

국내 고함량 우라늄 지하수의 분포와 기원에 관한 지질학적 고찰

황 정*

대전대학교 건설안전방재공학과, 교수

Geological Review on the Distribution and Source of Uraniferous Grounwater in South Korea

Jeong Hwang*

Department of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Korea, Full Professor

Abstract

The most of groundwater with high U-concentration occur in the Jurassic granite of Gyeonggi massif and Ogcheon belt, and some of them occur in the Cretaceous granite of Ogcheon belt. On the contrary, they do not occur in the Jurassic granite of Yeongnam massif and the Cretaceous granite of Gyeongsang basin. The Jurassic and Cretaceous granite, the host rock of high U-groundwater, were resulted from parental magma with high ratio of crustal material and highly differentiated product of fractional crystallization. These petrogenetic characteristics explain the geological evidence for preferential distribution of uraniumiferous groundwater in each host rock. It were reported recently that high U-content, low Th/U ratio and soluble mineral occurrence of uraninite in the two-mica granite of Daejeon area which have characteristics of S-type peraluminous and highly differentiated product. It is the mineralogical-geochemical evidences supporting the fact that the two-mica granite is the effective source of uranium in groundwater. The biotite granite and two-mica granite of Jurassic age were reported as biotite granite in many geological map even though two-mica granite occur locally. This fact suggest that the influence of two-mica granite can not be ignored in uraniumiferous groundwater hosted by biotite granite.

Keywords: uraniumiferous groundwater, source rock, granite, U-mineral, tectonics



*Corresponding author: Jeong Hwang
E-mail: jeongha@dju.kr

Received: 15 October, 2018
Revised: 6 December, 2018
Accepted: 12 December, 2018

© 2018 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/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

고함량 우라늄 지하수의 대부분은 경기육괴와 옥천대의 주라기 화강암 지질에서 그리고 일부는 옥천대의 백악기 화강암 지질에서 산출되며, 영남육괴의 주라기 화강암 지질과 경상분지의 백악기 화강암 지질에서는 거의 산출되지 않는다. 경기육괴와 옥천대의 주라기 화강암과 옥천대의 백악기 화강암은 근원 마그마내 지각물질의 비율이 높고 고분화된 특성을 보이는데, 이러한 암석-성인적 특성은 고함량 우라늄 지하수가 해당 암상에서 우선적으로 산출되는 지질학적 주요 요인이다. S-type의 과알루미늄질의 고분화 암상인 대전지역의 복운모 화강암에서는 높은 U-함량과 낮은 Th/U ratio 그리고 용해성 광물인 우라니나이트가 산출된다. 이러한 특성은 복운모 화강암이 지하수 내 우라늄의 유용한 공급원임을 지지하는 광물-지구화학적 주요 요인이다. 여러 지역의 지질도폭에서 주라기의 흑운모 화강암과 복운모 화강

암을 서로 구분하지 않고 흑운모 화강암으로 기재한 경우가 많음을 고려하면, 고함량 우라늄 지하수가 산출되는 흑운모 화강암 지질에서도 복운모 화강암의 영향이 있을 것으로 추정된다.

주요어: 우라늄 지하수, 기원암, 화강암, 우라늄 광물, 지체구조

서론

우라늄은 높은 이동성과 긴 반감기 때문에 지하수에 비교적 높게 검출되며 우라늄이 인체에 흡수되면 방사선적 영향과 화학적 영향으로 인해 인체에 유해하다고 한다(CEPA, 2001). 1998년 대전지역의 지하수에서 방사성물질인 우라늄이 검출되었다는 보도 이후 국가차원의 사실규명과 관리대책 수립을 위해 1999년부터 3단계에 걸쳐 전국단위로 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사가 수행되어 왔다.

현재까지 수행된 국립환경연구원 조사 자료에 의하면 지하수내 우라늄 함량은 화강암 지역에서 가장 높으며 그중에서도 중생대 대보화강암 분포 지역에서 특히 높다(NIER, 2008; 2009; 2010). Yun et al. (2016)은 지하수내 우라늄과 지질의 상관성을 규명을 위해 전국의 1013개 지점에서의 지하수내 우라늄 자료를 분석한 결과 우라늄의 농도가 음용수 수질 기준치(30 $\mu\text{g/L}$)를 초과하는 지점은 주로 화성암 지역 또는 화성암과 변성암의 경계지역에서 나타난다고 보고하였다. 그러나 대보화강암은 연장이 약 350 km, 폭이 30-50 km의 대규모 저반형 심성암체로 산출되므로 남한 면적의 25%를 차지하는 지역의 많은 주민들이 우라늄 지하수를 우려하는 실정이다.

동일한 화강암 지질에서 지하수 내 우라늄 함량의 지역별 차이는 수리화학적 환경의 차이, 우라늄 광물의 산출 특성과 존재 형태에 따른 우라늄 광물의 용해도 차이 등의 다양한 현상과 관련이 있을 것으로 추정하였다(Kim et al., 2013). 우리나라와 같은 국토 면적이 비교적 좁은 지역에서 지하수 내 우라늄 함량의 지역별 차이는 수리지화학적 및 기후적 요인 보다는 근원암과 관련된 지질학적 요인의 영향 가능성이 높다(Dana et al., 1988). 전국에서 우라늄 함량이 가장 높게 보고된 대전지역의 지하수는 복운모 화강암 지역에서 집중적으로 분포하는데(NIER, 2008), 주변에 분포하는 옥천대 저품위 우라늄 광화대의 영향은 없는 것으로 보고되었다(Moon et al., 2013). 우라늄 광물은 지하수 중 방사성 물질의 일차적인 근원물질이므로 암석 내 방사성 원소를 함유하는 광물들의 산출상태와 광물학적 정보가 중요하다(Choo, 2002). 지하수 중 자연방사성 물질의 주요 기원에 대하여 Jeong et al. (2011)은 흑운모 내 수반되는 부성분 광물로, Hwang(2013)은 우라늄이 주성분인 우라니나이트(uraninite)로 보고하였다.

일부 연구에서 대보화강암의 다양한 암상 중 고함량 우라늄 지하수의 주요 기원이 되는 암석과 광물로서는 흑운모 화강암과 흑운모에 수반되는 부성분 광물로 보고하고 있다. 그러나 흑운모 편암과 불국사 화강암류 지역에는 지하수 중 고함량의 우라늄이 거의 보고되지 않는다. 현재까지 지하수 내 우라늄이 화강암중에서도 어떤 종류의 암상과 광물에서 기원하는지 그리고 그 분포에 대한 지질학적 규명이 미흡한 실정에 있다. 따라서 이 연구의 목적은 국립환경과학원이 조사한 지하수 중 우라늄이 고함량으로 보고된 대표적인 지역과 지질을 중심으로 우라늄의 주요 기원이 될 수 있는 광물과 암석 그리고 분포 특성을 고찰하는 데 있다. 이를 통해 고함량 우라늄 지하수의 분포와 기원에 대한 지질학적 근거를 제시하고자 한다.

연구지역 및 방법

국립환경연구원은 남한 전체를 대상으로 선캄브리아 시대로부터 시작하여 신생대에 이르기까지 다양한 지질시대의 암석 분포지역에 대한 실태조사를 통해 지질별 특성 연구를 수행해 왔다. Yun et al. (2016)은 국립환경연구원의 일부 자료를 분석하여 한국지질자원연구원의 1:100만 지질도폭을 기초로 여러 암석을 화성암, 탄산염암, 화산암, 변성암, 퇴적암

의 5개 암상으로 단순화시켜 지하수내 우라늄 함량의 지질특성을 고찰한 바 있다. 그 결과 고함량 우라늄은 화성암 지질에 높은 상관성을 보인다고 보고하였다. 국립환경과학원은 지하수 중 우라늄이 고함량 지역인 지점은 화성암 중에서도 중생대 화강암류 지역에 집중된다고 보고하였다(NIER, 2010).

이번 연구에서는 국립환경과학원이 보고한 우라늄 고함량 지역이 중생대 화강암류에 집중되어 있음에 주목하여, 우라늄이 고함량으로 보고된 대표적인 지역에서 지질에 따른 우라늄 함량의 최고치, 지질시대, 그리고 지체구조를 조사하였다 (Table 1). 조사된 고함량 우라늄 지역의 지질학적 특성을 고찰하기 위해 각 대표 지역을 트라이아스기 화강암, 쥐라기 화강암, 백악기 화강암으로 구분한 중생대 화강암류의 분포지질도 및 지체구조도에 함께 표시하였다(Fig. 1). 또한 지하수 중 우라늄 함량이 전국에서 가장 높게 보고된 대전지역 화강암의 우라늄 관련 광물 및 지구화학적 특성을 고찰하여 지하수 중 우라늄의 기원에 대하여 고찰하였다.

Table 1. Summary of characteristics on the representative sites in which the highest U-concentrations were reported in groundwater according to host rock type.

	district	U (ppb)	Lithology	Tectonic	Reference
Gangwon	Cheolwon	711	Jgr	Gyeonggi massif	NIER, 2010
	Pocheon	84	Jbgr		NIER, 2010
	Chuncheon	231	P \mathcal{C} grgn		NIER, 2008
	Wonju	106	P \mathcal{C} grgn		NIER, 2008
	Wonju	70	Jbgr		NIER, 2009
	Wonju	53	Jtmgr		NIER, 2008
Gyeonggi	Yongin	69	Jbgr	Gyeonggi massif	NIER, 2009
	Icheon	1011	Jbgr		Jeong et al., 2012
	Yeoju	268	Jbgr+Jtmgr		NIER, 2001
	Anseong	75	Jtmgr		NIER, 2009
	Anseong	1757	Jbgr		NIER, 2008
Daejeon	Daejeon	188	Jtmgr	Ogcheon belt	NIER, 2009
	Daejeon	3607	Jtmgr		NIER, 2006
Cheongju	Cheongju	186	Jgr		NIER, 2009
	Cheongju	683	Jgr+Jbgr		Jeong et al., 2011
Chungbuk	Chungju	158	Kgr	Ogcheon belt	NIER, 2009
	Jecheon	335	Kgr		NIER, 2008
	Boeun	58	Jgr		NIER, 2009
	Ogcheon	136	Jgr		NIER, 2010
	Geumsan	40	Jbgr		NIER, 2010
Cheonbuk	Jinan	131	P \mathcal{C} grgn	Ogcheon belt	NIER, 2009
	Gimje	670	Jgr		NIER, 2010
	Gochang	170	Jgr		NIER, 2008
	Jeongup	158	Kgr		NIER, 2008
Gyeongbuk	Moongyeong	286	Kgr	Ogcheon belt	NIER, 2010
	Yecheon	75	Jbgr	Yeongnam massif	NIER, 2009
	Gumi	51	Jgr		NIER, 2008

Jbgr (Jurassic biotite granite), Jtmgr (Jurassic two-mica granite), Jgr (Jurassic granite), Kgr (Cretaceous biotite granite), P \mathcal{C} grgn (Precambrian granitic gneiss)

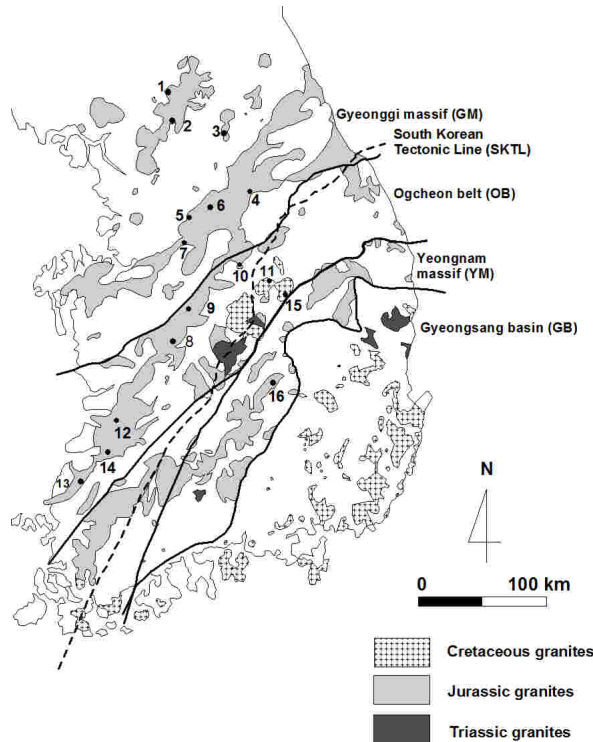


Fig. 1. Spatial distributions of the representative sites in which uraniferous groundwater occur shown on Mesozoic granite lithology and tectonic map.

1. Cheolwon, 2. Pocheon, 3. Chuncheon, 4. Wonju, 5. Yongin, 6. Icheon, 7. Anseong, 8. Daejeon, 9. Cheongju, 10. Chungju, 11. Jecheon, 12. Gimje, 13. Gochang, 14. Jeongup, 15. Moongyeong, 16. Gumi

연구결과 및 토론

지질 및 지체구조별 분포 특성

Table 1은 우라늄의 음용수 수질 기준치를 초과하는 대표적인 지역에서 해당 지점의 암상에 따라 지하수 중 우라늄 함량의 최고치를 정리한 것이다. 지하수내 우라늄 함량이 높게 나타난 지점의 지질은 중생대 쥐라기의 흑운모 화강암(Jbgr), 복운모 화강암(Jtmgr), 화강암(Jgr)과 백악기의 흑운모 화강암(Kgr), 그리고 선캠브리아시대 편마암(PCgrgn)이며, 고함량의 우라늄 함유 지하수는 중생대 쥐라기 화강암 지질에서 집중적으로 산출된다. 각 지역에서 지하수내 우라늄 함량이 최고치를 보이는 지점의 지질은 쥐라기의 흑운모 화강암과 복운모 화강암 그리고 쥐라기 화강암에 집중된다. 쥐라기 화강암과 흑운모 및 백운모 화강암 간의 구분에 대하여는 뒤에서 논의하고자 한다. 현재까지 국내에서 가장 높은 우라늄 함량이 보고된 곳은 대전지역의 쥐라기 복운모 화강암 지질이며, 그 다음으로 높은 함량이 보고된 곳은 안성과 이천지역으로서 지질은 흑운모 화강암이지만 부근에는 복운모 화강암이 분포한다. 일부의 백악기 화강암 지질에서도 지하수 중 고함량의 우라늄이 보고된다.

Fig. 1은 우라늄의 음용수 수질 기준치 초과하는 대표적인 지역을 지체구조도와 중생대 화강암 분포도에 도시한 것이다. 쥐라기 화강암과 관련된 우라늄 지하수의 대부분은 경기육괴와 옥천대 지역에서 산출되며 일부는 경북의 영남육괴 지

역에서 산출된다. 백악기 화강암과 관련된 우라늄 지하수는 충주, 제천, 문경의 옥천대 중부 지역과 정읍의 옥천대 서부 지역에서 일부 산출되지만 경상분지 지역에서의 산출 보고는 아직 없다. Cho et al. (2014)은 경상남북도 전역에 대한 조사에서 의성의 신동층군 1개 지점에서 지하수 중 우라늄 기준치를 초과하였으나 타 지역에 비하여 매우 낮은 우라늄 함량을 갖는다고 보고하였다. 이상에서 고함량의 우라늄 지하수는 경기육괴와 옥천대 지역의 주라기 화강암 지질에서 집중 보고되며 일부는 옥천대의 중부와 서부 지역의 백악기 화강암 지질에서 보고되며, 영남육괴의 주라기 화강암 지질과 경상분지의 백악기 화강암 지질에서는 거의 보고되지 않는다. Chough et al. (2000)은 옥천대 동북부의 태백산 분지는 영남육괴에, 옥천대 중부 및 서남부의 옥천변성대는 경기육괴에 포함되며 그 경계를 남한구조선(South Korean Tectonic Line, SKTL)으로 명명한 바 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 고함량 우라늄 지하수는 남한구조선 북측의 중생대 화강암류에 국한되어 분포하는 특성을 보인다.

마그마의 성인적 관련성

우라늄은 자연에서 산출되는 가장 무거운 원소로서 큰 이온반경과 높은 원자가로 인하여 조암광물의 결정구조에 들어가지 못해 부분용융 혹은 마그마 분화작용 동안에 액상에 계속적으로 부화된다. 그 결과 우라늄은 지질학적 시간동안에 주로 대륙지각 상부에 부화되어 왔다. 우라늄의 평균 함량은 전형적인 맨틀 기원 마그마(MORB)에서는 0.5 ppm 이하이며(Sun and McDonough, 1989), 상부지각에서는 2.7 ppm이며(Plant et al., 1999; Rudnick and Gao, 2003), 산성질 화성암에서는 2.2-15.0 ppm 범위를 보인다(Boyle, 1982). 따라서 대륙지각의 부분용융으로 생성된 마그마에는 U이 부화되고 이들 마그마의 고분화작용으로 생성된 화성암은 U 함량이 높아 우라늄 광화작용을 일으킬 수 있다.

대보화강암류는 주라기에 대보조산운동과 동시에 환원성 환경에서 변성퇴적암류를 주로 하는 대륙지각 물질이 부분용융된 산물이거나 맨틀에서 형성된 화강암질 마그마가 상승하는 동안 대륙지각 물질의 혼입으로 생성되었으나, 불국사 화강암류는 백악기에 맨틀기원의 마그마가 산화성 환경에서 지각물질과의 혼합이 없이 분별정출작용에 의해 분화되어 생성되었다(Kim, 1992). Uchida et al. (2012)은 대보화강암류는 화강섬록암에서 화강암에 해당되는 다양한 분화특성을 보이지만 백악기 화강암류들은 주로 화강섬록암류에 해당되며, 백악기 화강암류 중에서도 고분화된 화강암류는 옥천대 중부와 서부에서 산출된다고 보고하였다. 또한 옥천대 중서부 백악기 화강암류는 대륙지각의 부분용융으로 생성된 마그마로부터 생성되었다고 보고하였다. 따라서 주라기와 백악기 화강암의 근원물질과 분화정도의 차이로 요약되는 성인적 차이는 고함량의 우라늄 지하수의 산출이 백악기 화강암 보다는 주라기 화강암 지역에 집중되는 지질학적 원인으로 해석된다.

지체구조적 관련성

경기육괴와 영남육괴의 저반상의 주라기 화강암은 무수히 많은 개별 암체들의 집합체로서 관입시기와 마그마의 근원물질에서 차이를 보인다. 경기육괴 주라기 화강암(180-160 Ma)은 영남육괴(210-170 Ma) 보다는 대체로 젊은 관입연대를 보이며, 경기육괴 주라기 화강암은 지각-지각 혼합물질이며 영남육괴의 주라기 화강암은 맨틀-지각의 혼합 성분이 근원물질이었다(Jwa, 2008). 경기육괴와 영남육괴의 주라기 화강암체를 생성시킨 근원물질의 차이는 고함량의 우라늄 지하수의 산출이 영남육괴 보다는 경기육괴 지역에 집중되는 원인으로 해석된다.

경상분지와 옥천대에는 생성시기와 분화정도가 서로 다른 암주상의 백악기 화강암류들이 분포한다. 이들 백악기 화강암류들은 그 세부적인 생성시기와 지역에 따라 조구조적인 환경변화 및 용융물질 내의 맨틀과 지각 물질의 상대적인 비율 등의 성인적 차이를 갖는다(Park and Lee, 2014). 백악기 화강암 지질에서 고함량 우라늄 지하수는 경상분지에서는 산출

되지 않은 반면 옥천대 중서부에서는 그 산출이 보고된다. 옥천대의 백악기 화강암류는 암주상 암체들이 경기육괴와 영남 육괴의 경계부를 따라 관입하였고 흑운모 화강암 및 알칼리 장석 화강암의 특성을 갖는다. 대표적으로는 무암사 월악산, 속리산 화강암이 있으며 경상분지 화강암에 비해 훨씬 오래된 생성연령(88-94 Ma)을 갖는다(Lee et al., 2010). 이중 속리산 화강암은 암체의 분화말기 암상에서 주변의 류라기 화강암에 비해 평균 2.5배 이상의 높은 우라늄 이상치를 보인다(Lee, 1978). 경상분지의 백악기 화강암과 달리 옥천대 백악기 화강암 지역에서 고함량 우라늄 지하수의 산출이 보고되는 것은 전술한 바와 같이 두 지역 화강암의 근원물질 및 분화 정도와 같은 성인이 다르기 때문으로 해석된다.

경기육괴와 영남육괴의 기반암들의 연대와 동위원소적 특성이 구별되지 않는다는 남한구조선(SKTL)에 대한 논의도 있지만(Gwak et al., 2017), 류라기와 백악기의 화강암 지질에서 고함량 우라늄 지하수가 산출되는 지역이 남한구조선의 북측으로 한정되는 분포특성이 화강암의 지체구조적 환경과 성인에 어떤 관련이 있는지에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

지하수 내 우라늄 기원암의 암석학적 특성

화강암체가 지하수와 반응에 의해 우라늄 공급원으로 작용하기 위해서는 화강암의 우라늄 함량이 높아야 하고 우라늄 포함 광물의 용해성이 높아야 한다.

일반적으로 우라늄 광화작용을 일으키는 생산성 화강암들은 9 ppm 이상의 높은 우라늄 함량을 갖고 지각기원의 고분화된 과알루미네질 특성을 보인다(Boyle, 1982). 우라늄을 포함하는 광물로 우라니나이트가 흔하게 산출되는 이들 우백질 화강암류들은 과알루미네질 S-type의 Li-운모 화강암이거나 I-S transitional type의 흑운모 및 복운모 화강암으로 산출된다(Forster, 1999). 복운모 화강암으로 기재되는 우백질화강암은 우라늄 광상과 관련이 깊은 대표적인 우라늄 생산성 화강암으로서 세계 각지에서 보고된다(Ibrahim et al., 2002; Rene, 2005; Min et al., 2005).

우라늄의 함량이 높은 화강암이라 하더라도 우라늄이 불용성인 부성분 광물 속에 포함되어 있다면 지하수 내 우라늄의 공급원이 될 수 없다. Thorite, zircon, monazite, xenotime 등의 부성분 광물에 치환되어 있는 U은 이들 광물에 강하게 결합되어 있어 약한 산성 용액에 의해서는 쉽게 용출되지 않는다. 반면에 U-운모, 우라니나이트와 같은 용해종(soluble species)의 부성분 광물에 포함되어 있다면 U은 상대적으로 쉽게 용출될 수 있다. 화강암 내에 Th이 풍부한 불용성의 부성분 광물보다 U이 주성분인 용해종의 부성분 광물이 풍부할수록 Th/U ratio는 낮아진다. 화강암과 유문암 등의 산성질 화성암의 평균 Th/U ratio는 3.3이며, 우라니나이트와 같은 용해종의 우라늄 광물을 포함하는 화강암은 Th/U 비가 3-0.1 범위의 낮은 값을 보인다(Dahlkamp, 1993).

맨틀의 부분용융과 소량의 지각물질 혼합으로 생성된 calc-alkaline granite는 U의 함량이 낮으며, 해양지각과 퇴적물로부터 H₂O, U, Th, REE가 혼입된 맨틀의 부분용융으로 생성된 alkaline granite는 U, Th, REE, Zr 함량은 높지만 U과 Th이 불용성이 큰 부성분 광물에 포함되어 산출된다. 따라서 이들 암석은 U함량이 높아도 지하수 내 우라늄의 기원암이 될 수 없다. 지각물질의 재용융에 의해 생성되는 S-type의 과알루미네질 화강암은 마그마의 온도가 낮아서 부성분 광물에 대한 용해도가 낮아 이들을 초기에 정출시켜 후기 잔류 용액에는 Zr, Th, REE가 결핍되고 상대적으로 U이 부화된다. 이들 잔류 용액으로부터 결정화된 우라니나이트를 포함한 과알루미네질 화강암은 지하수 내 우라늄 기원암이 된다(Cuney, 2014). 따라서 지각물질 기원의 S-type의 과알루미네질 고분화 화강암은 지하수에 의한 우라늄 용출이 용이한 우라니나이트를 포함하고 있어 지하수 내 우라늄의 용출 기원암이 된다.

대전지역 지하수 내 우라늄 기원암

류라기 대보화강암은 석영섬록암, 화강섬록암, 흑운모 화강암, 복운모 화강암, 백운모 화강암, 혼성암 등으로 구성되며,

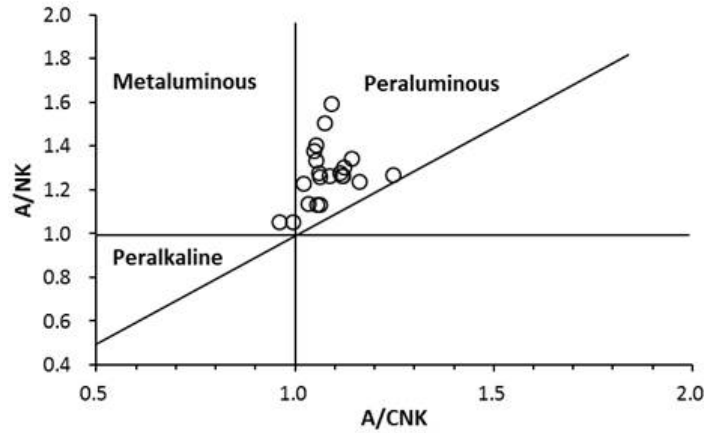


Fig. 2. Molar A/NK vs. A/CNK diagram showing the peraluminous character of the two-mica granite in Daejeon area (data from Hwang and Moon, 2018).

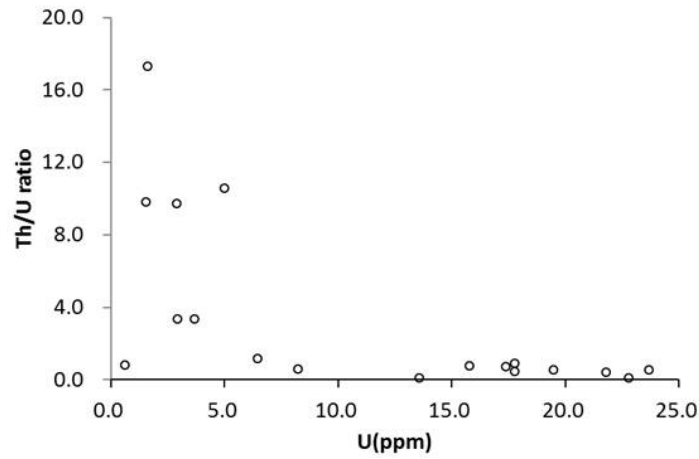


Fig. 3. Plot for U value vs. Th/U ratio of the two-mica granite in Daejeon area (data from Hwang and Moon, 2018).

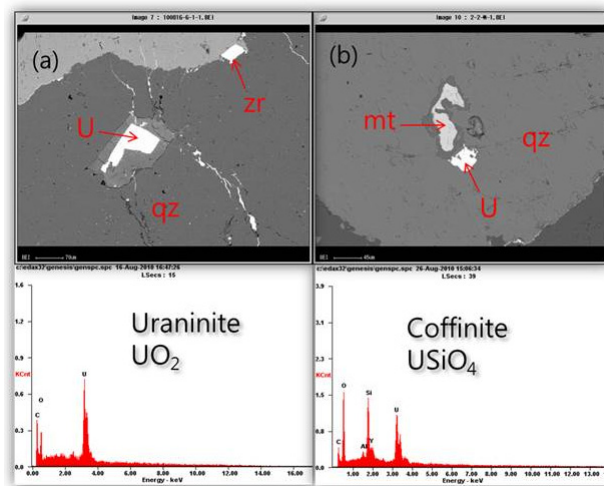


Fig. 4. The backscattered electron image and microprobe X-ray spectra showing the U-mineral occurrence and identification of Uraninite(a) and coffinite(b) in the two-mica granite of Daejeon area (after Hwang et al., 2014).

qz: quartz, U: U-mineral, zr: zircon, mt: magnetite

화강섬록암 → 흑운모 화강암 → 복운모 화강암으로 분화하였다. 이들의 지화학적특성은 alumina saturation index 값이 대부분 1.1이하로 I-type 또는 I/S type 경계부에 해당되는 특성을 보이는 반면 복운모 화강암과 백운모 화강암은 과알루미너질의 S형 화강암의 특성에 해당된다(Jin, 1998). 전국에서 지하수 내 우라늄 함량이 가장 높게 보고된 대전지역의 화강암류는 변성이질암이 60-70% 부분용융된 S-type의 본원마그마에 의해서 생성되었으며(Kwon, 1988), 이중 가장 넓은 분포를 보이는 복운모 화강암은 과알루미너질 특성을 보인다(Fig. 2). Hwang and Moon(2018)은 대전지역 복운모 화강암의 Th/U ratio는 17.8-0.08의 범위값을 갖는데 이중 높은 우라늄 함량(13-23 ppm)을 보이는 암상들의 Th/U ratio는 1 이하로 매우 낮은 값을 보인다고 보고하였다(Fig. 3). 또한 우라늄 함량이 높은 화강암에서는 우라늄이 주성분 광물인 우라니나이트(UO₂)와 코피나이트(coffinite, USiO₄)가 산출된다(Fig. 4). 우라니나이트는 물-암석 반응에 의해서 용해성인 UO₂²⁺ 이온으로 산화될 수 있어(Langmuir, 1978), 지하수내 우라늄의 주요 공급원이 될 수 있다.

대전지역의 복운모 화강암은 S-type의 과알루미너질, 높은 U-함량, 낮은 Th/U ratio, 용해성 U-광물 산출 등의 특성을 보이는데, 이는 복운모 화강암이 지하수 내 우라늄의 기원암인 광물암석학적 근거이다(Hwang, 2013; Hwang and Moon, 2018).

기타 지역 지하수내 우라늄 기원암

전국에서 지하수 중 우라늄 함량이 가장 높은 곳으로 보고된 대전-청주, 안성-이천, 포천지역의 1:5만 지질도폭에서는 지역에 따라 흑운모 화강암(Jbgr)과 복운모 화강암(Jtmgr)의 구분이 불명확하게 기재된 곳도 있으며, 1:25만 지질도폭에서는 이들을 모두 주라기 화강암(Jgr)으로 포괄적으로 기재한 경우가 많다. 대전과 유성도폭에서는 흑운모 화강암에서 복운모 화강암으로 분화되며 이들은 점이적 경계를 갖는 것으로 기재되어 있다(Park et al., 1977; Lee et al., 1980). 그러나 유성도폭 북측과 접하는 청주도폭에서는 이들을 모두 흑운모 화강암으로 명명하고 부분적으로 복운모 화강암의 특성을 보인다고 기재하였다(Kwon and Jin, 1974). 또한 경기지역의 이천도폭에도 흑운모 화강암으로 명명하였는데 부분적으로 백운모 함량이 증가하여 복운모 화강암과 유사하지만 이들 암체가 흑운모 화강암을 관입한 증거를 야외에서 관찰하기 어려워 흑운모 화강암에 포함시켰다고 한다(Yeo and Lim, 1974). 포천지역에는 중생대 주라기 화강암 중 흑운모 화강암이 넓게 분포하며 이를 관입한 석류석을 포함하는 흑운모 화강암에서 백운모를 포함하는 우백질 화강암의 특성을 보인다고 한다(Kee et al., 2005).

Table 1에서 보는 바와 같이, 우라늄 함량이 가장 높게 보고된 대전-청주, 안성-이천지역의 지하수는 복운모 화강암과 밀접한 관련성을 갖는다. 또한 각 지역의 지질도폭에서 주라기 복운모 화강암을 주라기 흑운모 화강암 및 주라기 화강암과 엄밀하게 구분하지 않은 것으로 보아 복운모 화강암이 기재되지 않은 고함량 우라늄 지하수 산출 지역에서도 복운모 화강암의 영향이 있을 것으로 추정된다.

결론

이상의 고찰 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고함량 우라늄 지하수의 대부분은 경기육괴와 옥천대의 주라기 화강암 지질에서 그리고 일부는 옥천대의 백악기 화강암 지질에서 산출되며, 영남육괴의 주라기 화강암 지질과 경상분지의 백악기 화강암 지질에서는 거의 산출되지 않는다. 고함량 우라늄 지하수는 남한구조선 북측의 중생대 화강암류에 국한되어 분포하는 특성을 보인다.
2. 주라기 화강암은 백악기 화강암에 비해 상대적으로 근원 마그마 내 지각물질의 비율이 높고 고분화된 특성을 보이

는데, 이러한 암석 성인적 차이는 고함량 우라늄 지하수의 산출이 백악기 화강암 보다는 주라기 화강암 지역에 집중되는 지질학적 주요 요인이다.

3. 경기육괴와 영남육괴의 주라기 화강암체를 생성시킨 근원물질의 차이는 고함량 우라늄 지하수의 산출이 영남육괴 보다는 경기육괴 지역에 집중되는 주요 요인이다.
4. 옥천대의 백악기 화강암은 경상분지의 백악기 화강암에 비해 마그마 내 지각물질의 비율이 높고 고분화된 특성을 보이는데, 이러한 암석 성인적 특성은 옥천대의 백악기 화강암 지질에서만 고함량 우라늄 지하수가 산출되는 지질학적 주요 요인이다.
5. 대전지역의 복운모 화강암은 S-type의 과알루미너질의 고분화 암상으로서 높은 U-함량과 낮은 Th/U ratio 그리고 용해성 U-광물인 우라니나이트가 산출되는데, 이는 복운모 화강암이 지하수 내 우라늄의 가장 유용한 공급원임을 지시하는 광물-지구화학적 근거로 추정된다.
6. 여러 지역의 지질도폭에서 주라기 화강암 중 흑운모 화강암과 복운모 화강암이 서로 동일한 마그마의 분화산물로서 접이적인 경계를 가지고 있어 두 암상을 따로 구분하지 않고 기재한 경우를 고려하면, 고함량 우라늄 지하수가 산출되는 흑운모 화강암 지질에서도 복운모 화강암의 영향이 있을 것으로 추정된다.

References

- Boyle, R.W., 1982. Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits, Geological Survey Canada, Elsevier Scientific Publishing Company, 498p.
- CEPA (California Environmental Protection Agency), 2001, Public health goals for uranium in drinking water, CEPA, California, 30p.
- Cho, B.W., Choo, C.O., Yun, U., Lee, B.D., Hwang, J.H., Kim, M.S., 2014, Hydrogeochemical characteristics, occurrence, and distribution of natural radioactive materials (uranium and radon) in groundwater of Gyeongnam and Gyeongbuk Provinces The Journal of Engineering Geology, 24(4), 551-574.
- Choo, C.O., 2002. Characteristics of uraniferous minerals in Daebo granite and significance of mineral species, Journal of Mineral Society of Korea, 15, 11-21. (in Korean with English abstract).
- Chough, S.K., Kwon, S., Ree, J.H., Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: A review and new view, Earth-Sciencé Reviews, 52, 175-235.
- Cuney, M., 2014, Felsic magmatism and uranium deposits, Bulletin-Société géologique de France, 185(2), 75-92.
- Dahlkamp, F.J., 1993, Uranium Ore Deposits, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 499p.
- Dana, P.L., James, E.W., Douglas, J.C., 1988, Predicting the occurrence of radon in groundwater supplies, Environmental Geochemistry and Health, 10(2), 41-50.
- Forster, H.J., 1999, The chemical composition of uraninite in Variscan granites of the Erzgebirge, Germany, Mineralogical Magazine, 63(2), 239-252.
- Gwak, M., Song, Y., Park, K., 2017, Depositional age of the Bangnim Group, Pyeongchang, Korea constrained by SHRIMP U-Pb age of the detrital zircons, The Journal of Petrological Society of Korea, 26(1), 73-82. (in Korean with English abstract).
- Hwang, J., 2013, Occurrence of U-minerals and source of U in Groundwater in Daebo granite, Daejeon area, The Journal of Engineering Geology, 23(4), 399-407. (in Korean with English abstract).
- Hwang, J., Moon, S.H., 2018, Geochemical evidence for K-metasomatism related to uranium enrichment in Daejeon granitic rocks near the central Ogcheon Metamorphic Belt, Korea, Geosciences Journal, 22(6), 1001-1013.

- Hwang, J., Moon, S.H., Ripley, E.M., Kim, Y.H., 2014, Determining uraniumiferous host rocks and minerals as a source of dissolved uranium in granite aquifers near the central Ogcheon metamorphic belt, Korea, *Environmental Earth Science*, 72, 4035-4046.
- Ibrahim, M.E., Saleh, G.M., Abd El-Naby, H.H., 2002, Uranium mineralization in the two mica granite of Gabal Ribdab area, South Eastern Desert, Egypt, *Applied Radiation and Isotopes*, 55(6), 861-72.
- Jeong, C.H., Kim, D.W., Kim, M.S., Lee, Y.J., Kim, T.S., Han, J.S., Joe, B.U., 2012, Occurrence of natural radioactive materials in borehole groundwater and rock core in the Icheon area, *The Journal of Engineering Geology*, 22(1), 95-111. (in Korean with English abstract).
- Jeong, C.H., Kim, M.S., Lee, Y.J., Han, J.S., Jang, H.G., Joe, B.U., 2011, Hydrochemistry and occurrence of natural radioactive materials within borehole groundwater in the Cheongwon area, *The Journal of Engineering Geology*, 21, 163-178. (in Korean with English abstract).
- Jin, M. S., 1998, Igneous activity, In: Cheong et al. (Editors), *Teh Geology of Korea*, Sigma Press, 5, 385-465.
- Jwa, Y., 2008, A Preliminary study on granite suite and supersuite for the Jurassic granites in South Korea, *The Journal of Petrological Society of Korea*, 17(4), 222-230. (in Korean with English abstract).
- Kee, W.S., Cho, D.L., Kim, B.C., Jin, K., 2005, Geological report of the Pocheon sheet, Pocheon Ssheet(1:50,000), Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, K.H., 1992, Geochemical study of some mesozoic granitic rocks in South Korea, *Jour. Korean Inst. Mining Geology*, 25(4), 435-446. (in Korean with English abstract).
- Kim, M.S., Kim, T.S., Kim, H.K., Kim, D.S., Jeong, D.H., Ju, B.K., Hong, J.K., Kim, H.J., Park, S.H., Jeong, C.H., Cho, B.W., Han, J.S., 2013, Study on temporal decay characteristics of naturally occurring radionuclides in groundwater in two mica granite area, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 18(4), 19-31. (in Korean with English abstract).
- Kwon, C.S., 1988, Abundances of trace elements of the granitic rocks and their tectonic implications in Daejeon-Gongju area, *Journal of the Geological Society of Korea*, 24(special issue), 147-162.
- Kwon, Y.I., Jin, M.S., 1974, Geologic map of Cheongju sheet. Cheongju sheet(1:50,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Langmuir, D., 1978, Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(6), 547-669.
- Lee, M.S., 1978, Geochemical study of granite intrusions in the area of uranium bearing formation of the Ogcheon system, *Journal of the Geological Society*, 14(3), 113-119. (in Korean with English abstract).
- Lee, S.G., Shin, S.C., Kim, K.H., Lee, T., Koh, H., Song, Y.S., 2010, Petrogenesis of three Cretaceous granites in the Okcheon metamorphic belt, south Korea: geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic constraints, *Gondwana Research*, 17, 87-101.
- Lee, S.M., Kim, H.S., Na, K.C., 1980, Geologic map of Daejeon sheet. Daejeon sheet (1:50,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Min, M., Fang, C., Fayek, M., 2005, Petrography and genetic history of coffinite and uraninite from the Liueyiqi granite-hosted uranium deposit, SE China, *Ore Geology Reviews*, 26, 187-197.
- Moon, S.H., Hwang, J., Lee, J.Y., Hyun, S.P., Bae, B.K., 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.
- NIER, 2001, Study on the radionuclide concentrations in groundwater, NIER Report (in Korean).
- NIER, 2006, An investigation on the radionuclide concentrations in groundwater, NIER Report (in Korean).
- NIER, 2008, Occurrences of radionuclides in groundwater of the 4 high potential areas (I), NIER Report (in Korean).
- NIER, 2009, Occurrences of radionuclides in groundwater of the 4 high potential areas (II), NIER Report (in Korean).

- NIER, 2010, Occurrences of radionuclides in groundwater of the 4 high potential areas ('10), NIER Report (in Korean).
- Park, H.I., Lee, J.D., Cheong, J.G., 1977, Geologic map of Korea, Yuseong sheet (1:50,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Park, K., Lee, T., 2014, Characteristics of Nd isotopic compositions of the Phanerozoic granitoids of Korea and their genetic significance, *The Journal of Petrological Society of Korea*, 23(3), 279-292, (in Korean with English abstract).
- Plant, J.A., Simpson, P.R., Smith, B., Windley, B.F., 1999. Uranium ore deposits: products of the radioactive earth, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 38, 255-319.
- Rene, M., 2005, Geochemical constraints of hydrothermal alterations of two-mica granites of the Moldanubian batholith at the Okrouhla Radoun uranium deposit, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2(4), 63-79.
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003, Composition of the continental crust, In *The Crust*, In: Karl, D.H., and Rudnick, R.L., (Editors), *Treatise On Geochemistry* Heinrich, Elsevier Science, 3, 1-64.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A.D. and Norry M.J., (Editors), *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society of London Special Paper 42, 313-345.
- Uchida, E., Choi, S.G., Baba1, D., Wakisaka, U., 2012, Petrogenesis and solidification depth of the Jurassic Daebo and Cretaceous Bulguksa granitic rocks in South Korea, *Resource Geology*, 62(3), 281-295.
- Yeo, S.C., Lim, J.H., 1974, Geologic map of Icheon sheet. Icheon sheet (1:50,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Yun, S.W., Lee, J., Park Y., 2016, Occurrence of radionuclides in groundwater of Korea according to geologic condition, *The Journal of Engineering Geology*, 26(1), 71-78. (in Korean with English abstract).