

## 서울지역 지하철역의 라돈농도 분포 특성

전재식<sup>†</sup> · 김덕찬\*

서울시보건환경연구원 · \*서울시립대학교 화학공학과

(2006년 4월 3일 접수, 2006년 5월 31일 채택)

### Distribution of <sup>222</sup>Rn Concentration in Seoul Subway Stations

Jae-Sik Jeon<sup>†</sup> · Dok-Chan Kim\*

Seoul Metropolitan Research Institute of Public Health and Environment

\*Department of Chemical Engineering, University of Seoul

**ABSTRACT** : Indoor radon(<sup>222</sup>Rn) concentrations of subway stations in Seoul area were measured to survey the environmental indoor radon levels and to identify sources of radon. The radon concentration of indoor air by method of long-term measuring with  $\alpha$ -track detector were surveyed at 232 subway stations from 1998 to 2004. And the radon concentration in ground-water was measured with a method of alpha particle counting. To trace main source of radon, 8 out of 232 stations were selected and their radon concentrations in tunnel and on platform were analyzed. Total geometric mean and arithmetic mean of radon concentrations in all stations from 1998 to 2004 were 1.40±1.94 pCi/L, 1.65±1.07 respectively. Geometric means of radon concentrations on platform and concourse were 1.54±1.96 pCi/L, 1.23±1.88 pCi/L respectively, with higher concentration at the platform than at the concourse. The geological structure was significantly correlated to the indoor radon concentration in subway stations region. Radon concentrations of adjacent tunnel and ground-water of subway station was significantly correlated to the indoor radon concentration in subway stations. And There was a significant difference in radon concentration, depending on the depth levels in platform of subway stations(p < 0.05).

**Key Words** : Radon(<sup>222</sup>Rn), Subway Stations, Radon Map, Geological Structure, Tunnel

**요약** : 본 연구는 서울지역 지하철역 실내 공기 중 라돈분포를 조사하여 그 발생원을 추적·확인하기 위하여 수행되었다. 1998년부터 2004년까지 232개 역사를 대상으로 알파비검출기를 사용하여 실내 공기 중 장기라돈을 측정하였으며 지하수중 라돈농도는 알파입자계수법에 의하여 측정하였다. 라돈의 주 발생원을 추적하기 위하여 8개 역사를 선정하여 각 역사의 승강장과 인접터널에 대한 공기 중 라돈농도를 조사하였다. 전체역사에 대한 라돈농도 분석결과 기하평균 및 산술평균은 각각 1.40±1.94 pCi/L, 1.65±1.07였으며, 승강장과 매표소의 기하평균은 각각 1.54±1.96 pCi/L, 1.23±1.88 pCi/L로 승강장에서의 라돈농도가 매표소의 농도보다 더 높게 나타났다. 지질구조와 지하역사의 라돈분포는 밀접한 상관성을 보였으며 터널내부와 지하수중의 라돈농도는 역사 승강장의 라돈농도에 크게 영향을 미치고 있었다. 또한 역사의 승강장이 위치하고 있는 깊이 정도에 따라 라돈농도의 차이를 보였다(p < 0.05).

**주제어** : 라돈, 지하철역사, 라돈지도, 지질구조, 터널

## 1. 서론

산업화된 도시에서 사람들은 하루 24시간 중 80~90% 이상을 실내에서 생활하고 있으며, 효율적인 에너지 사용을 위한 건축물의 밀폐화로 실내공간에 분포되어 있는 환경오염 물질은 매우 중요한 문제가 아닐 수 없다.<sup>1,2)</sup> 최근 실내공간에서의 오염발생원 증가 및 환기부족 등으로 유해물질에 의한 실내공기오염이 증가되면서 실내환경에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 그 중 지하철역사는 대중교통 수단을 대표하는 시설로 공간적 밀폐성으로 실내공기질 문제가 끊임없이 대두되어 왔다. 서울지역을 운행하는 지하철은 1974년 개통

이후 일 평균 560만명 이상이 이용하여 37% 이상의 수송분담율을 나타내고 있으며, 지하역사수는 2006년 현재 총 201개 역사로 중요한 시민의 생활공간으로서 역사내 실내공기질은 시민 건강에 대단히 중요하다. 지하역사에서 발생하는 오염물질은 미세먼지, 라돈, 석면, 휘발성유기화합물질 등이 있으며, 이들의 대부분은 인위적으로 생성되지만, 라돈은 자연적으로 발생한다는 이유로 그동안 생활환경에서 소홀히 취급되어 왔다.

토양가스, 건축자재, 천연가스 및 지하수 등에서 주로 발생<sup>3,4)</sup>하는 라돈은 자연계에 널리 존재하는 자연방사능이며 공기보다 매우 무거운 비활성 기체로 <sup>222</sup>Rn, <sup>220</sup>Rn, <sup>219</sup>Rn의 3개의 동위원소가 존재한다. 이들은 각각 <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>235</sup>U로 시작하는 자연방사능 붕괴산물로 <sup>206</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb 형태로 서 연쇄적인 붕괴가 종결된다. 특히 <sup>222</sup>Rn는 붕괴과정 동안 생성되는 <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Bi, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Po와 같은 입자상의 방사성

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: jeon1807@seoul.go.kr  
Tel: 02-570-3369

Fax: 02-570-3364

핵종으로부터 방출된 α-입자에 의해 폐암을 유발시키며, 흡연에 이어 두 번째로 폐암발병 기여도가 높은 원인물질로 알려져 있다.<sup>5-7)</sup> 국내의 경우 암에 의한 사망률은 1990년대 중반까지는 간암과 위암에 의한 사망률이 1, 2위를 차지하였으나 1994년 16.7%였던 폐암에 의한 사망률이 1999년 이후부터는 1위를 차지하여 2004년에는 20.6%로 나타났으며<sup>8)</sup> 이는 국외 선진국과 유사한 추이를 나타내고 있는 것이다.

라돈은 화학적 안정성으로 인해 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 함께 실내공간에서의 대기오염도 평가를 위한 추적자(tracer)로서,<sup>9)</sup> 또는 지각변동 징후의 전조물질로 유용하게 사용<sup>10,11)</sup>되어 왔다. 반면에 인체에 미치는 심각한 위해성에 따라 미국은 1988년에 실내라돈경감법(Indoor radon Abatement Act)을 제정하여 시행하고 있으며, 유럽의 선진국들도 1980년대 중반부터 라돈방사능을 환경적인 측면에서 실내환경에서의 위해성평가 및 저감대책에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 국내의 경우 주거지역에 대한 실내 라돈농도 연구는 최근에야 일부 연구자<sup>12,13)</sup>들에 의해 제한적으로 이루어지고 있는 실정이다. 특히 지하역사내 라돈에 대한 생활 환경적 관점에서의 평가 및 저감을 위한 연구<sup>14)</sup>는 매우 부족한 실정이다. 최근 제정된 실내공기질관리법<sup>15)</sup>에서 자연방사능 라돈에 대한 관리기준을 설정한 것은 공중 보건 차원의 매우 적절한 조치라 할 수 있다.

본 연구는 서울지역의 198개 지하역사(호선별 232역사)를 대상으로 1998년부터 2004년까지 조사한 라돈농도 분포를 파악하고 이에 영향을 미치는 요인별 특성을 평가하였다. 또한 승강장내 고농도 라돈분포를 나타내고 있는 일부 역사를 대상으로 라돈의 주 발생 원인을 추적, 분석 및 해석하여 라돈농도 저감방안을 제시하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 측정시기 및 대상

지하역사내 실내공기에 대한 장기라돈농도는 1998년부터 2004년까지 매년 5~9월 사이의 약 3개월 동안 연속적으로 시료를 채취하여 분석하였다. 측정대상 역사는 1호선의 경우 9개 역사, 2호선은 37개 역사, 3호선은 29개 역사, 4호선은 21개 역사, 5호선은 50개 역사, 6호선은 38개 역사, 7호선은 37개 역사, 마지막으로 8호선의 경우는 11개 역사이며, 1, 2기의 각 호선별로 총 232역사로 구분하여 라돈농도를 측정하였다. 시료채취 지점은 각 역사의 대합실과, 승강장 및 35지점의 환승통로로 구분하였다. 전체 측정지점은 총 2,839지점으로 연도별 지하역사내 라돈농도 측정지점 수는 Table 1과 같다.

최근까지 고농도의 라돈분포를 나타내고 있는 역사의 주 발생원을 추적하기 위하여 2006년 1월 18일부터 2월 22일까지 약 1개월간 역사내 터널내부 및 집수정내부의 실내 라돈농도를 지점별로 조사하였다. 각 역사에서의 승강장, 매표소 및 환승통로에 대하여도 동일기간 동안 라돈농도의 측정을 실시하였다. 대상터널은 고농도 라돈검출 역사인 충무로(3호선)

**Table 1.** Numbers of each sampling sites for long-term radon analysis during 1998~2004

Line	Annual Number of station	Year						
		1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
1	9	6	11	26	25	24	25	23
2	37	12	28	91	90	87	88	87
3	29	12	25	65	65	63	65	66
4	21	6	16	49	49	48	49	49
5	50	22	46	108	108	106	106	106
6	38	-	-	-	90	86	90	87
7	37	4	14	84	85	85	84	85
8	11	6	12	35	35	35	35	35
Sum	232	68	152	458	547	534	542	538

와 동대입구(3호선)승강장 연결터널, 충무로(4호선)와 동대문운동장(5호선)승강장 연결터널 및 노원(7호선)와 중계(7호선)승강장 연결터널과 상대적으로 저농도 라돈검출을 나타내고 있는 미아(4호선)와 미아삼거리(4호선)승강장 연결터널 등 4개 터널을 대상으로 선정하였다. 지하수층의 라돈농도 측정은 조사기간 동안 강수량이 매우 적어 2004년도에 고농도의 라돈분포를 나타낸 역사를 대상으로 2004년의 연평균 지하수 유입량과 측정된 지하수의 라돈농도 자료를 이용하였다.

### 2.2. 시료채취 및 분석

시료의 분석은 실내 공기질 공정시험방법<sup>16)</sup>에 따라 수행하였다. 역사내 실내공기 중 라돈농도 측정을 위하여 시간적 분형 라돈검출기를 사용하였으며 설치된 검출기는 Fig. 1에서 볼 수 있다. 각 지점별로 2개씩의 알파비적검출기(한국, Rn-Tech. Co.)를 설치하여 약 3개월간 시료 채취 후 회수하여 분석하였으며 분석결과와 평균값을 data로 사용하였다. 분석을 위하여 검출기에 부착된 film detector(C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>N<sub>2</sub>)를 표준 etching 지시약(10%-NaOH)으로 etching(60°C, 150 min)한 후 생성된 비적을 광학 현미경 및 CCD-Camera를 사용하여 약 200배로 확대하여 비적수를 계산하였다. 검출기는 사용 전에 교정을 통하여 환산인자를 결정하였으며 다음의 관계식에 의하여 라돈농도를 계산하였다. Fig. 2에는 현미경의 확대율에 따른 비적형태를 나타냈다.

$$C_{Rn} = K \times T/D$$

$C_{Rn}$  : 공기 중의 평균 라돈농도(pCi/L)

$K$  : 환산인자 [(pCi/L) · day/(T/cm<sup>2</sup>)]

$T$  : 생성 비적수(T/cm<sup>2</sup>)

$D$  : 누적시간(day)

또한 평균 라돈농도 4 pCi/L 이상인 역사에 대한 정밀조사를 위하여 조사 대상역사의 터널과 각 역사의 승강장, 매표소 및 환승통로에 약 1개월 동안 알파비적검출기를 지점별로

설치하고 회수 후 분석하였다. 지하역사내 지하수의 수중 라돈농도 측정은 RDU-200(CANADA, SCINTREX)을 이용하여 알파입자 섬광계수법으로 측정하였다.

**2.3. 요인별 평가방법**

지하역사내 라돈분포에 영향을 미치는 주요 인자를 평가하기 위하여 GIS(지리정보시스템)을 이용하였다. 역사내 라돈

농도와 기반암석과의 상관성을 파악하기 위하여 ArcView 3.3를 이용하여 수치지질도(Digital Geologic Map)에 UTM좌표를 나타냈으며, 이를 바탕으로 서울시 라돈분포 지도를 작성하였다. 서울 메트로와 도시철도공사에서 수집한 각 역사내 지하수 발생량 자료를 사용하여 지하수량이 라돈농도에 미치는 영향을 파악코자 하였다. 모든 통계분석은 SPSS(Ver. 12.0)를 이용하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 전체 지하철역의 라돈농도**

1998년부터 2004년까지 232개 역사를 대상으로 측정한 호선별 라돈농도의 기하평균은 Table 2와 같으며, Table 3에는 연도별 라돈농도의 산술평균과 기하평균을 요약, 비교하여 나타냈다. 전체 역사에 대한 라돈농도 분포범위는 ND~9.25 pCi/L였으며, 기하 평균농도 및 산술 평균농도는 각각 1.40±1.94 pCi/L, 1.65±1.07 pCi/L로 기하평균이 산술평균보다 낮게 나타났다. 이는 국내의 실내 주거공간에서의 평균 라돈농도 43.3±1.8 Bq/m<sup>3</sup>(약 1.17 pCi/L)<sup>13)</sup>와 비교할 때 다소 높은 결과이다.

전체 평균 라돈농도가 국내의 실내공기질 관리기준인 4 pCi/L 이상을 나타내고 있는 역사는 Table 4에 나타난 바와 같이 3호선의 충무로, 4호선의 남태령과 5호선의 종로3가, 동대문운동장, 을지로 4가, 광화문 및 서대문 그리고 6호선의 고려대 및 7호선 노원 등의 승강장 9개 지점이었으며, 이중 7호선 노원역은 Table 5에서 알 수 있듯이 매표소에서 4 pCi/L 이상을 나타내고 있어 라돈저감을 위한 특별한 관리대책이 요구되고 있다. 환승통로의 경우 5호선과 3호선을 연결하는 종로 3가역사의 환승통로에서 관리기준을

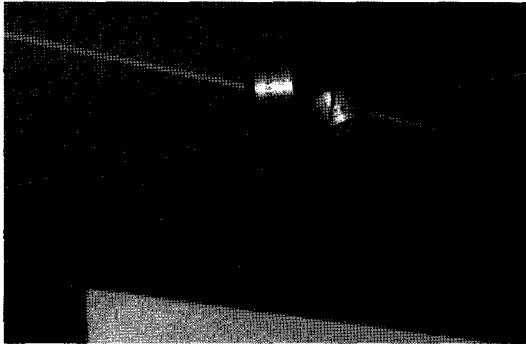


Fig. 1. Photograph of α-track detector setting.

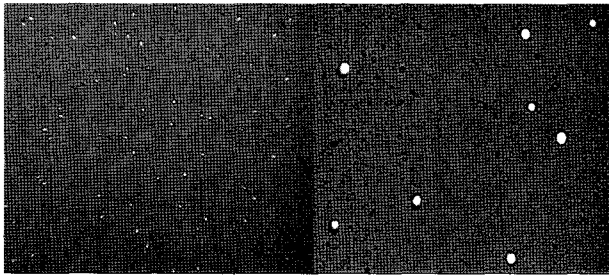


Fig. 2. Microphotograph of 200(left) and 800(right) magnifications by microscope.

**Table 2.** Geometric mean values of radon concentration in Seoul subway stations during 1998~2004

Line	Radon concentration(pCi/L)							Mean of line
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	
1	0.96±1.39	0.85±2.02	1.53±1.67	1.09±1.98	1.10±1.90	1.47±1.48	1.69±1.46	1.28±1.78
2	0.87±1.69	1.13±1.94	1.33±2.08	1.63±1.68	1.07±1.84	1.75±1.54	1.74±1.63	1.44±1.83
3	1.09±1.77	1.13±2.35	1.58±1.95	1.36±1.92	1.31±2.07	1.67±1.58	1.55±1.78	1.44±1.91
4	1.28±1.74	1.48±2.42	1.25±2.01	1.65±1.85	1.57±2.08	1.72±1.73	1.66±1.85	1.55±1.94
5	1.08±1.64	1.20±2.19	1.61±1.99	1.66±2.06	1.30±1.99	1.58±1.74	1.59±1.90	1.49±1.96
6	-	-	-	1.55±1.95	1.04±2.08	1.60±1.66	1.49±1.91	1.40±1.94
7	1.44±1.74	1.08±2.01	1.83±2.08	1.42±1.89	1.03±2.18	1.53±1.76	1.37±2.18	1.37±2.03
8	0.68±1.77	1.23±1.96	0.89±1.84	1.15±1.98	0.81±1.77	1.10±1.82	0.99±1.95	0.98±1.89
Annual mean	1.02±1.70	1.16±2.14	1.43±2.02	1.49±1.93	1.16±2.03	1.58±1.69	1.55±1.89	1.40±1.94

**Table 3.** Summary of mean radon concentrations in Seoul subway stations during 1998~2004

Type of mean	Radon concentration(pCi/L)						
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Annual AM	1.17±0.61	1.48±1.07	1.75±1.15	1.83±1.25	1.38±1.04	1.78±0.92	1.69±1.00
Annual GM	1.02±1.70	1.16±2.14	1.43±2.02	1.49±1.93	1.16±2.03	1.58±1.69	1.55±1.89

AM ; Arithmetic mean GM ; Geometric mean

초과하여 나타났다. 1호선 및 8호선은 1998년부터 2004년 까지 조사기간 동안 라돈농도가 4 pCi/L를 넘는 역사가 한 곳도 나타나지 않았다.

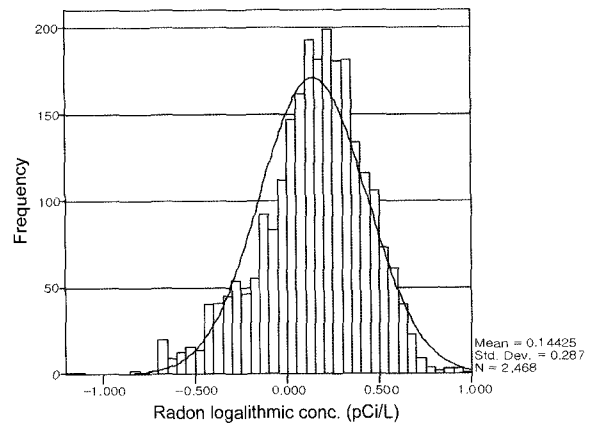
**Table 4.** Subway stations measured above 4 pCi/L, radon concentration at platform during 1998~2004

Line	Station	Mean	Max.	Min.	Frequency (above 4 pCi/L)
	Dongdaemun Stadium	3.19	4.61	1.76	2
	Ahyeon	2.51	4.26	1.64	1
2	Euljiro 4(sa)-ga	2.33	4.02	1.16	1
	Ewha Womans Univ.	2.16	4.28	1.25	1
	Jamsil	3.28	4.29	2.56	1
	Gyeongbokgung	3.31	4.02	1.85	1
	Anguk	3.12	4.02	2.37	1
3	Jongno 3(sam)-ga	3.23	4.78	2.08	1
	Chungmuro	4.51	4.76	3.85	4
	Seoul Nat'l Univ of Education	2.65	4.50	1.58	1
	Namtaeryeong	5.13	7.53	3.89	4
4	Samgakji	2.78	4.62	1.76	1
	Hoehyeon	2.54	4.05	1.67	1
	Chungmuro	3.34	4.52	1.86	3
	Gwanghwamun	4.68	8.50	3.16	3
	Gunja	3.01	4.14	1.26	1
	Dongdaemun Stadium	4.64	7.42	3.33	2
	Seodaemun	4.83	8.27	3.28	2
5	Euljiro 4(sa)-ga	4.55	5.33	3.92	4
	Jongno 3(sam)-ga	5.33	9.25	3.89	3
	Cheongju	3.26	4.14	1.86	2
	Chungjeongno	3.18	4.42	2.11	2
6	Korea Univ.	4.52	5.12	4.10	4
	Yeokchon	3.37	4.46	2.59	1
	Gongneung	3.70	4.60	2.53	2
	Nowon	4.20	6.65	1.89	3
7	Madeul	3.52	4.58	2.02	1
	Junggye	3.35	5.92	1.69	1
	Hagye	3.51	4.17	2.00	2

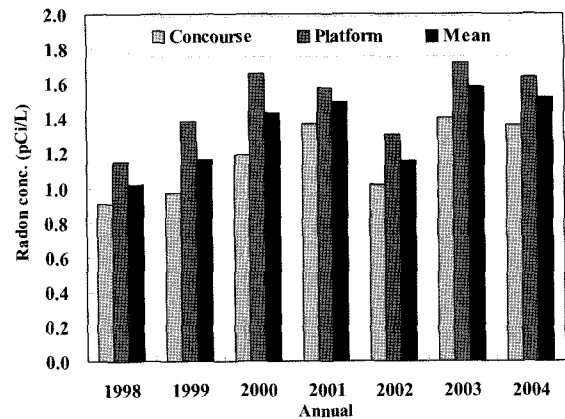
**Table 5.** Subway stations measured above 4 pCi/L, radon concentration at concourse during 1998~2004

Line	Station	Mean	Max.	Min.	Frequency (above 4 pCi/L)
4	Namtaeryeong	3.49	4.56	2.85	1
	Jongno 3(sam)-ga	2.96	4.56	1.71	1
5	Gwanghwamun	3.67	7.50	1.55	1
	Seodaemun	2.54	4.00	1.37	1
6	Yeokchon	3.25	4.99	1.60	1
	Nowon	4.33	5.91	2.88	2
7	Madeul	2.73	4.19	1.15	1
	Junggye	3.14	4.48	2.27	1

Fig. 3에는 전체 라돈농도 측정결과를 히스토그램으로 나타냈다. Fig. 3에서와 같이 라돈농도 분포는 대수정규분포에 근사하였다. Fig. 4에서와 같이 연도별 평균 라돈농도는 2002년도에 가장 낮게 나타났으며, 이는 2002년도 월드컵 행사로 인해 역사마다 충분한 환기 시스템 등의 가동 등 철저한 관리<sup>17)</sup>에 기인하였던 것으로 사료된다. 역사의 각 측정지점별 평균 라돈농도 분포는 Table 6에서 알 수 있듯이 환승통로, 승강장 및 매표소에서 각각  $1.62 \pm 1.88$  pCi/L,  $1.54 \pm 1.96$  pCi/L, 및  $1.23 \pm 1.88$  pCi/L를 보여 매표소보다 승강장 및 환승통로에서 높게 나타났다. 집단 간 분산 분석결과 환승통로와 승강장사이에는 유의성( $p > 0.05$ )이 없었고, 매표소와 승강장, 환승통로와는 유의성( $p < 0.05$ )이 있었다.



**Fig. 3.** Histogram of <sup>222</sup>Rn concentration in Seoul subway stations.



**Fig. 4.** Variation of radon concentrations at each site of subway stations by year.

**Table 6.** Distributions of indoor radon concentrations(pCi/L) according to each sites of subway stations

Site	Arithmetic Mean	Geometric Mean	Range	N
Platform	$1.83 \pm 1.18$	$1.54 \pm 1.96$	ND~9.25	1,324
Concourse	$1.43 \pm 0.90$	$1.23 \pm 1.88$	ND~8.17	1,325
Transform	$1.93 \pm 1.08$	$1.62 \pm 1.88$	0.22~6.45	278

N; Numbers of each sampling sites category

3.2. 기반암석별 라돈농도 분포

역사내 라돈분포에 주변 기반암석이 미치는 영향을 파악하기 위하여 한국지질자원연구원에서 작성한 수치지질도(Digital geologic map)를 활용하였다. ArcView 3.3를 이용하여 만든 서울시지질도를 바탕으로 1998년부터 2004년까지 전체 역사의 승강장 및 매표소의 평균 라돈농도를 각각 구분하여 작성한 서울시 라돈분포 지도(Radon map)를 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타냈다. 라돈분포 지도에서 알 수 있듯이 비 화강암 기반 역사보다 화강암을 기반으로 하고 있는 역사에서 고농도 라돈분포를 보이고 있다. 조사기간 동안 라돈 관리기준인 4 pCi/L를 1회 이상 초과한 역사는 승강장의 경우 29개 역사, 매표소는 8개 역사로 대부분 화강암 기반 역사였다. 고농도의 라돈 출현이 일시적이라 할지라도 여러 가지의 물리적인 조건에 따라 농도수준의 변화<sup>18,19)</sup>가 큰 라돈의 특성상 특별한 저감대책이 없는 한 고농도의 라돈이 출현할 가능성은 매우 크다고 할 수 있다.

Table 7에는 역사가 위치하는 기반암석을 화강암과 비화강암으로 구분하여 라돈농도와 상관성을 나타내었다. Table 7에서 알 수 있듯이 화강암을 기반암석으로 하고 있는 역사의 평균 라돈농도가 뚜렷하게 높음을 알 수가 있었다( $p < 0.05$ ).

Table 7. Comparisons of radon concentration between granite and non-granite rocks

Type of rock	N	AM	SD	GM	GSD	Max	Min
Granite	843	2.06	1.22	1.76	1.85	9.25	ND
Non-Granite	1864	1.51	0.96	1.30	1.91	7.53	ND

N; Number of sample, AM; Arithmetic mean, GM; Geometric mean, SD; Standard deviation, GSD; Geometric standard deviation

Table 4 및 Table 5에서와 같이 3호선 충무로, 4호선 남태령, 5호선 을지로4가 및 6호선 고려대 역사는 4 pCi/L를 초과한 빈도수가 측정기간 동안 4회 이상으로 나타나 중점관리 대상 역사로 판단된다. 서울의 지질은 편마암과 선캄브리아기 편마암 밑의 마그마가 뚫고 들어온 뒤 오랜 세월 동안 지각 변동과 침식을 거쳐 드러난 화강암 구조로 대별될 수 있다.<sup>20)</sup> 은평구, 마포구, 서대문구 등은 변성암인 편마암 암반위에 있으며 중구, 종로구, 성북구, 도봉구 및 노원구 등의 지역은 화강암 암반위에 있다. 특히 노원, 마들, 중계역 등은 지질구조가 의정부 지역에서부터 연결되어 내려오고 있는 단층대에 속하므로 가장 경계하여야 할 역사들로 사료된다. 1998년 5월 공릉역사의 장마에 의한 역사 침수시 고 농도의 라돈이 검출

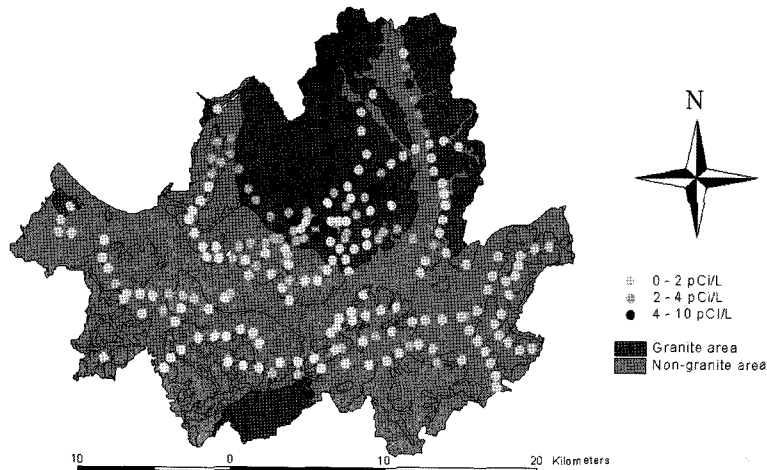


Fig. 5. Distribution map(platform) of <sup>222</sup>Rn concentration in Seoul subway stations.

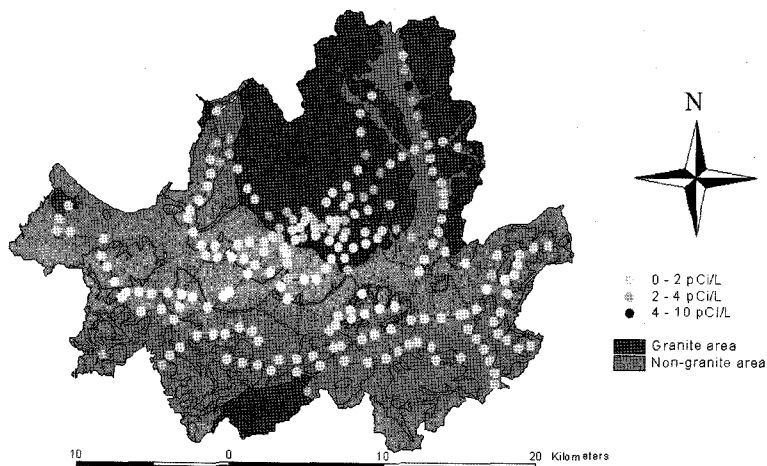


Fig. 6. Distribution map(concourse) of <sup>222</sup>Rn concentration in Seoul subway stations.

되어 사회적인 문제<sup>21)</sup>가 야기된 것은 이러한 원인으로 판단된다.

**3.3. 지하역사 깊이별 라돈농도 분포**

서울시를 운행중인 지하철은 1기(1~4호선)가 먼저 건설되어 운행되었고, 다음에 2기(4~8호선)가 개통되었다.<sup>22,23)</sup> 먼저 운행된 1기 지하철은 지상에 비교적 가깝게 위치한 반면 2기 지하철은 더 깊이 위치하게 되었다. Table 8은 전체 역사의 층수별 라돈농도 분포를 조사한 결과이다. 지하에 깊이 위치한 충일수륙 역사의 실내 라돈농도가 높아지는 경향은 있었으나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 반면 화강암반에 위치한 역사에서는 저층에 위치한 역사일수록 높은 라돈농도를 보였다. Table 4와 같이 5호선 종로3가 역사의 경우, 라돈농도가 9.25 pCi/L으로 전체 지하철역사의 조사결과 가장 높게 나타난 역사로 지하 5층에 위치하고 있으며, 5호선 광화문 역사는 8.50 pCi/L로 두 번째로 높은 농도로 지하 4층에 위치하고 있었다. 두 역사 모두 4 pCi/L이상의 검출빈도가 3회로 나타나 화강암반대의 저층에 위치하는 역사의 승강장 및 환승통로에 대하여는 별도의 환기시스템 등을 통한 철저한 관리가 필요한 것으로 판단된다. 특히 저층에서의 배기시스템만의 환기는 실내 공간내 부압이 형성되어 라돈농도를 더욱 증가<sup>9,14)</sup>시킬 우려가 있어 신중하게 대처하여야 할 것으로 사료된다. Li<sup>24)</sup> 등의 연구에 의하면 지하터널을 포함한 건축물의 경우 지하층에서의 라돈농도는 겨울보다 여름철에 더 높았으며, 지상층의 경우는 이와 반대로 겨울철에 더 높은 결과로 나타났다. 이와 관련하여 본 연구가 수행된 지하철역사에서의 시간적, 공간적 라돈농도 분포에 대한 세부적인 추가 연구가 진행 중에 있다.

**3.4. 인접터널 내부의 라돈농도 분포**

지하역사에서의 라돈 발생원은 터널내부의 옹벽과 지하암

반을 경유하여 역사에 유입되는 지하수로 구분할 수 있다. 지하역사 터널의 경우 라돈의 방출은 터널옹벽의 부분균열 장소뿐 아니라 옹벽자체에서도 재질에 따라 상당량의 라돈이 방출되는 것으로 알려져 있다.<sup>25,26)</sup> 본 연구에서는 지하철역 승강장의 고농도 라돈발생의 주 기여원을 추적하기 위하여 국내에서는 연구결과가 거의 없는 지하철 터널내부의 라돈농도를 조사하였다. 조사대상 역사 터널내부와 인접 승강장에서의 공기 중 라돈측정 결과를 Table 9 및 Table 10에 각각 나타내었다. 터널내부의 라돈농도는 역사 승강장의 농도 분포에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 특히 노원역과 중계역의 승강장을 연결하고 있는 터널내부의 라돈농도는 7.73±1.30 pCi/L로 측정되어, 타 역사에 비해 높은 수준의 라돈농도를 보이고 있었다. 매년 승강장에서 고농도의 빈번한 출현을 나타내었던 노원 및 중계역은 이번 조사에서도 5.52±1.35 pCi/L, 4.80±1.84 pCi/L로 측정되어 실내공기질 관리기준을 초과하고 있는 바, 터널내부의 라돈오염이 승강장의 고농도 라돈에 직접 기인하고 있음을 알 수 있었다. 또한 집수정이 있는 밀폐공간의 실내 라돈농도 조사결과 123.89 pCi/L의 고농도를 보여 지하수에 의한 영향도 매우 크리라 예상된다. 이러한 장소를 출입하는 작업자 및 열차 이용 승객의 건강보호를 위해서 보다 세부적인 조사 및 작업장의 배기 환기장치 구비 등의 대책이 요구된다. 앞에서 언급한 바와 같이 노원 및 중계역사가 위치하는 지역은 지질학적으로 단층지대에 속하므로 고 농도의 라돈검출이 우려되는 지역이다. 따라서 타 역사에 비해 옹벽의 균열부분 및 지하수가 누출되는 부분 등을 우선 시공하여 라돈유입 방지대책과 함께 환기시스템의 개선 및 환기량의 증가도 시급한 것으로 판단된다.

Table 10에서 알 수 있듯이 동일 역사에서도 지하층수에 따라 라돈분포가 달리 나타나고 있음을 재확인하였다. 3, 4호선의 충무로역사의 승강장은 4 pCi/L 이상의 고농도 라돈이 자주 검출되고 있는 역사중의 하나이나, 이번 조사결과 4 pCi/L 이하로 조사되어 관리방법 등의 개선에 기인한 것인

**Table 8.** Comparisons of radon concentration according to basement levels

Basement level	N	AM	SD	GM	GSD	Max	Min
1	908	1.34	0.83	1.16	1.88	5.02	ND
2	1148	1.56	0.95	1.34	1.89	8.17	ND
3	541	1.90	1.14	1.64	1.87	7.53	ND
4	194	2.39	1.35	2.01	1.94	8.50	ND
5	88	2.50	1.65	1.98	2.14	9.25	0.43

N; Number of sampling, AM; Arithmetic mean, GM; Geometric mean, SD; Standard deviation, GSD; Geometric standard deviation

**Table 9.** Summary of indoor radon concentrations at the tunnel of subway stations for about one month(2006. 1. 18~2. 22)

Line	Radon concentration(pCi/L)			
	3	4	7	4
	Chungmuro	Chungmuro	Nowon	Mia
Tunnel	↑	↓	↑	↓
	Dongguk Univ	Dongdaemun Staudium	Junggye	Miasamgeori
Mean	2.14±1.01	2.83±1.01	7.73±1.30	1.88±0.63

**Table 10.** Summary of indoor radon concentrations at platform of subway stations for about one month(2006. 1. 18~2. 22)

Line	Radon concentration(pCi/L)									
	2	3	3	4	4	4	4	5	7	7
Station	Dong daemun Staudium	Dongguk Univ.	Chungmu ro	Chungmu ro	Dong daemun Staudium	Mia	Mia samgeori	Dong daemun Staudium	Nowon	Junggye
Mean	0.90±0.64	1.36±0.68	2.30±0.95	2.14±0.28	1.68±0.74	0.99±0.20	1.36±0.61	2.92±0.64	5.52±1.35	4.80±1.84

지 계절에 따른 일시적 현상인지에 대한 추가조사의 필요성이 있는 것으로 사료된다. Patrick 등의 연구<sup>9)</sup>에 의하면 폐광 터널에서의 계절별 라돈농도 조사결과 외기에 비해 터널 내부 공기의 밀도가 높아지는 여름철에는 자연환기 부족으로 라돈농도가 겨울철보다 높은 것으로 나타났다. 참고로 4호선 충무로역사의 터널 배기구의 라돈농도는 1.75 pCi/L로 나타났으며 흡입구가 설치되어 있는 부근의 외기 라돈농도는 0.90 pCi/L였다.

**3.5. 지하수중 라돈농도 분포**

지하수량은 역사마다 큰 차이가 있으며 1기 지하철 역사보다 2기 역사에서 더 많은 지하수 유입량을 나타내고 있다. 발생하는 지하수는 대부분 터널 및 승강장의 관로를 통하여 집수정으로 집수 후 방류하고 있다. 2004년도 지하역사의 지하수량에 대한 자료와 라돈농도 측정결과를 바탕으로, 지하역사의 라돈농도와 지하수량간의 상관 분석결과 약한 양의 상관성(상관계수; 0.269)을 보이고 있으며, 지하수량 1,000 m<sup>3</sup>/day을 기준으로 구분하여 평균 라돈농도와 비교한 결과를 Table 11에 나타냈다. Table 11에서와 같이 연 평균 지하수량이 1,000 m<sup>3</sup>/day 이상인 역사의 라돈농도(기하평균; 1.83±1.81)가 1,000 m<sup>3</sup>/day 이하인 역사의 라돈농도(기하평균; 1.36±1.87)보다 통계적으로 높은 결과(p < 0.05)를 보이고 있음을 알 수가 있었다.

전체 지하역사중 2004년도 평균 라돈농도가 4 pCi/L를 넘는 역사를 대상으로 지하수중 라돈농도를 조사한 결과를 Table 12에 나타냈다. 5호선의 동대문운동장, 을지로4가, 광화문, 중

로3가역사 및 6호선의 고려대 역사에서 각각 1,590 pCi/L, 1,352 pCi/L, 1,899 pCi/L, 1,195 pCi/L 및 1,185 pCi/L의 농도로 측정되었다. 특히 고려대, 을지로4가 및 동대문운동장의 연평균 지하수 유입량은 각각 6,079 m<sup>3</sup>/day, 2,325 m<sup>3</sup>/day, 1,764 m<sup>3</sup>/day로 타 지역에 비하여 지하수가 풍부하게 존재하였다. Hess 등의 연구<sup>27)</sup>에서도 지하수가 실내 라돈농도에 일정부분 영향을 주는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로 이들 역사의 라돈오염은 지하수가 상당한 기여를 하는 것으로 판단된다. 따라서 고 농도 라돈출현 역사를 대상으로 추가적인 수중 라돈농도 조사를 통한 근본적인 라돈 발생원 추적과 함께 그에 따른 저감대책 마련이 시급한 것으로 사료된다.

**4. 결론**

1998년부터 2004년까지 서울지역의 지하철 8개 노선의 232개 역사의 승강장, 대합실 및 환승통로 등 총 2,839지점에 대하여 지하역사내 라돈농도를 측정하여, 이를 바탕으로 서울시 지하역사의 라돈분포 지도(radon map)를 작성하였다. 전체 지하철 역사내의 라돈 농도범위는 ND~9.25 pCi/L로 대수정규분포에 근사하였으며, 기하평균농도 및 산술평균농도는 각각 1.40±1.94 pCi/L, 1.65±1.07 pCi/L였다. 역사의 라돈농도는 역사에 위치한 승강장의 깊이에 따라 차이를 보였으며, 지하수량과도 상관성을 나타냈다. 조사기간의 전체 평균 라돈농도가 실내공기질 관리기준 4 pCi/L를 넘는 역사는 승강장9개 역사, 매표소 1개 역사였으며 조사기간 중 한번이라도 관리기준을 초과한 역사는 승강장 29개 역사, 매표소 8개 역사로 나타났다.

지하철역사 승강장의 고농도 라돈검출의 발생원별 요인 분석결과, 역사주변의 지질구조가 근본적인 영향을 미치고 있었다. 화강암반대를 기반암적으로 하는 역사의 인접터널은 지하수와 함께 역사내 고농도 라돈 출현의 주요 기여원으로 밝혀져 현재의 환기시스템 운영으로는 라돈저감의 한계에 이르렀음을 지적할 수 있다. 따라서 합리적이고 효율적인 환기시스템 운영의 제고와 함께 정밀조사를 통한 역사별 저감방안 선택이 중요할 것으로 판단된다. 즉 고농도 라돈분포 역사를 중심으로 승강장 라돈형성의 주 원인인 터널과 지하수의 제반 특성 및 경제성을 고려한 라돈저감을 위한 시공 우선순위가 정해져야 할 것으로 생각된다. 터널 등 역사내 지하수 관로의 덮개 설치를 통한 승강장의 라돈확산 억제와 함께 고농도 라돈이 집결되는 집수정 실내공간에 대하여 국소배기에 의한 지속적인 라돈배출이 요구된다. 또한 고농도 라돈분포 역사를 대상으로 지하수 및 터널에서의 라돈 방출률과 라돈농도의 관계로부터 적정 환기량을 산정하고 이에 따른 저감방안이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

**참고문헌**

1. 김윤신, “실내환경과학,” 믿음사(1994).

**Table 11.** Comparisons of radon concentration according to ground-water volume

Ground-water	N	AM	SD	GM	GSD	Max	Min
Over 1000 m <sup>3</sup> /day	193	2.06	1.03	1.83	1.81	4.35	ND
Below 1000 m <sup>3</sup> /day	267	1.46	0.93	1.36	1.87	4.38	ND

N; Number of sample, AM; Arithmetic mean, GM; Geometric mean, SD; Standard deviation, GSD; Geometric standard deviation

**Table 12.** Radon concentrations of ground-water at subway stations measured high level radon in 2004

Line	Station	Volume of ground-water (m <sup>3</sup> /day)	Radon concentration(pCi/L) of	
			ground-water	platform
3	Chungmuro	55.3	1,388	4.38
4	Namtaeryeong	752.9	718	4.35
	Cheonggu	550.1	-	4.14
	Dong daemun Stadium	1,764.2	1,590	4.05
5	Euljiro 4(sa)-ga	2,325.6	1,352	4.16
	Gwanghwamun	626.4	1,899	4.16
	Jongno 3(sam)-ga	1,745.3	1,195	4.15
6	Korea Univ.	6,079.7	1,185	4.10
7	Nowon	5,758.6	850	4.17
	Hagye	1,054.1	-	4.11

2. U.S.EPA(Environmental Protection Agency), "Report to Congress on Indoor Air Quality: Assessment and Control of Indoor Air Pollution," OAR 400-1-89-001C(1989).
3. ECA(European Collaborative Action), "Indoor Air Quality and its Impact on Man," Radon in Indoor Air Report No. 15, EUR 16123 EN(1995).
4. NCRP(Nation Council on Radiation Protection and Measurements), "Environmental radiation measurements," NCRP Report No. 50(1976).
5. U.S.EPA(Environmental Protection Agency), "A Citizen's Guide To Radon," ANR-464, 4022-K-92-001(1992).
6. U.S.EPA(Environmental Protection Agency), "A Consumer's Guide To Radon Reduction," 402-K-92-003(1992).
7. ICRP(International Commission on Radiological Protection), "Protection against Radon-222 at Home and at Work," Publications 65(1998).
8. 통계청, "2004년도 사망원인 통계결과,"(2005).
9. Patrick Richon, Frédéric Perrier, Jean-Christophe Sabroux, Michaël Trique, Cécile Ferry, Vicent Voisin, and Eric Pili, "Spatial and time variations of radon-222 concentration in atmosphere of a dead-end horizontal tunnel," *Journal of Environmental Radioactivity*, **78**, 179~198 (2005).
10. Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sakaki, Y., Takahashi, M., and Sano, Y., "Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan," *Science*, **269**, 60~61(1995).
11. Planinic, J., Radolic, V., and Vukovic, B., "Radon as an earthquake precursor," *Nuclear Instrument and Method in Reseach*, **A 530**, 568~574(2004).
12. 김윤신, "서울시 일부 지역에서의 실내라돈 농도에 관한 조사," *한국환경위생학회지*, **15**(1), 11~18(1989).
13. Kim, Y. J., Lee, H. Y., Kim, C. S., Chang, B. U., Rho, B. H., Kim, C. K., and Tokonami, S., "Indoor radon, thoron, and daughter concentration in Korea," *International Congress Series*, **1276**, pp. 46~49(2005).
14. Kim, D. S. and Kim, Y. S., "Distribution of Airborne Radon Concentrations in Seoul Metropolitan Subway Stations," *Health Physics*, **65**(1), 12~16(1993).
15. 환경부, "다중이용시설등의 실내공기질관리법,"(2004).
16. 환경부, "실내공기질공정시험방법,"(2004).
17. 서울시, "2002 월드컵대비 지하역사공기질관리대책," 문서번호 대기67307-21(2002).
18. Hoffmann, R. L., "Radon Contamination of Residual Structure," Impact of the Weather Effect on Short-Term Radon Test, Proceedings of the 1995 International Radon symposium, IX-1(1995).
19. Miles, J. C. and Algar, R. A., "Variation In Radon-222 Concentrations," *J. Radiol. Prot.*, **8**(2), 103~105(1988).
20. Gunter, K. and Möller, P., "The not-so-rare earths," *Scientific Americans*, **258**(1), 63(1988).
21. 최명식, 이제교, 홍성철, "지하철 7호선 라돈검출-기준치 최고 9배 초과," *문화일보*(1998).
22. 서울메트로 홈페이지, <http://www.seoulmetro.co.kr>(2006).
23. 서울시도시철도공사 홈페이지, <http://www.smt.co.kr>(2006).
24. Li, X., Zheng, B., Wang, Y., and Wang X., "A study of daily and seasonal variations of radon concentrations in underground building," *Journal of Environmental Radioactivity*, **87**, 101~106(2006).
25. Peter, B., "The radon emanation power of building materials, soils and rock," *Applied Radiation and Isotopes*, **59**, 389~392(2003).
26. Steiner, V., Kovler, K., Prevalov, A., and Kelm, H., "Estimation of the radon dose in building by measuring of the exhalation rate from building materials," *International Congress Series*, **1276**, pp. 397~398(2005).
27. Hess, C. T., Michel, J., Horton, T. R., Prichard, H. M., and Coniglio, W. A., "The occurrence of radioactivity in public water supplied in United States," *Health Physics*, **48**, 553(1985).