

ORIGINAL ARTICLE

라돈 노출 유효선량 평가를 위한 연간 평균 라돈 농도 예측모델 개발

이철민* · 강대용¹⁾ · 고상백²⁾ · 조용석³⁾ · 이다정³⁾ · 이슬비³⁾

서경대학교 화학생명공학과, ¹⁾아주대학교 의과대학 인문사회학부교실, ²⁾연세대학교 원주의과대학 예방의학교실, ³⁾한국 라돈 협회

Development of Predictive Model for Annual Mean Radon Concentration for Assessment of Annual Effective dose of Radon Exposure

Cheolmin Lee*, Daeyong Kang¹⁾, Sangbaek Koh²⁾, Yongseog Cho³⁾, Dajeong Lee³⁾, Sulbee Lee³⁾

Department of Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University, Seoul 02713, Korea

¹⁾*Department of Humanities and Social Medicine, Ajou University School of Medicine, Suwon 16499, Korea*

²⁾*Department of Preventive Medicine, Wonju College of Medicine, Yonsei University, Wonju 26426, Korea*

³⁾*Korea Radon Association, Seoul 04788, Korea*

Abstract

This research, sponsored by the Korean Ministry of Environment in 2014, was the first epidemiological study in Korea that investigated the health impact assessment of radon exposure. Its purpose was to construct a model that calculated the annual mean cumulative radon exposure concentrations, so that reliable conclusions could be drawn from environment-control group research. Radon causes chronic lung cancer. Therefore, the long-term measurement of radon exposure concentration, over one year, is needed in order to develop a health impact assessment for radon. Hence, based on the seasonal correction model suggested by Pinel et al.(1995), a predictive model of annual mean radon concentration was developed using the year-long seasonal measurement data from the National Institute of Environmental Research, the Korea Institute of Nuclear Safety, the Hanyang University Outdoor Radon Concentration Observatory, and the results from a 3-month (one season) survey, which is the official test method for radon measurement designated by the Korean Ministry of Environment. In addition, a model for evaluating the effective annual dose for radon was developed, using dosimetric methods. The model took into account the predictive model for annual mean radon concentrations and the activity characteristics of the residents.

Key words : Seasonal correction, Radon, Assessment of the effective dose for radon exposure, Annual mean radon concentrations

Received 23 May, 2016; **Revised** 18 July, 2016;

Accepted 9 August, 2016

***Corresponding author** : Cheolmin Lee, Department of Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University, Seoul 02713, Korea
Phone : +82-2-940-2924
E-mail : cheolminlee1@gmail.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

1. 서론

라돈(Rn-222)에 노출되어진 사람들을 대상으로 수행되어진 연구들을 통해 가정 및 직장에서의 라돈이 건강에 심각한 위해를 나타내는 것을 확인하였고(EC, 1999; ICRP, 2007; WHO, 2005; 2009; UNSCEAR, 2009; AGIR, 2009), 장기간의 높은 실내 라돈농도에 노출된 사람은 병리학적 영향과 호흡기계 기능의 변화를 가져와 결국에는 폐암으로 발전하는 위해도가 증가되며, 이 위해도는 실내 라돈농도, 노출기간 그리고 실내의 환기에 의존하는 것으로 보고되었다(Webb, 1992; Lubin and Boice, 1997; Neuberger and Gesell, 2002; Lazar et al., 2003). 일반적으로 외부 공기에서 라돈농도는 매우 낮으나 확산이 좋지 않은 실내공간에서는 축적에 의해 높은 농도로 증가된다. 라돈의 빙점은 영하 68℃ 이하로 그 보다 높은 온도에서 기체가 되며, 무색, 무취의 성질을 가지고 있어 실내로 잠입해도 사람의 감각으로 느끼지 못하는 특징을 가지고 있다(UNSCEAR, 2000).

원자번호 222인 라돈(Rn-222)은 라돈 동위원소 가운데 가장 잠재적이고 위험한 방사성 동위원소로 토양으로부터 콘크리트 바닥과 벽의 균열, 바닥의 구멍, 배수펌프, 건축물의 연결부분과 중공블록벽의 작은 금이나 구멍을 통해 실내로 들어온다. 밀폐된 방에 들어온 라돈가스가 농축이 될 때 가스인 라돈은 알파선을 방출시키는 Po-218이나 Po-214와 같은 방사성 원소로 붕괴되는데, 이들은 폐포에 심각한 피해를 줄 수 있으며 때때로 공중보건에 유해한 수준에 도달하는 것으로 알려져 있다(Kurnaz et al., 2011). 거주지에서 라돈농도는 실내공기질 제어 설계 전략을 결정하거나, 건강위해성의 측면에서 중요하다. 라돈과 라돈의 붕괴산물의 흡입과 관련된 방사학적 위해도의 평가는 주로 누적 라돈량의 측정을 기초로 한다(Singh et al., 2006). 즉, 폐암은 라돈과 라돈 붕괴산물의 장기간의 노출과 관련되어 발생하는 대표적인 건강상의 악영향으로 알려져 있으며, 장기간의 라돈 측정 결과는 단기간의 라돈 측정 결과에 비해 개개인의 장기간의 라돈 노출량을 더욱 잘 반영할 수 있음을 고려할 때, 라돈 노출에 의한 건강상의 악영향인 폐암 발생 위해도를 평가하는데 있어 장기간의 누적 라돈노출량의

평가는 라돈 노출에 의한 건강영향 평가에 있어 매우 중요한 노출평가의 한 부분이라 할 수 있다.

국내의 경우 실내환경에서의 라돈 측정에 관한 공식시험방법으로는 장기간 측정방법인 3개월간의 평균 누적 라돈농도를 산출하는 방법을 권장하고 있다. 그러나 실내 라돈농도는 계절 변동에 따르므로 3개월간의 평균 누적 라돈농도가 일년간의 평균 누적 라돈농도를 대표하기에는 역부족한 실정이다. 영국을 비롯한 선진외국의 경우 라돈노출에 의한 건강영향평가 연구 및 관리방안 수립에 있어 연간 누적 라돈농도를 활용하기 위한 다수의 연구를 통해 계절보정 계수 및 농도 보정 계수를 산출하여 이용하고 있다(Pinel et al., 1995; Daniel et al., 2005; Gavin et al., 2005; Groves-Kirkby et al., 2010; Khan et al., 2014).

본 연구는 2014년도 환경부 주관의 국내 최초 라돈 노출에 의한 건강영향평가 연구로 라돈에 대한 위해 관련 정보 수집 및 의사소통기법과 위해지수 개발을 목적으로 한 환자-대조군 연구의 일환으로 Pinel et al.(1995)에 의해 제시된 계절보정 모델을 바탕으로 국내 단기간 계절 측정 라돈농도 자료를 바탕으로 계절보정을 통한 연간평균 라돈농도 예측 모형 및 거주자의 거주시간이 고려된 맞춤형 라돈 유효선량 평가 모형을 개발하였다.

2. 연구방법

계절보정을 통한 연간평균 라돈농도 예측 모형의 유도는 다음과 같은 3단계의 연구과정을 거쳐 유도하였다. 1단계, Pinel et al.(1995)에 의해 제시된 계절보정 모델의 유도 과정의 고찰을 통한 계절보정 모델을 이해하였으며, 2단계, 서울시 성동구에서 1999년 12월부터 2002년 1월까지 26개월에 걸쳐 Electrostatic Radon Monitor를 이용하여 실시간 실외 라돈농도를 조사한 결과를 이용한 실외 평균 라돈농도를 산출하여 모델에 적용하였다. 마지막 3단계는 2010년부터 2011년 동안 전국 1,000여 지점과 한국원자력안전기술원에서 2005년 전국 4,000여 지점에서 4계절동안 조사된 자료 중 주택에서 조사된 자료만을 발췌하여 모델 내의 계절별 보정 계수를 산출하였다.

라돈 발암성 평가를 위한 연간평균 노출선량 예측

을 위한 방법은 다음의 Fig. 1에서 제시하는 바와 같이 UNSCEAR(2000)에서 제시하는 유효선량 평가 도식에 맞춰 본 연구의 수행을 통해 개발되어진 계절보정을 통한 연간평균 라돈농도 예측모형을 활용하여 거주자의 거주시간이 고려된 맞춤형 라돈 유효선량 평가 모형을 개발하였다.

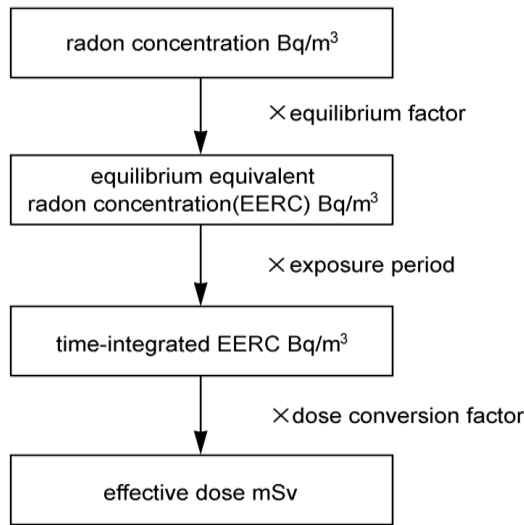


Fig. 1. Flowchart on the assessment of the effective dose for radon exposure.

3. 결과 및 고찰

3.1. Pinel et al.(1995)의 실내라돈 계절 보정 농도 모델 유도 과정 고찰

M_i 는 거주지 i 에서의 측정기간 전체 동안 평균 실내 라돈농도(Bq/m^3)로 할 경우, 일반 배경농도(실외 농도) 하에서의 실내 라돈농도는 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$M_i = C_o + \frac{1}{t_i^{(2)} - t_i^{(1)}} \int_{t_i^{(1)}}^{t_i^{(2)}} f_i(t) dt \quad (1)$$

여기서 C_o 는 배경농도(실외 농도(Bq/m^3))로 하면, $t_i^{(1)}$ 과 $t_i^{(2)}$ 는 각각 거주지 i 에서의 측정 시작과 끝난 시간이다. $f_i(t) > 0$ 은 시간 t 에서 거주지 i 에서의 실

내 라돈농도(Bq/m^3)를 나타내는 함수로 지속적으로 배경농도를 초과하는 것으로 표현된다. 또한 실내 라돈농도는 계절변화에 대하여 다음과 같이 단순한 모델로 표현할 수 있다.

$$f_i(t) = s(t)h_i \quad (2)$$

여기서 $s(t)$ 는 시간 t 에서 일반 주거지에서의 라돈 농도를 반영한 12개월 기간의 주기 함수이다. 그리고 h_i 는 전형적인 실내 라돈농도와 거주지 i 에서의 농도 특성 사이의 차이를 고려한 가중 팩터이다. 계절 변동 패턴은 모든 거주지에서 공통적인 것으로 가정한다면 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$M_i = C_o + \frac{1}{t_i^{(2)} - t_i^{(1)}} \int_{t_i^{(1)}}^{t_i^{(2)}} s(t) dt h_i \quad (3)$$

식 (3)의 좌변과 우변에 각각 로그를 취하여 변환시키면 다음 식 (4)와 같다.

$$\log(M_i - C_o) = \log\left(\frac{1}{t_i^{(2)} - t_i^{(1)}} \int_{t_i^{(1)}}^{t_i^{(2)}} s(t) dt\right) + \log h_i \quad (4)$$

거주지 i 에서 j 월에 시작하여 3개월 동안 라돈농도가 조사되었다면, 식 (4)는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 j 는 1부터 12까지의 수를 부여받을 수 있으며, $j=1$ 은 1월을 나타낸다.

$$\log(M_j - C_o) = \log\left(\frac{1}{3} \sum_{k=j}^{j+2} m_k\right) + \log h_i \quad (5)$$

식 (5)를 바탕으로 만약 거주지의 라돈농도 측정이 측정결과가 j 달을 첫달로 시작하여 t 달 동안 측정되어졌다면 식 (5)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$M = C_o + \left(\frac{1}{t} \sum_{k=j}^{j+t-1} m_k\right) h \quad (6)$$

측정이 1년(12개월) 동안 수행되었을 경우 식 (6)은 다음의 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$M^{(12)} = C_o + \left(\frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} m_k \right) h \quad (7)$$

최종적으로 식 (7)을 바탕으로 계절 보정식을 유도하면 다음의 식 (8)과 같으며, 식 (8)의 보정 계수는 식 (9)와 같이 표현될 수 있다. 여기서 $f_{j,t}$ 는 계절보정계수이다.

$$M^{(12)} = C_o + f_{j,t} (M - C_o) \quad (8)$$

$$f_{j,t} = \frac{t}{12} \frac{\sum_{k=1}^{12} m_k}{\sum_{k=j}^{j+t-1} m_k} \quad (9)$$

3.2. 국내 환경을 고려한 연간 평균 라돈농도 예측 모형

상기에 제시한 식 (8)과 식 (9)를 바탕으로 국내 환경에 적합한 연간 평균 라돈농도 예측 모형을 유도하기 위해 우선적으로 국내 실외 라돈농도 즉, 배경농도를 산출하였다. 배경농도는 Kim et al.(2007)에 의해 대기 중 시간별 라돈농도의 관측을 통한 대기 중 라돈농도 분포 특성을 파악하기 위한 일환으로 1999년 12월부터 2002년 1월까지 26개월에 걸쳐 서울시 동쪽 성동구에 위치한 한양대학교 서울캠퍼스 내의 대기 중 라돈 농도 관측소(북위 37°31' - 37°34', 동경 127°00' - 127°04')에서 일본 나고야 대학의 Iida(1985)에 의해 개발되어진 Electrostatic Radon Monitor를 이용하여 일일 시간별로 연속적으로 대기 중 라돈농도를 관측한 결과를 활용하였다. Kim et al.(2007)의 연구결과에 따르면, 조사기간 동안의 일반 대기 중의 라돈 측정 자료는 16,733개의 자료로 평균농도는 $7.62 \pm 4.11 \text{ Bq/m}^3$ 인 것으로 제시하였다. 또한 계절별 평균 라돈농도는 봄, 여름, 가을 겨울 각각 5.23 ± 1.32

Bq/m^3 , $6.21 \pm 1.91 \text{ Bq/m}^3$, $9.16 \pm 3.09 \text{ Bq/m}^3$, $8.52 \pm 3.74 \text{ Bq/m}^3$ 인 것으로 제시하였다. 이와 같은 연평균 라돈농도와 계절별 평균 라돈농도를 고려할 때 국내 실외 라돈 평균농도는 7 Bq/m^3 로 산정하였다. 이의 값은 Gunby et al.(1993)와 Pinel et al.(1995)이 제시한 영국의 실외 배경 라돈농도인 4 Bq/m^3 보다 높은 값으로, 실외 라돈농도가 영국에 비해 다소 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 산정된 국내 실외 라돈 평균농도인 7 Bq/m^3 을 배경농도로 식 (8)에 대입한 계절 보정 모형은 다음의 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$M^{(12)} = 7 + f_{j,t} (M - C_o) \quad (10)$$

계절별 보정 계수를 산출하기 위해 국립환경과학원에서 2010년부터 2011년 동안 전국 1,000여 지점에서 계절별로 사계절 라돈농도를 알파비적검출기를 이용하여 조사한 자료와 2005년도 한국원자력안전기술원의 전국 4,000여 지점에서 국립환경과학원에서 조사한 방법과 동일하게 알파비적검출기를 이용하여 계절별로 사계절 라돈농도 조사한 자료의 원자료를 획득하여 이의 자료로부터 산출하였다.

획득된 자료는 다음과 같은 자료 정리 조건에 따라 데이터베이스를 재구성하였으며, 재구성된 데이터베이스를 활용하여 자료 분석을 수행하였다. 자료 정리 조건은 다음과 같다. 첫째, 여러 시설 중 주택에서 조사된 라돈농도 조사 결과만 자료 분석에 활용한다. 둘째, 사계절 자료 즉, 봄, 여름, 가을 및 겨울 자료 중 한 계절의 농도 값이 없는 자료는 본 분석에서 제외한다. 셋째, 구축된 데이터베이스 중 농도 표시가 부등호(< or >)로 표시된 명확한 농도값을 제시하고 있지 않은 자료는 제외한다.

이와 같은 자료 정리 조건에 따라 재정리된 자료를 식 (9)에 대입하여 측정지점별 계절별 보정 계수를 산출한 후, 산출된 계절별 보정 계수값들의 평균값을 산출한 결과는 다음의 표와 같다.

Table 1. Seasonal correction factors for calculating the annual average radon concentration

Season	Spring	Summer	Fall	Winter
Correction factor	1.4±0.8	2.3±1.5	0.9±0.6	0.8±0.3

식 (10)을 4계절로 구분하여 표현하면 다음 식 (11)과 같으며, 이에 Table 1에서 제시한 계절별 보정계수를 삽입하여 최종적으로 식 (12)와 같은 연간 평균 라돈농도 예측 모형을 구축할 수 있다. 식 (12)에서 측정이 이루어지지 않은 계절의 항은 전체 값을 0으로 처리한다.

$$M^{(12)} = 7 + [a(M_{spring} - 7) + b(M_{\Sigma mer} - 7) + c(M_{fall} - 7) + d(M_{winter} - 7)] \quad (11)$$

$$M^{(12)} = 7 + [(1.4(M_{spring} - 7)) + (2.3(M_{\Sigma mer} - 7)) + (0.9(M_{fall} - 7)) + (0.8(M_{winter} - 7))] \quad (12)$$

다음의 Fig. 1은 식 (12)를 이용하여 산출된 계절보정 평균농도값과 측정된 평균값간의 편차 분포를 나타낸 것으로 각 계절별로 편차 값이 0인 값 주변의 값의 빈도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 본 계절보정 평균값의 사용이 사계절의 평균 값을 대표할 수 있음을 간접적으로 시사하는 결과로 사료된다.

3.3. 거주자의 거주시간이 고려된 맞춤형 라돈 유효선량 평가 모형

라돈 발암성 평가를 위한 연간평균 노출선량 예측을 위한 방법은 크게 선량학적 접근방법, 생물학적 이론에 근거한 접근방법 및 경험학적 접근방법에 의한 평가방법과 같이 3가지 방법으로 구분할 수 있다

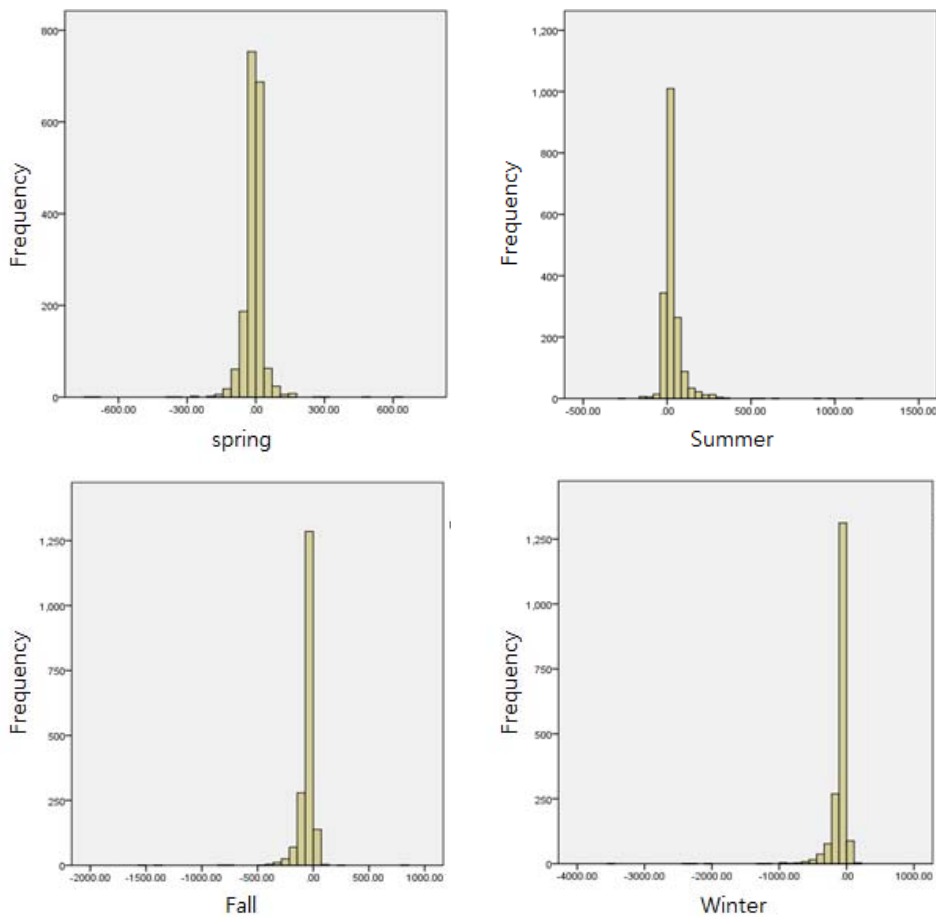


Fig. 2. Seasonal distribution of deviation between the measured value and corrected value.

(NRC, 1999). 선량적 접근 방법은 원폭 생존자들을 대상으로 획득된 자료를 즉, γ 선의 노출에 관한 건강 영향을 평가할 때 적용되는 방법으로 이의 방법을 적용하여 라돈 노출에 의한 건강영향을 추정하는데 있어서의 장점으로는 원폭 생존자들을 대상으로 한 풍부한 역학적 연구들의 수행이 이루어졌고, 이들 연구들로부터 획득된 자료가 풍부하다는 점이다. 즉, 풍부한 역학적 자료들을 활용할 수 있다는 것이 이 방법의 장점이다. 생물학적 이론에 근거한 접근방법은 방사 에너지의 접근에 의한 발암발생과정 중의 각 단계에 대한 단계별로 생물학적 이론에 근거하여 폐암 발생 가능성을 평가하는 방법을 BEIR 위원회(NRC, 1999)에서는 이 방법이 라돈의 노출로 인한 폐암 발생 위험성을 평가하기에 적합하지 않다고 보고하고 있다. 마지막으로 경합학적 접근방법에 의한 라돈 노출에 기인한 폐암 발생 가능성을 평가하는 방법은 역학적 자료의 통계적 분석을 이용하는 방법이다. 이와 같은 연간평균 노출선량 예측을 위한 다양한 방법 중 본 연구에서는 선량학적 방법에 기초하여 본 연구의 수행을 통해 개발되어진 계절보정을 통한 연간평균 라돈농도 예측 모형을 활용하여 거주자의 거주시간이 고려된 맞춤형 라돈 유효선량 평가 모형을 개발하였다.

UNSCEAR(2000)에서는 선량학적 접근방법에 준하여 선량환산계수를 산출하고 이의 적용을 통한 라돈 노출에 의한 연간유효선량을 산출하고 있다. 이의 산출방법은 다음과 같다.

$$E[mSv/y] = Q \cdot F \cdot T \cdot K \quad (13)$$

여기서 Q 는 라돈농도(Bq/m^3)를, F 는 평형인자, T 는 거주계수에 연간 시간을 곱한 값, K 는 선량환산계수($mSv/Bq \cdot h/m^3$)을 의미한다. UNSCEAR(2000)에서 제시하고 있는 평형인자의 값을 요약하여 제시하면 Table 2와 같다. UNSCEAR은 1977년 실내와 실외에서 평형인자 값을 각각 0.5와 0.6으로 제안한 이래 2000년 이후부터 현재까지 실내외 각각 0.4와 0.6으로 제안하고 있다. 또한 선량환산계수는 1982년에 실내외 각각 $8.7 \text{ nSv/Bq} \cdot \text{h/m}^3$ 으로 제안하고 있다.

Table 2와 3에서 제시하고 있는 계수의 값을 식 (13)에 적용하면 다음 식 (14)와 같다.

$$E[mSv/y] = 0.032 \cdot \Delta t \cdot M^{(12)} \quad (14)$$

여기서 Δt 는 거주지에서의 거주계수로 거주자의 거주지에서의 거주시간(hour)을 24시간으로 나눈 무명수로 거주자들의 거주지에서의 거주활동특성(거주시간)을 고려한 유효선량 평가가 이루어질 수 있도록 하였다.

최종적으로 라돈 노출에 의한 발암성 평가에 있어 연간평균노출선량을 이용한 거주시간이 고려된 연간 평가 모형은 식 (14)에 식 (12)를 대입하여 정리한 것과 같다.

$$E[mSv/y] = 0.032 \cdot \Delta t \cdot [7 + [a(M_{spring} - 7) + b(M_{\sum mer} - 7) + c(M_{fall} - 7) + d(M_{winter} - 7)]] \quad (15)$$

Table 2. Equilibrium factor presented in the UNSCEAR

	1977	1982	1988	1993	2000
Indoor	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4
Outdoor	0.6	0.6	0.8	0.8	0.6

Table 3. Dose conversion factor presented in UNSCEAR

(Unit : nSv/Bq·h/m³)

	1982	1988	1993	2000
Indoor	8.7	10	9	9
Outdoor	17	10	9	9

4. 결론

본 연구는 2014년 환경부 주관의 국내 최초 라돈 노출에 의한 건강영향평가 연구로 라돈에 대한 위해 관련 정보 수집 및 의사소통기법과 위해지수 개발을 목적으로 환자-대조군 연구 수행에 있어 신뢰성 있는 결과의 도출을 도모하기 위한 일환으로 연간 평균 누적 라돈노출농도를 제공하기 위한 모형의 구축을 목적으로 수행되어졌다.

라돈 노출에 의한 대표적 건강상의 악영향은 만성적 질환인 폐암 발생으로 국제적으로 라돈 노출에 의한 폐암 발생을 감소시키기 위한 다양한 방법들이 개발되어지고 있다. 이러한 다양한 방법들의 개발에 있어 라돈 노출량의 평가 즉, 실내공기 중 라돈농도 평가 및 라돈 노출에 의한 유효선량 평가는 필연적인 개발 과정이나 노출량 평가에 있어 단기간 측정 및 장기간 측정을 통해 획득된 라돈농도들이 적용되어지고 있다. 그러나 라돈의 건강영향이 만성적 질환인 폐암 발생임을 고려할 때 라돈에 대한 건강영향 평가 개발과정에서는 1년 동안의 장기간 누적 라돈노출농도의 측정이 요구되어지고 있다.

사람이 생활하고 있는 거주공간에서 1년간의 장기간 라돈 누적농도를 조사하는 것은 실현 가능성이 높지 못한 실정으로 국내의 적으로 단기간의 라돈농도 조사를 통한 라돈 노출 유효선량 평가 및 폐암 발생 위험도를 평가하고 있다. 우리나라와 같이 일년 동안 사계절의 변화가 뚜렷한 국가의 경우 실내환경 역시 사계절 계절변동에 따라 변화하는 것은 누구나 알고 있다. 거주환경에서의 실내 라돈농도는 겨울철이 굴뚝 효과의 특성에 의해 다른 계절에 비해 높은 라돈농도를 보이며, 여름의 경우 빈번한 환기에 의해 다른 계절에 비해 낮은 라돈농도를 보이고 있다. 이는 측정시기(계절)에 따라 라돈농도의 변화가 크며, 이러한 변화는 라돈 노출에 의한 유효선량 평가 및 폐암 발생 위험도 평가에 있어 큰 불확실성을 야기한다 할 수 있다.

국내 환경부에서는 거주환경에서의 실내 라돈농도 조사를 3개월간의 누적라돈농도 조사를 공정시험방법으로 정하여 권장하고 있으며, 국가 차원의 대단위 라돈농도 조사 역시 일정 계절(겨울철)에 국한하여 지속적으로 조사되어져 오고 있다. 이러한 국가 차원의

통일된 측정방법의 권장과 국가 차원의 대단위 라돈 농도 조사를 통해 많은 거주환경에서의 라돈농도 자료가 구축되어져 있으나 상기에 제시한 이유에 의해 라돈 노출량 평가 및 건강영향 평가의 활용성이 매우 미흡한 실정이다. 이에 신뢰성 있는 라돈 노출에 의한 폐암 발생 위험도 평가와 같은 건강영향평가 및 거주환경별 맞춤형 평가의 수행을 위한 단기 계절 측정 라돈농도의 계절 보정을 통한 연간평균라돈농도 예측 모형의 개발을 위해 Pinel et al.(1995)에 의해 제안된 계절보정 모델을 기반으로 국립환경과학원, 한국원자력안전기술원에서 1년간 계절별 측정자료와 한양대 실외 라돈 농도 관측소에서 조사된 자료를 바탕으로 국내 환경부에서 정하는 라돈 측정 공정시험법인 3개월(한 계절) 조사 결과를 바탕으로 연간평균 라돈농도를 예측할 수 있는 모형을 개발하였다. 또한 라돈의 연간 노출에 의한 유효선량 평가에 있어 개발된 연간평균 라돈농도 모형과 거주자들의 거주지 활동특성(거주시간)이 고려된 선량학적 방법을 이용한 연간 라돈 유효선량 평가 모형을 개발하여 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 생활공간 환경보건기술개발사업에서 지원받았습니다(과제번호 : 2015001350002).

REFERENCES

AGIR (Advisory Group on Ionising Radiation), 2009, Radon and Public Health. Report of the independent Advisory Group on Ionising Radiation. Doc HPA, RCE-11, 1-204. Available at <http://www.hpa.org.uk>

Daniel, K., Ranjeeta, M., Jan, M. Z., Ernest, G. L., 2005, Modeling seasonal variation in indoor radon concentrations, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 15, 234-243.

EC (European Commission), Radiation Protection Unit, 1999, Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials, *Radioation Protection*, 112.

Gavin, K. G., Paul, S. P., Antony, R. D., 2005, The effects of geology and the impact of seasonal correction factors on indoor radon levels: A case study

- approach, *Journal of Environmental Radioactivity*, 84, 469-479.
- Groves-Kirkby, C. J., Denman, A. R., Phillips, P. S., 2010, Crockett, R. G. M., Sinclair, J. M., Comparison of seasonal variability in European domestic radon measurements, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 565-569.
- Gunby, J. A., Darby, S. C., Miles, J. C. H., Green, B. M. R., Cox, D. R., 1993, Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom, *Health Phys.*, 64(1), 2-12.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection), 2007, Recommendation of the international commission on radiological protection, ICRP Publication 103, *Ann ICRP*, 37.
- Iida, T., 1985, An electrostatic radon monitor for the continuous measurement of environmental radon in atmospheric radon progeny and environmental radioactivity, *Okabe. Atomic Energy Society of Japan*, 66-73.
- Khan, M. S. A., Tariq, M., Rawat, R. B. S., 2014, Environmental monitoring of radon-thoron levels and their seasonal variation in some selected dwellings in and around rampur city using solid state nuclear track detector (SSNTD), *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(8), 151-157.
- Kim, Y. S., Lee, C. M., Kim, K. Y., Jeon, H. J., Kim, J. C., Iida, T., 2007, Time series observations of atmospheric radon concentration in Seoul, Korea for an analysis of long-range transportation of air pollutants in the North-East Asia, *Kor. J. Env. Hlth*, 33(4), 283-292.
- Kurnaz, A., KucukÖmeroğlu, B., Cevik, U., Celebi, N., 2011, Radon level and indoor gamma doses in dwellings of Trabzon, Turkey, *Applied Radiation and Isotopes*, 69(10), 1544-1549.
- Lazar, I., Toth, E., Marx, G., Czigler, I., Kotdes, G. J., 2003, Effects of residential radon on cancer incidence, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 258(3), 519-524.
- Lubin, J. H., Boice, Jr, J. D., 1997, Lung cancer risk from residential radon: Meta-analysis of eight epidemiologic studies, *J. Natl. Cancer Inst.*, 89, 49-57.
- National Research Council (NRC), 1999, Committee on health risks of exposure to radon, board on radiation effects research, Commission on Life Sciences, *Health Effects of Exposure to Radon (BEIR-6)*. Washington, DC: National Academy Press.
- Neuberger, J. S., Gesell, T. F., 2002, Residential radon exposure and lung cancer: Risk in nonsmokers, *Health Phys.*, 8(1), 1-18.
- Pinel, J., Fearn, T., Darby, S. C., Miles, J. C. H., 1995, Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom, *Radiation Protection Dosimetry*, 58(2), 127-132.
- Singh, A. K., Kumar, A., Prasad, R., 2006, Distribution of radon levels in Udaipur, *Asian Journal of Chemistry*, 18(5), 3408-3411.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2000, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- UNSCEAR (United Nations Scientific committee on the Effects of Atomic Radiation), 2009, Effects of ionizing radiation, Volume II, Annex E: Sources-to-effects assessment of radon in homes and workplaces, UNSCEAR 2006 Report, New York, United Nations, Available at <http://www.unscear.org>
- Webb GA, 1992, Exposure to radon, *Radiat. Prot. Dosim.*, 42(3), 191-195.
- WHO (World Health Organization), 2005, Fact sheet No. 291: Radon and Cancer, Available at <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/index.html>
- WHO (World Health Organization), 2009, WHO Handbook on Indoor Radon Available at http://www.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf