

## 실내 라돈오염 해석을 위한 2구역 모델의 민감도 및 불확실성 분석

### Sensitivity and Uncertainty Analysis of Two-Compartment Model for the Indoor Radon Pollution

유동한\* · 이한수 · 김상준<sup>1)</sup> · 양지원<sup>1)</sup>  
한국원자력연구소, <sup>1)</sup>한국과학기술연구원 생명화학공학과  
(2002년 4월 11일 접수, 2002년 7월 22일 채택)

Donghan Yu\*, Han Soo Lee, Sang-Joon Kim<sup>1)</sup> and Ji-Won Yang<sup>1)</sup>  
Korea Atomic Energy Research Institute,  
<sup>1)</sup>Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST  
(Received 11 April 2002, accepted 22 July 2002)

#### Abstract

The work presents sensitivity and uncertainty analysis of 2-compartment model for the evaluation of indoor radon pollution in a house. Effort on the development of such model is directed towards the prediction of the generation and transfer of radon in indoor air released from groundwater. The model is used to estimate a quantitative daily human exposure through inhalation of such radon based on exposure scenarios. However, prediction from the model has uncertainty propagated from uncertainties in model parameters. In order to assess how model predictions are affected by the uncertainties of model inputs, the study performs a quantitative uncertainty analysis in conjunction with the developed model. An importance analysis is performed to rank input parameters with respect to their contribution to model prediction based on the uncertainty analysis. The results obtained from this study would be used to the evaluation of human risk by inhalation associated with the indoor pollution by radon released from groundwater.

**Key words** : Indoor Radon Pollution, Compartment Model, Uncertainty Analysis, Sensitivity Analysis

#### 1. 서 론

이제까지 미국동지에서 건축자재나 토양에 의해 발생하는 실내 라돈오염에 의한 인체건강영향에 대

해서는 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 생활용수의 대부분을 지표수에 의존하고 있는 국내에서는 이러한

\* Corresponding author  
Tel : 042-868-8380, E-mail : dhyu@kaeri.re.kr

경로를 통한 라돈의 인체노출은 거의 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 앞으로 아파트단지 등 대규모 주택단지가 조성되는 경우, 지표수의 부족으로 대체 용수로 지하수를 활용할 가능성이 높아지게 되어 이러한 경로를 통한 라돈의 인체노출에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이미 저자들의 논문(Yu *et al.*, 2001)에서는 주택에서 지하수를 활용하는 경우 지하수에 용해되어 있던 휘발하는 라돈이 일으키는 실내오염을 3 구역모델을 사용하여 평가하였고 이로부터 호흡노출로 인한 체내축적량을 정량적으로 분석하여 보았다.

본 논문에서는 전에 개발한 3-구역모델에서 지적되었던 ‘샤워실’과 ‘화장실’의 경계가 없는 국내 실정을 고려하여 보다 현실적인 2-구역 모델을 개발하였다. 그러나 이렇게 개발된 수학적 모델에서 사용된 입력인자들의 불확실성은 최종결과인 실내 라돈농도와 호흡으로 인한 체내축적량을 결정하는데 직접적인 영향을 미치게 된다. 이러한 영향을 보다 정량적으로 평가하기 위해 본 논문에서는 개발된 모델에 대한 민감도, 불확실성 및 중요도분석을 수행하였다. 이러한 연구결과는 실내라돈오염에 의한 인체노출 저감방안을 마련하는데 필요한 구체적 근거를 마련하는데 도움이 되리라고 판단된다.

## 2. 본 론

### 2.1 실내오염해석을 위한 2-구역 모델개발

라돈이 함유된 지하수를 생활용수로 사용할 때 휘발성이 있는 라돈이 실내공기로 휘발, 이동하는

과정을 수학적으로 모의하기 위해 2구역 모델(2-compartment model)을 개발하였다. 그림 1과 같이 실내를 두 구역(‘샤워실’과 ‘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 (pCi/L)는 실내공기 중에 존재하는 라돈 농도를, V (L)는 각 구역의 부피를, 그리고 R은 각 구역에서 공기의 체류시간을 뜻한다. 사용된 아래첨자 s, a, o는 각각 ‘샤워실’(shower)과 ‘그 밖의 집안’(the remainder of the house) 그리고 실외(outdoor)를 의미하며  $\lambda_d$ 는 라돈의 붕괴상수로  $1.26 \times 10^{-4}$  (min<sup>-1</sup>)이다. q는 공기환기율을 의미하며 사용된 아래첨자는 이동시작구역에서 도달구역을 의미한다. 이러한 공기 환기율은 관계식 (3), (4), (5), (6)으로부터 구해진다.

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

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

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

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

Q (pCi/h)는 라돈의 발생원으로 식 (7)과 같이 정

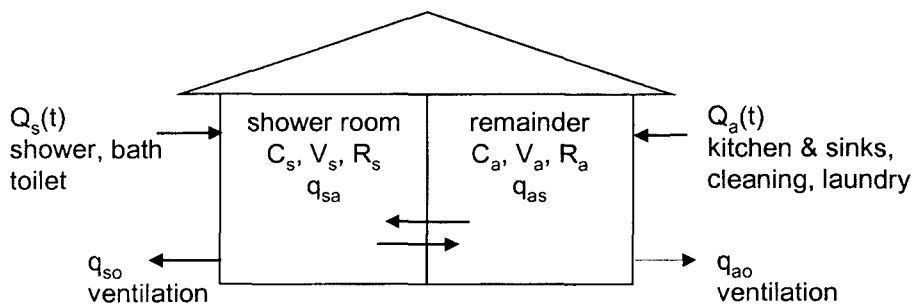


Fig. 1. A two-compartment model for simulating the transfer of radon from groundwater to indoor air.

**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
$\tau_s^o, \tau_s^*$	Time interval when shower water is used	7 ~ 8 o'clock.	
$\tau_t^o, \tau_t^*$	Time interval when toilet water is used	0 ~ 24 o'clock.	
$\tau_a^o, \tau_a^*$	Time when other household water use ends	7 ~ 23 o'clock.	
$\Phi_s$	Transfer efficiency from shower/bath water to air	0.7	0.3 ~ 0.7
$\Phi_b$	Transfer efficiency from toilet water to air	0.3	0.3
$\Phi_a$	Transfer efficiency from other household water to air	0.66	0.58 ~ 0.74

의되며  $I_i$ 는 각 활동에서 쓰이는 물의 양,  $\Phi_i$ 는 물에서 실내공기 중으로 이동하는 전달계수 (transfer efficiency),  $\tau_i^o$ 는 용수를 사용하기 시작하는 시간이며  $\tau_i^*$ 는 사용을 끝내는 시간이다. 다른 모델인자들에 대한 자세한 설명은 저자들의 논문 (Yu *et al.*, 2001) 을 참조하기 바란다.

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

‘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 공기체류시간에 의해 결정된다.

표 1은 본 모델식에서 사용된 여러 입력자료들을 정리하여 보여주고 있다. 32평형 아파트를 기준으로 각 구역의 부피를 계산하였으며 국내의 4인 가족을 기준으로 한 평균적인 물 사용량 및 사용 시간을 기존 자료 (Han, 1995)에서 인용하였다. 또한, 용도별 물 사용량 ( $I_i$ )의 비율과 실내공기 중으로 라돈의 휘발 정도를 나타내는 water-to-air의 전달계수 ( $\Phi_i$ )는 McKone (1987)의 논문에서 인용한 값을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 유성지역의 지하수내 라돈농도는 기존연구 (Han and Park, 1996)로부터 조사된 라돈농도 sample들을 lognormal 분포로 가정하여

얻어진 평균값인 1106 (pCi/L)을 사용하였다 (Yu *et al.*, 2001).

### 2. 2 인체노출량 계산

앞서 개발된 2구역 모델에서 예측된 각 구역내 라돈의 농도로부터 호흡노출에 의한 인체축적량 (Internal Dose)은 다음과 같은 식을 통해 계산한다.

$$D = \frac{\alpha}{BW} \int_0^{24} [OF_s(t)C_s(t) + OF_a(t)C_a(t)]BR(t)dt \quad (8)$$

여기서  $D$  = 개인에 대한 하루동안의 체내축적량 (pCi/kg/d),  $\alpha$  = 흡입된 라돈의 체내 흡수율 (단위 없음),  $BW$  = 몸무게 (kg) (남성 : 65.42 kg, 여성 : 54.66 kg) (한국표준과학연구원 1992),  $OF_s(t)$  = 개인당  $t$ 시간에 샤워실의 점유율 (단위 없음),  $OF_a(t)$  = 개인당  $t$ 시간에 ‘그 밖의 집안’의 점유율 (단위 없음),  $BR(t) = t$ 시간의 호흡량 (L/hr) (남성 (활동/비활동) : 796.2/ 442.8, 여성 : 529.2/330.6)을 의미한다.

인체축적량의 계산을 위해 노출시나리오는 저자들의 논문 (Yu *et al.*, 2001)에서 사용되었던 기준경우 (base case)와 최악경우 (worst case) 2가지를 그대로 사용하였다.

앞서 개발한 2구역 모델을 사용하여 2가지 인체 노출시나리오에 대해 각각 남녀별 체내 축적량을 계산하여 표 2에 수록하였다. 기준경우에는 남자에 비해 실내에 오랜시간 거주하는 여자는 비록 몸무게에 대한 호흡량이 작다고 하더라도 거의 2배에

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

(a) base case				
Compartment	Man		Woman	
	Shower room	Remainder	Shower room	Remainder
Contribution (%)	42.4	57.6	17.1	82.9
Internal dose (pCi/kg/day)	14.70		28.98	

(b) worst case				
Compartment	Man		Woman	
	Shower room	Remainder	Shower room	Remainder
Contribution (%)	29.7	70.3	29.5	70.5
Internal dose (pCi/kg/day)	67.29		41.99	

가까운 체내축적량을 보이고 있으며 이 경우 체내 축적량에 대한 ‘그 밖의 집안’구역의 라돈농도의 기여율이 각각 남녀별로 58, 83%인 것으로 보아 호흡에 의한 인체노출량은 대부분 ‘그 밖의 집안’구역의 라돈양에 의해 좌우되는 것을 볼 수 있다. 최악경우는 남녀 모두 실내에 거주하는 양상이 비슷하므로 호흡량이 큰 남자의 체내축적량이 여자의 그것보다 크다. 이 경우의 체내축적량에 대한 각 구역의 라돈농도의 기여율도 역시 남녀 모두 비슷함을 볼 수 있다.

**2. 3 민감도분석**

현 모델에 사용된 여러 입력인자의 변화에 따른 체내축적량의 상관민감도를 평가하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 우선 대상 인체노출시나리오를 남자의 기준경우와 여자의 최악경우로 선정하고 모델의 입력인자값들에 대해 각각 1%의 증가분을 주었을 때 최종결과인 체내축적량의 변화율을 근거로 하여 민감도를 평가하였다.

표 3은 이 경우 최종 민감도분석의 결과를 보여 주고 있다. 민감도분석으로부터 체내축적량에 영향을 주는 주요인자들은 1)  $\alpha$ : 흡입한 라돈의 인체 흡수율, 2)  $BR(t)/BW$ : 몸무게에 대한 호흡량의 비, 3)  $V_a$ : ‘그 밖의 집안’ 구역의 부피, 4)  $R_a$ : ‘그 밖의 집안’구역의 공기가 머무는 시간, 그리고 5)  $OF_a(t)$ : 하루동안 ‘그 밖의 집안’구역의 시간점유율 등의 순서로 나타났다. 여성의 경우 ‘그 밖의 집안’구역에

**Table 3. Sensitivity Analysis of input parameters in two compartment model.**

Parameter	Local relative sensitivity,   dF/dx	
	Man for base case	Woman for worst case
Fraction of radon inhaled available for uptake	1.00	1.00
Ratio of breathing rate to body weight	1.00	1.00
Volume of the remainder of house	0.36	0.89
Residence time of household air volume	0.37	0.88
Household occupancy from during the day	0.30	0.72
Transfer efficiency from shower water to air	0.76	0.53
Water used in shower	0.76	0.53
Water used in other household activities	0.14	0.33
Transfer efficiency from household activities	0.14	0.33
Duration of shower	0.63	0.13
Duration of toilet	-	0.13
Transfer efficiency from toilet water to air	0.07	0.10
Water used in the toilet	0.07	0.10
Residence time of shower room air	0.09	0.09
Volume of shower room	0.37	0.05

관계하고 있는 인자들의 민감도가 높게 나타나는 반면 남성의 경우는 ‘화장실’구역의 라돈의 기여도가 크므로  $\Phi_s$ : 샤워실에서 공기 중으로 이동하는 전달효율,  $I_s$ : ‘샤워시 물사용량’ 그리고  $T_{shr}$ : 샤워시간 등의 인자들이 비교적 높은 민감도를 보이고 있다. 이는 남녀별로 호흡에 의한 라돈의 체내축적량이

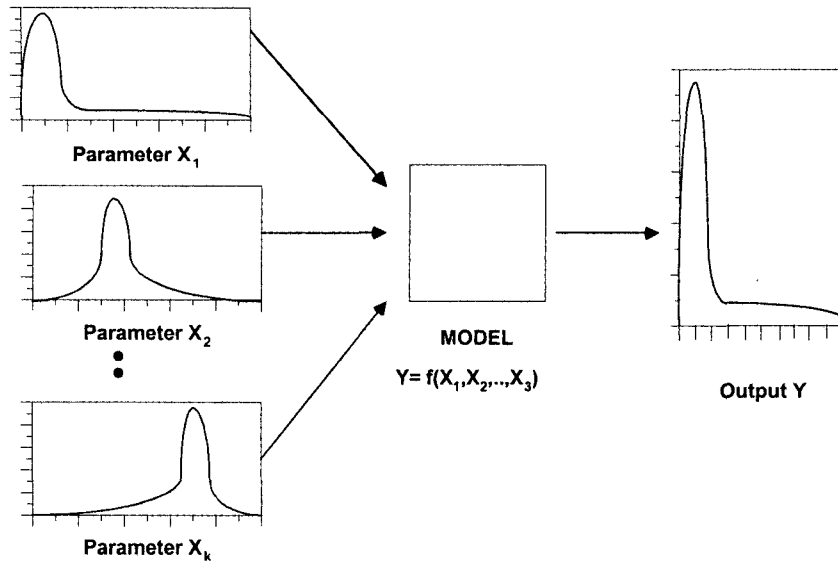


Fig. 2. A schematic diagram of uncertainty analysis.

Table 4. Distributions of parameters used in uncertainty analysis.

Parameter	Distribution	Range
$\alpha$ : adsorption ratio into blood among inhaled radon	uniform	0.0 ~ 1.0
$R_R$ : residence time of air volume of remainder	triangular	30 ~ 240 min Middle value: 120 (min)
TE: 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
BW: woman's body weight	lognormal	Mean = 54.66 kg Standard deviation = 6.49 kg

인체 노출시나리오에 따라 차이가 나기 때문이다.

#### 2.4 불확실성분석

불확실성분석이란 입력자료들 ( $X_i$ )과 이로부터 얻어지는 최종결과치 ( $Y_i$ )의 함수관계 또는 모델을 통해 전파되는 불확실성을 정량화하는 작업이다(그림 2. 참조).

$$Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \text{ or } Model(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (9)$$

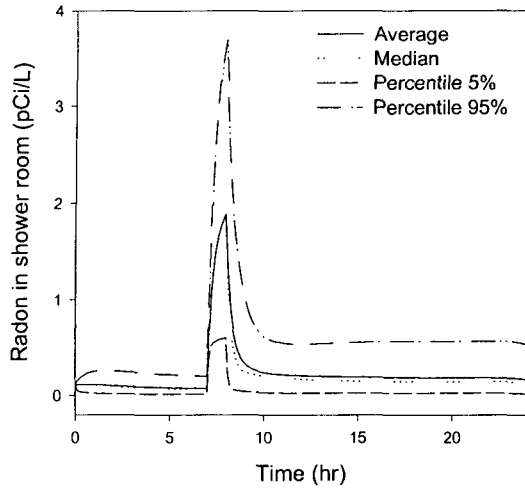
이 경우 입력자료들 ( $X_i$ )는 확률밀도분포인 pdf (probability density function)으로 표현된다.

우선적으로 입력인자들의 확률밀도함수로부터 얻어지는 입력자료 set을 마련하여야 하는데 이를 위

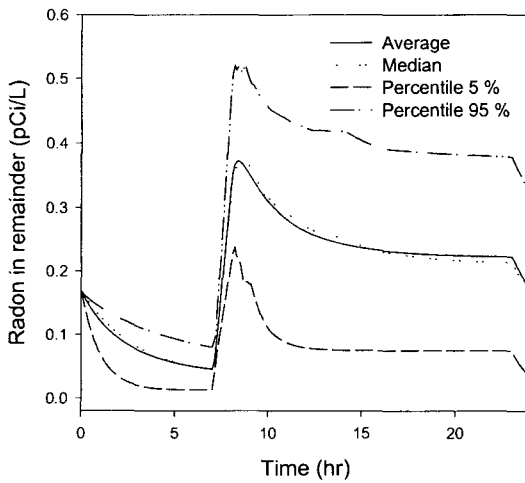
해 Monte-Carlo Sampling이나 LHS (Latin Hyper-cubable Sampling)기법을 사용한다. 이러한 sampling을 통해 얻어진 입력자료들의 set은 대개 100~200개 정도 준비하여 이로부터 최종 결과치의 불확실성분포를 결정하게 된다. 결정된 최종치의 분포로부터 평균치 (mean) 또는 불확실성의 분포(예를 들어, 5th 또는 95th percentile) 등이 정량화하게 된다.

본 연구에서는 불확실성분석을 실내거주시간이 긴 여자의 최악경우로 한정하여 앞서 수행한 민감도분석의 결과로부터 다음과 같은 인자를 선정하여 실행하였다.

- $\alpha$  (adsorption ratio into blood among inhaled radon)



(a) shower room



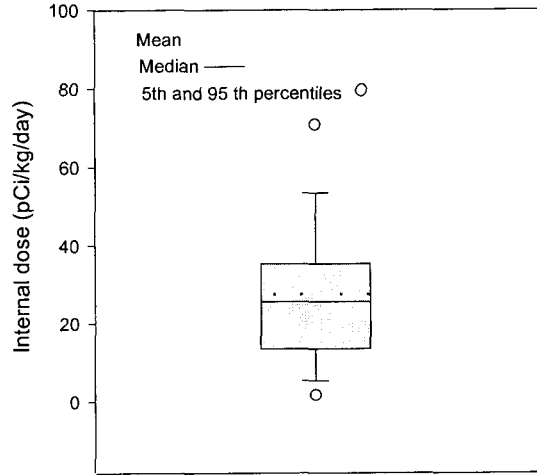
(b) Remainder

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

- $R_a$  (residence time of air volume of remainder)
- TE (transfer efficiency shower water to air)
- $f_o$  (fraction of air leaving shower room exhausted outdoors)
- BW (woman's body weight)

표 4는 불확실성분석에 선정된 인자들의 분포형태와 불확실성범위를 보여주고 있다.

선정된 인자의 분포로부터 LHS (Latin Hypercube



Woman for worst case

Fig. 4. Result from uncertainty analysis of internal dose for woman.

Sampling)방법을 이용하여 100개의 입력인자 set을 준비한 후 이로부터 라돈의 실내농도분포와 이로 인한 호흡노출시 인체축적량을 계산하여 이들 값의 정상화된 분포를 평가하였다.

그림 3은 입력인자들의 불확실성을 포함하여 계산된 최종 실내라돈농도의 분포를 보여주고 있다.

그림 4는 불확실성이 포함된 실내라돈농도분포로부터 최악경우에 대한 여자의 인체축적량의 분포를 보여주고 있다. 그림 4에서 상자안은 전체분포중에서 50%의 값들을, 상자밖의 외곽선은 전체분포중 80%의 값들을 포함하고 있다. 체내축적량의 분포를 좀 더 자세히 살펴보면 분포의 평균(mean)은 27.34 (pCi/kg/day), 중앙값(median)은 25.32 (pCi/kg/day), 그리고 분포의 하한치와 상한치(5<sup>th</sup> percentile와 95<sup>th</sup> percentile)은 각각 1.97, 69.57 (pCi/kg/day)로 계산되었다.

### 2.5 중요도분석 (Importance Analysis)

중요도분석이란 최종결과에 가장 영향을 주는 입력자료를 파악하는 것이다. 이때 중요도란 최종결과와 샘플과 불확실한 입력자료의 샘플로부터 얻어지는 rank-order correlation을 말한다. 보통 수행하는 하나의 입력자료의 변화에 따른 최종결과치의 변화

만을 파악하는 민감도분석과 달리 이 분석은 전체 입력자료의 분포에 따른 sampling으로부터 얻어지는 최종결과치의 분포를 사용한다. 이런 경우 실제 최종결과치의 분포에 관계하지 않는 점도 이러한 rank-order correlation이 갖는 좋은 점이다. 그리고 최종 결과치 및 입력자료가 order of magnitude가 차이가 나는 경우도 분포에서 순위(rank)만을 갖고 결정하기 때문에 상당히 안정된 결과를 얻는다는 점이 또 다른 장점이 될 수 있다. 여러 종류의 rank-order correlation이 있으나 많은 경우 Spearman rank-order correlation이 가장 흔히 쓰여지는데 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum(x_i - y_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (10)$$

여기서  $x_i, y_i$ 는 X, Y 변수의 i번째의 순위(rank)이며 n은 sample수를 의미한다.

이렇게 얻어진  $\rho$ 값은 -1에서 1까지 변하는데 -1에 가까우면 음수적으로 연관성(correlated)되어 있음을 의미한다. 대부분의 경우  $\rho$ 의 절대값을 취해 표시하는데 이 값이 크다는 것은 입력자료의 불확실성이 최종 결과치에 커다란 영향을 주는 것을 의미하게 된다. 따라서 입력자료들에 대해 이러한 spearman rank-order correlation을 구한 후 이를 순위화하면 최종결과에 영향을 주는 중요입력자료들의 순위를 얻을 수 있다.

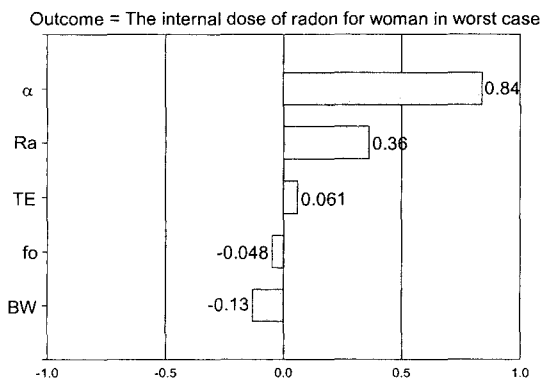


Fig. 5. Importance analysis of input parameters for the outcome of the two compartment model. The outcome is the internal dose of radon for woman in worst case.

그림 5는 앞서 수행한 불확실성분석결과를 바탕으로 모델입력인자의 중요도를 이러한 spearman rank-order correlation로 표시하여 보여주고 있다. 결과를 보면 인체노출량에 가장 영향을 주는 인자는  $\alpha$ (흡입한 라돈의 인체 흡수율)로써 이 인자의 불확실성을 줄일 수 있다면 최종예측결과인 체내노출량의 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 모델인자  $R_a$ (‘그 밖의 집안’구역의 공기가 머무는 시간)의 불확실성도 예측결과에 커다란 영향을 주는 것을 볼 수 있다.

### 2.6 조절가능인자 도출

기준경우의 남성에 대해 ‘샤워실’의 라돈농도의 기여도는 체내축적량의 42%를 차지하고 있을 뿐만 아니라 민감도분석결과 ‘샤워실’구역의 모델식에 관련된 입력인자가 체내축적량을 결정하는 주요인자임을 유추할 수 있다. 특히 입력인자 중 ‘샤워실’의 실내농도에 직접 영향을 줄 수 있는 인자는 ‘f’와 ‘ $\Phi_s$ ’로 나타났다. ‘샤워실’보다 ‘그 밖의 집안’의 거주시간이 훨씬 긴 여자의 경우, ‘그 밖의 집안’구역에서 ‘ $R_a$ ’가 실내라돈의 농도를 조절하는 인자라고 나타났기 때문에 이 인자로 인한 실제 실내라돈의 농도변화폭은 적으나 라돈을 호흡하여 발생하는 체내축적량에는 남녀 모두에게 큰 영향을 줄 수 있다.

또한 전체적으로 인체노출량의 저감을 위해 조절 가능한 인자는 앞서 설명한 모델인자외에 직접각 구역의 라돈농도를 낮추는 환기량조절을 통해 인체노출을 작게 할 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 지하수내 존재하는 라돈에 의한 실내오염정도를 모의하는 수학적 2-구역 모델에서 사용된 모델입력인자들의 불확실성을 정량적으로 평가하여 보았다. 이러한 결과를 바탕으로 하여 라돈에 의한 실내오염시 인체노출시 적절한 노출저감 방법을 제시하고자 하였다. 본 연구에서 얻어진 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 지하수로부터 휘발하여 실내공기오염을 유발하는 라돈의 분포를 모의하는 2-구역 모델을 사용

하는 기준 경우 실내거주시간이 긴 여자의 경우 체내측적량이 남자보다 2배 가량 높았다. 최악경우는 남자가 실내거주양상이 동일하므로 호흡량이 큰 남자는 보다 높은 체내측적량을 보이고 이 경우는 남자는 기준 경우의 경우보다 무려 5배 가량 높은 라돈측적량을 보였다.

2) 최악경우 여성의 체내측적량에 대한 민감도분석의 결과 인체노출평가에 영향을 주는 주요인자는 'α: 흡입한 라돈 중 몸에 흡수한 비율', 'BR(t)/BW: 몸무게 당 공기흡입률', 'V<sub>a</sub>: '그 밖의 집안'의 부피', 'R<sub>a</sub>: '그 밖의 집안'에 공기가 머무는 시간', 그리고 'OF<sub>a</sub>(t): 하루동안의 '그 밖의 집안의 점유율' 등의 순으로 나타났다. 실내거주시간이 긴 이 경우 '그 밖의 집안'과 관련한 모델인자가 높은 민감도를 가지고 있는 것을 알 수 있다.

3) 이 경우에 대한 불확실성분석 결과는 체내측적량의 평균값은 27.3 (pCi/kg/day)이며 분포의 하한치 및 상한치 (5<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile)는 각각 2.0 및 69.6 (pCi/kg/day)으로 나타나 평균보다 높은 값들의 분포쪽으로 넓게 분포하는 것을 볼 수 있다.

4) 중요도 분석결과는 인체노출량의 저감을 위한 조절가능한 입력인자로 여자의 경우, '그 밖의 집안'의 공기체류시간이 유력한 것으로 나타났다. 그러나 직접적으로 실내라돈농도를 낮출 수 있는 실외환기량의 조절은 남녀 모두 인체노출을 낮추는데 중요한 역할을 할 수 있는 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 한국표준과학연구원, 국민표준체위조사보고서, 공업진흥청 (1992).
- 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.
- McKone, T.E. (1987) Human Exposure to Volatile Organic Compounds in Household Tap Water, *Environ. Sci. Technol.*, 21, 1194-1201.
- Spengler, 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*, Volume I: General Factors, Chapter 5.
- Yu, D. *et al.* (2001) Assessment of Human Exposure to Indoor Radon Released from Groundwater, *J. KOSAE*, 17(3), 241-249.