

금산 수영리 우라늄광화대의 지질 및 지화학적 특성

조남후¹ · 신동복^{1,*} · 김창렬² · 이명종²

¹공주대학교 지질환경과학과
²한국지질자원연구원 광물자원연구본부

요 약

금산군 복수면 수영리 일대에 분포하는 우라늄광체의 산출양상 및 지구화학적 특징을 파악하였다. 연구지역에는 북동방향의 주향을 갖는 암회색점판암, 흑색점판암 및 녹회색점판암이 발달하며, 우라늄 광체는 흑색점판암내에 협재된 1~3 m의 두께를 갖는 3매의 탄질점판암을 중심으로 발달한다. 탄질점판암은 흔히 층리가 교란되거나 각력화되어 있으며, 토라이트(thorite), 토루타이트(thorutite), 에카나이트(ekanite), 코피나이트(coffinite), 우라니나이트(uraninite) 등의 우라늄광물이 산출된다. 넓은 조성비를 갖는 주성분 원소 및 희유원소 거동특성으로 보아 탄질점판암에는 화성기원 퇴적물이 함께 혼재되어 형성되었을 것으로 추정된다. 암회색 및 녹회색점판암과 흑색점판암이 대부분 황화물이 없거나 적은 환원환경 기원에 가까운 조성을 보이는 반면, 탄질점판암은 황화물이 풍부한 환원환경에서 형성된 것으로 나타난다. U, V, Mo 등의 희유원소들이 현저히 부화되어 산출되거나 희토류원소 중 Eu이 부화되고, Ce이 결핍되며, 높은 U/Th 조성비를 갖는 특징으로 보아 탄질점판암내 우라늄의 농집은 해저열수작용의 영향을 받은 것으로 여겨진다.

주요어: 금산, 우라늄광체, 탄질점판암, 지구화학적 특성, 열수작용

Namhoo Jo, Dongbok Shin, Changryol Kim and Myeongjong Yi, 2013, Geology and geochemical characteristics of uranium mineralized zone in Suyoung area, Geumsan. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 49, no. 2, p. 231-244

ABSTRACT: Occurrence features and geochemical characteristics were investigated for uranium ores distributed in Suyoungri area, Geumsan. NE-trending dark gray slate, black slate and green gray slate are developed in the study area, and uranium ores occur as three sheets of coaly slate with 1 ~ 3 m thickness interbedded in black slate. Coaly slate commonly shows disturbed or brecciated texture, and contains thorite, thorutite, ekanite, coffinite, and uraninite for uranium minerals. Wide range of major element ratios and geochemical characteristics of trace elements suggest that coaly slates are a mixture of sediments of both igneous and sedimentary origin. Dark gray slate, green gray slate and black slate show compositional characteristics of sulfide-absent or poor reducing environments, while coaly slate shows sulfide-abundant reducing environments. Noticeable concentrations of trace elements such as U, V and Mo, relative enrichment of Eu and depletion of Ce, and high U/Th ratio in coaly slates, suggest that uranium mineralization in coaly slate seems to have been influenced by submarine hydrothermal activities.

Key words: Geumsan, uranium ores, coaly slate, geochemical characteristics, hydrothermal activities

(Namhoo Jo and Dongbok Shin, Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea; Changryol Kim and Myeongjong Yi, Mineral Resources Research Division, KIGAM, Daejeon 305-350, Korea)

1. 서 언

전 세계적으로 에너지 광물자원이 국가 발전의

중요 요소로 부각되면서 자원의 안정적인 확보를 위한 국가간의 경쟁이 치열하게 전개되고 있다. 우리나라 또한 기존 광상의 재평가 및 정밀탐사 등을 통

* Corresponding author: +82-41-850-8509, E-mail: shin@kongju.ac.kr

해 자원 확보에 노력을 기울이고 있으며, 그 중 현재 국내 전력생산의 약 36% 가량을 차지하는 원자력의 연료인 우라늄 자원 확보를 위해 함우라늄층으로 알려진 옥천변성대 흑색점판암에 대한 연구가 새롭게 주목을 받고 있다(KIGAM, 2010).

그 동안 옥천변성대 우라늄 광화작용에 관하여 우라늄광화대의 지질 및 층서, 지질구조, 우라늄광물의 산출, 지화학적 특성 및 광상성인 등과 관련된 여러 연구가 수행되어 왔다(Lee and Chon, 1980; Lee *et al.*, 1981, 1986; Lee and Kim, 1985; Kim, 1989; Jeong and Lee, 2001; Jeong, 2006). 또한, 옥천변성대 내에 광범위하게 분포하고 있는 탄질의 흑색점판암은 옥천변성대의 기원을 해석하는데 있어 중요한 실마리를 제공해주고 있으며(Cheong *et al.*, 2003; Jeong, 2006), 기존 연구결과에 따르면 이들 탄질점판암층은 Ba, V, Mo, U과 같은 희유원소들의 높은 함량으로 특징지어 진다(Kim, 1989; Lee *et al.*, 1996).

최근 들어서는 전자현미경 분석 및 광물학적 연구를 통해 옥천대 우라늄광물에 대한 유형 및 산출 특징에 관한 해석이 있었고(Kang *et al.*, 2010; Lee, 2011), 대표적인 우라늄 광화대로 알려진 괴산군 덕평리 지역에 산출되는 흑색점판암과 함우라늄 탄질점판암에 대한 지구화학적 연구를 바탕으로 우라늄 농집환경에 대해 기존 연구결과를 재해석하기도 하였다(Shin and Kim, 2011).

그러나 그 동안의 연구가 대부분 대표적인 우라늄광화대인 충북 괴산지역에 집중되어 왔고 보은, 금산 지역 광체에 관한 연구가 미흡하여 100여 km 이상에 걸쳐 분포하는 흑색점판암내 우라늄광체의 지질학적 변화나 특성을 파악하는데 부족함이 있었다. 특히, 옥천대 흑색점판암의 남동위원소 조성

(Cheong *et al.*, 2003)과 우라늄광물종(Lee, 2011)이 지역에 따라 차이가 있는 것으로 나타나 생성환경에 대한 심도있는 연구가 필요한 상황이다. 이에 본 연구에서는 옥천변성대 남서부 우라늄광화대에 해당하는 금산군 복수면 수영리 일대의 지질, 암석기재학적 및 지화학적 특성을 바탕으로 우라늄광화작용의 특징을 파악하고자 하였다.

2. 지질 및 광상

2.1 지질

연구지역은 행정구역상 충남 금산군 복수면 수영리에 속하며, 좌표상으로 북위 36°11'25", 동경 127°24'20" 부근에 위치한다. 연구지역을 포함하는 금산군 복수면과 진산면 일대는 지질학적으로 옥천변성대 남서부로 대전도폭의 중남부에 해당한다(Lee *et al.*, 1980). 암석은 대부분 선캄브리아기 편마암류를 기반암으로 시대미상 및 고생대 변성퇴적암과 백악기 화성암으로 구성되어 있다(그림 1).

연구지역 일대는 점판암이 주로 분포하는 지역으로 야외에서 육안상으로 암회색점판암, 흑색점판암, 그리고 녹회색점판암으로 구분 지을 수 있으며 편리구조가 뚜렷이 잘 발달하고 있다. 암회색점판암과 흑색점판암은 연구지역 중앙부와 남동부에 반복되어 분포하는데 탄질점판암이 협재된 흑색점판암의 경우 다른 점판암보다 어두운 색상을 띤다. Lim *et al.* (2006)에 의하면 두 점판암은 페름기의 비봉층에 해당되고, 북서부에는 상기 지층과 드리스트로 접하는 시대미상의 녹회색점판암이 발달하는데 판상의 세립사암과 박층의 이질암이 교호한다.

암회색점판암은 연구지역 중앙부에 북동방향의 주향을 가지며 흑색점판암과 서로 교호하면서 분포하며, 대체적으로 흑색점판암과 유사한 광물군을 보이나 상대적으로 탄질의 함량이 적고 흑색점판암에 비해서 밝은 색상을 보인다(그림 2A). 석영, 백운모가 주구성 광물로 관찰되며, 녹니석, 각섬석 및 소량의 금홍석이 수반되고, 황철석이 산점상으로 분포한다(그림 3A). 이 밖에 소규모의 석영세맥이 관찰된다. 흑색점판암은 암회색점판암과 같이 평행하게 발달하는데, 암회색점판암이나 녹회색점판암에 비해 석영 함량이 적고 탄질과 운모의 함량이 높아서 육안상 다른 두 점판암에 비해서 어두운 색상을 보인

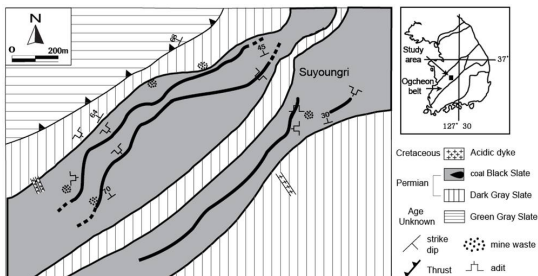


Fig. 1. Geologic map of the Suyoungri area.

다(그림 2B). 흑색점판암 내에는 소규모 습곡과 단층 등의 변형 작용의 흔적이 나타나고, 암석 내에 절리 구조가 발달하고 틈을 따라서 황철석을 수반한 석영 맥이 발달한다. 백운모와 석영이 주로 관찰되고, 사장석, 침정석 및 소량의 금운모와 투각섬석이 산출된다(그림 3B, C). 다른 두 점판암에 비해서 밝게 나타나는 녹회색점판암은 연구지역 북서부에 분포하는데(그림 2C), 세립의 석영과 백운모가 주를 이루며, 소량의 녹니석이 수반된다(그림 3D).

이 밖에 북서방향으로 발달한 소규모의 백악기 산성암맥이 연구지역 남동부와 남서부에서 관찰되는데(그림 2F), 이들은 석영, 사장석 및 정장석이 주 구성 광물을 이루고, 소량의 금홍석과 황철석이 수반된다.

연구지역의 동서로 발달한 골짜기를 중심으로 흑색점판암과 암회색점판암이 분포하는 중앙부의 3개소에서 소규모의 역단층이 관찰된다. 이들은 지층의 주향과 평행한 N40~60°E의 방향을 가지며 일부 단층대를 따라서 탄층이 발달하고 이를 따라 굴진한 흔적이 관찰된다. 연구지역 점판암은 대체로 N50~70°E 주향과 40~70°NW의 경사를 보이거나 북동부 흑색점판암대에서는 지층이 교란된 흔적이 관찰된다. 습곡은 주로 중앙부의 흑색점판암 분포 지역에서

서 관찰되는데 습곡축은 북동방향으로서 단층과 유사한 방향을 보여준다.

2.2 우라늄 광상

연구지역 우라늄 광체는 흑색점판암 내에 탄질성분이 주를 이루고 있는 탄층을 따라 부존된 양상을 보인다. 주변 흑색점판암에 비해 현저히 어두운 색을 띠고 있어서 육안으로 비교적 쉽게 구분되고 뚜렷한 경계를 나타내며, 흑색점판암과 대체로 평행하게 발달하나 층리가 교란되거나 각력화 된 특징을 보이기도 한다(그림 2D, E). 연구지역에는 3매의 광체가 흑색점판암내에서 북동방향으로 발달하며 약 1~3 m의 두께와 1 km 가량의 연장을 보인다. 광체를 따라 곳곳에 채굴적과 폐갱도가 발달하나 이들 중 일부는 과거 흑연을 개발했던 것으로 알려져 있다. 갱도는 붕락되거나 물이 차 있고 일부는 입구가 차단되어 있어서 내부 진입은 대부분 불가능한 상태이다.

탄질점판암은 흑색점판암에 비해 다량의 탄질물질과 더불어 석영 및 황철석의 산출이 많고 백운모, 금운모, 녹니석, 방해석 등이 수반된다. 특히, 1 mm 내외의 폭을 가지는 세맥들이 종종 관찰되는데 이들은 주로 석영, 방해석, 혹은 녹니석으로 구성되며 황

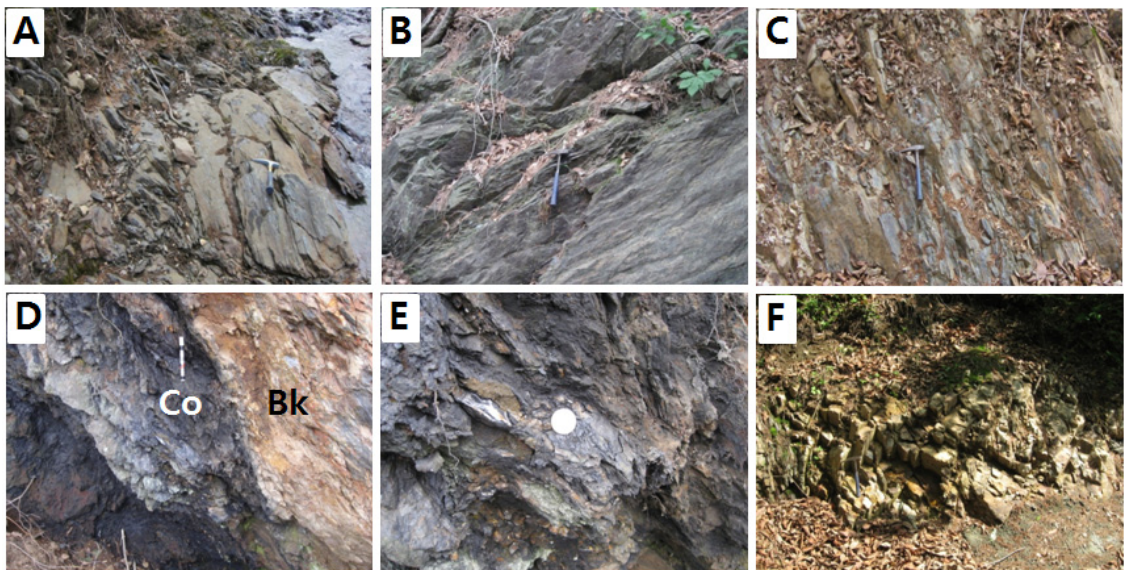


Fig. 2. Outcrop images of various rock types from the Suyoungri area. (A) dark gray slate, (B) black slate, (C) green gray slate, (D) coalty slate (Co) in sharp contact with black slate (Bk), (E) coalty slate showing brecciation texture, (F) acidic dyke.

화광물이 흔히 수반된다(그림 3E, F). 황화광물이 관찰되는 부분이 주로 균열대 부근이지만, 주변 모암과 더불어 변성작용을 받아 세맥을 이루고 있는 것으로 보아 변성작용을 받는 도중 혹은 변성작용이 끝날 무렵 생성된 것으로 보인다. 모암인 흑색점판암에서는 반자형내지 타형의 황철석 입자들이 산점상으로 산출되는 것이 일반적이거나 탄질점판암에서는 괴상의 황화광물 집합체가 석영과 더불어 단속적으로 산출되기도 한다.

3. 시료 및 분석

연구지역 우라늄광체의 모암인 흑색점판암과 광석시료인 탄질점판암에서 산출되는 우라늄광물의 화학조성을 파악하기 위하여 전자현미분석을 실시하였다. 분석은 한국기초과학지원연구원 전주센터의 SHIMADZU사 EPMA1600을 이용하였으며, 분석조건은 15 kv의 전압, 20 nA 전류와 빔(beam) 크기는 3 μm 로 하였다.

또한, 다양한 점판암과 우라늄 광체의 지화학적 특징을 파악하기 위해 암회색점판암 6개, 흑색점판

암 6개, 녹회색점판암 2개 및 탄질점판암 6개 시료를 선별하여 이들의 암석기재학적 특징을 파악한 후 주원소, 희유원소 및 희토류원소 분석을 실시하였다. 주원소 분석은 서울대학교 기초과학공동기기원의 X-선 형광분석기(XRF)를 사용하였고, 미량원소 및 희토류원소의 분석은 한국기초과학지원연구원 서울센터의 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)와 유도결합플라즈마 방출분광분석기(ICP-AES)를 이용하였다. 총유기탄소(TOC) 함량을 위한 Rock-Eval 열분석은 캐나다 ACTLAB에서 수행하였다.

4. 우라늄광물

우라늄광물은 편광현미경으로는 관찰이 어려우나 BSE(후방산란전자)를 이용한 전자현미경 관찰시 매우 밝게 나타난다. 대부분 10 μm 미만의 극세립질로 산점상으로 산출되며 불규칙한 형태를 띠고 있다(그림 4). 이들은 탄질점판암에서 주로 산출되며 흑색점판암 내에는 소량 관찰된다. 특히, 탄질점판암에서는 석영맥과 황철석이 함께 수반되는 시료에서 주로 산출된다. 전자현미분석결과 구성원소의 함량

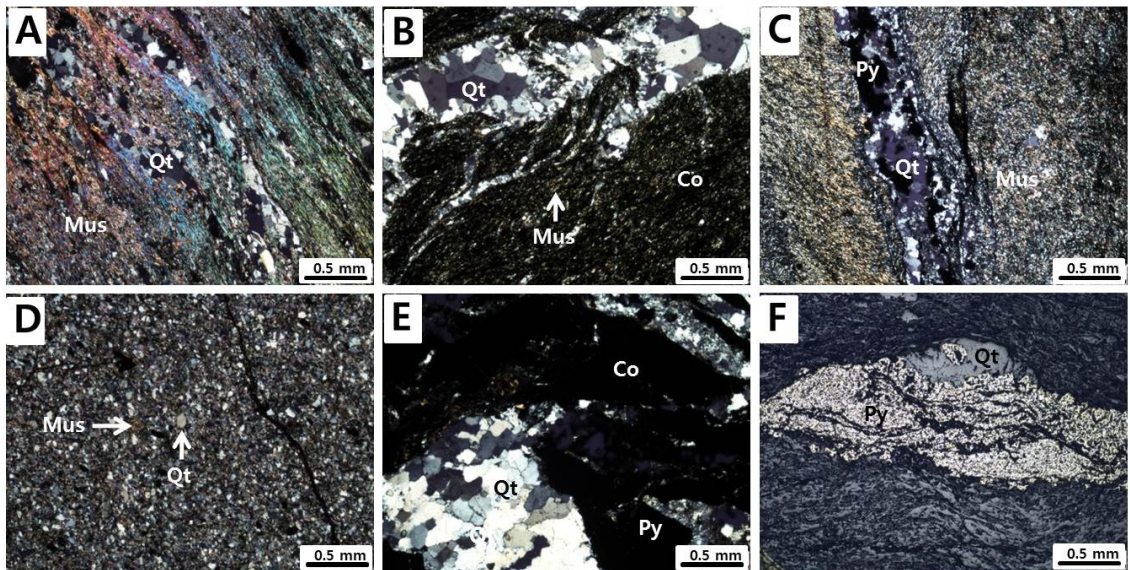


Fig. 3. Photomicrographs of slate samples from the Suyongri area. (A) dark gray slate showing foliated texture consisting of muscovite and quartz, (B) black slate consisting of muscovite, coal materials, and quartz vein, (C) quartz vein containing pyrite in black slate, (D) green gray slate consisting of fine-grained muscovite and quartz, (E) coaly slate consisting of coal materials, quartz, and pyrite. (F) reflected microscopic image of coaly slate showing pyrite associated with quartz.

비를 고려할 때 우라늄광물로는 토라이트(thorite; Th,U)SiO₄, 토루타이트(thorutite; Th,U,Ca)Ti₂(O,OH)₆, 에카나이트(ekinite)(Ca,Fe,Pb)₂(Th,U)(Si₈O₂₀) 등이 주로 관찰되며, 이 밖에 미량의 우라나나이트(uraninite; UO₂)가 수반된다. 이들 가운데 흑색점판 암에서는 토루타이트(thorutite)만이 관찰된다. 일

Table 1. The concentration of major elements in samples (wt.%).

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI	Total
Dark gray slate												
BS-1	65.32	16.79	0.81	5.20	2.55	0.43	0.37	4.28	0.02	0.14	3.73	99.64
BS-11	80.03	8.26	0.44	4.00	3.06	0.17	0.17	1.20	0.02	0.12	2.42	99.87
BS-12	62.11	18.81	1.00	4.22	3.44	0.06	0.86	4.70	0.02	0.08	4.60	99.88
BS-31-6	74.24	11.15	0.52	4.80	2.69	0.13	1.28	2.31	0.02	0.11	2.64	99.88
BS-64	67.03	14.05	0.53	7.87	3.99	0.01	0.08	3.08	0.02	0.11	4.65	101.42
BS-66	60.07	18.39	0.66	9.30	3.84	0.03	0.28	3.15	0.09	0.01	5.23	101.06
Black slate												
BS-21-1	64.29	16.47	0.60	4.96	2.40	0.07	0.76	3.79	0.02	0.03	6.39	99.78
BS-21-3	66.99	15.88	0.55	4.27	2.05	0.09	1.21	3.59	0.02	0.05	4.97	99.66
BS-24	63.63	20.04	0.69	4.00	1.28	0.05	0.48	5.08	0.01	0.03	4.57	99.85
BS-29-6	61.18	18.75	0.57	5.46	2.31	0.09	0.52	4.62	0.02	0.05	6.10	99.66
BS-68	66.30	17.77	0.65	2.76	1.88	0.06	1.05	4.02	0.02	0.01	6.42	100.94
BS-73	68.62	16.46	0.71	2.39	1.52	0.01	0.20	4.14	0.01	0.01	6.52	100.60
Green gray slate												
BS-63	86.19	5.42	0.26	2.46	1.45	0.14	1.30	0.36	0.01	0.08	1.32	99.00
BS-69	79.43	7.98	0.36	5.90	3.56	0.06	0.02	0.95	0.02	0.07	3.01	101.36
Coaly slate												
BS-25-2	59.42	13.12	0.88	1.49	2.88	1.89	0.23	3.44	0.03	0.44	15.42	99.25
BS-26-2	59.46	9.73	0.57	1.81	5.02	0.87	0.19	1.88	0.02	0.57	19.83	99.95
BS-26-3	47.29	5.19	0.36	1.15	0.85	0.43	0.06	1.20	0.01	0.33	41.90	98.78
BS-29-8	65.70	16.17	0.45	1.13	0.90	0.04	0.42	4.45	0.01	0.02	10.42	99.71
BS-30-2	53.25	16.52	0.52	9.80	1.25	0.04	0.14	4.98	0.01	0.05	12.52	99.08
BS-31-1	33.29	7.15	0.49	4.31	1.42	0.95	1.68	0.46	0.01	0.54	48.97	99.28

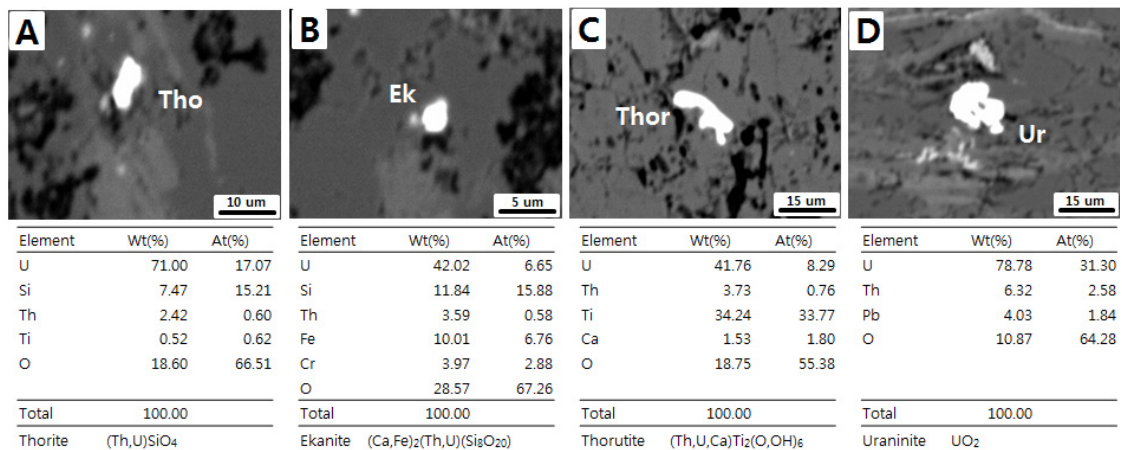


Fig. 4. Back scattered electron images and chemical compositions of uranium minerals from the Suyongri area. (A) thorite, (B) ekanite, (C) thorutite, (D) uraninite.

Table 2. The concentration of rare earth elements in samples (ppm).

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	(La/Yb) _N	Eu/Eu*	Ce*	SUM
Dark gray slate																		
BS-1	57.8	110.9	12.6	64.2	7.1	1.3	7.5	0.9	5.1	1.0	3.0	0.4	2.8	0.4	2.1	0.8	-0.07	275.0
BS-11	17.4	35.4	4.0	20.9	2.6	0.5	3.2	0.4	2.7	0.5	1.7	0.2	1.6	0.2	1.1	0.8	-0.06	91.4
BS-12	74.8	139.4	15.0	77.1	6.9	1.2	7.0	0.8	4.1	0.8	2.6	0.4	2.7	0.4	2.8	0.8	-0.07	333.1
BS-31-6	29.6	57.9	6.6	34.1	3.9	0.8	4.4	0.6	3.3	0.6	2.0	0.3	1.9	0.3	1.6	0.9	-0.07	146.0
BS-64	34.2	61.9	6.9	35.0	4.7	0.8	5.2	0.7	3.3	0.7	2.2	0.3	2.4	0.4	1.4	0.7	-0.08	158.6
BS-66	25.5	49.5	5.6	28.7	3.9	0.9	3.9	0.5	2.5	0.5	1.6	0.2	1.6	0.3	1.6	1.0	-0.07	125.1
Black slate																		
BS-21-1	37.1	71.4	8.6	43.5	5.1	1.0	5.2	0.7	3.8	0.7	2.4	0.3	2.4	0.4	1.6	0.9	-0.08	182.5
BS-21-3	32.4	61.4	7.3	36.8	4.2	0.9	4.4	0.6	3.1	0.6	1.9	0.3	1.9	0.3	1.7	0.9	-0.08	156.0
BS-24	35.1	64.4	7.8	38.9	4.3	1.0	4.1	0.5	2.8	0.6	1.8	0.3	1.9	0.3	1.9	1.1	-0.09	163.6
BS-29-6	26.1	48.2	5.9	29.8	4.0	1.0	3.7	0.5	2.7	0.5	1.8	0.3	1.8	0.3	1.5	1.2	-0.09	126.4
BS-68	32.4	59.8	7.2	36.1	5.2	1.1	4.8	0.6	2.6	0.5	1.8	0.3	2.1	0.3	1.6	1.0	-0.09	154.8
BS-73	25.7	56.1	6.4	33.8	5.3	1.2	5.2	0.7	3.2	0.7	2.1	0.3	2.1	0.3	1.2	1.0	-0.04	143.2
Green gray slate																		
BS-63	18.8	36.7	4.1	21.2	2.7	0.5	3.1	0.4	1.8	0.4	1.1	0.1	1.0	0.2	1.9	0.7	-0.06	92.1
BS-69	25.7	46.2	6.1	29.6	4.8	0.8	5.9	0.9	4.8	1.0	2.9	0.4	2.7	0.4	1.0	0.7	-0.10	132.3
Coaly slate																		
BS-25-2	45.0	81.3	10.0	51.4	12.5	5.8	6.9	1.0	6.1	1.4	4.4	0.6	3.8	0.6	1.2	2.8	-0.10	230.8
BS-26-2	45.4	87.2	9.5	50.8	13.9	7.3	5.8	0.7	4.4	1.0	3.1	0.4	2.5	0.4	1.8	3.5	-0.07	232.3
BS-26-3	48.1	74.7	8.4	45.5	7.8	3.0	8.8	1.4	10.0	2.5	8.1	1.1	6.3	0.8	0.8	1.6	-0.14	226.6
BS-29-8	31.3	53.5	7.1	35.0	5.1	1.3	4.8	0.6	3.3	0.7	2.1	0.3	2.1	0.3	1.5	1.2	-0.12	147.5
BS-30-2	82.0	102.6	18.9	84.2	14.9	5.0	11.4	1.4	7.5	1.6	5.1	0.7	4.3	0.7	1.9	1.7	-0.24	340.2
BS-31-1	32.7	57.2	6.3	34.2	3.9	0.8	4.8	0.6	3.3	0.7	2.1	0.3	1.8	0.3	1.8	0.8	-0.10	148.9

$$Ce^* = \log(3Ce_N / (2La_N + Nd_N)).$$

차 우라늄광물로 알려진 우라니나이트의 산출이 미미한 것이 특징으로 보이며, 다른 광물들에서도 이차 발생광물에서 관찰되는 나뭇가지 형태의 성장이나 광물 내부의 구멍 등이 보이지 않는다.

Lee (2011)에 의하면 괴산지역은 주로 프란세빌라이트(*francevillite*)나 토버네이트(*torbernate*)와 같이 VO₄나 PO₄계열의 이차생성광물이 주로 산출되고, 추부 및 미원지역에서는 우라니나이트(*uraninite*)와 브래너라이트(*branerite*) 등이 산출되는 등 지역에 따라 차이가 있고, 입자의 크기도 괴산지역은 대체로 100-200 μm, 추부 및 미원지역은 10 μm 이하부터 20 μm 에 이르는 것까지 존재하는 것으로 보고한 바 있다.

이와 같이 연구지역을 포함한 옥천대 우라늄광상에서 산출되는 우라늄광물의 종류, 크기, 그리고 형태가 지역에 따라 차이를 보이는 것은 이들의 생성환경이 서로 달랐음을 지시하는 것으로 해석된다.

5. 암석지화학

5.1 주원소

연구지역의 암회색점판암, 흑색점판암, 녹회색점판암 및 탄질점판암의 20개 시료에 대한 주원소 분석결과 SiO₂ 함량은 녹회색점판암이 79.43~86.19 wt.%(평균 82.81 wt.%)로서 암회색점판암(평균 68.13 wt.%)이나 흑색점판암(평균 65.17 wt.%)에 비해 높은 함량을 보이고, 탄질점판암은 다른 유형에 비해 넓은 조성변화(33.29~65.70 wt.%)를 보이며 평균 함량(53.07 wt.%)은 가장 적게 나타난다(표 1). SiO₂ 외에도 Al₂O₃ (5.19~16.52 wt.%, 평균 11.31 wt.%), Fe₂O₃ (1.13~9.80 wt.%, 평균 3.28 wt.%) MgO (0.85~5.02 wt.%, 평균 2.06 wt.%), K₂O (0.46~4.98 wt.%, 평균 2.73 wt.%) 등 대부분의 원소에서 탄질점판암의 함량변화는 흑색점판암을 비롯한 다른 암종에 비해 크게 나타난다. LOI는 탄질점판암이 24.84 wt.%로 흑색점판암(평균 5.83 wt.%)이나 다

른 점판암에 비해 현저히 높게 나타난다.

5.2 희토류 및 희유원소

희토류원소 분석결과 전체 평균 함량은 암회색점판암 188.2 ppm, 흑색점판암 154.4 ppm, 녹회색점

판암 112.2 ppm, 그리고 탄질점판암 214.1 ppm으로서 탄질점판암에서 가장 부화되어 나타난다(표 2). 이들을 NASC (North American Shale Composite: Gromet *et al.*, 1984)로 표준화하여 La/Yb 값을 상호 비교한 결과 흑색점판암은 La/Yb 값이 1.2~1.9

Table 3. The concentration of trace elements in samples (ppm).

Sample	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Zr	Mo	Th	U	TOC (wt.%)
Dark gray slate												
BS-1	13.4	8109.2	106.8	68.6	245.3	13.1	39.5	98.2	4.1	20.6	4.2	0.15
BS-11	10.0	4351.0	39.2	99.7	158.0	6.5	19.3	31.4	3.3	10.1	1.8	0.15
BS-12	14.3	9988.4	134.2	124.9	160.4	3.2	8.4	189.9	1.1	28.0	4.7	0.67
BS-31-6	10.0	5153.1	62.9	133.3	195.9	6.9	22.1	18.2	2.1	14.6	2.9	0.05
BS-64	8.4	5305.2	49.1	89.3	229.0	2.1	5.8	238.4	7.8	21.2	5.2	0.32
BS-66	16.3	6580.8	106.2	126.3	862.9	7.6	21.4	161.2	2.1	13.8	2.9	0.46
Black slate												
BS-21-1	17.0	5970.3	345.8	169.6	212.2	6.3	16.5	126.5	12.2	13.3	9.4	2.52
BS-21-3	14.2	5537.2	331.3	197.9	207.8	6.9	22.2	94.0	14.0	7.4	3.7	2.07
BS-24	18.8	6855.0	143.8	142.5	113.6	1.4	2.2	123.1	3.9	12.2	2.5	0.72
BS-29-6	20.3	5677.1	168.5	148.2	201.0	12.6	31.5	112.2	5.7	9.1	3.4	1.44
BS-68	18.0	6517.7	359.6	151.8	168.6	2.0	12.3	139.5	1.2	14.7	3.1	2.90
BS-73	20.3	7126.4	340.5	200.1	121.6	2.1	5.0	147.1	5.6	12.5	2.1	2.73
Green gray slate												
BS-63	2.9	2585.1	21.5	96.0	128.3	4.2	13.7	102.8	7.2	8.5	3.7	0.05
BS-69	3.3	3561.2	37.8	113.1	232.9	8.1	28.1	126.6	0.5	10.7	2.3	0.03
Coaly slate												
BS-25-2	12.9	8824.3	2055.1	287.8	339.2	1.4	72.7	10.0	71.6	12.9	82.5	9.55
BS-26-2	14.1	5661.1	1101.4	203.3	165.3	0.8	76.5	13.8	40.6	10.7	22.6	13.10
BS-26-3	10.0	3632.8	2628.0	134.0	60.1	0.8	36.7	10.0	162.2	10.2	61.9	42.58
BS-29-8	19.8	4543.2	385.2	175.4	55.4	0.4	2.7	101.3	25.9	7.5	2.2	8.23
BS-30-2	19.6	5227.6	9485.6	728.9	80.3	2.6	51.4	105.2	144.0	14.3	11.1	6.05
BS-31-1	10.1	4876.0	562.2	171.5	115.0	1.5	109.1	10.0	427.2	7.4	25.1	48.61

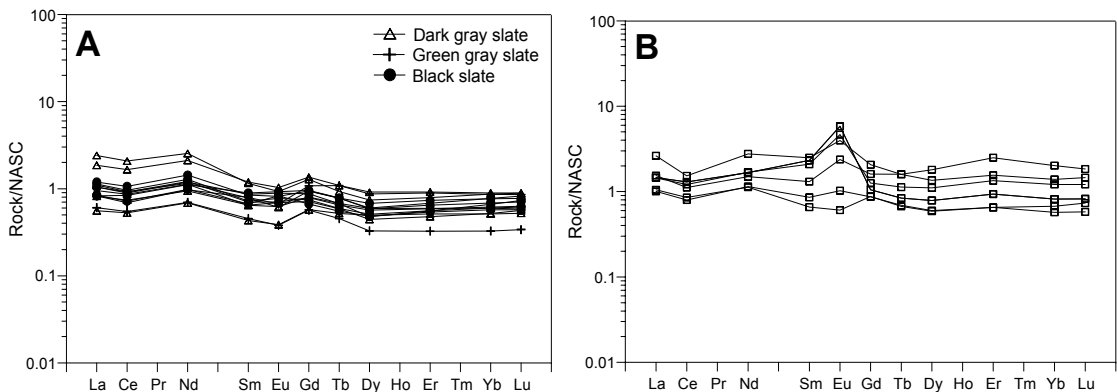


Fig. 5. REE patterns normalized by NASC (North American Shale Composite) for (A) dark gray slate, black slates, and green gray slate, and (B) coaly slates.

로서 비교적 일정한 변화곡선을 보이며 다른 점판암에 비해 상대적으로 좁은 범위의 함량변화를 나타낸다(그림 5). 암회색점판암은 La/Yb 값이 1.1~2.8로서 희토류함량 범위가 넓고, 다른 점판암에 비해 경희토류가 상대적으로 약간 부화된 모습을 보이며, 녹회색점판암 두 개 시료는 La/Yb 값이 각각 1.0, 1.9를 보인다. 이에 반해 탄질점판암은 0.8~1.9의 범위로서 흑색점판암과 유사하게 거의 평평한 곡선을 나타낸다. Eu 이상 값($Eu/Eu^* = Eu / ((Sm_N + Gd_N) / 2)$)은 암회색점판암 0.8~1.0(평균 0.8), 흑색점판암 0.9~1.2(평균 1.0), 녹회색점판암 0.7인 반면, 탄질점판암에서는 그보다 높은 0.8~3.5(평균 2.1)의 값을 나

타내어 탄질시료가 다른 점판암에 비해 Eu가 현저히 부화되어 있어서, 해저열수환경의 특징을 보여준다(Craddock, 2010).

희유원소분석결과 탄질시료는 U 외에도 V, Cr 및 Mo 등이 상당히 부화되어 나타난다. U함량은 다른 점판암에서는 평균 3~4 ppm을 보이지만 탄질점판암에서는 약 40 ppm에 이른다(표 3). V은 암회색점판암과 녹회색점판암이 각각 83 ppm, 30 ppm인 반면, 흑색점판암에서 282 ppm으로 높게 나타나고, 탄질시료는 2352 ppm으로서 현저히 부화된 양상을 보인다. Mo의 경우 탄질점판암을 제외한 다른 점판암에서는 대부분 10 ppm 이하로 산출되나 탄질점판암에서는 평균 160 ppm에 이른다. TOC (Total organic carbon)은 암회색점판암, 흑색점판암, 그리고 녹회색점판암에서 각각 평균 0.30 wt.%, 2.06 wt.%, 0.04 wt.%를 보이는 반면, 탄질점판암에서는 21.35 wt.%로 가장 높게 나타난다.

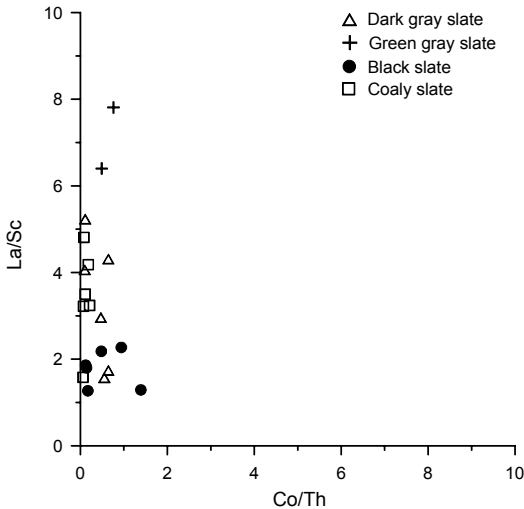


Fig. 6. Correlation between Co/Th and La/Sc for slates.

6. 토 의

6.1 원암의 기원

연구지역 점판암을 구성하는 주성분 원소비는 흑색점판암의 경우 SiO_2/Al_2O_3 은 3.17~4.22로서 비교적 좁은 조성범위를 갖지만, Al_2O_3/Na_2O 와 K_2O/Na_2O 은 각각 13.12~81.11과 2.96~20.41로서 비교적 넓은 범위를 나타내며, 암회색점판암과 녹회색점판암도 유사한 특징을 보여준다. 특히, 탄질점판암의 경우 이들 원소비가 각각 3.22~9.10, 4.25~117.92,

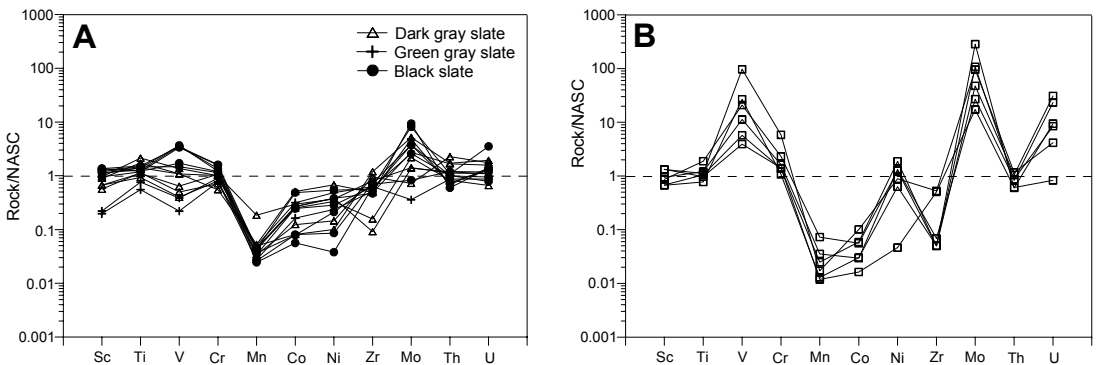


Fig. 7. Concentrations of some redox-sensitive elements (V, Cr, Mn, Co, Ni, Mo, Th, U), as well as Sc, Ti and Zr for (A) dark gray slate, black slates, and green gray slate, and (B) coaly slates. The values were normalized to NASC (Gromet *et al.*, 1984), except V (Degens *et al.*, 1958) and Mo (Wedepohl, 1974).

0.27~35.51로서 넓은 범위를 나타내는 것으로 보아 퇴적 당시 근원암이 단순히 퇴적물에 의한 퇴적암이 아닌 화성기원 퇴적물이 함께 혼재되어 형성되었을 것으로 추정된다(McLennan *et al.*, 1984; Lee and Lee, 1997).

희유원소들과 고장력원소(High field strength elements; Zr, Hf, Nb, Ta, Ti) 및 Th, Sc, Co는 풍화, 속성작용, 변성작용 등이 일어날 때 낮은 이동성을 보이며 이를 통해 퇴적암의 근원암을 유추하게 되는데, 이 가운데 Th과 La은 불호정성으로써 염기성암보다는 규장질암에 더 농집되며, Sc, Co는 호정성이 강해서 반대로 규장질암보다는 염기성암에 더 많이 농집이 되어 있다(Taylor and McLennan, 1985). 이를 바탕으로 연구지역 점판암을 Co/Th-La/Sc 다이어그램에 도시한 결과 규장질암에 해당하는 것을 알 수 있다(그림 6).

이상과 같이 주원소 및 희유원소 등을 이용한 연구지역 퇴적암의 근원암을 조사한 결과 이들은 단순

히 한 종류에 의해 형성된 것이 아닌 규장질 화성암을 포함한 여러 종류의 퇴적물질이 혼재되어 형성된 것으로 추정된다.

6.2 산화환원환경

산화환원환경에 민감한 원소들에 대하여 연구지역 모암과 탄질점판암을 NASC (North American Shale Composite: Degens *et al.*, 1958; Wedepohl, 1974; Gromet *et al.*, 1984)와 비교해 본 결과 V, Cr, Mo, U이 탄질점판암에서 현저히 부화된 값을 보이는 반면, Mn, Co, Zr의 경우에는 표준시료에 비해 현저히 결핍되어 있으며, Sc, Ti, Ni 및 Th는 별다른 차이를 나타내지 않는다(그림 7). 특히, V가 현저히 부화된 이유는 산화환경에서 이온상태로 존재하다가 혐기성환경에서 퇴적되어 농집된 결과로 해석된다(Francois, 1988). 우라늄 또한 탄질점판암에서 부화된 양상을 보이는 것은 연구지역 우라늄 농집이 일반적인 해수에서의 단순한 침전이 아닌 다른 기작

Table 4. Trace elements index in anoxic environment (according to Yarincik (2000)).

Sedimentary environment indicators	Anoxic environment		Oxygen-rich environment	Suyoungri area			
	Anaerobic	Oxygen deficient		Dark gray slate	Black slate	Green gray slate	Coaly slate
V/(V+Ni)	>0.54	0.46-0.60	<0.46	0.67-0.94	0.84-0.99	0.57-0.61	0.84-0.99
V/Cr	>4.25	2.00-4.25	<2.00	0.39-1.56	1.01-2.04	0.22-0.33	2.19-19.61
Ni/Co	>7.00	4.00-7.00	<4.00	2.65-3.21	1.52-6.04	3.28-3.45	6.41-101.02
U/Th	>1.25	0.75-1.25	<0.75	0.17-0.24	0.17-0.71	0.21-0.44	0.29-6.38
$\Delta U^{1)}$	>1		<1	0.67-0.84	0.67-1.36	0.78-1.14	0.94-1.90

¹⁾ $\Delta U = U / (0.5 * (U + Th/3))$

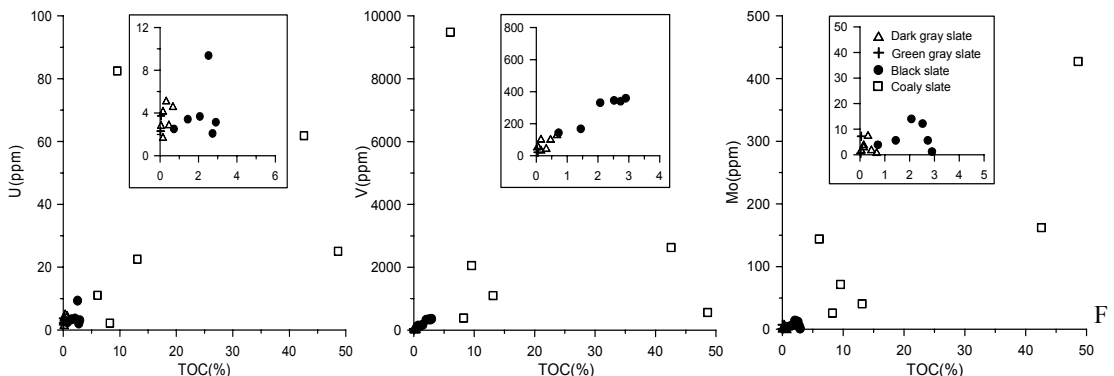


Fig. 8. Correlation between TOC with U, V, and Mo contents for slates.

의 영향을 받았음을 시사한다.

총유기탄소(TOC: Total organic carbon)와 희유 원소들(U, V, Mo) 간의 상관관계를 통해서도 환원 상태에 대해서 설명할 수 있다. U은 대부분 산화 내지 아산화 환경의 해양내에 우라닐 탄소 복합체 $[UO_2(CO_3)_3^{4-}]$ 의 형태로 존재하나 U^{4+} 로 환원되면 퇴적암 내에 우라니아이트 결정으로 침전되거나 환원 상태의 준안정 전구체로 된다(Anderson *et al.*, 1989; Calvert and Pedersen, 1993). U^{6+} 의 감소는 대부분 박테리아에 의한 황화물의 감소와 관련이 있고 이런 감소는 유기물의 양과 큰 관계를 보이고 있다. 그래서 일반적으로 황화물이 없는 무산소 내의 TOC와 U은 강한 상관관계를 보이는 반면, 황화물이 있는 폐쇄해성내에서는 상당량의 U이 농집이 되지만 U-TOC의 상관관계는 약하거나 거의 변화가 없게 나타난다(Tribouvillard *et al.*, 2006). 연구지역 시료들에 포함된 U, V, Mo 금속원소들의 TOC와의 상관관계는 비교적 약하게 나타나는 편이다(그림 8). 다만, V의 경우 다른 점판암에서는 비교적 뚜렷한 상관을 형성하지만 탄질점판암에서는 별다른 경향을 보이지 않는다.

연구지역의 점판암의 U/Al(ppm/%)을 황화물이 없는 환원환경인 PAAS (Post Archaean Australian Shale)(0.31; Taylor and McLennan, 1985)와 황화물이 풍부한 환원환경인 흑해의 퇴적암(3.3; Calvert and Pedersen, 1993)과 비교해 본 결과 탄질점판암을 제외한 나머지 세 암석(암회색점판암 0.25; 흑색점판암 0.24; 녹회색점판암 0.49)은 대체로 PAAS와 유사한 값을 보이는 반면, 탄질점판암(4.14)은 황화물이 풍부한 환원환경에 가까운 값을 나타내고 있다.

V은 산화되는 퇴적암에 비해 환원되는 퇴적암에 우선적으로 농집이 일어나며 두 종류의 환원상태로 구분 지을 수 있다. V^{5+} 에서 V^{4+} 로의 환원은 황화물이 없는 무산소 상에서 일어나고 TOC와의 상관관계도 뚜렷하게 잘 나타나지만 V^{4+} 에서 V^{3+} 은 황화물이 있는 상태에서 일어나지만 TOC와는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다. PAAS (15.0; Taylor and McLennan, 1985)와 흑해의 퇴적암(V/Al=28.8; Calvert and Pedersen, 1993)을 기준으로 비교했을 때, 암회색점판암(평균 5.52), 흑색점판암(평균 16.49), 녹회색점판암(평균 4.36)의 V/Al은 U과 마찬가지로 PAAS에 가까운 값을 나타내는 반면, 탄질점판암(평균 242.05)

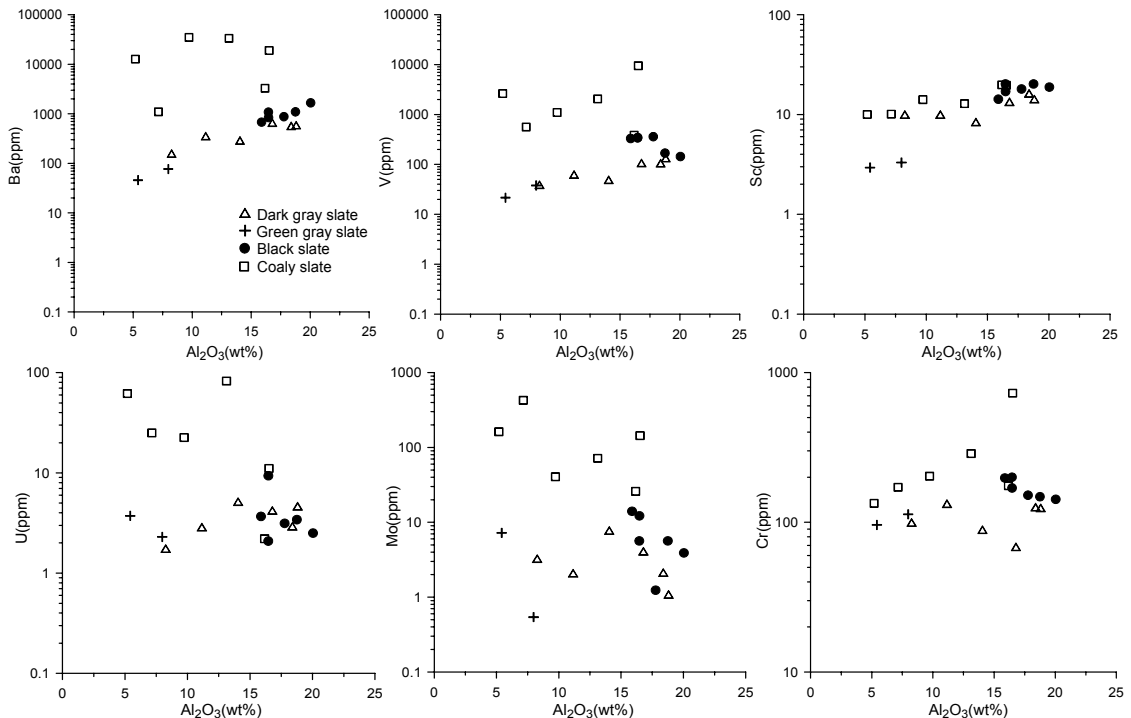


Fig. 9. Selected minor elements- Al_2O_3 variation diagrams for slates.

은 흑해 퇴적암에 비해서도 현저히 높은 값을 보이고 있다.

Mo 또한 PAAS (0.10; Taylor and McLennan, 1985)와 흑해의 퇴적암(Mo/Al=4.3; Calvert and Pedersen, 1993)을 비교했을 때 연구지역의 암회색 점판암(평균 0.26), 흑색점판암(평균 0.42), 녹회색점판암(평균 0.70)은 PAAS에 보다 가까운 값을 보여 주고, 탄질점판암(평균 18.49)은 흑해 퇴적암보다도 훨씬 높은 값을 보여준다.

이러한 경향은 Yarincik *et al.* (2000)이 제시한 환원환경 지시원소비 조성에도 나타난다 (표 4). 이들의 분석 값을 보면 연구지역 암회색 및 녹회색점판암은 혐기성환경을 지시하는 V/(V+Ni)를 제외하고는 V/Cr, Ni/Co, U/Th 비가 대부분의 시료에서 산소가 풍부한 환경에 해당하는 값을 보이고, 흑색점판암은 무산소환경과의 중간 정도에 해당하는 것으로 나타난다. 이에 반해 탄질점판암 시료 대부분은 무산소환경에 해당하는 것을 알 수 있다.

일반적으로 해수기원시료의 경우 중희토류로 갈수록 부화되는 경향을 보이고 La, Pr, 혹은 Nd에 비해 Ce 결핍이 두드러진 경향을 나타내는데 이러한 점은 해성기원 세일에서 나타나는 주요 특징으로 알려져 있다(Elderfield and Greaves, 1982; Sotro and Yoshiyuki, 1999). Ce 이상 값($Ce^* = \log(3Ce_N / (2La_N + Nd_N))$)을 비교해 보면 암회색점판암 -0.08~

-0.06(평균 -0.07), 녹회색점판암 -0.10~-0.06(평균 -0.08), 흑색점판암 -0.09~-0.04(평균 -0.08), 탄질점판암 -0.24~-0.07(평균 -0.13)로서 모암에 해당하는 세 점판암이 상호 유사한 값을 나타내는 반면 탄질점판암은 이들에 비해 낮은 값을 보여준다(표 2). Ce 이상 값은 산화환원환경에 따라 민감하게 변하는 것으로 알려져 있는데(Sholkovitz *et al.*, 1994; Wilde *et al.*, 1996), 산화환경에서는 정의 Ce 이상치(>0.10)을 보이는 반면, 환원환경에서는 이와는 반대로 부의 이상치(<-0.10)를 나타낸다. 상기한 바와 같이 탄질점판암의 Ce 이상치는 모암인 흑색점판암 보다도 작은 값을 보이고 있어서 탄질점판암의 생성환경이 다른 점판암과는 달리 환원환경이 주를 이루었음을 알 수 있다.

이와 같이 연구지역 대부분을 차지하는 점판암들은 대부분 황화물이 없는 환원환경의 조성에 가까우며, 그 가운데 흑색점판암은 상대적으로 황화물의 함량이 많은 특징을 보여준다. 반면, 탄질점판암은 황화물이 풍부한 환원환경을 지시하는 것으로 보아 다른 점판암과는 성인적으로 뚜렷한 차이가 있는 것으로 해석된다.

6.3 열수작용

점판암들에 대해 퇴적기원암석 지시원소인 Al₂O₃와 이동성이 강한 미량원소인 Ba, V, Sc, U, Mo을

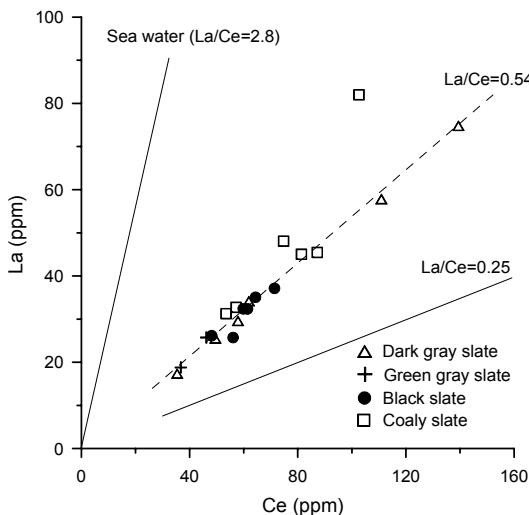


Fig. 10. Correlation diagram showing the Ce-La relationship (according to Toth (1980)).

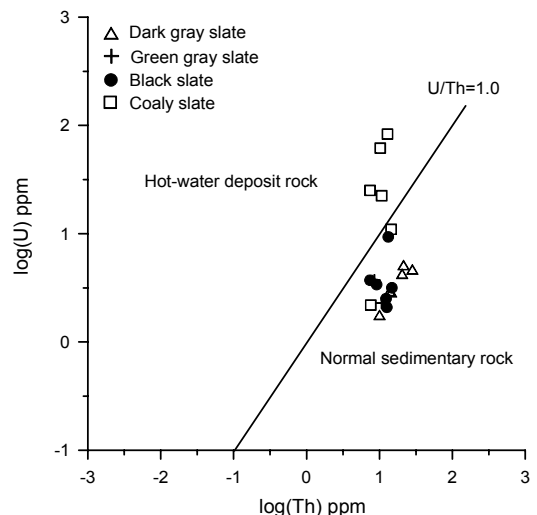


Fig. 11. U-Th correlation diagram for slates (according to Bostrom (1983)).

이용하여 상관관계를 도출해 본 결과(Campos Alvarez and Roser, 2007; Pi *et al.*, 2011) Ba, V, 및 Sc의 경우 부분적으로 정의 상관관계를 나타내는 반면, U, Mo, Cr은 별다른 양상을 보이지 않는다(그림 9). 이는 퇴적 당시 함께 수반된 이후 이차적인 요인에 의해 재농집된 것으로 여겨진다. 특히, 탄질점판암의 경우 Sc를 제외하고 암회색점판암이나 녹회색점판암은 물론 모암인 흑색점판암과 보다 현저히 많은 금속원소 함량을 나타내고 있으며, Ba의 경우 정의 상관관계를 보이는 다른 세 점판암과는 달리 별다른 경향성이 나타나지 않고 있어서 탄질점판암이 이차적인 변질작용 산물일 가능성을 시사하고 있다.

특히, 주원소성분의 LOI 함량이 탄질점판암에서 높게 나타나는 것은 기존의 흑색점판암이 열수변질 작용에 의해 우라늄이 재농집되었을 가능성이 있음을 시사하는 것으로 여겨진다. 맥상의 석영 및 황철석의 산출은 이러한 열수작용이 활발하였음을 뒷받침하는 증거이다.

퇴적환경 및 산화환원조건에 따라 변하는 Ce 함량은 고해수이나 열수환경에서는 La/Ce가 약 2.8로서 Ce의 부화가 나타나지 않으나, Fe-Mn을 수반한 수성기원 퇴적물에서는 Ce가 부화되어 약 0.25에 이른다(Toth, 1980). 연구지역 시료들에 대한 La/Ce 값을 도시한 결과 0.45~0.80의 범위를 나타내며 이 가운데 탄질점판암은 다른 암석들에 비해 상대적으로 높은 값을 보이고 있다(그림 10). U/Th의 경우 퇴적 당시의 특징을 잘 나타내는데 Bostrom (1983)에 따르면 U/Th 값이 1보다 낮은 경우 일반적인 퇴적암이고 U/Th 값이 1보다 큰 경우에는 열수에 의해 형성된 것이다. 연구지역 모암에 해당하는 암회색점판암, 흑색점판암, 녹회색점판암의 경우 1보다 낮은 값으로 일반적인 퇴적암의 값을 보이고 있으나, 탄질점판암의 경우 대부분 1보다 큰 값에 도시되는 것으로 보아 우라늄 농집과정에 열수의 영향이 있었던 것으로 생각된다(그림 11).

한편, 열수 환경에서 유동성이 큰 것으로 알려져 있는 Eu는 해저 열수환경에서는 부화되어 나타나는 반면(Manikyamba *et al.*, 1993; Craddock, 2010), 조산대 및 대륙의 열수에서는 반대로 결핍되는 것으로 알려져 있다(Michard and Albarede, 1986). 이는 Eu의 유동성이 산화환원 및 온도 조건에 큰 영향을 받아서 고온의 환원환경에서는 Eu가 부화되는

반면, 저온의 산화환경에서는 결핍되는 특징과 관련되어 있다(Parr, 1992). 연구지역 시료 중에서 탄질점판암의 경우에만 Eu이 부화되어 나타나고, 아울러 Ce의 결핍이 다른 유형의 시료에 비해 두드러진 것으로 보아 탄질점판암의 생성은 해저열수의 영향을 받은 것으로 여겨진다. 옥천변성대가 활발한 화산활동을 수반한 열개 환경이었다는 점에서(Cluzel *et al.*, 1990; Cho and Kim, 2002; Cho *et al.*, 2004) 연구지역 우라늄광체는 해저화산활동이 수반된 퇴적작용이나 혹은 이차적인 열수작용이 활발한 환원 환경하에서 형성된 것으로 여겨진다.

7. 결론

(1) 금산군 수영리 일대에 분포하는 우라늄 광체는 흑색점판암내에 협재된 1~3 m의 두께를 갖는 3매의 탄질점판암을 중심으로 발달하며, 우라늄광물로는 토라이트(thorite), 토루타이트(thorutite), 에카나이트(ekanite), 우라나나이트(uraninite) 등이 산출된다.

(2) 점판암의 SiO₂/Al₂O₃, Al₂O₃/Na₂O 및 K₂O/Na₂O 등의 주성분 원소비의 특징으로 보아 탄질점판암에는 화성기원 퇴적물이 함께 혼재되어 형성되었을 것으로 추정되며, La, Sc, Co, 및 Th 원소 거동특성분 석 결과 규장질 화성암이 첨가된 것으로 보인다.

(3) 암회색 및 녹회색점판암의 퇴적환경은 대부분 황화물이 없는 환원환경에 가까운 조성을 보이고 흑색점판암은 상대적으로 황화물의 함량이 많은 특징을 나타내나, 탄질점판암은 황화물이 풍부한 환원환경을 지시하는 등 생성환경의 뚜렷한 차이를 보여준다.

(4) U, V, Mo 등의 희유원소들이 표준시료(NASC)에 비해 현저히 부화되어 산출되고, 희토류원소 중 Eu가 부화되고, Ce의 결핍이 다른 암석에 비해 두드러지며, 탄질점판암의 U/Th 비가 대부분 1보다 큰 것으로 보아 탄질점판암내 우라늄의 농집은 해저열수작용의 영향을 받은 것으로 여겨진다.

사 사

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 에너지지원기술개발 “우라늄광

융합탐사 기술개발(1세부)”(과제번호 2010201030003A) 사업비 지원을 받아 수행된 결과임. 이 논문에 대해 유익한 심사를 주신 황정 교수님과 허순도 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Anderson, R.F., Fleisher, M.Q. and Le Huray, A.P., 1989, Concentration, oxidation state and particulate flux of uranium in the Black Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 2205-2213.
- Bostrom, K., 1983, Genesis of Ferromanganese deposits-diagnostic criteria for recent and old deposits. In: Rona P, Bostrom K, Laubier L, Smith K L. *Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centers*. New York: Plenum Press, 473-489.
- Calvert, S.E. and Pedersen, T.F., 1993, Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record. *Marine Geology*, 113, 67-88.
- Campos Alvarez, N.O. and Roser, B.P., 2007, Geochemistry of black shales from the Lower Cretaceous Paja Formation, Eastern Cordillera, Colombia: Source weathering, provenance, and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 23, 271-289.
- Cheong, C.S., Jeong, G.Y., Kim, H.C., Choi, M.S., Lee, S.H. and Cho, M., 2003, Early Permian peak metamorphism recorded in U-Pb system of black slates from the Ogcheon metamorphic belt, South Korea and its tectonic implication. *Chemical Geology*, 193, 81-92.
- Cho, M. and Kim, T., 2002, Metamorphic Evolution of the Ogcheon Metamorphic Belt: Review of Recent Studies and Remaining Problems. *Journal of Petrological Society of Korea*, 11, 121-137 (in Korean with English abstract).
- Cho, M., Kim, T. and Kim, H., 2004, SHRIMP U-Pb Zircon Age of a Felsic Meta-tuff in the Ogcheon Metamorphic Belt, Korea: Neoproterozoic (ca. 750 Ma) Volcanism. *Journal of Petrological Society of Korea*, 13, 119-125 (in Korean with English abstract).
- Cluzel, D., Cadet, J.P. and Lapierre, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, 183, 41-56.
- Craddock, P.R., Bach, W., Seewald, J.S., Rouxel, O.J., Reeves, E. and Tivey, M.K., 2010, Rare earth element abundances in hydrothermal fluids from the Manus Basin, Papua New Guinea: Indicators of sub-seafloor hydrothermal processes in back-arc basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 5494-5513.
- Degens, E.T., Williams, E.G. and Keith, E.G., 1958, Application of geochemical criteria [Pennsylvania], part 2 of environmental studies of carboniferous sediments. *AAPG Bulletin*, 42, 981-997.
- Elderfield, H. and Greaves, M.J., 1982, The rare earth elements in seawater. *Nature*, 296, 214-219.
- Francois, R., 1988, A study on the regulation of the concentration of some trace metals (Rb, Sr, Zn, Pb, Cu, V, Cr, Ni, Mn, and Mo) in the Saanich Inlet sediments, British Columbia. *Marine Geology*, 83, 285-308.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A. and Korotev, R.L., 1984, The "North American shale composite": its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 2469-2482.
- Jeong, G.Y., 2006, Mineralogy and geochemistry of metaliferous black slates in the Okcheon metamorphic belt, Korea: a metamorphic analogue of black shales in the South China block. *Mineralium Deposita*, 41, 469-481.
- Jeong, G.Y. and Lee, S.H., 2001, Form of molybdenum in the carbonaceous black slates of the Ogcheon Belt. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 14, 52-57 (in Korean with English abstract).
- Kang, S.A., Kim, Y.J. and Lee, Y.J., 2010, Genetic consideration of uranium and vanadium minerals in black slates of the Ogcheon Belt. (abstract), *Symposium of the Korean Society of Economic and Environmental Geology*, p. 95.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2010, Total cycle technical development for securing of domestic and overseas uranium resources. KIGAM report, 122 p.
- Kim, J.H., 1989, Geochemistry and genesis of Guryongsan (Ogcheon) uraniumiferous black slate. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 22, 35-63.
- Lee, C.H. and Lee, H.K., 1997, Geochemistry and mineralogy of metapelite and barium-vanadium muscovite from the Ogcheon Supergroup of the Deokpyeong Area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 30, 35-49 (in Korean with English abstract).
- Lee, C.H., Lee, H.K. and Shin, M.A., 1996, Geochemistry of vanadium-bearing coal formation in metapelite of the Ogcheon Supergroup from the Hoenam area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 29, 471-481 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.J., 1986, Mineralogy of low-grade uranium ores in the black slate of the Ogcheon Group, Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 19, 133-146 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.S., Yun, S.K., Lee, J.H. and Kim, J.T., 1986, Lithologic and structural controls and geochemistry of uranium deposition in the Ogcheon Black-Slate Formation. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 19, 19-41 (in Korean with English abstract).

- Lee, M.S. and Chon, H.T., 1980, Geochemical correlations between uranium and other components in U-bearing formations of Ogcheon Belt. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 13, 241-246 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.S. and Kim, S.W., 1985, Uranium distribution patterns and U-mineral in the U-bearing clay slate of Ogcheon system. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 18, 135-138 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.M., Kim, H.S. and Na, K.C., 1980, Geologic map of Daejeon sheet. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Lee, S.M., Park, H.I., Kim, S.J., Park, B.S. and Lee, S.H., 1981, Genesis of the uranium deposits in the metasediments of Deogpyeong area, Goesan-gun. *Journal of the Geological Society of Korea*, 17, 53-68 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.J., 2011, U-bearing minerals in black shale of Okcheon metamorphic belt, South Korea: Mineralogical and geochemical implications of the minerals. In: Special session volume of Reviews of Ore Deposits in Korea, Symposium of the Geological Society of Korea, 83-104.
- Lim, S.B., Chun, H.Y., Kim, Y.B., Kim, B.C. and Song, K.Y., 2006, Stratigraphy and geological ages of the metasedimentary strata in Jinsan ~ Boksu area, Chungcheongnam-do, NW Okcheon belt. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 149-174 (in Korean with English abstract).
- Manikyamba, C., Balaram, V. and Naqvi, S.M., 1993, Geochemical signatures of polygenetic origin of a banded iron formation (BIF) of the Archaran Sandur greenstone belt (schist belt) Karnataka nucleus, India. *Precambrian Research*, 61, 137-164.
- McLennan, S.M., Taylor, S.R. and McGregor, V.R., 1984, Geochemistry of Archean metasedimentary rocks, West Greenland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1-13.
- Michard, A. and Albarede, F., 1986, The REE content of some hydrothermal fluids. *Chemical Geology*, 55, 51-60.
- Parr, J.M., 1992, Rare-earth element distribution in the exhalites associated with Broken Hill-type mineralization at the Pinacles deposit, New South Wales, Australia. *Chemical Geology*, 100, 73-91.
- Pi, D.H., Liu, C.Q., Shields-Zhou, G.A. and Jiang, S.Y., 2011 Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in the early Cambrian Niutitang Formation in Guizhou province, South China: Constraints for redox environments and origin of metal enrichments. *Precambrian Research*.
- Shin, D.B. and Kim, S.J., 2011, Geochemical characteristics of black slate and coaly slate from the uranium deposit in Deokpyeong area. *Economic and Environmental Geology*, 44, 373-386 (in Korean with English abstract).
- Sholkovitz, E., Landing, W.M. and Lewis, B.L., 1994, Ocean particle chemistry: the fractionation of the rare earth elements between suspended particles and seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 1567-1580.
- Sotto, D. and Yoshiyuki, N., 1999, Rare earth elements in seawater: particle association, shale normalization, and Ce oxidation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 363-372.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 46-92.
- Toth, J.R., 1980, Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron. *Geological Society of America Bulletin*, 91, 44-54.
- Tribouillard, N., Algeo, T.J., Lyons, T. and Riboulleau, A., 2006, Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 232, 12-32.
- Wedepohl, K.H., 1974, *Handbook of Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin.
- Wilde, P., Quinby, M.S. and Erdtmann, B.D., 1996, The whole-rock cerium anomaly: a potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of anoxic facies. *Sedimentary Geology*, 101, 43-53.
- Yarincik, K.M., Murray, R.W., Lyons, T.W., Peterson, L.C. and Haug, G.H., 2000, Oxygenation history of bottom waters in the Cariaco Basin, Venezuela, over the past 578000 years: Results from redox-sensitive metals (Mo, V, Mn, and Fe). *Paleoceanography*, 15, 593-604.

투 고 일 : 2013년 2월 15일

심 사 일 : 2013년 2월 20일

심사완료일 : 2013년 3월 29일