

후방 확산 영향을 고려한 건축자재에 의한 실내 라돈 농도 평가

**Assessment of the Indoor Radon Concentration
by the Building Materials considering Back Diffusion**

장미, 김용민, 이영옥, 강창순

서울대학교

서울시 관악구 신림동 산56-1

요 약

인산부산석고보드에 의한 실내 라돈 농도를 예측하기 위하여 먼저 라돈 이송 메커니즘을 살펴보았다. 이를 통해 실내 라돈 농도의 중요한 변수인 건축자재의 라돈 방출률을 유도하였으며, 라돈 방출률에 의한 실내 라돈 농도 예측 모델을 세웠다. 이 때, 실내 라돈 농도가 증가함에 따라 석고보드의 라돈 방출률이 감소하게 되므로, 이러한 후방 확산 영향을 고려하지 않을 경우, 실내 라돈 농도를 과대 평가할 위험이 있게 된다. 후방 확산은 건축자재의 두께에 비례하며, 이는 실험으로도 확인하였다. 석고보드에 의한 실내 라돈 농도를 평가한 결과, 석고보드 내 라듐 함량이 5pCi/g이하인 경우, 가장 보수적인 EPA기준을 만족하였다.

We examined radon transportation mechanism to predict the indoor radon concentration by phosphogypsum board. Using the mechanism, we verified the exhalation rate of building materials, one of the significant variables to affect radon concentration in dwellings. And we established the indoor radon concentration estimation model due to radon exhalation rate. As the radon concentration increases in dwellings, the exhalation rate from phosphogypsum board decreases. Therefore, radon concentration can be lower than the expected value in space of poor ventilation. Because back diffusion increases in proportion to material thickness, thickness increment does not induce the sudden increment of radon concentration. To satisfy the most conservative EPA limit, the radium content in the phosphogypsum board used in Korea is limited to less than 5pCi/g.

1. 서론

라돈은 자연에 존재하는 방사성 가스로서, 우라늄이나 토륨의 붕괴 과정 중에 발생한다. 라돈은 우리 생활환경 주변에서 쉽게 찾아 볼 수 있는 암석, 모래, 그리고 지하수뿐만 아니라 일반 건축자재로 사용되는 벽돌, 콘크리트 등에서도 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 라돈 가스는 우리가 거주하는 실내환경으로 유입되어 호흡 등에 의해 인체 내로 흡입될 경우 폐암을 초래하는 주요 오염물질로 인식되고 있다.

우리가 사용하고 있는 많은 건축자재 속에는 소량의 우라늄-라듐이 포함되어 있고 이러한 우라늄-라듐 계열의 방사성동위원소는 라돈가스를 생성시킨다. 라돈가스는 호흡을 통해 인체 내로 흡입되면 대부분 알파 방출체인 단반감기의 딸핵종을 방출하여 폐세포에 국부적인 피폭을 가하여 인체에 영향을 준다.

특히 건축자재중 인산석고보드의 원자재인 인산부산석고에 관심을 가질 필요가 있다. 이는 국내에서 인산 비료의 원료로서 인광석을 사용하고, 인산 비료의 생산 과정에서 부산물로 생성되는 석고는 건축 자재로 많이 사용되는 인산석고보드의 원자재가 되기 때문이다. 인광석에는 라듐과 우라늄이 많이 함유되어 있어, 일반적으로 인산석고보드 내에도 라듐의 양이 많다.

현대사회에서 일반인들은 대부분의 시간을 실내에서 보내고, 그 주변 환경을 구성하고 있는 건축물로 인한 영향이 인간에 대한 추가적인 주요 방사학적 요인이 됨을 감안할 때, 건축 자재 속에 포함된 라듐의 양을 파악하고 이로 인한 방사학적 영향을 명확히 분석하는 것이 필요하다. 한편, 아직 우리나라는 실내 라돈 준위나 석고보드 내 라듐 함량에 대한 특별한 규정이 없다. 따라서 실내 라돈 준위나 건축자재 내 라듐 함량에 대한 기준치를 세울 필요가 있으며, 이러한 기준치를 세우기 위한 연구가 필요하다.

2. 라돈 이송 메커니즘

토양이나 건축자재 같은 기공성 물질(porous medium)에서 라돈 기체의 생성과 이송에 대한 분석은 거주지로의 라돈 방출에 대한 기본이 된다. 라돈은 기본적으로 확산(diffusion)과 이류(advection) 메커니즘에 의해 움직인다. 확산은 라돈 농도 차에 의한 것이고, 이류는 압력 차에 의한 것이다. 라돈 농도에 의한 확산은 기체 상에서나 액체 상에서 중요하다. 기공성 물질을 통한 라돈 이송에 대한 설명은 다음과 같은 정보가 필요하다.

- (1) 매개물의 구조
- (2) 이동을 유발하는 과정
- (3) 라돈과 매개물의 반응
- (4) 라돈 생성

즉, 공극 같은 매개물의 구조는 라돈 이송에 큰 영향을 미친다. 공극의 크기가 크고 많을수록 물질에서의 라돈 이송은 쉬워지며, 결과적으로 라돈 방출률이 커지게 된다. 라돈의 이동을 유발하는 과정은 위에서도 언급했듯이 확산과 이류가 주를 이룬다. 라돈과 매개물의 반응으로는 흡수와 흡착이 있다. 매개물에서의 라돈 생성은 라듐함량과 발산계수에 의존한다. 따라서 라돈 이송에 대한 수학적 모델은 다음과 같은 평형 반응을 포함하여 세울 수 있다.

- (1) 기체와 액체 상으로부터의 확산
- (2) 기체 상에서의 이류(advection)
- (3) 액체 상에서의 흡수(absorption)
- (4) 고체 상에서의 흡착(adsorption)

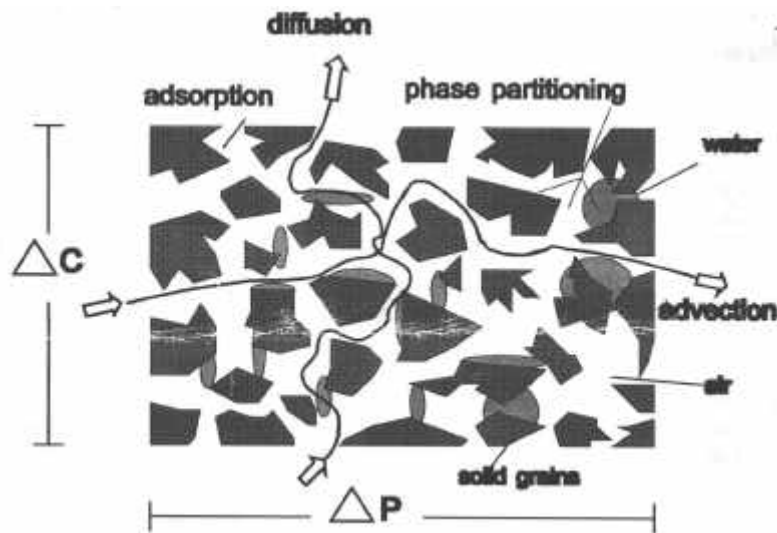


그림 1. 기공성 물질을 통한 라돈 이송 메커니즘

위의 반응들을 식으로 구성하면 다음과 같다. 기체 상에서의 라돈 농도에 대한 라돈 평형 식은 (a)확산 (b)이류 (c)붕괴 (d)생성 (e)이동 향으로 구성된다.

$$(1-m)\varepsilon \frac{\partial C_a}{\partial t} = \nabla \cdot ((1-m)\varepsilon D_a \nabla C_a) + \frac{K}{\mu} \nabla P \cdot \nabla C_a - \lambda C_a + R\rho\lambda E_a - \sum_{i \neq a} (T_{ai} - T_{ia}) \quad (1)$$

여기서, C_a = 공기로 채워진 기공 공간에서의 라돈 농도(Bq/m³)

D_a = 공기로 채워진 기공 공간에서의 라돈 확산계수(m² s⁻¹)

K = 물질의 공기 투과성(m^2)

μ = 공기의 점성도($Pa \cdot s$)

ε = 전체 공극률

m = 기공에서의 물의 침투 비율

P = 기공에서의 공기의 압력(Pa)

λ = 라돈의 붕괴 상수(s^{-1})

R = 고체 물질의 라돈의 함량($Bq \text{ kg}^{-1}$ dry mass)

ρ = 고체 물질의 밀도($kg \text{ m}^{-3}$)

E_a = 기공의 공기 중에서의 라돈 방출 계수

T_{ai} = 기공 공기로부터 다른 상으로의 라돈 이송 인자($Bq \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

T_{ia} = 다른 상으로부터 기공 공기로의 라돈 이송 인자($Bq \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

액체 상에서의 라돈 농도에 대한 평형식은 (a)확산 (b)이류 (c)붕괴 (d)생성 (e)이동 항으로 구성된다.

$$m\varepsilon \frac{\partial C_w}{\partial t} = \nabla \cdot (m\varepsilon D_w \nabla C_w) - m\varepsilon \lambda C_w + R\rho\lambda E_w - \sum_{i \neq w} (T_{wi} - T_{iw}) \quad (2)$$

여기서, C_w = 물로 채워진 기공 공간에서의 라돈 농도($Bq \text{ m}^{-3}$)

D_w = 물로 채워진 기공 공간에서의 확산계수($m^2 \text{ s}^{-1}$)

E_w = 기공의 물에서의 라돈 방출계수

T_{wi} = 기공 물로부터 다른 상으로의 라돈 이송 인자($Bq \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

T_{iw} = 다른 상으로부터의 기공 물로의 라돈 이송 인자 ($Bq \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

고체 표면에서의 라돈 흡착에 대한 라돈 평형식은 (a)확산 (b)붕괴 (c)이동 항으로 구성된다.

$$\rho \frac{\partial C_s}{\partial t} = -\rho\lambda C_s + R\rho\lambda E_s - \sum_{i \neq s} (T_{si} - T_{is}) \quad (3)$$

여기서, C_s = 흡착된 라돈 농도 ($Bq \text{ kg}^{-1}$)

E_s = 고체 표면에서의 라돈 방출 계수 ($m^2 \text{ s}^{-1}$)

T_{si} = 기공 고체 표면에서 다른 상으로의 라돈 이송 인자($Bq \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

T_{is} = 다른 상으로부터 기공 고체 표면으로의 라돈 이송 인자 ($\text{Bq m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

위의 식을 하나의 식으로 도출하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

(1) 젖은 표면에 대한 흡착을 무시한다. ($T_{us} = T_{sv} = 0$)

(2) 물 상태와 공기 상태에서의 교환이 일어나는 시간 크기는 일반적인 라돈의 이송에 대한 시간 크기보다 훨씬 짧다. ($T_{ua} = T_{aw}$)

(3) 공기와 흡착된 상간의 교환은 빠르거나 건조한 표면의 흡착은 무시할만하다. ($T_{as} = T_{sa}$)

여기서 가정(1)은 일반적인 토양에 대해 잘 성립하는데, 이는 물이 라돈보다 대부분의 미세탈 표면에 대해 훨씬 더 큰 친화력을 가지고 있기 때문이다. 한편, 물과 공기 상에서의 교환 시간은 물의 깊이가 10에서 $100\mu\text{m}$ 일 때 0.1에서 10초 정도이다. 확산이나 이류에서의 농도 변화의 시간 크기는 이보다 훨씬 크기 때문에 가정(2)도 적절하다고 할 수 있다. 가정(3)은 흡착이 작은 모래의 경우에는 타당하나, 흡착이 중요할 수 있는 건축자재나 점토의 경우에는 적용에 있어서 불확실성을 고려해야 한다.

위의 세 가지 가정들을 이용하여 하나의 식을 도출한 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = \nabla \cdot D_c \nabla C_a + \frac{K_c}{\mu} \nabla P \cdot \nabla C_a - \lambda C_a + R \rho \lambda E_c \quad (4)$$

식(4)로부터 알 수 있듯이 라돈 이송에 영향을 미치는 요소들은 공극률, 확산계수, 발산계수 등이 있다. 공극률이란 물질 속의 공기의 부피와 전체 부피의 비를 말한다. 공극률의 증가는 라돈이 물질 안에서 이동할 수 있는 더 많은 공간을 제공하므로, 라돈 이송에 대한 저항을 줄인다. 또한 농도의 변화가 라돈 이송의 움직이는 힘일 때, 물질의 라돈 확산계수는 라돈이 물질을 통과하는 능력을 결정짓게 된다. 이 변수는 물질의 공극률과 투과성에 비례한다.

공극률은 시료의 단위 부피 속에 포함된 공극의 양을 표현하는 것으로 대부분의 건축 자재에는 공극이 존재하고 있으며 이런 공극은 Ra-226이 알파 붕괴하여 생성된 라돈이 건축 자재 외부로 빠져나갈 수 있는 유일한 통로이다. 따라서 건축자재의 공극률에 따라서 외부로 방출되는 라돈의 양이 달라진다. 공극률은 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$= \left(\frac{(g) - (g)}{(g/cm^3)} \right) \div (cm^3)$$

발산계수 E는 전체 기공에서의 라돈의 방출을 의미한다. E, E_a, E_w 사이의 관계는 다음

그림과 같다. m 이 증가하면서 기공의 더 많은 라돈 분자가 물에서 멈추게 된다. 따라서 E_a 는 감소하고 E_w 는 증가한다. 그리고 어느 정도의 수분 함량이 되면 E_a 는 0이 되고 $E=E_w$ 가 된다. 그 이상의 수분의 증가는 E 에 거의 변화를 주지 않는다.

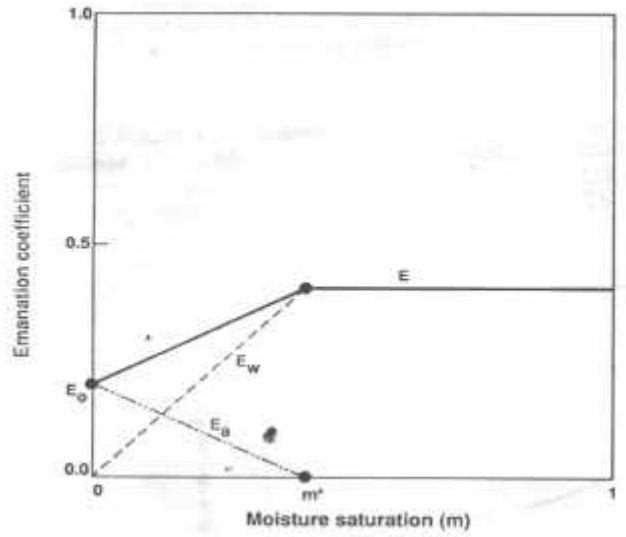


그림 2. 수분 함량과 발산계수 사이의 관계

3. 건축자재의 라돈 방출률

지금까지 기공성 물질, 즉 건축자재나 토양 같이 공극이 존재하는 물질에서의 라돈 이송에 관하여 살펴보았다. 이제 그 중에서도 건축자재에서의 라돈 이송을 살펴보기 위해 평형 상태의 한쪽 방향으로의 라돈 이송을 살펴보면 D_c , K_c , E_c 의 값이 변하지 않으므로 식(4)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_c \frac{d^2 C_a}{dx^2} - \frac{K_c}{\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left(\frac{dC_a}{dx} \right) - \lambda C_a + R \rho \lambda E_c = 0 \quad (5)$$

실내에서의 라돈의 이송은 확산에 의한 것이 주된 인자이므로 이류 항을 무시하면, 다음과 같다.

$$D_c \frac{d^2 C_a}{dx^2} - \lambda C_a + R \rho \lambda E_c = 0 \quad (6)$$

식 (6)을 풀어보면

$$\frac{d^2 C_a}{dx^2} - \frac{\lambda}{D_c} C_a = -\frac{P_0}{D_c} \quad (7)$$

여기서, $P_0 = R\rho\lambda E_c$ 이다.

평형 상태에서의 경계조건은 그림 3에서 보듯이 $C_a(x=0) = C_1$, $C_a(x=x_c) = C_2$ 이다.



그림 3. 건축자재에서의 라돈 이송 경계조건

식 (7)은 다음과 같이 변형할 수 있는데

$$\frac{d^2 C_a}{dx^2} - \frac{C_a}{l_0^2} = -\frac{P_0}{D_c}$$

여기서, $l_0^2 = \frac{D_c}{\lambda}$, l_0 =확산 길이(diffusion length)이다.

위 식의 해는 다음과 같다.

$$C_a(x) = A \sinh\left(\frac{x}{l_0}\right) + B \cosh\left(\frac{x}{l_0}\right) + \frac{P_0}{\lambda} \quad (8)$$

여기서, $A = \frac{C_2 - C_1 \cosh \beta - \frac{P_0}{\lambda} (1 - \cosh \beta)}{\sinh \beta}$, $B = C_1 - \frac{P_0}{\lambda}$, $\beta = \frac{x_c}{l_0}$ 이다.

위의 결과를 이용하여 건축자재에서의 라돈 방출률을 예측할 수 있다. 라돈 방출률은 건축자재에서 단위 시간당 자재 외부로 붕괴되어 나오는 라돈의 양을 나타내는 인자이다. 건축자재로부터 방출되는 라돈이 옥내 라돈농도에 영향을 미치기 때문에 실제 건축자재로부터 어느 정도의 라돈이 방출되는지를 평가하는 것은 매우 중요한 사항이다. 건축자재에서의 라돈 방출률은 다음과 같다.

$$F = \frac{D_c}{l_0} \left[\frac{P_0}{\lambda} \left(\frac{\cosh \beta - 1}{\sinh \beta} \right) + \frac{C_1}{\sinh \beta} - C_2 \frac{\cosh \beta}{\sinh \beta} \right] \quad (9)$$

또한 건축자재의 두께는 확산 길이(diffusion length)에 비해 아주 작은 경우가 대부분이다. 즉, $x_c \ll l_0$ 이므로, 다음과 같이 간단하게 할 수 있다.

$$\sinh \beta \approx \beta, \quad \cosh \beta \approx 1 + \frac{1}{2} \beta^2$$

$$F = \frac{D_c}{l_0} \left[\frac{P_0}{\lambda} \left(\frac{x_c}{2l_0} \right) + C_1 \frac{l_0}{x_c} - C_2 \left(\frac{l_0}{x_c} + \frac{1}{2} \frac{x_c}{l_0} \right) \right] \quad (10)$$

만약 초기에 $C_1 = C_2 = 0$ 가 되면 건축자재에서의 라돈 방출률은 다음과 같다.

$$F = Ra \rho E_c \sqrt{\lambda D_c} \frac{\beta}{2} = Ra \rho E_c \lambda \frac{x_c}{2} \quad (11)$$

위의 값은 건축자재의 각각의 면으로부터 나오는 값이다. 따라서 한쪽 방향으로 모든 플럭스가 방출된다고 할 때 다음과 같다.

$$F = Ra \rho E_c \sqrt{\lambda D_c} \tanh \beta \quad (12)$$

만약, 확산 길이에 비해 건축자재의 두께가 매우 작다면 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$F = Ra \rho E_c \sqrt{\lambda D_c} \beta = Ra \rho E_c \lambda x_c \quad (13)$$

위의 식으로부터 건축자재 표면으로부터의 라돈 방출률은 건축자재의 공극률, 확산계수에 비례하며, 라돈 생성률과 건축자재 표면 밑의 라돈 농도는 건축자재 표면 라돈 방출률을 증가시킬 수 있다. 반면에, 건축자재 위의 라돈 농도는 표면으로부터의 라돈 플럭스를 감소시킨다. 따라서 두께에 따른 라돈 플럭스의 변화를 관찰하고자 할 때에는 건축자재 표면에서의 라돈 농도를 0으로 하는 것이 정확한 실험을 위해서 필요하다.

4. 실내 라돈 농도 평가 모델

위에서 이론적으로 도출한 건축자재의 라돈 방출률은 실내 라돈 농도의 평가에 이용할 수 있다. 이 때 고려해야 할 점은 실내 라돈 농도가 높아지게 되면 건축자재로부터 방출되는 라돈 확산의 양이 감소한다는 것이다. 이를 실내 라돈 농도 예측에 적용해보면, 시간이 흐르면서 실내 라돈 농도가 증가하게 되고, 건축자재에서 방출되는 라돈 방출률은 처음 라돈 방출률보다 작아지게 된다. 따라서 충분한 시간이 흐른 후의 실내 라돈 농도를 측정하기 위해서는 시간에 따라 확산 항의 감소, 즉 후방 확산(back diffusion)의 영향을 고려하여 실내 라돈 농도를 예측할 필요가 있다. 이 후방 확산항의 고려 없이 실내 라돈 농도를 예측할 경우 실내 라돈 농도를 과대 평가할 위험이 있다. 따라서 좀 더 정확한 실제적인 실내 라돈

평가를 위해 후방 확산에 대한 평가가 이루어질 필요가 있다.

이를 위해 다음과 같이 후방 확산 항을 구할 수 있다. 예를 들어 건축자재의 표면의 농도 $C_1 = C_2 = C$ 가 되면 다음과 같다.

$$F = \frac{D_c}{l_0} \left[\frac{P_0}{\lambda} \left(\frac{x_c}{2l_0} \right) - C \left(\frac{1}{2} \frac{x_c}{l_0} \right) \right] = \frac{D_c}{l_0} \frac{x_c}{2} \left(\frac{P_0}{\lambda} - C \right)$$

즉 위의 식은 다음과 같은 형태가 된다.

$$F = F_0 - \alpha C$$

$$F_0 = R\rho\lambda E_c x_c, \quad \alpha = \lambda x_c (mh^{-1})$$

즉, 후방 확산 계수는 건축자재의 두께가 확산 길이에 비해 아주 작은 범위에 있을 때, 건축자재의 두께에 비례하게 된다. 실제로 후방 확산을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때의 실내 라돈 농도를 평가하여보고 이를 실험 결과와 비교해볼 필요가 있다.

후방 확산을 고려하지 않았을 때 실내 라돈 농도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dC_{Rn}(t)}{dt} &= \frac{F_0 A}{V} - \lambda C(t) \\ C_{Rn}(t) &= \frac{F_0 A}{\lambda V} [1 - \exp(-\lambda t)] \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $C_{Rn}(t)$ = 시간에 따른 실내 라돈 농도

A = 실내공간에서 사용되는 건축자재의 면적

V = 실내공간의 부피

후방 확산을 고려하게 되면 실내 라돈 농도는 다음 식으로부터 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= F_0 - \alpha C_{Rn}(t) \\ \frac{dC_{Rn}(t)}{dt} &= \frac{F_0 A}{V} - \frac{\alpha A}{V} C_{Rn}(t) - \lambda C_{Rn}(t) = \frac{F_0 A}{V} - \left[\frac{\alpha A}{V} + \lambda \right] C_{Rn}(t) \\ C_{Rn}(t) &= \frac{F_0 A / V}{\alpha A / V + \lambda} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\alpha A}{V} + \lambda \right) t \right] \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

후방 확산 계수도 건축자재의 두께에 비례하므로, 만약 건축자재의 두께가 두꺼워졌을 때 증가하는 플럭스의 양만큼 감소하는 양도 커져, 실내 라돈 농도는 그리 커지지 않는다.

5. 인산석고보드에 의한 실내 라돈 농도

우리나라에서 사용되는 건축자재 중 석고보드에서 가장 높은 라돈 방출률을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 건축자재 중 석고보드에 관심을 가질 필요가 있다. 국내에서 인산 비료의 원료로서 인광석을 사용하고, 인산 비료의 생산 과정에서 부산물로 생성되는 석고는 건축 자재로 많이 사용되는 석고 보드의 원자재가 되는데 인광석에는 라듐과 우라늄이 많이 함유되어 있어, 일반적으로 석고보드 내에도 라듐의 양이 많다. 우리나라에서 생산되는 인산 부산석고보드 내 Ra-226 함량은 인광석의 수입원에 따라 180-550 Bq/kg (5-15 pCi/g)으로 알려져 있다.

따라서 석고보드를 이용하여 실내 라돈 농도를 예측하는 실험을 하고, 이를 이용하여 가장 보수적인 EPA 기준을 만족시키는 석고보드 내 라듐 함량을 평가하였다.

지하철 역사처럼 환기율이 나쁜 공간에서 라돈 농도를 평가할 경우, 후방 확산의 영향은 무시할 수 없게 된다. 따라서 석고보드를 이용하여 환기율이 없는 공간에서의 실내 라돈 농도를 평가하는 실험을 수행하였다. 실내 라돈 농도를 예측하기 위한 실험으로서 1m³의 콘테이너 안에 석고보드를 넣은 후 라돈 탐지기로 라돈 농도를 측정하였다. 사용된 라돈 측정기는 DURRIDGE RAD7으로서 반도체 이용 알파감지기이다. 감지기에 사용되는 반도체는 보통 실리콘으로 알파선을 직접 전기적 부호로 전환시킨다.

그림 4는 두께에 따른 실내 라돈 농도를 예측값과 실험값을 비교한 것이다. 두께가 증가할수록 후방확산의 영향 또한 커짐을 확인할 수 있다. 이를 통해 건축자재의 두께에 의한 실내 라돈 농도에 대한 과대 평가의 위험을 막을 수 있다.

실험결과에서 어느 정도 두께까지는 후방 확산의 영향을 고려한 결과와 비슷하였다. 측정 초반에 예측값보다 높은 값이 측정되는 것은 석고보드의 표면적 이외에 모서리에서도 방출되는 라돈의 영향으로 보이며, 따라서 초반의 높은 농도는 측정 후반으로 갈수록 예측값보다 낮은 값이 측정되는 결과를 보이게 된다. 라돈 농도 실험값의 급작스런 변화는 외부 환경, 즉 기온의 영향으로 생각되며, 이는 추후 연구가 필요하다 하겠다.

거의 모든 건축자재들이 건축자재 두께가 확산 길이에 비해 매우 작으므로, 식 (15)는 다른 건축자재들에도 적용할 수 있으며, 쉽게 건축자재에 의한 실내 라돈 농도를 예측할 수 있다. 또한 이를 이용하여 실내 라돈농도 제한치의 만족 여부를 평가할 수 있을 것으로 보인다.

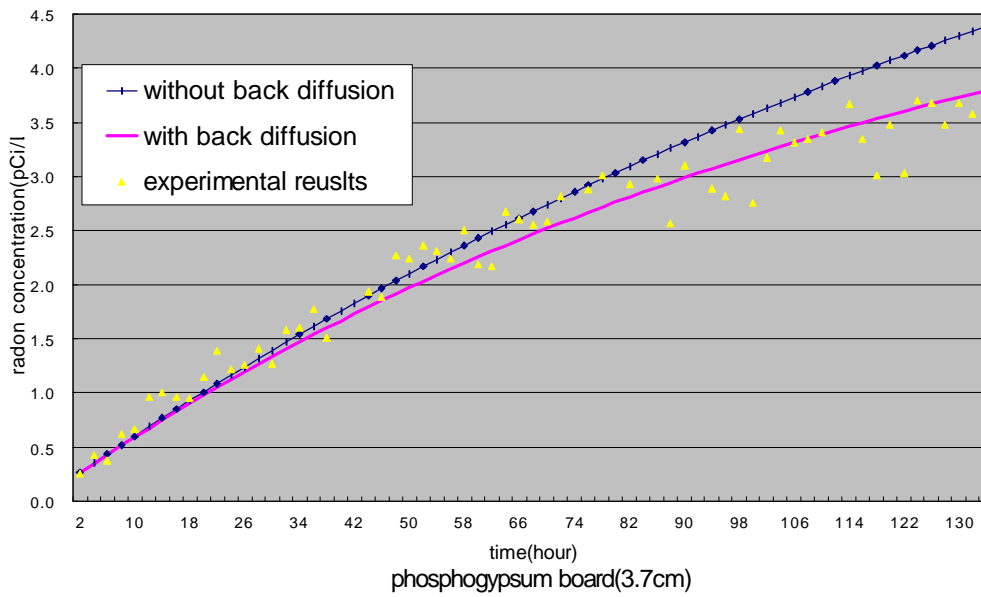
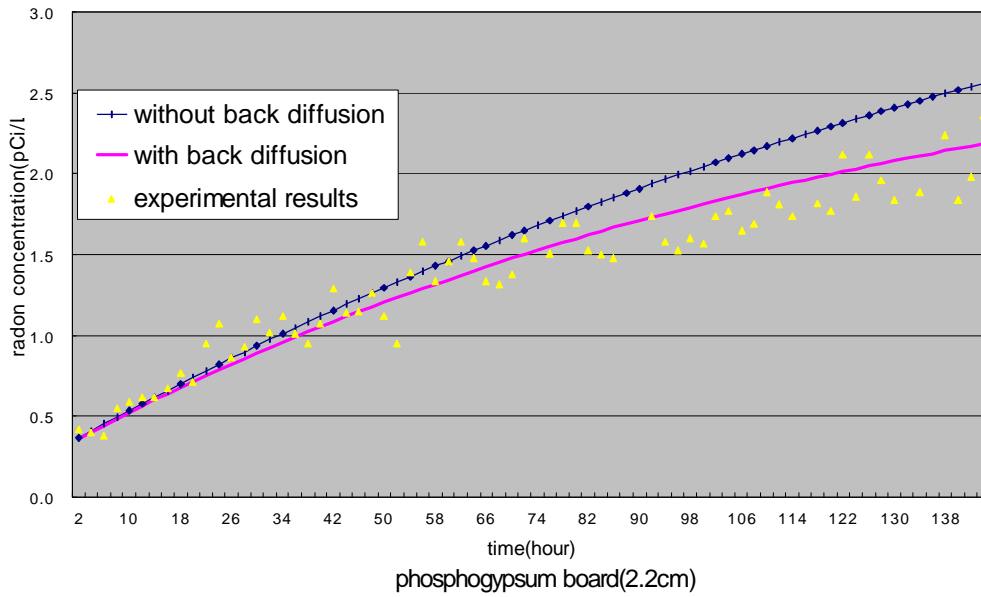


그림 4. 석고보드 두께에 따른 라돈 농도 예측값과 실험값의 비교

주거시설 (아파트 및 빌딩) 내에는 석고보드를 많이 사용하고 있다. 사용되고 있는 석고보드에 Ra-226이 함유되어 있다면, 알파 핵변환에 의하여 Rn-222가 생성되어 실내로 유입된다. 우리나라에서 건설되고 있는 주거시설인 아파트의 설계 자료를 살펴보면 표 1과 같다. 또한 실내 Rn-222 평형상태 농도를 구하기 위해 사용된 입력자료인 국내 석고보드의 특성을 살펴보면 표 2와 같다. 석고보드를 사용한 국내 주거시설의 실제 자료를 이용하여 실내 라돈 농도를 평가하였다.

표 1. 국내아파트 설계자료

내용	부호	자료	비고
아파트 부피	V	266.8m ³	아파트평균면적 (115m ² ×층고2.32m)
아파트 실내 환기량	R	3.88volumes/hour	환기량 설계 기준: - 사무실(일반):10m ³ /h·m ² - 사무실(개인):8m ³ /h·m ² - 주택, 아파트:9m ³ /h·m ²
아파트 내 사용석고보드 면적	A	152m ²	9.5mm기준, 아파트 사용 석고보드 양 = 940kg (석고보드 약 3.52kg/m ³ 소요)

표 2. 국내 석고보드 특성자료

내용	부호	자료
석고보드 Ra-226 함유량	ξ	5-15pCi/g (다양)
석고보드 밀도	ρ	0.65g/cm ³
석고보드 발산계수	E	0.06 포장보드의 경우 0.11 비포장보드의 경우
석고보드 제품 두께	X	0.95cm 1.25cm 1.50cm

식(15)에 의거 포장된 9.5 mm 두께 석고보드로부터의 라돈가스 방출에 의한 실내 평형 상태의 Rn-222 농도는 다음과 같다. 이 때 환기율은 전혀 고려하지 않았으며, 최대 5pCi/g 인 경우 EPA기준을 만족시키는 것을 확인할 수 있다.

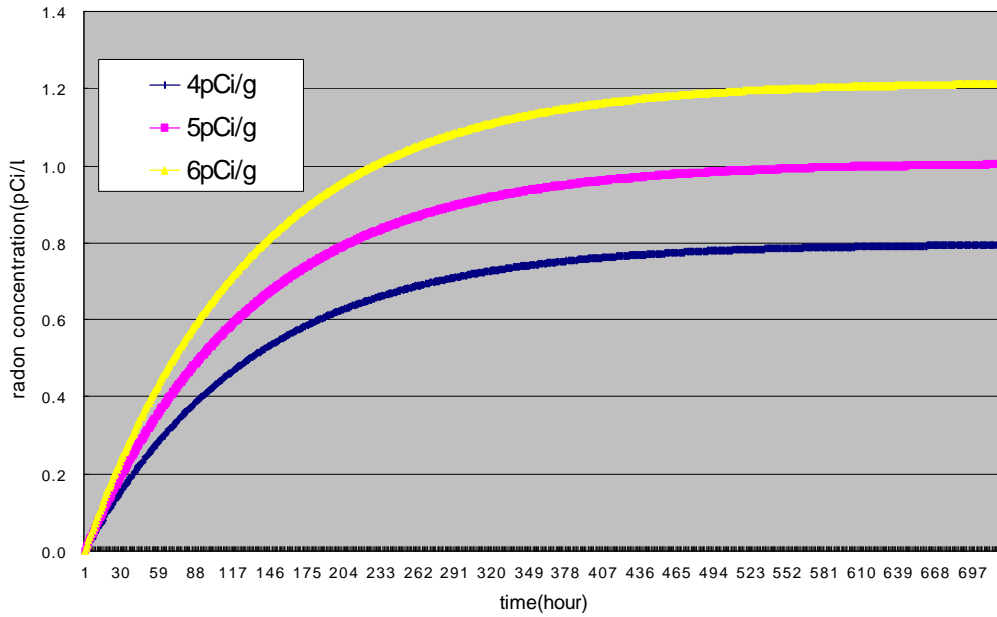


그림 5. 석고보드 내 라듐함량에 따른 실내 라돈 농도

여러 가지 외부 인자들이 실내 라돈 농도에 영향을 미치게 되는데, 대표적인 것으로는 압력, 습도, 온도가 있다. 갑작스런 압력의 감소는 건축자재로부터 라돈 방출률을 증가시키는 것으로 잘 알려져 있다. 습도에 의한 영향은 건축자재의 습도 함량에 따라 달라지게 된다. 온도에 의한 영향에 대한 실험도 많이 이루어졌는데 콘크리트의 경우, 온도가 올라갈수록 라돈 방출률이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 건축자재별로 각각의 고유특성이 있어 외부 환경이 라돈 방출률에 미치는 영향은 달라질 수 있다. 즉, 건축자재별로 이러한 인자들의 영향이 달라지게 되며, 그 영향의 크기 또한 다르다.

6. 결론

현대사회에서 일반인들은 대부분의 시간을 실내에서 보내고, 그 주변 환경을 구성하고 있는 건축물로 인한 영향이 인간에 대한 추가적인 주요 방사학적 요인이 됨을 감안할 때, 건축 자재 속에 포함된 라듐의 양을 파악하고 이로 인한 방사학적 영향을 명확히 분석하는 것이 필요하다.

특히 건축자재중 석고보드의 원자재인 인산부산석고에 관심을 가질 필요가 있다. 인산 비료의 생산 과정에서 부산물로 생성되는 석고는 건축 자재로 많이 사용되는 석고 보드의 원자재가 되는데, 일반적으로 석고보드 내에는 라듐의 양이 많다.

인산부산석고보드에 의한 실내 라돈 농도를 예측하기 위하여 먼저 라돈 이송 메커니즘을 살펴보았다. 이를 통해 실내 라돈 농도의 중요한 변수인 건축자재의 라돈 방출률을 유도하였으며, 라돈 방출률에 의한 실내 라돈 농도 예측 모델을 세웠다. 이 때, 실내 라돈 농도가 증가함에 따라 석고보드의 라돈 방출률이 감소하게 되므로, 이러한 후방 확산 영향을 고려

하지 않을 경우, 실내 라돈 농도를 과대 평가할 위험이 있게 된다. 후방 확산은 건축자재의 두께에 비례하며, 이는 실험으로도 확인하였다.

석고보드에 의한 실내 라돈 농도와 외부 감마 피폭선량을 평가한 결과, 석고보드 내 라돈 함량이 5pCi/g이하인 경우, 가장 보수적인 EPA기준을 만족하였다.

7. 참고문헌

[1] V.C. Rogers and K.K. Nielson, "Multiphase Radon Generation and Transport in Porous Materials", Health Physics Vol. 60, No. 6, pp.807-815, 1991

[2] Ching-Jiang Chen, Pao-Shan Weng, and Tieh-Chi Chu, "Radon Exhalation Rate from Various Building Materials", Health Physics Vol. 64, No. 6, pp.613-619, 1993

[3] Christopher Y. H. Chao and Thomas C. W. Tung, "Radon Emanation of Building Material-Impact of Back Diffusion and Difference between One-Dimensional and Three-Dimensional Tests", Health Physics Vol. 76, No. 6, pp.675-681, 1999