

大田市 地域 라돈 環境 地化學 研究

洪 永 國*

Environmental Geochemistry of Radon at the Taejon City Area in Korea

Young-Kook Hong*

ABSTRACT : The high radon (Rn^{222}) potentials of soil, groundwater, hot spring and indoor environments in the Taejon city area were delineated by use of an EDA RDA-200 radon detector. The U and Th contents were also analysed using a Multi Channel Analyzer to illustrate the sources of the radon potentials. The average U concentrations in Taejon vary according to the type of granites such as 4.14 ± 2.36 ppm in schistose granite (SG), 3.13 ± 1.70 ppm in biotite granite (BG) and 3.01 ± 1.95 ppm in two mica granite (TG). The U contents in the granites are closely related with the amounts of uraniumiferous minerals. However, the U contents in the soil are found to be 5.05 ± 4.75 ppm in TG, 4.07 ± 1.69 ppm in BG and 3.87 ± 1.91 ppm in SG which are mainly explained by the different cation exchange capacities (CEC) of the soils from various granites. The levels of soil radon are 552 ± 656 pCi/l in SG, in which levels at two locations exceed the level of 1,350 pCi/l established as guideline for follow-up action by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 443 ± 284 pCi/l in TG and 224 ± 115 pCi/l in the BG. The soil radon concentrations are found to be proportional to the U content and hardness of the soils. The groundwater radon concentrations in the domestic wells of -30 ~ -100 m depth show that $6,907 \pm 4,665$ pCi/l in TG, $5,503 \pm 6,551$ pCi/l in SG and $2,104 \pm 1,157$ pCi/l in BG which are positively related with U contents in soils. The radon levels of six groundwater wells in TG and two in SG are greater than guideline for drinking water level, 10,000 pCi/l by EPA (1986). Average radon contents of hot springs and public baths in the TG area are $7,071 \pm 1,942$ pCi/l and $1,638 \pm 709$ pCi/l, respectively, which are below the EPA standard for remedial action value of the 10,000 pCi/l. The mean indoor radon concentrations of the TG and SG areas are 1.60 ± 1.20 pCi/l and 1.60 ± 0.70 pCi/l, respectively. The elevated indoor radon levels of 5.6 pCi/l and 6.7 pCi/l are found to be particularly in TG area, which exceeds 4 pCi/l guideline, correlating positively with the U contents in the soil and radon concentration in the groundwater.

서 언

라돈-222 (radon)와 220 (thoron)은 각각 우라늄-238과 토륨-232의 붕괴계열에서 산출되는 딸원소 (자핵종)인 라듐-226과 224 동위원소의 자연적 방사붕괴로 생기며 무색, 무취, 무미의 불활성가스이다. 라돈은 함우라늄 암석, 토양과 자연수등에서 발생되어 우라늄, 지열 및 석유자원 탐사를 위한 지시원소로 이용되며, 또한 활성단층탐지를 통하여 지진 및 화산분출 예보에도 활용되고있다 (Ball, 1993). 영국의 경우, 일반 주거 가옥내 총 방사능 원소함량의 4%

만을 차지하는 라돈-220은 반감기가 54.7초이며 건강에 큰 위험을 가져오지 않는다고 발표된 바있다 (Ball, *op cit*). 또한 라돈-219 (actinon)는 우라늄-235의 붕괴산물이지만, 우라늄-235가 전체 우라늄의 약 0.7%로 소량 존재하므로 생태계에 유해하지 않다.

그러나, 환경지구화학적 측면에서 라돈-222가 환경기준치 이상 농집된 공기를 장기간 호흡하거나 물을 마시는 경우에 폐로 흡입된 라돈의 딸원소인 폴로늄 (Po)-218과 214가 알파붕괴하는 과정에서 폐조직을 파괴시켜 폐암을 유발시키는 것으로 알려졌다 (Harley, 1984; Nero, Loweder, 1987; Hornung, Meinhardt, 1987). 반감기가 3.825일인 라돈 (Rn^{222})은 대부분 호흡시 폐로부터 배출되지만, 반감기가 짧은 라돈의 딸원소들은 에어로졸, 먼지와 담배연기 표면에 붙어있다가 호흡시 폐에 흡입되어 건

* 韓國資源研究所 環境地質研究部 (Environmental Geology Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejon 305-350, Korea)

강에 매우 유해한 발암성 원소들이다.

라돈에 의한 폐암위험도는 라돈의 함량과 얼마나 장기간 고농도 라돈존재 환경하에 노출되었는가에 직접적으로 비례한다. 예를 들어 라돈 4 pCi/l (picocuries per liter) 농도의 공기를 30년간 호흡했다면 폐암에 걸릴 확률이 높으며 라돈은 미국의 폐암원인 중에서 담배흡연 다음으로 위험하고 매년 5,000~20,000명 (평균 14,000명)이 라돈으로 인한 폐암때문에 사망한다 (EPA: Environmental Protection Agency, 1986, 1992). 이같은 라돈의 유해성 때문에 인간생활과 밀접하게 관계되는 토양, 음용수 및 지하실내공간등의 라돈 존재함량을 밝혀 그에 따른 대책수립이 필요하다 (EPA, 1986; Reimer, Gundersen, 1989; Otton, 1992). 토양에 존재하는 라돈가스는 우리의 주거공간으로 쉽게 분산농집되며, 음용수내 라돈은 물을 마시면서 호흡시 폐로 흡입되기 때문에 지질환경별 라돈함량에 대한 체계적인 조사연구가 필요하다.

선진국에서의 라돈 환경기준치는 공기중에서 미국 EPA (1986)가 4 pCi/l로 규정하였다. 토양에서 라돈농집량은 미국의 경우 270~1,350 pCi/l 범위이며, 위험기준치는 1,350 pCi/l로 제안되었다 (Reimer, 1991). 음용지하수에서 라돈함량의 환경기준치는 미국의 EPA (1986)가 10,000 pCi/l로 제안하였다.

국내 지하 실내공간의 라돈연구는 서울 지하철 3호선 경복궁역 (4.9 pCi/l)과 안국역 (4.1 pCi/l)으로 미국 EPA의 공기중 허용기준치 (4 pCi/l)보다 과농집되었다는 연구결과 (김운신 등, 1993)가 발표된 바있다. 대전 유성 지역의 지하수와 온천수 시료를 액체섬광계수법 (Liquid Scintillation Counter)에 의한 분석결과 2,600~9,000 pCi/l의 값을 얻었다 (김창규 외, 1994). 그러나, 대도시 인구밀집지역의 암석, 토양, 음용지하수 및 지하 실내공간 등의 지질환경에 대한 종합적인 라돈환경지구화학적 연구는 되어있지 않아서, 라돈생성의 기초조사연구가 전무한 실정이다.

본 연구의 목적은 대전지역의 기반암을 이루는 쥐라기 화강암류지역을 대상으로 라돈 (Rn-222)과 Thoron (Rn-220)생성의 근원 (source)인 화강암류와 토양내 U과 Th 방사성원소 함량과 토양, 음용지하수, 온천수 그리고 지하 실내공간내 라돈함량측정과 그들의 관련성을 규명함으로써 라돈 환경지구화학연구의 체계를 확립하는데 있다.

연구지역 지질

연구지역은 위도 36° 14' 53"~36° 26' 38", 경도 127° 16' 58"~127° 30' 00"에 위치하는 대전시 전역이다 (Fig.

1). 지질은 하부로부터 시대미상의 변성퇴적암류와 이들을 관입한 쥐라기 화강암류가 분포하며, 이를 부정합으로 덮는 제4기의 충적층이 하천을 따라 발달되어 있다 (박희인 등, 1977; 이상만 등, 1980). 대전지역의 기반암인 쥐라기 화강암류는 암상에 따라 편상화강암 (SG), 흑운모화강암 (BG), 그리고 복운모화강암 (TG)으로 나누어 진다.

연구지역의 북서부와 동부에 분포하는 SG는 편상구조가 현저하고 중립질인 변성퇴적암류를 관입한다. SG의 주구성광물로는 석영, 사장석, 미사장석과 흑운모이며, 부구성광물로는 저어콘, 인회석, 모나자이트를 수반한다. SG분포지역에 발달된 토양은 육안상 갈색을 띠며 세립점토질이 주를 이룬다.

BG는 연구지역 남부에 분포하고 주로 석영, 알칼리장석, 사장석 및 흑운모들로 이루어져있으며 인회석, 저어콘, 각섬석을 수반한다. 본암의 풍화산물인 토양은 황갈색이다.

TG는 연구지역 쥐라기화강암류의 약 70%를 점유하며 연구지역에서 가장 광범위하게 분포하는 암석이다. TG는 SG를 관입하고, BG와는 점이적인 관계를 가지며, 중립질 내지 세립질이다. 흑운모가 백운모에 비하여 압도적으로 많으나 페그마타이트가 밀집 발달한 지역에서의 암질은 중립질로 되며, 백운모의 함량이 증가하는 경향을 보인다. 주구성 광물로는 석영, 퍼사이트, 사장석, 미사장석 및 흑운모등이 있으며, 부구성광물로는 저어콘, 루틸, 인회석등이 나타난다. 본암에서 발달되는 토양은 심한 풍화로 인하여 석영입자, 거정질의 백운모, 그리고 흑운모등이 쉽게 식별된다.

시료채취 및 측정방법

시료채취

연구지역의 시료채취는 다양한 쥐라기화강암류의 암상에 따라서 실시하였으며, 시료수는 화강암시료 21개, 토양 및 토양가스시료 65개, 음용지하수가스시료 43개, 온천수가스 시료 7개, 그리고 지하 실내공기시료 46개로 총 182개 시료이다 (Fig. 1).

라돈생성의 근원 이 되는 U과 Th함량 분석을 위한 화강암시료 채취는 신선한 노두를 택하여 실시 되었으며, 토양시료 채취는 외부의 물리적 힘으로 교란 및 이동되지 않은 잔류토양을 선택하여 지표의 유기물을 포함한 토양 A-층을 걷어내고 약 30~80 cm 깊이의 B-층에서 약 1 kg의 토양을 채취하였다.

토양내 라돈가스 채취는 토양시료 채취시 동일지점에

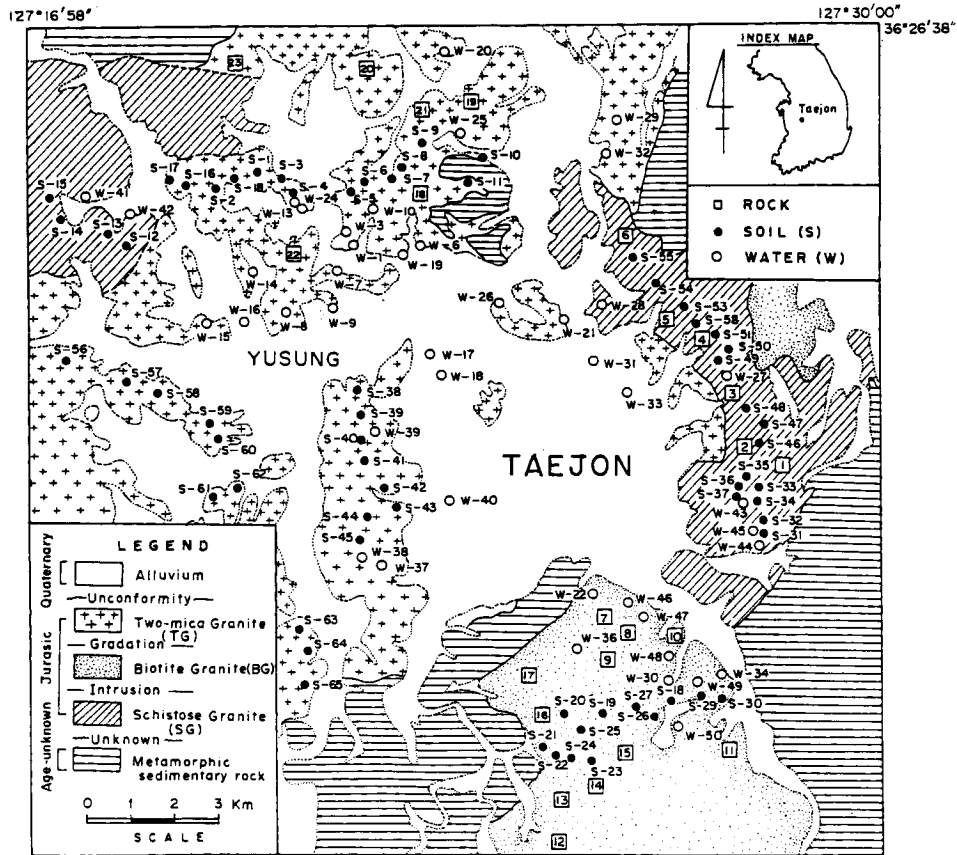


Fig. 1. General geology and sample locations for radon measurement in the Taejon city (modified from Park *et al.*, 1977 and Lee *et al.*, 1980).

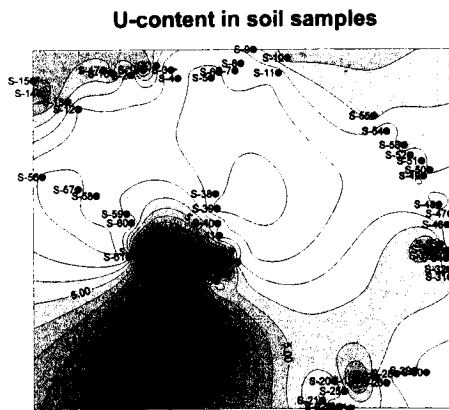


Fig. 2. Contour map of U contents (in ppm) in the soil samples from the Taejon city. Sample locations are same as the Fig. 1.

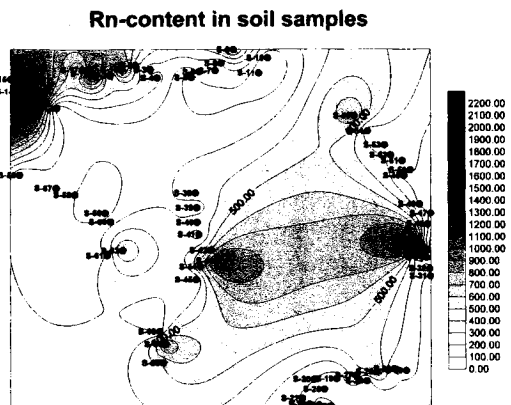


Fig. 3. Contour map of Rn contents (in pCi/l) in the soil samples from the Taejon city. Sample locations are same as the Fig. 1.

서 동시에 실시하였으며 길이가 1.5 m이고 속이 빈 탄소 강철 probe (외경 : 6~9 mm, 내경 : 2~3 mm)를 Split

hammer를 이용하여 토양속에 평균 75 cm정도 박아 넣고 (Reimer, 1990, 1991; 이태섭 등 1995), 진공주사기

Rn-content in water samples

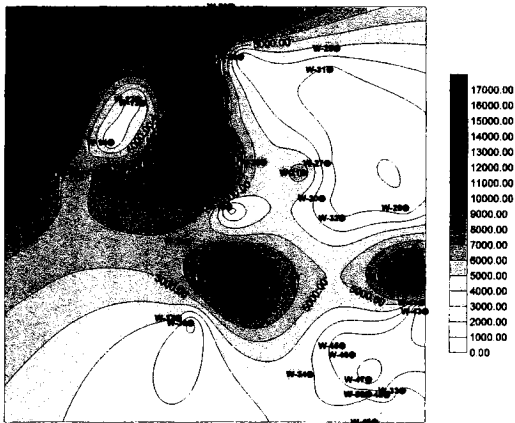


Fig. 4. Contour map of Rn contents (in pCi/l) in the groundwater samples from the Taejon city. Sample locations are same as the Fig. 1.

(Reimer *et al.*, 1979)를 통해 탄소강철 탐침 상부에서 20cc의 토양가스시료를 포집한 다음 황화아연 (ZnS)으로 내부벽면이 도포된 광전자 증폭기 (Photomultiplier tube)인 Scintillation (또는 Lucas) cell에 주입하였다. 평균 75cm의 깊이는 B-층에서 일반적으로 외부 기후조건에 영향을 받지않는 깊이이다 (Reimer, 1991). 주입된 토양공기 중의 라돈과 그 자핵종들이 붕괴시 발생시키는 알파입자가 Scintillation cell의 황화아연과 반응하여 형광 빛의 전자 진동이 생기게 한다. 이러한 광전자의 진동은 매우 미약하므로 외부의 빛이 차단된 광전자 증폭기에서 황화아연과 반응하여 생긴 빛을 통과시킨후 전기에너지로 바꿔 라돈의 알파 붕괴수를 계산하며, 이런 원리를 이용하여 라돈의 함량을 측정하였다 (Reimer, *op cit*).

지하 30내지 100 m 심도의 음용지하수 라돈가스시료는 가스가 새지않도록 특수 제작된 1 liter부피의 플라스틱 병을 사용하여 채취하였다 (Reimer, 1991). 지하수 시료 양은 탈기되어 지하수가 존재할수 있는 공간을 고려하여 평균 750ml를 취하였다. 채취된 지하수시료는 곧바로 플라스틱 병의 뚜껑을 닫고 약 30초간 심하게 흔들어서 물에 용해된 가스가 모두 탈기되도록 하였으며, 그 후 약 2분간 정치안정시켜 수면의 거품이 사라진 다음 주사기로 지하수로 부터 탈기된 가스 시료 20cc를 채취하였다. 채취된 음용지하수 가스 시료는 토양가스시료에서와 같은 요령으로 Scintillation cell에 곧바로 주입하였다.

또한, 대전시 중심가 지하공간 46개소 (TG : 42개소 및 SG : 4개소)의 지하 실내공기 라돈함량 조사를 위하여 미

국 Radiation Safety Services Incorporate (RSSI)회사의 알파 - 트랙 모니터를 각 지하 실내공간 측정지점의 천장에 3개월 동안 설치하였다.

측정방법

암석 및 토양시료는 U과 Th 함량측정을 위하여 분말화시켜 각각 -200 mesh 및 -80 mesh 크기로 체질하여 Multi Channel Analyzer (MCA)로 정량 분석하였다. 시료당 측정시간을 24시간으로 하였으며, 국제원자력기구 (IAEA)의 화강암 표준시료 9개 및 Blank test를 통해 배경값을 측정한 다음 회귀방정식을 구하여 Compton effect와 쌍전자 효과를 배제함으로 분석치의 정확도 및 정밀도를 높였으며 (Rybach, 1988), 그 오차범위는 5%이하이다.

토양 및 음용지하수의 라돈 가스시료분석은 시료분석전에 Portable Radon Detector (RDA)-200의 기기조건을 점검하기 위해 표준 cell을 넣어 5분씩 3회 측정하여 평균값이 1,020 cpm (count per minute)±5%의 범위내를 유지하는지 확인한 다음, 시료를 주입 할 Scintillation cell의 배경값을 각각 측정하였다. 이때 배경값이 0이 되도록 하였으며 그렇지 않는 경우에는 핸드펌프를 이용하여 반복해서 Cleaning과정을 거친다.

채취된 가스시료는 Scintillation cell에서 4시간 숙성시킨후 RDA-200으로 측정하였다. 이는 Scintillation cell내에서 라돈은 약 3시간후에 그의 자핵종들과 방사 평형을 이루며, 실험결과 4시간 경과시 가장 안정한 값을 갖기 때문이다 (Reimer, 1991). 그리고 측정시 주변의 빛에 의한 광전자의 영향을 피하기 위해 처음 1분 측정된 값은 배제하고 1분간 1회, 5분간 3회를 연속 측정하여 그 평균값을 사용하였다.

알파-트랙 모니터를 이용한 실내공기내 라돈가스 시료 분석은 미국 RSSI회사에 의하여, 라돈핵종들이 붕괴될 때 방출되는 알파입자의 흔적들이 기록된 검출 필름들로 부터 계산되어졌다.

라돈함량 (Rn²²² pCi/l) 환산방법

라돈계측기 RDA-200에 의해 측정된 각 cell의 cpm값은 측정시간과 시료의 부피 그리고 이미 라돈함량을 알고 있는 라돈 표준가스를 분석해 얻어진 보정값을 곱한 실험적인 상수값 500을 구하였으며, 이 상수값을 적용하여 라돈 함량을 환산하였다 (Reimer, 1991). 실제로 라돈함량이 1,000 pCi/l인 라돈표준가스를 10 cc를 채취하여

RDA-200에서 1분간 측정해본 결과 20의 값이 나왔다. 이 때 cpm은 20/1분, 즉 20 cpm이며, 보정값은 1,000 pCi/l를 20 cpm으로 나눈 50 pCi/l/cpm이 된다. 또한 같은 표준가스를 20 cc 채취하여 RDA-200 라돈카운터에서 1분간 측정해본 결과 40의 값이 나왔다. 이 때 cpm은 40/1분, 즉 40 cpm이며, 보정값은 1,000 pCi/l를 40 cpm으로 나눈 25 pCi/l/cpm이 된다. 여기서 RDA-200 라돈측정기에서 측정시간 (분)×채취시료의 부피 (cc)×보정값을 곱한 값은 첫번째의 경우 1×10×50=500이며, 두번째의 경우 1×20×25=500이 된다. 이러한 실험적 상수 500 (Reimer, *op cit*)은 동일 기종의 측정장비와 cell을 사용할 때 매우 유용하게 활용된다. 토양가스와 지하수가스에 대한 환산공식은 다음과 같다:

1) 토양가스 시료에서 Rn²²² (pCi/l)의 계산;

$$Rn^{222} \text{ (합량)} = \frac{\text{cpm} - \text{BKG}}{3} \times 25 = \text{pCi/l}$$

2) 지하수가스 시료에서 Rn²²² (pCi/l)의 계산;

$$Rn^{222} \text{ (합량)} = \frac{\text{cpm} - \text{BKG}}{3} \div \text{Vol. correction} \times 25 \\ = \text{pCi/l}$$

여기에서, pCi/l: 공기 1리터에 1 pCi의 방사성 활동도를 갖는 방사능원소의 농집량

BKG: Scintillation cell의 배경값 (cpm)

상수 3: 4시간 숙성후 Rn²²², Po²¹⁸, Po²¹⁴의 total counts에서 Rn²²²만의 값을 얻기 위한 상수

상수 25: 시료 20 cc에 대한 보정값

Vol. correction: 채취한 지하수의 부피 (liter)

측정결과

연구지역 화강암과 토양에 대한 MCA 분석결과인 방사성원소 (U, Th) 함량은 각각 Table 1과 Table 2와 같다.

대전지역 화강암시료내 U함량범위는 0.81~8.69 ppm이고 평균함량은 3.01±1.95 ppm이며, 반감기가 54.7초인 라돈-220의 근원이되는 Th의 함량범위는 0.40~76.24 ppm이고 평균함량은 18.09±20.91 ppm이다.

이들을 암상별로 살펴보면, SG지역에서 U의 평균함량은 4.14±2.36 ppm이며, Th의 평균함량은 5.14±4.28 ppm이다. BG지역에서 U의 평균함량은 3.13±1.70 ppm이며, Th의 평균함량은 24.96±20.50 ppm이다. TG지역에서 U의 평균함량은 1.72±0.69 ppm이며, Th의 평균함량은 20.75±25.22 ppm이다.

Table 1. U and Th contents (in ppm) of the Jurassic granites in the Taejon area.

	Sample	U	Th	
SG	R-1	1.40	0.40	
	-2	3.14	7.81	
	-3	5.50	12.80	
	-4	2.95	1.50	
	-5	3.14	5.99	
	-6	8.69	2.35	
	Mean	4.14±2.36	5.14±4.28	
	BG	-7	2.12	3.79
		-8	5.35	62.29
		-9	3.39	29.27
-10		6.73	59.57	
-12		2.65	6.92	
-13		1.93	17.62	
-15		2.41	17.01	
-16		2.58	9.34	
-17		0.97	18.79	
Mean		3.13±1.70	24.9±20.50	
TG	-18	2.03	9.43	
	-19	2.12	7.30	
	-20	1.60	18.25	
	-21	2.80	10.13	
	-22	0.81	3.14	
	-23	0.95	76.24	
	Mean	1.72±0.69	20.7±25.22	
	Mean of Total	3.01±1.95	18.09±20.91	

토양시료의 분석결과 연구지역의 Th 함량범위는 6.87~74.60 ppm이고 평균함량은 25.40±12.50 ppm이며, U의 함량범위는 0.40~17.68 ppm이고 평균함량은 4.49±3.62 ppm이다. 이들을 암상별로 살펴보면, SG지역에서 Th의 평균함량은 19.26±3.93 ppm이며, U의 평균함량은 3.87±1.91 ppm이다. BG지역에서 Th의 평균함량은 36.89±13.15 ppm이며, U의 평균함량은 4.07±1.69 ppm이다. TG지역에서 Th의 평균함량은 25.05±12.95 ppm이며, U의 평균함량은 5.05±4.75 ppm이다. 라돈의 농집에 직접적인 관계가 있는 토양의 U 평균함량은 TG에서 가장 높고, BG지역, 그리고 SG지역 순으로 낮아진다.

대전지역 토양중 라돈함량 범위 (Table 2)는 100~2,475 pCi/l이며, 평균농집은 438±440 pCi/l이다. SG에서 라돈의 농집범위는 133~2,475 pCi/l이며, 평균함량은 552±656 pCi/l이다. BG에서 라돈의 범위는 108~517 pCi/l이며, 평균농집은 224±115 pCi/l이다. TG에서 라돈의 농집범위는 100~1,283 pCi/l이며, 평균농집은 443±284 pCi/l이다. 토양내 라돈 평균농집량은 SG에서 가장 높고, TG지역, 그리고 BG지역순으로 감소된다. 토양의 환경기준치인 1,350

Table 2. Rn²²² concentration in soil-gas and climate parameters of the Taejon area.

Rock Type	Sample No.	Temp. (°C)	Depth (cm)	Moisture (%)	Atm. (mb)	Soil pH	Soil Hardness (mm)	Wind Speed (m/s)	U (ppm)	Th (ppm)	Rn ²²² (pCi/l)	
SG	S-12	33	70	70	992	6.5	20	0.0	2.89	15.12	242	
	-13	31	75	80	992	6.9	23	0.1	4.86	20.96	911	
	-14	34	74	48	990	6.8	23	0.2	8.18	21.54	2342	
	-15	34	70	54	989	6.8	23	0.1	6.62	20.65	1167	
	-31	25	75	-	1004	6.8	14	0.7	4.29	20.34	142	
	-32	24	73	-	1004	7.0	19	1.1	3.69	28.22	408	
	-33	25	75	-	999	7.0	11	3.2	2.68	16.78	133	
	-34	27	75	-	1000	7.0	11	4.2	3.54	26.30	217	
	-35	26	75	-	1001	7.0	15	1.5	3.59	13.41	450	
	-36	24	70	-	1000	6.8	21	0.7	9.02	18.96	2475	
	-37	23	70	-	1002	6.6	12	0.1	4.64	22.02	342	
	-46	30	75	-	981	6.9	15	0.4	2.63	18.97	208	
	-47	27	75	-	979	6.9	13	0.5	2.42	22.76	175	
	-48	28	75	-	984	6.9	15	-	1.65	15.98	183	
	-49	27	75	-	985	6.8	21	-	2.01	19.79	175	
	-50	26	75	-	984	6.9	17	1.0	3.28	16.81	225	
	-51	26	75	-	988	6.6	16	-	2.69	23.58	275	
	-52	26	75	-	987	6.9	20	0.8	2.24	16.28	283	
	-53	25	75	-	990	7.0	14	-	3.75	12.95	267	
	-54	25	75	-	986	6.4	16	-	2.09	14.72	242	
-55	23	75	-	985	6.9	13	-	4.43	18.33	725		
Range of Rn									1.65~9.02	12.95~28.22	133~2475	
Mean of Rn									3.87±1.91	19.26±3.93	552±656	
BG	-19	35	75	48	978	7.0	19	0.3	9.04	58.99	133	
	-20	33	75	53	983	6.9	12	0.2	3.65	48.51	208	
	-21	34	75	50	982	6.8	21	1.5	2.73	30.35	183	
	-22	34	72	50	992	7.0	14	2.5	5.25	29.62	108	
	-23	35	75	51	990	6.9	12	0.5	4.38	23.35	225	
	-24	34	75	55	992	7.0	15	0.1	4.22	29.39	292	
	-25	33	70	58	990	7.0	24	0.1	4.24	34.75	108	
	-26	32	75	59	982	6.9	23	0.5	3.19	19.98	142	
	-27	31	75	61	989	7.0	14	0.1	3.76	22.66	367	
	-28	29	75	70	990	6.6	18	0.1	2.90	56.25	517	
	-29	28	70	72	992	7.0	26	0.1	3.16	52.61	167	
	-30	28	65	77	993	7.0	15	0.0	2.30	36.27	242	
	Range of Rn									2.30~9.04	19.98~58.99	108~517
	Mean of Rn									4.07±1.69	36.89±13.15	224±115

pCi/l (Reimer, 1991) 이상인 시료 역시 SG지역의 2개소에서만 나타난다.

토양의 라돈농집량에 영향을 줄수 있는 기압, 기온, 풍속, 토양의 채취심도, 굳기 (Hardness)와 토양 수분량 (Table 2) 등 현장시료채취시 측정된 자료와 라돈함량에 대한 상관계수들을 구해 보았다 (Table 3). 대전지역의 전체적인 라돈 (Rn²²²) 농집과 토양내 U함량 및 굳기는 양 (+)의 상관관계를 보이며 기압, 심도, 온도, 풍속 과 pH와는 뚜렷한 관련성이 없는 것이 특징이다. 그러나 토양내 수분량과 Rn함량은 반비례한다.

대전화강암지역의 음용지하수에 대한 라돈함량 측정결

과는 Table 4와 같다. 대전지역 지하수중 라돈 (Rn²²²)의 농집범위는 169~17.873 pCi/l이며, 평균농집은 5.497±4.913 pCi/l이다. 이를 다시 암상별로 세분하면 BG에서 라돈의 농집범위는 200~4.000 pCi/l이며, 평균농집은 2.104±1.157 pCi/l이다. SG에서 라돈의 농집범위는 169~17.873 pCi/l이며, 평균농집은 5.503±6.551 pCi/l이다. TG에서 라돈의 농집범위는 1.186~17.436 pCi/l이며, 평균농집은 6.907±4.665 pCi/l이다. 미국의 경우 음용수내 라돈환경 기준치는 10,000 pCi/l (EPA, 1986)이며, 일부 TG 및 SG지역에서 환경기준치를 넘는다.

대전 유성온천지역내 자연온천수 및 대중온천탕에 대

Table 2. Continued.

Rock Type	Sample No.	Temp. (°C)	Depth (cm)	Moisture	Atm. (mb)	Soil pH	Soil Hardness (mm)	Wind Speed (m/s)	U (ppm)	Th (ppm)	Rn ²²² (pCi/l)
TG	S-1	34	72	65	1000	6.6	-	0.5	3.79	12.77	550
	-2	33	70	67	997	6.8	20	0.1	2.82	28.65	425
	-3	33	70	63	999	6.9	16	1.0	1.85	31.06	350
	-4	32	70	66	1000	6.8	11	0.5	2.37	19.21	458
	-5	33	75	67	1000	7.0	11	0.1	1.62	16.90	125
	-6	33	75	67	993	7.0	10	0.1	1.85	55.50	342
	-7	34	75	64	998	6.9	16	0	3.15	17.65	267
	-8	35	70	61	995	6.8	20	0.5	1.89	19.94	308
	-9	36	70	59	997	7.0	25	0.1	3.77	15.11	775
	-10	36	70	58	996	6.8	16	0.1	5.59	6.87	100
	-11	35	75	65	995	6.9	19	0.1	2.25	15.94	133
	-16	35	70	43	990	7.0	22	0.1	6.36	17.93	1283
	-17	38	75	47	994	6.6	18	0.1	5.45	15.57	583
	-18	39	75	39	993	6.6	19	0.5	8.57	43.84	1017
	-38	22	75	-	1012	6.8	20	0.1	1.53	14.65	392
	-39	23	73	-	1012	6.8	20	0.2	0.40	21.15	208
	-40	24	75	-	1011	6.9	22	0.1	3.36	19.55	400
	-41	24	74	-	1009	6.9	17	0.2	2.36	24.90	250
	-42	22	70	-	1010	6.9	16	0.0	5.39	26.20	592
	-43	23	70	-	1014	6.9	21	0.1	3.08	17.72	1017
	-44	23	75	-	1014	7.0	15	0.0	14.72	74.60	625
	-45	21	75	-	1012	7.0	16	0.0	3.82	36.83	300
	-56	26	75	-	990	6.9	23	0.4	1.84	14.77	208
	-57	26	75	-	990	6.9	27	0.1	1.67	26.17	308
	-58	29	75	-	989	6.9	20	0.7	3.03	27.71	200
	-59	30	75	-	991	7.0	17	0.1	3.22	28.33	142
	-60	30	75	-	986	7.0	23	0.1	1.98	27.55	267
	-61	30	75	-	990	7.0	20	0.8	2.21	18.41	308
	-62	32	75	-	989	6.8	23	0.1	15.09	25.23	617
	-63	30	75	-	991	6.9	22	0.6	16.70	29.52	250
	-64	29	75	-	991	6.8	27	0.8	17.68	30.93	858
	-65	29	75	-	990	6.9	25	0.5	12.26	20.64	508
Range of Rn ²²²									0.40~17.68	12.77~74.60	100~1283
Mean of Rn ²²²									5.05±4.75	25.05±12.95	443±284
Mean of Total Rn ²²²									4.49±3.62	25.4±12.50	438±440

한 라돈농집량 조사결과는 Table 5과 같다. 시료수는 총 7개 지점이며, 그중 온천수가 2개, 대중 온천탕 5개 지점이다. 대전지역의 온천수에서 라돈농집범위는 5,129~9,012 pCi/l이며, 평균함량은 7,071±1,942 pCi/l이다. 이들 온천수는 TG분포지역에 위치하므로 이 지역의 음용지하수의 평균 라돈농집량 (6,907±4,665 pCi/l)과 비교한 결과 음용지하수에 비해 약간 높게 나타나나 별 차이가 없다고 볼수 있다.

대중 온천탕에서 라돈농집범위는 404~2,394 pCi/l이며, 평균함량은 1,638±709 pCi/l이다. 대중온천탕 라돈농집량이 온천수보다 낮은 것은 온천수가 탕내에 유입되는 과정에서 대부분의 라돈가스가 탈기되었음을 나타낸다. 이와같은 결과로 보아 대전지역 온천수는 라돈의 농집량이

비교적 낮아 EPA (1986)의 음용지하수 환경기준치인 10,000 pCi/l이하 임이 확인되었다.

지하 실내공간에 농집된 라돈가스함량의 전체적인 범위는 0.40~6.70 pCi/l이며, 평균함량은 1.60±1.10 pCi/l이다. 이를 다시 암상별로 분류하여 보면 TG분포지역은 라돈의 함량범위가 0.40~6.70 pCi/l이며 평균함량은 1.60±1.20 pCi/l이다. 그리고 SG지역은 1.00~2.80 pCi/l의 범위와 평균 1.60±0.70 pCi/l를 보인다. 특히 EPA (1986)의 공기내 환경기준치인 4 pCi/l를 초과하는 곳은 TG분포지역의 지하 실내공간 2개소에서 각각 5.60 pCi/l와 6.70 pCi/l임이 밝혀졌으며, 이 TG분포지역은 역시 토양내 U함량과 음용지하수내 Rn함량이 높은 지역으로 나타났다.

Table 3. Linear correlation coefficient matrix of soil radon and weather parameters in the Taejon area (Abbreviations are same as the Table 2).

	Atm.	Depth	Moisture	Rn	Soil Hd.	Soil pH	Temp.	Th	U	Wind Sp.
Atm.	1									
Depth	-0.34541	1								
Moisture	0.38623	-0.258	1							
Rn	0.01417	-0.01175	-0.30845	1						
Soil Hd.	-0.23617	-0.21488	-0.0699	0.38466	1					
Soil pH	-0.0784	-0.18981	0.23063	-0.29422	-0.08634	1				
Temp.	0.06164	0.26226	-0.75557	0.19804	0.01109	-0.32646	1			
Th	-0.43456	0.13275	0.0554	-0.17475	-0.08054	0.04082	-0.34875	1		
U	-0.40684	0.15732	-0.68103	0.55463	0.31578	-0.20398	0.48285	0.06853	1	
Wind Sp.	-0.13936	0.02393	-0.30616	-0.18935	-0.13218	0.01259	0.12787	0.02829	0.0034	1

Table 4. Rn²²² concentration (pCi/l) in groundwater of the study area.

	SG	BG	TG
w-27	2,239	w-22 2,150	w-1 11,875
w-28	3,867	w-30 2,244	w-3 6,203
w-41	17,873	w-34 3,200	w-6 7,189
w-42		w-36 417	w-7 9,178
w-43	13,114	w-46 1,585	w-8 6,781
w-44		w-47 200	w-9 8,025
w-45	169	w-48 2,422	w-10 15,689
	289	w-49 4,000	w-13 3,450
	972	w-50 2,719	w-14 1,822
			w-15 4,525
			w-16 7,789
			w-17 8,494
			w-18 1,186
			w-19 16,383
			w-20 17,436
			w-21 5,786
			w-24 1,917
			w-25 4,300
			w-26 1,203
			w-29 2,847
			w-31 1,578
			w-32 1,967
			w-33 3,311
			w-37 9,125
			w-38 5,569
			w-39 12,739
			w-40 10,114
Range	169~17,873	Range 200~4,000	Range 1,186~17,436
Mean	5,503±6,551	Mean 2,104±1,157	Mean 6,907±4,665

종합 및 토의

본 연구에서의 라돈 환경기준치는, 선진국 중에서 환경규제가 가장 엄격한 미국의 기준을 근거로 라돈환경지화학을 논하였다. 공기중 라돈함량은 4 pCi/l 이상, 토양의 경우는 1.350 pCi/l 이상, 그리고 지하수의 경우는 10,000

Table 5. Rn²²² concentration (pCi/l) in natural hotspring and public bath of the Taejon area.

Sample	Samle location	Water Temperature	Rn ²²² (pCi/l)
Natural hotspring	Y-restaurant	45	9,012
	D-Hotol	42	5,129
	Mean value		7,017±1,942
Public baths	L-Hotel	40	1,621
	D-Hotel	38	2,394
	Y-Hotel	40	1,499
	YY-Hotel	45	2,271
	H-Hotel	40	404
	Mean value		1,638±709

pCi/l 이상을 환경위험기준치로 사용하였다 (EPA, 1986; Reimer, 1991).

대전 화강암시료의 U평균함량은 SG (4.14±2.36 ppm)에서 가장 높고, 그다음이 BG (3.13±1.70 ppm) 그리고 TG (1.72±0.69 ppm)에서 가장 낮게 나타난다. 이는 각 암상내 함우라늄 광물의 존재량과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 그러나 토양의 경우는 U평균농집은 TG (5.05±4.75 ppm)분포 지역에서 가장 높고 BG (4.07±1.69 ppm), 그리고 SG (3.87±1.91 ppm)순으로 낮아진다. 암석 (-200 mesh)과 토양 (-80 mesh)내 U함량의 차이는 TG 자체 암석의 함우라늄광물 존재량은 적지만, TG의 풍화산물인 토양은 U원소에 대한 양이온교환능력이 높기때문이라고 해석된다. 대전 화강암류와 토양시료의 Th함량은 BG에서 가장 높고, TG 그리고 SG순으로 낮아지지만 라돈-220은 라돈-222에 비하여 환경에 큰 문제가 되지 않는다 (Ball, 1991).

토양내 라돈가스의 경우, SG (평균 552±656 pCi/l)분포지역에서는 환경기준치 (1,350 pCi/l)를 초과하는 곳이 2개 지점이며, TG (443±284 pCi/l), 그리고 BG (224±115 pCi/l)순으로 낮아진다. 토양공극사이에 존재하는 라

돈가스함량은 토양의 U함량과 굳기와 정비례하는 것으로 밝혀졌다. 특히, SG지역에서 라돈의 평균농집량이 높으며 변화폭이 큰 것은 이 지역의 토양의 물리적특성과 구조지질학적적 요인과 관련될 것으로 생각된다.

음용지하수에서의 라돈농집량은 TG (6.907 ± 4665 pCi/l)에서 가장 높고, SG (5.503 ± 6.551 pCi/l), BG (2.104 ± 1.157 pCi/l)순으로 낮아진다. 또한, 음용수의 EPA (1986) 환경기준치인 10,000 pCi/l를 초과하는 곳이 TG분포지역에서 6군데, 그리고 SG지역에서 2개소이다. 음용지하수내 라돈함량은 토양의 U함량과 직접적인 관계가 있다. 특히 라돈함량이 높은 음용지하수는 마시기 전에 물컵을 흔드는 등 탈기후 사용하여야한다 (EPA, 1992).

TG분포지역 자연온천수와 대중온천탕의 평균 라돈함량은 각각 7.071 ± 1.942 pCi/l와 1.638 ± 709 pCi/l이며, 이는 EPA (1986) 환경기준치인 10,000 pCi/l이하이다. 대중온천탕의 라돈값이 온천수보다 낮은 것은 온천수가 대중탕으로 유입되는 과정에서 탈기되었기 때문으로 해석된다.

지하 실내공간에 농집된 라돈가스함량의 전체적인 범위는 $0.40 \sim 6.70$ pCi/l이며, 평균함량은 1.60 ± 1.10 pCi/l이다. EPA (1986)의 공기내 환경기준치인 4 pCi/l를 초과하는 지하 실내공간은 TG분포지역에서의 조사지점 42개소 중 2개소에서 5.60 pCi/l와 6.70 pCi/l임이 밝혀졌다. 지하 실내공간의 라돈함량측정 결과는 동일지역에서도 계절적 변화에 따른 차이가 있으며, 일반적으로 겨울철의 측정값이 여름철보다 높게 나타난다고 한다 (Gundersen *et al.*, 1988; Schumann, Owen, 1988). 대전지역에 대한 실내공간 라돈함량 측정은 6월에서 10월에 걸친 하절기에 실시되었기 때문에 라돈함량은 최소함량으로 해석된다. 그러므로 지하공간내 라돈함량은 토양내 U함량과 음용지하수내 Rn함량과 직접적인 관계가 있음이 밝혀졌다. 라돈이 환경기준치이상 높은 지역은 건축구조물 하부의 예상되는 라돈유입구를 차단하고 통기를 원활히 실시함으로써 라돈함량을 환경기준치 이하로 줄여야한다.

대전의 토양, 음용지하수 및 실내지하공간내 라돈함량을 화강암의 암상별로 평가해 본 결과 TG분포지역이 대체로 높은 것으로 나타나므로 이지역에 대한 지속적인 감시 (monitoring)가 필요하다.

결 언

1. 연구지역 화강암시료의 U함량은 SG (4.14 ± 2.36 ppm)에서 가장 높고, 그 다음이 BG (3.13 ± 1.70 ppm) 그리고 TG (3.01 ± 1.95 ppm)에서 가장 낮게 나타난다. 이

는 각 암상내 함우라늄 광물의 존재량과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 그러나 토양의 경우는 U농집은 TG (5.05 ± 4.75 ppm)분포 지역에서 가장 높고 BG (4.07 ± 1.69 ppm), 그리고 SG (3.87 ± 1.91 ppm)순으로 낮아진다. 암석 (-200 mesh)과 토양 (-80 mesh)내 U함량의 차이는 TG자체 암석의 함우라늄광물 존재량은 적지만, TG분포지역 토양내 U원소에 대한 양이온교환능력이 높기 때문에 U함량이 높게 나타난다고 해석된다.

2. 토양내 라돈가스의 경우, SG (552 ± 656 pCi/l)분포 지역에서는 환경기준치 ($1,350$ pCi/l)를 초과하는 곳이 2개 지점이며, TG (443 ± 284 pCi/l), 그리고 BG (224 ± 115 pCi/l)순으로 평균함량이 낮아진다. 토양공극사이에 존재하는 라돈함량은 토양의 U함량과 굳기와 정비례하는 것으로 밝혀졌다. 특히, SG지역에서 라돈의 평균농집량이 높으며 변화폭이 큰 것은 이 지역의 토양의 굳기 (hardness)와 구조지질학적적 요인과 관계될 것으로 생각된다.

3. 음용지하수에서의 라돈농집량은 TG (6.907 ± 4.665 pCi/l)에서 가장 높고, SG (5.503 ± 6.551 pCi/l), BG (2.104 ± 1.157 pCi/l)순으로 낮아진다. 또한, 음용수의 EPA (1986) 환경기준치인 10,000 pCi/l를 초과하는 곳이 TG분포지역에서 6군데, 그리고 SG지역에서 2개소로 나타난다. 음용지하수내 라돈함량은 동일지역의 토양의 U함량과 정비례 관계가 있다. 라돈함량이 높은 지하수는 탈기후 사용하도록 제한한다.

4. TG분포지역 자연온천수와 대중온천탕의 평균 라돈함량은 각각 7.071 ± 1.942 pCi/l와 1.638 ± 709 pCi/l이며, 이는 EPA 환경기준치인 10,000 pCi/l 이하로 나타났다. 대중온천탕의 라돈값이 자연온천수보다 낮은 것은 원수가 대중온천탕으로 유입되는 과정에서 라돈이 탈기되었기 때문으로 해석된다.

5. 대전지역 지하 실내공간에 농집된 라돈가스함량의 전체적인 범위는 $0.40 \sim 6.70$ pCi/l이며, 평균함량은 1.60 ± 1.10 pCi/l이다. 암상별로 보면 TG지역은 라돈의 함량 범위가 $0.40 \sim 6.70$ pCi/l이며 평균함량은 1.60 ± 1.20 pCi/l이다. 그리고 SG지역은 $1.00 \sim 2.80$ pCi/l의 범위와 평균 1.60 ± 0.70 pCi/l를 보인다. EPA의 공기내 환경기준치인 4 pCi/l를 초과하는 지하 실내공간은 TG의 42개 중 2개 지점에서 5.60 pCi/l와 6.70 pCi/l로 나타났다. 실내지하공간내 라돈함량은 토양내 U함량과 음용지하수내 Rn함량과 정비례의 상관관계가 있음이 밝혀졌다. 라돈이 환경기준치이상 높은 지역은 예상되는 라돈가스 유입구 차단 및 통기를 통하여 실내라돈함량을 줄여야 한다.

사 사

본 연구를 수행함에 있어서 시료채취 및 측정에 많은 협조를 아끼지 않으신 김승오박사, 김운수 그리고 손석화 씨께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 김운신, 신용배, 김신도, 김동술, 전준민 (1993) 서울시 일부 지하철역내 대기오염물질에 대한 조사연구. 한국환경위생학회지, v. 20, p. 19-27.
- 김창규, 김철수, 한만중, 이도성 (1994) 극준위 액체섬광계수기와 파괴형 분석법을 이용한 지하수 및 온천수중 라돈-222의 신속측정법. 대한방사선 방어학회, 제 18차 정기총회 및 학술발표회 논문요약집, p. 41-43.
- 박희인, 이준동, 정지근 (1977) 유성도폭지질보고서. 국립지질조사소.
- 이상만, 김형식, 나기창 (1980) 대전도폭지질보고서. 국립지질조사소.
- 이태섭, 홍영국, 이상규 등 (1995) 지구물리 지구화학적 오염영역 탐지 및 감시 기술개발연구 (I). 과학기술처, p. 261-293.
- Ball, K. (1993) Radon. British Geological Survey, 20p.
- EPA (1986) A Citizen's guide to Radon. USEPA, OPA-86-004, 13p.
- EPA (1992) A Citizen's To Protecting Yourself and Your family from Radon. 15p.
- Gundersen, L.C.S., Reimer, G.M., and Agard, S.S. (1988) Correlation between geology, radon in soil gas, and indoor radon in the Reading Prong, in Marikos, M. ed., Proceedings of GEORAD, Geology in Causes of Radionuclide Anomalies : Missouri Depart. of Natural Resour. Speci. Publ. No. 4, p. 99-111.
- Harley, N.H. (1984) Radon and lung cancer in mines and homes. Nat. Eng. J. Med., v. 310, p. 1535-1527.
- Hornung, R.W. and Meinhardt, T.J. (1987) Quantitative risk assessment of lung cancer in U.S. uranium miners. Health Phys., v. 52, p. 417-430.
- Nero, A.V. and Loweder, W.M. (1987) Special issue on indoor radon. Health Phys., v. 45, p. 273-570.
- Otton, J.K. (1992) The geology of radon. U.S. Geology Survey open-file report, p. 20-28.
- Reimer, G.M. (1990) Reconnaissance Techniques for determining soil-gas radon concentrations: An example from Prince Georges County, MD. Geophy. Research Letters, v. 17, p. 809-812.
- Reimer, G.M. (1991) Simple techniques for soil-gas and water sampling for radon analysis. U.S. Geological Survey, p. 19-22.
- Reimer, G.M., Gundersen, L.C.S. (1989) A direct correlation among indoor, soil gas radon and geology in the Reading Prong near Boyrtown, Pennsylvania. Health Phys., v. 57, p. 155-160.
- Reimer, G.M. and Denton, E.H., Friedman, I., and Otton, J.K. (1979) Recent developments in uranium exploration using the U.S. Geological Survey's mobile helium detector. J. of Geochem. Explor., v. 11, p. 1-12.
- Rybach (1988) Determination of heat production rate: Handbook of terrestrial heat-flow density determination, Haenel, Rybach and Stegena, p. 125-142.
- Schumann, R.R., and Owen, D.E. (1988) Relationships between geology, equivalent uranium concentration, and radon in soil gas, Fairfax Country, Virginia. U.S. Geological Survey Open-File Report 88-18, 28p.

1997년 1월 24일 원고접수