

# 서울지역 건축물의 환경적 특성에 따른 실내 라돈농도 변화

## The Variation Characteristics of Indoor Radon Concentration from Buildings with Different Environment, Seoul

전재식\* · 이지영 · 엄석원 · 채영주

서울특별시보건환경연구원

(2011년 10월 25일 접수, 2011년 11월 3일 수정, 2011년 11월 23일 채택)

Jae-Sik Jeon\*, Ji-Young Lee, Seok-Won Eom and Young-Zoo Chae  
*Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment*

(Received 25 October 2011, revised 3 November 2011, accepted 23 November 2011)

### Abstract

For more effective indoor radon reduction policy and technique, we researched radon data analysis for some buildings in Seoul. Those buildings were categorized as dwelling, underground and office space and the variations of radon concentration and its sources were evaluated. The variations of radon concentrations of indoor space of buildings for a day were patterned specifically by dwelling habits and different environment. As for the new built apartments which were not yet moved in, their indoor radon concentrations were showed more than 3 times after applying interior assembly, and were 5 times higher than ones of rather old residences. As for the subway stations, the radon concentrations during off-run times were about 15% higher than run-times. 10% of radon seemed to be reduced by installation of platform screen doors. As for office space, radon concentrations during working hours were about 2.5 times higher than non-working hours. Plaster board are expected as a main source of radon for them. By radon measurement method for long-term, its data can be over estimated because it covers non-active time in office or public space. Therefore combination of short and long-term measurement method is required for effective and economic reduction. Furthermore importance of ventilation is requested as public information service for all dwelling space. And also standardization for radium content or radiation of radon is necessary.

**Key words** : Indoor radon, Buildings, Seoul, Plaster board, Ventilation, Short-term measurement

### 1. 서 론

토양, 건축자재, 지하수 및 천연가스 등에서 주로 발생 (ECA, 1995; NCRP, 1976)하는 라돈은 자연계에

널리 존재하는 자연방사능으로 지질학적 환경에 따라 지각을 이루는 암석과 토양에 다양한 농도로 분포하고 있는 우라늄의 6번째 붕괴생성물이다. 지구상에 노출되어 있는 라돈은 방사능 중 유일한 기체상으로 이동성이 크며 공기에 비해 매우 큰 분자량과 비활성 등 고유한 화학적 특성 때문에, 환기가 잘 되지 않는 지하 건축물 등 실내공간에서 고농도로 검

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-570-3365, E-mail : jeon1807@seoul.go.kr

출되고 있어 장기간 노출 시 호흡을 통해 인체에 쉽게 흡입되며 폐암 발생 위험성이 높아 석면, 벤젠 등과 함께 A 등급의 발암물질로 분류하고 있다(U.S. EPA, 2001, 1992a, b; ICRP, 1998).

실내공간의 라돈농도 분포 및 변화는 외부 대기환경과는 그 양상이 매우 다르다. 대기환경에서의 라돈 발생원은 주로 토양가스로, 특정한 장소를 제외하고는 대기의 확산에 의해 매우 낮은 농도의 라돈분포를 나타내고 있으나(Wilkening, 1990), 실내공간에서는 환기량을 포함한 여러 가지 영향 요인에 따라 농도수준의 정도 차이가 매우 광범위하다. 즉, 라돈 발생원의 종류는 물론 실내공간의 구조·형태, 생활습관, 건축물 내·외부의 기압차, 온도, 습도 등 많은 변수로 구성되어 있으며, 라돈을 지배하는 요인들 자체도 타 요인에 의해 지배를 받으므로 실내공간에 대한 라돈농도 평가시 과대 또는 과소평가되지 않도록 유의하여야 한다. 극히 한정된 시·공간에서의 라돈농도 측정을 통한 실내공간의 라돈 평가시에는 합리적인 해석이 요구된다.

주거용 건물을 포함한 주택, 작업장 및 다중이용시설 등 모든 실내환경에서의 라돈농도 분포는 근사적으로 대수정규분포(log-normal distribution)를 따르지만 약간은 대수정규분포로 예상되는 값보다 높은 농도를 보이는 경향이 있다(전재식 등 2006; ICRP, 1998). 또한 라돈농도가 불검출로 나타나는 실내공간은 거의 없으며 분포도의 모양은 더 높은 라돈농도 쪽으로 갈수록 항상 빈도가 낮은 수준으로 나타난다. 일반적으로 지상위의 건물은 겨울에 라돈농도가 높게 나타나며 지하에 위치하는 건축물은 이와 반대로 여름철에 높게 나타나는 경향을 보인다(Li *et al.*, 2006; Richon *et al.*, 2005; Muramatsu *et al.*, 2002).

우리나라 실내주택에서의 전체 평균 라돈농도는 43 Bq/m<sup>3</sup>이며 서울은 45 Bq/m<sup>3</sup>로 세계의 평균농도 39 Bq/m<sup>3</sup>보다 다소 높게 나타나고 있으며, 서울지역의 외기 평균 라돈농도는 약 11 Bq/m<sup>3</sup>로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2005; UNSCEAR, 2000). 주거공간의 라돈농도가 나라마다 다소 차이가 있는 이유는 지질과 기후의 차이, 건축자재와 건축방법의 차이는 물론 국가마다 풍습에 의한 생활습관의 영향 때문이기도 하다(Zhuo *et al.*, 2005; Harley and Terilli, 1990).

주택, 작업장 등 생활공간에서의 라돈의 계절변화, 일변화 등 시간적 변화 특성에 대하여는 여러 연구

자들에 의해 보고되고 있으나(Tokonami *et al.*, 2003; Yu *et al.*, 1998; Harley and Terilli, 1990), 우리나라의 경우 아파트를 포함한 주거공간, 작업장 그리고 지하역사 등 건축물 실내공간에서의 라돈에 대한 연구가 대부분 장기(long-term)라돈 측정방법(김윤신 등, 2003; 김창규 등, 2003)에 의해 조사가 이루어지고 있다. 따라서 생활공간마다 라돈의 발생원이 다양하고 분포패턴이 상이하어 용도가 서로 다른 공간에서의 근본적인 원인파악에 한계가 있으므로 적절한 라돈저감 방안을 적용하기가 어려운 실정이다. 본 연구에서는 서울지역 건축물을 대상으로 실내라돈의 시간적 변화와 분포특성을 분석하고 발생원을 추적·평가하여, 고농도 라돈분포를 나타내고 있는 실내공간의 대기환경개선을 위한 효율적이고 환경친화적인 라돈 저감방안에 필요한 기초자료 제공을 목적으로 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구대상 건축물 및 지점 선정

본 연구는 서울지역의 1989년부터 2009년까지 준공연도가 다양한 건축물의 실내공간 20개 지점을 대상으로 주거공간, 지하공간 그리고 업무공간으로 구분하여 라돈조사를 실시하였다. 주거공간은 2008년 입주자 완료된 신축아파트로서 입주 전인 2007년에 10세대(내부 마감재 시공 전 4세대, 시공 후 6세대)를 선정하여 조사를 진행하였으며 또한 입주하여 주민이 생활하고 있는 주거중인 아파트 3세대와 단독주택 2세대를 조사대상에 포함하였다. 지하공간은 지하철 6, 7호선의 대표적인 역사 승강장 각 1개 지점과 지하철 9호선이 개통되기 전인 2008년에, 현재의 고속버스터미널역 공사구간 내부의 심도 약 50m 지하터널 1개 지점을 선정하여 조사를 실시하였다. 업무공간으로는 서초구 양재동 소재 서울시보건환경연구원 사무실용도 건물의 지상 2층과 체력단련을 위해 조성한 지하 1층 실내공간을 연구대상으로 선정하였다. 또한, 배경농도 측정을 위하여 조사대상 건축물과 인접한 지점에서 외기의 라돈농도 모니터링을 함께 실시하였다. 측정기간은 2006년 5월부터 2008년 10월까지의 기간이었으며 상세한 조사대상 지점과 측정일정은 표 1과 같다.

**Table 1. Sampling site and date for radon measurement.**

Type of building	Establish year	Sampling site	Floor	Location (gu)	Date of measurement	
					Year	Period
Apartment	2008	APT A	5	Eunpyeong	2007	10/17 ~ 11/8
		APT B	6			
		APT C	3			
		APT D	10			
	2008	APT E	9	Gangseo		11/19 ~ 12/10
		APT F	6			
		APT G	5			
		APT H	8			
		APT I	3			
		APT J	11			
1993	APT K	2	Dobong	08/14 ~ 08/29		
1999	APT L	7	Nowon			
2001	APT M	9				
House	2004	SH 1	1	Eunpyeong	2007	08/14 ~ 08/29
	1999	SH 2	2	Gwanak		
Subway	2000	Platform K		Seongbuk	2006	05/02 ~ 05/22
	1997	Platform J	-	Jungnang	2008	08/25 ~ 10/23
	2009	Tunnel E		Gangnam	2008	05/20 ~ 05/23
Office	1989	Room	2	Seocho	2006	08/10 ~ 09/14
		Basement	-	Seocho		08/10 ~ 09/14

\*APT; apartment, \*\*SH; single detached house



**Fig. 1. Monitoring of radon concentration at each locations using RAD-7 system.**

**2. 2 라돈농도 측정방법**

조사대상 공간별 라돈농도의 시간적 변화를 분석하기 위한 단기(short-term) 라돈측정은 연속식(continuous) 측정기인 미국 Durrige사의 RAD-7을 사용하여 24시간 라돈을 측정하였다. 연속식 라돈농도 측

정기의 원리는 라돈원자가 붕괴할 때 5.49 MeV의 에너지를 가진 알파입자가 방출되는데, 이 에너지를 반도체(실리콘)를 이용하여 전기적 부호로 전환시켜 스펙트럼 또는 문자로 표시하는 작동원리를 갖고 있다. 측정범위는 4 Bq/m<sup>3</sup>에서 400,000 Bq/m<sup>3</sup>까지 가능

하며 본 실험에 사용된 RAD-7의 정확정밀도는 2% 이내, 제로 및 스팬 드리프트(drift)는 2% 이내/year 이었다.

라돈농도 측정을 위해 사용된 RAD-7의 시료채취 도입부는 조사대상 공간의 실내바닥 또는 지표면으로부터 1.5~2 m 위치에 고정 설치하였다. 측정시간은 공간별로 최소 4일에서 최대 60일 동안 라돈을 연속 측정하였다. RAD-7을 이용한 라돈농도 측정과정을 그림 1에 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실내환경 특성에 따른 라돈 변동 비교

서울의 건축물중 주거공간을 대표하는 아파트(입주 아파트; Apartment K, 입주전 아파트; Apartment J)와 지하공간을 대표하는 지하철역사(Subway station K), 지하철 공사가 한창 진행 중이었던 지하터널(Tunnel E) 그리고 업무공간으로 양재동에 위치하는 일반 사무실과 사무실 인접 외기에서 각 공간별로

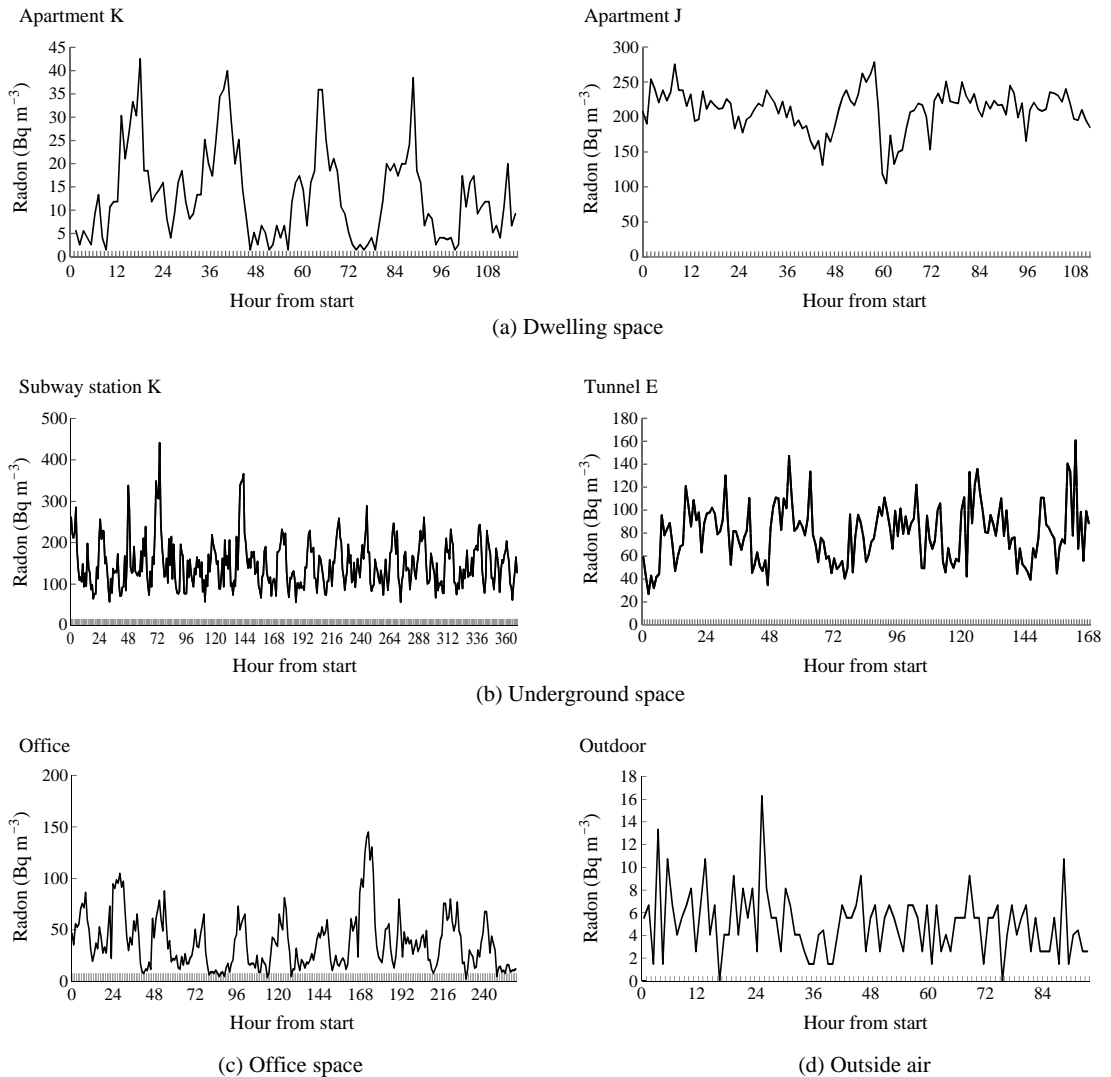


Fig. 2. Typical temporal variability of short-term radon concentrations, as monitored using RAD-7 system.

일정기간 동안 측정된 라돈농도의 전형적인 변동 패턴을 그림 2에 나타내었다. 아파트(a)의 경우, 시간에 따른 실내의 라돈농도 변동추이가 입주 후(왼쪽)와 입주 전(오른쪽)에 극명히 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 입주하여 주민이 생활을 하고 있는 아파트는 라돈농도 변화가 일정한 주기를 지속적으로 반복하며 나타나고 있는 반면 입주 전은 라돈의 변동이 매우 불규칙하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 라돈농도 변화의 패턴은 지하공간(b)에서도 유사하게 나타났다. 지하철이 운행 중인 역사(왼쪽)는 라돈농도가 일정한 주기의 패턴을 보이는 반면 지하철 공사가 한창 진행 중인 터널(오른쪽) 형태의 지하공간은 이와는 대조적인 경향을 보이고 있다. 또한 정해진 시간에 출근을 하여 일정한 시간동안 작업을 하는 업무공간(c)의 경우도 일정한 라돈농도 사이클을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 라돈변동 패턴의 차이는 실내공간에서의 쾌적한 실내 환경조성을 위한 창문의 개방 및 기계적 환기의 정도에 기인하는 것으로 판단된다. 외기(d)의 라돈농도는 실내와는 또 다른 양상으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

생활공간에서의 라돈발생원은 토양가스, 건축자재, 실내 유입 지하수 등이 있으며, 실내공간별로 이들 발생원의 기여도는 다르다. 지하철역사와 같은 지하공간에서의 라돈발생원은 지하수이며, 토양에 기초하여 건축된 단독주택은 토양가스가 실내 라돈의 주 기여원이라 할 수 있다(전재식 등, 2008; ICRP, 1998). 아파트를 포함한 현대식 가옥은 토양과 암석을 원료로 사용한 콘크리트 벽과 천정으로 구성되며, 천정과 일부 벽에는 석고보드 등 마감재를 사용하고 벽지를 도포한다. 라돈발생원으로부터 일정한 속도로 방출(exhalation)되어 실내공간에 형성된 라돈은 방사능 붕괴에 의한 소멸과정과 외기와의 공기교환에 의해 감소된다. 실내공간에서의 라돈농도는 공기 교환율에 의해 큰 영향을 받으므로 실내공간에 대한 라돈농도를 예측할 때 건축자재의 우라늄 및 라듐 함량만으로 실내 라돈농도가 높다고 평가하는 것은 바람직하지 않다.

### 3.2 주거공간의 라돈농도 분포 및 변화 특성

표 2에는 주거공간을 입주 전의 신축아파트와 입주하여 주민이 생활하고 있는 기존 아파트 그리고

**Table 2. Average radon concentrations measured at apartments and houses.**

Characteristic of house	Sampling site	No. of sampling	Concentration (Bq/m <sup>3</sup> )	
			Mean	SD
Non-dwelling new apartment	APT A	12	72.8	12.2
	APT B	11	31.2	4.7
	APT C	11	39.9	10.9
	APT D	10	40.8	8.2
	Total	44	46.2	6.8
Non-dwelling new apartment	APT E	11	207.1	24.5
	APT F	11	66.8	6.0
	APT G	12	118.3	12.0
	APT H	9	120.4	12.2
	APT I	11	158.0	12.1
	APT J	12	238.2	15.8
	Total	66	151.5	8.1
Total		110	109.4	7.2
Dwelling apartment and house	APT K	15	16.1	8.5
	APT L	14	11.7	4.2
	APT M	14	7.0	4.1
	SH 1	15	50.6	32.5
	SH 2	13	25.1	16.6
Total		71	22.1	9.9

\*APT; apartment, \*\*SH; single detached house

단독주택 실내의 일평균(공간별 9~15일) 라돈농도 분포를 요약하여 나타내었다. 입주 전의 신축아파트는 전체 평균 라돈농도가  $109.4 \pm 7.2 \text{ Bq/m}^3$ 으로 입주 아파트 및 주택의 평균농도  $22.1 \pm 9.9 \text{ Bq/m}^3$ 에 비해 약 5배가 높은 것으로 나타났다. 최대 라돈농도는 실내 마감재 처리를 완료한 J아파트에서  $238.2 \pm 15.8 \text{ Bq/m}^3$ 로 관측되었으며 E아파트에서도  $207.1 \pm 24.5 \text{ Bq/m}^3$ 을 보여 미국환경보호청(U.S.EPA)의 주택 실내의 라돈가이드라인  $148 \text{ Bq/m}^3$ 을 초과하여 나타났다. 반면 신축아파트 중 가장 낮은 라돈농도는 실내 마감재 시공을 앞두고 내벽에 콘크리트 타설을 완료한 B아파트에서  $31.2 \pm 4.7 \text{ Bq/m}^3$ 로 측정되었다. 참고로 J와 E아파트는 강서구의 비 화강암반대를 기반으로 지어졌으며 B아파트는 은평구의 화강암반대 지역에 지어진 건축물이다. 본 연구의 대상으로 조사가 진행되었던 신축 아파트의 경우 3~5개월 후 준공·입주예정인 창문 등이 거의 밀폐상태로 환기가 매우 어렵고 실내에 지속적으로 형성된 라돈의 감소는 주로 자연 방사능 붕괴에 의한 소멸에 의존하므로 높은 라돈농도 분포를 보인 것으로 판단된다. 반면 입주하여 생활하고 있는 주거공간은 창문개방 등 인위적인 환기의 영향으로 입주 전의 실내공간에 비해 라돈농도가 낮게 나타난 것으로 추정된다. UNSCEAR(2000)은 전 세계에 대한 주거공간의 산술평균 라돈농도는  $39 \text{ Bq/m}^3$ , 기하평균은  $30 \text{ Bq/m}^3$ 인 것으로 보고하고 있다. 주거공간의 라돈농도는 나라마다 서로 다르며 이는 지질과 기후, 건축자재와 건축방법의 차이는 물론 나라마다 풍습의 차이 때문이기도 하다. 한국의 경우 전국을 대상으로 한 주거공간에서의 평균 라돈농도는  $43.3 \text{ Bq/m}^3$ 로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2005).

입주 전 신축아파트의 경우, 천정 및 벽에 대한 콘크리트 타설 후 합판, 석고보드, 벽지 등 마감재를 시공 처리한 아파트(APT E~APT J)실내의 평균 라돈농도는  $151.5 \text{ Bq/m}^3$ 로 나타났으며 마감재 처리를 하지 않은 아파트(APT A~APT D)의 실내에는  $46.2 \text{ Bq/m}^3$ 을 보여 마감재 처리후가 처리전에 비해 3배 이상 높은 라돈농도를 나타내었다(그림 3). 건축자재는 중요한 실내 라돈형성의 원인물질 중 하나로 비교적 외부의 영향을 적게 받으며 시간에 따른 변화량이 적은 발생원이다. 건축물을 구성하는 대부분의 건축자재는 라돈의 모핵종인 우라늄 및 라듐을 함유하고 있으며,

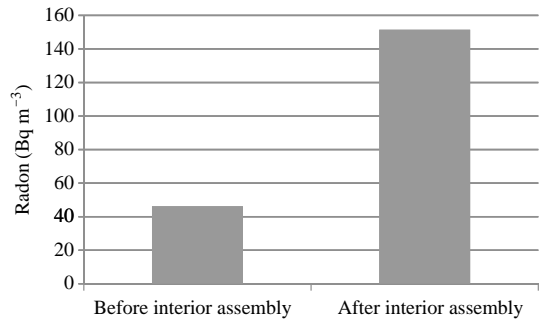


Fig. 3. Comparison of radon concentrations before and after applying interior assembly in new apartment.

지속적으로 라돈을 방출하는 잠재적인 실내 라돈의 기여원이다. 특히 일부 천연물질 및 인공적으로 가공된 물질의 경우에서 높은 함량의 우라늄 및 라듐을 함유할 수 있다. 우라늄은 약 3ppm까지 지구상의 지각에 넓게 분포하고 있으며, 인산염을 함유한 우라늄 원광석과 같은 산화물 등에는 수천ppm의 우라늄이 함유되어 있다. 농업용 비료로 사용되고 있는 인산염 비료에서도 평균 40ppm의 우라늄이 함유되어 있다(NCRP, 1987). 마감재 처리를 완료한 본 연구대상의 일부 신축아파트의 경우 인산비료 생산과정의 부산물인 황산칼슘( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )을 재료로 제조한 석고보드가 고농도 실내라돈의 기여원으로 작용하였을 가능성이 매우 높을 것으로 추정된다. 천정이나 벽 등에 벽지를 도배하기 전 마감재로 사용한 석고보드는 일반 톱밥으로만 제조한 합판에 비해 가격대비 우수한 효율성이 인정되어 과거에는 실내 건축물의 내장 마감재 용도로 많이 사용하여 왔다. 따라서 토양광물을 원료로 제조한 다양한 건축자재에 대한 라돈 방출 시험방법과 기준 설정의 검토가 요구된다.

입주전 신축아파트의 하루 중 라돈농도 시간변화 추이를 세대별로 비교하여 그림 4에 나타내었다. 시간대별 전체 평균 라돈농도는 최대, 최소가 각각 오전 8시에  $118.0 \text{ Bq/m}^3$ , 오후 3시에  $90.4 \text{ Bq/m}^3$ 로 나타나 하루 중 라돈농도 변동 폭이 비교적 작았다. A아파트의 실내공간에서 라돈농도 측정을 하는 기간 동안 동시에 인접 외기에서도 동시에 라돈농도를 측정된 결과, 실내와 외기의 라돈농도는 낮은 상관관계를 보였다( $R^2=0.265$ ). 이는 지속적인 창문의 밀폐로 외기와의 공기교환이 거의 이루어지지 않음에 기인

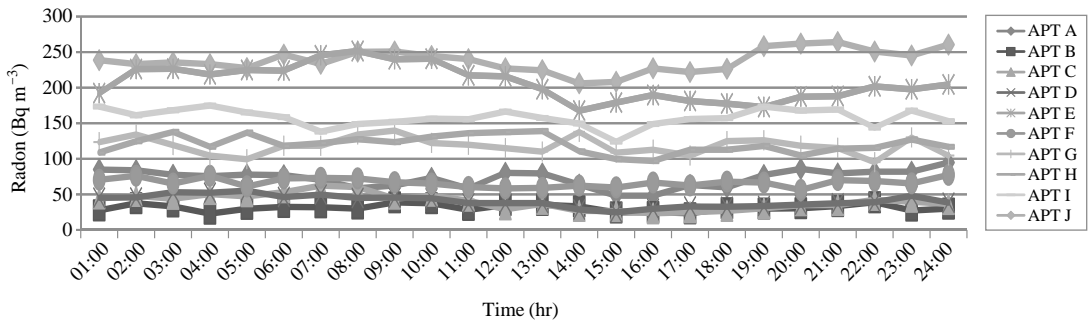


Fig. 4. Diurnal variations of hourly average radon concentrations in non-dwelling new apartments.

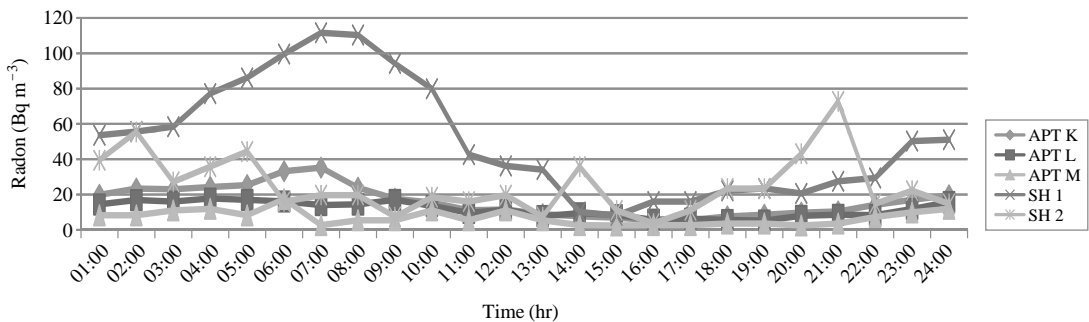


Fig. 5. Diurnal variations of hourly average radon concentration in dwelling apartments and houses.

한 것으로 추정된다.

입주하여 생활하고 있는 주거공간의 시간대별 평균 라돈농도를 살펴보면, 오전 7시에 최대농도 36.7 Bq/m<sup>3</sup>, 오후 3시에 최소농도 7.4 Bq/m<sup>3</sup>로 관측되었다. 하루 중 라돈농도 변동폭은 12:00시를 기준으로 오후에 비해 오전 시간대에서 2배 이상 크게 나타나 입주 전 아파트의 낮은 변동폭과는 대조적임을 확인할 수 있다(그림 5). 이러한 라돈농도의 하루 중 변화는 출입문, 창문 등의 개방을 포함한 주거공간에서의 일상적인 활동과 관련이 있는 것으로 판단된다. 단독주택의 평균 라돈농도가 37.9 Bq/m<sup>3</sup>로 아파트의 11.6 Bq/m<sup>3</sup>보다 높게 나타난 것(표 2)은 아파트의 층고가 3층에서 11층(전용면적; 49~84 m<sup>2</sup>)까지로 단독주택보다 높아 좋은 환기조건을 유지하고 있기 때문으로 사료된다.

입주 전·후 아파트의 하루 중 활동 시간대를 4등분하여 라돈농도 분포비율을 비교 분석한 결과, 입주 아파트의 경우 취침 등으로 활동이 많지 않은 새벽

시간대(00:00~06:00)에 36%로 가장 높은 라돈분포 비율을 보였으며, 그 다음으로 오전시간대(06:00~12:00)에 31%로 높게 나타났다. 반면 입주 전의 아파트는 오전, 오후 시간대별로 유사한 라돈분포 비율을 보였다.

그림 6에는 지질학적으로 화강암반대에 위치하며 준공된 지 약 18년이 경과한 K 아파트 2층의 안방(Room 1), 거실(Room 2), 서재(Room 3)로 구분한 3개의 실내공간과 인접 외기에서 측정된 하루 중 라돈농도 시간변화를 비교하여 나타내었다. 분석결과, 다른 공간에 비해서 구조적으로 환기상태가 어려울 것으로 예상되는 안방의 라돈농도가 26.1 Bq/m<sup>3</sup>로 가장 높았으며 거실이 14.1 Bq/m<sup>3</sup>로 외기 14.8 Bq/m<sup>3</sup>과 유사했고 외기와 바로 접해있는 서재는 13.1 Bq/m<sup>3</sup>로 가장 낮은 라돈농도를 보였다. 외기와 서재의 라돈농도 상관관계는 그림 7에 나타낸 바와 같이 높게 나타났다(R<sup>2</sup>=0.8138). K 아파트는 조사기간이 8월 14일부터 8월 29일까지 여름철이었다. 따라서 창문의

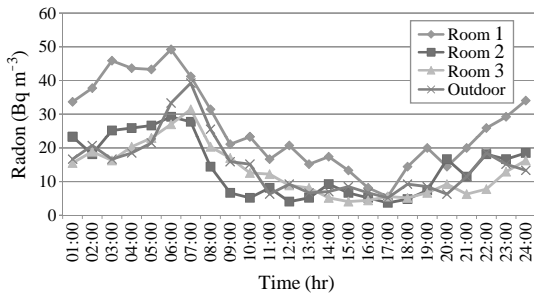


Fig. 6. Diurnal variations of hourly average radon concentration in apartment K.

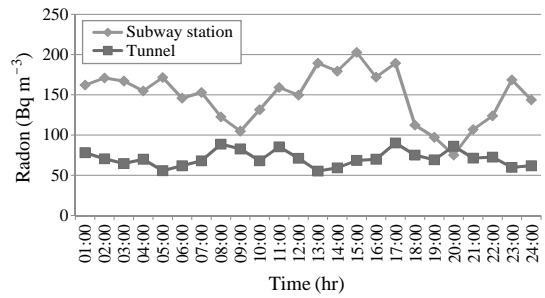


Fig. 8. Diurnal variations of hourly average radon concentration according to substructure of underground buildings.

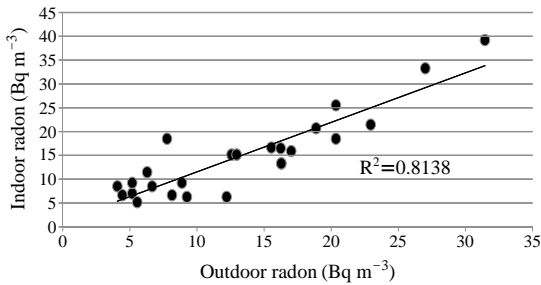


Fig. 7. Correlation of radon concentrations between indoor (Room 3) and outdoor.

개방시간 증가에 따른 외기 공기질의 영향을 크게 받은 것으로 추정된다.

### 3.3 지하공간의 라돈농도 변화

그림 8에는 지하철 6호선 K역사 승강장과 개통을 앞두고 공사가 진행 중이었던 지하철 9호선 고숙버스터미널역 지하터널 공사구간에서 측정한 라돈농도의 하루 중 시간변화를 비교하여 나타내었다. 지하철 운행역사의 라돈변화를 살펴보면, 다른 시간대에 비해 오전 9시와 오후 8시에 상대적으로 매우 낮은 라돈농도 분포를 보이며 2개의 일정한 사이클을 나타내고 있는 반면 공사구간인 터널의 경우는 변동폭이 적고 규칙적인 라돈변동 패턴을 보이지 않았다. 지하철 승강장의 경우 하루 중 라돈 변화특성이 출퇴근 시간대에 강력한 환기량에 기인함을 확인할 수 있었다. 즉, 환기량을 증대시키는 오후 8시 전후와 오전 9시 전후에 낮은 라돈농도를 보였다. 또한 최대 라돈농도는 오후 3시에 나타난 바, 이는 환기량의 저감과 터

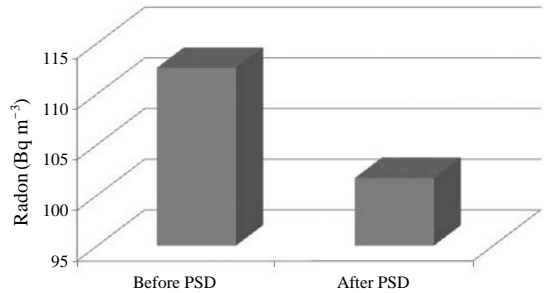


Fig. 9. Comparison of radon average concentration before and after installing PSD at platform of subway station J.

널내 고농도 라돈의 열차풍에 의한 수송에 기인된 것으로 추정된다. K역사의 열차 비운행시간대(01:00~05:00)와 운행시간대(005:00~익일 01:00)로 구분하여 라돈농도 분포를 분석한 결과, 열차 비운행시간대의 평균 라돈농도는 166.0 Bq/m<sup>3</sup>로 운행시간대의 144.4 Bq/m<sup>3</sup>보다 약 15% 높게 나타났다. 따라서 현재 라돈측정 공정시험기준으로 적용하고 있는 장기 라돈 측정방법은 지하철 이용승객 및 역무원이 활동하지 않는 새벽시간대의 라돈농도까지 포함되므로 지하철역의 라돈농도를 과대평가할 소지가 있다고 사료된다. 물론, 라돈의 시공간적인 대표값을 구하기가 어려워 채택되고 있는 장기라돈 측정방법이 라돈 잠재능(radon potential)의 중요한 의미를 내포하지만 실내 라돈발생원에 대한 정확한 평가와 효율적인 라돈저감을 위해서는 장기와 단기 측정방법의 병행이 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다.



승강장스크린도어(PSD) 설치에 의한 지하철역 라돈 저감효과를 확인하기 위하여 2008년 9월 24일 PSD가 설치 완료된 7호선 J역사를 대상으로 2008년 8월 25일부터 10월 23일까지 PSD설치 전·후의 각 1개월간 총 2개월에 걸쳐 역사 승강장에서 라돈농도 모니터링을 실시하였다. 그림 9에 나타낸 바와 같이 PSD 설치 전 평균 라돈농도가 112.6 Bq/m<sup>3</sup>에서 설치 후에 101.7 Bq/m<sup>3</sup>로 약 10%의 라돈 감소효과를 나타내었다. 그러나 전재식 등(2008)에 의하면 지하철역사의 라돈발생원이 터널내부로 확인되고 있는 바, 승객의 머무름 시간이 승강장보다 매우 긴 지하철 전동차 객실에서의 라돈농도 분포 및 변화에 대한 정밀조사와 그에 대한 대책 강구가 요구된다(전재식 등, 2010).

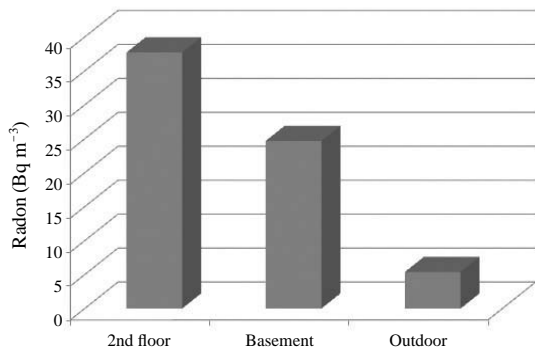


Fig. 10. Comparison of average radon concentrations measured at 2nd floor, basement in office and outdoor.

### 3.4 업무공간의 라돈농도 변화

그림 10에는 서초구 양재동에 소재하는 4층 건물의 2층 사무실과 지하 1층에서 2006년 8월 10일부터 9월 14일까지 측정된 실내 라돈농도와 인접 외기에서 측정된 농도를 비교하여 나타내었다. 사무실의 일평균 라돈농도는 37.7±18.0 Bq/m<sup>3</sup>이었으며 지하층은 24.7±5.2 Bq/m<sup>3</sup> 외기는 5.4±1.6 Bq/m<sup>3</sup>으로 지하보다 사무실에서 높은 농도수준을 보였다. 조사대상의 사무실은 준공된 지 20년 이상된 건축물로 지하의 실내환경은 천정과 벽면이 모두 콘크리트로 마감 처리되었으나 사무실은 벽면이 콘크리트였으며 천정은 전체 면적이 석고보드로 마감재 처리된 공간이었다. 따라서 환기조건이 더 어려운 지하층보다 사무실의 라돈농도가 더 높게 나타난 이유는 앞의 절에서 논의한 바와 같이 석고보드가 라돈 발생원으로 작용한 것으로 판단된다(NCRP, 1987).

그림 11은 사무실과 지하층 실내 그리고 외기의 하루 중 라돈농도 시간변화를 비교하여 나타내었다. 사무실의 라돈농도는 오전 6시에 70.7 Bq/m<sup>3</sup>로 가장 높은 농도를 보였으며 지하층은 이와 대조적으로 오후 8시에 37.7 Bq/m<sup>3</sup>로 가장 높게 나타났다. 사무실의 라돈농도 분포를 평일과 휴일로 구분하여 비교 분석한 결과 평일에는 출근시간인 오전 7부터 9시까지 사무실의 라돈농도가 급격히 감소하여 이후 일정한 농도를 유지하다가 퇴근시간인 오후 6시부터 서서히 농도가 증가하는 경향을 보인 반면, 휴일에는 직원들의 사무실 출입이 일정하지 않아 평일과는 다른 라돈농도 시간변화를 보였다(그림 12). 평일을 근

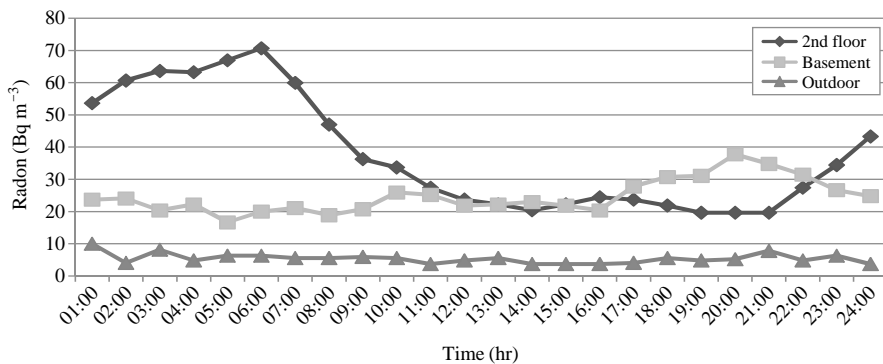


Fig. 11. Diurnal variations of hourly average radon concentrations measured at 2nd floor, basement in office and outdoor.

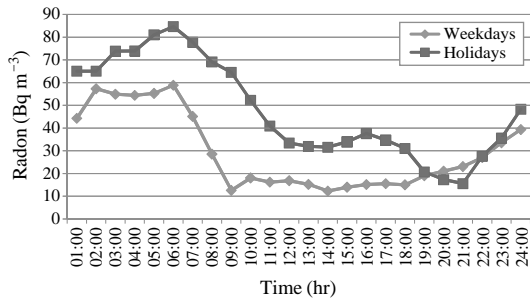


Fig. 12. Diurnal variations of hourly average radon concentrations on weekdays and holidays in office room.

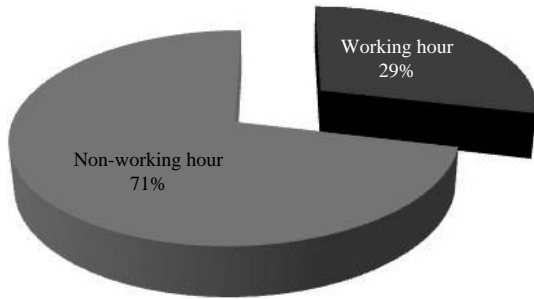


Fig. 13. Radon components of working and non-working hours.

무시간대 (09:00~18:00)와 비 근무시간대 (18:00~익일 09:00)로 구분하여 하루 중 사무실 실내공간의 라돈농도를 비교한 결과 그림 13과 같이 근무시간대와 비 근무시간대의 라돈분포 비율이 1/2.5로 나타났다. 또한 휴일과 평일의 라돈농도는 각각 47.8 Bq/m<sup>3</sup>, 28.9 Bq/m<sup>3</sup>로 휴일이 평일에 비해 1.7배 높게 나타났다. 따라서 앞 절에서 언급한 바와 같이 실내 라돈농도 평가 시 과대평가의 소지가 있으므로 단기와 장기 측정방법의 병행이 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 서울지역의 일부 건축물을 대상으로 주거공간, 지하공간, 업무공간 등 용도별로 구분하여 공간별 실내환경의 특성에 따른 라돈농도의 변화를 분

석하고 발생원을 평가하여 효율적인 실내 라돈저감을 위한 기초자료를 제공하기 위해서 이루어졌다.

건축물 실내공간의 하루 중 라돈농도는 주거습관 및 활동양상에 따라 변화 패턴을 달리하고 있다. 입주 전 신축아파트는 입주하여 주민이 생활하고 있는 아파트 등 주거공간보다 약 5배 높은 실내 라돈농도를 나타냈으며, 마감재 시공 처리후가 처리전보다 3배 이상 높은 라돈농도를 보였다. 마감재 처리를 한 J와 E 아파트에서의 일평균 라돈농도는 각각 238 Bq/m<sup>3</sup>, 207 Bq/m<sup>3</sup>으로 높게 나타났다. 일부 신축아파트의 고농도 라돈분포는 마감재로 사용된 석고보드와 충분치 못한 환기에 원인이 있는 것으로 사료된다. 입주하여 주민이 생활하고 있는 아파트의 경우, 입주 아파트의 시간대별 라돈농도 분포는 취침시간 등이 포함되고 실내활동이 비교적 활발치 않은 오전시간대 (00:00~12:00)에 67%로 높게 나타났으며 오후시간대 (12:00~24:00)에는 33%로 낮게 나타났다. 또한, 외기와 아파트 실내의 라돈농도는 높은 상관관계(R<sup>2</sup>=0.8138)를 보였다.

지하철 운행역사의 하루 중 라돈농도 변화는 역사 내 강력한 기계적 환기로 일정한 주기의 패턴을 보였다. 열차 비운행시간대 (01:00~05:00)가 운행시간대 (05:00~익일 01:00)에 비해 약 15% 높은 라돈농도를 나타냈다. 따라서 24시간 동안 라돈농도를 측정하는 장기라돈 측정방법은 승객이 지하철을 이용치 않는 시간대의 측정시간이 포함되어 라돈의 과대평가 소지가 우려된다. 지하철 스크린도어 설치로 승강장의 라돈농도는 약 10%의 감소효과를 보였으나, 터널내부가 지하철 라돈의 주 발생원임을 상기할 때 전동차 객실에 대한 라돈 정밀조사가 요구된다.

사무실의 하루 중 라돈농도 변화는 직원들의 출퇴근시간에 따라 일정한 라돈농도 변화 패턴을 보였으며 이는 기계적 환기 및 창문개방 등 인위적 환기에 기인된 것으로 판단된다. 휴일의 평균 라돈농도는 평일에 비해서 약 1.7배 높게 나타났으며 비근무시간대 (18:00~익일 09:00)가 근무시간대 (09:00~18:00)에 비해 약 2.5배 높은 라돈농도를 보여 업무공간 역시 라돈의 과대평가 소지가 상존한다. 지상 2층의 사무실이 지하층에 비해 환기가 양호함에도 불구하고 라돈농도가 더 높게 나타난 것은 천정 마감재인 석고보드로부터의 라돈방출에 기인된 것으로 판단된다.

일반 주거공간에서의 라돈농도 분포는 지질학적 압박대의 영향보다 건축물의 형태와 구조 그리고 거주자의 생활습관 등과 직접적인 상관이 있었으며, 사무공간의 라돈농도 형성은 건축자재로부터의 라돈방출과 근무시간에 따른 환기량의 지배를 받고 있음을 확인할 수 있었다.

라돈은 시·공간적으로 변동폭이 매우 큰 특성으로 측정의 대표값을 얻기가 어려워 장기라돈 측정에 의하지만, 장기라돈 측정방법은 업무공간과 공공시설에서 직접 활동하지 않는 시간대의 라돈 측정값이 포함되어 과대평가의 소지가 존재한다. 따라서 라돈 잠재능의 지표로서 활용되는 장기라돈 측정방법과 발생원 추적이 가능한 단기라돈 측정방법을 병행한 경제적이고 효율적인 저감방안을 적용하여야 할 것으로 판단된다. 또한 주거공간을 포함한 모든 생활공간에서의 라돈저감을 위한 방안으로, 환기의 중요성에 대한 대국민 홍보와 함께 건축자재의 라듐함량 또는 라돈방출 기준치 설정 등의 필요성이 강조된다.

## 참 고 문 헌

- 김윤신, 홍승철, 이철민, 박원석, 이태형, 전형진, 조정현 (2003) 다중이용시설의 실내공기중 라돈농도분포 특성, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 529-530.
- 김창규, 김용재, 이재성, 노병환 (2003) 국내 가옥 및 공공건물내 라돈농도, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 67-68.
- 전재식, 김덕찬, 이호찬, 이지영, 홍대화, 신정식 (2006) 서울 지역 지하역사의 라돈농도 분포 특성 평가, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 549-551.
- 전재식, 이진, 김주형, 김민영 (2008) 서울지하역사 라돈농도 분포를 결정하는 요인 분석, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 692-694.
- 전재식, 한규문, 윤종철, 유인철, 김주형, 김민영 (2010) 스크린도어 설치 후 지하철 진동차 객실의 라돈농도 변화, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 123.
- ECA (1995) Indoor Air Quality and its Impact on Man, Radon in Indoor Air Report No. 15, EUR 16123 EN.
- Harley, N.H. and T.B. Terilli (1990) Predicting annual average indoor  $^{222}\text{Rn}$  concentration, Health Physics, 59, 205-209.
- ICRP (1998) Protection against Radon-222 at Home and at Work, Publications 65.
- Kim, Y.J., H.Y. Lee, C.S. Kim, B.U. Chang, C.K. Rho, and S. Tokonami (2005) Indoor radon, thoron, and daughter concentrations in Korea, International Congress Series, 1276, 46-49.
- Li, X., B. Zheng, Y. Wang, and X. Wang (2006) A study of daily and seasonal variations of radon concentrations in underground building, J. Environmental Radioactivity, 87, 101-106.
- Muramatsu, H., Y. Tashiro, N. Hasegawa, C. Misawa, and M. Minami (2002) Seasonal variations of  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in the air of a tunnel located in Nagano city, Environment Radioactivity, 60, 263-274.
- NCRP (1976) Environmental radiation measurements, NCRP Report No. 50.
- NCRP (1987) Exposure of the population of the United States and Canada from natural background radiation, NCRP No. 94.
- Richon, P., F. Perrier, J.C. Sabroux, M. Trique, C. Ferry, V. Voisin, and E. Pili. (2005) Spatial and time variations of radon-222 concentration in atmosphere of a dead-end horizontal tunnel, J. Environmental Radioactivity, 78, 179-198.
- Tokonami, S., M. Furukawa, Y. Shicchi, T. Sanda, and Y. Yamada (2003) Characteristics of radon its progeny concentrations in air-conditioned office buildings in Tokyo, Radiation Protection Dosimetry, 106, 71-75.
- U.S.EPA (1992a) A Citizen's Guide To Radon, ANR-464, 4022-K-92-001.
- U.S.EPA (1992b) A Consumer's Guide To Radon Reduction, 402-K-92-003.
- U.S.EPA (2001) Building Radon Out, Step-by-Step Guide On How To Build Radon-Resistant Homes, EPA/402-K-01-002.
- UNSCEAR (2000) Sources and effects of ionizing radiation, Report to the general assembly with scientific annexes, UNSCEAR United Nations.
- Yu, K.N., E.C.M. Young, M.J. Stokes, and K.K. Tang (1998) Radon properties in offices, Health Physics, 75, 159-164.
- Wilkening, M. (1990) Radon in the environment, Elsevier, p. 137.
- Zhuo, W., M. Turukawa, Q. Guo, and Y.S. Kim (2005) Soil radon flux and outdoor radon concentration in East Asia, International Congress Series, 1276, 285-286.