철원분지 동막골응회암의 분출유형과 분출과정

황상구* · 손영우 · 최장오 · 김재호

안동대학교 지구환경과학과

Eruption Styles and Processes of the Dongmakgol Tuff, Cheolwon Basin, Korea

Sang Koo Hwang*, Yeong Woo Son, Jang O Choi, and Jae Ho Kim

Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

요약: 동막골응회암은 대부분 화쇄류암으로 구성되지만 입도와 퇴적구조에 따라 암상을 분류하면 (1) 괴상 응회각력암, (2) 용결 응회암 및 라필리응회암, (3) 유변상 응회암 및 라필리응회암이 있고 (4) 괴상 세립질 응회암, (5) 성층화 라필리응회암, (6) 점이층리 라필리응회암, (7) 불량층리 라필리응회암과 (8) 괴상 세립질 응회암이 있다. 이 암상들은 상하로 3개 화성쇄설암군으로 구별하여 조합할 수 있다. 하부 화성쇄설암군(LI)은 괴상 라필리응회암, 용결 응회암 및 라필리응회암과 유변상 응회암 및 라필리응회암으로 조합되며, 화쇄류형성 분출로부터 끓어넘침 분출에 의한 화쇄류로부터 정치된 것이다. 중부 화성쇄설암군(LT+MI)은 하부에 성층화 라필리응회암, 점이층리 라필리응회암, 괴상 라필리응회암과 이들에 조합된 괴상 세립질 응회암으로 구성되고 중·상부에 괴상 라필리응회암, 용결 응회암 및 라필리응회암과 유변상 응회암 및 라필리응회암으로 조합된다. 이들은 외부물의 소량 유입으로 수증기마그마성 분출에 의한 화쇄씨지로 시작하여 끓어넘침 분출의 화쇄류로 전환된 것이다. 상부 화성쇄설암군(IUT+uUT+UI)은 최하부에 성층화 라필리응회암, 점이층리 라필리응회암으로 조합되고, 하부에 괴상 응회각력암, 불량층리 라필리응회암, 괴상 라필리응회암과 괴상 세립질 응회암으로 조합되며 중·상부에 괴상 라필리응회암, 용결 응회암 및 라필리응회암으로 조합되며, 이들은 수증기플리니언 분출에 의한 씨지로 시작해서 플리니언 분출에 의한 강하를 거쳐 끓어넘침 분출로 전환되어 화쇄류로부터 퇴적된 것이다. 결론적으로 동막골응회암에서 분출과정은 대체로 전·중·후기 화산작용이 단계별로 수증기플리니언 혹은 플리니언 분출로 시작하여 화쇄류형성 분출로 전환되고 끓어넘침 분출로 진행되는 순서를 밟았다. 그러나 전기 화산작용은 아마도 초엽의 수증기플리니언 혹은 플리니언 분출 없이 진행되었다.

핵심어: 동막골응회암, 암상, 수증기플리니언 분출, 플리니언 분출, 끓어넘침 분출

Abstract: The Dongmakgol Tuff is divided into 8 lithofacies based on their grain size and depositional structures: massive tuff breccia(TBm), welded tuff and lapilli tuff(LTw), rheomorphic tuff and lapilli tuff(LTr), massive lapilli tuff(LTm), stratified lapilli tuff(LTs), gradedly bedded lapilli tuff(LTg), crudely bedded lapilli tuff(LTb) and massive fine tuff(Tm). They can be divided into 3 pyroclastic rock group based on their constituents of the lithofacies. The lower group(LI) is composed of LTm, LTw and LTr, which are interpreted to have resulted from emplacement of voluminous pyroclastic flows due to ignimbrite-form eruption to boiling-over eruption. The middle group(LT+MI) consists of LTs, LTg and LTm associated with Tm in the lower part, and of LTm, LTw and LTr in the middle and upper parts; these suggest that started with deposition of pyroclastic surges from phreatoplinian eruption by poor eternal water, passed through emplacement of pyroclastic flows from ignimbrite-form eruption and ended with deposition of voluminous pyroclastic flows from boiling-over eruption. The upper group(IUT+uUT+UI) is composed of LTs, LTg and Tm in the lowermost, TBm, LTb, LTb and Tm in the lower part, and LTm and LTw in the middle and upper part, suggesting that began with deposition of surges from phreatoplinian

*Corresponding author

Tel: 054-820-5469

E-mail: hwangsk@andong.ac.kr

eruption, passed through deposition of pumice- and ash-fallouts from plinian eruption and transformed into emplacement of pyroclastic flows due to boiling-over eruption. As result, eruptive processes in the Dongmakgol Tuff approximately began with phreatoplinian or/and plinian eruption, transformed into ignimbrite-forming eruption and proceeded into boiling-over eruption in each volcanism, but proceeded presumably without phreatoplinian or plinian eruption in the earlier stage of 1st volcanism.

Key words: Dongmakgol Tuff, Lithofacies, Phreatoplinian eruption, Plinian eruption, Boiling-over eruption

서 언

화쇄류암은 정치 온도와 상관없이 화산회를 포함하는 모든 화성쇄설물의 흐름이나 사태를 말하며 대부분 이들이 여러 차례 반복적으로 일어나 복잡하기 때문에 여러 가지 흥미로운 연구의 대상이 되어왔다 (Sparks *et al.*, 1973; Fisher and Schmincke, 1984; Cas and Wright, 1987; Valentine, 1987; Fisher, 1990; Druitt, 1992).

화쇄류암은 분출시의 분출상에 따라 구성원, 조성, 조직, 내부구조 등에 의해 여러 암상으로 나타난다. 우리는 이 암상들과 내부층서 관계로부터 이의 분출 작용을 해석하고 그 순서를 알아낼 수 있다.

화쇄류형성 분출(ignimbrite-forming eruption)에 있어서 이상적인 내부층서는 먼저 플리니언 분출의 강하상(fall phase)으로부터 시작하여 화쇄류상(pyroclastic flow phase) 순으로 나타낸다. 초기의 플리니언 분출은 가스함량 감소 혹은 화구반경 확장 등에 의하여 분연주(eruption column)가 과적되어 붕괴됨으로서 화쇄류를 생성하게 되어 화쇄류형성 분출로 전환된다. 따라서 강하상에서 화쇄류상으로의 전이는 방출률의 큰 증가를 일으키고(Bursik and Woods, 1996), 흔히 굵은 치짐 각력암(lag breccia)을 형성하는 다량의 암편 분출을 수반할 수도 있다(Wright and Walker, 1977; Aramaki, 1984; Druitt, 1985; Druitt and Bacon, 1986; Rosi *et al.*, 1996). 이 전이는 칼데라 함몰과 같은 새로운 화구의 개시를 나타내는 화산사건을 의미할 수도 있고(Druitt and Sparks, 1985), 화구 반경이 거의 동시에 넓어진다는 것을 시사할 수도 있다. 그러나 모든 화쇄류형성 분출은 반드시 초기 플리니언 분출을 가지는 것은 아니다(Francis *et al.*, 1983). 그리고 마그마 방출률은 분연주를 유지하는데 필요한 방출률보다 월등히 증가될 수 있는데, 이때의 분출은 높은 분연주가 형성되지 않고 다량의 화쇄류를 화구 위로 흘러 내리는 끓어넘

침 분출(boiling-over eruption)로 전환되는 것이다. 그러나 한반도 화산암류 중에는 화쇄류암이 많지만 이들에 대해 냉각단위 별로 분출상에 대해 논의된 바가 거의 없다.

우리는 화쇄류암의 분출과정을 연구하기 위해 다음을 연구목표와 착안점을 두어 진행하였다. 철원분지에서 화쇄류암으로 구성되는 동막골웅회암을 연구대상으로 하여 이 동막골웅회암이 기존의 층서체계에서 어떠한 역할을 하는지 화산학적 특성을 중심으로 연구를 수행하였다. 이는 화산 지역에서 광역적인 연구보다 하나의 층서단위에 대한 효율적인 연구 수행에 집중될 뿐만 아니라 분출과정 해석에 큰 비중을 두는 것이며, 대표적인 화쇄류암의 주요 측정단면에서 암상분석을 실시하여 암상의 수직변화를 중심으로 기재하고 이 자료로부터 이 웅회암의 분출상과 유형을 밝히고 그 과정을 엮어내는 것이 목적이다. 이들 변화와 자료의 해석은 화구에서 분출로부터 지표에서 일어난 화산과정을 해결해 주는 열쇠가 될 수 있다.

이 목적을 위해 동막골웅회암을 대상으로 암상분석을 실시하고 주상도를 작성하였다. 각 암상은 구성원, 조성, 조직, 내부구조를 중심으로 세밀하게 기재하고 철저히 해석하였다. 왜냐하면 분출상과 유형에 대한 여러 가지 판단들은 야외 노두에서 분출물의 형태적 분석과 암석의 내부구조 및 상호간의 관계로부터 가능하기 때문이다.

층서개요

경기육괴와 임진강대의 경계부는 추가령 지구대를 따라 동두천단층과 동송단층 사이에 철원분지가 형성되어 있다. 이 철원분지의 주변은 크게 선크브리아기 변성암류, 고생대 연천층군, 중생대 적성층, 중생대 심성암류, 백악기 화산암류, 그리고 제4기의 현무암으로 구성된다(Fig. 1).

철원분지는 하부에 화산성 퇴적암이 소규모로 협재

Fig. 1. Geological map of the Cheolwon basin, showing the section locations (A, B, C) on two dash lines that display the horizons of Lower bedded tuffs(LT) and Upper bedded tuff(UT). A, B and C represent locations of Seongsan, Jongjasan and Hyangrobong sections respectively.

되지만 대부분 화산암류로 채워져 있다. 철원분지의 화산암류는 하부에 염기성 화산암류, 중부에 중성과 산성 화산암류, 상부에 산성 화산암류로 구성된다. 염기성 화산암류는 분지 남부에서 측방으로 제한적인 분포를 하며 그 위에 응회질 퇴적암이 국지적으로 놓인다. 중성 화산암류는 분지 북부의 금학산에서 두껍지만 남쪽으로 가면서 점점 얇아지고 산성 화산암류에 의해 덮인다. 산성 화산암류는 지표쇄설성 각력암(epiclastic breccia)을 사이에 두고 상·하부로 구분된다. 즉 하부 산성 화산암류는 분지 중남부에 두껍게 분포하고 측방으로 넓게 퍼지며 북쪽으로 가면서 점점 얇아진다. 상부 산성 화산암류는 지장봉, 화인봉과

북대의 능선부에만 소규모로 분포한다.

이 화산암류는 조성 차이가 확실할 뿐만 아니라 중간에 지표쇄설암이 두 차례 협재되기 때문에 이들을 기준으로 하여 8개 암층으로 구분하고 이 모두를 철원층군이라 하였다(Kee *et al.*, 2008). 이 철원층군은 하부로부터 신흥층, 궁평층, 중리층, 금학산안산암, 동막골응회암, 유문암, 신서각력암, 지장봉응회암 순으로 놓인다(Fig. 1).

철원분지 화산암류는 저어콘으로부터 분석된 SHRIMP U-Pb 연령 측정결과 유문암이 115.0 ± 1.1 Ma, 화강반암이 111.24 ± 0.85 Ma와 109.1 ± 1.1 Ma의 평균 연령을 보여준다. 그리고 지장봉응회암의 최소연령은

113 Ma를 보여준다(Hwang *et al.*, 2011). 유문암의 연령은 동막골응회암의 분출 직후에 칼데라 함몰을 지시하는 환상암맥의 관입시기를 한정하고 지장봉응회암의 최소연령은 아마도 철원분지에서 마지막 화산 작용을 의미하는 것으로 해석된다.

동막골응회암

동막골응회암은 대부분 금학산안산암을 피복하고 신서각력암에 의해 덮인다. 이 응회암은 최고 약 450 m 두께를 나타내지만(Hwang and Kim, 2010), 북동쪽으로 가면서 거의 150 m 정도로 얇아진다. 이 동막골응회암은 Rb-Sr 동위원소 측정에 의하면 103.1 ± 3.2 Ma의 등시선을 보여준다(Hwang and Ryu, 2011).

동막골응회암은 대부분 화쇄류암으로 구성되는데, 흐름 지시자들과 암편 및 부석편들의 입도변화 등에 따르면, 이 응회암을 집적시킨 화쇄류는 동막리 남부와 고문리 북부의 경계부 근처에서 공급되었음을 나타낸다(Hwang and Kim, 2010).

동막골응회암은 화학적으로 유문암에서 유문테사이트 조성을 나타내며(Hwang *et al.*, 2010), 물리적 구성원에 따르면 파리질응회암에 속하고 입도에 따르면 응회암내지 라필리응회암에 속한다(Hwang and Kim, 2010). 이 파리질응회암은 사이드, 부석편, 반정, 암편 등으로 구성되며, 반정으로 사장석, K-장석, 석영, 흑운모 등을 소량으로 함유한다.

암상 분석

동막골응회암은 회색, 회갈색과 회백색을 띠고 일부를 제외하고 대부분 전암층을 통하여 분급이 거의 되어 있지 않고 층리가 관찰되지 않으며 심히 용결되어 있다. 따라서 이 암층은 고온의 화쇄류에 의해 정지되었음을 나타낸다. 그러면 두꺼운 동막골응회암은 450 m의 두꺼운 두께를 고려하면 하나의 단일 화쇄류 단위로 구성되었다고 할 수 없다. 복수 화쇄류 단위라면 화쇄류 단위 간에 지면찌지(ground surge)에 의한 써지응회암(layer 1)과 재구름(ash cloud)에 의한 강하응회암(layer 3)이 협재되어야만 이상적이다

Fig. 2. Columnar sections showing interior sequences of the Dongmakgol Tuff. See Figure 1 for the location A, B and C, pointing out Seongsan, Jongjasan and Hyangrobong sections respectively. Abbreviations are the same as follows: LI, Lower ignimbrites; MI, Middle ignimbrites; UI, Upper ignimbrites; LT, Lower bedded tuffs; UT, Upper bedded tuffs.

(Sparks *et al.*, 1973). 그러나 이 동막골응회암은 이러한 써지응회암은 발견되지 않고 간혹 강하응회암이 발견될 뿐이다. 따라서 화쇄류 단위를 인식하고 정의하는 것은 특히 심하게 용결된 암석에서 화쇄류암의 가장 어려운 문제 중의 하나라고 생각된다. 그러면 여기서 이들을 구분해 주는 분계(parting) 물질은 암편풍부대(lithic-rich zone)가 이의 기능을 담당한다고 본다. 화쇄류암의 기본단위(layer 2)에서 이 암편풍부대는 얇은 세립질대(layer 2a) 직상위에 암편의 정점 이대(layer 2b)의 최하부에 속한다. 이 암편풍부대는 동막골응회암에서 드물게 발견되기 때문에 이를 기준으로 하여 이로부터 조금 아래쪽을 기본 화쇄류 단위의 분계로 설정할 수 있다.

동막골응회암은 대부분 화쇄류암으로 구성되며 국부적으로 층상응회암이 얇게 협재되어 있다. 여기서

입도와 퇴적구조에 따라 암상을 분류하면 화쇄류암에 속하는 암상은 (1) 괴상 응회각력암(massive tuff breccia: TBm), (2) 용결 응회암 및 라필리응회암(welded tuff and lapilli tuff: LTw), (3) 유변상 응회암 및 라필리응회암(rheomorphic tuff and lapilli tuff: LTr)과 (4) 괴상 라필리응회암(massive lapilli tuff: LTm)이 있다. 층상응회암에는 (5) 성층화 라필리응회암(stratified lapilli tuff: LTs), (6) 점이층리 라필리응회암(gradedly bedded lapilli tuff: LTg), (7) 불량층리 라필리응회암(crudely bedded lapilli tuff: LTb)과 (8) 괴상 세립질 응회암(massive fine tuff: Tm) 등의 암상이 있다.

그리고 동막골응회암에서 성산 지역, 종자산 지역과 향로봉 지역의 층상응회암이 협재되는 능선을 선택하여 주상도를 작성하였다(Fig. 2 and 3).

Fig. 3. Columnar sections showing interior sequences focused on the Lower and Upper bedded tuffs in the Dongmakgol Tuff. A, B and C represent Seongsan, Jongjasan and Hyangrobong sections respectively. Abbreviations are the same as follows: LI, Lower ignimbrites; MI, Middle ignimbrites; UI, Upper ignimbrites; LT, Lower bedded tuffs; IUT, lower part of the Upper bedded tuffs; uUT, upper part of the Upper bedded tuffs.

암상 기재와 해석

(1) 괴상 응회각력암에서 암편들은 대체로 2~10 cm 이고 최고 16 cm이며 라필리가 암괴보다 우세하다. 이들은 회색내지 담회색 유문암과 드물게 녹색 반상 안산암으로 구성된다. 기질은 담회색내지 담갈색을 띠고 세립의 화산회로 이루어진다. 분급은 매우 불량하며 기저부에서 매우 드물지만 역점을 보여준다. 라필리와 암괴들은 화산회 기질에 기질지지되어 있으며 암괴들은 대부분 층의 중간에 떠 있는 양상을 보여준다(Fig. 4A).

이 암상은 다소 큰 폭발에 의해 형성된 높은 분연주 봉괴로부터 밀집된 테프라가 팽창성 화쇄류로 정착된 것을 지시한다. 한편 암괴들이 우세한 것은 화구 주변의 지층 봉괴 또는 화구의 확장과 함께 주변 암편이 방출되면서 발생한 암설류(debris flow)에 의해 퇴적된 것으로 해석된다(Cas *et al.*, 1989).

(2) 용결 응회암 및 라필리응회암은 동막골응회암의 대부분을 차지하며 전체적으로 분급되어 있지 않고 괴상으로 나타난다. 이 암상은 화산회의 기질 속에 다양한 색의 암편과 소량의 부석으로 구성되는 파릴리응회암이다. 분급은 불량하고 괴상을 나타내며 기저부에서 가끔 역점을 나타낸다(Fig. 4B). 암편은 매우 약하지만 간혹 점이현상을 나타내고 하부에서 미약하지만 다소 풍부하다. 부석편은 대개 기질보다 더 어두운 색이지만 간혹 더 밝은 회백색으로 뚜렷한 색 차이를 보인다. 두께는 대개 3~40 m 범위이고 그 경계가 다소 불규칙하지만 단일층 내에서 암편의 하부 밀집에 의해 구분된다. 냉각단위의 위치에 따라 비용결 부분도 있지만 부분용결내지 치밀용결 부분도 나타난다. 그리고 용결 부분에서 부석은 하중에 의해 편평화되어 있다.

이 암상은 불량한 분급, 암편의 정점이 변화, 기저부의 역점이 변화 등에 의하면 화쇄류에 의해 정착되

Fig. 4. Features of lithofacies of ignimbrites in the Dongmakgol Tuff. (A) Massive tuff breccia in the Hyangrobong section; (B) Welded tuff and lapilli tuff showing reverse grading at the base of an ignimbrite. Note slightly flattened pumice clasts preserved in vitric ash; (C) Rheomorphic tuff and lapilli tuff displaying a parataxitic fabric due to alignment of fiammes; (D) Massive lapilli tuffs associated with thin massive fine tuff beds at the top.

있음을 알 수 있다. 또한 이 암상은 조직적인 균질성, 큰 두께에 의하면 마그마성 폭발작용에 의해 형성된 낮은 분연주 붕괴로부터 밀집된 화쇄류가 속도가 느리게 이동하면서 유체화가 적고 화산회 손실이 적은 비팽창성 화쇄류로 정치된 것을 지시한다(Wilson, 1980). 이러한 화쇄류상은 대규모 분출에서 유래되었음을 암시한다.

(3) 유변상 응회암 및 라필리응회암은 전체적으로 분급되어 있지 않고 층리가 없다. 이 암상은 파리질 응회암에 속하지만 대부분 심히 용결되어 있어 마치 용암과 유사한 유변상 엽리를 나타낸다. 그리고 부석은 암회색이고 용결되면서 리본같이 길게 신장되고 결정과 암편 주위를 비껴가는 마치 비단결 같은 선구조를 형성한다(Fig. 4C).

이 암상은 조직적인 균질성, 강한 용결작용에 의하면 고온의 마그마에서 분출되어 속도가 느리고 유체화가 적으며 화산회 손실이 적은 비팽창성 화쇄류에 의해 정치된 것을 반영한다. 또한 유변상 엽리 및 선구조에 의하면, 이 화쇄류가 심하게 용결되면서 정치하기 직전에 유체상 흐름이 있었다는 것을 지시한다.

(4) 괴상 라필리응회암은 1.5~3 m 두께로 분급이 불량하고 괴상을 나타내며(Fig. 4D) 기저부에서 드물지만 가끔 역점이를 나타낸다. 라필리는 담회색 내지 회갈색의 세립질 화산회 기질에 의해 기질지지 되어 있으며 분급은 불량하다. 라필리들은 암편과 부석편으로 구성되어 있으며, 암편은 크기가 평균 4 mm 내외이고 최대 10 m 이상이며, 매우 약하지만 간혹 점이 현상을 나타낸다. 부석편은 회백색내지 담갈색을 띠며

Fig. 5. Features of lithofacies of surge and fallout tuffs in the Dongmakgol Tuff. (A) Stratified lapilli tuffs, exhibiting diffuse stratification due to lapilli alignment, associated with massive fine tuffs at the tops; (B) Graded bedded lapilli tuffs interbedded with massive fine tuffs at the tops; (C) Crudely bedded lapilli tuffs exhibiting diffuse stratification due to grain size contrast between layers; (D) Massive fine tuff visible in Y-shaped shards under plane light of a microscope.

평균 2~3 mm가 우세하며 최대 5 mm까지 발견된다.

이 암상은 불량한 분급, 암편의 정점이 변화, 하부의 역점이 변화 등에 의하면 화쇄류가 사면을 따라 암설류에 의해 정치되었음을 지시한다. 또한 상위에 나타나는 화산회 응회암층의 산출은 이동하는 화쇄류로부터 상공으로 이탈된 재구름에 의한 강하상을 지시한다.

(5) 성층화 라필리응회암은 주로 괴상 응회암 및 라필리응회암 아래에 나타난다. 이 암상은 회갈색 화산회의 기질 속에 부석과 암편으로 구성되는 파리질응회암이다. 암편은 평균 크기가 2 mm~4 mm가 우세하나 최대 15 mm까지 있다. 부석은 담황색 내지 담갈색을 나타내고 크기가 평균 2 mm 내외가 우세하며 신장된 모습을 거의 보여주지 않는다. 이 암상은 분급이 불량하지만 라필리 배열에 의해 성층화된 양상을 보이고(Fig. 5A) 기저부에서 역점을 보인다. 층간 경계는 입도차이가 미약하여 구분하기가 어렵지만 차별적 풍화도 차이에 의해 구분이 가능하다.

이 암상은 화쇄씨가 속도와 입자밀도가 일정하지 않은 부유와 견인에 의해 퇴적된 것 같다. 이러한 견인 퇴적의 결과로 인하여 라필리가 불연속적으로 배열된 것으로 생각된다.

(6) 점이층리 라필리응회암은 담청록색 혹은 회색 화산회의 기질 속에 부석과 암편으로 구성되는 파리질응회암이다. 라필리는 화산회 기질에 기질지지되어 있으며 분급은 불량하지만 층리를 발달시킨다. 이 암상은 그 두께가 2~10 cm 범위이고 단위층 내에서 입도에 의해서 종종 라필리응회암에서 조립에서 세립질 응회암으로 상향세립화하는 정점이 층리를 나타낸다(Fig. 5B).

이 암상이 정점이 현상을 보여주는 것은 큰 폭발에 의해 형성되는 높은 분연주로부터 발생하는 활발한 와류운동의 화쇄씨지에 의해 주로 부유 및 밀집 이동하는 라필리들이 화산회 입자들보다 빠르게 퇴적된 결과로 해석된다(Chough and Sohn, 1990; Branney and Kokelaar, 2002).

(7) 불량층리 라필리응회암은 향로봉 상부에 괴상 암편풍부 응회각력암 위에 분포한다. 이 암상은 층간의 입도 차이에 의한 희미한 층리를 보여주며(Fig. 5C) 단위층은 8~70 cm의 두께를 가지며 측방 연장성이 양호하다. 라필리들은 화산회 기질 속에 기질지지되어 있으며 분급이 불량하다. 라필리 입자들은 부석이 암편에 비해 훨씬 풍부하며, 풍화에 의해 부석이

튀어나와 있다. 부석은 대부분 회백색 내지 담회색을 띠며 2 mm~3 mm의 평균 크기를 보인다. 암편은 3 mm~4 mm가 우세하고 최대 25 mm까지이며 회색 및 핑크색이 보인다.

이 암상이 희미한 층리를 보여주는 것은 다소 높은 분연주의 붕괴로부터 발생하는 테프라가 급격히 낙하되어 퇴적되었거나 낙하 직후 짧은 거리를 이동하다 퇴적된 것으로 해석된다. 또한 풍화면에 부석이 튀어나와 있는 것은 부석이 유리질 성분이 포함되어 기질에 비해 풍화에 좀 더 강함을 지시한다.

(8) 괴상 세립질 응회암은 흔히 괴상 라필리응회암 혹은 성층화 라필리응회암 상위에 소규모로 얇게 놓인다. 담회색내지 갈회색을 띠고 세립 화산회로 구성되며 분급이 양호하다(Fig. 5A and B). 이 암상은 주로 괴상이나 희미한 층리를 발달시키고 경하에서 Y형 샤아드를 보여주는 것도 간혹 있지만(Fig. 5D), 대부분 블록형을 보여준다. 이 암상은 두께가 수cm 내외이고 상·하위의 다른 응회암과 관계가 점이적인 양상을 보이지 않는다. 그러나 측방으로 지속적이지만 첨멸되고 라필리응회암으로 전환된다.

이 암상이 세립질이고 괴상 및 성층화 라필리응회암 상위에 얇게 협재되고 그 하부 경계가 뚜렷하지 못한 것은 화쇄류 혹은 씨지에 결부되어 뒤따라 발생하는 재구름으로부터 화산회가 공중에서 대류하다 낙하되어 형성되는 재구름 강하응회암(ash cloud-fall tuff)임을 지시한다. 블록형 샤아드는 마그마성 폭발작용에 의하기보다 수증기마그마성 폭발에 의해 형성된 것으로 해석된다.

각 암층 단위의 암상 조합

동막골응회암은 대부분 화쇄류암으로 구성되지만, 중부와 상부에 층상응회암과 조합되어 있어서 하·중·상부 화쇄류암층(LI, MI, UI)과 하·상부 층상응회암층(LT, UT)으로 구분된다(Fig. 2; Hwang, 2013). 그리고 상부 층상응회암층(UT)은 중간에 응회각력암이 협재되어 있어서 이의 하부층(IUT)과 상부층(uUT)으로 세분된다(Fig. 3). 따라서 이들을 기준으로 6개의 암층 단위로 구분할 수 있다.

하부 화쇄류암층(LI)

이 암층 단위는 최고 약 260 m 두께로 용결 응회암 및 라필리응회암, 유변상 응회암 및 라필리응회암,

괴상 라필리응회암으로 구성되며 전자가 훨씬 우세하게 산출된다(Fig. 2). 층간 경계는 각 층의 입도차이가 미약하여 명확하게 구분하기 힘들다. 괴상 라필리응회암은 이 암층 단위의 하부에 가끔 협재되고 유변상 응회암 및 라필리응회암은 중부에 협재되어 있다.

괴상 라필리응회암은 다소 높이 솟은 분연주 봉괴에 의한 화쇄류로부터 발생한 것이고, 용결 응회암 및 라필리응회암은 연달아 발생하던 고농집 화쇄류가 사면을 따라 이동하다가 빠른 정치로 말미암아 연속적으로 형성된 결과이다. 이때 화쇄류는 연속적으로 두껍게 집적되면서 부석들이 쉽게 유착될 정도로 고온일 경우에 부석들이 용결되었고, 특히 사면으로 이동하던 화쇄류는 부석들이 신장되어 유변상 응회암 및 라필리응회암을 형성하였던 것으로 보인다. 이때 화쇄류는 고농집이고 활성적이지 않아 상공으로 발생하는 재구름이 미미하였거나 화쇄류가 연속적으로 발생하여 공중에서 대류하던 화산회가 낙하하지 못하였음을 암시한다.

하부 총상응회암층(LT)

이 암층 단위는 성산 단면에서 약 6m이고 종자산 단면에서 약 2m로 산출된다. 이 암층 단위는 주로 성층화 라필리응회암, 점이층리 라필리응회암, 괴상 라필리응회암과 괴상 세립질 응회암으로 구성된다(Fig. 3). 그리고 괴상 세립질 응회암은 성층화 라필리응회암, 점이층리 라필리응회암과 괴상 라필리응회암의 상위에서 제한적으로 산출되며 괴상 라필리응회암은 이 암층 단위의 상부에서 나타난다.

제한적인 점이층리 라필리응회암은 화쇄씨지에 의해 주로 부유 및 밀집 이동하는 라필리들이 화산회 입자들 보다 빠르게 퇴적된 결과이다. 성층화 라필리응회암은 분연주로부터 발생하는 화쇄씨가 속도와 입자밀도가 일정하지 않은 부유와 견인에 의해 퇴적된 결과이며 견인 퇴적의 결과로 인하여 라필리가 불연속적으로 배열되어졌다. 괴상 라필리응회암은 다소 높이 솟은 분연주 봉괴로부터 발생한 화쇄류의 빠른 정치로 말미암아 형성된 것이다. 이때 화쇄씨지 혹은 화쇄류로부터 상공으로 발생하는 소규모 재구름에서 세립질 화산회가 낙하하여 괴상 세립질 응회암을 형성하기도 하였다.

중부 화쇄류암층(MI)

이 암층 단위는 최고 약 230 m 두께를 가지며 주

로 괴상 라필리응회암, 용결 응회암 및 라필리응회암, 유변상 응회암 및 라필리응회암으로 구성된다(Fig. 2). 용결 응회암 및 라필리응회암이 절대적으로 우세하며, 유변상 응회암 및 라필리응회암은 이 중부 화성쇄설암층 중부의 두 층준에서 국부적으로 협재한다(Hwang, 2013). 그리고 괴상 라필리응회암은 이 암층 단위의 하부에서 가끔 제한적으로 산출된다.

괴상 라필리응회암은 다소 높이 솟은 분연주 봉괴에 의한 화쇄류로부터 발생한 것이고, 그리고 고농집 화쇄류가 연속적으로 발생하여 이들의 빠른 정치로 말미암아 연속적인 용결 응회암 및 라필리응회암을 두껍게 형성하고 대부분 용결되었으며, 사면에서 고온의 화쇄류는 심하게 용결되면서 신장되어 유변상 응회암 및 라필리응회암이 형성되었던 것이다.

상부 총상응회암층의 하부층(IUT)

이 암층은 향로봉 단면에서 약 11 m로 산출된다. 이 암층 단위는 주로 성층화 라필리응회암, 점이층리 라필리응회암과 괴상 세립질 응회암으로 구성된다(Fig. 3). 그리고 괴상 세립질 응회암은 성층화 라필리응회암, 점이층리 라필리응회암의 상위에서 제한적으로 산출된다.

점이층리 라필리응회암은 화쇄씨지에 의해 주로 부유 및 밀집 이동하는 라필리들이 화산회 입자들 보다 빠르게 퇴적된 결과이다. 성층화 라필리응회암은 분연주로부터 발생하는 화쇄씨가 속도와 입자밀도가 일정하지 않은 부유와 견인에 의해 퇴적된 결과로 라필리가 불연속적으로 배열되어졌다. 이때 화쇄씨지로부터 상공으로 발생하는 소규모 재구름에서 세립질 화산회가 낙하하여 괴상 세립질 응회암을 형성하기도 하였다.

상부 총상응회암층의 상부층(uUT)

이 암층 단위는 향로봉 단면에서 27 m 두께이고 괴상 응회각력암, 불량층리 라필리응회암, 괴상 라필리응회암과 괴상 세립질 응회암으로 구성된다(Fig. 3). 괴상 응회각력암은 이 상부층 단위의 하부에서 산출되고, 이 상위에 불량층리 라필리응회암에 의해 덮이며, 후자의 상위에 괴상 라필리응회암이 협재된다.

이 암층 단위에서 괴상 응회각력암이 하부에서 나타나는 것은 아마도 새로운 화구개시 혹은 화구확장을 의미하며, 짧은 화산휴지기 후에 다시 시작되는 화산활동을 의미한다. 이 괴상 응회각력암은 다양한

테프라의 화쇄류가 사면을 따라 암설류로 정치되었음을 지시한다. 이때 보다 강력한 폭발력은 분연주를 높게 치솟게 하여 높은 분연주의 붕괴로부터 발생하는 테프라가 급격히 낙하되고 낙하 직후 짧은 거리를 이동하다 불량층리 라필리웅회암을 형성한 것이다. 그리고 후기에 화쇄류가 간헐적으로 발생하여 괴상 라필리웅회암을 가끔 형성하였다.

상부 화쇄류암층(UI)

이 암층 단위는 향로봉 단면에서 최고 약 130 m 두께를 가지며, 나머지 대부분이 용결 응회암 및 라필리웅회암으로 구성되고 하부에 괴상 라필리웅회암이 가끔 협재된다(Fig. 2).

초기에 화쇄류가 간헐적으로 발생하여 괴상 라필리웅회암을 가끔 형성하였고, 점차 방출률이 증가되어 고농집 화쇄류가 연속적으로 발생하여 이들의 빠른 정치로 말미암아 연속적인 괴상 응회암 및 라필리웅회암을 두껍게 형성한 것이다. 이 화쇄류는 마그마성 폭발작용에 의해 형성된 낮은 분연주 붕괴로부터 발생하여 느리게 이동하면서 유체화가 적고 화산회 손실이 적은 비팽창성 화쇄류로 정치되었다.

토 의

분출유형

플리니언 및 수증기플리니언 분출: 동막골응회암은 대부분 화쇄류암으로 구성되지만, 하부 층상응회암층 단위(LT)와 상부 층상응회암층의 하부층 단위(IUT)에는 주로 성층화 라필리웅회암, 점이층리 라필리웅회암, 괴상 세립질 응회암 등이 협재되어 있다. 성층화 라필리웅회암과 점이층리 라필리웅회암은 화쇄씨지에 의해 발달한 것이고 괴상 세립질응회암은 이 화쇄씨지에 결부되는 강하응회암이며 이 화쇄씨지는 수증기 플리니언 분출(phreatoplinian eruption)에 의해 형성되는 것으로 생각된다.

상부 층상응회암층의 상부층 단위(uUT)에는 괴상 응회각력암, 불량층리 라필리웅회암, 괴상 세립질 응회암 등이 협재되어 있다. 불량층리 라필리웅회암은 희미한 층리를 발달시키고 화산회의 기질 속에 다량의 부석을 포함하는 점에 의하면 플리니언 분출(plinian eruption)에 의해 형성된 것으로 생각된다.

일반적으로 마그마는 자체가 보유한 잠재적인 증기압(P_{H_2O})이 주변 암압(P_{rock})보다 작으면 비폭발성 분출

작용(non-explosive eruption)을 일으킬 수 있으며, 외부물의 유입없이 자체 증기압이 주변 암압보다 클 때는 마그마성 폭발작용(magmatic explosion)을 일으킬 수 있고 외부물의 유입에 의해 증기압이 증가하면 수증기마그마성 폭발작용(phreatomagmatic explosion)을 일으킬 수 있다(Cas and Wright, 1987). 따라서 철원분지에서 동막골응회암은 모든 화산작용 단계마다 화도로 상승하는 마그마가 그 증기압이 주변의 암압보다 컸던 관계로 맹렬한 마그마성 폭발작용을 유도하였다.

폭발작용은 그 강도가 증기 및 후기 화산작용 단계의 초엽에 가장 컸던 것으로 보인다. 이때 폭발작용은 매우 강렬한 분출로 높은 수증기플리니언 분연주를 형성하였다. 이 분연주로부터 화쇄씨지가 발생하여 측방으로 이동하면서 성층화 라필리웅회암과 점이층리 라필리웅회암을 연속적으로 퇴적시켰다. 후기 화산작용 단계에는 뒤따라 부석이 풍부한 테프라를 낙하시키는 플리니언 분출을 야기했다. 이 분연주로부터 다소 밀집된 테프라가 화구 근처에 무더기로 퇴적되었거나 낙하 직후에 암설류로서 짧은 거리를 이동함으로써 불량층리 라필리웅회암을 퇴적시켰다. 그리고 세립질 화산회가 공중으로 높게 이동하여 플룸(plume) 속에서 체공하다가 낙하됨으로서 괴상 세립질 응회암을 퇴적시켰다.

화쇄류형성 분출: 플리니언 분출은 초기에 강하 분출상으로부터 강하응회암을 형성시키고 수증기플리니언 분출은 씨지 분출상으로부터 씨지응회암을 형성시키지만, 중국적으로 화쇄류형성 분출(pyroclastic flow-forming eruption)로 전환되어 괴상 라필리웅회암을 형성시켰다. 이와 같이 플리니언 분출 혹은 수증기플리니언 분출은 강하상 혹은 씨지상에서 화쇄류상 분출로 전환된다는 것은 매우 흔하게 나타나는 분출현상이다(Self and Rampino, 1981). 강하상 혹은 씨지상에서 화쇄류상으로의 전환은 방출물의 큰 증가를 일으키고(Bursik and Woods, 1996), 흔히 많은 암편을 수반할 수 있다(Wright and Walker, 1977; Aramaki, 1984; Druitt, 1985; Druitt and Bacon, 1986; Rosi *et al.*, 1996). 이러한 전환은 계속되는 화산활동으로 화도가 넓어져 순간적으로 분연주가 붕괴됨으로서 다량의 화쇄류로 전환되는데 그 원인이 있다. 이때의 마그마 방출률은 대류상 분연주(convective column)를 유지하는데 필요한 방출률보다 월등히 커졌을 것이다. 화도 확장에 대한 단적인 증거는 각 화산작용 단계의

초엽에 응회각력암 혹은 라필리응회암 내에 다소 풍부한 암편들의 존재로부터 유추할 수 있다.

또한 본격적인 화쇄류 분출 초기에는 분연주 봉괴가 수차례 반복되었다고 본다. 왜냐하면 동막골응회암의 하부 및 상부 층상응회암층 단위(LT, UT)에서 여러 라필리응회암들이 세립질 응회암과 교호하기 때문이다. 이때 괴상 응회각력암은 다소 큰 폭발에 의해 형성된 다소 높은 분연주 봉괴로부터 밀집된 테프라가 화쇄류로 정치된 것을 지시한다. 암편들이 약한 점이현상을 보이는 것은 약하게 유체화되었음을 의미하며, 화산회 기질이 풍부한 것은 유체화가 강하지 않아 화산회의 이탈이 적었다는 것을 나타낸다. 그러므로 이 암상은 다소 큰 폭발에 의한 다소 높은 분연주 봉괴로부터 발생하는 밀집된 테프라가 다소 유체화된 화쇄류로부터 정치된 것을 지시한다. 그러나 상부로 가면서 용결되는 것은 분연주의 높이가 점점 낮아지고 방출량이 점차 증가되었다는 것을 지시한다.

끓어넘침 분출: 동막골응회암에서 각 화쇄류암층 단위(LI, MI, UI)에서 큰 용적으로 산출되는 용결 응회암 및 라필리응회암이 분급되지 않고 대부분 용결열리를 발달시키는 것은 화쇄류에 의해 정치되었음을 지시한다. 이 암상은 각 화쇄류암층 단위의 전반에 걸쳐 재구름 강하응회암이 조합되어 있지 않는데, 이는 가까운 분출중심지에서 재구름의 강하를 허용할 만한 시간적 여유조차 없는 연속적 분출이었음을 반영한다.

Sparks *et al.*(1973)에 의하면 화쇄류의 본체에 해당되는 화쇄류상(layer 2)은 기저부에 지면찌지에 의한 찌지상(layer 1)과, 상단부에 재구름으로부터의 강하상(layer 3)이 조합되어 있다. 하지만 찌지상과 강하상은 매우 얇고 드물게 산출되기 때문에 발견하기가 매우 어렵다. 그런데 강하응회암이 없는 화쇄류암은 매우 짧은 시간차로 화쇄류가 연속적으로 일어나 미처 재구름으로부터 강하회가 퇴적될 여유가 없었거나 혹은 분화구와 가까이에서 속도가 빠른 강력한 화쇄류에 의해 깔여나갈 수도 있었기 때문일 것이다.

화쇄류의 흐름기구는 부분적으로 유체화 흐름(fluidized flow)을 나타내고(Sparks, 1976), 큰 암편들이 세립 화산회와 가스에 의해 운반된다. 화쇄류는 유체화 거동을 기초로 하면 비팽창류(non-expanded flow), 팽창류(expanded flow), 분리류(segregating flow) 등의 3 유형으로 나뉜다(Wilson, 1980). 동막골응회암에서 각 화쇄류암층 단위는 대부분 비팽창류

에 의해서 정치된 것으로 생각된다. 왜냐하면 동막골응회암에서 대부분 화쇄류암들은 조직적인 균질성, 큰 두께와 심한 용결열리를 보여줄 뿐만 아니라 암편의 정점기와 부석의 역점이 현상이 거의 관찰되지 않고 각 암층의 최상부를 제외하고 재구름 속으로 이탈된 세립질 화산회의 강하층이 나타나지 않기 때문이다. 이 점이현상과 재구름 강하층은 화쇄류의 팽창 정도가 클 때 기질과의 밀도차가 클수록 심하게 나타난다.

이러한 화쇄류상은 맹렬하지 않은 대규모 분출에서 유래되었음을 암시하며, 이때의 분출은 폭발성이 약하게 연속적으로 일어나는 끓어넘침 분출(boiling-over eruption)이었다고 생각된다. 이 분출이 일어날 때는 재구름이 거의 발생하지 않는 반복적인 화쇄류의 범람에 의해 큰 용적의 화쇄류암을 형성시킨다. 이러한 반복적인 화쇄류가 두껍게 집적됨으로서 고온의 열이 오래 유지되었고 이로 인해 강한 용결작용이 일어날 수 있었을 것이다.

그리고 마그마챔버의 비교적 깊은 곳에서 매우 높은 온도의 마그마가 상승하여 끓어넘침 분출을 일으켰다면, 이때 화쇄류는 유체화가 적은 고온의 비팽창성 화쇄류를 발생시켰을 것이다. 따라서 이 비팽창성 화쇄류는 심하게 용결되면서 사면을 따라 유체상 흐름을 일으킴으로서 유변상 응회암 및 라필리응회암을 형성했을 것이다.

분출과정 해석

동막골응회암은 각 암층 단위의 암상 구성원로부터 분출유형을 알 수 있었고, 상부로 가면서 암층 단위에 따른 암상변화로부터 이들의 분출과정을 알아낼 수 있다. 이 동막골응회암은 상부로 가면서 암층 단위를 묶는다면 하부 화성쇄설암군(LI), 중부 화성쇄설암군(LT+MI), 상부 화성쇄설암군(IUT+uUT+UI)으로 구분되며 이들에 대응하여 전·중·후기 화산작용 단계로 나타낼 수 있다. 이 화산작용 단계들은 대체로 (1) 폴리니언 혹은 수증기폴리니언 분출, (2) 화쇄류 혹은 찌지형성 분출, (3) 끓어넘침 분출의 순서로 연속적인 화산작용을 일으켰음을 나타낸다.

중기 화산작용의 초엽은 외부물의 유입에 의한 수증기폴리니언 분출로 높은 분연주를 형성하였다. 이 분연주 봉괴로부터 화쇄찌지가 발생하여 성층화 라필리응회암과 점이층리 라필리응회암을 연속적으로 퇴적시켰다. 이 수증기폴리니언 분출은 외부물의 급격한 감소 혹은 화구반경 확장 등에 의하여 분연주가

과적되어 붕괴됨으로서 화쇄류를 생성하게 되어 화쇄류형성 분출로 전환되었다.

그리고 후기 화산작용의 초엽은 위의 수증기플리니언 분출을 뒤따라 외부물의 급격한 감소와 화구반경 확장 등에 의하여 플리니언 분출로 전환되었다. 이때 화구 확장으로 먼저 괴상 응회각력암을 형성하였으며, 뒤따라 플리니언 분연주로부터 부석이 풍부한 테프라가 반복적으로 낙하됨으로서 불량층리 라필리옹회암을 연속적으로 퇴적시켰고, 보다 밀집된 테프라가 무더기로 낙하됨으로서 불량층리 라필리옹회암을 퇴적시켰다. 이 플리니언 분출은 가스함량 감소 혹은 화구 확장 등에 의하여 분연주가 과적되어 붕괴됨으로서 화쇄류를 생성하게 되어 화쇄류형성 분출로 전환되었다.

그러나 모든 화쇄류형성 분출은 반드시 초기 플리니언상을 가지지는 않는다(Francis *et al.*, 1983). 동막골응회암의 하부 화성쇄설암층에서 써지상 혹은 강하상이 발견되지 않으므로 전기 화산작용의 초엽에는 플리니언 분출 없이 화쇄류상으로 시작되었다고 생각할 수 있다. 그렇지만 전기 화산작용에는 써지상 혹은 강하상이 화쇄류상으로 덮여서 발견되지 않을 수도 있다.

각 화산작용 중엽 및 후엽은 높은 분연주 붕괴에 의한 화쇄류는 점차 뿔어넘침 분출에 의한 화쇄류로 전환되었다. 뿔어넘침 분출로의 전환은 마그마 방출률이 급격히 증가되었기 때문이며, 이 방출률 증가는 아마도 화도의 점진적인 확대로부터 기인되었다. 따라서 이때 분출은 분연주가 거의 형성되지 않고 뿔어넘침 분출로 전환되어 다량의 화쇄류를 일으켰다. 이때의 마그마 방출률은 분연주를 유지하는데 필요한 방출률보다 월등히 컸을 것이다.

따라서 각 화쇄류암층 단위의 하부에는 암편들이 비교적 많은 편이지만 중·상부에는 암편들이 급격히 줄어들고 그 크기도 매우 작은 편이다. 암편들이 적기 때문에 각 암층의 중·상부에는 각 흐름단위 간의 경계를 인지하기 매우 어려운 뿐만 아니라 대부분 강한 용결엽리를 형성하였으며 심지어 유변상 선구조를 형성하였다. 하지만 상부 화성쇄설암층에는 유변상 선구조가 발견되지 않는다.

이러한 고도 용결응회암을 형성하려면 고온 마그마로부터 낮은 분연주의 붕괴에 의해 화쇄류의 속도가 느렸고 유체화 정도가 적은 비팽창성 화쇄류이었으며 이들이 단기간에 두껍게 집적되었다. 왜냐하면 고온

의 화쇄류가 연속적으로 생성되어야만 범람할 때 열손실을 막을 수 있기 때문이다. 이렇게 낮은 분연주 높이는 분출시에 가스 함량이 적고 가스 확산속도가 적으면서 마그마 방출률이 매우 컸어야만 가능하다. 이런 상태에서 화쇄류는 덜 퍼져 나가고 세립질 화산회의 손실도 적었다. 이러한 화쇄류는 맹렬하지 않은 대규모 분출에서 유래되었으며, 이때의 분출은 거의 폭발성이 없이 연속적으로 일어나는 뿔어넘침 분출이었다. 이 분출은 재구름이 거의 발생하지 않는 반복적인 화쇄류의 범람에 의해 큰 용적의 화쇄류암만을 형성할 수 있었고 강하응회암이 퇴적될 여유를 주지 않았다.

결론

동막골응회암은 대부분 화쇄류암으로 구성되며 국부적으로 층상응회암이 얇게 협재되어 있다. 입도와 퇴적구조에 따라 암상을 분류하면 (1) 괴상 응회각력암, (2) 용결 응회암 및 라필리옹회암, (3) 유변상 응회암 및 라필리옹회암이 있고 (4) 괴상 라필리옹회암, (5) 성층화 라필리옹회암, (6) 점이층리 라필리옹회암, (7) 불량층리 라필리옹회암과 (8) 괴상 세립질 응회암이 있다.

성층화 라필리옹회암과 점이층리 라필리옹회암은 높은 분연주의 붕괴로 인한 화쇄뿌리를 발생시키는 수증기플리니언 분출에 의해 형성되었다. 불량층리 라필리옹회암은 매우 강렬한 폭발작용으로 부석이 풍부한 테프라를 낙하시키는 플리니언 분출에 의해 형성되었다. 그리고 용결 응회암 및 라필리옹회암과 유변상 응회암 및 라필리옹회암은 마그마 방출률의 급격한 증가로 인해 대체로 분연주가 거의 발생하지 않고 폭발성이 약하게 연속적으로 일어나는 뿔어넘침 분출에 의해 형성되었다.

이 암상들은 상하로 3개 화성쇄설암군으로 구별하여 조합할 수 있다. 하부 화성쇄설암군(LI)은 괴상 라필리옹회암, 용결 응회암 및 라필리옹회암과 유변상 응회암 및 라필리옹회암으로 조합되며, 주로 뿔어넘침 분출에 의한 화쇄류로부터 정지된 것이다.

중부 화성쇄설암군(LT+MI)에서 하부 층상응회암층 단위(LT)는 점이층리 라필리옹회암, 성층화 라필리옹회암, 괴상 라필리옹회암과 이들에 조합된 괴상 세립질 응회암으로 구성되고, 중부 화쇄류암층 단위(MI)는 괴상 라필리옹회암, 용결 응회암 및 라필리옹회암

과 유변상 응회암 및 라필리응회암으로 조합된다. 이들은 외부물의 소량 유입으로 수증기마그마성 분출에 의한 화쇄썩지로 시작하여 화쇄류형성 분출을 거쳐 끓어넘침 분출의 화쇄류로 전환되었다.

상부 화성쇄설암군(IUT+uUT+UI)에서 상부 층상응회암의 하부층 단위(IUT)는 점이층리 라필리응회암, 성층화 라필리응회암과 이들에 조합된 괴상 세립질 응회암으로 구성되고, 상부층 단위(uUT)는 괴상 응회각력암, 불량층리 라필리응회암, 괴상 라필리응회암과 괴상 세립질 응회암으로 조합되며, 상부 화쇄류암층 단위(UI)는 괴상 라필리응회암, 용결 응회암 및 라필리응회암으로 조합된다. 이들은 수증기플리니언 분출에 의한 썩지상으로 시작해서 플리니언 분출에 의한 강하상을 거쳐 끓어넘침 분출로 전환되어 화쇄류로부터 퇴적된 것이다.

결론적으로 동막골응회암에서 분출과정은 전·중·후기 화산작용 단계별로 대체로 수증기플리니언 및/혹은 플리니언 분출, 끓어넘침 분출의 순서로 진행되었다. 각 화산작용 단계 중엽 및 후엽은 마그마 방출률의 급격한 증가로 높은 분연주 붕괴에 의한 화쇄류가 점차 끓어넘침 분출에 의한 비팽창성 화쇄류로 전환되었다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2010-0009118)의 결과임을 밝힌다. 원고의 부족한 면을 채우고 건설적인 유익한 조언을 해주신 두 분의 심사위원, 편집위원과 편집위원장께 감사를 드린다. 그리고 야외작업에 동행한 안동대 화산학실험실 여러 멤버들의 도움이 있었다.

참고문헌

- Aramaki, S., 1984, Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, ~22,000 years ago. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8485-8501.
- Branney, M.J. and Kokelaar, P., 2002, Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. London, The Geological Society Memoir 27, 143p.
- Bursik, M.I. and Woods, A.W., 1996, The dynamics and thermodynamics of large ash flows. *Bulletin of Volcanology*, 58, 175-193.
- Cas, R.A.F., Landis, C.A. and Fordyce, R.E., 1989, A monogenetic, Surtla-type, Surtseyan volcano from the Eocene-Oligocene Waiareka-Deborah volcanics, Otago, New Zealand: a model. *Bulletin of Volcanology*, 51, 281-298.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic successions. Allen & Unwin, London, 528.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 1990, Depositional mechanics and sequences of base surges, Songaksan tuff ring, Cheju Island, Korea. *Sedimentology*, 37, 1115-1135.
- Druitt, T.H., 1985, Vent evolution and lag breccia formation during the Cape Riva eruption of Santorini, Greece. *Journal of Geology*, 93, 439-454.
- Druitt, T.H., 1992, Emplacement of the 18 May 1980 lateral blast deposit ENE of Mount St. Helens, Washington. *Bulletin of Volcanology*, 54, 554-572.
- Druitt, T.H. and Bacon, C.R., 1986, Lithic breccia and ignimbrite erupted during the collapse of Crater Lake caldera, Oregon. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29, 1-32.
- Druitt, T.H. and Sparks, R.S.J., 1985, On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. *Nature*, 310, 679-681.
- Fisher, R.V., 1990, Transport and deposition of a pyroclastic surge across an area of high relief: the 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 1038-1054.
- Fisher, R.V. and Schmincke, H.-W., 1984, Pyroclastic rocks. Springer, Heidelberg, 472p.
- Francis, P.W., O'Callaghan, L., Kretzchmar, G.A., Thorpe, R.S., Sparks, R.S.J., Page, R.N., de Barrio, R.E., Gillou, G. and Gonzalez, O.E., 1983, The Cerro Galan ignimbrite. *Nature*, 301, 51-53.
- Hwang, S.K., 2013, Welding and crystallization facies, and cooling processes of the Dongmakgol Tuff in the Cheolwon Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 101-119.
- Hwang, S.K., An, Y.M. and Yi, K., 2011, SHRIMP age datings and volcanism times of the igneous rocks in the Cheolwon Basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 231-241.
- Hwang, S.K. and Kim, J.H., 2010, Flow directions and source of the Dongmakgol Tuff in the Cheolwon Basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 51-65.
- Hwang, S.K., Kim, S.H., Hwang, J.H. and Kee, W.S., 2010, Petrotectonic setting and petrogenesis of Cretaceous igneous rocks in the Cheolwon Basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 71-91.
- Hwang, S.K. and Ryu, H.Y., 2011, Volcanic processes of the Cretaceous ignimbrites, Cheolwon Basin: Magmatic processes of the Dongmakgol Tuff. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 647-664.
- Kee, W.-S., Lim, S.-B., Kim, H., Hwang, S.K., Song, K.-Y.

- and Kihm, Y.-B., 2008, Geological report of the Yeoncheon Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 83p.
- Rosi, M., Vezzoli, L., Aleotti, P. and De Censi, M., 1996, Interaction between caldera collapse and eruptive dynamics during Campanian Ignimbrite eruption, Phlegrean Fields, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 57, 541-554.
- Self, S. and Rampino, M.R., 1981, The 1883 eruption of Krakatau. *Nature*, 294, 699-704.
- Sparks, R.S.J., 1976, Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. *Sedimentology*, 23, 147-188.
- Sparks, R.S.J., Self, S. and Walker, G.P.L., 1973, Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, 1, 115-118.
- Valentine, G.A., 1987, Stratified flow in pyroclastic surges. *Bulletin of Volcanology*, 49, 616-630.
- Wilson, C.J.N., 1980, The role of fluidisation in the emplacement of pyroclastic flows: An experimental approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8, 231-249.
- Wright, J.A. and Walker, G.P.L., 1977, The ignimbrite source problem: significance of a co-ignimbrite lag-fall deposits. *Geology*, 5, 729-732.
-
- 2013년 2월 28일 접수
 2013년 3월 14일 심사개시
 2013년 3월 26일 채택