한국환경보건학회지, 제41권 제2호(2015)
J Environ Health Sci. 2015; 41(2): 61-70
pISSN: 1738-4087 eISSN: 2233-8616
http://dx.doi.org/10.5668/JEHS.2015.41.2.61

원 저 Original articles

국내 라돈 취약가구에 대한 주거공간의 실내 라돈 농도에 관한 연구

주덕현† · 박기호 · 정희원 · 임형준 · 복동석 · 윤동원 ·
민경환 · 문경덕 · 김정운 · 이지민 · 최원용 · 김성윤
한국환경공단 안전정책지원팀

A Study on Indoor Radon Concentration among Vulnerable Households in Korea

Duck Hyun Zoo†, Ki Ho Park, Hui Won Jeong, Hyeong Jun Lim, Dong Seok Bok, Dong Won Yun, Kyung Hwan Min, Kyung Deok Mun, Jeong Un Kim, Ji Min Lee, Choi Won Yong, and Kim Sung Yoon
Environmental Safety Team, Environmental Safety Center, Korea Environment Corporation

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this research was to examine radon exposure in terms of the relationship between the living environment and indoor radon concentrations among vulnerable households.

Methods: Nationwide, 1,129 subjects were selected using personal questionnaires for adequately understanding the living environment, installation of E-PERM radon gas detectors, and investigation of the structure of the housing.

Results: The mean concentration of indoor radon for all subjects was 130.2 Bq/m^3 (GM=101.7), and a total of 438 subjects (38.8%) exceeded the recommended standards (148 Bq/m^3) for public facilities by the Ministry of the Environment. By location, the highest concentrations (164.3 Bq/m^3, GM=124.1) were seen in North Chungcheong Province. In the case of the Seoul/Gyeonggi Province metropolitan area, they showed 125.6 Bq/m^3 (GM=105.1) and 118.9 Bq/m^3 (GM=96.5), respectively. By type of housing, indoor radon concentrations in single-family housing were higher than in row/multi-family housing ($p<0.01$). Although indoor radon concentrations raised in accordance with year of construction ($p<0.05$), the difference between indoor radon concentrations in underground residences was not observed to be statistically significant ($p=0.633$).

Conclusion: More studies are necessary in the future regarding the difference in indoor radon concentrations that may occur due to different of types of indoor construction, building materials, and the amount of building materials.

Keywords: E-PERM, Indoor radon, Radon, Radon exposure, Vulnerable households

I. 서 론

라돈(^{222}Rn)은 천연적으로 존재하고 있는 방사성 기체를 말한다. 토양이나 암반 내에 존재하는 우라늄(^{238}U)의 단계적 붕괴 과정에서 생성되는 무색, 무취의 비활성 기체로 토양, 모래, 건축자재 등에 미량(7.8 Bq/kg)으로 함유되어 있는 라듐(^{226}Ra)의 알파 붕괴시 생성되며,[1] 지구상 어디서나 존재하는 자연 방사능 물질이다. 화학적으로 극히 안정한 상태로 다른 물질과 화학적으로 반응하지 않으며 3.8일의 반

†**Corresponding author:** Environmental Safety Center, Korea Environmental Company, Hwangyeong-ro 42, Seo-gu, Incheon, Tel: +82-32-590-4749, Fax: +82-32-590-4729, E-mail: maina331@gmail.com
Received: 26 December 2014, Revised: 4 March 2015, Accepted: 6 March 2015

감기를 지닌 채 토양에서 공기 중으로 방출되므로 라돈 딸핵종에 의한 일반인의 자연방사선 피폭 기여도가 높다.[2)]

실내 라돈의 유입은 대부분(85~97%)이 확산이동 및 압력과 온도구배에 따른 대류 과정으로 건축물의 바닥이나 갈라진 벽의 균열부위를 통해 유입[3)]되므로 1층 이하의 거주공간에서 생활하는 사람들이 상대적으로 라돈 노출에 취약하다고 할 수 있다.[4)] 특히 현대사회로 접어들어 인간의 활동양상은 유해인자 노출과 밀접[5)]해지고 하루 24시간의 대부분(80~88%)을 실내에서 생활하는 패턴으로 변화하고 있다. 특히 영·유아·청소년 및 노약자와 같은 취약계층은 경제연령층보다 더 많은 시간을 실내에서 생활하게 된다.[6-9)]

라돈의 위해성은 실내에서 생활하는 시간에 비례하고, 실내의 다른 유해인자와 상가작용(additive)을 통해 개인의 건강에 심각한 영향을 미치게 되므로,[10)] 금연을 하고 수시로 환기를 하여 실내의 라돈 수준을 저감하는 것이 라돈으로 인한 위해성을 낮추는 중요한 조치사항이 된다. 영·유아·청소년의 경우 성인에 비해 방사선에 매우 취약하다고 보고[11)]되어 있으므로 실내 라돈에 대해 관심을 가지고 라돈 수준의 저감에 대해 적극적인 노력을 취해야 할 것이라고 본다.

본 연구에서는 상대적으로 라돈 노출에 취약하다고 판단되는 국내의 단독주택, 연립/다세대주택의 1층, 지하층, 반지하층(이하 라돈취약가구) 거주자들 대상으로 주거공간의 특성을 파악하고 지역별로 실내 라돈 농도의 수준을 조사하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상가구 선정

본 연구는 라돈 노출에 취약할 것으로 예상되는 단독주택과 연립/다세대주택의 지하, 반지하, 1층 거주자들을 대상으로 라돈정보센터와 한국환경공단의 홈페이지(www.radon-free.or.kr)를 통해 조사사업 시행 공고를 게시하여, 홈페이지나 유선·팩스 등을 통해서 접수된 대상가구들 중 주택의 형태, 건축년수, 거주층수를 종합하고 지역별 인구 분포비율을 참조하여 전국적으로 라돈취약가구 1,129가구를 선정하였다.

조사는 환기 횟수가 적은 겨울철부터 초봄까지(2014년 1~3월) 총 3개월간 실시하였고, 기간 내 대상가구에 대해 별도로 제작된 라돈 저감 가이드북을 배포하고, 주택 실내 라돈 저감 방안 제시 등 현장 컨설팅을 실시하였다.

2. 설문조사

본 연구의 라돈취약가구에 대한 설문조사를 위해 내부 평면도 및 측정 자료를 기록할 수 있는 조사표(측정자용)와 대상가구의 주택 정보 및 거주자의 주거환경을 조사하기 위한 조사표(거주자용)를 제작하였다. 이 중 거주자용 조사표는 신청인이나 세대주와의 직접 대면 방식으로 본인이 직접 작성하게 유도하였으나, 답변이 불가능한 고령층이나 지체장애인들의 경우는 문답형식으로 조사원이 대리 작성토록 하였다.

조사절차는 소정의 교육을 받은 개별 연구원들이 대상가구를 방문하여 연구목적과 취지를 설명하고 통계법 제33조에 의거 비밀보장에 대한 내용을 알린 후 인적정보의 제공 여부를 확인하고 측정기를 설치함과 동시에 주택의 유형, 건축년도, 거주층수, 지하공간 유·무, 흡연력 등 주거환경을 조사하는 절차로 수행되었다.

3. 측정기기

라돈취약가구의 실내 라돈 농도 조사를 위해 Passive sampler[12)] 중 충전막 전리함(EIC; Electret ion chamber) 방식의 측정기기인 E-PERM(Rad Elec Inc., US)을 사용하였다. E-PERM은 210 ml 용량의 뚜껑 달린 Small Chamber와 일정 전압이 충전된 Electret으로 구성되어 있다(Fig. 1).

Electret의 전압 감소량은 37 Bq/m^3 (1 pCi/L)의 ^{222}Rn 농도 하에서 1일 2.5 V의 전압이 감소되도록 설계되어, US EPA의 실내 라돈 권고기준인 148 Bq/m^3 (4 pCi/L)의 환경에서 1일 10 V의 전압이 감소되는 특성을 지니고 있다.[13)] 보통 측정 전의 전압량에서 측정 후의 전압량을 차감한 값을 실내 라돈 농도로

Fig. 1. E-PERM, Electret voltage detector and installation.

환산하게 된다. Electret의 표면은 습도가 높은 환경에서도 사용가능하도록 23 mm 두께의 Teflon-FEP (Fluorinated Ethylene Propylene copolymer) 필름으로 제작되어 있다.

실내공기 중 라돈 농도의 단위는 pCi/L나 Bq/m^{3}으로 표시하며, 1 Bq/m^{3}은 국제통일단위계(SI)로 초당 1개의 핵이 붕괴하는 것을 의미하므로 아래의 식을 통해 라돈 농도를 Bq/m^{3}으로 환산하여 나타낸다. 본 연구에서의 E-PERM을 이용한 검출하한(Lower Limit of Detection, LLD)은 7 Bq/m^{3}이다.

Radon Concentration(*pCi/L*)

$$\left\{\frac{(I-F)}{CF_a \times D} - BG\right\} \times CF_b \qquad (1)$$

Where :

- A, B, G = constants for electret configuration
- I = initial voltages of electret (V)
- F = final voltage of electret (V)
- D = exposure duration in days (days)
- CF_a = A+[B×{(I+F)/2}]
- BG = [environmental gamma background (μR/h)×constant G] (pCi/L)
- CF_b = elevation correction factor of 1.00 for the electret was used for these calculations

※ 1 pCi/L = 37 Bq/m^3

Table 1. Status of radon vulnerable households

(Unit : N(%))

Province	Korea Population and Housing Census (2010)*	Number of radon vulnerable households
Gangwon	557(3.2)	72(6.4)
Gyeonggi	3,831(22.1)	295(26.1)
Gyeongnam	1,151(6.6)	40(3.5)
Gyeongbuk	1,005(5.8)	79(7.0)
Gwangju	515(3.0)	11(1.0)
Daegu	868(5.0)	30(2.7)
Daejeon	532(3.1)	22(1.9)
Busan	1,243(7.2)	24(2.1)
Seoul	3,504(20.2)	284(25.2)
Ulsan	373(2.2)	12(1.1)
Incheon	918(5.3)	72(6.4)
Jeonnam	681(3.9)	49(4.3)
Jeonbuk	659(3.8)	41(3.6)
Jeju	187(1.1)	6(0.5)
Chungnam	749(4.3)	59(5.2)†
Chungbuk	558(3.2)	33(2.9)
Total	17,331(100)	1,129(100)
R‡	0.962	

*Statistics Korea; Population and Housing Census (2010): Census is conducted to five-year cycle, the latest data is the status of 2010. It is corresponds to the 18st Population Census and 10st Housing Census.

†Including five households residing in Sejong-si

‡Verified by the correlation analysis

4. 측정방법

실내의 라돈 농도는 잠깐의 기류 변화나 습도로 인해 급격히 변동하기 때문에 측정기가 설치될 장소는 US EPA의 설치 매뉴얼[14]을 준수하여 창가, 주방과, 욕실, 다용도실을 피하고 창, 출입문으로부터 90 cm 이상, 내벽으로부터 30 cm 이상 이격되고 바닥에서 50 cm 이상, 전자기기로부터 1 m 이상(단 고출력 스피커가 있는 방은 설치장소에서 제외) 이격된 장소에 설치하였다.

5. 분석방법

측정 완료 후 Electret을 E-PERM에서 분리한 뒤 Rad Elec사(US)에서 제공하는 Electret voltage detector를 이용하여 분석하였다. 조사표의 입력과 코딩 및 실내 라돈 측정 자료의 정리는 Excel 2013 (Microsoft Co., US)을 사용하였고 통계분석에는 SPSS 19.0(IBM Co., US)을 사용하였다. 입력된 자료에 대해 내부 교차검증을 실시하고, 주택의 환경에 따른 라돈 농도의 차이를 보기 위해서 t-test 및 분산분석을 수행하였다.

III. 연구결과

1. 조사가구 현황

지역별 조사가구 현황은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에 참여한 가구 수는 총 1,129가구로, 라돈취약가구의 선정기준은 상대적으로 라돈 노출에 취약하다고 판단되는 가구를 통계청 「인구주택총조사

Table 2. Characteristics of the residential environment by questionnaire

Parameter	Subject	N(%)
Gender	Male	540(48.0)
	Female	585(52.0)
Age of responder (n=894)	Before 1969	409(45.7)
	1970~1989	444(49.7)
	Since 1990	41(4.6)
Floor	First floor	919(81.7)
	Semi-underground	145(12.9)
	Underground*	61(5.4)
Housing form	Single-family housing†	782(69.5)
	Multi‡ and row§ housing	343(30.5)
Construction year	Before 1989	363(32.2)
	1990~1999	379(33.7)
	2000~2009	251(22.3)
	After 2010	132(11.7)
Smoker	Yes	313(27.8)
	No	812(72.2)
Basement	Existence	846(75.2)
	None	279(24.8)

* Means a household living in a basement floor below
† 1 ground, 1 building and 1 stand-alone residential structure
‡ 3rd floor below, the total floor area of less than 660m^2
§ 4th floor below, the total floor area exceeding 660m^2

(Population and Housing Census, 2010)」의 지역별 인구 비율과 대비하여 선정하였으며(r=0.962), 선정 결과 수도권 지역(서울・인천・경기)에서 가장 높은 연구 참여 비율(651가구(57.7%))을 나타냈다.

2. 주거환경 조사 결과

주거환경 조사 결과를 Table 2에 나타내었다. 해당 조사 결과는 현장 방문간 라돈 측정과 설문 조사에 응하지 않은 4가구를 제외한 1,125가구를 대상으로 실시되었으며, 여성 응답자(n=585(52.0%))가 남성 응답자(n=540(48.0%))에 비해 많은 것으로 나타났다. 설문 응답자들의 연령 분포 조사는 개인 신상정보 제공에 동의한 894명에 대한 결과로서 1970~1989년 사이의 출생자가 444명(49.7%)로 나타나 청・장년층의 라돈에 대한 관심과, 라돈 관련 정보의 접근성이 다른 연령대에 비해 높은 것으로 보인다.

조사가구의 층별 분포는 반지하층과 지하층이 각각 145가구(12.9%), 61가구(5.4%)이고, 1층이 919가구(81.7%)로 가장 많은 분포를 나타냈다. 주택의 유형별 분포는 단독주택이 782가구(69.5%)로 가장 많은 유형을 나타냈고, 아파트 대상자를 포함한 다세대/연립주택은 343가구(30.5%)를 나타냈다.

주택의 건축년도 분포는 1990~1999년 사이에 지어진 가구가 379가구(33.7%)로 가장 많은 분포를 보였으며 1989년 이전에 지어진 가구가 363가구(32.2%)로 뒤를 이었다. 2000년부터 2009년 사이는 251가구(22.3%), 2010년 이후로 지어진 가구는 132가구(11.7%)를 나타냈다.

조사가구의 구성원 중 가구당 1인 이상의 흡연자가 있는 가구는 총 313가구로 흡연자 보유율은 27.8%로 나타났으며, 313가구 중 실내 라돈 농도가 환경부 권고기준 148 Bq/m^{3}을 초과하는 가구는 총 75가구로 나타났다. 흡연의 경우 라돈과 상가작용(additive)을 통해 개인의 건강에 심각한 영향을 미치게 되므로[10] 권고기준 초과 가구에 대한 금연 권고와 실내 라돈 관리가 동시에 필요할 것이라 사료된다.

3. 지역별 실내 라돈 농도

연구대상인 라돈취약가구 1,125가구를 대상으로 실내에서의 라돈 농도를 측정한 결과는 Table 3, 4와 같다. 측정기기의 검출한계인 7 Bq/m^3 미만으로 조사된 5가구를 제외한 평균 라돈 농도는 130.2 (GM=101.7) Bq/m^3 이며, 환경부 다중이용시설 실내 라돈 권고기준인 148 Bq/m^{3}을 초과한 가구의 비율은 38.8%로 나타났다.

지역별로는 충청북도가 164.3 (GM=124.1) Bq/m^3 로 다른 지역에 비해 높게 나타났고, 인천광역시와 대전광역시가 각각 161.7 (GM=123.2) Bq/m^3, 148.9 (GM=123.1) Bq/m^{3}를 나타냈다. 충청북도의 경우 조사된 라돈취약가구의 57.6%가 권고기준을 초과하는 것으로 나타났고, 광주광역시, 강원도, 대전광역시도 50% 이상의 가구가 권고기준을 초과하는 것으로 조사되었다.

수도권의 경우 경기도에서 125.6 (GM=105.1) Bq/m^3, 서울특별시가 118.9 (GM=96.5) Bq/m^{3}로 조사되었고, 권고기준을 초과한 가구의 비율은 각각 39.1%, 32.0%로 나타났다. 반면 부산광역시의 경우 60.7 (GM=52.7) Bq/m^{3}를 나타냈고, 부산과 인접한 울산광역시도 85.0 (GM=73.2) Bq/m^{3}를 나타내어, 내륙지역 보다는 해・강안지역을 포함하고 있는 시・도의 실내 라돈 농

Table 3. Result of regional radon concentration in house by a short-term measurement

Region	No. of homes(N)	Range (Bq/m^3)	A.M.* (Bq/m^3)	S.D. (Bq/m^3)	G.M. (Bq/m^3)	Median (Bq/m^3)	% exceeding 148 Bq/m^3†
Gangwon	71	20.2 - 2722.9	179.8	323.9	116.6	108.5	51.4
Gyeonggi	294	17.8 - 968.1	125.6	93.2	105.1	103.8	39.1
Gyeongnam	40	28.7 - 543.1	118.1	90.9	96.3	92.5	42.5
Gyeongbuk	79	7.6 - 627.8	129.1	123.2	93.2	91.8	42.3
Gwangju	11	45.6 - 224.4	120.2	49.3	109.8	120.6	54.5
Daegu	30	8.6 - 1449.5	182.7	256.2	117.9	102.6	43.3
Daejeon	22	43.8 - 489.2	148.9	102.5	123.1	118.8	50.0
Busan	24	18.4 - 135.2	60.7	32.9	52.7	55.2	9.1
Seoul	282	17.1 - 1097.9	118.9	101.5	96.5	91.4	32.0
Sejong	5	30.2 - 155.2	78.3	41.4	68.6	65.3	20.0
Ulsan	12	27.6 - 155.9	85.0	41.2	73.2	87.5	33.3
Incheon	72	33.9 - 1379.2	161.7	184.2	123.2	113.7	43.1
Jeonnam	49	12.7 - 621.6	119.4	92.3	98.6	91.0	30.6
Jeonbuk	41	23.8 - 425.0	132.8	98.4	102.4	113.3	43.9
Jeju	6	39.2 - 208.2	117.1	68.7	95.5	104.3	33.3
Chungnam	54	15.3 - 305.5	114.1	64.8	95.5	98.2	43.4
Chungbuk	33	30.2 - 680.4	164.3	129.9	124.1	134.6	57.6
Total	1,125	7.6 - 2722.9	130.2	138.3	101.7	98.9	38.8

A.M.: Arithmetic Mean. G.M.: Geometric Mean. S.D.: Standard Deviation.
* Except 5 households less than LLD (7 Bq/m^3)
† Ratio of exceeds the recommended standards (148 Bq/m^3) on public facilities of the Ministry of Environment

도가 상대적으로 낮은 경향을 나타냈다.

2011년부터 2012년까지 2년간에 걸쳐 겨울철에 실시된 국립환경과학원의「전국 주택 라돈조사」[15]에서도 본 연구와 마찬가지로 강원도(213.0)・대전(161.9)・충남(148.4)・충북(140.2)지역 주택들의 실내 라돈 농도가 높게 나타난 것으로 보아, 태백산맥과 옥천대를 포함하고 있는 지층에서의 라돈 농도가 높은 화강암이 분포되어 있음을 알 수 있다.

단 실내 라돈 농도는 지하수 사용 유・무, 토양에서의 발생량, 주택의 노후화 정도, 주택의 시공방법, 건축자재, 계절적 기후 변화, 실내 환기량, 거주 층수 등과 같은 다양한 인자와 연관[16]되어 있으므로 보다 정확한 실내 라돈 농도를 측정하기 위해서는 위와 같은 변수들을 반영하여 계절별로 꾸준히 모니터링을 실시해야 한다고 본다.

4. 주택의 유형 및 지하공간 유・무에 따른 라돈 농도

주택의 유형별 라돈 농도를 단독주택, 연립/다세대주택으로 구분하여 Table 5에 나타내었다. 단독주택과 연립/다세대주택의 실내 라돈 농도를 비교하였을 때 단독주택 139.0 (GM=105.8) Bq/m^3, 연립/다세대주택 111.2 (GM=92.8) Bq/m^3으로 나타나 단독주택이 높은 것으로 나타났다($p<0.01$).

권고기준을 초과하는 비율도 단독주택(43.6%)이 연립/다세대주택(28.5%)보다 높게 나타났으며 이는 단독주택의 경우 1980년 이전에 건축된 주택이 많고(n=299(38.2%)), 토양과 직접 접해있는 구조를 가지고 있어 노후화되어 갈라진 바닥의 미세 균열을 통해 라돈 가스가 실내로 직접 유입되어 상대적으로 단독주택에서의 라돈 농도가 높다고 판단된다.

거주공간의 하부 층으로 지하실이나 아래층과 같은 지하공간 유・무에 따른 라돈 농도를 Table 6에 나타내었다. 조사된 1,125가구 중 지하공간을 보유하고 있는 가구 수는 846가구(75.2%)로 조사되었고, 지하공간 없이 지반과 밀접한 가구 수는 279가구(24.8%)로 조사되었다. 지하공간이 존재하는 가구의

Table 4. Status of exceeds the recommended standards (148 Bq/m^3) on public facilities

Region	No. of excess homes(N)	Single-family housing	Row housing	Multi-family housing
Gangwon	37 / 71	27	2	8
Gyeonggi	115 / 294	82	8	25
Gyeongnam	17 / 40	15	1	1
Gyeongbuk	33 / 79	31	1	1
Gwangju	6 / 11	6	-	-
Daegu	13 / 30	12	1	-
Daejeon	11 / 22	9	1	1
Busan	2 / 24	2	-	-
Seoul	91 / 282	54	7	30
Sejong	1 / 5	1	-	-
Ulsan	4 / 12	4	-	-
Incheon	31 / 72	22	3	6
Jeonnam	15 / 49	15	-	-
Jeonbuk	18 / 41	18	-	-
Jeju	2 / 6	2	-	-
Chungnam	23 / 54	23	-	-
Chungbuk	19 / 33	17	-	2
Total	438 / 1,125	340	24	74

실내 라돈 농도는 129.2 (GM=98.0) Bq/m^{3}이며, 존재하지 않는 가구의 실내 라돈 농도는 135.0 (GM=101.2) Bq/m^{3}을 나타내어, 지하공간이 존재하지 않는 가구에서 실내 라돈 농도가 높은 분포를 나타냈지만, 지하공간으로 인해 상부 층에서의 라돈 농도가 낮아질 것이라는 가설은 유의성 분석 결과 통계적으로 유의하지 않는 결과를 나타냈다(p=0.633).

이는 이 등[17]의 연구와도 유사한 결과이며, 주택 지하공간의 환기시설 유·무에 따른 급·배기량, 구조, 용도, 이용조건, 시공 상태 등이 대상가구마다 차이가 있기 때문에 지하공간의 존재 여부는 상층부 거주공간의 실내 라돈 농도 변화와는 큰 연관성이 없는 것으로 사료된다. 그리고 조사 대상 가구의 층수에 따른 라돈 농도 차이 역시 통계적으로 유의하지 않는 결과를 나타내었다(p=0.120).

5. 주택의 건축년도별 라돈 농도

조사대상 주택의 건축년도를 10년 단위로 분할하고 단독주택, 연립/다세대주택으로 구분하여 조사한 라돈 농도 결과를 Table 7에 나타내었다. 본 연구에서 조사된 1,125가구 중 단독주택에 거주하는 가구는 782가구(69.5%)이며 연립/다세대주택은 343가구(30.5%)로 나타났다.

주택의 건축년도별 라돈 농도를 비교하였을 때 1989년 이전에 건축된 가구(n=363)들의 실내 라돈 농도가 142.7 (GM=109.7) Bq/m^{3}로 가장 높게 나타났으며, 2010년 이후로 건축된 가구(n=132)에서 109.0 (GM=86.6) Bq/m^{3}을 나타내어, 주택의 연식이 오래될수록 실내 라돈 농도가 상승하는 경향을 나타냈다 ($p<0.05$). 단독주택의 경우 연식에 따라 실내 라돈 농도가 높게($p<0.05$) 나타났지만, 연립/다세대주택의 연식에 따른 실내 라돈 농도의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다(p=0.349).

IV. 고 찰

지난 1997년부터 2004년까지 총 2단계에 걸쳐 실시되었던 「국민 방사선 위해도 평가 및 전국 실내 라돈조사」 연구에서 총 3,886가구의 실내 라돈 농도를 조사한 결과 우리나라의 라돈 농도가 연평균 55 Bq/m^{3}로 나타나, WHO의 세계평균 39 Bq/m^{3}에 비해 높은 수준이며 미국(46 Bq/m^3), 영국(20 Bq/m^3)보다 높은 수준[18]으로 국가차원의 적극적인 라돈 관련 정책의 필요성이 증가해 왔다.

그 후 2012년 「전국 주택 라돈조사(2011-2012)」[15]에서 전국 7,885가구를 조사한 결과 라돈취약시기인 동절기의 실내 라돈 농도가 124.9 Bq/m^{3}로 조사되었다. 이 연구결과는 동일한 시기에 전국 1,129가구를 대상으로 수행된 본 연구 결과(130.2 Bq/m^3)와도 비슷한 결과로서, 우리나라의 겨울철 실내 라돈 농도는 연평균 농도 보다 2배 이상 높은 수준으로 환기와 실외 활동시간 모두 제한적일 수밖에 없는 취약시기에 라돈에 의한 피폭이 심각할 것이라 사료된다.

라돈의 실질적 피폭자인 가구의 구성원들을 중심으로 실질적인 실내 환경 중 라돈 농도에 관여하는 요인들을 규명할 수 있는 다각적이면서도 심층적인 연구가 이뤄져야 할 것이라고 본다.[16] 2010년 이전에도 다중이용시설, 공공건물 등을 대상으로 한 라돈 조사 연구가 활발히 있었으며, 과거 국내에서 수행된 다양한 실내 라돈 조사 연구들을 수집하여 병합한 이 등[19]의 연구와 연평균 라돈 농도가 108 Bq/m^3[18]로

Table 5. Statistical analysis of type of a residential between radon measurement data

Classification	No. of homes(N)	A.M.* (Bq/m^3)	S.D. (Bq/m^3)	G.M. (Bq/m^3)	Median (Bq/m^3)	% exceeding 148 Bq/m^3	*p-value*
Single-family housing	782	139.1	157.4	105.8	105.6	43.6	$p < 0.01^{\dagger}$
Multi and row housing	343	111.4	91.1	93.0	87.3	28.5	

* Except 5 households less than LLD (7 Bq/m^3)
† p-value was verified by t-test between single and multi/row housing group

Table 6. Result of radon concentration in a residential floor and underground existence

Status		No. of homes(N)	A.M.* (Bq/m^3)	S.D. (Bq/m^3)	G.M. (Bq/m^3)	Median (Bq/m^3)	*p-value*
Existence of underground space in housing	existence	846	129.2	119.5	101.2	98.0	$p = 0.63^{\dagger}$
	none	279	135.0	191.9	103.2	101.2	
Radon concentration in a residential floor	in first floor	919	134.5	148.9	103.7	102.6	$p = 0.12^{\S}$
	in semi-underground	145	110.4	106.7	89.3	83.6	
	in underground‡	61	120.2	68.1	102.8	96.4	

* Except 5 households less than LLD (7 Bq/m^3)
† p-value was verified by t-test between the subgroups associated with the existence of underground
‡ Means a household living in a basement floor below
§ p-value indicates the difference of indoor radon concentration between subgroups using one-way analysis of variance (ANOVA)

Table 7. Construction and the consequential status of radon concentration

		N(%)	Construction year	N	Radon concentration* (Mean±SD(GM)), Bq/m^3	*p-value*†
Classification	Single-family housing	782 (69.5)	before 1989	299	151.5±149.1(115.6)	$p = 0.01$
			1990 ~ 1999	206	154.7±226.6(113.4)	
			2000 ~ 2009	168	118.9±73.3(96.9)	
			after 2010	109	106.5±98.4(83.3)	
	Multi and row housing	343 (30.5)	before 1989	64	100.6±68.6(85.5)	$p = 0.34$
			1990 ~ 1999	173	118.9±112.6(96.1)	
			2000 ~ 2009	83	101.4±52.1(89.9)	
			after 2010	23	120.7±69.7(103.8)	
Total		1,125 (100)	before 1989	363	142.7±139.7(109.7)	$p = 0.01$
			1990 ~ 1999	379	138.3±183.9(105.1)	
			2000 ~ 2009	251	113.1±67.4(94.5)	
			after 2010	132	109.0±93.9(86.6)	

* Except 5 households less than LLD (7 Bq/m^3)
† p-value indicates the difference of indoor radon concentration between subgroups using one-way analysis of variance (ANOVA)

우리나라의 2배에 해당하는 스웨덴의 실내 라돈 연구의 사례[20]를 볼 때도 일반주택 유형에서 가장 높은 실내 라돈 농도 수준을 나타냄을 확인할 수 있다.

본 연구에서도 단독주택의 실내 라돈 농도(139.1 Bq/m^3)가 연립/다세대주택의 실내 라돈 농도(111.4 Bq/m^3)보다 높게 나타났다. 특히 단독주택의 경우 건축연식이 오래될수록 평균 실내 라돈 농도가 권고기준에 근접하는 것을 확인할 수 있었다. 때문에 동계에 라돈에 취약한 시설에 위치한 가구를 대상으로 정밀조사와 함께 저감 관리가 실시되어야 할 것이라 본다.

본 연구에서 실내 라돈의 지역적 분포를 볼 때 강원도와 충청북도 및 대전광역시의 평균 실내 라돈

농도가 각각 179.8 Bq/m^3, 164.3 Bq/m^3, 148.9 Bq/m^{3}을 나타내었는데 이는 기존 조사 결과[15]와도 유사한 양상으로서 태백산맥과 옥천지질대가 위치한 지역의 실내 라돈 농도가 상당한 것으로 나타났다.

국내에서 나타나는 지질의 종류를 5가지로 구분할 경우 화강암, 퇴적암, 변성암, 옥천변성암, 제주화산암으로 구분 가능하며 이 중 옥천변성암에서 우라늄의 함량이 가장 높은 것으로 알려져 왔다. 이 옥천지질대는 옥천변성암으로 구성되어 있고, 변성암 내 일부 흑색 셰일(shale; 퇴적암)은 평균 294 ppm의 우라늄을 함유하고 있는 것으로 보고[21]되었는데, 실내 라돈 유입량의 약 20%가 지하수에서 기인하며,[22] 이 라돈을 함유한 지하수는 지질의 영향을 가장 많이 받는 것으로 알려져 있다.

조 등[23]의 연구에서도 옥천변성암의 지하수에서 국내 최고 라돈 함량치(Mean=2,020 pCi/L, Max=40,010 pCi/L)를 보고하고 있는 것으로 보아, 옥천지질대에서 자연적으로 발생하는 라돈의 양이 상당하기 때문에 실내 라돈 농도도 다른 지역에 비하여 높게 나타나는 것으로 보인다. 단 지질에 함유된 우라늄이 아닌 지하수에 함유된 우라늄과 라돈의 상관성은 약간의 상관성(r=0.418)만을 보여주고 있으며,[24] 지하수의 라돈 농도는 수질화학적 요소들 보다는 해당 지하수가 위치한 지질 특성과, 지하수 유동량에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.[25]

본 연구에서는 거주층에 따른 라돈 농도 차이는 유의하지 않은 것으로 나타났지만(p=0.120), 이는 1층과 반지하/지하층 거주자들만을 대상으로 한 결과로서, 향후 2층 이상 고층에서의 라돈 농도에 대한 조사가 이뤄지고 서로 비교되어야 거주층에 따른 라돈 농도 차이를 알 수 있을 것이라 사료된다.

그리고 최근 드러난 아파트 고층에서의 고농도 라돈 검출 문제가 대대적으로 미디어를 통해 보도되어 사회적으로 큰 파장을 일으킨 적이 있었다. 아파트의 실내 라돈 농도는 지면에서의 영향 보다는 실내 내장 건축자재의 종류(시멘트벽돌, 에코카라트*, 석고보드)와 주택의 구조에 크게 영향 받는 것으로 보고[26]되었으며, 전 등[27]의 연구에서도 마감재를 처리한 아파트의 경우 실내 라돈 농도가 평균 151.5 Bq/m^{3}을 나타낼 만큼, 상당한 농도 수준을 보여주고 있기 때문에 아파트의 실내 공간에 대한 라돈 농도 연구가 필요하다고 본다.

* Ecocarat: 화산재에서 추출한 점토성분인 알로펜(allophane)을 주성분으로 하는 벽지대용 건축자재

V. 결 론

본 연구는 라돈 노출에 취약할 것으로 예상되는 단독 및 연립/다세대주택의 1층과 반지하층, 그리고 지하층에 거주하는 전국 1,129가구를 대상으로 환기가 제한적인 겨울철의 실내 라돈 농도를 측정한 연구이다.

1,129가구 중 현장에서의 라돈 측정기 설치에 응한 1,125가구의 평균 실내 라돈 농도(LLD 미만 5가구 제외)는 130.2 Bq/m^{3}을 나타내었고, 그 중 환경부 다중이용시설 실내라돈 권고기준 148 Bq/m^{3}을 초과한 가구는 438가구로(38.8%) 나타났다.

지역적으로는 충청북도에서 가장 높은 평균 농도인 164.3 Bq/m^{3}을 나타냈고, 수도권의 경우 경기도 125.6 Bq/m^3, 서울특별시 118.9 Bq/m^3, 인천광역시 161.7 Bq/m^{3}로 조사되었다. 단 인천광역시의 경우는 가구별 측정편차가 크고 수도권 내 최대농도인 1379.2를 나타내어 산술평균이 상승하는 효과로 이어졌다.

주택의 유형별 라돈 농도 차이는 단독주택(139.0 Bq/m^3)이 연립/다세대주택(111.2 Bq/m^3)에 비해 높게 나타났다(p<0.01). 단독주택의 경우 건축 연식이 오래될수록 실내 라돈 농도가 상승하는 경향을 나타낸 반면(p<0.05), 연립/다세대주택의 경우 건축 연식에 따른 실내 라돈 농도의 상승은 통계적으로 유의하지 않았다(p=0.349).

거주중인 주거공간에서 지하공간을 보유하고 있는 가구(n=846)의 실내 라돈 농도(129.9 Bq/m^3)가 지하공간을 보유하지 않은 가구(n=279)의 실내 라돈 농도(135.0 Bq/m^3)보다 낮은 경향을 나타냈지만, 통계적으로 유의하진 않았다(p=0.633).

거주층간 라돈 농도의 차이에서도 1층의 경우 134.5 Bq/m^3, 반지하층은 110.2 Bq/m^3 지하층에서 119.0 Bq/m^{3}로 나타나는 등, 층간 라돈 농도의 차이 역시 통계적으로 유의하지 않았다(p=0.120).

본 연구는 라돈취약가구만을 대상으로 한 조사연구로서 다른 연구들과의 차이점은 전문 연구원이 직접 가구를 방문하여 설문조사와 함께 측정기를 설치하고, 기간 종료 후 직접 회수처리를 하여 측정기에

대한 대상자의 개입을 최소화 하였다는 점과 설치 조건의 환경을 자체 표준 업무 매뉴얼에 의거 가구별로 동일하게 설정하였다는 점이다.

그러나 주택별로 건축물의 구조와 건축자재의 종류 및 사용량이 달라서 발생할 수 있는 가구별 실내 라돈 농도의 차이에 관한 부분에 대해서는 향후 추가적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

우리나라의 취약시기 실내 라돈 농도는 본 연구결과와 다른 연구결과들처럼 대체로 지역에 상관없이 전반적으로 높은 편에 속하기 때문에, 건축 연식이 오래되고, 환기가 불량할수록 실내 라돈 농도가 높아진다고 보아야 한다.

때문에 해당 주택에 거주하는 가구원들의 건강을 보호하는 측면에서 실내 라돈을 환기 등을 통하여 개인이 적극적으로 저감할 수 있도록 라돈의 위험성을 인식시키고, 라돈취약계층에 대한 조사 확대와 같은 대책이 마련되어야 할 것이라고 본다.

References

1. Lee JD, Kim YS, Son BS, Kim DS. A study of radon concentration in first floor and basement and prediction of annual exposure rate in Korea. *J Environ Sci*. 2006; 15(4): 311-7.
2. Jamil K, Al-Ahmady KK, Fazal-ur-Rehman, Ali S, Qureshi AA, Khan HA. Relative performance of different types of passive dosimeters employing solid state nuclear track detectors. *Health Phys*. 1997; 73(4): 629-32.
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation(UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes. United Nations. New York. 1988.
4. International Commission on Radiological Protection(ICRP). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annals of ICRP. 1991; 21(1-3).
5. Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, et al. The national human activity pattern survey(NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2011; 11(3): 231-52.
6. Yang WH, Lee KY, Yoon CS, Yu SD, Park KW, Choi WH. Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2011; 21(3): 310-6.
7. Spengler JD, Dockery DW. Personal exposure to respirable particulates and sulfates. *J Air Pollut Control Assoc*. 1981; 31(2): 153-9.
8. Ott WR. Models of human exposure to air pollutant. Technical report No.32. Study of Statistics. California: Stanford Univ Press; 1982.
9. Robinson J, Nelson WC. National human activity pattern survey database (US EPA). North Carolina: Research Triangle Park Press; 1995.
10. Steenland K, Thun M. Interaction between tobacco smoking and occupational exposures in the causation of lung cancer. *J Occup Med*. 1986; 28(2): 110-8.
11. Gofman JW. Radiation and human health. San Francisco: Sierra Club Press; 1981.
12. Kotrappa P, Dempsey JC, Ramsey RW, Stieff LR. A practical E-PERM (electret passive environmental radon monitor) system for indoor ^{222}Rn measurement. *Health Phys*. 1990; 58(4): 461-7.
13. Kotrappa P, Dempsey JC, Hickey JR, Stieff LR. An electret passive environmental ^{222}Rn monitor based on ionization measurement. Health Phys. 1988; 54(1): 47-56.
14. US EPA. Indoor Radon and Radon Decay Product Measurement Device Protocols. Available: http://www.epa.gov/radon/pubs/devprot1.html [Accessed 24 November 2013].
15. National Institute of Environmental Research(NIER). Nationwide survey (2011-2012) of indoor radon at home in Korea. Incheon: National Institute of Environmental Research Press; 2012.
16. Kim YS, Yoon SW, Lee JI, Shin HW, Lee JH, Lee CM, et al. Evaluation of correlation between indoor radon concentration and the attribution of gypsum board content in building materials. *J Kor Soc Indoor Environ*. 2013; 10(3): 217-26.
17. Lee SY, Lee YM, Park JH, Kim SS, Hong GY, Ahn HG, et al. Radon concentration assessment of studio apartments surrounding a university. *J Environ Health Sci*. 2013; 39(2): 138-43.
18. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation(UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes. United Nations. New York. 2000.
19. Lee CM, Kim YS, Roh YM, Jeon HJ, Kim JC. Radon concentration in various indoor environment and effective dose by inhabitants in Korea. *Kor J Environ Health Sci*. 2007; 33(4): 264-75.
20. Swedgemark GA, Mjnes L. Radon and radon

daughter concentrations in Swedish homes. *Radiat Prot Dosimetry.* 1984;7(1-4):341-5.
21. Kim JH. Caledonian Ogcheon Orogeny of Korea with special reference to the Ogcheon uraniferous marine black slate. Doctoral thesis, Tokyo: University of Tokyo; 1987.
22. Ju SH, Je WM. Chapter 5. Groundwater carries the radon. In: Ju SH, Je WM. editors. Radon radioactivity and living environment. 1st ed. Seoul: Gyechuk Press; 1995. p.154.
23. Cho BW, Sung IH, Cho SY, Park SK. A preliminary investigation of radon concentrations in groundwater of South Korea. *J Soil Groundw Environ*. 2007; 12(5): 98-104.
24. Cho BW, Kim MS, Kim TS, Han JS, Yun U, Lee BD, et al. Hydrochemistry and distribution of uranium and radon in groundwater of the Nonsan area. *J Eng Geol*. 2012; 22(4): 427-37.
25. Jeong CH, Kim DW, Kim MS, Lee YJ, Kim TS, Han JS, et al. Occurrence of natural radioactive materials in borehole groundwater and rock core in the Icheon Area, *J Eng Geol*. 2012; 22(1): 95-111.
26. Park HC, Choi HS, Cho SY, Kim SH. Numerical study on indoor dispersion of radon emitted from building materials. *J Kor Soc Environ Eng*. 2014; 36(5): 325-32.
27. Jeon JS, Lee JI, Eon SW, Chae YZ. The variation characteristics of indoor radon concentration from buildings with different environment, Seoul. *J Kor Soc Atmos Environ*. 2011; 27(6): 692-702.