지질학회지 제 50권 제 3호, p. 343-363, (2014년 6월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 50, no. 3, p. 343-363, (June 2014)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2014.50.3.343

울릉도 최후기 화산암류의 암석학적 진화과정

황상구‡ · 조인화
안동대학교 지구환경과학과

요 약

울릉도에서 최후기의 나리층군은 하부로부터 봉래분석층, 말잔등응회암, 나리분석층, 알봉조면안산암 및 죽암분석층으로 구성되며, 조면안산암-조면암-포놀라이트 범위(SiO_2 52.8～61.2%)의 알칼리 암석계열을 나타낸다. 주원소와 미량원소 하커도에 의하면 나리층군에서 말잔등응회암, 나리분석층 및 알봉조면안산암 등의 주 단위들은 상부로 가면서 비교적으로 일관된 변화 트렌드를 나타내며, 거미도와 REE 패턴에 의하면 서로 매우 유사한 패턴을 나타낸다; 반면에 나머지 봉래분석층 및 죽암분석층은 이들로부터 이탈된 양상을 보여준다. 이러한 일관적인 변화 트렌드와 패턴은 모마그마챔버에서 작용하는 분별정출/결정축적 과정에 달려있다는 것을 암시한다. 그러므로 나리층군의 하부층에서 상부층으로의 조성변화는 마그마챔버가 분별정출 과정에 의해 하부 조면안산암질 마그마로부터 상부 조면암질 및 포놀라이트질 마그마로의 연속적 조성누대를 형성했음을 암시한다. 먼저 이 마그마챔버는 그 상부로부터 포놀라이트질 및 조면암질 마그마의 대규모 분출로 말잔등응회암을 형성하면서 칼데라 함몰을 일으켰으며 이로 인해 그 아래의 조면안산암질 마그마의 분출로 나리분석층과 알봉조면안산암 형성을 유도하였다. 그러나 변화 트렌드에서 이탈하는 죽암분석층과 봉래분석층은 다소 다른 진화를 겪은 별도의 마그마솥에서 분출되었을 것으로 생각된다. 결과적으로 조성누대 챔버로의 칼데라 함몰에 의해 마그마 출조 입구가 급격하게 낮아짐으로 인해서, 3개 주 암층들 간에 상향고철질 층서를 이루었으며 원소들의 변화 트렌드에서 조면암질 암층과 조면안산암질 암층 간의 작은 조성단절을 일으킨 것으로 해석된다.

주요어: 나리층군, 변화 트렌드, 마그마챔버, 분별정출 과정, 조성누대

Sang Koo Hwang and In Hwa Jo, 2014, Petrologic evolution processes of the latest volcanic rocks in Ulleung Island, East Sea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 3, p. 343-363

ABSTRACT: The Nari Group, stratigraphically latest group in Ulleung Island, consists upwardly of Bongrae Scoria Deposits, Maljandeung Tuff, Nari Scoria Deposits, Albong Trachyandesite and Jugam Scoria Deposits, and exhibit alkali series ranging in composition (SiO_2 52.8～61.2%) from trachyandesite through trachyte to phonolite. The three main units, the Maljandeung Tuff, Nari Scoria Deposits and Albong Trachyandesite, show upwards coherent variation trends with respect to major and trace element chemistry, and very similar aspects to each other with respect to spider diagram and REE patterns; while the rest units, Bongrae Scoria Deposits and Jugam Scoria Deposits, exhibit small deviation form the variation trends. Quantitative modelling suggests that most of the variations and patterns can be attributed to have experienced fractional crystallization and crystal accumulation processes acting on a parental magma chamber. So, the compositional variations in lower to upper rock units of the Nari Group suggest that the magma chamber formed continuous compositional zonations from the lower trachyandesite to trachyte and phonolite magmas. First, the chamber had produced Maljandeung Tuff from explosions of voluminous phonolitic and trachytic magmas near its roof, and then occurred a caldera collapse, which led to produce Nari Scoria Deposits and Albong Trachyandesite from eruptions of trachyandesitic magmas at the lower part. But it is likely that the Bongrae Scoria Deposits and Jugam Scoria Deposits were erupted from a few of chemically distinct magma batches having experienced different evolutions. As result, the abrupt descend of tapping depth in compositionally zonal chamber due to the caldera collapse could explain upward-mafic sequence between three main formations, and compositional gaps between trachytic and trachyandesitic formations in some variation trends of many elements.

Key words: Nari Group, Variation trend, Magma chamber, Fractional crystallization process, Composional zonation

‡ Corresponding author: +82-54-820-5469, E-mail: hwangsk@anu.ac.kr

(Sang Koo Hwang and In Hwa Jo, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Republic of Korea)

1. 서 언

울릉도는 우리나라 현생 화산으로 화산층서, 암석학 및 화산학 연구에 있어 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 울릉도 화산암류는 지질학, 암석학 및 화산학 관점에서 다른 지역만큼 중요함에도 불구하고, 이들에 관한 정보가 부족한 편이다. 그러나 Harumoto (1970)는 울릉도 화산에 관한 지질, 화산역사, 암석기재를 다루었으며, 이 지역의 알칼리암대에 관한 지식에 약간이나마 공헌하였다.

그 후 1980년대부터는 화산암류에 대한 암석학적 및 지구화학적 연구가 주로 수행되어 왔다(Kim and Lee, 1983; Won and Lee, 1984, 1988; Kim, 1985, 1986; Lee and John, 1985; Yun, 1986; Song *et al*., 1999, 2006). 이들에 의한 연구에 의하면 울릉도 화산암류는 조성이 현무암에서 조면암 범위와 약간의 포놀라이트로 구성된다고 하였다.

이러한 연구는 선택된 용암에 대한 원소들의 함량변화로부터 개략적인 분별결정작용 모델을 제시하였으며 (Won and Lee, 1984; Kim, 1985, 1986; Song *et al*., 1999), 이들 화산암류의 맨틀 공급지역의 주원소 및 미량원소 특징을 평가하였고 마그마 조성을 지배하는 천부레벨과정과 성인을 언급하였다(Yun, 1986; Song *et al*., 2006).

울릉도 최후기 화산암류는 봉래분석층, 말잔등응회암, 나리분석층, 알봉조면안산암, 죽암분석층 등으로 구분하였다(Hwang *et al*., 2012). 봉래분석층은 봉래골에 제한적으로 분포하며, 나리분석층 및 알봉조면안산암은 나리분지 내에서 화구 근처에 국한적으로 분포하고, 죽암분석층은 죽암 남동부에 작은 분석구로 존재한다. 이러한 제한적인 분포는 약한 폭발력으로 분석들이 화구 가까이에만 좁게 확산된 결과이다. 반면에 말잔등응회암은 울릉도 전역뿐만 아니라 동해 시추코아와 일본 남서부에서도 얇은 층으로 발견되기도 하였다(Machida *et al*., 1984; Chun, *et al*., 1997, 2006). 이 광역 테프라층은 강한 폭발력으로 화산회 및 부석들이 넓게 확산된 결과이다.

한편 울릉도 화산암류는 모두 알칼리 계열로서 분출 시기별로 다양한 화학 조성을 보이지만 일련의 분별결정작용을 겪으면서 분화된 것으로 해석되었다 (Won and Lee, 1984; Kim, 1985; 1986; Song *et al*., 1999). 그러나 이 연구들은 적은 시료로부터 울릉도 전체 화산암류를 다루었기에 구체적인 암석화학적 진화과정을 보여주지 못하였다. 울릉도 화산암류는 전반적으로 알칼리 현무암-조면암-포놀라이트로 조성변화를 보여주지만, 반면에 최후기 화산암류는 짧은 기간 내에 포놀라이트-조면암-조면안산암으로 큰 조성변화를 나타내기에 흥미롭다. 또한 최후기 화산암류에 대한 암석화학적 자료와 정보가 매우 미흡한 실정이며, 이에 대한 암석학적 진화에 대한 체계적인 연구가 필요한 시점이다.

따라서 이 논문에서 우리는 (1) 울릉도 최후기 화산암류에 대해 층서에 따라 선택된 시료의 주원소, 미량원소 및 희토류원소 분석치를 검증하고, (2) 층서에 따른 암석화학적 변화를 해석하여, (3) 이들의 암석학적 진화에 대한 과정을 제시하고자 한다.

2. 지질개요

울릉도는 동해의 남서부에 있는 울릉분지의 북변부에 위치하는 화산도이며 해저에서 약 3,000 m 솟아있다. 이 섬은 길이 12.2 km, 너비 8.0 km이고 면적 72.9 km^2이며, 해수면에서 983.6 m 높이로 솟아있다.

울릉도에는 소규모지만 나리분지로 알려진 나리칼데라가 중북부에 존재한다. 이 칼데라는 북쪽으로 개방된 원형극장 모양의 지형을 보이며 개략적인 경계를 칼데라 외륜(caldera rim)으로 잡는다면 직경이 최장 3.4 km에 이른다. 칼데라 외연(caldera margin)은 직경 약 2.0 km이다. 이 칼데라 외륜은 북쪽으로 칼데라 바닥에서 <100 m로 낮고 남쪽으로 최고 600 m로 높고 비고가 최고 560 m 이상이다. 칼데라 북서부는 알봉 용암돔이 칼데라 바닥에서 약 140 m 솟아있다.

바닥의 형태는 그 중앙부를 위시하여 약간 개석되었지만 남북 방향으로 나리분석층으로 이루어진 수개의 분석구가 있다. 또한 북서부에는 알봉조면안산암의 용암돔이 있고 이의 남북으로 혀 모양의 용암류가 연결된다. 칼데라 바닥에는 다소 높은 용암

돔과 분석구들에 의해 상대적으로 낮은 2개의 소분지가 2단으로 분리되어있다. 이 소분지에는 평탄화 작업으로 충적층이 채워져 왔다.

울릉도는 환동해 알칼리 암석구에서 현무암, 조면안산암, 조면암 및 포놀라이트 용암의 조합을 가지는 것으로 유일하다. 울릉도에서 노출되는 최고기 암석은 해안을 따라 발견되는 현무암질암류이고 이들은 주로 용암과 각력암으로 구성된다. 이 현무암질암류 위의 저지에 화산역암이 퇴적되어있고, 조면암질암류가 울릉도의 거의 전역에 초기 현무암질암류의 나머지를 두껍게 덮고 있다. 이 조면암질암류는 대개 용암류로 구성되지만 하부에 두꺼운 각력암층이 놓이고 중간에 응회암층이 협재되어 있어 상·하부 조면암질암류로 구분된다. 이들 용암류는 반정의 집합유무와 밀집도에 따라 암질이 다른 여러 용암류로 구분된다. 이후에 포놀라이트질암류가 북부와 죽도에서 크게 침식된 지형 위에 놓이고 응회암 및 부석층에 의해 넓게 덮여 있다. 이 광역 테프라층은 강한 폭발력으로 화산회 및 부석들이 넓게 확산된 결과이고 성인봉 북측에 나리칼데라가 함몰되는 원인이 되었다. 마지막으로 조면안산암질암류가 칼데라 내에서 분석층과 용암돔을 형성하였다(Hwang *et al*., 2012).

울릉도 화산암류는 화학조성으로 보면, 현무암, 조면안산암, 조면암과 포놀라이트로 구성된다(Kim and Lee, 1983; Won and Lee, 1984; Kim, 1985; Min *et al*., 1988; Song *et al*., 1999). 이들은 분출물 양상으로 보면 대부분 용암과 화산쇄설암으로 구성되며, 층서분류와 암석화학적 기재의 차이로 대개 5 단계로 구분되었다(Kim and Lee, 1983; Won and Lee, 1984; Kim, 1985; Min *et al*., 1988; Xu *et al*., 1998). 지구화학적 연구에 의하면 울릉도 화산암류는 해양도의 특성을 나타내며, 그 성인이 맨틀플륨과 관련되는 열점 활동으로 보고 있다(Song *et al*., 2006).

울릉도의 화산층서는 화산윤회와/혹은 부정합을 기준으로 할 때, 도동현무암질암류, 울릉층군, 성인봉층군과 나리층군 등의 4개 층군으로 구분하였다(Hwang *et al*., 2012). 울릉층군은 화산쇄설암류와 하부 조면암질암류로 구성되고, 성인봉층군은 상부 조면암질암류와 포놀라이트질암류로 구성되며, 최후기의 나리층군은 칼데라형성 화산암류(봉래분석층 및 말잔등응회암)과 조면안산암질암류(나리분석층, 알봉조면안산암 및 죽암분석층)로 구성된다(그림 1).

특히 나리층군에서 말잔등응회암은 탄화목과 부석질 토양 시료로부터 ^{14}C 연대측정에 따르면 약 19-5.6 ka B.P. 연대를 가진다(Okuno *et al*., 2010; Im *et al*., 2012; Kim *et al*., 2014). 한편 알봉조면안산암은 K-Ar 연대측정에 의하면 <0.01 Ma 연대를 나타낸다(Kim *et al*., 1999).

최근에 말잔등응회암은 나리테프라층으로 기재하면서 19개 퇴적상을 구분하여 상세히 기재 해석되었으며, 중간에 풍화 및 토양 층준을 기준으로 5개 별도 분출사건을 인식하고 과거 19ka B.P. 동안 일어났던 분출사가 밝혀졌다(Kim *et al*., 2014).

3. 암석기재

울릉도 나리층군은 울릉도에서 최후기에 폭발성 분출로부터 분류성 분출로 끝나는 마지막 화산윤회에 의해 발생한 분출물이 장기간 침식으로 지금과 거의 같은 지형 위에 쌓인 화산쇄설층과 용암을 말한다. 이 층군은 화학조성, 구성원, 선후관계와 분포에 따라 봉래분석층, 말잔등응회암, 나리분석층, 알봉조면안산암, 죽암분석층 등으로 구성된다(Hwang *et al*., 2012). 봉래분석층은 조면암질이고 분석들로 구성되며 응회암 및 부석층에 의해 덮인다. 말잔등응회암은 조면암질내지 포놀라이트질이고 응회암 및 부석층으로 구성되며 넓게 퍼져 분포한다. 나리분석층은 조면안산암질이고 분석들로 구성되며 응회암 및 부석층을 덮는다. 알봉조면안산암은 용암으로 구성되고 나리분석층 위에 놓인다. 죽암분석층은 조면안산암질이고 분석들로 구성되며 죽암 남동부에서 응회암 및 부석층 위에 고립되어 분포한다.

3.1 봉래분석층

봉래분석층은 봉래폭포 서쪽에서부터 성인봉 남동부 산사면에 비교적 넓게 분포한다(그림 1). 이 층은 말잔등 남쪽 계곡부에서 최고 약 50 m 두께이며, 대부분 분석(scoria)들로 구성되고 이 층의 하부에 2~4 m 두께의 용결응회암이 협재된다. 분석들은 대부분 적갈색을 띠지만 큰 것들은 그 내부가 암회색을 띠고 부분적으로 암회색 분석층을 그대로 유지하며 심한 다공상을 나타낸다(그림 2a).

용결응회암은 전체적으로 암회색내지 황갈색 기질에 흑색 및 암갈색 유리질 렌즈를 포함하며 이들

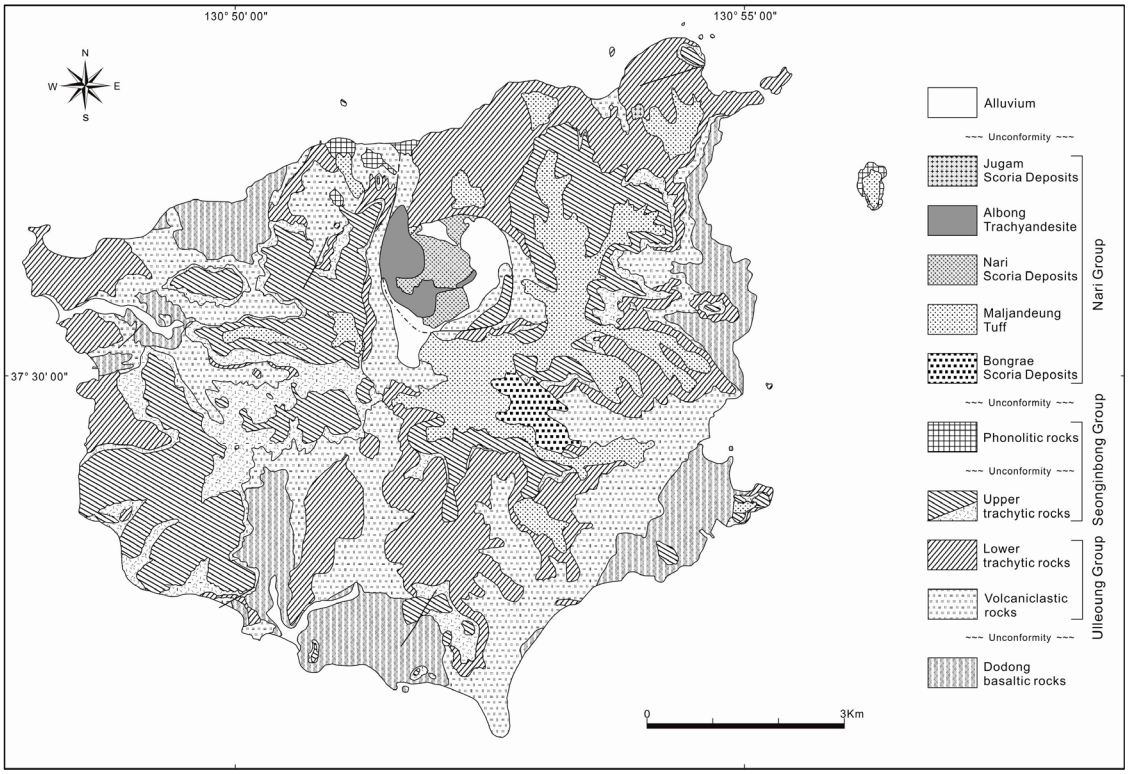

Fig. 1. General geological map of Ulleung Island (after Hwang *et al*., 2012).

은 서로 평행하게 배열되고 위로 가면서 더 많아진다. 유리질 렌즈들은 층리 방향으로 1:3 정도로 신장되어 있다. 용결응회암 상위에는 분석들 사이에 조면암편을 다분히 함유한다.

3.2 말잔등응회암

말잔등응회암은 나리 칼데라의 외륜부로부터 외곽부의 산사면으로 넓게 분포한다(그림 1). 말잔등 서쪽 계곡부에서 이 응회층은 두께가 최고 약 70 m를 가진다(Kim *et al*., 2014).

이 암층은 주로 응회암과 부석층으로 구성되며 전반적으로 전자가 후자보다 우세하다. 일반적으로 이 층은 층리가 발달되어 있으며 분급도가 비교적 좋은 편이어서 응회암, 라필리응회암, 응회각력암과 부석층이 호층을 이룬다. 이 암층은 19개 퇴적상으로 구분되어 자세한 기재로부터 운반·퇴적기구가 해석되었다(Kim *et al*., 2014). 또한 이들로부터 분출유형을 수증기마그마성 분출(phreatomagmatic eruption)과 플리니언 분출(plinian eruption)로 유추하고 중간에 개재되는 풍화 및 토양 층준으로부터 화산휴지기를 유추함으로서 5개 별도 분출사건에 따른 과거 19~5.6 ka B.P. 동안 분출사가 엮어졌다(Kim *et al*., 2014).

경하에서 응회암은 알칼리장석, 소량의 사장석, 단사휘석, 캘슈타이트(kaersutite), 티탄자철석, 흑운모 등의 결정들과, 크고 작은 조면암편을 함유하고 이들 사이에 화산회로 채워져 있다(그림 2b). 화산회는 샤아드 모양을 나타내는 것도 있지만 불규칙하고 대부분 점토광물로 존재한다. 부석편은 심한 다공상을 이루며 가끔 위의 반정들이 나타난다.

3.3 나리분석층

나리분석층은 칼데라 분지 내에 분포하며(그림 1) 크고 작은 많은 분석구를 이루고 있다. 이 분석층은 말잔등응회암 위에 놓이고(그림 2c) 알봉조면안산암 용암돔에 의해 덮인다.

분석들은 크기가 3~15 cm 범위가 가장 흔하고 최고 25 cm도 존재하며 모양이 매우 불규칙하지만 간혹 화산탄 모양도 관찰된다. 이들은 대부분 암회색이고 풍화

면에서 회갈색내지 갈색을 띠며 기공을 많이 함유한다.

경하에서 분석편은 많은 기공들로 심한 다공상 구조를 보여주며(그림 2d) 가끔 사장석, 알칼리장석, 캘슈타이트, 흑운모, 티탄자철석과 단사휘석 등이

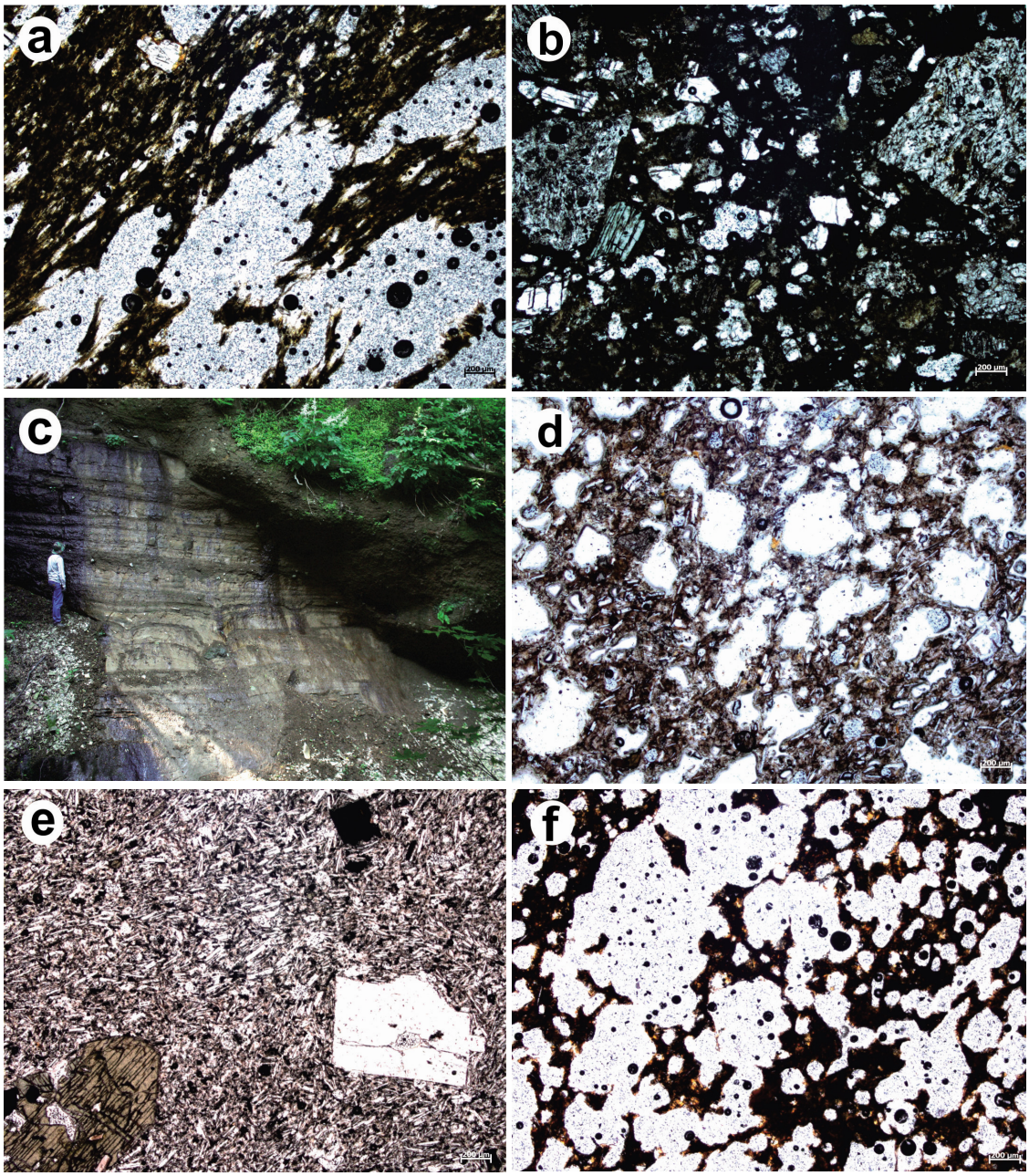

Fig. 2. Photomicrographs and outcrop. (a) Scoria showing highly vesicular texture in hyalopilitic groundmass, open nicol; (b) Tuff showing alkali feldspar, plagioclase, pyroxene and kaersutite crystals, shard, pumice, and trachyte fragments, cross nicol; (c) Scoria deposits accumulating on the Maljandeung Tuff in the northern caldera margin; (d) Scoria exhibiting highly vesicular texture in hyalopilitic groundmass, open nicol; (e) Lava including plagioclase, pyroxene and titanmagnetite phenocrysts in a groundmass of trachytic texture, open nicol; (f) Scoria showing highly vesicular texture in tachylite groundmass, open nicol.

Table 1. Stratigraphic units and sample locations in the Nari Group of Ulleung Island.

Stratigraphic Units	Distribution	Forms	Sample No.	Latitude	Longitude
Jugam Scoria Deposits	extracaldera	Scoria cone	UL607	37°32′20″	130°53′54″
			UL608	37°32′24″	130°53′52″
			UL609	37°32′24″	130°53′49″
			UL615	37°32′26″	130°53′37″
Albong Trachyandesite	intracaldera	Lava flow and dome	UL16	37°30′54″	130°51′57″
			UL17A	37°31′00″	130°52′28″
			UL17B	37°30′59″	130°52′10″
			UL21	37°31′09″	130°51′33″
			UL22	37°31′08″	130°51′32″
			UL23	37°31′09″	130°51′27″
Nari Scoria Deposits	intracaldera	Scoria cones	UL571	37°30′50″	130°51′56″
			UL572	37°30′49″	130°51′56″
			UL573	37°30′49″	130°51′57″
Maljandeung Tuff	extracaldera	Tuff and pumice beds	UL111	37°30′16″	130°51′44″
			UL112	37°30′17″	130°51′48″
			UL117	37°30′17″	130°51′53″
			UL125	37°30′20″	130°52′13″
			UL521	37°31′25″	130°51′31″
Bongrae Scoria Deposits	extracaldera	Scoria flows and ash flow sheet	UL776	37°29′55″	130°53′07″
			UL780A	37°29′58″	130°52′46″
			UL780B	37°29′58″	130°52′46″
			UL781	37°30′06″	130°52′46″
			UL785	37°28′55″	130°52′44″

반정으로 나타난다. 석기는 대부분 유리질로 존재하지만 매우 작은 침상 알칼리장석 미정들이 드문드문 나타나며 유리양모상 조직(hyalopilitic texture)을 나타낸다(그림 2d).

3.4 알봉조면안산암

알봉조면안산암은 나리분지 북서부에서 나리분석층을 피복하면서 용암돔을 형성하고 있다(그림 1). 용암돔의 남측부에는 나리분석층 위에 용암류를 형성한다.

이 용암은 전반적으로 회색 내지 회갈색을 띠는 조면안산암이다. 용암의 표면부는 대부분 거칠고 조각화되어 있고 불규칙한 냉각절리를 가지며 간혹 불완전한 로피구조(ropy structure)도 보존되어 있다. 부분적으로 작은 기공을 갖는 다공상 구조를 보여주며 희미한 유상엽리를 나타내고 분석 포획체도 관찰할 수 있다.

현미경 관찰에 의하면 이 용암은 조면상 조직의 석기에 사장석, 알칼리장석, 단사휘석, 캘슈타이트, 흑운모, 감람석 및 티탄자철석 등의 반정을 포함하고(그림 2e) 드물게 백류석, 인회석 및 저어콘을 수반한다. 알칼리장석은 흔히 칼스배드 쌍정을 이루며 사장석은 일반적으로 알칼리장석에 의해 둘러싸여 있다.

3.5 죽암분석층

죽암분석층은 죽암 마을 남동쪽의 능선부에 하나의 분석구를 이루고 있다(그림 1). 말잔등응회암 위에 놓이며 대체로 기존 지형의 기복을 덮는 양상을 나타낸다.

이 층은 대부분 분석들로 구성되지만 아주 작은 용암류를 포함하고 있다. 분석들은 일반적으로 7~20 cm 크기로서 암적갈색을 띠고 신선한 것은 암회색 내지 흑색을 나타내며 장석 반정을 흔히 관찰할 수 있다. 이들은 심한 다공상 구조를 나타내고 가벼우며 헐렁하게 접촉하고 있다. 용암류는 과거 계곡 바닥의 자갈층 위에 남아있으며, 암회색내지 흑색을 띠고 비반상 조직을 나타낸다.

경하에서 분석들은 조면안산암질 흑철유리(tachylite)를 바탕으로 하여 심한 다공상 구조를 형성하고 있다(그림 2f). 용암은 사장석, 알칼리장석, 캘슈타이트, 단사휘석 및 자철석 등의 작은 반정으로 구성된다. 석기는 대개 알칼리장석으로 구성되고 흔히 조면상 조직을 형성하며 캘슈타이트, 흑운모, 티탄자철석, 인회석, 저어콘 및 백류석을 소량 수반한다.

Table 2. Major element compositions (wt.%) and trace element abundance (ppm) for the volcanic rocks of Nari Group in Ulleung Island.

Strati-graphy	Bongrae Scoria Deposits					Maljandeung Tuff					Nari Scoria Deposits	
Samples	UL776	UL780A	UL780B	UL781	UL785	UL111	UL112	UL116	UL125	UL521	UL571	UL572
SiO_2 (%)	60.51	61.24	61.23	59.39	59.60	59.86	59.31	59.73	59.90	57.95	52.75	56.24
TiO_2	0.51	0.48	0.48	0.49	0.51	0.47	0.36	0.43	0.44	0.37	1.51	1.34
Al_2O_3	19.53	19.16	18.98	18.77	18.75	18.73	19.05	18.77	18.93	18.97	20.17	19.20
$Fe_2O_3^t$	3.27	3.03	3.17	3.12	3.13	3.24	3.19	3.20	2.71	3.14	6.14	5.43
MgO	0.26	0.26	0.26	0.25	0.27	0.28	0.17	0.22	0.18	0.31	1.59	1.43
MnO	0.14	0.13	0.14	0.14	0.13	0.15	0.17	0.15	0.14	0.16	0.16	0.15
CaO	1.43	1.41	1.37	1.34	1.46	1.32	1.14	1.24	1.24	2.34	3.90	3.51
Na_2O	6.31	5.77	6.45	5.83	5.78	6.27	7.35	6.70	6.58	5.00	4.60	5.28
K_2O	6.94	6.94	6.80	6.71	6.90	6.63	6.14	6.49	6.63	5.52	4.67	5.46
P_2O_5	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.06	0.09	0.06	0.10	0.39	0.36
Total	98.99	98.51	98.97	96.13	96.63	97.06	96.94	97.02	96.81	93.86	95.88	98.40
Li (ppm)	10.5	10.6	9.7	10.2	9.6	12.4	16.1	13.8	14.0	14.4	7.5	8.8
Sc	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.9	0.5	0.9	0.6	1.2	5.9	5.3
V	2.9	3.9	3.0	2.9	3.5	4.3	3.1	3.4	3.9	11.2	86.3	75.3
Cr	0.5	0.4	1.4	1.2	0.6	0.8	1.2	0.5	0.7	1.4	9.1	7.2
Co	6.5	9.7	9.8	4.0	5.4	2.0	5.9	1.6	1.9	14.7	16.7	14.1
Ni	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.6	2.3	0.5	0.6	1.1	9.3	7.6
Cu	3.3	2.7	6.2	39.4	19.1	30.2	24.3	47.7	51.3	21.8	150	16.7
Zn	71.5	63.9	73.5	62.4	65.2	77.8	84.3	79.1	76.0	93.0	73.3	75.6
Ga	19.3	18.6	18.5	18.0	18.1	20.4	22.3	20.9	20.2	26.1	21.3	21.8
Rb	125	87	130	111	117	117	139	135	157	176	73	94
Sr	52	69	55	44	87	54	14	34	16	87	576	506
Ba	96	122	98	75	156	99	40	57	15	138	871	787
Y	17	15	16	15	17	20	20	21	17	28	21	22
Zr	646	574	633	626	589	795	1005	868	863	1288	588	559
Mo	7.8	7.5	8.0	8.7	7.6	11.4	15.2	12.8	13.7	4.4	6.5	8.5
Cs	1.3	1.0	1.2	1.3	1.1	1.6	1.9	1.9	1.9	2.1	0.9	1.3
Pb	10.5	11.7	10.5	7.4	8.6	13.5	13.5	13.6	13.7	15.4	9.1	9.3
Th	15.6	13.6	14.1	12.9	13.7	20.5	25.3	24.1	21.5	32.4	15.9	16.6
U	2.8	2.3	2.4	2.0	2.4	3.4	4.9	4.8	4.3	3.2	2.5	2.6

4. 암석화학

울릉도 나리층군의 화산암류에 대한 화학적 조성 변화와 암석성인을 살펴보기 위해 화학분석을 실시하였다. 암석표품은 봉래분석층에서 5개, 말잔등응회암에서 5개, 나리분석층에서 3개, 알봉조면안산암에서 6개, 죽암분석층에서 4개(용암 1개 포함) 등의 모두 23개를 선택하여 분석하였다(표 2). 주원소 분석은 한국지질자원연구원에서 X선 형광분석법으로, 미량원소와 희토류원소 분석은 한국기초과학연

Table 2. Continued.

Strati-graphy	Albong Trachyandesite						Jugam Scoria Deposits				Average
Samples	UL573	UL16	UL17	UL17B	UL21	UL22	UL23	UL607	UL608	UL609	UL615	
SiO_2 (%)	55.98	57.19	57.03	57.50	58.71	58.78	57.39	55.87	56.09	54.46	55.44	57.92
TiO_2	1.29	1.25	1.24	1.11	0.94	0.92	1.15	1.25	1.27	1.59	1.70	0.92
Al_2O_3	19.58	19.12	19.07	19.07	19.27	19.29	18.93	18.95	19.37	18.89	19.41	19.13
$Fe_2O_3^t$	5.28	5.32	5.43	4.92	4.34	4.26	4.97	5.97	6.10	6.81	4.97	4.4
MgO	1.33	1.32	1.28	1.14	0.83	0.81	1.17	1.34	1.24	1.69	1.17	0.82
MnO	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.17	0.18	0.17	0.11	0.15
CaO	3.41	3.48	3.45	3.44	2.67	2.63	3.15	3.29	2.78	4.18	4.40	2.55
Na_2O	4.96	5.48	5.39	5.76	5.98	6.02	5.62	5.05	4.26	4.31	6.53	5.71
K_2O	5.40	5.45	5.64	5.68	5.88	5.87	5.67	5.16	5.55	4.69	2.32	5.79
P_2O_5	0.33	0.34	0.35	0.35	0.25	0.25	0.30	0.40	0.43	0.49	0.67	0.25
Total	97.71	99.1	99.03	99.11	99.01	98.97	98.49	97.45	97.27	97.28	96.72	97.62
Li (ppm)	8.2	9.1	9.1	9.4	10.4	10.4	10.1	8.9	9.4	5.8	6.5	10.2
Sc	4.6	4.0	3.9	4.2	2.1	2.6	3.9	2.8	3.8	4.6	5.7	2.6
V	67.4	62.1	63.7	66.9	36.9	34.4	50.5	53.5	52.4	74.9	92.8	37.4
Cr	4.7	3.0	3.1	5.3	2.2	2.0	4.9	2.0	5.2	3.9	9.5	3.1
Co	12.7	15.5	12.1	10.6	17.8	12.4	11.4	16.8	12.1	23.7	10.2	10.8
Ni	6.6	5.3	5.5	5.6	2.5	2.3	5.3	2.8	3.9	4.6	5.4	3.2
Cu	25.1	8.2	7.4	8.9	5.1	4.8	7.5	149	32.1	42.0	12.2	31.1
Zn	71.6	75.6	71.7	76.3	65.9	67.8	70.9	78.4	86.9	84.0	97.2	75.7
Ga	21.2	22.0	21.4	21.2	20.5	21.4	21.7	20.6	20.4	20.3	24.9	20.9
Rb	85	73	87	106	117	107	102	63	94	62	130	108.1
Sr	525	534	499	470	386	393	472	379	353	536	552	291
Ba	832	832	823	779	640	667	757	591	594	810	618	456.4
Y	20	21	21	22	20	20	20	27	22	36	28	21.1
Zr	554	561	621	627	655	653	614	500	505	445	608	668.6
Mo	7.7	6.5	7.7	8.0	6.9	7.6	5.9	5.7	2.9	5.3	4.1	7.8
Cs	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.3	0.9	0.8	0.7	1.4	1.3
Pb	14.3	9.9	8.9	9.5	8.3	9.9	10.6	6.4	6.0	6.5	11.5	10.4
Th	15.8	16.4	16.9	17.6	17.7	18.6	16.9	11.5	13.3	10.6	16.6	17.3
U	2.4	2.4	2.7	2.6	2.4	3.0	2.9	1.3	1.9	1.5	2.2	2.7

구원 오창센터에서 유도결합플라즈마 질량분석법(ICP-MS)에 의해 실시되었다.

4.1 주원소

울릉도 나리층군의 화산암류에 대해 2차 변질에 따른 화학조성의 변화를 알아보기 위하여 $100xK_2O/(Na_2O+K_2O)$에 대한 Na_2O+K_2O 상관도(Hughes, 1973)에 도시하였다. 이 상관도에서 나리층군의 화산암류는 죽암분석층의 용암을 제외하고 모두 화성암 영역(igneous spectrum) 내에 도시되므로(그림 3), 2차적 변질을 받지 않은 것으로 나타난다. 따라서 나리층군 화산암류의 주원소는 죽암분석층의 용

암을 제외하고 화학적 특징을 논의하는 것이 적합하다고 본다.

나리층군 화산암류는 화학적 분류를 하기 위해 TAS 도에 도시하였다(Le Maitre, 1984; Zanettin, 1984; Le Bas *et al*., 1986). 여기서 봉래분석층은 모두 조면암 영역에 속하며, 말잔등응회암은 대부분 포놀라이트와 조면암 영역에 속하고 조면안산암 영역에도 일부 들어간다(그림 4). 나리분석층은 모두 조면안산암 영역에 속하며 알봉조면안산암은 대부분 조면안산암 영역에 속하고 일부 조면암 영역에도 포함된다. 그리고 죽암분석층은 모두 조면안산암 영역에 속한다.

나리층군 화산암류의 암석계열은 Irvine and Baragar (1971)의 Alkalis-silica 관계도에서 모두 알칼리 계열에 도시된다(Hwang *et al*., 2014). 한편 $K_2O/(Na_2O-2)$ 보다 높은 K_2O/Na_2O 부근에 주로 도시되므로 대부분 K-계열에 속하며(그림 5), 대서양의 고프섬(Gough Island) 및 트리스탄다쿤하(Tristan da Cunha)(Le Maitre, 1962)와 같은 변화 트렌드를 보여준다(그림 6).

주원소에서 SiO_2 조성은 52.8～61.2%의 비교적

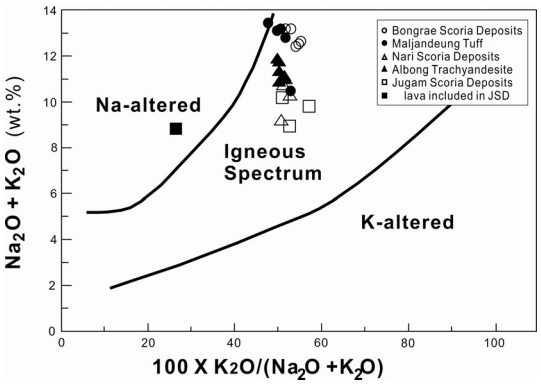

Fig. 3. Na_2O+K_2O versus $100xK_2O/(Na_2O+K_2O)$ (wt.%) diagram for the volcanic rocks of Nari Group. The field between solid lines (Igneous Spectrum) represents the variation range of modern volcanic rock (after Hughes, 1973).

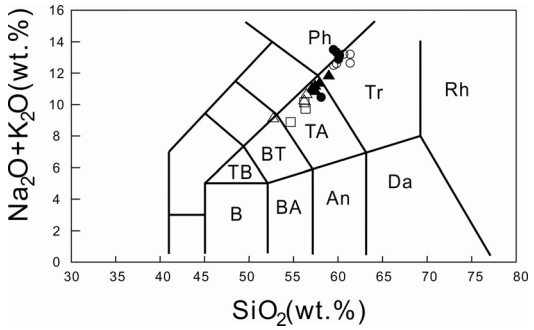

Fig. 4. Classification of the volcanic rocks of Nari Group on the total alkali silica (TAS) diagram. The fields rock nomenclature schemes of Le Bas *et al*. (1986). The root names are the same as B, basalt; TB, trachybasalt; BT, basaltic trachyandesite; TA, trachyandesite; Tr, trachyte; Ph, phonolite; BA, basaltic andesite; An, andesite; Da, dacite, Rh, rhyolite. Symbols are the same as in Fig. 3.

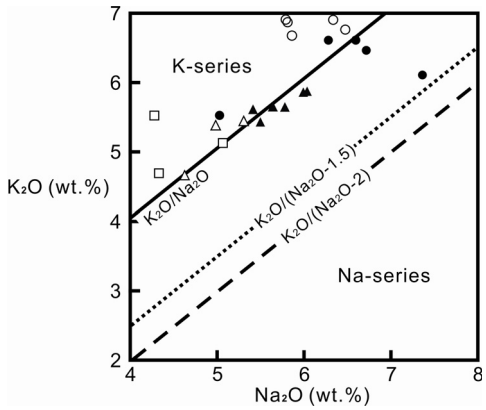

Fig. 5. K_2O versus Na_2O plot of the volcanic rocks of Nari Group, showing the subdivision of the alkalic series into K and Na subseries. The boundary line $K_2O/(Na_2O-1.5)$ are designed from Le Maitre (1984) and Zanettin (1984), and $K_2O/(Na_2O-2)$, Le Bas *et al*. (1986). Symbols are the same as in Fig. 3.

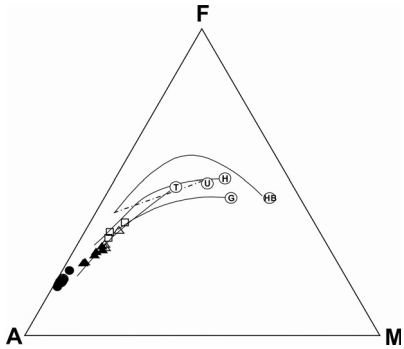

Fig. 6. AFM diagram for the volcanic rocks of Nari Group. U=boundary of trachyandesite in Oki Dogo; H=Hawaiian alkaline volcanics; HB=Hebridian alkaline volcanics; G=alkaline series from Gough Island; T=alkaine volcanics from Tristan da Cunha; Dash-dot line is from Uchimizu's (1966) showing boundary between trachyandesite and basaltic trachyandesite. Symbols are the same as in Fig. 3.

넓은 조성 범위를 나타낸다(표 2). SiO_2 조성에 따른 주원소 하크도(Harker diagram)를 보면 다음과 같이 나타난다(그림 7).

Al_2O_3는 반정의 영향에 의해 상당히 분산되어 표시되지만 SiO_2가 증가함에 따라 대체로 서서히 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 사장석과 알칼리장석의 정출이 보다 중요했음을 의미한다.

$Fe_2O_3^t$는 SiO_2가 증가함에 따라 약간 분산되나 전반적으로 감소하는 경향을 보여준다. 이런 감소하는 경향은 Fe 조성이 많은 티탄자철석과 같은 광물이 관련되었음을 지시한다.

TiO_2는 SiO_2의 증가에 따라 $Fe_2O_3^t$의 변화와 상당히 유사하게 감소하는 경향을 나타내며 티탄자철석이 초기부터 분별정출로 큰 영향을 미쳤음을 제시해 준다. 또한 이는 Ti가 각섬석류의 Al을 치환하여 캘슈타이트의 형성(Deer *et al*., 1992)에도 상당한 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

MgO와 SiO_2가 증가함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보여주는데, $Fe_2O_3^t$와 함께 단사휘석, 캘슈타이트와 흑운모 등의 고철질 광물에 큰 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

CaO는 SiO_2의 증가에 따라 서서히 감소하는 경향을 보여주는데, 이는 MgO와 $Fe_2O_3^t$의 변화에 일치하기 때문에 단사휘석 정출에 기여하였음을 나타낸다. 또한 Al_2O_3와 함께 사장석 정출에 영향을 미쳤을 것이지만 Na_2O의 변화에 불일치하기 때문에 큰 기여를 하지 못했음을 제시한다.

Na_2O는 SiO_2가 증가함에 따라 분산되어 나타나지만 대체로 서서히 증가하는 경향을 보여준다. 이는 불호정적이었음을 지시하며 Al_2O_3, CaO의 변화와 일치하지 않기 때문에 사장석이 주요 정출광물이 아니었음을 제시한다. 그러나 왜장석(anorthoclase)과 같은 알칼리장석 정출에 중요한 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

K_2O는 SiO_2의 증가에 따라 연속적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 K_2O가 감람석, 휘석, 사장석, 티탄자철석에 대해 상당히 불호정적인 성분이므로 Na_2O와 함께 주로 후기 광물로 알칼리장석 정출에 사용되고 정출된 이들은 이동없이 다른 광물 사이에 그대로 남았음을 제시한다. 그 이유는 일반적으로 알칼리장석의 밀도(2.4～2.6)가 조면암질 유리의 밀도(2.6)와 거의 같거나 작기(Klein and Hurbut, 1993) 때문이다. 그리고 K_2O는 흑운모 정출에도 상당한 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

P_2O_5는 SiO_2가 증가함에 따라 다소 분산되어 나타나지만 감소하는 경향을 보여주며, 인회석 분별작용의 중요성을 강조한다. 이 경향은 결정분화 과정에서 단사휘석, 티탄자철석과 같이 고철질 광물에 비해 사장석, 알칼리장석과 같이 규장질 광물이 보다 많이 마그마에서 제거되었을 경우로 해석될 수 있다.

위의 SiO_2 변화도에서 주원소 조성변화를 요약하면 SiO_2가 증가함에 따라 전반적으로 $Fe_2O_3^t$, TiO_2, CaO, MgO, P_2O_5가 감소하는 경향이며, 반면에 Na_2O, K_2O가 증가하는 경향이다(그림 7). MgO, CaO 변화는 단사휘석 정출이, Al_2O_3, K_2O, Na_2O 변화는 알칼리장석 정출이, $Fe_2O_3^t$, TiO_2 변화는 티탄자철석의

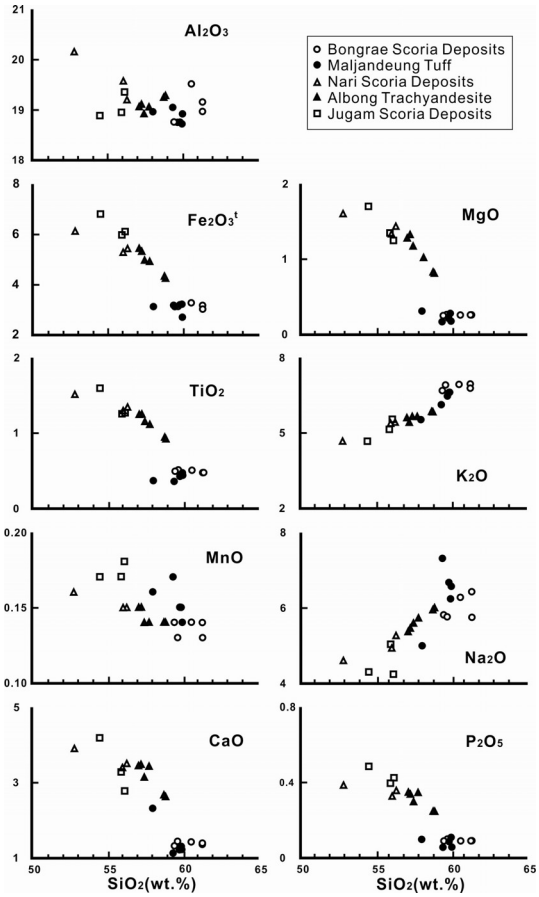

Fig. 7. Harker variation diagrams of the major elements versus SiO_2 for the volcanic rocks of Nari Group.

정출이 나리층군 암석의 분화에 중요한 영향을 미쳤음을 제시해준다. 그러나 죽암분석층에 포함된 용암은 MnO와 K_2O의 변화 트렌드에서 결핍되는 이탈을 나타내고, Na_2O와 P_2O_5의 변화 트렌드에서 부화되는 이탈을 보여준다. 이런 이탈은 앞에서 언급한 바와 같이 변질에 의해 화성 트렌드를 벗어난 것과 연관되거나 혹은 다른 원인도 배제할 수 없다.

이와 같이 주원소의 조성이 SiO_2에 대해 거의 연속적인 변화 트렌드를 나타내는 것은 전형적인 마그마 진화에 따른 조성변화 경향을 나타낸다. 즉 마그마 조성이 조면안산암, 조면암 및 포놀라이트로의 변화를 반영하는데, 이는 마그마챔버에서 아마도 분별결정작용이 우세하게 일어났음을 나타낸다.

4.2 미량원소

울릉도 나리층군의 화산암류에서 층서단위별로 나누어 놓은 미량원소의 분석 결과는 표 2와 같다.

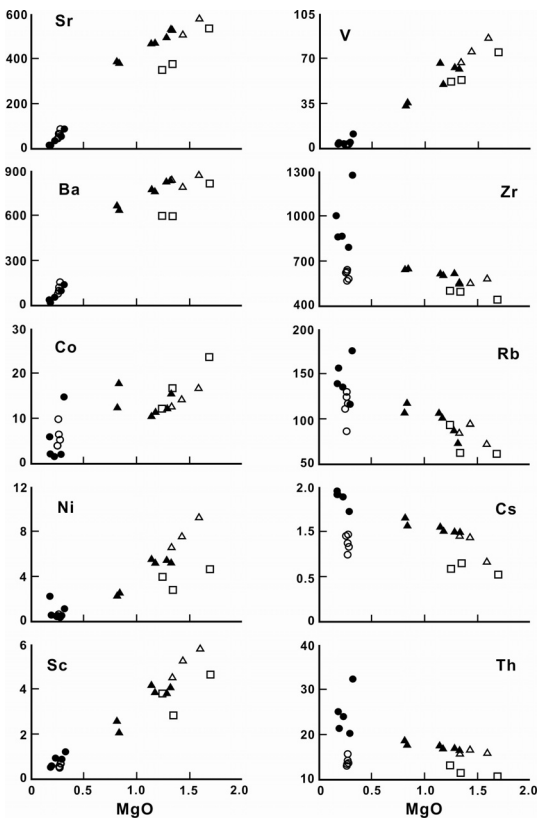

Fig. 8. Harker variation diagrams of some trace elements versus MgO for the volcanic rocks of Nari Group. Symbols are the same as in Fig. 7.

미량원소의 성질은 마그마 진화와 관련하여 민감한 반응을 보여주므로 이를 통해 암석화학적인 특성을 알아볼 수 있다.

미량원소는 맨틀광물에 대해 호정성원소인 Ni과 Cr 조성이 각각 0.4～9.3 ppm (평균 3.2 ppm), 0.4～9.5 ppm (평균 3.1 ppm)으로 초생마그마에 비해서 매우 낮은 편이다. 이는 맨틀 기원의 마그마에서 분화가 진전됨에 따라 Ni은 감람석의 분별결정작용에, Cr은 사방휘석에 분배되어졌기 때문이다. Co, V, Sc 조성은 각각 1.6～23.7 ppm (평균 10.8 ppm), 2.9～92.8 ppm (평균 37.4 ppm), 0.5～5.9 ppm (평균 2.6 ppm) 범위이다. 그리고 이 호정성원소는 MgO의 증가에 따라 모두 거의 일직선 상에 정(+)의 변화 트렌드를 보여주는데(그림 8), 이들은 감람석이나 단사휘석의 정출에 영향을 미쳤음을 지시해준다. 그러나 죽암분석층은 이들 트렌드에서 분산적으로 이탈되는 것을 보여준다.

K_2O와 SiO_2와 밀접한 상관관계가 있는 Rb, Cs, Th과 Zr은 일반적으로 높은 조성을 보인다. Rb 조성은 62～176 ppm 범위(평균 108 ppm)이고 Cs 조성은 0.7～2.1 ppm 범위(평균 1.3 ppm)이며, Th 조성은 10.6～32.4 ppm 범위(평균 17 ppm)이고 Zr 조성은 555～1288 ppm 범위(평균 669 ppm)이다.

사장석과 밀접한 상관관계가 있는 Ba과 Sr은 일반적으로 CaO 조성에 따르는 변화를 보여준다. Ba 조성은 15～871 ppm 범위(평균 456 ppm)이고 Sr 조성은 14～576 ppm 범위(평균 291 ppm)이다. 그러나 Sr과 Ba은 사장석을 함유하는 조면안산암에서 비교적 높은 조성을 나타내고 상대적으로 사장석이 거의 없는 조면암과 포놀라이트에서 낮은 조성을 보여주며 호정성을 나타낸다. 그리고 이들은 MgO의 증가에 따라 모두 거의 일직선 상에 부(-)의 변화 트렌드를 보여주며(그림 8), SiO_2의 증가에 따라 현무암으로부터 분별결정작용에 의해 증가하다(Le Roex, 1985) 감소하는 변화 트렌드를 나타낸다(그림 9). 그러나 죽암분석층은 이 Ba과 Sr의 트렌드에서 다소 벗어나있다.

그리고 불호정성원소 Zr, Rb, Cs과 Th은 MgO 조성이 감소함에 따라, 대체로 증가하는 경향을 보인다(그림 8). 그런데 봉래분석층은 이 불호정성원소 Zr, Cs, Th의 트렌드에서 아래로 이탈되어있다.

미량원소들은 암석계열과 진화정도를 알아보기

위하여 원시맨틀값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화하여 거미도(spider diagram)를 나타내었다(그림 10). 원소의 배열은 함수유체(aqueous fluid)에 대한 유동성과 불호정성의 순서대로 배열되어 있다. 유동성원소(mobile element) Rb, Ba과 Sr은 왼쪽에 배치하되, 왼쪽에서 오른쪽으로 불호정성이 증가하는 순으로 배열되어 있다. 그 외의 비유동성원소(immobile element)는 오른쪽에서 왼쪽으로 불호정성이 증가하는 순서로 배열되어 있다. Rb, K, Ba과 Sr은 이온전위가 낮은 친석원소(LILE, large ion lithophile element)로, 함수유체에 녹기 쉬운 유동성원소이다. 이들 원소는 함수유체에 농집되어 다른 원소들에 비해서 상대적으로 높은 값을 가지며 원시맨틀에 비하여 부화되어 있다.

이 거미도 패턴에서 나리층군의 화산암류는 전형적인 K-계열의 특징을 보여 주고 있다. 다시 말하면, Rb, K, Ba과 La과 같이 함수유체에서 유동성이 높은 불호정성원소들은 원시맨틀에 비해서 상당히 부화되어 있는 반면에, Sc, V, Fe, Cr, Co와 Ni 같이 유동성이 낮은 호정성원소들은 원시맨틀보다 매우 결핍된 양상을 보여준다(그림 10). Ba과 Sr은 원시맨틀에 비해서 약간 부화 혹은 결핍되어 있는데, 이는 해양도 알칼리 계열 중에서도 Na-계열에서는 나타나지 않고, K-계열에서만 관찰되는 현상으로, 이들 원소는 원시맨틀의 부분용융(partial melting) 정도에 의해서 설명된다(Le Roex, 1985). 봉래분석층과 말잔등응회암과 같이 조면암의 경우, Ba, Sr, P와 Ti를 제외한 나머지 불호정성원소들이 대체로 나리분석층, 알봉조면안산암과 죽암분석층의 조면안산암보다 부화되어 있고, 그 중에서 Rb, K, La과 Zr과 같은 불호정성원소들은 더 크게 부화되어 있다.

이와 같이, 원시맨틀 값에 대하여 나타나는 미량원소의 부화-결핍 패턴은 나리층군 화산암류가 열점기원의 화산활동(Yun, 1986; Song *et al.*, 2006)에 관

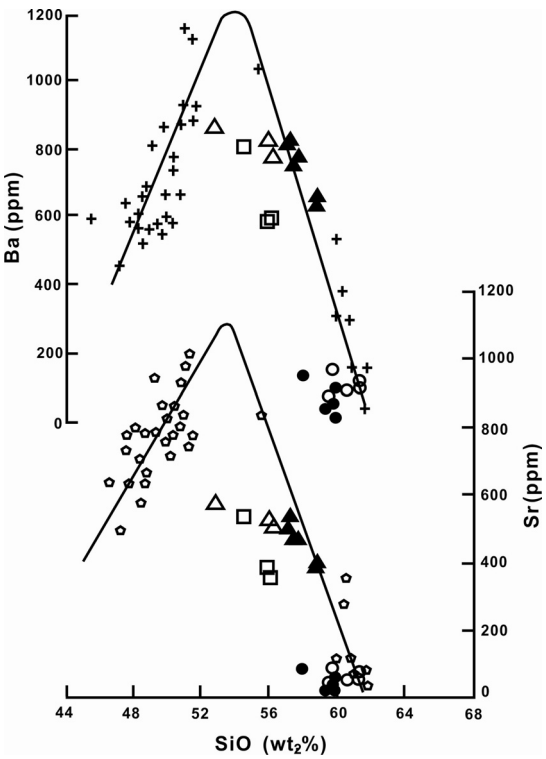

Fig. 9. Variation of Ba and Sr versus SiO_2 for the volcanic rocks of Nari Group. The lines and symbols (crosses and stars) are from data of Gough Island (Le Roex, 1985). Symbols are the same as in Fig. 7.

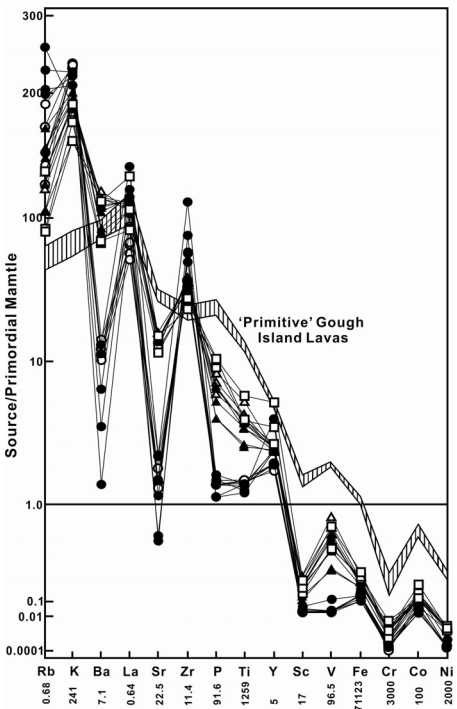

Fig. 10. Normalized spider diagram patterns for selected elements for the volcanic rocks of Nari Group. Values are normalized to primordial or Archean mantle from Sun and Nesbitt (1977). The field for 'primitive' Gough Island lavas (Le Roex, 1985) is shown for comparison as is a pattern for typical alkalic OIB. Symbols are the same as in Fig. 7.

Table 3. Rare earth element abundances (ppm) for the volcanic rocks of Nari Group in Ulleung Island.

Strati-graphy	Bongrae Scoria Deposits					Maljandeung Tuff					Nari Scoria Deposits	
Samples	UL776	UL780A	UL780B	UL781	UL785	UL111	UL112	UL116	UL125	UL521	UL571	UL572
La (ppm)	60.8	51.5	48.2	44.8	52.9	67.0	75.9	79.1	57.7	90.4	68.9	74.1
Ce	124	112	119	110	116	138	155	148	137	178	134	134
Pr	10.2	8.76	8.51	7.96	9.23	11.3	12.0	12.4	9.3	13.8	12.0	12.5
Nd	32.5	28.6	27.7	26.4	29.9	35.9	36.4	38.4	28.4	41.9	40.8	40.0
Sm	4.86	4.24	4.07	4.41	4.48	5.60	5.30	5.52	4.26	6.45	6.44	6.62
Eu	1.11	1.17	0.95	0.96	1.24	1.15	0.61	1.09	0.84	0.72	2.18	2.16
Gd	3.08	2.69	2.77	2.65	2.91	3.52	3.50	3.44	2.58	4.17	4.69	4.55
Tb	0.54	0.50	0.50	0.47	0.52	0.62	0.61	0.63	0.48	0.78	0.72	0.72
Dy	3.35	2.76	2.86	2.78	3.07	3.78	3.84	3.86	3.01	4.93	4.21	4.11
Ho	0.65	0.57	0.57	0.57	0.58	0.74	0.73	0.78	0.60	0.98	0.77	0.80
Er	1.95	1.62	1.69	1.66	1.62	2.21	2.25	2.25	1.85	3.08	2.14	2.24
Tm	0.27	0.23	0.24	0.22	0.25	0.34	0.35	0.34	0.27	0.44	0.29	0.29
Yb	1.89	1.63	1.78	1.72	1.72	2.19	2.31	2.34	2.03	3.25	2.03	1.98
Lu	0.30	0.24	0.25	0.27	0.25	0.35	0.37	0.36	0.30	0.47	0.29	0.32
∑REE	245.5	216.51	219.09	204.87	224.67	272.7	299.17	298.51	248.62	349.37	279.46	284.39
(La/Lu)n	21.00	21.78	20.03	17.24	22.02	19.99	20.88	22.42	20.01	19.75	24.17	23.88
(Ce/Yb)n	16.68	17.43	17.03	16.29	17.15	16.03	17.06	16.05	17.19	13.94	16.79	17.21
(Eu/Eu*)n	0.88	1.06	0.87	0.86	1.05	0.8	0.43	0.77	0.78	0.43	1.22	1.21

Strati-graphy		Albong Trachyandesite						Jugam Scoria Deposits				Average
Samples	UL573	UL16	UL17	UL17B	UL21	UL22	UL23	UL607	UL608	UL609	UL615	
La (ppm)	69.4	72.2	71.1	74.9	68.7	74.4	75.0	68.7	58.6	85.5	90.7	68.72
Ce	131	132	132	136	132	136	129	148	140	153	179	137.09
Pr	11.6	12.3	11.9	12.6	11.4	12.1	12.1	14.4	11.8	16.7	16.6	11.80
Nd	38.4	40.1	39.3	41.0	36.8	39.6	39.7	50.3	41.6	60.3	56.9	38.73
Sm	6.29	6.34	6.26	6.46	5.69	6.02	5.94	8.66	7.11	9.78	9.12	6.08
Eu	2.05	2.05	1.98	1.92	1.75	1.89	2.04	1.94	1.69	2.73	2.38	1.59
Gd	4.17	4.42	4.35	4.34	3.81	4.23	4.17	6.01	4.79	7.98	6.42	4.14
Tb	0.67	0.71	0.71	0.71	0.63	0.65	0.65	0.96	0.81	1.18	0.99	0.69
Dy	4.01	4.05	3.99	4.16	3.73	3.83	3.79	5.54	4.58	6.53	5.62	4.02
Ho	0.75	0.79	0.79	0.81	0.72	0.77	0.73	1.01	0.87	1.35	1.06	0.78
Er	2.05	2.25	2.24	2.31	2.14	2.17	2.02	2.81	2.43	3.49	2.83	2.23
Tm	0.29	0.31	0.30	0.32	0.30	0.30	0.30	0.36	0.31	0.42	0.36	0.31
Yb	2.00	2.14	2.02	2.19	2.09	2.08	1.92	2.42	2.13	2.92	2.61	2.15
Lu	0.29	0.34	0.32	0.32	0.31	0.33	0.31	0.36	0.31	0.44	0.39	0.33
∑REE	272.97	280	277.26	288.04	270.07	284.37	277.67	311.47	277.03	352.32	374.98	278.65
(La/Lu)n	24.28	22.13	22.96	24.19	22.69	23.20	24.63	19.91	19.22	20.08	23.91	21.76
(Ce/Yb)n	16.67	15.68	16.64	15.82	16.03	16.61	17.06	15.56	16.71	13.30	17.43	16.36
(Eu/Eu*)n	1.23	1.19	1.17	1.12	1.15	1.15	1.26	0.83	0.89	0.95	0.95	0.97

련된 해양도의 조구조와 관련되어 산출되었음을 강하게 시사하고 있다(Pearce *et al*., 1984). 그리고 거미도가 대부분 같은 패턴을 가지면서 상하위로 배치되는 것을 관찰 할 수 있는데, 이는 동일한 기원의 마그마챔버에서 분화에 의해 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

4.3 희토류원소

나리층군 화산암류에서 층서단위별로 나누어 놓은 희토류원소의 분석 결과는 표 3과 같다. 희토류원소는 란탄계열에 속하며 물리적 및 화학적 성질이 매우 유사하고 암석학적 또는 광물학적 과정에 따라 서로 다른 거동을 함으로써 화성암류의 진화과정을 밝히는데 매우 유용하게 이용되고 있다(Henderson, 1984).

나리층군 화산암류에 대한 희토류원소 총량은 204～375 ppm 범위(평균 290 ppm)를 보인다(표 3). 선택된 희토류원소(Sm, Gd, Eu, Tb)는 Zr 함량이 증가함에 따라 대체로 감소하는 경향을 나타낸다(그림 11). 그런데 봉래분석층과 죽암분석층은 이 희토류원소의 트렌드에 처져 이탈되는 경향을 보여준다. 이와 같이 기타 불호정성원소로부터 Zr의 분리는 이 두 암층이 별도의 모마그마로부터 유래되었다는 증거로서 활용될 수 있다.

희토류원소는 그 함량을 콘드라이트값(Nakamura, 1974)으로 표준화하여 그래프에 원자번호 순으로 왼쪽에서 오른쪽으로 배열하여 도시한다(그림 12). 희토류원소는 이온반경이 커서 다른 미량원소들처럼 일반적인 광물들의 주원소와는 잘 치환되지 않는다. 따라서 마그마 과정 동안에 희토류원소의 전 함량이 변하고 각각의 조성이 증감하는 것으로 알려져 있다. 특히 LREE는 주요 분별성 광물에서 배제되기 때문에 전형적으로 불호정성원소로서 거동한다.

희토류원소 함량은, 기타 해양도 현무암(OIB)에서 흔한 바와 같이, 평균 콘드라이트값에 비해 전반적으로 부화되어 있다. 이 REE 패턴도 경희토류원소(LREE)가 크게 부화되어 있고, 중희토류원소(HREE)는 다소 덜 부화되는 경향을 나타낸다(그림 12). La 함량은 콘드라이트의 약 136-274배 범위이고 Lu 함량은 콘드라이트의 약 7-14배 범위이다. 따라서 LREE/HREE 비는 강한 기울기를 보여준다(La/Lu=평균 208, Ce/Yb=평균 64). 이러한 강한 기울기는 불호정성원소가 부화되어 있는 것과 동시에 해양도 암석이라는 것을 암시해준다(Basaltic Volcanism Study Project, 1981). 이 REE 변화의 흥미로운 양상은 많은 조면암 중에 가장 낮은 절대 LREE 함량을 가진 것이 조면안산암 중에 가장 진화된 것보다 적거나 혹은 같은 REE 함량을 가진다는 것이다(표 3; 그림 12). 이 LREE는 이 조면암질 암층에서 불호정성원소로서 거동하지 않았음을 암시하는데, 이는 인회석 분별작용이 역시 LREE의 호정성 거동에 공헌한다는 것을 지지한다(Nagasawa, 1970; Watson and Green, 1981). 규장질 액체에서 LREE의 호정성 거동은 Miller and Mittlefehldt (1982)에 의해 강조되었고 결과적으로 이들 암석에서 암석성인 관계를 평가하기 위해 이들 원소의 이용에 신중

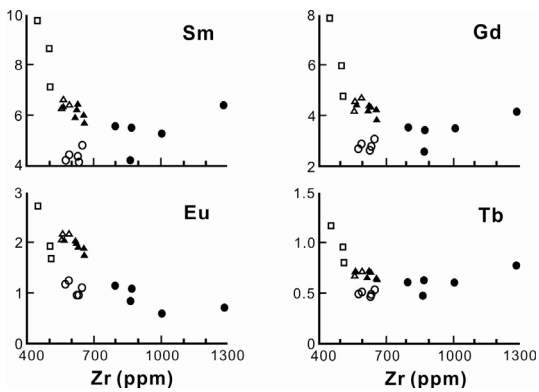

Fig. 11. Harker variation diagrams of some rare earth elements versus Zr for the volcanic rocks of Nari Group. Symbols are the same as in Fig. 7.

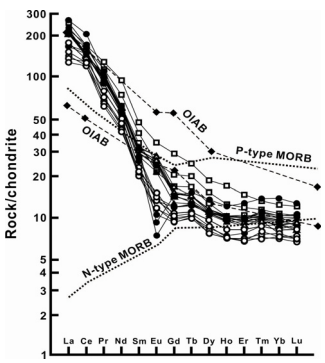

Fig. 12. Chondrite-normalized REE patterns for the volcanic rocks of Nari Group. The fields for typical MORB and OIAB (Wilson, 1989) are shown for comparison. Symbols are the same as in Fig. 7.

한 고려가 필요하다.

그리고 Eu의 부(-) 혹은 정(+) 이상이 나타나는데, 이는 환원조건 아래에서 안정적인 Eu^{+2}가 Sr과 유사한 이온 반경으로 사장석의 분별결정작용에 따르는 것으로 알려져 있다. Eu의 이상은 어떻게 변화하는지를 Eu/Eu^{*}에 대한 Sr과 SiO_2의 상관도에서 알아볼 수 있다(표 3). 두 상관도에서 Eu 부이상(Eu/Eu^{*})은 나리분석층과 알봉조면안산암에서 1보다 약간 큰 정이상을 나타내지만, 반면에 모든 죽암분석층 및 말잔등응회암과 대부분 봉래분석층에서 1보다 작은 부이상을 나타낸다. 또한 SiO_2가 증가할수록 Eu/Eu^{*}가 대체로 역비례 관계를 나타낸다. 즉 SiO_2가 많아질수록 Eu 정이상에서 부이상으로 커지는데, 이는 대체로 상부층으로 가면서 Eu이 부화되었음을 나타낸다. 이는 사장석이 대체로 하부층으로 갈수록 분별작용으로 제거되었음을 시사한다. 이러한 경향은 분별결정작용에 따른 사장석 함량의 고갈로 인한 Eu 부이상을 나타낸다는 것을 설명할 수 있다.

5. 토 의

울릉도 나리층군의 화산암류는 앞에서 언급한 바와 같이 층서가 봉래분석층, 말잔등응회암, 나리분석층, 알봉조면안산암과 죽암분석층 순으로 놓이며, 암석계열이 K-계열에 가까운 알칼리 계열에 속한다. 여기서 말잔등응회암의 일부는 화학조성이 포놀라이트에 속하고 말잔등응회암의 나머지와 봉래분석층은 조면암에 속하며, 나리분석층, 알봉조면안산암과 죽암분석층은 조면안산암에 속한다(그림 4). 그러나 이 화산암류는 대체로 화학적 조성이 비슷할지라도 봉래분석층과 죽암분석층은 변화 트렌드에서 이탈하는 양상을 보였기 때문에, 이들을 제외하고 말잔등응회암, 나리분석층과 알봉조면안산암을 하나의 그룹으로 연관시켜 검토하는 것이 가장 올바른 암석학적 진화를 고찰할 수 있을 것으로 생각된다. 이 세 암층에서 조성 범위는 꽤 큰 범위의 분별결정작용 결과로 나타난다고 볼 수 있다. 즉 이들은 층서에 따라 포놀라이트-조면암-조면안산암질 알칼리 암석계열로 순차적인 순서를 보여주는데(표 4), 이는 챔버 내에서 마그마가 아래에서 위로 조면안산암질에서 조면암질과 포놀라이트질로 상향규장질 마그마로부터 순차적으로 분출되었음을 의미한다. 이에 대한 마그마 진화를 알아보고, 어떤 과정을 거쳐서 다양한 암석이 되었는지 고찰해 본다.

5.1 마그마의 성인

이러한 사실을 바탕으로 나리층군 화산암류의 성인에 대하여 살펴보고자 한다. 화산도에서의 조면안산암질 마그마는 생성기구로서 부분용융, 분별정출작용, 혼합작용에 의해 생성될 수 있다. 또는 한 가지 이상의 복합적인 과정에 의해서도 가능하다.

먼저 울릉도의 도동현무암질암류는 그 아래에 있는 해양지각 아래의 맨틀물질이 부분용융됨으로써 생겨난 알칼리 마그마로부터 유래되었을 것으로 생각된다. 이 알칼리 마그마로부터 유래된 암석은 강한 불호정성원소 중에 Rb, K, La, Zr이 부화되는 특성을 가지며 다른 불호정성원소인 Ba, Sr이 다소 적은 함량을 나타내는데 이는 알칼리 마그마의 주요 근원지가 심부 맨틀일 것이라는 것과 관계된다. 즉, 이는 울릉도에서 현무암질 알칼리 마그마가 하부맨틀의 플룸에서 일어나는 일련의 과정에 의해 생성되었음을 의미한다(Wison, 1989). 왜냐하면 REE 패턴이 중앙해령 현무암과 완전히 다르고 해양도 현무암과 매우 유사하기 때문이다(그림 12). 그리고 조면안산암을 포함하는 규장질 암류는 심부맨틀에서 상승하는 마그마액이 상부맨틀과 지각의 경계부에서 부분용융을 일으켜 생성된 성층화 마그마챔버(stratified magma chamber)로부터 분출된 것으로 해석되었다(Yun, 1986). 이러한 단순한 성인 관계를 정량적으로 증명할 수 있는 방법은 시료의 동위원소비로부터 검증할 수밖에 없다.

한편 울릉도 화산암류의 다양한 조성은 일련의 분별결정작용을 겪으면서 분화된 것으로 해석하였다(Won and Lee, 1984, 1988; Kim, 1985, 1986; Song *et al*., 1999). 또한 울릉도 화산암류는 고프 화산도(Le Roex, 1985)와 같이 중앙해령에서 먼 Miyashiro (1978)의 케네디형의 트렌드를 가진다고 알려져 있다(Lee and John, 1985; Kim, 1986). 이 연구들은 적은 시료로부터 울릉도 전체 화산암류를 포괄적으로 다루었기 때문에 구체적인 암석화학적 진화과정을 충분하게 제시하지 못하였다. 특히 주원소 및 미량원소가 층서에 따라 체계적으로 변화하는 것을 발견하고, 분화된 용암들에서 관찰되는 조성변화는 알칼리 현무암질 모마그마의 지속적인 분별결정작용에

Table 4. Petrography and compositional variations in the Nari Group.

Stratigraphy		Lithology and petrography	Eruption styles	Compositional variations			
upper ↑	Jugam Scoria Deposits	composed of dark reddish brown, highly vesicular scorias, and very small lava flow, including phenocrysts of plagioclase, alkali feldspars, clinopyroxene and kaersutite in a tachylitic groundmass.	Strombolian eruption	Tachy-andesitic	deviate from some variation trends of major and trace elements.		
	Albong Trachy-andesite	composed of gray and brownish gray lavas, which include phenocrysts of plagioclase, alkali feldspars, clinopyroxene, kaersutite, biotite, olivine and titanomagnetite, with a little of apatite and zircon in a groundmass of trachytic texture.	Lava effusion	Tachy-andesitic	more basic ⇧	upward increase ↑	incompatible elements ↓
	Nari Scoria Deposits	composed of highly vesicular, dark gray scorias, which include plagioclase, alkali feldspars, kaersutite, biotite, titanomagnetite and clinopyroxene in a hyalopilitic groundmass.	Strombolian eruption	Tachy-andesitic			
	Maljandeung Tuff	equals to Nari Tephra Formation (Kim *et al*., 2014), and consists of tuffs, lapilli tuffs, tuff breccias and pumice deposits; tuffs consist of crystals of alkali feldspars, minor plagioclase pyroxene, kaersutite and biotite, shards, and lithic fragments.	Plinian and phreato-magmatic eruption	Trachytic to phonolitic	⇩ more siilcic	compatible elements ↑	downward increase ↓
lower ↓	Bongrae Scoria Deposits	composed of highly vesicular scoria deposits, intercalated with a welded tuff; scorias are colored to dark gray with reddish brown on the surface.	Strombolian eruption	Trachytic	deviate from some variation trends of major and trace elements.		

연유된다는 암석성인적 모델을 제시하였다(Kim, 1986). 또한 현무암질 알칼리 마그마가 상부맨틀 내의 저장고에 머물면서 분별결정작용이 일어났으며, 이때 진화된 조면안산암질 마그마가 상부레벨의 지하공간으로 올라와 마그마챔버에 머물면서 분별결정작용이 계속되었던 것으로 보았다(Song *et al*., 1999). 따라서 울릉도에서 조면안산암은 현무암질 마그마의 분별정출작용에 의해 형성되었다고 볼 수 있다.

현무암질 마그마가 조면암질 마그마와 혼합작용에 의하여 조면안산암질 마그마가 생성될 수도 있다. 이때 혼합된 마그마는 단성분의 두 마그마의 혼합으로 인하여 조성변화 트렌드가 직선적이어야 하며, 또 조직에 있어서 마그마 혼합의 양상을 보여주는 반정광물의 불완전공존, 또한 융식구조, 역누대구조, 유리질 포유물과 동원내포체의 존재와 같은 비평형적 조직이 나타나야 한다. 그러나 나리층군 화산암류에서는 일반적인 비평형 증거가 되는 장석 반정의 체조직을 제외하고 혼합 증거가 되는 비평형 조직을 관찰할 수 없기 때문에 혼합에 의해 조면안산암질 마그마가 형성되었다고 보기 어렵다.

5.2 마그마의 진화과정

나리층군에서 조면암질 및 포놀라이트질 암층은 앞에서 언급한 바와 같이 분별결정작용 혹은 부분용융에서 유래된 조면안산암질 마그마로부터 분별결정작용에 의해 진화되었다고 생각된다. 나리층군 화산암류에서 불호정성원소의 거미도 패턴을 보면 전형적인 K-계열의 고프 섬(Gough Island)의 용암과 같이 조면암질 암층은 미량원소 패턴이 조면안산암

질 암층의 패턴과 매우 유사하고, Ba, Sr을 제외한 나머지 불호정성원소의 함량이 모두 높게 나타난다(그림 10). REE 패턴에서도 포놀라이트질 및 조면암질 암층의 패턴이 조면안산암질 암층의 패턴과 매우 유사하고, 그 아래에 배치되어 나타난다. LREE와 HREE는 모두 현저하게 부화되지만 LREE가 HREE보다 더욱 강하게 부화된다(그림 12). La, Ce, Pr과 같은 LREE의 현저한 부화는 Rb, K가 부화되는 것과 같은 이유로 나타나는 것으로 생각된다. 이러한 양상은, 거미도 패턴과 마찬가지로, 조면안산암질 마그마로부터 분별정출작용에 의해 조면암질 및 포놀라이트질 마그마로 진화되었음을 시사해준다.

나리층군에서 말잔등응회암, 나리분석층 및 알봉조면안산암은 전반적으로 주원소가 SiO_2의 변화에 대하여 거의 직선적 변화 트렌드를 보이는데, 이는 이 층군에서 나온 모든 시료는 단순한 암석성인적 과정에 의해 서로 관련될 수 있다. 즉 이 변화 트렌드는 마그마챔버에서 분별결정작용이 우세한 마그마 진화에 의해 마그마 조성이 조면안산암질, 조면암질 및 포놀라이트질 순으로 변화했음을 지시한다. 따라서 이 알칼리 화산암류는 꽤 큰 조성범위를 가지는 마그마 진화 결과를 나타낸다. 그러나 일관된 주원소 변화에도 불구하고, 미량원소의 하커도 변화 트렌드에서 이탈을 나타내는 죽암분석층과 봉래분석층은 국지적으로 분리된 별도의 마그마솥(magma batch)에 머무는 동안 진화과정이 약간 달랐음을 암시한다.

마그마챔버에서 주원소 특징은 지화학적으로 별도의 많은 모마그마의 반정광물의 결정분별작용(혹은 축적작용)의 다양성을 나타낸다. 어떤 경우에, 마그마챔버 과정에서 추가적인 효과는 이 결정분별작용에 축적작용이 중첩돼 있다. 이러한 과정은 다음을 포함한다고 생각된다: (1) 더 원시적인 마그마솥(magma batch)이 마그마챔버에 있는 더 진화된 마그마와의 혼합작용이며, 주입된 마그마솥은 마그마챔버에 있는 것과 유사한 조성일 수도 있고 아닐 수도 있다; (2) 결정분별작용 동안에 마그마챔버의 출조(tapping)인데, 이때 분출된 마그마는 기대되는 호정성 및 불호정성 미량원소의 거동에서 큰 편차를 유도할 수 있다(Cann, 1983). 이들 과정은, 단독으로 혹은 복합적으로 일어나며, 몇몇 암층에서 관찰되는 전반적인 암석화학의 복잡성을 일으켰다고 생각한다. 따라서 비록 나리층군의 근원지역에 대한 특성을 정량적으로 확실하게 접근하기가 어렵다고 생각된다.

나리층군 화산암류에서 원소간의 변화는 이들이 단순한 결정분별작용 과정에 의해 모두 직접적인 관계를 유지한다고 할 수 없다. 예를 들면, 규장질 마그마에서 저어콘 분별작용이 없을 때 Ba, Sr, Zr의 거동은 우리의 지식 내에서 이들 암층 간의 어떤 단순한 관계를 나타내지 않는다(Berlin and Henderson, 1969; Korringa and Noble, 1971; Long, 1978; Pearce and Norry, 1979). 저어콘은 조면암질 암층에서 석기 광물상으로 산출되기 때문에 극히 작은 크기는 중력낙하에 의해 분별되지 않음을 암시한다. 그러나 분화에 따른 Zr의 한결같은 심한 부화(그림 8)와 희토류원소와의 Zr의 좋은 상관성(그림 11)은 적지만 저어콘 분별작용을 부수적으로 지지해준다.

덜 분화된 조면안산암과 더 분화된 포놀라이트 간의 조성 차이는 넓은 결정분화작용과 일치한다. 예를 들면, 중간의 조면암질 조성은 덜 진화된 조면안산암질 마그마로부터 알칼리장석과 소량의 감람석, 단사휘석, 사장석, 티탄자철석, 캘슈타이트, 흑운모, 백류석 및 인회석의 많은 정출에 의해 유래된다. 비슷하게, 가장 진화된 포놀라이트의 조성은 조면암질 마그마로부터 유래될 수 있다.

5.2 마그마챔버의 조성누대와 분출과정

말잔등응회암, 나리분석층 및 알봉조면안산암을 고려하면 조면안산암질 마그마는 상부레벨의 마그마챔버에 머무는 동안 분별결정작용이 일어났다(Wilson, 1989). 앞에서 나리층군 화산암류의 조성차이는 조면안산암질 마그마의 분별결정작용에 의한 분화작용으로 설명될 수 있었다. 이곳에서도 조면안산암질 마그마가 장기간에 걸쳐서 더욱 분화를 겪게 되며 더 진화된 조면암질 및 포놀라이트질 마그마가 상부에 분리되어 존재한다(그림 13a). 즉 상부 레벨의 챔버에 머무는 동안 보다 고철질 마그마는 주로 분별결정작용에 의해 결정낙하와 침적작용을 일으켜 조면안산암질 마그마가 하부에 자리잡았으며, 보다 규장질의 조면암질과 포놀라이트질 마그마가 챔버 상부에 순서대로 자리를 차지하였을 것이다. 일반적으로 분출된 화산암류의 분화정도는 마그마챔에서의 체류시간과 관련되는 것으로 생각되는데, 이는 근원지로부터 마그마 공급률(magma supply rate) 및 분출률(eruption rate)과도 관련되어 있

다(Feigenson and Spera, 1981).

이때 챔버의 한쪽에서 국지적으로 분리된 별도의 마그마솥(magma batch)에서 일시적으로 약간 다른 진화과정이 일어났을 것이다. 이 마그마솥에서 조면암질 마그마의 분출이 일어나 분석들을 퇴적시켜 봉래분석층을 형성하였다(그림 13b).

포놀라이트질, 조면암질 및 조면안산암질 마그마로 조성분대를 형성한 마그마챔버는 상부의 포놀라이트질 마그마대로부터 분출을 시작하여 점차 조면암질 마그마대로 내려가면서 분출을 확대하였다(그림 13c). 화산활동은 수증기마그마성 분출과 플리니언 분출에 의해 맥동적으로 진행되었으며 중간에 4차례의 휴지기가 있었다(Kim *et al.*, 2014). 이때 마그마 분출률은 비교적 커서 울릉도 전역을 덮고 일

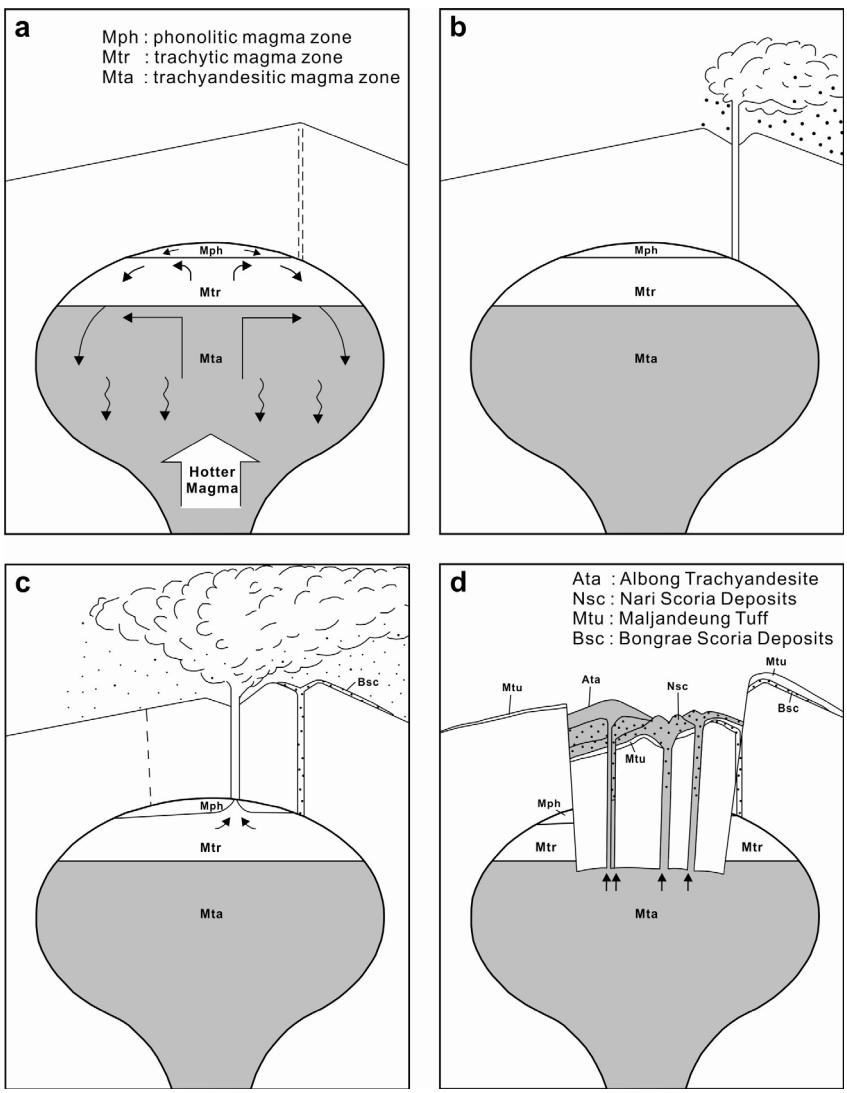

Fig. 13. Pictorial explanation of stages in the magmatic evolution and eruptive processes in the magma chamber. (a) Compositional zonnation resulting from settling and accumulation of earlier crystals through fractional crystallization in magma chamber; (b) Bongrae Scoria Deposits accumulated by strombolian eruptions from the trachytic magma in a separate magma batch; (c) Maljandeung Tuff accumulated by phreatoplinian and plinian eruptions from the phonolitic and trachytic magma zones, and followed by a caldera collapse; (d) Nari Scoria Deposits accumulated by strombolian eruptions, thereafter Albong Trachyandesite dome emplaced by lava effusions from the trachyandesitic magma zone with which the chamber roof was contacted by the caldera collapse.

본까지 날라갈 수 있을 정도(Machida *et al*., 1984)로 큰 용적의 말잔등응회암을 퇴적시켰다. 포놀라이트질 및 조면암질 마그마의 분출은 약 19～5.6 ka B.P. 동안에 일어났었다(Okuno *et al*., 2010; Im *et al*., 2012; Kim *et al*., 2014).

이러한 막대한 양의 분출작용은 마그마챔버 내의 압력 저하로 칼데라 함몰을 유도하여 나리 칼데라를 형성하였다. 이로 말미암아 챔버 상부에 있던 포놀라이트질 및 조면암질 마그마의 막대한 방출과 칼데라 함몰은 챔버 지붕이 조면안산암질 마그마 부위까지 도달하게 되어 다시 마그마 압력을 증가시켜 이 조면안산암질 마그마대로부터 스트롬볼리언 분출과 용암분류(lava effusion)를 차례로 일으켰다(그림 13d). 스트롬볼리언 분출은 칼데라 바닥에 분석들을 퇴적시켜 나리분석층을 형성하였으며 용암분류는 알봉조면안산암 돔을 형성할 수 있었다.

결론적으로 울릉도 최후기 화산암류에서 3개 암층들 간의 상향고철질 분포와 조면암질 암층과 조면안산암질 암층 사이에서 원소들의 연속성이 약간이지만 조성단절(compositional gap)되는 근본적 이유는 칼데라 함몰에 의해 조성누대된 챔버에서 마그마 출조 입구가 점진적으로 낮아지지 않고 급격하게 낮아짐으로 인해서 조성단절을 일으킨 현상이라고 설명할 수 있겠다.

6. 결 론

울릉도 나리층군은 봉래분석층, 말잔등응회암, 나리분석층, 알봉조면안산암, 죽암분석층으로 구성된다.

나리층군 화산암류는 조면안산암-조면암-포놀라이트 범위의 알칼리 암석계열을 나타낸다. 이들은 주원소와 미량원소가 하커도에서 SiO_2 조성이 52.8～61.2% 범위에서 증가 혹은 MgO 조성이 감소함에 따라 대개 직선적인 변화 트렌드를 보여준다. 그러나 죽암분석층과 봉래분석층은 이들 트렌드에서 다소 이탈되는 경향을 나타낸다.

거미도 패턴과 REE 패턴에서 불호정성원소와 희토류원소가 MORB보다 부화되고 LREE/HREE의 기울기가 큰 해양도의 화학적 특징을 보여준다.

나리층군에서 대표되는 하부의 조면암질 및 포놀라이트질 암층(말잔등응회암)에서 상부의 조면안산암질 암층(나리분석층 및 알봉조면안산암)으로 가면서 불호정성원소의 감소와 호정성원소의 증가를 보여준다. 또한 각 암층은 거미도와 REE 패턴에서 각 암층마다 패턴이 매우 유사하면서도 상부층으로 갈수록 미량원소와 희토류원소가 대개 부화하는 경향을 나타낸다. 이러한 주원소, 미량원소 및 희토류원소의 암석화학에 의한 일관적인 변화는 모마그마에서 작용하는 분별결정작용/결정축적작용에 달려있다는 것을 암시한다.

그러므로 말잔등응회암, 나리분석층 및 알봉조면안산암은 마그마챔버가 분별정출과정에 의해 하부 조면안산암질 마그마로부터 상부 조면암질 및 포놀라이트질 마그마로의 연속적 조성누대를 형성했음을 암시한다. 먼저 이 마그마챔버는 그 상부로부터 포놀라이트질 및 조면암질 마그마를 대규모로 분출하면서 칼데라 함몰을 일으켰으며 이로 인해 그 아래의 조면안산암질 마그마의 분출을 유도하였다. 따라서 각 암층의 조성은 마그마챔버의 지붕으로부터 하부로 포놀라이트-조면암-조면안산암 순으로 분출된 결과를 나타낸다. 그러나 변화 트렌드에서 다소 벗어난 죽암분석층과 봉래분석층은 별도의 마그마솥에서 분출되었을 것으로 생각된다.

결론적으로 울릉도 최후기 화산암류에서 3개 주암층들 간의 상향고철질 분포와 원소들의 변화 트렌드에서 조면암질 암층과 조면안산암질 암층 간의 조성단절은 칼데라 함몰에 의해 조성누대 챔버에서 마그마 출조 입구가 급격하게 낮아짐(그림 13d)으로 인해서 일어났던 현상이라고 생각된다.

사 사

이 연구는 2013년도 학부교육 선진화 선도대학(ACE) 지원사업의 일환으로 코칭기반 Honor Class 프로그램에 의해 연구되었다. 심사과정에서 논문의 질 향상을 위해 날카로운 비평과 조언을 해준 한국지질자원연구원 권창우 박사님, 충남대 최성희 교수님, 경북대 장윤득 교수님과 편집위원님께 감사를 드린다.

REFERENCES

Basaltic Volcanism Study Project, 1981, Basaltic volcanism on the terrestial planets. New York, Pergamon

Press. 1286 p.
Berlin, R. and Henderson, C.M.B., 1969, The distribution of Sr and Ba between the alkali feldspar, plagioclase and groundmass phases of porphyritic trachytes and phonolites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 33, 247-255.
Cann, J.R., 1983, Rayleigh fractionation with continuous removal of liquid. Earth and Planetary Science Letters. 60, 114-116.
Chun, J.H., Han, S.J. and Cheong, D., 1997, Tephrostratigraphy in the Ulleung Basin, East Sea: Late Pleistocene to Holocene. Geosciences Journal, 1, 154-166.
Chun, J.H., Cheong, D.K., Han, S.J., Hug, S. and Yoo, H.S., 2006, Tephrography and paleoenvironmentals of marine core in the Kita-Yamato Trough, East Sea (Japan Sea). Economic and Environmantal Geology, 39, 83-93 (in Korean with English abstract).
Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1992, An introduction to the rock forming minerals. 2nd ed., Longmans, 696 p.
Feigenson, M.D. and Spera, F.J., 1981, Dynamical model for temporal variation in magma type and eruption interval at Kohala volcano, Hawaii. Geology, 9, 531-533.
Harumoto, A., 1970, Volcanic rocks and associated rocks of Utsuryoto island. Nippon Printing and Publishing Co., 39 p.
Henderson, P., 1984, Rare earth elements geochemistry. Elsevier Science Pub. Co. Inc., 510 p.
Hughes, C.J., 1973, Spilites, keratophyres and the igneous spectrum. Geological Magazine, 109, 513-527.
Hwang, S.K., Hwang, J.H. and Kwon, C.W., 2012, Geological report of the Ulleung Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 84 p.
Hwang, S.K., Kim, Y.B. and Hwang, J.H., 2014, Rock series and petrochemical classification of the volcanic rocks in Ulleung Island. Journal of Geological Society of Korea, 50, 61-70 (in Korean with English abstract).
Im, J.H., Shim, S.H., Choo, C.O., Jang, Y.D. and Lee, J.S., 2012, Volcanological and paleoenvironmental implications of charcols of the Nari Formation in Nari Caldera, Ulleung Island, Korea. Geosciences Journal, 16, 105-114.
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.
Kim, G.B., Cronin, S.J., Yoon, W.S. and Sohn, Y.K., 2014, Post 19 ka B.P. eruptive history of Ulleung Island, Korea, inferred from an intracaldra pyroclastic sequence. Bulletin of Volcanology,
Kim, Y.K., 1985, Petrology of Ulreung volcanic island, Korea-part 2, Petrography and bulk chemical composition. Journal of Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists, 80, 292-303 (in Japanese with English abstract).
Kim, Y.K., 1986, Magmatic differentiation in the volcanic rocks from Ulreung Island, Korea. Journal of Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists, 81, 165-180 (in Japanese with English abstract).
Kim, Y.K. and Lee, D.S., 1983, Petrology of alkali volcanic rocks in northern part of Ulrung Island. Journal of Korean Institute of Mining Geology, 16, 319-336 (in Korean with English abstract).
Klein, C. and Hurbut, C.S., 1993, Manual mineralogy. John Wiley and Sons, Inc., New York, 681 p.
Korringa, M.K. and Noble, D.C., 1971, Distribution of Sr and Ba between natural feldspar and igneous melt. Earth and Planetary Science Letters. 11, 147-151.
Le Bas, M.J., Lemaitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. Journal of Petrology, 27, 745-750.
Lee, M.S. and John, Y.W., 1985, Study on the Quaternary volcanics and their tectonic environments of southern Korea. Journal of Geological Society of Korea, 21, 260-280 (in Korean with English abstract).
Le Maitre, R.W., 1962, Petrology of volcanic rocks, Gough Island, South Atlantic. Geological Society of America Bulletin, 73, 1309-1340.
Le Maitre, R.W., 1984, A proposal by the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram. American Journal of Earth Sciences, 31, 243-255.
Le Roex, A.P., 1985, Geochemistry, mineralogy and magmatic evolution of the basaltic and trachytic lavas from Gough Island, South Atlantic. Journal of Petrology, 26, 149-186.
Long, P.E., 1978, Experimental determination of partition coefficients for Rb, Sr and Ba between alkali feldspar and silicate liquid. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42, 833-846.
Machida, H., Arai, F., Lee, B.S., Moriwaki, H. and Furuta, T., 1984, Late Quaternary tephras in Ulreungdo Island, Korea, J. Geography., 93 (1), 1-14.
Middlemost, E.A.K., 1975, The basalt clan. Earth Science Reviews, 11, 337-364.
Miller, C.F. and Mittleefehldt, D.W., 1982, Depletion in light rare-earth elements in felsic magmas. Geology, 10, 129-133.
Miyashiro, A., 1978, Nature of alkalic volcanic rock series. Contribition to Mineralogy and Petrology, 66, 91-104.

Nakamura, N., 1974, Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 38, 757-773.

Nagasawa, H., 1970, Rare earth concentrations in zircon and apatites, and their host dacites and granites. Earth and Planetary Science Letters. 9, 359-364.

Okuno, M., Shiihara, M., Torii, M., Nakamura, T., Kim, K.h., Domitsu, H., Moriwaki, H. and Oda, M., 2010, AMS radiocarbon dating of Holocene tephra layers on Ulleung Island, South Korea. Radiocarbon, 52, 1465-1470.

Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979, Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. Contribition to Mineralogy and Petrology, 69, 33-47.

Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25, 956-983.

Song, Y.-S., Park, K.-H. and Park, M.-E., 1999, Major, rare-earth and trace geochemistry of Ulleungdo volcanic rocks. Journal of Petrological Society of Korea, 8, 57-70 (in Korean with English abstract).

Song, Y.-S., Park, M.-E. and Park, K.-H., 2006, Ages and evolutions of the volcanic rocks from Ulleung-do and Dok-do. Journal of Petrological Society of Korea, 15, 72-80 (in Korean with English abstract).

Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A.D., and Norry, M.J. (eds.), Magmatism in the Ocean Basin. Geological Society Special Publication, 42, 313-345.

Sun, S.S. and Nesbitt, R.W., 1977, Chemical heterogeity of the Archean mantle: composition of the earth and mantle evolution. Earth and Planetary Science Letters, 35, 429-448.

Tsuboi, S., 1920, On the leucite rock, vulsinitic vicoite from Utsuryoto island in the Sea of Japan. Journal of Geological Society of Tokyo, 27, 91-104.

Uchimizu, M., 1966, Geology and petrology of alkali rocks from Dogo, Oki Island. Journal of Faculty of Sciences, University of Tokyo, Section 2, 16, 85-159.

Watson, E.B., 1980, Apatite and phosphorus in mantle source regions: an experimental study of apatite/melt equilibria at pressures to 25 Kbar. Earth and Planetary Science Letters, 51, 322-335.

Watson, E.B. and Green, T.H., 1981, Apatite/liquid partition coefficients for rare earth elements and strontium. Earth and Planetary Science Letters. 56, 405-421.

Wilson, M., 1989, Igneous petrogenesis. Unwin Hyman, London, 466 p.

Won, C.K. and Lee, M.W., 1984, The volcanism and petrology of alkali volcanic rocks, Ulrung Island. Journal of Geological Society of Korea, 20, 296-305 (in Korean with English abstract).

Won, C.K. and Lee, M.W., 1988, The study on petrology for the Quaternary alkali volcanic rocks of the Korean Peninsula. Journal of Geological Society of Korea, 24, 181-193.

Xu, S., Uto, K. and Kim, K., 1998, K-Ar dating of volcanic rocks from Ulreung Island, Korea. Geochemical Journal, 32, 117-123.

Yun, H.D., 1986, The geochemical characteristic and origin of alkaline magmas in the Ulrung Island, Korea. Doctoral dissertation, Graduate School, Seoul National University, 172 p (in Korean with English abstract).

Zanettin, B., 1984, Proposed new chemical classification of volcanic rocks. Episodes, 7, 19-20.

투 고 일 : 2014년 3월 27일
심 사 일 : 2014년 3월 27일
심사완료일 : 2014년 6월 2일