

환기를 이용한 지하 역 실내 공기질 개선 방안

Reduction Methods of Indoor Air Quality on the Subway Station using by Ventilation

박덕신¹⁾, 정병철²⁾, 조준호³⁾, 정우성⁴⁾

Duck-Shin Park, Byung-Chul Jung, Jun-Ho Cho, Woo-Sung Jung

ABSTRACT

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

1. 서 론

도심 교통의 악화로 지하철이 교통문제의 해결책으로 새롭게 인식되고 있으며, 기존선 이용객 뿐만 아니라 신선의 증설로 점차 많은 시민이 지하철을 이용하고 있다. 현재 지하 역사와 지하 상가에 대해서 1996년 「지하생활공간공기질관리법」이 제정되어 실내 공기질을 측정하도록 의무화하고 있다. 본 연구에서는 실내대기오염물질 중 지하 역에서 문제가 되고 있는 라돈(Radon-222)을 주요 연구대상으로 하였다. 라돈은 우라늄(Uranium-238)으로부터 붕괴된 방사성 물질이다. 지구 전체의 라돈 방사량을 평가한 결과 토양이 라돈의 가장 큰 오염원으로 밝혀졌으며, 그 다음이 지표수와 바다이다. 라돈의 대기 중 농도는 평균 3.7~7.4 Bq/m³(100~200 pCi/m³)이고, 우라늄 원광석 정도되는 토양 위의 농도는 일반적으로 18.5~37.0 Bq/m³(500~1000 pCi/m³)이다. 실내 라돈의 5가지 주요 오염원은 토양, 건축자재, 천연가스, 음용수, 실외대기이다. 발생된 라돈가스는 다양한 경로를 통해 지하공간이나 건물내부로 유입된다[1]. 라돈의 반감기는 3.8일로써 공기 중에 부유

1) 한국철도기술연구원, 주임연구원, 회원
2) 한국철도기술연구원, 연구원, 비회원
3) 한국철도기술연구원, 선임연구원, 회원
4) 한국철도기술연구원, 책임연구원, 비회원

하여 인간의 호흡에 의해서 인체에 유입되어 폐에 침착한다. 그리고, 침착 후 α 입자를 방출함으로써 폐 조직을 손상시키는 물질이다[2]. 현재 국내에서는 실내오염물질 중 라돈에 대해서 미국 환경보호청(U.S. EPA)의 148 Bq/m^3 (4 pCi/L)을 권고치로 삼고 있다.

2. 라돈의 저감방법

지하층이 있거나 바닥판(slab-on-grade) 기초 구조인 건물에서는 라돈 농도를 줄이기 위해 토양 흡입방법을 일반적으로 사용한다. 흡입방법은 크게 하부 슬라브 흡입(subslab suction), 배수관 흡입(drain tile suction), 웅덩이 흡입(sump hole suction), 중공벽 흡입(block wall suction) 등 네 가지로 나눌 수 있다. 하부 슬라브 흡입을 이용한 감압(depressurization)법은 가장 신뢰성 있는 라돈 저감법으로 알려져 있다. 이 방법은 파이프와 연결된 팬이 진공 청소기처럼 작용하여 건물 하부에서 라돈 가스를 끌어내어 실외 대기 중으로 뽑아 낸다.

바닥에 공간이 있는 건물의 경우 이 공간을 수동적이거나 능동적으로 환기시켜 라돈 수치를 저감시킬 수 있다. 바닥공간에서의 환기는 토양에 대한 주택의 흡입을 감소시키고, 건물 하부의 라돈을 희석시켜 실내 라돈 수치를 떨어뜨린다. 바닥 공간에 대한 자연 환기법은 배출구를 열어주거나 배출구를 추가로 만들면 된다. 능동 환기법에서는 자연적인 공기의 순환에 맡기지 않고 팬을 사용하여 바닥 공간을 통하여 공기를 불어넣어 준다. 바닥 공간이 있는 건물에서의 또 다른 효과적인 방법은 바닥층을 무거운 플라스틱 시트로 덮기도 하며, 배출 파이프와 팬을 사용하여 시트 아래에서 라돈 가스를 뽑아내어 실외로 환기시킨다. 이 방법은 하부 막 감압(sub membrane depressurization)법이라고 한다.

건물의 형태에 관계없이 사용할 수 있는 방법으로는 밀봉(sealing), 건물 가압법, 자연 환기법과 열 회수 환기법 등이 있다. 이들 방법 중 대부분은 일시적인 수단으로 고려할 수 있으며, 다른 방법과 조합하여 이용해야 하는 부분적인 해결 방법이다. 모든 건물에서 자연적인 환기는 일어나며 창문이나 문, 저층의 배출구를 열어 놓음으로써 환기량은 증가한다. 이 환기에 의해 라돈은 외부 공기와 섞이게 되고 결과적으로 라돈 수치를 떨어뜨릴 수 있다[3].

라돈 농도를 저감시키는 방법에는 다양한 기술들이 있으나 이러한 기술들은 일반적으로 비용이 많이 소요되고 지하역사와 같이 이미 건축된 건물에는 적용이 곤란한 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.

3. 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 환기방법에 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, 일정시간동안 방사선량을 조사하는 축적식으로도 이용할 수 있어, 라돈농도의 조사 및 스크리닝에 이상적인 방법이다. 이 모니터는 수동확산(passive diffusion) 방식으로 Radon-222만을 측정할 수 있으며, 라돈의 붕괴산물은 정전기적으로 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 1에 의해 계산하였다[4].

$$\text{라돈농도}(pCi/L) = \frac{(\text{측정종점의카운터수} - \text{측정시작점의카운터수})}{\text{측정시간간격(본실험은10분)} \times \text{보정계수}} - \text{배경농도} \text{-----}(\text{식 1})$$

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

4. 각 노선별 라돈농도 측정결과

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.

각 노선별 라돈농도는 한 지점에서 6회씩 조사를 실시하여 산술평균과 표준편차를 구하여 나타내었다. 조사결과 분당선 라돈농도는 table 2에서 보는 바와 같이 평균농도는 S, M, K역의 대합실

에서 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.

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. 측정시간 동안 K역의 라돈농도는 대합실 0.0~2.5 pCi/L, 승강장 0.0~2.3 pCi/L, 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.

Table 1. 각 노선별/측정지점별 라돈농도 측정결과

(단위: pCi/L)

노 선	주 간			야 간		
	대합실	승강장	외 기	대합실	승강장	외 기
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(Ilsan-Line)	0.9	1.2	0.6	0.6	0.5	0.8

Table 2 분당선 라돈농도 측정결과

(단위: pCi/L)

측정지점	대 합 실			승 강 장			외 기		
	S역	M역	K역	S역	M역	K역	S역	M역	K역
측정횟수	6	6	6	6	6	6	6	6	6
산술평균	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 과천선 라돈농도 측정결과

(단위: pCi/L)

측정지점	대 합 실			승 강 장			외 기		
	I역	J역	G역	I역	J역	G역	I역	J역	G역
측정횟수	6	6	6	6	6	6	6	6	6
산술평균	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 일산선 라돈농도 측정결과

(단위: pCi/L)

측정지점	대 합 실			승 강 장			외 기		
	B역	A역	U역	B역	A역	U역	B역	A역	U역
측정횟수	6	6	6	6	6	6	6	6	6
산술평균	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

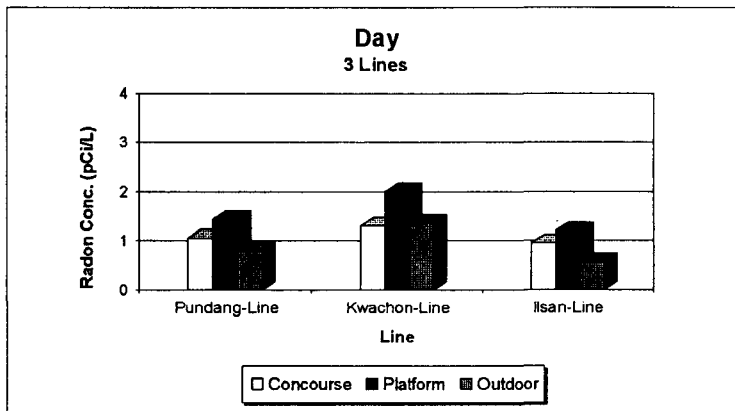


Fig 1 각 노선별 주간의 라돈농도

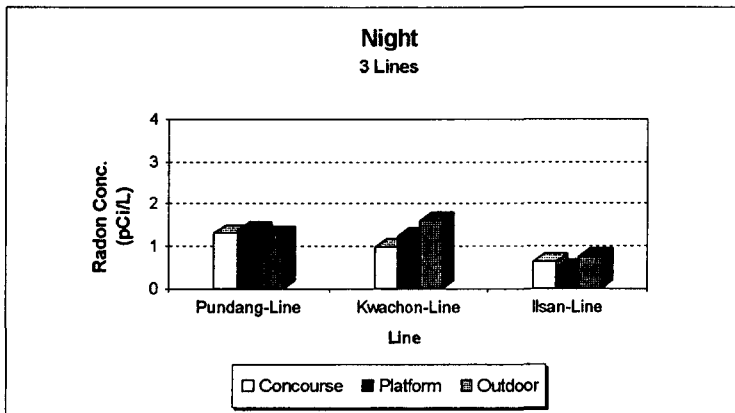


Fig. 2 각 노선별 야간의 라돈농도

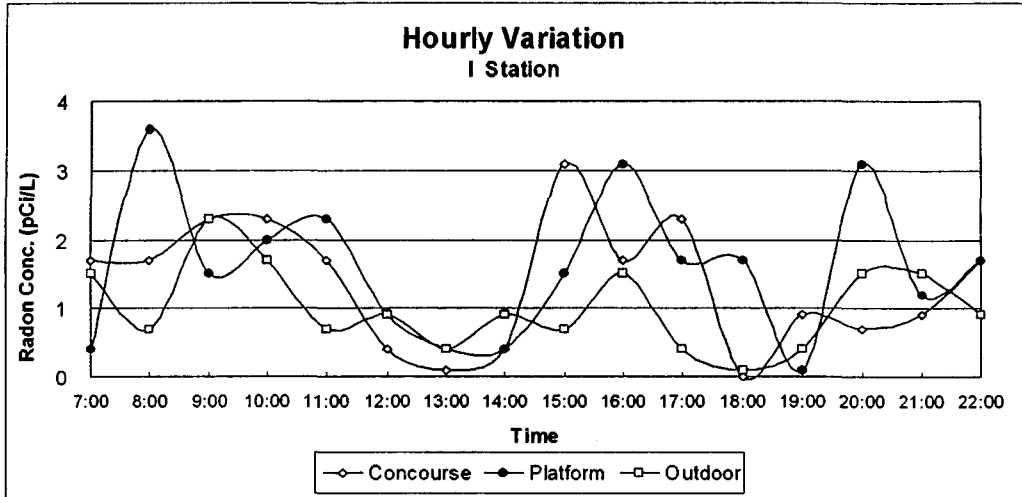


Fig. 3 시간별 라돈농도의 변화

5. 환기조건에 따른 라돈농도의 변화

지하철은 정거장 구간과 터널 구간으로 구분할 수 있으며, 정거장은 승객의 출입 승하차에 이용되고 터널은 열차통과기능을 한다. 환기방식은 자연환기방식, 기계환기방식 및 자연환기와 기계환기의 혼용방식이 있다. 초기의 지하철에서는 자연환기방식에 의존하였으나, 근래의 지하철은 자연환기방식과 기계환기방식을 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 구분된다.

라돈은 미세한 입자이기 때문에 공기의 유동에 의해 많은 영향을 받는다[6]. 그러므로, 환기조건에 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 환기조건 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 경우 평균농도는 1.2 pCi/L로 나타났다. 결과를 종합하면 전체 측정역의 대합실에 급기만을 가동하였을 경우에 라돈 농도가 가장 높게 나타났고, 급기와 배기를 동시에 실시하였을 경우에 라돈 농도가 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.

Table 5 환기조건에 따른 라돈농도의 변화

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

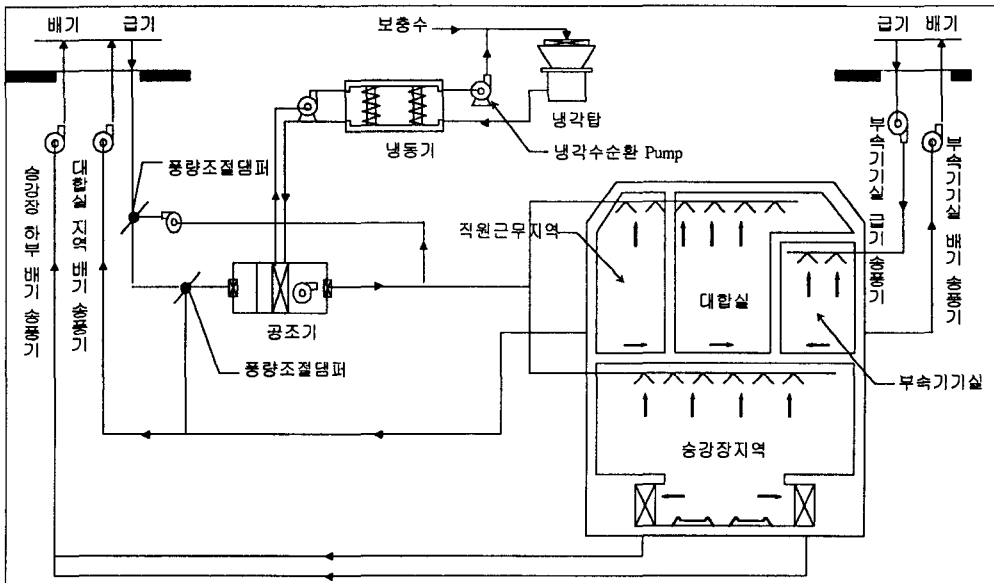


Fig. 4 지하 역의 환기시스템 개략도

6. 결론

실내대기오염물질 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 농도분포를 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. 측정결과 전체 측정역에서 환기조건에 따른 라돈농도의 변화는 대합실의 경우 급기> 배기> 급·배기의 순서를 나타내어, 급기와 배기를 동시에 가동하였을 때 라돈농도가 가장 낮은 것을 확인하였다. 승장장의 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., 1984, "Optimizing the total-alpha three-count technique for measuring concentrations of radon progeny in residences", *Health Phys.*, Vol.46, pp 395-405.
- [2] Evans, R. D., 1969, "Engineer's guide to the elementary behavior of radon daughters", *Health Phys.*, Vol.17, pp 229-252.
- [3] U.S. EPA, 1993, "Office of Air and Radiation(6604J)", EPA Document #402-K-93-008.
- [4] U.S. EPA, 1986, "Interim indoor radon and radon decay measurement protocols", EPA Document #520/1-86-04.
- [5] 조울연, 1997, "지하철의 환기시스템 현황 및 연구과제", *공기조화 냉동공학* 제26권 제2호, pp 91-100.
- [6] Kenneth, Q. Lao., 1990, "Controlling indoor radon", New York: Van Nostrand Reinhold.
- [7] National Council on Radiation Protection and Measurements, 1984b, "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.
- [8] Traynor, G. W., 1981, "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.
- [9] Nero, A. V., 1985, "Indoor concentration of radon 222 and its daughters: sources, range, and environmental influences", Berkeley, CAL Lawrence Berkeley Laboratory; report No. LBL-19346.
- [10] 한국철도기술연구원, 1998, "지하전철역의 공기오염도 조사".