

울릉도 말잔등응회암에서 멤버 N-5의 부서편 기공률과 분화유형

황상구^{1,2,*} · 이소진² · 오경식³

¹안동대학교 지구환경과학과

²안동대학교 기초과학연구소

³안동대학교 신소재학부

요 약

우리는 울릉도 말잔등응회암의 멤버 N-5에서 화성쇄설물의 미조직, 밀도와 기공률을 측정하여 분화유형, 파쇄유형과 파쇄기구를 해석하였다. 멤버 N-5A, D에서 누적라필리와 무장라필리 등의 습윤한 쇄설물의 산출에 의하면, 말잔등에서 18.8 ka B.P. 경에 화산활동은 ‘습윤성’ 폭발성 분화로부터 유래되었음을 지시하고 마그마가 외부물을 만나는 환경을 반영한다. 이 폭발성 분화는 분연주가 물-풍부한 습윤성과 세립질 입자의 풍부함을 감안하면 ‘건조한’ 마그마성 분화라기보다 ‘습윤한’ 수증기마그마성 분화라는 것을 의미한다. 이 멤버에서 탄화목의 산출을 고려하면 외부물은 마그마와 접촉할 수 있는 지하수인 것으로 판단된다. 멤버 N-5B의 부서질 라필리암에서 평균 기공률이 54.5~63.3% 범위인데, 이는 화도에서 마그마가 대수층과 접촉하는 수증기마그마성 파쇄면의 위치가 가상적 마그마성 파쇄면 위치보다 아래에 있음을 나타낸다. 왜냐하면 마그마가 화도에서 마그마성 분화를 일으킬 수 있는 위치는 그 마그마가 상승하여 75~83% 범위의 기공률로 팽창하는 위치이기 때문이다. 그래서 18.8 ka B.P. 경에 수증기마그마성 파쇄작용은 화도에서 지하수가 마그마와의 접촉으로 빠르게 가열되어 부피팽창에 의해 유발되었다. 용리되는 마그마성 휘발성물질도 역시 이 수증기마그마성 사건동안 팽창과 파쇄작용에 어느 정도 기여하였다. 이때 수증기마그마성 파쇄작용은 마그마성 휘발성물질보다 지하수에 의한 높은 가스압력이 더 크게 작용하였다. 이 멤버에서 우세한 블록상 입자는 산산조각난 유리 혹은 플라스틱할 때 부분적으로 꼬이고 변형된 유리를 닮았다. 이들 파편들은 수증기마그마성 파쇄작용동안 급냉으로 응력파가 멜트를 통해 전달되어 체적 탄성률을 증가하는 변형률을 생산하는 파쇄기구에 의해 형성되었다.

주요어: 말잔등응회암, 멤버 U-5, 수증기마그마성 분화, 마쇄면, 파쇄기구

Sang Koo Hwang, So Jin Lee and Kyung Sik Oh, 2019, Eruption types and vesicularities from pumice clasts of Member N-5 in the Maljandeung tuff, Ulleung Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 4, p. 431-444

ABSTRACT: We analyzed several microtextures and measured densities and vesicularities to interpret its eruption type, and fragmentation type and mechanism in the Member N-5 of the Maljandeung Tuff, Ulleung Island. Occurrence of wet pyroclast materials, such as accretionary lapilli and armoured lapilli in the Member N-5A and D, suggests that the volcanic activity at the Maljandeung during 18.8 ka B.P. originates from ‘wet’ explosive eruptions, and reflects the environment in which magma may encounter external water. It means that the explosive eruption is a ‘wet’ phreatomagmatic eruption than ‘dry’ magmatic eruptions, as considering water-rich wet plumes and abundance of finer grains. Considering the occurrence of charred woods in the member, the external water is considered to be groundwater that can come into contact with magma. Mean vesicularities in pumiceous lapillistones of the Member U-5B range from 54.5 to 63.3%, indicating that the level of the phreatomagmatic fragmentation surface in which magma comes into contact with aquifer is lower than level of the hypothetical magmatic fragmentation surface, because the level where magma can cause magmatic fragmentation in the conduit is where the magma rises and expands at a vesicularity of 75 to 83%. Thus, the phreatomagmatic fragmentation was driven by volumetric expansion of groundwater after it was rapidly heated by contact with magma in the conduit during 18.8 ka B.P. Exsolving magmatic volatiles may also contribute to expansion and fragmentation during the phreatomagmatic event. At this time, the phreatomagmatic fragmentation resulted in a higher gas pressure caused by groundwater than the magmatic volatiles. The blocky grains dominant the Member resemble shattered glass or glass that has been partially twisted and deformed while still plastic during the fragmentation. These

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

fragments form a fragmentation mechanism that stress waves propagate through a melt and produced strain rates that exceed its bulk modulus due to quenching during the fragmentation.

Key words: Maljandeung tuff, member U-5, phreatomagmatic eruption, fragmentation surface, fragmentation mechanism

(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; Kyung Sik Oh, Division of New Material Engineering, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea)

1. 서 언

폭발성 분화는 화산활동 중에 강력하고 파괴적인 유형이며, 크게 2개의 다른 기구에 의해 일어난다. 마그마성 혹은 '건조성' 분출은 원래 마그마에 용존된 가스에 의해서만 일어나며, 반면에 수증기마그마성 혹은 '습윤성' 분출은 마그마가 외부물과 혼합될 때 일어난다.

이 연구에서 우리는 분화유형과 함께, 특히 폭발 과정 자체, 즉 파쇄과정에 초점을 맞춘다. 왜냐하면 이 과정은 우리가 화산분화가 어떻게 일어나는지를 이해하는 것에 초점을 두기 때문이다. 파쇄작용은 액체 마그마에서 분리된 가스기포를 가진 마그마를 분산된 액체방울(±기포와 고체) 혹은 고립된 고체입자를 가진 가스체로 변환시킨다. 화산분출의 폭발력은 파쇄작용동안 생성되며, 여기서 팽창하는 마그마(멜트+기포)의 잠재에너지는 개개 파편의 운동에너지로 전환되고 열에 의해 화산플룸으로 팽창한다.

폭발작용 즉 파쇄작용도 화도에서 일어나는 환경에 따라 크게 다른 2개 유형이 있다. 마그마성 파쇄작용은 빠르게 상승하는 마그마로부터 용존 가스의 빠른 해방에 의해 화산폭발을 일으킨다. 마그마는 규산염 액체에서 가스기포들의 포말로부터 빠르게 가속하는 가스 흐름으로 변환되어 화성쇄설물(액체와 고체 입자)을 운반한다. 마그마와 지표수(호수 혹은 바다) 혹은 지하수의 맹렬한 상호작용은 수증기마그마성 파쇄작용의 원인이 된다. 마그마의 수동적 급음으로부터 폭발성 포출까지의 활동 스펙트럼은 마그마가 물과 접촉하는 환경에서 수리학을 반영한다.

자연계에서 관찰되는 화산폭발은 복잡하지만 분출 역학과 분출과정을 이해하고 과정 간의 상호작용을 터득할 수 있다. 분출역학은 (1) 마그마 저장고, (2) 화도, (3) 화구에서 일어나는 과정들에 의해 총체적으

로 영향을 받는다. 마그마챔버에서 조성구배 혹은 새로운 마그마의 맥동적 유입은 분출로 몰고 가는 초과 압력에 큰 영향을 미칠 것이다. 화도환경에서, 마그마 상승은 탈기작용(degassing)과 결정작용동안 멜트 유동에 변화를 일으킨다(Cas and Wright, 1987; Jaupart and Allegre, 1991; Cashman *et al.*, 2000). 화도에서 마그마가 갇히고 휘발성물질을 잃는데, 이는 멜트 유동의 변화를 일으켜 분출과정에 영향을 미친다(Gardner *et al.*, 1998). 흐름역학은 멜트에서 용존 휘발성물질과 기포의 농도 변화에 따라 변화하는 멜트 유동에 관련되어 있다(Pinkerton and Stevenson, 1992; Manga *et al.*, 1998; Rust *et al.*, 2003).

울릉도에서 가장 큰 폭발성 분화작용에 해당하는 말잔등응회암은 면밀한 암상분석을 통해 운반 및 퇴적과정을 정확하게 해석하였고 분출과정을 유추하였다(Kim *et al.*, 2014). 그러나 분화작용은 화도에서 파쇄작용으로부터 시작하여 폭발작용을 거치는 과정이기에 이들에 대한 정량적 자료를 획득함으로써 더 신뢰성 있는 해석을 할 필요가 있다.

이 연구에서 우리는 이 말잔등응회암의 4개 멤버 중에 칼데라 외부에서 발견되지 않고 칼데라 내부에 노출되는 멤버 N-5의 부석편을 자세히 검토하고, 이 멤버의 폭발성 분화동안 화도에서 일어난 변화에 관해 중점을 둔다. 이 분화작용은 폭발사건 직전에 화도 환경을 시험하고 폭발사건동안 화도 역학을 유추하며 분화유형을 설명할 수 있는 좋은 예가 될 것이다. 왜냐하면 파쇄기구, 파쇄유형과 분화유형은 이 멤버의 화성쇄설물로부터 쉽게 증명될 수 있기 때문이다. 파쇄작용과 분화작용의 유형에 관한 일반적 의문은 멤버 N-5 부석편에 대해 정량적인 밀도 및 기공률, 정성적인 조직으로부터 설명될 수 있다. 각 분출단위에서 나온 부석편에 대해 조직분석, 밀도와 기공률을 정량적으로 시험함으로써, 우리는 이러한 의문에 답

할 수 있을 것이다.

한편 용어를 명확하게 사용하기 위하여, 우리는 폭발작용(explosion)은 폭발에 대한 지진적 표시 혹은 음향적 표시를 의미하고, 분화작용(eruption)은 화구에서 물질을 포출하는 것을 말하며, 파쇄작용(fragmentation)은 기포를 가진 연속적 액체 혹은 고체로부터 기포상 액체 및 고체의 덩어리를 함유하는 연속적 기체로의 전환을 나타낸다(Cashman *et al.*, 2000).

2. 지질배경

2.1 울릉도 층서

울릉도는 동해 서부에서 울릉분지의 북변부에 위치하며 약 2,200 m 깊이의 심해저에서 해수면 위로 984.6 m 까지 솟아있는 화산이다.

이 화산의 층서는 부정합 및 조성차이에 의해 하부로부터 도동현무암질암류, 울릉층군, 성인봉층군과 나리층군의 4개 층군으로 구분되었다(Hwang *et al.*, 2012). 도동현무암류는 현무암질 용암 및 유리쇄설성 퇴적층의 연속체(1.43~0.97 Ma; Hwang *et al.*,

2012; Brenna *et al.*, 2014)이고 대부분 바다쪽으로 40~70° 경사되며, 이의 기저는 노출되지 않는다. 울릉층군은 조면암질 각력암 및 용암류(1.25~0.51 Ma; Hwang *et al.*, 2012)로 구성되고, 성인봉층군은 조면암질 화성쇄설암 및 용암류(0.73~0.23 Ma; Hwang *et al.*, 2012)와 포놀라이트질 용암돔으로 구성된다. 나리층군은 포놀라이트질 화성쇄설층과 조면안산암질 분석층 및 용암돔으로 구성되고 봉래분석층, 말잔등응회암, 나리분석층, 알봉조면암과 죽암분석층 순으로 구분된다.

2.2 말잔등응회암의 층서

말잔등응회암은 탄화목의 C 연대측정에 의하면 약 18.8~5.6 ka B.P.에 분출되었고(Im *et al.*, 2012) 두꺼운 테프라 연속체가 대부분을 차지한다(Kim *et al.*, 2014). 이때 일련의 칼데라 함몰이 수반되었으며, 이 섬의 중앙부에 원형 저지로서 나리분지를 형성하였다. 말잔등응회암은 중거리부에서 상부로부터 하부로 가면서 U-2에서 U-5로 세분되었으며(Machida *et al.* (1984), 근거리부에서 N-2에서 N-5로 세분되

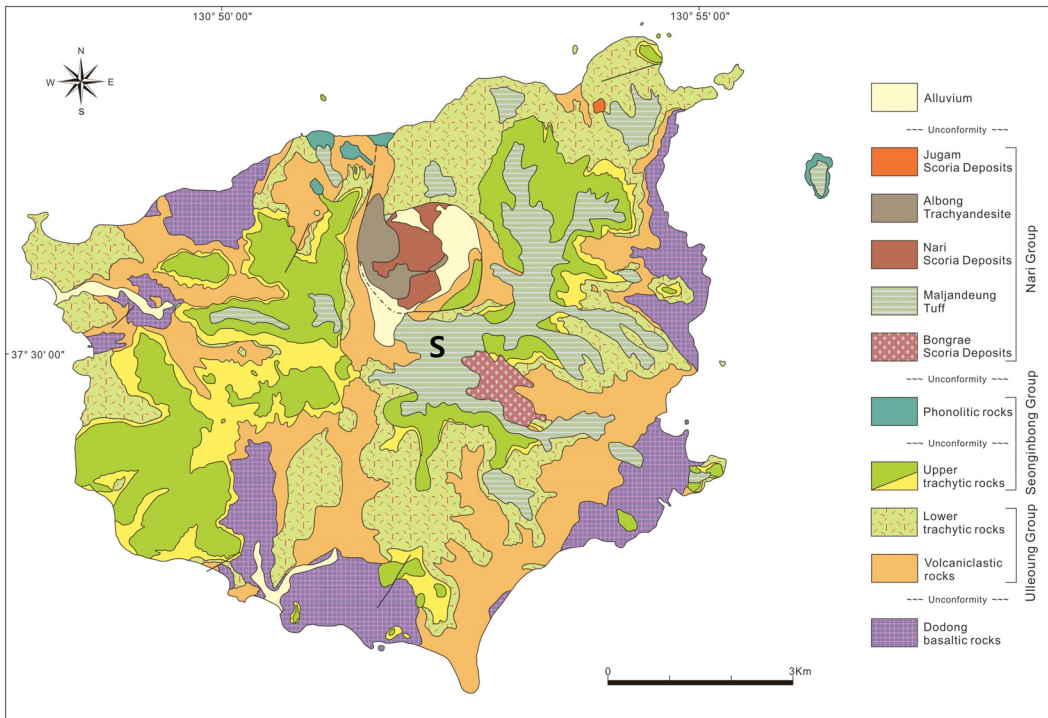


Fig. 1. Geological map of Ulleung Island after Hwang *et al.* (2012), showing the sampling sites (S) in the southern wall of Nari caldera.

었다(Kim *et al.*, 2014).

칼데라 벽에서 근거리 층서는 매우 복잡하지만 Kim *et al.* (2014)는 나리테프라층이라 하고 N-5에서 N-1으로 구분하였다. 이들은 국지적으로 혹은 광역적으로 분산된 강하 화성쇄설층의 교호 및 혼합되어있고 국지적인 화성쇄설찌꺼지와 화성쇄설밀도류(PDCs)의 화성쇄설암층을 포함한다. N-5에서 N-2까지는 말잔등 응회암에 대비되고 N-1은 나리분석층(Hwang *et al.*, 2012)에 대비된다(Hwang *et al.*, 2018).

말잔등응회암은 좁은 조성범위(55.1~58.7% SiO₂)를 가지지만, 여러 가지 화학적 변화에 의한 마그마 진화의 해석을 가능케 한다(Hwang *et al.*, 2019). 각 멤버의 분화작용은 18.8 ka B.P. (N-5), 11.0 ka B.P. (N-4), 8.4 ka B.P. (N-3), 5.6 ka B.P. (N-2)에 일어났다(Okuno *et al.*, 2010; Shiihara *et al.*, 2011; Im *et al.*, 2012). 말잔등응회암은 조성이 포놀라이트질 내지 테프리포놀라이트질에 속한다(Brenna *et al.*, 2014; Hwang *et al.*, 2019). 이 중에서 멤버 U-4, 3, 2는 평균 기공률이 74~80% 범위를 가지지만, 이와 달리 멤버 N-5는 훨씬 더 낮은 기공률을 가진다.

3. 멤버 N-5의 기재

말잔등응회암의 최하부 멤버 N-5는 약 13 m 두께이고 다양한 암상으로 표시되며 5개 단위, 즉 상부로 향하여 N-5A에서 N-5D와 N-5R로 구분된다(Kim *et al.*, 2014). 이 멤버는 라필리암을 제외하고 응회질 기질에 라필리 내지 암괴 크기의 부석으로 구성되고 종종 이질 조면암질 암편을 가진다(그림 2). N-5A에서 N-5D는 화성쇄설암(pyroclastic rocks)이고 N-5R은 지표쇄설암(epiclastic rocks)에 속한다.

단위 N-5A는 수십 cm 두께이고 괴상 누적 라필리 응회암(mTacc)으로 구성되고 희미한 층상 부석질 라필리응회암(dbpLT) 렌즈를 협재한다(Kim *et al.*, 2014). 누적 라필리응회암은 수 cm 두께의 여러 층으로 구성되고 경우에 따라 희미한 층상 부석질 라필리응회암을 덮는다. 누적 라필리응회암은 변동성 수증기마그마성 폭발로 인해 스템이 풍부한 분화 플룸으로부터 생성되었다(Kim *et al.*, 2014).

단위 N-5B는 희미한 층상 부석질 라필리응회암(dbpLT)으로 구성되고 부석질 라필리암(pLS) 렌즈를 협재한다(그림 3a). 층상 부석질 라필리응회암은

두께가 수십 cm이지만 측방으로 넓은 두께 변화를 나타낸다. 부석질 라필리암은 대부분 부석 라필리로 구성되고 입자지지되어 있지만 그들 사이에 응회질 기질의 코팅으로 인해 서로 붙어있다(그림 3b). 본질의 부석편은 조성이 포놀라이트질이며(Brenna *et al.*, 2014; Hwang *et al.*, 2019), 모양이 흔히 모서리가 거의 직각인 블록상(blocky)이고 간혹 판상(planar)도 있으며, 색깔이 대개 담회색 내지 담황색이다(그림 3b). 본질 부석편은 대부분 라필리 크기이고 부수적으로 화산탄 크기(최대 25 cm)도 함유하며 대개 낮은 기공률을 갖는 불량 다공상(poorly vesicular)을 나타내고 석기에 침상 알칼리장석 미반정을 매우 드물게 가진다(그림 3c). 이 단위는 이질 암편으로 조면암 라필리 및 암괴를 부수적으로 함유한다(그림 3b). 이 층상 부석질 라필리응회암은 5~30 cm 두께의 저각도 사층리 응회암(sT/xT)에 의해 덮인다. 여기서 라필리암에 포함된 암회색의 이질 조면암질 암괴는 이 화산의 정상부를 이루는 선기 조면암 용암에서 유래되었다고 해석된다. 본질 포놀라이트질 부석편은, 아마도 수증기마그마성 분화동안 탄도비행 혹은 고농집 PDCs에 의해서 혹은 초가압 돔의 갑작스런 폭발성 해체에 의해서 내측 칼데라벽 위로 해체되어 운반되었다고 보았다(Kim *et al.*, 2014). 이 단위에서 입자지지 라필리암 렌즈는 PDC로부터 조립 라필리 및 암괴의 기저층으로 분리 퇴적된 것으로 해석되었다(Kim *et al.*, 2014).

단위 N-5C는 3 m 두께의 괴상 부석질 라필리응회암(mLT) 혹은 응회암이고 기저에 저각도 절단면을 가진다(Kim *et al.*, 2014). 이 라필리응회암은 대부분의 부석편이 심하게 변질되어 황갈색을 보여준



Fig. 2. Outcrop photograph showing a vertical section of the Member N-5 in the southern caldera wall.

다(그림 3a). 큰 이질 조면암 및 응회암 암괴는 종종 직경이 50 cm를 능가하며, 곳곳에 산재하고 기저에 비대칭 봄색을 수반하기도 한다(Kim *et al.*, 2014). 큰 암괴를 함유한 괴상 부석질 라필리응회암은 아마도 화도 혹은 화구벽에서 유래된 탄도비행의 암괴가 수반되는 치밀한 층류 PDCs의 퇴적물로 해석되었다(Kim *et al.*, 2014).

단위 N-5D는 5 m 두께의 연속체이며, 무장 라필리응회암(mLTacc), 수평의 쇄설물 방향성을 가진 괴상 암편질 및 부석질 라필리응회암 혹은 응회각력암(mLT/mTBr)으로 구성된다(그림 3d). 무장 라필리응회암은 화산화가 작은 암편 및 부석편을 다양하게 둘러싸는 조직을 가지는 독특한 특징을 보여준다. 그러나 가끔 암편 핵이 없이 화산회로만 뭉쳐진 둥근 덩어리 펠릿도 있다(그림 3d). 이는 산발적인 수증기 마그마성 활동에서 유래되는 습윤한 써지 혹은 밀도류의 이동으로 생성되었다(Schumacher and Schmincke, 1991; Kim *et al.*, 2014).

단위 N-5R은 절개면 위에 놓이는 암편질 각력암(Br)의 혼돈 연속체이다(Kim *et al.*, 2014). 이 각력암

은 절개면 위에 놓이며, 흔히 분급이 불량하고 쇄설물 혹은 기질지지되며 희미한 외상배열을 가진다(Kim *et al.*, 2014). 이러한 특징은 혈령한 화산쇄설 물질의 재이동에서 유래되는 암설류 혹은 암설강하 퇴적물로 해석되었다(Kim *et al.*, 2014).

4. 연구방법

4.1 시료채취

부석의 시료는 나리 칼데라 내부의 남쪽 만곡부 계곡에서 노출되는 단면으로부터 수집되었다. 이 단면에서 부석 시료는 멤버 N-5의 부석질 라필리암(I_1 , I_2 and I_3)에서 선택되었다(그림 2). 왜냐하면 부석질 라필리암은 다량으로 부석편을 온전하게 수집할 수 있지만 기타 화성쇄설암은 화산재에 의한 고결로 인하여 부석을 파괴하지 않는 상태로 수집하기가 어렵기 때문이다. 기공의 크기와 전반적 기공률의 완전한 범위를 나타내기 위해, 각 시료는 16~64 mm 직경의 20~60개 쇄설물을 수집하였다. 칼데라 남쪽 만곡부 계곡의 멤버 N-5 라필리암에서 3개 시료는

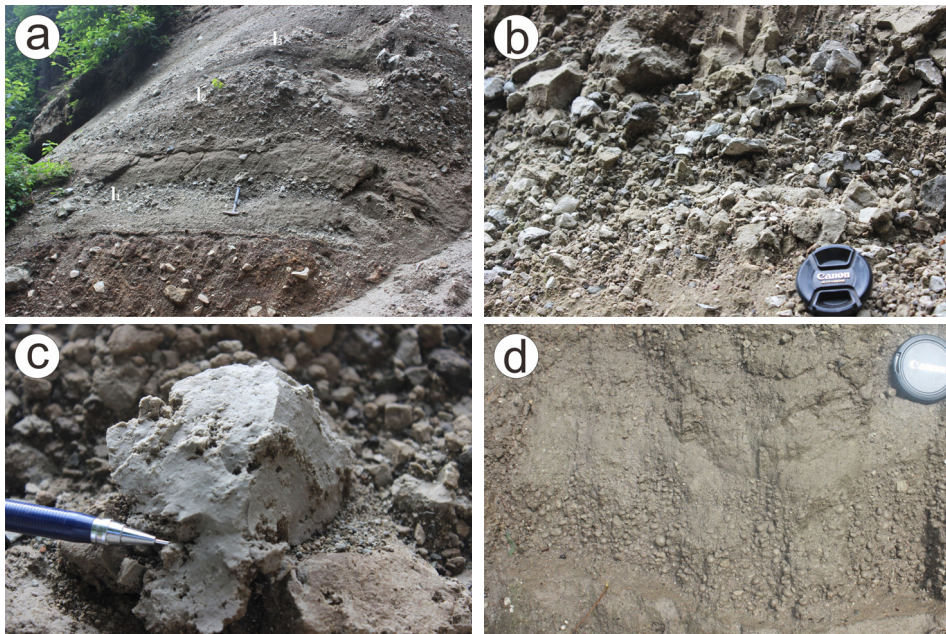


Fig. 3. Outcrop photographs showing the deposit features of some lithofacies of the Member N-5 in the southern caldera wall. (a) Three pumice lapillistones (I_1 , I_2 and I_3) alternated with diffusely stratified lapilli tuffs in the lower part of the member; (b) Pumice lapillistone consisting of juvenile pumice lapilli with subordinate grey trachyte lapill, thinly coating with volcanic ashes; (c) A coarse pumice lapillus showing the irregular distribution of some vesicle clusters; (d) armoured lapilli tuff in the upper part of the member.

총 100여개 부석편을 채취하였다.

4.2 이미지 분석

화성쇄설물의 조직에서 특히 기공 입도, 기공 모양, 미정 함량은 화도과정을 연구하는데 이용될 수 있다(Cashman and Mangan, 1994; Hammer *et al.*, 1999). 박편에서 찍은 이미지는 개별 층서레벨에서 나온 부석의 조직적 특징을 시험하고 멤버 N-5 라필리암에서 분출단위에 대한 기공률의 상태와 변화를 분석하기 위해 이용되었다.

각 선택 분출단위에서 나온 1~3개 부석편은 박편에서 이미지 수집과 분석을 위해 선택되었다. 선택은 한 시료에서 모든 부석편의 밀도 자료와 정성적 관찰에 기준을 두고 하였다. 단일 박편에서 기공 입도 및 모양의 불균질성은 3개의 다른 확대 이미지로 찍어 분석되는 것을 필요로 하였다. 이 자료는 기공 입도를 완전하게 특징짓기 위해 종합되었다. 멤버 N-5에 대하여, 가장 적절한 확대배율은 25x, 50x와 100x이다. 최저배율(25x) 이미지는 각 16~64 mm 쇄설물에서 큰 기공을 포함하기 위해 찍었다. 최소의 25x 이미지는 전 단면에서 기공조직의 범위를 나타내기 위해 조심스럽게 선택하여 찍었다. 더 큰 배율의 이미

지는 조직해석에 도움을 주기 위해 전략적으로 이미지 세트에 포함시켰다(그림 4).

4.3 밀도와 기공률

본질 쇄설물의 밀도가 크기에 따라 변화하기(e.g., Walker, 1981) 때문에, 라필리 크기 중에서 16~32 mm 크기 범위를 가진 한정된 부석편만 사용되었다. 이 크기 범위는 밀도가 더 큰 모든 부석편과 구별하기 쉬운 정도로 충분히 큰 부석편을 포함한다(e.g., Walker, 1981). 그러나 거의 모든 화성쇄설층에서 합리적이고 일반적인 정도로 작기 때문에, 많은 수의 부석편을 수집하고 신속하게 처리하기가 쉽다. 부석편은 일차적으로 입도에 따라 밀도 변화를 나타내며(Cas and Wright, 1987), 이차적으로 화산탄의 경우 파쇄 후의 용리작용으로 더 높은 기공률을 나타낼 수 있고(Wright *et al.*, 2007), 세립 라필리 크기로 작아질수록 오차가 크게 나타날 수 있기 때문에 파쇄 직전의 정량치를 얻고 합리적 비교를 위하여 크기 범위를 한정해야만 한다.

밀도와 기공률 측정은 각 건조한 부석편에 대해 공기 중에서 무게, 고온에서 끓여 물로 포화시킨 부석편에 대해 공기 중에서의 무게와 물속에서의 무게를

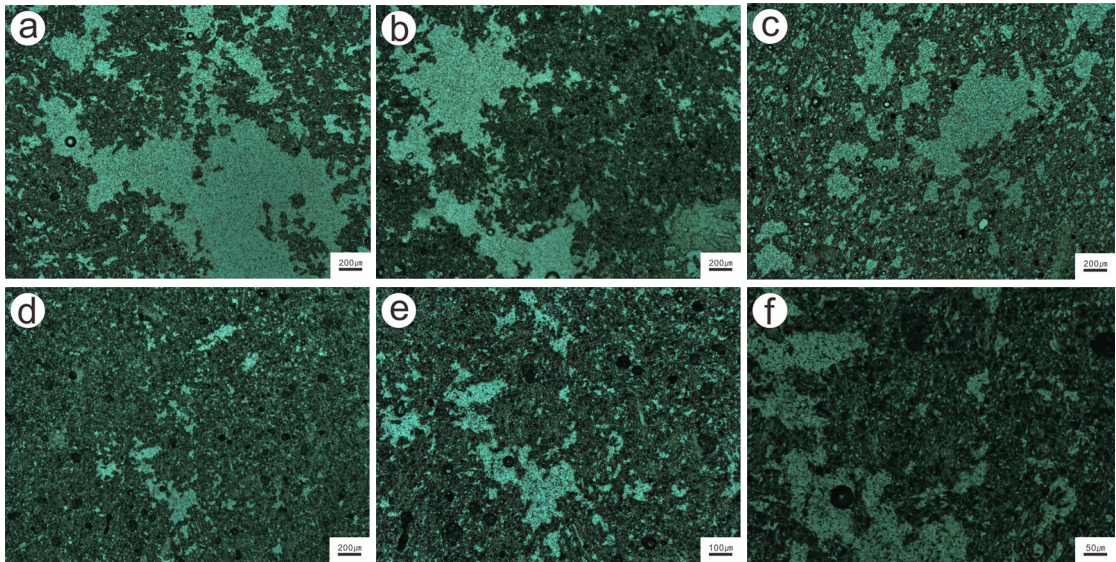


Fig. 4. Photomicrographs that show textural features in modal pumice clasts from lapillistones (l_1 , l_2 and l_3) of the Member N-5, under plane light. (a) A coarse vesicle, with irregular ameoba shape, surrounded by fine and intermediate vesicles, x25; (b) Intermediate vesicles with irregular ameoba shape, x25; (c) Range of vesicle sizes is evenly distributed in a domain, x25; (d) Irregular distribution of fine vesicles between intermediate vesicles in a pumice clast, x25; (e) The central part of the x25 enlarged to the x50; (f) The central part of the x50 enlarged to the x100.

측정함으로써 아르키메데스의 원리에 따라 세심하게 결정되었다.

5. 결 과

5.1 기공조직 관찰

기공조직의 관찰은 기포화과정의 역할을 이해하고 상승 및 탈기작용의 상대적 시간척도 규모를 이해하는 열쇠이다(e.g., Cashman and Mangan, 1994). 기공크기는 폭발성 분화에서 기포 생성, 성장, 합체와 잠재적 파괴의 상대적 시기를 평가하는 도구이고 마그마 탈기작용의 양식, 시기와 정도가 분출화동을 잇따라 일으키는데 어떤 영향을 미치는지를 이해하는 도구이다(Cashman and Mangan, 1994; Polacci *et al.*, 2003). 기공 모양도 역시 급냉 당시에 마그마의 응력상태에 관한 정보를 가지고 있다(Marti *et al.*, 1999). 기포 생성과 성장에 관한 운동학적 정보는, 화도에서 상승속도 혹은 방사상 위치와 같은 분출전(pre-eruptive) 변수에 따라 달라질 수 있고, 또한 멜트 온도 및 휘발성 물질 함량과 같은 분출시 변수에 따라 달라질 수 있다.

멤버 N-5 라필리암에서 부석편들에 대한 특징은 박편에서 다양한 조직적 형상을 나타낸다(그림 4). 멤버 N-5의 라필리암에서 나온 부석편들로부터 조직을 관찰할 수 있다. 라필리암층에서 나온 최빈 부석은 각각 비교적 불규칙한 조직을 나타내지만, 비교적 두꺼운 기공벽을 가지고, 이미지는 합체된 조립 기공의 특징도 나타낸다. 이 부석편은 합체된 큰 아메바상 기포 주위에 작은 기포의 많은 집단이 흔히 무리를 이룬다(그림 4).

부석편에서 기공크기 범위는 전체적으로 매우 불균일한 분포를 보여준다(그림 3c, 4). 그러나 자세히 보면, 중립 내지 조립 기공 주위에는 작은 기공들의 우세한 부분이 도처에 불규칙한 분포를 나타낸다(그림 4a, 4b, 4c). 기공 크기에 따라 특징을 살펴보면, 중립 기공은 불규칙하지만 볼록하고 오목한 벽을 가진 것으로 합체되어 있으며(그림 4c), 조립 기공은 중립 기공들의 합체에 의한 성장을 지시하는 아메바상 모양을 가진다(그림 4a, 4b). 그러나 얇은 기포벽과 얇은 피막(film) 등은 전혀 관찰되지 않는다. 세립 기공들은 마치 하늘에 무수한 별들이 산재한 것처럼 불규칙한 분포를 보인다(그림 4d, 4e, 4f). 그러나 신장된 기공들의 띠는 전혀 관찰되지 않는다.

5.2 부석조직의 의미

멤버 U-5의 라필리암에서 나온 부석편의 조직은 세립 기포의 많은 개수를 가지고 두꺼운 유리벽을 나타낸다. 그러나 불규칙한 기포 조직과 합체는 적은 시간과 짧은 체류시간을 암시하며, 불균일한 기포크기의 분포는 비교적 단순한 마그마 상승역사를 의미한다. 즉 부석편에서 중간 내지 낮은 정도의 합체를 보여주며, 작은 기포의 풍부함과 불규칙한 조직은 기포 성숙과 합체에 필요한 시간이 길지 않았고, 작은 기포화를 위해 짧은 시간을 반영하는 것을 암시한다. 그러나 얇은 기포벽 및 피막(film)과 같은 높은 상호연결성(inter-connectivity)과 높은 투과성(permeability)을 나타내는 증거가 관찰되지 않는데, 이는 효과적인 기포합체와 가스탈출이 일어나지 않았음을 반영한다. 얇은 피막은 기포 팽창에 의해 얇아지며 결국 합체를 일으킬 수 있다(e.g., Klug and Cashman, 1996).

5.3 밀도와 기공률 측정

멤버 N-5의 라필리암 I_1 , I_2 , I_3 에서 나온 부석편들에 대해 시험하였다. 이들 부석편에 대해 측정된 각 밀도와 기공률은 표 1에 정리되어있다.

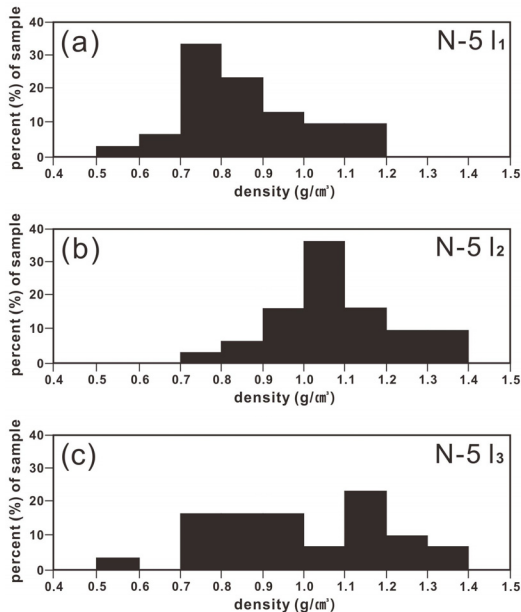
이들 시료는 라필리암의 전반에 걸쳐 시간에 따라 부석편의 밀도 및 기공률 변화패턴을 명확하게 보여준다. 각 분출층 자료는 각각 나름대로 일관된 변화를 나타낸다. 비록 이 자료는 3개 시료($I_1 \sim I_3$)에서 밀도가 다소 좁은 범위($0.55 \sim 1.37 \text{ g/cm}^3$)를 나타내지만 말잔등응회암의 다른 멤버보다 상당히 더 높고, 기공률도 좁은 범위($41 \sim 78\%$)를 가지지만 기타 멤버보다 상당히 더 낮다(표 1). 시료의 평균밀도는 0.85 g/cm^3 에서 1.07 g/cm^3 로 증가하다가 1.00 g/cm^3 로 약간 감소한다. 그리고 밀도 빈도를 보면 I_1 및 I_2 시료는 완전한 단봉상을 나타내지만(그림 5a, 5b), I_3 시료는 거의 대등한 빈도를 가지는 쌍봉상을 보여준다(그림 5c). 한편 평균기공률은 63.3에서 54.5로 감소하다가 57.5로 약간 증가하는 경향이다(표 1). 그리고 기공률 빈도를 보면, I_1 시료는 빈도 차이가 큰 쌍봉상을 보여주고(그림 6a) I_2 시료는 완전한 단봉상을 나타내지만(그림 6b), I_3 시료는 거의 대등한 빈도의 완전한 쌍봉상을 보여준다(그림 6c).

5.4 밀도 및 기공률의 의미

이 멤버 N-5의 라필리암의 자료에서 밀도의 다소

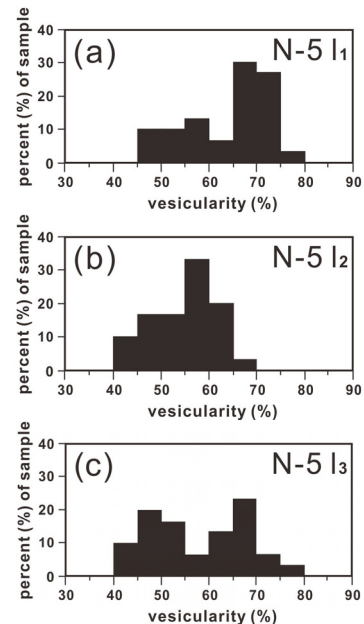
Table 1. Parameters for lapillistone units from Member N-5, and average parameters for units of lapillistone and pumice deposits from the other Maljandeung Tuff.

Member	Lithofacies	Strati-graphic unit	Density (g/cm ³)				Vascularity (%)			
			Min.	Max.	Mean	Modal	Min.	Max.	Mean	Modal
N-5	Lapillistone	l ₃	0.55	1.37	1.00	1.17	41.15	78.01	57.51	66.88
		l ₂	0.80	1.37	1.07	1.04	41.15	67.59	54.47	56.21
		l ₁	0.55	1.18	0.85	0.74	46.76	78.01	63.33	66.85
U-4	Pumice deposits	p ₁	0.39	0.55	0.47	0.46	70.89	82.48	77.17	77.29
U-3	Pumice deposits	average	0.29	0.66	0.44	0.38	67.35	86.54	79.80	81.18
	Lapillistone	average	0.31	0.72	0.48	0.44	62.41	85.06	73.77	75.17
U-2	Pumice deposits	average	0.29	0.67	0.45	0.48	62.62	86.84	75.74	78.28
	Lapillistone	average	0.29	0.60	0.40	0.37	65.42	85.55	77.59	78.24

**Fig. 5.** Histograms showing range in density for the pumice lapillistones (l₁, l₂ and l₃) from the Member N-5.

좁은 범위(0.55~1.37 g/cm³)와 기공률의 좁은 범위(41~78%)는 이들의 범위가 매우 넓은 펠리언 분화(pelean eruption)와 벨카니언 분화(vulcanian eruption)와 상당히 큰 차이를 가진다. 또한 이 자료가 말잔등응회암의 다른 멤버보다 밀도가 상당히 더 높고 기공률이 상당히 더 낮은 것(그림 7)은 일반 마그마성 분화로부터 유래되었음을 나타내지 않는다.

수집된 부석 시료의 밀도는 비교적 높은 밀도에서

**Fig. 6.** Histograms showing vesicularity distribution for the pumice lapillistones (l₁, l₂ and l₃) from the Member N-5.

대체로 유사한 좁은 단봉상 피크를 가지지만(그림 5a, 5b) 대등한 피크의 쌍봉상을 나타내는 것도 있다(그림 5c). 밀도 자료의 단봉상 분포는 기공률에 의하면 l₂ 시료에서 분출된 마그마가 비교적 균일했음을 지시하지만(그림 6b), l₁ 시료에서 분출된 마그마는 다소 불균일했음을 지시한다(그림 6a). 역시 분출단위 사이에서 상승 및 기공화작용의 화도과정은 큰 차이 없이

대체적으로 유사했음을 암시한다. 특히 I_2 시료와 같이 부석편 밀도분포의 더 좁은 범위는 폭발 직전에 화도 내에서 기포화작용의 균일한 환경을 암시한다. 대조적으로, I_3 시료의 밀도와 기공률은 다른 시료의 것보다 더 넓은 분포와 쌍봉상 분포를 가진다(그림 5c). 이 시료에서, 쌍봉상 밀도분포는 더 높은 밀도를 가진 부석편의 유입으로 인해 넓어질 수도 있다. 한편 쌍봉상 기공률 분포는 초기 균질한 마그마로부터 불균일한 휘발성물질의 손실 때문이라고 추리할 수 있다(c.f., Hoblitt and Harmon, 1993). 이들 변화경향은 분출할 때마다 마그마가 약간 다른 이력을 가졌음을 암시한다. 이러한 밀도 및 기공률 분포의 범위는 평균값과 함께 시간에 따라 지그재그상 변화패턴을 나타내는데, 이는 N-5B 분출동안 각 분출단위를 지시하는 맥동적 분화작용을 지지한다(Hwang *et al.*, 2018).

6. 토 의

말산등응회암의 멤버 N-5 라필리암에 대한 분화 유형과 화도과정은 이 멤버의 암상과 화성쇄설물의 조직으로 새겨져 있기 때문에 이들로부터 유추해야 한다. 특히 화도에서 휘발성물질의 용리와 상승의 역할은 펠트에서 기포의 모양과 크기를 지배한다. 따라서 조직적 특징은 1) 기포 생성, 2) 확산, 감압과 합체에 의한 성장, 3) 파괴를 포함하는 과정들에 의해 만들어진다. 3개의 모든 과정은 아마도 동시적으로 일어났지만, 각각의 중요성은 공간과 시간에 따라 변화한다.

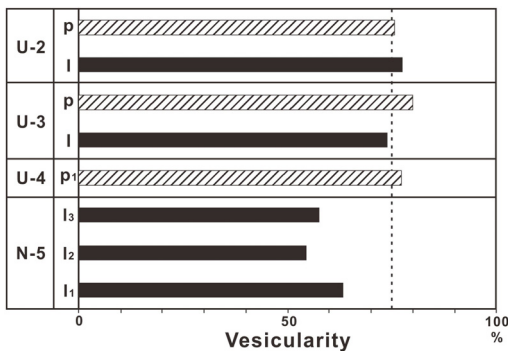


Fig. 7. Histograms showing the mean vesicularities of the Member N-5 are significantly distinguished from those of the other members.

6.1 습윤성 분출물: 분화유형

말산등응회암의 최하부 멤버 N-5는 약 13 m 두께로서 누적 라필리응회암, 부석질 라필리암, 층상 부석질 라필리응회암, 괴상 부석질 라필리응회암, 무장 라필리응회암 및 암편질 각력암 등의 다양한 암상으로 구성된다(Kim *et al.*, 2014). 이 멤버의 화성쇄설암은 라필리암을 제외하고 응회질 기질에 라필리 내지 암괴 크기의 포놀라이트질 부석으로 구성되고 종종 이질 조면암질 암괴를 가진다. 이들의 모양은 연마작용이 아니고 단열작용에 의한 파쇄작용을 지시한다. 입도에 관해서도 세립질이 우세하며 높은 물/마그마 비를 지시한다.

특히 하부(N-5A)에서 누적 라필리응회암의 협재에 의하면 분화작용은 스팀이 풍부한 분출구름의 불연속적 맥동을 생성시키는 변동성 수증기마그마성 폭발로 시작되었다고 보았다(Kim *et al.*, 2014). 또한 상부(N-5D)에서 여러 무장 라필리응회암층은 산발적인 수증기마그마성 활동에서 유래되는 써지 및 밀도류의 다양한 물성과 물 함량을 암시한다(c.f., Schumacher and Schmincke, 1991; Rosi, 1992; Houghton *et al.*, 2000). 이러한 암상들은 모두 물기가 풍부한 습윤한 분출물로 기재되며, ‘습윤성’ 폭발성 분화로부터 유래되었음을 지시하고 마그마가 물을 만나는 환경을 반영한다. 이 폭발성 분화는 물-풍부한 습윤성과 분출물의 세립질 입도를 감안하면 ‘건조성’ 마그마성 분화라기보다 수증기마그마성 분화라는 것을 의미한다(Kim *et al.*, 2014).

이때 상호작용하는 물과 마그마의 상대적 질량비에 따라 스팀(수증기) 혹은 2개 상(액체와 가스)의 유체로 전환될 것이다. 물은 역시 준안정(metastable) 액상으로 가열되어 외부 힘에 의해 계속 작용할 때 스팀으로 내보일 것이다. 일반적으로, 상호작용동안 더 많은 외부물이 유입되면, 분출은 더 습윤(액체가 풍부한 유체)할 것이다. 역시 마그마/물 상호작용의 결과에 의해 분출 양식도 다양해질 것이다.

이 활동에 관련된 분출물은 습윤한 화성쇄설물로 기재되었으며, 분출과 이동동안 모든 물이 스팀으로 전환되지 않았음을 지시한다. 이 분출은 수증기마그마성 상호작용으로부터 발생하는 높은 압력의 가스가 원인이라고 생각된다. 수증기플리니언 분출은 화성쇄설물이 세립질이라는 것을 제외하고 플리니언 분출과 유사한 양식을 가진다. 전자의 활동양식에 관련

된 화성쇄설물은 분출과 이동동안 물의 대부분이 스팀으로 전환되었지만 일부가 물로 남았을 정도로 습윤했다고 할 수 있다.

6.2 밀도 및 기공률 차이: 화도 마그마 층서

중부(N-5B, C)에서 부석질 라필리용회암과 이에 협재되는 부석질 라필리암은 다양한 해석이 가능한데, 후자가 해석의 열쇠를 쥐고 있다. 라필리암의 부석편들은 중다공상(moderately vesicular, 40~60%) 기공률에 의하면 화도에서 극히 낮은 마그마성 가스 팽창, 비효율적 마그마성 파쇄작용 혹은 수증기마그마성 파쇄과정을 암시하는데, 이는 마그마성 혹은 수증기마그마성의 어느 파쇄과정의 영향을 받았는지를 밝혀야 한다.

먼저 내인성 돔의 성장에서 극히 낮은 마그마성 가스 팽창으로부터 중력붕괴에 의한 파쇄작용(Sparks, 1997)을 생각해보자. 이 중력붕괴는 가압됨으로서 플라스틱한 용암의 파쇄에 의해 대부분 많은 암괴들에 라필리와 화산재가 수반되는 암괴회류(block and ash-flow)를 일으키는 펠리언 분화(pelean eruption)를 나타낸다. 따라서 이 암괴회류는 입자지지를 하는 단암질 각력암을 형성할 것이다. 그러나 이 각력암은 본질 암괴들이 $1.0\sim 2.5\text{ g/cm}^3$ 의 밀도와 치밀상(dense, <5%)에서 저다공상(poorly vesicular, 20~40%) 기공률을 가지며 밀도가 높고 기공이 적은 치밀상이 가장 우세하다(Wright *et al.*, 1980). 이러한 암괴회류 각력암은 암질, 밀도 및 기공률을 고려할 때 중다공상의 부석질 라필리암과 너무나 다를 뿐만 아니라 라필리암 상위를 덮는 비교적 화산재가 풍부한 대규모의 라필리용회암과 조합될 수 없다.

화도충전 혹은 은둔돔에서 미정 결정작용에 대응하는 초가압(over-pressurization)으로부터 폭발성 분화를 일으키는 벌카니언 분화(Hammer *et al.*, 1999; Wright *et al.*, 2007)를 생각할 수 있다. 마그마가 화도를 채우면 화도가 봉합되어 가압되고, 천부 마그마가 탈기작용으로 치밀상 뚜껍(cap)을 이룬다. 심부 마그마는 휘발성물질의 용리로 기포화가 일어나고 가스가 상승하여 천부 마그마와 평형을 이룬다. 이러한 화도 층서는 개개 벌카니언 분화 사이의 휴지기간 동안 발달될 것이다. 이런 층서 발달은 다음 분출에 요구되는 가압을 허용하는 천부계의 봉합, 천부계 최상부에서 용리된 휘발성물질의 손실, 그리

고 심부 마그마의 기포화에 따른 가스 상승으로 천부 화도 마그마에 가압을 의미하는 것이다. 그러니까 화도충전, 가압과 분화로 연결되는 윤회가 반복적으로 일어난다. 분화작용은 천부 화도로의 가압이 최상부의 탈기된 마그마의 강도를 증가할 때 야기되고, 천부 화도 마그마의 분출로 인해 심부 마그마의 빠른 기포화를 유도할 것이다. 즉 가스 탈출로 최상부 마그마가 분출을 야기하는 것이 아니고 천부 화도 마그마에 가스 상승으로 인해 가압될 때 분출을 야기하는 것이다. 그리고 최상부 마그마의 탈기작용과 이로 인한 정출작용에 의한 결정 추가는 최상부와 심부 화도 마그마 사이에 큰 밀도와 기공률 차이를 이룰 것이다(e.g., Sparks, 1997; Cashman and Blundy, 2000). 그렇다면 이 분출로부터 나온 본질편들은 밀도가 $<0.4\sim 2.5\text{ g/cm}^3$ 의 넓은 범위와 기공률이 치밀상(dense, <5%)에서 고다공상(highly vesicular, 60~80%)의 넓은 범위를 가질 것이다. 특히 화산탄과 같은 큰 본질편은 분출 후에도 긴 냉각기간동안 내부에 남아있던 휘발성물질의 용리로 팽창되어 더 낮은 밀도와 더 높은 기공률을 가질 수도 있다(Wright *et al.*, 2007). 그러나 이 부석질 라필리암에서 본질 부석편들은 밀도가 $0.55\sim 1.37\text{ g/cm}^3$ 범위이고 기공률이 54.5~63.3% 범위(표 1)로서 중다공상의 한정된 범위를 나타내기 때문에, 벌카니언 분화는 이 정량적인 자료에 부합되지 않는다. 또한 부석편의 정성적 관찰에 따르면, 실제로 짧은 체류기간에 의해 기포 성장, 그리고 조직의 붕괴 및 변화에 대한 시간이 상당히 제한적이었다. 그래서 작은 기포 생성이 지배적이고 불규칙한 기포 성숙만이 존재하였던 것으로 생각된다. 이러한 증거들도 긴 체류시간을 가지는 벌카니언 분화에서의 조직과 상반된다. 또한 벌카니언 분화에서 흔히 산출되는 뽕껍질 화산탄은 관찰되지 않는 것도 이를 지지한다.

이러한 이유들 때문에, 마지막으로 중부(N-5B, C)에서 부석질 라필리용회암과 이에 협재되는 부석질 라필리암도 역시 외부물과 접촉함으로써 발생하는 수증기마그마성 분화를 고려할 수밖에 없다. 수증기마그마성 분화는 일차적으로 외부물이 마그마와 접촉에 의해 빠르게 가열된 후, 물의 팽창에 의해 일어난다(Morrissey *et al.*, 2000). 폭발하는 마그마성 휘발성분은 역시 수증기마그마성 사건동안 팽창과 파쇄작용에 기여할 것이다.

6.3 기공률 범위: 파쇄유형

멤버 내에서 기공률 자료로부터 파쇄유형을 알아 낼 수 있다. 기공들은 모양과 분포가 매우 불규칙하고(그림 3c) 평균 기공률은 멤버 N-5 라필리암에서 시간에 따라 크게 변화하지 않는다. 멤버 N-5 라필리암의 평균 기공률은 54.5~63.3% 범위이지만(표 1), 말잔등응회암에서 다른 멤버들이 74~80% 범위인 것에 비해 상당히 낮은 편이다(그림 7). 이 기공률 변화는 마그마 상승동안 기포생성을 변화에 대해 일어나는 기구로서 대체로 감압률의 변화를 암시한다(Mangan and Sisson, 2000). 따라서 이 기공률은 화도에서 가상적 마그마성 파쇄면 위치보다 더 아래에 있을 때를 의미한다(그림 8). 왜냐하면 마그마성 분화의 특징은 화도 내에서 그 파쇄면의 위치가 상승하여 팽창하는 마그마의 기공률이 75~83% 범위에 달하는 점에 의해 지배되기 때문이다(Sparks, 1978).

한편으로 이 감압용리(decompressional exsolution)에 의한 일차비등(first boiling) 외에 정출유도 용리(crystallization-induced exsolution)에 의한 이차비등(second boiling)을 생각해볼 수도 있다. 오로지 이차비등에 의해서만 폭발작용이 일어나려면 적어도 약 20% 이상의 정출작용이 일어나야만 하는데, 이 부석편에서 미반정이 3% 이하로 존재하므로 이차비등에 의한 파쇄작용을 고려할 수 없다. 이에 따르면, 라필리암에서 기공이 적고 미정이 풍부한 본질 부석편은 폭발성 분화 전에 미정 결정작용에 대응하는 초가압(over-pressurization)을 겪었다고 보는 것(Sparks, 1997; Hammer *et al.*, 1999)과 상충된다. 이러한 이유 때문에, 우리는 이 테프라가 마그마가 지표수 및 지하수와 같은 외부물과 접촉함으로써 파쇄작용, 즉 폭발작용이 일어날 수 있었다고 생각할 수밖에 없다. 화도에서 마그마가 외부물과의 접촉은 수증기마그마성 활동의 원인이 되었다. 그래서 수증기마그마성 분화의 특징은 스팀이 풍부한 플룸이었고 세립질 화성쇄설물이 풍부했음을 나타내는 것이다.

울릉도에서 외부물은 해수 혹은 분화구를 채운 호수물 등의 지표수와 지하수가 가능할 것이다. 그런데 단위 N-5B에서 탄화목이 산출되는데 이는 화구 주위에 수목이 자라고 있었음을 의미한다. 그렇다면 화구 주위는 육상이어야지 해수 혹은 호수 등이 자리해서는 안 된다고 본다. 왜냐하면 지표수가 관여했다면 차라리 조개와 같은 수생 화석이 산출돼야 하지만

탄화목이 산출되니 지하수가 관여했다고 보는 것이 합리적이기 때문이다. 이런 이유로 외부물은 지표수라기보다 지하수가 마그마와 접촉한 것으로 판단된다(Hwang *et al.*, 2018).

그러므로, 말잔등에서 18.8 ka B.P.의 수증기마그마성 파쇄작용은 화도에서 지하수가 마그마와 접촉으로 빠르게 가열되어 부피팽창에 의해 유발되었다. 이와 동시에 용리되는 마그마성 휘발성물질은 역시 수증기마그마성 사건동안 팽창과 파쇄작용에 어느 정도 기여하였다. 따라서 가상적 마그마성 파쇄작용의 위치는 아마도 지하대수층 레벨보다 위에 있다고 생각할 수 있다(그림 8). 이때 수증기마그마성 파쇄는 마그마성 휘발성물질보다 지하수에 의한 높은 가스압력이 더 크게 작용하였다고 생각된다. 역시 수증기플리니언 분출은 화성쇄설물이 더 세립질이라는 것을 제외하면 양식이 플리니언 분출과 유사하다.

6.4 입자유형: 파쇄기구

수증기마그마성 분화에서 입자유형은 블록상, 방추상, 이끼상, 판상, 그리고 구형 혹은 방울상이 있다(Wohletz, 1983). 멤버 N-5의 화성쇄설층에는 블록

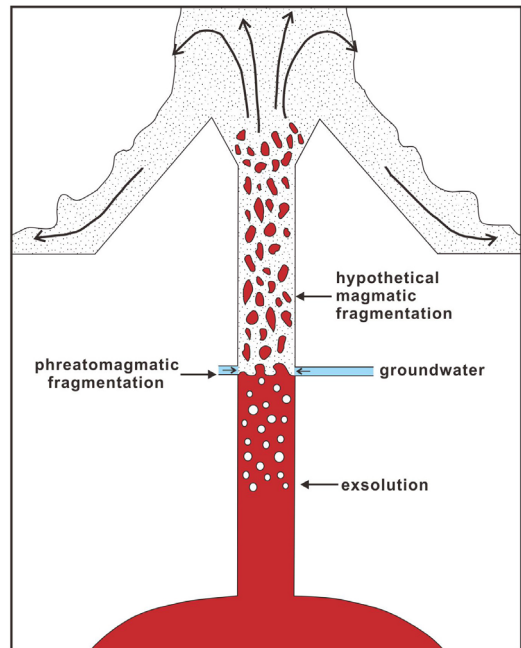


Fig. 8. A longitudinal section showing the levels of hypothetical magmatic and phreatomagmatic fragmentation surfaces in the conduit of the Member N-5.

상 입자가 우세하고 판상 입자가 포함된다(그림 3b).

블록상 입자는 산산조각난 유리 혹은 아직도 플라스틱할 때 부분적으로 꼬이고 변형된 유리를 닮았다. 이들 파편들은 수증기마그마성 사건동안 급냉으로 응력파(stress wave)가 멜트를 통해 전달되어 체적 탄성율(bulk modulus)을 증가하는 변형률을 생산할 때 형성된다(Morrissey *et al.*, 2000). 역시 멜트의 국지적 온도가 고상선 근처이고 취성 단열이 증기막(vapor film)의 붕괴에 의해 생산되는 열적 수축 혹은 신장성 응력파에 의해 발달한다고 생각된다. 응력파는 일반적으로 열파(thermal wave)보다 더 빠르게 전파되기 때문에, 멜트 체적이 빠르게 기계적 응력을 받을 때 아마도 열적 수축은 오로지 멜트 표면에 영향을 미친다.

멜트의 급냉부에서, 단열이 멜트 표면에 45° 이하의 각도로 전파되고, 판상 내지 곡판상(curvilinear) 면을 갖는 블록상 쇄설물을 형성할 것이다(Morrissey *et al.*, 2000). 증기막 진동은 액체 멜트의 표면에서 급냉된 멜트 조각들을 쪼개고 비급냉 표면을 노출시키는 와류를 생산할 것이다. 급냉되기 전에 파쇄되는 멜트 부분에서, 증기 와류는 비급냉 입자를 변형시키는 원인이 되고 멜트 표면장력이 유체표면 조식을 형성하도록 촉진시킨다.

판상 입자는 마그마 표면에서 벗겨진 급냉 외피의 조각으로 해석된다(Morrissey *et al.*, 2000). 이 파쇄 과정은 증기막의 진동, 기화파의 전파, 혹은 불안정성의 와류 때문일 수 있다. 이때 물 분사가 멜트 속으로 침투하고 부분적으로 혹은 완전히 표면 아래에 갇힐 수 있다(Wohletz, 1983). 이 갇힌 물은 과열되고 팽창되어 멜트의 추가적 파쇄작용의 원인이 된다.

7. 결론

우리의 자료에 의하면 분화유형, 파쇄유형과 파쇄 기구는 화성쇄설물의 미조직, 밀도와 기공률에 의해 인식될 수 있다. 멤버 N-5A, D에서 누적라필리와 무장라필리 등의 습윤한 쇄설물의 함유에 의하면, 말잔등에서 18.8 ka B.P.에 화산활동은 '습윤성' 폭발성 분화로부터 유래되었음을 지시하고 마그마가 외부물을 만나는 환경을 반영한다. 이 폭발성 분화는 습윤한 플룸과 풍부한 세립질 입자를 감안하면 수증기마그마성 분화라는 것을 의미한다. 이 멤버에는

탄화목의 산출을 감안하면 외부물은 지하수가 마그마와 접촉한 것으로 판단된다.

멤버 N-5B의 라필리암에서 평균 기공률이 54.5~63.3% 범위인데, 이는 화도에서 대수층과 마그마가 접촉하는 수증기마그마성 파쇄면의 위치가 가상적 마그마성 파쇄면 위치보다 더 아래에 있음을 나타낸다. 왜냐하면 마그마성 분화는 화도 내에서 그 파쇄면의 위치가 상승하여 팽창하는 마그마의 기공률이 75~83% 범위에 달하기 때문이다.

그러므로, 말잔등에서 18.8 ka B.P.에 수증기마그마성 파쇄작용은 화도에서 지하수가 마그마와의 접촉으로 빠르게 가열되어 부피팽창에 의해 유발되었다. 이와 동시에 용리되는 마그마성 휘발성물질은 역시 이 수증기마그마성 사건동안 팽창과 파쇄작용에 어느 정도 기여하였다. 이때 수증기마그마성 파쇄작용은 마그마성 휘발성물질보다 지하수에 의한 높은 가스압력이 더 크게 작용하였다.

수증기마그마성 파쇄작용에서 우세한 블록상 입자는 산산조각난 유리 혹은 아직도 플라스틱할 때 부분적으로 꼬이고 변형된 유리를 닮았다. 이들 파편들은 수증기마그마성 파쇄동안 급냉으로 응력파가 멜트를 통해 전달되어 체적 탄성율을 증가하는 변형률을 생산할 때 형성된 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 연구비(KMI2018-01610)에 의해 지원되었다. 한국지질자원연구원의 최근 지질도는 이 연구에서 층서 뼈대로서 작업에 중요한 역할을 하였다. 밀도와 기공률은 안동대학교 세라믹실험실에서 측정되었다. 또한 심사과정에서 건설적 비평으로 우리의 생각과 해석을 명확하게 해준 두 분의 심사위원께도 사의를 표한다.

REFERENCES

- Brenna, M., Price, R., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K., Kim, G.B. and Maas, R., 2014, Final magma storage depth modulation of explosivity and trachyte/phonolite genesis at an intraplate volcano: a case study from Ulleung Island, Republic of Korea. *Journal of Petrology*, 55, 709-747, Doi: 10.1093/petrology/egu004.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic successions:

- modern and ancient. Allen and Unwin, London, 1-528.
- Cashman, K.V. and Blundy, J., 2000, Degassing and crystallization of ascending andesite and dacite. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358, 1487-1513.
- 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.
- Cashman, K.V., Sturtenvant, B., Papale, P. and Navon, O., 2000, Magmatic fragmentation. In: Sigurdsson, H. (ed.) *Encyclopedia of volcanoes*. Academic, San Diego, 421-430.
- Hammer, J.E., Cashman, K.V., Hoblitt, R.P. and Newman, S., 1999, Degassing and microlite crystallization during pre-climactic events of the 1991 eruption of Mt. Pinatubo, Philippines. *Bulletin of Volcanology*, 60, 355-380.
- Hoblitt, R.P. and Harmon, R.S., 1993, Bimodal density distribution of cryptodome dacite from the 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. *Bulletin of Volcanology*, 55, 421-437.
- Houghton, B.F., Wilson, C.J.N., Smith, R.T. and Gilbert, J.S., 2000, Phreatoplinian eruptions. In: Sigurdsson, H. (ed.) *Encyclopedia of volcanoes*. Academic, San Diego, 513-525.
- Hwang, S.K., Hwang, J.H. and Kwon, C.W., 2012, Geological report of the Ulleungdo Sheet Korea. Institute of Geoscience and Mineral Resources, 1-83.
- 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. *The Journal of The Petrological Society of 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).
- 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.
- 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-caldra pyroclastic sequence. *Bulletin of Volcanology*, 76:802, DOI 10.1007/s00445-014-0802-1.
- Klug, C. and Cashman, K.V., 1996, Permeability development in vesiculating magma: implications for fragmentation. *Bulletin of Volcanology*, 58, 87-100.
- Machida, H., Arai, F., Lee, B.S., Moriwaki, H. and Furuta, T., 1984, Late Quaternary tephra in Ulreung-do Island, Korea. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 93, 1-14.
- Manga, M., Castro, J., Cashman, K.V. and Loewenberg, M., 1998, Rheology of bubble-bearing magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87, 15-28.
- 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*, 83, 441-455.
- Marti, J., Soriano, C. and Dingwell, D.B., 1999, Tube pumices as strain markers of the ductile-brittle transition during magma fragmentation. *Nature*, 402, 650-653.
- Morrissey, M., Zimanowski, B., Wohletz, K. and Buettner, R., 2000, Phreatomagmatic fragmentation. In: Sigurdsson, H. (ed.) *Encyclopedia of volcanoes*. Academic, San Diego, 431-445.
- 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.
- Pinkerton, H. and Stevenson, R.J., 1992, Methods of determining the rheological properties of magmas at sub-liquidus temperatures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53, 47-66.
- 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.
- Rosi, M., 1992, A model for the formation of vesiculated tuff by the coalescence of accretionary lapilli. *Bulletin of Volcanology*, 54, 429-434.
- Rust, A.C., Manga, M. and Cashman, K.V., 2003, Determining flow type, shear rate and shear stress in magmas from bubble shapes and orientations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 122, 111-132.
- Schumacher, R. and Schmincke, H.-U., 1991, Internal structure and occurrence of accretionary lapilli—a case study at Laacher See Volcano. *Bulletin of Volcanology*, 53, 612-634.
- 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.
- Sparks, R.S.J., 1978, The dynamics of bubble formation

- and growth in magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 3, 1-37.
- Sparks, R.S.J., 1997, Causes and consequences of pressurisation in lava dome eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 150, 177-189.
- Walker, G.P.L., 1981, Plinian eruptions and their products. *Bulletin of Volcanology*, 44, 223-240.
- Wohletz, K.H., 1983, Mechanisms of hydrovolcanic pyroclast formation: grain-size, scanning electron microscopy, and experimental studies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17, 31-63.
- Wright, H.M.N., Cashman, K.V., Rosi, M. and Cioni, R., 2007, Breadcrust bombs as indicators of Vulcanian eruption dynamics at Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 69, 281-300.
- Wright, J.V., Smith, A.L. and Self, S., 1980, A working terminology of pyroclastic deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8, 315-336.

Received : June 18, 2019

Revised : August 5, 2019

Accepted : August 14, 2019