

# 土壤에서 放出되는 라돈 線束 豫測 모델

Models for Prediction  
of Radon Flux from Soils



황 선 태

한국표준과학연구원 책임연구원

## 개 요

라돈(Rn)은 불활성 기체원소중의 하나로써 무색(colorless), 무미(tasteless) 및 무취(odorless)의 방사성 기체이다. Rn의 동위원소중  $^{219}\text{Rn}$ 과  $^{220}\text{Rn}$ 의 반감기는 각각 3.96s와 55.6s이므로 인체에 끼칠 수 있는 위해성이 매우 낮으나  $^{222}\text{Rn}$ 은 그 반감기가 3.823d로서  $^{219}\text{Rn}$ 과  $^{220}\text{Rn}$ 에 비하여 상당히 길기 때문에 대기중이나 물에 녹아 있다가 호흡과 식수를 통하여 인체에 유입됨으로써  $^{222}\text{Rn}$ 과 그 자핵종이 방출하는  $\alpha$ 방사선에 의하여 유발될 수 있는 폐암으로 인한 사망과 관련하여 보건물리학자들의 Rn방사능 연구가 세계적으로 활성화되고 있어서 토양에서 방출되는 라돈 선속의 예측모델에 관한 실례에 관하여 서술하고자 한다.

## 1. 머리말

우라늄(U) 광물중에 포함되어 있는 라듐( $^{226}\text{Ra}$ )의 알파( $\alpha$ ) 붕괴 생성물인 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )기체는 다공성 토양을 통하여 확산함으로써 수송될 수 있다.  $^{222}\text{Rn}$ 은 주택의 각종 통풍구조를 통하여 유동될 뿐만 아니라 주택의 콘크리트 슬라브를 통하여서도 쉽게 확산될 수 있다. Figure 1은 일반주택의 경우 흔히  $^{222}\text{Rn}$ 이 주택안으로 스며 들어오는 진입지점들을 보여 주고 있다. 즉, 진입지점

은 지면에 접해 있는 바닥에 갈라진 틈, 수도관 들레에 벌어진 틈, 벽 속에 공간 부분 및 상수도 등이다. 이러한 경로를 통하여 스며 들어온  $^{222}\text{Rn}$ 기체의  $\alpha$ 붕괴 생성물들은 주택내 거주자들에게 보건안전관리에 관심을 제기시키고 있다.

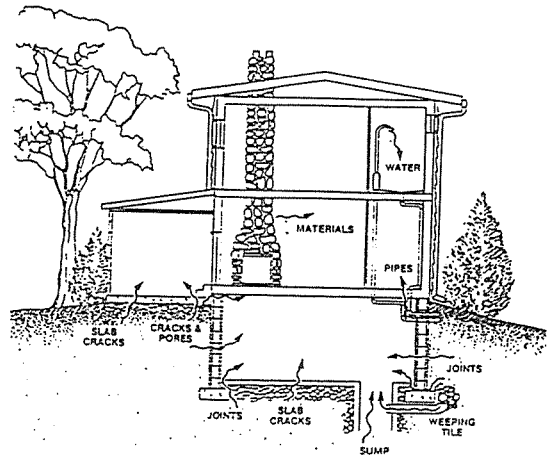


Figure 1. Common Entry Points of Radon to the Home. <sup>(1)</sup>

$^{222}\text{Rn}$ 의 전반적인 수송현상과 인체흡수 모델을 조합하는 것은 매우 복잡한 문제가 되므로 본 서술논문에서는 토양중에 존재하는 라듐과 토양표면으로 부터의 라돈 발산 사이에 단일한 관련의 경우에 초점을 맞추고자 한다. 참고로 Table 1에는 각종 매질에

대한 라돈의 확산계수가 실례로 주어져 있다.

Table 1. Radon Diffusion Coefficients<sup>(2)</sup>

Medium	Diffusion coefficient ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	Diffusion length(m)
Air	$10^{-4}$	2.4
Water	$10^{-7}$	—
Sand	$3 \times 10^{-4}$	1.5
Argillite	$8 \times 10^{-7}$	—
Concrete	$2 \times 10^{-7}$	0.04~0.26
Mineral crystals	$10^{-11} \sim 10^{-22}$	—

## 2. 주요 모델 변수

Figure 2에서는 라돈(Rn)의 수송현상과 관련하여 몇가지의 주요 모델 변수가 그림상에 포함되어 있으며 그들의 물리적 환경과의 관계를 보여준다. 한편, Table 2에는 기호와 단위에 관하여 요약되어 있다. 보통 지표와 공기의 경계면에서의 Rn선속은  $J_0$ 로 표현하며 이것은 단위시간당 단위면적을 통과하는  $^{222}\text{Rn}$ 방사능의 값을 나타낸다.

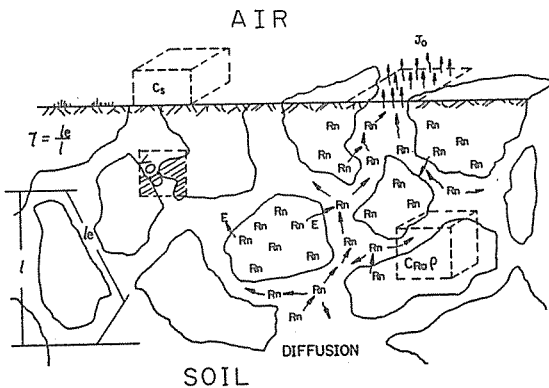


Figure 2. Physical Model of Parameters Important to Radon Transport Models.<sup>(3)</sup>

$^{222}\text{Rn}$ 방사능의 원천은 토양중에 존재하는  $^{226}\text{Ra}$ 이다. 따라서 라돈의 원천항은 라듐의 농도로서  $C_{\text{Ra}}$ 로 표시된다. 토양의 단단한 부분에 포함된 라듐은 반드시 체적측정 분량과 관련되어져 토양밀도  $\rho$ 가 중요한 변수로 작용하게 된다. 이것은 단위체적의 습기찬 토양재질이 일정한 무게를 갖도록 건조되었을 때의 무게이다.

$^{226}\text{Ra}$ 은 토양중 광물질에 편입되어 있다가 거기서  $\alpha$  붕괴하면서 기체원소인  $^{222}\text{Rn}$ 으로 변환된다.  $^{222}\text{Rn}$ 기체가 토양중 빈 공간으로 수송되기 전에 붕괴할 확률은 높다. 그래서 토양공간에 도착되는  $^{222}\text{Rn}$ 의 분율은 토양의  $^{222}\text{Rn}$  방출력(emanating power,  $E$ )으로 알려져 있다. pCi의  $^{222}\text{Rn}$ 은 pCi의  $^{226}\text{Ra}$ 과 방사능이 같으므로 라듐의 농도  $C_{\text{Ra}}$ 과 토양의  $^{222}\text{Rn}$  방출력  $E$ 를 곱한  $C_{\text{Ra}} \cdot E$ 의 단위는  $^{222}\text{Rn}$  pCi  $\cdot$  m<sup>-3</sup>로 된다. 한편  $^{222}\text{Rn}$ 의 붕괴상수  $\lambda$ 의 값은  $2.092 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 이다. 토양의 대부분 체적중에서 오직 일부만이 자유공간으로 비어 있다.

이와같이 전체체적에 대한 비어 있는 자유공간체적의 비율을 다공성도(porosity),  $p$

Table 2. List of Symbols

Radon flux at soil-air interface	$J_0$	pCi $\cdot$ m <sup>-2</sup> $\cdot$ s <sup>-1</sup>
Radon concentration in soil media	$C_{\text{Ra}}$	pCi $\cdot$ kg <sup>-1</sup>
Bulk density	$\rho$	kg $\cdot$ m <sup>-3</sup>
Emanating power*	$E$	pCi $\cdot$ pCi <sup>-1</sup>
Decay constant for $^{222}\text{Rn}$	$\lambda$	s <sup>-1</sup>
Porosity	$p$	—
Molecular diffusion coefficient	$D_m$	m <sup>2</sup> $\cdot$ S <sup>-1</sup>
Tortuosity	$\tau$	—
Media diffusion coefficient for dry air	$D_0$	m <sup>2</sup> $\cdot$ s <sup>-1</sup>
Media diffusion coefficient	$D$	m <sup>2</sup> $\cdot$ s <sup>-1</sup>
Concentration of radon at air-soil interface	$C_s$	pCi $\cdot$ m <sup>-3</sup>
Depth of media	$d$	m

$E$ : Amount of Radon released to void space per unit of radium(or radon).

라 한다. 다공성도  $p$ 에 의해서 항상 분자확산 계수가 보정되며 그래서  $p$ 는 독립적으로 고려되거나 혹은 유효매개확산계수에 편입된다. 한편, Fick의 법칙에 따르면 질량선속을 gradient에 관련시키는 비례상수는 분자확산계수,  $D_m$ 으로 나타내며 단위는  $m^2 \cdot s^{-1}$ 가 사용된다. 이러한 계수  $D_m$ 은 확산원자의 성질 및 원자가 통과하는 매체와 밀접한 관계를 갖는다. 라돈-건조공기쌍에 대한 분자확산계수는 대략  $1.0 \times 10^{-1} m^2 \cdot s^{-1}$ 인 것으로 알려져 있다. 그러나 확산이 토양중 빈공간에서 일어날 때는 보정인수로서 곡질계수(tortuosity),  $\tau$ 가 결부된다. 즉,  $\tau$ 는 다음의 식으로 정의된다.

$$\tau = \frac{D_m}{D_0} \dots \dots \dots (1)$$

여기서,  $D_0$ 는 건조공기에 대한 매질확산계수이다. 확산계수를 보정하는데 중요한 인수는 토양중 빈 공간에서의 수분의 양이다. 이것은 토양중 수분의 직접적인 함수이며 수분이 많을 수록 확산계수  $D$ 는 감소한다. 따라서 Culot<sup>(4)</sup>에 의하면 매질확산계수,  $D$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$D = D_0 \cdot \exp\left[\frac{0.693(\%수분)}{11}\right] \dots \dots \dots (2)$$

끝으로 중요한 매개변수는 토양-공기의 경계면에서의 라돈 농도,  $C_s$ 이다.

### 3. 예측 모델

몇 가지의 수학적 모델을 면밀하게 고찰하기 위하여 모든 토양은 서술된 경계내에서 균일하고 균질하다고 가정함으로써 예측 모델을 기술함에 있어서 주어진 매개 변수들에 대하여 간편하게 전개하고자 한다.

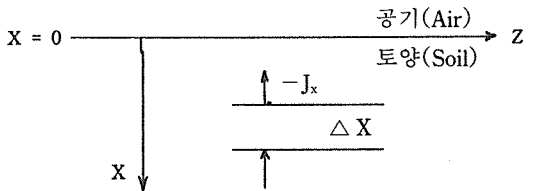
#### 3. 1. 무한 매질

간단한 모델은 무한히 두꺼운 매질의 조건에서 유도될 수 있다. 무한매질에서 토양은 상당히 큰 깊이(10m 이상)에 이르기까

지 균등한 성질을 갖는다. 이 간단한 모델에서는 3가지의 특성을 갖는다. 즉, (1) 여러가지 매개변수의 상대적 중요성을 설명하는데 사용될 수 있다. (2) 보다 더 복잡한 유한모델과 비교될 수 있다. (3) 현장측정에 대한 대강의 예측 값을 제공할 수 있다.

토양에서의 라돈(Rn)확산을 예측할 수 있는 간단한 확산 모델은 토양-공기의 경계면에서 라돈 선속과 토양속에 라돈 농도와 관계를 얻는데 사용된다. 그러면 그 결과는 얻어진 실험데이터와 비교하게 된다. 확산이론은 이상적인 토양조건과 연결된다. 이러한 조건들은 균일하게 균질의 토양을 의미한다. 물리적 향으로 말하면, 이러한 가정은 토양이 일정한 다공성도를 갖고 라돈이 토양덩어리속에 균일하게 분포되어 있으며 라돈기체가 일정한 비율로 토양속에 기체상태로 자유롭게 스며들어 퍼져 나간다는 것이다.

이제, 라돈 수지(Radon balance)를 알아보기 위하여 평면의 넓이가  $A$ , 간격이  $\Delta X$ 되는 양면으로 한정된 토양의 통제체적  $CV$ 를 고려하자. 그림에서  $X$ -축의 양 방향은 공기-토양경계면에서 아랫쪽으로 향한다.



정상상태에서 통제체적  $CV$ 로부터 나오는 라돈의 순유동율은  $CV$ 내에서의 라돈 생성율과 붕괴율의 차이에 해당된다.

$$[\text{라돈 출력률}] - [\text{라돈 입력률}] = [\text{라돈 생성율}] - [\text{라돈 붕괴율}]$$

여기서, 입력과 출력 방향은  $X$ -축의 양

방향으로 취해진다. 이제, J로 표시되는 라돈선속을 단위면적당 라돈의 유동율로서 정의한다. 따라서 J<sub>x</sub>는 참고 평면으로부터 거리 X되는 곳에서 그 면적에 수직 방향으로 단위면적당 라돈의 유동율을 나타낸다. 그러면 면적 A를 통하여 지나게 되는 유동율은 AJ<sub>x</sub>로 된다. 이러한 상황에서 물질수지방정식은 식(1)로 주어진다.

$$A(-J_x + \Delta X) - A(-J_x) = A(\Delta X)R_p - A(\Delta X)R_d \dots\dots\dots (1)$$

여기서, R<sub>p</sub>: 단위체적당 라돈의 생성율  
R<sub>d</sub>: 단위체적당 라돈의 붕괴율

식(1)의 양변을 AΔX로 나눠주면 식(2)와 같이 된다.

$$-\left[\frac{J_x + \Delta X}{\Delta X} - J_x\right] = R_p - R_d \dots\dots\dots (2)$$

X→0인 때 한계식을 취하면 식(3)으로 주어진다.

$$-\frac{dJ}{dX} = R_p - R_d \dots\dots\dots (3)$$

다음 단계는 식(3)에서 3개의 항을 확산 계의 특성(토양, 라돈 등)이 되는 양 또는 측정될 수 있는 양(라돈 농도, 라듐 농도 등)으로 나타내는 것이다.

라돈 붕괴율, R<sub>d</sub>

통제체적은 라돈이 통하여 확산되는 유체(흔히 공기)로서 꼭 채워진 작은 공간을 갖고 있는 단단한 덩어리 토양을 구성된다. 그 작은 공간의 범위는 덩어리 체적에 대한 공간체적의 비로 정의되는 다공성도 p로서 특정지워진다. 통제체적 내에서 라돈의 붕괴율은 토양에 기체상태로 포함된 전체 라돈에 비례한다. 이제, 이 기체상태의 체적은 전체 통제체적과 다공성도의 곱과 같다. 여기서, 만약 기체상태로 측정되는 라돈의 농도를 C(X)로 나타내면 라돈 붕괴율은 식(4)에 의

해서 결정된다.

$$[A(\Delta X)]R_d = [C(X)] \cdot (A\Delta X) \cdot p \cdot \lambda \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{그러므로, } R_d = C(X) \cdot p \cdot \lambda \dots\dots\dots (5)$$

라돈 생성율, R<sub>p</sub>

만약, C<sub>ra</sub>를 토양 1g당 pCi의 단위로써 토양중의 라듐의 농도라고 한다면 통제체적 AΔX는 (AΔX)ρ되는 토양을 포함한다고 인정한다. 여기서 ρ는 토양의 전체 밀도이다. 그러면 라돈 생성율은 식(6)에 의해서 결정된다.

$$(A\Delta X)R_p = (A\Delta X) \cdot \rho C_{ra} \cdot \lambda \cdot E \dots\dots (6)$$

$$\text{그러므로, } R_p = \rho C_{ra} \cdot \lambda \cdot E \dots\dots\dots (7)$$

라돈 선속향 dJ/dX

라돈 선속을 라돈의 농도 gradient에 관련시키는 1차원의 Fick확산법칙을 사용하면 라돈 선속은 식(8)로 주어진다.

$$J_x = D_e \frac{dC(X)}{dX} \dots\dots\dots (8)$$

여기서, D<sub>e</sub>: 고체 덩어리의 존재를 고려한 확산계수

식(3)에 3개의 식(5), (7) 및 (8)을 식(3)에 관련시키면 식(9)을 얻게 된다.

$$-D_e \frac{d^2C(X)}{dX^2} = [\lambda \cdot E \cdot \rho \cdot C_{ra}] - \rho \cdot \lambda \cdot C(X) \dots\dots\dots (9)$$

다시 정렬하면,

$$-D_e \frac{d^2C(X)}{dX^2} - \rho \cdot \lambda \cdot C(X) = -\lambda \cdot \rho \cdot E \cdot C_{ra} \dots\dots\dots (10)$$

식(10)의 양변을 D<sub>e</sub>로써 나눔으로써 식(11)을 얻게 된다.

$$\frac{d^2C(X)}{dX^2} - \frac{\rho \cdot \lambda}{D_e} C(X)$$

$$= \frac{-\lambda \cdot \rho \cdot E}{D_e} C_{Ra} \dots\dots\dots (11)$$

여기서, 다음의 경계조건을 무한 매질의 경우에 적용한다.

즉, (1)  $X=0$ 일 때,  $C(X=0)=C(0)=C_1$

(2)  $X \rightarrow \infty$ 일 때,  $C(X=\infty)=C(\infty)=C_0$

2계 미분방정식 (11)을 풀어보면,

$$C(X) = Ae^{mx} + Be^{-mx} + \frac{C_{Ra} \cdot \rho \cdot E}{p} \dots\dots\dots (12)$$

여기서, A와 B는 상수이고  $m = (\frac{\lambda \cdot \rho}{D_e})^{1/2}$  한편, 경계조건에서  $C(\infty) = C_0$ 이므로,

$$A = 0, C_0 = \frac{C_{Ra} \cdot \rho \cdot E}{p}$$

$C(0) = C_1$ 이므로,  $B = C_1 - C_0$

따라서 식(12)는 다음의 식(13)으로 된다.

$$C(X) = (C_1 - C_0)e^{-mx} + \frac{C_{Ra} \cdot \rho \cdot E}{p} \dots\dots\dots (13)$$

여기서,  $C_1$ 은 지면과 공기의 경계면에서의 라돈 농도이다. 따라서, 지면과 공기의 경계면에서 라돈 선속은

$$J_{X=0} = J_0 = [D_e \frac{dC(X)}{dX}]_{X=0}$$

$$= D_e [-m(C_1 - C_0)e^{-mx}]_{X=0} = 0$$

$$= D_e(C_0 - C_1) \cdot m \dots\dots\dots (14)$$

대부분의 경우,  $C_0 \gg C_1$ 이므로 식(14)는 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$J_{X=0} = J_0 = D_e \cdot C_0 \cdot m \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{즉, } J_{X=0} = J_0 = D_e \cdot \frac{C_{Ra} \cdot \lambda \cdot E}{p} \cdot (\frac{\lambda \cdot \rho}{D_e})^{1/2}$$

$$= C_{Ra} \cdot \rho \cdot E \cdot (\frac{D_e \cdot \lambda}{p})^{1/2}$$

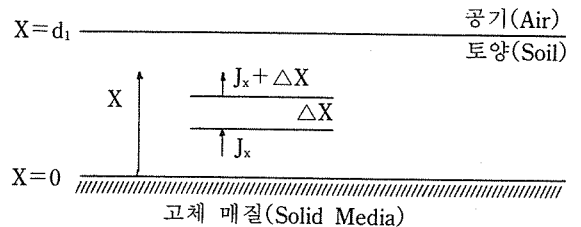
일반적으로,

$$J_0 = I \cdot C_{Ra} \cdot \rho \cdot E \cdot (\frac{\lambda \cdot D}{p})^{1/2} \dots\dots\dots (16)$$

여기서, I는 상수이다. 식(16)에서 E와 D가 가장 중요한 계수이다. E값은 라돈 선속과는 별도로 측정될 수 있다. D는 다른 토양 및 환경조건들과 관련되어야 한다.

### 3. 2. 유한 매질

이 모델에서는 토양의 주어진 깊이에서 균일한 매질을 가정한다. 이 균일한 토양에서 위로는 공기에 의하여 아래로는 아무것도 스며들지 못하는 고체층으로 경계되어진다. 아랫쪽의 경계는 지하수면일 수도 있다. 왜그러나하면, 수성의 용액에서 라돈의 확산계수는 기체성 분자의 확산계수보다  $10^2 \sim 10^3$  정도 더 작은 계수값을 갖기 때문이다. 편의상 다음의 그림에서와 같이 평면의 넓이가 A, 간격이  $\Delta X$ 되는 양면으로 한정된 토양의 통제체적 CV를 또 고려한다. 그림에서 X-축의 양방향은 고체매질 면에서 윗쪽으로 향한다.



무한 매질의 경우에서 처럼 미분 방정식을 이용하여 라돈의 수지를 표현하면 식(1)로 주어진다.

$$\frac{d^2C(X)}{dX^2} - \frac{p \cdot \lambda}{D} C(X) = -\frac{\beta}{D} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $\beta = R_p = \rho C_{Ra} \cdot \lambda \cdot E$

경계조건을 검토하면,

$$X=0 \text{에서 } \frac{dC(X)}{dX} = 0 \text{(라돈 선속=0)}$$

$$X=d_1 \text{에서 } C=C_s$$

$$X=d_1 \text{에서 } C=C_s$$

따라서 식(1)의 해는 다음의 식(2)로 주

어진다.

$$C(X) = A \cdot e^{mX} + B \cdot e^{-mX} + \frac{\beta}{\lambda \cdot p} \dots (2)$$

$$\text{여기서, } m = \left(\frac{\lambda \cdot p}{D}\right)^{1/2}$$

식(2)를 미분하면,

$$\frac{dC(X)}{dX} = A \cdot m e^{mX} - B \cdot m e^{-mX} \dots (3)$$

$$X=0 \text{에서 } A \cdot m - B \cdot m = 0$$

따라서,  $A=B$ 이고 식(3)으로부터 식(4)를 얻는다.

$$C(X) = A(e^{mX} + e^{-mX}) + \frac{\beta}{\lambda \cdot p} \dots (4)$$

$$\text{즉, } C(X) = A[2 \cosh(mX)] + \frac{\beta}{\lambda \cdot p} \dots (5)$$

경계조건  $X=d_1$ 에서  $C(X)=C_s$ 이므로,

$$C(d_1) = A[2 \cosh(md_1)] + \frac{\beta}{\lambda \cdot p} = C_s$$

$$\text{따라서 } A = \frac{C_s - \frac{\beta}{\lambda \cdot p}}{2 \cosh(md_1)} \dots (6)$$

식(5)와 (6)을 합성하면

$$\frac{C(X) - \frac{\beta}{\lambda \cdot p}}{C_s - \frac{\beta}{\lambda \cdot p}} = \frac{\cosh(mX)}{\cosh(md_1)} \dots (7)$$

식(7)을 미분하면

$$\frac{dC(X)}{dX} = \frac{C_s - \frac{\beta}{\lambda \cdot p}}{\cosh(md_1)} \cdot [m \cdot \sinh(mX)] \dots (8)$$

그런데, 라돈 선속  $J = -D \frac{dC(X)}{dX}$  이므로

$$J = -D \cdot m \left(C_s - \frac{\beta}{\lambda \cdot p}\right) \frac{\sinh(mX)}{\cosh(md_1)} \dots (9)$$

$$\begin{aligned} \text{따라서, } & \frac{J}{D \cdot m \left(\frac{\beta}{\lambda \cdot p} - C_s\right)} \\ &= \frac{\sinh(mX)}{\cosh(md_1)} \dots (10) \end{aligned}$$

$X=d_1$ 되는 표면에서는 식(10)은 식(11)과 같이 된다

$$\begin{aligned} \text{따라서, } & \frac{J_s}{D \cdot m \left(\frac{\beta}{\lambda \cdot p} - C_s\right)} \\ &= \frac{\sinh(md_1)}{\cosh(md_1)} = \tanh(md_1) \dots (11) \end{aligned}$$

식(10)과 (11)을 합성하면,

$$\frac{J}{J_s} = \frac{\sinh(mX)}{\sinh(md_1)} \dots (12)$$

식(11)로부터

$$J_s = D \cdot m \left(\frac{\beta}{\lambda \cdot p} - C_s\right) [\tanh(md_1)] \text{ 이므로}$$

로  $m = \left(\frac{\lambda \cdot p}{D}\right)^{1/2}$ 를 대입하면 그림에서 고체매질의 표면( $X=0$ )에서의 라돈 선속  $J_0$ 는 식(13)으로 주어진다.

$$\begin{aligned} J_{x=0} = J_0 &= [C_{Ra} \cdot \rho \cdot E \cdot \left(\frac{\lambda \cdot p}{p}\right)^{1/2}] \\ &\cdot \tanh\left[d_1 \left(\frac{\lambda \cdot p}{D}\right)^{1/2}\right] \dots (13) \end{aligned}$$

일반적으로

$$\begin{aligned} J_0 &= I \cdot C_{Ra} \cdot \rho \cdot E \left(\frac{\lambda \cdot D}{p}\right)^{1/2} \\ &\cdot \tanh\left[d \left(\frac{\lambda \cdot p}{D}\right)^{1/2}\right] \dots (14) \end{aligned}$$

여기서,  $I$ 는 상수이다. 그런데 관심있는 많은 지역의 지하수면까지의 깊이가 상당히 낮을 수 있으므로 깊이가 얇은 매질의 상대적인 기여가 중요하다.

### 3.3 차폐 모델

라돈 선속의 예측모델과 관련하여 고려되어야 할 중요사항의 하나는 주택건설을 위하여 조성된 대지에서의 라돈 선속이 추천된 값을 초과할 경우이다. 이러한 관점에서 차폐모델을 도입하게 되는데 우선, 초기에 라돈의 표면선속  $J_0$ 로부터 시작하여 라돈의 함유량을 무시할 수 있는 충전물질을 깊이  $d$ 까지 채우게 되면 차폐모델은 다음식으로 표현될 수 있다.

$$\text{즉, } \frac{J_0}{J_1} = \frac{2e^{md}}{1+e^{2md}}, \quad m = \left(\frac{\lambda \cdot p}{D}\right)^{1/2}$$

실례로서 Figure 3에서는 라돈 선속 차폐용 충전물질( $C_{Ra}=0$ )의 깊이에 따른 라돈의 표면선속 감소율을 보여주고 있다.

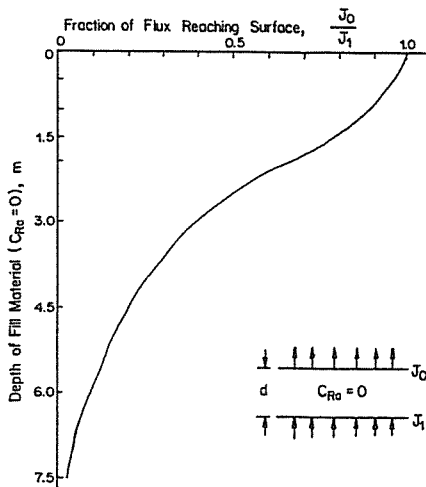


Figure 3. Reduction of Surface Radon Flux with Depth of Fill Material.<sup>(3)</sup>

이 차폐 모델에서 충전물질은 라돈의 표면선속  $J_0$ 를 감소시키는데 있어서 1차 인자인 방사성 붕괴의 성질을 갖는 역할을 어느 정도 하게 된다.

#### 맺는 말

라돈의 안전 준위는 알려진 바가 없으므로

로 항상 다소의 위험성이 있을 수 있다. 그러나 그 위험성은 주택에서 라돈 준위를 낮춤으로써 감소시킬 수 있다. 일반주택에서 라돈 준위를 낮추기 위하여 여러가지의 방법이 사용되는데 어떤 경우에는 건물바닥과 벽에 생긴 틈새를 막음으로써 라돈기체를 줄일 수 있으며 다른 경우에는 기체관과 환풍기를 사용하는 간단한 장치가 라돈기체를 줄이는데 사용될 수 있다. 이와같은 장치를 "Sub-slab depressurization"<sup>(5, 6)</sup>이라 일컬으며 이러한 방법은 주택구조의 많은 변형을 필요로 하지 않는다. 한편, 본문에서 전개된 바와 같이 라돈 선속을 적절하게 예측하기 위해서는 많은 토양의 특성들이 필요하며 예측 모델링을 개선하자면 더 많은 현장 데이터를 수집·활용하여야 한다. 그리고 주택 단지 조성에 있어서 충전물질 조달을 위하여 자원 재 활용기술을 개발·도입할 것을 제의한다.

#### 참고 문헌

1. SAI, Radon-The Invisible Threat, Scientific Analysis, Inc., 6012E. Shirley Lane, Montgomery, Alabama, 1990.
2. C.R. Cothorn and J.E. Smith, Jr., Eds., Environmental Radon, Plenum Press, New York and London, Chapter 4 by J. Michel, 1988.
3. W. Emmett Bolch and Charles E. Roessler, Personal Communication, 1979.
4. Culot, M.U.J and K.J. Schiager, Radon Progeny Control in Buildings, 1973 Research Report, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado, 1977.
5. U. S. EPA, A Citizen's Guide To Radon (2nd Edition), Air and Radiation(ANR-464), 1992.
6. U. S. EPA, Sub-Slab Depressurization for Low-Permeability Fill Material, EPA/625/6-91/029, 1991.