

## 울릉도 나리 칼데라의 형태와 다단계 진화의 해석

황상구<sup>1,2</sup> · 정성욱<sup>2</sup> · 손영우<sup>3</sup> · 강지훈<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>안동대학교 기초과학연구소

<sup>3</sup>한국수자원공사 보현산댐지사

### 요 약

울릉도 나리 칼데라의 진화는 과거 4만년의 화산활동에 의해 생산된 지형관찰, 정밀총서, 관련 쇄설층의 분포 및 상변화를 근거로 복원되었다. 현재 칼데라는 폭발성 분출에 관련되는 다운힐의 중첩상 구조를 보여주며, 2개의 칼데라-형성 사건이 인지된다. 각 칼데라의 함몰은 특별한 “함몰표시층”으로서 “봉래 용결옹회암(40 ka)” 및 “말잔등 이전의 산사태 각력암”, 그리고 “말잔등옹회암의 N-4C 옹회각력암(11 ka)”에 의해 정의된다. 봉래 용결옹회암은 끓어넘침 분출에 의한 고온 화쇄류, 산사태 각력암은 고기 칼데라 벽의 산사태에 의한 암설류에 의해 정치되었으며, 멤버 N-4 옹회각력암은 고밀질 분연주의 붕괴에 따른 치밀한 화쇄류에 의해 형성되었다. 고기 성인 칼데라는 심부의 챔버로부터 상승하는 마그마로부터 끓어넘침 분출의 결과로, 후기 나리 칼데라는 화쇄류-형성 분출로 비워진 결과로서 형성되었다. 그러나 고기 칼데라는 현재 형태와 환상단층의 매몰로 그 계단식 모양을 잃었기 때문에 수직 변위를 정확히 알아낼 수 없다. 나리 칼데라는 우선 외형적으로 보면 지형적 외륜의 직경 3.4 km, 구조적 환상단층의 직경 2 km로서 피스톤 블록 침하에 의한 결과이다. 칼데라 블록은 약 750 m 이상의 수직 변위를 갖는데, 이는 모두 환상단층을 따라 축적되었다. 따라서 우리는 나리 칼데라의 현재 외측 경계가 플리니언 분출 동안 마그마 챔버의 대규모 배출에 의한 반복적 함몰로 형성되는 다단계 칼데라 외륜의 형태적 진화의 결과라고 결론짓는다.

**주요어:** 울릉도, 나리 칼데라, 지형적 외륜, 환상단층, 블록 침하

**Sang Koo Hwang, Seong Wook Jeong, Young Woo Son and Ji-Hoon Kang, 2020, Interpreting the geometry and multistage evolution of the Nari Caldera, Ulleung Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 6, p. 737-752**

**ABSTRACT:** We reconstruct the evolution of the Nari caldera, Ulleung Island, based on geomorphological observations, detailed stratigraphy, and the distribution and faces changes of the related clastic deposits that are produced by the volcanism during the past 40 ka. Currently, the caldera shows the overlapped structure of multicycles related to explosive eruptions, from which we recognize two caldera-forming events. Each collapse is a special “collapse-marker deposit”, defined by “Bongrae welded tuff (40 ka)” and “pre-Maljandeung landslide breccia”, and “N-4C tuff breccia in the Maljandeung Tuff (11 ka)”, respectively. The Bongrae welded tuff was produced by hot pyroclastic flows derived from boiling-over eruptions, whereas the landslide and tuff breccias were formed by debris flows from landsliding on the caldera wall, and by dense pyroclastic flows from the collapse of eruptive columns, respectively. The older Seongin caldera was formed as a result of emptying magma chamber by boiling-over eruption from magma arising from deep chamber, and the younger Nari caldera by pyroclastic-forming eruption. However, it is currently impossible for us to recognize clear vertical displacement in the older caldera because of losing its stepped shape by subsequent collapses and ring faults. The Nari Caldera is the result of piston block subsidence, which is 3.4 km wide in topographical rim and 2 km wide in structural ring faults. The caldera block has a vertical displacement of about 750 m, all of which have been accumulated along the ring fault. Thus we currently conclude that the outer boundary of the caldera is the result of the morphological evolution of the multistage caldera rim formed from repeated collapses by the voluminous drainage of magma chamber during the Plinian eruption.

**Key words:** Ulleung Island, Nari caldera, topographic rim, ring fault, block subsidence

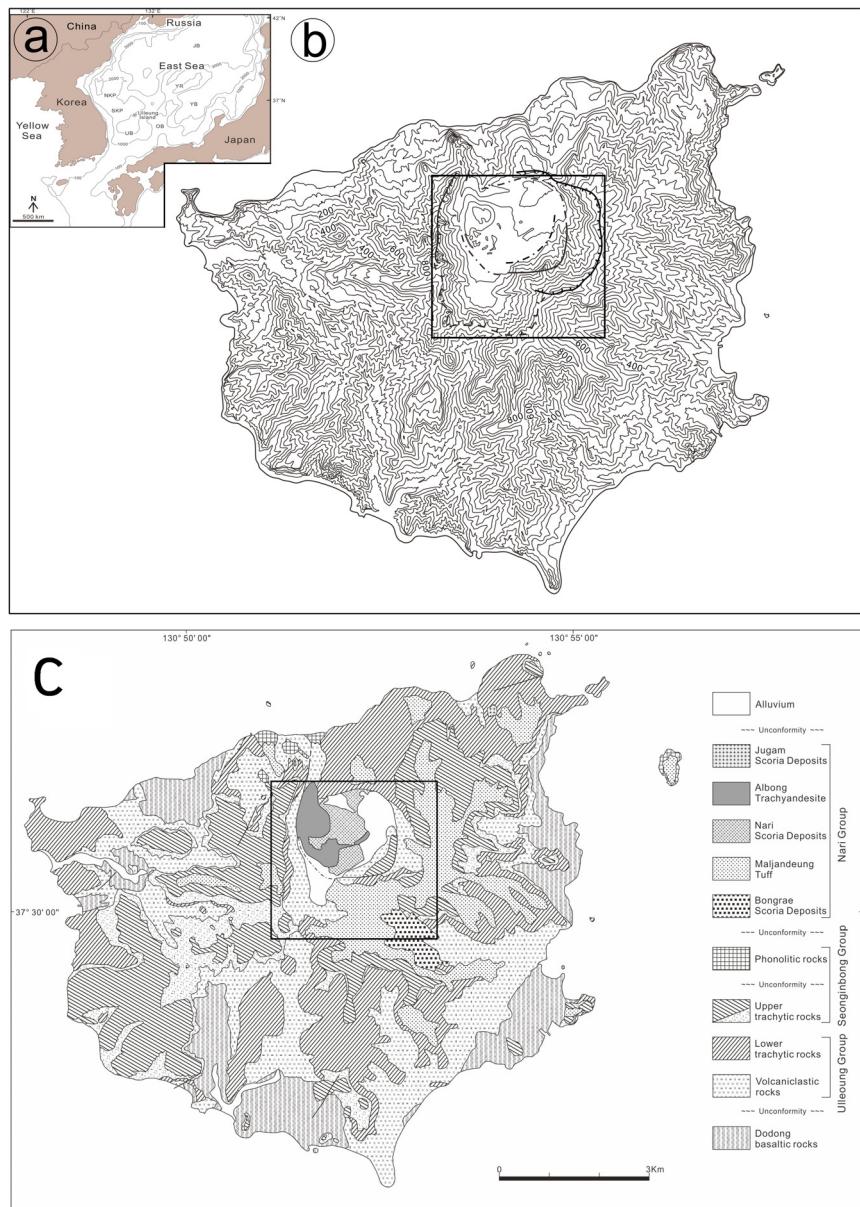
\* Corresponding author: +82-54-820-5474, E-mail: jhkang@anu.ac.kr

(Sang Koo Hwang and Ji-Hoon Kang, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Sang Koo Hwang and Seong Wook Jeong, Institute of Basic Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Young Woo Son, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 34350, Republic of Korea)

## 1. 서 언

울릉화산 전체는 동해 해저로부터 솟아났으며(그

림 1a) 수면 위에 드러난 부분은 높이가 986 m이고 면적이  $72.6 \text{ km}^2$ 이다(그림 1b). 이 섬은 현무암질 용암과 관련 지표쇄설 퇴적물과 조면암질 용암돔 및



**Fig. 1.** (a) Physiographic map, (b) topographic map with 50 m contour interval, and (c) geological map of Ulleung Island after Hwang *et al.* (2012). The rectangular boxes in both maps represent the location of Fig. 2 and 3.

용암류의 범위까지 노출시킨다. 가장 최근 화산작용은 나리 칼데라라고 부르는 칼데라 내에 집중되어 있다. 이와 같은 어린 칼데라는 침식이 적어 잘 보존된 분출 형태를 가지고 있지만, 일반적으로 지하구조, 침하심도, 또는 공급 마그마 저장고에 관련된 정보를 명쾌하게 제공하지 못한다.

울릉화산은 고기의 복성화산(composite volcano)으로서 정상 북쪽에 나리 칼데라와, 그 내에 최근의 알봉 용암돔을 가진다(그림 1c). 따라서 이 화산은 복식복성 화산으로서 베수비우스(Vesuvius) 화산을 닮은 솜마(Somma)형 화산이라고 할 수도 있다. 칼데라는 폭발성 분출 동안 불연속적으로 소규모 정상 함몰과 함께 형성되었으며, 새로운 용암돔은 불안정기를 지나 비교적 안정기에 지속적인 스트롬볼리언 분출과 함께 분류성 활동에 의해 성장하였다(Hwang et al., 2020). 불안정기에는 >18,800년 전에 저플리니언 분출에 의해 봉래분석층이 퇴적되었고, 18,800~5,600년 전에 플리니언 및 수증기플리니언 분출에 의해 말잔등응회암이 퇴적되었다.

개별 칼데라들은 기하학적으로 복잡하며 1개 이

상의 구조 유형과 침하 과정의 요소들을 포함하는 경우가 있다(Lipman, 1984; Walker, 1984; Branney, 1995). 솜마형 칼데라는 일반적으로 이들의 내부에 후기 화산구를 가지는 아원상 구조로 나타난다(Simkin and Siebert, 1994). 솜마형 칼데라는 “카리카토아(Krakatoa)” 칼데라의 한 예이며, “1개 이상의 화구로부터 혹은 측면의 환형 열곡으로부터 규질 부석의 폭발성 분출을 뒤따르는 큰 복합화산 상단부의 침몰”에 의해 형성된다고 하였다(Williams and McBirney, 1979). 최근까지, 나리 칼데라의 형성은 막연히 말잔등응회암을 퇴적시켰던 폭발성 분출의 결과라고 간주하였다. 나리 칼데라의 전체 형태는 거의 원형에 가깝지만, 그 범위를 남쪽의 큰 계곡부로 확대하면 비대칭 모양을 보여준다. 이 계곡부에는 말잔등응회암층의 전부가 두껍게 분포하기 때문에 이 칼데라가 이전부터 이미 존재했음을 암시한다(Kim et al., 2014). 나리 분지에서 지형에 따른 화산학적 해석은 기존 칼데라의 존재에 관해 적지 않은 의문을 해소할 수 있다(그림 2).

나리 분지에는 지형적 근거에 의해 적어도 2개의

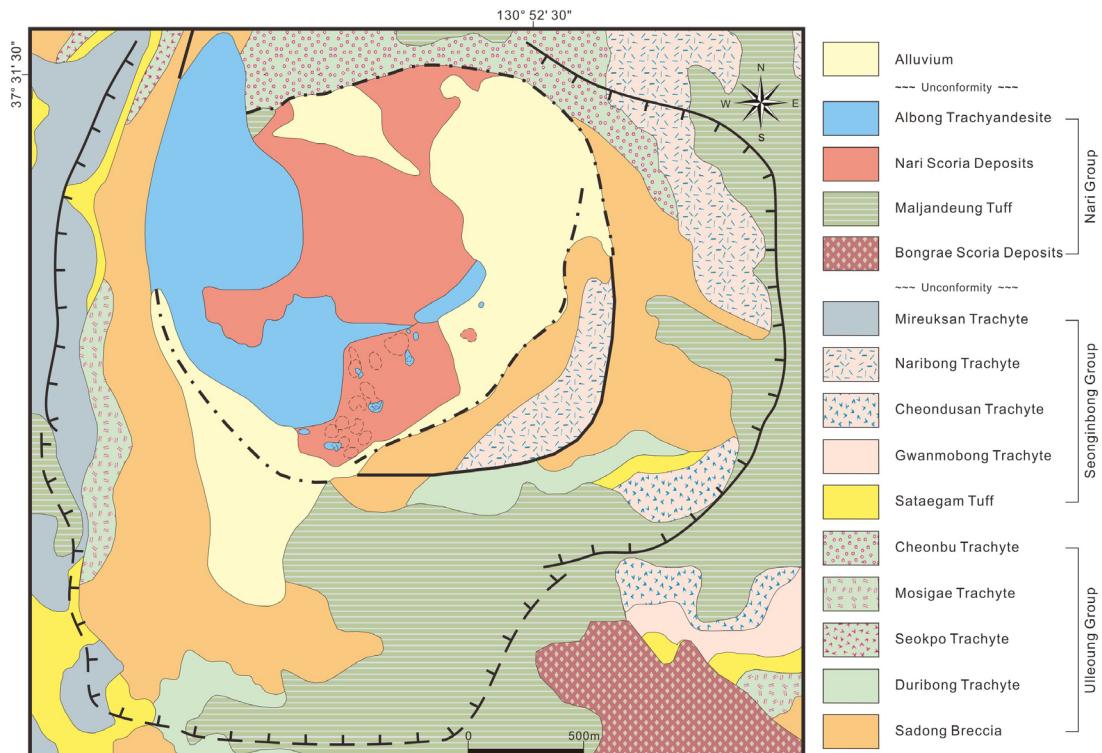


Fig. 2. Geological map of Nari caldera region, showing the bounding ring faults and topographic rims.

칼데라, 즉 칼데라 복합체(caldera complex)를 확인 할 수 있다. 이 구조는 여러 차례 수직 함몰의 결과이 었을 것으로 보인다. 이러한 원인 물질로서 칼데라 형성 끊어넘침 분출 및 플리니언 분출에 의해 잠재적으로 가능한 여러 화성쇄설층이 인식되었지만 (Hwang *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2014), 지금까지 다단계의 칼데라 형성을 구체적으로 풀어내지 못했다. 원인 물질에 의하면 칼데라 함몰은 봉래 용결응회암과 말잔등응회암 N-4C 응회각력암을 퇴적시킨 폭발성 분출 동안 일어났음을 암시하며, 이 분출은 대략 40 ka와 11 ka로 측정되었다(Okuno *et al.*, 2010; Shiihara *et al.*, 2011; Im *et al.*, 2012; McLean *et al.*, 2020). 나리 칼데라의 비대칭 모양은 언뜻 보기에도 측방 함몰의 가능성을 암시하는데, 실제로 지질학적 혹은 화산학적 추적에 의하면 “고기 칼데라와 혼돈적 산사태를 일으킨 격동적인 사건”에 관련된다는 것을 배제할 수 없다.

이 논문은 중첩된 칼데라의 형태로부터 반복적인 수직 함몰을 유도했던 사건의 입증과 시기를 통해 이 칼데라의 다단계 진화를 복원하였다. 이 연구는 다음과 같은 (1) 야외조사 및 지형관찰, (2) “칼데라-형성” 분출에 관한 충서적 복원, (3) 특히 칼데라 함몰에 관련되는 충서단위를 중심으로 수행되었다.

## 2. 지질개요

울릉화산은 현무암질, 조면안산암질, 조면암질 및 포놀라이트질 용암과 화성쇄설암, 그리고 이들로부터 나온 지표쇄설 퇴적층의 범위까지 노출시킨다. 이 화산은 부정합 및 조성차이에 의해 하부로부터 도동현무암질암류, 울릉충군, 성인봉충군과 나리충군의 4개 충군으로 구분되었다(그림 1c; Hwang *et al.*, 2012).

도동현무암류는 현무암질 용암 및 유리쇄설성 퇴적층의 연속체(1.43~0.97 Ma; Brenna *et al.*, 2014)이고 이의 기저는 노출되지 않는다. 울릉충군은 조면암질 각력암 및 용암류(1.25~0.51 Ma)로 구성되고, 성인봉충군은 조면암질 화성쇄설암 및 용암류(0.73~0.23 Ma)와 포놀라이트질 용암류으로 구성된다. 나리충군은 포놀라이트질 화성쇄설층과 조면안산암질 분석층 및 용암류으로 구성되고 봉래분석층, 말잔등 응회암, 나리분석층, 알봉조면암과 죽암분석층 순으로 구분된다(그림 1c, 2).

말잔등응회암은  $^{14}\text{C}$  연령측정에 의하면 약 18.8~5.6 ka에 분출되었고(Okuno *et al.*, 2010; Shiihara *et al.*, 2011; Im *et al.*, 2012) 두꺼운 화성쇄설 연속체이다. 이외에 60~61 ka U-Sado 및 40.1 ka U-Ym 테프라가 울릉도에서 유래되었다고 최근 보고되었다(Lim *et al.*, 2013; McLean *et al.*, 2020). 이때 일련의 칼데라 함몰이 수반되었으며, 이 섬의 중앙부에 원형 저지인 나리 칼데라를 형성하였다(그림 2).

## 3. 나리 칼데라의 형태

칼데라에 대한 구조적 및 형태적 요소에는 기본적으로 지형적 외륜(topographic rim), 내측 칼데라벽(inner caldera wall), 경계 단층(bounding fault), 구조적 칼데라 바닥(structural caldera floor), 칼데라내부 충전물(intracaldera fill), 하위의 마그마 챔버 등이 포함된다(Lipman, 1984, 1997).

나리 칼데라는 북쪽으로 열린 원형 극장 모양을 하지만 남쪽에 만곡상으로 나와서 비대칭을 이룬다(그림 1b, 3). 이 칼데라를 경계짓는 타원상 외륜은 북쪽에서 칼데라 바닥 위로 <100 m 높이로 솟아있고 남쪽에서 최고 600 m 높이까지 도달한다(그림 1b). 칼데라 북서부는 알봉 용암돔이 위치하는데, 칼데라 바닥에서 약 120~150 m 솟아있다(그림 4a).

나리 칼데라의 지형적 외륜은 3.4 km 직경의 동서 주축을 가지는 거의 타원상 모양을 이루고 남쪽으로 만곡상을 나타낸다(그림 3). 그래서 이 외륜은 미륵산과 말잔등을 경계로 하여 3개 서쪽, 남쪽 및 동쪽 외륜으로 구분할 수 있다(그림 4a). 그러나 북쪽 외륜은 열린 부분으로 정의되지 않는다.

### 3.1 남쪽 외륜

남쪽 외륜은 울릉화산에서 가장 높은 능선을 이루며 미륵산-형제봉-성인봉(986 m)-말잔등(968 m)으로 뻗는다(그림 3). 이 외륜은 약 4.2 km 길이로서 활모양으로 휘어지고 북쪽에 중심을 둔 약 1.5 km의 곡선 반경을 추정할 수 있다. 대략 900 m의 평균 고도를 가지는 비교적 가파른 내측 칼데라 벽을 나타낸다.

이 외륜은 주 칼데라 벽에서 남서쪽으로 만곡부를 형성한다. 이러한 만곡부는 일부 칼데라 벽을 따라 지형적 확대 혹은 위성 환상단층으로 연결되는 돌출

부의 불규칙한 주변 침하로부터 발생할 수도 있겠지만(Branney, 1995; Branney and Gilbert, 1995), 층서적으로 부합되지 않는다. 이 칼데라 벽은 500 m 높이로 비교적 가파르지만 말잔등응회암이 용암과 각력암 위에 두껍게 쌓여있기 때문에, 우리는 이 만곡부를 선기의 함몰구조로 보는 것이다. 만곡상 함몰구조는 바이아스(Valles) 칼데라의 톨레도(Toledo) 만에서와 같이 반복적인 분출과 조합되어 편심으로 겹치는 연속적인 침하 사건과 관련된 것으로 선기의 침하구조에 의한 것이다(Self *et al.*, 1986).

나리 칼데라의 만곡부에는 차별적 침식으로 인한 부채꼴(수지상) 계곡이 알봉골로 모여 충적선상지를 형성하고 있다(그림 4b). 부채꼴 모양의 평면도와 칼데라 벽의 비교적 완만한 사면은 크리드(Creede) 칼데라(Steven and Lipman, 1976)와 같은 큰 칼데라에서와 비교될 수 있는 지형적 칼데라의 슬럼핑(slumping) 확대를 암시한다.

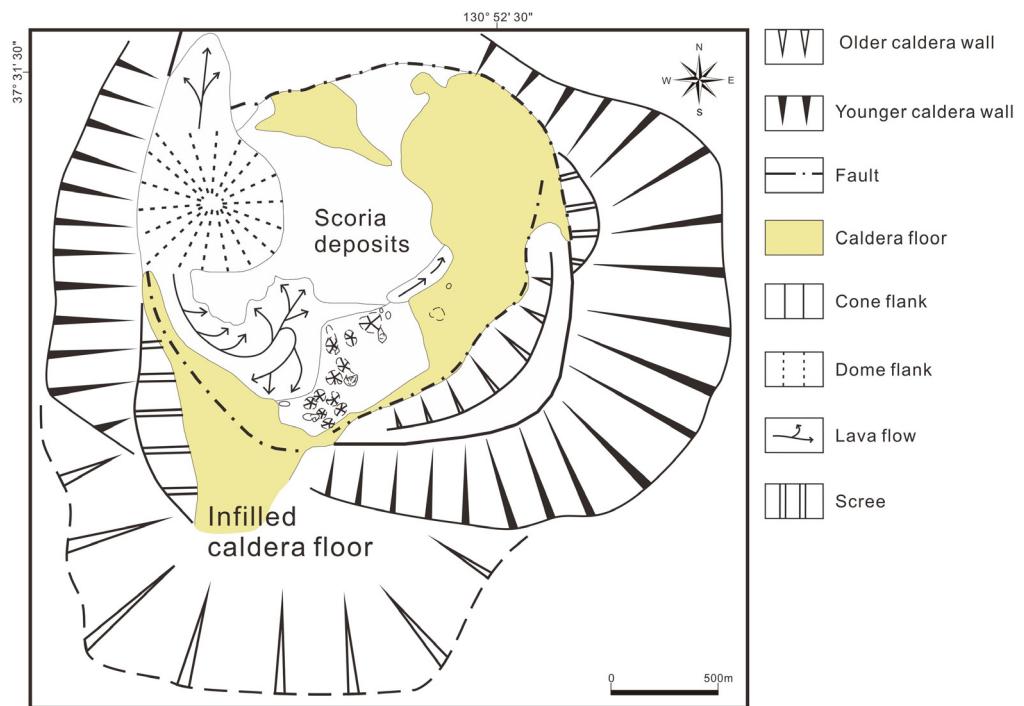
이 외륜의 외측 화산체 사면은 배수패턴이 파라솔과 같이 방사상으로 말잔등응회암의 화성쇄설 덮개뿐만 아니라 그 아래 용암과 각력암까지도 깊게

침식된 특징을 나타낸다. 파라솔과 같은 방사상 배수패턴은 울릉화산에서 전체적으로 서쪽, 남쪽 및 남동쪽 방향의 능선을 따르는 계곡의 배열 관계를 보여주는 타원상 화산 모양을 나타낸다(그림 1b).

원래 대칭적 화산구를 생각하면, 고기 울릉화산의 크기는 배수축의 수렴점에 의해서 또한 외측 칼데라 외륜의 반원형 등고선(예, 그림 1b에서 900 m 등고선)에 의해서 평가될 수 있다. 이런 방식으로, 고기 화산의 정점은 대체로 현재 성인봉의 북쪽 부근에서의 고도 1,050 m에 위치할 것으로 예상된다. 이러한 고기 화산구에서, 칼데라의 남쪽 외륜 부분(그림 3, 4)은 화산의 북측 사면에 중심을 두었던 함몰 잔류체를 나타낸다. 이는 남쪽 외륜보다 훨씬 더 낮은 바다쪽 외륜을 가지는 칼데라의 심한 비대칭 단면을 초래하였다.

### 3.2 서쪽 외륜

서쪽 외륜은 미륵산(905 m)-유두봉-깃대봉-송곳 산(611 m)으로 약 1.4 km 연결되고 북동쪽으로 낮아진다(그림 1b). 이는 남쪽 외륜과 예각을 이루고



**Fig. 3.** Schematic map of the Nari caldera complex summarizing the main structural and morphological features of the calderas.

활모양으로 약간 휘어지며 동쪽 내측으로 거의 수직에 가까운 칼데라 벽을 가진다(그림 3).

칼데라 벽은 하부에 각력암과 상부에 용암층으로 구성되고(그림 2) V자곡이 가리비 모양의 침식패턴으로 형성되며(그림 4c), 기슭에는 절벽에서 낙하된 암괴들에 의한 애추로 덮이거나 용암돔으로 덮여 칼데라 구조의 최후기 부분을 나타낸다(그림 3). 이 벽은 역시 이의 기슭에서 애추가 지시하는 바와 같이 산사태의 영향을 받았다. 이 활은 동쪽 외륜과 함께 동쪽에 중심을 둔 반경이 대략 1.7 km으로 추산된다.

외륜의 서쪽 화산체 사면의 성숙한 모양은 용암층에 잘려진 망상의 구심적 배수패턴을 가지며, 화산구조의 고기 부분을 나타낸다. 화산의 최고 높이에서 배수패턴은 대체로 방사상 양상을 보여준다(그림 1b).

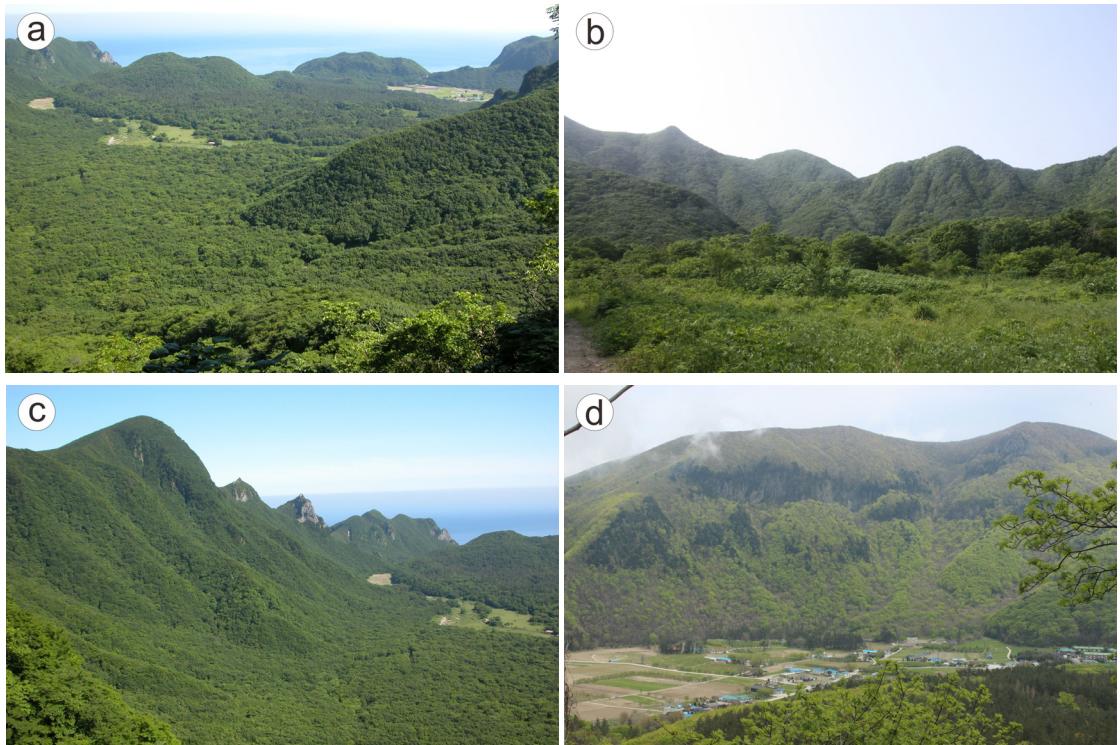
### 3.3 동쪽 외륜

동쪽 외륜은 밀잔등-천두산(961 m)-나리령(799 m)

-나리봉(816 m)으로 뻗치고 나리고개를 거쳐 북서쪽으로 내려간다(그림 1b), 이 외륜은 남쪽 외륜과 거의 직각을 이루고 약 4 km 이상으로 길며 북서쪽에서 뚜렷하지 않다. 그래서 북쪽 외륜은 선명하게 정의되지 않는다. 동쪽 외륜은 서쪽에 중심을 둔 활모양의 원상 곡선을 나타내며 이 활은 약 1.7 km의 곡선 반경을 가진다.

칼데라 벽은 매우 가파른 절벽으로 대개 고기 용암류와 각력암층으로 구성되며(그림 2) V자곡으로 파인 가리비 모양의 침식패턴을 나타내고 절벽에서 떨어진 암괴들에 의한 작은 애추가 기슭에 놓여있다(그림 3).

외륜의 동쪽 화산체 사면은, 화성쇄설 단위뿐만 아니라 그 아래 용암층에 잘려진 구심적 배수패턴을 가지며, 화산구조의 고기 부분을 나타낸다. 화산의 최고 높이에서 배수패턴은 분명히 방사상 양상을 보이지만, 최근 분출물에 의해 현저한 퇴적층에 의해 명확하지 않다(그림 1b).



**Fig. 4.** Main morphological features in the Nari caldera complex. (a) Overview of the Nari caldera complex, showing opening rim northward; (b) Morphological feature showing dendritic pattern in the southern caldera wall; (c) Morphological feature with scalloped pattern in the western caldera wall; (d) Feature exhibiting scalloped pattern in the middle part and covered with rock-falling scree deposits in the lower part of the eastern caldera wall.

경계단층은 이 외륜의 내측에 약 300~700 m 간격의 칼데라 벽을 사이에 두고 거의 평행하게 동심원상으로 나타나고 두 가닥의 환상단층(ring fault)을 이룬다. 내측 환상단층은 칼데라 충전물로 거의 전부 덮여있지만 칼데라 바닥의 남동측에서 수직 절벽을 이루기 때문에, 수직 내지 외측경사를 이룬다고 생각된다. 외측 환상단층은 대부분 지질경계선을 따라 추적되고 칼데라 벽을 따라 수직에 가까운 내측 경사를 이룬다. 칼데라에서 환상단층은 그 기하학적 구조가 흔히 천부 레벨에서 안쪽으로 경사지더라도 깊어지면서 가팔라지고 챔버 바로 위 레벨에서 바깥 쪽으로 경사진다(Williams, 1941; Branney, 1995). 이 환상단층도 피스톤 침하로 정의되며, 분출이 진행됨에 따라 점점 일관된 피스톤 함물을 일으켰을 것이다(Fridrich *et al.*, 1991). 한편 이 환상단층은 칼데라 바닥을 뚜렷하게 정의해주며 그 최저고도 345 m 이하이었다. 지금 경계단층과 칼데라 바닥은 칼데라내부 충전물로 덮였지만, 숨은 단층을 예측할 수 있다(그림 2). 따라서 환상단층은 거의 원형을 나타내며 그 직경을 2 km로 측정할 수 있다.

칼데라 바닥은 나리분석층, 알봉 용암돔 및 용암류와 충적층 등의 함몰 후의 충전물로 기복을 나타내지만, 아직도 낮은 저지를 나타내므로 칼데라 분지라 할 수 있다. 특히 경계단층의 북서부는 용암돔이 538 m로 솟아있어서 원래 북쪽으로 트인 칼데라를 구축한 모양새이다(그림 1b, 3). 이는 바다쪽으로 화산의 비대칭 성장을 유도하는 칼데라 경계부 저지를 구축한 충전물을 나타낸다. 이 돔의 외측 사면은 북쪽으로 큰 계곡을 형성하고 칼데라 내로 스며든 지하수가 용출되고 있다.

#### 4. 폭발성 분출과 칼데라 함몰

나리 칼데라 함몰에 관련된 원인 물질은 봉래분석층 하부와 말잔등용회암 기저와 중부에 존재하며, 봉래 용결용회암(아마도 40 ka), 말잔등 이전 각력암(>18,8 ka), 말잔등용회암의 멤버 N-4 화성쇄설암(11 ka) 등이다.

##### 4.1 봉래 용결용회암과 끓어넘침 분출

봉래 용결용회암은 봉래분석층 하부에 2~4 m 두께로 존재되는 것이 인상적이다(그림 5a). 말잔등 이

전 각력암에도 2 m 크기의 거대암괴(megablock)로 포함되어있고(그림 5b) 칼데라의 북동쪽 지겟골에서도 말잔등용회암 아래에서 소규모로 발견된다. 이 용결용회암은 남동측 사면 계곡부에서 4 m 두께의 설상체를 형성하며 사동각력암 침식면 위에 직접 놓인다. 상위에는 스트롬볼리언 내지 저플리니언 분출의 분석층들에 의해 덮인다(Hwang *et al.*, 2012).

이 용회암은 전체적으로 암갈색을 띠는 기질에 흑색 및 암갈색 유리질 피아메, 반정과 회색 암편이 존재하며, 괴상이고 기질지지를 한다. 피아메는 부석이 편평화된 것이며 대체로 사면 방향에 평행하게 1:3 정도로 신장되어 있다(그림 5a). 반정은 대부분 1~2 mm 크기의 유백색 알칼리장석이고 드물게 휘석과 캘슈타이트로 구성된다. 기질은 암갈색 본질화산재 샤아드로 이루어지고 치밀용결을 나타낸다(그림 5a).

조직적 형상은 이 용회암이 고온 고밀질 화쇄류에 의해 정치된 결과라는 것을 암시한다. 이는 화쇄류가 화산 계곡부의 완만한 기슭에 도달했을 때 집단 정치된 것으로 생각된다. 이러한 이유는 피아메가 배열된 완배열상 석리의 형성, 기질에 치밀한 본질 샤아드의 존재, 수 km 긴 이동거리에서의 치밀 용결작용, 그리고 구성원의 다양성 및 불균질성이지만 외관의 치밀성 및 균질성 등의 특징으로부터 알 수 있다.

이 용결용회암층은 단지 화산의 남동측 사면 계곡부에서만 기재되었지만(Hwang *et al.*, 2012), 그 당시 북동측 사면 지겟골에서도 소규모 노두로 발견되었다. 이 두 산출은 울릉화산의 중심부인 성인봉을 중심으로 할 때 전반적으로 방사상으로 분포를 보여준다. 이들은 분산되어 분포하지만 암질적으로 완전히 같을 뿐만 아니라 사동각력암 혹은 천부조면암의 침식면 위에 놓이고 수증기마그마성 퇴적층에 의해 덮여 같은 충서적 위치에 놓을 수 있다. 말잔등-이전 산사태 각력암에 들어있는 용결용회암 암괴도 마찬가지로 완전히 같은 암질을 나타내고, 사동각력암 침식면 위에 놓이고 말잔등의 시작 수증기마그마성 퇴적층에 의해 덮여 있는 각력암 속에 포함되어있기 때문에 동일한 충서적 위치에서 유래된 것으로 볼 수 있다. 미국 서부에서 수많은 조사에 의하면  $5 \text{ km}^3$  이상의 용결용회암은 반드시 마그마 챔버의 최상단부가 내려앉는 칼데라 함몰과 연관된다고 한다(Smith,

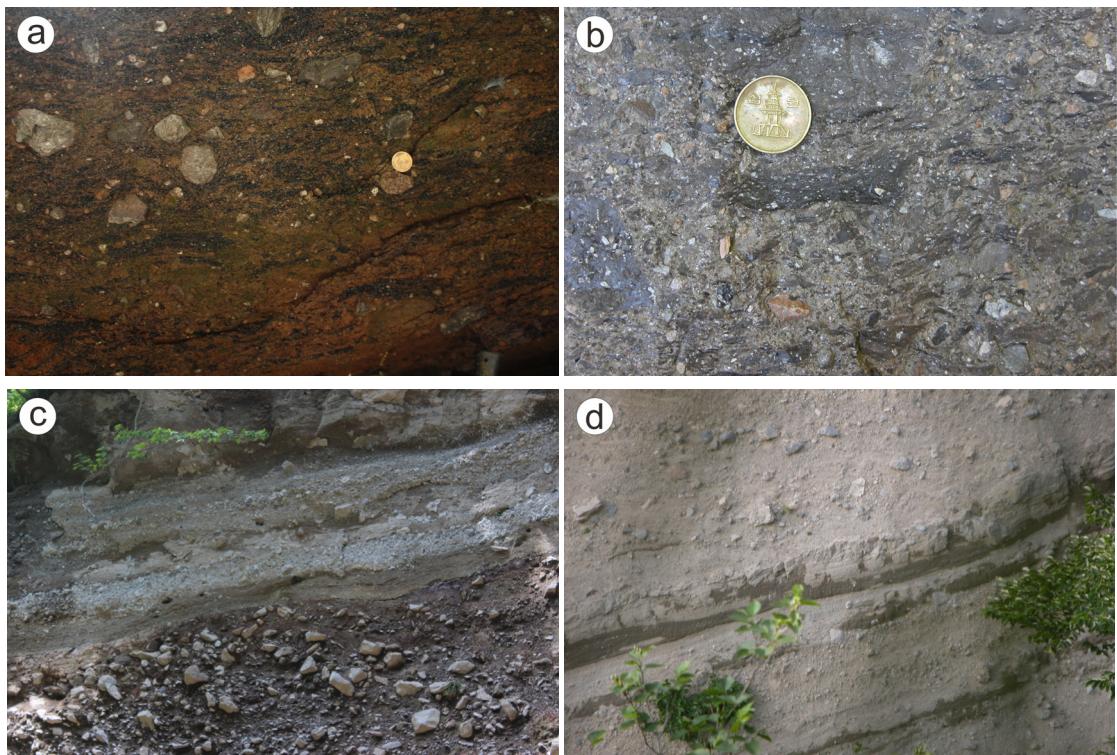
1960). 이 용결응회암은 매우 적은 양으로 남아있는 데, 그 이유는 급한 화산사면의 지형 지배뿐만 아니라 화쇄류의 이동속도가 최고 100 km/h의 빠른 관계로 그 대부분이 화산 아래로 흘러내려가 바다 속으로 들어갈 수밖에 없었기 때문이라고 생각된다.

이러한 용결화쇄류층의 산출 위치와 층서적 위치는 남쪽 외륜 부분(그림 1b, 3)이 고기 칼데라 함몰을 유도했던 잔류 부분을 나타내는 것을 암시한다. 계곡에 충진된 용결화쇄류층은 고기 칼데라 벽의 형성과 관련되는 증거물인 것이다. 이 용결화쇄류층은 지속적 분연주의 함몰에 의하기보다 칼데라 함몰 직전에 분화구를 따라 끓어넘침 분출(boiling-over eruption)에 의해 생성되는 함몰 동시 및 후의 고온 고밀도 화쇄류가 칼데라 외측부에 정치된 결과이었다는 것을 암시한다(Hwang and Kim, 1990). 즉 계곡에 충진된 화쇄류층은 남쪽 칼데라 벽이 끓어넘침 분출에 따른 함몰로 형성되었다는 간접적 증거이다. 분

화구를 넘치는 화쇄류가 계곡을 따라 흘러 대부분 바다로 들어가고 일부가 완만한 계곡부에 정치된 것이다. 이때 분출에 관여했던 마그마는 칼데라 블록을 구축함으로 위로 압출되는 마그마의 휘발성 물질이 부족한 부분을 나타낼 것이다.

폭발성 화쇄류(혹은 회류) 분출과 조합된 칼데라들은 지난 반세기 동안 칼데라 형성(Williams, 1941)과 회류 과정(Smith, 1960)에 대한 획기적인 검토에 자극을 받아 많은 연구가 이루어졌지만, 칼데라 형성과정과 침하의 입체모양이 완전하게 이해되지 못했다(McBirney, 1990). 하지만 하위의 마그마 저장고에 지붕 붕괴에 의한 칼데라의 형성은 현재 수  $\text{km}^3$  이상의 마그마 부피에 관련되는 폭발성 분출을 수반하는 것으로 널리 인식되고 있다.

이러한 대규모 분출은 동해나 일본까지로 분산되어 그 일부를 화산재 강하를 일으켰을 것이다. 최근에 보고된 동해에서의 60~61 ka U-Sado 텤프라 (Lim



**Fig. 5.** Main lithological images of collapse-maker deposits involved in the Nari caldera complex. (a) Bongrae welded tuff occurred at the base of Bongrae Scoria Deposits in a valley over the Bongrae Fall; (b) Welded tuff lithology of a megablock at the base of landslide breccia outcropped in a valley west of Maljandeung; (c) Landslide breccia exposed below the Maljandeung Tuff in a valley west of Maljandeung; (d) Block-rich tuff breccia overlying crudely bedded lapill tuff in Member N-4.

*et al.*, 2013)와 일본 혼슈에서 40 ka U-Ym 테프라 (McLean *et al.*, 2020)가 이에 대응될 것으로 생각된다.

#### 4.2 말잔등 이전의 산사태 각력암과 칼데라 벽의 임설류

말잔등 이전 산사태 각력암은 두께가 최고 5 m 이상인 불규칙한 설상체를 형성하며, 멤버 N-5에 의해 덮이고 아마도 남쪽 칼데라 벽의 기슭에 해당하는 사동각력암 위에 직접 놓인다. 이 각력암은 일반적으로 괴상이고 입자지지를 나타내고, 일반적으로 각상의 조립 라필리 내지 암괴 크기의 쇄설물로 구성된다(그림 5c). 쇄설물은 대부분 조면암편으로 구성되며 직경이 최고 2 m의 다양한 암괴를 함유한다. 암괴들은 대부분 회색 조면암편들이고 이 각력암의 주요 구성원이며, 특히 거대암괴 중에는 톱니상 단열도 나타나고 드물지만 산발적으로 용결응회암을 포함한다. 암편-풍부 설상체는 이 퇴적체에서 아주 약한 층리를 형성하면서 드물게 나타난다. 판상 암편들은 약하게 배열되고, 이들의 장축이 일반적으로 수평이거나 혹은 매우 저각도로 하류로 경사된다. 기질은 본질 화산재 물질이 부족하고 속성작용으로 인해 적색 내지 갈색을 가지는 불량분급의 사질 뿐으로 구성되며, 알칼리장석과 휘석을 갖는 다양한 암편을 함유한다.

대부분 칼데라는 관련 분출 중에 함몰되기 때문에, 칼데라내부 충전물은 칼데라 과정에 대한 주요한 증거를 제공한다. 충전물은 흔히 칼데라 내의 단층 파괴를 평가하는데 충서 표시자 역할을 한다. 이 각력암의 불규칙한 더미는 화산분출의 긴 휴지기 동안 칼데라 벽의 반복적인 산사태에 의한 암설 축적 애추로서 고기 칼데라 내부 충전물이다(Kim *et al.*, 2014). 이 산사태 각력암은 후기 분출물로 덮여 소규모로 노출되지만 초기 칼데라 함몰을 수반하는 대량의 산사태 암설이 환상단층 근처에 숨겨져 있을 것으로 추정된다. 이러한 각력암 더미는 침하된 고기 칼데라 바닥 내에 깊숙이 축적되기도 하며(Lipman, 1976), 화구에 인접하면 직접적인 화도 침식 외에, 분연주에 유입되어 암편질 각력암(lithic breccia)으로 정치될 수 있는 큰 암편질 물질의 잠재적 공급원이기도 하다. 하지만 칼데라 벽에서 발생하는 대규모 산사태는 일차적 화산구조를 숨기는 경향이 있어 침하과정의 해석이나 심지어 일부 칼데라의 존재를 방해하기도 한

다. 특히 칼데라 벽에서 매우 짧은 이동, 톱니상 단열, 언덕 같은 표면과 피아메 같은 기존 내부구조를 갖는 거대암괴의 존재뿐만 아니라 기질의 본질 물질의 부재와 불균질성 등이 암설 사태의 성인으로 나타난다. 이 각력암은 단지 남쪽 외륜의 칼데라 벽에서만 발견된다. 그러므로 이 산사태 각력암은 선기 칼데라의 존재에 대한 간접적인 증거를 지시한다.

#### 4.3 말잔등응회암의 N-4C 응회각력암과 11 ka

##### 플리니언 분출

말잔등응회암은 칼데라 외부에서 상부로부터 하부로 가면서 멤버 U-2, 3, 4, 5 강하층으로 세분되고 (Machida *et al.*, 1984), 칼데라 내부에서도 멤버 N-2, 3, 4, 5로 세분되었다(Kim *et al.*, 2014). 이 연속체는 국지적 및 광역적으로 분산된 강하층, 국지적인 써지층과 화쇄류층으로 구성된다(Kim *et al.*, 2014). 이들은 대개 수증기플리니언 분출과 플리니언 분출로부터 퇴적된 것이다(Hwang *et al.*, 2018, 2020). 멤버 N-5의 분출 후에, 이 화산은 거의 8 ka 동안 조용해졌으나, 11 ka 전에 N-4 분출은 말잔등응회암에서 기록된 가장 크고 가장 폭발적인 분출이었다. 처음에는 단기간 수증기마그마성 활동이었으나 후기로 가면서 극히 폭발적인 플리니언 분출로 높은 분연주를 형성하여 널리 퍼지는 강하층(N-3B)을 유도하였다.

단위 N-4B는 화학조성과  $^{14}\text{C}$  연령측정에 따르면 동해와 일본열도에서의 U-Oki 테프라(Machida *et al.*, 1984; Shiihara *et al.*, 2011)와 같은 층이다(Kim *et al.*, 2014). U-Oki 테프라는 >5 cm 두께로서 광역적으로 분포하고 충서적으로 육상 테프라와 같은 양성한 부석 라필리 퇴적층 조직을 보여준다. 이러한 특징은 플리니언 분연주를 지속할 만큼 강력했었고 동해를 넘어 일본 열도로 대량의 부석질 테프라를 퇴적시킬 만큼 광범위했음을 지시한다.

특히 N-4C 화성쇄설암은 13 m 두께의 기질지지 화성쇄설 연속체이며, N-4B 위에 정합으로 놓인다 (Kim *et al.*, 2014). 이는 대부분 1~2 m 두께의 괴상 라필리응회암 및 응회각력암층으로 구성되며, 10~20 cm 두께의 응회암층이 협재된다(Kim *et al.*, 2014). 라필리응회암 및 응회각력암층은 담갈색을 띠고 조립 암편이 다른 멤버에 비해 특히 풍부하다. 괴상 응회각력암층은 조립 암괴가 풍부한데 주로 역점이 층

리를 보여준다. 이 암괴들은 일반적으로 칼데라 벽에서 축적되는 산사태 각력암에 비해 훨씬 적은 편이다.

N-4C의 라필리옹회암 및 응회각력암층은 고밀집의 암괴-풍부 화쇄류와 뒤따르는 저밀집의 세립질 꼬리에 의한 화쇄류층이다(Kim *et al.*, 2014). 이질 암편의 풍부함은 왕성한 칼데라-형성 분출에서 화도에서 유래하는 암편 분출물로서 고밀집 화쇄류에 포함된 것이다(Kim *et al.*, 2014). 즉 암편은 분출물이 지표로 상승하는 동안 화도에서 뜯겨 나왔음을 의미한다. 그러나 이는 상승하는 마그마 분출물이 화도를 통해 통과되는 동안 이들의 강력하고 끊임없는 침식능력의 결과라고 할 수 없고(Macedonio *et al.*, 1994), 칼데라 함몰과 조합되는 마그마 챔버 상위의 지붕암의 단열에 의한 것도 포함된다. 즉 암괴-풍부 화쇄류층은 진화된 마그마 챔버의 최상단부가 칼데라 함몰에 필요한 환경을 충진시키는 분출에 관련되었다는 것을 암시한다. 멤버 N-4에 협재된 암괴-풍부 화쇄류층의 존재는 플리니언 분출에 따른 칼데라 와 관련되었다는 증거이다.

플리니언 분출에 관한 연구에서, 초기의 지속적 플리니언 분연주는 화도계의 빠른 확장과 조합하여 붕괴되기 시작하거나, 혹은 마그마 챔버의 감압이 뒤따르는 칼데라 혹은 환상단층 함몰로 인해 붕괴되기 시작한다고 널리 알려져 왔다(e.g., Druitt and Sparks, 1984; Heiken and McCoy, 1984; Polacci *et al.*, 2003; Kawakami *et al.*, 2007; Bear *et al.*, 2009). 뚜렷한 상전이는, 멤버 N-4에서 부석-풍부 강하층(N-4B)에서 암괴-풍부 화쇄류층(N-4C)으로 증명되는데, 분연주가 지속되는 분출단계에서 분연주가 붕괴하는 단계로 분출양식의 변화를 나타낸다. 이 붕괴 단계에서 나온 화쇄류의 높은 암편 함량은 칼데라-형성 분출 작용과 연관되어 있다. 한편 섬장암 포획체의 존재는 강력한 플리니언 분출 동안 마그마 챔버 지붕의 불안정성을 암시한다. 멤버 N-4가 해저 테프리층(U-Oki)과 육상 테프리층(U-4) 기록에서 발견되는 가장 크고 가장 널리 퍼진 단위라는 것을 고려하면, 아마도 이 분출은 고기 칼데라 구조에 중첩하여 북쪽에서 칼데라의 함몰을 반영하는 것으로 생각된다. 내측 칼데라벽에서 암괴-풍부 화쇄류층은, 상류로 이동하는 흐름에 의해 분산되었지만(Kim *et al.*, 2014), 지형지배를 받는 관계로 높은 칼데라 외륜을 넘지는

못했던 것 같다. 왜냐하면 이러한 화쇄류층은 칼데라 외부의 화산사면 노두에서 발견되지 않기 때문이다. 따라서 높은 칼데라 외륜은 치밀한 화쇄류의 통과를 방해했던 기존 지형적 장애물을 지시하는 것으로 생각된다.

## 5. 토 의

칼데라는 화산 지역에서 아원형 저지이며, 직경이 2 km 이상으로서 분화구의 지름보다 더 큰 것이다(Williams, 1941). 미국의 라 가리타(La Garita)처럼 직경이 35×75 km에 이르는 것도 있다(Steven and Lipman, 1976). 칼데라는 수백 m에서 수 km까지 다양한 침하심도로 함몰한다. 이들의 모양은 아원형 또는 더 흔하게 타원형일 수 있다.

칼데라는 분류성이나 폭발성 분출 동안 마그마 챔버를 비우는 것의 지표 표현이다. 함몰 전에 어느 시점에서 마그마 챔버 내의 감압의 결과로서, 저장고의 지붕이 함몰되어 지표면에서 저지를 형성할 때 만들어진다(Williams, 1941; Druitt and Sparks, 1984; Branney, 1995; Lipman, 1997). 일단 함몰이 시작되면, 휘발성이 풍부한 마그마의 대부분 혹은 전부를 챔버에서 밀어낼 것이다.

### 5.1 나리 칼데라의 규모

칼데라는 대개 적당한 크기와 침하를 가지는 피스톤과 같은 구조를 닮았다(Newhall and Dzurisin, 1988; Chadwick and Howard, 1991; Rowland and Munro, 1992). 다단계의 함몰은 흔히 길쭉한 구조물을 발달시킬 수 있다(Martí and Gudmundsson, 2000).

울릉화산에서 칼데라는 40 ka(혹은 60~61 ka)에 봉래 용결옹회암의 분출과 11 ka 말잔등옹회암 분출할 때 형성되었으며, 잘 보존된 중첩된 칼데라이다. 즉, 전자의 분출은 선기 성인 칼데라를 후자의 분출은 후기 나리 칼데라를 형성하였다. 선기 칼데라는 후기 칼데라에 숨어있기에 나리 칼데라의 규모만을 알아본다. 나리 칼데라는 지형적 외륜의 직경(D)이 대략 3.4 km인 대표적인 소형 피스톤-침하 칼데라이다(표 1). 구조적 직경(d)이 약 2 km인 환상단층은 칼데라 충전물로 잘 노출되지는 않았지만, 가파른 칼데라 벽과 평탄한 충전물과의 접촉하는 호상 트렌드로부터 추론되고, 마찬가지로 칼데라 벽과 알

**Table 1.** Caldera elements and calculated volumes for the Nari caldera.

	Topo C diameter	Structural diameter	Sudsidence depth	Unfilled collar height	Topo C area	Structural area	Sudsidence volume	Roof thickness
Symbol	D	d	s	h	Tca	Sa	Sv	T
Formula					$\pi (D/d)^2$	$\pi (d/2)^2$	$Sa \cdot s$	
Nari	3.4	2.0	0.7	0.55	1.53	3.14	2.36	20

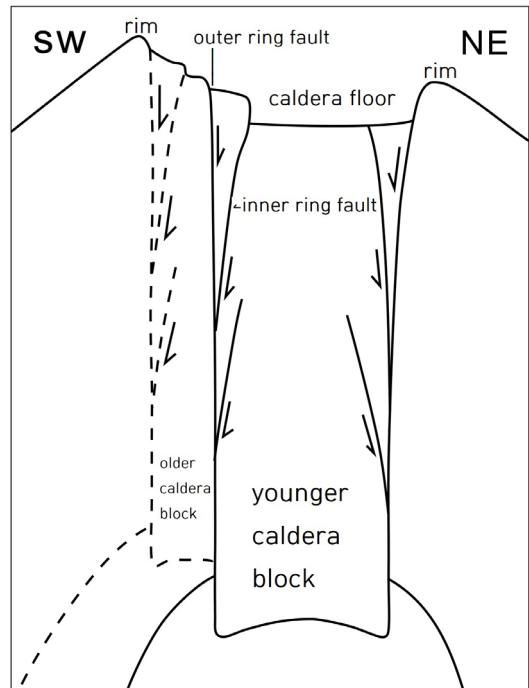
봉 용암돔 간의 경계선을 따라 유추된다. 이 단층은 외측 환상단층이라 한다면 그 내측에 내측 환상단층 도 칼데라 바닥 남동측 경계부를 따라 지나면서 충적층에 피복된다.

칼데라 서쪽 해자(moat)에서 시추 결과(Kang, 1989)는 칼데라의 지형적 바닥 아래 24 m부터 120 m 이상까지 심도에서 평탄한 조면안산암의 상단을 관통 하였으며, 원래의 “비충전의 칼라 높이”에 엄격한 평가를 제공한다. 칼데라 내부에는 지표에 노출되는 조면안산암 용암류보다 고기의 용암류가 그 기저에 도달하는 채로 적어도 100 m 두께로 지하에 존재한다. 따라서 약 550 m의 채워지지 않은 칼라 높이(h) 와 칼데라 내부를 충전한 용암층 및 충적층을 합친 것은 최소 침하 심도(s)이다. 구조적 환상단층 너머의 만곡부 노두에서 칼데라내부 응회암의 존재는 선기 칼데라의 존재를 의미하며 선기 칼데라 벽에서 유래된 산사태 각력암층 위에 이 응회암의 중첩을 암시한다(그림 5c). 단지 산사태 각력암만이 구조적 단층 가까이에서 소규모로 노출되지만, 이의 상당한 부피는 선기 칼데라 벽에서 유래하는 대량의 산사태 암설류층이 지하 조면안산암 용암층 아래에 깊숙이 숨겨져 있다는 것을 지시한다. 충전물 내에서 암편질 암설 선상지의 높이는 대략 30 m로 추산되므로 총 침하심도(s)는 700 m로 계산된다(표 1).

열압력계를 적용하면 나리충군에서 각섬석은 약 1600~500 MPa 사이에서 변화하는 압력에서 결정화되었다고 한다(Brenna *et al.*, 2014). 즉 말잔등응회암의 포놀라이트에서 각섬석은 유사하게 약 600 MPa에서 정출되었다. 이는 포놀라이트가 비교적 높은 압력(약 600 MPa)에서 진화하는 마그마로부터 유래되었음을 나타낸다. 따라서 말잔등응회암은 그 공급 마그마는 약 20 km 심도에서 분출되었음을 의미하며, 챔버 위의 지붕 두께(T)도 이와 유사하다.

지표에서 환상단층의 존재는 지형적 차이에 의해

인지될 수 있지만, 심부에서 이의 경사도는 불확실하다. 이는 내측경사 정단층, 외측경사 역단층 혹은 수직단층으로 다양하게 존재할 수 있겠지만, 나리 칼데라에서는 외측경사 역단층이 가장 유력하다. 왜냐하면 지붕 두께가 20 km로서 지붕 종횡비(A: T/d)는 10으로 매우 커서 정단층에 의해 침하할 수 없고 수직단층에 의해서도 상당히 어렵기 때문이다. 특히 내측 환상단층이 외측경사 역단층에 해당할 것이며 (그림 6), 남동측 경계부의 수직 절벽이 증거이다. 함몰을 경계짓는 외측경사 역단층에 대한 광범위한 규모의 불변적 증거들이 많이 있다. 현재 활동 중인 화산에서, 외측경사 역단층은 2000년 일본 미야케지마



**Fig. 6.** Section view of the Nari caldera complex summarizing collapse pattern for piston caldera with small deep chamber.

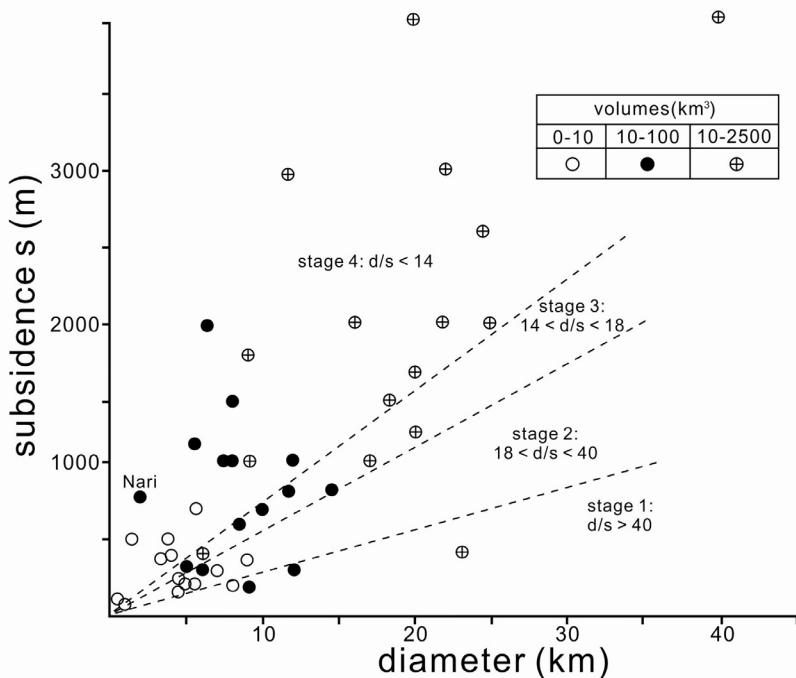
(Miyakejima)에서 초기 함몰동안 형성되었으며, 지금까지 관측된 가장 중대한 곳으로 수 100 m의 침하를 나타낸다(Geshi *et al.*, 2002). 수 km 규모에서, 외측경사 환상단층은 파푸아뉴기아의 라바울(Rabaul) (Saunders, 2001), 일본의 이쉬즈uchi(Ishizuchi) (Yoshida, 1984), 이태리의 콜리 알바니(Colli Albani) (Giordano *et al.*, 2006), 칼라파고스의 시에라 네그라(Sierra Negra) (Jonsson *et al.*, 2005) 등에서 관찰되었다. 외측 환상단층은 대부분 지질경계선을 따라 추적되고 칼데라벽을 따라 수직에 가까운 내측경사 정단층을 나타낸다(그림 6).

울릉화산 아래에 마그마챔버 형태를 알아보려면 분출물 부피와 침하 면적이 필요하다. 말잔등용회암의 분출물의 부피 계산치는 대략  $12.4 \text{ km}^3 \text{ DRE}$ 이다(Hwang and Jo, 2016). 마그마 챔버를 전부 비운다는 가장 보수적 사고와 타원체 모양을 생각할 때, 분출된 마그마 부피와 침하된 면적 크기는 대략 12:3이며 마그마챔버가 4:1의 종횡비(수직:수평)를 가지는 편장상(prolate) 형태임을 암시한다(Cioni *et al.*, 1998).

## 5.2 나리 칼데라의 진화단계

세계의 잘 연구된 여러 칼데라에서 역시 중첩된 구조적 특징을 쉽게 관찰되고 있다(Barberi *et al.*, 1991; Nappi *et al.*, 1991; Hwang and Kim, 1992; Marti *et al.*, 1997; Florio *et al.*, 1999; Milner *et al.*, 2002; Gudmundsson and Nilsen, 2006). 이는 선기 구조가 보존되어 있을 때 더 진행된 침하로 산출될 것이고, 혹은 칼데라를 따라 다른 함몰 단계에 해당하는 구조를 발달시킬 때 비대칭 구조로 산출될 것이다. 실제로, 칼데라 내에서 구조적 특징이 중복됨을 인지할 수 있다면 칼데라의 전체 지표구조에 의해 칼데라의 진화 단계를 인식하는 것이 원칙적으로 가능하다. 지금까지 울릉도에서 지표 자료는 만곡부를 이루는 외측 칼데라가 더 선기 성인 칼데라라는 것을 알 수 있고 더 뚜렷한 내측 칼데라가 후기 나리 칼데라로 나타낼 수 있다.

Acocella (2007)는 가장 잘 알려진 46개 칼데라에 대해 그 진화를 일관성 있게 이해하고 최초로 분류하기 위한 정량적 시도를 하였다. 그는 실험을 통해



**Fig. 7.** Variation diagram between subsidence ( $s$ ) and diameter ( $d$ ) of the worldwide 47 calderas (modified from Acocella, 2007). The calderas are classified accordingly with the 4 experimental stages of Acocella (2007). Dashed lines define specific  $d/s$  ratios for each caldera stage. The symbol patterns in the inset represent the DRE volume of erupted deposits during the formation of the caldera.

(1) 다운사그, (2) 환상 역단층, (3) 주변 다운사그, (4) 주변 환상 정단층 순서로 침하를 일으키는 4단계 진화단계를 제시하였다. 그리고 그는 각 칼데라의 직경(d)과 침하심도(s)를 d-s 상관도에 도시하고 4가지 실험 단계에 따라 칼데라를 크게 둑음으로써, d/s 비와 진화단계 간에 관계를 알아보고자 하였다(그림 7). 1단계 칼데라는 그림의 오른쪽 하단에 분포하고, 작은 침하와 중간에서 긴 직경을 가진다. 2단계 칼데라는 그 위로 중간 정도의 침하와 중간 내지 짧은 직경을 가진다. 그 위의 3단계 칼데라는 중간 침하와 직경을 가지고, 반면에 4단계 칼데라는 더 위로 더 큰 침하와 짧은 직경을 가지고 있다. 이러한 4가지 칼데라 유형의 대부분은 d/s(지름/침하) 값이 대체로 서로 다른 파선에 의해 경계되는 영역 내에 군집 한다. 1단계 칼데라는 d/s >40, 2단계는 18< d/s <40, 3단계는 14< d/s <18, 4단계는 d/s <14 범위에 있는 것이 특징적이다. 나리 칼데라는 d/s=2.9이므로 진화단계의 4단계에 속하며, 미야케지마(Miyakejima) 칼데라(Geshi *et al.*, 2002)와 째로 아줄(Cerro Azul) 칼데라(Munro and Rowland, 1996)와 유사하다(그림 7; Acocella, 2007). 따라서 이는 먼저 외측경사 역단층에 의해 내측 환상단층을 발달시키고 그 다음에 내측경사 정단층에 의해 외측 환상단층으로 진화 했음(그림 6)을 의미한다.

또한 분출된 부피는 대체로 진화 단계와 상관관계를 보여준다(그림 7). 4단계 칼데라는 대개 가장 큰 부피와 조합되어 있는 반면, 2단계 칼데라의 대부분은 가장 작은 부피와 연관되어 있다. 이는 일반적으로 구조적으로 진화된 칼데라가 더 큰 분출량과 관련되고 덜 진화된 칼데라가 더 적은 부피와 관련이 있음을 시사한다.

### 5.3 칼데라 함몰과 화산작용

칼데라 형성동안, 화산작용은 침하량과 지붕 종횡비 A에 의해 제어될 것이다. 지붕 종횡비가 A<1 일 때, 함몰 동안 저장고 내의 부피변화는 지표에서 생성된 저지의 것과 유사하다(Roche *et al.*, 2000). 이는 칼데라의 부피와 챔버 수축 간의 대략 1:1 비를 의미한다. 반대로, A>1일 때, 챔버의 부피 변화는 일반적으로 더 두꺼운 지붕에서 일어나는 일관성 없는 변형 때문에 지표에서 칼데라의 부피보다 현저히 낮다(Roche *et al.*, 2000). 따라서 칼데라와 챔버 부피

간의 비는 <1이 되는데, 이는 지표에서 붕괴되기 위해서는 상당한 양의 마그마가 분출되어야 함을 의미한다. 이는 이론적 계산(Roche and Druitt, 2001)과 실험(Geyer *et al.*, 2006) 결과와 일치한다. 그러한 지붕 종횡비의 제어는 현무암질 칼데라에서 함몰을 발생시키는 분류성 분출이 일어나고, 규장질 칼데라에서 함몰을 발생시키는데 필요한 많은 양의 폭발성 분출이 일어난 것을 설명해줄 수 있다(Cole *et al.*, 2005). 실제로, 일부 규장질 칼데라는 분출 마그마의 부피에 크게 관련되는데, 지붕 종횡비가 A>1를 가진다(Geyer *et al.*, 2006). 이와 마찬가지로, 나리 칼데라도 A>1이므로 일본까지 펴질 정도로 많은 테프라(약 12 km<sup>3</sup>)를 분출시킴(Hwang and Jo, 2016)으로써 함몰될 수 있었다.

함몰 후 화산작용은 마찬가지로 침하량과 그 다음으로 지붕 종횡비에 따라 달라질 것이다. 적당히 적은 침하는 다운사그를 발생시키며 환상단층이 지표에 도달하지 않는다. 마그마의 퇴각은 붕괴 및/혹은 기존 구조에 의해 제어되는 새로운 단열에 만들어진 화구를 따라 예상된다. 따라서 다운사그 칼데라의 조구조적 배경을 이해하면 불안정동안 화구의 위치를 예측할 수 있게 한다. 더 큰 침하와 함께, 지붕 종횡비 A는 외측경사 또는 내측경사 환상단층을 따라 2단계(Deception Island; Walker, 1984), 3단계(Rotorua; Milner *et al.*, 2002), 4단계 칼데라(Valles, Campi Flegrei, Latera, Rabaul, Creede, Batur, Suswa; Lipman, 1984; Walker, 1984; Newhall and Dzurisin, 1988; Nappi *et al.*, 1991; Skilling, 1993; Di Vito *et al.*, 1999)에서 칼데라 후의 화구를 흔히 발생시킨다. 이러한 거동에 대한 변화는, 알봉에서와 같이, 기존 구조를 따라 화구 개방을 가능케 하였다. A>1이면, 일관성 없는 함몰을 정의하는, 외측경사 역단층이 예상되고(Roche *et al.*, 2000) 칼데라가 함몰 후의 화산작용 동안 그러한 효과적인 퇴각을 제공하지 못할 것이다. 나리 칼데라에서와 같이, 칼데라 바닥 기하학의 복잡성은 역시 반복적으로 침하되는 칼데라 내에서 함몰 후 화구들의 분산 또는 횡단 분포에 의해 서도 지시되고 있다.

### 6. 결 론

나리 칼데라는, 40 ka(혹은 60 ka) 봉래 용결옹회

암과 11 ka 말잔등옹화암 N-4의 분출 동안 형성되었으며, 한정된 침식 절개로 이의 내부구조에 대해 확실한 해석을 하기에 한계가 있다. 그러한 중첩된 함몰의 기하학적 구조는, 개개의 큰 폭발성 분출 동안 칼데라 함몰과 규모가 다르지만, 유사한 과정을 동반할 수 있고 많은 화쇄류 칼데라의 특성을 나타내는 다단계의 함몰 역사를 보존하고 있다.

나리 칼데라는 적어도 두 차례 수직함몰의 결과이며, 이 화산의 원래 산봉은 현재 성인봉의 북쪽 가까이에 있었다. 봉래 용결옹회암은 끓어넘침 분출에 의한 고온 화쇄류의 정치에 의해 형성되고, 산사태 각력암은 고기 칼데라 벽의 산사태에 의한 암설류의 정치를 나타내며, 멤버 N-4 응회각력암은 고밀질 분연주의 봉괴에 따른 치밀한 화쇄류의 정치에 의해 형성되었다.

성인봉 북쪽에서 선기 성인 칼데라는 지하에 있는 마그마 챔버로부터 상승하는 마그마의 끓어넘침 분출, 후기 나리 칼데라는 화쇄류-형성 분출로 비워진 결과로서 형성되었다. 그러나 고기 칼데라는 현재 형태와 환상단층의 매몰로 인해 그 수직 변위를 정확히 알아낼 수 없다. 칼데라 바닥이 충적선상지 퇴적층으로 덮인 관계로 그 계단식 모양을 잊었기 때문이다.

나리 칼데라는 우선 외형적으로 보면 피스톤 모양의 블록 함몰에 의한 결과이며, 지붕 종횡비가  $A>1$ 이므로 큰 칼때기형 함몰에 속한다. 나리 칼데라 블록은 약 750 m 이상의 수직 변위를 갖는데, 이는 모두 환상단층을 따라 축적되었다. 환상단층은 외측경사 역단층이 형성되고 뒤따라 외곽부에 내측 경사 정단층이 형성되었다. 그러므로 우리는 나리 칼데라의 현재 외측 경계가 플리니언 분출 동안 천부 레벨의 성숙한 마그마 챔버의 대규모 배출 후에 반복적 함몰에 의해 형성되는 다단계 칼데라 외륜의 형태적 진화의 결과이라고 결론짓는다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 연구비(KMI2018-01610)에 의해 지원되었다. 우리는 한국지질자원연구원의 최근 제작된 지질도에 따라 작업을 진행하였다. 지형 자료는 울릉군청 최희성님이 흔쾌히 제공하였으며 이에 감사한다. 심사과정을 통하여 원고를 다듬어준

두 분의 심사위원께 사의를 표한다. 그림 제작은 안동대 화산학실험실 혼혜원의 도움이 있었다.

## REFERENCES

- Acocella, V., 2007, Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas. *Earth-Science Reviews*, 85, 125-160.
- Barberi, F., Cassano, E., La Torre, P. and Sbrana, A., 1991, Structural evolution of Campi Flegrei caldera in light of Volcanological and geophysical data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 48, 33-49.
- Bear, A.N., Cas, R.A.F. and Giordano, G., 2009, The implications of spatter, pumice and lithic clast rich proximal co-ignimbrite lag breccias on the dynamics of caldera forming eruptions: the 151 ka Sutri eruption, Vico Volcano, Central Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 181, 1-24.
- Branney, M.J., 1995, Downsag and extension at calderas: new prospectives on collapse geometries from ice-melt, mining, and volcanic subsidence. *Bulletin of Volcanology*, 57, 303-318.
- Branney, M.J. and Gilbert, J.S., 1995, Ice-melt collapse pits and associated fractures in the 1991 lahar deposits of Volcan Hudson, Chile, criteria to distinguish eruption-induced glacier melt. *Bulletin of Volcanology*, 57, 293-302.
- 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/phonoelite genesis at an intraplate volcano: a case study from Ulleung Island, Republic of Korea. *Journal of Petrology*, 55, 709-747, <https://doi.org/10.1093/petrology/egu004>.
- Chadwick, W.W. and Howard, K.A., 1991, The pattern of circumferential and radial eruptive fissures on the volcanoes of Fernandina and Isabela islands, Galapagos. *Bulletin of Volcanology*, 53, 259-275.
- Cioni, R., Marianelli, P. and Santacroce, R., 1998, Reconstructing the thermal and compositional evolution of shallow magma chambers through melt inclusions in pyroxene. Examples from Vesuvius. *Journal of Geophysical Research*, 103, 18277-18294.
- Cole, J.W., Milner, D.M. and Spinks, K.D., 2005, Calderas and caldera structures: a review. *Earth Science Reviews*, 69, 1-96.
- Di Vito, M.A., Isaia, R., Orsi, G., Southon, J., de Vita, S., D'Antonio, M., Pappalardo, L. and Piochi, M., 1999, Volcanism and deformation since 12000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy). *Journal of Volcanology*

- and Geothermal Research, 91, 221-246.
- Druitt, T.H. and Sparks, R.S., 1984, On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. *Nature*, 310, 679-681.
- Florio, G., Fedi, M., Cella, F. and Rapolla, A., 1999, The Campanian Plain and Phleorean Fields: structural setting from potential field data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91, 361-379.
- Fridrich, C.J., Smith, R.P., De Witte, E. and McKee, E.H., 1991, Structural, eruptive, and intrusive history of the Grizzly Peak caldera, Sawatch range, Colorado. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1160-1177.
- Geshi, N., Shimano, T., Chiba, T. and Nakada, S., 2002, Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 64, 55-68.
- Geyer, A., Folch, A. and Martí, J., 2006, Relationship between caldera collapse and magma chamber withdrawal: an experimental approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157, 375-386.
- Giordano, G., De Benedetti, A.A., Diana, A., Diano, G., Gaudioso, F., Marasco, F., Miceli, S., Mollo, S., Cas, R.A.F. and Funiciello, R., 2006, The Colli Albani mafic caldera (Roma, Italy): stratigraphy, structure and petrology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155, 49-80.
- Gudmundsson, A. and Nilsen, K., 2006, Ring faults in composite volcanoes: structures, models, and stress fields associated with their formation. *Journal of the Geological Society of London*, 269, 83-108.
- Heiken, G. and McCoy, F., 1984, Caldera development during the Minoan eruption, Thira, Cyclades, Greece. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8441-8462.
- 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. and Jo, I.H., 2016, Risk analyses from eruption history and eruptive volumes of the volcanic rocks in Ulleung Island, East Sea. *Economic and Environmental Geology*, 49, 181-191 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1990, Silicic ash-flow tuffs with calderas in the terrane between Miryang and Yangsan, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 26, 329-340 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W., 1992, Silicic volcanism of Yangsan Caldera, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 28, 445-458 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.-J. and Han, K.H., 2018, Interpretation of volcanic eruption types from granulometry and component analyses of the Maljandeung Tuff, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 54, 513-527 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, S.J. and Oh, K.S., 2020, Relationship between Vesicularities of Pumice Clasts and Shifts of Eruption Types in the Maljandeung Tuff, Ulleung Island, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 56, 453-468 (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.
- Jonsson, S., Zebker, H. and Amelung, F., 2005, On trapdoor faulting at Sierra Negra volcano, Galapagos. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 144, 59-72.
- Kang, G.W., 1989, A feasibility study for the development of water resources in Jeju-do and Ulleung-do. Korea Water Resources Corporation, 272 p (in Korean).
- Kawakami, Y., Hoshi, H., Yamaguchi, Y., 2007, Mechanism of caldera collapse and resurgence: observations from the northern part of the Kumano Acidic Rocks, Kii peninsula, southwest Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167, 263-281.
- 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, <https://doi.org/10.1007/s00445-014-0802-1>.
- Lim, C., Toyoda, K., Ikebara, K. and Peate, D.W., 2013, Late Quaternary tephrostratigraphy of Baegdusan and Ulleung volcanoes using marine sediments in the Japan Sea/East Sea. *Quaternary Research*, 80, 76-87.
- Lipman, P.W., 1976, Caldera collapse breccias in the western San Juan Mountains, Colorado. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 1397-1410.
- Lipman, P.W., 1984, The roots of ash flow calderas in Western North America: windows into the tops of granitic batholiths. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8801-8841.
- Lipman, P.W., 1997, Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry. *Bulletin of Volcanology*, 59, 198-218.
- Macedonio, G., Dobran, F. and Neri, A., 1994, Erosion processes in volcanic conduits and application to the AD 79 eruption of Vesuvius. *Earth and Planetary Science Letters*, 121, 137-152.
- Machida, H., Arai, F., Lee, B.S., Moriwaki, H. and Furuta, T., 1984, Late Quaternary tephras in Ulleung-do Island, Korea. *Journal of Geology*, 93, 1-14.
- Marti, J. and Gudmundsson, A., 2000, The Las Canadas caldera (Tenerife, Canary Islands): Example of an overlapping collapse caldera generated by magma-chamber migration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 161-173.

- Marti, J., Hurlimann, M., Ablay, G.J. and Gudmundsson, A., 1997, Vertical and lateral collapses on Tenerife (Canary Islands) and other volcanic ocean islands. *Geology*, 25, 879-882.
- McBirney, A.R., 1990, An historical note on the origin of calderas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42, 303-306.
- McLean, D., Albert, P.G., Suzuki, T., Nakagawa, T., Kimura, J.-I., Chang, Q., MacLeod, A., Blockley, S., Staff, R.A., Yamada, K., Kitaba, I., Haraguchi, T., Kitagawa, J. and Smith, V.C., 2020, Refining the eruptive history of Ulleungdo and Changbaishan volcanoes (East Asia) over the last 86 kyr using distal sedimentary records. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 389, 106669.
- Milner, D.M., Cole, J.W. and Wood, C.P., 2002, Asymmetric, multiple block collapse at Rotorua caldera, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 64, 134-149.
- Munro, D.C. and Rowland, S.K., 1996, Caldera morphology in the western Galapagos and implications for volcano eruptive behaviour and mechanism of caldera formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 72, 85-100.
- Nappi, G., Renzulli, A. and Santi, P., 1991, Evidence of incremental growth in the Vulsinian calderas (central Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 47, 13-31.
- Newhall, C.G. and Dzurisin, D., 1988, Historical unrest at large calderas of the world. U.S. Geological Survey, 1109 (in Korean with English abstract).
- Okuno, M., Shiihara, 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.
- Polacci, M., Pioli, L. and Rosi, M., 2003, The Plinian phase of the Campanian Ignimbrite eruption (Phlegraean Fields, Italy): evidence from density measurements and textural characterization of pumice. *Bulletin of Volcanology*, 65, 418-432.
- Roche, O. and Druitt, T.H., 2001, Onset of caldera collapse during ignimbrite eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 191, 191-202.
- Roche, O., Druitt, T.H. and Merle, O., 2000, Experimental study of caldera formation. *Journal of Geophysical Research*, 105, 395-416.
- Rowland, S.K. and Munro, D.C., 1992, The caldera of Volcan Fernandina: a remote sensing study of its structure and recent activity. *Bulletin of Volcanology*, 55, 97-109.
- Saunders, S.J., 2001, The shallow plumbing system of Rabaul caldera: a partially intruded ring fault?. *Bulletin of Volcanology*, 63, 406-420.
- Self, S., Goff, F., Gardner, J.N., Wright, J.V. and Kite, W.M., 1986, Explosive rhyolitic volcanism in the Jemez Mountains: vent locations, caldera development and relation to regional structure. *Journal of Geophysical Research*, 91, 1779-1798.
- Shiihara, M., Torii, M., Okuno, M., Domitsu, H., Nakamura, T., Kim, K.H., Moriwaki, H. and Oda, M., 2011, Revised stratigraphy of Holocene tephras on Ulleung Island, South Korea, and possible correlatives for the U-Oki tephra. *Quaternary International*, 246, 222-232.
- Simkin, T. and Siebert, L., 1994, *Volcanoes of the world*. Geosciences Press, Tucson, Arizona, 1-349.
- Skilling, I.P., 1993, Incremental caldera collapse of Suswa volcano, Gregory Rift Valley, Kenya. *Journal of the Geological Society London*, 150, 885-896.
- Smith, R.L., 1960, Ash flows. *Geological Society of America Bulletin*, 71, 795-842.
- Steven, T.A. and Lipman, P.W., 1976, Calderas of the San Juan volcanic field, southwestern Colorado. US Geological Survey Professional Paper, 958, 35 p.
- Walker, G.P.L., 1984, Downsag calderas, ring faults, caldera sizes, and incremental caldera growth. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8407-8416.
- Williams, H., 1941, Calderas and their origin. *Bulletin of the Department of Geological Sciences, University of California*, 21, 239-346.
- Williams, H. and McBirney, A.R., 1979, *Volcanology*. Freeman, San Francisco, 396 p.
- Yoshida, T., 1984, Tertiary Ishizuchi Cauldron, Southwestern Japan Arc: formation by Ring Fracture Subsidence. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8502-8510.

---

Received : October 31, 2020

Revised : December 8, 2020

Accepted : December 15, 2020