

ORIGINAL ARTICLE

건축자재 라돈 방출에 의한 실내공기 중 라돈농도 예측에 관한 연구

이철민* · 곽윤경¹⁾ · 이동현²⁾ · 이다정¹⁾ · 조용석¹⁾

평택대학교 환경융합시스템학과, ¹⁾(사)한국라돈협회, ²⁾(주)EHS 기술연구소

A study on the Prediction of Indoor Concentration due to Radon Exhalation from Domestic Building Materials

Cheolmin Lee*, Yoonkyung Gwak¹⁾, Donghyun Lee²⁾, Dajeong Lee¹⁾, Yongseok Cho¹⁾

Department of Integrated Environmental Systems, PyeongTaek University, Gyeonggi-Do 450-701, Korea

¹⁾Korea Radon Association, Seoul 133-825, Korea

²⁾Institute of Technology for EHS, Seoul 133-825, Korea

Abstract

Radon exhalation rates have been determined for samples of concrete, gypsum board, marble, and tile among building materials that are used in domestic construction environment. Radon emanation was measured using the closed chamber method based on CR-39 nuclear track detectors. The radon concentrations in apartments of 100 households in Seoul, Busan and Gyeonggi Provinces were measured to verify the prediction model of indoor radon concentration. The results obtained by the four samples showed the largest radon exhalation rate of 0.34314 Bq/m²·h for sample concrete. The radon concentration contribution to indoor radon in the house due to exhalation from the concrete was 31.006 ± 7.529 Bq/m³. The difference between the prediction concentration and actual measured concentration was believed to be due to the uncertainty resulting from the model implementation.

Key words : Radon emanation, Radon exhalation rates, Building materials, Nuclear track detector(NTD), Prediction model

1. 서론

라돈은 우라늄 계열 중 라듐의 알파붕괴에 의해 생성되는 방사성 불활성 가스이다. 일부 지상에 존재하는 물질은 우라늄 동위원소와 같은 천연 방사성 핵종을 가지고 있으며, 라돈 가스를 많이 또는 적게 방출한다. 이로 부터 방출된 라돈 원자는 실내와 실외 공기 중에 분포하며, 3.8일의 단반감기를 가지고 이동한다. 대기 중의 라

돈과 딸핵종은 천연 발생원으로부터 인체에 노출될 때 가장 큰 역할을 하는 것으로 잘 알려져 있다(UNSCEAR, 2000). 라돈 가스는 토양으로부터 콘크리트 바닥과 벽을 통해 집으로 들어올 수 있다. 밀폐된 방에 들어온 라돈이 농축될 때 때때로 공중보건에 유해한 수준까지 도달한다(Kurnaz 등, 2011).

라돈과 라돈자손은 특히 지하광산, 동굴, 지하실, 또는 환기하기 어렵게 설계된 주택에서 농축되고, 건강상 큰

Received 29 May, 2015; Revised 6 August, 2015;

Accepted 28 August, 2015

*Corresponding author : Cheol-min Lee, Department of Integrated Environmental Systems, PyeongTaek University, Gyeonggi-Do 450-701, Korea

Phone: +82-31-689-8114

E-mail: cheolmin@ptu.ac.kr

© 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.

위해를 야기할 수 있다. 따라서 거주지에서의 라돈농도는 실내공기질 제어 설계 전략을 결정하거나, 건강 위해성의 측면에서 중요하다(Singh 등, 2006). 라돈과 라돈 딸핵종의 흡입과 관련된 방사학적 위해도의 평가는 주로 누적 라돈량의 측정을 기초로 한다. 국제방사선방어위원회(ICRP)에서는 국가에서 지정한 평균 라돈농도보다 10 배 높은 실내 라돈수치를 보이는 건축물 1 % 와 그 이상의 수치는 보이는 건축물에 대하여 'radon prone' 지역으로 고려되어야한다고 제안하였다. 따라서 라돈의 측정 뿐만 아니라 주택 내에서의 주된 라돈의 발생원을 발견하는 것이 요구된다(Ramola 와 Choubey, 2003). 라돈은 건축된 주택의 토양과 암석으로부터 주로 형성되지만, 건축자재에서 방출되는 라돈 역시 실내 환경에서의 주된 잠재적 발생원의 하나로 알려져 있다(Bavarnegin 등, 2012; Chen 등, 2010; Cother 와 Smith, 1987; Saad 등, 2010; UNSCEAR, 2000, 2008; WHO, 2009).

그러나 국내 건축 환경에 사용되는 건축자재로부터의 라돈 방출율을 측정하는 연구는 거의 전무한 실정이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 국내 건축 환경에 사용되는 건축 자재 중 가장 정량적으로 많이 사용되고 있는 일부 건축 자재를 대상으로 건축자재로부터의 라돈 방출량을 조사하였다. 이 결과로 실내공기 중의 기여농도를 평가하여 제시함으로써 향후 관련 연구의 기초적 자료로서 활용될 수 있고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 라돈 방출량 조사 및 실내 기여 라돈농도 예측

건축자재 라돈 방출량 조사를 위해 본 연구에서는 밀폐된 챔버 방법(Closed chamber method)을 이용하였다. 본 실험을 위해 본 연구팀은 가로, 세로, 높이 각각 400 mm로 전체 0.064 m³의 부피로 아크릴 챔버를 제작하였다. 또한 선택된 건축자재를 가로 375~384 mm, 세로 375~384 mm, 높이 9.5~12.5 mm의 시편을 제작하여 챔버 바닥에 고정 시켰으며, 챔버 상단에 CR-39 기반의 passive type 검출기 설치하고 밀폐시킨 후 방출량을 조사하는 방법이다. 밀폐된 챔버 내의 라돈 농도는 라돈이 수차례의 반감기를 거치며 평형상태에 도달하게 된다. 이를 다음의 식을 이용하여 건축자재로부터 방출

되는 라돈의 방출량을 평가하였다(Fleischer 와 Mogro-Gampero, 1978; Khan 등, 1992; Mahur 등, 2008a, 2008b; Saad 등, 2010; Saad 등, 2013). 또한, 챔버 내의 라돈농도의 배경농도를 산출하기 위해 시편을 설치하지 않은 두개의 챔버를 제작하여 동일 실험 기간 동안에 챔버 내 라돈농도를 조사한 후 이의 값을 챔버 내 배경농도로 사용하였다.

$$E_A = \frac{C_{Rn} \lambda V}{A \left[T + \frac{1}{\lambda_{Rn} (e^{-\lambda_{Rn} T} - 1)} \right]} \quad \text{----- (1)}$$

여기서 E_A : 면적방출율(mBq/m²·h)

C_{Rn} : 누적라돈노출량(Bq/m³)

A : 라돈이 방출된 건축재료 샘플의 전체 표면적(m²)

V : 밀폐된 챔버의 빈 부피(m³)

M : 건축재료 샘플의 질량(kg)

λ : 라돈의 붕괴상수(1/h)

T : 밀폐 이후의 시간(h)

건축자재로부터 방출된 라돈이 실내 공기 중 라돈농도에 미치는 영향은 물질수지식을 기초로 유도될 수 있다. 건축자재나 토양으로부터 방출된 라돈에 의한 실내 공기 중 라돈농도의 예측은 다음의 식에 따라 계산하였다(Mahur 등, 2008a, 2008b; Nazaroff 와 Nero, 1988; Saad 등, 2010, Saad 등, 2013).

$$C_{Rn} = \frac{E_x \times S_r}{V_r \times \lambda_v} \quad \text{----- (2)}$$

여기서 C_{Rn} : 건축자재 라돈 방출에 의한 실내 라돈농도(Bq/m³)

E_x : 라돈 방출율(Bq/m²·h)

V_r : 방의 체적(m³)

λ_v : 공기교환율(1/h)

S_r : 표면적(m²)

2.2. 연구대상 시설 및 연구대상 건축자재 선정

본 연구에서는 최근 국내 주택환경에 대부분을 차지하고 있는 아파트를 대상으로 하여 이들 아파트 건설에 있어 주로 사용되는 건축자재를 조사하였다. 연구대상 아파트는 국내 대도시인 서울과 부산 및 경기도에 위치한 아파트를 대상으로 무작위로 100 세대를 추출하였다. 추출된 아파트의 건축대장을 입수하여 라돈 방출 가능성이 있는 것으로 판단되는 건축자재의 사용량을 조사하였으며, 또한 본 연구에서 실내 라돈농도 예측에 있어 필요한 환기량의 자료를 확보하기 위해 연구대상 시설 거주자를 대상으로 일일 환기시간에 대해 조사하였다.

건축대장을 바탕으로 조사한 결과를 바탕으로 라돈 배출 가능성이 있으며, 건축자재 사용량에 대한 정보를 확보할 수 있는 건축자재들을 본 연구의 연구대상 건축자재로 선정하였다. 이와 같은 과정을 통해 본 연구의 연구대상 건축자재는 콘크리트, 석고보드, 타일 및 대리석으로 하였다. 또한, 실내 라돈농도 예측과정 중에 필요한 환기량의 정보는 조사결과 거주자들의 일일 환기량은 평균적으로 하루 약 1 시간의 환기를 하는 것으로 조사되어 실내공기 중 라돈농도 예측에 있어 이의 정보를 활용하였다.

2.3. 실내농도 예측모델 검증을 위한 실제환경 농도 조사

건축자재로부터 방출된 라돈에 의한 실내공기 중의 라돈농도를 예측하기 위한 모델(식 (2))의 검증을 위해 본 연구진은 건축자재의 정보를 획득하기 위해 10 층 이상의 고층에 거주하는 90 세대와 3 층 이하의 저층에 거주하는 10 세대 총 100 세대의 아파트를 선정하였다. 거실의 건축자재 방출량 실험을 위한 챔버실험에서 사용한 동일한 검출기를 이용하여 2013 년 2 월과 3 월에 걸쳐 검출기를 설치하고, 3 개월간 노출 이후 5 월과 6 월에 회수하였다. 회수과정 중 3 개의 검출기의 분실로 인해 총 97 개의 검출기를 회수하였으며, 회수된 검출기는 외부의 공기가 유입되지 않도록 잘 밀봉한 후 검출기 제조사로 보내어 농도를 분석하였다.

세대를 저층과 고층으로 구분한 것은 저층세대와 고층세대 간의 실내공기 중 라돈농도의 차이 검증을 통해 토양에서 기원하는 라돈이 고층세대의 실내공기 중의 라돈농도에 크게 기여하지 않음을 검증하고자 하기 위해서이다. 이와 같이 고층 세대 실내공기 중의 라돈농도에 토

양 기원의 라돈이 크게 기여하지 않는다는 가설을 검증하고, 이의 가설의 확인 후 고층에서 조사된 90 세대의 값만을 실내농도 예측모델 검증에 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

국내의 경우 아직 건축자재로부터 라돈 방출량을 평가하는 방법의 표준화가 이루어져 있지 못한 상태로 이와 관련된 연구는 초보 단계에 있다 할 수 있다. 본 연구에서는 여러 건축자재의 라돈 방출량 실험 방법들 중 현재 국내 친환경건축자재 시험법이 소형 챔버법을 채택하고 있음을 고려하였다. 향후 이 시험법과의 연계성을 고려하여 Closed chamber method를 적용하였다. 또한 컨테이너 내의 라돈농도의 조사는 알파비적검출기를 이용하여 조사하였다.

현재 건축자재 라돈 방출량 조사에 사용되어지는 조사방법들의 내용에 대해서 이미 선행 연구논문(Lee 등, 2015)에 제시한 바 있다. 본 연구에서 사용하고자 하는 Closed chamber method는 건축자재로부터 밀폐된 챔버로 방출된 라돈 방사능의 측정을 통해 방출율을 산출하는 방법으로 밀폐된 챔버 내 라돈농도 N은 다음의 식과 같이 시간에 따라 증가된다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{c}{V} - (\lambda + \lambda_v)N$$

- 여기서 V : 챔버 부피
- C : 시료의 총배출율
- λ : 방사붕괴율
- λ_v : 누출 또는 환기율

여기서 방사능의 농도는 다음 식에 의해 산출할 수 있다.

$$A(t) = \frac{\lambda}{(\lambda + \lambda_v)} \cdot \frac{C}{V} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \lambda_v)t})$$

건축자재로부터의 라돈 방출량에 대한 실험 결과로 연구대상 건축자재에 대한 챔버 내 라돈농도 및 단위 면적당 라돈 방출량을 산출하여 Table 1에 제시하였다. 챔

Table 1. Radon concentration and radon exhalation of construction materials in chamber

Materials	Radon concentration in chamber (Bq/m ³)	Concentration of radon emanation (Bq/m ³)	Radon emanation per unit area (Bq/m ² ·h)
Concrete	429	415	0.34314
Gypsum board	63	49	0.04051
Marble	27	13	0.01075
Tile	19	5	0.00413

버 내 라돈농도는 blank의 챔버 내 라돈농도를 보정하지 않은 상태의 라돈농도 값을 나타낸 것이고, 방출라돈농도는 챔버 내 라돈농도에 blank 챔버 내 라돈농도를 뺀 값을 나타낸 것이다. 이 값을 사용하여 방출량 산출 식으로 단위 면적당 라돈 방출량을 산출하여 제시하였다.

가장 높은 단위면적당 라돈 방출량을 보인 건축자재는 콘크리트로 0.34314 Bq/m²·h의 농도를 보였으며, 다음으로 높은 라돈 방출량을 보인 건축자재로는 석고보드와 대리석의 순으로 각각 0.04051 Bq/m²·h과 0.01075 Bq/m²·h의 농도를 나타냈다. 가장 낮은 단위면적당 라돈 방출량을 보인 건축자재는 타일이며 0.00413 Bq/m²·h의 농도를 나타냈다. 이는 각 건축자재별로 단위면적당 라돈 방출량 간에는 큰 차이를 있음을 보여주는 결과로 건축자재별로 실내 공기 중 라돈농도 증가에 기여하는 정도의 차이 역시 자재 종류별로 큰 차이가 있는 것으로 확인할 수 있다. 위의 결과를 통해 향후 건축자재에 대한 관리방안 수립에 있어 각 건축자재별 라돈 방출량 조사를 통한 방출량이 높은 건축자재들의 목록 작성이 선행적으로 이루어진 후에 높은 방출량을 보이는 건축자재들에 대한 관리방안이 우선적으로 수립되는 것이 바람직하다 판단된다.

본 연구에서 건축자재로부터 방출된 라돈 농도들의 합이 실내공기 중의 라돈농도에 비해 낮은 것으로 조사

되었다. 이는 앞에서 제시한 바와 같이 모델 구현에 따르는 제한점으로 판단되며, 이러한 제한점을 모델 구현 과정에 따른 불확실성 즉, 시나리오의 불확실성과 모수의 불확실성 및 모형의 불확실성으로 구분하여 모델 구현과 실측자료와의 차이에 관해 고찰하였다.

건축자재 기여 실내 예측 라돈농도의 경우, 저층(3층 이하)과 고층(10층 이상)의 조사대상 거주환경에서의 라돈농도분포 특성에 따라 Table 2에 나타내었다. 고층에 비해 저층의 주거환경 실내공기 중의 라돈농도가 약 1.5 배 이상의 높은 농도를 나타냈으며, 고층과 저층의 실내공기 중의 라돈 농도 간에는 유의수준이 0.05로 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다(<0.05). 라돈의 주 발생원은 토양으로 저층의 경우 토양과 근접하여 있어 토양으로부터 발생하는 라돈에 의한 영향으로 고층에 비해 실내 공기 중 높은 라돈의 농도를 나타낸 것으로 판단된다. 즉, 고층은 토양에서 발생하는 라돈에 의한 영향은 매우 희박하며, 주로 건축자재 등에서 발생하는 라돈에 의한 실내 공기 중 라돈농도가 증가된 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 이 결과를 바탕으로 고층(10층 이상)의 조사대상 거주환경의 실내공기 중의 라돈농도는 단지 건축자재에서 방출된 라돈에 의한 것으로 가정하였다.

건축자재별로 방출된 라돈이 실내공기 중 라돈농도에

Table 2. Comparison of radon concentration in indoor air of above tenth floor or below third floor

Classification	Number	Mean (Bq/m ³)	Standard deviation (Bq/m ³)	p-value
Above tenth floor	88	88.0	30.2	0.014
Below third floor	9	145.1	54.5	
Total	97	93.3	36.8	

Table 3. Prediction of indoor radon concentration by radon emanation of construction materials

Materials	Number	Mean (Bq/m ³)	Standard deviation (Bq/m ³)	p-value	Duncan
Concrete	97	31.006	7.529	0.000	a
Gypsum board	97	1.7195	0.416		b
Marble	97	0.0230	0.006		c
Tile	92	0.0395	0.025		c
Total	383	8.3035	13.785		

기여하는 정도를 평가하기 위해 식 (2)을 이용하여 건축자재 기여 실내 라돈농도를 예측한 결과 Table 3과 같은 결과를 획득하였다.

라돈 방출량이 가장 높았던 콘크리트의 경우 31.006 ± 7.529 Bq/m³으로 가장 높은 예측 실내농도를 나타냈으며, 다음으로 석고보드로 1.7195 ± 0.416 Bq/m³의 예측 실내농도를 보였다. 타일과 대리석에서 방출된 라돈에 의한 예측 실내라돈농도는 콘크리트와 석고보드에 비해 낮은 농도로 두 건축자재간에는 통계적으로 유의한 농도차가 없는 것으로 조사되었다. 반면 콘크리트와 석고보드 및 타일과 대리석간의 예측 실내 라돈 농도 간에는 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다. 이는 실내 공기 중 라돈농도에 가장 큰 영향을 미치는 건축자재는 콘크리트임을 확인할 수 있는 결과로 콘크리트의 경우 다른 건축자재에 비해 라돈의 방출량이 크고, 또한 건축물에 사용되는 양 역시 다른 건축자재에 비해 많이 사용됨으로써 실내 공기 중의 라돈농도 증가에 크게 기여하고 있는 것으로 판단된다.

이상의 건축자재에서 기여하는 라돈농도들의 총 라돈농도가 실태조사에서 획득된 실내공기 중의 라돈농도 (Table 3)에 비해 낮은 것으로 조사되었는데 이는 모델 구현에 따르는 제한점으로 판단된다.

시나리오 불확실성에서 발생될 수 있는 오류는 묘사 오류, 자료집계 오류, 전문적 판단의 오류 및 불완전한 분석에 의한 오류 등을 들 수 있다. 본 연구 역시 시나리오 불확실성에 의한 오류가 발생되어진 것으로 판단되며, 이들 시나리오 불확실성 중 가장 큰 오류를 나타낼 수 있는 오류로는 자료 집계의 오류가 본 연구 결과에 가장 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 본 연구 결과에 영향을 미칠 것으로 판단되는 자료집계의 오류로는 첫째, 본 연구

에서 조사대상 시설의 건축자재별 사용현황의 조사를 위해 각 조사대상 시설의 건축대장을 바탕으로 건축자재의 사용현황을 조사하였다. 이때 사용된 건축자재의 종류 및 이들 건축자재의 사용량 등에 대한 사용현황을 파악 하는데 어려움이 따랐으며, 본 연구의 연구대상 건축자재인 4개의 건축자재의 사용현황만을 파악할 수 있었다. 이로 인해 다른 라돈 방출이 가능한 건축자재들에서 발생하는 라돈의 방출량 평가가 이루어지지 못함으로써 모델 구현값과 실측값 간의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서의 건축자재 방출량 실험에 사용된 건축자재는 각 건축자재 유형별 대표적 건축자재 한 개만을 한 차례 시험한 것으로 생산회사의 차이, 건축자재 재료의 원자재 차이 등과 같이 같은 종류의 건축자재에 대한 방출량의 차이를 고려한 대표적 방출량 값을 활용하지 못함으로써 본 연구의 결과가 각 건축자재의 방출량을 대표할 수 있기에 부족하다. 또한 조사대상 시설에 사용된 건축자재가 본 연구에서 사용된 건축자재와 동일한 제품이 아닌 것 등에 의한 불확실성이 발생될 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 시나리오의 불확실성을 줄이기 위해서는 향후 건축자재별로 국내에 생산되는 모든 건축자재의 라돈 방출량 조사가 이루어져야 할 것이며, 또한 이들 건축자재별로 대표적 방출량 값을 획득하기 위한 반복 실험을 통한 평균 방출량에 관한 자료가 획득되어야 할 것으로 판단된다. 또한 모델 구현 대상 시설에 사용되어진 건축자재의 정보와 이들 자재의 사용량에 대한 현황 조사가 보다 정밀적으로 이루어질 수 있는 방안의 구축이 이루어져야 할 것이다.

모수 불확실성을 야기 시키는 다양한 오류들의 종류로는 측정오류, 표본추출 오류, 자료의 변동, 포괄적 또는 대안자료의 사용 등을 들 수 있으며, 이 중 본 연구에서

모델 구현에 의해 산출된 값에 큰 불확실성을 야기 시킨 것으로 여겨지는 오류들을 고찰해 보면 다음과 같다. 본 연구의 수행 중에 발생될 수 있는 표본 추출 오류는 본 연구에서는 연구의 규모와 범위를 고려하여 다양한 건축자재의 라돈 방출량 평가를 위해 유형별 한 개 종류의 건축자재만을 조사하였으며, 연구기간의 제한으로 건축자재별 라돈 방출량 실험을 반복적으로 수행하지 못함으로써 산출된 건축자재별 라돈 방출량의 값이 대푯값으로서의 의미를 부여할 수 없는 것에서의 불확실성이 발생될 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 불확실성을 줄이기 위해서는 향후 건축자재 방출량 실험에 있어 건축자재 유형별 국내 시판되어지는 건축자재의 종류 파악 및 이로부터 임의의 표본추출과 추출된 건축자재의 반복적인 방출량 실험 등이 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 모수불확실성을 야기하는 오류 중 대안자료의 사용으로 인한 불확실성 역시 건축자재에서 방출되는 라돈에 의한 실내 라돈농도 기여도 평가에 있어 중점적으로 고려되어야 할 내용으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 실내 환기율의 경우 일반적인 값을 적용함으로써 모델 구현 값의 불확실성을 초래한 것으로 판단된다. 이의 불확실성의 감소를 위해 조사대상 시설에서의 환기량 및 국내 조사대상 주거형태별 대표적 환기량에 대한 조사가 이루어져야 할 것이며, 이로부터 산출된 결과의 활용이 이루어지는 것이 바람직하다고 여겨진다. 이와 같이 국내 라돈 관련 연구 환경이 초보적 단계로 높은 모수 불확실성을 가지고 있어 모델 구현 산출 결과의 신뢰성이 낮아짐을 다시금 확인할 수 있다. 따라서 모수 불확실성의 감소를 위한 방안으로 지속적인 연구의 수행을 통한 관련 자료의 데이터베이스 구축 및 구축된 Big 데이터베이스의 분석을 통한 입력 자료의 대표성과 신뢰성을 높이는 것이 무엇보다도 중요하다 판단된다. 이는 연구자들 개인의 노력보다는 국가 단위의 라돈 관련 연구기관이나 라돈관련 협회 및 정부기관과의 연계를 통한 노력이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

마지막으로 모형의 불확실성을 들 수 있다. 이는 본 연구에서 제안된 모델 자체가 가지고 있는 불확실성이라 할 수 있으며, 이는 보다 더 정확하고 신뢰성 있는 모델의 개발을 통한 불확실성의 감소가 이루어져야 하는데 국제적으로 이와 같은 모형의 불확실성을 줄이기 위해 신뢰성 높은 모델 개발을 위한 노력이 이루어지고 있는 실정

이다.

이와 같이 국내의 경우 건축자재에서 방출되는 라돈에 의한 실내공기질의 기여도 평가에 관한 연구는 거의 전무한 실정으로 건축자재로부터 방출되는 라돈에 의한 거주환경 내 거주자들의 건강을 보호하기 위한 관련 규제기준 및 관리방안 수립은 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 연구는 국내 건축자재 라돈 방출량 실험에 있어 국내 환경에 적합하다 판단되는 방출량 실험법을 제시하고, 이 방법을 통해 국내 건축 환경에 다량으로 사용되는 건축자재를 대상으로 라돈 방출량 실험 및 실내환경에서의 건축자재 사용량을 이용한 건축자재 라돈 방출에 의한 실내 라돈농도의 기여도를 평가하여 제시하였다. 모델의 구현 값과 실측값 간에는 큰 차이를 보였으나 아직 국내 라돈관련 연구 환경에서의 빈약한 자료의 활용에서 발생한 불확실성이라 판단되며, 향후 관련 연구의 추진을 통한 자료의 축적이 시급한 것으로 여겨진다.

4. 결론

최근 라돈에 대한 사회적 관심의 증가로 인한 주거환경 내 라돈 농도의 중요성이 강조되고 있다. 또한 관련 실태조사가 빈번히 이루어지고 있으나, 국내 건축 환경에 사용되고 있는 건축자재로부터의 라돈 방출율을 측정하는 연구는 거의 전무한 실정이며, 관련 정책 및 관리방안 역시 매우 미비한 실정이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 국내 건축 환경에 사용되는 건축자재 중 가장 정량적으로 많이 사용되고 있는 일부 건축자재를 대상으로 건축자재로부터의 라돈 방출량과 실내공기 중의 기여농도를 평가하여 제시함으로써 향후 관련 연구의 수행에 있어 본 연구가 기초적 자료로서 활용될 수 있고자 수행되었다. 이에 본 연구에서는 국내 주택환경의 대부분을 차지하고 있는 아파트를 대상으로 서울과 부산 및 경기도에 위치한 아파트 100세대를 무작위로 선정하고, 이들 아파트 내의 실내공기 중 라돈 농도를 조사하여 예측 모델 검증의 자료로 활용하였다. 또한 조사대상 아파트의 건축대상을 통해 건축자재 사용량에 대한 정보를 확보하였다. 이 과정에서 라돈 방출 가능 건축자재 중 사용량의 정보를 확보할 수 있는 건축자재로는 콘크리트, 석고보드, 타일 및 대리석을 본 연구의 연구대상 건축자재로 선정하였다. 이들 건축자재로부터의 라돈 방출량 조사는 Closed

Chamber Method에 맞춰 수행하였으며, 산출된 결과와 건축자재 사용량을 이용하여 건축자재별 실내공기 중 라돈농도 증가에 기여하는 예측농도를 산출하였다.

본 연구의 수행을 통해 획득된 결과를 요약하면 다음과 같다. 조사대상 건축자재 중 단위면적당 가장 높은 방출량을 보인 건축자재는 콘크리트로 0.34314 Bq/m²·h의 농도를 보였으며 가장 낮은 방출량을 보인 건축자재는 타일로 0.00413 Bq/m²·h의 농도를 나타냈다. 저층(3층 이하)과 고층(10층 이상)의 조사대상 거주환경 실내 공기 중 라돈농도 조사 결과 저층의 라돈농도가 고층에 비해 약 1.5 배 이상의 높은 농도를 나타내 고층의 경우 토양에서 방출되는 라돈의 영향보다는 건축자재에서 방출되는 라돈에 큰 영향을 받고 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다. 건축자재로부터의 라돈방출에 의한 실내 라돈농도를 예측한 결과 콘크리트의 경우 31.006 ± 7.529 Bq/m³으로 가장 높은 예측 실내농도를 나타냈으며, 다음으로 석고보드로 1.7195 ± 0.416 Bq/m³의 예측 실내농도를 보였다. 그러나 건축자재에서 기여하는 라돈농도의 총합 라돈농도와 실태조사에서 획득된 실내 공기 중의 라돈농도를 비교한 결과 예측농도가 실측농도에 비해 낮은 것으로 조사되었다. 이는 모델 구현 과정에서 따르는 불확실성 요인에 의한 것으로 향후 이들 불확실성을 감소시키는 방안에 대한 추가적인 연구의 진행이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 환경산업선진화기술개발사업(2014-000140006)에서 지원을 받았습니다.

REFERENCE

Bavarnegin, E., Fathabadi, N., Vahabi Moghaddam, M., Vasheghani Farahani, M., Moradi, M., Babakhni, A., 2012, Radon exhalation rate and natural radionuclide content in building materials of high background areas of Ramsar, Iran, *Journal of Environmental Radioactivity*, 117, 36-40.

Chen, J., Rahman, N. M., Atiya, I. A., 2010, Radon exhalation from building materials for decorative use, *Journal Of Environmental Radioactivity*, 101(4),

317-322.

Cothem, C. R., Smith, J. E., 1987, Environmental radon, *Environmental Science Research*, 35, 31-58.

Fleischer, R. L., Mogro-Campero, A., 1978, Mapping of integrated radon emanation for detection of long-distance migration of gases within the Earth: Techniques and principles, *Journal Of Geophysical Research, Solid Earth* 83(B7), 3539-3549.

Khan, A. J., Prasad, R., Tyagi, R. K., 1992, Measurement of radon exhalation rate from some building materials. *International Journal Of Radiation Applications & Instrumentation, Part D, Nuclear Tracks & Radiation Measurements*, 20(4), 609-610.

Kurnaz, A., KucukÖmeroğlu, B., Cevik, U., Celebi, N., 2011, Radon Levels and Indoor Gamma Doses in Dwellings of Turkey, *Applied Radiation and Isotopes* 69(10), 1554-1559.

Lee, C.M., Jung, S.W., Lee, D.H., Kim, Y.B., Lee, D.J., Cho, Y.S., Jin, Y.H., 2015, Investigation of radon emanation of domestic building materials, *Journal of odor and Indoor Environment*, 14(1), 50-56.

Mahur, A. K., Kumar, R., Sengupta, D., Prasad, R., 2008a, Estimation of radon exhalation rate, natural radioactivity and radiation doses in fly ash samples from Durgapur thermal power plant, West Bengal, India, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(8), 1289-1293.

Mahur, A. K., Kumar, R., Sengupta, D., Prasad, R., 2008b, An investigation of radon exhalation rate and estimation of radiation doses in coal and fly ash samples, *Applied Radiation and Isotopes*, 66(3), 401-406.

Nazaroff, W.W., Nero, A.V., 1988, *Radon and its Decay Products in Indoor Air*, Wiley-Interscience Publication, New York.

Ramola, R.C., Choubey, V.M., 2003, Measurement of Radon Exhalation Rate from Soil Samples of Garhwal Himalaya India, *Journal Radiational and Nuclear Chemistry*, 256(2), 219-223.

Saad, A. F., Abdalla, Y. K., Hussein, N. A., Elyaseery, I. S., 2010, Radon exhalation rate from building materials used on the Garyounis University campus, Benghazi, Libya, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 34, 67-74.

Saad, A. F., Abdallah, R. M., Hussein, N. A., 2013,

- Radon exhalation from Libyan soil samples measured with the SSNTD technique. *Applied Radiation and Isotopes*, 72, 163-168.
- 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 Report. 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, 2008 Report, Effects of ionizing radiation, Annex E : Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces, United Nations, New York.
- WHO. The World Health Organization, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon [cited 2014 December]; Available from: http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf.