

청송 주왕산 북부 일대의 구과상 유문암에 대한 연구

오창환^{1,*} · 김성원² · 황상구³ · 손창환¹ · 김창숙¹ · 김형식⁴

¹전북대학교 지구환경과학과, ²전북대학교 기초과학연구소,
³안동대학교 지구환경과학과, ⁴고려대학교 지구환경과학과

The Study on the Spherulitic Rhyolites in the northern part of Juwang Mt., Cheongsong.

Chang Whan Oh^{1,*}, Sung Won Kim², Sang Koo Hwang³, Chang Whan Son¹,
Chang Suk Kim¹ and Hyung Shik Kim⁴

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

²Basic Science Research Institute, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

³Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea

⁴Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea

요약: 청송 지역에서는 국내외적으로 희귀하며 매우 다양하고 아름다운 형태를 보여주는 구과상 유문암들이 맥의 형태로 산출된다. 청송 구과상 유문암내에 나타나는 섬유상 광물은 이들 암맥이 지표근처에서 빠르게 냉각되었음을 지시하며 청송 구과상 유문암의 다양한 형태는 각 맥의 냉각속도의 다양함에 기인한다. 구과상 유문암의 형태는 성인에 따라 방사상 단식, 층상 단식, 층상 복식, 방사상-층상 복식, 방사층상 복식의 5가지로 분류된다. 방사상 단식 구과형과 방사층상 복식 구과형은 상대적으로 가장 빠른 냉각시 과냉각에 의한 확산류에 의해 형성되었으며 냉각속도가 상대적으로 가장 느린 경우 리제강 링의 형성 원리와 같은 방식으로 상대적으로 느린 확산에 의해 층상형 복식 구과형이 형성되었다. 그리고 냉각속도가 중간일 경우 층상 단식 구과형이 생성된다. 따라서 청송 지역의 구과상 유문암중 방사상 단식 혹은 방사층상 복식 구과형인 국화형, 민들레형, 해바라기형, 다알리아형은 가장 빠르게 냉각된 암맥에서 생성된 반면 층상형 복식 구과형인 장미형, 무명형과 목단형등은 상대적으로 가장 천천히 냉각된 암맥으로부터 형성되었다. 그리고 매화형과 같은 층상 단식 구과형은 상대적으로 중간 속도의 냉각 속도를 갖는 맥에서 산출된다. 구과상 유문암 맥들의 K-Ar 전암 연령은 이들 암석이 48-50 Ma에 관입한 암체임을 지시한다. 청송지역의 구과상 유문암은 그 희귀성과 다양하며 아름다운 형태 때문에 연구 및 보존가치가 높다.

주요어: 청송, 구과상 유문암, 과냉각, 확산류, 리제강 링, K-Ar 전암 연령

Abstract: In Cheongsong area, very rare spherulitic rhyolites both in Korea and foreign countries occur as dykes showing various types. The spherulites in them represent an undercooling caused by very fast cooling of the dykes in a shallow depth near to the surface and the variety of types were resulted from the difference of relative cooling rate. Cheongsong spherulitic rhyolites can be classified into five types; radiated simple spherulite, layered simple spherulite, layered multiple spherulite, radiated-layered multiple spherulite, radiating layered multiple spherulite. Radiated simple and radiating layered multiple spherulites formed by diffusion current caused by undercooling related to very fast cooling. On the other hand, layered multiple spherulites formed by relatively slow diffusion as a Liesegang ring during relatively slow cooling. If the cooling rate is between the two cases, layered simple spherulites formed. This interpretation indicates that Chrysanthemum, Dandelion, Dahlia and Sunflower types which are included in radiated simple or radiating layered multiple spherulites formed in the dykes with the fastest cooling rate in Cheongsong area while Peony, Rose and Innominate types classified as layered multiple spherulite formed in the dykes with the relatively slowest cooling rate. At the cooling rate between them, Apricot type spherulite formed. The

*Corresponding author: Tel. 82-63-270-3397, E-mail. ocwhan@chonbuk.ac.kr

K-Ar age-dating for Cheongsong spherulitic rhyolites indicate them to be formed between 48 and 50 Ma. The Cheongsong rhyolites are very valuable for research and preservation because of their rarity, beauty and diversity.

Key words: Cheongsong, Spherulitic Rhyolite, Undercooling, Diffusion current, Liesegang ring, K-Ar age-dating

서 론

구상조직(orbicular structure)은 어떤 광물이나 포획물로 구성된 핵을 중심으로 어두운 층과 밝은 층이 교호되며 구상으로 배열하거나 광물들이 방사상으로 배열됨으로 해서 동심원상의 구를 형성하는 조직이며 이러한 조직을 보여주는 암석을 구상암(orbicular rock)이라 한다. 구상암은 그 산출이 매우 희귀하고 그 형태가 아름다워 1802년 Von Buch에 의해 최초로 언급된 이후 많은 지질학자들의 관심의 대상이 되어왔다(Hatch, 1888; Leveson, 1963, 1966; 김형식 외, 1979; Vernon, 1985). 국외의 경우 100여개 지역에서 다양한 구상암이 보고 되어 있으며 그들 중 대부분은 화성암중 심성암인 섬록암이나 반려암 그리고 화강암질 편마암내에 발달되어 있고 화산암내에 발달된 구상암은 매우 드물다(Leveson, 1966). 국내에서도 여러 곳에서 구상암이 보고 되었으나 역시 대부분이 변성암이나 심성암내에 발달되어 있다. 부산 황령산에서는 심성 화성암인 반려암내에 구상 조직이 나타나는 구상반려암(김형식 외 1979; 윤성호 외, 1998)이 보고 되었다. 그리고 부산 영도일대에서는 변성암인 호른펠스 내에 구상조직이 나타나는 구상호른펠스(김형식 외, 1985), 전북 무주군 왕정리 지역에서는 변성암인 편마암내에 구상조직이 나타나는 구상편마암(권용완 외, 1995)이 보고되었다. 이에 반해 청송 주왕산 지역에 나타나는 구상암은 국내는 물론 국제적으로 드물게 화산암인 유문암내에 나타나고 있으며 심성암에서 관찰되는 구상암에 비해 섬유상 광물(spherulite)이 잘 발달되어 있어 구과상 유문암(spherulitic rhyolite)이라 불리운다. 국내외의 여러 지역의 구상암에 비해 청송지역의 구과상 유문암은 다양한 형태의 조직을 보여주고 있어 많은 수석 애호가들의 관심의 대상이 되어 왔으며 보존 및 연구가치가 높다. 하지만 청송 지역의 구과상 유문암에 대한 자세한 연구는 아직 수행되지 못한 실정이다.

본 연구에서는 청송 주왕산 지역의 야외 조사를 통하여 이 지역의 구과상 유문암의 산출상태 조사와 체계적인 시료 채취를 실시하고 구과상 유문암에 대한 현미경관찰, 화학조성 및 광물조성 분석 그리고 K-Ar 전암분석을 실시하여 구과상 유문암을 분류하고 그 성

인과 생성시기를 밝히는 동시에 주왕산 구상유문암의 우수성과 보존의 필요성을 널리 알리고자한다.

일반지질

경상분지는 경상남북도에 걸쳐서 나타나며 백악기의 퇴적암과 화성암으로 주로 구성되어있다. 유라시아판의 끝 부분인 경상분지 밑으로는 백악기 시기에 일본의 동쪽에 위치한 해양지각인 이자나기판이 섭입을 하였으며(Uyeda and Miyashiro, 1974), 이 섭입작용은 여러 시기에 걸친 화산작용을 일으켰으며 이 시기에 경상분지내에 화산작용이 일어나고 동시에 퇴적암이 퇴적되었다. 그 결과 경상분지내에는 여러 개의 화산지역이 나타난다. 영양 소분지 동남부와 의성 소분지 동부에 해당하는 청송군, 영덕군, 영천시와 포항시가 맞닿는 지역에도 화산암류가 넓게 분포하는데 이 화산지역은 황상구(1998)에 의해 주왕산 화산지역이라 명명되고 자세히 연구되었다.

주왕산 화산지역은 하부에 염기성과 중성 화산암류, 중부에 산성과 중성 화산암류, 상부의 산성 화산암류로 구성되며 다음과 같이 분류되었다(황상구, 1998). 주왕산일대의 최하부 화산암은 주왕산 입구에 나타나는 현무암이며 이는 주왕산 입구의 대전사의 이름을 따서 대전사 현무암이라 불리운다. 대전사 현무암 이후에 형성된 화산암은 입봉안산암이다. 입봉안산암 상부에는 주로 유문암질 용회암 및 용암으로 이루어진 지품화산암이 형성되고 그 이후 유문암질의 주왕산용회암이 형성되었다. 주왕산용회암은 퇴적암과 안산암질 용암층으로 이루어진 너구동층에 의하여 덮이며 이는 다시 데사이트질의 무포산용회암에 의하여 덮인다. 연구지역에 이 화산암류 중에서 하부로부터 입봉안산암, 지품화산암층, 주왕산용회암, 너구동층과 무포산용회암이 분포된다(Fig. 1).

관입암류로는 유문암과 안산암이 나타난다. 유문암은 암주, 플러그와 암맥 형태로 산출되며 안산암은 매우 드물지만 암맥으로만 산출된다. 이중에 큰 암주상 관입체는 석정상 유문암으로 구성되고 중태상을 형성한다. 플러그상 관입체는 역시 석정상 유문암으로 구성되고 갈평지를 중심으로 분포되며, 암맥은 이 관입

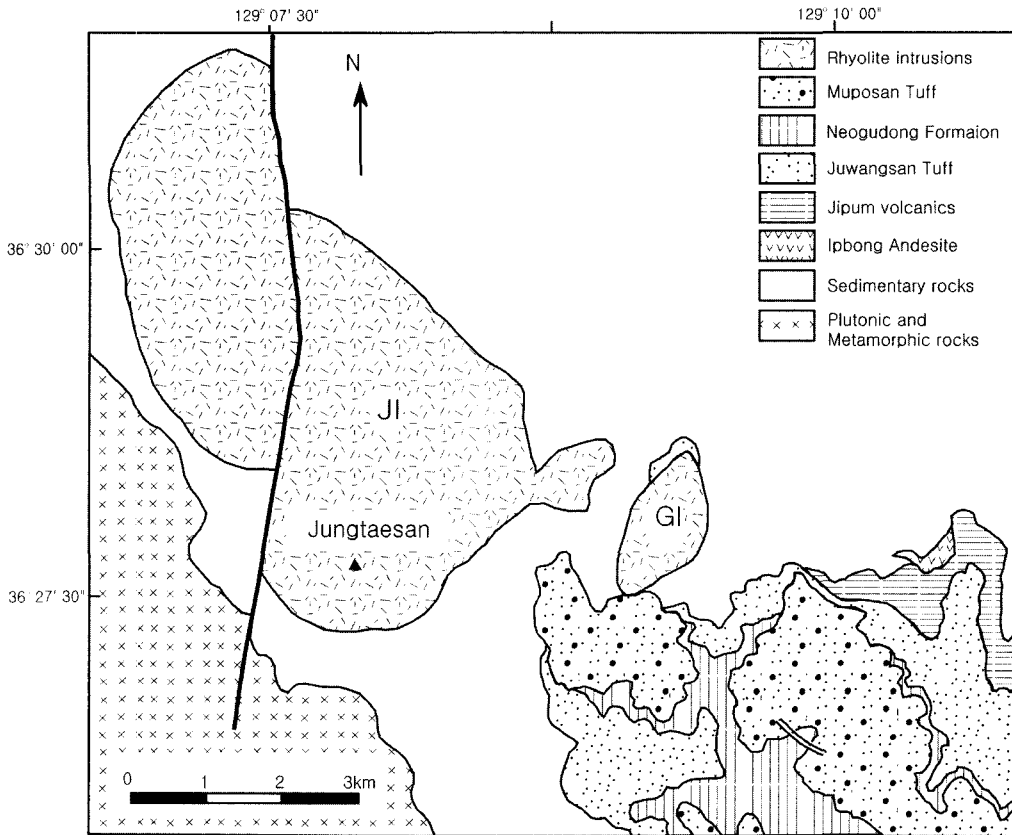


Fig. 1. Geological map of the study area. JI, Jungtaesan Intrusion; GI, Galpyeongji Intrusion.

체 주위에 분포하며 분출암과 관계가 있는 것으로 생각된다. 그리고 안산암맥은 분출활동과 직접적인 관계 없이 광역적인 질리를 따라 관입된 것이다.

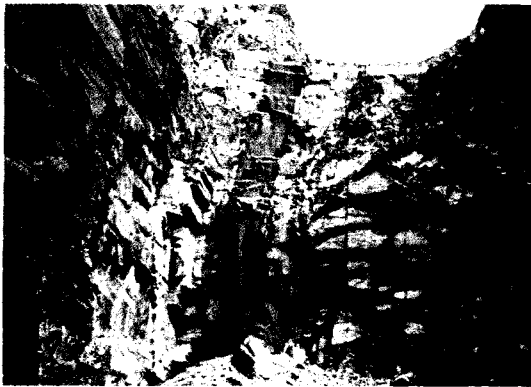
관입암류

중태산 관입체

중태산 관입체는 연구지역 북서부에 중태산을 중심으로 분포하며 영양 소분지 남경계부 근처의 가송동층과 도계동층의 퇴적암류를 관입한다. 이 관입체는 남북 방향의 후평단층(김상욱과 박봉순, 1970)에 의해 잘려 있지만 이를 복원하면 평면에서 대체로 타원형이다(Fig. 1). 이 관입체는 퇴적암류보다 풍화에 강하여 중태산(700 m)과 같이 높은 산지를 이루고 퇴적암류와의 경계부는 거의 대부분 돌시렁으로 덮인다. 그래서 이 관입체는 현재로서 지하 형태가 어떤지를 정확히 알 수 없지만 대체로 암주상을 나타낸다.

갈평지 관입체

갈평지 관입체는 중태산 암주상 관입체로부터 남동으로 1.5 km 떨어져 놓이며 도계동층과 주왕산응회암, 그리고 무포산응회암을 관입한다. 이 관입체는 평면에서 기다란 타원형 모양을 나타낸다(Fig. 1). 이 관입체는 장축의 끝 부분에서 무포산응회암을 접촉하고 단축부위에서 하위의 도계동층의 퇴적암류를 접촉하며 지하 형태는 아래로 거의 수직이고 위로 약간 벌어지는 형태의 플러그상 관입체를 이룬다. 퇴적암류는 마그마의 관입으로 약한 도움을 형성하였으며, 이 관입체의 근처에서 부분적으로 녹회색으로 변질되었지만 나머지 퇴적암류는 적회색 그대로이다. 따라서 이는 이 관입체가 무포산응회암 후에 별개의 유문암질 분출암에 대한 공급로(feeder) 역할을 한 후속 관입체일 가능성을 지시한다. 이 관입체는 암주상 관입체와 더불어 북서-남동 방향으로 연속되는 지하 약대를 통해 관입된 것으로 추정된다(Fig. 1).



(a)



(b)

Fig. 2. The occurrence of rhyolitic dyke (a) with spherulites in it (b).

청송 암맥군

청송 암맥군은 갈평지 관입체를 중심으로 하여 여러 곳에 분포한다. 이 암맥들은 대부분 직선형이고 곡선형을 거의 발견할 수 없으며 여러 방향성을 나타낸다. 암맥들은 거의 서로 합쳐지지 않고 갈평지의 플러그상 관입체를 절단하지 않으며 어떤 한 암맥이 또 다른 암맥에 의해 교차되는 곳도 드물게 나타난다.

이 청송 암맥군에서 모든 암맥들은 유문암 관입상으로 산출된다(Fig. 2a). 이 암맥들은 갈회색 내지 홍회색을 띠며 흔히 유상엽리를 잘 발달시키고 구과상 구조를 가지는 부분도 많아서 구과상 유문암에 속한다(Fig. 2b). 그러나 암주상 및 플러그상 관입체와 같이 회백색이고 특이한 구조 없이 괴상을 가지는 것도 있다. 이 구과상 유문암은 여러 암맥에서 꽃돌이라는 장식재로서 채석되었으나 모든 채석장에서 구과상유문암이 거의 모두 채굴되어 현재 가동중인 채석장은 없다.

주왕산 지역의 구과상 유문암의 분류 및 야외산상

주왕산 화산지역에 나타나는 구과상 유문암은 매우 다양한 구상조직을 보여주고 있으며 수석업자들에 의해 수십 종류로 분류되고 있다. 수석업자들의 분류를 단순화하면 국화형, 민들레형, 매화형, 카네이션형, 목단형, 장미형, 무명형, 해바라기형, 다알리아형등으로 나누인다(Fig. 3, Table 1). 이들 구과상유문암들은 일단계 성장으로 끝난 단식 구과형(simple spherulite)과 다단계 성장으로 연속된 복식 구과형(multiple spherulite)으로 크게 구분되며 좀 더 자세하게는 아래와 같이 구분된다.

국화형과 민들레형은 어두운 색의 구형 바탕에 구형 중심에 발달한 핵으로부터 밝은 색을 띤 섬유상 광물(spherulites)들이 방사상으로 성장한 조직을 보여주기 때문에 방사상 단식 구과형으로 분류된다(Figs. 3a, b). 단 민들레형은 중심부에 발달한 핵이 국화형에 비해 크며 그 결과 방사상 형태의 섬유상 광물의 길이가 짧다. 일부 국화형과 민들레형은 전체적으로 구형을 보이지 않고 다각형을 보인다(Fig. 3b). 매화형은 전체적으로 구형을 보이며 어두운 중심부가 밝은 주변부에 의해 둘러 쌓이거나 그 반대의 형태를 보여주는 한 개의 각만을 갖는 총상 단식 구과형으로 분류될 수 있다(Fig. 4e).

카네이션형은 내부에는 방사상형의 구과가 발달하고 그 외측에 밝은 색의 각이 둘러싸는 형태를 보여주는 방사상-총상 복식 구과형으로 분류될 수 있다(Fig. 3c). 목단형, 장미형, 무명형에서는 밝은 색과 어두운 색의 구형의 각이 반복적으로 나타나기 때문에 이들은 총상 복식 구과형으로 분류될 수 있다(Figs. 3d, e, f). 장미형(Fig. 3e)의 경우 밝은 색을 보이는 층이 잘 연결되고 완전한 동심원상으로 발달된 데 비해 목단형(Fig. 3d)의 경우 밝은 층이 자주 끊어지고 불규칙한 동심원상을 나타낸다. 무명형은 목단과 장미형에 비해 밝은 층의 폭이 매우 좁고 연결성이 좋으며 밝은 층의 숫자가 많다(Fig. 3f).

해바라기형과 다알리아형은 총상 복식 구과형과 같이 여러 개의 밝고 어두운 각들이 반복하여 나타나지만 밝은 각내의 광물들이 방사상 형태의 성장을 잘 보여주기 때문에 방사총상 복식 구과형으로 분류될 수 있다(Figs. 3g, h). 일반적으로 방사총상 복식 구과형은 구과의 크기가 다른 형태의 구과에 비해 상대적으로 크다. 다알리아형은 해바라기형에 비해 광물의 방사상 형태 성장이 덜 뚜렷하며 각의 두께가 불규칙하다.

일부 구과들은 다각형을 이루거나 타원형을 보이지

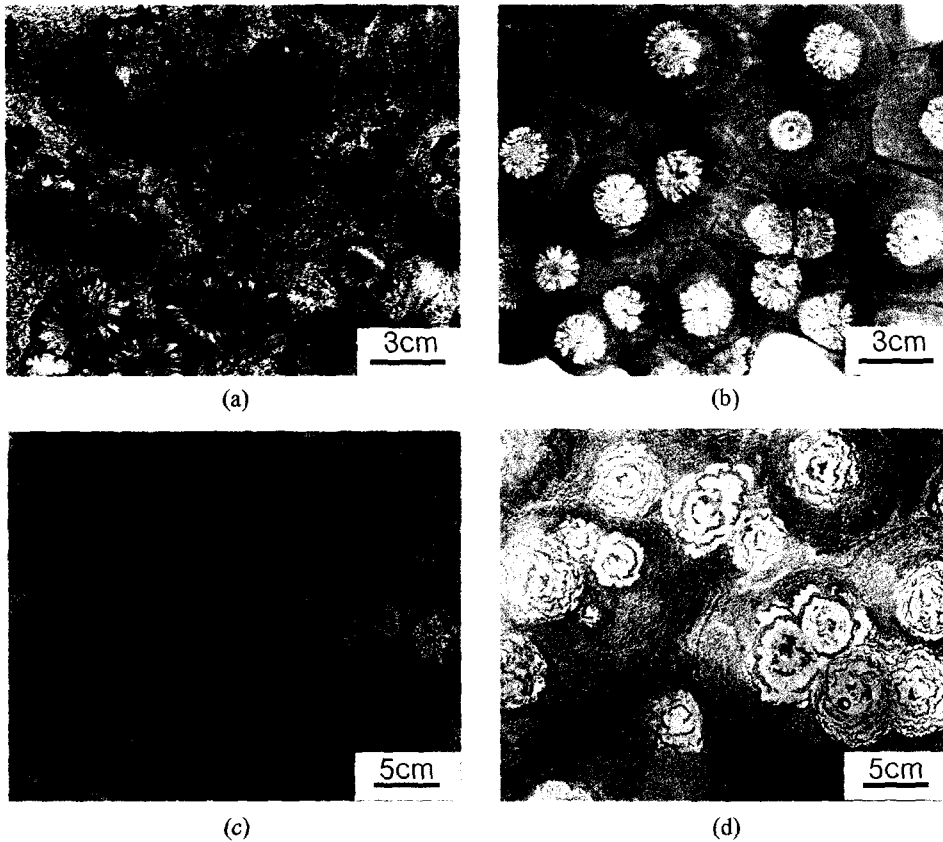


Fig. 3. The variety of spherulitic rhyolites in Cheongsong area. a, Chrysanthemum type; b, Dandelion type; c, Carnation type; d, Peony type; e, Rose type; f, Innominate type; g, Dahlia type; h, Sunflower type.

만 대부분의 구과들은 구형의 형태를 보여주며 때로는 구과 들이 모여 집단을 이루기도 한다(Fig. 4a). 그리고 한 암체에서 한 형태의 구과만이 나타나기도 하지만 여러 형태의 구과가 함께 나타나는 경우도 많다. 방사층상 복식 구과형인 해바라기형은 층상 복식 구과형인 장미형 혹은 무명형과 함께 나타나는 경우가 많으며 목단형과 무명형도 자주 함께 나타난다(Fig. 4b). 그리고 방사상-층상 복식 구과형인 카네이션형은 방사층상 복식 구과형인 다알리아형과 자주 함께 나타나며 방사상 및 층상 단식 구과와도 함께 나타난다. 방사상 단식 구과인 국화형은 같은 분류에 속하는 민들레형이나 층상 복식 구과인 목단형이 함께 나타나며 이 경우 국화형은 항상 맥의 상부에 그리고 민들레형과 목단형은 항상 하부에 나타난다. Fig. 4c, d에서는 맥의 하부에 다각형의 민들레형이 나타나며 그 위에 형성된 구형의 구과들이 점차 상부로 가면서 민들레형에서 국화형으로 변해가는 현상을 보여준다. 이런 경우에서 보듯이

여러 형태의 구과들이 불규칙하게 섞여 나타나기도 하지만 일부의 경우는 맥의 중심과 주변 혹은 맥의 상부와 하부에 특정 구과가 나타나는 규칙적인 관계를 보여준다. 일부 구과상 유문암내에는 많은 세맥(가는 맥)과 기공들이 함께 나타난다. 많은 세맥들은 구과와 만나기 전에 구과 주변에 발달한 둥근 원 형태의 층들에 의해 끊어진다(Fig. 4c). 때로는 구상이 아닌 대상 형태의 밝고 어두운 층이 반복되어 나타나며 이들 층 내에 구과들이 나타나기도 한다(Fig. 4f).

현미경 관찰 및 X선 화학조성도 해석

대표적인 방사상 단식 구과형(국화형), 층상 복식 구과형(무명형), 방사층상 복식 구과형(다알리아형) 시료에 대해 자세한 현미경 관찰과 전자현미기로 화학분석을 실시했다. 전자현미분석은 일본 오까야마 이과대학의 JXA-8900R Superprobe와 기초과학지원연구원 전주

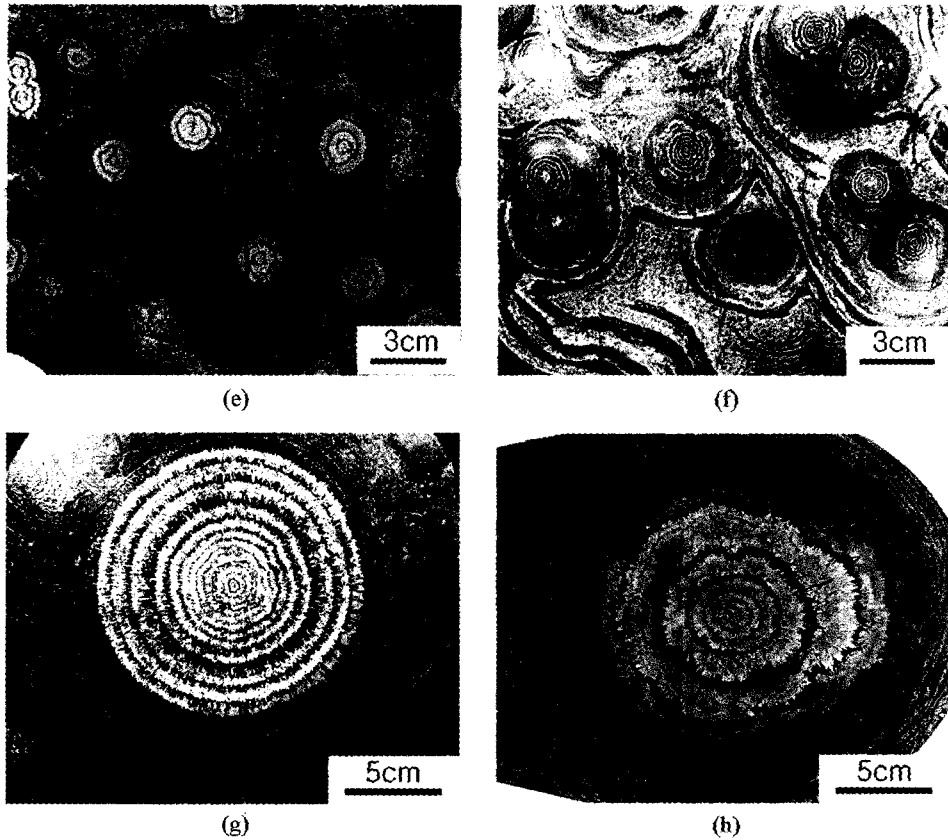


Fig. 3. Continued.

Table 1. The origin and classification of spherulitic rhyolites in Cheongsong

	성인적 분류	성인	구과상 유문암의 형태적 분류
단식	방사상 단식 구과형	상대적으로 빠른 과냉각에 의한 확산류에 의하여 형성	국화형, 민들레형
	층상 단식 구과형	상대적으로 중간속도의 과냉각에 의해 형성	매화형
복식	층상 복식 구과형	상대적으로 느린속도의 과냉각에 의해 리제강링 형식으로 형성	목단형, 장미형, 무명형
	방사상-층상 복식 구과형	방사상 단식 구과형 성인과 기체유출을 수반한 과냉각 성인이 복합되어 형성됨	카네이션형
	방사층상 복식 구과형	상대적으로 빠른 과냉각의 반복에 의해 형성	해바라기형, 다알리아형

분소의 EPMA-1600을 이용하여 실시하였으며 분석시 구과내 화학성분의 분포를 확인하기 위하여 X-선을 이용한 화학조성도(X-ray map)를 작성하였고 광물 상호간의 관계를 확인하기 위하여 BSI(Back Scattered Image)를 찍었다. 전자현미분석시 가속전압, 빔 전류와 빔 직경은 각각 15 kV, 12 nA, 3-5 μm 이며 X-선 화학

조성도 작성시 가속전압, 빔 전류와 빔 직경은 각각 15 kV, 200 nA, 1-2 μm이었다. 분석결과는 Table 2에 제시되었다.

방사상 단식 구과형 (국화형)

깃털 모양의 조직을 보여주며(Figs. 5a, b) 정장석과

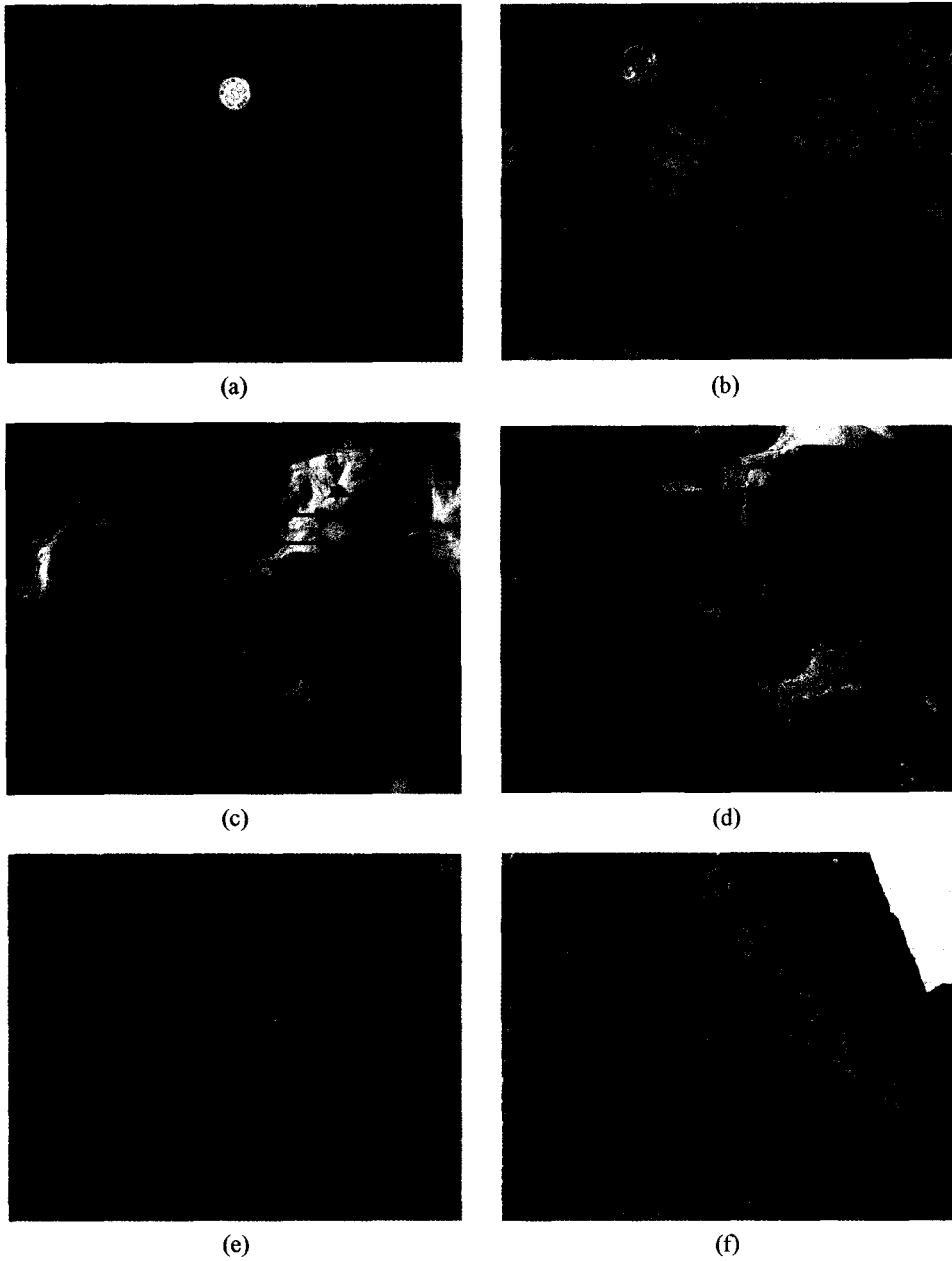


Fig. 4. The photo of spherulitic rhyolites. (a) spherulites occur as single one or aggregate, (b) Carnation type spherulites occur with Innominate type, (c) and (d) Dandelion type spherulites occur at the bottom of dyke and Chrysanthemum type at the top, (e) Rose type spherulites occur with fine veinlets and vesicles, (f) spherulites occur along the layers representing fluid infiltration.

사장석이 약간 섞인 석영이 성장한 섬유상 광물이 방사상 형태로 자라나고 있으며 그 결과 섬유상 광물내에는 Si 성분들이 집중되며 야외에서 밝게 나타난다. 섬유상 광물 사이에는 이들 광물 형성에 사용되지 않

은 Mg, Fe 등의 고철질 성분과 Na, K 성분들이 집중되어 나타난다(Figs. 5c, d, e, f). Mg, Fe, Na 성분이 집중된 부분은 야외에서 어렵게 나타난다. 고철질 성분이 높은 부분에는 적철석등의 불투명 광물 혹은 녹

Table 2. Chemical compositions of feldspar and chlorite in Cheongsong spherulitic rock

Sample	Feldspar					Chlorite		
	5-1	5-1	6-3	6-3	6-1	5-1	6-3	6-3
SiO ₂	68.42	64.47	68.58	68.54	68.24	35.92	32.63	29.38
Al ₂ O ₃	18.49	17.18	18.57	18.75	14.62	2.15	17.47	20.51
FeO	0.57	1.46	0.11	0.20	2.16	50.39	36.63	32.07
MgO	0.01	0.02	0.00	0.01	0.12	0.19	0.70	5.12
CaO	0.04	0.09	0.00	0.02	0.00	0.15	0.00	0.12
Na ₂ O	11.40	1.39	11.53	11.47	0.36	0.07	0.07	0.11
K ₂ O	0.20	14.39	0.13	0.07	13.53	0.20	0.09	0.50
TiO ₂	0.24	0.11	0.01	0.01	0.19	1.75	0.03	0.03
MnO	0.02	0.00	0.00	0.02	0.09	0.06	0.98	0.71
F	0.00	0.18	0.37	0.10	0.00	0.00	0.00	0.05
BaO	0.03	0.04	0.10	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04
Total	99.42	99.33	99.40	99.19	99.31	90.88	88.61	88.64
OxNum.	8	8	8	8	8	28	28	28
Si	3.014	3.005	3.015	3.016	3.144	8.304	7.091	6.291
Al	0.960	0.944	0.962	0.972	0.794	0.587	4.476	5.175
Fe ⁺²	0.021	0.057	0.004	0.007	0.083	9.741	6.658	5.742
Mg	0.000	0.001	0.000	0.001	0.008	0.067	0.227	1.636
Ca	0.002	0.004	0.000	0.001	0.000	0.038	0.000	0.027
Na	0.974	0.125	0.983	0.979	0.032	0.033	0.030	0.045
K	0.011	0.856	0.007	0.004	0.795	0.058	0.026	0.137
Ti	0.008	0.004	0.000	0.000	0.007	0.304	0.004	0.005
Mn	0.001	0.000	0.000	0.001	0.003	0.012	0.180	0.129
F	0.000	0.027	0.052	0.014	0.000	0.000	0.000	0.037
Ba	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003
Albite	98.675	12.723	99.281	99.502	3.833			
Anorthite	0.191	0.436	0.000	0.081	0.018			
Orthoclase	1.133	86.841	0.719	0.417	96.149			

니석이 형성되어있으며 Na 성분이 높은 부분에는 사장석이 형성되어있다.

깃털 모양의 조직을 보여주는 섬유상 광물은 광물이 과냉각 상태에서 빠른 확산에 의해 성분이 빨리 공급될 수 있는 방향으로만 빠르게 성장하였음을 지시한다. 섬유상 광물을 구성하는 석영 내에 매우 미세한 규모로 정장석과 사장석이 섞이는 현상 또한 섬유상 광물이 매우 빨리 성장하였음을 지시한다. 섬유상 광물은 최외곽부에서는 순수한 석영이 분석되지만 대부분의 경우 미세한 규모의 섞임에 의해 분석시 순수한 석영이 분석되는 경우가 드물며 많은 경우 두 광물이 섞여서 분석된다. 이러한 미세한 규모의 섞임은 Fowler *et al.*(2002)에 의해서도 보고되었다. 섬유상 광물 주변에 집중된 고철질 및 나트륨 성분은 섬유상 광물 형성시 사용되지 못한 성분이 그 주변으로 밀려났음을 지

시한다. 그리고 섬유상 광물들의 끝 부분을 연결하는 선 바깥쪽으로는 석영, 정장석, 사장석 그리고 불투명 광물이 균질하게 분포하며 나타난다.

총상 복식 구과형 (무명형)

중앙부는 석영의 집합체로 이루어져 있으며 석영 사이에 사장석들이 형성되어 있다(Fig. 6). 방사상 단식 구과형에서와 마찬가지로 석영 입자 내에 미량의 정장석과 사장석이 섞여있으며 전반적으로 석영 중심부에서 가장자리로 가면서 사장석의 양이 줄어들고 정장석의 양이 약간 늘어나며 바깥부분에는 거의 순수한 석영이 나타난다. 이러한 조직과 성분 변화는 석영입자가 먼저 빠르게 성장하고 그 결과 석영 형성에 사용되지 않은 Na, Al 성분이 입자 사이에 집적되어 사장석을 형성한 것으로 생각된다. 중앙부에서 Fe 성분의 집

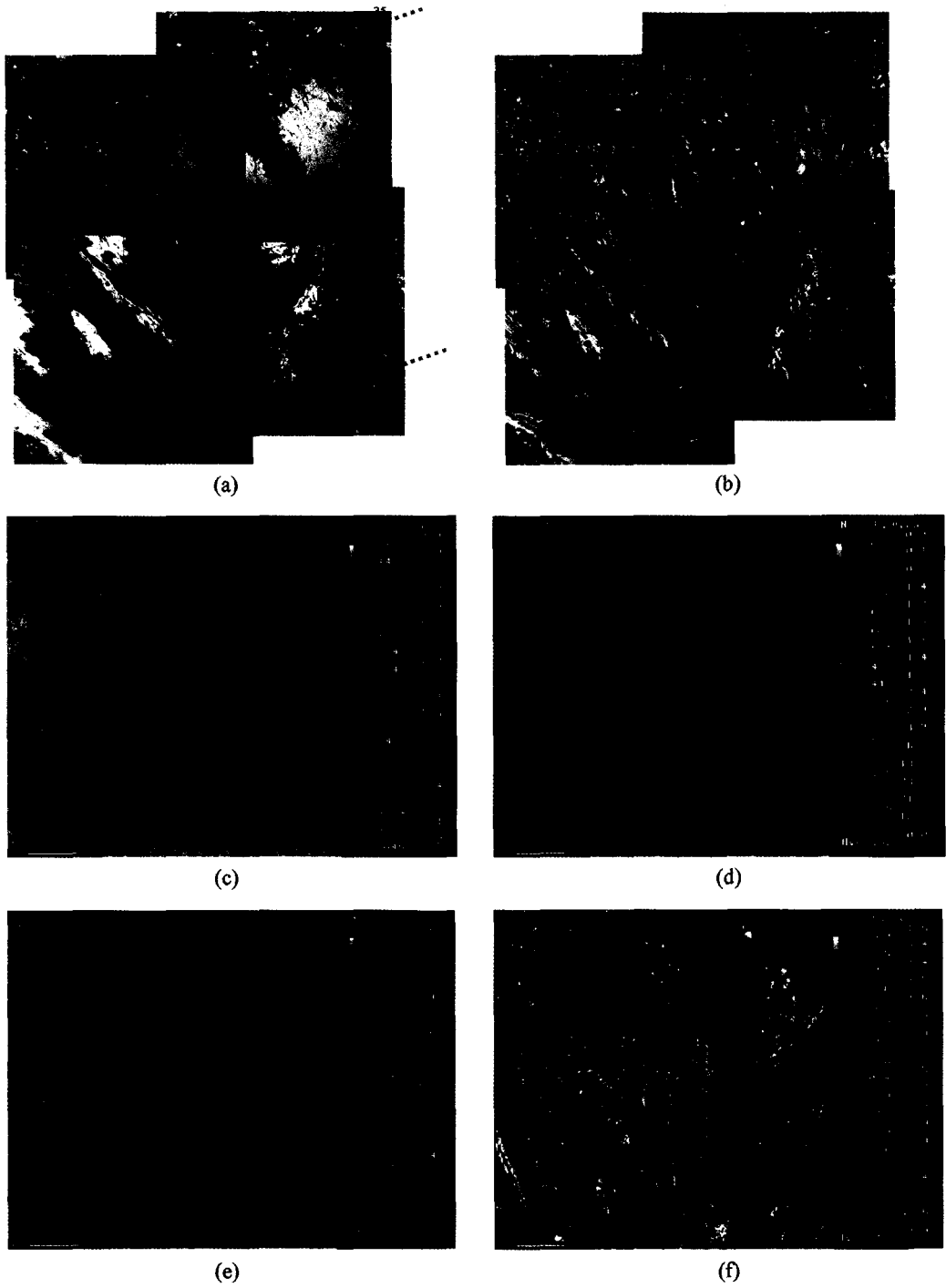


Fig. 5. The microphoto (a, Open Nicol; b, Cross Nicol) and X-ray maps (c, Si; d, Na; e, K; f, Fe) of Chrysanthemum type spherulite.

증현상이 부분적으로 나타나며 집중된 지역에는 자철석과 녹니석이 나타난다.

석영 집합체 주변부에는 K농도가 상대적으로 높고 Si 농도가 낮고 Na, Al 농도가 중간 정도인 층이 나타난 후 Na와 Al 성분이 상대적으로 높은 층이 나타난다. 이후 K와 Si가 상대적으로 높은 좁은 층이 나타난 다음 Na와 Al 농도가 상대적으로 높은 층이 다시 나타난 후 Na, Al 농도가 중간 정도인 층이 나타난다. 이는 층상복식 구과형 형성시 정장석과 석영이 결정화되는 K와 Si 농도가 상대적으로 높은 부분이 형성된 후 그 주변부에는 정장석과 석영 형성에 사용되지 않은 Na와 Al 성분이 상대적으로 높은 부분이 형성되었으며 이와 같은 현상이 구과형의 중심에서 바깥쪽으로 반복되어 일어났다. 석영과 정장석으로 이루어진 K와 Si가 상대적으로 높은 층은 야외에서 밝게 나타나며 Na와 Al 농도가 상대적으로 높은 층은 사장석으로 주로 구성되며 야외에서 어둡게 나타난다.

방사층상 복식 구과형(다알리아형)

방사층상 복식 구과형에서는 약한 방사상 형태를 보여주며 미세하게 사장석이 섞인 석영으로 이루어진 여러개의 섬유상 광물이 측면으로 연결되어 형성된 층, 고철질 성분이 농축된 녹니석과 자철석으로 이루어진 얇은 층 그리고 사장석 혹은 석영이 섞인 사장석으로 이루어진 Na, Al 성분이 상대적으로 높은 층이 반복되어 나타난다(Fig. 7). 그리고 석영 섬유상 광물로 이루어진 층과 고철질 성분이 농축된 층 경계는 섬유상 광물 끝 부분의 둥근 형태에 의해 리본 형태를 보인다. 분석시 섬유상 광물의 내부에서 바깥쪽으로 점차 Si가 증가하여 최외각에는 거의 순수한 석영으로 이루어진 부분이 나타나며 그 바로 바깥쪽에는 Fe, Mg의 고철질 성분이 농집된 녹니석 층과 Na, Al이 농집된 사장석층이 연속적으로 나타난다. 방사상 구과형에 비해서는 매우 미약하지만 각 석영 섬유상 광물 사이에도 고철질 성분과 Na, Al이 상대적으로 높은 부분들이 나타난다. 이러한 조직과 성분 경향은 석영 섬유상 광물이 빠르게 성장하며 성장에 필요하지 않은 성분을 좌우로 밀어내기도 하지만 주로 바깥으로 밀어냄으로써 형성되었다고 생각된다. 이는 방사상 구과형에 비해 과냉각에 의한 확산 속도가 감소하여 전방 방향뿐 아니라 측방으로도 석영 성분이 잘 공급되어 방사상 구과형에 비해 섬유상 광물의 장경이 줄어들고 단경이 늘어났으며 그 결과 섬유상 광물들이 서로 연결되고 고철질과 Na 성분은 측면보다는 주로 전방으로 밀려났음을 지시한다. Na가 상대적으로 높은 층에서는 외부로 가면

서 Na가 증가하여 최외각부에는 순수한 사장석이 많이 나타난다.

구상암 및 구과상암 형성의 주요 원인인 리제강 링과 과냉각

리제강 링

구상암 및 구과상암 형성 원리 설명에 기본적으로 사용되는 리제강 링 원리가 Liesegang(1896)에 의해 처음 보고 되었다. Liesegang(1896)은 중크롬산칼륨 성분이 포함된 젤라틴 겔에 질산은 용액을 중앙에 떨어뜨리면 질산은 용액의 확산에 의해 구형의 중크롬산은 층이 형성되고 이때 중크롬산은을 형성하기 위해 층의 바깥 부분으로 부터 중크롬 성분 이동하여 들어옴으로 인해 차후 질산은이 확산되어도 중크롬산은 이 형성되지 않는 층이 형성되며 그 각 바깥 부분에서는 다시 동일한 현상이 반복적으로 발생함으로써 중크롬산은이 겔에 의하여 분리되어 반복되는 여러개의 동심원상으로 침전되는 사실을 발견하였다. 이러한 동심원상의 침전은 리제강 링(Liesegang ring)이라 불리운다(Carl and Amstutz, 1958). Carl and Amstutz(1958)은 리제강 링에 대한 좀 더 자세한 실험결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. 질산은 용액을 떨어뜨리기 전 겔이 냉각속도에 따라 겔의 점성도가 달라지며 그 점성도에 따라 질산은 용액의 확산속도가 달라진다. 겔의 냉각속도가 30분 정도로 빠른 경우 중크롬산은이 방사상 형태로 침전하게 된다(Fig. 8a). 이는 겔의 빠른 냉각에 의해 겔의 점성도가 낮아지고 그 결과 확산이 흐름의 형태인 확산류(diffusion current)가 생성되기 때문이다. 이러한 방사상 형태의 성장위에 동심원 형태의 침전층이 중복되어 나타나며 링 주변에는 밝은 띠가 함께 형성된다. 밝은 띠는 그 지역의 중크롬 이온이 중크롬산은을 형성하기 위하여 중크롬산은이 침전된 지역으로 이동하였기 때문이다. 이러한 과냉각에 의한 방사상의 구과상 광물이 형성된 Lofgren(1974)이 실험에 의해 확산암내에서도 형성됨이 확인되었다. 그리고 45분 동안 겔이 냉각된 경우 방사상 형태의 침전이 나타나지 않으며 한개의 동심원 형태의 중크롬산은이 침전되며 그 주변에 밝은 띠가 형성된다(Fig. 8b). 방사상 형태의 침전이 나타나지 않는 이유는 겔의 점성도가 증가하여 확산류(diffusion current)가 형성되지 않고 침전 전진부(precipitation front)만을 형성하기 때문이다. 60분간 냉각되어 겔의 점성도가 더 증가한 경우 Fig. 8c에서와 같은 리제강 링이 형성된다. 이러한 리제강 링은 여러

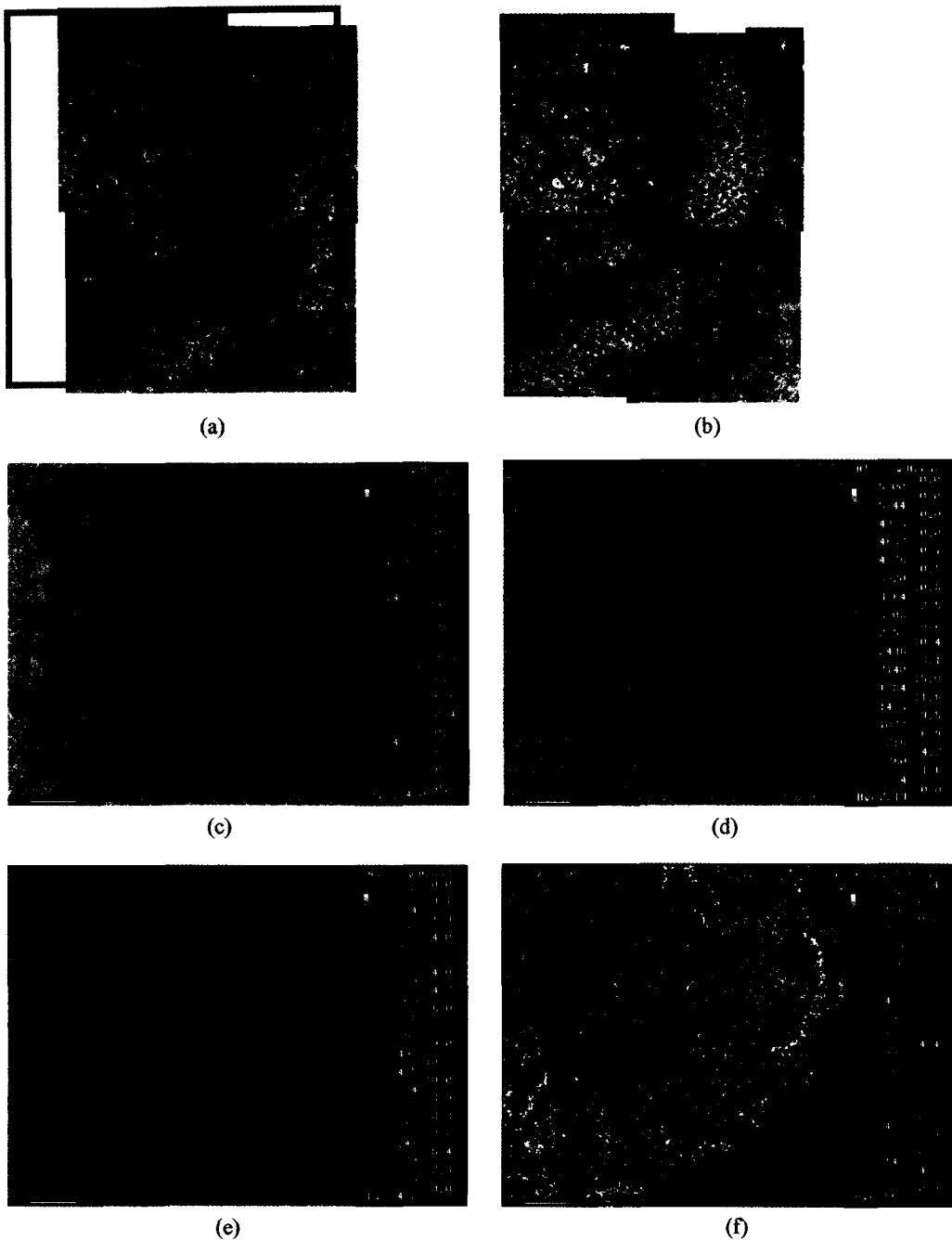


Fig. 6. The microphoto (a, Open Nicol; b, Cross Nicol) and X-ray maps (c, Si; d, Al; e, Na; f, K) of Innominate type spherulite.

학자들에 의해 암석내에 나타나는 구상 조직과 유사함이 인지되었다(Erdmannsdorffer, 1924; Ishioka, 1953; Leveson, 1963).

과냉각

구상암 및 구과상암을 형성하는 중요한 또 다른 원인은 과냉각이다(Leveson, 1963, Lofgren, 1980). 마그

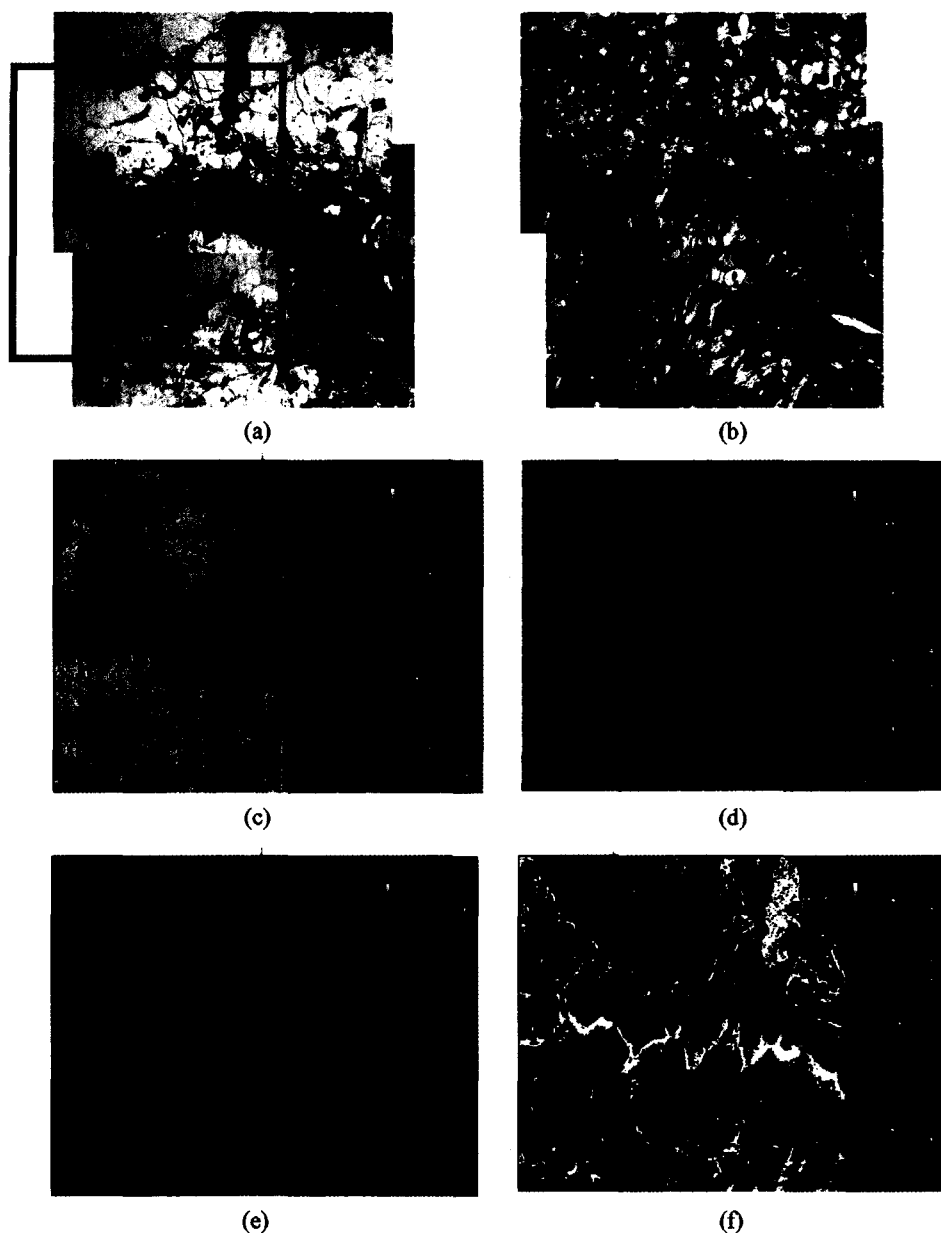


Fig. 7. The microphoto (a, Open Nicol; b, Cross Nicol) and X-ray maps (c, Si; d, Al; e, Na; f, Fe) of Dahlia type spherulite.

마가 천천히 식을 경우 마그마가 식으면서 각 단계의 온도에 맞는 결정이 만들어지나 빠르게 식을 경우 광물을 형성하지 못하거나 충분히 광물을 만들지 못한 상태로 냉각된다. 이러한 냉각을 과냉각이라 하며 이럴 경우 마그마 내에 성분이 과포화되게 되며 그 결과 일부 광물들이 성분이 잘 공급되는 방향으로 빠른 속도로 성장하게 되어 섬유상 광물을 형성하게 된다. 특

히 마그마내 먼저 만들어진 광물이나 암편이 있을 경우 새로운 광물들이 그들을 핵으로 하여 방사상 형태로 빠르게 성장하여 구상의 형태를 보이게 된다.

과냉각에 의해 구상 조직이 만들어질 수 있는 또 다른 방법은 다음과 같다. 예로 중크롬산칼륨을 유리판 위에 떨어뜨리고 증발을 시키면 가장 바깥 부분이 가장 빨리 증발되어 동심원상의 침전이 생기고 그 주변

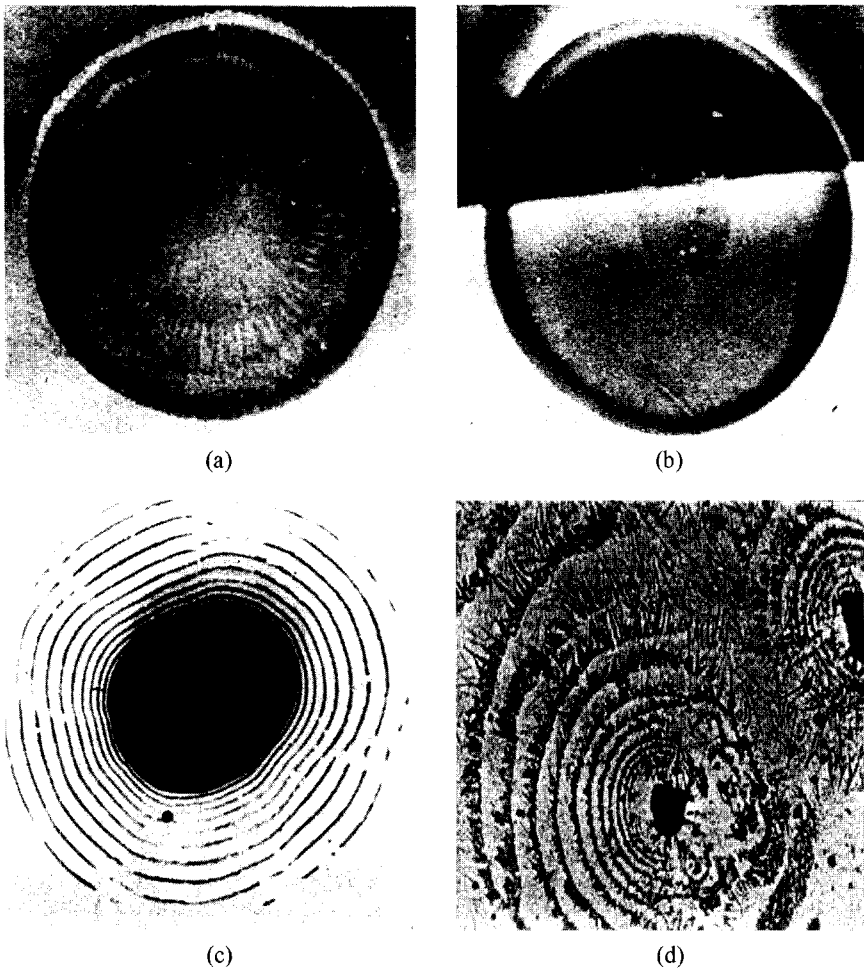


Fig. 8. The silver dichromate precipitate patterns relating to the cooling rate (a, cooling time 30 min; b, 45 min; c, 60 min; Data from Carl and Amstutz, 1958). d) Rhythmic precipitate of potassium dichromate produced by evaporation (Data from Leveson, 1963)

에서는 증크롬산 성분이 침전 부위로 이동되어 결핍됨으로서 침전이 일어나지 않으며 밝은 색을 띄게 된다. 이때 침전 링에서는 광물들이 링에 수직되는 방향 즉 중심에 대해 방사상 형태로 침전하게 된다. 그에 이어 조금 더 안쪽에 증발이 시작되어 침전 링과 밝은 띠가 형성되고 이것이 반복되면 Fig. 8d에서와 같은 조직이 형성된다.

청송 구과상 유문암 성인

청송 구과상 유문암을 생성시킨 산성 암맥 내에 일반적으로 나타나는 섬유상 광물은 이들 암맥이 빠르게 냉각되었음을 지시한다. 그리고 청송 구과상 유문암에

대한 연구결과 및 Carl and Amstutz(1958)의 연구를 살펴 볼 때 청송 구과상 유문암의 다양한 형태는 서로 다른 냉각 속도에 의해 형성된 것으로 생각된다. 즉 방사상 단식 구과형과 방사층상 복식 구과형은 상대적으로 가장 빠른 냉각시 형성되었으며 냉각속도가 중간일 경우 층상 단식 구과가 생성되며 냉각속도가 더 느려지면 층상 복식 구과형이 형성된다. 따라서 청송 지역의 구과상 유문암중 국화형, 해바라기형, 다알리아형과 같은 방사상 단식 혹은 방사층상 복식 구과형의 구과상 유문암이 가장 빠르게 냉각된 환경에서 만들어진 반면 층상 복식 구과형인 장미형, 무명형과 목단형등은 상대적으로 가장 천천히 냉각된 암맥으로부터 형성되었다고 생각된다.

방사상 단식 구과형

X-선 화학조성도에서 보여지듯이 방사상 단식 구과형의 경우 과냉각시 마그마내에 먼저 만들어진 광물을 중심으로 방사상 형의 섬유상 광물이 빠르게 성장하여 방사상 구과형의 밝은 부분을 형성하고 이때 사용되지 않은 Na, Al, Fe 성분이 주변으로 밀려나 어두운 부분을 형성하고 있다. 섬유상 광물이 잘 성장하며 그 결과 방사상 구과형이 잘 형성된다. 이는 야외에서 맥의 상부로 갈수록 즉 지표면과 가까워져 냉각속도가 증가할수록 구상암의 구조가 완벽해지는 현상과 잘 일치한다.

층상 복식 구과형

층상 복식 구과형의 경우도 과냉각에 의해 형성되지만 냉각속도가 방사상 단식 구과형에 비해 상대적으로 느려져 광물의 성장 속도가 전방과 측면으로 비슷하기 때문에 섬유상 광물이 형성되지 않거나 섬유상 광물이 매우 미약하게 성장함으로써 방향성이 없거나 뚜렷하지 않은 석영과 정장석들로 구성된 밝은 각이 형성된다. 그리고 밝은 각의 바로 바깥 부분에서는 석영과 정장석 형성에 필요한 성분이 밝은 각으로 이동되어짐으로서 Si와 K 성분이 상대적으로 결핍되고 Na, Al, Fe 성분이 우세한 어두운 각이 형성된다. 그리고 이러한 밝고 어두운 각이 한 쌍으로 형성되는 과정이 중심로부터 바깥쪽으로 계속됨에 따라 여러 개의 각을 갖는 층상 복식 구과형이 형성된 것으로 판단된다.

방사층상 복식 구과형

방사층상 복식 구과형은 대부분 그 크기가 크며 밝은 각과 어두운 각이 반복되는 다각 형태를 보이나 각각의 각을 살펴 볼 때 층상 복식 구과형과 달리 밝은 각들이 외곽방향으로 성장성을 뚜렷히 보여주는 석영 섬유상 광물로 구성되어있다. 이러한 방사층상 복식 구과형의 성인에는 두가지 가능성이 있다. 첫째 방사상 단식 구과형에서와 같이 빠른 냉각에 의해 만들어졌음을 지시하나 구과의 큰 크기 때문에 Fig. 8d에서와 같이 방사상 단식구과형과 달리 외각에서부터 내부로 결정화되었을 수 있다. 둘째 역시 구의 큰 크기 때문에 빠른 냉각에 의해 방사상 단식 구과 형성과정에서 중심에서 바깥 방향으로 여러 단계로 반복되어 진행됨으로 인해 여러 개의 각이 형성되어 전반적으로는 층상복식 구과형과 유사해 졌을 가능성도 있다.

방사상-층상 복식 구과형

앞에서 방사상-층상 복식 구과형인 카네이션 형이 나타나는 맥의 중심부에는 방사상 단식 구과형이 그리

고 주변부에는 층상 단식 구과형이 나타나며 맥의 중간부에는 방사상 단식 구과형을 보여주는 중앙부가 층상 단식 구과형으로 둘러싸인 방사상-층상 복식 구과형이 나타난다. 일반적으로 맥의 중심부보다 주변부가 빨리 냉각되는 것으로 보아 더 빨리 냉각되는 맥의 주변에 층상 단식 구과형이 그리고 상대적으로 냉각이 느린 중앙부에 방사상 단식 구과형이 형성됨을 설명할 수 없다. 따라서 이 경우 맥 주변부에 나타나는 층상 단식 구과형은 중앙부로부터 바깥쪽에서의 성분 확산에 의한 구상 조직이 아니라 Carl and Amstutz(1958)이 제시한 바와 같이 기체 증발에 따른 과냉각에 의해 바깥부분으로부터 안쪽에서의 고화작용에 의해 형성된 것으로 생각된다. 즉 맥의 주변부에서 기체가 주변으로 빠져나가며 맥이 냉각됨으로서 층상 단식 구과형이 만들어진 것으로 생각된다. 그 결과 맥의 중간 부분에는 방사상 단식 구과형이 기체증발에 의해 형성된 층상 단식 구과형에 둘러싸인 방사상-층상 복식 구과형이 형성된 것으로 생각된다.

마그마 혼합에 의한 구과 형성

일부 노두에서는 Fig. 4c, d에서와 같이 하부는 홍회색을 띄며 다각형으로 갈라져 있으며 이들 중 상부 다각형 중앙부에는 민들레형의 방사상 단식 구과가 형성되어 있다. 그리고 다각형 균열을 보이는 암체 상부에는 녹회색을 띄는 암체가 나타난다. 이들 암체간의 경계는 녹회색 암체쪽으로 둥글게 블록하며 일부부에서는 구형의 형태로 홍회색 암체가 상부 암체안으로 이동되어 유입되는 현상을 보여준다. 암체의 경계와 홍회색 암체 내에는 거품처럼 보이는 기체들이 관찰된다. 그리고 상부 암체내의 구형 구과는 상부로 갈수록 점차 민들레형에서 국화형으로 바뀐다.

Phillips and Woods(2002)는 뜨거운 현무암질 마그마가 비중이 자신보다 낮으며 온도가 낮은 산성질 마그마 챔버 하부로 이동되어 온 후 결정분화작용을 받으면 그 결과 형성된 결정들은 마그마 하부로 이동하고 현무암질 마그마 상부에는 기체 성분이 증가하면서 최종적으로는 상부의 산성질 마그마보다 가벼워져서 상부 마그마내로 물방울의 형태로 이동해 들어가게 됨을 밝혔다. 이러한 연구 결과는 홍회색 부분에 거품 형태의 기포가 많이 관찰되는 것으로 보아 녹회색 부분보다 후기에 관입한 홍회색 마그마가 결정분화작용 결과 상부에 기포가 많아져 상부의 녹회색 마그마보다 가벼워짐으로서 상부 마그마내로 물방울의 형태로 이동하였을 가능성을 지시한다. 또한 상부로 갈수록 민들레형에서 국화형으로 변화하는 것은 상부가 지표면에 가

Table 3. K-Ar age data of whole rock from spherulitic rhyolites.

Sample	Potassium (wt%)	wt (g)	Rad. 40Ar (10-8ccSTP/g)	Age (Ma)	Non-Rad 40Ar (%)
spherulitic rhyolite-1	3.06	0.020	605.6 ± 0.9	50.3 ± 1.0	7.2
spherulitic rhyolite-2	3.53	0.026	669.4 ± 0.9	48.2 ± 1.0	5.3
spherulitic rhyolite-3	3.58	0.021	693.6 ± 0.5	49.2 ± 1.0	6.7
spherulitic rhyolite-4	3.58	0.022	703.5 ± 0.5	49.9 ± 1.0	10.2

깨워 냉각이 빨리 일어났음을 지시한다. 즉 최소한 일부 구과상들이 구형은 후기의 마그마가 기존 마그마내로의 진입시 만들어지며 이들이 급격히 냉각하면서 구형내에 구과상 조직이 형성되었을 것으로 추측된다. 이러한 해석은 일부 구형내에는 구과상 조직이 나타나지 않는 사실과 잘 일치한다.

구과상 조직 주변 점이대와 세맥 성인

일부 구과상 조직은 많은 세맥과 함께 나타나며 이들 세맥은 구과들을 관통하지 않으며 많은 경우(Fig. 4e)는 구과 주변에 발달된 점이대에 의해 절단되고 있다. 현미경하에서 관찰하면 이들 세맥과 점이대내에도 세립의 구과상구조들이 많이 관찰된다. 특히 구과상 조직 주변의 점이대가 세맥을 자르는 사실은 구과상조직 형성시 확산 현상에 의하여 점이대가 형성되었음을 지시한다. 이러한 현상은 세맥들이 구과상 조직을 형성되기 전 즉 최종 냉각 이전에 관입하였다는 사실과 일부 구과의 경우 세맥을 통하여 공급된 성분에 의해 크기가 증가하였을 가능성도 있음을 지시한다.

연대 측정

청송 구과상 유문암의 형성시기를 밝히기 위하여 청송 주왕산 북부 일대의 구과상 유문암내에서 채취한 4개의 전암표본에 대해 K-Ar 연대 측정을 수행하였다. K-Ar 연대측정은 대전 한국기초과학지원연구원에서 수행하였으며 K-Ar 연대분석방법과 분석조건은 김정민(2001)에 의해 보고된 바와 같다. 채취된 시료는 각각 48.2±1.0, 49.2±1.0, 49.9±1.0 및 50.3±1.0 Ma의 연대를 보여주며(Table 3) 이들 연대결과들은 청송 주왕산 북부 일대의 구과상 유문암맥류들이 48~50 Ma 사이에 형성되었음을 지시한다.

현재까지 청송 주왕산 북부 일대의 화산암류 및 구과상 유문암맥들은 좀 더 자세한 연대학적 연구가 수행되어야 하지만 청송 구과상 유문암맥의 생성연대와 인접한 의성 동남부의 금성산 화산암류중 보고된 중성암맥의 K-Ar 연대 결과(이현구 외, 1993; 46~52

Ma)와 같은 연대범위를 갖는다. 또한 지리적으로 인접한 두 지역의 화산암류들이 시간공간적으로 유사한 분화를 경험했을 것으로 예상할 때 연구지역을 포함한 영양 소분지와 의성 분지 내에 46~52 Ma경에 광범위한 중성 및 산성맥의 관입이 있었던 것으로 예측된다.

결론

청송 지역에 나타나는 구과상 유문암에 대한 야외 및 실내 연구 결과 그 성인에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 청송 구과상 유문암을 생성시킨 산성암맥 내에 일반적으로 나타나는 섬유상 광물은 이들 암맥이 빠르게 냉각되었음을 지시한다. 그리고 청송 구과상 유문암의 다양한 형태는 각각의 맥 그리고 각 맥내에서도 부분적으로 서로 다른 냉각 속도에 의해 형성된 것으로 생각된다. 그리고 그 냉각속도의 다양함에 의해 청송지역 유무암내 구과상은 심성암이나 변성암내의 구과상에 비해 매우 다양하고 아름다운 구상조직을 보여준다.
2. 방사상 단식 구과형과 방사충상 복식 구과형은 상대적으로 가장 빠른 냉각시 형성되었으며 냉각속도가 중간일 경우 충상 단식 구과형이 생성되며 냉각속도가 더 느려지면 충상 복식 구과형이 형성된다. 따라서 청송 지역의 구과상 유문암중 방사상 단식 혹은 방사충상 복식 구과형인 국화형, 민들레형, 해바라기형, 다알리아형은 가장 빠르게 냉각된 상태에서 생성된 반면 충상 복식 구과형인 장미형, 무명형과 목단형등은 상대적으로 가장 천천히 냉각된 암맥으로부터 형성되었다.
3. 카네이션형 구과상 유문암의 경우 맥의 중앙부에서는 중심에서 주변부로의 확산에 의한 방사상 단일 구과형이 그리고 맥의 주변부에서는 기체가 주변암으로 빠져나가면서 일어난 과냉각에 의해 형성된 충상 단식 구과형이 형성되었으며 맥의 중앙부에는 방사상 단일 구과형이 충상 단식 구과형에 의해 둘러싸인 방사상-충상 복식 구과형이 나타난다.
4. 일부 구과상 암체의 구형은 두개의 마그마가 고화되기 전에 액체 상태로 만나서 혼합될 때 허부 마그

마가 상부의 다른 마그마내로 방울형태의 진입에 의해 만들어지고 빠른 냉각에 의해 구형 내에 구과상 조직이 형성된 것으로 생각된다.

5. 세맥과 함께 나타나는 일부 구과상 유문암내에서 냉각시 형성된 방사상의 섬유상 조직이 구과 내에는 물론 세맥내에도 형성되었으며 이는 세맥이 방사상의 섬유상 조직이 형성되기 전에 관입하였음을 지시한다.

6. K-Ar 전암분석연령은 구과상 암체가 48 Ma에서 50 Ma 사이에 관입하였음을 지시한다.

감사의 글

본 연구는 청송군의 청송 꽃돌 학술 용역의 지원으로 수행되었다. 논문심사 과정에서 세심하고 건설적인 지적과 의견들을 제시하여 주신 부산대 김진섭 교수님과 경북대 장윤득 교수님께 감사드립니다. 그리고 연령 측정에 도움을 준 대전 기초과학 연구원의 김정민 박사과 EPMA 분석에 도움을 준 전주 기초과학 연구원 지원분소의 이영부 박사에게도 감사드립니다.

참고문헌

- 권용완, 김형식, 이설경, 1995, 무주 구상편마암의 성인에 관한 연구, 암석학회지, 4, 186-200
- 김상욱, 박봉순, 1970, 한국지질도(1:50,000), 영양도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 25p.
- 김정민, 2001, 한국기초과학지원연구원에 도입된 K-Ar 연대 측정 시스템: 개요 및 성능, 10, 172-178
- 김형식, 김영겸, 정호종, 김항목, 1985, 부산 영도일대의 구상호온펠스에 대한 연구, 대한지질학회지, 21, 50-62
- 김형식, 김진섭, 김항목, 1979, 부산 황령산 일대의 구상 반러암질암에 대한 연구, 대한지질학회지, 15, 4, 295-313
- 윤성호, 고정선, 김병환, 1998, 부산 황령산 구상반러암의 구상구조 및 광물조성, 한국지구과학회지, 19, 171-181
- 이현구, 김상중, 윤혜수, 최위찬, 송영수, 板谷 徹丸, 1993, 경북 의성 동남부에 분포하는 금성산 화산암류의 K-Ar 연대와 그 주변의 광화시기, 대한광산지질학회지, 1993, 26, 4, 445-454
- 황상구, 1998, 청송 주왕산 일대의 화산지질, 대한지질학회 '98춘계학술답사 가이드북, 42p
- Carl, J. D. and Amstutz., G. C., 1958, Three-dimensional Liesegang rings by diffusion in a colloidal matrix, and their significance for the interpretation of geological phenomena, Geol. Soc. Am. Bull., 69, 1467-1468
- Erdmannsdorffer, O. H., 1924, Grundlagen der petrographie: Stuttgart, Ferdinand Enke, 327
- 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, F. H., 1888, On the spheroid-bearing granite of Mullaghderg, County Donegal: Geol. Soc. London Quart. Jour., v.44, 548-560
- Ishioka, Kakichi, 1953, On orbicular esboite from the Aomine mine, Central Japen: Nagoya Univ. Jour. Earth Sci., V.1, nos. 1-2, 85-106
- Leveson, D. J., 1966, Orbicular rocks, A Review. Bull. Geol. Soc. Am., 77, 409-426
- Leveson, D. J., 1963, Orbicular rocks of the Lonesome Mountain area, Beartooth Mountains. Montana and Wyoming, A Review. Bull. Geol. Soc. Am., 74, 1015-1040
- Liesegang R. E., 1896, Naturwiss Wochenscher II, 353p.
- Lofgren, G., 1974, An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization. Am. J. Sci., 274, 243-273
- Lofgren, G., 1980, 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
- Phillips, J. C., and Woods A. W., 2002, Suppression of large-scale magma mixing by melt-volatile separation. Earth and Planetary Science Letters, 204, 47-60.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A., 1974, Plate tectonics and the Japanese Islands: a synthesis Geol. Soc. Am. Bull., 85, 1159-1170
- Vernon, R. H., 1985, Possible role of superheated magma in the formation of orbicular granitoids. Geology, 13, 843-845
- Von Buch, L., 1802, Geognostische Beobachtungen auf Reisen durch Deutschland und Italien. v. 1 (2 volumes).

(2004년 5월 10일 접수; 2004년 5월 27일 채택)