

# 장기지역 범곡리층군에 부존되는 진주암의 산출상태와 생성관계

## Occurrence and Genesis of Perlite from the Beomgockri Group in Janggi Area

노진환 (Jin Hwan Noh)\* · 홍진성 (Jin-Sung Hong)

강원대학교 지질학과

(Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

**요약** : 함유유리질 암석인 진주암은 장기지역의 제3기 마이오세 화성쇄설성 퇴적층인 범곡리층군의 하부에서 산출된다. 진주암은 대개 그 하위의 장기층군과의 부정합면을 따라 단속적으로 분포하고, 시공간적으로 유문테사이트, 부석질 용결응회암과 밀접한 접촉 및 성인적 관계를 보이며 층상으로 산출된다. 이 진주암은 전형적인 진주암과 비교해 반정과 암편을 많이 함유하는 것이 특징이며 화학 조성상 낮은 SiO<sub>2</sub> 함유 수준(63.2~66.4 wt.%)을 이룬다. 반면에 함유량에 있어서는 진주암보다는 송지암에 가까운 함유 수준(3.2~7.8 wt.%)을 나타낸다. 이 진주암과 그 주변의 화산암류 및 화성쇄설성 암석들 사이의 암석기재학적 특징들을 비교해 본 결과, 부석질 용결응회암과 유문테사이트가 진주암의 원암일 개연성을 지시하는 것으로 나타난다. 진주암과 그 원암들의 희유 및 희토류 원소들의 조성비(Zr/TiO<sub>2</sub> 대비 Nb/Y)와 야외에서의 산출상태는 이러한 해석을 뒷받침하며, 특히 진주암 내에 남아 있는 기공 조직은 화산유리뿐만 아니라 부석 암편도 진주암질 유리의 주요 원물질이었을 것이라는 점을 강하게 지시한다. 이 진주암은 호소 환경에서 형성된 망해산층의 퇴적 단계에서 물과 암석 간에 완만하게 진행된 수화·변질 형식의 속성작용에 의해서 생성된 것으로 여겨진다. 진주암화 과정 동안에 SiO<sub>2</sub>와 알칼리는 일률적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이 진주암은 속성작용에 의해서 2차적으로 형성되었고 회적 연장성도 결여되기 때문에, 이 암층에 의거한 기존의 범곡리층군의 층서 체계는 수정되어야 할 것이다.

**주요어** : 장기지역, 범곡리층군, 장기층군, 진주암, 유문테사이트, 부석질 용결응회암, Zr/TiO<sub>2</sub> 대비 Nb/Y, 원물질, 진주암화 과정

**ABSTRACT** : Perlite, a hydrated volcanic glass, occurs mainly as a bed-like body, and is distributed intermittently along the unconformity surface between the Beomgockri Group and its lower formations, viz. Janggi Group. The perlite is intimately associated with surrounding pumiceous welded tuff and rhyodacites in space and time. Compared to the typical perlite, the perlite is rather silica-poor and impure, and thus, includes lots of phenocrysts and rock fragments. Nearly the perlite is compositionally rather close to a pitchstone than a perlite in water contents. Petrographic comparison between perlite and associated volcanic to volcanoclastic rocks indicates that pumiceous welded tuff and rhyodacite seem to be protolith of the perlite. A Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y diagram and field occurrence of perlite and their

\*교신저자: jhnoh@kangwon.ac.kr

protholith rocks also conforms the above interpretation. In addition, remnant vesicles in perlite strongly reflect that the precursor of perlitic glass appeared to be pumice fragment as well as volcanic glass. The perlite was diagenetically formed by way of a pervasive water-rock interaction at the deposition of the Manghaesan Formation in lacustrine environment. During perlitization,  $\text{SiO}_2$  and alkali tend to be consistently depleted. Preexisting stratigraphic system of the Beomgockri Group based on the perlite formation should be corrected, because the perlite was formed diagenetically without lateral persistence in its occurrence.

**Key words** : Janggi area, Beomgockri Group, Manghaesan formation, perlite, rhyodacite, pumiceous welded tuff,  $\text{Zr/TiO}_2$  vs.  $\text{Nb/Y}$ , precursor, perlitization

## 서 언

진주암(perlite)은 암석학적으로 화성기원인 흑요석(obsidian)과는 달리 2차적 수화과정에 의한 체적 변화에 기인하여 특징적인 동심원상의 열극, 즉 진주암질 조직(perlitic texture)을 갖는 규질 조성의 함수유리질 암석이다(Ross and Smith, 1955). 흑요암과 송지암(pitchstone) 사이의 함유 수준을 보이는 수분 함량(2~5 wt.%)과 진주암 특유의 조직과 광택에 의해서 다른 천연 유리질 암석들과 구분된다. 진주암은 일반적으로 흑요암이나 유문암질 암석이 2차적으로 수화·변질(glass hydration and alteration)되는 과정에서 형성되며(Friedman and Smith, 1958; Friedman *et al.*, 1966), 이 같은 수화 과정이 심화되면, 제올라이트(zeolite)나 스멕타이트(smectite)로의 변질이 야기되는 것으로 알려져 있다(Jezek and Noble, 1978; Noh and Boles, 1989). 전 세계적으로 제3기에서 제4기 중기의 규질 화산암류와 성인적으로 연계된 산출 양상을 보인다(Breese and Barker, 1994; Harben and Kuzvart, 1996; Rotella and Simandl, 2003).

응용광물학적으로 진주암은 1000℃ 정도로 가열·처리하면 높은 열적 부피 팽창성을 갖는 유리질 암석을 의미하는 명칭으로도 사용된다. 소위 '팽창 진주암(expanded perlite)'으로 통용되는 이 광물질은 화학적 불활성, 낮은 밀도, 내화성, 경량성 등과 같은 물성적 특성에 의해 다양한 용도로 산업에 이용되는 일종의 산업광물(industrial mineral)로 간주된다(Koukouzas *et al.*, 2000; Chang, 2002).

국내에서 진주암에 대한 연구는 구룡포 지역에서 그 산출이 알려지게 됨에 따라(Noh, 1985), 그 생성 환경과 수화·변질의 과정 및 메카니

즘 등이 연구된 바 있다(Won, *et al.*, 1987; Noh and Boles, 1989). 이와는 별도로 오래 전부터 장기 지역의 제3기 육성층군의 최상위 층군인 범곡리층군의 기저에 진주암이 주요 암층을 이루며 산출된다는 사실이 보고되었다(Tateiwa, 1924). 이 진주암은 데사이트질(dacitic) 화산암체(지층명으로는 놀대리조면암) 내에 괴상의 다소 불규칙한 암체로 산출되는 구룡포 진주암과는 달리, 단위 지층명(방산리 진주암 및 창암 진주암)이 부여 될 정도로 층상을 이루며 산출되는 것이 특징이다. 이 같은 산출상의 특징은 통상적으로 점성도가 높은 규질 화산암류의 2차적 수화과정에서 파생되는 진주암으로서는 이례적인 것이다. 여기에는 범곡리층군 특유의 화산활동과 화성쇄설성 퇴적과정이 관여되었을 것으로 여겨지지만, 아직까지 이에 대한 연구는 물론 이 진주암 자체의 암상, 분포 및 산출상태 그리고 부존자원으로서의 잠재성 등에 관한 기본적인 조사조차도 제대로 이루어지지 못한 상황이다.

이 같은 배경 하에서 우선 필자들은 이 논문을 통해서 범곡리층군에 부존되는 진주암의 암상, 분포 및 산출상태를 밝히고자 한다. 이와 아울러 이 진주암의 암석화학적 및 조암광물학적 분석 자료와 관찰 사항을 토대로 그 원암 관계와 진주암화 과정을 규명함으로써, 궁극적으로는 범곡리층군 초기의 화성쇄설성 환경을 해석하는데 기여하고자 한다.

## 연구 방법 및 실험 조건

야외에서 진주암의 분포 및 산출 상태의 파악을 위해 범곡리층군을 중심으로 정밀조사하였고, 진주암은 물론 이 암석과 성인적으로 연

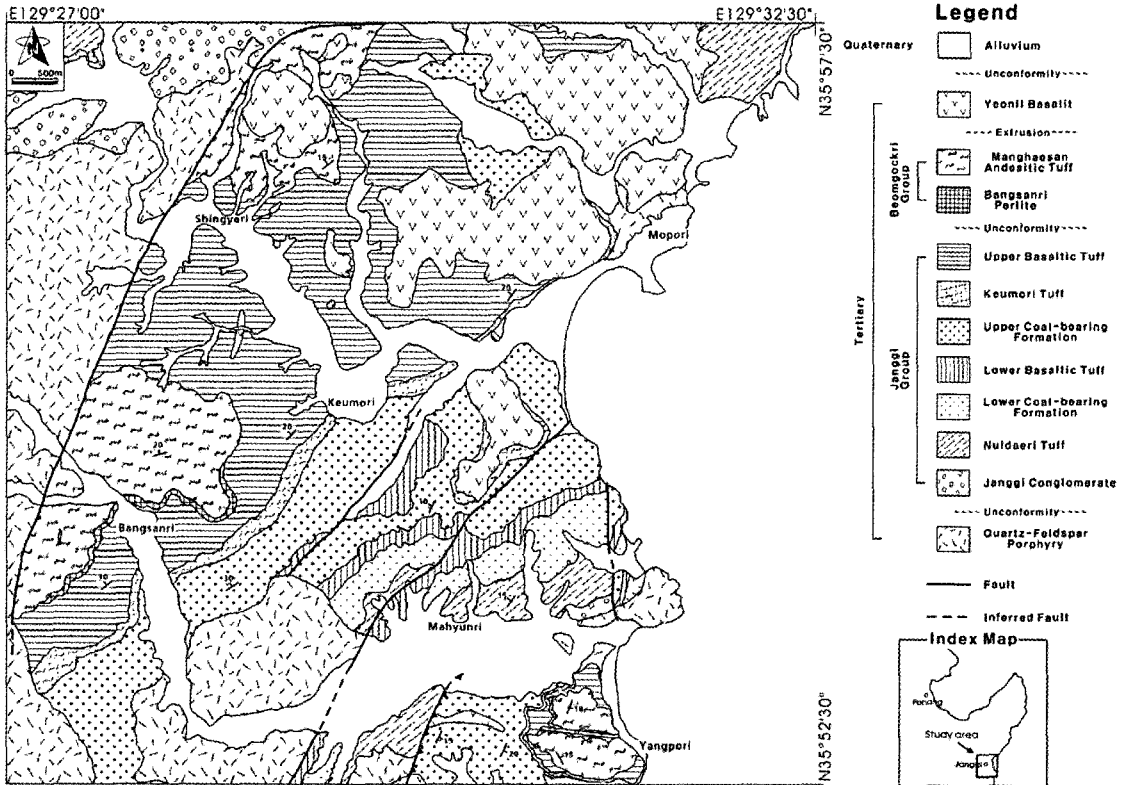


Fig. 1. Geologic and index maps in Janggi area, showing the distribution of perlite formation (modified from Tateiwa, 1924; Noh, 1989).

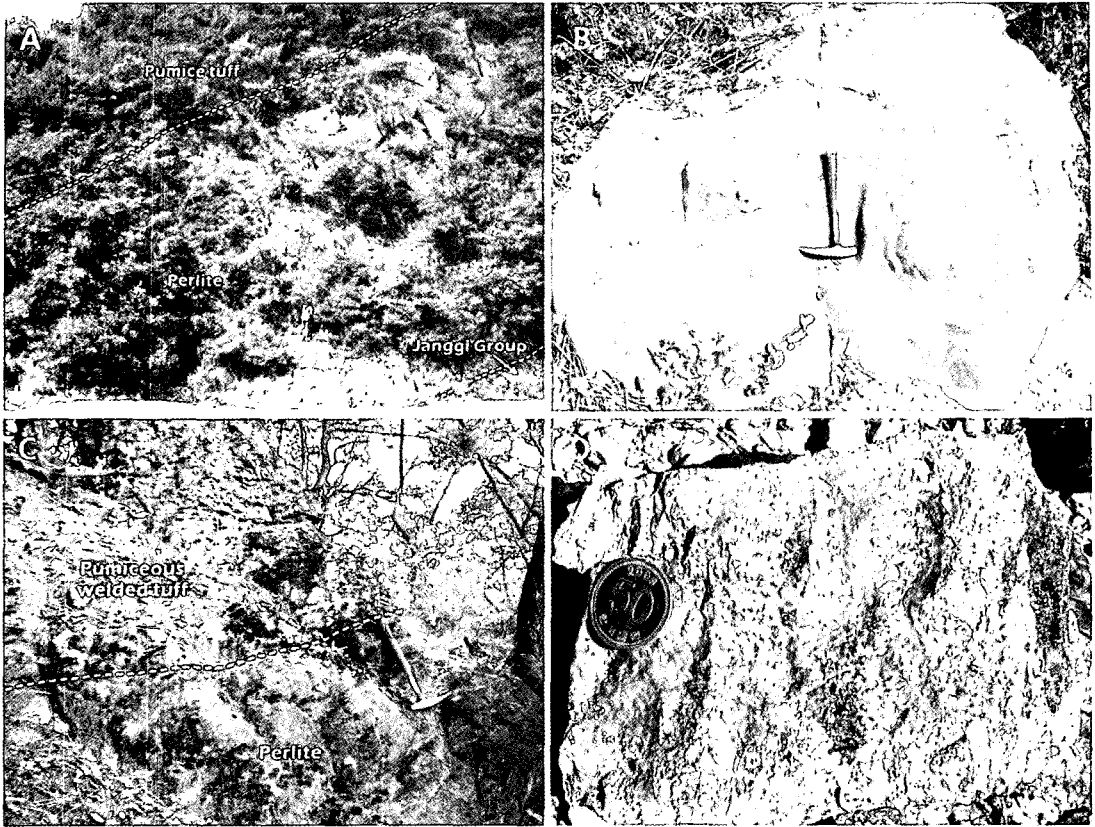
계되었을 개연성이 있는 화산암류 및 응회암류들의 표품을 채취하였다. 채취된 표품들은 암석의 유형별로 연마박편(polished thin section)의 형태로 제단되었고, 필요에 따라 전암 단위로 X-선회절 및 화학분석을 시행하기 위한 분말 시료의 형태로도 준비되었다.

진주암, 화산암류 및 화산쇄설암류들의 광물 조성, 함량 및 조직 등을 밝히기 위해 편광현미경 관찰과 X-선회절 분석(Rigaku model D/Max2200)을 병행하여 실시하였다. X-선회절 분석은  $CuK\alpha$ 의 X-선을 사용하여  $3\sim 60^\circ$ 의  $2\theta$  범위에서  $1^\circ/\text{min}$ 의 조건으로 시행되었다. 진주암과 그 원암들의 화학 분석은 기초과학지원연구원에 의뢰하여 주요 원소, 희유 및 희토류 원소 단위로 구분하여 시행되었다. 주요 화학성분들의 분석에는 X-선형광(XRF) 분석법이 적용되었고, 그 밖의 미량성분들에 대해서는 플라즈마 유도방출분광(ICP/MS) 분석법으로 분석하였

다. 장석류 광물들의 화학조성은 전자현미분석기(SHIMADZU model EPMA1600)를 사용하여  $15\text{ kV}\sim 20\text{ nA}$ 의 가속 전압 및 전류 조건에서  $3\ \mu\text{m}$ 의 분석 범위로 분석되었다.

#### 지질 배경

연구 지역은 제3기 마이오세(Miocene) 육성층군의 중심지로서 장기층군과 그 상위의 범곡리층군에 속하는 화성쇄설성(volcaniclastic) 퇴적층이 주된 암층을 이룬다(그림 1). 이 마이오세 육성층군들의 기반암은 에오세(Eocene) 화산암류인 석영·장석 반암류들로 구성된다(진명식의 외, 1988; 이현구 외, 1992; 노진환, 2002). 연구 지역 내에서는 이 에오세 화산암류들이 마이오세 퇴적층군들과 단층접촉 관계를 보이며 주로 북서부에 분포한다(그림 1). 장기층군과 그 상위의 범곡리층군은 부정합 관계를 이루며 분포



**Fig. 2.** Field occurrences of perlite. A. A perlite formation overlying the Janggi Group. B. Perlite mass showing concentric fracturing. C. A contact between perlite and upper pumiceous welded tuff. D. Elongated perlite fragments (dark) in pumiceous welded tuff.

하고, 과거에 제4기의 ‘연일현무암(Tateiwa, 1924)’이라고 부르던 염기성 화산암류들이 열극을 따라 분출하는(fissure eruption) 지질 양상을 보인다(노진환, 1989).

장기층군은 하부로부터 장기역암, 늑대리옹회암, 하부함탄층, 하부현무암질옹회암, 상부함탄층, 금오리옹회암 및 상부현무암질옹회암으로 구성된다. 이들은 대개 N20~40°E의 주향과 15~20°NW의 경사를 이루며 분포하지만, 연구 지역의 남동부, 즉 양포 지역에서는 이와는 반대의 경사(대개 20°SE)를 이루며 분포하는 것이 특징이다. 장기층군을 구성하는 퇴적층들의 암상은 함탄층을 제외하고는 대부분 화성쇄설성 옹회암류로 구성된다.

장기층군 위에 부정합으로 놓이는 범곡리층군은 진주암층이나 진주암질 용결옹회암이 기저를 이루고 주로 부석질(pumiceous) 옹회암류

를 주된 암상으로 갖는 전형적인 화성쇄설성 퇴적층이다. 이 지역에 대한 최초의 지질도폭 조사자인 다데이와(1924)에 의해서 방산리진주암과 망해산옹회암층으로 각각 명명되었던 이 범곡리층군의 암층들은 하위의 장기층군과는 다소 어긋난 지층 발달 양상(N50~60°E의 주향과 15~20°NW의 경사)을 보인다. 또한 범곡리층군도 장기층군과 마찬가지로 연구 지역의 남동부에서는 충상단층(thrust)으로 여겨지는 N20~30°E 방향의 단층선을 기준으로 반대의 경사(N30~40°E의 주향과 15~20°SE의 경사)를 이룰 뿐만 아니라, 국지적으로는 주향 방향도 크게 달라질 정도(N40~50°W의 주향과 15~25°NE의 경사)로 교란되어 다소 복잡한 지층 분포 양상을 나타낸다.

양포 지역에서의 장기층군과 범곡리층군들의 지층 교란 양상은 퇴적 이후에 이루어진 단층

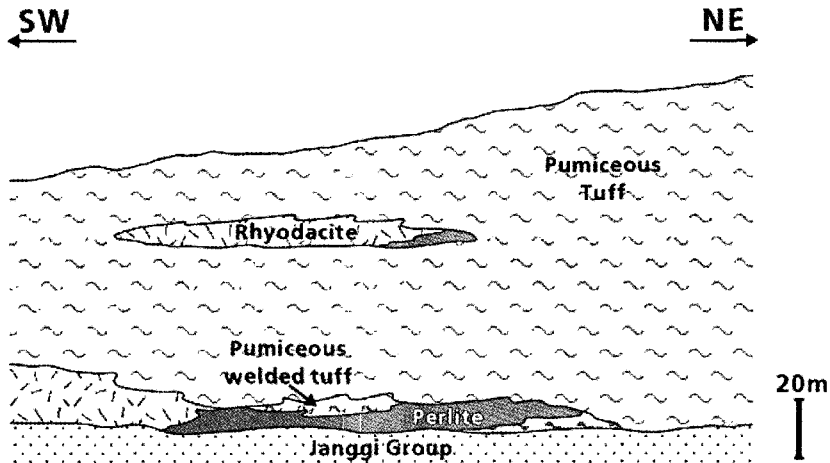


Fig. 3. A schematic cross section showing the mode of occurrence of perlite.

의 발달과 염기성 화산암류들의 분출에 의한 것으로 보인다. 연구 지역에서 최후기의 지층인 염기성 화산암류들은 단층대에 규제되어 분포되는 경향이 뚜렷하고 대부분 지형상 고지대를 이루며 분포한다.

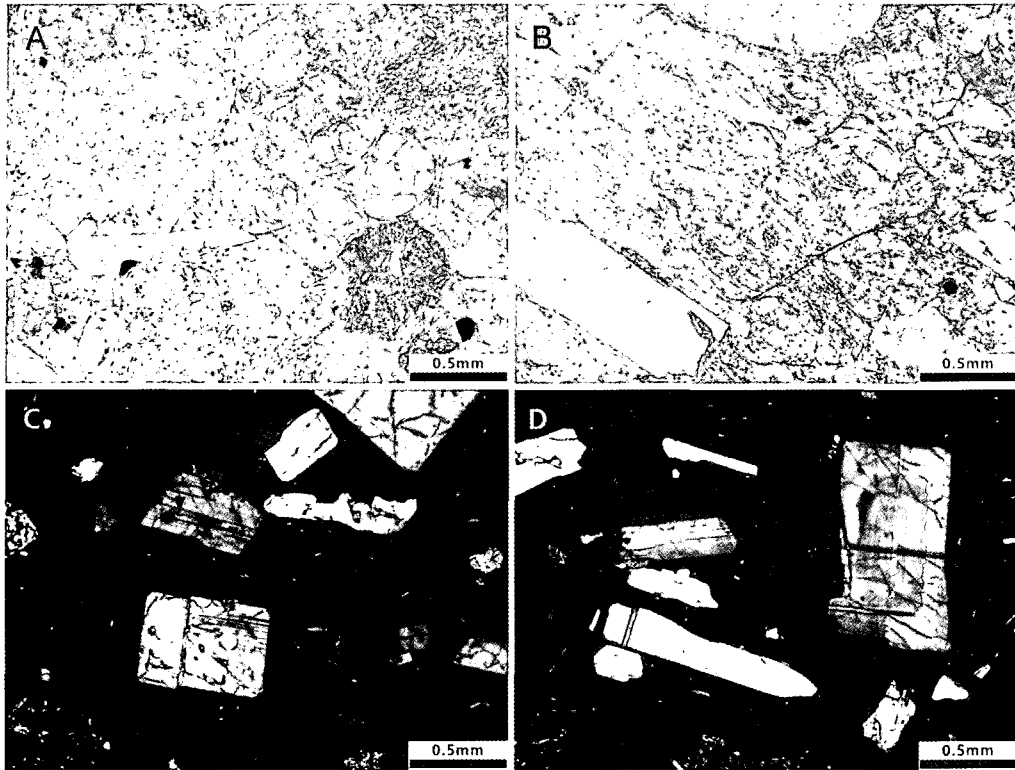
### 진주암의 분포 및 산출상태

장기 지역에서 진주암은 장기층군과 범곡리층군의 사이의 부정합면을 따라 소위 '방산리진주암층'이라고 명명될 정도로 정연한 층상의 분포를 이루며 산출된다. 그렇지만 연구 지역의 북부(신계리 지역)에서 볼 수 있는 바와 같이, 진주암은 전층군에 걸쳐 지속적으로 분포하는 것은 아니고 곳에 따라 횡적으로 용결융회암류나 유문데사이트(rhyodacite)로 전이되는 단속적인 분포 양상을 보이는 것이 특징이다(그림 1). 또한 연구지역의 서측부에서는 범곡리층군 내의 유문데사이트 암체의 하부에서 다소 불규칙한 괴상의 암체로서 산출되기도 한다. 연구 지역의 남동부에서도 별도로 소규모의 층상 암체(창암진주암)를 이루며 분포한다. 대개 5~10m 정도의 두께를 갖는 이 진주암은 특징적인 암회색조의 견고·치밀한 암상을 이루기 때문에, 주위의 암석들과 쉽게 구분되며 건층(key bed)으로 사용될 수 있을 정도로 그 분포 및 산출 양상이 현저하다(그림 2A, B, C). 장기 지역 진주암의 이 같은 분포 및 산출 양상을 종합하여 모식적으로 나타내면 그림 3과 같다.

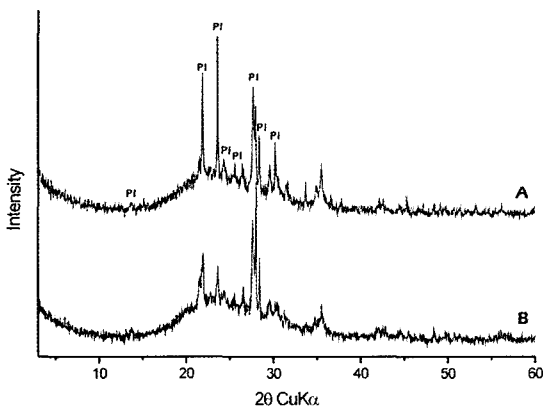
이 진주암은 대부분 부석질 용결융회암(pumiceous welded tuff)과 횡적 접촉관계를 보이며 발달하는데(그림 2C), 그 경계는 점이적인 변화 양상을 보인다. 간혹 부석질 용결융회암 내에서도 길게 신장된 암편상으로 마치 피아메(fiamme) 형태를 이루며 산출되기도 한다(그림 2D). 이 층상의 진주암체 상부에서는 망해산층의 하부 암상을 이루는 부석질 융회암이 피복한다. 지표에 노출된 진주암은 양파 껍질과 같은 구상의 독특한 풍화 양상을 보인다(그림 2B). 곳에 따라 변질이 심화되면, 제올라이트나 스멕타이트로 변질되어 담회색 내지 베이지색 계통의 밝은 색조를 나타낸다.

### 진주암의 암석학적 특징

장기 지역에서 산출되는 진주암은 이 암석 특유의 함수유리질 성분과 조직을 보이지만 광석의 의미로는 대체로 저급한 유형으로 간주될 수 있을 정도로 불순한 조성을 이룬다. 즉, 이 진주암은 전형적인 진주암과는 달리 반정과 미소 암편을 상대적으로 많이 함유하고 팽창열극(perlitic crack)의 발달도 다소 미약한 양상을 보인다(그림 4A, B). X-선회절 분석 자료에서도 알 수 있듯이, 산업적으로 활용되는 전형적인 진주암들에 비해서 유리질 성분의 존재를 지시하는 4 Å 근처에서의 완만한 구배 형태의 배경치 강도(background intensity)의 수준이 낮고 장석을 비롯한 불순 광물들의 회절선이 현저하다



**Fig. 4.** Microphotographs of perlite showing the characteristic glassy texture and plagioclase phenocrysts. A. Perlitic glass containing vesicles derived from the pumice welded tuff. B. Characteristic glassy and perlite texture in the perlite altered from rhyodacite. C. Partial vitrification mode of plagioclase by incipient welding in the pumiceous welded tuff, resulting in embayed outline. D. Zoned and twinned plagioclase phenocrysts in the perlite altered from rhyodacite.



**Fig. 5.** X-ray diffraction patterns of two different types of the perlite from the Beomgockri Group: A. the perlite from rhyodacite, B. the perlite from pumiceous welded tuff, pl. plagioclase.

(그림 5). 따라서 장기 지역의 진주암은 학술적으로는 진주암이 분명하지만 산업적 용도로는 활용되기 어려운, 즉 산업광물로는 다소 저급한 물질적 상태를 이루고 있는 것으로 판단된다.

이 진주암의 반정들은 대부분 안데신(andesine) 조성의 사장석으로 이루어지고 여기에 소량의 각섬석과 불투명 광물들이 수반된다. 대개 0.07 ~ 0.7 mm 크기의 입도를 갖는 사장석은 대부분 칼스바드-알바이트(Carlsbad-Albite) 유형의 쌍정을 이루며 일부 누대구조(zoning)를 나타내기도 한다(그림 4C, D). 사장석 반정들은 대부분 재차 유리화(vitrification) 되는 과정에서 그 결정 윤곽이 만입된(embayed) 상태로 나타나는 것이 특징이다(그림 2B). 사장석의 조성( $An_{32-42}$ )은 대체로 균일한 조성을 보이지만, 누대구조를 보이는 결정들의 경우에는 결정의 중심에서 연

**Table 1.** Chemical analyses (wt.%) of perlite and other associated rocks, compared to those of typical perlite and pitchstone

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I	Total
Pe-1	65.25	0.73	14.79	3.38	0.14	1.03	2.31	4.63	3.01	0.13	4.55	99.95
Pe-2	65.79	0.70	14.65	3.39	0.14	0.94	2.09	4.92	3.19	0.14	3.84	99.79
Pe-3	65.99	0.67	14.76	3.40	0.13	0.83	2.04	4.55	3.30	0.14	3.20	99.01
Pe-4	65.31	0.67	14.39	3.24	0.13	0.99	2.34	4.66	3.11	0.12	4.65	99.61
Pe-5	63.82	0.70	15.12	3.62	0.16	1.29	2.68	4.91	2.33	0.15	5.14	99.92
Pe-6	64.77	0.68	14.54	3.50	0.13	0.94	2.31	4.92	3.01	0.13	4.55	99.48
Pe-7	65.85	0.68	14.68	3.52	0.13	0.87	2.15	4.49	3.09	0.13	3.40	98.99
Pe-8	66.49	0.53	14.99	3.01	0.11	1.00	1.72	4.66	3.35	0.11	3.75	99.72
Pe-9	65.11	0.72	15.54	3.56	0.11	1.07	1.81	4.09	3.04	0.13	4.76	99.94
Pe-10	63.21	0.67	13.77	3.23	0.11	0.94	2.41	3.68	2.70	0.11	6.90	97.73
Pe-11	62.49	0.69	13.77	3.34	0.13	1.10	2.46	3.69	2.07	0.12	7.87	97.73
Wt-1	65.43	0.66	15.13	3.20	0.13	0.97	2.09	5.49	3.13	0.12	3.41	99.76
Wt-2	66.49	0.64	15.27	3.13	0.13	0.90	2.02	4.38	3.19	0.12	3.09	99.36
Rd-1	68.83	0.64	15.52	3.42	0.10	0.33	1.62	5.87	2.19	0.04	1.33	99.89
Rd-2	69.02	0.64	15.82	3.15	0.08	0.28	1.37	5.06	2.38	0.02	1.23	99.05
Perlite*	72.7	0.91	12.91	1.35	0.05	0.23	0.82	3.07	4.73	0.04	3.19	100.00
Pitchstone**	72.3	0.06	12.10	0.85	-	0.29	1.10	3.37	2.55	-	7.10	99.72

\*: Average chemical composition of perlite (Shackley and Allen, 1992),

\*\* : Data from Wondraczek *et al.* (2003).

변으로 가면서 Ca-단성분이 감소하는 정상 누대구조를 보인다. 진주암에 수반되는 대개 1~2 mm 정도의 크기를 보이는 미소 암편들은 안산암질 내지 현무암질의 화산암편이 대부분이다. 이 진주암은 반정과 암편의 조성에 있어서 주변의 유문데사이트 및 부석질 용결응회암과 유사한 수준을 나타낸다.

화학조성에 있어서 이 진주암의 SiO<sub>2</sub> 함량은 63.2~66.4 wt.%의 함유 수준을 나타낸다(표 1). 통상적으로 70 wt.% 이상의 SiO<sub>2</sub> 함유 수준을 갖는 전형적인 진주암들의 경우와 비교하면, 이 같은 수치는 상대적으로 낮은 함유 수준에 해당된다. 이에 비해서 이 진주암은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, 그리고 MgO 함량에 있어서는 상대적으로 높은 함유 수준을 보인다. 또한 작열감량(L.O.I.: Loss on Ignition)으로 추산된 H<sub>2</sub>O의 함량(3.2~7.8 wt.%)에 있어서는 진주암보다는 오히려 송지암에 가까운 함유 수준을 나타낸다.

### 진주암의 원암 관계

일반적으로 진주암은 흑요석이나 유문암으로부터 유래된 2차적인 변질산물로 알려져 있지만(Epel'baum and Salova, 1987; Harben and Kuzvart, 1996), 이 지역에서는 이 같은 성인적 연계성을 찾아 볼 수 없다. 전술한 바와 같이, 장기 지역에서 산출되는 진주암은 주위의 부석질 용결응회암과 유문데사이트와 그 분포 및 산출 양상에 있어서 밀접한 연계성을 갖는다. 특히, 범곡리층군의 기저부를 따라 분포하는 진주암층의 횡적 연장부가 부석질 용결응회암으로 전이된다는 사실은 이 같은 개연성을 단적으로 지시한다. 또한 범곡리층군에 포함되는 유문데사이트 암체의 하부가 일부 진주암으로 변질되어 있다는 사실을 감안하면, 이 지역에서 산출되는 진주암들은 이원적인 원암(protolith) 조건, 즉 부석질 용결응회암과 유문데사이트로부터 유래되었을 개연성을 강하게 시사한다. 이

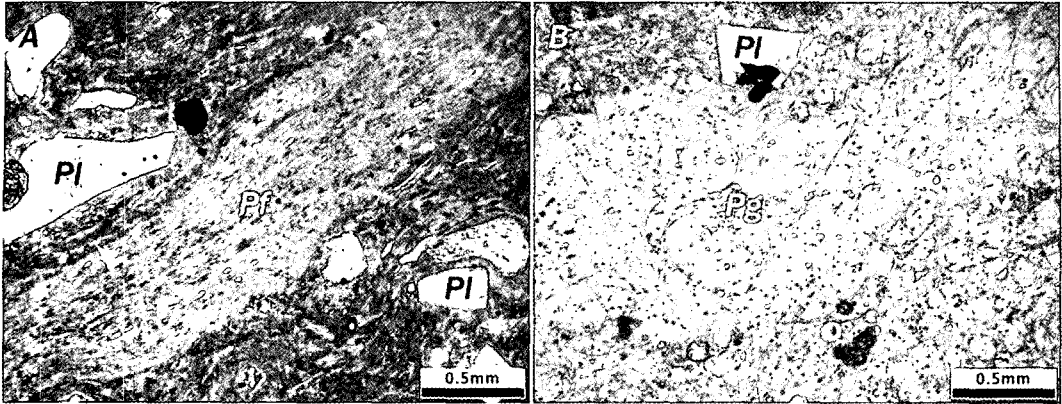


Fig. 6. Microphotographs showing the comparison of unaltered pumiceous part (A) with the altered part (B) to perlite in pumiceous welded tuff; Note the skeletal vesicles from original pumice fragment. Pl: plagioclase, Pf: pumice fragment, Pg: perlitic glass.

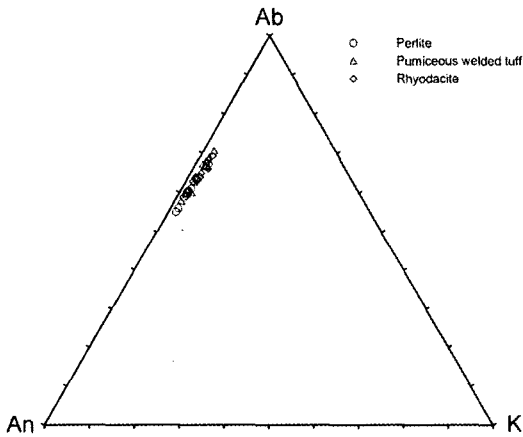


Fig. 7. Ternary diagrams illustrating the composition of plagioclase phenocrysts in perlite and associated rocks.

같은 암석들은 일반적인 진주암의 원암으로는 다소 상계에서 벗어난 암석 유형인 관계로 주목할만한 상황인 것으로 여겨진다. 증상을 이루는 진주암들은 대부분 부석질 용결응회암으로부터 유래된 것이고, 유문데사이트 부근에서 이 암석의 반정 조성과 조직을 보이는 진주암이 소규모로 산출된다. 전자는 상대적으로 진주암질 유리 성분과 암편을 많이 함유하고 부석으로부터 유래된 미세 기공을 수반하는데 비해서, 후자는 이 같은 기공이 수반되지 않으면서 상대적으로 사장석 반정의 양이 많은 것이 특징이다(그림 4).

진주암은 화산유리질 성분의 수화·변질 과정의 산물인 관계로 반정들은 별다른 변질을 겪지 않는 것으로 나타난다. 따라서, 전술한 바와 같이, 진주암과 그 원암으로 간주되는 부석질 용결응회암 및 유문데사이트의 반정들의 조성, 특히 사장석 반정들의 결정도, 쌍정 양상 및 누대구조 등의 양상이 서로 흡사하다는 사실도 이들 간의 성인적 연계성을 뒷받침하는 것으로 여겨진다. 또한 부석질 용결응회암을 원암으로 하는 진주암의 경우에는, 진주암질 유리 성분에서 부석편에서 유래된 것으로 해석되는 미세공극과 같은 잔류조직(skeletal texture)을 이룬다(그림 6). 뿐만 아니라 사장석 반정에서는 그 윤곽이 잠열(latent heat)에 의하여 용식된 것 같은 만입 양상이 흔히 잔존된다는 사실도 진주암의 원암은 부석질 용결응회암일 개연성을 강하게 시사한다.

화산유리 외에 부석질 성분이 이 지역의 진주암 생성에 주요한 원물질(precursor) 역할을 했다는 점이 특기할만한 사항이다. 이 같은 해석은 신장된 부석질 암편의 진주암으로의 변질과 진주암질 유리부에 잔존되는 공극들의 잔존 양상 등에 의해서 가능하다. 부석질 용결응회암에 대략 20~30% 정도 함유되는 부석편들의 함유도를 고려하면, 부석은 진주암을 형성하는데 주요 원물질이었을 것으로 판단된다.

사장석 반정들의 Ca-단성분 조성 면에 있어서도 진주암과 원암들 사이에는 별다른 차이를 보이지 않고 대부분 안데신 조성 범위 내로 한



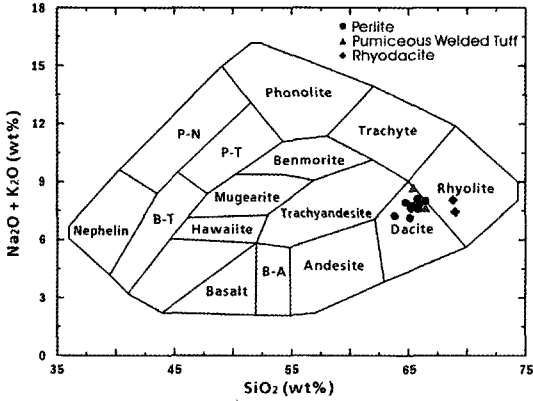


Fig. 8.  $\text{SiO}_2$ - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  discrimination diagram (Cox *et al.*, 1979) for perlite and other associated volcanic rocks.

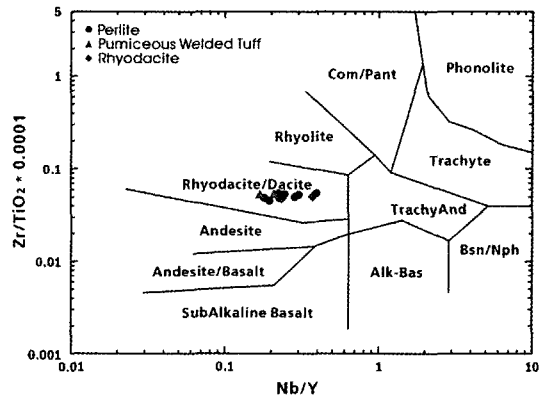


Fig. 9.  $\text{Nb}/\text{Y}$ - $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  discrimination diagram (Winchester and Floyd, 1977) for perlite and other associated volcanic rocks.

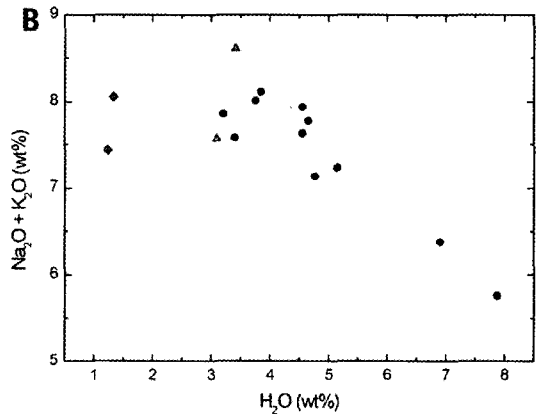
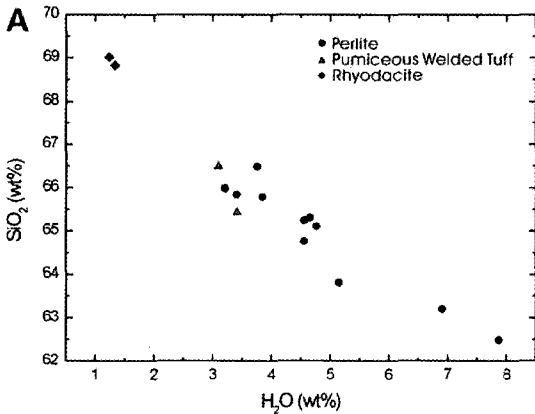


Fig. 10.  $\text{SiO}_2$  and alkali abundances vs.  $\text{H}_2\text{O}$  diagrams for perlite and its protolithic rocks.

정된다(그림 7).  $\text{An}_{28-43}$  범위에 걸치는 조성 변화는 사장석의 누대구조에 의한 것으로써 암종 별로 차이를 갖는 것은 아니다. 이 같은 사장석 반정들의 조성 자료는 진주암의 형성 과정에서 원암에서 유래된 사장석들이 별다른 변질 과정을 겪지 않았음을 지시한다.

진주암과 원암들의 화학성분상의 성인적 연계성과 그 기원을 해석하기 위해서, 관련 화학 성분들을 분석하여 잘 알려진 화산암 분류 체계, 즉  $\text{SiO}_2$ - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  대비도(Cox *et al.*, 1979)와  $\text{Nb}/\text{Y}$ - $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  대비도(Winchester and Floyd, 1977)에 도시하였다.  $\text{SiO}_2$ 에 대한 알칼리( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) 함량을 대비시킨 결과, 진주암과 그 원암류들은 화학성분상 대부분 데사이트 영역에 함

께 도시되고 일부 원암들이 유문암의 조성을 보이는 것으로 나타났다(그림 8). 이는 진주암과 그 원암류들이 대체로 동일한 화산활동의 산물임을 지시한다. 그렇지만 진주암으로 변질되는 과정에서 주요 원소들의 조성 변화가 야기될 수 있으므로, 상대적으로 거동성이 낮은 희유 및 희토류 성분들 간의 조성비, 즉  $\text{Nb}/\text{Y}$ 과  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  간의 성분 대비를 통해서 진주암의 기원암을 검토하였다. 그 결과, 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이, 동일한 영역(rhyodacite/dacite)에 도시되었다. 이 같은 화학조성상의 특징은 진주암, 부석질 용결용회암 및 유문데사이트가 그 기원에 있어서 동일하다는 해석을 가능하게 하고, 궁극적으로는 이미 산출상태와 암

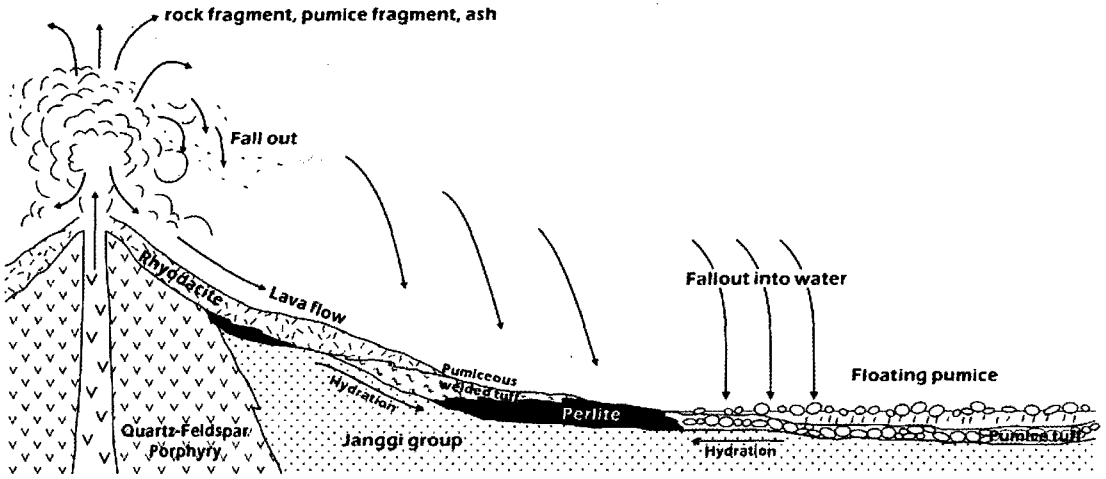


Fig. 11. A schematic illustration of volcaniclastic environments for the origin and formation of perlite in the Janggi area.

석학적 특징 등에 의해서 파악된 진주암과 그 원암들과의 성인적 연계성을 뒷받침하는 것으로 해석된다.

#### 진주암의 생성 관계와 그 의의

전술한 바와 같이, 장기 지역에서 산출되는 진주암은 주로 부석질 용결응회암에서 파생되었고 부석이 주요 원물질 역할을 했다는 점에서 성인적으로 특별한 관심을 불러일으킨다. 왜냐하면 이 같은 원암 관계는 전 세계적으로 알려져 있지 않기 때문이다.

이 같이 특별한 원암 조건을 갖는 진주암들의 생성 과정은 화산유리와 부석편의 수화·변질에 의한 함수유리, 즉 소위 'perlitic glass'로의 전환을 의미한다. 부석도 본질적으로는 화산유리질 성분이고 게다가 다공성이기 때문에 통상의 화산유리 못지않게 수화·변질될 개연성은 충분할 것으로 여겨진다. 진주암으로의 수화·변질 과정에서 야기되는 화학성분상의 거동을 파악하기 위해서 작열감량으로부터 추산된 함수량을 기준으로 주요 성분들에 대한 조성변화를 대비해 보았다(그림 10). 그 결과, 수분 함량이 증가할수록 SiO<sub>2</sub>와 알칼리 함량이 일률적으로 감소하는 경향을 나타낸다는 사실을 알 수 있었다. 또한 암상별로는 유문데사이트로부터 부석질 용결응회암을 거쳐 진주암에 이르는 일

련의 암상 변화 과정도 이 같은 함수량의 증가와 아울러 대체로 이 같은 화학성분상의 변화를 보인다는 점도 인지된다. 진주암을 형성시킨 이 같은 일련의 2차적인 수화·변질 작용은, Fisher and Schmincke (1984)가 언급한 바와 같이, 화성쇄설성 환경에서의 속성변질 과정의 일환으로 해석된다.

부석질 용결응회암은 부석질 응회암이 부분적으로 용결된 암상으로, 사장석 반정들의 외곽부가 부분적으로 만입된 조직을 통해서 인지되고 이는 진주암에도 그대로 유전된다. 전술한 바와 같이, 이 용결응회암은 암석화학적으로 유문데사이트와 동원 화산활동으로 유래된 것이다. 또한 이 용결응회암은 곳에 따라 횡적으로 범곡리층군의 주된 암상인 부석질 응회암으로 전이되는 산출양상을 보인다. 이들은 또한 부석편을 주된 성분으로 한다는 공통점이 있을 뿐만 아니라 반정의 조성 상으로도 별다른 차이를 보이지 않는다. 따라서 유문데사이트, 부석질 용결응회암 및 부석질 응회암들은 모두 동일한 화산활동의 산물이었을 것으로 해석된다. 다시 말해서, 그림 11에서 볼 수 있는 바와 같이, 범곡리층군 시대의 초기부터 시발된 산성 화산활동에 의해서 분출된 용암으로부터는 유문데사이트가 형성되었고 화산분출물들은 그 퇴적 및 냉각 여건의 차이에 의해서 부석질 용결응회암과 부석질 응회암을 각각 형성시킨 것

으로 여겨진다.

장기층군 퇴적 이후에 야기된 지체 변동으로 새롭게 형성된 호성 퇴적분지는 수위가 높지 않았던 관계로 수중 및 건륙상의 퇴적이 모두 가능했던 것으로 여겨진다. 수중에서 퇴적되어 형성된 부석질 응회암들은 대부분 화산유리의 급격한 수화·변질의 결과로 제올라이트나 스멕타이트가 주된 변질광물상을 이루는 속성변질 과정을 겪었지만, 호수가 닿지 않는 화산분출대 주변의 퇴적분지 가장자리에서 퇴적된 부석질 화산쇄설물들은 잠열에 의해 부분적으로 용결되면서 용결응회암을 형성시킨 것으로 해석된다. 이 같은 부석질 용결응회암과 유문데사이트들은 퇴적 후에 2차적으로 유입되는 지하수나 호수의 수위 변화에 의해서 간헐적으로 스며드는 지표수에 의해서 부석질 응회암의 경우보다는 상대적으로 완만한 수화·변질 과정을 겪으면서 진주암으로 전이된 것으로 해석된다. 이 같은 진주암의 생성 관계는 화성쇄설성 퇴적암에서 화산유리의 수화·변질 과정이 합수유리질 성분의 중간 단계를 거쳐 pH 조건이나 공극수의 화학조성 여건에 따라 스멕타이트와 제올라이트로 순차적으로 진행된다는 기존의 보고들(Dibble and Tiller, 1981; Noh and Boles, 1989; 노진환, 2002)과 부합되는 것으로 해석된다.

진주암과 그 원암들의 생성과 관련된 이 같은 화성쇄설성 퇴적 조건 및 환경 해석은 기존의 이 지역의 지질총서 체계에 대한 강한 의구심을 불러일으킨다. 이 지역에 대한 최초의 지질조사자인 다데이와(1924)에 의해서 명명된 이래 지금까지, 범곡리층군의 기저층으로서 '방산리 및 창암 진주암층'의 존재가 인정되어 왔고, 장기층군과 범곡리층군을 구분하는 주요 기준층으로서 인정되어 왔다. 그렇지만 이 암층이 전술한 바와 같이 단속적으로 발달하고 2차적인 속성작용의 산물이라는 점을 고려하면 층군 구획의 지표가 될 정도로 주요한 단위 층으로써 구분하는 것은 불합리한 처사로 여겨진다. 따라서 이 지층 명은 폐지되어야 하고, 이 진주암층을 그 상위의 층으로 설정되어 있는 '망해산응회암층'에 포함시켜 포괄적 개념의 암층 단위인 '망해산층'으로 새롭게 층서를 설정하는 것이 타당할 것으로 여겨진다.

## 결 론

1) 장기지역의 진주암은 마이오세 화성쇄설성 퇴적층인 범곡리층군의 하부의 부정합 층운을 따라 주로 층상의 암체를 이루며 단속적으로 분포된다. 이 진주암층은 5~10 m의 두께로 유문데사이트 및 부석질 용결응회암과 횡적 접촉관계를 보이며 산출된다. 진주암은 곳에 따라 유문데사이트 암체의 하부에서 소규모의 암체를 이루기도 하고 드물게는 부석질 응회암의 부석편만을 선택적으로 치환시킨 형태로도 산출된다.

2) 이 진주암은 전형적인 진주암에 비해 반정과 암편을 많이 함유하고 상대적으로 낮은 SiO<sub>2</sub> 함유 수준을 보이는 광석으로는 다소 저급한 형태를 이룬다. 함유량에 있어서는 전형적인 진주암보다는 다소 높아서 송지암에 가까운 함유 수준(3.2~7.8 wt.%)을 나타낸다.

3) 이 진주암의 원암은 산출상태와 암석학적 특징에 의거하여 부석질 용결응회암과 유문데사이트인 것으로 해석된다. 특히, 화산유리 외에 부석편이 주요 원물질 역할을 한 것으로 판단된다.

4) 이 진주암은 망해산층군을 형성시킨 화성쇄설성 퇴적환경 하에서 속성작용에 의해서 생성된 것으로 여겨진다. 지하수와 지표수에 의한 2차적인 완만한 수화·변질 과정을 통해서 야기된 진주암화 과정에서 SiO<sub>2</sub>와 알칼리는 일률적으로 감소하는 경향을 나타낸다.

5) 진주암층에 의거한 기존의 층서 구분은 폐지되어야 할 것이다. 이 진주암층을 그 상위의 부석질 응회암층과 통합하여 '망해산층'과 같은 포괄적 지층 명으로 새롭게 층서체계를 설정해야 할 것이다.

## 사 사

이 연구는 2005년도에 이루어진 한국과학재단의 국가지정연구소재은행 사업(산업광물은행)의 일환으로 수행되었다. 이 연구에 필요한 화학분석(XRF 및 ICP/MS)을 대행해준 기초과학지원연구원 서울분소의 윤혜은 박사와 박찬수 박사를 비롯한 연구원들께도 감사한다. 이 논문의 심사를 맡아 비평을 해준 부산대학교 김진섭 교수와 윤성효 교수에게 감사한다. 또한 이

논문 준비 과정에서 야외 조사와 자료 정리를 도와준 강원대학교 광물학연구실의 학생들에게 사의를 표하고자 한다.

## 참 고 문 헌

- 노진환 (1989) 장기 지역 제 3기층의 불석화 작용. 지질학회지, 25, 30-43.
- 노진환 (2002) 국내산 벤토나이트의 광물학적 및 암석화학적 특징과 그 성인적 의미. 지질학회지, 38, 3, 441-455.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 板谷徹丸 (1992) 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구: 화산암류의 K-Ar연대. 광산지질, 25, 337-349.
- 진명식, 김성재, 신성천 (1988) K-Ar 및 희선트랙법에 의한 포항-감포일대 화산암류의 암석연령 측정 연구. 한국동력자원연구소, 연구보고서, KR-87-27, 51-88.
- Brees, R.O.Y. and Barker, J.M. (1994) Industrial Minerals and Rocks 6th Edition: Perlite. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., 735-749.
- Chang, L.L.Y. (2002) Industrial mineralogy: Perlite and pumice. Prentice Hall, Inc., 272-281.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J. (1979) The Interpretation of Igneous Rocks. Allen & Unwin, London, 450p.
- Dibble, W.E. and Tiller, W.A. (1981) Kinetic model of zeolite paragenesis in tuffaceous sediments. Clays and Clay Minerals, 29, 323-330.
- Epel'baum, M.B. and Salova, T.P. (1987) Experimental study of volcanic glasses: Water specification, Application to perlite genesis and vesiculation. 2nd International Conference on Natural Glasses, Charles University, Prague, 73-80.
- Fisher, R.V. and Schmincke, H.U. (1984) Pyroclastic Rocks. Springer-Verlag, Berlin, 327p.
- Friedman, I. and Smith, R.L. (1958) The deuterium content of water in some volcanic glasses. Geochimica et Cosmochimica Acta, 15, 218-228.
- Friedman, I., Smith, R.L. and Long, W.D. (1966) Hydration of natural glass and formation of perlite. Geological Society of America Bulletin, 77, 323-328.
- Harben, P.W. and Kuzvart, M. (1996) Global Geology: Perlite. BPC Wheatons Ltd, 280-287.
- Jezek, P.A. and Noble, D.C. (1978) Natural hydration and ion exchange of obsidian: and electron microprobe study. American Mineralogist, 63, 266-273.
- Koukouzas, N.K. Dunham, A.C. and Scott, P.W. (2000) Suitability of Greek perlite for industrial applications. Trans. Instn Min. Metall., 109, B105-111.
- Noh, J.H. (1985) Mineralogy and Genesis of Zeolites and Smectites from the Tertiary Tuffaceous rocks in Yeongil area. Ph.D. thesis, Seoul National University, 129p.
- Noh, J.H. and Boles, J.R. (1989) Diagenetic alteration of perlite in the Guryongpo are. Republic of Korea. Clays and Clay Minerals, 37, 47-58.
- Ross, C.S. and Smith, R.L. (1955) Water and other volatiles in volcanic glasses. American Mineralogist, 40, 1071-1089.
- Rotella, M. and Simandl, G. (2003) Geological fieldwork 2002: Marilla perlite-volcanic glass occurrence. British Columbia, British Columbia Geological Survey, 165-173.
- Shackley, D. and Allen, M.J. (1992) Mineral Industry International: Perlite and the Perlite Industry. Institution of Mining and Metallurgy, 1008, 13-22.
- Tateiwa, I. (1924) Geological atlas of Chosen, Ennish and Choyo Sheets. Geological Map Korea, 2, 42p.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20, 325-343.
- Won, C.K., Noh, J.H. and Lee, M.W. (1987) Formation and alteration of perlite in Guryongpo area. Journal Geological Society Korea, 23, 381-390.
- Wondraczek, L., Gross, G.-P., Heide, G., Kloess, G. and Frischat, G.H. (2003) Abbe numbers and refractive indices of tektites and volcanic glasses. Journal of Non-Crystalline Solids, 323, 127-130.

2005년 12월 6일 원고접수, 2005년 12월 14일 게재승인.