

서울시 지하철역내의 라돈 농도분포 및 저감대책

Concentration Distributions and A Reduction Strategy of Airborne Radon in Seoul Metropolitan Subway Stations

김동술¹⁾, 김윤신²⁾, 김신도³⁾, 신응배⁴⁾, 김성천¹⁾, 유정석¹⁾

¹⁾경희대학교 환경학과 대기오염연구실

²⁾한양대학교 의과대학

³⁾서울시립대학교 환경공학과

⁴⁾한양대학교 토목공학과

(원고접수: 1993. 9. 9)

Dong-Sool Kim¹⁾, Yoon-Shin Kim²⁾, Shin-Do Kim³⁾,
Eung-Bai Shin⁴⁾, Seong-Cheon Kim¹⁾, Jeong-Seok Yoo¹⁾

¹⁾Air Pollution Lab., Dept. of Environmental Science,
Kyung Hee University-Suwon Campus

²⁾College of Medicine, Hanyang University

³⁾Dept. of Environmental Engineering, Seoul City University

⁴⁾Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

(Received 9 September 1993)

Abstract

Indoor radon has been known as one of the notorious carcinogens. However, a safe environmental criterion of radon has not yet been established in Korea. The main objectives of this study were to study concentration distributions of radon, to trace radon sources in subways, and to obtain a strategy for radon reduction in Seoul metropolitan area. Radon concentrations had been extensively determined by several steps. The first step was to survey radon levels in all of 83 subway stations from October to November in 1991. The second step was to select 40 out of 83 stations and then to study seasonal variations in 1991 and 1992. The third step was to monitor radon levels by hourly-basis plans. The fourth step was to seek a radon reduction strategy by altering ventilation at Ankuk station where had the highest radon concentration during the first measurement step. Each underground floor in the station was divided into 10 sites to measure hourly radon variations. The final step of the study was to measure radon concentrations in groundwater that is one of the possible main sources radon place. The result of the various measuring approaches showed short-and long-term radon variation and indicated radon reduction schemes

1. 서 론

현대인들의 생활은 주로 실내에서 행동이 이루어진다. 하지만, 건물, 주택 및 지하공간 등의 실내공간이 에너지 절약의 일환 및 열악한 실외공기의 차단 등으로 밀폐되고 있어, 실내공기오염의 심각성이 거론되고 있다. 실내공기 오염물질 중 라돈(Radon; Rn-222)에 대하여, 구미 각 국에서는 건강에 미치는 영향 등 다각적인 연구가 활발히 진행되고 있으며, 라돈 규제에 관한 논의도 활발하다. 최근들어, 우리나라에서도 라돈오염에 대한 관심이 높아가고 있으며, 라돈에 관한 기준치의 설정과 규제 및 저감 대책의 마련이 시급하다.

라돈은 무색, 무취, 무미의 비활성 물질로서 α -붕괴에 의하여 라듐의 낭핵종(radon daughter)을 생성하며, 이 낭핵종이 폐포에 흡입되면 폐암의 발생율을 높인다(Crawford, 1992). 일반적으로, 라돈은 자연계에 널리 존재하는 자연방사능으로 우라늄광, 토양, 시멘트 등의 건축자재 및 지하수 등에서 주로 방출되지만, 실내라돈은 건축자재, 음용수, 가스 및 석탄과 같은 에너지원에서 실내에 유입되며, 기후 및 기상, 거주자의 생활습관, 건물의 환기여부 등과 같은 인자에 영향을 받는다(Crameri and Burkart, 1989). 미국 환경보호청의 보고에 의하면(NCRP, 1984), 미국에서 연간 13만건의 폐암 사망자중 약 5천~2만 명이 주거지 내의 라돈에 폭로되어 사망한 것으로 추정하고 있다.

라돈의 장기간 저농도 노출에 관한 국가차원의 기준이 설정된 나라는 스웨덴과 미국으로, 스웨덴의 경우 1979년 라돈위원회가 구성되어, 1983년 신축 주택에서는 1.9 pCi/L(70 Bq/m³), 개축주택에서는 5.4 pCi/L(200 Bq/m³), 기존 주택에서는 10.8 pCi/L(400 Bq/m³)이하로 라돈의 기준농도를 규정하고 있다(김윤신, 1989). 미국은 환경보호청에서 일반 가정과 건물에 대한 라돈의 권고치로서 4 pCi/L를 규정하고 있으며, 이 농도는 사람이 70년 동안 라돈에 폭로되었을 때 폐암에 걸릴 확률이 1~5% 정도인 것을 나타내는 수치이다(Crawford, 1992). 우리나라에서는 과학기술처 규정에 의하여 원전 관련 시설에서 10 pCi/L 이하로 규제하고 있을 뿐, 실내 환경에 대한 기준은 없고, 다만 환경처에서 4 pCi/L를 지하공간 환경기준 권고치로 적용하고 있다. 우리나라에서 라돈에 관한 연구는 지하철 역(Kim and Kim, 1993)과 일부 제한된 지역(김윤신 등, 1991)을 대상으로 라돈농도의 분포연구가 한정적으로 수행된 바 있다.

본 논문은 서울시민의 400만명 이상이 이용하는

대중 교통수단인 지하철역내에서 라돈농도를 측정하여, 각 역에서 농도분포와 시간별 및 계절별 농도분포를 다각적으로 분석하였으며, 높은 라돈농도를 보이는 안국역에서는 집중적으로 오염원을 추적하기 위하여 격자별로 농도를 결정하였고, 환기를 이용한 라돈농도의 저감방안을 제시하였다.

2. 실험절차 및 방법

서울시민의 주요 교통수단인 지하철역에서 이용객이 가장 많은 대학실과 승강장, 역무실 및 외부공기를 대상으로 라돈농도를 측정조사하였다. 지하철역의 라돈농도 조사는 분진, 포름알데하이드, 이산화황, 일산화탄소, 이산화질소 및 석면 등과 같은 기타 지하역 오염물질의 측정과 병행하여 다단계로 나누어 수행하였다. 첫 단계는 1차 측정과정으로 1991년 10월부터 11월까지 환승역을 포함한 서울시 전체 지하역 83개를 대상으로 대학실, 승강장, 역무실 등 3개 지점에서 라돈농도를 측정하였다. 두번째 단계는 2차측정 과정으로 1차 측정대상역 중 40개역을 선정하여, 각 역의 대학실, 승강장, 역무실, 외부의 공기 등 4개 지점을 봄, 여름, 가을, 겨울 등 4계절로 나누어 계절별 변화를 조사하였다. 세번째 단계는 3차 측정과정으로 4개역을 선정하여, 각 역에서 주중과 주말의 시간별 라돈농도를 조사하였다. 네번째 단계는 3차 측정과정에서 특히 높은 농도를 보인 안국역을 대상으로, 측정지점을 30개의 층별격자로 나누고 환기방법에 따라 라돈농도의 변화를 조사하였다. 마지막 단계는 안국역과 종로 3가역에서 라돈의 주요오염원으로 사료되는 지하수를 대상으로 라돈의 농도를 측정하였다.

지하철역내 실내공기 중 라돈 농도를 측정하기 위해, 미국 Femto-Tech 사의 연속식 라돈 모니터(Model R210F)와 미국 Terradex사의 축적식 Track Etch 모니터를 사용하였다. 연속식 라돈 모니터는 측정지점에서 5분간 안정화 시킨후, 10분 농도를 측정하였다. Track Etch 모니터는 부착식이므로 최소 60일 정도 공기중에 노출시킨 후 수거하여, 제작회사에 보내 농도를 결정하였다. 지하수 중의 라돈농도를 측정하기 위하여, 미국 Terradex사의 수질용 축적식 Track Etch 모니터를 사용하였다. 이 모니터 역시 약 1개월간 지하수 중에 노출시키고 농도를 결정하였다. 연속식 라돈 모니터는 이동식 검출기이며, 또한 일정 시간동안 축적적으로도 이용할 수 있어, 라돈농도의 조사 및 측정에 양호한 장치이다. 이 모니터는 수동확산(passive diffusion) 방식으로 Rn-222 만을 측정할 수 있으며, 매 6개

월마다 Femto-Tech사에 보내 영점조정(calibration)을 하였다. 연속식 라돈 모니터에 대한 구체적인 설명은 여타 문헌을 참고할 수 있다(Field and Kross, 1990).

3. 결과 및 고찰

3.1 전체 지하철역의 라돈농도

1991년 10월부터 11월까지 83개 전체역을 대상으로 1, 2, 3, 4호선의 라돈농도를 조사하였다. 농도의 범위는 1호선의 경우, 대합실은 0.6~4.5 pCi/L, 승강장 0.6~3.8 pCi/L, 역무실 0.2~3.5 pCi/L로 조사되었으며, 2호선은 대합실 0.0~3.5 pCi/L, 승강장 0.2~3.8 pCi/L, 역무실 0.0~3.5 pCi/L이었다. 3호선은 대합실 0.0~10.7 pCi/L, 승강장 0.6~10.3 pCi/L, 역무실 0.2~8.9 pCi/L이었고, 4호선은 대합실 0.6~6.0 pCi/L, 승강장 0.6~6.7 pCi/L, 역무실 0.9~4.9 pCi/L이었다. 1호선과 2호선은 전반적으로 낮은 농도를 보여 양호한 편이었으며, 4호

선은 길음역의 대합실과 명동역의 승강장에서 4 pCi/L를 초과하였으나, 8 pCi/L에는 미치지 못하였다. 하지만, 3호선에서는 독립문에서 종로 3가까지 4개역이 집중적으로 높은 라돈농도를 보였다. 가장 높은 라돈농도는 3호선의 안국역으로 대합실, 승강장, 역무실 각각 10.7, 8.5, 8.9 pCi/L이었다. 다음으로 높게 측정된 종로 3가역의 대합실, 승강장, 역무실에서 라돈농도는 각각 9.6 pCi/L, 10.3 pCi/L, 6.0 pCi/L를 나타내었다. 환기의 정도차로 기존의 연구결과치(Kim and Kim, 1993)와는 다소 차이를 보였으나, 각 역에서 농도의 증감경향은 일치하였다. 표 1은 호선별로 라돈농도의 기하평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 전체 지하철역 라돈농도의 기하평균은 1.9 pCi/L(71.6 Bq/m³)를 나타내었다. 라돈농도의 분포는 정규분포 형태가 아닌 저농도쪽으로 치우치는 분포형태를 보이고 있으므로, 이와같은 분포형태를 정규화에 접근시켜 평균농도를 산출하기 위해 로그변환된 기하평균을 사용하는 것이 합당하다.

Table 1. Results of radon concentrations and standard deviations in October and November, 1991.

Line Site	Line 1			Line 2			Line 3			Line 4		
	Co	Pl	Of	Co	Pl	Of	Co	Pl	Of	Co	Pl	Of
Number of sampling station	9	9	9	32	32	32	22	22	22	20	20	20
Geometric mean (pCi/L)	2.2	1.9	1.3	1.5	1.6	1.4	2.2	3.2	2.4	2.4	2.3	2.1
Geometric standard deviation (PCi/L)	1.8	1.8	2.2	1.9	2.0	2.0	2.2	3.2	2.4	1.9	1.8	1.5
Maximum concentration (pCi/L)	4.5	3.8	3.5	3.5	3.8	3.5	10.7	10.3	8.9	6.0	6.7	4.9
Minimum concentration (pCi/L)	0.6	0.6	0.2	ND	0.2	ND	ND	0.6	0.2	0.6	0.6	0.9

(Co : concourse, Pl : platform, Of : office, ND : non-detection)

3.2 계절별 라돈농도의 변화

지하철역의 이용객이 많은 1호선 5개역, 2호선 16개역, 3호선 10개역, 4호선 9개역 등 총 40개 역을 임의로 선정하여 2차 측정의 대상역으로 하였다. 가을 측정은 1991년 10월 26일부터 11월 20일까지 수행하였으며, 겨울은 1992년 1월 6일부터 1월 16일까지, 봄은 1992년 4월 30일부터 5월 4일까지, 여름은 7월 27일부터 8월 1일까지 계절별로 측정조사하였다. 표 2는 계절에 따른 각 호선별 라돈농도의 기하평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 겨울철 3호선의 경우 가장 높은 라돈농도를 나타냈으

며, 연간 40개 지하철역의 라돈평균은 2.1pCi/L로 계산되었다. 그림 1은 40개 지하역 승강장에서 측정된 라돈 농도의 확률분포도로서 계절별로 표시하였다. 승강장의 라돈농도가 4 pCi/L 이하를 나타내는 역은 여름철에는 40개역 중 97.5%(39개역), 겨울철에는 72.5%(29개역), 봄과 가을은 87.5%(35개역)을 나타내었다. 또한 승강장의 라돈농도가 8 pCi/L 이상을 나타낸 역은 여름철에는 없었으며, 봄과 가을은 각각 7.5%(3개역), 5%(2개역), 겨울철에는 12.5%(5개역)을 나타내었다. 따라서, 라돈농도의 분포는 봄과 가을이 비슷하였으며, 여름철은

Table 2. Seasonal Variation of radon concentrations and standard deviation at 40 subway stations.

Season	Line	line 1				line 2				line 3				line 4			
	Site	Co	Pl	Of	Ou	Co	Pl	Of	Ou	Co	Pl	Of	Ou	Co	Pl	Of	Ou
Number of sampling		5	5	5	5	16	16	16	16	10	10	10	10	9	9	9	9
Fall 91.10.26 - 11.20	Mean	2.2	1.7	1.0	1.3	1.3	1.1	1.8	0.9	2.6	3.5	3.2	2.1	2.4	2.9	1.7	2.3
	Deviation	2.0	1.8	2.5	2.5	2.5	1.8	2.7	1.9	3.8	1.8	1.9	1.7	1.6	1.7	1.5	1.5
Winter 92. 1. 6 - 1.16	Mean	3.0	2.6	1.6	1.9	1.6	1.9	1.5	1.7	4.6	6.3	5.0	3.7	2.7	2.8	2.0	1.9
	Deviation	1.3	2.9	1.5	1.5	1.8	1.7	2.8	1.8	1.7	1.7	1.9	2.1	1.8	1.9	3.2	1.9
Spring 92. 4.30 - 5. 4	Mean	1.3	1.8	0.8	0.9	1.1	0.9	1.8	1.2	4.6	3.7	4.2	2.7	1.9	2.2	2.8	1.6
	Deviation	1.9	1.5	2.2	2.5	2.2	1.8	1.7	2.5	1.8	3.0	2.0	1.9	2.0	1.7	1.5	2.4
Summer 92. 7.27 - 8. 1	Mean	1.5	1.0	0.8	2.1	0.6	1.0	0.8	0.3	1.2	1.8	1.3	0.4	0.6	0.8	1.4	0.7
	Deviation	1.9	1.7	2.1	1.8	3.5	1.4	2.8	2.8	1.3	2.7	2.2	3.1	2.4	3.5	1.7	2.8

(Unit : pCi/L, Co : concourse, Pl : platform, Of : office, Ou : outdoor)

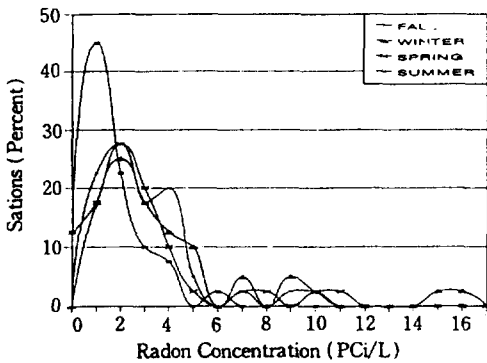


Fig. 1. Probability distribution of underground platform corresponding to radon concentration in the Ankuk station.

낮았고, 겨울철은 높았다. 이러한 결과는 Miles and Algar(1988)에 의해서 조사된 일반적인 실내의 계절별 변화 양상과 유사한 형태이다. 겨울철 라돈농도가 높게 나타난 이유는 여름철에는 환기장치의 가동이 겨울철을 비롯한 다른 계절보다 집중적으로 이루어졌기 때문으로 사료된다. Cramer and Burkart(1989)는 실내라돈과 냉해종의 농도조사 과정에서 환기량이 증가할수록 라돈의 농도는 감소된다고 보고한 바 있다.

3. 3 일별 및 시각별 라돈 농도의 변화

실내 라돈농도의 변화는 실내와 실외의 압력차이, 건물 이용자의 습관, 온도와 습도, 환기 정도가 주

요변수로 작용한다(Miles and Algar, 1988). 본 실험에서는 오염원에 관한 접근을 3단계로 수행하였다. 우선 동대문역, 시청역, 고속터미널역, 안국역 등 4개역에서 시간별로 라돈농도, 습도 및 온도를 측정하여 라돈농도에 영향을 주는 인자를 추적하였다.

4개역을 대상으로 일별 및 시각별 라돈농도를 조사하였다. 측정결과 각 역의 특성에 따라 다양한 변화를 나타내었다. 그 중 고농도를 보인 안국역의 경우, 주중(92.1.24(금))과 주말(92.1.25.(토))로 나누어 조사한 결과, 평균농도는 각각 지하 3층의 승강장은 12.78, 11.70 pCi/L, 지하 2층인 대합실은 10.68, 11.70 pCi/L, 지하 1층의 상가는 11.55, 11.87 pCi/L, 역무실 11.16, 12.05 pCi/L로 주말과 주중의 차이는 없는 것으로 나타났고, 층별 차이도 거의 없이 모두 높은 값을 나타내었다. 대부분 측정위치에서 농도가 8 pCi/L를 초과하였으며, 지하 1, 2, 3층 각 지점에서 최고 16 pCi/L를 초과할 때도 있었다.

그림 2는 주중과 주말의 시간별 라돈농도 변화를 나타낸 것이다. 지하 2, 3층의 라돈농도는 주중, 주말 모두 오후 2시에 최고치를 보이다가 오후 11시 이후부터 감소하여 새벽까지 낮은 농도에서 증감하는 경향을 나타냈다. 각 층의 농도변화는 비슷하였으나, 같은 시간대에서 라돈농도가 대체로 3층이 높게 다음으로 2층 1층 순서로 농도 차이가 있었다. 이것은 안국역에서 라돈농도의 변화요인이 각 층별로 독립하여 존재하지 않고, 같은 인자에 의해 영향을 받는 것으로 생각되었다. 열차의 운행 빈도

가 라돈농도에 영향을 주는 것으로 생각되며, PTV (Piston Type Ventilation) 현상도 밀접한 관련이 있을 것으로 사료되었다. 라돈의 이동현상에 영향을 주는 요인 중 습도는 라돈의 농도와 약한 비례 관계를 보이는 데(Singh et al., 1990 ; Kim and Kim, 1993), 상기 4개역에서 각 지점(승강장, 대합실, 역무실, 외부)별로 습도와 상관성을 구해본 결과, 역내 보다는 지하역 외부에서 상대적으로 큰 상관성을 보였다. 즉 시청역의 경우 승강장, 역무실, 대합실, 외부에서 라돈농도와 습도와의 상관계수 R값은 각각 0.152, 0.325, 0.060, 0.405이었다. 즉, 외기의 경우 라돈농도가 습도와 약한 상관성을 보이는 반면, 실내에서는 라돈농도가 습도와는 거의 무관하였다. 이러한 경향은 나머지 3개역에서도 유사하였다.

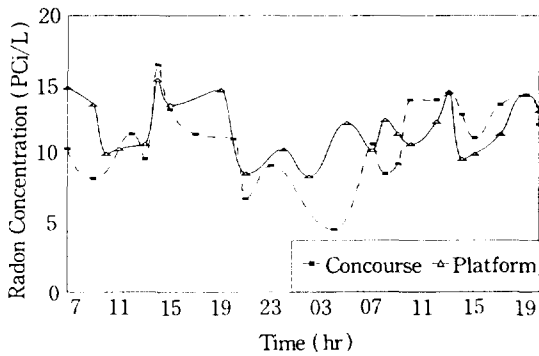


Fig. 2. Hourly variations observed in concourse and platform of the Anuk station.

3. 4 환기 방법의 변화에 따른 라돈농도 변화

최고 농도를 나타낸 안국역의 경우, 라돈 저감대책의 일환으로 환기조건을 달리하여 라돈농도를 조사하였다. 안국역의 지하구조는 지하 3층으로 지하 1층은 상가가 위치해 있고, 지하 2층은 역무실과 대합실, 지하 3층은 승강장이 위치하고 있다. 환기에 의한 저감대책을 마련하기 위해, 1) 배기와 급기를 모두 가동한 경우 2) 급기를 중단하고, 배기만 가동한 경우, 3) 급기를 가동하고, 배기를 중단한 경우, 4) 배기와 급기 모두 중단한 경우 등 4가지 경우에 대하여, 층별 격자별로 30군데에서 라돈농도를 측정하였다. 이 실험은 밤과 낮시간으로 나누어 실시되었지만, 열차운행에 따른 자연환기의 영향을 최소화 하기 위하여, 열차운행이 중단된 심야에 집중적으로 조사하였다. 표 3은 환기 조건을 다르게 하였을 때, 각 조건에 대한 라돈농도의 변화를 나타낸 것이다. 배기와 급기가 모두 가동된 경우,

라돈농도 산술 평균 8.85 pCi/L를 나타내었고, 급기만 가동한 상태와 배기만 가동한 경우에는 각각 평균 5.55 pCi/L, 9.00 pCi/L를 나타내었으며, 배기와 급기를 모두 가동하지 않은 상태에서는 평균 6.63 pCi/L의 농도를 나타내었다. 또한, 모든 환기 조건에서 안국역의 일별 변화에서 나타난 바와 같이 지하로 내려 갈수록 즉 승강장 위치로 갈수록 라돈농도가 높게 측정됨을 알 수 있었다. 따라서 지하 3층인 승강장근처에서 라돈의 오염원이 존재할 것으로 사료되었다. 안국역의 환기는 기계환기와 자연환기가 혼용될 수 있도록 설계되어 있으며, 급기에 해당하는 송풍기와 공조기의 유량은 각각 253, 620 m³/h, 252,300 m³/h이었고, 배기량은 517,500 m³/h이었다. 급기와 배기의 비율은 0.98 대 1로 비슷한 압력비를 가지고 있었다.

Table 3. Resulting radon concentrations obtained by altering ventilation patterns in the Anuk station.

Date	92.1.14 ~ 1.15	92.1.17 ~ 1.18	92.1.20 ~ 1.21	92.1.23 ~ 1.24
Site	E (ON) M(ON)	E(OFF) M(ON)	E (ON) M(OFF)	E(OFF) M(OFF)
1st Floor	5.62	4.08	8.03	5.62
Stair 1-2	7.23	6.00	9.39	6.06
2nd Floor	7.15	4.85	8.44	5.00
Stair 2-3	13.71	5.70	8.76	6.87
Platform	10.52	7.10	10.20	7.92
Arithmetic mean	8.85	5.55	9.00	6.30
Standard deviation	2.91	1.03	0.76	1.02

(Unit : pCi/L, E : exhaust, M : make-up)

이상의 결과로 급기만을 가동하였을 때 라돈농도가 가장 낮게 측정되었고, 배기만을 가동하였을 때 가장 높게 측정되었다. 이는 급기만을 가동한 경우 라돈농도의 희석 효과가 나타났기 때문이며, 배기만을 가동하였을 때는 지하역내의 부압에 의해 라돈의 방출확산이 활발하였기 때문이다(Lao, 1990). 따라서, 배기로 인한 감압시 농도의 증가 현상을 볼 수 있었고, 급기로 인한 증압시 농도감소 현상을 볼 수 있었다. 단순히 내부의 공기를 외부로 빼내는 것 보다는, 외부의 공기가 내부로 유입될 때 라돈농도를 낮추는데 효과적이라 생각되었다. 하지만, 여기

서 고려해야할 중요한 점은 라돈을 제외한 여타 오염물질의 저감과약이다. 급기를 위주로 한 라돈의 저감방안은 기타 오염물질의 실외에서 실내로의 유입을 심화시킬 수 있다. 실제 SO₂, NO₂ 등은 거의 대부분 실외에서 지하역내로 유입되고 있으므로, 라돈의 저감방안을 강구할 때, 유출입 되는 모든 오염물질의 상대적 위해성 평가가 수반되어야 한다. 즉, 급배기의 정도와 모든 오염물질들의 거동이 함께 고려되어야 한다.

Kokotti에 의하면(1989), 실내 라돈의 농도는 환풍의 안정도에 의존하며, 라돈의 단기농도는 환기의 속도가 최대일때 최대가 되었다고 보고한 바 있다. 실외 대기상태 역시 실내 감압현상에 영향을 주며, 열차의 역사내 진출입에 의한 PTV 현상도 큰 영향 인자가 된다. PTV는 열차의 진출입시 열차의 전면과 후면에 발생하는 거대한 공기의 흐름으로, 일부역에서는 기계식 환기 대신 이러한 PTV 형태의 자연환기법을 이용하고 있다(Seoul Subway Corp., 1987). 따라서, 이러한 PTV 현상, 외기와의 온도 및 압력차등의 현상은 지하역에서 공기 흐름에 큰 영향을 주며, 라돈의 발생 근원에서 라돈가스의 이동에 큰 영향을 주게된다. PTV 현상은 열차의 속도, 길이, 열차 및 터널의 단면적 비율, 승강장의 면적 및 환기구의 크기에 의존한다. 실제로 열차가 승강장으로 진입할 때, 라돈 모니터의 LCD 계기판은 빠른 속도로 변함을 볼 수 있었다. 이러한 이유로 안국역을 포함한 인근역들에서 고농도의 라돈이 조사되는 것으로 추정되었다.

3.5 지하수 중의 라돈농도

라돈의 오염원 추적을 위한 방안의 하나로, 안국역을 비롯한 3호선의 고농도역 인근의 외부 건물에서 라돈의 농도가 측정된 바 있다(Kim and Kim, 1993). 이들의 결과에 의하면, 고농도를 보이는 지하역인근의 토양은 라돈농도에 큰 기여를 하지 않는 것으로 조사되었다. 반면에, 이 지역의 특성 중에 하나로 이 지역은 다른 지역에 비하여 지하수가 풍부하게 존재하였다. 시료 채취 지역은 안국역의 승강장을 중심으로 각 4지점과 종로 3가 승강장을 중심으로 3지점을 정하여 지하수의 라돈농도를 측정된 결과, 농도의 범위는 1,471~9,689 pCi/L로 측정되었다. 표 4는 7개 지점에서의 지하수 중 라돈 농도, 산술평균 및 표준편차를 나타낸 것이다. 지하수 중의 평균 라돈농도는 6196.9 pCi/L로 높게 나타났으며, 안국역 보다는 종로 3가 역 주변이 높

게 측정되었다. Rand 등(1991) 및 Lawrence 등(1992)은 지하수가 실내 라돈농도에 큰 기여를 한다고 보고한 바 있다. 또한, 그리스와 일본의 경우 지하수중 라돈의 평균농도가 각각 324 pCi/L, 405 pCi/L 정도이었고, 미국의 경우 평균농도는 200~600 pCi/L이었다(Kobal et al. 1990 ; Leo, 1990). 참고로 미국 음용수의 최대 오염농도기준(MCL : Maximum Contamination Level)은 300 pCi/L이다. 이와 같은 결과로 서울시 3호선, 특히 안국역 및 종로 3가역의 라돈오염은 지하수가 큰 기여를 하는 것으로 사료되며, 오염원의 직접처리 측면에서 저감대책의 마련이 시급하다.

Table 4. Radon concentration in groundwater near the Ankuk and the Chongno-3 Station on Line 3.

Station	Radon concentration
Ankuk station	7951.0 pCi/L
	4670.4 pCi/L
	1471.3 pCi/L
	3588.5 pCi/L
Arithmetic mean	4420.3 pCi/L
Chongno-3	7415.9 pCi/L
	9608.8 pCi/L
	8672.3 pCi/L
Arithmetic mean	8565.7 pCi/L
Total mean	6196.9 pCi/L
Standard deviation	2772.2

4. 결 론

라돈농도의 측정결과는 대합실, 승강장, 역무실의 모든 측정지점에서 3, 4, 1, 2호선 순으로 3호선이 가장 높은 농도를 보였다. 1991년 10월부터 11월까지 전체 지하철 역의 라돈 기하평균농도는 1.9 pCi/L로 나타났으며, 3호선의 일부역을 제외하고 서울시 대부분 지하역에서의 라돈농도는 우려할만한 수준은 아니었다. 계절별 라돈농도의 경향은 봄과 가을이 유사하였으며, 여름철이 가장 낮은 농도를 보이는 반면, 겨울철이 가장 높은 농도를 보였다. 전체역 조사결과에서 선정된 40개역의 연간 라돈농도의 기하 평균은 2.1 pCi/L를 나타 내었다.

환기의 조건을 변화시켜 라돈농도의 감축방안을 제시할 수 있었다. 배기보다는 급기를 할 경우 라돈

농도는 효율적으로 감소되었으나, 다른 오염물질의 실외에서 실내로 유입과 유해성을 고려하여 적절한 급배기의 비율을 설정할 필요가 있었다. 고농도를 나타내는 일부역의 경우 지하수 중에 1,471~9,689 pCi/L의 고농도 라돈이 검출되었으며, 고농도 라돈의 큰 오염원으로 사료되었다.

〈사 사〉

본 연구는 서울시 지하철공사의 연구비 지원을 받아 수행된 것으로, 측정조사 과정에서 도움과 편의를 제공하여 주신 지하철공사의 임직원께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김윤신(1989) 서울시 일부 지역에서의 실내라돈 농도에 관한 조사, 한국환경위생학회지, 15 : 1 : 11-18.
- 김윤신, 김동술, 이주형(1991) 실내외 공기의 유해평가 관리 및 기준치 개발에 관한 연구, KOSEF 89-0705-03, 한국과학재단.
- Cramer, R. and W. Burkart (1989) Radon Problem, Radiat. Phys. Chem., 34 : 2 : 251-259.
- Crawford brawn, D.J.(1992) Cancer Risk From Radon, J. AWWA. 77-81.
- Field, R.W. and B.C. Kross (1990) Field Comparison of Several Commercially Available Radon Detectors, AJPH, 80 : 8 : 926-930.
- Kershner, C.J. and E.T. Burgess (1988) Phase Shifted Feedback Electrometer for Pulsed Ion Chamber, Manual for Model R210F, Femto-Tech Inc., U.S.A.
- Kim, D.S. and Y.S. Kim (1993) Distributions of Airborne Radon Concentrations in Seoul Metropolitan Subway station, Health Physics, 65 : 1 : 12-16.
- Kobal, I., J. Vaupotic, D. Mititic, M. Ancik, S. Jerancic and M. Skofljanec (1990) Natural Radioactivity of Fresh Waters in Slovenia, Yugoslavia, Environment International, 16 : 141-154.
- Kokotti, H., P. Kalliokoski and T. Raunemaa (1989) Short and Long Term Indoor Radon Concentrations in Buildings with Different Ventilation Systems, Environ. Tech. Letters, 10 : 1083-1088.
- Lao, K.Q.(1990) *Controlling Indoor Radon*, Van Nostrand Reinhold Inc., New York.
- Lawrence, E.P., R.B. Wanty and P. Nyberg (1992) Contribution of 222Rn in Domestic Water Supplies to 222Rn in Indoor Air in Colorado Home, Health Physics., 62 : 2 : 171-177.
- Miles, JCH and RA. Algar (1988) Variation in Radon-222 Concentrations, J. Radiol. Prot., 8 : 2 : 103-105.
- National Council on Radiation Protection and Measurements(NCRP) (1984) Evaluation of Occupational and Radon Daughters in the United States, NCRP Report No 78, Bethesda MD.
- Rand, P.W., E.H. Lacombe, and W.D. Perkins (1991) Radon in Homes Following Its Reduction in a Community Water Supply, J. AWWA., 154-158.
- Reimer, G.M. and A.B. Tanner (1991) Radon in the Geological Environment. Encyclopedia of Earth System Science, 3 : 705-712.
- Seoul Subway Corp. (1987) *The Construction Report of Seoul Subway Line 3 and 4*, 1 : 843-871.
- Singh, M., R.C. Ramola, S. Singh and H.S. Virk (1990) Influence of Moisture Content on Radon Diffusion in Soil. Nucl. Geophys., 4 : 4 : 479-482.