

Quantitative Exposure Assessment of Indoor Radon Released from Groundwater

Donghan Yu and Sang-Joon Kim
Korea Atomic Energy Research Institute

지하수로부터의 실내 라돈오염에 의한 정량적인 인체노출평가

유동한 · 김상준
한국원자력연구소

(2001년 3월 26일 접수, 2001년 5월 30일 채택)

Abstract - This study presents the quantitative exposure assessment of indoor radon released from groundwater. Most of the indoor radon comes directly from soil beneath the basement or foundation. Recently, radon in groundwater releases to indoor air whenever the water is used and contributes to the total inhalation risk from indoor air. This study first develops a mathematical model to describe the transfer and distribution of radon released from groundwater in a house. Then, daily human exposures through inhalation of such radon are estimated with the model for an male adult based on two sets of exposure scenarios. The results obtained from the study would help 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

요약 - 본 연구는 지하수로부터 방출되는 라돈에 의한 실내오염시 정량적인 인체노출량을 평가하였다. 실내에 존재하는 라돈은 대부분 건물의 지하층에 존재하는 토양층으로부터 발생하는 것으로 알려져 왔다. 그러나, 최근 지하수내에 존재하는 라돈은 물사용으로 인해 실내공기로 휘발하여 실내오염을 야기하고 호흡에 의한 인체위해를 증가시키는 것으로 밝혀졌다. 본 연구는 주택내의 라돈의 이동 및 분포를 정량적으로 평가하기 위해 수학적 모델을 개발하였다. 그리고, 실내에서 예상되는 인체노출패턴과 이런 수학적 모델을 사용하여 성인의 경우, 실내 라돈오염에 의한 호흡노출을 통한 인체노출량을 계산하였다. 이러한 연구의 결과는 지하수로부터의 발생하는 라돈의 실내오염시 인체노출에 의한 위해도평가시 도움을 주리라고 판단된다.

중심어: 실내라돈오염, 환경위해도 평가, 노출평가

서 론

라돈(Rn-222)은 우라늄(U-238) 방사능계열의 원소로서 라듐(Ra-226)의 알파(α) 붕괴시 자연생성되는 가스상 물질이다. 화학적으로는 불활성이며, 무색, 무취의 특성을 가지고 있다. 최근까지도 많은 일반인들은 라돈이 온천욕등으로 건강에 좋은 원소로 인식하고 있으나 의학적으로는 기준치 이상의 라돈을 마시거나 호흡했을 경우 치명적인 폐암을 유발시킨다는 것으로 알려져 있다[1]. 주로 토양과 건축자재(시멘트, 콘크리트, 모래, 벽돌 등)

로부터 상당량의 라돈이 실내로 방출된다고 보고되고 있다[2]. 특히 우리나라를 함유한 암석층 토양에 위치한 주택들을 중심으로 이러한 문제가 발생하고, 라돈은 공기보다 무겁기 때문에 지표면에 주로 존재하므로 저환기량 주택일수록 실내 라돈 농도가 높아지는 것으로 알려졌다[3]. 현재 많은 도시인들은 하루생활 중 80% 이상을 실내(일반주택, 사무실, 학교, 공공건물, 작업장, 지하철역, 지하상가, 차내 등을 포함하여)에서 활동하고 있으며, 특히 가정주부들과 노약자들은 하루 활동의 90% 이상이 실내에서 이루어지는 것으로 보고되

고 있다[4]. 따라서 라돈에 의한 실내오염문제는 실내에서 생활하는 시간이 많은 현대인의 생활패턴을 고려할 때 직접적인 건강상의 영향을 미칠 수 있기 때문에 그 동안 중요한 문제로 인식되어 왔다.

건축자재, 토양에 의한 실내로 방출되는 라돈에 의한 인체건강영향에 대해서는 이제까지 비교적 많은 연구와 조사가 이루어져 왔었다. 최근 이런 라돈의 실내오염발생원과는 다른 새로운 실내오염원이 밝혀졌다[1]. 이는 지하수에 용해되어 있는 라돈이 휘발하여 실내라돈의 농도를 높이게 된다는 사실이다. 이는 많은 양의 라돈이 용해되어 있는 암반층에서 지하수를 취수하는 경우 발생하게 된다. 최근 지하수를 취수하여 음용수 및 생활용수로 사용하는 주택의 비율이 늘어나는 추세를 반영할 때, 지하수속에 용해되어 있었던 라돈이 실내공기로 휘발하여 발생하는 실내오염에 의한 인체영향평가가 필요하게 되었다. 그 동안 국내에서는 생활용수의 대부분을 지표수에 의존하기 때문에 이러한 경로의 라돈에 의한 인체노출은 거의 없다고 인식되고 있다. 그러나 앞으로 아파트단지 등 대규모의 주택단지를 조성시 지표수의 부족으로 인해 부족용수로 지하수를 활용할 가능성이 많아짐을 고려할 경우 이런 경로에 의한 라돈의 인체노출에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 이런 새로운 라돈의 인체노출경로에 대하여 인체노출량을 정량적으로 평가하고자 한다.

이를 위해 먼저 지하수내 라돈에 의한 실내오염정도를 해석하는 수학적 모델을 개발하였다. 이런 수학적 모델과 실내에서 생활하는 패턴을 고려한 인체노출시나리오를 사용하여 인체 노출량을 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 결과는 앞으로 라돈의 실내오염에 의한 인체위해 평가시 필요한 자료를 제공하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

연구방법

환경위해도평가(Environmental Risk Assessment)

1980년대부터 현재까지 미국환경부(USEPA)에서 널리 사용하고 있는 환경위해도평가란 환경오염물질에 대한 인체건강 피해를 정량적으로 평가하는 방법론을 의미한다. 이 방법론에서는 크게 위험도확인(Hazard Identification), 용량-반응평가(Dose

-Response Assessment), 노출평가 (Exposure Assessment), 그리고 위해도결정 (Risk Characterization) 등의 절차로 구성되어 있다.

(그림 1. 참조)[5]

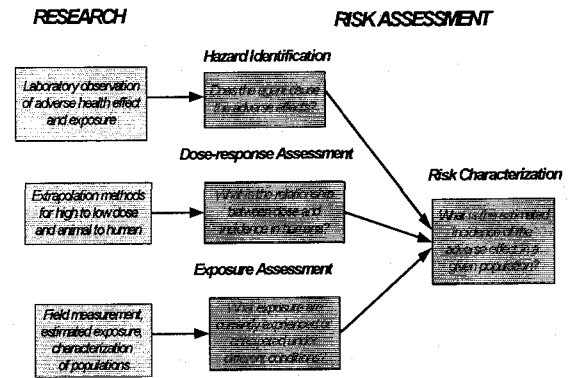


Fig.1. Steps in Environmental Risk Assessment

이 방법론의 가장 중요한 부분은 환경위해도 (Environmental Risk) 라는 정량적인 척도를 정의하는 것부터 시작된다. 이때, 환경위해도란 오염물질의 물리, 화학적 성질 및 독성자료를 나타내는 독성인자(Toxicity) 와 이런 물질의 환경내에서의 거동과 이로 인해 인체가 노출되는 정도를 정의하는 노출인자 (Exposure)라는 두가지 주요인자로 정의할 수 있다. 따라서 비록 독성인자가 매우 큰 물질이라도 노출인자가 작은 경우, 즉 환경내에서 인체로의 노출이 작은 경우, 실제 인체가 입는 위해도는 작을 수 있다.

이런 면에서 보면 환경오염물질의 인체노출평가는 매우 중요한 역할을 하게 되고 새로운 연구분야로 대두되게 되었다. 이는 환경노출억제 (Exposure Prevention) 에 중점을 둔 위해도감소 정책 (Risk Reduction Program)을 개발하는 방향으로 환경정책을 추구할 수 있는 이점이 있게 된다.

특히 현실적으로 다중매체를 통한 복잡한 노출 경로를 가진 환경오염물질일수록 각 노출경로에 대한 분석이 필수적이다. 이러한 연구는 환경정책의 목표인 환경오염물질로부터 인체로의 노출을 감소시키기 위해, 물질의 방출, 환경내에서의 거동, 그리고 인체까지의 노출경로에 대한 지식을 활용하여 보다 합리적이고 체계적인 환경관리를 추구할 수 있다.

연구추진체계

본 연구에서는 기존의 원자력분야에서 사용한 방사선물질에 의한 인체 유효선량평가보다 앞서 언급한 환경위해도평가에 바탕으로 둔 라돈의 정량적인 인체노출평가를 대상으로 하고 있다. 이를 위해 지하수내 존재하는 라돈이 휘발하여 실내오염을 야기시키는 과정과 이를 통해 인체가 노출되는 과정을 정량적으로 분석하려고 한다. 그림 2은 본 논문에서 사용한 연구절차 및 방법을 간략히 보여주고 있다. 우선 국내중 대전지역의 지하수에 존재하는 라돈양을 측정된 자료를 바탕으로 하여 지하수내 라돈의 농도분포를 결정한다. 이러한 지하수내 라돈이 지하수를 사용하는 동안 휘발하여 주택 실내공간으로 이동, 분포하는 양상을 모의하기 위해 수학적인 모델인 3 compartment 모델을 개발한다. 이러한 모델로부터 시간에 따른 라돈의 실내분포량을 예측하여 이러한 실내에서 성인이 생활하면서 호흡을 통해 체내에 라돈이 축적되는 양을 주요 인체노출 패턴별로 분석하려고 한다.

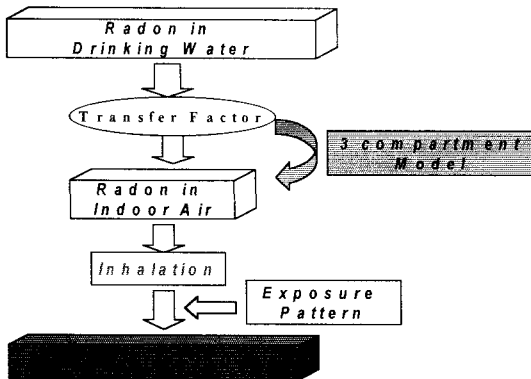


Fig. 2. Procedure used for this study

지하수내 평균라돈농도결정

대전지역은 지질학상 우라늄을 함유한 흑색셰일 (shale)이 분포하는 옥천대에 위치하고 있어서 이곳의 지하수에는 우라늄 및 라돈이 함유되어 있을 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 특히 유성지역을 중심으로 한 지역은 온천수에 라돈이 함유되어 있는 것으로 알려져 지하수중에 라돈의 함유량

이 상당히 높다고 판단되고 있다. 본 연구에서는 이런 대전지역의 지하수를 대상으로 이루어진 기존 연구[6]를 근거로 하여 지하수내 존재하는 라돈의 농도를 결정하였다. 본 연구에서는 우선 측정자료를 대수정규 (lognormal) 분포하고 있다고 가정하여 농도분포를 예측하였다. 그림 3은 기존 연구의 측정자료와 대수정규분포로 가정한 경우에 대한 분포특성을 보여주고 있다. 이런 분포가정시 지하수내 라돈의 평균농도는 40.9 Bq /L로 계산되었다. 따라서 본 연구에서는 지하수내 라돈의 평균농도를 40.9 Bq/L로 가정하여 이후 라돈의 실내 오염정도 및 이에 따른 인체노출량을 평가하기로 한다.

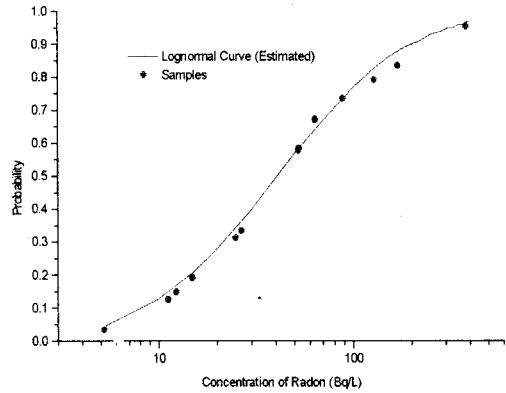


Fig. 3. Radon concentration profile in groundwater of Taejon: measured data vs. a fitted lognormal curve

실내오염평가를 위한 3 compartment 모델 개발

용해된 라돈이 함유된 지하수를 취수하여 음용수 및 생활용수로 사용하는 경우, 라돈이 휘발하여 실내공기에 확산, 이동하는 것을 모의하기 위해서는 다음과 같은 수학적인 모델을 개발하였다. 우선 주택실내를 간단히 3-compartment ('샤워실', '화장실', '그 밖의 집안')로 나누고 각 compartment에서는 그림 4에서와 같은 조건을 가지고 있다고 가정하여 라돈의 이동 및 분포에 대한 물질수지식을 세웠다. 각 compartment에서 자세한 라돈의 물질수지 방정식들은 아래와 같다.

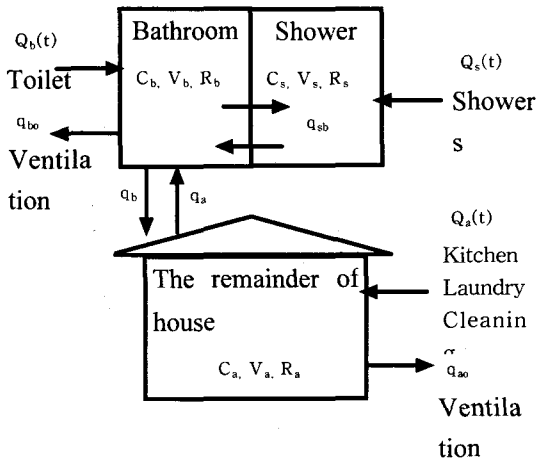


Fig. 4. The three-compartment model for simulating the transfer of radon from groundwater to indoor air

● 샤워실

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

● 화장실

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

● 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 C는 농도(Bq/L)를 뜻하며 V는 부피(L) 그리고 Q는 compartment로의 라돈유입량(Bq/min)을 말한다. 첨자인 s, b, a는 각각 샤워실, 화장실, 그 밖의 집안을 뜻한다. q는 공기환기율(L/min)을 말하는데, 예를 들면, q_{sb}는 샤워실에서 화장실로 이동하는 단위 시간당 공기의 양을 뜻한다. k_d는 라돈의 방사학적 붕괴상수를 의미한다.

3-compartment 모델식에서 사용되는 각 실내 공간자료들은 국내에서 가장 전형적인 32평형 아파트를 기준으로 하여 산정하였다. 4인 가족을 기준으로 하여 한 가구가 평균적으로 사용하는 여러 용도의 물 사용량 및 사용 시간을 기존 자료[7]에서 인용하였다. 또한, 실내에서 라돈의 휘발시 중요한 자료인 라돈의 water-to-air로의 전달계수는 McKone의 논문[8]에서 인용한 값을 사용하였다. 표 1은 본 모델식에서 사용된 주요 입력자료들을 정리하여 보여주고 있다.

인체노출량 평가

앞서 개발한 compartment 모델은 주택의 실내 공간에서 라돈의 이동 및 분포를 예측하는데 활용되었다. 이러한 식으로부터 예측된 각 compartment 내의 라돈의 농도로부터 실제 실내에 거주하는 인체의 노출량을 평가하는 것이 필요하다. 인체노출량 산정은 하루를 기준으로 하여 여러 종류의 노출 시나리오에 따라 실제 실내에 거주하는 인체를 통해 누적되는 총 라돈의 양을 예측하는 것이다.

3 compartment식에서 예측하는 라돈농도하에서 하루를 기준으로 인체가 노출된 총 라돈의 양은 아래와 같은 식을 통해 계산할 수 있었다.

$$D = \frac{\alpha}{BW} \int_0^{24} [OF_s(t)C_s(t) + OF_b(t)C_b(t) + OF_a(t)C_a(t)]BR(t)dt \quad (4)$$

여기서 D= 어떤 사람에 대한 daily internal dose (mg/kg · d), α=흡입된 라돈량 중 폐에 흡수된 비 (단위 없음), BW=몸무게 (남성: 65.42 kg, 여성: 54.66 kg)[9], OF_s(t)=개인이 t시간에 샤워실에 있을 수 있는 확률 (단위 없음), OF_b(t)=개인이 t시간에 화장실에 있을 수 있는 확률 (단위 없음), OF_a(t)=개인이 t시간에 그 밖의 집안에 있을 수 있는 확률 (단위 없음), BR(t)= t시간의 호흡량(L/min) (남성 (활동/비활동): 13.27, 7.38, 여성: 8.82, 5.51)[10]을 의미한다. 이때, OF란 4인 가족 기준으로 각 용도의 물사용 시간대에서 개인이 존재하는 시간의 분율을 뜻한다. 예를 들면 아침 7시에서 8시까지 샤워수를 이용할 때 그 시간대 중 한 개인이 10분을 샤워실에 존재하게 되면 확률은 0.167(=10/60)이 된다.

인체노출시나리오

본 연구에서 라돈의 실내오염으로부터 인체노출을 평가하기 위한 노출시나리오는 크게 두가지, 기준경우 (base case)와 최악경우 (worst case)로 나누어 평가하였다.

기준경우는 여성과 남성의 하루동안 생활형태의 차이에 따른 인체노출량을 비교, 분석하기 위해 선정하였다. 남성의 기준경우에서는, 오전 7시에 기상하여 오전 7시에서 8시 사이에 각각 10분 동안 샤워와 화장실을 이용 한 후 오전 8시에 출근하여 오후 7시에 귀가하고 오후 11시에 취침한다고 가정하였다. 이 경우, 라돈의 체내흡수율(α)은 폐에 들어마신 전체 라돈의 50%로 가정하였다. 여성의 기준경우는 실내에 거주하는 시간이

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

	Description	Representative value
V_s	volume of shower	6300 L
R_s	residence time of air in shower stall	20 min
V_b	volume of bathroom	12600 L
R_b	residence time of air in bathroom	30 min
V_a	volume of remaining house	248000 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	331.2 L
T_{shr}	duration of shower per individual	10 min
ϕ_s	transfer efficiency from shower/bath water to air for radon	0.7
ϕ_b	transfer efficiency from toilet water to air for radon	0.3
ϕ_a	transfer efficiency from other household water to air for radon	0.66

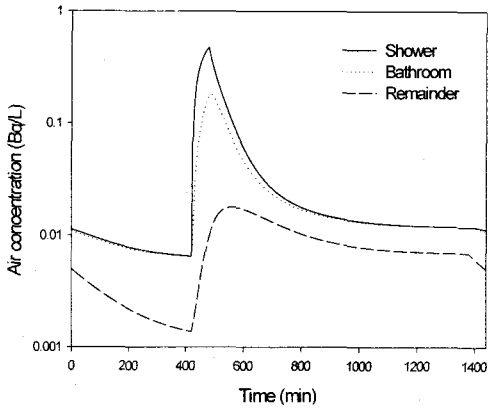
일반적인 가정주부를 모의하기 위해 가정한 노출 시나리오이다. 이 경우는, 오전 7시에 기상하며 오전 7시에서 8시 사이에 각각 10분 동안 샤워하고 화장실을 이용한다. 낮시간 동안은 외부출입이 없으며 오후 11시에 취침한다고 가정하였다. 기준경우에서는 샤워의 영향을 알아보기 위해 샤워를 아침샤워, 저녁샤워로 나누어 라돈의 인체노출량에 미치는 영향을 비교·분석하여 보았다. 이를 위해, 저녁샤워의 경우는 오후 7시에서 8시 사이에 각각 10분 동안 샤워와 화장실을 이용한다고 가정하였다.

최악경우에서는 남자의 경우도 라돈의 체내흡수율(α)과 샤워 및 화장실 사용시간을 제외한 여성의 기준 경우 시나리오와 동일하게 가정하였다. 이 노출시나리오에서는 샤워와 화장실 이용시간을 각각 20분, 라돈의 체내흡수율(α)을 100%로 가정하는 등 상당히 보수적인 인체노출경우에 대해 고려하였다.

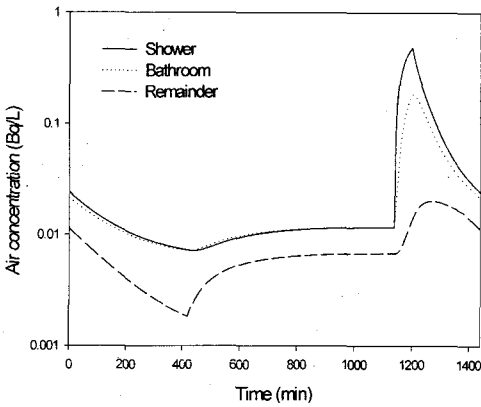
실내 라돈 농도분석

그림 5는 샤워를 통한 라돈방출을 기준으로 하여 각 compartment에서의 하루 중 라돈농도의 변화를 보여주고 있다. 아침샤워의 경우 오전 8시 각 compartment의 농도가 최고값을 보이고 있으며 이 경우 샤워실의 최고 라돈농도는 0.48 Bq/L였다. 저녁샤워의 경우 오전 7시에 0.0074 Bq/L의 최저점을 보이다가 오전 7시 기상이후로 오후 7시까지 서서히 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이때 아침샤워와 마찬가지로 샤워가 끝나는 시간인 오후 8시를 최고점으로 라돈 농도가 급격히 감소하였으며 샤워실, 화장실, 그 밖의 집안의 라돈의 농도는 각각 0.48, 0.18 그리고 0.015 Bq/L로 많은 차이를 보이고 있었다. 계산결과에서 보면 라돈농도의 변화는 주로 샤워의 이용시간에 의해 각 compartment의 농도분포형태가 결정되며 샤워실, 화장실, 그 밖의 집안의 순서로 라돈의 농도가 높음을 알 수 있었다.

연구결과분석



(a) morning shower



(b) evening shower

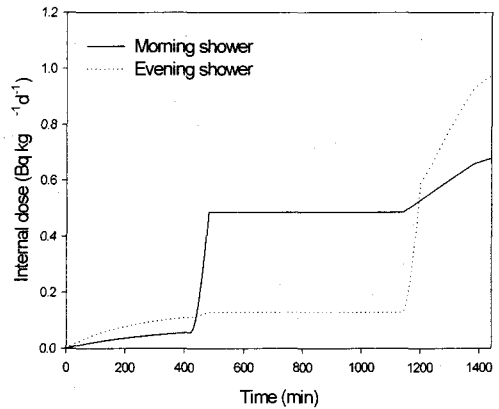
게에 비해 낮은 폐활량을 가지므로 그 차이는 크지 않았다. 이 경우, compartment중에서 '그 밖의 집안'이 하루 동안의 인체 라돈축적량의 70% 이상을 공헌하고 있다. 또한, 샤워의 영향에 따른 총 라돈의 인체축적량은 거의 차이가 없었다. 그 이유는 두 경우 라돈이 실내공기에 방출되고 나서 3시간 가량 방출되기 전의 농도 이상으로 유지되므로 두 경우 모두 활동시간 중의 폐활량으로 공기를 흡입하고 라돈을 축적하기 때문에 총 라돈 축적량의 차이가 크지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 5. Estimated concentration of radon in the three compartments for base case (man)

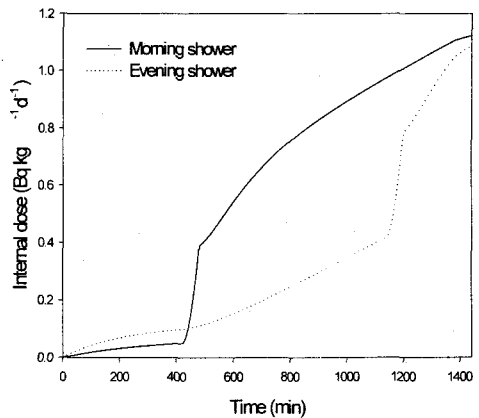
인체 축적량 분석

남자의 기준경우에서는 그림 6-(a)와 같이 아침 샤워 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 그림 6-(b)와 같이 하루의 대부분 시간을 집안에 머무르게 되므로 남성보다 높은 라돈 인체축적량을 보이고 있으나 몸무



(a) man



(b) woman

Fig. 6. Estimated total amount of radon accumulated in a human body for base case

그림 7는 최악 경우에 대해 남녀 각각 인체축적량 결과를 비교하여 보여주고 있다. 남녀사이의 몸무게 및 호흡량의 차이를 제외하고는 모든 조건이 동일하므로 각 compartment의 공헌도는 거의 같았으며 시간에 따른 인체축적량의 변화도 동일하였다. 이 경우, 남자의 총 라돈 인체축적량은 여자보다 약 1.3배 컸는데, 이는 호흡량이 몸무게보다 라돈 축적량에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 남자의 최악 경우에서 라돈의 인체축적량은 기준 경우의 그것보다 5.3배 더 큼을 알 수 있었다.

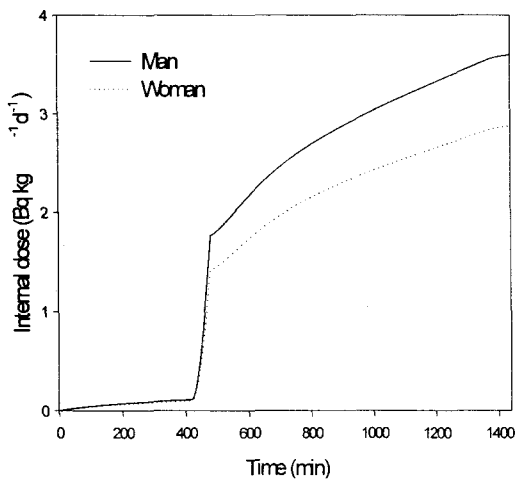


Fig. 7. Estimated total amount of radon accumulated in a human body for worst case

결론

최근 지하수를 활용하여 음용수 및 생활용수를 사용하는 주택의 비율이 늘면서 지하수내 용해된 라돈이 실내공기로 휘발하여 발생하는 실내오염에 의한 인체건강평가가 필요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 주택에서 지하수를 활용하는 경우 발생하는 라돈의 실내오염 정도와 이에 따른 인체축적량을 정량적으로 평가하여 보았다. 본 연구에서 얻어진 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 대전시 유성지역을 대상으로 한 기존연구의 측정치를 대수정규분포로 가정했을 때 지하수내 라돈농도분포의 평균농도는 40.9

Bq/L로서 예상되어 미국 EPA의 권고치인 11.1 Bq/L를 상회하는 것으로 나타났다.

- 본 연구에서 개발한 3-compartment 모델식을 사용하여 국내 32평형 아파트를 대상으로 한 모의결과, 샤워의 경우가 실내 라돈의 농도를 높이는 데 가장 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 샤워이용시간에 따라 낮 동안 실내 라돈농도의 분포를 결정하는데 큰 영향을 주는 것을 알 수 있으며, '샤워실', '화장실', '그밖의 집안'의 순서로 라돈의 실내농도가 높음을 알 수 있었다.
- 실내에 존재하는 라돈은 호흡을 통해 실내에 축적되는데, 정량적인 인체축적량은 실내에서 활동양상이 다른 남자와 여자의 하루 인체노출 시나리오에 따라 다르게 된다. 아침 샤워의 경우, 방출된 라돈이 낮 시간동안 실내에 머무르게 되어 낮동안 주택 내에서 활동하는 주부의 경우, 남자보다 66% 정도 높은 인체축적량을 나타낸다. 그러나, 저녁샤워의 경우는 남녀모두 거의 비슷한 인체노출량을 보이고 있는데 이는 남녀모두 실내에서 거주하는 시간대가 비슷하기 때문이라 추측된다. 남자의 경우, 하루종일 실내에 머문다는 보수적인 최악경우를 가정하면 라돈의 인체축적량은 기준경우의 그것보다 최대 5배이상 높아지는 것으로 나타났다.
- 본 연구의 결과를 바탕으로 하여 볼때, 라돈의 실내오염으로 인한 인체축적을 감소시키기 위해서는 적절한 샤워 시간대, 샤워 시간의 최소화가 권고되며 건축물내의 적절한 환기시설의 설치, 운영 역시 필요하다고 판단된다. 앞으로 현재보다 많은 양의 지하수를 활용하려고 한다면, 지하수내 존재하는 라돈의 실내오염시 호흡으로 인한 인체위해를 최소화하는 적절한 수준의 지하수내 라돈의 농도규제가 필요하다고 본다.
- 본 연구에서 개발한 모델에 사용된 입력자료들은 적지 않는 불확실성이 포함되어 있다. 따라서 추후 연구에서는 본 논문에서 자세히 다루지 못한 이러한 불확실성을 보다 정량적으로 평가하는 연구가 보강되어야 한다고 판단된다. 또 본 연구결과들의 검증

을 위해 추후 실내라돈의 농도를 직접 측정, 분석하는 연구가 추가되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Doull, J. et al. Risk Assessment of Radon in Drinking Water, Washington, D.C., *National Academy Press*.(1999).
2. Grader, J.B. Indoor Air Issue, Architectural Technology.(1986).
3. APCA. Indoor Radon, Air Pollution Control Association, Pittsburgh, PA.(1986).
4. Spengle. J.D. and Dockery, D.W. Personal exposure to respirable particulates and sulfates, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, Vol. 31, 153-159.(1981).
5. AiChE. Guidelines for Hazards Evaluation Procedures, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York.(1985).
6. 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).
7. Han, M.Y. Water Supply Alternatives Considering Quantity, Quality and Energy of Water, *J. KSWQ*, Vol. 11, 263-268.(1995).
8. McKone, T.E. Human Exposure to Volatile Organic Compounds in Household Tap Water, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 21, 1194-1201.(1987).
9. 한국표준과학연구원, 국민표준채워조사보고서, 공업진흥청(1992).
10. USEPA. Inhalation Exposure Factors Handbook, Volume I: General Factors, Chapter 5.(1996).