대전지역 대보 화강암내 우라늄 광물의 산출상태와 지하수내 우라늄의 기원

황 정*

대전대학교 지반방재공학과

Occurrence of U-minerals and Source of U in Groundwater in Daebo Granite, Daejeon Area

Jeong Hwang*

Department of Geotechnical Engineering, Daejeon University, Daejeon 300-716, Korea

대전지역은 우리나라에서 고함량 우라늄 지하수에 대한 우려가 높은 지역이다. 대전의 복운모 화강암 지역의 지하수에서 우라늄의 함량이 높지만 복운모 화강암에서 우라늄 함량은 화강암의 세계 평균치 보다 낮고 우라늄 광물의 산출이 아직 보고되지 않았다. 이 연구는 우라늄의 근원암과 지하수에 우라늄을 공급할 수 있는 우라늄 광물의 산출상태를 규명하는데 있다. 이를 위해 지표 방사능 탐사와 전자현미경을 이용한 광물학적 연구를 수행하였다. 우라늄 이상은 화강암맥과 열수변질된 화강암에서 측정되었다. 우라늄 이상을 보이는 화강암맥은 복운모 화강암과 운모-편암의 경계부에 발달한다. 복운모 화강암 내의 우라늄 이상대는 열극대를 따라 석영 세맥이 충진한 열수변질대에 발달한다. 우세한 열수변질 작용은 칼륨 변질작용과 프로필리틱 변질작용이다. 우라니나이트는 화강암맥과 열수변질된 화강암에서 공통적으로 산출되는 우라늄 광물이며, 코피나이트와 우라노페인은 열수변질 화강암에서 산출된다. 모든 우라늄 광물은 백운모, 녹니석, 녹염석, 방해석 등과 같은 열수변질 광물과 밀접히 공생한다. 우라늄 광물이 산출되는 화강암맥과 열수변질된 화강암은 대전지역 지하수 내 우라늄의 주요 기원암으로 판단된다.

주요어 : 화강암, 우라늄 광물, 우라늄 지하수, 기원

Some groundwater in Korea contains high U concentrations, especially where two-mica granite occurs in the Daejeon area. The elemental U in the two-mica granite is lower than that in normal granites elsewhere in the world, and U-minerals have yet to be reported in the two-mica granite in the Daejeon area. This study focuses on investigating the occurrence of U-minerals serving as the U source in groundwater. In situ gamma ray spectrometry and mineralogical analyses using EPMA were performed. U-count anomalies were identified in a granitic dyke and in hydrothermally altered granite. Uraniferous granitic dykes occur along the contact zone between the two-mica granite and mica-schist. The uraniferous parts within the two-mica granite are developed in the hydrothermally altered zone, which contains numerous quartz veinlets within a fracture zone. Hydrothermal alteration is dominated by potassic and prophyllitic alteration. Uraninite is a common U-mineral in granitic dykes and hydrothermally altered granite. Coffinite and uranophane occur in the hydrothermally altered granite. All of these U-minerals are commonly accompanied by hydrothermal alteration minerals such as muscovite, chlorite, epidote, and calcite. It is concluded that granitic dyke and hydrothermally altered granite are the main source rocks of U in groundwater.

Key words : Granite, U-mineral, Uraniferous groundwater, Source

*Corresponding author: jeongha@dju.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

자연방사성 물질 중 지하수와 관련하여 관심의 대상이 되는 원소는 라돈과 우라늄이다. 라돈은 불활성 기체이므로 공기 중에 노출되면 쉽게 탈기되므로 지하수 중의 라돈 함량은 급격하게 감소한다. 그러나 우라늄은 높은 이동성과 긴 반감기 때문에 지하수에 비교적 높게 검출되는 미량원소이다. 지하수의 우라늄이 인체에 흡수되면 방사선적 영향과 화학적 영향으로 인해 인체에 유해하다고 한다(CEPA, 2001). 대전지역 지하수에서 우라늄이 미국의 먹는물 기준치 30ppb를 초과하는 우라늄이 보고된 이후(Han and Park, 1996) 대전의 대보 화강암 분포지역에서 고함량의 우라늄 지하수가 집중 보고되고 있어(Kim et al., 2000; Jeong, 2003; Cho, 2010) 대전은 우라늄에 의한 지하수 오염이 가장 우려되는 지역 중의 하나이다(Fig. 1).

정부는 지하수 중 자연방사성 물질 함유실태 조사를 두 차례 수행하였고 현재는 제3차 조사(2007-2016)가 수행중이다. 우라늄을 고농도로 포함하는 지하수는 대전 지역 이외에도 김제, 이천, 안성, 원주의 대보 화강암 분포지역에서 집중 보고되며, 지하수 내 우라늄은 대전의 경우 최고 402 ppb, 이천의 경우 최고 1640 ppb까지 검출된다(NEPI and KIGAM, 1999; NIER and KIGAM, 2008). 또한 지질특성이 주라기의 화강암질 저반인 안성, 이천, 원주에서도 고함량의 우라늄 지하수가 보고되고 있다. 지하수 내 우라늄의 기원에 대하여는 이들 지역의 지질특성을 근거로 화강암-지하수간 반응결과로 추정하고 있다(Kim et al., 2000). 그러나 대보 화강암은 우라늄 함량이 낮고 부성분 광물에 치환된 우라늄을 포함하는 광물의 산출도 극히 적은 것으로 보고되어(NEPI and KIGAM, 1999, 2001; Choo, 2002) 지하수 내 우라늄의 기원 규명이 미흡한 실정에 있다. 고함량의 우라늄 지하수가 대보 화강암 지질의 모든 지역에서 보고되는 것이 아니라 일부 지역에서만 보고되는 것은 우라늄 광화대와 같은 특별한 지질특성의 존재와 성인적 관련성이 매우 높은 것으로 판단된다.

우리나라의 주요 우라늄 광상은 옥천대의 흑색 셰일 층에 배대된 퇴적기원의 우라늄 광화대이며 이에 대한 연구는 많다(Lee et al., 1981; Jeong, 2006; Shin and Kim, 2011). 화성기원의 우라늄 광화대로는 페그마타이트 광상이 보고되어 있다(Oh, 1989; Park and Kim, 1998). 그러나 이들 페그마타이트 광상에서는 U이 REE 원소를 소량 치환한 희토류 광물이 주로 산출되며,

Fig. 1. Map of the regional geology and spatial distribution of dissolved U content in groundwater (modified from Moon et al., 2013). Highly enriched U groundwaters are found only in the Daejeon area where granite intrudes the Ogccheon Group. Most of the data are from the National Environmental Protection Institute (NEPI) and the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (1999, 2000, 2001, 2002), and from the National Institute of Environmental Research (NIER) and the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (2008).

uraninite (UO_2), pitchblende (U_3O_8)와 같은 초생 우라늄 광물의 산출은 보고되지 않았다. 따라서 국내에서 화성기원의 우라늄 광상의 존재는 아직 보고되지 않았다. 고함량 우라늄 지하수가 집중 보고되는 대전지역의 화강암에는 아직까지 보고되지 않은 우라늄 광화대의 부존 가능성이 매우 높다. 이 연구에서는 우라늄 광화대의 부존 가능성을 규명하기 위해 지표 방사능 탐사를 수행하여 우라늄 이상대를 추적하고, 우라늄 광화대와 우라늄 광물의 산출상태를 기재하였다. 또한 연구결과를 이용하여 대전지역 지하수 내 우라늄의 기원을 고찰하였다.

연구방법

이 연구에서는 대전지역 화강암류에 대하여 방사능 탐사를 수행하여 화강암류 내 우라늄 이상대를 추적하

였다. 확인된 우라늄 이상대에 대하여 지질조사를 수행하여 야외 산출상태를 기재하였다. 방사능 탐사에서는 76개 지점에서 각 암상별 총방사능의 강도, 방사능 강도를 농도로 환산한 방사성 원소의 등가 함량(eU, eTh, K) 측정 자료 177개를 획득하였다. 이 연구에 활용된 GR-320A 모델의 방사능 측정기는 지름이 10 cm에 달하는 넓은 측정 면적을 갖고 있어 신뢰성이 높은 방사성 원소 함량 자료를 얻는데 유용하다. GR-320A에 의해 측정된 방사능의 세기를 원소 함량으로 환산한 측정치의 오차범위는 우라늄(eU) 0.1 ppm, 토륨(eTh) 0.5 ppm, 칼륨(K) 0.1% 내외이다. 또한 300초의 긴 측정시간을 설정하여 신뢰성이 높은 자료를 얻을 수 있게 하였다.

우라늄 이상대 암석에 대한 구성광물의 산출상태를 기재하기 위하여 100여개의 연마박편을 제작하여 광석 및 편광 현미경 기재 연구를 수행하였다. 광석 및 편광 현미경으로는 확인이 어려운 우라늄 광물의 산출상태는 전자현미경의 후방산란전자영상(back-scattered electron image, BSE)을 이용하여 기재하였다. 후방산란전자영상은 무거운 원소의 광물일수록 밝은 영상을 보이는 특성을 보이므로 비교적 가벼운 원소로 구성된 조암광물에서 산출되는 우라늄 광물을 발견하고 확인하는데 유용하다. 확인된 우라늄 광물에 대하여는 에너지분산분광기(Energy dispersive spectrometer, EDS)를 이용한 정성분석 연구를 수행하였다. 연구에 사용된 전자현미경은 한국기초과학지원연구원의 Shimadzu사 EPMA 1600을 이용하였다.

일반지질

연구지역의 지질에 대한 보고로는 유성도폭(Park et al., 1977)과 대전도폭(Lee et al., 1980)이 있으며, 이들에 의하면 연구지역의 지질은 주로 선캄브리아의 변성암류와 시대미상의 옥천누층군 그리고 이를 관입한 중생대 화강암류로 구성된다. 연구지역의 북부에는 변성암류와 남부에는 북동-남서방향의 옥천누층군의 변성퇴적암류가 분포하며, 중앙부에는 중생대 화강암류가 넓게 분포한다(Fig. 2). 변성암류는 주로 흑운모 편암과 호상편마암이다. 옥천누층군의 변성퇴적암류는 주로 천매암과 점판암의 두꺼운 호층으로 구성되며 석회암이나 규암이 박층으로 협재된다. 점판암과 천매암의 호층대 내 흑색 셰일에는 탄질물과 함께 저품위 우라늄 광화대가 발달한다. 옥천누층군의 동측과 서측 경계는 모두 주라

Fig. 2. Geological map of the Daejeon area and bubble diagram showing the distribution of eU values (in ppm). Geological map is modified from Park et al. (1977) and Lee et al. (1980).

기 화강암류의 관입을 받아 그 연장이 연구지역에서 절단된다. 주라기 화강암류는 구성광물과 조직에 따라 편상 화강암, 흑운모 화강암, 복운모 화강암으로 세분된다. 이중 복운모 화강암은 연구지역의 전체에 걸쳐 광범위하게 분포하며, 편상 화강암을 관입하며 흑운모 화강암과는 점이적인 관계에 있다(Park et al., 1977). 백악기 화강암류들은 남북방향의 방향성을 가지고 주라기 화강암체를 암주상 혹은 맥암의 형태로 관입하였으며, 미문상조직 및 정동구조 등 천부 관입암의 특징을 보인다. 이들 화강암류들은 홍색장석-화강암과 규장질암으로 구성된다. 연구지역 주변 옥천대의 화강암에 대한 연구는 많지만 대전지역의 화강암에 대한 연구로는 Hong(1984) 외에는 아직 없다.

연구 결과 및 토의

방사능 탐사 결과

방사능 탐사는 우라늄의 기원암일 가능성이 높은 화강암류를 4가지 유형의 암상으로 세분하여 수행되었다. 암상별 탐사 대상 암석은 주라기 화강암(Jgr), 주라기 화

Table 1. Results of in situ gamma ray spectrometry of the four granite types.

Granite type		Jgr	Cgr	Hag	Peg	Average abundance for acid intrusives (Killeen, 1979)
Number. of measurements		49	46	32	50	
K (%)	Min.-Max.	2.4-6.9	2.3-6.4	2.8-6.9	2.5-7.8	3.4
	Average $\pm$ S.D	4.7 $\pm$ 1.1	5.1 $\pm$ 0.8	5.1 $\pm$ 0.8	4.7 $\pm$ 1.2	
eU (ppm)	Min.-Max.	1.3-29.3	2.1-10.6	2.5-34.3	1.7-40.7	4.5
	Average $\pm$ S.D	7.2 $\pm$ 5.5	5.0 $\pm$ 2.3	13.0 $\pm$ 7.1	11.1 $\pm$ 8.0	
eTh (ppm)	Min.-Max.	8.6-40.6	10.9-41.5	10.1-26.5	10.2-64.4	25.7
	Average $\pm$ S.D	23.1 $\pm$ 9.2	26.2 $\pm$ 7.2	16.0 $\pm$ 4.5	21.4 $\pm$ 8.3	

Abbreviation; Min. - Max. (minimum and maximum values), S.D. (standard deviation), Jgr (Jurassic granite), Cgr (Cretaceous granite), Peg (pegmatite), Hag (hydrothermally altered granite)

강암내 발달하는 열수변질대(Hag), 주라기 화강암과 그 주변에 발달하는 화강암맥(Peg) 그리고 백악기 화강암(Cgr)이다. 방사능 탐사결과 각 암상별 총방사능의 강도, 방사능 강도를 농도로 환산한 등가 함량(eU, eTh, K)에 대한 177개의 자료를 얻었다(Table 1). 각 암상별 K(%)의 범위(평균값)는 Cgr 2.3~6.4 (5.1), Hag 2.8~6.9 (5.1), Peg 2.5~7.8 (4.7), Jgr 2.4~6.9 (4.7)로 암상별 K의 범위와 평균값은 큰 차이를 나타내지 않는다. 각 암상별 eU의 범위(평균값)는 Peg 1.7-40.7 (11.1), Hag 2.5-34.3 (13.0), Jgr 1.3~29.3 (7.2), Cgr 2.1~10.6 (5.0)의 순서를 보인다. 주라기 화강암류와 백악기 화강암류에서의 eU 농도는 10 ppm 이하로 나타나는 반면에 열수변질대와 화강암맥에서는 eU 농도가 넓은 범위에서 다양하게 나타난다. 각 암상별 eTh의 범위(평균값)는 Cgr 10.9~41.5 (26.2), Jgr 8.6~53.2 (23.1), Peg 10.2~64.4 (21.4), Hag 10.1~26.5 (16.0)의 순서를 보인다. eTh 함량은 열수변질대와 화강암맥에서 낮게 나타나며 주라기 화강암과 백악기 화강암에서는 상대적으로 높게 나타나 eU와는 반대의 경향을 보인다. 이상의 지표 방사능 탐사 결과 대전지역 화강암 내 우라늄 이상대는 주라기 화강암의 열수변질대와 화강암맥에 부존한다. 이들 우라늄 이상대는 주라기 화강암 내부와 변성암과의 관입 경계부에 주변에서 집중 발달하는데, 주요 우라늄 이상대의 부존지역으로는 유성구 국립현충원, 유성구 반석동, 대덕구 부용면 지역 일대이다(Fig 2).

우라늄 이상대의 산출상태

우라늄 이상대는 복운모 화강암과 주변의 흑운모 편암과의 경계에서 산출되는 화강암맥과 복운모 화강암내 열극을 따라 발달한 열수변질대에 발달한다(Fig. 2). 두 우라늄 이상대에서는 녹니석과 백운모가 함께 공통적으

로 산출된다.

화강암맥 : 우라늄 이상이 현저한 화강암맥은 유성구 반석동과 대덕구 부용면 일대에서 잘 관찰되며, 복운모 화강암과 흑운모 편암의 경계부에서 흑운모 편암을 관입한 상태로 발달한다. 화강암맥은 주로 10-20 cm 크기의 폭을 가지나 큰 것은 50 cm인 것도 있다. 화강암맥은 석영과 장석 이외에 조립질의 백운모를 갖는 우백질 화강암맥(Fig. 3-a)과 중립의 백운모와 세립의 흑운모를 갖는 복운모 화강암맥이 있다(Fig. 3-b). 화강암맥에서 우라늄 이상은 백운모가 농집된 부분에서 현저하며, 복운모 화강암맥 보다 우백질 화강암맥에서 더 현저하다. 우백질 화강암맥의 균열대에는 홍색장석이 충전되어 산출되며 우라늄 이상은 열극대가 주변보다 더 현저한 특성을 보인다. 복운모 화강암맥은 규장질 암맥에 의해 절단된다. 복운모 화강암체 내부에는 거정질의 페그마타이트가 곳곳에 발달한다. 페그마타이트는 대덕구 장동지역에 집중 발달하며, 과거원 후문과 노은동 송림마을 부근에서도 일부 발달하는데 이들 암체에서 특별한 우라늄 이상은 측정되지 않았다.

열수변질대 : 우라늄 이상이 현저한 열수변질대는 대전 국립현충원 주변의 도로 공사장 주변에서 가장 잘 관찰되며 일부는 대덕구 부용면에서도 관찰된다. 이들 열수변질대의 암석은 열극대를 따라 석영세맥이 발달하며 홍색 장석이 산출되어 붉은 색을 띤다(Fig. 3-c). 열수변질대에는 주로 남북방향의 절리를 따라 백운모와 녹니석이 다량으로 산출되며, 이들이 피복된 열극대에서는 높은 우라늄 이상을 보인다. 석영 또는 녹니석, 녹염석 세맥이 지나는 부분일수록 열수변질이 현저하고 중립의 백운모가 산출되기도 한다. 또한 열수변질대 내에는 녹

Fig. 3. Outcrop photographs showing the occurrences of uraniferous rocks in the Daejeon area. (a) Leucocratic granitic dikes intruded parallel to the foliation in metamorphic rock. Coarse-grained quartz, feldspar, and muscovite are shown in the circular enlargement. (b) Granitic dike cutting the foliation in metamorphic rock. A two-mica granitic texture is shown in the circular enlargement. (c) Pink-colored alteration zone in fractured granite. Quartz veinlets and pink feldspars are shown in the circular enlargement. (d) Greenish-yellow alteration zone in fractured granite. Chlorite, epidote, and muscovite in the vicinity of a quartz vein are shown in the circular enlargement.

니석 세맥이 가장 잘 발달하며 세맥 내부에는 녹니석, 녹염석, 백운모, 방해석, 자철석과 황철석이 산출된다. 녹니석, 녹염석, 백운모가 산출되는 변질대는 세립질 석영맥에 의해 다시 절단된다(Fig. 3-d).

열수변질작용과 변질광물의 산출상태

쥬라기 화강암의 우라늄 이상대는 칼륨 변질작용(potassic alteration)과 프로필리틱 변질작용(propylitic alteration)을 받았다.

칼륨 변질작용 : 연구지역의 쥬라기 대보화강암은 주로 중립질의 복운모 화강암이며 열수변질작용으로 미사장석이나 열수성 백운모가 이차적으로 생성되는 칼륨 변질작용(potassic alteration)을 받았다. 홍색 장석이 산출되는 복운모 화강암의 열수변질대에서는 미사장석이 석영이나 심하게 변질된 사장석의 입자경계를 둘러싸거나 교대하면서 산출된다(Fig. 4-a). 복운모 화강암맥에서는 변질된 정장석이 석영을 포함하는 백운모와 함께 산출된다(Fig. 4-b). 열수성 백운모는 비늘상의 집합체로 다량 산출되기도 한다. 장석이 변질된 주변에는 붉은색의 미세한 Fe-산화물이 산출되기도 한다. 열수변질작용으로

생성된 미사장석과 Fe-산화물로 인해 칼륨 변질작용을 받은 열수변질대는 붉은색을 띤다.

프로필리틱 변질작용 : 연구지역 열수변질대에서 가장 우세한 변질작용으로서 흑운모와 장석이 변질되어 주로 녹니석, 녹염석, 백운모, 방해석이 열수변질광물로 산출된다. 이들 열수변질광물 내부에는 티탄석, 티탄철석, 자철석, 금홍석 등의 불투명 광물이 함께 산출되는데 이들은 열수변질에 대한 저항성이 큰 기존 광물이 잔류되어 산출되는 것으로 판단된다. 사장석은 엘바이트 쌍정을 관찰할 수 없을 정도로 열수변질을 심하게 받아 주로 백운모와 방해석으로 교대된다(Fig. 4-c). 또한 녹니석이나 녹염석의 내부와 그 주변에는 티탄석, 티탄철석 등의 불투명 광물이 함께 산출된다(Fig. 4-d). 녹니석과 녹염석은 탄산염 광물과 함께 절리면이나 미세열극에서 잘 산출된다. 노출된 절리면에 피복되어 있는 녹니석과 녹염석으로 인해 프로필리틱 변질대는 연록색 혹은 녹황색을 띤다. 프로필리틱 변질대에는 황철석, 백철석, 섬아연석, 방연석, 황동석 등의 황화광물이 소량 산출되기도 한다. 탄산염광물과 황화광물의 산출은 프로필리틱 변질작용이 초기의 칼륨 변질작용을 일으킨 열수시스템

Fig. 4. Photomicrographs showing hydrothermal alteration of granite from the Daejeon area. (a) Microcline replacing altered plagioclase as an example of potassic alteration. Crossed nicols. (b) Muscovite containing quartz as the breakdown product of K-feldspar. Open nicols. (c) Muscovite and calcite replacing plagioclase and K-feldspar as evidence of intense hydrothermal alteration. Crossed nicols. (d) Alteration mineral assemblage consisting of muscovite, chlorite, and calcite, with minor sphene and ilmenite, are evidence of propylitic alteration. Open nicols. Abbreviations: Cal (calcite), Chl (chlorite), Ep (epidote), Ilm (ilmenite), K-fd (K-feldspar), Pl (plagioclase), Mus (muscovite), Qz (quartz), Sp (sphene).

의 온도가 감소하고, CO_2 그리고 S 함량이 증가하는 환경에서 나타나는 변질작용임을 시사한다.

우라늄 광물의 산출상태

화강암맥의 우라늄 광물 : 우백질 화강암맥에서 현저한 우라늄 이상을 보이는 부분은 열수변질을 받아 다량의 백운모와 녹니석이 방해석과 함께 산출되는 곳이다. 우백질 화강암맥에서 산출되는 우라늄 광물은 우라나이트(*uraninite*, UO_2)이며, 우라나이트는 석영내에서 장석과 함께 산출되거나(Fig. 5-a), 석영과 장석의 입자 경계에서 백운모, 녹니석, 티탄석과 함께 산출된다(Fig. 5-b). 복운모 화강암맥에서 산출되는 우라늄 광물은 우라나이트이며, 흑운모와 장석의 입자 경계부에서 녹니석에 둘러싸인 상태로 산출된다(Fig. 5-c). 화강암맥에서 산출되는 우라나이트는 주로 20-30 μm 의 크기이나 최대 100 μm 크기로 산출되기도 한다. 우백질 화강암맥에서는 인회석과 저어콘이 산출되나 정성분석 결과 우라늄을 포함하지는 않는다. 복운모 화강암의 사장석에는 저어콘이 산출되며 흑운모에는 인회석과 저어콘, 모나자이트가 산출된다. 이들에 대한 정성분석 결과 사장석내 저어콘은 REE원소를 포함하지 않으나 흑운모의 저어콘과

모나자이트는 Th과 REE가 미량으로 포함되어 있다.

열수변질대의 우라늄 광물 : 열수변질대에서 현저한 우라늄 이상을 보이는 부분은 열극이나 석영 세맥을 따라 녹니석, 녹염석, 백운모, 방해석이 산출되는 곳이다. 이러한 열수변질대에서 산출되는 우라늄 광물은 우라나이트, 코피나이트(*coffinite*, USiO_4), 우라노페인(*uranophane*, $(\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3(\text{OH})_2) \cdot 5\text{H}_2\text{O})$)이다. 우라나이트는 열수변질을 받은 사장석 내부에서 황철석에 둘러싸인 상태로 40 μm 의 크기로 산출된다(Fig. 5-d). 코피나이트는 석영과 장석 내부에서 녹염석, 방해석 등의 열수변질 광물과 함께 산출되며(Fig. 5-e), 우라노페인은 석영내 열극을 따라 녹염석과 함께 세맥상으로 산출된다(Fig. 5-f). 이들 녹염석에는 U이 미량원으로 포함되어 있다.

지하수내 우라늄의 기원고찰

Fig. 1에서 보는 바와 같이 대전 지역의 고함량의 우라늄 지하수는 화강암 지역에서 집중 보고되고 있으며 주변에는 우라늄 광화대가 발달하는 옥천대의 변성퇴적암류가 분포하고 있다. 대전지역의 이러한 지질환경은

Fig. 5. Backscattered electron images and microprobe X-ray spectra showing the occurrence of U-minerals in uraniferous rocks. Uraninite occurs in both granitic dike and hydrothermally altered granite. (a) Uraninite in quartz and feldspar in leucocratic granitic dike. (b) Uraninite occurs along grain boundaries between quartz and feldspar in leucocratic granite, and is commonly associated with alteration minerals such as muscovite and chlorite. (c) Chlorite -rimmed uraninite occurs along grain boundaries between biotite and feldspar in two-mica granitic dike. (d) Pyrite-rimmed uraninite occurs in plagioclase grains in hydrothermally altered granite. (e) Coffinite occurs in quartz grains along with epidote and calcite in hydrothermally altered granite. (f) Uranophane occurs in epidote-veinlets in hydrothermally altered granite. Abbreviations: Cal (calcite), Chl (chlorite), Ep (epidote), Fd (feldspar), Mus (muscovite), Qz (quartz), Sp (sphene), U (U-mineral), Zr (zircon).

대전지역의 지하수내 우라늄의 기원을 옥천대 우라늄 광화대와 화강암의 두가지 기원을 상정해 볼 수 있게 한다. 옥천대 우라늄 광화대가 지하수에 대한 우라늄의 주요 공급원일 가능성에 주목하고 자연수내 우라늄에 대한 연구를 수행한 결과, 옥천대 우라늄 광화대에서 우라늄 함량이 높은 광산폐수에 대한 보고는 일부 있으나 (Woo et al., 2002; Hwang, 2010) 지하수에서 우라늄의 함량은 5ppb 이하로 매우 낮다(NEPI and KIGAM, 1999; Hwang, 2010). 이는 옥천대 우라늄 광화대의 경우 환원환경에 유리한 수질환경과 탄소 유기화합물의 우라늄 흡착 등에 의하여 지하수에는 우라늄 함량이 낮게 검출되는 것으로 추정된다(Choo, 2002; Hwang, 2010).

대전지역 지하수의 우라늄 기원으로 옥천대 퇴적암류내 우라늄의 영향을 고찰하기 위해 옥천대의 퇴적암 지역과 대전의 화강암 지역 지하수에 대한 환경동위원소 연구 결과 두 지역 지하수는 서로 성인적 관련성은 없는 것으로 밝혀졌다(Moon et al., 2013). 따라서 대전지역 지하수내 우라늄의 기원은 옥천대 우라늄 광화대일 가능성은 매우 낮다.

대전지역 지하수내 우라늄의 기원 추적을 위해 대보 화강암에 대한 연구는 우라늄 광물을 전자현미경으로도 발견하기가 매우 어려울 정도로 그 산출이 매우 적다고 보고하였다(NEPI and KIGAM, 2001; Choo, 2002). 대전지역 암석의 우라늄 평균 우라늄 함량은 3 ppm 내

외이며, 분포면적의 70%를 차지하는 복운모 화강암의 평균 우라늄 함량은 1.7 ppm 내외로서 일반 산성화성암류의 배경치에 불과하다(NEPI and KIGAM, 1999). 그러나 대전과 그 주변 지역의 우라늄 지하수 분포 현황을 살펴보면 고함량 우라늄 지하수는 대보 화강암 지질 특성의 지역에만 분포하며, 대보 화강암 지역 중에서도 옥천대 변성퇴적암류를 관입하여 그 연장이 절단된 대전지역에 집중 분포한다(Fig. 1). 고농도 우라늄 지하수의 이러한 분포 특성은 우라늄의 기원이 대보 화강암의 특수한 지질상황과 관련이 있을 것임을 시사한다.

Lee and Baik (2007)은 한국원자력연구원의 지하처분 연구시설의 복운모 화강암에서 신선한 암석보다는 열극 충전물에서 높은 우라늄과 토륨 함량을 보고하고 이들 원소들이 심부 지하수 혹은 열수를 따라 이동한 결과로 해석한 바 있다. 이번 연구에서 우라늄 광물은 백운모, 녹니석, 녹염석 등의 열수변질광물과 함께 산출됨이 처음으로 확인되었다. 기존의 연구에서 화강암 내 우라늄 함량이 낮고 우라늄 광물의 산출을 확인하지 못한 것은 연구대상을 화강암의 신선한 암석 시료에 한정하였기 때문인 것으로 추정된다. Jeong et al. (2011)은 대전 인근의 청원지역에서 고농도 우라늄 지하수가 산출되는 지역의 시추코어 연구에서 방사성 포유물을 포함하는 흑운모가 많이 산출되는 흑운모 편암을 지하수내 우라늄의 주요 근원 암종으로 해석한 바 있다. 대전지역에 수행된 방사능 탐사에서 흑운모 편암을 포함한 모든 암종에서 방사능 이상은 매우 낮게 나타났으며 높은 방사능 이상은 우라늄 광물이 산출되는 열수변질대와 화강암맥에서만 국한되어 나타났다. 따라서 대전지역 방사능 이상의 주요 기원은 우라니나이트, 코피나이트, 우라노페인 등의 우라늄이 주성분인 우라늄 광물로 추정된다. 흑운모와 사장석에 소량으로 산출되는 저어콘, 인회석, 모나자이트 등에서는 U와 Th를 포함하지 않거나 극소량 함유하고 있어 이들 광물에 의한 방사능 이상 형성에의 기여는 미미한 것으로 판단된다.

결 론

이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대전 지역 화강암류에 대한 지표 방사능 탐사 결과 우라늄 이상대는 복운모 화강암과 흑운모 편암과의 경계에서 산출되는 화강암맥과 복운모 화강암내 열수변질대에 발달한다
2. 우라늄 이상대는 주로 칼륨 변질작용과 프로필리틱

변질작용을 받았다. 칼륨 변질대에서는 홍색의 미사장석, 열수성 백운모, 철산화물이 주로 산출되며 붉은색을 띤다. 프로필리틱 변질대에서는 백운모, 견운모, 녹니석, 녹염석, 방해석이 주로 산출되며 녹색을 띤다.

3. 화강암맥과 열수변질대에서 공통적으로 산출되는 우라늄 광물은 우라니나이트이며, 코피나이트, 우라노페인이 열수변질대에서 산출된다. 우라늄 광물은 백운모, 녹니석, 녹염석, 방해석 등의 열수변질광물과 밀접히 공생한다.

4. 대전 지역 지하수 내 우라늄의 주요 근원암은 우라늄이 주성분인 광물들이 산출되는 화강암맥과 열수변질된 복운모 화강암인 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호: 2010-0011998)의 지원에 의해 수행되었다.

References

- CEPA (California Environmental Protection Agency), 2001, Public health goals for uranium in drinking-water, CEPA, California, 30p.
- Cho, B. W., Yun, U., and Choo, C. O., 2010, Uranium and radon concentration in groundwater of Daejeon area, Korea, IAH (International Association of Hydrogeologists) Congress, Proceedings of a groundwater quality sustainability, Krakow, Poland, 12-17 September 2010.
- Choo, C. O., 2002, Characteristics of uraniferous minerals in Daebog granite and significance of mineral species, J. Mineral. Soc. Korea, 15, 11-21. (in Korean with English abstract)
- Han, J. H. and Park, K. H., 1996, Abundances of uranium and radon in groundwater of Daejeon area, Economic and Environmental Geology, 29, 589-595. (in Korean with English abstract)
- Hwang, J., 2010, Hydrochemistry of groundwater in the uraniferous sedimentary rocks of the Ogcheon belt, Republic of Korea, J. Korean Earth Sci. Soc., 31, 205-213. (in Korean with English abstract)
- Hong, Y. K., 1984, Petrology and Geochemistry of Jurassic Daejeon and Nonsan Granitoids in the Ogcheon Fold Belt, Korea, Journal of Korean Institute Mining Geology, 71, 179-195.
- Jeong, C. H., 2003, Hydrochemistry and nitrogen and sulfur isotopes of emergency-use groundwater in Daejeon city, The Journal of Engineering Geology, 13, 239-256. (in Korean with English abstract)
- Jeong, C. H., Kim, M. S., Lee, Y. J., Han, J. S., Jang, H. G., and Joe, B. U., 2011, Hydrochemistry and occurrence of natural radioactive materials within bore-

- hole groundwater in the Cheongwon area, The Journal of Engineering Geology, 21, 163-178. (in Korean with English abstract)
- Jeong, G. Y., 2006, Mineralogy and geochemistry of metalliferous black slates in the Okcheon metamorphic belt, Korea: a metamorphic analogue of black shales in the South China block, Mineralum Deposita, 41, 469-481.
- Killeen, P. G., 1979, Gammaray spectrometric method in uranium exploration application and interpretation. Geol. Surv. Can. Rep., 31, 163-229.
- Kim, G. Y., Koh, Y. K., Kim, C. S., Bae, D. S., and Park, M. E., 2000, Geochemical studies of geothermal waters in Yuseung geothermal area. J. Korean Soc. Groundwater Environ., 7, 32-46.
- Lee, S. M., Kim, H. S., and Na, K. C., 1980, Geologic map of Daejeon sheet. Daejeon Sheet (1:50,000), 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, S. Y. and Baik, M. H., 2007, Characters of Fracture-filling Minerals in the KURT and Their Significance, J. Miner. Soc. Korea, 20, 165-173. (in Korean with English abstract)
- Moon, S. H., Hwang, J., Lee, J. Y., Hyun, S. P., Bae, B. K., and Park, Y., 2013, Establishing the origin of elevated uranium concentrations in groundwater near the central Ogcheon metamorphic belt, Korea, Journal of Environmental Quality, 42, 118-128.
- National Environmental Protection Institute (NEPI) and Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 1999, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (I), KIGAM, Daejeon, Korea, 338p.
- National Environmental Protection Institute (NEPI) and Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2000, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (II), KIGAM, Daejeon, Korea, 323p.
- National Environmental Protection Institute (NEPI) and Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2001, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (III), KIGAM, Daejeon, Korea, 388p.
- National Environmental Protection Institute (NEPI) and Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2002, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (IV), KIGAM, Daejeon, Korea, 357p.
- National Institute of Environmental Research (NIER) and Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2008, Detailed study on the natural radionuclides concentrations in the groundwater (I), KIGAM, Daejeon, Korea, 293p.
- Oh M. S., 1989, Allanite mineralization in the Mt. Eorae area, Journal of Korean Institute Mining Geology, 22, 151-166. (in Korean with English abstract)
- Park, H. I., Lee, J. D., and Cheong, J. G., 1977, Geologic map of Korea, Yuseong Sheet (1:50,000) Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Park M. E. and Kim, G. S., 1998, Geochemistry of uranium and thorium deposits from the Kyemyeongsan pegmatite, Economic and Environmental Geology, 31, 365-374. (in Korean with English abstract)
- 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)
- Woo, N. C., Choi, M. J., and Lee, S. K., 2002, Assessment of groundwater quality and contamination from uranium bearing black shales in Goesan-Boeun area, Korea, Environmental Geochemistry and Health, 24, 261-273.

원고접수일: 2013년 10월 8일

수정본채택: 2013년 12월 9일

게재확정일: 2013년 12월 12일

대전대학교 지반방재공학과

300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3

E-mail: jeongha@dju.ac.kr