

서울시 지하철역사의 라돈농도분포 조사

이철민* · 김윤신 · 김종철 · 전형진
한양대학교 환경 및 산업의학연구소

Distribution of Radon Concentration at Subway Station in Seoul

Cheol-Min Lee^{*} · Yoon-Shin Kim · Jong-Cheol Kim · Hyung-Jin Jeon

Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University

(Received Aug. 26, 2004/Accepted Nov. 29, 2004)

ABSTRACT

The radon concentrations were measured to survey distribution of radon concentrations in Seoul subway stations. The radon concentrations in air and water were measured at seventeen subway stations(Mapo, Chungjongno, Sodaemun, Kwanghwamun, Chongno3ga, Ulchiro4ga, Tangdaemun, Sangildong on Line 5;Nowon, Chunggye, Hagye, Kongnung, Taenung, Mokkol, Chunghwa, Sangbong, Myomok on Line 7) using the RADtrak™ radon gas detector, Pylon AB-5 continuous passive radon detector and liquid scintillation counting method from January to May 1999. The major results obtained from this study were as follows: The long-term mean concentrations of radon were 61.8 Bq/m³ in office, 78.9 Bq/m³ in platform, 38.2 Bq/m³ in concourse and 20.1 Bq/m³ in outdoor, respectively. These levels were less than the action level (148 Bq/m³) of the U.S. EPA. The highest level of short-term mean concentrations was 116.55 Bq/m³ at Chongno3ga station on the 5th line subway stations, while the lowest mean concentration was 19.55 Bq/m³ at Mokkol station on the 7th line subway stations. The highest concentration of radon in the road water and storing underground water in the subway stations was 234.7 KBq/m³ and 155.5 KBq/m³ in Sodaemun subway station, respectively. The results suggest that radon concentration in subway stations seems to be affected by ventilation and radon concentration in underground water in the subway stations.

Keywords: radon, indoor air, subway, underground environment

I. 서 론

라돈(²²²Rn)은 무색, 무취, 불활성의 자연계에 널리 존재하는 자연방사능 기체로 지각 중의 토양, 모래, 암석, 광물질 및 이들을 재료로 하는 건축자재 등에 미량(7.4~74 Bq/Kg)으로 함유되어 있는 라듐(²²⁶Ra)의 α 붕괴시 생성되며, 반조에너지에 의한 확산이동 및 압력과 온도구배에 의한 대류 이동과정에 의해 지상 또는 실내환경으로 방출된다.¹⁾ 라돈의 붕괴과정에서 생성되는 라돈자손(²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Po)은 호흡을 통해 흡입하게 되면, 폐에 흡착하여 붕괴하면서 방출되는 알파에너지를 주변조직에 부여함으로써 장기적으로 폐암

을 유발할 수 있는 생물학적 손상을 야기한다.^{2,3)} 라돈의 경우에는 폐에 흡착하지 않고 호흡을 통해 다시 배출되기도 한다. 또한 라돈자손의 경우 생성당시부터 정전기적으로 전하를 띤 입자이므로 공기 중에 존재하는 먼지, 담배연기 그리고 수증기와 즉시 부착하여 에어로졸 형태로 흡입된다. 라돈은 다른 물질과 화학적으로 결합 또는 부착하지 않는 불활성 기체이며 상대적으로 긴 반감기(3.8일)를 갖고 있기 때문에 충분한 시간 동안 공기 중에 머물러 있으므로 다른 자연방사선원에 비하여 라돈과 라돈 자손에 의한 일반인의 자연방사선 피폭 기여도가 가장 높다.⁴⁾

세계 여러 나라에서는 라돈피폭에 기인한 건강상의 위해를 인식하여 주택을 비롯한 여러 생활공간의 실내 및 음용수 중의 라돈농도에 대한 대규모적인 측정을 수행하여 왔다. 미국의 경우는 환경청에서 권고하고 있는 실내공기 및 음용수 중의 라돈 권고치인 148 Bq/m³과

*Corresponding author : Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University
Tel: 82-2-2290-1510, Fax: 82-2-2294-0160
E-mail : spica@ihanyang.ac.kr

11,100 Bq/m³을 초과하는 것으로 나타났다.⁵⁾

이에 반하여 국내에서 수행된 라돈의 환경적인 측면에서의 연구로는 김윤신의 ‘우리나라 일부 주택 내 라돈농도에 관한 조사연구’,⁶⁾ 김윤신의 ‘원전주변주택의 실내외 라돈농도에 관한 조사연구’,⁷⁾ 김동술등의 ‘서울시 지하철역내의 라돈농도분포 및 저감대책’,⁸⁾ 이철민 등의 ‘주요 5개 도시의 실내외 라돈농도 조사연구’,⁹⁾ 김윤신등의 ‘Alpha Track Detector를 이용한 실내외 라돈농도조사에 관한 연구’¹⁰⁾ 등 수 편의 연구가 매우 단기적이며, 국한된 장소에서 수행되어져 왔다. 또한 오늘날 도시인들의 대표적인 생활공간으로 자리 잡고 있으며, 라돈의 발생원과 환기상태를 고려할 때 전형적인 라돈의 취약지구로 평가되고 있는 지하철¹¹⁾의 경우 제1기 지하철에 국한되어 연구가 수행되어져 왔으며, 1998년 5월 국내 제2기 서울시 지하철의 일부 역사의 라돈농도가 미국 환경청에서 권고하는 실내공기 중 라돈농도 권고치(action level)보다 높게 나타나 매스컴의 주목을 받은 바 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 자료를 통해 라돈농도가 높을 것으로 판단되는 서울시 제2기 지하철의 몇몇 역사를 선정하여 역사 내 공기 중의 라돈농도분포와 지하수의 라돈농도분포를 측정하고 제시하였으며, 또한 이 라돈농도에 영향을 미치는 인자를 분석하여 제시함으로써 향후 지하철 지하 공간에서의 라돈오염 저감대책 마련에 있어 기초자료

를 제공하고자 한다.

II. 연구대상 및 연구방법

1. 연구대상 및 측정위치

연구대상역사는 서울시 지하철역사중 5호선과 7호선 가운데 보수적인 라돈농도평가와 위험도 평가를 수행하기 위해 연구대상시설 선정기준을 설정하고 이 기준을 바탕으로 대상역사를 선정하였다. 연구대상시설 선정기준은 첫째, 1998년의 하천수 유입사고 역사를 우선적으로 연구대상으로 선정하였다. 둘째, 특정오염물질의 배출농도가 높거나, 또는 초과유려 가능성이 예측되는 지하역사를 표본 역사에 포함하였다. 셋째, 환승역 등 지하철 승객이용도가 높은 역이 우선적으로 선정되도록 하였다.

이와 같은 연구대상시설 선정기준을 바탕으로 선정된 연구대상 역사는 Fig. 1과 같이 5호선의 8개 역사(마포역, 중경로역, 서대문역, 광화문역, 종로 3가역, 을지로 4가역, 동대문운동장역 그리고 상일동역)와 7호선의 9개 역사(면목역, 상봉역, 중화역, 먹골역, 태릉입구역, 공릉역, 하계역, 중계역, 노원역)를 선정하였으며, 이들 17개 역사의 승강장, 대합실, 역무실 및 외기의 공기 중 라돈농도와 역사 내 노반 및 침수조 지하수의 수중 라돈농도를 측정하였다.

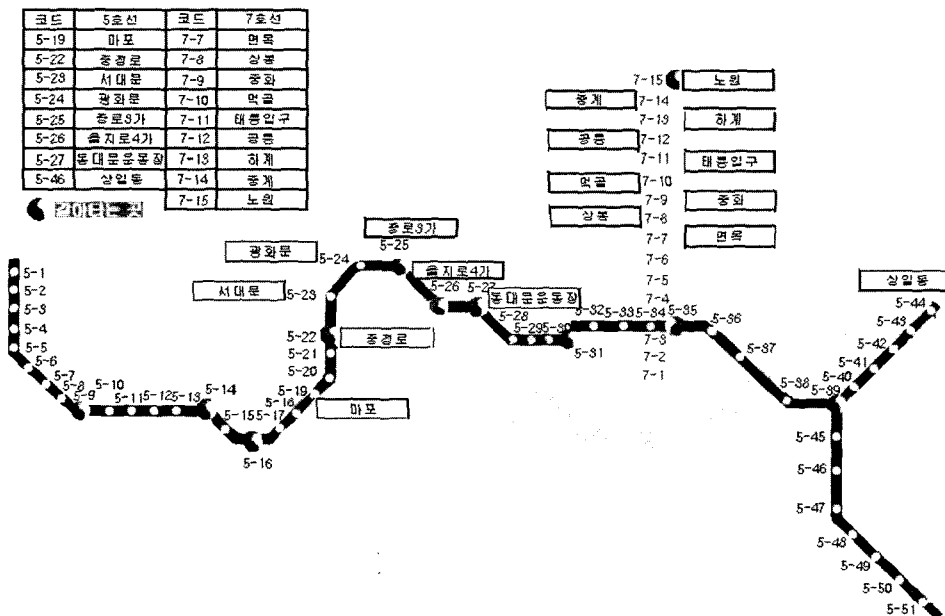


Fig. 1. Sampling locations at the 5th and the 7th line subway in Seoul.

2. 연구방법

1) 공기 중 라돈농도 장기측정

지하철역사의 공기 중 장기간 라돈농도를 측정하기 위해 연구대상 17개 역사의 승강장, 대합실, 역무실 및 외기에 미국 LANDAUER사의 Radtrak™ 라돈 가스 검출기를 1999년 1월부터 5월까지 각각 2회씩 2개월간 공기 중에 노출시킨 이후 이 검출기를 회수하여 LANDAUER사로 보내어 분석을 실시하였다.

Radtrak™ 라돈 가스 검출기는 알파비적검출기(alpha-track detector)로서 측정원에 장시간 노출시킨 후 분석을 통하여 노출시간동안의 평균 라돈농도를 산출할 수 있는 수동형 라돈 검출기이다. 검출 시스템은 공기 중의 먼지 입자, 에어로졸 그리고 라돈자손으로부터 라돈 가스를 분리하는데 사용되는 확산필터와 검출기 홀더 그리고 알파입자의 비적을 생성하는 검출기(CR-39)로 구성되어 있다. Radtrak™ 라돈 가스 검출기의 교정인자(calibration factor)는 검출기의 농도에 대한 반응도 즉, 시간동안 존재하는 라돈농도에 대한 검출기에서 생성된 단위면적당 비적밀도의 비율로 표현된다. 측정위치에서 일정시간 동안 공기 중에 노출된 검출기는 회수된 다음 CR-39 필름을 최적부식조건 즉 70°C, 6.2KOH, 4.5시간에서 에칭 시킨 다음 흐르는 물에 3시간 이상 세척하고 다시 증류수로 세척하여 광학현미경을 사용하여 단위 면적당 비적의 수를 산출한 후 교정인자를 이용하여 공기 중의 라돈농도를 산출한다.

2) 공기 중 라돈농도 단기측정

이 연구에서는 역사 내 공기 중 라돈농도의 시간별 분포를 파악하기 위하여 캐나다 PYLON사의 Pylon AB-5 수동형 연속 라돈 검출기를 이용하여 1999년 2월 10일부터 3월 18일까지 연구대상 16개 역사(5호선: 마포역, 충정로역, 서대문역, 광화문역, 종로3가역, 을지로4가역, 동대문운동장역, 상일동, 7호선: 면목역, 상봉역, 중화역, 떡골역, 태릉입구역, 공릉역, 하계역, 중계역)의 승강장에서 저녁 10시부터 다음날 저녁 9시까지 23시간동안의 시간별 라돈농도를 측정하였다. 검출기의 설치는 16개 역사의 승강장 중앙부에서 벽이나 기타 장애물과 최소 1.5m의 거리를 두고, 사람의 호흡영역 높이에 해당되는 지상 1.5m 높이에 설치하였다. 또한 기상요인과 연계분석을 위해 기상장비(Model: Weather Monitor II™, Davis Instruments 사)를 이용하여 같은 시간대의 기상요인을 측정하였다.

이 연구에서 사용된 수동형 연속 라돈 검출기는 Pylon사에서 제작된 것으로서 금속제질의 실린더 모양을 이루고 있으며, 한쪽 끝은 개방되어 있고 다른 한쪽 끝은 4개의 작은 구멍이 나 있다. 각각의 구멍은 빛을

Table 1. Characteristics of Pylon AB-5 continuous passive radon detector

Item	Characteristics
Sensitivity	150 cpm/pCi/L
Detection limit	1.0 pCi/L
Scintillation matter	ZnS(Ag)
Volume	272 ml
Diameter	5.5 cm
Length	15.2 cm

차단할 수 있는 폴리우레탄 폼(polyurethane foam) 필터가 부착되어 있으며, 필터는 라돈자손 및 기타 부유분진이 검출기내로 들어가는 것을 막아주는 역할을 한다. 또한 검출기는 습도, 먼지 그리고 온도 변화에 거의 영향을 받지 않도록 제작되어 있다. 공기 중에 포함된 라돈이 확산을 통해 폴리우레탄 폼 필터를 통과하여 검출기의 내부로 들어가게 되면 3.82일의 반감기를 가지고 붕괴하여 여러 라돈자손을 생성하게 된다. 라돈의 붕괴 뿐만 아니라 생성된 라돈자손의 붕괴과정에서 방출되는 알파입자는 검출기의 내부 벽에 도포된 ZnS(Ag)과 반응하여 가시광선 정도의 파장을 지닌 빛을 생성한다. 이때 생성된 빛을 광전자 증폭배관으로 증폭하여 계수함으로써 라돈농도를 분석할 수 있다. AB-5 계수기의 검출한계는 3.7 Bq/m³이다. 이 연구에서 사용된 Pylon AB-5 수동형 연속라돈검출기의 제반사항은 다음의 Table 1과 같다.

기상요인과의 연계분석을 위해 기상장비(Model : Weather Monitor II™, Davis Instruments)를 이용하여 같은 시간대의 기상요인을 측정하였다.

3) 지하수 중 라돈농도 측정

역사의 공기 중 라돈농도의 주된 요인 중 하나로 인식되고 있는 지하수의 라돈농도를 측정하기 위해 1999년 3월 9일부터 3월 22일까지 1차 측정 및 4월 20일부터 5월 4일까지 2차 측정을 연구대상역사의 노반(지하유입수), 저수조(집수정) 및 재활용수의 라돈농도를 액체섬광계수법(liquid scintillation counting method)을 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 수중에 용해되어 있는 라돈농도의 분석절차는 다음과 같은 6단계를 거쳐 수중의 라돈농도를 분석하였다. 첫째, 20 ml EPA Vial에 추출 섬광용액 2.5 ml와 물 시료 21 ml를 Vial에 가급적 공기층이 없게 채운다. 둘째, 시료가 담긴 Vial을 교반기에 넣어 유층과 수층이 잘 섞이도록 5분 정도 충분히 흔든 다음 원심분리기를 이용하여 상층을 완전히 분리한다. 셋째, 상이 분리된 시료에서 유층 1 ml를 취하여 10×75 mm 계측용 glass culture tube에 놓

는다. 넷째, 계측용기를 실리콘 고무마개로 밀봉하고 파라필름을 씌워 라돈농도의 손실을 방지한다. 다섯째, 추출된 시료를 3시간 방치하여 방사평형상태에 도달하도록 한다. 여섯째, PERALS 계측기 안에 계측용기를 넣은 후 라돈의 에너지 스펙트럼을 산출하여 라돈농도를 계산한다.

이 연구에서 사용된 액체섬광법을 이용한 지하수 중의 라돈방사능의 분석에는 PERALS(photon electron rejection alpha liquid scintillation) 분광기를 알파분광 수단으로 선정하였다. PERALS는 섬광액과의 작용시 방사선의 종류에 따라 시간성이 다른 점을 이용하여 베타, 감마신호로부터 알파신호를 99.95% 이상 분해하여

Table 2. Radon concentrations by a long-term measurement at the sampling site in subway stations

		Concentration, Bq/m ³							
		Line 5			Line 7				
	Station	1st	2nd	Mean		1st	2nd	Mean	
Map'o	Office	25.9	44.4	35.2	Nowon	Office	99.9	88.8	94.4
	Platform	48.1	37.0	42.6		Platform	103.6	146.2	124.9
	Concourse	18.5	37.0	27.8		Concourse	37.0	75.9	56.4
	Outdoor	18.5	18.5	18.5		Outdoor	18.5	22.2	20.4
Chungjongno	Office	40.7	37.0	38.9	Chunggye	Office	77.7	124.0	100.8
	Platform	62.9	48.1	55.5		Platform	118.4	162.8	140.6
	Concourse	18.5	29.6	24.1		Concourse	22.2	68.5	45.3
	Outdoor	18.5	18.5	18.5		Outdoor	18.5	22.2	20.4
Sodaemun	Office	85.1	144.7	99.9	Hagye	Office	74.0	70.3	72.2
	Platform	88.8	88.8	88.8		Platform	74.0	103.6	88.8
	Concourse	18.5	40.7	29.6		Concourse	18.5	50.0	34.2
	Outdoor	21.46	29.6	25.5		Outdoor	18.5	18.5	18.5
Kwanghwamun	Office	66.6	66.6	66.6	Kongnung	Office	51.8	66.6	59.2
	Platform	N.A.	92.5	46.3		Platform	129.5	192.4	161.0
	Concourse	29.6	55.5	42.6		Concourse	55.5	81.4	68.5
	Outdoor	18.5	N.A.	9.3		Outdoor	18.5	18.5	18.5
Chongno3ga	Office	114.7	118.4	116.6	Taenung	Office	44.4	33.3	38.9
	Platform	103.6	170.2	136.9		Platform	33.3	27.8	30.5
	Concourse	92.5	111.0	101.8		Concourse	18.5	20.4	19.4
	Outdoor	25.9	24.1	25.0		Outdoor	18.5	N.A.	9.3
Ulchiro4ga	Office	44.4	88.8	66.6	Mokkol	Office	18.5	18.5	18.5
	Platform	88.8	151.7	120.3		Platform	18.5	33.3	25.9
	Concourse	18.5	55.5	37.0		Concourse	18.5	18.5	18.5
	Outdoor	18.5	25.9	22.2		Outdoor	18.5	18.5	18.5
Tangdaemun stadium	Office	77.7	59.2	68.5	Chunghwa	Office	25.9	85.1	55.5
	Platform	77.7	118.4	98.1		Platform	48.1	51.8	50.0
	Concourse	22.2	33.3	27.8		Concourse	18.5	51.8	35.2
	Outdoor	22.2	N.A.	11.1		Outdoor	18.5	18.5	18.5
Sangildong	Office	18.5	25.9	22.2	Sangbong	Office	33.3	44.4	38.9
	Platform	18.5	18.5	18.5		Platform	25.9	37.0	31.5
	Concourse	18.5	18.5	18.5		Concourse	18.5	59.2	38.9
	Outdoor	18.5	18.5	18.5		Outdoor	N.A.	18.5	9.3
					Myomok	Office	33.3	51.8	42.6
				Platform		25.9	59.2	42.6	
				Concourse		18.5	29.6	24.1	
				Outdoor		18.5	N.A.	9.3	

N.A. : Not Availabled

측정하여 고감도, 소형 알파전용 액체섬광계수기로 기존의 액체섬광법에서 문제가 되었던 고준위 백그라운드, 낮은 에너지 분해능 등을 극복한 알파전용의 분광기이다. PERALS 분광기의 검출효율은 99.7%이며 β - γ 백그라운드 제거율은 99.95%로 백그라운드 계수율은 0.002 cpm 정도이다.¹²⁾

III. 결과 및 고찰

1. 공기 중 라돈농도 장기 측정 결과

Radtrak™ 라돈 가스 검출기를 이용하여 총 17개 역사의 승강장, 대합실, 역무실 및 외기의 1차 및 2차에 걸친 측정에 따른 지하철 역사 내 공기 중 장기간의 라돈농도는 Table 2와 같다. 역사 실내의 공기 중 장기 라돈농도 측정 결과 승강장에서 평균라돈농도는 61.8 Bq/m³을 나타냈으며, 5호선의 종로3가역(170.2 Bq/m³), 을지로4가역(151.7 Bq/m³), 공릉역(192.4 Bq/m³)이 미국 환경청의 실내공기 중 라돈농도의 권고치인 148 Bq/m³을 초과하고 있는 것으로 조사되었다. 대합실에서 평균라돈농도는 38.2 Bq/m³으로 조사되었으며, 최대농도를 나타낸 역사는 5호선의 종로3가역(111.0 Bq/m³)으로 조사되어 대합실에서의 실내공기중 라돈농도는 미국 환경청에서 제시하고 있는 라돈농도의 권고치를 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 역무실에서의 평균라돈농도는 61.8 Bq/m³으로 조사되었으며, 최대농도를 나타낸 역사는 서대문역(144.7 Bq/m³)으로 조사되어 역무실 또한 미국 환경청에서 제시하고 있는 라돈농도의 권고치를 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 조사대상역사의 실외공기중의 평균라돈농도는 20.1 Bq/m³으로 조사되었으며, 최대농도를 나타낸 역은 서대문역(29.6 Bq/m³)으로 조사되었다. 또한 역사 실외의 라돈농도는 역사의 승강장, 대합실 및 역무실의 실내공기중의 라돈농도에 비해 매우 낮은 농도를 나타내고 있는 것으로 조사되었다.

Table 3은 승강장, 대합실 및 역무실의 실내공기중의 라돈농도와 실외공기중의 라돈농도간의 차이를 검정하

기위한 일원분산분석을 수행한 결과를 나타낸 것으로 승강장, 대합실, 역무실 및 실외 공기중의 라돈농도간에 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다(p<0.01). 또한 Duncan 방법을 이용한 사후 검정결과 승강장, 대합실, 역무실 및 실외 공기중의 라돈농도간에 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다. 이와 같은 결과는 승강장, 대합실, 역무실 및 실외 공기중의 라돈농도간에 차이를 나타낸 것은 각 환경의 물리적 특성(급·배기량, 심도, 구조 등) 및 기상요인(온도, 습도, 풍속, 기압 등) 등과 같은 환경적 요인에 의한 것으로 여겨진다.

2. 공기 중 라돈농도 단기 측정 결과

5호선 8개 역사(마포역, 충정로역, 서대문역, 광화문역, 종로3가역, 을지로4가역, 동대문운동장역, 상일동역)와 7호선 8개 역사(면목역, 상봉역, 덕곡역, 중화역, 테릉입구역, 공릉역, 하계역, 중계역)를 대상으로 승강장에서 라돈농도를 연속 측정할 결과는 Table 4, 5와 같다.

5호선에서 일일 평균 라돈농도 중 가장 높은 농도를 나타낸 역사는 종로3가역으로 116.55 Bq/m³을 나타냈으며, 가장 낮은 일일 평균 라돈농도를 나타낸 역사는 마포역으로 26.76 Bq/m³을 나타냈다. 7호선에서의 일일 평균 라돈농도 중 가장 높은 농도를 나타낸 역사는 중계역으로 93.63 Bq/m³을 나타냈으며, 최소 일일 평균 라돈농도를 나타낸 역사는 덕곡역으로 19.55 Bq/m³을 나타냈다.

5호선과 7호선의 역사별 승강장의 일일 라돈농도는 마포역의 경우 오전 3시에 가장 낮은 라돈농도인 4.44 Bq/m³를 나타냈으며, 19시에 일일 중 가장 높은 라돈농도인 48.47 Bq/m³를 나타냈다. 충정로역은 오전 7시에 가장 낮은 라돈농도인 3.70 Bq/m³를 보였으며 12시에 가장 높은 라돈농도인 49.21 Bq/m³를 나타냈다. 서대문역은 23시에 41.07 Bq/m³로 가장 낮은 라돈농도로, 18시에 88.06 Bq/m³로 가장 높은 라돈농도를 나타냈으며, 5호선 8개의 측정역사 중 높은 라돈평균농도를 보였던 광화문역과 종로3가역은 각각 1시와 16시에

Table 3. Results of one way analysis of variances test between radon concentrations and sampling sites

Sampling site	Number of sample	Mean (Bq/m ³)	Standard deviation	Duncan method ^a	p value
Platform	33	78.9	8.55	a	p < 0.01
Concourse	34	38.2	4.25	b	
Office	34	61.8	5.66	c	
Outdoor	29	20.1	0.55	d	

*Mean concentration for sampling sites in homogeneous subsets are displayed

Table 4. Radon concentrations by a short-term measurement at platform in the 5th line subway stations

Time	Radon Concentration, Bq/m ³							
	Mapo	Chungjongro	Sodaemun	Kwanghwamun	Chongno3ga	Ulchiro4ga	Tongdaemun	Sangildong
23:00	35.89	43.29	41.07	77.70	119.51	71.04	87.69	69.93
00:00	34.04	44.40	48.84	104.34	99.53	67.34	59.94	61.42
01:00	21.46	37.37	74.37	119.14	101.01	61.42	58.83	56.24
02:00	15.54	39.59	54.39	88.43	95.46	76.96	66.23	69.19
03:00	4.44	29.60	44.77	107.67	106.56	92.50	54.02	96.94
04:00	8.88	11.84	54.39	91.76	84.73	92.87	58.46	99.53
05:00	14.43	8.51	43.29	103.61	103.23	92.13	94.72	95.09
06:00	36.63	14.43	49.21	111.37	103.97	100.64	82.88	106.56
07:00	21.46	3.70	64.01	113.22	88.43	82.88	89.91	91.02
08:00	21.46	9.62	74.37	118.77	113.22	81.77	66.97	62.16
09:00	24.79	19.98	71.78	104.71	141.34	68.08	62.53	67.37
10:00	20.72	33.3	63.27	93.98	118.03	74.37	66.23	71.04
11:00	26.64	46.62	65.12	84.73	106.93	76.59	66.97	62.16
12:00	25.90	49.21	60.31	101.38	113.96	65.12	84.36	27.38
13:00	24.42	48.10	66.60	107.30	131.72	67.71	88.43	79.18
14:00	25.53	36.26	68.82	105.08	130.98	77.70	79.92	72.52
15:00	32.56	34.41	63.64	104.71	157.62	79.92	103.23	107.3
16:00	39.22	28.12	75.11	89.91	170.57	75.48	99.16	87.69
17:00	36.63	32.19	76.96	99.16	165.76	67.34	108.78	93.24
18:00	46.99	29.97	88.06	116.18	130.98	66.97	85.47	107.67
19:00	48.47	37.00	80.29	84.73	106.56	59.94	65.49	106.19
20:00	32.56	39.22	62.90	91.02	103.60	58.46	54.76	92.50
21:00	25.90	39.66	69.93	85.10	89.91	43.66	59.20	62.53
Mean	26.76	30.61	64.57	102.42	116.55	74.08	75.30	80.68
S.D.	11.00	13.53	12.52	13.47	23.93	13.07	16.69	20.72

S.D. : Standard deviation

가장 높은 라돈농도 119.14 Bq/m³, 170.57 Bq/m³를 보였으며, 종로3가의 경우 라돈농도의 일일 변화 폭이 크지 않는 것으로 조사되었다. 을지로4가역은 오전 6시에 100.64 Bq/m³로 가장 높은 라돈농도를 나타냈으며 21시에 43.66 Bq/m³로 가장 낮은 라돈농도를 나타내었고, 동대문역은 3시와 17시에 각각 54.02 Bq/m³, 108.78 Bq/m³의 가장 낮은 라돈농도와 가장 높은 라돈농도를 나타냈다. 상일동은 12시에 27.38 Bq/m³로 가장 낮은 라돈농도를 나타냈으며, 6시와 18시에는 각각 106.56 Bq/m³, 107.67 Bq/m³의 높은 라돈농도를 나타냈다. 7호선의 경우 면목역은 0시에 9.62 Bq/m³로 가장 낮은 라돈농도를 나타냈으며 3시에 43.29 Bq/m³로 가장 높은 라돈농도를 나타냈다. 상봉역은 0시와 12시에 가장 낮은 라돈농도인 6.29 Bq/m³를 나타냈으며, 5시에 58.83 Bq/m³로 가장 높은 라돈농도를 나타냈다.

먹골역은 16시, 18시, 20시에 6.29 Bq/m³의 가장 낮은 라돈농도를 나타냈으며, 3시에 71.41 Bq/m³로 가장 높은 라돈농도를 나타냈다. 중화역은 4시와 5시에 15.54 Bq/m³로 가장 낮은 라돈농도를 나타냈으며, 13시에 가장 높은 라돈농도인 52.91 Bq/m³를 나타냈다. 태릉역의 경우 2시와 3시에 12.58 Bq/m³로 낮은 라돈농도를 나타냈으며, 6시에 62.16 Bq/m³의 가장 높은 라돈농도를 나타냈다. 공릉역은 16시에 31.08 Bq/m³의 가장 낮은 라돈농도를 나타냈으며, 0시에 77.70 Bq/m³의 가장 높은 라돈농도를 나타냈다. 하계역은 20시와 14시에 49.58 Bq/m³의 가장 낮은 라돈농도를 나타냈으며 4시에는 133.57 Bq/m³의 가장 높은 라돈농도를 나타냈다. 증계역은 6시에 52.91 Bq/m³의 가장 낮은 농도를 나타냈으며, 19시에는 133.20 Bq/m³의 가장 높은 라돈농도를 나타냈다.

Table 5. Radon concentrations by a short-term measurement at platform in the 7th line sub stations

Time	Radon Concentration, Bq/m ³							
	Myomok	Sangbong	Mokkol	Chunghwa	Taerung	Kongnung	Hagye	chunggye
16:00	15.54				15.54	31.08		
17:00	21.83				21.83	65.12		
18:00	34.04	21.83			24.79	40.70	105.45	123.95
19:00	12.58	24.79			21.46	68.45	87.32	133.20
20:00	21.83	12.21			21.83	58.83	49.58	96.20
21:00	15.54	18.50		24.79	18.87	68.08	58.83	80.66
22:00	18.50	12.58	9.25	31.08	24.79	65.12	43.66	99.16
23:00	31.08	18.50	18.50	15.54	34.41	74.37	68.45	108.78
00:00	9.62	6.29	12.58	34.04	21.83	77.70	77.33	111.74
01:00	18.50	18.50	12.58	27.75	24.79	71.41	62.16	96.20
02:00	18.50	34.41	28.12	34.04	12.58	71.41	61.79	105.45
03:00	43.29	18.50	71.41	28.12	12.58	62.16	83.99	71.41
04:00	21.83	21.83	21.83	15.54	40.33	71.41	133.57	71.41
05:00	12.58	58.83	46.62	15.54	58.83	62.16	102.49	102.49
06:00	24.79	40.33	24.79	37.37	62.16	58.83	99.53	52.91
07:00	12.58	18.87	31.08	37.37	46.62	55.87	65.12	80.66
08:00	18.50	31.08	12.58	34.04	34.41	65.12	52.91	55.87
09:00	21.46	15.54	21.83	18.50	15.54	43.29	58.83	62.16
10:00	24.79	27.12	12.58	40.33	37.37	55.87	71.41	102.49
11:00	18.87	18.50	18.87	31.08	31.08	58.83	55.87	83.99
12:00	12.58	6.29	18.50	28.12	28.12	68.45	62.16	71.41
13:00	24.79	18.50	19.24	52.91	24.79	62.16	71.41	111.74
14:00	21.83	18.87	12.58	21.83	15.54	52.91	49.58	111.74
15:00		15.54	9.62	37.37	21.83	55.87	52.91	102.49
16:00			6.29					117.28
17:00			9.62					
18:00			6.29					
19:00			18.50					
20:00			6.29					
Mean	20.67	21.75	19.55	29.76	28.00	61.05	71.56	93.63
S.D.	7.73	11.60	14.68	9.75	13.28	10.99	22.36	22.01

S.D. : Standard deviation

Table 6은 지하철 승강장의 이용시간을 열차 운행 정지시(00:00~07:00), 오전출근시간(07:00~09:00), 비출퇴근시간(09:00~17:00), 오후퇴근시간(17:00~21:00) 그리고 심야시간(21:00~23:00)으로 구분할 경우 역사의 특성에 따라 다소 가변적이나 비침두시와 운행정지시가 오전출근시간, 오후퇴근시간 및 심야시간대에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 이는 비침두시와 운행정지시의 환기량이 유동인구의 이동 및 열차의 운행이 빈번한 다른 시간대에 비해 감소하는 것을 고려할 때 환기 정도가 역사내 공기중 라돈농도의 증감에 크게 영향을 주는 것으로 여겨진다. 즉, 환기량의 감소는 역사내의

공기 중 라돈농도를 증가시키는 환경요소임을 알 수 있었다. 심야시간에는 실내환기가 가동되지 않아 실내에서 발생된 라돈이 외부유출이 이루어지지 않고 정체됨으로써 농도가 증가하는 것으로 여겨진다.

이상과 같이 5·7호선의 승강장내 일일 시간별 라돈 농도간에는 공통된 특성을 찾을 수 없었다. 이는 각 역사별 라돈농도는 역사의 물리적 특성(급·배기량, 심도, 구조 등) 및 기타 운영상(시간대별 환기량의 조절 등)의 차에 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 또한 승강장 내 공기 중 라돈농도의 단기간의 측정결과 가장 높은 평균농도를 보인 종로3기역의 경우 1993년 서

Table 6. Mean concentration of radon by time zones at platform in the 5th and the 7th line stations

Station	Radon Concentration, Bq/m ³					
	Midnight ¹⁾	Office-going hour ²⁾	Midday ³⁾	Closing hour ⁴⁾	Night ⁵⁾	
5th Line	Mapo	19.94	22.57	28.86	38.48	35.89
	Chungjongno	26.64	11.10	38.84	36.63	43.29
	Sodaemun	54.76	69.93	70.67	63.64	48.84
	Kwanghwamun	107.67	112.11	98.42	94.35	77.70
	Chongno3ga	99.16	114.33	136.90	107.67	119.51
	Ulchiro4ga	83.25	77.70	72.89	57.35	71.04
	Tongdaemun	67.71	73.26	86.95	66.23	87.69
	Sangildong	83.62	73.63	72.15	92.13	69.93
7th Line	Chunggye	87.32	66.23	100.27	108.41	103.97
	Hagye	88.80	58.83	60.68	75.11	55.87
	Kongnung	67.71	54.76	56.24	58.09	69.93
	Taerung	33.30	32.19	24.42	21.83	29.60
	Mokkol	31.08	21.83	10.73	10.36	14.06
	Chunghwa	27.38	29.97	35.15	24.79	23.31
	Sangbong	28.49	21.83	17.76	19.24	15.54
	Myomok	21.46	17.76	19.98	21.09	24.79
Mean	57.97	53.63	58.16	55.96	55.69	
Standard deviation	31.01	32.68	35.83	32.87	31.81	

1) : 00:00-06:00, 2) : 07:00-09:00, 3) 09:00-17:00, 4) 17:00-21:00, 5) 21:00-23:00

울시 지하철역내의 라돈농도 조사⁸⁾에서도 다른 역에 비해 높은 농도를 보인 것으로 보아, 종로3가의 지질 및 지하수층의 라돈 함유량이 다른 지역에 비해 높아 종로3가역 내 라돈농도가 높게 나타난 것으로 보인다.

3. 수중 라돈농도 측정 결과

17개 측정역사의 노반, 저수조 및 재활용수에서 1·2차 측정 조사된 수중 라돈농도는 아래의 Table 7 및 Table 8과 같다. 측정결과 선로 주변 노반지하수의 수중 라돈농도가 저수조와 재활용수의 라돈농도보다 전반적으로 높게 나타났다. 노반(지하유입수)에서의 라돈평균농도는 서대문(234.7 kBq/m³), 노원(191.5 kBq/m³), 하계(170.9 kBq/m³), 공릉(168.3 kBq/m³)의 순으로 높은 라돈평균농도를 보였으며, 가장 낮은 라돈평균농도를 보인 역사는 마포역(8.3 kBq/m³)으로 조사되었다. 저수조(집수정)의 수중 라돈평균농도는 서대문(155.5 kBq/m³), 하계(136.2 kBq/m³), 을지로4가(127.9 kBq/m³), 공릉(105.0 kBq/m³), 종로3가(77.5 kBq/m³)의 순으로 높은 라돈평균농도를 보였으며, 충정로(4.7 kBq/m³)에서 낮은 라돈평균농도를 보여 역사별 노반(지하유입수)의 라돈평균농도와 유사한 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다. 재활용수는 사용하지 않고 있으나 본 연구를 위해

잠시동안 펌프를 가동시켜 역사내로 유입되는 관의 중간에서 채수하여 재활용수층의 라돈농도를 측정하였다. 측정 역사 중 재활용수에서 가장 높은 라돈평균농도를 보인 역사는 노원역(104.3 kBq/m³)으로 조사되었으며, 덕골역(9.2 kBq/m³)에서 가장 낮은 라돈평균농도를 보였다.

이 연구 결과 노반(지하유입수)에서의 라돈평균농도가 가장 높게 나타났으며, 저수조(집수정)에 유입된 지하수내의 라돈평균농도는 지하 유입수의 라돈평균농도에 비해 낮게 나타났다. 그리고 재활용수층의 라돈평균농도 또한 지하유입수의 라돈평균농도에 비해 낮게 나타났다. 노반(지하유입수)의 라돈평균농도가 저수조중의 라돈평균농도보다 높은 이유는 노반으로부터 유입된 지하수층의 라돈이 저수조에 저장되어있는 동안 방사성 붕괴 및 대기확산 등을 통해 라돈농도가 감소한 것으로 여겨진다.

4. 라돈농도와 영향인자간의 상관분석

실내에서 라돈과 라돈자손의 농도는 물리·화학적 활성도 및 공기 중의 입자수, 입자크기, 습도, 실내 용적대 표면적의 비와 환기정도, 온도, 압력구배에 의한 공기의 이동 등에 의하여 크게 영향을 받는 것으로 보고

Table 7. Concentrations of radon at the underground water in the 5th line subway stations

Station	Radon Concentration, KBq/m ³	
	Road water	Storing water
Map'o	1st	8.6
	2nd	7.9
	Mean	8.3
Chungjongno	1st	4.6
	2nd	16.9
	Mean	10.8
Sodaemun	1st	282.4
	2nd	187.0
	Mean	234.7
Kwanghwamun	1st	144.5
	2nd	143.6
	Mean	144.0
Chongno3-ga	1st	91.2
	2nd	1221.0
	Mean	106.6
Ulchiro4-ga	1st	102.0
	2nd	127.3
	Mean	114.7
Tongdaemun Stadium	1st	761.6
	2nd	74.0
	Mean	79.0
Sang-il-dong	1st	26.9
	2nd	25.9
	Mean	26.4

Table 8. Concentrations of radon at the underground water in the 7th line subway stations

Station	Radon Concentration, KBq/m ³		
	Road water	Storing water	Reclaimed water
Nowon	1st	177.3	130.8
	2nd	178.0	9.0
	Mean	191.5	69.9
Chunggye	1st	78.2	58.4
	2nd	42.7	20.8
	Mean	60.5	39.6
Hagye	1st	198.9	128.6
	2nd	143.0	143.9
	Mean	170.9	136.2
Kongnung	1st	220.9	134.1
	2nd	115.6	75.9
	Mean	168.3	105.0
Taerung	1st	74.7	41.1
	2nd	59.7	39.2
	Mean	67.2	40.2
Mokkol	1st	87.6	96.5
	2nd	79.7	83.7
	Mean	83.7	90.6
Chunghwa	1st	113.8	44.2
	2nd	37.8	46.9
	Mean	75.8	45.6
Sangbong	1st	70.3	41.6
	2nd	59.1	33.1
	Mean	64.7	37.3
Myomok	1st	41.9	N.A.
	2nd	30.0	12.2
	Mean	36.0	12.2

N.A. : Not Available

되고 있다.^{13,14)} 이에 본 연구에서는 측정 조사된 역사별 공기중 단기간 라돈농도와 기상요인(온도, 습도, 풍속, 기압 등)과의 상관성을 분석하고 지하수 중의 라돈평균농도와 역사 내 공기 중의 라돈평균농도와의 상관성을 분석하였다.

승강장에서의 기상상태와 라돈농도와의 상관관계를 조사하기 위해 5호선의 종로3가역과 광화문역 및 7호선의 중계역을 대상으로 승강장 내 일일 기상상태를 측

정 조사하였다. Table 9은 5호선의 2개 역사와 7호선의 1개 역사의 승강장 내에서 측정 조사된 기상상태를 나타낸 것이다. 역사별 기상상태는 큰 변화 없이 일정한

Table 9. Distribution of atmospheric phenomena factors at platform in the 5th line and the 7th line subway stations

	Mean±Standard deviation			
	Temperature (°C)	Humidity (%)	Wind velocity (m/s)	Air pressure (atm)
Kwanghwamun	13.6±1.7	38.1±2.3	1.01±0.60	1.010±0.001
Chongno3ga	14.4±1.5	42.1±4.5	0.87±0.53	1.010±0.002
Chunggye	20.5±0.1	50.2±0.7	0.37±0.06	1.010±0.001

Table 10. Correlation between radon concentration and various atmospheric factors

	Concentration	Temperature	Humidity	Wind velocity	Air pressure
Concentration	1.000				
Temperature	0.108	1.000			
Humidity	0.103	0.660**	1.000		
Wind velocity	0.251**	-0.037	-0.214*	1.000	
Air pressure	-0.625**	-0.403**	-0.312**	-0.314**	1.000

*Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

기상상태를 유지하고 있었으며, 5호선 2개 역사의 승강장에서의 온·습도보다 7호선 1개 역사의 승강장에서 온·습도가 약간 높은 경향을 보였다. Table 10은 기상인자와 라돈농도와의 상관관계를 나타내고 있다. 라돈농도와 기압과의 상관정도는 0.251로 양의 상관관계를 나타내고 있다. 라돈농도와 풍속과의 상관정도는 -0.625로 음의 상관관계를 나타냈다(각각 $p < 0.01$). 이에 반해 온도 및 습도와의 상관관계는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 역사 내 라돈농도와 온·습도 간의 상관성이 유의한 차이를 보이지 않은 것은 환기 시설 및 냉난방시설에 의해 역사내의 온·습도가 일정하게 유지되어 역사 내 라돈농도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다. 또한 열차의 운행에 따라 발생되는 풍속 및 기압의 변동은 역사 내 라돈농도 발생에 큰 영향을 주고 있음을 시사하고 있다. 즉, 열차의 운행에 따른 역사 내 풍속 및 기압의 변화(감압)로 인해 공기의 분자운동 및 대류운동의 증가로 역사 내 토양 및 건축구조물에서 방출되는 라돈의 양이 증가하는 것으로 여겨진다.

수 중의 라돈농도 370 kBq/m^3 은 대략 대기 중의 라돈농도를 37 Bq/m^3 정도 증가시킨다는 연구 보고에 따라 수 중의 라돈농도와 공기 중의 라돈농도와의 관계를 살펴보기 위해 지하수에 용해되어 있는 라돈평균농도와 승강장 및 역사 내 공기중의 라돈평균농도와의 상

관관계를 살펴보면 Table 11과 같다. 노반지하수의 라돈평균농도와 저수조 지하수의 라돈평균농도와의 상관성은 상관계수가 0.736으로 높은 상관관계를 보이고 있으며($p < 0.05$), 재활용수의 라돈평균농도와의 상관성 역시 상관계수가 0.513로 양의 상관관계를 보였다($p < 0.01$). 이는 노반 지하수(지하유입수)중의 라돈평균농도가 저수조의 물과 재활용수의 라돈평균농도에 큰 영향을 미치고 있음을 시사하고 있다. 또한 지하수에 용해되어 있는 라돈평균농도와 승강장 및 역사 내 공기 중의 라돈평균농도와의 상관관계를 살펴보면 상관계수가 0.573으로 양의 상관관계를 보였으며($p < 0.05$), 재활용수의 라돈평균농도와 승강장의 공기 중 라돈평균농도와의 상관성 또한 상관계수가 0.654로 양의 상관관계를 나타냈다($p < 0.01$). 이는 대부분의 집수정이 승강장과 터널의 연결부 및 터널 내부에 설치되어 있어 집수정 내 지하수에서 방출된 라돈이 열차의 운행에 의하여 유동하면서 역사내 공기중의 라돈농도에 기여할 수 있는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

이 연구는 지하철역사의 승강장, 대합실, 역무실 및 외기의 4개 지점에서 공기 중 라돈농도분포 및 지하철 역사내 지하수내의 라돈농도분포를 조사하기 위하여

Table 11. Correlation between radon concentrations in the underground water and airborne radon concentrations in the subway stations

	Road water concentration	Storing water concentration	Reclaimed water concentration	Platform concentration	Concourse concentration
Road water concentration	1.000				
Storing water concentration	0.736**	1.000			
Reclaimed water concentration	0.513*	0.184	1.000		
Platform concentration	0.573*	0.367	0.654**	1.000	
Concourse concentration	0.375	0.165	0.412	0.743**	1.000

*Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

1999년 1월부터 1999년 5월까지 서울시의 제 2기 지하철 역사 중 라돈농도가 높은 곳으로 여겨지는 17개 역사를 대상으로 역사 내 공기중 장·단기 라돈농도 및 지하수 중의 라돈농도를 측정하였으며, 라돈농도에 영향을 주는 인자로 알려진 기상요인(기온, 습도, 기류 및 기압)과의 상관분석 및 지하수의 라돈농도와 승강장과 대합실의 공기중 라돈농도와의 상관성분석을 수행하여 그 결과를 제시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 17개 역사의 승강장, 대합실, 역무실 및 외기의 공기 중 누적 라돈평균농도는 각각 78.9 Bq/m^3 , 38.2 Bq/m^3 , 61.8 Bq/m^3 , 20.1 Bq/m^3 으로 미국 환경청의 실내 라돈농도 권고치인 148 Bq/m^3 에 비해 낮은 수준을 나타내고 있는 것으로 조사되었다.

2. 16개 역사의 승강장에서 일일 공기중 라돈농도분포를 조사한 결과 최대 일일 평균 라돈농도를 나타낸 역사는 5호선 종로3가역(116.55 Bq/m^3)로 조사되었으며, 최소 일일 평균 라돈농도를 나타낸 역사는 7호선 벽골역(19.55 Bq/m^3)으로 조사되었다. 역사별 라돈농도는 역사의 물리적 특성(급·배기량, 심도, 구조 등) 및 기타 운영상(시간대별 환기량조절)의 차에 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

3. 지하철 승강장의 이용시간을 열차 운행 정지시, 오전첨두시, 비첨두시, 오후첨두시 그리고 심야시간으로 구분하여 각 시간대별 라돈평균농도를 비교한 결과 비첨두시와 운행정지시 승강장내 공기중 라돈농도가 오전첨두시, 오후첨두시 및 심야시간에 비해 높은 것으로 조사되었다.

4. 지하철역사 내 노반, 저수조 및 재활용수 중의 평균라돈농도 조사 결과 선로주변 노반 지하수의 라돈평균농도가 저수조와 재활용수의 라돈평균농도보다 높은 것으로 조사되었다.

5. 승강장에서의 기상인자와 공기중 라돈농도와의 상관분석 결과 라돈농도와 풍속과의 상관정도는 0.251로 양의 상관관계를($p < 0.01$), 기압과의 상관정도는 -0.625의 음의 상관관계를 보였다($p < 0.01$). 온도 및 습도와 공기중 라돈농도와의 상관성은 통계적으로 유의한 관계를 나타내지 않았다. 또한 지하수의 라돈농도와 승강장 공기중의 라돈농도간의 상관성분석 결과 집수정 내 지하수의 라돈농도가 승강장 공기 중의 라돈농도에 영향을 주는 것으로 조사되었다($r=0.573$, $p < 0.05$).

이상의 연구결과 지하철 역사의 공기 중의 라돈농도는 역사의 환기에 의한 대류운동의 증가에 따라 영향을 받는 것으로 여겨지며, 지하수 유입에 의한 지하수의 라돈농도에도 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한

지하수 중의 라돈농도는 기압, 온도, 습도와 같은 대기의 기상요인, 지질학적 특성, 지하수의 역사 내 체류시간 및 지하수량 등에 의존하므로 지하철 지하공간에서의 라돈대책을 적절히 연계하기 위해서는 향후 보다 장기적인 연속측정이 필요할 것이다. 또한 지하철 이용시민과 종사자들의 건강보호측면에서 역사 내 환기시스템의 강화와 순환근무제 도입 및 지하수를 이용한 물청소의 금지와 같은 지하철 지하공간내의 라돈농도 저감을 위한 대책 마련 등이 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

참고문헌

1. United Nations, Sources : Effects and risks of ionizing radiations, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 report to the General Assembly, with Annexes. United Nations, New York, 1988.
2. International Commission on Radiological protection(ICRP), "Lung cancer risk from indoor exposure to radon and radon daughters" ICRP publication 50, Annals of the ICRP 17(1), 1987.
3. National Research Council, Health risk of radon and other internally deposited alpha emitters, report of the Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation(BEIR-IV). National Academy Press. Washington D.C., 1988.
4. Khalid Jamil, K. K. Al-Ahmady : Relative performance of different types of passive dosimeters employing solid state nuclear track detectors. *Health Phys.*, 73(4), 629-632, 1997.
5. United States Environmental Protection Agency(EPA) : A citizen's guide to radon, U.S.EPA. ANR-464, 4022-K-92-001, 1992.
6. 김윤신 : 우리나라 일부 주택 내 라돈 농도에 관한 조사 연구. *한국환경위생학회지*, 16(1), 1-7, 1990.
7. 김윤신 : 원전주변 주택의 실내의 라돈농도에 관한 조사 연구. *대한보건협회지*, 17(2), 60-66, 1991.
8. 김동술, 김윤신, 김신도, 신응배, 김성천, 유정석 : 서울시 지하철역내의 라돈농도분포 및 저감대책. *한국대기보전학회지*, 9(4), 271-277, 1993.
9. 이철민, 김윤신, 박원석, Takao Iida : 주요 5개 도시의 실내외 라돈농도 조사 연구. *대한위생학회지*, 17(3), 75-82, 2002.
10. 김윤신, 이철민, 김현탁, Takao Iida : Alpha Track Detector를 이용한 실내외 라돈 농도조사에 관한 연구. 28(5), 71-76, 2002.
11. 김윤수, 추병길, 정주영, 김윤신, 이철민 : 서울시 지하철역사의 라돈농도 측정분석. *한일환경세미나*, 대기환경과 라돈을 중심으로. 65-81, 1998.
12. 한국자원연구소 : 지질시료 분석체계 및 정도관리시스템개발(I). 347, 1995.
13. Stranden, E. : Building materials as a sources of indoor radon. In: Radon and its decay products in

- indoor air, W. Nazaroff and A. Nero (eds), 1-43, John Wiley and Sons, New York, 1988.
14. Phillips, C., Khan, A. and Leung, H. : The nature and determination of the unattached fraction of radon and thron progeny, In: Radon and its decay products in indoor air, W. Nazaroff and A. Nero (eds), 203-250, John Wiley and Sons, New York, 1988.