

사무실 내 라돈 농도에 관한 연구

최현우¹ · 김치년¹ · 원종욱² · 김홍관³ · 노재훈^{2*}

¹연세대학교 보건대학원 및 산업보건연구소,

²연세대학교 의과대학 예방의학교실 및 산업보건연구소, ³인하대학교 대학원 환경안전융합전공

A Study on the Radon Concentration in the Office

Hyun Woo Choi¹ · Chi-Nyon Kim¹ · Jong-Uk Won² · Hong-Kwan Kim³ · Jaehoon Roh^{2*}

¹Institute for Occupational Health & Graduate School of Public Health, Yonsei University

²Institute for Occupational Health & Department of Preventive Medicine, Yonsei University College of Medicine

³Program in ET&ST Convergence, Inha University Graduate School

ABSTRACT

Objectives: This study is aimed at examining radon exposure in offices and the factors that can influence the concentrations.

Methods: Indoor radon concentrations in a total of 30 places were measured from January 18 to 21, 2016, targeting six buildings in Seoul with different completion years. The measurement was conducted according to the radon measurement guidelines for indoor air suggested by the Ministry of Environment.

Results: As a result of comparing each average concentration, underground area concentration was 42.850 ± 22.501 Bq/m³, and that of the ground floors was 27.850 ± 12.232 Bq/m³, which was lower than the concentration in the underground areas and statistically significant ($p=0.045$). As a result of comparing the concentration according to whether or not outside air entered, the average concentration for ventilated areas was 24.876 ± 11.833 Bq/m³, and the average concentration for enclosed areas was 47.892 ± 19.375 Bq/m³. The concentration in ventilated areas was lower at a statistically significant level ($p=0.001$). Finally, as a result of the multiple regression analysis for evaluating the factors influencing radon concentration, only ventilation was significant ($p=0.007$).

Conclusions: As a result of measuring radon in office buildings, there was no place that exceeding the recommended standard of the US EPA, but the concentration in poorly ventilated areas was measured to be high. An effort to manage radon concentration and reduce it through the improvement of ventilation systems, repeated measurement is necessary in the future.

Key words: E-PERM, indoor air, office, radon, ventilation

I. 서 론

라돈(²²²Rn)은 모든 실내공간에서 존재하는 자연방사능 물질로서 무색, 무취, 그리고 화학적으로 비활성 기체이며 고농도에서 오랜 기간 노출 시 폐암을 일으키는 것으로 잘 알려져 있다(UNSCEAR, 1993).

일반적으로 라돈의 농도는 옥외환경 보다 환기의 정도가 낮은 주택이나 건물 내에서 대개 수십 배, 많

게는 수 백 배 이상 높게 나타난다. 특히 환기상태가 저조한 지하 공간에서 라돈의 농도는 더 높게 나타난다. 실내 공기 중 라돈 농도에 영향을 주는 요인으로는 건물 특성(냉방구조, 건물수명, 벽 및 바닥 마감재), 지질학적 구조(지반의 지질 구조; 우라늄 혹은 라듐의 함량, 지하 깊이) 그리고 지상학적 조건(지하수의 유입 정도, 상대습도, 압력, 기온, 기류 속도)을 들 수 있다(Yim, 2007).

*Corresponding author: Jaehoon Roh, Tel: 02-2228-1905, E-mail: jhroh@yuhs.ac

Institute for Occupational Health, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea. 50-1 Yonsei-ro, Seodamun-gu, Seoul 03722

Received: September 6, 2016, Revised: September 19, 2016, Accepted: September 23, 2016

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial

License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 라돈이 흡연에 이어 폐암 발병원인의 3~14%를 차지한다고 보고 하였으며(WHO, 2009), 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 2012년부터 라돈을 발암성 구분1(Carcinogenic to humans)로 분류하여 관리하고 있다(IARC, 2016). 이처럼 라돈은 건강과 관련된 측면에서 사회적인 이슈가 되고 있으며, 이미 미국을 비롯한 여러 선진국에서는 라돈을 자연 방사선 규제물질로 규정하고 있다.

우리나라 고용노동부에서는 산업안전보건법 제27조 제1항 사무실 공기관리 지침을 2007년부터 시행하고 있지만, 라돈을 제외한 9가지의 물질만이 관리되고 있다. 그러나 환경부에서는 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법에 라돈을 포함한 5가지 오염물질을 권고기준을 설정하여 관리하고 있으며 관리기준은 148 Bq/m^3 로 미국환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)의 기준과 같으며 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)의 Action Level인 주거지 기준 $200 \sim 600 \text{ Bq/m}^3$ 이나 직장 기준 $500 \sim 1,500 \text{ Bq/m}^3$ 보다는 강화된 수준이다(ICRP, 1993).

최근 근로복지공단은 지하철 역사에서 약 15년간 근무하다 폐암으로 사망한 직원 2명에게 업무상 질병, 즉 라돈으로 인한 폐암 사망을 인정했다(Eco-tv, 2015). 이로 인해 다중이용시설 거주자뿐만 아니라 사무실에서 근무하는 근로자의 노출을 생각해 볼 수 있으며 이에 따라 산업안전보건법의 관리기준 마련이 필요한 상황이다. 국내에서도 라돈에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 주택시설이나 지하역사 등 한정된 장소에서 진행된 연구가 대부분이며 사무실에 대한 연구 자료는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 실내 근무가 많고 근무지 이동이 많지 않은 사무실을 대상으로 라돈 농도를 측정하여 사무실 근로자의 노출 정도를 파악하여 관리기준을 마련하는데 기초자료로 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 2016년 1월 18일부터 21일까지 서울시에 위치한 건축연도가 다른 6개 건물의 사무실을 대

상으로 라돈 농도를 측정하였으며 측정 장소는 건물 형태와 라돈 농도의 상관관계를 비교할 수 있도록 건물, 층수, 외부 공기 유입 여부를 고려하여 총 30 장소를 선정하였다. 측정 전 각 부서의 협조를 받아 사전 예비조사를 실시하였으며 실내공기 중 라돈측정 지침(MoE, 2000)에 따라 측정지점, 측정기간을 파악 후 측정을 실시하였다. 측정 장소는 Table 1과 같다.

2. 측정 및 분석

1) 측정장비

본 연구에 사용한 라돈 측정기는 우리나라 환경부와 U.S EPA에서 승인하고 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)에서 측정과 분석 매뉴얼(ID-208)에서 제시하고 있는 수동적분형 검출기인 Electron Ion Chamber(EIC)로서 E-PERM (Electret Passive environment Radon Monitor, Rad Elec. Ltd, USA)을 사용하였다.

Chamber는 단기측정용인 S-chamber와 장기측정용인 L-Chamber로 구분하며 Electret은 단기간 측정에 적합한 Short term electret와 장기간 측정에 적합한 Long term electret으로 구분한다.

본 측정에서는 측정기간을 고려하여 S-chamber와 Short term electret으로 구성된 장비를 사용하여 측정하였으며 측정 장비의 검출한계(limit of detection)는 0.1 pCi/L (3.7 Bq/m^3)이다.

2) 측정방법

실내의 라돈 농도는 기류나 환기장치, 습도의 영향을 받기 때문에 측정 장비의 설치는 실내공기 중 라돈 지침(MoE, 2000)을 참고 하였으며 다음과 같은 사항을 고려하여 장비를 설치하여 3일간 측정을 진행하였다.

- ① 측정기가 주변의 환경에 의해 방해받지 말아야 한다(기류, 환기장치 등).
- ② 측정기가 가열, 환기, 냉방을 위한 환기, 문, 팬, 창문 등에 의해 영향을 받으면 안 된다.
- ③ 측정기는 햇빛이 비치거나 습도가 높은 곳에 설치하지 않는다.
- ④ 측정지점은 창으로부터 90 cm 이상 이격시켜야 한다.
- ⑤ 측정기는 바닥에서 최소 50 cm 이상, 다른 실내의 대상물체로부터 10 cm 이상을 이격시켜야 한다.

Table 1. Characteristics of buildings

Building No	location	Construction years	Sampling Floor	Air Exchange	extent(m ²)
1	Seodaemun-gu Sinchon-dong	2014	B7	×	58.43
			B7	×	48.89
			B5	×	50.29
			B2	○	28.69
			1	×	30.46
			2	×	30.46
			5	×	47.77
2	Seodaemun-gu Sinchon-dong	1986	B1	○	20.23
			1	○	34.12
			5	×	39.00
3	Seodaemun-gu Sinchon-dong	1991	B1	○	52.31
			B2	○	37.42
			2	○	31.40
			4	○	18.22
4	Seodaemun-gu Sinchon-dong	2005	B3	×	76.00
			B2	×	84.40
			B1	○	82.00
			B1	×	66.38
			1	○	147.95
			1	×	80.24
			5	○	48.40
5	Seodaemun-gu Sinchon-dong	1996	10	○	60.35
			B2	×	30.03
			B1	○	38.90
			1	○	37.13
			2	○	34.65
6	Seodaemun-gu Sinchon-dong	1995	3	○	35.20
			B2	×	96.32
			1	○	30.36
			7	○	29.00

3) 분석방법

측정 장비를 설치하기 전에 충전막(electret)의 전압을 측정한다. 측정원리는 전리막(chamber) 내에서 라돈이 붕괴하여 생성된 음이온이 양전기를 띤 전리막에 결합함으로써 전압이 떨어지게 된다. 측정 후 충전막의 전압을 측정하여 라돈의 농도를 알 수 있으며 그 기전은 필터를 통해 확산되어 들어간 라돈이 붕괴하는데 이때 전리막에 포집되는 이온쌍의 수에 비례하여 필터에 충전되어 있던 전하가 강하게 되

고 충전막 표면의 전압강하 정도를 정해진 reader로 읽어서 라돈의 농도를 알 수 있는 방법이다(Kotrappa et al., 1988).

본 측정의 농도 단위는 국제 표준단위인 Bq/m³를 사용하였으며 산출된 pCi/L을 Bq/m³으로 단위변환으로 제시하였다.

3. 통계분석

통계학적 분석에는 SPSS 24.0(IBM Company, USA)

을 사용하였다. 라돈 농도는 평균과 표준편차를 산출하였으며, 각 분류별 유의성을 살펴보기 위해 t-test를 이용하였고 사무실의 위치, 외부 공기의 여부, 건축시기가 라돈의 농도에 영향을 미치는 영향을 알아보기 위해 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 하였다. 통계학적 유의수준은 P-value<0.05로 정하였다.

III. 결 과

1. 사무실 내 라돈 농도

6개의 건물에서 총 30곳의 라돈 농도를 측정하였으며 전체적으로 산술평균이 기하평균보다 높으며 대수정규분포를 나타냈다. 측정 농도는 5.000~86.500 Bq/m³로 U.S EPA 권고기준인 148 Bq/m³를 초과한 장소는 없었다. 가장 높은 평균 농도를 보인 곳은 Building 1로 45.500±17.602 Bq/m³이며 전체 평균 농도인 33.941±16.326 Bq/m³ 보다 약 1.3배 높았다. 또한 평균 농도가 가장 낮은 장소는 Building 5로 20.760±8.637 Bq/m³이었다(Table 2).

Table 2. Result of radon concentration in Office

(Unit, Bq/m ³)				
Building	N*	Mean±S.D. [†]	GM [‡] (GSD) [§]	Range
1	7	45.500±17.602	42.925(1.380)	28.900~86.500
2	3	31.733±17.745	23.902(2.367)	7.100~48.200
3	4	28.175±9.959	26.475(1.425)	16.100~43.800
4	8	36.575±21.173	30.897(1.802)	12.000~77.200
5	5	20.760±8.637	17.734(1.921)	5.000~27.600
6	3	40.900±22.841	35.524(1.668)	24.400~73.200
Total	30	33.941±16.326	29.576(1.761)	-

*N : Number of samples [†]S.D. : Standard Deviation

[‡]GM : Geometric Mean [§]GSD : Geometric Standard Deviation

2. 지하 공간의 라돈 농도

지하 7층까지 있는 Building 1과 지하3층까지 있는 Building 4의 경우를 제외하고 대부분의 건물이 지하 2층까지 있었다. 농도의 범위는 16.100~86.500 Bq/m³로 U.S EPA의 권고기준을 초과하는 곳은 없었으나 권고기준의 50%인 74 Bq/m³을 초과하는 장소는 2곳이 있었다. 가장 높은 곳은 Building 1의 지하 7층으로 평소 출입문이 열려 있지 않고 보안이 설정되어 있는 밀폐된

Table 3. Radon concentration according to underground area

(Unit, Bq/m ³)				
Building	N*	Mean±S.D. [†]	GM [‡] (GSD) [§]	Range
1	4	49.775±21.876	45.729(1.490)	28.900~86.500
2	1	N/A	N/A	48.200
3	2	21.500±5.400	20.811(1.293)	16.100~26.900
4	4	48.050±22.683	42.383(1.671)	22.000~77.200
5	2	22.100±4.200	21.697(1.212)	17,900~26,300
6	1	N/A	N/A	73,200

*N : Number of samples [†]S.D. : Standard Deviation

[‡]GM : Geometric Mean [§]GSD : Geometric Standard Deviation

^{||}N/A : Not Available

장소로 외부인이 쉽게 출입할 수 없는 구조였다. 그 다음으로 높은 농도를 보인 곳은 각 건물의 지하 2층이었으며 77.200 Bq/m³, 73.200 Bq/m³, 62.700 Bq/m³로 모두 지하주차장과 인접해 있었고 3곳 모두 출입 시에만 문을 여는 밀폐된 장소였다(Table 3).

3. 지상 공간의 라돈 농도

측정한 장소의 대부분은 1층에서 5층까지 위치해 있고, 7층과 10층이 한 장소씩 있었으나 층간 농도의 차이를 알아보기엔 제한이 있었다. 농도의 범위는 5.000~46.600 Bq/m³로 U.S EPA의 권고기준 및 권고기준의 50%를 초과하는 장소는 없었다. 가장 높은 농도를 보인 곳은 1층에 위치한 공간으로 평상시엔 문을 닫아 놓고 출입 시에만 문을 여는 장소였으며 가장 낮은 농도를 보인 곳은 3층에 위치한 곳으로 항상 문을 열어 놓아 환기가 잘 이루어지고 있는 곳이었다(Table 4).

Table 4. Radon concentration according to ground area

(Unit, Bq/m ³)				
Building	N*	Mean±S.D. [†]	GM [‡] (GSD) [§]	Range
1	3	39.800±5.290	39.452(1.142)	33.700~46.600
2	2	23.500±16.400	16.400(2.371)	7.100~39.900
3	2	34.850±8.950	33.681(1.300)	25.900~43.800
4	4	25.100±10.898	22.524(1.615)	12.000~36.800
5	3	19.870±10.515	15.503(2.226)	5.000~27.600
6	2	24.750±0.350	24.748(1.014)	24.400~25.100

*N : Number of samples [†]S.D. : Standard Deviation

[‡]GM : Geometric Mean [§]GSD : Geometric Standard Deviation

4. 지하와 지상 공간의 라돈 농도 비교

지상 공간과 지하 공간으로 분류하여 각각 16곳, 14곳의 라돈 농도를 비교하였다(Table 5).

지하 공간에서의 평균농도는 42.850 ± 22.501 Bq/m³, 지상공간에서의 평균농도는 27.850 ± 12.232 Bq/m³으로 지상 공간 보다 지하 공간에서의 농도가 더 높았다. U.S EPA의 권고기준인 148 Bq/m³를 초과하는 곳은 없었으며 지하와 지상 공간의 상관성을 알아보기 위한 t-test 결과 통계적으로 유의하였다($p=0.045$).

라돈의 주 발생원이 토양인 것에 기인하였을 때 토양과 가깝고 지하수가 흐르는 지하층에서 라돈의 농도가 높게 나타나는 것을 알 수 있으며 다른 계절에 비해 겨울철 환기량이 부족한 것 또한 라돈의 농도에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

5. 외부 공기의 유입에 따른 라돈 농도

외부 공기의 유입여부에 따른 장소를 분류하여 밀폐된 장소 13곳, 외부 공기가 유입되는 장소 17곳의 라돈 농도를 비교하였다(Table 6).

밀폐장소는 사무실의 특성상 완전히 밀폐가 불가능하여 출입 시에만 문을 여는 장소를 밀폐장소로 분류하였다. 측정결과 밀폐된 장소의 평균농도는

47.892 ± 19.375 Bq/m³이며 가장 높은 농도를 보인 장소 역시 밀폐된 장소로 지하에 위치하고 있다. 외부 공기가 유입되는 장소의 평균농도는 24.876 ± 11.833 Bq/m³로 주기적으로 문을 열어 외부와의 공기 교환을 통해 환기를 시켜주는 곳이 더 낮은 농도를 보였다. 외부 공기 여부의 상관성 검증을 위해 실시한 t-test 결과 통계적으로 유의하였다($p=0.001$).

6. 건축 시기에 따른 라돈 농도

2000년도를 기준으로 이전에 지어진 건물은 구축, 이후에 지어진 건물은 신축으로 나누어 각각 3곳의 건물 농도를 비교하였다(Table 7).

신축 건물의 평균농도는 40.740 ± 20.088 Bq/m³, 구축 건물의 평균농도는 28.960 ± 16.470 Bq/m³이며 신축 건물의 평균 농도가 구축 건물의 평균 농도 보다 높았다.

건축자재의 차이로 인한 농도차이가 있을 것으로 생각하였으나 측정대상의 건물이 동일한 건축자재를 사용하여 건축되어 그 차이를 보기에 어려움이 있었다. 신축건물에서 농도가 높게 나타난 이유는 측정 장소의 대부분이 지하층에 위치한 것에 기인한 것으로 사료되며 통계적으로 유의하지 않았다($p=0.100$).

Table 5. Radon concentration according to underground and ground area

(Unit, Bq/m ³)					
variables	N*	Mean±S.D.*	GM [‡] (GSD) [§]	Range	p-value
ground area	16	27.850±12.232	23.933(1.876)	5.000~46.600	0.045
underground area	14	42.850±22.501	37.316(1.697)	16.100~86.500	

*N : Number of samples *S.D. : Standard Deviation ‡GM : Geometric Mean §GSD : Geometric Standard Deviation

Table 6. Radon concentration according to air exchange

(Unit, Bq/m ³)					
variables	N*	Mean±S.D.*	GM [‡] (GSD) [§]	Range	p-value
non air exchange	13	47.892±19.375	44.410(1.464)	26.300~86.500	0.001
air exchange	17	24.876±11.833	21.506(1.808)	5.000~48.200	

*N : Number of samples *S.D. : Standard Deviation ‡GM : Geometric Mean §GSD : Geometric Standard Deviation

Table 7. Radon concentration according to construction years

(Unit, Bq/m ³)					
variables	N*	Mean±S.D.*	GM [‡] (GSD) [§]	Range	p-value
before	15	28.960±16.470	24.070(1.941)	5.000~73.200	0.100
after	15	40.740±20.088	36.021(1.665)	12.000~86.500	

*N : Number of samples *S.D. : Standard Deviation ‡GM : Geometric Mean §GSD : Geometric Standard Deviation

Table 8. Affecting factor of radon concentration

Independent Variable	B	β	t	p	VIP
Location	9.686	0.251	1.604	0.121	1.073
air exchange	19.904	0.511	2.914	0.007	1.354
Construction years	1.200	0.031	0.182	0.857	1.285

n=30; B; parameter estimate, VIP; variance inflation factor, p; p-value by Multiple regression analysis, Statistically significant at $p < 0.05$

7. 라돈 농도에 영향을 미치는 요인

라돈 농도에 영향을 미치는 요인에 대해서 측정 위치, 외부 공기의 여부, 건축연도에 대하여 다중회귀분석을 실시하였다(Table 8).

회귀모형 검증결과 $p=0.03$ 으로 적합하였으며, 변수들의 다중공선성은 문제가 발생할 수 없다. 또한 R^2 값은 0.341로 34.1%의 설명력을 보였다. 각 계수의 유의성을 검증한 결과 위치($p=0.121$)와 건축연도($p=0.857$)는 통계적으로 유의하지 않았고, 외부 공기 유입에 따른 라돈의 농도는 통계적으로 유의하였다($p=0.007$). 위 결과를 토대로 외부 공기의 유입, 즉 적절한 환기가 라돈의 농도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

IV. 고 찰

라돈은 주로 지각이나 건축자재로부터 생성되어 건물의 틈새를 통하여 실내에 유입되어 거주자에게 내부 피폭을 일으킨다. 실내로 유입된 라돈은 플로늄과 같은 딸핵종과 함께 폐로 흡입되어 이들이 방출하는 알파선에 의해 폐조직을 손상시켜, 고농도에 장기간 노출될 경우 폐암을 유발시킬 수 있다(Chung et al., 2014). 이러한 방사선으로 인하여 염색체가 손상되면 비정상세포가 재생산되면서 폐암의 발생 위험률을 높이는 것으로도 보고되고 있고, 폐암의 발생률과 라돈의 농도는 비례한다고 알려져 있다(ICRP, 1987). 우리나라에서는 사무실 공기를 관리하기 위해 산업안전보건법 제27조 제1항에 따른 사무실 공기관리 지침을 정하여 9가지 물질에 대해서 관리기준을 제시하고 있다. 하지만 공표 이래 규제 및 개정이 이루어지지 않고 있으며 최근 마스크를 통해 라돈으로 인한 건강장해가 사회적 이슈가 되고 있어 현 제도의 문제점에 대한 방안을 마련하는 것이 필요하다(Kim, 2015). 특히 사무실 근로자는 현장에서 근무하는 근로자에 비해 한 곳에 오래 머물러 있어 오염물

질에 장시간 노출될 가능성이 있어 라돈은 건물 바닥이나 벽면에서 주로 방출되기 때문에 그 위험이 증가될 수 있다.

사무실의 라돈 노출 실태를 파악하고 농도에 영향을 줄 수 있는 요인에 대해 알아보기 위해 측정을 실시하였다. 그 결과 지하공간에 위치한 곳이 지상공간에 위치한 곳보다 높은 농도를 나타냈다. 또한 환기가 이루어지지 않는 곳이 환기를 실시하는 곳보다 높은 농도를 나타내었으며 모두 통계적으로 유의하였다.

측정된 노출수준은 U.S EPA의 권고기준인 148 Bq/m^3 을 초과하는 장소는 없었으며 50%인 74 Bq/m^3 을 초과한 장소는 2곳이 있었다. 측정값 중 높은 농도를 보인 장소의 대부분이 지하에 위치하고 있었으며 환기가 제대로 이루어지지 않은 장소였다. 이는 토양층과 가까운 위치적인 조건과 외부 공기와 순환이 이루어지지 않는 환기의 여부가 라돈의 농도에 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다.

본 연구에서의 지하 공간과 지상 공간의 농도는 각각 $42.850 \pm 22.501 \text{ Bq/m}^3$, $27.850 \pm 12.232 \text{ Bq/m}^3$ 이었다. Lee et al.(2010), Choi et al.(2008), Kim & paik (2002)의 연구결과와 수치적으로 차이가 있었지만 이는 측정 당시의 주변 환경과 대상의 특성에 따른 차이일 것으로 사료된다. 하지만 지상공간보다 지하 공간에서 더 높은 농도가 나타난 점에서 같은 결과를 보였다고 할 수 있다. 또한 Min et al.(2015)이 진행한 연구에서는 같은 장소에서 환기 실시 여부에 따라 라돈의 농도를 측정된 결과 적극적으로 환기를 실시할 때 라돈의 농도가 낮았다. 본 연구에서도 밀폐된 장소와 환기를 실시한 장소의 농도를 비교한 결과 환기를 실시한 장소의 농도가 더 낮게 나타났으며 이는 라돈 농도의 저감을 위해 가장 기본적이고 필수적인 방법이 환기가 될 수 있음을 보여준다. 마지막으로 건축연도에 따른 농도 차이를 비교하여

건축자재의 영향을 알아보기 위해 조사한 결과 동일한 건축자재를 사용함에 따라 그 차이를 확인할 수 없었다.

전체적인 노출수준은 권고기준보다 낮은 분포를 보였지만 라돈의 노출은 단시간 폭로가 아닌 누적 폭로됨으로써 건강과 관련된 증상을 일으킬 수 있다. 작업장 뿐 만 아니라 사무실 근로자에게도 라돈의 인체 영향 및 저감 방법에 대한 적극적인 교육 및 홍보, 환기시스템의 개선 등 체계적인 관리 및 제도적인 지원을 통해 라돈의 위험으로부터 근로자들을 보호하여야 할 것이다.

따라서 향후 연구에서는 단기측정과 장기측정을 모두 진행하여 어떠한 방법이 더 경제적이고 적합한 지에 대한 방법론적인 연구를 통해 가장 적합한 측정방법을 제안하고 다양한 조건 및 노출 가능성을 고려한 반복적인 측정을 실시하고 데이터를 구축하여 관리하여야 한다.

V. 결 론

장기간 노출 시 폐암을 유발할 수 있는 라돈에 대해서 사무실 노출실태를 파악하고자 총 6개 건물 30곳의 사무실 라돈 농도를 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, U.S EPA 및 환경부 권고기준인 148 Bq/m^3 을 기준으로 사무실의 라돈농도를 측정한 결과 $5.000 \sim 86.500 \text{ Bq/m}^3$ 이며, 권고기준을 초과한 장소는 없었다. 또한 전체 평균 농도는 $33.941 \pm 16.326 \text{ Bq/m}^3$ 이었다.

둘째, 지하 공간의 산술평균 농도는 42.850 Bq/m^3 로 지상 공간의 평균 농도인 27.850 Bq/m^3 보다 높은 결과를 보였으며 통계적으로 유의하였다.

셋째, 외부 공기 유입 여부에 따른 농도를 확인한 결과 밀폐된 장소의 산술평균 농도는 47.892 Bq/m^3 , 외부 공기가 유입된 장소의 농도는 24.876 Bq/m^3 로 밀폐된 장소의 라돈 농도가 더 높은 결과를 보였으며 통계적으로 유의하였다.

넷째, 신축 건물과 구축 건물의 농도 비교 결과 신축 건물의 산술평균 농도는 40.740 Bq/m^3 , 구축건물의 평균 농도는 28.960 Bq/m^3 로 신축 건물에서 더 높은 결과를 보였으며 이는 통계적으로 유의하지 않았다.

다섯째, 라돈 농도에 영향을 줄 수 있는 요인을 알

아보기 위해 다중회귀분석을 실시한 결과 외부공기의 유입 여부만이 통계적으로 유의하였다.

본 연구를 통해 사무실 실내의 라돈 노출 실태를 알 수 있었으며, 지상과 지하의 차이, 환기 여부가 농도에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있는 것을 확인하였다. 비록 권고기준을 초과하는 장소는 없었으나 장시간 노출될 경우 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있으므로 체계적인 관리가 필요하다. 이에 창문을 여는 등의 주기적인 자연 환기 혹은 공조시스템 가동을 통해 실내 공간에 라돈의 축적을 줄일 수 있다. 향후 다양한 조건을 고려한 라돈의 측정 및 건강영향에 대한 연구가 주기적으로 이루어져야 할 것이다.

References

- Choi IJ. Concentration Distribution and Characteristic of Radon for Public Facilities in Daegu Area. Graduate School of Industry, Kyungpook National University. 2008
- Chung EK, Kwon JW, Kim KB, Kim JK, Jang JK et al. A Study for Occupational Exposure and Assessment Method of Radon. Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI), 2014
- Eco-TV. 2015 Available from: URL: <http://www.greenpostkorea.co.kr/news/article.html?no=49695>
- International Agency for Research on Cancer(IARC). Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1-116. 2016. Available from: http://monogr.aphs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php
- International Commission on Radiological Protection (ICRP), ICRP Publications 65, Protection against Radon-222 at Home and at Work, 1993
- Kim KY. A Study on the Indoor Air Quality and Regulatory Improvements. Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI), 2015
- Kim SA, Paik NW. A Study on Indoor Radon Concentrations in Urban Area. Kor J Hlth Soc 2002; 28(2):89-98
- Kotrappa P, Dempsey JC, Hickey JR, Stieff LK. An Electret Passive Environmental Rn-222 Monitor Based on Ionization Measurements. Health Physics 1988;54(1): 47-56
- Lee TJ, Jeong MS, Kim HR, Park HS. A study on the concentration distribution and characteristic of Radon for Public facilities in Cheonan area. J Korea Society of Environmental Administration. 2010;16(1):1-9
- Min TU, Chung KS, Kim YI. A Study on the Variation of

- Indoor Radon Concentration due to the Ventilation Rate in Apartment Housing. 2015;28(6):431-434
- Ministry of Environment(MoE). radon measurement guidelines of indoor air.; 2000
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1987 Lung cancer risk from indoor exposure to Radon and Radon daughter. ICRP Publication 50. Annals of ICRP. 1987;17:4-11
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation(UNSCEAR) United Nations. 1993
- World Health Organization(WHO). Handbook on Indoor Radon. 2009
- Yim SH. Concentration Distributions and a Reduction Strategy of Airborne Radon in Metro Subways of Korea. 2007