

건축물 유형에 따른 라돈 저감 효과 평가

이동현¹ · 류승훈² · 조정흙³ · 서성철^{4*}

¹EHS 기술연구소, ²고려대학교 보건대학원, ³고려대학교 보건과학대학 보건과학과,

⁴고려대학교 의과대학 알레르기면역연구소

Evaluation for Effectiveness of Radon Mitigation on Dwellings and Public Buildings in Korea

DongHyun Lee¹ · Seung-Hun Ryu² · JungHeum Jo³ · SungChul Seo^{4*}

¹*Institute of Technology for Environmental Health and Safety,*

²*Graduate School of Public Health, Korea University,*

³*Department of Public Health Science, College of Health Science, Korea University,*

⁴*Institute of Allergy and Immunology, College of Medicine, Korea University*

ABSTRACT

Objectives: The adverse health effects attributed to exposure to radon have been well known over the world. However, the efforts for prevention and mitigation of radon have not been taken in Korea so far. The purpose of this study was to evaluate the effectiveness of mitigation methods applied for various types of houses and public buildings with high level of radon.

Methods: Based on the results of "National Radon Survey" performed by the National Institute of Environmental Research(NIER) in 2010-2012, we selected 30 candidate buildings consisting of 20 houses and 10 public buildings with greater than 148 Bq/m³ of radon level. We measured the concentration of radon in 30 buildings, using E-PERMs and RAD-7 during January to March of 2013. More than five E-PERMs and one RAD-7 per house were installed for seven days. Ten houses and five public buildings were finally chosen to be mitigated after mainly considering the level of radon and the location of buildings nationwide. Three mitigation methods such as Sealing, two types of Active Ventilation(window-shaped and wall-typed ventilations), and Active Soil Depressurization(ASD) were applied, and the concentrations of radon were measured before and after mitigation, respectively. To evaluate the effectiveness of mitigation methods, reduction rates of radon were calculated and Wilcoxon's signed-rank test was performed.

Results: The mean concentration of 15 buildings just before radon mitigation was 297.8 Bq/m³, and most of the buildings were located in Gangwon, Chungbuk, Chungnam, and Daegu areas(73.3%), and built in 1959-1998. The level of radon decreased from 48% to 90% and kept the below recommendation limit of 148 Bq/m³ after installation of radon mitigation. Among mitigation methods applied, the reduction rate(58.7-90.4%) of radon attributed to ASD was the greatest than that of other methods, followed by Active Ventilation(48.4-78.4%) and Sealing(<22%). The effectiveness of radon reduction by window-shaped Active Ventilation(63.2-75.2%) was relatively better than that of wall-typed Active Ventilation(48.4-54.3%).

Conclusions: The results of this study indicate that ASD could be more effective for radon mitigation. Moreover, our findings would be background information in future for making the strategy for radon mitigation nationwide, as well as for developing Korean-version of mitigation techniques according to types of dwellings in Korea.

Key words: radon, mitigation, Rn, Active Soil Depressurization, lung cancer

*Corresponding author: SungChul Seo, Tel: 02-920-5464, E-mail: sungchul_seo@korea.ac.kr

Institute of Allergy and Immunology, College of Medicine, Korea University. 73 Incheon-ro, Seongbuk-gu, Seoul 136-705

Received: August 19, 2014, Revised: December 22, 2014, Accepted: December 27, 2014

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial

License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

라돈(^{222}Rn)은 자연환경 중에 존재하는 천연 방사성 핵종 중의 하나로 지각의 암석이나 토양 및 건축 자재에 함유되어 있는 우라늄(^{238}U)의 붕괴과정에서 생성된다. 라돈 가스는 무색, 무취의 불활성 기체로 인체에 높은 농도에서 지속적으로 노출될 경우 폐암, 위암 등을 유발할 수 있기 때문에 세계보건기구에서는 라돈을 흡연 다음으로 폐암을 유발시키는 주요 발암물질로 간주하고 있다(WHO, 2009). 특히 밀폐된 실내 공기 중의 라돈은 인체건강에 지대한 영향을 미칠 수 있어, 미국, 유럽 등의 선진국에서는 1980년대부터 라돈의 유해성에 대한 많은 연구와 조사를 통해 실내 라돈 오염실태를 파악하고 관리방안을 이미 마련했거나, 추진 중에 있는 것으로 알려져 있다(USEPA, 1993a; Darby et al., 2005; Krewski et al., 2005; Darby et al., 2006; Krewski et al., 2006). 반면 국립환경과학원에서 수행된 전국 주택 라돈 조사(2010-2012)를 살펴보면(MoE, 2013), 라돈 농도에 관한 국내 다중이용시설 권고기준($4 \text{ pCi/L} = 148 \text{ Bq/m}^3$)과 비교했을 때, 전국 평균의 경우 $50.5\text{--}98.6 \text{ Bq/m}^3$ 이며, 단독주택 33.0%, 연립 및 다세대주택 14.4%, 아파트 5.9% 순으로 초과하고 있는 것으로 조사되어, 미국(평균, 46 Bq/m^3), 캐나다(34 Bq/m^3), 중국(24 Bq/m^3), 일본(16 Bq/m^3) 등에 비추어 볼 때 결코 라돈의 노출수준이 낮은 국가가 아닌 것으로 확인되었다(UNSCEAR, 2000). 하지만, 국내 실내의 라돈에 대한 기초자료 조사와 연구는 이제 막 시작단계에 있으며, 특히 저감공법 적용 및 개발에 있어서는 그 진행 정도가 매우 더딘 실정이다.

환경부의 실내라돈저감 가이드라인(MoE, 2010a)에 따르면 실내 라돈을 저감시키는 방법은 크게 발생원 제거, 발생원 조절 등으로 나뉜다. 먼저 발생원을 제거하는 방법으로는, 토양 내의 라돈의 농도가 높을 경우 건물 아래의 토양을 교환하는 방법이 있으나 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 또한 실내에 사용되는 건축자재 중의 라돈 방출 수준을 평가하여, 되도록 라돈 발생량이 적은 자재를 사용하도록 해야 하는데, 이를 위하여 토양으로부터 유발된 다양한 건축자재의 라돈 방출 수준을 국가가 관리하고 가이드할 필요가 있다. 그 외에 장벽을 설치하여 토양과 건

물의 기초가 직접 접촉하는 것을 방지하거나 토양 중 라돈의 농도가 낮은 곳을 건축지로 선택하는 방법이 있다. 다음으로 보다 효율적인 라돈저감방법인 발생원을 조절 하는 방법에는 라돈의 유입 경로(배수구, 속이 빈 콘크리트 벽, 벽과 바닥의 교차 부분, 바닥재의 이음새, 열에 의한 팽창과 재료들의 수축에 의한 틈, 지하실 바닥 및 건물의 갈라진 틈 등)를 차단하거나 배출파이프를 지하실 슬래브(Slab) 밑에 넣어 공기를 환기를 시켜 주는 방법이 있다. 또한 지하실에서 지상으로 라돈이 유입되는 것을 방지하기 위해 지하실 쪽으로 약 $3\text{--}4 \text{ Pa}$ 정도의 약한 압력을 걸어주어 실내의 라돈 농도를 148 Bq/m^3 미만으로 유지시킬 수 있다.

일반적으로 앞서 설명된 저감공법의 경우 외국에서 적용 및 실용화되고 있는 공법으로, 국내 주택 환경에서 라돈 저감에 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만, 외국의 저감공법을 그대로 적용하기에는 우리나라의 지리적 조건, 주택구조 등의 차이로 인한 적용에 문제가 있을 수 있기 때문에 국내 가옥, 기타 건물 특성에 맞는 공법을 개발 하거나 맞춤형 공법 수정이 필요할 것으로 보인다. 또한 실내 라돈 농도는 지역별, 주택별 유해 환경 인자에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문에 이러한 변수에 따른 제거효율 평가도 필요할 것이다. 이에 본 연구에서는 건축연도, 주택층수, 지하공간의 유무, 지하수 사용 등 주택별 환경 인자를 고려하여 실내 라돈 농도를 조사하며, 조사된 내용을 근거로 주택유형에 따른 저감공법의 효과평가를 하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 라돈 저감시공 후보가구 선정

국립환경과학원의 전국 주택 라돈조사(2010-2012) 결과 Seo et al.(2012)의 자료를 바탕으로 권고기준 148 Bq/m^3 를 초과한 100여곳의 건물에서 주택 유형별로 높은 라돈농도 수준을 보인 20 가구(일반주택) 및 10개의 공공기관을 1차 저감시공 후보군으로 선별하였다. 선별된 시설(총 30곳)에 대해서는 2013년 1-3월 동안에 라돈 노출수준을 재 측정하였으며, 이 자료와 더불어 라돈발생의 특성(지반, 지하수 사용 유무, 주택구조 등)이 반영된 선정 평가표를 이용하

여 각각의 시설을 점수화 하였다. 이를 간략히 살펴 보면, 라돈 기준 농도초과 유무(20점), 건물 건축년도(10점), 지하수 이용현황 유무(10점), 건축의 바닥재질(20점 시멘트, 목재, 흙), 건축자재(20점 콘크리트, 적벽돌, 목재 등), 건물 노후정도(15점 균열), 지하실 유무(5점) 등으로 총 7개 요소에 각각 점수를 부여하였다. 이후, 산정된 총 점수가 높은 순으로 나열하였으며, 우선 순위 가구(주택 10가구)를 대상으로 세대주와 개선시공에 대한 협의를 거쳐 저감시설로 선정하였고, 세대주가 저감시공에 대한 개선 의지가 없거나 시공 불허 등에 의한 경우 차순위 가구를 선정하였다. 이와 유사하게 공공시설도 점수가 높은 상위 5개소를 우선 선정, 개선희망 유무에 따라 차순위 시설을 선정하였다. 이에 본 연구에서는 주택 10가구, 공공시설 5곳 등 총 15곳을 저감시설 대상으로 선정하였다.

2. 라돈 노출 농도 측정

라돈의 측정은 저감시공 후보 선정을 위해 일반가정집과 공공시설 총 30곳에 대한 1회 측정과 선정된 15곳의 시설군에 대한 저감시공법 효과 평가를 위해 시공 전·후 각각 1회로 총 3회 실시하였다. 분석 결과의 신뢰도를 높이기 위해 측정 장비는 구조가 견고하고 빠른 판독이 가능한 수동형 검출기(E-PERM, Rad Elec Inc., USA)와 시간대별로 연속 모니터링이 가능한 능동형 검출기(RAD-7, Durrigge Radon Inc., USA)을 동시에 사용하여 라돈 농도를 측정하였다. 실내의 라돈 검출기의 측정 위치는 Figure 1과 같이,



Figure 1. Example of sampling locations for measuring airborne radon in each house

격벽이 있는 곳을 위주로 수동형 검출기를 설치하였으며, 능동형 검출기는 주된 활동공간인 거실이나 교실, 복도 등의 장소에 설치하여 라돈 농도를 측정하였다. 이때 후보시설선정과 저감시공 효과평가의 정확한 분석을 위해 시설별로 수동형 검출기는 최소 5개 이상, 능동형 검출기는 최소 1개 이상 설치하여 노출수준을 파악하였다.

수동형 및 능동 검출기의 측정기간은 7일 이상으로 측정하였으며, 측정에 사용된 수동형 검출기의 경우 라돈의 농도 분석을 위해 검출기(The electret voltage reader, Rad Elec Inc., USA)를 사용하였다. 이는 전리된 이온이 충전된 충전막의 전하량을 판독하여 최종 라돈 농도로 환산되는 방식이다. 최소 5개 이상의 검출기에서 측정된 노출 수준을 (산술)평균±표준편차(Bq/m³)로 최종 결과 값을 나타내었다.

3. 저감 시공법 적용

전반적인 저감공법 선정 과정을 Figure 2에 나타내었다. 저감 시공법은 틈새막음법(Sealing), 외부공기 유입법(Active ventilation), 토양가스배기법(Active Soil Depressurization, ASD)을 사용하였으며, 라돈 노출 농도, 건물 유형 및 구조, 시설 설치 및 운영비용 등의 효율성을 종합적으로 평가하여 가구 및 시설에 최적의 공법을 적용하였다.

상대적으로 라돈 농도가 낮은 시설에서는 틈새막음공법을 적용하였다. 본 공법을 적용하기 위해 우선 온돌마루 또는 장판을 철거 후 바탕면의 이물질들을 깨끗이 청소한 뒤, 바닥면 등의 갈라진 틈(Crack) 부분에 크랙보수재(Crack Cover Seal, SG Industry, Korea) 등을 이용하여 바닥면에 골고루 분사한 뒤 충분한 양생기간을 거친 후에 마감재를 시공하였다. 다만, 본 연구에서는 저감공법으로 틈새막음공법을 적용하지는 않고, 2012년도 본 연구진이 수행한 “주택 라돈 저감을 위한 측정분석, 저감시공 및 표준화” 용역(KECO, 2012) 결과를 인용, 공법별 저감효과를 비교하였다.

외부공기유입법의 경우 건물 아래로 공기를 빼낼 수 있는 공간이 없는 기초구조를 가진 건물에 적용하였으며, 환기장치를 통해 실내공기의 압력을 건물 하부보다 높여 실내의 라돈가스 유입을 효과적으로 차단 하고자 하였다. 기존 주택의 경우 벽체 및 창문

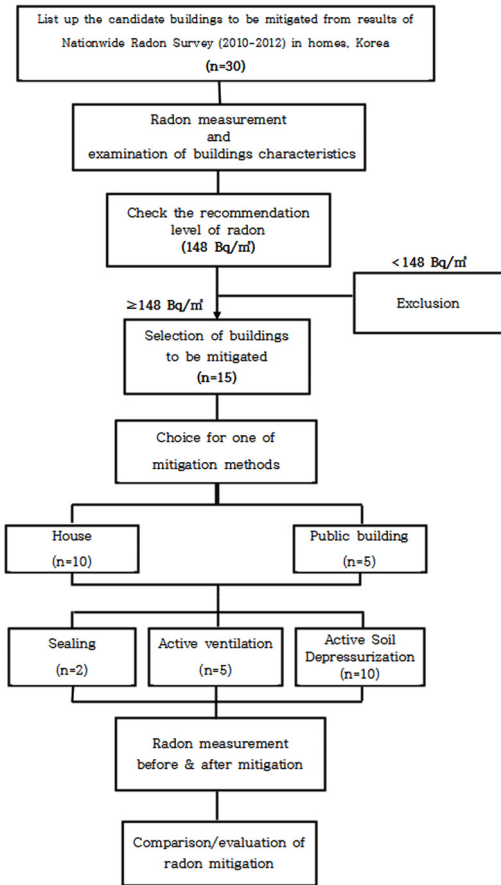


Figure 2. Strategy for radon mitigation by types of houses and public buildings

형 환기 방식을 사용하였으며, 공공기관의 경우 모두 창문형 환기 공법을 사용하였다. 벽체형 환기의 경우 건물의 벽에 급·배기가 가능한 환기 시설(M-WRG-S, Meltem Lueftungsgeraete GmbH, Germany)을 설치하여 30 m³/h의 공기를 주입하였다. 창문형의 경우 기존 창틀의 일부에 설치하는 반창형(폭×높이×길이: 105×1000×114 mm)을 설치하여 약 15 m³/h의 급·배기를 하였다.

지하공간에 공기를 빼낼 수 있는 구조를 가진 시설의 경우 환기관 내의 공기온도 차에 의한 부력과 주거건물 하부의 토양을 약하게 감압하여 토양으로부터 유입되는 라돈가스를 외부로 효과적으로 배출하기 위하여 ASD를 적용하였다. 지하공간이 있는 구조에서는 우선 1층 하부 측면을 천공하여 배수조(Sump)를 설치하고 흡입관을 시공 후 팬을 사용하여

토양 가스를 배출하였다. 또한 구들이 있는 구조의 경우 온돌층 하부에 흡입관을 설치하여 공기를 배출하였다. 흡입관에는 200 m³/h의 풍량을 가진 펌프(MV-200, Meltem Wärmerückgewinnung GmbH, Germany) 1대를 설치하여 24시간 가동토록 한 후, 저감효과를 평가하였다.

4. 통계분석

조사된 라돈 노출 수준은 건물유형, 건축년도 등으로 구분하여 기술통계분석을 하였으며, 저감공법의 시공 전, 후 비교에 있어 통계학적인 유의성을 판단하기 위해 비모수통계방법인 Wilcoxon's signed-rank test를 이용하였다(Klotz, 1963). Wilcoxon's signed-rank test 통계분석 결과 95% 신뢰수준에서 통계적 유의성을 검정하였다(P -value<0.05). 통계패키지 프로그램은 SPSS(Version 18.0, PASW Statistics, USA)를 사용하여 통계분석을 실시하였다.

III. 연구 결과

1. 30개 후보시설군에 대한 라돈 측정 결과

Figure 3에서는 총 30곳의 기존 주택과 공공기관에서 E-PERM을 이용하여 측정한 라돈농도 결과를 나타내었다. 한 곳을 제외한 29곳 시설에서 기준치인 148 Bq/m³를 초과하였으며, 초과된 시설에서의 농도의 범위는 최소 48.1 Bq/m³에서 최대 1883.3 Bq/m³ 농도 수준을 나타내었다. 시설군별로 살펴보면 주택의 경우 초과율은 87%, 공공시설 72%로 주택의 초과율이 상대적으로 더 높은 것으로 나타났다.

2. 주택유형별 라돈 저감 시공 전·후 라돈 농도

1) 선정된 15개 시설군에 대한 특성

측정된 라돈 농도 결과 값을 반영하여 앞서 연구 방법에서 설명한 선정평가표에 의해 총점 순으로 10개의 주택과 5개의 공공기관을 후보시설로 선정하였다(선정점수 범위: 57-85점). 후보시설 중 총점이 더 높더라도 저감시설 설치를 원하지 않은 기존주택 7곳과 공공기관 1곳은 제외하였으며, 차점을 받은 시설을 선택하여 최종적으로 15개의 시설을 선정하였다(Table 1).

선정된 시설을 지역별로 살펴보면 전반적으로 라

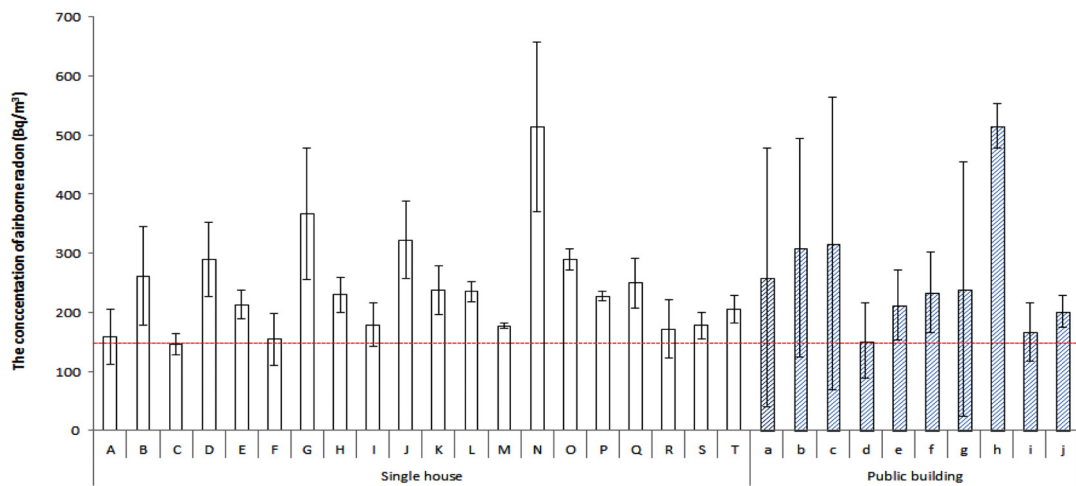


Figure 3. The mean concentration of airborne radon in 30 facilities including dwellings and public buildings. The dotted line indicates the recommendation limit of exposure to radon, 148 Bq/m³

Table 1. Characteristics of selected 15 buildings to be mitigated

ID	Location	Building materials	Year in construction	Use of groundwater	Rock type	Type of building
B	GW*	Red-colored brick, Cement block	1995	X	Granite	Single house
C	GW	Soil	1963	O	Granite	Single house
E	JB [†]	Soil	1959	X	Non granite	Single house
G	JB	Cement, Soil, Red-colored brick	1994	X	Non granite	Single house
H	DJ [‡]	Concrete	1997	X	Granite	Row house
J	CB [§]	Soil	1976	X	Granite	Single house
L	CN	Red-colored brick, Cement block	1996	O	Granite	Single house
N	GW	Red-colored brick, Soil, Cement block	1998	O	Granite	Single house
P	DG [¶]	Prefabricated panel, Concrete, Soil	1991	X	Non granite	Single house
Q	GB ^{**}	Red-colored brick, Cement block	1997	X	Non granite	Single house
a	CB	Cement	1976	X	Granite	Public building
b	CB	Cement	1969	X	Granite	Public building
f	GW	Cement	1984	X	Granite	Public building
g	CB	Cement	1997	X	Granite	Public building
h	GG ⁺⁺	Cement	1992	X	Non granite	Public building

*GW: Gangwon, [†]JB: Jeonbuk, [‡]DJ: Daejeon, [§]CB: Chungbuk, ^{||}CN: Chungnam, [¶]DG: Daegu, ^{**}GB: Gyeongbuk, ⁺⁺GG: Gyeonggi

돈 농도가 낮은 서울과 주요 수도권 지역을 제외한 강원, 충남·북, 대전, 경북, 대구 등 전국에 고루 분포되어 있으며, 상대적으로 강원, 충북지역의 시설이

많이 선정된 것으로 나타났다(Seo et al., 2012). 주택 10곳의 경우 단독주택이 주거형태의 90%를 차지하였으며, 건축연도는 대부분이 1998년 이전에 지어진

것으로, 통상 15-20년 이상 된 건물들이 주를 이루었다. 특히 흙으로 지어진 주택들은 1980년 이전에 건축된 것으로 나타났다. 건물 유형의 경우 대부분이 적벽돌, 시멘트 등을 이용하여 건축되었으나, 3가정의 경우 흙으로만 지어진 것으로 조사되었다. 또한 층수의 경우 대부분이 2층 이하의 건물이었다. 공공 시설은 3곳의 초등학교와 2곳의 면사무소가 선정되었으며, 대부분이 건축된 지 15년 이상 된 건물들로, 모두 시멘트를 사용한 건물이었다. 지하수 사용은 강원도 및 충남 일부 주택을 제외하곤 모두 사용 하지 않는 것으로 나타났다. 주변지형은 한국지질자원 연구원의 1:1,000,000 한국지질도(KIGAM, 1995)를 이용하여 주소지 등으로 확인한 결과 강원, 충청, 대전 지역에 있는 시설이 화강암 분포지역에 있는 것으로 조사되었다.

2) 선정된 15개 시설군에 대한 라돈 측정 결과

15개 시설에서의 라돈 저감시설 설치 전·후의 라돈 농도를 Table 2에 나타내었다. 후보선정을 위해

측정한 1차 측정결과에 비해 저감시설 설치 바로 전의 측정값이 약 3% 정도 낮은 것으로 나타났으나, 일부 시설의 경우 1차 때보다 오히려 라돈 농도가 다소 올라간 것을 확인 할 수 있었다.

저감시설을 설치 후 라돈 농도를 재 측정한 결과 설치 전보다 최소 약 48%에서 최대 90%까지 라돈 농도가 낮아진 것을 확인하였으며, 모든 시설에서 기준치 이하로 저감되었다. 특히 저감방법별 저감률을 살펴보면(Figure 4), 토양가스배기공법(58.7-90.4%), 외부공기유입법(48.4-78.4%), 틈새막음공법(<22%) 순으로 저감률이 우수한 것으로 나타났다. E-PERM과 RAD-7에 의한 측정값을 비교해보면 E-PERM으로 측정한 값의 평균이 RAD-7의 의해 측정한 값에 비해 다소 높은 것으로 나타났지만, 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다. 초등학교나 면사무소와 같은 공공기관의 경우 틈새막음법은 적용하지 않고 토양가스배기공법과 외부공기유입공법(창문형 및 벽체형 환기)만을 적용하였으며, 저감률 평균은 토양가스 배기법이 70.0%, 외부공기유입법이 69.0%로 주택

Table 2. Reduction rates of airborne radon by mitigation methods and two different methods for radon measurement(Unit: Bq/m³)

ID	1 st measurement (E-PERM)	2 nd measurement(E-PERM)				2 nd measurement(RAD-7)			Mitigation method
		Before mitigation	After mitigation	Reduction rate(%)	P-value	Before mitigation	After mitigation	Reduction rate(%)	
B	456.2 ± 83.3	543.6 ± 451.1	67.3 ± 44.3	87.6	0.028	234.2 ± 141.1	115.7 ± 68.4	50.6	ASD*(Under floor)
C	145.9 ± 18.1	191.6 ± 18.8	79.0 ± 37.9	58.7	0.043	121.8 ± 76.4	66.7 ± 42.0	45.2	ASD(Under heating floor)
E	212.0 ± 24.1	308.8 ± 75.7	141.1 ± 13.9	54.3	0.043	184.4 ± 106.5	59.7 ± 39.2	67.6	Active Ventilation (Wall-typed)
G	366.1 ± 111.5	237.2 ± 28.7	40.6 ± 7.1	82.9	0.043	105.1 ± 83.3	61.3 ± 42.5	41.7	ASD(Under heating floor)
H	229.5 ± 29.0	227.7 ± 57.2	105.4 ± 20.4	53.7	0.043	208.1 ± 121.0	96.9 ± 51.8	53.4	Active Ventilation (Wall-typed)
J	323.9 ± 64.7	251.8 ± 69.7	81.8 ± 45.4	67.5	0.043	176.4 ± 96.5	66.0 ± 41.8	62.6	ASD(Under heating floor)
L	240.3 ± 17.1	362.6 ± 192.3	57.6 ± 14.3	84.1	0.028	132.7 ± 80.7	47.8 ± 31.3	64.0	ASD(Under floor)
N	513.9 ± 144.1	399.0 ± 92.0	54.3 ± 36.3	86.4	0.043	222.8 ± 149.2	77.7 ± 57.1	65.1	ASD(Under heating floor)
P	227.3 ± 7.7	241.3 ± 73.3	124.6 ± 18.3	48.4	0.043	190.3 ± 120.9	71.6 ± 47.6	62.4	Active Ventilation (Wall-typed)
Q	238.3 ± 41.9	223.6 ± 67.1	21.5 ± 8.6	90.4	0.043	151.3 ± 71.4	67.4 ± 51.0	55.5	ASD(Under heating floor)
a	258.4 ± 218.5	236.1 ± 65.1	58.6 ± 25.1	75.2	0.018	208.8 ± 127.9	60.0 ± 31.1	71.3	Active Ventilation (Window-shaped)
b	308.0 ± 184.7	253.0 ± 53.6	99.9 ± 13.0	60.5	0.028	247.4 ± 116.9	119.3 ± 61.9	51.8	ASD(Under floor)
f	234.1 ± 68.2	198.6 ± 28.0	73.0 ± 24.1	63.2	0.018	277.8 ± 149.6	47.8 ± 25.8	82.8	Active Ventilation (Window-shaped)
g	239.9 ± 215.3	221.6 ± 38.2	64.1 ± 27.6	71.1	0.005	278.4 ± 163.4	84.9 ± 54.2	69.5	ASD(Under floor)
h	515.7 ± 37.7	477.8 ± 75.5	103.2 ± 17.6	78.4	0.005	179.1 ± 121.1	72.2 ± 43.2	59.7	ASD(Under floor)

*ASD: Active Soil Depressurization

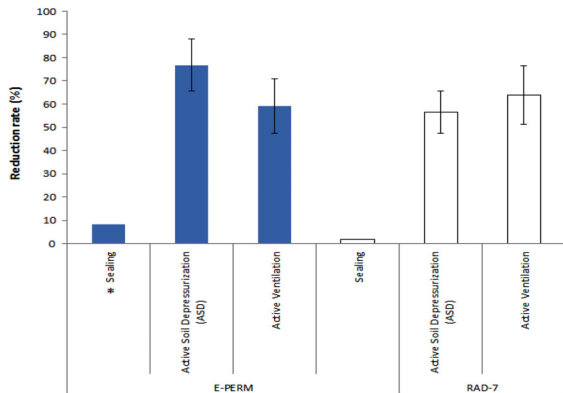


Figure 4. Different reduction rates by mitigation and measurement methods. Data for reduction rates of the sealing method were excerpted from the results of “Standard of radon analysis and mitigation for dwellings” performed by Korea Environment Corporation(KECO) in 2012

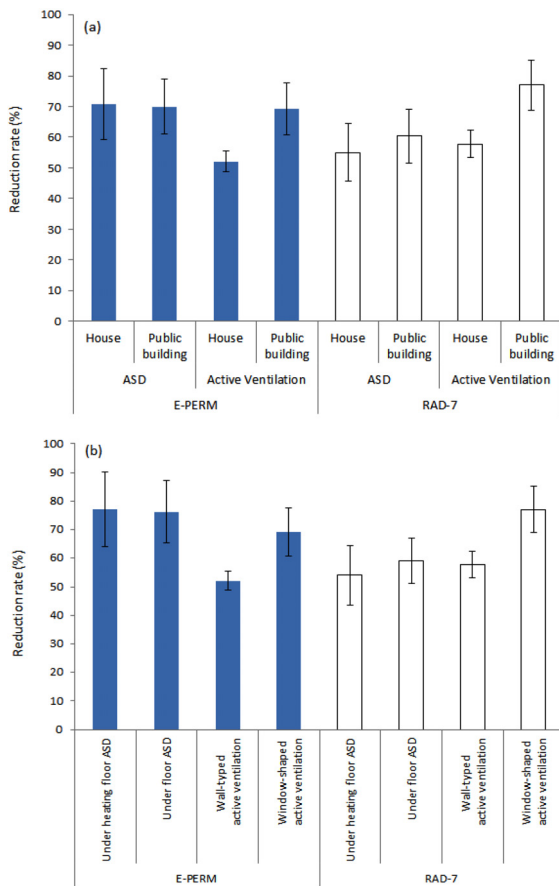


Figure 5. The comparisons of reduction rates; (a) by houses and public buildings; (b) by ventilation types condition of under floor

과 마찬가지로 보다 근소한 우위를 나타냈지만, 통계적 차이는 없는 것으로 나타났다($P > 0.05$).

Figure 5에서는 주택과 공공기관의 환기 및 지하배기 방식에 따른 라돈 농도 저감률을 나타내었다. 토양배기법의 경우 E-PERM과 RAD-7에 의한 측정값 모두에서 토양배기법의 경우 기존 주택과 공공기관에서의 저감률 차이를 보이지 않았지만, 외부공기유입법의 경우 저감률이 약 35%로 주택보다는 공공기관에서 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타났다 (Figure 5(a)). 배기 방식에 따른 저감률의 경우 구들(Under heating floor ASD) 및 지하배기(Under floor ASD) 방법에 따른 차이는 없는 것으로 나타났지만, 환기방식에 따른 저감률 비교에 있어서는 창문형 방식(Window-shaped active ventilation)이 벽체형 환기방식(Wall-typed active ventilation)에 비해서는 저감률이 약 23% 이상 우수한 것으로 나타났다.

IV. 고 찰

본 연구에서 라돈의 농도 수준은 수동식 측정기인 E-PERM과 능동식 측정기인 RAD-7과 다소 차이가 나는 것으로 나타났다. 한 주택에서 E-PERM을 사용한 모든 시료의 라돈 평균은 297.8 Bq/m^3 이었으며, RAD-7은 202.7 Bq/m^3 으로 약 30% 정도 능동식 측정기인 RAD-7이 낮게 검출되었다. 반면, RAD-7과 동일한 장소에 있었던 E-PERM 값만을 이용한 평균은 250.2 Bq/m^3 으로 RAD-7 값과 비교해 보면 여전히 약 20% 높게 측정되었지만, 전체 평균에 비해 약 10% 정도 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. Scarpitta의 연구에 의하면 통상 능동식 측정기가 수동식에 비해 10-15% 가량 낮게 검출되는 것으로 보고하고 있는데, 이는 입자를 측정하는 능동식 측정기에서 측정하는 입자에 부착된 라돈 자핵종의 농도가 낮아 발생하는 것으로 설명하고 있다(Scarpitta et al., 1996). 이에 본 연구에서 능동형 측정기를 통한 농도 차이(약 20%)도 이러한 이유로 볼 수 있을 것이다.

1차 측정의 노출 수준은 $300.6 \pm 113.5 \text{ Bq/m}^3$ 으로 저감시설 설치 전 노출 수준인 $291.6 \pm 106.6 \text{ Bq/m}^3$ 보다 미미하지만 높게 나타났다. 이는 라돈의 1차 측정 시기는 1월로 기온이 낮았으며, 이로 인해 대부분의 가정 및 시설에서 환기를 하지 않아 저감시설 설치 전

보다 다소 높게 측정된 것으로 여겨진다(Baysson et al., 2003; Im, 2004; Zhang et al., 2007).

라돈 저감 공법을 적용한 기존 가구 및 공공시설의 전, 후 라돈 농도의 저감률을 비교한 결과, 저감률의 평균은 70.8%였다. 건축 유형에 따른 저감 효과는 주택(단독, 연립)에서 71.4%였으며, 공공시설(면사무소, 분교)에서 69.7%로 평가되었다. 공법에 따른 저감률은 ASD(구들, 지하)와 외부공기유입공법(창문, 벽)이 각각 76.8%와 59.3%였다. 본 연구결과 건축유형별 저감률의 차이는 2% 미만의 범위로 근소하였으나, 저감공법별 저감률의 차이는 15% 이상으로 확인되었다. ASD와 외부공기유입공법의 저감률을 계산한 연구들에서 이들 공법 적용 시 50-99%의 저감 효과를 보이는 것으로 보고되어 본 연구에서의 저감 공법별 저감효과 역시 이와 유사한 결과 범위에 있는 것으로 보인다(USEPA, 1993b; BRE, 1998; USEPA, 2003; WHO, 2007). 다만, 기존 연구와 같이 저감률 평균이 90%를 보이지 않는 이유로, 저감 시공을 실시한 계절적 이유(여름과 겨울 등)와 외부공기유입법의 경우 기존 연구에서 사용된 방법과 본 연구에서 사용된 창문형과 벽체형 환기 방식의 차이에 기인한 것으로 추정 된다. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이 적용된 공법 모두 기준치 이하로 저감효과를 보이고 있어, 라돈 농도, 시설 현황 등에 따른 맞춤형 저감공법의 적용이 고려되어야 할 것이다.

환경부의 2010-2011년 자료에 따르면 실내공기질 관리법 권고기준인 148 Bq/m^3 을 초과한 비율은 단독주택 15.7%(산술평균, 98.6 Bq/m^3)와 연립 및 다세대주택 0.9%(58.3 Bq/m^3)이지만, 아파트는 초과한 가구가 없는 것으로 나타났다(MoE, 2010b). 이에 본 연구에서 아파트는 저감 시설에서 제외하고 단독주택이 9가구, 연립 및 다세대 1가구를 최종 저감 시설군으로 선정하였다. 하지만, 최근 석고보드 등의 일부 건축자재에서 라돈이 발생하는 것으로 보고되고 있는 것처럼 향후 아파트 등의 공동주택에 대한 좀 더 심도 깊은 라돈농도 조사 및 저감시설 설치효과 평가 등이 필요할 것으로 사료된다.

환기방식에 따른 저감률 비교에 있어서는 창문형 환기가 벽체형 환기에 비해 약 0.3배 정도 라돈 저감률이 더 좋은 것으로 나타났다. 이는 창문형과 벽체형 시설 자체의 공기교환률, 공기주입장치의 가동효율 등의 차

이에 기인된 것으로 보인다. 다만, 벽체형 환기 방식의 경우, 벽을 뚫고 장비를 설치하다보니 기존의 창문과 연계되어 설치된 창문형 환기에 비해 실내 공기 환기가 충분히 이루어지지 않았을 가능성도 배제 할 수 없을 듯하다. 설치 및 기기비용 등을 고려하더라도 창문형 환기방식이 라돈 저감에 다소 유리할 것으로 사료되나, 본 연구에서 벽체 및 창문형 환기방식을 사용한 가구 수가 많지 않아 저감효과 해석에는 좀 더 신중함이 필요 할 것으로 사료된다. 아울러 ASD는 기존 주택과 공공기관에서 저감률의 차이가 없었으나, 외부공기유입법의 경우에는 공공기관에서 저감효과가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 기존 주택과 공공기관의 차이가 아닌 창문형 환기만 사용한 공공기관과 벽체형 환기만 사용한 기존주택의 차이, 즉 환기방식의 차이에 기인한 것으로 여겨진다.

미국, 캐나다, 스웨덴, 노르웨이 등의 북미와 유럽 등지에서는 이미 오래 전부터 라돈의 건강상 위험성을 인지하여, 실내 라돈 농도 저감을 위한 공법과 가이드라인 등을 개발하여 보급해오고 있다(USEPA, 1993b; Henschel, 1995; Field et al., 2000; ASTM, 2001; WHO, 2007). 특히, 2009년 WHO에서 발표된 라돈 관련 보고서에 따르면 라돈 노출과 관련된 위험성과 저감공법 등을 소개하고 라돈에 대한 많은 정보를 정리하여 배포해오고 있는 실정이다(WHO, 2009). 국내에서는 2010-2012년 국립환경과학원에서 실시한 전국 주택 라돈 조사를 통해 그 농도를 측정해 오고 있다. 이 결과에 따르면, 전국 라돈 농도의 평균 범위는 $50.5\text{-}98.6 \text{ Bq/m}^3$ 으로 WHO의 라돈 노출 권고기준인 148 Bq/m^3 을 초과하지는 않지만, 전 세계 평균인 39.0 Bq/m^3 에 비해 1.3-2.5배 정도 높은 수치이며, 조사된 40여 개국 중 미국, 캐나다, 일본, 중국 보다도 높은 20위 정도 수준으로 그 농도가 결코 낮지 않음을 보여주고 있다(UNSCEAR, 2000). 하지만, 라돈 농도 모니터링 등의 관리 부분은 라돈 농도 수준에 비해 아직 시작 단계이며, 더욱이 국내 주택 현황에 맞춘 라돈 저감공법 개발은 거의 이루어지지 않은 실정이다. 이에 본 연구는 국내에서 처음으로 라돈 저감공법의 적용 및 국내 주택과 공공시설 건물 유형에 따른 기존 공법을 국내 현황에 맞게끔 수정하여 제시했다는 점에서, 향후 라돈 저감공법 개발 등에 있어서 중요한 기초자료로 활용 될 수 있을 것

으로 여겨진다.

V. 결 론

본 연구에서는 기존 주택 및 공공기관 건물에서의 라돈 저감공법의 효과평가를 수행하였으며, 틸새막음 공법, 외부공기유입공법, 토양가스배기공법 등의 공법을 적용하였다. 공법에 따른 라돈 농도 저감률은 틸새막음공법 22% 미만, 외부공기유입공법 48.4-78.4%, 토양가스배기공법 58.7-90.4%의 저감률을 나타냈다.

본 결과와 같이, 라돈 저감시설의 경우 기존 외국의 자료와 유사하게 토양가스배기공법의 저감효율이 가장 좋은 것으로 확인되었다. 더욱이 토양가스배기공법의 경우 공기를 배기 할 수 있는 작은 지하 공간만 있다면, 상대적으로 다른 공법에 비해 손쉽게 높은 라돈 저감효과를 기대 할 수 있을 것으로 보인다. 다만, 본 연구에서는 라돈 저감 공법별 설치 시설 수가 다소 적은 면이 있어, 평가 및 적용의 효과에 있어서는 보다 신중한 고려가 필요하며, 향후 연구에 있어서는 국내 실정에 맞는 라돈 저감공법 개발 및 효과 평가가 더불어 수행되어야 할 것이다. 아울러 라돈 저감시공의 경우 설치비 및 운영비 등의 경제성이 고려되어야 하므로, 라돈 고농도 지역에서 건물을 신축할 경우에는 상황에 맞는 라돈 저감공법을 선택하고, 신축과 동시에 저감공법을 설치하는 등의 방법이 정책적으로 수반되어야 보다 효율적인 라돈 저감이 이루어질 것으로 사료된다.

감사의 말씀

본 연구는 환경부와 용역 사업의(건물 유형별 라돈 저감 시공 표준 매뉴얼 개발, 2013) 일환으로 수행된 내용입니다. 환경부와 측정, 저감시설 설치 등에 도움을 주신 집 소유자 분들과 관계자 분들에게 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 아울러 본 연구 사업에 기술적인 도움을 많이 준 William Angel 교수에게도 감사의 말씀을 전해 드립니다.

References

American Society for Testing Materials International

(ASTM). Standard Practice for Installing Radon Mitigation in Existing Low-Rise Residential Buildings. E2121-01 2001

Baysson H, Zhang Z, Billon S, Laurier D, Rogel A et al. Seasonal correction factors for estimating radon exposure in dwellings in France. *Radiation protection dosimetry* 2003;104(3):245-252

Building Research Establishment(BRE). Guide to Radon Remedial Measures in Existing Dwellings: Dwellings with Cellars and Basements. BRE Watford 1998

Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Bmj* 2005;330(7485):223-227

Darby S, Hill D, Deo H, Auvinen A, Barros-Dios JM et al. Residential radon and lung Cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand J Work Environ Health* 2006;32(Suppl 1):1-84

Field RW, Steck DJ, Smith BJ, Brus CP, Fisher EL et al. Residential radon gas exposure and lung cancer the Iowa radon lung cancer study. *Am J Epidemiol* 2000;151(11):1091-1102

Henschel DB. Re-entrainment and dispersion of exhausts from indoor radon reduction systems: Analysis of tracer gas data. *Indoor Air* 1995;5(4):270-284

Im IC. Radon Concentration Measurement at General House in Pusan area. *Korean Society of Radiological Science* 2004;27(2):29-33

Klotz J. Small sample power and efficiency for the one sample Wilcoxon and normal scores tests. *Ann Math Statist* 1963;34(2):624-632

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM). Korean geologic map(1:1,000,000). 1995

Korea Environment Corporation(KECO). Standard of radon analysis and mitigation for dwellings. 2012

Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS et al. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology* 2005;16(2):137-145

Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS et al. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J Toxicol Environ Health* 2006;69(7-8):533-597

Ministry of Environment of Republic of Korea(MoE). Guideline of Indoor Radon Mitigation. 2010a

Ministry of Environment of Republic of Korea(MoE).

- Establishment of strategy for managing exposure to radon. 2010b
- Ministry of Environment of Republic of Korea(MoE). Development of Radon Mitigation Standard Manual by Building Types. 2013
- Scarpitta SC, Tu KW, Fisenne IM, Cavallo A, Perry P. Intercomparison of active, passive and continuous instruments for radon and radon progeny measurements in the EML chamber and test facility. USDOE Report EML-585, 1996.
- Seo SY, Yoo JH, Kim HD, Lee KS, Oh SJ et al. Nationwide survey(2011-2012) of indoor radon at home in Korea. National Institute of Environmental Research; Indoor Environment and Noise Research Division, Environmental Infrastructure Research Department. 2012
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation(UNSCEAR) Report - Sources and Effects of Ionizing Radiation. 2000
- United States Environmental Protection Agency(USEPA). Consumer's Guide to Radon Reduction. USEPA Publication 402-K-03-002, Washington D.C. 2003
- United States Environmental Protection Agency(USEPA). Map of Radon Zones. USEPA Publication 402-F-93-013, Washington D.C. 1993a
- United States Environmental Protection Agency(USEPA). Radon Reduction Techniques for Existing Detached Houses: Technical Guidance(Third Edition) for Active Soil Depressurization. USEPA Publication 625-R-93-011, Washington D.C. 1993b
- World Health Organization(WHO). International Radon Project Survey on Radon Guidelines, Programmes and Activities. WHO, Geneva. 2007
- World Health Organization(WHO). Handbook on Indoor Radon. 2009
- Zhang Z, Smith B, Steck DJ, Guo Q, Field RW. Variation in Yearly Residential Radon Concentrations in the Upper Midwest. Health physics 2007;93(4):288-297