

서울 地下鐵驛 昇降場 및 土壤內 有害라돈含量 研究

洪永國* · 金承吾** · 金統權*

Radon-222 Concentrations of Metropolitan Subway Stations and Soils in the Seoul

Young-Kook Hong, Sung-Oh Kim* and Tong-Kwon Kim

ABSTRACT : The radon (Rn-222) potential of metropolitan subway stations and soils in Seoul city were delineated using alpha-track filter and EDA-200 radon detectors, respectively. The uranium (U) and thorium (Th) contents were also determined using a Multi Channel Analyzer to identify the sources of radon gas. The average U concentrations in Seoul varies according to basement rock types. For example, there is 9.40 ± 10.11 ppm in the Precambrian metasedimentary rock (PM), 9.08 ± 2.85 ppm in the Jurassic Kwanaksan granite (JK) and 4.94 ± 1.43 ppm in the Jurassic Seoul granite (JS). Uranium contents in soil samples are 10.30 ± 4.74 ppm in JK, 10.10 ± 7.43 ppm in PM and 6.69 ± 3.95 ppm in JS and these closely reflect the content of uraniferous minerals. The levels of soil radon are 604 ± 273 pCi/L in JK, 502 ± 275 in JS and 262 ± 211 pCi/L in PM. The soil radon concentrations are shown to reflect soil permeability and porosity rather than their U contents. The mean indoor radon contents in subway stations are 1.50 ± 0.62 pCi/L on the 4th line, 1.41 ± 0.95 pCi/L on the 3rd line, 0.84 ± 0.13 pCi/L on the 1st line and 0.80 ± 0.25 pCi/L on the 2nd line. The subway stations located in the JK have the highest average radon concentration with 2.04 ± 0.65 pCi/L, where levels of 1.57 ± 0.81 pCi/L occur in the JS and 0.80 ± 0.23 pCi/L in the PM. The highest radon levels of 4.1 pCi/L occur mainly in Keongbokkang station on the 3rd line and these exceed 4 pCi/L of the US EPA action level.

서 론

라돈 (Rn)은 자연적으로 산출되는 무색, 무취, 무미의 수용성 방사성 가스이다. 라돈은 원자량 219, 220과 222의 동위원소를 가지며, 이들은 각각 U-235, Th-232, U-238의 방사성 붕괴산물이다. Rn-219 (actinon)는 3초의 매우 짧은 반감기를 가지며, U-235 역시 전체 우라늄의 0.7%만을 차지하기 때문에 생태계에 미치는 영향은 무시 할만하다. Rn-220 (thoron)은 반감기가 54.7초이며 Th-232의 붕괴계열이므로 유해하지않다. 그러나, Rn-222은 반감기가 3.823일 (Hem, 1985)이며 우라늄-238의 붕괴계열에서 발생하는 딸원소 (자핵종)인 라듐-226 동위원소의 자연 방사성 붕괴산물이므로 우라늄 함량이 높은 암석, 토양과 지하수로 부터 우리의 생활환경에 유입

되어 매우 유해하다. 일반적으로 환경지화학적 측면에서 라돈을 언급할 때 Rn-222 동위원소를 말한다.

미국의 경우 라돈가스는 폐암원인중에서 담배흡연 다음으로 위험하고 매년 약 14,000명이 라돈에 인한 폐암으로 사망하는 실정이다 (Environmental Protection Agency: EPA, 1992). 라돈이 환경기준치이상 농집된 공기를 장기간 호흡하는 경우, 폐로 흡입된 라돈의 딸원소인 폴로늄 (Po)-214와 218의 알파붕괴 과정에서 방출하는 높은 에너지의 알파입자가 폐조직을 파괴시켜 폐암을 유발시키는 것으로 알려졌다 (Harley, 1984; Nero, Loweder, 1987; Hornung, Meinhardt, 1987; Brooks, 1988; Robillard *et al.*, 1991). 라돈가스는 대부분 호흡시 폐에서 배출되지만 (Hurlburt, 1989), 반감기가 짧은 라돈의 딸원소들은 기관지에 남아있거나 에어로졸, 미세먼지와 담배연기 표면에 붙어있다가 호흡시 폐에 흡입되어 건강에 매우 유해하다. 또한, 라돈과 우라늄-238의 함량이 높은 물을 마시는 경우腎臟조직을 파괴한다.

이같은 라돈의 유해성 때문에 인간생활과 밀접하게 관계되는 지하공간과 주거지역 주변 토양등에 함유된 라돈

* 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)

** 全南大學校 自然科學大學 地質學科 (Department of Geology, Cheonnam National University)

함량과 그 생성원인을 규명하고 그에 따른 대책수립이 필요하다 (EPA, 1986; Reimer and Gundersen, 1989). 공기 및 물속에 존재하는 라돈함량은 1리터 (L)당 피코큐리 (picocuries: pCi)단위로 그 활성도를 표현한다 (Otton, 1992). 1 pCi/L의 활성도는 1 분동안에 공기나 물 속의 라돈원자 두 개정도가 붕괴하는 것을 의미한다.

미국 EPA (1986)가 설정한 공기중의 라돈환경기준치 (Maximum Contaminant Level: MCL)는 4 pCi/L이다. 미국의 경우 토양에서 라돈농집량의 범위는 270~1,350 pCi/L이며, 위험기준치는 1,350 pCi/L이라고 발표된 바 있다 (Reimer, 1991). 음용수에서 라돈함량의 환경기준치는 미국 EPA (1986)가 10,000 pCi/L이었으나, 최근 EPA (1994)가 300 pCi/L로 개정후 제안하였다.

국내의 라돈연구는 서울 지하철 3호선 역구내에서 라돈이 미국 EPA의 공기중 허용기준치보다 높은 4.9 pCi/L (경북구역)와 4.1 pCi/L (안국역)로 발표된 바 있다 (김윤신 등, 1993). 또한 대전지역의 지하실내공간, 토양 및 지

하수에 대한 라돈환경지구화학연구를 실시한 결과 (홍영국, 1997), 토양의 경우 65개조사 지점중 2개지점, 지하수는 43개 시료중 8개 그리고 실내공간은 46개소 조사지점중 2개소에서 5.60 pCi/L와 6.70 pCi/L(홍영국, 손석화, 1998, 미발표자료)로 미국 EPA (1986)의 환경기준치를 초과하는 라돈 오염영역을 탐지하고, 토양과 암석의 U과 Th함량과 비교하여 라돈의 생성원인을 연구한 바 있다.

본 연구의 목적은 1) 인구밀집 장소인 서울 지하철역 승강장내 공기와 주거시설과 밀접히 관련있는 토양내 유해 라돈함량조사, 그리고 2) 라돈가스 발생의 근원인 암석과 토양내 U과 Th함량을 측정하여 라돈가스생성의 관련성을 규명하는데 있다.

연구지역 지질

서울시 일대의 지질은 선캠브리아기 편마암류와 이를 관입한 쥐라기화강암들로 이루어져 있다 (Fig. 1). 선캠브

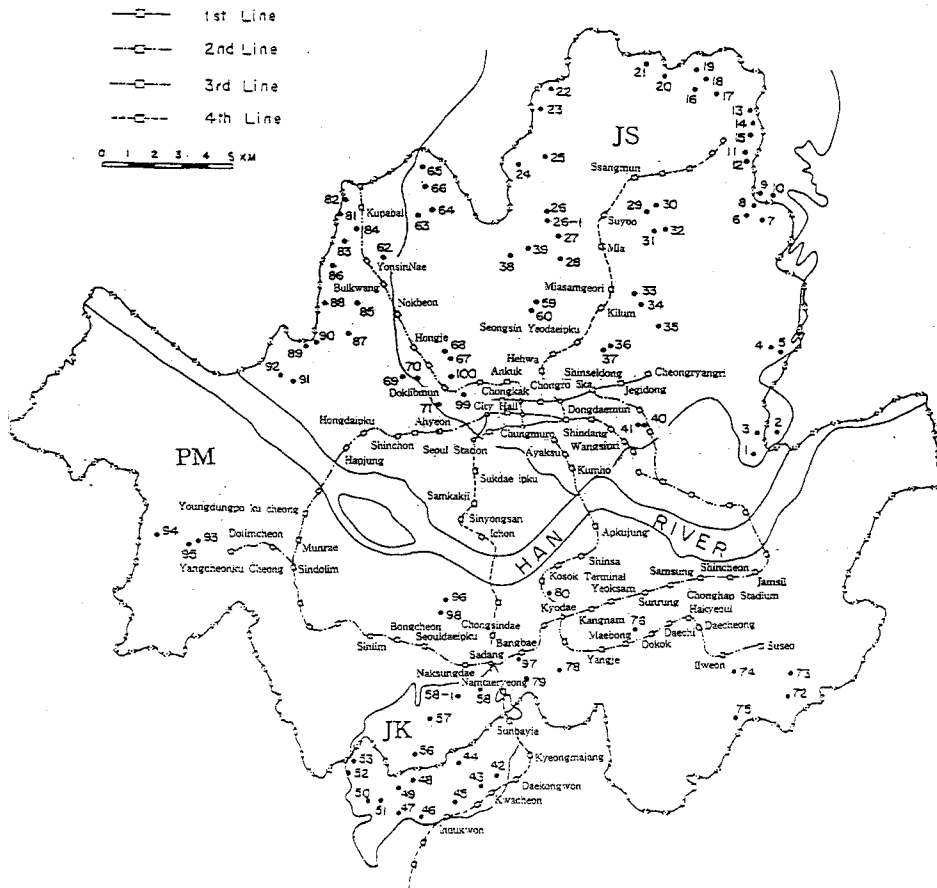


Fig. 1. Geology, subway stations and sample locations of soil in the Seoul city. JS; Jurassic Seoul granite, PM; Precambrian Metasedimentary rock, and JK; Jurassic Kwanaksan granite.

리아기 변성퇴적암류 (PM)는 주로 호상흑운모 편마암, 화강암질 편마암 그리고 연구지역 북부에 분포하는 운모편암등으로 구성되어있으며 앵피블라이트상에 속한다 (나기창, 1978). 편마암에는 엽리가 잘 발달되어 있으며 엽리의 주향은 N15~50°E 이고 경사는 40~60°SE방향이다. 호상흑운모 편마암은 일반적으로 조립질의 등립 변정질 조직을 보이며, 주로 석영, 사장석, 알칼리장석과 흑운모들로 구성되어있다. 부수광물로는 석류석, 각섬석, 휘석, 녹렴석, 근정석, 규선석으로 이루어져있다. 운모편암은 석영, 사장석, 정장석, 백운모, 흑운모, 규선석, almandine과 흑연으로 구성되어있다. 변성퇴적암류는 Rb/Sr 전암법에 의한 암석연령측정 결과 $2,666 \pm 40$ Ma이며 Sr 초생치는 0.705임이 밝혀졌다 (나기창과 이동진, 1973).

쥬라기 화강암들은 서울화강암 (JS)과 관악산화강암 (JK)으로 약 240 Km² 면적을 차지하며, 서울화강암은 대체로 광물조직이 균질하고 조립의 약간 붉은 포타쉬 장석, 우유팩 사장석, 반자형 석영과 흑운모로 이루어져있다. 관악산 화강암은 서울화강암과 비교하여 흑운모가 적고 우백질인 것을 제외하고는 광물조직과 조성은 서로 비슷하다. 서울화강암의 Rb/Sr 전암 연대측정 결과 160 ± 10 Ma 이며 Sr 초생치는 0.712이다 (박병권, 1972). 서울 및 관악산화강암은 서브-알칼라인 몬조화강암으로 앵피블라이트상의 편마암 근원암이 각각 30%와 10% 부분용융에 의하여 생성된 S-형 및 Ilmenite-계열의 화강암이라는 것이 밝혀졌다 (Hong, 1984). 연구지역내 화강암의 구조인 절리면의 방향은 N70~80°E 이다.

시료채취 및 측정방법

시료채취

라돈시료채취는 서울 1, 2, 3, 4호선 지하철역 승강장의 공기 시료 100개와 토양라돈시료가 98개로서 총 198개시료를 대상으로 하였다. 지하철역 승강장의 지하실내 공기 라돈조사는 1호선에서 9개시료, 2호선 33개, 3호선 29개 및 4호선에서 29개 시료를 채취하였다. 시료채취 지하철역을 지질별로 분류하여 보면, 서울화강암이 분포하는 지하철역 승강장은 42개소, 변성퇴적암지역 53개 그리고 관악산화강암지역은 5개의 승강장이다 (Fig. 1). 서울시 지하철 4개노선에 위치하는 100개소의 지하철역 승강장 공기내 라돈함량 조사를 위하여 미국 Radiation Safety Services Incoporate (RSSI)회사의 알파-트랙 모니터를 각 지하철 승강장의 가판대 천정에 외부 (지상)공기와 대체로 차단된 동절기인 1995년 10월에서 1996년 2월에 걸

쳐서 약 3개월 동안 설치하여 공기중에 노출시켰다. 알파-트랙 검출기는 직경 7 cm, 높이 5 cm의 원통형이며 내부에는 검출필름이 들어있다. 공기내 라돈과 그 붕괴산물로부터 발생하는 알파입자가 검출필름에 흔적들을 남기게되며, 그 흔적들의 숫자로서 라돈함량을 환산한다.

토양내 라돈시료채취는 지하철 승강장의 알파-트랙 검출기 설치기간을 통하여 잔류토양에서 실시하였으며 서울화강암 분포지역의 토양에서 54개, 변성퇴적암지역 28개, 그리고 관악산화강암지역 16시료로 총 98개 시료이다 (Fig. 1). 토양라돈가스는 속이 비어있으며 길이가 1.5 m인 탄소강철 probe (외경: 6~9 mm, 내경: 2~3 mm)를 split hammer를 이용하여 토양속에 평균 75 cm정도 박아 넣고 (Reimer, 1990, 1991; 홍영국, 1997), 진공주사기 (Reimer *et al.*, 1979)를 통해 강철심 상부에서 20cc의 토양가스시료를 포집한다음 Zinc Sulfide (ZnS)로 내부벽면이 도포된 광전자증폭튜브 (Photomultiplier tube)인 Scintillation cell에 주입하였다. 평균 75 cm의 토양 깊이는 온대지방에서의 B-층에서 일반적으로 외부 기후조건에 영향을 받지않는 깊이이다 (Reimer, 1991). 주입된 토양가스시료내의 라돈함량은 붕괴시 생기는 알파입자가 Scintillation (또는 Lucas) cell의 황화아연과 반응하여 나타나는 빛의 진동을 광증폭시켜 측정한다.

또한, 토양 라돈가스함량조사시 동일지점의 토양내 U과 Th함량을 토양라돈함량과 비교하기 위하여 98개의 토양시료를 채취하였다. 토양시료 채취는 지표의 유기물을 포함한 토양 A-층을 걷어내고 약 75 cm 깊이의 B-층에서 약 1 kg의 토양을 채취하였다 (Gates, Gunderson, 1992). 그리고 연구지역 라돈생성의 근원 (source)인 암석내 U과 Th함량을 토양의 U과 Th함량 및 지질별 지하철역 승강장 공기의 라돈을 비교하기 위하여, 서울화강암분포지역에서 43개, 변성퇴적암지역 18개, 그리고 관악산화강암지역 10개의 신선한 암석시료를 채취하였다.

측정방법

지하철역 승강장 공기내 라돈가스 시료분석은 알파-트랙 모니터를 미국 RSSI회사에 보내어, 라돈핵종들이 붕괴될 때 방출되는 알파-입자의 흔적들을 검출필름에서 정량 분석 되어졌다. 오차 한계는 $\pm 3.5\%$ 이다.

토양내 라돈함량은 시료 측정전에 Portable Radon Detector (RDA)-200의 기기조건을 점검하기 위해 표준 cell을 넣어 5분씩 3회 측정하여 평균값이 1,020 cpm (count per minute) $\pm 5\%$ 의 범위내를 유지하는지 확인한 다음, 시료를 주입 할 Scintillation cell의 배경값을 각각

측정하였다. 이때 배경값이 1~2 cpm이 넘는 경우에는 핸드펄프를 이용하여 반복해서 cleaning과정을 거친다.

채취된 가스시료는 Scintillation cell에서 4시간 숙성시킨후 RDA-200으로 측정하였다. 이는 Scintillation cell내에서 라돈농집값은 약 3 시간후에 최대치가 되며 4시간 정도에서 가장 안정한 값을 갖기 때문이다 (Reimer, 1994). 그리고 측정시 주변의 빛에 의한 광전자의 영향을 피하기 위해 처음 1분 측정된 값은 배제하고 1분간 1회, 5분간 3회를 연속 측정하여 그 평균값을 사용하였다. 라돈계측기 RDA-200에 의해 측정된 각 cell의 cpm값은 측정시간과 시료의 부피 그리고 이미 라돈함량 (pCi/L)을 알고 있는 라돈 표준가스를 분석해 얻어진 보정값 (calibration factor)를 곱한 실험적인 상수값 500을 구하였으며, 이 상수 값을 적용하여 라돈 함량 (pCi/L)으로 환산하였다 (Reimer, 1994; 홍영국, 1997).

U과 Th 함량측정을 위하여 토양 및 암석시료는 각각 -80 mesh 및 -200 mesh 입자 크기로 체질하여 Multi Channel Analyzer (MCA)로 정량 분석하였다. U함량은 라돈의 고체 딸핵종중에 하나인 bismuth-214의 높은 감마 에너지를 이용하여 1.76 MeV에서 측정하였다. 시료당 측정시간은 24시간이며 국제원자력기구의 9개 표준시료와 blank test를 통해 배경값을 측정한 다음 회귀방정식을 구하여 compton effect와 쌍전자 효과를 배제함으로 분석치의 정확도 및 정밀도를 높였으며 (Rybach, 1988), 그 오차 범위는 5%이하이다.

측정결과

지하철역 승강장 라돈함량

Table 1. Radon concentrations of Seoul Subway stations on the 1st line.

Name of Stations	Rn (pCi/L)		Geology
	After Kim <i>et al.</i> , (1994)	This Study	
Cheongryangri	0.5	0.7	JS
Jegidong	0.5	0.7	"
Shinseldong	1.2	0.9	"
Dongdaemun	0.4	0.7	"
Chongro 5 ka	0.6	1.0	"
Chongro 3 ka	0.8	0.9	"
Chongkak	1.2	1.0	"
City Hall	0.6	1.0	"
Seoul Station	0.8	0.7	PM
Mean \pm δ	0.73 \pm 0.28(n=9)	0.84 \pm 0.13(n=9)	

JS; Jurassic Seoul granite, PM; Precambrian Metasedimentary rock, JK; Jurassic Kwanaksan granite, n; Number of samples.

서울지역의 4개노선의 지하철구내에 설치한 알파-트랙 모니터를 이용하여 전철역 승강장 공기내 함유된 라돈의 함량결과 (Tables 1, 2, 3, 4)에 의하면 1호선의 경우 농집 범위는 0.7~1.0 pCi/L, 평균농집은 0.84 \pm 0.13 pCi/L이며 2호선은 농집범위가 0.5~1.7 pCi/L, 평균농집은 0.80 \pm 0.25 pCi/L이며, 3호선은 농집범위가 0.5~4.1 pCi/L, 평균농집은 1.41 \pm 0.95 pCi/L이며, 4호선은 농집범위가 0.6~3.2 pCi/L, 평균농집은 1.50 \pm 0.62 pCi/L으로서 4호선의 승강장내 라돈평균함량이 가장 높게 나타났다 (Fig. 2).

1호선의 경우는 1991년 11월에서 1992년 1월까지 설치한 알파-트랙모니터의 결과 (김윤신등, 1994)인 평균라돈

Table 2. Radon Concentrations of Seoul Subway stations on the 2nd line. Abbreviations are the same of Table 1.

Name of Station	Rn (pCi/L)		Geology
	After Kim <i>et al.</i> , (1994)	This study	
City Hall	1.0	0.9	JS
Euljiro ipku	0.8	1.0	"
Euljiro 3 ka	0.9	0.9	"
Euljiro 4 ka	0.7	0.7	"
Dongdaemun Stadium	0.5	0.6	"
Shindang	0.7	0.7	"
Sangwangsipri	0.8	1.2	"
Wangsipri	0.5	1.4	"
Jamsil	0.6	0.6	"
Shincheon	0.6	0.6	PM
Chonghap Stadium	0.9	0.8	"
Samsung	0.5	0.7	"
Sunrung	0.5	0.7	"
Yeoksam	0.7	0.5	"
Kangnam	0.4	0.6	"
Kyodae	0.4	0.6	"
Bangbae	0.7	0.7	"
Sadang	1.0	0.7	"
Naksungdae	0.6	0.9	"
Seouldaeipku	0.8	0.7	"
Bongcheon	0.8	0.8	"
Sinlim	0.7	0.8	"
Sindolim	0.3	0.8	"
Munrae	0.5	0.6	"
Youngdungpo ku cheong	L	0.8	"
HapjungHongdaipku	0.7	0.6	"
Shincheon	0.8	0.7	"
Edae	0.8	0.5	"
Ahyeon	1.6	0.9	"
Chung	1.5	1.0	"
Jungro	1.6	1.7	"
Dolimcheon	ND	0.8	"
Yangcheonku Cheong	"	0.8	"
Mean \pm δ	0.74 \pm 0.34 (n=31)	0.80 \pm 0.25 (n=33)	

L; Less than detection limit, ND; Not determined.

Table 3. Radon Concentrations of Seoul Subway stations on the 3rd line. Abbreviations are the same of Tables 1 and 2.

Name of Station	Rn (pCi/L)		Geology
	After Kim <i>et al.</i> , (1994)	This study	
Kupabal	0.8	1.0	PM
Yonsin Nae	1.5	1.3	"
Bulkwang	L	0.8	"
Nokbeon	1.4	1.4	JS
Hongje	2.2	1.9	"
Muakje	1.0	1.7	"
Doklibmun	2.9	2.7	"
Kyeongbokkung	4.9	4.1	"
Ankuk	4.1	3.2	"
Chongro 3 ka	3.4	3.8	"
Euljiro 3 ka	2.0	2.1	"
Chungmuro	2.1	2.0	"
Dongdaecipku	1.4	1.3	"
Ayaksu	0.9	1.5	"
Kumho	0.5	0.8	"
Apkujung	0.4	0.7	PM
Shinsa	0.6	0.6	"
Jamwon	0.4	0.4	"
Kosok Terminal	L	0.5	"
Kyodae	0.4	1.4	"
Nambu Terminal	0.7	1.0	"
Yangje	0.5	0.6	"
Maebong	ND	1.4	"
Dokok	"	0.8	"
Daechi	"	0.9	"
Hakyeoul	"	0.7	"
Daecheong	"	0.8	"
Ilweon	"	0.9	"
Suseo	"	0.6	"
Mean ± δ	1.46 ± 1.31 (n=22)	1.41 ± 0.95 (n=29)	

Table 4. Radon Concentrations of Seoul Subway stations on the 4th line. Abbreviations are the same of Tables 1 and 2.

Name of Station	Rn (pCi/L)		Geology
	After Kim <i>et al.</i> , (1994)	This study	
Ssangmun	0.7	1.3	JS
Suyoo	1.7	1.8	"
Mia	1.8	1.8	"
Miasamgeori	1.6	1.6	"
Kilum	1.2	1.2	"
Seongsin Yeodaecipku	1.1	1.3	"
Hansungdae ipku	1.5	1.9	"
Hehwa	2.2	1.9	"
Dongdaemun	2.6	2.5	"
Dongdaemun Stadium	2.2	2.5	"
Chungmuro	2.6	2.2	"
Myeongdong	1.5	1.5	"
Heohyeun	2.0	1.8	"
Seoul Station	1.0	1.2	PM
Sukdae ipku	0.5	0.6	"
Samkakji	1.0	0.7	"
Sinyongsan	0.7	0.6	"
Ichon	0.8	0.8	"
Chongsindae ipku	L	0.7	"
Sadang	1.1	1.1	"
Namtaeryeong	ND	3.2	JK
Sunbayie	"	2.2	"
Kyeongmajang	"	1.1	PM
Daekongwon	"	1.0	"
Kwacheon	"	1.4	JK
Je 2 Chonghap Cheongsa	"	1.6	"
Indukwon	"	1.8	"
Beomal	"	1.1	PM
Bumkye	"	1.2	"
Mean ± δ	1.39 ± 0.69 (n=20)	1.50 ± 0.62 (n=29)	

함량 0.73 ± 0.28 pCi/L보다 약 4년후에 측정한 이번 결과가 평균 함량이 0.84 ± 0.13 pCi/L로서 다소 높게 나타난다. 2호선 지하철역의 평균 라돈함량은 0.80 ± 0.25 pCi/L이며 대체로 1 pCi/L 이하이다. 3호선의 라돈평균함량은 1.41 ± 0.95 pCi/L로서 김윤신 등(1994)의 1.46 ± 1.31 pCi/L보다 낮다. 3호선 지하철역 중에서 경복궁역이 미국 EPA의 환경기준치인 4 pCi/L를 조금넘는 4.1 pCi/L이며, 안국역과 종로 3가역이 3.2~3.8 pCi/L으로 환경기준치에 근접하고 있다. 4호선의 경우는 평균 라돈함량이 1.50 ± 0.62 pCi/L이며 동대문, 동대문운동장과 충무로역이 2.2~2.5 pCi/L의 분포를 보여준다.

서울지하철역 승강장의 평균라돈함량을 지질별로 분류하여 살펴보면, 관악산 화강암지역 승강장이 2.04 ± 0.64 pCi/L으로 제일 높고, 그 다음이 서울화강암지역에서

1.57 ± 0.81 pCi/L 그리고 변성퇴적암지역이 0.80 ± 0.23 pCi/L으로 가장 낮게 나타난다.

토양 라돈, U 및 Th 함량

서울시 지역 토양내 존재하는 라돈, U 및 Th 평균 함량은 Table 5와 같다. 조사결과 서울화강암분포지역 (Fig. 1)의 토양중 라돈의 농집범위는 167~1,300 pCi/L, 평균 함량은 502 ± 275 pCi/L이며, 관악산화강암지역은 토양중 라돈의 농집범위는 100~1,142 pCi/L, 평균농집은 604 ± 273 pCi/L이며, 변성퇴적암지역은 토양중 라돈의 농집범위는 67~1,033 pCi/L, 평균농집은 262 ± 211 pCi/L이다 (Fig. 3). 미국 토양내 라돈환경기준치로 제안된 1,350 pCi/L (Reimer, 1991)를 넘는 시료채취 지점은 연구지역에서는 발견되지않는다. 서울화강암 지역 (Fig. 2)의 토양

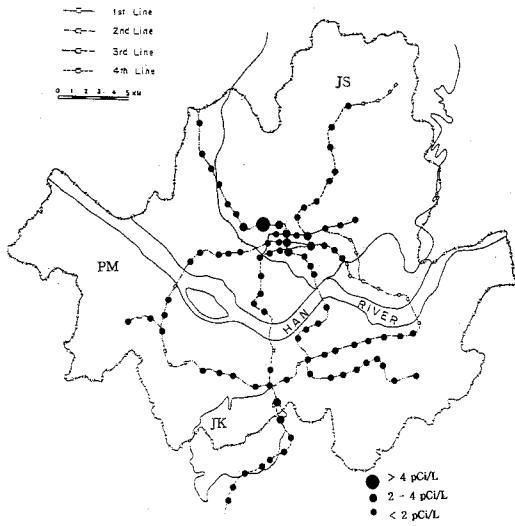


Fig. 2. Dot map of Rn contents (pCi/L) in the subway stations in the Seoul city. Closed circle dots represent the subway stations as Fig. 1.

Table 5. Average contents for Rn (pCi/L), U (ppm) and Th (ppm) contents in soil of Jurassic Seoul Granite (JS), Kwanaksan granite (JK) and Precambrian Metasedimentary rock (PM).

Rock type	Rn (pCi/L)	U (ppm)	Th (ppm)
JS (n=54)	502±275	6.69±3.95	38.62±12.45
JK (n=16)	604±273	10.30±4.74	27.64±6.08
PM (n=28)	262±211	10.10±7.43	26.48±9.58

(n=sample number)

Table 6. Average contents for U and Th contents (in ppm) in the rocks from Jurassic Seoul granite (JS), Kwanaksan granite (JK) and Precambrian Metasedimentary rock (PM).

Rock type	U (ppm)	Th (ppm)
JS (n=43)	4.94±1.43	26.04±3.13
JK (n=10)	9.08±2.85	33.47±3.89
PM (n=18)	9.40±10.11	17.39±5.68

(n=sample number)

평균 U과 Th함량은 각각 6.69±3.95 ppm 및 38.62±12.45 ppm이다 (Table 5). 관악산화강암 지역의 토양 평균 U과 Th함량은 각각 10.30±4.74 ppm 및 27.64±6.08 ppm이다. 변성퇴적암분포 지역의 토양 평균 U과 Th함량은 각각 10.10±7.43 ppm 및 26.48±9.58 ppm이다 (Figs. 4, 5).

암석내 U 및 Th함량

연구지역 암석내 U과 Th함량은 지하철역 승강장 공기 및 토양라돈의 근원 (source)이다.

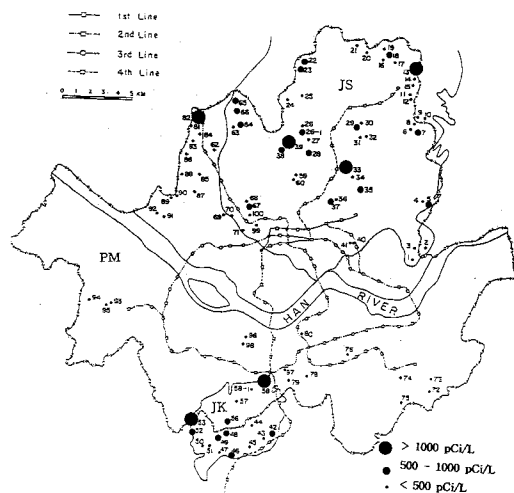


Fig. 3. Dot map of Rn contents (pCi/L) in residual soil samples from the Seoul city.

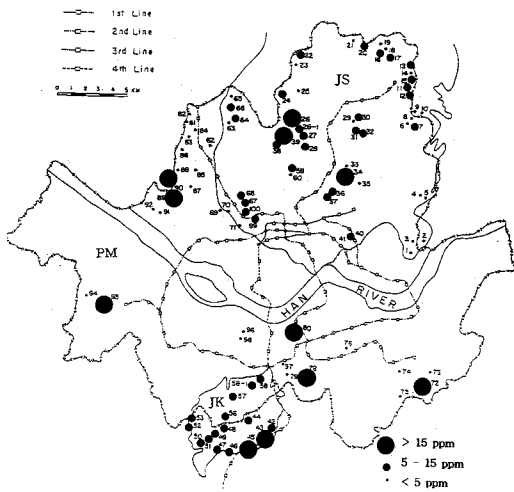


Fig. 4. Dot map of U contents (ppm) in residual soil samples from the Seoul city.

서울화강암의 평균 U과 Th함량은 각각 4.94±1.43 ppm 및 26.04±3.13 ppm이다 (Table 6). 관악산화강암의 평균 U과 Th함량은 각각 9.08±2.85 ppm 및 33.47±3.89 ppm이다. 변성퇴적암의 평균 U과 Th함량은 각각 9.40±10.11 ppm 및 17.39±5.68 ppm이다 (Figs. 6, 7).

토의 및 결론

1995년 10월부터 1996년 2월까지 실시한 서울시 지하철역 승강장의 평균 라돈함량은 3호선과 4호선이 각각 1.41±0.95 pCi/L와 1.50±0.62 pCi/L로서 1호선과 2호선의 0.84±0.13 pCi/L과 0.80±0.25 pCi/L 보다 높다.

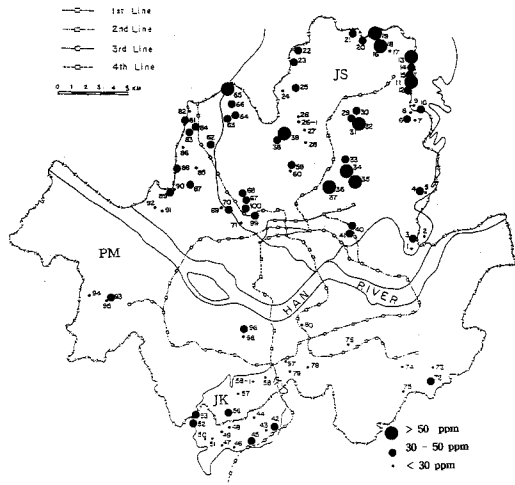


Fig. 5. Dot map of Th contents (ppm) in residual soil samples from the Seoul city.

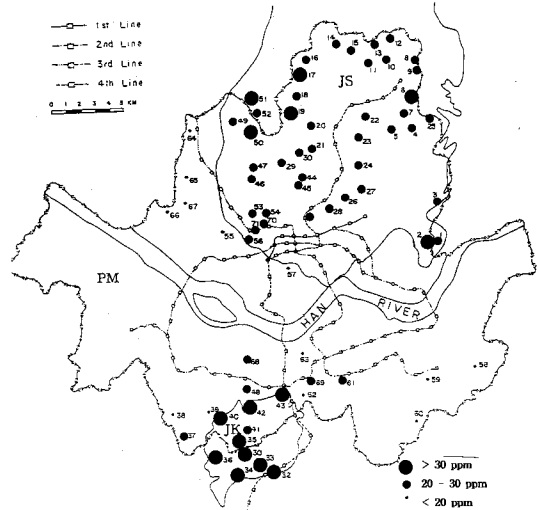


Fig. 7. Dot map of Th contents (ppm) in basement rocks from the Seoul city.

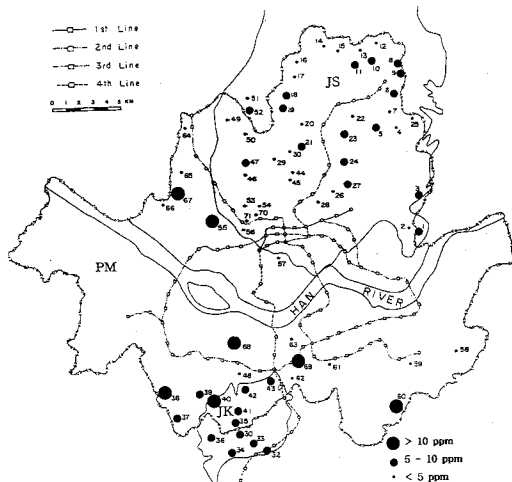


Fig. 6. Dot map of U contents (ppm) in basement rocks from the Seoul city.

1호선 지하철역이 대부분 서울화강암분포지역을 통과하며, 2호선과 3호선은 서울화강암과 변성퇴적암지역을 통과한다. 4호선의 경우는 서울화강암, 변성퇴적암 및 관악산화강암지역을 통과한다 (Fig. 1과 Tables 1~4). 서울 지하철역 승강장의 분포와 주변지질을 분류하여 평균라돈함량을 살펴보면, 관악산 화강암지역 승강장이 2.04 ± 0.64 pCi/L으로 제일 높게 나타나고, 그 다음이 서울화강암지역에서 1.57 ± 0.81 pCi/L 그리고 변성퇴적암지역이 0.80 ± 0.23 pCi/L으로 가장 낮은 함량을 보인다.

관악산 화강암지역 토양라돈 함량이 604 ± 273 pCi/L으로 제일 높게 나타나고, 그 다음이 서울화강암지역에서 502 ± 275 pCi/L 그리고 변성퇴적암지역이 262 ± 211

pCi/L으로 가장 낮은 함량을 보이며 이는 지하철역 승강장의 라돈함량과 정비례 관계를 보인다.

지하철역 승강장과 토양라돈함량은 라돈의 근원 (source)인 그 지역의 암석과 토양 U함량과는 직접적인 관계가 없음을 나타냈다. 즉, 관악산 화강암 및 토양의 U함량은 각각 9.08 ± 2.85 ppm과 10.30 ± 4.74 ppm으로 제일 높고, 변성퇴적암과 토양에서 9.40 ± 10.11 ppm과 10.10 ± 7.43 ppm이며, 서울화강암과 토양은 4.94 ± 1.43 ppm과 6.69 ± 3.95 ppm으로 가장 낮은 함량을 보인다.

4호선 지하철이 지나가는 관악산화강암지역에서는 암석 및 토양의 U함량과 지하철역 승강장과 토양내 라돈함량이 높게 나타난다. 그러나, 서울화강암지역은 연구지역 중에서 암석과 토양내 U함량이 가장 낮음에도 불구하고 다소 높은 토양라돈과 지하철 승강장 공기 라돈함량을 보인다. 또한 변성퇴적암과 토양에서는 높은 U함량을 보이지만 지하철 승강장 라돈과 토양라돈값은 낮게 나타낸다.

토양내 라돈함량은 지하철역 승강장 같은 실내 지하공간의 공기내 라돈 함량과 매우 밀접한 관계가 있음이 밝혀졌다. 그러나 암석과 토양내 U함량과 토양과 지하철역 승강장 공기내 라돈함량이 정비례관계를 가지지 않는 이유는 다음과 같다. 즉, 어떤 조사지점의 토양이나 지하실내공기내 라돈함량은 궁극적으로는 그 주변지역의 암석과 토양의 U원소의 붕괴산물에서 유래되었지만, 라돈함량과 관련된 더욱 중요한 요소들은 라돈가스가 압력이 낮은 지표로 이동할 수 있는 그지역의 단층, 파쇄대와 균열 등의 지질구조, 그리고 토양의 공극율과 수분함량등이라고 판단된다.

서울지역 변성퇴적암의 U함량은 높은데 지하철역 승강장 공기와 토양내 라돈함량이 낮은 이유는 화강암의 풍화 토양 보다는 공극율이 낮아서, 라돈가스의 이동이 용이하지않기 때문으로 해석 된다.

따라서 유해 라돈가스에 대한 피해를 막기 위하여, 특히 주거지 건축시 지하로 부터의 라돈유입을 차단하기 위한 불투수층 시공과 건축후에는 철저한 통기가 필요하다. 또한 대도시지역 라돈함량조사를 위한 주기적인 조사연구가 요구된다.

사 사

본 연구를 수행함에 있어서 야외시료채취 및 측정에 많은 협조를 아끼지 않으신 박경택씨께 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 김윤신, 신용배, 김신도, 김동술, 전준민 (1994) 서울시 일부 지하철역내 대기오염물질에 대한 조사연구. 한국환경위생학회지, 20권, p. 19-27.
- 박희인, 이준동, 정지곤 (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.
- 홍영국 (1997) 대전시 지역 라돈 환경지화학연구. 자원환경지질, 30권, p. 51-60.
- 홍영국, 손석화(1998) 대전지역 지하실내공간 라돈환경지구 화학 연구. 미발표자료.
- Ball, K. (1993) Radon. British Geological Survey, 20pp.
- Brooks, J.R. (1988) Radon and your home: Maryland Dept. of Nat. Resour., Geological Survey, 4p.
- EPA (1986) A Citizen's guide to Radon. USEPA, OPA-86-004, 13pp.
- EPA (1991) Radionuclides in drinking water-National primary drinking water regulations; radionuclides, proposed rule: Federal Register, v. 56. No. 138.
- EPA (1992) A Citizen's To Protecting Yourself and Your family from Radon. 15pp.
- EPA (1994) National Primary Drinking Water Standards: EPA 810-F-94-001A, 4p.
- Gates, A.E. and Gundersen, L.C.S. (1992) Geologic Controls on Radon. Special Paper Geological Society of America. No. 271.
- 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.
- Hem, J.D. (1985) Study and interpretation of chemical characteristics of natural water, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263p.
- Hong, Y.K. (1984) Petrology and Geochemistry of Jurassic Seoul and Anyang Granites, Korea, Jour. of Geol. Soc. Korea, v. 20, p. 51-71.
- 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.
- Hurlburt, S. (1989) Radon-A real killer or just an unsolved mystery?: Water Well Journal, v. 43, p. 34-41.
- 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) Sampling techniques for soil-gas and water sampling for radon analysis, U.S. Geological Survey, p. 19-22.
- Reimer, G.M. and 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.
- Robillard, P.D., Martin, K.S., and Sharpe, W.E. (1991) Reducing radon in drinking water: Pennsylvania State Univ., Agricultural and Biological Engineering Fact Sheet, SW-135, 4p.
- 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.