

국내 지하수의 라돈 함량 예비조사

조병욱^{1*} · 성익환¹ · 조수영¹ · 박선구²

¹한국지질자원연구원, ²국립환경연구원

A Preliminary Investigation of Radon Concentrations in Groundwater of South Korea

Byong-Wook Cho^{1*} · Ig-Hwan Sung¹ · Soo-Young Cho¹ · Sun-Ku Park²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²National Institute of Environmental Research

ABSTRACT

A survey was performed to evaluate the distribution of radon concentrations in groundwater of South Korea. Groundwaters of 615 wells were sampled for this study during the four years from 1999 to 2002. The results showed radon values ranging from 4 pCi/L to 40,010 pCi/L with a mean and a median of 1,862 pCi/L and 920 pCi/L, respectively. The samples were classified into five groups according to the rock types; granite, sedimentary rocks, metamorphic rocks, Ogcheon metamorphic rocks, and Cheju volcanics. Mean radon concentrations were highest (2,595 pCi/L) in granites and lowest (238 pCi/L) in Cheju volcanic rocks. The groundwaters generally showed the highest radon content (2,298 pCi/L) in the weathered and the fractured bedrock complex and the lowest level (672 pCi/L) in the alluvium. The results showed that the radon concentrations in South Korea are low relative to those reported from other countries. But further investigations are suggested to confirm our results.

Key Word: Groundwater, Aquifer, Radon concentration

요 약 문

국내 지하수의 라돈 함량을 파악하기 위하여 1999년부터 2002년까지 4년에 걸쳐서 615개 지하수 시료에 대한 분석이 이루어졌다. 조사된 농도범위는 4 pCi/L에서 40,010 pCi/L까지로 나타났으며, 평균값과 중간값은 각각 1,862 pCi/L와 920 pCi/L이었다. 조사한 지하수시료를 지질조건에 따라 5개의 집단으로 구분한 결과 평균 라돈함량은 화강암 지역 지하수에서 2,595 pCi/L로 가장 높았으며, 제주화산암 지하수에서는 238 pCi/L로 가장 낮았다. 또한, 풍화대와 암반지하수에서 2,298 pCi/L로 가장 높았으며, 충적층지하수에서는 672 pCi/L로 가장 낮게 나타났다. 국내 지하수중 라돈의 평균 함량과 최고 함량은 유사한 지질환경을 가지는 외국의 경우와 비교하면 낮은 편이나 보다 확실한 결론을 위해서는 추가 분석자료가 필요하다.

주제어 : 지하수, 대수층, 라돈 함량

1. 서 론

라돈(²²²Rn)은 가장 잘 알려진 천연방사성핵종 중의 하나로서 우라늄(²³⁸U) 방사능계열에서 라듐(²²⁶Ra)의 방사능

붕괴로부터 생성된다(EPA, 1999). 반감기가 3.82일에 불과한 라돈은 무색, 무취의 불활성기체이며 붕괴과정에서 알파입자를 발생한다. 라돈은 인간에게 피폭되는 총방사선 양의 50% 이상을 차지하며 흡연에 이어 두 번째의

*Corresponding author : cbw@kigam.re.kr

원고접수일 : 2007. 7. 23 게재승인일 : 2007. 10. 16

질의 및 토의 : 2007. 12. 31 까지

폐암발병인자로 알려져 있다(주승환과 제원목, 1995). 따라서 발암물질인 라돈의 건강위험성에 대한 관심이 국내 외적으로 증대되고 있다. 1990년대 이후 유럽연합, 미국, 일본, 캐나다 등에서는 실내주거공간 및 작업장에서 라돈의 농도를 4-27 pCi/L 정도로 규제하고 있다. 국내에서는 1994년에 대한방사선방어학회 주최로 환경과 라돈을 주제로 한 세미나가 처음으로 개최되었으며, 2005년 개정된 '다중이용시설 등의 실내공기질관리법'에 의해 라돈농도를 4 pCi/L로 규제하고 있다(제현국 외, 2006).

실내 라돈 유입량 중의 약 20%가 지하수에서 유입되며(주승환과 제원목, 1995), 지하수를 음용수로 이용할 경우 지하수에 함유되어 있는 라돈가스는 혈액과 조직에 용해되어 호흡기로 배출되기 전에 신체의 각 장기내에서 라돈가스가나 딸핵종이 분열하면서 알파입자를 발생시키고 근접 조직에 영향을 주게 된다(한국자원연구소, 1999). 지하수의 라돈 함량에 대한 선진 외국의 조사연구는 1960년대부터 시작되었으며 분석된 시료 수는 핀란드의 경우 25,000개, 스웨덴의 경우 35,000개, 미국의 경우 200,000개 이상으로 알려져 있다(한국지질자원연구원, 2002). 한편 국내 지하수의 라돈 함량 및 분포에 대한 연구가 1990년대 들어서부터 수행되어 왔다(한정희와 박계현, 1996; 홍영국, 1997; 윤윤열외, 2005; 제현국외, 2006). 그러나 이들 연구들은 모두 분석된 시료수가 적거나 조사대상 지역이 일부에 국한되어 있는 문제점이 있다.

본 연구는 1999년부터 2002년까지 4년 동안 전국에 걸쳐서 조사된 615개 지하수시료에 대한 분석결과를 바탕으로 개략적인 국내 지하수의 라돈 함량 정도를 제시함에 그 목적이 있다. 연구지역인 남한의 면적에 비해서 분석된 시료 수는 615개로 적지만 국내 지하수의 라돈 함량을 지질과 대수층 심도와 연관시켜 보았으며, 마지막으로 우리나라와 유사한 지질환경을 가지는 외국의 지하수중 라돈 함량과도 비교하였다.

2. 연구방법

2.1. 지질분류

지하수의 라돈 함량은 여러 요인에 의해 영향을 받지만 그 중에서도 지질에 의한 영향을 가장 많이 받는다(Dana et al., 1988). 따라서 Hess et al.(1985)은 미국 공공급수(public water supply)의 방사성물질 함량 특성을 11개 지질구(geologic province)로 나누어 설명하였다. 본 연구에서는 조사지역의 지질을 1:1,000,000 한국지질도(한국자원연구소, 1995)를 이용하여 화강암, 퇴적암, 변성암, 옥

천변성암, 제주화산암의 5개로 구분하였다. 여기서 옥천변성암은 변성암에 포함될 수 있으나, 옥천변성암의 흑색 셰일에서는 우리나라의 함량이 높은 것으로 알려져 있어서(Kim, 1987) 별도로 구분하였다. 또한 퇴적암에는 화산암류도 일부 포함되어 있는 문제점도 있다. 615개 시료 채취지점의 지질은 현장에서 직접 구분을 하기도 하였으나, 대부분은 Garmin III plus GPS로 시료채취 지점의 좌표를 측정 후 실내에서 1:250,000 전자지질도와 중첩시켜서 구분하였다. 각 지질에 대해서 간단히 기술하면 다음과 같다.

화강암은 주로 류라기와 백악기의 화강암이다. 시료채취가 이루어진 화강암은 불국사화강암, 남산화강암, 대보화강암, 염리상화강암, 홍제사화강암 등이었다. 퇴적암은 주로 경상분지에 분포하는 중생대 퇴적암에서 시료가 채취되었으나, 일부 시료는 강원도와 서해안의 고생대 퇴적암과 포항 일대의 신생대 퇴적암에서 채취되었다. 옥천변성암은 소위 옥천변성대에 분포하는데 녹니석편암, 사질천매암, 흑운모편암, 규암, 석영견운모편마암 등과 같은 다양한 종류의 변성퇴적암류로 구성된다. 옥천변성암의 일부 흑색 셰일에서의 우리나라 함량은 평균 294 ppm으로 알려져 있다(Kim, 1987). 변성암은 낭림층군, 반상변정편마암, 화강암질편마암으로 구분된다. 제주화산암은 3기와 4기에 분출된 현무암, 조면암, 안산암에서 시료를 채취하였다.

2.2. 시료채취 및 분석

지하수중 라돈분석용 시료채취 지점은 총 615개이다(Fig. 1). 우리나라의 면적이 약 100,000 km²임을 고려할 때 하나의 시료가 커버하는 면적은 약 160 km²로서 60-70년대 미국지질조사소의 조사계획인 100 km²당 1개 지하수시료 분석(Milvy and Cothorn, 1990)에 비해서도 밀도가 떨어진다. 615개 시료채취 지점은 그 시료가 주변 지역 지하수의 라돈 함량을 대변할 수 있도록 선정하였기 때문에 각 시료채취 지점간에는 일정한 거리를 두도록 노력하였다. 그러나 사람이 살지 않는 산악지역 등에서는 지하수 관정이 없기 때문에 시료가 거의 분포하지 않는 지역도 존재한다. Fig. 1의 지하수시료 채취 분포도에서와 같이 암석내 방사성물질 함량이 높을 것으로 추정되며 먹는샘물도 많이 분포하고 있는 충남북지역은 시료채취 밀도가 높은 편이며, 퇴적암 분포가 우세한 경남북지역은 시료채취 밀도가 낮은 편이다.

지하수 시료의 채취시기는 강우에 의한 라돈 함량의 변화가 적도록 가능한 한 건기에 해당하는 11월에서 5월 사이에 이루어졌다. 시료가 채취된 지하수는 우선적으로 식수로 이용되고 있는 지하수를 대상으로 하였다. 따라서

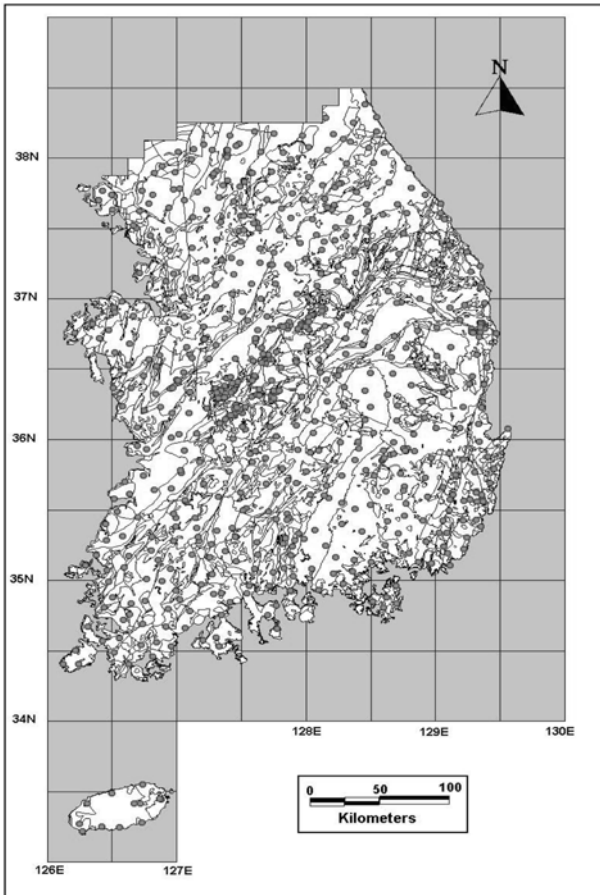


Fig. 1. Location map of sampling site.

615개 지하수의 약 82%는 식수 또는 식수+생활용수로 사용되고 있으며, 이 중에는 59개 국내 먹는샘물도 포함되어 있다. 시료가 채취된 지하수공의 심도는 대부분은 200 m 이하이다(한국지질자원연구원, 2002).

현장에서 시료채취는 대상 지하수공 체적의 약 3~5 배 지하수를 배출시켜 수온과 현장 수질이 안정을 이룬 다음 이루어졌다(Barcelona et al., 1985). 라돈 분석을 위한 시료 채취는 외경 20 mm의 플라스틱관에 신축성 있는 고무튜브를 달고 이 고무튜브를 원수와 연결된 수도관에 끼워 와류(turbulent flow)에 의한 폭기(aeration)를 방지한 후 20 ml의 EPA vial을 이용하여 이루어졌다 채취된 지하수는 완전히 밀봉하여 외부 공기와의 접촉을 차단한 다음 한국지질자원연구원의 실험실로 운반하였고, 라돈추출용 설파용액 1.5 ml를 첨가하여 라돈을 유기용매로 추출한 후 알파전용 액체설파계수기인 PERALS 분광기로 라돈의 알파방사능을 측정하였다. 라돈의 검출 하한치는 PSA 준위 100에서 600분간 계측했을 때 1.5 pCi/L였다.

Table 1. U concentrations from the selected studied rocks in South Korea

Rock type	Studied area (Sampled no.)	U(Mean) (ppm)
Granite	Songrisan granite (30) ¹⁾	1.17-5.53 (4.03)
Sedimentary rocks	Yucheon group (11) ²⁾	1.49-6.20 (3.21)
Metamorphic rocks	Yulri formation (6) ²⁾	0.85-4.03 (1.99)
Ogcheon metam. rocks	Black slate ³⁾	1.0-163.0 (6.2)
Cheju volcanics	Cheju ⁴⁾ (3)	1.12-1.32 (1.24)

1) KIGAM, 2000, 2) KIGAM, 2001, 3) NEMA, 2006, 4) Cheong et al., 2006

3. 결과 및 고찰

3.1. 지질별 암석내 우라늄 함량

지하수의 라돈 함량은 일차적으로는 주변 암석내의 우라늄과 리듐의 함량에 의해 영향을 받는다(Otton et al., 1989). 따라서 지하수의 라돈 함량의 이해를 위해서는 시료가 채취된 지역의 암석내 방사성물질 함량 자료가 중요하지만 국내 암석내 방사성물질 함량에 대한 분석자료는 상당히 제한적이다. 5개로 나눈 지질의 대표적인 암석내 우라늄 함량은 Table 1과 같다. 화강암을 대표한 속리산 화강암의 우라늄 함량은 세계 평균과 비슷한 4.03 ppm이고, 퇴적암과 변성암을 대표한 유천그룹과 울리층의 평균 우라늄 함량은 각각 3.21 ppm, 1.99 ppm이다(한국지질자원연구원, 2002). 옥천변성대에서 가장 우세하게 분포하는 흑색점판암의 평균 우라늄 함량은 6.2 ppm이다(소방방재청, 2006). 그러나 흑색점판암에 박층으로 협재된 탄질세일의 평균 우라늄 함량은 131 ppm이나 된다(소방방재청, 2006). 이러한 우라늄 함량은 스웨덴의 알루미늄 함량이 높은 흑색 세일의 우라늄 함량인 50-400 ppm(Akerblom and Clavensjo, 1994)과 비슷하다. 제주화산암에서 분석된 3개 암석시료의 우라늄 평균 함량은 1.24 ppm으로(정창식 외, 2006) 미국 Long Valley의 현무암내 우라늄 함량 1.0 ppm(Flexser et al., 1987)과 비슷하며, 5개의 지질 중에서 가장 낮은 우라늄 함량을 보인다.

한편 옥천습곡대에서 분석된 405개 토양가스내 평균 라돈 함량을 암종별로 보면 최저는 편마암지역의 475 pCi/L이고, 천매암변성사질암지역에서 509 pCi/L, 화강암지역에서 617 pCi/L, 석회암지역에서 628 pCi/L이고, 최고는 흑색점판암세일지역의 789 pCi/L로서 지질별 토양가스내 라돈 함량에는 큰 차이가 없는 편이다(소방방재청, 2006).

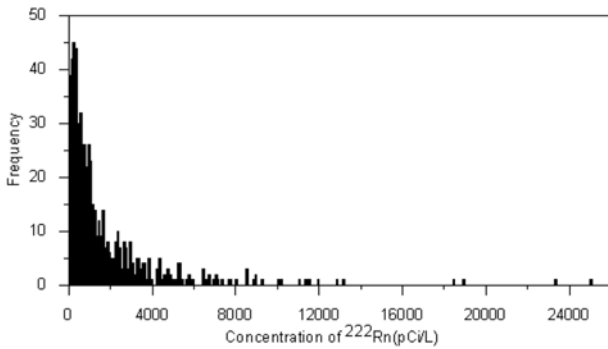


Fig. 2. Distribution of radon concentrations in groundwaters.

Table 2. Rn concentration in the groundwater from each geology

Geology (samples)	Rn (pCi/L)		
	Mean	Med.	Max.
Granite (238)	2,595	1,516	25,092
Sedimentary rock (165)	926	520	11,986
Metamorphic rock (133)	1,752	1,010	11,384
Ogcheon metam. rock (69)	2,020	938	40,010
Cheju volcanics (10)	238	205	528
Total (615)	1,862	920	40,010

3.2 지질별 지하수중 라돈 함량

지하수중 라돈 함량을 파악하기 위하여 1999년부터 2002년까지 4년간 분석된 615개 지하수의 평균 함량은 1,862 pCi/L이고, 함량 범위는 4 pCi/L부터 최고 40,010 pCi/L의 범위를 보였다(Table 2). 615개의 함량분포는 Fig. 2와 같으며, 전체 시료의 88.8%인 546개가 미국 EPA의 대체최고허용농도(Alternative Maximum Contaminant Level, AMCL)인 4,000 pCi/L(EPA, 1999) 이하의 농도를 보였다.

각 지질별 지하수 시료수와 지하수의 라돈 평균, 중간값, 최고값은 Table 2와 같다. Table 1의 암석내 우라늄 함량에서는 옥천변성암에서 가장 높고 다음으로 화강암에서 높은 것으로 나타났으나, 지하수중의 라돈 함량은 화강암지역 지하수에서 가장 높고 다음으로 옥천변성암지역 지하수에서 높다. 이와 같이 암석내 우라늄 함량은 옥천 변성암이 화강암보다 더 높지만 옥천변성암지역 지하수보다 화강암지역 지하수에서 우라늄 함량이 더 높은 것은 화강암내 우라늄 광물의 산출특징과 존재형태 등에 의하여 지하수에 쉽게 용해되기 때문으로 설명된다(Coothern and Reberts, 1990; 추창오, 2002). 지질별 지하수의 라돈 평균값은 화강암지역 지하수에서 2,595 pCi/L로 가장 높고, 옥천변성암지역 지하수에서는 2,020 pCi/L, 변성암지

역 지하수에서는 1,752 pCi/L, 퇴적암지역 지하수에서는 926 pCi/L이고, 제주화산암 지하수에서는 가장 낮은 238 pCi/L를 보였다. 이와 같은 지질별 지하수의 라돈 함량의 차이는 화강암과 결정질암지역 지하수에서 라돈 함량이 높고 퇴적암지역 지하수에서 낮다는 사실과 일치한다(King et al., 1982; Loomis, 1987). 옥천변성암 지하수의 라돈 평균값이 2,020 pCi/L로 높은 것은 분석된 69개의 시료 중 1개 시료의 라돈 함량이 40,010 pCi/L로 높게 검출되었기 때문이며 중간값을 기준으로 보았을 때는 938 pCi/L으로써 전체적으로는 화강암지역에 비하여 상당히 낮은 값을 보인다. 국내 화강암지역 지하수의 라돈 평균 함량 2,595 pCi/L은, 스웨덴 화강암지역 지하수의 평균 함량 24,462 pCi/L (Salonen and Hukkanen, 1997), 노르웨이 화강암지역 지하수의 평균 함량 18,921 pCi/L (Banks et al., 1998), 핀란드 화강암지역 지하수의 평균 함량 24,706 pCi/L(Salonen and Hukkanen, 1997), 미국 화강암지역(Maine, Carolina, California) 지하수의 평균 함량 8,000 pCi/L (Coothern and Rebers, 1990) 보다는 상당히 낮은 편이다.

각 지질별 지하수의 라돈 함량 분포는 Table 3과 같다. 제주화산암 지하수의 라돈 함량은 10개 시료 모두 1,000 pCi/L 이하였으며, 4,000 pCi/L 이상인 시료수는 퇴적암지역 지하수에서는 2.6%에 불과하였고, 옥천변성암지역 지하수에서는 8.9%, 변성암지역 지하수에서 11.6%였으며, 화강암지역 지하수에서는 18.1%로 가장 높은 비율을 보인다. 변성암지역 지하수의 라돈 함량이 화강암지역 지하수 다음으로 높은 것은 모암이 화강암질암일 가능성 때문으로 판단된다. Table 3에서 보는 바와 같이 615개 지하수에서 미국 EPA의 MCL(Maximum Contaminant Level)인 300 pCi/L를 넘는 시료는 전체의 79.5%에 달하나, EPA의 AMCL인 4,000 pCi/L를 넘는 시료는 11.2%에 불과하였다. 한편 핀란드의 공공급수의 권고치(enforced level)인 8,100 pCi/L를 넘는 시료는 3.4%에 불과하였다. 이와 같은 지하수의 라돈 함량 분포는 음용 지하수의 사용량, 사용인구, 공급방법 등의 음용 지하수의 이용 특성과 함께 향후 국내 음용 지하수의 라돈 함량 관리 방향 제시에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 대수층 심도와 지하수중 라돈 함량

대수층 심도 즉, 지하수의 산출심도와 라돈 함량과의 상관성 파악을 위하여 현장에서 시료 채취시에는 지하수공의 심도 자료를 수집하였다. 일부 심도파악이 어렵거나 그에 대한 공식기록이 없는 경우에는 지하수공 소유자의 증

Table 3. Distribution of the Rn concentrations in the groundwater from each geology

Rn (pCi/L)	Gr		Sed		Og		Met		Ch		Total	
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
300 >	32	13.4	49	29.7	24	23.2	23	17.3	6	60	126	20.5
300-1000	65	27.3	75	45.5	19	27.5	42	31.6	4	40	205	33.3
1000-4000	98	41.2	35	21.2	29	42.0	53	39.8	0	0	215	35.0
4000-8100	30	12.6	4	2.4	3	4.4	11	8.3	0	0	48	7.8
8100 <	13	5.5	2	1.2	2	2.9	4	3.0	0	0	21	3.4
계	238	100	165	100	69	100	133	100	10	100	615	100

Gr: Granite, Sed: Sedimentary rocks, Og: Ogcheon metamorphic rocks, Met: Metamorphic rocks, Ch: Cheju volcanics

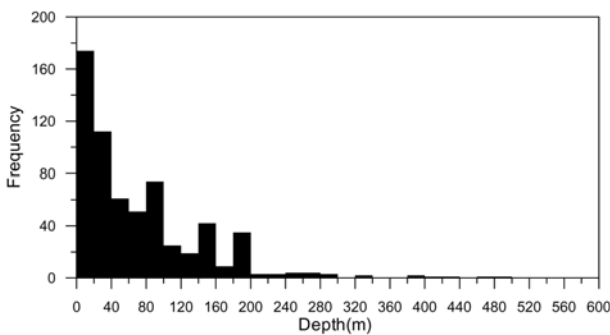


Fig. 3. Borehole depth distribution of the sampled groundwaters.

인에 의존하여 심도를 파악하였다. 시료가 채취된 지하수공의 심도는 최저 0 m (용출수)에서부터 최고 500 m에 달하나 대부분은 심도 200 m 이하이다(Fig. 3).

지하수 산출심도와 라돈 함량과의 관계를 파악하기 위하여 시료가 채취된 615개 지하수를 깊이에 따라 충적층, 충적층+풍화대, 풍화대, 풍화대+암반층, 암반층 등 5개의 대수층으로 구분하였다. 이 같은 깊이별 대수층 구분은 지하수공의 심도, 지하수공 주변의 지형과 지질, 양수시 배출되는 지하수의 수온, 수질 등을 고려하여 결정하였다. 이와 같은 대수층의 구분은 심도가 얕을 경우 충적층 또는 풍화대로 구분하여도 무방할 것이나, 일부 심도가 깊은 지하수공의 경우는 케이싱이나 그라우팅이 부실하고 암반내의 대수층의 발달이 미약한 경우 충적층이나 풍화대 지하수가 상당부분 유입되어 암반지하수의 특징을 보이지 못하는 문제점이 있음을 염두에 두기 바란다.

대수층에 따른 지하수중 라돈의 분포는 Fig. 4와 같다. 우리나라의 경우는 대수층의 심도가 깊어질수록 즉, 암반대수층에서 가장 높은 함량을 보이거나(한국지질자원연구원, 2002), 라돈의 경우는 우리나라 경우만큼 현저하지는 않지만 대수층의 심도가 깊어질수록 라돈의 함량이 증가함을 보인다. 그러나 가장 높은 라돈 함량을 보이는 대수층

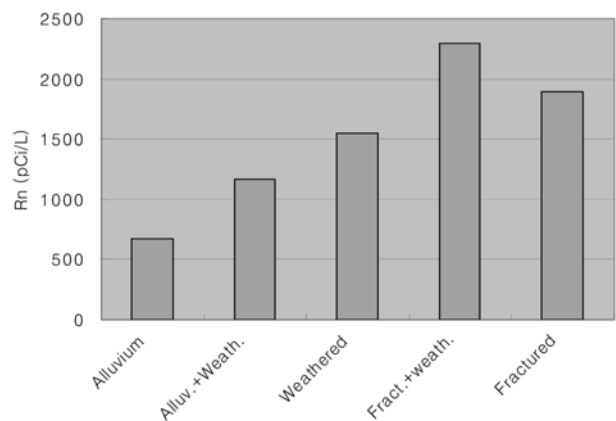


Fig. 4. Mean Rn concentrations in the groundwaters with aquifer type.

은 풍화대+암반층의 지하수로서 라돈의 평균 함량은 2,298 pCi/L이다. 다음으로는 암반대수층의 1,893 pCi/L 이고 충적층대수층에서 가장 낮은 672 pCi/L의 평균 함량을 보인다. 이와 같이 풍화대 + 암반층의 지하수에서 라돈 함량이 가장 높은 이유는 지하 심부에서 지하수를 따라서 지표로 이동하는 라돈의 특성으로 해석되지만 아직은 이유가 확실하지 않다. Cook 등(1999)은 결정질암 지하수내의 라돈 함량은 균열의 발달과 밀접한 관계가 있으며, 대체로 심도가 깊어질수록 지하수의 라돈 함량은 감소한다고 보았다. 국내 지하수의 산출 심도가 깊어질수록 라돈의 함량이 높아지는 현상은 일차적으로 지하수공의 천부지하수 유입방지 시설의 부실로 인한 지하수중 라돈 농도의 희석을 생각할 수 있다. 따라서 정확한 대수층별 지하수의 라돈 함량을 파악하기 위해서는 주 대수층, 케이싱과 그라우팅 심도와 정도에 대한 정보가 필요하다.

3.4. 외국의 지하수중 라돈 함량

국내 지하수중 라돈 함량을 파악하기 위하여 분석된 지하수 시료 수는 615개에 불과하고, 산악지역 등에는 시료

Table 4. Maximum Rn concentrations in the groundwater of other countries

Country	Sample	Rn(pCi/L)	
		Max.	Geo.
Korea	615	40,010	Meta. Sedi.
Finland ¹⁾	25,000<	2,094,825	Gr
Norway	4,000<	862,257 ²⁾	Gr
Sweden	35,000<	1,540,710 ³⁾	Gr
Canada	-	371,270 ⁴⁾	Gr
USA	2000,000<	1,600,176 ⁵⁾	Gr

1) Salonen and Hukkanen, 1997, 2) Banks et al., 1998, 3) Morland et al. 1988, 4) Health Canada, 1995, 5) Graves, 1987

채취 밀도가 낮으며 옥천변성암지역에는 시료채취 밀도가 높은 등의 문제점이 있지만 지하수중 라돈 함량 분석 결과를 외국의 경우와 비교하면 Table 4와 같다.

우선 분석 시료의 수에 있어서 외국과 비교하면 상당히 적다. 핀란드의 경우 분석 시료수는 약 25,000개 이상이며, 스웨덴은 35,000개 이상으로서 국내에서 4년간 분석한 615개 시료의 약 50배에 달한다. 물론 스웨덴과 핀란드의 국토면적은 남한의 수배에 달하나 인구는 남한의 1/5 미만이고, 지하수를 음용수로 이용하는 정도와 1개 지하수공에서의 지하수 이용량과 이용인구 등이 다르기 때문에 단순한 산술적인 비교에는 무리가 따른다. 캐나다의 경우는 Manitoba의 남동부 지역에서만 287개소를 분석하였으며(Betcher et al., 1988), 미국의 경우 이미 1960년대와 1970년대에 걸쳐서 100 km² 당 1개소씩 선정하여 약 89,000개소에서 지하수중 우리늄을 분석한 바 있다(Cothern and Rebers, 1990).

국내 지하수의 라돈 최고 함량치는 40,010 pCi/L로서 옥천변성암에 위치하고 있다. 물론 지질별 지하수의 라돈 평균값과 중간값은 화강암지역에서 가장 높다. 이는 고함량 라돈은 일반적으로 화강암지역 지하수에서 검출되는 사실과 일치한다. 국내 615개 지하수의 라돈 함량 평균값 1,862 pCi/L와 최고치인 40,010 pCi/L는 시료채취 지점이 대부분 퇴적암지역인 대만, 사우디아라비아 등(Han et al., 2006)에 비해서는 높지만 시료채취 지점이 결정질암인 핀란드, 노르웨이 스웨덴 등에 비해서는 낮은 편이다. 즉, 대만 일부 해안지역 517개 시료의 라돈 최고 함량 1,100 pCi/L(Han et al., 2004)보다는 높지만 핀란드의 최고치인 2,094,825 pCi/L, 스웨덴의 최고치인 1,540,710 pCi/L와 비교하면 상당히 낮은 편이다. 그러나 분석에 이용된 시료수는 615개에 불과하기 때문에 국내 지하수와 지질별 지하수의 라돈 함량 특성을 파악하기 위해서는 화

강암지역을 위주로 한 추가 분석자료가 보완되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

예비적인 국내 지하수의 라돈 함량을 파악하기 위하여 615개의 지하수 시료를 채취하여 분석하였으며 이를 지질별, 산출 깊이 별로 구분한 결과는 다음과 같다.

615개 국내 지하수의 라돈 함량 범위는 4 pCi/L부터 최고 40,010 pCi/L의 넓은 범위로 나타났으며, 평균값과 중간값은 각각 1,862 pCi/L와 920 pCi/L이었다. 이러한 라돈 함량 분포는 시료채취 지점이 대부분 퇴적암지역인 대만, 사우디아라비아 등에 비해서는 높지만 우리나라와 비슷한 지질로 구성된 핀란드, 노르웨이 스웨덴 등에 비해서는 낮은 편이었다. 지하수를 깊이가 깊어짐에 따라 총적층, 총적층 + 풍화대, 풍화대, 풍화대 + 암반층, 암반층으로 구분하였을 때, 라돈 함량은 대체로 대수층의 심도가 깊을수록 증가함을 보였으며, 풍화대 + 암반지하수에서 2,298 pCi/L로 가장 높고 총적층지하수에서 672 pCi/L로 가장 낮은 함량을 보였다. 지질별 지하수의 라돈 함량은 화강암지역에서 가장 높았으며, 제주화산암에서 가장 낮다. 화강암지역 지하수의 라돈의 평균값, 중간값, 최고값은 각각 2,595 pCi/L, 1,516 pCi/L, 25,092 pCi/L으로써, 외국의 화강암지역 지하수의 라돈 함량에 비하면 낮은 편이었다.

분석된 615개 지하수 시료중 미국 EPA의 AMCL인 4,000 pCi/L를 넘는 시료는 11.2%, 핀란드의 권고치인 8,100 pCi/L를 넘는 시료는 3.4%에 불과하였다. 이러한 라돈 함량 분포는 향후 국내 음용 지하수의 라돈 관리에 방향을 제시해 줄 수 있다고 판단된다. 그러나 분석된 지하수 시료 615개는 외국의 경우와 비교할 때 상당히 적기 때문에 추가적인 분석자료가 필요하며, 주로 화강암지역을 우선으로 하여 지하수의 라돈 함량 실태조사가 요구된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 ‘청정 대용량 지하수자원 확보 기술개발’ 연구(07-3211)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

소방방재청, 2006, 지질기원 우리늄라돈 위해성평가 및 차폐저감화기술개발, p. 208.

- 윤윤열, 조수영, 이길용, 김용제, 2005, 대전지역 지역별 지하수 중의 라돈 및 우라늄 분포 특성 연구, 한국지하수토양환경학회, 2005년도 학술발표회 논문집, p. 300-303.
- 정창식, 정연중, 손영관, 최만식, 박병권, 2006, 제 4기 화산암에 대한 ^{238}U - ^{230}Th 연대측정의 시료 전처리와 열이온화질량분석법 소개, 지질학회, **42**(3), 455-465.
- 제현국, 전효택, 이진수, 정성필, 2006, 중부 옥천대에서 토양가스 및 지하수의 라돈 농도 정밀 조사, 대한 자원환경지질학회 2005년도 학술발표회 논문집, p. 29-31.
- 주승환, 제원묵, 1995, 라돈방사능과 생활환경, 계측문화사, p. 288
- 추창오, 2002, 대보화강암내 함우라늄 광물의 산출특성과 존재 형태의 중요성, 한국광물학회지, **15**(1), 11-21.
- 한국자원연구소, 1995, 1:1,000,000 한국지질도.
- 한국자원연구소, 1999, 지하수중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(I), KIGAM report, p. 338.
- 한국자원연구소, 2000, 지하수중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(II), KIGAM report, p. 323.
- 한국지질자원연구원, 2001, 지하수중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(III), KIGAM report, p. 388.
- 한국지질자원연구원, 2002, 지하수중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(IV), KIGAM report, p. 357.
- 한정희, 박계현, 1996, 대전지역 지하수에 함유된 우라늄 및 라돈의 함량, 자원환경지질, **29**(5), 589-595.
- 홍영국, 1997, 대전시 지역 라돈 지화학연구. 대한 자원환경지질학회지, **30**(1), 51-60.
- Akerblom, G. and Clavensjo, B., 1994, Radon book, The Swedish council for building research, p. 129.
- Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A.K., Krog, J.R., and Strand, T., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters: I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters, *Science of the Total Environment*, **222**, 71-91.
- Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A., and Garske, E.E., 1985, Practical guide for groundwater sampling, SWS Contract Report, p. 374.
- Betcher, R.N., Gascoyne, M., and Brown, D., 1988, Uranium in groundwater of southeastern Manitoba, Canada, *Canadian J. Earth Science*, **25**, 2089-2103.
- Cook, P.G., Love, A.J., and Dighton, J.C., 1999, Inferring groundwater flow in fractured rock from dissolved radon, *Ground Water*, **37**(4), 606-610.
- Cothern, C.R. and Rebers, P.A., 1990, Radon, radium and uranium in drinking water, Lewis publishers, p. 286.
- Dana, P.L., James, E.W., and Douglas, J.C., 1988, Predicting the occurrence of radon222 in groundwater supplies, *Environmental geochemistry and health*, **10**(2), 41-50.
- EPA, 1999, National Primary Drinking water Regulation; Radon222; Proposed rule, Federal Register, 64 (211).
- Graves, B., 1987, Radon, Radium, and other radioactivity in groundwater, Lewis Publishers, p. 546.
- Flexser, S., Wollenberg, H.A., and Smith, A.R., 1987, Radon in groundwater of the Long Valley caldera, California, *Proceeding of the NWWA conference*, 131-149.
- Han, Y.L., Tom Kuo M.C., Chiang, K.C., and Lee, Y.P., 2004, Radon distribution in groundwater of Taiwan, *Hydrogeology Journal*, **14**(2), 173-179
- Health Canada, 1995, Radon, Guidelines for Canadian drinking water quality: Supporting documentation.
- Hess, C.T., Michel, T.R., Horton, T.R., Prichard, H.M., and Coniglo, W.A., 1985, The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States, *Health Physics*, **48**(5), 553-586.
- Kim, J.H., 1987, Caledonian Orogeny of Korea with special reference to the Ogcheon uraniumiferous marine black slate, KIGAM report.
- King, P.T., Michel, J., and Moore, W.S., 1982, Ground water geochemistry of ^{226}Ra , ^{226}Ra and ^{220}Rn , *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **46**, 1173-1182.
- Loomis, D.P., 1987, Radon222 concentration and aquifer lithology in North Carolina, *Ground Water Monitoring Review* **7**(2), 33-39.
- Milvy P. and Cothern, C.R., 1990, Radon, radium and uranium in drinking water, Lewis publishers, p. 286.
- Morland, G., Strand, T., Furuhaug, L., and Banks, D., 1998, Radon in quaternary aquifers related to underlying bedrock geology, *Groundwater*, **36**(1), 143-146.
- Otton, J.K., Zielinski, R.A., and Been, J.M., 1989, Uranium in Holocene valleyfill sediments, and uranium, radon, and helium in waters, lake Tahoe-Carson range area, Nevada and California, USA, *Environ Geol. Water Sci.*, **13**(1), 15-28.
- Salonen, L. and Hukkanen, H., 1997, Advantages of lowbackground liquid scintillation alphaspectrometry and pulse shape analysis in measuring radon, uranium, and radium226 in groundwater samples, *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **226**(12), 67-74.