

청송 주왕산응회암의 용결작용과 조직적 진화

황상구

안동대학교 지구환경과학과

요 약

주왕산응회암(350 m 두께)은 결정풍부 파리질응회암(CVT; 15 m), 암편풍부 파리질응회암(LVT; 30 m)과 부석풍부 파리질응회암(PVT; 310 m)으로 구성된다. LVT와 PVT는 하나의 단순 냉각단위를 나타내며 비용결대, 부분용결대와 치밀용결대로 구분되었다. PVT에서 암회색 피아메는 불꽃상, 렌즈상 외관모양을 가지고 세관상, 괴상 내부조직을 가진다. 피아메와 샤아드들은 대개 편평화되어 층리에 평행하게 배열되어 완배열상 석리를 뚜렷하게 나타내며, 편평화비가 상부로 가면서 대체로 감소한다. 이들은 그 경계부가 축열상으로 결정화되거나 혹은 내부가 구과상, 모자익상으로 결정화됨으로서 더 밝은 색을 띤다. 반면에 LVT에서 녹회색 피아메는 불꽃상, 깃털상, 보우타이상, 썩기상의 다양한 형태를 가지고 세관상, 섬유상, 봉합상 내부조직을 가진다. 피아메들은 불량한 편평화로 희미한 평행 배열을 보이며 편평화비가 위로 가면서 대체로 증가한다. 이들은 견운모 혹은 녹니석+견운모로 변질되고 가끔 봉합흔으로 연결된다. 담녹색 기질은 다양한 이차 광물로 변질되어있다. PVT에서 피아메와 완배열상 석리는 화쇄류 축적에 따른 암압 하중에 조합된 용결 다짐작용에 의해 고온 부석편의 편평화와 신장작용의 결과로 해석된다. 이 용결작용의 결과는 층리에 평행한 피아메와 샤아드에 의해 뚜렷한 완배열상 석리를 만들었다. 그리고 용결작용에 뒤따라 피아메와 샤아드는 탈파리작용으로 유리질 조직을 상실하였다. 반면에 LVT에서 피아메는 암편이 풍부한 화쇄류의 축적으로 인한 저온 부석편의 변질작용 및 속성 다짐작용의 결과로 해석되어진다. 이 결과로 부석편은 견운모, 녹니석으로 변질되었고 층리에 평행한 피아메와 봉합흔에 의해 불완전한 완배열상 석리를 만들었다.

주요어: 피아메, 샤아드, 편평화, 완배열상 석리, 용결 다짐작용, 속성 다짐작용

Sang Koo Hwang, 2014, Welding and textural evolution in the Juwangsan Tuff in Cheongsong, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 4, p. 475-488

ABSTRACT: The Juwangsan Tuff (350 m thick) is composed of crystal-rich vitric tuff (CVT; 15 m), lithic-rich vitric tuff (LVT; 30 m) and pumice-rich vitric tuff (PVT; 310 m) accumulated from a series of rhyolitic ignimbrites. The LVT and PVT, which make up a simple cooling unit, are zoned into nonwelding, partial welding and dense welding zones. Dark gray fiammes in PVT have flame-like and lenticular shapes, and tubular and massive internal textures. The fiammes and shards, aligned parallel to bedding, define a distinct eutaxitic fabric, and have upward decrease in flattening ratio. They have lighter colors by having commonly devitrified as axiolites at the borders, and/or spherulitic and mosaic crystals inside. However, green gray fiammes in the LVT have flame-like, feathery, bow-tie and wedge shapes, and tubular, fibrous and stylolitic internal textures. The fiammes, aligned roughly parallel to bedding, perhaps have upward increase in flattening ratio, and define an anastomosing eutaxitic fabric. They are altered into sericite or sericite+chlorite and connected into matrix with various secondary alteration minerals. It is interpreted that the fiammes and eutaxitic fabrics in PVT resulted from flattening and stretching of hot pumice clasts due to welding compaction associated with a lithostatic pressure of hot ignimbrite accumulation. The welding had produced eutaxitic fabrics from fiammes and shards aligned parallel to bedding, then they destroyed many glassy textures from their devitrification following the welding. However, it is interpreted that the fiammes in LVT resulted from alteration and diagenetic compaction of colder pumice clasts due to accumulation of ignimbrites abundant in lithic clasts on the surface. During the diagenesis, pumice clasts had altered into sericite and chlorite, and the fiammes and stylolites produced anastomosing bedding-parallel eutaxitic fabrics.

Key words: Fiamme, Shard, Flattening, Eutaxitic fabric, Welding compaction, Diagenetic compaction

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

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

1. 서 언

피아메(fiamme)와 완배열상 석리(eutaxitic fabric)는 화산암류에서 흔히 나타나는 변형조직이다. 이들은 주로 용결 화성쇄설층에서 산출되며, 따라서 일반적으로 용결조직이라고 불려져왔다(예, Smith, 1960a). 피아메는 흔히 불꽃상 혹은 렌즈상을 나타내며, 용결 작용 동안 화쇄류층에서 뜨거운 유리질편이 함께 달라붙어 소성 변형작용과 편평화작용의 결과라고 해석된다(Smith, 1960a). 완배열상 석리는 편평화된 피아메와 유리 샤아드가 층리와 평행하게 배열되는 것으로 정의된다(Smith, 1960a; Ross and Smith, 1961).

피아메와 완배열상 석리는 용결 화쇄류층(예, Smith, 1960b; Ross and Smith, 1961)뿐만 아니라, 용결 화성쇄설강하층(예, Sparks and Wright, 1979), 용결 관입응회암(예, Wolff, 1986; Hwang, 1995), 용결 자각력암(예, Sparks *et al.*, 1993)에서도 나타나는 특징이다. 한편 유사한 피아메와 완배열상 석리는 드물게 비용결의 변질 부석풍부 각력암(예, Fiske, 1969; Allen, 1988; Branney and Sparks, 1990; Gifkins *et al.*, 2005), 규장질 용암(예, Allen, 1988)에서도 산출된다.

피아메와 완배열상 석리는 여기서 암석 조직 혹은 양상을 기재하기 위해 사용되는 것으로 어떤 특징적 성인을 의미하는 것은 아니다. 피아메는 엽리를 정의해주는 유리질 혹은 탈파리화된 불꽃상 렌즈를 말하며(cf., McPhie *et al.*, 1993), 완배열상 석리는 피아메의 평행배열에 의해 정의되는 엽리를 말한다(cf., Ross and Smith, 1961). 완배열상 석리는 전형적으로 더 어두운 색의 피아메와 더 밝은 색의 기질 간의 대조로 인해 흔히 얼룩상 줄무늬 양상을 보여준다.

용결조직은 화성쇄설층이 정치 동안 혹은 직후에 높은 온도를 유지했음을 의미하며 따라서 육상층에서 흔히 산출된다. 따라서 용결 화성쇄설층의 올바른 판단은 정치환경과 분출유형의 해석에 영향을 미칠 수 있다. 또한 용결조직은 그 암상의 정치후 조직적 진화를 이해하는데 쓸만한 지시자가 될 수 있다.

이 논문의 목적은 주왕산응회암(Hwang, 2007)에서 용결 및 비용결 조직의 예를 기재하는 것이다. 이 응회암층은 피아메 및 완배열상 석리가 존재하지만,

이들의 원인은 암편풍부 파리질응회암과 부석풍부 파리질응회암에서 서로 다른 점이 있다. 따라서 이 논문의 목적은 주왕산응회암의 각 암상에 대해 조직을 자세히 기재하고 그 원인을 찾아 이 응회암의 조직적 진화과정을 밝히는 것이다.

2. 지질개요

청송 동부 태행산에서 주왕산과 무포산에 이르는 주왕산 화산지역은 칼크알칼리 유문암 및 현무암과 국지적으로 약간의 안산암으로 구성되는 화산연속체를 가진다. 이 화산연속체는 변형되지 않았지만 광역 속성변질작용을 겪었다. 이 화산연속체는 4개의 특징적인 주요 응회암층을 포함한다. 이들 응회암층은 정치, 냉각 및 결정화 과정의 타입에 있어서 대조적인 양상을 보여준다.

주왕산 화산지역은 심하게 침식된 화산지대이기 때문에 여러 층서단위를 노출시키며, 이 중에서 산성 화성쇄설암이 가장 우세하며 여러 층으로 구분된다. 이들은 공급지와 조성이 다르기 때문에 지품화산층, 내연산응회암, 주왕산응회암, 너구동층, 무포산응회암, 구암산응회암 등의 여러 층서단위로 구분되었다(Hwang, 2007; Hwang *et al.*, 2007a, 2007b).

주왕산응회암은 주왕산 화산지역의 4개 회류 냉각단위 중에서 상당히 넓은 면적에 분포하는 큰 용적의 화쇄류암 냉각단위 중 하나이다. 즉 이는 청송 동부지역에서 제3기 초기에 일어났던 유문암질 화산작용을 나타내는 대규모 화쇄류암이다(Hwang *et al.*, 2007a, 2007b).

3. 주왕산응회암

주왕산응회암은 능선부에서 너구동층과 무포산응회암층에 의해 덮이기 때문에 불규칙하게 8자 모양으로 분포한다. 주왕산응회암은 그 동쪽 경계부에서부터 서쪽으로 10.5 km, 태행산으로부터 남쪽으로 13 km에 걸쳐 산출되며 거의 모두 주왕산국립공원 내에 분포한다. 그 공급지는 주 분포지로부터 남동동쪽에 위치하는 것으로 알려지고 있다(Hwang

et al., 2007a).

이 응회암은 전체적으로 괴상이고 가장 두꺼운 층(최고 350 m)으로 산출되며(Hwang, 2007), 동쪽과 북서쪽으로 가면서 다소 얇아진다.

주왕산응회암은 사아드, 부석편, 반정(<5%), 암편 등으로 구성되는 화쇄류암이며, 화학적으로 유문암 조성을 나타낸다(Hwang et al., 2007a). 이는 물리적 구성원에 따르면 상부로 가면서 결정풍부 파리질응회암(15 m; CVT), 암편풍부 파리질응회암(30 m; LVT), 부석풍부 파리질응회암(310 m; PVT)으로 구분된다(Hwang et al., 2007b). 이 화쇄류암은 하나의 단일 냉각단위를 이루고 국지적으로 강하게 유변화(rheology)되어 있다(Hwang, 2007). 이들 중에 CVT는 나머지 다른 응회암과는 암석학적인 성질이 다르고 공급지가 다를 것으로 해석되었기(Hwang et al., 2007b) 때문에 여기서 논외기로 한다.

3.1 암편풍부 파리질응회암(LVT)

3.1.1 암질 기재

LVT은 주방 계곡에서 기저부에 약 25 m 두께로 산출되고 측방으로 렌즈상으로 얇아져 침멸된다. 이 암상은 화산회 기질과 암편이 풍부하고 부석이 소량 포함되며 결정이 매우 적은 편이다(그림 2a). 암편은 각상, 블록상 및 등경상 사암, 안산암과 유문암, 매우 드물게 길쭉한 누더기상 이암편을 함유한다(그림 2b). 부석편과 사아드는 다소 넓적하게 편평화되어 기저 경계부를 제외하고 변형된 상태를 나타낸다. 기공들은 전형적으로 얇은 스�멕타이트 막으로 코팅되고 스�멕타이트, 탄산염으로 채워져 있다. LVT에서 광물군은 석영, 견운모, 녹니석, 방해석에 의해 지배된다. 이 부석편들의 모양과 광물은 이들이 산출되는 속성 변질대의 위치를 반영한다. 그리고 녹니석으로의 변질작용은 주방 계곡에서 암석이 녹회색을 띠는 원인으로 생각된다.

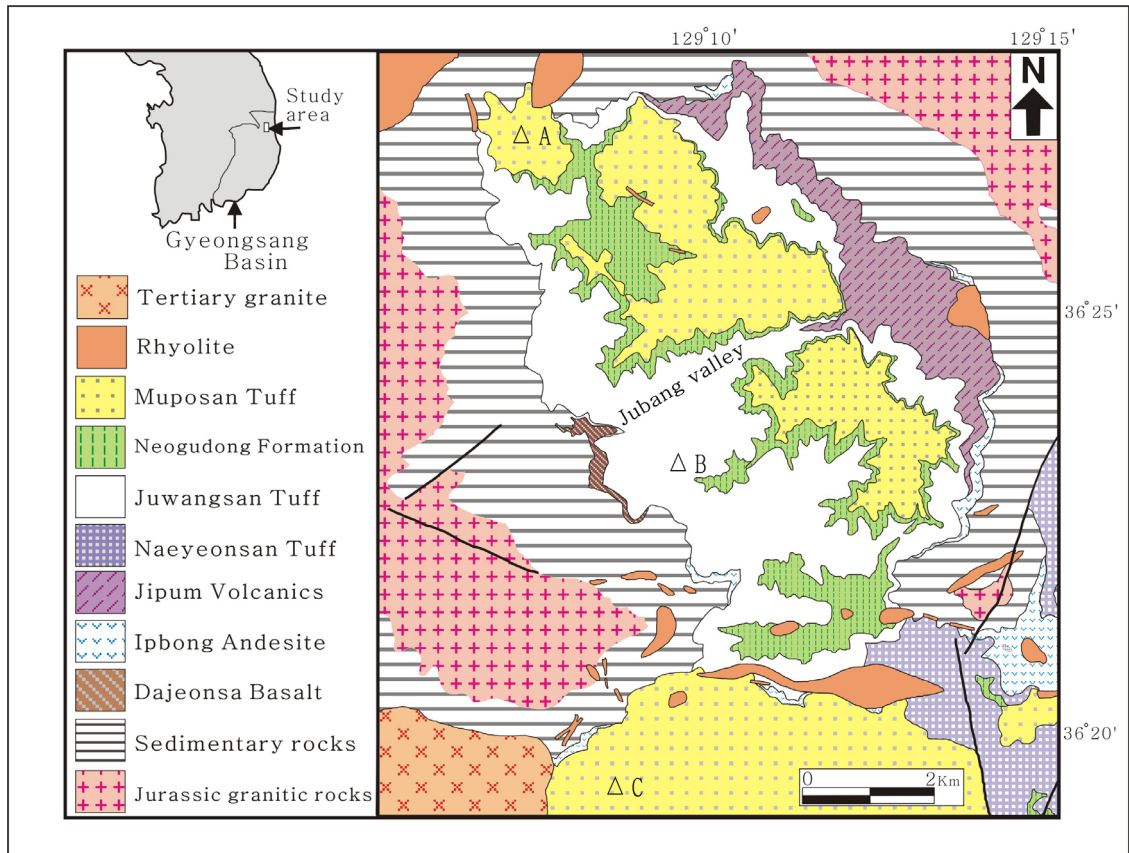


Fig. 1. Generalized geological map of the eastern Cheongsong area in the northeastern Gyeongsang basin. A, Taehangsansan; B, Juwangsansan; C, Muposan.

3.1.2 조직 기재

LVT의 조직은 피아메와 봉합흔(stylolite)을 고려할 수 있으며, 이들의 배열은 층리에 거의 평행하게 나타난다.

(1) 피아메

LVT에서 피아메는 암녹색-녹회색을 띠며 대체로 층리에 평행하게 배열되고 담녹색-담회색 기질 영역에 포함되어있다(그림 2a, 2c). 피아메는 길이가 전형적으로 3 mm-2 cm 이지만 최고 5 cm이다. 이들은 흔히 다져지지 않은 최대 부석편만큼 크거나 혹은 더 크다. 이들의 편평화비는 1.5 이하로 다양하며, 이는 세관상, 섬유상, 다공상, 괴상의 다양한 내부조직의 변화를 반영한다. 작은 편평화비를 가진 부석편은 흔히 덜 다져진 상태로 보존되거나 혹은 부분적으로 다져진 기공을 가지고 있다.

단면에서 피아메는 불꽃상, 보우타이상, 썩기상을

포함하여 다양한 모양을 가진다(그림 2c). 보우타이상 피아메는 비다공상 암편 혹은 결정에 인접하여 흔히 나타나며, 이들 주위에서 휘어져 있다(그림 2d). 이 피아메들은, 길고 얇은 녹니석+견운모+적철석 봉합흔으로 끝난다(그림 2d). 편평화비가 높은 것은 하나의 단일 봉합흔으로서 얇은 끝을 가진다. 이 피아메는 내부적으로 비반상이며, 매우 드물게 장석으로 채워진 기공을 가진다. 이 피아메들은 견운모+녹니석(+방해석)로 변질되어있다(그림 2c, 2d).

(2) 봉합흔

봉합흔은 변질된 화산쇄설암에서 흔하게 나타나는 용해조직이다(Gifkins and Allen, 2001; Gifkins *et al.*, 2005). 이들은 기존 상들(유리상 혹은 광물상)의 기계적 다짐작용과 용해작용의 결과로 나온 봉합상 압력-용식층(solution seam)이며(Merino *et al.*, 1983; Fisher and Schmincke, 1984; Gifkins *et al.*,

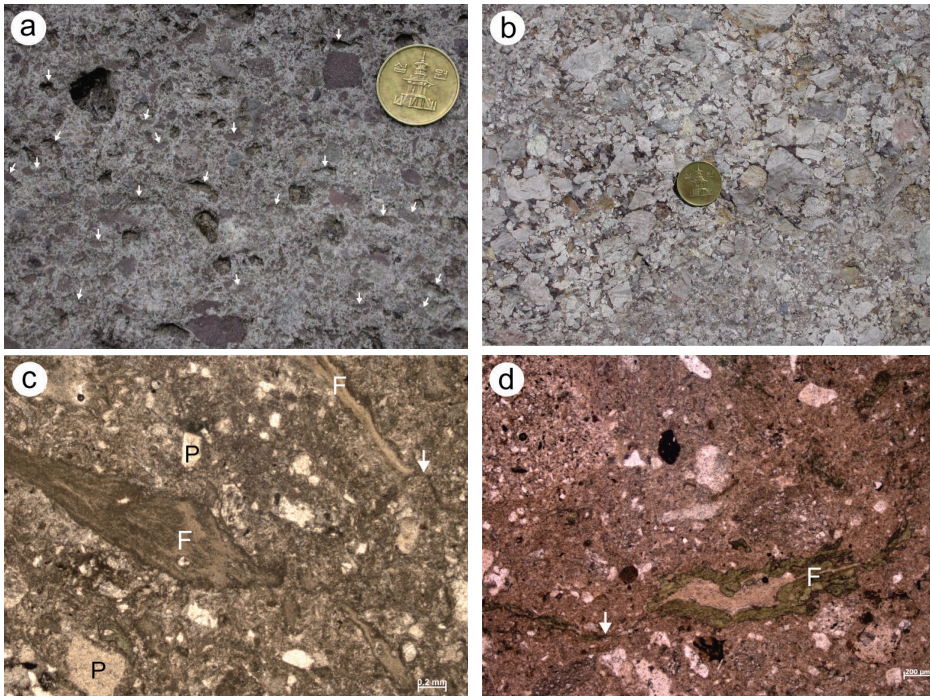


Fig. 2. Typical exposures and photomicrographs of lithic-rich vitric tuff in the Juwangsan Tuff. (a) Lithic-rich vitric tuff containing sparse greenish gray fiammes (arrows); (b) Lithic-rich vitric tuff consisting of angular pumice clasts and various volcanic lithics; (c) Darker flame-like chlorite+sericite fiammes (F) in paler feldspars, quartz and sericite matrix, and plagioclase crystals (P) are dusted with sericite. Open nicol; (d) chlorite+calcite fiamme (F) with a feathery termination, which connects with wispy chlorite+sericite (+hematite) stylolite (arrow), defines the eutaxitic fabric. Open nicol.

2005), 새로운 광물상에 의한 작은 교대작용을 수반할 수도 있다. 이 응회암은 녹니석+견운모+적철석 봉합흔이 피아메의 세관상 기공벽을 따라 층리에 평행하게 기질 내로 연장된다(그림 2d).

3.2 부석풍부 파리질응회암(PVT)

3.2.1 암질 기재

PVT는 암색과 용결도에 따라 기저 회백색 및 상단 유백색 비용결대, 이 보다 어두운 하부 회색 및 상부 회백색 부분용결대를 제외하고 전 두께를 통하여 중부 담회색 치밀용결대로 구성된다(Hwang, 2007). 그러나 하부 회색대는 부분적으로 철의 산화작용에 의해 담갈색을 나타내고 중부 치밀용결대도 북서부 계곡에서 부분적으로 담갈색을 나타낸다.

PVT는 전체적으로 괴상이고 매우 두꺼운 층으로 산출된다. 특히 치밀용결대는 냉각 동안에 발달되는 냉각수축에 의한 주상절리를 발달시키며 수직 절벽을 형성하고(그림 3a), 부분용결대는 석구(lithophysae)를 발달시킨다(그림 3b). 전형적으로 얼룩진 유백색

내지 회색의 비용결대를 제외하면 대부분 얇은 불꽃상 피아메를 함유한다(그림 3c). 암편들은 기저에서 다소 풍부하기 때문에 희미하지만 흐름단위(flow unit)를 인식케 한다. 단일 흐름단위들은 암편풍부 기저에서, 암편이 정점이되는 부석풍부 중부를 지나서, 부석편이 희미한 역점이되는 부석풍부 상부로 점이되는 양상을 나타낸다.

PVT는 분급이 비교적 불량하고 기질지지되어 있다(그림 3c). 이는 비반상의 부석편(15-30 vol%, 0.3-15 cm), 샤아드(30-60 vol%, <0.3 mm), 부수적으로 드물게 결정편(1-5 vol%, <1 mm), 비다공상 화산암편(3-10 vol%, <20 cm)으로 구성된다. 부석편은 비용결대에서 흔히 다져지지 않은 상태로 보존되거나 혹은 부분적으로 다져진 기공을 가지고 있다. 부석편은 비용결대에서 각상 혹은 등경상이지만, 용결대에서 불꽃상, 렌즈상이며 장경이 단경보다 대체로 15배 더 크다(높이:길이=1:5-1:25, 최고 1:40). 이 부석편들의 모양과 광물은 이들이 산출되는 용결대의 위치에 따라 다르다. 용결대에서 기공들은 알칼리장석으로 채워져 있거

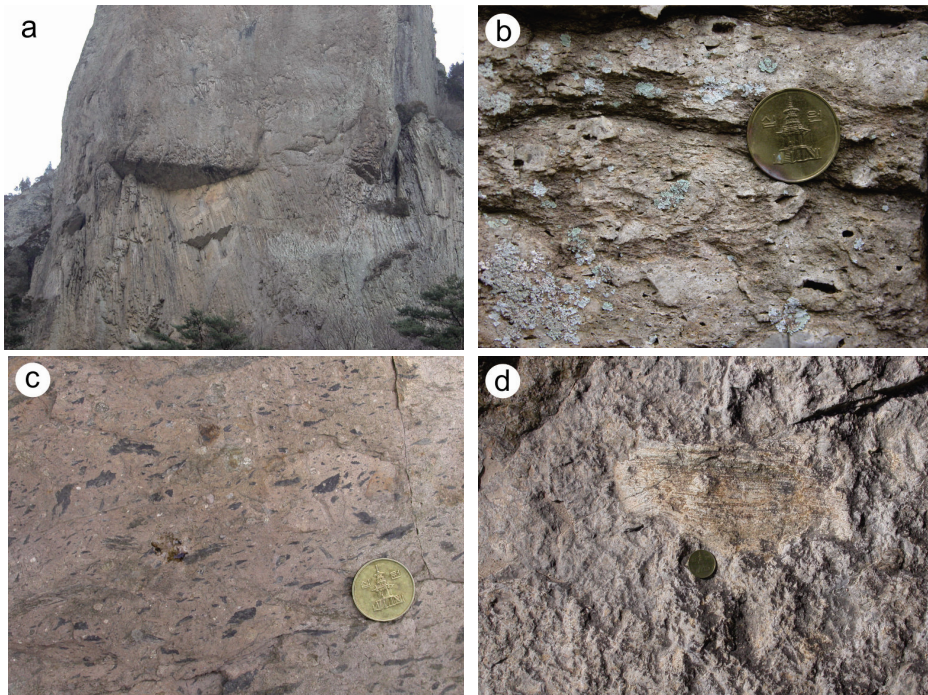


Fig. 3. Typical exposures of pumice-rich vitric tuff in the Juwangsan Tuff. (a) Columnar cooling joints in vertical cliff of the dense welding zone; (b) Lithophysae have a central cavity that is lined by quartz band rimmed by spherulitic crust in the partial welding zone; (c) Dark flammé-like lenses (fiamme) define the eutaxitic fabric in the dense welding zone; (d) A big tubular fiamme in the dense welding zone on plan view.

나 혹은/그리고 석영들이 모자익상으로 채워져 있다.

PVT는 분급이 매우 불량하고, 화산재가 상대적으로 풍부하며, 각 흐름단위 내에서 일반적으로 암편들이 매우 미약한 정점이를 가지고, 부석편들이 매우 미약한 역점이 혹은 불규칙 점이를 나타낸다. 부석편들은 심하게 편평화된 피아메를 형성한다. 이 피아메들은 제멋대로가 아닌 일정한 방향으로 배열되고 완배열상 석리를 나타낸다(그림 3c). 샤아드는 편평화되고 플라스틱하게 변형되고 피아메와 함께 평행 배열되어 완배열상 석리를 갖는다. 이러한 내부조직은 기존연구에서 보고된 화쇄류암의 특징과 일치한다(cf., Sparks *et al.*, 1973; Sparks, 1976).

3.2.2 조직 기재

PVT에서 층리에 평행한 피아메, 샤아드, 석구와 용식층의 배열은 완배열상 석리를 보여준다(그림 3).

(1) 피아메

PVT에서 피아메는 암회색-담회색을 띠며 대체로 층리에 평행하게 배열되고 갈회색-담회색 기질 영역에 함유되어있다(그림 3). 피아메는 전형적으로 5 mm-15 cm 길이를 가지지만 최대 40 cm이다. 이들은 흔히 다져지지 않은 최대 부석편만큼 크거나 혹은 더 크다. 이 피아메의 편평화비의 변화는 1:2-1:25이며, 내부조직은 세관상(그림 3d)에서 괴상까지의 변화를 보여준다. 피아메는 편평화비의 증가에 따라 단면에서 불꽃상(그림 3c)이거나 혹은 얇은 렌즈상을 나타낸다. 피아메의 배열은 흔히 완배열상 석리를 나타내고(그림 3c) 하부에서는 평행배열상 석리(parataxitic fabric)를 나타낸다.

단면에서 피아메는 불꽃상, 렌즈상 등의 여러 모양을 가지며, 평면에서 대개 타원형을 나타낸다(그림 3d). 피아메의 편평화비는 층서적 위치에 따라 강한 상관관계를 가진다. 치밀용결대는 높은 편평화도를 가지는데, 즉 낮은 중횡비를 보여준다. 용결도의 증가에 따라 편평화도는 증가한다. 비용결대는 다져지지 않아 거의 등경상을 나타낸다.

편평화도는 역시 단일 흐름단위 내에서 층서적 위치에 따라 약간의 차이를 가진다. 즉 암편이 풍부한 기저는 다른 위치보다 낮은 편평화도를 가진다. 그러나 이 관계는 일차적 구성원과 이차적 변질광물의 다양한 상대적 비율 때문에 늘 일치하지 않는다.

부석편의 내부조직은 대부분 비반상이며, 비용결대에서 장석-충전 기공을 가진다(그림 4a). 그러나 이 피아메의 내부는 교차 니콜 하에서 봤을 때, 대개 세립질 석영과 알칼리장석의 결정화로 파괴되어 있다. 상대적으로 더 밝은 부분은 대체로 결정화된 부분을 나타낸다. 피아메 윤곽은 그 경계부에 석영과 알칼리장석의 은미정질 축열상 구조(axiolitic structure)에 의해 대체로 잘 보존되어 있으며(그림 4b, 4c, 4d, 4e, 4f), 그 내부는 미정질의 구과상 연정으로 결정화되어 있다(그림 4b, 4c, 4e, 4f). 이는 부석편이 약간 더 공격적인 양상을 가지기 때문에 더 쉽게 결정화된 것을 보여준다. 특히 피아메 중심부는 공격 내에 잡혀있던 가스로부터 더 조립질의 모자익상 연정에 의해 심하게 파괴되어 있다(그림 4d, 4e, 4f). 이들의 윤곽이 보존된 것도 있지만 윤곽을 알아볼 수 없을 정도로 파괴된 것도 흔하다. 그림에도 불구하고 극미립의 산화철 색소가 기질의 유리질에서와 마찬가지로 무수히 산재되어 있다(그림 4b, 4d, 4e). 반면에 이 피아메는 그 내부에 산화철 색소가 없는 부분과 있는 부분이 평행하게 배열되어있으며, 중심부에는 불규칙하게 산화철 색소가 거의 없는 부분도 있다(그림 4e, 4f). 산화철 색소의 평행배열은 결정화 이전의 세관상 조직의 존재를 암시한다(그림 4d).

(2) 샤아드

경하에서 비용결대의 샤아드들은 속성 변질작용(diagenetic alteration)으로 인한 스멕타이드의 어두운 막(dark film)으로 둘러싸여 경계를 뚜렷하게 한다(그림 4a). 유리질 샤아드 간에 약간의 접촉이 있을 수 있고 샤아드의 원래 조직을 파괴하지 않고 거의 원래 모양을 간직하는 파리쇄설 석리를 나타낸다(그림 4a). 그러나 초기부터 유리질 물질의 유착은 일어나지 않았다. 이들은 부분적으로 은미정질 축열상 구조에 의한 초기 탈파리작용(devitrification)을 나타내지만, 이와 대조적으로 더 어두운 부분은 대체로 파리질을 나타낸다. 이는 초기 화쇄류가 용결될 만큼 뜨거웠지만 공기와 접촉하여 매우 빠르게 냉각되어 탈파리화되지 않았음을 암시한다.

용결대의 샤아드들은 부석편과 마찬가지로 렌즈상으로 편평화되고 압착되어 평행배열을 발달시키며 반정 혹은 암편 주위를 감싸면서 굴곡되는 완배열상 석리를 나타낸다(그림 4b, 4c, 4d). 샤아드들은

하부에서 더욱 가늘고 길게 세장되어 원래 모양을 찾아볼 수 없을 정도로 신장되어 평행배열상 석리를 나타내기도 한다(그림 4e, 4f). 경하에서 샤아드의 심한 편평화에 의해 원래 모양이 완전히 사라졌고 대부분 공극이 지워졌지만 긴 포크형 구조를 드물지만 보존하고 있어 압착의 증거를 알 수 있다.

이와같이 샤아드들이 렌즈모양으로 심하게 얇아지고 평행배열되고, 동시에 주위의 장애물을 감싸면서 굴곡되는 완배열상 석리 혹은 평행배열상 석리를 나타내는 것은 화쇄류가 정지하면서 샤아드들이 하중에 의해 심하게 짓눌려진 상태로 서로 달라붙는 강한 용결작용이 있었음을 지시한다.

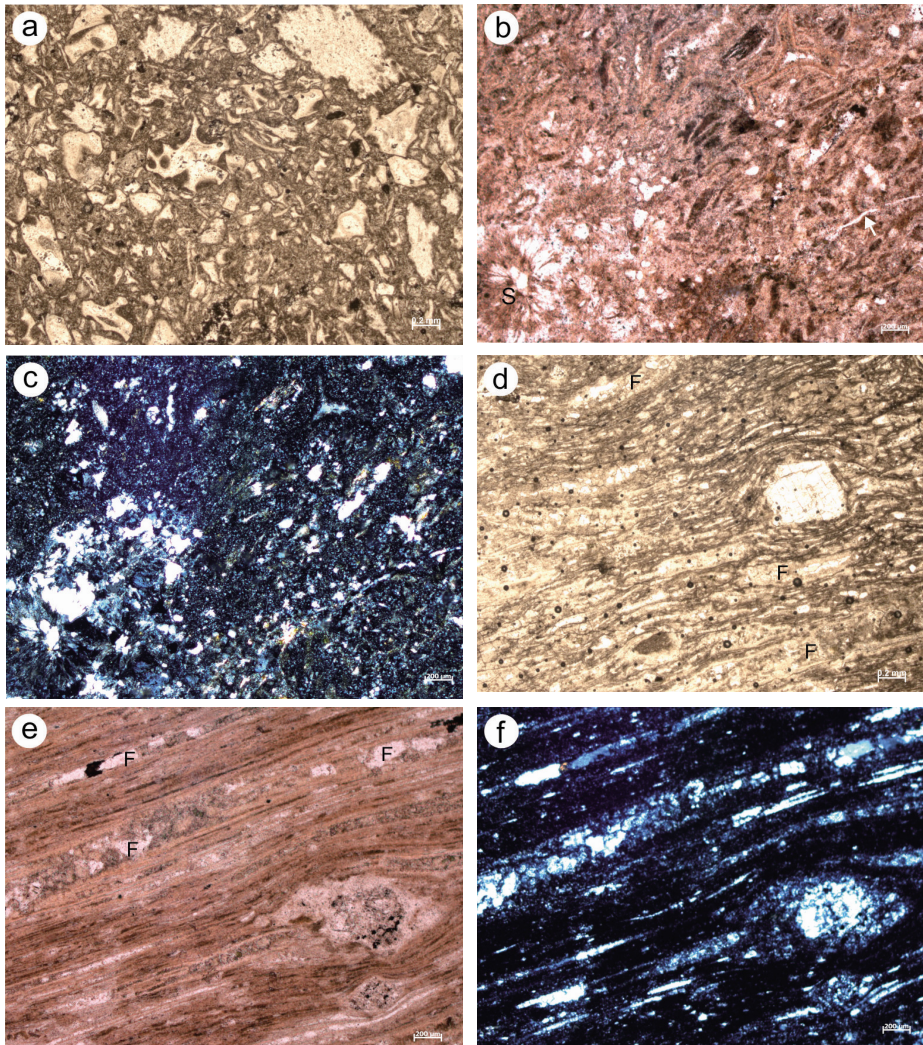


Fig. 4. Photomicrographs of pumice-rich vitric tuff in the Juwangsan Tuff. (a) Vitroclastic fabric recognized from shard structures in the nonwelding zone. Open nicol; (b) Slightly flattened vitric shards defined by cryptocrystalline axiolitic intergrowth along their borders in the partial welding zone, and pumice clast (light areas) destroyed by spherulitic crystallization (S), from which quartz-filled solution seam (arrow) passes away. Open nicol; (c) The same field as in (b) under crossed nicols; (d) Eutaxitic fabric from highly flattened shards and some fiammes (F) molded against crystals in the dense welding zone, and devitrified along the border into axiolitic crystallization. Open nicol; (e) Parataxitic fabric from very highly flattened shards and fiammes that are devitrified into microcrystalline axiolites in the dense welding zone; the fiammes (F) are crystallized by spherulitic and mozaic intergrowth of coarser-grained quartz and alkali feldspar. Open nicol; (f) The same field as in (e) under crossed nicols.

샤아드는 피아메와 유사하게 비파리질(stony or lithoidal) 성격에 의해 보여주는 바와 같이 세립질 석영과 알칼리장석의 결정화에 의해 탈파리화되어 있다. 샤아드는 그 경계부에 직각으로 결정화된 알칼리장석과 석영의 은미정질 축열상 구조에 의해 인식되며(그림 4), 큰 샤아드는 그 내부가 좀 더 큰 미정질로 결정화되어 있다(그림 4a). 이러한 부분은 열린니콜하에서 주위보다 밝고 선명하지만 아주 미세한 미립의 산화철 색소가 무수히 흩어져 분포한다(그림 4a, 4b, 4d, 4e). 이러한 샤아드 결정화로 인해 용결대는 원래 암회색을 띠었던 것이 대부분 담회색을 띠게 된 것으로 보인다.

(3) 석구

석구는 금은광이 동쪽 산복의 상부 부분용결대의 하단에서 최고 약 20 m 두께로 산출된다. 석구의 분포는 기질 내에 단지 몇 개로부터 수많은 석구까지 다양하다. 석구의 직경은 5-10 cm 내외로 다양하며 석구의 특이한 타입으로 최대 직경 15 cm 되는 것도 있다. 석구의 모양은 대체로 타원형이며 이들은 거의 수평으로 층리에 평행하게 배열된다.

석구들은 모두 결정들로 딱 차거나 혹은 벽을 결정들로 도배하고 부분적으로 속빈 상태로 존재한다(그림 2b). 이 공동들은 안쪽으로 향하는 침상 석영 결정으로 도배되고 경우에 따라 내부에 방해석과 녹니석 결정을 함유한다.

이 석구들은 용결 후에 탈파리작용 동안 보존된 휘발성분으로부터 기체상 결정작용에 의한 것이다. 이 기체상 결정작용은 화쇄류에서 유리질 내에 많은 휘발성분을 용액상태로 함유했다는 것을 의미한다(Ross and Smith, 1961). 이 휘발성분은 용결 후에 탈파리작용 동안에 빠져나온 것이며 냉각동안 화쇄류가 부분적으로 결정화되면서 석영을 결정화시켰으며, 냉각 후에 방해석과 녹니석을 침전시켰다. 탈파리작용 동안에 유리질로부터 빠져나온 가스들은 석구 내에 축적되고 단열을 일으킬 만큼 충분한 압력을 가할 수도 있다.

(4) 용식층

용식층은 응력(stress)과 관련하여 녹기쉬운 구성물질의 용해와 침전의 결과로 속성작용 동안 형성될 수 있는 비불합상, 불연속적 광물-충전 층(seam)이다(Merino *et al.*, 1983). 주황산용회암의 PVT에서,

얇은 석영+적철석 용식층이 간혹 피아메 내의 모자익상 연정으로부터 샤아드-풍부 기질 속으로 뻗어나간다(그림 4b). 이 용식층은 주로 석영으로 구성되지만 적철석으로 혼탁되는 경우도 있다. 이들은 압류되고 대체로 층리에 평행하며, 다른 피아메로 연결시켜주는 경우도 있다. 반면에 층리에 평행하지 않고 피아메와 가로질러 샤아드-풍부 기질 속으로 뻗치는 경우도 있다.

4. 토 의

4.1 LVT에서 피아메의 형성

LVT는 드물게 피아메와 완배열상 석리를 나타낸다. 이 예에서, 피아메들은 예리한 것털상 끝을 가진 외관모양, 부분적으로 보존된 다공상 및 세관상 내부조직이 편평화된 부석편이라는 해석을 지지해준다. 부석편은 초기에 높은 기공도(vesicularity)를 가지기 때문에, 매몰과 수반된 용결작용 동안에, 두꺼운 화성쇄설층에서 하중 압력에 조합된 기계적 다짐작용에 의해 쉽게 수정된다(Peterson, 1979; Allen, 1988; Branney and Sparks, 1990).

피아메는 편평화비가 일반적으로 다져지지 않은 부석편보다 크며 흔히 그 길이가 더 길다. LVT에서 피아메는 0.5 mm-5 cm 범위로 산출되며, 이들의 초과 길이는 화성쇄설층의 다짐작용의 결과이다.

편평화비의 변화는 용결도, 변질 광물 및 강도에 크게 관련되어 있다. (1) 총상규산염 광물군이 변질 광물로 나타나는 곳에서, 편평화비는 일반적으로 가장 크다. 피아메는 전형적으로 내부가 괴상이고 얇은 끝을 가지며 가끔 봉합흔이 수반된다. (2) 장석 혹은 석영이 변질광물로 산출되는 곳에서, 편평화비는 낮은 편이다. 피아메는 전형적으로 내부조직이 섬유상이고 부분적으로 다공상이며 외관모양이 솔상(brush-like) 끝을 가진다. (3) 탄산염으로 강하게 변질된 영역은 편평화의 증거를 보여주지 않는다. 그러므로 부석편은 내부조직이 빈 세관상 부석으로부터 다져진 세관상 피아메를 거쳐 괴상 피아메까지의 범위를 가지는데, 이는 편평화비의 증가에 관련된다. 필자는 매몰 동안에 암압 하중이 점토, 견운모 혹은 녹니석 등과 같은 기계적으로 약한 광물로 변질되는 세관상 부석편을 편평화시킬 수 있다고 판단한다.

균질한 변질작용을 일으킨 흐름단위에서, 편평화비

는 이 단위의 기저보다 하부에서 가장 높다고 생각된다. 왜냐하면, 강한 속성작용은 아마도 두꺼운 공극성 지층의 하부에서 자체 하중에 의해 더 강하게 일어나기(예, Branney and Sparks, 1990) 때문이다. 그리고 피아메의 다양한 외관모양과 내부조직은 일차적 부석 모양, 변질작용, 견고한 고체(암편, 결정)에 대한 차별적 다짐작용을 반영하는 것으로 생각된다.

LVT에서 봉합흔은 층리에 평행하는데, 이는 이들이 매몰된 후에 속성작용 동안에 만들어졌던 것으로 생각된다. 이들은 매몰 동안에 암압 하중에 따라 녹기 쉬운 구성물질, 특히 유리질의 용해작용에 의해 형성되었던 다짐 및 용해 석리로 해석된다. 더욱이 봉합흔은 피아메와 기질에서 상당한 체적손실을 일으켰던 증거임을 암시한다. 또한 피아메의 층리-평행 배열과 봉합흔과 공간적 조합은 매몰 동안에 암압 하중의 결과로 일어나는 속성 다짐작용(diagenetic compaction)과 일치한다.

부석편은 크기가 수평방향에 대해 수직방향으로 5배 이하로 축소되어있다. 다짐작용은 오로지 약 6개 인자에 의해 크기의 수직적 축소를 설명할 수 있다(Peterson, 1979). 즉 피아메로부터 증명되는 바와 같이, 기공의 압착에 수반되는 다짐작용은 본질적으로 체적축소를 가져올 수 있고 여기서 부석의 수직적 축소를 일으켰다.

LVT에서 피아메는 매몰 동안에 암압 하중의 증가에 따라 변질되고 편평화되었던 원래 비교적 저온 유리질 부석편으로 해석된다. 이 변질작용은 대개 속성 변질작용이었다고 생각된다. 결과적으로 변질된 부석편의 편평화는 속성 다짐작용에 의해 이 응회암에서 희미한 완배열상 석리를 만들었다.

4.2 PVT에서 피아메와 완배열상 석리의 형성

PVT는 화쇄류암이며 용결도에 따르면 대부분 치밀용결대로 구성되고 외곽으로 차례로 부분용결대와 비용결대가 둘러싼다(Hwang, 2007). 그래서 이 응회암은 비용결대를 제외하고 피아메가 풍부하고 흔히 완배열상 석리를 나타낸다. 용결대에서 피아메들이 대부분 불꽃상과 렌즈상 외관모양과 다져진 세관상 내부조직을 보이는 것은 이들이 편평화된 부석편이라는 해석을 강하게 지지한다. 부석편은 초기에 높은 기공도를 가지기 때문에, 매몰과 이에 수반된 용결작용 동안에, 두꺼운 화성쇄설층의 하중 압력에

조합된 기계적 다짐작용에 의해 쉽게 수정된다.

PVT에서 피아메는 길이가 5 mm에서 40 cm 범위이다. 늘어난 피아메 길이는 쇄설물 집합체의 다짐 혹은 층리에 평행한 신장작용의 결과로 보인다. 균질한 다짐작용을 일으킨 단위에서, 이들의 편평화비는 이 단위의 기저를 제외하고 하부에서 가장 높다. 왜냐하면, 아마도 강한 다짐작용은 하부에서 자체 하중에 의해 더 강하게 일어나기(예, Branney and Sparks, 1990) 때문이며, 기저에서는 다짐작용에 저항하는 비다공성 암편들이 많이 포함되기 때문이다.

피아메의 외관모양은 일차적 부석 모양, 용결작용, 암압 하중, 견고한 고체(암편, 결정)에 대한 차별적 다짐작용 등에 영향을 받는 것으로 생각된다. 내부조직은 일차적 내부조직(비반상, 반상, 세관상), 용결작용, 암압 하중, 결정작용 등에 지배되는 것으로 보인다. 특히 기체상 결정작용은 피아메의 내부를 크게 수정하고 결정도를 크게 반영하는 것 같다.

PVT의 상단에서 비변형 상태는 편평화가 이들 암층의 진화에서 초기부터 일어났음을 암시해준다. 기질내지 피아메에서 비변형된 기포벽 샤아드와 세관상 부석편의 존재에 의하면, 편평화는 오로지 용결작용에 의해서만 일어나지 않았음을 지시해준다(cf., Smith, 1960b; Ross and Smith, 1961). 그러나 PVT의 중·하부에서 변형된 피아메와 샤아드가 층리와 평행 배열과 이들의 공간적 조합은 용결작용 동안에 암압 하중의 결과로 일어나는 다짐작용과 일치한다. 즉 화쇄류가 정치하면서 피아메와 샤아드들이 하중에 의해 심하게 짓눌려진 상태로 서로 달라붙는 강한 용결 다짐작용(welding compaction)이 있었음을 지시한다.

부석편은 크기가 수평에 대해 수직적으로 2-25배로 축소되어있다. 피아메로부터 증명되는 바와 같이, 기공의 압착에 의해 수반되는 용결 다짐작용은 본질적으로 체적축소에 기여했으며 여기서 수직적 크기의 축소를 설명할 수 있다(Peterson, 1979).

PVT에서 상단을 제외하면 피아메와 샤아드는 용결작용 동안에 암압 하중의 증가에 따라 편평화되고 결정화되었던 원래 뜨거운 유리질 부석편과 샤아드로 해석된다. 부석편과 샤아드의 편평화는 이 응회암에서 완전한 완배열상 석리를 만들었다. 부석편과 샤아드의 내부는 유리질 조직이 부분적으로 결정질 조직으로 변하였다. 이들의 경계부는 축열상 조직으로 변하고 피아메의 내부는 구과상 혹은 미문상 조직과

중심부에 모자익상 조직으로 변했다. 그러나 이들은 결정화 영역에 산화철 색소가 남겨두어서 결정화되기 전에 유리질이었음을 알려준다. 특히 피아메의 결정화에도 불구하고 산화철 색소의 평행배열로 결정화 이전의 세관상 조직의 존재를 인식할 수 있다.

경계부의 축열상 결정들은 냉각시 샤아드와 주위의 미세한 화산회와의 접촉부에서 서로간 이온교환에 의하거나 혹은 샤아드 자체 내의 휘발성물질의 함유로 인하여 유리질로부터 초현미경적 내지 은미정질의 석영-알카리장석질 연정으로 결정화된 탈파리작용을 나타낸다(Lipman, 1965). 그런데 모자익상 조직부분은 극미립의 산화철 색소가 거의 없는 상태이다. 이는 아마도 정치시에 공동으로 빈 상태에서 휘발성물질로부터 결정화된 기체상 결정작용(vapor-phase crystallization)에 의한 것임을 암시한다(Smith, 1960a). 기체상 결정작용은 화쇄류에서 유리질 내에 많은 용존 휘발성분을 함유했다는 것을 암시한다(Ross and Smith, 1961).

4.3 피아메와 완배열상 석리의 원인과 차이

고기 화산 연속체에서 용결 다짐작용과 속성 다짐작용의 원인은 미묘한 조직과 압상 특징으로부터 알 수 있다.

여러 기존 연구자들에 의하면, 용결 다짐작용은 피아메가 한때 뜨거웠고 유리질이었던 쇠설성 기질과 조합되어 있는 곳에서만 오로지 확실하게 성립될 수 있다고 인식되어 왔다(예, Smith, 1960b; Branney and Sparks, 1990). 예를 들면, 쇠설성 기질은 진주상 열극, 구과, 석구 혹은 유변상 구조(선구조, 습곡, 자가각력 압)를 보여줄 수 있고, 그리고/혹은 이런 압층은 주상절리를 발달시킬 수 있다(Branney and Sparks, 1990). 그러나 용결 다짐작용에 대한 명료한 증거는 기질에서 플라스틱한 변형과 편평화를 일으킨 용융된 유리 샤아드와 세립 부석편의 존재에서 가능하다(Smith, 1960b; Cas and Wright, 1987). 편평화와 신장작용이 유대상 용암과 매우 얇은 용결 화쇄류암은 굴곡 작용(distortion)이 여러 범위로 다양하게 나타난다(Smith, 1960b). 굴곡의 증거는 샤아드들이 결정들의 날카로운 모서리를 비껴가면서 감싸는 곳과 이들이 2개의 인접 결정 사이의 압착되는 곳에서 잘 보존될 수 있다. 그리고 등근 기포와 기포벽 샤아드는 흔히 렌즈상으로 압축되어있다. PVT는, 노두에서 석구와

주상절리가 발달되고 경하에서 유리 샤아드와 세립 부석편의 편평화와 굴곡이 강하게 일어났기 때문에, 피아메와 완배열상 석리가 용결 다짐작용에 의한 것임을 강하게 지시한다. 그러나 LVT는 피아메의 편평화가 존재하지만 주변의 기질에서 압편들 사이에 임의 방향의 다져지지 않은 부석편과 샤아드들이 드물게 존재하는 점에서 이들의 편평화가 속성 다짐작용에 의한 비용결 압층의 특징이라고 할 수 있다.

용결 다짐작용과 속성 변질작용 및 다짐작용은 모두 부석편의 성격을 크게 변화시킬 수 있다. PVT에서 용결 다짐작용 동안, 내부 공극률의 대부분은 사라지고, 색깔은 화학조성에 따라 백색, 회백색 혹은 갈색으로부터 암회색 혹은 암갈색으로 변하며, 모양은 점차 강하게 편평화되어 렌즈상으로 변형된다(Ross and Smith, 1961). 왜냐하면 용결작용은 유리질이 철의 산화상태에 따라서 암색계통으로 색변화를 일으키기 때문이다(Smith, 1960a; Cas and Wright, 1987). 또한 용결작용에 의한 어두운 색깔은 유리질의 탈파리작용과 기체상 결정작용으로 담회색 혹은 담갈색으로 변한다. 그러나 LVT에서 속성 변질작용 및 다짐작용 동안, 부석편들은 층상규산염이 풍부한 광물군으로 변질되고 편평화될 수 있었지만, 탈파리작용에 의한 축열상 조직과 구과상 조직을 형성하지 못하였다. 그러나 두 암상에서 피아메들은 용결 다짐작용 혹은 속성 다짐작용에 의해 완배열상 엽리를 형성할 수 있었다.

PVT의 용결대에서 피아메는 전형적으로 수직 크기보다 수십 배 더 큰 수평 크기를 가진다. 강하게 편평화된 피아메(1:25)는 단순한 공극의 손실을 넘어 편평화되었고 층리에 평행한 점성류(viscous flow)의 결과로 해석되었다(Ross and Smith, 1961). 그리고 강하게 편평화된 피아메는 다짐작용이 부분 용해(partial dissolution)를 일으켰다는 것을 지시하는 압력-용식 조직을 드물게 가진다.

용결 및 비용결 화쇄류암에서 다짐 정도는 하나의 단일 흐름단위 내에서 다양하게 산출될 수 있다(예, Ross and Smith, 1961). 그러나 용결 화쇄류암은 단위의 상단에서 낮은 다짐 정도로부터 기저쪽으로 강하게 더 높은 다짐 정도의 누대를 발달시킨다(Peterson, 1979). PVT에서 수직 편평화 정도는, 다소 불규칙하지만, 많은 압편을 가진 각 흐름단위의 기저를 제외하면 높은 편평화비를 나타낸다. 또한 하나의 흐름

Table 1. Textural variations and possible affinities of fiammes and shards in the Juwangsan Tuff.

Stratigraphy		Textures of fiammes and shards			Possible affinities			
		Description	Fabrics	Flattening	Welding	Diagenesis		
upper ↑	PVT (310 m)	Non-welding zone	Randomly oriented equant pumice clasts enclosed in a matrix of uncompact bubble-wall, cusped and crescendo shards; vesicular and tubular internal textures in pumice clasts; some locally devitrified into axiolites in the borders.	Vitroclastic	↓	↑	↑	
		Partial welding zone	Slightly flattened flame-like fiammes and shards; containing aphyric and massive internal textures; aligned parallel to bedding; some devitrified into axiolites in the borders and spherulites in the interior of the fiammes	Eutaxitic	↓	↓ Welding	↓ Compaction	↓ Alteration
		Dense welding zone	Highly flattened lenticular fiammes and shards; some containing aphyric and massive internal textures; aligned parallel to bedding; devitrified into axiolites in the borders and spherulites in of the interior the fiammes	Eutaxitic and parataxitic	↓	↓	↓	↓
lower ↓	LVT (25 m)	Almost Non-welding zone	Abundant in volcanic lithic clasts; flame-like, feathery, bowtie and wedge fiammes with fibrous and stylolitic internal textures, enclosed in matrix of randomly oriented cusped shards and volcanic ashes, altered into sericite and chlorite, and aligned roughly parallel to bedding.	Anastomosing eutaxitic	↑	↑	↑	
	CVT (15 m)	Excluded because it chemically shows different variation trends with the above sequences						

Arrows represent the increase in degree of flattening or each possible affinity toward them.

단위 내에서, 속성 다짐작용을 겪은 LVT에서 편평화비의 범위는 매우 크지만 용결 PVT에서 편평화비의 범위는 매우 좁은 편이다.

용결 및 비용결 압층에서 완배열상 석리는 모두 피아메의 배열에 의해 정의되는 층리에 평행한 엽리를 나타낸다. 그러나 비용결 LVT에서 완배열상 석리는 매우 희미하고 서로 만나 합류하는 모습을 보이지만, 반면에 PVT에서 엽리는 전형적으로 판상으로 평행한 양상을 나타낸다.

4.4 조직적 진화과정

용결과 결정화 과정의 상대적인 시간순서는 조직적 증거로부터 추론할 수 있다(표 1). 용결작용은 정치되면서부터 가장 먼저 시작되는 과정이다. 일차적 용결작용(Chapin and Lowell, 1979) 혹은 유착작용(agglutination) (Branney and Kokelar, 1992, 2002)으로 알려진 바와 같이, 화쇄류는 흐름의 마지막 단계 때에 유리질 샤아드가 접촉되기 시작한다. 이때

샤아드와 부석편은 아마도 유리 표면의 접촉과 함께 즉시 시작된다. 유리질 샤아드의 실험에 의하면, 용결작용은 유문암질 성분에서 약 550°C 아래에서 샤아드의 변형이 무시할 정도로 인지되고 약 600°C와 750°C 사이에서 용결이 시작되며 최저용결온도는 유리질의 휘발성물질 함량과 화학성분에 따라 달라진다(Friedman *et al.*, 1963; Yagi, 1966; Fisher and Schmincke, 1984).

PVT에서 부석편과 샤아드들은 일차적으로 600°C 이상의 온도에서 서로 접촉되어 용결작용이 일어나기 시작하였다. 화쇄류가 두껍게 중첩됨으로서 이들은 자체의 하중에 의해 불꽃상 내지 렌즈상으로 편평화되고 압착되어 평행배열을 발달시키며 완배열상 석리를 발달시켰다(그림 4e). 이들은 하부에서 원래 모양을 찾아볼 수 없을 정도로 더욱 얇고 길게 신장되어 평행배열상 석리를 발달시키기도 하였다(그림 4f). 따라서 등경상 부석편은 불꽃상 내지 렌즈상 피아메로 편평화되었으며, 흔히 그 내부에 갖고

Table 2. Timing of textural evolution relative to the cooling processes of the Juwangsan Tuff.

Magma	Supercooled liquid	Glass
T_m ————— T_g ————— \rightarrow Temperature decrease		
Welding	—————	
Welding compaction	—————	
Vapor-phase crystallization	—————	
Devitrification	—————	
Diagenetic compaction	—————	
Diagenetic alteration	—————	

T_m : magma temperature; T_g : glass transition temperature

있던 세관상 기공들은 납작하게 축소되어 거의 대부분 혹은 완전히 상실하였다. 원래 샤아드들은 Y자형 반달형, 창촉형이지만 피아메와 함께 길쭉한 렌즈상으로 편평화되고 서로 밀착되어 평행배열을 발달시키며 반정 혹은 암편의 주위를 감싸면서 굴곡되었다. 따라서 샤아드의 심한 편평화는 원래 모양이 완전히 사라졌지만 긴 포크형 구조의 보존으로부터 알 수 있다.

그러나 PVT 상단의 비용결대에서 부석편과 샤아드들은 하중의 결어로 서로 간에 약간의 접촉만 있을 뿐, 이들의 원래 조직을 파괴하지 않고 거의 그대로 간직하는 파리쇄설상 석리를 보존할 수 있었다(그림 4a). 그러므로 PVT에서 용결작용은 정치될 때 뜨거운 화성쇄설물이 유착작용으로부터 시작되고 점차 두꺼운 화쇄류층이 냉각되는 동안 하중-다집작용으로 진행되었던 것이다.

PVT에서 피아메와 샤아드는 용결작용 동안에 암압 하중의 증가에 따라 편평화되면서 결정화되는 원래 뜨거운 유리질이었다. 왜냐하면 이들은 용결 다집작용에 의한 외관모양을 유지하면서 그 경계부 혹은 내부조직을 규칙적인 결정화를 보여주기 때문이다. 따라서 이 결정작용은 용결작용을 뒤따라 고온 상태에서 일어났다고 생각된다(Smith, 1960a, 1960b; Ross and Smith, 1961; Hwang, 1995).

이 단계는, 부분적으로 일차적 공극을 채우고 유리를 교대하는, 새로운 광물의 결정화를 일으켰다. 즉 기공들은 알칼리장석과 실리카로 채워졌고, 나머지 유리질은 알칼리장석이 축열상 결정화로 탈파리되었다. 이 탈파리작용은 준안정(metastable) 유리질 물질에서 고상선 아래의 결정작용을 의미한다(Ross and Smith, 1961; Lofgren, 1970). 피아메와

샤아드는 그 경계부에 은미정질 알칼리장석과 실리카가 축열상 연정으로 결정화되었다(Lofgren, 1971). 피아메는 부분적으로 다져진 장석-충전 기공을 보존하고 있는데, 이는 장석 성장이 용결작용과 동시에 시작되었음을 의미한다. 피아메에서 구과들의 우선적 발달은 주변의 샤드에 비해 부석에 더 많은 휘발성분이 농집되어 있기 때문이다(Briggs, 1976). 결정들의 다양한 크기는 온도 및/혹은 휘발성분 농도의 범위에 따른 성장을 반영한다.

LVT에서 유리질 부석편으로부터 피아메로의 진화는 정치 후에 아마도 유리 표면의 수화작용과 더불어 시작되었다. 얇은 점토 막(film)은 원래 모든 유리질 표면에서 형성되었다. 이들 점토 막은 후기 속성작용 동안 견운모에 의해 교대되었다(Gifkins and Allen, 2001). 그리고 새로운 광물이 일차적 공극을 채우고 유리를 교대하였다. 얼마의 기공들은 장석으로 채워졌는데, 이 장석은 불석과 유사한 방사상 소광 패턴을 보여주기 때문에 기공을 채웠던 불석을 교대한 것을 암시한다(Gifkins and Allen, 2001). 이는 불석 충전과 교결작용(cementation)이 다집작용 전에 시작되었음을 의미한다. 그리고 나머지 유리질 영역은 다집작용과 동시기적으로 용해작용과 변질작용이 일어났다. 이에 따라 변질 부석편은 다집작용에 의해 층리에 평행한 길쭉한 피아메를 생성시켰다.

그러나 LVT에서는 상단을 제외하면 용결작용을 지시하는 증거를 거의 관찰할 수 없다. 따라서 LVT는 용결작용이 불가능한 550°C 아래에 있었다고 생각된다. 그 이유는 아마도 화쇄류가 높은 분연주로부터 붕괴되어 공기 중으로 열손실을 일으켜 낮은 정치온도였던가, 차가운 암편을 상대적으로 많이 함유함으로써 이 암편들이 마그마성 유리질로부터 열

흡수를 하였던가, 또한 화쇄류가 차가운 지표면과 접함으로써 지표로 열손실을 일으켜 빠른 냉각속도 이었던 것으로부터 찾을 수 있다. 그중에서도 정치 환경에 연계된 냉각속도가 가장 유력한 조정자였다고 생각된다. 하지만 가열된 지하수는 화쇄류 속으로 스며들어 열수변질작용에 영향을 미칠 수 있었다.

마지막으로 LVT에서 속성 변질작용 및 다짐작용 동안에 유리질 물질의 기계적 다짐작용과 용해작용의 결과로부터 얇은 봉합흔이 형성되었다(Merino *et al.*, 1983; Fisher and Schmincke, 1984). 이 봉합흔은 주로 녹니석+견운모+적철석로 이루어지며, 약하게 다져진 부석편의 세관상 기공벽을 따라 혹은 피아메 내에서 불규칙한 층리에 평행하게 발달되었다.

5. 결론

주왕산응회암은 전체적으로 과상이고 최고 350 m 두께로 산출되며, 암상을 물리적 구성원에 따라 분류하면 주방 계곡에서 하부로부터 CVT (15 m), LVT (30 m)과 PVT (310 m)으로 구성된다. LVT와 PVT는 하나의 단위로 냉각된 단순 냉각단위를 나타내며 비용결대, 부분용결대와 치밀용결대로 분대되었다.

PVT는 피아메, 샤아드와 완배열상 석리가 뚜렷하게 나타내며, LVT는 이들이 매우 불량하게 관찰된다.

PVT에서 암회색 피아메는 불꽃상, 렌즈상 외관 모양을 가지고 세관상, 과상 내부조직을 가진다. 피아메와 샤아드들은 대개 편평화되어 층리에 평행하게 배열되어 완배열상 석리가 뚜렷하게 나타내며, 편평화비가 대체로 상부로 가면서 감소한다. 이들은 그 경계부가 축열상으로 혹은 내부가 구과상, 모자익상으로 결정화됨으로서 더 밝은 색을 띤다.

반면에 LVT에서 녹회색 피아메는 불꽃상, 깃털상, 보우타이상, 썩기상의 다양한 형태를 가지고 세관상, 섬유상, 봉합상 내부조직을 가진다. 피아메들은 불량한 편평화로 희미한 평행 배열을 보이며 편평화비가 위로 가면서 대체로 증가한다. 이들은 견운모 혹은 녹니석+견운모로 변질되고 가끔 봉합흔으로 연결된다. 담녹색 기질은 다양한 이차 광물로 변질되어있다.

PVT에서 피아메와 완배열상 석리는 화쇄류 축적에 따른 암압 하중에 조합된 용결 다짐작용에 의해 고온 부석편의 편평화와 신장작용의 결과로 해석된

다. 이 용결작용 결과는 층리에 평행한 피아메와 샤아드에 의해 뚜렷한 완배열상 석리를 만들었다. 그리고 용결작용에 뒤따라 피아메와 샤아드는 탈파리작용으로 유리질 조직을 상실하였다.

반면에 LVT에서 피아메는 많은 암편을 함유한 화쇄류의 축적으로 인한 저온 부석편의 변질작용 및 속성 다짐작용의 결과로 해석되어진다. 이 결과로 부석편은 견운모, 녹니석으로 변질되었고 층리에 평행하는 피아메와 봉합흔에 의해 불완전한 완배열상 석리를 만들었다.

사 사

이 논문은 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2010-0009118)의 결과임을 밝힌다. 심사과정을 통해 원고를 세심하게 읽고 매끄럽게 다듬어준 부산대학교 윤성호 교수님, 미공병대 박준범 박사님과 한라연구소 안웅산 박사님께 감사드린다. 그림 제작은 안동대 대학원 서승환과 최장오의 도움이 있었다.

REFERENCES

- Allen, R.L., 1988, False pyroclastic textures in altered silicic lavas, with implications for volcanic associated mineralisation. *Economic Geology*, 83, 1424-1446.
- Branney, M.J. and Kokelaar, 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.
- Branney, M.J. and Sparks, R.S.J., 1990, Fiamme formed by diagenetic and burial compaction in soils and subaqueous sediments. *Journal of Geological Society (London)*, 147, 919-922.
- Briggs, N.D., 1976, Welding and crystallization zonation in Whakamaru ignimbrite, central North Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 19, 189-212.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, Volcanic successions: modern and ancient: a geological approach to processes, products and 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. In: Chapin, C.E., Elston, W.E. (Eds), Ash-flow tuffs. Geological Society of America Special Paper 180, 137-154.
- Fisher, R.V. and Schmincke, H.-U., 1984, Pyroclastic rocks. Springer-Verlag, 472 p.
- Fiske, R.S., 1969, Recognition and significance of pumice in marine pyroclastic rocks. Geological Society of America Bulletin, 80, 1-8.
- Friedman, I., Long, W. and Smith, R.L., 1963, Viscosity and water contents of rhyolite glass. Journal of Geophysical Research, 68, 6523-6535.
- Gifkins, C.C. and Allen, R.L., 2001, Textural and chemical characteristics of diagenetic and hydrothermal alteration in glassy volcanic rocks: examples from the Mount Road Volcanics, Tasmania. Economic Geology, 96, 973-1002.
- Gifkins, C.C., Allen, R.L. and McPhie, J., 2005, Apparent welding textures in altered pumice-rich rocks. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 142, 29-47.
- Hwang, S.K., 1995, Welding and devitrification of intrusive welded tuff in Geumseungsan caldera. Journal of the Geological Society of Korea, 31, 512-522 (in Korean with English abstract).
- 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., Lee, B.J. and Reedman, A.J., 2007a, Folw lineations and emplacement processes of the Juwangsang Tuff, eastern Cheongsong, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 43, 463-476 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Lee, B.J. and Reedman, A.J., 2007b, Magmatic processes of the Juwangsang Tuff, southeastern Cheongsong, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 43, 65-81 (in Korean with English abstract).
- Lipman, P.W., 1965, Chemical composition of glassy and crystalline volcanic rocks. U.S. Geological Survey Bulletin, 1201-D, 24 p.
- Lofgren, G., 1970, Experimental devitrification rates of rhyolitic glass. Geological Society of America Bulletin, 81, 553-560.
- Lofgren, G., 1971, Experimentally produced devitrification textures in naturally rhyolitic glass. Geological Society of America Bulletin, 82, 111-124.
- McPhie, J., Doyle, M. and Allen, R.L., 1993, Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. CODES, University of Tasmania, Hobart, 198 p.
- Merino, E., Ortoleva, P. and Strickholm, P., 1983, Generation of evenly-spaced pressure solution seams during (late) diagenesis: a kinetic theory. Contributions to Mineralogy and Petrology, 82, 360-370.
- Peterson, D.W., 1979, Significance of the flattening of pumice fragments in ash-flow tuffs. In: Chapin, C.E., Elston, W.E. (Eds), Ash-flow tuffs. Geological Society of America Special Paper 180, 195-204.
- Ross, C.S. and Smith, R.L., 1961, Ash-flow tuffs: their origins, geologic relations and identifications. U.S. Geological Survey Professional Paper, 366.
- 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.
- 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. and Wright, J.V., 1979, Welded air tuffs. In: Chapin, C.E., Elston, W.E. (Eds), Ash-flow tuffs. Geological Society of America Special Paper, 180, 155-166.
- Sparks, R.S.J., Self, S. and Walker, G.P.L., 1973, Products of ignimbrite eruptions. Geology, 1, 115-118.
- Sparks, R.S.J., Stasiuk, M.V., Gardeweg, M. and Swanson, D.A., 1993, Welded breccias in andesite lavas. Journal of Geological Society (London), 150, 897-902.
- Wolff, J.A., 1986, Welded tuff dykes, conduit closure, and lava dome growth at the end of explosive eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 28, 379-384.
- Yagi, K., 1966, Experimental study on pumice and obsidian. Bulletin of Volcanology, 29, 559-572.

투 고 일 : 2014년 7월 14일

심 사 일 : 2014년 7월 16일

심사완료일 : 2014년 8월 6일