation of gold content in rocks and minerals from the Seongsan and Ogmansan clay deposits in the Haenam area, Korea. *Economic Environmental Geology*, v.28, p.571-577.
- Yonn, C.H., Kim, S.W. and Park, H.S. (2007) Application of alteration indices for geochemical exploration of clay mineral deposit in the hydrothermal alteration zone of the Nohwa Island, Wando. *The Korean Society for Geosystem Engineering*, v.40, p.110-118.