

구미 남부 금오산 화산암류의 성인과 진화

황상구¹ · 안웅산² · 송교영^{3,*}

¹안동대학교 지구환경과학과

²제주특별자치도 세계유산본부

³한국지질자원연구원 국토지질연구본부

요 약

구미분지는 영남육괴의 남동 중간부에 있으며 백악기의 구미층과 금오산 화산암류로 구성된다. 금오산 화산암류는 하부로부터 안산암질암류, 유문암질암류와 관입암류로 구분된다. 안산암질암류는 영암산응회암과 부상리안산암으로 구분되고, 유문암질암류는 오봉리응회암, 도선굴유문암과 금오산응회암으로 구분된다. 관입암류는 유문암질 환상암맥과 직선상암맥으로 구분된다. 금오산 화산암류는 주원소, 미량원소의 암석화학적 특성으로부터 이 화산암류의 조구조적 배경, 마그마 성인 및 진화를 고찰하였다. 이 화산암류는 TAS도에서 안산암-테사이트-유문암으로 분류된다. 암석화학적 변화는 대체로 분별결정작용에 의한 마그마 진화를 설명해줄 수 있다. 암석화학적 특징은 대부분 칼크알칼리 계열에 속하고 고-K 계열의 화산암류가 우세하다. 주원소와 미량원소 판별도에서 모두 섭입환경의 조산대를 지시하는 화산호 위치를 나타낸다. 이 화산암류의 성인은 하부지각에서 화성기원 각섬암의 부분용융에서 유래하였다. 선기 안산암질 및 후기 유문암질 마그마 간의 조성변화는 하부 마그마챔버에서 분별결정작용에 의해 설명된다. 하부지각의 안산암질 마그마챔버에서 분별된 유문암질 마그마는 밀도차이로 새로운 압력 조건으로 조정될 때 상승하여 상부지각의 유문암질 챔버에 머물다가 순차적으로 분출되었다. 즉 선기의 안산암질 마그마챔버는 하부지각에 머물렀고 후기의 유문암질 마그마챔버는 상부지각에 위치했을 것이다.

주요어: 금오산 화산암류, 칼크알칼리 계열, 화산호, 부분용융, 분별결정작용

Sang Koo Hwang, Ung San Ahn and Kyo-Young Song, 2021, Genesis and evolutions of the Geumosan volcanic rocks in Southern Gumi, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 57, no. 2, p. 123-139

ABSTRACT: The Gumi basin is located in the mid-southeast part of Yeongnam Massif, and consists of the Cretaceous Gumi Formation and Geumosan volcanic rocks, which is divided into andesitic rocks, rhyolitic rocks and intrusive rocks. The andesitic rocks are mapping into Yeongamsan Tuff and Busangni Andesite, while the rhyolitic rocks, into Obongni Tuff, Doseongul Rhyolite and Geumosan Tuff. The intrusive rocks are divided into rhyolitic ring and linear dikes. We have examined the petrochemical setting, magmatic evolution from petrochemical characteristics of major and trace elements for the Geumosan volcanic rocks. The volcanic rocks are classified as andesite, dacite and rhyolite on TAS diagram. Petrochemical data suggest that the volcanic rocks are in calc-alkaline series and dominantly high-K series, and identified as volcanic arc setting that indicates orogenic suite of the Cretaceous subduction environment on the discriminant diagram. The volcanic rocks were derived from the partial melting of amphibolite of igneous origin in the lower crust. Compositional variation between earlier andesitic and later rhyolitic magmas is explained by fractional crystallization in lower magma chamber. The rhyolitic magma, fractionated from the andesitic magma chamber in the lower crust, rose when it was adjusted to the new pressure conditions due to density difference, stayed in the rhyolitic magma chamber in the upper crust and erupted sequentially.

Key words: Geumosan volcanic rocks, calc-alkaline series, volcanic arc, partial melting, fractional crystallization

(Sang Koo Hwang, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Ung San Ahn, World Natural Heritage Office, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 63341, Republic of Korea; Kyo-Young Song, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-42-868-3046, E-mail: kysong@kigam.re.kr

1. 서 언

영남육괴의 중남동부에는 소규모 구미분지가 존재하며, 이 분지는 하부에 구미층과 상부에 금오산 화산암류로 구성된다. 이 화산암류는 지체구조상으로 백악기 화산호 중에서 영남호의 북동부에 위치한다(Hwang *et al.*, 2019).

구미분지는 오래전에 도폭지질조사가 수행되어 지질도가 발간된 바 있다(Kim and Lim, 1974). 이 분지에서 화산암류는 금오산 화산암류로 묶여있었고(Kim and Lim, 1974), 그 상태로 암석학적 연구가 수행된 바 있다(Nam, 1996). 그러나 이 화산암류는 대체로 하부의 안산암질암류, 상부의 유문암질암류와 관입암류로 분류되고, 최근에 7개 층서단위로 구분되었다(Hwang *et al.*, 2021).

개별 화산계 내에서 조성변화는 성층화 저장고(Hildreth, 1983), 기존 챔버로의 외래 마그마의 유입(Miller *et al.*, 1999) 혹은 단지 활발한 분출 동안만 상호작용하는 복식 마그마 저장고(Eichelberger and Izbekov, 2000) 등의 여러 성인 때문에 일어날 수 있다. 오직 이 변화에 관해서만 이야기한다면, 대부분 모델은 이 변화를 마그마 진화과정의 차이에 두었고, 암석화학적 증거를 제시하였다.

금오산 화산암류는 지금까지 상세하게 매핑되지 않았기 때문에, 이 화산암류에 대한 구체적인 암석학적 연구도 수행되지 못했다. 구미분지는 위에서 언급한 바와 같이 층서적인 복잡성을 보여주면서, 어떤 단일 모델을 통해 설명할 수 없는 다단계 마그마 진화를 나타낸다. 이러한 중요한 결과는 대개 각 화산에 대한 정밀조사가 선결되어야 가능하였다. 개별 화산의 이해는 그 화산 내에서 조성변화의 윤곽을 알 수 있고 그 화산이 더 큰 화산계에 기여하기 때문에 필수적이다. 금오산에서 화학조성은 전체적으로 하나의 마그마 계열을 나타내지만, 암석기재적, 주원소 및 미량원소 변화는 2개의 화산암류로 구분된다. 이러한 조성 차이는 같은 근원암을 요구한다면 아마도 공급지에서 지표로 올라오면서 근본적으로 다른 진화과정을 요구한다. 두 화산암류는 이 지역에서 백악기 후엽을 통해 시기를 달리하여 단속적으로 활동하였음을 지시한다.

이 논문에서 우리는 금오산의 백악기 후엽 화산암류에 대한 암석화학적 조성과 성질을 설명한다. 금

오산 마그마는 가장 낮은 규질 생산물조차도 별다른 원시적인 성격의 증거를 보여주지 않는다. 이 조성은 단한계에서 지각물질의 부분용융과 마그마의 단순한 분별결정작용에 의해 연관된다는 것을 보여준다. 이들을 바탕으로 금오산 화산암류에 대한 조구조 환경, 마그마 성인과 지표로 올라오면서 시공간적 진화과정에 대해 토의를 할 것이다.

2. 지질개요

영남육괴 내에는 구미분지, 구례분지, 괴목분지, 보성, 강진, 남창 및 고흥 화산암체 등과 같이 작은 분지가 산점상으로 분포한다. 이들 중에 구미분지는 영남육괴의 화강편마암류 내에서 북서쪽에 위치하는 소규모로 형성되어있다(그림 1).

구미분지에는 하부의 퇴적암류와 상부의 화산암류로 구성된다(그림 1). 퇴적암류는 녹회색 사암 및 역암이 호층을 이루며, 상부에 적갈색 이암층이 협재되어 있다. 이들은 화산암체를 향해 안쪽으로 20~57° 경사를 이룬다. 층서상으로 낙동층에 대비되었지만(Kim and Lim, 1974), 적갈색 층이 협재되어 있어 층서적으로 경상분지의 어느 층에 대비될지 문제가 많으므로 구미층으로 기재되었다(Hwang *et al.*, 2021).

이 화산암류는 금오산 화산암류로 묶어놓았지만(Kim and Lim, 1974), 하부에 안산암질암류, 상부에 유문암질암류로 구분된다. 이들은 각각 화성쇄설암과 용암으로 구성되며, 산성 암맥류에 의해 관입되어있다(그림 1; Hwang *et al.*, 2021).

안산암질암류는 하부의 영암산응회암과 상부의 부상리안산암으로 구분되며, 유문암질암류는 하부의 오봉리응회암, 중부의 도선굴유문암과 상부의 금오산응회암으로 구분된다(그림 1; Hwang *et al.*, 2021). 산성 암맥류는 모두 유문암맥들이고 환상암맥과 직선암맥으로 구분된다. 유문암질암류는 모두 환상암맥 안쪽에 분포하고 퇴적암류 및 안산암질암류는 대부분 환상암맥의 바깥쪽에 분포한다. 암맥류는 접촉부에서 국지적으로 각력화된 관입각력암(intrusion breccia)을 형성하고 접촉부에서 퇴적암을 약간 호온펠스화시켰다.

금오산 화산암류에서는 직경 3.5×5.6 km 크기의 칼데라를 가진다(Hwang *et al.*, 2021). 그리고 백악기의 지층은 북서-남동 방향의 김천단층의 연장부에

의해 잘려 좌수향 주향이동으로 어긋나 있다.

주요 층서단위에 대해 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정에 의하면 안산암질암류에서 부상리안산암은 75.3 ± 1.4 Ma 연대를 나타내며, 유문암질암류에서 오봉리응회암은 74.77 ± 0.78 Ma, 도선굴유문암은 74.4 ± 1.2 Ma와 금오산응회암은 74.2 ± 1.1 Ma 연대를 나타낸다.

3. 암석기재

3.1 영암산응회암

영암산응회암은 칼데라외부에서만 산출되며 김

천단층 남쪽에 크게 분포된다(그림 1). 이 암층은 화강편마암류 혹은 구미층을 부정합적으로 덮는다. 이 암층의 두께는 김천단층 남쪽에서 최고 약 300 m이다(Hwang *et al.*, 2021).

이 응회암은 청회색 내지 회색 기질에 결정이 비교적 풍부하고 종종 피아메(fiamme)와 암편을 함유한다. 피아메는 암청회색을 띠며 대개 1:5 정도로 편평화된 작은 부석편이다. 외관상 대체로 안산암질 양상을 나타내지만 화학조성은 데사이트질이다.

경하에서 결정은 대부분 0.5 mm 이하 크기의 사장석이고 각섬석 및 흑운모 등을 포함하며, 그 사이에 기질로 사이드들이 편평화된 채로 채워져 있다(그림 2a).

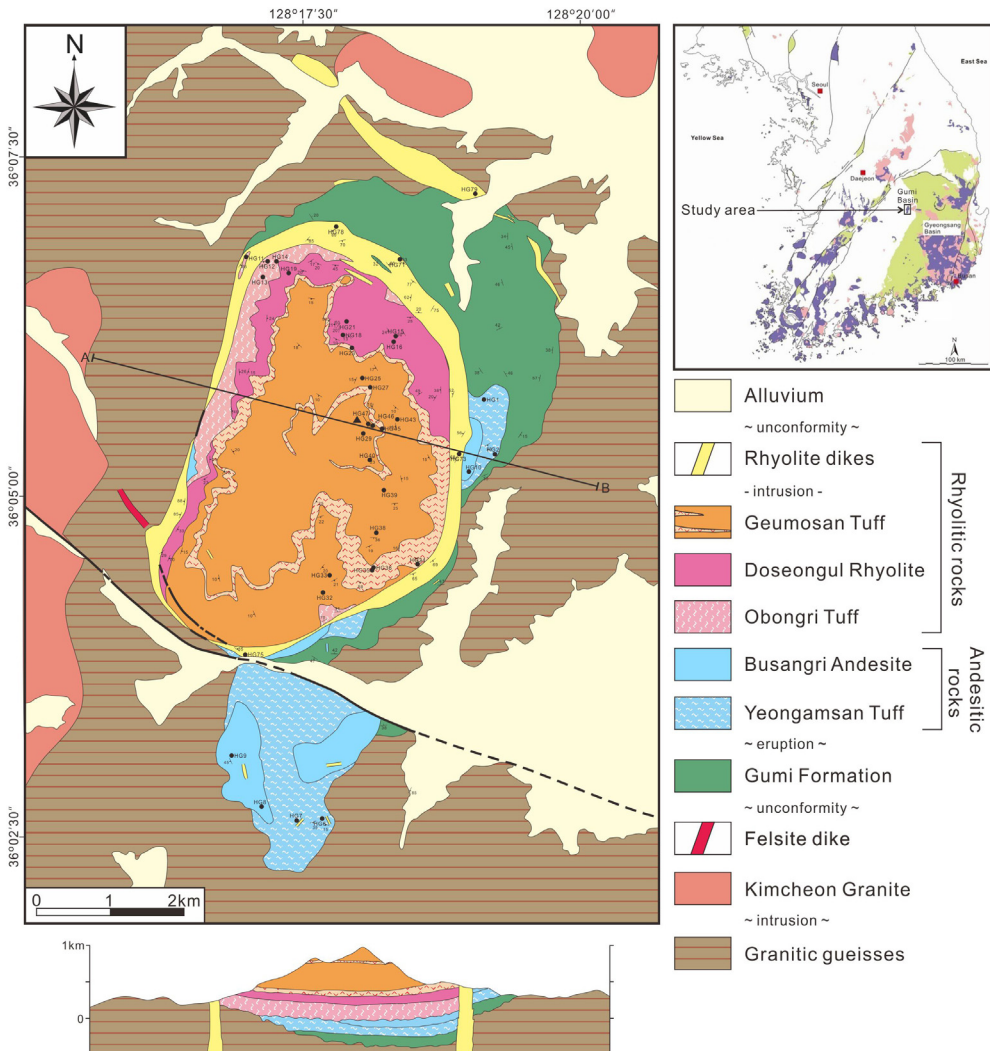


Fig. 1. Generalized geological map in the Gumi basin (Hwang *et al.*, 2021), showing 37 sampling sites.

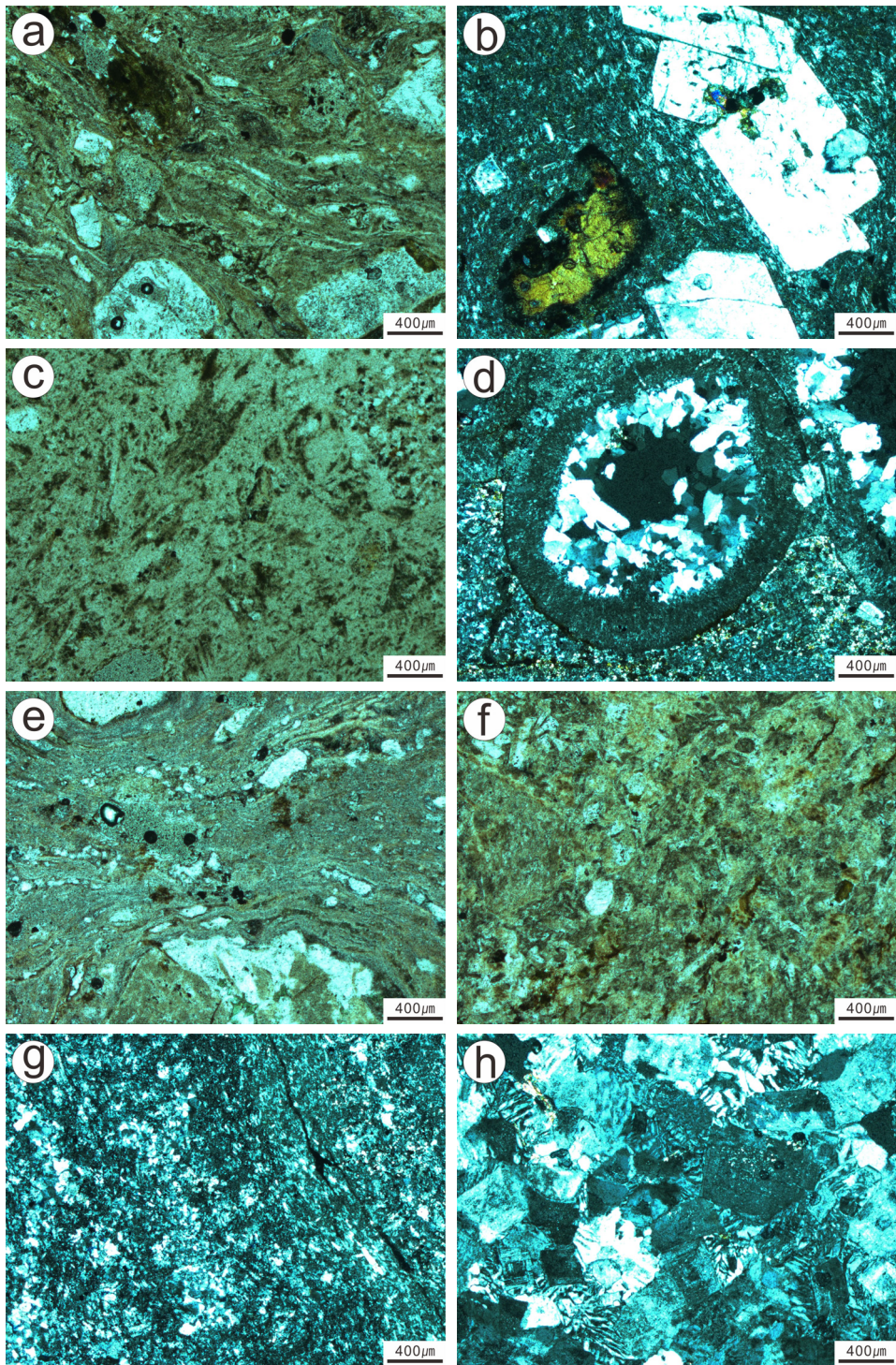


Fig. 2. Photomicrographic features of the typical volcanic rocks. (a) Welding foliation in the Yeongamsan Tuff; (b) Porphyritic texture in the Busangni Andesite; (c) Vitroclastic texture in the Obongni Tuff; (d) A lithophysae in the Doseongul Rhyolite; (e) Lower dense welding zone in the Geumosan Tuff; (f) Upper partial welding zone in the Geumosan Tuff; (g) Flow bands in the ring rhyolite dikes; (h) Micrographic texture in the linear rhyolite dikes.

3.2 부상리안산암

부상리안산암은 칼데라외부에서 영암산응회암 위를 덮고 있으며 칼데라내부에서 오봉리응회암 아래에 노출된다(그림 1). 두께는 최고 약 200 m 정도이다(Hwang *et al.*, 2021).

노두에서 대부분 암녹색 내지 청회색을 띠지만 풍화가 진행된 곳에서는 국부적으로 암갈색을 띠고, 특히 대부분 1 mm 이하 크기의 사장석 반정에 의한 반상조직을 나타내며 드물게 방해석과 녹니석으로 농집된 행인상 구조를 나타낸다.

경하에서도 대부분 다량의 사장석과 소량의 각섬석에 의해 뚜렷한 반상조직을 나타내며, 그 사이에 유리질 내지 은미정질 석기로 채워져 있으며, 유리양모상(hyalopilitic) 석리 혹은 양모배열상(pilotaxitic) 석리를 나타낸다(그림 2b). 유리질 석기는 전반적으로 녹니석 등으로 다소 변질되어 있다.

3.3 오봉리응회암

오봉리응회암은 칼데라내부에서 환상암맥을 따라 소규모로 분포한다(그림 1). 두께는 약 150 m 이상으로 추산된다.

이 응회암은 담회색 내지 담녹색을 띠는 화산회기질에 암편과 부석을 함유하고 결정을 거의 볼 수 없다. 입도에 의하면 대부분 라필리응회암에 속하며 부분용결의 회류응회암에 속한다. 부석은 대개 1:6으로 편평화되고 최대 5×3.5 cm 크기를 가지며, 곳에 따라 규칙적인 배열로 완배열상석리(eutaxitic fabric)에 의한 용결염리를 나타낸다. 입도에 의하면 대부분 라필리응회암에 속하며 부분용결의 회류응회암에 속한다.

경하에서 유리질편은 작은 부석편과 샤아드들이 흩어져있으며 약간의 부분용결 내지 비용결로 규칙적인 배열을 보여주지 않는다(그림 2c). 또한 샤아드들이 암편 주위를 비껴가는 양상을 나타내기도 한다.

3.4 도선굴유문암

도선굴유문암은 칼데라내부에서 용암류(lava flow)로 산출되며 환상암맥을 따라 대상으로 분포한다(그림 1). 이 용암류는 가파른 절벽을 형성하는 것이 특징이다. 이는 최대 약 350 m 두께를 가진다(Hwang *et al.*, 2021).

이 유문암은 거의 모두 용암류로 구성되지만, 그

기저부에 특히 단일 암괴들에 의한 단암질 각력암(monolithic breccia)를 가진다. 이 용암은 도홍색 내지 홍회색을 띠지만 기저부에서 담청회색을 띠기도 하며, 반정을 볼 수 없는 비반상을 나타낸다. 얇은 유백색대와 홍회색대가 조밀한 간격으로 반복되는 유상염리(flow foliation)를 발달시킨다. 그리고 상부에는 종종 구과상(spherulitic) 및 석구상(lithophysal) 구조를 가진다.

경하에서 이 용암은 석영과 장석의 미정질대와 미립의 불투명산화철 외에 결정화되지 않은 유리질대가 교호된다. 간혹 이들은 모자익상 결정질대 혹은 미구과상대와의도 교호된다. 유상염리 즉 유백색대와 홍회색대의 색차이는 결정도의 차이에 의해 정의되고 홍회색으로부터 회색으로의 전이는 아마도 불투명산화철의 종류에 따라 달라진다. 작은 석구는 유리질 테두리 안쪽으로 석영들이 성장되고 중심부에는 빈 공간으로 남아있다(그림 2d).

3.5 금오산응회암

금오산응회암은 칼데라내부에 넓게 분포한다(그림 1). 그리고 이 암층은 칼데라 형성에 직접적으로 관련되며 최고 약 600 m 두께로 계산된다(Hwang *et al.*, 2021).

이 응회암은 대부분 용결응회암으로 구성되지만 중부(GT₂) 및 상부(GT₄)에 부분용결대가 두 차례 얇게 협재됨으로 해서 이를 사이에 두고 하(GT₁)·중(GT₃)·상부(GT₅) 치밀용결대로 구분할 수 있다(Hwang *et al.*, 2021).

치밀용결대는 대체로 암편을 적게 함유하고 부석과 결정을 비교적 많이 함유하며 화산회가 풍부한 파리질응회암(vitric tuff)에 속한다. 그러나 이 용결대는 하부에서 암회색을 상부에서 암갈색을 띠므로서 상부로 갈수록 더 진한 갈색을 띠는 것이 특징이다. 부석들은 작지만 풍부한 편이며 치밀용결상을 나타내고 대개 용결염리를 보여준다. 경하에서 석영, 장석, 사장석 등이 반정으로 나타나며 이들은 흔히 파편상이다. 샤아드와 부석편들이 압착변형으로 평편화되어 완배열상 석리를 잘 나타낸다(그림 2e). 한편 샤아드들이 특히 결정이나 암편 주위를 비껴가는 모습을 뚜렷하게 나타낸다.

부분용결대는 대개 담회색을 띠고 부석과 암편이 풍부하다. 부석은 대개 불규칙하게 존재하지만 다소

편평화되고 불꽃같은 끝을 가진 것도 있다. 경하에서 기질은 주로 약간의 변형만을 보여주는 임의 방향의 샤아드를 가지지만(그림 2f), 반정 혹은 암편 주위에서 변형작용에 의한 비대칭으로 방향성을 나타내기도 한다.

3.6 유문암맥

유문암맥은 칼데라 경계를 따라 환상암맥으로 산출되고, 칼데라외부에서 직선상암맥으로 산출된다(그림 1). 두께는 10~450 m이고 모두 관입상을 나타낸다(Hwang *et al.*, 2021).

이 암맥은 회백색 내지 유백색의 석정질 유문암(stony rhyolite)으로 산출되며, 연변부에서 희미하게 유상엽리가 거의 수직으로 발달된다.

경하에서 이 유문암은 매우 드물게 1 mm 미만의 작은 사장석이 미반정으로 나타난다. 석기는 대부분 미정질 내지 은정질로 결정화되고 희미한 엽리를 나타내며(그림 2g), 특히 칼데라외부에서 직선상암맥은 완정질로 결정화되고 미세한 미문상 조직을 나타낸다(그림 2h).

4. 분석방법

대표 시료는 야외작업동안 풍화되지 않은 암층의 신선한 노출부에서 채취하였으나 절벽부에서 불가능했다. 대부분 시료는 화성쇄설암과 용암에서 체계적으로 신선한 것만 선택되었다. 선택된 시료는 안산암질암류에서 7개, 유문암질암류에서 25개, 그리고 유문암맥에서 5개로 총 37개이며 암석화학분석에 이용되었다. 주원소 분석과 미량원소 및 희토류 원소 분석은 각각 X선 형광분석법(XRF)과 고분해능 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)에 의해 실시되었다.

28개 원소에 대한 전암분석은 신선한 37개의 모든 시료에서 얻었다. 시료는 분쇄기로 <1 mm로 부수고 X선 형광분석(XRF)과 유도결합플라즈마분석(ICP-MS)을 위해 2018년 한국지질자원연구원에 의뢰해 실시하였다. XRF 분석은 Johnson *et al.* (1999) 이 제시한 절차를 따라 수행하였다. XRF 분석에 대한 분석오차는 2번의 내부표준작업의 반복 분석에 의해 결정되었고, 모든 주원소에 대한 표준편차에서 <0.1 wt.%이다. ICP-MS 분석한계는 10% 이하이다.

정확도는 농도에 달렸지만, 일반적으로 모든 원소에서 <1%이다.

5. 암석화학적 특성

금오산 화산암류에 대한 주원소, 미량원소 및 희토류원소 자료는 표 1에 정리하여 나타냈다.

5.1 주원소

금오산 화산암류는 전형적으로 장석이 풍부하고 경우에 따라 각섬석과 흑운모를 함유한다. 이 시료는 화학적으로 61.62~78.02 wt.% SiO₂ 범위이며(표 1) TAS도에 도시하면(Le Maitre, 1984), 대체로 안산암-데사이트-유문암으로 분류되는 마그마 집단이다(그림 3).

이 화산암류는 Irvine and Baragar (1971)의 알칼리-규산 관계도에서 모두 저알칼리 계열에 도시된다(그림 4a). 저알칼리 계열은 AFM 삼각도(Kuno, 1968; Irvine and Baragar, 1971)에서 대체로 FeO⁺가 결핍된 칼크알칼리 계열에 속하고 알칼리가 풍부해지는 진화를 나타낸다(그림 4b). 따라서 이 화산암류는 영남육괴에서 나타나는 백악기 화산대 영남호의 일부라는 것을 암시하며 경상분지에서 나타나는 활모양의 화산대 경상호의 칼크알칼리 계열의 화산암류와도 유사하다(Hwang *et al.*, 2019).

또한 Gill (1981)의 K₂O-SiO₂ 관계도에서, 이 화산암류는 대체로 대개 고-K 계열에 집중되는 양상을 나타내지만 일부 오펜리응회암과 도선굴유문암이 중-K 계열에 도시된다(그림 4c). 따라서 금오산 화산암류는 칼크알칼리 계열에 속하지만 전반적으로 고-K 계열에 우세하게 나타난다고 할 수 있다.

그러므로 이 화산암류는 백악기 후엽(약 75.3~74.2 Ma)에 한반도 남동부에서 태평양판의 하강에 따른 섭입대의 화산물질이라는 것을 암시해준다(Hwang and Kim, 1994). 즉 영남호 화산암류도 이 섭입작용에 의해 생성된 칼크알칼리 계열 마그마로부터 형성된 화산호이라는 것을 간접적으로 암시해준다(Hwang *et al.*, 2019).

5.2 미량원소

미량원소도 민감하게 반응하는 암석화학적 인 변화 특성을 가지므로 조구조 위치에 대한 실마리를

Table 1. Major and trace element abundance of the volcanic rocks in the Gumi basin.

Sample No.	Yeongamsan Tuff				Busangni Andesite			Obongni Tuff				Doseongul Rhyolite	
	HG1	HG2	HG6	HG7	HG8	HG9	HG10	HG11	HG12	HG13	HG14	HG15	HG16
wt %													
SiO ₂	69.14	65.81	70.43	70.95	71.37	64.13	61.62	75.46	74.18	75.01	77.54	75.05	78.02
Al ₂ O ₃	14.23	14.57	14.89	14.70	14.48	15.48	16.30	13.29	13.72	13.22	12.25	13.18	11.88
Fe ₂ O ₃	3.65	4.66	2.64	2.57	2.57	4.88	5.79	1.27	1.46	1.57	1.11	1.28	1.25
CaO	2.33	3.35	1.58	1.44	1.10	4.28	5.04	0.27	0.20	0.29	0.12	0.12	0.13
MgO	1.08	1.65	0.42	0.36	0.29	1.76	2.06	0.15	0.03	0.22	0.18	0.05	0.04
K ₂ O	3.65	3.44	3.93	4.10	4.28	3.73	2.70	4.48	5.64	4.40	3.14	5.21	3.18
Na ₂ O	3.71	3.47	4.63	4.38	4.50	3.66	3.92	3.64	3.45	3.51	3.51	3.17	3.24
TiO ₂	0.50	0.68	0.30	0.28	0.24	0.70	0.80	0.10	0.10	0.12	0.13	0.08	0.08
MnO	0.11	0.11	0.09	0.07	0.07	0.09	0.10	0.03	0.07	0.06	0.01	0.02	0.04
P ₂ O ₅	0.17	0.23	0.07	0.06	0.05	0.23	0.28	0.03	0.02	0.04	0.03	0.01	0.01
L.O.I	0.96	1.61	0.69	0.80	0.70	0.60	0.97	1.01	0.85	1.28	1.54	1.33	1.70
Total	99.53	99.58	99.67	99.71	99.65	99.54	99.58	99.73	99.72	99.72	99.56	99.50	99.57
ppm													
Y	28.40	26.90	26.10	27.40	29.00	23.70	27.00	16.70	24.30	15.40	16.20	15.40	13.70
La	42.80	39.30	41.90	46.10	48.40	36.10	41.30	39.00	49.20	37.00	35.00	37.10	23.20
Ce	82.30	76.80	79.40	86.50	92.30	68.90	80.00	69.60	86.80	66.70	61.10	67.10	55.30
Pr	9.01	8.43	8.46	9.25	9.69	7.49	8.68	6.80	8.77	6.58	6.22	6.64	4.25
Nd	33.80	32.70	31.40	34.90	36.70	28.90	34.10	23.40	29.90	22.70	21.40	22.50	14.30
Sm	6.23	6.05	5.66	6.23	6.37	5.30	6.10	3.63	4.90	3.61	3.57	3.50	2.29
Eu	1.48	1.71	1.71	1.71	1.71	1.53	1.73	0.67	0.82	0.67	0.63	0.58	0.40
Gd	6.02	6.01	5.58	6.23	6.45	5.28	6.30	3.86	4.98	3.69	3.40	3.52	2.50
Tb	0.72	0.75	0.66	0.76	0.78	0.66	0.73	0.44	0.59	0.41	0.41	0.39	0.30
Dy	4.67	4.76	4.34	4.68	4.93	4.16	4.49	2.70	3.69	2.63	2.70	2.58	2.21
Ho	0.92	0.95	0.88	0.98	1.00	0.83	0.89	0.55	0.75	0.53	0.54	0.52	0.47
Er	2.77	2.91	2.73	2.95	3.06	2.45	2.65	1.64	2.25	1.61	1.61	1.62	1.51
Tm	0.43	0.43	0.43	0.45	0.46	0.38	0.40	0.27	0.35	0.28	0.26	0.28	0.26
Yb	2.83	2.81	2.93	3.09	3.18	2.55	2.69	1.88	2.36	1.86	1.78	1.91	1.74
Lu	0.44	0.42	0.44	0.44	0.48	0.38	0.41	0.29	0.38	0.28	0.26	0.28	0.27
Th	12.90	12.10	13.10	13.60	14.10	10.70	10.80	15.10	17.80	14.80	13.70	15.30	14.20
U	2.36	2.41	2.42	2.49	2.60	1.87	1.68	2.09	2.39	2.01	1.96	1.97	1.77
ΣREE	238	225	228	248	261	201	230	189	240	181	171	181	139
(La/Lu) _n	10.02	9.64	9.81	10.80	10.39	9.79	10.38	13.86	13.34	13.62	13.87	13.65	8.85
(Ce/Yb) _n	7.40	6.95	6.89	7.12	7.38	6.87	7.56	9.42	9.35	9.12	8.73	8.94	8.08
(Eu/Eu*) _n	0.73	0.86	0.92	0.83	0.81	0.88	0.85	0.55	0.50	0.56	0.55	0.50	0.51
(La/Yb) _n	10.11	9.35	9.56	9.98	10.18	9.47	10.27	13.87	13.94	13.30	13.15	12.99	8.92

제공한다.

Gill (1981)은 효과적인 원소를 이용하여 생성될 당시의 조산대 환경을 구별하였다. 조산대에서는 일반적으로 La/Th의 비가 2~7의 범위에 이르는 변화

를 보인다(Gill, 1981). 금오산 화산암류는 La/Th 비가 0.81~3.82의 범위를 가지며, 대개 조산대 범위에 들어간다. 그리고 La-Th 구분도(Gill, 1981)에서 대부분 조산대 영역에 도시된다(그림 5a). La-Nb 관계

Table 1. continued.

Sample No.	Doseongul Rhyolite			Geumosan Tuff									
	HG18	HG19	HG21	GT ₁		GT ₂				GT ₃			
	HG18	HG19	HG21	HG32	HG33	HG23	HG34	HG35	HG36	HG25	HG38	HG39	HG43
wt %													
SiO ₂	75.87	75.08	74.84	73.83	73.11	72.12	76.03	75.86	75.62	75.12	74.69	73.54	73.11
Al ₂ O ₃	12.73	13.17	13.18	13.60	13.81	14.71	12.63	13.17	13.15	12.95	13.02	13.55	13.63
Fe ₂ O ₃	1.27	1.38	1.40	1.66	2.06	2.34	1.71	1.39	1.43	1.50	1.70	2.04	1.97
CaO	0.27	0.24	0.31	0.68	0.51	0.13	0.19	0.15	0.19	0.28	0.29	0.17	0.31
MgO	0.05	0.11	0.06	0.13	0.27	0.23	0.13	0.14	0.22	0.15	0.20	0.25	0.30
K ₂ O	4.49	4.39	4.73	4.99	4.58	4.26	3.88	4.02	4.16	4.54	4.50	4.58	4.48
Na ₂ O	3.73	4.07	3.53	3.70	3.94	2.27	3.04	3.18	2.97	3.77	3.55	3.56	3.77
TiO ₂	0.09	0.09	0.09	0.17	0.22	0.22	0.13	0.10	0.12	0.13	0.19	0.22	0.19
MnO	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.05	0.05	0.03	0.12
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.05	0.04	0.05
L.O.I	0.98	1.13	1.42	0.88	1.14	3.35	1.72	1.71	1.85	1.03	1.28	1.59	1.65
Total	99.54	99.73	99.62	99.72	99.73	99.70	99.52	99.75	99.74	99.55	99.52	99.57	99.58
ppm													
Y	17.10	18.20	15.30	21.10	21.90	20.20	18.10	17.70	17.10	21.00	15.00	18.40	24.30
La	36.50	41.20	33.00	44.00	47.40	46.60	42.60	33.40	35.00	40.50	32.10	40.90	46.80
Ce	64.00	71.90	62.50	79.40	78.00	87.30	71.20	61.50	62.70	72.70	57.90	75.30	85.30
Pr	6.52	7.24	6.09	8.17	9.13	8.59	7.32	6.19	6.46	7.53	6.13	7.60	8.69
Nd	21.90	25.10	20.40	29.10	32.90	29.50	25.20	21.60	22.20	26.00	21.80	26.70	31.20
Sm	3.46	3.96	3.15	4.66	5.37	4.64	3.98	3.65	3.76	4.37	3.61	4.34	5.22
Eu	0.56	0.64	0.55	0.95	1.11	0.94	0.82	0.54	0.61	0.73	0.66	0.85	1.11
Gd	3.39	4.06	3.19	4.80	5.23	4.49	3.96	3.65	3.78	4.37	3.52	4.38	5.26
Tb	0.41	0.47	0.37	0.55	0.62	0.50	0.46	0.45	0.44	0.53	0.42	0.50	0.67
Dy	2.65	3.02	2.58	3.67	3.91	3.20	3.00	2.95	2.92	3.45	2.66	3.17	4.11
Ho	0.56	0.60	0.54	0.73	0.77	0.69	0.61	0.60	0.58	0.71	0.53	0.65	0.82
Er	1.77	1.87	1.75	2.26	2.36	2.22	1.89	1.91	1.84	2.14	1.64	2.11	2.52
Tm	0.30	0.31	0.30	0.37	0.37	0.36	0.31	0.30	0.29	0.34	0.26	0.34	0.40
Yb	1.93	2.19	2.09	2.52	2.53	2.55	2.15	2.12	2.05	2.39	1.79	2.39	2.70
Lu	0.30	0.34	0.33	0.40	0.38	0.38	0.33	0.32	0.31	0.37	0.28	0.36	0.40
Th	16.00	16.50	17.70	16.30	16.10	17.70	14.50	16.00	16.40	16.20	11.60	15.60	16.90
U	2.41	1.97	2.13	2.33	2.42	2.72	2.23	1.87	2.09	2.46	1.71	2.29	2.45
ΣREE	180	200	172	221	231	233	199	175	179	206	162	206	239
(La/Lu) _n	12.54	12.49	10.30	11.33	12.85	12.64	13.30	10.75	11.63	11.28	11.81	11.71	12.06
(Ce/Yb) _n	8.43	8.35	7.61	8.01	7.84	8.71	8.42	7.38	7.78	7.74	8.23	8.01	8.04
(Eu/Eu*) _n	0.50	0.49	0.53	0.61	0.64	0.62	0.63	0.45	0.49	0.51	0.56	0.59	0.64
(La/Yb) _n	12.65	12.58	10.56	11.68	12.53	12.22	13.25	10.54	11.42	11.33	11.99	11.44	11.59

도와 La-Ba 관계도에서도 조산대 영역에 도시되었다(Nam, 1996). 이러한 범위는 섭입대를 통과하여 분출된 화산암류라는 것을 암시한다.

이 화산암류는 Nb-Y 판별도와 Rb-(Y+Nb) 판별

도에서 화산호 영역에 도시되었다(Nam, 1996). La/Yb-Th/Yb 판별도에서는 Th/Yb 비의 증가에 따라 La/Yb 비도 증가하는 대륙연변호 혹은 안데스호에 도시된다(그림 5b). 이들은 화산호 중에서도 대륙연

Table 1. continued.

Sample No.	Geumosan Tuff						Rholite dikes				
	GT ₄		GT ₅				HG71	HG73	HG75	HG78	HG79
	HG27	HG45	HG29	HG40	HG46	HG47					
wt %											
SiO ₂	75.31	76.09	71.90	72.98	74.09	72.92	75.36	73.76	73.78	77.76	74.83
Al ₂ O ₃	13.14	12.50	14.27	13.69	13.41	14.04	13.09	13.85	13.89	12.04	13.90
Fe ₂ O ₃	1.35	1.30	2.39	2.17	1.62	2.08	1.10	1.68	1.84	0.83	0.49
CaO	0.13	0.13	0.22	0.37	0.22	0.15	0.18	0.31	0.19	0.19	0.28
MgO	0.16	0.14	0.31	0.29	0.14	0.22	0.07	0.15	0.06	0.07	0.04
K ₂ O	4.13	4.38	4.31	4.49	5.27	4.37	3.87	4.76	4.48	4.16	4.97
Na ₂ O	3.23	3.03	4.26	3.88	3.12	3.73	4.08	3.33	4.27	3.16	3.69
TiO ₂	0.10	0.11	0.22	0.22	0.16	0.20	0.08	0.16	0.15	0.07	0.11
MnO	0.04	0.03	0.07	0.07	0.03	0.04	0.07	0.03	0.03	0.02	0.01
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.05	0.06	0.03	0.05	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02
L.O.I	1.93	1.80	1.57	1.32	1.52	1.91	1.61	1.48	1.04	1.29	1.38
Total	99.54	99.53	99.57	99.54	99.61	99.71	99.52	99.54	99.74	99.60	99.72
ppm											
Y	15.00	16.40	21.40	20.40	23.00	20.10	15.50	14.60	12.60	16.20	34.20
La	35.40	34.40	44.70	31.60	46.30	42.20	15.80	39.50	28.80	22.40	63.70
Ce	61.60	57.60	83.00	57.10	83.70	77.30	28.10	70.30	35.60	43.40	112.00
Pr	6.21	6.01	8.29	6.11	8.85	7.87	3.54	6.93	5.42	4.53	12.80
Nd	20.80	20.80	29.30	22.50	31.80	27.70	12.10	23.40	18.30	15.90	46.90
Sm	3.36	3.40	4.83	4.05	5.45	4.63	2.48	3.63	2.60	3.21	8.00
Eu	0.47	0.55	1.01	0.92	1.02	0.96	0.38	0.82	0.59	0.38	1.29
Gd	3.38	3.54	4.77	4.20	5.42	4.56	2.29	3.65	2.56	3.21	7.83
Tb	0.38	0.41	0.58	0.55	0.66	0.54	0.34	0.40	0.29	0.44	0.99
Dy	2.50	2.63	3.62	3.40	4.18	3.41	2.59	2.50	1.90	2.88	6.23
Ho	0.52	0.55	0.73	0.67	0.80	0.68	0.54	0.50	0.44	0.57	1.24
Er	1.64	1.71	2.32	1.95	2.48	2.17	1.82	1.52	1.56	1.69	3.49
Tm	0.27	0.28	0.39	0.32	0.38	0.36	0.29	0.25	0.28	0.26	0.53
Yb	1.85	1.93	2.60	2.05	2.76	2.43	2.16	1.74	2.05	1.86	3.45
Lu	0.28	0.28	0.39	0.30	0.41	0.37	0.32	0.25	0.33	0.28	0.50
Th	16.50	15.80	16.30	10.50	17.00	16.40	19.40	16.30	15.80	18.30	19.30
U	2.22	2.15	2.24	1.53	2.61	2.45	1.71	2.03	2.08	2.14	3.02
ΣREE	172	168	226	168	237	214	109	188	131	138	325
(La/Lu) _n	13.03	12.66	11.81	10.85	11.64	11.75	5.09	16.28	8.99	8.24	13.13
(Ce/Yb) _n	8.47	7.59	8.12	7.08	7.71	8.09	3.31	10.28	4.42	5.93	8.26
(Eu/Eu*) _n	0.42	0.48	0.64	0.68	0.57	0.63	0.48	0.68	0.69	0.36	0.49
(La/Yb) _n	12.80	11.92	11.50	10.31	11.22	11.61	4.89	15.18	9.39	8.05	12.35

번호의 화성암에서 나타나는 양상을 지시한다. 따라서 금오산 화산암류는 안데스에서와 같이 영남육괴를 뚫고 올라온 대륙연변부의 화산호 환경에서 만들어진 암석임을 지시한다.

6. 화학조성 변화

6.1 주원소 변화

SiO₂에 대한 주원소의 하키변화도에서 조성변화

트렌드를 살펴보았다. 이 변화도에서 SiO₂이 증가함에 따라 Fe₂O₃^t, MgO, TiO₂와 P₂O₅는 직선상으로 감소하는 경향을 나타낸다(그림 6). 이러한 직선상 감소는 보웬 원리에 따라 고철질 광물이 순차적으로 분별정출이 일어났음을 의미한다.

Al₂O₃는 거의 직선적으로 감소하는 경향을 보여 주지만 SiO₂이 70%에서 킥 모양으로 꺾어 일시적으로 상승했다가 다시 직선상으로 감소하는 경향을 보여준다(그림 6). 이러한 킥밴드 변화는 동일한 챔버 내에서 오로지 마그마의 분별결정작용에만 의한 내적 변화라기보다 외래 장석의 유입과 같은 다른 지각물질에 의한 외적 변화가 추가되었음을 암시한다.

CaO는 SiO₂ 61~72 wt% 범위에서 점진적으로 감소하는 경향을 보이다가, SiO₂ 72~78 wt% 범위의 금오산용회암과 유문암맥 시료들에서 거의 일정하게 수평으로 변화하는 경향을 보여준다(그림 6). 꼬리 부분에서 수평으로 일정한 변화는 아마도 후기 마그마에서 Ca 사장석 정출이 이미 끝남을 암시한다.

TiO₂는 SiO₂ 61~74 wt% 범위에서 점진적으로 감소하는 경향을 보이지만, SiO₂ 74~78 wt% 범위의 유문암맥과 일부 금오산용회암 시료들에서 거의 수평으로 변화하는 경향을 나타낸다(그림 6). 마지막 꼬리 부분에서 일정한 변화는 아마도 후기 마그마에서 루틸 정출이 이미 끝남을 의미한다.

MnO는 SiO₂ 61~70 wt% 범위의 안산암질암류에서 분산되지만 대체로 거의 일정한 경향을 보여 주며, SiO₂ 70~78 wt% 범위의 유문암질암류에서 감소하는 경향을 나타낸다(그림 6). 유문암질암류에서

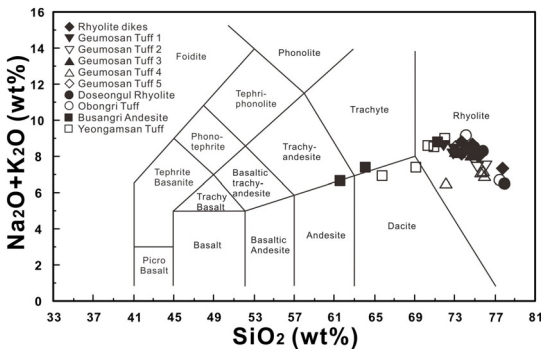


Fig. 3. Classification and nomenclature of the volcanic rocks on the total alkali silica (TAS) diagram (Le Maitre, 1984).

직선상 감소는 후반기에 고철질 광물이 계속적으로 정출되었음을 암시한다. 이러한 SiO₂ 70 wt%에서 변화는 Al₂O₃에서와 같이 동일한 챔버 내에서 변화라고 하기보다 챔버의 외적 변화를 암시한다.

Na₂O는 다소 분산되어있는 것처럼 보이지만, SiO₂

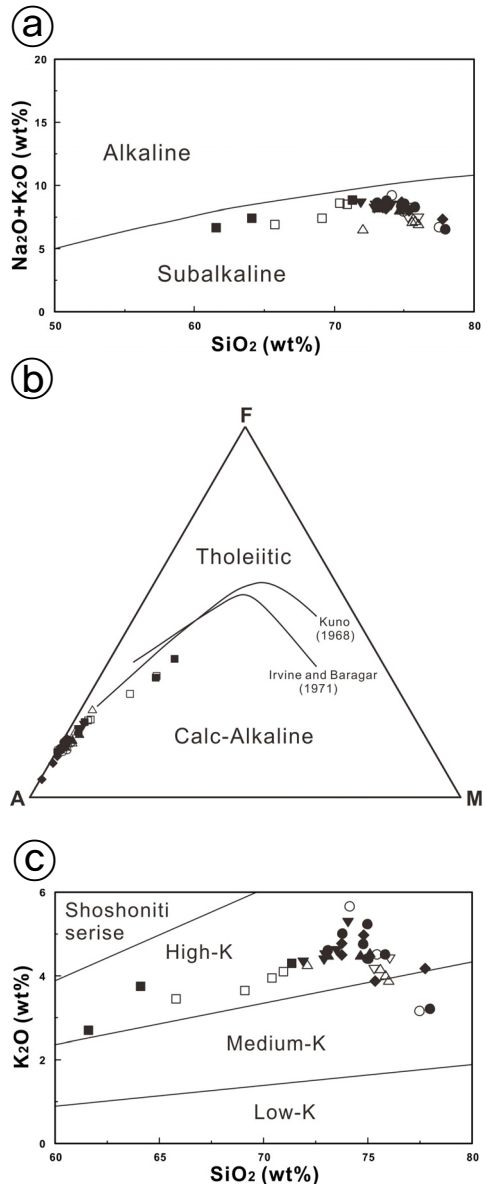


Fig. 4. (a) Classification of alkaline and subalkaline series (Irvine and Baragar, 1971); (b) AFM diagram showing classification of tholeiitic and calc-alkaline series (Kuno, 1968; Irvine and Baragar, 1971); (c) K₂O versus SiO₂ diagram (Gill, 1981). Symbols are the same as in Fig. 3.

61~70 wt%의 범위의 안산암질암류에서 분산되지만 대체로 거의 일정한 경향을 보여주며, SiO₂ 70~78 wt% 범위의 유문암질암류에서 감소하는 경향을 보여준다(그림 6). 유문암질암류에서 직선상 감소는 후반기에 알칼리장석이 계속적으로 정출되었음을 암시한다.

이와 같이 주원소들이 SiO₂에 대한 변화 트렌드는 전형적인 마그마 진화에 따른 조성변화를 나타낸다. 즉 마그마 조성이 안산암질에서 유문암질로 변화했음을 반영하며, 이는 마그마챔버에서 분별결정

작용이 우세하게 일어났음을 반영한다.

주원소 조성변화를 비교할 때 아마도 중요한 관찰은 하부의 안산암질암류(SiO₂ 61.62~70.95 wt%)와 상부의 유문암질암류(SiO₂ 71.90~78.02 wt%)가 양자 사이에 조성적으로 다른 변화를 한다는 것이다. 후기 마그마는 선기 마그마에 비하여 주어진 SiO₂ 농도에 따라 특히 Al₂O₃, MnO, Na₂O 등이 더 가파르게 감소하며, 이에 비해 선기 마그마는 더 완만하게 감소하거나 혹은 불규칙하면서 변화한다(그림 6). 이는 선·후기 마그마 간에 전체 조성차이 외에 외적인 요인을 지시한다.

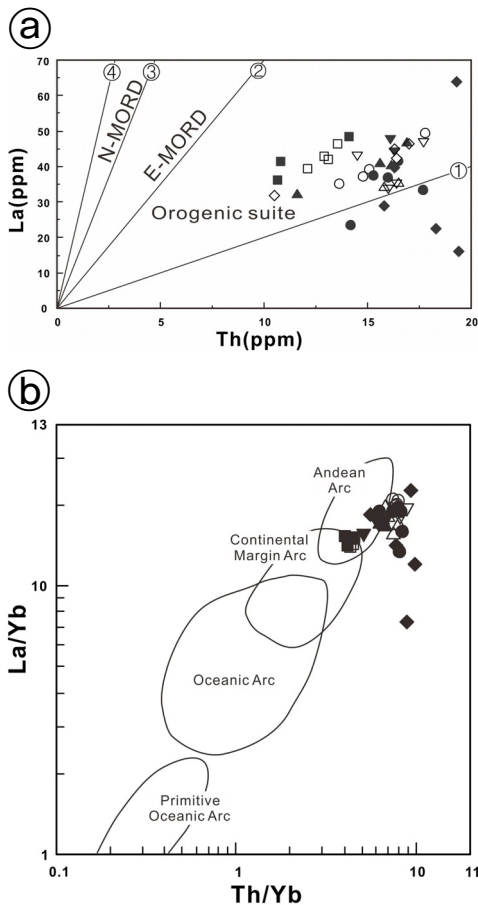


Fig. 5. (a) Discriminant diagram of incompatible trace elements La versus Th ratio (Gill, 1981). Line 1, 2, 3 and 4 represent La/Th=2, 7, 15 and 25 respectively. The Geumosan volcanic rocks typically lie in the orogenic suite. La/Th ratio decreases during fractionation. (b) Discriminant diagram of incompatible trace elements La/Yb versus Th/Yb. The volcanic rocks plots on the fields of the Andean and continental margin arcs. Symbols are the same as in Fig. 3.

6.2 미량원소 변화

금오산 화산암류에서 미량원소는 SiO₂에 따른 하 커변화도에서 살펴봐왔다(그림 7). 이 변화도에서 미량원소는 대개 분명한 체계적 변화를 보여주지 않지만, 선·후기 층서 간에 기율기와 분산정도가 현저한 차이를 나타낸다. Y은 전반적으로 “┐”자로 꺾인 조성변화 트렌드를 나타낸다. 한편 Th과 U은 “^”자로 꺾이는 아주 다른 조성변화 트렌드를 나타낸다.

경이온친석원소(LILE)인 Y은 SiO₂의 증가에 따라 대체로 선기의 안산암질암류에서 거의 일정하게 변화를 보여주지 않지만, 후기의 유문암질암류에서 감소하는 경향을 보여준다(그림 7). 또한 Th과 U은 SiO₂의 증가에 따라 선기의 안산암질암류에서 일관되게 증가하는 경향을 보이고, 후기의 유문암질암류에서 대체로 감소하는 경향을 보여준다(그림 7). 다시 말해서 안산암질암류는 SiO₂가 증가함에 따라 일정하거나 혹은 정(+)의 직선상 트렌드 위에 놓이지만, 유문암질암류는 부(-)의 직선상 트렌드 위에 놓인다.

REE는 특징적으로 평균 콘드라이트 값에 비해 모두 크게 부화되어 있으며, 전반적으로 LREE가 더 부화되어 있고 HREE는 덜 부화되어있으며 LREE가 상대적으로 HREE보다 더 급한 기울기를 가진다(그림 8a). 이것은 칼크알칼리 계열의 암석에서 나타나는 전형적인 특징 중의 하나이다. 따라서 모든 시료가 대체로 동일한 패턴을 가지면서 평행배열 되어있는데, 이것은 마그마챔버 내에서 시간에 따라 마그마가 분별결정작용에 의해 진화되었음을 지시한다. 그리고 Eu는 모두 부이상을 나타내는데(그림 8a, 8b), 이것은 결정분화작용이 진행될수록 사장석의 정출이

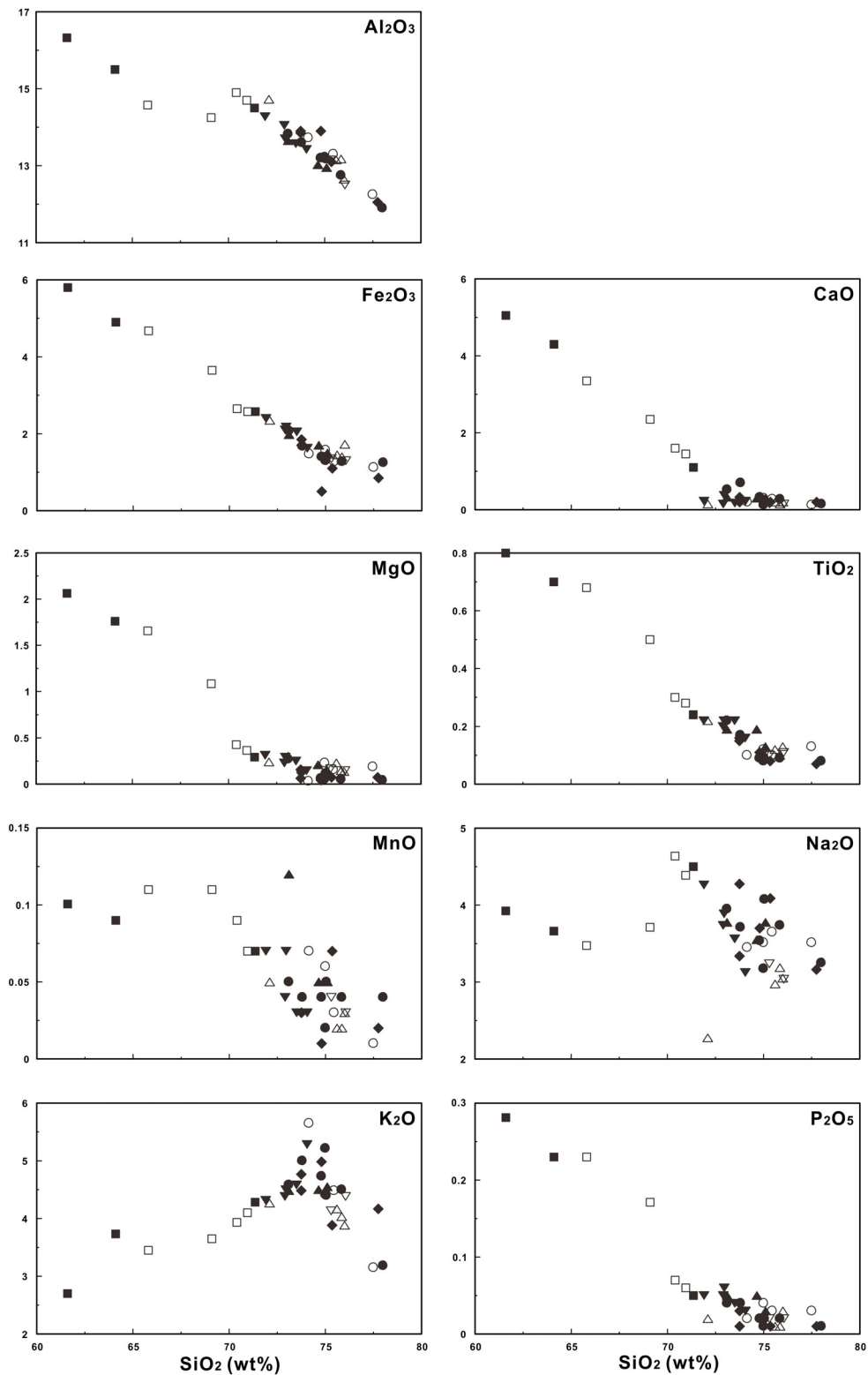


Fig. 6. Harker variation diagrams of major elements versus SiO_2 . Symbols are the same as in Fig. 3.

현저했음을 암시한다. 특히 안산암질암류는 SiO₂의 변화에 따라 부 이상이 거의 일정한 변화를 보이지만, 유문암질암류는 SiO₂의 증가에 따라 대체로 부 이상이 크게 나타난다(그림 8b).

7. 토 의

7.1 별개의 마그마 집단

금오산 화산암류에서 미량원소와 희토류원소의 화학적 특성을 보이는 요소들을 검토함으로써 이 화산암류에 대한 암석조구조 환경(petrotectonic setting)을 결정할 수 있다. 이들에 의하면 이 금오산 화산암류는 그 조구조 환경이 특히 대륙지각을 통과하여 분출한 화산암류와 아주 유사하다.

한반도 남부에는 유천층군 화산암류가 섭입대 조

구조 환경으로부터 기원하는 조산대 환경에서 생성되었던 활모양의 화산대를 형성하며 분포하는데, 이를 백악기 화산호로 보고 한국호(Korean arc)라고 하였다(Hwang and Kim, 1994). 또한, 이 한국호는 같은 방향으로 여러 화산호로 구성되는데(Hwang *et al.*, 2019), 그중에서 구미분지 내에 존재하는 화산암류는 영남호에 속하며 그 화산호의 북동부에 해당한다. 따라서 금오산 화산암류는 조산대 환경에서 위치한다는 것을 알 수 있다(그림 5).

금오산 화산암류는 암석층서에 따라 하부의 안산암질암류와 상부의 유문암질암류로 구분되었으며(Hwang *et al.*, 2021), 이러한 구분은 조성변화 트렌드에서도 확인된다. 안산암질암류와 유문암질암류 간의 조성차이는 약간의 중첩 부분도 있지만 거의 모든 주원소와 미량원소(Y, Th, U)에서 명백하게 나타난다(그림 6, 7). 미량원소 변화도에서 안산암질암류와 유문암질암류는 서로 다른 기율기와 분산정도에 의해 강조된다. 유문암질암류는 안산암질암류에 비해 거의 모든 불호정원소의 농도가 비교적 높게 나타나고 변

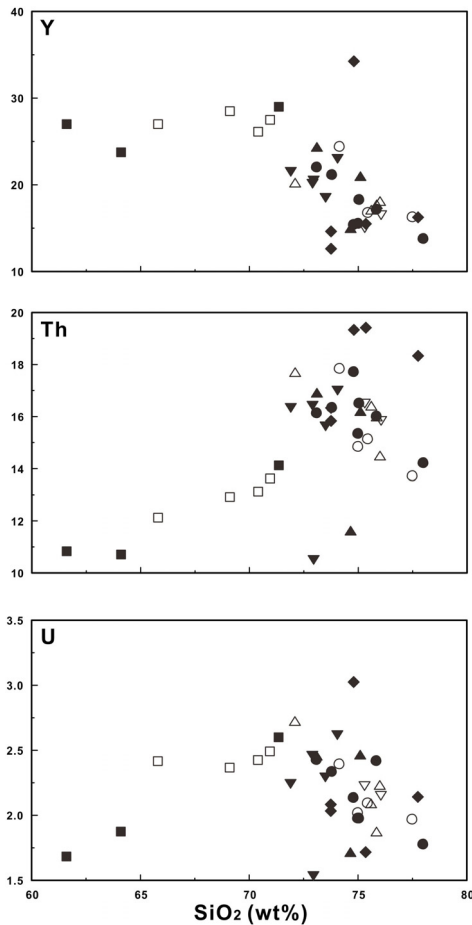


Fig. 7. Harker diagrams of selected trace elements versus SiO₂. Symbols are the same as in Fig. 3.

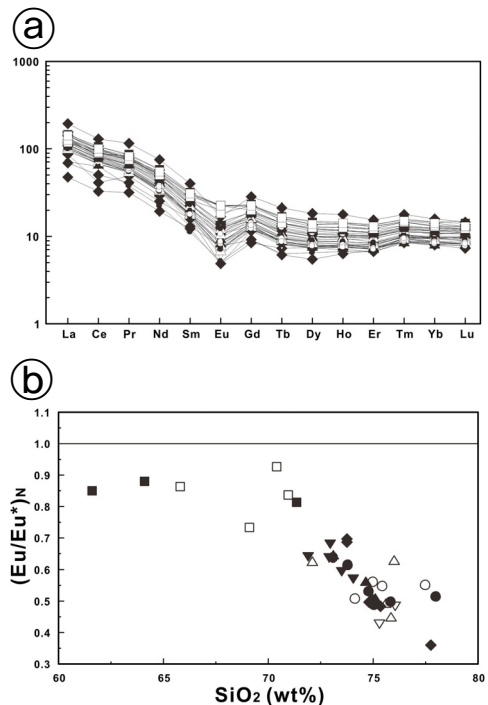


Fig. 8. (a) Chondrite-normalized REE patterns. Values are normalized to chondrite from Nakamura (1974); (b) Variation diagrams of Eu/Eu* versus SiO₂. $Eu/Eu^* = Eu_N / \sqrt{(Sm_N)(Gd_N)}$. Symbols are the same as in Fig. 3.

화도에서 대부분 더 크게 분산되어있다(그림 6, 7). 두 그룹 간의 차이는 다소 체계적이고 단지 단일 원소 농도에 기초하지 않는다는 것을 주목해야 한다. 따라서 조성자료의 차이와 층서적 차이는 수직으로 위치가 다른 2개의 마그마챔버가 존재했다는 것을 암시한다.

7.2 마그마 성인

앞에서 주원소와 미량원소 및 희토류원소의 변화를 검토해본 결과, 금오산 화산암류는 섭입대 환경에서 기원했지만, 그 성인이 무엇인지와 어떤 진화 과정을 겪었는지를 확인해야 한다.

구미분지에서 마그마의 성인을 살펴보기 위해, 우리는 선기 안산암질암류 및 후기 유문암질암류에 대해 가장 고철질 부분에 초점을 맞춰 생각해왔다. 그림 7은 후기 유문암질암류가 같은 SiO_2 조성에서 선기 안산암질암류보다 더 많은 함량의 불호정성원소(Th)를 함유함을 보여준다. SiO_2 증가 없이 불호정성 미량원소의 함량을 높이기 위하여, 최소한 사장석의 많은 결정작용이 요구될 것이다. 아마도 이 정도의 분별작용은 추가 광물의 정출 없이도 일어날 수 있을 것이다.

후기 유문암질암류의 근본적 특징은 불호정성 고장력원소(Y, U)의 비교적 더 적은 함량이다. 이는 만약 선기 및 후기 화산암류 간의 차이가 다른 정도의 부분용융에서 나왔다면 후기 유문암질 마그마가 더 높은 정도의 부분용융을 겪었다는 모순을 보여준다. 그런데 화산호계(volcanic arc system)에서 마그마 다양성은 일반적으로 균질한 모체의 부분용융 정도 차이에 의해 종종 설명되어왔다. 예를 들면, 하나의 마그마 계열이 하부 지각을 따라 높은 곳에서 생성되고(예, 낮은 정도의 부분용융) 또 다른 더 깊은 곳에서 생성되는 것(예, 더 많은 정도의 부분용융)과 같이, 그 원인은 지각물질의 차별 부분용융에 있다고 제시되어왔다(Woodhead and Johnson, 1993).

$\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 상관도에서 $\text{Na}_2\text{O} > 2\text{wt}\%$ 이기 때문에, 그 기원이 모두 I형의 화성기원에 속한다(그림 9). 따라서 성인은 맨틀 혹은 화성기원의 지각물질이 부분용융된 결과로 보아야 한다. 구미분지에서 안산암질암류는 층서적으로 유문암질암류에 의해 덮이기 때문에, 안산암질 마그마가 유문암질 마그마보다 먼저 분출되었음을 나타내는 것으로, 지각물질의 부분용융 과정을 적용하기에는 부적절하다. 왜냐하면, 맨

틀 혹은 대륙지각이 부분용융된다면 제일 먼저 유문암질 성분의 마그마가 형성될 것이며, 부분용융의 정도가 높아짐에 따라 안산암질 마그마가 차례로 만들어져야만 되기 때문이다.

금오산 화산암류를 Gill (1981)의 $\text{Ce}_N-(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 상관도에 도시해본 결과, 대륙지각 각섬암의 용융선을 따라 대체로 평행하게 도시됨을 나타내며 각섬암 용융선보다 조금 위쪽에 배열되어 있다(그림 10a). 이처럼 각섬암 용융선에 따르는 배열은 평균 대륙지각 각섬암의 부분용융 조성을 나타내고 $P_{\text{H}_2\text{O}}=5\text{kb}$ 의 현무암질 모체로부터 조산대 안산암의 생성에 적합한 용융조건을 보여준다(Wolf and Wyllie, 1994; Petford and Gallagher, 2001). 이 용융선의 오른쪽 일정한 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 구간은 용융물이 안산암질 조성에 해당하는데, 용융 비율이 증가함에 따라 각섬석과 휘석의 비율이 감소하기 때문에 평평하게 나타난다(Gill, 1981). 마찬가지로 La/Yb-La 상관도에서도 분화작용 트렌드를 완전히 벗어나서 부분용융 트렌드를 따르기 때문에 부분용융을 더욱 더 확실하게 뒷받침해준다(그림 10b).

그러므로 금오산 화산암류는 하부지각에서 화성기원의 정각섬암(orthoamphibolite)의 부분용융에 의한 마그마로부터 기원한다고 판단된다. 다른 한편으로 이 그림 10a에서 금오산 화산암류의 배열을 주목하자면, 이 화산암류에서 Ce/Yb 비의 상수는 고려된 공급원의 부분용융보다 차라리 분별결정작용에 의한 성인도 분명히 선호하는 것으로 보인다.

7.3 마그마 진화와 상승

금오산 화산암류는 섭입대에서 하부 지각 각섬암

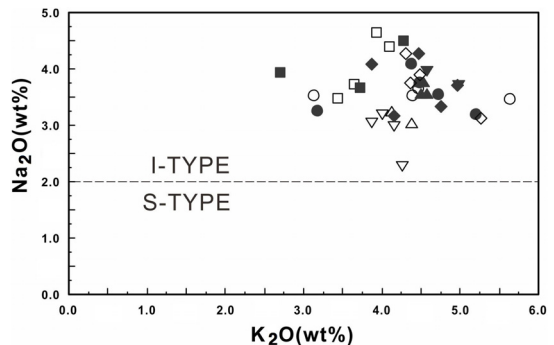


Fig. 9. Diagram of Na_2O versus K_2O distinguishing between I-type and S-type. Symbols are the same as in Fig. 3.

의 부분용융으로 금오산 화산암류의 기원이 되는 안산암질 모그마를 형성했으며 심부 마그마챔버에서 고철질 광물의 분별결정작용을 거치면서 유문암질 마그마가 상부로 올라와 천부 마그마챔버를 형성했다고(Wilson, 1989) 해석할 수 있다.

REE 패턴에서 전기 안산암질암류와 후기 유문암질암류의 패턴이 유사하게 나타나는 점과 상부 유문암질암류가 하부 안산암질암류에 비해 전반적으로 부화되어있는 양상을 보이는 점 등으로 미루어보아 전술한 바와 같이 생성된 안산암질 모그마로부터 분별결정작용이 일어났음을 시사한다.

안산암질 마그마는 그 밀도와 점압이 평형을 이루는 위치의 하부지각에 마그마챔버를 확보하며, 그곳에 머물면서 분별결정작용이 일어남으로써 밀도가 더 낮은 유문암질 마그마가 만들어지고 지표를 향

해 올라온다(Wilson, 1989). 이러한 여러 가지 물리적 기구 중에서 분별정출작용은 대륙호 안산암질 마그마가 진화될 수 있는 가장 중요한 기구로 볼 수 있다(Powell, 1978).

앞에서 금오산 화산암류의 성인은 지각물질의 부분용융으로 설명될 수 있지만(Wolf and Wyllie, 1994; Rollinson, 1999; Petford and Gallagher, 2001; Foley *et al.*, 2002), 이 화산암류의 조성 차이는 아마도 안산암질 마그마의 분별결정작용으로 설명될 수 있다. 그런데 지각 각섬암은 화성기원이기에 맨틀의 부분용융으로 형성된 고철질의 일차 마그마(그림 11a)가 하부지각에 정치한 고철질 심성암체의 변성암으로 보아야만 한다(그림 11b). 그리고 이 각섬암이 부분용융으로 안산암질 마그마가 형성되고 하부지각에 심부 챔버로 확장되었고 장기간에 걸쳐 분별결정작용이 일어났다(그림 11c). 안산암질 마그마는 하부지각의 마그마챔버에 머물면서 분별결정작용에 의해 조기 정출되는 밀도가 큰 고철질 광물의 중력낙하에 의한 분화작용으로 안산암질(An)과 데사이트질(Da) 마그마로 분리되었다(그림 11c). 이와 같이 더 많은 광물의 분리로 인하여 액체로 남아있는 유문암질 마그마는 주위의 암압보다 낮으므로 압력이 낮은 지역으로 상승할 수밖에 없다. 이때 진화된 밀도 낮은 유문암질 마그마가 이곳으로부터 상승하여 상부지각의 지하공간에 마그마챔버를 형성하여 머물게 된다(그림 11d). 천부 챔버에서도 유문암질 마그마가 장기간에 걸쳐서 더욱 진화를 겪게 된다.

금오산 화산암류와 관입암류에 대한 마그마는 아마도 상부 레벨로 상승하는 마그마챔버로부터 유래되었다. 즉 안산암질과 유문암질 마그마는 각각 밀도차이로 새로운 압력 조건으로 조정될 때 상승하여 서로 다른 위치의 지하 챔버에 머물다가 순차적으로 분출되었던 것으로 설명된다(그림 11). 마그마의 조성차이는 각 레벨의 마그마챔버에서의 분별결정작용이 이 순서에 따라 잘 설명해준다. 각 레벨의 챔버에 머무는 동안 더 고철질 마그마는 주로 분별결정작용에 의해 결정낙하와 연변누적을 일으켰으며, 더 진화된 안산암질 마그마와 유문암질 마그마가 각 챔버 상부에 분리되어 출조됨으로써 그 압력 조건이 맞는 레벨에 지하공간을 확보하여 마그마챔버를 만들었다. 즉 전기의 안산암질 마그마챔버는 하부지각에 머물렀고 후기의 유문암질 마그마챔버는 상부지각

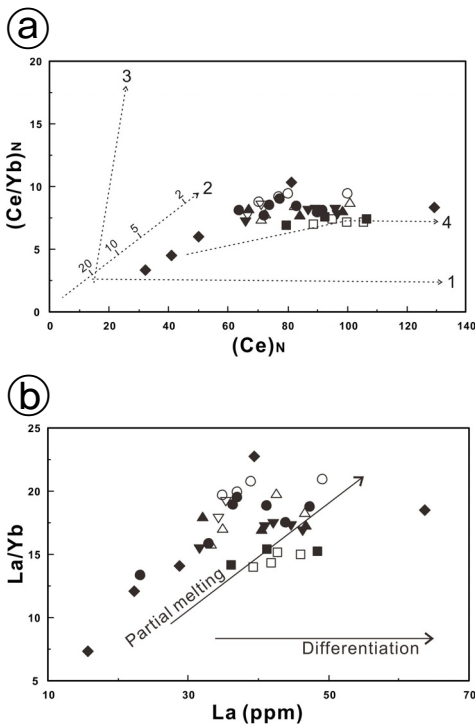


Fig. 10. (a) Testing specific model of Ce_N/Yb_N versus Ce_N distinguishing between general petrogenetic processes. Line 1 shows effect of fractional crystallization; Line 2, compositions of partial melts of peridotite; Line 3, compositions of partial melts of eclogite; Line 4, compositions of partial melts of average continental crust (Gill, 1981). (b) Model of La/Yb versus La distinguishing between differentiation and partial melting. Symbols are the same as in Fig. 3.

에 위치했을 것이다(그림 11). 이와 같이 유문암질 마그마 챔버가 보다 천부 레벨에 위치하고, 안산암질 마그마 챔버가 더 심부 레벨에 위치한다는 것을 시공간적으로 생각한다면, 구미분지의 안산암질암류와 유문암질암류가 분출되었던 마그마 챔버가 일정한 레벨에 상주한다는 것보다 차라리 지각 내에서 점진적으로 상승되었다는 것을 지지한다.

선기에 안산암질 마그마의 분별결정작용은 거듭되는 압력감소 효과에 따라 고철질 광물과 사장석의 분리를 일으키는데, 이 분별결정작용은 금오산에서 관찰되는 여러 화산암류 간의 조성 차이를 설명하기에 충분한 것 같다. 그리고 안산암질과 유문암질 마그마의 분출 사이에는 아마도 약 500만년의 시간이 경과되었을 것이다. 이 시간적 간격은 두 마그마의 분출이 상당한 시차를 두고 일어났음을 암시하고 이때 상당한 조성 차이를 일으키는데 기여했을 것이다. 이 간격 동안에 챔버에서 마그마는 초기 조성에 비하여 SiO₂와 K₂O가 더 풍부해지고 Al₂O₃, MgO, CaO 등이 더 고갈됐을 것이다. 점차 고철질 광물은 없어지는 것은 계속적인 분별결정작용을 반영하고 이로 인해 용융물 내에 P_{H2O} 증가를 일으켰다. 그리

고 불호정성 원소의 함량이 높은 것에 의하면 마그마가 모암과 접촉하는 곳에서 지각물질의 동화작용에 의한 혼염도 고려할 수 있다. 종합하면 마그마의 분별결정작용이 계속되고 이와 함께 마그마의 함유량과 지각물질의 혼염이 조금씩 증가되며 이에 따라 암류 간의 조성 차이를 설명해준다.

8. 결론

금오산 화산암류는 하부로부터 하부의 안산암질암류, 상부의 유문암질암류, 관입암류로 구분된다. 안산암질암류는 영암산응회암과 부상리안산암으로 구분되고, 유문암질암류는 오봉리응회암, 도선굴유문암과 금오산응회암으로 구분된다. 관입암류는 환상암맥과 직선상암맥으로 구분된다.

이 화산암류는 TAS도에서 안산암-데사이트-유문암으로 분류된다. 이 화산암류의 암석화학적 변화는 대체로 분별결정작용에 의한 마그마 진화를 설명해 줄 수 있다. 암석화학적 특징은 대부분 칼크알칼리 계열에 속하고 고-K 계열의 화산암류가 우세하다. 주 원소와 미량원소 판별도에서 모두 조산대에 속하고 섭입대를 지시하는 화산호 환경을 나타낸다.

이 화산암류의 성인은 하부지각에서 화성기원 각섬암의 부분용융에서 유래하는 마그마이다. 선기 안산암질 및 후기 유문암질 마그마 간의 조성변화는 마그마 챔버에서 분별결정작용에 의해 설명된다. 안산암질 마그마 챔버에서 분별된 유문암질 마그마는 밀도차이로 새로운 압력 조건으로 조정될 때 상승하여 상부지각 챔버에 머물다가 순차적으로 분출되었다. 즉 선기의 안산암질 마그마 챔버는 하부지각에 머물렀고 후기의 유문암질 마그마 챔버는 상부지각에 위치했을 것이다

감사의 글

이 논문은 한국지질자원연구원에서 지원하는 “디지털매핑에 의한 통합 지질정보 제공기술 개발(과제번호 19-3111-1)”의 일환과 추가 자료로 이루어졌다. 이 논문의 심사과정을 통하여 유익한 지적과 건설적인 비평을 해주신 두 익명의 심사위원님께 사의를 표한다. 그림 제작은 안동대학교 화산실험실 현혜원의 도움이 있었다.

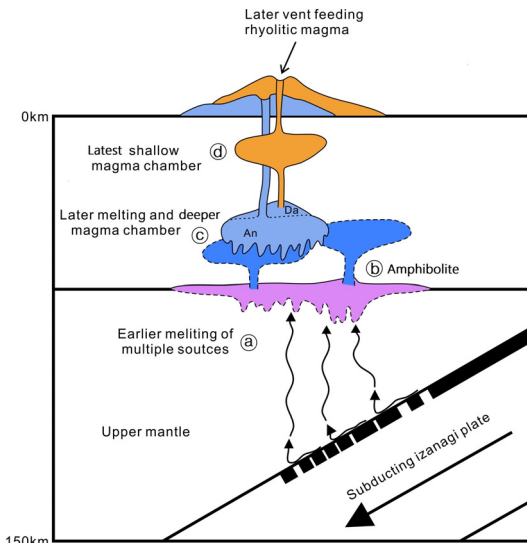


Fig. 11. Model of magma processes for the Geumosan volcanic rocks. (a) Earlier melting of multiple sources; (b) Orthoamphibolite metamorphosed from earlier mafic plutons originated from primary magma; (c) Later melting from the amphibolite and deeper andesitic magma chamber; (d) Latest shallow rhyolitic magma chamber fractionated from andesitic magma.

REFERENCES

- Eichelberger, J.C. and Izbekov, P.E., 2000, Eruption of andesite triggered by dyke injection: contrasting cases at Karymsky Volcano, Kamchatka and Mt. Katmai, Alaska. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 358, 1465-1485.
- Foley, S., Tiepolo, M. and Vannucci, R., 2002, Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 417, 837-840.
- Gill, J.B., 1981, *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 390 p.
- Hildreth, W., 1983, The compositionally zoned eruption of 1912 in the Valley of Ten Thousand Smokes, Katmai National Park, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 1-56.
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1994, Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Miryang-Yangsan Area, Korea (I): petrotectonic setting. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 229-241 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Kim, S.W., Kee, W.-S. and Kim, J.J., 2019, U-Pb zircon ages and division of the Cretaceous volcanic arc in the Korean Peninsula: Spatiotemporal evolution of the arc volcanism. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 595-619 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Son, Y.W., Seo, S.H. and Kee, W.-S., 2021, Collapse Type and Processes of the Geumosan Caldera in the Southern Gumi, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 54, 35-48 (in Korean with English abstract).
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Johnson, D.M., Hooper, P.R. and Conrey, R.M., 1999, XRF analysis of rocks and minerals for major and trace elements on a single low dilution Li-tetraborate fused bead. *Advances in X-ray Analysis*, 41, 843-867.
- Kim, J.H. and Lim, J.W., 1974, Explanatory text of the geologic map of Gumi Sheet. Daejeon, Geological and Mineral Institute of Korea, 20 p.
- Kuno, H., 1968, Differentiation of basalt magmas. In: Hess H.H. and Poldervaart A. (eds.), *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition*. Vol. 2. Interscience, New York, 623-688.
- Le Maitre, R.W., 1984, A proposal by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram. *Australian Journal of Earth Sciences*, 31, 243-255.
- Miller, T.P., Chertkoff, D.J., Eichelberger, J.C. and Coombs, M.L., 1999, Mount Dutton volcano, Alaska: Aleutian Arc analog to Unzen volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 89, 275-301.
- Nakamura, N., 1974, Determination of Re, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, 757-775.
- Nam, J.-G., 1996, Petrology of the volcanic rocks from Mt. Keumo area, Kumi, Korea. Master's thesis, Kyungpook National University, Daegu, 45 p (in Korean with English abstract).
- Petford, N. and Gallagher, K., 2001, Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 483-499.
- Powell, M., 1978, Crystallization conditions of low-pressure cumulate nodules from the Lesser Antilles island arc. *Earth and Planetary Science Letters*, 39, 162-172.
- Rollinson, H.R., 1999, Petrology and geochemistry of metamorphosed komatiites and basalts from the Sula Mountains greenstone belt Sierra Leone. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 134, 86-101.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466 p.
- Wolf, M.B. and Wyllie, P.J., 1994, Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 115, 369-383.
- Woodhead, J.D. and Johnson, R.W., 1993, Isotope and trace-element profiles across the New Britain island arc, Papua New Guinea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113, 479-491.

Received : February 26, 2021

Revised : March 31, 2021

Accepted : April 5, 2021