

## 지하수로부터의 실내 라돈오염시 인체노출평가 Assessment of Human Exposures to Indoor Radon Released from Groundwater

유 동 한\* · 김 상 준<sup>1)</sup> · 양 지 원<sup>1)</sup>  
한국원자력연구소, <sup>1)</sup>한국과학기술원 화학공학과  
(2001년 3월 21일 접수, 2001년 6월 18일 채택)

Donghan Yu\*, Sang-Joon Kim<sup>1)</sup> and Ji-Won Yang<sup>1)</sup>  
Korea Atomic Energy Research Institute, <sup>1)</sup>Dept. of Chemical Engineering, KAIST  
(Received 21 March 2001; accepted 18 June 2001)

### Abstract

A report by the National Research Council in the United States suggested that many lung cancer deaths each year are associated with breathing radon in indoor air. Most of the indoor radon comes directly from soil beneath the basement or foundation. Recently, radon released from groundwater is found to contribute to the total inhalation risk from indoor air. This study presents the assessment of a human exposure to radon released from the groundwater into indoor air. At first, a 3-compartment model is developed to describe the transfer and distribution of radon released from groundwater in a house through showering, washing clothes, and flushing toilets. The model is used to estimate a daily human exposure through inhalation of such radon for adults based on two sets of exposure scenarios. Finally, a sensitivity analysis is used to identify important parameters. The results obtained from the study would help to increase the understanding of risk assessment issues associated with the indoor radon released from groundwater.

**Key words** : indoor radon pollution, health risk assessment, exposure assessment

### 1. 서 론

라돈(Rn-222)은 우라늄(U-238) 방사능계열의 원소로서 라듐(Ra-226)의 알파( $\alpha$ ) 붕괴시 자연생성되는 가스상 물질이다. 화학적으로는 불활성이며, 무색, 무취의 특성을 가지고 있다. 암석 내에서 생성

되는 라돈은 보통 완전히 붕괴될 때까지 그 곳에 머무르게 된다. 이때, 암석표면의 공극내에서 물에 용해된 라돈(recoiled radon)은 붕괴하지 않고 상태를 유지하게 된다. 라돈이 공극 속의 공기와 물사이의 분배정도는 Oswald 계수를 표현되는 Henry 법칙을 따른다(Lewis *et al.*, 1987). 따라서 이런 라돈이 존재하는 암석층으로부터 지하수를 취수할 경우, 상당량의 라돈이 지하수속에 용해되어 있을 수 있다. 이렇게 용해된 상당량의 라돈은 실내공기 내로 휘

\* Corresponding author  
Tel : 042-861-1761, E-mail : dhyu@kaeri.re.kr

발하면서 주변으로 확산하게 된다. 라돈은 공기보다 상당히 무겁기 때문에 지표면 가까이에서 주로 존재하게 된다. 최근까지도 일반인에게는 라돈은 온천욕 등으로 건강에 좋은 원소로 인식되어 있으나, 의학적으로는 기준치 이상의 라돈을 마시거나 호흡했을 경우 치명적인 폐암을 유발시킨다는 것이 밝혀졌다(Doull *et al.*, 1999).

일반적으로 현재 도시인들은 하루생활 중 보통 80% 이상을 실내(일반주택, 사무실, 학교, 공공건물, 작업장, 지하철역, 지하상가, 차내 등)에서 생활하고 있으며, 특히 가정주부들이나 노약자들은 거의 90% 이상을 실내에서 생활하고 있는 것으로 보고되었다(Spengle and Dockery, 1981). 이 경우, 실내공기의 오염은 실내에서 생활하는 시간이 많은 사람들에게 여러 건강상의 영향을 미치게 되리라고 추산하고 있다. 실제로 토양과 건축자재(시멘트, 콘크리트, 모래, 벽돌 등), 지하수 등에서 상당량의 라돈은 방출되는 것으로 알려져 있다(Grader, 1986). 특히 우라늄을 함유한 암석질 토양에 위치한 주택, 천연석고보드 등 라돈함유량이 높은 건축자재를 사용하는 태양열 주택 등이 문제가 될 수 있으며 이러한 주택에서의 실내라돈농도는 저환기량 주택일수록 높아지게 된다(APCA, 1986).

이제까지 미국 등지에서 건축자재나 토양에 의해 발생하는 실내 라돈오염에 의한 인체건강영향에 대해서는 많은 연구와 조사가 이루어져 왔었다. 그러나, 최근 지하수를 취수하여 음용수 및 생활용수로 사용하는 주택의 비율이 늘어나면서 이러한 지하수 속에 용해되어 있었던 라돈이 실내에서 휘발하여 발생하는 실내오염에 의한 인체건강평가가 필요하게 되었다(Doull *et al.*, 1999). 현재 국내에서는 생활용수의 대부분을 지표수에 의존하기 때문에 이러한 경로에 의한 라돈의 인체노출은 거의 없다고 알려져 있다. 그러나 앞으로 지표수의 부족으로 인해 아파트단지 등 대규모 주택단지의 조성시 부족용수의 대체로 지하수를 활용할 가능성이 높아질 것임을 고려할 때 이러한 경로에 의한 라돈의 인체노출에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구의 주목적은 주택에서 지하수를 활용하는 경우 용해되어 존재하는 라돈이 유발하는 실내오염정도를 정량적으로 평가하고 이러한 실내오염시 인체노출의 경향을 분석하여 앞으로 라돈의

실내오염에 의한 인체위해평가기 필요한 자료를 제공하는데 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 지하수내 평균라돈농도결정

본 연구에서는 우선 국내의 대전지역을 대상으로 이루어진 기존 연구(Han and Park, 1996)를 근거로 하여 지하수내 존재하는 라돈의 농도를 결정하였다. 대전지역은 지질학상 함우라늄 흑색셰일(shale)이 분포하는 옥천대에 위치하고 있어서 이 곳의 지하수에는 우라늄 및 라돈이 함유되어 있을 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 특히 유성지역을 중심으로한 지역은 온천수에 라돈이 함유되어 있는 것으로 알려져 지하수 중에 라돈의 함유량이 상당히 높다고 판단되고 있다. 유성지역의 14개 지하 취수장에서의 라돈의 농도를 측정하여 자세한 결과는 Han and Park (1996)의 논문을 참조하기 바란다.

지하수내 라돈농도의 측정자료를 대수정규(log-normally) 분포로 가정하여 분포특성을 계산하였다. 그림 1은 기존연구의 측정자료와 대수정규분포로 가정한 경우에 대한 분포특성을 보여주고 있다. 이렇게 대수정규분포 가정시 지하수내 라돈의 평균농도는 1,106 pCi/L로 계산되었다. 따라서 본 연구에서는 지하수내 라돈의 평균농도를 1,106 pCi/L로 가정하여 이후 라돈의 실내오염정도 및 이에 따른 인체노출량을 평가하였다.

### 2.2 실내오염 평가를 위한 수학적 모델개발

라돈이 용해된 지하수를 사용하는 경우 함유된 라돈이 실내로 확산, 이동하게 되는데 이러한 상황을 효과적으로 모의하는 수학적 모델의 개발이 우선되어야 한다. 이러한 수학적 모델의 개발시 고려된 기본가정 및 한계점을 아래와 같이 요약하여 보았다.

- 본 연구의 취지는 실내라돈오염에 의한 인체노출을 보다 보수적인 관점에서 평가하는데 있다. 따라서 이러한 취지를 바탕으로 평가한 연구결과는 경우에 따라 실제 상황보다 과장된 라돈의 실내오염으로 나타날 수 있다.

- 각 구역에서의 라돈의 물질수지식을 수립할 때 예상되는 외부공기유입에 따른 실내 라돈농도의 희석은 외부로 라돈이 방출되는 것으로 처리한다.

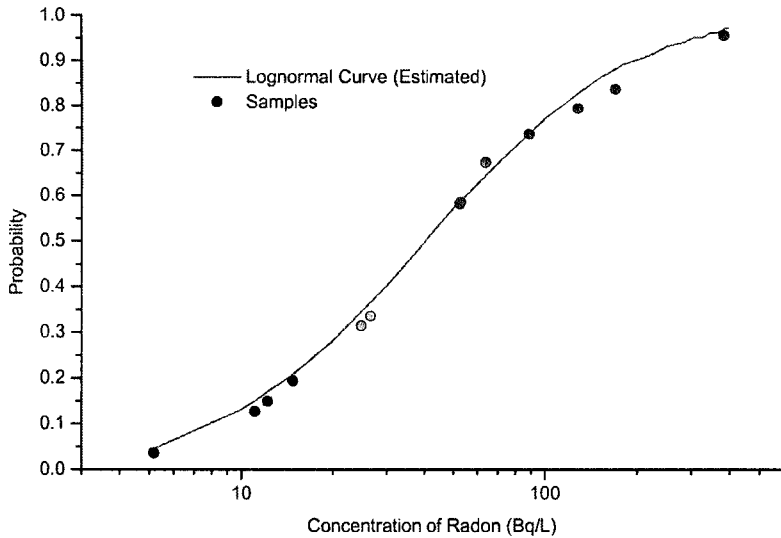


Fig. 1. Radon concentration profile in groundwater of Taejon: measured data vs. a fitted lognormal curve.

● 평가모델에 사용된 입력자료에는 실제 적용시 적지 않은 불확실성이 포함되어 있으므로 본 연구에서는 앞서 언급한 보수적인 입장을 바탕으로 하여 이들 값을 선택하였다. 본 연구에서 다루지 못한 이러한 불확실성의 정량적인 평가는 추후 연구에서 보강되어야 한다.

● 본 연구에서 개발한 수학적 모델로부터의 결과들은 앞서 언급한 여러 가정하에 얻어졌으므로 추후 실내라돈의 농도를 직접 측정하여 얻어진 자료와 비교, 검증하는 연구가 필요하다.

라돈의 실내오염을 정량적으로 평가하는 수학적 모델을 개발하기 위해 우선, 주택실내를 간단히 3개의 구역 (compartment): ‘샤워실’, ‘화장실’, ‘그 밖의 집안’으로 나누었다. 이렇게 샤워실과 화장실은 별도의 구역으로 나눈 우선적인 이유는 지하수내의 라돈이 휘발하는 일차적인 구역인 샤워실에서의 거동을 중점적으로 평가하기 위해서이다. 미국 등에서의 샤워실은 화장실과 분리되어 있는 경우가 대부분이나 국내에서는 구조상 이 두 구역을 하나의 구역으로 간주할 수도 있으리라 판단된다. 그러나 본 연구에서는 실내에서의 라돈의 정량적 거동분석을 위해 우선 3개의 구역으로 나누어 평가하기로 한다.

그림 2와 같이 각 구역에서는 라돈의 이동 및 분포에 대한 물질수지식을 아래와 같이 수립하였다.

● 샤워실

$$V_s \frac{dC_s(t)}{dt} = Q_s(t) + q_{sb}C_b(t) - q_{sb}C_s(t) - V_s C_s(t) k_d \quad (1)$$

● 화장실

$$V_b \frac{dC_b(t)}{dt} = Q_b(t) + q_{sb}C_s(t) + q_{ab}C_a(t) - (q_{bs} + q_{bo} + q_{ba}) C_b(t) - V_b C_b(t) k_d \quad (2)$$

● 그 밖의 집안

$$V_a \frac{dC_a(t)}{dt} = Q_a(t) + q_{ba}C_b(t) - (q_{ab} + q_{ao}) C_a(t) - V_a C_a(t) k_d \quad (3)$$

여기서  $C$ 는 라돈의 농도 (pCi/L)를 뜻하며  $V$ 는 부피 (L)를 의미한다.  $k_d$ 는 라돈의 방사학적 붕괴상수로  $1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ 이다. 첨자인  $s, b, a, o$ 는 각각 ‘샤워실 (shower stall)’, ‘화장실 (bathroom)’, ‘그 밖의 집안 (the remainder of house)’, 그리고 실외 (outdoor)을 뜻한다.  $q$ 는 공기환기률 (L/min)로 아래첨자들은 공기환기의 근원지부터 최종이동지를 표시한다. 예를 들면,  $q_{sb}$ 는 샤워실에서 화장실로 이동하는 단위 시간당 공기의 양을 뜻한다. 이러한 공기 환기율은 다음과 같은 관계식으로부터 구해진다.

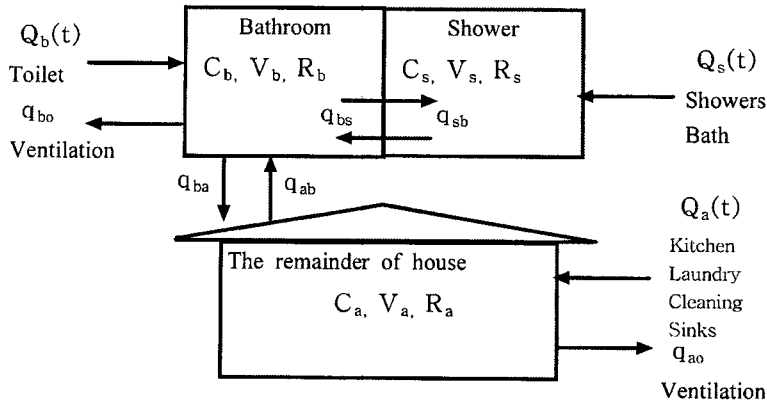


Fig. 2. A three-compartment model for simulating the transfer of radon from groundwater to indoor air.

$$q_{sb} = q_{bs} = \frac{V_s}{R_s} \tag{4}$$

$$\frac{V_b}{R_b} = q_{ba} + q_{bo} \tag{5}$$

$$q_{bo} = f_o q_{ab} \tag{6}$$

$$q_{ba} = q_{ab} - q_{bo} \tag{7}$$

$$\frac{V_a}{R_a} = q_{ao} + q_{ab} \tag{8}$$

여기서  $R_s, R_b, R_a$ 은 각 구역에서의 공기가 머무는 시간 (min),  $f_o$ 는 화장실에서의 공기가 환기에 의해 외부로 방출되는 분율을 의미하는데, 이는 실제 외부대기상황에 따라 상당히 변화할 수 있다. McKone (1987)의 논문에서는 대부분의 경우 0.0에서 0.6 사이에 있으리라 예측했는데, 본 연구에서는 실내에서의 라돈에 의한 노출을 보수적인 관점에서 평가하기 위해 상당히 낮은 값인 0.1을 사용하였다. 그리고, 각 구역의 부피는 국내에서 건설되고 있는 가장 전형적인 32평형 아파트를 기준으로 하여 산정하였다.

$Q_s, Q_b, Q_a$ 들은 지하수로부터 각 구역으로 유입되는 라돈의 양을 나타내며 아래와 같은 형태로 표시된다.

$$Q_i(t) = \frac{I_i \Phi_i H(t, \tau_i^0, \tau_i^*)}{\tau_i^* - \tau_i^0} \tag{9}$$

여기서  $I_i$ =각 구역에서 각종 활동으로 사용되는 물의 양(L);  $H(t, \tau_i^0, \tau_i^*)$ =시간이  $\tau_i^0$ 와  $\tau_i^*$  사이일 경우 값이 1이고 그 외에는 0 값을 갖는 함수;  $\tau_i^0$ =각 구역에서 활동이 시작하는 시간 (min);  $\tau_i^*$ =각 구역에서 활동이 끝나는 시간 (min); 그리고  $C_w$ 는 물에 존재하는 라돈의 농도를 의미한다. 일반적인 4인 가족을 기준으로 하여 한 가구가 평균적으로 사용하는 여러 용도의 물 사용량 및 사용시간 등은 Han (1995)의 자료에서 인용하였다. 또한, 라돈의 물에서 공기중으로의 전달효율,  $\Phi$ 는 물에서 공기로 이동한 라돈농도증가분을 초기 물속에서의 라돈농도로 나누는 것을 의미한다. 이 값은 실제로 실내구역의 부피와 계절에 따른 온도 등에 따라 결정되게 되는데, 실내 여러 활동으로 인해 공기 중 증가된 라돈의 농도변화를 실험적으로 측정하여 평균적으로 산출된다. 일반적으로 라돈을 함유한 물이 넓은 표면적의 공기와 접촉하면 상대적으로 큰 값을 갖으며, 화장실의 경우와 같이 24시간 동안 물이 공기의 접촉면적이 거의 변화없이 일정히 유지되면 상대적으로 낮은 값을 갖는다 (Prichard and Gesell, 1981). 본 연구에서는 이들 값을 Prichard and Gesell (1981)의 논문 및 McKone (1987)의 논문에서 사용한 값을 바탕으로 선정하였다.

표 1은 본 모델식에서 사용된 여러 입력자료들을 정리하여 보여주고 있다. 앞서 언급했듯이 사용된 입력자료들은 실제 적용시 적지 않은 불확실성이 존재하지만, 본 연구의 취지가 보수적인 관점에서 라돈의

**Table 1. Summary of parameters used to calculate indoor radon concentrations for three compartment model.**

Description	Representative value
$V_s$ volume of shower	6,300 L
$R_s$ residence time of air in shower stall	20 min
$V_b$ volume of bathroom	12,600 L
$R_b$ residence time of air in bathroom	30 min
$V_a$ volume of remaining house	248,000 L
$R_a$ residence time of air in household air	120 min
$f_o$ fraction of air leaving bathroom exhausted outdoors	0.10
$I_s$ water used in showers and baths	248 L
$I_b$ water used in toilet	248 L
$I_a$ water for other household uses	331.2L
$T_{shr}$ duration of shower per individual	10 min
$\tau_s^0$ time when shower water use begins	7 a.m.
$\tau_s^*$ time when shower water use ends	8 a.m.
$\tau_b^0$ time when toilet water use begins	12 a.m.
$\tau_b^*$ time when toilet water use ends	12 a.m.
$\tau_a^0$ time when other household water use begins	7 a.m.
$\tau_a^*$ time when other household water use ends	11 a.m.
$\Phi_s$ transfer efficiency from shower/bath water to air for radon	0.7*
$\Phi_b$ transfer efficiency from toilet water to air for radon	0.3*
$\Phi_a$ transfer efficiency from other household water to air for radon	0.66*

\*: Prichard, H.M. and Gesell, T.F. (1981) An estimate of population exposures due to radon in public water supplies in the area of Houston, Texas, *Health Phys.*, vol. 41, 599-606.

실내오염을 평가하는데 있기 때문에 본 연구의 취지에 맞도록 선택하였음을 다시 한번 밝힌다.

### 2. 3 인체노출량 평가

앞서 개발한 구역모델은 주택의 실내공간에서 라돈의 이동 및 분포를 예측하는데 활용되었다. 예측된 각 구역내 라돈의 농도로부터 실제 실내에 거주하는 인체의 노출량을 평가하는 것이 필요하다. 실제 각 개인별 인체노출량 산정은 개인이 갖는 여러 인체조건 및 하루 중 실내에 거주하는 생활패턴의 차이점등을 고려하여야 하므로 상당한 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 어려움을 고려하여 표준한국인 남성과 여성의 신체조건을 가정하고 하루 중 예상되는 여러 노출 중 중요한 두 가지 노출시나리오에 따라 인체에 누적되는 총 라돈의 축적량을 예측하고자 한다.

#### 2. 3. 1 노출량산정식

3 구역식에서 예측된 실내 라돈농도하에서 하루를 기준으로 호흡을 통해 인체에 피폭된 총 라돈의 양을 다음과 같은 식을 통해 계산하려고 한다.

$$D = \frac{\alpha}{BW} \int_0^{24} [OF_s(t) C_s(t) + OF_b(t) C_b(t) + OF_a(t) C_a(t)] BR(t) dt \quad (10)$$

여기서 D=한 개인이 하루동안 호흡을 통해 라돈을 흡입한 경우 인체축적량(pCi/kg·day), BW=몸무게(표준남성: 65.42 kg, 표준여성: 54.66 kg)(한국표준과학연구원, 1992),  $OF_s(t)$ =개인이 t시간에 '샤워실' 구역에 있을 수 있는 확률(단위 없음),  $OF_b(t)$ =개인이 t시간에 '화장실' 구역에 있을 수 있는 확률(단위 없음),  $OF_a(t)$ =개인이 t시간에 '그 밖의 집안' 구역에 있을 수 있는 확률(단위 없음),  $BR(t)$ =t시간의 호흡량(L/min)(표준남성(활동시/비활동시): 13.27/7.38, 표준여성: 8.82/5.51)(USEPA 1996)을 의미한다. 그리고  $\alpha$ 는 흡입된 라돈량 중 폐를 통해 인체내로 흡수된 비율(단위 없음)을 의미한다.

#### 2. 3. 2 인체노출시나리오

본 연구에서 라돈의 실내오염으로부터 인체노출을 평가하기 위한 노출시나리오는 크게 두 가지, 즉, 기준 경우(base case)와 최악 경우(worst case)로 나누어 평가하였다.

기준경우에서는 첫째, 여성과 남성의 하루동안 생활형태의 차이에 따른 인체노출량을 비교, 분석하기 위해 선정하였다. 남성의 기준경우에서는 오전 7시에 기상하여 오전 7시에서 8시 사이에 각각 10분 동안 샤워 및 화장실을 이용하고 오전 8시에 출근하여 오후 7시에 귀가하고 오후 11시에 취침한다고 가정하였다. 이 경우, 라돈의 체내흡수율( $\alpha$ )은 폐에 들이마신 전체 라돈의 50%로 가정하였다. 라돈은 휘발성 물질이지만 실내에서는 여러 크기의 분진들에 흡착되어 존재하여 호흡시 폐까지 흡입되어 인체에 흡수되는 과정 중 기관지에서 먼지와 더불어 흡착이 일어난다. 이 경우, 실제로는 실내 공기에 존재하는 양보다 적은 라돈 양만이 폐조직으로 유입되어 인체에 흡수되게 된다. 그러나, 이러한 라돈의 실내 먼지분자의 크기에 따른 흡착과정 및 기관지에서의 제거과정에 대한 불확실성이 많으므로, 기준경우에서는 이런 기관지에서 제거된 후 실제 폐조

직까지 도달하여 인체에 흡수되는 라돈의 분율을 평균적으로 50%이라고 가정하였다.

여성의 기준경우란, 실내에 거주하는 시간이 많은 가정주부를 모의하기 위해 노출시나리오이다. 이 경우 오전 7시에 기상하며 오전 7시에서 8시 사이에 각각 10분 동안 샤워 및 화장실을 이용하고 낮시간 동안 외부출입은 하지 않으며 오후 11시에 취침한다고 가정하였다. 또한, 기준경우에서는 샤워의 영향을 알아보기 위해 샤워를 아침샤워, 저녁샤워로 나누어 라돈의 인체노출량에 미치는 영향을 비교·분석하여 보았다. 이를 위해, 저녁샤워의 시간을 오후 7시에서 8시 사이에 각각 10분 동안 샤워 및 화장실을 이용한다고 하였다.

최악경우에서는 라돈의 체내흡수율( $\alpha$ )과 샤워 및 화장실 사용시간을 제외한 여성의 기준경우 시나리오와 동일하게 모의하였다. 이 노출시나리오에서는 여성의 기준경우 시나리오에서 샤워와 화장실 이용시간을 각각 20분, 라돈의 체내흡수율( $\alpha$ )을 100%로 가정하여 보수적으로 산정하였다. 이는 보다 보수적인 인체노출이 이루어진다는 최악경우이므로 앞서 언급한 라돈이 기관지에서의 흡착을 무시하여 폐조직까지 그대로 흡입되어 인체내로 모두 흡수된다는 보수적인 가정을 사용하였다.

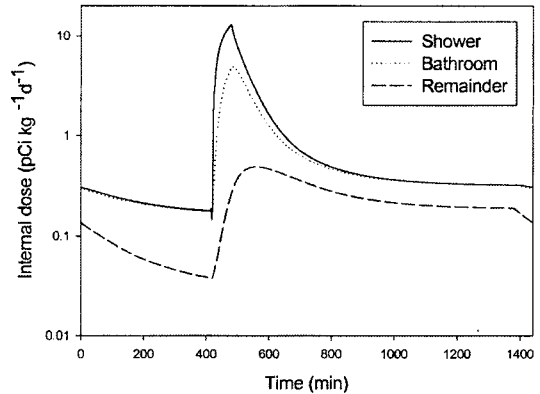
### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 주택의 각 구역에서 라돈이 함유된 지하수를 생활용수로 사용하는 여러 활동으로부터 실내로 방출되는 하루 중 라돈농도의 변화를 보여주고 있다. 아침샤워의 경우 오전 8시에 각 구역의 농도가 최고값을 보이고 있으며 이 경우 ‘샤워실’의 최고 라돈농도는 12.9 pCi/L였다. 저녁샤워의 경우 오전 7시에 0.2 pCi/L의 최저점을 보이다가 오전 7시 기상 이후로 오후 7시까지 서서히 증가하고 있음을 알 수 있었다. 아침샤워와 마찬가지로 샤워가 끝나는 시간인 오후 8시를 최고점으로 실내라돈 농도가 증가하였다가 이후 감소하는 것을 알 수 있다. 이 경우 ‘샤워실’, ‘화장실’, ‘그 밖의 집안’의 라돈의 최대농도는 각각 13.1, 4.8 그리고 0.4 pCi/L 등으로 계산되었다. 현 모델을 사용하여 평가한 결과에 의하면, 라돈농도의 변화는 주로 샤워의 이용시간에 의해 각 구역의 농도분포형태가 결정되며 ‘샤워실’,

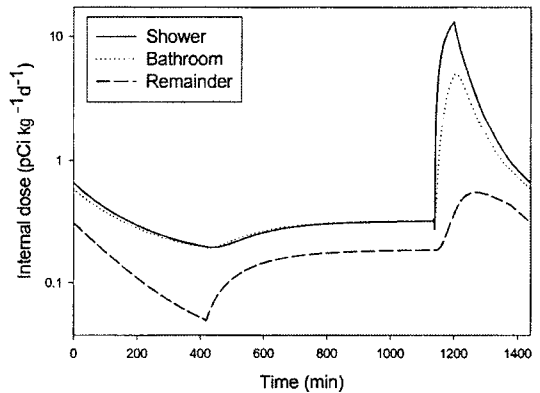
‘화장실’, ‘그 밖의 집안’의 순서로 실내라돈의 농도가 높음을 알 수 있었다.

남성의 기준경우에서는 표 2-(a)와 그림 4-(a)와 같이 아침샤워 대 저녁샤워의 경우, 총 라돈 방출량은 차이가 없으나, 인체내 라돈축적량 관점에서 볼 때 아침샤워는 낮 동안의 외근으로 인한 실내에 머무는 시간이 적기 때문에 결과적으로 저녁샤워가 아침샤워보다 1.4배 높은 라돈 축적량을 일으키게 한다. 이런 요인은 저녁샤워의 경우, 상당량의 라돈이 ‘그 밖의 집안’에 잔류하게 되고 수면시간 중에 이런 라돈을 흡입하게 되기 때문이다.

여성의 기준경우에서는 표 2-(b)와 그림 4-(b)와 같이 하루의 대부분 시간을 집안에 머무르게 되



(a) morning shower



(b) evening shower

Fig. 3. Estimated concentration of radon in the three compartments for the base case (man).

**Table 2. Summary of estimated contribution of the amounts of human inhalation at each compartment and total internal dose by inhalation.**

(a) base case (man)

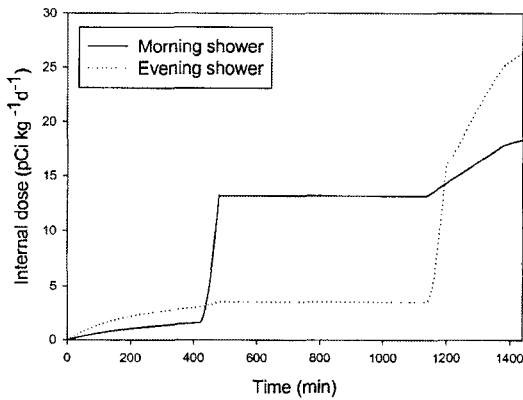
Compartment	Morning shower	Bathroom	The remainder	Evening shower	Bathroom	The remainder
Accumulated amount (pCi/d)	550.0	158.8	490.7	559.2	167.7	994.2
Contribution (%)	45.9	13.2	40.9	32.5	9.7	57.8
Internal dose (pCi/kg · d)	18.3			26.3		

(b) base case (woman)

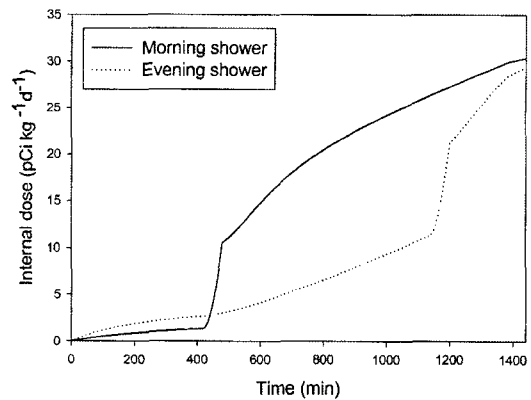
Compartment	Morning shower	Bathroom	The remainder	Evening shower	Bathroom	The remainder
Accumulated amount (pCi/d)	365.5	105.5	1186.8	371.3	111.0	1123.7
Contribution (%)	22.0	6.4	71.6	23.1	6.9	70.0
Internal dose (pCi/kg · d)	30.3			29.4		

(c) worst case

Compartment	Man			Woman		
	Morning shower	Bathroom	The remainder	Morning shower	Bathroom	The remainder
Accumulated amount (pCi/d)	2193.3	632.9	3538.4	1457.8	420.7	2373.6
Contribution (%)	34.5	9.9	55.6	34.3	9.9	55.8
Internal dose (pCi/kg · d)	97.3			77.8		



(a) man



(b) woman

**Fig. 4. Estimated total amount of radon accumulated in a human body for the base case.**

므로 남성보다 높은 인체내 라돈축적량을 보이고 있으나 몸무게에 비해 낮은 폐활량을 가지므로 그 차이는 크지 않았다. 이 경우, 구역 중에서 ‘그 밖의 집안’이 하루 동안의 인체 라돈축적량의 70% 이상을 공헌하고 있다. 또한, 샤워의 영향에 따른 총 라돈의 인체축적량은 거의 차이가 없었다. 그 이유는

두 경우 라돈이 실내공기에 방출되고 나서 3시간 가량 방출되기 전의 농도 이상으로 유지되므로 두 경우 모두 활동시간 중의 폐활량으로 공기를 흡입하고 라돈을 축적하기 때문에 총 라돈 축적량의 차이가 크지 않음을 알 수 있었다.

표 2-(c)와 그림 5는 최악경우에 대한 결과를 보

여주고 있다. 남녀사이의 몸무게 및 호흡량의 차이를 제외하고는 모든 조건이 동일하므로 각 구역의 공헌도는 거의 같았으며 시간에 따른 인체축적량의 변화도 동일하였다. 이 경우, 남성의 총 라돈 인체축적량은 여성보다 약 1.3배 컸는데, 이는 호흡량이 몸무게보다 체내축적량에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 남성의 최악 경우에서 라돈의 인체축적량은 기준 경우의 그것보다 5.3배 더 큼을 알 수 있었다.

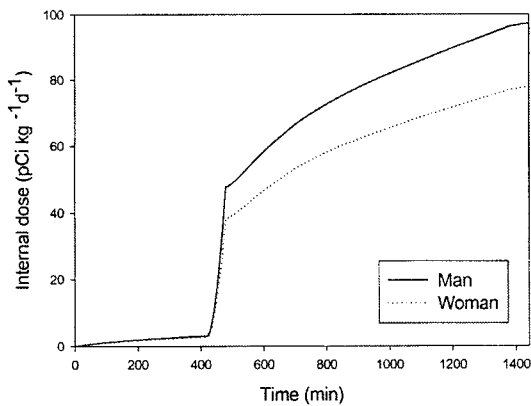


Fig. 5. Estimated total amount of radon accumulated in a human body for the worst case.

Table 3. Sensitivity of parameters for the model in case of a man with a morning shower for the base-case.

Parameter (x)	Local relative sensitivity,  dF/dx
Fraction of radon inhaled available for uptake	1.0
Ratio of breathing rate to body weight	1.0
Transfer efficiency from shower water to air	0.76
Water used in shower	0.76
Duration of shower	0.63
Volume of shower stall	0.37
Residence time of household air volume	0.37
Volume of house	0.36
Household occupancy from during the day	0.30
Volume bathroom	0.22
Amount of time spent in bathroom	0.17
Residence time of bathroom air volume	0.14
Water used in other household activity	0.14
Transfer efficiency from household activities	0.14
Residence time of air in shower stall	0.09
Transfer efficiency from toilet to bathroom air	0.07
Water used in toilet	0.07

마지막으로 모델의 민감도분석을 통해 인체노출 평가에 영향을 주는 주요 입력인자를 파악하였다. 표 3에서 나타난 바와 같이 라돈의 인체축적량 계산에 영향을 미치는 주요 입력인자로는 ‘ $\alpha$ : 라돈의 체내흡수율’, ‘BR (t)/BW: 호흡량과 몸무게의 비’, ‘ $\Phi_s$ : 샤워물에서 공기 중으로 이동하는 전달효율’, ‘ $I_s$ : 샤워시 물사용량’ 그리고 ‘ $T_{shr}$ : 샤워시간’ 순으로 영향력이 큼을 알 수 있었다. 이 결과로부터 라돈의 실내오염으로 인한 인체축적을 감소시키기 위해서는 적절한 샤워 시간대, 샤워 시간의 최소화, 집안 및 화장실의 환기, 그리고 취수 전 지하수에 용해된 라돈의 농도를 적절한 수준으로 낮추어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

최근 지하수를 취수되어 음용수 및 생활용수로 사용하는 주택의 비율이 늘면서 이러한 지하수 속에 용해되어 있던 라돈이 실내에서 휘발하여 발생되는 실내오염에 의한 인체건강평가가 필요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 주택에서 지하수를 활용하는 경우 발생하는 라돈의 실내오염 정도와 이에 따른 인체노출 경향을 정량적으로 평가하여 보았다. 본 연구에서 얻어진 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 국내 대전유성지역은 지하수에 비교적 높은 라돈농도를 함유하고 있다는 기존연구의 측정치를 대수정규분포로 가정했을 때 라돈농도분포의 평균농도는 1,106 pCi/L로서 예상되어 미국 환경부의 권고치인 300 pCi/L를 상회하는 것으로 나타났다.
2. 본 연구에서 개발한 3 구역모델로 국내 32평형 아파트를 대상으로 하여 모의한 결과, 생활용수를 사용하는 여러 활동 등에 의해 지하수 내 라돈이 실내로 방출되며 이러한 실내 라돈농도의 변화는 샤워이용시간에 따라 결정되는 것으로 나타났다. 또한 하루 중 실내라돈의 농도는 ‘샤워실’, ‘화장실’, ‘그 밖의 집안’의 순서로 높음을 알 수 있었다.
3. 실내에 존재하는 라돈은 호흡을 통해 인체에 축적되는데 이는 실내에서 활동양상이 다른 남자와 여자의 하루 인체노출 시나리오에 따라 다른 양상을 보인다. 아침 샤워의 경우, 낮시간동안 실내에 머무르는 시간이 많은 여자의 경우가 남자의 경우보



다 66% 정도 높은 인체노출량을 나타내는 것으로 나타났다. 그러나, 저녁샤워의 경우는 남녀 모두 거의 비슷한 인체노출량을 보이고 있는데 이때가 남녀 모두 실내에서 거주하는 시간대이기 때문이다.

4. 모델의 민감도분석을 통해 인체노출평가에 영향을 주는 주요입력인자로는 ‘ $\alpha$ : 라돈의 체내흡수율’, ‘BR (t)/BW: 호흡량과 몸무게의 비’, ‘ $\Phi_s$ : 샤워실에서 공기중으로 이동하는 전달효율’, ‘ $I_s$ : 샤워시 물 사용량’, ‘ $T_{shr}$ : 샤워시간’ 등으로 나타났다. 그리고 보다 자세한 인체부위별 축적량평가를 위해 인체내에서의 라돈의 거동 및 분포를 모의할 수 있는 “생리학을 바탕으로 한 동적 약리학모델”(Physiologically-based Pharmacokinetic model)의 개발이 필요하다고 판단된다.

5. 본 연구의 결과로부터 라돈의 실내오염으로 인한 인체축적을 감소시키기 위해서는 적절한 샤워 시간대, 샤워 시간의 최소화가 권고되고, 건축물 내의 적절한 환기시설의 설치 및 운영 역시 필요하다고 판단된다. 그리고 인체에 위해가 안되는 적절한 수준의 지하수내 라돈의 농도 결정을 위해서는 보다 자세한 라돈의 실내오염에 의한 인체위해평가가 선행이 되어야 할 것이다.

6. 수학적 평가모델에 사용된 입력자료들은 적지 않은 불확실성이 포함되어 있으므로 본 논문에서 다루지 못한 이러한 불확실성의 정량적인 평가는 추후 연구에서 보강되어야 한다. 또한, 본 연구 결과들의 검증을 위해 추후 실내라돈의 농도를 직접 측정, 분석하는 연구가 추가되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- 한국표준과학연구원 (1992) 국민표준체위조사보고서, 공업진흥청.
- APCA (1986) Indoor Radon, Air Pollution Control Association, Pittsburgh, PA.
- Doull, J. *et al.* (1999) Risk Assessment of Radon in Drinking Water, Washington, D.C., National Academy Press.
- Grader, J.B. (1986) Indoor Air Issue, Architectural Technology.
- Han, J.H. and K.H. Park (1996) Abundances of uranium and radon in groundwater of Taejeon area, *Econ. Environ. Geol.*, 29(5), 589-595.
- Han, M.Y. (1995) Water supply alternatives considering quantity, Quality and Energy of Water, *J. KSWQ*, 11, 263-268.
- Lewis, C., P. Hopke, and J.J. Stukel (1987) The solubility of radon in selected perfluorocarbon compounds and water, *Industrial Eng. and Chemical Research*, 26, 356-359.
- McKone, T.E. (1987) Human exposure to volatile organic compounds in household tap water, *Environ. Sci. Technol.*, 21, 1194-1201.
- Prichard, H.M. and T.F. Gesell (1981) An estimate of population exposures due to radon in public water supplies in the area of Houston, Texas, *Health Phys.*, 41, 599-606.
- Spengle, J.D. and D.W. Dockery (1981) Personal exposure to respirable particulates and sulfates, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 31, 153-159.
- USEPA (1996) Inhalation Exposure Factors Handbook, Vol. I: General Factors, Chapter 5.