부산 장산 지역의 구과상(球課狀) 유문암에 대한 암석학적 연구

박수미 · 윤성호*

부산대학교 지구과학교육과

Petrological Study on the Spherulitic Rhyolite in the Jangsan Area, Busan

Sumi Park and Sung-Hyo Yun*

Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

요 약: 부산광역시 동부의 장산화산암체는 화산합몰체로 알려져 있고, 화산합몰체 외각부를 따라 구과상 유문암이 60°~90°의 각도로 수직유상구조를 보여주며 환상암맥으로 나타난다. 구과의 직경은 수 mm에서 2.8 cm 이상이며, 평균적으로 5~10 mm로 측정되었다. 이들 구과는 하나의 핵을 중심으로 방사상을 나타내는 단식 구과형과 육안상 흰색을 띠는 각을 가지면서 핵 부분을 중심으로 방사상을 나타내는 방사상 단식 구과형으로 비교적 단순한 형태를 보여주며, 이들 구과들이 서로 인접하여 합체된 포도송이와 같은 집합체를 보여주기도 한다. 구과의 동심원상 핵 부분에 대한 전자현미분석 결과, 은미정질 기질부 물질의 성분은 주로 SiO₂가 거의 82% 이상, Al₂O₃는 7~10%, Na₂O+K₂O는 8% 이하의 실리카 물질과 장석(새니딘)의 미세한 섬유상 교생으로 나타났다. 구과에 대한 X-선 회절분석 결과, 석영, 새니딘, 엘바이트 그리고 소규모의 운모, 카올린, 녹니석으로 구성되며, X-선 면분석 결과, 핵 부분은 SiO₂가 풍부하며, 각 부분은 Na₂O 또는 K₂O, Al₂O₃가 풍부하였다. 장산칼드론의 유문암 암맥에서 나타나는 구과의 깃털형과 비등형 결정 형태는 마그마 관입에 의한 이동속도보다 유리질 물질로부터 탈유리화작용이 더 빠른 속도로 진행되었고, 비교적 정제된 상태에서 급속한 냉각으로 형성되었음을 지시한다. 구과들은 고규산(75.4~75.7 wt.%) 유문암질 마그마로부터 유래되었다.

핵심어: 구과상 유문암, 장산칼드론, 환상암맥, 탈유리화작용

Abstract: Spherulitic rhyolite occur as part of ring dyke which showing a vertical flowage of 60°~90°, of the Jangsan cauldron was studied. The spherulites range in diameter from a few millimeters to 2.8 centimeters or more, and average 5~10 millimeters. It belongs to radiated simple spherulite type. They consist of a core of moderate brown dense material encased by a thin crust, a few millimeters thick at most of white grey material. The spherulites frequently have a radiating fibrous structure, which are thought to have formed as a consequence of rapid mineral growth caused by very fast cooling of the dykes in shallow depth near the surface. EPMA examination of the concentric-zoned core of spherulites show that they are mainly composed of cryptocrystalline-fibrous intergrowth of silica minerals and alkali feldspars which have SiO₂ 82% or more, Al₂O₃ 7~10%, Na₂O+K₂O less than 8%. The feldspar compositions of the spherulites lie essentially within the sanidine field. XRD examination show that spherulites are mainly composed of quartz, sanidine, albite with minor mica, kaolinite and chlorite. According to X-ray mapping, the spherulites are enriched in SiO₂ in the core and partly enriched Na₂O or K₂O, Al₂O₃ in the shell that reflect in compositional zoning with increasing spherulitic devitrification. The feathery and non-equant crystal shapes of spherulites from rhyolite dyke of Jangsan cauldron suggest that they may have formed during the rapid cooling of dyke under the static state, or faster velocity of devitrification from glassy materials than movement velocity of the magma intrusion. The spherulitic rhyolite originated from high-silica(75.4~75.7 wt.%) rhyolite magma.

Key words: Spherulitic rhyolite, Jangsan cauldron, Ring dike, Devitrification

*Corresponding author
Tel: 051-510-2723
E-mail: yunsh@pusan.ac.kr

서 론

일반적으로 유문암에서 특징적으로 나타나는 조직은 비현정질(非顯晶質) 조직이며, 결정의 존재 유무 및 미결정의 크기에 따라 유리질, 미정질(微晶質), 은미정질(隱微晶質) 석기에 반정(斑晶) 광물이 존재하는 반상(斑狀) 조직을 나타내며 유상구조(流狀構造, flow structure)를 나타낸다.

본 연구 지역인 경상분지 유천소분지의 동남쪽에 위치하는 부산 장산(634 m) 일대의 화산암체에 유상구조와 구과상 구조를 가지는 유문암이 산출되며, 동심원상 구조보다는 핵 부분에 방사상 구조가 잘 나타나고 있다. 장산 지역에서 나타나는 구과상 유문암에 대한 암석학적 특징 및 성인 고찰을 목적으로 연구가 진행된 바 없어 이 연구를 수행하게 되었다. 본 연구에서는 지질도폭(Son *et al.*, 1978; Jang *et al.*, 1983)과 기존 연구논문, 장산에 관련된 참고문헌 등을 기초로 하여 야외조사를 실시하여 본 역에 산출되는 화산암류 및 관입암류의 야외 산출상태, 암상 변화와 분포 양상을 파악하여 장산 화산암체(Cha, 1985)에서 산출되는 구과상 유문암의 특징을 살펴보고, 편광현미경 관찰을 통한 암석기재적 특징을 고찰하고, 구과상 유문암 및 구성 광물의 성분 분석을 통하여 지구화학적 특성을 밝히고, 구과의 성인을 고찰하였다.

2011년 7월부터 2012년 4월에 걸쳐 수차례의 야외조사를 실시하였고, 편광현미경 관찰 및 암석 화학 분석을 위해 노두에서 대표적인 신선한 암석 표품을 채취하였으며, 채취한 표품은 실내에서 박편으로 제작하여 경하에서 구성광물의 종류 및 조직을 관찰하였다. 편광현미경 관찰을 통해 대표적인 시료의 연마편 4개를 선택하여 구성광물의 화학적 특성을 밝히기 위하여 경상대학교 공동실험실습관의 전자현미분석기(EPMA; JXA-8100)를 이용하여 점분석을 실시하였다. 정량분석 조건으로 가속전압 15 kv, 가속전류 10 nA, 전자빔 직경은 1 μm 이다. 동시에 면분석과 선분석도 실시하였고, 면분석 조건은 가속전압 15kv, 가속전류 30nA, 전자빔 직경은 1 μm 이다. 선분석 조건은 가속전압 15 kv, 가속전류 30 nA, 전자빔 직경은 0.1 μm , 길이 800 μm , 분석시간은 16분이다. 구과를 이루는 물질에 대하여 한국기초과학자원연구원 부산분소에서 XRD분석을 실시하였으며, 구과상 유문암의 화학성분 분석을 위해 부경대학교 공동실험실습관에서 XRF분

석을 실시하였다.

지질개요

본 연구 지역인 부산 장산 일대는 행정구역상 부산광역시 해운대구(위도 35°08'55"~35°13'45"N, 경도 129°07'30"~129°12'30"E)에 위치한다. 동래·월내도폭(Son *et al.*, 1978)의 남동부 일대와 부산·가덕도폭(Jang *et al.*, 1983)의 북동부 일대의 양 도폭에 걸쳐 있는 지역이다. 본 연구지역은 경상분지 내 유천소분지의 동남부에 위치하는 곳으로서 유천층군의 이천리층과 안산암질암을 기반으로 하여 조기 유문암, 유문암질 용결응회암, 후기 유문암 및 화강반암과 이들 주변을 관입하여 분포하는 심성암류들로 구성된다(Cha, 1985; Yun and Sang, 1994). 장산은 유문암질 용결응회암으로 구성되는 화산암체(Cha, 1976;

Fig. 1. Generalized geologic map of the Jangsan area in Busan (Modified from Cha and Yun, 1982; Yun *et al.*, 2010).

Son *et al.*, 1978)이며, 그 주변 산록이 거의 완전한 환상암맥으로 구성되고, 직경 약 5 km인 칼데라의 하부구조를 나타냄이 알려져 ‘장산콜드론’으로 명명되어 있다(Cha and Yun, 1982).

구과가 발달되지 않았으며 유상구조도 잘 나타나지 않는 초기 유문암(야외명: 규장암, felsite)은 석대동과 반송동 일대에 넓게 분포하고 있으며(Cha and Yun, 1982), 석대동 부근에서는 안산암을 덮고 있고, 지역에 따라 본질 암편을 다수 함유하여 풍화면에서는 응회각력암과 유사한 암상을 나타내기도 한다. 반송동 부근에서는 장산 산체의 주구성암인 용결응회암 내에 유질암편으로 함유되어 나타나므로, 용결응회암에 앞선 최고기의 규장질화산암류이다(Cha, 1976; Yun and Sang, 1994).

백색의 핵이 뚜렷한 구과를 가지고 있으며 곳에 따라 유상구조와 미아롤리틱 구조가 발달한 후기 유문암(본 연구에서는 구과상 유문암으로 지칭)은 장산 서남록, 반여동, 백동 부근에 소규모로 나타난다. 이 후기 유문암은 특징적으로 수직 유상구조를 나타내며, 환상암맥에서 멀어질수록 수평에 가까운 유상구조를 보여준다.

구과상 유문암의 암석 기재

야외산상: 본 연구 지역에서 발견되는 구과상 유문암에는 담홍색의 비현정질 석기에 평균적으로 직경이 5~10 mm 정도의 구과들이 많이 나타나고 있다(Fig. 2a). 주로 유상구조의 발달이 미약한 곳에서 밀집되어 발달하고(Fig. 2b), 유상구조의 띠(band)를 따라서 또는 유상구조에서 약간 떨어진 부분에서도 발달한 것으로 보인다(Fig. 2c). 구과의 형태를 보면 구과의 중앙에 핵이 있는 것도 있고, 이것을 둘러싸는 백색의 각(shell)을 가지거나 풍화면에서는 중앙부의 핵 부분이 제거되고 두꺼운 각을 가지는 것도 있다(Fig. 2d).

청송 주왕산 화산지역(Hwang, 1998)에서 나타나는 구과상 유문암(Oh *et al.*, 2004)은 일단계 성장으로 끝난 단식 구과형(simple spherulite)과 다단계 성장으로 연속된 복식 구과형(multiple spherulite)로 크게 구분되며, 구과의 형태에 따라 국화형, 민들레형, 매화형, 카네이션형, 목단형, 장미형, 무명형, 해바라기형, 다알리아형 등으로 나누어지지만(Oh *et al.*, 2004), 본 역에서는 주로 하나의 구과 내부에 방사상 배열을 나타내는 단순한 구형으로 되어 있다(Fig. 2).

Fig. 2. Outcrop of the rhyolite showing spherulitic texture. (a; Spherulites ranging in size from 5mm to 10mm, b; Spherulites occur far from flow-band of rhyolite, c; Spherulitic bands are clearly formed by their coalescence, d; Spherulites are radiated simple brown coloured core with white grey material shell and matrix.).

즉 본 연구 지역에서 발견되는 구과상 유문암은 구과들이 각을 가지지 않고 하나의 핵을 중심으로 방사상을 나타내는 단식 구과형과 육안상 흰색을 띠는 각을 가지면서 핵 부분을 중심으로 방사상을 나타내는 방사상 단식 구과형으로 비교적 단순한 형태를 보여주고 있다. 그리고 이들 구과들이 서로 인접하여 합쳐진 포도송이와 같은 집합체를 보여주기도 한다.

본 연구 지역의 유문암의 산출상태를 알아보기 위하여 유상구조의 주향과 경사를 고도에 따라 측정하였다. 해운대구 우동 해발 고도 133 m (N35°10'42.7", E129°07'51.00")에서 N10°W, 55°SW이고, 유동에 의해서 부분적으로 각력화되어 유상구조가 끊어지거나 불규칙하게 각력의 형태로 포함되어 있으며, 이런 경우에는 유상면에 구과가 상대적으로 소량 발달되어 관찰되기도 한다. 고도 148 m (N35°10'42.9", E129°07'52.00")에서 유상면의 주향과 경사가 N20°W, 60°SW이고(Fig. 3a), 구과의 크기는 직경이 대체로 1 cm 정도이며 큰 것은 직경이 2.8 cm에 이른다. 고도 160 m (N35°10'44.1", E129°07'52.4")에서는 주향과 경사가 N4°~5°W, 70°SW이고 고각도의 유상구조

Fig. 3. Vertical flowage of the spherulitic rhyolite at Jangsan. a; surface view of parallel vertical flowage, b; High angle flowage of 64°.

를 가지는 회색 유문암이 나타난다. 고도 169 m (N35°10'46.4", E129°07'54.8")에서는 N25°W, 64°NE (Fig. 3b), 고도 194 m (N35°10'48.3", E129°07'55.3")에서는 유상구조의 주향과 경사는 N35°W, 60°SW이었다. 구과는 유상구조가 발달한 유상면에서 보이지 않고 유상구조로부터 떨어진 곳에서 주로 관찰되고 있다. 하나의 독립적인 구과도 많이 보이지만(Fig. 2) 몇 개의 구과들이 합쳐져서 포도송이모양으로 덩어리진 형태들도 종종 관찰된다.

유문암에서 유상구조의 경사각이 55°에서 70°로 급해지는 것은 이들 유문암이 지표에서 용암이 흘러가면서 만들어진 분출상이 아니고, 틈새를 따라 수직으로 상승한 관입상임을 지시한다. 해발고도 200 m 이상의 고도에서는 유문암이 산출되지 않고 갈색의 용결응회암이 산출되며, 그 풍화된 표면에서 풍화에 저항력이 큰 석영이 결정 반정으로 나타나고 있었다.

여기에서 북쪽으로 약 200 m 정도 떨어진 지점의 노두인 해발 고도 132m (N35°10'49.3", E129°07'49.1")에서는 N10°E, 76°NW로 유문암의 유상면의 경사각도가 수직으로 매우 급하다(Fig. 3). 이는 장산 용결응회암 분출 후 환상단층을 따라 관입된 환상암맥(ring dyke)으로서의 유문암이라는 것을 잘 나타내고 있는 것이다(Cha and Yun, 1982).

연구결과

편광현미경 관찰: 편광현미경에서 볼 수 있는 전형적인 구과는 밝은 광물들이 깃털 모양으로 방사상으로 뻗어 있는 형태이다(Fig. 4). 구과의 중심에서 외곽으로 갈수록 색이 어두워지고 있으며, 여러 개의 미세한 동심원상 각을 가지고 있다(Fig. 4a and 4b).

Fig. 4. Spherulitic texture (a, b; open polar, c; crossed polar). (a, b; Concentric-zoned portion of spherulite are radiated with white grey material shell and matrix, c; Concentric-zoned portion of spherulite show that they are composed of fibrous silica mineral.).

이들 구과의 각들은 개방니콜(open polar)에서 더 자세히 볼 수 있다. 직교니콜에서 보이지 않던 각이 또 는 겨우 보이는 각들이 개방니콜에서는 여러 개의 각들이 동심원상의 줄무늬를 이루며 둘러싸는 것들이 관찰된다. 직교니콜(Fig. 4c)에서 미세한 실리카 광물들이 깃털모양으로 방사상으로 발달하면서 구과를 나타내고 있다. 구과의 기질부는 이들보다 더 미세한 은미정질에서 유리질 물질로 되어있다.

그림 5에서 구과의 내부는 밝은 실리카 광물들로 방사상의 방향성을 보이며 나타나 있고, 바깥쪽에는 이들을 둘러싸는 두꺼운 테두리가 각을 이루고 있다. 주변에 있는 구과들은 같은 형태를 나타내고 있다. 구과의 각을 이루는 광물의 색이 핵을 이루는 광물에 비해 어둡고 구과 내부의 핵을 이루는 결정의 크기보다 상대적으로 매우 작아 보인다. 직교니콜에서 보이지 않던 매우 얇은 각들이 개방니콜에서 나타나고 있다. 이 외에도 연구 지역에서 나타나는 구과의 형태는 완전한 구과의 직교니콜 모양은 아니지만 단계적으로 구과의 발달 과정에 있는 것으로 예상되는 몇 개의 부채꼴형의 모습을 볼 수 있었다.

EPMA 점분석: 전자현미분석기(EPMA)에서 전자빔의 직경(전자빔 직경)이 1 μm 인데 구과를 이루는 광

Fig. 5. Spherulitic texture (a, c; open polar, b, d; crossed polars). (a, c; Concentric-zoned portion of spherulite are radiated with thick shell, b, d; Concentric-zoned portion of spherulite show that they are composed of fibrous silica mineral.).

물 입자가 대부분 $1\mu\text{m}$ 이하로 매우 작았다. 입자들 사이에 미세한 작은 구멍들이 혼재해 있고 철산화물들이 $0.5\mu\text{m}$ 이하로 들어 있어서 이들을 피해 평탄한 면을 찾아서 분석하였다. EPMA 분석 결과(Fig. 6) 후방산란전자이미지(BSI: Back scattered electron image)에서 구과의 내부에서 어두운 부분은 주로 밝은 색 광물들로 이루어져 있었고, 대부분 Si 원소와 O 원소가 풍부하였다. 구과 내부의 밝은 부분은 Si와 O가 결핍되어 있었고, Na와 Al 원소가 많이 나타났다. 구과의 내부는 대부분 은미정질의 실리카광물과 장석이 미세하게 섞여 있어서 EPMA 분석치에서 깨끗한 석영이나 장석 성분을 측정하기에는 어려움이 있었으며, 측정치에서 약간의 오차가 발생하기도 했다.

그림 6의 샘플 a, b, c, d에 대한 점분석을 실시하였다. 은미정질 기질부 물질의 성분분석에서 주로 SiO_2 가 거의 80%이상이며, Al_2O_3 는 7~10%, Na_2O , K_2O 는 장석으로 보이는 광물에서 4~5%로 나타났다. 이는 일반적으로 구과의 내부가 크리스토팔라이트나 칼세도니와 같은 실리카광물로 구성된다는 사실과 달리 미세한 실리카광물과 장석의 집합체로 구성됨을 보여준다.

순수한 석영 결정은 구별되지 않았으며 장석 중 일

Fig. 6. Back scattered electron image of spherules in Jangsan spherulitic rhyolite, showing the analysis point. (yellow arrow; line analysis, red dot; spot analysis point).

부 결정은 분석이 가능하였다. 섬유상 광물을 구성하는 실리카광물 내에 매우 미세한 규모로 정장석과 사장석이 섞이는 현상 또한 섬유상 광물이 매우 빨리 성장하였음을 지시한다. 섬유상 광물은 최외곽부에서는 SiO_2 함량이 94.0%로 순수한 석영에 가깝게 분석되지만 대부분의 경우 미세한 규모의 섞임에 의해 분석시 순수한 석영이 분석되는 경우가 드물며 많은 경우 두 광물이 섞여서 분석된다. 이러한 미세한 규모의 섞임은 Flower *et al.*(2002)에 의해서도 보고되었다.

장석을 Or-Ab-An 삼각도(Fig. 7)에 도시해 보면 장석은 대부분 고온에서 형성된 새니딘(sanidine) 영역에 해당된다. Na_2O 함량이 10.6%, CaO 함량이 0.4%, K_2O 함량이 0.6%로 분석된 Na성분이 높은 알칼리장석은 엘바이트($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) 영역에 도시된다. 즉 구과 내부에 성장해 있는 장석들은 알칼리장석 $[(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ 집합체임을 보여준다.

EPMA 선분석: EPMA를 통한 성분변화를 X-선 선 분석으로 알아본 결과, O, Si 값이 대체적으로 많았고 K, Na, Al 성분의 변화가 우세하였으며, 이들의 함량변화는 구과의 각과 일치하는 경향을 보이고 있었다.

그림 6a에 보이는 구과에서 구과 내부의 밝은 부분

Fig. 7. Or-Ab-An diagram showing feldspar compositions of the spherulitic rhyolite.

Fig. 8. EPMA line analysis along Line-1 of spherulite in Fig. 6a.

을 지날 때 마다 Fe의 함량이 드문드문 높게 나타나고 있다. 이는 철산화물로 인지된다. L1선을 따라 구과의 중심부에서 외곽부 쪽으로 약 0.9 mm 근처에서 K, Al 성분이 증가하고 Si, O 성분이 감소하는 성분

Fig. 9. EPMA line analysis along Line-2 of spherulite in Fig. 6b.

변화가 뚜렷이 나타나는 것으로 보아 구과의 첫 번째 각 부분이 시작된 것으로 생각된다(Fig. 8). 1.15~1.2 mm 사이에서 K, Na 성분이 다시 높게 변하는 것으로 보아 얇은 1층의 각을 지나 구과의 바깥 유문암 기질부로 나왔다는 것을 알 수 있다.

그림 6b의 구과에서 구과의 중심부에서 가장자리로 감에 따라 성분변화를 보면 0.64 mm 부근에서 구과의 중심이 끝나고 있다(Fig. 9). 즉 중심부에서 일정한 함량을 유지하던 O, Si 성분이 낮아지고 0.65 mm 외곽에서 반대로 K, Al 성분이 매우 높게 나타나고 있기 때문이다. 0.95 mm 근처에서 Si, Al, K 등이 큰 폭으로 성분변화가 나타나고 있고 이것이 구과의 경계부분이 된다. 그 이후에 나타나는 것은 기질부가 된다. BSI 사진에서 구과 형태의 내부에 있는 밝은 부분에는 Fe의 함량이 높게 나타나고 있다.

그림 6c의 구과는 BSI 사진에서 구과 형태의 내부에 있는 밝은 부분에서 Fe의 함량이 높게 나타나고 있다. 따라서 Fe를 기준으로 살펴보면 된다. 철의 함량이 높은 부분은 구과 내에 협재된 철산화물로 해석된다. 내부에서 어두운 부분에는 O, Si 순으로 함량이 높게 나타난다. 즉 실리카 물질로 된 부분이다(Fig.

Fig. 10. EPMA line analysis along Line-3 of spherulite in Fig. 6c

10). 구과의 경계부분은 0.8 mm로 볼 수 있는데 Na 함량이 급격하게 낮아지면서 K, Al 함량이 높게 나타나기 시작했기 때문이다. 이는 알칼리장석의 고용체에서 알바이트 성분이 낮아지면서 새니딘 성분이 상대적으로 높아진 것으로 해석된다.

그림 6d는 각의 발달이 뚜렷한 구과로서 L4를 따라 0.56 mm 이전까지는 미세한 여러 개의 각이 나타남을 보여준다(Fig. 11). 구과 내에서 K, Al, Na의 함량은 낮으나 O, Si 성분이 고르게 높은 편으로 나타나다가 첫 번째 각 부분(0.56 mm)에서 O, Si 성분이 감소하고 대신에 K, Al 성분이 높게 나타난다. 이는 구과의 중심부는 실리카 광물이 우세하다가 첫 번째 각 부분에서는 실리카광물이 줄어들고 대신 알칼리장석의 함량이 높아졌기 때문이다. 그 외곽부에서는 경계부분에서 Fe가 갑자기 높게 나타났다. 이는 첫 번째 각의 성장기에 수용액에 의한 철광물의 침전으로 볼 수 있다. 2번째 각 부분에서는 K, Al 성분이 계속 높게 나타나다가 3번째 각 부분이 시작되는 곳에서 Na 성분이 매우 높게 나타난다. 구과의 바깥쪽에서는 Na 성분이 다시 낮아진다.

Fig. 11. EPMA line analysis along Line-4 of spherulite in Fig. 6d.

EPMA 면분석: 구과 전체에서 특정 성분의 변화를 알아보기 위해 X-선 면분석을 실시하였다(Fig. 12 & 13).

그림 12에서와 같이 개방니콜과 직교니콜에서 뚜렷한 각을 가지며, 그 내부에 약간 짙은 색의 핵부분을 가지는 구과에서 중심부 부근에서 각을 지나 기질부로 감에 따라 성분 변화가 뚜렷함을 면분석 결과 알 수 있다. 핵 부분에서는 첫 번째 각 부분에 비하여 Si와 O의 함량이 우세한 실리카 물질로 되어 있으며 첫 번째 각에서는 K, Al 함량이 우세하고 Si가 함께 존재하므로 알칼리장석이 각을 이루고 있음을 볼 수 있으며, 그 외곽의 약간 짙은 두 번째 각에서는 실리카 광물과 K장석이 혼합되어 있으며 핵 부분에 비해 약간 Fe 함량이 높게 나타난다. 구과의 최외각 껍질 부분에서는 Si 함량이 매우 높으며, 반면 Al, K, Na, Fe가 매우 낮으므로 순수한 실리카 광물이 구과를 둘러싸고 있는 것으로 해석된다. O, Si 값이 대체적으로 많았고 구과의 성분변화를 한 눈에 잘 알아볼 수 있었다.

그림 13은 2개 이상의 구과가 합체되어 있는 포도

상의 구과의 중심부와 독립된 구과에 대해 면분석을 실시한 결과이다. 합체된 구과의 내부에서 Si, O 함량이 우세하여 실리카 물질이 풍부함을 보여주며 부분적으로 모자이크상으로 Na, Al이 풍부한 부분에서

Fe 함량이 다소 높음을 보여준다. 구과 내의 모자이크 무늬 부분에 Si 대신에 Al, Na 농도가 높게 나타나는 것은 석영이 형성될 때 장석이 함께 성장하기 시작했다고 생각되고, 그림 13g에서 Na 농도가 상대

Fig. 12. Photomicrography (a; open polar, b; crossed polar) and X-ray maps (c; Si, d; Al, e; K, f; Na, g; Fe, h; O) of concentric spherulite.

적으로 약하게 나타나는 부분에 K, Fe 농도가 약간씩 높아지는 것을 보이는데 이것은 성장이 일어나면서 석영과 K-장석 성분이 함께 섞여서 형성되었다고 생각된다. 이 같은 결과는 구과 내부의 모자이크 부

분의 EPMA분석 결과와 잘 일치하고 있다. 그림 13과 같은 독립된 하나의 구과의 내부는 중심핵 부분과 이를 둘러싸는 각, 그리고 기질부 간의 뚜렷한 성분 차이를 보여준다. 중심부의 핵에는 각과 기질부에 비

Fig. 13. Photomicrography (a; open polar, b; crossed polar) and X-ray maps (c; O, d; Si, e; Na, f; Al, g; K, h; Fe) of concentric spherulite.

해 O, Na 성분이 풍부하며, Si 성분은 거의 유사하다. 각에서는 핵부분에 비해 K 성분이 우세하여 구분된다. 즉 핵 부분에는 실리카 광물과 Na-장석이, 각 부분에서는 실리카 광물과 K-장석이 혼합되어 존재함을 지시한다. 전체적으로 구과의 내부 핵 부분에는 Si, O 성분이 많이 나타나 실리카 물질이 우세하고 각에서는 K, Al 성분이 많아 장석 성분이 우세함을 보인다. 아주 얇지만 테두리 부분은 Na, Al 성분이 많은 띠모양으로 나타나고 있고 구과의 밖인 기질 부분은 대부분은 Si, O 성분이지만 Al, K, Na도 많이 나타나고 있다. Fe 성분은 거의 나타나지 않고 있다. 그림 13에서 구과의 중심부분에서 O, Si 농도가 낮은 곳에 K, Al 농도가 불규칙하게 높게 나타나는 것으로 보아 석영과 K-장석이 미세하게 섞여 있는 것으로 생각되고, Na 농도가 중심보다 각 부분에서 낮게 나타나는데 이것은 EPMA분석에서 Na_2O 값이 다르게 나타나는 것과 일치한다.

타원형의 독립된 구과에서 구과의 내부에는 대부분 O와 Si 성분이 가장 많아 실리카 물질로 구성되며, 그 내부에 BSI에서 밝게 보이는 부분은 Si가 적고 Al, Na, K 성분이 상대적으로 높게 나타나고 있다. 아울러 Fe 함량도 높게 보인다. 이는 K, Na-장석이 상대적으로 함량이 높은 부분이다. 타원형 구과와 마찬가지로 각이 발달되지 않은 타원형 구과의 BSI 사진에서 내부의 어두운 부분은 Si가 풍부한 부분이며, 내부의 가장 밝은 부분에 Si 대신 K, Na, Al 성분이 많이 함유되어 있고 특징적으로 철이 상대적으로 높게 나타나고 있다. 즉 장석으로 구성되는 구분이다. 구과의 외곽부에는 K, Na, Al 성분의 미세한 띠를 볼 수 있는데 기질부와 쉽게 구분이 가능하다.

구과 내부의 스폰지형 조직에 대한 면분석 결과는 다음과 같다. 다른 구과들의 면분석에서와는 다르게 구과내부의 스폰지형 조직 부분에는 O, Si양이 적게 나타난다. 구과내의 밝은 부분은 K, Al, Na 함량이 높고 대체적으로 구과의 바깥쪽 엷은 각 부분과 기질부에서도 높게 나타난다. Al, Na 성분도 다른 면분석 결과에 나오는 구과들과 비교했을 때 현저하게 낮게 나타난다. 구과의 내부 모양도 매우 불규칙하다. 구과의 바깥 각에는 Na, Al 성분의 변화가 짙은 것을 볼 수 있다. 즉, 구과의 각 부분이 특정 성분 원소의 함량이 뚜렷하게 나타나고 있다. 구과의 바깥쪽에 K 성분이 많은 것이 특징적이다.

석영이 결정화되어 형성될 때 장석이 함께 형성되

면서 구과 내부에 모자이크 무늬를 만들고 있다고 보인다. 그림 12와 13과 같이 구과 내부에 석영이 집합체로 잘 나타나고 외부로 갈수록 석영의 결핍이 나타나는 구과와 타원형이나 스폰지형처럼 결정이 만들어지기 전에 석영과 장석이 함께 자라는 형태로 관찰되고 있다.

XRD분석: 구과를 구성하는 유문암에 함유된 미세한 광물 결정을 감정하는 또 다른 방법으로 X-선 분말회절분석을 실시하였다. 2개의 시료에 대해 분석을 실시하였는데 분석 결과, 주구성 광물은 석영, 사장석, 알칼리장석과 소량의 운모류, 고령석, 녹니석으로 분석되었다(Fig. 14).

운모와 고령석 그리고 녹니석은 극소량으로 암석 시료의 미세한 풍화산물로 해석되며, 실리카광물 중 고온의 β -크리스토팔라이트의 피크는 검출되지 않았으며 저온에서 안정한 α -실리카광물이 검출되었다. α -크리스토팔라이트는 270°C 이하에서 안정한 것으로

Fig. 14. XRD pattern of spherule of rhyolite(sample B). Q; quartz, α - SiO_2 ; silicon dioxide alpha, kf, sanidine, Ab; albite, ch; chorite, Ka; kaolinite.

알려져 있다(Hatch and Ghose, 1991). 비정질의 실리카는 XRD로는 검출이 불가능한 것으로 알려져 있다. 이들을 제외한 나머지 대부분은 석영과 장석으로 구성된다. 장석은 새니딘과 알바이트로 확인되었다.

전암 주성분 분석: 구과를 가지는 유문암의 전암 분석 결과는 표 1과 같으며, SiO_2 함량은 75.4~75.7%, Al_2O_3 11.9~12.6%, CaO 0.9~0.3%, Na_2O 2.6~2.4%, K_2O 5.9~6.2%로 전형적인 고규산질 유문암에 해당된다.

CIPW 노름분석에서는 석영+장석(Q+Or+Ab+An)의 함량이 95% 이상이며, 장석에 대한 Ab/An비는 4.6~13.2%로 규장질 암석에 나타나는 엘바이트~올리고클레이스 조성을 나타낸다.

본 암석의 전암 분석결과에 근거하여 2개의 시료에서 얻어진 평균치 A_{AVE} 와 B_{AVE} 를 Kim(2009)의 장산 지역에 나타나는 유문암과 비교해 본 결과를 그림 15에서 검토해 보았다. 본 연구 지역의 2개의 평균치 값은 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO , CaO , MgO , P_2O_5 값은 전체 분화에 따른 변화 경향의 선상에 도시되나, K_2O 는 특징적으로 높은 값을, Na_2O 는 다소 낮은 값을 보여 주고 있다. 이러한 결과를 구과상 구조의 분석 결과와 비교해 보면, 그림 12에서는 석영을 중심으로 해서 성장한 각 부분에 Na 함량이 낮고, K의 함량이 높게 나타나고 있다. 또 다른 구과의 중심부에 있는 모자이크 무늬 안의 성분 변화를 보면 Al 함량은 일정하나 Na 성분이 감소하는 부분에서 K 성

Table 1. Bulk compositions and CIPW norms of spherulite rhyolite from Jangsan area, Busan

Sample	A1	A2	A3	A_{AVE}	B1	B2	B3	B_{AVE}
SiO_2	75.39	75.41	75.36	75.39	75.69	75.64	75.70	75.67
TiO_2	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10
Al_2O_3	12.58	12.57	12.59	12.58	11.92	11.91	11.91	11.91
Fe_2O_3	0.58	0.58	0.58	0.58	0.56	0.56	0.56	0.56
FeO	0.51	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.51
MnO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07
MgO	0.36	0.35	0.35	0.35	0.31	0.32	0.32	0.32
CaO	0.34	0.34	0.34	0.34	0.91	0.91	0.91	0.91
Na_2O	2.55	2.53	2.55	2.54	2.39	2.40	2.39	2.39
K_2O	6.21	6.21	6.21	6.21	5.89	5.89	5.89	5.89
P_2O_5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.01	0.01	0.01
Total	98.7	98.68	98.67	98.68	98.36	99.32	98.37	98.34
LOI	1.06	1.06	1.06	1.06	1.39	1.39	1.39	1.39
Q	35.86	36.01	35.84	35.93	37.30	36.82	37.30	37.28
Or	37.22	37.22	37.23	37.22	35.42	35.08	35.42	35.43
Ab	21.84	21.67	21.84	21.75	20.54	20.42	20.53	20.54
An	1.65	1.65	1.65	1.65	4.42	4.31	4.40	4.40
C	1.06	1.09	1.07	1.08	0.00	0.00	0.00	0.00
Di wo	--	--	--	--	0.05	0.10	0.06	0.06
Di en	--	--	--	--	0.03	0.06	0.03	0.03
Di fs	--	--	--	--	0.02	0.03	0.02	0.02
Hy en	0.91	0.89	0.89	0.89	0.79	0.74	0.78	0.78
Hy fs	0.36	0.39	0.39	0.39	0.43	0.41	0.43	0.43
Mt	0.85	0.85	0.85	0.85	0.83	0.82	0.83	0.83
Il	0.23	0.21	0.21	0.21	0.19	0.19	0.19	0.19
Ap	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02
Ab/An	13.2	13.1	13.2	13.2	4.6	4.7	4.7	4.7

Bulk composition expressed as weight %, determined using XRF. The CIPW norm is given in terms of weight % of quartz(Q), corundum(C), orthoclase(Or), albite(Ab), anorthite(An), diopside(Di), hypersthene(Hy), ilmenite(Il), haematite(Hm) and apatite(Ap). LOI: Loss on ignition, Abr: A_{AVE} =average 3 times analysis for A sample, B_{AVE} =average 3 times analysis for B sample.

Fig. 15. Harker variation diagrams of volcanic rocks from the Jangsan area(Kim, 2009), showing the composition of spherulitic rhyolite.

분이 증가하는 것으로 보아 석영의 성장 사이에 장석이 형성됨에 따라 치환 관계가 형성된 것으로 사료된다. 그림 13에서는 중심부의 석영을 둘러싸고 각을 이루는 부분에서 Na 함량이 아주 낮고 석기를 이루고 있는 K 성분이 각을 이루는 부분에 침투하듯이 불규칙하게 높은 함량을 나타내고 있다. 이와 같은 결과로 보아 구과가 발달되는 곳에서는 Na 성분 보다는 K 성분이 더 농집됨을 알 수 있으며 전암 분석 결과와 밀접한 관련성이 있는 것으로 사료된다. Ewart(1971)는 구과구조가 발달됨에 따라 K 성분이 증가하는 것은 탈유리화가 활발히 진행되는 단계에서 잔류 유리질 물질(glass) 내에 K 성분이 농집되는 것이 장석과 석영-장석에서 일어나는 것보다 더 큰 것에 기인하며, 이러한 구과상 구조의 형성동안 후기에 일어나는 알칼리 함량에서의 분화 작용은 이전에 분출했던 암석내의 반정에 의한 분별결정작용에 의해 좌우된다고 언급하였다.

본 연구 지역에서 구과상을 가지는 암석에서 Na에 비해 높은 K 함량을 가지는 것은 장산 지역에서 나타나는 이전의 유문암을 포함한 암석의 분별결정작용의 결과 잔류 멜트 내에서 K₂O의 농집의 결과에 기인하며 이는 구과상 유문암이 후기 유문암에 속한다는 사실과 잘 부합한다.

토 의

본 연구 지역에 나타나는 구과들은 대부분 중앙부가 실리카함량이 높은 광물의 집합체로 이루어져 있으며, 높은 실리카 함량은 미세한 석영 결정 사이에 부분적으로 미세한 알칼리장석이 형성되어 혼합되어 있는 것으로 사료된다. 여러 개의 각이 잘 발달된 구과일수록 중심부에서 가장자리로 갈수록 실리카의 함량은 줄어들고 알칼리장석의 함량이 늘어났으며 구과의 바깥쪽에서는 다시 실리카광물이 증가하기 시작했

다. 각이 없거나 있어도 매우 얇은 각을 가진 타원형의 구과들은 중앙부가 실리카광물로 집중되어 있는 것은 동일했다.

전자현미경 상에서 K-장석과 Na-장석이 섞인 실리카광물 집합체가 섬유상으로 방사상 형태로 있었다. Si 함량이 높은 섬유상 실리카광물 사이에는 이들 광물 형성에 사용되지 않은 Na, K, Al 성분들이 많이 나타나고 Fe를 갖는 성분들도 있었다. 상대적으로 Fe 성분이 높은 부분에서는 녹니석과 고령석(Kaolinite)이 형성되어 있다. Na 성분이 높은 부분에서는 알칼리장석(엘바이트)이 형성되어 있고, K 성분이 높은 부분에서도 알칼리장석(새니딘)이 형성되어 있었다.

깃털 모양의 조직을 보여주는 섬유상 광물은 광물이 과냉각 상태에서 빠른 확산에 의해 성분이 빨리 공급될 수 있는 방향으로만 빠르게 성장하였음을 지시한다. Oh *et al.*(2004)는 청송지역의 구과상 유문암에서 섬유상 광물을 구성하는 석영 내에 매우 미세한 크기로 정장석과 사장석이 섞이는 현상 또한 섬유상 광물들이 매우 빨리 성장하였음을 지시한다고 기술하였다. 섬유상 광물은 최외각부에서는 순수한 석영이 분석되지만 대부분의 경우 미세한 규모의 섞임에 의해 분석시 순수한 석영이 분석되는 경우가 드물며 많은 경우 실리카광물과 장석의 두 광물이 섞여 있는 것으로 분석된다. 이러한 미세한 규모의 섞임은 Fowler *et al.*(2002)에 의해서도 보고되었다. 탈유리화 작용 과정에서 섬유상 광물 주변에 집중된 고철질 및 Na, K, Al 성분은 섬유상 광물 형성시 사용되지 못한 성분이 그 주변으로 밀려났음을 지시한다(Oh *et al.*, 2004).

관입상으로 유문암이 환상의 단층을 따라 서서히 관입할 때 마그마의 유동속도보다 결정성장의 속도가 큰 정제된 상황에서 마그마가 서서히 냉각되면서 탈유리화작용이 진행된다(Lofgren, 1974). 탈유리화작용의 초기 단계에는 구과들이 대부분 독립되어 있고 유리질 내에 거의 완벽한 구형으로 산출되고 이들은 전형적으로 직경이 1~5 mm 정도이다(Lofgren, 1970). 본 연구지역의 구과에 대한 박편 관찰에서 색채의 미약한 변화에 의해 볼 수 있는 동심원상 누대와 함께 방사상의 섬유상 구조를 나타낸다(Fig. 12 & 13). 큰 구과들에서는 종종 장석과 같은 반정을 핵으로 그 주변에 발달한 것도 있다.

탈유리화작용이 진행됨에 따라 구과들의 개수는 집단으로 합체되면서 증가하고, 그 때문에 K, Na, Al

성분이 많이 함유되어 있는 잔류 유리질부분이 고립되어 불규칙한 패치(조각)로 남겨진다. 서로 합체된 구과들은 종종 서로 다각형의 윤곽을 보이기도 한다. 그러나 구과들의 접촉 경계부와 잔류 유리질은 큰 구과의 표면에 종종 매우 작은 구과들의 출현으로 불규칙하게 나타난다. 구과들은 합체되어 포도송이와 같은 조직을 보인다.

탈유리화작용의 최종 단계(실리카광물이 상대적으로 결핍 전)에 잔류간극충진적인 유리질 물질은 미정질 또는 은미정질로 탈유리화되어 다른 구과들이 기질부 내에서 비구과의 집합체로 바뀐다. 구과의 발달이 미약한 기질부는 주로 유리질이며, 현미경 관찰 결과 막대상 정자(晶子)의 배열이나 결정이 풍부한 부분과 결정이 결핍된 부분의 좁은 띠를 이루며 교호하여 나타나는 잘 발달된 유상구조가 나타난다. 점진적으로 구과가 발달함에 따라 정자들의 양은 잔류 유리질의 체적이 감소하면서 증가하는 것 같다.

매우 중요한 것의 하나는 인접한 구과와 비교하여 유리질 내의 유상구조의 관계이다. 구과들은 대부분 독립적이나, 어떤 경우에는 유상구조가 약간 변형된 것이 구과 주변이나 구과 내부에 분명히 나타난다. Holmes(1920)와 Morse *et al.*(1932)은 구과상 결정작용이 용암이 움직이지 않는 고정된 상태에서 매우 점성이 큰 상태 동안에 일어난다고 지적하였지만, 본 역에서는 구과들이 유상구조와 함께 산출되는 것을 볼 때 움직이지 않는 상태보다는 서서히 움직이는 과정에서 이보다 빠른 결정작용(탈유리화작용)으로 성장하였음을 지시한다. 이러한 성장 조건은 본 역의 구과상 유문암이 환상암맥으로 관입상이라는 것과 매우 조화적이다.

Lofgren(1971, 1974)은 탈유리화 작용의 비율이 마그마의 이동속도와 수용성 용액의 존재와 성분에 의존하는데, 300°C 이하 또는 수분이 부족하거나 순수한 물이 존재하는 조건에서 탈유리화의 비율은 매우 느리다고 하였다. 알칼리가 풍부한 용액이 존재하면 탈유리화 정도는 4~5배 정도 빨라지는 것으로 알려져 있다(Lofgren, 1970). 이들 용액의 OH⁻이온은 SiO₄의 다중결합고리를 SiO₄ 사면체로 변환시키고 Na와 K의 급속한 확산을 유도하여 탈유리화과정에서 미세한 석영과 장석의 결정작용을 촉진시킨다. 조직적인 변화로는 탈유리화작용으로 SiO₂, H₂O, Na₂O, K₂O와 Al₂O₃ 함량의 변화를 야기한다고 한다.

700°C 정도의 고온에서 형성되는 구과는 넓은 공간

을 가진 빗자루 모양의 섬유상 결정의 집단으로 구성되며, 400°C 이하의 낮은 온도에서는 방사상-섬유상 결정의 다발로 구성된다(Lofgren, 1971, 1974). 나비넥타이 모양의 섬유상결정 다발은 400~650°C의 중간 온도에서 형성된 것이다.

본 역에서 일부 구과편들은 나비넥타이형을 나타내기도 하나 대부분 방사상의 둥근 구조를 나타내므로 400°C 이하의 낮은 온도에서 지하수나 마그마의 냉각에 의한 수분의 공급에 의해 급냉하면서 탈유리화작용으로 구과상 조직이 형성된 것으로 사료된다.

결 론

장산 지역에 나타나는 구과상 유문암에 대한 야외 및 실내 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

부산 장산 구과상 유문암의 구과는 유문암이 60°에서 90°의 각도로 수직으로 관입한 곳에서 주로 발달해 있었다. 구과의 크기는 1 mm 이하에서부터 2.8 cm보다 큰 것도 관찰되며 5~10 mm의 것들이 많았다. 이들 구과의 대부분은 방사상 단식구과형에 속한다. 구과 내에 나타나는 실리카함량의 높은 섬유상 광물은 이들이 성장과정에서 빠르게 냉각되었음을 지시한다.

구과를 구성하는 광물은 EPMA 분석 결과, 주로 실리카광물과 알칼리장석으로 구성된다. XRD 분석 결과, 석영, 사장석, 알칼리장석, 운모류, 고령석, 녹니석으로 구성된다. 구과를 이루고 있는 물질은 SiO_2 가 거의 82% 이상이며, Al_2O_3 는 7~10%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 는 8% 이하로 나타났으며, 미세한 실리카광물과 알칼리장석이 섞여 있는 것으로 생각된다. 구과 내 장석의 성분은 새니딘 영역에 주로 표시된다. X-선 화학조성 분석 결과, 구과가 형성될 경우 고규산질 마그마 내에 먼저 만들어진 실리카 광물들이 구과의 중앙부에서 방사상형의 섬유상으로 빠르게 성장하여 Si, O가 풍부한 밝은 부분을 보여주고, 이 때 사용되지 않은 Na, K, Al 성분이 주변으로 밀려나 어두운 부분을 형성하며 각을 이룬 것으로 판단된다.

장산지역의 구과상 유문암에서 나타나는 구과의 성인은 유문암이 환상의 단층을 따라 서서히 관입할 때 마그마의 유동속도보다 탈유리화작용에 의한 결정 성장의 속도가 큰 정체된 상황에서 빠르게 냉각되면서 형성되었을 것이다. 수직 유상구조를 가진 유문암 환상암맥 내에서 마그마의 관입속도보다 구과의 성장속

도가 더 빨랐음을 지시한다. 즉 마그마가 이동이 거의 정지된 상태에서 SiO_2 함량이 75.4~75.7 wt.%인 고규산질 마그마로부터 냉각된 유리질의 탈유리화작용으로 구과가 성장한 것으로 해석된다.

사 사

본 논문의 초고에 대하여 건설적으로 비평하여 주시고 질적 향상을 위해 내용을 개선해 주신 이상원 교수님과 고정선 이정현 박사, 익명의 심사자에게 감사드린다. 이 연구는 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)에 의해 연구되었다.

참고문헌

- Cha, M.S., 1976, Petrological study on the Bulgusa acidic igneous rocks in Busan area. *Journal of Korea Institute of Mining Geology*, 9, 85-106.
- Cha, M.S., 1985, Ring structure in the southeastern Kyeongsang basin(1), *Journal of College of Education, Pusan National University*, 11, 369-386.
- Cha, M.S. and Yun, S.H., 1982, Cretaceous volcanic activity in the vicinity of Busan: Jangsan caldera remnant structure, *Journal of Natural Science, Pusan National University*, 34, 377-388.
- Ewart, A., 1971, Chemical changes accompanying spherulitic crystallization in rhyolite lavas, Central Volcanic Region, New Zealand. *Mineralogical Magazine*, 38, 424-434.
- Fowler, A.D., Berger, B., Shore, M., Jones, M.I. and Ropchan, J., 2002, Supercooled rocks: development and significance of varioles, spherulites, dendrites and spinifex in Archaean volcanic rocks, Abitibi Greenstone belt, Canada. *Precambrian Research*, 115, 311-328.
- Hatch, D.M. and Ghose, S., 1991, The α - β transition in cristobalite, SiO_2 , *Physics and Chemistry of Minerals*, 17, 554-562.
- Holmes, A., 1920, *The Nomenclature of Petrology, with references to selected literature*. London, Thomas Murby & Co., 284p.
- Hwang, S.K., 1998, Volcanic geology of the Juwangsang area, Cheongsong. *Guidebook for 1998 spring field excursion*. 42p.
- Jang, T.W., Kang, P.J., Park, S.H., Hwang, S.K. and Lee, D.W., 1983, Explanatory text of the geological map (1:50,000) of Busan and Gadeuk sheets. *Korea Research Institute of Geological and Mineral Resources*, Seoul, Korea, 22p.
- Kim, H.J., 2009, Petrological study on the felsic volcanic rocks in the Jangsan, Pusan. *Pusan National University*,

- Master thesis, 82p.
- Lofgren, G., 1970, Experimental devitrification rate of rhyolite glass. Geological Society of America Bulletin, 81, 553-560.
- Lofgren, G., 1971, Spherulitic textures in glassy and crystalline rock: Journal of Geophysical Research, 76, 5635-5648.
- Lofgren, G., 1974, An experimental studies on the dynamic crystallization of silicate melts. in Physics of Magmatic Processes (ed. R. B. Hargraves), Princeton University Press, New Jersey, 487-551.
- Morse, H.W., Warren, C.H., and Donnay, J.D.H., 1932, Artificial spherulites and related aggregates. American Journal of Science, 5th series, 23, 421-39.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Hwang, S.K., Son, C.W., Kim, C.S. and Kim, H.S., 2004, The Study on the Spherulitic Rhyolites in the northern part of Juwang Mt., Cheongsong. Journal of Petrological Society of Korea, 13, 103-118.
- Son, C.M., Lee, S.M., Kim, Y.G., Kim, S.W., and Kim, H.S., 1978, Explanatory text of the geological map (1:50,000) of Dongrae and Weolnae sheets(Sheet-7019-IV-I). Korea Research Institute of Geological and Mineral Resources, Seoul, Korea, 27p.
- Yun, S.H. and Sang, K.N., 1994, Geochronology and cauldron structure of the Cretaceous volcanic complexes in southern Kyeongsang basin, Korea. Journal of Korean Earth Science Society, 15, 376-391.
- Yun, S.H., Koh, J.S. and Kim, H.J., 2010, Emplacement pressure and equilibrium temperature of the Cretaceous rhyolitic magma chamber in the Mt. Jangsan, Busan, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. 46, 119-140.

2013년 7월 17일 접수

2013년 7월 26일 심사개시

2013년 8월 8일 채택