

울릉도 말잔등응회암의 입도와 구성원 분석으로부터 화산분화 유형 해석

황상구^{1,2,*} · 이소진¹ · 한기환³

¹안동대학교 지구환경과학과

²안동대학교 기초과학연구소

³주식회사 서정엔지니어링

요 약

울릉도 말잔등응회암의 화성쇄설층에 대해 입도측정과 구성원 분석을 수행하고 주요 분화유형과 역학적 기구를 해석하였다. 말잔등응회암은 나리 칼데라 외측부에서 3개 멤버로 구분되며, 각 멤버는 하부에 조립 응회암층 및 라필리암층과 상부에 부석층 등의 암상으로 구성된다. 응회암층 및 라필리암층은 순수한 부석층과 구별되는 입도 및 구성원의 정량적 증거를 나타낸다. 응회암층 및 라필리암층은 부석층에 비하여 암편/본질 비와 결정/본질 비의 상대적 증가, 본질 부분의 우세한 파쇄작용 등의 특징을 가진다. 응회암층 및 라필리암층에서 암편과 결정의 풍부성은 지하수의 폭발적 기화로 주입암의 우세 파쇄작용, 채공 중에 세립물질의 제거에 의한 암편 및 결정의 간접적 농집과 같은 이유 때문일 수 있다. 위의 자료는 수증기마그마성 분화가 앞서 일어났고 마그마성 분화가 뒤따라 일어났음을 나타낸다. 즉 응회암층 및 라필리암층은 지하수가 화도로 접근하여 마그마가 물과 폭발적 상호작용에서 유래되는 수증기마그마성 분화(수증기플리니언 분화)를 암시하며, 부석층은 본질 가스압에 의한 마그마성 폭발작용(플리니언 분화)에서 유래되는 화성쇄설물을 나타낸다. 결론적으로 초기에는 마그마 기동이 낮을 때 정압수가 화도에 접근하여 마그마와 폭발적인 상호작용으로 수증기플리니언 분화를 일으켰으며, 후기에 마그마 기동의 상승으로 마그마성 가스압이 지하수압보다 커져 화구로의 지하수 접근을 차단함으로써 마그마성 휘발성물질에 의해서만 일어나는 플리니언 분화로 전환되었다.

주요어: 말잔등응회암, 입도측정, 구성원 분석, 플리니언 분화, 수증기플리니언 분화

Sang Koo Hwang, So-Jin Lee and Kee Hwan Han, 2018, Interpretation of volcanic eruption types from granulometry and component analyses of the Maljandeung tuff, Ulleung Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 5, p. 513-527

ABSTRACT: We have carried out granulometry and component analysis on pyroclastic deposits of the Maljandeung Tuff, Ulleung Island, to interpret the eruption types and prime dynamic mechanisms. It is divided into three members in the extracaldera area, each of which comprises the lithofacies of coarse tuffs and lapillistones in the lower part, and pumice deposits in upper one. The lithofacies present quantitative evidences in the granularity and component distribution patterns. As compared to the pumice deposits, the coarse tuffs and lapillistones exhibit a relative increase in both the lithic/juvenile and the crystal/juvenile ratios, and a preferential fragmentation of the juvenile fraction. The abundance of lithics and crystals in the tuffs and lapillistones can be attributed to preferential fragmentation of the aquifer-hosting rocks due to explosive evaporation of ground water, and indirect enrichment in lithics and crystals due to removal of juvenile fines from eruptive cloud. The above data exhibit that early phreatomagmatic phase was followed by purely magmatic fragmentation phases. The coarse tuffs and lapillistones suggest phreatoplinian eruption derived from explosive interaction of magma with ground water near the conduit, while pumice deposits indicate magmatic eruption by magmatic explosion from juvenile gas pressure. In early stage, phreatoplinian eruption occurred from explosive magma/water interaction in connecting confining water with drawdown of the magma column in the conduit; Later it shifted to plinian eruption by explosive expansion of only magmatic volatiles in intercepting water influx due to higher magmatic gas pressure than confining water pressure with rising of the magma column in the conduit.

Key words: Maljandeung tuff, granulometry, component analysis, plinian eruption, phreatoplinian eruption

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

(Sang Koo Hwang and So-Jin Lee, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Sang Koo Hwang, Institute of Basic Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Kee Hwan Han, Seojeong Engineering Limited Company, Anyang 10350, Republic of Korea)

1. 서 언

화산작용에서 폭발성 분화는 흔히 2개의 기본 유형으로 구분할 수 있는데 마그마성 및 수증기마그마성 분화이다. 마그마성 분화는 마그마챔버 내에서 본질 휘발성물질의 용리와 팽창에 의해 파쇄작용을 일으킨다. 수증기마그마성 분화는 부분적으로 혹은 전적으로 마그마가 외부물과 폭발적 상호작용에 의해 유래된다. 현무암질 응회구 및 마르에 관련된 수증기마그마성 화성쇄설층에서 잘 구축되고 널리 받아들여지는 특징은 현저한 마그마 파쇄작용, 급냉 유리 사아드의 존재, 누적라필리와 뿔 화성쇄설층이다(Waters and Fishers, 1971). 심하게 파쇄되고 강하게 분산된 화산재는 역시 “수증기플리니언” 화성쇄설층을 정하는데 사용되어왔다(Self and Sparks, 1978).

현재와 과거 화성쇄설층에서 입도 및 구성원 분포는 갈수록 더 육상 강하, 화쇄류 및 씨지의 운반 및 퇴적작용을 모델링하는데 사용되었다(Walker, 1972; Sigurdsson *et al.*, 1987; Arce *et al.*, 2005). 그리고 수증기마그마성 화성쇄설층으로부터 마그마성 화성쇄설층을 판별하기 위한 도구로서 화산연속체에서 구성원 분포를 이용하려는 시도가 많아졌다. 그러나 암편의 함량은 많은 주의를 받지 못하였다. 암편 함량은 분명히 마그마-물의 상호작용이 지표수와 같이 일어난다면 별 의미를 가지지 않지만, 지하수와 마그마의 상호작용으로 인한 수증기마그마성 활동에서 매우 중요해진다(Wohletz, 1986; Wohletz and Heiken, 1992). 왜냐하면 여기서 이들은 상호작용의 심도를 평가하고 대수층을 증명하는데 공헌할 수 있기 때문이다.

이 연구에서 우리는, 수증기마그마성 활동의 산물을 인식하기 위한 실마리로서 또한 중요한 화산폭발의 종류를 지배하는 환경을 이해하기 위해, 화성쇄설층의 입도 자료와 구성원 패턴을 조합하여 사용하였다. 이 연구를 위해서는 분화구 근처에 분포하는 근역부(proximal part)보다 중역부(medial part) 화성쇄설층을 선택하는 것이 효과적이다. 왜냐하면 분화유형은 강하 화성쇄설층을 대상으로 분산면적(D)과 파쇄

작용(F)에 따라 분류되고 정의되기 때문이다(Walker, 1973).

울릉도에서 폭발성 규질 화산작용의 분화유형 연구를 위해 말잔등응회암을 선택하였다. 왜냐하면 울릉도는 높은 지하 투수성 때문에 지하수와 마그마의 폭발적 상호작용에 대한 이상적 환경을 나타내고, 선택된 말잔등응회암은 마그마성 분화에서 분명한 수증기마그마성 분화를 포함하기 때문이다.

2. 지질배경

울릉도는 동해의 울릉분지 북변부를 따르는 신생대 화산지역 내에 솟아있는 화산도이다. 울릉화산은 해저로부터 약 3,200 m 솟아있고 수면위에 드러난 부분은 높이가 983.6 m이고 면적이 72.9 km²되는 대체로 5각형을 이룬다(그림 1). 이 화산은 주로 현무암질에서 조면암질 용암 및 화성쇄설암과 관련 지표쇄설층으로 구성되는 복합화산으로 수면위에 노출되어있다. 가장 최근 화산작용에 의한 분출물은 나리 칼데라 부근에 집중적으로 분포하고 사방으로 분산되어 있다. 이 칼데라는 바닥에서 외연(margin)을 고려할 때 직경이 2.0 km이고 외륜(rim)을 잡는다면 직경이 최대 3.4 km이며, 북쪽으로 열려있고 남쪽으로 만곡상 지형을 보여준다.

울릉도는 독도와 함께 그 화산작용의 성인을 설명하기 위해 여러 가설이 제안되었는데, 맨틀 플룸, 태평양판과 조합된 탈수 용융작용, 배호확장에 의한 갑압 용융작용 등을 포함한다(Peng *et al.*, 1986; Min *et al.*, 1988; Basu *et al.*, 1991; Tatsumoto and Nakamura, 1991; Song *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2011; Brenna *et al.*, 2014; Hwang *et al.*, 2017). 이 섬은 현무암질 및 조면현무암질 내지 조면암질 및 포놀라이트질 용암과 화산쇄설층으로 구성된다.

울릉도는 Harumoto (1970)에 의해 지질도가 작성되어 여러 연구에 널리 이용되어 왔었으며, 최근에 공식적으로 지질조사가 수행되어 1:5만 지질도가 발간되었다(Hwang *et al.*, 2012).

울릉도의 화산층서는 화산응회 및/혹은 부정합을

기준으로 할 때, 도동현무암질암류(Ar-Ar 1.43 Ma), 울릉층군, 성인봉층군과 나리층군 등의 4개 층군으로 묶었다(Hwang *et al.*, 2012). 울릉층군은 화산쇄설암류(Ar-Ar 1.25 Ma)와 하부 조면암질암류(Ar-Ar 0.75 ~ 0.53 Ma)로 구성되고, 성인봉층군은 상부 조면암질암류(Ar-Ar 0.33 ~ 0.17 Ma)와 포놀라이트질암류로 구성되며, 최후기의 나리층군은 칼데라형성 화산암류와 조면안산암질암류로 구성된다(그림 1).

나리층군은 울릉도에서 최후기에 폭발성 분출로부터 분류성 분출로 끝나는 마지막 화산유희에 의해 발생한 분출물이 장기간 침식으로 지금과 거의 같은 지형 위에 쌓인 화산쇄설층과 용암을 말한다. 나리층군은 칼데라형성 화산암류와 조면안산암질암류로 나눌 수 있다. 칼데라형성 화산암류는 (1) 봉래분석층과 (2) 말잔등응회암이 있으며, 조면안산암질암류는 (1) 나리분석층, (2) 알봉조면안산암과 (3) 죽암분석층으로 구성된다(그림 1; Hwang *et al.*, 2012).

봉래분석층은 조면암질이고 분석들로 구성되며 응회암 및 부석층에 의해 덮인다. 말잔등응회암은

조면암질 내지 포놀라이트질이고 응회암 및 부석층으로 구성되며 넓게 퍼져 분포한다. 나리분석층은 조면안산암질이고 분석들로 구성되며 응회암 및 부석층을 덮는다. 알봉조면안산암은 용암으로 구성되고 나리분석층 위에 놓인다. 죽암분석층은 조면안산암질이고 분석들로 구성되며 죽암 남동부에서 응회암 및 부석층 위에 고립되어 분포한다.

말잔등응회암에 대한 방사성탄소 연대는 동해에서 해저 퇴적물 코아를 기초로 9.3 ~ 6.3 ka B.P. 사이로 측정되었다고 보고되었다(Arai *et al.*, 1981; Machida *et al.*, 1984). 최근에 Okuno *et al.* (2010)은 탄화목과 부석질 토양 시료를 이용하여 일련의 칼데라 외부 테프라층에 대하여 약 11, 9, 5.6 ka B.P.의 방사성탄소 연대를 보고하였다. 한편 Im *et al.* (2012)은 일련의 칼데라 내부 화성쇄설 퇴적물에 대하여 약 19, 8.4, 5.6 ka B.P.의 ^{14}C 연대를 보고하였다. Okuno *et al.* (2010)와 Shiihara *et al.* (2011)는 화산회층으로부터 방사성탄소 연대와 지구화학적 분석에 기준하여 테프라층서를 수정하였고, 따라서 U-4의 연대를 약 11

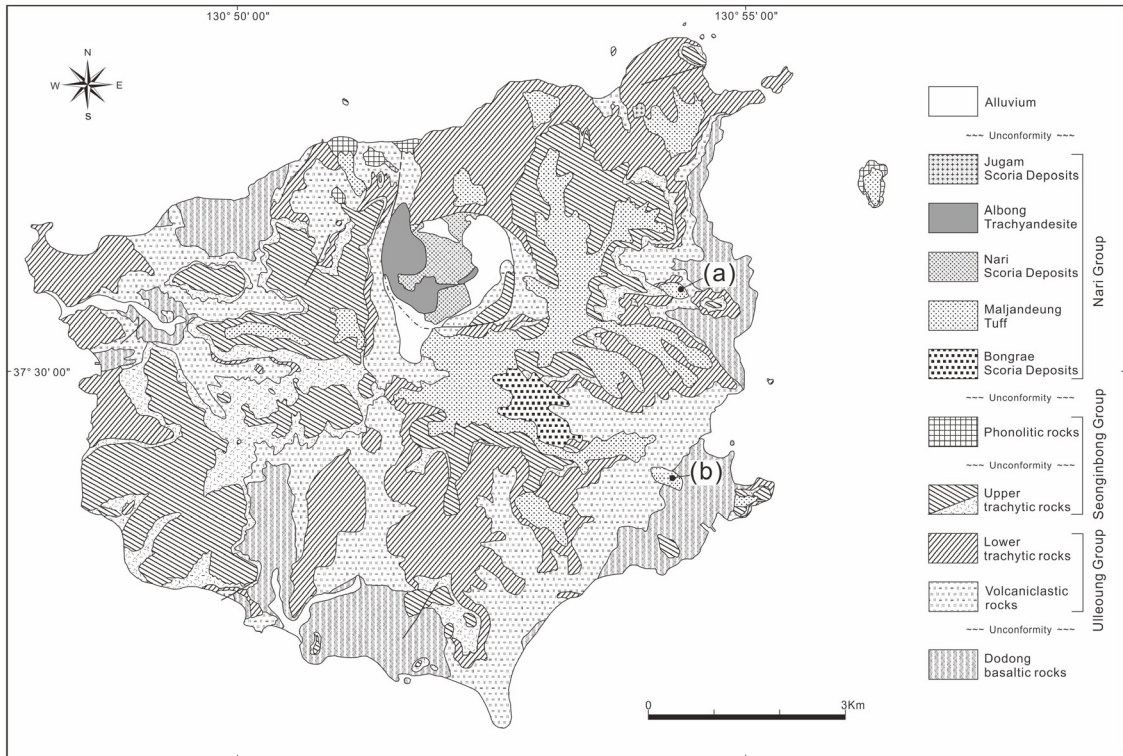


Fig. 1. Generalized geological map of Ulleung Island (modified after Hwang *et al.*, 2012), showing sampling sites of Naesujeon Hill (a) and Jeodong Hill (b).

ka로, U-3 연대를 8.3~9 ka B.P.로, U-2 연대를 5.6 ka B.P.로 수정하였다.

3. 분석기법

이 연구는 칼데라 외측부에 분포하는 말잔등응회암의 단면에 대해 정밀 야외관찰과 검층에 의해 수행되었다(그림 1, 2). 이 응회암은 완전한 암석상태가 아니고 반고결 내지 미고결 상태이기 때문에 흔히 침식 삭박되었으며 평평한 구릉과 완만한 사면에만 부분적으로 남아있다. 따라서 이 응회암의 완전한 단면을 드러내는 자연 노두는 거의 없으며 울릉도 동부와 동남부의 완사면에서 전담, 도로와 대지 확보를 위해 절개된 곳에 단면을 노출시키는 인공 노두가 분석대상으로 선정되었다.

야외작업은 두께, 입도, 조직, 퇴적구조 등을 포함하기 위해 1:10 축적으로 수행하였으며, 특정 단면에서 암상기재, 입도와 함께 구성원 분석을 통해 기초 자료를 얻었다. 이 분석에 대한 표준기법은 없기 때문에 우리는 이 작업에 이용된 절차를 기재한다.

입도측정 분석은 -4에서 4 ϕ (1/16~16 mm) 범위의 1파이(ϕ)를 가진 체 세트에 하였고 체질할 수 없는 64 mm (-6 ϕ) 이상 범위는 실측하여 입도 암석분류에 대비하였다. 4 ϕ 이하의 입자들은 체질할 때 달아나고 큰 의미가 없기에 배제되었고, 채취 과정 중에 파괴된 시료는 제거하였다. 채취된 시료의 양은 화성쇄설층의 구성원에 따라 다르지만 대체로 0.5~1 kg 내외이다. 시료는 건조 후에, 조립 물질($\phi > 2$)은 손으로 체질하여 기포화된 파편의 깨짐을 방지하였다. 세립 물질은 200~300 g을 기계적으로 말려 체질하였다. 매우 집합성을 보이는 시료는 물에 담가 해체를 도왔다. 구성원 분석은 입도에 따라 다른 절차를 따랐다. 2 mm ($\phi < -1$)보다 더 큰 입자는 확대경 하에서 손으로 골라냈다. 이보다 더 작은 세립 구성원은 0.01 g으로 달고 무게 백분율을 계산하였다.

분석할 구성원은 암석기재적 결과에 기초하여 선택하였다. 입도 및 구성원(본질편, 암편, 결정)의 자료는 화성쇄설층의 그림 표현에 사용되었다. 또한 결정은 본질 부분에 추가되었고 암편은 여러 암형(용암, 심성암)으로 분리하였다. 각 시료의 전체 조성은 분석된 크기 등급의 합을 백분율로 재계산하여 얻어졌다. 이의 신뢰성은 구성원 분석이 수행되지 않은 가장 세립부분($\phi > 4$)의 비율에 따라 달라질 수 있다.

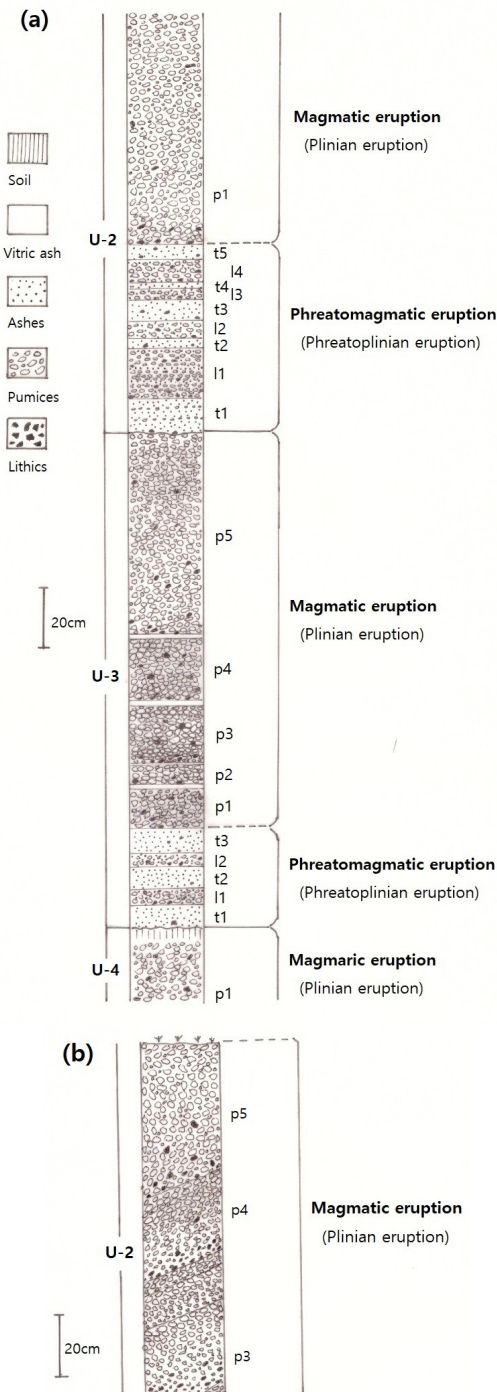


Fig. 2. Columnar sections for extracaldera pyroclastic sequences of the Maljandeung Tuff near Naesujeon Hill (a) and Jeodong Hill (b).

4. 말잔등응회암

말잔등응회암은 나리 칼데라의 외륜부로부터 외곽부의 산사면에 넓게 분포한다. 말잔등 서쪽 계곡부에서 이 응회암층은 두께가 최고 약 70 m를 가진다(Kim *et al.*, 2014). 이 암층은 주로 화성쇄설암(조립 응회암과 라필리암)과 부석층으로 구성되며 라필리암은 세립질 화산재를 비교적 많이 포함하여 대개 반고화상태이기 때문에 엉성한 부석층과 구별된다. 전반적으로 화성쇄설암은 부석층보다 근역부에서 우세하지만 중역부에서는 그 반대이다.

말잔등응회암층은 나리 칼데라의 남측 만곡부의 내부벽을 따라 약 70 m 두께의 단면에 노출된다. 이 단면에서 화산쇄설 연속체는 나리테프라층으로 하고 상부에서 하부로 가면서 N-1에서 N-5의 5개 멤버로 구분되었으며(Kim *et al.*, 2014), N-2에서 5까지는 말잔등응회암에 속하고 N-1은 대개 나리분석층(Hwang *et al.*, 2012)의 원역부에 속한다. 각 멤버는 분화작용 사이에 중대한 시간적 단절(hiatus)을 지시하는 현저한 침식면 혹은 토양 층준에 의해 경계된다(Kim *et al.*, 2014). 이 멤버들은 주로 조면암질에서 포놀라이트질 조성의 라필리응회암으로 구성되고 다양한 성인의 암편을 가진다.

칼데라 외측부에서 말잔등응회암은 부석층과 화성쇄설암이 호층으로 산출된다. 이 호층대는 칼데라의 동부와 남부에서 발견되며, 침식면 혹은 토양 층준에 의해 상부에서 하부로 U-2, U-3, U-4 단위 혹은 멤버로 구분하였으며(Shiuhara *et al.*, 2011), 각각 칼데라 만곡부의 멤버 N-2, N-3, N-4와 대비할 수 있다고 하였다(Kim *et al.*, 2014). 이들은 주로 조면암질 혹은 포놀라이트질 부석으로 구성되고, 혼한 반정으로 각섬석류, 단사휘석과 알칼리장석을 함유한다(Shiuhara *et al.*, 2011; Hwang *et al.*, 2012).

이들 테프라 모두는 강하층의 특징을 가지며, Okuno *et al.* (2010)가 상세하게 기재하였다. U-4 테프라는 총 0.8~1.0 m 두께이고, 정점이의 회백색 부석(U-4a)으로 구성되며, 하부에 암편을 가지고 상부에 암편과 스코리아 라필리로 구성되는 회색층(U-4b)이다. U-3 테프라는 총 0.7~1.1 m 두께이며, 기저에 회갈색 내지 회백색 화산재와 세립 부석 퇴적물(U-3a)로 구성되고, 중부에 누적라필리를 함유한 회백색 응회암(U-3b), 상단에 정점이 회백색 부석 및 암편 라필

리로 구성되는 층(U-3c)이다. U-2 테프라는 총 0.3~1.1 m 두께이며, 하부에 누적라필리를 함유하는 황회색 내지 회백색 응회암(U-2a)과 상부에 정점이 회색 내지 백색 부석 및 암편 라필리로 구성되고, 흑색 토양으로 덮인다.

Shiuhara *et al.* (2011)은 분출 연대와 암석기재적 특징을 기초로 하여 통합된 울릉 테프라의 층서적 뼈대를 제안하였다. U-4 테프라는 동해와 일본 육상의 여러 지점에서 나오는 U-Oki 테프라와 대비시켰다.

5. 칼데라 외부 말잔등응회암의 특징

칼데라 외륜에서 말잔등응회암의 단면은 동쪽으로 1.7 km에 위치하는 내수전 고개 부근의 사면에 약 4 m 두께로 노출되어 있다(그림 1). 이 단면은 강하 분산층에 놓이는 단면이고 분출순서의 거의 모두를 기록하고 있다. 그러나 이 단면의 기저부는 상부에서 흘러 내려온 풍화물로 덮여있으며, 하부 1 m는 심하게 풍화되어, 퇴적학적 관찰과 지구화학적 분석을 방해한다. 반면에 상부 1.8 m는 꽤 신선한 화성쇄설암층과 본질 부석층의 호층을 이루며, 침식면 혹은 얇은 토양층에 의해 U-4, U-3, U-2 멤버로 구분할 수 있다(그림 2a). 이 단면의 모식적 표현은 그림 1에 보고된다. 구성원 및 입도 분석의 결과는 그림 2에 요약되어 있다.

말잔등응회암의 다른 단면은 남동쪽으로 3.0 km에 위치하는 저동 고개 부근의 사면에 약 2 m 두께로 노출되어 있다(그림 1). 이 단면은 모두 여러 개의 부석층으로 구성되며 기저부가 노출되지 않고 응회암층 혹은 라필리암층이 협재되지 않기 때문에 U-2 멤버에 대비되는 것으로 생각된다(그림 2b).

5.1 U-4 화성쇄설층

기재: U-4 화성쇄설층은 엉성한 부석층의 상부만 1 m 두께로 노출되며 하부는 사면에서 흘러내려온 풍화물에 덮여있다(그림 2a, 3a). 이 상부는 풍화되지 않은 조립 라필리 내지 암괴 크기의 부석편과 드문 암편으로 구성되며 희미하게 정점이를 나타낸다(그림 3b). 상단에는 4 cm 두께의 갈회색 토양층을 가지고 저각도 침식 흔적을 흐릿하게 보여준다. 이 화성쇄설층에서 부석편은 회백색 내지 황갈색으로서 흔히 각상이고(그림 3b) 고다공상(highly vesicular)

이며 뒤틀린 세관상 기공조직을 나타낸다. 암편은 다른 성인의 다양한 암질, 즉 화구벽에서 유래된 조면암들이며 드물지만 심부 성인의 섬장암도 포함된다. 입도 분석에 의하면 본질 부분이 대부분 라필리를 나타내며(그림 4a), 구성원에서 본질 부분이 70 wt%를 차지한다(그림 4b).

해석: 화성쇄설층에서 각상이고 고다공상 부석들이 세립의 기질이 결핍된 엉성한 조직을 가지며 화

도에서 유래된 암편들이 산재하는 것은 플리니언 분연주로부터 부석강화와 동시에 암괴의 포물선 낙하를 암시한다. 이러한 U-4 화성쇄설층의 특이한 퇴적물 성격과 쇄설물 암질은 칼데라 남측 만곡부의 N-4B와 동일하다고 시사하였으며(Kim *et al.*, 2014), 칼데라 내부 및 외부에서 이들 퇴적단위가 같은 분출사건에서 유래되었음을 의미한다. 이 지점에는 칼데라 남측 만곡부에서와 같은 화쇄류층이 없는데, 이는

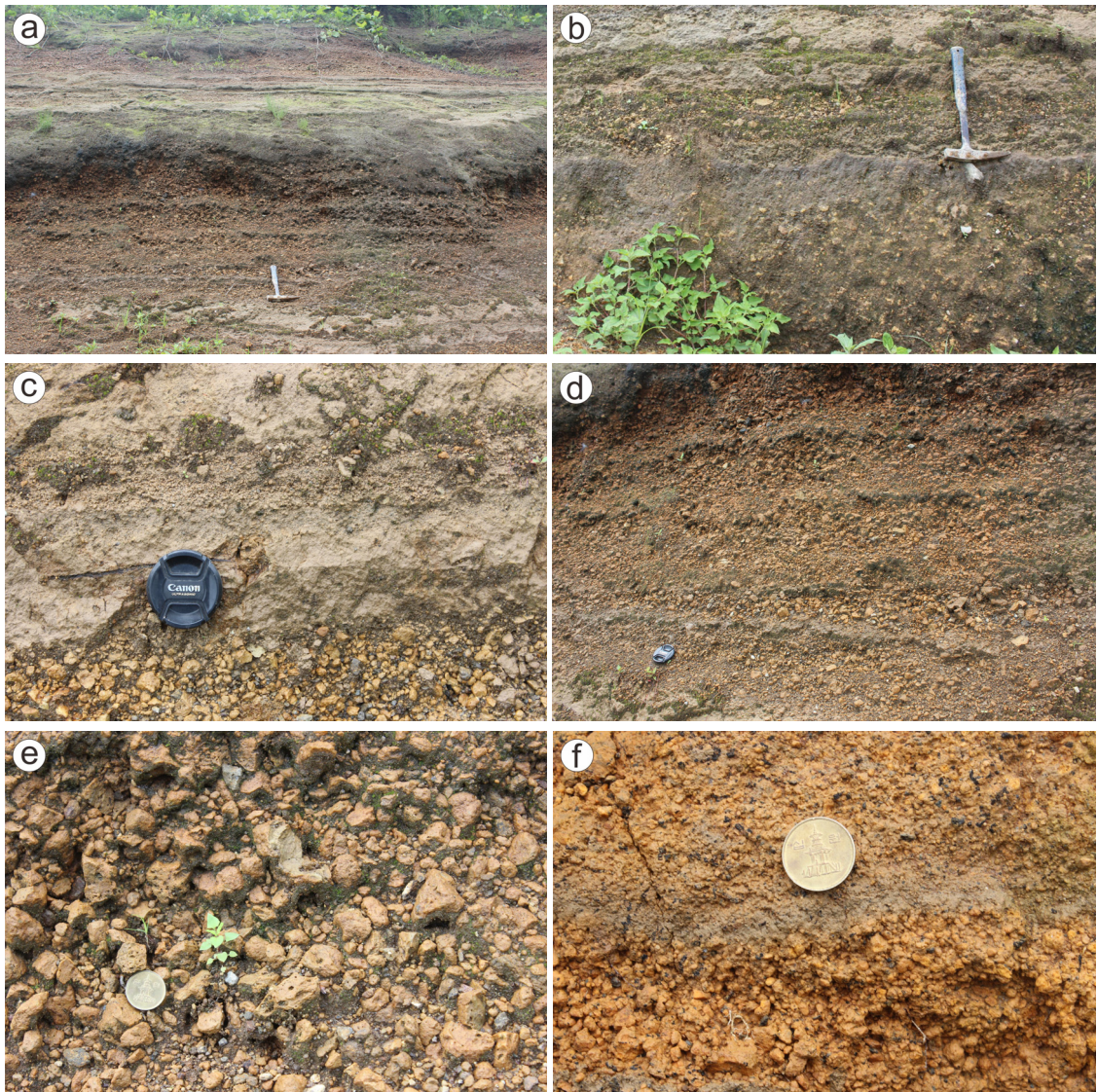


Fig. 3. Outcrop photographs showing some lithofacies in U-4 and U-3 members of the extracaldera Maljandeung Tuff near Naesujeon Hill. (a) Overall view of extracaldera pyroclastic sequence; (b) Pumice deposits of the upper U-4 member; (c) Coarse tuffs and lapillistones to lapilli tuffs in the lower U-3 member; (d) Pumice deposits in the upper U-3 member; (e) Openwork feature of the pumice deposits; (f) Air-fall tuff between both pumice beds.

초기 플리니언 부석강하에 뒤따르는 화성쇄설밀도류가 칼데라 외륜을 넘을 만큼 왕성한 에너지를 가지지 않았음을 암시한다. 이 층은 마그마챔버의 벽에서 나온 심부 공급지의 압편(섬장암) 산출이 더 큰 특징이다. 압편의 성격은 이 분화작용동안 파쇄작용을 일으키는 레벨이 마그마챔버 벽 근처에 구축되었음을 암시한다.

이 화성쇄설층은 층서관계와 방사성탄소 연대측정에 의하면 동해와 일본열도에서의 U-Oki 화성쇄설층과 동일한 층임을 암시한다(Machida *et al.*, 1984; Shiihara *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2014). U-Oki 화성쇄설층은 광역적으로 >5 cm의 두께로 산출되고 부석들의 집합층으로서 엉성한 조직을 보여준다. 이러한 특징은 광범한 플리니언 분연주가 지속될 만큼 가장 강력했었고 분산면적이 동해를 넘어 일본까지 먼 거리에 도달할 만큼 넓다는 것을 나타낸다.

5.2 U-3 화성쇄설층

U-3 화성쇄설층은 1.7 m 두께의 응회암과 부석층 연속체이며, 하부의 응회암 우세대와 상부의 부석층 우세대로 구분된다(그림 3b, 3c).

하부는 0.4 m 두께이며, 3개 조립 응회암층과 그 중간에 2개 부석질 라필리암(lapillistone) 내지 라필리응회암층으로 구성된다. 조립 응회암층은 8~9 cm 두께이며 회갈색 내지 담갈색을 띠고 드물게 누적라필리와 세립 라필리 크기의 부석편을 함유하며 평행층리를 보여준다(그림 3a, 3b). 그리고 부석질 라필리암층은 5~6 cm 두께이고 세립 라필리 크기의 부석들로 구성되고 그 사이에 화산재로 채워져 있다.

이 부석들은 위로 갈수록 흐릿한 정점을 나타낸다. 특히 고토양 위에 있는 기저의 조립 응회암층은 결정이 다소 풍부한 화산재 강하층을 나타낸다. 입도 분석에 의하면 본질 부분이 강한 파쇄작용을 드러내며(그림 5a), 본질/암편 비는 이 연속체에서 최소이다(그림 5b).

상부는 1.3 m 두께이며, 5개 부석층과 중간에 4개 얇은 응회암층으로 구성된다(그림 3d). 부석층은 각각 두께가 6~70 cm 범위이며 아각상의 세립 내지 중립 라필리 크기의 부석들로 구성되고 부수적으로 라필리 크기의 암편을 가진다(그림 3e). 부석들은 서로 엉성한 조직을 가지며 흐릿한 입도변화를 보여준다(그림 3d). 부석들은 중다공상(moderately vesicular) 내지 고다공상이며 하부층에서 입도가 최고 1 cm 내외이지만 점차 증가하여 상부층에서 최대 4 cm로 되고 전체적으로 역점을 나타낸다(그림 3d). 부석편은 얇은 기공벽을 가지고 약간 신장된 타원상 기공을 나타낸다. 응회암층은 두께가 1~2 cm 범위로 매우 얇고 갈회색을 띠며 세립 내지 조립 화산재로 구성된다(그림 3f). 이 화산재는 대부분 유리질 샤아드들로 구성되며 본질 부분의 현저한 농집을 보여준다. 이 화성쇄설층의 상단은 국지적으로 저각도로 침식되어있다.

종합하면 하부 화성쇄설층은 평균적으로 더 세립 입도(그림 5a), 낮은 본질/암편 비(2.7~3.5), 본질 구성원의 현저한 우선 파쇄작용, 또한 암편의 높은 비율을 가지는데(그림 5b), 이는 수증기마그마성 성인을 시사한다. 상부 부석층은 높은 본질/암편 비(4.0~6.9; 그림 5a)와 어떤 구성원의 우선 파쇄작용이 없

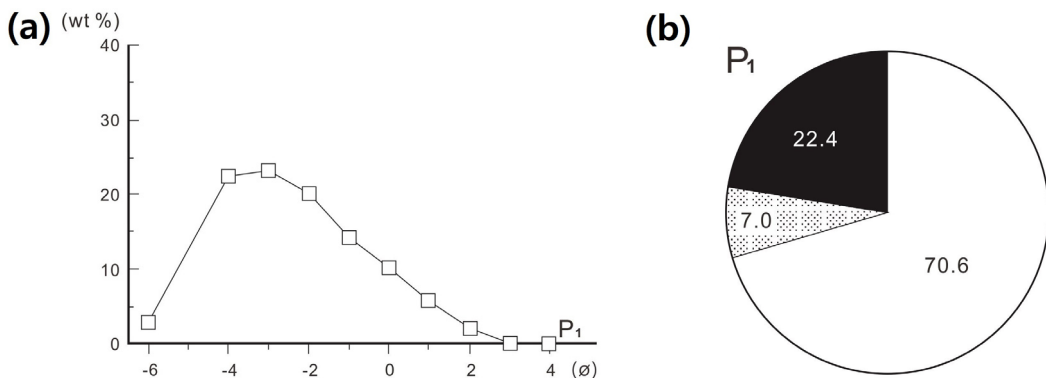


Fig. 4. Gran size (a) and component (b) distributions for the sample of the pumice deposit in the upper U-4 member; Pie diagram consists of juvenile (unornamented), crystals (stippled) and lithics (solid).

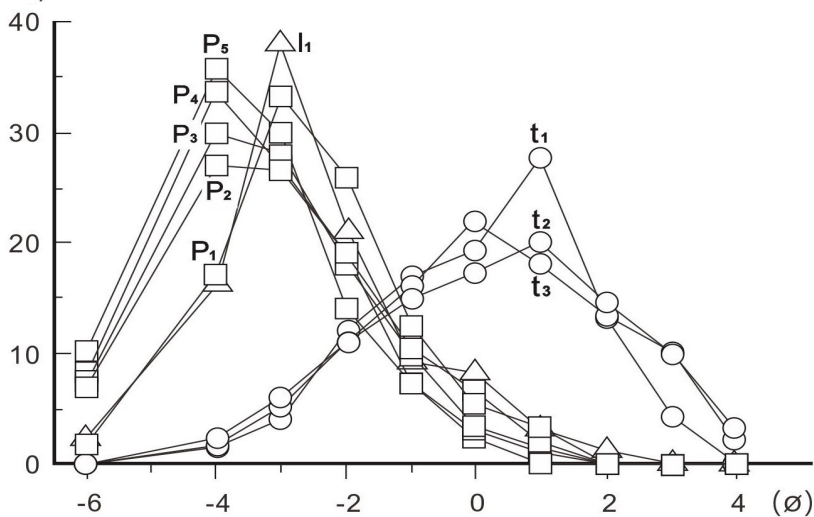
는 것(그림 5b)이 특징이며, 이는 마그마성 성인을 지시한다.

이 연속체의 분석은 2개 범주의 화성쇄설층을 드러낸다. 하나는 분출작용의 초기상에서 분출된 특이한 수증기마그마성이고, 다른 하나는 후기상에서 분출된 화성쇄설층으로서 육안적으로 의심할 여지없는 순수한 마그마성이다.

하부에서 조립 응회암층은 수증기마그마성 층의 패턴과 매우 유사한 입도 및 구성원 패턴을 나타낸

다. 이들은 실제로 본질 물질의 파쇄 정도의 증가와 병행해서 다소나마 압편 구성원의 증가가 특징적이다. 그러므로 이들의 입도와 누적라필리의 함유에 의하면 수증기마그마성 분화에 의한 습기가 풍부한 화산재 구름으로부터 강하층으로 해석될 수 있다. 특히 기저의 응회암층에서 결정이 풍부함은, 가장 가벼운 물질(파리질 화산재)을 제거하고 다소 무거운 부분(결정)을 초기에 낙하시킬 만큼 뜨거운 낮은 분연주로부터 강하된 물질로 생각할 수 있다. 부석질

(a) (wt %)



(b)

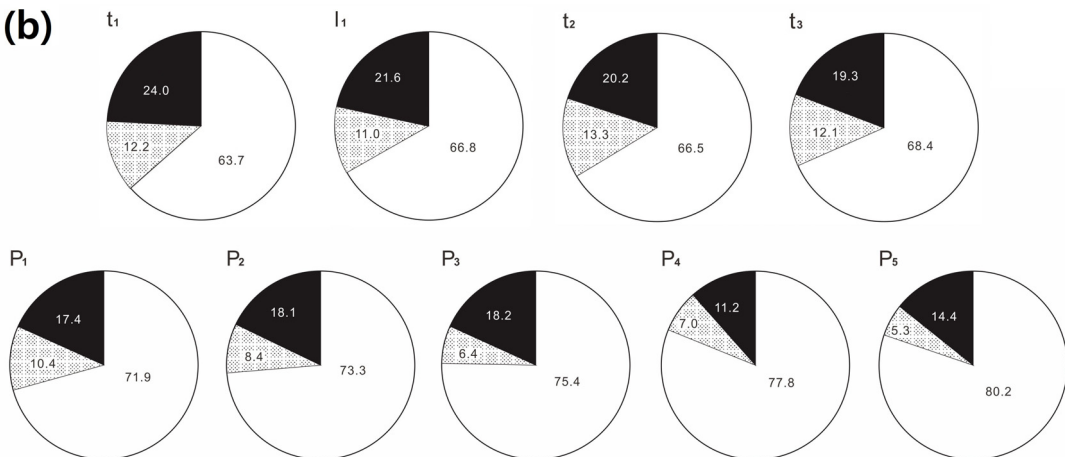


Fig. 5. Grain size (a) and component (b) distributions for the samples of the pyroclastic sequence in the U-3 member; Broken line graphs include three coarse tuffs (○), a lapillistone (△) and five pumice deposits (□); Pie diagrams consists of juvenile (unornamented), crystals (stippled) and lithics (solid).

라필리암층으로 갑작스런 상변화는 습윤에서 건조로의 분출상 전이와 동시에 분출강도의 변동을 암시한다. 조립 응회암층과 부석질 라필리암층의 반복은 수증기마그마성 분화가 맥동적으로 일어났음을 반영한다. 그러므로 이들 두 특징을 종합하면 낮은 분출률과 일치하고 대부분 비마그마성 휘발성물질에 의한 분출, 즉 수증기마그마성 분화의 지배를 받았음을 암시한다.

상부 부석층들은 마그마 유형 패턴으로 플리니언 분화를 나타낸다. 부석의 농집은 더 많은 본질 함량의 증가를 의미하며, 부석들의 중다공상 내지 고다공상 조직은 마그마성 분화를 지시하고 세립이 결핍된 엉성한 조직은 플리니언 분연주로부터 부석강하를 나타낸다. 그 사이에 협재되는 얇은 세립 응회암층은 플리니언 분연주의 일시적인 중지로 분연주의 플룸에 포함된 재구름으로부터 화산재강하를 지시한다. 이와 함께 부석층과 얇은 응회암층의 반복적인 산출은 플리니언 분화에 의한 단속적 분연주의 맥동을 반영한다. 상부 부석층으로 갈수록 부석 입도의 증가는 점진적 분출률의 증가를 반영하는, 분연주의 점진적 상승을 지시한다.

5.3 U-2 화성쇄설층

U-2 화성쇄설층은 2.1 m 두께의 화성쇄설 연속체이다. 하부는 0.7 m 두께이고 5개의 조립 응회암층과 4개의 부석 라필리암층이 교호하는 호층대를 나타낸다(그림 6a). 조립 응회암층은 2~12 cm 두께이며 황갈색을 띠고 평행층리를 보여주며(그림 6a) 드물게 누적라필리를 함유한다. 특히 기저의 조립 응회암층은 12 cm 두께이지만 그 내에 2~4 cm 크기의 세립 라필리암이 <2 cm 두께로 2차례 협재되어 있다(그림 6b). 기타 조립 응회암층은 흔히 세립 부석 라필리를 드물게 함유하고 그 함량이 풍부해짐으로서 거의 세립 라필리응회암에 속하는 것도 있다(그림 6c). 부석질 라필리암층은 4~18 cm 두께이고 세립 내지 중립 라필리 크기의 부석들로 구성되고 입자지지를 나타내며 그 사이에 화산재가 기질로 약간 채워졌지만 거의 엉성한 상태로 남아 있다(그림 6d, 6e). 특히 최하부의 부석질 라필리암층은 18 cm 두께이지만 그 내에 <2 cm 두께의 조립 응회암이 2 곳에 협재되어 있다.

상부는 1.4 m 두께이며, 세립에서 조립 라필리 크기의 각상 부석층으로 구성되고 암편 라필리를 수반

한다. 이 부석층은 분급이 매우 불량하고 엉성한 퇴적물 조직을 보여준다(그림 6f). 부석들은 회백색 내지 황갈색을 띠며 대개 고다공상이며 팽창된 기포벽 타입과 신장된 타원상의 기공조직을 보여준다(그림 6f). 저동 고개에서 부석층은 30° 내외의 경사를 가지며(그림 6g) 각 층단위마다 대개 현저한 역점이를 나타낸다(그림 6h).

이 부석층은 하부 화성쇄설암층과 매우 다른 분포패턴을 나타낸다(그림 7a). 이 부석층은 특별한 입도 등급에 우세한 체계적 농집이 없지만 라필리가 대부분이며, 이 본질 물질 함량이 76 wt%를 능가하고 암편이 미약한 감소를 보이는 것이 특징이다(그림 7b). 즉 상부 화성쇄설층의 우세한 특징은 본질 구성원의 우세한 파쇄작용이 관찰되지 않는다. 그러므로 하부 화성쇄설층과 매우 다른 분포패턴은 전체적으로 다른 분출상에 관련됨을 지시한다.

암상, 입도와 구성원 분석은 마그마성 및 수증기마그마성 층에 대한 특이한 패턴을 드러낸다. 하부의 조립 응회암층에서 구성원 분석은 본질편의 구성원(61 wt% 이하)의 감소와 암편의 미약한 증가가 특징이다. 이는 본질 구성원의 우세한 파쇄작용을 지시한다. 따라서 조립 응회암층은 그 입도와 누적라필리의 함유에 의하면 수증기마그마성 분화에 의한 화산재 구름으로부터 강하 화성쇄설암층으로 해석될 수 있다. 기저의 조립 응회암층은 화구의 폭발 개시를 나타내며 이 응회암층에서 얇은 라필리암의 협재는 분화강도의 변동을 암시한다. 엉성한 부석 라필리암층은 초기 분화단계동안 수증기마그마성에서 마그마성 분화로의 전이를 반영한다. 전체적으로 하부 화성쇄설암층은 평균적으로 더 세립 입도, 낮은 본질/암편 비(2.8~3.3), 본질 구성원의 현저한 우선 파쇄작용과 암편의 높은 비율을 가진다. 조립 응회암과 부석 라필리암층의 반복은 위의 분출작용의 전이가 반복적으로 일어났음을 암시한다. 그리고 강하 화성쇄설층에서 화쇄류층 혹은 써지층이 협재되지 않는데, 이는 기존 칼데라의 외륜이 높았기 때문에 화쇄류 혹은 써지와 같은 화성쇄설 밀도류가 발생했더라도 외륜을 넘을 수 없었음(Kim *et al.*, 2014)을 지시한다.

상부에서 부석층이 30° 내외의 경사와 현저한 역점이를 나타낸 사면을 따라 굴러내리는 입자류(grain flow)에 의한 분산압력으로 분급된 것으로 해석된다. 이 부석층에서 누적라필리 응회암이 없는 것은 물-

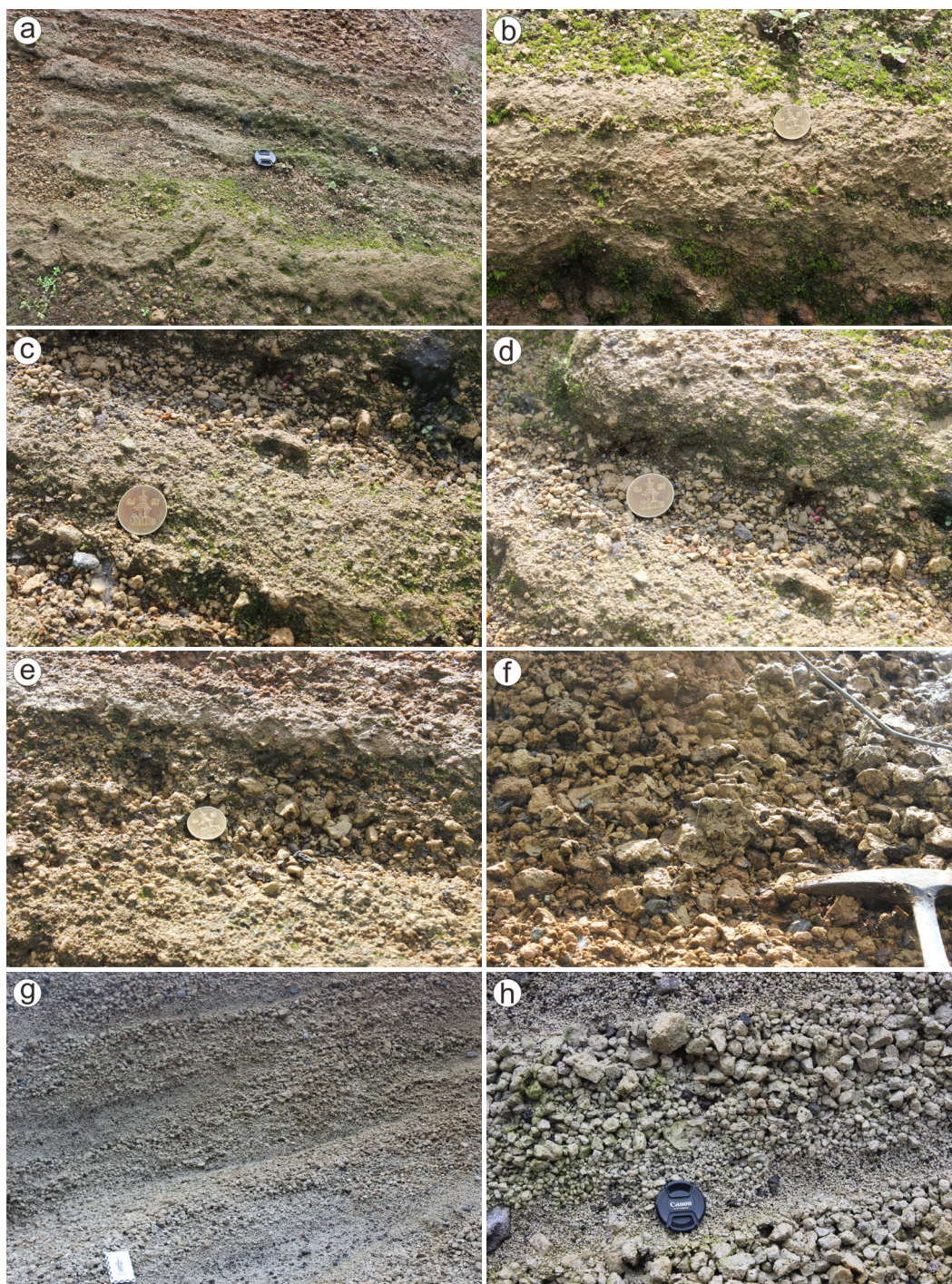


Fig. 6. Outcrop photographs showing some lithofacies in U-2 members of the extracaldera Maljandeung Tuff. (a) Overall view of U-2 pyroclastic sequence near Naesujeon hill; (b) Basal coarse tuff (t_1) intercalated with two thin fine lapilli tuff beds; (c) Another coarse tuff to lapilli tuff (t_2) in the lower U-2 member; (d) Lapillistone (l_2) between both coarse tuffs; (e) Another lapillistone (l_4) between both coarse tuffs; (f) Pumice deposits showing openwork texture in the upper U-2 member; (g) Pumice deposits dipping at 30° in the upper U-2 member near Jeodong Hill; (h) Remarkable reverse grading within each pumice deposit.

마그마 상호작용이 분화작용의 후기 분화단계에서 별로 중요하지 않았음을 보여준다. 부석 라필리층의 엉성한 조직, 부석의 각상 모양과 두꺼운 두께는 플리니언 분화의 지속적 분원주로부터 부석강하를 암시한다. 플리니언 부석강하와 같이, 마그마 성인의 부석층은 높은 본질/암편 비(6.0~9.5), 가장 세립 입도 등급에서 어떠한 구성원도 우세한 농집이 없음과 극세립질층의 결핍이 의심할 여지없는 중요한 특징이다.

6. 토 의

울릉도의 화산분화는 플리니언에서 스트롬볼리

언의 넓은 에너지 스펙트럼을 가지는데, 말잔등응회암은 칼데라 외부의 중역부에서 암상, 입도와 구성원 분포 패턴의 연구에 기초하면 수증기마그마상에서 마그마상으로 전이를 명확하게 구별할 수 있다.

수증기마그마성 화성쇄설암층은 같은 연속체 내에서도 마그마성 층과 매우 다른 패턴을 가진다(그림 4, 5, 7). 즉 수증기마그마성 화성쇄설암층은 암편/본질 비의 증가, 본질 부분의 우선 파쇄작용, 결정/본질 비율의 증가와 같은 특징을 나타낸다. 연속체 내의 개별 층에서, “수증기마그마성” 구성원 분포 패턴을 가지는 화성쇄설층 중에 얼마는 누적라필리와 같은 스텝 응축의 증거를 나타내고 얼마는 그렇지 않다. 그러므로 이들은 화성쇄설층의 “습윤” 수증기

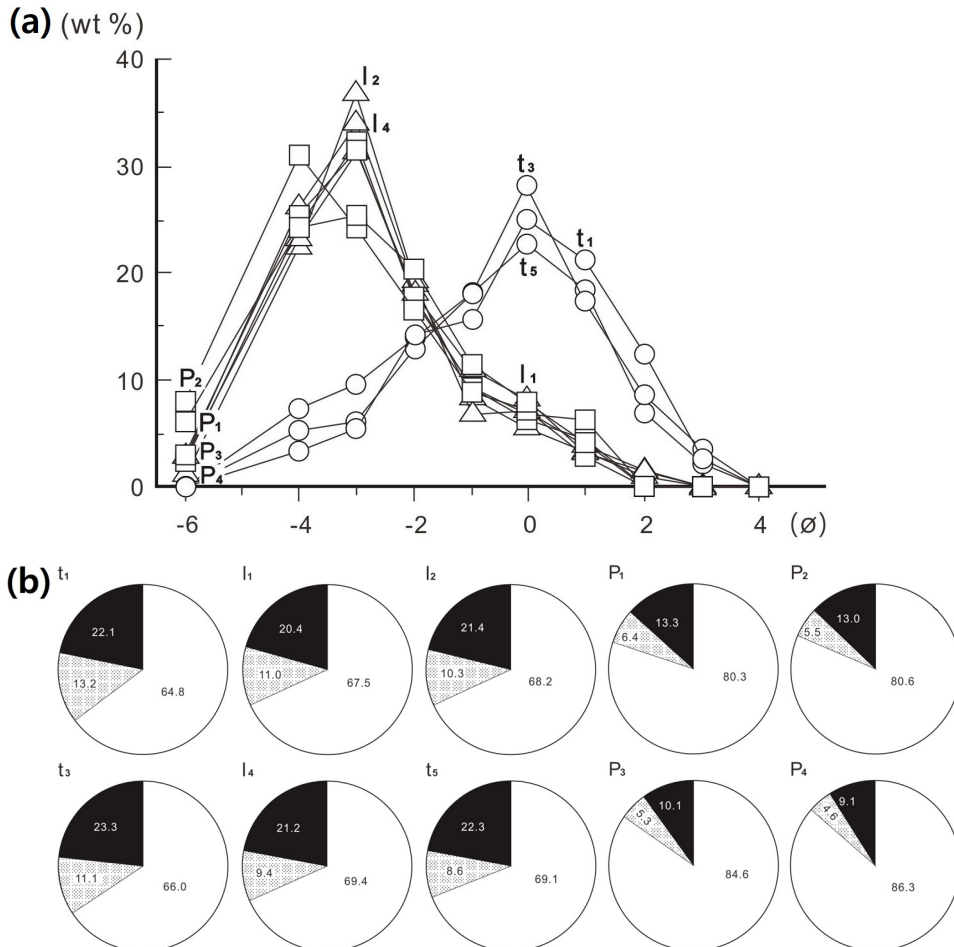


Fig. 7. Gran size (a) and component (b) distributions for the samples of the pyroclastic sequence in the U-2 member; Broken line graphs include three coarse tuffs (○), three lapillistone (△) and four pumice deposits (□); Pie diagrams consists of juvenile (unornamented), crystals (stippled) and lithics (solid).

마그마성 성인에 대한 증거로 충분하지만 진단을 위해 반드시 필요한 특징은 아니다(Sheridan and Wohletz, 1983). 한편 이러한 조직적 특징이 없는 “건조” 수증기마그마성 화성쇄설층은 가열된 스템을 생산하고 오래 유지케 하는 다른 에너지 환경과 더 잘 부합된다.

6.1 암상의 구성과 분화유형

“수증기마그마성” 분화를 보여주는 화성쇄설암층 중에 얼마는 누적라필리를 가지는데, 이는 “습윤” 수증기마그마성 성격을 지시한다. 대조적으로 “건조” 수증기마그마성 층은 마그마/물 비가 커서 가열된 스템을 생산하고 유지하는 에너지 환경을 조성한다(Sheridan and Wohletz, 1981). 말잔등응회암의 조립 응회암층에서도 수증기마그마성 분화의 특징이 관찰되는데, 이는 분화작용동안 지하수와 상호작용이 일어났다고 탄화목의 산출(Im *et al.*, 2012)을 증거로 뒷받침해 해석하였다. 이때 화도 내에서 가스 압은 매우 높아 정수압과 상호작용을 허락했을 것이다. 이때 수증기플리니언 분연주가 형성되었으며, U-2 기저부의 응회암층과 최하부의 부석질 라필리 암층에서와 같이 입도 다분성(polymodality)은 분연주의 부분붕괴(partial collapse)가 일어났음을 확인시켜준다(Sparks *et al.*, 1997). 반면에 순수한 마그마성 분화는 부석층에서 관찰되는데, 이는 마그마 자체의 휘발성물질의 용리로 인한 가스압 증가에 의해 우세한 본질 입자의 방출로 일어났다고 해석하였다. 이때 플리니언 분연주가 형성되었으며, U-3 부석층에서 전체를 통하여 하부층에서 상부층으로 역점을 지시하는 바와 같이, 분연주의 높이는 질량 분출률의 증가와 함께 점진적으로 증가하였다(Wilson *et al.*, 1980; Sparks *et al.*, 1997). 말잔등응회암에서 부석층은 수증기마그마성 분화를 종식시키고 마그마성 분화로의 전이를 나타내며, U-3에서 부석층은 단속적으로 분연주를 구축하는 맥동적 분화를 일으켰고 U-2에서 부석층은 지속적인 분연주를 구축하였다. 그러나 칼데라의 남쪽 만곡부에서 말잔등응회암은 분연주의 전체붕괴(total collapse)를 나타내는 화쇄류와 써지가 혼하게 산출되는데(Kim *et al.*, 2014) 비해 이 단면에서는 발견되지 않는다.

수증기마그마성 분화는 아마도 마그마 기둥(magma column)이 낮을 때 정압수가 화구에 접근하여 마그마와 폭발적인 상호작용으로 일어난다(Sparks *et al.*,

1997). 그러나 마그마성 분화는 아마도 마그마 기둥의 상승을 반영하는데, 이때 마그마압이 지하수압보다 커져 화구로의 지하수 접근을 막음으로서 충분한 마그마성 휘발성물질에 의해서만 폭발작용을 일으킬 수 있었다.

6.2 암편 함량과 폭발작용

암편은 나팔상(flaring) 화구가 고압, 고속도 치밀 질 화산분사(volcanic jet)에 의한 기계적 침식으로부터 형성될 때 크게 증가된다(Eichelberger and Koch, 1979). 역시 암편은 화도벽에서도 나올 수 있으며 더 구나 상당한 심도에서 유래될 수도 있다. 울릉도 플리니언 분화에서도 심부에서 공급된 암편으로서 섬강암이 드물게 산출되는데, 이러한 심성암의 존재는 상위 화산층에서 나온 암편과 확연하게 구별된다. 화도벽의 최대 침식은 파쇄작용 레벨의 근접부에서 상승 마그마 기둥의 최대 점도에 관계된다고 생각된다(Sparks *et al.*, 1997). 마그마는 화도에서 가스가 70~80 vol%로 팽창하는 레벨에서 파쇄작용이 일어날 수 있는데(Sparks, 1978), 점도는 가스기포가 없는 멜트로부터 파쇄작용 레벨 아래에서 가스기포의 65 vol%를 가진 포말로 전이할 때 사실상 약 20배 증가한다(Shimozuru, 1978). 한편 이 점도는 파쇄 레벨 위에서 빠르게 상승하는 가스-화성쇄설물 혼합체에서 대략 10배로 감소한다(Wilson *et al.*, 1980).

3개의 분출층서에서 암편 함량이 분화유형에 따라 상당히 다른데, 암편 함량은 각 분화의 마그마성 층에서보다 수증기마그마성 층에서 항상 더 높다(그림 5b, 7b, 8). 또한 암편은 칼데라 남쪽 만곡부의 말잔등응회암의 근역부 화성쇄설층에서 비교적 풍부한 편이지만(Kim *et al.*, 2014), 중역부 화성쇄설층에서는 9~24 wt%로서 정상적 강하 화성쇄설층으로 점진적으로 감소한다.

마그마성보다도 수증기마그마성 활동에서 관찰되는 암편의 증가는 동일시기에 일어나는 여러 요인에 의해 좌우될 것이며, 그 특이한 점은 다음과 같이 해석할 수 있다.

먼저 지하수의 폭발적 기화로 인해 대수층 주인암의 우선 파쇄작용이다. 이 과정은 마그마와 상호작용하는 대수층에 의해 일어났음을 입증하게 한다. 그 이유는 칼데라 남쪽 만곡부에 분포하는 말잔등응회암의 근역부 화성쇄설층에서의 여러 층준에서 탄

화목이 산출되므로(Im *et al.*, 2012) 그 화구 위치가 칼데라호에 있었다고 해석하기에 무리가 있기 때문이다. 실제로 울릉도의 여러 곳에서 용천수의 존재는 지하수와 마그마의 상호작용에 의한 수증기마그마성 활동의 가능성을 증명한다.

폭발작용이 일어날 때 화구는 나팔모양으로 침식되어 분화구를 발생시킨다. 이 과정은 반드시 수증기마그마작용에만 관련되지 않는다. 그러나 수증기마그마성 활동에 의한 분화구는 응회환과 응회구와 같이 일반적으로 마그마성 활동에 의한 것보다 더 큰 나팔상 분화구를 형성한다. 즉 물-마그마 상호작용에 의해 발생한 다량의 스팀이 화도로 유입됨은 초과압력(overpressure) 환경을 만들고 따라서 갑작스런 폭발작용으로 더 큰 나팔상 분화구의 형성을 돕는다(Kieffer, 1984).

섬강암편은 본질적으로 챔버의 주변부에 형성된 마그마 냉각면변대에서 유래된다. 이 과정은 느린 냉각작용과 결정작용에 따라 고철질 침적물이 아래로 낙하할 때 더 조립질 섬강암층이 챔버의 상부에서 안쪽으로 성장한다. 장기간동안 분화작용(分化作用; differentiation)은 휘발성물질이 풍부한 진화 마그마가 상부에 정체된 조성누대를 형성했을 것이며(Hwang and Jo, 2014), 하부는 보다 고철질이고 아마도 대류로 인해 더 균질했을 것이다.

6.3 본질 물질의 우선 파쇄작용과 결정 농집

마그마-물 상호작용은 마땅히 필연적으로 마그마 파쇄작용을 향상시킨다. 높은 파쇄작용은 흔히 수증기마그마성 층의 특징으로 생각되어왔으며(Walker,

1973; Self and Sparks, 1978; Sheridan and Wohletz, 1983; Wohletz, 1983, 1986), 이는 앞에서 토의한 바와 같이 울릉도 말잔등응회암에서도 확인된다. 화산재가 우세한 응회암층은 흔히 수증기마그마상에서 산출되며, 구성원 분포 패턴에 기초하면 수증기마그마성으로 고려되는 모든 화성쇄설암층은 마그마성 분출상보다 평균적으로 훨씬 더 세립질이다. 그러나 정치 및 퇴적기구가 원래 입도집단에 크게 영향을 미치기 때문에, 이러한 입도집단은 오로지 화성쇄설암층의 파쇄정도를 근거로 절대적 진단의 판단기준으로 설정하는데 한계가 있게 마련이다. 예를 들면 울릉도의 말잔등응회암층에서 마그마성 부석층은 더구나 근역부 단면에서조차 약간의 세립질 유형을 협재되거나 함유되는 것(Kim *et al.*, 2014)을 볼 수 있다. 반면에 수증기마그마성 화성쇄설암층은 무시할 수 없을 정도의 조립 암편을 함유하는 것을 관찰할 수 있다(그림 3c, 6c).

수증기마그마성 활동에서 하나의 특징으로서 본질 물질의 우선 파쇄작용은 분출 구름에서 세립 입자의 제거에 의한 결정 농집으로 생각할 수 있다(그림 9). 이 같은 과정은 역시 수증기마그마성 화성쇄설암층에서 관찰되는 결정/본질 비의 증가를 설명해준다.

우리는 마지막으로 다음과 같은 일련의 관찰을 주목할 수 있다. U-4 화성쇄설층에서 심성암편의 산출은 마그마성 파쇄작용 레벨의 심도가 다른 U-2와 U-3의 활동 심도보다 더 깊은 심도에서 일어났음을 유추할 수 있다. 또한 U-2와 U-3에서 짧은 기간의 수증기마그마상과 화도에서 마그마 기둥의 확대 사이에서 밀접한 관계를 생각할 수 있다. 초기에 본질

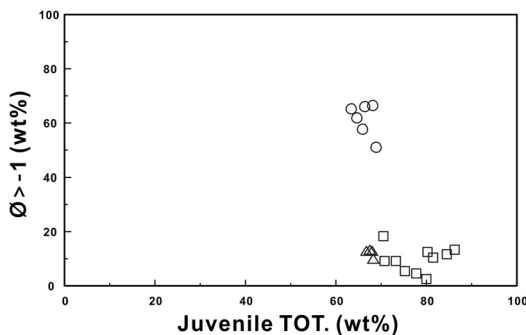


Fig. 8. Correlation diagram between juvenile content and ash-size fraction (<2 mm). Symbols are the same as in Fig. 5.

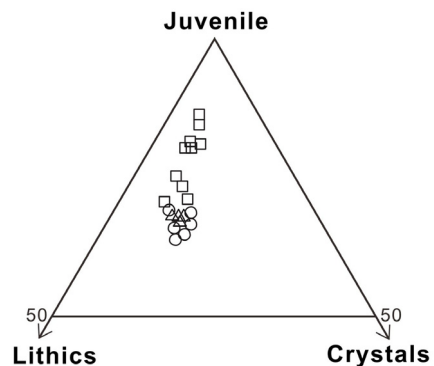


Fig. 9. Ternary diagram for juvenile, lithics and crystals. Symbols are the same as in Fig. 5.

가스압이 대수층의 정수압 아래로 떨어졌을 때 수증기마그마성 분화가 우선적으로 일어났다. 이때 마그마 레벨이 주요 대수층 아래에 있기 때문에 풍부한 물 공급은 뿜어내는 압력이 정수두(hydrostatic head) 아래로 떨어졌을 때 가능했을 것이다. 스팀의 감압 전에 물과 마그마의 혼합 정도에 따라서, 그 효과는 강한 수증기마그마성 혹은 수증기성 폭발을 일으키는 것이다. 말잔등응회암에는 수증기성 각력암이 관찰되지 않으므로(Kim *et al.*, 2014) 전자의 폭발작용만 일어났던 것으로 유추된다. 그리고 후기로 갈수록 마그마 기동이 수직으로 확대되면서 마그마 정압이 정수압보다 증가할 때 수증기마그마성 폭발상의 종식과 더불어 마그마성 분화로 전이되었다. 아마도 챔버의 중앙부로부터 마그마성 분화는 조립 부석들을 생산했을 것이고 강한 가스 폭발작용을 일으켜 분연주를 유지시켰을 것이다.

7. 결 론

울릉도의 나리 칼데라 외측부에서 말잔등응회암의 화성쇄설층에 대해 입도와 구성원 분석을 수행하였으며, 주요 분화유형을 추론하고 그 에피소드에 대해 역학적 기구를 해석하였다.

말잔등응회암은 나리 칼데라 외측부에서 3개 멤버로 구분되며, 각각 조립 응회암층 및 라필리암층, 부석층과 세립 응회암층 등의 암상으로 구성된다.

응회암층 및 라필리암층은 순수한 부석층과 구별되는 특징적인 입도 및 구성원 분포패턴을 가진다. 부석층에 비하여 응회암층 및 라필리암층은 암편/본질 비와 결정/본질 비의 증가, 본질 부분의 우세한 파쇄작용 등의 특징을 가진다. 응회암층 및 라필리암층에서 암편과 결정의 풍부성은 (1) 지하수의 폭발적 기화로 인해 대수층을 가진 주인암의 파쇄작용; (2) 분출 구름으로 본질 세립의 이동에 의해 결정 및 암편의 간접적 부화; (3) 화도에 대량의 스팀이 유입된 뒤에 아마도 초과압력 환경에 관련된 나팔상 화구형성 등과 같은 이유 때문일 수 있다.

위의 자료에 의하면, 말잔등응회암은 명확히 구별될 수 있는 수증기마그마성 활동상에서 마그마성 활동상으로 이동을 나타낸다. 즉 응회암층 및 라필리암층은 지하수가 화도로 접근하여 마그마가 물과 폭발적 상호작용에서 유래되는 수증기마그마성 분화

(수증기플리니언 분화)를 암시하며, 부석층은 본질 가스압에 의한 마그마성 폭발작용(플리니언 분화)에서 유래되는 화성쇄설물을 나타낸다.

화산분화에서 일차적 마그마 파쇄작용의 정도는 열교환 표면에 대한 마그마/물 비가 확실히 상호작용의 효율성과 에너지 평형을 지배하는 주요 요인이다. 초기에는 마그마 기동이 낮을 때 정압 지하수가 화도에 접근하여 마그마와 폭발적인 상호작용으로 수증기플리니언 분화를 일으켰으며, 후기에 마그마 기동의 상승으로 마그마성 가스압이 지하수압보다 커져 화도로의 지하수 접근을 막음으로서 마그마성 휘발성성분에 의해서만 일어나는 플리니언 분화로 전환되었다.

감사의 글

이 연구는 기상청 「기상지진See-At기술개발연구」(KMI2018-01610)의 지원으로 수행되었다. 또한 심사과정에서 유익한 지적으로 논문의 질을 향상시켜 주신 익명의 두 심사위원회 사의를 표한다.

REFERENCES

- Arai, F., Oba, T., Kitazato, H., Horibe, Y. and Machida, H., 1981, Late Quaternary tephrochronology and paleo-oceanography of the sediments of the Japan Sea. *The Quaternary Research*, 20, 209-230.
- Arce, J.L., Cervantes, K.E., Macias, J.L. and Mora, J.C., 2005, The 12.1 ka Middle Toluca Pumice: A dacitic plinian-subplinian eruption of Nevada de Toluca in Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 147, 125-143.
- Basu, A.R., Huang, W.K., Zie, G.H. and Tatsumoto, M., 1991, Major element, REE, and Pb, Nd, and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of Eastern China: implications for origin from suboceanic type mantle reservoirs. *Earth and Planetary Science Letters*, 105, 149-169.
- 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, South Korea. *Journal of Petrology*, 55, 709-747.
- Eichelberger, J.C. and Koch, F.G., 1979, Lithic fragments in the Bandelier Tuff, Jemez Mountains, New Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5, 115-134.
- Harumoto, A., 1970, Volcanic rocks and associated rocks of Utsuryoto island. Nippon Printing and Publishing Co., 39.

- Hwang, S.K., Hwang, J.H. and Kwon, C.W., 2012, Geological report of the Ulleung Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 84 p.
- Hwang, S.K. and Jo, I.H., 2014, Petrologic Evolution Processes of the Latest Volcanic Rocks in Ulleung Island, East Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 343-363 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Kim, J.H. and Jang, Y., 2017, Volcanism and Petrogenesis of Dodong Basaltic Rocks in the Ulleung Island, East Sea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 26, 361-371 (in Korean with English abstract).
- Im, J.H., Shim, S.H., Choo, C.O., Jang, Y.D. and Lee, J.S., 2012, Volcanological and paleoenvironmental implications of charcols of the Nari Formation in Nari Caldera, Ulleung Island, Korea. *Geosciences Journal*, 16, 105-114.
- Kieffer, S.W., 1984, Factors governing the structure of volcanic jets. In: *Explosive Volcanism: Inception, Evolution and Hazards*. National Academy Press, 143-157.
- 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, 802-828.
- Kim, G.B., Yoon, S.H., Chough, S.K., Kwon, Y.K. and Ryu, B.J., 2011, Seismic reflection study of acoustic basement in the South Korea Plateau, the Ulleung Interplain Gap, and the northern Ulleung Basin: volcano-tectonic implications for Tertiary back-arc evolution in the southern East Sea. *Tectonophysics*, 504, 43-56.
- Machida, H., Arai, F., Lee, B.S., Moriwaki, H. and Furuta, T., 1984, Late Quaternary tephra in Ulleungdo Island, Korea. *Journal of Geography*, 93, 1-14.
- Min, K.D., Kim, O.J., Yun, S., Lee, D.S. and Kim, K.H., 1988, Applicability of plate tectonics to the post-Late Cretaceous igneous activity and mineralization in the southern part of South Korea (II). *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 11-40 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Peng, Z.C., Zartman, R.E., Futa, K. and Chen, D.G., 1986, Pb-, Sr-, and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chemical Geology*, 59, 3-33.
- Self, S. and Sparks, R.S.J., 1978, Characteristics of wide-spread pyroclastic deposits formed by the interaction of silicic magma and water. *Bulletin of Volcanology*, 41, 1-17.
- Sheridan, M.F., Barberi, F., Rosi, M. and Santacroce, R., 1981, A model for plinian eruption of Vesuvius. *Nature*, 289, 282-285.
- Sheridan, M.F. and Wohletz, K., 1981, Hydrovolcanic explosions: the systematics of water-pyroclast equilibrium. *Science*, 212, 1387-1389.
- Sheridan, M.F. and Wohletz, K., 1983, Hydrovolcanism: basic considerations and review. In: M. Sheridan and F.Barberi (Editors), *Explosive volcanism*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17, 1-29.
- 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.
- Shimozuru, D., 1978, Dynamics of magma in a volcanic conduit: special emphasis on viscosity of magma with bubbles. *Bulletin of Volcanology*, 41, 333-340.
- Sigurdsson, H., Carey, S. and Fisher, R.V., 1987, The 1982 eruption of EL Chichon volcano, Mexico (3): Physical properties of pyroclastic surges. *Bulletin of Volcanology*, 49, 467-488.
- Song, Y.-S., Park, M.-E. and Park, K.-H., 2006, Ages and evolutions of the volcanic rocks from Ulleung-do and Dok-do. *Journal of Petrological Society of Korea*, 15, 72-80 (in Korean with English abstract).
- Sparks, R.S.J., 1978, The dynamics of bubble formation and growth in magmas: a review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 3, 1-37.
- Sparks, R.S.J., Bursik, M.I., Carey, S.N., Gilbert, J.G., Glaze, L.S., Sigurdsson, H. and Woods, A.W., 1997, *Volcanic plumes*. Wiley, Chichester, 574 p.
- Tatsumoto, M. and Nakamura, Y., 1991, DUPAL anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin. *Geochim Cosmochim Acta*, 55, 3697-3708.
- Walker, G.P.L., 1972, Crystal concentration in ignimbrites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 36, 135-146.
- Walker, G.P.L., 1973, Explosive volcanic eruptions - a new classification scheme. *Geologische Rundschau*, 62, 431-446.
- Waters, A.C. and Fisher, R.V., 1971, Base surges and their deposits: Capelinhos and Taal volcanoes. *Journal of Geophysical Research*, 76, 596-5614.
- Wilson, L., Sparks, R.S.J. and Walker, G.P.L., 1980, Explosive volcanic eruptions, IV, the control of magma properties and conduit geometry on eruption column behaviour. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 63, 117-148.
- Wohletz, K.H., 1983, Mechanism of hydrovolcanic pyroclasts formation: grain-size, scanning electron microscopy, and experimental studies. In: M. Sheridan and F. Barberi (Editors), *Explosive volcanism*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17, 31-63.
- Wohletz, K.H., 1986, Explosive magma-water interactions: thermodynamics, explosion mechanisms, and field studies. *Bulletin of Volcanology*, 48, 245-264.
- Wohletz, K.H. and Heiken, G.H., 1992, *Volcanology and geothermal energy*. University of California Press, Berkeley, 432 p.

Received : August 29, 2018

Revised : October 17, 2018

Accepted : October 17, 2018