

충청북도 일부지역 내 주택 실내 라돈 농도

지현아 · 유주희 · 김가현 · 원수란 · 김선홍 · 이정섭[†]
국립환경과학원 환경기반연구부 생활환경연구과

A Study on the Concentrations of Indoor Radon for Houses in Chungcheongbuk-do Province, Korea

Hyun-A Ji, Ju-Hee Yoo, Ga-Hyun Kim, Soo Ran Won,
Seonhong Kim, and Jeongsub Lee[†]

Indoor Environment and Noise Research Division, National Institute of Environment Research

ABSTRACT

Objectives: Modern people spend most of their day indoors. As the health impact of radon becomes an issue, public interest also has been growing. The primary route of potential human exposure to radon is inhalation. Long-term exposure to high levels of radon increases the risk of developing lung cancer. Radon exposure is known to be the second-leading cause of lung cancer, following tobacco smoke. This study measures the indoor radon concentrations in detached houses in area A of Chungcheongbuk-do Province considering the construction year, cracks in the houses, the location of installed detectors, and seasonal effects.

Methods: The survey was conducted from September 2017 to April 2018 on 1,872 private households located in selected areas in northern Chungcheongbuk-do Province to figure out the year of building construction and the location of detector installed and identify the factors which affect radon concentrations in the air within the building. Radon was measured using a manual alpha track detector (Raduet, Hungary) with a sampling period of longer than 90 days.

Results: Indoor radon concentrations in winter within area A was surveyed to be 168.3 ± 193.3 Bq/m³. There was more than a 2.3 times difference between buildings built before 1979 and those built after 2010. The concentration reached 195.4 ± 221.9 Bq/m³ for buildings with fractures and 167.2 ± 192.4 Bq/m³ for buildings without fractures. It was found that detectors installed in household areas with windows exhibited a lower concentration than those installed in concealed spaces.

Conclusion: High concentrations of indoor radon were shown when there was a crack in the house. Also, ventilation seems to significantly affect radon concentrations because when the location of the detector in the installed site was near windows compared to an enclosed area, radon concentration variation increased. Therefore, it is considered that radon concentration is lower in summer because natural ventilation occurs more often than in winter.

Key words: Indoor radon, construction year, natural radiation, lung cancer, alpha track detector

I. 서론

현대인들은 하루 중 90%에 이르는 시간을 실내에

서 보내고 있는 만큼¹⁾ 실내공기와 건강영향과의 관련성이 대두되면서 실내공기질에 관심이 증가하고 있다. 또한, 에너지 효율을 높이기 위하여 건축물의

[†]Corresponding author: National Institute of Environmental Research, Hwankyong-ro 42, Seo-gu, Incheon, 22689, Republic of Korea, Tel: +82-32-560-8307, E-mail: ljsrex@korea.kr

Received: 7 November 2019, Revised: 5 December 2019, Accepted: 5 December 2019

밀폐율이 높아짐에 따라 환기부족으로 오염물질이 증가하고 있는 현실이다.²⁾ 특히 라돈은 언론매체를 통하여 폐암의 주요 원인으로 알려져 대중들의 관심이 높아지고 있다.

라돈(²²²Rn)은 자연환경 중에 존재하는 천연 방사성 핵종 중의 하나로 지질의 암석이나 토양에 함유되어 있는 우라늄(²³⁸U)이 몇 단계의 방사성 붕괴 과정을 거쳐 생성되는 무색, 무취의 방사성 기체를 말한다. 일반적으로 라돈은 건물의 균열이나 구멍을 통해 실내로 유입되며, 건축에 사용되는 석고보드, 콘크리트, 석재 등 라돈농도가 높은 지역의 암석이나 토양을 사용하여 제작하였다면 실내 라돈농도에 기여하는 것으로 보여진다.³⁾

실내로 유입된 라돈과 라돈이 붕괴되면서 생성되는 라돈 자손들(²¹⁸Po, ²¹⁴Po, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Pb)은 호흡을 통하여 폐에 유입되며 짧은 반감기(30분 미만)로 인하여 호흡을 통해 체외로 유출되기 전에 폐에서 붕괴된다. 특히 ²¹⁸Po, ²¹⁴Po은 반감기가 3분, 1×10⁻⁴초로 붕괴하면서 알파선을 방출하는데, 그 알파입자가 주변 폐 조직을 손상시키는 것으로 알려져있다.⁴⁾ 따라서 높은 농도의 라돈에 장기간 노출될 경우 폐암을 유발할 수 있고⁵⁾ 미국 환경청(Environmental Protection Agency: EPA)은 라돈이 흡연에 이어서 두 번째로 폐암 발생의 원인으로 보고하였다.⁶⁾ 이에 많은 국가에서는 라돈의 위해성을 인식하고 실내 라돈 농도 파악과 관리방안 마련에 힘쓰고 있다. 미국 EPA에서는 ‘A Citizen’s Guide to Radon (Second Edition)’을 편찬하여 라돈의 위험을 알리고 있으며 각 주정부에서는 실내 라돈측정을 의무화하여 주택 거래 시 라돈 보증서를 첨부하는 등 라돈에 대한 규제를 강화하고 있는 실정이다.⁷⁾

우리나라 환경부도 라돈으로부터 국민의 건강을

지키기 위하여 실내공기질 관리법에서 다중이용시설과 신축 공동주택의 권고기준치를 148 Bq/m³ 이하로 관리하고 있다. 하지만 거주하고 있는 주택에 대한 관리는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 충청북도 일부지역(A)을 대상으로, 계절적(봄, 여름, 가을, 겨울)인 영향과 더불어 주택의 건축년도, 주택 내 균열여부, 검출기 설치 장소에 따른 실내 라돈농도를 조사하여 주택에서 라돈에 대한 효율적인 관리방안을 마련하기 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상 및 기간

본 연구는 2017년 11월부터 2018년 4월까지 충청북도 일부지역(A)의 단독주택 1,872세대를 대상으로 조사하였다. 주택 내 실내공기 중 라돈에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위하여 건축년도, 주택 내 균열여부, 검출기 설치장소에 관한 설문조사를 실시하였다. 또한 계절별 특성을 알아보기 위하여 A지역 내 8개 읍·면의 대표주택 1지점을 중심으로 가구수가 많은 인구밀집 지역의 경우 2~3지점을 추가로 선정하여 총 78세대에서 2017년 9월부터 2018년 9월까지 1년간 집중조사를 하였다.

2. 측정 및 분석방법

실내 라돈 농도의 측정은 “실내공기질 공정시험방법 ES 02301.1a 실내 공기 중 라돈 측정방법-알파비적검출법”에 따라 실시하였다. 사용된 검출기는 수동형 알파비적검출기인 라듀엣(Raduet, Hungary)을 사용하여 한 가구당 90일 이상 장기간 측정하였다. 검출기는 전자파나 정전기가 발생하거나 실외공기와 직접 만나는 곳, 기거하지 않은 공간, 물기가 많은

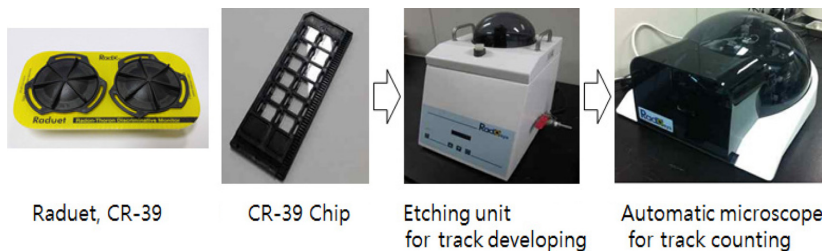


Fig. 1. The components of radon analysis system

곳을 피하여 침실이나 거실을 위주로 천장과 벽으로 부터 약 30 cm 이상 떨어진 곳에 설치하였다.

90일 경과 후 회수된 검출기는, 알루미늄 코팅된 포장지에 완전히 밀봉하여 실험실로 이동되었으며, 회수된 라듐 검출기는 검출소자(Chip)를 분리하여 90°C의 6.25 M NaOH용액에서 4시간 30분 동안 화학적 에칭을 실시하였다. 그 후 1% 초산 용액에서 20분간 중화시킨 후, 하루정도 건조시켜 자동판독기(RSV80, Radosys, Hungary)를 이용(Fig. 1)하여 비적을 계수한 뒤 결과 값을 아래의 식으로 계산하여 농도를 산출하였다.

$$\begin{aligned} \text{RAC} &= \text{ExpRn} \times 1000 / 24 / T \\ \text{ExpRn} &= \text{CF} \times (a_{11} \times \text{RnD} - a_{12} \times \text{TnD}) \end{aligned} \quad (1)$$

where:

RAC: Radon Activity Concentration, Bq/m³

ExpRn: Exposure value for the Rn-Channel, kBq · h/m³

T: Time of exposure in Day

CF: Calibration Factor provided by the Radosys QC system

RnD: Track density counted for the Rn-Channel, in mm⁻²

TnD: Track density counted for the Tn-Channel, in mm⁻²

a₁₁: Relative uncertainty of Matrix of RnD

a₁₂: Relative uncertainty of Matrix of TnD

3. 통계적 분석방법

주택 실내 라돈농도에 영향을 주는 요인을 파악하기 위하여 SPSS 12.0 (SPSS Inc., USA)를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 라돈농도에 영향을 주는 요인으로는 주택의 건축시기, 균열여부, 검출기 설치 장소에 대하여 집단별 기술통계를 수행하였으며, 유의수준 0.05를 기준으로 영향 요인별 평균농도를 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 충청지역 단독주택 실내 라돈 농도 분포 특성

Figure 2는 본 연구에서 조사된 라돈농도의 분포를 나타낸 것으로 전형적인 실내공기 오염물질들 및 라돈의 농도인 비정규분포를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

충청북도 A지역의 단독주택 겨울철 실내 라돈농도를 측정된 결과, 평균 168.3±193.3 Bq/m³으로 조사되었다. 국립환경과학원에서 2013-2014년에 조사된 전국 주택 라돈조사 보면 지역별 주택 실내 라돈농도가 높은 곳으로 강원도는 149.7 Bq/m³, 전라북도는 117.0 Bq/m³, 대전은 111.8 Bq/m³으로 조사되었다.⁸⁾ 이에 충청북도 A지역의 단독주택 겨울철 실내 라돈 농도는 높은 수준으로 사료된다.

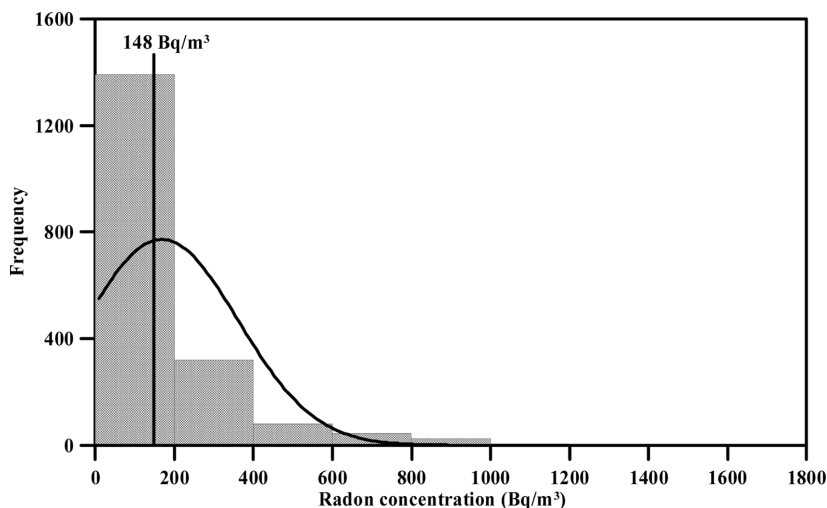


Fig. 2. Distribution of indoor radon concentration at homes in Chungcheongbuk-do

각 나라의 라돈 관리기준을 보면 독일과 WHO 100 Bq/m³, 우리나라와 미국 148 Bq/m³, 캐나다, 스웨덴 200 Bq/m³로 관리하고 있다. 본 연구에서는 1,872세대 중 662세대가 우리나라 실내공기질 관리법의 기준치 148 Bq/m³보다 높게 조사되어 35.4%, WHO 기준으로는 924세대가 초과되어 49.4% 초과율을 보였다.

2. 환경영향인자에 따른 실내 라돈 농도 특성

건축시기에 따른 라돈농도를 확인하기 위하여 설문 실시한 1,771세대 중 ‘모른다’로 답한 가구를 제외하고 1,746세대에 대하여 조사한 결과를 Table 1에 나타내었다. 건축연도가 오래될수록 실내 라돈의 농도가 증가하는 경향을 보였다. 1979년 이전에 건축된 주택은 237.8±238.7 Bq/m³, 1980-1989년에는 217.8±216.7 Bq/m³, 1990-1999 166.5±177.5 Bq/m³, 2000-2009 140.8±181.2 Bq/m³, 2010년 이후에는 102.5±137.1 Bq/m³으로 조사되었다. 특히, 1979년 이전에 지은 주택과 2010년 이후에 건축된 주택 내 실내 라돈 농도는 2.3배 이상의 차이를 보였다. 이는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다(p<0.05). 건축연도에 따른 기존의 국내외 연구들도 본 연구와 마찬가지로 건축연도가 이태리 남부의 주택에서 실내 라돈 농도를 조사한 결과 1919년 이전에 건축된

주택은 137 Bq/m³, 그 이후에 건축된 주택에서는 131, 83 Bq/m³으로 조사되었다.⁹ 기존의 연구들도 본 연구와 마찬가지로 건축연도가 오래될수록 라돈의 농도가 높은 것으로 조사되었다.¹⁰⁻¹²⁾ 이는 건축물들이 노후되면서 주택 내 균열이나 틈으로 토양 중 라돈가스가 주택으로 유입되는 것으로 보여진다.

주택 내 균열이나 틈새 유무에 대해서는 1,771세대 중 ‘모른다’ 라고 답한 가구를 제외한 1,752세대에 대하여 조사가 이루어졌으며, 결과는 Table 1에 나타내었다. 주택 내에 균열이나 틈새가 있는 경우의 실내 라돈농도는 195.4±221.9 Bq/m³ 틈새나 균열이 없는 경우는 167.2±192.4 Bq/m³ 로 나타났다. 균열이 있는 경우가 더 높은 실내 라돈농도를 보였지만 유의한 차이가 나타나지 않았다. 하지만 주택 내 균열이나 틈새가 있는 경우 토양으로부터 라돈가스가 유입될 가능성이 많은 것은 기존의 연구결과를 통하여 판단할 수 있다¹³⁾. 라돈 농도를 낮추기 위하여 주택의 틈새를 메우거나 라돈저감 시공 등의 관리가 필요할 것으로 판단된다. 우리나라 환경부에서는 라돈가스를 저감하기 위하여 일부지역에서 저감사업(토양가스배기공법, 외부공기유입법, 틈새막음법)을 실시한 결과 시공 후 약 48~90%까지 라돈가스가 감소한 것으로 조사되었다.¹⁰⁾ 따라서 라돈농도가 높은 주택은 주택의 특성에 맞는 라돈저감 시공

Table 1. Comparison of indoor radon concentration by environmental factor

	n	Radon Concentration (unit: Bq/m ³)					
		Range ¹	Mean±SD ²	GM ³	Median	P-value	
Year	Before 1979	242	15.5~1411.9	237.8±238.7	152.4	152.5	0.000
	1980-1989	242	19.8~1775.1	217.8±216.7	146.8	142.1	
	1990-1999	538	12.9~1276.7	166.5±177.5	110.1	99.8	
	2000-2009	510	13.6~1755.8	140.8±181.2	89.3	80.7	
	After 2010	214	11.8~1130.3	102.5±137.1	67.3	55.3	
	Total	1,746	11.8~1775.1	168.1±194.1	106.2	98.1	
Crack	No crack	1,674	11.8~1775.1	167.2±192.4	105.6	97.8	0.210
	With crack	78	26.2~1411.9	195.4±221.9	127.9	128.0	
	Total	1,752	11.8~1775.1	168.5±193.9	106.5	98.3	
Window	Open	66	25.1~753.5	198.4±167.7	139.1	149.9	0.205
	Close	1,682	11.8~1775.1	167.6±194.9	105.5	97.7	
	Total	1,748	11.8~1775.1	168.7±194.0	106.6	98.3	

¹Range: Minimum and Maximum

²Mean±SD: Arithmetic mean±Standard deviation

³GM: Geometric Mean

이 필요한 것으로 판단된다.

주택에서 검출기가 설치된 장소에 창문이 있는 곳, 창문이 없이 밀폐된 곳으로 나누어 설문을 진행하였다. 총 1,748가구에 대한 조사가 이루어졌고 외부와 통할 수 있는 창문이 있는 곳에 설치된 가구는 66세대, 창문이 없이 밀폐된 곳에 설치한 가구는 1,682세대였다. 개방된 곳의 실내 라돈 농도는 198.4 ± 167.7 Bq/m³, 밀폐된 곳에서의 농도는 167.6 ± 194.9 Bq/m³로 측정되었고 이는 통계적으로 유의하지는 않았다. 하지만 기존의¹⁴⁾ 연구결과를 보면 개방된 공간에서는 40.1 Bq/m³, 밀폐된 공간에서는 64.8 Bq/m³으로 조사되었으며 유의한 결과를 보였다. 또한 한 주에 1-2회 환기를 할 경우 라돈농도는 161.6 Bq/m³, 매일 환기를 할 때에는 136.6 Bq/m³으로 나타나 실내 라돈농도는 환기 여부와 밀접한 관련이 있는 것으로 보여 실내 라돈을 저감하기 위해서는 주택에서 적절하게 환기를 하는 것이 바람직하다고 생각된다. 행정구역상에 같은 충청북도여도 농도의 차이가 나는 것은 실내 생활 습관, 환기 습관, 건축년도, 지역의 지질특성 차이에 영향을 받는 것으로 사료된다. 기존의 연구자료를 보면, 일반 생활공간에서 라돈 차이가 나는 요인으로 생활환경, 기후차이, 건축자재, 건물의 밀폐화 등 영향 때문이라고 보고한 바 있다.¹⁵⁻¹⁷⁾

3. 계절에 따른 실내 라돈 농도 특성

충청북도 A지역 내 78가구에 대하여 계절별 실내에 라돈농도를 박스플롯으로 알아보았다(Fig. 3). 그림에서 박스는 각각 25%와 75%, 박스안 실선은 중앙값을, 그리고 세로의 선의 처음과 끝은 최소값과 최대값을 표시하였다. 그 결과, 봄철에는 94.2 ± 112.7 Bq/m³, 여름철 42.3 ± 50.0 Bq/m³, 가을철 116.8 ± 145.1 Bq/m³, 겨울철 172.2 ± 196.1 Bq/m³로 나타나, 겨울철의 실내 라돈농도가 가장 높았으며 가을, 봄, 여름 순으로 조사되었다. 기존의¹⁸⁾ 연구결과 강원도 일부 지역에서도 겨울철의 실내 라돈농도가 다른 계절에 비하여 1.14-3.18배 높은 수준을 보이는 것으로 조사되었다. 또한 인도의 주택 내 계절적 실내 라돈농도를 조사한 연구결과도 겨울철/여름철의 비율이 1.46으로 나타났고 계절에 따라 창문과 출입문의 개방시간에 영향을 받는다고 조사되었다.¹⁹⁻²⁰⁾ 계절별로 실내 라돈농도의 차이가 발생하는 이유는 겨울철에 비해 여름철이 자연환기를 자주 시키기 때문에 라돈

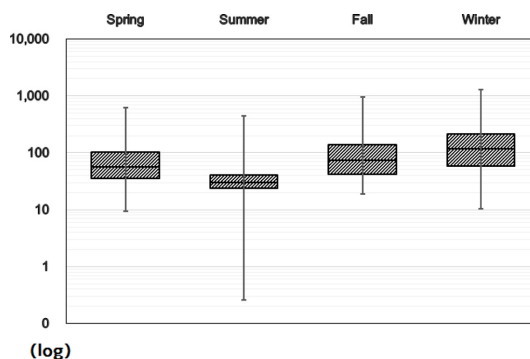


Fig. 3. Seasonal radon concentration in intensive investigated homes

농도가 낮게 검출된 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 2017년 11월부터 2018년 4월까지 충청북도 내 A지역을 대상으로 단독주택 1,872세대를 대상으로 실내 라돈농도에 영향을 주는 요인인 건축년도, 주택 내 균열여부, 검출기 설치장소에 따른 농도를 분석하였다. 이 중 8개 읍·면의 대표주택 1지점을 중심으로 가구수가 많은 인구밀집 지역의 경우 2-3지점을 추가로 선정하여 총 78세대에 대하여 1년간 계절별 라돈농도를 수행하였다.

계절별 특성을 조사하였다. A지역의 평균농도는 168.3 ± 193.3 Bq/m³으로 조사되었으며, 실내공기질 관리법의 다중이용시설 및 신축공동주택의 기준치인 148 Bq/m³를 초과한 가구는 전체 35.4%인 것으로 조사되었다. 1979년 이전에 건축된 주택이 2010년에 지은 주택보다 2.3배 이상 실내 라돈 농도가 높았고 이는 통계적으로 유의한 것으로 조사되었다. 이는 주택이 오래될수록 균열이나 틈으로 토양 내 라돈가스가 유입되어 높은 라돈의 농도를 보인 것으로 판단된다. 주택에 균열이나 틈이 있는 경우, 그렇지 않은 경우에 비하여 높은 농도를 보였고, 외부로 공기가 통하는 창문으로부터 가까운 곳에 설치한 검출기가 밀폐된 장소에 설치된 검출기보다 낮게 조사되어 설치위치에 따른 농도 영향을 볼 수 있었다. 이로 인하여 환기등을 통하여 외부 공기가 주택 내로 들어오게 하면 실내 라돈의 농도가 낮아질 것으로 판단된다. 계절별로 실내 라돈농도 결과 겨울($172.2 \pm$

196.1 Bq/m³>가을(116.8±145.1 Bq/m³)>봄(94.2±112.7 Bq/m³)>여름(42.3±50.0 Bq/m³) 순으로 조사되어 환기가 부족한 겨울철에 농도가 높은 것으로 조사되었다. 본 연구의 결과는 전국이 아닌 충청북도 일부의 결과이며, 우리나라는 아파트, 빌라 등 많은 주택의 구조를 갖고 있으나 단독주택에 대한 결과만을 나타내었다. 또한, 지역에 따라 암석의 종류가 다르므로 전체 지역을 대표하지는 못한다는 제한점이 존재한다.

그러나 건축년도, 균열여부, 검출기 설치장소, 계절별 특성과 같이 라돈농도에 영향을 주는 요인들에 따라 실내 라돈농도를 분석한 점에서 있어서 라돈을 저감하는 관리방안을 마련하는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-RP2018-201).

References

- Kim KC, Lee YG. Measurement on the indoor air quality in the public facility of underground market. *Journal of Odor and Indoor Environment*. 2018; 17(2): 168-173.
- Kang YS. VOCs Emission characteristics of Various Wood Coatings and their Effects on Indoor Air Quality. The University of Seoul. 2009.
- Lee CM, Jung SW, Kim YB, Lee DJ, Cho YS, Jin YH. Investigation of radon emanation of domestic building materials. *Journal of Odor and Indoor Environment*. 2015; 14(1): 50-56.
- Wilkening, M. Radon in the Environment. Elsevier. 1990.
- World Health Organization (WHO), Air quality guidelines for Europe second edition. 2000.
- Environmental Protection Agency (EPA), EPA assessment of risks from radon in homes, EPA 402-R-03-003. 2003.
- Cha DW, Kim SH, Cho SY. Radon reduction efficiency of the air cleaner equipped with a Korea carbon filter. *Journal of Odor and Indoor Environment*. 2017; 16(4): 364-368.
- Kwon MH, Seo SY, Yoo JH, Lee KS, Oh SJ, Kim SM, Shim IK, Kim SY, Lee WS, Kwon OS, et al. Nationwide survey (2013-2014) of indoor radon at home in Korea: National Institute of Environmental research.
- Quarto, M., Pugliese, M., Loffredo, F., & Roca1, V. Indoor radon concentration measurement in some dwellings of the Penisola Sorrentina, South Italy. *Radiation Protection Dosimetry*. 2013; 156(2): 207-212.
- Zoo DH, Park KH, Jeong HW, Lim HJ, Bok DS, Yun D W, Min KW, Mun KD, Kim JW, Lee JM, Choi WY, Kim SY, et al. A study on indoor radon concentration among vulnerable households in Korea. *Journal of Environmental Health Science*. 2015; 41(2): 61-70.
- Lee K, Seo SY, Kim YJ, Choi KH, Son BS. A study on the indoor radon concentration of elementary school in Korea. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*. 2012; 9(2): 127-133.
- Zoo HD, Park KH, Jeong HW, Lim HJ, Bok DS, Yun DW, Min KH, Mun KD, Kim JU, Lee JM, Yong CW, Yoon KS, et al. A study on indoor radon concentration among vulnerable households in Korea, *J Environ Health Sci*. 2015; 41(2): 61-70.
- Jung JS, Lee JW, Shim IK, Yoo JH, Lee KS, Kim SM, Seo SY, Kwon MH, et al. A Study of Construction Type and Seasonal Radon Concentration at Dwellings in Gangwon-do Province. *The Korean Society of Living Environmental System*. 2017; 24(6): 715-721.
- Kim MJ, An SS, Cho MC, Park SI, Kim JM, Bae SJ, Cho YG, Seo GY, et al. Distribution characteristics on indoor radon concentration of multiple-use facilities in Gwangju area. *Journal of Odor and Indoor Environment*. 2019; 18(2): 177-184.
- Zhuo W, Furukawa M, Guo Q, Kim YS. Soil radon flux and outdoor radon concentration in East Asia. *International Congress Series*. 2005; 1276: 285-286.
- Harley NH, Terilli TB. Predicting annual average indoor ²²²Rn concentration. *Health physics*. 1990; 59(2): 205.
- Lee CM, Kim YS, Roh YM, Kim KY, Jeon HJ, Kim JC, Radon concentration in various indoor environment and effective does by inhabitants in Korea, *J Environ Health Sci*. 2007; 33(4): 264-275.
- Yoo JH, Seo SY, Jung JS, Lee KS, Lee JW, Kwon M.H. Comparison of indoor radon concentrations by seasonal in some areas of Gangwondo. *Journal of Odor and Indoor Environment*. 2016; 15(3): 204-212.
- Singh S, Mehra R, Singh K. Seasonal variation of indoor radon in dwellings of Malwa region. Punjab. *Atmospheric Environment*. 2005; 39: 7761-

7767.

20. Mehra R, Badhan K, Kansal S, Sonkawade RG. Assessment of seasonal indoor radon concentration in dwellings of Western Haryana. *Radiation Measurements*. 2011; 46: 1803-1806.

<저자정보>

지현아(전문위원), 유주희(전문위원),
김가현(전문위원), 원수란(전문위원),
김선홍(연구사), 이정섭(연구관)