무주 왕정리 일대 구상 화강편마암의 성인과 형성시기

오창환^{1,2} · 이병춘^{1,2*} · 이기욱³

¹전북대학교 지구환경과학과, ²전북대학교 지구환경시스템 연구소,

³한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

The Origin and Age of the Orbicular Granite Gneiss in Wangjungri, Muju

Chang Whan Oh^{1,2}, Byung Choon Lee^{1,2*}, and Keewook Yi³

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

²The Earth and Environmental Science System Research Center, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

³Division of Earth and Environmental Sciences, Korea Basic Science Institute, Ochang 363-883, Korea

요 약: 무주군 왕정리 지역에서 구상 화강편마암이 초기 원생대 변성퇴적암류를 관입하는 우백질 복운모 화강암내에 포획체의 형태로 나타난다. 우백질 복운모 화강암의 전암성분 분석치와 SHRIMP 저어콘 연대측정 결과는 우백질 복운모 화강암이 1875±75 Ma에 대륙 충돌 환경에서 형성된 S-type 화강암임을 지시한다. 우백질 복운모 화강암내에 나타나는 구상 화강편마암으로부터 추출된 모나자이트에 대한 SHRIMP 분석에 의해 구상 화강편마암을 형성시킨 변성작용 시기가 1867±4 Ma임이 밝혀졌고 이 변성 연령은 우백질 복운모 화강암의 관입시기와 오차 범위내에서 유사하다. 이는 우백질 복운모 화강암 관입시 마그마내로 침강한 변성퇴적암이 마그마에 의해 650-740°C, 4-6.5 kbar 정도의 열변성작용을 받아 구상 화강편마암이 만들어졌음을 지시한다. 열변성 작용시 근청석을 주로 하는 구상 화강편마암의 핵부가 만들어졌고 이때 일부 구상 화강편마암에서는 석영 및 장석을 포함한 일부 광물이 용융되어 만들어진 우백질 용융체가 핵부를 빠져나온 후 핵부 주변에서 결정화하여 우백질 각부를 형성하였다. 구상 화강편마암이 형성된 후 마그마 분화작용 중 최후에 남아있던 열수가 구상 화강편마암에 침투하여 후퇴 변성작용을 일으키고 이때 근청석이 pinite화 되면서 세립의 녹니석과 견운모로 치환되었다. 무주 화강편마암은 퇴적기원의 변성암이므로 앞으로는 무주 화강암질 편마암으로 명명하는 것이 적합하다.

핵심어: 무주, 구상 화강편마암, SHRIMP, 대륙충돌, 열변성작용

Abstract: Orbicular granite gneisses occur as a xenolith within two-mica leucogranites, together with early Paleoproterozoic metasedimentary xenoliths, in Wangjeong-ri, Muju area. The whole-rock chemistries and SHRIMP zircon Pb/U ages of the leucogranites indicate that they are S-type granitoids formed in the continental tectonic setting at 1875±75 Ma. The SHRIMP age of monazites from the orbicular granite gneiss gives 1867±4 Ma as a metamorphic age which is similar to the intrusion age of the two-mica leucogranite within the error range. The similar ages between zircons and monazites represent that the orbicular granite gneisses formed by metamorphism during the intrusion of the two-mica leucogranite; the metasedimentary xenoliths which sank within the parent magma of leucogranites were metamorphosed into orbicular granite gneisses by thermal metamorphism (650-740°C, 4-6.5 kbar) due to the heat supplied from surrounding magma. During the thermal metamorphism, the core of orbicular granite gneiss mainly consisting of cordierite formed, and in some orbicular granitic gneisses, the leucocratic melt formed by melting of quartz and plagioclase in the core, squeezed out from core and crystallized around the core forming outer rim. The hydrothermal fluid at the late stage of magma differentiation penetrated into the

*Corresponding author

Tel: 063-270-3397

E-mail: geopet2@daum.net

orbicular granite gneisses resulting pinitization of cordierite into chlorite and sericite. As Muju orbicular granite gneiss was formed from sedimentary rocks, it is more appropriate to be called Muju orbicular granitic gneiss.

Key word: Muji, Orbicular granite gneiss, SHRIMP, Continental collision, Thermal metamorphism

서 론

소백산육괴의 중앙부에 해당하는 전라북도 무주군 왕정리 일대의 우백질 복운모 화강암내에 구상구조를 가지는 화강편마암이 산출하고 있다(Fig. 1). 구상구조란 구성 광물들이 동심원상 또는 방사상으로 배열된 구조를 보이는 것으로, 구상 구조를 가지는 암석은 국내외에서 매우 드물게 산출되며 미관상 아름답고 많은 관심의 대상이 되어왔으며 보존가치가 높다. 국내에서는 구상 구조를 갖는 암석으로 연구 지역인 무주군 왕정리의 구상 화강편마암을 비롯하여 경상북도 상주군 율령리의 구상화강암(천연 기념물 제 69호, Kim and Park, 1992; Lee *et al.*, 2008; Son *et al.*, 1980), 부산 전포동의 구상반려암(천연기념물 제 267호, Kim *et al.*, 1979; Son *et al.*, 1980), 부산 영도 일대의 구상혼펠스(Kim *et al.*, 1985)와 청송 주왕산 일대 구과상 유문암(Oh *et al.*, 2004) 등이 알려져 있다. 국내 구상암의 대부분이 화성기원입에 반해 무주 구상 화강편마암은 변성기원의 구상암(Kwon *et al.*, 1995)이어서 보존가치가 더 높다. 이러한 중요성이 인정되어 무주 구상 화강편마암은 천연기념물로 지정되었으나 현재는 도난을 우려하여 설치된 보호 철망 속에 흙물스럽게 방치된 상태이며 일반인은 물론 전문가들의 접근 또한 힘든 상태다. 따라서 무주 구상 화강편마암을 제대로 보존 관리하고 일반인과

전문가들의 접근성을 높여 천연기념물로서의 가치를 높이기 위한 주변 정비 계획 수립 및 시행이 절실하며 이를 위한 기초 단계로 무주 구상 화강편마암의 성인과 형성시기를 정확히 밝히는 것이 중요하다.

무주 구상 화강편마암은 Son *et al.*(1980)에 의해 처음으로 연구되었으나 연구대상이 전석이었으며 Kim and Lim(1992)에 의하여 처음으로 무주 구상 화강편마암 노두가 보고되었다. Son *et al.*(1980)의 경우 무주 구상 화강편마암은 변성퇴적암이 화강암질 편마암으로 변성되는 미그마타이트화 과정에서 형성되었으며 구상 조직의 중심 부분은 운모편암, 전기석 등 각종 포유물들을 중심으로 형성되었으며 그 이후 주변부가 형성되었다고 주장하였다. 이에 반해 Kwon *et al.*(1995)은 무주 구상 화강암의 중심부는 화강섬록암 관입시 포획된 이질기원의 퇴적암이 앰피볼라이트상에 해당하는 광역변성작용을 받을 때 일어난 변성분화 작용에 의하여 생성되었으며 후기에 유입된 유체들에 의해 일어난 후퇴변성작용에 의하여 근청석이 피나이트(pinite)화 되었다고 보고했다. 두 연구 모두 무주 구상 화강편마암의 형성시기를 선택캄브리아기로 추정하였다. 무주 구상 화강편마암 노두는 수십 m³의 제한된 규모의 노두로 나타나기 때문에 성인을 연구하기 위해서는 무주 구상 화강편마암 뿐 아니라 이를 포함하고 있는 주변의 우백질 복운모 화강암의 성인을 밝히는 것이 필요하다.

Fig. 1. The photographs of orbicular granite gneiss.

이 연구에서는 무주군 왕정리 일대에서 채취한 구상 화강편마암과 그 주변 암석 시료의 박편을 제작하여 암석기재학적 관찰을 실시하고 그 중 중요한 시료에 대하여 전자현미분석기(EPMA)를 이용한 광물성분 분석, 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP/MS)를 이용한 전암성분 분석 그리고 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP)를 이용한 연대 측정을 수행하여 무주 구상 화강편마암의 성인과 형성시기를 밝혔다.

지질개요 및 암석각론

영남육괴는 경기육괴, 남령육괴와 함께 한반도의 기저를 형성하고 있으며 주로 원생대 초기의 화성암과 변성퇴적암으로 구성되어있다. 영남육괴는 북쪽으로 옥천변성대와 태백산 분지에 의해 경기육괴와 구분된다. 영남육괴의 북동부는 소백산 육괴로 남동부는 지리산 육괴로 지칭한다. 최근 소백산육괴지역 북동부지역을 중심으로 한 저어콘 Pb/U 연령분석이 수행되었다(Cheong and Na, 2008; Kim, J.M. *et al.*, 2009; Kim, N.H. *et al.*, 2009, Kim *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2010). 분석결과 소백산 육괴에서 경기육괴나 남령육괴에서 발견되지 않는 20-19억년 경에 섭입대 환경에서 만들어진 화성암과 24-20억년 사이에

퇴적된 변성퇴적암이 나타나며 이들은 1890-1840 Ma사이에 변성을 받았고 변성시기와 거의 동일한 시기(1879-1840 Ma)에 변성퇴적암이 용융되어 S-type의 우백질 복운모 화강암이 형성되었다. 그리고 이들 변성작용과 S-type 우백질 복운모 화강암은 대륙충돌 환경에서 만들어졌을 가능성이 제시되었다(Cheong and Na, 2008).

전라북도 무주군 왕정리 일대는 소백산 육괴에 해당하며 기저부는 원생대 초기에 퇴적되어 변성된 것으로 추정되는 호상 흑운모 편마암으로 구성되어 있고 이들은 시대미상의 우백질 복운모 혹은 흑운모 화강암에 의해 관입되었다. 연구 지역의 원생대 초기의 호상 흑운모 편마암은 앰피블라이트상에서 상부 앰피블라이트상에 걸치는 전진변성작용을 받아 생성되었고 후기에 앰피블라이트 내지 녹색 편암상의 후퇴변성작용을 받은 것으로 알려져 있으나(Song *et al.*, 1989) 자세한 연구가 수행되지 않았다. 연구지역의 주변부인 전라북도 무주군 오산리 일대에는 원생대 초기로 예상되는 대리암과 흑색 천매암이 시대 미상의 우백질 복운모 혹은 우백질 흑운모 화강암에 관입되어 나타나고 있다. 그리고 일부 지역에서는 중생대 쥐라기 시기의 만계리 역암이 우백질 복운모 혹은 우백질 흑운모 화강암을 부정합으로 피복하고 있으며

Fig. 2. Simplified geological map of the Muju area within the Sobaeksan massif (modified after Kim, 1978).

중생대 백악기의 화산암류와 반상 화강암이 이들 암석들을 관입하였다(Fig. 2).

무주 구상 화강편마암은 크게 각 없이 핵부만 존재하는 TYPE-I(Figs. 3a)과 핵 주변부에 녹니석화 된 흑운모가 주를 이루는 유색의 각과 석영 및 사장석이 주를 이루는 무색의 각이 존재하는 TYPE-II로 구분된다(Figs. 3b). TYPE-I과 TYPE-2의 핵부는 *pinite* 화가 진행된 근청석으로 주로 구성되어있으며 사장석, 백운모, 흑운모, 석영, 정장석도 나타난다. 석영과 백운모는 불규칙한 반자형 내지 타형의 모양을 보이며 이는 핵부 형성시 일어난 용융에 의하여 광물의 입자들이 부분적으로 용융되었기 때문일 것으로 추정된다(Figs. 4a-d). TYPE-II에 나타나는 유색각의 경우 주로 녹니석화 된 흑운모로 이루어져 있고(Figs. 4e,f) 이를 다시 둘러싸고 있는 무색각의 경우 주로 석영과 사장석으로 이루어져 있다(Figs. 4g,h). 왕정리 일대의 호상 흑운모 편마암은 주로 석영, 사장석, 정장석, 흑운모로 구성되어있으며 호상구조를 잘 보여 주는 것이 일반적 특징이지만 우백질 복운모 혹은 우백질 흑운모 화강암의 인접 부분으로 갈수록 흑운모의 양이 줄어들고 호상구조가 불명확해지는 반면, 석영과 사장석의 양이 증가하고 방향성도 상당부분 불명확해지는 경향이 있다(Kwon *et al.*, 1995). 하지만 이들 우백질 복운모 혹은 우백질 흑운모 화강암내에 호상 흑운모 편마암을 포함한 변성퇴적암의 포획체가 루프 펜던트(roof pendant) 형태로 나타나는 것을 보아 우백질 복운모 혹은 우백질 흑운모 화강암이 원생대 초기의 호상 흑운모 편마암을 포함한 변성퇴적암류를 관입한 것으로 판단된다. 구상 화강편마암의 주변에는 우백질 복운모 화강암이 주를 이루고 있으며 부분

적으로 우백질 흑운모 화강암도 관찰된다. 일부 지역에서 후기에 생성된 것으로 추정되는 페그마타이트 형태의 합전기석 화강암이 관찰되기도 한다. 우백질 복운모 화강암은 주로 석영, 사장석, 정장석, 미사장석으로 이루어져있으며 백운모와 흑운모를 포함하고 있다. 우백질 흑운모 화강암내 광물군은 백운모를 제외하고는 우백질 복운모 화강암의 광물군과 동일하다. 페그마타이트 형태의 전기석 화강암의 경우 전기석과 석영, 백운모, 사장석, 정장석이 관찰 되었다. 구상 화강편마암은 우백질 복운모 화강암내에 매우 드물게 소규모로 나타난다.

광물 화학 및 암석화학

광물화학

광물의 화학조성을 알아보기 위하여 TYPE-I과 TYPE-II 구상 화강편마암을 대상으로 EPMA를 실시하였다. 전자현미분석은 한국기초과학지원연구원 전주센터에 설치되어 있는 일본 SHIMADZU사의 EPMA1600을 사용하였다. 분석 조건으로 가압전압은 15 kv, 빔(beam) 직경은 3 μm , 빔 전류는 20 nA이다. 기질효과 보정은 ZAF 방법을 사용하였다. 각 원소에 사용된 천연 혹은 합성 표준 시료는 Kynite(Si, Al), Orthoclase(K), Wollastonite(Ca), Pyrite(Fe), Albite(Na, Si, Al), MgO(Mg), TiO₂(Ti), Rhodonite(Mn)을 사용하였다. 각각의 광물에 대한 전자현미 분석 결과는 Table 1에 정리하였다.

근청석: 근청석은 무주 구상 화강편마암에서 핵부를 구성하고 있는 중요한 광물이다. 그러나 근청석 대부분이 후퇴변성작용시에 피나이트(*pinite*)화 작용을 강

Fig. 3. Photographs of Type I (a) and Type II orbicular granite gneisses (b).

Fig. 4. Photomicrographs of orbicular granite gneiss. (a,b) The core of Type-I orbicular granite gneiss. (c,d) The core of Type-II orbicular granite gneiss. (e,f) The inner mafic shell around core in Type-II orbicular granite gneiss. (g,h) The outer felsic shell in Type-II orbicular granite gneiss. Qtz=quartz, Bt=biotite, Mu=muscovite, Crd=cordierite, Pl=plagioclase, Chl=chlorite.

Table 1. The representative analysis compositions of plagioclase, muscovite and chlorite

Sample No.	Plagioclase in orbicular			Plagioclase in shell			Muscovite in orbicular			Muscovite in shell			Chlorite in shell					
	MJ1-04	MJ1-33	MJ1-34	MJ1-01	MJ1-06	MJ1-08	MJ1-01	MJ1-07	MJ1-12	MJ1-29	MJ1-03	MJ1-05	MJ1-09	MJ1-14	MJ1-06	MJ1-10	MJ1-23	MJ1-36
SiO ₂	68.10	61.42	60.67	61.79	60.86	62.87	45.63	43.23	45.53	45.04	46.35	47.88	46.31	45.76	24.61	23.77	23.30	26.40
TiO ₂	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.04	0.02	0.50	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	2.33	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	20.01	23.96	23.73	23.74	24.24	24.16	37.46	39.55	37.79	37.21	37.32	35.16	37.44	37.81	23.63	22.71	23.77	23.87
FeO ^T	0.18	0.06	0.02	0.07	0.02	0.11	0.62	0.51	0.74	0.80	0.71	1.17	0.65	0.75	22.75	22.88	22.29	20.20
MnO	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.02	0.38	0.37	0.37	0.35
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.43	0.51	0.41	0.53	0.47	1.02	0.46	0.42	13.48	13.24	13.46	12.48
CaO	0.01	4.20	4.08	4.52	4.46	4.63	0.00	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.04
Na ₂ O	10.82	9.26	9.22	8.43	9.57	8.12	1.10	2.26	0.80	0.80	0.93	0.93	0.81	1.02	0.00	0.01	0.01	0.14
K ₂ O	0.03	0.05	0.23	0.03	0.06	0.06	9.35	5.67	9.04	9.20	9.07	8.24	8.65	8.81	0.16	0.14	0.07	0.35
Total	99.17	98.95	97.96	98.59	99.26	99.97	94.60	94.28	94.34	94.10	94.86	94.40	94.34	94.61	85.02	85.46	83.29	83.83
Number of cations on the basis of 32 oxygens																		
Si	11.96	10.99	10.98	11.07	10.90	11.09	6.06	5.72	6.05	6.01	6.12	6.32	6.12	6.06	5.28	5.10	5.11	5.63
Al ^{IV}	4.14	5.05	5.06	5.01	5.11	5.02	1.94	2.28	1.96	1.99	1.88	1.68	1.88	1.95	2.72	2.90	2.89	2.37
Al ^{VI}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.92	3.89	3.95	3.87	3.92	3.79	3.95	3.95	3.25	2.84	3.24	3.63
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00
Fe ⁺³	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ⁺²	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.07	0.06	0.08	0.09	0.08	0.13	0.07	0.08	4.08	4.11	4.09	3.60
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.06
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.10	0.08	0.11	0.09	0.20	0.09	0.08	4.31	4.24	4.40	3.97
Ca	0.00	0.81	0.79	0.87	0.86	0.88	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Na	3.68	3.22	3.24	2.93	3.32	2.78	0.28	0.58	0.21	0.21	0.24	0.24	0.21	0.26	0.00	0.00	0.00	0.06
K	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	1.58	0.96	1.53	1.57	1.53	1.39	1.46	1.49	0.04	0.04	0.02	0.10
Number of cations on the basis of 28 oxygens																		
Si	11.96	10.99	10.98	11.07	10.90	11.09	6.06	5.72	6.05	6.01	6.12	6.32	6.12	6.06	5.28	5.10	5.11	5.63
Al ^{IV}	4.14	5.05	5.06	5.01	5.11	5.02	1.94	2.28	1.96	1.99	1.88	1.68	1.88	1.95	2.72	2.90	2.89	2.37
Al ^{VI}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.92	3.89	3.95	3.87	3.92	3.79	3.95	3.95	3.25	2.84	3.24	3.63
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00
Fe ⁺³	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ⁺²	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.07	0.06	0.08	0.09	0.08	0.13	0.07	0.08	4.08	4.11	4.09	3.60
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.06
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.10	0.08	0.11	0.09	0.20	0.09	0.08	4.31	4.24	4.40	3.97
Ca	0.00	0.81	0.79	0.87	0.86	0.88	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Na	3.68	3.22	3.24	2.93	3.32	2.78	0.28	0.58	0.21	0.21	0.24	0.24	0.21	0.26	0.00	0.00	0.00	0.06
K	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	1.58	0.96	1.53	1.57	1.53	1.39	1.46	1.49	0.04	0.04	0.02	0.10
X(Ab)=Na/(Na+Ca+K)×100, X(An)=Ca/(Na+Ca+K)×100, X(Or)=K/(Na+Ca+K)×100, FeO ^T =Fe as total FeO.																		
X _(Ab)	99.80	79.70	79.30	77.00	79.30	75.80												
X _(An)	0.10	20.00	19.40	22.80	20.40	23.90												
X _(Or)	0.20	0.30	1.30	0.20	0.30	0.40												

하게 받아 근청석의 정확한 성분을 분석하는 것이 가능하지 않은 상태이다. Kwon *et al.*(1995)는 핵부가 근청석으로만 이루어진 것으로 가정하고 핵부의 전암 분석치를 이용하여 계산해본 결과 X_{Mg} (=0.46-0.47)인 근청석이 인지되었다.

사장석: 무주 구상 화강편마암의 핵 부분과 무색의 각 부분에서 사장석의 성분은 Table 1과 같다. 핵으로만 이루어진 TYPE-I 구상 화강편마암의 경우 K, Na성분이 포함된 Anorthoclase(X_{Ab} =62.6, X_{Or} =35.7), Na성분이 많은 조장석(albite) (X_{Ab} =99.8, X_{An} =0.1)이 관찰되기도 하지만 대부분 사장석은 회조장석(oligoclase)(X_{Ab} =75.8-79.7, X_{An} =20.0-23.9) 영역에 도식된다. 무색의 각과 함께 나타나는 TYPE-II 구상 화강편마암의 경우 핵부와 각부의 구분 없이 대부분 사장석이 회조장석(oligoclase)영역에 도식된다(Fig. 5). 각 부분의 사장석의 Ca가 약간 높은 것은 사장석내의 Na 성분이 정장석으로 들어가 sanadine이 만들어지고 그 결과 사장석은 원래 성분보다 Ca 성분이 약간 높아졌을 가능성을 지시한다.

백운모와 녹니석: 백운모는 근청석 광물 내에 중립의 불규칙한 형태로 나타나며(Figs. 4a-d) 근청석의 피나이트(pinite) 작용 시에 근청석을 치환하는 세립으로 나타나는 경우도 있다. 이들 백운모에 대한 성

분은 Table 1에 나타내었다. 백운모는 핵부에서 각부로 진행하면서 Mg와 Fe의 성분변화가 뚜렷하게 관찰되며 이는 핵부에서 각부로 진행하면서 펜자이틱(Phengitic)조성이 증가한다는 Kwon *et al.*(1995)의 연구와 유사한 결과이다. 녹니석은 후퇴변성작용시 근청석이 pinite 작용을 받거나 변질 작용에 의하여 흑운모가 녹니석화 되면서 형성되었다. 이들 녹니석에 대한 성분은 Table 1에 나타나 있으며 피나이트(pinite)작용에 의한 녹니석과, 흑운모가 변질된 녹니석간의 성분차이는 크게 나타나지 않는다.

암석화학

구상 화강편마암의 핵부와 각부 그리고 구상 화강편마암을 포함하고 있는 주변 우백질 복운모 화강암 2개의 시료와 우백질 흑운모 화강암 3개, 함전기석 화강암 1개 시료에 대해서 주성분 원소, 미량원소 및 희유원소 분석을 실시하였다. 분석은 캐나다 Activation Laboratories Ltd.,에 설치된 유도결합 플라즈마 원자방출 분광기(FUS-ICP-AES; TermoHarrel-Ash ENVIRO II)와 유도결합 플라즈마 질량분석기(FUS-ICP/MS; Perkin Elmer Optima 3000)을 이용하였고 분석결과는 Table 2와 같다.

Fig. 5. The composition of feldspar from the core of Type-I and Type-II orbicular granite gneisses and the shell of Type-II orbicular granite gneiss in the ternary Ab-Or-An diagram.

Table 2. Whole rock compositions of orbicular granite gneiss and biotite, two-mica, tourmaline bearing leucogranite

Sample	TYPE-I orbicular		TYPE-II Core		TYPE-II Shell		Biotite leucogranite		Two-mica leucogranite		Tur bearing leucogranite	
	MJ26-3-1	MJ26-3-2	MJ0405	MJ26-3-1	MJ26-3-2		MJ24-4	MJ24-5	MJ21-1	MJ21-2	MJ20-1	
SiO ₂	47.20	46.49	46.5	62.19	61.06		69.29	72.23	73.18	73.93	73.89	
Al ₂ O ₃	27.63	28.58	27.8	22.89	22.88		16.60	15.39	13.20	13.62	14.57	
FeO ^T	7.16	7.51	8.57	1.24	1.42		2.31	1.74	2.30	1.28	0.94	
MnO	0.08	0.08	1.83	0.05	0.03		0.04	0.03	0.33	0.01	0.04	
MgO	4.32	4.32	4.42	0.38	0.6		0.91	0.60	0.27	0.23	0.16	
CaO	0.12	0.08	0.12	2.44	2.58		3.07	2.24	0.27	0.19	0.59	
Na ₂ O	0.93	1.08	1.17	6.19	5.59		4.39	4.06	2.99	2.30	3.41	
K ₂ O	5.25	5.13	4.62	1.77	1.92		1.76	2.81	5.10	5.49	3.72	
TiO ₂	0.03	0.03	0.06	0.05	0.03		0.38	0.28	0.15	0.09	0.03	
P ₂ O ₅	0.12	0.09	0.10	0.20	0.30		1.18	0.56	0.13	0.13	0.32	
LOI	5.53	5.81	5.81	1.85	2.12		1.18	0.56	0.77	1.1	0.96	
Total	98.37	99.20	101.00	99.25	98.53		101.11	100.5	98.69	98.37	98.67	
Trace elements(ppm)												
Be	126	116	96	11	13		5	7	2	2	5	
V	10	8	11	11	6		22	15	9	<5	<5	
Zn	160	140	190	<30	40		60	50	8	30	30	
Rb	556	463	399	127	140		78	144	282	255	203	
Sr	40	44	38	153	147		440	305	46	40	26	
Y	33	27.4	33.4	12.1	9		6.3	8.8	24	21.8	6.4	
Zr	35	29	58	8	5		115	105	112	58	22	
Nb	1.3	3.3	2.1	1.7	1.6		10.4	6.6	16	7.8	14	
Ba	159	147	78	94	62		491	584	235	210	36	
La	307	231	290	57.4	53.1		31.9	30.2	42.9	20	2.72	
Ce	622	460	552	111	103		62.7	57.3	94.80	42.3	5.07	
Nd	245	197	226	48.6	43.1		22.8	20.3	39.50	17.6	1.89	
Sm	47.2	38.1	44.6	10.4	8.94		3.44	3.35	9.15	4.47	0.57	
Eu	1.37	1.05	0.932	1.22	1.17		1.06	0.685	0.33	0.309	0.151	
Tb	3.33	2.69	3.46	1.02	0.74		0.29	0.33	0.95	0.68	0.15	
Yb	0.64	0.56	0.76	0.36	0.33		0.46	0.8	1.77	1.74	0.82	
Lu	0.066	0.059	0.085	0.042	0.041		0.065	0.127	0.26	0.262	0.147	
Hf	1	0.9	1.4	0.3	0.2		2.6	2.8	3.90	2.2	1	
Ta	0.2	0.14	0.23	0.07	0.15		0.99	2.6	1.60	0.86	8.96	
Pb	27	26	28	40	40		21	24	53.00	49	37	
Th	149	125	137	24.7	19		7.7	11.5	36.00	14.7	0.91	
U	17.6	16.8	18.9	4.27	3.57		0.86	1.33	10.00	14.1	3.69	

Tur : Tourmaline. The same abbreviations in Table. 1 are used.

주원소 분석

본 연구에서 분석한 시료의 수가 적다. 따라서 이에 기인한 주원소 분석의 신뢰도 향상을 위해 Kwon *et al.*(1995)이 실시한 구상 화강편마암의 핵부와 각부에 대한 주원소 분석 자료를 함께 도시하고 해석하였다(Fig. 6). 각부는 핵에 비하여 SiO_2 , Na_2O 와

CaO 성분이 높은 반면 K_2O , FeO^T , MgO , Al_2O_3 함량은 낮다. 이는 각부가 주로 석영과 사장석으로 이루어져 있으며 각부에 비해 핵부에 백운모와 흑운모가 상대적으로 많이 나타나는 것과 잘 일치한다. ACF($A=\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$), $C=\text{CaO}$, $F=\text{FeO}+\text{MnO}+\text{MgO}$) 삼각도 내에서 구상 화강편마암이 이질

Fig. 6. The major element compositions of the orbicular granite gneiss and two mica, biotite and tourmaline leucogranites in the SiO_2 vs major element(Na, K, Ca, Al, Fe, Mg) diagrams.

Fig. 7. ACF diagram showing the sedimentary origin for the orbicular granite gneiss. Pelite, Graywacke and Basalt-Andesite fields are from Winkler (1979). The same symbols in Fig. 6 are used.

암(pelite) 영역에 해당 하는 것으로 보아 기원암은 세일로 판단된다(Fig. 7). 우백질 복운모 화강암은 우백질 흑운모 화강암과 전기석 화강암에 비해 Na_2O 와 CaO 가 낮고 K_2O 함량이 높게 나타난다. 이는 우백질 복운모 화강암에는 정장석이 많이 나타나며 우백질 흑운모 및 전기석 화강암에는 사장석이 많이 나타나는 사실과 잘 일치한다(Fig. 6). 구상 화강편마암 핵부와 구상 화강편마암을 포함하고 있는 우백질 복운모 화강암의 주원소 분석 값을 비교 해보았을 때 구상 화강편마암이 우백질 복운모 화강암보다 Al_2O_3 , FeO^T , MgO 성분이 높으며 이는 구상 화강 편마암과 우백질 복운모 화강암의 근원암은 다름을 지시하는 것으로 판단된다(Fig. 6).

미량 원소 및 희유 원소

주원소 분석과 동일하게 무주 구상 화강편마암의 핵부와 각부 그리고 구상 화강편마암 주변의 우백질 복운모 화강암과 우백질 흑운모 및 전기석 화강암에 대한 미량 및 희유 원소 분석을 실시하였고 결과는 Fig. 8과 Table 2에 나타내었다. 무주 구상 화강편마암의 핵부에 비해 각부에서 Y, Rb, Zr 함량이 낮으며 Sr함량이 높다. 무주 구상 화강편마암에 비해 주변 화강암은 높은 Nb 값을 보이며 우백질 흑운모 화강암은 우백질 복운모 화강암에 비해 Ba, Sr 성분이 높으며 Rb, Y 성분이 낮다. 구상 화강편마암 주변의 우백질 복운모 화강암과 우백질 흑운모의 rare earth

elements (REE)를 콘드라이트에 표준화 시킨 REE패턴은 이들 내에 경희토류원소(light REE: La-Sm)가 부화되어 있음을 지시한다(Fig. 9a). 우백질 복운모 화강암의 경우 Eu에서 강한 부(-) 이상치가 나타난다. 반면 우백질 흑운모 화강암의 경우는 Eu의 부(-)이상이 나타나지 않고 있으며 실제 현미경 관찰에서도 우백질 흑운모 화강암의 경우 상대적으로 많은 양의 사장석이 관찰되었다. 원시맨틀 값으로 표준화한 Spider도표에서는(Fig. 9b) 우백질 복운모 화강암과 우백질 흑운모 화강암의 분석 결과 값이 상대적으로 차이가 나지만 전체적으로 보았을 경우 LIL 및 Th의 부화와 Ta, Nb의 상대적인 부(-)이상이 관찰되며 이는 화산호 환경에서 형성된 화강암의 일반적인 특징을 일치한다(Ding *et al.*, 2003). 우백질 복운모 화강암은 지구조 분별도 중 Rb-Yb+Na 분별도와 Rb/30-Hf-Ta와 Rb/10-Hf-Ta 분별도에서는 충돌 동시형(Syn-collision)이나 충돌형(collision) 지구조환경에 도시되는 반면 Rb-Y+Nb, Ta-Yb와 Ta-Y 분별도에서는 분석 결과가 충돌 동시형 지구조 환경뿐 아니라 화산호(Volcanic Arc Granite) 지구조 환경에도 도시된다(Fig. 10). 우백질 흑운모 화강암은 지구조분별도 중 Rb-Yb+Na와 Rb-Y+Nb 지구조 분별도에서는 주로 화산호 지구조 환경에 도시되지만 다른 지구조 분별도에서는 화산호, 충돌 후 혹은 판내부 환경에 분산되어 나타난다. 전기석 화강암은 마그마 분화의 최후 과정 생성물로 판단되어 최초 마그마 형성시 지구조 환경을 나타내지 못할 것으로 판단되어 지구조 분별도에 도시하지 않았다. 이들 화강암 대부분은 퇴적암이 용융되어 형성된 S-type 화성암에 해당한다(Fig. 11). 이러한 분석 결과는 연구 지역내 우백질 복운모 화강암과 우백질 흑운모 화강암 모두 섭입이 일어나던 화산호 환경에서 퇴적된 퇴적암이 대륙충돌시 혹은 대륙 충돌 후 용융되어 만들어진 마그마로부터 생성되었음을 지시한다. 우백질 복운모 화강암에 나타나는 Eu의 부(-)이상은 퇴적암 용융에 의한 마그마 형성시 퇴적암내의 사장석을 잔류물로 남겨놓음으로서 발생하였을 것으로 판단된다(Kim, N.H., *et al.*, 2009).

연대 측정

무주 구상 화강편마암과 주변의 화강암의 생성시기를 알아보기 위하여 충북 청원군 오창읍에 위치한 기초과학연구소 오창분원 초정밀분석동에서 SHRIMP를

Fig. 8. The trace element compositions of the orbicular granite gneiss and two mica, biotite and tourmaline leucogranites in SiO_2 vs trace element (Ba, Y, Nb, Rb, Zr, Sr) diagrams. The same symbols in Fig. 6 are used.

이용한 연대측정 분석을 실시하였다. 분석 대상은 무주 구상 화강편마암(MJ-1, 북위 $36^\circ 2'24.58$, 동경 $127^\circ 41' 36.29$)과 구상 화강암 주변에 산출하는 우백질 복운모 화강암(MJ101121-1, 북위 $36^\circ 2' 16.25$, 동경 $127^\circ 41' 7.37$)을 선정 했다.

구상 화강암의 핵부에서는 저어콘이 너무 적게 산출되었고 저어콘의 우라늄양이 높아 저어콘 연령을

측정할 수 없었다. 따라서 모나자이트를 선별하여 연대측정 분석이 이루어졌고, 구상 화강편마암을 포획하고 있는 우백질 복운모 화강암으로부터 저어콘을 추출하여 연령을 측정하였다. 모나자이트와 저어콘의 추출은 조분쇄기(Jaw crusher)로 분쇄 후 표준 망체를 이용해 180 메쉬에 해당하는 부분을 따로 분리했다. 분리된 시료를 패닝(panning)하여 중광물을 회

Fig. 9. (a) Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) rare earth element(REE) patterns and (b) Primitive mantle-normalized (Sun and McDonough, 1989) trace element distribution patterns of the two-mica, biotite and tourmaline leucogranites. The same symbols in Fig. 6 are used.

Fig 10. The tectonic settings of the two-mica and biotite leucogranites in (a) Y+Nb vs. Rb discrimination diagram (after Pearce *et al.*, 1984, Perace 1996), field are defined as follows: syn-COLG(syn-collisional granites), WPG(within-plate granite), ORG(ocean-ridge granite), VAG(volcanic-arc granite); (b) Yb+Ta vs. Rb discrimination diagram (after Perace *et al.*, 1984); (c) Hf-Rb/30-Ta*3 discrimination diagram (after Harris *et al.*, 1986); (d) Ta vs. Yb discrimination diagram (after Perace *et al.*, 1984); (e) Nb vs. Y discrimination diagram (after Perace *et al.*, 1984); (f) Hf-Rb/10-Ta*3 discrimination diagram (after Harris *et al.*, 1986). The same symbols in Fig. 6 are used.

수하고 실체 현미경을 이용하여 모나자이트와 저어콘을 추출 했다. 빔의 분석직경은 30 μm 내외이다. 모나자이트와 저어콘의 표준물질은 각각 USGS 표준

모나자이트와 FC-1을 사용했다. 모나자이트 분석 시에 에너지 필터를 이용하여 간섭 동위원소의 영향을 최소화 하였다. 분석을 위한 후방산란영상(BSE: back

Fig. 11. The compositions of two-mica and biotite leucogranites plotted in the A/NK vs. A/CNK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989). $A=Al_2O_3$, $N=Na_2O$, $K=K_2O$, $C=CaO$ (molar). Chappell and White (1974) classified I- and S-type granites. The same symbols in Fig. 6 are used.

scattered electron)과 음극발광영상(CL: cathodoluminescence image)는 한국 기초과학 지원 연구원 오창 캠퍼스 SHRIMP센터에서 얻었다. 연대측정 계산은 Isoplot/Ex와 Squid 프로그램(Ludwig, 2008, 2009)를 사용하여 처리했다.

무주 구상 화강편마암 내에서 나타나는 모나자이트의 크기는 $50\ \mu m$ 내외다. 대부분의 모나자이트는 구형이지만 일부 모나자이트에서는 각진 형태의 모나자이트가 관찰된다(Fig. 12a). 13개의 모나자이트에서 14점의 U-Pb 동위원소 분석을 실시하였고 Tera-Wasserburg 조화선상에 도시하였다(Fig. 11b). 모나자이트의 Th와 U의 함량은 각각 31361-42741 ppm과 3417-6073 ppm이며 Th/U 비율은 7.3-10.9이다. 모나자이트에서 얻어진 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 연령 범위는 1852 Ma-1872 Ma로 나타나며 $1867 \pm 4\ Ma(1s)$ 의 일치연령을 얻었다(Table 4; Fig. 12b). 연대 측정결과는 원생대 초기에 해당하며 무주 구상 화강편마암이 이 시기에 변성작용을 받아 형성되었음을 지시한다.

우백질 복운모 화강암 내에서 선별한 저어콘의 크기는 $70-130\ \mu m$ 내외이다. 저어콘 내부에는 상속핵이 관찰되며 상속핵은 주로 화성기원을 나타내는 줄무늬형과 동심원형 누대가 관찰된다. 저어콘의 주변부에서는 대부분 누대가 관찰되지 않으나 일부 저어콘에서는 동심원형 누대가 관찰된다(Fig. 12c). 21개의 저어콘에서 24점의 U-Pb 동위원소 분석을 실시했고

Tera-Wasserburg 조화선상에 도시 했다(Fig. 12d). 저어콘의 상속핵에서 Th와 U의 농도는 각각 56-931 ppm과 149-1442 ppm이며 Th/U 비율은 0.19-1.08로 나타났고, 저어콘의 주변부에서 Th와 U의 농도는 각각 66-1277 ppm과 1909-7933 ppm이며 Th/U 비율은 0.06-0.33으로 나타난다. 저어콘 내부 상속핵에서 얻어진 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 연령은 2256-1978 Ma와 1952-1822 Ma에 해당하는 두 가지 연령 군집을 보여준다(Table 4). 1952-1822 Ma 연령 군집에 속하는 상속핵 연령 자료와 저어콘 주변부에서 얻어진 연령 자료를 Tera-Wasserburg 조화선상에서 도시한 결과 $1875 \pm 75(1\sigma)$ 의 상부 교차점 연령과 $188 \pm 33\ Ma$ 의 하부 교차점 연령을 얻었다(Fig. 12d). 상속핵이 모두 화성기원의 조직을 보여주는 것으로 보아 $1875 \pm 75\ Ma$ 는 관입연령으로 판단되며 $188 \pm 33\ Ma$ 는 변성연령일 가능성이 있으나 그 의미가 확실치 않다. 그리고 상속핵에 나타나는 2256-1978 Ma의 오래된 연령은 S-type 화강암의 근원암인 퇴적암에 포함되어 있던 쇄설성 저어콘의 연령이었을 것으로 생각된다. 즉 우백질 복운모 화강암은 중생대에 변성작용을 받은 저온의 고원생대 S-type 화강암이며 그 결과 저어콘에서는 고원생대의 화성 시기 연령 이외에 화성암 생성시 용융되지 않은 화성암의 근원암인 퇴적암에 존재했던 쇄설성 저어콘의 연령도 나타난 것으로 판단된다.

무주 구상 화강편마암의 성인 모델

구상 화강암을 포함하고 있는 우백질 복운모 화강암은 약 1875 Ma에 형성되었으며 충돌 동시형 S-type 화성암의 특성을 보여주면서 동시에 섭입대 화성암과 유사한 미량원소 패턴을 보여준다. 이들 자료로부터 예상할 수 있는 우백질 복운모 화강암 형성시기의 지구조 환경은 다음과 같을 것으로 예상된다. 약 1875 Ma경 무주 지역에는 섭입환경이 조성되어 있었으며 전호분지(forearc)와 해구 지역에 퇴적물이 퇴적되고 있었다. 이들 퇴적물은 주로 화산호 지역에서 생성되는 화성암이 주요 공급원 이었다. 따라서 이들 퇴적물은 화산호 환경을 지시하는 희유원소와 미량원소 특성을 갖게 되었을 것이다. 그리고 그 이후 대륙 충돌이 일어났으며 대륙 충돌시 전호분지 지역에 퇴적되었던 퇴적물이 열과 압력을 받아 용융되며 S-type의 우백질 복운모 화강암이 형성하였을 것이다. 앞으로 이에 대해서는 추가적인 자세한 연구가 필요하다.

Table 3. The monazite SHRIMP ages of the orbicular granite gneiss

Spot	Pb* (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U (ppm)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	Apparent ages (Ma)		
											$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$
MJ-1 (orbicular granite gneiss.)													
MJ-1.1	1010	3417	34267	10.4	0.11423	0.37	5.373	1	0.3426	0.92	1899	1859.9	± 7.2
MJ-1.2	1290	4343	38439	9.1	0.11443	0.34	5.433	0.97	0.345	0.9	1911	1867.4	± 6.4
MJ-1.3	985	3360	32169	9.9	0.11411	0.37	5.317	1	0.3408	0.92	1890	1850.7	± 7.4
MJ-1.4	1060	3596	31361	9.0	0.11458	0.36	5.439	0.99	0.3443	0.92	1907	1873.1	± 6.5
MJ-1.5	1040	3534	33603	9.8	0.11348	0.37	5.315	1	0.3418	0.93	1895	1844.9	± 7.2
MJ-1.6	1600	5745	40790	7.3	0.11346	0.34	5.056	0.97	0.3237	0.91	1808	1852.8	± 6.2
MJ-1.7	1310	4558	40330	9.1	0.11341	0.36	5.244	1	0.3356	0.93	1866	1853.4	± 6.6
MJ-1.8	1100	3825	34222	9.2	0.11499	0.38	5.279	1	0.3347	0.95	1861	1870.7	± 7.3
MJ-1.9	1200	4161	39191	9.7	0.11411	0.38	5.279	1	0.3361	0.95	1868	1862.7	± 7.4
MJ-1.10	1180	4173	37488	9.3	0.11396	0.38	5.147	1	0.3289	0.95	1833	1855.8	± 7.4
MJ-1.11	1620	6073	42680	7.3	0.11416	0.36	4.856	1	0.3097	0.94	1739	1859.8	± 6.9
MJ-1.12	1110	3962	34522	9.0	0.11483	0.4	5.144	1.1	0.3256	0.96	1817	1873.1	± 7.7
MJ-1.13	1110	3845	40704	10.9	0.11434	0.37	5.276	0.99	0.3354	0.91	1865	1865.2	± 7.1
MJ-1.14	1310	4584	42741	9.6	0.11485	0.39	5.251	1.1	0.3333	1.1	1854	1868.5	± 7.9

Errors are 1-sigma, Pb indicate the common and radiogenic portions. Common Pb corrected using ^{204}Pb

Table 4. The zircon SHRIMP ages of the two-mica leucogranite

Spot	Pb* (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U (ppm)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$ ±%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ ±%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ ±%	Apparent ages (Ma)		Position					
								$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ±%	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ±%						
MJ101121-1(two-mica granite)															
MJ1121-1.1	10.7	380	94	0.26	0.1423	1.1	5.7	1.7	0.290	1.3	1644	±19	2256	±20	core
MJ1121-1.4	15.9	925	337	0.38	0.1385	3.1	3.1	4.4	0.163	3.1	975	±28	2209	±54	core
MJ1121-1.16	4.6	149	56	0.39	0.1230	0.8	6.2	1.7	0.366	1.5	2012	±25	2000	±14	core
MJ1121-1.22	3.4	385	180	0.48	0.1318	1.0	4.0	2.2	0.217	2.0	1268	±23	2122	±18	core
MJ1121-1.3	10.9	681	225	0.34	0.1218	0.4	3.7	1.3	0.220	1.3	1282	±15	1983	±8	core
MJ1121-1.5	3.2	448	83	0.19	0.1163	0.5	4.2	3.8	0.260	3.8	1488	±50	1900	±10	core
MJ1121-1.7	42.7	300	294	1.01	0.1215	0.5	6.2	1.4	0.372	1.3	2041	±23	1978	±9	core
MJ1121-1.10	4.7	441	60	0.14	0.1191	0.4	5.1	1.8	0.309	1.7	1737	±26	1943	±8	core
MJ1121-1.15	7.2	278	89	0.33	0.1215	0.6	5.3	1.5	0.315	1.4	1764	±21	1978	±10	core
MJ121-1.19	8.0	358	179	0.51	0.1196	0.6	4.9	1.5	0.298	1.4	1680	±20	1950	±11	core
MJ1121-1.20	20.6	1442	931	0.67	0.1197	1.6	1.5	2.5	0.090	1.9	555	±10	1952	±29	core
MJ1121-1.23	14.3	612	425	0.72	0.1171	0.5	3.8	2.0	0.236	1.9	1364	±23	1913	±10	core
MJ1121-1.8	13.5	1087	325	0.31	0.1137	2.2	3.7	3.6	0.236	2.8	1367	±34	1859	±40	core
MJ1121-1.11	17.2	570	260	0.47	0.1155	0.5	4.1	1.4	0.255	1.3	1464	±17	1887	±8	core
MJ1121-1.12	8.1	844	185	0.23	0.1114	1.3	3.6	2.2	0.233	1.8	1349	±22	1822	±23	core
MJ1121-1.13	37.2	792	616	0.80	0.1146	1.5	4.0	2.8	0.251	2.4	1442	±31	1874	±27	core
MJ1121-1.17	38.5	602	631	1.08	0.1159	0.6	3.7	1.4	0.231	1.3	1338	±16	1894	±11	core
MJ1121-1.6	5.6	996	203	0.21	0.0964	0.8	2.0	1.6	0.151	1.3	905	±11	1555	±15	core
MJ1121-1.2	22.7	1909	609	0.33	0.0989	1.0	2.2	3.3	0.162	3.1	965	±28	1604	±20	rim
MJ1121-1.9	6.6	2712	267	0.10	0.0986	5.5	1.2	5.6	0.090	1.4	556	±7	1597	±102	rim
MJ1121-1.14	4.7	1224	66	0.06	0.0925	0.8	1.6	1.5	0.124	1.3	755	±9	1478	±15	rim
MJ1121-1.18	9.3	7933	930	0.12	0.0618	2.0	0.3	3.0	0.030	2.2	193	±4	666	±43	rim
MJ1121-1.21	13.6	4556	1277	0.29	0.0650	5.6	0.4	5.9	0.043	2.0	269	±5	775	±117	rim
MJ1121-1.24	11.7	3039	630	0.21	0.1063	0.8	1.8	1.5	0.123	1.3	746	±9	1738	±14	rim

The same abbreviations in Table 3 are used.

Fig. 12. The concordia plots of SHRIMP U-Pb isotopic analyses. (a) monazite BSE(back scatter electron) images from orbicular granite gneisses, (b) the monazite ages from orbicular granite gneisses plotted in the Tera-Wasserburg idagram, (c) zircon CL(cathodoluminescence) images from two-mica leucogranites and (d) the zircon ages from two-mica leucogranites plotted in the Tera-Wasserburg diagram. The circles and numbers indicate the analyzed positions and resulted SHRIMP ages.

구상 화강암의 형성 모델을 Fig. 14와 같이 제시할 수 있다. 앞서 설명한 지구조 환경에서 형성된 우백질 복운모 화강암내로 이질기원의 변성퇴적암이 붕괴되어 침강하게 되고 이들이 마그마가 공급하는 열에 의해 변성작용과 부분용융을 받게 된다. 이때에 이질기원의 변성퇴적암 포획물이 Spear와 Cheney (1989)가 제시한 반응식 (1)에 의해 약 560-620°C, 2.5-6 kbar의 변성 환경에서 근청석으로 주로 구성된 핵부로 변성된다(Fig. 13).

그 후 지속적인 열과 압력의 증가로 인해 약 620-740°C의 변성조건에서 Spear와 Cheney(1989)가 제시한 반응식 (2)가 일어나 근청석과 정장석이 형성되었다.

Fig. 13. The cordierite forming reactions in the P-T grid for pelites in the KFMASH system (after Spear and Cheney, 1989) and AFM and AKM triangular phase diagrams showing stable mineral assemblages of orbicular granite gneiss (Black triangles) in each field. The melting reaction of the H₂O saturated granite is from Spear and Cheney (1989). The arrow indicates the P-T path of the thermal metamorphism experienced by the Orbicular granite gneiss. The thick outlined area is the peak metamorphic condition. The same abbreviation in Fig. 4 are used. Sill = sillimanite, Ky = kynite, Grt = garnet, St = staurolite.

즉 구상 화강편마암의 핵부는 점진적인 변성작용에 의해 많은 양의 근청석으로 구성된 것으로 보인다 (Fig. 13).

구상 화강편마암내 불규칙한 형태로 나타나는 우백질 부분은 (2)번 변성작용이 일어난 후 변성 조건이 물이 포화된 화강암 용융되는 조건에 도달하여 암석 내 석영과 장석등이 용융되어 용융체가 형성된 것을 나타내는 것으로 생각된다 (Fig. 13). 이때 형성된 용융체의 일부는 주변의 마그마로부터 가해지는 압력에

의하여 핵부 바깥으로 빠져나가 핵부 주변에서 결정화되어 주로 석영, 사장석으로 구성되며 약간의 정장석을 포함한 우백질각을 형성하였다. 이 시기의 변성 온도 압력 조건은 약 650-740°C, 4-6.5 kbar (Fig. 13). 이러한 형성 과정은 알제리아 Tuareg shield의 구상 화강암에서도 보고되었다 (Abdallah *et al.*, 2007). 그 결과 각부는 핵에 비하여 SiO₂, Na₂O, CaO, Sr 성분이 높은 반면 K₂O, FeO^T, MgO, Al₂O₃ 함량은 낮다 (Fig. 4).

Fig. 14. The petrogenesis model for the Muju orbicular granite gneiss. The Muju orbicular granite gneiss was formed from sedimentary xenolith which sank in the two-mica leucogranite magma and then was thermally metamorphosed with partially melting by the heat supplied from two-mica leucogranite.

구상 화강편마암이 형성된 이후 후퇴변성작용 기간에 주변 화강암으로부터 공급된 잔류 열수 등에 의해 근청석이 후퇴 변성작용을 받아 *pinite*화 되었으며(반응식 3, Marchand *et al.*, 1982) 이로 인하여 근청석이 세립의 녹니석과 백운모로 치환되었다.

$\text{Cordierite(근청석)} + \text{Biotite(흑운모)} + \text{H}_2\text{O} = \text{Chlorite(녹니석)} + \text{Muscovite(백운모)}$

(3)

결론과 토의

무주 왕정리 구상 화강편마암은 변성퇴적암이 우백질 화강편마암화 작용을 받아서 형성되었다는(손치무 외, 1980) 성인과 화강섬록암내에 포획된 이질기원의 퇴적암이 광역변성 작용을 경험하면서 형성되었다는(Kwon *et al.*, 1995) 성인과 다르게 다음과 같은 과정을 거쳐 형성되었다. 소백산 육괴 지역에 섭입대가 형성되어 있었음과 1890-1840 Ma 경에는 대륙 충돌이 일어나 우백질 복운모 화강암이 형성되고 광역적인 변성작용이 일어났을 가능성을 제시하고 있다(Cheong and Na, 2008; Kim, J.M. *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012). 이러한 기존 연구와 본 연구 결과를 종합해 볼 때 소백산 육괴의

일부인 왕정리 지역이 약 1900 Ma 이전에 섭입지역의 화산호 앞에 위치한 전호(*forearc*) 분지였으며 이 분지에는 화산분출시 형성된 화성암들이 풍화 침식되고 운반되어 퇴적되었다. 그 이후 대륙충돌이 1875 Ma 이전에 일어났고 이때 전호(*forearc*)에 퇴적된 퇴적암들이 대륙충돌에 의해 퇴적암이 지하 깊은 곳에 매몰되어 높은 온도와 압력을 받음으로서 광역적인 변성작용을 받고 이때 일부 퇴적암이 용융되어 *S-type* 우백질 복운모 화강암을 형성한 마그마를 만들었다. 이때(1867±4 Ma) 이질기원의 변성퇴적암이 마그마내로 침강한 후 마그마 내에서 650-740°C, 4-6.5 kbar 정도의 열변성작용을 받아 구상 화강편마암으로 변성되었다. 열변성작용시 근청석을 주로하는 구상 화강편마암의 핵부가 만들어졌고 석영과 사장석을 포함한 일부 광물이 용융되어 만들어진 우백질 용융체가 주변 마그마의 압력에 의해 핵부를 빠져나온 후 핵부 주변에서 결정화하여 우백질 각부를 형성하였다. 구상 화강편마암이 형성된 후 마그마 결정작용 중 최후에 남아있던 열수가 구상 화강편마암에 후퇴 변성작용을 일으키고 이때 근청석이 피나이트(*pinite*)화 되면서 세립의 녹니석과 백운모로 치환되었다. 무주 화강편마암은 퇴적기원의 변성암이므로 앞으로는 무주 화강암질 편마암으로 명명하는 것이 적합하다.

사 사

이 연구는 무주군청의 무주 구상 화강편마암 분포지 조사 학술 용역의 지원으로 수행되었으며 논문 작성에 도움을 주신 안건상 교수님과 익명의 심사자께 감사를 드린다.

References

- Abdallah, N., Liegeois, J.P., De Waele, B., Fezaa, N. and Ouabado, A., 2007, The Temaguessine Fe-cordierite orbicular granite(Central Hoggar, Algeria): U-Pb SHRIMP age, petrology, origin and geodynamical consequences for the late Pan-African magmatism of the Tuareg shield, *African Earth Sciences*, 49, 153-178.
- Chappell, B.W and White, A.J.R., 1974, Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8, 173-174.
- Cheong, W.S. and Na, K.C., 2008, Origin and evolution of leucogranite of NE Yeongnam Massif from Samcheok Area, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 16-35 (in Korean with English abstract).

- Ding, L., Kapp, P., Zhong, D. and Deng, W., 2003, Cenozoic Volcanism in Tibet: Evidence for a Transition from Oceanic to Continental Subduction. *Journal of Petrology*, 44, 1833-1865.
- Harris, N.B.W., Perace, J.A. and Tindle, A.G., 1986, Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M.P., Reis, A.S.(Eds.), *Collision Tectonics: Geological Society of London, Special Publication*, 67-81.
- Kim, H.S., Kim, J.S. and Kim, H.M., 1979, Orbicular Gabbroic Rocks from the Hwangryeong Mountain District, Pusan, Korea. *Journal of the Geological society of Korea* 15, 295-313.
- Kim, H.S., Kim, Y.K., Jeong, H.J. and Kim, H.M., 1985, Orbicular hornfels from the yeongdo district, pusan, korea. *Journal of the Geological society of Korea* 21, 50-62.
- Kim, H.S. and Lim, S.T., 1992, The petrological study on the Muju orbicular gneiss. Natural monument(fossil, rock) and dinosaur tracks report, *Journal of the Geological society of Korea*, 157-185.
- Kim, H.S. and Park, C.S., 1992, Petrological and geochemical study on the Sangju orbicular diorite. Natural monument(fossil, rock) and dinosaur tracks report, *Journal of the Geological society of Korea*, 101-131.
- Kim, J.M., Cho, M.S. and Cheong, W.S., 2009, SHRIMP zircon and monazite U-Pb ages of high-temperature/low-pressure metamorphism and granitic magmatism in the northern Yeongnam Massif (in Korean). *Annual meetings of Geological Society of Korea, Cheju, Korea. (October)*, 119p.
- Kim, N.H., Song, Y.S., Park, K.H. and Lee, H.S., 2009, SHRIMP U-Pb zircon ages of the granite gneiss from the Pyeonghae Area of the northeastern Yeongnam Massif (Sobaeksan Massif). *Journal of the Petrological Society of Korea*, 18, 31-47 (in Korean with English abstract)
- Kim, N.H., Cheong, C.S., Park, K.H., Kim, J. and Song, Y.S., 2012, Crustal evolution of northeastern Yeongnam Massif, Korea, revealed by SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry. *Gondwana Research*, 21, 865-875.
- Kwon, W.Y., Kim, H.S. and Yi, S.K., 1995, Petrogenesis of the orbicular gneiss in the Muju area. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 4, 186-200.
- Lee, H.S., Park, K.H., Song, Y.S., Kim, N.H. and Orihashi, Y., 2010, LA-ICP-MS U-Pb zircon age of the Hongjesa Granite in the Northeast Yeongnam Massif. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 103-108 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.G., Asahara, Y., Tanaka, T., Kim, N.H., Kim, K.H., Yi, K., Masuda, A. and Song, Y.S., 2010, La-Ce and Sm-Nd isotopic systematics of early Proterozoic leucogranite with tetrad REE pattern. *Chemical Geology*, 276, 360-373.
- Lee, S.H., Jang, Y.D. and Kim, J.J., 2008, The petrological and mineralogical study on the Sangju orbicular granite. *Proceedings of the Annual Joint Conference, Petrological Society of Korea and Mineralogical Society of Korea, Busan, Korea. (May)*, 93.
- Ludwig, K.R., 2008, *Isoplot 3.6. A User's Manual*. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 2455 Ridge Road, Berkeley, Ca 94709, USA, 78p.
- Ludwig, K.R., 2009, *SQUID 2.50. A User's Manual*. Berkeley Geochronology Center, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA, 102p.
- Marchand, J., Bossiere, G. and Leyreloup, A., 1982, Pinite and Pseudo-"Glass" in High-Grade Metamorphic Gneisses, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 79, 439-442.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101, 635-643.
- 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 the Petrological society of Korea*, 13, 103-118.
- Perace, J.A. Harris, N.B. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 957-983.
- Perace, J.A., 1996, Source and setting of granitic rocks. *Episodes* 19, 120-125.
- Son, C.M., Lee, D.S., Jeong, J.G. and Kang, J.N., 1980, Petrographic Study on the Orbicular rocks in Korea. The report for conservation of Korean nature, 5-61p.
- Song, Y.S. and Lee, S.M., 1989, Petrology of the precambrian metamorphic rocks from the central sobaeksan massif, korea. *Journal of the Geological society of Korea*, 25, 451-468.
- Spear, F.S. and Cheney, J.T., 1989, A petrogenetic grid for pelitic schists in the system SiO_2 - Al_2O_3 - FeO - MgO - K_2O - H_2O . *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 101, 149-164.
- Sun, S.S. and McDough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematic of oceanic basalt: implications for mantle composition and process. In: Saunders, A.D., Norry, M.J.(Eds.), *Migmatism in the Ocean Basin: Geological Society of London, Special Publication*, 42, 528-548.
- Winkler, H.G.F., 1979, *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer-Verlag, 334.

2013년 3월 11일 접수
 2013년 3월 25일 심사개시
 2013년 5월 22일 채택