

청송 남·동부 무포산응회암의 흐름 지시자로부터 유향 결정

안웅산 · 황상구*

안동대학교 지구환경과학과

Determination of Flow Direction from Flow Indicators in the Muposan Tuff, Southern and Eastern Cheongsong, Korea

Ung San Ahn and Sang Koo Hwang*

Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea

The Muposan Tuff is a stratigraphic unit which is distinguished as a cooling unit in the volcanic rocks of the northeastern Kyeongsang Basin. The Muposan Tuff commonly belongs to tuff field according to the granulometric classification and to vitric tuffs according to the constituent classification. The tuffs are mostly densely to partially welded to include very flattened and sometimes stretched pumices and shards, and involve several flow indicator and lateral gradings in maximum diameter and content of their constituents. Movement pattern from flow lineation, lithic and pumice imbrications, asymmetric flow folds, and lateral gradings in maximum diameter and content of their constituents indicate that the Muposan Tuff had a source from the southeastern part.

Key words : Flow indicator, Flow lineation, Movement pattern, Asymmetric flow fold, Lateral grading

청송 무포산응회암은 경상분지 북동부 화산암류에서 하나의 냉각단위로 구별되는 층서단위이다. 이 응회암은 그 입도에 의하면 대부분 응회암에 속하고 구성원에 의하면 파리질 응회암에 속한다. 대부분 부석과 샤프트가 일정하게 배열되고 심하게 편평화되어 용결엽리를 발달시키며 여러 가지 흐름지시자를 보여준다. 무포산응회암에서 부석 정향배열에 의한 유상선구조로부터 이동 패턴, 암편과 부석의 외상배열, 용결엽리의 비대칭 유상습곡 등의 흐름 지시자, 암편과 부석의 최대입径의 측방점, 그리고 구성원 함량의 측방점에 의하면 이 응회암을 집적시킨 화쇄류는 남동부에서 공급되었던 것으로 해석된다.

주요어 : 흐름지시자, 유상선구조, 이동 패턴, 비대칭 유상습곡, 측방점

1. 서 언

경상분지에 분포하는 화산암류는 대부분 공급지를 달리하는 여러 응회암들로 구성되어있다. 이 응회암들은 생성된 후의 다른 화산암류에 의한 피복, 침식, 관입 등의 여러 사건들에 의하여 공급지를 알 수 없는 경우가 많으며, 여러 화산중심지가 복합되어 어느 공급지에서 유래되었는지 관련시킬 수 없는 경우가 많다. 그러나 화산암류의 공급지를 알아내는 것은 여러 화산사건으로 얽혀진 복잡한 화산지역에서 화산과정과 성인을 해석하는데 중요한 연구이다.

미국과 일본 등에서는 응회암을 집적시킨 화쇄류의 공급지를 규명하는 연구는 다양한 흐름지시자를 이용하여 시도되어 왔다. Rhodes and Smith(1972), Suzuki and Ui(1982) 등은 응회암 내의 길쭉한 결정들의 방향을 통계적으로 처리하여 그 주방향성을 측정하여 화쇄류의 유향(flow direction)을 결정함으로써 공급지를 추론하였다. Potter and Oberthal(1987)은 용결에 의하여 변형되지 않은 길쭉한 부석의 방향들을 측정하여 화쇄류의 유향을 측정하였다. Froggatt *et al.*(1981)은 통나무를 흐름 지시자로 사용하여 공급지를 알아냈다. 청송 지역에서도 무포산응회암의 일부에서 부석의 선

*Corresponding author: hwangsk@andong.ac.kr

구조를 이용하여 유향을 측정한 바 있다(Ahn, 1999; Hwang *et al.*, 1999).

무포산응회암은 공급지가 지금까지 알려져 있지 않았고, 비교적 넓게 분포하며 계곡이 깊어 많은 노두가 노출되고 다양한 흐름 지시자가 나타나기 때문에 공급지를 추적하기에 매우 좋은 연구대상이라고 생각한다. 따라서 무포산응회암에서 화쇄류의 흐름을 나타내는 흐름 지시자들로부터 유상선구조와 유상방위를 측정하여 유향을 결정하고 공급지를 알아내는 것이 주 목적이다. 더불어 이들 화쇄류의 유향을 지시하는 증거들을 근거로 무포산응회암을 생성시킨 화쇄류의 흐름특성에 대하여도 생각해본다.

2. 지질개요

무포산응회암은 청송군의 남부와 동부에 주로 분포하는데, 이곳은 의성소분지의 북동부와 영양소분지 남

동부에 해당되는 주왕산 화산지역 내에 포함된다. 주왕산 화산지역에서 화산암류는 하양층군 위에 놓이며 과거에 각력질 안산암(Lee and Hong, 1973)으로, 혹은 괴상 안산암, 각력질 안산암, 안산반암으로 구성된 안산암류로 기재되었다(Kwon and Lee, 1973). 그리고 청하도폭에서 이들은 보경사빈암류로 기재되었다(Kim *et al.*, 1968).

주왕산 화산지역의 하부는 염기성과 중성 화산암류, 중부는 산성과 중성 화산암류, 상부는 산성 화산암류로 구성된다. 즉 하부는 현무암질과 안산암질의 용암과 화성쇄설암으로 구성되고, 중부와 상부는 대부분 유문암질과 데사이트질 화쇄류에 의한 큰 용적의 응회암들로 구성된다. 중부와 상부에서 이 응회암층 사이에는 안산암질 용암층과, 퇴적암층 및 안산암질 용암층이 협재되어 있어 이들을 기준으로 하여 여러 암층으로 구분하였다(Hwang, 1998).

주왕산 화산지역에서 화산층서는 하부에 대전사현무

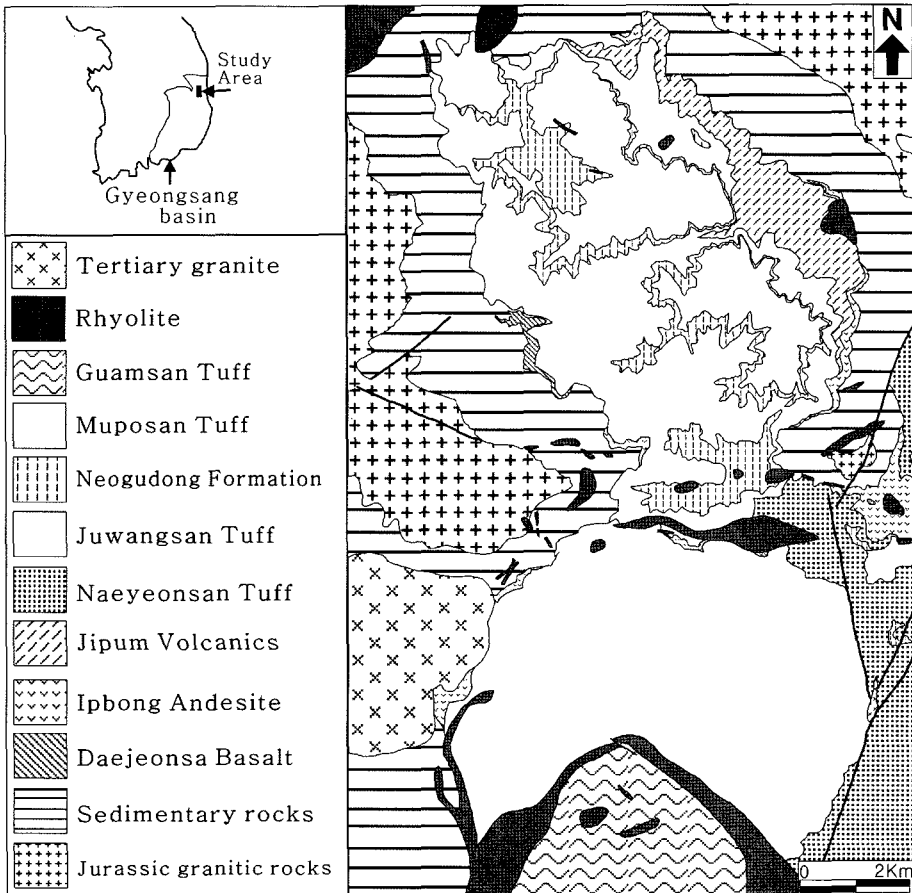


Fig. 1. Geological map of the study area.

암과 입봉안산암이 차례로 놓인다. 이 입봉안산암은 과거에 입봉빈암으로 칭해진 바 있다(Hatae, 1936). 중부에서 층서는 지품화산층, 내연산응회암, 주왕산응회암으로 구분되고, 상부에서 너구동층, 무포산응회암 및 구암산응회암으로 구분되었다(Hwang, 1998).

이들 가운데 4개 응회암층은 별도의 화산중심지에서 유래되었다. 이중에서 구암산응회암은 구암산 칼데라에서 유래되었음이 이미 밝혀졌다(Hwang *et al.*, 2002).

3. 무포산응회암

3.1. 야외관계

무포산응회암은 주왕산 화산지역의 회류 냉각단위 중에서 가장 넓게 퍼진 큰 용적의 회류 냉각단위 중 하나로서 청송 남동부에서 63.6±3.4 Ma에 일어난 큰 용적의 유문데사이트질 화산작용에 의한 것이다(Hwang and Kim, 2006). 이 응회암층은 청송 남동부의 무포산 지역에 가장 넓게 분포하고 이로부터 북쪽으로 가메봉, 두수람과 태행산 능선부에 분리되어 분포한다(Fig. 1). 이 분포는 최상부 암층으로서 동서 방향으로 깊게 파인 계곡에 의해 절개되었음을 반영한다.

이 무포산응회암은 태행산, 두수람과 가메봉 지역에서 대부분 너구동층을 덮고 있고 그 상한은 나타나지 않지만 두께가 최고 약 500m 이상인 것으로 보인다. 이 응회암은 청송 남동부 지역에서 내연산응회암 상위에 놓이고, 지역에 따라 입봉안산암 혹은 하양층군을 직접 덮는다(Fig. 1). 또한 이 응회암은 유문암맥 혹은 화강암 암주에 의해 관입되어 있고, 남동부 지역에서 북서서-남동동 방향의 유문암맥을 경계로 그 북부 지역보다 수100m 함몰되어 있다.

3.2. 응회암의 분류

무포산응회암은 화학적인 분류에 의하면 비알칼리계 열내의 칼크-알칼리계열에 해당하는 유문데사이트질 내지 유문암질 응회암에 속한다(Hwang and Kim, 2006). 이 무포산응회암은 야외에서 입자의 크기에 따라 분류하면, 라펠리나 블록 크기의 입자들을 소량 포함하는, 대부분이 2mm 이하의 화산회 크기의 입자로 이루어진 응회암에 속하며 남동부 일부에서 라펠리응회암에 해당한다(Fig. 2).

이 응회암은 부석과 유리질 샤드가 가장 풍부하고 반정광물의 결정이 상당히 많으며 상대적으로 암편이 적은 편이다. 응회암은 실내에서 흔히 결정, 암편 및 유리질의 구성원 체적비에 따라 파리질 응회암(vitric

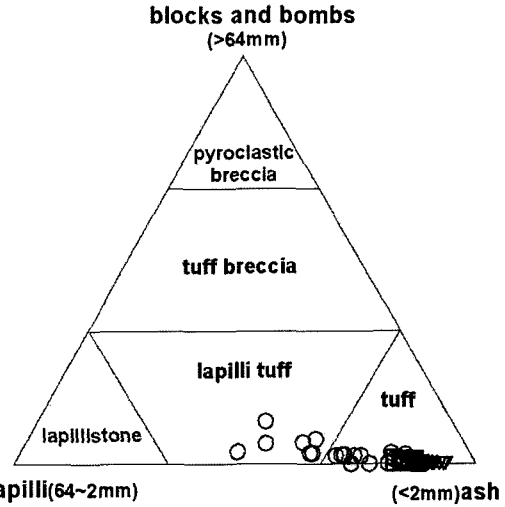


Fig. 2. Granulometric classification of the Muposan Tuff by the volume proportions of ash, lapilli, and blocks and bombs (Fisher, 1966). Circles, Muposan area; squares, Gamebong area; normal triangles, Dusuram area; reverse triangles, Tachaengsan area.

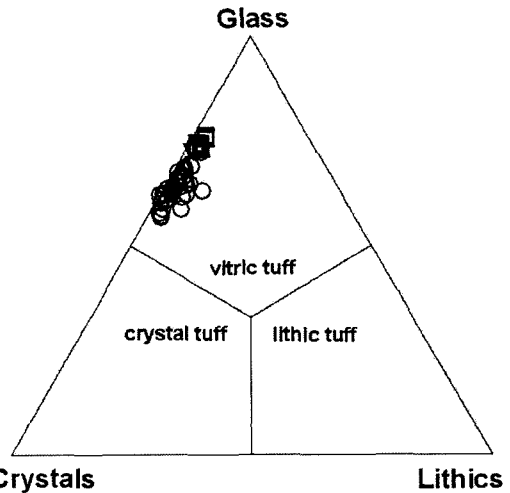


Fig. 3. Constituent classification of the Muposan Tuff by the volume proportions of glass, crystal and lithic fragments. Symbols are the same as those in Fig. 4.

tuff), 결정질 응회암(crystal tuff) 및 암편질 응회암(lithic tuff)으로 분류할 수 있다. 이에 따르면, 무포산 응회암은 모두 파리질 응회암에 속하며 결정이 상당히 풍부한 것을 고려한다면 결정풍부 파리질 응회암(crystal-rich vitric tuff)으로 분류된다(Fig. 3). 그러나 이들은 암편이 적은 부분을 선택하여 현미경하에서 그 구성원의 부피 함량을 모드 분석한 것으로 실제 노두

에서 암편의 양은 조금 더 많을 것으로 예상되지만 크게 다르지는 않을 것이다.

3.3. 암질기재

무포산응회암은 녹회색 내지 담회색의 수많은 치밀 내지 부분용결 회류응회암으로 구성되며, 암층의 기저는 보다 밝은 색의 비용결 내지 부분용결 응회암으로 되어 있고 중부와 상부에서 어두운 색의 치밀용결 응회암을 나타내는 특징을 보인다. 또한 기저의 유문암질에서 상부로 갈수록 유문데사이트질로 지그재그형으로 접이되는 양상을 보인다(Hwang and Kim, 2006).

이 응회암은 다른 응회암들과 마찬가지로 분급이 불량하고 괴상으로 산출된다. 야외에서 이 응회암은 대부분 거의 녹회색을 띠지만 간혹 담회색과 담홍색을 띠는 것도 있다. 이 응회암은 야외에서 편평화된 부석에 의해 나타나는 완배열상 석리(eutaxitic fabric)로부터 용결엽리가 뚜렷이 관찰되기도 한다(Fig. 4A). 이

응회암층의 중간 부위에서는 석구상 석리(lithophysal fabric)가 관찰되기도 한다(Fig. 4B).

기질은 결정이 풍부하고 청록색 부석과 암편이 포함되어 있다. 결정들은 대부분이 사장석 결정이고 각섬석과 석영 결정들이 육안으로 소량 관찰되는데 각섬석이 석영 결정에 비해 더 많이 나타난다. 현미경하에서는 간혹 흑운모가 관찰되기도 한다. 기질뿐만 아니라 부석 내에서도 흔히 사장석과 각섬석 결정들이 관찰된다.

야외에서 부석은 두 가지 양상으로 관찰된다. 한 가지는 회류응회암에서 흔히 관찰되는 부석으로 나타나며 이 부석은 부분용결대에서 길쭉한 타원형 형태로 나타나고, 치밀용결대에서 크게 편평화되어 완배열상 석리를 형성시킨다(Fig. 4A). 다른 것은 약간 길쭉한 형태가 대부분이고 간혹 등방형의 것들도 관찰되는데 20cm 이상의 크기를 가지는 양상을 보인다. 현미경하에서 부석들은 대부분 그 기공이 거의 관찰되지 않고 드물지만 용결에 의하여 압축된 상태로 관찰되는 경우

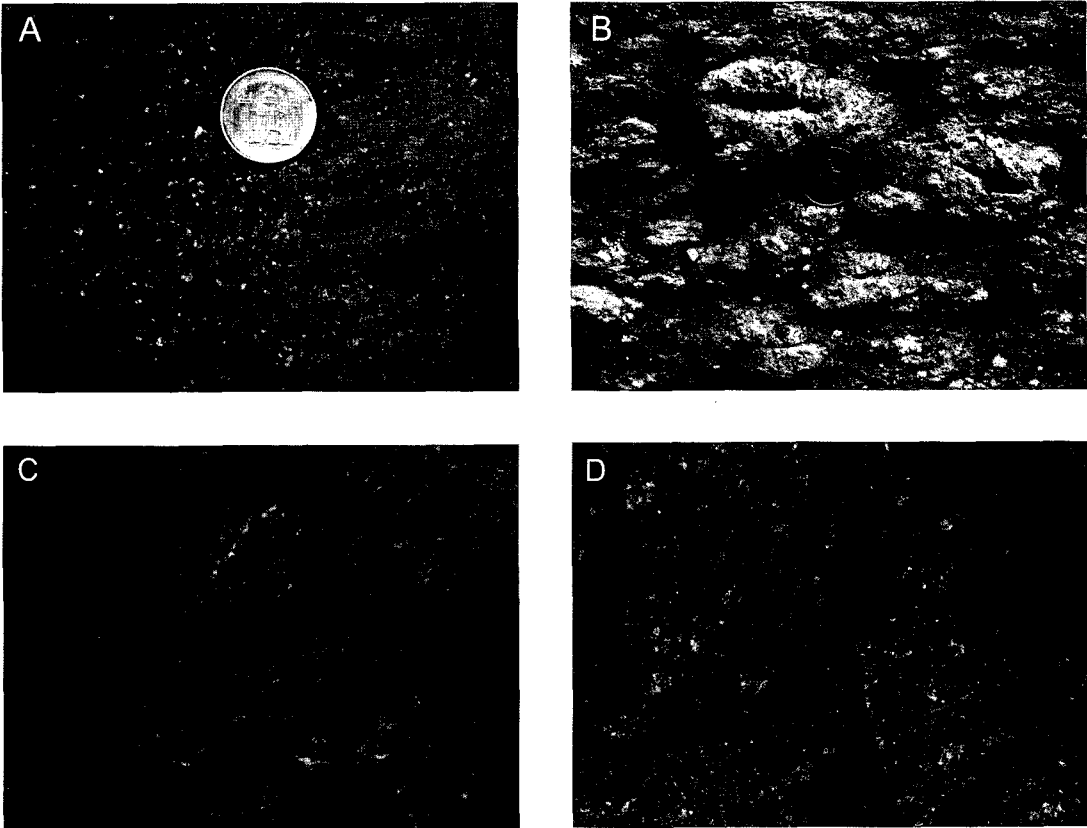


Fig. 4. Photographs and photomicrographs showing some fabrics, showing (A) eutaxitic fabric by flattened pumices, (B) lithophysal fabric, (C) eutaxitic fabric by flattened shards, and (D) axiolitic crystallization in shards deflected around crystals, in a densely welded zone of the Muposan Tuff.

가 있으며 대부분 탈파리화에 의하여 거의 남아있지 않고 간혹 그 부석의 외곽에는 들쭉날쭉한 모양의 잔류상을 남기는 경우도 있다. 이 부석들은 기질에서와 마찬가지로 대부분 사장석, 각섬석, 소량의 흑운모 반정을 함유한다. 이 부석들은 반정을 대개 25~30% 함유하며 주위의 기질은 결정율을 약 25~40% 포함하고 있다. 따라서 기질은 부석보다 반정 함량이 대체로 더 많고 함량의 범위가 더 넓다.

암편은 반상 유문테사이트와 안산암편들이 주로 나타나며 간혹 드물게 응회암편도 나타난다. 후자는 하위의 회류단위에서 뜯겨져 올라왔을 것으로 생각되며, 이들은 기질의 용결엽리와는 다른 자세의 엽리를 가진다.

무포산응회암은 두께가 약 500 m 이상으로서 용결 현상이 뚜렷하게 나타나며 층위에 따라 부분용결대와 치밀용결대를 이룬다. 부분용결대는 이 응회암층의 하부에서 나타나며 녹색 내지 회녹색을 띤다. 이 부분용결대는 부석편이 약간 편평화되어 나타나지만 거의 용결엽리를 이루지는 않는다. 그래서 이러한 부분용결대에서는 야외에서 용결엽리를 측정하기가 어렵다. 이 부분용결대는 현미경에서 암편이나 결정편 주변에서 사드들이 약간 변형되어 있지만 이들로부터 먼 곳에서 원래 사드의 모습을 어느 정도 인지할 수 있다.

치밀용결대는 이 응회암의 하부를 제외하고 거의 모든 지역에서 넓게 나타난다. 야외에서 부석들이 심하게 편평화되어 뚜렷한 용결엽리를 형성한다(Fig. 4A). 특히 부석이 편평화된 피아메들은 두께가 1~2mm 정도이고 길이가 3cm 이하로 절단면에서 세장된 모양으로 뚜렷한 엽리를 잘 보여주고 사드들도 편평화되어 완배열상 석리를 나타낸다(Fig. 4C). 사드들도 대부분 현재처럼 편평화되어 있고 특히 결정이나 암편 주위에서

비켜가면서 축열상으로 결정화되어 있다(Fig. 4D).

4. 흐름 지시자

4.1. 유상선구조의 측정

무포산응회암에서 부석들은 크기가 최고 20cm되는 것도 관찰된다. 이 부석들은 장축이 일정한 방향으로 나란히 놓인다. 이들은 개울 바닥에서 가장 쉽게 발견되고 부석의 배열에 의해 용결엽리와 유상선구조를 나타낸다(Fig. 5). 이 유상엽리와 유상선구조는 야외에서 측정하는 것은 그리 어려운 일이 아니다. 유상엽리의 측정치는 도면에다 위치에 따라 표시하여 구조도를 작성하였다(Fig. 6).

신장된 부석에 의한 유상선구조를 측정하는 일은 신중을 기해야 한다. 왜냐하면 이 신장된 부석의 기원에 대하여 두 가지 견해가 있기 때문이다. 신장된 부석을 흐름의 지시자로서 사용하기 전에 무포산응회암에 나타나는 신장된 부석의 기원에 대하여 생각해 봐야 한다. 그 하나는 신장된 피아메가 화쇄류의 후기 단계동안의 층류(laminar flow)에 의해 부석편이 신장되어서 생긴 진정한 일차성 흐름 지시자라는 것이다(Schmincke and Swanson, 1967; Deal, 1973; Chapin and Lowell 1979). 다른 하나는 화쇄류에 의한 퇴적물이 압축변형 후에 경사면에서 이차적으로 재유동되어서 생긴 신장으로 화쇄류의 진정한 유향이 아니라는 것이다(Wright, 1980; Wolff and Wright, 1981). 한편 Branney and Kokelaar (1992, 2002) 같은 사람들은 부석이나 암편의 외상배열과 신장을 오히려 층류에 반하며 와류(turbulent flow)를 지시하는 구조로 해석하고 있다.

무포산응회암에서 관찰되는 신장된 부석의 기원을

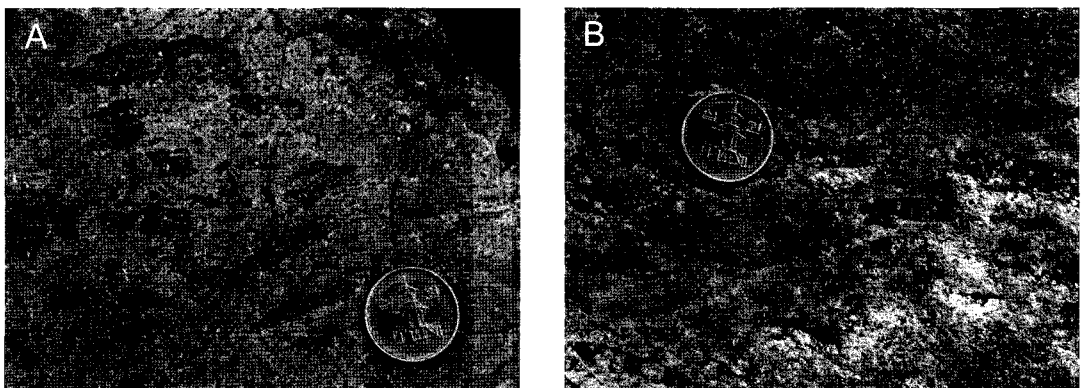


Fig. 5. (A) flow lineation of elongate pumice clasts, and (B) flow lineation of stretched pumice clasts on a welding foliation of the Muposan Tuff.

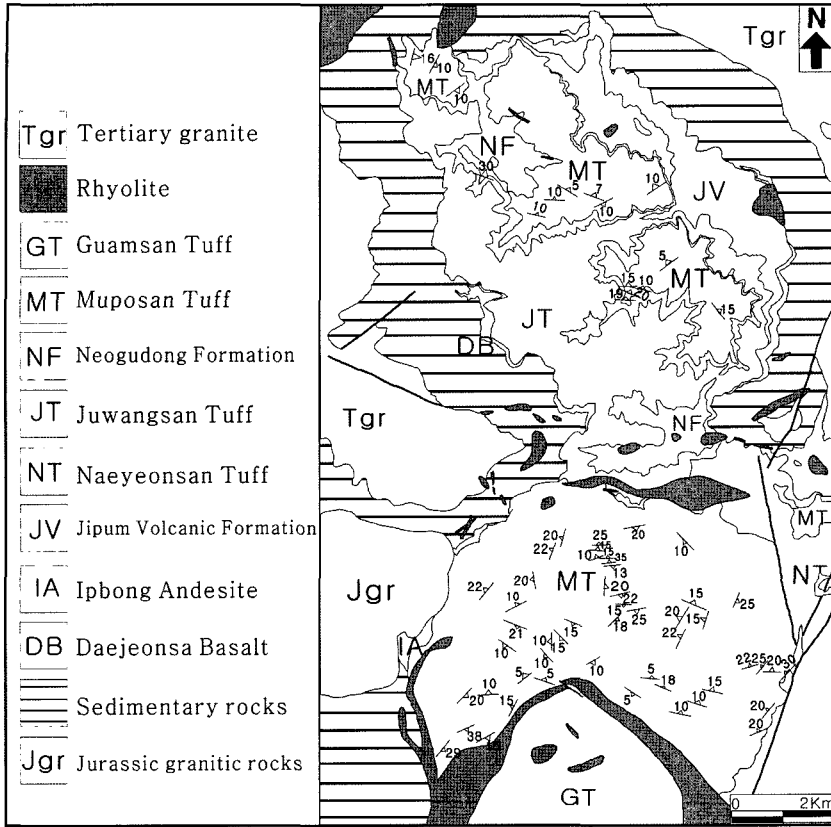


Fig. 6. Structural map of the Muposan Tuff from the welding foliations.

파악하기 위하여 야외에서 측정된 유상선구조들은 대부분 방향성이 일관성을 유지한다. 그리고 이 응회암 층 아래에서 기록을 나타내는 지형이 거의 발견되지 않는다. 그러므로 무포산응회암에서 신장된 부석은 일차성 흐름에 의해 형성된 것으로 생각한다. 즉 이들 신장된 부석은 화쇄류의 후기단계에 흐름이 멈추기 전의 와류에 의해서 배열되고 이와 동시적 혹은 그 후에 일어나는 압축작용에 의해서 편평화되었을 것이다. 그러므로 본 응회암의 용결열리 상에서 길쭉한 부석(Fig. 5A)과 신장된 부석(Fig. 5B)에 의한 유상선구조는 이 응회암을 집적시킨 화쇄류의 유상의 지시자로서 사용될 수 있다.

이 응회암에서 암편들은 그 모양이 등방형에서부터 길다란 형태의 것까지 다양하게 산출된다. 이 길쭉한 암편들의 배열도 화쇄류 방향의 좋은 지시자이다. 이들로부터 유상선구조는 객관적 기준에 의해 결정될 수 있을 때만 측정되었으며 측정치는 도면에다 위치에 따라 표시하여 유향도를 작성하였다(Fig. 7).

4.2. 유상선구조의 이동 패턴

유상선구조의 방향성은 무포산 지역, 가메봉 지역, 두수람 지역과 태행산 지역에서 서로 약간의 차이를 나타낸다. 가장 남쪽의 무포산 남부지역에서 방향성은 $N35^{\circ}W \sim EW$ 범위이고 $N65^{\circ}W$ 로 가장 우세하게 달리기 때문에 대체로 NNW-SEE 방향을 나타낸다(Fig. 8A). 그렇지만 무포산 북부지역에서 방향성은 $N30^{\circ} \sim 55^{\circ}W$ 범위이고 $N40^{\circ}W$ 로 가장 우세함을 보이기 때문에 거의 NW-SE 방향을 나타낸다(Fig. 8B). 그리고 약간 동쪽 가메봉 지역에서는 $N10^{\circ}W \sim N25^{\circ}E$ 범위를 가지고 $N10^{\circ}E$ 로 가장 우세한 방향성을 가지기 때문에 거의 NS 방향을 나타낸다(Fig. 8C). 두수람 지역에서는 $N05^{\circ} \sim 15^{\circ}W$ 범위를 보여주고 $N10^{\circ}W$ 로 우세한 방향을 보여주기 때문에 거의 NNW-SSE 방향을 나타낸다(Fig. 8D). 가장 북쪽 태행산 지역에서는 $N30^{\circ} \sim 40^{\circ}W$ 범위를 나타내므로 NW-SE 방향을 나타낸다(Fig. 8E).

전반적으로 유상선구조는 북서-남동 방향으로 가장 우세한 방향성을 나타낸다(Fig. 8 Total). 이것은 무포산 응회암의 화쇄류가 아마 북서에서 남동 방향으로 아니

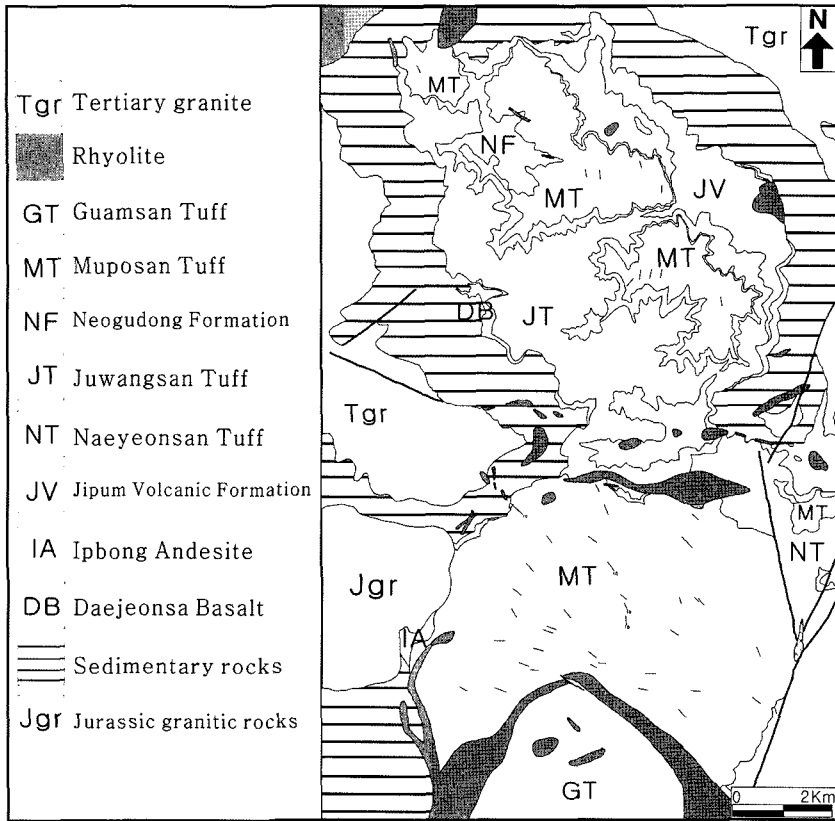


Fig. 7. Flow direction map of the Muposan Tuff from the flow lineations.

면 남동에서 북서 방향으로 흘렀음을 나타낸다. 그러나 유상선구조 방향의 패턴은 전체적으로 남동 지역에서 북서쪽으로 향하여 펼쳐지는 부채꼴 모양을 나타낸다(Fig. 7). 이는 북서쪽에서 공급되었다기보다 무포산응회암 분포의 남동부 외곽지역에서 공급되었음을 지시한다.

4.3. 유상방위의 결정

길쭉한 부석 및 압편의 배열에 의한 유상선구조는 흐름에 대한 양방향성을 나타내지만 절대방향을 가리키는 유상방위(flow azimuth)를 나타내지는 않는다. 그러므로 야외에서 유상방위를 결정하기 위해서는 유상선구조에 평행하게 수직으로 잘린 단면에서 길쭉한 부석과 압편의 외상배열을 찾아내는 것이 필요하다. 이 외상배열은 흐름의 절대방향을 나타내기 때문에 유상방위를 결정짓는 좋은 수단으로 쓰인다. 하지만 야외에서 용결엽리를 어느 정도 나타내면서 유상선구조에 평행하게 잘린 단면을 찾기란 쉽지 않다.

무포산응회암에서 부석과 압편의 외상배열은 경사가

남동쪽으로 기울기 때문에 남동 방향의 유상방위를 나타낸다(Fig. 9). 그러므로 흐름의 절대방향이 남동에서 북서 방향으로 흘렀다는 것을 지시한다.

무포산응회암에서 용결엽리는 대부분 완만하게 분포 중심지를 향하여 경사된다. 그러나 국부적으로 용결엽리는 주향이 거의 평행하면서 경사가 여러 차례 파동적으로 서로 반대방향으로 기우는 소습곡을 이루는 곳도 발견된다(Fig. 6). 이러한 반복적인 용결엽리는 습곡 측면이 남동쪽으로 기울어지는 비대칭 소습곡 구조를 나타내는 것을 알 수 있다. Deal(1973)은 화쇄류의 마지막 단계 흐름에 의해서 습곡이 생기며 이 습곡의 크기는 현미경하에서 관찰되는 것부터 그 크기가 10 m 만큼 큰 진폭을 가지는 것까지 다양하다고 한다. 그는 노두에서 관찰되는 큰 습곡들의 습곡측면은 공급지를 향하여 기울어져 있고 신장된 부석에 의한 유상선구조에 수직하다고 하였다. 그는 습곡측면이 신장된 부석에 의한 유상선구조에 대해 직각을 이루기 때문에 이 습곡의 형성기구가 이차적인 재유동이 아니라 일차적인 흐름에 의한 것임을 나타낸다고 하였다.

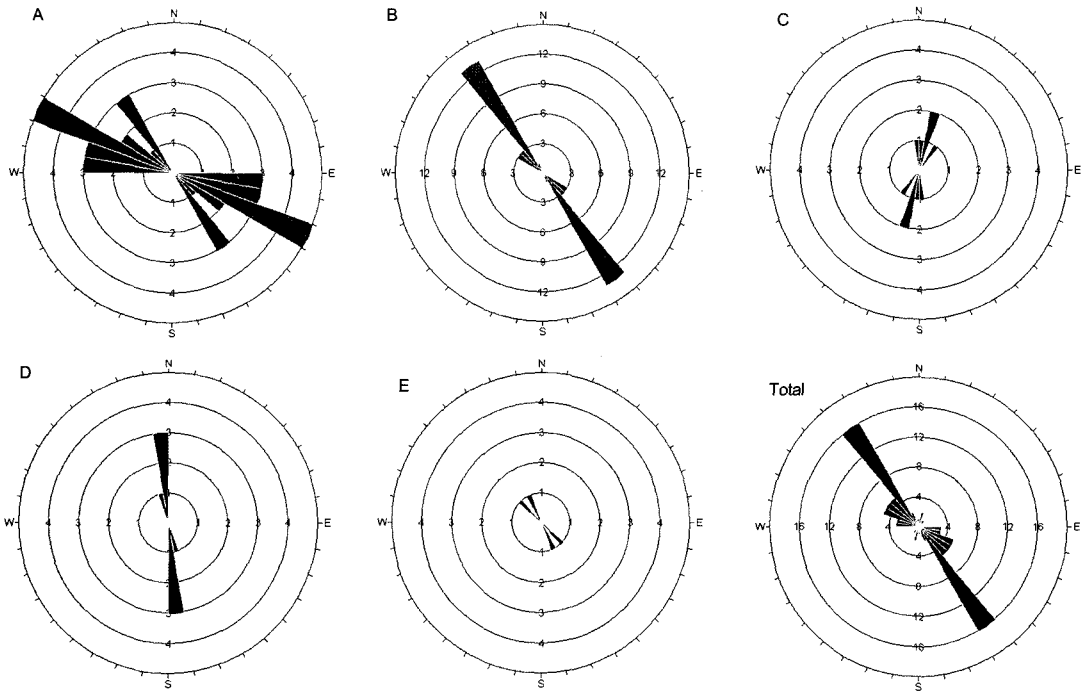


Fig. 8. Rose diagrams showing orientation from flow lineation in (A) southern Muposan area, (B) northern Muposan area, (C) Gamebong area, (D) Dusuram area, (E) Taehaengsan area, and (F) Total area.



Fig. 9. Imbrication of lithic clasts indicating that the flow azimuth is from right to left.

이 응회암에서도 신장된 부석의 유상선구조가 대략 이 습곡측면에 수직인 양상을 보여주기 때문에 이 소 습곡은 용결엽리에 의한 유상습곡의 좋은 예이다. 이것은 위에서 언급된 신장된 부석이 일차적 흐름에 의한 것이라는 생각과 잘 일치한다. 무포산응회암에서 비대칭 유상습곡은 위와 마찬가지로 화쇄류가 정지하기 직전에 공급지를 향하여 기울어진 것으로 판단된다. 따라서 이 비대칭 유상습곡도 화쇄류가 남동에서 북서 방향으로 흘렀다는 것을 지시한다.

5. 측방점이

5.1. 최대입경의 측방점이

무포산응회암에서 유향은 흐름 지시자들과 이동 패턴을 이용하여 알 수 있었다. 이러한 결과들은 그 유향이 대체로 남동-북서 방향으로 가장 우세하다는 것을 지시하기 때문에 이 방향으로 이동함에 따라 이 응회암을 구성하는 암편과 부석의 입경 변화가 나타날 것으로 생각된다. 이들에 대한 입경은 각 노두에서 최대입경을 가지는 5개의 평균값이다. 거리는 지질도에서 가장 남동쪽 경계를 기준으로 나타낸 것이다. 입경 변화를 살펴보면, 암편과 부석의 입경은 공급지에서 멀어지는 방향으로 가면서 감소하는 변화가 관찰된다. 즉 이들의 입경은 무포산 지역에서 가장 크지만 북쪽의 가배봉, 두수람과 태행산 지역으로 갈수록 점점 감소하는 측방점이(lateral grading)를 보여준다(Table 1; Fig. 10).

화쇄류에 의한 퇴적물들은 공급지로부터 거리에 따라 그 암편이나 부석의 크기가 어떠한 특정한 패턴을 보이면서 변화한다고 보고된 바 있다(Sparks, 1975; Palladino and Valentine, 1995). 이탈리아의 불시니 화쇄류암에서 가장 큰 암편 3개의 평균입도가 공급지

Table 1. Average maximum diameter of lithic and pumice clasts in 4 individual areas.

Clasts	Range and average	Muposan area	Gamebong area	Dusuram area	Taehaengsan area
Lithics	Range	8.5~2.5cm	4.1~2.0cm	3.0~2.0cm	2.4~1.5cm
	Average	4.3cm	2.8cm	2.6cm	2.1cm
Pumices	Range	10.0~2.8cm	6.5~4.0cm	5.0~3.8cm	3.6~2.5cm
	Average	6.2cm	5.0cm	4.3cm	3.1cm

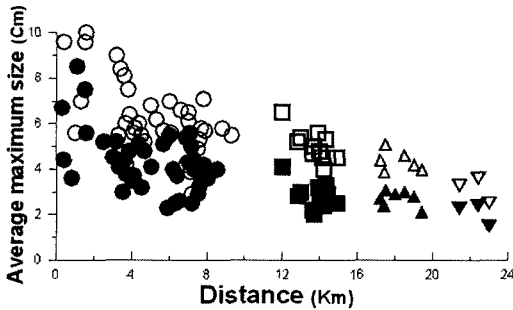


Fig. 10. Lateral grading of average maximum diameter of lithic clasts(solid symbols) and pumice clasts(open symbols). Symbols are the same as those in Fig. 2.

인 라테라 칼데라로부터 멀어지면서 감소한다(Sparks, 1975). 그리고 위와 같은 지역의 라테라 화산암복합체에서 암편, 부석 및 스코리아의 가장 큰 5개의 평균입도도 공급지로부터의 거리에 따라 변화한다(Palladino and Valentine, 1995). 즉 Sparks(1975)가 얻은 결과에 의하면 암편의 평균입경은 거리가 멀어지면서 감소하며, 부석의 평균입경은 암편과는 반대로 거리가 멀어짐에 따라 더 크게 증가한다. 스코리아의 입경은 암편과 마찬가지로 거리가 멀어지면서 감소한다. 그러나 부석의 크기는 일본의 이토 화쇄류에서 거리가 멀어지면서 감소하는 경우도 있다(Yokoyama, 1974).

무포산응회암에서 암편은 기존의 연구에서와 마찬가지로 그 입경이 거리가 멀어지면서 감소하는 경향을 보인다. 부석도 라테라 화산암복합체(Palladino and Valentine, 1995)와는 달리 거리가 멀어지면서 크기가 감소한다. 이러한 입경의 측방점이는 이 무포산응회암을 집적시킨 화쇄류의 특성과 관계가 있을 것으로 생각된다. 즉 암편의 크기와 밀도, 화쇄류 기질의 점성과 밀도에 달려있을 것이다(Cas and Wright, 1987).

이 응회암의 부석이 암편과 거동을 같이하는 것은 아마 위에서 언급했던 것처럼 부석 내의 기공의 부피가 상대적으로 작아서 결정과 사드 등으로 구성된 화쇄류의 기질보다는 그 밀도가 크기 때문일 것으로 생각된다. 그리고 또 다른 하나의 가능성은 화쇄류가 흘러갈 때 더 멀리 이동하는 동안 큰 부석들이 충돌하고 마찰하면서 그 부석의 크기가 작아진 것일 수도 있다

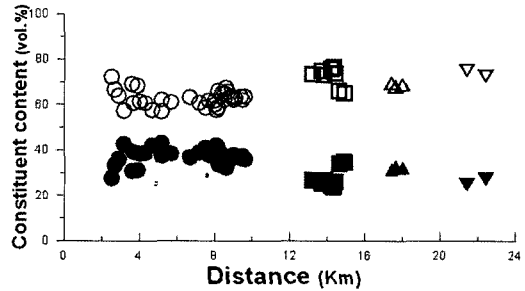


Fig. 11. Lateral grading of total content of crystals and lithic clasts (solid symbols), and vitric ash and pumice clasts (open symbols). Symbols are the same as those in Fig. 2.

(Walker, 1981; Yokoyama, 1974).

5.2. 구성원 함량의 측방점이

무포산응회암의 구성원 중에서 결정과 암편의 함량은 무포산 지역에서 풍부하지만 북쪽의 가메봉, 두수람과 태행산 지역으로 갈수록 감소한다. 반대로 부석과 사드 등의 유리질 물질은 무포산 지역에서 북쪽 태행산 지역으로 가면서 증가하는 측방점이를 보여준다(Fig. 11).

이러한 변화는 밀도가 큰 결정과 암편이 화구로부터 멀리 이동하지 못하고 쉽게 정지하고 비중이 낮은 유리질 물질이 더 쉽게 멀리 이동하고 낙하하기 어려움을 반영하는 것으로 생각된다. 그러므로 거리에 따른 구성원 함량의 측방점이도 공급지가 남동쪽에 있다는 것을 지지해준다.

6. 토 의

화쇄류의 이동기구는 여러 저자들에 의해 토의되었다(Smith, 1960; Ross and Smith, 1961; Fisher, 1966). Ross and Smith(1961)에 의하면 화쇄류는 분화구나 열극으로부터 폭발적으로 분출되어 산사면 아래로 혹은 지면을 따라 빠르게 이동하는 고온의 가스와 화성쇄설물의 와류상 혼합체이다. Fisher(1966)는 화쇄류를 와류로 빠르게 이동하는 가스성 구름으로 정의하였다.

여기에서 와류는 소용돌이(eddies, whirls, swirls)

치면서 함께 전진한다. 흐름이 와류상이라면 여러 타입의 유상선구조가 나타날 수 있다. 즉 와류의 성격을 지닌 다양한 화성쇄설성 밀도류에 의해 유상선구조(parting lineation), 중축침식(groove), 와상배열 등 흐름의 방향을 지시하는 다양한 구조들이 만들어진다(Branney and Kokelaar, 2002; Hughes and Druitt, 1998; Pittari and Cas, 2004). 오히려 층류에 의해 만들어질 수 있는 유상선구조의 종류가 적은 편이다.

화쇄류는 가스화 화성쇄설물들의 혼합물로서 고속도 밀도류로 지표를 따라 흘러간다. 아주 간단하게 화쇄류를 체계화해 보면 두 가지의 화쇄류로 나눌 수 있다. 하나는 고밀도 플러그 흐름(plug flow)으로써 흐름이 순간적으로 멈추면서 그 물질들을 집적시키는 것으로 층류를 나타낸다. 이러한 화쇄류는 이동계(transport system)와 퇴적계(deposition system)가 동일하다(Valentine, 1987; Fisher, 1990). 다른 하나는 고속도의 와류로서 대부분의 입자들은 맹렬한 와류에 의해서 떠다닌다. 이런 흐름에서는 입자들이 기저로 떨어짐에 따라 아래에서 위로 집적된다. 이러한 경우에 이동계는 비교적 저밀도 성층화 밀도류(stratified density current)이며, 퇴적계는 흐름의 기저부에 나타나며, 입자들이 훨씬 더 밀집되어 있고 이동계와는 독립적으로 짧은 거리를 흘러간다(Fisher, 1990; Druitt, 1992). 그러나 자연계에서 관찰되는 것은 이 두 경우 중에서 어느 하나와 꼭 일치하는 것을 찾아내기란 어렵다. 아마도 이 두 경우의 중간 정도의 여러 성질을 가진 것들이 더 흔하게 나타난다(Palladino and Valentine, 1995).

무포산용회암에서 흐름을 지시하는 길쭉한 부석이나 암편의 평행배열과 와상배열, 부석의 신장 등은 이 무포산용회암을 집적시킨 화쇄류의 유형뿐만 아니라 흐름의 상태를 추론하게 한다.

많은 화쇄류에 의한 집적물들은 특징적으로 피상이고 분급이 나쁘다. 그러나 입도가 큰 암편이나 부석편들이 화쇄류 내에서 수직으로나 측방으로 점이현상을 보인다는 것이 여러 지역에서 조사되었다(Palladino and Valentine, 1995; Sparks, 1975; Wilson, 1985; Freundt and Schmincke, 1986). 앞에서 언급한 바와 같이 입도의 측방점에 대한 기존의 연구에 따르면 암편들은 화구로부터 거리가 멀어짐에 따라 최대 입경이 흔히 작아지는 경향을 보이는 반면 부석편은 화구로부터 거리가 멀어짐에 따라 최대 입경이 커지든지 아니면 작아지든지 아니면 어떠한 특정한 관련성을 나타내지 않는 경우도 있다(Palladino and Valentine, 1995).

화쇄류에 의한 퇴적물들은 암편, 유리편 및 결정편으로 주로 구성되어 있다. 이 중에서 유리편들은 화쇄류의 높은 온도에 의해서 용결되고 편형화된 피아메(fiamme)를 이루는 경우가 많다. 피아메는 대부분 다공질 부석이 편평화된 것으로 생각하지만 때때로 원래부터 기공이 거의 없는 본질 쇄설물(juvenile clast)인 것도 있다(Gibson and Tazieff, 1967). Ragan and Sheridan (1972)에 의하면 피아메는 부석편의 편평화를 나타내는 압축변형이라고 생각하지만 어떤 것은 신장된 변형을 나타내는 것으로 생각하였다. 이들 피아메에 의한 용결열리면에 평행하게 잘린 면에서 이들 피아메는 선구조를 나타낸다.

화쇄류층에서 흐름 지시자를 조사하여 공급지를 추적하는 여러 연구들에 의하면 흔히 화쇄류의 유형이 공급지를 중심으로 방사상 혹은 부채꼴 패턴을 나타낸다고 보고하였다(Potter and Oberthal, 1987; Le Penneec *et al.*, 1994; Rhodes and Smith, 1972). 무포산용회암에서 측정된 유상선구조는 방사상 패턴을 보이기보다는 거의 북서-남동 방향의 직선상 패턴에 가까운 부채꼴 패턴을 나타낸다. 그리고 와상배열이나 유상습곡의 습곡축면이 남동쪽으로 기울어지는 것은 공급지가 남동쪽에 위치함을 지시한다. 따라서 무포산용회암에서 유상선구조에 의한 이동 패턴은 뚜렷한 방사상이나 부채꼴 패턴을 나타내지 않기 때문에 정확한 공급지의 위치를 지적하기는 어렵지만 공급지의 방향은 정확하게 나타내준다.

일본의 이토 화쇄류(22,000yr B.P)는 공급지로부터 70 km를 이동했고(Yokoyama, 1974), 타우포(Taupo) 화쇄류는 그 분포 면적이 20,000 km²에 달한다(Wilson, 1985; Wilson and Walker, 1985). 알루산 열도의 아니악차크(Aniakchak)와 피셔(Fisher) 칼데라로부터 유래한 화쇄류는 50 km까지 이동하였다(Miller and Smith, 1977). 이러한 화쇄류의 이동거리나 분포 면적에 비추어 본다면 무포산용회암도 원래 생성 당시의 분포면적이 상당히 컸을 것으로 생각된다. 그러나 무포산용회암의 분포면적은 크게 침식삭박되어 현재와 같이 일부 분에만 남아있기 때문에 원래의 방사상이나 부채꼴 패턴을 나타내는 것 중에 북서쪽과 북쪽 부분만을 남겨놓은 것으로 생각된다. 그러나 분역에서 무포산용회암의 두께가 약 500 m 이상 되는 것으로 미루어 그 공급지가 그리 멀지 않을 것을 추측된다.

Palladino and Valentine(1995)에 의하면 화성쇄설물의 와상배열과 유상선구조는 이동하는 화쇄류 내에서 전단 효과가 있었음을 나타낸다고 하였다. 즉 이들은 화쇄류가 그 내부에 수직적으로 속도구배(velocity gradient)를

가지면서 이동하고 내부에 전단효과를 일으켜서 이러한 배열이 생긴다고 생각하였다. Deal(1973)에 의하면 화쇄류는 초기에 와류로 이동하던 것이 큰 거리를 이동해 가면서 정지하기 직전 흐름속도가 낮아지면 본래의 와류상 성질을 잃으면서 층류상을 나타낸다고 하였다.

이 연구에서 흐름 지시자들은 화쇄류의 이동도중의 와류에 의해 생성된 것으로 생각된다. 이 용회암을 집적시킨 화쇄류가 이동의 마지막에도 와류로 이동하면서 길쭉한 부석이나 암편은 규칙성 없이 흩어져 산만할지라도 규칙적인 배열을 했을 것이다.

무포산용회암에서 암편과 부석의 최대입경은 남동부에서 북서부로 가면서 감소하는 추방점을 나타낸다. 이러한 최대입경의 추방점은 공급지가 남동쪽에 위치한다는 것을 지지한다. 그런데 무포산용회암에서 분출마그마의 조성을 나타내는 부석에 비해 용회암의 기질에서 결정의 함량이 더 크다. 이러한 결정의 부화현상은 상대적으로 더 가벼운 유리질편의 손실을 나타낸다. 그리고 이 용회암의 구성원 함량에서 결정과 암편은 남동 지역에서 풍부하지만 북서 지역으로 갈수록 감소하고 부석과 사드 등의 유리질 물질은 반대로 증가하는 추방점을 보여준다. 이러한 추방점은 밀도가 큰 결정과 암편이 화구로부터 멀리 이동하지 못하고 비중이 낮은 유리질 물질이 더 쉽게 멀리 이동했다는 것을 반영한다. 그러므로 거리에 따른 구성원의 함량변화도 암편과 부석의 최대입경과 마찬가지로 공급지가 남동쪽에 있다는 것을 지지해준다.

무포산용회암을 집적시킨 화쇄류는 아마도 Wilson(1984)에 의한 화쇄류의 분류에 의하면 유형 3에 해당할 것으로 생각된다. 이 유형 3에서 부석은 추방 역점이현상을 보이는데 반해 무포산용회암에서의 부석은 추방 정점이현상을 나타낸다. 이는 Wilson(1984)에 의한 용회암의 분류에서 부석의 밀도(0.2~1.5)에 비해 본 무포산용회암 내의 부석의 밀도가 더 커서 이러한 부석의 추방 정점이현상을 일으킨 것으로 생각된다. 만일 본 용회암 내의 부석이 밀도가 충분히 작아서 추방 역점이현상을 보인다면 그 부석의 최대입경이 멀리 가면서 커지는 추방 역점이현상을 보일 것이다(Palladino and Valentine, 1995). 그러나 무포산용회암에서 부석과 암편이 모두 추방 정점이현상을 보여주기 때문에 용회암 내에서 부석의 밀도는 컸다는 것을 암시한다.

7. 결 론

무포산용회암은 경상분지 북동부 화산암류에서 하나

의 생각단위로 구별되는 층서단위이다. 이 무포산용회암은 그 입도에 의하면 대부분 용회암에 속하고 구성원에 의하면 파리질 용회암에 속한다. 이들은 대부분 용결되어 있고 부석과 사드가 심하게 편평화되어 있다.

무포산용회암의 용결염리에서 길쭉한 부석이나 암편들은 유상선구조를 나타내며 그 방향성은 대체로 북서-남동 방향으로 우세하지만 남동쪽에서 북서쪽과 북쪽으로 벌어지는 부채꼴 모양의 이동 패턴을 나타낸다.

드물지만 길쭉한 부석과 암편들의 와상배열과 비대칭 유상습곡의 습곡측면은 남동쪽으로 기울어져 유상방위를 결정하게 한다. 이러한 증거들은 무포산용회암의 공급지가 본 연구지역의 남동쪽에 위치하였다는 것을 지지한다.

암편과 부석의 최대입경 뿐만 아니라 밀도가 큰 구성원의 함량도 남동쪽에서 북서쪽으로 감소하는 추방점은 마찬가지로 그 공급지가 남동쪽에 위치함을 지지한다.

사 사

본 논문은 2003년도 한국과학재단 특정기초연구(R01-2003-000-10044-0)의 지원에 의해 연구되었다. 심사과정을 통하여 세심한 지적을 해주신 부산대 윤성호 교수님, 강원대 박영록 교수님, 익명의 심사위원에게 감사한다. 자료정리와 그림제작에 있어서 안동대 대학원 손용석 군의 도움이 있었다.

참고문헌

- Ahn, U.S. (1999) Volcanology of Muposan Tuff in the southeastern Cheongsong, Kyeongsangbuk-do. Master thesis, Graduate school, ANU, 58p.
- 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. *Bull. Volcanol.*, v. 54, p. 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, 143p.
- Cas, R.A.F. and Wright, R.V. (1987) Volcanic succession, modern and ancient. Chapman and Hall, London, 528p.
- Chapiñ, C.E. and Lowell, G.R. (1979) Primary and secondary flow structures in ash-flow tuffs of the Gribbles run paleovalley, Central Colorado. In Capin and Elston (eds.), *Ash-flow tuff*, p. 137-154.
- Deal, E.D. (1973) Geology of the northern part of the San Nateo mountains, Socorro country, New Mexico: A

- study of a rhyolite ash-flow tuff cauldron and the role of laminar flow in ash-flow tuffs. Ph.D. thesis, University of New Mexico, p. 107-128.
- Druitt, T.H. (1992) Emplacement of the 18 May 1980 lateral blast deposit ENE of Mount St. Helens, Washington. *Bull. Volcanol.*, v. 54, p. 554-572.
- Fisher, R.V. (1966) Rock composed of volcanic fragments. *Earth. Sci. Rev.* v. 1, p. 287-298.
- 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. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 102, p. 1038-1054.
- Freundt, A. and Schmincke, H.-U. (1986) Emplacement of small-volume pyroclastic flows at Laacher See (East-Eifel, Germany). *Bull. Volcanol.*, v. 48, p. 39-59.
- Froggatt, P.C., Wilson, C.J.N. and Walker, G.P.L. (1981) Orientation of logs in the Taupo Ignimbrite as indicator of flow direction and vent position. *Geology*, v. 9, p. 109-111.
- Gibson, I.L. and Tazieff, H. (1967) Additional theory on the origin of fiamme in ignimbrites. *Nature*, v. 215, p. 1473-1474.
- Hatae (1936) Geological map of Yeonghae and Yeongdeok Sheet. Geological Survey of Korea, 22p.
- Hughes, S.R. and Druitt, T.H. (1998) Particle fabric in a small, type-2 ignimbrite flow unit (Laacher See, Germany) and implications for emplacement dynamics. *Bull. Volcanol.*, v. 60, p. 125-136.
- Hwang, S.K. (1998) Volcanic geology of Juwangsan area, Cheongsong. Guidebook of 1998 Spring Field Excursion, 42p.
- Hwang, S.K. and Kim, S.H. (2006) Magmatic processes of the Muposan Tuff, southern and eastern Cheongsong, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 42, p. 253-271.
- Hwang, S.K., Son, J.D., Lee, B.J. and Reedman, A.J. (2002) Eruptive phases and volcanic processes of the Guamsan caldera, southeastern Cheongsong, Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, v. 11, p. 74-89.
- Hwang, S.K., Ahan, U.S. and Kim, S.H. (1999) Volcanology of Muposan Tuff in the southeastern Cheongsong, Kyeongsangbuk-do: Flow indicator and direction. *Proceedings of 1999 Annual Congress of the Petrological Society of Korea*, p42.
- Kim, O.J., Yoon, S. and Gil, Y.J. (1968) Geological map of Cheongha Sheet. Geological Survey of Korea, 16p.
- Kwon, Y.I. and Lee, I.K. (1973) Geological map of Dopyeong Sheet. Korea Institute of Geology and Minerals, 21p.
- Lee, H.G. and Hong, S.H. (1973) Geological map of Cheongsong Sheet. Korea Institute of Geology and Minerals, 23p.
- Le Pennec, J.-L., Bourdier, J.-L., Froger, J.-L., Temel, A., Camus, G. and Gourgaud, A. (1994) Neogene ignimbrites of the Nevsehir plateau (central Turkey): stratigraphy, distribution and source constraints. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 63, p. 59-87.
- Miller, T.P. and Smith, R.L. (1977) Spectacular mobility of ash flows around Aniakchak and Fisher calderas, Alaska. *Geology*, v. 5, p. 173-176.
- Palladino, D.M. and Valentine, G.A. (1995) Coarse-tail vertical and lateral grading in pyroclastic flow deposits of the Latera Volcanic Complex (Vulsini, central Italy): origin and implications for flow dynamics. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 69, p. 343-364.
- Pittari, A. and Cas, R.A.F. (2004) Sole Marks at the base of the late Pleistocene Abrigo Ignimbrite, Tenerife: implications for transport and depositional processes at the base of pyroclastic flows. *Bull. Volcano.*, v. 66: p. 356-363.
- Potter, D.B. and Oberthal, C.M. (1987) Vent sites and flow directions of the Otowi ash flows (lower Banderlier Tuff), New Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 98, p. 66-76.
- Ragan, D.M. and Sheridan, M.F. (1972) Compaction of the Bishop Tuff, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 83, p. 95-106.
- Rhodes, R.C. and Smith, E.I. (1972) Distribution and directional fabric of ash-flow sheets in the north-western Mogollon plateau. New Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 83, p. 1863-1868.
- Ross, C.S. and Smith, R.L. (1961) Ash-flow tuffs: their origin, geologic relations, and identification. U.S.G.S. Professional Paper 336.
- Schmincke, H.-U. and Swanson, D.A. (1967) Laminar viscous flowage structures in ash-flow tuffs from Gran Canaria, Canary Islands. *J. Geol.*, v. 75, 641-664.
- Smith, R.L. (1960) Ash flow. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 71, p. 795-842.
- Sparks, R.S.J. (1975) Stratigraphy and geology of the ignimbrites of Vulsini Volcano, Central Italy. *Geol. Rundsch.*, v. 64, p. 497-523.
- Suzuki, K. and Ui, T. (1982) Grain orientation and depositional ramps as flow direction indicators of a large-scale pyroclastic flow deposit in Japan. *Geology*, v. 10, p. 429-432.
- Valentine, G.A. (1987) Stratified flow in pyroclastic surges. *Bull. Volcanol.*, v. 49, p. 616-630.
- Walker, G.P.L. (1981) Volcanological applications of pyroclastic studies. in Self, S. and Sparks, R.S.J. (eds.), *Tephra Studies*, p. 391-403.
- Wilson, C.J.N. (1984) The rule of fluidisation in the emplacement of pyroclastic flows, 2: experimental results and their interpretation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 20, p. 55-84.
- Wilson, C.J.N. (1985) The Taupo eruption, New Zealand II. The Taupo ignimbrite. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A.314, p. 229-310.
- Wilson, C.J.N. and Walker, G.P.L. (1985) The Taupo eruption, New Zealand I. General aspects. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A. 314, p. 199-228.
- Wolff, J.A. and Wright, J.V. (1981) Rheomorphism of welded tuffs. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 10, p. 13-34.
- Wright, J.V. (1980) Stratigraphy and geology of the welded air-fall tuffs of Pantelleria, Italy. *Geol. Rundsch.*, v. 69, p. 263-291.
- Yokoyama, S. (1974) Flow and emplacement mechanism of the Ito pyroclastic flow from Aira caldera, Japan. *Tokyo Kyoiku Daigaku Sci. Rep.*, C, 12, p. 17-62.