Journal of Biomedical Engineering Research 39: 243-249 (2018)
http://dx.doi.org/10.9718/JBER.2018.39.6.243

학 술 논 문

선량 환산 관례를 이용한 생애유효선량 및 라돈피폭 위험도 예측: 대학 강의실 라돈농도 중심으로

이재승[1] · 권대철[2]

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

Prediction for the Lifetime Effective Dose and Radon Exposure Risk by using Dose Conversion Convention: Base on the Indoor Radon Concentration of Lecture Room in a University

Jae-Seung Lee[1] and Dae Cheol Kweon[2]

[1]Research Institute of R&D Center, Segei Inspection Engineering Technology Co., Ltd.
[2]Department of Radiological Scienece, College of Bioecological Health, Shinhan University
(Manuscript received 25 July 2018 ; revised 6 November 2018 ; accepted 28 November 2018)

Abstract: The indoor radon concentration was measured in the lecture room of the university and the radon concentration was converted to the amount related to the radon exposure using the dose conversion convention and compared with the reference levels for the radon concentration control. The effect of indoor radon inhalation was evaluated by estimating the life effective dose and the risk of exposure. To measure the radon concentration, measurements were made with a radon meter and a dedicated analysis Capture Ver. 5.5 program in a university lecture room from January to February 2018. The radon concentration measurement was carried out for 5 consecutive hours for 24 hours after keeping the airtight condition for 12 hours before the measurement. Radon exposure risk was calculated using the radon dose and dose conversion factor. Indoor radon concentration, radon exposure risk, and annual effective dose were found within the 95% confidence interval as the minimum and maximum boundary ranges. The radon concentration in the lecture room was 43.1-79.1 Bq/m^3, and the maximum boundary range within the 95% confidence interval was 77.7 Bq/m^3. The annual effective dose was estimated to be 0.20-0.36 mSv/y (mean 0.28 mSv/y). The life-time effective dose was estimated to be 0.66-1.18 mSv (mean 0.93 ± 0.08 mSv). Life effective doses were estimated to be 0.88-0.99 mSv and radon exposure risk was estimated to be 12.4 out of 10.9 per 100,000. Radon concentration was measured, dose effective dose was evaluated using dose conversion convention, and degree of health hazard by indoor radon exposure was evaluated by predicting radon exposure risk using nominal hazard coefficient. It was concluded that indoor living environment could be applied to other specific exposure situations.

Key words: Dose conversion, Lecture room, Lifetime effective dose, Radon exposure risk

I. 서 론

최근 현대화된 건축물들은 주변에 오염된 공기의 실내 유입을 차단하고 효율적인 에너지 절감을 위하여 실내 밀폐율이 점차 높아지고 있으며 외부 환기율이 낮거나 실내 공기가 자연 순환되지 않고 정체되어 있는 실내 주거 환경에서 다양한 경로를 통해 실내로 유입된 라돈 (Radon. ^{222}Rn) 농도가 지속적으로 증가되고 있어 새로운 실내 환경 문제로 대두되고 있다[1]. 특히 라돈은 인공 방사선과 달리 지각 내 존재하는 라듐 (Radium. ^{226}Ra)이 붕괴하여 생성되는 자연 발생적 방사성 기체로서 인간의 모든 생활권 내에 존재할

Corresponding Author : Dae Cheol Kweon
Department of Radiological Science, Shinhan University, 95, Hoam-ro, Uijeongbu-shi, Gyeonggi-do, 11644 Republic of Korea
TEL.: +82-31-870-3411 / Fax: +82-31-870-3419
E-mail: dckweon@shinhan.ac.kr

수 있기 때문에 라돈에 의한 피폭은 불가피할 뿐 만 아니라 인간의 제어 또는 규제 등에 어려움이 수반된다는 점에서 관리가 쉽지 않다[1,2].

국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection. ICRP)의 라돈 관리는 비정상적으로 높은 라돈에 대한 관리는 합리적으로 달성 가능하지만 라돈 준위가 정상적 수준인 많은 가옥들이 잠재적으로 관련되어 있고 실내 라돈농도는 지역의 특성, 건축물, 생활습관 및 공간특성에 따라 변화가 있기 때문에 관리가 어렵다는 점에서 공식적으로 라돈 규제에 대한 언급은 거론하지 않고 있다[3-5].

실내 라돈에 대한 피폭 관리는 어떤 피폭 상황에 부합되는 적절한 참조 준위를 설정하고 방호의 최적화 결과가 참조 준위를 초과한 경우 라돈농도 및 피폭을 감축하기 위한 규제기관의 적극적 개입(intervention)으로 달성할 수 있으며 보조적 수단으로 각각의 환경에 적합한 실내 라돈농도 관리 기준을 마련할 것을 권고하고 있다. 이와 관련하여 미국환경보호청(Environmental Protection Agency. EPA), 세계보건기구(World Health Organization. WHO), 유엔방사선영향과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation. UNSCEAR) 등 대부분의 관련 국제기구들은 개인의 라돈피폭선량 참고준위 상한값으로 연간유효선량 10 mSv를 권고하고 있다[6-12]. 권고한 유효선량 범위를 선량 환산 관례(dose conversion convention)에 따라 라돈농도로 환산하면 실내라돈에 대한 참조 준위는 300 Bq/m^3 수준으로 제한되며 다중이용시설에 대한 라돈농도 관리 기준을 148 Bq/m^3 수준으로 권고하고 있다[6-12].

실내 라돈에 대한 기준 준위들은 고농도 라돈 및 라돈 자손에 장기간 피폭된 우라늄 광산의 광부들에 대한 역학적 연구 결과들을 기반으로 하고 있다[13-14]. 또한 실내 라돈 피폭과 같은 저농도 라돈피폭과 암 발생 위험에 대한 선량-반응 관계는 별다른 이견 없이 문턱 없는 선형 모델(linear non-threshold model. LNT)을 채택하고 있다[15-18]. LNT 모델은 저선량 영역에서 초과 암(excess cancer) 및 유전적 질환의 발생 위험도가 피폭 선량에 선형적으로 비례하여 증가된다는 가정에 기초한 선량-반응 모델이다. 라돈 흡입에 의해 폐로 유입된 라돈 자손들이 방출하는 잠재적인 알파 에너지는 고농도 라돈에 피폭된 우라늄 광부들과 저농도 라돈에 피폭된 일반인들에게 동일한 위해(detriment)를 가지고 있다는 가정을 기반으로 우라늄 광부들의 선량-반응 관계를 저선량 영역까지 외삽(extrapolation)하고 역학적으로 평가한 결과에서 유도된 명목위해계수(nominal detriment coefficient)를 보정하고 적절한 수학적 risk projection model을 도입함으로써 실내 주거 환경에서 저 도 라돈 흡입에 의한 일반인의 암 발생 위험도를 정량적으로 예측할 수 있다[3-4].

현재까지 LNT 모델은 과학적으로 검증되지 않았고 저선량 피폭에서 높은 불확실성 때문에 논란의 여지는 있었지만 다양한 역학적 연구를 가장 적절하게 해석하고 저선량 피폭에 대한 확률적 영향(stochastic effect)을 이해할 수 있는 일관성 있는 모델이라 할 수 있다[15-18]. LNT 모델을 기반으로 하는 명목 위해 계수는 어떤 라돈피폭 상황에서 동일한 위해에 근거하여 실내 라돈농도를 선량 환산 관례에 따라 라돈피폭 당 연간유효선량으로 환산하거나 라돈피폭 위험도를 예측할 수 있다[4,12].

본 연구는 대학 강의실을 대상으로 실내 라돈농도를 측정하고 선량 환산 관례를 이용하여 실내 라돈농도를 라돈피폭과 연관된 양으로 환산하고 실내 라돈농도 관리를 위한 기준 준위들과 비교하여 실내라돈 흡입에 의한 생애유효선량 및 피폭 위험도를 예측함으로써 강의실 라돈피폭에 의한 영향을 평가하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 측정 장비

실내라돈 측정 기기(RAD7, Durridge Company, Inc., Boston, MA, USA)는 표준모드(0.4 cpm/pCi/L)에서 1분당 1리터(1L/min)의 속도로 흡입된 기체 시료는 흡착제(desiccant)와 필터(inlet filter)를 거치면서 수분과 입자상의 물질들이 제거되고 순수한 라돈 기체만 선택적으로 0.7 리터 체적인 반구 형태의 표준화 공간(sampling space)에 유입된다[19]. 측정된 실내 라돈농도의 자료 분석은 프로그램(Capture Version 5.5, Durridge Company Inc., Boston, MA, USA)을 이용하여 연속적 또는 단위 시간 당 실내 라돈농도 분포를 측정하여 분석하였다.

2. 재료 및 방법

대학 강의실 라돈농도가 최대인 조건에서 측정하기 위하여 토양 또는 지각의 온도와 실내 온도 차이가 크고 다른 계절과 비교하여 실내 환기율이 감소되는 겨울철과 학사 일정이 없어 강의실이 일정 기간 밀폐되어 실내 라돈농도가 증가하는 겨울 방학 기간인 2018년 01월부터 02월에 경기도 소재 일개 대학의 강의실을 대상으로 수행되었다. 측정 장소는 1998년에 철근 콘크리트 구조로 건축된 단과대학 1층에 위치한 강의실에서 측정 하였다. 강의실은 82.5 m^2 으로 출입문과 창문으로 구성되었고, 환기시설은 천장형 에어컨이 설치 되어있다.

실내 라돈농도 측정은 12시간 밀폐 상태에서 24시간 동안 연속적으로 동일한 방법으로 총 5회 측정하였다. 측정은

환경부예규의 실내 공기 중 라돈측정지침[20]을 준수하여 창문으로부터 5 m 이상 떨어진 강의실 중앙에서 바닥으로부터 100 cm 떨어진 동일 측정 지점에서 라돈을 측정하였고, 측정 기간 동안에는 환기 제어 장치를 가동하지 않았다.

3. 선량 환산 관례를 이용한 생애유효선량 및 라돈피폭 위험도 예측

표 1은 본 연구에서 단위라돈농도(unit radon concentration)를 단위라돈피폭(unit exposure)과 연관된 양으로 환산하기 위한 환산계수들을 보여준다. 이 값들은 ICRP Pub. No. 115 보고서에 의해 제시되었다[6]. 라돈농도가 최대인 조건에서 24시간 동안 측정한 강의실 라돈농도를 C_{Rn}이라 할 때 단위라돈농도(unit radon concentration. C_{Rn_unit})는 다음 식(1)으로 구할 수 있다[21].

$$C_{Rn_unit}[Bq\cdot hr/m^3] = C_{Rn}(Bq/m^3)\times T_l[hr] \quad \text{식 (1)}$$

여기서 T_l 은 생애 라돈흡입시간(lifetime of indoor radon inhalation)이다. 본 연구에서 T_l 은 강의실에서 라돈을 흡입할 수 있는 최대 가용 시간을 의미하며 졸업 학점을 160 학점으로 하고 주(week) 당 20시간, 학기 당 15주, 연간 2학기, 4년의 학부 과정으로 학사 일정이 진행된다고 가정할 때 생애 라돈 흡입 시간(T_l)은 총 2,400 시간으로 하였다.

단위 라돈농도(C_{Rn_unit})를 라돈피폭과 연관된 양으로 환산하기 위하여 피폭과 라돈농도 환산계수(exposure and radon gas concentration)가 이용되었다[21]. 여기서 어떤 특정 피폭 상황을 정량화하기 위하여 도입된 양으로서 누적 워킹 레벨(working level month. *WLM*) 단위를 사용할 수 있다[22]. 워킹 레벨(working level. *WL*)은 1L (liter)의 공기 중 1.3×10^5 MeV의 잠재 알파 에너지를 방출하는 단수명 라돈 자손들의 농도로서 3,700 Bq/m^3 (100 pCi/L) 농도를 의미하며 누적 워킹 레벨(*WLM*)은 1*WL* 농도의 공기를 170시간 동안 호흡했을 때 누적 피폭선량으로 정의된다[22-24]. 따라서 1*WLM*은 다음 식(2)으로 구할 수 있으며 단위 피폭 당 단위 라돈농도 환산계수(WLM/Bq·hr·m^{-3})는 식(3)으로 산출할 수 있다[22-24].

$$WLM = WL\times170[hr] = 3{,}700[Bq/m^3]\times170[hr] = 6.29\times10^5[Bq\cdot hr/m^3] \quad \text{식 (2)}$$

$$\frac{WLM}{Bq\cdot hr/m^3} = 6.29\times10^5 \quad \text{식 (3)}$$

또한 주어진 식(1)과 (3)의 관계식을 정리하면 식(4)로 실내라돈에 의한 피폭량(WLM_{Rn})을 환산할 수 있다[22].

표 1. 국제방사선방호위원회(ICRP)가 권장하는 환산계수의 요약
Table 1. Summary of conversion coefficients recommended by International Commission on Radiological Protection (ICRP)

Quantities	Units	Recommended Value[a]
Nominal detriment coefficient unit Radon concentration unit exposure	(Bq·hr/m^3)$^{-1}$ WLM^{-1}	8×10^{-10} 5×10^{-4}
Exposure and Radon gas concentration[b] (equilibrium factor: 0.4)	WLM per (Bq·hr/m^3)	6.29×10^5
Dose conversion convention	WLM per mSv	4
Action level (reference level) unit Radon concentration annual effective dose	Bq·hr/m^3 mSv	300 10
Public annual limit on exposure	WLM/yr	2.5×10^{-1}

WLM: working level month.
[a]Assuming 7000 hours per year indoors or and an equilibrium factor of 0.4.
[b]Risk were considered both fatal cancers and non-fatal cancer, and genetic effects.

$$WLM_{Rn} = C_{Rn_unit}\times\frac{Bq\cdot hr/m^3}{WLM} \quad \text{식 (4)}$$

따라서 강의실이 라돈에 의해 피폭되었을 때 라돈에 의한 피폭량과 명목위해계수의 관계를 이용하여 라돈피폭 위험도(radon exposure risk. $Risk_{Rn}$)를 식(5)로 산출하였으며 라돈에 의한 피폭량과 선량환산계수를 이용하여 생애유효선량(lifetime effective dose. D_{Rn})을 식(6)으로 산출하였다[22-24].

$$Risk_{Rn} = WLM_{Rn}\times5\times10^{-4}WLM^{-1} \quad \text{식 (5)}$$

$$D_{Rn} = WLM_{Rn}\times4mSv.WLM^{-1} \quad \text{식 (6)}$$

4. 데이터 분석

측정된 데이터는 SPSS (Ver. 21.0, IBM Co., Armonk, NY, USA)을 이용하여 분석하였다. 기술적 통계량은 기하평균(geometric mean. GM)과 산술평균(arithmetic mean. AM), 표준편차(*SD*), 최대값(C_{Rn_max})과 최소값(C_{Rn_min}) 사이의 범위를 산출하였다. 강의실 라돈농도(C_{Rn}), 생애유효선량(D_{Rn}), 라돈피폭위험도($Risk_{Rn}$)에 대한 특성 분석은 백분위수(percentile) 및 사분위수(quartile)를 이용하여 분석하였다[24]. 중앙값(median value, Q_2)을 중심으로 라돈농도의 50%가 집중된 범위를 의미하는 사분위

수 범위(interquartile range. IQR)는 Q_3에서 Q_1을 감액한 값의 범위로 하여 산출하였다[5].

최소 및 최대 경계범위는 실내 라돈농도(C_{Rn})와 라돈피폭 위험도($Risk_{Rn}$) 및 연간유효선량(D_{Rn})에 대한 95% 신뢰구간 내의 분포 범위로서 식(7), (8)로 산출하였다.

$$\text{Minimum boundary} = Q_1 - 1.5 \times IQR \quad \text{식 (7)}$$

$$\text{Maximum boundary} = Q_3 + 1.5 \times IQR \quad \text{식 (8)}$$

III. 결 과

1. 강의실 라돈농도 및 연간유효선량

실내 라돈농도가 최대인 조건에서 24시간 동안 연속적으로 5회 측정한 강의실 라돈농도는 최소 43.1 Bq/m^{3}에서 최대 79.1 Bq/m^{3}까지 범위에서 기하평균 60.24 Bq/m^3, 산술평균 61.16 ± 6.37 Bq/m^3 로 측정되었다(표 2).

실내라돈 측정결과는 실내라돈에 대한 참조 준위 300 Bq/m^{3}와 비교하여 20.1% 수준으로 규제기관의 개입 준위보다 매우 낮은 수준이었으며 다중이용시설에 대한 라돈농도 관리 기준 148 Bq/m^{3}과 비교에서는[5] 약 41.6% 로 라돈에 의한 보건상의 위해를 저감화를 위한 실내라돈 관리 방안이 요구되는 수준은 아니다(그림 1a). 다만 95% 신뢰구간 내에서 최대 경계 범위는 77.7 Bq/m^3 수준으로 측정되었으며 실내라돈 관리지침[26]에 따라 일일 3회 이상, 회당 30분 이상의 정기적인 환기가 요구되는 74 Bq/m^3 (2pCi/L) 기준치가 초과되었다. 또한 강의실 라돈농도가 최대인 환경에서 연간 600시간의 학사 일정 동안 실내라돈을 흡입했을 때 예측되는 연간유효선량은 최소 0.20 mSv/y에서 최대 0.36 mSv/y의 범위에서 평균 0.28 mSv/y로 평가되었다(Table 2). 이러한 결과는 실내라돈피폭에 의한 선량 참조 준위 상한 값 10 mSv/y과 비교하여 2.8% 수준이었으며 연간 자연방사선 피폭 선량 2.4 mSv/y 및 일반인의 연간 선량한도 1 mSv/y와 비교하여 각각 11.7%, 28% 수준으로 평가되었다(그림 1b).

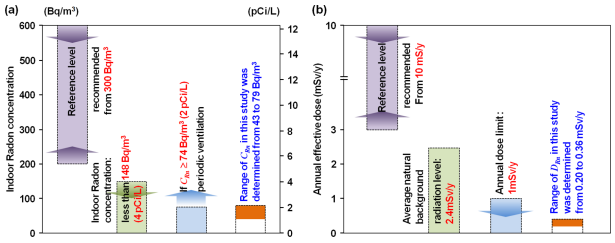

그림 1. 권장 실내 라돈 농도 (a)와 연간 유효선량 (b)의 비교 결과.
Fig. 1. Comparison results of the recommended indoor radon concentration levels (a) and the recommended annual effective doses (b).

2. 생애유효선량 및 라돈피폭 위험도 예측

Table 3은 가용할 수 있는 최대 학사일정에서 강의실 라돈흡입에 의한 생애유효선량 및 피폭 위험도에 대한 예측 결과를 보여준다. 주 당 20시간, 학기 당 15주, 연간 2학기, 4년의 학부 과정으로 총 2,400시간의 학사 일정이 진행되는 최대 가용 시간 동안 강의실 라돈 흡입에 의한 생애유효선량은 최소 0.66 mSv에서 최대 1.18 mSv 범위에서 평균 0.93 ± 0.08 mSv로 예측되었다. 라돈피폭 위험도는 100,000명 당 최소 8.7명에서 15.5명의 범위에서 평균 11.7 ± 1.0명 정도가 라돈피폭에 기인되어 암이 발생될 수 있을 것으로 예측되었다(표 3).

그림 2는 강의실 라돈농도의 95% 신뢰구간 내에서 생애유효선량 및 라돈피폭 위험도를 예측한 결과를 보여준다. 강의실 라돈농도의 중앙값(Q_2: 60.8 Bq/m^3)을 중심으로 50%가 집중된 사분위수 범위(IQR: 56.7 ~ 65.1 Bq/m^3)내에서 라돈 흡입에 의한 생애유효선량은 0.88 mSv에서 0.99 mSv

표 2. 동일 실내 강의실을 24시간 측정한 실내 라돈농도 및 연간유효선량의 결과
Table 2. Results for indoor radon concentrations and annual effective doses by measured the same lecture room for 24 hours

Measurement number	Indoor radon concentration (Bq/m^3)				Annual effective dose (mSv/yr)[b]
	GM	AM	SD	Range[a]	
1st	62.10	62.35	5.64	46.2~77.3	0.21~0.36
2nd	61.22	61.68	7.58	44.9~79.1	0.21~0.36
3rd	60.81	61.13	6.21	43.1~74.9	0.20~0.35
4th	60.26	60.59	6.43	46.9~75.7	0.22~0.35
5th	59.77	60.04	5.67	45.5~73.9	0.21~0.34
Total	60.24	61.16	6.37	43.1~79.1	0.20~0.36

GM: geometric mean, *AM*: arithmetic mean, *SD*: standard deviation.
[a]The difference between the maximum and the minimum values in indoor radon concentration.
[b]Life time of indoor Radon inhalation (T_l) were calculated as 600 hours. Also, radiation weight factor (W_R = 20) for the alpha rays and tissue weight factor (W_T = 0.12) were considered.

표 3. 4년간 대학 교육 일정 중에 실내 라돈 농도를 흡입에 의한 생애유효선량 및 라돈 노출 위험 예상의 결과
Table 3. Predicted results for the lifetime effective dose and radon exposure risk by inhalation of indoor radon concentration during the university's schooling schedule of four years

Items	Lifetime effective dse (mSv)[a]	Radon exposure risk (100,000 person^{-1})
Mean ± SD	0.93 ± 0.08	11.7 ± 1.0
Range[b]	0.66~1.18	8.7~15.5

[a]Lifetime of indoor radon inhalation (T_l) were calculated as 2400 hours.
[b]The difference between the maximum and the minimum values in indoor radon concentration.

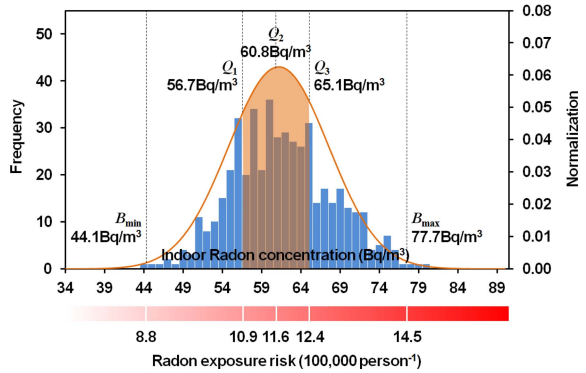

그림 2. 실내 라돈 농도의 전체 확률 무작위 분포에 따른 생애유효선량 및 라돈 노출 위험에 대한 예상 결과.
Fig. 2. Predicted results for the lifetime effective dose and radon exposure risk according to the overall probability random distribution of indoor radon concentration.

로 예측되었으며 라돈피폭 위험도는 100,000명 당 10.9명에서 12.4명 정도가 암이 발생될 수 있을 것으로 예측되었다. 특히 95% 신뢰구간 내 최대 경계 범위(B_{max}: 77.7 Bq/m^3)에서 생애유효선량과 라돈피폭 위험도는 각각 1.16 mSv, 100,000명 당 14.5명으로 예측되었다.

IV. 고 찰

인간은 삶을 영위하는 동안 필연적으로 라돈 및 붕괴 생성물에 의한 피폭을 받을 수밖에 없다. 일상적인 환경에서 라돈 및 붕괴 생성물에 의한 피폭은 평균 1.3 mSv/y 정도로 자연방사선에 의한 총 피폭 방사선량의 약 50% 정도를 차지하고 있어 인류 역사상 최대 피폭원으로 간주되고 있다[12]. 100 mSv 미만의 저선량 방사선 피폭에 대한 생물학적 영향(Biological Effects of Ionizing Radiation. BEIR IV)에 대한 보고서는 미국국립연구회(National Research Council. NRC)에 의해 제시되었다[18]. 이 보고서에 따르면 라돈 및 붕괴 생성물에 의한 저선량 방사선 피폭은 유전자를 구성하고 있는 DNA 이중 나선 구조를 절단하고 유전자 손상을 유도하여 암 유전자의 발현 또는 암 억제 유전자의 손상으로 암 발생 위험성이 있다고 보고하고 있다.

불활성 기체 라돈은 하전 입자 형태의 라돈 자손들은 호흡을 통해 폐 속의 기저세포에 흡착되고 단 시간 내 고에너지의 알파선을 부여함으로써 폐암 발생 위험도가 증가되는 것으로 보고되었다[7,18,27]. 이와 관련하여 ICRP는 라돈 및 붕괴 생성물에 의한 보건상의 위해 정도를 전면 재검토하면서 ICRP Pub. No. 115 보고서 이전의 라돈 위험이 약 2배 정도 과소평가 되었다는 결론을 도출하고 방사선 방호의 최적화 수단을 도입한 라돈 위험 관리가 선언되었다[5]. 이러한 결론은 모든 연령 집단에 대한 명목 위해 계수를 누적 워킹 레벨 (WLM) 당 3×10^{-4} (ICRP Pub. No. 65)에서 5×10^{-4}로 상향 조정되었으며 라돈피폭에 의한 선량 참조 준위 상한 값 10 mSv를 만족하는 라돈농도를 600 Bq/m^3 (ICRP Pub. No. 65)에서 300 Bq/m^{3}로 하향 조정되었다[6]. 또한 실내라돈 흡입에 의한 피폭은 선량 계측학적으로 접근하지 않고 역학적 연구 결과들에 근거하여 접근하였기 때문에 선량 환산 관례에 따라 단위 유효선량 또는 단위 라돈피폭에 따른 위해를 직접 비교하여 평가할 것을 권고하고 있다[4,21].

본 연구는 어떤 특정한 라돈피폭 상황을 대학 내 강의실로 설정하고 가용할 수 있는 최대 조건에서 강의실 라돈농도를 측정하고 선량 환산 관례를 이용하여 생애유효선량 및 라돈피폭 위험도를 예측하였다. 가용할 수 있는 최대 조건에서 측정한 강의실 라돈농도는 평균 61.2 ± 6.4 Bq/m^3 수준으로 측정되었다. 실내라돈 관리에 대하여 ICRP는 모든 실내라돈에 대하여 방사선 방호 수단을 적용하는 것이 아니라 실내라돈 관리 방안을 마련하기 위한 국가 또는 규제기관 차원의 전국 스크리닝(screening) 조사에서 관찰된 라돈농도 분포의 약 75% 수준을 평균적 수준 또는 정상적 수준으로 간주하고 본질적으로 평균적 수준은 방호의 대상에서 제외할 것을 권고하고 있다[6]. 따라서 본 연구 결과는 환경부 국립환경과학원에서 2016년도 전국 7,940 가구를 대상으로 조사한 실내 라돈농도 95.4 Bq/m^{3}와 비교하여 64.1% 정도로 평균적 수준으로 측정되었고 다중이용시설에 대한 라돈농도 관리 기준 148 Bq/m^{3}과 비교하여 약 41.6% 수준으로 실내 라돈농도를 줄이기 위한 라돈 관리 방안이 요구되는 수준은 아니었다[26,28].

측정된 강의실 라돈농도를 ICRP Pub. No. 115 보고서에서 제시한 선량 환산 관례에 따라 라돈피폭과 연관된 양으로 환산한 결과 연간 600시간의 학사 일정 동안 실내라돈을 흡입했을 때 연간유효선량은 평균 0.28 mSv/y로 예측

되었다. 또한 4년간 2400시간의 가용할 수 있는 최대 학사 일정에서 강의실 라돈 흡입에 의한 생애유효선량은 0.71 mSv에서 1.16 mSv 까지의 범위(95% 신뢰구간)에서 평균 0.93±0.08 mSv로 예측되었으며 라돈피폭 위험도는 100,000명 당 8.8명에서 14.5명의 범위(95% 신뢰구간)에서 평균 11.7±1.0명이 라돈피폭에 기인되어 암이 발생할 수 있을 것으로 예측되었다. 이러한 결과는 실내 라돈농도가 가용할 수 있는 최대 조건인 강의실에서 4년간의 학부 과정을 졸업할 때까지 학사 일정을 운영한다고 가정할 때 실내라돈피폭에 의한 생애유효선량은 일반인의 연간선량한도 1mSv/y를 초과하지 않았고 자연방사선에 의한 연간 평균 피폭 선량 2.4 mSv/y의 38.8%에 불과한 수준으로 평가되었다. 또한 대학 내 학생 정원수를 약 2,500명으로 가정할 때 라돈피폭에 의한 암 발생 위험도는 0.3명으로 1명을 초과하지 않았으며 국내 사망자 1,000명 중 암에 의한 사망자가 약 200명 정도인 것과 비교하면 강의실 라돈피폭에 의한 보건상의 영향은 심각한 위협이 아니라고 판단되었다.

V. 결 론

대부분의 국제기구들은 체내 흡입된 라돈 및 붕괴 생성물에 의한 명목 위해 계수 및 라돈피폭 위험도를 역학적으로 평가한 결과를 기반으로 실내라돈 관리에 대한 중요성을 언급하고 있다. 그러나 라돈은 지구상의 모든 곳에 존재할 수 있고 지역의 특성, 공간적 환경 등에 따라 변화되기 때문에 어떤 특정한 라돈피폭 환경에 대한 라돈 관리는 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 국제방사선방호위원회는 방호의 최적화 수단을 도입한 라돈 선언을 통해 고 농도 라돈 식별 지역이나 고 농도 작업장 등에 규제기관의 적극적 개입이 요구되는 참조 준위를 적용하고 다중이용시설에 대한 실내 라돈농도 기준을 마련하여 합리적으로 달성 가능한 실내 라돈농도를 최소화할 것을 권고하고 있다.

본 연구는 대학 강의실을 대상으로 가용할 수 있는 최대 조건에서 실내 라돈농도를 측정하고 선량 환산 관례를 이용하여 생애유효선량을 평가하였으며 명목 위해 계수를 이용하여 라돈피폭 위험도를 예측함으로써 실내라돈피폭에 의한 보건상의 위해 정도를 명확하게 평가하였으며 향후 실내 주거 환경이 다른 특정한 피폭 상황에 적용될 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

[1] T.H. Park, D.R. Kang, S.H. Park, D.K. Yoon, and C.M Lee, “Indoor radon concentration in Korea residential environments,” *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 25, no. 13, pp. 12678-12685, 2018.

[2] S. Chalupnik, K. Skubacz, P. Urban, and M. Wysocka, “Measurements of airborne concentrations of radon and thoron decay products,” *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 177, no. 1-2, pp. 45-48, 2017.

[3] International Commission on Radiological Protection, “2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” ICRP Publication No. 103, *Ann. ICRP*, 2007.

[4] International Commission on Radiological Protection, “1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” ICRP Publication No. 60, *Ann. ICRP*, 1991.

[5] J.S. Lee, and D.C. Kweon, “Assessment of indoor radon concentration and annual effective dose in a university lecture room,” *J. Radiat. Indt.*, vol. 12, no. 3, pp. 223-231, 2018.

[6] M. Tirmarche, J.D. Harrison, D. Laurier, F. Paquet, E. Blanchardon, and J.W. Marsh; International Commission on Radiological Protection, “ICRP Publication 115. lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon,” *Ann. ICRP*, vol. 40, no. 1, pp. 1-64, 2010.

[7] United States Environmental Protection Agency, “Assessment of risk from radon in homes,” EPA402-R-03-003, Washington, DC, 2003.

[8] United States Environmental Protection Agency, “More action needed to protect public from indoor radon risks,” EPA report No. 08-P-0174, Washington, DC, 2008.

[9] United States Environmental Protection Agency, “A citizen's guide to radon: the guide to protecting yourself and your family from radon,” EPA402-K-12-002, Washington, DC, 2016.

[10] World Health Organization, “International radon project: survey on radon guidelines, programmes and activities,” WHO/HSW/EAD/07.01, Geneva, 2007.

[11] World Health Organization, “WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective,” WHO press, Geneva, 2009.

[12] United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, “Sources, effects and risks of ionizing radiation,” UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, New York, 2016.

[13] National Council on Radiation Protection and Measurements, “Evaluation of occupational and environmental exposures to Radon and Radon daughters in the United States,” NCRP Report 78, Bethesda, 1984.

[14] National Council on Radiation Protection and Measurements, “Measurement of Radon and Radon Daughters in Air,” NCRP Report 97, Bethesda, 1988.

[15] United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, “Sources: Effects and Risks of Ionizing Radiations,” UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly, with Assembly, with Annexes, New York, 1988.

[16] International Commission on Radiological Protection, “Lung cancer risk from indoor exposure to radon and radon daughter,” ICRP Publication No. 50, *Ann. ICRP*, vol. 17, no. 1, 1987.

[17] International Atomic Energy Agency, “Proposal for the coordinated research program on radon in the human environment,” IAEA, Vienna, 1989.

[18] National Research Council, “Health risks of radon and other internally deposited alpha emitters,” Report of the committee

on the biological effects of ionizing radiation (BEIR IV), National Academy Press, Washington, DC, 1988.

[19] Durridge Company Inc., "RAD7 Radon detector owner's manual," pp. 27-34, 2017.

[20] Ministry of Environment Korea (MOE), Indoor airborne radon measurement guidelines, Ministry of Environment Regulation, pp. 3-14, 2000.

[21] T.H. Park, D.R. Kang, S.H. Park, D.K. Yoon, and C.M. Lee, "Indoor radon concentration in Korea residential environments," *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.,* vol. 25, no. 13, pp. 12678-12685, 2018.

[22] International Commission on Radiological Protection, "Protection against radon-222 at home and at work," ICRP Publication No. 65, *Ann. ICRP*, 1993.

[23] L. Vaillant, and C. Bataille, "Management of radon: a review of ICRP recommendations," *J. Radiol. Prot.*, vol. 32, no. 3, pp. 1-12, 2012.

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

[25] R.H. Hyndman, and Y. Fan, "Sample quantiles in statistical packages," *Am. Stat.*, vol. 50, no. 4, pp. 361-365, 1996.

[26] Korea Environment Corporation(KECO), "Indoor radon management," Keco2016-RF09-29, pp. 108-122, 2016.

[27] J.B. Little, A.R. Kennedy, and R.B. McGandy, "Effect of dose rate on the induction of experimental lung cancer in hamsters by alpha radiation," *Radiat. Res*., vol. 103, no. 2, pp. 293-299, 1985.

[28] Living Environment Information Center, "Radon map," 2016. https://iaqinfo.nier.go.kr/leinfo/radonmap_define.do