



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년10월06일
(11) 등록번호 10-2309390
(24) 등록일자 2021년09월29일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01T 1/178 (2006.01) G01T 1/167 (2006.01)
G06F 17/10 (2006.01) G06Q 50/10 (2012.01)
G06Q 50/26 (2012.01)
- (52) CPC특허분류
G01T 1/178 (2013.01)
G01T 1/167 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2019-0121083
(22) 출원일자 2019년09월30일
심사청구일자 2019년09월30일
(65) 공개번호 10-2021-0017955
(43) 공개일자 2021년02월17일
(30) 우선권주장
1020190095188 2019년08월05일 대한민국(KR)
- (56) 선행기술조사문헌
KR1020170090728 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌
- (73) 특허권자
연세대학교 원주산학협력단
강원도 원주시 흥업면 연세대길 1
- (72) 발명자
강대용
강원도 원주시 원일로 115-16
이철민
서울특별시 성북구 서경로 124
박지현
경기도 수원시 영통구 월드컵로 206
- (74) 대리인
김보정

전체 청구항 수 : 총 5 항

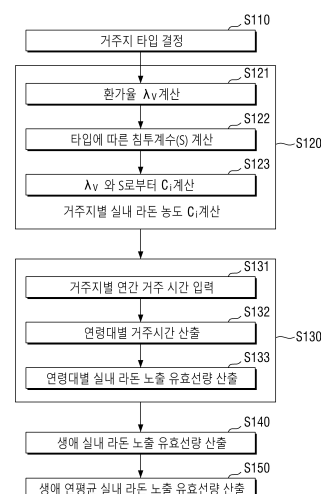
심사관 : 이해준

(54) 발명의 명칭 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법

(57) 요약

거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법이 개시된다. 본 발명은 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)를 추정하고 이를 이용하여 거주지별 연령별 거주시간을 입력하여 생애 실내 라돈 노출 유효선량을 산출할 수 있도록 구성함으로써, 실제 거주지에 대한 라돈 농도 측정없이 거주지별 연평균 실내 라돈 농도를 추정할 수 있으며, 건물 특성에 따라 다를 수 있는 침투요인들을 주택 및 지하수 사용의 유형에 따라 침투 계수 값을 산정하여 실제 라돈 농도와 비교하여 실내 라돈 농도를 추정할 수 있는 효과가 있다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

G06F 17/10 (2013.01)

G06Q 50/10 (2013.01)

G06Q 50/26 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

| | |
|-------------|--------------------------------|
| 과제고유번호 | 2015001350002 |
| 부처명 | 환경부 |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국환경산업기술원 |
| 연구사업명 | 환경기술개발사업 |
| 연구과제명 | 실내라돈 개인기반 노출평가 및 통합 위해관리 기술 개발 |
| 기 여 율 | 1/1 |
| 과제수행기관명 | 연세대학교 원주산학협력단 |
| 연구기간 | 2019.01.01 ~ 2019.09.30 |

명세서

청구범위

청구항 1

제어기에서 거주자가 거주하는 거주지정보를 이용하여 거주지별 연평균 실내 라돈 농도를 추정하고 이를 이용하여 연간 라돈 노출 유효선량을 산출하는 방법에 있어서,

상기 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)는

다음의 수학식으로 표현되는 것을 특징으로 하는, 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법.

$$C_i = \frac{E_s \frac{S_g}{V} + E_{bm} \frac{S_{bm}}{V} + \lambda_v C_o - \lambda(C_s + C_{bm})}{\lambda + \lambda_v},$$

$$\lambda_v = (f_t |T_i - T_o| + f_w u^2) \sqrt{N}.$$

$$S = E_s \frac{S_g}{V} + E_{bm} \frac{S_{bm}}{V} = C_i(\lambda + \lambda_v) + \lambda(C_s + C_{bm}) - \lambda_v C_o,$$

$$\lambda_v = (f_t |T_i - T_o| + f_w u^2) \sqrt{N}.$$

$$S_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 Y_{1i} + \beta_4 Y_{2i} + \beta_5 Y_{3i} + \epsilon_i,$$

여기서, C_{bm} = 건축 자재의 라돈 농도 (Bqm^{-3}), C_i = 거주지별 실내 라돈 농도 (Bqm^{-3}), S 는 침투계수, S_i 는 각 거주지 i 에 대한 토양 및 건축 자재로부터의 침투 계수, C_s = 라돈 농도 (Bqm^{-3}), C_o 는 실외 공기 중 라돈 농도 (Bqm^{-3}), E_{bm} 은 건축 자재의 유효 라돈 호기율 ($\text{Bqm}^{-2} \text{h}^{-1}$), E_s 는 라돈의 유효 토양 호기율, f_t 와 f_w 는 fitting 변수, k_a 는 토양의 이류 전이 계수 ($\text{mPa}^{-1} \text{h}^{-1}$), $k_{d,s}$ = 토양의 확산 전달 계수 (mh^{-1}), S_{bm} 은 건축 자재를 함유한 라돈의 실내 표면적 (m^2), S_g 는 지면을 향한 건물 면적 (m^2), T_i 와 T_o 는 실내 및 실외 온도($^{\circ}\text{C}$), u 는 풍속 (m s^{-1}), V = 실내 체적 (m^3), λ 는 라돈 감쇠 상수 (h^{-1}), λ_v 는 환기율 (h^{-1}), ΔP_{s-i} 는 토양과 실내의 차압 (Pa), T_o 와 u^2 는 기상정보, N 은 통풍 횟수로 \sqrt{N} 은 환기정보, X_{1i} 는 거주지 i 가 속하는 행정 구역의 녹지 비율, X_{2i} 는 거주지 i 가 속한 행정 구역의 실내 라돈 수준의 기하 평균, Y_{1i} 는 거주 건물 i 의 건축 자재 유형, Y_{2i} 는 거주 건물 i 의 균열 정도, Y_{3i} 는 거주 층 i , ϵ_i 는 거주지 i 의 측정값 오류이다.

청구항 2

삭제

청구항 3

삭제

청구항 4

청구항 1에 있어서,

거주자가 거주하는 거주지 정보는

양옥과 한옥을 포함하는 단독주택 및 아파트 또는 다세대주택 그리고 연립을 포함하는 비단독주택이며, 지하수를 사용하는 지 유무에 따라 4그룹으로 구분하는 것을 특징으로 하는 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

(a) 추정된 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)에 거주지별 거주시간을 입력하여 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량을 산출하는 단계; 및

(b)상기 (a)단계에서 추출된 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량을 합산하여 개인 생애 실내 라돈 노출 유효선량을 산출하는 단계;

를 포함하는 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 (a)단계는

추정된 상기 거주지별 실내 라돈 농도에 거주지별 평균 거주 시간을 적용함으로써 상기 거주자에게 노출되는 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량을 산출하는 것을 특징으로 하는, 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법.

청구항 7

청구항 5에 있어서,

상기 (b)단계의 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량(E_{ij})은

다음의 수학적식으로 표현되는 것을 특징으로 하는, 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법.

$$E_{ij} = C_i * (T_{ij} * 365 \text{ day} * Y_{ij}(\text{단위: year})) * 0.4 * 9 * 10^{-6}$$

$$E = \frac{\sum_{i=1, \dots, I} \sum_{j=1, \dots, J} E_{ij}}{\sum_{i=1, \dots, I} \sum_{j=1, \dots, J} Y_{ij}}$$

여기서 E_{ij} 는 거주지별(i) 거주연령별(j)로 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량, ($T_{ij} * 365 \text{ day} * Y_{ij}(\text{단위: year})$)는 연령대별 거주시간을 의미한다.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 거주지별 실내 라돈 농도 추정에 관한 것으로, 보다 상세하게는 실제 거주지에 대한 라돈 농도 측정 없이 거주지별 연평균 실내 라돈 농도를 추정하여 라돈 노출 유효 선량을 계산할 수 있는 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법에 관한 것이다.

배경기술

- [0002] 라돈은 자연 방사선의 주요 성분으로 알려진 방사성, 무색, 무취, 무미의 고귀한 가스이다.
- [0003] 폐에 축적되어 폐암을 유발할 수 있으며 흡연 후 폐암의 두 번째 주요 원인으로, 사람들이 거주지와 같이 많은 시간을 보내는 실내 환경에서 장기간 라돈에 노출되면 건강에 위험이 따른다.
- [0004] UNSCEAR 보고서(2000)에 따르면, 실내 라돈의 56%는 토양, 21%는 건축자재, 20%는 외부 공기, 2%는 상수도, 나머지 1%는 천연가스로부터 유입된다고 보고되어 있다.
- [0005] 고농도 라돈에 장기간 노출될 경우 호흡기능이 변화하고, 폐암 발병률이 증가하게 된다. 실내 라돈에 대한 노출과 관련된 건강 위험은 라돈 농도, 노출 기간에 기인한다. 실내 라돈의 건강 위험도 평가 및 실내 라돈의 장기간 노출은 실내 라돈 노출과 폐암 간의 관계를 확인하기 위해 고려되어야 한다.
- [0006] 실내 라돈 노출에 의한 건강영향 평가를 위해서는 장기간의 라돈 노출량 평가가 이뤄져야 한다. 실내 라돈에 대한 장기 노출을 산정하기 위해서는 실내 라돈 수준과 실내 체류 시간에 대한 정보가 필요하다.
- [0007] 그러나 장기간의 실내 라돈 농도를 측정하는 것은 시간과 비용이 많이 소요되고, 거주지 이동에 따른 변동성을 고려해야 하므로, 장기 실내 라돈 노출과 관련된 유해한 건강 영향에 대한 연구가 제한적일 수 밖에 없다. 세계적으로도 단기간의 라돈 농도 조사만으로 라돈 노출에 의한 유효선량 및 폐암 발생 위험도를 평가하고 있는 실정이다.
- [0008] 하지만 단기간의 평균 누적 라돈농도가 일 년간의 평균 누적 라돈농도를 대표하기에는 역부족한 실정이다. 일년 동안 사계절의 변화가 뚜렷한 국가의 경우에 실외환경과 마찬가지로 실내환경도 역시 사계절의 날씨 변동에 따라 변화하게 된다. 예를 들어, 겨울에는 굴뚝효과에 의해 실내공기 중 라돈 농도가 다른 계절에 비해 높게 검출되고, 여름에는 빈번한 환기에 의해 다른 계절에 비해 실내공기 중 라돈 농도가 다른 계절에 비해 낮게 검출된다.
- [0009] 또한, 주거 유형에 따라, 예컨대 단독주택 및 비단독주택에 따라 계절별 라돈 농도의 변화가 크게 나타난다. 예를 들어, 단독주택 및 비단독주택 간 겨울과 여름의 라돈 농도 비율의 유의적인 차이가 있다.
- [0010] 이것은 라돈 농도의 측정시기 및 주거 형태에 따라 라돈 농도의 변화가 크다는 것을 의미하며, 이러한 변화는 라돈 노출에 의한 유효선량 및 폐암 발생 위험도를 평가하는 데에 있어서 불확실성을 야기한다고 할 수 있다.
- [0011] 이러한 문제들을 극복하기 위해 Park et al. 는 Pinel et al.이 제안한 방법을 토대로 한국원자력안전기술원(KINS)과 국립환경연구원(NIER)이 공동으로 실시한 계절별 3개월 간격으로 측정값을 사용하여 계절 보정 계수를 산출하고 일 년간의 평균 누적 라돈농도를 추정할 수 있는 계절보정모델을 제시하였다. 또한 Park et al. 는 2016년 1월과 4월 사이의 조사 자료를 사용하여 물질수지 방정식을 바탕으로 거주지 정보 및 환기습관 정보만으로 단독 주택에 대한 실내 라돈 농도를 추정하기 위한 모델을 제시하였다.
- [0012] 하지만 계절보정모델은 단기간의 실제 라돈 측정값을 요구하므로 라돈 농도 측정이 어려운 과거 거주지에 대해서는 라돈 노출량 평가가 어려운 실정이며, 거주지 정보 및 환기습관 정보만으로 단독 주택에 대한 실내 라돈 농도를 추정하기 위한 모델은 단독 주택에만 적용가능하다는 제한점을 가지고 있다.
- [0013] 따라서 실내 라돈 노출에 의한 건강영향 평가를 위해서는, 다양한 주택 유형에 적용 가능하며 일 년간의 평균 누적 라돈농도를 추정할 수 있는 실내 라돈 농도 모형을 개발할 필요가 있는 것이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0014] (특허문헌 0001) KR 등록특허공보 제10-1528780호(2015.06.09)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0015] 이러한 과제를 해결하기 위한 본 발명은 실제 거주지에 대한 라돈 농도 측정없이 거주지별 연평균 실내 라돈 농도를 추정하여 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

[0016] 또한, 본 발명은 주택 및 지하수 사용의 유형에 따라 침투 계수 값을 산정하여 실제 라돈 농도와 비교하여 실내 라돈 농도를 추정할 수 있는 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법을 제공하는 것을 다른 목적으로 한다.

[0017] 그리고 본 발명은 거주지 정보와 거주 시간을 입력하면 거주지에서의 연평균 실내 라돈 노출 유효선량을 산출할 수 있는 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법을 제공하는 것을 또 다른 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0018] 이러한 과제를 해결하기 위한 본 발명의 제어기에서 거주자가 거주하는 거주지정보를 이용하여 거주지별 실내 라돈 농도를 추정하고 이를 이용하여 연간 라돈 노출 유효선량을 산출하는 방법은 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)를 다음의 수학식으로 표현되게 구성함으로써 달성될 수 있다.

$$C_i = \frac{E_s \frac{S_g}{V} + E_{bm} \frac{S_{bm}}{V} + \lambda_v C_o - \lambda(C_s + C_{bm})}{\lambda + \lambda_v}$$

$$\lambda_v = (f_t |T_i - T_o| + f_w u^2) N^{\frac{1}{2.4}}$$

[0019] 여기서, C_{bm} = 건축 자재의 라돈 농도 (Bqm^{-3}), C_i = 거주지별 실내 라돈 농도 (Bqm^{-3}), C_s = 라돈 농도 (Bqm^{-3}), C_o 는 실외 공기 중 라돈 농도 (Bqm^{-3}), E_{bm} 은 건축 자재의 유효 라돈 호기율 ($Bqm^{-2}h^{-1}$), E_s 는 라돈의 유효 토양 호기율, f_t 와 f_w 는 fitting 변수, k_a 는 토양의 이류 전이 계수 ($mPa^{-1}h^{-1}$), $k_{d,s}$ = 토양의 확산 전달 계수 (mh^{-1}), S_{bm} 은 건축 자재를 함유 한 라돈의 실내 표면적 (m^2), S_g 는 지면을 향한 건물 면적 (m^2), T_i 와 T_o 는 실내 및 실외 온도($^{\circ}C$), u 는 풍속 (ms^{-1}), V = 실내 체적 (m^3), λ 는 라돈 감쇠 상수 (h^{-1}), λ_v 는 환기율 (h^{-1}), ΔP_{s-i} 는 토양과 실내의 차압 (Pa), T_o 와 u^2 는 기상정보를 그리고 N 은 통풍 횟수로 \sqrt{N} 은 환기정보를 의미한다.

[0021] 또한, 침투 계수(S)는 다음의 수학식으로 표현된다.

$$S = E_s \frac{S_g}{V} + E_{bm} \frac{S_{bm}}{V} = C_i(\lambda + \lambda_v) + \lambda(C_s + C_{bm}) - \lambda_v C_o$$

$$\lambda_v = (f_t |T_i - T_o| + f_w u^2) \sqrt{N}$$

[0022] 또한, 거주지 i 의 건축 자재로부터의 침투 계수를 추정하기 위한 수학식은 다음의 회귀 수학식으로 표현된다.

$$S_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 Y_{1i} + \beta_4 Y_{2i} + \beta_5 Y_{3i} + \epsilon_i$$

[0024] 여기서, S_i 는 각 거주지 i 에 대한 토양 및 건축 자재로부터의 침투계수, X_{1i} 는 거주지 i 가 속하는 행정 구역의 녹지 비율, X_{2i} 는 거주지 i 가 속한 행정 구역의 실내 라돈 수준의 기하 평균, Y_{1i} 는 거주 건물 i 의 건축 자재 유

형, Y_{2i} 는 거주 i 의 균열 정도, Y_{3i} 는 거주 층 i , ε_i 는 거주지 i 의 측정값 오류이다.

[0026] 또한, 거주자가 거주하는 거주지 정보는 양옥과 한옥을 포함하는 단독주택 및 아파트 또는 다세대주택 그리고 연립을 포함하는 비단독주택이며, 지하수를 사용하는지 유무에 따라 4그룹으로 구분할 수 있다.

[0027] 또한, (b) 상기 (a)단계에서 추정된 거주지별 연평균 실내 라돈 농도(C_i)에 거주지별 거주시간을 입력하여 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량을 산출하는 단계, 및 (c)상기 (b)단계에서 추출된 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량을 합산하여 개인 생애 실내 라돈 노출 유효선량을 산출하는 단계를 포함하게 구성하여 생애 유효선량을 산출하게 할 수 있다.

[0028] 상기 (b)단계는 추정된 상기 거주지별 연평균 실내 라돈 농도에 거주지별 평균 거주 시간을 적용함으로써 상기 거주자에게 노출되는 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량을 산출하고, 상기 (b)단계의 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량(E_{ij})은 다음의 수학식으로 표현되게 할 수 있다.

$$E_{ij} = C_i * (T_{ij} * 365 \text{ day} * Y_{ij} (\text{단위: year})) * 0.4 * 9 * 10^{-6}$$

$$E = \frac{\sum_{i=1, \dots, I} E_{ij}}{\sum_{j=1, \dots, J} Y_{ij}}$$

[0029]

[0030] 여기서 E_{ij} 는 거주지별(i) 거주연령별(j)로 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량, ($T_{ij} * 365 \text{ day} * Y_{ij}$ (단위: year))는 연령대별 거주시간을 의미한다.

발명의 효과

[0031] 따라서 본 발명의 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법에 의하면, 실제 거주지에 대한 라돈 농도 측정없이 거주지별 연평균 실내 라돈 농도를 추정할 수 있는 효과가 있다.

[0032] 또한, 본 발명의 거주지별 실내 라돈 농도를 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출 방법에 의하면, 건물 특성(예 : 지역, 건축 자재, 균열 및 층수)에 따라 다를 수 있는 침투요인들을 주택 및 지하수 사용의 유형에 따라 침투 계수 값을 산정하여 실제 라돈 농도와 비교하여 실내 라돈 농도를 추정할 수 있는 효과가 있다.

[0033] 그리고 본 발명은 주택의 연평균 실내 라돈 농도에 거주 시간을 입력하여 거주지에서의 연평균 실내 라돈 노출 유효선량을 산출할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0034] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 거주지별 실내 라돈 농도 추정 방법을 이용한 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 산출을 위한 장치의 구성도,

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 생애 연평균 라돈 노출 유효선량의 산출 방법을 설명하기 위한 흐름도,

도 3은 주거 유형 및 지하수 사용량에 따른 연평균 라돈 농도 요약표,

도 4는 거주시간 특성에 따른 침투 계수 모델의 계수 추정표,

도 5는 주택 타입에 따른 침투계수 S의 계산값과 추정값의 비교표,

그리고

도 6은 주택 타입에 따른 실내 라돈 계산값과 측정값의 비교표이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0035] 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 한정 해석되지 아니하며, 발명자는 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.

- [0036] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다. 또한, 명세서에 기재된 "...부", "...기", "모듈", "장치" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어 및/또는 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.
- [0037] 명세서 전체에서 "및/또는"의 용어는 하나 이상의 관련 항목으로부터 제시 가능한 모든 조합을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 예를 들어, "제1 항목, 제2 항목 및/또는 제3 항목"의 의미는 제1, 제2 또는 제3 항목뿐만 아니라 제1, 제2 또는 제3 항목들 중 2개 이상으로부터 제시될 수 있는 모든 항목의 조합을 의미한다.
- [0038] 명세서 전체에서 각 단계들에 있어 식별부호(예를 들어, a, b, c, ...)는 설명의 편의를 위하여 사용되는 것으로 식별부호는 각 단계들의 순서를 한정하는 것이 아니며, 각 단계들은 문맥상 명백하게 특정 순서를 기재하지 않은 이상 명기된 순서와 다르게 일어날 수 있다. 즉, 각 단계들은 명기된 순서와 동일하게 일어날 수도 있고 실질적으로 동시에 수행될 수도 있으며 반대의 순서대로 수행될 수도 있다.
- [0039] 이하, 도면을 참고하여 본 발명의 일실시예에 대하여 설명한다.
- [0040] 먼저, 본 발명은 거주지 이동에 따른 변동성 및 장기간의 실내 라돈 농도 측정이 현실적으로 어렵기 때문에 실내 라돈 농도 추정을 위한 모형을 개발하고, 실제 데이터에 근거한 수학적 모형에 대한 연구는 거의 없기 때문에 실내 라돈 농도 모형 중 RAGENA(Font, 1997) 모형을 수정하여 한국형 실내 라돈 농도 추정을 위한 모형을 개발하였음을 밝혀둔다.
- [0041] 또한, 우리의 모델에서 주 요인은 침투율로서 지역, 건축 자재, 균열, 층수 등에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 주택 및 지하수 사용 유형 및 그 결과에 따라 침투 계수를 계산하였다.
- [0042] 전반적으로, 침투계수 모델을 이용한 실내 라돈 농도의 측정된 농도와 추정치는 비슷했음을 밝혀둔다. 실험결과 본 발명의 모델은 라돈 농도가 매우 높은 몇몇 주택을 제외하고는 이전 모델보다 우수한 성능을 보였다.
- [0043] 본 연구는 실내 라돈의 계절적 변화를 고려한 실제 거주지의 평균 연간 실내 라돈 농도를 추정하기 위해 널리 적용 가능한 모델을 개발하고자 하는 것을 목적으로 한다.
- [0044] 이 모델은 지리적 요인, 건물 특성, 기상 요인 및 전국적인 라돈 조사에 관한 자료를 활용하여 물질 수지 방정식을 기반으로 구성된다.
- [0045] 이하에서 설명되는 실시예들은 어떤 거주지에서 일정 개월 동안에 측정된 라돈의 평균농도 및 기상 요인을 반영하여 그 거주지의 거주자에게 피폭되는 주택의 실내 라돈 농도를 추정하고 이를 이용하여 라돈 노출 유효선량을 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0046] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 주택의 실내 라돈 농도 추정 방법을 이용한 연간 라돈 노출 유효선량 산출을 위한 장치의 구성도이다.
- [0047] 도 1을 참조하면, 라돈의 연간노출선량 예측을 위한 장치는 라돈센서(10), 제어기(20) 및 출력기(30)로 구성되고, 거주지의 내부에 설치된다. 라돈 센서(10)는 실내 공기에 포함된 라돈의 농도를 검출한다. 제어기(20)는 아래에 설명된 방법에 따라 라돈의 연간노출선량을 예측한다. 출력기(30)는 제어기에서 추정한 라돈 노출 유효선량을 출력한다.
- [0048] 제어기(20)는 데이터 수신부(21), 프로세서(22), 스토리지(23), 사용자 인터페이스(24)로 구성된다.
- [0049] 스토리지(23)에는 어떤 거주지에서 설정된 일정 개월 동안에 측정된 라돈의 평균농도 및 기상 요인을 반영한 거주지별 연평균 라돈 농도 추정값과 그 거주지의 거주자에게 피폭되는 라돈 노출 유효선량을 추정하는 프로그램이 저장되어 있다.
- [0050] 프로세서(22)가 스토리지(23)에 저장된 추정 프로그램을 실행함으로써 제어기(20)는 이러한 추정 프로그램에 따라 생애 누적 라돈 노출량을 추정하여 출력기(30)로 전송한다.
- [0051] 사용자 인터페이스(24)는 사용자로부터 그 거주지의 형태, 보다 구체적으로 단독주택 및 비단독주택 여부를 입력받고, 그 거주지에서의 거주시간 및 설정된 일정 개월 동안 측정된 라돈의 평균농도를 입력받아 프로세서(22)로 전송한다.
- [0052] 데이터 수신부(21)는 라돈측정 기관으로부터 축적된 계절별 거주지 지역의 실내 라돈 평균농도 데이터를 전송받고, 기상청으로부터 매월 실외 월별 평년 온도 및 월별 평년 풍속 데이터를 전송받아 스토리지(23)에 DB로 저장

한다. 이때 상기 계절별 거주지 지역의 실내 라돈 평균농도 데이터는 거주지 형태에 따라 구분되고, 보다 구체적으로 단독주택 및 비단독주택으로 구분된다.

- [0053] 따라서, 프로세서(22)가 스토리지(23)에 저장된 추정 프로그램을 실행함에 있어서 프로세서(22)로 전송된 거주지 형태에 따라 거주지 지역의 실내 라돈 평균농도 데이터를 구분하여 대입할 수 있다.
- [0054] 출력기(30)는 프로세서(22)에서 산출된 라돈 노출 유효선량을 전송받아 출력한다.
- [0055] 라돈의 연간유효선량의 산출에 사용되는 수학적 예측모델을 구체적으로 어떻게 구축하고 기상 요인을 반영한 월별 보정계수를 구체적으로 어떻게 결정하는가에 대해서는 이하에서 도 3, 4를 참조하면서 상세히 살펴보기로 한다.
- [0056] 일반적으로 실내에서의 라돈 측정의 공정시험방법으로 장기간 측정방법인 3개월간의 라돈 누적농도를 산출하는 방법이 권장되고 있다. 그러나 실내공기 중 라돈 농도는 계절적으로 차이를 보이고 있어 계절별 3개월간의 라돈 누적농도가 일 년간의 평균 라돈농도를 대표하기는 역부족이다. 따라서, 계절별 3개월간의 라돈의 평균농도를 기반으로 하는 라돈의 연간노출선량 예측이 불확실해질 수 있으며, 이에 따라 라돈 노출에 의한 폐암발생 위험도의 평가의 신뢰성이 떨어질 수 있다.
- [0057] 본 실시예에 따르면, 임의의 일정 개월 동안 측정된 라돈의 평균농도, 예컨대 권장되는 임의의 3개월간 측정된 라돈의 평균농도를 기반으로 라돈의 연간노출선량을 예측함으로써, 계절에 상관없이 라돈의 연간노출선량을 산출할 수 있다. 또한, 기상 요인, 구체적으로 실외 월별 평년 온도 및 월별 평년 풍속을 반영한 월별 보정계수를 함께 고려하여 라돈의 연간노출선량을 예측하기 때문에 거주 지역의 환경이 고려된 보다 정확한 연간노출선량을 산출할 수 있다. 이에, 라돈 노출에 의한 폐암발생 위험도의 산출에 상기 라돈의 연간노출선량을 적용할 수 있어 신뢰성 있는 폐암 발생 위험도의 산출이 가능할 뿐만 아니라 라돈의 연간노출선량을 고려하여 라돈 저감 대책을 수립할 수 있어 라돈에 의한 만성적 질환인 폐암을 예방할 수 있다.
- [0058] 이하에서는 주택의 연평균 실내 라돈 농도를 추정하는 방법에 대하여 도면을 참고하여 설명한다.
- [0059] 주택의 연평균 실내 라돈 농도를 추정하기 위하여 먼저 실내 라돈 농도와 설문지를 실시하였다.
- [0060] 2015년 10월에서 2018년 12월까지 최소 90일 동안 수동식 알파 트랙 탐지기(Raduet Model RSV-8, Radosys Ltd., 헝가리 부다페스트)를 사용하여 1,437 개의 주거지에서 실내 라돈 농도를 수집하였다.
- [0061] 라돈 농도는 각 거주지의 2개 지점에서 측정되었으며, 측정 지점은 거실과 침실과 같이 주로 대부분의 시간을 소비하는 공간에서 선택되었다. 주거지 내의 두 지점으로부터의 라돈 농도의 기하 평균은 라돈 농도 모델을 개발하는데 사용되었음을 밝혀둔다.
- [0062] 라돈 농도의 로그 정규 분포 때문에, 로그 변환값이 적용되고, 또한, 주소 (도시 /도 및 시 / 군 / 지구), 주택 유형, 건축 자재, 건물의 균열 위치 및 수, 지하수 사용, 환기습관, 벽 건축 자재, 층수 및 거주자의 정보를 총 1,390 개의 거주자에게 설문지를 통하여 수집하였다.
- [0063] 최종적으로, 개발된 모델의 안정성을 위해 로그 변환된 라돈 데이터에서 47 개의 선택된 특이점을 제거하고 1,343 개의 거주지를 사용하여 모델을 개발하였다.
- [0064] 실내 라돈 농도는 계절에 상관없이 측정되었으므로 라돈 조사에서 얻은 데이터를 표준화하여 계절 변화를 없애기 위하여 실내 라돈 농도는 Park et al.에 의해 기술된 계절 보정 계수를 사용하여 가정에서의 연 평균 라돈 농도로 변환하였다.
- [0065] 도 3은 주거 유형 및 지하수 사용량에 따른 연평균 라돈 농도를 요약한 것이다.
- [0066] 전국 라돈 조사 자료
- [0067] 모델 개발을 위해 한국의 국립 환경 연구원 (National Institute of Environmental Research)의 전국 라돈 조사 자료를 사용하여 2011년부터 2016년까지 겨울철에 3회 (<https://iaqinfo.nier.go.kr>) 조사를 실시하였습다.
- [0068] 2011-2012 년, 2013-2014 년 및 2015-2016 년 조사는 각각 약 11,000개, 8,000개 및 12,000개 거주지에 대해 수행되었습니다.
- [0069] 조사 대상 주택은 단독 주택, 아파트 및 다가구 주택과 같은 주거 구조 유형을 고려하여 선정되었습니다. 아파트 및 다층 건물에서는 3층 이하의 거주지만 선택되었다. 분리된 집에서 측정된 약 14,152 개의 라돈값이 추출

되었고, (AM = 116.71 ± 103.43 Bq m⁻³), GM = 86.52 ± 2.14 Bq m⁻³) 로그변환 후에 특이값을 제거한 후에 13,975개 거주지의 라돈 농도 값이 사용되었다.

- [0070] 지리정보 및 기상데이터
- [0071] 구조 방정식 모델을 사용하여, Lee et al. [6] 높은 녹지 비율을 나타내는 지역에서 실내 라돈 농도가 높다는 것을 보여 주었다.
- [0072] 환경부가 주관하는 환경 지리 정보 서비스 (Environmental Geographic Information Service)는 시/군/구(<https://eais.me.go>)에 따라 관리 지역에 비해 녹지 면적을 반영한 녹지 비율 데이터에 대한 액세스를 제공한다. 녹색 지역은 산림과 초원 지대로 구성되며 논과 같은 농경지는 포함하지 않는다.
- [0073] 환기는 실내 라돈 농도에 영향을 주는 주요 인자로 잘 알려져 있으며 환기율은 실내 및 실외 온도차와 풍속과 같은 기상 요인의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 월 평균 기상 요인의 연간 편차를 원활하게 하기 위해 국가 기후 데이터 서비스 시스템 (<https://sts.kma.go.kr>)에서 30년 평균(1981-2010)을 사용했습니다.
- [0074] 실내 라돈의 물질수지 방정식
- [0075] 실내 라돈은 여러 매개 변수의 영향을 받기 때문에 모델을 개발하기 위해서는 많은 매개 변수가 필요하다. 그러나 우리는 토양, 건축 자재, 실외 공기 및 환기와 같은 이전 연구에서 실내 라돈 농도에 영향을 미치는 것으로 나타난 요인에만 초점을 맞추었다.
- [0076] 물질수지방정식(Mass balance equation)은 프로세스의 일부분 또는 전체에 대해서 질량 보존의 법칙을 적용하여 유도되는 물질의 질량 수지관계. 계에 들어오는 질량과 계에서 나가는 질량의 차는 계 내에 축적되거나 혹은 계 내의 화학 반응에 의해 생성·소멸하는 질량과 같다. 실내 라돈 농도의 경우에는 다음의 식을 적용할 수 있다.
- [0077] 누적 실내 라돈 = 유입±환기에 의한 이동-방사선붕괴에 의한 분해
- [0078] Park et al. 에서 RAGENA(Font, 1997) 모형을 수정하여 한국형 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)를 추정하기 위한 미분 방정식 시스템은 다음 수학식 1과 같다.
- [0079] 실제의 (C_i)는 거주지별 연평균 실내 라돈 농도를 의미하나 이하에서는 "거주지별 실내 라돈 농도"로 설명한다.

수학식 1

$$\begin{aligned}\frac{dC_i}{dt} &= \{k_{d,s}(C_s - C_i) + k_a \Delta P_{s-i} C_s\} \frac{S_g}{V} + k_{d,bm}(C_{bm} - C_i) \frac{S_{bm}}{V} - \lambda_v(C_i - C_o) - \lambda C_i \\ \frac{dC_s}{dt} &= E_s \frac{S_g}{V} - \{k_{d,s}(C_s - C_i) + k_a \Delta P_{s-i} C_s\} \frac{S_g}{V} - \lambda C_s \\ \frac{dC_{bm}}{dt} &= E_{bm} \frac{S_{bm}}{V} - k_{d,bm}(C_{bm} - C_i) \frac{S_{bm}}{V} - \lambda C_{bm} \\ \lambda_v &= (f_t |T_i - T_o| + f_w u^2) N^{\frac{1}{2}}\end{aligned}$$

- [0080]
- [0081] 여기서 C_{bm} = 건축 자재의 라돈 농도 (Bqm⁻³), C_i = 거주지별 실내 라돈 농도 (Bqm⁻³), C_s = 라돈 농도 (Bqm⁻³), C_o는 실외 공기 중 라돈 농도 (Bqm⁻³), E_{bm}은 건축 자재의 유효 라돈 호기율 (Bqm⁻²h⁻¹), E_s는 라돈의 유효 토양 호기율, f_t와 f_w는 fitting 변수, k_a는 토양의 이류 전이 계수 (mPa⁻¹h⁻¹), k_{d,s} = 토양의 확산 전달 계수 (mh⁻¹), N은 통풍 횟수, S_{bm}은 건축 자재를 함유 한 라돈의 실내 표면적 (m²), S_g는 지면을 향한 건물 면적 (m²), T_i와 T_o는 실내 및 실외 온도(°C), u는 풍속 (m s⁻¹), V = 실내 체적 (m³), λ는 라돈 감쇠 상수 (h⁻¹), λ_v는 환기율 (h⁻¹), ΔP_{s-i}는 토양과 실내의 차압 (Pa)이다.

- [0082] 수학식 1에서 평형상태를 가정하면, 다음 수학식 2와 같은 방정식을 구할 수 있다.

수학식 2

$$C_i = \frac{E_s \frac{S_g}{V} + E_{bm} \frac{S_{bm}}{V} + \lambda_v C_o - \lambda(C_s + C_{bm})}{\lambda + \lambda_v},$$

$$\lambda_v = (f_t |T_i - T_o| + f_w u^2) N^{\frac{1}{2}}.$$

[0083]

[0084]

여기서 C_{bm} = 건축 자재의 라돈 농도 (Bqm^{-3}), C_i = 거주지별 실내 라돈 농도 (Bqm^{-3}), C_s = 토양의 라돈 농도 (Bqm^{-3}), C_o 는 실외 공기 중 라돈 농도 (Bqm^{-3}), E_{bm} 은 건축 자재의 유효 라돈 호기율 ($Bqm^{-2}h^{-1}$), E_s 는 라돈의 유효 토양 호기율, f_t 와 f_w 는 fitting 변수, N 은 통풍 횟수, S_{bm} 은 건축 자재를 함유 한 라돈의 실내 표면적 (m^2), S_g 는 지면을 향한 건물 면적 (m^2), T_i 와 T_o 는 실내 및 실외 온도($^{\circ}C$), u 는 풍속 ($m\ s^{-1}$), λ 는 라돈 감쇠 상수 (h^{-1}), λ_v 는 환기율 (h^{-1})을 의미한다.

[0085]

수학식 2가 실내 라돈 농도를 계산하기 위한 최종 수학식으로, 모형의 모수를 추정해야 하지만 위의 식을 그대로 적용하는 것은 어렵기 때문에, 아래와 같이 침투계수모델(infiltration factor model)을 고려하여야 한다.

[0086]

수학식 2에서 " $E_s * (S_g/V) + E_{bm} * (S_{bm}/V)$ "는 토양 및 건축 자재로부터의 침투계수를 나타낸다. 그러나 방정식의 모든 매개 변수에 대한 정보는 토양 및 건축 자재로부터의 라돈 방출률을 계산하는 데 필요하며 가능한 정보가 제한적이기 때문에 이 접근법은 비현실적이다.

[0087]

이러한 이유로 " $E_s * (S_g/V) + E_{bm} * (S_{bm}/V)$ "를 추정할 수 있는 회귀 모델을 제시하기 위하여 다음과 같이 침투 계수 모델을 정의한다.

[0088]

침투 계수 모델

[0089]

수학식 2의 " $E_s * (S_g/V) + E_{bm} * (S_{bm}/V)$ "를 토양 및 건축 자재로부터의 타입에 따른 침투 농도를 나타내는 침투 계수(infiltration factor) S 로 표시했다. 또한, 위에서 설명한 물질수지 방정식과 입력 변수를 기반으로 다음 수학적 3을 사용하여 침투계수 S 를 직접 계산할 수 있다.

수학식 3

$$S = E_s \frac{S_g}{V} + E_{bm} \frac{S_{bm}}{V} = C_i(\lambda + \lambda_v) + \lambda(C_s + C_{bm}) - \lambda_v C_o.$$

$$\lambda_v = (f_t |T_i - T_o| + f_w u^2) \sqrt{N}.$$

[0090]

[0091]

한편, 토양 및 건축 자재로부터의 침투계수는 지리적 특성 및 건축 특성에 의해 영향을 받는다. 녹지 비율은 지표에서 라돈의 토양 방출률과 관련있는 인자로 간주될 수 있다. 건물 및 바닥의 균열이 요인이 될 수도 있기 때문에 거주지 i 의 토양 및 건축 자재로부터의 침투 계수를 추정하기 위한 다음 수학식 4의 통계 모델을 고려할 수 있다.

수학식 4

$$S_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 Y_{1i} + \beta_4 Y_{2i} + \beta_5 Y_{3i} + \epsilon_i,$$

[0092]

[0093] 여기서, S_i 는 각 거주지 i 에 대한 토양 및 건축 자재로부터의 침투계수, X_{1i} 는 거주지 i 가 속하는 행정 구역의 녹지 비율, X_{2i} 는 거주지 i 가 속한 행정 구역의 실내 라돈 수준의 기하 평균, Y_{1i} 는 거주 건물 i 의 건축 자재 유형, Y_{2i} 는 거주 건물 i 의 균열 정도, Y_{3i} 는 거주 층 i , ε_i 는 거주지 i 의 측정값 오류이다.

[0094] 수학적 식 3의 S 는 실제 데이터에 근거하여 계산한 값으로, S 를 계산하기 위해서는 라돈 농도 실측값 등 여러 정보가 필요한데, 추후 라돈 농도를 모를 경우 S 를 계산하기 위해 수학적 식 4의 S_i 식을 구축(회귀 모델)한 것이며, S_i 는 실측값이 없어도 i 번째 주택의 정보들을 가지고 S 를 추정할 수 있는 식으로, 이 추정된 S_i 를 S 로 간주하여 수학적 식 2 또는 수학적 식 3에 대입하여 C_i 를 추정할 수 있는 것이다.

[0095] 수학적 식 4에서 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ 는 수학적 식 3에서 계산된 S 와 거주지 정보($X_1 \sim X_3$)의 데이터에 근거하여 추정된 계수 값으로, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ 값과 거주지 정보($X_1 \sim X_3$)를 바탕으로 실제 라돈농도 측정값이 없더라도 S 를 추정할 수 있는 것이다.

[0096] 모형적용

[0097] 연구 자료를 수학적 식 3에 적용하여, 모형의 모수를 추정할 수 있도록 모형의 모수는 아래 표 1의 네 가지 유형 별로 분리하여 추정한다.

[0098] 즉 주택유형과 지하수 사용 유무에 따라 주택의 타입을 결정하는 것이다.

표 1

| TYPE결정 | | 주택유형 | |
|--------|-------------------------------|----------------------|--------------------|
| | | 단독(양옥)주택 단독(한옥)주택 | 아파트 다세대주택 연립 |
| 지하수 사용 | 예 (설거지, 빨래, 샤워 중에 하나라도 체크) | TYPE1 | TYPE3 |
| | 아니오 (그외) | TYPE2 | TYPE4 |

[0100] 연구 자료로는 실내 라돈 농도값과 겨울철 실내 라돈 농도와 기상 자료 및 녹지율 자료 등을 이용한다.

[0101] 먼저 실내 라돈 농도를 측정하기 위한 자료는 표 2와 같다.

[0102] 본 발명에서 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)라고 설명은 하고 있으나, 수치로 표현되는 농도값을 의미함을 밝혀둔다.

표 2

- 연구자료
- 본 연구의 1-4차년도 조사
 - 주택 1,400여 지점
 - 계절 상관 없이, 3-5개월 동안 측정
 - 계절보정보형 적용하여 연간평균 실내라돈 값으로 환산
 - 이상치 및 설문조사 결측 자료 제외

→ 1,300여 지점

| 설문조사 항목 | |
|----------|---|
| 주택특성 | 거주지역, 주택종류, 지면과 접해있는 유형, 건축년도, 지하공간 사용 유무 및 용도, 석고보드 사용 유무 및 위치, 바닥 및 벽면의 건축자재 종류 |
| 측정기 주변환경 | 측정기 설치된 장소 및 위치, 주변 창문유무, 주변 균열 유무 및 위치 |
| 생활양식 | 거주인원, 환기습관, 난방기간, 지하수 사용 유무 및 용도 |

[0103]

[0104] 또한, 겨울철 실내 라돈 농도는 다음 표 3과 조건을 설정하여 측정한다.

[0105] 이 자료는 공개자료로 시/군/구와 주택 유형 외에 다른 거주지 정보는 없는 상태이다.

표 3

- 전국주택라돈조사 (국립환경과학원)
- 2011-2012년, 2013-2014년, 2015-2016년
- 단독주택 14,000여 지점
- 이상치 제외

[0106]

[0107] 공개된 기상 자료 및 녹지율 자료는 표 4를 이용하였다.

표 4

- 기상 자료 (기상자료개방포털) 및 녹지율 자료
- 지역별 평균기온 및 풍속
- 광주광역시의 경우 평년값 관측 지점에 포함되어 있지 않아, 전라남도 평년값으로 대체

[0108]

[0109] 모형을 적용한 결과 주택 타입별 침투계수모델(Infiltration factor model)의 추정된 계수는 표 5와 같다.

표 5

| • 환기를 λ_v 과 Type에 따른 infiltration factor S 계산 | | | |
|---|-------|---|------|
| λ_v | | $\lambda_v = (f_t T_i - T_o + f_w u^2) N^{\frac{1}{2}}$ | 식(2) |
| S | TYPE1 | $S = -15.888 + 0.179X_1 + 2.727X_2 + Y_1 + Y_2 + Y_3$ | 식(3) |
| | TYPE2 | $S = -8.897 + 0.124X_1 + 2.718X_2 + Y_1 + Y_2 + Y_3$ | |
| | TYPE3 | $S = 4.490 - 0.096X_1 + 2.593X_2 + Y_1$ | |
| | TYPE4 | $S = 11.094 + 0.080X_1 + 2.484X_2 + Y_1 + Y_2 + Y_3$ | |
| 주어진 값 (엑셀 파일 참조) 대입하여 계산 | | | |

[0110]

[0111] 각 TYPE별 S 의 각 계수는 연구자료 data로부터 추출된 계수이다.

[0112] 즉 1,343 개의 거주지의 Type별 연구자료 Data를 입력하여 추출된 계수이다.

[0113] 침투 계수 S 의 계산값과 추정값의 비교는 도 5에 도시되어 있다.

[0114] 본 발명의 모델은 침투율에 달려 있기 때문에 개별 주택에 대한 토양 및 건축 자재로부터의 침투 계수에 대한 값을 얻어야 한다.

[0115] 따라서, 수학적 4를 사용하여 S 를 계산하고 그것을 사용하여 수학적 5의 매개 변수를 추정한다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 단독 주택의 실내 라돈 농도가 다른 주택의 실내 라돈 농도보다 높기 때문에 고려해야 할 요인은 거주 유형에 따라 다르다.

[0116] 지하수의 라돈은 실내 라돈 농도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있지만, 한국에서는 지하수에서의 라돈에 대한 정보가 부족하다. 주거 유형과 지하수가 실내 라돈 농도에 미치는 영향을 고려하기 위해 거주 유형과 지하수 사용량에 따라 모델을 4 가지로 나누어 침투 계수 S 를 추정했다. 따라서 우리는 거주지별 실내 라돈 농도 C_i 를 예측하기 위해 수학적 3과 수학적 4 그리고 수학적 5를 통합했다. 마지막으로 4 가지 모델 유형 모두의 예측 능력

을 평가하였다.

- [0117] 수학적식 3에서 S를 계산하기 위한 입력 변수와 수학적식 4에서 S를 추정하기 위한 파라미터는 다음과 같다.
- [0118] 1) 위에서 언급한 바와 같이, 실내 라돈 농도는 Park et al.의 보정 계수를 사용하여 거주지의 연 평균 라돈 농도로 변환되었다.
- [0119] 2) 건축 자재로부터의 라돈 유입은 토양에 비해 상대적으로 작기 때문에 " $C_s + C_{bm} \approx C_s$ "라고 가정했다. 또한, 한국의 토양 중 라돈 농도에 대한 정보가 부족하고 토양의 라돈 농도가 같은 조건에서 측정되지 않기 때문에 C_s 의 대표값으로 사용하기에 적합하지 않다. 한국의 실내 라돈 농도는 다른 지역에 비해 화강암 지역에서 높다.
- [0120] 본 발명에서 사용된 라돈 측정된 라돈에 대한 전국의 라돈 조사 자료는 겨울철에만 얻어졌으며 환기와 같은 요인들의 영향을 줄였다. 따라서 전국의 라돈 조사에서 얻은 자료를 이용하여 우리는 233 행정 구역 (시 / 군 / 구)의 토양 중 라돈 농도를 가중치로 결정했다. 가중치는 총 기하 평균에 대한 지역 기하 평균의 비율로 계산되었다. 실외 공기 중 라돈 농도 C_o 의 경우, 위와 같은 방법으로 17개 행정 구역 (시/도)의 실외 공기 중 라돈 농도를 추정했다.
- [0121] 실내 및 실외 온도차, 풍속 등의 기상 요인에 의해 환기율이 영향을 받기 때문에 월 평균 풍속과 실외 온도가 환기율을 계산하는데 사용되었다. 평균 월간 기상 요인의 연간 편차를 원활하게 하기 위해 30 년 평균 (1981 ~ 2010)을 사용했습니다. 또한, 환기율 λ_v 를 계산하기 위해, 피팅 파라미터 f_t 및 f_w 의 값은 Park et al.등의 값과 동일하다고 가정되었다. 또한 거주자의 환기 습관에 따라 N값이 다르게 할당되었다.
- [0122] 매개변수 추정결과
- [0123] 도 4는 침투 계수 모델 (R 버전 3.5.1)의 계수 추정치를 보여준다. 여기서 녹지 비율과 행정 구역의 실내 라돈 수준의 기하 평균과 같은 지리적 매개 변수의 영향은 건축 자재의 영향이 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다 ($P < 0.05$).
- [0124] 그러나 건축자재의 영향은 P가 0.05보다 크지 않았다. 군열의 수가 증가함에 따라, 침투 인자 값도 증가했지만, 통계적으로 유의하지는 않았다 ($P > 0.05$). 또한 층수가 많을수록 침투율이 높았지만, 이 값의 차이는 단독 주택에서만 통계적으로 유의미했다 ($P < 0.05$). 한편, 계산된 환기율은 0.24에서 0.73 h^{-1} ($AM = 0.34 \pm 0.08 \text{ h}^{-1}$)에서 다양하게 나타났으며, 이 값은 침투 속도를 계산하기 위해 포함되어 0.1에서 1 h^{-1} 사이이다. 이 결과를 토대로 토양 및 건축 자재로부터의 침투 계수를 추정하기 위해 침투 계수 모델을 적용했다. 모델의 적합성을 평가하기 위해 수학적식 3을 사용하여 S의 계산 된 값과 수학적식 4를 사용하여 S의 추정된 값을 비교했다(도 5참조).
- [0125] 도 5는 주택 타입에 따른 침투 계수 S의 계산 값과 추정 값의 비교표로, 모델은 단독 주택보다 다른 주거에서 더 좋은 성과를 보였으나 계산되고 추정된 침투율 값은 전반적으로 비슷한 추세를 따랐습니다.
- [0126] 수학적식 4에서 추정된 침투 계수 S로, 우리는 수학적식 2를 사용하여 실내 라돈 농도를 예측했다.
- [0127] 도 6은 주택 타입에 따른 실내 라돈 농도의 계산 값과 추정 값의 비교표로서, 측정된 실내 라돈 농도와 추정된 실내 라돈 농도 간의 일치도이다. 결과는 침투 계수 모델에서 단독 주택보다 다른 주택에 대한 결과가 좋았기 때문에 실내 라돈 농도를 추정할 때 단독 주택보다 다른 주택에 대한 일치도가 더 좋았다. 타입 3의 경우 주거의 수가 적지만 분산이 적어서 일치도가 가장 좋았다. 우리의 모델은 라돈 농도가 매우 높은 몇몇 주택을 제외하고는 이전 모델보다 우수한 성능을 보였다.
- [0128] 개인별 연평균 노출량(E)는 아래 수학적식 5에 의하여 계산된다.

수학적식 5

$$E_{ij} = C_i * (T_{ij} * 365 \text{ day} * Y_{ij}(\text{단위: year})) * 0.4 * 9 * 10^{-6}$$

$$E = \frac{\sum_{i=1, \dots, I} \sum_{j=1, \dots, J} E_{ij}}{\sum_{i=1, \dots, I} \sum_{j=1, \dots, J} Y_{ij}}$$

[0129]

[0130] 지금까지의 연평균 실내 라돈 노출 유효선량 계산과정을 요약 정리하면 다음 표 6과 같다.

표 6

| | 거주력* | 1 | 2 | 3 | | | |
|--------------------|----------------------|---|---------------------------|-------------------------|--------|---|--------|
| | 거주 연령 | 10-19세 | 20-24세 | 25-34세 | 35-44세 | 45-54세 | 55-64세 |
| 실내 라돈 농도 | 주소지 | 강원도 원주시 | 서울특별시 관악구 | 대전광역시 중구 | | | |
| | 주택 특성 | 민족주택/지하수 사용함 콘크리트/1층 | 다세대주택/지하수 사용함함 콘크리트/4층 | 아파트 콘크리트/8층 | | | |
| 주요 변수 | 환기습관 | 거의 열어놓지 않는다 | 하루에 1번 | 하루에 2-3번 | | | |
| | 단기간 라돈 농도 측정값 | - | - | - | | | |
| 실내라돈 농도 추정 모델 적용 | | | | | | | |
| 노출 평가 | 연평균 라돈 농도 추정값 | 291.13 Bq/m ³ | 61.48 Bq/m ³ | 48.43 Bq/m ³ | | | |
| 주요 계수 | 연간 거주시간 ^b | 5000.5 | 5146.5 | 4672 | 4854.5 | 4927.5 | |
| | 연령대별 거주시간 | 50005 | 25732.5 | 46720 | 48545 | 49275 | |
| 개인 생애 실내라돈 노출 유효선량 | | $E_{1.1} = 291.13 \frac{Bq}{m^3} \times 50005h \times 0.4 \times 9 \times 10^{-6} \frac{mSv \cdot m^3}{Bq \cdot h} = 52.41 mSv$ | | | | $E(\text{누적}) = \sum_{\substack{i: \text{living history} \\ j: \text{age group}}} E_{ij} = 92.66 mSv$ 연간 평균 실내라돈 노출량 = 92.66mSv/55y = 1.68mSv/y = 191.78nSv/h | |
| | | $E_{2.2} = 61.48 \frac{Bq}{m^3} \times 25732.5h \times 0.4 \times 9 \times 10^{-6} \frac{mSv \cdot m^3}{Bq \cdot h} = 5.70 mSv$ | | | | | |
| | | $E_{3.3} = 48.43 \frac{Bq}{m^3} \times 46720h \times 0.4 \times 9 \times 10^{-6} \frac{mSv \cdot m^3}{Bq \cdot h} = 8.15 mSv$ | | | | | |
| | | $E_{3.4} = 48.43 \frac{Bq}{m^3} \times 46720h \times 0.4 \times 9 \times 10^{-6} \frac{mSv \cdot m^3}{Bq \cdot h} = 8.46 mSv$ | | | | | |
| | | $E_{3.5} = 48.43 \frac{Bq}{m^3} \times 46720h \times 0.4 \times 9 \times 10^{-6} \frac{mSv \cdot m^3}{Bq \cdot h} = 8.59 mSv$ | | | | | |
| | | $E_{3.6} = 48.43 \frac{Bq}{m^3} \times 46720h \times 0.4 \times 9 \times 10^{-6} \frac{mSv \cdot m^3}{Bq \cdot h} = 9.35 mSv$ | | | | | |
| | | | | | | | |

[0131]

[0132] 여기서 E_{ij}는 거주지별(i) 거주연령별(j)로 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량, (T_{ij}*365day*Y_{ij}(단위:year))는 연령대별 거주시간을 의미한다.

[0133] 표 6을 참고하여 예를 들면, E_{3,2}는 3번째 거주지인 대전광역시 중구에서 35세~44세까지의 실내 라돈 노출 유효선량을 의미한다.

[0134] 다시 말하면, 개인 생애 실내 라돈 노출 유효선량은 거주지별 주택의 실내 라돈 농도를 추정하고, 추정된 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)에 연령대별 거주시간을 입력하고 그 합산값으로 개인 생애 실내 라돈 노출 유효선량을 산출하는 것이다.

[0135] 상술한 바와 같이 본원 발명은 실내 라돈 노출에 의한 건강 영향 평가를 위한 노력의 일환으로 본 발명이 수행되었으며, 추가 연구를 통해 라돈에 대한 누적 노출량을 추정하고 폐암과의 관계를 수립할 수 있는 모델을 개발할 수 있을 것이다.

[0136] 즉, 실내 농도에 영향을 미치는 많은 요인들로 인해 실내 라돈 농도를 추정하기 위한 모델을 개발하는 것이 어렵고 겉보기에는 비현실적이지만, 실내 라돈 농도를 추정하는 것은 실내에서 장기간의 라돈 노출 효과를 결정하는 데 필요하기 때문이다.

[0137] 본원 발명에서는 지형 특성, 건물 특성, 기상 특성 및 거주 행동을 고려하여 입력 변수에 대한 실제 측정값을 얻을 수 없을 때 실내 라돈 농도를 추정하기 위한 것으로, Park 등이 제안한 이전 실내 라돈 모델에 비해 모델의 적용 성과 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

[0138] 이 연구에는 몇 가지 한계가 있었다. 첫째, 이 모델은 라돈 농도가 매우 높은 몇몇 주택에서 더 좋은 결과를 보여주지 못했다. 이것은 본 연구에서 조사한 거주지 중 약 88%의 라돈 농도가 100 Bqm⁻³ 미만이기 때문일 수 있다.

[0139] 실내 라돈 농도가 저농도 및 고농도 주거에 고르게 분포되면 모델 성능이 향상되었을 수도 있다. 그리고 실내 라돈 수준에 영향을 미치는 중요한 요인인 환기율은 실제 측정없이 설문지에 보고된 환기 습관에 의존하여 산정되었다.

- [0140] 따라서 잘못된 주민 반응은 측정된 및 추정된 라돈 농도의 큰 차이를 초래할 수 있다. 따라서 설문지의 응답보다는 환기율을 예측하는 데 사용할 수 있는 다른 매개 변수를 고려하면 모델의 정확성이 향상될 것으로 예상된다. 또한 우리 모델은 건축 연도와 같은 다른 건물 특성을 고려하여 개선될 수 있을 것이다.
- [0141] 상술한 조사에 기반한 주택의 실내 라돈 농도 추정 방법을 이용한 연간 라돈 노출 유효선량 산출 방법에 대하여 설명한다.
- [0142] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 생애 연평균 라돈 노출 유효선량의 산출 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.
- [0143] 도 2를 참조하면, 본 실시예에 따른 생애 연평균 라돈 노출 유효선량 예측 방법은 다음과 같이 제어기(20)에 의해 수행되는 단계들로 구성된다. 도 1에 도시된 바와 같이, 스토리지(23)에는 상술한 조사를 통하여 추정된 생애 연평균 라돈 노출 유효선량을 예측하는 프로그램이 저장되어 있다. 도 2에 도시된 생애 연평균 라돈 노출 유효선량 예측 방법은 제어기(20)의 프로세서(22)가 스토리지(23)에 저장된 추정 프로그램을 실행함으로써 수행될 수 있다.
- [0144] 본 발명의 생애 연평균 라돈 노출 유효선량 예측 방법은 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)를 추정하는 과정(S110~S120)과 추출된 C_i 에 연령대별 거주시간을 입력하여 개인 생애 실내 라돈 노출 유효선량을 산출하는 과정(S130~S140)으로 이루어질 수 있다.
- [0145] 먼저 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)를 추정하는 과정(S110~S120)은 먼저 S110에서 제어기(20)는 사용자 인터페이스(24)를 통하여 사용자로부터 거주하는 거주지에 대한 데이터를 입력받는다.
- [0146] 거주지에 대한 데이터로는 거주지역, 주택유형, 지하수 사용유무, 그리고 환기습관에 대한 데이터를 입력한다.
- [0147] 주택유형은 단독인지 아파트/다세대/연립인지를 입력하게 한다.
- [0148] 단계 S110에서 거주지에 대한 Data입력이 완료되면 제어기(20)는 스토리지(23)에 저장된 해당 거주지에서 측정된 라돈의 평균농도, 실외 월별 평년 온도 및 월별 평년 풍속 등을 반영하여 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)를 산출한다(S120).
- [0149] 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)를 산출하기 위하여 먼저 제어기(20)는 상술한 바와 같이 환기율(λ_v)과 침투계수(S)를 계산한다(S121~S122).
- [0150] 환기율(λ_v)과 침투계수(S)가 계산되면, 이를 이용하여 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)를 계산한다(S123).
- [0151] 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)는 수학적 2에 의하여 산출된다.
- [0152] 제어기(20)는 스토리지(23)에 저장된 추정 모델에 따라 거주지별 연간 실내 라돈 농도를 산출하는 것이다.
- [0153] 단계 S120에서 거주지별 실내 라돈 농도(C_i)가 산출되면 연령대별 거주시간을 수학적 5의 연평균 실내 라돈 노출 유효선량(E_{ij})에 산입하여 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량을 산출한다(S130).
- [0154] 구체적으로 단계 S130에서는 거주지별 연간 거주시간을 입력받는다(S131).
- [0155] 단계 S110에서는 거주지 주소를 입력할 때 해당 거주지의 거주 연령을 함께 입력받도록 한다. 거주기간이 긴 경우에는 대략 10년 단위로 구별하여 연령대를 형성하는 것이 바람직하다.
- [0156] 이는 해당 거주지에 연간 거주시간이 예측되더라도 연령별로 실제 거주시간이 다를 수 있기 때문에 본 발명에서는 약 10년 단위로 구별하여 연령대별 거주시간을 기준으로 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량을 산출한다.
- [0157] 다시말하면 단계 S131에서 거주지별 연간 거주 시간이 입력되면 입력된 연령대별로 거주시간을 산출한다(S132).
- [0158] 단계 S132에서 연령대별 거주시간이 산출되면 프로세서(22)는 수학적 5의 연평균 실내 라돈 노출 유효선량(E_{ij})에 산입하여 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량을 산출한다(S133).
- [0159] 결국 단계 S130에서 연령대별 실내 라돈 노출 유효선량이 산출되면 이를 연령대별로 합산하여 개인 생애 실내 라돈 노출 유효선량을 산출하면 되는 것이다(S140).
- [0160] 이후, 단계 S140에서 생애 실내 라돈 노출 유효선량이 산출되면 산입한 연령으로 나누면 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량이 산출되는 것이다(S150).

[0161] 표 6을 참고하면, 거주지 1에서 10~19세까지 10년, 거주지 2에서 20~24세까지 5년, 그리고 거주지 3에서 25~34세까지 10년과, 35~44세까지 10년, 45~54세까지 10년 그리고 55~64세까지 10년이므로 거주지 3에서 모두 40년이 되므로, 산업한 연령은 모두 55년이 되므로 단계 S140에서 산출된 개인 생애 실내 라돈 노출 유효선량을 55년으로 나누면 생애 연평균 실내 라돈 노출 유효선량이 산출되는 것이다.

[0162] 상술한 바와 같이 본 발명은 측정된 라돈의 평균농도에 기타 연구 자료들을 적용하여 연간 라돈의 평균농도를 추정하고, 추정된 라돈의 평균농도값에 거주시간을 적용함으로써 거주자에게 노출되는 라돈의 연간유효선량을 산출하여 사용자에게 제공될 수 있는 것이다.

[0163] 이상에서 본 발명은 기재된 구체예에 대하여 상세히 설명되었지만 본 발명의 기술사상 범위 내에서 다양한 변형 및 수정이 가능함은 당업자에게 있어서 명백한 것이며, 이러한 변형 및 수정이 첨부된 특허 청구범위에 속함은 당연한 것이다.

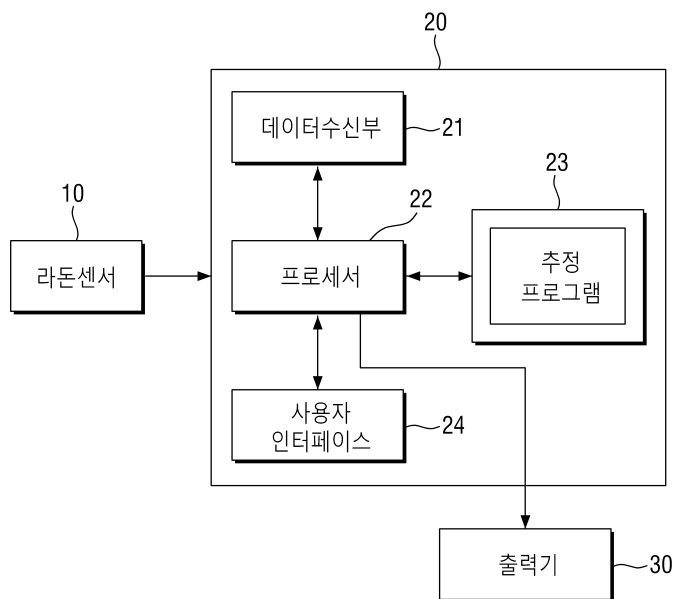
부호의 설명

[0164]

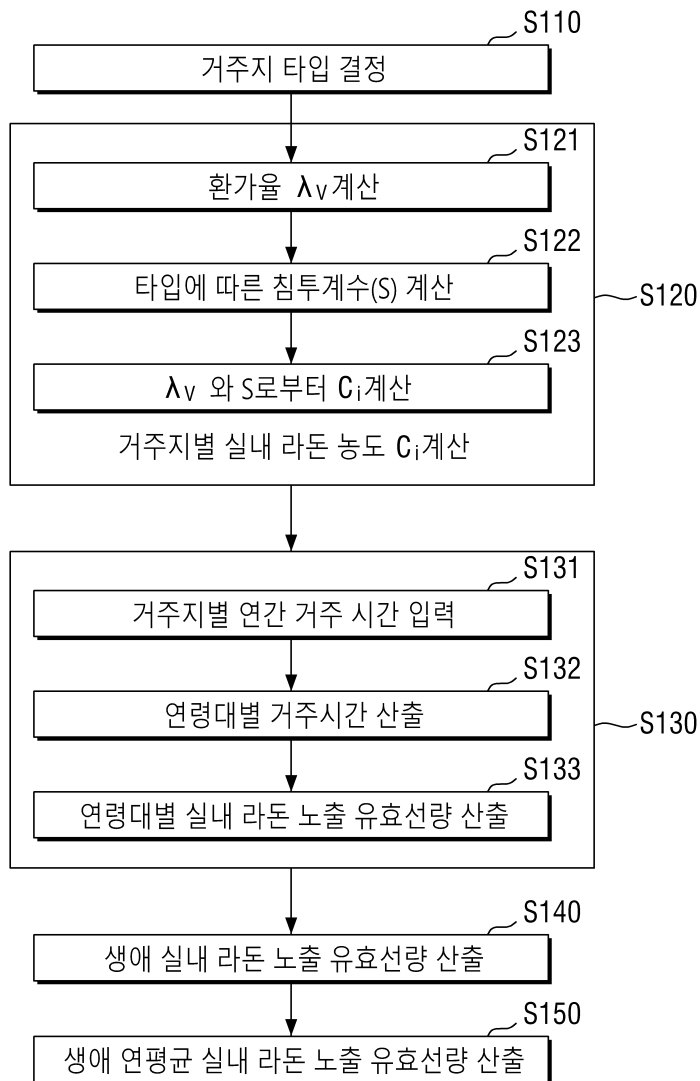
| | |
|----------------|------------|
| 10 ... 라돈 센서 | 20 ... 제어기 |
| 22 : 프로세서 | 23 : 스토리지 |
| 24 : 사용자 인터페이스 | 30 ... 출력기 |

도면

도면1



도면2



도면3

| | | | | AM±SD (Bq m ⁻³) | GM±GSD (Bq m ⁻³) |
|------------------|-------------------|-----|--------|--------------------------------|---------------------------------|
| Detached house | Groundwater usage | yes | Type 1 | 71.07±38.05 | 62.19±1.68 |
| | | no | Type 2 | 58.98±37.27 | 49.71±1.78 |
| Other residences | Groundwater usage | yes | Type 3 | 34.98±7.76 | 34.26±1.25 |
| | | no | Type 4 | 48.73±22.05 | 44.48±1.53 |
| Total | | | | 57.62±33.75 | 49.86±1.70 |

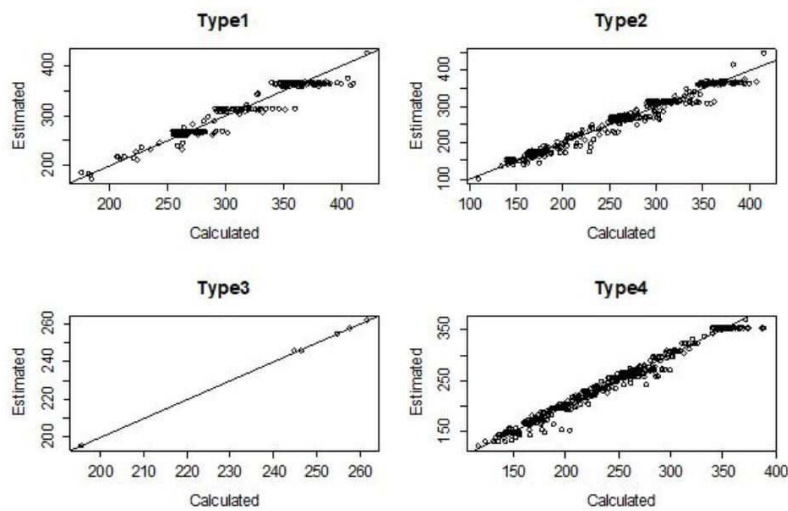
Abbreviations: AM, arithmetic mean; SD, standard deviation; GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation.

도면4

| Predictor variables | Multiple linear regression model | | | | | | | |
|--|----------------------------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|---------------|---------|
| | Type 1 | | Type 2 | | Type 3 | | Type 4 | |
| | β (SE) | p-value | β (SE) | p-value | β (SE) | p-value | β (SE) | p-value |
| (Intercept) | -15.89 (6.05) | 0.009 | -8.90 (2.58) | 0.001 | 4.49 (5.77) | 0.579 | 11.09 (2.11) | <0.001 |
| Greenery ratio | 0.18 (0.07) | 0.015 | 0.12 (0.03) | <0.001 | -0.10 (0.04) | 0.242 | 0.08 (0.03) | 0.002 |
| GM of indoor radon levels of the administrative district | 2.73 (0.07) | <0.001 | 2.72 (0.02) | <0.001 | 2.59 (0.07) | 0.018 | 2.48 (0.02) | <0.001 |
| Building materials | | | | | | | | |
| Concrete | reference | | reference | | reference | | reference | |
| Red brick | -1.52 (3.00) | 0.613 | -2.62 (1.37) | 0.055 | -4.00 (1.68) | 0.253 | 1.29 (1.71) | 0.449 |
| Cement block | -0.41 (2.96) | 0.890 | -4.76 (1.43) | 0.001 | -6.88 (1.68) | 0.152 | -2.81 (3.29) | 0.394 |
| Soil | -2.54 (3.98) | 0.524 | -0.22 (2.81) | 0.938 | | | | |
| Wood | -8.01 (5.48) | 0.145 | -5.32 (2.75) | 0.054 | | | | |
| Others | -3.22 (3.52) | 0.361 | -7.16 (2.06) | 0.001 | | | -14.19 (9.13) | 0.121 |
| Number of crack locations | | | | | | | | |
| 0-1 | reference | | reference | | | | reference | |
| ≥ 2 | 1.17 (2.44) | 0.632 | 2.43 (1.64) | 0.139 | | | 2.24 (2.58) | 0.384 |
| Floors | | | | | | | | |
| ≤ 1 | reference | | reference | | | | reference | |
| ≥ 2 | -4.94 (2.34) | 0.036 | -5.56 (1.35) | <0.001 | | | -0.58 (1.49) | 0.697 |

Type 1, detached house and groundwater use; Type 2, detached house and no groundwater use; Type 3, other residences and groundwater use; Type 4, other residences and no groundwater use; SE, standard error; GM, geometric mean; NA, not applicable.

도면5



도면6

