

### 3A2) 지하수로부터 방출된 라돈에 의한 실내오염시 정량적인 인체 노출량 평가

#### A Quantitative Exposure Assessment for Indoor Pollution of Radon Released from Groundwater

유 동 한  
 한국원자력연구소

#### 1. 서 론

그 동안 미국등지에선 건축자재나 토양으로부터 방출되어 실내공기오염을 일으키는 라돈에 대한 연구와 조사가 수행되었다. 최근에 새롭게 지하수 속에 용해되어 있었던 라돈이 실내로 휘발하면서 발생하는 실내공기오염에 의한 인체위해의 가능성이 제기되었다. 현재 국내에서는 생활용수의 대부분을 지표수에 의존하기 때문에 이러한 경로의 라돈에 의한 인체노출은 없다고 알려져 있으나 앞으로 지표수의 부족으로 인해 아파트단지등과 같은 대규모 주택단지조성시 부족용수의 대체로 지하수를 활용할 가능성이 높아짐을 고려할 때 이러한 라돈의 실내오염에 따른 인체영향에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 지하수로부터 방출된 라돈에 의한 실내오염시 인체노출시나리오에 따른 체내축적량을 보다 현실적이고 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 아파트에서의 라돈의 실내오염상태를 모의하는 수학적 2-구역 모델을 개발하여 사용된 입력인자의 불확실성이 고려된 각 구역의 실내라돈 농도분포를 계산하였다. 이러한 실내라돈 농도분포에서 평균농도 및 상한치 (95th percentile)을 선정하여 2 가지 주요인체노출시나리오를 가정하여 각각 경우에 대해 호흡으로 인한 체내축적량을 수학적 모델, PBPK(Physiologically-Based Pharmacokinetic) 모델을 개발하여 정량적으로 평가하였다. 이러한 연구결과는 실내라돈오염에 의한 인체노출 저감방안을 마련하는데 필요한 구체적 근거를 마련하는데 도움이 되리라고 판단된다.

#### 2. 실내오염평가를 위한 수학적 모델

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.

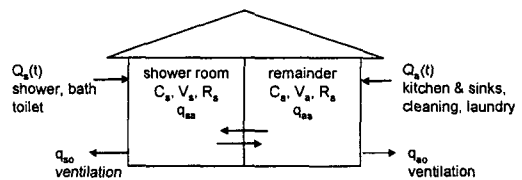


Fig. 1. 라돈 실내오염평가를 위한 2 구역모델

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

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

#### 3. 체내축적량평가를 위한 PBPK 모델

실내공기로부터 흡입된 라돈의 체내거동을 해석하기 위해 본 연구에서는 생리학을 바탕으로 한 동적 약리학모델, Physiologically-Based Pharmacokinetic(PBPK)모델을 개발하여 활용하였다. 이 모델은 라돈의 호흡노출시 라돈의 시간에 따른 체내 각 장기속에서의 축적량을 정량적으로 평가할수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 사용한 모델은 음용수를 통한 라돈섭취시 사용하였던 모델을 호흡을 통한 라돈흡입에 중점을 두어 일부 수정하여 사용하였다. 그림 2은 호흡을 통한 라돈흡입경우에 대한 PBPK 모델의 전체적인 구조를 보여주고 있다.

#### 4. 계산결과

##### 4. 1 실내오염농도 계산결과

2-구역모델로부터 입력인자의 불확실성을 고려하여 계산된 각 구역의 라돈농도 분포는 그림 3과 4에서 보여주고 있다.

##### 4. 2 노출시나리오

본 연구에서는 크게 두 경우의 인체 노출시나리오를 사용하기로 한다. 첫째는 출퇴근을 고려한 일반남성의 경우에 해당하는 기준경우와 최대한의 실내거주를 고려한 최악경우는 일반여성처럼 하루 종일 실내에 거주하는 경우로 가정하였다.

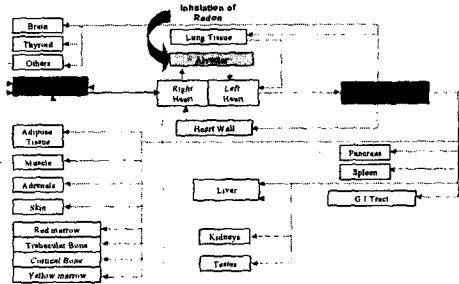


Fig. 2. 호흡노출평가를 위한 PBPK모델

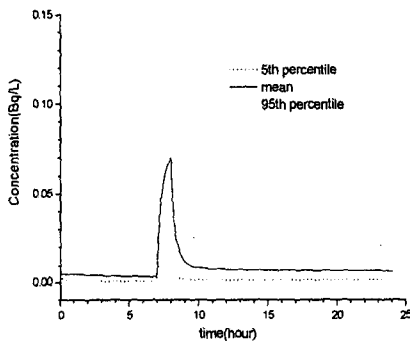


Fig. 3. 샤워실에서의 라돈농도분포

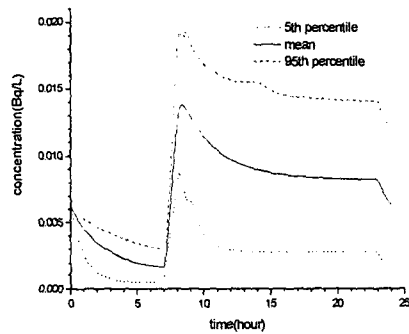


Fig. 4. remainder에서의 라돈농도분포

##### 4. 3 인체축적량 계산

라돈은 호흡노출을 통해 체내에 흡입되는 경우 폐에 축적되어 폐암을 일으킨다고 알려져 있으므로 인체 내에서 폐에 축적되는 라돈의 양을 평가하여 보았다. 그림 5과 6은 기준경우와 최악경우에 대해 하룻동안 폐에 축적되는 라돈의 양을 보여주고 있다. 기준경우시 상한치의 라돈농도에 의한 체내축적량은 평균라돈농도에 의한 그것보다 약 2배정도 높음을 알 수 있었다. 최악경우는 상한치의 라돈농도에 의한 체내축적량이 평균라돈 농도에 의한 것보다 1.6배 정도보다 높았다. 따라서 인체노출 시나리오와 모델인자의 불확실성을 같이 고려하면 폐에 축적되는 라돈농도의 상한치는 평균치보다 약 3.2배 정도 높은 수준이라고 할 수 있다.

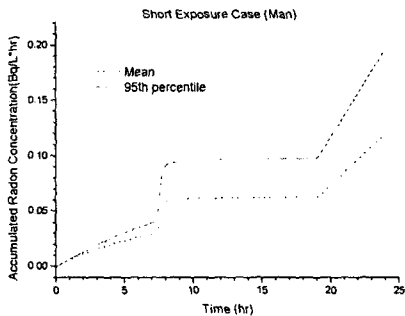


Fig. 5. 기준경우의 폐에서의 노출량

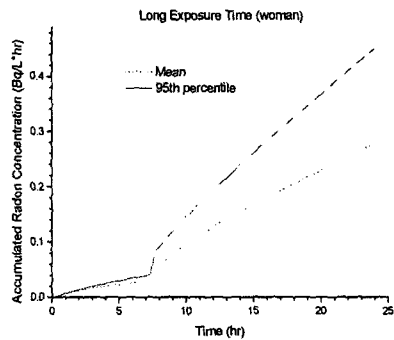


Fig. 6. 최악경우의 폐에서의 노출량