

## 강화 석모도 화강암류와 온천수의 지구화학: 온천수의 기원규명을 위한 Sr 동위원소의 응용

이승구\* · 김통권 · 이진수 · 송윤호

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

## Rb-Sr Isotope Geochemistry in Seokmodo Granitoids and Hot Spring, Gangwha: An Application of Sr Isotope for Clarifying the Source of Hot Spring

Seung-Gu Lee\*, Tong-Kwon Kim, Jin-Soo Lee and Yoon-Ho Song

Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,  
Daejeon 305-350, Korea,

**요약:** 인천광역시 강화군의 석모도는 주로 흑운모 화강암과 각섬석 화강섬록암으로 구성되어 있으며, 각섬석 화강섬록암에 의해 흑운모 화강암은 남과 북으로 양분된다. 남쪽의 흑운모 화강암 지역에서는 수온이 72°C에 달하는 Na-Cl형의 고온성 온천이 산출된다. 흑운모 화강암의 Rb-Sr 전암연대는 각섬석 화강섬록암을 기준으로 북쪽에 분포하는 흑운모 화강암은  $207 \pm 70$  Ma이고 Sr 초기치는 0.7132이다. 그리고 주로 남쪽에 분포하는 흑운모 화강암은  $132 \pm 50$  Ma이고 Sr 초기치는 0.7125로서 양 화강암체가 지각기원물질의 마그마로부터 생성되었음을 지시해준다. 남북의 흑운모 화강암과 각섬석 화강섬록암체는 칼크-알칼리계열의 마그마로부터 분화되어온 특징을 보여주며, Rb과 Y+Nb 그리고 Yb+Ta의 상관관계도는 충돌대환경에서 마그마가 형성되었음을 지시해준다. 2005년과 2006년의 3월에 채취된 온천수의 Sr 동위원소비는 0.714507와 0.714518로서 거의 변화가 없고, 이 값은 남쪽에 흑운모 화강암의 Sr 동위원소비의 현재값과 거의 일치한다. 이와 같은 온천수의 Sr 동위원소비는 석모도내 온천수가 흑운모 화강암과 밀접한 연관성이 있음을 지시해주는 것이다.

**핵심어:** 석모도, 흑운모 화강암, 각섬석 화강섬록암, 고온성 온천, Rb-Sr 동위원소계

**Abstract:** The Seokmodo consists mainly of biotite granite and granodiorite. The biotite granite is divided into the south and the north part by granodiorite. There occurs high temperature hot spring of which temperature is up to 72°C. The Rb-Sr isotopic data for the biotite granite define whole-rock isochron ages of  $207 \pm 70$  Ma with initial Sr isotopic ratio of 0.7132 in north part and  $132 \pm 50$  Ma with initial Sr isotopic ratio of 0.7125 in south part, suggesting that the magma be derived from the crustal source material. The geochemical characteristics of the biotite granite and hornblende granodiorite indicate that they were crystallized from calc-alkaline under syn-collisional tectonic environment. The samples of hot spring were collected at March 2005 and March 2006. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of hot spring are 0.714507 and 0.714518, respectively and correspond to those of the granite being occurred at the south part. The similarity of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios between the granite and hot spring strongly suggests that the hot spring might be derived from the Seokmodo biotite granite.

**Key words:** Seokmodo, biotite granite, granodiorite, high temperature hot spring, Rb-Sr and Sm-Nd isotope system

\*Corresponding author: Tel: 82-42-868-3376, E-mail: sgl@kigam.re.kr

## 서 언

남한에 분포하는 40°C 이상의 고온성 온천지역은 80°C 정도의 수온을 갖는 부곡을 위시하여 약 15개 정도가 알려져 있으며, 이 고온성 온천수는 중생대 화강암류 분포지역에 위치한다. 우리나라의 고온성 온천수의 광역적인 지구화학적 특성에 관해서는 신병우와 최승(1973)의 연구결과를 포함하여 최근에는 김규한과 최현정(1998)에 의해 보고된 바 있다. 그러나 신병우와 최승(1973)의 경우 탄산이온류( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ )에 관한 자료가 결핍되어 있고, 김규한과 최현정(1998)의 경우도  $\text{CO}_3^{2-}$ 에 관한 자료가 없는 관계로 양이온과 음이온의 당량비(대부분의 시료에서 50% 이상의 차이를 보여주며, 일부시료에서는 3배 정도의 차이가 계산됨)에 있어서 너무 큰 차이를 보여준다. 이외에 최근에는 지역적으로 혹은 개별온천수에 대한 지구화학적 자료가 비교적 활발하게 보고된 바 있다(Yum and Kim, 1999; 정복선 외, 2001; 고용권 외, 2003; 정찬호 외, 2004; Park et al., 2004). 그러나 우리나라의 고온성 온천수의 전반적인 지구화학적 특성과 고온성 온천수가 분포하고 있는 주변 화강암과의 상관성에 대한 체계적인 연구보고는 아직 부족한 편이라고 볼 수 있다. 그리고 우리나라의 고온성 온천의 수온을 살펴보면 백악기 화강암류가 분포하는 지역에서 산출되는 온천(예: 부곡온천, 해운대온천 및 동래온천 등)의 수온은 60-78°C로 쥬라기 화강암류가 분포하는 지역에서 산출되는 온천수(온양, 유성, 덕산, 속초 등)의 45-55°C에 비해 10°C 이상 높은 경향을 보여준다. 이와 같은 화강암분포와 온도와의 경향 또한 우리나라 온천수의 열원을 밝혀낼 수 있는 간접적인 자료로 활용되어질 수 있다고 본다.

최근에 강화도에 인접한 석모도 남쪽 매음리(Fig. 1)의 남쪽 흑운모 화강암지역) 일대에서, 심도 약 750-1280 m의 시추공들로부터 수온이 62-72°C에 달하는 고온성 온천수가 발견되었다. 그리고 이들 온천 시추공에서의 물리검층(온도 및 전기검층)에 의하면 지온증가율이 45-46.7°C/km에 달하는 고온성의 대수층이 존재하는 것이 밝혀졌다(송윤호, 2005). 이와 같은 고온의 온천수는 한반도 중부 이북지역에서는 비교적 고온의 수온으로서, 앞의 절에서 언급한 화강암의 시대별 분포와 비교해 볼 때 백악기 화강암류와의 연관성을 고려해 볼 수 있다. 특히 최근에 발견된 강화·온수리 지질도폭(1:50,000)에서 석모도에 백악기의 각섬석 화강섬록암이 분포한다고 보고한 바 있다(황재하와 김유홍, 2005). 석모도의 온천수는 중립질 흑운모 화강암과 각섬석 화강섬록암의 경계부분에서 산출되고 있다(Fig.

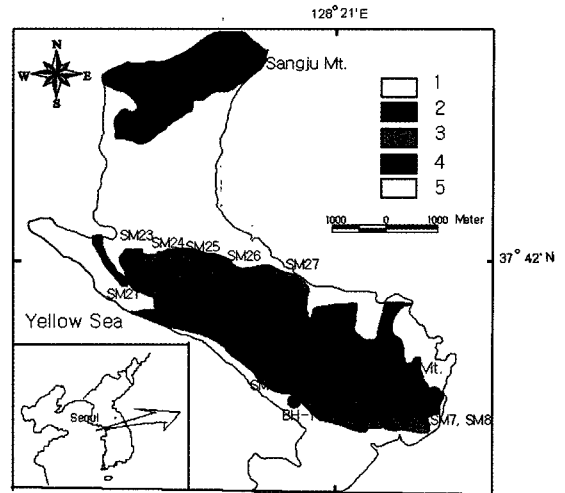


Fig. 1. Simplified geologic and sample location map of the Seokmodo, Gangwha. 1: alluvium, 2: Hornblende granodiorite, 3: Biotite granite, 4: Porphyritic biotite granite, 5: Jangbong schist. ■: rock sample, ●: hot spring, ▲: mountain.

1의 BH1). 이 논문에서는 강화도 화강암류의 화학조성(주성분, 희토류원소 및 Rb-Sr 동위원소계)과 온천수의 화학조성을 보고하고자 한다. 그리고 이들 화강암류와 온천수의 지구화학적 특성 특히 Sr동위원소비의 지구화학적 특성을 토대로 서로간의 상관성에 대해서 살펴 보고자 한다.

## 지질개요 및 시료 특성

연구지역은 행정구역상 인천광역시 강화군 강화읍 삼산면의 석모도이다. 이 석모도는 강화도의 산계의 연장선상에 놓이며, 석모도의 남서부 해안가에는 선캄브리아기의 장봉편암이 분포하고 이를 순차적으로 쥬라기의 반상흑운모 화강암, 중립질 흑운모 화강암(이하 흑운모 화강암), 각섬석 화강섬록암이 관입하여 분포한다. 황재하와 김유홍(2005)의 각섬석 화강섬록암내 제어콘의 SHRIMP 연대측정에 의하면  $108.1 \pm 1.1$  Ma로서 백악기의 화강암에 속한다. 주변의 통진도폭(최위찬 외, 1997)에 의하면 중립질의 흑운모 화강암은 섬장암을 관입하고 홍색장석화강암에 의해서 관입당한다. 이 도폭의 섬장암과 홍색 장석화강암내 흑운모의 K-Ar 연대측정에 의하면 중립질의 흑운모 화강암의 냉각 연대는 130 Ma에서 193 Ma사이인 것으로 추정된다.

흑운모 화강암은 석모도의 중앙부와 남부에 분포한다. 각섬석 화강섬록암을 기준으로 했을 때, 암상차이

에 의해서 북쪽 암체와 남쪽 암체로 나눌 수 있다. 북쪽 암체는 입자의 크기가 2-3 mm인 중립질 흑운모화강암이 주를 이루는 반면에, 남쪽 암체는 중세립질이 우세하며, 해명산 동측 능선에서는 일부 반상질의 화강암이 산출된다. 광물조성에 있어서도 흑운모의 비율이 북쪽암체에 비해 높고 일부 남쪽의 흑운모 화강암은 각섬석도 포함한다. 구성광물은 주로 석영, 사장석, 미사장석, 정장석과 흑운모이다. 부구성광물에는 저어콘, 인회석, 갈렙석, 불투명광물 등이 관찰된다. 2차광물로는 녹리석과 백운모가 흑운모 혹은 각섬석 주변에서 관찰된다.

각섬석 화강섬록암은 석모도의 중앙부에 분포하며, 중립질 내지 조립질의 각섬석을 많이 함유하고, 흑운모의 함량은 적은 편이다. 그리고 수 cm에서 수 m 크기의 염기성 미립 포유암(mafic microgranular enclave, MME)을 많이 포함하고 있다. 전체적으로 대부분이 타원형이고, 이 포유암들은 산삼면 석포리(시료 SM7, 8의 북쪽)의 골짜기에서는 포유암들이 일부 방향성을 보이기도 한다. 각섬석 화강섬록암의 주구성광물은 석영, 각섬석, 흑운모, 사장석으로, 대개 자형내지 반자형으로 산출된다. 포유암의 구성광물도 모암인 각섬석 흑운모 화강암과 유사하지만, 모암에 비해 유색광물의 함량이 더 많고 더 세립질이다.

반상 흑운모화강암은 석모도 북쪽의 상리, 하리지역에 분포한다(Fig. 1), 반정의 크기는 20-35 mm 정도이다. 석모도 상주산 동측의 반상 흑운모화강암체는 약한 엽리의 발달이 관찰되는데, 황재하와 김유홍(2005)은 이 엽리가 판입당시 형성되었던 것으로 해석하였다.

## 시료 및 분석방법

암석내 주성분원소, 희토류원소 그리고 기타 미량원소는 한국지질자원연구원의 XRF(Shimadzu MXF-2300)와 ICP-MS(Elan 6100, Perkin-Elmer Ltd.)를 이용하여 분석하였다. 주성분의 분석오차는 3% 이내이고 미량원소와 희토류원소의 경우 분석오차는 10% 이내로 판단된다. 희토류원소의 실험방법은 김건환과 음철현(2004)에 기재되어 있다. 온천수의 경우, 현장에서 온도, 수소이온농도, 전기전도도, 탄산이온 농도 등을 측정하였으며, 0.45  $\mu\text{m}$ 의 셀룰로오즈 여과지로 거른 후, 음이온, 양이온(희토류원소 포함)용으로 분리하여 시료를 채취하였다. 이 때 1개의 시료는 고순도의 진한 질산으로 처리하여(pH 2 이하) 박테리아 증식, 산화반응 차단 및 양이온의 시료채취용기벽에 흡착되거나 공침 등이 일어나는 것을 방지하여 주로 양이온과 금속이온

의 분석에 사용하였고, 다른 하나는 산처리를 하지 않고 실내 음이온의 분석에 사용하였다. 물 속에 용존되어 있는 성분인 유리 탄산( $\text{CO}_2$ ), 변하기 쉬운 중탄산( $\text{HCO}_3^-$ ) 및 탄산( $\text{CO}_3^{2-}$ ) 성분들은 현장에서 습식으로 분석하였다. 나머지 성분은 실내에서 주로 원자흡광분석기(Atomic Absorption Spectroscopy, AAS; 한국지질자원연구원)를 이용하여 분석하였다. 희토류원소의 측정에는 한국지질자원연구원의 ICP-MS(Perkin Elmer사의 Elan DRC II)를 이용하여 측정하였다. 측정시 5% 질산용액 및 시료용기의 바닥값은 1 ppt(10-12/ml) 이하였다.

연대측정을 위한 Nd, Sm, Sr, Rb의 함량과 Nd, Sr 동위원소비는 한국기초과학지원연구원의 열이온화 질량분석기(VG Sector 54-30)를 이용하여 측정하였다. 온천수의 Sr 동위원소비도 한국기초과학지원연구원의 열이온화 질량분석기(VG Sector 54-30)를 이용하여 측정하였다. NIST987 Sr 표준시료의 7회 반복측정에 의한  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는  $0.710207 \pm 0.000011$  ( $N=7, 2\sigma$ )이고, 이때의 바닥값은 Sr, Rb 모두 0.1 ng 이하였다. LaJolla Nd 표준시료의 경우 30회 반복측정한  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  값이  $0.511838 \pm 0.000004$  ( $N=30, 2\sigma$ )였고, Sm, Nd의 바탕값은 0.04 ng 이하였다.

## 결 과

### 화강암류에서의 주원소, 미량원소 및 희토류원소

화강암류에서의 주성분원소, 미량원소 및 희토류원소의 분석결과는 Table 1에 기재되어 있다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이, 흑운모화강암과 각섬석 화강섬록암의 화학조성은 비교적 균질하다. 흑운모 화강암과 각섬석 화강섬록암의  $\text{SiO}_2$ 의 함량은 각각 69.7-75.2%, 66.9%-67.6%이고, 북쪽에 분포하는 흑운모 화강암의  $\text{SiO}_2$ 의 함량폭이 남쪽에 분포하는 흑운모 화강암보다 더 넓다. Fig. 2는  $\text{SiO}_2$ 의 함량변화에 따른 다른 주성분의 변화도(Harker diagram)이다.  $\text{SiO}_2$ 의 함량이 증가함에 따라 MgO, total  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , CaO, MnO,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 감소하는 경향을 보여준다.  $\text{K}_2\text{O}$ 는 완만하지만 증가하는 경향을 보여준다. 반면에  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 거의 변화가 없이 균질한 함량을 갖는다. Fig. 3a의 Qtz-Ab-Or 성분도는 흑운모 화강암과 각섬석 화강섬록암이 거의 동일한 온도/압력 조건에서 정치되어졌음을 지시해주며, Fig. 3b의 A/NK vs. A/CNK 상관도는 각섬석 화강섬록암이 보다 더 메타알루미나 화강암류에 속함을 알 수 있다. 그리고 AFM성분도(Fig. 4)에서는 칼크-알칼리암계열에 속한다.

운석으로 규격화한 희토류원소의 분포도는 Fig. 5에

**Table 1. Major element composition (wt%), CIPW norm, trace element and REE abundance of granite (GR.) and granodiorite (GD) in Seokmodo, Gangwha**

Sample No.	SM1-1	SM1-2	SM1-3	SM1-4	SM-2	SM3	SM4	SM7	SM8	SM21	SM22	SM23	SM24	SM25	SM26	SM27	SM5	SM6
	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GD	GD
SiO <sub>2</sub>	71.51	69.71	71.65	71.94	72.26	71.39	72.85	71.85	72.72	72.67	73.43	75.18	71.88	71.17	68.84	72.26	66.94	67.55
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.27	0.13	0.21	0.25	0.25	0.20	0.24	0.23	0.39	0.26	0.18	0.36	0.45	0.59	0.39	0.52	0.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.94	15.59	14.88	14.64	14.62	15.08	14.64	14.61	14.59	14.76	14.14	13.49	14.31	14.99	15.29	14.15	15.01	15.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.86	2.33	1.85	1.83	1.75	1.78	1.30	1.95	1.54	1.88	1.45	0.97	1.90	2.37	2.73	2.47	4.12	3.71
MnO	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.06
MgO	0.62	0.90	0.61	0.63	0.57	0.57	0.25	0.72	0.39	0.45	0.28	0.17	0.40	0.52	0.70	0.41	1.96	1.76
CaO	2.01	2.79	2.01	2.12	1.76	2.08	1.61	2.08	1.71	0.84	1.52	1.17	1.77	2.13	2.54	1.52	3.47	3.08
Na <sub>2</sub> O	3.41	3.74	3.41	3.33	3.37	3.47	3.29	3.33	3.45	3.66	3.34	3.01	3.15	3.36	3.45	3.14	3.25	3.15
K <sub>2</sub> O	4.58	3.82	4.54	4.54	4.54	4.46	4.91	4.40	4.55	3.87	4.33	4.76	4.33	4.23	3.90	4.77	3.77	4.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.08	0.07	0.06	0.07	0.07	0.05	0.07	0.06	0.10	0.06	0.03	8.00	0.11	0.16	0.09	0.16	0.15
LOI	0.48	0.51	0.59	0.44	0.56	0.57	0.69	0.51	0.49	1.18	0.64	0.45	0.50	41.00	42.00	0.40	0.54	0.59
total (wt%)	99.78	99.79	99.77	99.78	99.78	99.75	99.81	99.80	99.75	99.83	99.49	99.43	106.63	140.36	140.23	99.64	99.80	99.72
A/NK	1.41	1.51	1.41	1.41	1.40	1.43	1.36	1.43	1.38	1.45	1.39	1.33	1.45	1.48	1.54	1.37	1.59	1.54
A/CNK	1.05	1.01	1.05	1.03	1.07	1.05	1.07	1.04	1.06	1.26	1.09	1.10	1.09	1.07	1.05	1.08	0.95	0.98
Qtz(%)	28.0	26.9	28.4	28.7	29.8	28.0	30.4	27.3	30.3	33.3	33.3	36.4	32.1	29.1	26.5	30.7	21.3	22.0
Or	26.9	23.1	26.8	26.7	26.7	26.2	28.9	25.4	26.8	22.8	25.5	28.1	25.7	24.9	23.2	28.1	22.2	24.6
An	9.51	13.70	9.56	8.27	8.27	9.86	7.66	9.66	8.09	3.52	7.20	5.61	8.36	9.85	11.70	6.96	15.30	14.30
Ab	28.8	32.5	29.0	28.5	28.5	29.3	27.9	27.6	29.2	30.9	28.3	25.6	26.9	28.3	29.5	26.6	27.5	26.6
Di																		0.77
Hy	4.00	2.29	4.20	4.07	3.74	3.78	23.00	7.08	2.99	3.42	2.53	1.63	3.41	4.28	5.12	4.22	10.20	9.45
Mt			0.52	0.52	0.49	0.51	0.38	1.00	0.44	0.54	0.42	0.29	0.54	0.65	0.76	0.07	1.09	0.99
Hmt		0.01																
Ilm	0.51	0.06	0.25	0.48	0.48	0.48	0.38	0.46	0.44	0.74	0.49	0.34	0.70	0.86	1.14	0.74	0.99	0.89
Ap	0.15	0.17	0.15	0.13	0.15	0.15	0.11	0.15	0.13	0.22	0.13	0.06	0.17	0.24	0.34	0.19	0.34	0.32
Cm	0.88	0.42	0.87	0.54	1.13	0.93	1.09	0.75	1.03	3.27	1.34	1.34	1.44	1.28	1.14	1.26		0.03
Rb (ppm)	366	337	356	278	328	368	280	311	340	164	365	291	539	764	746	565	369	382
Sr	184	172	183	185	180	180	200	192	181	503	221	211	166	168	118	107	185	165
Zr	45.2	58.5	50.9	160.2	148.2	149.5	709	60.7	29.8	11.3	19.8	31.1	12.7	17.2	11.0	23.6	138.1	64.3
Ba	1051	603	1048	629	913	980	888	698	915	1086	931	874	1374	1687	1819	1031	899	823
Sc	2.86	4.64	2.30	3.53	2.86	2.67	1.58	3.17	1.46	1.23	1.12	0.98	1.28	1.36	1.56	2.64	8.70	7.93
Y	9.28	13.40	7.68	13.50	9.87	7.81	6.93	10.50	6.55	18.40	13.70	10.30	12.10	12.80	9.93	15.40	18.00	19.30
Nb	6.54	64.50	23.40	266	348	294	195	5.29	8.17	13.40	35.60	21.40	12.40	36.90	30.20	30.30	296	12.00
Th	18.2	17.2	14.6	16.1	17.6	18.4	20.5	19.6	14.2	10.3	18.2	23.1	15.0	19.0	13.9	23.0	19.7	16.5
U	2.66	2.86	2.52	3.61	2.03	1.96	2.66	2.67	1.73	1.80	5.87	2.11	1.73	3.00	0.83	3.11	2.27	2.09
Hf	1.14	1.87	1.14	39.20	28.10	36.60	13.30	1.67	0.71	0.53	0.87	1.05	0.40	0.57	0.31	0.68	31.70	1.52
Ta	0.06	0.21	0.17	0.37	0.26	0.65	0.35	0.30	0.09	12.90	4.49	21.40	7.29	1.76	2.81	4.87	0.80	0.36
La	54.1	39.6	40.0	29.0	43.6	45.6	48.7	32.9	42.0	49.5	47.0	43.3	51.2	66.4	72.8	75.7	56.9	43.2
Ce	87.8	64.9	64.3	47.7	71.6	73.7	81.5	55.1	68.2	66.1	80.2	72.5	88.5	111.5	120.8	125.7	93.1	74.6
Pr	8.51	6.32	6.28	4.69	6.98	7.23	8.11	5.55	6.66	9.63	9.09	7.97	9.67	12.60	13.50	13.80	9.24	7.83
Nd	28.7	21.5	22.1	16.5	23.9	24.6	27.7	18.9	22.1	36.8	33.1	28.3	36.0	45.5	48.5	48.0	35.1	28.5
Sm	4.21	3.44	3.49	2.75	3.76	3.55	4.00	3.13	3.31	6.09	5.44	4.60	5.30	6.48	6.66	6.50	4.79	4.80
Eu	1.02	0.87	0.93	0.74	0.90	0.94	0.87	0.79	0.88	1.47	1.03	0.96	1.33	1.64	1.78	1.10	1.19	1.17
Gd	4.21	3.44	3.49	2.75	3.76	3.55	4.00	3.02	3.31	3.57	4.84	3.31	4.24	5.05	5.19	5.41	5.30	4.81
Tb	0.41	0.39	0.33	0.33	0.38	0.34	0.36	0.33	0.32	0.57	0.51	0.41	0.45	0.51	0.47	0.55	0.57	0.56
Dy	1.68	2.00	1.33	1.85	1.63	1.37	1.35	1.60	1.20	2.91	2.36	1.90	1.93	2.20	1.85	2.46	2.75	2.91
Ho	0.27	0.37	0.22	0.36	0.28	0.22	0.20	0.28	0.18	0.49	0.40	0.32	0.36	0.39	0.30	0.45	0.52	0.54
Er	0.65	0.97	0.51	0.93	0.65	0.52	0.44	0.70	0.40	1.20	0.89	0.64	0.82	0.87	0.64	1.03	1.30	1.38
Tm	0.09	0.16	0.08	0.16	0.10	0.07	0.06	0.11	0.06	0.17	0.12	0.09	0.11	0.12	0.09	0.13	0.20	0.22
Yb	0.57	1.05	0.48	1.10	0.60	0.48	0.37	0.71	0.34	1.05	0.79	0.51	0.72	0.73	0.52	0.74	1.33	1.39
Lu	0.07	0.16	0.06	0.16	0.08	0.06	0.05	0.10	0.04	0.14	0.10	0.06	0.09	0.10	0.07	0.10	0.18	0.20
Eu/Eu* <sup>1)</sup>	0.73	0.77	0.84	0.82	0.73	0.79	0.66	0.78	0.80	0.93	0.64	0.76	0.88	0.89	0.94	0.58	0.73	0.74
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	62.5	24.8	55.5	17.4	47.9	63.1	86.2	30.5	80.7	31.1	39.2	55.9	46.8	59.9	92.2	67.4	28.2	20.5

<sup>1)</sup>Eu\* is defined as the ratio of observed Eu abundance to that which would fall on the Sm-Gd join in chondrite-normalized REE patterns.

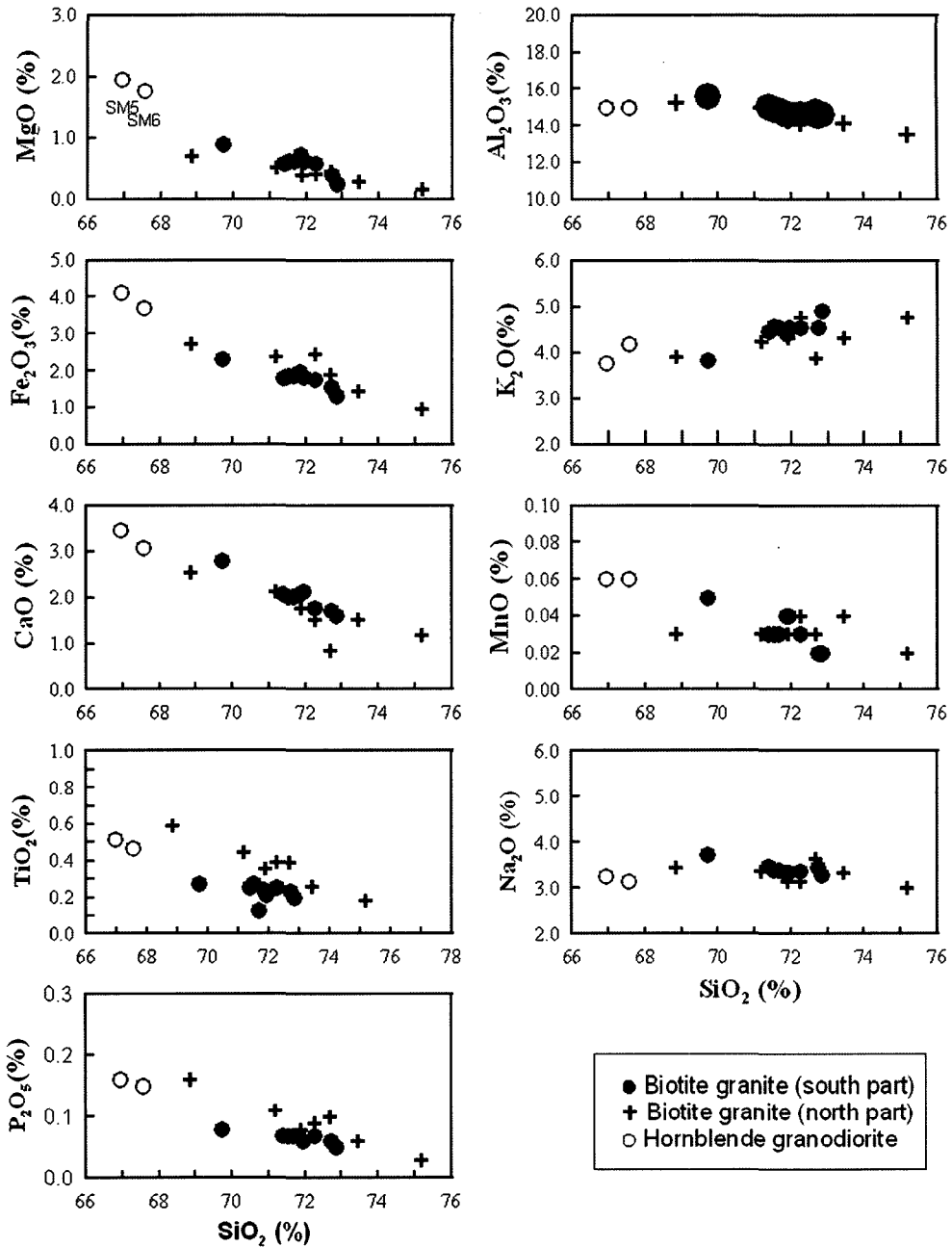


Fig. 2. Harker variation diagram of the biotite (Bt) granite and hornblende (Hb) granodiorite.

도시하였다. Fig. 5의 a와 b는 각각 북쪽과 남쪽에 분포하는 흑운모 화강암의 희토류원소 분포도이고 Fig. 5c는 각섬석 화강섬록암의 희토류원소 분포도이다. 흑운모 화강암의 분포도 기울기( $La_N/Yb_N$ )는 17.4-92.2이고 각섬석 화강섬록암의 분포도 기울기( $La_N/Yb_N$ )는

20.5-28.2이며, Eu의 부(-)의 이상은 흑운모 화강암이 더 큰 편이다.

화강암의 Rb-Sr 동위원소계

Table 2에는 흑운모 화강암에 대한 Rb-Sr 및 Sm-Nd

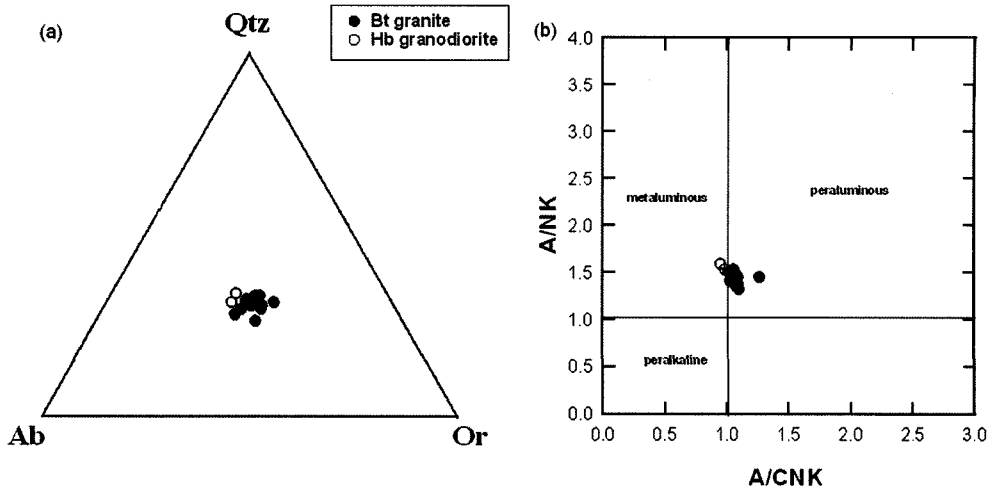


Fig. 3. (a) Normative Qtz-Or-Ab compositions of the biotite granite and granodiorite (b) A/CNK-A/NK plot showing meta-aluminous character (Maniar and Piccoli, 1989). A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N = Na<sub>2</sub>O, K = K<sub>2</sub>O, C = CaO (in molar proportion).

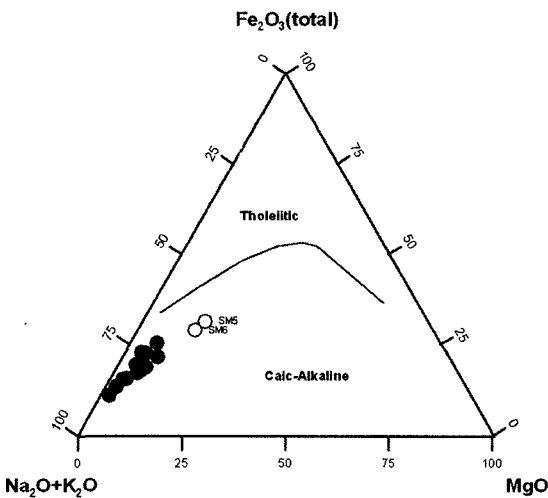


Fig. 4. AFM diagram. The biotite granite and granodiorite show a typical calc-alkaline trend. Symbols are the same as those in Fig. 3.

동위원소비가 기재되어 있고, Fig. 6은 흑운모 화강암의 Rb-Sr 동위원소계를 도시한 도면이다. Ludwig(1999)의 ISOPLOT 프로그램을 이용하여 Rb-Sr의 등시선 연대를 계산하였다. Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이, 석모도의 흑운모 화강암은 각섬석 화강섬록암을 기준으로 주로 북쪽에 보다 멀리 분포하는 흑운모 화강암의 Rb-Sr연대는 207±70 Ma이고 Sr 초기치는 0.7132이다. 반면에 북쪽에 분포하는 흑운모 화강암 중 각섬석 화강섬록암에 가까이 분포하는 흑운모 화강암과 주로 남

쪽에 분포하는 흑운모 화강암(이들도 각섬석 화강섬록암에 인접하여 분포)의 Rb-Sr연대는 132±50 Ma이고 Sr 초기치는 0.7125이다. 등시선연대 계산에 있어서 등시선으로부터 멀리 벗어난 SM1-4와 SM7은 계산에서 제외하였다. 이와 같은 Rb-Sr 전암연대는 통진도폭(최위찬 외, 1997)의 섬장암과 홍색 장석화강암내 흑운모의 130 Ma에서 193 Ma K-Ar 연대와 오차의 범위내에서 일치한다. 그리고 흑운모 화강암의 Nd 모델연대(T<sub>DM</sub>)는 1.8-2.2Ga로 선캠브리아기 중기의 지각물질로부터 유래되었음을 알 수 있다.

### 온천수의 화학조성

온천수의 화학조성 및 Sr 동위원소비는 Table 3에 기재되어 있다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이, 온천수의 온도는 62°C를 넘고, 아울러 Na-(Ca)-Cl형(Fig. 7)의 수질 특성을 보여준다.

## 토 의

### 화강암류의 생성시기 및 조구조적 위치

연구지역내 화강암류 특히 흑운모 화강암과 각섬석 화강섬록암의 대표적인 특징은 흑운모 화강암이 각섬석 화강섬록암에 의해 남북으로 나뉘어 분포한다는 것이다. Fig. 2에서 SiO<sub>2</sub>의 함량변화에 따른 다른 주성분의 변화도(Harker diagram)는 흑운모 화강암이 동일기원의 마그마로부터 유래되었음을 지시해준다. Fig. 4의 AFM도와 Fig. 8의 스파이더 다이어그램에서도 남북의 두 흑운모 화강암체는 동일한 기원물질에서 분화되었

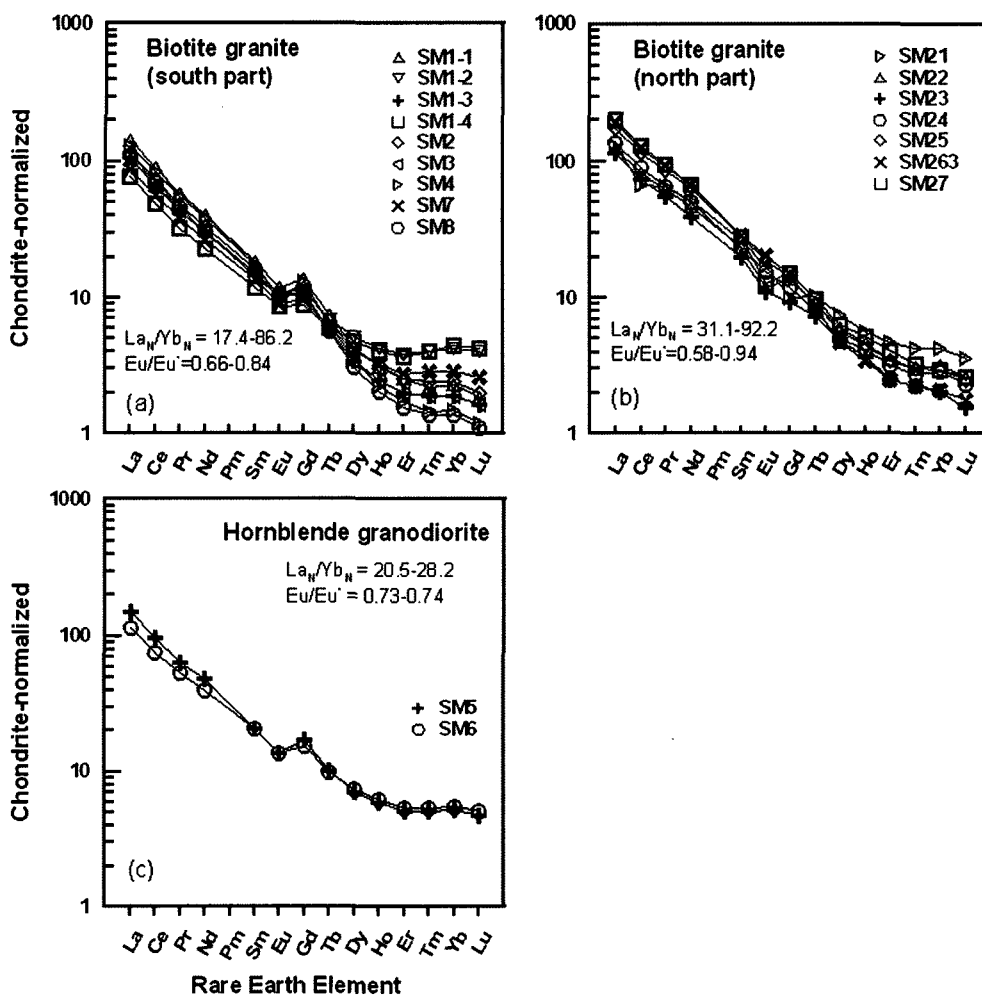


Fig. 5. Chondrite-normalized (Masuda *et al.*, 1973; Masuda, 1975) REE pattern for the granite and granodiorite. (a) granite in the south part (SM1-SM8), (b) granite in the north part (SM21-SM27), (c) hornblende granodiorite (SM5, SM6).

음을 지시해준다. 그리고 화강암류에서의 Rb과 Y+Nd 그리고 Yb+Ta의 상관관계를 Fig. 8에 도시하면(Pearce *et al.*, 1984), 연구지역내 화강암류는 syn-COLG(syn-collisional granite) 및 WPG(within-plate granites)의 영역에 속한다.

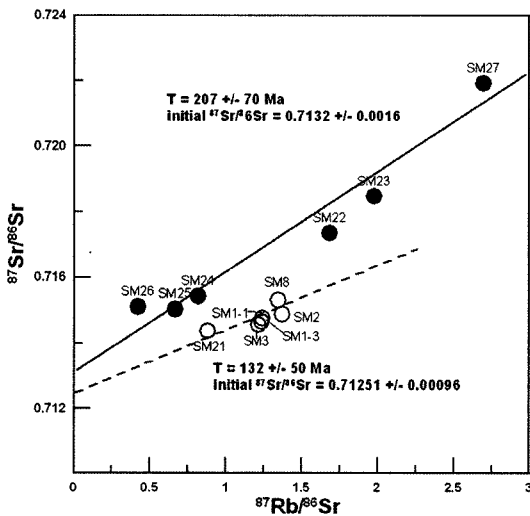
Fig. 5의 희토류원소 분포도를 비교해보면, 남쪽에 분포하는 흑운모 화강암의 Eu의 부(-)의 이상의 변화폭이 북쪽에 분포하는 흑운모 화강암의 Eu의 부(-)의 이상보다 적은 편이다. 일반적으로 화강암에서의 Eu의 부(-)의 이상은 장석의 분화과정에 의해 설명된다. 즉 사장석의 분화가 초기에 많이 이루어지면 Eu의 부(-)의 이상이 보다 많이 발달된다. 앞의 암상기제에서 남쪽의 흑운모 화강암은 북쪽의 흑운모 화강암에 비해 흑운모 함량이

더 높다고 언급한 바 있다. 이는 두 화강암체가 동일기 원일 경우 북쪽의 흑운모 화강암이 남쪽의 흑운모 화강암보다 더 초기에 정지되었음을 지시해준다고 볼 수 있다. 이와 같은 해석은 Fig. 6의 오시선도와 일치한다고 볼 수 있다. 즉 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 북쪽에 보다 멀리 분포하는 흑운모 화강암의 Rb-Sr년대는  $207 \pm 70$  Ma이었고, 북쪽에 분포하는 흑운모 화강암 중 각섬석 화강섬록암에 가까이 분포하는 흑운모 화강암과 주로 남쪽에 분포하는 흑운모 화강암(이들도 각섬석 화강섬록암에 인접하여 분포)의 Rb-Sr년대는  $132 \pm 50$  Ma이었다. 비록 오시선이라 할지라도, 이와 같은 Rb-Sr년대는 석모도내 흑운모 화강암의 정지순서가 북에서 남으로 이루어짐을 지시해준다고 볼 수 있다.

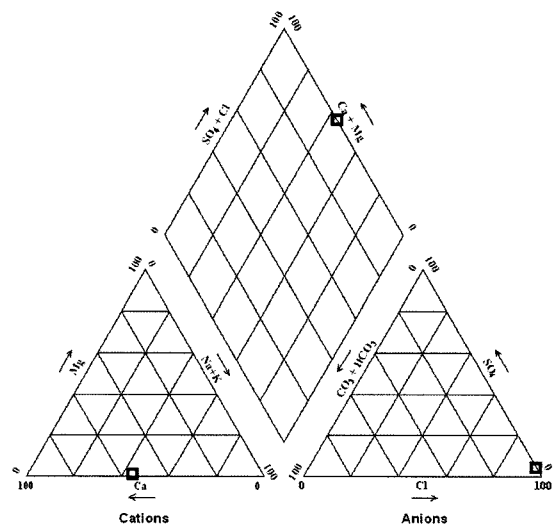
**Table 2. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions of the granite in Seokmodo.**

sample	Rb (ppm)	Sr (ppm)	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	2σ	Sm (ppm)	Nd (ppm)	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	2σ	T <sub>DM</sub> (Ma)	ε <sub>Nd</sub> (0.21 Ga)
SM 1-1	145.6	342.0	1.2328	0.714686	0.000011	-	-	-	-	-	-	-
SM 1-3	147.5	344.0	1.2417	0.714786	0.000013	-	-	-	-	-	-	-
SM 1-4	146.9	256.6	1.6572	0.714394	0.000013	-	-	-	-	-	-	-
SM 2	147.4	312.1	1.3673	0.714889	0.000013	-	-	-	-	-	-	-
SM 3	147.2	351.1	1.2139	0.714577	0.000013	-	-	-	-	-	-	-
SM 7	157.9	294.7	1.5509	0.714435	0.000013	-	-	-	-	-	-	-
SM 8	148.4	320.4	1.3408	0.715306	0.000011	-	-	-	-	-	-	-
SM4	171.5	252.0	1.971	0.716315	0.000022	3.87	28.1	0.0832	0.511612	0.000016	1791	-17.0
SM21	123.9	408.2	0.879	0.714387	0.000011	5.13	30.9	0.1005	0.511642	0.000014	2022	-16.8
SM22	170.7	293.6	1.683	0.717361	0.000013	4.79	28.7	0.1007	0.511525	0.000014	2183	-19.1
SM23	159.3	233.5	1.976	0.718482	0.000011	3.66	22.5	0.0986	0.511462	0.000017	2227	-20.3
SM24	129.3	459.0	0.815	0.715437	0.000013	5.37	37.1	0.0875	0.511528	0.000014	1952	-18.7
SM25	125.4	547.5	0.663	0.715055	0.000013	5.46	37.7	0.0875	0.511505	0.000016	1980	-19.2
SM26	95.1	654.0	0.421	0.715115	0.000013	6.56	49.2	0.0807	0.511544	0.000013	1835	-18.2
SM27	197.7	212.4	2.696	0.721921	0.000013	5.69	41.5	0.0829	0.511536	0.000011	1876	-18.4

NBS987: <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr = 0.7102071 ± 0.000011 (N = 7, 2s standard error)  
 Total procedural blank level was below 0.1ng for Sr.  
 La Jolla: <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.5118381 ± 0.000004 (N = 30, 2s standard error)  
 Nd blanks: below 40pg



**Fig. 6. Rb-Sr isochron diagram for the biotite granite.**



**Fig. 7. Trilinear diagram of chemical composition in the Seokmodo hot spring.**

**화강암의 Sr 초기치와 온천수내 Sr 동위원소비와의 관계**

서언에서 언급한 바와 같이, 우리나라의 고온성 온천수의 전반적인 지구화학적 특성과 고온성 온천수가 분포하고 있는 주변 화강암과의 상관성에 대한 체계적인 연구보고는 아직 부족한 편이라고 볼 수 있다. 특히 온천수의 기원에 대해서는 아직도 명확한 결론을

내리지 못하고 있다.

1990년대 이후, Sr 동위원소는 지하수 유동의 지시자로서 유용하게 이용되어져왔다(Johnson and Depaolo, 1994; Bullen, 1996; Frost *et al.*, 2002; Gosselin *et al.*, 2004). 이는 Sr이 비록 미량원소로 분류된 다 할지라도, 대부분의 암석내에 쉽게 측정할 수 있는 양이 함



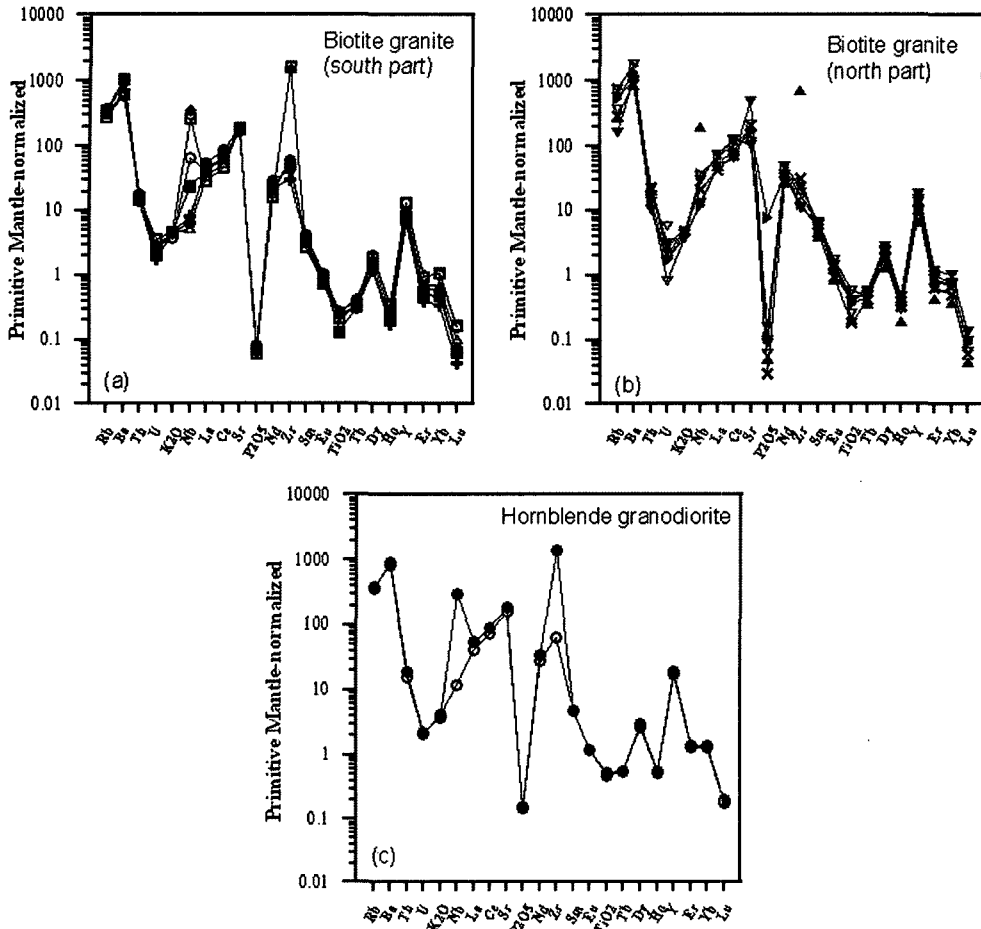


Fig. 8. Primitive Mantle (McDonough and Sun, 1995)-normalized spider-diagrams. There is no difference in features between biotite granite and granodiorite.

유, 지구화학적으로 Ca과 매우 유사한 거동을 갖기 때문이다. 그리고 Sr 동위원소들은 자연계에서 쉽게 분별작용을 일으키지 않는다. 예를 들면, 광물의 침전 혹은 양이온 교환의 결과로서 물속에 남아있는 Sr의 동위원소 조성은 영향을 받지 않는다. Sr의 동위원소는 <sup>84</sup>Sr(0.5%), <sup>86</sup>Sr(9.5%), <sup>87</sup>Sr(7%)과 <sup>88</sup>Sr(83%)으로 구성된다. 이 중 <sup>87</sup>Sr은 반감기가 488억년인 <sup>87</sup>Rb의 방사성 붕괴에 의해 생성된다. 따라서 각종 지질매체내에서의 <sup>87</sup>Sr의 양은 시료의 생성시기 및 시료내 <sup>87</sup>Rb의 양에 의해 조절된다. 즉 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소비의 변화는 반감기에 따른 변화이외는 다른 외적인 요인에 의해서는 변하지 않는다. 그러므로 지하수내 Ca의 함량은 변할 지라도 동위원소 조성은 거의 변하지 않게 된다. 이와 같은 특성 때문에, Sr 동위원소비는 물속에 있는 용질의 기원에 대해 중요한 정보를 제공하여준다(Gosselin

et al., 2004). 그리고 이와 같은 특성은 지하수내의 Sr 동위원소비에 적용하였을 때, 온천수를 함유하고 있는 대수층의 특성을 이해하는 데 유용하다고 볼 수 있다.

Table 2의 화강암내 Sr 동위원소비를 살펴보면, 북쪽에 분포하는 흑운모화강암(SM21-SM27)의 Sr 동위원소비는 0.714387-0.721921의 범위에 놓이고, 남쪽에 분포하는 흑운모화강암의 Sr 동위원소비는 0.714394-0.715306의 범위에 속한다.

최근에 Lee et al.(2005)은 우리나라 고온성 온천수의 Sr 동위원소가 해당 온천지역에 분포하는 화강암류의 초기치와 거의 일치한다고 보고한 바 있다. Table 3의 온천수내 Sr 동위원소비를 보면 0.714507-0.714518로서 지난 1년간 거의 일정한 Sr 동위원소비 값을 유지함을 알 수 있다. 이와 같은 온천수내 Sr동위원소비의 값은 석모도 남쪽 매음리 일대에 분포하는 흑운모

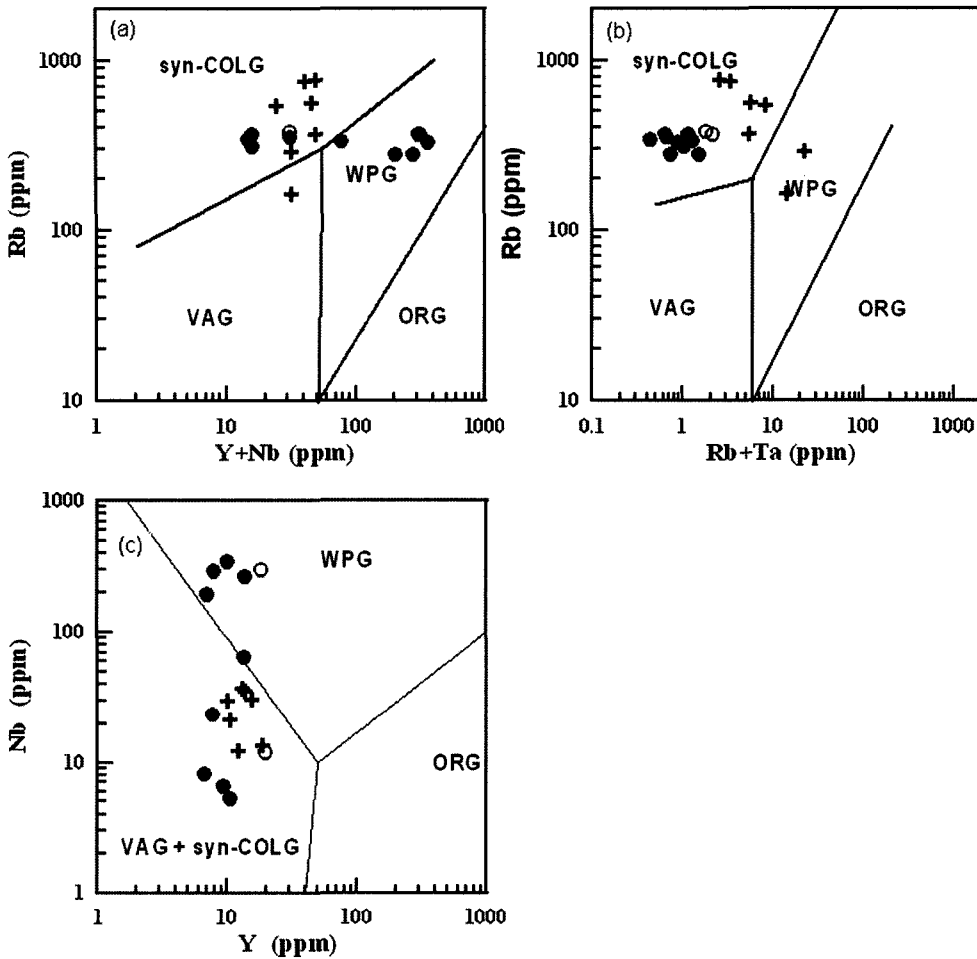


Fig. 9. Tectonic discrimination diagram based on (a) Rb vs. (Y+Nb), (b) Rb vs. (Yb-Ta), (c) Nb vs. Y (Pearce *et al.*, 1984). Symbols are the same as those in Fig. 2.

화강암의 Sr 동위원소비 값(0.714394-0.715306)과 유사하다. 이는 강화도내 온천수는 각섬석 화강섬록암을 기준으로 남쪽에 분포하는 흑운모 화강암류와 밀접한 연관이 있음을 지시해주는 것이라 볼 수 있다. 그러나, 서언에서 백악기 화강암류가 분포하는 지역에서 산출되는 온천(예: 부곡온천, 해운대온천 및 동래온천 등)의 수온은 60-78°C로 쥬라기 화강암류가 분포하는 지역에서 산출되는 온천수(온양, 유성, 덕산, 속초 등)의 45-55°C에 비해 10°C 이상 높은 경향을 보여준다고 언급한 바 있다. 석모도의 경우, 현재 고온성 70°C에 달하는 고온성 온천수는 쥬라기의 화강암류에서 산출되며, 이 화강암과 백악기의 각섬석 화강섬록암이 인접하고 있다. 이는 흑운모 화강암에 접하여 후기에 관입한 각섬석 화강섬록암의 영향을 완전히 배제하기는 어

렵다는 것을 지시해준다. 이 연구에서는 흑운모 화강암내에서 용출되는 온천수와 화강암과의 Sr동위원소비의 상관성에 초점을 두고 진행하였다. 그러므로 향후 각섬석 화강섬록암의 보다 정확한 생성연대, 그리고 흑운모 화강암과의 성인적 혹은 조구조적 연관관계의 규명을 통해 석모도내 온천수의 형성과정을 보다 명확히 밝혀낼 수 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

### 요약 및 결론

인천광역시 강화군 강화읍 삼산면 섬유도에 분포하는 화강암류지역에서의 흑운모 화강암과 각섬석 화강섬록암 그리고 흑운모 화강암내에서 산출되는 온천수의 지질학적, 지구화학적 특징을 요약하면 다음과 같다.

**Table 3. Chemical and Sr isotopic composition of Gangwha hot spring**

Sampling date	Temp (°C)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	Cl (mg/l)	Br (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	Na (mg/l)	Ca (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Sr (mg/l)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	2σ
Mar-05	62.1	6.8	-22	38100	15381.00	49.60	950.1	46.38	4440	4860	48	66.2	80296	0.714507	0.000012
Mar-06	63	6.81	-61	39420	14775.76	-	1086.3	42.71	4890	3480	83.9	272	88230	0.714528	0.000013

NBS 987 average

<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.7102461 ± 0.000004 (N = 14, 2s standard error)

Total procedural blank level was below 80 pg for Sr.

1) 석모도의 화강암류는 흑운모 화강암과 각섬석 화강섬록암이며, 흑운모 화강암은 각섬석 화강섬록암에 의해 남과 북으로 양분된다

2) 흑운모 화강암의 Rb-Sr 전암연대는 각섬석 화강섬록암을 기준으로 북쪽에 분포하는 흑운모 화강암은 207 ± 70 Ma이고 Sr 초기치는 0.7132이, 남쪽에 분포하는 흑운모 화강암은 132 ± 50 Ma이고 Sr 초기치는 0.7125로서 지각기원물질로부터 마그마가 생성되어졌음을 지시해준다.

3) 희토류원소 분포도를 비교해보면, 남쪽에 분포하는 흑운모 화강암의 Eu의 부(-)의 이상의 변화폭이 북쪽에 분포하는 흑운모 화강암의 Eu의 부(-)의 이상보다 적은 편이다. 이는 Rb-Sr 전암연대에 의한 두 화강암체의 정치시기와 일치하는 경향이라 볼 수 있다.

3) 두 암체의 마그마는 칼크-알칼리계열의 특징을 보여주며, Rb과 Y+Nb 그리고 Yb+Ta의 상관관계에 의하면 두 암체는 충돌대환경에서 마그마가 형성되어졌음을 지시해준다.

5) 남쪽의 흑운모 화강암지역에서는 용출되는 수온 72°C의 온천수는 Na(-Ca)-Cl형의 수질특성을 갖는다.

6) 2005년과 2006년의 3월에 채취된 온천수의 Sr 동위원소비는 0.714507와 0.714518로서 거의 변화가 없고, 이 값은 남쪽에 흑운모화강암의 Sr동위원소비와 거의 일치한다. 이와 같은 온천수의 Sr동위원소비는 석모도내 온천수가 흑운모 화강암과 밀접한 연관성이 있음을 지시해주는 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 2006년도 기관고유사업(06-3213)의 지원을 받아 수행되었다. 이 논문을 자세히 읽고 많은 문제점과 미비점을 지적하여 주신 경상대학교의 좌용주 교수님과 한국기초과학지원연구원의 정연중 박사님에게 깊은 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- 고용권, 김진영, 김천수, 배대석, 성규열, 2003, 부산동래 온천수의 심부환경. 한국지하수토양환경학회 추계학술대회 요약집, 제주, 583-586.
- 김건한, 음철현, 2004, 유도결합 플라즈마 질량분광법에 (ICP-MS)에 의한 암석표준물질 중의 Lanthanids, Y, Th, U 분석. 한국지질자원연구원 논문집, 8, 43-53.
- 김규한, 최현정, 1998, 남한의 온천지역의 열수와 지하수의 지구화학적 연구. 한국지구과학회지, 19, 22-34.
- 송윤호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성근, 박인화, 이태중, 심병완, 조병욱, 염병우, 이승구, 기원서, 현혜자, 손정술, 황세호, 오재호, 이윤수, 박찬, 정용복, 김통권, 이진수, 고동찬, 안응영, 윤옥, 2005, 심부 지열에너지 개발 사업 한국지질자원연구원연구보고서 OAA2003001-2005(3). 과학기술부, 147p.
- 신병우, 최승일, 1973, 남한 온천수의 특성과 온양온천의 대수성 시험결과에 대하여. 지질학회지, 9, 161-167.
- 정복선, 구민호, 김형수, 2001, 온양지역 온천수의 수질특성: 천부지하수와 혼합비율분석. 한국지하수토양환경학회 추계학술대회 요약집, 전주, 199-203.
- 정찬호, 박지선, Nagao, K., Sumino, H., 김규한, 허순도, 이종익, 고용권, 박종화, 2004, 한반도 온천수의 수리화학 및 영족기체 기원: 대전-충청지역을 중심으로. 한국지하수토양환경학회 추계학술대회 요약집, 전주, 115-118.
- 최위찬, 최성자, 김규봉, 1997, 한국지질도 통진도폭 (1:50,000) 지질도 및 설명서. 한국자원연구소, 76p.
- 황재하, 김유홍, 2005, 강화 · 온수리도폭 지질조사보고서 (1:50,000 장기리). 한국지질자원연구원, 46p.
- Bullen, T.D., Krabbenhoft, D.P., Kendall, C., 1996, Kinetic and mineralogic controls on the evolution of groundwater chemistry and <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr in a sandy silicate aquifer, northern Wisconsin, USA. Geochim. Cosmochim. Acta 60, 1807-1822.
- Frost, C.D., Pearson, B.N., Ogle, K.M., Heffern, E.L., Lyman, R.M., 2002, Sr isotope tracing of aquifer interactions in an area of accelerating coal-bed methane production. Geology, 30, 923-926.
- Gosselin, D.C., Harvey, F.E., Frost, C., Stotler, R., Macfarlane, P.A., 2004, Strontium isotope geochemistry of

- groundwater in the central part of the Dakota (Great Plains) aquifer, USA. *Appl. Geochem.* 19, 359-377.
- Johnson, T.M. and Depaolo, D.J., 1994, Interpretation of isotopic data in groundwater-rock systems: model development and application to Sr isotope data from Yucca Mountain. *Water Res. Res.* 30, 1571-1587.
- Ludwig, K. R., 1999, Isoplot/Ex(v.2.06)-A geochronological tool kit for Microsoft Excel, Berkley Geochronology Center, Special Publications No. 1a, 49p.
- Lee, S. G. Kim, T-K. Lee, J., Y-H Song, 2005, Sr Isotope and Rare Earth Element Geochemistry of the High Temperature Hot Springs in Korea: a Comparison with the Distribution of the Jurassic Granite. Abstract of 2005 Annual Meeting of the Geothermal Research Society of Japan, A21.
- Maniar, P. D. and Piccoli, P. M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.* 101, 635-643.
- Masuda, A., 1975, Abundances of mono isotopic REE, consistent with the Leedy chondritic values. *Geochem. J.*, 9, 183-184.
- Masuda, A., Nakamura, N. and Tanaka, T., 1973, Fine structure of mutually normalized rare earth patterns of chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 239-248.
- McDonough, W. F. and Sun, S.-s., 1995, The composition of the Earth. *Chem. Geol.* 120, 223-253.
- Park, J., Sumino, H., Nagao, K., Jeong, C. H., Lee, J. I., Kim, K. H., Koh, Y. K. and Park, J. H., 2004, Noble gas geochemistry of hot-spring waters and gases in Korean Peninsula. 2004 Congress of the Geological Society of Korea (Abstracts), Daejeon, October 29-30, 50-51.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic Rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-983.
- Yum, B. W. and Kim, Y., 1999, Thermal water Level Change and Geochemistry in the Suanbo Area, Korea. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment.* 6, 59-65.

---

(2006년 4월 21일 접수; 2006년 5월 8일 채택)