

## 철원분지 동막골응회암의 용결상 및 결정화상과 냉각과정

황상구

안동대학교 지구환경과학과

### 요약

철원분지 동막골응회암은 두 층수에 얇은 층상응회암을 협재하는 대규모 화쇄류암층으로 구성되며 Rb-Sr 연령측정에서  $103.1 \pm 3.2$  Ma의 등시선이 구해졌다. 이 암층은 그 층준을 따라 비용결대 혹은 부분용결대를 갖는 하나의 복합 냉각단위의 많은 특징을 설명해준다. 여러 계곡을 따라 두드러진 노두는 용결도, 결정화의 차이에 따라 수직 및 수평 변화를 나타내며 이 변화로부터 화쇄류암층의 내부를 여러 용결대와 결정화대로 나눌 수 있다. 동막골응회암은 이들에 의해 분대하면 비용결대, 부분용결대, 치밀용결대와 유변상대 등의 용결대로 나뉘고 이 용결대에 파리질대, 탈파리대와 기체상 결정화대가 겹쳐진다. 각 화쇄류암층 내에서 용결대는 일반적으로 외곽부 비용결대, 중간부 부분용결대, 내부 치밀용결대로 나뉘고 치밀용결대 혹은 이와 부분용결대 경계부에 유변상대가 발달된다. 결정화대는 대체로 부분용결대와 치밀용결대에 탈파리대가 겹치고 부분용결대와 치밀용결대의 경계부에 국부적으로 기체상 결정화대가 겹쳐지며 외곽부에 파리질대로 남아있다. 이 응회암에서 냉각과정은 용결작용이 정치 때와 후에 먼저 일어났고 초기 결정작용이 용결작용에 뒤따라 파리질 물질을 탈파리화를 일으켰으며, 후기 기체상 결정작용이 국부적으로 탈파리대를 중첩하여 발달되었다.

**주요어:** 복합 냉각단위, 용결대, 유변상대, 결정화대, 냉각과정

**Sang Koo Hwang, 2013, Welding and Crystallization Facies, and Cooling Processes of the Dongmakgol Tuff in the Cheolwon Basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 1, p. 73-91**

**ABSTRACT:** The Dongmakgol Tuff, dated to be  $103.1 \pm 3.2$  Ma by Rb-Sr method, consists of voluminous ignimbrites with intercalations of thin bedded tuffs in two horizons. It illustrates many features of a compound cooling unit with nonwelding or partial welding zones along the horizons. Noticeable exposures along the valleys and cliffs exhibit vertical and horizontal changes in degree of welding and crystallization, from which the ignimbrites can be divided into several welding and crystallization zones. The welding zones in two ignimbrites are generally divided into outer nonwelding zones, middle partial welding zones and inner dense welding zones, and rheomorphic zones between the partial and dense welding zones. Thick devitrified zones commonly overprint much portion of the dense and partial welding zones, whereas thin vapor-phase crystallization zones locally develop in the contact of the partial welding zones with dense welding zones. Welding in the Dongmakgol Tuff initiated during and after emplacement of pyroclastic flows. Early crystallization followed welding to devitrify the vitric tuffs and later vapor-phase crystallization locally occurred to overprint the devitrified zones.

**Key words:** Compound cooling unit, Welding zone, Rheomorphic zone, Crystallization zone, Cooling process

(Sang Koo Hwang, Department of Earth & Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

### 1. 서 언

화쇄류암(ignimbrite)은 화성쇄설물의 분출작용, 흐름작용, 정치작용을 포함하고, 뒤따라 유리질 물

질의 탈가스작용, 용결작용(welding)이 일어나는 복잡한 화산과정 순서의 마지막 산물이다. 용결작용은 고온 유리질 화산물질이 유리전이온도 위의 온도에서 소결작용(sintering), 다짐작용(compaction)과

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

편평화작용을 일으키는 물리-화학적 과정이다(예, Smith, 1960a; Ross and Smith, 1961; Cas and Wright, 1987). 용결작용은 화산과정의 전반에 걸쳐 나타날 수 있지만, 화쇄류층에서 가장 흔하게 산출되고(예, Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith, 1961; Ragan and Sheridan, 1972; Streck and Grunder, 1995) 용결 양상을 가장 특징적으로 나타낸다.

냉각단위(cooling unit)는 한 개 이상의 화쇄류단위(pyroclastic flow unit)가 연속적으로 급속히 정치되어 냉각작용과 용결작용이 현저하게 한꺼번에 일어나는 화쇄류단위들의 한 묶음을 말한다(Smith, 1960b). 이러한 단위의 냉각과정은 한결 같거나 연속적인 정치에 의해 약간의 단절이 있을 수도 있다. 그러나 이 냉각과정은 한 화쇄류단위가 다른 화쇄류단위 위에 정치되기 전에 완전히 냉각될 정도로 단절되지는 않는다. 그래서 이 냉각단위가 여러 개 존재하는 대규모 화쇄류지역에서 층서를 나누는데 유용하게 쓰일 수 있다.

화쇄류암으로 구성되는 냉각단위는 같은 단순한 용결변화를 보여주는 화쇄류암체를 단순 냉각단위(simple cooling unit)로 분류된다(Smith, 1960b). 이러한 단위에서 용결변화는 일정한 온도로 정치하는 화쇄류암체의 냉각에 대한 이론적 해석으로부터 예상될 수 있다(Riehle, 1973). 그러나 얼마의 화쇄류암체는 여러 개의 치밀용결대(dense welding zone)와 부분용결대(partial welding zone)를 가지는 경우도 있다. 이러한 화쇄류암체는 복합 냉각단위(compound cooling unit)로 분류된다(Smith, 1960b). 이에 의하면 화쇄류암체의 초기 흐름단위의 상부는 후기 흐름단위가 정치하기 전에 부분적으로 혹은 전체적으로 냉각되었음을 암시한다.

화쇄류암에서 용결작용과 결정작용의 강도에 따라 나타나는 암대와 누대변화(zonal variation)가 기재되기 시작하였다(Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith, 1961; Streck and Grunder, 1995). 그러나 한 반도 화산암류 중에는 화쇄류암이 많지만 이들에 대해 냉각단위 별로 용결대와 결정화대에 대해 논의된 바가 거의 없다.

철원분지 동막골응회암은 용결작용과 결정작용이 우수하게 보존된 암상으로 표현될 수 있으며, 비용결대에서부터 치밀용결대와 거의 용암에 가까운 유변상대까지의 다양한 특징을 나타내는 냉각단위

이다. 이 냉각단위는 대부분 유문암질 조성의 화쇄류들로 구성되며 기저와 상단에서 비용결대(nonwelding zone)로부터 시작하는 것이 모든 화쇄류암체에서 일반적이지만 중간에 비용결대가 두 군데 존재하는 복합 냉각단위의 좋은 예이다. 이 냉각단위는 비용결대에서 내부로 가면서 대체로 부분용결대와 치밀용결대로 전이되며 유변상대(rheomorphic zone)가 치밀용결대 내와 치밀 및 부분용결대에 걸쳐서 존재한다. 그러나 이 응회암층의 전반에 걸쳐서 치밀용결대가 상대적으로 두꺼운 것은 개별회류가 고온이었다는 것을 나타낸다.

이 화쇄류암체의 암석기록에서 용결작용과 결정작용이 다양한 유형과 넓은 범위에 걸쳐 일어나는 사실은 화쇄류암의 냉각과정에서 용결작용과 결정작용이 화산학에서 흥미있고 중요한 과정이라는 것을 암시해준다. 따라서 이 연구는 동막골응회암에 대해 용결상과 결정화상을 분대하고 이들의 수직변화와 수평변화에 초점을 맞추어 그 냉각과정을 추론하는 것이 주 목적이다.

이 연구에서 용결작용과 결정작용에 필요한 조건을 이해하기 위해 야외작업과 실내작업을 동시에 이용한다. 표본은 이 냉각단위를 횡단하는 수직단면에서 두위부에서부터 중위부로 가면서 채취하였으며 표준박편을 제작하였다. 이 자료로부터 용결대, 결정화대를 구분하는 단면도를 작성하였다.

## 2. 지질개요

철원분지는 강원도 서부 철원과 경기도 북동부 전곡 사이에서 동두천단층과 동송단층 사이에 위치한다. 이 철원분지에는 고생대 연천층군에 해당하는 변성퇴적암류의 기반암 위에 퇴적암류와 화산암류로 구성되는 철원층군으로 채워져 있으며 그 중에서 화산암류가 훨씬 우세하다. 화산암류는 주로 현무암질에서 유문암질의 용암류(lava flow)와 화산쇄설암(volcaniclastic rock)으로 구성된다.

철원층군의 층서단위는 바닥 부분에 회색 쇄설암층으로 구성되는 신흥층이 국부적으로 놓이지만 그 상위에 대부분 화산암층으로 구성되어 있다. 이 화산암층의 층서는 광물조성에 따라 하부로부터 크게 현무암질 용암을 포함하는 궁평층, 금학산안산암, 화쇄류암층과 유문암으로 구분된다. 그리고 궁평층

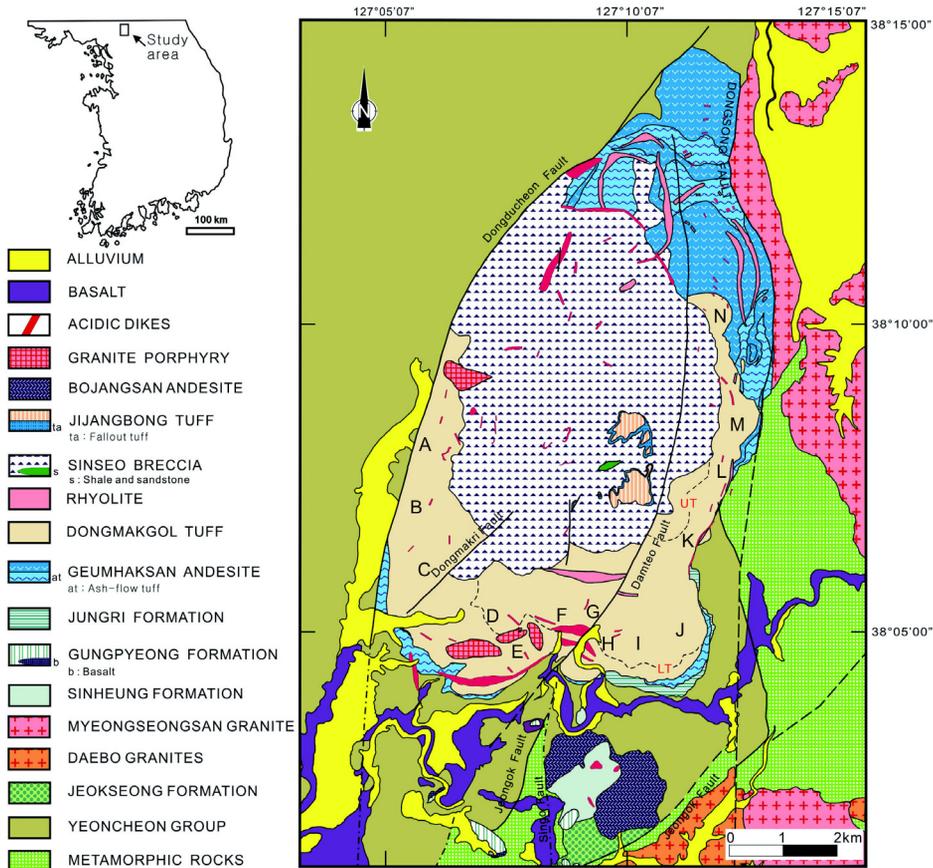
과 금학산안산암 사이에는 적갈색층으로 이루어진 중리층이 협재되며, 화쇄류암층은 중간에 두꺼운 신서각력암이 놓여서 상·하부로 구분되고 각각 동막골응회암과 지장봉응회암으로 명명되었다(Kee *et al.*, 2008). 그리고 화강반암이 작은 암주와 암맥으로 여러 곳에 관입되어 있다.

따라서 이 철원층군은 하부로부터 차례로 신흥층, 궁평층, 중리층, 금학산안산암, 동막골응회암, 유문암, 신서각력암, 지장봉응회암 등으로 구분된다(그림 1). 이 구분으로부터 각 층서단위는 암질, 화학조성, 연대가 상세하게 연구되는 계기를 마련하게 되었다.

철원층군은 기존 연구에 의하면 대개 백악기 후기에 해당하는 연령을 나타낸다. 안산암은 K-Ar 전암 연령이  $78.6 \pm 2.5$  Ma (Lee, 1989)와  $89.5 \pm 4.7$ Ma (Lee *et al.*, 2001)로 측정되었으며, 산성 화산암류는 저어

콘 피션트랙 연령이  $52 \pm 2$  Ma로 보고되었다(Kim *et al.*, 1984). 또한 화산암류 전체는 한 고지자기 측정에 의해 약 83 Ma를 나타낸다고 하였다(Kim and Song, 1995). 그러나 최근 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령측정에 의하면 좀 더 정확한 백악기 전기의 연령을 나타낸다. 즉 유문암이  $115.0 \pm 1.1$  Ma, 화강반암이  $111.24 \pm 0.85$  Ma와  $109.1 \pm 1.1$  Ma를 보여주고, 지장봉응회암의 최소연령이 113 Ma를 나타낸다(Hwang *et al.*, 2011).

위의 두 응회암층은 정치, 냉각 및 결정화 과정의 타입에 있어서 대조적인 우수한 예를 제공한다. 이들 응회암층은 상위층으로 덮이거나 삭박되어 일반적으로 전부를 볼 수 없거나 혹은 완전하게 노출되지 않지만 계곡부 절벽과 바다에서 몇 가지 특징적인 양상을 보여준다.



**Fig. 1.** Geological map of the Cheolwon basin, showing the section locations in near-proximal part (A, B, C, D, E, F, G, H, I) and near-medial part (J, K, L, M, N) in the Dongmakgol Tuff. Two dash lines represent the horizons of LT (lower bedded tuffs) and UT (upper bedded tuffs).

### 3. 동막골응회암

동막골응회암은 철원분지 내에서 그 서쪽 경계부에서부터 동쪽으로 9.8 km, 남쪽 종자산으로부터 북쪽으로 12.0 km에 걸쳐 산출되며, 본역의 남부 동막골과 종자산 일대에서 넓게 분포한다. 이 암층은 대부분 금화산안산암을 피복하고 신서각력암에 의해 덮이며 북쪽으로 가면서 얇아진다. 이 동막골응회암은 Rb-Sr 동위원소 측정에 의하면  $103.1 \pm 3.2$  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). 이 응회암의 하부와 상부 경계는 분포면적의 전반에 걸쳐 많은 곳에서 노출된다. 기저와 상단이 노출되지 않을 때는 비슷하거나 더 완벽한 단면에서 누대변화의 두께를 비교하여 결정하였다. 상단부 비용결 응회암은 상위의 신서각력암에 의해 덮이기 이전에 침식되어 보존된 곳이 현저하게 제한적이다.

이 응회암은 여러 단면에서 최고 약 450 m 두께를 나타내지만(Hwang and Kim, 2010), 북동쪽으로 가면서 거의 150 m 정도로 얇아진다. 이 암층은 그 서측부가 동두천단층에 의해 잘렸으며, 동부가 서부보다 더 얇지만 더 높은 고도에 위치한다. 이러한 지층의 자세는 고지형적 기복을 나타낸다고 보기보다도 동고서저형 경동(tilting)에 의한 것을 의미하는 것으로 생각된다. 왜냐하면 이 응회암의 공급지가 남서부에 위치하기 때문에 북부와 동부가 고지형적으로 더 낮았어야 하기 때문이다. 그러나 아주 작은 기복은 이 응회암층의 아래에 국부적으로 존재했을 것으로 생각된다.

동막골응회암은 화학적으로 유문암에서 유문대 사이트 조성을 나타내며(Hwang *et al.*, 2010), 물리적 구성원에 따르면 부석풍부 파리질응회암에 속하고 입도에 따르면 응회암내지 라필리응회암에 속한다(Hwang and Kim, 2010). 부석풍부 파리질응회암은 샤아드, 부석편, 반정, 암편 등으로 구성되며, 반정은 사장석, K-장석, 석영, 흑운모 등으로 구성되고 암석의 약 5% 이하로 매우 적은 편이다.

### 4. 수직 분대

동막골응회암은 층상응회암층이 두 층준에서 협재하지만 대부분 한 단위로 냉각될 만큼 빠르게 분출된 매우 뜨거운 화쇄류들로 구성되며 잘 발달된 내부 분대를 가진다. 이 분대는 이 동막골응회암이 교란되지 않은 냉각과정을 경험했음을 지시해준다. 내부 수직 분대의 우수한 단면은 여러 능선과 계곡을 따라서 계곡 바닥과 수직 절벽을 따라 노출된다(그림 1). 이 단면들로부터 야외작업과 채취된 시료의 박편으로부터 야외암질대, 용결대와 결정화대를 나눌 수 있다.

#### 4.1 야외 암질대

동막골응회암은 대부분 화쇄류암층으로 구성되지만 두 층준에서 10 m 내외 두께의 얇은 층상응회암층이 협재되어 있다. 이 응회암의 협재 때문에 하부, 중부 및 상부 화쇄류암층으로 구분할 수 있다(그림 2). 하부 및 중부 화쇄류암층은 100~200 m 범위로 매우 두껍고 대규모로 노출되지만 상부 화쇄류암층은 100 m 이내로 얇고 소규모로 국부적으로 노출된다. 그러나 동막골응회암은 층상응회암층을 협재하지만 한 단위로 냉각될 만큼 빠르게 분출된 매우 뜨거운 화쇄류들로 대부분 구성되기 때문에 여러 용결대로 분대할 수 있다.

##### 4.1.1 층상응회암층

층상응회암층은 대체로 황갈색을 띠고 10 m 내외 두께를 가지며, 1~15 cm 정도 두께의 여러 층(bed)으로 구성된다(그림 3A). 이 층들은 분급이 다소 양호하고 정점이층과 역점이층을 발달시킨다. 이 암층은 대개 강하응회암과 써지응회암의 교호로 이루어지며 간혹 응회각력암을 협재한다. 이들은 동막골응회암의 층서를 하부, 중부와 상부 화쇄류암층으로 세분할 수 있는 기준이 된다. 하부 응회암층은 성산에서 주로 N70°W 20°NE에서 N80°E 33°NW의 자세를 가지며, 상부 응회암층은 대개 N30°~80°E 20°~39°NW의 자세를 나타낸다.

##### 4.1.2 화쇄류암층

화쇄류암층은 분급이 불량하고 괴상으로 산출되며 심하게 용결된 부분이 많다. 대체로 담회색, 회색,

회갈색 또는 회백색을 띠며 담녹색을 띠는 부분도 있다. 이 암층은 기질에 부석편과 약간의 반정 및 암편들이 포함되어 있다.

기질은 대부분 화산회 크기의 사이드들로 구성된다. 이 기질은 비용결대에서 회백색, 유백색 등으로 밝은 색을 띠고 기타 용결대와 유변상대에서 담회색, 회색, 회갈색 등으로 어두운 색을 띤다. 그리고 층상응회암층으로 구분되는 세 화쇄류암층은 각각 내부에 치밀용결상이 가장 우세하게 나타나지만 외곽부에 비용결암상이 매우 얇게 감싸고 양자간의 중간부에 부분용결상이 존재한다.

부석편들은 흔히 회백색 혹은 암회색을 띠며 용결 정도에 따라 편평도가 다르게 나타난다. 이 부석편들은 비용결대에서 약간 소결(sintering)될 정도로 존재하고 변형을 거의 발견할 수 없다(그림 3B). 노출면이 거칠고 울퉁불퉁하게 나타나며 채취된 시료가 무디어 보인다.

부분용결대에서 부석편들은 약간 편평화되고 용결되어 렌즈상을 나타내며 결정과 암편 주위에서 약간 변형되어 있다(그림 3C). 이 암대는 약한 절벽을 형성하며 외곽부로 가면서 회백색 비용결대로 접이 되고 내부로 가면서 치밀용결대로 접이되거나 유변

상대와 접하기도 한다.

치밀용결대에서 부석편들은 대부분 심하게 편평화 되고 용결되어 피아메를 이루며 수직단면에서 렌즈상이고 수평면에서 넓적한 타원체를 나타낸다. 이 피아메는 대개 기질보다 더 어두운 암회색으로서 뚜렷한 색 차이를 이루며 간혹 풍화면에서 튀어 나와 있다(그림 3D). 이 피아메들은 단면에서 흔히 완배열상 석리(eutaxitic fabric)를 나타내며 이에 의한 용결엽리를 쉽게 관찰할 수 있다(그림 3E).

유변상대에서 피아메들이 신장되어 마치 유대상 유문암을 닮은 평행배열상 석리(parataxitic fabric)를 나타내고 유상선구조를 발달시킨다(그림 3F). 이곳에서 피아메의 신장비는 적어도 1:10 이상을 나타내며 최대 1:30 이상을 갖는 경우도 있다. 또한 이들 부석편은 용결되면서 리본 모양으로 길게 신장되고 결정과 암편 주위를 비껴가는 마치 비단결 같은 줄무늬를 형성한다.

반정들은 드물지만 석영, 장석, 사장석 등으로 구성된다. 이들은 1 mm 내외의 사장석과 다소 등근형의 석영 등이 인식된다. 이 반정들은 주로 파편상으로 관찰되지만 자형을 나타내는 것도 있다. 암편들은 안산암, 현무암, 천매암, 편암, 규암과 석회암 등을 포함한다.

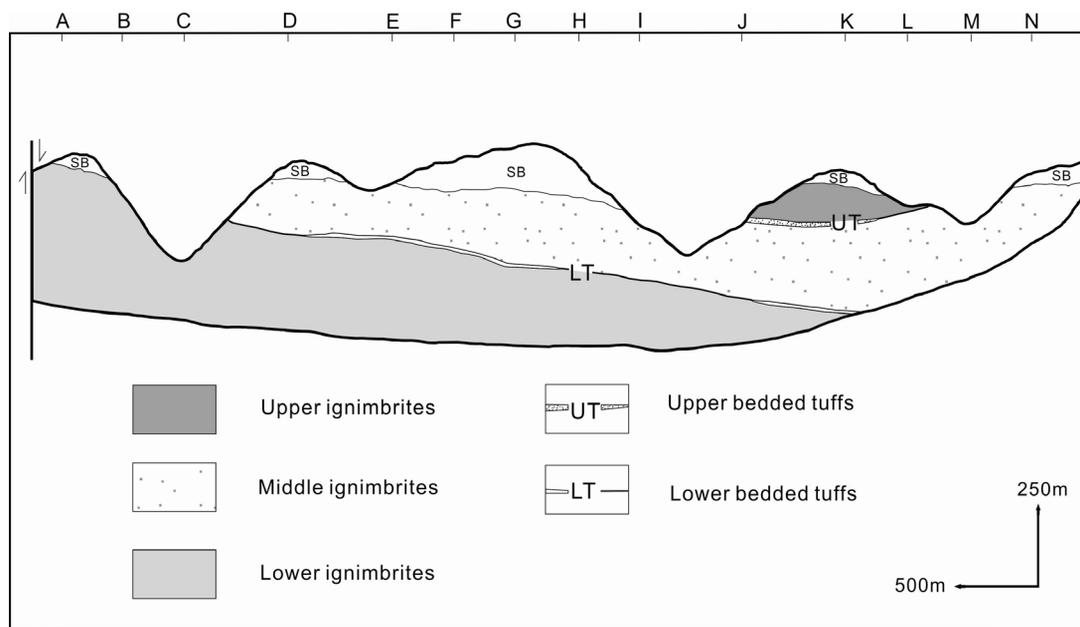
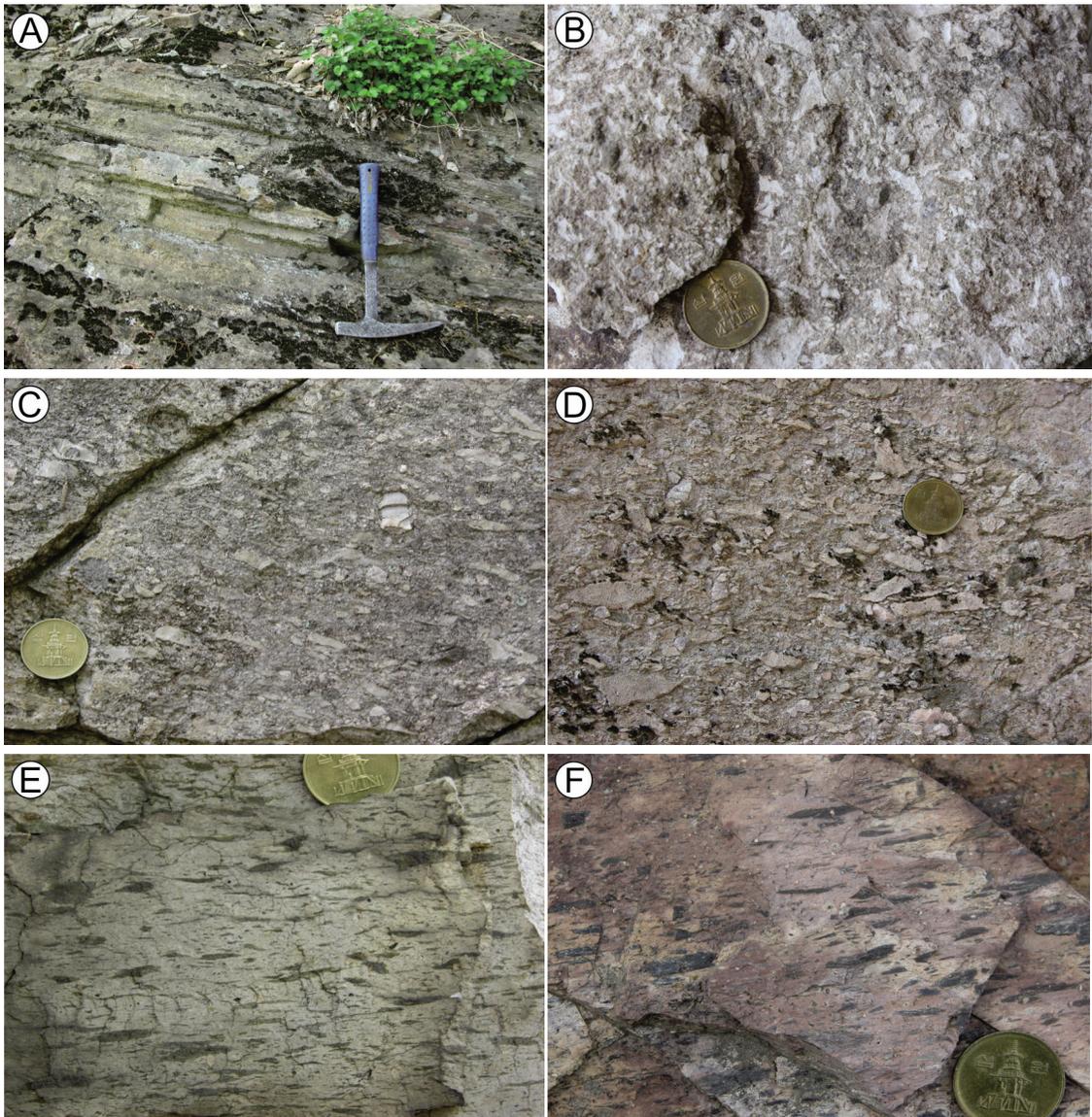


Fig. 2. Cross section of field lithology zones, showing interior sequences of lower and upper bedded tuffs, and lower, middle and upper ignimbrites in the Dongmakgol Tuff. SB represents the Sinseo Breccia.

#### 4.2 용결대

화쇄류암층은 고온에서 정지하고 충분한 두께를 가지기 때문에 쉽게 용결된다. 용결작용은 부석편과 유리질 샤아드 등의 뜨거운 화산물질이 유리전이온도 위의 온도에서 소결작용, 다짐작용과 편평화작용을 일으키는 물리-화학적 과정이다(예, Smith, 1960a; Ross and Smith, 1961; Cas and Wright, 1987). 화

쇄설물 유동성에 따르면, 용결작용은 정지되는 동안 빠른 유착과 합체에서부터 두꺼운 화쇄류층이 냉각되는 동안 하중에 의한 느린 다져짐까지 범위이다(Freundt, 1998). 화쇄류암은 점진적 용결작용 동안에, 화산회 기질과 부석 라필리가 변형된다(예, Ragan and Sheridan, 1972). 점진적 용결작용 동안에, 유리질 샤아드와 부석편은 배열되어 편평화 방향에 직각



**Fig. 3.** Typical exposures of the Dongmakgol Tuff. (A) Bedded tuffs in the Seongsan area; (B) Nonwelded tuff showing the original pumice clasts at the base of the lower ignimbrite; (C) Partially welded tuff showing a relief by the differential erosion; (D) Slight flattening of pumice clasts in the partially welded tuff; (E) Densely welded tuff showing an eutaxitic fabric and fiammes surrounding a lithic fragment; (F) Rheomorphic tuff displaying a parataxitic fabric.

인 석리를 형성한다(예, Smith, 1960a).

용결작용이 완벽에 가깝다면, 치밀용결(dense welding), 부분용결(partial welding), 비용결(nonwelding)의 3개 용결대가 형성된다(Smith, 1960b; Cas and Wright, 1987). 용결대에서 편평화된 유리편은 흔히 피아메라 부르며, 유리질 사아드와 함께 판상 엽리와 완배열상 석리를 형성한다. 용결작용은 흔히 철의 산화상태에 따라 뚜렷한 색변화를 일으킨다. 유리질 양상을 가지는 치밀용결 응회암은 경우에 따라 파리반암(vitrophyre)이라 부른다.

동막골응회암은 육안 및 현미경적 조직 변화에 의해 비용결대, 부분용결대, 치밀용결대와 유변상대의 4개 용결대(welding zone)로 구분된다. 용결대 간에는 매우 점이적으로 변화한다.

#### 4.2.1 비용결대

동막골응회암에서 비용결대는 고결되어 있지만 부석편은 변형되지 않고 기포를 그대로 간직하고(그림 4A) 임의 방향으로 놓이며 절리가 부석편을 통과하기보다 차라리 주위를 지나간다(예, Smith, 1960a). 기질은 종종 유리 사아드의 초생 점착을 보여주지만 기포와 Y-사아드의 변형을 거의 보여주지 않는다. 따라서 유리질 사아드 간에 약간의 점착이 있을 수 있으며 임의 방향으로 거의 원래 모양을 간직한 채로 파리쇄설상 석리(vitroclastic fabric)를 나타낸다(그림 4B). 그러나 초기부터 유리질 물질의 유착은 일어나지 않는다. 비용결대는 대개 회백색을 나타내고 울퉁불퉁하고 노출면으로부터 부석이 풀어져 나올 수 있다.

비용결대는 단면의 기저 및 상단뿐만 아니라 층상응회암층과 각 화쇄류암층 간의 좁은 범위에서 발견된다(그림 6A). 이 비용결대는 냉각이 가장 빠른 화쇄류암층의 상단과 바닥에서 산출된다(예, Riehle, 1973; Riehle *et al.*, 1995). 이들의 두께는 약 10 m 내외로 매우 얇지만 동측 경계부에서는 10~30 m 범위로 다소 두꺼운 편이다. 따라서 비용결대는 수 m 두께로 얇은 곳에서 측방으로 추적이 어려울 경우가 많다. 어떤 곳에는 냉각과정동안 위로 기체의 탈출에 의한 산화작용 때문에 회백색에서 갈회색으로 색변화가 일어났다.

#### 4.2.2 부분용결대

부분용결대에서 부석편은 약간의 배열을 보여주

고 기포 사아드와 Y-사아드들은 변형되고 타원형 기포를 나타낸다. 부석편은 분명하게 편평화되고 완배열상 석리를 뚜렷하게 해주고 얼마의 부석편은 변형되어 불꽃같은 끝을 가진다(그림 4C, D). 유리질 사아드는 반정 혹은 압편 주위에서 변형작용에 의해 방향성을 보여주지만 기질의 나머지는 주로 약간의 변형작용만을 보여주는 임의 방향의 사아드들을 포함한다.

부분용결대는 각 화쇄류암층의 외곽부 비용결대와 내부 치밀용결대 혹은 유변상대 사이의 중간부에서 발견된다(그림 6A). 이들의 두께는 대체로 10~50 m 범위로 상당히 두껍지만, 하부 화쇄류암층의 하부 부분용결대에서는 약 100 m 이상에 달하는 곳도 있고 하부 화쇄류암층의 상부 부분용결대에서는 얇아지면서 침멸되어 비용결대로 대체되는 곳도 있다(그림 6A). 부분용결대는 대개 담회색을 띠고 유리질 광택을 가진다. 그러나 인지할만한 암색화가 부분적으로 변질작용 혹은 산화작용에 의해 담녹회색 혹은 담갈색을 나타낸다.

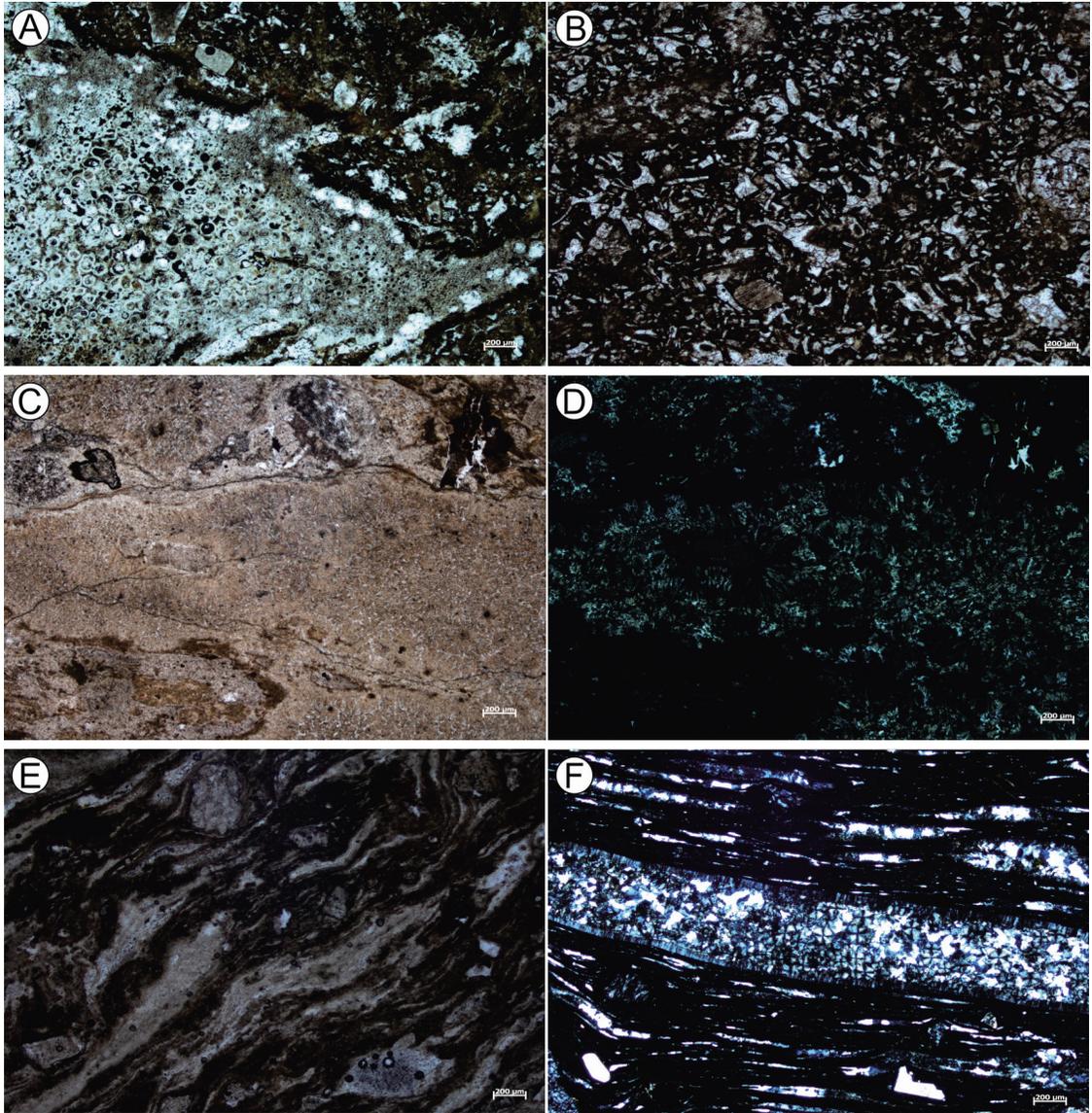
#### 4.2.3 치밀용결대

치밀용결대는 대부분 부석편이 피아메로 충분히 붕괴되어 실제 공극을 가지지 않고 강하게 편평화되고 배열되어 뚜렷한 완배열상 석리를 나타내는 것(그림 4E)이 특징이다. 반면에 기질은 다소 뚜렷한 완배열상 석리를 보여주지만 약간의 잔류 공극을 가진다(예, Streck and Grunder, 1995). 일반적으로 부석편은 화산회 기질보다 더 낮은 용결도에서 변형되기 시작하며, 궁극적으로, 부석편은 주위의 화산회 기질이 아직도 약 10%의 잔류 공극률을 가질 때 모든 공극률을 잃어버린다(예, Sheridan and Ragan, 1976; Quane and Russel, 2005). 전체적으로 더 암색이고 유리질이지만, 공극이 계속적으로 감소되었기 때문에 보다 더 높은 밀도를 나타낸다.

치밀용결대는 각 화쇄류암층의 부분용결대의 안쪽에서 두껍게 산출되며 흔히 유변상대를 내포하고 있다(그림 6A). 어떤 곳에는 가끔 수축냉각에 의한 주상절리를 발달시킨다. 이들의 두께는 대체로 100 m 내외로 상당히 두껍지만, 하부 화쇄류암층과 같이 두꺼운 화쇄류암층에서는 약 100 m 이상에 달하는 곳도 있으며 화쇄류암층이 얇은 곳일수록 50 m 이하로 얇고 상부 화쇄류암층에서는 20~30 m 범위

로 상대적으로 매우 얇은 편이다(그림 6A). 하부 화쇄류암층의 상부 부분용결대에서는 얇아지면서 침멸되어 비용결대로 대체되는 곳도 있다. 치밀용결대

는 대개 회색을 띠고 뚜렷한 유리질 광택을 나타낸다. 그러나 곳에 따라 색변화가 부분적인 산화작용에 의해 담갈색을 인지할 수 있다.



**Fig. 4.** Photomicrographs of the Dongmakgol Tuff. (A) A pumice clast, originally showing highly vesicular texture in nonwelded tuff under plane light; (B) Crude vitroclastic fabric from recognition of shard structure in nonwelded tuff under plane light; (C) A slightly flattened pumice clast preserved in vitric material in partially welded tuff under plane light; (D) Same as above with crossed nicols, showing that the pumice is weakly devitrified into crude spherulites (gray areas); (E) Eutaxitic fabric from pumices (light streaks) and shards (dark streaks) molded against a crystal fragments in densely welded tuff under plane light, and crystallized along the boundary by microcrystalline axiolites that are too fine to see; (F) parataxitic fabric from shards and fiammes, crystallized by microcrystalline axiolites in rheomorphic tuff with crossed nicols. Pumice structure defined by outer microcrystalline axiolitic intergrowth, and partly destroyed by inner microcrystalline spherulitic crystallization (light areas).

#### 4.2.4 유변상대

유변상대에서 부석편과 사아드는 충분히 붕괴되어 종종 유문암질 용암과 구별하기 어려울 정도이다. 부석편과 사아드는 심하게 신장되어 강한 평행배열상 석리를 보여준다(그림 4F). 특히 부석편은 기체상 광물로 도배되어 있는 경우가 많다. 이 유변상대는 용결 후 흐름 혹은 유변작용(rheomorphism)에 조합된 석리를 나타낸다. 이 석리에는 심하게 신장된 부석편, 당김 분리(pull-apart) 형상과 신장 틈, 강한 포유체 주변의 그림자(shadow), 습곡, 암편 외상배열, 램프 구조 등을 포함한다.

유변상대는 중부 및 하부 화쇄류암층의 치밀용결대의 안쪽에서 렌즈 모양으로 발견된다(그림 5A). 이들은 그 화쇄류암층의 상부와 하부에 치우쳐 형성되어 있으며 부분용결대와 접촉하는 경우가 많다. 이 유변상 응회암은 공급지 주변의 최고 반경 7 km 이내에서 발견되며 이를 벗어나면 극히 드물게 나타난다. 이러한 산출양상은 유변상 석리가 치밀용결대에서 가장 흔하게 산출되지만(예, Schmincke and Swanson, 1967) 부분용결대에서도 산출되는 경우도 있다(예, Streck and Grunder, 1995). 두께는 15~25 m 범위이지만 측방으로 가면서 얇아져 침멸된다. 그러나 곳에 따라 색변화가 부분적인 산화작용에 의해 담갈색내지 갈회색로 변색되어 있다.

#### 4.3 결정화대

화쇄류암의 냉각기간에 일어나는 결정화는 탈파리작용(devitrification)과 기체화 결정작용(vapor-

phase crystallization)을 생각할 수 있다(Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith, 1961). 탈파리작용은 준안정(metastable) 유리질 물질에서 고상선 아래의 결정작용을 의미한다(Ross and Smith, 1961; Lofgren, 1970). 주요 생성물은 크리스토팔라이트(cristobalite)와 알칼리장석이다. 탈파리작용은 특히 냉각기간이 긴 두꺼운 화쇄류암체에서 더 우세하게 나타나지만, 공극이 있는 화쇄류암체도 역시 탈파리화될 수 있다. 유리는 열역학적으로 불안정하기 때문에 분출 후의 탈파리작용을 겪을 수 있으며, 이 탈파리작용은 대체로 석영과 알칼리장석의 섬유상 결정의 핵생성과 성장을 의미한다(Lofgren, 1970, 1971a, 1971b). Lofgren (1971b)은 온도, 압력, 시간과 유체 조성의 다양한 조건하에서 유문암질 유리의 실험실 탈파리작용을 관찰하였다. 그는 자연 유리에서 발견되는 구과상, 보우타이, 축열상(axiolitic), 구상 조직을 포함하는 탈파리 조직을 발견하고 기재하였다.

기체상 결정작용은 냉각동안에 화쇄류암 속으로 뜨거운 가스가 스며들어가면서 일어난다(Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith 1961). 대부분 가스 공급원은 아마도 본질 파리질 입자와 가열된 지하수로부터 유래된다. 기체상 결정작용에 의한 주요 생성물은 기질과 부석 공극을 채우는 트리디마이트(tridymite), 크리스토팔라이트와 알칼리장석이며, 이로 인해 그 공극이 교결되어 줄어들고 점착성 있는 암석을 만들 수 있다. 기체상 결정작용은 용결 화쇄류암체의 상부 부분용결대에서 일정한 암대로 흔히 발견된다(Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith 1961).

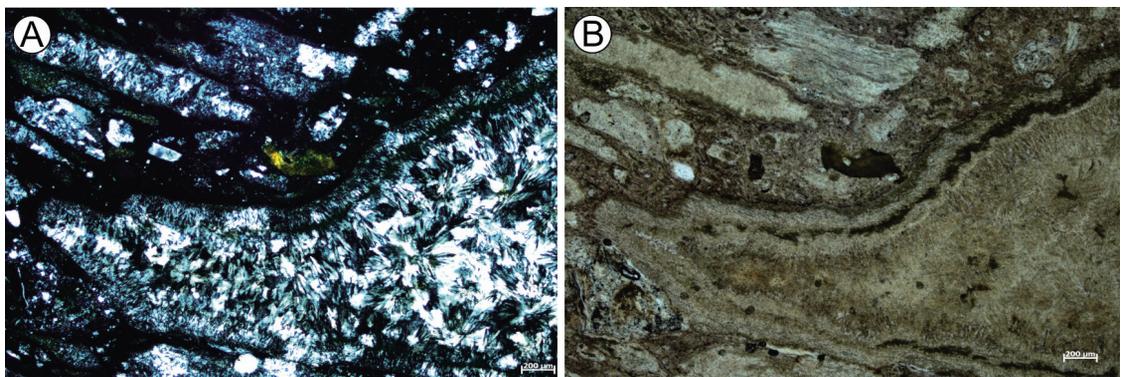


Fig. 5. (A) Photomicrographs of pumice structures defined by outer microcrystalline axiolitic intergrowth, and inner coarser-grained spherulitic crystallization (light areas) in densely welded tuff with crossed nicols; (B) Same as above under plane light.

동막골응회암에서 결정화대는 (1) 파리질대(vitric zone), (2) 탈파리대(devitrified zone), (3) 기체상대(vapor phase zone)로 구분된다. 이 결정화대는 냉각동안에 결정화 유무와 생성된 결정도에 따라 매우 점이적으로 변화하기 때문에 구별하기란 여간 쉽지 않다. 따라서 결정화대 간에는 대개 점이적이고 그 범위가 약 10 m 내외 두께로 다를 수 있다.

#### 4.3.1 파리질대

파리질대는 냉각동안에 이차적으로 결정화가 일어나지 않고 그대로 냉각되어 유리질로 남아있는 부분이다. 그래서 이 부분은 냉각기간이 길지 않고 상대적으로 짧은 기간에 냉각되었음을 의미한다.

파리질대는 매우 좁은 부분을 제외하고 대부분 비용결대와 일치한다. 따라서 이들의 두께는 약 10 m 내외로 매우 얇지만 동측 경계부에서는 10~30 m 범위로 다소 두꺼운 편이다(그림 6B). 그러나 그 내측의 비용결대도 부분적으로 결정화되지 못한 채 파리질대로 연결된다. 특히 하부 화쇄류암층의 상부 부분용결대가 파리질대로 남아있고 치밀용결대가 파리반암을 이룬다. 그래서 이 부분에서 파리질대는 약 30~50 m로 두꺼운 편이다.

#### 4.3.2 탈파리대

탈파리대에서 편평화 샤아드 구조가 잘 보존되어 있지만 그 경계부에서 은미정질 축열상 구조(axiolitic structure)가 관찰된다(그림 4E); 단일 결정의 폭은 <math>< 1 \mu\text{m}</math> 이하이다. 대조적으로, 큰 샤아드에서 축열상 구조는 15-150  $\mu\text{m}$ 의 미정질 입자로 보다 더 조립질이다(그림 4B, D). 부석편도 세립질 석영과 알칼리 장석으로 경계부에 축열상 구조를 형성하며 그 내부에 구과상으로 결정화되어 있다(그림 4E, F). 이는 부석편이 약간 더 공격적인 양상을 가지기 때문에 더 쉽게 결정화된다는 것을 나타낸다. 이 구조에서 단일 결정은 폭이 수  $\mu\text{m}$  이하로 매우 작다. 그러나 석기에서 유리질 물질은 결정화되지 않고 남아있는 부분도 있다.

탈파리화대는 치밀용결대와 부분용결대의 대부분에서 발달되며, 석정질(stony) 양상으로 인지된다. 두께는 중·하부 화쇄류암층에서 가장 두꺼운 곳에서 100~200 m까지의 범위로 두껍지만, 상부 화쇄류암층에서는 100 m 이하로 얇은 편이다(그림 6B).

#### 4.3.3 기체상대

기체상대에서 샤아드와 부석편은 그 경계부가 수십~수백  $\mu\text{m}$ 의 결정 입자로 보다 더 조립질로 축열상 구조를 형성하고 조립질로 결정화되어 원래 윤곽이 크게 훼손되어 있다(그림 5). 보다 더 큰 결정은 기공벽을 따라 성장되어 있는데, 이는 열린 공극 속에 특징적인 결정작용을 보여준다(Smith, 1960a). 보다 큰 입자로 결정화되었음에도 불구하고, 샤아드 구조가 인지되는 경우도 있다. 기체상 결정작용은 탈파리작용에 중첩되어 샤아드 구조를 지우는 경우도 있다. 기체상 결정들은 먼저 부석편에서 발달되며, 여기서 이들은 탈파리 생성물보다 더 조립질이다. 또한 기체상대에서 파리쇄설상 석리는 공극들이 부분적으로 광물 침전으로 메워졌다.

이 기체상대는 하부 화쇄류암층의 상·하부 부분용결대에서 각각 하나씩 소규모 렌즈 모양으로 발달되며 외곽부의 비용결대와 부분적으로 접촉한다(그림 6B). 그 중에 하부의 것은 하부 비용결대로 걸쳐 발달된다. 중부 화쇄류암층에서는 부분용결대와 치밀용결대 사이에서 소규모 렌즈 모양으로 발달된다(그림 6B). 하부 부분용결대와 치밀용결대 사이와 상부 부분용결대와 치밀용결대 사이에 각각 한 곳에서 관찰된다. 이들 기체상대는 두께가 10~25 m 범위로 발달하지만 하부 부분용결대의 것이 상부 부분용결대의 것보다 더 얇은 편이다. 이들은 측방으로 가면서 얇아져 침멸된다. 이 동막골응회암에서 기체상대가 하부 부분용결대에서도 발달하는 것은 주왕산응회암에서 상부 비용결대 아래의 부분용결대에 발달하는 것(Hwang, 2007)과 상당한 차이를 보인다.

### 5. 수평 변화

야외작업과 실내실험 자료(표 1, 2)를 종합하면 상변화 단면도를 그릴 수 있다(그림 6). 이들은 남서부의 두위부 근처에서 북동부의 중위부 근처로 향하며 암질, 색깔, 용결도, 결정화 등의 일반적인 수직 및 수평 범위를 설명해준다.

수직 분대는 계곡부와 절벽의 대부분에 걸쳐서 나타나는 동막골응회암의 특징을 나타낸다. 그러나 이 분대는 북동부의 노두지역으로 가면서 즉 화쇄류암의 중위부로 가면서 상당한 상변화를 나타낸다. 북동부로 가면서 하부 및 중부 화쇄류암층은 거의 동

**Table 1.** Physical characteristics of near-proximal parts of the Dongmakgol Tuff based on specimens and thin sections collected in Dosinri (A), Oksanri (B), Dongmakri (C), Seongsan (D), Gomunri (E), Bugok valley (F), Bugok ridge (G), Darakdae (H) and Munamdong(I) sections.

(A) Dosinri section

Sample No.	Height above base	Field lithology zones	Color	Flattening or fabrics	Welding zones	Crystallization zones	
YC659	285 m	Lower ignimbrites	Milky white	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric	
YC658	275 m		Pale brown		Slight flattening	Partial welding	Vapor-phase crystallized
YC657	250 m				Parataxitic	Rheomorphic	
YC656	220 m		Pale gray		Eutaxitic	Dense welding	Devitrified
YC655	195 m						
YC654	170 m						
YC653	140 m		Gray		Parataxitic	Rheomorphic	
YC652	110 m						
YC651	60 m		Whitish gray		Slight flattening	Partial welding	Vitric
YC650	30 m						

(B) Oksanri section

YC671	260 m	Lower ignimbrites		Eutaxitic	Dense welding	Vapor-phase crystallized		
YC670	240 m			Pale brown	Parataxitic	Rheomorphic		
YC669	225 m			Gray	Eutaxitic	Dense welding		
YC668	190 m							
YC667	170 m			Pale brown		Parataxitic	Rheomorphic	Devitrified
YC665	140 m							
YC664	115 m			Pale gray	Eutaxitic	Dense welding		
YC663	80 m			Brownish gray	Slight flattening	Partial welding		
YC661	30 m			Pale gray			Vitric	

(C) Dongmakri section

YC689	170 m	Lower ignimbrites		Eutaxitic	Dense welding	Devitrified				
YC688	160 m						Pale gray			
YC687	150 m						Pale brown			
YC686	135 m									
YC685	125 m						Pale gray to whitish gray			
YC684	115 m									
YC683	90 m						Brownish gray	Slight flattening	Partial welding	
YC682	70 m									
YC681	30 m						Whitish gray	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric

(D) Seongsan section

YC730	400 m	Sinseo Breccia	Greenish gray	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric				
YC729	390 m	Middle ignimbrites		Slight flattening	Partial welding	Devitrified				
YC728	380 m						Brownish gray			
YC727	370 m									
YC726	350 m						Pale gray			
YC725	340 m									
YC724	330 m						Pale brown to pale gray	Eutaxitic	Dense welding	
YC723	320 m									
YC722	310 m						Gray			
YC721	300 m									
YC719	280 m						Pale gray			
YC718	260 m									
YC717	250 m	Whitish gray	Slight flattening to eutaxitic	Partial welding	Devitrified					
YC716	240 m									
YC715	230 m	Pale gray	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric					
YC714	220 m	Lower bedded tuffs				Yellowish gray				

Table 1. continued.

Sample No.	Height above base	Field lithology zones	Color	Flattening or fabrics	Welding zones	Crystallization zones					
YC713	210 m	Lower ignimbrites	Pale gray	Slight flattening	Partial welding	Vitric					
YC712	200 m			Eutaxitic	Dense welding						
YC710	180 m			Parataxitic	Rheomorphic						
YC709	165 m			Pale brown	Eutaxitic	Dense welding	Devitrified				
YC708	140 m										
YC707	120 m			Pale gray	Parataxitic	Rheomorphic					
YC706	105 m										
YC705	90 m										
YC704	40 m										
YC702	25 m		Slight flattening to eutaxitic	Partial welding							
YC701	15 m		Milky white	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric					
YC700	5 m										
<b>(E) Gomunri section</b>											
YC741	300 m	Middle ignimbrites	Pale gray	Slight flattening	Partial welding	Devitrified					
YC740	280 m										
YC739	270 m					Whitish gray	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric		
YC738	240 m										
YC737	230 m	Lower ignimbrites	Pale gray	Eutaxitic	Dense welding	Devitrified					
YC736	220 m										
YC735	180 m										
YC734	165 m										
YC733	140 m										
YC732	105 m						Pale brown	Slight flattening	Partial welding	Vitric	
YC731	20 m										
<b>(F) Bugok valley section</b>											
YC769	320 m	Middle ignimbrites	Pale brown	Parataxitic to eutaxitic	Rheomorphic	Devitrified					
YC768	290 m										
YC767	270 m						Pale gray	Eutaxitic	Dense welding		
YC766	250 m									Brownish gray	Rheomorphic
YC765	230 m									Pale gray	Slight flattening
YC764	210 m						Lower ignimbrites	Whitish gray	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric
YC763	170 m										
YC762	140 m	Pale gray	Eutaxitic	Dense welding							
YC761	110 m										
YC760	80 m	Lower ignimbrites	Brownish gray	Pale gray	Slight flattening	Devitrified					
YC759	50 m										
YC757	40 m						Pale brown	Slight flattening	Partial welding		
YC756	20 m									Gray	Vitric
<b>(G) Bugok ridge section</b>											
YC785	310 m	Middle ignimbrites	Whitish gray	Eutaxitic	Dense welding	Vapor-phase crystallized					
YC784	295 m										
YC783	280 m					Pale gray	Parataxitic	Rheomorphic	Devitrified		
YC782	260 m										
YC781	240 m										
YC780	220 m									Gray	Slight flattening
YC779	190 m					Lower ignimbrites	Whitish gray	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric	
YC778	160 m										
YC776	140 m	Pale gray to gray	Eutaxitic	Dense welding							
YC775	105 m				Slight flattening						Partial welding

Table 1. continued.

Sample No.	Height above base	Field lithology zones	Color	Flattening or fabrics	Welding zones	Crystallization zones	
YC774	70 m	Lower ignimbrites	Pale gray to gray	Slight flattening	Partial welding	Devitrified	
YC773	45 m						
YC772	30 m		Whitish gray	Vitroclastic	Nonwelding		Vitric
YC771	10 m						
<b>(H) Darakdae section</b>							
YC818	350 m	Middle ignimbrites	Whitish gray	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric	
YC817	310 m		Pale gray	Slight flattening	Partial welding		
YC815	270 m		Pale brown	Eutaxitic	Dense welding	Devitrified	
YC814	230 m		Pale gray				
YC813	190 m		Pale gray to gray	Slight flattening	Partial welding		
YC811	175 m		Whitish gray	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric	
YC810	160 m		Lower ignimbrites	Pale gray to gray	Slight flattening	Partial welding	
YC808	140 m						
YC807	125 m						Devitrified
YC806	100 m	Eutaxitic			Dense welding		
YC805	85 m						
YC804	70 m						
YC803	50 m	Gray			Slight flattening	Partial welding	Vapor-phase crystallized
YC802	20 m	Pale gray			Vitroclastic	Nonwelding	Vitric
<b>(I) Munamdong section</b>							
YC834	215 m	Lower ignimbrites	Brownish gray	Vitroclastic	Partial welding	Devitrified	
YC833	190 m			Eutaxitic	Dense welding		
YC832	165 m		Brownish gray	Eutaxitic	Dense welding		
YC831	145 m	Lower ignimbrites	Pale brown	Parataxitic	Rheomorphic	Devitrified	
YC830	110 m			Eutaxitic	Dense welding		
YC829	85 m			Pale gray	Slight flattening		Partial welding
YC828	60 m				Vapor-phase crystallize		
YC827	35 m						
YC826	5 m		Pale brown	Vitroclastic	Nonwelding	Vitric	

일한 두께를 유지하다가 현저하게 얇아진다(그림 2).

용결상의 변화도에서 치밀용결대와 부분용결대도 하부 및 중부 화쇄류암층의 두께 변화에 따라 각각 동일한 두께를 지속하다가 빠르게 얇아져 침멸되는 양상을 나타낸다(그림 6A). 이와 반대로 비용결대는 북동부로 가면서 적지만 점차 약간씩 증가하다가 그 하부와 상부가 서로 만나면서 두꺼워진다. 이러한 상변화는 화쇄류의 내부를 대표하는 용결상의 수직 분대가 측방으로도 완벽한 수평 상변화를 보여준다.

결정화상의 변화도에서 탈파리대도 하부 및 중부 화쇄류암층의 두께 변화에 따라 각각 동일한 두께를 지속하다가 빠르게 얇아져 침멸되는 양상을 나타낸다(그림 6B). 이와 다르게 파리질대는 탈파리대를 둘러싸고 있으며 북동부로 가면서 불규칙하게 약간의 변화를 보이다가 그 하부와 상부가 서로 만난다. 이

러한 상변화는 화쇄류의 내부를 대표하는 결정화상의 수직 분대가 측방으로도 거의 완전한 수평 상변화를 나타낸다. 그러나 하부 화쇄류암층의 상부 파리질대와 하부 화쇄류암층의 하부 파리질대가 합체되는 곳에서 두께가 부분적으로 두꺼워지는 양상을 보여준다. 그리고 기체상대는 하부 화쇄류암층에서 탈파리대의 상단과 하단에 발달하고 중부 화쇄류암층에서 탈파리대 내의 하부와 상부에 발달된다. 이들은 모두 측방으로 가면서 얇아져 결국 렌즈 모양으로 침멸된다(그림 6B).

상변화 단면도에서 용결대와 결정화대를 서로 비교하면 파리질대는 대체로 비용결대에 일치하는 경향이고 탈파리대는 치밀용결대와 부분용결대와 일치하는 모습을 나타낸다. 그러나 기체상대는 하부 화쇄류암층에서 비용결대와 부분용결대 사이 혹은

**Table 2.** Physical characteristics of near-medial parts of the Dongmakgol Tuff based on specimens and thin sections collected in Jongjasan (J), Hyangrobong (K), Harangdong (L), Damteo ridge (M) and Damteo valley (E) sections. (J) Jongjasan section

Sample No.	Height above base	Field lithology zones	Color	Flattening or fabrics	Welding zones	Crystallization zones
YC892	280 m	Middle ignimbrites	Pale gray to gray	Slight flattening	Partial welding	Devitrified
YC891	260 m			Eutaxitic	Dense welding	
YC890	240 m					
YC875	190 m					
YC874	170 m					
YC859	150 m		Slight flattening	Partial welding	Vitric	
YC858	120 m	Parataxitic	Rheomorphic			
YC857	80 m	Lower ignimbrites	Pale gray to whitish gray	Eutaxitic	Dense welding	Devitrified
YC856	60 m			Slight flattening	Partial welding	
YC855	30 m		Vitreous			
YC854	10 m			Vitric		
<b>(K) Hyangrobong section</b>						
YC918	380 m	Sinseo Breccia	Greenish gray	Vitreous	Nonwelding	Vitric
YC917	360 m	Upper ignimbrites	Whitish gray			
YC916	350 m		Pale gray			
YC915	340 m		Pale brown	Slight flattening	Partial welding	
YC914	330 m		Pale gray to gray			
YC913	320 m					
YC912	310 m					
YC911	300 m			Eutaxitic	Dense welding	Devitrified
YC910	295 m		Pale brown			
YC909	285 m					
YC908	275 m			Slight flattening	Partial welding	
YC907	260 m	Upper bedded tuffs		Pinkish gray	Vitreous	Nonwelding
YC906	230 m		Pale green			
YC905	215 m	Middle ignimbrites	Pale gray	Eutaxitic	Dense welding	Devitrified
YC904	110 m					
YC903	80 m	Middle ignimbrites	Brownish gray	Slight flattening to Eutaxitic	Partial welding	Devitrified
YC902	50 m					
YC901	30 m					
<b>(L) Harangdong section</b>						
YC949	260 m	Sinseo Breccia	Milky white	Vitreous	Nonwelding	Vitric
YC948	240 m	Middle ignimbrites				
YC947	210 m		Whitish gray	Slight flattening	Partial welding	
YC946	140 m		Pale gray to whitish gray			
YC944	70 m					
YC943	50 m					
YC942	30 m			Gray to whitish gray	Slight flattening	Partial welding to nonwelding
YC941	20 m					
<b>(M) Damteo ridge section</b>						
YC961	290 m	Sinseo Breccia	Pale gray	Vitreous	Nonwelding	Vitric
YC960	265 m	Middle ignimbrites				
YC959	255 m		Whitish gray	Slight flattening	Partial welding	
YC958	245 m					
YC957	235 m		Gray to dark gray	Eutaxitic	Dense welding	Devitrified
YC956	220 m					
YC955	200 m					

Table 2. continued.

Sample No.	Height above base	Field lithology zones	Color	Flattening or fabrics	Welding zones	Crystallization zones
YC954	180 m	Middle ignimbrite	Gray to dark gray	Eutaxitic	Dense welding	Devitrified
YC953	140 m					
YC952	100 m		Pale gray	Slight flattening	Partial welding	Vitric
YC951	50 m					
<b>(N) Damteo valley section</b>						
YC977	170 m	Middle ignimbrite	Gray to pale gray	Slight flattening	Partial welding	Vitric
YC976	145 m					
YC975	120 m					
YC974	100 m		Pale gray	Eutaxitic	Dense welding	Devitrified
YC973	60 m					
YC972	35 m			Slight flattening	Partial welding	Vitric
YC971	15 m					

부분용결대와 치밀용결대 간에 발달하고, 중부 화쇄류암층에서 부분용결대와 치밀용결대 간에 발달되며, 상부 화쇄류암층에서 발달되지 않는다.

단면도에서 보여주는 바와 같이 북동부로 가면서 화쇄류암층이 얇아지는 것(그림 2)은 기존의 지형적 고지라기 보다 차라리 공급지로부터 멀어지는 것을 암시한다. 북동부로 가면서 화쇄류암층의 두께가 얇아짐에도 불구하고 부분용결대와 비용결대의 두께가 작으나마 약간씩 두꺼워지는 것(그림 6A)은 공급지로부터 멀어지면서 용결작용의 부분적인 감소를 나타낸다. 이 단면도는 공급지에서 거리에 따라 화쇄류암층이 점차 얇아지는 것을 보여주며 이러한 용결도의 감소는 화쇄류의 온도 감소 때문에 나타나는 것으로 해석된다.

6. 토 의

위에서 토의된 암석기재적 특징의 변화는 동막골 응회암에 대한 냉각단위를 토의할 뿐만아니라 이 암층에서 용결작용의 진행을 직접 추적하고, 더구나 본질적인 용결작용이 일어난 후의 결정작용의 과정을 살펴본다.

Smith (1960b)는 단순 냉각단위와 같은 단순한 용결변화를 보여주는 화쇄류암체를 분류하였다. Riehle (1973)은 이러한 변화가 일정한 온도로 정치하는 화쇄류암체의 냉각에 대한 이론적 해석으로부터 예상될 수 있다는 것을 발견하였다. 그러나 얼마의 화쇄류암체는 여러 개의 치밀용결대와 부분용결대를 가지는 경우도 있다. 이러한 화쇄류암체를

Smith (1960b)는 복합 냉각단위로 분류하였다. 이에 의하면 동막골응회암체는 초기 흐름단위의 상부는 후기 흐름단위가 정치하기 전에 부분적으로 혹은 전체적으로 냉각된 흔적 즉 냉각의 단절을 지시하는 증거를 보여주기 때문에 복합 냉각단위로 분류된다.

화쇄류암에서 수직 및 수평 상변화 모델은 Smith (1960a)가 세운 바 있다. 그의 모델은 수많은 화쇄류암에서 나온 자료를 종합함으로써 세 유형의 화쇄류암에서 용결대와 결정화대의 일반적인 분포차이를 보여주었다. 세 유형은 다음과 같이 (1) 두꺼우나 너무 차가워서 강한 용결대와 결정화대를 발달시키지 못하는 응회암, (2) 보다 강한 용결대를 발달시키지만 풍부한 결정작용이 없는 얇은 고온 응회암, (3) 치밀용결대와 결정화대를 발달시킬 만큼 충분히 두껍고 가스가 풍부한 고온 응회암으로 구분되었다(Smith, 1960b). 각 유형에서 타나나는 모든 변화는 화구로부터 거리의 증가에 따르는 응회암의 온도와 두께의 감소 때문에 나타난다(Smith, 1960b). 마찬가지로 동막골응회암에서의 수직 및 수평 상변화도 지역적으로 상당히 복잡하고 크게 나타나지만 두께와 거리에 따라 오로지 용결작용과 결정작용이 변화하는 양상을 보여준다.

수직 및 수평 상변화는 여러 요인이 용결작용과 결정작용에 영향을 미치는데, 이들 중 가장 중요한 것은 온도, 압력, 휘발성분, 조성이다(Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith, 1961). 이 요인들 가운데 동막골응회암의 일차적인 상변화에 관련 있는 것 중 가장 중요한 것부터 고찰해보면 흥미롭다.

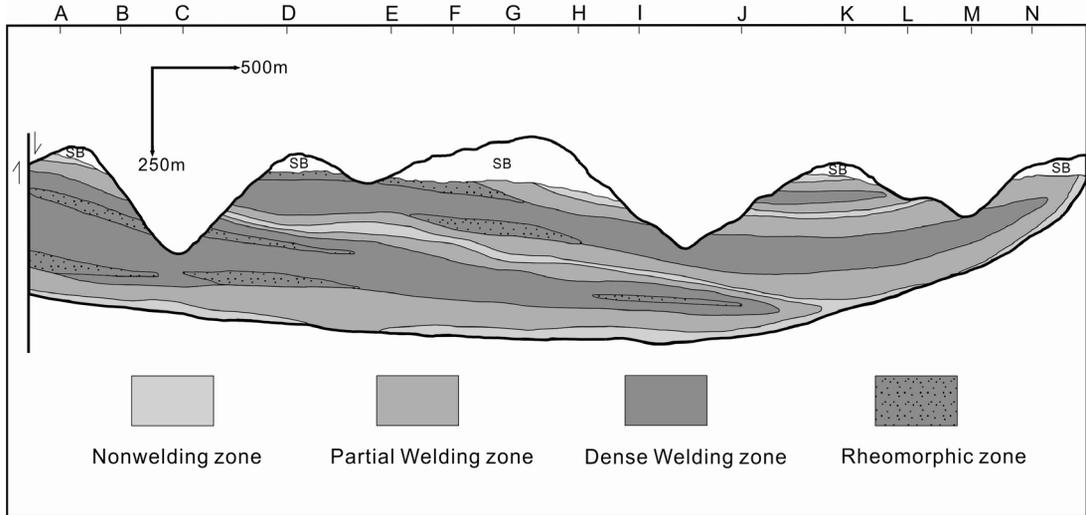
전암 마그마 조성의 차이는 넓은 의미에서 무시

될 수 있고 거의 일정한 편이다. 왜냐하면 SiO<sub>2</sub> 조성이 67.1~79.4% 범위(Hwang and Ryu, 2011)로서 유문암에서 유문테사이트에 속하기 때문이며, 더구나 조성이 이와 다른 부석이 국부적이라도 농집된 경우가 발견되지 않기 때문이다.

휘발성분은 마그마성 휘발성분과 지면에서 유래된 이차적 휘발성분으로 구분될 수 있다. 마그마성 휘발성분은 기공에서 나오고 또한 유리의 계속적인 탈가스로부터 나오며, 화구로부터 이동거리와 함께

감소된다. 그러나 마그마성 휘발성분의 조성 혹은 함량은 지역적인 규모에 따라 크게 변화하지 않는다. 반면에 지면에서 유래된 휘발성분은 지역에 따라 크게 다를 것이다. 화쇄류암체에서 기저부의 용결도는 얇은 물에 정치가 일어났다면 현저하게 감소된다(Riehle, 1973). 그러므로 습윤한 지면으로부터 상승하는 물 유입에 의해 기대되는 것은 동막골융회암의 하부를 냉각시켜 강한 용결작용을 일으킬 수 없다는 것이다. 국지적인 용결도 변화는 물의 차별

(A) Welding zones



(B) Crystallization zones

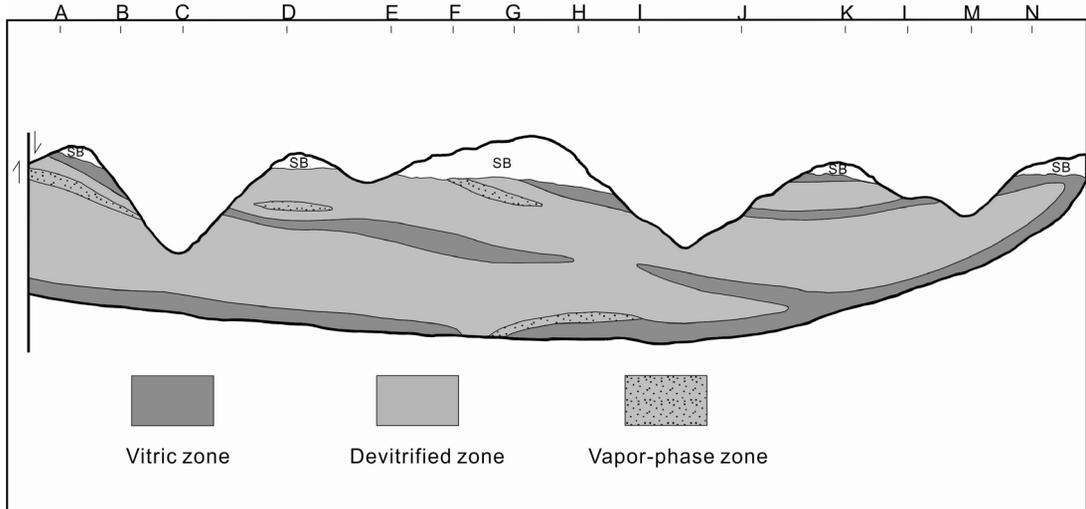


Fig. 6. Cross sections of welding zones (A) and crystallization zones (B). Alphabets and ticks at top show section localities (see Fig. 1). SB represents the Sinseo Breccia.

적 유입에 의해 기록되는 경우를 설명해줄 것이다. 그러나 동막골응회암의 기저부에서는 결정화대가 국부적으로 발견되는데, 이는 보다 강한 결정작용이 지면으로부터 증가되는 휘발성분 유입에 의한 원인이라고 생각한다면 결정화대가 화쇄류암체의 상부에 존재한다는 것(Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith, 1961)을 설명하지 못한다. 그러므로 보다 강한 결정작용은 하부 파리질대에서 보다 적은 용결도에 의해 수반된다고 할 수 있다.

용결작용의 주요 요인은 (1) 온도와 조성에 좌우되는 유리질의 점성과 (2) 퇴적물 두께에 따르는 하중이다. 압편 함량도 역시 용결 발달에 영향을 미칠 수 있다(Eichelberger and Koch, 1979). 실험에 의하면 용결작용은 유문암질 조성에서 약 600~700°C 사이에서 시작되며 하중과 유리의 H<sub>2</sub>O 함량에 따라 달라진다(Friedman *et al.*, 1963). 응회암의 온도조건 변화는 가장 있을 만한 상변화의 원인이 되는 것 같다. 정치 바로 후의 응회암 온도는 초생 마그마온도와 정치시의 온도손실에 좌우되며, 이들은 차례로 축적물과 냉각물에 좌우된다. 즉 용결작용은 고온에서 정치하고 충분한 두께를 가진 화성쇄설층에서 일어난다는 것이다. 한편 일반적으로 용결도는 상위에 놓인 하중과 그 물질의 유리 전이온도(Tg) 위의 온도에서 체류시간의 효과를 반영한다(Riehle *et al.*, 1995). 그렇다면 축적물과 냉각물은 분출기구와 정치기구에 따라 달라질 밖에 없다. 동막골응회암은 중간에 층상응회암을 퇴적시킨 플리니언 및 수증기 플리니언 분출이 두 차례 있었다. 이 분출기구는 소규모지만 분출물을 확산시키는 고에너지 성격이기 때문에 분출물을 저온으로 퇴적시킬 것이다. 따라서 이러한 이유 때문에 동막골응회암은 중간에 얇지만 비용결대가 형성되어 있다. 그러나 동막골응회암은 이 폭발적인 성격을 제외하면 대부분 저에너지 성격을 띠고 두껍게 축적될 수 있는 큰 지형적 저지가 없기 때문에 지역적으로 거의 동일한 정치기구로 축적될 수 있었음을 암시한다. 그러므로 이들 요인은, 서로 복잡한 상호작용을 무시한다면, 국지적 상변화의 특징이 되는 단거리 정치 직후에 큰 온도차이의 원인이 된다고 생각할 수 없다. 필자는 정치 후의 온도과정 즉 주변 온도로의 냉각과정이 일부 지역을 제외하면 국지적 상변화를 제어할 만큼 차이나지 않았을 것으로 생각한다(예, Smith, 1960b; Ross and

Smith, 1961; Cas and Wright, 1987).

용결과정은 고온 유리질 화성쇄설물의 소결작용, 다짐작용과 편평화작용을 포함한다(예, Ross and Smith, 1961; Smith, 1979; Cas and Wright, 1987). 이때 화성쇄설물에서 물성의 현저한 변화가 용결작용에 수반된다. 예를 들면, 용결작용이 강화될 때, 화성쇄설층은 일차 공극률이 축소되고, 밀도가 증가되며(예, Ragan and Sheridan, 1972; Streck and Grunder, 1995; Rust and Russell, 2000) 염리화가 점진적으로 더 커진다(예, Smith, 1960a; Ragan and Sheridan, 1972; Sheridan and Ragan, 1976; Peterson, 1979).

용결작용과 결정작용은 후정치과정 동안에 대부분 일어나며, 공급지로부터 거리와 함께 감소한다. 이때 용결작용과 결정작용은 응회암이 얼마의 시간 동안 임계온도에 도달하여 머물 때 일어난다. 그래서 열 절연체로서 응회암은 꽤 얇은 두께 차이도 어느 정도 중대한 영향을 미칠 수 있다. 용결과 결정화 과정의 상대적인 시간순서는 조직과 야외 증거로부터 추론할 수 있다. 용결작용은 정치되면서부터 가장 먼저 시작되는 과정이다. 일차적 용결작용(Chapin and Lowell, 1979) 혹은 유착작용(agglutination) (Branney and Kokelaar, 1992, 2002)으로 알려진 바와 같이, 흐름의 마지막 단계 때에 유리질 샤아드가 점착되기 시작한다. Sheridan and Ragan (1976)에 의하면, 용결작용 동안에 부석편은 주위의 화산회 기질보다 더 빠르게 변형되며, 부석편은 기질이 아직도 약 10% 공극률을 가졌을 때 완전한 공극률 손실을 보여준다. 그러므로 동막골응회암에서 용결작용은 정치될 때 뜨거운 화성쇄설물이 유착작용으로부터 시작되고 점차 두꺼운 화쇄류층이 냉각되는 동안 하중-다짐작용으로 진행된다고 볼 수 있다. 이때 마지막 정치 단계 직후에는 국지적인 유변작용에 의해 평행 배열상 석리를 발달시킬 수 있었다(Schmincke and Swanson, 1967; Wolff and Wright, 1981; Branney and Kokelaar, 1992).

결정작용은 용결작용을 뒤따라 일어난다. 왜냐하면 이는 용결조직에 중첩되고 얼마의 결정화상이 특이한 용결상과 조합되어 있기 때문이다. 일반적으로 기체상대는 부분용결 응회암에서 산출된다. 보다 더 높은 용결도에서 탈파리화대가 대신 발달된다.

결정작용은 반드시 용결작용을 뒤따라 일어난다(Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith, 1961; Hwang,

1995). 왜냐하면 이는 용결조직에 중첩되고 어떤 결정화대가 특이한 용결대와 조합되어 있기 때문이다. 기체상대는 주로 부분용결대에서 산출된다(Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith, 1961; Hwang, 2007). 그러나 동막공용회암에서는 부분용결대와 치밀용결대에서 주로 산출되는 것이 특징적이다. 이보다 더 높은 치밀용결 응회암에서는 탈파리대가 대신 발달한다. 구과 형성도 용결작용 후에 둘 수 있고 탈파리화대 형성 후인 것 같다. 규질 용암류에서 나온 증거도 역시 구과 형성 중앙부분이 탈파리화된 후에 남은 유리질 물질에서 산출된다는 것을 암시한다(Bonnichsen and Kauffman, 1987). 결정화 과정에서 마지막으로 일어나는 석구의 발달(Hwang, 2007)은 동막공용회암에서 산출되지 않는다.

## 7. 결론

동막공용회암은 대부분 화쇄류암으로 구성되던 중간에 얇은 층상응회암이 협재되어 하부 중부 및 상부 화쇄류암층으로 나누어진다.

따라서 동막공용회암은 비용결에서부터 유변상 특징을 가지는 냉각단위이지만 중간에 비용결대 혹은 부분용결대를 갖는 하나의 복합 냉각단위(compound cooling unit)를 나타낸다.

동막공용회암은 용결상과 결정화상의 수직 및 측방 변화를 가지며 이들에 의해 분대하면 비용결대, 부분용결대, 치밀용결대와 유변상대의 용결대로 나뉘지고 이 용결대에 탈파리대, 기체상의 결정화대가 겹쳐진다.

각 화쇄류암층 내에서 용결대는 일반적으로 외곽부 비용결대, 중간부 부분용결대, 내부 치밀용결대로 나뉘지고 치밀용결대 혹은 이와 부분용결대 경계부에 유변상대가 발달된다. 결정화대는 대체로 부분용결대와 치밀용결대에 탈파리대가 겹치고 부분용결대와 치밀용결대의 경계부에 국부적으로 기체상 결정화대로 겹쳐지며 외곽부에 파리지대로 남아있다.

동막공용회암에서 용결대와 결정화대는 임계온도 위의 냉각의 지속시간에 의해 지배되는 용결작용과 결정작용의 결과인 것으로 해석되며 이 지속시간은 공급지로부터 거리와 두께 차이로부터 좌우된다.

이 응회암에서 냉각과정은 용결작용이 정지 때와 후에 먼저 일어났고 초기 결정작용이 용결작용에 뒤따라 파리지질 물질을 탈파리화시켰으며, 후기 기체상

결정작용이 탈파리대를 중첩하여 발달되었다.

## 사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2010-0009118)의 결과임을 밝힌다. 아울러 이 논문의 향상을 위해 수고해주신 부산대 윤성효 교수님, 경북대 장윤득 교수님과 한국지질자원연구원 이승렬 박사님께 감사드린다. 야외 및 실내작업에서 안동대 화산학실습실 대학생의 도움이 있었다.

## 참고문헌

- Bonnichsen, B. and Kauffmann, D.F., 1987, Physical features of rhyolite lava flows in the Snake River Plain volcanic province, southwestern Idaho. Geological Society of America Special Paper, 212, 119-145.
- Branney, M.J. and Kokelaar, B.P., 1992, A reappraisal of ignimbrite emplacement: progressive aggradation and changes from particulate to non-particulate flow during emplacement of high-grade ignimbrite. Bulletin of Volcanology, 54, 504-520.
- Branney, M.J. and Kokelaar, B.P., 2002, Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. Geological Society Memoir 27. The Geological Society, London, 143 p.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic successions. Allen & Unwin, London, 528 p.
- Chapin, C.E. and Lowell, G.R., 1979, Primary and secondary flow structures in ash-flow tuffs of the Gribbles Run paleovalley, Central Colorado. Geological Society of America Special Paper 180, 137-154.
- Eichelberger, J.C. and Koch, F.G., 1979, Lithic fragments in the Bandelier Tuff, Jemez Mountains, New Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 5, 115-134.
- Freundt, A., 1998, The formation of high-grade ignimbrite; 1: Experiments on high- and low-concentration transport systems containing sticky particles. Bulletin of Volcanology, 59, 414-435.
- Friedman, I., Long, W. and Smith, R.L., 1963, Viscosity and water contents of rhyolite glass. Journal of Geophysical Research, 68, 6523-6535.
- Hwang, S.K., 2007, Cooling processes of the Juwangsang Tuff in eastern Cheongsong, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 43, 353-367 (in Korean with English abstract).

- 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 (in Korean with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- 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, 83 p (in Korean with English summary).
- Kim, K.H., Kim, O.J., Min, K.D. and Lee, Y.S., 1984, Structural, paleomagnetic and petrological studies of the Chugaryeong rift valley. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 17, 215-230 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H. and Song, M.-Y., 1995, Structure and physical properties of the mid-west crust of Korea: Paleomagnetism of the Cretaceous volcanic rocks on Jeongok-Yeoncheon area. *Journal of Korean Earth Science Society*, 16, 65-73 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.S., 1989, Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoic volcanics of Seoul, Korea: Geodynamic implication on the east Eurasian margin. Ph.D. thesis, Orleans University, 349 p.
- Lee, Y.S., Min, K.D. and Hwang, J.H., 2001, The Geodynamic Evolution of the Chugaryeong Fault Valley in a View Point of Paleomagnetism. *Economic and Environmental Geology*, 34, 555-571 (in Korean with English abstract).
- Lofgren, G., 1970, Experimental devitrification rates of rhyolitic glass. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 553-560.
- Lofgren, G., 1971a, Spherulitic textures in glassy and crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research*, 76, 5635-5648.
- Lofgren, G., 1971b, Experimentally produced devitrification textures in naturally rhyolitic glass. *Geological Society of America Bulletin*, 82, 111-124.
- Peterson, D.W., 1979, Significance of the flattening of pumice fragments in ash-flow tuffs. *Geological Society of America Special Paper* 180, 195-204.
- Quane, S.L. and Russell, J.K., 2005, Ranking welding intensity in pyroclastic deposits. *Bulletin of Volcanology*, 67, 129-143.
- Ragan, D.M. and Sheridan, M.F., 1972, Compaction of the Bishop Tuff, California. *Geological Society of America Bulletin*, 82, 111-124.
- Riehle, J.R., 1973, Calculated compaction profiles of rhyolitic ash-flow tuffs. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 95-106.
- Riehle, J.R., Miller, T.F. and Bailey, R.A., 1995, Cooling, degassing and compaction of rhyolitic ash flow tuffs: a computational model. *Bulletin of Volcanology*, 57, 319-336.
- Ross, C.S. and Smith, R.L., 1961, Ash-flow tuffs: their origins, geologic relations and identifications. U.S. Geological Survey Professional Paper, 366.
- Rust, A.C. and Russell, J.K., 2000, Detection of welding in pyroclastic flows with ground penetrating radar: field and forward modeling data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95, 23-34.
- Schmincke, H.U. and Swanson, D.A., 1967, Laminar viscous flowage structures in ash-flow tuffs from Gran Canaria, Canary islands. *Journal of Geology*, 75, 641-664.
- Sheridan, M.F. and Ragan, D.M., 1976, Compaction of ash-flow tuffs. In: Chilingarian, G.V. and Wolf, K.H. (eds) *Compaction of coarse-grained sediments, II*. Elsevier, Amsterdam, 677-713.
- Smith, R.L., 1960a, Ash flow. *Geological Society of America Bulletin*, 71, 795-842.
- Smith, R.L., 1960b, Zones and zonal variations in welded ash-flows. U.S. Geological Survey Professional Paper, 354-F, 149-157.
- Smith, R.L., 1979, Ash-flow magmatism. *Geological Society of America Special Paper*, 180, 5-27.
- Streck, M.J. and Grunder, A.L., 1995, Crystallization and welding variations in widespread ignimbrite sheet; the Rattlesnake Tuff, eastern Oregon, USA. *Bulletin of Volcanology*, 57, 151-169.
- Wolff, J.A. and Wright, J.V., 1981, Rheomorphism of welded tuffs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 10, 13-34.

---

투 고 일 : 2013년 1월 3일

심 사 일 : 2013년 1월 7일

심사완료일 : 2013년 2월 15일