

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

인산부산석고보드 내 함유된 라듐과 라돈이 실내거주환경에 미치는 방사학적 영향 평가

Assessment on Radiological Impact of Radium and Radon in Phosphogypsum Board on Residential Environment

장미, 고현석, 이영욱, 문주현, 강창순

서울대학교
서울시 관악구 신림동 산56-1

요 약

국내 건축자재로 널리 사용되는 인산부산석고보드에는 ^{226}Ra 이 약 $180\sim 550 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($5\sim 15 \text{ pCi}\cdot\text{g}^{-1}$) 함유되어 있는 것으로 알려져 있다. ^{226}Ra 은 알파 핵변환을 통하여 딸핵종인 불활성 기체상태의 ^{222}Rn 을 실내 공기 중으로 방출하며, 이어서 ^{222}Rn 은 ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , 그리고 ^{214}Po 등의 딸핵종을 생성한다. ^{222}Rn 의 딸핵종 중 상기 4개의 단반감기 딸핵종은 호흡을 통해 인체 내로 흡입될 경우, 기관지 및 폐의 상피세포에 국부적인 피폭을 가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 국내에서 생산되는 ^{226}Ra 을 함유한 인산부산석고보드를 아파트 건축자재로 사용한 경우, 아파트 실내거주 공간에 미치는 방사학적 영향을 평가하기 위해, 먼저 건축자재를 비롯한 토양에서의 라돈 이송 메커니즘을 분석하고, 이를 이용하여 건축자재에서의 라돈 방출율을 예측하였다. 또한 Ra-226 과 Rn-222 으로부터 나오는 감마선에 의한 외부 피폭선량을 구하였다.

Abstract

It is known that the domestic phosphogypsum board, which is widely used as one of building materials, contains progenitor radionuclide ^{226}Ra about $180\sim 550 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($5\sim 15 \text{ pCi}\cdot\text{g}^{-1}$). ^{226}Ra is transformed by alpha decay to ^{222}Rn , which is then exhaled into residential air through the inner wall surface. ^{222}Rn exhaled into residential air produces its daughter products by a series of transformation. Short-lived daughter products such as ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , and ^{214}Po are known to cause localized exposure of the basal cells of the bronchial and pulmonary epithelia. To assess the radiological impact of radium contained in the domestic phosphogypsum board

used as apartment building material on residential environment, for a start, radon transportation mechanism through the porous medium, for example soil and building materials, was estimated. Also, it is predicted that the external gamma exposure dose rate of Ra-226 and Rn-222 using MCNP.

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 건축 자재로 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 있다. 그런데 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. 또한 Ra-226 및 Th-232의 붕괴생성물과 K-40으로부터 나오는 감마선에 의한 외부피폭도 고려의 대상이 되고 있다. 이와 같이 Ra-226은 실내 라돈 농도에 영향을 미치며, Ra-226을 비롯한 Th-232, U-238 및 K-40는 함량에 따라 딸핵종으로부터 나오는 감마선에 의해 외부 피폭선량에도 영향을 미칠 수 있다.

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

따라서 본 논문에서는 건축자재를 비롯한 토양에서의 라돈 이송 메커니즘을 분석하고, 이를 이용하여 건축자재에서의 라돈 방출율을 예측하였다. 또한 Ra-226과 Rn-222으로부터 나오는 감마선에 의한 외부 피폭선량을 구하였다.

2. 라돈의 방사학적 특징

폐암의 한 원인으로 주목받는 라돈은 지각의 암석이나 토양 중에 천연적으로 존재하는 U-238과 Th-232가 몇 단계 방사성붕괴를 거듭한 후 생성되는 불활성 기체이다. U-238의 붕괴 생성물인

Ra-226이 붕괴하면 Rn-222이 되고 Th-232의 붕괴 생성물인 Ra-224이 붕괴하면 Rn-220이 된다. Rn-222과 Rn-220은 서로 동위원소 관계에 있다. 우라늄으로부터 라듐까지 붕괴되는 동안의 모든 핵종은 고체이므로 땅속에서만 진행된다. 그러나 라듐이 붕괴하여 생성되는 라돈은 불활성 기체이므로 땅속에서 쉽게 이동하여 공기 중으로 방출된다. 일명 토론이라고도 불리는 Rn-220은 반감기가 짧아 공기 중으로 나오는 양이 Rn-222에 비해 매우 작기 때문에 통상 라돈이라고 말할 때는 Rn-222을 지칭한다.

Rn-222 라돈가스는 3.8일의 반감기로 붕괴하여 Po-218으로부터 Pb-206에 이르는 붕괴를 계속 하는데 이때 만들어지는 Po-218, Bi-214, Pb-214, Po-214와 같은 방사성 핵종들을 딸핵종이라 부른다. 그러나 방사선 피폭의 측면에서는 반감기가 긴 Pb-210 이하는 방사능이 극히 작아 무시할 수 있다. 또한 중요 관심사인 폐암 유발 위해도가 작은 베타 방사선을 내는 핵종(예: Pb-214)이나 생성확률이 1%도 못되는 핵종(예: At-218)도 무시할 수 있다. 따라서 딸핵종을 알파 방사선을 내는 Po-218, Bi-214, Pb-214, Po-214 네 핵종으로 범위를 좁혀서 생각한다. 딸핵종은 먼지 형태로 공기 중에 떠돌거나 어떤 물체의 표면에 흡착되거나 한다. 공기 중에 떠다니는 이러한 딸핵종을 흡입하면 폐에 흡착되며 여기서 방출되는 알파 방사선 피폭으로 인해 장기적으로는 폐암을 유발할 수 있는 것으로 보고 있다. 라돈가스 자체는 방사성 가스이지만 불활성이므로 사람이 호흡하더라도 폐에서 흡수되지 않고 다시 방출되므로 위해도가 작다.

3. 라돈 이송 메커니즘

1) 기공성 물질에서의 라돈 이송 메커니즘

토양이나 다른 기공성 물질(porous medium)에서 라돈 기체의 생성과 이송에 대한 분석은 라듐이 함유된 폐기물로부터 라돈의 방출과 거주지로의 라돈 방출에 대한 기본이 된다. 라돈은 기본적으로 확산(diffusion)과 이류(advection) 메커니즘에 의해 움직인다. 이류는 압력 차에 의한 것이고, 확산은 농도의 변화에 의한 것이다. 라돈 농도에 의한 확산은 기체 상에서나 액체 상에서 중요하다.

기공성의 물질을 통한 라돈 이송에 대한 설명은 다음과 같은 정보가 필요하다.

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

확산에 의한 라돈의 이송은 Fick's law로 설명할 수 있다.

$$F_d = -D_0 \nabla C$$

여기서, F_d = 확산된 라돈 flux(Bq m⁻² s⁻¹)

C = 라돈 농도 (Bq m⁻³)

D_0 = 확산계수(m² s⁻¹)

기체 상에서의 라돈 농도에 대한 라돈 평형식은 (1)확산 (2)이류 (3)붕괴 (4)생성 (5)보정 (6)기공의 물로부터의 라돈 이송 (7)고체 입자 표면으로의 라돈 손실 항으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \frac{\delta C_a}{\delta t} = & \nabla \cdot (D_a \nabla C_a) - \frac{K}{\mu \epsilon (1-m)} \nabla P \cdot \nabla C_a - \lambda C_a \\ & + \frac{R \rho \lambda E_a}{\epsilon (1-m)} - \frac{R m \lambda}{(1-m) k_d} + T_{wa} - T_{as} \end{aligned} \quad (1)$$

C_a = 기공으로 채워진 기공 공간에서의 라돈 농도(Bq/m³)

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

K = 물질의 공기 투과성(m²)

μ = 공기의 점성도(Pa s)

m = 기공에서의 물의 침투 비율

P = 기공에서의 공기의 압력(Pa)

R = 고체 물질의 라돈의 함량(Bq kg⁻¹ dry mass)

λ = 라돈의 붕괴 상수(s⁻¹)

E_a = 고체 물질의 밀도(kg m⁻³)

ϵ = 기공의 기공률

T_{wa} = 기공 액체와 기공 공기 사이의 라돈 이송 인자(Bq m⁻³ s⁻¹)

T_{as} = 기공 공기와 고체 표면에서의 라돈 이송 인자(Bq m⁻³ s⁻¹)

액체 상에서의 라돈 농도에 대한 평형식은 (1)확산 (2)이류 (3)붕괴 (4)생성 (5)보정 (6)기공의 기공으로부터의 라돈 이송 항으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \frac{\delta C_w}{\delta t} = & \nabla \cdot (D_w \nabla C_w) - K_h \nabla H \cdot \nabla C_w - \lambda C_w \\ & + \frac{R \rho \lambda E_w}{\epsilon m} - \frac{R \lambda (1-\epsilon)}{k_d} + T_{aw} \end{aligned} \quad (2)$$

C_w = 물로 채워진 기공 공간에서의 라돈 농도(Bq m⁻³)

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

K_h = 물에서의 unsaturated hydraulic conductivity($m s^{-1}$)

∇H = 수압 변화

E_w = 기공의 물에서의 라돈 방출계수

T_{aw} = 기공 공기에서 기공 물로의 라돈 이송 인자($Bq m^{-3} s^{-1}$)

고체 표면에서의 라돈 흡착에 대한 라돈 평형식은 (1)확산 (2)붕괴 (3)기공 공기로부터 기공 고체 표면으로의 라돈 이송 항으로 구성된다.

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \nabla \cdot (D_s \nabla C_s) - \lambda C_s + T_{as}' \quad (3)$$

C_s = 흡착된 라돈 농도 ($Bq kg^{-1}$)

D_s = 표면 확산 계수 ($m^2 s^{-1}$)

T_{as} = 기공 공기로부터 기공 고체 표면으로 의 라돈 이송 인자($Bq m^{-3} s^{-1}$)

위의 세 가지 식은 상간의 이동 인자 T_{wa} , T_{aw} , T_{as} , T_{as}' 에 의해 연결된다.

$$T_{wa} = \frac{m}{(m-1)} T_{aw} \quad (4)$$

$$T_{as} = \frac{\rho}{\epsilon(1-m)} T_{as}' \quad (5)$$

$$k = C_w / C_a \quad (6)$$

$$k_a = C_s / C_a \quad (7)$$

여기서, k = 라돈 평형 분포계수

k_a = 라돈 표면 흡착계수($m^3 kg^{-1}$)

여기서 젖은 표면에 대한 흡착을 무시한다는 가정을 하였는데, 대부분의 일반적인 토양에서 잘 맞는다. 왜냐하면 물은 라돈보다 대부분의 미네랄 표면에 대해 훨씬 더 큰 친화력을 가지고 있기

때문이다. 즉 $T_{ws} = T_{sw} = 0$ 이라고 할 수 있다.

위의 식에서 이류 항을 포함하나, 기공의 물을 통한 mass movement는 라돈의 이송에 거의 기여하지 못하므로 생략 가능하다. 그리고 흡착된 라돈의 표면 확산도 무시할 만하다.

그러면,

$$(1-m) \frac{\delta C_a}{\delta t} + mk \frac{\delta C_a}{\delta t} + \frac{\rho k_a}{\epsilon} \frac{\delta C_a}{\delta t} = (1-m) \nabla \cdot (D_a \nabla C_a) - \frac{K}{\mu \epsilon} \nabla P \cdot \nabla C_a$$

$$- (1-m) \lambda C_a + \frac{R \rho \lambda E_a}{\epsilon} - \frac{R m \lambda}{k_d} + mk \nabla \cdot (D_w \nabla C_a)$$

$$- m \lambda k C_a + \frac{R \rho \lambda E_w}{\epsilon} - \frac{R m \lambda (1-\epsilon)}{k_d} - \frac{\rho}{\epsilon} \lambda k_a C_a$$

정리하면,

$$(1-m + mk + \frac{\rho k_a}{\epsilon}) \frac{\delta C_a}{\delta t} = \nabla \cdot (D_a + D_w)(1-m + mk) \nabla C_a - \frac{K}{\mu \epsilon} \nabla P \cdot \nabla C_a$$

$$- [1-m + mk + \frac{\rho k_a}{\epsilon}] \lambda C_a + R \rho \lambda [\frac{E_a}{\epsilon} - \frac{m}{k_d \rho} + \frac{E_w}{\epsilon} - \frac{m(1-\epsilon)}{k_d \rho}]$$

$$\therefore \frac{\delta C_a}{\delta t} = \nabla \cdot D_c \nabla C_a - \frac{K_c}{\mu} \nabla P \cdot \nabla C_a - \lambda C_a + R \rho \lambda E_c$$

여기서,

$$D_c = D f_a / f_s$$

$$D = \frac{(1-m)D_a}{1-m+mk} + \frac{mkD_w}{1-m+mk} \quad \text{: pore average radon diffusion coefficient}$$

$$f_a = \epsilon(1-m+mk)$$

$$f_s = \epsilon(1-m+mk) + \rho k_a$$

$$K_c = K / f_s$$

$$E_c = [E - m\epsilon(2-\epsilon)/k_d \rho] / f_s \quad (E = E_a + E_w)$$

여기에 더하여 다른 가정들을 해볼 수 있는데 그 중 하나는 물 상태와 공기 상태에서의 교환이 일어나는 시간 크기는 일반적인 라돈의 이송에 대한 시간 크기보다 훨씬 짧다는 것이다. 물과 공기 상에서의 교환 시간은 물의 깊이가 10에서 100 μ m일 때 0.1에서 10초 정도이다. 확산이나 이류(advection)에 의한 농도 변화의 시간 크기는 이보다 훨씬 크기 때문에 이 가정도 잘 맞는다고 할 수 있다. 이 경우, $T_{wa} = T_{aw}$ 라고 할 수 있다. 위와 같은 방식으로 식을 전개하였을 때 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{\delta C_a}{\delta t} = \nabla \cdot \left(\frac{(1-m)D_a}{1-m-(1-m)k} - \frac{(1-m)kD_w}{1-m-(1-m)k} \right) \frac{\epsilon[1-m-(1-m)k]}{\epsilon[1-m-(1-m)k] + \rho k_a} \nabla C_a$$

$$- \frac{K}{\mu} \frac{1}{\epsilon[1-m-(1-m)k] + \rho k_a} \nabla P \cdot \nabla C_a - \lambda C_a$$

$$+ R \rho \lambda \frac{[E_a - \frac{(1-m)}{m} E_w + \frac{\epsilon(1-2m-\epsilon+m\epsilon)}{k_d \rho}]}{\epsilon[1-m-(1-m)k] + \rho k_a}$$

$$\therefore \frac{\delta C_a}{\delta t} = \nabla \cdot D_c \nabla C_a - \frac{K_c}{\mu} \nabla P \cdot \nabla C_a - \lambda C_a + R\rho\lambda E_c$$

여기서,

$$D_c = Df_a/f_s$$

$$D = \frac{1}{1-k} (D_a - kD_w): \text{ pore average radon diffusion coefficient}$$

$$f_a = \epsilon[(1-m) - (1-m)k]$$

$$f_s = \epsilon[(1-m) - (1-m)k] + \rho k_a$$

$$K_c = K/f_s$$

$$\frac{E_c}{E} = \frac{[E - \frac{\epsilon(1-2m-\epsilon+m\epsilon)}{m} E_w]}{E_a - \frac{\epsilon(1-2m-\epsilon+m\epsilon)}{m} E_w} / f_s$$

또한 공기와 흡착된 상간의 교환은 빠르거나 건조한 표면의 흡착은 무시할만하다고 가정할 수 있다. 이러한 가정은 흡착이 작은 모래의 경우 타당하나, 건축자재나 점토의 경우 흡착이 중요할 수도 있으므로 가장 불확실하다. 이 경우, $T_{as} = T_{sa} = 0$ 이라고 할 수 있다. 이를 적용하여 식을 전개하였을 때 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \therefore \frac{\delta C_a}{\delta t} = \nabla \cdot \left(\frac{D_a - kD_w}{1-k} \right) \nabla C_a - \frac{K}{\mu\epsilon(1-m)(1-k)} \nabla P \cdot \nabla C_a - \lambda C_a \\ + R\rho\lambda \frac{\left[\frac{E_a}{\epsilon(1-m)} - \frac{m}{(1-m)k_d\rho} - \frac{E_w}{\epsilon m} + \frac{1-\epsilon}{k_d\rho} \right]}{1-k} \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{\delta C_a}{\delta t} = \nabla \cdot D_c \nabla C_a - \frac{K_c}{\mu} \nabla P \cdot \nabla C_a - \lambda C_a + R\rho\lambda E_c$$

토양이나 건축자재에 대한 라돈 이송 메커니즘을 적용할 경우, 그 물질의 고유특성에 대한 분석이 필요하다.

2) 건축자재에서의 라돈 이송

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 위의 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

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

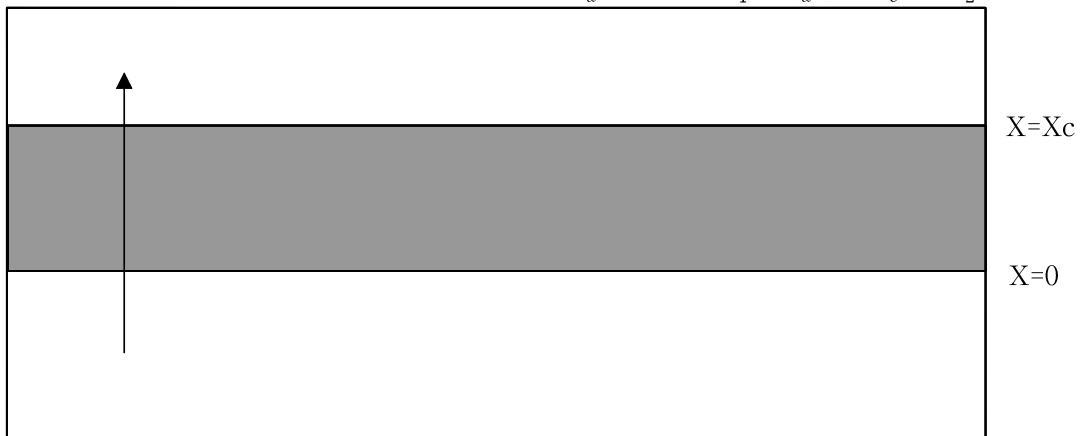
$$D_c \frac{d^2 C_a}{dx^2} - \lambda C_a + R\rho\lambda E_c = 0$$

위의 식을 풀어보면

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

여기서 $P_0 = R\rho\lambda E_c$ 이다.

평형상태에서의 경계조건은 다음 그림에서 보듯이 $C_a(x=0) = C_1$, $C_a(x=x_c) = C_2$ 이다.



위의 식은 다음과 같이 변형할 수 있는데

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

여기서 $l_0 = \sqrt{\frac{D_c}{\lambda}}$ 는 diffusion length

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

여기서

$$A = \frac{C_2 - C_1 \cosh \beta - P_0(1 - \cosh \beta)/\lambda}{\sinh \beta}$$

$$B = C_1 - \frac{P_0}{\lambda}, \quad \beta = \frac{x_c}{l_0}$$

건축자재별로 라돈의 방출률과 발산계수 등을 측정함으로써 건축자재가 실내 라돈농도에 어느

정도의 기여를 하고 있는지를 평가할 필요가 있다. 라돈 방출률과 발산계수라 함은 건축자재중에 존재하는 Ra-226이 붕괴하여 생성된 라돈이 건축자재로부터 이탈하여 외부로 방출되는 실제 라돈의 양을 가늠할 수 있는 지수로서 라돈의 실제 방출량을 판단할 때 쓰이는 양이다. 방출률이란 단위 시간 단위 면적당 방출되는 activity의 양을 의미한다. 방출률은 물질의 방사성 물질 함유량과 방출 계수, 그 물질에서의 기체의 확산계수, 그리고 공극률과 밀도에 의존한다.

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.

라돈방출률 $F = -D_c \nabla C_a$ 이며 경계 조건을 $C_1 = C_2 = 0$ 로 하였을 때 건축자재 표면에서 방출되는 flux는 다음과 같다.

$$F = Ra \rho E_c \sqrt{\lambda D_c} \left[\tanh \beta - \frac{1}{\sinh \beta} \right]$$

만약, 건축자재 아래에 토양 같은 라돈 소스가 있어서, 건축자재에 의한 라돈 소스를 무시할 수

있으므로, 다음과 같은 라돈 방출률을 구할 수 있다. 즉 $C_1 = \frac{P_0}{\lambda}$, $C_2 = 0$ 일 때, 다음과 같다.

$$F = Ra \rho E_c \sqrt{\lambda D_c} \tanh \beta$$

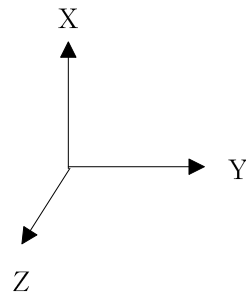
4. 라듐과 라돈에 의한 외부 감마 피폭선량

건물 내에 살고 있는 인간은 건축자재로부터 방출된 라돈가스의 흡입에 의한 내부피폭 외에 건축자재 내에 존재하는 자연 방사성 핵종인 Ra-226의 감마선 방출 딸핵종(Bi-214, Pb-214등), Th-232의 감마선 방출 딸핵종(Tl-208등) 및 K-40으로부터 감마선에 의한 외부 피폭을 받으며 살고 있다. 이러한 이유 때문에 선진국의 경우는 건축자재로부터 방출되는 감마선에 의한 외부피폭으로부터 국민건강을 보호하기 위하여 자국 나름의 라듐 등가농도 기준의 권고치를 설정하여 관리하고 있다. 그러나 국내에서는 건축자재에 대한 권고치가 설정되어 있지 않고 따라서 건축자재로부터의 외부피폭에 대한 관리가 진행되지 않고 있는 상태이다.

건축자재중에 들어있는 Ra-226, Th-232 및 K-40의 방사능 농도가 같다 하더라도 Ra-226과 Th-232의 딸핵종들과 K-40이 방출하는 감마선 에너지가 서로 다르기 때문에 피폭 선량값은 서로 다르게 된다. 따라서 라듐 등가농도라는 것은 Th-232와 K-40을 Ra-226의 자손들로부터 방출되는 감마선량과 동일한 선량에 해당하는 방사능 농도로 환산하여 Ra-226방사능 농도와 합한 값을 의미한다. 위험지수는 건축자재로부터의 연간 유효선량을 $1\text{mSv} \cdot \text{y}^{-1}$ 로 가정할 때 평가지수를 의미

한다.

석고보드의 경우 Ra-226의 양이 지배적으로 많으므로 Ra-226에 의한 외부 감마 피폭선량을 예측할 필요가 있다. 이를 위해 MCNP를 이용해보았다. 다음 그림과 같이 실내 공간을 도식화하였다.



석고보드에 라듐 1pCi/g이 들어있을 때, 외부 감마 피폭선량을 구하면 다음과 같다.

xy, yz, zx평면에서 살펴본 바와 같이 벽 쪽이 방의 중앙보다 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 라듐을 포함한 석고보드로부터 방사선이 방출되므로 방의 중앙보다는 벽 쪽에서 높은 수치를 나타내며, 라듐 1pCi/g에 의한 외부 감마 피폭의 범위는 $2.753 \times 10^{-3} \sim 4.838 \times 10^{-2} [\mu R/hr]$ 이다. 실내 공간 중 라돈이 균일하게 분포되어 있다고 가정하여 라돈에 의한 외부 감마 피폭 선량을 고려해 볼 필요가 있다. 라듐이 포함된 석고보드로부터 어느 정도 시간이 흐르면 실내 공간에 라돈이 평형 상태가 되어 일정한 농도로 존재하게 된다. 따라서 석고보드로부터 방출되는 라듐에 의한 영향뿐만 아니라 실내 공간 중에 평형상태로 존재하게 되는 라돈의 영향 또한 고려할 필요가 있다.

xy, yz, zx평면에서 벽 쪽보다는 방의 중앙에서 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 라돈 1pCi/L에 의한 외부 감마 피폭의 범위는 $5.444 \times 10^{-3} \sim 2.632 \times 10^{-2} [\mu R/hr]$ 이다.

5. 결 론

인간이 살고 있는 주거환경에는 우주 또는 지반에서 자연적으로 생성된 라돈 가스가 존재한다. 라돈 가스는 호흡을 통해 인체 내로 흡입되면 폐 세포와 접촉하여 알파선을 방출하고, 라돈 가스의 방사성붕괴에 의해 생성된 딸핵종은 베타선 및 감마선을 방출하여 인체에 방사학적 영향을 주게 된다.

단열재로 많이 사용되는 건축자재인 석고보드에는 소량의 우라늄-라듐이 포함되어 있으며, 이러한 우라늄-라듐은 핵적 특성에 의해 라돈 가스를 방출하는 것으로 알려져 있다. 주거환경을 구성하는 건축물로부터 인체에 해가 될 수 있는 방사성 물질이 방출된다는 사실에 특별한 관심을 두지 않을 수 없다. 그러나 국내에는 거주공간의 라돈에 대한 제한기준이나 석고보드의 방사성물질(우라늄-라듐 등) 함량을 제한하는 규정이 없는 실정이다.

석고보드에서 방출되는 라돈에 의한 영향을 알아보기 위한 기본으로서 건축자재나 토양으로부터 라돈 이송 메커니즘에 대한 분석이 필요하다. 이를 이용하여 라돈 방출률을 구할 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.

라돈과 그 딸핵종들의 인체영향의 위해도를 평가하기 위해서는 내부 피폭뿐만 아니라 외부 피폭도 고려할 필요가 있다. 따라서 라듐에 의한 외부 감마 피폭과 라돈에 의한 외부 감마 피폭을 MCNP를 이용하여 구하였다. 석고보드에 1pCi/g의 라듐이 석고보드에 함유되어 있는 경우, 석고

보드에서 방사선이 방출되므로 방의 중앙보다는 벽 쪽에서 높은 값이 나타났고, 그 범위는 $2.753 \times 10^{-3} \sim 4.838 \times 10^{-2} [\mu R/hr]$ 이다. 라돈의 경우를 살펴보기 위하여 실내 공간 중 라돈이 1pCi/L의 농도로 균일하게 분포되었다고 가정하였을 때 외부 감마 피폭은 벽 쪽보다는 방의 중앙에서 높은 값을 가지며 그 범위는 $5.444 \times 10^{-3} \sim 2.632 \times 10^{-2} [\mu R/hr]$ 이다.

참고문헌

- [1]V.C.Rogers and K.K.Nielson, *Multiphase and Transport in Porous Materials*, Health Physics Vol.60. No.6 (June) pp.807-815 (1991)
- [2]Vern C. Rogers and Kirk K. Nielson, *Technical Basis for a Candidate Building Materials Radium Standard*, EPA/600/SR-96/022, (1996)
- [3]국민 방사선 위험도 평가 및 전국 실내 라돈방사능 조사, KINS/GR-200 (2000)
- [4]*Protection Against Radon-222 at Home and at Work*, RRL/TR/98-2