

인산부산석고보드 내 함유된 라듐이 실내거주환경에  
미치는 방사학적 영향 평가

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

고현석, 이영욱, 문주현, 송재혁, 강창순

서울대학교

서울시 관악구 신림동 산56-1

요 약

국내 건축자재로 널리 사용되는 인산부산석고보드에는  $^{226}\text{Ra}$ 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.  $^{226}\text{Ra}$ 은 알파 핵변환을 통하여 딸핵종인 불활성 기체상태의  $^{222}\text{Rn}$ 을 실내 공기 중으로 방출하며, 이어서  $^{222}\text{Rn}$ 은  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ , 그리고  $^{214}\text{Po}$  등의 딸핵종을 생성한다.  $^{222}\text{Rn}$ 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  $^{226}\text{Ra}$ 을 함유한 인산부산석고보드를 아파트 건축자재로 사용한 경우, 아파트 실내거주 공간에 미치는 방사학적 영향을 평가하기 위해, 인산부산석고보드로부터 방출된  $^{222}\text{Rn}$  및 딸핵종의 아파트 실내 공기중 안정상태 농도를 예측하였다. 안정상태 농도를 예측하기 위해 lumped-parameter 모델을 개발하고, 이를 이용하여 인산부산석고보드 내  $^{226}\text{Ra}$  함유량에 따른 아파트 실내의 라돈 및 4개의 단반감기 딸핵종의 안정상태 농도를 예측하였다.

Abstract

It is known that the domestic phosphogypsum board, which is widely used as one of building materials, contains progenitor radionuclide  $^{226}\text{Ra}$  about  $180\sim 550 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ( $5\sim 15 \text{ pCi}\cdot\text{g}^{-1}$ ).  $^{226}\text{Ra}$  is transformed by alpha decay to  $^{222}\text{Rn}$ , which is then exhaled into residential air through the inner wall surface.  $^{222}\text{Rn}$  exhaled into residential air produces its daughter products by a series of transformation. Short-lived daughter products such as  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ , and  $^{214}\text{Po}$  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, hence, the steady-state concentrations of indoor airborne radon and its 4 short-lived daughters are estimated using the lumped-parameter model developed for this estimation in this paper.

## 1. 서 론

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.

우리 나라의 건축자재 중 널리 사용되고 있는 석고보드에는  $^{226}\text{Ra}$ 이 함유되어 있는 것으로 알려져 있다. 이는 국내에서 생산되는 석고보드가 우라늄 및 라듐이 함유되어 있는 인광석으로부터 인산비료를 생산할 때 부산물로 생성되는 인산부산석고로 제작되기 때문이다. 우리 나라에서 생산되는 석고보드 내  $^{226}\text{Ra}$ 의 함량은 인광석의 수입원에 따라 다르지만 약  $180\sim 550\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ( $5\sim 15\text{ pCi}\cdot\text{g}^{-1}$ )으로 알려져 있다.[1]

인산부산석고보드 내에 함유되어 있는  $^{226}\text{Ra}$ 은 알파 핵변환을 통하여 딸핵종인 불활성 기체상태의  $^{222}\text{Rn}$ 을 실내 공기 중으로 방출하며, 이어서  $^{222}\text{Rn}$ 은  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ , 그리고  $^{214}\text{Po}$  등의 딸핵종을 생성한다.  $^{222}\text{Rn}$ 의 딸핵종 중 상기 4개의 딸핵종은 반감기가 다른 딸핵종에 비해 상대적으로 짧고  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ 는 알파 방출체로서 호흡과정을 통해 인체 내로 흡입될 경우, 기관지 및 폐의 상피세포에 국부적인 피폭을 가해 심하면 폐암을 유발하는 것으로 알려져 있다. 알려진 바에 의하면, 상기 4개 단반감기 딸핵종의 방사학적 위해도가  $^{222}\text{Rn}$  자체의 방사학적 위해도 보다 훨씬 큰 것으로 알려져 있다.[2]

따라서 본 논문에서는 국내에서 생산되는  $^{226}\text{Ra}$ 을 함유한 인산부산석고보드를 아파트 건축자재로 사용한 경우, 인산부산석고보드로부터 방출된  $^{222}\text{Rn}$  및 4개의 단반감기 딸핵종이 아파트 실내 거주공간에 미치는 방사학적 영향을 평가하기 위하여, 아파트 실내 공기중의 라돈 및 4개의 단반감기 딸핵종의 안정상태(steady-state) 농도를 예측하였다. 이를 위해 라돈 및 4개의 단반감기 딸핵종 안정상태 농도 평가모델을 개발하고, 평가모델을 이용하여 인산부산석고보드 내  $^{226}\text{Ra}$  함량에 따른 아파트 실내의 라돈 및 4개의 단반감기 딸핵종 안정상태 농도와 연간유효선량을 예측하였다.

## 2. 라돈의 방사학적 특성

라돈은 1900년대 초에 발견된 원자번호 86번인 방사성 기체 원소이다.  $^{238}\text{U}$  붕괴계열의 6번째 생성물로서 원자량은 222이다. 동위원소로는  $^{232}\text{Th}$  붕괴계열의 5번째 생성물인 토론( $^{220}\text{Rn}$ )과  $^{235}\text{U}$  붕괴계열의 6번째 생성물인 악티논( $^{219}\text{Rn}$ ) 등이 존재한다. 자연 방사성원소인 상기 세 가지 라돈 동위원소의 방사학적 성질을 요약하면 표 1과 같다.

표 1. 라돈 동위원소의 주요 방사학적 특성

| 계열  | 동위원소              | 반감기<br>(초)          | 알파선            |           | 감마선          |           |
|-----|-------------------|---------------------|----------------|-----------|--------------|-----------|
|     |                   |                     | 에너지<br>(MeV)   | 빈도<br>(%) | 에너지<br>(MeV) | 빈도<br>(%) |
| 악티늄 | <sup>219</sup> Rn | 3.96                | 6.819<br>6.553 | 81<br>12  | 0.271        | 10        |
| 토륨  | <sup>220</sup> Rn | 55.60               | 6.288          | 100       |              |           |
| 우라늄 | <sup>222</sup> Rn | 3.3×10 <sup>5</sup> | 5.490          | 100       |              |           |

라돈(<sup>222</sup>Rn)은 우라늄 붕괴계열의 한 원소로서 반감기가 3.3×10<sup>5</sup>초(3.82일)로서, 세 개의 동위원소 중 반감기가 가장 길다. 토양으로부터의 라돈 방출율은 다른 동위원소에 비해 훨씬 낮지만, 상대적으로 긴 반감기 때문에 대기 중에 광범위하게 분포하고 있다. 선량평가의 관점에서 라돈의 중요성은 앞서 언급한 바와 같이 라돈 자체보다는 라돈 딸핵종인 <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi 및 <sup>214</sup>Po이 중요한데, <sup>218</sup>Po 및 <sup>214</sup>Po 두 딸핵종은 알파 방출체이면서 반감기가 짧기 때문이다. 선량평가 관점에서 중요한 상기 핵종에 대한 방사학적 성질을 요약하면 표 2와 같다.

표 2. 주요 라돈 딸핵종의 방사학적 특성

| 방사성핵종                | 반감기 (초)              | 붕괴 상수 (초 <sup>-1</sup> ) |
|----------------------|----------------------|--------------------------|
| <sup>222</sup> Rn(α) | 3.3×10 <sup>5</sup>  | 2.1×10 <sup>-6</sup>     |
| <sup>218</sup> Po(α) | 183                  | 0.00379                  |
| <sup>214</sup> Pb(β) | 1,608                | 4.3×10 <sup>-4</sup>     |
| <sup>214</sup> Bi(β) | 1,182                | 5.9×10 <sup>-4</sup>     |
| <sup>214</sup> Po(α) | 1.6×10 <sup>-4</sup> | 4226.5                   |

대기 중에서 라돈 및 딸핵종이 핵변환을 일으키면 처음에는 미부착 이온(unattached ion) 또는 중성(neutral)원자로 존재한다. 이후 딸핵종은 에어로졸 입자에 부착(attached)되거나 미부착 이온 또는 원자로 존재하며, 부착율은 에어로졸 입자의 크기 분포에 좌우된다. 통상적으로 부착 이온 또는 원자가 핵변환을 일으키면, 반동에 의하여 미부착 이온이나 중성원자 상태로 된다. 에어로졸 입자의 크기 분포와 딸핵종의 미부착 이온 또는 중성원자로서의 존재비율(unattached fraction)은 폐의 피폭에 영향을 미친다. 에어로졸에 부착된 핵종이나 미부착 핵종은 특히 실내 내부 벽 표면에 침전(plate-out)될 수 있으며, 침전율은 실내공간의 표면적 대비 체적의 비율에 종속적이다. 이러한 내벽 표면에서의 침전 때문에 라돈의 딸핵종은 모핵종인 라돈과 평형상태에 쉽게 도달하지 않는다. 딸핵종의 에어로졸에의 부착 및 평형상태에 도달하기 어렵다는 사실 때문에 라돈 농도와 피폭선량 사이의 관계를 찾기란 쉽지 않다. 이 때문에 활동준위(working level), 평형등가라돈농도(equilibrium-equivalent radon concentration), 그리고 평형상수(equilibrium factor) 등과 같이 선량예측을 위한 새로운 개념의 용어가 사용된다.[2]

### 3. 라돈 및 딸핵종의 실내 안정상태 농도 평가

#### 3.1 라돈 및 딸핵종의 실내 안정상태 농도 평가모델

본 절에서는 인산부산석고보드를 아파트의 건축자재로 사용한 경우, 아파트 실내의 라돈 및 4개의 단반감기 딸핵종의 공기중 안정상태 농도를 예측하기 위한 평가모델을 도출하였다.

$^{222}\text{Rn}$  및 딸핵종에 대한 balance equation을 수립하기 위해, 고려한 사항을 기술하면 다음과 같다. 먼저 실내의 라돈 및 딸핵종의 생성원으로서 (1) 인산부산석고보드를 함유한 내부 벽 표면으로부터의 라돈 가스 방출(exhalation), (2) 실내 환기시 공기와 함께 유입되는 실외 라돈 및 딸핵종, (3) 지하수 또는 천연가스로부터 발생하는 라돈의 외래 전원, 그리고 (4) 딸핵종의 경우, 모핵종으로부터의 방사성 붕괴 등을 고려하였다. 그리고 실내 라돈 및 딸핵종 농도의 감소를 유발하는 인자로서는 (1) 라돈 및 딸핵종의 방사성붕괴, (2) 환기에 의한 제거, 그리고 (3) 딸핵종의 경우, 내부 벽 표면에서의 침전 그리고 에어로졸 표면에서의 부착 등을 고려하였다. Balance equation 수립을 위해, 고려한 상기 인자들을 도식적으로 표현하면 그림 1과 같다.

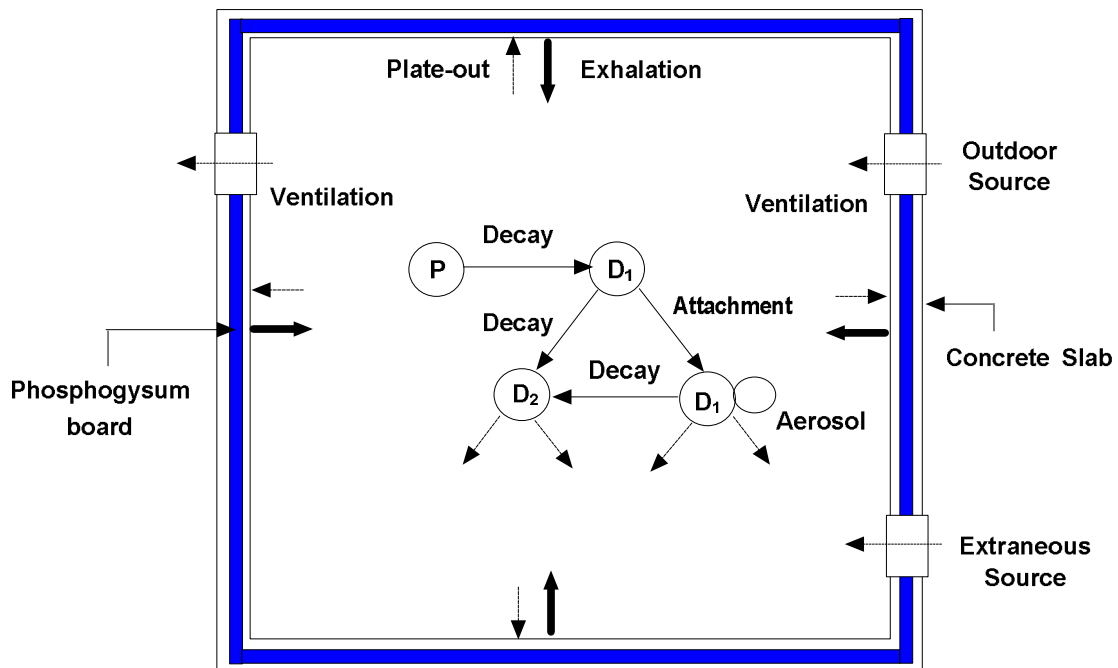


그림 1.  $^{222}\text{Rn}$  및 딸핵종의 실내 거동 모사도

다음으로 balance equation 수립시 고려한 주요 가정은 다음과 같다.

- (1) 라돈 및 딸핵종의 실내 공기중 농도의 공간 구배를 무시할 수 있고, lumped parameter 모델

을 사용할 수 있을 정도로 실내 공기의 혼합이 충분히 빠르게 발생한다.

(2) 모핵종으로부터 핵변환되어 생성된 딸핵종은 독립(unattached) 핵종으로 수명을 시작한다.

상기 가정 및 앞서 언급한 사항을 반영하여,  $^{222}\text{Rn}$  및 딸핵종의 실내 공기중 농도 예측을 위한 balance equation을 세우면 다음과 같다. 불활성 기체이어서 항상 미부착 핵종으로 존재하는 모핵종  $^{222}\text{Rn}$  농도의 시간에 따른 변화는 식 (1)과 같이 전개할 수 있다.

$$\frac{dC_o^0}{dt} = \frac{W_o S}{V} - \lambda_o C_o^0 - \lambda_v C_o^0 + \lambda_v Q_o^0 + \frac{A_o}{V} \quad (1)$$

여기서,  $C_o (Bq \cdot m^{-3}) = ^{222}\text{Rn}$ 의 실내 공기중 농도. 위첨자 o는 미부착 핵종을 의미,

$W_o (Bq \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}) =$  내벽 표면으로부터  $^{222}\text{Rn}$ 의 평균 발산율,

$S (m^2) = ^{222}\text{Rn}$ 이 방출되고 딸핵종의 침전이 발생하는 내부 벽의 표면적,

$V (m^3) =$  실내 공기체적,

$\lambda_o (sec^{-1}) = ^{222}\text{Rn}$ 의 붕괴상수,

$\lambda_v (sec^{-1}) =$  환기율(ventilation rate),

$Q_o (Bq \cdot m^{-3}) =$  환기시 공기와 함께 실내로 유입되는 실외  $^{222}\text{Rn}$ 의 농도,

$A_o (Bq \cdot sec^{-1}) =$  지하수 또는 천연가스로부터 발생하는  $^{222}\text{Rn}$ 의 외래 선원.

한편 미부착 핵종 또는 부착핵종으로 존재하는 단반감기 4개의 딸핵종의 농도의 시간에 따른 변화는 식 (2) 및 (3)과 같이 전개할 수 있다.

$$\frac{dC_i^0}{dt} = \lambda_i (C_{i-1}^o + C_{i-1}^+) - (\lambda_i + \lambda_a + \lambda_d^o + \lambda_v) C_i^0 + \lambda_v Q_i^o \quad (2)$$

$$\frac{dC_i^+}{dt} = \lambda_a C_i^o - (\lambda_i + \lambda_d^+ + \lambda_v) C_i^+ + \lambda_v Q_i^+ \quad (3)$$

여기서  $C_i (Bq \cdot m^{-3}) =$  핵종  $i$ 의 실내 공기중 농도. 위첨자 o는 미부착 핵종을, 위첨자 +는 에어로졸에 부착된 핵종을 의미하며,  $i = 1, \dots, 4$ 까지로서,  $i=1$ 은  $^{218}\text{Po}$ ,  $i=2$ 는  $^{214}\text{Pb}$ ,  $i=3$ 은  $^{214}\text{Bi}$ , 그리고  $i=4$ 는  $^{214}\text{Po}$ ,

$\lambda_i (sec^{-1}) =$  핵종  $i$ 의 붕괴상수,

$\lambda_d (sec^{-1}) =$  핵종  $i$ 의 침전율로서,  $\lambda_d = v_d S / V$ . 여기서  $v_d$ 는 침전속도( $m \cdot sec^{-1}$ )이며, 기준값은  $v_d^+ = 0.000035 m \cdot sec^{-1}$  그리고  $v_d^o = 0.003 m \cdot sec^{-1}$ ,

$\lambda_a (sec^{-1}) =$  핵종  $i$ 의 에어로졸에의 부착율 상수이며, 미부착 핵종으로서의 평균수명의 역수로 주어지며, 기준값은  $0.01 sec^{-1}$ 임

$^{222}\text{Rn}$  및 딸핵종의 실내 공기중 안정상태 농도를 구하기 위해, 시간에 대한 도함수를 0으로 놓으면 식 (1)~(3)은 각각 식 (4)~(6)과 같이 된다.

$$C_o^o = \frac{(W_o S + A_o) / V + \lambda_v Q_o^o}{\lambda_o + \lambda_v} \quad (4)$$

$$C_i^o = \frac{\lambda_i(C_{i-1}^o + C_{i-1}^+) + \lambda_v Q_i^o}{\lambda_i + \lambda_a + \lambda_d^o + \lambda_v} \quad (5)$$

$$C_i^+ = \frac{\lambda_a C_i^o + \lambda_v Q_i^+}{\lambda_i + \lambda_v + \lambda_d^+} \quad (6)$$

### 3.2 라돈 및 딸핵종의 실내 안정상태농도 및 피폭선량 평가결과

앞 절에서 도출한 방정식을 이용하여, 본 절에서는 국내에서 생산되는  $^{226}\text{Ra}$ 을 함유한 인산부산 석고보드를 아파트 건축자재로 사용하였을 경우, 인산부산석고보드 내의  $^{226}\text{Ra}$  함유량에 따른 아파트의 실내 라돈 및 4개의 딸핵종의 평형농도를 평가하였다.

본 평가에 사용된 국내 인산부산석고보드 특성자료와 국내 아파트 관련 설계자료를 표 3과 표 4에 요약하여 놓았다.[1] 본 평가에서는 인산부산석고보드의  $^{226}\text{Ra}$ 만에 의한 방사학적 영향을 평가하는 것이 주목적이므로, 환기를 통한 외부 라돈의 실내 유입과 석고보드 이외의 외래 선원으로 부터의 라돈 유입은 고려하지 않았다. 즉,  $Q_o=0, A_o=0$ 이다.

표 3. 국내 인산부산석고보드의 특성자료

| 특 성   | 기 호  | 자료값       |
|---|------|-----------|
| 인산부산석고보드에서 방출된 콘크리트 내 $^{226}\text{Ra}$ 농도 ( $pCi \cdot g^{-1}$ ) | $Ra$ | 0.45~1.35 |
| 인산부산석고보드 밀도 ( $g \cdot cm^{-3}$ )                                 | -    | 0.65      |
| 인산부산석고보드 두께 (cm)  | -    | 0.95      |
| 라돈 발산 계수 (단위없음)   | $E$  | 0.11      |

표 4. 계산에서 고려된 아파트 설계자료

| 특 성                                      | 기 호    | 자료값                |
|--|--------|--------------------|
| 아파트 공기 부피 ( $m^3$ )                      | $V$    | 266.8              |
| 평균 환기율 ( $volumes \cdot hour^{-1}$ )     | $R$    | 3.88               |
| 인산부산석고보드를 포함하는 아파트 표면적 ( $m^2$ )         | $A$    | 152                |
| 콘크리트 두께 (cm)                             | $X_c$  | 10                 |
| 콘크리트 밀도 ( $g \cdot cm^{-3}$ )            | $\rho$ | 2.1                |
| 콘크리트의 라돈 확산 상수 ( $cm^2 \cdot sec^{-1}$ ) | $D$    | $2 \times 10^{-3}$ |

먼저 인산부산석고보드를 건축자재로 사용한 경우, 내부 벽 표면을 통한  $^{222}\text{Rn}$ 의 실내공간으로의 방출율은 다음 식에 의하여 구할 수 있다.[3]

$$W_o = 370 \cdot Ra \cdot \rho \cdot E \cdot \sqrt{\lambda_{Rn} D} \cdot \tanh\left(\sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}} \cdot X\right) \quad (7)$$

여기서  $Ra (pCi \cdot g^{-1})$  = 인산부산석고보드에서 방출된 콘크리트 내  $^{226}Ra$  농도

$\rho (g \cdot cm^{-3})$  = 콘크리트 밀도,

$E$  = 라돈가스 발산계수,

$D (cm^2 \cdot sec^{-1})$  = 콘크리트 내 라돈가스 확산상수,

$X (cm)$  = 콘크리트 두께,

$370 = pCi \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1}$ 에서  $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 로 단위를 변환하기 위한 전환상수

일반적으로  $\sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}} X \ll 1$ 이므로,  $\tanh\left(\sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}} X\right) \cong \sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}} X$ 이 되어, 식 (7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_o = 370 \cdot Ra \cdot \rho \cdot E \cdot \sqrt{\lambda_{Rn} D} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}} \cdot X = 370 \cdot Ra \cdot \rho \cdot E \cdot \lambda_{Rn} \cdot X \quad (8)$$

식 (8)을 식 (4)에 대입한 후, 순차적으로 식 (5)와 (6)을 이용하면, 국내 아파트 실내의  $^{222}Rn$  핵종 및 4개의 단반감기 딸핵종의 안정상태 농도를 계산할 수 있다. 계산결과는 표 5에 요약하였다.

표 5. 개별 핵종에 대한 안정상태 계산 결과

(단위:  $Bq \cdot m^{-3}$ )

| 콘크리트 내 $^{226}Ra$<br>농도( $pCi \cdot g^{-1}$ ) | 0.45<br>( $W_o = 8.07 \times 10^{-4} Bq \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$ ) |       |       | 0.9<br>( $W_o = 1.61 \times 10^{-3} Bq \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$ ) |       |       | 1.35<br>( $W_o = 2.42 \times 10^{-3} Bq \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$ ) |       |       |
|---|--|-------|-------|---|-------|-------|--|-------|-------|
|   | 미부착  | 부착    | 계     | 미부착   | 부착    | 계     | 미부착  | 부착    | 계     |
| $^{222}Rn$                                    | 0.425  | -     | 0.425 | 0.850   | -     | 0.850 | 1.275  | -     | 1.275 |
| $^{218}Po$                                    | 0.097  | 0.199 | 0.296 | 0.194   | 0.397 | 0.591 | 0.291  | 0.596 | 0.887 |
| $^{214}Pb$                                    | 0.010  | 0.063 | 0.073 | 0.019   | 0.126 | 0.145 | 0.029  | 0.189 | 0.218 |
| $^{214}Bi$                                    | 0.003  | 0.019 | 0.022 | 0.006   | 0.038 | 0.044 | 0.009  | 0.056 | 0.066 |
| $^{214}Po$                                    | 0.022  | 0.000 | 0.022 | 0.044   | 0.000 | 0.044 | 0.066  | 0.000 | 0.066 |
| 평형상수  | 0.18   |       |       | 0.18  |       |       | 0.18   |       |       |
| 평형 등가 $^{222}Rn$<br>농도( $Bq \cdot m^{-3}$ )   | 0.076  |       |       | 0.151   |       |       | 0.227  |       |       |

아파트 실내에  $^{222}Rn$  및 딸핵종이 표 5의 계산결과와 같은 값으로 존재할 경우, 거주민이 호흡으로 인해 유입된 라돈 및 딸핵종에 의한 연간유효선량(annual effective dose)은 다음 식 (9)에 의해 계산할 수 있다.[4]

$$E [nSv a^{-1}] = C_{Rn} \cdot F \cdot t \cdot DCC_{ICRP} \quad (9)$$

여기서  $C_{Rn} (Bq \cdot m^{-3})$  = 라돈농도,

$F$  = 평형상수,

$t (hour \cdot yr^{-1})$  = 일반인의 연간 평균 실내 거주시간,

$DCC_{ICRP} (nSv \cdot Bq^{-1} \cdot hour^{-1} \cdot m^3)$  = 선량환산인자(기준값 = 6.1).

일반실내에 대한 연간 거주시간을  $t = 6,000 \text{ hour}\cdot\text{yr}^{-1}$ 으로 가정할 경우, 인산부산석고보드 내의  $^{226}\text{Ra}$  함량에 따른 연간유효선량을 표 5의 자료를 이용하여 계산하면 표 6과 같다.

표 6.  $^{222}\text{Rn}$  및 딸핵종 흡입으로 인한 연간 유효선량 결과

| 국내 인산부산석고보드 내 $^{226}\text{Ra}$ 함량 ( $\text{pCi}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 5       | 10      | 15      |
|---|---------|---------|---------|
| 연간 유효선량 ( $\text{nSv}\cdot\text{yr}^{-1}$ )                           | 2,781.6 | 5,526.6 | 8,308.2 |

#### 4. 결론 및 토의

국내에서 건축자재로 널리 활용되는 인산부산석고보드 내에는  $^{226}\text{Ra}$ 이 함유되어 있으며,  $^{226}\text{Ra}$ 은 알파 변환을 통하여 라돈을 생성한다. 내부 벽 표면을 통해 실내로 방출된 라돈은 일련의 핵변환에 의해 딸핵종을 생성하게 되고, 이에 따라 실내에는 라돈 및 그 딸핵종이 존재하게 된다. 실내에 존재하는 라돈 및 딸핵종, 특히 4개의 단반감기 딸핵종은 실내에 거주하는 거주민의 호흡을 통하여 인체 내로 흡입되고, 흡입된 라돈 딸핵종에 의해 호흡기 계통에 피폭이 초래되며, 심지어 이로 인해 폐암 등이 발생하는 것으로 알려져 있다.

이에 본 논문에서는 국내에서 생산되는  $^{226}\text{Ra}$ 을 함유한 인산부산석고보드를 아파트 건축자재로 사용한 경우, 인산부산석고보드로부터 방출된  $^{222}\text{Rn}$  및 4개의 단반감기 딸핵종의 아파트 실내 공기중 안정상태 농도를 예측하기 위한 lumped-parameter 모델을 도출하고 이를 이용하여 인산부산석고보드 내  $^{226}\text{Ra}$  함유량에 따른 아파트 실내의 라돈 및 4개의 단반감기 딸핵종의 안정상태 농도 및 연간유효선량을 평가하였다.

본 평가를 통해 밝혀진 사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 국내에서 생산되는 인산부산석고보드에는  $^{226}\text{Ra}$ 이 약  $180\sim 550 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $5\sim 15 \text{ pCi}\cdot\text{g}^{-1}$ )이 존재하며, 인산부산석고보드로부터 실내로의  $^{222}\text{Rn}$  방출량은  $^{226}\text{Ra}$  함유량에 따라  $8.07\times 10^{-4}\sim 2.42\times 10^{-3}(\text{Bq}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sec}^{-1})$  사이인 것으로 나타났다.
- (2) 인산부산석고보드의  $^{226}\text{Ra}$  함유량에 따른  $^{222}\text{Rn}$  및 4개 단반감기 딸핵종의 실내 공기중 안정상태 농도( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )는  $^{222}\text{Rn} : 0.425\sim 1.275$ ,  $^{218}\text{Po} : 0.296\sim 0.887$ ,  $^{214}\text{Pb} : 0.073\sim 0.218$ , 그리고  $^{214}\text{Bi}$  및  $^{214}\text{Po} : 0.022\sim 0.066$ 인 것으로 나타났다.
- (3) 국내 인산부산석고보드에 함유된  $^{226}\text{Ra}$ 에 의한  $^{222}\text{Rn}$  및 4개의 단반감기 딸핵종에 의한 실내의 공기 중 방사능농도는 현존하는 세계 라돈 관련 방호기준 중 가장 엄격한 미국 EPA의 방호기준인  $4 \text{ pCi}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $150 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [3] 이내인 것으로 나타났다.
- (4) 인산부산석고보드의  $^{226}\text{Ra}$  함유량에 따른  $^{222}\text{Rn}$  및 4개의 단반감기 딸핵종의 호흡으로 인한 일반 거주민의 연간유효선량을 평가한 결과,  $2,781.6\sim 8,308.2 \text{ nSv}\cdot\text{yr}^{-1}$  ( $0.278\sim 0.831 \text{ mrem}\cdot\text{yr}^{-1}$ )로 예측되었다.



위와 같이  $^{226}\text{Ra}$ 를 미량 함유한 인산부산석고보드만에 의한 아파트 실내 거주공간에 대한 방사학적 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 만약 실외에 상당량의 라돈이 존재하거나 외래 선원이 존재하여 실내로 라돈이 유입될 경우, 실내 거주공간의 라돈 및 딸핵종의 공기중 농도가 상당히 커질 수 있을 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 또한 아직까지 국내에서는 방사선방호 측면에서 자연방사능에 대한 구체적인 규정이나 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다. 특히 물질 내 우라늄 또는 라듐 등의 함량을 제한하는 특별한 규제 및 기준은 현재 없다. 라돈 가스의 경우 환경부 주관으로 생활공간(예: 지하철) 속의 농도에 관한 기술기준을 제정하려는 움직임이 1999년에 있었으나, 주변여건 미성숙과 일부 기관의 반대로 기준제정은 현재 보류된 상태이다.

따라서 자연 방사능이라 할지라도 자연 그대로의 상태가 아니고 임의의 행위(예: 인산부산석고보드의 제조)가 시행되어 일반인 또는 작업자의 방사선 피폭이 우려되는 경우, 방사선 피폭을 가능한 한 낮게 관리한다는 차원에서 작업자나 일반인에 대한 방사선방호 요건의 제정이 필요하다고 하겠다.

## 참고문헌

- [1] 강창순, 석고보드 특성자료(개인 전자메일), (2000)
- [2] R.E. FaW and J. K Shultis, *Radiological Assessment, Sources and Exposures*, pp 184-199, Prentice-Hall, New Jersey (1993)
- [3] Vern C. Rogers and Kirk K. Nielson, *Technical Basis for a Candidate Building Materials Radium Standard*, EPA/600/SR-96/022, (1996)
- [4] 정양근, 김희근, 조찬희, 신상운, 손중권, *원자력발전소내 라돈농도 분포 및 피폭선량평가*, 99전력연-단785, 한국전력공사 전력연구원 (1999)