

일부 제조업 사업장의 사무 및 공장동에서의 라돈농도 수준 및 유효선량 평가

정은교 · 김기웅

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Evaluation of Effective Dose and Exposure Levels of Radon in Office and Plant Buildings

Eun Kyo Chung^{*} · Ki Woong Kim

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objectives: Radon may be second only to smoking as a cause of lung cancer. Radon is a colorless, tasteless radioactive gas that is formed via the radioactive decay of radium. Therefore, radon levels can build up based on the amount of radium contained in construction materials such as phospho-gypsum board or when ventilation rates are low. This study provides our findings from evaluation of radon gas at facilities and offices in an industrial complex.

Methods: We evaluated the office rooms and processes of 12 manufacturing factories from May 14, 2014 to September 23, 2014. Short-term data were measured by using real-time monitoring detectors(Model 1030, Sun Nuclear Co., USA) indoors in the office buildings. The radon measurements were recorded at 30-minute intervals over approximately 48 hours. The limit of detection of this instrument is 3.7 Bq/m³. Also, long-term data were measured by using α -track radon detectors(α -track, Rn-tech Co., Korea) in the office and factory buildings. Our detectors were exposed for over 90 days, resulting in a minimum detectable concentration of 7.4 Bq/m³. Detectors were placed 150-220 cm above the floor.

Results: Radon concentrations averaged 20.6 ± 17.0 Bq/m³ (3.7-115.8 Bq/m³) in the overall area. The monthly mean concentration of radon by building materials were in the order of gypsum>concrete>cement. Radon concentrations were measured using α -track in parallel with direct-reading radon detectors and the two metric methods for radon monitoring were compared. A t-test for the two sampling methods showed that there is no difference between the average radon concentrations($p<0.05$). Most of the office buildings did not have central air-conditioning, but several rooms had window- or ceiling-mounted units. Employees could also open windows. The first, second and third floors were used mainly for office work.

Conclusions: Radon levels measured during this assessment in the office rooms of buildings and processes in factories were well below the ICRP reference level of 1,000 Bq/m³ for workplaces and also below the lower USEPA residential guideline of 148 Bq/m³. The range of indoor annual effective dose due to radon exposure for workers working in the office and factory buildings was 0.01 to 1.45 mSv/yr. Construction materials such as phospho-gypsum board, concrete and cement were the main emission sources for workers' exposure.

Key words: Becquerel(Bq), construction materials, radon exposure, effective dose

I. 서 론

실내공기 오염물질 중 라돈은 인류 태초부터 자연 환경 중에 존재하는 천연방사성물질 중의 하나로서

지각의 암석이나 토양 또는 건축자재 중에 들어있는 우라늄과 토륨이 몇 단계의 방사성 붕괴 과정을 거친 후 생성되는 무색·무취의 비활성기체이다. 라돈은 지각이나 건축 자재로부터 생성되어 건물의 틈새를

*Corresponding author: Eun Kyo Chung, Tel: 052-703-0902, E-mail: jungek60@kosha.or.kr
Occupational Safety and Health Research Institut. KOSHA. 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44429
Received: July 18, 2016, Revised: March 8, 2017, Accepted: March 17, 2017

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.

통하여 실내로 유입되어 거주자에게 내부 피폭을 일으킨다. 실내로 유입된 라돈은 폴로늄(^{218}Po , ^{214}Po)과 같은 딸핵종과 함께 폐로 흡입되어 이들이 방출하는 알파선에 의해 폐 조직을 손상시켜, 고농도에 장기간 노출될 경우 폐암을 유발시킬 수 있다. 천연방사성물질인 라돈(^{222}Rn)은 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 1급 발암물질로 규정하고 있고 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 흡연 다음으로 폐암을 유발하는 유해물질로 규정할 만큼 인체에 치명적인 영향을 미치는 유해성 물질이다(Je, 2010). 그리고 라돈은 인공방사선과 달리 자연 발생적인 방사선원이므로 통제·관리상의 어려움이 수반된다는 점에서 선진국에서는 라돈에 의해 국민들이 받는 연간 피폭선량을 평가하고, 라돈농도에 대한 권고치를 설정하여 라돈으로부터 국민의 건강을 보호하기 위하여 1980년대부터 국가별로 전국 규모의 라돈농도 조사를 수행하고 있다. 국내에서 최초 라돈 조사는 1981년 경북지역 토양을 대상으로 알파비적검출기를 사용하여 라돈농도를 측정하였고(Kang, 1982) 처음 주택을 대상으로 한 라돈농도 조사는 1988년 4개 지역(서울, 송탄, 도고, 군산)의 일반주택 75가구를 대상으로 실시하였는데, 전체평균농도는 108.8 Bq/m^3 이었고 미국 EPA 기준(148 Bq/m^3)을 초과하는 경우는 각각 서울 5%, 송탄 16%, 도고 18%, 군산 14%로 나타났다(Kim, 1990). 국립보건원에서는 1995년 라돈과 그 붕괴생성물에 의한 방사선 유해도를 평가하기 위해 서울시내 보건소 건물을 대상으로 조사한 결과, 평균라돈농도는 지하실 42.65 Bq/m^3 , 1층 사무실 42.65 Bq/m^3 이었고 아파트, 빌라, 일반주택, 연립주택을 대상으로 한 조사에서는 전체 주거시설의 평균라돈농도는 27.75 Bq/m^3 이고 아파트 19.61 Bq/m^3 , 빌라 24.79 Bq/m^3 , 일반주택 31.45 Bq/m^3 , 연립주택 34.78 Bq/m^3 이었다. 서울대 보건대학원에서는 2001년부터 2003년까지 서울, 부산 및 대구 지하철을 대상으로 지하역사 공기 중 존재할 수 있는 라돈 등 발암성 물질에 대한 농도 분포를 조사하였으며(Paik & Chung, 2004), 보건환경연구원에서는 1998년부터 2004년까지 서울 지하철역 1호선~8호선 232개 역사를 대상으로 장기간 조사를 실시하였다(Jeon & Kim, 2006). 이와 같이, 주요 연구대상이 일반대중을 대상으로 한 연구가 대부분이고 국내에서 직업인에

대한 라돈노출 실태조사는 지하철의 지하터널, 광산 근로자를 대상으로 한 경우를 제외하고는 산업단지 내 사무동 및 공장동 등 제조업 사업장을 대상으로 한 라돈농도 실태조사는 없었다. 2013년 전북 남원지역에서 음용수중 라돈 노출로 인한 질병발생이 의심되는 사회적 이슈가 발생한 바 있다.

우리나라는 다른 나라에 비해 화강암이 많은 토양을 가진 나라중 하나이다. 화강암은 우라늄과 라듐을 많이 함유하고 있는 암석이기 때문에 화강암이 많은 지역일수록 라돈농도가 높게 나타날 수 있다(Shin et al., 1999). 그러므로 토양에 기인하는 라돈농도는 지역에 따라 차이가 날수 있다. 왜냐하면, 우라늄과 라듐 등은 라돈의 원인물질이기 때문이다. 또한 라돈농도는 계절 및 환기여부에 따라 달라질 수 있다. 겨울철에는 난방으로 인해 외기와의 환기가 비교적 적어 라돈농도가 가장 높았으며 여름철에는 외부공기의 실내유입으로 인해 실내공기가 희석되어 라돈농도가 낮은 것으로 조사되고 있다(Jeon et al., 2000).

환경부에서 조사한 우리나라 전국 주택의 실내 라돈농도 분포를 보면, 권고기준 148.0 Bq/m^3 를 초과하는 지역은 전북, 대전·충남 및 강원도 지역으로 나타났다(Seo et al., 2012). 고용노동부의 산업안전보건법 및 사무실 공기질 관리지침에는 라돈 측정방법 및 라돈에 대한 노출기준치가 없다.

라돈농도 측정 시 미국 직업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)에서는 측정 분석방법 ID-208에 의해 E-PERM을 사용한 충전막 전리함(Electret Ion Chamber, EIC) 방식을 이용하고 있으나 고용노동부에는 아직 근로자를 대상으로 한 측정 분석방법이 없어 본 연구에서는 알파비적 검출방법을 사용하였다.

또한, 권고기준 148.0 Bq/m^3 을 고용노동부의 산업안전보건법 관할 시설에 적용시킬 수는 없으나 환경부에서의 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법에서 적용하고 있는 기준치를 이용하여 기준초과 여부를 평가 하였다.

본 연구의 목적은 라돈농도가 높은 곳으로 알려진 전북지역의 제조업사업장을 대상으로 사무동 및 공장동의 라돈농도 차이, 벽재질에 따른 라돈농도 차이와 라돈농도 수준에 대한 유효선량 평가를 통해 그에 따른 관리의 필요성을 검토해 보고자 함이다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상

연구대상은 전북지역에 위치한 제조업사업장 12개사의 사무동 및 공장동 등을 대상으로 2014년 5월부터 9월 까지 실시하였다. 측정장소는 25개소이고 사무동 22개소, 공장동 3개소이었다. 이중 3개사의 사무동(5개소)과 공장동(3개소)는 동일한 장소에 있다. 그리고 각 측정위치별 총 시료수는 108개(사무동 89, 공장동 19) 이었다.

2. 연구방법

연구에서 단기측정용으로 사용된 장비는 연속모니터측정기(Radon Sentinel 1030, Sun Nuclear Co., USA)로 확산접합형 포토다이오드 방식에 의한 알파선 검출기이다. 또한, 장기측정용으로 사용된 알파비적 검출기(α -track, Rn-tech Co., Korea)는 시간적분형 라돈농도 측정기로서 휴대가 간편하고 원하는 높이로 설치할 수 있으며 필터를 파손시키지 않고 본체 내부에 고체비적검출기를 쉽게 수거 및 교환할 수 있도록 설계된 것이다. 이것은 셀룰로오스 필터와 같은 고체물질 표면에 라돈 및 라돈자손으로 부터 알파입자가 입사될 때 조직에 미세한 방사선 손상으로 생성된 비적을 검출한다. 알파비적 검출기를 수산화나트륨(NaOH)용액으로 화학처리 후 현미경 등을 이용하여 생성된 비적을 계수하는 원리이다.

측정용 검출기는 다음과 같은 조건을 고려하여 배치하였다.

- ① 통풍구, 환기구, 가전제품(예: 컴퓨터, 프로젝터 등)으로부터 멀리
- ② 사무실 바닥에서 20 inch(50 cm) 높게
- ③ 문이나 창문으로부터 3 feet(90 cm) 떨어진 곳
- ④ 모든 외부 벽으로부터 12 inch(30 cm) 떨어진 곳
- ⑤ 어떤 다른 대상물로부터 4 inch(10 cm)이상 떨어진 위치
- ⑥ 화기, 고습지역, 직사광선을 피할 수 있을 것

모든 측정기 및 검출기는 동일한 날짜에 측정을 시작하였고 측정시료의 식별번호, 위치, 시작 날짜 및 시간을 체크리스트에 기록하였다. 본 연구는 온도 18~29℃에서 상대습도 55~95% 범위에서 측정하

였다. 또한, 검출기의 회수율을 높이기 위해 근로자들이 잘 볼 수 있게 검출기에 '라돈농도 측정중'이라는 주의 표지를 부착하였다. 단기측정인 경우 수동형 검출기를 사용하여 측정위치에서 48시간동안 측정하였고 장기측정인 경우는 상기 조건을 고려하여 3개월 동안 대상이 되는 지점에 검출기를 매달아 측정하였다. 공장동에 대한 단기측정은 실시하지 않았다. 측정장소에 대한 시료수를 산정하기위해 사무실 등 측정대상 시설의 면적을 실측하고 빌딩의 바닥 등 평면도 관련정보를 체크리스트에 기록하였다. 주로 거주하는 사무실, 연구실험실 등을 대상으로 하였고 화장실, 복도, 계단 등은 제외하였다. 검출기는 185 m² 당 1개이상 설치하는 것을 기준으로 데이터의 신뢰성 확보를 위해 충분한 수의 시료를 설치하였다(Ohio Department of Health, 2008). 검출기의 제조, 운반, 처리과정에서 측정의 정확도에 영향이 있는지 알아보기 위해 공시료를 확보하였고 공시료는 검출기 시료수의 5%로 하였다. 공시료를 통해 얻은 값들은 측정결과를 보정하는데 사용하였다. 벽의 재질에 따라 라돈 농도에 차이가 있는지 알아보기 위해 벽의 구성물질을 조사하였다.

본 연구에서 조사한 제조업 사업장 사무동 및 공장동의 실내 라돈농도 측정결과는 실제 각 시설에서 근무하는 근로자의 실내 라돈에 의한 연간 유효선량으로 변환하여 평가하였다. 공기 중 라돈농도를 방사선 유효선량으로 변환하려면, 먼저 평형등가농도(Equilibrium Equivalent Concentration, EEC)를 알아야 한다. 평형등가농도는 다음식으로 구할 수 있다.

$$EEC = \text{Equilibrium factor} \times \text{Radon gas concentration}$$

여기서, 평형상수(Equilibrium factor, F)는 환기율에 따라 0.3~0.7를 적용한다. 일반적으로 실내 라돈에 대해서는 0.4, 실외에 대해서는 0.6을 적용하고 있다. 라돈의 선량환산계수(Dose conversion factor)는 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서 8 nSv/(Bq·hr/m³)를 제시하고 있다(Tirmarche et al., 2010). 근로자가 실내에서 하루 8시간, 한달 170시간 근무한다고 가정하여 라돈 흡입으로 인한 연간 유효선량(Indoor Annual Effective Dose, IAED)은 다음식으로 계산할

수 있다.

$$IAED = EEC \times \text{Occupancy} \times \text{Dose conversion factor}$$

여기서, 거주율 또는 점유율(Occupancy)은 일반적으로 실내인 경우 80%, 실외인 경우 20%를 적용한다. 그런데, 실제 라돈에 의한 폐의 영향을 유효선량으로 나타내고자 할 때에는 방사선 가중치($W_R=20$) 및 조직 가중치($W_T=0.12$)를 고려하여야 한다.

모든 통계분석은 유의수준 0.05수준에서 분석하였고 분석을 위해 사용한 프로그램은 SPSS 18.0을 사용하였다.

III. 연구결과

1. 측정장소별 라돈농도 및 유효선량 수준

전체 12개 사업장의 라돈농도는 기하평균으로 14.3 (GSD 2.7) Bq/m^3 (0.7~115.8 Bq/m^3) 이었고 산술평균으로는 $20.6 \pm 17.0 Bq/m^3$ 이었으며 폐를 표적기관으로 한 조직 및 방사선 가중치를 고려한 IAED 범위는 0.01~1.45 mSv/yr 이었다. 측정장소를 사무동과 공장동으로 구분했을 때, 라돈농도는 기하평균으로 사무동 14.2(2.6) Bq/m^3 , 공장동 10.1(3.2) Bq/m^3 로 나타났다(Table 1).

사무동을 층(floor)별로 구분하여 라돈농도 수준을 보면, 기하평균으로 1층 17.0 Bq/m^3 , 2층 14.1 Bq/m^3 , 3층 13.8 Bq/m^3 이었고 산술평균으로 1층 $25.6 \pm 22.9 Bq/m^3$, 2층 $19.1 \pm 12.9 Bq/m^3$, 3층 $16.6 \pm 9.9 Bq/m^3$ 으로 나타나 층수가 올라갈수록 약간씩 라돈농도가 낮아지는 추세를 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다 ($p < 0.05$).

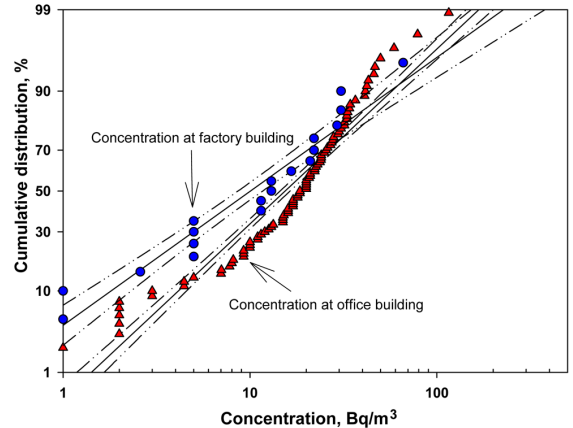


Figure 1. Lognormal distribution of radon sampled by sampling location

라돈의 농도분포는 대수정규분포 하였고 사무동의 회의실 등과 같이 자주 사용하지 않는 공간일수록 라돈농도가 높아지는 경향을 보였다(Figure 1). 사무동 및 공장동의 라돈농도 누적분포를 보면, 라돈농도 20.0 Bq/m^3 를 기준으로 낮은 농도 쪽에서는 공장동이 더 높고 높은 농도 쪽에서는 사무동이 더 높은 경향을 보였다.

2. 건축자재별 라돈농도 및 유효선량 수준

연구대상 사업장의 라돈농도에 영향을 미칠 수 있는 여러인자 중 건축물의 벽, 바닥 및 천장의 건축자재가 무엇인지에 따라 농도차이가 있는지 조사하였다. 이중 영향을 미치는 부분이 바닥 및 천장보다는 벽의 재질이 무엇이었냐에 따라 차이가 클 것으로 판단하였다. 벽의 재질은 석고보드, 시멘트, 콘크리트, 샌드위치 판넬 등으로 구성되어 있었다. 벽의 재질이

Table 1. Radon concentration and effective dose by sampling location

Sampling location (No. of sites)	Number of samples	Radon concentration(Bq/m^3)			IAED (mSv/yr)	
		GM(GSD)	AM \pm SD	Range		
Total	108	14.3(2.7)	20.6 ± 17.0	0.7~115.8	0.01~1.45	
Sub-total	89	14.2(2.6)	21.2 ± 17.3	0.7~115.8	0.01~1.45	
Office area (22)	1 floor	33	$17.0(2.9)$	25.6 ± 22.9	1.0~115.8	0.01~1.45
	2 floor	46	$14.1(2.5)$	19.1 ± 12.9	0.7~50.0	0.01~0.63
	3 floor	10	$13.8(1.9)$	16.6 ± 9.9	5.0~33.3	0.06~0.42
Factory area(3)	19	10.1(3.2)	16.4 ± 15.6	1.0~66.0	0.01~0.83	

* IAED : Indoor Annual Effective Dose

Table 2. Radon concentration and effective dose by wall materials of building

Materials of wall	Number of samples	Radon concentration(Bq/m ³)			IAED (mSv/yr)
		GM(GSD)	AM±SD	Range	
Total	108	14.3(2.7)	20.6±17.0	0.7~115.8	0.01~1.45
Gypsum	46	18.1(2.4)	23.6±15.5	0.7~78.8	0.01~0.99
Cement	16	9.6(2.8)	14.2±11.5	2.0~46.0	0.02~0.58
Concrete	24	14.9(2.6)	21.6±22.3	1.0~115.8	0.01~1.45
Sandwich panel	22	10.6(3.0)	16.5±14.8	1.0~66.0	0.01~0.83

* IAED : Indoor Annual Effective Dose

석고보드인 경우 기하평균은 18.1(2.4) Bq/m³로 가장 높았고, 그 다음은 콘크리트 14.9(2.6) Bq/m³순으로 높았으며, 시멘트인 경우가 샌드위치 판넬보다 더 높을 것으로 판단되었으나, 더 낮게 나타났다(Table 2). 벽의 재질이 샌드위치 판넬인 경우는 대부분 공장동의 벽 재질이었으나 공장의 바닥은 대부분 콘크리트 형태이어서 이로 인한 영향을 배제할 수 없었다. 벽의

재질에 따라 라돈농도의 평균에 차이가 있는 것으로 나타났고 통계적으로도 유의하였다(p<0.05).

건축재료별 라돈농도 누적분포를 보면, 벽의 재질이 샌드위치 판넬인 경우 자료의 퍼짐정도가 크게 나타났다. 이것은 벽의 재질이 샌드위치 판넬로 설치된 건물은 대부분 공장동으로 공장 내 기기배치 및 작업형태에 따라 라돈농도분포에 영향을 준 것으로 판단되었다(Figure 2). 그러나 공장동을 제외하고 사무동에 대해서만 벽의 재질과 라돈농도를 비교해보면, 유의하게 재질(석고보드, 콘크리트, 시멘트)에 따라 평균농도에 차이가 있음을 알 수 있었다.

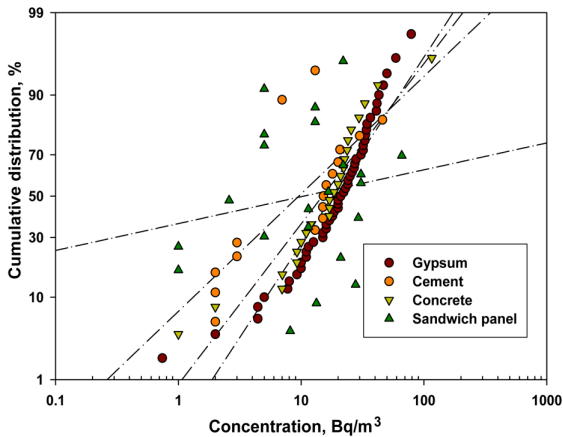


Figure 2. Comparison of cumulative distribution of radon by building materials

3. 측정방법별 라돈농도

연구대상 사업장의 라돈농도를 측정함에 있어 두 가지 측정방법을 병행하였다. 즉 단기측정방법인 직독식 측정장비에 의한 48시간 동안 연속측정방법과 장기측정방법인 알파트랙에 의한 3개월 동안 시간적분 측정방법을 적용하였는데, 두 방법간 측정된 평균농도 사이에 차이가 있는지 조사하였다(Table 3). 두 방법간 독립표본 t-검정결과, 라돈의 평균농도 사이에는 차이가 없는 것으로 분석되었다(p<0.05).

Table 3. Radon concentration and effective dose by monitoring methods

Monitoring methods	Number of samples	Radon concentration(Bq/m ³)			IAED (mSv/yr)
		GM(GSD)	AM±SD	Range	
Total	89	14.2(2.6)	21.2±17.3	0.7~115.8	0.01~1.45
Short-term measurements (48 hrs)	19	18.0(1.9)	22.7±18.0	7.0~78.8	0.09~0.99
Long-term measurements (3 months)	70	14.8(2.7)	21.2±17.1	0.7~115.8	0.01~1.45

* IAED : Indoor Annual Effective Dose

IV. 고 찰

연구대상 사업장의 사무동에서 근무하는 근로자의 라돈농도는 21.1 ± 17.2 Bq/m³ 이었고, 공장동에서 근무하는 근로자는 16.4 ± 15.6 Bq/m³ 이었으며 평균 유효선량 수준으로는 각각 0.33 mSv/yr, 0.26 mSv/yr 이었다. 국립환경과학원이 겨울철(2013.12~2014.2) 3개월 동안 전국 주택 6,648호를 대상으로 겨울철 라돈농도를 조사한 결과, 평균농도는 102 Bq/m³이었고 주택형태별로는 토양의 영향을 많이 받는 단독주택의 경우 134 Bq/m³로 가장 높았으며, 연립·다세대주택 79 Bq/m³, 아파트 56 Bq/m³ 순으로 나타났다. 또한, 지역별로는 전라북도·강원도가 평균 138 Bq/m³, 충청북도가 133 Bq/m³로 나타났으며, 이 같은 라돈 수치는 이 지역에 옥천층, 화강암반 지질대가 넓게 분포하기 때문인 것으로 보고하였다(NIER, 2015). 본 연구에서도 주택에서와 마찬가지로 높을 것으로 판단되었으나 낮게 나타난 이유는 다음과 같은 원인에서 찾아볼 수 있다. 첫 번째는 주택형태별 농도분포에서도 토양의 영향을 받는 단독주택보다는 아파트에서 낮게 나타났듯이 산업 단지내 사무동 및 공장동의 경우에도 콘크리트 등 건축자재로 차단되어 있어 지질의 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단되었고 두 번째는 사무동 및 공장동은 주택보다 인구이동이 많고 작업동선에 따라 생산활동이 자주 이루어져 공기교환이 잘된다고 볼 수 있다. 세 번째는 측정시점이 여름철이어서 상대적으로 낮은 농도분포를 보인 것 같다. 즉 측정시점에 의한 계절적인 차이에 기인한 것으로 추정되었다. 계절별 라돈농도의 크기는 겨울철 > 가을철 > 봄철 > 여름철의 순으로 나타나는 것으로 알려져 있다(Son et al., 2012; Kang et al., 2013).

지하철에 대한 공기 중 라돈농도 조사는 1기 지하철(1호선~4호선)을 대상으로 최초 실시하였고(Kim et al., 1993), 1991년 1월부터 1999년 5월에는 5호선 8개 역사, 7호선 9개 역사의 승강장, 대합실, 역무실, 외기 라돈 농도를 측정하였고(Lee et al., 2004), 산업안전보건연구원에서 2008년 4개 지하철 공사의 117개역을 대상으로 터널 내 라돈 농도를 측정된 결과, 지하철 터널 내 라돈농도가 환경부 실내공기질 관리기준인 148 Bq/m³를 초과하는 측정개소는 22개이었고 지하철 승강장 14개소에서 라돈농도가 관리기준

을 초과하는 장소는 1개소이었다(Yim et al., 2008). 학교의 경우 미세먼지 농도는 학생들의 활동이 많은 시간대 높았으며 라돈은 학생들의 하교후에 높은 것으로 조사되었다(Kim et al., 2000). 1999년 4월과 5월에 걸쳐 서울시내 15개 초등학교를 대상으로 알파비적검출기를 이용하여 실내 라돈농도를 측정하였는데, 측정지점의 평균농도는 0.92 ± 0.82 pCi/L(34.0 Bq/m³)의 수준이었다. 이것을 시간대별로 보았을 때 밤 시간대가 낮시간대보다 높았으며 주변의 공사여부는 라돈농도에 영향을 주는 것을 볼 수 있었다. 그리고 지질구조에 따라 라돈의 농도는 화강암 > 편마암 > 층적층 순으로 나타났다(Shin et al., 1999; Kim et al., 2002). 일반적으로 라돈의 경우 미세먼지와 반대로 지하가 지상보다 높게 측정되는 것으로 보고하고 있다(Kim & Paik, 2002). 반면에 주택, 관공서, 초등학교를 대상으로 한 연구에서는 지하공간이 있는 곳보다 지하공간이 없는 곳의 라돈농도가 높았다(Son et al., 2014). 또한, 자연환기에 의존하고 있는 견운모 및 연·아연 광산이 각각 7,770 Bq/m³, 3,700 Bq/m³이었으며 강제환기를 하고 있는 석탄광산이 370~555 Bq/m³이었고 지하 석회석 광산이 74 Bq/m³로 대부분 환경부 관리기준을 초과하는 것으로 나타났다(Choi et al., 2000). 이와 같이 어떤 장소의 라돈농도 수준이 여러 가지 다양한 측정 및 환경조건 등에 좌우됨을 알 수 있다.

실내 라돈농도의 수준에 영향을 미치는 인자로서 환기는 중요하다. 연구대상 사업장 1개소 외에는 공조시설이 없고 단지 냉난방 송풍기나 창문을 이용한 전체환기 방식이어서 강제환기 여부에 따른 라돈농도의 차이를 비교하기에는 불가능하였다. 공조시설이 있다하여도 냉방을 이유로 가동하지 않고 있었다. 평가시점이 여름이라서 사무실 문 및 창문을 개방하거나 냉방시설을 가동하여서 라돈농도 수준을 낮추는데 기여했다고 볼 수 있다.

국립환경과학원에서 다중이용시설의 내벽 마감재 종류에 따른 라돈농도 변화를 보기 위하여 콘크리트, 회반죽, 타일, 목재, 벽지, 뽀칠재, 석고보드 등으로 구분하여 평균 라돈농도를 조사한 결과, 회반죽 43.8 ± 27.1 Bq/m³, 벽지 38.3 ± 30.0 Bq/m³, 뽀칠재 30.6 ± 13.9 Bq/m³, 콘크리트 26.6 ± 17.7 Bq/m³, 석고보드 24.2 ± 13.2 Bq/m³ 등의 순으로 나타나 오히려 석고보

드가 낮은 것으로 조사되었다. 일반적으로 석고보드는 라돈의 모핵종인 ^{226}Ra 함량이 가장 많은 건축자재로 대부분 라돈농도가 높게 나타나는데 낮은 것은 시료수가 적은 것을 이유로 들고 있다(NIER, 2011). 본 연구에서는 벽 재질이 석고보드인 경우 가장 높았다. 이것은 석고보드의 원료로 지금은 탈황석고를 주로 사용하고 있으나 2014년 이전에는 인산부산석고를 사용한다기 때문이다. 그리고 연구대상 사업장이 2007년 이전에 설립된 건물로 벽 재질이 인산석고를 주로 사용하고 있다. 인산석고에 함유된 천연방사성물질이 라돈농도에 영향을 주었으리라 생각된다.

라돈에 의한 방사선의 영향을 유효선량으로 나타내 고자 할 때에는 알파입자인 경우 방사선 가중치($W_R=20$)와 라돈에 의한 표적장기인 폐에 대한 조직가중치($W_T=0.12$)를 고려하여 산출된 IAED값에 두 가중치를 곱해야 한다. 그러므로 조사대상 사업장 근로자의 라돈노출에 따른 연간 평균유효선량은 0.31 mSv/yr 정도이다. 이것은 순수하게 하루 8시간의 노출만을 고려한 것이다. 세계에서 라돈흡입에 의한 연간 평균유효선량은 1.2 mSv/yr 이지만, 어떤 작업환경 또는 측정조건이냐에 따라 이보다 더 많은 라돈에 노출되고 있다고 할 수 있다. 본 연구는 일정한 시점을 두고 라돈농도가 높다고 평가한 특정지역에 대해 측정한 결과이므로 우리나라 전체 사업장을 대표하기에는 부족하지만 국내에서 처음으로 산업단지 내 제조업 사업장의 사무동 및 공장동에 대한 라돈농도 수준 및 방사선 유효선량을 평가한 데 의미가 있다.

V. 결 론

전북지역에 위치하고 있는 제조업체 12개 사업장의 사무동 22개소와 공장동 3개소에서 실시한 라돈농도 측정결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 조사대상 사업장에서 측정한 라돈농도는 환경부 관리기준(148.0 Bq/m^3)을 초과하는 경우는 없었으며 사무동 및 공장동에서 근무하는 근로자의 라돈농도는 $20.6 \pm 17.0 \text{ Bq/m}^3$ 이었다.
2. 측정장소별 라돈농도는 사무동이 공장동 보다

더 높았고 사무동을 층별로 분류한 라돈농도 수준은 1층> 2층> 3층>의 순으로 높았으나, 통계적으로는 유의하지 않았다.

3. 건축자재별 라돈농도는 석고보드> 콘크리트> 시멘트 순으로 차이가 있었으며, 단기 및 장기 측정 방법간 라돈의 평균농도는 차이가 없었다($p<0.05$).

4. 공장동 및 사무동에서 일하는 근로자의 라돈농도 노출로 인한 연간 유효선량 범위는 0.01~1.45 mSv/yr이었다.

References

- Choi BS, Kang DH, Park YU, Shin YC. Cancer of the lung evaluation and assessment of risk of mining workers : exposure levels of carcinogen agents. Research Report of Occupational Safety and Health Research Institute(Pub. No. S-RD-2000).; 2000. p. 51-53
- Je HK. Overview of recent radon policy and radon industry in and outside the country. Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering. 2010; 47(3) : 400-405
- Jeon JS, Kim DC. Distribution of radon concentration in Seoul subway stations. J of KSEE 2006; 28(6): 588-595
- Jeon JS, Kim DC, LEE JY. Temporal variations and sources of Rn-222 in subway stations. J. of KSEE 2007; 29(11):1231-1242
- Kang CH, Ko HJ, Sin SH, Hu CG, Kim WH et al. Time-series variation of atmospheric radon concentrations at Gosan site, Jeju island. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 2013; 29(1):86-96
- Kang YH, Park JS, Kim DS. Radon measurement by alpha particle track method. Journal of Radiation Protection and Research 1982;7(1):17-22
- Kim DS, Kim YS, Kim SD, Shin EB, Kim SC et al. Concentration distributions and a reduction strategy of airborne radon in Seoul metropolitan subway stations. J. KAPRA 1993;9(4):271-277
- Kim SA, Paik NW. A study on indoor radon concentrations in urban area. Kor. J. Env. Hlth. Soc. 2002;28(2): 89-98
- Kim YS. Indoor radon levels in four different areas in Korea. Journal of Korean journal of environmental health society 1990; 16(1):1-7
- Kim YS, Kim HT, Lee CM, Jang KS, An JH. A study on distribution of particulate and radon concentrations in

- indoor environment in Seoul city. Journal of Korea Society For Atmospheric Environment 2000; 2:365-366
- Lee CM, Kim YS, Kim JC, Jeon HJ. Distribution of radon concentration at subway station in Seoul, J Environ Health Sci. 2004; 30(5): 469-480
- NIER(National Institute of Environmental Research). Nationwide survey(2009-2010) of indoor radon at home in Korea- Public facilities. Ministry of Environment(NIER-RP2012-233). 2011. p.1-37
- NIER(National Institute of Environmental Research). Nationwide survey(2013-2014) of indoor radon at home in Korea- Public facilities. Ministry of Environment. 2015. Available from: <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=495570&menuId=286>
- Ohio Department of Health. Indoor radon program; School radon testing checklist. Bureau of Environmental Health and Radiation Protection.; 2008. p.1-6. Available from : [https://www.odh.ohio.gov/~media/ODH/ASSETS/Files/eh/school%20environmental%20health/schoolradon testingchecklist.pdf](https://www.odh.ohio.gov/~media/ODH/ASSETS/Files/eh/school%20environmental%20health/schoolradon%20testingchecklist.pdf)
- Paik NW, Chung MH. Assessment of underground air quality and identification of asbestos containing material. Korea Foundation for the Advancement of Science and Creativity(R01-2001-000-00227-0); 2003. p. 1-40
- Seo SY, Yoo JH, Kim HD, Lee KS, Oh SJ et al. A study on the spatial distribution characteristics of indoor radon level in Korea. National Institute of Environmental Research(NIER-RP2012-234).; 2012. p.1-32
- Shin DC, Park SE, Kim JY. Health risk of radon in schools. The Environment Education 1999; 12(2): 81-90
- Son BS, Lee KS, Seo SY, Kim YJ, Choi KH. A Study on the indoor radon concentration of elementary school in Korea. Journal of Korean Society for Indoor Environment 2012; 9(2): 127-133
- Son BS, Woo KS, Oh SJ, Park HJ, Seo SY et al. A study on the concentration of radon for house, government office and school in Chungnam area. Journal of Odor and Indoor Environment 2014;13(1):73-79
- Tirmarche M, Harrison JD, Laurier D, Paquet F, Blanchardon E et al. Lung cancer risk from radon and progeny. ICRP Publication 115. 2010. ICRP 37 (11-56).
- Yim SH, Choi SJ, Lee YK. A study on radon exposure in air and management strategies for underground workers. Research Report of Occupational Safety and Health Research Institute(Pub. No. 2006-223-945).; 2008. p. 120-124