Journal of Radiation Industry 12(3) : 223~231(2018)

일개 대학 강의실의 실내 라돈농도 및 연간유효선량 평가

이 재 승[1] · 양 성 환[2] · 권 대 철[3,*]

[1]세계아이티(주) 기업부설연구소, [2]한국복지대학교 의료보장구과,
[3]신한대학교 바이오생태보건대학 방사선학과

Assessment of Indoor Radon Concentration and Annual Effective Dose in a University Lecture Room

Jae-Seung Lee[1], Sung Hwan Yang[2] and Dae Cheol Kweon[3,*]

[1]*Research Institute of R&D Center, Segei Inspection Engineering Technology Co., Ltd., Ulsan, 44252, Republic of Korea*
[2]*Department of Prosthetics & Orthotics, Korea National University of Welfare, Pyeongtaek, 17738, Republic of Korea*
[3]*Department of Radiological Science, College of Bioecological Health, Shinhan University, Uijeongbu, 11644, Republic of Korea*

Abstract - The purpose of this study is to evaluate the effective dose of radon by radon exposure by measuring the concentration of radon in university lecture room. The measurement of radon concentration was made in two lecture rooms on the first floor of reinforced concrete structure from March to May, 2018. On weekends when there was no use of the lecture room, it was measured for 24 hours in a closed state for 12 hours before measurement, and continued for 12 hours in 12 hours and 12 hours in continuous for 5 weeks. The indoor radon concentration was measured by a radon meter and an analysis program, and the indoor radon concentration per unit time was converted in real time. The annual effective dose and the continuously measured radon concentration due to radon inhalation were analyzed for mean and standard deviation, coefficient of variation, indoor radon concentration range, and quartile range. The closed lecture room radon concentration was estimated to be 67~81.8 Bq·m^{-3} (mean 74.5±6.65 Bq·m^{-3}) and the effective dose per year was 0.289~0.353 mSv·y^{-1}. The average radon concentration in normal operation was 26.6~54 Bq·m^{-3} (mean 40.2±8.34 Bq·m^{-3}), which was 54% lower than the closed room. The mean radon concentration was 48.3±5.94 Bq·m^{-3} before the start of the academic year, 31.3±6.64 Bq·m^{-3}, the average radon concentration was 41.9±9.64 Bq·m^{-3}, 0.115~0.233 mSv·y^{-1}. Radon concentration 32.2~54 Bq·m^{-3} (average 45.7±5.2 Bq·m^{-3}) at 18:00 o'clock without the lecture at 09:00 the following day, quaternary range 43.9~48.8 Bq·m^{-3}, annual effective dose 0.190~0.211 mSv·y^{-1} respectively. Radon concentration was 26.6~40 Bq·m^{-3} (average 31.3±6.64 Bq·m^{-3}) from 09:00 am to 18:00 pm, which was reduced by 68.5% compared to the classroom without class, and the quartile range was 28.3~33.8 Bq·m^{-3}, and annual effective dose was 0.122~0.146 mSv·y^{-1}. The average radon concentration in the lecture room was 10 min resting time (31.8±6.54 Bq·m^{-3}) after lecture 50 minutes, 10 minutes resting time (32.3±7.18 Bq·m^{-3}) after 1 hour and 50 minutes lecture, and 0.008~0.013 mSv·y^{-1}. The average indoor radon concentration of 40.2±8.92 Bq·m^{-3}

* Corresponding author: Dae Cheol Kweon, Tel. +82-31-870-3411, Fax. +82-31-870-3419, E-mail. dckweon@shinhan.ac.kr

for 2 hours and 50 minutes of continuous use in classroom, the annual effective dose of 0.01～0.016 mSv·y^{-1} for 50 minutes or 1 hour 50 minutes, indoor radon concentration and annual effective dose of about 30% respectively. The radon concentrations in the lecture room were measured at lower levels than the indoor radon concentration control standards, and the hazard coefficients from the radon inhalation in these environments were evaluated to be lower than the population mean life time cancer risk.

Key words : Radon and its progeny, Indoor annual effective dose, Equilibrium equivalent concentration, Detriment coefficient

서 론

라돈(radon: ^{222}Rn)은 지각 내 존재하는 자연방사성원소(natural radioactive element) 중 우라늄 계열(uranium series: ^{238}U)의 붕괴 생성물인 라듐(radium: ^{226}Ra)이 자발적으로 붕괴하여 생성되며 3.82일의 짧은 반감기로 폴로늄(polonium: ^{218}Po)으로부터 안정된 원소인 납(plumbum: ^{206}Pb)까지 붕괴하는 과정에서 ^{218}Po, ^{214}Po, 비스무스(bismuth: ^{214}Bi), ^{214}Pb와 같은 입자상의 라돈 자손을 생성한다(Font *et al*. 2003; United States Environmental Protection Agency 2016; Chalupnik *et al*. 2017). 이러한 붕괴 생성물들은 능동적 확산 이동이나 대기 압력과 온도에 의한 대류 이동을 통해 인간의 생활권으로 방출되며 호흡을 통해 체내 유입된다(Park *et al*. 2018). 체내 유입된 라돈과 라돈 자손들 중에서 불활성 기체인 라돈은 생체 구성 분자들과 화학적 반응이 일어나지 않고 대부분 체외로 배출되지만 하전 입자(charged particle) 형태의 라돈 자손들은 대기 중에 존재하는 먼지 또는 에어로졸(aerosol) 형태의 응축핵(condensation nucleus)과 화학적으로 결합하여 호흡을 통해 폐의 표면(pulmonary surface), 기관지(bronchus), 폐포(pulmonary alveoli) 등에 흡착되고 단시간 내 고 에너지의 알파선, 베타선, 감마선을 방출함으로써 체내 생물학적 장해를 유발한다(Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency 1983; International Commission on Radiological Protection 1987; Miles 1998; United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation 2016).

조직 내 알파선의 물리적 특성은 1 μm의 비적(track) 당 약 60～230 keV의 매우 높은 에너지를 조직 내 세포들에게 부여하고 생체 구성 원자들을 빈번하게 무리지어 전리(ionization) 시키기 때문에 조직 내 비정이 약 50～90 μm로 매우 짧고 10 μm 미만의 세포를 2～10개 정도 투과하기 어렵다(International Commission on Radiation Units and Measurements 2011). 라돈 자손 중 218Po과 214Po은 각각 6 MeV, 7.69 MeV의 알파선 에너지를 폐의 기저세포(pulmonary basal cell)에 부여하고 세포사 또는 염색체 돌연변이를 유도하는 과정에서 암원유전자(oncogene)의 발현되어 폐암 발생 위해 계수(detriment coefficient)가 증가되는 것으로 보고되었다(Little *et al*. 1985; United States Environmental Protection Agency 2003; World Health Organization 2007; World Health Organization 2009; United States Environmental Protection Agency 2016). 이와 관련하여 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 및 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 위험 투사 모델(risk projection model)을 적용하여 체내 흡입된 라돈 자손에 기인된 폐암 발생 위해 계수를 역학적으로 평가한 결과를 기반으로 전 세계적으로 발생한 폐암의 약 3% 내지 14% 정도가 라돈 노출과 밀접한 연관성이 있다고 판단하였으며 라돈과 라돈 자손을 1군 발암 물질로 규정하고 흡연에 이어 두 번째 폐암 원인 물질로 지정하고 있다(International Agency for Research on Cancer 1988; World Health Organization 2007; World Health Organization 2009). 또한 미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency USEPA)의 보고서에 따르면 미국 내 폐암에 의한 연간 사망자 중 약 2만 명(10%) 정도는 라돈과 라돈 자손에 지속적으로 노출되어 사망한 것으로 보고하고 있으며(United States Environmental Protection Agency 2003, 2016) 국내의 경우 한국환경정책평가연구원(Korea Environment Institute, KEI)의 정책 보고서에 따르면 연간 국내 폐암 사망자 15,625명 중 12.6%가 실내 라돈 노출에 의한 초과 폐암 사망자로 추정하고 있다(Shin *et al*. 2014).

최근 인간의 생활권으로 유입된 라돈에 대한 보건상의 영향을 규명하기 위하여 사람 집단에서 일어나는 현상을 관찰하고 이를 통계적 관점에서 인과관계를 규명하려는 역학적 연구들이 다양하게 시도되었다(Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency 1983; Little *et al*. 1985; International Commission on Radiological Protection 1987; United States Environmental Protection Agency 2003; United States Environmental Protection Agency 2016; World Health Organization 2007; World Health Organization 2009; International Commission on Radiation Units and Measurements 2011; United Nations

Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation 2016). 이러한 연구 결과들을 토대로 USEPA는 라돈에 의한 건강 영향 및 비용-효과 분석, 라돈 저감 기술 수준 등을 고려하여 실내 라돈농도 관리 기준을 148 $Bq \cdot m^{-3}$로 제시하였으며 WHO는 200 $Bq \cdot m^{-3}$ 이하의 라돈농도에서 폐암 발생 위해 계수에 영향을 미칠 수 있다고 판단하여 2009년부터 라돈에 의한 피해 예방 및 건강 증진을 목적으로 실내 라돈농도를 100 $Bq \cdot m^{-3}$로 관리하도록 권고하고 있다(United States Environmental Protection Agency 2003; World Health Organization 2007). 국내의 실내 라돈농도 관리 기준은 USEPA 권고 기준과 동일하게 적용되고 있다(National Institute of Environmental Research 2016). 그러나 실내 라돈농도 및 라돈에 의한 보건상의 위해 정도는 지역의 지질학적 특성, 건축물의 유형 및 용도, 거주하고 있는 사람의 생활 습관, 시·공간적 환경 등에 따라 매우 큰 폭으로 변화될 수 있기 때문에 주기적으로 실내 라돈농도를 측정하여 관리 기준 이하로 실내 라돈농도를 유지하고 라돈 노출에 의한 위해를 저감화하기 위한 적극적 노력이 매우 중요하다(Tirmarche *et al*. 2010).

기존 라돈에 대한 연구에서 종합병원의 라돈농도를 알파비적검출기를 이용하여 측정하여 보고하였고(Ryu *et al*. 2018), 대학교의 강의실은 장시간 라돈에 노출가능성이 있어 지속적 관리가 필요성에 대한 연구가 있었고(Ryu 2008), 또한 라돈의 실내 라돈농도에 대한 저감 연구가 이루어져 왔다(Park *et al*. 2014).

본 연구는 다른 다중이용시설과 비교하여 단위 면적 당 인구 밀도가 높고 밀폐된 실내에서 체류 시간이 길면서 유동성이 상대적으로 적은 대학 내 강의실을 대상으로 강의실 운영 환경에 따른 실내 라돈농도의 변화를 측정하고 대학생들의 실내 라돈 피폭에 의한 연간유효선량을 평가함으로써 대학 내 강의실에 대한 라돈 관리의 필요성을 검토하고자 한다.

연구 및 방법

1. 연구 대상

연구는 대학 강의실 운영 환경에 따른 실내 라돈농도를 측정하기 위하여 통상적인 학사 일정이 운영되는 2018년 03월부터 05월까지 경기도 소재 일개 대학의 강의실을 대상으로 수행되었다. 측정 장소는 지역의 지질학적 특성, 건축 구조물의 특성, 대학생들의 생활 습관, 공간적 환경 등에 따른 실내 라돈농도의 의존성을 배제하기 위하여 2002년에 철근 콘크리트 구조로 건축된 일개 단과대학 1층에 위치한 2개의 강의실로 하였다. 강의실은 83.7 m^2이었고, 강의실 내부는 출입문, 창문, 천장형 에어컨 등 동일한 환기 시설이 구비 되어 있었다.

2. 측정 장비 및 방법

대학 강의실 운영 환경에 따른 실내 라돈농도를 측정하기 위한 조건은 다음과 같이 설정되었다. 첫째, 학사 일정이 없어 밀폐된 상태에서 사용되지 않은 강의실 라돈농도를 측정하기 위하여 강의실 사용이 없는 토요일 또는 일요일을 정하여 측정 전 12시간 동안 밀폐된 상태를 유지한 후 24시간 동안 연속적으로 측정하였다. 둘째, 통상적인 학사 일정에 따라 운영되는 강의실 라돈농도를 측정하기 위하여 일일 8시간 이상 강의실이 운영되는 매주 수요일을 정하여 강의실 사용 전 12시간부터 사용 종료 후 12시간까지 32시간 동안 연속적으로 측정되었으며 강의 중 별도의 환기 절차는 진행되지 않았고 강의 종료 후 출입문 또는 창문이 개방되었다. 셋째, 연속된 강의에 따라 밀폐 시간이 다른 강의실 라돈농도를 측정하기 위하여 총 3시간의 강의 시간을 각각 50분 수업 후 10분간 휴식, 1시간 50분 수업 후 10분간 휴식, 그리고 2시간 50분 수업 후 10분간 휴식하는 학사 일정으로 라돈 피폭 시나리오를 설정하였으며 강의 시간은 출입문 및 창문을 닫고 휴식 시간은 출입문을 개방하는 조건으로 강의 시작 전 3시간부터 강의 종료 후 3시간까지 9시간 동안 연속적으로 측정하였다.

대학 강의실 운영 환경에 따른 실내 라돈 측정은 총 5주간 반복적으로 진행되었다. 모든 측정은 주변 환경에 의한 영향을 최소화하기 위하여 환경부 실내 공기 중 라돈 측정 지침(Ministry of Environment Korea 2000)에 따라 햇빛이 비치거나 습도가 높은 곳을 피하고 창문으로부터 6 m 떨어진 강의실 중앙에서 바닥으로부터 80 cm 정도 이격시킨 동일 측정 지점에서 수행되었다. 측정 기간 동안 별도의 환기 제어 장치는 가동되지 않았으며 실외 기압의 변화가 심하거

Fig. 1. Shows the Radon and Radon daughters measuring instrument used to measure the indoor Radon concentration in this study.

나 바람이 심하게 부는 날은 측정에서 제외되었다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 라돈 측정기(RAD7, Durridge Co., Boston, USA)를 이용하여 측정하였고, 표준 모드에서 1 L·min^{-1}의 속도로 흡입된 기체 시료는 흡착제와 필터를 거치면서 수분 및 입자 물질들이 제거되고 순수한 라돈 기체가 선택적으로 0.7 리터의 반구 형태의 표준화 공간에 유입된다. 표준화 공간 내에서 2,200 V 인가전압에 의해 유입된 라돈 기체가 붕괴되면서 생성되는 하전 입자상의 라돈 자손들은 실리콘 검출기 표면에 포집되며 이 때 방출된 알파선을 탐지하여 가시적인 값으로 변환된다(Durridge 2017). 일정 시간 동안 연속적으로 측정된 실내 라돈농도에 대한 자료 분석은 전용 분석 프로그램(Capture Ver. 5.5, Durridge Co., Boston, USA)을 이용하여 연속적 실내 라돈농도 분포를 분석하였으며 단위 시간 당 실내 라돈농도를 실시간으로 변환하였다.

3. 실내 라돈 피폭에 의한 연간유효선량 평가

본 연구에서 실내 라돈 흡입에 의한 연간유효선량(indoor annual effective dose, D_{Rn})은 다음 식(1)과 같이 환산하여 평가하였다(International Commission on Radiological Protection 1991; United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation 2000; Pan 2003; Li *et al*. 2006).

$$D_{Rn} = C_{eq} \times F_{dc} \times T_a \quad (1)$$

여기서 C_{eq}는 평형등가농도(equilibrium equivalent concentration), F_{dc}는 라돈 선량 환산 계수(radon dose conversion factor), T_a는 연간 실내 거주 시간(annual indoor hours)이다. 평형등가농도(C_{eq})는 라돈과 단수명의 라돈 자손 사이의 혼합에서 실제의 비평형 혼합과 동일한 잠재 알파에너지(potential alpha energy concentration, C_p)를 가지는 평형 상태의 라돈농도로 정의되며 대학 내 강의실 운영 환경에 따라 측정된 라돈농도(radon gas concentration, C_{Rn})와 평형 인자(equilibrium factor, F)를 알면 다음 식(2)와 같이 구할 수 있다(International Commission on Radiological Protection 1991).

$$C_{eq} = F \times C_{Rn} \quad (2)$$

여기서 평형 인자(equilibrium factor, F)는 실내 라돈농도(C_{Rn})에 대한 평형등가농도(C_{eq})의 비로 정의되며 환기율에 따라 0.3 내지 0.7의 범위에서 실내 라돈은 0.4, 실외 라돈은 0.6을 적용할 것을 권고하고 있으며 본 연구에서는 실내 라돈 평형 인자 0.4를 적용하였다(International Commission on Radiological Protection 1991; United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation 2016). 선량 환산 계수(F_{dc})는 단위피폭 당 유효선량의 비로서 실내라돈을 기준으로 8 nSv·Bq·hr^{-1}·m^{-3}을 적용하였다(International Commission on Radiological Protection 1991; United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation 2000). 또한 연간 실내 거주 시간(T_a)은 일일 8시간, 주당 40시간, 학기 당 15주, 년간 2학기를 적용하여 총 1,200시간을 적용하거나 학사 일정에 따라 대학생들이 실제 강의실에 거주한 시간을 적용하였다.

4. 데이터 분석

일정 시간 동안 연속적으로 측정된 실내 라돈농도는 평균(m) 및 표준편차(SD), 변동계수(coefficient of variation, CV), 실내 라돈농도 범위(range), 사분위 범위(inter-quartile range, IQR)를 이용하여 분석하였다. 본 연구는 강의실 운영 환경에 따라 실내 라돈농도의 평균값이 급격하게 변화되기 때문에 표본 표준편차를 이용한 실내 라돈농도의 변화를 분석하기보다는 각 변수들의 표준편차를 표본 평균으로 나눈 변동계수를 이용하여 표본 평균 당 실내 라돈농도의 변화를 분석하였으며 변동계(CV)는 다음 식(3)과 같이 구하였다.

$$CV = \frac{SD}{m} \times 100\% \quad (3)$$

실내 라돈농도에 대한 범위(range)는 어떤 강의실 운영 환경에서 측정한 실내 라돈농도의 최대값(C_{Rn_max})과 최소값(C_{Rn_min})의 차로 정의하였다. 또한 n개의 데이터 $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ ($x_1 \leq \ldots \leq x_n$)을 크기에 따라 순차 배열하여 n을 수집 자료의 수, $x_{(n)}$은 n번째 값, 100등분하여 각 등분점에 위치하는 값을 p번째 백분위수($0 < p < 1$)라 할 때 백분위수 중에서 각각 25, 50, 75번째 백분위수를 각각 1, 2, 3사분위수(1st, 2nd, 3rd-quartile. Q_1, Q_2, Q_3)로 정의하였으며 실내 라돈농도에 대한 범위에서 데이터의 50%가 집중되어 있는 사분위 범위(inter-quartile range, IQR)를 다음 식(4)와 같이 구하였다.

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (4)$$

결 과

1. 강의실 사용 여부에 따른 라돈농도

Fig. 2는 학사 일정이 없어 밀폐된 상태에서 사용되지 않은 강의실과 통상적인 학사 일정에 따라 정상 운영되는 강의실에서 24시간 동안 연속적으로 측정한 실내 라돈농도의 변화를 보여준다. 출입문 또는 창문 등의 외부 환기 시설이 밀폐된 강의실 라돈농도는 최소 67.0 Bq·m^{-3}에서 최대 81.8

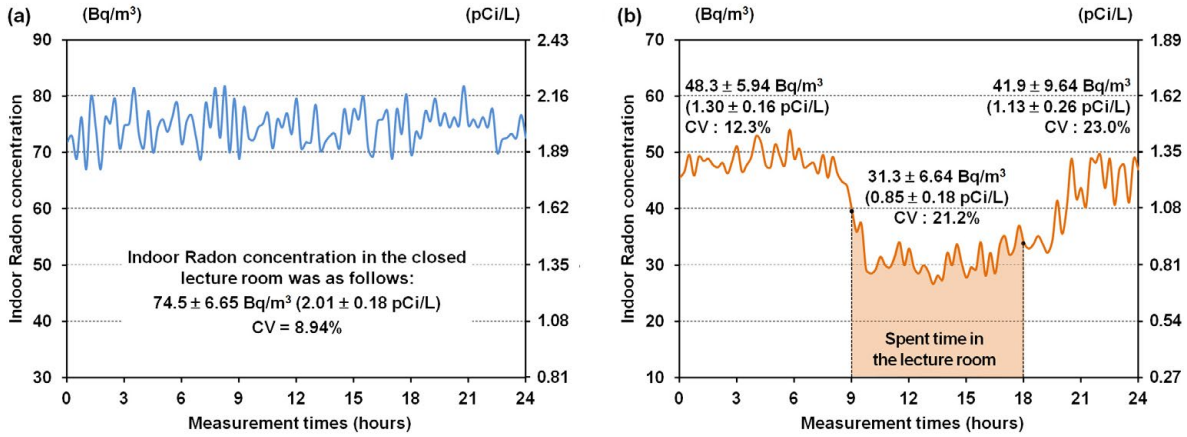

Fig. 2. Comparison results for the continuative indoor Radon concentration according to the with or without using by the lecture room during the 24 hours. (a) Closed lecture room due to the without schooling schedule, and (b) the lecture room usually operated used by with schooling schedule.

Table 1. Indoor Radon concentration (C_{Rn}) and annual effective dose (D_{Rn}) according to the with or without university's schooling schedule.

	Without schooling schedule[1)]		With schooling schedule[2)]	
	C_{Rn}	D_{Rn}[3)]	C_{Rn}	D_{Rn}
	$Bq \cdot m^{-3}$ ($pCi \cdot L^{-1}$)	$mSv \cdot y^{-1}$	$Bq \cdot m^{-3}$ ($pCi \cdot L^{-1}$)	$mSv \cdot y^{-1}$
Mean ± SD	74.5 ± 6.65 (2.01 ± 0.18)	0.289~0.353	40.2 ± 8.34 (1.09 ± 0.23)	0.115~0.233
Range[4)]	67.0~81.8 (1.81~2.21)		26.6~54.0 (0.72~1.46)	

C_{Rn}: indoor Radon concentration, D_{Rn}: annual effective dose.
[1)]The condition did not use the lecture room for a long time, and closed the ventilation facility of doors, windows, etc.
[2)]The condition were open to the lecture room on a schooling schedule.
[3)]Annual indoor time was assumed to be 1200 hours.
[4)]Means from the minimum to the maximum in the distribution of indoor Radon concentration.

$Bq \cdot m^{-3}$ 범위에서 평균 74.5 ± 6.65 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 측정되었으며 변동계수(CV)는 8.94%로 시간의 경과에 따라 일정한 강의실 라돈농도 분포를 보였다. 이러한 환경 내에서 실내 라돈 흡입에 의한 연간유효선량은 0.289 $mSv \cdot y^{-1}$에서 0.353 $mSv \cdot y^{-1}$로 예측되었다(Table 1).

통상적인 학사 일정에 따라 정상 운영되는 강의실 라돈농도는 최소 26.6 $Bq \cdot m^{-3}$에서 최대 54.0 $Bq \cdot m^{-3}$ 범위에서 평균 40.2 ± 8.34 $Bq \cdot m^{-3}$로 밀폐된 강의실과 비교하여 54% 수준으로 감소되었으며 변동계수(CV)는 20.7%로 급격한 실내 라돈농도 분포를 보였다. 특히 학사 일정이 시작되기 전까지 강의실 평균 라돈농도는 48.3 ± 5.94 $Bq \cdot m^{-3}$로 일정한 수준을 유지하고 있었으나(CV = 12.3%) 학사 일정이 운영되는 오전 09시부터 오후 18시까지 강의실 평균 라돈농도는 31.3 ± 6.64 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 급격하게 감소되다가(CV = 21.2%) 학사 일정이 종료된 이후부터 강의실 평균 라돈농도는 41.9 ± 9.64 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 급격하게 증가되는(CV = 23.0%) 경향을 보였다. 이러한 환경 내에서 라돈 흡입에 의한 연간유효선량은 0.115 $mSv \cdot y^{-1}$에서 0.233 $mSv \cdot y^{-1}$로 분석되었다(Table 1).

2. 일일 강의실 라돈농도의 변화

Fig. 3은 통상적인 강의실 운영 환경에서 대학생들이 수업에 참여하는 시간대와 수업이 없는 시간대에 대한 일일 강의실 라돈농도 분포를 보여준다. 오후 18시부터 다음 날 오전 09시 까지 수업이 없는 시간대의 강의실 라돈농도는 최소 32.2 $Bq \cdot m^{-3}$에서 최대 54 $Bq \cdot m^{-3}$까지의 범위에서 평균 45.7 ± 5.2 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 측정되었다. 변동계수(CV)는 11.4%로 비교적 일정한 강의실 라돈농도 분포를 보였으나 대수정규분포에서 예상되는 실내 라돈농도 분포보다 높은 농도를 보이는 경향이 있었다. 특히 강의실 라돈농도의 중앙 50% 범위를 의미하는 사분위수 범위(IQR)는 43.9 $Bq \cdot m^{-3}$에서 48.8 $Bq \cdot m^{-3}$까지 수준으로 측정되었으며 이 범위에서 라돈 흡입에 의한 연간유효선량은 0.190 $mSv \cdot y^{-1}$에서 0.211 $mSv \cdot y^{-1}$로 평가되었다(Table 2).

대학생들이 수업에 참여하는 오전 09시부터 오후 18시까지 강의실 라돈농도는 최소 26.6 $Bq \cdot m^{-3}$에서 최대 40.0 $Bq \cdot m^{-3}$까지의 범위에서 평균 31.3 ± 6.64 $Bq \cdot m^{-3}$로 수업이 없는 시간대의 강의실과 비교하여 68.5% 수준으로 감소되

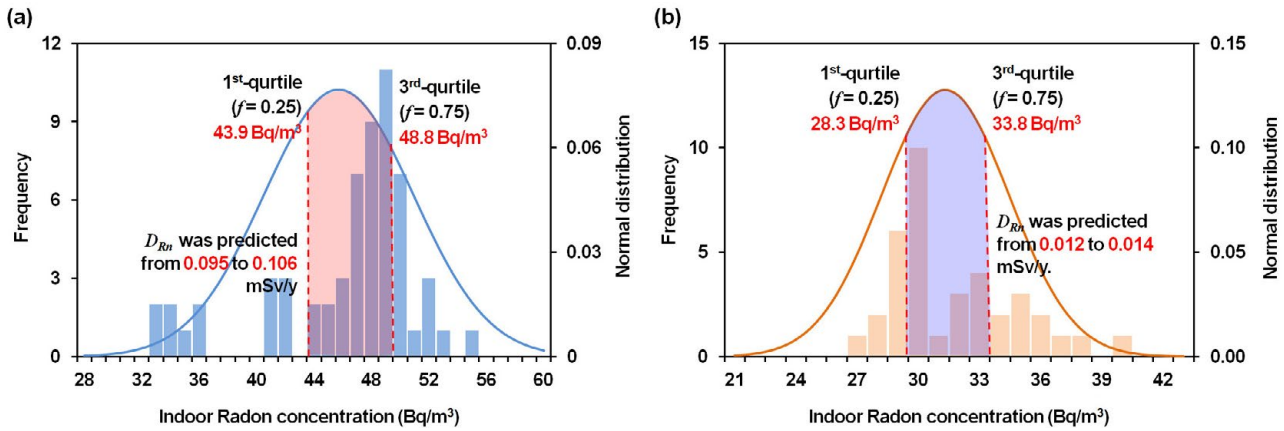

Fig. 3. In generally lecture room operating environment, variable distribution of daily indoor radon concentrations according to the with or without lecture times. (a) Time period with lecture, and (b) time period without lecture.

Table 2. Indoor Radon concentration (C_{Rn}) and annual effective dose (D_{Rn}) according to the with or without lecture times.

	Time period without lecture (From 18:00 PM the previous day until 09:00 AM today)		Time period with lecture (From 09:00 AM until the 18:00 PM today)	
	C_{Rn}	D_{Rn} [1)]	C_{Rn}	D_{Rn}
	$Bq \cdot m^{-3}$ ($pCi \cdot L^{-1}$)	$mSv \cdot y^{-1}$	$Bq \cdot m^{-3}$ ($pCi \cdot L^{-1}$)	$mSv \cdot y^{-1}$
Mean ± SD	45.7 ± 5.20 (1.24 ± 0.14)	0.139~0.233	31.3 ± 6.64 (0.85 ± 0.18)	0.115~0.173
Range*	32.2~54.0 (0.87~1.46)		26.6~40.0 (0.72~1.08)	
IQR†	43.9~48.8 (1.19~1.32)	0.190~0.211	28.3~33.8 (0.76~0.71)	0.122~0.146
CV‡	11.4%		21.2%	

C_{Rn}: indoor Radon concentration, D_{Rn}: annual effective dose.
[1)]Annual indoor time was assumed to be 1200 hours.
*Means from the minimum to the maximum in the distribution of indoor Radon concentration.
†Inter-quartile range (IQR) is a measure of statistical dispersion, being equal to the difference between 75th and 25th percentiles, or between upper and lower quartiles.
‡Coefficient of variation (CV) was defined as the ratio of the standard deviation to the mean.

Table 3. Indoor Radon concentration (C_{Rn}) and annual effective dose (D_{Rn}) depending on the continuous lecture times.

Radon exposure situation	C_{Rn}		D_{Rn} [1)]
	$Bq \cdot m^{-3}$	$pCi \cdot L^{-1}$	$mSv \cdot y^{-1}$
50-minute lecture, 10-minute break	31.8 ± 6.54	0.80 ± 0.18	0.008~0.012
1-hour and 50-minute lecture, 10-minute break	32.3 ± 7.18	0.86 ± 0.19	0.008~0.013
2-hour and 50-minute lecture, 10-minute break	40.2 ± 8.92	1.09 ± 0.24	0.010~0.016

C_{Rn}: indoor Radon concentration, D_{Rn}: annual effective dose.
[1)]Annual indoor time was assumed to be 90 hours.

었다. 변동계수(CV)는 21.2%로 비교적 급격한 강의실 라돈농도 분포를 보였으나 대수정규분포에서 예상되는 실내 라돈농도 분포보다 낮은 농도를 보이는 경향이 있었다. 특히 사분위수 범위(IQR)는 28.3 $Bq \cdot m^{-3}$에서 33.8 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 측정되었으며 이 범위에서 라돈 흡입에 의한 연간유효선량은 0.122 $mSv \cdot y^{-1}$에서 0.146 $mSv \cdot y^{-1}$로 평가되었다 (Table 2).

3. 강의실 연속 사용 시간에 따른 실내 라돈농도

Table 3은 각각 50분 수업 후 10분간 휴식, 1시간 50분 수업 후 10분간 휴식, 그리고 2시간 50분 수업 후 10분간 휴식하는 학사 일정으로 총 3시간 동안 실내 라돈 피폭 상황을 가정할 때 연속된 강의에 따라 밀폐 시간이 다른 강의실 라돈농도를 보여준다. 각각 50분과 1시간 50분간 강의실이 연속적으로 사용될 때 실내 평균 라돈농도는 각각 31.8 ± 6.54

$Bq \cdot m^{-3}$와 32.3±7.18 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 유사한 라돈농도 분포를 보였으며 이러한 피폭 상황에서 예상되는 연간유효선량은 0.008 $mSv \cdot y^{-1}$에서 0.013 $mSv \cdot y^{-1}$로 판단되었다. 그러나 2시간 50분간 강의실이 연속적으로 사용될 때 실내 평균 라돈농도는 평균 40.2±8.92 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 이러한 피폭 상황에서 예상되는 연간유효선량은 0.010 $mSv \cdot y^{-1}$에서 0.016 $mSv \cdot y^{-1}$로 판단되었으며 50분 또는 1시간 50분 라돈 피폭 상황과 비교하여 실내 라돈농도 및 연간유효선량이 약 30% 증가되었다.

고 찰

최근 국제방사선방호위원회(ICRP)는 실내 라돈 피폭에 대한 방사선 방호를 지속적으로 권고하고 있다(International Commission on Radiological Protection 1990; International Commission on Radiological Protection 2007). 라돈에 의한 방사선 피폭은 관리 또는 제어를 결정하는 시점에서 인간의 생활권에 이미 존재하고 있기 때문에 기존 피폭 상황(existing exposure situations)으로 간주하여 방호의 최적화(optimization of protection)를 달성하고 참고 준위(reference level)를 제한하는 방사선 방호 체계가 적용되고 있다(International Commission on Radiological Protection 2007). 여기서 방호의 최적화는 피폭 발생 가능성, 피폭 대상자의 수, 개인의 피폭 선량을 경제적·사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 유지(ALARA) 하자는 의미로서 방사선 방호에 포괄적으로 적용되고 있다(International Commission on Radiological Protection 2007). 따라서 본 연구에서 방호의 최적화는 지역의 지질학적 특성, 건축물의 유형 및 용도, 거주자의 생활 습관, 시·공간적 환경 등에 의존하는 실내 라돈농도를 정기적으로 측정하고 라돈 흡입에 의한 보건상의 위해 정도를 최소화하기 위한 자발적인 관리 행위(practice)로 해석할 수 있다(Tirmarche *et al*. 2010). 반면 참고준위는 최적화 절차에서 불공평한 결과를 미연에 방지하기 위하여 실내 라돈농도, 개인의 연간유효선량, 보건상의 위해 정도를 각각 제한하는 준위로서 규제기관의 적극적 개입(intervention)에 해당된다. 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR) 등의 많은 국제기관들은 일반인의 실내 라돈에 대한 참고준위를 200 $Bq \cdot m^{-3}$에서 600 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 제한하고 실내 라돈 피폭에 대한 방호의 최적화를 달성할 때 선량에 대한 제약 조건으로 설정하는 개인선량 상한치를 3 $mSv \cdot y^{-1}$ 내지 10 $mSv \cdot y^{-1}$로 권고하고 있다(United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation 2000; United States Environmental Protection Agency 2003; World Health Organization 2009).

본 연구에서 학사 일정이 없어 출입문 또는 창문 등의 외부 환기 시설이 밀폐된 상태에서 장시간 운영된 강의실의 평균 라돈농도가 74.5±6.65 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 가장 높게 나타났으며 이러한 운영 환경에서 라돈 흡입으로 예측되는 연간유효선량은 0.4 $mSv \cdot y^{-1}$ 미만으로 평가되었다. 이러한 결과는 실내 라돈에 대한 참고준위(200~600 $Bq \cdot m^{-3}$)와 비교하여 12.5%에서 37.5% 수준이었고 실내 라돈농도 관리 기준(148 $Bq \cdot m^{-3}$)과 비교하여 약 50% 수준으로 규제기관의 개입이 요구되는 준위는 아니지만 강의실 라돈농도 및 라돈에 의한 보건상의 위해 정도를 저감화하기 위한 실내 라돈 관리 방안이 필요할 것으로 판단되었다(International Commission on Radiological Protection 2007; National Institute of Environmental Research 2016).

국제방사선방호위원회(ICRP)는 실내 라돈농도를 적극적 또는 효율적으로 저감화하기 위한 방안으로 건물과 토양 사이의 압력 차이를 역 전환함으로써 라돈의 유입을 줄이는 토양 감압 방법, 라돈 가스 방출원을 제거하는 물 처리 또는 하부 토양 제거 방법, 라돈 가스의 실내 유입 경로를 차단하는 바닥 밀봉 방법, 환기율을 증대시켜 라돈 및 라돈 자손의 실내 농도를 희석시키는 환기 증대 방법, 필터나 실내 공기의 유동성을 증대시켜 라돈 자손 입자들을 부착시킴으로써 공기 중 라돈 자손의 농도를 감소시키는 공기 유동 증대 방법 등을 비용-효과 측면에서 상황을 고려하여 적절하게 적용할 것을 제안하고 있다(International Commission on Radiological Protection 2007; Korea Environment Corporation 2016). 따라서 본 연구에서 대학 내 방학 또는 공휴일 등 학사 일정이 없는 밀폐된 강의실에 대한 실내 라돈 관리 방안은 환기 증대 방법을 적용하여 국내 실내 라돈 관리 지침에 따라 일일 3회 이상, 1회당 30분 이상 실내를 환기시킬 수 있는 정기적 실내 라돈 관리가 필요할 것으로 판단되었다(Korea Environment Corporation 2016).

통상적인 강의실 운영 환경에서 대학생들이 수업에 참여하는 오전 09시부터 오후 18시까지 강의실 라돈농도는 평균 31.3±6.64 $Bq \cdot m^{-3}$ 수준으로 오후 18시부터 다음 날 오전 09시까지 수업이 없는 시간대의 강의실 평균 라돈농도 45.7±5.20 $Bq \cdot m^{-3}$와 비교하여 68.5% 정도 낮은 농도 분포를 보였다. 이러한 결과는 수업 시간과 휴식 시간이 반복적으로 진행됨에 따라 자발적인 강의실 환기가 이루어졌고 대학생들의 유동적 이동과 더불어 대류가 순환되는 과정에 기인되었을 것으로 판단되었다. 특히 통상적인 강의실 운영 환경에 따른 실내 라돈농도는 대수정규분포에서 예상되는 실내 라돈농도 분포보다 낮거나 높은 농도 분포를 보였으나 대학생들이 수업에 참여하는 시간대의 강의실 라돈농도 분포 중 중앙 50% 범위를 의미하는 사분위수 범위(IQR)가 28.3 $Bq \cdot m^{-3}$에서 33.8 $Bq \cdot m^{-3}$까지 수준으로 측정되었고 이 범위에서 라돈 흡입에 의한 연간유효선량은 0.122 $mSv \cdot y^{-1}$

에서 0.146 mSv·y^{-1} 정도로 평가되었다. 국제방사선방호위원회(ICRP)는 일반 공중에 대한 단위 유효선량(mSv) 당 실내 라돈에 의한 위해 계수를 7.3×10^{-5} mSv^{-1} 정도로 보고하였다(International Commission on Radiological Protection 1991; International Commission on Radiological Protection 2007).

본 연구 결과를 토대로 대학생들이 수업에 참여하는 시간대에 강의실 라돈 흡입에 따른 위해 계수는 8.4×10^{-6} 내지 1.3×10^{-5} 정도로 대학생 10만 명당 0.84명에서 1.3명이 암에 걸릴 확률로 평가되었다. 따라서 통상적인 강의실 운영 환경에 따라 대학생들이 수업에 참여하는 시간대에서 강의실 라돈 관리 방안은 요구되지 않을 것으로 판단되었다. 그러나 수업 시작 전 1시간부터 시작 후 1시간 동안 강의실 라돈농도가 오전 08시의 경우 49.2±3.98 Bq·m^{-3}, 오전 09시의 경우 39.7±5.26 Bq·m^{-3}, 오전 10시의 경우 28.3±3.13 Bq·m^{-3} 수준으로 급격하게 변화되기 때문에 매일 수업 시작 1시간 전부터 30분 이상 환기를 시킬 수 있는 정기적 실내 라돈 관리가 필요할 것으로 판단되었다. 또한 연속된 강의에 따라 강의실 밀폐 시간이 증가됨에 따라 강의실 라돈농도가 비례적으로 증가되기 때문에 강의실 라돈농도 및 라돈에 의한 보건상의 위해 정도를 저감화하기 위하여 50분 수업 후 10분간 강의실 공기를 환기시키는 학사 일정이 필요할 것으로 판단되었다.

건축연도에 따른 강의실의 라돈농도 연구에서 1973년 강의실은 33.5±4.7 Bq·m^{-3}, 2011년 강의실은 96.5±8.0 Bq·m^{-3}로 오래된 건물일수록 라돈농도가 낮게 검출되었다(Park *et al*. 2017). 또한 대학가 주변의 원룸에 대한 라돈농도 측정에서는 75.11 Bq·m^{-3}로 보고하였다(Lee *et al*. 2013). 본 연구에서는 밀폐된 강의실 라돈농도는 평균 74.5±6.65 Bq·m^{-3}, 정상 운영 강의실 라돈농도는 평균 40.2±8.34 Bq·m^{-3}, 수업이 없는 강의실 라돈농도는 평균 45.7±5.2 Bq·m^{-3}, 수업이 있는 강의실 라돈농도는 평균 31.3±6.64 Bq·m^{-3}로 측정되어 기존 연구에 비해 강의실 환경 및 조건에 따라 다양한 라돈농도 분포를 보였다.

제한점으로는 3월에서 5월의 대학교 강의실의 라돈농도를 측정하여 1년 동안의 계절에 따른 연구를 추가적으로 실시하여 연간유효선량에 대한 신뢰성을 확보하고 계절변화에 따른 보정농도를 고려하여 라돈농도의 유효선량을 평가할 필요성이 있다.

결 론

최근 황사나 미세먼지 등으로 주변 공기의 질이 악화되고 건물의 현대화로 효율적인 에너지 절감을 위하여 실내 거주 환경은 밀폐율이 높아지고 있기 때문에 실내 라돈농도가 지속적으로 증가되고 있다. 라돈은 인간의 생활권으로 쉽게 유입될 수 있고 지역의 지질학적 특성, 건축물의 유형 및 용도, 거주자의 생활 습관, 시·공간적 환경 등에 따라 실내 라돈농도가 급격하게 변화되기 때문에 실내 라돈농도를 정기적으로 측정하고 라돈 피폭 상황을 고려하여 비용-효과 측면에서 실내 라돈농도 및 라돈에 의한 보건상의 위해 정도를 저감하기 위한 실내 라돈 관리 방안이 요구되고 있다.

이를 위하여 본 연구는 대학 내 강의실 운영 환경에 따른 실내 라돈농도 변화를 측정하였고 실내 라돈 피폭에 의한 연간유효선량을 평가함으로써 강의실 라돈 관리 방안을 제안하였다. 대학 내 강의실 운영 환경에 따른 실내 라돈농도는 실내 라돈농도 관리 기준보다 낮은 준위로 측정되었고 이러한 환경에서 라돈 흡입에 의한 위해 계수는 인구 평균 생애 암 위험률보다 낮게 평가되었다. 그러나 라돈은 인간의 생활권에서 영구적으로 격리할 수 없을 뿐만 아니라 방호의 최적화 관점에서 실내 라돈농도를 경제적·사회적 인자를 고려하여 합리적으로 달성 가능한 한 낮게 유지하고 라돈에 의한 보건상의 위해 정도를 저감하기 위한 지속적인 관리가 필요하다.

참 고 문 헌

Chalupnik S, Skubacz K, Urban P and Wysocka M. 2017. Measurements of airborne concentrations of radon and thoron decay products. *Radiat. Prot. Dosimetry*. **177**(1-2):45-48.

Durridge Company Inc. 2017. RAD7 Radon Detector owner's manual, pp. 27-34.

Font L and Baixeras C. 2003. The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors. *Sci. Total Environ*. **307**(1-3):55-69.

International Agency for Research on Cancer. 1988. Man-made mineral fibres and radon, IARC monographs, Vol. 43.

International Commission on Radiation Units and Measurements. 2011. Report 85: Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation, ICRU Report No. 85a.

International Commission on Radiological Protection. 1987. Lung cancer risk from indoor exposure to radon and radon daughter, ICRP Publication No. 50, Annals at the ICRP, pp. 16-18.

International Commission on Radiological Protection. 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication No. 60, Annals at the ICRP.

International Commission on Radiological Protection. 2007. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication No. 103, Annals at the ICRP.

Korea Environment Corporation. 2016. Indoor radon management, KECO2016-RF09-29, pp. 108-122.

Lee S, Lee Y, Park J, Kim S, Hong G, Ahn H and Yang W. 2013. Radon concentration assessment of studio apartmetnts surrounding a university. *J. Environ. Health Sci.* **39** (2): 164-169

Li X, Zheng B, Wang Y and Wang X. 2006. A survey of radon level in underground buildings in China. *Environ. Int.* **32**(5):600-605.

Little JB, Kennedy AR and McGandy RB. 1985. Effect of dose rate on the induction of experimental lung cancer in hamsters by alpha radiation. *Radiat. Res.* **103**(2):293-299.

Miles J. 1998. Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of house radon data. *Health Phys.* **74**(3):370-378.

Ministry of Environment Korea. 2000. Indoor airborne radon measurement guidelines. Ministry of Environment Regulation, pp. 3-14.

National Institute of Environmental Research, Healthier environment and healthier people, 2016 NIER annual report, NIER-GP2016-109, Incheon, 2016.

Organization for Economic Co-operation and Development/ Nuclear Energy Agency. 1983. Dosimetry aspects of exposure to radon and thoron daughter products: Report, OECD/NEA Group of Experts, Paris.

Pan Z. 2003. Exposure resulted from radon and its decay products in air in China. *Radiat. Prot.* **23**(3):129-137.

Park HC, Choi HS, Cho SY and Kim SH. 2014. Numerical study on indoor dispersion of radon emitted from building materials. *J. Kor Soc. Environ. Eng.* **36**(5):325-332.

Park HH, Jeong E, Kim HJ, Lee J and Lyu KY. 2017. Assessment of indoor radon gas concentration change of college. *J. Radiol. Sci. Technol.* **40**(1):127-134.

Park TH, Kang DR, Park SH, Yoon DK and Lee CM. 2018. Indoor radon concentration in Korea residential environments. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **25**(13):12678-12685.

Ryu JW. 2008. A study on the Measurement and Evaluation of IAQ in School Classroom, Graduate School of Chungju National University, pp. 1-76.

Ryu YH, Lee SH, Kim MY, Kwak JG and Dong KR. 2018. Medical institutions of the Seoul Metropolitan Area's internal air radon atmosphere emission: suggestions for density measurement and improvement. *J. Radiat. Indt.* **12**(2):139-143.

Shin YC, Leem JH, Kim SD and Cho SK. 2014. Estimation of the risk reduction and health benefit of regulating radon level indoor air quality. Korea Environment Institute, Policy report, 2014-12.

Tirmarche M, Harrison JD, Laurier D, Paquet F, Blanchardon E and Marsh JW. 2010. ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon, International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP*. **40**(1):1-64.

United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation. 2000. UNSCEAR 2000. General assembly with scientific annexes, New York.

United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation. 2016. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. I Sources, UNSCEAR 2016, New York, pp. 222-232.

United States Environmental Protection Agency. 2003. Assessment of risk from radon in homes, USEPA Publication 402-R-03-003, Washington, DC.

United States Environmental Protection Agency. 2016. A citizen's guide to radon: the guide to protecting yourself and your Family from radon, USEPA Publication 402-K-12-002, Washington, DC.

World Health Organization. 2007. International Radon project survey on radon guidelines, programmes and activities, WHO, Geneva.

World Health Organization. 2009. Handbook on indoor Radon, WHO, Geneva.

Received: 3 July 2018
Revised: 2 August 2018
Revision accepted: 11 August 2018