건축자재로부터 방출되는 라돈의 실내 확산에 대한 수치해석적 연구 Numerical Study on Indoor Dispersion of Radon Emitted from Building Materials

박훈채 · 최항석[†] · 조승연 · 김선홍

Hoon Chae Park · Hang Seok Choi[†] · Seung Yeon Cho · Seon Hong Kim

연세대학교 환경공학부

Department of Environmental Engineering, Yonsei University

(2014년 1월 14일 접수, 2014년 4월 28일 수정, 2014년 5월 1일 채택)

Abstract : Growing concerns about harmful influence of radon on human body, many efforts are being made to decrease indoor radon concentration in advanced countries. To develop an indoor radon reduction technology, it is necessary to develop a technology to predict and evaluate indoor inflow and emission of radon. In line with that, the present study performed computational modelling of indoor dispersion of radon emitted from building materials. The computational model was validated by comparing computational results with analytical results. This study employed CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis to evaluate the radon concentration and the airflow characteristics. Air change rate and ventilation condition were changed and several building materials having different radon emission characteristics were considered. From the results, the indoor radon concentration was high at flow recirculation zones and inversely proportional to the air change rate. For the different building materials, the indoor radon concentration was found to be highest in cement bricks, followed by eco-carats and plaster boards in the order. The findings from this study will be used as a method for selecting building materials and predicting and evaluating the amount of indoor radon in order to reduce indoor radon.

Key Words : Indoor Radon, Building Material, CFD, Indoor Airflow

요약 : 전 세계적으로 라돈에 대한 관심이 증대되면서 실내 라돈 농도를 저감하기 위한 노력이 여러 분야에서 진행 중이다. 실내 라돈의 저감 기술 개발을 위해서는 라돈의 실내 유입 및 방출 차단에 대한 예측 및 평가방법에 대한 기술 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 건축자재에서 방출되는 라돈의 실내 확산을 전산모델링 하여 해석적 방법과 비교하였으며, CFD 해석을 통하여 환기조건, 환기량, 건축자재 변화에 따른 건물 내 기류 특성과 라돈 농도를 평가하였다. 실내 라돈 농도는 실내 기류의 재순환 영역이 형성되는 곳에서 높게 분포하였으며, 환기량이 증가할수록 감소하였다. 건축자재별 실내 라돈 농도는 시멘트 벽돌이 가장 높았으며, 그 다음 에코카라트, 석고보드 순으로 나타났다. 본 연구의 결과는 실내 라돈 저감을 위한 건축재료의 선정과 실내 라돈 예측 및 평가 방법으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

주제어 : 실내 라돈, 건축자재, 전산유체역학, 실내 기류

1. 서론

라돈(Rn-222)은 우라늄(U-238) 방사능 계열의 원소로서 라듐(Ra-226)의 알파(α) 붕괴시 자연 생성 되는 가스상 물질로 기준치 이상의 라돈을 흡입했을 경우 치명적인 폐암을 유발시킨다고 알려져 있다.¹⁾ 국제암연구센터(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 건강 및 인체 유해성 측면에서 석면과 더불어 라돈을 1급 발암물질로 규정하고 있으며, 흡연 다음으로 폐암을 유발하는 물질로 분류하고 있다.²⁾ 또한 미국 환경청(Environmental Protection Agency, EPA)에서는 라돈의 실내 환경 권고 기준치를 148 Bq/m³로 제안하고 있으며, 권고 기준치 농도에 평생 노출될 경우 폐암이 유발되어 사망할 확률을 약 1~2%로 제시하고 있다.³⁾ 주로 토양, 지하수, 건축자재로부터 상당량의 라돈이 실내로 방출된다고 보고되고 있으며,⁴⁾ 특히 콘크리트, 시멘트 벽돌, 석고보드, 텍스 등의 건축자재에서 방출되는 라돈은 주택에서의 농도가 우려할 수준인 것으로 나타났다.⁵⁻⁷⁾ 사회적으로 라돈에 대한 관심이 증대되면서 실내 라돈 농

도를 저감하기 위한 노력이 여러 분야에서 진행 중이다. 라돈의 실내 유입 및 방출을 차단하여 실내 공기환경의 개선에 이용될 수 있는 저감 방법을 개발하기 위해서는 실내의 공기 유동과 이에 따른 라돈의 농도분포를 정확히 파악할 필요가 있다. 즉, 정확한 농도분포의 예측은 보다 신뢰성 있는 평가 방법의 개발이 기본이 된다고 할 수 있다. 이러한 농도분포의 예측에는 기초 실험, 실측 및 전산해석 방법이 이용되어질 수 있다. 특히 최근에는 경계조건의 제어와 해석 비용이 저렴한 전산해석 방법이 많이 사용되고 있으며 이 중 CFD (Computational Fluid Dynamics)는 실내 공기유동, 온도분포의 예측뿐만 아니라 실내공기 오염물질 농도 분포의 예측에도 널리 이용되고 있다. 특히 실험, 실측에서 발생 특성 등을 제어하기 힘든 오염물질의 예측이나 저 농도에서도 많은 문제점을 유발시키는 오염물질의 예측에도 탁월한 성능을 발휘하고 있어 미국, 일본 등과 같은 선진국에서도 많이 사용되고 있다.

전산해석을 통한 실내 라돈 연구는 국외 소수 연구자들에 의해 연구되고 있으며, 주요 연구내용은 다음과 같다. Fang

[†] Corresponding author E-mail: hs.choi@yonsei.ac.kr Tel: 033-760-2485 Fax: 033-760-2571

등⁸⁾은 대형건물의 환기시스템 작동에 따른 건물 내 기류 및 라돈의 이동을 CONTAM88 프로그램을 이용하여 평가하였다. Wang 등⁹⁾은 지하실이 있는 주택에서 라돈의 실내 유입에 대한 모델을 개발하여 전산해석을 수행하였으며, 개발된 라돈의 실내 유입 모델을 해석적 결과와 비교하여 모델을 검증하였다. Zhuo 등¹⁰⁾은 CFD 해석을 통하여 실내 라돈 농도와 분포를 연구하였으며, 실험결과와의 비교를 통하여 전산해석 결과를 검증하였다. Akbari 등¹¹⁾은 실내 온도, 습도, 환기량이 실내 라돈 농도에 미치는 영향과 환기량에 따른 건물의 에너지 효율을 CFD해석을 통하여 평가하였다.

국내 라돈 연구는 실험 및 측정 위주로 간헐적으로 수행되었지만 종합적이고 체계화된 학술적 연구는 거의 전무한 실정이어서 실내 환경에서의 라돈 저감 및 평가 기술에 대한 기초 연구가 절실히 요구되는 시점이다. 따라서 실내 라돈의 저감 기술 개발을 위해서는 라돈의 자연 오염원과 인위적 오염원에 의한 실내 유입 및 방출 차단에 대해 예측 및 평가 방법에 대한 기술 개발이 필요하다. 본 연구에서는 라돈의 인위적 오염원인 건축자재로부터 방출되는 라돈의 실내 확산을 전산모델링 하여 해석적 방법과 비교하였으며, CFD 해석을 통하여 실내 환기조건, 환기량, 건축자재 변화에 따른 실내 기류 특성과 라돈 농도를 평가하였다.

2. 계산방법

2.1. 지배방정식

본 연구에서는 실내 라돈 확산에 대한 유동해석을 위하여 정상상태 비압축성 층류 유동을 가정하였다. 계산영역 내의 정상상태 유동에 대한 지배 방정식은 식 (1)의 연속방정식과, 식 (2)의 운동량 방정식이 사용되었으며, 실내 라돈의 확산 해석을 위하여 물질 전달 방정식을 사용하였다. 식에서 u 는 속도, ρ 는 밀도, p 는 압력, ν 는 동점성계수, ϕ 는 질량분율, D_ϕ 는 확산계수이다.

- 연속방정식(Continuity equation)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- 운동량 방정식(Momentum equation)

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) \quad (2)$$

- 물질 전달 방정식(Species transport equation)

$$u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = D_\phi \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} \right) \quad (3)$$

2.2. 계산영역 및 격자

현재 건설된 일반주택은 형태와 규모가 다양하여 모델링에 일반화된 주택 형태를 적용하기에는 많은 어려움이 따

른다. 따라서 본 연구에서는 국민주택 규모의 상한면적으로 공공과 민간에 가장 많은 공급량을 보이고 있는 전용 면적 85 m² 규모의 일반주택을 대상으로 전산해석을 수행하였다.¹²⁾ 해석 대상 주택 구조는 Fig. 1과 같으며, 방 2개와 화장실 2개, 거실, 주방으로 구성되어 있다. 실내 건축자재로부터 방출되는 라돈의 확산을 전산해석 하기 위하여 Fig. 2와 같이 정렬 격자를 이용하여 계산 격자를 구성하였다. 전산해석의 정확도는 계산영역 격자수의 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 계산을 수행하기 전 격자수에 의한 계산결과와의 오차를 차단하기 위하여 격자 의존성 연구를 수행하였다. Fig. 3은 실내 환기량이 1일 때 격자 의존성 연구를 수행한

Fig. 1. House geometry.

Fig. 2. Computational domain and grid allocation.

Fig. 3. Results of grid independence test.

결과이며, 실내 환기량은 식 (4)와 같이 정의 된다. 실내 라돈 농도를 변수로 하여 격자수를 증가하며 수치해의 격자의존성 연구를 수행하였다. 격자 의존성 연구 결과, 실내 라돈 농도는 약 10만개 이상의 격자수에서 수렴하는 경향을 보이며, 본 연구에서는 실내 라돈 농도가 수렴하는 최소 격자수를 선택하여 계산을 수행하였다.

2.3. 계산방법 및 조건

2.3.1. 건축자재

본 연구에서는 실내 내장재로 많이 사용되고 있는 타일, 석고보드, 에코카라트, 시멘트 벽돌을 건축자재로 선정하여 계산을 수행하였다. 타일은 점토와 석회석을 이용하여 소성한 건축자재로 바닥이나 벽 등의 표면장식에 사용되며, 석고보드는 이수석고를 소성하여 결정수의 일부를 탈수시킨 소석고를 주원료로 하여 표면을 원지로 피폭 성형한 판재로 건축물의 불연내장재로 사용된다. 에코카라트는 벽지대용 내장타일로 사용되거나 아트 월에 많이 사용되는 실내 내장재로 확산재로부터 추출해낸 알로펜을 주성분으로 세라믹화 하여 제조한 내장재이다. 시멘트 벽돌은 주택 시공시에 구조체나 벽재로 사용되며 모래, 자갈과 시멘트를 이용하여 압축 성형하여 건조한 건축자재이다. 각 건축자재별 라돈 방출 농도 및 방출률은 Table 1과 같다.

2.3.2. 라돈의 물리적 특성

라돈은 1기압, 상온에서 가스 상태로 존재하며 끓는점은 211.3 K, 녹는점은 202 K이다. 단원자로 존재하는 라돈 가스의 밀도는 9.73 kg/m^3 으로 현재까지 알려진 기체 중 가장 밀도가 크며, 공기의 약 8배 정도이다. 라돈 가스는 밀도가 크기 때문에 주로 지하층이나 낮은 곳에서 농도가 높다. 또한 라돈은 무향, 무취, 무색의 불활성 방사성 기체로 물리 화학적으로 안정하여 다른 물질과 반응하지 않는 특성을 가지고 있다. 본 계산에 사용된 라돈과 실내로 유입되는 공기에 대한 물성치는 Table 2와 같다.

Table 1. Radon concentration and surface exhalation rate for building materials¹³⁾

Building materials	Radon concentration (Bq/m ³)	Radon exhalation rate (Bq/m ² ·h)
Tile	4.1	0.34
Plaster board	29	2.53
Ecocarar	58.5	5.23
Cement brick	130.5	33.39

Table 2. Properties of fluids¹¹⁾

Fluid	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/m·s)	Molecular weight (kg/kmol)	Radon diffusion coefficient in air (m ² /s)
Air	1.22	1.78×10^{-5}	28.96	1.1×10^{-5}
Radon	9.73	1.8×10^{-5}	222	

Table 3. Calculation conditions

Case	Front windows	Back windows	Side windows	ACH (1/h)	Building materials
1	Inlet	Outlet	Wall	ACH=1 (Q=183.9 m ³ /h)	Plaster board Ecocarar Cement brick
2	Outlet	Inlet	Wall	ACH=2 (Q=367.8 m ³ /h)	
3	Wall	Outlet	Inlet	ACH=3 (Q=551.7 m ³ /h)	
4	Outlet	Wall	Inlet	ACH=4 (Q=735.6 m ³ /h)	

2.3.3. 계산방법

본 연구에서는 외부공기의 실내 유입 및 유출 방향에 따른 실내 기류 특성과 환기량, 건축자재에 따른 라돈 농도를 평가하기 위하여 Table 3과 같이 환기방식, 환기량, 건축자재를 변수로 설정하여 계산을 수행하였다. Case1 계산조건은 외부공기가 주택 전면 창에서 유입되어 후면 창으로 유출되는 조건이며, Case2 계산조건은 후면 창에서 유입되어 전면 창으로 유출되는 조건이다. Case3과 Case4 계산조건은 측면 창에서 유입되어 후면 창과 전면 창으로 유출되는 조건이다. 본 연구에서는 실내 기류의 층류 유동 계산을 위하여 모든 계산 조건을 Re 수 2,300 이하가 되도록 실내 환기량을 선정하였다. 실내 환기량(Air change rate per hour)은 식 (4)와 같이 정의되며, 식에서 Q는 실내로 유입되는 공기의 유량(m³/h), V는 주택의 체적(m³)이다. 실내 환기량은 시간당 1~4회로 가정하여 계산을 수행하였다.

$$ACH(1/h) = \frac{Q}{V} \quad (4)$$

라돈은 실내 벽면에서 일정한 방출량으로 방출된다는 조건으로 해석을 수행하였으며 화장실 벽면은 타일, 나머지 벽면은 석고보드, 에코카라트, 시멘트 벽돌로 설정하여 계산을 수행하였다. 계산영역에 대한 경계조건은 Table 4와 같으며, 주택 입구는 일정속도 조건, 출구는 일정 압력조건으로 경계조건을 설정하였다. 그리고 실내 벽면은 no-slip 조건으로 설정하여 계산을 수행하였으며, 실내 온도차에 의한 부력의 효과는 고려하지 않았다.

본 전산해석 연구는 상용코드인 STAR-CCM+ Ver.8.02를 이용하여 수행되었으며, 유한 체적법(Finite Volume Method)을 이용하여 위의 절에 나열한 지배방정식들을 이산화(discretization) 하였다. 이산화시 각 방정식들의 공간미분에 관한 항들은 이차 풍상 차분법(Second Order Upwind Scheme)

Table 4. Boundary conditions

Boundary	Condition
Inlet	- Dirichlet
	- Constant velocity
Outlet	- Constant pressure
	- 0 Pa (atmospheric)
Wall	- No-slip
	- Constant radon exhalation rate

을 사용하여 차분화 하였다. 압력장의 처리는 연속 방정식을 이용하여 압력 보정 방정식을 유도하고 해를 구하여 그 결과를 제어체적면(control volume)의 질량 보존 법칙에 따라 압력과 속도를 연결시키는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1. 전산해석 결과 비교

본 연구에서는 전산해석 결과의 검증을 위하여 실내 환기량 변화에 따른 건축자재별 실내 라돈 농도를 이론값과 비교하였다. 실내 라돈 농도의 경우 실측한 자료가 상당히 적고 또한 이를 적용할 수 있는 범위가 매우 제한적이어서 본 연구에서는 라돈 농도의 이론값과 비교하여 계산의 정확성을 평가하였다. 실내 라돈 농도에 대한 이론식¹⁴⁾은 식 (5)와 같으며, 식에서 E는 건축자재 라돈 방출량($Bq/m^2 \cdot h$), A는 라돈 방출 면적(m^2), V는 실내 체적(m^3), λ_{Rn} 는 라돈 붕괴 상수($1/h$)이며, λ_v 는 실내 환기량($1/h$)이다.

$$C = \frac{EA}{V(\lambda_{Rn} + \lambda_v)} \quad (5)$$

Fig. 4는 실내 환기량 변화에 따른 건축자재별 실내 라돈 농도를 이론값과 비교한 것으로 본 연구의 전산해석 결과는

(a) Plaster board

(b) Ecocarot

(c) Cement brick

Fig. 4. Comparison of radon concentration between analytical method and CFD results.

실내 환기량 변화에 따른 실내 라돈 농도를 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 계산에 사용된 격자, 공간 차분법 등의 계산방법이 적절하였다고 판단된다.

3.2. 실내 기류 분포

Fig. 5는 실내 환기량이 1이고, 벽면이 시멘트 벽돌일 때 건물 바닥으로부터의 높이 1.5 m에서의 속도 벡터 분포를 각 환기방식별로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실내 기류는 이동 폭이 좁은 영역에서 빠른 속도 분포를 나타내며, 방 1에서는 낮은 속도 분포를 나타낸다. 실내 기류는 기류의 이동에 따라 벽으로 둘러싸인 곳에서 재순환 영역이 형성되며, 재순환 영역은 Case4 계산조건에서 가장 넓은 범위에 걸쳐 형성된다. 이러한 재순환 영역이 형성되는 곳에서는 오염물질의 농도가 높고, 긴 정체시간으로 이어지는 결과를 초래하게 된다. 따라서 주택 설계단계에서부터 실내 구조나 창호의 위치/크기에 따라 실내에 형성되는 기류의 흐름을 파악하고, 기류의 흐름과 오염물질의 방출에 따라 형성되는 오염농도 분포를 고려하여 주택 구조를 설계하는 것이 중요하다.

3.3. 환기조건에 따른 라돈 분포

Fig. 6은 실내 벽면이 시멘트 벽돌인 조건에서 환기량이 1 일 때 높이 1.5 m에서의 환기 조건별 실내 라돈 농도 분포를 나타낸 것이다. 실내 라돈 농도는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 기류의 속도가 빠른 영역에서 낮게 분포하며, 재순환

Fig. 5. Vector plot of the airflow velocity (ACH = 1).

Fig. 6. Contours of radon concentration in the house with various ventilation conditions (ACH = 1, Cement brick).

영역이 형성되는 영역에서 높게 분포한다. 반면 Case2 환기조건에서 거실의 라돈 농도는 기류속도가 Case1 보다 빠름에도 높게 분포하는데, 이는 Case2 환기조건에서는 거실에 재순환 영역이 형성되어 라돈이 정체하기 때문에 농도가 높게 분포한다. 그림에서 흑색으로 나타나는 공간은 환경부의 ‘다중이용시설 등의 실내공기질 관리법’에서 규정하고 있는 다중이용시설 실내공기 중의 라돈 농도 권고 기준 148 Bq/m³를 초과하는 공간으로, Case2 환기조건에서는 권

고 기준을 초과하는 공간이 없는 반면 Case4 환기조건에서는 거실과 욕실 2를 제외한 공간에서 라돈 농도 권고 기준을 초과한다.

Fig. 7은 실내 벽면이 시멘트 벽돌일 경우 환기 조건별 실내 라돈 농도를 공간 평균하여 나타낸 것이다. 실내 라돈 농도는 실내 환기량이 증가할수록 감소하며, 실외 공기가 주택의 전면과 후면을 통해 유입되어 유출되는 Case1과 Case2 조건이 Case3, Case4 조건보다 낮게 나타났다. 실내 환기 조

Fig. 7. Radon concentration with various ventilation conditions (Cement brick).

Fig. 8. Radon concentration in each space with various ventilation conditions (ACH = 1, Cement brick).

건에 따른 라돈 농도는 실외 공기가 주택 후면 창을 통해 유입되어 전면 창으로 유출되는 Case2 조건이 가장 낮게 나타나며, 주택 측면 창을 통해 실외 공기가 유입되어 전면 창으로 유출되는 Case4 조건이 실내 라돈 농도가 가장 높게 나타난다. 따라서 실내 라돈을 저감하기 위해서는 Case1, Case2와 같은 맞통풍(cross ventilation) 형태의 환기가 효과적일 것이라 판단된다.

Fig. 8은 실내 벽면이 시멘트 벽돌일 경우 각 공간별 라돈 농도를 나타낸 것이다. 공간별 라돈 농도는 실내 환기 조건에 따라 차이가 있으며, 타 공간에 비하여 방 1, 2에서 비교적 높게 분포 한다. 이는 방 1, 2에서 형성되는 재순환 영역에서 벽면에서 방출되는 라돈이 빠르게 배출되지 못하고 정체되기 때문이다. 방 1, 2와 욕실의 라돈 농도는 Case2 환기 조건에서 가장 낮으며, 거실과 주방의 라돈 농도는 Case1 환기 조건에서 낮게 나타난다. Case4 환기 조건에서는 방 1과 거실을 제외한 모든 공간에서 라돈 농도가 높게 나타난다. 이와 같이 실내 라돈 농도는 기류의 흐름과 환기 조건에 따라 공간별로 많은 차이가 나타나기 때문에, 실내 라돈 농도를 정확히 측정하기 위해서는 실내 기류 흐름을 고려한 측정위치의 선정이 매우 중요할 거라 판단된다. 또한 실

내로 유입되는 바람의 방향은 주변 지형지물과 계절풍에 따라 변화하기 때문에 주택설계 단계에서부터 풍향을 고려한 주택설계가 요구된다.

3.4. 건축자재 변화에 따른 실내 라돈 분포

Fig. 9는 Case1 환기 조건에서 실내 환기량이 1일 때 건축자재별 실내 라돈 농도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 건축자재별 실내 라돈 농도 분포는 시멘트 벽돌이 타 건축자재 보다 넓은 범위의 공간에서 높게 분포한다. 그림에서 적색으로 나타나는 공간은 라돈 농도 권고 기준을 초과하는 공간으로 석고보드, 에코카라트 건축자재에서는 권고 기준을 초과하는 공간이 없는 반면 시멘트 벽돌에서는 방 1 공간에서 라돈 농도 권고 기준을 초과한다. Fig. 10은 환기조건과 실내 환기량 변화에 따른 건축자재별 실내 공기 중 라돈 농도를 정량적으로 비교한 것으로, 실내 라돈 농도는 주택 전체를 체적 평균 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 건축자재별 실내 라돈 농도는 시멘트 벽돌이 가장 높았으며, 그 다음 에코카라트, 석고보드 순으로 나타났

Fig. 9. Contours of radon concentration in the house with various building materials (Case1, ACH = 1).

Fig. 10. Radon concentration in the house with various building materials.

Fig. 11. Radon concentration in each space with various building materials.

다. 에코카라트와 석고보드를 실내 건축자재로 사용하였을 경우, 해석 대상 주택의 공기 중 평균 라돈 농도는 모든 환기조건에서 환경부의 실내공기 중의 라돈 농도 권고 기준

인 148 Bq/m³에 비해 낮게 나타났다. 반면 시멘트 벽돌의 경우 실내 라돈 농도는 Case1, Case2, Case3 환기조건에서는 권고 기준 이하로 나타나지만, Case4 환기 조건에서는 환

기량이 2 이상이 되어야 권고 기준 이하로 감소한다. 실내 환기량이 1에서 4로 증가하게 되면 실내 공기 중 라돈 농도는 건축자재별로 시멘트 벽돌 74.2%, 에코카라트 74.1%, 석고보드 72.4% 감소한다. 본 연구에서는 실내 라돈 권고치를 초과하는 실내 환기량에서의 공간별 라돈 농도를 평가하기 위하여 Fig. 11과 같이 실내 환기량이 1인 조건에서 환기 조건과 건축자재에 따른 공간별 라돈 농도를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 공간별 라돈 농도는 모든 환기조건에서 실내 벽면이 시멘트 벽돌인 경우가 가장 높게 나타난다. 각 공간별 라돈 농도는 Case1, Case2 환기 조건에서는 석고보드, 에코카라트, 시멘트 벽돌 건축자재 모두 라돈 농도 권고 기준을 초과하지 않으며, Case3, Case4 환기 조건에서는 시멘트 벽돌의 경우만 방 1, 2와 욕실 1에서 권고 기준을 초과한다. 따라서 실내 벽면이 시멘트 벽돌인 경우 실내 라돈 농도를 권고치 이하로 낮추기 위해서는 실내 환기량을 증가하여야 한다.

앞서 살펴본 바와 같이 실내 라돈 저감을 위해서는 실내 환기가 라돈 저감 효율이 우수하지만 여름, 겨울철에는 에너지 손실을 초래한다. 따라서 실내 라돈 발생원이 건축자재일 경우 환기가 절대적으로 필요하지만, 주택 설계 및 건설 단계에서부터 라돈 발생원이 되는 건축자재의 사용을 피하는 것이 에너지 효율 측면에서 더 효과적일 것이라 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 건축자재에서 발생하는 라돈의 실내 확산에 대한 모델링 및 전산해석을 통하여 건축자재별 실내 라돈 방출 및 확산 특성과 환기 조건에 따른 실내 라돈 농도 분포에 대한 연구를 수행하였다. 라돈은 실내 재순환 영역이 형성되는 곳에서 높게 분포하였으며, 맞통풍(cross ventilation) 형태의 환기 조건에서 라돈 농도가 낮았다. 따라서 실내 라돈 저감을 위해서는 주택 설계단계에서부터 실내에 형성되는 기류의 흐름을 파악하고 기류의 흐름과 라돈의 방출에 따라 형성되는 농도 분포를 고려하여 주택 구조를 설계하는 것이 요구된다.

건축자재별 실내 라돈 농도는 라돈 방출률이 높은 시멘트 벽돌이 가장 높았으며, 그 다음 에코카라트, 석고보드 순으로 나타났다. 실내 환기량이 증가할수록 실내 라돈 농도는 감소하며, 실내 환기량이 1에서 4로 증가하게 되면 실내 공기 중 라돈 농도는 건축자재별로 시멘트 벽돌 74.2%, 에코카라트 74.1%, 석고보드 72.4% 감소하였다. 실내 라돈 저감을 위해서는 실내 환기가 라돈 저감 효율이 우수하지만, 이에 따른 에너지 손실을 초래하기 때문에 주택 설계 및 건설 초기 단계에서부터 건축자재의 라돈 방출량을 평가하여 라돈이 다량 방출되는 건축자재의 사용을 피하는 것이 에너지 효율 측면에서 더 효과적일 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “생활공감 환경보건기술개발사업”으로 지원 받은 과제임.

KSEE

Reference

1. World Health Organization, “WHO handbook on indoor radon: A public health perspective,” (2009).
2. International Agency for Research on Cancer, “Monographs on the evaluation on carcinogenic risk to humans: Man-made fibres and radon,” (1988).
3. Page, S., “EPA’s strategy to reduce risk of radon,” *J. Environ. Health*, **56**(5), 27~36(1993).
4. Grader, J. B., “Indoor air issue,” *Architectural Technology* (1986).
5. Kim, Y. S., “Indoor radon levels in four different areas in Korea,” *Kor. J. Environ. Health Soc.*, **16**(1), 1~7(1990).
6. Lee, E. K., Lee B. D. and Park J. C., “A study on the indoor air quality in newly-constructed apartment houses,” *Proceeding of annual conference of the architectural institute of Korea planning & Design*, Architectural Institute of Korea, AIK, pp. 311~316(1994).
7. Park, J. C., Lee, S. H. and Lee, E. K., “A study on the characteristics of radon concentration in newly-constructed apartment houses,” *Proceeding of annual conference of the architectural institute of Korea planning & Design*, Architectural Institute of Korea, AIK, pp. 349~354(1994).
8. Fang, J. B. and Persily, A. K., “Computer simulations of airflow and radon transport in four large buildings,” *Environmental Protection Agency*(1995).
9. Wang, F. and Ward, I. C., “The development of a radon entry model for a house with a cellar,” *Building Environ.*, **35**(7), 615~631(2000).
10. Zhou, W., Lida, T., Moriizumi, J., Aoyagi, T. and Takahashi, I., “Simulation of the concentration and distributions of indoor radon and thoron,” *Radiation Protection Dosimetry*, **93**(4), 357~367(2001).
11. Akbari, K., Mahmoudi, J. and Ghanbari, M., “Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house,” *J. Environ. Radioactivity*, **116**, 166~173(2013).
12. Kim, S. A., “Plane change and tendency of 85 m² area for exclusive use of the apartment house,” *Engineering & Construction Technology Review*, pp. 17~25(2003).
13. Ju, Y. J., “The measurement of radon-222 concentration for release gas into the atmosphere from the building material,” *Mater’s thesis*, Graduate School of Chosun University(2012).
14. Petropoulos, N. P., Anagnostakis, M. J. and Simopoulos, S. E., “Building materials radon exhalation rate: ERRICCA intercomparison exercise results,” *Sci. Total Environ.*, **272**(1), 109~118(2001).