

## 도시 일부지역에서의 실내 라돈농도에 관한 연구

김순애<sup>†</sup> · 백남원

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

## A Study on Indoor Radon Concentrations in Urban Area

Soon Ae Kim<sup>†</sup>, Nam Won Paik

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University

### ABSTRACT

This study was taken in general hospital, hotel, shopping center, underground cafe, school, house, for the purpose of investigating the distribution of indoor radon concentration in urban area, by E-PERM which approved U.S. EPA, between August and November 1999.

There are two sampling places were exceed  $148 \text{ Bq/m}^3$ (4 pCi/L; US EPA remedial level), difference mean is  $24.0 \text{ Bq/m}^3$  when compared with underground vs. aboveground indoor radon concentration in the same building and ratio is 1.6, so underground area is higher than aboveground ( $p<0.05$ ).

Influencing factors were examined. They related to the location of sampler(detector) open or near the door is lower radon concentration than inside portion, which explains probably open area has better ventilated air and dilutes indoor radon concentration. Temperature has a negative relationship ( $p<0.05$ ) with indoor radon concentration and relative humidity has a positive ( $p<0.05$ ). Simultaneously to investigate water radon concentration, collected piped-water and the results were very low, which is the same in piped-water concentration other countries.

In conclusion, underground indoor radon concentration is higher than aboveground. Concentration was related to sampling spot, open portion is lower than inside. Higher the temperature, lower the indoor radon concentrations. On the other hand higher the relative humidity, higher the indoor radon concentrations. Indoor radon concentration is influenced by sampling point, temperature, relative humidity.

**Keywords:** Indoor radon concentration, Influencing factors, E-PERM, Water radon concentration

---

<sup>†</sup> Corresponding Author :Dept. of Environmental Health,  
Graduate School of Seoul National University  
Tel: 02-740-8897 019-612-5138, Fax: 02-745-9104  
E-mail: heaven1995@hotmail.com

## I. 서 론

실내 공기 질에 관한 관심은 현대인들이 실내에서 생활하는 시간이 길어질수록 높아질 수밖에 없으며 다양한 영향인자들 중에서 라돈은 무색, 무미, 무취의 방사성 가스로 우리가 보거나 느낄 수가 없어서 문제가 될 수 있다. 라돈은 암석이나 토양의 우라늄이 붕괴되어 생성되는 물질로 우라늄으로부터 라듐까지 붕괴되는 동안에는 모든 핵종이 고체로 땅속에서만 진행되지만 라듐이 붕괴하여 생성되는 라돈은 화학적으로 불활성 기체로 땅속에서 쉽게 이동하여 지표 공기 중으로 방출이 일어난다. 지상의 공기 중으로 방출된 라돈가스는 3.8 일의 반감기로 붕괴하여  $^{218}\text{Po}$ 으로부터  $^{206}\text{Pb}$ (안정된 보통의 납)에 이르게 된다.<sup>1-3,28)</sup> 라돈가스는 건물바닥의 갈라진 틈새 등의 여러 유입 경로를 거쳐 실내로 들어옴으로써 실내 공기 중에 라돈이나 라돈자손의 농도가 증가하게 된다. 라돈은 건물 지반뿐만 아니라 건축 자재, 상수, 취사용 천연가스 등을 통해서도 실내로 들어오지만 일반적으로는 약 80%가 지반의 토양으로부터 방출이 주요 노출원이므로 지하보다는 지하 지반과 가깝고 환기상태가 상대적으로 좋지 않은 지하 공간에서 더욱 문제가 될 수 있다.<sup>2)</sup>

건강위해 측면에서 라돈가스 자체는 방사성 가스이지만 불활성이므로 사람이 호흡하더라도 폐에서 흡수되지 않고 다시 방출되어 별 문제가 되지 않지만, 라돈이 붕괴하여 만들어지는  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Po}$ 과 같은 입자상의 방사성 핵종(이들을 라돈자손(radon daughters and progeny)이라고 부른다)은 먼지 형태로 공기 중에 떠돌거나 어떤 물체의 표면에 흡착된 상태로 체내로 흡입되고 폐에 흡착되며 여기서 방출되는 알파 방사선의 피폭으로 장기적으로 폐암이 유발될 수 있다고 한다.<sup>1-7,18,28)</sup> 이와 같은 위험은 지하 광부 특히 우라늄 광부들을 대상으로 한 많은 연구에서 비롯되어 UNSCEAR(1986,1988), NRC(National Research Council, 1988), IARC,

(International Agency for Research on Cancer, 1988), ICRP(International Commission on Radiological Protection, 1991)등이 검토하여 요약 및 보고하고 있다. 이를 근거로 미국 환경 보호청(U.S. EPA; Environmental Protection Agency 이후 U.S. EPA로 하기로 한다.)이 제시하고 있는 폐암 위험도는 실내 라돈의 평균농도  $150\text{Bq}/\text{m}^3$ 의 공기를 평생 흡입하는 경우 폐암 사망위험은 100명 중 5~7명이다.<sup>1-2,4-5,7)</sup> 이러한 배경으로 이미 선진국가들에서는 많은 측정 자료를 기반으로 실내 라돈 농도의 분포와 준수 할 기준을 정해두고 있는 실정이다.

한편, 우리 나라에서는 1980년대 후반 최초로 한 일간지(한겨레신문, 1988.6.10)에 라돈에 의한 실내 공기 오염문제에 대한 보도가 됨으로써 처음 주목을 받았고 그 후 주로 지하철이나 지하상가(지하철과 연계되었거나 연면적이 넓은 상가 지역)를 위주로 실내 라돈 농도를 측정했다.<sup>9)</sup> 법적인 측면에서는 1988년 '지하 공간 공기 질 환경 기준 권고치'로서 가스 및 입자상 물질과 미량 유해 물질이 설정되었고 이때 라돈에 대한 권고 기준으로  $4\text{pCi/L}$ ( $148\text{Bq}/\text{m}^3$ )를 정한 바 있다. 이어 1996년 "지하 생활공간 공기질 관리법"이 제정되었고 1997년 시행령과 시행 규칙이 제정, 공포되어 오염 물질로 14개 물질이 규정되었고 그 중에 7가지 항목의 기준이 있으나 현재 라돈은 기준이 설정되지 않은 항목이다. (지하 생활 공간 공기질 관리법, 시행 규칙 및 시행령, 1999) 그러나 라돈 문제는 아직 일반대중에게는 잘 알려지지 않은 문제일 뿐만 아니라 Cohen (1986)에 의하면 대기 오염 정도가 상대적으로 낮은 시골이나 도심 외곽 지역보다는 도심 지역의 실내 라돈 농도가 평균적으로 약간 상승된 것<sup>8)</sup>을 보여 주고 있어 대도시 지역에서의 실내 라돈 농도의 반복 측정은 필요하다고 사려된다.

이에 따라 본 연구에서는 새로운 측정기기를 활용하여 인구가 밀집되어 있는 도시 지역의 여러 공간에서의 지하 및 지상의 실내 라돈 농도를

측정하여 지하와 지상 공간의 실내 라돈 농도를 비교하고, 농도에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 조사하여 동일 측정 장소의 수질에서의 라돈 농도를 측정하여 실내 공기와 수질에서의 라돈 농도 사이의 연관성을 보고자 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상

본 연구는 서울시를 중심으로 경기도 일부 지역에서 지하공간이 있는 건물의 지하 및 지상 공간을 측정 대상으로 하였다. 서울시 일대의 지질은 선캄브리아기 편마암류와 이를 관입한 쥐라기 화강암으로 이루어졌고 쥐라기 화강암들은 서울 화강암(Jurassic Seoul granite)과 관악산 화강암(Jurassic Kwanaksan granite)으로 나누어지는<sup>10)</sup> 지질 구조의 차이가 있지만 서울시와 경기도 일부 지역을 동, 서, 남, 북 방향으로 측정하였다. 측정 대상 공간으로는 병원, 가정집, 호텔, 상가(지하생활 공간 공기질 관리법에서 규정한 지하상가인 연면적 2000m<sup>2</sup>이상이 아닌 상가), 학교 등이 선정되었다. 대상지역의 측정은 1999년 8월~11월까지 수행했고 각 건물의 지상 및 지하 공간을 반복 측정이 가능한 경우는 반복 측정하였다.

### 2. 연구방법 및 내용

#### (1) 측정 기기 및 조건

본 연구에서 사용한 라돈 농도측정기는 U.S. EPA에서 승인한 Electron Ion Chamber(EIC)로서 E-PERM(electret passive environment radon monitor; 이 후에는 측정기를 E-PERM이라 한다.)으로 통상적으로 불리운다. 측정원리는 chamber 내에서 라돈이 붕괴하여 생성된 이온과 전자를 측정함으로써 라돈의 농도를 알 수 있으며 그 기전은 필터를 통해 chamber로 확산(diffusion)되어 들어간 라돈이 붕괴하는데 이때 테프론 필터(electret)에 포집되는 이온쌍의 수에

비례하여 필터에 충진되어 있던 전하가 강하하게 되고 electret 표면의 전압강하 정도를 정해진 reader로 읽어서 라돈의 농도를 알 수 있는 방법이다.<sup>13)</sup> Electret의 형태는 두 가지로 electret이 두꺼울수록 민감도가 향상되므로 두꺼운 electret은 단기간 측정(2~7일)에 적합하고 얇은 것은 장기간 측정에 적합하다.<sup>12,13)</sup> 측정 조건은 U.S. EPA에서 제시하는 조건에 맞추었고 Table 1과 같다. E-PERM은 U.S. EPA의 기술담당자에 의해 calibration되었고 농도가 gamma rays에 의해 영향을 받는데 측정 장소별 자료가 없으므로 default로 정해진 gamma ray 값인  $2.6n\text{Ckg}^{-1}\text{h}^{-1}(10\mu\text{Rh}^{-1})$ 을 활용하여 보정을 했다.<sup>14)</sup>

Table 1. Conditions of sampling by E-PERM

Model	E-PERM(Rad Elec. Ltd, USA)
Sampling Period	short term (2~7 days)
Sampling site	1) No draft site(e.g. apart from ventilation system, doors, windows etc.) 2) At least above 50centimeters from floor
Sampling set	2 Samplers each sampling site
LOD(Limit of Detection)	0.1pCi/L(3.7Bq/m <sup>3</sup> )

#### (2) 실내 공기중 라돈농도 측정

라돈 농도의 계산은 강하된 전압의 차이를 활용하여 식1에 의해 계산된 값이다. 여기서 계산된 농도인 pCi/L는 1리터의 공기 중에 원자핵이 분당 2.2 decay하는 것이고 SI(Systeme International; 국제 통일 단위계)는 Bq/m<sup>3</sup>로서 Becquerel은 초당 1개 핵의 붕괴를 의미한다. 본 연구에서는 SI단위인 Bq/m<sup>3</sup>로 환산한 값을 제시했다. 또한 각각의 측정 지점에서 온도, 상대습도,

기류 속도는 기류계 (ALNOR, U.S.A.)를 이용하여 측정했다.

#### (식1)

실내 라돈농도 ( $\text{pCi/L}$ )

$$= \frac{VI - VF}{C1 * Period} X(C2 * C3)$$

VI; initial voltage      VF; final voltage

C1; calibration factor

$$= 1.69776 + 0.00057420 * (V_I + V_F) / 2$$

C2; background gamma radiation( $10\mu\text{R h}^{-1}$ )

C3; 0.087  $\text{pCi/L}$     1  $\text{pCi/L} = 37 \text{Bq/m}^3$

#### (3)자료처리

측정된 농도의 대표값으로 각 측정 지점 별 산술평균과 산술 표준편차와 기하 평균과 기하 표준편차를 구했다. 지하 및 지상 공간에서의 측정된 농도의 차이, 각 측정 장소간 농도 차이, 측정기의 위치에 따른 농도의 차이 등 Student's t-test를 실시했다. 또한 각 측정 장소별 측정기의 위치, 환기 형태의 종류, 온도, 상대 습도 사이의 상관성을 보기 위하여 95% 신뢰구간에서 회귀분석을 실시했다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 측정 대상장소의 일반적 특성

Table 2에 제시한 바와 같이 각 측정대상 장소들은 대부분이 1990년대 이후 건축되었고 거의 콘크리트로 구조된 건물들이며 상주인구나 근무자들이 다수 공존하고 있는 공간들로서 1999년 8월부터 11월까지 측정한 총 시료수는 119개였다.

#### 2. 지하공간의 공기중 라돈농도의 분포

지하 공간에서의 라돈 농도의 분포는 Table 3와 같다. 대부분이 지하 1층이나 2층이었고 지하3층이 있었으나 그 농도는 동일 건물의 지하 1

층과 차이가 없어서 지하층에 따른 구분은 하지 않았다. 전체적으로 기하 평균이 산술평균보다 큰 값을 나타냈고 그 차이는 그리 크지 않았으며 전체 측정 농도의 범위는  $12.5\sim163.8 \text{Bq/m}^3$ 인데 이는 이전의 국내연구들에서 제시한 농도<sup>10,15~18)</sup> 보다 높았으나 동일한 측정 방법에 의한 값이 없어 측정 방법간의 차이가 있을 수 있다. 동일한 방법을 이용한 Zuo-Yang Wang(1996) 등의 연구와 비교한 결과, 단기 측정법으로 E-PERM을 이용한 경우 다른 측정기보다 높은 농도를 보인 것과 같았다. 지하 공간의 농도중 U.S. EPA의 권고 기준인  $148 \text{Bq/m}^3$ (4  $\text{pCi/L}$ )를 초과하는 곳은 두 군데로 권고 기준보다 각각  $7 \text{Bq/m}^3$ ,  $15.8 \text{Bq/m}^3$ (권고 기준의 1.04배, 1.1배) 높았는데 가정집의 지하와 호텔의 기계실로 평소 문과 창문을 닫아두고 사용 시에만 문을 여는 밀폐된 곳이었다.

Table 2. Characteristics of sampling areas

N*	Sampling sites(floor)	Construction material	Ventilation type
			Underground
Hospital	3 1,2/aboveground 1,2	concrete, brick	mechanic/ local exhaust/ natural
Hotel	2 1,3/aboveground 1,2	concrete	mechanic/ natural
Shopping area	2 1/aboveground 1,2	concrete	mechanic/ natural
House	6 1/aboveground 1,2	concrete, brick	natural
School	1 1/aboveground 1,2	concrete, brick	mechanic/ natural

Table 3. Distributions of indoor radon concentrations ( $\text{Bq/m}^3$ ) in underground area

Site	Arithmetic		Geometric		Range	N*
	Mean	Std Dev	Mean	Std Dev		
Hospital	46.0	19.8	42.3	1.52	19.8~89.1	3
Hotel	54.1	36.9	48.1	1.54	36.1~163.8	2
Shopping area	29.3	16.2	26.3	1.58	12.5~74.9	2
House	75.7	33.6	69.8	1.51	31.8~155.4	6
School	128.5	37.3	123.4	1.42	73.8~157.6	1

N\*: Numbers of each sampling sites category

3. 지상 공간에서의 공기중 라돈 농도의 분포  
 측정대상 장소별 지상 공간에서의 라돈 농도의 분포는 Table 4와 같다. 지상 공간의 경우 대부분이 지상 1층이나 2층이었기 때문에 그 구분을 하지 않았고 지상 6층이 한 장소가 있었지만 층별 농도의 차이를 보기에는 부적절하여 구분하지 않고 값을 이용했다. 전체적으로 기하 평균이 산술평균보다 큰 값을 나타냈고 그 차이는 그리 크지 않았으며 전체 측정 농도의 범위는 6.8~93.5Bq/m<sup>3</sup>이었다. 이중에 U.S. EPA의 권고 기준인 148Bq/m<sup>3</sup>(4 pCi/L)를 초과하는 곳은 없었다.

**Table 4.** Distributions of indoor radon concentrations (Bq/m<sup>3</sup>) in aboveground area

Site	Arithmetic		Geometric		Range	N*
	Mean	Std Dev	Mean	Std Dev		
Hospital	44.8	18.5	41.2	1.53	19.2~93.5	3
Hotel	43.6	13.1	41.9	1.35	26.4~65.9	2
Shopping area	13.3	16.2	12.2	1.82	7.9~18.6	2
House	39.8	26.4	30.6	2.23	6.8~88.3	6
School	40.8	4.6	40.6	1.12	35.2~47.5	1

N\*: Numbers of each sampling sites category

#### 4. 지상과 지하 공간의 실내라돈농도의 분포 비교

동일 장소별 실내 라돈 농도를 비교한 Table 5에서는 동일 건물이라도 지하 공간이 지상 공간보다 실내 라돈 농도가 낮게 나타난 곳이 병원이었으며 이는 지하 공간이 환자들의 왕래가 많아 항상 근무시에 문을 열어 두는 것에 기인한 것으로 볼 수 있다. 각 측정장소에서의 지상과 지하 공간의 라돈 농도를 Student's t-test한 결과 통계적으로 유의( $p=0.005$ )하여 지하 공간의 실내 라돈 농도가 지상 공간보다 크다는 것을 알

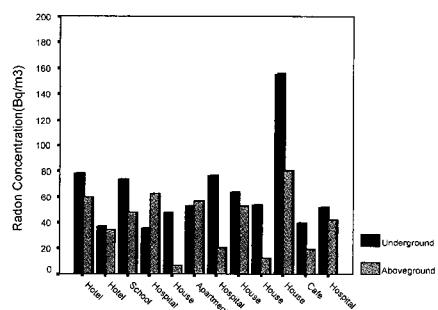
수 있다. 지하 공간과 지상 공간의 실내 라돈 농도의 편차의 평균은 24.0Bq/m<sup>3</sup>였고 농도의 비는 약 1.6으로 나타났다.

Figure 1은 측정장소별 지상 및 지하 공간에서의 실내 라돈 농도의 평균을 비교한 그림이다. 각 장소별 비교에서는 지상의 농도가 높은 장소가 있음을 나타내 주고 전체 농도를 비교한 그림에서는 전체적으로 지하 공간의 농도가 지상 공간보다 약간 높은 분포를 하고 있었다.

**Table 5.** Comparisons of indoor radon concentrations (Bq/m<sup>3</sup>) in underground vs. aboveground area

	Hospital	Hotel	Shopping area	House	School	Total
Difference* Mean	13.2	10.8	20.9	33.1	26.3	24.0
U/A Ratio ^	1.4	1.2	2.1	1.8	1.6	1.6

\*; Difference = Underground Mean Radon Concentration(Bq/m<sup>3</sup>)-Aboveground Mean Radon Concentration(Bq/m<sup>3</sup>)  
 U/A Ratio ^ ; Underground/Aboveground Radon Concentration Ratio



**Figure 1.** Comparisons mean of underground vs. aboveground indoor radon concentrations (Bq/m<sup>3</sup>) in each sampling site.

5. 측정기 위치에 따른 실내 라돈 농도의 비교  
 환기율에 따른 실내 라돈 농도를 비교하기 위해 이산화탄소를 이용한 시간당 공기 치환율은 계절적으로 여름과 가을이어서 대부분 문과 창문

이 열려있었고 왕래하는 사람들도 많아 계산이 용이하지 않았고 공간의 체적과 기류 속도를 이용한 환기율을 이용하기 위해 측정했지만 대부분의 기류가 0m/sec로 나타나 계산이 부적합했다. 이러한 이유들로 인해 측정기위치를 비교하여 측정지점이 열려있거나 문과 가까운 지점인지와 문과 떨어진 안쪽인지 여부로 나누어서 측정했다. Table 6은 측정기의 위치를 고려한 후의 각각 측정기 위치 비율과 실내 라돈 농도의 평균을 비교한 것이다.

그 결과 상관계수가 0.472이고 통계적으로도 유의( $p<0.05$ )하여 열려 있거나 문과 가까운 곳에서의 실내 라돈 농도가 낮고 문과 떨어진 지점에서 높은 농도를 나타냈다.

**Table 6.** Comparisons of indoor radon concentrations ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) in different sampler(detector) location

Detector location	N(%)	Rn concentration( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )
Open	44(36.9)	48.4 ±29.7
Middle	43(36.1)	49.9 ±30.2
Inside	32(26.9)	50.5 ±30.7

6. 측정 장소별 수질에서의 라돈 농도의 분포 수질에서의 라돈 농도는 식 2<sup>19)</sup>에 의해 계산된 농도( $\text{pCi}/\text{L}$ )로 이를 국제 통일 단위계인  $\text{Bq}/\text{m}^3$ 로 환산한 농도로 분포 정도는 Table 7과 같고, 공기중 농도를 측정한 동일건물에서 통상적으로 사용하는 수돗물을 채취했는데 매우 낮은 농도의 분포를 보였다. 이는 대전시 지역의 연구<sup>20,21)</sup>에서 음용 지하수의 라돈 함량이 동일 지역의 토양의 우라늄 함량과 정비례한다고 한다는 결과에서와 같이 음용 지하수가 아닌 수돗물에서의 농도는 지하수의 라돈 농도에 비해 매우 낮은 값으로 나타나고 있다.

#### (식2)

Collection radon water concentration

$$= \frac{(ARC)(\lambda T)[(VA/VW + OC)]}{[\exp(-\lambda D)][(1 - \exp(-\lambda T))]}$$

ARC; Average radon concentration

$\lambda$ ; Decay constant of radon( $\text{d}^{-1}$ ) = 0.1814

T; Period of analysis time

VA; Volume of air in the analysis jar

VW; Volume of water in the analysis jar

OC; Ostwald coefficient

D; Delay time(time of collection to the time of starting measurement)

**Table 7.** Radon concentrations( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) of water at sampling area

	Hospital	Hotel	shopping Area	House	School
Mean	1156.6	841.4	N/A	950.3	1361.9
Std Dev	89.9	150.1	N/A	214.3	483.7

N/A; Not Available

#### 7. 실내 라돈 농도에 영향을 미치는 요인

본 연구에서 측정된 농도를 이용하여 실내 라돈 농도에 영향을 미치는 요인들을 평가했다. 측정기의 위치를 고려하여 환기율을 비교한 방법에서는 공간의 안쪽과 문쪽이나 열려있는 공간으로 평가한 결과 차이가 있었다. 또한 계절적인 차이를 대신하여 온도의 차이를 고려했으며 실내 라돈 농도에 영향을 미치는 것으로 알려진 상대 습도와 다른 인자들을 고려했다.

회귀 분석을 실시한 결과 측정기 위치와 실내 라돈 농도와는 통계적으로 매우 유의한 결과( $P<0.05$ )를 보여 측정기의 위치가 문에 가깝거나 열려진 넓은 공간일 경우에 그렇지 않은 경우에 비해 상대적으로 낮은 농도를 나타냈다. 온도와의 관계는 음의 관계가 존재했고( $r^2=0.057$ ,  $p=0.009$ ) 상대 습도와의 관계에서는 양의 관계( $r^2=0.195$ ,  $p<0.05$ )가 나타났는데 각각 상관관계는 매우 낮게 나타났다. 온도와 습도를 동시에 고려하여 회귀 분석한 결과 온도에 의해 -1.5씩 라돈 농도가 변하고 습도에 대해서는 1.2씩 변하며 통계적으로 유의했다(습도,  $p<0.01$ ). Figure 2와 Figure 3은 각각 온도와 상대 습도와 실내

라돈 농도의 95% 신뢰구간에서 회귀직선을 그린 그림이다.

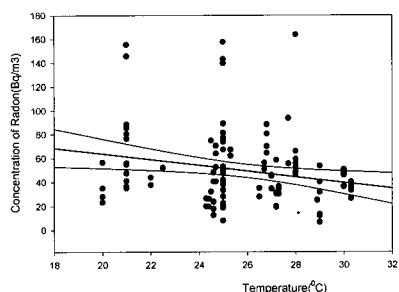


Figure 2. Regression plot between indoor radon concentration( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) and temperature (solid line; 95% confidence interval)

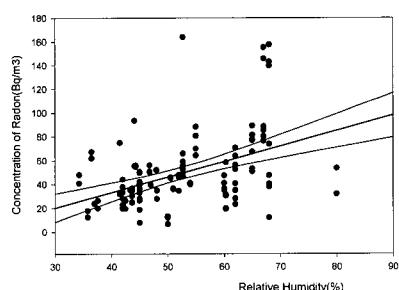


Figure 3. Regression plot between indoor radon concentration( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) and relative humidity (solid line; 95% confidence interval)

#### IV. 결론

UNSCEAR(1993)의 보고에 따르면, 일반적으로 공기중 라돈의 평균농도가 실내에서는  $40 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , 실외에서는  $10 \text{ Bq}/\text{m}^3$  정도로 지역에 따라 편차가 크기 때문에 평균치가 큰 의미를 갖지 못한다고 했으나 이 값은 반복 측정을 통해 얻은 평균이므로 우리 나라에서도 전국적인 대단위 반복조사를 통한 평균값을 제시해야 한다.<sup>2,5,9)</sup> E-PERM을 이용할 경우 각 측정 지점에 두 개씩 측정기를 두어 농도 사이의 변이계수(coefficient of Variation)가 10 %미만일 것을 권장(U.S.

EPA)하여 본 연구에서는 모든 장소에서 동일 측정 지점마다 두 개씩의 측정기를 두었고 전체 변이계수의 평균이 5.08%로 나타났다. 지하 공간의 경우 환기가 상대적으로 나쁘고 기반암석과 가까운 영향 등으로 인해 지상 공간보다 라돈 문제가 제기될 수 있고<sup>2,12)</sup> 실제로 제현국 외(1998)의 조사에 따르면 환기가 불량하고 지하인 경우의 실내 라돈 농도가 지상보다 높은 것으로 나타났다.<sup>15,25)</sup> 본 연구에서도 차이가 크지는 않지만 지하 공간이 지상 보다 실내 라돈 농도가 높은 결과를 보여 다시금 지하 공간에서 생활을 하거나 작업을 하는 사람들의 체적 환경을 위한 문제가 제기된다고 본다. 홍영국 외(1998)가 연구한 바로는 토양내 라돈 함량과 지하철역 송강장의 실내 공기중 라돈 농도는 매우 밀접한 관련이 있으나 라돈 가스가 압력이 낮은 지표로 이동할 수 있는 그 지역의 단층, 파쇄대와 균일 등의 지질구조, 토양의 공극율, 수분함량 등이 주변 지역의 암석과 토양의 우라늄 원소의 봉괴산물에서의 유래된 원인보다 더 중요한 요소로 밝혀졌다.<sup>10)</sup>

일반적으로 창문을 활짝 열어두면 풍속이 3  $\text{m/sec}$ 일 경우 시간당  $10-30 \text{ m}^3$ 의 공기가 교환이 되고 이는 정상 시간당 공기 치환율의 2~3배이고 이로써 라돈 농도가 50~70%가량 감소된다 는 보고가 있다.<sup>26)</sup> 또한 기계적인 환기 시설의 가동이 되는 경우라면 창문을 통한 자연환기보다 그 감소 폭이 크다고 하며 시간당 환기율을 달리 한 후의 실내 라돈 농도의 변화를 본 연구에서도 환기 정도가 클수록 실내 라돈 농도가 낮았다.<sup>20,27,28)</sup> 본 연구에서도 환기 정도에 따른 동일 지역의 실내 라돈 농도의 변화를 보기 위해 문의 개폐여부, 측정기를 둔 지점위치로 구분하여 측정한 결과 열려진 공간이나 문과 가까울수록 실내 라돈 농도가 낮게 나타나서 자연적 환기를 자주 해 주는 것이 라돈 농도의 감소를 위해 바람직하다는 사실을 확인했다.<sup>14,27)</sup> 실내 라돈 농도에 영향을 미치는 인자로 계절적인 변이가 있는데, 여름은 상대적으로 자연 환기를 자주하

는 반면 주로 실내에서 생활을 하게 되고 에너지 절감이라는 이유로 환기를 하기 어려운 겨울은 여름보다 실내 라돈 농도가 높다는 이전의 연구들이 많다.<sup>1,3,15,16,18,20,24)</sup> 이는 온도에 따른 실내 라돈 농도의 분포를 고찰한 본 연구의 결과 음의 상관관계를 나타내어 온도가 높을수록 실내 라돈 농도가 낮다는 것을 알 수 있다.

건축자재의 영향을 보기 위해 조사를 한 결과 대부분이 콘크리트 또는 벽돌을 사용하여 그 차이를 볼 수 없었고 건축년도 역시 1990년을 전후로 건축되어 건축년도에 의한 차이도 보기가 어려웠다. 이전의 연구에서 건축자재는 발산율이 낮아 기계적 환기 시스템의 적용에 의한 저감이 비효율적이라고 한다.<sup>22)</sup> 다음으로 습도와 대기 압의 영향에 의해 건축자재의 라돈 발산율은 변화하는데 건축자재의 기공 속에 물이 포함된 경우와 기공 표면이 손상을 입을 경우 물에 의한 라돈 침출량이 증가하여 라돈의 생성이 더욱 많아진다.<sup>23)</sup> 그러므로 본 연구에서 상대 습도와 실내 라돈 농도 사이에 양의 관계가 있다는 것은 건축 자재에 의해 라돈이 생성되는 위 기전의 작용이나 습도가 높은 조건에서 상대적으로 기류의 이동이 적은 영향 등에 기인한 것으로 파악된다. 한편, 음용수에서 라돈 함량의 환경 기준치는 U.S. EPA(1986)가 10,000pCi/l로 정했으나 1994년에 300 pCi/l(11,100 Bq/m<sup>3</sup>)로 개정 후 제안을 하였다.<sup>21)</sup> 1999년 환경부의 발표 자료에 의하면, 대덕 연구단지 지역 주민이 애용하는 샘물에서 천연 방사성원소인 라돈과 우라늄 등 방사성 핵종의 농도가 미국 환경보호청의 음용수 수질기준치보다 많이 높은 농도가 나타나 유해성이 우려된다고 보도된 바 있으며 이와 함께 충북지역에서 생산되어 전국적으로 시판되는 샘물을 조사한 결과 방사능 농도가 높은 것은 시판을 중지시키는 사건이 발생했었다. Hopke(1987)에 의하면 지하수를 가정용수로 활용할 경우 지하수에 녹아 있는 라돈양은 지하수를 통과하는 토양층의 라듐 농도와 지질환경 등에 영향을 받고 그 농도는 약 20~20,000pCi/l였으나 상수도

를 공급받는 가정용수에는 135~189pCi/l(4,995~6,993Bq/m<sup>3</sup>)정도의 적은 양의 라돈을 함유하므로 큰 문제가 되지 않는다고 한다. 그러므로 본 연구에서 측정한 수질의 라돈 농도는 수돗물이 분석대상이었고 그 농도가 매우 낮아서 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 생수나 약수를 음용하는 지역과 특히 지하수를 주로 이용하는 시골 지역에서의 라돈 농도를 측정할 필요성이 제기되며 그 측정값을 일반 대중에게 알리고 라돈 함량이 높은 지하수를 음용할 때는 마시기 전에 물컵을 흔드는 등의 탈기를 한 후에 음용(U.S. EPA, 1992)하도록 홍보를 해서 음용수 내의 라돈 노출을 줄이도록 해야 한다.<sup>21)</sup>

결론적으로 실내 라돈 농도는 동일 건물인 경우 지하 공간이 지상 공간 보다 높은 농도를 보이므로 우리 나라와 같이 지하생활 공간이 많은 경우에는 반복적인 실내 라돈 농도를 측정하고 그 누적된 값을 토대로 전국적인 평균과 함께 특히 라돈 농도가 높은 지역을 선정하여 그 지역을 중심으로 포괄적으로 관리하는 프로그램을 마련해야 하겠다. 또한 실내 라돈 농도는 온도와 습도의 영향을 받을 수 있으므로 적절한 온도와 습도를 유지하도록 해야 하며, 흡연과 함께 폐암의 주요 원인으로 대두되는 라돈을 폐암의 발생과 관련시킨 연구들이 수행되어져야 하겠지.<sup>1,6,30,31)</sup>

## 참고문헌

1. U.S. EPA(Environment Protection Agency) : A Citizen's Guide to Radon. EPA, ANR-464,4022-K-92-001, 1992a.
2. ICRP : Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annals of ICRP 21(13), 1991.
3. U.K. NRPB : Radon. At a Glance Series, 1990.

4. NCRP(1988) : Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters.
5. UNSCEAR : Sources, effects and risks of Ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1988 Report to the General Assembly, United Nations, New York, 1988.
6. U.S. National Research Council Report. BEIR IV, National Academy Press, Washington D.C. 28. Andrew, M.P. and David, P.R. ; Environmental Medicine. National Academy Press, 1995.
7. IARC. Evaluation of carcinogenic risks to humans : Man-made fibers and radon. IARC monograph, vol. 43. International Agency for Research on Cancer, Lyon ; 1988.
8. Cohen B.L. ; A National survey of radon in homes and correlating factors. *Health physics*, 52 : 1986.
9. 지하철 역사 라돈 관련 전문가 회의 결과. 환경보전, 1998. 8.
10. 홍영국, 김승오, 김통권 : 서울 지하철역 승강장 및 토양내 유해 라돈 함량 연구. *자원환경*, 31(3) : 215-222 ; 1998.
11. U.S. DOE. Office of Health and Environmental Research : Radon program research. FY . Washington D.C. 1992.
12. Kotrappa,P. and Stieff L.R. : Elevation correction factors for E-PERM radon monitors. *Health physics*, 62 : 82-86 ; 1992.
13. Kotrappa, P. Dempsey, J.C. Steiff, L.R. : An electret passive environmental  $^{222}\text{Rn}$  monitor based on ionization measurement. *Health physics*. 54 : 47-56 ; 1988.
14. Zuo-Yuan, W. Jay, H.L. Long-De, W. Susan, C. Shou-zhi, Z. Ruth, K. Bing, S. Shan-Xiang, G. Ping-Ying, G.Su-Wen, L. John, D. B. : Radon measurements in underground dwellings from two prefectures in China. *Health Physics*. 70(2) : 192-198, 1996.
15. 김윤신 : 서울시 일부 지역에서의 실내 라돈 농도에 관한 연구. *한국환경위생학회지*. 15(1) : 11-18 ; 1989.
16. 이종대 : 국내 라돈 농도의 분포조사와 연간 폐폭선량 예측에 관한 연구. *한양대학교 환경대학원 석사학위 논문*, 1998.
17. 지하 생활 공간 공기오염 저감방안 연구. 서울특별시, 1997.
18. 서울시 지하철 환경개선 방안 연구. 서울특별시 지하철 공사, 1998.
19. Kotrappa, P. and Jester W.A. : Electret ion chamber radon monitors measure dissolved  $^{222}\text{Rn}$  in water. *Health physics*, 64 : 397-405, 1993.
20. Hopke.P.K. : Radon and decay products ; occurrence, properties, and health effects. Univ. of Illinois, 1992.
21. 홍영국 : 대전시 지역 라돈 환경 지화학 연구. *자원환경*, 30(1) : 51-60, 1997.
22. Leslie G.B. and Lunau F.W. : Indoor air pollution : Problems and priorities. Cambridge Univ, 1992.
23. 주승환, 제원목 : 라돈 방사능과 생활환경, 계축문화사, 서울(1995).
24. 김윤신 : 원천 주변 주택의 실내 라돈 농도에 관한 연구. *대한 보건협회*. 17(2) : 60-66, 1991.
25. 제현국, 강치구, 전효택 : 서울대학교 판악 캠퍼스 지역에서의 실내라돈농도 분포. *자원환경*. 31(5) : 425-430, 1998.
26. Goran P. : Residential radon exposure and lung cancer in Sweden. *The New England of Medicine*, 330(30) : 695-700, 1994.
27. Pirjo A.K. Helmi M.K. Pentti J.K. : Radon

- prevalence associated with different methods of ventilation and types of foundation construction at workplaces. *AIAH Journal*, 58 : 366-369, 1997.
29. Borak, T.B. Woodruff, B. Toohey, R.E. : A survey of winter, summer and annual average  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in family dwellings. *Health physics*, 57 : 465-470, 1989.
30. Warner, K.E. : Toward a more realistic appraisal of the lung cancer risk from radon : the effects of residential mobility. *Am J of Public Health*, 86(9), 1996.
31. Mendez D. : Effects of radon mitigation vs. smoking cessation in reducing radon-related risk of lung cancer. *Am J of Public Health*, 88(5), 1998.