

보고

중국 오대연지 라오헤이산과 후오샤오산의 화산 형태와 분출 과정

황상구^{1,*} · 진 궈² · 안응산¹

¹안동대학교 자연과학대학, ²길림대학 지구탐색과학기술학원

Volcanic Forms and Eruption Processes of Laoheishan and Huoshaoshan in the Wudalianchi Volcanics, NE China

S.K. Hwang^{1,*}, X. Jin² and U.S. Ahn¹

¹College of Natural Sciences, Andong Nat'l University, Andong 760-749, Korea

²College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Jilin Province, China

요약: 중국 오대연지 신기 화산인 라오헤이산과 후오샤오산은 1720~1721년에 분출하였다. 이 화산은 각각 K이 풍부한 포노테프라이트질 화성쇄설층과 용암으로 구성되는 스크리아구와 스페터구를 이루고 모두 넓은 용암류역을 가진다. 라오헤이산 스크리아구는 내부구조가 복잡하고 선·후기 화산체로 형성된 복성복식 화산이며 후기 화산체의 중앙부에는 깔때기형의 분화구가 있다. 후오샤오산 스페터구는 단성단식 화산이며 화산체 중앙부에 피트 분화구가 형성되어 있다. 화산층서는 먼저 라오헤이산이 형성되었고 후에 후오샤오산이 형성되었음을 지시한다. 또한 라오헤이산에서의 분출 과정이 용암분천과 스트롬볼리언 분출을 포함하는 폭발성 분출과 분류성 분출의 5개 단계를 거치는 반복적 패턴을 따랐다는 것을 지시하고, 후오샤오산에서 스트롬볼리언 분출과 용암분류의 2개 단계를 거치는 규칙적 패턴을 따랐다는 것을 지시한다.

주요어: 신기 화산, 스크리아구, 스페터구, 용암류, 폭발성 분출, 분류성 분출, 분출과정

Abstract: Modern volcanoes, Laoheishan and Huoshaoshan, have erupted during 1720~1721 in the Wudalianchi volcanic group, NE china. They comprise scoria and spatter cones that consist of potassium-rich phono-tephritic pyroclastic deposits and lavas, and include wide lava flow fields. The Laoheishan scoria cone is a polygenetic multiple volcano that overlaps earlier and later edifices with more complicated internal structures produced in greater scale and in earlier time than the Huoshaoshan. There is a funnel-shaped crater in the center of the later edifice of the Laoheishan scoria cone. The Huoshaoshan spatter cone is a monogenetic simple volcano with a central pit crater. The volcanic sequences indicate eruption processes that followed a repeated pattern that progressed through 5 stages of explosive and effusive eruption including lava fountains and Strombolian eruptions in the Laoheishan, and a recognizable pattern of 2 stages that started with Strombolian eruption and progressed through lava effusion in the Huoshaoshan.

Key words: modern volcano, scoria cone, spatter cone, lava flow, explosive eruption, effusive eruption, eruption process

서 언

중국 북동부의 헤이룽장성 우달란치시에는 오대연지 화산군이 분포한다. 이 화산군은 동경 125° 57'~126° 31', 북위 48° 35'~48° 51'에 위치하며 하얼빈에서 북쪽으로 약 420 km 거리에 놓인다(Fig. 1). 이 화산군은

약 800 km²에 걸쳐서 14개 화산과 용암류로 구성되며 화산들의 분포는 NE와 NW 방향의 단층대에 의해 지배된다. 이 화산들 중에서 가장 유명한 라오헤이산과 후오샤오산은 오대연지 화산군의 중앙부에 위치하며 (Fig. 2) 가장 신기에 형성된 화산이다.

이 화산은 각각 스크리아구(scoria cone), 스페터구

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

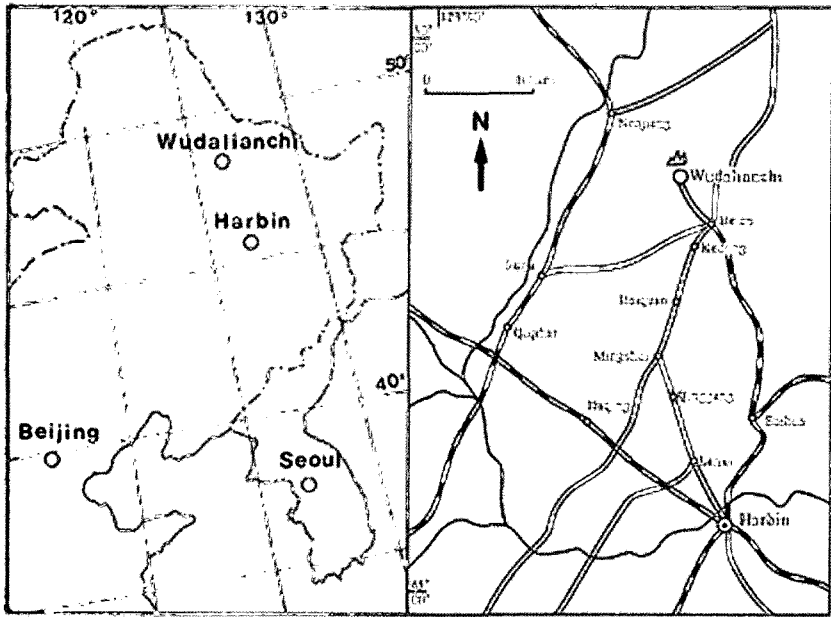


Fig. 1. Index map and location map of Wudalianchi area, Heilongjiang Province, NE China.

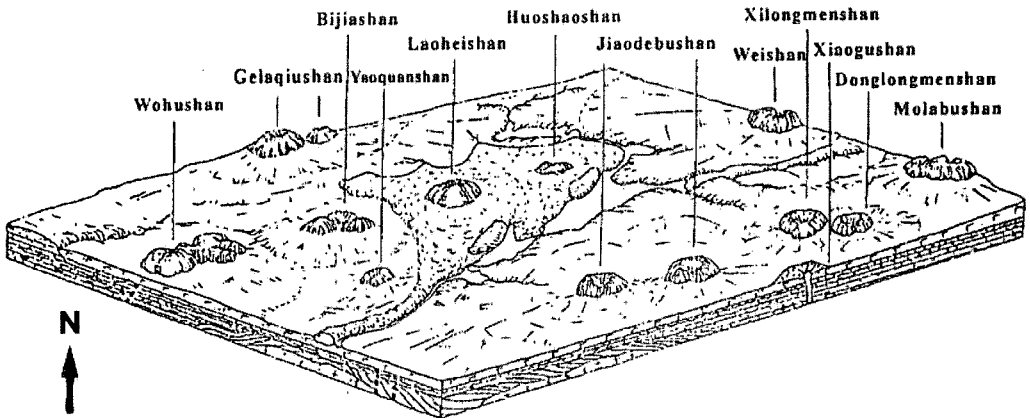


Fig. 2. Sketch map showing the distributions of volcanoes in the Wudalianchi area (Wang *et al.*, 1996).

(spatter cone)와 용암류(lava flow)로 구성되며, 최근 발견된 청나라 만주어 역사 문헌의 기록에 의하면 1720~1721년에 분출되었다(Chen, H. and Ren, J., 1999; Chen and Wu, 2003). 지금은 잠시 쉬고 있는 화산이지만 280여년 전만 해도 분출했을 만큼 활화산 연구를 위해서 매우 좋은 자연실험실 역할을 해오고 있다. 이 분출물들은 암석학적으로 K이 풍부한 알칼리 계열에 속하는 포노테프라이트(phono-tephrite) 영역에 대개 떨어지며, 미량원소와 동위원소에 의하면 이 화산암은 EMI 맨틀로부터 유래되었음을 지시한다(Fan *et al.*, 1999).

이 화산은 형태가 거의 파괴되지 않고 자연 상태 그대로 남아있어서 중국에서 ‘화산 자연 박물관’이라고 불리어왔고 화산지질을 연구하는 이상적인 장소로 알려져 있다. 적지 않은 지질학자들은 20C 초부터 여러 각도로 체계적인 조사연구를 시행하였으며 특히 근래 20년 동안에는 그 연구가 더욱 자세하게 진행되었다.

본 논문은 2004년 7월 야외답사를 수행하면서 얻어진 많은 야외자료와 부분적인 실내 자료를 근거로 하여 이 화산의 구조적인 형태와 분출 과정에 역점을 두어 엮었다.

라오헤이산의 화산 형태

오대연지 화산군은 동위원소 자료에 의하면 활동이 130만전부터 시작하여 280년전까지 7차례에 걸쳐 단속적으로 일어났다(Li *et al.*, 1999). 라오헤이산 화산은 1720년 1월 14일부터 1721년 3월 18일 사이에 분출되었으며(Chen, H. and Ren, J., 1999; Chen and Wu, 2003), 선·후기의 두 화산체가 포개져 있고 전체적으로 정부가 없는 원추형의 스킨리아구를 나타낸다(Fig. 3). 스킨리아구는 느슨하게 고결되어 있는데 이는 화성쇄설물들이 지면에 떨어지기 전에 냉각되어 고화되었기 때문이다(Cas and Wright, 1987).

이 화산은 면적이 약 2 km²이고 기저의 직경이 1,600 m이며 해발 높이가 484 m이고 기저로부터 높이가 140 m이다. 이 화산은 선기 화산체의 남서부가 후기의 화산체를 구성하는 화성쇄설물에 덮이고 동쪽, 서쪽 및 북쪽은 후기의 용암 분출로 파괴되어 U형과 V형의 골짜기를 형성하고 있다. 선기 화산체의 분화구는 후기 화산체의 화성쇄설물로 메워졌지만 분화구 립의 퇴적물 분포로 추정하면 분화구의 지름은 약 600 m 정도이다. 후기 화산체는 규모가 선기 화산체에 비하여 작고 평면 형태가 원형을 이루며 약 0.07km² 면적을 가지고 비고가 171 m에 달한다. 이 화산체는 거의 온전하게 보존되어 있고 그 중앙부에 깔때기형 분화구를 가진다(Fig. 4). 이 분화구는 원형을 이루고 깊이가 약 145 m이며 안쪽 벽이 전체적으로 가파르지만 동쪽 벽이 상대적으로 35~48°로 좀 완만하다. 후기 화산체의 분화구는 선기 분화구와 완전하게 합치되지 않고 상대적으로 남서쪽에 치우쳐 있다(Fig. 5). 즉 화산체를 형성하는 분출 중심은 후기로 가면서 남서쪽으로

이동된 양상을 나타내며, 후기 화산체는 선기 화산체의 남서쪽 연변부를 덮고 있다. 선기 화산체는 상대적으로 낮고 완만하여 화산체의 사면은 10~25° 정도이다. 후기 화산체는 남서쪽에서 바라보면 마치 엎어놓은 큰 가마솥이 선기 화산체 위에 놓인 모습을 나타내며 그 사면이 28~38° 정도로 가파르고 표면에는 식생이 거의 자라지 않는다. 후기 화산체는 선기 화산체보다 상대적으로 남동쪽이 31 m 더 높고 북쪽이 약 50 m 더 높다. 선기와 후기 화산체가 접하는 곳에는 너비가 약 100~150 m인 환상의 저지가 있으며(Fig. 6), 이 저지는 후기 화산체의 북쪽에서 더욱 뚜렷하며 선기 분화구의 연변부에 해당하는 위치이다.

선기 화산체의 북동쪽 주변부에는 하나의 작은 기생 분화구가 발달하는데(Fig. 6) 이곳에는 따뜻한 공기에 의해 ‘화구삼림(火口森林)’을 형성하고 있다. 이 분화구는 직경이 약 80 m 정도이고 깊이가 약 30 m 정도이며 분화구의 벽이 거의 수직에 가깝다. 분화구 주위에는 화성쇄설물들이 낮고 완만한 기생 화산을 형성하고 있으며 이 화산체는 적갈색의 용결집괴암과 상대적으로 푸석푸석한 갈색, 흑색 스킨리아와 화산탄으로 구성된다.

이 밖에 주 화산체의 외연부의 용암 유출구 앞쪽의 용암류 위에는 소분석구가 몇 군데 분포되어 있다. 이 소분석구는 높이가 일반적으로 2~5 m이고 최고 16 m에 달하며 기저 직경이 대부분 6~12 m이고 뾰족한 추형이면서 중앙부에 분화구가 없다. 이들 중에 일부는 주 화산체로부터 용암을 유출할 때에 용암류가 업고 운반한 주 화산체의 쇄설물이 잔류되어 있다가 후에 풍화 침식에 의해 현재와 같은 모양으로 남아있는 것이다. 형태적 특징이 일차적인 성인으로 혼돈하기 쉽지만 화산체의 구조와 퇴적물 입도 분포에 근거하면

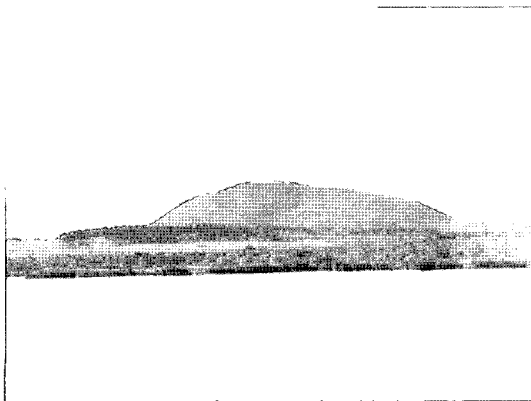


Fig. 3. Laoheishan volcano taken from southern area.



Fig. 4. Funnel-shaped crater of the later edifice of the Laoheishan volcano.

위에서 설명한 바와 같이 이차적인 성인을 나타낸다. 또한 몇 개의 소분석구는 이미 채굴되어 없어서 화산체 하부의 온전한 용암류를 노출시키며 분출을 일으켰던 화구의 흔적과 그 뿌리를 볼 수 없다. 이는 뿌리없는 이차구(secondary cone)임을 지시한다.

라오헤이산의 분출물

용암층과 화성쇄설층

라오헤이산 화산은 용암층과 화성쇄설층으로 구성된

다. 화산체에서 용암층은 화산체의 기저부에 주로 놓이며(Fig. 5) 암회색 쇄설성 용암(clastogenic lava)이고 치밀괴상을 이루며 기공을 적게 함유하고 유사 구조가 발달한다. 주로 흑색 유리, 적갈색 쇄설편 및 소량의 사장석, 휘석과 감람석 미정으로 구성된다. 적갈색 쇄설편은 흑색 유리 속에 드물게 흩어져 분포되며 대부분 찢어진 모양, 렌즈 모양을 이루고 장축의 길이는 1~10 cm 정도이다. 이는 마그마가 상승하는 과정에서 약한 기포화작용(vesiculation)으로 폭발에 의해 쇄설화된 분출물이 서로 달라붙어 용암류가 되면서 일부 남

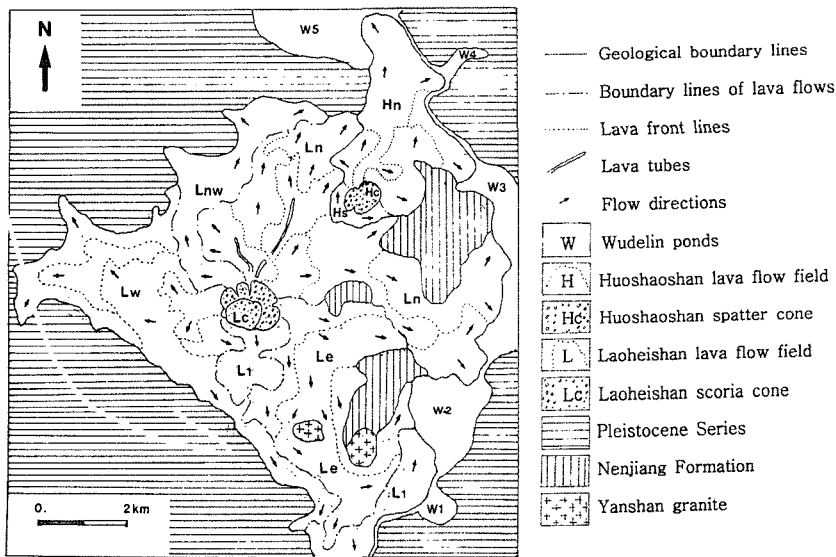


Fig. 5. Geological map around Laoheishan and Huoshaoshan volcanoes in the Wudalianchi area. L1, Lava flows from in the earlier episode of Laoheishan; Lw, Lava flows from in the western breached crater of Laoheishan; Le, Lava flows from in the eastern breached crater of Laoheishan; Lnw, Lava flows from in the northwestern breached crater of Laoheishan; Ln, Lava flows from in the northern breached crater of Laoheishan; Hs, Lava flows from in the southern breached crater of Huoshaoshan; Hn, Lava flows from in the northern breached crater of Huoshaoshan; W1, 1st pond; W2, 2nd pond; W3, 3rd pond; W4, 4th pond; W5, 5th pond.

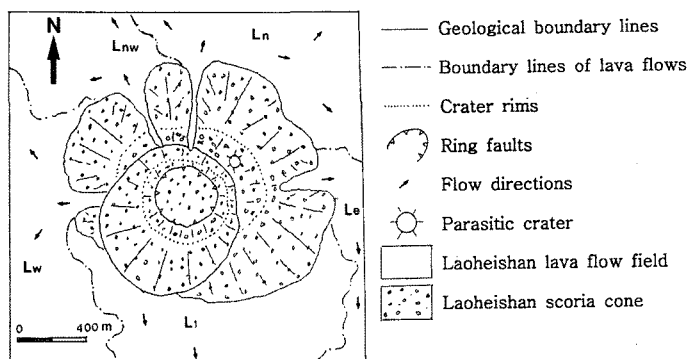


Fig. 6. Geological map of the Laoheishan scoria cone. L1, Lw, Le, Ln, Lnw are the same as Fig. 5.

은 것이다. 그러므로 용암류를 형성했던 분출은 용암 분천(lava fountain)과 용암분류(lava effusion)에 의해 진행되었던 것으로 생각된다.

화성쇄설층은 스페터층(혹은 용결 집괴암)과 스킨리아층으로 구분되며 평면에서 스킨리아구(scoria cone)를 형성한다. 스페터층은 주로 화산체의 중·하부에 분포되고 쇄설성 용암 위에 덮여 있다. 이는 주로 적갈색의 스페터, 화산탄으로 구성되고, 스킨리아를 포함하며 서로 유착되어 있다. 화산탄과 스페터의 평균 입도는 20~50 cm이고 스킨리아는 10~15 cm이다. 이 화성쇄설물은 비교적 강한 소성 변형으로 편평상 혹은 렌즈상을 변형되고 서로 평행으로 배열되고 유착되어 있다.

스킨리아층은 주로 스페터층(혹은 용결 집괴암) 위에 놓이고 화산체의 상부와 표면에 분포하며 입자들은 고결되지 않고 푸석푸석하게 서로 느슨하게 붙어 있다(Fig. 7). 여기서 이 층은 흑색 스킨리아, 화산탄 및 분석적으로 구성되며 이밖에 다른 출처의 화강암과 사질 세일편이 소량 포함된다. 화성쇄설물들의 입도와 함량은 화산체의 위치에 따라 약간 다르다. 화산체의 정부에서는 주로 자회색과 흑색 스킨리아, 다갈색 분석으로 구성되고 화산탄을 약간 포함한다. 그러나 화산탄은 입도가 매우 크고 평균 약 40 cm에 달한다. 화산체의 사면에서는 주로 다갈색 분석, 흑색 스킨리아로 구성되지만 스킨리아보다 분석이 훨씬 더 많고 소량의 화산탄을 포함한다. 이 화성쇄설물은 대체로 원래 모양 그대로 유지되어 있고 거의 변형되어있지 않으며 서로 점접촉으로 입자들 사이의 접촉 면적이 작고 많은 공극을 가지고 있다. 그러나 사면 기슭은 탄도케적에 의한 운반보다 화산체 사면각의 지배를 받기 때문에 입자의 크기가 상대적으로 더 굵은 편이다.

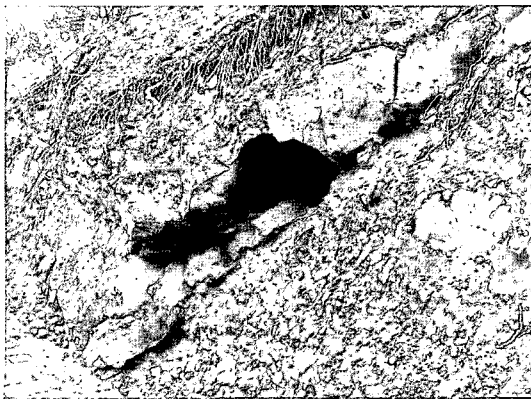


Fig. 7. Scoria deposits and a thin lava in the upper part of the later edifice of the Laoheishan.

이러한 스페터층과 스킨리아층은 폭발력이 비교적 약한 스트롬볼리언 분출(Strombolian eruption)에서 신속한 낙하로 집적된 산물이다. 즉 이들은 낮은 분연주에 의해 분화구 주변에 빠르게 낙하될 경우에, 고온과 산화 상태를 상당한 기간에 걸쳐 유지되고 이와 더불어 뒤이어 낙하한 화성쇄설물의 압축작용으로 서서히 밀착되면서 유착이 일어난다. 동시에 밑에 깔린 뜨거운 용암으로부터 받는 열도 화성쇄설물이 소성 변형을 일으키는 중요한 요인 중의 하나가 된다. 에켄대 북쪽 틈새(breach)로부터 약 100 m 떨어진 용암 위에는 2 cm 두께의 스킨리아층이 용결된 특징을 보여주는데 이들은 얇지만 강하게 소성 변형되어 평행배열을 이루며 압편을 둘러싸는 양상을 나타내며 이의 기저부에서 용암면에 가까운 화성쇄설물은 소성변형이 더욱 강하다.

용암류

지질공원의 입구에서 순환도로를 따라 라오헤이산을 지나가면 사면에서 여러 색깔 변화를 발견할 수 있다. 이 색깔변화는 용암류의 연대와 표면 특징에 따라 달라진다. 이 라오헤이산에서 나온 신선한 파호이호이 용암류는 암회색을 나타내고 신선한 아아 용암류는 흑색을 나타낸다. 더 고기 용암류는 적갈색을 나타내고 훨씬 더 고기 용암류는 식생으로 어지럽다. 실제로 용암류는 종종 더 고기 지역을 둘러싸면서 갈라지며 교란되지 않은 작은 섬 '키푸카'(kipuka)을 남긴다. 라오헤이산의 동쪽 대지에서 나온 검은색 용암류는 이전의 기반암인 백악기 넨장층(Nenjiang Formation)의 키푸카를 감싸고 남쪽 대지에서 보다 더 고기 안산 화강암(Yanshan granite)의 키푸카를 둘러싼다(Fig. 5). 이러한 기반암의 키푸카는 큰 고목이 있고 식생이 울창한 섬으로 남아있다.

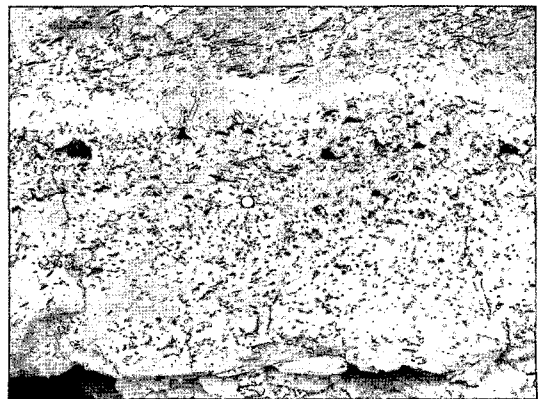


Fig. 8. Lava units divided by vesicle density in pahoehoe lava.

라오헤이산에서 나온 용암류는 주로 파호이호이 용암이지만 아아 용암도 있다. 라오헤이산 북부에서 소로를 따라 북쪽으로 내려가면 용암류에서 볼 수 있는 여러 특징을 관찰할 수 있다. 길옆에는 암회색 파호이호이 용암류가 펼쳐져 있는데, 표면이 매끈하거나 주름잡혀 새끼구조가 형성되어 있다. 새끼구조는 흔히 활모양을 이루어 흐른 방향으로 볼록하며 또한 엮어진 뿔목과 같이 직선을 이룬 때도 있다. 이 용암류는 기공이 많이 형성되어 있으며 이들은 상단부에 밀집되어 있기 때문에 단면에서 흐름단위(flow unit)를 파악하는데 이용될 수도 있다(Fig. 8). 기공들은 흔히 흐른 방향으로 심하게 늘어났으며 횡단면에서 원통을 나타내지만(Fig. 9A) 종표면에서 뚜렷한 선구조를 나타낸다(Fig. 9B). 이 용암류의 유향(flow direction)은 위에서 설명한 바와 같은 새끼구조의 볼록한 방향, 파의 드래그와 같은 비대칭 구조, 늘어난 기공의 선구조에 의해 판단할 수 있기 때문에 각 용암류의 방향성을 추적할

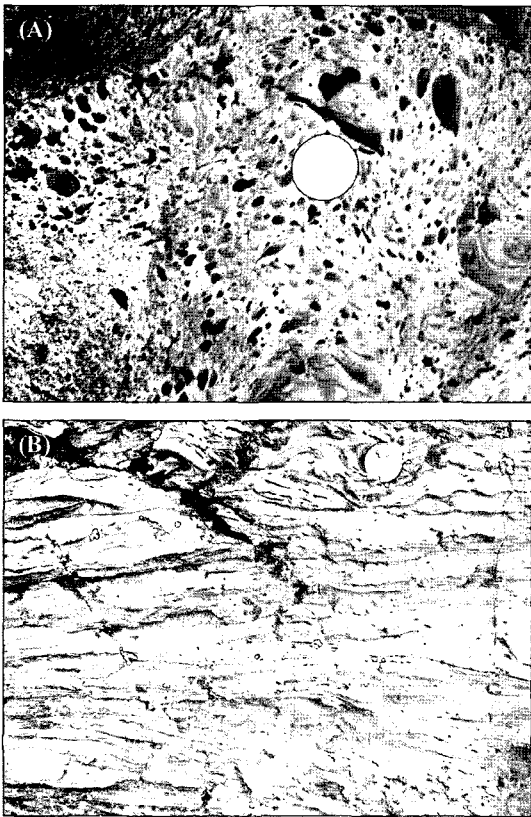


Fig. 9. Cross section (A) and longitudinal section of lamination (B) produced from the stretched vesicles in pahoehoe lava.

수 있다(Fig. 5). 또한 용암류 전면부에서 튀어나온 용암혀(lava tongue)와 용암발가락(lava toe)를 흔히 볼 수 있으며(Fig. 10) 이들은 파충류가 누워있는 것과 같아 하여 현지에서 '파충상 용암'이라고 부르고 있다. 이러한 용암류들은 야생풀조차도 자라지 않기 때문에 주위의 다른 용암류보다 나중에 분출되었음을 알 수 있다. 불규칙하지만 그 위에 튜물러스(tumulus)가 볼록하게 솟아 있으며 이들은 내부의 액체 용암의 압력에 의해 형성된 압력돔(pressure dome)이다. 혹은 어떤 곳은 용암언덕(pressure ridge)이 형성된 곳도 있으며 이들은 가끔 함몰되어 용암도랑(lava trench)을 형성하기도 한다(Fig. 11). 이 함몰은 튜물러스와 압력언덕 아래에 용암튜브가 형성되어 있다는 것을 지시한다. 이러한 파호이호이의 특징은 아아보다 더 고온이고 더 많은 가스로 인해 점성이 낮기 때문이다.



Fig. 10. Lava toes budded from a lava tongue, which are called as reptile-like lava in this area.



Fig. 11. A lava trench formed from the downward collapse of lava tube.

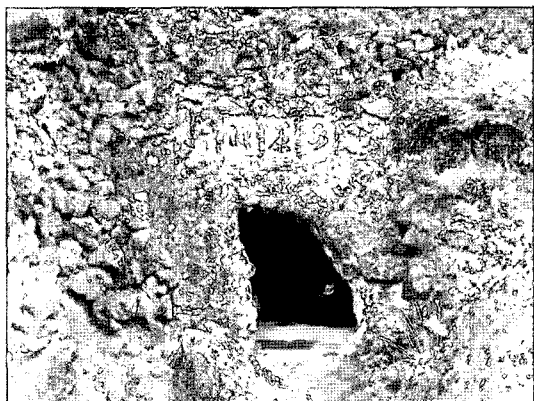


Fig. 12. Entrance of a lava tube cave in the north of the Laoheishan.

파호이호이 용암류는 빨리 움직이는 용암하천(lava stream)을 따라 채널을 형성할 수도 있고 혹은 용암관(lava tube)에 의해 공급되는 천천히 움직이는 용암류를 형성할 수도 있다. 라오헤이산 북쪽 틈새로부터 큰 용암하천이 형성되어 있고 북쪽으로 여러 갈래의 지선(branch)으로 갈라진다. 어떤 지선은 계단상으로 상당히 가파른 경사를 가지며, 이 곳에서 용암은 암괴상 용암(blocky lava)과 같이 매우 큰 용암슬랩으로 쪼개져 있다. 그 중에 위로 솟은 것은 동물 형상을 닮은 것이 있으며 그 형상에 따라 말, 소, 닭 등의 여러 동물명을 붙여진 것도 있다.

용암관은 채널화된 용암류에서 발달되는데, 채널의 연변부에 표피가 축적되어 실제로 용암을 가로질러 지붕을 형성한다. 용암관은 열 손실로부터 용암하천을 격리 단열시켜 용암이 유체로 남게 하고 냉각과 정체되기 전에 훨씬 더 빨리 이동하게 할 뿐만 아니라 더 멀리까지 이동케 한다. 특히 북쪽 틈새에서 나온 용암류는 용암관이 발달되어 있으며 더 멀리 이동하여 넓게 퍼졌다(Fig. 5). 한 화구에서 활동이 멈췄을 때, 용암관 내의 대부분 용암은 빠져나가 아취형 천장과 평탄한 바닥을 가지는 터널을 남긴다. 북쪽 틈새로부터 북쪽으로 '수렴동(水帘洞)'이라는 용암관이 있고(Fig. 12) 그 북쪽으로 '선녀굴'이라 부르는 용암관이 뻗어 있다. 이 용암관은 입구가 라오헤이산에서 북쪽으로 400 m에 위치하고 길이가 북쪽으로 23 m이며 동북쪽과 북서쪽의 두 갈래로 갈라진다. 각각 길이가 35° NE 방향으로 188 m이고 55° NW 방향으로 215 m이다(Fig. 5). 이 용암관은 파호이호이 용암류에 형성되어 있으며 폭이 2~4 m이고 높이가 1~3 m이다. 동굴벽에는 용암유석(lava flowstone)이 발려있거나 유선(flowline)이 그려

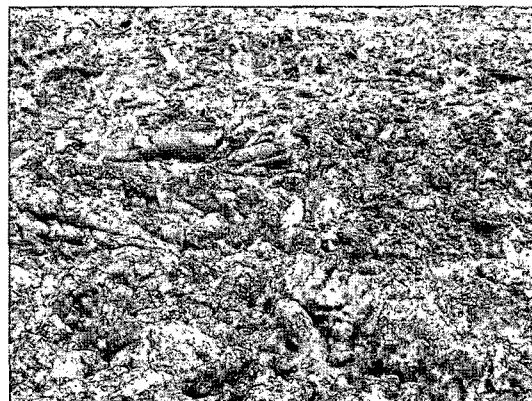


Fig. 13. Toothpaste lava transitted from pahoehoe lava.

져 있으며, 낮은 천장에는 용암종유(lava stalactite)을 형성하고 바닥에는 새끼구조, 용암 뗏목(lava raft) 등이 존재하는 매우 아름다운 내부를 형성한다. 그리고 바닥과 벽이 마주치는 곳에는 용암롤(lava roll)이 원통으로 도르륵 말려 있다. 이 용암관은 용암을 계속 공급하여 용암류역을 북쪽과 동쪽으로 더 넓게 확장하였다(Fig. 5).

반면에 아아는 매우 거칠고 혹은 뒤죽박죽된 표면을 가지지만 그러나 치밀한 내부를 가진다. 아아 용암은 가까이에서 스코리아 같이 보이지만 흐름단위별로 표층부에 형성되어있기 때문에 용암의 이동시에 표층부가 부수진 용암편이라는 것을 알 수 있다. 이 아아 용암류는 대부분 공급지에서 먼 곳에서 산출되기 때문에 파호이호이 용암류가 냉각되고 결정화될 때 전이된 것으로 생각된다. 왜냐하면 파호이호이 용암이 아아 용암으로 전이되는 경계부에서는 표면이 용암을 치약과 같이 짜놓아 울룩불룩하면서 평탄하게 치약상 용암(toothpaste lava)을 형성하고 있기 때문이다(Fig. 13). 예를들면 라오헤이산 북동부에는 북쪽 틈새에서 이동한 파호이호이 용암류가 치약상 용암(Fig. 13)을 거쳐 아아 용암류로 전이된 것이 넓게 분포한다. 이 아아 용암류는 표면이 매우 거칠은 돌밭을 형성하는데 이는 마치 파도치는 바다 모습을 하기 때문에 '석해(石海)'라고 부르고 있다. 이 용암류의 전면부는 수 m로 상당히 두껍다(Fig. 14).

아아와 파호이호이 두 용암류의 차이는 화학조성에 따라 전혀 일어나지 않고 차라리 온도, 가스와 결정 함량에 따라 나타난다. 아아 용암류는 가파른 사면에서 높은 속도를 내는 빠른 용암강(lava river)에 의해 공급된다. 용암강의 채널에서, 용암은 측방으로 퍼져 흐르는 연변부에 공급되지만 그러나 가장 큰 용적이 아래



Fig. 14. Higher front of the aa lava flow in the northeast of the Laoheishan.

로 흘러 용암류 전면부에 공급된다. 아아 용암류의 전면부는 공급 채널보다 훨씬 더 느린 속도로 움직인다. 그러나 이들 용암류는, 전면부 뒤에서 채워지는 용암이 임계 두께에 도달하여 더 냉각된 용암의 표피를 깨뜨릴 때, 갑자기 앞으로 써지를 형성하며 전진한다.

후오샤오산의 화산 형태

후오샤오산은 라오헤이산의 동북쪽 약 3 km인 곳에 위치하는 스패터구(spatter cone)로서 단성단식 화산이며 (Fig. 15), 1721년 4월 26일부터 5월 28일 사이에 분출되었다(Chen, H. and Ren, J., 1999; Chen and Wu, 2003). 스패터구는 지면에 떨어질 때 아직도 부분적으로 녹아있던 용암 방울들이 함께 용결된다. 이 화산체는 높이가 해발 392 m이고 비고가 82 m이며 기저부의 직경이 약 800 m이고 평면에서 원형에 가깝다(Fig. 16).

화산의 중앙부에는 피트 분화구가 존재한다(Fig. 16). 이 분화구는 벽이 가파르며 분화구의 안지름이 약 450 m이고 깊이가 67.2 m이다. 분화구 주변부는 좁고 뾰족하며 고저가 심하다. 화산체의 남측과 북측 사면이 상대적으로 6~10°로 완만하고 동측과 서측 사면이 20~24°로 좀 가파르다. 피트 분화구는 폭발에 의하지 않고 수직함몰에 의해 형성된다. 마그마가 빠져나가 지하공동을 남길 때, 상위의 암석은 지지되지 못하고 함몰된다.

분화구 내에는 증기 폭발에 의한 3개의 작은 분화구가 발달되어 있다. 화산체의 남측과 북측 기슭에는 용암이 유출했던 2개의 틈새가 있으며, 이로 인해 화산체가 동부와 서부의 두 부분으로 나뉘인다. 특히 북측 틈새는 분화구의 내부로 깊이 들어가 있다. 이 화산체는 동심원상과 방사상의 단열이 발달되고 있다(Fig. 16).

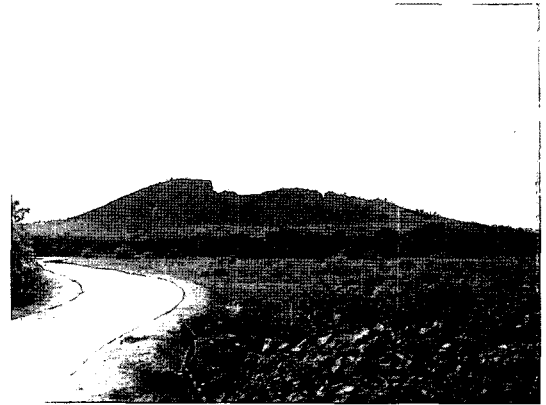


Fig. 15. Huoshaoshan taken from eastern area.

후오샤오산의 분출물

화성쇄설물

후오샤오산 화산체는 주로 적갈색 스패터층(혹은 용결 집괴암)으로 구성되고 암회색 용암층이 협재된다. 분화구 안에는 주로 파괴된 큰 용암편과 스패터편으로 구성된다.

분화구의 동측벽은 최근에 새로운 함몰로 인해 가파르고 싱싱한 노두와 뚜렷한 층서를 나타낸다. 여기서 후오샤오산 화산체의 층서는 스패터층과 용암층의 교대로 구성되었음을 나타내며 스패터층이 훨씬 두껍다. 스패터층은 암상이 라오헤이산에서와 대동소이하다. 이는 화산체를 형성하는 분출 방식이 주로 스트롬볼리언 분출에 의해 지배되었으며 폭발력이 약해지면서 용암 분출을 일으키는 하와이언 분출(Hawaiian eruption)로 전이되는 순환과정을 반복적으로 거쳤음을 반영한다. 그러나 이때 용암분출은 주로 스패터를 포출하였으며 폭발력이 약해 높게 뜨지 못한 스패터들은 낙하된 직후에 곧 서로 달라붙어 쇄설성 용암류를 형성하였다. 그러나 스트롬볼리언 분출은 폭발력이 강해서 스패터들은 공중으로 보다 높게 솟아올라 떨어짐으로 곧 냉각되어 용결된 스패터층을 형성하였다. 후기 단계에 폭발력이 더욱 강할 때는 화성쇄설물들은 더 높게 포출되어 낙하됨으로서 거의 용결되지 않은 채로 스패터층을 형성한 특징을 보인다.

분화구 바닥으로 내려가면 분화구를 가까이서 자세히 볼 수 있다. 분화구 바닥은 용암으로 덮여있고 그 표면에는 큰 암괴들과 스패터들이 여기저기에 뒹굴고 있다. 이들은 지하수에 의한 급냉으로 파편화되어 빠르게 뿔어대는 맹렬한 증기폭발에 의해 깨져 불려나온 것이다. 폭발에 의해 불려 나온 화성쇄설물은 새로운

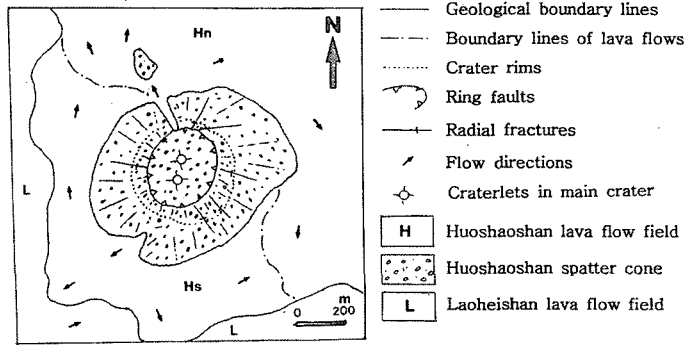


Fig. 16. Geological map of the Huoshaoshan spatter cone. L, lava flows from the Laoheishan volcano; Hs, Hn are the same as Fig. 5.

화산물질을 함유하지 않고 대부분 분화구벽의 고체 암석으로 구성되어 있다. 이는 이 폭발이 마그마 저장고 내에서 유래되지 않았고 차라리 저장고 위에서의 물로 포화된 암층 내에서 유래되었다는 것을 지시한다. 후오샤오산 아래에서 대규모 마그마의 퇴각은 주위 암석으로부터 지하수가 화도로 흐르게 하였다. 지하수는 뜨거운 화도벽을 만났을 때 증기로 바뀌었으며, 상부 암석에 의한 압력하에서 이 증기는 일련의 폭발로 맹렬하게 달아나면서 이와 함께 주위의 암편과 스패터편을 날려보냈던 것이다. 지하수의 가열이 일어날 때, 흔히 이와 같은 수증기성 폭발을 예상할 수 있을 것이다. 이때에는 수 톤 무게의 암괴도 터져 나올 수 있었다. 이 증기폭발은 후오샤오산에서 최후기에 일어난 폭발이며 대부분 분화구 바닥을 뒤덮었다.

용암류

라오헤이산 동쪽 틈새에서 북쪽으로 순환도로를 따라 후오샤오산 동쪽을 지나가면 식생 변화를 관찰할 수 있다. 도로 동쪽의 수목이 울창하게 우거진 곳은 백악기 넝장층 지역으로서 섬과 같이 키푸카로 남아있다. 그리고 서쪽의 용암류는 황량하게 식생이 거의 없다. 그러나 이 용암류도 사면을 따라 미미하지만 약간의 식생 차이와 색깔 변화를 발견할 수 있다. 이러한 식생 차이와 색깔 변화는 용암류의 연대와 표면 특징에 따라 달라진다. 이 후오샤오산에서 나온 신선한 파호이호이 용암류는 라오헤이산에서와 같이 암회색을 나타내고 신선한 아아 용암류는 흑색을 나타낸다. 더 고기 용암류는 적갈색에 가깝고 이끼류와 같은 식생이 약간 자라고 있다. 또한 최후기 용암류는 종종 더 고기 용암류를 둘러싸는 키푸카를 발견할 수도 있는데 이는 식생 차이와 색깔 변화로 구분된다.

후오샤오산에서 나온 용암류는 파호이호이 용암이

많지만 아아 용암도 많다. 도로 옆에는 흑색 아아 용암류이지만 후오샤오산의 북쪽 틈새로 접근하면 암회색 파호이호이 용암류가 우세해진다. 이 용암류는 이끼조차도 거의 자라지 않기 때문에 오대연지의 다른 용암류보다 가장 나중에 분출되었음을 알 수 있다. 그 표면은 표면이 매끈하거나 주름잡혀 새끼구조가 형성되어 있다. 새끼구조는 흔히 활모양을 이루어 불룩한 쪽으로 유향을 쉽게 알 수 있기 때문에 후오샤오산 용암류의 방향성을 추적할 수 있다. 북쪽 틈새에서 나온 용암류는 북쪽으로 흐르고 다시 동쪽으로 넓게 퍼졌다 (Fig. 5). 남쪽 틈새에서 용암류는 남쪽으로 나와서 이내 동쪽으로 흐르거나 북쪽으로 흘러갔다(Fig. 16). 그리고 용암류가 이전의 언덕진 용암류의 전면부를 지나갈 때는 용암폭포를 형성하는 곳도 있다.

파호이호이 용암류는 빨리 움직이는 용암하천(lava stream)을 따라 채널을 형성하여 흘러간다. 후오샤오산 북쪽 틈새로부터 큰 용암하천이 형성되어 있고 북쪽으로 여러 갈래의 지선(branch)으로 갈라진다. 어떤 지선은 가파른 경사를 지나면서 용암폭포를 형성하며, 이곳에서 용암은 암괴상 용암(blocky lava)과 같이 쪼개져 매우 큰 용암슬랩으로 형성하고 있다. 그 중에 어떤 것은 곰, 원숭이와 같은 동물 형상을 닮은 것도 있다.

반면에 아아 용암류는 이동시에 표층부가 부수진 용암편으로 구성되기 때문에 매우 거칠고 울퉁불퉁한 표면을 가지지만 그 내부는 치밀하고 균질하다. 이 아아 용암류는 파호이호이 용암류가 냉각되고 결정화될 때 전이된 것으로 대부분 후오샤오산의 공급지에서 먼 북부에서 넓게 산출된다. 여기서도 라오헤이산 북동부에서와 같이 이들은 돌덩이를 널려 놓은 것과 같이 표면이 매우 거칠은 돌밭을 형성하는 ‘석해’를 이루고 있다. 공급지로부터 더 멀리 간다면 마치 이들은 표면에 매우 큰 용암덩어리로 이루지기 때문에 암괴상 용암류를 닮았다.



Fig. 17. Hornito representing a driblet cone (A) and a driblet dish (B) in lava flows of the Huoshaoshan.

오대연지의 3지(3rd pond) 가까이에서는 아아와 파호이호이 용암류의 표면에서 하니토(hornito)가 발견되는데 이들은 마치 검은 모래 포대를 원형으로 차곡차곡 쌓아 올린 것과 같은 양상이다(Fig. 17). 이들은 높이가 대개 2~3m 정도, 기저 직경이 2~5m 정도이며 각각의 상단에 구멍이 나와 있고 내부로 비워있다. 이 하니토들은 탑 모양을 이루는 용암병구(driblet cone)도 있고(Fig. 17A) 쟁반 모양을 나타내는 용암병접(driblet dish)도 있다(Fig. 17B). 이들은 주로 4지와 5지 사이와, 3지의 서부에서 발견되며, 또한 아오관호(藥泉湖)의 서부와 바일룡호(白龍湖) 근처에서도 발견된다. 따라서 이들은 모두 호수 근처의 늪지에서 발달된다는 것을 알 수 있는데, 이는 뜨거운 용암류가 늪지를 덮음으로서 공극수가 가열 기화되어 위로 달아날 때 형성된다는 것을 암시한다. 즉 액체 상태의 녹은 용암이 수증기와 함께 위로 뿜어져 나오므로 형성된다는 것이다. 이때 가스 분기공을 통하여 액체 용암 덩어리가 튕겨나와 분기공 주위에 차곡차곡 쌓아 올라간 것이다. 한

화구를 통하여 수증기가 계속적으로 뿜어져 용암덩어리가 계속 튕겨 나와 수 m로 쌓아 올라가면 탑 모양의 원추형을 이룰 것이고 수증기가 일시에 다나와 용암덩어리가 계속 튕겨 나오지 못하고 이내 멈추면 납작한 원형을 이룰 것이다.

후오샤오산에서 분화구는 폭발에 의하지 않고 수직 함몰에 의해 형성된 피트 분화구(pit crater)이다(Fig. 7). 마그마가 빠져나가 지하공동을 남길 때, 상위의 암석은 지지되지 못하고 함몰된다. 다음 차기분출에서 나오는 용암은 피트 분화구로 쏟아 붓거나 혹은 분출열극이 그 분화구 내부로 열려있을 것이다. 후오샤오산에서 이런 열극은 여러 개가 분화구 바닥을 가로질러 수직벽 위의 외륜까지 뻗어나고 이 분화구 밖으로 연장되어 있다(Fig. 7). 따라서 후오샤오산의 후기 분출 동안에 분화구는 분화구 벽을 자르는 열극에서 용암이 흘러나왔을 것이다.

분출 과정

라오헤이산의 층서

화산을 구성하는 분출물의 층서를 분석하면 화산의 분출 과정을 알아낼 수 있다. 라오헤이산은 스크리아구이며 하나의 복식화산이다. 선기 분화구는 아마도 함몰에 의한 하나의 피트 분화구인 것으로 추정되며, 후기 화산체의 분화구는 갈매기형이고 선기 분화구의 함몰에 따르는 단열대에 위치한다. 따라서 전후기의 분화구는 합치되지 않는다.

라오헤이산 스크리아구는 선기 용암류(L1) 위에 놓이며 선·후기 화산체로 구분된다(Fig. 6). 선기 화산체는 후기 화산체의 화성쇄설물로 덮여 있기 때문에 온전하지 않지만 선기 화산체의 분화구 연변상 퇴적물에 해당하는 스페터층(혹은 용결 집괴암)이 초승달 모양으로 노출되어 분포한다(Fig. 6). 선기 분화구 연변부의 스페터층은 그 단면이 후기 용암 유출로 인해 형성된 북쪽과 동쪽 틈새의 양측에 잘 노출되어 있다. 이 스페터층은 폭발력이 비교적 약한 스트롬볼리언 분출에 의해 화성쇄설물들이 공중으로 뿜다가 낙하된 강하 퇴적층(fallout deposits)이라는 것을 반영한다.

후기 화산체의 층서는 후기 분화구 안벽 단면에서 분명하게 나타난다. 화성쇄설층들은 방향에 따라 그 두께가 약간의 차이를 보이며 남측 벽에 잘 노출되어 있다. 이 단면에서 화성쇄설층은 아래로부터 위로 가면서 입도가 상대적으로 작아지고 용결도가 낮아지며 색깔이 적색에서 흑색으로 변한다. 이 층서는 분출 유형이 스트롬볼리언 분출이 있었다는 것을 나타내며, 시

간이 지나면서 폭발 강도가 커진다는 것을 반영한다.

용암류는 마그마가 상승하는 도중에 낮은 정도의 기포화(vesiculation)로 인하여 용암분전을 일으키면서 쇄설화되고 지표에서 이들이 냉각되기 전에 녹은 상태로 합체되어 형성된 쇄설성 용암과 용암분류에 의해 화구에서 직접 흘러나온 용암이 있다. 스크리아구는 마그마가 상승하는 도중에 높은 정도의 기포화로 인하여 스트롬볼리언 분출을 일으키면서 화성쇄설물의 급격한 낙하로 집적된 스페터층(혹은 용결 집괴암)과, 헐렁한 스크리아층이 있다(Cas and Wright, 1987).

남쪽의 용암류(L1)는 다양한 색깔의 스크리아층에 의해 스크리아구에서 남동쪽으로 약 1.6 km까지 덮인다. 이의 두께는 스크리아구 기슭에서 5 m이지만 남동쪽으로 가면서 얇아져 1.6 km 떨어진 곳에서 0.2 m이다. 그러므로 이 용암류는 아마도 스크리아구 형성 이전에 분출되었던 것으로 보인다.

스크리아구는 전기 화산체에서 동쪽과 서쪽에 U형과 V형의 골짜기를 발달시키는데(Fig. 6), 이는 동쪽(Le)과 서쪽 틈새의 용암류(Lw)가 온전하던 전기 화산체를 파괴하여 생긴 것이고 전기의 스페터층보다 후에 분출되었다는 것을 암시한다. 마찬가지로 후기 화산체에서 북쪽과 북서쪽에 U형과 V형의 골짜기를 발달시킨다(Fig. 6). 특히 후기 분화구에서 북쪽 골짜기로 내려가면 단면에서 스크리아층 위에 얇은 용암층이 덮여 있음을 볼 수 있다. 이 골짜기도 북서쪽(Lnw)과 북쪽 틈새의 용암류(Lw)가 온전하던 후기 화산체를 길이 300 m, 너비 40 m, 깊이 20 m로 파괴하여 생긴 것이고 층서 관계는 북쪽 틈새의 용암류가 후기의 스크리아층보다 후에 분출되었다는 것을 암시한다.

후오샤오산의 층서

후오샤오산은 용암과 화성쇄설층으로 구성된 단성단식 화산이며 스페터구이다. 스페터구는 마그마가 상승하는 도중에 높은 정도의 기포화로 인하여 스트롬볼리언 분출을 일으키면서 화성쇄설물의 급격한 낙하로 집적된 스페터층(혹은 용결 집괴암)을 형성하였다는 것을 지시한다.

이 화산체는 체적이 작고 사면이 비교적 가파르며 중심원상, 방사상 단열대가 발달하고 중앙부에 분화구가 존재한다. 스크리아구는 북쪽과 남서쪽에 골짜기를 발달시키는데, 이는 북쪽 틈새의 용암류(Hn)와 남서쪽 틈새의 용암류(Hs)가 온전하던 스페터구를 파괴하여 생긴 것이고 스페터층보다 후에 분출되었다는 것을 지시한다.

분화구의 바닥에는 증기 폭발에 의한 3개의 소분화구가 발달한다. 이들은 소량의 용암편을 분출하여 소

분화구 주위에 퇴적됨으로서 낮고 완만한 화산구를 형성하였다. 그리고 분화구 바닥에는 주위 분화구벽에서 함몰 낙하한 용암편들도 흩어져 있다.

라오헤이산과 후오샤오산의 선후관계

라오헤이산의 북쪽 틈새에서 나온 후기 용암류(Ln)와 후오샤오산 용암류(Hs, Hn)는 그 접촉부에서 전자가 후자에 의해 덮이는 것이 분명하다. 어떤 구간에서는 후오샤오산 용암류의 전면부가 라오헤이산 용암류의 장애로 인하여 소성 변성을 일으키는 새끼구조를 발달시킨다. 이는 후오샤오산 용암류가 이동할 때 라오헤이산 용암류가 이미 고결되었음을 반영한다. 그러므로 후오샤오산 화산이 라오헤이산 화산보다 더 늦게 활동하였음을 나타낸다.

라오헤이산의 분출 과정

제1단계 용암류 분류: 전기 용암의 하위에서 화성쇄설층이 아직 발견되지 않기 때문에 제1단계 화산활동은 용암의 유출로부터 시작된 것으로 추정된다. 이 단계는 열극을 따라 용암분류 혹은 용암분전에 의해 나온 용암류가 고지형의 지배를 받아 주로 남쪽으로 흘러 지면을 평탄해 나갔다. 이때 마그마의 유출률이 상당히 높았기 때문에 용암류는 홍수와 같이 사방으로 퍼져나갔다. 이 용암류는 점성이 낮았기 때문에 표면이 매끈한 파호이호시 용암을 이루고 표면에 새끼 구조를 형성하고 있으며 또한 표면에 기공이 까칠까칠하게 형성되어 있다. 이 용암류는 용의 표피를 닮은 양상이라 하여 현지에서 “석룡암(石龍岩)”이라고 부르고 있다.

제2단계 폭발성 분출: 1단계 용암이 유출된 후에, 마그마 공급이 줄어들면서 화도 상부의 마그마에서 휘발성 성분이 용리되어 폭발성 분출(explosive eruption)로 유도되었다. 이때의 분출 유형은 폭발력이 약한 스트롬볼리언 분출이었으며 이로부터 스페터, 화산탄, 스크리아로 구성된 화성쇄설층을 형성하였다. 이 화성쇄설물들은 대부분 높게 뜨지 못하고 분화구 주변에 신속히 낙하하여 집적되었다. 이들은 상당한 기간 동안 여전히 고온 산화 상태를 유지하면서 소성 변형으로 용결되어 적갈색의 스페터층(혹은 용결 집괴암)을 형성하였다. 이와 같이 스페터층이 집적됨으로서 전기 화산체로서 스크리아구가 형성되기 시작하였다. 동시에 세립질 스크리아는 분화구에서 좀 더 밖으로 퍼져 낙하함으로써 분포면적이 약 15 km²이고 두께가 2-20 cm 되는 얇은 판상 스크리아층을 이루었다. 화성쇄설층은

분포 범위가 멀리 확산되지 못하고 분화구 주위에 제한되지만 특히 남동쪽 바깥으로 길고 얇게 분포된다. 이러한 증거는 분연주의 높이가 상당히 낮았음을 반영한다.

제3단계 분류성 분출: 스트롬볼리언 분출은 많은 가스의 방출로 폭발력은 거의 소진되면 용암이 직접 분화구 위로 넘쳐 흘러나오는 분류성 분출(*effusive eruption*)로 전환된다. 이 분출은 주로 용암분류(*lava effusion*)로 진행되었으며 간헐적으로 용암분출을 수반하였다. 이때의 용암은 분화구의 동쪽과 서쪽 낮은 곳을 선택하여 틈새를 만들고 이 틈새를 따라 낮은 곳으로 흘러간다. 또한 이 틈새는 압력에 약하고 화산체의 화성쇄설층과 용암류 사이의 밀도 차이로 그 경계면을 따라 유출구(*spillway*)를 만들어 빠져나갈 수도 있다. 이와같이 동쪽, 서쪽의 분화구 틈새 혹은 유출구를 따라 용암이 대량으로 흘러나와 주로 동쪽, 서쪽으로 전진하였으며 특히 동쪽 용암류는 점차 남쪽으로 더 멀리 흘러나갔다. 화산체의 남쪽 약 1.6 km 지점에서는 아아 용암류와 파호이호이 용암류가 서로 포개지면서 접촉되는데, 이는 아마도 동쪽과 서쪽 틈새에서 동시에 흘러나와 겹쳐졌거나 아니면 시기에 따라 유출률의 차이로 점성의 증감이 일어나 파호이호이 용암이 아아 용암으로 전환되었음을 암시한다. 이 분출작용은 기본적으로 라오헤이산의 화산체를 용암방패(*lava shield*)과 같이 튼튼하게 하였고 동시에 온전하던 선기 화산체를 부분적으로 파괴하여 동쪽과 서쪽에 두 개의 U형 골짜기를 형성시켰다.

제4단계 폭발성 분출: 제3단계 분류성 분출은 용암을 대량으로 유출한 후에 화도에서 마그마 압력이 급격히 낮아지면서 분화구의 함몰이 일어났다. 제4단계 폭발성 분출은 함몰된 선기 분화구의 연변부 단열대를 따라 일어났으며 위치는 상대적으로 선기 분화구의 남서쪽으로 치우쳐 있다. 그러므로 후기 화산체는 선기 화산체의 남서 연변부를 덮고 있다. 이 단계의 폭발성 분출은 먼저 화도에서 기포화작용이 비교적 활발하게 발생하여 상당히 강렬한 폭발작용을 일으켜 발생하였다. 이 폭발작용은 분출 유형이 2단계 폭발성 분출과 마찬가지로 폭발력이 약한 스트롬볼리언 분출이었으며 일련의 여러가지 화성쇄설물을 발생시켰다. 이 화성쇄설물은 공중으로 높이 뜨지 못하고 분화구 주위에 신속히 집적되어 라오헤이산의 새로운 화산체로서 후기 스킨리아구를 형성하였다. 동시에 보다 작은 분석들은 화산체 밖으로 특히 남동쪽으로 더 멀리 흩어져 제1단

계와 제3단계 용암류 위에 낙하하였다. 화산체 남부의 선기 용암류 위에 낙하한 화성쇄설물은 두 차례의 화산체를 형성했던 폭발성 분출물에 의해 중첩되었기 때문에 두께가 상당히 두껍다. 그러나 동쪽과 서쪽 유출구에서 나온 3단계 용암류 위에 낙하한 분석들은 분포가 국한되고 두께도 매우 얇다. 이는 제1단계 용암류가 제3단계 용암류보다 더 먼저 분출되었다는 것을 암시하며, 또한 4단계 폭발성 분출은 폭발성이 비교적 약했다는 것을 시사하고 분연주의 높이는 더욱 낮았다는 것을 반영한다.

제5단계 분류성 분출: 제4단계 폭발성 분출이 일어난 후에 북부 화산체의 북서쪽과 북쪽에 낮은 분화구 틈새가 형성되어 이들 틈새를 따라 용암이 거의 동시에 흘러나와 북부에 넓은 용암류를 집적시켰다. 이는 제4단계 스트롬볼리언 분출이 가스의 방출로 폭발력은 거의 소진되면서 분화구 위로 용암을 넘쳐 흘리는 분류성 분출로 전환되었음을 암시한다. 이 분출은 아마도 용암분류와 용암분출이 번갈아 일어났다. 이때의 용암류는 동시에 동, 서쪽 틈새에서 나온 3단계 용암류를 덮었다. 또한 이 용암류는 화산체의 말단부를 덮어 라오헤이산이 용암방패 모양을 최종적으로 형성되게 하였다. 이와 동시에 화산체 북부는 많은 용암 분류로 말미암아 분화구의 틈새가 심하게 파괴된 두 개의 V형 골짜기가 형성되었다. 북쪽 틈새의 중·상부 용암 위에는 약 2 cm 두께의 스킨리아와 분석이 퇴적되어 있는데 이는 분류성 분출 과정 중에도 폭발성 분출이 간헐적으로 일어났음을 암시한다. 그러나 북서와 북쪽 틈새의 상단부 용암 위에서는 분석이 전혀 분포되지 않는다. 이는 라오헤이산이 3단계 용암류 분출 이후에 활동하지 않았음을 반영한다. 그러나 큰 분화구 주변에는 일정하게 작은 깔때기형 소분화구가 발견되는데 이는 아마도 말기에 증기폭발에 의해 소분화구를 형성하였던 것으로 생각된다.

후오샤오산의 분출 과정

전단계 폭발성 분출: 라오헤이산의 마지막 용암류 분출 후에는 마그마의 공급 부족으로 화도에 체류 중인 마그마가 점차 냉각 고결되어 마그마의 상승통로가 막히면서 화산활동이 종결 단계에 이르렀다. 그러나 지하의 마그마는 통로가 라오헤이산에서 북동쪽으로 3 km 떨어진 후오샤오산으로 이동하여 분출이 일어나기 시작하였다.

후오샤오산에서는 먼저 비교적 강렬한 폭발이 발생하여 대량의 스페터, 화산탄, 스킨리아가 폭발적으로 분출되었다. 이때 분출은 대부분 스트롬볼리언 분출이

었지만 주기적으로 용암분출을 일으켜 화구 주위에 스페터구를 형성하면서 밖으로 소량이지만 용암류를 흘러 보내기도 하였다. 따라서 이때 분출된 화성쇄설층과 소량의 용암층은 번갈아 가면서 축적되어 후오샤오산 화산체로서 스페터구를 형성하여 나갔다.

후단계 분류성 분출: 화산체가 어느 정도 형성된 후에 화산체의 남서쪽과 북쪽 기슭에서 마그마는 초기에 주로 용암분출을 일으키고 후기에 용암분류에 의해 용출하여 스페터구 말단부를 덮어나갔다. 이때의 남쪽과 북쪽에서 용암분출은 기존의 화산체를 파괴하였고 화산체를 동서 두 부분으로 갈라놓았다. 두 화구에서 대량의 용암이 용출되므로서 이와 동시에 주 화구 주위에는 낮고 완만한 용암방패가 형성되었다.

후단계에는 대량의 용암이 분출되었기 때문에 화도의 마그마 압력이 떨어져 화구 주위를 따라 함몰이 일어나면서 피트 분화구(pit crater)가 형성되었다. 이러한 분화구의 형성은 화산활동이 종결 단계에 돌입한 것을 암시한다.

그리고 말기에는 이 분화구 내에서만 규모가 작은 증기폭발이 일어남으로서 소분화구를 형성하였으며 이 소분화구 주위에 용암편과 스페터편이 느슨하게 흩어져 있다. 이 증기폭발은 후오샤오산에서 마지막 깊이가 67m까지 함몰했던 분화구 활동의 종식을 나타낸다.

결 론

(1) 라오헤이산은 복성복식 화산이며 선기 화산체는 이의 북동부에 노출되고 후기 화산체는 남서부 상위에 놓인다. 후기 화산체 중앙부에는 깔때기형 분화구가 형성되어 있고 화산체 기슭에 용암이 유출되었던 4개의 분화구 틈새가 발견된다. 후오샤오산은 단성단식 화산이고 그 중앙부에는 피트 분화구가 있고 화산체 기슭에 용암이 유출된 틈새가 2개 발견된다.

(2) 선기 화산체는 모두 용암과 화성쇄설층으로 구성되고 하부는 주로 용암류로 구성되며 중부는 주로

스페터와 화산탄으로 구성되는 스페터층(혹은 용결 집괴암)이고 상부는 주로 스크리아와 분석으로 구성되는 헐렁한 스크리아층으로 구성된다.

(3) 선기 화산활동은 두 화산에서 스트롬볼리언 분출, 용암분출과 용암분류가 교대로 일어났으며 이로 인해 스크리아구, 스페터구와 용암류를 형성하였다.

(4) 화산층서는 먼저 라오헤이산이 형성되었고 후에 후오샤오산이 형성되었음을 지시한다. 또한 라오헤이산의 분출 과정은 용암분출과 스트롬볼리언 분출의 반복에 의한 5 단계를 거쳤으며 후오샤오산은 스트롬볼리언 분출과 용암분류의 2 단계를 거쳤다는 것을 지시한다.

참고문헌

- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic successions. London, Allen & Unwin, 528 p.
- Chen, H. and Ren, J., 1999, Volcanic eruptive processes and characteristics of the current volcanoes in the Wudalianchi volcano clusters known from Manchurian-language historical archives discovered at present. Geological Review, 45, 409-413.
- Chen, H. and Wu, X., 2003, Observation records of the eruption of Wudalianchi volcanoes in 1720-1721 AD. Seismology and Geology, 25, 491-500.
- Fan, Q., Lui, R. and Sui, J., 1999, Petrology and geochemistry of rift type Wudalianchi K-rich volcanic rock zone. Geological Review, 45, 358-368.
- Li, Q., Chen, W., Li, D. and Ji, F., 1999, A chronological research on volcanic rocks from the Wudalianchi area. Geological Review, 45, 393-399.
- Maoseng Feng, Whitfordo-stark, J.K., 1986, The 1719-1721 eruptions of potassium-rich lava at Wudalianchi, China. J. Volcanol. Geotherm. Res., 30, 131-148.
- Wang, Y., Han, Z. and Mu, L., 1996, Wudalianchi volcanic group, Guideline for Excursion of the 30th International Geological Symposium, 1-28.

(2005년 12월 10일 접수; 2005년 12월 23일 채택)