

대전지역 토양에서 유해 방사성가스인 라돈 농집에 대한 연구

김 승 오 · 김 해 경*

초당대학교 환경공학과 · 광주교육대학교 과학교육과
(1996년 11월 18일 접수)

A Study on Harmful Radioactive Gas(Rn^{222})-Concentration in Soils, Taejeon City

Seung-Oh Kim and Hai-Gyoung Kim*

Dept. of Environmental Engineering, Chodang University

**Dept. of Science Education, Kwangju National University of Education*

(Manuscript received 18 November 1996)

The aim of this study is to determine harmful radioactive gas(Rn^{222})-concentrations in soils and to suggest the anomalous regions of Rn^{222} -concentration in Taejeon area. The range of Rn^{222} -concentration in the soils (45 samples) of the survey area is 100 to 2,475 (pCi/L) and mean $\pm\sigma$ of those values is 489 ± 505 (pCi/L).

The 2% (4 samples) of soil-gas samples (45 ones) collected in the survey area is corresponded to high risk level, 53% (24 samples) to medium one and 43% (19 samples) to low one. Especially, The Rn^{222} -concentration is relatively higher in schistose granite region than in other rock units (two-mica granite and biotite granite) in the survey area.

The Rn^{222} -concentration is propotional to the uranium contents in the soils. The soil hardness among the various factors is correlative with Rn^{222} -concentrations. To prevent the damage from Rn^{222} -concentrations, it is necessary to close the cracks of underground structure and to consider methods reducing Rn^{222} -concentration for the anomalous regions.

Key words : Rn^{222} -concentration, pCi/L, risk level

1. 서 론

라돈은 최근까지도 온천등지에서 건강에 매우 좋은 원소로 알려져 왔으나 사실은 라돈이 기준치이상 과농집된 공기를 호흡하거나, 물을 마시는 경우에 폐로 흡입된 라돈은 체내에서 붕괴됨으로 치명적인 폐암을 유발시킨다는 것이 밝혀졌다 (Harley, 1984; Nero & Loweder, 1987; Hornung & Meinhardt, 1987). 또한 라돈은 무색, 무취, 무미한 자연발생적 원소라

는 특성때문에 자신도 모르는 사이에 노출되기 쉽고 기준치 이하일지라도 장기적 노출시 건강을 해칠 확률은 매우 높다. 이 같은 라돈의 유해성 때문에 선진국에서는 이미 라돈농집의 환경기준치를 제시하고 있다. EPA(1986)에 의하면 공기중에서 허용될 수 있는 라돈농집량은 4pCi/L이며, 음용지하수에서는 10,000pCi/L이다. 그리고 토양내에 허용될수 있는 라돈함량은 1,350pCi/L이다 (Akerblom, 1986).

영국, 스웨덴, 그리고 미국등의 선진국에서는 라돈에 대한 환경지화학적 연구가 활발하게 이루어져 주거지역의 토양, 지하구조물과 실내가옥의 공기 그리고 음용지하수등에서 라돈의 농집도를 조사하여 그 자연적 농집상태를 기술하고, 과농집방지책을 제시하고 있다 (EPA, 1986; Ball, 1993; Otton, 1992; Reimer & Gundersen, 1989).

한편 우리 나라에서도 서울 지하철 구내 공기시료중 일부가 라돈의 허용기준치인 4pCi/L 보다 4배 정도 과농집 되었다는 연구 (김윤신 외, 1993) 가 있었지만, 보다 근본적인 라돈의 기원인 지질환경, 즉 토양과 지하수등에 대한 라돈의 농집정도는 전혀 연구되어 있지 않아 이들에 대한 기초자료 확보가 시급한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 인구 밀집지역이면서 비교적 우라늄함량이 높은 화강암을 기반암으로 하는 대전지역을 선정하여 1994년 7월과 8월에 걸쳐 시료를 채취하였다. 또한, 토양내 우라늄의 함량과 라돈농집량을 측정하여 라돈 가스의 근원 그리고 기준치 이상의 과농집지역의 분석등, 라돈농집에 대한 기초 조사를 하는데 그 목적을 두었다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역 지질

본 지역은 북위 36° 14' 53" ~ 36° 26' 38", 동경 127° 16' 58" ~ 127° 30' 00"에 위치한다 (Fig. 1). 본 지역의 지질은 하부로부터 시대미상의 변성퇴적암류(향산리층)와 이를 관입한 쥬라기의 화성암류 그리고 이들을 부정합으로 덮는 제 4기의 충적층으로 이루어지며(박희인 외, 1977), 그 세부적인 지질계통표는 Table 1과 같다.

본 지역의 기반암인 쥬라기 화강암은 암상에 따라 크게 편상화강암, 흑운모화강암 그리고 복운모화강암으로 나눌 수 있다. 편상화강암은 유성도폭(박희인외, 1977)의 서남부와 동남부, 그리고 대전도폭(이상만외, 1980)의 북서부 관암산에서 북부와 북동부 대전시 판암동, 용운동일대에 분포된다. 본 암은 편상구조가 뚜렷하며 중립질암이다. 주로 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모로 구성되며, 저어콘, 인회석, 모나자이트를 수반한다. 본암에서 유래

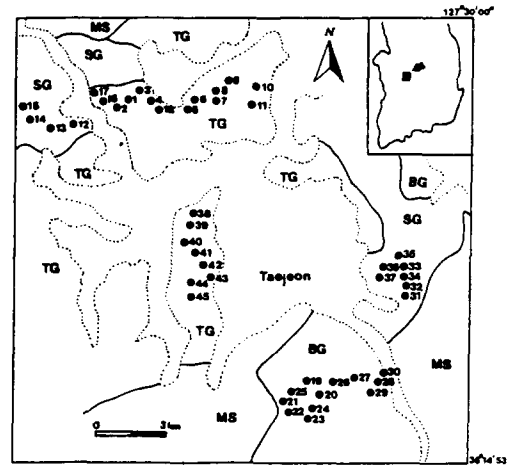


Fig. 1. Location map and sampling sites of the survey area.

TG: Two-mica Granite

BG: Biotite Granite

SG: Schistose Granite

MS: Meta-sedimentary rock

— : Boundary between other rock units

● : Sampling sites

Table 1. Geological sequence of the study area (Park et al., 1977)

Quaternary	Alluvium
	- Unconformity -
	Two-mica Granite
	- Gradation -
Jurassic	Biotite Granite
	- Intrusion -
	Schistose Granite
	- Intrusion -
Age-unknown	Hyangsanri Group
	(Meta-sedimentary rock)

된 토양은 야외관찰시 갈색을 띠는 세립 점토질 토양이다.

흑운모화강암은 대전시 남부의 보문산을 중심으로 하여 서측으로는 기성면 흑석리, 평촌리 일대, 두마면 농소리, 왕대리 일대에 분포되며, 동측의 추북면 마전리 일대에도 분포한다. 본 암에서 유래된 토양은 야외관찰시 황갈색을 띠며 손으로 비벼서 쉽게 부서지지 않는다.

복운모화강암은 유성구와 대전시의 전역에 걸쳐 가장 광범위하게 분포하며 연구지역의 기반암인 쥬라기 화강암의 약 70%를 차지한다. 본 암은 중립질 내지 세립질암이다. 구성 광물

은 주로 석영, 피사이트, 사장석, 미사장석 및 흑운모등이며, 저어콘, 루틸, 인회석등이 수반된다. 본 암에서 유래된 토양은 풍화된 석영 알갱이, 거정질의 백운모, 그리고 흑운모등이 잔류되어 있어 육안으로 쉽게 식별된다.

2.2 시료채취

쥬라기 화강암 분포지역에서 총 45개의 토양시료 및 토양가스시료를 채취하였으며, 암상별로는 북운모화강암 지역에서 22개, 흑운모화강암 지역에서 12개 그리고 편상화강암 지역에서 11개 이다.

토양시료는 물리적으로 교란 및 이동되지 않은 원위치 잔류토양을 선택하였으며, 부식층을 걷어낸 후 신선한 토양시료를 약 1kg씩 채취하여 비닐봉지에 밀봉하였다.

토양가스는 USGS (United State Geological Survey)에서 특수 제작된 강철침(외경: 6~9mm, 내경: 2~3mm)을 Split hammer로 타격하여 지표로부터 평균 75cm정도 박아 넣고, 진공주사기로 20cc의 가스시료를 포집한 다음 곧바로 광증폭튜브인 Scintillation cell에 주입하여 가스를 숙성시켰다(Fig. 2).

2.3 측정방법

토양시료의 우라늄 함량측정은 자연 건조된 토양시료를 200 # 이하 분말로 만든 후 한국자원연구소의 MCA (Multi Channel Analysis)로 분석하였다. 특히 방사성 원소의 함량이 낮은 경우 분석시간이 중요하다는 점을 감안하여 시료당 측정시간을 24시간으로 프로그램하여 정확한 분석치를 얻도록 하였다. 또한 측정 오차를 줄이기 위해 IAEA (The International Atomic Energy Agency)의 화강암 표준시료 9개 및 Blank test를 통해 배경값을 측정하고 다음 회귀방정식을 구하여 Compton's effect와 쌍전자 효과를 배제함으로써 시료분석치의 정확도를 높였다 (Rybach, 1988).

토양가스시료의 라돈 함량측정은 Scintillation cell에서 4시간 숙성된 가스시료를 standard cell에 의해 정확도가 확인된 RDA-200 (Portable Radon Detector)을 사용하여 측정하였다. 시료채취 후 4시간이 지난 다음 측정하는 이유는 Scintillation cell내의 라돈함량은 약 3시간 후에 최대값이 되며 4시간 정

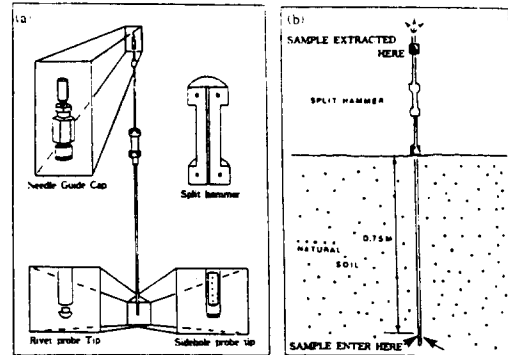


Fig. 2. Gas sampling instruments.

(a)Probe, split hammer and needle guide cap (b)Soil- gas collection at the field

도에서 딸핵종과 방사평형을 이루기 때문이다 (Reimer, 1994). 또한 측정시 주변의 빛에 의한 광전자의 영향을 피하고자 처음 1분간의 측정값은 버리고 5분간 3회를 연속 측정하여 그 평균값을 사용하였다. RDA-200에서 얻어진 카운트는 다시 cpm(counts per minute)단위로 환산하였다. 라돈함량의 계산은 Reimer (1994)의 방법을 따라 1 liter당 라돈함량(pCi/L)을 알고 있는 표준가스를 분석해서 얻은 실험상수 500을 곱하여 야외시료의 라돈 함량(pCi/L)을 계산하였다. 이런 실험상수는 동일한 측정장비와 Scintillation cell을 사용할 때 매우 유용하다. 토양가스중 라돈함량의 계산공식은 다음과 같다.

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

여기에서

pCi/L: 공기 1 리터에 1pCi(10^{-12} Ci)의 방사성 활동도

Ci : Ra^{226} 1g이 1초동안 방사할수 있는 활동도

BKG : Scintillation cell의 배경값(cpm)

상수3 : 4시간 숙성 후 Rn^{222} , Po^{218} , Po^{214} 의 total counts 에서 Rn^{222} 만의 값을 얻기 위한 상수

상수25: 시료 20cc에 대한 실험상수(20cc × 25 = 500)

3. 결과 및 고찰

3.1 토양내의 우라늄 함량

Table 2. The contents of Uranium and Radon in soils of the study area

Rock Type	Sample No.	U(ppm)	Rn ²²² (pCi/L)
SG	12	0.58	242
	13	1.61	911
	15	4.34	1,167
	36	3.15	2,475
Mean ± σ		2.42 ± 1.44	1,199 ± 811
BG	19	1.81	133
	23	2.52	225
	27	2.14	367
Mean ± σ		2.16 ± 0.29	242 ± 96
TG	1	1.51	550
	2	1.69	425
	5	1.90	125
	10	2.07	100
	16	4.66	1,283
	43	2.38	1,017
Mean ± σ		2.37 ± 1.06	583 ± 437
Total Range		0.58 ~ 4.34	100 ~ 2,475
Total Mean ± σ		2.34 ± 1.09	694 ± 651

라돈(Rn²²²)은 우라늄(U²³⁸)의 붕괴산물인 라듐(Ra²²⁶)의 딸핵종으로 지질환경의 어디에서나 자연발생되어 농집될 수 있는 유해방사성 가스이다.

조사지역의 기반암인 주라기화강암에서 유래된 토양시료 45개중 총 13개 시료에 대해 우라늄(U²³⁸)함량을 측정하였다. 암상별로는 편상화강암 지역에서 4개, 흑운모화강암 지역에서 3개 그리고 가장 분포면적이 넓은 복운모화강암 지역에서 6개의 시료를 분석하였다(Table 2). 시료의 분석결과 대전 화강암지역의 우라늄 함량(ppm)의 범위는 0.58~4.34이고, 평균함량(ppm)은 2.34 ± 1.09이다. 암상별 평균함량(ppm)은 편상화강암지역에서 2.42 ±

1.44, 흑운모화강암지역에서 2.16 ± 0.29 그리고 복운모화강암지역에서 2.37 ± 1.06이다. 라돈(Rn²²²)생성의 모체인 우라늄(U²³⁸)의 평균함량(ppm)은 편상화강암지역이 가장 높고, 복운모화강암지역, 그리고 흑운모화강암지역 순으로 낮아진다.

우라늄(U²³⁸)의 붕괴로 생성된 라돈(Rn²²²)은 토양내 농집 과정까지 많은 요인들이 작용할수 있지만 그중 가장 중요한 요인은 근원암의 우라늄(U²³⁸)함량과 근원암에서 유래된 토양의 우라늄(U²³⁸)함량이다. 연구지역 토양의 우라늄 함량과 야외에서 채취된 시료의 라돈의 함량(pCi/L)을 비교한 결과 대체적으로 비례 관계를 보여줌으로 (Fig. 3) 본 연구지역의 라돈농집이 주로 토양내 우라늄 함량의 영향을 받았음을 알수 있다.

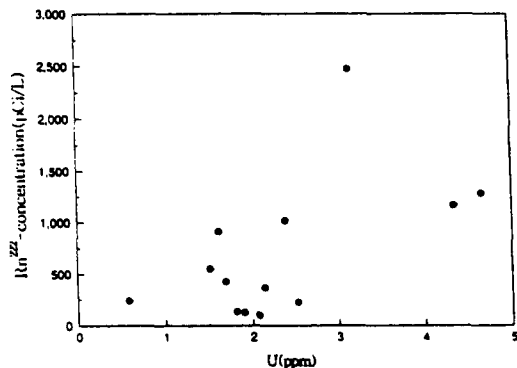


Fig. 3. Relation between U²³⁸ and Rn²²²-concentration in soils.

3.2 토양내 라돈농집과 토양 및 기후조건

토양에서 라돈의 이동 방법과 속도는 토양의 습도, 공극율, 투수율등과 같은 토양의 물리적 성질과 그밖의 기상학적 조건에 의해 조절된다. 본 연구에서는 토양가스채취와 동시에 토양경도, pH, 시료 채취 깊이등의 물리적 조건과 기압, 기온, 풍속, 습도등의 기상학적 조건을 측정하고 이들의 상호관계를 해석하고자 요인분석을 실시하였다(Table 3).

토양내 라돈농집을 조사한 결과 대전지역 화

대전지역 토양에서 유해 방사성가스인 라돈 농집에 대한 연구

Table 3. Rn²²²-concentration in soil and other factors of the survey area (- : Not measured)

Rock Type	Sample No.	Temp. (°C)	Depth (cm)	Humidity (%)	Atm. (hPa)	Soil (pH)	Soil Hardness (mm)	Wind Speed (m/s)	Rn ²²² (pCi/L)
SG	12	33	70	70	992	6.5	20	0.0	242
	13	31	75	80	992	6.9	23	0.1	911
	14	34	74	48	990	6.8	23	0.2	2,342
	15	34	70	54	989	6.8	23	0.1	1,167
	31	25	75	-	1,004	6.8	14	0.7	142
	32	24	73	-	1,004	7.0	19	1.1	408
	33	25	75	-	999	7.0	11	3.2	133
	34	27	75	-	1,000	7.0	11	4.2	217
	35	26	75	-	1,001	7.0	15	1.5	450
	36	24	70	-	1,000	6.8	21	0.7	2,475
	37	23	70	-	1,002	6.6	12	0.1	342
Range of Rn									133~2,475
Mean of Rn									803±817
BG	19	35	75	48	978	7.0	19	0.3	133
	20	33	75	53	983	6.9	12	0.2	208
	21	34	75	50	982	6.8	21	1.5	183
	22	34	72	50	992	7.0	14	2.5	108
	23	35	75	51	990	6.9	12	0.5	225
	24	34	75	55	992	7.0	15	0.1	292
	25	33	70	58	990	7.0	24	0.1	108
	26	32	75	59	982	6.9	23	0.5	142
	27	31	75	61	989	7.0	14	0.1	367
	28	29	75	70	990	6.6	18	0.1	517
	29	28	70	72	992	7.0	26	0.1	167
30	28	65	77	993	7.0	15	0.0	242	
Range of Rn									108~517
Mean of Rn									224±115
TG	1	34	72	65	1,000	6.6	-	0.5	550
	2	33	70	67	997	6.8	20	0.1	425
	3	33	70	63	999	6.9	16	1.0	350
	4	32	70	66	1,000	6.8	11	0.5	458
	5	33	75	67	1,000	7.0	11	0.1	125
	6	33	75	67	993	7.0	10	0.1	342
	7	34	75	64	998	6.9	16	0	267
	8	35	70	61	995	6.8	20	0.5	308
	9	36	70	59	997	7.0	25	0.1	775
	10	36	70	58	996	6.8	16	0.1	100
	11	35	75	65	995	6.9	19	0.1	133
	16	35	70	43	990	7.0	22	0.1	1,283
	17	38	75	47	994	6.6	18	0.1	583
	18	39	75	39	993	6.6	19	0.5	1,017
	38	22	75	-	1,012	6.8	20	0.1	392
	39	23	73	-	1,012	6.8	20	0.2	208
	40	24	75	-	1,011	6.9	22	0.1	400
	41	24	74	-	1,009	6.9	17	0.2	250
	42	22	70	-	1,010	6.9	16	0.0	592
43	23	70	-	1,014	6.9	21	0.1	1,017	
44	23	75	-	1,014	7.0	15	0.0	625	
45	21	75	-	1,012	7.0	16	0.0	300	
Range of Rn									100~1,283
Mean of Rn									477±304

Table 4. The correlation of Rn²²²-concentration in soil and other factors

	Atm. (hPa)	Depth (cm)	Soil Hardness	Humidity (%)	Soil pH	Rn ²²² (pCi/L)	Tem. (°C)	Wind (m/s)
Atm.	1.0000							
Depth	-.3409*	1.0000						
Hardness	-.2349	-.2250	1.0000					
Humidity	.3795*	-.2849	-.0521	1.0000				
pH	-.0514	-.0743	-.1277	.0992	1.0000			
Rn ²²²	.0136	.0044	.3749*	-.3188*	-.1941	1.0000		
Tem.	.0614	.2640	.0083	-.7464**	-.2456	.2002	1.0000	
Wind	-.1391	.0452	-.1405	-.3222*	.0956	-.1764	.1310	1.0000

* - Signif. LE .05 ** - Signif. LE .01

강암 분포지의 토양중 라돈농집은 100~2,475(pCi/L)이며, 평균농집은 489±505(pCi/L)이다. 이를 암상별로 살펴 보면 편상화강암에서 라돈의 농집범위는 133~2,475(pCi/L)이고, 평균농집은 803±817(pCi/L)이며, 복운모화강암에서 라돈의 농집범위는 100~1,283(pCi/L)이고, 평균농집은 477±304(pCi/L)이다. 그리고 흑운모화강암에서 라돈의 농집범위는 108~517(pCi/L)이고, 평균농집은 224±115(pCi/L)이다.

암상별 라돈의 평균농집량(pCi/L)과 토양의 우라늄 평균 함량(ppm)을 비교하면 둘다 편상화강암 지역에서 가장 함량이 높고, 복운모화강암지역, 그리고 흑운모화강암 지역 순으로 감소되어진다. 또한 토양내 라돈농집의 최대 위험기준치인 1,350pCi/L를 넘는 시료는 편상화강암 지역에서만 나타난다 (Fig. 4).

토양의 라돈 농집량과 라돈농집량에 영향을 줄 수 있는 토양 및 기후조건등의 측정치에 대한 요인 상관관계는 Table 4와 같다.

토양중 라돈농집은 지질, 토양, 기후, 그리고 기상학적 상호작용에 의해 조절되지만 그 중 지질이 가장 강한 상관관계를 가지며, 지질학적 단위가 같은 곳에서는 광물학, 화학, 구조 그리고 토양의 수분함량에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Sigrid et al., 1991). 본 조사지역에서 라돈의 농집량과 함께 측정된 요인들 중 가장 상관관계가 높은 것은 토양경도(+0.3749)와 대기습도(-0.3188)이며, 나머지 요인들은 상관관계가 뚜렷하지 않다. Fig. 5는 라돈농집량(pCi/L)과 가장 상관관계가 높은 토양경도와 대기습도간의 관계를 도시한 것이다. 연구지역에서 라돈농집량과 토양경도는 정(+)의 상관관계를 가지나 이를 암상별 평균값으로 비교하면 라돈농집량은 편상화강

암, 복운모화강암, 그리고 흑운모화강암순으로 감소하지만, 토양경도는 역으로 편상화강암 (17.46±4.72), 복운모화강암(17.62±3.76), 그리고 흑운모화강암(17.75±4.62)순으로 증가하는 경향을 보이는 것으로 보아 토양경도는 라돈농집량과 부(-)의 상관관계를 가져야 할 것으로 생각될수 있다. 이러한 상반성은 토양의 특성상 상대적으로 토양조직이 약한 곳은 라돈가스가 이동하기 쉽기 때문에 일반적으로 라돈농집량이 높게 나타날 수 있으며, 상대적으로 토양조직이 단단한 곳에서는 하부에서 올라온 라돈가스가 지표근처에서 농집되어 있었을 것으로 사료된다.

연구 지역의 토양중 라돈농집량은 최대 위험 기준치인 1,350(pCi/L)을 기준으로 고위험준위 (>1,350pCi/L), 중위험준위(270~1,350pCi/L), 그리고 저위험준위(< 270pCi/L)의 3등급으로 나눌 수 있다 (Akerblom, 1986).

암상별로는 편상화강암 지역에서는 고위험준위가 2개 지점이며, 중위험준위가 5개 지점, 저위험준위가 4개 지점으로 나타난다. 흑운모화강암 지역에서는 3개 지점이 중위험준위를 보이고, 나머지 9개 지점은 저위험준위로 나타났다. 그리고 복운모화강암 지역에서는 조사시료의 대부분인 16개 지점이 중위험준위를 보이며, 나머지 6개지점은 저위험준위를 보인다. 결과적으로, 본 조사지역의 총 45개의 시료중 약 4%가 고위험준위 시료이고, 53%가 중위험준위 시료이며 그리고 43%가 저위험준위 시료로 밝혀졌다. 라돈의 유해성은 저위험준위 지역일 지라도 지질구조 또는 지하구조물의 특성에 따라 비정상적으로 과농집되는 경우가 빈번하므로 지속적인 감시 관찰이 필요하다는 것이다. 특히 본 연구지역 중 편상화강암지역은 라돈 평균농집량 값(pCi/L)이 매우 높고 변화폭 또

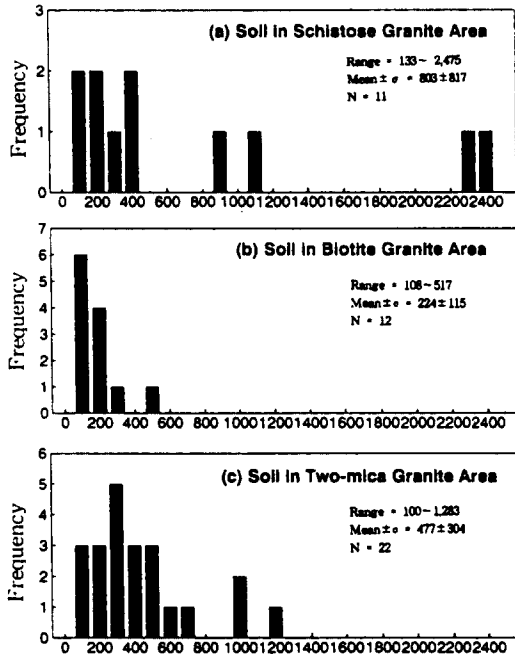


Fig. 4. Histogram of Rn^{222} -concentration in soils.
 (a) Schistose granite area (b) Biotite granite area (c) Two-Mica granite area

한 넓게 나타나서 주거민들의 각별한 주의가 필요하며, 라돈농집 방지를 위해 지하구조물등의 환기 장치를 갖추어야 할 것으로 생각된다. 편상화강암지역에서 상대적으로 라돈이 과농집된 것은 본 암의 편리 및 2차 선구조적 특성과 관계될 것으로 생각되나, 정확한 원인규명을 위해서는 보다 정밀한 지질조사가 필요하겠다.

1) 본 조사지역에서 조사된 토양내의 라돈가스의 농집범위는 $100 \sim 2,475 pCi/L$ 이며, 평균 농집량은 $489 \pm 505 pCi/L$ 으로 총 45개의 시료중 약 4%가 고위험준위, 53%가 중위험준위 그리고 43%가 저위험준위를 보여준다. 특히 편상화강암지역의 토양시료에서 라돈 농집량이 높게 나타난다.

2) 토양의 우라늄 함량과 라돈의 농집량은 대체로 비례한다.

3) 토양에서 라돈 농집과 관련될 수 있는 토양 및 기후조건등의 여러요인중에 토양경도가 $+0.3749$ 그리고 대기습도가 -0.3188 의 상관

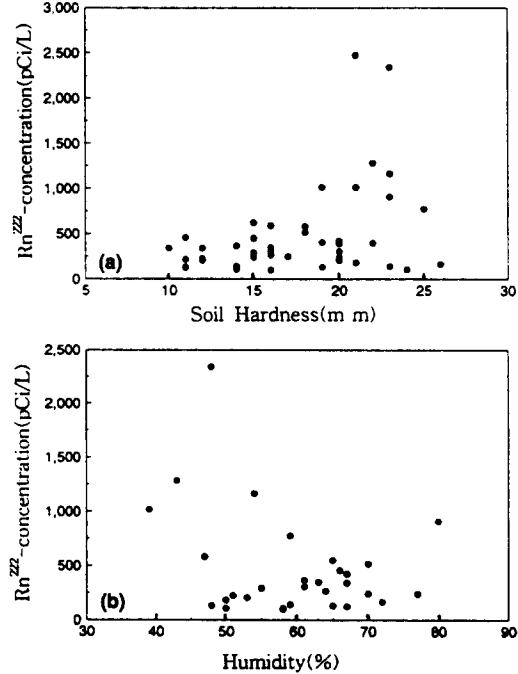


Fig. 5. Relation between Rn^{222} -concentration in soil and other factors.
 (a) Rn^{222} -concentration and soil hardness (b) Rn^{222} -concentration and humidity

계수를 보이며 나머지 요인들은 상관관계가 뚜렷하지 않다.

4) 라돈의 과농집이 밝혀진 토양지역에서는 라돈이 침투될 수 있는 건축물의 지하구조를 밀폐시키고, 장기적인 모니터링을 통해 라돈의 농집량을 점검하는 한편 위험기준치 이상 과농집시 환기대책을 세워야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 김윤신, 신용배, 김신도, 김동술, 전준민, 1993, 서울시 일부 지하철역내 대기오염 물질에 대한 조사연구, 한국환경위생학회지, 20 (1), 19~27.
 박희인, 이준동, 정지곤, 1977, 유성도폭(1:50, 000), 국립지질조사소.
 이상만, 김형식, 나기창, 1980, 대전도폭(1:50, 000), 국립지질조사소.
 Akerblom, G., 1986, Investigation and

- mapping of radon risk area : Lulea, Sweden, Swedish Geological Company Reports IRAP 86036, 15pp.
- Ball, K., 1993, Dangers and benefits of a radioactive gas, British Geological Survey, 20pp.
- Harley, N.H., 1984, Radon and lung cancer in mines and homes, N. Eng. J. Med. 310, 1525~1527.
- Hornung, R.W. and Meinhardt, T.J., 1987, Quantitative risk assessment of lungcancer in U.S. uranium miners. Health Phys. 52, 417~430.
- Nero, A.V. and Lowder, W.M., 1987, Special issue on indoor radon. Health Phys. 45, 273~570.
- Otton, J.K., 1992, The geology of radon, U.S. Geological Survey Open-File Reports, 28pp.
- Reimer, G.M. and Gundersen L.C.S., 1989, A direct correlation among indoor Rn, soil gas Rn and geology in the Reading Prong near Boyertown, Pennsylvania. Health Physics, 57, 155~160.
- Reimer, G.M. and Gundersen L.C.S., 1991, Sampling techniques for soil-gas and water sampling for radon analysis: U. S. Geological survey, 19~22.
- Reimer, G.M. and Gundersen L.C.S., 1994, Telefax(about the calculation method of Radon concentration), U.S.G.S. Geochem Core, 1~2.
- Rybach, 1988, Determination of heat production rate; Handbook of terrestrial heat-flow density determination, Haenel, Rybach & Stegena, 125~142.
- Sigrud A.B., Owen, D.E., and Schumann, R.R., 1991, A preliminary evaluation of environmental factors influencing day to day and seasonal soil-gas radon concentrations: U.S. Geological survey, 23~31.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1986, A Citizen's Guide to Radon, OPA-86-004, 13pp.