

A Realistic Human Exposure Assessment of Indoor Radon released from Groundwater

Donghan Yu and Moonhee Han

Korea Atomic Energy Research Institute

지하수로부터 방출된 라돈에 의한 현실적인 체내축적량 평가

유 동 한 · 한 문 희

한국원자력연구소

(2002년 4월 9일 접수, 2002년 6월 19일 채택)

Abstract- The work presents a realistic human exposure assessment of indoor radon released from groundwater in a house. At first, a two-compartment model is developed to describe the generation and transfer of radon in indoor air from groundwater. The model is used to estimate radon concentrations profile of indoor air in a house using by showering, washing clothes, and flushing toilets. Then, the study performs an uncertainty analysis of model input parameters to quantify the uncertainty in radon concentration profile. In order to estimate a daily internal dose of a specific tissue group in an adult through the inhalation of such indoor radon, a PBPK(Physiologically-Based Pharmaco-Kinetic) model is developed. Combining indoor radon profile and PBPK model is used to a realistic human assessment for such exposure. The results obtained from this study would be used to the evaluation of human risk by inhalation associated with the indoor radon released from groundwater.

Key words: Indoor Radon, Compartment Model, Uncertainty Analysis, Human Exposure Assessment

요약- 본 연구는 지하수로부터 방출되어 가옥의 실내에 존재하는 라돈에 의한 체내축적량을 현실적으로 평가하는 방법을 보여준다. 먼저, 지하수로부터 실내공기로 전달되는 과정을 모의하기 위해 2-구역모델을 개발하였다. 이 모델은 실내에서 발생하는 생활활동, 즉, 목욕, 세수, 세탁, 변기에서의 물사용에 의해 의해 실내로 휘발, 이동하는 시간에 따른 라돈농도분포를 계산한다. 다음, 이 모델의 불확실성이 존재하는 입력인자들에 대해 불확실성분석을 수행하여 최종 실내라돈 농도분포를 결정하였다. 그리고 이러한 실내라돈을 호흡하여 체내에 축적되는 양을 보다 정량적으로 모의하기 위해 PBPK 모델을 개발하였다. 불확실성이 포함된 라돈농도분포와 정량적인 체내축적모의를 위한 PBPK모델의 결합으로 보다 현실적인 라돈의 체내축적량을 분석할 수 있다. 이러한 연구의 결과는 지하수로부터 발생하는 라돈에 의한 인체위해평가시 도움을 주리라고 판단된다.

중심어: 실내라돈, 구역모델, 불확실성분석, 체내축적량 분석

서 론

이제까지 미국등지에서 건축자재나 토양으로부터 실내로 유입된 라돈에 의한 인체건강영향에 대해서는 많은 연구와 조사가 이루어져 왔었다.

그러나, 최근 지하수를 취수하여 음용수 및 생활 용수로 사용하는 주택의 비율이 늘어나면서 이러한 지하수 속에 용해되어 있었던 라돈이 실내로 휘발하면서 발생하는 호흡노출에 의한 인체건강 평가가 필요하게 되었다[1]. 현재 국내에서는 생

활용수의 대부분을 지표수에 의존하기 때문에 이러한 경로의 라돈에 의한 인체노출은 거의 없다고 알려져 있다. 그러나 앞으로 지표수의 부족으로 인해 아파트단지등과 같은 대규모 주택단지조성시 부족용수의 대체로 지하수를 활용할 가능성이 높아짐을 고려할 때 이러한 경로에 의한 라돈의 인체노출에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 저자들의 논문[2]에서는 이와 같이 주택에서 지하수를 활용하는 경우 휘발하는 라돈이 일으키는 실내오염을 3 구역모델을 사용하여 평가하였고 이로부터 호흡노출로 인한 체내축적량을 정량적으로 분석하여 보았다.

본 연구에서는 개발한 모델인자의 불확실성을 고려하여 이러한 지하수로부터 방출된 실내라돈에 의한 호흡노출에 의한 체내축적량을 보다 현실적으로 평가하려고 한다. 우선, 전에 사용한 3-구역모델을 샤워실과 화장실을 구분하는 경계가 없는 국내실정을 감안하여 보다 현실적으로 개량한 2-구역 모델을 개발하였다. 이렇게 개발된 2-구역모델을 활용하여 입력인자의 불확실성을 고려하여 각 구역의 실내라돈 농도분포를 결정하였다. 이러한 농도분포에서 평균농도 및 상한치(95th percentile)을 선정하여 2가지 인체노출시나리오를 가정하여 각 경우에 대해 호흡으로 인한 체내축적량을 정량적으로 평가하기 위해 수학적 모델, PBPK(Physiologically-Based Pharmacokinetic) 모델을 개발하였다. 이 모델을 통해 체내장기 중 폐에 축적되는 라돈의 축적량을 정량적으로 평가하여 보았다. 이러한 연구결과는 실내라돈오염에 의한 인체노출 저감방안을 마련하는데 필요한 구체적인 근거를 마련하는데 도움이 되리라고 판단된다.

연구방법

라돈의 실내확산해석을 위한 2-구역 모델개발

라돈이 함유된 지하수를 생활용수로 사용할 때 휘발성이 있는 라돈이 실내공기로 휘발, 이동하는 과정을 수학적으로 모의하기 위해 2-구역 모델을 개발하였다. 그림 1과 같이 실내를 두 구역(샤워실, '그 밖의 집안')으로 나누고 각 구역에서 라돈의 물질수지 방정식은 아래와 같이 수립하였다.

$$V_s \frac{dC_s}{dt} = Q_s(t) + q_{as} C_a(t) - q_{so} + q_{sa} + \lambda_d V_s C_s(t) \quad (1)$$

$$V_a \frac{dC_a}{dt} = Q_a(t) + q_{sa} C_s(t) - q_{ao} + q_{as} + \lambda_d V_a C_a(t) \quad (2)$$

여기서 C (Bq/L)는 실내공기중에 존재하는 라돈의 농도를 뜻하며 V(L)는 구역의 부피를, 그리고는 라돈의 붕괴상수로 $1.26 \times 10^{-4} \text{ (min}^{-1}\text{)}$ 이다. 아래첨자인 s, a, o는 각각 샤워실(shower)과 그 밖의 집안(the remainder of the house) 그리고 실외(outdoor)를 의미하며 R은 각 구역에서 공기의 체류시간을 뜻한다. q는 공기환기율을 의미하며 아래첨자는 이동의 시작구역에서 도달구역을 의미한다. 이러한 공기 환기율은 관계식 (3), (4), (5), (6)으로부터 구해진다.

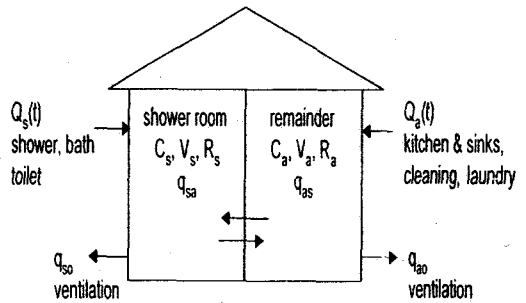


Fig. 1. A two-compartment model for simulating the transfer of radon from groundwater to indoor air.

$$\frac{V_a}{R_a} = q_{ao} + q_{as} \quad (3)$$

$$\frac{V_s}{R_s} = q_{so} + q_{sa} \quad (4)$$

$$q_{so} = f_o q_{as} \quad (5)$$

$$q_{so} = q_{as} - q_{sa} \quad (6)$$

Q(Bq/h)는 라돈의 발생원으로 식 (7)과 같이 정의되며 I_i 는 각 활동에서 쓰이는 물의 양, Φ_i 는 물에서 실내공기 중으로 이동하는 전달계수 (transfer efficiency), τ_i^o 은 용수를 사용하기 시작하는 시간이며 τ_i^i 는 사용을 끝내는 시간이다. 사용된 모델인자들의 보다 자세한 설명은 저자들의 논문[2]을 참조하기 바란다.

$$Q_i(t) = \frac{I_i \phi_i H(t, \tau_i^o, \tau_i^i)}{\tau_i^i - \tau_i^o} C_w \quad (7)$$

'샤워실'의 라돈의 원천으로는 샤워나 목욕용수의 사용으로 인한 것과 변기에 고여있는 물이 될 수 있으며 '그 밖의 집안'에서는 취사 및 설거지 그리고 청소, 세탁에 사용된 물이 라돈의 발생 원천이 된다. 각 구역의 구역간 그리고 외부 공기와의 교환율은 구역의 공기 체류시간에 의해 결정된다.

한 동적 약리학모델, Physiologically-Based Pharmacokinetic(PBPK)모델을 개발하여 활용하였다. 이 모델은 라돈의 호흡노출시 라돈의 시간에 따른 체내 각 장기속에서의 축적량을 정량적으로 평가할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 사용한 모델은 저자의 논문[6]에서 음용수를 통한 라돈섭취시 사용하였던 모델을 호흡을 통한 라돈흡입에 중점

Table 1. Summary of parameters used to calculate indoor radon concentration in two compartment model.

Description		Representative Value	Likely range
V_s	Volume of shower	18900 L	
R_s	Residence time of air in shower room	30 min	20-60
V_a	Volume of remaining house	248000 L	
R_a	Residence time of air in remaining house	120 min	30-240
f_o	Fraction of air leaving shower room exhausted outdoors	0.1	0-0.6
I_s	Water used for shower	248 L	
I_b	Water used for toilet	248 L	
I_a	Water used for other household uses	331.2 L	
T_{shr}	Duration of shower per individual	10 min	5-20
τ_s^o, τ_s^*	Time interval when shower water is used	7 - 8 o'clock.	
τ_t^o, τ_t^*	Time interval when toilet water is used	0 - 24 o'clock.	
τ_a^o, τ_a^*	Time when other household water use ends	7 - 23 o'clock.	
Φ_s	Transfer efficiency from shower/bath water to air	0.7	0.3-0.7
Φ_b	Transfer efficiency from toilet water to air	0.3	0.3
Φ_a	Transfer efficiency from other household water to air	0.66	0.58-0.74

표 1은 본 모델식에서 사용된 입력자료를 정리하여 보여주고 있다. 이 경우, 32평형 아파트를 기준으로 각 구역의 부피를 계산하였으며 국내의 4인가족을 기준으로 한 평균적인 물 사용량 및 사용 시간을 기존 자료[3]에서 인용하였다. 또한, 용도별 물사용량(I_i)의 비율과 실내공기 중으로 라돈의 휘발 정도를 나타내는 water-to-air의 전달 계수(Q_i)는 McKone의 논문[4]에서 인용한 값을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 유성지역의 지하수내 라돈농도는 기존연구[5]로부터 측정된 라돈농도를 정규대수(lognormal) 분포로 가정하여 얻어진 평균농도인 40.9 Bq/L을 사용하였다[2].

인체축적량 평가를 위한 동적 약리학 모델개발

실내공기로부터 흡입된 라돈의 체내거동을 해석하기 위해 본 연구에서는 생리학을 바탕으로

을 두어 일부 수정하여 사용하였다. 따라서 본 모델의 자세한 설명은 저자의 논문[6]을 참조하기를 바란다. 그림 2은 호흡을 통한 라돈흡입경우에 대한 PBPK 모델의 전체적인 구조를 보여주고 있다.

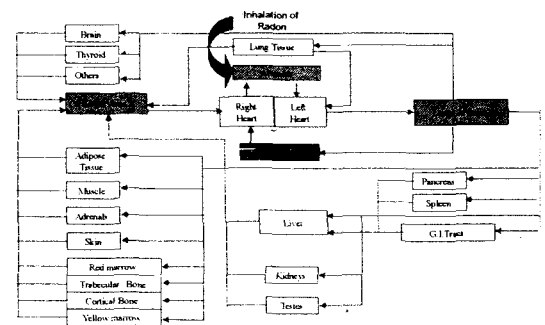


Fig. 2. Diagram of PBPK model used for Inhaled radon

불확실성분석

우선 불확실성분석에 앞서 현 모델에 사용된 여러 입력인자의 민감도를 평가하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 이러한 민감도분석으로부터 체내축적량에 영향을 주는 주요인자들을 선택한 후 선택된 입력인자들의 분포를 결정한다. 많은 경우 이렇게 선정된 입력인자의 확률밀도함수를 가정하게 된다. 이로부터 불확실성분석에 필요한 입력자료 set을 마련하여야 하는데 이를 위해 Monte-Carlo Sampling 이나 Latin Hyper-cube Sampling(LHS)기법을 사용한다. 이러한 sampling을 통해 얻어진 입력자료 set은 대개 100 - 200개정도 준비한 후 모델을 통해 계산된 최종결과치의 불확실성분포를 결정하게 된다. 얻어진 최종치의 분포로부터 평균(mean) 또는 불확실성의 범위(예를 들어, 5th 또는 95th percentile)등을 계산하게 된다.

본 연구에서는 입력인자의 민감도분석 수행후 불확실성분석을 위한 입력인자를 아래와 같이 선정하였다.

- R_a (residence time of air volume of remainder)
- T_E (transfer efficiency shower water to air)
- f_o (fraction of air leaving shower room exhausted outdoors)

표 2는 불확실성분석에 선정된 인자들의 분포형태와 불확실성범위를 보여주고 있다.

Table 2. Distributions of parameters used in uncertainty analysis

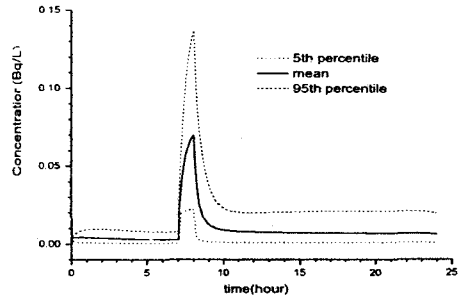
Parameter	Distribution	Range
R _a : residence time of air volume of remainder	Triangular	30-240 min Middle value: 120 (min)
T _E : transfer efficiency shower water to air	Uniform	0.3 ~0.7
f _o : fraction of air leaving shower room exhausted outdoors	Uniform	0.0 ~0.6

결 과

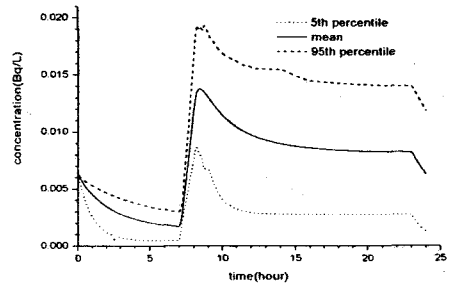
지하수로 유입된 실내라돈 농도분포

앞서 선정된 입력인자의 분포로부터 LHS (Latin Hypercube Sampling)방법을 이용하여 100개의 입력인자자료를 준비한 후 구역모델로부터 각 구역의 라돈농도 분포를 계산하였다. 그림 3은 각 구역에서 입력인자들의 불확실성을 포함하

여 계산된 최종 실내라돈농도의 분포를 보여주고 있다.



a) Shower room



(b) Remainder

Fig. 3. Profile distribution of indoor radon concentration derived from uncertainty analysis

인체노출계산을 위한 라돈농도

각 구역의 라돈농도가 결정되고 각 구역에 사람이 머물러 있는 확률을 곱하면 하루 동안 실내에 거주할 경우, 사람이 실제 각 구역에서 노출되는 라돈농도분포를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$C_m = F_s C_s + F_a C_a \tag{10}$$

여기서 C_{in} (Bq/L)는 실제 사람이 실내에 거주하는 시간대가 고려된 라돈농도를 의미하며, F_s 와 F_a 는 각각 구역에서 머무르는 확률인자를 의미한다.

이러한 C_{in} 의 분포는 실내에 거주하는 인체노출 시나리오에 따라 다르게 된다. 본 연구에서는 크게 두 경우의 인체 노출시나리오를 사용하기로 한다. 첫째는 일반남성의 경우에 해당하는 기준경우로 다음과 같은 실내거주 형태를 가정하였다.

- ▶ 저녁 11시부터 아침 7시까지는 침실에서 잠을 잔다.
- ▶ 아침 7시부터 8시 사이 화장실을 사용한다.
- ▶ 화장실에서 각각 10분씩 세면과 샤워를 한다.
- ▶ 아침 8시부터 저녁7시까지 직장에서 시간을 보낸다.
- ▶ 저녁 7시에 퇴근하여 11시까지 집에서 머문다.

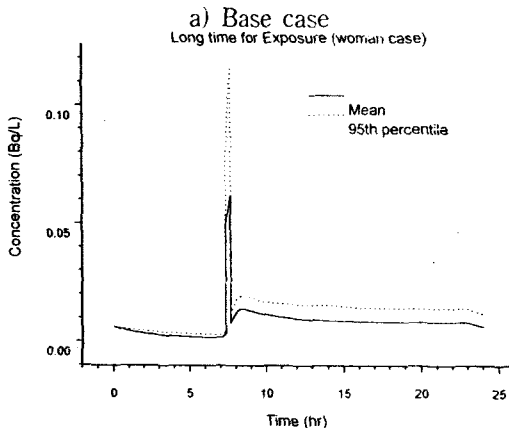
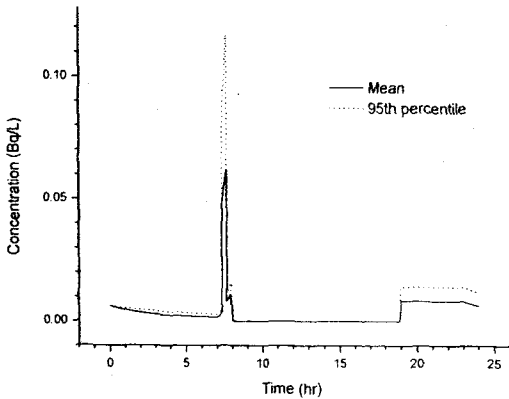


Fig. 4. Personal concentration of radon

이와 달리 최대한의 실내거주를 고려한 최악경우

는 일반여성처럼 하루 종일 실내에 거주하는 경우로 가정하였다.

그림 4는 기준경우와 최악경우에 대한 C_{in} 의 분포를 평균과 상한치의 라돈농도에 대해 보여주고 있다.

체내축적량

앞서 구한 C_{in} 의 분포로부터 실내에 거주하는 남성이 호흡을 통해 체내에 축적되는 라돈의 양을 구하기 위해 PBPK모형을 사용하였다. 라돈은 호흡노출을 통해 체내에 흡입되는 경우 폐에 축적되어 폐암을 일으킨다고 알려져 있다[7]. 따라서 본 연구에서는 타 장기에서의 라돈축적량 보다는 폐에 축적되는 라돈의 양을 평가하여 보았다.

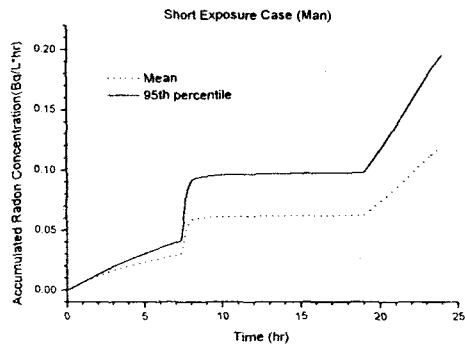


Fig. 6. Accumulated concentration of radon for the base case

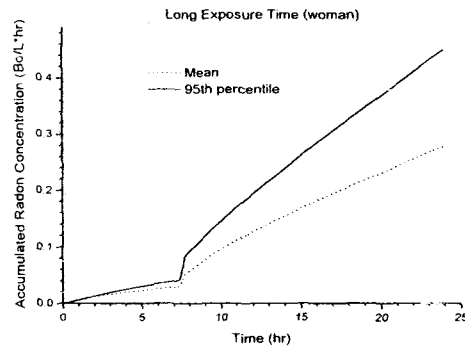


Fig. 7. Accumulated concentration of radon for the worst case

그림 6과 7은 기준경우와 최악경우에 인체장기 중에서 폐에 축적되는 라돈의 양을 보여주고 있다. 기준경우시 상한치의 라돈농도에 의한 체내축적량은 평균라돈농도에 의한 그것보다 약 2배정

도 높음을 알 수 있었다. 최악경우는 상한치의 라돈농도에 의한 체내축적량이 평균라돈 농도에 의한 것보다 1.6배 정도보다 높았다. 인체노출 시나리오와 모델인자의 불확실성을 같이 고려하면 폐에 축적되는 라돈농도의 상한치는 평균치보다 약 3.2배 정도 높은 수준이라고 할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 지하수로부터 방출된 라돈에 의한 호흡노출시 라돈의 인체축적량을 보다 현실적으로 평가하는 모델개발 및 방법론을 소개하였다. 우선 라돈이 함유된 지하수로부터 생활용수를 사용하는 여러 활동으로 실내로 휘발, 확산하는 라돈거동을 평가하기 위해 수학적인 2.구역모델을 사용하였다. 이 모델은 전에 사용하였던 3.구역모델의 문제점인사위실과 화장실을 구분하는 경계가 없다는 국내실정을 감안하여 새롭게 개발된 것이다. 그러나 이와 같은 수학적 모델사용시 예상되는 입력인자의 불확실성이 최종계산결과인 실내라돈농도의 분포에 영향을 미치기 때문에 이러한 영향을 정량화할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 선정된 입력인자들의 불확실성을 고려하여 2.구역 모델을 모의한 후에 따른 실내라돈농도의 불확실성분포를 결정하였다. 즉, 예측된 실내라돈 농도분포 중에서 평균농도 및 상한치(95th percentile)을 대표값으로 선정하여 이에 따른 체내축적량을 계산하였다.

호흡을 통해 인체내로 흡입된 라돈은 인체내에서 여러 장기사이를 이동, 분포하게 된다. 이러한 동적 거동분석을 위해 본 연구에서는 최근 약리학에서 활발히 연구되고 있는 새로운 모델인 PBPK모델을 개발, 사용하였다. 이러한 인체거동 모델을 사용하는 경우, 라돈의 체내축적량을 보다 정량적으로 평가할 수 있는 이점이 있다. 본 연구에서는 PBPK모델을 사용하여 인체장기중에서 라돈의 영향이 큰 폐조직에 대한 라돈농도의 축적량을 평가하였다. 이 경우 우선 실내에서 예상되는 두 경우의 거주시나리오를 가정하였는데, 일반적인 남성의 생활패턴을 고려한 기준경우시 실내라돈농도분포의 상한치(95th percentile)에 의한 노출에 의한 폐조직내 라돈의 농도축적량은 평균 실내라돈농도에 의한 그것보다 2배정도 높다고 평가되었다. 또한 상당히 보수적으로 하루종일 실내에 거주하는 최악경우시 상한치의 실내라돈농도에 의한 폐조직의 라돈농도의 축적량은 평균적인 실내라돈농도경우보다 1.6배정도 높은 것으로

평가되었다. 따라서 인체노출시나리오와 모델인자의 불확실성을 함께 고려하여 볼 때, 폐조직에 축적되는 라돈농도의 상한치는 평균치보다 약 3.2배 정도 높은 수준이라고 평가되었다. 이러한 연구결과는 지하수로부터 실내로 유입되는 라돈에 의해 호흡노출시 인체건강영향평가와 이로 인한 인체위해감소를 위한 노출저감방안을 마련하는데 필요한 기본자료를 공급할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Doull, J. et al., Risk Assessment of Radon in Drinking Water, Washington, D.C., National Academy Press (1999).
2. Yu, D. et al., Assessment of Human Exposure to Indoor Radon Released from Groundwater, J. KOSAE, Vol.17 (3), 241-249 (2001).
3. Han, M.Y., Water Supply Alternatives Considering Quantity, Quality and Energy of Water, J. KSWQ, Vol.11, 263-268 (1995).
4. McKone, T.E., Human Exposure to Volatile Organic Compounds in Household Tap Water, Environ. Sci. Technol, Vol.21, 1194-1201(1987).
5. Han, J.H. and Park, K.H., Abundances of Uranium and Radon in Groundwater of Taejeon Area, Econ. Environ. Geol., Vol.29 (5), 589-595(1996).
6. Yu, D. and Lee C., The Quantitative Internal Dose Assessment of Ingested Radon, J. Korean Society of Environmental Engineers, vol. 21(9), 1305-1314 (2001).
7. National Research Council, Risk Assessment of Radon in Drinking Water, Washington, D.C., National Academy Press(1999).