

울릉도 나리 칼데라 내에서의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정과 배관체계 추론

황상구¹ · 이소진² · 류한영³ · 장윤득^{4,5}

¹안동대학교 지구환경과학과

²주식회사 자연과 기술

³한국농어촌공사

⁴경북대학교 지구시스템과학부

⁵경북대학교 울릉도독도연구소

요 약

우리는 울릉도 나리 칼데라 내의 나리분석층과 알봉조면안산암에 대한 야외관계에 대해 설명하고 그들의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정하여 배관체계에 관해 추론한다. 나리분석층은 3개 지역으로 구분되는데, 남부 분석층은 하부상이고 여러 소분석구를 포함하며 중부 분석층은 상부상이고 북부 분석층은 중부 분석층의 원거리상에 해당된다. 알봉조면안산암은 선기 및 후기 용암류, 용암돔과 용암쿨리의 형태로 구성되며 남부 분석층에서 5개의 소규모 용암 유출구를 포함한다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 결과, 나리분석층은 남부 분석층에서 25.8 ka 연대와 중부 분석층은 9.2 ka 연대가 나왔다. 알봉조면안산암은 후기 용암류에서 8.3 ka 연대로 도출되었고 용암돔에서 7.9 ka 연대를 얻었으며 용암쿨리에서 5.8 ka 연대로 측정되었다. 한편 남부 분석층에서의 유출구 용암에서 7.8 ka 연대를 얻었다. 칼데라 내에서 화구들의 배열은 기존의 선행 칼데라 함몰에 따른 환상단층과 일치하는 것으로 보인다. 따라서 화구들은 심부에서 환상단층에 의해 호스팅되는 환상암맥에서 방출을 나타내는 것이다. 이 환상암맥은 각 화산을 공급하기 위해 출조되는 마그마챔버로의 작은 통로를 반영한다.

주요어: 울릉도, 나리 칼데라, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정, 배관체계, 환상단층

Sang Koo Hwang, So Jin Lee, Han Yeong Ryu and Yun Deuk Jang, 2021, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and inferences about plumbing system in Nari Caldera, Ulleung Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 5, p. 679-690

ABSTRACT: We describe field relationships of Nari Scoria Deposits and Albong Trachyandesite in the Nari caldera, Ulleung Island, and infer about their plumbing system by their $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. The Nari Scoria Deposits are divided into three scoria zones: the southern zone correspond to their lower facies including many scoria conelets, the middle zone to their upper facies and the northern zone to the distal facies of the middle zone. Albong Trachyandesite is composed of such forms as earlier and later lava flows, a lava domes and a lava coulee, and includes five lava boccas in the southern scoria zone. According to $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, the Nari Scoria Deposits dated 25.8 ka and 9.2 ka ages. A big gap between two ages suggests a possibility of poly-cycling eruptions. Albong Trachyandesite dated 8.3 ka from the later lava flow, 7.9 ka age from the lava dome, and 5.8 ka age in the lava coulee. Meanwhile, it obtained 7.8 ka age from a bocca lava. Alignment of vents on the caldera appear to coincide with pre-existing ring faults, consistent with the existing earlier caldera callapse. So the vents represent the release from the ring dykes hosted by the ring faults at depth. As result, these ring dykes reflect the small passage to magma chamber that was tapped to feed each volcano.

Key words: Ulleung Island, Nari caldera, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, plumbing system, ring fault

(Sang Koo Hwang, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; So Jin Lee, Nature and Geotech Limited Company, Andong 36760, Republic of Korea; Han Yeong Ryu, Korea Rural Community Corporation, Naju 58217, Republic of Korea; Yun Deuk Jang, Division of Earth System Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea; Yun Deuk Jang, Institute of Ulleungdo and Dokdo, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea)

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

1. 서 언

신생대 화산 및 그 화구의 위치를 제어하는 요인은 화산 위험을 예측하는 관점에서 그리고 마그마작용과 화산지대 진화에 대한 우리의 전반적인 이해를 위해서 중요하다. 울릉도 나리 칼데라 내에서 산발적인 조면안산암질 화산작용은 활동 가능성으로서 마그마 저장고의 성능을 추정하는 데에 있어 미칠 잠재적 영향 때문에 특히 관심을 끌고 있다. 이 칼데라에서 중요한 과제로는 분출유형 외에 야외관계, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정, 암맥 및 화도의 천부 배관체계 등을 유추하여 화구와의 관계를 이끌어내는 것이다 (Doubik and Hill, 1999; Connor *et al.*, 2000; Woods *et al.*, 2002; Gaffney and Damjanac, 2006; Valentine and Krogh, 2006).

울릉화산의 나리 칼데라에 있는 제4기 알봉 용암 돔을 위시한 화산암층은 마그마 저장고와 연결되는 잠재적 미래 화산활동의 중요한 표시자이다. 이 논문의 주제인 나리 칼데라 내의 분석층과 용암은 약 25.8~5.8 ka 사이의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대로 측정되었다. 조성상으로 이들은 알칼리-규산 분류도에서 조면안산암질 영역에 도시되며 (Le Bas *et al.*, 1986; Hwang and Jo, 2014), 사장석, 알칼리장석, 흑운모와 칼슘타이트 반정을 함유한다. 우리는 나리 칼데라 내에서 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대를 측정하고 이에 따라 화산 분출물의 층서를 정립하고 이들의 분출유형과 야외관계에 대해 해석하고, 화구 위치가 기존의 환상단층에 의해 제어되었다는 것을 논의한다. 마지막으로, 더 깊은 배관체계와 관련하여 화산 위치, 환상단층 및 지형 간의 관계에 대해 토의한다.

2. 화산층서

울릉도 지질은 크게 (1) 도동현무암질암류, (2) 울릉층군, (3) 성인봉층군과 (4) 나리층군 순으로 구분된다 (Hwang *et al.*, 2012). 도동현무암질암류는 용암 및 화산쇄설암의 연속체이다. 울릉층군은 화산역암층을 시작으로 하부 조면암질 용암류 (lava flow) 를 말하며, 성인봉층군은 응회암층으로부터 상부 조면암질 용암류와 포놀라이트질 화산암을 말한다.

나리층군은 화학조성, 구성원과 선후 관계 및 분포에 따라 봉래분석층, 말잔등응회암, 나리분석층,

알봉조면안산암, 죽암분석층 등으로 구성된다 (Hwang *et al.*, 2012). 이 층군의 하부는 일련의 칼데라 분출작용으로 형성되었는데, 이 섬의 중북부에 원형 저지인 나리 칼데라를 형성하였고 두꺼운 화성쇄설 연속체를 퇴적시켰다. 말잔등응회암은 최대의 폭발성 분출로서 플리니언 및 수증기플리니언 분출에 의해 생산된 것이다 (Kim *et al.*, 2014; Hwang *et al.*, 2018). 4개 에피소드의 폭발은 ^{14}C 연대에 의하면 약 19, 8.4, 5.6 ka B.P.에 일어났으며 (Okuno *et al.*, 2010; Shiihara *et al.*, 2011; Im *et al.*, 2012), 플리니언 및 수증기플리니언 강화퇴적층 및/혹은 화쇄류층의 연속체를 생성시켰다 (Kim *et al.*, 2014; Hwang *et al.*, 2018). 이 말잔등응회암의 일부는 강한 폭발성 분출로 화산재가 동쪽으로 날아가 일본에서도 퇴적되었다 (Machida and Arai, 1983).

3. 칼데라 내의 지질

나리 칼데라 벽에는 울릉층군과 성인봉층군이 대체로 대상으로 둘러쳐 있지만, 칼데라 내에는 나리 분석층, 알봉조면안산암과 층적층이 분포한다 (그림 1, 2). 이 칼데라 내의 북서쪽에는 고도 518 m의 알봉이 칼데라에서 마지막 화산작용으로 형성된 중앙 화산으로 솟아있는데 알봉 용암돔을 형성하고 있다 (그림 3a). 이 용암돔은 너비 720 m와 높이 120 m (동쪽)에서 150 m (서쪽)의 돔 모양을 이룬다. 이 용암돔을 중심으로 대체로 분석층, 용암류, 층적층이 초승달 모양으로 둘러싸여 분포한다 (그림 1). 그중에서 나리분석층은 돔 동쪽에 앞치마 모양으로 둘러싸여 아마도 말잔등응회암을 덮는다.

3.1 나리분석층

나리분석층은 일반적으로 말잔등응회암층을 덮고 알봉조면안산암에 의해 덮이거나 혹은 층적층에 의해 덮여있다. 또한 이 나리분석층은 화산작용이 끝난 후에 장기간에 걸쳐 급사면에 쌓인 말잔등응회암으로부터 쓸려내려온 부석들이 저지에 재이동으로 퇴적된 층적층에 의해 덮여있다. 이 두 이유로 분석층이 현재 알봉 용암돔의 1~1.7 km 반경 내에 있는 동쪽 부분에서 나타나지 않는다 (그림 2). 이 분석층은 남북으로 나뉘어 남부, 중부 및 북부 분석층으로 고립되어 분포한다.

3.1.1 남부 분석층

남부 분석층은 여러 개의 소분석구(scoria conelet)를 포함하고(그림 3b) 이들로부터 분석(噴石, scoria)들이 재이동으로 인한 애프론을 형성해 불규칙하게 분포한다. 분석구 사면은 대부분 식생으로 그 내부를 노출하지 않지만, 밭 개간 혹은 농로 개설로 인해 드물게 그 내부를 드러내는 곳도 있다. 이곳에선 화성쇄설물의 현저한 입도 차이를 보여준다. 즉 붉은 스코리아 라필리(scoria lapilli), 스패터 및 화산탄로 구성되며, 상부 분석구상을 형성하고 있다. 라필리는 블록상부터 유체상(fluidal)의 불규칙한 모양이며 보통 mm 또는 더 큰 크기의 기공을 가지고 대부분 고다공상(highly vesicular)을 나타낸다. 내부로 갈수록 대부분 쇄설물은 화산탄 크기로 로피상에서 우둘투둘한(ragged) 표면을 가지며, 일반적으로 10~30 cm 길이의 유체상 스패터가 더 풍부하고 서로 들러붙은 유착암(agglutinate) 덩어리를 이루며 흩어져 있다. 이러한 유착상태는 이들이 분출된 화구 가까이에서 퇴적되었다는 것을 나타낸다. 일부 둥근 화산탄은 그 표면에 박혀있는 작은 스코리아 라필리로

코팅돼 있기도 한데, 이는 화구 근처에 떨어져 작은 쇄설물을 부착시켰던 여전히 액체 상태 화산탄임을 암시한다. 대체로 내부에서 분석층은 다양하게 용결된 스패터 및 화산탄 등이 뒤엉켜 조잡한 층을 형성한다. 중부 및 북부 분석층과 대조적으로, 남부 분석층은 2 mm 이상 크기의 큰 기공이 훨씬 더 풍부하다.

3.1.2 중부 분석층

중부 분석층은 알봉 용암돔을 중심으로 650 m의 EW 분산축을 가지면서 반달 모양으로 분포한다(그림 1). 분석들은 외형이 유체상 조직을 갖는 것이 흔하고, 꽃배추상(cauliflower-shaped) 조직, 드물게 빵껍질상(bread-crust) 조직도 나타나는데(Hwang *et al.*, 2020c), 이들은 고온에서 분출되었음을 시사한다. 기공 크기는 1~10 mm 범위의 다양한 것도 있고 1 mm 내외의 균질한 것도 있다(Hwang *et al.*, 2020c). 기공률은 빈다공상(poorly vesicular)에서 고다공상(highly vesicular)까지 다양한 범위에 걸쳐 존재한다(Hwang *et al.*, 2020c). 암괴들은 거의 유리질에서 결정질로서 비본질(non-juvenile)로 분류되며,

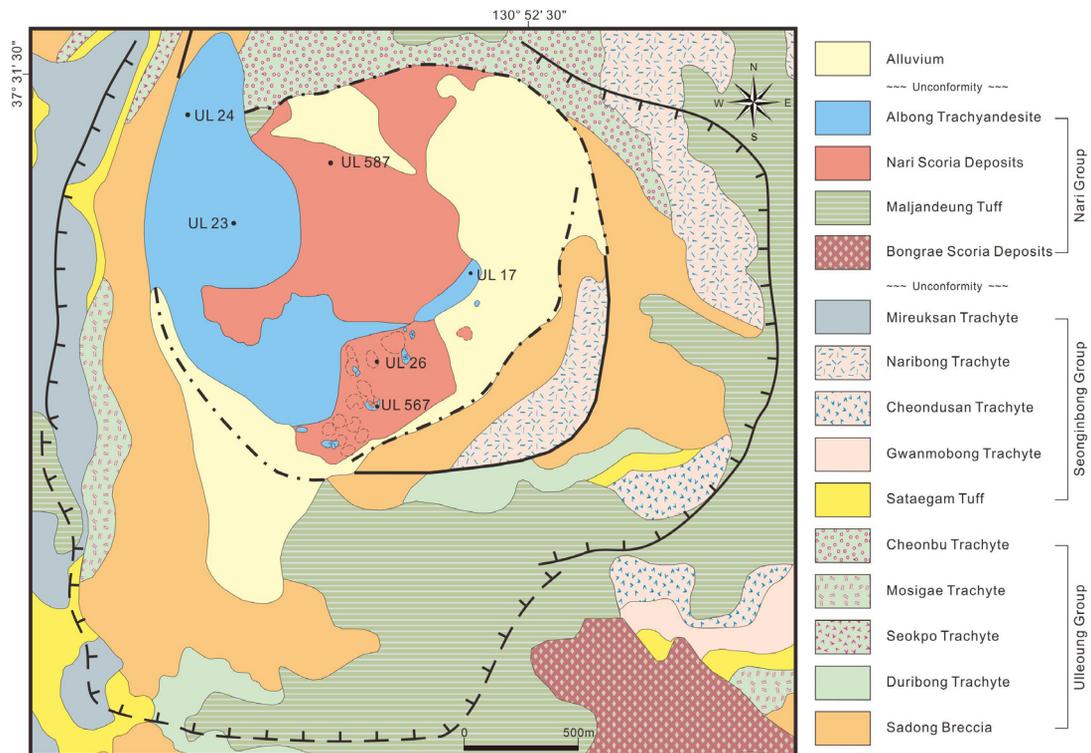


Fig. 1. Geological map of Nari caldera region, showing the sampling sites, the bounding ring faults and topographic rims.

그 기원은 이전의 화도를 채운 플러그와 화도벽에서 뜯겨 나온 조각이다. 유리질 암괴는 아마도 이전 용암 껍데기의 일부로 생각되며, 빠른 냉각으로 거의 기온과 평형을 이루었음을 반영한다.

그리고 북부 분석층은 분석들의 입도가 현저하게 줄어들음을 고려하면 중부 분석층의 원거리부에 해당한다.

3.2 알봉조면안산암

알봉조면안산암은 용암으로 산출되며 그 형태와 정치 양상에 따라 용암돔, 용암류와 용암쿨리(coulee)로 나뉘인다.

3.2.1 용암돔

용암돔은 칼데라 내의 북서쪽에 고도 538 m 높이의 알봉으로 솟아있는 중앙화산을 이룬다(그림 3a). 이 용암돔은 너비가 720 m이고 높이가 120 m(동쪽)에서 150 m(서쪽)를 이루는 종 모양의 돔을 나타낸다(Hwang *et al.*, 2020c). 용암돔에는 분석을 포획체

로 종종 발견할 수 있고(그림 3c) 다각상 절리를 관찰할 수 있다(그림 3d). 그래서 알봉에서 마지막 단계의 안정한 돔 성장은 동일 지점에서 분석층의 분출이 선행된 후에 일어났다고 볼 수 있다(Hwang *et al.*, 2012, 2020c). 다각상 절리는 열수변질로 인해 유착된 변질대를 형성하고 있는데(그림 3e), 이는 돔의 내인성 성장으로 인해 절리가 장기간 열수통로 역할을 했던 것을 암시한다. 열수 공급원은 돔 내부에 갇힌 마그마성 휘발성물질이 비폭발성 변질작용을 돕기 위한 충분한 내부 휘발성물질로 작용할 수 있다고 본다.

이 용암돔 표면의 침식은 최고 1 m 깊이, 수십 m 간격의 실개천(rill)을 형성한다. 이 용암돔의 남서측 기저 부분에서 용암류를 공급했던 우곡(gully)에 의해 이의 남서측이 뚫려 있다(그림 2). 그리고 북측 허리 부분에서도 아마도 용암류가 터져나왔던 화구로 보이는 불규칙한 지형을 형성하고 있다. 원래 용암돔의 바깥쪽 사면은 대개 치밀한 용암으로 이루어지지만, 이들의 표면 피각(carapace)으로부터 떨어져 나온 용암 조각들이 험령하게 덮여있어(그림 3f) 실

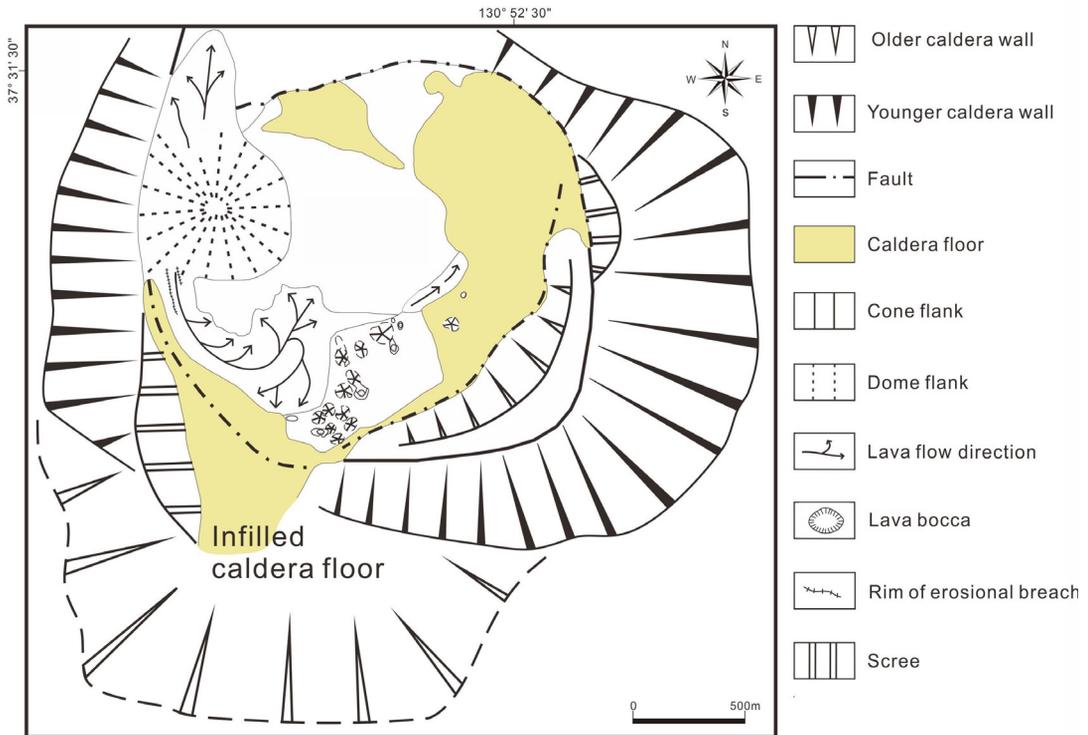


Fig. 2. Schematic map of the Nari caldera region summarizing the main structural and morphological features of the calderas.

제로 용암 자체를 관찰하기란 쉽지 않다. 이 용암돔의 사면은 실개천이 만들어지고, 돔에서 떨어져 나온 용암편들이 쓸려 내려와 실개천 아래의 좁은 구역에 일반적으로 작은 선상지로 퇴적되어, 돔의 기저를 불규칙하게 감싸는 둥근 돔 앞치마(dome apron)를 형성하기도 한다.

3.2.2 용암류

용암류는 식생과 풍화도의 차이에 의해 돔의 남

서측 기저부에서 뺏어나온 선기 용암류와 남부 분석층의 한 유출구(bocca)에서 뺏어나온 후기 용암류가 있다.

선기 용암류는 가장 길며(1.4 km) 용암돔의 남서쪽 기저에 있는 추정 유출구에서 나왔던 것으로 보인다. 돔의 남서측에서 흘러나오다가 동쪽을 향해 흘러가면서 여러 가닥으로 갈라졌으며, 돔의 기저에서 구불구불하게 약 1.4 km 뺏어 나간다(그림 2). 이 용암류는 남서측 용암돔에서 남쪽으로 뺏는 깊은 우

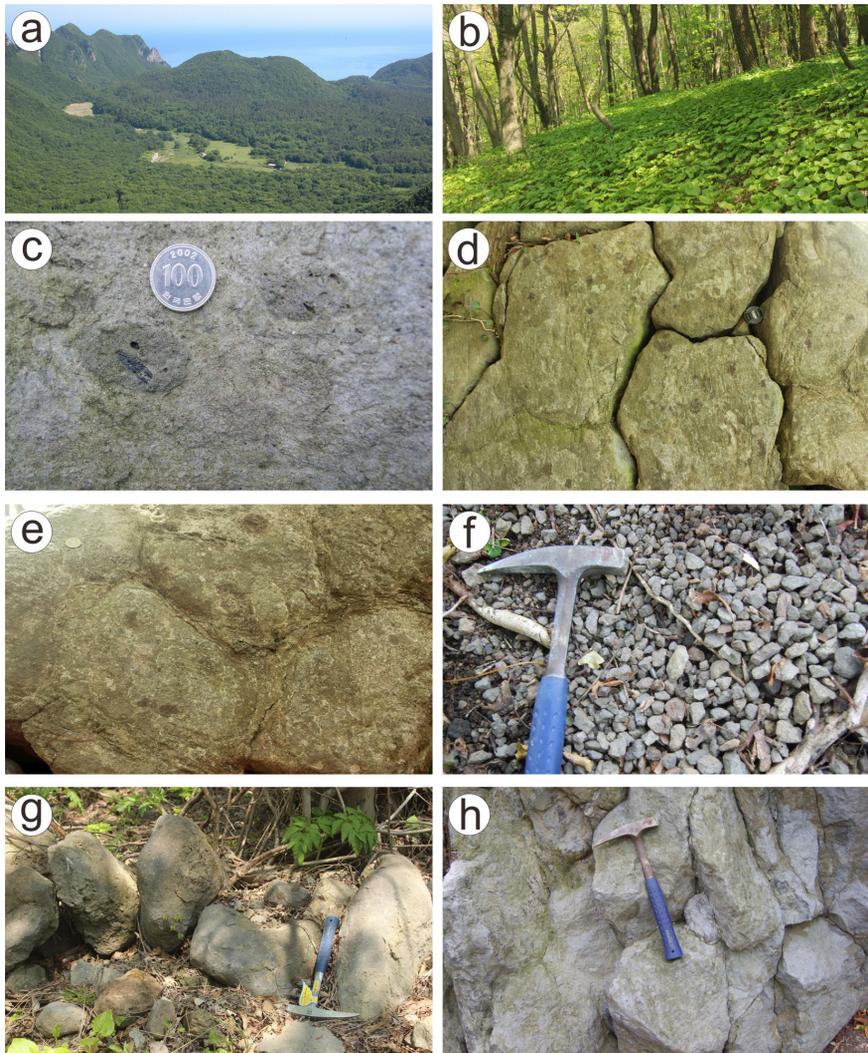


Fig. 3. Typical exposures of the volcanic rocks in Nari caldera. (a) Overview of the Nari caldera complex, showing Alalong lava dome and earlier lava flow northward; (b) A part of scoria conelet in southern scoria zone; (c) The lava dome capturing a few of vesicular scoria; (d) Polygonally joints in the lava dome; (e) Alteration zones along primary polygonal joints; (f) Some lava rubbles that washout the slope of lava dome; (g) Blocky lava surface of earlier lava flow; (h) Jointed lava surface with no vegetation in later lava flow.

곡과 연결되어 있는데, 이 우곡은 용암이 흘러내린 채널 역할을 했던 것으로 생각된다. 따라서 용암돔의 남서측의 기저 근처가 화구 지역으로 추적할 수 있다. 이 용암류는 표면에 풍화토가 축적되고 식생이 무성하므로 표면 조식을 쉽게 인지할 수 없지만, 암괴상 용암(blocky lava)의 잔존물을 여러 곳에 보존하고 있다(그림 3g). 따라서 이러한 풍화토와 무성한 식생은 이 용암류가 남부 분석층의 유출구에서 나온 것보다 먼저 분출된 것으로 보인다. 이 용암류에서의 굴곡진 우곡은 여러 가닥으로 갈라진 용암류의 가닥을 반영하는 것으로 보인다(그림 2).

후기 용암류는 남부 분석층 북동측의 한 유출구에서 흘러나온 용암류이다. 이 용암류에서 하류로의 변화는 용암의 기저 접촉부의 자세에 의해 표시되며, 이는 용암류 기저에 있는 분석층 상단과 일치하게 된다. 이러한 변화로, 용암류의 측방은 하류로 가면서 제약울 덜 받아, 용암류가 사면을 따라 다소이지만 점점 넓어진다. 이 용암류는 표면에서 절리를 따라 자라는 나무 외에 식생과 풍화토가 거의 없고, 냉각절리와 같은 표면 조식을 그대로 보존하고 있다(그림 3h). 따라서 이 용암류는 돔에서 나온 선기 용암류보다 훨씬 후기인 것으로 판단된다.

3.2.3 용암쿨리

용암쿨리는 돔 북측의 허리 부분에서 흘러나와 북쪽을 향해 흘러내려 400 m 길이의 용암혀를 형성한다. 이 용암은 다수의 흐름단위로 구성되며, 상부(후기) 단위는 일반적으로 하위 단위의 내측에서 끝나고, 돔을 향해 마치 벤치 모양의 계단식으로 위로 올라가는 표면을 형성한다. 그런데 하부 단위는 돔에서 더 멀리 떨어져 진행된 관계로 아마도 선기 용암류에 해당될 수도 있다. 개별 흐름단위는 두께가 약 3~5 m이다. 이들 단위는 노출이 좋지 않지만, 상단에 뗏목처럼 떠내려온 분석 물질로 잘게 각력화된 양상을 보여준다.

용암돔의 북측 허리 부분에는 움푹한 저지가 수 m 깊이의 불규칙한 사발 모양으로 형성되어 화구로 추정되며, 이곳으로부터 용암이 터져 나와 북쪽으로 흘러내린 것 같다.

돔 정상부 남측에서도 용암쿨리가 남쪽으로 짧게 흘러나와 불규칙한 지형을 형성한다. 이 때문에 돔 남측의 허리 부분이 불룩하고 정상부가 가라앉아 알

봉이 소봉(538.0 m)과 동봉(515.4 m)으로 갈라졌으며, 서봉 동측부의 용암 외피(crust)가 거의 남북 방향으로 찢어져 내려앉음으로써 그 내부를 드러냈다(Hwang *et al.*, 2020b).

3.2.4 용암 유출구

유출구는 이 용암류 서쪽으로 떨어져 분석층 사면에 너비 약 6 m의 작은 침강지(구멍이)가 있고 주위에 동심원상의 용암으로 보존되어 있다. 이 침강지에는 각력화된 표피(rind)를 가진 수 m 크기의 용암 거력(boulder)들이 흩어져 있어 아마도 화구, 즉 유출구임을 나타낸다. 주변 분석층과의 수직 접촉은 용암 내에 드물게 형성된 동심원상 엽리대와 평행하며, 상어 이빨 모양의 조식을 가지는 전단대로 표시된다. 유출구의 아래쪽 사면 끝 부근에서는 수직 접촉이 완화되어 안쪽으로 가파른 경사(약 50°~80°)를 나타낸다. 유출구에서 바깥으로 향한 용암은 용암의 기저 접촉부의 자세에 의해 표시되며, 이는 유출구 상단에서 약 3 m 아래에 있는 분석층의 표면과 일치한다. 이 유출구로부터 용암이 동쪽으로 흘러내려 후기 용암류로 공급되었다.

이외에 남쪽에서도 몇몇 유출구가 관찰되는데, 주로 분석층의 측면에서 작은 침강지(폭 약 5~10 m)에 의해 그 위치가 표시된다. 이들 침강지에는 수 m 두께의 용암과 수 m 크기의 용암 거력들이 흩어져 있는데, 이는 용암 통로를 기록하는 것으로 유추한다. 그러나 유출구 바깥으로 향한 용암 외에 주위에선 큰 규모의 용암류가 관찰되지 않는다.

4. Ar-Ar 연대측정

4.1 시료채취

야외에서 층서에 따라 형태, 암질과 내부구조 등을 기록하였으며, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{A}$ 동위원소 연대측정을 위해 신선하고 적절한 시료를 채취하였다. 시료는 나리 분석층의 2개 지점, 알봉조면안산암의 4개 지점에서 수집하였다.

나리분석층 시료는 남부 분석층에서 1개 지점(UL 26), 중부 분석층에서 1개 지점(UL 587)이 포함된다(그림 2). 용암 시료는 층서와 위치에 따라 1개씩 채취하였다. 즉 이들은 용암돔(UL 23), 후기 용암류(UL 17), 용암쿨리(UL 24)와 유출구(UL 567)를 포함한다(그림 2).

Table 1. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating data of the volcanic rocks in Nari caldera.

Sample Information			Results			Plateau					
Sample Name	Experiment Type	Material	Age Type	Age Interpretation	Age $\pm 2\sigma$ (i) $\pm 2\sigma$ (f)	^{39}Ar K/Ca $\pm 2\sigma$	MS WD	P	n	N	
UL-26	Incremental Heating	Ground mass	Mini Plateau	Crystallization Age	25.8 ± 2.1 ka ± 25 ka	33%	3.113 ± 0.123	0.93	43%	4	22
UL-587	Incremental Heating	Ground mass	Mini Plateau	Crystallization Age	9.2 ± 4.9 ka ± 49 ka	21%	2.104 ± 0.319	0.08	97%	4	22
UL-17	Incremental Heating	Ground mass	Plateau	Crystallization Age	8.3 ± 4.9 ka ± 49 ka	68%	1.232 ± 0.412	0.32	100%	18	22
UL-23	Incremental Heating	Ground mass	Plateau	Crystallization Age	7.9 ± 2.8 ka ± 29 ka	86%	1.783 ± 0.462	0.60	89%	18	22
UL-24	Incremental Heating	Ground mass	Plateau	Crystallization Age	5.8 ± 1.9 ka ± 19 ka	94%	1.817 ± 0.674	1.16	28%	19	22
UL-567	Incremental Heating	Ground mass	Plateau	Crystallization Age	7.8 ± 2.4 ka ± 25 ka	76%	1.436 ± 0.401	0.59	90%	18	22

4.2 시료준비 및 연대측정

연대 결정에서 시료를 준비하기 위해 다양한 방법을 적용한다. 신선한 세립질 화산암은 석기 부분을 5 mm 직경의 다이아몬드 드릴비트로 코어를 만들고, 그리고 100~300 mg의 원판(disk)으로 자른다. 그 후에 산(HNO_3 , HF) 세척, 초음파 세척, 건조한다. 시료는 미국 오레곤주립대학교 TGIRA 실험원자에서 미지 시료의 연대에 대해 중성자를 1MW로 방사된다. 이때 중성자 흐름은 표준시료로 모니터링한다.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정은 미국 오레곤주립대학 아르곤지연대실험실(Argon Geochronology Lab)에서 석기에 대해 불활성기체질량분석기(Noble Gas Mass Spectrometer)로 이루어졌다. 이 분석기는 모든 금속추출시스템을 갖추고 있다. 증분식가열(Incremental heating)을 위해, 이 시스템은 Heine 저바닥값의 이중진공 저항로가 장착되고 적외선열측정 가스추출시스템을 갖춘 Merchantek 융합 CO_2 연속불꽃 레이저를 장착하고 있다. 이러한 분석시스템을 이용하여 실험유형(experimental type)은 증분식가열로 진행되었고 대량레이저가열(bulk laser heating) 추출법으로 분석되었다. 레이저시스템을 이용한 실험을 위해서, 방사되는 석기 시료는 <50 mg 정도를 피트/팬에 담아 Cu-관 속에 실렸고, 이때 이 재료는 CO_2 레이저 파장에 투과되는 시료챔버 내로 펌프되었다. CO_2 레이저는 모든 광물과 유리질에 의한 10.6 μm 에너지의 흡수율이 높기 때문에 증분식가열에 가장 흔히 쓰인다. 여기서 생성된 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 자료는 석

기 알리쿼트(aliquot)에서 가스를 추출하는 것을 포함한다. 실험실에서는 증분식가열을 하는 동안 Ar 동위원소 특성에 초점을 맞추고 겹쳐 온도의 대략적인 대용물로서 레이저파워 레벨을 이용하여 각 증분마다 점진적으로 더 높은 레이저파워를 적용함으로써 단계적으로 가스를 추출하였다(Schaen *et al.*, 2020). 온도는 적외선 광학 열측정기로 모니터링되고 컴퓨터에 의한 레이저파워로 조정되었다.

이 결과로부터 절대연대는 ArArCALC v2.7.0 (beta version) 전산프로그램(Koppers, 2002)을 사용하여 계산되었다.

4.3 결과

측정된 시료에 대한 Ar 동위원소비의 분석치는 정리하여 표 1에 나타났다. 이 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료는 모두 각 시료의 석기에 대한 결정화 연대를 나타내고 정등시선(normal isochron) 연대와 역등시선(inverse isochron) 연대도 제공하고 있지만, 해석에서는 과잉 아르곤의 영향을 배제할 수 있는 플래토(plateau) 연대 혹은 미니플래토(mini-plateau) 연대를 이용하였다. 최근 연구에 의하면 기본적으로 플래토 연대는 방출된 ^{39}Ar 가 50% 이상으로 구성되거나 미니플래토 연대는 ^{39}Ar 가 50% 미만인 것을 고려한다(Schaen *et al.*, 2020).

각 시료에 대한 석기들은 증분식가열에 따른 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 스펙트럼으로부터 얻어졌으며 이들은 다 이아그램에서 체계적인 변화를 보여주며 시료별로

일정한 플래토 연대 혹은 미니플래토 연대를 나타낸다(그림 4). 빠르게 냉각되고 변질되지 않은 화산암에서 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 흔히 분출시기로 해석한다(Schaen *et al.*, 2020). 고온에서 암석학적 평형을 유지했던 시료에서 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 그 시료가 냉각됐을 때 열유도화산의 중단을 나타낸다. 일반적으로 검체의 폐쇄계의 유효성은 중분식 가열실험을 통해 구체화된다. 이때 Ar은 저온에서 고온으로 단계적으로 가스가 제거된다. 그 다음 각 단계에서 나온 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 연대 스펙트럼 다이어그램에 표시되며, 이를 통해 연대 플래토로 알려진 일치성의 통계적 평가가 가능해지는 것이다.

나리분석층은 남부 분석층의 소분석구(UL-26)에서 25.8 ± 2.1 ka 미니플래토 연대를 나타내고(그림 4a) 중부 분석층(UL-587)에서 9.2 ± 4.9 ka 미니플래토

연대를 보여준다(그림 4b). 따라서 이러한 연대 차이는 남부 분석층이 훨씬 더 먼저 분출되었고 중부 분석층이 더 나중에 분출되었다는 다운회 분출의 가능성을 시사한다.

알봉조면안산암은 용암돔(UL-23)에서 7.9 ± 2.8 ka 플래토 연대를 보여주며(그림 4c) 후기 용암류(UL-17)에서 8.3 ± 4.9 ka 플래토 연대를 나타내고(그림 4d) 용암쿨리(UL-24)에서 5.8 ± 1.9 ka 플래토 연대를 지시한다(그림 4e). 한편 남부 분석층을 뚫은 유출구의 용암(UL-567)에서 7.8 ± 2.4 ka 플래토 연대를 얻었다(그림 4f). 따라서 알봉조면안산암은 대략 $8.3 \sim 5.8$ ka 사이에 분출되었음을 보여주며 각기 다른 시기에 다양한 용암 형태를 형성하였다. 이 연대 범위는 알봉조면안산암이 $25.8 \sim 9.2$ ka 범위의 나리분석층보다 후기에 분출되었음을 나타낸다. 한편 점성이

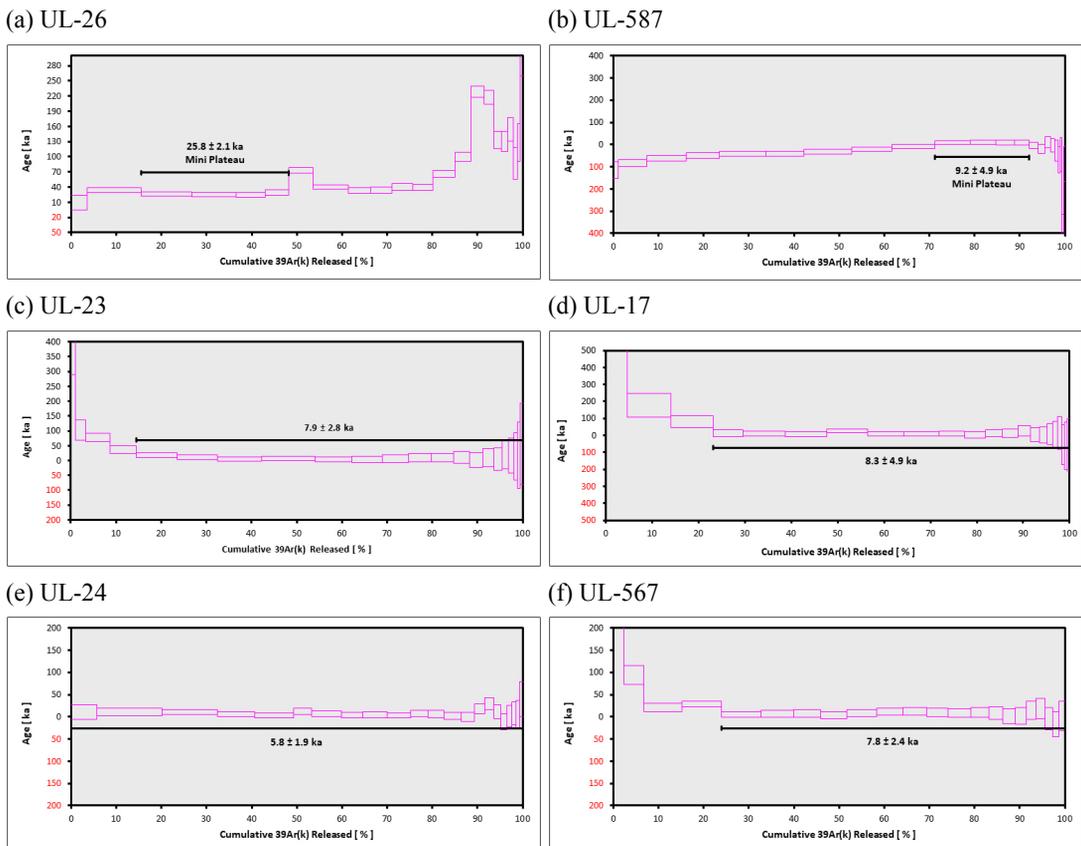


Fig. 4. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spectrum diagrams released from groundmass of the volcanic rocks in the Nari caldera. A Plateau consists of 50% or more of the ^{39}Ar released, and a Mini-Plateau is considered anything less than 50% of the ^{39}Ar released (Schaen *et al.*, 2020). Standard initial $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio = 298.56 ± 0.31 (SD) for samples, but excess initial $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio = 311.18 ± 5.17 (SD) for UL-17.

낮은 용암류가 가정 먼저 분출하였으며 이후에 용암돔이 형성되었고 이의 북측 허리 부분이 터져 북쪽으로 용암쿨리를 형성했음을 지지해준다.

5. 토 의

말잔등응회암은 탄화목의 ^{14}C 연대에 의하면 과거 18.8~5.6 ka B.P. 동안 4차례에 걸친 폭발성 분출로 4개 멤버가 퇴적되었다고 보고되었다(Kim *et al.*, 2014). 이들 측정연대에 따르면 나리분석층과 알봉조면안산암은 말잔등응회암의 4개 멤버와 교호해야 하지만 그런 양상은 나타나지 않으며 말잔등응회암 위에 차례로 놓일 뿐이다. 그렇다면 이 문제는 석기의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 측정과 탄화목의 ^{14}C 측정으로 인한 서로 다른 대상물질과 측정법의 차이로 부터 발생하는 것이며 이로부터 그 해결책을 찾아야만 될 것으로 보인다.

아무튼, 이 연구를 통해 나온 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 측정연대는 울릉도에서 다른 암층에서의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 측정연대와 비교하기에 적합할 뿐만 아니라, 적어도 절대연대로서 문제가 있더라도 상대연대로서 충분한 역할을 한다고 본다. 따라서 이번 연구의 주제로서 나리분석층과 알봉조면안산암에 대한 화산작용 시기와 칼데라 내의 배관체계를 확인할 수 있다.

5.1 칼데라 후의 화산작용 시기

앞서 언급한 바와 같이, 나리분지는 울릉화산 내에 독특하게 만들어진 소규모 칼데라이다. 나리 칼데라 내에 나타나는 화산암류는 조성이 모두 조면안산암질로서 칼데라 일원에서 조면안산암질 화산활동이 활발하였음을 지시한다.

나리 칼데라 내에서 화산작용 시기의 하한과 상한에 대한 직접적인 정보를 제공할 수 있는 나리분석층의 하부와 알봉조면안산암의 용암쿨리를 대상으로 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정을 실시하였다. 측정결과, 나리분석층 하부는 약 25.8 ka, 그리고 알봉조면안산암의 용암쿨리는 5.8 ka의 연대가 구해졌다. 화산암에서 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대는 빠르게 냉각되고 변질되지 않았다면 흔히 분출시기로 해석한다(Schaen *et al.*, 2020). 나리분석층 하부의 연대측정결과가 최고연대로서 자료가 충분하다고 할 수 없지만, 현재로서는 칼데라 내의 화산작용이 25.8 ka 이전에 시작

되었다고 할 수밖에 없다. 그러나 용암쿨리는 적어도 알봉조면안산암의 용암류로써 알봉 용암돔을 직접 피복하고 있음을 감안하면 적어도 5.8 ka까지 화산작용이 계속된 것으로 판단된다.

결과를 종합하면, 칼데라 내에서 화산작용의 시작 연대는 대체로 25.8 ka 이전이며 5.8 ka까지 진행된 것으로 판단된다. 나리분석층이 대체로 25.8~9.2 ka 범위에 분출하였고 알봉조면안산암이 대략 8.3~5.8 ka 사이에 활동하였으며, 이 연대는 층서관계와 일치한다.

5.2 칼데라 후의 분출유형

나리분석층에 대해 유추된 분출유형은 깊게 절개되어 잘 노출되는 노두가 없기에 지표에 쌓인 분출물에 의해 유추할 수밖에 없다. 특히 남부 분석층은 스트롬볼리안 분출의 초기 단계로 천천히 상승하는 마그마 기둥의 상단을 통해 기포가 터지면서 생기는 조립 분출물의 낮고 짧은 폭발을 일으켰고, 뒤이어 중부 분석층은 스트롬볼리안 활동의 후기 단계로 나타나는 잘 파쇄되고 다공상 라필리와 화산탄의 더 높은 분연주를 형성하는 더 활기찬 폭발양상을 가졌던 것으로 보인다. 두 분석층 간의 식생 정도가 상당히 큰 것으로 보는데, 이는 아마도 다운회 분출을 나타내는 것으로 해석할 수도 있다. 또 다른 이유로 오래된 소분석구 주위의 에이프런 퇴적물에는 비교적 더 많은 토양 발달을 꼽을 수 있다. 요컨대 이러한 이유들은 나리분석층이 다운회일 가능성을 뒷받침하는 것으로 생각한다. 북부 분석층은 중부 분석층의 원거리상으로 더 맹렬한 스트롬볼리안 테프라 강하층의 성격을 나타내지만, 침식으로 인해 자세하게 언급할 수 없다.

용암류의 흐름 유형은 용암돔 혹은 분석구 측면의 유출구에서 비교적 낮은 배출률로 터져 나왔던 것으로 보인다. 용암돔 남서측에서 나온 용암류는 비교적 얇지만, 더 선기에 더 멀리 퍼졌고 용암류 형태가 압괴상 표면과 가파른 끝면을 가진다. 이 용암류는 용암돔이 형성되기 전 혹은 초기에 칼데라 단열대의 틈으로부터 더 선기에 분출된 것으로 보인다. 왜냐하면 용암 표면은 상대적으로 풍화에 의한 토양생성으로 인해 더 왕성한 식생을 암시하기 때문이다. 비교적 얇은 두께는 이러한 작은 부피의 화산에서 단순히 더 짧은 분류 시간과 관련이 있을 수 있

으며, 더 적은 용암 단위 및 더 적은 확장의 원인이 될 수 있다.

남부 분석층의 북동부 유출구에서 나온 용암류는 비교적 두껍지만, 8.3 ka에 분출하여 동쪽으로 퍼졌고 용암류 형태가 거칠은 표면과 가파른 측면 및 끝면을 나타낸다. 용암 표면은 상대적으로 풍화에 의한 토양생성의 부족으로 적은 식생으로 더 후기에 분출되었음을 반영한다. 남부 분석층에는 이외에 유출구와 함께 용암이 묻혀 있는 곳이 여러 군데 있는데, 상대적 시기가 모호하나 대개 7.8 ka 즈음에 일어났다. 그리고 이후에 용암돔 북측의 유출구에서는 5.8 ka에 용암이 분출하여 북쪽으로 흘러 혀 모양의 용암쿨리를 형성하였다. 이 쿨리 형태는 암괴상 표면, 포개진 흐름 단위와 가파른 끝면을 나타낸다. 그러나 하부 흐름단위는 아마도 선기 용암류에 해당될 수도 있다.

5.3 칼데라 후의 배관체계

야외관계를 볼 때 칼데라 내에서 화구들이 칼데라 단열대의 트렌드와 일치한다는 것을 주목할 수 있다. 용암돔에서의 남쪽 용암을 공급했던 유출구는 아마도 칼데라 단열대의 북서측 틈으로 추정되었다. 그리고 용암돔에서의 화구는 돔 중심부에 있을 것이고 용암쿨리의 유출구는 돔 북측 허리에 있는 것으로 보았다. 두 화구도 칼데라 단열대의 북서측 틈에 가깝다고 할 수 있다. 만약 이들 화구가 암맥으로 심부에서 연결된다면, 그 방향은 그 지역의 구조적인 것들의 상당 부분과 평행할 것이다. 따라서 이들은 나리 칼데라 함몰에 따른 환상단층 제어와 관련되는 것으로 볼 수 있다. 이곳에서 분출은 폭발성 활동이 먼저 일어나고 뒤따라 분류성 활동이 일어났다(Hwang *et al.*, 2020c).

남부 분석층에서의 주요 외관 화구 지역(소분석구, 용암 유출구)는, 소분석구들을 둘러싸면서 덮는 얇은 에이프런 퇴적층이 이들에 대해 직접 매핑을 불가능하게 하지만, 역시 대략적으로 하위의 암층에서의 기존 칼데라 단열대와 관련될 수 있는 WSW 방향의 호상 배열을 보여준다(그림 2). 이곳에서 5개 용암 유출구의 배열도 소분석구들의 배열과 거의 평행함을 보여준다(그림 2). 이러한 화구들의 배열은 북서측 화구들과 연결한다면 이미 존재하는 선형 칼데라 함몰에 따른 1차 환상단층(Hwang *et al.*, 2020a)

의 일부와 거의 일치한다고 볼 수 있다. 나리 칼데라에서 이런 양상은 상당히 젊은 예라고 생각할 수 있다. 따라서 화구들은 심부에서 환상단층이 호스팅하는 환상암맥에서 방출을 나타내는 것임을 암시한다.

이러한 배열의 해석은 심부 방향성을 가진 주 암맥에 의해 공급되었다는 것이지만, 이는 천부에서 기존 환상단층을 지배하는 칼데라 함몰을 나타내는 것이다. 이러한 해석은 주어진 배열을 따르는 화구들이 거의 동시에 발생했다는 것을 의미할 것이다. 불행하게도, 측정연대는 이 가설을 시험하기에 충분한 분석을 하지 못했지만, 다만 주어진 배열상에 있는 소화산이 1000년 분의 몇 10년의 기간에 걸쳐 분리되는 단성 사건으로만 형성되었다고 추정할 수 있을 것이다. 또한, 화산 분출물은 서로 겹치지 않기 때문에 상대적인 시기를 시험하기 위해 층서 관계를 사용하기도 불가능하다. 따라서 우리는 각 화산이 더 긴 활동 맥동 내에서 일시적으로 분리된 마그마 사건을 나타내는 해석을 선호할 수밖에 없다.

여러 연구에 따르면 화산시대에서의 암맥 전파는 대형 순상화산이나 성층화산의 측면에서 흔히 관찰되는 것처럼 수평이 아니라 주로 수직을 이룬다는 것이다(예: Delaney and Gartner, 1997; Kuntz *et al.*, 2002). 나리 칼데라에서도 직접 관찰할 수 있는 공급 암맥이 노출되지 않음에도 불구하고 이러한 판단을 지지한다. 이 화산은 지형적으로 높은 지역에서 분출했다. 나리 칼데라에서는 위에서 언급한 바와 같이 1차 칼데라의 환상단층에 대체로 평행한 두 개의 잠재적 화구 배열을 하고 있다. 한 배열은 작은 용암 유출구들과 남쪽 용암류를 공급했던 추정 유출구에 의해 형성되는 외측 배열이며, 다른 한 배열은 용암돔의 중심화구와 소분석구들을 공급했던 화구들에 의해 형성되는 내측 배열이다. 이 두 배열을 따르는 지형과 비교되는 화구 위치에서, 칼데라의 외측 또는 내측으로 관련 암맥이 나타나지 않는 지질매핑은 공급 암맥이 천부에서 측방으로 전파되는 중요한 구성요소를 가지고 있지 않다는 것을 암시한다. 역으로 그렇지 않다면 그 암맥은 바로 인접한 하부 지역에 분출했다는 것을 암시한다. 마찬가지로 수직으로 상승하는 암맥은 지표 근처에서 화도로 연결될 만큼 짧았을 것이다.

만약 위쪽으로 전달되는 암맥이 먼저 위쪽으로 동근 모양을 가지고 있다면, 측방으로 암맥 길이가

지표면과 교차하는 곳에서의 길이보다 심도에 따라 증가한다고 보는 것이 타당하다. 정량적으로 평가하기는 어렵지만, 이 길이 증가는 실험실에서 암맥의 모양에 기초하여 두세 개의 인자가 있을 수 있다(예: Menand and Tait, 2002). 주인암에서의 수직적 변화는 단순하기는커녕 복잡하겠으나 암맥의 끝이 단순한 표면이 아닌 불규칙한 “손가락 모양”으로 위쪽으로 연결될 수 있다는 점에 유의할 필요가 있다. 나리 칼데라에서 공급 암맥이 심부에서 1~2 km의 길이에 있다고 가정할 때, 우리는 추정된 암맥 길이가 화산에 공급하기 위해 출조되는 마그마챔버 공급지역의 특정 심도와 길이가 일치한다고 본다. 그러나 이 경계는 심도에 따른 공급암맥 크기에 대한 지식 없이는 직접 정량화할 수 없다.

울릉화산이 하부에서 순상화산에 가까운 것(기저 약 30 km)은 이 지역에서 그 아래의 암석권 맨틀 공급지가 주변 암석보다 더 부분용융되기 쉽게 하는 약간 다른 조성을 가졌을 가능성을 암시한다. 따라서 화산작용이 장기간에 걸쳐 일어날 수 있는 곳을 시사한다.

6. 결론

울릉화산에서 나리 칼데라 내의 조면안산암질 분출물인 나리분석층과 알봉조면안산암에 대한 야외 관계를 분석하고 이들의 분출 시기를 밝히고 칼데라 후의 지하 마그마 배관체계를 해석하였다.

나리분석층은 남부, 중부 및 북부 분석층으로 구분된다. 남부 분석층은 하부상이고 여러 소분석구를 포함하며, 중부 분석층은 상부상이고 북부 분석층은 중부 분석층의 원거리대에 해당한다. 알봉조면안산암은 선기 및 후기 용암류, 용암돔과 용암쿨리의 형태로 구성되며 남부 분석층에서 5개의 소규모 유출구 용암을 포함한다.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 결과, 남부 분석층의 소분석구에서 25.8 ka 연대가 나왔고 중부 분석층에서 9.2 ka 연대를 얻었다. 따라서 이러한 연대 차이는 다운회 분출의 가능성을 시사하는 것 같다. 알봉조면안산암은 후기 용암류에서 8.3 ka 연대로 도출되었고 용암돔에서 7.9 ka 연대를 얻었으며 용암쿨리에서 5.8 ka 연대로 측정되었다. 한편 남부 분석층에서의 유출구 용암에서 7.8 ka 연대를 얻었다. 따라서 나리

분석층이 대체로 25.8 ka와 9.2 ka 범위에 분출하였고 알봉조면안산암이 8.3~5.8 ka 사이에 분출되었다. 이상의 결과를 종합하면, 칼데라 내에서 화산작용의 시작 연대는 대체로 25.8 ka 이전이며 5.8 ka까지 진행된 것으로 판단된다.

남부 분석층에서의 소분석구는 대체로 호상 배열을 형성하며, 5개의 용암 유출구의 배열도 소분석구와 거의 평행한 배열을 한다. 이러한 화구들의 배열은 북서측 화구들과 연결한다면 이미 존재하는 선형 칼데라 함몰에 따른 환상단층과 관련된다. 따라서 화구들은 환상단층이 호스팅하는 암맥에서 방출을 나타낸다. 이러한 배열의 해석은 심부에서 방향성을 가진 환상암맥에 의해 공급되었다는 것이지만, 이는 천부에서 기존 환상단층을 지배하는 칼데라 함몰을 나타내는 것이다.

감사의 글

이 연구는 2018년 기상청 기상·지진 See-At 기술개발연구의 일환과 2016년도 교육부 재원에 의한 한국연구재단의 기초연구사업으로 지원되었다. 미국 오레곤주립대학교 Daniel P. Miggins 박사, Anthony Koppers 교수, Robert Duncan 명예교수는 이 연구의 기본 자료로서 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정을 수행하였고 분석결과를 함께 논의해 주었다. 한국기초과학지원연구원 김정민 박사님과 익명 심사자의 의견 및 제안은 논문을 개선하는 데 큰 도움을 주었다. 안동대 한혜원과 오채영은 그림 작업을 수행하였다.

REFERENCES

- Connor, C.B., Stamatakos, J.A., Ferrill, D.A., Hill, B.E., Ofoegbu, G.I., Conway, F.M., Sagar, B. and Trapp, J., 2000, Geologic factors controlling patters of small-volume basaltic volcanism: Application to a volcanic hazards assessment at Yucca Mountain, Nevada. *Journal of Geophysical Research*, 105, 417-432.
- Delaney, P.T. and Gartner, A.E., 1997, Physical processes of shallow mafic dike emplacement near the San Rafael Swell, Utah. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 1177-1192.
- Doubik, P. and Hill, B.E., 1999, Magmatic and hydromagmatic conduit development during the 1975 Tolbachik eruption, Kamchatka, with implications for hazards assessment at Yucca Mountain, NV. *Journal of Volcanology*

- and Geothermal Research, 91, 43-64.
- Gaffney, E.S. and Damjanac, B., 2006, Localization of volcanic activity: topographic effects on dike propagation, eruption and conduit formation. *Geophysical Research Letters*, 33, <https://doi.org/10.1029/2006GL026852>.
- Hwang, S.K., Hwang, J.H. and Kwon, C.W., 2012, Geological report of the Ulleungdo Sheet. Korea, Institute of Geoscience and Mineral Resources, 83 p.
- Hwang, S.K., Jeong, S.W., Son, Y.W. and Kang, J.-H., 2020a, Interpreting the geometry and multistage evolution of the Nari Caldera, Ulleung Island, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 56, 737-752 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Jo, I.H., 2014, Petrologic Evolution Processes of the Latest Volcanic Rocks in Ulleung Island, East Sea. *Journal of Geological Society of Korea*, 50, 343-363 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Kim, K.B., Son, Y.W. and Hyeon, H.W., 2020b, Interpretation of transition between explosive and effusive eruptions from microlite textural analyses in the Albong Lava Dome, Ulleung Island, Korea. *Economical and Environmental Geology*, 53, 553-564 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.-J. and Han, K.H., 2018, Interpretation of volcanic eruption types from granulometry and component analyses of the Maljandeung Tuff, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 54, 513-527 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.-J. and Oh, K.S., 2020c, The Latest Volcanism in Nari Caldera, Ulleung Island: Transition from Explosive to Effusive Eruption. *Journal of Geological Society of Korea*, 56, 539-553 (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 charcoals of the Nari Formation in Nari Caldera, Ulleung Island, Korea. *Geosciences Journal*, 16, 105-114.
- 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 intra-caldera pyroclastic sequence. *Bulletin of Volcanology*, 76, 802, DOI 10. <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0802-1>.
- Koppers, A.A.P., 2002, ArArCALC-Software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations. *Computers & Geosciences*, 28, 605-619, [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(01\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00095-4).
- Kuntz, M.A., Anderson, S.R., Champion, D.E., Lanphere, M.A., Grunwald, D.J., Link, P.K. and Mink, L.L., 2002, Tension cracks, eruptive fissures, dikes, and faults related to late Pleistocene- Holocene basaltic volcanism and implications for the distribution of hydraulic conductivity in the eastern Snake River Plain, Idaho. *Special Paper- Geological Society of America*, 353, 111-133.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B.A. and IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, 1986, Chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Machida, H. and Arai, F., 1983, Extensive ash falls in and around the Sea of Japan large late Quaternary eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 151-164.
- Menand, T. and Tait, S.R., 2002, The propagation of a buoyant liquid-filled fissure from a source under constant pressure: An experimental approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107, 2306, <https://doi.org/10.1029/2001JB000589>.
- 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.
- Schaen, A.J., Jicha, B.R., Hodges, K.V., Vermeesch, P., Stelten, M.E., Mercer, C.M., Phillips, D., Rivera, T.A., Jourdan, F., Matchan, E.L., Hemming, S.R., Morgan, L.E., Kelley, S.P., Cassata, W.S., Heizler, M.T., Vasconcelos, P.M., Benowitz, J.A., Koppers, A.A.P., Mark, D.F., Niespolo, E.M., Sprain, C.J., Hames, W.E., Kuiper, K.F., Turrin, B.D., Renne, P.R., Ross, J., Nomade, S., Guillou, H., Webb, L.E., Cohen, B.A., Calvert, A.T., Joyce, N., Ganerød, M., Wijbrans, J., Ishizuka, O., He, H., Ramirez, A., Pfänder, J.A., Lopez-Martínez, M., Qiu, H. and Singer, B.S., 2020, Interpreting and reporting $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronologic data. *GSA*, 133, 461-487, <https://doi.org/10.1130/B35560.1>.
- Shiihara, M., Torii, M., Okuno, M., Domitsu, H., Nakamura, T., Kim, K.H., Moriwaki, H. and Oda, M., 2011, Revised stratigraphy of Holocene tephra on Ulleung Island, South Korea, and possible correlatives for the U-Oki tephra. *Quaternary International*, 246, 222-232.
- Valentine, G.A. and Krogh, K.E.C., 2006, Emplacement of shallow dikes and sills beneath a small basaltic volcanic center: The role of preexisting structure (Paiute Ridge, southern Nevada, USA). *Earth Planetary and Science Letters*, 246, 217-230.
- Woods, A.W., Sparks, S., Bokhove, O., LeJune, A.-M., Connor, C.B. and Hill, B.E., 2002, Modeling magma-drift interaction at the proposed high level radioactive waste repository at Yucca Mountain, Nevada, USA. *Geophysical Research Letters*, 29.

Received : July 31, 2021

Revised : August 30, 2021

Accepted : September 10, 2021