

서울 일부 지하철 공기 중 라돈과 토론 발생 특성

곽현석^{1*} · 김소연² · 박지훈³ · 최상준⁴ · 박동욱^{2*}

¹근로복지공단 직업환경연구원, ²한국방송통신대학교 환경보건학과,
³서울대학교 보건환경연구소, ⁴대구가톨릭대학교 산업보건학과

Characteristics of airborne radon and thoron levels monitored in Seoul Subway stations and circulation lines

Hyunseok Kwak^{1*} · So-Yeon Kim² · Jihoon Park³ · Sangjun Choi⁴ · Dong-Uk Park^{2*}

¹Institute of Occupational and Environmental Health, Korea Workers' Compensation and Welfare Service

²Department of Environmental Health, Korea National Open University

³Institute of Health and Environment, Graduate School of Public Health, Seoul National University

⁴Department of Occupational Health, Daegu Catholic University

ABSTRACT

Objective: This study aims to characterize airborne radon and thoron levels (Bq/m³) generated from working environments in three subway stations in Seoul.

Method: A radon and thoron detector (EQF3220) was used to monitor real-time airborne radon and thoron levels (Bq/m³) and their daughters (Bq/m³) every two hours. They were monitored not only in the driver's cabin of seven circulation lines, but also three offices, platforms, and water pump reservoirs in the three stations.

Results: The average levels of radon and thoron were 67.9 Bq/m³ (range: 7.2-619.4 Bq/m³) and 44.4 Bq/m³ (range: 4.3-819.2 Bq/m³), respectively. Notably, higher than legal airborne radon levels (600 Bq/m³) were frequently monitored in the driver's cabin of seven circulation lines. Airborne radon levels monitored in the platforms and administrative offices were found to be over 100 Bq/m³. The average equilibrium factors (F) were 0.12 and 0.06, respectively. The percentages detected were found to be 84.9 for radon and 72.4 for thoron, respectively.

Conclusions: Significant airborne radon and thoron levels were frequently found to be generated in subway facilities including water reservoirs, platforms and driver's cabins. Further study is necessary to thoroughly investigate airborne radon and thoron in all subway stations and to devise proper measures.

Key words: indoor air, exposure, radon, subway, thoron

I. 서 론


지하철은 방사성물질이 발생할 수 있는 지질 및 기반 시설에서 운행된다. 특히, 지하철 시설과 환경 정비를


위한 지하수 저장 시설인 펌프장(집수정, 이하 펌프장)은 라돈(Rn²²²) 발생의 근원으로 잘 알려져 있다(Park et al., 2018). 지하철역 별 지질학적 특성, 시설, 환기 수준에 따라 라돈 등 방사성물질의 발생 특성은 다를


*Corresponding author: Dong-Uk Park, Tel: 02-3668-4707, E-mail: pdw545@gmail.com


Department of Environmental Health, Korea National Open University, 86 Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul, Republic of Korea 03087


Received: May 13, 2019, Revised: June 12, 2019, Accepted: June 20, 2019

 Hyunseok Kwak <https://orcid.org/0000-0002-6893-3208>

 So-Yeon Kim <https://orcid.org/0000-0001-8080-3126>

 Jihoon Park <https://orcid.org/0000-0002-4829-5587>

 Sangjun Choi <http://orcid.org/0000-0001-8787-7216>

 Dong-Uk Park <http://orcid.org/0000-0003-3847-7392>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수 있다. 근로복지공단 업무상질병사례집(2007-2012)에 따르면 해당기간 지하철 노동자가 호흡기 관련 직업병으로 인정받은 사례는 원발성 폐암 8건, 특발성폐섬유화증 1건, 만성호흡부전 1건이었고(KCOMWEL, 2014), 아직 공식적으로 발표되지 않은 기간(2013-2017)의 원발성 폐암 10건, 천식 1건까지 포함하면 총 21건이었다. 부산지역 1명(천식)을 제외하고는 모두 서울교통공사(구 서울메트로) 소속 노동자였다.

지하철 환경에서 폐암을 포함한 호흡기질환을 일으킬 수 있는 주요 유해인자는 라돈, 토론(Tn^{220}), 디젤연소배출물, 바이오에어로졸, 먼지 등을 들 수 있다. 지하철 환경을 대상으로 수행된 국내외 연구에서는 주로 먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$), 다핵방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs), 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 금속 등의 발생과 노출을 다뤘고(Fromme et al., 1997; Fromme et al., 1998; Ripanucci et al., 2006; Kam et al., 2011), 연구장소도 주로 지하철 승객들이 노출될 수 있는 객차, 승강장 등이었다. 지하철에서 발생하는 라돈과 토론 등 방사성물질 발생과 관련된 연구는 거의 없었다. 공기 중 라돈 방사성물질은 산업안전보건법상 작업환경측정대상 인자에도 해당되지 않아 지하철에서 이들의 발생 특성을 파악할 수 없는 상태이다. 실내공기질관리법에 따라 지하철 역사에서 누적 평균 라돈 강도를 측정하는 것만으로는 지하철 환경에서의 라돈 발생은 물론 노동자의 노출 위험을 제대로 평가하기 어렵다(MOE, 2018). 본 연구의 목적은 서울 지역 일부 지하철역과 운행 호선에서 노동자 및 일반시민의 노출 가능성이 높은 일부 장소를 대상으로 공기 중 라돈과 토론의 발생 특성을 평가하고 관리 대책을 제안하는 것이다.

II. 대상 및 방법

1. 대상

전국 지하철은 6개 도시(서울, 인천, 부산, 대전, 대구, 광주) 34개 노선에서 총 841개 역이 운영되고 있다. 가장 오래된 지하철은 서울 1호선으로 1974년부터 운행되고 있다(Park et al. 2018). 이 중 서울의 3개 지하철역(A역, S역, D역)의 역사, 승강장, 지하수 펌프장, 그리고 일부 호선의 승무칸(승무원)을 조사 대상으로 하였다. 역사에서는 펌프장, 역무실, 승강장에서 각 하루씩, 연속 3일 동안 모니터링하였다. 승무칸은 6개

호선에서 7명(인천 a호선 1명, 서울 a호선 1명, 수도권 d호선 2명, 서울 c호선 1명, 서울 d호선 1명, 서울 e호선 1명)을 대상으로 운행할 때 일부 시간대에서 시간별 공기 중 라돈과 토론을 측정하였다.

2. 공기 중 라돈(Rn)과 토론(Tn) 모니터링

Radon & Thoron detector(Model. EQF-3220, SARAD GmbH, Germany)로 공기 중 라돈과 토론 그리고 이들의 딸핵종 농도를 동시에 실시간으로 측정하였다(SARAD, 2012; SARAD., 2013). 대략 1 미터 높이에 측정 장비의 흡입구를 위치시키고, 승무칸은 15분 간격으로 다른 장소는 2시간 간격으로 연속모니터링 하였다. 측정기기 상의 빠른(fast) 모드로 측정된 결과는 단시간 동안 라돈이 붕괴되어 생기는 딸핵종 Po-218만 측정되어 공기 중 라돈이 과소평가될 수 있다. 공기 중 라돈 측정자료 중 부등호(∞)로 표시된 값은 검출한계 미만으로 간주하고 공기 중 농도 자료 분석에서 제외하였다.

3. 라돈과 토론의 방사평형인자와 평형등가농도

공기 중 라돈과 토론의 방사평형인자(Equilibrium factor, F)는 본 연구에서 직접 측정한 공기 중 라돈과 토론의 평형등가농도(Equivalent equilibrium concentration, EEC, EEC_{rn} , EEC_{tn} , Bq/m^3)를 공기 중 라돈과 토론의 농도로 나눈 값이다.

- F_{rn} = 라돈의 평형등가농도(EEC_{rn})/라돈 농도
- F_{tn} = 토론의 평형등가농도(EEC_{tn})/토론 농도

평형등가농도는 공기 중 라돈이나 토론 농도가 평형 상태에 도달했을 때 딸핵종의 농도이다. 또한, 공기 중 라돈과 토론, 그리고 이들의 딸핵종 검출률(%), 라돈과 토론 농도의 비(Ratio), 라돈 딸핵종 농도(EEC_{rn})와 토론 딸핵종 농도(EEC_{tn})의 비(Ratio)를 산출하였다.

4. 지하철 침실에서 라돈 누적 농도

서울 지하철 49개역의 침실(지하철 역사 내 일반 근무자 및 숙직 근무자의 휴식 공간) 천정에 2018년 10월 8일부터 11월 20일까지 시간적분식 라돈측정기(Model: α -Track(D40 mm/H35 mm), Rn-tech Co., Ltd., Korea)로 누적하여 공기 중 라돈 농도를 측정했다. 측정이 완료된 시료는 Bowser-morner로 부터 인증 받은 전문분석기관에 의뢰하였다. 알파트랙은 라돈이 붕괴하면서 발생하는 알파선의 전리작용을 이용하는

시간 적분형 라돈 검출기이다. 즉, 알파선에 의해 LR-115 표면에 생성된 분자구조결합을 화학 에칭(10% NaOH solution)으로 확대한 후 현미경으로 판독하고 단위 면적당 비적의 수를 라돈 농도로 환산하는 원리이다. 시간별로 라돈 발생 농도를 알 수 없고 토론을 모니터링할 수 없는 단점이 있다.

5. 자료 분석

장소 별 공기 중 라돈과 토론, 그리고 이들의 딸핵종 농도는 분산분석(analysis of variance, ANOVA)으로

비교하였다. 기술통계를 비롯한 모든 자료 분석은 STATA (ver. 11, Stata Corp LP, USA)를 이용하였다.

III. 결 과

1. 승무칸의 공기 중 라돈과 토론 발생 특성

서울과 수도권 지하철 일부 승무 칸에서 공기 중 라돈과 토론 농도가 특정 시간대에 100 Bq/m³ 이상 발생하는 것을 확인하였다. 특히, 서울 d호선 승무칸에서 동일한 시간대에 공기 중 라돈 농도가 최대 700

Table 1. Summary of airborne radon and thoron levels by subway environment or location

Location	Radon (Bq/m ³)					Thoron (Bq/m ³)				
	Number of measurements detected	AM	SD	Range	p	Number of measurements detected	AM	SD	Range	p
Platform	32	39.4	35.6	7.2-151.1	0.0263	30	20.9	19.8	4.6-74.5	<0.0001
Driver cabin	71	82.0	96.1	10.2-619.4		40	115.1	141.8	30.0-819.2	
Office	37	39.8	29.1	5.9-134.5		35	16.0	13.1	4.3-66.7	
Pump station*	51	86.5	142.2	6.1-543.6		58	25.0	12.6	8.3-60.2	
Total	191	67.9	97.7	5.9-619.4		163	44.4	81.5	4.3-819.2	

Abbreviations: AM, arithmetic mean; SD, standard deviation; P, significance of ANOVA result.,

* underground water reservoir for maintain subway facility including tunnel

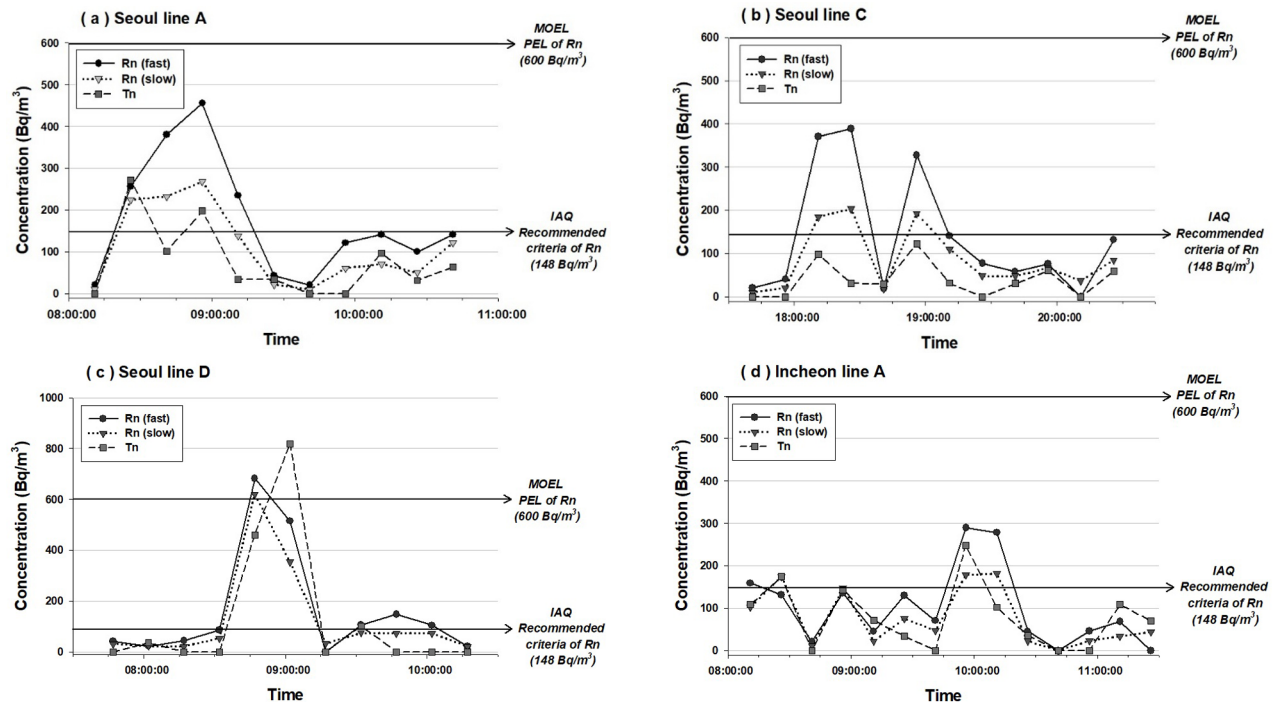


Figure 1. Radon and thoron levels measured at the personal zone in driver room. Two lines were excluded due to either low level or short time monitored

Bq/m³, 토론 농도는 최대 800 Bq/m³까지 측정되었다. 인천 a호선 승무칸 특정 시간대에서도 높은 공기 중 라돈(300 Bq/m³)과 토론(200 Bq/m³) 농도가 측정되었다. c호선에서는 공기 중 라돈 농도가 350~450 Bq/m³, 토론 농도는 50 Bq/m³수준이었다. 승무칸에서 라돈과 토론의 전체 평균 농도는 100 Bq/m³ 이하 였지만, 각각 최대 619.4 Bq/m³와 819.2 Bq/m³의 수준을 보인 시

간대가 있었다(Table 1 & Fig. 1).

2. 펌프장, 역사, 승강장에서 라돈 발생 특성

지하철 3개역의 펌프장, 역무실, 승강장에서 1일 이상 연속(S역과 D역: 역무실→승강장→펌프장 순서, A역: 펌프장→역무실→승강장 순서)해서 시간 별로 라돈과 토론 농도를 측정하였다(Fig. 2). A역에서 공기 중

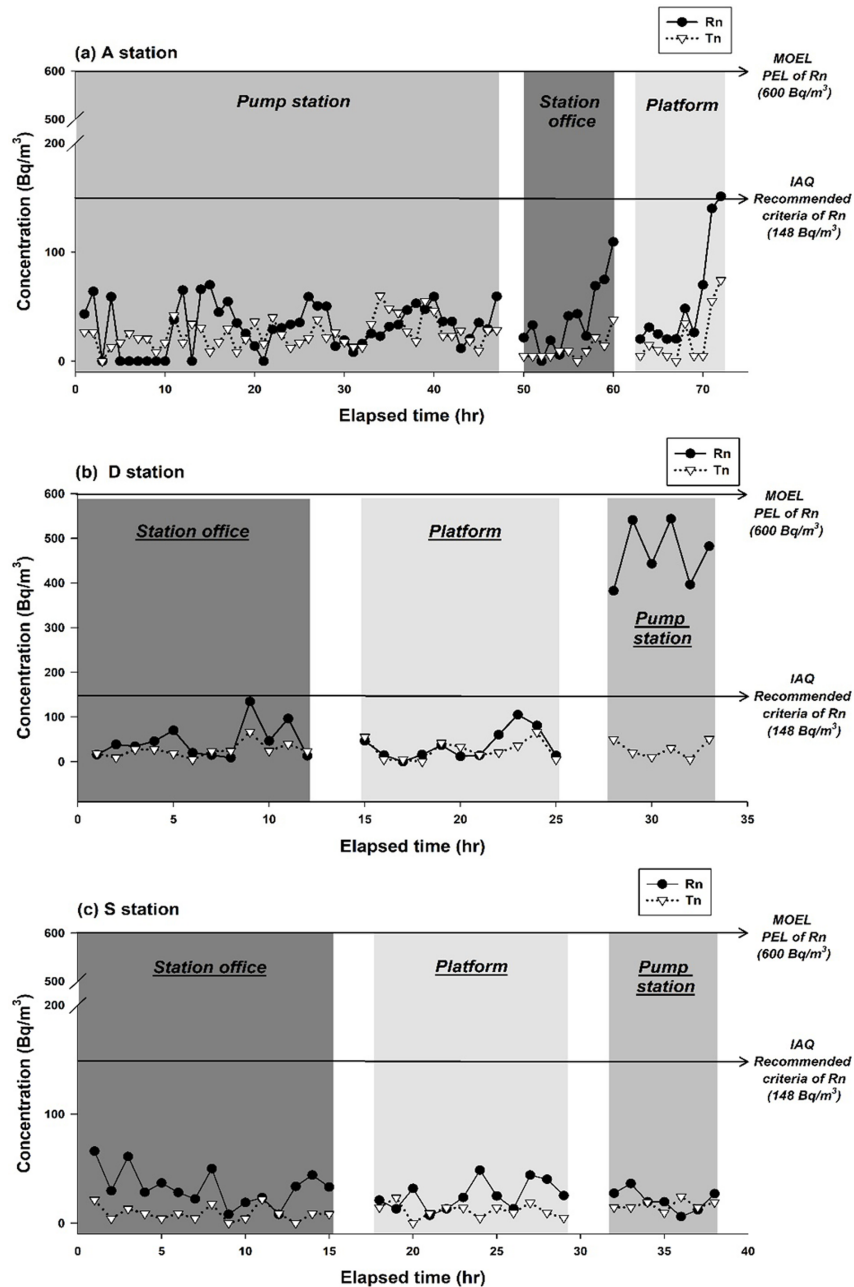


Figure 2. Temporal variations of radon and thoron at the office, platform and pump station in each station. All results monitored at slow mode.

라돈 최고 농도는 펌프장 65 Bq/m³, 역무실109 Bq/m³, 승강장151 Bq/m³로, 라돈 발생원(펌프장)보다 오히려 역무실과 승강장에서 높았다. D역의 경우 펌프장 근처에서 라돈의 최고 농도는 543 Bq/m³, 최저 농도는 382 Bq/m³이었다. 역무실과 승강장은 새벽에 공기 중 라돈 농도가 높아지는 경향을 보였다. 역무실은 오전 7시에 96 Bq/m³이었고, 승강장은 새벽에 최고 농도(105 Bq/m³)를 보였다.

역무실과 승강장에서의 라돈 농도는 모두 100 Bq/m³ 이하로 실내공기질관리법상 라돈 기준(148 Bq/m³)보다는 낮았다(Fig. 3a). 토론의 경우, 모든 측정 장소에서 평균 9.0~27.7 Bq/m³ 수준이었고, D역의 펌프장과 역무실, 승강장에서의 농도가 S역과 A역에 비해 상대적으로 높았다(Fig. 3b).

3. 지하철 라돈과 토론의 발생 특성

라돈(84.9%)과 라돈 딸핵종(98.2%)의 검출률은 토론

(72.4%)과 토론 딸핵종(23.6%)에 비해 높았다(Table 2). 라돈의 평균 농도는 펌프장과 승무칸이 다른 장소(승강장, 역무실)에 비해 유의하게 높았다(p=0.0263). 반면 토론은 승무칸에서 평균 농도가 115.1 Bq/m³로 다른 장소에 비해 현저히 높았으며, 최고 농도도 819.2 Bq/m³로 가장 높은 수준이었다(Table 1).

공기 중 토론과 라돈 평균 F값은 0.13과 0.06으로 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서 이룬 값으로 가정한 라돈의 F값(0.4)보다는 낮고 토론의 F값(0.02)보다는 높았다(UNSCEAR, 2008). 라돈은 펌프장에서의 F값이 평균 0.18로 다른 장소에 비해 유의하게 높았다. 반면 토론은 승무칸에서 토론 F값이 0.09로 다른 장소에 비해 유의하게 높았다(Table 3). 라돈과 토론, 그리고 라돈 딸핵종(EEC_{rn})과 토론 딸핵종(EEC_{tn})의 비는 대부분 라돈과 딸핵종의 농도가 토론보다 높았지만 승무칸에서는 반대로 토론의 딸핵종이 라돈보다 높았다(Table 4).

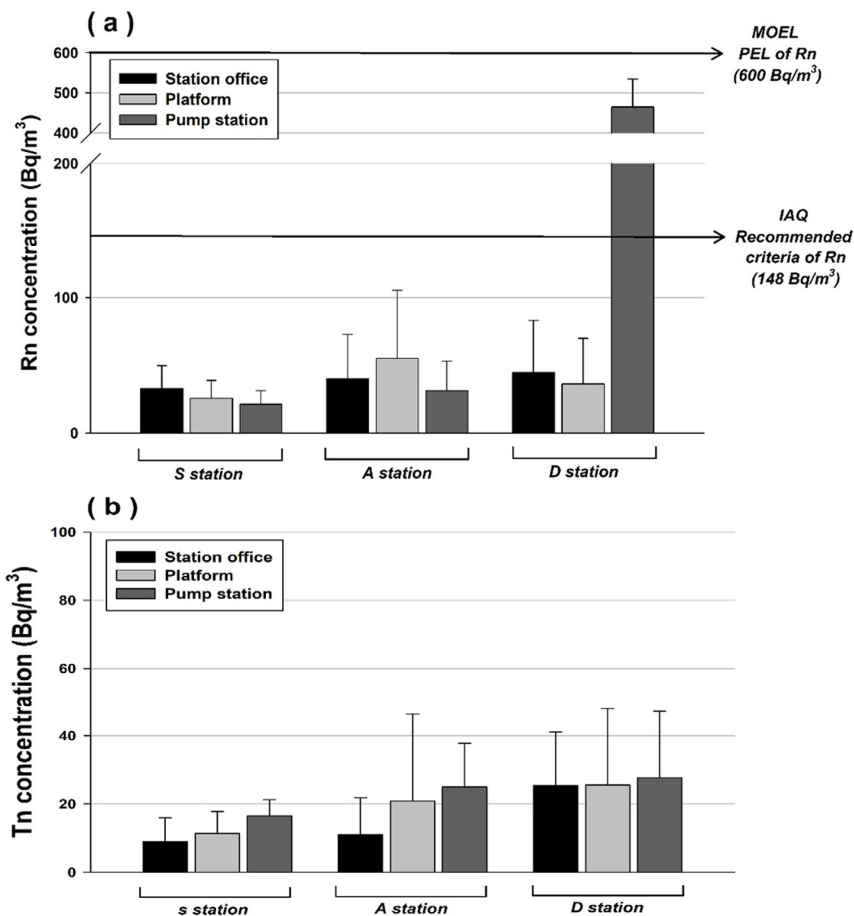


Figure 3. Differences of radon(a) and thoron(b) levels between the monitoring locations. All results monitored at slow mode.

Table 2. Proportion of radon, thoron and their daughter detected(%)

Location	Total measurements	Radon	%	Radon-EEC	%	Thoron	%	Thoron-EEC	%
Platform	33	32	97.0	33	100.0	30	90.9	8	24.2
Driver cabin	94	71	75.5	90	95.7	40	42.6	24	25.5
Office	38	37	97.4	38	100.0	35	92.1	9	23.7
Pump station *	60	51	85.0	60	100.0	58	96.7	12	20.0
Total	225	191	84.9	221	98.2	163	72.4	53	23.6

Abbreviations: EEC, equilibrium equivalent concentration.

* underground water reservoir for maintain subway facility including tunnel

Table 3. Equivalent equilibrium factor for radon and thoron by subway environment or area

Location	Radon (F)					Thoron (F)				
	Number of measurement detected	AM	SD	Range	p	Number of measurement detected	AM	SD	Range	p
Platform	32	0.102	0.056	0.029-0.232	0.0070	30	0.032	0.033	0.004-0.094	0.0893
Driver cabin*	71	0.108	0.117	0.004-0.642		40	0.093	0.084	0.009-0.226	
Office	37	0.128	0.147	0.011-0.904		35	0.038	0.027	0.009-0.096	
Pump station*	51	0.176	0.118	0.063-0.585		58	0.045	0.053	0.011-0.195	
Total	191	0.129	0.119	0.004-0.904		163	0.056	0.062	0.004-0.226	

Abbreviations: AM, arithmetic mean; SD, standard deviation; p, significance of ANOVA result.

* underground water reservoir for maintain subway facility including tunnel

Table 4. Ratios of radon and thoron, and their daughter levels by subway environment or area

Location	Ratio of radon and thoron level (Rn/Tn)					Ratio of radon and thoron's daughter level (Rn-EEC/Tn-EEC)				
	Number of measurements detected	AM	SD	Range	p	Number of measurements detected	AM	SD	Range	p
Platform	29	2.94	2.96	0.36-14.13	0.1391	8	6.15	2.68	3.15-9.93	<0.0001
Driver cabin *	35	1.40	1.23	0.31-6.59		22	0.68	0.64	0.02-2.52	
Office	34	3.29	2.01	0.38-8.48		9	10.58	6.67	4.18-22.36	
Pump station*	50	3.75	7.37	0.25-43.95		12	90.35	99.98	0.70-254.62	
Total	148	2.93	4.67	0.25-43.95		51	24.39	59.89	0.02-254.62	

Abbreviations: Rn, radon; Tn, thoron; EEC, equilibrium equivalent concentration; AM, arithmetic mean;

SD, standard deviation; p, significance of ANOVA result

* underground water reservoir for maintain subway facility including tunnel

4. 지하철 침실에서 누적 라돈 농도

지하철역 내 침실에서 측정된 라돈 누적 농도는 5~145 Bq/m³였으며, 이 중 5개 역에서는 100 Bq/m³를 초과하였다(결과 제시하지 않음). 이는 일부 역 침실에서 유의미한 라돈이 발생하고 있어 노동자 노출 가능성을 나타냈다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 서울 일부 지하철 환경(역무실, 승강장, 승무칸, 펌프장)에서 라돈과 토론의 발생 특성을 조사하였다. 지하철 일부 장소에서 공기 중 라돈과 토론, 그리고 이들의 딸핵종이 발생하는 것을 확인하였다. 일

부 승무칸 내에서 특정 구간의 일정 시간대에서 높은 농도의 라돈(최고 619.4 Bq/m^3)과 토론(최고 819.2 Bq/m^3)이 발생하였다. 이는 특정 지역의 공기가 승무칸의 라돈 농도를 높이는 것으로 판단된다. 본 연구결과는 지하철 노동자와 지하철을 이용하는 시민들의 라돈과 토론 노출 가능성이 있다는 것을 나타낸 것이다.

공기 중 토론의 환경 기준은 아직 제정되지 않았다. Chen & Moir (2012)는 공기 중 라돈 농도 1 Bq/m^3 당 토론 $4.5 \sim 5 \text{ Bq/m}^3$ 를 같은 수준으로 제안한 근거에 따라 공기 중 토론 농도를 라돈 농도로 환산해서 평가했다. 승무칸에서 측정된 최대 공기 중 토론 농도 819.2 Bq/m^3 를 라돈 농도로 환산하면 $163.8 \sim 182.0 \text{ Bq/m}^3$ 가 된다. 공기 중 토론을 라돈으로 환산한 수치에 최고 라돈 농도(619.4 Bq/m^3)를 더하면 $783.2 \sim 801.4 \text{ Bq/m}^3$ 으로 고용노동부의 라돈 기준(600 Bq/m^3)을 초과하였다. 각 호선 별 승무칸의 특정 운행 구간(시간대)에서 높게 나타난 원인을 찾을 수 없었다. 이는 이전 특정구간역에서 누적된 결과로 나타난 현상이기 때문이다. 승무칸에서는 토론의 농도와 딸핵종 비가 라돈보다 더 높은 수준이었다(Table 4). 토론의 평균 농도는 115.1 Bq/m^3 로 라돈의 평균 농도(82.0 Bq/m^3)보다 높았다(Table 1). 이는 공기 중 라돈과 토론이 붕괴한 딸핵종의 반감기가 10시간 등으로 서로 비슷하고 환기 수준에 따른 것으로 판단된다. Chen & Harley (2018)는 기존 문헌에서 보고된 공기 중 토론 농도를 종합 비교한 결과, 측정 위치와 장소에 따라 차이가 큰 것을 확인하였다. 이 연구에 따르면, 토론 농도는 벽과 바닥 근처(30 cm 이내)에서 높고, 30 cm 이상 떨어진 곳에서는 낮아지는 반면, 토론의 딸핵종 농도는 균일했다.

승무칸에서 라돈과 토론을 모니터링한 사례는 본 연구가 처음으로, 특정 호선과 특정 시간대에서 승무원들은 높은 라돈과 토론에 노출될 가능성이 있다는 것을 발견했다. 지하철 승무칸과 객차에서 공기 중 라돈과 토론 발생 특성을 종합적으로 조사할 필요가 있다.

서울 지하철 3개역 내 펌프장, 승강장, 역무실에서 측정한 라돈과 토론 농도, 환기상태, 공기 흐름 등의 조건을 종합적으로 판단하면 펌프장에서 발생한 라돈과 토론이 본선 터널, 승강장, 역사 농도에 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다(Fig. 2). 이러한 경향은 승무칸에서 특정 시간대 라돈과 토론 농도의 증가와도 연관될 수 있다. 한편, 지하철 운행과 역무실업무가 종료된 후에는 환기가 불충분하여 펌프장보다 라돈 농도가 높아

지는 경향을 보였다. 따라서, 지하철 역사별로 펌프장에서 라돈과 토론의 발생 가능성 및 발생 수준, 그리고 이러한 발생 특성이 승무칸, 역사, 승강장에서의 농도에 미치는 영향 등을 종합적으로 규명하여 라돈과 토론의 발생을 최대한 억제하는 대책을 마련할 필요가 있다.

지하철 주요 장소(펌프장, 역사, 승강장 등)와 승무칸에서의 공기 중 라돈은 총 225회 모니터링 중 191회(85%), 토론은 163회(72%)가 검출되었다. 공기 중 농도수준도 펌프장을 제외한 모든 측정 장소에서 라돈 농도가 토론보다 높았다. 이는 자연환경에서 공기 중 라돈이 토론보다 훨씬 높게 나타나는 일반적 경향과 일치한다(Table 1 & Fig. 1). 공기 중 라돈 농도가 토론보다 높은 것은 반감기가 약 3.8일로 토론(1분 정도)보다 길고, 실내 공간으로 볼 수 있는 지하 환경에서 어느 정도 균질화될 수 있기 때문이다. 또한, 대부분 라돈과 토론의 딸핵종 농도 비 차이가 훨씬 큰 것으로 나타났으나, 승무칸에서 토론의 딸핵종농도 비는 라돈의 딸핵종농도 비보다 높은 특이한 현상을 보였다(Table 2).

본 연구에서 보고한 공기 중 라돈 조사 결과는 세계보건기구(World Health Organization, WHO)기준인 100 Bq/m^3 을 초과한 장소, 시간대 등이 다수 확인되었고, 공기 중 토론 농도도 국외 실내 환경에서 보고된 결과보다 높은 수준이었다. 지하철 공기 중 라돈과 토론의 발생 특성에 관한 본 연구결과를 과거에 보고되었던 서울과 부산 지하철 일부 역사와 장소 별로 비교하였다. 1999년부터 2013년까지 지하철 환경에서의 공기 중 라돈 자료는 서울시보건환경연구원(2009~2014년, 부산포함), 한국산업안전보건공단(2008년), 직업성폐질환연구소(2012~2013년)의 조사 결과를 종합한 연구에서(Park et al., 2018), 지하철 승강장과 역무실 등 여러 장소에서 WHO의 권고 기준 100 Bq/m^3 와 우리나라 환경부 기준 148 Bq/m^3 를 초과한 것을 보고했다. 서울 지하철(2000년 이후 자료)에서 공기 중 라돈 수준이 148 Bq/m^3 를 넘는 승강장, 대합실, 역무실(펌프장 제외)은 총 86개였으며, 부산은 역무실 3개소에서 148 Bq/m^3 를 초과하였다. 조사대상 지하철 역과 장소별 라돈 측정 결과는 박동욱 등(2018)이 수행한 연구에서 자세히 고찰되어 있다(Park et al., 2018).

우리나라 지하철 환경은 지역과 역의 특성에 따라 농도 차이는 있지만 라돈과 토론 발생 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 그러나 지금까지 지역별(서울, 인천, 부산, 대구, 광주 등) 모든 역을 대상으로 라돈과 토론

발생 가능성과 수준을 조사한 경우가 없었다. 서울과 부산 외의 지역은 라돈 조사를 실시한 적이 전혀 없었다.

본 연구에서는 일부 역사의 침실에서 WHO 기준인 100 Bq/m^3 를 넘는 경우가 확인되었다. 환경 기준을 넘지 않더라도 라돈 발생을 줄이거나 노출을 피할 수 있는 근본적 조치가 필요하다. 지하 환경이 공기의 신선도, 습도, 온도 등 공기질측면에서 건강에 좋지 않다는 것은 잘 알려져 있다. 노동자의 건강을 보호하는 방안으로 지하철역 근처 외부 지상 주거시설을 활용하는 방안을 검토하는 것이 필요하다.

국내외 라돈에 대한 조치 기준은 다양하다. Colgan & Gutiérrez (1996)이 세계 20개국의 작업장에 대한 라돈 조치 수준(Action level)을 고찰한 결과, 최저 20 Bq/m^3 (네덜란드)부터 최고 $3,000 \text{ Bq/m}^3$ (스위스)에 이르기 까지 범위가 매우 넓었다(Colgan & Gutiérrez, 1996). 영국은 최소 1개월 이상 누적 측정된 공기 중 라돈 농도가 400 Bq/m^3 를 초과하면 정밀조사를 하도록 하고 있다. 우리나라 산업안전보건법 고시 제 2018-62호(2018. 7.30., 일부 개정)에서 작업장 기준 농도로 600 Bq/m^3 를 제시하고 있다.

전국 지하철 주요 장소 별 라돈과 토론 발생 가능성 및 발생 수준 등에 대한 종합적인 자료 부족으로 지하철 환경에서의 라돈 노출 저감대책을 세우기가 어렵다. 지하철 내 모든 펌프장과 주요 장소(승강장, 역사)에서 라돈 발생 가능성과 발생 수준을 조사하여 라돈 지도(Radon map)를 작성하고 이를 근거로 장소별 적절한 공학적 행정적 대책을 마련하는 조치가 필요하다.

본 연구결과는 서울의 특정 역을 대상으로 특정 계절과 시기에 측정된 결과이기 때문에 지하철 환경에서 라돈과 토론 발생을 대표할 수 없다. 그러나 지하철 환경에서 공기 중 라돈과 토론의 발생 가능성을 확인하고 관리대책의 필요성을 제시하는 연구결과로 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

V. 결 론

서울 지하철 3개역(S역, A역, D역)과 6개 호선 승무칸에서 공기 중 라돈, 토론과 이들의 딸핵종 농도, 방사평형인자, 검출률 등을 평가하였다. 6개 호선 승무칸에서 공기 중 라돈과 토론 농도가 특정 시간대에 100 Bq/m^3 이상 발생하였다. 특히 서울 d호선 승무칸에서는 고용노동부 라돈기준(600 Bq/m^3)을 초과하였다. 라

돈(84.9 %)과 라돈 딸핵종의 검출률(98.2 %)은 토론(72.2 %)과 토론 딸핵종(23.6 %)에 비해 대부분의 장소에서 높았다. 펌프장과 승무칸에서의 평균 라돈 농도가 다른 장소에 비해 높았다. 대부분 라돈과 딸핵종의 농도가 토론보다 높았지만, 승무 칸에서는 반대로 나타났다. 라돈과 토론의 건강위험과 노동자와 시민의 영향 등을 고려할 때 전국 지하철 역별, 장소별로 라돈과 토론 발생 가능성과 발생수준을 조사하고 이 결과에 적절한 공학적, 행정적 관리 대책 마련이 시급하다.

감사의 글

이 연구는 산업안전보건연구원의 지원을 받아 수행되었음 (2018-연구원-796)

References

- Chen J, Harley NH. A review of indoor and outdoor radon equilibrium factors-Part I: 222Rn. *Health Phys* 2018; 115(4):490-499.
- Chen J, Moir D. The concept of equivalent radon concentration for practical consideration of indoor exposure to thoron. *Int J Env Res Public Health* 2012;9(1):286-293.
- Colgan P, Gutiérrez J. 1996. Cost effectiveness of reducing radon exposure in Spanish dwellings. *J Radiol Prot* 1996;16(3):181.
- Fromme H, Oddoy A, Lahrz T, Pilot M. Aromatic hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and carbon monoxide inside a car and a subway-train. *WIT Trans Ecol Envir* 1997;21(15): 727-734.
- Fromme H, Oddoy A, Piloty M, Krause M, Lahrz T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and diesel engine emission (elemental carbon) inside a car and a subway train. *Sci Total Environ* 1998;217(1-2): 165-173.
- Kam W, Ning Z, Shafer MM, Schauer JJ, Sioutas C. Chemical characterization and redox potential of coarse and fine particulate matter (PM) in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro. *Environ Sci Technol* 2011; 45(16):6769-6776.
- KCOMWEL(Korea Workers' Compensation and Welfare Service). Casebook of occupational diseases. 2014.
- MOE(Ministry of Environment). Article 11-7. Implementation of investigation on Radon. *Indoor Air Quality*

- Management Law. 2018.
- Park DU, Choi S, Kwak H, Park JH. Evaluation of subway workers' exposure to particulate matters, radon, and diesel exhaust emissions. Research Report No. 2018-OSHRI-796. Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI), 2018.
- Ripanucci G, Grana M, Vicentini L, Magrini A, Bergamaschi A. Dust in the underground railway tunnels of an Italian town. J Occup Env Hyg 2006;3(1):16-25.
- SARAD GmbH. Manual for RTM2200 - RPM2200 - EQF3200 - EQF3220 - A2M4000. 2012.
- SARAD GmbH. EQF3220-Radon/Thoron Gas & Decay Product -Monitor for attached and unattached decay products. 2013;1-3.

UNSCEAR(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Sources and effects of ionizing radiation: sources. United nations publications. 2008. Available from: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html.

<저자정보>

박동욱(한국방송통신대학교 교수), 최상준(대구가톨릭대학교 교수), 곽현석(근로복지공단 책임연구원), 박지훈(서울대학교 박사 후 연구원), 김소연(한국방송통신대학교 연구원)