

파주지역 규암의 층서관계 규명을 위한 지구화학적-구조지질학적 연구: 층서규명을 위한 희토류원소 분포도와 Nd 동위원소의 응용

고희재¹ · 이승구^{2,*} · 이병주¹

¹한국지질자원연구원 지질기반정보부, ²한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Geochemical and Structural Geological Approach for clarifying Stratigraphy of Quartzite in the Paju Area: an Application of Rare Earth Element and Nd Isotope in Stratigraphy

Hee Jae Koh¹, Seung-Gu Lee^{2,*} and Byung-Joo Lee¹

¹Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

²Geological and Information Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

요약: 경기도 파주시 월릉면, 광탄면, 조리면 지역에는 다중 습곡 작용을 받은 선캠브리아기 암석이 N10°E 방향의 습곡축을 갖는 2 조의 U형 습곡구조(습곡 I과 II)를 따라서 분포한다. 습곡구조를 따라 분포하는 10여 개의 규암과 4 개의 석회질 편암은 기원 퇴적암이 순차적으로 반복 퇴적된 것인지, 혹은 1~2 개의 동일한 규암과 석회질 편암이 동시습곡작용에 의하여 반복 분포되는 것인지에 관한 직접적인 증거(퇴적구조)는 발견되지 않는다. 이 논문에서는 U형 습곡이 습곡축을 중심으로 동측과 서측의 양 방향에 분포하는 규암의 상호 연결성을 희토류원소 분포도와 Nd 동위원소비와 같은 지구화학적 방법으로 대비하였다. 습곡구조를 형성하는 규암의 희토류원소 분포도 특성은 경희토류는 편평하고 중희토류가 약간 결핍되어 있다. 또한 Ce의 부(-)의 이상을 보여주는 반면에 Eu의 이상은 거의 존재하지 않는다. 희토류원소 분포도 양상은 습곡축을 중심으로 동서 양 방향의 규암에 있어서 매우 유사하게 나타났다. 이들 규암의 Nd 모델연대도 습곡축의 양쪽 외곽부에서 내부로 들어오면서 젊어지는 경향을 보여준다. 이와 같이 유사한 희토류원소 분포특성과 Nd 모델연대는 연구지역내에서 습곡축을 중심으로 동측과 서측에 분포하는 규암이 동일한 기원물질로부터 유래되었음을 시사해주는 것으로서, 층서적 및 구조지질학적 연결과 대비되는 것으로 볼 수 있다. 규암과 호층을 형성하는 운모편암의 희토류원소 분포도 및 Sr, Ba, Eu, Rb과 같은 미량원소의 상관관계도는 운모편암이 규암의 근원 물질과는 다를 가능성을 지시한다. 이는 변성작용, 풍화작용과 같은 지질현상에 의해서도 전체적인 분포 특성이 거의 영향을 받지 않는 희토류원소 지구화학적, 지각내 체류시간을 지시해주는 Nd 동위원소 지구화학이 서로 떨어져 분포하는 퇴적층의 연결성을 추적하는데 유용하게 활용될 수 있음을 지시해준다.

주요어: 파주, 규암, 희토류원소, Nd 동위원소, 층서적 연결성

Abstract: The Precambrian quartzite and calc-schist layers experienced multi-folding events are distributed along the two kinds of U-shaped fold (Fold I and II) with N10°E-directed fold axis in Wollong-myeon, Gwangtan-myeon, Jori-myeon of Paju city, the northeastern part of Gyeonggi-do. Occurrence of 10 layers of quartzite and 4 layers of calc-schist is not clear whether quartzite and schist layers were deposited sequentially each other or one to two layers of quartzite and schist were distributed repeatedly by isoclinal folding and thrusting, because of lack of sedimentary structures. In this paper, we tried to clarify the correlative relationship among the quartzite beds which are distributed along the U-shaped folds using geochemical tools such as rare earth element (REE) patterns and Nd isotope ratio. Quartzites have characteristics of LREE-flattened, HREE- slightly depleted patterns. They also show Ce negative anomaly whereas there are no Eu anomalies. As a result, quartzite beds occurred along the bilateral sides of fold

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

axis show very similar REE patterns from outer side to inner side of fold. The Nd model age of quartzite layers shows a trend that the inner part of fold is younger than the outer part of it. Such geochemical characteristics suggest that bilateral quartzite beds occurred along the fold axis were derived from the cogenetic source materials. The REE patterns and trace element geochemistry of mica schist intercalated within quartzite indicate that the quartzite and mica schist may be derived from different source materials. Our results suggest that REE and Nd isotope geochemistries may be very useful in clarifying the relationship of sedimentary deposits which do not show stratigraphical and structural connections in the field.

Key words: Paju, Quartzite, Rare Earth Element, Nd isotope, Stratigraphical Relationship

서 언

희토류원소는 외적요인 즉 변성작용, 변질작용 및 풍화작용의 영향을 다른 원소와 비교해 볼 때 덜 받는다는 특성과 더불어 미량성분의 분석기술의 발달로 인해 지난 40여 년간 지구과학의 여러 가지 현상을 해석하기 위한 필수적인 도구로써 사용되어 왔다(Taylor and McLennan, 1985; McLennan, 1989; Lee *et al.*, 1994, 2003; Takahashi *et al.*, 2000; Shimizu *et al.*, 2001). 특히 화성암의 진화 혹은 분화과정을 설명하는데 있어서 희토류원소는 매우 유용한 역할을 하고 있다. 이는 희토류원소가 일반적으로 3가의 원자기를 가지며 상호간에 물리적, 화학적 성질이 아주 유사하고 지구환경에서 발생한 모든 환경에서 규칙성을 가지고 거동하기 때문이다. 최근의 연구결과에 의하면 퇴적물의 기원 및 지하수의 유동방향을 밝히는데 있어서 희토류원소가 매우 유용한 도구가 될 수 있음이 밝혀졌다(Piper, 1985; Cullers *et al.*, 1979, 1987, 1989; Elderfield *et al.*, 1990; Sholkovitz, 1992; Johannesson *et al.*, 1996, 1997; Sholkovitz and Szymczak, 2000; Yang *et al.*, 2002). 퇴적물에서의 Nd 동위원소비는 퇴적물의 입도크기나 퇴적물내 Nd의 함량에 관계없이 거의 유사한 지각체류시간(crustal residence time)을 보여준다(Goldstein *et al.*, 1984; Awwiller and Mack, 1991). McLennan *et al.* (1989)는 심해저퇴적물(turbidites)의 균질도를 비교하기 위해 서로 다른 지구조적환경하에서 형성된 심해저퇴적물의 모래와 진흙시료에서 Nd 모델연대를 비교하였다. Nelson and Depaolo(1988)은 작은 분지에서의 퇴적물의 기원지를 구분하는데 Sm-Nd 계를 적용한 결과, 침식과 퇴적작용에도 불구하고 혼합물과 단성분(end member) 사이의 Nd 동위원소비는 일정한 상관관계를 보여주는 것으로 보고한 바 있다. 이들 연구는 Nd 동위원소가 퇴적물의 기원물질 혹은 상관성을 밝히는 데 매우 유용하다는 것을 시사해주는 것이다.

경기육괴의 북서부에 속하는 파주시 월릉면, 광탄면, 조리면 지역에는 여러 번의 습곡작용을 받은 선캄브리아기 규암과 석회질 편암이 분포한다(Fig. 1). 이들 10여 개의 규암과 2개의 석회질 편암은 반복적인 분포의 원인을 밝힐 수 있는 지층의 상하 판단의 기준인 퇴적구조가 규암에서 소수의 사층리를 제외하고는 다른 퇴적구조가 전혀 관찰되지 않는다. 이들 규암과 석회질 편암의 반복적인 분포는 서로 각각 다른 규암과 석회질 편암을 형성하는 퇴적암이 순차적으로 퇴적된 것인지, 혹은 1~2개의 동일한 규암과 석회질 편암이 등사 습곡작용 혹은 트러스트 단층작용에 의하여 반복 분포되는 것인지 그 원인이 불분명하다. 그러므로 규암에서 희토류원소의 지구화학적 특성과 Nd 모델연대자료를 토대로 반복 분포하는 규암의 상호 연결성을 밝히고자 한다. 이는 야외지질조사에서 반복 분포하는 지층의 직접적인 연결성을 확인할 수 없는 경우에 지구화학적 도구를 이용하여 해석하는데 유용한 방법으로 사용될 수 있다고 사료된다.

지질각론

연구지역은 경도 126°45'00"~126°55'00", 북위 37°43'50"~37°50'00" 내에 위치하며, 선캄브리아기 변성암(변성 퇴적암류 혹은 변성화성암류), 쥐라기 화강암, 제4기 충적층으로 구성된다(Fig. 1). 선캄브리아기 암석은 퇴적기원의 변성암인 흑운모편마암, 미그마타이트질 편마암, 이들을 관입한 화성기원의 잔류반상질(blastoporphyrictic) 화강편마암, 흑운모 화강편마암, 우백질 화강편마암, 엽리상 거정질 흑운모화강암으로 구성된다(고희재 외, 2004). 쥐라기의 각섬석 흑운모 화강암은 선캄브리아기 암석을 관입한 소규모 암주 형태로 존재한다. 연구지역의 기반암을 형성하는 흑운모 편마암에는 석영-운모 편암, 운모 편암, 대리암, 석회규산염암, 석회질 편암, 유백색 규암, 석영편암이 호층으로 협재된다. 유백색을 띠며 괴상으로 치밀 견고한 순수한 규암은

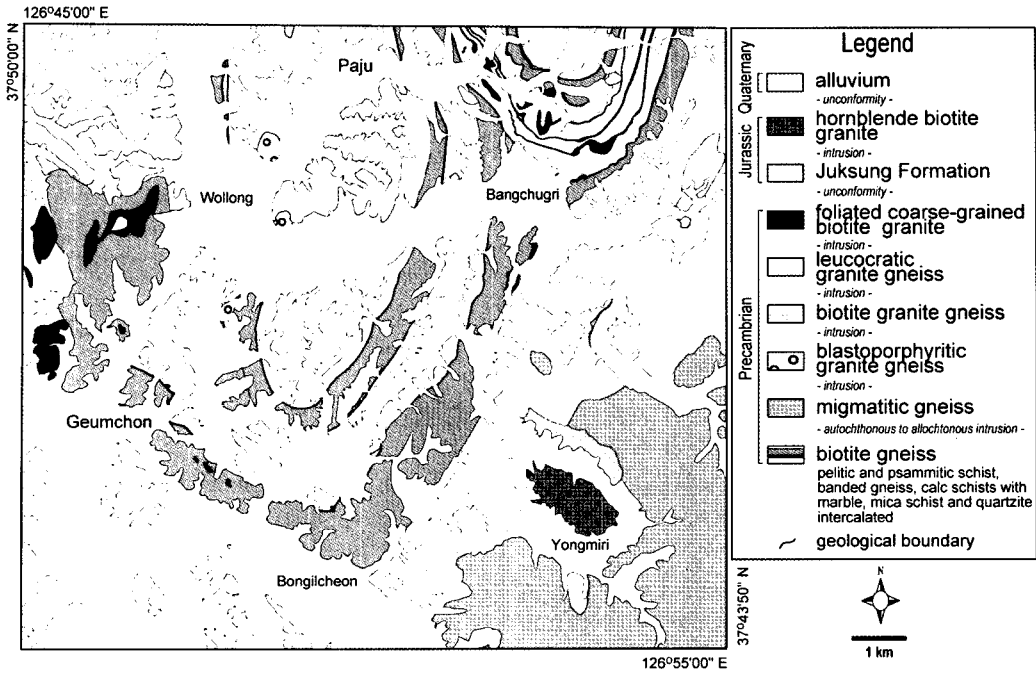


Fig. 1. Geological map of the study area (after Koh *et al.*, 2004).

1 m 내의 두께를 갖으며, 수 cm~수십 cm 두께의 석영 편암 혹은 석영, 백운모, 석류석으로 구성된 석영-운모 편암과 호층을 형성한다. 규암과 석영편암, 석영-운모 편암을 하나의 규암 구성체로 간주하면 전체적인 규암의 두께는 5~30 m 정도로 다양하게 나타난다. 석영-운모편암은 석영과 운모류의 함량이 비슷하며, 운모류가 우세한 층에서는 1~2 cm 크기의 석류석이 신장선구조 방향으로 정향배열을 한다. 규암은 연풍제-삼방리-금병산 지역에 6매, 영태리-조리 지역에 4매 등 총 10매가 존재하며, 이들 10매의 규암은 석회질 편암의 분포와 밀접히 연관되어 있다. 10매의 규암과 4매로 구성된 석회질 편암의 반복 분포 양상은 의견상 등사습곡작용에 기인된 것으로 나타난다(Fig. 2). 노두에서 관찰되는 등사습곡의 형태와 이와 연관된 지질구조는 2~3매의 규암이 반복하여 분포된 가능성을 시사한다. 등사습곡작용 이후에 10매의 규암은 N10°E 방향으로 침강하는 습곡축을 갖는 2조의 대규모 개방형 향사구조에 의하여 습곡축면의 동측과 서측에 반복 분포된다.

괴상의 유백색 규암은 완전히 재결정된 모자이크 조직을 보이는 석영으로 구성되며, 소량의 백운모가 석영과 석영의 결정 경계면 사이에 존재한다. 석영편암은 신장된 후 재결정된 석영립들이 엽리면에 평행하게 배열을 하고 있으며, 백운모와 소량의 흑운모가 정향

배열되어 엽리면을 형성한다. 현미경하에서 운모류는 두 방향의 정향배열을 보여준다. 두 조의 정향배열면(엽리면)은 10°~15° 사교하며 운모류는 서로 다른 형태를 갖고 있다. 1차 엽리면(S_{n+1})에 평행한 운모류는 크기가 비교적 큰 백운모와 흑운모로 구성되며 석영의 신장방향과 평행하게 놓여있다. 노두에서 관찰되는 1차엽리인 광역엽리와 일치하는 2차 엽리면(S_{n+2})은 1차 엽리의 운모류에 비하여 상대적으로 크기가 작고 길쭉한 형태의 운모류로 구성된다. 불균질한 석영장석질 사암에서 기원한 규암은 석영 이외에 다수의 정장석, 사장석과, 백운모, 소량의 흑운모로 구성된다. 규암에 협재된 운모편암은 반자형내지 타형의 석류석이 다수 산출된다. 석류석 반정의 내부에 포유된 광물은 석영과 백운모, 흑운모가 대부분이며, 이들은 주엽리에 비하여 초기 시기에 성장한 전구조직 성장의 증거를 흔히 나타낸다. 법원을 삼방리 지역에서 규암에 박층으로 협재된 운모편암에는 남정석을 포유한 석류석 변성반정이 산출된다. 남정석이 포유된 운모편암의 기질에는 중심부에 남정석 잔류물을 일부 포함하는 것으로 판단되는 홍주석이 관찰된다. 남정석의 산출은 규암과 운모편암을 포함하는 편암류가 중압의 광역변성작용을 경험하였음을 지시하며, 운모편암에서 관찰되는 규선석과 함께 산출되는 홍주석은 중압형 변성작용 이후에

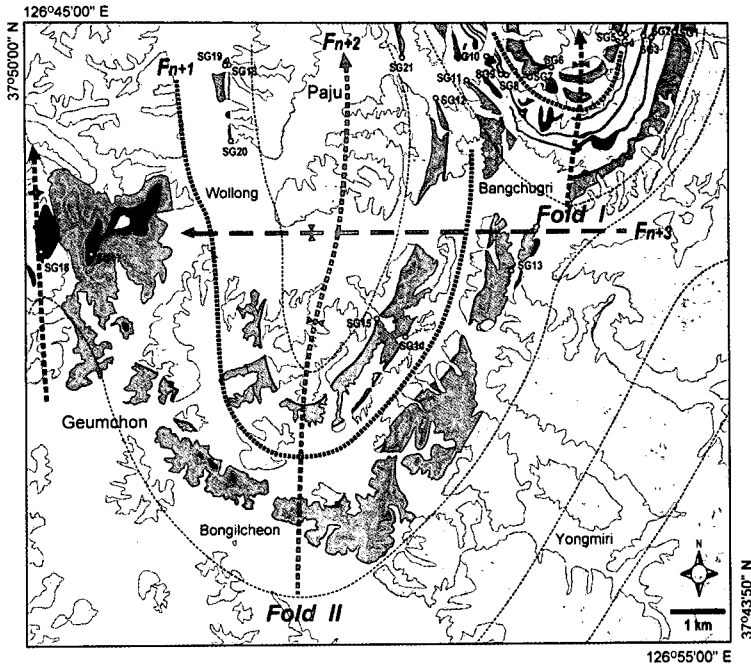


Fig. 2. Folding structure emphasized on quartzite (black) and calc-schist (green) layers and sample locality map of quartzite. Line of F_{n+1} axial trace is possible interpretation based on the occurrence of quartzite and calc-schist layers.

저압형 변성작용이 중첩된 다변성작용이 발생하였음을 지시한다.

지질구조

연구지역의 지질구조는 선캠브리아기 지구조운동에 의하여 형성된 동사습곡, 광역엽리, N10°E 방향의 습곡축을 갖는 개방형 습곡에 의한 지층의 반복 분포 등이 특징적이다. 현생이언에 발생한 구조운동은 한반도 전역에 걸쳐 나타나는 동-서 방향의 완만한 개방형 습곡과 북북동-남남서 방향의 단층을 형성하였다(Chough *et al.*, 2001). 그러나 현생이언의 지구조운동에 의한 습곡구조와 단층구조는 국부적으로 인지될 뿐, 조사지역 전반에 걸친 지질분포에는 영향을 주지 못하였다.

연구지역에는 최소한 3회의 습곡작용이 존재한다. 퇴적기원 편마암에서 사질암과 이질암이 교호하는 성분적 경계는 변성분배작용에 의하여 관통상 엽리로 완전히 전위되었기 때문에 야외노두와 미세구조로부터 판단되는 첫 번째 습곡구조의 형성 이전에 발생한 습곡작용이 몇 회가 존재하는지 알 수 없다. 따라서 조사지역에서 인지되는 습곡의 간섭구조를 기준으로 1차, 2차, 3차 습곡작용을 각각 F_{n+1} , F_{n+2} , F_{n+3} 으로 정의하였다(Fig. 2).

연구지역의 광역엽리를 형성시킨 F_{n+1} 은 습곡구조의 양 날개가 서로 평행한 동형습곡이 특징으로서 광역엽리면에 평행한 전단운동이 수반되었다. F_{n+1} 에 의하여 형성된 동형습곡은 습곡의 축부가 두꺼워지고 날개부가 얇아지는 형태이며, 엽리면, 습곡축면, 습곡날개는 서로 평행하다. 이들 구조는 층평행 편평작용(layer-parallel flattening)에 의하여 형성되었으며, 노두규모의 석영-운모 편암, 편암과 규암의 호층대, 석회질 편암 등에서 전단운동이 수반되어 잘 나타난다. 편암과 규암의 호층대나 석영맥을 포함하고 있는 석회질 편암에서 습곡화작용에서 층평행 편평화 작용이 더 진행된다면 두 암상의 물리적 특성차이에 의하여 석영맥이나 박층의 규암은 부딘화되고, 동형습곡은 렌즈 모양의 고립된 뿌리없는 습곡(rootless fold) 형태로 나타난다. 엽리 면상에서 이들 부딘과 뿌리없는 습곡은 규칙적인 정향 배열을 하는 로드(rod)구조를 형성하여 신장선구조 방향을 정확하게 지시한다. 부딘구조와 뿌리없는 습곡의 꼬리부분에서는 광역엽리면의 형성과 연관된 전단운동면이 존재하며, 대부분의 경우 광역엽리와 전단운동면은 서로 일치하거나 10° 이내의 각으로 사교한다.

파주시, 월롱면, 광탄면, 조리면 지역에서는 규암, 석회질 편암, 흑운모 편마암과 같은 동일 암석이 습곡작

용에 의하여 수회 반복 분포한다(Fig. 1). 그러나 지층의 구조적 반복 분포를 파악할 수 있는 지층의 상하 판단 기준이 될 수 있는 퇴적구조가 일부 규암에서 관찰되는 사층리를 제외하고는 다른 증거가 전혀 관찰되지 않는다. 또한 습곡과 엽리의 버전스(vergence), 습곡 측면과 층리면의 상호관계로부터 유추할 수 있는 상하 판단의 지질구조적 해석이 F_{n+1} 습곡작용 동안에 발생한 강한 수축작용과 전단작용 때문에 불가능하다. 그

러므로 Fig. 2에서 보는 바와 같은 유사한 암석학적 특성을 갖는 여러 개의 규암, 석회질 편암, 흑운모 편암이 습곡작용이나 트러스트 단층작용과 같은 지구조 운동에 의하여 동일 지층이 반복 분포하는 것인지, 혹은 서로 다른 시기에 퇴적된 동일 성분의 지층인지에 관한 진위를 확인 할 수 없다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 규암에 함유된 희토류원소와 Nd 동위원소비를 분석한 결과로부터 동일한 특성을 갖는 규암

Table 1. Concentrations of major elements (wt.%), trace and rare earth elements (ppm) of quartzites and mica schists.

	Quartzite									Mica schist		
	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	SG7	SG8	SG9	SG3-1	SG7-1	SG9-1
SiO ₂	93.1	96.6	97.1	94.5	94.9	94.8	97.5	95.0	96.2	-	64.4	63.6
Al ₂ O ₃	4.42	1.96	1.67	3.11	3.10	2.91	1.20	2.41	2.24	-	18.4	20.4
Fe ₂ O ₃ *	0.18	0.26	0.22	0.45	0.20	0.29	0.31	1.10	0.31	-	6.79	4.05
CaO	0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.07	0.02	0.01	<0.01	<0.01	-	0.43	0.08
MgO	0.09	0.07	0.05	0.28	0.10	0.35	0.17	0.07	0.09	-	1.00	0.55
K ₂ O	1.13	0.55	0.43	0.87	0.85	0.86	0.29	0.64	0.63	-	5.08	6.63
Na ₂ O	0.07	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.04	0.02	-	0.19	0.21
TiO ₂	0.16	0.04	0.03	0.08	0.08	0.06	0.02	0.13	0.02	-	0.65	0.91
MnO	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	-	0.19	0.01
P ₂ O ₅	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	-	0.10	0.08
Ig. loss	0.92	0.48	0.46	0.71	0.61	0.68	0.43	0.59	0.49	-	2.77	3.42
total	100.1	100.02	100.02	100.07	100.02	100.02	99.96	100.01	100.03	-	100	99.94
Rb	56.6	30.9	22.1	50.4	43.8	40.3	21.8	42.2	35.3	306.3	250.2	405.5
Sr	26.5	5.04	5.82	7.58	8.11	4.30	2.58	10.7	3.27	49.5	47.4	32.0
Zr	92.7	1.45	1.51	27.8	5.52	4.38	7.27	18.4	2.72	174.1	155.8	230.0
Ba	1883	69.4	2426	315.4	70.0	92.0	98.8	145.0	44.1	3178	3700	1529
U	1.85	0.60	0.53	1.01	0.63	0.48	0.27	1.15	0.35	4.12	5.05	4.46
Th	14.9	3.53	4.83	13.8	5.14	5.57	2.64	10.7	2.55	27.3	30.6	54.2
Y	10.4	3.03	6.53	16.5	10.4	7.81	3.13	10.5	2.64	49.1	92.8	18.9
La	29.6	6.95	34.1	32.2	38.3	11.4	6.02	20.6	8.08	24.7	57.2	85.6
Ce	44.1	8.59	31.6	42.3	19.3	16.0	7.11	29.4	8.41	51.1	93.7	219.5
Pr	6.05	1.07	3.93	5.92	4.54	1.88	1.19	3.59	1.22	5.54	12.1	17.4
Nd	20.5	3.69	13.4	19.3	11.7	6.79	3.76	12.6	3.89	20.0	42.7	60.3
Sm	4.17	0.73	2.01	3.71	2.78	1.32	0.90	2.23	0.74	4.46	9.87	11.8
Eu	0.73	0.12	0.60	0.61	0.59	0.21	0.15	0.38	0.16	1.06	1.95	1.89
Gd	3.40	0.63	1.72	3.27	2.32	1.14	0.70	1.94	0.64	4.27	9.63	9.25
Tb	0.39	0.08	0.19	0.44	0.32	0.16	0.10	0.25	0.08	0.77	1.56	1.03
Dy	1.77	0.43	0.94	2.31	1.59	0.93	0.47	1.46	0.40	5.30	10.2	3.93
Ho	0.31	0.09	0.18	0.46	0.31	0.20	0.09	0.29	0.08	1.21	2.31	0.60
Er	0.77	0.24	0.48	1.21	0.80	0.54	0.24	0.83	0.20	3.40	6.41	1.55
Tm	0.09	0.03	0.05	0.15	0.10	0.07	0.03	0.11	0.03	0.51	0.91	0.18
Yb	0.55	0.23	0.33	0.97	0.65	0.48	0.20	0.75	0.18	3.43	6.09	1.30
Lu	0.08	0.03	0.05	0.13	0.09	0.07	0.03	0.11	0.03	0.52	0.89	0.21
(La/Yb) _N	3.98	2.21	7.52	2.44	4.36	1.74	2.23	2.03	3.36	18.7	3.36	0.69
Eu/Eu*	0.90	0.85	1.51	0.81	0.90	0.79	0.88	0.85	1.11	1.05	0.93	0.84

¹⁾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

의 분대를 시도하였다.

시료채취 및 분석방법

Fig. 2에서와 같이 반복 분포하는 규암의 연결성을 밝혀내기 위해, 구조지질학적으로 동일한 암상으로 사료되는 암석을 채취한 후 화학분석을 실시하였다. 시료채취 위치는 Fig. 2에 기재된 바와 같다. 습곡 I 지역에서의 시료채취시 습곡 I의 습곡축을 기준으로 시료 SG1-SG11, SG2-SG10, SG3-SG9, SG4-SG8, SG5-SG7 은 각각 같은 층준의 규암에 속한다(Fig. 2). 습곡의 가장 내부에 해당되는 SG6의 경우 노두 상태가 매우 불량인 관계로 1개의 시료 밖에 얻지 못하였다. 그리고 규암의 근원암 관계를 살펴보기 위해, 규암 사이에 협재되어 분포하는 운모편암의 시료를 채취하였다. 습곡 II 지역은 습곡 I 지역에 비하여 정확한 대비 상태를 규명하는데 어려움이 있으나, SG15-SG21의 시료군과 SG18-SG19-SG20의 시료군, SG12-SG14가 동일한 층인 것으로 간주되는 시료이다. 시료는 대개 3~7 kg 정

도의 무게를 갖는 크기로 채취하였으며, 이 중 1 kg 정도를 분쇄기로 1차 파쇄시켜 이로부터 100 g 정도를 화학분석용 시료분말을 만들었다. 그리고 암석시료들의 주성분, 미량성분과 희토류원소는 각각 한국지질자원연구원의 XRF(Shimadzu MXF-2300)와 ICP-MS(Elan 6100, Perkin-Elmer Ltd.)를 이용하여 분석하였다. 주성분의 경우 분석오차는 3% 이내이며, 미량원소와 희토류원소의 경우 분석오차는 10% 이내로 판단된다. 그러나 Ba의 함량이 1000 ppm 이상 매우 높은 일부 시료의 경우, Ba 산화물이 Eu의 분석치에 매우 큰 영향을 주기 때문에 분석오차가 매우 클 것으로 판단된다. 실험방법은 김건한과 음철현(2004)에 기재되어 있다. Nd 동위원소비는 한국기초과학지원연구원서 열이온화질량분석기로 분석하였다. Nd 동위원소비의 측정과 관련된 실험방법은 Cheong and Chang(1997)에 기재되어 있다. 실험과정의 Sm, Nd에 대한 바닥값은 50 pg 이하였고, La Jolla Nd 표준물질의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 의 평균분석값은 0.511855 ± 0.000015 ($N = 12, 2\sigma_m$)이었다.

Table 2. Trace and rare earth elements abundance (ppm) of quartzites.

	SG10	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
Rb	24.8	125.8	99.2	40.2	23.6	43.0	75.1	35.6	138.1	23.4	26.3	75.9
Sr	5.04	280.8	6.70	27.0	4.20	7.50	21.5	5.10	25.2	5.49	7.10	13.3
Zr	6.89	15.9	17.1	25.3	6.46	10.7	19.3	11.4	62.9	6.10	1.67	11.6
Ba	32.8	3985	155.8	212.6	1386	216.8	185.9	133.7	853.7	102.7	73.6	161.0
U	0.31	1.52	1.05	0.89	0.44	0.74	0.63	0.36	1.48	0.45	0.30	0.75
Th	3.45	21.7	12.0	4.61	3.12	7.99	11.0	4.00	12.6	3.61	3.05	7.23
Y	3.38	23.1	12.3	4.80	2.16	5.17	5.81	2.36	10.9	4.47	2.50	5.47
La	10.3	52.5	20.9	8.87	2.68	11.7	21.7	21.6	14.2	36.7	6.02	11.8
Ce	11.9	72.9	38.9	11.9	5.71	15.7	30.6	25.8	18.8	64.4	5.44	14.7
Pr	1.52	9.41	4.28	1.67	0.51	2.32	3.86	3.35	2.96	7.27	1.07	2.23
Nd	5.13	32.5	16.1	5.58	2.18	7.52	13.2	11.0	9.35	26.3	2.99	7.33
Sm	0.93	6.49	2.87	1.23	0.36	1.44	2.30	1.29	2.32	4.56	0.68	1.64
Eu	0.17	1.44	0.49	0.31	0.16	0.24	0.45	0.31	0.43	0.88	0.10	0.27
Gd	0.76	5.79	2.48	1.03	0.33	1.12	1.88	1.07	2.00	3.02	0.51	1.09
Tb	0.09	0.74	0.32	0.13	0.05	0.14	0.21	0.10	0.30	0.29	0.07	0.14
Dy	0.46	3.57	1.69	0.68	0.27	0.72	0.95	0.41	1.68	1.15	0.38	0.76
Ho	0.09	0.65	0.35	0.14	0.06	0.15	0.17	0.07	0.34	0.16	0.08	0.16
Er	0.25	1.58	0.95	0.36	0.18	0.42	0.47	0.22	0.90	0.33	0.21	0.46
Tm	0.03	0.18	0.12	0.05	0.03	0.05	0.06	0.02	0.12	0.038	0.03	0.06
Yb	0.20	1.05	0.73	0.33	0.17	0.37	0.37	0.15	0.81	0.30	0.18	0.41
Lu	0.03	0.15	0.09	0.05	0.030.05	0.05	0.02	0.11	0.035	0.02	0.06	
(La/Yb) _N	3.72	3.68	2.10	2.01	1.15	2.34	4.32	10.8	1.30	4.27	2.48	2.12
Eu/Eu*	0.97	1.10	0.86	1.27	1.69	0.89	1.00	1.23	0.92	0.95	0.81	0.94

¹⁾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

결과 및 토의

본 지역에 분포하는 규암의 연결성을 층서학적 및 구조지질학적으로 이미 앞에서 토의한 바 있다. 이 절에서는 상기에 기술된 희토류원소의 지구화학적 특성, Nd 동위원소비 그리고 미량원소의 지구화학적 특성을 이용하여 서로간의 상관성을 비교 검토하고자 한다. Table 1에는 조사지역내 규암과 운모 편암의 주성분, 미량성분과 희토류원소의 함량을 기재하였고, Table 2에는 미량성분과 희토류원소 조성을 기재하였다. 규암의 주성분 함량에 있어서 SiO₂의 함량은 93.1~97.5%로 대개 95% 전후에 밀집되어 있고, Al₂O₃와 K₂O는 각각 1.20~4.42%, 0.29~1.13%로 약간의 변화가 관찰된다.

Fig. 3과 4는 연구지역의 북동부에 분포하는 6개의 규암 및 운모편암에 대하여 PAAS(Post-Archean Aus-

tralian Shale; Nance and Taylor, 1976)로 규격화한 희토류원소 분포도이다. Fig. 3의 a와 b에서의 기호는 Fig. 1에서 연결된 층으로 판단되는 규암에 대해서는 동일한 기호를 사용하였다. 즉 SG1-SG11, SG2-SG10, SG3-SG9, SG4-SG8, SG5-SG7은 상호 연결된 동일한 층으로 추정된 것이다. 습곡 1의 오른쪽 날개부에 해당되는 Fig. 3a의 시료들은 희토류원소의 전체적인 분포도 특성에 따라 SG1-SG3-SG5와 SG2, SG4의 3개군으로 구분된다. 반면에 습곡 1의 왼쪽 날개부에 해당되는 Fig. 3b의 시료들은 SG11, SG7-SG9-SG10 그리고 SG6-SG8의 3개군으로 구분할 수가 있다.

연구지역의 중앙에 위치하는 규암들에 대하여 PAAS로 규격화한 희토류원소 분포도는 Fig. 4a와 4b에 도시되어 있다. 각각의 시료들에 대한 기호의 표시에 있어서, 지질구조적으로 동일한 층군에 속하는 시료는 동

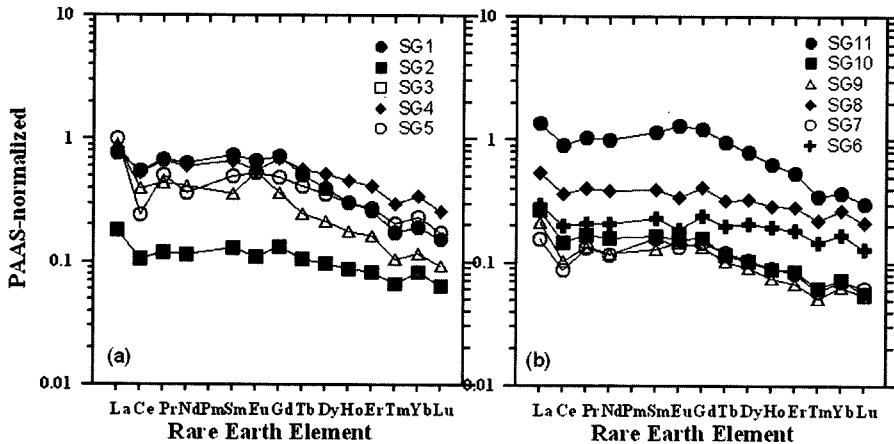


Fig. 3. PAAS-normalized REE pattern for quartzite at the northeastern part (Fold I).

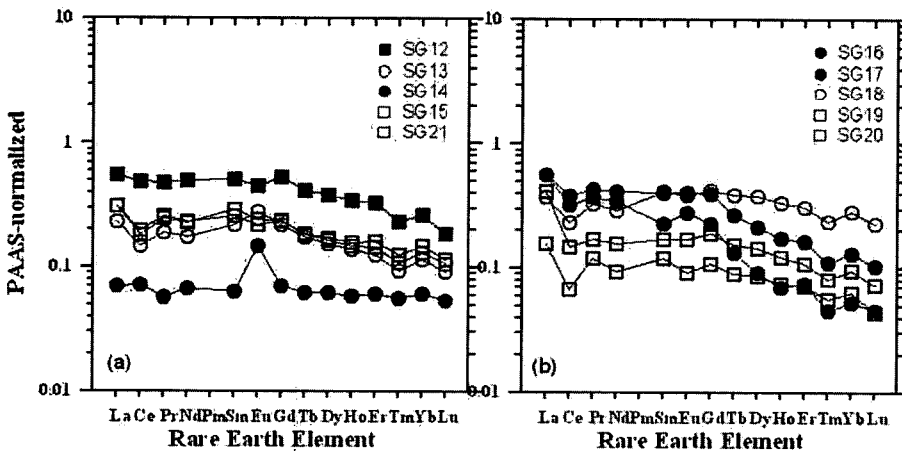


Fig. 4. PAAS-normalized REE patterns for quartzite at the middle part (a) and western part (b) in Fold II.

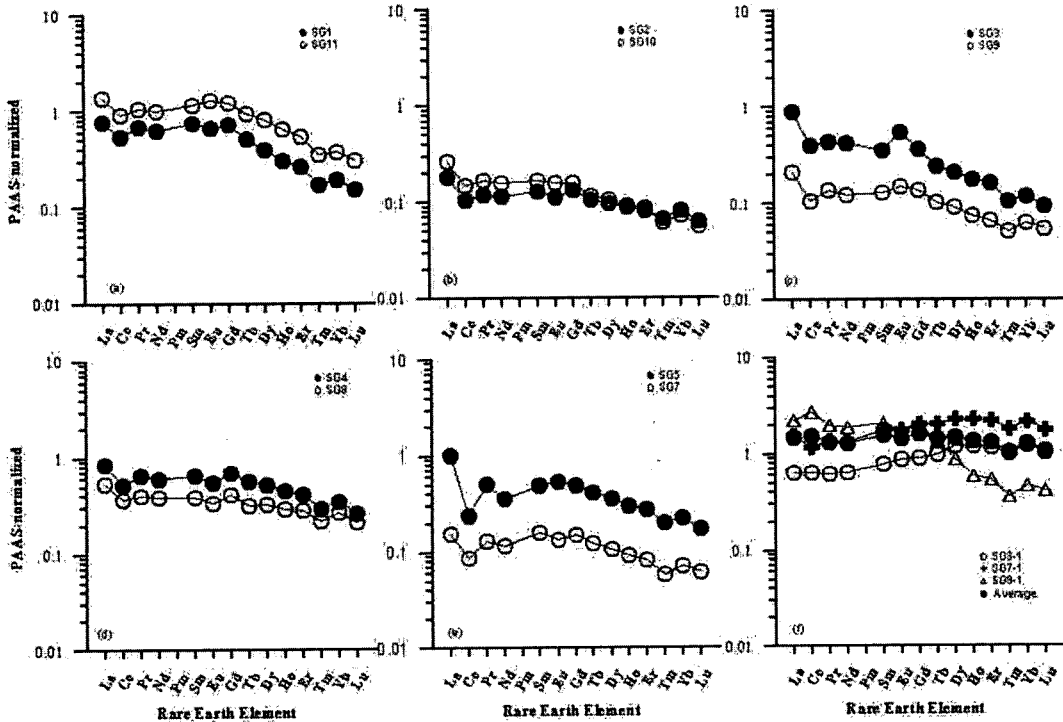


Fig. 5. PAAS-normalized REE patterns for quartzite (a-e) and mica schist (f). In (a) to (e), the samples symbolized by solid circle are for the right side of Fold I whereas those by open circle are for the left side of Fold II. The solid symbol in (f) is average value of three mica schists.

일한 기호를 사용하였다. 우선 습곡 II의 오른쪽에 분포하는 규암인 희토류원소 분포도인 Fig. 4a에서 지질 구조적인 측면을 고려하지 않고, 희토류원소 지구화학적 특성만을 고려한다면, 크게 SG12, SG13-SG15-SG21과 SG14의 3개군으로 구분할 수가 있다. 그리고 습곡 II의 왼쪽에 속하는 규암인 Fig. 4b에서는 중희토류의 분포특성을 토대로 SG16-SG17과 SG18-SG19-SG20으로 크게 분류된다.

Fig. 3a의 시료 SG3과 Fig. 4a의 시료 SG14는 현저한 Eu의 정(+)의 이상을 보여주고 있는 데, 이는 시료 자체의 특성이라기보다는 Table 2에서 보여주는 바와 같이 Ba의 함량이 너무 높아, ICP-MS로 분석을 실시할 때 ^{151}Eu 과 ^{153}Eu 에 영향을 미치게 되기 때문에 발생한 것이다. 현재 이 자료에서는 나타나지 않지만, 실제로는 다른 시료들과 마찬가지로 Eu의 이상이 거의 존재하지 않거나 부(-)의 이상을 지니고 있는 것으로 추정된다.

Fig. 5a에서 Fig. 5e는 습곡 I의 습곡축을 기준으로 양 측의 동일한 지층으로 사료되는 시료들을 묶어서 도시한 그림이고, Fig. 5f는 규암과의 경계 부분에서 채

취된 운모편암들에 대한 희토류원소 분포도이다. 습곡 I의 규암들의 희토류원소 분포도를 비교해 볼 때, 습곡 축의 외곽부에 해당되는 SG1과 SG11, SG2와 SG10, SG4와 SG8은 서로 간에 매우 유사한 분포양상을 보여준다. 이와 같은 유사한 희토류원소 분포특성은 양 측의 규암들이 동일한 기원물질로부터 유래되었음을 시사해주는 것으로써, 층서적 및 지질구조적 연결과 대비되는 것으로 볼 수 있다. Fig. 5a에서 Fig. 5e의 습곡 I에 분포하는 규암들과 Fig. 4의 습곡 II에 분포하는 규암들의 희토류원소 분포도에서는, 대부분의 시료가 미약하나마 Ce의 부(-)의 이상을 보여주고 있다. 일반적으로 산화환경하에서 Ce^{3+} 는 Ce^{4+} 로 산화되며, 이는 Ce의 이온반경을 약 15% 정도 감소시키어, Ce의 결핍을 일으키는 요인이 된다(McLennan, 1989). 그러므로 연구지역에 분포하는 규암의 기원물질들이 퇴적될 당시에는 산화 환경이 강했을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 규암과 편암에서의 Ba/Sr, Rb/Sr, Ba/Eu, Eu/Sr의 상관관계를 비교한 도면이다. Fig. 6의 Ba/Sr, Rb/Sr, Ba/Eu, Eu/Sr의 상관관계도를 살펴보면, 비교적 선형관계를 잘 보여주고 있음을 알 수 있다. Sr에 대

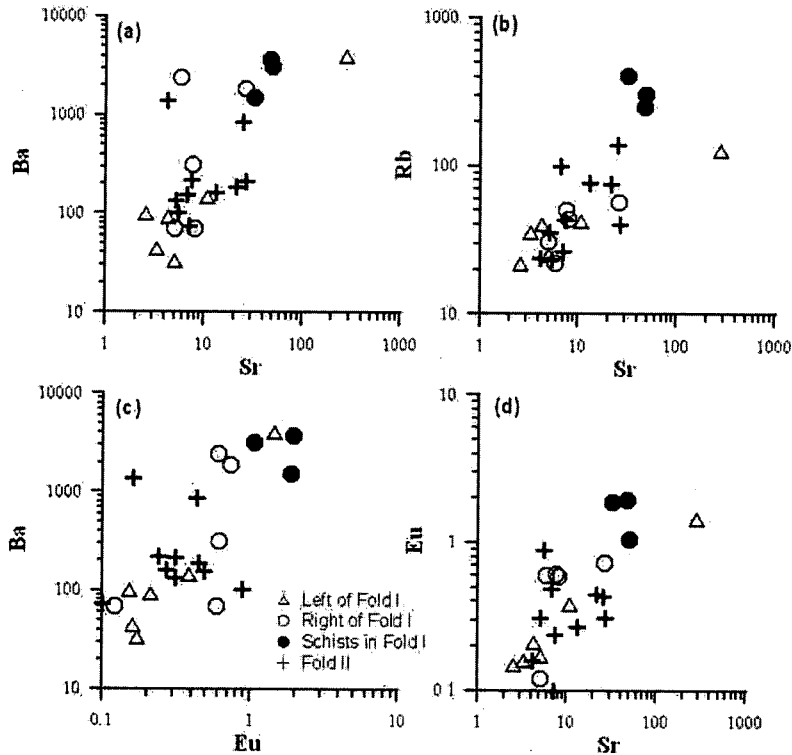


Fig. 6. (a) Ba vs. Sr, (b) Rb vs. Sr, (c) Ba vs. Eu, (d) Eu vs. Sr correlation diagram for quartzites and mica-schists.

한 Ba, Rb과 Eu의 함량변화는 시료의 채취 위치와 거의 일치하는 경향을 보여준다. 특히 운모편암에서 각 원소들의 함량은 규암 원소들의 값과는 분리되어 있는데, 이는 규암의 근원물질이 규암과는 다를 수 있음을 지시한다.

Table 3은 규암의 Nd 동위원소비를 정리한 표이다. Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 규암시료들의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값은 0.511016~0.511474의 범위에 속하고, $T_{\text{CHUR}}(\text{Ma})$ 는 1.84Ga~2.76Ga로서 비교적 넓은 범위의 Nd 모델연대를 보여주는데, 이는 규암의 기원암이 매우 광범위한 연대를 갖는 기원물질로부터 유래되었음을 지시해주는 것이다. 그리고 F_{n+2} 를 기준으로 SG1에서 SG5, SG11에서 SG7을 볼 때, 습곡축을 중심으로 동측과 서측에 분포하는 규암이 습곡의 외곽부에서 습곡축부인 중심부로 갈수록 즉 SG1의 2.45Ga에서 SG5의 1.84Ga 그리고 SG11의 2.76Ga에서 SG7의 2.09Ga와 Nd 모델연대가 젊어지는 경향이 관찰된다. 일반적으로 퇴적암에서의 Nd 모델연대는 지각내 체류시간을 의미하므로, 이는 규암의 기원물질의 퇴적순서를 시사하는 것으로 볼 수 있다. 즉 습곡구조의 중심부에 속하는 SG5와 SG7이 가장 젊은 기원의 퇴적물로부터 생

성되었고, 외곽부의 SG1과 SG11은 가장 오래된 퇴적물로부터 기원된 것으로 볼 수 있다. 그러나 현재의 Nd 모델연대 자료로부터 연구지역의 규암과 석회질 편암의 반복 원인을 명확히 밝혀내는 것은 어려움이 있다. 따라서 이와 같은 Nd 모델연대의 차이가 퇴적순서를 지시해주는 지를 밝히기 위해서는 보다 체계적인 시료의 채취와 이에 따른 Nd 동위원소비의 추가적인 연구가 필요하다. 그럼에도 불구하고, SG4와 SG8은 습곡구조의 외곽부로 갈수록 젊어지는 경향과는 반대로 $T_{\text{CHUR}}(\text{Ma})$ 가 오래된 것으로 계산되었으며, 이 두 암층은 서로 간에 매우 유사한 모델연대와 희토류원소 분포도를 나타낸다. 이와 같은 지화학적 특성은 이 두 암층이 상하부의 SG3~SG5, SG7~SG9와는 다른 시기에 퇴적되었거나 혹은 습곡작용, 트러스트 운동과 같은 다른 원인에 의하여 하부지층이 상부지층 사이에 놓이게 되었을 가능성을 시사한다. 이외에 SG2와 SG4, SG8과 SG10의 유사한 Nd 모델연대는 이 두 암층이 유사한 기원물질로부터 운반 퇴적된 것임을 시사한다. 그리고 습곡 II의 외곽부에 채취된 시료인 SG13, SG21, SG15, SG20, SG18, SG19(Fig. 2)의 희토류원소 분포도를 하나의 도면에 도시하면(Fig. 7), 서로 간에 매우

Table 3. Nd isotope data for the quartzite.

Sample	Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	εNd(0)	T _{CHUR} (Ga) ^{a)}
SG1	3.35	19.1	0.1062	0.511176 ± 0.000009	-28.5	2.45
SG2	0.58	3.28	0.1077	0.511339 ± 0.000010	-25.3	2.22
SG3	1.64	11.8	0.0844	0.511141 ± 0.000012	-29.2	2.02
SG4	2.76	16.8	0.0995	0.511232 ± 0.000012	-27.4	2.20
SG5	2.24	13.6	0.0997	0.511463 ± 0.000012	-22.9	1.84
SG7	0.96	5.19	0.1122	0.511474 ± 0.000017	-22.7	2.09
SG8	1.46	9.42	0.0940	0.511179 ± 0.000011	-28.5	2.16
SG10	0.93	5.66	0.0994	0.511293 ± 0.000024	-26.2	2.10
SG11	5.76	32.4	0.1076	0.511016 ± 0.000010	-31.6	2.76
SG12	2.36	14.1	0.1010	0.511209 ± 0.000011	-27.9	2.23

^{a)}calculated from CHUR value: ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0.1967; ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512638

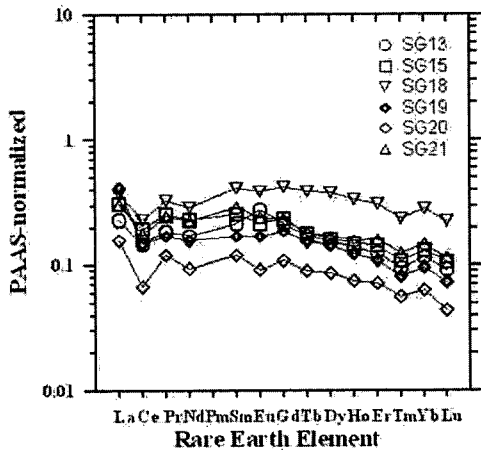


Fig. 7. PAAS-normalized REE patterns for quartzite samples at the outer side of Fold II.

유사한 분포도 양상을 보여준다. 이는 미약하나마 F_{n+1}의 존재를 지시해주는 지구화학적 증거로 판단된다. 이는 희토류원소 지구화학과 Nd 동위원소 지구화학이 퇴적작용과 습곡작용에 따른 지질현상과 구조지질학적 증거와 연관하여 해석하는데 유용하게 활용되어질 수 있음을 시사해주는 것이다.

결론

경기도 파주시, 월릉면, 광탄면, 조리면 지역에는 여러 번의 습곡 작용을 받은 10여 개의 선캠브리아기 규암이 N100E 방향의 습곡축을 갖는 2조의 U자형 습곡 구조(습곡 I, II)를 중심으로 동측과 서측에 분포한다. 이들 규암과 변성퇴적암에는 지층의 상하 판단을 할 수 있는 퇴적구조가 거의 존재하지 않기 때문에 희토류원소와 Nd 동위원소비를 이용하여 서로 떨어져 분

포하는 규암의 연결성을 밝혀내고자 하였다.

이 연구에서는 희토류원소의 전체적인 분포도 특성에 따르면 규암간의 상호연관성은 습곡축을 중심으로 각각 크게 3개군으로 구분되며, 특히 습곡의 외곽부에 대칭적으로 분포하는 규암들은 상호 유사한 희토류원소 분포도를 보여준다. 그리고 습곡 II의 외곽부에 채취된 시료들은 희토류원소 분포도가 서로 간에 매우 유사하다. 이는 미약하나마 F_{n+1}의 존재를 지시해주는 지구화학적 증거라고 볼 수 있다. 이들 규암들의 Nd 모델연대도 습곡의 양쪽 외곽부에서 내부로 젊어지는 경향을 보여준다. 이와 같은 유사한 희토류원소 분포 특성과 Nd 모델연대는 연구지역내에서 습곡축을 중심으로 동측과 서측에 분포하는 규암들이 동일한 기원물질로부터 유래되었음을 시사해주는 것으로써, 층서학적 및 구조지질학적 연결과 대비되는 것으로 볼 수 있다. 이번 연구 결과, 희토류원소 지구화학과 Nd 동위원소 지구화학이 퇴적작용과 습곡작용에 따른 지질현상과 구조지질학적 증거와 연관하여 해석하는데 유용하게 활용되어질 수 있음이 확인되었다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기관고유사업인 도록지질조사사업의 지원을 받아 수행되었다. 그리고 본 논문의 내용을 정성껏 읽어주시고 많은 조언을 해주신 부경대학교 박계현 교수님과 안동대학교 강지훈 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

고희재, 이병주, 이승렬, 2004, 고양 도록 지질조사보고서 (1:50,000), 한국지질자원연구원, 63 p.

- 김건환, 음철현, 2004, 유도결합 플라즈마 질량분광법(ICP-MS)에 의한 암석표준물질 중의 Lanthanoids, Y, Th, U 분석. 한국지질자원연구원 논문집, 8, 43-53.
- Awwiller, D.N. and Mack, L.E., 1991, Diagenetic modification of Sm-Nd model ages in Tertiary sandstones and shales, Texas Gulf Coast. *Geology* 15, 893-895.
- Cheong, C.S. and Chang, H.W., 1997, Sr, Nd and Pb isotope systematics of granitic rocks in the central Ogcheon Belt, Korea. *Geochem. Jour.* 31, 17-36.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: a review and new view. *Earth-Sci. Rev.* 52, 175-235.
- Cullers, R.L., Chaudhuri, S., Kilbane, N. and Koch, R., 1979, Rare earths in size fractions and sedimentary rocks of Pennsylvanian-Permian age from the mid-continent of the U.S.A. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1285-1302.
- Cullers, R.L., Barrett, T., Carlson, R. and Robinson, B., 1987, Rare earth element and mineralogic Changes in Holocene soil and stream sediment: A case study in the West Mountains, Colorado, USA. *Chem. Geol.* 63, 275-297.
- Cullers, R.L., Basu, A. and Suttner, L.J., 1989, Geochemical signature of provenance in sand size material in soils and stream sediment near the Tobacco Root Batholith, Montana, U.S.A. *Chem. Geol.* 70, 335-348.
- Elderfield, H., Upstill-Goddard, R., Sholkovitz, E.R., 1990, The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 54, 971-991.
- Goldstein, S.L., O'nions, R. K. and Hamilton, P.J., 1984, A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth Planet. Sci. Lett.* 87, 249-265.
- Johannesson, K.H., Stetzenbach, K.J., Hodge, V.F., Lyons, W.B., 1996, Rare earth element complexation behaviour in circumneutral pH groundwaters: Assessing the role of carbonate and phosphate ions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 139, 305-319.
- Johannesson, K.H., Stetzenbach, K.J., Hodge, V.F., 1997, Rare Earth Elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 3605-3618.
- Lee, S.G., Masuda, A. and Kim, H.S., 1994, An early Proterozoic leuco-granitic gneiss with the REE tetrad phenomenon. *Chem. Geol.* 114, 59-67.
- Lee, S.G., Lee, D.H., Kim, Y., Chae, B.G., Kim, W.Y. and Woo, N.C., 2003, Rare earth elements as an indicator of groundwater environment changes in a fractured rock system: Evidence from fractured-filling calcite. *Appl. Geochem.* 18, 135-143.
- McLennan, S.M., 1989, Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin, B.R. and McKay, G.A. (eds.), *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*. Mineralogical Society of America, 169-200.
- Nance, W.B. and Taylor, S.R., 1976, Rare earth element patterns and crustal evolution-I. Australian post-Archean sedimentary rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, 1539-1551.
- Nelson, B.K. and Depaolo, D.J., 1988, Application of Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematics to studies of provenances and basin analysis. *Jour. Sed. Petrol.* 58, 348-357.
- Piper, D.Z., 1985, Rare earth elements in the sedimentary cycle: a summary. *Chem. Geol.* 14, 285-304.
- Shimizu, H., Kunimaru, T., Yoneda, S. and Adachi, M., 2001, Sources and depositional environments of some Permian and Triassic cherts: significance of Rb-Sr and Sm-Nd isotopic and REE abundance data. *Jour. Geol.* 109, 105-125.
- Sholkovitz, E.R., 1992, Chemical evolution of rare earth elements: Fractionation between colloidal and solution phases of filtered river water. *Earth Planet. Sci. Lett.* 114, 77-84.
- Sholkovitz, E.R., Szymczak, R., 2000, The estuarine chemistry of rare earth elements: Comparison of the Amazon, Fly, Sepik and the Gulf of Papua systems. *Earth Planet. Sci. Lett.* 179, 299-309.
- Takahashi, Y., Shimizu, H., Kagi, H., Yoshida, H., Usui, A. and Nomura, M., 2000, A new method for the determination of CeIII/CeIV ratios in geological materials: application for weathering, sedimentary and diagenetic processes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 182, 201-207.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312 p.
- Yang, S.Y. Jung H.S., Choi, M. S., Li, C.X., 2002, The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 201, 407-419.

(2005년 5월 7일 접수; 2005년 5월 20일 채택)