

# 다중 이용 건물 또는 지하 실내 공간의 용도에 따른 라돈 오염도 비교와 지하 공간의 시간대별 라돈 농도 변화

최 임 조, 신 승 호<sup>1</sup>, 조 완 근<sup>1,\*</sup>

대구시 보건환경연구원, <sup>1</sup>경북대학교 환경공학과

## Evaluation of Radon Levels in Various Public-access Buildings or Underground Facilities, and Their Temporal Variation in Underground Facilities

Im-Cho Choi, Seung-Ho Shin<sup>1</sup> and Wan-Kuen Jo<sup>1,\*</sup>

*Daegu Health and Environment Research Institute*

<sup>1</sup>*Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University*

### ABSTRACT

A lesser degree of research is available with respect to indoor radon characteristics associated with occupants' exposure. The present study evaluated the radon levels in several public-access buildings or underground facilities, and their temporal variation in underground facilities. Radon measurements were conducted in 2005 and 2006, utilizing a continuous radon detector. A solid alpha detector (RAD7) was utilized to measure indoor radon levels. The mean radon concentrations obtained from the building or facilities were in a descending order: platforms of Daegu subway line 2, 2005 (32 Bq/m<sup>3</sup>), hot-air bathroom (14 Bq/m<sup>3</sup>), basement of office building (14 Bq/m<sup>3</sup>), underground parking garage (14 Bq/m<sup>3</sup>), underground shop (12 Bq/m<sup>3</sup>), nursery (10 Bq/m<sup>3</sup>), platforms of Daegu subway line 2, 2006 (9.0 Bq/m<sup>3</sup>), platforms of Daegu subway line 1, 2006 (8.9 Bq/m<sup>3</sup>), supermarket (7.9 Bq/m<sup>3</sup>), hospital (7.3 Bq/m<sup>3</sup>), and second-floor of office building (5.7 Bq/m<sup>3</sup>). In general, underground-level facilities exhibited higher radon levels as compared with ground-level facilities. It was suggested that ventilation is an important parameter regarding the indoor levels of a subway. There was a decreasing or increasing trend in hourly-radon levels in a subway, whereas no trend were observed in a basement of office building. In addition, the radon levels in the subway lines 1 and 2 varied according to the platforms. The radon levels in the present study were much lower than those of previous studies. The average annual effective dose (AED) of radiation from indoor radon exposure was estimated to be between 0.043 and 0.242 mSv/yr, depending on facility types. These AEDs were substantially lower than the worldwide average AED (2.4 mSv/yr).

**Key words** : continuous radon detector, subway, ventilation, annual effective dose

---

\* To whom correspondence should be addressed.  
Tel: +82-53-950-6584, Fax: +82-53-950-6579  
E-mail: wkjo@knu.ac.kr

## 서 론

라돈은 무색, 무취, 무미의 기체 물질이고, 불활성 물질이라서 화학적 반응성이 없고, 라돈의 동위원소는 27가지로 알려져 있는데, 그 중 3가지 라돈 종류( $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  및  $^{222}\text{Rn}$ )가 자연적으로 발생하는 방사능 물질이다(USEPA, 2007). 특히, 자연적 방사능 라돈 종류 중에서  $^{222}\text{Rn}$ 은 상대적으로 긴 반감기(3.8일)를 가지고 있어 충분한 시간 동안 공기 중에 머물러 있으므로 다른 자연 방사선원에 비하여  $^{222}\text{Rn}$ 과 그의 자핵 중(radon decay products)에 의한 일반인의 자연방사선 피폭 기여도가 가장 높기 때문에 실내 및 실외 공기, 그리고 토양가스에서 발견되고 실내 환경적으로 주목받는 라돈은  $^{222}\text{Rn}$ 과 자핵 중이다(Font and Baixeras, 2003; USEPA, 2006; Font *et al.*, 2008).

높은 농도 라돈에 노출될 때 폐암이 유발되는 것으로 알려져 있다(Miles, 1988; USEPA, 2006, 2009). 라돈에 의한 폐암 유발 원인은 라돈가스 자체 보다는 라돈 자핵 중인 Polonium의  $\alpha$ -붕괴에 의해 발생하는 방사선이며, 이로 인하여 폐 조직이 손상을 입기 때문이다. 즉 호흡 과정에서 흡입되는 라돈 가스는 폐에 흡착되지 않고 다시 호흡을 통해 배출되어 문제를 일으키지 않지만 라돈가스가 붕괴되어 생기는 고체물질인 라돈 자핵 중은 정전기적으로 전하를 띤 입자이므로 공기 중에 존재하는 먼지, 담배연기, 그리고 수증기에 즉시 부착하여 에어로졸 형태로 흡입되어 폐에 쉽게 흡착되는데, 이것들 중 일부는 폐의 자연치유시스템에 의해 제거되거나 기침으로 내뱉어지지만 대부분은 붕괴하면서 방사능인  $\alpha$ -에너지를 방출하여 장기적으로 폐암을 유발할 수 있는 생물학적 손상을 야기한다(Miles, 1988).

라돈 노출에 의한 건강 위해도 조사에서, 세계보건기구는 라돈에 의한 폐암의 위험성을  $1\text{ Bq/m}^3$  당  $3\sim 6 \times 10^{-5}$  (3~6명/10만 명)으로 추정하고 있다(WHO, 2000). 만약  $1,000\text{ Bq/m}^3$ 의 고농도 라돈을 가지는 가정에서 거주한다 했을 때,  $3\sim 6 \times 10^{-2}$  (3~6%)의 폐암 위험성을 나타내므로 일반적인 폐암 위험성인 3%를 초과한다. 따라서, 세계보건기구(WHO, 2000)는 건물의 라돈 연간평균농도가  $100\text{ Bq/m}^3$  ( $2.7\text{ pci/L}$ ) 이상일 때 치유 활동을 취할 것을

권고하고 있다. 한편, 미국 EPA에서는 권고치로서  $148\text{ Bq/m}^3$  ( $4\text{ pci/L}$ )를 제안하고 있고, 이 농도에서 일생 동안 노출될 경우 폐암으로 사망할 위험 확률을 약 1~2%로 추정하고 있고, 2003년 한 해에만 약 21,000명의 폐암 사망자가 라돈 노출과 관련이 있는 것으로 보고하였다(USEPA, 2006, 2009). 우리나라에서도 라돈 노출에 의한 폐암 발생 확률에 대한 과학적 연구 자료를 찾기 쉽지는 않지만, 1989년에 “지하 공간 환경기준 권고치 설정”으로 라돈의 권고기준을  $148\text{ Bq/m}^3$  ( $4\text{ pci/L}$ )로 정하였고, 1996년 “지하 생활 공간 공기질 관리법”에서는 라돈을 오염물질로 규정하였으나 자연 방사능이라 해서 기준설정을 하지 않았지만, 2003년 “다중이용 시설 등의 실내공기질 관리법”의 제정으로 라돈의 권고기준이  $148\text{ Bq/m}^3$  ( $4\text{ pci/L}$ )로 마련되었다(환경부, 2003).

실내 라돈의 주요 오염원으로는 토양가스이며, 가정용수와 건축자재에 의해서도 라돈가스가 일부 방출된다(USEPA, 2006, 2009). 이 중 토양가스는 건물바닥이나 벽의 균열부분, 연결부위, 벽과 바닥의 교차부분과 바닥재의 이음새, 배수관이나 오수관, 전기·가스·상하수도 주변의 틈을 통해서 실내로 유입된다(Font and Baixeras, 2003; Font *et al.*, 2008). 수도관이나 지하수관로 등 실내공기와 접한 물에서 라돈이 방출되기도 하고, 건축자재로 사용되는 석고보드와 토양에서도 높은 농도의 라돈 방사능이 배출된다(Font and Baixeras, 2003; Bonotto and Padron-Armada, 2008; Font *et al.*, 2008; Vinson *et al.*, 2008; Vogiannis and Nikolopoulos, 2008). 이러한 라돈의 보편적 분포 특성 때문에, 일반 가정(Dwicedi *et al.*, 2001; 유동한 등, 2002; Prasad *et al.*, 2008; Vinson *et al.*, 2008)뿐만 아니라 지하 건물(Li *et al.*, 2006a, b) 및 지하철 역사(이지영 등, 2006; 전재식 등, 2006; 전재식 등, 2008)와 같은 지하 실내 공간에서의 라돈 오염이 사회적 관심을 받아 오고 있다. 지하철 역사 라돈 연구의 경우, 주로 국내에서 보고되었고, 이들 선행 연구는 모두 서울지역에서 수행되었다(이지영 등, 2006; 전재식 등, 2006; 전재식 등, 2008). 지하 공간의 라돈 오염은 지질 특성과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있는데, 서울지역의 경우 화강암이 기반을 이루는 반면에 대구지역은 퇴적암이 주로 기반암을 형성하고 있기 때문에 서울지역과 대구지역의 지하철 역사 라

돈 오염은 서로 다르게 나타날 수 있다(최임조, 2008). 그럼에도 불구하고, 대구지역 지하철 역사의 라돈 오염 특성에 대한 연구는 찾기가 쉽지 않다. 따라서, 본 연구는 다양한 건물과 지하철 승강장을 포함한 지하 실내 공간의 용도에 따른 라돈 오염도를 비교·평가하기 위하여 수행되었다. 나아가, 지하철 승강장의 라돈 오염도가 시간대별로 차이가 있는지를 평가하고 대조 공간으로서 사무실 건물의 지하층을 선정하여 이 지하 공간의 시간대별 라돈 농도 변화도 조사하였다.

## 연구 방법

### 1. 연구 대상 및 연구 기간

본 연구는 건물 또는 지하 실내 공간의 용도에 따른 라돈 오염도와 지하 공간의 시간대별 라돈 농도 변화를 평가하기 위하여 2005년 5월부터 2006년 11월까지 수행되었다. 건물 또는 지하 실내 공간의 조사를 위하여 의료기관, 찜질방, 보육시설, 사무실 건물 2개(지상 및 지하 공간), 대구시 지하철 1호선 및 2호선 승강장, 대형 슈퍼마켓, 지하주차장, 그리고 지하사가 각각에 대하여 최대 15개를 선정하였다. 건물 또는 지하 공간 조사 경우 현실적으로 용이하지 않은 관계로 환기에 대한 제어 없이 평상시 조건에서 연구가 수행되었지만 측정 당시의 환기 상태는 기록되었다. 한편, 대구시 지하철 2호선의 경우 2005년도 조사 경우에는 지하 역사 내부 환기 장치가 가동되지 않았고, 2006년도 조사할 때에는 환기 장치가 가동되고 있었으므로, 지하철 역사 내부 환기 장치 가동 여부에 따른 역사 내부 실내 공간의 라돈 오염도 비교를 가능하게 하였다. 또한, 지하철 1호선 승강장 15개와 사무실 건물의 지하층 한 개를 선정하여 시간대별 라돈 농도를 측정하였다. 본 연구는 보다 폭 넓고 심도 있는 장래 연구를 위한 방향 제시를 위하여 pilot-scale 연구로 수행되었기 때문에 대상으로 선정된 각 군들이 대표성을 나타내지는 않을 수 있다는 연구의 한계성을 가진다.

### 2. 라돈 측정

본 연구를 위해서 연속모니터 기능을 가진 고체

알파선 검출기(Durridge사의 Rad-7)가 이용되었다. 이 검출기는 시료 공기를 가습부로 통과시켜서 수분을 제거하고 다시 필터부로 통과시켜서 입자상 물질을 제거시킨 후에 시료 측정 장치에 유입시킨다. 시료 측정 장치에서는, 장치 내벽과 실리콘 검출기 사이의 높은 전위차(2,200 V)에 의해 라돈가스가 붕괴된다. 라돈이 붕괴될 때 생성되는 라돈 자핵 중(양의 전하를 띤)이 실리콘 검출기 표면에서 포집되어 측정된다. 이 때 흡입라인의 필터에서 라돈 자핵 중은 여과되기 때문에 라돈 자핵종의 농도인 WL(Working Level: 공기 중 라돈 농도가 100 pCi/L 조건에서 라돈 및 자핵 종들이 방사선 평형에 도달할 때 방출하는  $\alpha$  방사선 전체 에너지)은 측정되지 않고, 오직 라돈가스의 농도만이 측정된다.

건물 또는 지하 실내 공간의 라돈 농도는 실내 근로자의 근로 시간을 고려하여 8시간 연속으로 측정되었고, 지하철 승강장은 시간대별 변화 추이를 조사하기 위하여 24시간 연속으로 측정되었다. 측정은 현장 여건을 고려하여 가능한 한 실내 공간 중앙 위치에서 1.5미터 높이에서 이루어졌다. 부가적인 측정위치 기준은 환경부의 실내공기 중 라돈측정지침을 고려하여(환경부, 2000), 측정 주변의 환경, 즉 기류 또는 환기 장치에 의해 영향을 받지 않았고, 햇빛이 비치거나 습도가 높은 곳을 피하였고, 측정기를 창으로부터 90 cm 이상 이격시켰고, 다른 실내의 대상 물체로부터 10 cm 이상을 이격시켰다.

### 3. 연간 방사선 피폭선량 산정

실내 공기 중 라돈 농도에 대한 연간 유효선량(annual effective dose)을 구하기 위하여 다음의 식(1)을 이용하였다(Pan, 2003; Li *et al.*, 2006):

$$D_{Rn} = C_{EEC} \times K \times T \quad (1)$$

여기서,  $D_{Rn}$ 은 연간 유효선량(mSv/y),  $C_{EEC}$ 는 평형 동가농도(equilibrium equivalent concentration, Bq/m<sup>3</sup>), K는 전환 계수(nSv/(Bq/m<sup>3</sup>)), 그리고 T는 실내 거주 시간(h/y)을 나타낸다. 전환 계수 K는 유엔 방사선 평가위원회(UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR, 2000)와 Pan(2003)이 제안하는 9 nSv/(Bq/m<sup>3</sup>)를 이용하고, 실내 거주 시간은 UNSCEAR이 제안하는 실내

**Table 1.** Summary of indoor radon concentrations (Bq/m<sup>3</sup>) measured at various public access buildings or underground facilities, and in subway stations\*

Sampling site	Floor	Mean	SD	Ventilation
Hospital	1~2 F	7.3	4.5	Yes
Hot-air bathroom	2 F	14.0	6.4	Yes
Nursery	1 F	10.0	5.5	Yes
Office building-ground	2 F	5.7	3.6	Yes
Office building-underground	Underground	14.0	8.5	Yes
Subway station#1	Underground	8.9	6.7	Yes
Subway station#2 (2005) <sup>a</sup>	Underground	32.0	22	No
Subway station#2 (2006) <sup>a</sup>	Underground	9.0	5.9	Yes
Supermarket	1 F	7.9	3.6	Yes
Underground parking garage	Underground	14.0	8.1	Yes
Underground shop	Underground	12.0	6.5	Yes

\*Subway station#2 (2005), ventilation system was not operated; and Subway station#2 (2006), ventilation system was operated.

<sup>a</sup>Analysis of variance test represented that there was a significant difference between data obtained in 2005 and those in 2006 ( $p < 0.05$ ).

공간 근무자들의 근로 시간은 일일 8시간, 그리고 일 개월에 173시간으로 가정하였다. 나아가, 평형등가농도는 아래의 식 (2)를 사용하여 계산하였다 (Pan, 2003):

$$C_{EEC} = F_E \times C_{Rn} \quad (2)$$

여기서,  $F_E$ 는 평형계수(0.4)(UNSCEAR, 2000)이고  $C_{Rn}$ 는 실내 공간에서 측정된 라돈가스 농도이다 (Bq/m<sup>3</sup>).

## 결과 및 고찰

### 1. 건물/지하 실내 공간의 용도에 따른 라돈 오염도

Table 1에 다중 이용 건물 및 지하 실내 공간의 라돈 오염도를 나타내었다. 2005년에 대구 지하철 2호선 승강장에서 조사된 라돈 평균 농도가 32 Bq/m<sup>3</sup>로서 가장 높았고, 찜질방, 사무실 건물 지하실 및 지하 주차장의 평균 농도가 각각 14 Bq/m<sup>3</sup>로서 두 번째로 높았으며, 다음으로 지하상가, 보육시설, 2006년 지하철 2호선 승강장, 2006년 지하철 1호선 승강장 순으로 나타났다. 반면에, 대형 슈퍼마켓 (7.9 Bq/m<sup>3</sup>), 병원 1~2층 (7.3 Bq/m<sup>3</sup>) 그리고 사무실 건물 2층 (5.7 Bq/m<sup>3</sup>)이 낮은 라돈 농도를 나타내었다. 따라서, 전반적으로 지상 실내 공간보다 지하 실내 공간의 라돈 농도가 높게 나타났다. 이러한 경향

은 실내 공간의 라돈 오염도를 조사한 대부분의 선행 연구 결과 (이종대 등, 2006; Li *et al.*, 2006a, b)와 일치하는 것으로 나타났고, 이는 지하 공간이 라돈 오염원인 토양에 보다 인접해 있기 때문인 것으로 사료된다 (Font and Baixeras, 2003; Font *et al.*, 2008; Vinson *et al.*, 2008). 지하철 승강장 2호선에서 2005년에 조사된 라돈 농도가 2006년 값보다 훨씬 높게 나타난 것은 환기시스템 작동 차이 때문인 것으로 사료된다. 환기시스템이 가동되지 않은 지하철 승강장 2호선 2005년 라돈 농도와 환기시스템이 가동된 2006년 값을 통계적 분석법(분산 분석)을 이용하여 분석한 결과에서도 환기시스템 작동 여부에 따라서 통계적 유의성이 있는 것으로 나타났다 (Table 1). 한편, 환기 여부를 확인한 결과, 2005년에 조사된 지하철 2호선 승강장의 경우를 제외하고는 기계적 환기 장치는 모두 작동하고 있었기 때문에 환기가 지상 실내 공간과 지하 실내 공간의 라돈 농도 차이를 유발시키지는 않은 것으로 추정된다. 그러나, 본 연구에서는 측정 공간의 환기 장치를 제어하지 않았기 때문에 환기 효율성에 따른 라돈 농도 영향을 정확하게 평가하기는 쉽지 않다는 점이 강조되며, 이에 대한 차후 연구가 수행될 필요성이 제기된다. 나아가, 실내 공간의 다른 라돈 오염원인 라돈으로 오염된 가정용수와 건축자재 (USEPA, 2006, 2009)의 경우, 본 연구를 수행하는 기간 동안 지하 공간에서는 가정용수를 사용하지 않았기 때문에 지상 실내 공간과 지하 실내 공간의

라돈 농도 차이에 대한 가정용수의 영향은 없었던 것으로 나타났으나, 건축자재의 라돈 오염도에 대한 자료를 구하기 쉽지 않기 때문에 건축자재의 영향에 대해서는 확인할 수 없었다. 한편, 최대 평균 농도와 최대 시간농도(57.4 Bq/m<sup>3</sup>)를 나타낸 2005년도 지하철 2호선 승강장의 측정결과도 환경부 권고기준인 148 Bq/m<sup>3</sup> 이하로 나타나, 대구지역 다중 건물/지하 실내 공간에서 라돈 오염이 심각한 수준은 아닌 것으로 나타났다.

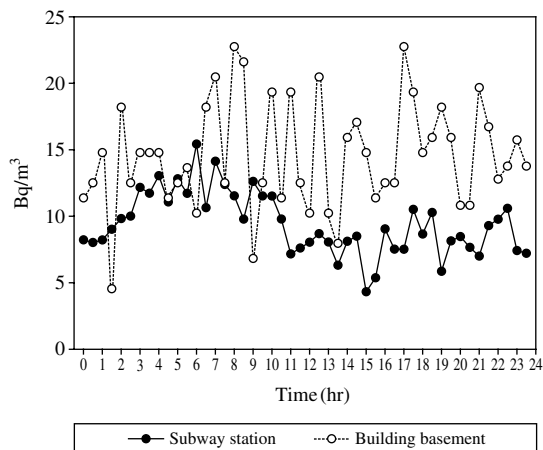
**2. 라돈 농도의 일중 변화**

본 연구에서 선정된 모든 실내 공간에서 시간대별 라돈 농도를 측정하였지만, 특정 추세를 나타낸 지하철 1호선 승강장을 대표적으로 선정하고, 대조 지점으로 밀폐된 사무실 건물 지하실을 선정하여 이들 실내 라돈 농도의 일중 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 지하철 1호선 15개 승강장의 경우, 시간대별 실내 라돈 농도가 4.3±5.1~15.4±7.0 Bq/m<sup>3</sup>의 분포를 나타내었고, 15:00~15:30에서 최소농도인 4.3 Bq/m<sup>3</sup>이었고, 06:00~06:30에서 최대농도인 15.4 Bq/m<sup>3</sup>이었다. 이러한 결과는 지하철의 운행에 따른 환기장치 가동 여부가 주요 원인 중 하나로 추정된다. 즉, 지하철 운행과 더불어 급·배기시스템이 07시부터 24시까지 일정 시간 간격으로 가동되었기 때문에 환기시스템이 가동되기 전인 06:00~06:30에 최대 라돈 농도가 나타났고, 환기시스템을 가동

하기 시작한 07시 이후에 주기적으로 환기시스템이 가동됨에 따라 지하철 승강장 농도가 증가와 감소를 반복하면서도 전반적으로는 감소하는 경향을 나타낸 것으로 사료된다. 한편, 서울의 지하철 5호선 중로3가역과 6호선 고려대역에서도 일중 라돈 농도 변화 연구에서도 환기시스템을 가동하기 전에 높은 라돈 농도를 나타내다가 07시부터 환기시스템을 가동하면서 감소하는 결과가 나타났다(이지영 등, 2006). 그러나, 본 연구 결과와는 달리 중로3가역과 고려대역에서 17:00~20:00에 최소농도가 나타났다. 이러한 결과는 대구지하철 1호선과는 달리(공조환기 시스템 담당자에게 확인함) 서울의 지하철 5호선과 6호선에서는 퇴근 시간에 맞추어 환기시스템을 시간당 60분 동안 지속적으로 가동하기 때문으로 사료된다.

**Table 2.** Comparison of indoor radon concentrations(Bq/m<sup>3</sup>) among subway stations of two subway lines (1 and 2) for a year of 2006

Subway line	Stations	Mean	SD
1	1	11.5	6.6
	2	12.7	4.5
	3	10.8	7.0
	4	7.0	6.4
	5	8.4	5.7
	6	6.0	4.6
	7	5.4	3.4
	8	7.9	4.2
	9	13.9	7.5
	10	2.9	3.1
	11	8.8	5.4
	12	8.7	5.2
	13	9.1	4.0
	14	10	4.4
	15	9.6	6.2
2	1	7.8	5.4
	2	8.7	5.4
	3	6.9	3.5
	4	12.0	4.1
	5	13.1	6.8
	6	10.5	6.3
	7	9.2	4.5
	8	7.6	3.3
	9	10.2	4.5
	10	8.0	3.1
	11	7.2	2.5
	12	8.2	4.8
	13	7.5	3.5



**Fig. 1.** Hourly variation of radon concentrations(Bq/m<sup>3</sup>) in subway stations of Daegu subway line 1 and a basement of office building.

사무실 건물 지하실의 일중 시간대별 라돈 농도 변화도 00:00부터 24:00까지 살펴보았다. 라돈 농도 분포는  $4.4 \pm 7.4 \sim 22.8 \pm 12.7 \text{ Bq/m}^3$ 의 범위를 보였다. 최소농도를 나타낸 시간은 05:30~06:00이었고, 최대농도는 12:00~12:30에 나타내었고, 농도 변화 폭은 컸지만 전체 시간에 걸쳐서 증가 또는 감소와 같은 특정 추세를 나타내지는 않았다. 이러한 결과는 환기 효율과 다른 환경 조건을 제어하지 않았기 때문에 명확한 원인을 파악하기는 쉽지 않다.

### 3. 지하철 승강장에 따른 라돈 오염도

지하철 승강장에 따른 라돈 오염도 자료가 많지 않기 때문에, 본 연구에서는 환기시스템이 모두 가동한 2006년도 대구지하철 1호선과 2호선에서 승강장에 따른 라돈 농도를 추가적으로 분석하였다. Table 2에 1호선 15개와 2호선 13개 승강장의 라돈 평균 농도를 나타내었다. 지하철 1호선의 경우, 승강장에 따라  $5.4 \pm 3.4 \sim 12.7 \pm 4.5 \text{ Bq/m}^3$ 의 범위를 보였고 승강장 #7에서 가장 낮았으며, 승강장 #2에서 가장 높게 나타났다. 승강장에 따라서 최대 2.4배 정도 차이가 나는 것으로 나타났다. 지하철 2호선의 경우에는, 승강장에 따라  $7.2 \pm 2.5 \sim 13.1 \pm 6.8 \text{ Bq/m}^3$ 의 범위를 보였고 승강장 #11에서 가장

낮았으며, 승강장 #5에서 가장 높게 나타났다. 지하철 1호선과 지하철 2호선을 비교할 때, 승강장에 따른 농도 범위가 큰 차이는 나지 않았다. 서울 지하철의 경우, 동일 노선에서 승강장에 따른 라돈 농도 변화를 보고한 자료를 확보할 수 없었지만, 서울 지하철의 노선 간의 승강장 라돈 농도는 큰 차이가 나는 것으로 보고된 바 있다(이지영 등, 2006; 전재식 등, 2006). 예를 들면, 이지영 등(2006)은 서울지하철 3호선 충무로역에서 라돈 평균농도가  $1.4 \text{ Bq/m}^3$ , 4호선 충무로역에서  $2.1 \text{ Bq/m}^3$ , 5호선 종로3가역에서  $3.5 \text{ Bq/m}^3$ , 그리고 6호선 고려대역에서는  $4.5 \text{ Bq/m}^3$ 로 지하철 노선에 따라 라돈 오염도가 다소 차이가 나는 것으로 보고하였다. 이와 같이, 동일한 노선에서 승강장에 따른 라돈 농도차이 또는 지하철 노선에 따른 승강장 농도 차이는 지하철에 인접한 토양 또는 지하수의 라돈 함량 및 배출 속도, 승강장의 공기 교환량, 대기압 차이, 승강장 실내 구조, 온도 및 습도 등 다양한 변수의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(전재식 등, 2008).

### 4. 타 연구와의 실내 공간 라돈 농도 비교

본 연구에서 조사된 대구시 다중 이용 건물/지하 공간의 라돈 평균농도를 국내·외 연구 결과와 비

**Table 3.** Comparison of mean indoor radon concentrations ( $\text{Bq/m}^3$ ) between this and previous studies\*

Location	Facility type	Year <sup>a</sup>	Instrument <sup>b</sup>	Mean conc.	Ref.
Daegu <sup>c</sup>	Subway station	2006	RAD7	8.9	This study
Daegu <sup>d</sup>	Building-ground level	2006	RAD7	9.0	This study
Daegu <sup>e</sup>	Building-underground level	2006	RAD7	15.0	This study
Seoul <sup>f</sup>	Subway station	2006	RAD7	106	Lee <i>et al.</i> (2006)
Seoul <sup>g</sup>	Building-ground level	1996~1997	CR-39 Detector	34.8	Lee <i>et al.</i> (2006)
	Building-underground level	1996~1997	CR-39 Detector	45.4	Lee <i>et al.</i> (2006)
Guiyang, China	Building-ground level	2003	CR-39 Detector	63	Li <i>et al.</i> (2006)
	Parking garage Tunnel			180	
Catalonia, Spain	Underground workplace	Un-known	PRASSI monitor Makrofol-DE	13~12,900	Font <i>et al.</i> (2008)

\*Detection limit: RAD7,  $3.7 \text{ Bq/m}^3$ ; CR-39,  $3.0 \text{ Bq/m}^3$ ; PRASSI monitor,  $10 \text{ Bq/m}^3$ ; Makrofol-DE,  $2.5 \text{ Bq/m}^3$ .

<sup>a</sup>Represents the year that the surveys were conducted.

<sup>b</sup>Represents the radon measurement instrument.

<sup>c</sup>Represents the mean indoor concentration of 28 subway stations in Daegu subway lines 1 and 2 for the year of 2006.

<sup>d</sup>Represents the mean indoor concentration obtained from hospitals, hot-air bathrooms, office buildings, nurseries, and supermarkets.

<sup>e</sup>Represents the mean indoor concentration obtained from office buildings, parking garages, and underground shops.

<sup>f</sup>Represents the mean indoor concentration of 4 subway stations.

<sup>g</sup>Represents the mean indoor concentration obtained from apartments, hospitals, houses, office buildings, and stores.

교하기 위하여 Table 3을 작성하였다. 선행 연구들과 본 연구에서 사용된 라돈 측정 방식, 측정 자료의 질 보증 프로그램, 또는 다른 측정 조건이 서로 다르기 때문에 정확하게 상호 비교하는 데에는 한계를 가진다. 하지만, 각 측정 기관에서 보고한 자료가 정확하다고 가정하는 경우, 측정 결과만을 비교하면, 대구지역 지하철 승강장, 다중 이용 건물의 지상시설 그리고 지하 공간 모두에서 라돈 평균농도가 서울지역 지하철, 다중 이용 시설보다 훨씬 낮게 나타났고, 한국원자력안전기술원에서 1999년부터 2002년까지 실시한 “전국 실내 라돈 농도 조사”의 공공건물 내 라돈 농도의 산술평균값인  $41.0 \text{ Bq/m}^3$  (한국원자력안전기술원, 2002)보다도 낮은 수준이다. 나아가, 본 연구 결과는 중국 Guiyang의 지하 주차장 ( $51 \text{ Bq/m}^3$ )과 차량용 터널 ( $180 \text{ Bq/m}^3$ ) 그리고 스페인 Catalonia의 건물 지하 공간에서 ( $13 \sim 129 \text{ Bq/m}^3$ ) 측정된 농도보다 훨씬 낮은 것으로 나타났다. 또한, 중국 Guiyang의 지하 주차장과 차량용 터널에서 측정된 농도에서 지하 주차장보다 차량용 터널에서 라돈 농도 수치가 높게 나타났다. 지역적인 지질특성이 실내 공간의 라돈 농도에 영향을 미치는 주요 인자 중에 하나인 것으로 알려져 있다(제현국, 1988). 중국과 스페인 연구에서는 해당 지역의 지질특성이 보고되지 않았기 때문에 이에 대한 고찰은 생략한다. 서울시 일대의 지질이 선캠브리아기 편마암류와 이를 관입한 주라기 화강암을 기반으로 하고 있는 반면에, 대구지역은 지질학적으로 중생대 백악기 하양군 층에 해당되며, 이 하양군 층은 후기 화산활동에 의한 퇴적분지로 역암, 사암, 혈암, 이암 등과 같은 쇄설성 퇴적암이 주로 기반암을 형성하고 있다(최임조, 2008). 화강암의 경우 라돈 발산율과 라돈 방사능이 기타 화성암 및 퇴적암에 비해서 높고, 화강암지대의 토양층에서의 방사능은 토양 평균값의 두 배 정도로 알려져 있다(제현국, 1988). 따라서, 대구지역의 라돈 농도가 서울에 비해서 낮은 수준을 나타내는 것은 두 지역의 지질특성과 관련이 있는 것으로 사료된다.

## 5. 연간 방사선 피폭선량

식(1)과 (2)를 이용하여 각각 추산된 연간 방사선 피폭선량과 평형등가농도를 Table 4에 나타내었다.

**Table 4.** Equilibrium equivalent concentrations (EEC,  $\text{Bq/m}^3$ ) and annual effective doses (AED,  $\text{mSv/yr}$ ) estimated for workers of various building or underground facilities

Sampling site	EEC	AED
Hospital	2.92	0.055
Hot-air bathroom	5.52	0.103
Nursery	4.04	0.075
Office building-ground	2.28	0.043
Office building-underground	5.72	0.107
Subway station#1	3.56	0.067
Subway station#2 (2005)	12.8	0.242
Subway station#2 (2006)	3.60	0.068
Supermarket	3.16	0.059
Underground parking garage	5.60	0.105
Underground shop	4.88	0.091

**Table 5.** Worldwide average values (AED,  $\text{mSv}$ ) and typical range ( $\text{mSv}$ ) of annual effective dose from external and internal exposure\*

Source	Average AED	Typical range
External exposure		
Cosmic rays	0.4	$0.3 \sim 1.0^a$
Terrestrial gamma rays	0.5	$0.3 \sim 0.6^b$
Internal exposure		
Inhalation (mainly radon)	1.2	$0.2 \sim 10^c$
Ingestion	0.3	$0.2 \sim 0.8^d$
Total	2.4	$1 \sim 10$

\*Data were obtained from UNSCEAR(2000).

<sup>a</sup>Range from sea level to high ground elevation.

<sup>b</sup>Depending on radionuclide composition of soil and building materials.

<sup>c</sup>Depending on indoor accumulation of radon gas.

<sup>d</sup>Depending on radionuclide composition of foods and drinking water.

평형등가농도는  $2.28 \sim 12.8 \text{ Bq/m}^3$  농도범위에서, 연간 방사선 피폭선량은  $0.043 \sim 0.242 \text{ mSv/yr}$  범위에서 추산되었다. 라돈 농도에만 기초할 때, 본 연구에서 선정한 다중 이용 건물/지하 공간에서 근무하는 근로자 중에서 사무실 건물 지상 층에서 근무자들이 연간 가장 낮은 방사선에 피폭되는 것으로 나타났다. 지하철 승강장과 지하철 근무자들의 근무지의 라돈 농도가 유사하다는 가정을 할 때, 2005년 대구 지하철 2호선 근무자의 경우에는 연간 방사선 피폭선량이 최대 ( $0.242 \text{ mSv/yr}$ )로 나타났고, 사무실 건물 지상 근무자 ( $0.043 \text{ mSv/yr}$ )의 56배 보

다 높게 나타났다. 이 경우, 지하철 역사 내부 환기 시스템이 가동되지 않았지만, 환기시스템이 가동된 2006년도 대구 지하철 2호선 근무자의 연간 방사선 피폭선량이 0.068 mSv/yr로서 2005년에 비해 30% 이하 수준으로 감소하였다. 따라서 대구시 다중 이용 시설/지하 공간 근무자의 연간 유효선량은 Table 5(UNSCEAR, 2000)에 제시된 자연방사선에 의한 전 세계 평균 유효선량(average annual effective dose) 2.4 mSv/yr (외부 피폭량, 0.9 및 내부 피폭량 1.5 mSv/yr)보다 훨씬 낮으며, 나아가 라돈 및 라돈 자핵 중 흡입에 의한 유효선량 1.2 mSv/yr보다 낮게 나타나 대구지역 다중 이용 건물/지하 공간 근무자들의 라돈 노출로 인한 건강 위해성은 크지 않은 것으로 사료된다. 그러나, 지하철 역사 내부 환기시스템이 가동되지 않았던 2005년 지하철 2호선 근무자들의 연간 방사선 피폭선량이 0.242 mSv/yr 라는 점을 고려할 때, 환기 등 주위 환경에 따라 다중 이용 건물/지하 공간 근무자들의 연간 방사선 피폭선량이 달라질 수 있다는 점이 강조된다.

## 결 론

본 연구는 다양한 건물과 지하철 승강장을 포함한 지하 실내 공간의 용도에 따른 라돈 오염도를 비교·평가하고 나아가, 지하철 승강장의 라돈 오염도가 시간대별로 차이가 있는지를 평가하고 대조 공간으로서 사무실 건물의 지하층을 선정하여 이 지하 공간의 시간대별 라돈 농도 변화를 조사하였다. 일반적으로, 지상 실내 공간보다 지하 실내 공간의 라돈 농도가 높은 것으로 확인되었지만, 지하 공간의 라돈 수준도 환경부 권고기준인 148 Bq/m<sup>3</sup>보다 훨씬 낮게 나타났다. 지하 공간의 라돈 수준은 시간대별로 뚜렷한 변화가 있으며 지하 공간의 특성에 따라 다른 경향을 나타내고, 지하철의 승강장에 따라 라돈 수준이 다른 것으로 확인되었다. 본 연구에서 추산된 라돈 노출에 의한 연간 방사선 피폭선량이 자연 방사선에 의한 전 세계 평균 유효선량보다 훨씬 낮게 나타났기 때문에, 대구지역 다중 이용 시설/지하 공간에서의 실내 공기 중 라돈 오염도는 우려할 수준은 아닌 것으로 판단된다. 그러나, 환기 등 주위 환경조건에 따라 연간 방사선 피폭선량이 크게 달라질 수 있고 라돈의 폐

암 위해성 때문에 실내 라돈 오염에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- 유동한, 이한수, 김상준, 양지원. 실내 라돈오염 해석을 위한 2구역 모델의 민감도 및 불확실성 분석, 한국대기환경학회지 2002; 18(4): 327-334.
- 이종대, 김윤신, 손부순, 김대선. 국내 실내 라돈농도와 연간 피폭선량 예측에 관한 연구, 한국환경과학회지 2006; 15: 311-317.
- 이지영, 이상수, 전재식, 김덕찬, 김주형, 김민영. 지하철역사 라돈농도의 시간적 변화 특성, 한국대기환경학회 2006 추계학술대회 논문집 2006; 568-570.
- 전재식, 김덕찬, 박영웅, 이지영, 이상수, 김남진, 김민영. 지하철 승강장 고준위 라돈분포의 원인분석 및 저감방안, 한국대기환경학회 2006 추계학술대회 논문집 2006; 552-553.
- 전재식, 이진, 김주형, 김민영. 서울지하철역 라돈 분포를 결정하는 요인 분석, 한국대기환경학회 2008 추계학술대회 논문집 2008; 692-694.
- 제현국. 지질환경 및 실내환경에서의 라돈방사능에 관한 기초 연구, 서울대학교 대학원 논문 1988; 23-43.
- 최임조. 대구시 다중이용시설에서의 라돈 농도분포와 특성평가, 경북대학교 대학원 논문 2008; 15-20.
- 한국원자력안전기술원. 전국실내라돈농도준위조사, 2002; 187-190.
- 환경부. 실내공기 중 라돈측정지침, 2000; 3-14.
- 환경부. 다중이용시설 등의 실내공기질관리법, 2003; 1-26.
- Bonotto DM and Padron-Armada PC. Radon and progeny (214Pb and 214Bi) in urban water-supply systems of Sao Paulo State, Brazil, Appl Geochem 2008; 23: 2829-2844.
- Dwicedi KK, Mishra R, Tripathy SP, Kulshreshtha A, Sinha D, Sricastava A, Deka P, Bhattacharjee B, Ramachandran TV and Nambi KSV. Simultaneous determination of radon, thoron and their progeny in dwellings, Radiat Meas 2001; 33: 7-11
- Font L and Baixeras C. The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors, Sci Total Environ 2003; 307: 55-69.



- Font L, Baixeras C and Moreno V. Indoor radon levels in underground workplaces of Catalonia, Spain, *Radiat Meas* 2008; 43: S467-S470.
- Li X, Zheng B, Wang Y and Wang X. A survey of radon level in underground buildings in China, *Environ Int* 2006a; 32: 600-605.
- Li X, Zheng B, Wang Y and Wang X. A study of daily and seasonal variations of radon concentrations in underground buildings, *J Environ Radioact* 2006b; 87: 101-106.
- Miles J. Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses, *J Hazard Mater* 1988; 61: 53-58.
- Pan Z. Exposure resulted from radon and its decay products in air in China, *Radiat Protect* 2003; 23: 134-137.
- Prasad G, Prasad Y, Gusain GS and Ramola RC. Measurement of radon and thoron levels in soil, water and indoor atmosphere of Budhakedar in Garhwal Himalaya, India, *Radiat Meas* 2008; 43: S375-S379.
- UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, 2000.
- USEPA (United States of Environmental Protection Agency). Consumer's Guide To Radon Reduction, EPA 402-K-06-094, December 2006.
- USEPA (United States of Environmental Protection Agency). A Citizen's Guide To Radon, [Http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/radon.html](http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/radon.html), August 2007.
- USEPA (United States of Environmental Protection Agency). Radon. A Citizen's Guide To Radon, EPA 402/K-09/001, January 2009.
- Vinson D, Campbell TR and Vengosh A. Radon transfer from groundwater used in showers to indoor air, *Appl Geochem* 2008; 23: 2676-2685.
- Vogiannis E and Nikolopoulos D. Modelling of radon concentration peaks in thermal spas: Application to Polichnitos and Eftalou spas (Lesvos Island-Greece), *Sci Total Environ* 2008; 405: 36-44.
- WHO (World Health Organization). Air Quality Guidelines for Europe 2nd Edition, 2000; 209-215.