

서울 지하철역사의 라돈농도 분포 및 특성에 관한 연구

소음진동팀

하광태 · 유승성 · 전재식 · 김영호 · 이민환 · 김민영

A study on the distribution and characteristic of Radon at subway in Seoul area.

Noise and Vibration Team

Kwang-Tae Ha, Seung-Seong Yoo, Jae-Sik Jeon, Young-Ho Kim,
Min-Hwan Lee, and Min-Young Kim

Abstract

The measurement of radon concentration was performed to evaluate the impact of passenger at subway in Seoul. 352 points and 156 points from concourse and platform at subway were selected to measure radon concentration by TDR method and RDA-200 method, respectively. The average and maximum concentrations of radon measured by TDR were 1.46 pCi/l and 4.97 pCi/l and those measured by RDA-200 were 0.80 pCi/l and 5.37 pCi/l, respectively.

The concentration of radon daughter was simultaneously measured with measuring radon concentration by RDA-200 and the concentration of Po-218, Pb-214, Bi-214 were 0.37 pCi/l, 0.29 pCi/l, and 0.23Ci/l, respectively. 0.347 of equilibrium factor was determined by computing the result of measurement by RDA-200 and acceptance value radon concentration estimated was 5.37 pCi/l at subway in seoul.

As a result of this analysis, it is concluded that the impact of radon to passenger at subway in seoul can be ignored.

서 론

라돈(Rn-222)은 지각중의 토양, 모래, 암석, 광물 질 및 이들을 재료로 하는 건축자재 등에 함유되어 있는 우라늄 붕괴계열의 기체상태 원소이므로 대기 중에 존재하는 방사성물질의 대부분은 라돈 및 라돈자핵종들로 구성되어 있으며, 공기 중에 존재하는 라돈 자핵

종은 일반적인 대기오염물질에 비해 폐암 유발의 가능성이 높다고 알려져 있다. 이에 따라 국제방사선방호위원회(ICRP)는 각국에 대하여 일정 농도 이상의 라돈 농도는 규제하도록 권고하고 있는 상황에 있다. 공기중의 라돈농도 측정법은 일반적으로「시간적분측정법」과「회분식측정법」으로 구분할 수 있으며, 인체에 미치는 영향을 평가하기 위한 목적에서 라돈의 농도를 측정하기 위해서는 라돈의 농도가 시간 및 장소에 따

라 변화의 폭이 크다는 이유 때문에「시간적분 측정법」에 의한 평균라돈농도를 측정하는 것이 바람직하다고 평가되고 있다.¹⁰⁾ 또한 라돈의 농도는 밀폐된 실내 또는 지하공간에서 높게 나타나므로 일반건물에 비해 밀폐된 건물 또는 지하 건물에서의 라돈 농도 측정은 필수적인 사항이라고 할 수 있다.

본 연구는 대표적인 지하공간에 해당되는 서울지하철의 역사별 라돈농도 분포를 파악하고 지하철을 이용하는 시민의 라돈에 의한 영향을 평가한 후 규제치를 초과하는 지점이 있는 경우 라돈의 농도를 저감시킬 수 있는 방안을 강구하기 위한 목적이다.

측정 방법

1. 조사대상 및 기간

서울시 지하철 역사내의 라돈 농도 및 분포를 파악하기 위한 라돈 농도 측정 대상은 1호선 서울역 등 7개 노선 78개 역사의 대합실, 승강장과 환승 통로 10개소 등 88개소에 대하여 시료채취 및 분석을 실시하였으며, 단기농도 측정은 99년 6월 3일부터 99년 9월 7일까지 실시하였고, 장기농도 측정은 Fig.1과 같은 라돈캡(TDR)를 99년 6월3일부터 설치한 후 99년 9월 7일 회수하여 화학분석을 실시하였다.

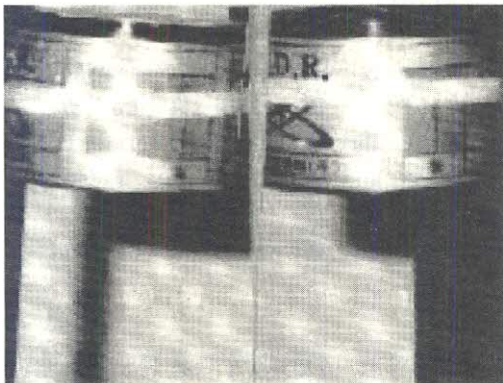


Fig. 1. Time integrated detector for radon measurement.(TDR)

2. 라돈 및 라돈자핵종 농도 측정

본 연구에서는 미국환경보호청(EPA)에서 설정한 실내환경에서의 라돈농도 규제치인 4 pCi/l 를 지하

철 환경에서의 라돈농도 규제치로 적용할 수 있는가를 판단하고 지하철에서의 라돈농도 규제치를 별도로 설정할 필요성이 있는가를 판단하기 위하여「시간적분 측정법」에 의한 평균라돈농도 측정과 병행하여 회분식 라돈모니터(RDA-200, Scintrex)에 의한 라돈 및 라돈자핵종의 농도를 측정하였으며, 시간 및 장소에 따라 큰 폭의 변화를 나타내므로 피폭선량을 평가하기 위한 목적에서 라돈농도를 측정하기 위해서는 일반적으로 시간적분라돈농도 측정법에 의한 평균라돈농도 측정을 권장되고 있다. 시간적분라돈농도 측정법에는 고체비적검출기 또는 충전막전리함이 내장된 라돈캡을 이용하는 방법과 활성탄을 이용하는 방법이 있으나, 기술의 도입이 없이 국산화가 가능한 방법은 고체비적검출기를 이용한 라돈캡을 이용하는 방법이다.

즉, 시간적분라돈검출기(TDR)를 이용한 평균라돈농도 측정은 검출기의 분배·설치·회수·에칭 및 판독 등 일반적인 측정 공정뿐만 아니라 검출기의 교정 등 경비를 필요로 하는 부수적인 업무가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 교정이 완료된 시간적분라돈검출기(TDR)를 지하철의 각 지점에 3개월 동안 설치한 후 회수하였으며, 회수된 시간적분라돈검출기(TDR)의 LEXAN을 표준에칭시약 (KOH 80% 수용액+에틸알코올 20%) 으로 에칭한 후 생성된 비적을 현미경 및 CCD - Camera를 사용하여 약 200배로 확대하여 10회 계수한 다음 비적수를 계산하였다.

회분식 라돈모니터(RDA-200, scintrex)를 이용한 라돈 및 라돈자핵종의 농도 측정은 Po -218, Pb -214, Bi -214등 라돈자핵종간의 농도를 측정한 후 WL을 계산하는 회분식 측정법과 WL만을 측정대상으로 하는 연속식 측정법이 있으며, 방사평형인자를 얻기 위해서는 같은 시간과 장소에서 라돈과 라돈자핵종의 농도를 동시에 측정할 수 있는 회분식 측정법이 적당하다. 현재 라돈자핵종의 농도를 측정하기 위하여 가장 널리 사용되고있는 방법은 1980년 Busign & Phillips가 개발한 방법으로 신틸레이터셀 및 집진 필터를 사용하여 측정지점에서 5분 동안 공기시료를 채취한 후 신틸레이터셀은 시료채취 후 3시간 방치시킨 후 1시간동안 측정한 후 측정값을 라돈농도로 환산하였으며, 집진 필터는 시료채취 후 2~5분, 7~15분, 25~30분 각각 측정한 후 다음 식 (1), (2), (3)에 대입하여 라돈자핵종의 농도로 환산하였다.

$$C_{Po-213} = \frac{1}{E \cdot V} \{ 0.16817 \cdot I(2.5) - 0.11421 \cdot I(7.15) + 0.09133 \cdot I(25.30) \} - (1)$$

$$C_{Pb-214} = \frac{1}{E \cdot V} \{ -0.00084 \cdot I(2.5) - 0.02461 \cdot I(7.15) + 0.07167 \cdot I(25.30) \} - (2)$$

$$C_{Bi-214} = \frac{1}{E \cdot V} \{ -0.02181 \cdot I(2.5) - 0.04537 \cdot I(7.15) + 0.047731 \cdot I(25.30) \} - (3)$$

위 식에서 C는 계산된 라돈자핵종 Po-218, Pb-214, Bi-214 각각의 농도(pCi/l)이며, I는 시료채취 후 각 구간 동안 측정된 계수치(counts)이다. Am-241 표준선원으로 라돈자핵종의 농도를 측정하기 위한 신틸레이터트레이의 알파선 검출효율(E)을 측정한 결과 47% 이었으며, 시료채취유속(V)은 15 l/min이다.

3. 서울지하철에서의 라돈농도 규제치 설정

라돈은 방사선을 방출하고 있음에도 불구하고 화학적으로 불활성의 가스상태이므로 입자상태의 자핵종과 비교하였을 때 피폭선량은 무시할 수 있으므로, 일반적으로 라돈에 의한 피폭선량은 라돈자핵종에 의한 피폭선량을 의미한다. 미국환경보호청(EPA)은 실내환경에서의 방사평형인자를 0.5로 가정하여 일반 환경에서의 라돈농도 규제치를 4 pCi/l로 설정하고 있으나, 일반 실내환경과는 환기조건이 매우 다른 지하철 등 강제 환기구역에서는 미국환경보호청에서 제시한 0.5를 라돈농도 규제치를 설정하기 위한 계산에 필요한 방사평형인자(Equilibrium Factor, Ft)로 적용할 수 없는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 회분식 라돈 모니터(RDA-200, Scintrex)를 사용하여 서울지하철 대부분의 역사를 대상으로 라돈과 라돈자핵종의 농도를 측정 후 라돈과 자핵종들 간의 평균 방사평형인자 즉, 라돈방사능에 대한 라돈자핵종들의 방사능 비를 도출한 다음 이를 근거로 하여 라돈자핵종의 농도가 0.02WL에 해당되는 라돈농도를 서울지하철에서의 라돈농도 규제치로 설정하고자 한다. 그리고 라돈캡으로 측정된 라돈 농도값을 이용하여 인체의 라돈 피폭선량을 예측하기 위한 기술로서 라돈농도를

WL(Working Level)로 나타내기 위한 방사평형인자(Equilibrium Factor, Ft)는 식(4)에 대입하여 계산한다.

$$C_{Rn} = 100 \times \frac{WL}{F_t}$$

$$F_t = \frac{1}{C_{Rn}} \left(0.106 \cdot C_{Po-218} + 0.514 \cdot C_{Pb-214} + 0.380 \cdot C_{Bi-214} \right) = 100 \cdot \frac{WL}{C_{Rn}} - (4)$$

그러나 일반적으로 환기설비가 가동중인 공간에서는 방사평형인자와 환기속도는 반비례의 관계가 있으나, 어느 한계점에 가까워 지게되면 라돈농도 감소에 따른 측정오차 등으로 인하여 방사평형인자는 역으로 증가되는 경우가 발생할 것으로 예측된다. 그러나 이런 경우 방사평형인자가 증가되더라도 환기의 영향으로 라돈의 농도는 낮아진 상태에 있게 되므로 평균방사평형인자를 이용하여 산출한 WL 값은 실제보다 높은 값을 나타내게 될 것이므로, 환기장치가 가동되고 있는 지하철 등의 장소에서는 평균 라돈농도 측정값을 라돈자핵종의 농도로 환산하기 위한 평균 방사평형인자(Mean Equilibrium Factor, Fw)는 방사평형인자의 산술평균 값을 사용하기보다는 라돈 농도가 높은 지점에서 계산된 방사 평형 인자에 가중치를 주어 계산한 가중방사평형인자(Weighted Equilibrium Factor, Fw)를 평균한 값을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 식(5)에 가중방사평형인자를 적용하여 라돈자핵종의 농도가 0.02WL에 해당되는 라돈농도를 규제치로 설정하였으며, 위의 관계를 Fig.2에 나타내었다.

$$F_w = F_t 100 \times \frac{C_{Rn}}{C_{Rn, ave}} - (5)$$

결과 및 고찰

1. 라돈농도 (장기, 단기)

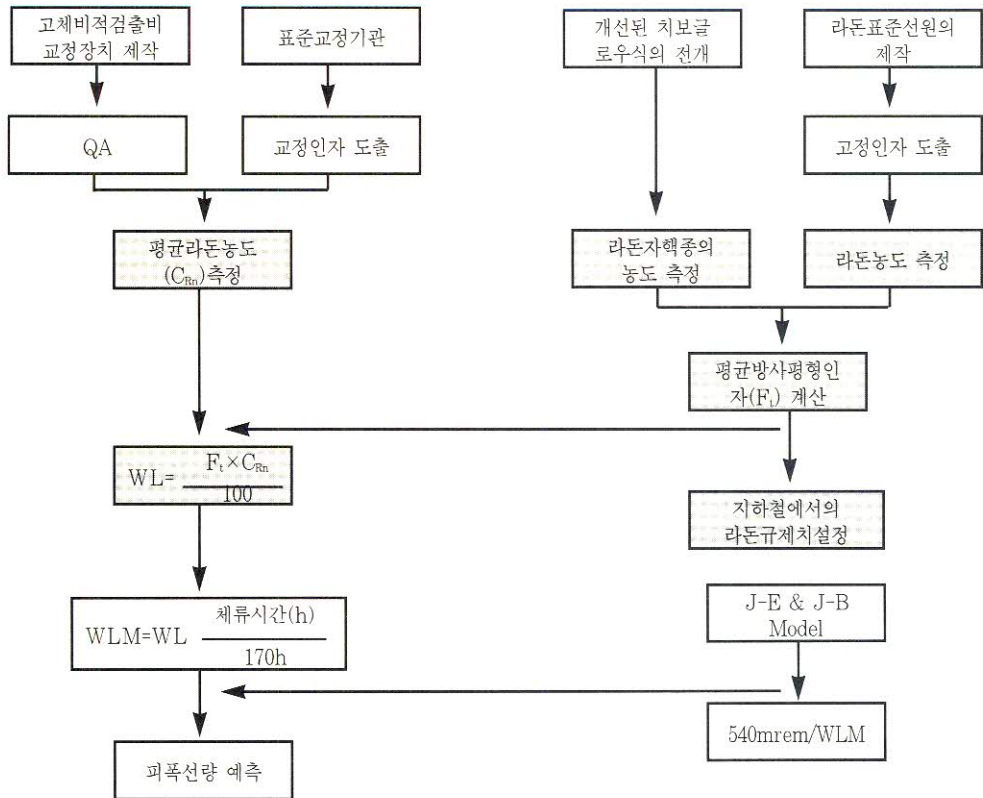


Fig. 2. Flow diagram of deriving effective dose from radon and its daughters in air.

시간적분라돈검출기(TDR)를 이용하여 측정된 장기 라돈농도와 라돈모니터(RDA-200, Scanter)를 이용한 단기라돈 및 라돈자핵종의 측정결과는 Table 1과 같다. Table 1의 결과를 보면 먼저 장기라돈농도의 평균값 및 최대값은 각각 1.46 pCi/l, 4.97 pCi/l이었으며, 장기라돈농도의 측정지점별 평균은 환승통로 2.12 pCi/l, 승강장이 1.73 pCi/l, 매표소 1.10 pCi/l로 환승통로가 가장 높았다. 이는 라돈농도는 환기량에 큰 영향을 받으며, 환승통로의 환기가 제대로 되지 않고 있기 때문으로 사료된다.

라돈 단기농도의 평균농도는 0.80pCi/l로 장기농도보다 낮게 나타났으며 이는 장기농도는 24시간 계속 시료가 포집되므로 환기상태가 좋지 않은 야간에도 시료가 포집되나 단기농도는 환기가 잘되는 시간인 주간에만 시료를 포집하기 때문으로 사료된다.

그리고 라돈 자핵종인 Po-218, Pb-214, Bi-214의 농도는 각각 0.36, 0.29, 0.23 이었으며 측정결과로부터 계산된 방사평형인자는 라돈의 농도가 높은 경우

는 낮아지고, 라돈의 농도가 낮은 경우는 높아지는 경향이 있으므로 각 지점에서의 방사평형인자에 라돈농도의 상대적인 비율을 곱하여 구한 가중방사평형인자의 평균값은 0.347 이었으며, 이 평균값을 적용하여 미국환경보호청의 실내환경기준 0.4pCi/l(방사평형인자 0.5일때)과 같은 수준의 서울지하철에서의 라돈농도 규제치는 5.76 pCi/l 이었다. 이 규제치를 바로 서울지하역사의 규제치로 적용할 수는 없다고 판단되며 차후 RDA-200의 정밀 교정 및 더 많은 측정을 수행한 후 결정하여야 할 것이다.

지하철 승강장 및 매표소의 호선별 장, 단기 라돈농도는 Fig. 3 ~ Fig. 9 와 같았다. Fig. 3 ~ Fig. 9 를 보면 지하철 5호선의 라돈농도가 약간 높은 것으로 나왔으나 호선에 따른 라돈농도의 차이는 없는 것으로 나타났다. 그리고 측정지점 중 미국환경보호청에서 정한 주거환경에서의 라돈농도 규제치인 4 pCi/l를 초과한 지점은 종로3가 환승통로(3-5) 1개소이었다.

시간적분라돈검출기(TDR)에 의한 측정결과로부터

서울지하철을 이용하는 시민의 라돈에 의한 연간 방사선 피폭선량을 계산하면 지하철을 이용하는 시간이 1개월에 40시간이라고 하고 방사평형인자를 0.347을 적용하면 약 4.3 mrem/y 에 해당하며 국제연합방사선평가과학위원회(UNSCEAR)가 발표한 일반인의 라돈에 의한 방사선 피폭선량이 110 mrem/y 인 점을 고려하였을 때 서울지하철을 이용하는 시민의 라돈에 의한 영향은 무시할 수 있다고 판단된다. 그러나 본 연구는 지하에 위치한 전체 역사를 측정 대상으로 한 것이 아니므로 서울지하철을 이용하는 시민에 대한 라돈에 의한 영향을 정확하게 평가하기 위해서는 지하에 위치한 전 역사를 대상으로 시간적분 라돈농도를 측정할 필요성이 있다고 판단되며, 또한 라돈의 농도는 환기조건 및 계절별로 큰 차이를 나타내므로 본 연구와 연계하여 계절별 및 환기장치 가동상태에 따른 농도변화를 포함한 장기간에 걸친 측정이 수행되어야 할 것이다.

2. 지하수 중의 라돈 농도

지하수중의 라돈농도가 공기중의 라돈농도에 영향을 줄 수 있을 것으로 사료되어 지하역사내 지하수 중의 라돈농도를 측정하였다. 라돈 sampling기(RDU-200)로 시료를 채취한 후 라돈 모니터(RDA-200, Scintrex)를 이용하여 라돈농도를 측정 한 결과는

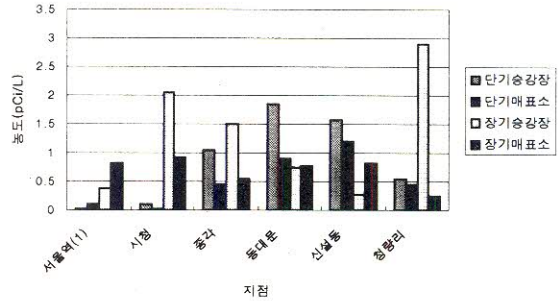


Fig 3. Comparison of Rn at subway line 1.

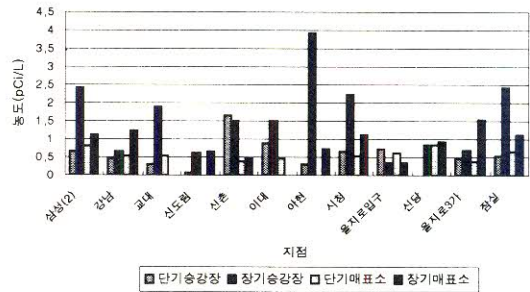


Fig 4. Comparison of Rn at subway line 2.

Table 1. The concentration of Rn at the subway

Unit: pCi/ l

Line	Long Term			Short Term			Radon daughter		
	Platform	Concourse	Transform	Platform	Concourse	Transform	Po-218	Pb-214	Bi-214
1	1.31	0.70		0.86	0.52				
2	1.69	0.88		0.56	0.48				
3	1.66	1.29		1.02	0.64				
4	2.14	1.19		0.72	0.48				
5	1.81	1.20		1.39	0.65				
7	1.38	1.18		0.75	0.37				
8	1.79	1.15		0.32	0.36				
Max.	3.94	3.69	4.97	4.47	2.38	5.37			
Ave.	1.73	1.10	2.12	0.95	0.50	1.00			
Total Ave.	1.46			0.80			0.3	0.29	0.23

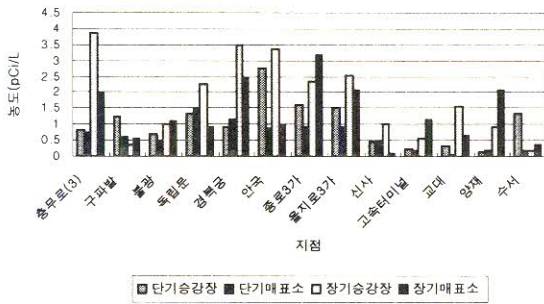


Fig 5. Comparison of Rn at subway line 3.

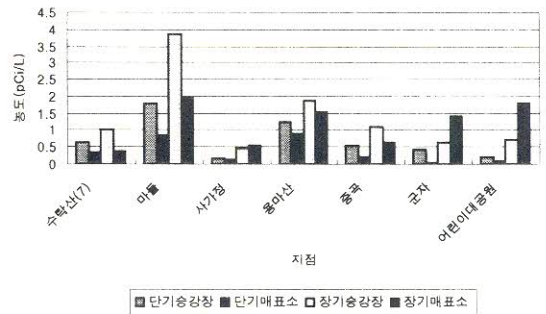


Fig 8. Comparison of Rn at subway line 7.

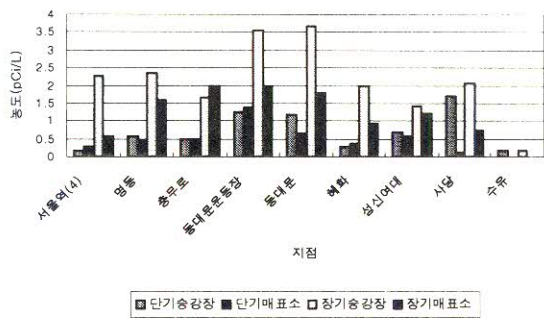


Fig 6. Comparison of Rn at subway line 4.

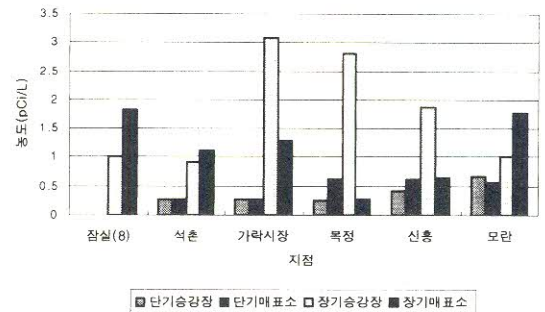


Fig 9. Comparison of Rn at subway line 8.

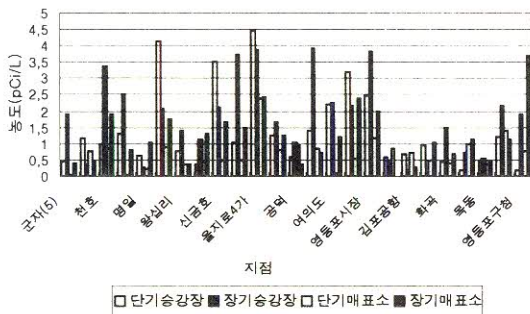


Fig 7. Comparison of Rn at subway line 5.

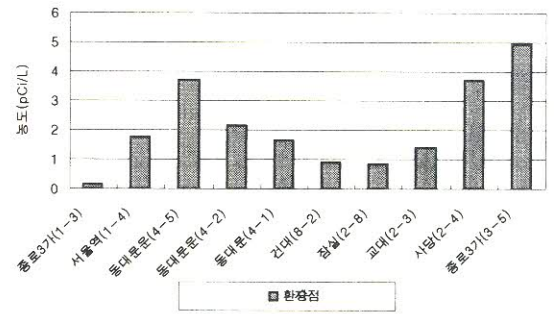


Fig 10. Concentration of Rn at subway trans.

Table 2 와 같았다. Table 2의 결과에서 지하수중의 평균라돈 농도는 1,313 pCi/L이었고, 최고 농도는 2,956 pCi/L 로 나타났다.

3. 측정지점 및 방법에 따른 상관성 비교

지하역사 내 라돈농도의 측정지점 및 측정방법 등에 따른 상관성의 유무를 보기 위하여 여러 가지 데이터를 비교하여 보았다.

먼저 단기라돈농도에서 승강장과 매표소의 관계는 Fig 11 에 나타난 바와 같이 상관관계가 높은 것으로

Table 2. Result of Rn-concentration in the underground water

Line	Sampling	Con. (pCi/L)
1	Tongdaemum	61
2	Samsung	276
3	An-guk	2,699
	Kyongbokkung	1,914
	Ch' ungmuro	1,388
4	Tongdaemum	2,915
	Average	1,404
5	Kkach' isan	1,596
	Youngdungp' o Market	749
	Youinaru	724
	Ch' onggu	2,956
7	Kunja	1261
8	Moran	313

Table 3 The relation of Rn concentration (short & long term) at Seoul subway

line	Relation(R ²)
2	0.0021
3	0.1842
4	0.3144
5	0.2506
7	0.9193
8	0.0950

것으로 사료된다.

위의 결과에서 상관관계가 낮게 나타나는 경우는 단기라돈의 경우 실내의 환기율, 에어졸의 수 및 크기 등의 환경조건 변화에 따라 동일한 장소에서도 농도의 시간적 변화와 요동이 심하므로 라돈 및 라돈 자핵종 농도를 정밀히 측정하기는 쉽지 않으므로, 적어도 한 장소에서 더 오랜 동안 측정해야 그 의미가 있다고 본다.

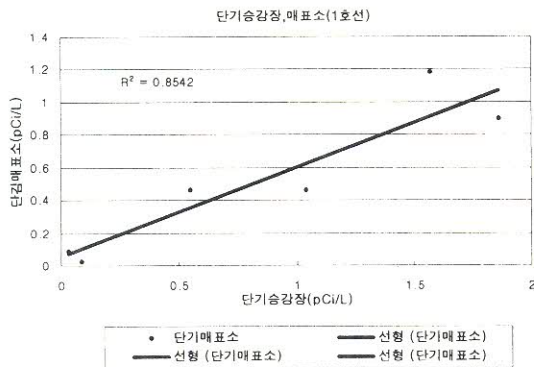


Fig 11. The relation between platforms and concourses.

나타났으며, 호선별 승강장의 단기농도와 장기농도를 비교한 결과는 Table 3과 같았다. Table 3에 나타난 결과를 보면 2, 8호선은 R²가 0.0021, 0.0085로 상관성이 거의 없는 것으로 나타났으나 그 외의 노선은 비교적 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 지하수 중의 라돈농도와 승강장의 장, 단기 라돈농도를 농도는 Fig. 12, Fig. 13과 같이 지하수중의 라돈농도는 공기중의 라돈농도의 약 1000배 정도로 나왔으며, 상관관계는 Fig. 14,15와 같이 지하수중의 라돈농도는 장기라돈농도와는 비교적 상관성이 있지만 단기라돈농도와는 상관성이 없는 것으로 나왔으나, 비교한 데이터의 양이 충분하지 못하여 계속하여 조사하여야 할

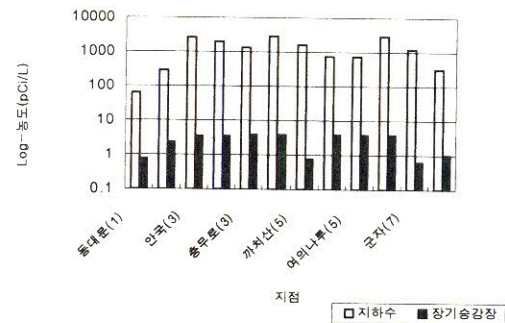


Fig 12. Comparison of Rn between underground water and long term

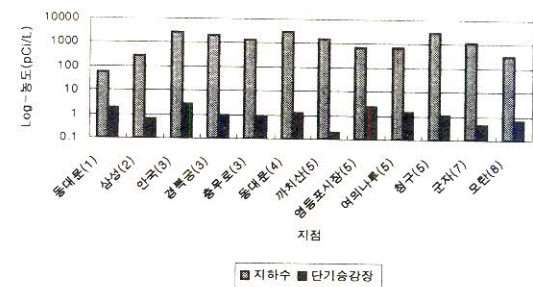


Fig 13. Comparison of Rn between underground water and short term

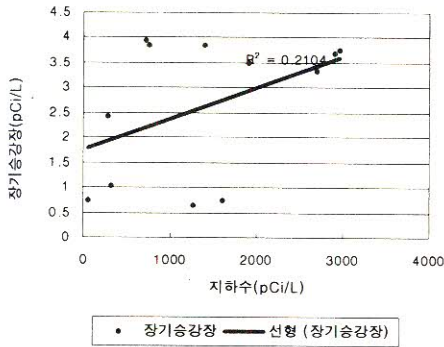


Fig. 14. The relation between platforms and underground water

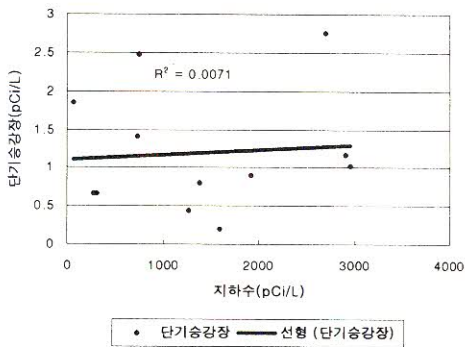


Fig. 15. The relation between platforms and underground water

TDR을 이용한 장기라돈과 RDA-200으로 측정된 단기라돈을 비교해 보았을 때 1호선의 경우 Fig3에서와 같이 단기 승강장과 매표소는 상관관계가 높으나, 2, 8호선의 장, 단기승강장의 상관관계는 낮았다. 3, 4, 5, 7호선은 높은 경향이 있다. 지하수의 경우는 장기승강장과의 상관관계가 단기승강장 보다 높았다.

결론

라돈자핵종은 인간생활과 밀접한 관계가 있으며 또 한 일반적인 대기오염물질에 비하여 위험도가 높다고 알려져 있으므로 라돈자핵종의 농도를 규제해야 할 필요성은 있다고 판단되나 국내의 기술, 경제적인 실정을 고려하면 라돈자핵종의 농도를 규제치로 설정하기

보다는 평균라돈농도를 규제대상으로 하는 것이 바람직하며, 이를 위해서는 조건이 비슷한 건축물 또는 시설별로 라돈과 라돈자핵종간의 평균방사평형인자를 구한 후 이를 근거로 하여 평균라돈농도 규제치를 설정하여야 할 것이다.

1. (TDR)를 사용하여 서울지하철 352개 지점에서 평균라돈농도를 측정된 결과 최대값 및 평균값은 각각 4.97 pCi/l (종로3가 : 3-5 환승), 1.46 pCi/l 이었으며, 미국환경보호청(EPA)에서 정한 라돈농도 규제치인 4 pCi/l 을 초과하는 지점은 1개소였다.
2. 서울지하철의 156개 지점에 대한 라돈 및 라돈자핵종의 농도를 동시 측정하여 가장방사평형인자를 계산한 후 평균한 값은 0.347이었으며, 이 값으로부터 미국환경청에서 규정한 실내환경에서의 라돈농도 규제치와 동일한 서울지하철에서의 라돈농도를 계산한 결과는 약 5.37 pCi/l이었다.
3. 측정결과로부터 서울지하철을 이용하는 시민의 라돈방사선에 의한 피폭선량을 계산하면 약 4.3 mrem/y에 해당하므로 서울지하철을 이용하는 시민에 대한 라돈방사선에 의한 영향은 무시할 수 있음을 알 수 있다.
4. 지하철 역사내 12개 지점 지하수 농도를 측정된 결과 평균라돈 농도는 1,404 pCi/L, 최고 농도는 2,956 pCi/L(청구: 5호선)이었다.

참고 문헌

1. 제현국: 지질환경 및 실내환경에서의 라돈 방사능에 관한 기초연구, (1997)
2. 이병영: 실내 미흡착 라돈 자핵종 분율의 실험적 측정에 관한 연구, (1992)
3. 김영준: 서울시내 초등학교에서의 실내라돈 농도에 관한 조사연구, (1999)
4. 박영용, 장시영, 하정우, 노성기 : 공기중의 라돈 측정을 위한 CR-39의 교정, 대한방사선방어학회지, 14(2):18 (1989)
5. 하정우, 장시영외 : 대기중의 라돈방사능에 의한 인체피폭선량 평가, KAERI/RR-951/90, 한국원자력연구소 (1990)

6. 김윤신 : 서울시 일부 지역에서의 실내 라돈 농도에 관한 조사, 한국환경위생학회지, 15(1):11~18(1989)
7. 김동술 : 서울시 지하철역내의 라돈 농도 분포 및 저감 대책, 한국대기보전학회지, 9(4):271~277(1993)
8. 박영웅, 양현수 : 고체비적검출기의 알파선 검출 효율 측정에 관한 연구, 대한방사선방어학회지, 21(3): 167~173(1996)
9. 박영웅, 하정우, 노성기 : 공기중 라돈 및 라돈 자핵종의 농도 측정, 대한방사선방어학회지, 14(2):23 (1989)
10. 장시영 : 국내라돈 측정 및 분포 현황(환경과 라돈), 대한방사선방어학회, (1994년)
11. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation : Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 1988 Report to the General Assembly with Annexes, United Nations, News Nations, News York (1988)
12. G.A.Swedjema : The Equilibrium Factor F, Health Physics, 45, 453-462 (1983)
13. G.Keller and K.H.Folkerts : Radon-222 concentration and decay product equilibrium in dwellings and in the open air, Health phys., 47:385~395(1984)