Technical Information

A Study on Distribution and Characteristics of Radon Concentration in Metro Line 1 in Busan

Seongwoo Choi[†] · Youngwook Cha[✉] · Youngman Cho[✉] · Jeonggu Cho[✉]

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Korea

(Received October 18, 2019; Revised December 24, 2019; Accepted January 2, 2020)

Objective : Adverse health effects of Radon with a particular focus on indoor environment has been outlined. Most of the metro stations and platforms are situated under the ground where relatively enhanced concentration of radon has been observed.

Method : On-line measurements of indoor Radon have been made in Metro Line 1 in Busan using RAD-7.

Results and Discussion : The average concentration of Radon was 8.9 Bq/m³ (n=40). In general, a positive relation was shown between the level of radon and the depth of station. Slightly enhanced radon concentrations were observed between 0 a.m. ~ 5 a.m. when the station is closed under the non-operation of ventilation system. Interestingly, the negative relation was seen between the radon level and temperature.

Conclusions : Relatively low levels of indoor radon has been observed in Metro Line 1 in Busan, which may be associated with geographical location of non-granite regions.

Key Words : Radon, Subway, Underground Station, Platform, Concourse

[†] Corresponding author E-mail: choisw7931@korea.kr Tel: 051-309-2921 Fax: 051-309-2939

기술자료

부산도시철도 1호선의 라돈농도 분포 및 특성에 관한 연구

최성우[✉] · 차영욱[✉] · 조영만[✉] · 조정구[✉]

부산광역시 보건환경연구원

목적: 실내 라돈은 제한된 공간에서 인체 건강에 심각한 악영향을 미친다. 도시철도 역사 대부분은 지하공간에 위치하고, 지하철과 같은 지하공간은 라돈성분이 증가하는 것으로 알려져 있다.

방법: RAD-7을 이용하여 지하철 1호선에서 실내공기의 라돈농도를 연속측정하였다.

결과 및 토의: 측정 결과 40개 지하철역에 측정한 평균 라돈농도는 8.9 Bq/m^3 이었으며, 심도가 깊은 지하역사에서 상대적으로 높은 라돈농도가 측정되었다. 지하철 운행이 중단되고 환기시설이 가동되지 않는 0시부터 5시에 라돈 농도가 증가하였고, 승강장과 대합실에서 측정한 평균 라돈농도는 온도가 낮을수록 높은 것으로 나타났다.

결론: 부산 지하철 1호선은 비화강암 지역에 위치하여 상대적으로 낮은 라돈농도가 나타났다.

주제어: 라돈, 지하철, 지하역사, 승강장, 대합실

1. 서론

부산도시철도는 1985년 7월 개통 이래 2018년 기준으로 연간 약 3억3천6백만명이 이용하는 대표적인 대중교통수단이다.¹⁾ 하지만 도시철도 역사의 대부분은 지하공간에 위치하고 자연환기가 어려우므로 다수의 이용객이 밀집하게 되면 다양한 실내공기 오염에 노출될 우려가 있다. 지하역사에 발생하는 오염물질은 미세먼지, 이산화탄소, 라돈, 석면, 휘발성유기화합물 등이 있으며, 이들의 대부분은 인위적으로 생성되지만, 라돈(^{222}Rn)은 다른 실내오염물질과 달리 자연 발생적인 방사성 물질이기 때문에 관리상 어려움이 수반된다.

라돈은 지각의 암석이나 토양 또는 건축자재 등에 존재하는 우라늄(^{238}U)과 토륨(^{232}Th)이 몇 차례 붕괴를 거치는 과정에서 생성되는 무색, 무취, 무미의 기체로 지구상 어디에서나 존재하는 자연방사성 물질이다.²⁾ 다른 물질과 화학적으로 반응을 하지 않는 불활성기체이나 방사선을 내는 성질이 있으므로 매우 불안정하며 물질표면에 흡착성이 강하고 공기밀도보다 약 8배 정도 크다. 라돈 기체와 그 붕괴생성물인 입자상태의 라돈자손은 호흡을 통해 몸속으로 들어와 폐포나 기관지에 잘 달라붙어 손상을 일으킨다. 세계보건기구(WHO) 산하기관인 국제암연구소(IARC: International Agency for Research on Cancer)는 라돈과 라돈자손을 1군 발암물질로 분류하였다. 또한, WHO에서는 전 세계적으로 발생하는 폐암의 3~14%가 라돈에 노출되어 발생한 것으로 보

고, 라돈을 흡연에 이은 두 번째 원인물질로 지정하고 있다.³⁾

대부분의 실내공간에서 검출되는 라돈은 토양가스의 유입에 의한 것이며 건축재료 및 지하수 사용도 원인이 된다.^{2,4)} 토양 및 건축자재의 함수율 등 구조적 요인과 온도, 압력, 습도 등 기상학적인 요인도 실내공간의 라돈분포에 영향을 미치며, 환기정도 등 생활습관도 실내의 라돈농도와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다.^{5,6)}

우리나라는 1989년에 “지하공간환경기준치설정”으로 라돈의 권고기준을 4 pCi/L 로 정하였고, 1996년 “지하생활공간 공기질관리법”에서는 라돈을 오염물질로 규정하였으나 자연방사성 물질이라서 기준을 설정하지 않았다. 그 후 2003년 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”의 제정으로 라돈의 권고기준을 4 pCi/L 로 하였으며, 2010년도에 법이 개정되면서 148 Bq/m^3 을 권고기준으로 하고 있다. 이는 미국의 Action Level과 동일한 수준이다.⁷⁾

현재 국내에서 적용하고 있는 도시철도 지하역사에서의 라돈 저감방법은 지하수 표면으로부터 방출되는 라돈이 공기 중으로 방출되는 것을 억제하기 위해 승강장을 포함한 승강장 근처의 집수로 및 집수정에 덮개를 설치하는 방법과 승강장으로 방출된 라돈의 농도를 희석시키기 위해 환기횟수를 증가시키는 방법 등을 사용하고 있으나, 열차풍에 의해 터널 내부의 고농도 라돈을 함유한 공기가 계속해서 승강장으로 유입되는 한계가 있다.⁸⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위해 국내 라돈관련 연구는 간헐적으로 수행되었

지만 종합적이고 체계화된 학술적 연구는 부족한 실정이며, 특히 다수인이 이용하는 지하철역 내 라돈에 대한 연구는 서울지하철을 중심으로만 진행되었을 뿐 부산지하철 등 지방 도시철도에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.⁹⁻¹²⁾ 따라서, 본 연구는 부산도시철도 이용객의 50% 이상을 수송하는 1호선 40개 역사를 대상으로 승강장과 대합실 라돈농도의 시간적 변화를 조사하여 지하철역 이용 시민 및 역내 작업자의 라돈으로부터 받을 수 있는 위험을 줄이고 공기질 관리 및 유지에 필요한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 부산도시철도 1호선 각 역사 선정지점별로 3월부터 7월까지 단기라돈을 측정하였다. 시료채취는 실내 공기질 공정시험기준 ES 02901.1a에 따라 실시하는 것을 원칙으로 하였으며, 시료채취 당시의 온도·기압·풍속 등 물리적 환경인자에 관한 정보를 기록하였다. 시료채취 지점은 승강장과 대합실에 연속식 측정기인 RAD-7 (DURRIDGE Company, USA)을 사용하여 1시간 간격으로 11:00부터 이틀 후 11:00까지 총 48시간동안 연속적으로 측정하였다. 연속

식 라돈농도 측정기의 원리는 라돈원자가 붕괴할 때 5.49 MeV의 에너지를 가진 알파입자가 방출되는데, 이 에너지를 반도체(실리콘)를 이용하여 전기적 부호로 전환시켜 스펙트럼 또는 문자로 표시한다.

부산도시철도 1호선 40개역은 32개의 지하역사와 6개의 고가역사 및 2개의 지상역사로 이루어져 있으며, 시료의 채취는 일변화 및 지하역사 깊이에 대한 영향을 측정하기 위하여 각 역사의 승강장과 대합실에서 통행량이 많은 지점을 선정하여 라돈농도를 연속적으로 모니터링하였다. Fig. 1과 같이 승강장은 구간 내 정중앙지점, 대합실은 고객센터 앞을 선정하였으며, 측정지점별 역사심도, 평균농도, 측정일자는 Table 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 도시철도 1호선 역사의 라돈농도

부산도시철도 1호선 40개 역사를 대상으로 1시간 간격으로 48시간 동안 측정한 라돈농도는 Table 2와 같으며, 지하역사, 지상역사 및 승강장과 대합실의 산술평균값을 비교하여 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

Platform

Concourse

Fig. 1. Photograph of sampling sites.

Fig. 2. Distributions of radon mean concentration at each site of subway stations.

Table 1. Sampling sites for this study in Busan subway line 1.

Site	Station Depth (m)		Temperature (°C)		Date	Remarks
	Platform	Concourse	Platform	Concourse		
Nopo	-	-	15.8	15.5	3/15-3/17	Ground station
Beomeosa	14.27	9.97	14.9	17.3	3/8-3/10	
Namsan	10.02	5.67	15.3	16.2	3/10-3/12	
Dusil	13.35	9	15.8	15.7	3/13-3/15	
Guseo	-	-	28.2	28.4	7/5-7/7	High station
Jangjeon	-	-	28.8	28.8	7/3-7/5	High station
Pusan Nat'l Univ.	-	-	29.2	28.5	6/30-7/2	High station
Oncheonjang	-	-	28.9	28.2	6/28-6/30	High station
Myeongnyun	-	-	25.9	26.3	6/26-6/28	High station
Dongnae	-	-	27.7	27	6/22-6/24	High station
Busan Nat'l Univ. of edu.	6.12	6.12	16.6	17.1	3/17-3/19	
Yeonsan	11.96	7.66	18.9	18.5	3/20-3/22	
City Hall	11.1	6.8	17.4	17.8	3/22-3/24	
Yangjeong	12.11	7.81	20.1	17.6	3/24-3/26	
Bujeon	10.37	6.07	16.5	17.4	3/27-3/29	
Seomyeon	13.03	8.61	17.5	18.4	3/29-3/31	
Beomnaegol	12.3	7.95	15.9	17.4	3/31-4/2	
Beomil	11.83	7.53	20.2	20.7	4/5-4/7	
Jwacheon	12.99	8.69	18.4	18.6	4/26-4/28	
Busanjin	12.08	7.78	23.7	22.1	4/28-4/30	
Choryang	11.94	7.64	22.7	22.2	5/1-5/3	
Busan Station	11.71	7.41	23.9	23.8	5/4-5/6	
Jungang	12.82	8.47	23.8	24.2	5/8-5/10	
Nampo	14.28	9.9	24.7	24.9	5/10-5/12	
Jagalchi	13.28	8.98	23.5	23.9	5/12-5/14	
Toseong	12.18	7.8	21.4	21.8	5/15-5/17	
Dongdaesin	12.58	8.2	22.7	22.5	5/17-5/19	
Seodaesin	24.3	10.2	25.4	24.9	5/19-5/21	
Daeti	26.14	7.08	24.2	24.3	5/22-5/24	
Goejeong	15.09	10.71	23.8	24.3	5/24-5/26	
Saha	12.45	8.15	23.4	22.7	5/26-5/28	
Dangni	12.71	8.41	24.4	24.5	5/29-5/31	
Hadan	11.68	7.3	24.9	24.8	5/31-6/2	
Sinpyeong	-	-	23.6	23.7	6/2-6/4	Ground station
Dongmae	15.0	10.0	23.9	23.7	6/5-6/7	
Jangnim	19.0	14.0	25.6	25.6	6/9-6/11	
Sinjangnim	19.5	14.5	23.9	23.2	6/12-6/14	
Natgae	23.5	12.5	24.9	24.7	6/14-6/16	
Dadaepo Harbor	17.5	12.0	26.2	25.5	6/16-6/18	
Dadaepo Beach	15.5	10.5	24.5	24.6	6/19-6/21	

부산도시철도 40개 역사에서 측정한 1호선 평균 라돈농도는 8.9 Bq/m^3 으로 실내공기질 권고기준 148 Bq/m^3 보다 매우 낮게 조사되었다. 40개 역사의 대합실 평균 라돈농도는 8.3 Bq/m^3 이었으며, 대합실보다 상대적으로 깊은 곳에 위치한

승강장의 평균 라돈농도는 9.6 Bq/m^3 으로 조사되었다. 서울 지하철의 경우 승강장 안전문(PSD : Platform Screen Door) 설치 전엔 Lee 등의 연구에서 승강장 평균 라돈농도가 61.8 Bq/m^3 , 대합실은 38.2 Bq/m^3 으로 조사되었고,¹³⁾ PSD 설치

Table 2. Radon concentrations (Bq/m³) according to each site of subway stations line 1.

Site	Platform			Concourse		
	min	max	mean	min	max	mean
Nopo	2.8	30.5	13.8	5.6	22.3	11.1
Beomeosa	1.4	25.1	11.8	2.9	20.6	11.4
Namsan	5.6	29.3	15.2	1.4	26.1	13.4
Dusil	0.0	32.8	12.9	5.5	31.6	15.4
Guseo	0.0	19.5	6.4	0.0	22.0	7.3
Jangjeon	0.0	20.8	4.3	0.0	13.7	5.0
Pusan Nat'l Univ.	0.0	12.6	3.5	0.0	11.5	3.8
Oncheonjang	0.0	19.5	6.5	0.0	19.2	7.4
Myeongnyun	0.0	19.6	6.7	0.0	20.5	5.1
Dongnae	0.0	29.3	9.1	0.0	22.0	7.4
Busan Nat'l Univ. of edu.	2.8	27.9	13.4	2.8	28.9	12.0
Yeonsan	5.6	33.5	15.3	0.0	28.9	12.7
City Hall	1.4	25.1	11.1	2.7	22.0	10.1
Yangjeong	1.4	23.7	12.3	0.0	27.5	8.2
Bujeon	2.8	19.5	9.2	1.4	20.6	9.7
Seomyeon	1.4	23.7	9.4	0.0	17.9	8.3
Beomnaegol	0.0	18.1	7.7	1.4	20.6	10.2
Beomil	0.0	21.0	8.3	0.0	17.9	6.9
Jwacheon	0.0	11.2	4.6	0.0	12.4	6.0
Busanjin	0.0	16.7	8.8	0.0	19.2	7.6
Choryang	0.0	13.9	6.3	0.0	24.7	9.4
Busan Station	1.4	18.1	7.5	1.4	15.1	6.1
Jungang	0.0	18.1	6.2	0.0	16.5	6.2
Nampo	1.4	21.0	8.6	1.4	24.7	10.2
Jagalchi	0.0	18.1	6.9	1.4	16.5	8.8
Toseong	2.8	18.1	7.2	2.9	14.4	8.2
Dongdaesin	1.4	44.7	14.0	0.0	23.4	11.7
Seodaesin	7.0	40.5	22.4	0.0	22.0	9.4
Daeti	5.6	37.9	19.2	0.0	38.2	10.8
Goejeong	0.0	20.9	8.7	0.0	15.1	6.9
Saha	0.0	21.0	8.1	0.0	16.5	6.7
Dangni	4.2	29.1	15.1	1.4	19.5	8.4
Hadan	1.4	16.8	8.3	0.0	12.4	6.4
Sinpyeong	0.0	22.3	5.8	0.0	17.9	6.0
Dongmae	0.0	13.8	5.2	0.0	10.9	3.9
Jangnim	0.0	20.8	7.8	0.0	19.2	6.6
Sinjangnim	0.0	16.8	6.5	0.0	11.0	3.4
Natgae	0.0	36.3	12.6	0.0	45.0	8.8
Dadaepo Harbor	0.0	18.1	7.4	0.0	16.5	5.9
Dadaepo Beach	2.8	23.7	8.9	0.0	31.6	7.8

후엔 Jeon 등의 연구에서 승강장 평균 라돈농도 54 Bq/m³, 대합실 평균 라돈농도 34 Bq/m³으로 보고되었다.¹⁴⁾ 부산지하철은 현재 전 역사에 PSD가 설치되어 있으므로 PSD 설치 전과 후의 변화값은 알 수 없으나 Lee와 Jeon 등의 서울지하철 평균농도와 비교하더라도 PSD가 설치된 부산도시철도 1호선 평균 라돈농도는 상대적으로 낮은 농도임을 알 수 있

었고, 승강장이 대합실보다 높은 농도를 보이는 경향은 유사하게 나타났다.

3.2. 지하역사 심도에 따른 라돈농도

부산도시철도 1호선 32개 지하역사와 8개 지상역사(지상 2개, 고가 6개)의 승강장과 대합실의 라돈농도를 측정한

Fig. 3. Boxplot of radon concentration at each site of subway stations.

Fig. 4. Radon concentration and relations between subway stations depth.

결과 지하역사 라돈농도는 승강장이 4.6~22.4 Bq/m³(평균 10.2 Bq/m³), 대합실이 3.4~15.4 Bq/m³(평균 8.7 Bq/m³), 지상역사 라돈농도는 승강장이 3.5~13.8 Bq/m³(평균 7.0 Bq/m³), 대합실이 3.8~11.1 Bq/m³(평균 6.6 Bq/m³)으로 지상역사보다 지하역사의 라돈농도가 높게 나타났으며, 승강장이 대합실보다 높게 나타나 라돈농도는 심도에 의한 영향이 높은 것으로 판단되었다. 또한 40개 역사 중 서대신동 승강장이 48시간 평균 22.4 Bq/m³으로 가장 높게 나타났으며, 승강장 심도가 깊은 서대신동, 대터, 낮개역이 상대적으로 높은 값으로 측정되었다. 시간당 최대값은 낮개역 대합실이 45.0 Bq/m³, 동대신동 승강장이 44.7 Bq/m³으로 나타났으나, 실내공기질 라돈 권고기준 148 Bq/m³의 30% 정도로 안전함을 알 수 있었다.

Fig. 4는 라돈농도와 역사심도와와의 상관관계가 있음을 나타내고 있다.

3.3. 시간변화에 따른 라돈농도

라돈농도의 시간적 변화를 측정하기 위하여 RAD-7 연속식 측정기로 오전 11시부터 이틀 후 11시까지 48시간동안 측정된 40개 역사 시간별 평균 라돈농도는 Fig. 5와 같다.

측정기간 동안 지하철 운행이 중단되고 환기시설이 가

Fig. 5. Daily variation of radon mean concentration at subway stations.

동되지 않는 0시에서 5시에 라돈농도가 증가하는 것으로 나타났다. 라돈농도 최대값의 경우 승강장은 5시에 14.3 Bq/m³, 대합실은 4시에 12.5 Bq/m³으로 나타났으며, 최소값의 경우 승강장은 20시에 6.6 Bq/m³, 대합실은 21시에 5.9 Bq/m³으로 조사되었다. 이는 Jeon 등¹¹⁾과 Yu 등의 연구¹⁵⁾에서와 유사한 경향을 보이는 것으로 승강장의 환기가동 시간에 따른 라돈농도의 변화폭이 매우 큰 것을 알 수 있다. 부산도시철도의 경우 5시부터 24시까지 역사공기질에 따라 가동속도를 조절하여 연속적으로 환기시스템을 가동하고 있으나, 출근시간대보다 퇴근시간대 라돈농도는 급격한 감소가 나타났다. 이는 퇴근시간대 환기량 증가에 의한 것으로 지하역사 등 실내공간에서 환기량 증가는 라돈농도를 저감시킬 수 있는 매우 중요한 요인임을 확인할 수 있다. 또한 열차가 운행하기 시작하는 6시 경에 라돈의 일시적인 감소가 일어났는데, 이는 Jeon 등의 연구에서와 마찬가지로 밤사이 공기의 큰 유동이 없다가 열차운행으로 발생하는 열차풍에 의한 것으로 추정된다.¹¹⁾ 열차가 운행되는 동안은 열차풍의 환기효과는 어느 정도 지속되는 것으로 판단된다.

1시간 간격으로 48시간 연속측정한 라돈농도 중 최고 상승하는 시간대를 알아보고자 Fig. 6에 48시간 중 최고 라돈농도가 측정된 동대신동역과 낮개역 등 3개 역사의 측정시간을 나타내었다. 평균 라돈농도와 마찬가지로 시간당 최고 라돈농도도 환기시설이 가동되지 않는 0시에서 5시에 나타났고, 이 측정값은 실내공기질 라돈 권고기준 148 Bq/m³보다 낮은 값을 알 수 있었다.

3.4. 온도변화에 따른 라돈농도

Fig. 7에는 부산도시철도 1호선 40개 역사의 승강장과 대합실에서 3월부터 7월까지 측정된 온도와 라돈농도와의 관계를 나타내었다.

상관계수의 값은 높지 않지만, 3월부터 7월까지 조사한 승강장과 대합실내 온도는 14.9~29.2℃로 온도가 낮을수록 평균 라돈농도는 높은 것으로 조사되었다. 일반적으로 지하철역 승강장의 여름철 실내환경은 매우 무더우므로 온도

Fig. 6. Comparisons of radon concentration and time at subway stations measured high level radon.

Fig. 7. Radon concentration and relations between subway station temperature.

Fig. 8. Distribution of geologic map in Busan subway stations line 1.

센서에 의해 적절한 환기량을 조절하게 된다. 이에 따라 효율적인 냉방시설 가동을 위해 환기시스템의 가동비율이 증가하므로 Li 등의 연구결과¹⁶⁾와 유사하게 여름철이 낮은 농도값을 보였다. 이러한 결과는 Miles 등에 의해서 조사된 일반적인 실내의 계절별 변화 양상과 유사한 형태이다.¹⁷⁾ 일반적으로 겨울철에는 환기시스템의 가동시간이 줄어들

어 실내에 있던 라돈이 바깥으로 빠져나기 어렵게 만들어 실내 라돈농도가 높아지는 것으로 알려져 있다.¹⁸⁾

3.5. 기반암석에 따른 라돈농도

라돈은 화강암·변성암과 같은 암석, 토양 그리고 우라늄이나 라듐을 함유한 건축자재에서 발생한다. 우리나라에서

도 화강암·편마암 지질대나 옥천단층 지대에 있는 지역에서 라돈농도가 높게 나타나는 것으로 조사되고 있다. 따라서, 부산도시철도 1호선 40개 역사가 위치한 기반암석이 라돈농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 한국지질자원연구원 지리정보시스템을 활용하여 Fig. 8에 나타내었다.

서울시의 지질은 편마암과 선캄브리아기 편마암 밑의 마그마가 뚫고 들어온 뒤 오랜 세월동안 지각변동과 침식을 거쳐 드러난 화강암 구조로 이루어져 있으며, 이러한 화강암을 기반으로 하는 지하철 역사를 많이 가지고 있어 고농도의 라돈분포가 나타난다.¹⁰⁾ 부산지역 구성암류의 지질시대에는 크게 백악기, 제3기, 제4기로 구분되고, 제4기 47.02%, 백악기 41.0% 및 제3기 6.73% 순으로 나타나며, 구성암류는 제4기 충적층이 47.02%, 안산암 및 안산암질 응회암 16.77%, 유문암 및 유문암질 응회암 13.85%, 화강암 6.73%, 각섬석 화강암 5.19%, 다대포층 4.07%, 그 외 4개 암층이 1.13% 존재한다. 부산도시철도 1호선은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 비화강암 지역에 위치하므로, 타 도시에 비해 상대적으로 낮은 라돈농도를 보이고 있다.

부산도시철도 1호선 38개 역사 지역은 모두 신생대 제4기 충적층으로 대표암상은 역암, 사암 및 점토로 이루어져 있으며, 낮개역 지역은 중생대 백악기 유천층군 다대포층으로 적색, 회색, 녹색 사암세일역암으로 조사되었고, 다대포 해수욕장역 지역은 중생대 백악기 유천층군으로 안산암류로 조사되었다. 안산암의 경우 화산암류로 환경방사능이 소량 나타나기 때문에 2017년 연장 개통된 1호선 다대포 구간 6개 역사에 비해 다대포 해수욕장역의 평균 라돈농도가 조금 높게 나타났지만, 1호선 전체 구간과 비교하면 평균정도의 값으로 나타났다. 안의 연구에서 부산지역 토양가스 내의 라돈농도는 화강암질 암석에서 약 1.09 pCi, 안산암 0.61 pCi, 퇴적암 0.61 pCi로 조사되어 화강암 지역의 토양에서는 전반적으로 높게 나타나고, 안산암 지역의 토양에서 상대적으로 낮게 나타난다고 보고하고 있으므로,¹⁹⁾ 부산도시철도 1호선 40개 역사의 라돈농도는 타 도시에 비해 기반암석의 영향을 적게 받는 지역임을 알 수 있다.

4. 결론

자연방사능 물질인 라돈은 담배연기에 이어 두 번째로 위험한 폐암유발물질로 공기보다 8배 무거워서 지하에 거주하는 사람에게 주의가 필요하다. 도시철도 역사 대부분은 지하공간에 위치하고 자연환기가 어려우므로, 부산도시철도 1호선 40개 역사를 대상으로 승강장 및 대합실 라돈농도 조사를 통하여 관련 기초자료를 확보하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 부산도시철도 1호선 평균 라돈농도는 8.9 Bq/m³으로 실내공기질 권고기준 148 Bq/m³보다 매우 낮게 조사되

었다. 40개 역사의 대합실 평균 라돈농도는 8.3 Bq/m³이었으며, 승강장의 평균 라돈농도는 9.6 Bq/m³으로 조사되었다.

- 2) 부산도시철도 1호선 32개 지하역사 라돈농도는 승강장이 4.6~22.4 Bq/m³(평균 10.2 Bq/m³), 대합실이 3.4~15.4 Bq/m³(평균 8.7 Bq/m³), 8개 지상역사 라돈농도는 승강장이 3.5~13.8 Bq/m³(평균 7.0 Bq/m³), 대합실이 3.8~11.1 Bq/m³(평균 6.6 Bq/m³)으로 조사되었다.
- 3) 심도가 깊은 역사에서 상대적으로 높은 라돈농도가 조사되었다. 서대신동 승강장의 라돈농도가 48시간 평균 22.4 Bq/m³으로 가장 높게 조사되었으며, 시간당 최대값은 낮개역 대합실이 45.0 Bq/m³, 동대신동 승강장이 44.7 Bq/m³으로 조사되었다.
- 4) 지하철 운행이 중단되고 환기시설이 가동되지 않는 0시에서 5시에 라돈농도가 증가하는 것으로 조사되었다. 라돈농도 최대값의 경우 승강장은 5시에 14.3 Bq/m³, 대합실은 4시에 12.5 Bq/m³으로 나타났으며, 최소값의 경우 승강장은 20시에 6.6 Bq/m³, 대합실은 21시에 5.9 Bq/m³으로 조사되었다.
- 5) 3월부터 7월까지 승강장과 대합실에서 측정한 평균 라돈농도는 온도가 낮을수록 높은 것으로 조사되었다.
- 6) 부산도시철도 1호선 지역은 비화강암 지역에 위치하므로, 라돈농도가 상대적으로 높지 않음을 알 수 있었다.

References

1. Busan Transportation Corporation Home Page, <http://www.humetro.busan.kr>(2019).
2. M. Wilkening, Radon in the environment, 1st ed., Elsevier Science, USA, pp. 137(1990).
3. Ministry of Environment, Understanding radon, a natural radioactive material in life(2016).
4. A. V. Sundal, H. Henriksen, O. Soldal, T. Strand, The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway, Sci. Total Environ., 328, 41-53(2004).
5. UNSCEAR (United Nation's Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation. Report to the general assembly with scientific annexes, UNSCEAR United Nations(2006).
6. U.S.EPA (Environmental Protection Agency), Building radon out (A step-by-step guide on How to guild radon-resistant homes, EPA, 402-K-01-002(2001).
7. Korea Environment Corporation, Indoor radon management, 50(2016).
8. J. S. Jeon, D. C. Kim, Y. W. Park, J. Y. Lee, S. S. Lee, N. J. Kim, M. Y. Kim, A study on assessment of distribution characteristics of ²²²Rn concentration in seoul subway stations, Proceeding of the 41st Meeting of KOSAE, pp. 552-553(2006).
9. K. T. Ha, J. Y. Kim, J. S. Jeon, D. S. Lee, D. I. Kim, M.

- Y. Kim, M. H. Kim, Characteristics of airborne radon contamination levels in seoul subway station, Report of S.I.H.E., 38, 313-318(2002).
10. J. S. Jeon, D. C. Kim, Distribution of ^{222}Rn concentration in seoul subway stations, J. Korean Soc. Environ. Eng., 28(6), 588-595(2006).
11. J. S. Jeon, D. C. Kim, J. Y. Lee, Temporal variations and sources of ^{222}Rn in subway stations, J. Korean Soc. Environ. Eng., 29(11), 1231-1242(2007).
12. H. K. Namgung, J. H. Song, S. Y. Kim, H. M. Kim, S. B. Kwon, Characteristics of indoor air quality in the overground and underground railway stations, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 17(5), 17-25(2016).
13. C. M. Lee, Y. S. Kim, J. C. Kim, H. J. Jeon, Distribution of radon concentration at subway station in Seoul, J. Env. Hlth., 30(5), 469-480(2004).
14. J. S. Jeon, J. C. Yoon, H. C. Lee, S. W. Eom, Y. Z. Chae, A noticeable change in indoor radon levels after platform screen doors installation in Seoul subway station, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(1), 59-67(2012).
15. K. N. Yu, E. C. Young, T. F. Chaj, T. Lo, R. V. Balendran, The variation of radon exhalation rates from concrete surface of different ages, Building and Environment, 31(3), 255-257(1996).
16. X. Li, B. Zheng, Y. Wang, X. Wang, A study of daily and seasonal variations of radon concentrations in underground

- building, J. Environmental Radioactivity, 87, 101-106(2006).
17. J. C. H. Miles, R. A. Algar, Variation in Radon-222 concentration, J. Radiol. Prot, 8(2), 103-105(1988).
18. S. A. Durrani, R. Llic, Radon measurements etched by track detectors, World Scientific, 387(1997).
19. J. K. Ahn, Distribution of radon in rock, soil, groundwater and underground space in busan, BETEC, 20-40(2007).

Authors

Seongwoo Choi

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Korea, Researcher, ORCID[®] 0000-0002-7069-6184

Youngwook Cha

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Korea, Researcher, ORCID[®] 0000-0002-9448-4899

Youngman Cho

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Korea, Team manager, ORCID[®] 0000-0001-8393-0382

Jeonggu Cho

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Korea, Department manager, ORCID[®] 0000-0001-7523-1274