

생활 속 자연방사성 물질, 라돈의 이해

L I F E R A D I A T I O N

01

생활방사능의 개념 및 종류

1. 라돈의 정의

1) 라돈의 발견 및 어원

라돈(Rn)은 우라늄, 토륨, 라듐, 폴로늄 다음으로 발견된 다섯 번째 방사성 원소로 1900년 도른(Friedrich Ernest Dorn)에 의해 발견되었다. 라돈(Rn)의 발견 역사는 먼저 퀴리 부부(Pierre and Marie Curie)가 1899년에 라듐에서 방사성기체가 방출되며 이 기체의 방사능이 시간이 지날수록 줄어드는 것을 발견하였다. 라돈(Radon)은 '라듐에서 태어난 기체'라는 뜻인데, '라듐(Radium)'에 비활성 기체를 나타내는 'on'이 합쳐져서 만들어진 말이다(환경부, 2016).

2) 라돈의 물리·화학적 성질

라돈은 무색·무취·무미인 불활성 기체로 표준상태(0°C, 1기압)에서 공기밀도(1.217 g/L)보다 9.73 g/L로 약 8배 크며, 자연에 존재하는 기체 중에서 가장 무겁다. 그러나 라돈이 공기보다 무겁기 때문에 라돈은 바닥에 깔린다는 생각하는 경우가 많다. 하지만 인간이 활동하는 동안 실내 공기는 항상 움직이기 때문에 기체인 라돈도 항상 실내 공간에 골고루 분포하고 있다. 라돈은 다른 물질과 화학적으로 반응을 하지 않으나 방사선을 내는 성질을 가지고 있기 때문에 물리적으로 매우 불안정하다(조승연, 2016).

라돈이 기체 상태인 것과는 달리 라돈 자손은 입자 형태로 되어 있으며, 물리·화학적으로 반응성이 높다. 이러한 성질 때문에 미세한 먼지에 잘 달라붙는데, 우리가 숨을 쉴 때 몸속으로 들어와 폐포나 기관지에 잘 달라붙어 손상을 줄 수 있다(환경부, 2016).

라돈은 표준상태(0°C, 1기압)에서 수용성이지만, 온도가 올라가면 용해도가 내려가면서 휘발하게 된다. 라돈은 활성탄, 실리카겔류 물질에 쉽게 흡착 또는 흡수되면, 이 특성에 의해 다른 가스들로부터 쉽게 분리할 수 있다(조승연, 2016).

3) 라돈 농도의 단위

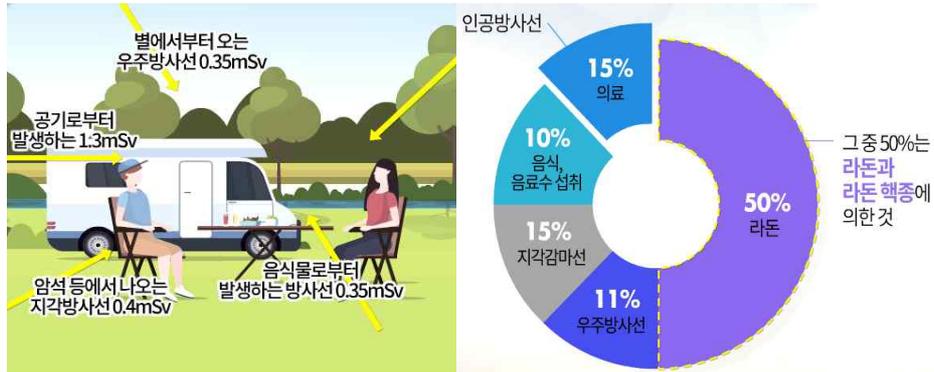
라돈 농도는 베크렐(Becquerel, Bq)이나 피코큐리(pCi)로 표기한다. '베크렐'은 우라늄에서 나온 광선(베크렐선)을 발견한 앙투안 앙리 베크렐(1852~1908)의 이름을 따온 것이다. 그리고 '큐리'는 라듐을 발견하고 베크렐선이 어떤 물질에서 에너지를 내는 방사선임을 밝혀낸 퀴리부부(피에르 퀴리(1859~1906), 마리 퀴리(1867~1934))의 이름에서 따온 것이다.

베크렐은 방사성물질 국제표준 단위이며, 1초에 방사선 1개가 핵에서 한번 방출되는 것, 즉 1초 동안 하나의 방사성 붕괴가 일어나는 양을 나타낸다. 공기 중 라돈의 농도는 Bq/m³이나 pCi/L로 표시하며, 1 pCi/L는 37 Bq/m³에 해당하는 농도를 의미한다(환경부, 2016).

$$1 \text{ pCi/L} = 37 \text{ Bq/m}^3$$

4) 대표적인 자연방사성 물질

라돈은 자연적으로 생기는 자연방사성 물질 중 대표적인 물질로 알려져 있다. 자연방사선 관련해서 사람이 연간 노출되는 방사선의 85%는 자연 방사선에 의한 것이고, 그 중 50%는 라돈과 라돈 자손핵종에 의한 것으로 알려져 있다. 자연방사선은 암석 등에서 나오는 지각 방사선, 별에서부터 오는 우주방사선, 공기나 음식 등에서 발생하는 방사선 등이 있다. 반면에 항암치료나 X-ray 촬영시 나오는 방사선은 인공방사선에 해당된다(환경부, 2015).



※ 출처: 고용노동부·안전보건공단(2015), 라돈으로부터 근로자 건강보호를 위한 가이드, p.2.

<그림 1> 연간 노출되는 방사선의 종류.

2. 라돈의 생성과정 및 발생원

1) 라돈의 생성과정

라돈은 암석이나 토양 중의 우라늄(^{238}U)과 토륨(^{232}Th)이 방사성 붕괴를 하면서 자연적으로 라듐(^{226}Ra , ^{224}Ra)이 만들어지고, 라듐이 붕괴하여 라돈(^{220}Rn , ^{222}Rn)과 같은 방사성 물질을 만든다.

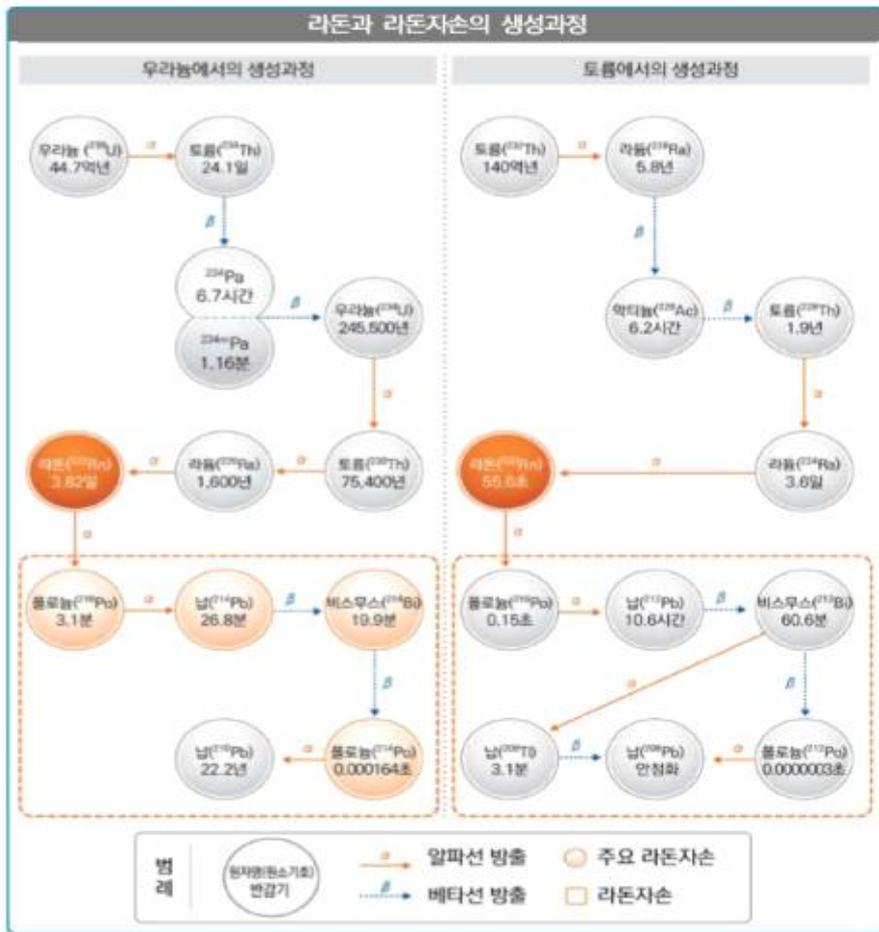
우라늄(^{238}U)의 붕괴로 생성된 라듐(^{226}Ra)의 붕괴산물인 라돈(^{222}Rn)은 반감기가 3.8일이다. 라돈(^{222}Rn)이 붕괴하면서 생성된 폴로늄(^{218}Po)으로부터 안정된 납(^{210}Pb)에 이르는 연쇄 붕괴 과정 중에서 생성되는 방사성 물질들을 라돈 자손 또는 라돈 자핵종(Radon progeny)이라고 부른다.

토륨(^{232}Th)의 붕괴로 생성된 라듐(^{224}Ra)의 붕괴산물인 라돈(^{220}Rn)은 토륨에서 유래되어 일반적으로 토론(thoron)이라고 한다. 토론(thoron)은 반감기가 55.6초로 매우 짧다. 우라늄(^{238}U)이 붕괴하면서 생기는 라돈(^{222}Rn)에 비해 지표나 대기 중으로 나오는 양이 매우 적다. 라돈(^{220}Rn)이 붕괴하면서 생성된 폴로늄(^{216}Po)으로부터 안정된 납(^{208}Pb)에 이르는 연쇄 붕괴 과정 중에서 라돈 자손 또는 라돈 자핵종이 생성된다(환경부, 2016).



※ 출처: 환경부(2016), 생활 속 자연 방사성 물질, 라돈의 이해, p.6.

<그림 2> 라돈의 생성과정.



※ 출처: 환경부(2016), 생활 속 자연 방사성 물질, 라돈의 이해, p.8.

* 반감기(Half-life): 방사성 물질의 방사능의 양이 절반으로 줄어드는 데까지 걸리는 시간

<그림 3> 라돈과 라돈 자손의 생성과정.

2) 라돈 발생원

① 토양 내 라돈

암석 중의 라돈은 화강암에 가장 높게 존재하며 다음으로는 변성암, 옥천계 변성암, 퇴적암, 화산암 순으로 존재한다(환경부, 표준 업무 매뉴얼, 2015). 라돈 농도는 지역에 따라 다르게 나타나는데, <그림 3>과 같이 대체로 표층 토양에 라돈이 많이 포함된 지역과 화강암 분포지역에서 높게 나타난다.

라돈은 모든 암반 및 토양에 존재하므로 땅 속에서 라돈은 토양 입자 표면으로부터 토양 공극, 혹은 공기나 물의 빈 공간으로 라돈을 배출한다. 토양에서 기원하는 라돈가스의 실내 유입은 강우, 적설, 토양의 동결, 실내외 온도차, 부엽토, 기압상승 등과 관계가 있으며, 특히 토양 중 수분 함유량과는 음(-)의 상관관계가 있는 것으로 보고되고 있다(환경부, 2016).

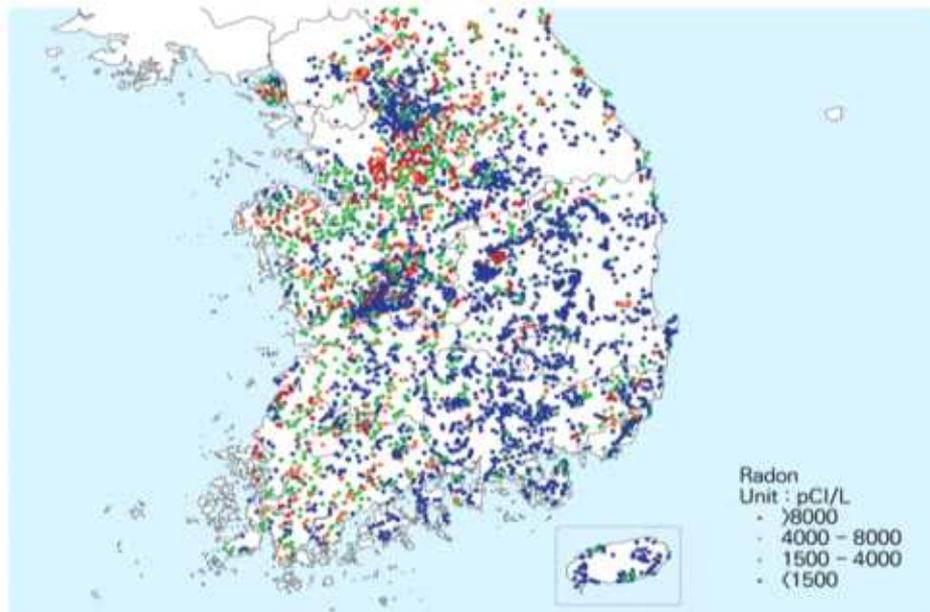


※ 출처: 한국원자력안전기술원(2012), 생활환경 중의 방사선영향평가

<그림 4> 우리나라의 암석 및 라돈 분포 현황.

② 지하수 내 라돈

우라늄이나 라듐이 포함된 암석 주변으로 지하수가 흐르면 암석 또는 토양에서 생긴 라돈이 지하수로 녹아들어갈 수 있다. 토양에 우라늄이 많이 있을수록 지하수에서의 라돈농도가 높은 경우가 많다(환경부, 2016).



※ 국립환경과학원(2015), 지하수 중 자연방사성물질 함유실태조사 연구
<그림 5> 우리나라의 지하수의 라돈 농도 분포 현황.

③ 건축자재 내 라돈

토양과 직접 닿아있지 않은 고층 건물에서도 간혹 라돈이 검출되는데, 이 경우의 라돈은 주로 건축자재에서 나오는 것으로 보고 있다.

건축자재 중에서도 주로 석고보드에서 라돈이 방출될 수 있는데, 석고보드 중에서도 인산부산석고를 이용하여 만든 석고보드에서 방출된다. 인산부산석고는 비료를 만들때 인공석에서 인산을 뽑아내고 남는 물질로, 라듐과 우라늄의 함량이 높아 라돈이 많이 방출될 수 있다.

또한, 고농도 라듐이 포함된 모래 또는 자갈로 만든 벽돌이나 모래, 콘크리트 등의 건축자재에서도 라돈이 방출되어 실내 공기 중으로 들어올 수 있다(환경부, 2016).

<표 1> 우리나라 건축자재의 라돈 함량

시료명	시료수	²²⁶ Ra(Bq/kg)
일반벽돌	16	12.7~53.7(30.0±12)
적벽돌	9	21.2~46.4(36.4±8.3)
타일	7	44.1~82.3(58.1±17)
석고보드	3	209~330(271±60)
콘크리트	3	25.9~27.4(26.4±0.9)
시멘트	2	33.3~35.7(34.5±1.7)
목재	3	5.17~8.47(6.47±1.8)
화강석	3	20.7~85.6(53.1±32)
모래	1	28.9±1.5
속빈 블럭	1	14.7±1.0
황토 흙	1	39.7±2.1
황토흙벽돌	1	33.3±1.1

※ 출처: 한국원자력안전기술원(2001), 국민 방사선 위험도 평가 및 전국 실내 라돈 방사능 조사

④ 생활밀착형 제품 내 라돈

2018년 침대 매트리스에서 라돈이 검출되어 사회적으로 이슈가 된 바 있다. 라돈 발생 원인을 확인한 결과 매트리스 속 커버 원단 내에 음이온파우더가 도포되어 있었으며, 그 원료는 천연방사성핵종인 토륨이 높게 함유된 모나자이트(Monazite)인 것으로 확인되었다. 모나자이트는 희토류 원소를 포함하는 적갈색의 인산염 광물로서 화강암, 페크마타이트, 편암, 편마암과 같은 화성암과 편마암의 부성분 광물로 산출되는 것으로 알려져 있다. 대부분의 모나자이트 광상은 사광상(모래)으로 존재하며 비중이 높은 광물이다. 주로 하천 퇴적물과 해변모래 등에 존재한다(조승연, 2016).

모나자이트의 수입상 국가는 주로 중국, 브라질, 인도, 베트남, 말레이시아, 태국 등으로 수입 시 형태는 모나자이트 원광, 정광 혹은 분말로 일차 가공된 상태이다. 분말 등의 형태로 일차 가공된 후 최종제품을 생산하는 제조회사로 공급되어 다양한 품목의 소비자제품으로 생산된다. 일부 원료 수입업체에서는 직접 모나자이트를 이용한 제품을 생산하는 경우도 있다. 모나자이트 이용 제품 유형은 지압, 매트용, 팔찌 등 건강제품, 사우나 등 재료, 마감재 도료, 섬유제품 코팅, 도자기의 표면 처리 등이다(김혜정, 2018).

이처럼 생활밀착형 제품 내 라돈의 경우 침대 매트리스, 마스크 등 호흡 밀착형 제품에 의도적으로 넣은 모나자이트에 다량 함유된 토륨에서 방출된 토륨은 체내로 들어오는 양을 무시할 수 없으며, 우리 인체에 심각한 영향을 초래할 수 있다(조승연, 2016).

<표 2> 원광, 산업부산물/폐기물, 생산물내의 방사능 농도

(단위: Bq/g)

광석 및 미네랄사광	U-238 계열	Th-232 계열
인산염 광석	0.2-1.5	0.02
인공비료	0.3-3.0	0.008-0.04
모나자이트(Monazite)	6-40	8-300
루틸(Rutile)	3.8	0.56
주석광석(Cassiterite)	1	0.3
파이로클로르(Pyrochlore)	6-10	7-80
티타늄광석	0.07-9	0.07-9
일메나이트(Ilmenite)	2.3	1.2
지르코늄사광	0.2-74	0.4-40
보크사이트(Bauxite)	0.4-0.6	0.3-0.4
이회토(Marl)	0.022	0.003
편암(Schist)	0.04	0.056
포트랜드 시멘트	0.08	0.05
석탄	0.01-0.025	0.01-0.025

※ 출처: 유엔방사선영향에관한과학위원회(UNSCEAR) (2000)

3. 라돈의 실내 유입 경로 및 특성

1) 라돈의 실내 유입 경로

실내로 유입되는 대부분의 라돈은 건물 지반의 토양 또는 암석으로부터 기인한다. 토양층을 통과하여 올라온 라돈 또는 기타 오염 가스는 건물 하부에 계속적으로 축적되게 된다. 보통 실내의 기압은 토양 내의 압력보다 낮는데, 그로인해 건물 하부의 압력은 건물의 바닥 또는 벽 등을 통해 라돈과 같은 유해 가스를 실내로 유입시킨다(환경부, 2010).



※ 출처: 고용노동부·안전보건공단(2015), 라돈으로부터 근로자 건강보호를 위한 가이드, p.4.

<그림 6> 라돈의 실내 유입 경로.

특히 대부분의 라돈 가스는 갈라진 벽 틈 사이 또는 기타 실내와 실외의 연결 통로 등을 통해 유입된다. 이렇게 한번 유입된 라돈은 쉽게 빠져나가지 못하고 실내에 계속 축적되게 된다.

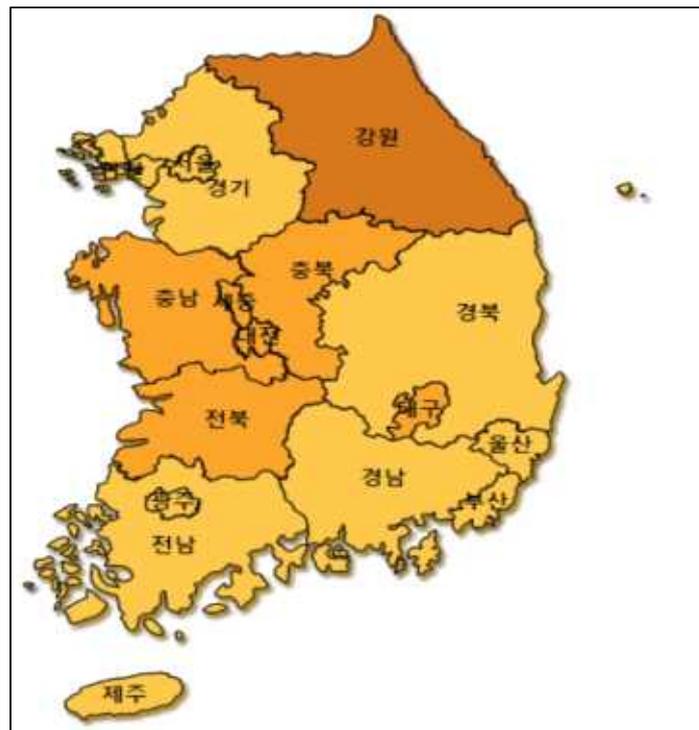
생활환경 중 주택 내에 존재하는 라돈의 80~90%는 토양이나 지반의 암석에서 발생된 라돈 기체가 벽과 바닥의 갈라진 틈을 통해 주로 유입된다. 따라서, 우라늄이 기반암에 많이 포함되어 있는 경우 실내 라돈의 농도는 더욱 증가하게 된다. 이외에도 천장, 벽, 또는 바닥의 건축자재에 들어있는 라듐 등으로부터 발생(2~5%)되거나, 지하수에 녹아있는 라돈(1%)이 유입된다. 이러한 이유로 환기가 잘 안된 밀폐된 구조에서 실내 라돈의 농도가 높아지게 된다.

생활환경의 라돈 노출경로 중 약 95%가 실내 공기를 호흡할 때 노출되며, 이 밖에 샤워를 할 때나 물을 마실 때도 지하수에 녹아있는 라돈에 노출될 수 있다(환경부, 2016). 실내로 유입된 지하수의 경우 통상적으로 지하수 농도의 약 1/10,000 정도가 라돈 가스로 유입이 된다고 보고되고 있다(환경부, 2010).

2) 라돈의 유입 특성

① 지역별 암석 분포에 따른 라돈 유입 특성

라돈은 주로 화강암이 넓게 분포된 지역에서 높게 나타난다. 화강암에는 우라늄과 라듐이 많이 들어 있는 것으로 알려져 있다. 우리나라 지역별로는 화강암·편마암 지질대 또는 옥천 단층 지대가 분포되어 있는 강원도, 전라북도, 충청북도에서 라돈농도가 높게 나타나고 있다.



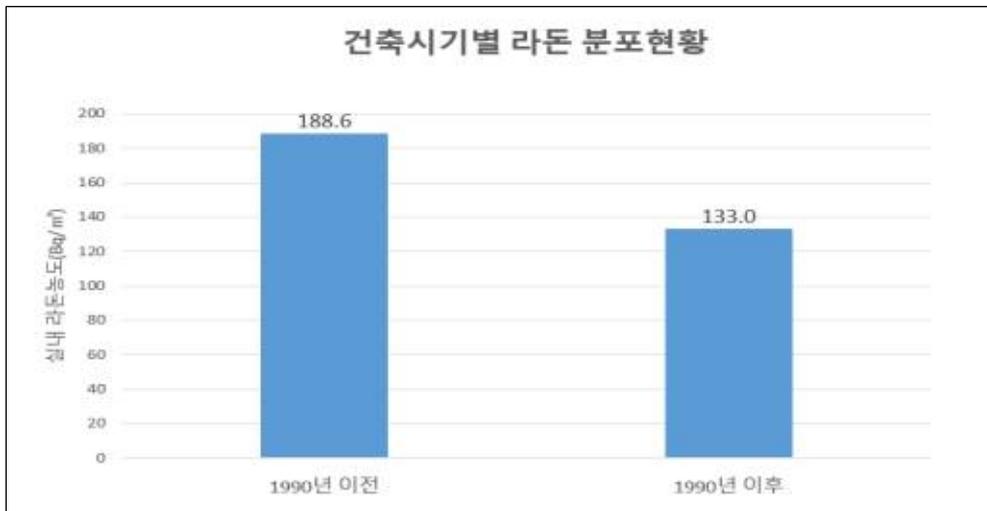
※ 출처: 환경부 생활환경정보센터 라돈 지도

<그림 7> 2016년 국내 겨울철 주택 평균 라돈농도.

② 건물 유형에 따른 라돈 유입 특성

일반적으로 실내 라돈농도는 지하실과 같이 토양에 가장 가까운 지역에서 가장 높게 나타나고, 건물의 2층처럼 토양에서 가장 먼 곳에서 가장 낮게 나타난다. 같은 지층 또는 같은 건물일지라도 건물 구조나 건축 양식, 환기량 등에 따라 라돈 농도가 차이가 날 수 있다.

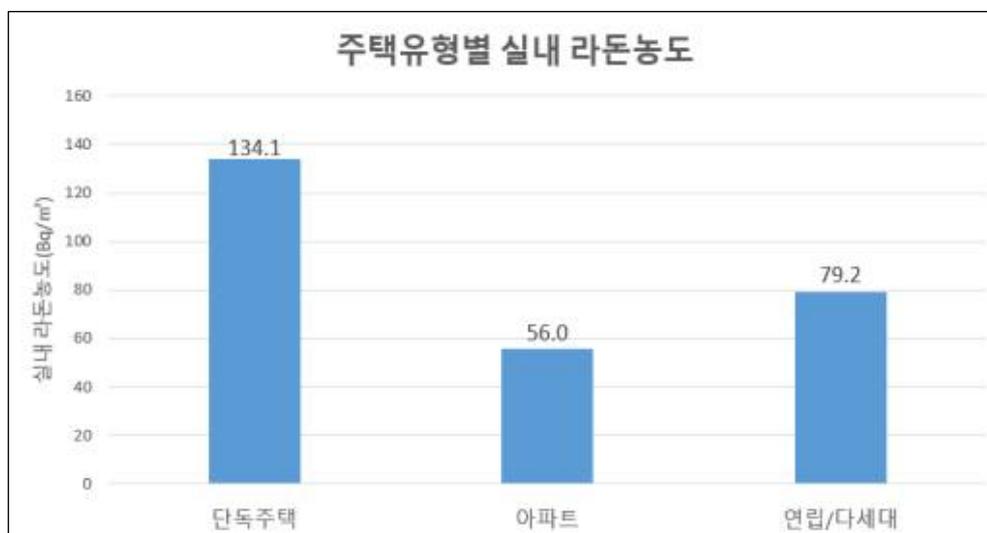
라돈농도는 토양과 인접한 단독주택이나 바닥과 벽 등에 균열이 많은 오래된 건축물, 밀폐도가 높고 환기시설이 부족해 유입된 라돈이 잘 빠져나갈 수 없는 실내에서 농도가 높다.



※ 출처: 전국 주택라돈조사(2013-2014년), 국립환경과학원

<그림 8> 건축시기별 라돈 분포현황.

반면 고층 아파트나 빌딩은 토양 라돈의 실내 유입 가능성이 낮아 상대적으로 농도가 낮다고 볼 수 있다.

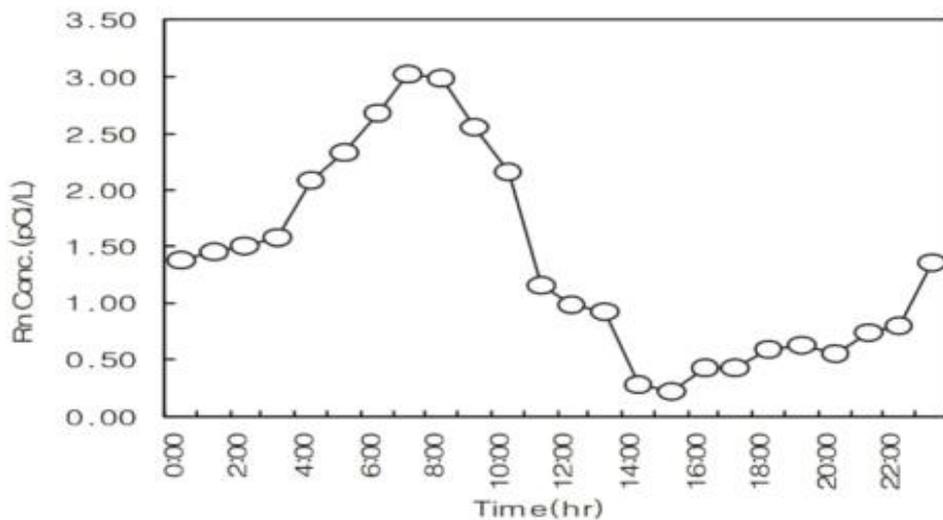


※ 출처: 전국 주택라돈조사(2013-2014년), 국립환경과학원

<그림 9> 주택유형별 실내 라돈농도.

③ 일변화에 따른 라돈 유입 특성

이지영 등(2007)은 2007년 4월부터 2007년 9월까지 6개월간 주거 공간의 형태에 따라 실내 라돈농도의 일변화를 측정하기 위해 시간당 라돈농도를 측정한 결과 단독주택의 실내 라돈농도의 경우 대체적으로 아침 8시 이전의 오전시간에 높았으며, 가정의 생활습관에 따라 불규칙한 일변화 양상을 보일 수 있지만 주로 새벽과 밤 시간대에 점차 라돈 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

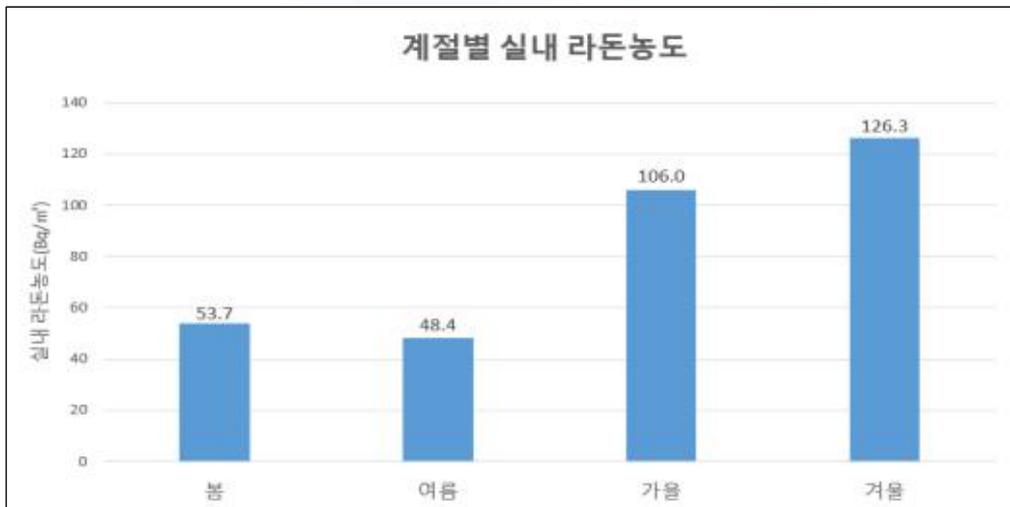


※ 출처: 이지영 외. 2007. 서울특별시 보건환경연구원보, Vol. 43, 355-360
<그림 10> 단독주택에서의 실내 라돈농도의 일변화.

④ 계절에 따른 라돈 유입 특성

겨울에는 건물 아래 토양의 온도는 낮아지고, 건물 안은 난방으로 바닥 온도가 높아진다. 그래서 토양과 실내 바닥의 온도 차이가 커지고, 이로 인해 압력 차이도 커진다. 이로 인해 토양에 있던 공기가 실내로 들어오는 양이 다른 계절보다 많아지고, 라돈도 더 많이 실내로 들어오게 된다.

또한, 겨울철에는 환기를 자주 안 하는 것도 실내에 있던 라돈이 바깥으로 빠져나가는 것을 어렵게 만든다. 즉, 겨울에는 다른 계절에 비해 실내로 들어오는 라돈의 양이 많지만 바깥으로 빠져 나가는 양은 줄어들기 때문에 실내 라돈농도가 높아진다(환경부, 2016).



※ 출처: 전국 주택라돈조사(2010-2011년), 국립환경과학원

<그림 11> 계절별 실내 라돈농도.

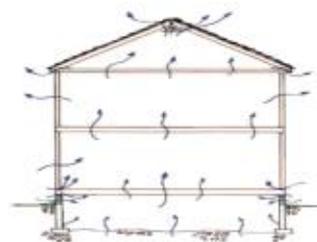
⑤ 기후조건에 따른 라돈 유입 특성

라돈은 고기압 지역에서 저기압 지역으로 기압에 의해 움직이는 공기 흐름에 따라 이동하기도 하는데, 이것이 라돈의 주된 이동 메커니즘이라 할 수 있다. 주택은 대부분 주변의 토양보다 낮은 기압을 지닌 지하실이나 지반과 맞닿은 빈 공간인 크롤 스페이스(Crawl space)에 비해 보통 기압이 더 낮거나 부압을 지닌다. 따라서 라돈은 보통 공기압의 차이를 통해 토양으로부터 하부구조를 통하여 실내로 이동한다.

바람이 강한 경우 지표면에서 대기 중으로 발산되는 라돈의 양이 많아지므로 주택 내 유입량이 적어지며, 강수량 또는 강설량이 많거나 주택 인근 부지가 아스콘이나 콘크리트 등의 기체 발산이 어려운 재질로 포장되어 있는 경우 마개 효과(Capping effect)로 대기 중으로 발산되는 라돈의 양이 적어지므로 상대적으로 주택 내 유입량은 증가한다(한국환경공단, 2016). 반면 바람이 강한 경우에는 건물 실내 대기압이 소폭 상승하여 라돈 유입량이 감소하는 경향도 있다(AI-Ahmady & Kaiss K, 1996).

⑥ 실내·외 기온 차이에 의한 라돈 유입 특성

실내 부압의 주된 원인은 우선 실내·외의 기온차이다. 아래 그림처럼 이러한 기온차이는 라돈이 건물의 낮은 곳에서 높은 곳으로 빠져나가는 상승 온난기류의 연돌효과를 발생시킨다. 대부분의 주택에서 연돌효과는 실내 부압의 가장 큰 원인이며, 그 다음으로는 기계 장치와 바람이 있다(한국환경공단, 2016).

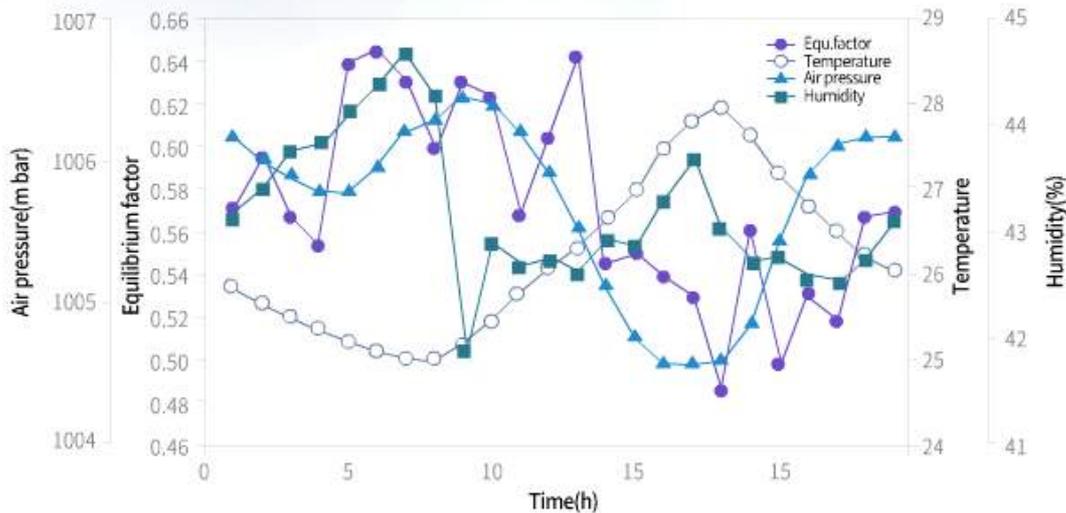


※ 출처: 한국환경공단, 실내 라돈 관리, p.29, 2016

<그림 12> 연돌효과

⑦ 실내 온도와 습도에 의한 라돈 유입 특성

이승찬 등(2001)은 2000년 8월부터 9월까지 한국원자력안전기술원에서 약 35일간 연속적으로 실내 라돈농도와 라돈 자핵종을 측정하고, 라돈평형인자는 습도와 기압에 비례하고 있는 반면 온도는 반비례하는 나타냈다. 라돈평형인자(Equilibrium factor)는 라돈과 라돈 자핵종간의 비율을 의미한다.



※ 출처: 이승찬, 김창규, 이동명, 강희동(2001) "가옥 및 실험실내 라돈평형인자, 비 흡착 라돈자손 비율의 일일 변동 특성" J. Korea. Asso. Radiat. Prot., Vol. 26, No. 4, 399-408.

<그림 13> 라돈평형인자의 습도, 온도 및 기압에 따른 일일변동 특성

● 참고 문헌

- 김혜정(2018) 생활 속 방사능 문제점과 대책(라돈 침대 사건의 원인과 해결방안) p.27.
- 경기연구원(2017) 라돈 생활유해물질 얼마나 심각한가? p.1-3.
- 이승찬, 김창규, 이동명, 강희동(2001) "가옥 및 실험실내 라돈평형인자, 비 흡착 라돈자손 비율의 일일 변동 특성" J. Korea. Asso. Radiat. Prot., Vol. 26, No. 4, 399-408.
- 조승연(2016) 라돈, 불편한 진실, p.117.
- 한국환경공단(2016) 실내 라돈 관리 p.19-44.
- 환경부(2010) 라돈 고노출 경로 관리체계 구축, p.1-2.
- 환경부(2016) 생활 속 자연 방사성 물질, 라돈의 이해, p. 6-19.
- 환경부. 라돈 저감 관리 매뉴얼[주택소유자용]
- 환경부·한국환경공단(2015) 표준 업무 매뉴얼[v.2]
- 환경부·한국환경산업기술원. 생활환경 속 국내 라돈 분포 현황(코네틱 리포트)
- Al-Ahmady, Kaiss K. (1996). Characterization of wind-induced pressure differentials as driving forces affect indoor radon entry and removal. In International Radon Symposium IIP, 3.3-3.4.