



## 건축자재 라돈 방출률 평가를 통한 공동주택 내 라돈 기여율 평가

홍형진<sup>1</sup> , 최지원<sup>1</sup> , 윤성원<sup>2</sup> , 김희천<sup>3</sup> , 이철민<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>서경대학교 환경화학공학과 <sup>2</sup>서경대학교 나노화학생명공학과, <sup>3</sup>서울대학교 행정대학원 행정학과

## Evaluation of the Radon Contribution Rate in Apartments through Evaluation of the Radon Exhalation Rate from Building Materials

Hyungjin Hong<sup>1</sup>, Jiwon Choi<sup>1</sup>, Sungwon Yoon<sup>2</sup>, Heechun Kim<sup>3</sup>, and Cheolmin Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Chemical Engineering, Seokyeong University, <sup>2</sup>Department of Nano, Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University, <sup>3</sup>Department of Public Administration, Graduate School of Public Administration, Seoul National University

### ABSTRACT

**Background:** This study evaluated the radon contribution rate through an evaluation of the exhalation rate of radon from building materials.

**Objectives:** This study compared and evaluated the computation of the radon contribution rate based on each different exhalation rate in a building.

**Methods:** The six demonstration houses that are the subject of this study are wall structures or Rahmen structures, and include demonstration houses similar to general residential environments and non-finishing houses with some walls exposed.

**Results:** The highest exhalation rate was found at 62.98 Bq/m<sup>2</sup> per day from the non-finishing floor, and the second highest exhalation rate was from stone materials at 58.76 Bq/m<sup>2</sup> per day. Based on this result, investigating the contribution rate of building materials derived from building materials among indoor radon concentrations, house three was the highest at 81.7%, and house one was confirmed to be 33.96%.

**Conclusions:** It can be judged that the effect of exposed concrete and stone is high, and that it is possible to reduce radon emitted from indoor building structures by controlling the indoor materials.

**Key words:** Indoor air quality, radon, exhalation rate, contribution rate, building material

**Received** September 13, 2021

**Revised** October 14, 2021

**Accepted** October 19, 2021

### Highlights:

- This study compared and evaluated the computation in radon contribution rate based on each different exhalation rate in building.
- It can be judged that the effect of exposed concrete and stone is high exhalation rate.
- It is possible to reduce radon emitted from indoor building structures by controlling indoor materials.

### \*Corresponding author:

Department of Nano, Chemical and Biological Engineering, Seokyeong University, 124, Seogyong-ro, Seongbukku, Seoul 02713, Republic of Korea  
Tel: +82-2-940-2924  
Fax: +82-2-940-7616  
E-mail: cheolmin@skuniv.ac.kr

## I. 서 론

자연 방사능 핵종인 라돈은 토양 및 지반에 존재하는 우라늄의 붕괴 시 공기 중 가스 상태로 방출된다.<sup>1)</sup> 방출된 라돈 원자는 약 3.8일의 반감기를 가지고 공기 중에 분포하여 이동한다. 분포된 라돈 가스는 화학적 불활성 기체 상태로 실내에 유

입 시 호흡을 통하여 인체에 쉽게 노출될 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>2-4)</sup>

불활성 기체인 라돈은 빠르게 실내로 방출되며 흡입 시 폐에 직접적으로 침착된 후 붕괴 시 방출되는 알파 입자의 영향으로 폐 속 세포를 손상시켜 암으로 이어질 수 있다. 이러한 이유로 라돈은 흡연과 함께 폐암의 주요 원인이며 비흡연자 폐암의 가



장 큰 원인으로 알려져 있다. 라돈 노출은 매년 미국 국민 중 약 21,000명의 폐암으로 인한 사망 원인이 되며, 그 중 약 2,900명은 비흡연자로 확인됨에 따라 미국 환경보호청은 라돈 노출과 흡연의 위해성을 강조하였다.<sup>5)</sup> 라돈에 대한 노출이 건강에 해롭다는 것과 더불어 라돈은 자연적으로 발생하는 무색, 무취의 가스형태로 직접적인 식별이 어렵기에 가정의 실내환경에서 심각한 건강 위협을 초래한다.<sup>6,7)</sup> 라돈의 주된 원인은 건물이 세워진 토양, 지반 등 외부환경적 요소와 실내 건축자재를 통한 내부환경적 요소이며 특히 건축자재는 실내 라돈 오염의 주된 잠재적 발원지일 가능성이 있다.<sup>8)</sup> 이러한 이유로 전 세계 여러 국가에서는 이미 수십 년간 실내 라돈 농도에 영향을 미치는 건축자재 라돈 평가에 대해 관심을 가졌다.

국외 여러 국가 및 국제기구에서는 건축자재 라돈 관리를 위한 방안 및 규제 등이 수립되었다. 유럽 연합(EU), 국제 방사선 방호 위원회(ICRP) 등은 방사능 지수를 이용한 안전 요구 평가, 방사능 농도를 이용한 권고기준 마련, 거주환경의 유효 선량 평가 등 국가 환경에 맞는 규제를 통해 거주자의 안전을 보호하는 중이다. 현재 국내에서는 관련 연구 및 기준 마련 등의 관리 방안 수립 등이 매우 부족한 실정이다. 주택 내 주요 라돈 공급 원인 건축자재는 구성요소 및 성분이 상이하므로 국가별 환경에 적합한 건축자재 라돈 관리 연구의 필요성을 주장한 바 있다.<sup>9)</sup>

국내의 경우 최근 마스크 등을 통해 고층 주거 건물의 고농도 라돈 농도 검출이 확인되며, 이 원인이 건축자재에서 방출되는 라돈에 의한 것이라 보도된 이후 건축자재에 대한 라돈 관리 방안 마련에 관한 국민들의 요구가 증대되고 있다. 이에 정부는 2019년부터 건축자재 관리를 위해 대리석 등 일부 단일석재에 대하여 해외 사례를 통한 지침서를 마련하였으나 국내 적용 가능성에 대하여 확인이 필요한 상황이며 이미 완공된 건축물에 대한 대안 마련이 절실한 시점이다.

이에 본 연구는 국내 건축자재 라돈 방출률 평가 및 관련 정책 수립의 기초적 자료 제공을 목적으로 대표적인 거주 유형

인 공동주택을 대상으로 건축자재 라돈 방출 및 방출된 라돈의 영향을 파악하기 위하여 공동주택 내 복합건축자재로 구성된 건축 구조물의 라돈 방출률 평가를 실시하고 이를 통해 실내 공기 중 건축자재에 대한 라돈 영향 및 관계성을 파악하고자 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 연구 대상

본 연구의 연구 대상 건축물은 국내 대표적 주거형태인 아파트 건설사의 실증 모의 공동주택 6개를 대상으로 수행하였다. 연구 대상 주택의 구조는 수평의 하중을 견디는 구조물의 차에 따라 크게 벽식 건축물(wall construction)과 기둥식 건축물(rahmen construction)로 구분하였다. 벽식 건축물은 마감재 처리가 이루어진 마감 형태(finishing)의 1층, 5층 주택과 콘크리트가 노출되며 마감재 시공이 안 된 비마감(non finishing) 형태의 2층, 4층 주택으로 구분하였다. 2개의 기둥식 건축물은 모두 마감 형태의 주택으로 각 2층과 3층에 위치하였다. 각 주택은 전용면적 84 m<sup>2</sup>의 규모로 대중적인 형태이며 방 3개, 거실 1개, 화장실 2개로 구성되었다.

공동주택의 기여율 평가를 위해 도면 해석 및 구조 확인을 통하여 구조물의 특징에 따른 방출률 평가 대상을 선정하였다. 건축물의 벽은 크게 철근 콘크리트 구조물로 수평 및 하중을 견디는 내력벽(bearing wall)과 그렇지 않은 외력벽(non bearing wall)으로 구분하였으며 이를 석재건축자재(stone wall) 및 경량복합자재(lightweight wall)로 구분하였다. 또한 부엌 등 타일 시공 부분에 한하여 따로 구분하였다. 따라서 대상을 구성하는 건축자재 구조는 내력벽, 외력벽(석재), 외력벽(경량), 천장, 바닥, 타일로 구분하였다. 기둥식 건축물의 외력벽은 경량복합자재로 구성되어 있다(Table 1).

**Table 1.** The architecture characteristics of the investigated buildings

House	Floor	Construction	Shape	Structure
1	1	Wall	Finishing	Bearing wall, non bearing wall (stone), non bearing wall (lightweight), ceiling, floor, tile
2	2	Wall	Non finishing	Bearing wall, non bearing wall (stone), non bearing wall (lightweight), ceiling, floor
3	4	Wall	Non finishing	Bearing wall, non bearing wall (stone), non bearing wall (lightweight), ceiling, floor
4	5	Wall	Finishing	Bearing wall, non bearing wall (stone), non bearing wall (lightweight), ceiling, floor, tile
5	2	Rahmen	Finishing	Bearing wall, non bearing wall (lightweight), ceiling, floor, tile
6	3	Rahmen	Finishing	Bearing wall, non bearing wall (lightweight), ceiling, floor, tile

### 2. 측정 방법

대상 주택의 실내 공기 중 라돈 농도는 국내에서 단기간 라돈 측정에 빈번히 사용되고 있는 전리함 검출기(ionize detector)인 E-perm (Rad Elec Inc. USA)을 사용하여 측정하였다. 측정은 7월에서 9월 사이에 수행되었으며, 각 조사대상 주택별로 약 3 일간 실내 공기 및 방출률에 대한 누적평균농도를 산출하였다. 실내 농도는 실내 공기질 공정 시험법에 의거하여 측정하였으며 이와 동시에 건축 구조물의 방출률 평가를 진행하였다. 측정이 이루어지는 동안 측정 대상 주택은 창문 및 환관 등을 닫아 밀폐상태를 유지하였으며, 주택 내부는 실 간의 교류가 이루어질 수 있도록 방문 등을 개방한 상태에서 측정을 수행하였다.

실내 농도는 측정 기간 중 E-perm을 주택의 중심인 거실 중앙에 설치하여 측정하였으며 방출률은 다양한 라돈 방출률 측정법 중 완공된 건축물의 복합 건축자재 평가에 적합한 In-situ method를 적용하여 측정하였다. In-situ method는 실환경(in-situ)에서 직접 측정하는 방법으로 실제 라돈 방출률에 가장 가까운 값을 제공하는 특징을 가지고 있으나, 시설물 손상으로 인해 현장 적용이 어려우며 현장의 복합 건축자재의 방출률 평가는 적합하나 건축자재별 영향 파악은 불가하다는 단점을 가지고 있다.<sup>10)</sup> 본 연구는 라돈 방출률 평가 및 관리 방안 수립에 대한 기초적 자료를 확보하는 것을 목적으로 함을 고려할 때 In-situ method 방법이 가장 적합한 것으로 판단하여 본 연구의 라돈 방출률 측정 방법으로 활용하였다. 본 연구에서는 실내 라돈 농도 측정에 사용한 전리함 검출기를 Rad Elec Inc.에서 출시한 반지름 7.6 cm의 반구 형태의 In-situ용 H-chamber를 활용하였다. H-chamber의 설치는 각 연구 대상 주택별로 6 개의 건축자재 구조물에 대해 각 3개의 검출기를 설치하여 조사를 수행하였다(Fig. 1). 주택의 전체 구조를 6개로 구분하여 방출률 평가 결과를 구조물의 대푯값으로 사용하여 전체 실내

라돈 농도에 대한 기여율을 산출하였다.

### 3. 평가 방법

방출률 평가는 In-situ chamber를 사용하여 다음과 같은 계산식을 이용하여 산출하였다. 식 (1)은 In-situ chamber 내 측정된 라돈 농도(Bq/m<sup>3</sup>)의 계산 방법이며, 이때 K는 노출 시간에 따른 상수로 식 (2)와 같다. 최종적으로 건축 구조물의 단위 면적당 라돈 방출률(F, Bq/m<sup>3</sup>·day)은 식 (1)을 역산출하여 식 (3)과 같이 산출하였다.<sup>11)</sup>

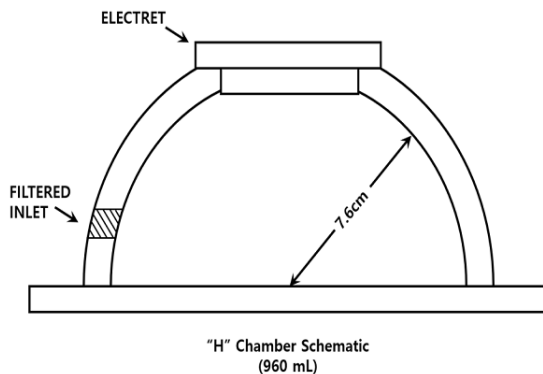
$$C_{Ra} = \frac{F \times A \times K}{V \times \lambda} \tag{1}$$

$$K = 1 - \left( \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda T} \right) \tag{2}$$

$$F = \frac{C_{Ra} \times V \times \lambda}{A \times K} \tag{3}$$

여기서 C<sub>Ra</sub>는 In-situ chamber에서 측정된 평균 농도(Bq/m<sup>3</sup>)이며 F (Flux)는 건축 구조물의 단위면적당 라돈 방출률(Bq/m<sup>2</sup>·day), A는 In-situ chamber의 면적(m<sup>2</sup>), K는 노출 시간에 따른 상수, V는 In-situ chamber의 부피(m<sup>3</sup>), λ는 방사능 붕괴 상수(day<sup>-1</sup>), T는 측정 시간(day)이다.

기여율은 가스 상태인 라돈이 구조물로부터 방출 후 공간 내 균등히 분포한 정상상태(steady-state)에서 구조물로부터 방출된 라돈 물질과 실내 라돈 물질이 평형을 이룬다는 물질수지(material balance) 조건으로 평가하였다. 기여율 평가는 실내 공기 중 단위 시간당 방사능 수치를 기준으로 공동주택 내 건축자재에서 기인한 단위 시간당 방사능 수치를 비교하여 기여율을 산출하였다. 공동주택 내 건축자재에서 구조물별로 방출되



Indoor material structure

Fig. 1. Radon chamber construction and configuration

는 라돈 수준(exhalation radon levels, ERL)을 계산하기 위해 식 (4)를 구성하였다. ERL은 건축 구조물의 라돈 방출이 실내로 영향을 미친 라돈 수준을 나타낸 값이다. 또한 기여율 평가를 위한 기준으로 실내 공기 중 라돈 수준(indoor radon levels, IRL)을 식 (5)와 같이 구성 하였다.

$$ERL_x = F_x \times D_x \tag{4}$$

$$IRL = Conc. \times V \tag{5}$$

이때 ERL (Bq/m<sup>2</sup>·day)은 식 (3)에서 계산된 건축자재별 단위면적당 라돈 방출률(F, Bq/m<sup>2</sup>·day)에 건축자재별 사용 면적(D, m<sup>2</sup>)을 곱하여 계산하였으며 IRL (Bq/m<sup>2</sup>·day)은 단위시간당 실내 라돈 농도인 Conc. (Bq/m<sup>3</sup>·day)에 공간의 체적 V (m<sup>3</sup>)를 곱하여 계산하였다. 이상적인 환경의 주택 내 라돈의 상태는 식 (6)과 같이 공동주택 내 구조물별로 방출되는 전체 라돈 수준이 실내 라돈 수준과 일치하며, 측정된 값과 비교를 위해 식 (7)과 같이 실내 라돈 수준과 실제 측정된 각 건축 구조물의 라돈 수준을 합하여 기여율을 평가하였다.

$$IRL = \sum ERL_x \tag{6}$$

$$CR = \frac{\sum ERL_x}{IRL} \times 100 \tag{7}$$

### III. 결 과

#### 1. 공동주택 내 건축자재 기인 라돈 방출률 평가

주택별 대표 구조물별 면적(Table 2)에 대한 방출률 평가 결과 주택 2의 바닥에서 63.0 Bq/m<sup>2</sup>·day로 가장 높은 방출률을 나타냈고 다음으로 주택 3의 외력벽(석재)에서 58.8 Bq/m<sup>2</sup>·day가 나타났다. 주택별 비교결과 주택 1, 3, 4에서는 건축 구조물 중 외력벽(석재)에서 각 15.9 Bq/m<sup>2</sup>·day, 58.8 Bq/m<sup>2</sup>·day, 24.7 Bq/m<sup>2</sup>·day의 방출률을 나타냈으며 주택 2, 6은 바닥에서 각 63.0 Bq/m<sup>2</sup>·day, 9.5 Bq/m<sup>2</sup>·day의 방출률이 나타났다. 주택 5는 천장에서 10.5 Bq/m<sup>2</sup>·day의 방출률을 나타냈다(Table 3). 주택 5와 주택 6의 경우 각 건축 구조물에 대해 전반적으로 낮은 방출률을 보였다. 기동식 구조인 두 주택과 벽식 주택과의 차이를 보이는 결과로 기동식 주택의 경우 건물의 수직을 지탱하는 콘크리트 벽이 없는 대신 천장과 바닥 같은 수평 구조물에 콘크리트가 추가적으로 시공된다.

공동주택의 구조별 건축 구조물의 라돈 방출률의 평균을 비교한 결과 벽식 구조에서 내력벽과 외력벽(경량)은 각 7.5 Bq/

**Table 2.** Area of each structures by the investigated buildings

House	Structure area (m <sup>2</sup> )					
	Wall			Ceiling	Floor	Tile
	Bearing	Non bearing (stone)	Non bearing (lightweight)			
1	40.0	69.6	28.6	117.6	117.6	2.5
2	38.5	47.9	15.2	87.6	87.6	-
3	36.7	47.9	15.2	87.6	87.6	-
4	36.6	69.6	28.6	117.6	117.6	2.5
5	55.8	-	112.5	81.5	81.5	2.5
6	63.0	-	79.6	73.1	73.1	2.5

**Table 3.** Radon exhalation flux of structures by the investigated buildings

House	Radon exhalation flux (Bq/m <sup>2</sup> ·day)					
	Wall			Ceiling	Floor	Tile
	Bearing	Non bearing (stone)	Non bearing (lightweight)			
1	8.9	15.9	7.6	5.6	7.0	10.0
2	4.6	39.5	8.6	3.0	63.0	-
3	6.5	58.8	8.5	50.6	7.2	-
4	6.9	24.7	6.6	6.4	7.7	6.1
5	6.1	-	6.4	10.5	8.7	10.5
6	3.1	-	6.6	5.3	9.5	6.9

m<sup>2</sup>·day, 7.1 Bq/m<sup>2</sup>·day로 기동식 구조보다 높게 나왔으나 천장, 바닥, 타일의 경우 각 7.9 Bq/m<sup>2</sup>·day, 9.1 Bq/m<sup>2</sup>·day, 8.7 Bq/m<sup>2</sup>·day로 벽식 구조보다 기동식 구조에서 높게 나왔다 (Table 4). 벽식 구조에서 건물의 수직을 지탱하는 벽체는 콘크리트 등 석재로 이루어진 건축자재를 사용하며 기동식 구조의 경우 건축 설계상 상대적으로 수평을 이루는 천장, 바닥에서 벽식 구조보다 더 많은 건축자재가 시공된다.

공동주택의 형태별 건축 구조물의 라돈 방출률의 평균을 비교한 결과 내력벽을 제외한 모든 건축 구조물에서 각 49.1 Bq/m<sup>2</sup>·day, 8.6 Bq/m<sup>2</sup>·day, 26.8 Bq/m<sup>2</sup>·day, 35.1 Bq/m<sup>2</sup>·day로 마감 형태보다 비마감 형태의 공동주택에서 높게 나왔다 (Table 5). 이때 마감형태는 실제 거주 환경과 똑같은 조건으로 마감재 등 비마감 형태 보다 많은 복합 건축자재가 사용되었으나 방출률 평가 결과 내력벽을 제외한 모든 건축 구조물에서 단위면적당 방출률은 적게 나왔다(Table 5).

**Table 4.** Average of radon exhalation flux of structures by building constructions

House construction	Radon exhalation flux (Bq/m <sup>2</sup> ·day)				
	Wall		Ceiling	Floor	Tile
	Bearing	Non bearing (lightweight)			
Wall*	7.5	7.1	6.0	7.4	8.0
Rahmen <sup>†</sup>	4.6	6.5	7.9	9.1	8.7

\*The construction of house 1, 2, 3, 4.

<sup>†</sup>The construction of house 5, 6.

**Table 5.** Average of radon exhalation flux of structures by building shape

House shape	Radon exhalation flux (Bq/m <sup>2</sup> ·day)				
	Wall		Ceiling	Floor	Tile
	Bearing	Non bearing (stone)			
Non finishing*	5.6	49.1	8.6	26.8	35.1
Finishing <sup>†</sup>	6.0	20.3	6.8	6.9	8.2

\*The shape of house 2, 3.

<sup>†</sup>The shape of house 1, 4, 5, 6.

**Table 6.** Evaluation of contribution rate by each investigated buildings

House	Contribution rate (%)					
	1	2	3	4	5	6
Materials	34.0	76.0	81.7	43.0	55.4	41.0
Unknown	66.0	24.0	18.3	57.0	44.6	59.0
Conc. (Bq/m <sup>3</sup> )	145.6	200.0	164.5	155.0	127.9	95.6

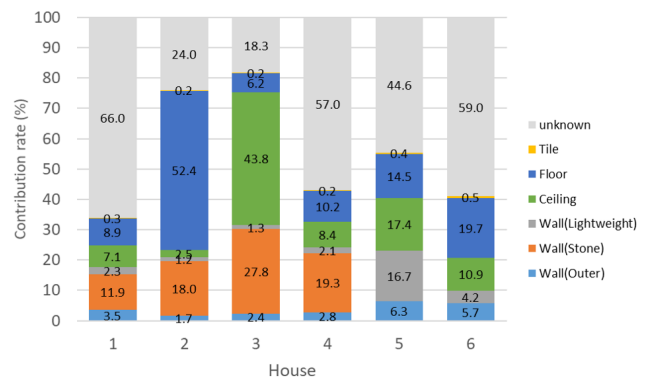
## 2. 공동주택 내 건축자재 기인 라돈 기여율 평가

Fig. 2는 건축자재별 실내 라돈에 대한 기여율을 나타낸 그래프이며 Table 6은 전체 건축자재에 대한 기여율과 그 외 요인에 대한 기여율을 나타내며 기여율 평가 당시의 실내 라돈 농도를 보여준다. 주택 1은 외력벽(석재)이 11.9%의 기여율로 실내 라돈 영향 중 가장 큰 비율을 차지했으며 주택 2는 바닥이 52.4%, 주택 3은 천장이 43.8%, 주택 4는 외력벽(석재)이 19.3%, 주택 5는 천장이 17.4%, 주택 6은 바닥이 19.7%로 주택별 가장 큰 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 또한 실내 라돈 농도 중 건축자재로부터 기인된 건축자재의 기여율은 비마감 주택인 주택 3이 81.7%, 주택 2가 76.0%로 콘크리트 노출 주택의 경우 미지 수준의 영향이 적은 것으로 확인되었다. 마감 주택인 주택 5, 주택 4, 주택 6, 주택 1은 55.4%, 43.0%, 41.0%, 34.0% 순으로 비마감 주택보다 미지 수준에 대한 영향이 다소 높은 것으로 보여졌다.

## IV. 고 찰

본 연구는 국내 건축자재 라돈 방출률 평가를 통한 정책수립의 기초적 자료 제공과 실내 라돈 농도의 원인 분석을 통한 저감 방안 마련을 목적으로 복합 건축자재로 구성된 공동주택 내 건축 구조물에서 기인한 실내 공기 중의 라돈 농도에 대한 기여율 평가를 수행하였다.

본 연구는 국내 대표 아파트 건설사의 실증 모의 공동주택



**Fig. 2.** Radon contribution rate by material source

실험동을 대상으로 수행하였으며 이 모의 공동주택은 벽식 구조와 기둥식 구조로 건축적 특징에 따라 구분하여 실내 인테리어 마감 상황에 따라 콘트리트가 들어난 비마감 형태와 인테리어 마감 시공이 완료된 마감 형태로 구분되었다. 방출률 평가 대상의 구분은 건축 전문가의 도면 및 육안 평가를 통해 한정된 정보 내 평가된 구분이다. 해당 실험동의 보안상의 이유로 방출률 평가 대상인 구조물의 복합 건축자재의 구성은 확인할 수 없는 한계점이 있었으나 실제 방출률이 높을 거라 예상된 내력벽에서 다소 낮은 수치를 확인한 결과를 통해 추후 고도화된 연구에서 구조물의 내부 구성 건축자재 중 실내 라돈 농도 영향 정도를 확인할 수 있는 개선이 필요할 것으로 사료된다.

대상 구조물의 각 방출률 평가 결과를 확인하면 내력벽의 경우 두께 및 시공 예상 자재로 인해 평가 전 가장 방출률이 높을 것이라 예상되었으나, 외력벽(석재) 구조가 전체적으로 높게 평가되었다. 이는 실내 라돈의 영향이 건축 구조의 두께가 아닌 건축재료의 종류 및 구성으로 연관되는 영향이 높을 것이라 판단되며 마감재의 유무 및 그 마감재의 종류가 실내 라돈 기여의 핵심적인 요소일 것으로 확인되는 바이다. 또한 다양한 건축자재로부터의 라돈 침투 가능성을 확인했을 뿐만 아니라 다공성, 기밀성 등 건축자재 개별적인 영향으로 인한 구조적인 차이로 인해 라돈이 적게 방출될 수 있으며 실제 실내환경에서 직접적인 조사를 통한 확인이 필요하다는 것을 시사한다.<sup>12)</sup>

평가 결과에서 두드러지는 특이점으로는 주택 2와 주택 3에서 특정 건축 구조물이 다른 주택의 건축 구조물보다 높은 수치의 방출률을 나타내고 있다. 이 두 주택은 각 구조물의 마감재 시공이 미비된 콘크리트 노출 주택으로 마감 형태의 다른 주택과 비교 시 외력벽(석재)에서 노출된 콘크리트로 인한 영향이 높을 것으로 판단된다. 특히, 주택 2의 바닥과 주택 3의 천장에서는 다른 주택 및 구조와 비교하여 약 5~9배의 높은 수치의 방출률을 보였으며 이는 건축 설계에 대한 차이로 도면상에서 복합 건축자재 300 mm가 추가적으로 시공된 것으로 확인되었으며 노출된 콘크리트로 인한 영향으로 보인다. 특히 주택 2, 3은 비마감 형태로 콘크리트와 관련된 구조물의 차이에서 더 큰 영향이 되며 실내 라돈 농도가 권고기준치인 148 Bq/m<sup>3</sup>를 넘으므로 이는 콘크리트 노출에 의한 실내 환경이 인체 건강에 영향이 있을 것으로 확인된다.

본 연구에서는 측정된 실내 라돈 농도를 기준으로 구분된 구조의 방출률에 대한 기여율을 산정하였다. 구조물로부터 평가된 결과를 토대로 실내 농도를 기준으로 기여율을 평가하기 위해 각 구조물로부터 방출된 라돈 수준의 합과 실내 농도로부터 계산된 라돈 수준을 비교하여 평가하였다.

기여율 결과에서 확인된 미지 수준은 주택의 공기교환율로 인한 외부 유입 및 배경농도에 대한 값이라 판단한다. 라돈은 불활성 가스로 밀폐된 주택 내에서 유입 및 유출될 수 있으며 실내 온습도, 건물의 노후화 등 물리적 특성에 큰 영향을 받는

다.<sup>13)</sup> 하지만 측정에서 사용된 전리함 검출기인 E-perm은 대상에 부착된 In-situ 챔버 내에서 라돈 저감 인자 보정 통한 값을 평가할 수 있으나, 실내 농도 측정 시 공간 전체에 대한 라돈 인자에 대해 확인할 수 없는 한계점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 실내 농도에 대해 미지 수준을 계산하여 주택별 건축자재에 대한 실내 영향도를 확인하고자 하였다. 주택 6세대를 대상으로 기여율을 평가했을 때 건축자재 라돈 방출률이 높을수록 미지 수준에 대한 영향이 적었으므로 실내 농도의 상당 비율이 건축자재로부터 비롯되었음을 확인할 수 있었다.

본 연구로부터 추론된 특징은 비마감 형태인 주택 2, 주택 3의 결과로 확인할 때 노출된 내부 콘크리트로부터 실내 라돈 중 약 70~80%가 기여된 것으로 확인되며 그에 반해 마감재 등의 마감처리가 완료된 일반 주택의 경우 기여율이 30~50%인 것으로 조사되어 마감재 시공을 통한 라돈 저감 방안 마련은 상당한 효과를 보일 것으로 기대되며 최종적으로 실내에 직접 노출된 건축자재가 실내 라돈 농도를 결정할 수 있는 요소라 판단된다. 하지만 실내 측정값과 챔버 등을 통한 구조물 측정값의 상호적으로 적합한 평가방법 개발을 위해 추후 고도화된 연구를 통하여 객관화될 필요성이 있을 것으로 판단된다. 실내 환경에서의 건축자재에 대한 영향은 건축 구조물을 이루는 건축자재의 개별적인 영향과 구조적인 차이로 인해 실제 환경에서의 확인이 필요하며 주택 내 라돈 관리를 위해선 건축자재에 대한 방출률 평가와 함께 실제 공동주택 내 영향 정도 파악이 필요할 것으로 판단된다.<sup>11-14)</sup>

## V. 결 론

본 연구는 건축자재로부터 실내 라돈 농도의 영향을 평가하기 위하여 복합 건축자재로 이루어진 건축 구조물 내 환경을 고려하여 실제 공동주택과 유사하게 구조된 실증 주택에서 건축자재 시공 등 구조적인 특징에 따라 건축자재 라돈 방출에 대한 실내 라돈 농도의 영향을 확인한 연구로 실내 라돈 농도를 기준으로 건축자재에 대한 라돈 기여율을 평가하여 실내 라돈 요인인 건축자재 및 그 구조물에 대한 기초적 연구 제공을 목적으로 수행되었다.

총 6 주택을 대상으로 각 주택의 구조별 특징을 확인하여 내력벽, 외력벽(석재), 외력벽(경량), 천장, 바닥, 타일로 구분하여 전리함 측정기 E-perm (Rad Elec Inc. USA)을 사용하여 공정 시험법을 토대로 실내 농도를 측정하였으며 그와 동시에 건축 구조물 전용 챔버(In-situ chamber)를 사용하여 구분된 구조물의 방출률 평가를 통해 기여율 평가를 수행하여 건축자재 유무 및 주택의 특징 등을 확인하였다.

주택 내 마감 시공의 유무에 따른 방출률에 대한 차이가 확인되었으며 석재구조물과 경량구조물의 방출률에 대한 차이가 확인되었다. 건축물의 형태적 특징에 따라 수직 구조와 수

평 구조의 건축자재 이용 양상이 다르며 그에 따라 주요 라돈 방출 요인이 상이하다는 것이 확인되었다. 기여율 평가 시 실제 확인된 라돈 기여율의 가장 큰 비중을 차지하는 요소로 실내 노출된 콘크리트로부터 비롯된 것을 확인하였으며 방출률이 높은 구조물로 구성된 주택에서 실내 라돈 영향의 변수가 적으며 건축자재의 영향이 높다는 것을 확인하였다.

본 연구 과정 및 결과를 바탕으로 실내 라돈 농도에 있어 건축자재의 영향이 중요하다는 것을 확인하였으며 단일 건축자재와 그로 이루어진 건축 구조물의 영향은 개별적인 확인이 필요하다는 것을 파악할 수 있었다. 또한 실내 라돈 건강 관리의 일환으로 마감재 시공을 통한 저감 방법의 가능성을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2021-01-01-028).

### Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

### References

1. International Agency for Research on Cancer. Man-Made Mineral Fibres and Radon: Views and Expert Opinions of an IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon: IARC; 1988. p.173-236.
2. United States. Environmental Protection Agency. Technical Support Document for the 1992 Citizen's Guide to Radon. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 1992a. p.2-37.
3. United States. Environmental Protection Agency. Indoor Radon and Radon Decay Product Measurement Device Protocols. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 1992b. p.9-23.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic

Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Available: [https://www.unece.org/unscear/en/publications/2000\\_1.html](https://www.unece.org/unscear/en/publications/2000_1.html) [accessed 12 August 2021].

5. U.S. Environmental Protection Agency. Health Risk of Radon. Available: <http://www.epa.gov/radon/health-risk-radon> [accessed 14 August 2021].
6. Gregory B, Jalbert PP. National Radon Results: 1985 to 2003. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2004. p.1-7.
7. Zeeb H, Shannoun F. WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. Geneva: World Health Organization; 2009. p.21-35.
8. United Nations. ANNEX E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. In: United Nations. editor. Effects of Ionizing Radiation. New York: United Nations Publication; 2009. p.197-334.
9. Saad AF, Abdalla YK, Hussein NA, Elyaseery IS. Radon exhalation rate from building materials used on the Garyounis University campus, Benghazi, Libya. *Turkish J Eng Environ Sci.* 2010; 34(1): 67-74.
10. Haquin G. Natural radioactivity and radon in building materials. Paper presented at: 12th Congress of the International Radiation Protection Association; 2008 October 19-24; Buenos Aires, Argentina. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
11. Kotrappa P, Stieff F. Electret ion chambers (eic) to measure radon exhalation rates from building materials. Paper presented at: Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists 2008 International Symposium; 2008 September 14-17; Las Vegas, USA. Hendersonville: AARST, 2008. p. 11-18.
12. Keller G, Hoffmann B, Feigenspan T. Radon permeability and radon exhalation of building materials. *Sci Total Environ.* 2001; 272(1-3): 85-89.
13. Lee CM, Kim YS, Roh YM, Kim KY, Jeon HJ, Kim JC. Radon concentration in various indoor environment and effective dose by inhabitants in Korea. *J Environ Health Sci.* 2007; 33(4): 264-275.
14. Chen J, Rahman NM, Abu Atiya I. Radon exhalation from building materials for decorative use. *J Environ Radioact.* 2010; 101(4): 317-322.

### <저자정보>

홍형진(대학원생), 최지원(대학원생), 윤성원(교수), 김희천(박사과정생), 이철민(교수)