

전라북도 일부지역의 라돈 농도 비교 연구

유주희 · 이규선 · 서수연 · 김선홍 · 이정섭[†]
국립환경과학원 환경기반연구부 생활환경연구과

Comparison of Indoor Radon Concentrations in Areas of Jeollabuk-do Province

Juhee Yoo, Kyusun Lee, Sooyun Seo, Seonhong Kim, and Jeongsub Lee[†]

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

ABSTRACT

Objective: This study was designed to compare construction types and seasonal radon concentrations in dwellings in Jeollabuk-do Province in Korea.

Methods: The measurement of indoor radon concentrations in 79 dwellings using alpha-track detectors was performed every three months (seasonally) over one year between 2015 and 2016. Also, Radon concentrations in soil were measured in spring to investigate the correlations between the concentrations in soil and indoor air.

Results: The annual average concentration of indoor radon for dwellings was 89.7 ± 72.1 (GM: 72.4) Bq/m³, with a range (min-max) of 17.2 to 505.4 Bq/m³. The highest indoor radon concentration was measured in winter and the lowest was shown in summer. The geometric mean of radon concentration in winter was 1.03-2.58 times higher than other seasons. Radon concentrations in soil were investigated at the depth of 1 m, and the concentrations ranged from 1,780 Bq/m³ to 123,264 Bq/m³. This showed low correlations with indoor radon concentrations.

Conclusions: Considering the comparison of seasonal radon concentrations and annual radon concentrations in this study, it is suggested that a future plan ought to be established for the management of indoor radon concentrations in dwellings. The data obtained from this study can be provided as a basis for preparing for legal regulations and public health protection manuals.

Key words: Radon, indoor radon concentration, alpha-track detector, seasonal radon variation, lung cancer

I. 서 론

라돈(²²²Rn)은 우라늄(²³⁸U)계열의 붕괴 생성물질인 라듐(²²⁶Ra)이 알파 붕괴로 생성되는 무색 무취의 불활성 기체이다. 지각내에서 생성된 라돈은 기체 상태로 지표 공기로 방출될 수 있기 때문에 주로 건물의 틈새 등을 통하여 실내로 유입되게 된다.¹⁾ EPA는 라돈을 담배, 흡연에 이어 두 번째 폐암 발생의

원인이라고 보고 하고 있다.²⁾ 라돈 자손은 ²¹⁸Po로부터 ²⁰⁶Pb에 이르는 연쇄 붕괴과정 중에 생성되는 방사성핵종을 말하며 라돈자손(²¹⁸Po, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Po)은 공기중에 떠돌거나 물질의 표면에 흡착되게 된다. 공기 중에 떠다니는 라돈자손이 사람의 호흡기를 통하여 폐에 흡착되게 되면, 폐에 흡착된 자손이 붕괴과정 중에 방출하는 고에너지의 알파선이 폐 기저세포에 영향을 미치게 된다.³⁾ 따라서 라돈에 장기

[†]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: 8 November 2019, Revised: 28 November 2019, Accepted: 3 December 2019

간 노출이 축적될 경우는 폐암을 유발할 수 있다고 WHO는 보고 하고 있다.⁴⁾ 토양 중에 우라늄(²³⁸U) 함량이 높으면 라듐(²²⁶Ra) 농도가 높고, 이러한 토양이 건축자재로 사용되면 실내 라돈 농도가 높아지는 원인이 될수도 있다. 실내 라돈의 주요 발생원은 주택시공의 기초를 이루는 토양에 함유되어 있던 라듐(²²⁶Ra)의 붕괴과정에 의한 라돈의 생성이다. 토양에서 발생된 라돈 가스는 주택을 건축 할 때 기초의 균열 또는 갈라진 틈으로 압력 차이에 따라 주택 내부로 이동되거나, 지상으로 방출된다. 1980년대에 들어서는 세계적으로 실내 라돈 농도에 대한 연구가 활발히 이루어 졌다. 1999년 유엔방사선영향위원회(UNSCEAR) 자료에 의하면 전 세계 약 50개 이상의 국가에서 전국 규모의 실내 라돈 조사를 수행하였다고 보고하였다.⁵⁾ 노르웨이, 핀란드, 스웨덴 등 북유럽 국가에서도 활발히 라돈연구를 해오고 있으며, 미국은 체계적인 전국 실내라돈 조사계획을 수립하고 정부(EPA)에서 라돈 저감화 방법 등 가이드를 제시하고 다양한 출판물을 제작하여 국민들에게 홍보하고 있다.^{6,8)} 국내에서도 라돈에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 아직까지 다양한 실내환경에서의 라돈의 연구는 많이 부족한 실정이다.⁹⁾ 환경부 국립환경과학원은 2008년부터 2011년까지 전국의 공공이용시설(관공서, 초등학교), 다중이용시설, 주택의 계절별 실내 라돈 조사를 실시해 연평균 농도를 조사 하였다. 그 결과 실내 라돈 농도는 겨울철에 가장 높은 것으로 보고하였다.¹⁰⁻¹²⁾ 실내 라돈 농도는 계절별로 차이가 크다. 계절별 라돈 발생 특이성을 파악하는 것은 단일 계절 조사보다 관리방안 마련의 기초자료가 되나 소요비용등 여러가지 제한점 때문에 계절별 조사가 어려운 실정이다. 본 연구는 환경부 국립환경과학원 조사결과 실내 라돈농도가 높게 조사된 A지역을 대상으로 선행연구결과들의 검토 및 기초자료 제공의 목적으로 계절별 실내라돈 조사 및 겨울철 라돈 농도와 연평균 라돈 농도와의 비교, 실외 라돈 농도 및 토양 중 라돈 가스 농도와 실내 라돈농도와의 비교를 수행하였다. 본 연구는 겨울철 실내 라돈 농도 결과와 연평균 실내 라돈 농도에 대한 연구의 기초 자료로 활용하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 연구대상

본 연구는 전라북도 A지역의 단독주택을 조사대상으로 하였으며, 2015년 9월에서 2016년 8월까지 1년 동안 계절별(봄철, 여름철, 가을철, 겨울철) 실내 라돈 농도를 조사하였다. A지역은 1개읍과 6개의 면, 73개 행정리로 구성되어있다. 행정리별 대표주택 1지점을 기본으로 하고, 가구수가 많은 지역은 2~3지점을 선정하여 총 97지점을 대표주택으로 정하였다. 그 중 47지점은 계절별 실내 라돈농도, 토양 중 라돈가스 농도, 토양 중 자연방사성물질인 라듐(²²⁶Ra), 토륨(²³²Th), 포타슘(⁴⁰K), 우라늄(²³⁸U)의 함량 결과를 조사하였다. 실내 라돈 농도 조사는 각 계절별 90일 정도 실시하였으며, 각 조사지점의 계절별 실내 라돈 농도의 조사결과를 이용하여 연평균 농도를 산출하였다. 해당 지역별 3지점씩 총 20지점을 선정하여 실외 라돈 농도도 측정하였다.

2. 조사 및 분석방법

2.1. 실내 라돈 농도

실내공기질 공정시험기준(환경부고시 제 2010-64호)의 실내 공기 중 라돈 측정 방법의 주 시험방법인 알파비적검출법(ES 02301.1a)으로 하였으며, 수동형 검출기 라듀엣(Radosys, Hungary)를 이용하여 90일 이상 장기간 측정방법으로 조사하였다.¹³⁾ 라듀엣(Raduet)은 검출소자는 CR-39이며, 라돈과 토론을 동시에 측정할 수 있고 토론의 농도를 측정하여 라돈 농도를 보정한다. 총 조사대상의 5% 지점에 검출기를 중복 설치하였으며, 미개봉 검출기도 함께 설치하였다. 90일 이상의 검출기 설치기간이 지난 후 알루미늄 재질 이중지퍼백과 정전기 방지용 재질 이중 지퍼백에 완전히 밀봉하여 라돈검출기를 회수한다. 회수된 라듀엣 내부의 검출소자(CR-39)는 에칭을 실시하였다. 검출기 제조사가 제시한 에칭과정을 준수하여 90°C의 6.25 M NaOH 용액에서 3시간 40분 동안 화학적 에칭을 실시하고 1% 초산 용액에서 20분간 중화한 후 증류수로 2번 세척 한 후 하루 이상 상온 건조시켜 전처리를 마친 후 자동화장비로

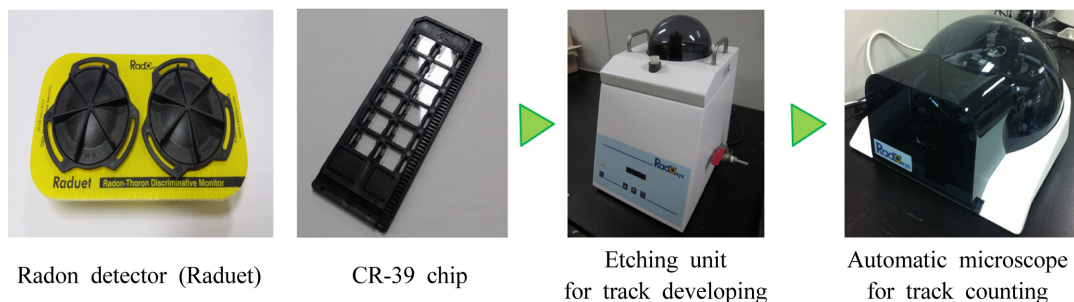


Fig. 1. Analysis process in this study

비적을 계수하여 비적의 밀도를 계산식에 적용하여 라돈농도를 산출하였다(Fig. 1).

$$\begin{aligned} \text{RAC} &= \text{Exp}_{\text{Rn}} \times 1000 / 24 / T \\ \text{Exp}_{\text{Rn}} &= \text{CF} \times (1.00 \times \text{RnD} - 0.02 \times \text{TnD}) \end{aligned} \quad (1)$$

RAC: Radon Activity Concentration, Bq/m³

Exp_{Rn}: Exposure value for the Rn-Channel, kBq·h/m³

T: Time of exposure in Days

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

2.2. 실외 라돈 농도

주택 실외 라돈농도 측정은 20지점 측정하였으며, 제작한 봉에 검출기를 넣어 계절별로 3개월씩 측정하였다. 실내 라돈조사 검출기가 설치·회수 되는 시기와 동일하게 실외 라돈조사 검출기도 설치·회수하였다.

2.3. 토양 중 라돈 가스 농도

토양 중 라돈가스 농도는 실내 공기 중 라돈 연속 측정방법(ES 02901.1c)³⁾의 실리콘검출방식인 RAD 7(Durrige, USA)을 사용하여 측정하였으며, 해당주택 주변 5 m 이내의 주변 토양 50~70 cm 깊이 2지점에서 측정하였다. 토양 중 라돈 가스 농도는 2016년 5월에 실시함에 따라 3월~5월 동안 측정된 봄철 실내 라돈 농도와 상관성을 비교하였다.

2.4. 토양 중 자연방사성물질 함량

토양 중 자연방사성 물질 함량은 토양 중의 라듐(²²⁶Ra), 토륨(²³²Th), 포타슘(⁴⁰K) 등 자연방사성 핵종 함량을 조사하였으며, 토양의 자연방사성 핵종 분석은 기초과학지원연구원에 의뢰하여 분석하였으며 고순도 게르마늄 감마선 측정기(High-Purity Germanium gamma-ray detector, HPGe)를 이용하여 분석하였다(Canberra Inc., USA). 우라늄(²³⁸U)은 ICP-MS(Perkin-Elmer)를 이용하여 분석하였다.

3. 통계적 분석 방법

실내 라돈농도는 SPSS (12.0)로 분석하였고, 특성 파악을 위하여 산술평균(Mean), 표준편차(Standard Deviation), 기하평균(Geometric Mean), 최소값(Minimum), 최대값(Maximum)으로 나타내었다. 계절별 비교와 지역별 비교는 t-test와 분산분석을 이용하여 유의수준 0.05를 기준으로 평균농도 차이를 검증하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 계절별 실내 라돈 농도

A지역 97지점의 계절별 실내 라돈 농도의 측정 결과를 Table 1에 나타내었다. 연평균 실내 라돈 농도 평균값은 89.7 Bq/m³로 조사되었으며, 계절별 실내 라돈 농도는 각각 봄철 64.6 Bq/m³, 여름철 33.6 Bq/m³, 가을철 118.5 Bq/m³, 겨울철 142.1 Bq/m³로 나타났으며, 다른 계절에 비하여 겨울철 실내 라돈 농도가 약 1.20-4.21배 높은 농도를 나타냈다(p<0.05).

본 연구에서는 겨울철 실내 라돈농도를 기준으로

Table 1. Comparison of indoor radon level in selected homes by season (Unit: Bq/m³)

	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual
N ¹⁾	97	97	97	97	97
AM. ²⁾	64.6	33.6	118.5	142.1	89.7
SD	47.5	19.7	93.5	151.2	72.1
GM ³⁾	52.2	29.7	98.0	102.1	72.4
Median	54.0	28.5	96.1	105.3	74.1
Minimum	9.0	9.0	24.2	21.2	17.2
Maximum	345.2	154.5	710.4	1169.0	505.4

¹⁾N: detected site number, ²⁾AM: Arithmetic mean, ³⁾GM: Geometric mean

Table 2. Compare of Indoor radon concentration at home by season in district A (unit: Bq/m³)

ID	N	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual
A	97	64.6	33.6	118.5	142.1	89.7
A1	12	57.3	40.8	115.8	121.6	83.9
A2	18	64.3	32.5	111.8	127.0	83.9
A3	17	62.4	28.2	90.8	108.1	72.4
A4	13	50.4	28.9	85.1	86.7	62.8
A5	13	71.1	36.2	163.5	243.2	128.5
A6	14	90.9	39.9	158.6	195.6	121.3
A7	10	50.7	29.6	110.1	116.9	76.8

다른 계절의 실내라돈 농도 산술평균을 기준으로 하여 비교해보면, 연평균 실내라돈 농도 분포 비율 (ratio)은 0.72로 나타났으며, 가을철(0.83)>봄철(0.45)>여름철(0.24) 순으로 나타났다. 이전 연구의 강원도 지역에서의 계절별 농도를 비교한 결과는 연평균 0.70, 가을철(0.87)>봄철(0.58)>여름철(0.31)으로 나타났다.¹⁴⁾ 계절별 실내 라돈 농도의 계절별 변화를 보면 창문을 여는 횟수가 상대적으로 낮아서 환기조건이 나쁜 겨울철에 가장 높은 농도를 보였으며,³⁾ 계절별 요인은 계절별 온도 차이와 토양 중 라돈농도의 계절에 따른 라돈가스의 발생량도 다르고 난방 가동 방법과 환기습관과 같은 일상 생활패턴에 따른 환경의 차이에 영향을 받는 것으로 사료된다.

2. 지역별 계절별 실내 라돈 농도 비교

계절적 차이와 지역에 따른 각 지역의 실내 라돈 농도를 분석한 결과는 Fig. 2~3과 Table 2에 나타내었다. 겨울철 농도가 가장 낮은 A4지역은 겨울철 실내 라돈 평균값은 86.7±54.7 Bq/m³ (GM: 68.7 Bq/m³)로 여름철 실내 라돈 평균값 28.9±16.5 Bq/m³

(GM: 25.6 Bq/m³)보다 약 3.0배 높은 것으로 나타났으며, 겨울철 농도가 높은 A5지역은 겨울철 실내 라돈 평균값은 243.2±311.0 Bq/m³ (GM: 140.6 Bq/m³)로 여름철 실내 라돈 평균값 36.2±17.3 Bq/m³ (GM: 33.1 Bq/m³)보다 약 6.7배 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 A5지역과 A6지역은 겨울철 실내 라돈 농도가 가을철 실내라돈 농도보다 높은 것으로 나타났으나, 다른 지역 가을철 실내 라돈 농도와 비슷한 분포를 보였다(p<0.05).

각 계절별 실내라돈 농도의 기하평균을 겨울철을 기준으로 비교한 비율을 Table 3에 나타내었다. 지역별 봄철/겨울철 실내라돈 농도값의 비율은 A3지역이 0.63로 가장 높았으며, 여름철/겨울철은 A4지역이 0.37, 가을철/겨울철은 A4지역이 1.07으로 나타났다. 본 연구에서는 A4지역의 가을철을 제외하고, 모든 측정기간에서 겨울철보다 낮은 농도값을 보인 것으로 나타났다.

3. 지역별 연평균 실내 라돈농도 비교

계절별로 조사한 97지점의 7개(A1~A7)의 각 지역

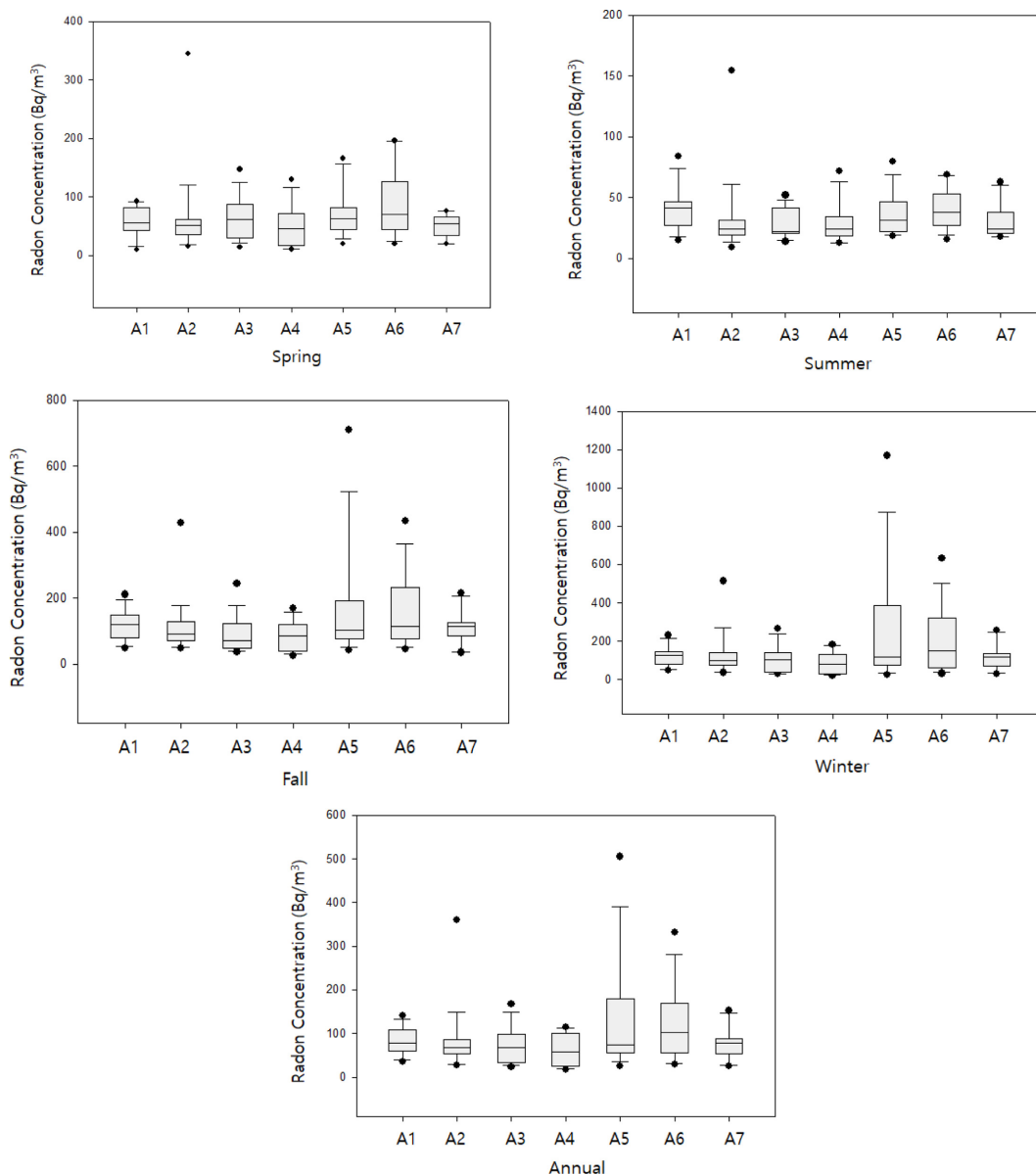


Fig. 2. The distribution of radon concentration in each district by season

별 연평균을 비교한 결과, 본 연구에서는 동일 행정 구역내에서도 농도 차이가 발생하였다(Table 4). A4 지역의 실내 라돈 평균값은 $62.8 \pm 35.0 \text{ Bq/m}^3$ (GM: 52.5 Bq/m^3)로 A지역 전체 97지점의 연간 평균값 89.7 Bq/m^3 (GM: 72.4 Bq/m^3)과 비교하여 약 30% 낮은 수준으로 나타났고, A5지역의 연평균 라돈 농도는 $128.5 \pm 127.5 \text{ Bq/m}^3$ (GM: 94.0 Bq/m^3)로 다른

지역보다 약 1.5-2.1배 높은 수준을 나타내었다. 그러나 각 지역의 연평균값을 기준으로 분석한 결과, 통계적으로 유의한 차이는 없었다($p=0.131$). 우리나라는 일년 동안 사계절의 변화가 뚜렷한 국가이다. 실내환경 역시 계절에 따라 변동하며 이는 측정에 따라 라돈 농도의 변화가 큼을 의미한다.¹⁵⁾

계절별 조사 중 실내 라돈 농도가 가장 낮은 A4

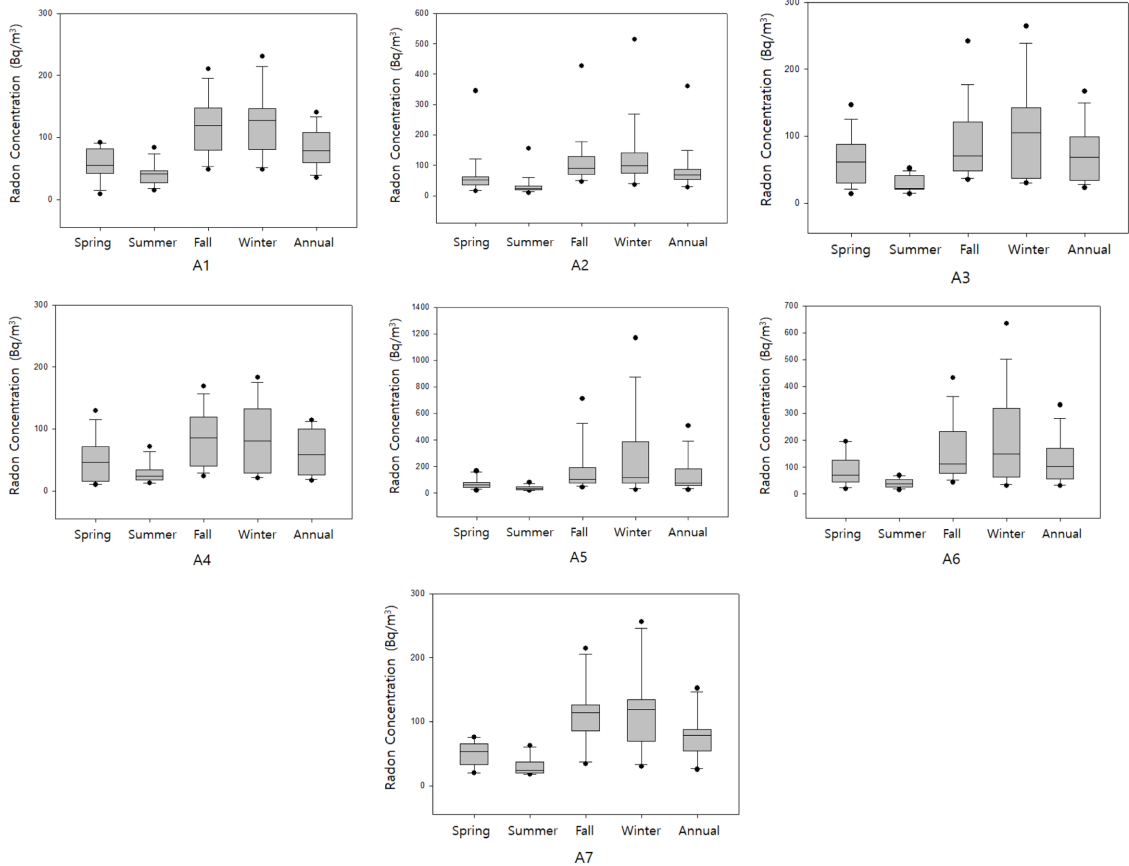


Fig. 3. Comparison of radon concentration by season in each district

Table 3. Comparison of seasonal radon Geometric mean ratio in each district (unit: ratio)

District	N	Spring/ Winter	Summer/ Winter	Fall/ Winter	Winter/ Winter	Annual/ Winter
A	97	0.51	0.29	0.96	1.00	0.71
A1	12	0.45	0.34	0.97	1.00	0.71
A2	18	0.48	0.26	0.95	1.00	0.69
A3	17	0.63	0.32	0.95	1.00	0.74
A4	13	0.56	0.37	1.07	1.00	0.76
A5	13	0.44	0.24	0.86	1.00	0.67
A6	14	0.55	0.27	0.96	1.00	0.71
A7	10	0.45	0.27	0.98	1.00	0.68

지역과 가장 높은 A5지역의 개별 농도를 Table 5, 6에 나타내었다. 겨울철 실내 라돈 농도를 기준으로 비교하였다. A4지역의 Annual/Winter비율은 0.58~1.00으로 나타났으며, A5지역은 Annual/Winter비율이 0.43~1.13으로 나타났다.

4. 계절별 실외 라돈 농도 비교

지역별로 실외 지점을 3지점 정도씩 선정하여 실외 라돈 농도를 측정하여 보았다. Table 7에서 보듯이 계절별로 실외 라돈 농도도 다소 차이를 보였으며, 20지점에서 봄철 평균은 12.2 Bq/m³, 여름철 평

Table 4. Indoor radon concentration at home by Annual in district A

Site	N	AM±SD	Range	Median	GM	p-value
A	97	89.7±72.1	17.2-505.4	74.1	72.4	p=0.131
A1	12	83.9±30.6	34.9-140.8	78.5	78.4	
A2	18	83.9±18.0	27.5-360.2	68.2	69.3	
A3	17	72.4±43.1	23.1-167.2	68.4	61.0	
A4	13	62.8±35.0	17.2-114.4	58.0	52.5	
A5	13	128.5±127.5	25.7-505.4	74.6	94.0	
A6	14	121.3±86.3	30.0-331.4	102.4	95.9	
A7	10	76.8±34.1	25.4-152.3	78.5	69.7	

Table 5. Compare of Indoor radon concentration at home by winter in district A4

ID	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual	Annual/Winter Ratio
Total	50.4	28.9	85.1	86.7	62.8	0.77
1	10.9	12.4	24.2	21.2	17.2	0.81
2	10.3	12.7	37.1	23.6	20.9	0.89
3	15.9	17.7	42.5	25.2	25.3	1.00
4	16.0	18.5	37.2	32.4	26.0	0.80
5	43.9	25.2	64.5	64.2	49.5	0.77
6	45.9	24.2	81.2	69.5	55.2	0.79
7	43.1	22.4	85.9	80.6	58.0	0.72
8	62.6	30.8	102.4	98.4	73.5	0.75
9	51.5	22.4	89.2	99.0	65.5	0.66
10	129.5	71.6	97.6	122.2	105.2	0.86
11	94.7	50.4	168.6	143.8	114.4	0.80
12	49.7	30.3	138.8	164.1	95.7	0.58
13	81.3	37.5	136.7	183.2	109.7	0.60

균은 13.6 Bq/m³, 가을철 평균은 31.5 Bq/m³으로 겨울철 평균 15.8 Bq/m³ 보다 높게 나타났다. 연평균 외기 농도는 18.3 Bq/m³으로 나타났다. 봄철, 여름철, 가을철, 겨울철의 실내/실외(I/O ratio) 라돈농도 수준을 나타내보았다. 여름철이 2.7로 가장 낮은 I/O의 비를 보였으며, 겨울철은 10.2로 다른 계절보다 다소 높은 차이를 보였다. 본 연구에서는 실내 라돈농도 측정 지점수에 비해 실외 측정 지점 수가 적은 한계점이 있다.

5. 토양중 라돈가스 농도 및 자연방사성물질 함량비교

A지역 47가구의 주변 토양 중 라돈 가스 농도를 측정 한 결과를 Table 8에 나타내었다. A4지역은

50,572 Bq/m³ (19,136~ 123,264 Bq/m³)로 가장 높은 농도 분포를 보였고, A3지역이 11,830 Bq/m³ (2,786~ 23,600 Bq/m³)로 가장 낮은 농도분포를 보였다. A3 지역은 가장 낮은 농도와 높은 농도는 8.5배 정도의 차이를 보였다. 토양가스 중 라돈농도의 일변화, 계절적 변화 양상을 연구한 미국의 사례를 보면 연간 최고 토양가스 라돈농도와 최저 토양가스 라돈농도와의 비는 10배 이상이라고 보고된바가 있다고하였다.¹⁶⁾ 그리고 국제방사선방호위원회(ICRP)는 라돈을 방출하는 지면위에 위치한 공간은 공기 중 라돈 농도가 높은 경향이 있다고 한다.¹⁷⁾ 토양 중 라돈가스의 농도 조사를 2016년 5월에 조사함에 따라, 2016년 3~5월(봄철)에 조사한 실내라돈 농도 결과와 상

Table 6. Compare of Indoor radon concentration at home by winter in district A5

ID	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual	Annual/Winter
	Unit: Bq/m ³					Ratio
Total	71.1	36.2	163.5	243.2	128.5	0.70
1	19.2	18.1	41.0	24.4	25.7	1.05
2	41.2	36.3	80.9	45.0	50.8	1.13
3	67.9	21.2	67.2	55.5	52.9	0.95
4	44.1	21.8	70.0	93.0	57.2	0.62
5	52.4	25.0	96.1	106.8	70.1	0.66
6	85.8	52.7	129.4	114.5	95.6	0.83
7	55.1	31.7	95.9	115.7	74.6	0.64
8	75.9	51.0	106.0	115.7	87.2	0.75
9	44.8	22.7	103.2	120.5	72.8	0.60
10	143.7	28.1	146.3	375.4	173.4	0.46
11	66.7	42.1	244.7	397.1	187.6	0.47
12	165.4	40.8	234.4	429.1	217.4	0.51
13	62.6	79.6	710.4	1169.0	505.4	0.43

Table 7. Comparison of Indoor/outdoor ratio by seasonal in district A

	Indoor (n=97)	Outdoor (n=20)	I/O ratio
Spring	71.2	12.2	5.8
Summer	36.7	13.6	2.7
Fall	133.6	31.5	4.2
Winter	161.1	15.8	10.2
Annual	100.7	18.3	5.5

라돈 농도는 주변 토양의 영향 외에도 주택구조와 건물유형등 다른 영향을 받게되므로 토양 중 농도와 실내 농도만의 비교는 상호 제한점이 있다고 보여진다. 함량분석 결과도 주변 토양의 라듐(²²⁶Ra) 함량은 A4지역 54.6 Bq/kg, A6지역이 52.3 Bq/kg으로 다른 지역과 비교해 상대적으로 높게 나타났다. 실내 라돈 농도와 의 유의한 상관성은 보이지 않았다.

IV. 결 론

관성 분석을 해보았다. 토양 중 라돈가스 농도와 비교해 본 결과 상관성은 낮은 것으로 보였다. 실내

본 연구는 2015년 9월부터 2016년 8월 까지 1년간 전라북도에 위치한 일부 지역 97지점의 계절별(봄철,

Table 8. Radioactivity concentrations in soil of selected homes

District	N	Radon gas conc. in soil (Bq/m ³)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Uranium (mg/kg)
A	47	27,003	40.8	64.9	699.7	1.9
A1	5	39,201	47.0	82.5	817.2	2.7
A2	8	15,993	38.2	59.1	731.5	2.0
A3	12	11,830	24.8	50.3	607.5	0.8
A4	6	50,572	54.6	71.7	770.3	1.9
A5	5	47,010	48.1	62.8	646.4	2.7
A6	5	25,961	52.3	79.7	751.6	3.4
A7	6	22,489	41.9	69.8	674.5	1.4

여름철, 가을철, 겨울철) 실내라돈 농도 조사를 실시 하였으며, 계절별 측정 결과와 토양 중 라돈가스 농도, 토양 중 자연방사성물질 함량을 비교하고자 하였다.

계절별 농도를 비교해 본 결과, 겨울철이 다른 계절에 비해 약 1.20-4.21배 높은 수준을 보였다($p < 0.05$). 또한 겨울철 농도를 기준으로 할 때, 연평균 실내 라돈 농도 분포 비율(ratio)은 0.72로 나타났으며, 가을철(0.83) > 봄철(0.45) > 여름철(0.24) 순으로 나타났다. 계절별로 조사한 97지점의 각 지역별 실내 라돈 농도값을 비교한 결과 본 연구에서는 동일 지역에서도 세부지역에 따라 농도 차이가 발생하였다. A5지역의 연평균 라돈 농도는 타 지역보다 약 1.5-2.1배 높은 농도 수준을 나타내었다($p = 0.131$). 차이가 발생하는 사유는 행정구역상 같은 지역이라도 지질학적 토양 모암의 종류의 차이와, 주택유형, 생활 습관 등 내/외부의 요인에 의해 영향을 받는 것으로 사료된다. 계절별 결과를 토대로 연평균 라돈 농도를 예측할수 있는 환경은 매우 어려운 실정이다. 계절별 실내/실외(I/O ratio) 라돈농도 수준을 비교한 결과, 전체적으로 겨울철 실내/실외(I/O)의 비가 10.2, 여름철의 실내/실외(I/O)의 비는 2.7로 나타났다. 토양 중 라돈 가스의 농도는 최저 1,780~123,264 Bq/m³의 분포를 보였다. 2015년 동일지역을 측정하는 연구는 최저 485 Bq/m³, 최대 59,070 Bq/m³, 평균 10,131 Bq/m³로 조사되었으며 측정시기 마다 큰 변동을 보이고 있어 주택의 실내 라돈 농도를 설명하기에는 무리가 있다고 하였다⁸⁾ 본 연구에서도 실내 라돈 농도와 상관성은 낮은 것으로 나타났다. 그러나 계절별 실내 라돈 농도를 조사함에 1차적인 주요한 목적이 있으므로, 향후 라돈 조사를 수행하는 방안에 활용할 수 있으며, 관리방안을 적용 시 중요한 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다. 전국주택 라돈조사(2015-2016)(NIER-RP2016-391).

References

1. Korea Institute of Nuclear Safety (KINS), Assessment of Radiation Risk for the Korean Population,

- KINS/GR-300. 2005.
2. Environmental Protection Agency (EPA), A Citizen's Guide to Radon, 2009.
3. KINS, Development of Regulatory Technology on Radiation Safety KINS/GR-300-1, 2005.
4. World Health Organization (WHO), WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2000.
5. NUSCEAR, Exposures from Natural Radiation Sources, in United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Preliminary document, Forty-eighth session of UNSCEAR, 12 to 16 April 1999, Vienna. 1999.
6. Environmental Protection Agency (EPA), Consumer's Guide to Radon Reduction: How to fix Your home, 2016.
7. Environmental Protection Agency (EPA), Home Buyer's Guide to Radon, 2018.
8. Environmental Protection Agency (EPA), Model Standards and Techniques for Control of Radon in New Residential Building, 1994.
9. Lee SK, Lee YM, Park JH, et al. Radon Concentration Assessment of Studio Apartments surrounding a University, *Journal of Environmental Science International*, 2013; 39(2); 138-143.
10. National Institute of Environmental Research (NIER), Nationwide Survey of Indoor Radon In Korea-Local government offices and elementary schools. 2009.
11. National Institute of Environmental Research (NIER), Nationwide survey of indoor radon in Korea-Public facilities. 2010.
12. National Institute of Environmental Research (NIER), Nationwide survey of indoor radon in Korea, 2011.
13. Ministry of Environment (ME), Indoor radon reduction guidelines. 2010.
14. National Institute of Environmental Research (NIER), Nationwide survey (2013-2014) of indoor radon at home in Korea, 2014.
15. Lee CH, Kang DY, Koh SB, et al. Development of Predictive Model for Annual Mean Radon Concentration for Assessment of Annual Effective dose of Radon Exposure, *Journal of Environmental Science International*, 2016; 25(8); 1107-1114.
16. Washington, JW., Radon generation and transport in soil, Ph.D. thesis, Pennsylvania State University, 1991.
17. International Commission on radiological protection (ICRP), Scope of Radiological Protection Control Measures, ICRP Publication 104, Ann. ICRP 37(5), 2007.
18. Jeollabukdo Institute of Health & Environmental

Research, A study on the Radon contents in the soil gas, 2015.

<저자정보>

유주희(전문위원), 이규선(전문위원), 서수연(연구사),
김선홍(연구사), 이정섭(연구관)