

울릉도 나리 칼데라에서 최후기 화산작용: 폭발성에서 분류성 분출로 전환

황상구^{1,2,*} · 이소진² · 황영인³

¹안동대학교 지구환경과학과

²안동대학교 기초과학연구소

³한국표준과학연구원 안전측정연구센터

요 약

울릉도 나리 칼데라 내에 분포하는 나리분석층과 알봉조면안산암은 이 칼데라에서 최후기에 조면안산암질 마그마에 의해 폭발성에서 분류성으로의 분출 전환을 나타낸다. 이 전환은 분출되는 마그마의 탈기 양식의 변화에 관련되는 분출체제의 이동에 의한 것이다. 기공률 측정에 의하면, 나리분석층은 고다공상 분석(HVS), 중다공상 분석(MVS), 저다공상 분석(LVS), 치밀상 암괴 등의 암질로 분류되고, 알봉조면안산암은 시다공상 및 치밀상 용암으로 분류된다, 이들에 대한 조직관찰은 현저히 큰 기포, 두꺼운 유리벽, 불규칙한 기공 모양을 포함하며, 기포 합체 및 붕괴를 확인해주는 특징을 가진다. 이들 조직분석은 멜트가 다양한 정도의 가스배출을 겪었음을 보여준다. 이 조직적 자료에서 기공률의 감소 및 넓은 범위와 함께 기포붕괴의 큰 증가는 단한계에서 열린계 탈기작용으로의 전환을 보여준다. 즉 가스가 자유롭게 빠져나오면서 마그마 파쇄작용과 화도차단이 종식되었다. 그러나 휘발성물질의 용리는 화도계를 따라 상승하는 멜트 부분에서 계속되었고, 부분적으로 가스배출되는 조면안산암질 마그마의 돔 분출을 촉진시켰다. 결론적으로 나리분석층과 알봉용암층은 탈가스 패턴을 거치면서 조면안산암질 마그마에서 일련의 스트롬볼리언 폭발성 분출로 시작되어 분류성 분출로의 전환을 의미한다.

주요어: 울릉도, 나리분석층, 기공률, 조직분석, 탈기작용, 분출전환

Sang Koo Hwang, So Jin Lee and Young-In Hwang, 2020, The latest volcanism in Nari Caldera, Ulleung Island: Transition from explosive to effusive eruption. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 56, no. 5, p. 539-553

ABSTRACT: Nari Scoria Deposits and Albong Trachyandesite (lavas), distributed in Nari caldera, Ulleung Island, suggest the transition from explosive to effusive eruption in the latest trachyandesite magma, which is a shift in eruption regime linked to a change in the type of degassing of the erupted magma. According to vesicularity, the Nari Scoria Deposits have been classified into 4 main lithologies: highly vesicular scoria (HVS), moderately vesicular scoria (MVS), lowly vesicular scoria (LVS), and dense blocks, and the Albong Trachyandesite: incipiently vesicular and dense lavas. Their textural observation include significantly coarse bubbles, thick glass walls, and irregularly shaped vesicles, with features confirming bubble coalescence and collapse. These textural analyses show portions of the melt underwent highly variable degrees of outgassing. From the textural data, the decrease in and widening range of vesicularity, and the significant increase in bubble collapse shows the transition from the closed to open system degassing. Free escape of the gas caused a cessation of magma fragmentation and conduit blockage. However, exsolution of volatiles continued in parts of the melt ascending along the conduit system, and promoted extrusion of a dome of partially outgassed magma. In conclusion, the Nari scoria deposits and the Albong lavas reveal that their volcanism began explosively with a series of Strombolian eruption through the degassing pattern and have a transition to effusive eruption.

Key words: Ulleung Island, Nari Scoria deposits, vesicularity, textural analyses, degassing, transition eruption

(Sang Koo Hwang, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Sang Koo Hwang and So Jin Lee, Institute of Basic Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Young-In Hwang, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, Republic of Korea)

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

1. 서 언

최근 규장질 마그마에서 폭발성 및 분류성 화산 작용은 마그마 상승과 탈기작용에 관한 2개의 대조적인 기구에 의해 설명하고 있다(Massol and Jaupart, 1999; Melnik, 2000). 마그마 상승동안 탈기작용의 스타일은 조성상 유사한 마그마의 분출양식을 결정하는 데 큰 역할을 한다(예: Platz *et al.*, 2007; Constantini *et al.*, 2011). 폭발성 분출은 용리된 가스와 멜트의 빠른 상승이 후기 단계에 종종 불안정한 탈기작용으로 이어지는 닫힌계 탈기작용으로 특징지어진다(Mangan and Sisson, 2000; Mangan *et al.*, 2004). 분류성 분출은 열린계 탈기작용으로 특징지어지는 상승에 따른 것으로 화도에서 상승 중에 휘발성물질과 멜트가 분리되면 투과성 흐름과 그에 따른 화도벽으로의 가스 손실이 가능해진다(Jaupart and Allegre 1991). 따라서 폭발성-분류성 전환을 보여주는 분출작용은 닫힌계와 열린계 거동 간의 전환, 즉 용리된 가스상과 멜트상의 결합 대 분리를 이해하는 것이 매우 중요하다.

우리는 약 5,000년 전에 올롱도 나리 칼데라에서 일어난 마지막 분출동안에 위와 유사한 전환을 설명할 수 있다. 야외 및 실험실 자료에 따르면, 나리 칼데라에서 최후기 단계의 화산작용은 말산등응회암의 분출이 끝난 후 조면안산암질 마그마로부터 단기간에 폭발성 분출로부터 분류성 분출로 진행되었다. 이러한 전환은 탈기작용에 의해 닫힌계에서 열린계로 유일한 방향 전환에 의해 일어나는 분출체제의 근본적인 변화를 의미한다.

이 논문에서는 나리분석층과 알봉조면안산암(용암돔)을 중점적으로 다루게 되며 전자가 더 중요하다. 먼저 우리는 집중적인 현장조사를 바탕으로 분석층의 분산면적과 구성원의 암질을 기재하였다. 그리고 상승과 기포화 패턴을 결정하기 위해 분출물에 대한 기공률 측정과 현미경에서 조직분석을 수행하였다. 마지막으로, 분출에 대한 휘발성물질의 필요조건을 더 잘 이해하기 위해 폭발역학의 모델을 적용하였다. 이들 자료에 기초하면, 상승과 탈기동안 조면안산암질 마그마의 내부변화는 스트롬볼리언 분출에서 분류성 분출로의 분출체제의 발전과 관련되었다.

2. 연구배경

H₂O가 풍부한 규장질 마그마를 포함하는 분출은

일반적으로 다른 역동적 제어, 즉 맹렬한 폭발성 분출과 함께 분류성 돔 형성을 포함하는 일련의 유희를 따라 진행된다. 폭발성에서 분류성 분출로의 전환은 닫힌계에서 열린계 탈기작용으로의 변화와 관련이 있다(Jaupart and Allegre, 1991; Eichelberger, 1995). 이러한 변화는 먼저 첫 요인으로 마그마 상승률에 연결되는데, 이는 연구자들이 폭발성 분출에서 분류성 분출 간의 갑작스런 전환을 예상케 한다(Woods and Koyaguchi, 1994). 최근 분출에서 나온 자료에 의하면, 열린계와 닫힌계 거동 간의 전환은 매우 복잡하며 마그마의 과압(overpressure), 상승률, 점성, 기포화작용, 미정 정출 간의 비선형적인 피드백을 수반한다(Melnik and Sparks, 1999; Barmin *et al.*, 2002). 따라서 분출물의 조직은 특히 폭발성에서 분류성 거동으로 전환하는 동안 이러한 과정의 복잡성을 보존하기 마련이다.

용암돔에서 마그마 상승과 탈기작용의 복잡한 패턴은 분출물의 조직을 통해 연구할 수 있다. 쇄설물 형태, 밀도, 기공률, 기공크기분포(VSD), 기공모양과 미정함량은 정량화하여 실험자료와 비교할 수 있다(Gardner *et al.*, 1999; Mangan and Sisson, 2000; Klug *et al.*, 2002; Mangan *et al.*, 2004). 폭발성 분출물은 암질에 따라 몇 개 그룹으로 묶을 수 있으며, 이에 따라 궁극적으로 분출물에 대한 크기와 조직적 체계를 재구성할 수 있다. 박편으로부터 스캔한 이미지를 통해 미조직 특징을 정량화하고 다른 분출물 간에 기공률과 결정률을 비교할 수 있다. 기공크기분포는 분출시에 기포 생성, 성장, 합체 및 붕괴 과정의 상대적 시기를 검정하고, 마그마 탈기작용의 양상, 시기 및 정도가 분출거동에 어떤 영향을 미치는지를 이해하는데 이용될 수 있다(Polacci *et al.*, 2003). 기공크기분포는 흔히 지속적인 생성과 성장에서 발생하는 결정집단에서 보여주는 선형 트렌드를 따르지 않고(Cashman, 1992), 그 대신에 마그마 상승과 탈기작용의 복잡한 과정을 나타낸다(Toramaru, 1990; Klug and Cashman, 1996). 따라서 우리는 올롱도 최후기 화산작용에 초점을 맞추어 나리분석층의 쇄설물에서 나타나는 다양한 조직을 이용하여 닫힌계에서 열린계 탈기작용으로의 전환을 추적한다.

3. 올롱도의 지질과 최후기 분출물

올롱도 지질은 (1) 도동현무암질암류, (2) 올롱층

군, (3) 성인봉층군과 (4) 나리층군 순으로 구분되었다(그림 1; Hwang *et al.*, 2012). 도동현무암질암류는 용암 및 화산쇄설암의 연속체이다. 울릉층군은 화산여암층을 시작으로 하부 조면암질 용암류를 말하며, 성인봉층군은 응회암층으로부터 상부 조면암질 용암류와 포놀라이트질 화산돌을 말한다.

나리층군은 일련의 칼데라 분출작용으로 일어났는데, 이 섬의 중북부에 원형 저지인 나리 칼데라를 형성하였고 두꺼운 화성쇄설 연속체를 퇴적시켰다. 이 분출작용으로부터 강하회가 일본 중앙부에서 탐지되었다(Machida and Arai, 1983). 이 층군은 화학 조성, 구성원과 선후관계 및 분포에 따라 봉래분석층, 말잔등응회암, 나리분석층, 알봉조면안산암, 죽암분석층 등으로 구성된다(그림 1; Hwang *et al.*, 2012). 그 중에서 나리분석층과 알봉조면안산암은 나리 칼데라 내에서만 분포한다(그림 2).

나리 칼데라는 2 km 너비의 함몰 저지로서 말잔등응회암을 분출할 때 형성된 원통 모양의 함몰체의 지표 표현이다(그림 2, 3a; Hwang *et al.*, 2012). 말

잔등응회암은 약 19,000년 전부터 시작된 최대의 분출로, 약 5,600년 전까지 플리니언 및 수증기플리니언 분출에 의해 생산된 것이다(Kim *et al.*, 2014; Hwang *et al.*, 2018). 4개 에피소드의 폭발은 플리니언 및 수증기플리니언 강화퇴적층 및/혹은 화쇄류층의 연속체를 생성시켰다(Kim *et al.*, 2014; Hwang *et al.*, 2018). 과거에는 플리니언 분출작용이 알봉 돔보다 후기단계로 생각했던 적도 있었다(Harumoto, 1970).

이 칼데라 내의 북서쪽에는 고도 518 m의 알봉이 칼데라에서 마지막 화산작용에 의해 형성된 중앙화산이며 알봉 용암돔으로 솟아있다(그림 3a). 이 용암돔은 너비 720 m와 높이 120 m (동쪽) 내지 150 m (서쪽)의 돔 모양을 이룬다. 이 용암돔을 중심으로 대체로 분석층, 용암류, 층적층이 초승달 모양으로 둘러싸며 분포한다(그림 2). 그 중에서 나리분석층은 돔 동쪽에 앞치마 모양으로 둘러싸며 아마도 말잔등응회암을 덮는다. 용암돔에는 종종 분석(噴石, scoria)을 포획체로 발견할 수 있고(그림 3b) 다각상 절리를 관찰할 수 있다(그림 3c). 그래서 알봉에서

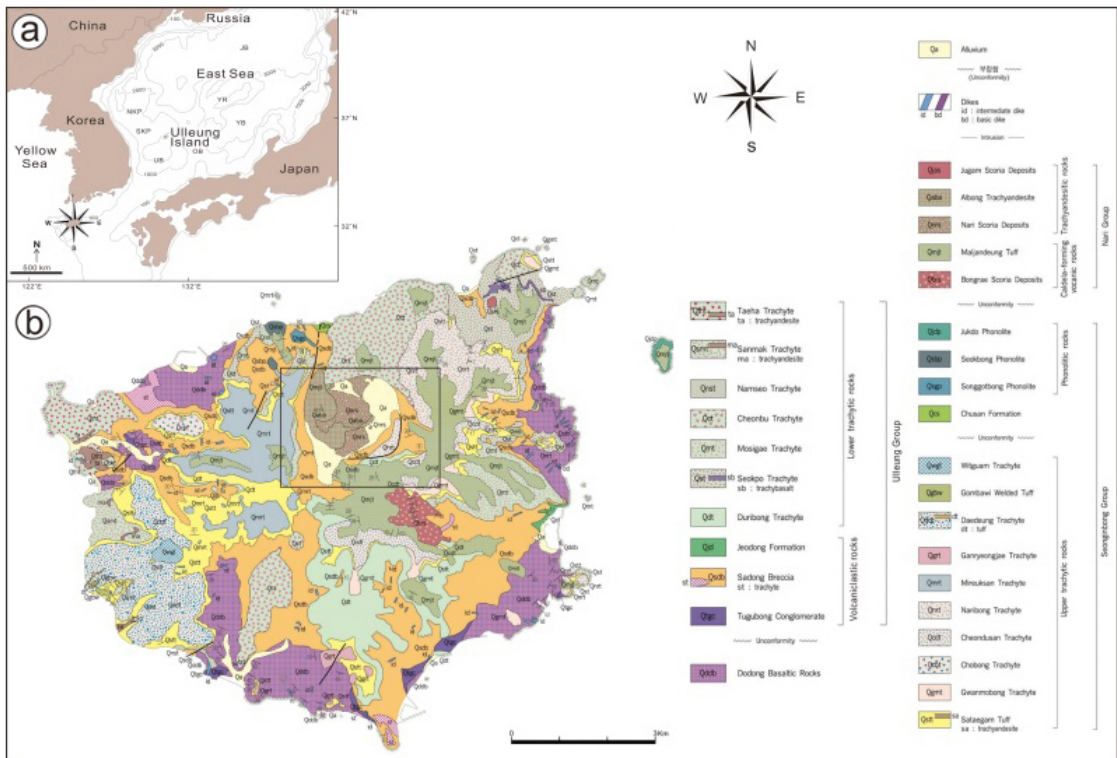


Fig. 1. (a) Physiographic map of the East Sea showing the location of Ulleung Island. (b) Geological map of Ulleung Island after Hwang *et al.* (2012), with a rectangular line indicating the location of Fig. 2.

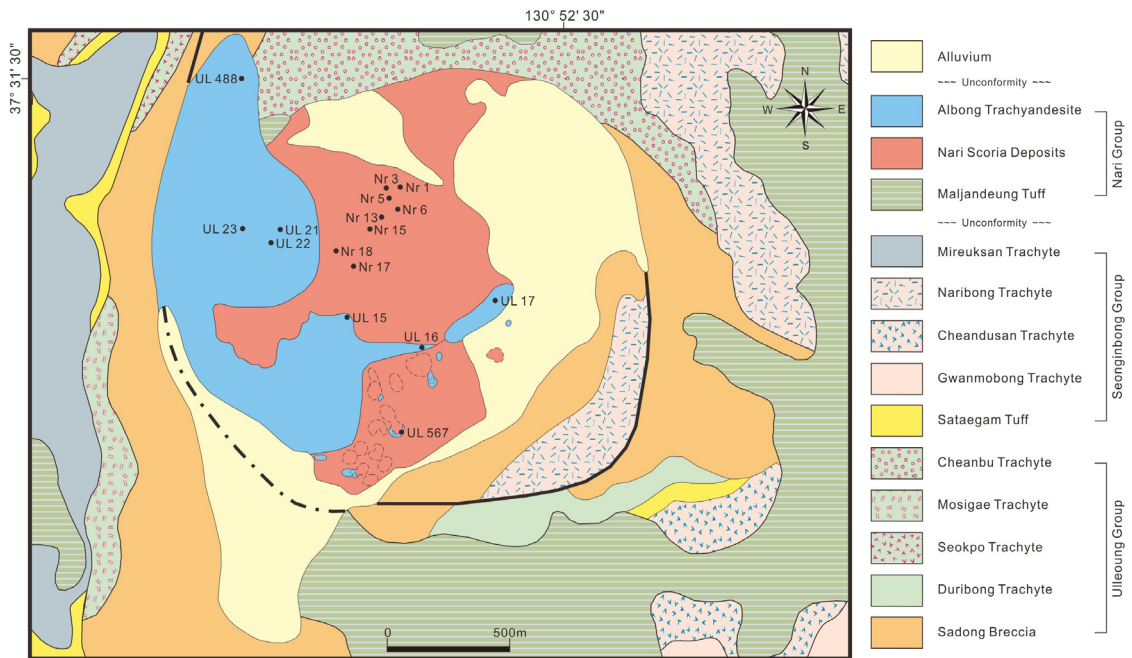


Fig. 2. Geological map of Nari caldera region, showing the sampling sites in the Nari Scoria Deposits and Albong Trachyandesite.

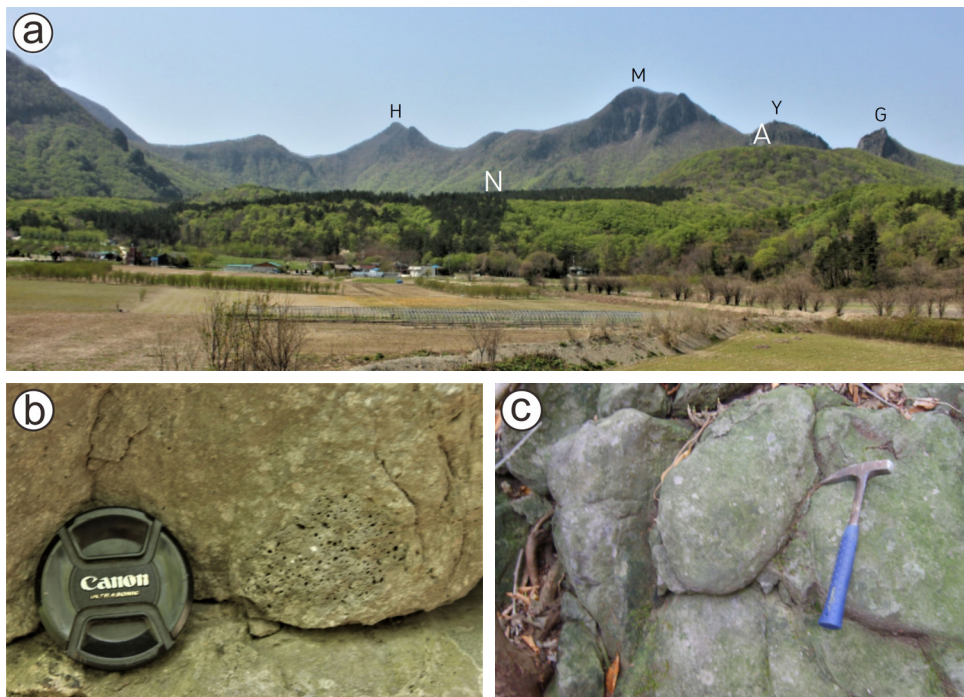


Fig. 3. Features of Nari caldera and major outcrops. (a) Overview of the Nari caldera showing Albong lava dome (A), Nari Scoria Deposits (N), and western caldera rim, which linked by a few of peaks: Hyeongjeobong (H), Mireuksan (M), Yudubong (Y) and Gitdaebong (G); (b) Trachyandesite lava capturing a vesicular scoria; (c) Polygonally jointed trachyandesite lava.

마지막 단계의 안정한 돔 성장은 동일 지점에서 분석층의 분출이 선행된 것으로 판단된다(Hwang *et al.*, 2012). 따라서 나리분석층은 폭발성 활동에 의한 말잔등응회암과 분류성 활동에 의한 알봉 용암돔 사이의 전환을 암시하기에 해결해야 할 흥미로운 연구과제를 던져준다.

4. 나리분석층

4.1 분석층의 구성물

나리분석층은 대부분 다공상 쇄설물인 분석들로 구성되지만 치밀한 암괴도 약간 포함된다. 분석들은 조성이 조면안산암질이지만 다양한 조직과 기공률을 가지며(그림 4a), 암괴들은 거의 조면암질이고 드물게 포놀라이트이며 치밀질이다. 분석들은 외형이 유체상(fluidal) 조직을 갖는 것이 흔하고(그림 4b), 꽃배추상(cauliflower-shaped) 조직(그림 4c) 드물게 빵겉질상(bread-crust) 조직도 발견되며(그림 4d), 이들은 고온에서 분출되었음을 지시한다. 기공 크기는 1~10 mm 범위의 다양한 것도 있고(그림 4e) 1 mm 내외의 균질한 것도 있다(그림 4f). 기공률은 빈다공상(poorly vesicular)에서 고다공상(highly vesicular)까지 다양한 범위에 걸쳐 존재한다. 암괴들은 거의 유리질에서 결정질이고 비본질(non-juvenile)로 분류되며, 그 기원은 이전의 화도를 채운 플러그와 화도벽에서 뜯겨져 나온 조각이다. 유리질 암괴는 아마도 이전 용암 꺾데기의 일부로 생각되지만 온도가 거의 기온과 평형을 이루었음을 나타낸다. 따라서 암괴는 이전의 화산물질이기에 중요하지 않고 분석들이 폭발성 분출의 원인물질로서 중요하다. 분석의 암질은 기공률과 밀도에 따라 분류하고 결정률을 추정할 수 있다.

야외에서 분석들은 각 지점에서 3개 최대 직경을 측정한 평균치, 형태와 암질을 기록하였으며, 적절한 크기의 시료 50개 정도를 수집하였다. 야외에서 나리분석층을 동쪽에서 서쪽으로 횡단하면서 8개 지점에서 분석들을 수집하였다(그림 2). 즉 이들은 나리분석층의 사면(하부층)에서 3개 지점(Nr 1, 3, 5), 상위 평단면(중부층)에서 3개 지점(Nr 6, 13, 15)과 돔 인접부(상부층)에서 2개 지점(Nr 17, 18)이 포함된다(그림 2).

용암 시료는 층서와 위치에 따라 7개 지점에서 채

취하였다. 즉 이들은 돔에서 3개(UL 21, 22, 23), 하부 용암류에서 2개(UL 15, 16), 상부 용암류에서 1개(UL 17), 쿨리(coulee)에서 1개(UL 488)와 유출구(bocca)에서 1개(UL 567)를 포함한다(그림 2).

4.2 쇄설물의 분포

나리분석층은 남북으로 3개로 나뉘어져 고립되어 분포한다. 중부 분석층은 알봉 용암돔을 중심으로 650 m의 EW 분산축을 갖는 반월상을 나타낸다(그림 2). 북부 분석층은 중부 분석층의 원거리부이며 분석들의 입도가 현저하게 줄어들어 따라 지지된다. 이 분석층은 일반적으로 말잔등응회암층을 덮고 알봉조면안산암에 의해 덮여있다. 또한 분석층은 화산작용이 끝난 후에 장기간에 걸쳐 급사면에 쌓인 말잔등응회암으로부터 분석들이 사면을 따라 재이동으로 퇴적된 층적층에 의해 덮인다. 이 두 이유로 분석들이 현재 알봉 용암돔의 1~1.7 km 반경 내에 있는 동쪽 부분에서 나타나지 않는다(그림 2), 서쪽 칼데라의 가파른 내벽에서는 분석들이 땅에 떨어졌다가 굴러내려 사면 굴곡부에서 발견된다. 남부 분석층은 여러 개의 소분석구가 있고 이들로부터 분석들이 재이동으로 인한 애프론을 형성해 불규칙하게 분포한다.

분석의 입경 분포는 시료 수집 지점에서 측정된 3개 최대분석들의 평균입경(d)을 통해 검토할 수 있다, 쇄설물들은 고르게 분포하지 않아 상당히 임의적으로 선택되기 때문에 입경 분포가 고르지 못하다. 나리분석층은 중부 및 북부에서 EW 방향으로 분산축을 보여주는데(그림 2), 이 분산축을 따라 평균최대입경이 11~17 cm 범위를 나타내며 알봉 용암돔에서 멀어질수록 대체로 감소한다(표 1). 이런 추세는 분석들의 공급지가 알봉 근처에 있다는 것을 지시하고 후기 용암에 의해 덮였던 것으로 추정할 수 있다.

운동량(momentum)을 고려할 때, 밀도가 더 큰 치밀질 쇄설물은 같은 크기의 더 낮은 밀도의 쇄설물보다 더 멀리 이동할 것이다. 이러한 원인에 의한 분산 불일치에 대한 설명은 암질이 화구로부터의 분산 패턴에 영향을 미칠 것이고, 기타 요인(대기환경, 분출각, 암괴모양 등)도 역시 쇄설물의 최종 분포에 영향을 미칠 것이다. 그러나 이 요인들은 분포 패턴에 기초하여 분간해내기란 무척 어렵다고 본다.

4.3 쇄설물의 구성 및 형태

나리분석층에서 쇄설물들은 다공상 분석들이 대다수를 차지하고 있다. 화산분출물은 흔히 기공 부피에 따라 치밀상(dense, <5%), 시다공상(incipiently vesicular, 5~20%), 빈다공상(poorly vesicular, 20~40%), 중다공상(moderately vesicular, 40~60%) 및 고다공상(highly vesicular, >60%)으로 나뉜다. 이와 같이 기공률에 따라 분석들을 그룹화하면, 고다공상 분석은 40.8%를 차지하고 중다공상 분석은 50.0%를 차지하며 빈다공상 분석은 5.2%를 차지한다. 나머지는 치밀상 암괴로서 4.0% 정도이다. 다공상 분

석들은 더 잘 깨어지기 때문에 깨지기 전의 다공상 쇄설물의 추정치는 상대적으로 더 증가할 것으로 예상된다.

쇄설물들은 클수록 떨어질 때 지면과의 충돌로 몇 조각으로 깨어질 수 있으며 작을수록 원래대로 남을 것이다. 또한 기공률이 높은 분석일수록 깨어지기 쉽지만 치밀질 암괴는 거의 깨지지 않는다. 분석들은 종종 유체상 외피를 가지지만, 반면에 암괴들은 유체상 외피를 가진 것을 전혀 발견할 수 없다. 따라서 분석들은 유체상 외피를 만들만큼 충분히 고온을 유지했음을 암시해준다.

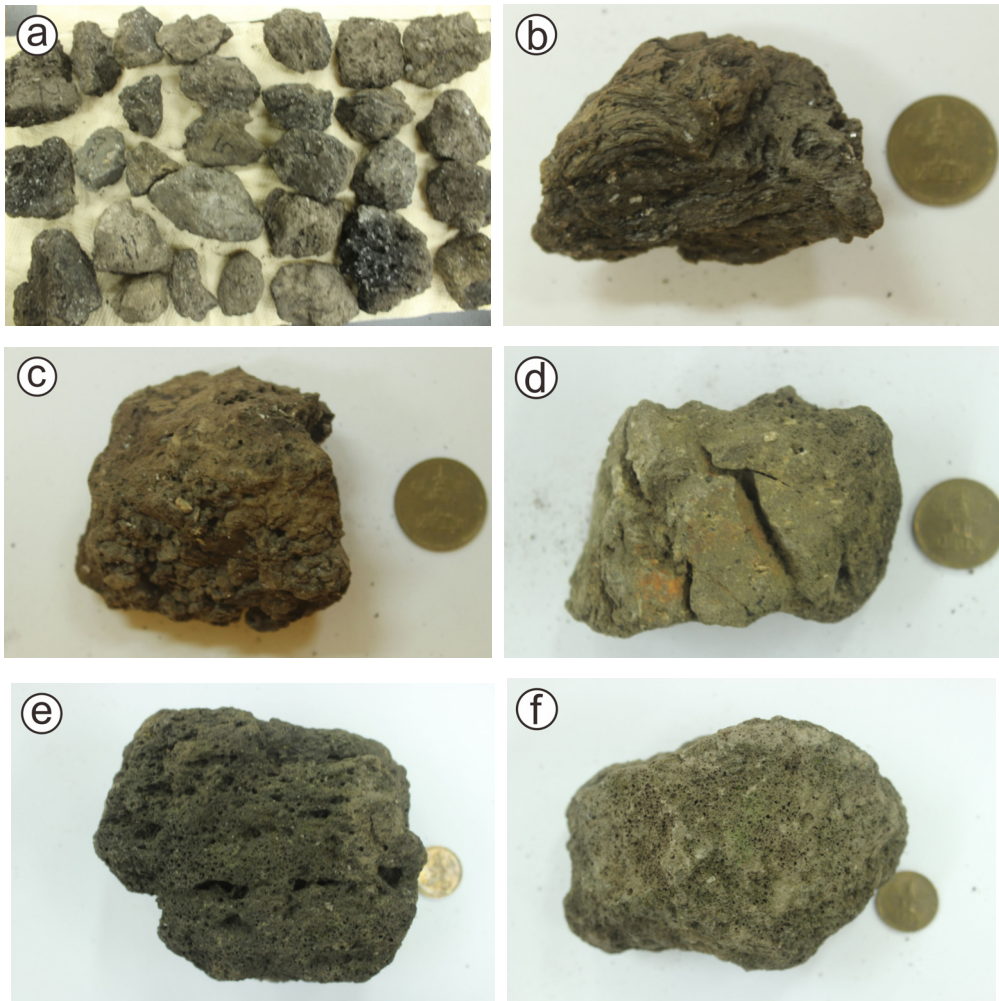


Fig. 4. Various scoriae collected from the surface of the Nari Scoria Deposits. (a) scoriaceous lapilli showing various vesicularities; (b) Scoriaceous bomb with fluidal surface; (c) Scoriaceous bomb showing cauliflower form; (d) Scoriaceous bomb with bread-crust-like cracks; (e) Scoriaceous bomb characterized by fine to coarse vesicles; (f) Scoriaceous bomb characterized by medium to fine vesicles.

나리분석층은 말잔등응회암의 플리니언 부석, 또한 수증기플리니언 분출의 어떤 분출물과 완전히 다른 본질 분출물이다. 조성상으로 분석들은 대부분 조면안산암질이기 때문에 포놀라이트질의 말잔등응회암 (Hwang *et al.*, 2019)과 다를 뿐만 아니라, 이 분출물의 다양한 조직은 스트롬볼리언 분출에 가까운 분출 유형을 암시한다. 암괴들은 울릉층군과 성인봉층군에 존재하는 기존 용암과 일치하는 암질을 나타낸다. 예를 들어, 맨눈으로 기공이 거의 보이지 않고 알칼리장석에 의한 반상 및 비반상의 치밀질 용암과 같은 범주에 든다. 칼데라 내벽에서 이러한 조직을 갖는 용암들이 복잡하게 분포한다(그림 1).

5. 본질 쇄설물의 기공률

5.1 밀도 및 기공률 측정

나리 칼데라의 마그마에서 일어난 탈기과정 및 기포화과정을 연구하기 위해, 시료의 부피밀도와 기

공률을 아르키메데스 원리에 따라 측정하였다(Hwang *et al.*, 2020). 이 자료는 박편에서 조직 연구를 위한 대표적 쇄설물을 선택하는데도 이용되었다. 한 박편에서도 기공 크기와 모양은 불균질하기에 조직분석을 위해 여러 전략이 요구되었다. 먼저 박편에서의 이미지로부터 기공 크기(장축 및 단축)를 측정하고 가장 적당한 타원형 방법을 이용하여 계산하였으며, 이 자료는 기공크기분포의 특징을 알기 위해 종합되었다. 기공 면적은 크기에 따라 처리하여 면적개수 밀도(N_A)를 산출하였고, Sahagian and Proussevitch (1998)의 방법에 따라 부피개수밀도(N_V)로 전환하였다. 면적개수밀도는 단위면적에서 차지하는 기공의 개수이고 부피개수밀도는 단위부피에서 기공의 개수이다.

본질 쇄설물 및 용암에 대해 측정된 밀도는 넓은 범위의 기공률과 조직을 나타낸다. 본질 쇄설물의 밀도는 0.34~1.39 g/cm³ 범위이며(표 1), 이 집단의 최빈 밀도(0.45~1.34 g/cm³)는 말잔등응회암의 상부층

Table 1. Densities and vesicularities measured for samples from Nari Scoria Deposits and Albong Trachyandesite.

Stratigraphy	Lithology	Episode	Locality	Sample No.	Mean max. diameter (cm)	Density (g/cm ³)				Vasicularity (%)			
						Min.	Max.	Mean	Modal	Min.	Max.	Mean	Modal
Nari Scoria Deposits	scoria	VI	Slope	Nr1	11.4	0.44	1.42	0.77	0.45	43.53	80.43	66.73	68.08
				Nr3	10.8	0.56	1.27	0.88	0.89	45.12	76.74	60.95	61.23
				Nr5	12.1	0.34	1.25	0.92	1.15	40.16	84.64	61.17	55.00
			Flat	Nr6	13.7	0.83	1.29	1.05	1.25	48.74	67.62	58.00	57.50
				Nr13	12.9	0.81	1.23	1.02	0.95	48.25	67.42	59.00	62.50
				Nr15	16.4	0.88	1.29	1.07	1.05	48.39	64.28	57.32	57.50
				Nr17	15.1	1.01	1.80	1.39	1.34	30.05	59.24	46.47	47.40
			Near dome	Nr18	17.1	0.90	1.58	1.21	1.10	16.05	65.04	44.07	51.30
				UL21		2.10	2.15	2.12		17.92	19.84	18.94	
			Albong Trachyandesite	lava	VII	Dome	UL22		2.16	2.25	2.21		13.60
	UL23					2.39	2.46	2.43		4.00	8.30	5.54	
Lower flow	UL15					2.71	2.81	2.76		1.08	2.75	1.91	
VIII	UL16				2.44	2.51	2.48		5.25	5.85	5.54		
	Upper flow	UL17				2.21	2.38	2.28		8.70	15.39	12.79	
	Coulee	UL488				2.14	2.19	2.17		16.43	18.60	17.66	
	Bocca	UL567				2.27	2.43	2.38		7.38	11.59	9.14	

(U-2)에서 나온 부석의 최빈 밀도(0.34~0.54 g/cm³) 보다 더 높은 편이다. 두 층서단위 간에는 약간의 중첩을 보여주지만, 두 층서단위가 상당히 다르다는 것을 알 수 있다. 용암에 대해 측정된 밀도는 훨씬 더 높고, 대부분 2.12~2.48 g/cm³ 범위이다(표 1). 측정된 본질 쇄설물과 용암에서 밀도는 1.40~2.11 g/cm³ 사이에서 중첩을 보여주지 않는다. 따라서 1.40~2.11 g/cm³ 사이의 단절은 화산작용의 성격이 달랐음을 확인해준다.

본질 쇄설물의 기공률은 16.05~84.64% 범위이며(표 1), 이 집단의 최빈 기공률은 47.40~68.08%로서 말잔등응회암의 마지막 플리니언 활동에서 나온 부석의 최빈 기공률 72.08~81.81%(Hwang *et al.*, 2020) 보다 더 낮다. 두 층서단위 간에는 68.09~72.07% 사이에서 중첩을 보여주지 않는데, 이 단절은 두 층서단위를 확실하게 정의해줄 뿐만 아니라 분출유형이 달랐다는 것을 암시한다. 그리고 이 최빈 기공률은 대기저 스트롬볼리언 화성쇄설물에 대해 보고된 0~76% 범위(Lautze and Houghton, 2005; Polacci *et al.*, 2006)와 대기저 하와이언 화염분천의 분출물에 대한 45~95% 범위(Cashman and Mangan, 1994; Polacci *et al.*, 2006) 내에 들어간다. 기공률은 넓은 범위로 측정되었지만, 기공률의 빈도분포는 모두 대체로 유사한 좁은 단봉상 피크를 보여주고 쌍봉상 피크도 나타낸다(그림 5). 이들에 따른 최빈기공률은 하부(Nr1)로부터 상부(Nr18)로 갈수록 지그재그로 변화하면서 감소하는 경향을 나타낸다.

용암에 대해 측정된 기공률은 훨씬 더 낮은 1.08~19.84% 범위이다. 쇄설물과 용암에서 측정된 기공률도 18.95~44.06% 사이에서 중첩을 보여주지 않는데, 이 사이의 단절은 화산작용의 양식이 완전히 달랐음을 지시한다.

5.2 기공률의 정성적 관찰

기공률이 40~60%에 집중되므로 연구의 편의를 위해 분석층은 시료 중에서 평균기공률로부터 (1) 고다공상 분석(HVS; >60%), (2) 중다공상 분석(MVS; 50~60%), (3) 저다공상 분석(LVS; 20~50%)으로 분류하고(표 1), 이미지 촬영 및 분석을 위해 그 등급에서 최빈기공률을 갖는 표품을 선택하였다. 이에 따르면 사면의 시료들은 평균 기공률이 고다공상이고 평탄지 시료들은 중다공상이며 돔 인접부 시료는 저

다공상에 속한다(표 1). 즉 기공률은 아마도 하부로 부터 상부로 가면서 감소하는 추세를 나타낸다. 그리고 알봉조면안산암은 시료 중에서 평균밀도로부터 (1) 저밀도 용암(LDL; <2.40 g/cm³), (2) 고밀도 용암(HDL; >2.40 g/cm³)으로 분류하고(표 1), 역시 각 등급에서 최빈밀도를 가진 표품도 선택하였다(그림 5).

나리분석층에서 현미경적 조직은 밀도 및 기공률 변화와 함께 기공 크기 및 벽 두께에서 연관적인 관계를 보여준다(그림 6). HVS의 이미지는 말잔등응회암의 마지막 플리니언 상의 전형적인 부석을 연상시킨다. HVS의 특징은 중립-조립 기포가 풍부한 지역에 인접해 작은 기포들이 집중되는 내부 불균질성을 나타낸다(그림 6a, 6b). 이 불균질성은 기공률 감소에 따라 낮아지는데, LVS에서는 다양한 기공크기와 벽두께의 분포가 상당히 균질해진다(그림 6e, 6f). HVS에서 벽두께가 5~10 μm로 상당히 얇은 것을 볼 수 있지만, 반면에 MVS에서 15~20 μm로 크게

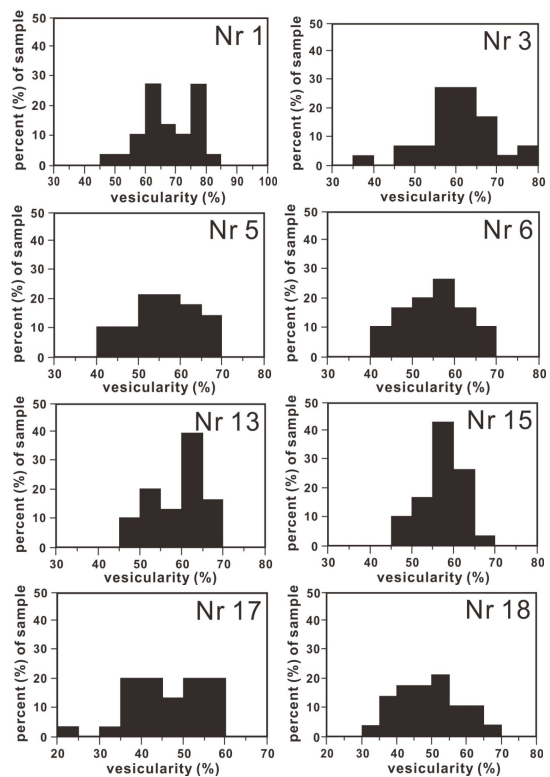


Fig. 5. Histograms showing vesicularity distribution for the scoriaceous lapilli collected from the Nari Scoria Deposits.

증가한다(그림 6c, 6d). LVS에선 얇은 벽이 없고, 관찰된 벽은 일관되게 $>20 \mu\text{m}$ 으로 두껍다(그림 6e, 6f). 3개의 모든 다공상 분석에서, 작은 기포들은 대부분 더 두꺼운 유리벽과 조합되어 있고 구형으로 나타나거나 혹은 아몬드상 끝을 가진다. HVS의 이미지에서는 늘어난 중간 크기의 기공과 작은 아몬드상 기공을 포함하는 너비 1 mm의 띠(band)가 얇은 유리벽에 의해 분리되는 유상 구조를 관찰할 수 있다(그림 6b). 그러나 MVS와 LVS에서는 유상 구조

를 관찰할 수가 없다.

기포 합체의 지시자는 나리분석층의 전체 분석들에서 풍부하지만, 밀도가 증가함에 따라 그러한 다양한 특징이 감소한다(그림 6). 더 큰 기포로 확장되는 작은 기포는 오로지 HVS에서만 보존되어 있다. 중립 내지 조립 기포를 분리하는 얇은 기포 벽의 주름과, 그리고 파열 후에 불규칙하게 오므라든 유리 필름이 HVS와 MVS에서 관찰된다. 대체로 동일한 내부압력에 의해 두 기포를 분리하는 선형의 얇은

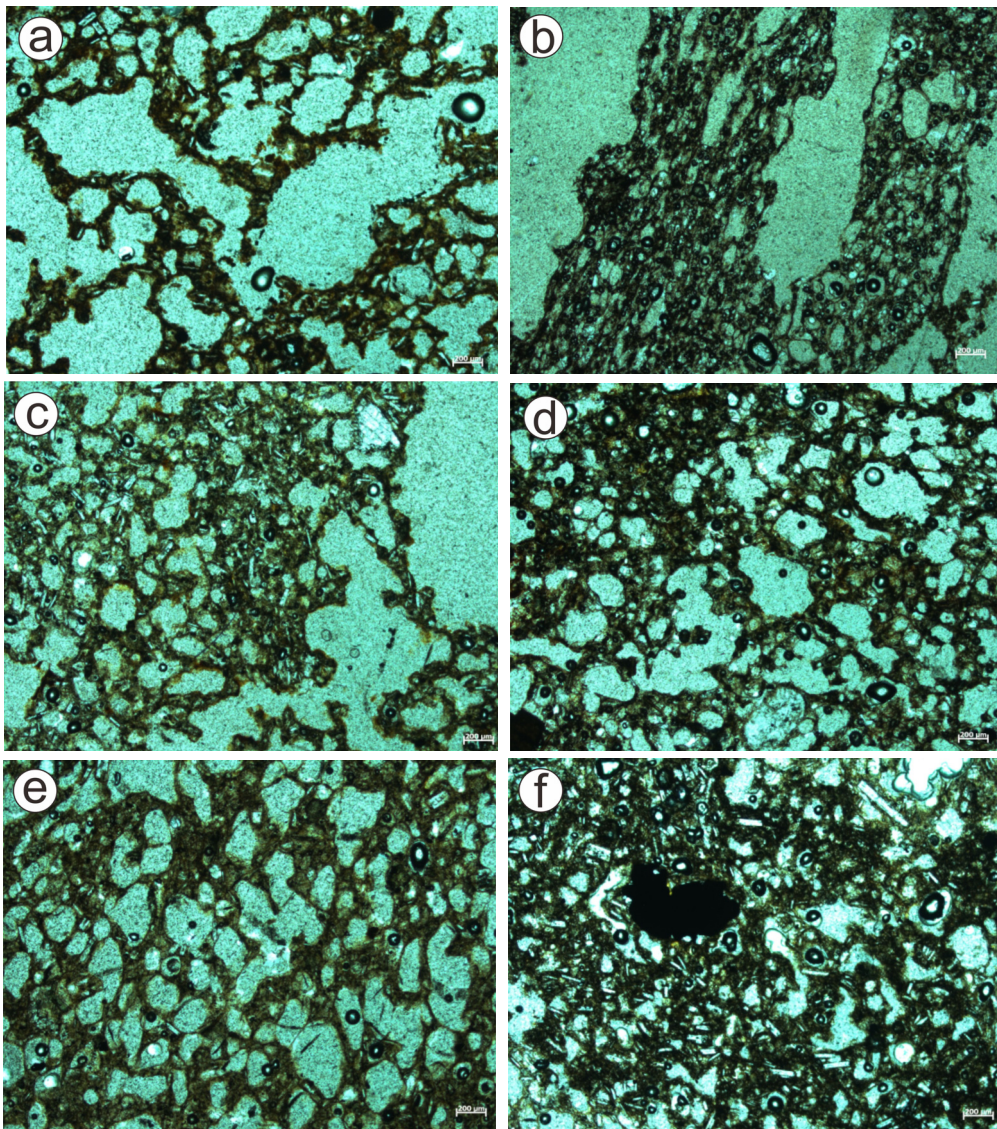


Fig. 6. Photomicrographs at the same scale for (a) and (b) highly vesicular scoriae (HVS), (c) and (d) moderately vesicular scoriae (MVS), and (e) and (f) lower vesicular scoriae (LVS). Length of the white bars in bottom right corners of all images is $200 \mu\text{m}$.

유리필름도 역시 HVS와 MVS 이미지 모두에서 볼 수 있다. 이러한 특징을 LVS에서는 관찰할 수 없으며, 기포들이 넓은 유리 영역에 의해 분리되어 있다. 그러나 기포의 상당수는 기포 합체의 초기 과정을 지시하는 아메바 모양을 하고 있다. 이와 같이 기공들이 3개의 모든 분석에서 복잡한 모양을 가지는 것은 2개 이상의 기포들이 합쳐진 후에 벽이 느슨해져 구형을 되찾을 수 없었기 때문이다.

저밀도 용암(LDL)은 용암에서 가장 낮은 밀도($<2.40 \text{ g/cm}^3$)를 가지며, 기공들이 균질하게 분포하지 않고 크기에 의해 다른 영역으로 구별된다. 한쪽 영역은 mm 크기의 기공 집단을 가지고 있는 반면에 인접 영역에는 기포의 최대 직경이 오로지 약 $20 \mu\text{m}$ 에 불과하다(그림 7a). 2차원에서 볼 때, 이 영역은 좁은 간격의 띠처럼 보인다. 그러나 3차원으로 확대하면, 이 영역의 입체모양은 더 불규칙할 것이다. LDL 전반에서 아메바상 기포 모양은 기포화 과정에서 중요한 역할을 했던 합체를 지시하지만, 기포 윤곽에서 오목상과 매끄러운 상실과 아몬드상 외관은 기포 붕괴에 의해 생성된 조직을 나타낸다. 용암에서 밀도가 증가함에 따른 조직변화는 LDL의 기포 집단($>2.12 \text{ g/cm}^3$)으로부터 계속된다. 고밀도 용암(HDL)은 높은 밀도($>2.40 \text{ g/cm}^3$)를 가지며, 기공이 드물고, 불규칙한 윤곽을 가지며 반정들과 명확한 관계를 보여주지 않는다(그림 7b). 미단열이 역시 유리화 결정을 관통하면서 종종 나타난다.

이러한 양상들은 밀도가 낮은 분석들(HVS, MVS, LVS)과는 더욱 심한 대조를 나타낸다. 앞에서와 같이, LDL에서 HDL로 밀도가 증가함에 따라 전반적

으로 기공 크기는 감소하고 기공벽은 두꺼워진다. 역시 기포들은 더 치밀한 표품일수록 아몬드상이거나 심지어 각상이며, 미단열은 더 흔하게 퍼져있다. 용암 표품에서 가장 현저한 특징은 침상 미정의 양상이다(그림 7). 모든 미정들은 같은 방향으로 배열되어 있으며, 밀도가 높을수록 더 현저하게 나타난다.

5.3 기공률의 정량적 관찰

기공부피분포(VVD)는 기포화과정에서의 기여도 차이를 설명하는데 이용될 수 있다, 예를 들면, 기포 합체가 우세하다면 일반적으로 기포 직경에 대한 부피분율(volume fraction)의 막대그림은 흔히 쌍봉상 집단을 나타낼 것이다(Orsi *et al.*, 1992; Klug and Cashman, 1994, 1996; Klug *et al.*, 2002). 이러한 그림에서, 나리분석층에서 HVS, MVS, LVS의 기공집단은 단봉상이지만, 모두는 합체로 인해 2~3 mm의 기포 크기로 뻗치는 꼬리부분을 보여준다(그림 8a). 기공률이 감소(밀도 증가)함에 따라 기포의 최빈 크기는 $85 \mu\text{m}$ (HVS)에서 $30 \mu\text{m}$ (LVS)로 이동한다(표 2). 이 자료는 역시 기포 직경에 대한 누적부피분율의 그림으로 도시하면 기공 직경의 중간값은 커브와 50번째 백분위의 교차점에서 결정할 수 있다. 분석층의 경우, HVS와 MVS의 중간값은 LVS에 비하여 서로 더 가깝고 더 크다(그림 8b). 기포 생성과 붕괴의 시기와 지속기간도 역시 누적개수밀도(N_v)에 기록되어 있다. LVS는 3 집단의 나리 분석들 중에서 가장 작은 N_v 값을 가진다(표 2).

더 치밀한 용암($>2.0 \text{ g/cm}^3$)은 VVD와 누적개수 밀도를 결정하기가 쉽지 않다. HDL, LDL은 박편에

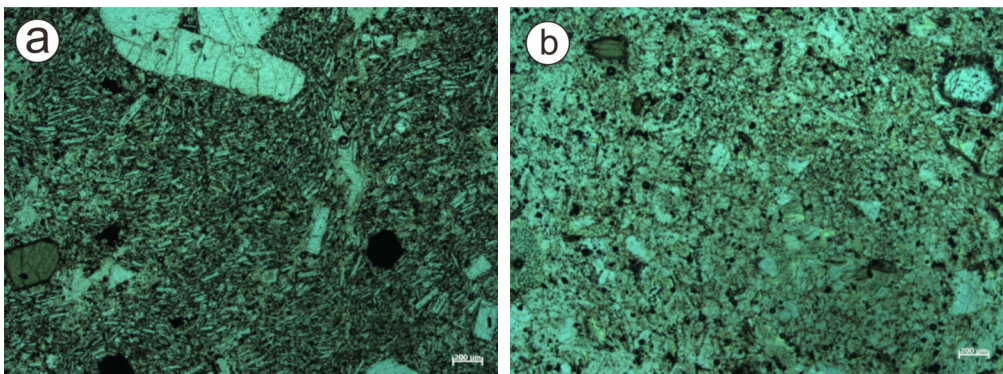


Fig. 7. Photomicrographs at the same scale for (a) low density lava (LDL), (b) moderate density lava (MDL), and (c) high density lava (HDL). Length of the white bars in bottom right corners of all images is $200 \mu\text{m}$.

서 복잡한 모양의 빈 공간을 위에서 언급된 방법에 의해 정량화하기 매우 어렵기 때문이다. 그 통계적 문제는 시료마다 기포가 너무 적고 모양이 불규칙하여 구형으로 변환하기가 어려운데 있다. 따라서 LDL에 측정된 수치는 나리분석층에서 나온 것보다 작고(표 2) 왼쪽에 치우치지만(그림 8b) 상당한 오류가 내포된 것으로 볼 수밖에 없다.

6. 토 의

우리는 실제로 폭발적인 나리분석층의 분출로부터 안정적인 알봉조면안산암 돔 성장까지의 불안정한 기간동안 화도와 돔에서 발생한 기공률의 의미, 열린계 및 닫힌계의 탈기작용, 파쇄작용을 고찰해본다.

6.1 기공률의 의미

나리분석층 표본에서 나온 모든 정량적 자료는 넓고 다양한 기포화 과정을 나타내며, 말잔등응회암

에 기록된 것과 연속성이 없고 상당히 다르다는 것을 가리킨다. 초기 기하급수적 기포 생성과 성장은 멜트가 화도를 통해 나아갈 때의 기포 합체가 함께 겹쳐져있고, 이후에 기포 붕괴의 시작이 일부 마그마 부분에 겹쳐져있다. 정성적으로 볼 때, 기포 합체는 나리 분석들 전반에서 명백하지만, 정량적으로 보면 기포크기분포에 의한 영향은 더 치밀한 분석일수록 기포 붕괴가 지배적인 과정이 되기 때문에 감소되는 것으로 생각된다. HVS와 MVS에 비해 LVS에서는 합체가 현저하지 않을 뿐만 아니라, 유리벽이 현저히 더 두껍고, 크기분포가 덜 불균질하며, 주된 기포 크기가 더 작은 것이 특징인데(그림 6e, 6f), 이는 모두 기포붕괴와 관련된다. 최빈값 기포 크기는 HVS 및 MVS에 비해 LVS에서 30 μm 이상 더 작다(표 2, 그림 8). 합체는 기포크기분포를 더 큰 크기로 이동시키고, 합체 특징도 정성적으로 볼 때 역시 명백하게 나타나지만, 붕괴가 LVS의 크기분포에 더 큰 영향을 미친 것으로 보인다. LVS에서 붕괴의 중요성

Table 2. Parameters for representative samples from Nari Scoria Deposits and Albong Trachyandesite.

Stratigraphy	Lithology	Sample No.	Density (g/cm ³)	Vascularity (%)	N _A (cm ⁻²)	N _V (cm ⁻³)	Size range (μm)	Median (μm)
HVS (lower part)	Highly vesicular scoria	Nr 3-13	0.83	62.93	2.3E+06	3.3E+08	7~2450	85
MVS (middle part)	Moderately vesicular scoria	Nr 15-17	1.07	57.48	1.6E+06	1.2E+08	7~1950	60
LVS (upper part)	Lowly vesicular scoria	Nr 18-26	1.11	50.99	1.2E+06	8.8E+07	8~1310	30
LDL (lava dome)	Low density lava	UL 21-2	2.11	19.38	4.4E+05	2.9E+07	7~310	20

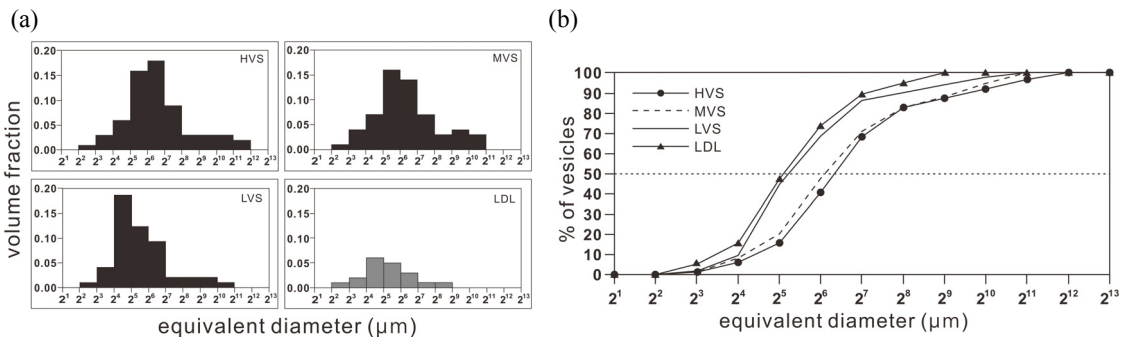


Fig. 8. Distributions of vesicle volume for highly, moderate and lowly vesicular scoriae (HVS, MVS and LVS, respectively). (a) Histograms showing the distributions of vesicle volume against vesicle size; (b) Cumulative volume percent diagram, showing that intersection of 50% with curves gives median vesicle sizes.

은 역시 VVD 막대그림에서 더 작은 최빈값과 더 낮은 누적개수밀도에 의해서도 나타난다(그림 8). 그러므로 붕괴는 총 기포수와 전체 기포크기를 감소시킬 것으로 추리된다. LVS는 가장 작은 N_V 를 가지며, 합체로 생성된 조립 꼬리에도 불구하고 VVD 막대그림에서 피크 값은 밀도 증가에 따라 감소한다(표 2; 그림 8). 우리는 이러한 경향이 아래에서 상세히 논의하는 바와 같이 돔과 같은 얇은 화도에서 체류 시간의 차이를 반영한다고 생각한다.

나리분석층과 알봉용암 간의 밀도 차이는 기포집단 간에 현저한 차이와도 일치한다. 그러나 용암들은 분석들과 유사하지만 더 광범위한 기포화 과정을 가지는 것 같다. 용암은 낮은 기공률, 낮은 기포개수 밀도를 가질 뿐만 아니라 치밀한 유리 영역에서 변형된 아몬드상 기공이 불규칙한 분포를 가지는데, 이는 치밀질 용암이 가스배출 및 기포붕괴의 최종 산물이라는 것을 시사한다. 이 용암들이 분석들과의 현저한 차이를 보이는 것은 투과성 시작으로 인해 기포붕괴가 동시에 빠르게 진행되면 가스가 제거되고 유변적으로 굳어지는 멜트상으로 전환되었다는 것을 강력히 지지하는 간접적 증거이다.

6.2 마그마 상승과 탈기작용

나리분석층에서 조면안산암질 화성쇄설물의 조직은 폭발성에서 분류성 분출양식으로 이동하는 마그마계의 변화를 반영하는 탈기 조건을 나타낸다. 나리분석층에서 다공상 쇄설물은 초기에 심부 멜트를 나타낸다. 즉, 닫힌계에서 비평형 탈기작용을 경험했음을 반영한다. 먼저 심부 마그마의 상승은 화도에서의 분출을 유도하였고, 이 분출은 화도 마그마의 상승에 있어서 마그마 가스를 제거하는 상대적인 역할을 하였다. 그러나 마그마 유입과 상승속도가 감소할 때 화도의 연변을 따라 상승하는 멜트에 우선적으로 영향을 미치는 닫힌계와 열린계 사이의 부분적 전환이 수반되었다. 화도를 따라 계속 상승하는 멜트는 기포 생성 및 성장을 하였지만, 탈기작용으로 멜트가 유변적으로 뻗뻗해짐으로써 화도에 정체되어 그 연변을 점점 더 안대기(lining)하고 화도의 반경을 효과적으로 축소시켰다. 이 탈기된 물질은 결국 화도의 가장 얇은 부분을 막았고, 동시에 폭발성 활동을 완전히 중단시켰다. 그러나 화도 중심부에 남아 있던 휘발성이 풍부한 물질은 계속 상승하

여, 화도를 통해 가스를 제거하지만 여전히 멜트를 운용하여 돔을 형성하게 되었다.

그리고 상대적으로 뜨겁고 기포화된 마그마는 가스가 배출되어 더 차갑고 치밀한 용암돔을 관입하거나 혀 모양으로 분출하여, 돔과 쿨리가 치밀상 및 다공상 용암으로 불균질하게 되었다. 조직의 쌍봉상 분포, 즉 고다공상에 비해 저다공상의 분석질 쇄설물의 경우 짧은 기간동안 마그마에서 투과성 시작과 가스 배출을 반영한다. 투과성의 감소는 빠르게 기포붕괴로 이어지고 이때 계는 가스배출을 막는다고 한다(Westrich and Eichelberger, 1994). 그런데 기포붕괴의 시간 간격은 상당히 길었을 것이라고 생각한다. 왜냐하면 알봉 용암돔의 정상부에는 초기 틈을 따라 열수변질 현상이 여러 곳에서 관찰되기 때문이다. 다공상 마그마의 투과성을 통한 부분적 탈기작용은 결국 기포붕괴 및 열린계 탈기 억제로 이어진다. 남동쪽 소분석구에서는 경미한 폭발이 얇은 환경에서 별도의 분출사건으로 연결될 수 있었지만, 알봉에서 주 분출은 더 깊은 곳에서 투과성 상실을 수반할 수 있었다. 소분석구 주변의 나리분석층에서 쇄설물들의 분포가 복잡함은 복수의 폭발을 배제할 수 없겠지만, 현재 우리는 단지 이 기간 동안 활동이 실제로 주기적이었다고 추측할 수 있을 뿐이다.

나리분석층의 분출동안 활동은 불안정했지만 상대적으로 알봉 용암돔의 성장시 활동은 안정했다고 생각된다. 이러한 생각은 조면안산암질 멜트에서 조직적 불균질성의 정도가 큰 것이 그 분출동안 마그마의 복잡한 탈기과정의 영향이라고 본다. 안정된 알봉 돔에서 나온 용암과 비교하면, 나리분석층의 쇄설물들은 더 넓은 범위의 기공률과 기포 크기를 가진다. 두 분출물 모두 기포붕괴를 암시하는 조직을 보여주지만, 나리분석층에 대한 마그마 내에서 조직의 다양성은 닫힌계 기포화작용에 의한 특징을 가졌음을 보여준다. 이는 급속한 비평형 탈기작용을 거친 조면안산암질 멜트의 구성원으로 인해 파쇄작용과 분출작용을 일으켰음을 반영한다. 이러한 활동은 소량의 외부 물의 추가 가능성도 조심스럽게 생각할 수 있다. 반대로, 알봉 용암의 조직은 장기간에 걸쳐 보다 일관된 열린계 탈기작용을 나타내며, 선형 폭발작용이 종료된 이후 얇은 화도에 머무는 멜트를 반영한다. 이들 조직은 아마도 얇은 화도에서 장기간 체류와 소극적인 가스배출을 나타내는 후기단계

를 의미한다.

6.3 파쇄작용의 요인

우리는 나리분석층에서 파쇄작용의 주요인이 이전에 상승하는 다공상 조면안산암질 마그마에 용존된 마그마성 휘발성물질의 빠른 팽창이라고 생각한다. 나리분석층의 쇄설물 조직은 투과성 지하로 인한 가압증가와 후에 수반되는 교란의 주기적인 순환을 암시한다. 나리분석층 쇄설물의 불균질성을 재고해볼 때, 이 순환동안 다공상 물질에서 탈출되는 휘발성물질은 부분적으로 갇히고 밀도가 높은 물질에 의해 농축될 수 있다고 본다. 화도의 단열과 같은 약대는 화도 내에 국한되어 폭발을 야기할 수 있는 가압 가스를 터뜨릴 수 있다. 한편 가스/고체 질량비 측면에서, 또 다른 시나리오를 생각해볼 수 있다. 저밀도 쇄설물의 분산에 필요한 높은 가스/고체 질량비는 이 계에 일시적인 외부물을 통해 가스의 추가적인 공급원을 고려해볼 수 있다.

외부물은 울릉도의 위치와 기후를 고려할 때 두 개의 가능한 공급물질이 관련될 수 있다. 나리 칼데라 내에 내린 비교적 높은 강우량은 균열과 미단열을 통해 직접적으로 마그마에 유입될 수 있다. 또한 이 강우량이 선행 말산응응회암에 스며들어 지하수로 마그마에 들어갈 수 있다. 이 응회암은 그 당시 암석화되기 전의 테프라로 존재했기에 얼마든지 지하수를 품을 수 있기 때문이다. 마그마가 천부로 상승하여 분출을 앞두고 있을 때 지하수는 일시적으로 화도 내의 단열로 연결된다면 폭발성 분출로 이어질 수 있다. 이 두 공급원은 팽창하는 마그마성 휘발성물질에 의해 주로 일어나는 폭발성 분출의 촉발을 돕기 위한 충분한 외부 휘발성물질로 제공될 수 있다. 갇힌 가스의 주머니에 외부물이 침입하면 화도의 파쇄작용을 야기하고 궁극적인 파괴로 이어질 수 있을 것이다.

7. 결론

울릉도 나리 칼데라에서 최후기에 일어났던 화산 활동은 폭발성에서 분류성 분출로의 전환을 나타낸다. 이러한 전환은 분출되는 마그마의 탈기 양식의 변화에 연관되는 분출체계의 기본적 이동을 의미한다. 이 전환을 나타내는 분출 산물은 알봉 용암돔 주

위를 조면안산암질 나리분석층이다.

나리분석층의 분석들은 대부분 포물선 낙하를 따랐던 것으로 보이며, 다공상 조면안산암으로 지배되는 넓은 범위의 조직과 암질을 나타낸다. 쇄설물은 400개 분석이 측정되어 1) 고다공상 부석, 2) 중다공상 분석, 3) 저다공상 분석, 4) 치밀상 암괴 등의 4개 주요 암질 범주로 분류되었다.

분석들의 조직분석에 의하면 멜트 부분이 다양한 정도의 가스배출을 겪었음을 나타낸다. 기공의 정성적 관찰에 의하면 분석들은 큰 기포, 두꺼운 유리벽, 불규칙한 모양의 기공을 포함하며, 기포 합체 및 붕괴를 나타내는 모든 특징을 가진다. 플리니언 분출에 의한 조직적 자료와 비교했을 때 기공률의 범위와 더불어 붕괴의 큰 증가는 단면계에서 열리게 탈기작용으로의 전환을 보여준다. 가스가 자유롭게 배출되면서부터 화도에서 마그마 파쇄작용이 종식되었다. 하지만 휘발성물질의 용리는 화도의 축을 따라 상승하는 멜트 부분에서 계속되었고, 부분적으로 가스가 배출되고 부분적으로 탈기하는 조면안산암질 마그마의 돔 형성 분출을 촉진하였다.

분석층과 용암돔의 조직은 이 마그마의 불완전한 가스배출이 폭발적 붕괴로 이어졌음을 강하게 시사한다. 따라서 분출양식은 조면안산암질 마그마에서 일련의 스트롬볼리언 폭발로 시작되어 분류성 분출로 전환되었다.

이러한 증거에 의하면 미래에 대규모 분출을 위한 선행물질은 가스가 풍부한 마그마가 심부에서 가스 과압의 축적을 포함할 수 있다는 것을 암시한다. 이러한 과정이 일어난다는 경고 신호는 구체적으로 지진 네트워크, 위성 모니터링, 가스 유입 및 지반 변형의 측정을 통해 원격으로 모니터링할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 연구비(KMI2018-01610)에 의해 지원되었다. 우리는 한국지질자원연구원의 최근 제작된 지질도와 층서에 따라 작업을 진행하였다. 밀도와 기공률은 안동대학교 세라믹실험실에서 측정되었다. 그림제작은 안동대 화산학실험실 현혜원의 도움이 있었다. 심사과정에서 도움을 준 한국지질자원연구원 김기범 박사님과 익명 심사자에게 감사를 표한다.

REFERENCES

- Barmin, A., Melnik, O. and Sparks, R.S.J., 2002, Periodic behavior in lava dome eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 199, 173-184.
- Cashman, K.V., 1992, Groundmass crystallization of Mount St Helens dacite, 1980-1986 - a tool for interpreting shallow magmatic processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109, 431-449.
- Cashman, K.V. and Mangan, M.T., 1994, Physical aspects of magmatic degassing. II. Constraints on vesiculation processes from textural studies of eruptive products. In: Carroll, M.R., Holloway, J.R. (Eds.), *Volatiles in Magmas*. *Rev. Mineral*, 30, 447-478.
- Constantini, L., Pioli, L., Bonadonna, C., Clavero, J. and Longchamp, C., 2011, A Late Holocene explosive mafic eruption of Villarrica volcano, Southern Andes: The Chaimilla deposit. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 200, 143-158.
- Eichelberger, J.C., 1995, Silicic volcanism: ascent of viscous magmas from crustal reservoirs. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23, 41-63.
- Gardner, J.E., Hilton, M. and Carroll, M.R., 1999, Experimental constraints on degassing of magma: isothermal bubble growth during continuous decompression from high pressure. *Earth and Planetary Science Letters*, 168, 201-218.
- Harumoto, A., 1970, *Volcanic rocks and associated rocks of Utsuryoto island*. Nippon Printing and Publishing Co., 39 p.
- 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., Lee, S.J. and Ahn, U.S., 2019, Magmatic evolutions from compositional variations with time in the Maljandeung Tuff, Ulleung Island, Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, 28, 111-128 (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 the Geological Society of Korea*, 54, 513-527 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.J. and Oh, K.S., 2020, Relationship between Vesicularities of Pumice Clasts and Shifts of Eruption Types in the Maljandeung Tuff, Ulleung Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 56, 453-468 (in Korean with English abstract).
- Jaupart, C. and Allegre, C.J., 1991, Gas content, eruption rate and instabilities of eruption regime in silicic volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters*, 102, 413-429.
- 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 10.1007/s00445-014-0802-1.
- Klug, C. and Cashman, K.V., 1994, Vesiculation of May 18, 1980, Mount St Helens magma. *Geology*, 22, 468-472.
- Klug, C. and Cashman, K.V., 1996, Permeability development in vesiculating magmas: implications for fragmentation. *Bulletin of Volcanology*, 58, 87-100.
- Klug, C., Cashman, K.V. and Bacon, C.R., 2002, Structure and physical characteristics of pumice from the climactic eruption of Mount Mazama (Crater Lake), Oregon. *Bulletin of Volcanology*, 64, 486-501.
- Lautze, N.C. and Houghton, B.F., 2005, Physical mingling of magma and complex eruption dynamics in the shallow conduit at Stromboli volcano, Italy. *Geology*, 33, 425-428.
- 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.
- Mangan, M.T., Mastin, L. and Sisson, T., 2004, Gas evolution in eruptive conduits: combining insights from high temperature and pressure decompression experiments with steady-state flow modeling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 129, 23-36.
- Mangan, M.T. and Sisson, T., 2000, Delayed, disequilibrium degassing in rhyolite magma: decompression experiments and implications for explosive volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 183, 441-455.
- Massol, H. and Jaupart, C., 1999, The generation of gas overpressure in volcanic eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 166, 57-70.
- Melnik, O., 2000, Dynamics of two-phase conduit flow of high-viscosity gas-saturated magma: large variations of sustained explosive eruption intensity. *Bulletin of Volcanology*, 62, 153-170.
- Melnik, O. and Sparks, R.S.J., 1999, Nonlinear dynamics of lava dome extrusion. *Nature*, 402, 37-41.
- Orsi, G., Gallo, G., Heiken, G., Wohletz, K., Yu, E. and Bonani, G., 1992, A comprehensive study of pumice formation and dispersal: the Cretaceous tephra of Ischia (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53, 329-354.
- Platz, T., Cronin, S., Cashman, K.V., Stewart, R.B. and Smith, I.E.M., 2007, Transition from effusive to explosive phases in andesite eruptions: a case study from the AD 1655 eruption of Mt. Taranaki, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161, 15-34.
- Polacci, M., Corsaro Rosa, A. and Andronico, D., 2006,

- Coupled textural and compositional characterization of basaltic scoria; insights into the transition from Strombolian to fire fountain activity at Mount Etna, Italy. *Geology*, 34, 201-204.
- Polacci, M., Pioli, L. and Rosi, M., 2003, The Plinian phase of the Campanian Ignimbrite eruption (Phlegrean Fields, Italy): evidence from density measurements and textural characterization of pumice. *Bulletin of Volcanology*, 65, 418-432.
- Sahagian, D.L. and Proussevitch, A.A., 1998, 3D particle size distributions from 2D observations. stereology for natural applications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 84, 173-196.
- Toramaru, A., 1990, Measurement of bubble size distributions in vesiculated rocks with implications for quantitative estimation of eruptive processes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43, 71-90.
- Westrich, H.R. and Eichelberger, J.C., 1994, Gas transport and bubble collapse in rhyolitic magma: an experimental approach. *Bulletin of Volcanology*, 56, 447-458.
- Woods, A.W. and Koyaguchi, T., 1994, Transitions between explosive and effusive eruptions of silicic magmas. *Nature*, 370, 641-644.
-
- Received : July 17, 2020
 Revised : August 19, 2020
 Accepted : August 21, 2020