

환기에 의한 지하 역의 라돈농도 변화

Influence of Ventilation on the Subway Radon Level

박덕신¹, 정우성², 정병철³

Duck-Shin Park, Woo-Sung Jung, Byung-Chul Jung

Key Words : Radon(라돈), Ventilation(환기), Air Quality(공기질), Subway(지하철)

Abstract

Modern people stay at indoor places about 90% of a day. Radon-222 is a gas produced by the radioactive decay of the element radium. And, radon is one of the major indoor air pollutants. Radon moves into the underground space through various routes and is considered to cause lung cancer by hurting the lung tissues. In this study, we measured the subway radon level at 9 stations of 3 lines. According to test results, we can figure out the concentration of radon by lines, times, and measuring points. So, it was found that ventilation conditions are the most important factors in the subway air quality. Finally, we suggested effective and economic management methods of air pollution in the subway.

기호설명 : pCi=pico Curie
Bq=Becquerel
CPM=Count Per Minute

1. 서 론

지하철은 1974년 1호선이 개통된 후 지속적인 증설로 서울시의 높은 수송분담율을 기록하는 대표적 교통수단으로 정착되었을 뿐만 아니라 지하공간 개발 및 활용의 핵심요소가 되고 있다. 그러나 지하공간은 공간적 제약으로 환경위해성이 주요 논의 대상이 되고 있다. 최근 쾌적하고 청정한 지하공간의 공기질을 유지하고 개선하기 위한 목적으로 1996년 '지하생활공간 공기질 관리법'을 제정하였다. 본 연구에서는 실내 대기오염물질 중 지하 역에서 문제가 되고 있는 라돈(Radon-222)을 주요 연구대상으로 하였다.

라돈은 우라늄(Uranium-238)으로부터 붕괴된 방사성 물질로 토양, 지하수 및 건축자재에서 발생되어 다양한 경로를 통하여 지하공간이나 건물 내부로 유입된다[1]. 라돈의 반감기는 3.8일으로써 공기 중에 부유하여 인간의 호흡에 의해서 인체에 유입되어 폐에 침착한다. 그리고, 침착 후 α 입자를 방출함으로써 폐 조직을 손상시키는 물질이다[2]. 현재 국내에서는 실내 오염물질 중 라돈에 대해서 미국 환경보호청(U.S. EPA)의 148 Bq/m^3 (4 pCi/L)을 권고치로 삼고 있다.

실내의 라돈농도를 저감시키는 방법은 라돈이 실내로 유입되지 못하게 하는 방법과 실내에 유입된 라돈을 감소시키는 방법으로 나눌 수 있다. 미국 환경보호청에서는 토양 흡입법(soil suction method)으로 건물 지하에서 라돈을 뽑아내어 파이프를 통해 대기 중으로 배출시켜 실내로의 라돈유입을 차단하는 방법을 추천하고 있다[3].

그러나 이 방법은 비용이 많이 소요되고 지하역사와 같이 이미 건축된 건물에는 적용이 곤란

*1 한국철도기술연구원 주임연구원
*2 한국철도기술연구원 책임연구원
*3 한국철도기술연구원 위촉연구원

한 단점이 있다.

본 연구에서는 노선별 라돈농도, 주간/야간/시간대별 농도분포, 측정지점별 농도분포를 파악하였다. 그리고, 환기조건을 변화시키면서 라돈농도를 측정하여 환기조건에 따른 라돈농도의 변화특성을 분석함으로써 토양 흡입법과 같은 시설물의 개선이나 대기오염 저감장치의 신규 장착 없이 기존 환기시스템을 활용함으로써 효율적으로 지하 역의 공기오염도를 저감할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 측정 및 분석방법

본 연구에서는 분당선, 과천선, 일산선, 3개 노선에서 라돈 농도가 높을 것으로 예측되고, 이용 승객이 많은 역을 중심으로 각 노선별 3개 역을 선정하여 라돈농도를 측정하였다. 대상 역은 분당선 3개역, 과천선 3개역, 일산선 3개역으로 총 9개 역을 선정하였다. 측정지점은 지하 역에서 승객들이 가장 많이 밀집해 있는 승강장, 대합실, 그리고 실내 공기 질에 가장 큰 영향을 미치는 외부 등 3곳을 대상으로 하였다. 지하 역의 라돈농도에 영향을 미치는 여러 요인들 중 환기 방법에 따른 라돈농도의 변동을 파악하기 위하여 환기방법을 세 가지 형태 즉, 급기, 배기, 급·배기로 나누어 측정을 실시하였다. 그리고, 측정결과를 토대로 각 노선별로 농도가 높게 나온 1개 역을 선정하여 시간대별 라돈농도의 경향을 파악하기 위하여 지하 역의 운행시간 중 승객이 주로 이용하는 07:00~23:00시경에 측정을 실시하였다.

본 연구에서는 라돈농도 측정을 위해, 이동식 라돈 검출기인 Femto-Tech사 제품의 라돈 모니터(Model CRM-510)를 이용하였다. 이 모니터는 실시간 타입으로 연속식으로 측정할 수 있다. 또한, 일정시간 동안 방사선량을 조사하는 축적식으로도 이용할 수 있어, 라돈농도의 조사 및 스크리닝에 이상적인 방법이다. 이 모니터는 수동 확산(passive diffusion) 방식으로 Radon-222만을 측정할 수 있으며, 라돈의 붕괴산물은 정전기적

으로 ionization chamber속의 electrometer에 도달하기 전에 제거된다. 이동식 라돈 모니터의 측정방법은 측정역의 승강장, 대합실 및 외부의 중간지점에 지면에서 30 cm 떨어진 곳에 모니터를 설치시키고 측정하였다. 라돈의 측정은 모니터의 움직임으로 인한 오차를 방지하기 위해 한 장소에서 처음 5분간 모니터를 안정화시킨 다음, 10분 동안 측정하였다. 이때, 라돈 농도는 식 (1)에 의해 계산하였다[4].

$$\text{라돈농도}(pCi/L) = \frac{(\text{총점 카운터 수} - \text{시작점 카운터 수})}{\text{측정시간간격}(10\text{분}) \times \text{보정계수}} \times \text{배경농도} \quad (1)$$

여기서, 보정계수(conversion factor)와 배경농도(background level)는 Femto-Tech사에서 제공한 값으로 보정계수는 0.357 CPM/pCi/L, 배경농도는 0.4 pCi/L이다.

3. 각 노선별 라돈농도 측정 결과

각 노선별 라돈농도를 비교하기 위하여 동일 시간대에 승강장(concourse), 대합실(platform), 외기(outdoor)에서 측정을 실시하였으며, 측정시간은 지하 역의 운행시간을 고려하여 주간의 경우 08:00~18:00, 야간은 18:00~23:00로 구분하였다. 각 노선별 라돈농도는 Table 1과 Fig. 1~2에 나타낸 바와 같이 분당선은 주간에 대합실, 승강장, 외기에서 각각 1.0, 1.4, 0.8 pCi/L, 야간에 1.3, 1.4, 1.3 pCi/L로 주간과 야간에 승강장에서 라돈농도가 가장 높게 나타났으며, 다음이 대합실, 외기의 순서로 농도분포를 보여 지하 역의 심도에 따른 라돈농도의 분포 특성과 유사한 경향을 보였다. 과천선은 대합실, 승강장, 외기에서 주간에 각각 1.3, 2.0, 1.4 pCi/L, 야간에 1.0, 1.2, 1.6 pCi/L로서 주간에는 승강장> 외기> 대합실의 순서를 야간에는 외기> 승강장> 대합실의 순서로 나타났다. 일산선은 대합실, 승강장, 외기에서 주간에 각각 0.9, 1.2, 0.6 pCi/L, 야간에 0.6, 0.5, 0.8 pCi/L로서 주간에는 승강장> 대합실>

외기의 순서를 보여 분당선과 유사한 경향을 보였으나 야간에는 외기 > 대합실 > 승강장의 순서를 보였다. 이 결과를 볼 때 낮 동안에는 승강장에서 라돈의 농도가 높게 나타났고, 야간에는 외기의 농도가 다소 높게 나타났으나 전체적인 라돈농도의 경향은 파악되지 않는 것으로 나타났다.

Table 1 Radon Concentrations of the Measured Lines

노 선	주간(pCi/L)			야간(pCi/L)		
	대합실	승강장	외기	대합실	승강장	외기
분당선 (Pundang-Line)	1.0	1.4	0.8	1.3	1.4	1.3
과천선 (Kwachon-Line)	1.3	2.0	1.4	1.0	1.2	1.6
일산선 (Isan-Line)	0.9	1.2	0.6	0.6	0.5	0.8

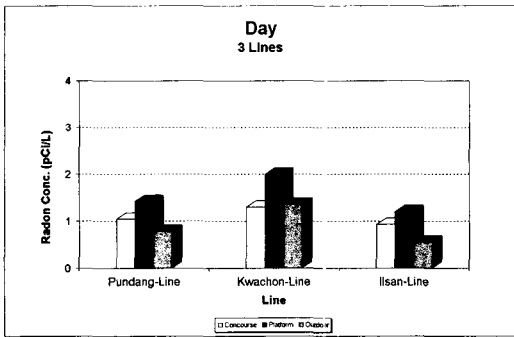


Fig. 1 Radon Concentrations of Daytime

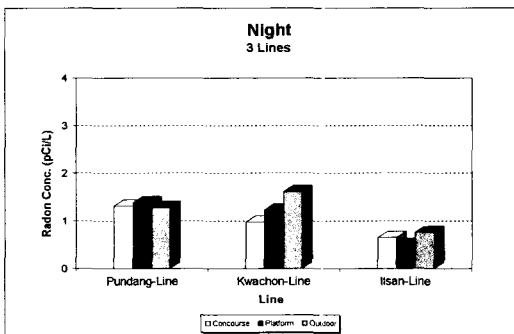


Fig. 2 Radon Concentrations of Nighttime

각 노선별 라돈농도는 한 지점에서 6회씩 조사를 실시하여 산술평균과 표준편차를 구하여 나타내었다. 조사 결과 분당선 라돈농도는 Table 2에서 보는 바와 같이 평균농도는 S, M, K역의 대합실에서 각각 0.9, 1.3, 1.3 pCi/L, 승강장에서 1.9, 1.1, 1.2 pCi/L, 외기에서 1.6, 0.6, 0.9 pCi/L로 나타났다. Table 2에서 S역의 외기에서 표준편차가 높게 나타난 것은 측정치중 라돈농도 권고치를 초과한 데이터가 있기 때문이다. 과천선의 라돈 평균농도는 Table 3에서와 같이 I, J, G역의 대합실에서 각각 0.6, 1.3, 1.5 pCi/L, 승강장에서 2.2, 1.5, 1.2 pCi/L, 외기에서 1.4, 1.8, 1.3 pCi/L로 조사되었다. 일산선의 라돈 평균농도는 table 4에서와 같이 B, A, U역의 대합실에서 0.6, 0.4, 1.4 pCi/L, 승강장에서 0.9, 1.2, 0.5 pCi/L, 외기에서 0.5, 0.5, 0.9 pCi/L로 나타났다. 각 노선별 라돈농도 측정결과 분당선의 경우 S역의 승강장에서 1.9 pCi/L, 과천선의 경우 I역의 승강장에서 2.2 pCi/L, 일산선의 경우 U역의 대합실에서 1.4 pCi/L로 농도가 가장 높게 조사되었다.

Table 2 Radon Concentrations on the Pundang-Line

측정지점	대합실			승강장			외 기		
	S역	M역	K역	S역	M역	K역	S역	M역	K역
측정횟수	6	6	6	6	6	6	6	6	6
산술평균 (pCi/L)	0.9	1.3	1.3	1.9	1.1	1.2	1.6	0.6	0.9
표준편차	1.05	0.96	0.92	0.88	0.88	0.65	1.57	0.49	0.56

Table 3 Radon Concentrations on the Kwachon-Line

측정지점	대합실			승강장			외 기		
	I역	J역	G역	I역	J역	G역	I역	J역	G역
측정횟수	6	6	6	6	6	6	6	6	6
산술평균 (pCi/L)	0.6	1.3	1.5	2.2	1.5	1.2	1.4	1.8	1.3
표준편차	0.52	0.83	1.16	0.66	1.33	0.63	0.79	0.93	0.73

Table 4 Radon Concentrations on the Ilsan-Line

측정지점	대합실			승강장			외 기		
	B역	A역	U역	B역	A역	U역	B역	A역	U역
측정횟수	6	6	6	6	6	6	6	6	6
산술평균 (pCi/L)	0.6	0.4	1.4	0.9	1.2	0.5	0.5	0.5	0.9
표준편차	1.07	0.42	1.14	0.62	1.07	0.44	0.32	0.65	0.69

시간별 라돈농도 변화를 파악하기 위하여 3개 노선의 측정 결과와 지하 역의 심도, 이용 승객의 수를 종합적으로 검토하여 각 노선별 1개 역을 선정하였다. 분당선은 K역을, 과천선은 I역을, 일산선은 B역을 선정하여 07:00~23:00까지 대합실 및 승강장에서 환기시스템을 가동하지 않은 상태로 1시간 간격으로 측정을 실시하였다. 측정 시간 동안 K역의 라돈농도는 대합실 0.0~2.5 pCi/L, 승강장 0.0~2.3 pCi/L, 외기대합실 0.9 pCi/L, 승강장 0.7, 외기 0.0~2.5 pCi/L의 분포를 보였으며, 평균농도는 대합실 0.9, 승강장 0.7, 외기 0.9 pCi/L로 조사되었다. I역은 Fig. 3과 같이 대합실 0.1~3.1 pCi/L, 승강장 0.1~3.1 pCi/L, 외기 0.1~2.3 pCi/L의 분포를 보였으며,

평균농도는 대합실 1.4, 승강장 1.6, 외기 1.0 pCi/L를 나타냈다. B역은 대합실 0.0~2.3 pCi/L, 0.0~2.8 pCi/L, 외기 0.1~2.3 pCi/L의 분포를 보였으며, 평균농도는 대합실, 승강장, 외기가 각각 0.7, 0.7, 0.8 pCi/L로 조사되었다.

4. 환기조건에 따른 라돈농도의 변화

지하철은 정거장 구간과 터널 구간으로 구분할 수 있으며, 정거장은 승객의 출입 승하차에 이용되고 터널은 열차통과 기능을 한다. 환기방식은 자연환기 방식, 기계환기 방식 및 자연환기와 기계환기의 혼용방식이 있다. 초기의 지하철에서는 자연환기 방식에 의존하였으나, 근래의 지하철은 자연환기 방식과 기계환기 방식을 병행하여 적용하고 있다[5]. 현재 지하 역에는 계절별/시간대별 환기시스템 운용 계획을 마련하여 환기를 하고 있다. 환기방식은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 외부의 신선한 공기를 송풍기를 이용해 대합실, 승강장 등 지하공간으로 공급해주는 급기, 지하 역의 오염된 공기를 외부로 방출하는 배기로 구분할 수 있으며, 환기방식은 급기, 배기, 급기/배기 동시 실시 등 3가지 형태로

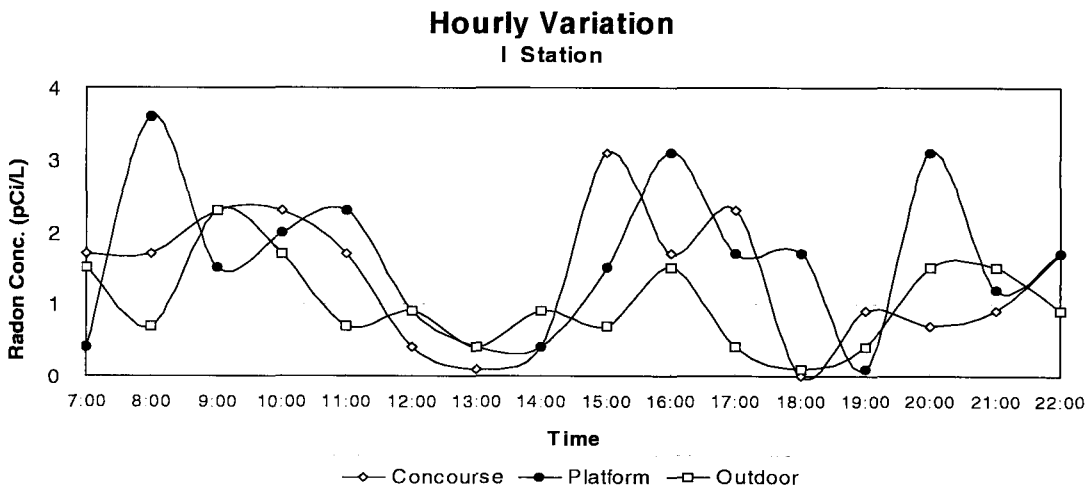


Fig. 3 Hourly Variation of Radon Concentration

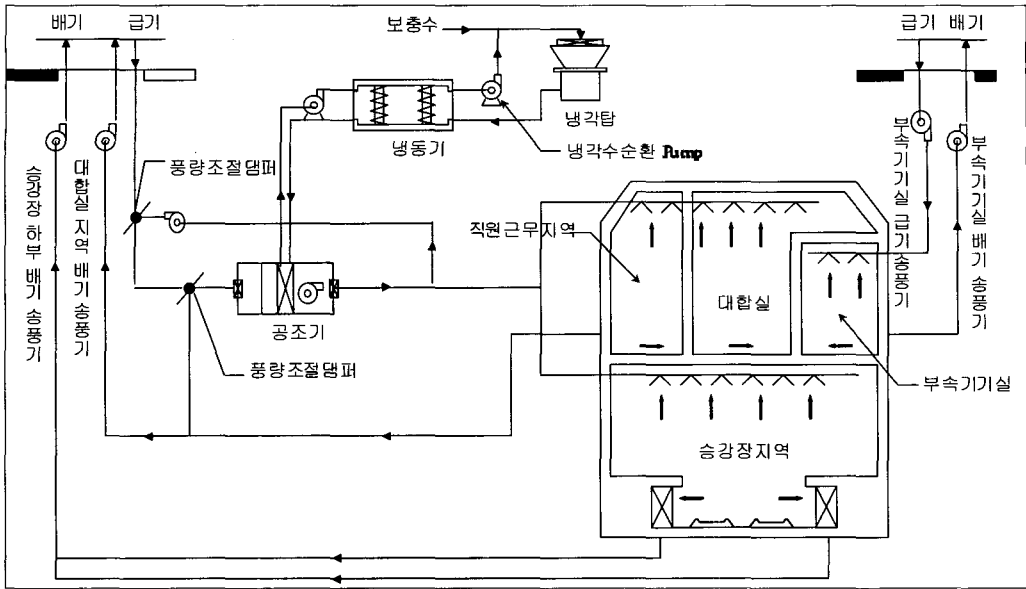


Fig. 4 Layout of Subway Ventilation System

구분된다.

라돈은 미세한 입자이기 때문에 공기의 유동에 의해 많은 영향을 받는다[6]. 그러므로, 환기 조건에 따른 라돈농도의 변화 양상을 파악하기 위하여 환기조건을 급기만 가동한 경우, 배기만 가동한 경우, 급기와 배기를 동시에 가동한 경우 등 3가지 조건으로 나누어 라돈농도의 변화를 조사하였다. Table 5에 나타낸 바와 같이 환기조

건 중 급기만을 가동하였을 경우 대합실에서 라돈의 평균농도는 1.5 pCi/L, 배기만을 가동하였을 경우는 평균농도 1.0 pCi/L, 급기와 배기를 동시에 가동하였을 경우는 평균농도 0.7 pCi/L로 조사되었다. 승강장에서 급기만을 가동하였을 경우 라돈의 평균농도는 1.5 pCi/L, 배기만을 가동하였을 경우 평균농도는 1.1 pCi/L, 급기와 배기를 동시에 가동하였을 경우에 평균농도는 1.2

Table 5 Variation of Radon Levels by Ventilation Type

측정지점	대합실			승강장		
	급기(○) 배기(×)	급기(×) 배기(○)	급기(○) 배기(○)	급기(○) 배기(×)	급기(×) 배기(○)	급기(○) 배기(○)
M역	2.3	0.4	0.2	2.7	2.0	1.0
K역	1.3	1.6	1.0	1.7	0.9	0.7
S역	2.3	1.0	0.7	1.6	1.1	1.0
I역	0.5	1.2	0.3	2.6	1.9	2.1
J역	1.7	1.9	0.4	2.4	0.5	1.7
G역	2.0	2.0	0.5	0.5	1.3	1.7
U역	1.4	0.3	0.0	1.2	0.2	0.4
A역	0.7	0.0	0.6	0.7	1.2	1.7
B역	1.4	0.2	2.6	0.2	0.6	0.8
평균	1.5	1.0	0.7	1.5	1.1	1.2

pCi/L로 나타났다. 결과를 종합하면 전체 측정 역의 대합실에 급기만을 가동하였을 경우에 라돈농도가 가장 높게 나타났고, 급기와 배기를 동시에 실시하였을 경우에 라돈농도가 가장 낮은 것으로 조사되었다. 승강장의 경우 급기만을 가동하였을 경우 라돈 농도가 가장 높게 나타났고, 배기만을 가동하였을 경우와 급기와 배기를 동시에 가동하였을 경우에는 거의 비슷한 양상을 보이는 것으로 조사되었다.

5. 결론

실내 대기오염물질 중 지하 역에서 문제가 되고 있는 라돈을 대상으로 3개 노선, 9개 역에서 다양한 조건으로 연구를 진행했다. 연구결과에 따르면, 농도범위는 전 노선에서 주간에는 대체적으로 심도가 깊은 승강장> 대합실> 외기의 순서로 높은 것으로 나타났다. 라돈의 시간별 농도 분포를 파악하기 위하여 07~23시에 측정을 실시한 결과 전 노선에서 시간별 기록이 심하고 측정지점간의 농도차이가 많이 났지만 특히, 이용 승객이 많은 08~10시 사이와 16~18시 사이에 높은 농도를 보였다. 환기조건에 따른 라돈농도는 급기시 대합실에서 1.5 pCi/L, 배기시 1.0 pCi/L, 급·배기시 0.7 pCi/L로 조사되었으며, 승강장에서 급기시 1.5 pCi/L, 배기시 1.1 pCi/L, 급·배기시 1.2 pCi/L를 나타냈다. 측정 결과 전체 측정역에서 환기조건에 따른 라돈농도의 변화는 대합실의 경우 급기> 배기> 급·배기의 순서를 나타내어, 급기와 배기를 동시에 가동하였을 때 라돈농도가 가장 낮은 것을 확인하였다. 승강장의 경우는 배기시와 급·배기시 라돈농도가 비슷한 양상을 보이는 것으로 나타났다. 연구결과를 종합해 보면 하루 중 라돈농도가 가장 높은 시간대에 급기와 배기 동시 가동 방식의 집중환기를 실시할 경우 지하 역의 실내대기오염물질을 효과적이며, 경제적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Nazaroff, W. W., "Optimizing the total-alpha three-count technique for measuring concentrations of radon progeny in residences", *Health Phys.*, Vol.46, pp. 395-405, 1984.
2. Evans, R. D., "Engineer's guide to the elementary behavior of radon daughters", *Health Phys.*, Vol.17, pp. 229-252., 1969
3. U.S. EPA, "Office of Air and Radiation(6604J)", EPA Document #402-K-93-008., 1993
4. U.S. EPA, "Interim indoor radon and radon decay measurement protocols", EPA Document #520/1-86-04, 1986.
5. 조율연, "지하철의 환기시스템 현황 및 연구과제", *공기조화 냉동공학*, 제26권 제2호, pp. 91-100, 1997
6. Kenneth, Q. Lao., "Controlling indoor radon", New York: Van Nostrand Reinhold, 1990
7. National Council on Radiation Protection and Measurements, "Exposures from the uranium series with emphasis on radon and its daughters", Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements; NCRP report No. 77, 1984
8. Traynor, G. W., "The effects of ventilation on residential air pollution due to emissions from a gas-fueled stove", Presented at: International symposium on indoor air pollution, Health and Energy Conservation, Amherst, MA., 1981
9. Nero, A. V., "Indoor concentration of radon 222 and its daughters: sources, range, and environmental influences", Berkeley, CAL Lawrence Berkeley Laboratory; report No. LBL-19346., 1985
10. 한국철도기술연구원, "지하 전철역의 공기오염도 조사", 1998