

건축자재내 포함된 천연방사성핵종에 의한 실내 공간의 방사선량 평가

조윤희*, 김창중*, 윤주용*·†, 조대형†, 김광표†

*과학기술연합대학원대학교, †한국원자력안전기술원, ‡경희대학교 원자력공학과

2012년 11월 13일 접수 / 2012년 12월 8일 1차 수정 / 2012년 12월 10일 채택

건축자재에 포함된 천연방사성핵종은 실내공간에 거주하는 일반인의 주요 피폭선원이다. 본 연구에서는 콘크리트 벽체에 존재하는 천연방사성 핵종에 의한 한국인의 실내에서의 외부피폭 방사선량을 평가하였다. 한국인의 주거실태, 실내공간의 크기 등을 고려하여 선량평가를 위한 표준 방의 크기를 결정하였다. 표준 방 이외의 다양한 크기의 공간에 대해서도 선량평가를 실시하였다. 방사선수송 코드인 MCNPX를 사용하여 실내공간에서의 공기 중 흡수선량을 계산하였으며, 이를 이용하여 유효선량률을 계산하였다. 콘크리트 벽체로만 이루어진 3×4×2.8 m³ 크기의 표준 방의 경우, 콘크리트 내 우라늄계열, 토륨계열, ⁴⁰K 핵종의 농도에 따라 공기 중 흡수선량률은 0.80, 0.97, 0.08 nGy h⁻¹ per Bq kg⁻¹이었으며, 유효선량률은 0.57, 0.69, 0.058 nSv h⁻¹ per Bq kg⁻¹이었다. 실내공간의 크기를 5-30 m²로 다양하게 변화시키더라도 천장/바닥 그리고 벽에 의한 상반된 선량률 변화로 인하여 전체 방사선량률은 실내 면적의 변화에 상관없이 거의 일정한 값을 보였다. 실제 국내에서 주로 사용되는 콘크리트 내의 천연방사성 핵종의 농도 및 한국인의 실내공간에서 생활양식 등을 토대로 한국인의 실내공간에서의 외부피폭 방사선량률 및 연간 유효선량을 평가하였다. 콘크리트 내의 우라늄계열, 토륨계열, ⁴⁰K 핵종의 농도가 각각 26, 39, 596 Bq kg⁻¹인 경우 공기 중 흡수선량률은 대략 104 nGy h⁻¹이었다. 일반인의 실내 점유율이 89%인 경우, 연간 유효선량은 0.59 mSv이었다. 국내의 일반적인 실내공간에서 콘크리트 벽체 내에 존재하는 천연방사성물질에 의한 연간 유효선량은 실내점유율×8760 h y⁻¹×(0.57C_U+0.69C_{Th}+0.058C_K)을 이용하여 계산할 수 있다.

중심어: 건축자재, 자연기원 방사성물질, NORM, 외부피폭

1. 서론

후쿠시마 원자력발전소 사고 이후 방사선 피폭에 대한 국민의 관심이 고조되었다. 이러한 시기에 콘크리트, 타일, 석고보드, 벽지 등에서 방사성핵종이 검출되었다는 보고 등은 건축자재로 인한 방사선 피폭에 대한 일반인의 염려를 크게 증대시켰다.

천연방사성핵종은 자연환경 중에 항상 존재하면서 일반인 피폭의 가장 큰 부분을 차지한다. 그 중에서도 일반적으로 하루 중 가장 많은 시간을 보내는 실내공간에서의 피폭선량은 천연방사성핵종에 의한 일반인 피폭의 중요한 부분을 차지한다. 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)에서는 실내공간의 경우 방사선원이 공간을 둘러싸고 있는 기하학적 분포를 나타내므로, 그 영향이 실외에서 보다 더 크다고 보고하였다[1].

건축자재 중 콘크리트는 구조체로 사용되며, 건축물의 대부분을 차지하고 있어 실내공간에서의 외부피폭 방사선량은 대부분 콘크리트 내 존재하는 천연방사성물질에 기인한다. 콘크리트의 경우 그 구성은 골재, 시멘트, 물,

공기 등으로 이루어져 있으며, 자재의 성능향상을 위하여 플라이애시, 고로슬래그, 실리카폼 등의 산업 부산물을 혼화제로 사용하기도 한다. 상기 콘크리트의 구성성분으로 사용되고 있는 물질들은 천연방사성핵종을 함유하고 있는데, 이러한 천연방사성핵종 중 외부피폭을 유발하는 감마 방출 선원은 우라늄계열 핵종, 토륨계열 핵종, ⁴⁰K을 포함한다[1,2].

건축자재에 의한 실내공간에서의 피폭선량평가에 대한 일부 연구가 수행되어 왔다[3-8]. 유럽위원회(EC)에서는 건축자재에 포함된 천연방사성핵종에 의해 실내에 거주하는 일반인이 선량한도를 초과하지 않도록 하는 방사능 농도지수(I)를 정의하였으며, 유럽각국은 이에 기초하여 각국의 현실을 반영한 안전규제 체계를 마련하여 운영하고 있다[9]. 방사능 농도지수는 다음과 같이 계산할 수 있는데,

$$I = \frac{C_{Ra}}{300 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{C_{Th}}{200 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{C_K}{3000 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (\text{식 1})$$

상기 식에서 C_{Ra}, C_{Th}, C_K는 각각 건축자재에 포함된 ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K의 농도를 나타낸다. 유럽위원회(EC)에서

책임저자 : 김광표, kpkim@khu.ac.kr
경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지 경희대학교 원자력공학과

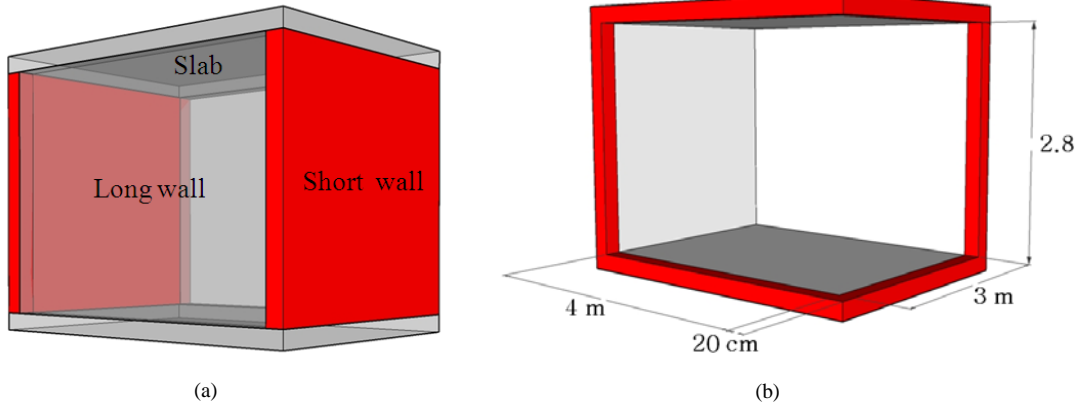


Fig. 1. Room model based on the analysis of housing scale of Korean Housing Corporation: (a) walls comprising a room, (b) wall dimension.

권고하는 농도지수는 유럽인들의 주거문화와 생활방식을 토대로 산정된 것이다. 핀란드에서는 건축자재에서 발생하는 감마 방사선에 의한 일반인의 연간 피폭선량을 법적으로 1 mSv로 제한하고 있다[10]. 이 외에도 실내에서의 외부피폭방사선량 평가에 대한 일부 연구들이 각 나라의 환경에 맞추어 수행되어 왔다[6,7,9,10]. 실내공간의 크기는 연구마다 다양하게 설정되어 선량평가가 이루어졌는데, 이 중에서 유럽위원회(EC)에서는 $5 \times 4 \times 2.8 \text{ m}^3$, 핀란드 방사선 및 원자력안전청(STUK)에서는 $12 \times 7 \times 2.8 \text{ m}^3$ 크기의 공간을 선량평가에 사용하였다. 실내공간에서의 피폭선량은 각 국가의 주거형태, 실내공간의 구조, 구조물의 방사선학적 특성, 국민의 생활양식 등을 고려하여 이루어져야 한다. 하지만 국내의 경우 이에 대한 체계화된 연구가 아직까지 부족한 상황이다.

본 연구의 목표는 콘크리트 벽체에 존재하는 천연방사성 핵종에 의한 한국인의 실내에서의 외부피폭 방사선량을 평가하는 것이다. 이를 위해 우선 콘크리트 내 우라늄 계열, 토륨 계열, ^{40}K 핵종의 농도별 외부피폭 방사선량을 계산하였다. 본 연구에서 제시한 방사선량률은 실측된 콘크리트 벽체의 천연방사성 핵종의 농도 및 일반인의 실내 점유율의 정보가 가용한 경우 각 실내공간에서의 외부피폭 방사선량 계산에 활용될 수 있다. 또한 한국인에 대한 실내에서의 외부피폭 방사선량 정도를 평가하기 위해 국내에서 사용되는 콘크리트의 방사능농도 및 한국인의 실내에서의 소요시간 통계정보를 이용하여 연간 유효선량을 평가하였다. 그리고 최종적으로 국내의 일반적인 실내공간에서의 콘크리트 벽체 내에 존재하는 천연방사성 물질에 의한 연간 유효선량을 일반화하여 평가할 수 있는 방법론을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

한국인의 실내공간에서의 외부피폭 방사선량 평가를 위해 국내의 주거실태, 실내공간의 구조 및 크기, 콘크리트 벽체의 물리적 화학적 특성을 조사하였다. 수집된 자료를 바탕으로 방사선 수송코드를 이용하여 콘크리트 내

핵종별 농도에 따른 실내공간에서의 외부피폭 방사선량을 계산하였다. 또한 국내에서 사용되는 콘크리트 벽체의 방사능 농도 및 한국인의 실내에서의 소요시간을 조사하였다. 이를 바탕으로 한국인의 실내공간에서의 외부피폭에 의한 연간 유효선량을 평가하였다.

2.1 주거실태, 실내공간의 구조 및 콘크리트 벽체의 구성

국내 주거실태조사에 따르면 2010년 기준으로 아파트, 단독주택, 다세대주택, 연립주택에 각각 47, 40, 5, 4%의 국민이 거주하는 것으로 조사되었다[12]. 따라서 본 연구에서는 아파트를 국내의 대표 주거형태로 가정하고 선량평가를 실시하였다. 아파트 외에 단독주택, 다세대 주택 등에서도 다수의 국민이 거주한다. 하지만 실내공간에서의 외부피폭에 영향을 미치는 주요 인자인 실내공간의 크기 및 콘크리트 벽체의 구성 등은 주거공간의 분류 형태에 따라 크게 다르지 않을 것으로 판단된다.

선량평가를 위해 국내 표준 실내공간의 크기를 결정하였다. 표준 실내공간의 크기는 한국인의 장소별 소요시간을 기반으로 결정되었다. 환경부에서는 한국형 노출지수 개발을 위해 국내 16개 광역시도에 거주하는 만 18세 이상의 성인 1980명에 대하여 장소별 소요시간을 조사하였다[13]. 조사에 의하면 하루 평균 21.4 시간을 실내에서 생활하는데, 이 중 침실 및 방에서의 거주시간이 9.2 시간으로 가장 길게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 일반인이 하루 중 가장 많은 시간을 보내는 침실의 크기를 바탕으로 실내공간에서의 선량평가를 실시하였다. 침실 외에도 사무실, 거실 및 복도, 목욕실 등의 다양한 공간에서 시간을 소요하므로, 표준 크기의 방 이외에서의 공간에 대해서도 선량평가를 실시하였다.

선량평가를 위한 기준 방의 크기는 대한주택공사에서 국민주택으로 설계한 아파트의 침실 크기를 참고하여 $3 \times 4 \times 2.8 \text{ m}^3$ (가로×세로×높이)로 결정하였다(그림 1) [14]. 방의 구조에 따른 피폭선량의 변화를 알아보기 위하여 그림 2와 같이 네 가지 방의 구조를 가정하였다. 우선 가장 단순한 구조인 문과 창이 존재하지 않는 콘크리트 벽체로 둘러싸인 직육면체의 공간을 가정하였다(그림 2-a). 두 번째는 긴 벽체의 한쪽 끝에 $0.9 \times 2.1 \text{ m}^2$ 의 출입

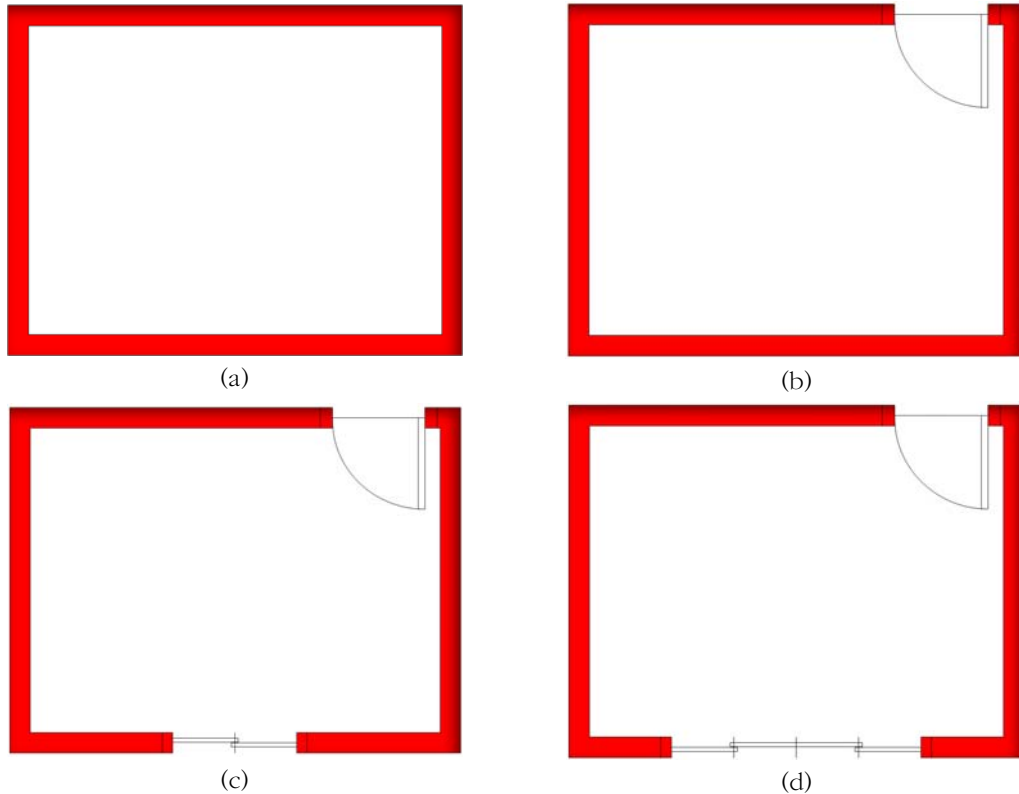


Fig. 2. Four different room structures for exposure assessment: (a) structure without door and window, (b) structure with door ($0.9 \times 2.1 \text{ m}^2$), (c) structure with door and window ($1.2 \times 1.4 \text{ m}^2$ at 1 m from floor), and (d) structure with door and window ($2.4 \times 1.4 \text{ m}^2$ at 1 m from floor).

문이 있는 공간을 가정하였다(그림 2-b). 다음으로 출입문과 함께 창이 존재하는 공간을 가정하였다(그림 2-c와 d). 이 경우 출입문이 있는 긴 벽체의 맞은편 벽에, 바닥에서 1 m 높이에 각각 $1.2 \times 1.4 \text{ m}^2$ 와 $2.4 \times 1.4 \text{ m}^2$ 크기의 창이 있는 것으로 가정하였다. 실내공간에서의 방사선량률은 그 실내공간을 이루고 있는 벽체내의 방사선원 이외에도 거실 혹은 옆방과 같은 이웃 공간, 위층, 아래층, 옆집에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 민감도 연구를 실시하였다. 위층, 중간층, 아래층에 각각 3개의 실내공간을 구성하고 중간층 가운데 실내공간에서 선량평가를 실시하였다. 이 경우 주위에 다른 공간이 존재하지 않는 경우에 비해 우라늄계열, 토륨계열, ^{40}K 에 의한 선량률은 각각 8%, 9%, 15% 증가하였으며, 총 유효선량은 11% 증가하였다.

일반인의 경우, 위에서 정의한 12 m^2 ($3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$) 면적의 침실 외에 이보다 더 넓거나 좁은 침실, 복도, 화장실, 사무실 등에서 시간을 보낸다. 따라서 실내공간의 크기를 $5\text{-}30 \text{ m}^2$ 로 변화시키면서 피폭선량을 계산하였다. 실내공간의 형태는 가로 및 세로의 길이가 같고, 실내공간의 높이는 2.8 m 로 가정하였다.

선량평가를 위해 콘크리트 벽체의 화학적 구성은 미국 국립표준연구소(NIST)에서 제공하고 있는 값을 사용하였다(표 1) [15]. 콘크리트 벽체의 두께 및 밀도는 가장 일반적으로 사용되는 값인 20 cm 및 2.35 g cm^{-3} 을 이용하였다[5,10,16,17]. 한국토지주택공사의 주택분야 건축설계 지침에서는 구조부분의 설계지침을 통하여 벽체의 두께

기준을 제시하고 있는데, 바닥과 천장의 두께는 최소 18 cm , 벽체의 두께는 아파트의 층수와 하중 조건에 따라 $15\text{-}30 \text{ cm}$ 의 범위에서 건설하도록 하고 있다 [17]. 실내공간에서의 피폭선량은 벽체의 두께에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 민감도 연구를 실시하였다. 벽체의 두께가 15 cm 혹은 30 cm 의 경우 실내공간에서의 피폭선량은 20 cm 두께의 벽체에 비해 최대 -10% 에서 $+9\%$ 의 차이를 보였다.

Table 1. Thickness, Density, and Elemental Composition of Concrete Used for External Exposure Assessment.

Properties	Values
Thickness (cm)	20
Density (g cm^{-3})	2.35
Elemental Composition (%)	
H	2.21
C	0.25
O	57.49
Na	1.52
Mg	0.13
Al	2.00
Si	30.46
K	1.00
Ca	4.30
Fe	0.64

2.2 실내공간에서의 외부피폭 선량계산

선량평가를 위해 MCNPX 코드를 사용하였다. 콘크리트 벽체는 그림 1과 같이 짧은 벽체, 긴 벽체, 가로 벽체(천장과 바닥)의 세 쌍으로 나누어 조사하였으며, 모든 벽체의 두께와 밀도는 동일하며, 구성성분은 표 1과 같다고 가정하였다. 이러한 벽체 내에 천연방사성물질이 균일하게 분포하며, 등방성으로 방사선을 방출하는 것으로 선원향을 조사하였다. 외부피폭 방사선량 평가를 위해 실내 중간지점 1 m 높이에서의 선량을 계산하였다.

외부피폭 방사선량 계산은 감마 방출 천연방사성핵종인 우라늄계열, 토륨계열, ⁴⁰K 핵종에 대해 실시되었다. 우라늄계열 핵종에서는 ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi 등의 핵종의 24개 감마선 방출 에너지, 토륨계열에서는 ²²⁸Ac, ²¹²Bi 등의 핵종의 20개 감마선 방출 에너지, ⁴⁰K의 경우는 1460 keV의 감마선 에너지를 고려하여 선량평가 하였다. 각 계열내의 핵종은 평형상태에 있는 것으로 가정하였다. 본 연구에서 고려한 우라늄 및 토륨계열 핵종의 감마선 에너지 및 방출분율을 표 2에 요약하였다 [11].

Table 2. Gamma Radiation Energies and Their Intensities of Uranium Decay Series and Thorium Decay Series.

²³⁸ U Decay Series			²³² Th Decay Series		
Energy (E _i) (MeV)	Intensity (Y _i) (%)	E _i ×Y _i (MeV)	Energy (E _i) (MeV)	Intensity (Y _i) (%)	E _i ×Y _i (MeV)
0.047	1.89	0.001	0.040	0.62	0.000
0.053	1.04	0.001	0.100	0.96	0.001
0.186	1.89	0.004	0.129	1.42	0.002
0.242	3.69	0.010	0.209	1.87	0.004
0.273	2.78	0.008	0.239	18.7	0.045
0.295	9.76	0.029	0.270	1.33	0.004
0.352	16.4	0.058	0.289	2.37	0.007
0.385	0.57	0.002	0.331	7.91	0.026
0.470	0.99	0.005	0.409	0.79	0.003
0.609	20.3	0.123	0.463	1.92	0.009
0.666	1.37	0.009	0.511	3.58	0.018
0.773	3.63	0.028	0.583	12.5	0.073
0.806	0.99	0.008	0.727	3.00	0.022
0.934	1.70	0.016	0.782	3.79	0.030
1.120	7.50	0.084	0.860	2.12	0.018
1.246	3.91	0.049	0.911	10.8	0.099
1.390	4.34	0.060	0.969	7.16	0.069
1.509	1.74	0.026	1.588	2.75	0.044
1.661	0.94	0.016	1.626	1.71	0.028
1.760	8.49	0.149	2.615	14.6	0.383
1.848	1.27	0.024	Weighted average energy		0.884 MeV
2.118	0.52	0.011			
2.204	2.92	0.064			
2.435	1.13	0.028			
Weighted average energy		0.811 MeV			

Table 3. Activity Concentrations of ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K (Bq kg⁻¹) in Concretes [22, 23].

Radionuclide	Activity Concentrations (Bq kg ⁻¹)	
	Korea	European Countries
²²⁶ Ra	26.4 (25.9-27.4)	60 (15-242)
²³² Th	39.1 (38.6-41.5)	35 (6-92)
⁴⁰ K	596 (559-652)	392 (88-747)

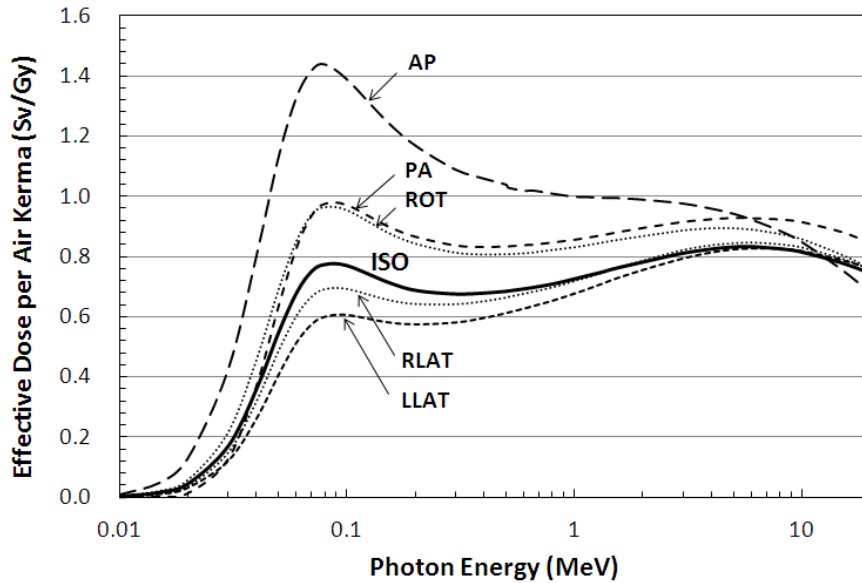


Fig. 3. Effective dose per air kerma free-in-air of photon: AP (antero-posterior), PA (postero-anterior), ROT (rotational), ISO (isotropic), RLAT (right lateral), LLAT (left lateral) [20].

MCNPX 코드 모사를 통해 계산된 공기 중 흡수선량 및 최근 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 제시한 외부피폭에 대한 환산인자를 이용하여 실내공간에서의 각 핵종에 의한 유효선량률을 계산하였다. 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 최근 ICRP 103 방사선방어에 대한 권고 및 ICRP 110 기준 선량평가 모의체 보고서 발행에 맞춰서, 기존 ICRP 74 보고서에서 제공하였던 외부피폭에 대한 선량계수를 개정하였다[18-21]. 전신피폭에 대해서는 전방에서 후방으로(antero-posterior), 후방에서 전방으로(postero-anterior), 좌측 측방(left lateral), 우측 측방(right lateral), 회전(rotational), 등방(isotropic) 등 총 6 가지 입사방사선 방향에 따른 선량환자 인자를 계산하였다. 입사방사선의 방향에 따른 자유공기 중 커마 당 유효선량 환산인자를 그림 3에 요약하였다. 인체 내에서 주요 장기의 위치가 다르기 때문에, 유효선량 환산인자는 입사방사선의 방향에 따라 차이가 있었다. 상대적으로 조직가중치가 높은 갑상선, 유방, 생식기 등이 인체의 앞면에 위치해 있으므로, 전방에서 후방으로(AP)의 입사의 경우 타 경우에 비해 상대적으로 높은 환산인자 값을 보였다. 측방(LAT)입사의 경우 전후방(AP) 혹은 후전방(PA)에 비해 상대적으로 관통해야 하는 몸통의 두께가 두꺼워서 낮은 유효선량 환산인자 값을 보였다. 회전(ROT) 입사의 경우 위의 경우들이 서로 합쳐져서 중간 정도의 값을 보였다. 본 연구의 경우 천연방사성 핵종이 콘크리트 내에 균일하게 분포하고 있으므로 등방(isotropic) 입사방향에 대한 유효선량 환산인자를 이용하였다. 유효선량 환산인자는 광자의 에너지에 따라 다르게 나타난다(그림 3). 본 연구에서는 우라늄 및 토륨계열 핵종의 에너지별 방출률을 고려하여, 우라늄 및 토륨계열 핵종에 대해서는 0.71 Sv Gy⁻¹를 ⁴⁰K에 대해서는 0.76 Sv Gy⁻¹를 이용하여 유효선량을 평가하였다.

실제 국내에서 주로 사용되는 콘크리트 내에 포함된 천연방사성 핵종의 방사능 농도를 이용하여 실내공간에서의 유효선량률을 평가하였다. 국내에서 사용하는 건축자재 내의 천연방사성핵종의 농도를 Lee 등이 측정하였다[22]. 이 중 콘크리트의 방사능 농도를 표 3에 요약하였다. Trevisi 등은 유럽국가의 건축자재 내의 방사능 농도에 대한 정보를 광범위하게 수집하였다[23]. 이 중 콘크리트 내의 방사능 농도에 대해서는 2700 개 이상의 표본 결과를 바탕으로 각 국가별로 방사능 농도를 제시하였다(표 3). 국내의 경우 콘크리트 내의 평균 방사능 농도는 ²²⁶Ra의 경우 26 Bq kg⁻¹, ²³²Th의 경우 39 Bq kg⁻¹, ⁴⁰K의 경우 596 Bq kg⁻¹로 전체적으로 유럽의 경우와 비슷한 수준이었다. 유럽국가의 경우 평균 방사능 농도는 국내와 비슷한 정도의 결과를 보였으나, 국가별로는 일부 많은 차이를 보였다.

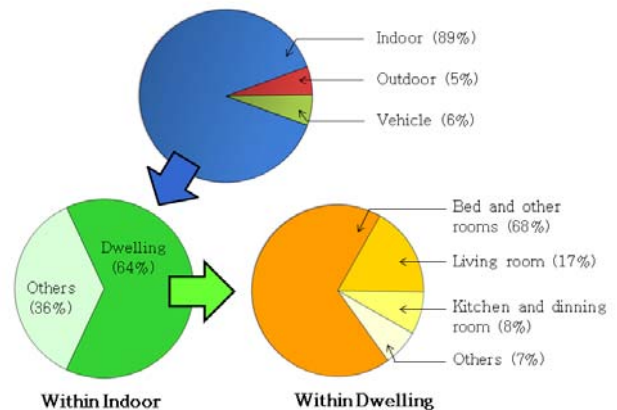


Fig. 4. Occupancy fractions of Korean population by location [13].

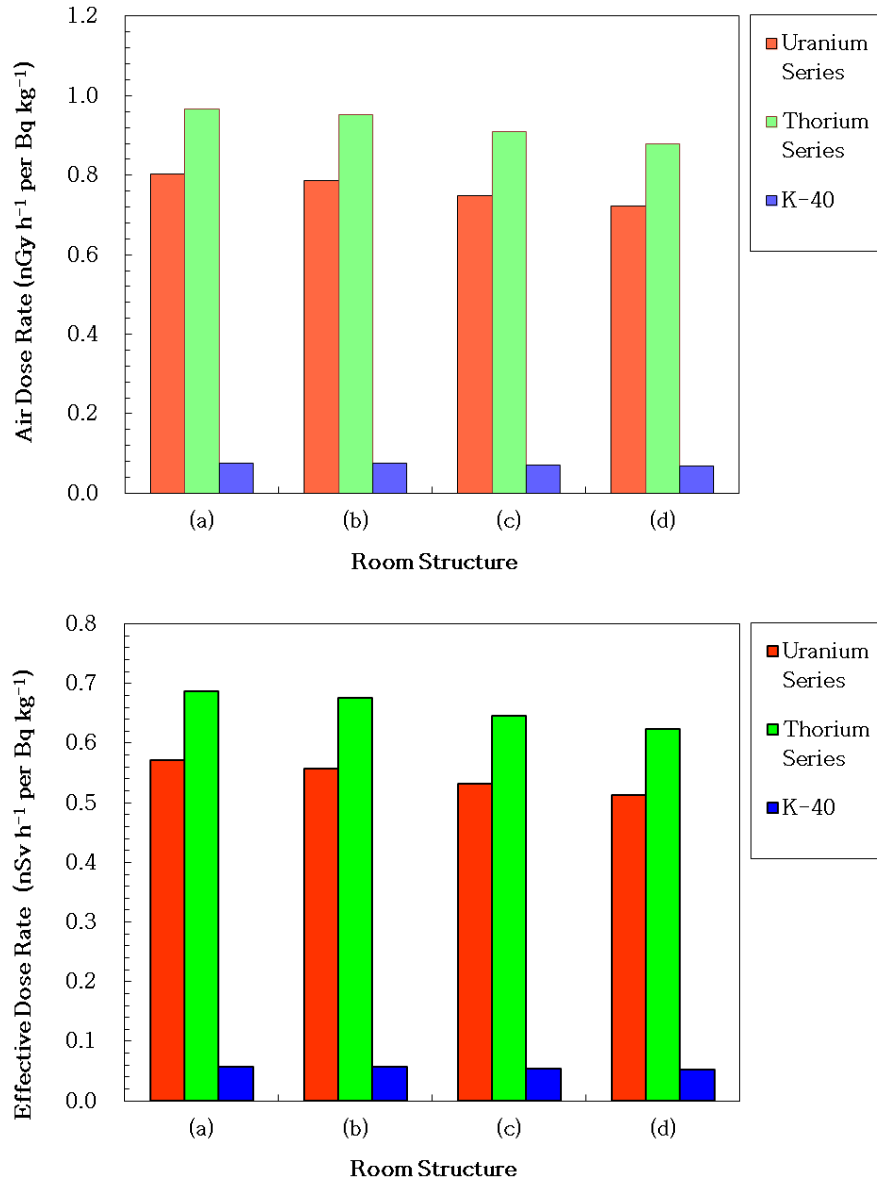


Fig. 5. Absorbed dose rate to air and effective dose rates by radionuclides and room structure: (a) structure without door and window, (b) structure with door (0.9×2.1 m²), (c) structure with door and window (1.2×1.4 m² at 1 m from floor), and (d) structure with door and window (2.4×1.4 m² at 1 m from floor).

최종적으로 실내공간에서의 유효선량률 및 실내 거주 시간을 바탕으로 한국인 성인에 대한 연간 피폭선량을 계산하였다. 환경부에서 국내 16개 광역시도에 거주하는 만 18세 이상의 성인 1980명에 대하여 실내에서 거주하는 연간 시간을 조사하였다 (그림 4) [13]. 한국 성인의 경우 하루 중 약 89%의 시간(21.4시간)을 실내에서 보내는 것으로 조사되었는데, 이 중 약 64%는 집에서, 36%는 집 외 실내, 주로 사무실에서 생활하는 것으로 조사되었다. 집에서는 침실 혹은 방에서 68%, 거실에서 17%, 부엌 및 식당에서 8%, 그리고 욕실 등 기타 공간에서 7%의 시간을 소요하는 것으로 조사되었다. 실내공간에서의 연간 피폭 유효선량은 실내공간 점유율을 89%로 가정하여 평가하였다. 이는 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)에서 선량평가를 위해 가정한 실내공간 점유율과 비슷한 수준

이다 [1].

3. 결과 및 논의

3.1. 표준 크기의 방에서의 방사선량률

그림 5에 표준크기 방에서 방의 구조 및 콘크리트 내 천연방사성 물질 농도에 따른 공기 중 흡수선량률 및 유효선량률 을 나타내었다. 공기 중 흡수선량률은 콘크리트 벽체의 우라늄계열 핵종, 토륨계열 핵종, ⁴⁰K의 농도에 따라 각각 0.72-0.80, 0.88-0.97, 0.07-0.08 nGy h⁻¹ per Bq kg⁻¹의 값을 보였다. 동일한 콘크리트 내 방사능 농도에 대해서는 토륨계열의 핵종, 우라늄계열 핵종, ⁴⁰K 순으로 높은 선량률을 나타내었으며, 우라늄계열 핵종 및 ⁴⁰K의

선량률은 토륨계열 핵종에 비해 대략 82% 및 8% 수준이었다. 이러한 핵종별 선량률의 차이는 각 계열 핵종에서 방출하는 감마선 방출분율 및 에너지가 다르기 때문이다. 본 연구에서는 우라늄계열 핵종에 대해서는 24개 감마선 에너지, 토륨계열 핵종에 대해서는 20개 감마선 에너지, ⁴⁰K에 대해서는 1개의 감마선 에너지에 대해 선량평가 하였다. 본 연구에서 고려한 감마선방출분율 및 에너지 곱의 합은 우라늄계열, 토륨계열, ⁴⁰K에 대해 대략 0.81, 0.88, 0.16 MeV 이었다.

본 연구에서 가정한 방의 구조, 즉 출입문 및 창문 유무 및 크기에 따라서 선량률이 조금씩 다르게 나타났으나, 그 차이는 크지 않았다. 출입문만 있는 경우(그림 2-b), 출입문과 함께 1.2×1.4 m² 크기의 창이 있는 경우(그림 2-c), 더 넓은 2.4×1.4 m² 크기의 창이 있는 경우(그림 2-d), 창과 출입문이 없다고 가정한 경우(그림 2-a)에 비해 대략 방사선량이 98%, 93-94%, 90-91% 수준이었다. 일반적으로 방의 구조는 출입문과 창문을 모두 포함하므로, 그림 2-a에서 가정한 단순 콘크리트 벽체로 구성된 방의 구조는 매우 보수적인 선량평가로 간주 될 수 있다. 하지만 출입문 및 창문이 존재하는 경우 그 실내공간을 구성하지 않는 외부 콘크리트 벽체 등에서 출입문 및 창문을 통하여 방사선이 실내로 입사될 수 있기 때문에, 선량평가를 위해 실내공간을 단순 콘크리트 벽체로 가정하는 것은 합리적인 접근방법이 될 수 있다.

유효선량률은 본 연구에서 계산한 실내공간에서의 공기 중 흡수선량률과 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 최근 제시한 유효선량 환산인자를 이용하여 계산하였다. 유효선량률은 콘크리트 벽체의 우라늄계열 핵종, 토륨계열 핵종, ⁴⁰K의 농도에 따라 각각 0.51-0.57, 0.62-0.69,

0.05-0.06 nSv h⁻¹ per Bq kg⁻¹의 값을 보였다.

본 연구에서 제시한 콘크리트 벽체의 방사능 농도당 피폭선량률은 실측된 콘크리트 벽체의 방사능 농도 값이 가용할 경우, 측정된 건축물 내 실제 외부피폭 방사선량률을 제공할 수 있다. 완성된 건축물 이외에도, 건축이 시작되기 전에 건축자재의 방사능을 측정하여 실내에서의 피폭선량을 예상할 수 있게 해준다.

3.2. 방의 크기에 따른 방사선량률

본 연구에서 기준 방으로 설정된 침실 이외에 화장실, 거실, 사무실 등과 같이 다양한 크기의 타 공간에 대한 선량평가를 위해 실내 면적의 크기를 변화시키면서 피폭선량을 평가하였다(그림 6). 천장 및 바닥을 구성하는 콘크리트에 의한 효과와 벽을 구성하는 콘크리트에 의한 효과를 분리하여 선량평가를 실시하였다. 천장 및 바닥의 면적은 실내 면적이 증가함에 따라 함께 증가한다. 따라서 이는 콘크리트 내의 총 방사선원의 양을 증가시켜, 결과적으로 실내공간에서의 방사선량률은 증가한다. 벽의 면적도 실내 면적이 증가함에 따라 함께 증가한다. 하지만 이 경우 콘크리트 내의 총 방사선원의 양은 증가하지만, 선량평가 지점에서 선원의 거리가 멀어지기 때문에 종합적으로 실내공간에서의 방사선량률은 실내 면적이 증가함에 따라 감소한다. 천장/바닥 그리고 벽의 상반된 실내면적에 따른 선량률 변화 때문에 전체 방사선량률은 실내 면적의 변화에 상관없이 거의 일정한 값을 보였다. 따라서 본 연구에서는 선량평가를 위해서 표준방의 크기를 정해놓고 선량평가를 하였지만, 표준방에서의 선량평가 결과를 화장실, 거실, 사무실과 같은 타 공간에도 적용할 수 있을 것이다.

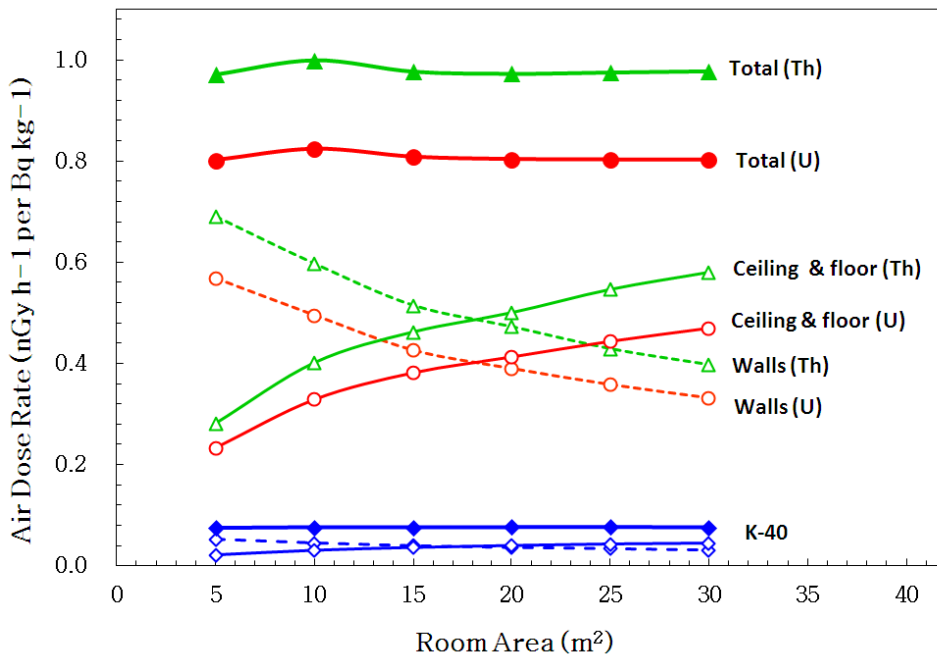


Fig. 6. Absorbed dose rate to air by room area. Radiation doses by wall concrete and ceiling and floor concrete were calculated separately.

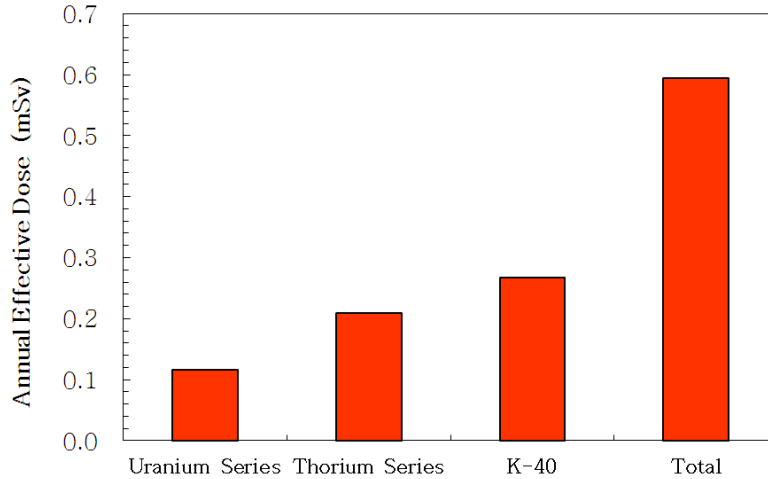


Fig. 7. Annual effective dose due to naturally occurring radioactive materials in concrete walls of Korea dwellings.

3.3. 국내 실내에서의 외부피폭 방사선량

본 연구에서 계산된 콘크리트의 방사능 농도당 공기 중 흡수선량률 및 국내에서 사용되는 콘크리트 내의 방사능 농도를 이용하여 실내에서의 선량률을 계산하였다. 콘크리트 내의 우라늄계열, 토륨계열, ⁴⁰K 핵종의 농도가 각각 26, 39, 596 Bq kg⁻¹인 경우 선량률은 대략 104 nGy h⁻¹이었다. 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)에서는 세계 인구의 약 45%에 대해 국가별 실내공간과 실외공간의 피폭선량 자료를 수집하여 보고하였다 [1]. 당시 보고된 한국인의 실외에서의 평균선량은 79 nGy h⁻¹이었으며, 실내공간에 대한 결과는 보고가 되지 않았다. 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)의 보고에 의하면, 실내에서의 외부피폭 방사선량은 실외에서의 피폭선량에 비해 세계적으로 평균값이 1.4 배로 나타났다. 따라서 이를 고려하면, 국내의 경우 실내에서의 선량률은 대략 110 nGy h⁻¹로 예상할 수 있으며, 이는 본 연구의 연구 결과와 비슷한 수준이다.

한국원자력안전기술원에서는 전국 주거건물의 표본에 대해 열형광선량계를 이용하여 실내선량률을 측정하였는데, 평균선량이 214 nGy h⁻¹로 본 연구의 결과보다 다소 높게 나타났다 [24]. 이에 대한 이유로 예상되는 것들은 다음과 같다. 본 연구에서는 콘크리트 벽체에서 방출되는 감마선만을 고려하여 선량평가를 실시한 반면, 기존 연구에서는 방사선량을 실측하였다. 따라서 실측된 값은 본 연구에서 고려한 콘크리트 벽체의 방사선원 이외에도 실외의 지각방사선에 의한 영향, 건축 마감재로 사용되는 목재, 석재 등에 의한 영향, 공기 중에 존재하는 라돈 및 딸핵종에 의한 영향, 감마선 이외의 타 방사선에 의한 영향 등을 모두 포함하므로 본 연구의 결과보다 실내선량률이 높을 수 있다. 국내의 콘크리트 내 천연방사성핵종의 농도에 대한 정보는 극히 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 Lee 등의 연구에서 제시한 값을 사용하였는데, 연구의 규모가 작기 때문에 상기 연구에서 주어진 건축자재내의 방사성핵종의 농도가 상대적으로 낮아, 평가된 선량값이 낮을 수 있다 [22]. 따라서 건축자재내 방사성핵종에

대한 전국적인 규모의 연구가 향후 더 수행되어야 할 것으로 판단된다.

한국인의 실내에서의 외부피폭 방사선량을 평가하기 위해, 국내에서 사용되는 콘크리트 내의 천연방사성 핵종의 농도 및 한국인의 실내에서의 소요시간 통계정보를 이용하여 연간 유효선량을 평가하였다 (그림 7). 선량평가는 모든 벽이 콘크리트 벽체로 이루어졌다고 가정하고 실시하였다 (그림 2-a 참조). 국내의 경우 콘크리트 벽체에 의한 유효선량은 연간 0.59 mSv이었다. 이중 우라늄계열, 토륨계열, ⁴⁰K 핵종에 의한 연간 유효선량은 각각 0.12 (20%), 0.21 (35%), 0.27 (45%) mSv이었다. ⁴⁰K의 경우 단위 방사능 농도당 선량률은 낮은 반면, 상대적으로 높은 콘크리트 내 방사능 농도 때문에, 전체 유효선량에 가장 크게 기여하였다. 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)에서는 각 나라별 실내공간에서의 피폭선량에 대한 자료를 수집 보고하였다[1,2]. 실내공간의 점유율을 80%로 가정하였을 때, 연간 유효선량은 0.48 mSv로 예측되었다. 실내공간에서의 피폭선량은 각 나라마다 다르게 보고되었는데, 70%의 실내 점유율을 가정하였을 때는 연간 유효선량은 0.3-0.6 mSv의 분포를 보였으며, 그 평균값은 0.41 mSv이었다. 국내의 경우, 70%의 실내 점유율을 가정하면 연간 유효선량은 0.42 mSv로써 유엔방사선영향과학위원회에서 제시한 세계 평균값과 비슷한 수준이다.

지금까지의 연구결과를 바탕으로 국내의 일반적인 실내공간에서의 콘크리트 벽체 내에 존재하는 천연방사성 물질에 의한 외부피폭 방사선량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E = OF \times 8760 h/y \times (0.57 C_U + 0.69 C_{Th} + 0.058 C_K) \quad (식 2)$$

여기서 E는 연간유효선량, OF는 실내 점유율(indoor occupancy fraction), C_U , C_{Th} , C_K 는 콘크리트 벽체 내에 포함된 우라늄계열, 토륨계열, ⁴⁰K 핵종의 방사능 농도

(Bq kg⁻¹)를 나타낸다. 상수 0.57, 0.69, 0.058은 각 계열 핵종의 방사능농도당 유효선량률(nSv h⁻¹ per Bq kg⁻¹)이다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 벽체에 존재하는 천연방사성 핵종에 의한 한국인의 실내에서의 외부피폭 방사선량을 평가하였다.

콘크리트 벽체로만 이루어진 3×4×2.8 m³ 크기의 표준 방의 경우, 콘크리트 내 우라늄계열, 토륨계열, ⁴⁰K 핵종의 농도에 따라 공기 중 흡수선량률은 0.80, 0.97, 0.08 nGy h⁻¹ per Bq kg⁻¹이었으며, 유효선량률은 0.57, 0.69, 0.058 nSv h⁻¹ per Bq kg⁻¹이었다. 본 연구에서 제시한 콘크리트 벽체의 방사능 농도 값이 가용할 경우, 혹은 건축이 시작되기 전에 건축자재의 방사능 측정을 통해 실내에서의 외부피폭 방사선량을 평가할 수 있게 해준다.

실제 국내에서 주로 사용되는 콘크리트 내의 천연방사성 핵종의 농도 및 한국인의 생활양식 등을 토대로 한국인의 실내공간에서의 외부피폭 방사선량률 및 연간 유효선량을 평가하였다. 공기 중 흡수선량률은 104 nGy h⁻¹이었으며, 연간 유효선량은 0.59 mSv로 평가되었다. 이는 유엔방사선영향과학위원회에서 제시한 세계 평균값과 비슷한 수준이다.

국내의 일반적인 실내공간에서의 콘크리트 벽체 내에 존재하는 천연방사성물질에 의한 연간 유효선량은 실내 점유율×8760 h y⁻¹×(0.57C_U+0.69C_{Th}+0.058C_K)을 이용하여 계산할 수 있다. 여기서 C_U, C_{Th}, C_K는 콘크리트 내에 포함된 우라늄계열, 토륨계열, ⁴⁰K 핵종의 방사능 농도 (Bq kg⁻¹)를 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 방사선기술개발사업 “천연방사성핵종 함유물질 이용에 따른 피폭 최적화 기술 개발 (2011-0032188)” 수행의 일환으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation, Vol. I Sources, 2000.
2. United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume I, 2010.
3. Risica S, Bolzan C, Nuccetelli C. Radioactivity in building materials: room model analysis and experimental methods, Sci. Total Environ, 2001; 272:119-26.
4. Allam KA. New model for dwelling dose calculation using monte carlo integration, Radiat.

- Prot. Dosim, 2009;133:153-157.
5. Maduar MF, Hiromoto G. Evaluation of indoor gamma radiation dose in dwellings, Radiat. Prot. Dosim, 2004;111:221-228.
6. Al-Jundi J, Ulanovsky A, Prohl G. Doses of external exposure in Jordan house due to gamma-emitting natural radionuclides in building materials, J. Environ. Radioact. 2009;100:841-846.
7. Koblinger, L. Calculation of exposure rates from gamma sources in walls of dwelling rooms, Health Physics, 1978;34:459-463.
8. Moharram BM, Suliman MN, Zahran NF, Shennawy SE, El Sayed AR. External exposure doses due to gamma emitting natural radionuclides in some Egyptian building materials, Appl. Radiat. Isot. 2012;70:241-248.
9. European Commission. Radiation protection principles concerning the natural radioactivity of building materials, Radiation Protection 112, 1999.
10. Radiation and Nuclear Safety Authority. Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity, STUK-B-STO 32, 1995.
11. Mustonen, R. Methods for evaluation of radiation from building materials, Rad. Prot. Dosim, 1984;7: 235-238.
12. 통계청. 국가통계포털 - 행정구역별 주택현황, 2012.
13. 환경부. 한국형 노출지수 개발 및 운영체계 구축. GOVP1200812666. (2007).
14. Lee JH, Lee C. Analytical study for the plan of unit household in national housing scale - Oriented on the cases of Korean housing corporation since 2005: Focused on analysing area, Journal of the Korean Institute of Interior Design, 2010;19: 180-189.
15. Hubbell JH, Seltzer SM. Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substance, National Institute of Standards and Technology, 2004.
16. Al-Sulaiti H, Nasir T, Al Mugren KS, Alkhomashi N, Al-Dahan N, Al-Dosari M, Bradley DA, Bukhari S, Matthews M, Regan PH. Determination of the natural radioactivity levels in north west of Dukhan, Qatar using high-resolution gamma-ray spectrometry, Appl. Radiat. Isot. 2011;70:1344-1350.
17. 한국토지주택공사. 주택분야 건설설계 지침, 2010.
18. International Commission on Radiological Protection. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Oxford; Pergamon Press, 2007.

19. International Commission on Radiological Protection. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Oxford; Pergamon Press, 2009.
20. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. ICRP Publication 116. Oxford; Pergamon Press, 2010.
21. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Oxford; Pergamon Press, 1997.
22. Lee SC, Kim CK, Lee DM, Kang HD. Natural radionuclides contents and radon exhalation rates in building materials used in South Korea. Radiat. Prot. Dosim. 2001;94:269-274.
23. Trevisi R, Risica S, D'Alessandro M, Paradiso D, Nuccetelli C. Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance. J. Env. Radioact. 2012;105:11-20.
24. 한국원자력안전기술원. 우리나라의 방사선 환경. KINS/GR-256. 2009.

External Exposure Due to Natural Radionuclides in Building Materials in Korean Dwellings

Yoon Hae Cho^{*}, Chang Jong Kim^{*}, Ju Yong Yun^{*†}, Dae-Hyung Cho[†], and Kwang Pyo Kim[†]

^{*}University of Science and Technology, [†]Korea Institute of Nuclear Safety, [‡]Department of Nuclear Engineering Kyung Hee University

Abstract - Naturally occurring radioactive materials (NORM) in building materials are main sources of external radiation exposure to the general public. The objective of this study was to assess external radiation dose in Korean dwellings due to NORM in concrete walls. Reference room model for dose assessment was made by analyzing room structure and housing scale of Korean dwellings. In addition, dose assessments were made for varying room sizes. Absorbed doses to air and effective dose rates were calculated using radiation transport code MCNPX. Assuming a reference room of 3×4×2.8 m³, absorbed dose rates in air were 0.80, 0.97, 0.08 nGy h⁻¹ per Bq kg⁻¹ for uranium series, thorium series, and ⁴⁰K, respectively. Effective dose rates were 0.57, 0.69, 0.058 nSv h⁻¹ per Bq kg⁻¹, respectively. Radiation dose resulting from concrete of ceiling and floor increased with room area while radiation dose from concrete of walls decreased with room area. Therefore, total radiation doses were almost the same for the varying room area from 5 to 30 m². Effective dose in Korean dwellings was calculated based on measurement data of NORM concentration in concrete and occupancy fraction of Korean population by location. Annual effective dose was 0.59 mSv assuming that indoor occupancy fraction was 0.89 and concentrations of uranium series, thorium series and ⁴⁰K were 26, 39, 596 Bq kg⁻¹, respectively. Finally, annual effective dose in Korean dwellings can be calculated by the following equation: Effective dose=indoor occupancy fraction×8760 h y⁻¹×(0.57C_U+0.69C_{Th}+0.058C_K).

Keywords : Building material, Naturally Occurring Radioactive Material, NORM, External exposure