

Research Paper

## 대전광역시 주택 실내 라돈 농도 분포와 저감 공법 적용 연구

장용철\* · 양재환\* · 김홍경\*,\*\* · 이가인\*,\*\* · 송하균\* · 김병환\* · 권영선\*

충남대학교 환경공학과\*, 국립환경과학원\*\*

### A Study on the Distribution and Reduction Method of Indoor Radon Concentration in Daejeon Metropolitan City

Yong-Chul Jang\* · Jae Hwan Yang\* · Hongkyoung Kim\*,\*\* · Gain Lee\*,\*\* ·  
Hakyun Song\* · Byeonghwan Kim\* · Youngsun Kwon\*

Department of Environmental Science and Engineering, Chungnam National University\*  
National Institute of Environmental Research\*\*

**요약:** 본 연구에서는 대전광역시 실내 라돈의 농도 분포를 조사하고 라돈 저감 공법을 적용하여 저감 효율을 평가하였다. 전국주택라돈조사 결과를 기초로 선별된 24개 주택을 대상으로 실내 라돈 측정을 실시한 결과, A자치구의 평균치가 261 Bq/m<sup>3</sup>로서 기준치를 크게 상회하는 수준임을 알 수 있었고, 동일한 주택에서도 실내 라돈 농도는 측정 지점과 시간에 따라 영향을 받고 있음을 확인하였다. 라돈 저감을 위해 토양 배기법을 적용한 8개 주택의 경우, 실내 라돈 수치는 기준치에 비해 크게 낮아졌으며 평균 저감 효율 역시 55% 정도로 나타나 양호한 라돈 저감 효과를 알 수 있었다. 또한 차폐법을 실시한 2개의 주택에서는 평균 저감 효율이 90% 정도로서 실내 라돈 저감 효과가 매우 우수하였다. 라돈 저감 시 동일한 저감공법을 적용하여도 건물의 구조, 환기의 빈도, 계절 등 여러 요인에 따라 저감 효율이 달라질 수 있으므로 향후 다양한 인자를 반영하여 저감공법의 효과를 정밀하게 평가할 필요가 있다. 이를 기초로 하여 라돈 노출에 의한 인체 위해 저감을 위한 대전광역시 실내 라돈 관리 대책 마련이 필요하다.

**주요어:** 실내 라돈, 토양배기법, 차폐법, 라돈 위해성, 라돈 저감 공법

**Abstract:** In this study, the concentration distribution of indoor radon in Daejeon Metropolitan City was investigated and the reduction efficiency was evaluated by applying the radon reduction methods. Based on the results of the National Institute of Environmental Research, indoor radon measurements were conducted on 24 selected houses, and the average value of District A was 261 Bq/m<sup>3</sup>, far exceeding the standard, and even in the same house, indoor radon concentration was

First & Corresponding Author: Yong-Chul Jang, Tel: +82-42-821-6674, E-mail: gogator@cnu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-5435-2915

Co-Authors: Jae Hwan Yang, Tel: +82-42-821-6677, E-mail: yjh98@cnu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-1770-9476

Hongkyoung Kim, Tel: +82-33-560-8331, E-mail: khongk1001@gmail.com, ORCID: 0000 0002 0310 6164

Gain Lee, Tel: +82-32-560-7215, E-mail: gainee2000@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9272-1099

Hakyun Song: +82-42-821-7779, E-mail: hakyunsong1126@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7330-3297

Byeonghwan Kim: +82-42-821-7779, E-mail: bhkim0104@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2296-9897

Youngsun Kwon: +82-42-821-7779, E-mail: deu04320@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4243-7115

Received: 7 June, 2022. Revised: 16 August, 2022. Accepted: 22 August, 2022.

affected by measurement point and time. In the case of eight houses that applied the soil venting method to reduce radon, the indoor radon level was significantly lower than the standard value, and the average reduction efficiency was also around 55%, indicating a good reduction effect. In addition, the average reduction efficiency was around 90% in the two houses that carried out the shielding method, showing the very excellent effect of the indoor radon reduction. Even if the same reduction method is applied when reducing radon, the reduction efficiency may vary depending on various factors such as the structure of the building, the frequency of ventilation, and the season, so it is necessary to accurately evaluate the effectiveness of the reduction method in the future. Based on this, it is necessary to establish indoor radon management measures in Daejeon Metropolitan City to reduce human harm caused by radon exposure.

**Keywords :** Indoor radon, soil venting method, shielding method, radon risk, radon reduction method

## I. 서론

라돈( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ )은 자연적으로 생성되는 방사성 물질로서, 우라늄( $^{238}\text{U}$ )과 토륨( $^{232}\text{Th}$ )이 방사능 붕괴 과정을 가지면서 라듐( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ )이 만들어지고, 이후 방사능 붕괴가 되어 발생된다. 토륨이 붕괴하면서 만들어지는 라돈( $^{220}\text{Rn}$ )을 일반적으로 토론이라고 하고, 반감기(55.6초)가 매우 짧고, 지표나 대기 중으로 배출되는 양은 매우 적다. 일반적으로 라돈은 우라늄이 붕괴되면서 만들어지는  $^{222}\text{Rn}$  물질(반감기 3.8일)을 말한다(Ministry of Environment 2016). 방사성 물질인 라돈은 무색, 무취의 불활성 기체로서 지각의 암석이나 토양 중에 자연적으로 존재하면서 토양층을 빠져나와 공기 중으로 방출될 수 있다(US EPA 2016; ASN\_NRPA 2015). 이러한 라돈은 붕괴과정을 거치면서 여러 핵종 또는 라돈 자손들은 주변 에어로졸에 흡착하거나 구조물의 표면이나 벽체에 침적된다. 또한 토양에서 생긴 라돈은 지하수로 녹아들어 갈 수 있다. 라돈의 발생원은 암석이나 토양, 지하수로부터 기인하고, 일반적으로 화강암 분포 지역, 편마암 지질대, 옥천단층 지대에 있는 지역에서 라돈 농도가 높은 것으로 알려져 있다(Ministry of Environment 2016). 이러한 라돈 농도가 높은 암석이나 토양층(85~97%)으로부터 건물 균열, 벽 틈새, 지하수(1~2 등을 매개체로 라돈이 건물 실내로 유입되기도 한다(Ministry of Environment, Yonsei University 2010). WHO(World Health Organization)

에서는 라돈의 물에서부터 공기로의 이동계수를  $1 \times 10^{-4} \text{ Bq/m}^3$ 로 제시하고 있다(WHO, 2009). 건축 자재 중 석고보드, 고농도 라듐이 포함된 모래 또는 자갈로 만든 벽돌이나 콘크리트 자재 등에서 라돈이 종종 검출되기도 한다(Ministry of Environment 2016). 최근에는 침대 제품에 음이온 발생을 목적으로 의도적으로 넣은 모나자이트에 다량 함유된 토륨에서 방출된 토론이 여러 붕괴 과정을 거치면서 인체에 영향을 줄 수 있다는 것이 알려져 국내의 라돈 침대가 사회적 문제로 대두되었고, 문제가 된 라돈 침대는 전량 회수 및 폐기 처분되었다(Lee et al. 2018; Chung 2019).

라돈은 1급 발암물질로서 노출 시 각종 호흡기 질환과 흡연자의 경우 폐암발병 두 번째 원인 물질이고 비흡연자의 경우 폐암 발병을 유발하는 주원인 물질이다(IARC 1988; WHO 2000). 미국 Environmental Protection Agency (US EPA)에서는 이러한 라돈의 노출로 인한 폐암 발병을 예방하고자, 2020년까지 5백만 가구의 라돈 위해 감소, 3,200명의 폐암 발병 예방을 목표로 설정하여 구체적인 국가 이행 계획을 수립하여 추진하였다(US EPA, 2015). 호주의 경우, ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency)에서 가정의 실내 라돈 농도에 대한 전국적인 조사를 실시하였고, 라돈 농도 모니터링과 라돈 지도 작성을 통해 라돈으로 인해 발생하는 폐암 예방을 모색하고 있다(ARPANSA, 2017). 체코의 경우 특정 지질학적 지하 토양으로 인해 라돈

에 대한 노출 수준이 높아, 2000년과 2009년 사이, 그리고 2010년과 2019년 사이에 정부 결의안을 기반으로 National Action Plan for Radon Exposure Control (RANAP)이라는 제도를 2020년 1월부로 실행하였다(State Office For Nuclear Safety Prague 2019).

토양 및 암반에 함유된 라돈이 기체 상태로 공기에 확산되어 방사선을 배출하기 때문에 라돈 농도 측정 단위로써 공간 단위 입방미터 당 베크렐(Bq/m<sup>3</sup>) 또는 공간 단위 리터 당 피코큐리 pCi/L 가 사용된다(WHO, 2009). 라돈이 인체에 미치는 영향은 라돈 기체 자체보다는 라돈 기체의 붕괴 생성물인 <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi, <sup>214</sup>Po 에 의해 더욱 심각한 위해를 끼친다고 알려져 있다(National Institute of Environmental Research 2010; KECO 2016). 또한, 국가마다 라돈의 노출 예방을 위한 실내 오염 규제 기준치는 다르며, 미국의 경우, US EPA는 건물 보수가 필요한 조치기준으로 4 pCi/L를 정하고 있다. 라돈 2~4 pCi/L의 경우도 가급적 보수 조치를 권장하고 있고(US EPA 2016), 일반적으로 4 pCi/L 또는 148 Bq/m<sup>3</sup>를 기준치로 정하고 있다(Ministry of Environment 2016). 국내에서도 「실내공기질 관리법」에서는 라돈의 실내 유입으로 인한 건강피해를 줄이기 위하여 실내공기 중 라돈의 농도 조사를 실시할 수 있으며, 다중이용시설의 소유자 등은 2년에 한번 실내 라돈 농도를 측정하도록 하고 있다. 또한 건축자재 사전 적합 확인제도를 도입하여 라돈 관리를 강화하고 있다(Ministry of Environment 2016). 국내에서 다중이용시설, 공동주택의 소유자 등은 실내공기질 권고 기준치로서 라돈 농도를 148 Bq/m<sup>3</sup> 이하로 규정하고 있다. 최근 환경부에서는 4차 실내공기질 관리 기본계획(2020~2024)을 수립하여 2024년까지 공동주택 라돈 평균 농도의 목표를 100 Bq/m<sup>3</sup>로 설정하였으며, 건축자재의 사전관리, 실내 공기질 관리 강화, 라돈관리 매뉴얼 개발 보급, 실내 라돈 지도 작성 등을 추진하고 있다(Ministry of Environment 2020). 특히, 대전광역시 지역의 실내 라돈 농도는 평균 약 110.1 Bq/m<sup>3</sup>로 전국에서 가장 높은 지역으로 알려져 있다(Ministry of Environment, 2020). 이러한 높은 라돈 농도 수준

은 주로 지질학적 원인으로 볼 수 있다. 대전은 차령산맥과 소백산맥 사이에 위치하고 있으며, 암반은 주로 화강암과 변성암으로 구성되어 있다(KIGAM 2019 <https://mgeo.kigam.re.kr>). 일반적으로 라돈 농도는 화강암지대나 변성암지대에서 높게 나타나는 것으로 알려져 있다(MOE 2016; Dillon et al. 1997; Kim et al. 2011).

본 연구에서는 대전시 주택 실내 라돈의 농도 수준을 조사하고 이를 저감하기 위한 라돈 저감 공법을 적용하여 저감 효율을 산정 제시하고자 하였다. 이를 바탕으로 대전시 실내 라돈 관리 및 저감 방안을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 라돈 저감 평가 결과는 실내 라돈 관리와 그로 인한 잠재적 인체 노출 저감을 위한 대책 수립 방안과 기초자료로 활용할 수 있다.

## II. 연구방법

### 1. 대전 실내 라돈 농도 자료 및 측정 분석

본 연구에서는 국립환경과학원에서 주기적으로 실시하는 전국 주택라돈조사를 검토하였고(National Institute of Environmental Research 2018), 대전광역시 행정구역별로 실내 라돈농도 현황을 조사하였다. 이를 기반으로 실내 라돈 농도의 자치구별 통계 조사 분석(산술평균, 표준편차, 기하평균, 최소값, 최대값 등)을 수행하였고, 권고기준치(148 Bq/m<sup>3</sup>)에 대비 초과율을 파악하였다. 1차 대상 가구 선정은 국립환경과학원에서 수행한 ‘전국주택라돈 조사(2011~2018)’ 결과를 바탕으로 대전광역시 라돈 농도 상위 100가구를 선정하였고 5개 자치구별에서 취약계층을 우선적으로 선별하고, 라돈 측정 참여 의사가 있는 가구들을 조사하여 47개 가구를 1차 농도 조사대상 가구로 선정하였다. 이중 실내 라돈 방문 측정 참여 의사가 있는 24개 주택을 대상으로 기초 조사(세대수, 소득수준, 주택 구조, 환기 등 생활 습관, 라돈 위험도 인지 등)와 실내 라돈 방문 측정을 실시하였다. 실내 라돈 방문 측정은 SOP (Standard Operating Procedures)를 작성하여 실시하였고, 가구주와 상의하여 가정 내 거주하는 대표적인 공간 3곳(거실, 안방, 작은방 또는 주방 등)을 중심으로 24시간 동안

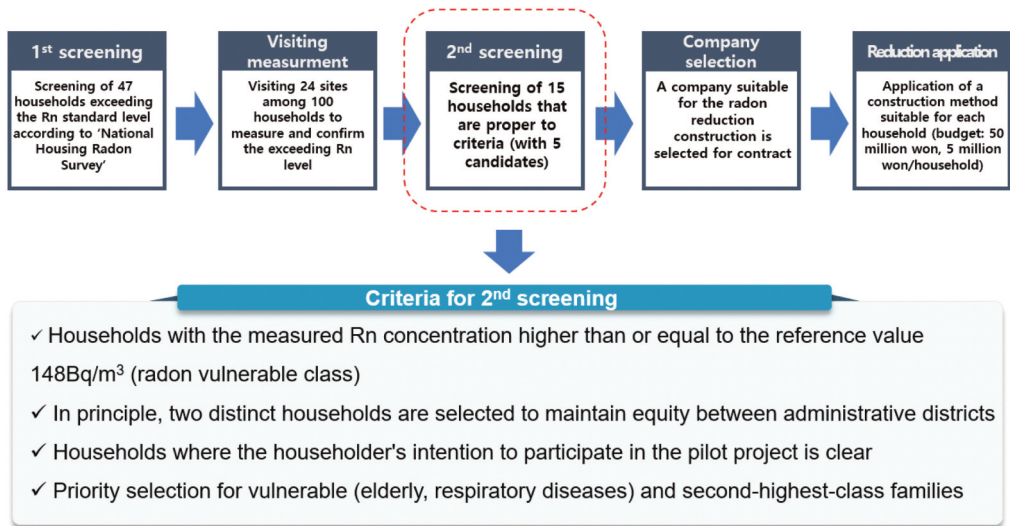


Figure 1. Procedure for indoor radon measurement and reduction methods in Daejeon Metropolitan City in this study.

(주)FTLAB의 라돈아이(RD200S)를 사용하여 라돈 농도를 측정하였다. Figure 1은 대전광역시 실내 라돈 조사 및 저감 사업 추진 절차를 개략적으로 표현하였다.

## 2. 대전 실내 라돈 저감 공법 적용

실내 라돈 저감 시공은 10개 가정 중 8개 가정은 저감 효과가 우수한 것으로 알려진 토양 배기법을 적용하였고, 2개 가정은 라돈 저감 방법 간 효율 비교를 위해 최근 많이 적용되고 있는 차폐법을 실시하였다. 각 가정에 맞는 저감 방법은 방문 측정자료, 설문 조사자료, 주택구조, 가구주의 의사를 고려하여 선정하였다. 다음은 토양 배기법과 차폐법에 대한 간략한 공법 특징과 개요를 제시하였다.

### 1) 라돈 토양 배기법

실내 공기 중 라돈 저감 방법으로 널리 사용되는 능동형 토양 배기법은 파이프 관을 토양 내 삽입하여 토양으로부터 발생하는 라돈을 실내를 거치지 않고 실외로 강제적으로 배출하는 공법을 말한다. 본 저감 사업에서는 환기 팬(ventilation fan)을 사용하는 능동형 토양 배기법(active soil depressurization)을 적용하였다. 환기팬은 PVC관을 사용하였으며, 관에 구멍을 뚫어 관 내부로 토양가스의 유입이 원활하게 하

였다. 가스 배출부는 지붕 위 등 인체 노출이 가장 적은 지점으로 선정하여 실내로의 라돈 재진입을 방지하였다(Figure 2). 저감 시공 후 실내에 라돈 농도 측정 장비(라돈아이, RD200S)와 데이터 송수신 장비(라도몬)을 설치하여 실시간 모니터링을 하였다. 토양 배기법 대상 8가구의 시공 전 실내 라돈 농도 측정은 FRD400 제품으로 측정하였다. 농도 측정은 48시간 이상 라돈 연속측정법(10분 단위로 1시간 이동평균)으로 시행하였다. 토양 배기법 시공 후 라돈 농도는 상시모니터링이 가능한 가정용 측정기기(RD200S)의



Figure 2. Example of application of the soil ventilation method to reduce indoor radon in Daejeon Metropolitan City.

측정값을 이용하여 실시간 측정하였다.

### 2) 라돈 차폐법

실내 라돈 차폐법은 건물의 바닥과 벽의 틈새를 막아 실내로의 라돈 유입을 차단하는 공법을 말한다. 본 연구 사업에서는 사용된 차단제는 라돈 차단율 90% 이상을 유지하는 라돈타이트와 벨류코트가 사용되었



Figure 3. Example of application of the shielding method to reduce indoor radon in Daejeon Metropolitan City.

다(Figure 3). 라돈 타이트의 경우 벽과 천장에 사용되었고, 발포 플라스틱으로 최대 10mm까지 부풀며, 라돈 차단뿐 아니라 단열 효과로 인한 에너지 절약 측면에서도 유리하다. 차폐법의 경우 건물 내벽에 시공을 해야 하기 때문에, 기존 주택보다 대체로 신축 주택에 적용하는 것이 용이하다. 본 연구에서는 차폐법 대상 2가구의 시공 전 라돈 농도 측정을 위해 FRD400 제품을 이용하였다.

## III. 연구결과 및 토의

### 1. 대전시 실내 라돈 측정 결과와 특성

본 연구에서 수행한 대전시 실내 라돈 측정 결과, (Table 1)에 제시한 것처럼 총 24개 가구 중 전체 실내 라돈 평균치는 약 186 Bq/m<sup>3</sup>로 나타났다. 이 중 A

Table 1. The results of indoor radon visit measurement among houses in Daejeon Metropolitan City

	Total	A District	B District	C District	D District	E District
No of households	24	5	4	6	6	3
Average (Bq/m <sup>3</sup> )	186	261	145	182	200	141
Maximum (Bq/m <sup>3</sup> )	832	677	426	832	387	353
Average excess rate (%)	64.4	100	38.5	50	77.8	44.4

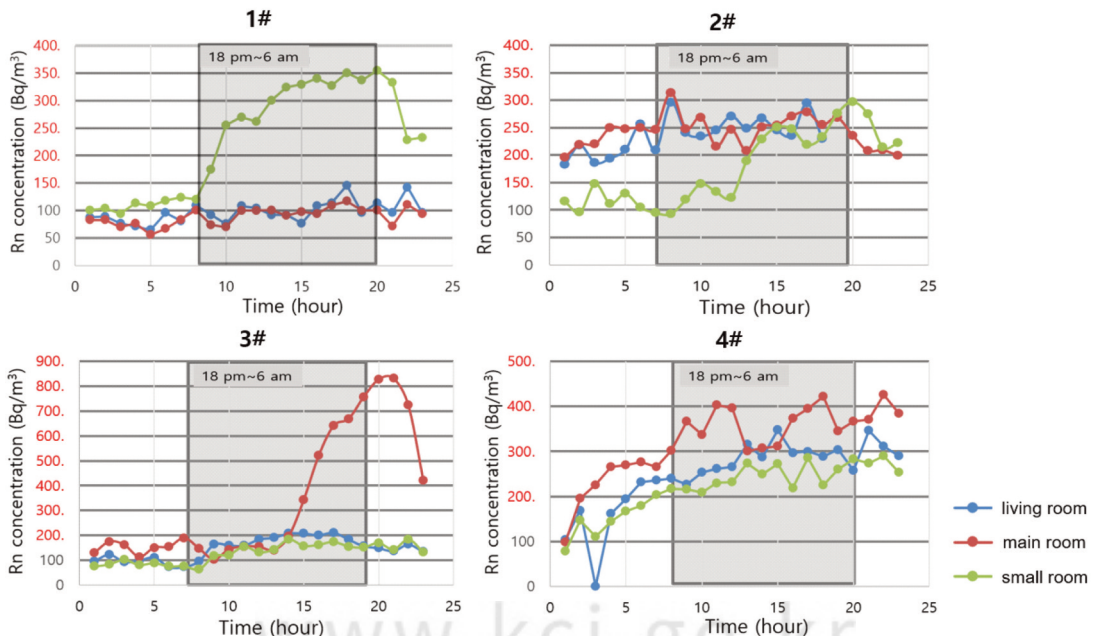


Figure 4. Temporal changes of indoor Rn levels at households 1#~4# before the applying the soil ventilation method.

자치구인 경우는 평균 약 261 Bq/m<sup>3</sup>로 가장 높게 나타났다으며, E 자치구의 경우는 141 Bq/m<sup>3</sup>로서 기준치(148 Bq/m<sup>3</sup>)에 근접하게 나타났다. 유의할 점은 본 연구에서 조사한 실내 라돈 대상 주택은 기존 국립환경과학원에서 조사한 농도가 상대적으로 높은 라돈 가구(취약계층)를 대상으로 하였기 때문에 전체 자치구를 대표하기 보다는 라돈 농도의 상위값을 대상으로 한 것이다.

Figure 4는 24개 주택 중 일부 측정결과, 4개 주택의 시간별 실내 라돈 농도 측정 변화를 나타낸 것이다. 1# 주택의 경우, 주방과 거실에 비해 안방에서 기준치(148 Bq/m<sup>3</sup>)를 초과하는 매우 높은 라돈 농도를 나타내었다. 특히, 오후 6시에서 새벽 6시까지 안방에 주로 거주할 수 있기 때문에 이는 라돈의 인체 노출에 따른 건강 위해가 우려되는 상황이다. 2# 주택의 경우 거실과 안방이 거의 비슷한 라돈 농도 경향을 나타내었고, 작은 방이 경우에는 상대적으로 약간 낮은 농도를 나타내었지만, 모든 곳에서 라돈 기준치(148 Bq/m<sup>3</sup>)를 초과하는 것으로 나타났다. 3# 주택의 경우는 대체로 상대적으로 높은 라돈 농도를 나타내었지만, 특히 자정이 넘는 시간에 라돈 농도가 안방에서 매우 높게 나타나는 특징을 나타내었다. 4# 주택의 경우 측정한 거실, 안방, 작은 방에서 대체로 높은 농도를 나타내었으며, 낮과 밤의 실내 라돈 농도가 크게 변화하지 않았다.

## 2. 실내 라돈 저감 공법 평가 결과

### 1) 토양배기법의 실내 라돈 저감 평가

Table 2에서는 대전광역시 실내 라돈 토양배기법 적용 전과 적용 후 라돈 농도 측정 결과와 효율을 나타낸 것이다. 8개 가정에서 실내 라돈 저감 효율은 최소 8.1%에서 최대 87.0%를 나타내었다. 특히 주택 #4의 경우 초기 라돈 농도(90.3 Bq/m<sup>3</sup>)에 비해 토양배기법 적용 후 큰 차이를 보이지 않아 이에 대한 향후 검토가 필요하다. 주택별 이러한 라돈 저감 효율의 차이는 라돈의 경우 계절적으로, 하루 시간 중 낮과 밤마다 차이가 있을 수 있으며, 주택 건물의 구조 형태, 환기 방법과 구조 등에 따라서도 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 주택별로 토양 배기법에 따른 라돈 저감 효과를 파악하여 제시하였지만, 향후 추가 연구를 통해 구체적인 영향 인자와 라돈 저감 원인 규명이 필요할 것으로 판단된다. 전체적으로 8곳의 토양 배기법의 평균 라돈 저감 효율은 55.04%를 나타내었다. Figure 5와 Figure 6에서는 주택 #1의 토양 배기법 적용 전과 적용 후의 시간별 라돈 농도를 나타내었다. 토양 배기법 시공 전에는 밤에 대체로 높은 농도를 나타냈고, 일부 시간대에서는 기준치 148 Bq/m<sup>3</sup>를 초과하기도 하였다. 하지만 토양 배기법 시공 후에는 대체로 낮은 라돈 농도를 나타내었으며, 평균 22.4 Bq/m<sup>3</sup>를 나타내었다. Table 3에서는 토양 배기법 시공 후 주택 #1~#8에서 낮과 밤 시간대 모두 라돈 농도가 기준치(148 Bq/m<sup>3</sup>) 이하로 양호하게 낮아졌음을 확인할 수 있다.

Table 2. Reduction efficiency of indoor Radon at households (#1-#8) by applying the application of soil venting method (unit: Bq/m<sup>3</sup>)

Household	Level of Rn (before)	Level of Rn (after)	Reduction efficiency (%)
#1	94.6	22.4	76.1
#2	199.5	35.2	82.4
#3	90.3	82.9	8.1
#4	119.2	15.5	87.0
#5	71.0	24.6	65.3
#6	71.8	28.7	60.0
#7	39.4	29.4	25.5
#8	68.0	43.7	35.8
average	94.2	35.3	55.0

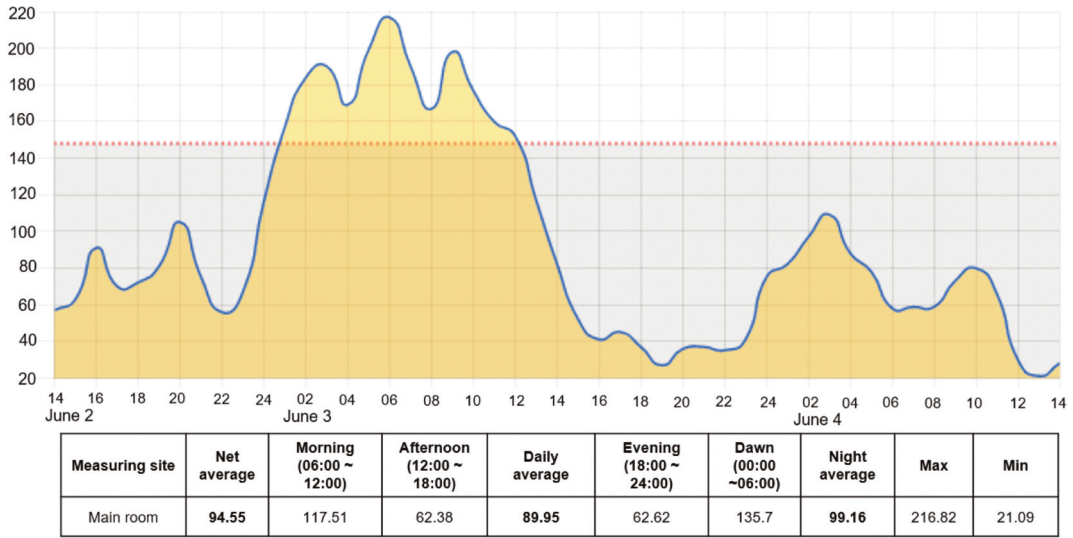


Figure 5. Temporal changes of indoor Rn levels at household #1 before the application of soil venting method.

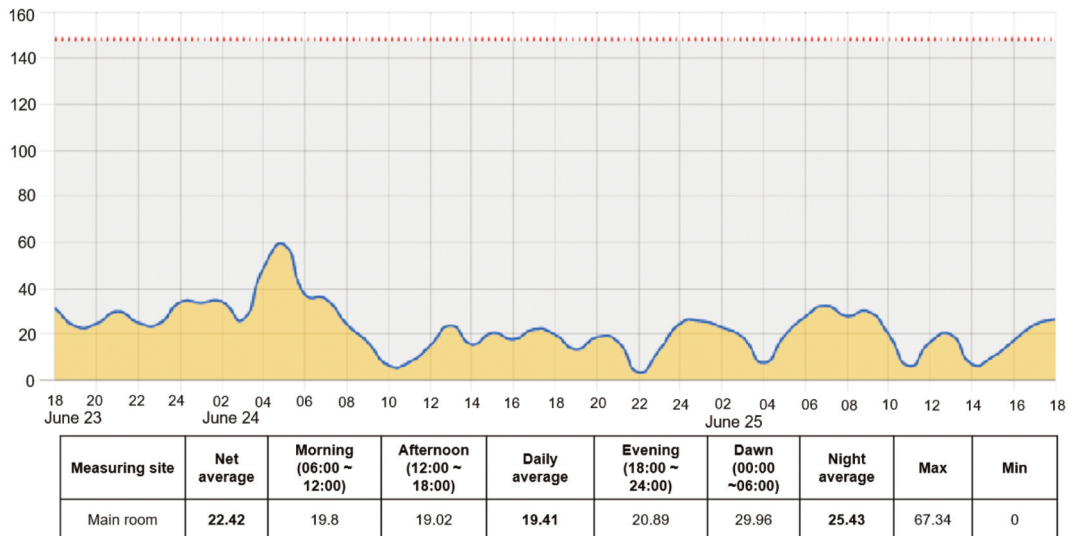


Figure 6. Temporal changes of indoor Rn levels at household #1 after the application of soil venting method.

Table 3. Levels of indoor Rn at households (#1-#8) after the application of soil venting method (unit: Bq/m<sup>3</sup>)

Household	average	morning (06:00~12:00)	night time (00:00~06:00)	maximum	minimum
#1	22.4	19.8	29.9	67.3	0
#2	35.2	38.1	54.2	98.4	0
#3	82.9	109.7	82.0	133.2	34.8
#4	15.5	14.8	23.0	49.2	0
#5	24.6	14.5	11.8	131.0	0
#6	28.7	25.5	59.7	93.6	0
#7	29.4	32.2	26.6	64.0	4.1
#8	43.7	33.5	55.4	108.4	0

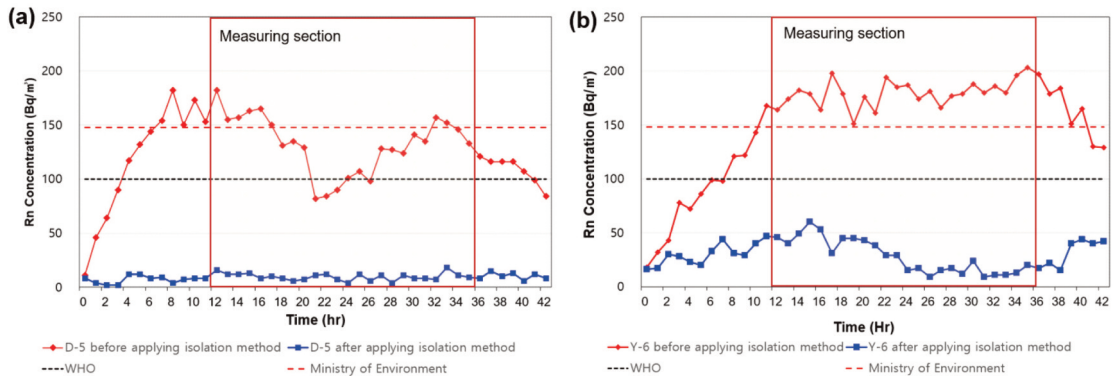


Figure 7. Temporal changes of indoor Rn levels at (a) #9 and (b) #10 households by applying isolation method.

Table 4. Reduction efficiency of indoor Radon by applying isolation method (Unit: Bq/m<sup>3</sup>)

Household	Level of Rn (before)	Level of Rn (after)	Reduction efficiency (%)
#9	132.2	9.6	92.7
#10	179.3	28.4	84.2

## 2) 차폐법의 실내 라돈 저감 평가

본 연구에서 차폐법을 적용한 실내 라돈 저감 결과, 실내 라돈 저감 전후의 농도변화를 Figure 7과 Table 4에 나타내었다. #9 주택의 경우 실내 라돈 농도가 차폐법 적용 전 평균 132.2 Bq/m<sup>3</sup>에서 시공 후 9.6 Bq/m<sup>3</sup>로 감소하였으며, 이는 약 92.7%의 라돈 저감 효율에 해당한다. #10 주택의 경우, 실내 라돈 농도는 차폐법 적용 전 평균 179.3 Bq/m<sup>3</sup>에서 시공 후 28.4 Bq/m<sup>3</sup>로 감소하였으며, 이는 약 84.2%의 저감 효율에 해당한다. 후자의 저감 효율은 #9번 저감 효율에 비해 상대적으로 낮는데, 이는 측정 시 외부전원 인입을 위해 서재 방문 틈에 2 cm 정도의 틈과 콘센트 박스 등 시공이 불가능한 공간을 통해 라돈이 유입되었기 때문으로 판단된다. 차폐법에 의한 실내 라돈 저감 평가는 토양배기법에 비해 효과가 높다가 예상되나, 향후 보다 많은 대상 주택을 대상으로 라돈 저감 효과를 평가하여야 한다.

## IV. 결론

본 연구를 통해 대전광역시 주택의 실내 라돈 농도 분포 특성을 조사하였고, 기준치를 상회하는 주택에

대해 라돈 저감 공법을 적용하여 저감 효율을 평가하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 국립환경과학원의 ‘전국주택라돈 조사’ 결과를 기초로 실내 라돈 농도가 높은 24개 주택에 대해 실내 라돈 방문 측정을 실시한 결과, A 자치구의 실내 라돈 평균 농도가 약 261 Bq/m<sup>3</sup>로 매우 높게 나타났고, E 자치구는 141 Bq/m<sup>3</sup>로서 기준치와 비슷한 수준을 보였다. 또한 같은 주택에서도 측정 지점과 시간에 따라 라돈 수치가 상이한 것을 확인할 수 있었다.

2) 실내 라돈 농도는 시간에 따라 달라지는 경향을 보였으며, 대체로 저녁 시간 이후에 라돈 농도가 증가하였고, 밤과 새벽 동안 높은 농도를 유지하다가 오전 및 낮 시간에는 상대적으로 낮은 농도를 유지하는 것을 알 수 있었다. 이는 일몰 이후 온도가 낮아지며 대기가 안정해지고 기류가 약해지기 때문에 환기에 의한 라돈 저감 효과가 떨어지기 때문으로 판단된다.

3) 토양배기법을 실시한 8개 주택의 경우, 라돈 저감 시공 후 실내 라돈 수치는 대체로 30~40 Bq/m<sup>3</sup> 정도로 크게 낮아져 라돈 기준치(30~40 Bq/m<sup>3</sup>)에 비해 매우 낮은 수준임을 확인하였고, 실내 라돈 저감 효율의 평균 약 55.0%로서 저감 공법의 효과가 양호함을 알 수 있었다. 그러나 주택별 라돈 저감 효율 범위는 8.1~87.0%로 상당한 차이가 있었으며, 이는

동일한 시공법을 적용하더라도 주택 건물의 구조 및 환기의 빈도 등에 의해 실내 라돈 농도가 크게 달라질 수 있음을 시사한다.

4) 차폐법을 적용한 2개 주택의 경우 실내 라돈 수치는 시공 전 각각 132.2 Bq/m<sup>3</sup>과 179.3 Bq/m<sup>3</sup>에서 시공 후 각각 9.6 Bq/m<sup>3</sup> (저감 효율: 92.7%)과 28.4 Bq/m<sup>3</sup> (저감 효율: 84.2%)로 낮아져 저감 시공의 효과가 매우 우수함을 알 수 있었다. 평균 라돈 저감 효율은 차폐법이 토양배기법에 비해 우세했지만, 차폐법을 적용한 주택의 수가 적어서 두 공법 중 라돈 저감에 더 효율적인 방법을 판단하기는 쉽지 않다. 또한 두 주택 중 상대적으로 낮은 저감 효율이 측정된 곳은 라돈 측정을 위해 차폐를 하지 않고 남겨둔 공간을 통해 라돈이 유입되었기 때문으로 판단되며, 이는 차폐법 시공의 최대 효과를 얻기 위해서는 실내 벽의 균열이나 문틀 사이 작은 공간 등을 꼼꼼하게 차단해야 함을 시사한다.

본 연구의 결과를 종합적으로 판단할 때, 대전시 취약계층이 거주하는 일부 주택의 실내 라돈 농도는 권고기준치인 148 Bq/m<sup>3</sup>을 종종 상회하는 것으로 나타나 실내 라돈 노출에 의한 건강피해가 우려된다. 또한 저감 공법을 적용한 모든 주택에서 실내 라돈 농도가 기준치 이하로 낮아진 것으로 볼 때, 토양배기법과 차폐법은 향후 주택의 실내 라돈 농도를 효과적으로 저감하기 위한 방법으로 도입이 필요하다. 그러나 본 연구의 라돈 데이터는 실내 라돈 농도가 가장 낮은 여름철인 6월에 측정되었기 때문에 사계절의 특성이 반영된 종합적인 실내 라돈 수치로 제시하기에는 한계가 있다. 또한 대표적인 저감 효율과 저감 영향 인자를 파악하기 위해서는 향후 보다 많은 고농도 실내 라돈 주택을 대상으로 저감 시공 조사를 실시하여 가장 비용 효율적인 방법과 비용 대비 최대 노출 저감 효과를 파악할 필요가 있다. 본 연구결과를 기초자료로 활용하고 향후 면밀한 라돈 주택 조사를 진행하여 라돈 노출에 의한 피해 저감을 위한 대전광역시 실내 라돈 관리 방안 수립이 필요하다.

## References

- ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency). 2017. Current Radiation Protection Requirements for Radon in Australia.
- ASN\_NRPA (French Nuclear Safety Authority (ASN), Norwegian Radiation Protection Authority (NRPA)). 2015. Radon National Action Plan.
- Chung EK. 2019. Characteristics of Internal and External Exposure of Radon and Thoron in Process Handling Monazite. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 29(2): 167-175. [Korean Literature]
- Dillon ME, Carter GL, Arra R, Kahn B. 1997. Radon concentrations in groundwater of Georgia piedmont. *Health Physics* 60(2): 229-236.
- Institute of Geoscience and Mineral Resources. 2019. 1:1,000,000 geologic sheet of Korea.
- International Agency for Research on Cancer. 1988. Man-made mineral fibres and radon. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 43, Lyon.
- Jung JS, Yoo JH, Lee KS, Lee JW, Shim IK, Seo SY, Kim BW, Kwon MH. 2016. Study on Characteristics of Radon Concentration and Effective Dose at Public Buildings in Korea. *The Korean Society of Living Environmental System* 23(6): 767-775. [Korean Literature]
- Korea Institute of Geological Resources. Geological Information Service System, from: <https://mgeo.kigam.re.kr/> (accessed date Nov. 19, 2021).
- Kim YJ, Chang BU, Park HM, Kim CK, Tokonami S. 2011. National radon survey in Korea.

- Radiation Protection Dosimetry 146(1-3): 6-10. [Korean Literature]
- Lee KS, Seo SY, Yoo JH, Oh SJ, Kwon MH, Lee WS. 2016. Factors influencing indoor radon concentration in detached houses. *Journal of Odor Indoor Environment*. 15(2): 93-99. [Korean Literature]
- Lee SM. 2018. A legal problem and an improvement plan of NORM management system seen through case of a radon detection bed. *Environ. Law Policy* 21: 167-199. [Korean Literature]
- Lee JS. 2019. Legal Improvement Plan for Radon Reduction in Public-Use Facilities, *Hannam Journal of Law & Technology* 25(3): 151-192. [Korean Literature]
- Ministry of Environment, Yonsei University. 2010. Establishment of Radon High Exposure Path Management System. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2016. Understanding of Radon, Natural Radioactive Substance in Life. [Korean Literature]
- Ministry of Environment of the Republic of Korea. 2020. 4th Basic Plan for Indoor Air Quality Management. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2016. indoor air quality management law. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2020. National indoor radon map, available from: [https://iaqinfo.nier.go.kr/leinfo/radon\\_map.do](https://iaqinfo.nier.go.kr/leinfo/radon_map.do) (accessed date: Nov. 19, 2021).
- National Institute of Environmental Research. 2010. Nationwide Survey of Indoor Radon In Korea- Public facilities. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. 2018. Nationwide survey (2017-2018) of indoor radon at home in Korea. [Korean Literature]
- State Office For Nuclear Safety Prague. 2019. National Action Plan For Control of Public Exposure To Radon.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency). 2015-2020. “Reflections on the National Radon Action Plan’s (NRAP) Progress” from The National Radon Action Plan: A Strategy for Saving Lives (pdf) (November 10, 2015, EPA 402/R-15/001)
- US EPA (United States Environmental Protection Agency). 2011. Protecting People and Families from Radon A Federal Action Plan for Saving Lives.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency). 2016. Basic radon facts.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency). 2016 Citizen’s Guide to Radon.
- WHO (World Health Organization). 2009. Handbook on Indoor Radon: a public health perspective. WHO: Geneva; pp. 3-16.
- WHO (World Health Organization). 2000. Air quality guidelines for europe second edition.