

계절적 라돈농도 변화 및 토양기원 실내라돈과 토양내 라돈농도의 상관성 분석 -단독주택 사례연구-

조주현 · 김영희*

호서대학교 벤처대학원 융합공학과

Seasonal Radon Concentration and Correlation Analysis of Indoor Radon Originated from Soil and Soil Radon at Detached House

Ju-Hyun Cho · Younghee Kim*

Department of Convergence Technology, Graduate School of Venture, Hoseo University

ABSTRACT

In this study, the variation of indoor and soil radon concentrations were measured at a test bed (detached house), and correlation analysis was performed using linear regression. The results showed that the average concentration of indoor radon was increased by about 20% when the heater was operated in the house, but it was decreased by 15% when the ventilation system was on. In the changes of seasonal radon concentrations, soil and indoor radon concentrations in winter were higher than in summer. Statistical analysis showed a weak correlation between the soil radon and indoor radon, but the correlation ($R=0.852$, $R^2=0.726$) was relatively high at exhaust condition in the winter. It is difficult to extrapolate the results of the study to the general cases because radon distribution is highly site-specific, but the result of this study could be used as a reference for radon management and reduction of detached house in the future investigations.

Key words : Detached house, Indoor radon, Soil radon, Correlation analysis

1. 서 론

도시화에 따라 인구밀도가 높아지고 건물, 지하철 등 실내에서 생활하는 시간이 길어져 실내환경오염물질 중 방사성물질인 라돈에 대한 국민적인 관심이 증가하고 있다.

라돈(Rn)은 토양, 암석 등에 포함된 우라늄의 붕괴 과정을 통해 생성되는 천연 방사성 기체로 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구센터(IARC: International Agency of Research on Cancer)에서는 라돈을 발암물질로 규정하고 있으며 사람이 장기간 노출될 경우 폐암 등 인체상의 심각한 위협이 되는 것으로 보고하고 있다(WHO, 2016).

라돈의 위해도농도는 농도, 노출기간, 실내 환기 등에 영향을 받을 수 있는데(Jung et al., 2016), 특히 겨울철에 추운 날씨로 인해 환기를 시키지 않는 실내 공간에서는 장

기간 호흡을 통한 인체노출의 우려가 높을 수 있다.

실내의 경우 라돈의 전체 인체노출경로 중 약 90%가 실내공기의 호흡이고 물의 섭취 등은 미미한 수준으로 보고된바 있다(KECO, 2016).

이러한 라돈이 실내로 유입되는 경우는 다양하지만 건축자재에 포함되는 일부 경우를 제외하고는 대부분 토양이나 암석에서 기인하여 건물의 바닥 슬라브의 균열 등을 통하여 건물 내·외부의 압력과 온도차에 의한 확산 및 대류 과정에 의하여 실내 환경으로 유입되고 이후 흡착되거나 침적되어 실내에 축적된다고 알려져 있다(Hovav et al., 2013; MOE, 2010a).

우리나라는 라돈의 위해성을 인식하여 환경부에서 2007년 6월 「실내 라돈관리 종합대책」을 수립하였고, 2008년부터 공공건물을 시작으로 전국 실내라돈 실태조사를

*Corresponding author : yhkim514@hoseo.edu

Received : 2017. 9. 7 Reviewed : 2017. 9. 30 Accepted : 2017. 10. 23

Discussion until : 2017. 12. 31

본격적으로 추진하였다(MOE, 2010b). 최근에는 토양 중 자연방사성물질 분포실태조사를 추진하고 있지만, 현재까지 토양 중 라돈의 실태자료 등은 미흡한 실정이다.

최근 환경부 발표에 의하면 2015~2016년 겨울철 전국 주택의 실내 라돈 평균 농도는 95.4 Bq/m³으로 다중이용 시설 권고기준(148 Bq/m³(벵크렐 · 방사성물질 국제표준단위)) 이내였지만 지역별로 약간의 편차가 있었다.

또한 국내 일부지역의 토양 중 라돈의 유효등가선량은 국제방사선방호위원회(ICRP: International Commission on Radiological Protection)가 제시한 세계 평균(0.06 mSv/y) 보다 약 2~4배 높은 수준을 보였다고 언론에 보도된바 있다.

라돈의 농도 측정을 위해 미국을 제외한 대부분의 국가들은 방사선 양의 국제단위인 벵크렐(Bq/m³)을 주로 단위로 사용하고 있고, 인체에 방사선이 노출되었을 때의 손상 정도를 나타내는 인체피폭선량은 시버트(Sv) 단위를 이용하고 있다. 세계보건기구(WHO) 등에서 연간 방사선 피폭선량 기준치를 1밀리시버트(mSv)로 권고하고 있다(KECO, 2016).

국내에서는 주로 실내환경에서의 라돈의 농도변화 및 라돈농도 경감에 대한 연구가 주로 수행되었고(Park and Lee., 2014; Park et al., 2014; Choi et al., 2016), 최근에 공공건축물을 대상으로 계절별 실내라돈농도 분포조사 연구를 수행한바 있으나(Jung et al., 2016), 실제 Test bed를 구축하여 단독주택의 토양 중 라돈과 실내 라돈의 농도를 측정하고 이를 바탕으로 상관성 분석을 수행한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 Test bed 구축을 통한 사례연구를 중심으로 단독주택에서 발생 가능한 내부 환경변화를 모사하고, 그에 따른 토양기원 실내라돈의 농도변화를 측정하여 토양내 라돈과 실내 라돈과의 상관성 분석을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. Test Bed 제작 및 설치

단독주택에서의 토양 기원 라돈의 실내 유입 상황을 모사하기 위해 국내 단독주택 형태와 유사한 Test bed를 경기 김포 지역에 설치하였다. 기초 조사를 통해 해당 지역의 토양기원 라돈의 발생을 확인한 바 있었다. Test bed는 토양에서 발생된 라돈가스의 흐름이 주변건물에 의해 영향을 받지 않도록 반경 30 m 이내에 다른 건물이 없는 곳을 선정하였으며, 일반주택에서는 바닥과 모서리 이음매 등의 틈새 또는 바닥재의 노후화에 따른 균열 등이 실내유입원이 되나, Test bed는 기존 일반주택의 노후화 정도를 반영하는데 어려움이 있어 바닥부분에 별도의 마감재를 시공하지 않고 기초부분을 자갈과 모래로 충전하였고 일반주택 주변의 토양보다 통기성을 더 높게 유지하여 실제환경과 유사한 실험환경을 구축하였다. Fig. 1에 Test bed의 모식도를 나타내었다.

Test bed의 규격은 가로 1.9 m, 세로 1.9 m, 높이 2.9 m로 제작하였다. 재질은 샌드위치 패널이며 단열효과를 주기 위해 40 mm의 우레탄폼을 단열재로 사용하였다.

일반 단독주택과 유사한 형태로 제작하기 위해 폭 1.0 m, 높이 0.8 m의 크기로 창호를 만들었으며, 출입문의

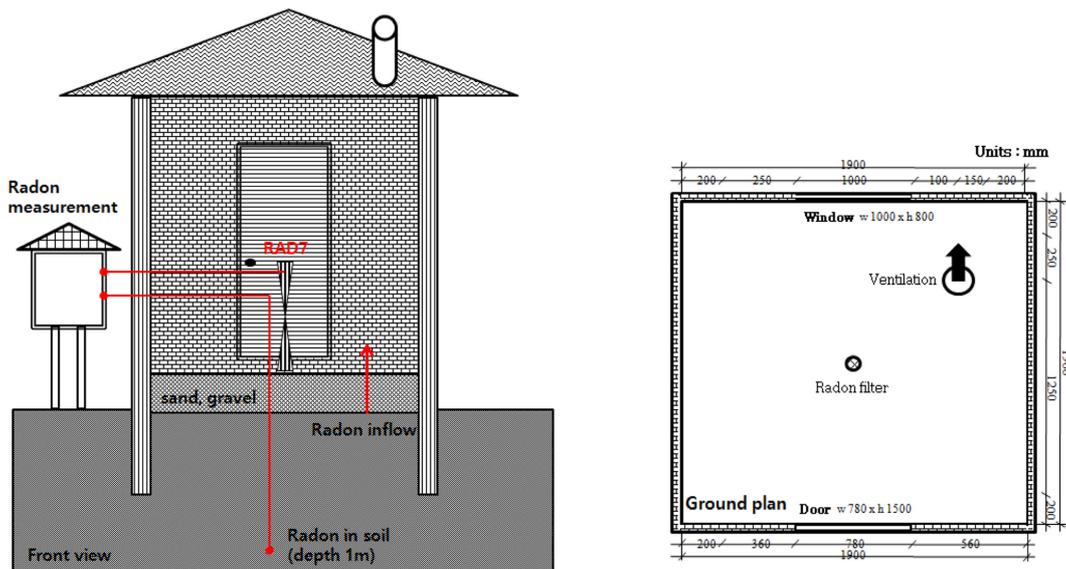


Fig. 1. Schematic diagram of Test bed in this study.

Table 1. Experimental conditions in this study

Exp.No.	Season	Duration	Heating system	Temp.(Avg.)		Ventilation condition
				Indoor	Outdoor	
Exp.1	winter (Dec.)	1week	off	5 ± 1°C	3 ± 1°C	Close
Exp.2	winter (Dec.)	1week	on	24 ± 1°C	1 ± 1°C	Close
Exp.3	winter (Dec.)	1week	on	24 ± 1°C	5 ± 1°C	Open
Exp.4	summer (Jul.)	1week	off	28 ± 1°C	28 ± 1°C	Close

크기는 폭 0.78 m, 높이 1.5 m의 크기로 제작하였다. 창호와 출입문은 마주보는 형태로 제작하였다.

2.2. 실험조건

본 연구의 총 연구기간은 2016년 12월부터 2017년 7월까지로서 단독주택의 내부 환경변화에 의한 라돈농도 변화를 확인하기 위해 아래와 같이 4개 실험군을 구성하였다.

세부적인 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

실험을 위한 라돈 농도의 측정기간은 일주일로 동일하게 하였고, 각 실험군에 대해 온도, 습도 등에 의한 외부적인 영향을 최소화하기 위하여 Test bed 내부 등은 최대한 통제된 환경을 유지하였다.

겨울철 난방기 가동유무에 따른 실내라돈 농도의 변화 영향을 확인하기 위하여 동일조건에서 난방기를 미가동(Exp.1)과 가동(Exp.2)으로 달리하여 비교하였고, 건물 환기여부에 의한 실내라돈 농도의 변화 영향을 확인하기 위하여 밀폐(Exp.2) 및 배기(Exp.3) 조건을 달리하여 실험을 진행하였다.

계절별 라돈농도의 경향을 추정하기 위하여 전체 연구기간 중 겨울(12월, Exp.1)과 여름(7월, Exp.4)에 Test bed 하부 토양 및 실내라돈농도를 각각 측정하여 그 결과를 분석하였고, 미측정 기간에는 시설 관리, 측정기 검보정 등을 진행하였다.

2.3. 라돈 농도 측정 방법 및 라돈의 상관성 분석

Test bed 실내의 라돈 측정은 실내공기질 공정시험기준(환경부 고시 제2010-24호)의 실내 공기 중 라돈 연속측정방법(ES 02901.1)에 따라 바닥면에서 1.2 m 이상의 높이에서 그리고 벽면으로부터는 1 m 이상 떨어진 곳에서 설치하여 측정하였다. 한편, 토양 중 라돈은 지면에 코어를 뚫고 수직으로 1 m 아래 지점의 농도를 측정하였다.

라돈측정을 위한 Durrige사의 RAD7은 여과지를 통하여 측정용기로 유입된 공기 중 라돈 및 라돈붕괴생성물이 붕괴할 때 방출하는 알파 입자를 실리콘 반도체 검출기를

이용하여 계수하는 측정기로서, 토양 및 실내 라돈농도는 1시간 단위로 연속적으로 측정하였다. 또한 Testo 174H를 이용하여 실내·외 온도를 연속적으로 측정하여 기록하였다. 토양으로부터 주택내로 유입되는 라돈에 대한 기상 영향을 고려하기 위해 인근 기상관측소의 기상관측자료를 사용하였다.

본 연구에서 측정한 토양라돈과 실내라돈 농도의 평균값 자료를 이용하여 선형회귀분석을 통해 상관성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 난방기 가동여부에 따른 실내 라돈 농도 변화

겨울철 난방기 가동여부에 의한 실내라돈 농도의 변화 영향을 확인하기 위하여 미가동(Exp.1)과 가동(Exp.2)에서의 실험결과를 Fig. 2에 나타내었다.

실험결과 Test bed 토양라돈의 평균농도는 난방기 미가동시 약 1,873 ± 691.8 Bq/m³, 가동조건 Exp.2에서 약 1,808 ± 663.5 Bq/m³ 범위를 보여 난방기 가동 여부에 상관없이 유사한 수준으로 나타났다. 반면에 Test bed내 실내라돈의 평균농도는 Exp.1에서 약 416 ± 219.6 Bq/m³, Exp.2에서 약 524 ± 142.8 Bq/m³ 범위를 보여, 주택내부의 난방기 가동으로 인해 실내라돈 평균농도가 약 20% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 난방기 가동에 의해 Test bed내 실내온도가 증가하여 실내공기의 상층부로의 확산이 일어나 실내라돈의 이동이 원활해졌기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 2에서 토양라돈농도는 난방기 가동여부에 상관없이 일부 구간에서 약간의 변동은 있으나 대체적으로 평균농도(약 1,800~1,900 Bq/m³) 범위에서 유지되는 경향을 보였다. 실내라돈농도는 난방기를 가동한 Exp.2에서 상대적으로 라돈의 변화폭이 적고 지속적으로 유지되는 경향을 보인 반면에 난방기를 가동하지 않은 Exp.1에서는 상대적으로 시간에 따른 실내라돈 농도의 변화가 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 난방기 가동에 의한 실내 온도의 증

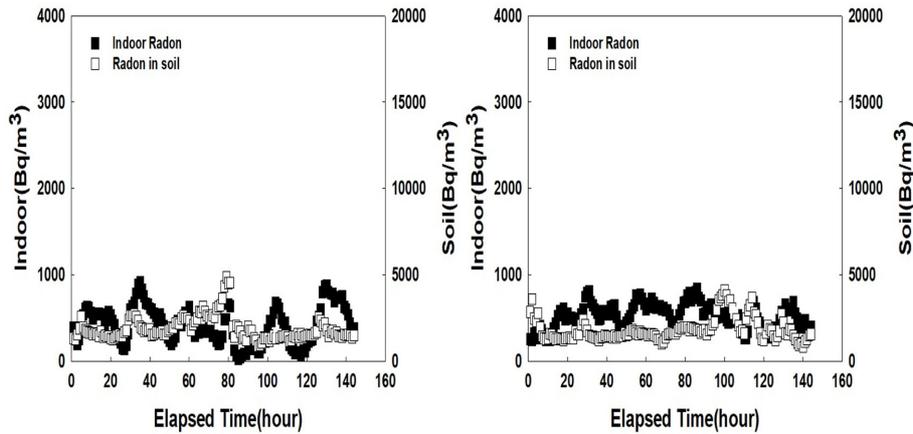


Fig. 2. Radon conc. changes by heating system (left: off, right: on).

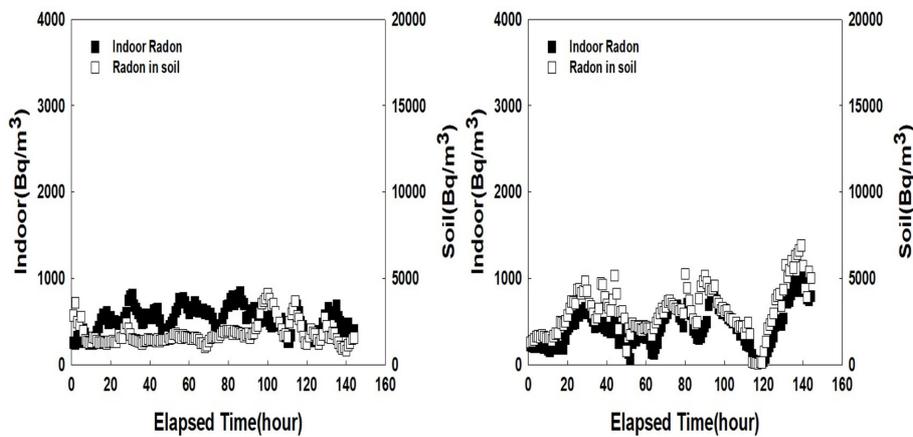


Fig. 3. Radon conc. changes by ventilation condition (left: close, right: open).

가 및 그에 따른 실내·외 온도의 차이가 발생하여 실내 공기의 흐름 및 내부 압력 등 변화가 생겼기 때문인 것으로 추정된다. 선행연구에서도 온도, 압력 등 조건과 실내 라돈농도와 상관관계가 있는 것으로 보고한바 있다 (Kang, 2007).

일반적으로 주택에서는 겨울철 추운 날씨 때문에 대부분 난방기를 가동하게 되고 실내는 더욱 밀폐되는 환경이 유지될 수 있으므로, 겨울철 실내라돈농도 저감을 위해서는 난방을 가동하는 경우에는 주기적으로 창문을 여는 등의 충분한 환기가 필요할 것이다.

3.2. 환기여부에 따른 실내 라돈 농도 변화

겨울철 건물 환기여부에 의한 실내라돈 농도의 변화 영향을 확인하기 위하여 밀폐조건(Exp.2)과 배기조건(Exp.3)에서의 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Test bed내 실내라돈의 평균농도는 밀폐조건(Exp.2)에서

약 $524 \pm 142.8 \text{ Bq/m}^3$, 배기조건(Exp.3)에서 약 $437 \pm 229.1 \text{ Bq/m}^3$ 의 범위를 보여, 주택내부의 환기로 인한 실내라돈의 저감효과는 약 15% 정도인 것으로 나타났다.

본 연구에서 Test bed의 전체면적 대비 환기창의 비율은 0.22로서 일반주택에 비해 창면적비가 약간 큰 경향은 있으나, 실제 주택 건설시 적용되는 비율(20분의 1이상) 및 에너지 절약형 친환경주택의 비율(0.2~0.45 이내)은 충족한다. 따라서 본 연구에서의 환기에 의한 실내라돈 농도에 큰 영향은 없을 것으로 판단된다. 라돈농도의 측정 기간이 짧고 실험조건, 기상 등에 따라 결과의 차이가 있을 수 있어 본 연구결과를 일반화하기에는 한계가 있으나 주택내부의 굴뚝에 의한 배기가 실내라돈 농도의 저감에 일부 효과는 있는 것으로 보인다.

선행연구에서도 단독주택의 경우 주택내부의 환기여부가 라돈농도와 상관관계가 높은 것으로 보고하였다(Lee et al., 2007). 다만 굴뚝에 의한 배기에 의한 효과는 미미하

여 겨울철 라돈농도 저감을 위해서는 주기적으로 창문을 여는 등의 충분한 환기가 필요할 것이다.

Fig. 3에서 밀폐조건(Exp.2)에서의 실내라돈농도의 변화 경향을 보면 상대적으로 실내로 유입된 라돈의 변화폭이 적고 농도가 아주 낮은 수준으로까지는 떨어지지 않는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 밀폐조건하의 실내 통풍력의 감소로 공기 순환 및 배기가 잘 되지 않았기 때문인 것으로 보인다. 반면에 배기조건(Exp.3)에서는 시간에 따른 토양 및 실내라돈의 농도가 비례적으로 급격하게 증가하다가, 이후 불검출 수준까지 감소되는 경향을 볼 수 있었는데, 이는 연돌효과에 의한 실내 통풍력의 증가로 인해 토양에서 발생한 라돈가스가 투수성이 높은 Test bed하부를 통해 더 많이 실내로 유입된 것으로 보인다(Fig. 3).

향후 단독주택 건축 시 하부 바닥 재질, 최적의 환기를 위한 환기구 위치 등 선정을 위한 고려가 필요할 것이다.

3.3. 계절별 라돈농도 변화

본 연구에서 분석한 토양 및 실내라돈 농도를 Table 2에 정리하였다. 계절별 라돈농도의 변화 경향을 추정하기 위하여 전체 연구기간 중 겨울(Exp.1), 여름(Exp.4)에 동일한 조건에서 측정된 실험결과를 비교하였다.

본 연구에서 계절별 토양 내 라돈의 평균농도는 각각 $1,873 \pm 691.8 \text{ Bq/m}^3$ (겨울), $1,104 \pm 183 \text{ Bq/m}^3$ (여름)로 여름보다는 겨울에 높게 나타났다. 이는 토양내 라돈농도는 토양 내·외부의 공기순환, 강우 등에 의한 라돈 발산율에 의해 영향을 받을 수 있는데(Moon et al., 2009), 여름철의 경우 토양의 온도보다 대기의 기온이 높아 토양층 내부로 외부공기의 순환이 원활하게 일어나지 않아 토양내 라돈농도가 높아질 수 있으나, 실험초기의 강수의 영향으로 인해 토양 공극이 포화되고 하부 지하수로 이동하여 일시적으로 토양내 라돈농도가 낮아진 것으로 추정된다.

반면에 겨울철은 토양의 온도가 대기의 온도보다 높기 때문에 공기 밀도차이에 의해 외부의 공기가 토양으로 유입되어 토양 내 라돈 농도가 낮아질 수 있지만 연구기간 중 최저기온이 영하로 떨어진바 있어 토양의 결빙으로 인

한 덮개효과로 인해 토양내 라돈농도가 상대적으로 높은 것으로 보인다. 선행연구에서도 수도권은 여름철에 비해 겨울철의 라돈 농도가 더욱 높게 나타났다고 보고된바 있다(Je et al., 2002).

한편 실내라돈농도는 각각 $416 \pm 219.6 \text{ Bq/m}^3$ (겨울), $5.6 \pm 2.9 \text{ Bq/m}^3$ (여름)으로 겨울의 실내라돈농도가 여름에 비해 약 80배 정도 높게 나타났는데, 이는 Test bed의 실내온도가 최저 영하까지 떨어져 토양 내·외부 온도 차이가 많고 토양의 결빙으로 인한 덮개효과가 발생하여 토양내 라돈이 다른 경로를 통해 토양외부로 발산되지 못하여 Test bed 하부를 통해 실내로 유입되었기 때문인 것으로 추정된다.

본 연구결과는 Test bed 구축을 통해 수행되어 실제 단독주택의 환경을 모두 반영하기에는 한계가 있어 연구 결과를 일반화할 수는 없을 것이다.

3.4. 실내 라돈과 토양 라돈 농도의 상관성 분석

단독주택에서 발생하는 실내 라돈과 토양 라돈농도와 상관성을 추정하기 위하여 실험을 통해 측정된 라돈 평균 농도값을 활용하여 상관성 분석을 수행하였다.

Table 2에 본 연구에서 분석한 실내라돈과 토양라돈의 평균농도 및 상관관계를 나타내었다. 실험결과 밀폐조건인 실험군에서는 다른 조건에 상관없이 실내라돈과 토양 라돈의 상관성이 없거나 낮은 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 토양내 존재하는 라돈은 가스형태로 실내로 유입되게 되는데 밀폐조건에서는 주택의 형태 및 실내·외 온도, 습도 등의 조건들과 토양의 물리화학적 특성 등 다양한 요인에 의해 토양가스의 실내유입이 영향을 받기 때문인 것으로 추정된다. 선행연구에서도 토양기원 라돈의 실내유입은 강우, 토양의 동결, 실내·외 온도차, 기압상승 등과 관계가 있으며, 토양 중 수분 함유량과는 음(-)의 상관관계가 있는 것으로 보고되고 있다[Kang, 2007].

Fig. 4에 환기여부를 제외한 동일한 조건인 Exp.2와 Exp.3에서의 실내라돈 농도와 토양내 라돈의 상관성 분석 결과를 비교하였다. 배기조건인 Exp.3의 경우 상관계수

Table 2. Radon concentration and correlation in this study(Units : Bq/m³)

Contents		Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4
Average conc. of soil radon		$1,873 \pm 691.8$ (n=144)	$1,808 \pm 663.5$ (n=144)	$3,078 \pm 1,411.2$ (n=144)	$1,104 \pm 183$ (n=144)
Average conc. of indoor radon		416 ± 219.6 (n=144)	524 ± 142.8 (n=144)	437 ± 229.1 (n=144)	5.6 ± 2.9 (n=144)
Coefficient of correlation	R	0.16	0.0274	0.852	0.09
Coefficient of determination	R ²	0.025	0.00075	0.726	0.00867

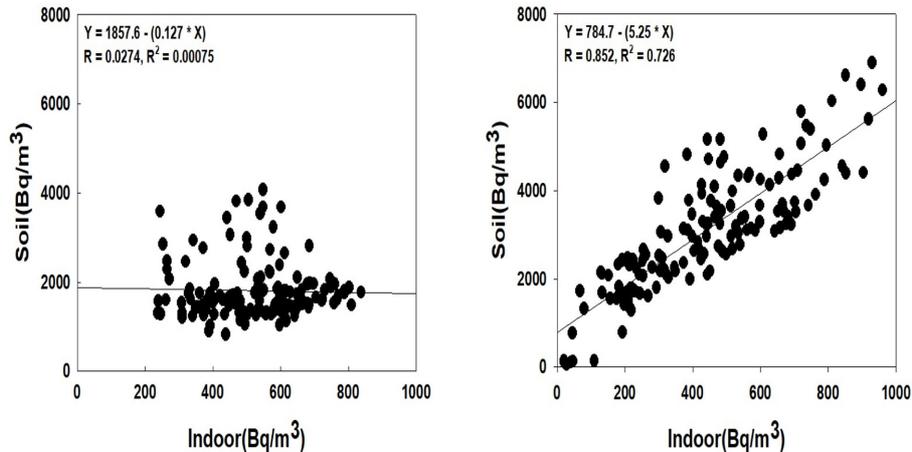


Fig. 4. Relationship between soil and indoor radon (left: Exp.2, right: Exp.3).

$R=0.852$, 결정계수 $R^2=0.726$ 으로 상관성이 높은 것으로 나왔는데, 이는 연돌효과에 의한 실내 통풍력의 증가로 실내에 음압이 형성됨에 따라 토양에서 발생된 라돈가스가 실내에 더 많이 유입된 결과로 해석할 수 있다. 반면에 밀폐조건인 Exp.2의 경우 상관계수 $R=0.0274$, 결정계수 $R^2=0.00075$ 으로 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 선행연구에서도 일반적으로 밀폐조건보다 자연배기조건에서 토양내 라돈농도와 실내라돈 농도의 상관관계가 뚜렷이 나타난다고 보고된 바 있다(Lee et al, 2007).

실내라돈과 토양라돈과의 정확한 상관성 분석을 위해서는 향후 추가적인 연구를 통해 종합적인 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 단독주택과 유사한 Test bed 구축을 통해 토양기원 실내라돈 측정 및 토양라돈 농도와의 상관성 분석에 관한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

겨울철 난방기 가동여부에 의한 실내라돈 농도의 변화 영향을 확인한 결과, Test bed내 실내라돈의 평균농도는 Exp.1에서 약 $416 \pm 219.6 \text{ Bq/m}^3$, Exp.2에서 약 $524 \pm 142.8 \text{ Bq/m}^3$ 범위를 보여, 주택내부의 난방기 가동으로 인해 실내라돈 평균농도가 약 20% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 난방기 가동에 의한 실내 온도의 증가 및 그에 따른 실내·외 온도, 압력의 차이에 의한 것으로 추정된다.

겨울철 환기여부에 따른 영향을 보면 Test bed내 실내라돈의 평균농도는 밀폐조건(Exp.2)에서 약 $524 \pm 142.8 \text{ Bq/m}^3$, 배기조건(Exp.3)에서 약 $437 \pm 229.1 \text{ Bq/m}^3$ 의 범

위를 보여, 주택내부의 환기로 인한 실내라돈의 저감효과는 약 15% 정도인 것으로 나타났다. 주택내부의 굴뚝에 의한 배기가 실내라돈 농도의 저감에 일부 효과는 있었으나 그 효과는 미미하였다.

계절별 실내라돈 농도는 겨울, 여름에서 각각 $416 \pm 219.6 \text{ Bq/m}^3$ (Exp.1), $5.6 \pm 2.9 \text{ Bq/m}^3$ (Exp.4)으로 겨울이 여름에 비해 약 80배 정도 높게 나타났는데, 이는 토양의 결빙으로 인한 덮개효과가 발생하여 토양내 라돈이 다른 경로를 통해 토양외부로 발산되지 못하여 Test bed 하부를 통해 실내로 유입되었기 때문인 것으로 추정된다.

실내라돈 농도와 토양내 라돈농도의 상관성 분석 결과, 밀폐조건에서 실험한 실험군에서는 통계적으로 유의미한 결과를 확인할 수 없었으나, 배기조건(Exp.3)인 경우 상관성($R^2=0.726$)이 높은 것으로 나타났다.

본 연구결과를 종합해보면, 일반적으로 주택에서는 겨울철 추운 날씨 때문에 대부분 난방기를 작동하게 되고 실내는 더욱 밀폐되는 환경이 유지될 수 있으므로, 겨울철 실내라돈농도 저감을 위해서는 주기적으로 창문을 여는 등의 충분한 환기가 필요할 것이다.

본 연구에서는 실험적인 여건 상 라돈농도의 측정기간이 짧고 온도, 습도 등 외부 기상 조건을 통제할 수 없는 등 실제 주택의 환경을 모두 반영하기에는 한계가 있었다.

다만 실제 국내 단독주택의 형태 및 환경을 모사한 Test bed 구축을 통해 토양 및 실내라돈 농도를 측정하고 상관성을 분석하였으므로, 연구결과는 국내 단독주택에서의 라돈 관리 및 저감을 위한 참고자료로 활용가능하고 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

References

- Moon, K.H., Kim, J.S., Ahn, J.K., Kim, H.C., and Lee, H.M., 2009, Long-term Variation of Radon in Granitic Residual Soil at Mt. Guemjeong in Busan, Korea, *Jour. Petrol. Soc.*, **18**(4), 279-291.
- Park, K.B. and Lee, S.H., 2014, A Study on Radon Emission Reduction of Construction Materials using Radon Reducing Paint, *J Environ Health Sci.*, **40**(6), 484-491.
- Park, H.C., Choi, H.S., Cho, S.Y. and Kim, S.H., 2014, Numerical Study on Indoor Dispersion of Radon Emitted from Building Materials, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **36**(5), 325-332.
- Je, H.G. and Chon, H.T., 2002, Characterization of Soil-gas Radon Fluctuations by Time-series Analysis, *J. of Mineral and Energy Resources*, **39**(6), 423-433.
- Choi, H.W., Kim, C.N., Won, J.W., Kim, H.K., and Roh, J.H., 2016, A Study on the Radon Concentration in the Office, *Jour. K.I.H.A.*, **26**(3), 334-341.
- Jung, J.S., Yoo, J.H., Lee, K.S., Lee, J.W., Shim, I.K., Seo, S.Y., Kim, B.W., and Kwon, M.H., 2016, Study on Characteristics of Radon Concentration and Effective dose at Republic Building in Korea, *J. Korean Soc. Living Environ. Sys.*, **23**(6), 767-775.
- Lee, J.Y., Lee, H.C., Han, K.H., Kim, N.J., Jeon, J.S., Kim, J.H., and Kim, M.Y., 2007, Source and Variations of Radon-222 Concentrations in Indoor Air, Public Health and Environment Research Institute of Seoul City, *Report of S.I.H.E.*, **43**, 355-360.
- Kang, S.A., 2007, A Study on the correlation between the Volume of Indoor Radon and the Measured concentration of Indoor Radon, Master Thesis, Chonbuk Univ. Graduate School.
- Korea Environment Corporation (KECO), 2016, Indoor radon mangement
- Ministry of Environment (MOE), 2010a, Guideline for Indoor radon reduction
- Ministry of Environment (MOE), 2010b, Nationwide Survey of Indoor Radon In Korea-Public facilities
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2010, Sources and Effects of Ionizing Radiation.
- Hovav Zafir., Susana M. Barbosa. and Uri Malik., 2013, Differentiation between the effect of temperature and pressure on radon within the subsurface geological media, *Radiation Measurements*, **49**, 39-56.
- WHO, 2016, Radon and Health, Fact sheet, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/> [accessed 17.10.07]