

국내 라돈의 분포, 처리현황 및 라돈 정책방향

○ 조승연 | 연세대학교 환경공학부
 교수 / 자연방사능 환경보건센터장
 E-mail : sy.cho@yonsei.ac.kr

1. 서론

라돈은 천연적으로 존재하고 있는 방사성 기체를 말한다. 우리가 살고 있는 지구상에는 태초부터 천연방사성 물질이 존재하고 있다. 그 중의 하나가 라돈이며, 라돈은 토양이나 암반 내에 천연적으로 존재하는, 반감기가 45억년이나 되는 우라늄으로부터 자연적으로 발생되고, 또한 수명(반감기 : 3.8 일)을 다하여 소멸하는 과정을 반복하고 있다. 또한 라돈은 그 후손(라돈 자핵종 이라고 함)을 만들고, 이들 역시 방사선을 내는 성질을 가지고 있다. 라돈 기체와 그 붕괴 생성물인 짧은 반감기의 자핵종들은, 장기간 누적하여 호흡을 통해 노출될 경우 폐암의 위험이 있다는 사실이 과학적으로 밝혀졌다. 자연방사선은 인류 생활환경의 일부분으로서 인류의 자연방사선 노출선량의 약 반 정도가 천연방사성 라돈과 그 자핵종의 호흡 노출에 의한 것이며, 인류가 실제로 원자력발전 등 원자력산업활동에서 방출되는 인공방사선원에 의한 평균 노출선량 보다 10~100 여배 높은 것으로 알려지고 있다.

라돈은 색깔이나 맛이 없고 냄새가 나지 않는 불활성기체로서 천연에 존재하는 기체 중에서 가장 무겁다. 다른 물질과 화학적으로는 반응을 하지 않으나 방사선을 내는 성질을 가지고 있으므로 물리

적으로는 매우 불안정하다. 또한 먼지 등의 미립자에 잘 달라붙어 떠돌아다니게 되며, 우리가 호흡을 하면 호흡기를 통하여 폐에 들어가게 된다.

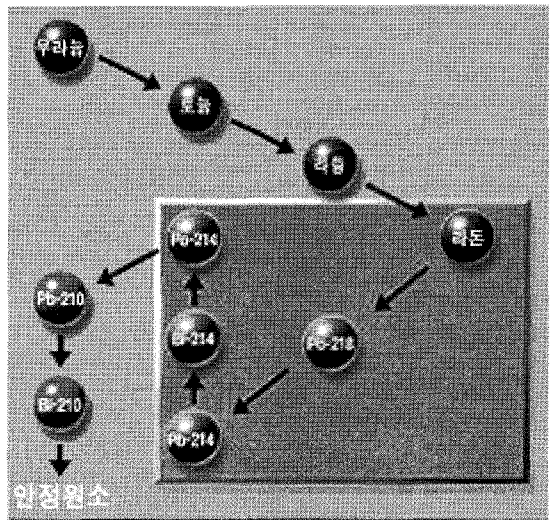


그림 1. 라돈 붕괴 도식

따라서 본 글에서는 국민의 인식도가 낮은 라돈에 대한 정보와 저감방법 등을 소개하고, 앞으로 나아가야 할 정책 방향 등을 제시하고자 한다.

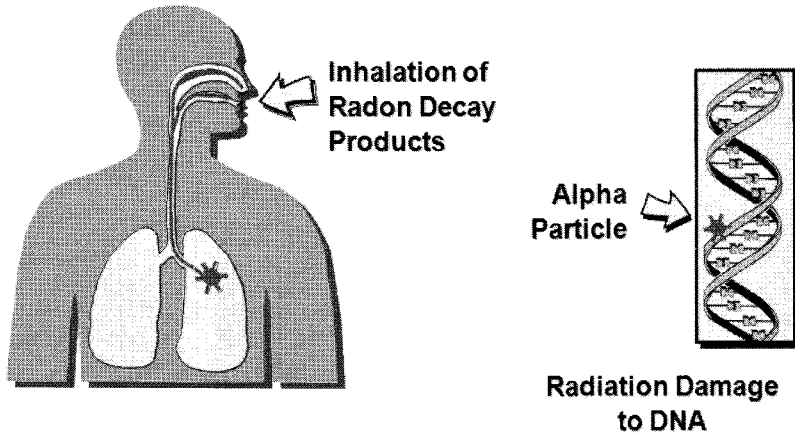


그림 2. 라돈의 인체영향

1.1 라돈의 인체영향

북유럽국가(스웨덴, 노르웨이 등)들과 같이 지질적으로 화강암과 화성암이 풍부한 나라의 광산에서

작업한 광부들이 상대적으로 폐암에 많이 걸린다는 것을 알게 되었다. 그래서 그 원인을 조사하는 가운데 라돈이 흡연과 마찬가지로 폐암의 한 가지 원인이 될 수 있다고 생각한 것이다. 즉, 우리가 호흡을

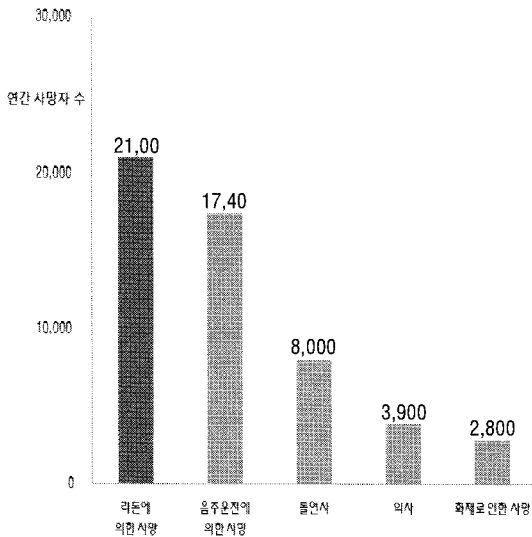


그림 3. 라돈 및 사고에 의한 연간 사망자 수

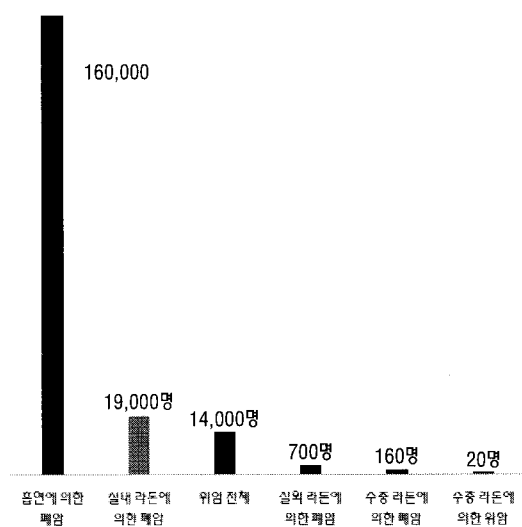


그림 4. 미국 내 폐암 및 위암에 의한 연간 사망자 수

[자료출처 : EPA Assessment of Risk from Radon in Homes [자료출처 : EPA Assessment of Risk from Radon in Homes (EPA 402-R-03-003)]

표 1. 흡연자의 경우 라돈에 의한 인체적 영향

라돈농도	폐암 발생률 (1,000명당)	기타 사고와의 위험도 비교	조치사항(금연 후)
20 pCi/L	260명	익사사고 위험의 250배	즉시 주택 수리
10 pCi/L	150명	화재사고의 200배	즉시 주택 수리
8 pCi/L	120명	돌연사의 30배	즉시 주택 수리
4 pCi/L	62명	자동차 사고의 5배	즉시 주택 수리
2 pCi/L	32명	독성물질에 의한 사고의 6배	주택 수리를 고려
1.3 pCi/L	20명	평균 실내 라돈 농도	현재 농도 유지
0.4 pCi/L	3명	평균 실외 라돈 농도	

[자료 출처 : EPA Assessment of Risk from Radon in Homes(EPA 402-R-03-003)]

표 2. 비흡연자의 경우 라돈에 의한 인체적 영향

라돈농도	폐암 발생률 (1,000명당)	기타 사고와의 위험도 비교	조치사항(금연 후)
20 pCi/L	36명	익사사고 위험의 35배	즉시 주택 수리
10 pCi/L	18명	화재사고의 20배	즉시 주택 수리
8 pCi/L	15명	돌연사의 4배	즉시 주택 수리
4 pCi/L	7명	자동차 사고의 1배	즉시 주택 수리
2 pCi/L	4명	독성물질에 의한 사고의 1배	주택 수리를 고려
1.3 pCi/L	2명	평균 실내 라돈 농도	현재 농도 유지
0.4 pCi/L	-	평균 실외 라돈 농도	

[자료 출처 : EPA Assessment of Risk from Radon in Homes(EPA 402-R-03-003)]

할 때, 라돈과 그 자핵종들이 호흡기 속으로 들어가서 대부분은 내쉬는 숨에 의해서 다시 나오지만, 일부는 기관지 및 폐에 달라붙은 후 붕괴를 하게 된다. 이 과정에서 알파선이란 방사선이 나오게 되는데 이것이 폐조직에 손상을 주기도 하는 것이다. 이와 같이 폐조직이 지속적으로 손상되면 폐암을 일으킬 수 있는 것이다.

라돈(Rn-222)은 3.82일 만에 단반감기의 자핵종으로 붕괴를 하며 이들은 화학적으로 활성적이며, Pb-210 까지 붕괴하는 동안 1.0 Bq 당 34,620 MeV의 잠재 알파에너지를 방출한다. 이들은 호흡 시 폐

에 누적 침적되어 폐기저 세포가 방사선 에너지 흡수에 의해 방사선에 노출이 된다. 따라서 라돈에 노출되었다는 말은 실제로 라돈 자핵종에 의한 노출을 의미하게 된다.

1.2 라돈의 유입경로

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

- A. 건물 하부의 갈라진 틈
- B. 벽돌과 벽돌 사이
- C. 벽돌내의 기공
- D. 바닥과 벽의 이음매
- E. 건물에 직접 노출된 토양
- F. 우수 배관로
- G. 모르타르 이음매
- H. 접합이 느슨한 파이프의 사이
- I. 출입문의 틈새
- J. 건축 자재
- K. 지하수의 이용

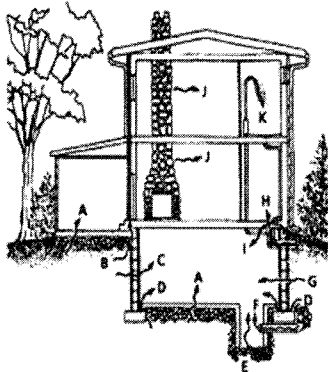


그림 5. 라돈의 실내유입 경로

토양 내의 압력보다 낮는데, 그로인해 건물 하부의 압력은 건물의 바닥 또는 벽 등을 통해 라돈과 같은 유해 가스를 실내로 유입시킨다.

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.

통상적으로 라돈가스가 실내로 유입되는 경로는 그림 5와 같다.

라돈은 또한 용해성이 강하여 특히 지하수에 많이 녹아있다. 실내로 유입된 지하수의 경우 통상적으로 지하수 농도의 약 1/10,000 정도가 라돈 가스로 유입이 된다고 보고되고 있다. 즉, 라돈 함유량이 높은 지하수가 주변에 존재 할 경우 실내라돈농도가 더욱 증가하는데 충분한 기여를 할 수 있다.

1.3 라돈의 측정방법

라돈 측정기는 그 작동에 있어서 외부 전원의 필요여부에 따라 외부 전원이 필요하면 능동형(active), 필요치 않으면 수동형(passive)으로 분류할 수 있다. 수동형 측정기에는 alpha track detectors (알파비적검출기), charcoal canisters (활성탄 캐니스터), electret ion chambers (충전막 전리함), TLD

(열형광선량계) 등이 있으며, 각각의 원리와 장단점은 다양한 자료를 통해 쉽게 찾아 볼 수 있다. 대부분, 라돈의 농도를 실시간으로 감시할 수 있는 능동형 측정기는 pulsed ionization chamber, scintillation cell 과 silicon detector 등을 주로 사용한다.

실제로 우리 체내로 유입되어 폐암을 유발하는 것은 218Po, 214Bi, 214Pb 등 고체 상태인 라돈의 자손이며 라돈의 자손은 주변의 먼지에 부착되거나 미부착된 클러스터 형태로 우리의 체내로 유입이 된다. 따라서 부착 또는 미부착 라돈의 자손을 측정하는 것은 라돈가스의 측정보다 어렵고 장비 또한 고가이다. 라돈 자손의 측정은 정확한 선량평가가 요구될 때 이용하며 실내에서 각 라돈자손의 거동을 연구할 경우 이용을 한다. 이를 위해 고효율필터에 포집된 라돈자손에서 방출되는 알파입자를 계수하며 주로 ZnS(Ag) 또는 알파 스펙트로미터를 이용한다.

알파선량을 기관지상피(bronchial epithelium)의 표적세포에 운반하는 것은 라돈의 자손 핵종이지만 그것들은 라돈으로부터 생겨났으므로 편의에 의해 라돈의 측정이 측정방법으로 선택되는 것이 일반적이다.

▶ Alpha Track Detector(알파비적 검출기)

플라스틱 필름(Polyallyl diglycol carbonate; CR-39), 셀룰로스필름(Ce-llulose nitrate; LR-115) 및 polycarbonate(PC: Makrofol, polycarbonate)와 같은 고체 물질 표면에 알파 입자에 의한 미세한 방사선 손상으로 생성되는 비적을 검출

○ 장점

- 경제적, 외부 전원 불필요, 사용 간편, 대규모 조사에 사용
- 우편 송달이 용이
- 측정 기간 동안 편향이 적어 90일에서 1년에 이르는 장기간 측정 가능
- 검출기가 베타나 감마선의 영향을 안 받음

○ 단점

- 라돈의 농도가 높지 않으면 단기간 측정이 어려움

- 낮은 라돈 농도에서 상대적으로 정밀도가 떨어짐
- 측정기간 동안 샘플링 조건 정보를 알 수 없음

▶ **Charcoal Canister(활성탄 캐니스터)**

활성탄에 침투한 라돈가스에서 붕괴한 214Pb (242, 295, 353 keV)와 214Bi(609 keV)으로 부터 방출되는 감마선을 계수함으로써 라돈농도를 결정

- 장점
 - 경제적, 외부전원 불필요, 취급과 설치가 간편, 우편송달이 용이
- 단점
 - 흡탈착의 영향으로 측정기간 마지막 12-24 시간 사이의 라돈농도의 편향이 심함
 - 측정기간 동안 샘플링 조건정보를 알 수 없음, 온도, 습도, 기류에 민감

▶ **Electret Ion Chamber(충전막 전리함)**

외부로부터 전리함 내에 들어온 라돈이 붕괴하여 생성된 이온과 전자를 측정함으로써 라돈의 농도를 파악

- 장점
 - 측정 현장에서 계산기와 전위계를 이용하여 바로 결과를 얻을 수 있음
 - 충전된 전압이 남아 있다면 재사용이 가능
- 단점
 - 백그라운드 감마선에 의한 감응을 보정
 - 우연한 마찰전하에 의해 충전막의 전위가 방전될 수 있음
 - 지나치게 습도가 높으면 전위계의 정확도에 영향

▶ **Pulsed Ionization Chamber (펄스형 이온화챔버)**

가장 고전적이며 주로 능동형 연속식 검출 장치 라돈의 붕괴로 생성되는 이온을 전위계에서 전기적인 펄스 형태로 변환

교정인자에 의하여 Bq/m^3 로 변환

▶ **Sintillation Cell(섬광셀 검출기)**

Lucas Cell(금속용기 내부에 ZnS scintillator)을 사용하는 연속식 검출 장치

알파입자와 ZnS(Ag)가 반응하여 나온 빛을 PMT (Photomultiplier Tube : 광전증배관)로 증폭하여 계수

▶ **Silicon Detector(실리콘 검출기)**

용기 벽과 실리콘 검출기 사이에 걸려진 2,200 V의 높은 전위차를 이용하여 용기 내부로 유입된 라돈과 라돈 자손을 실리콘 검출기 표면에 포집하여 연속적으로 측정

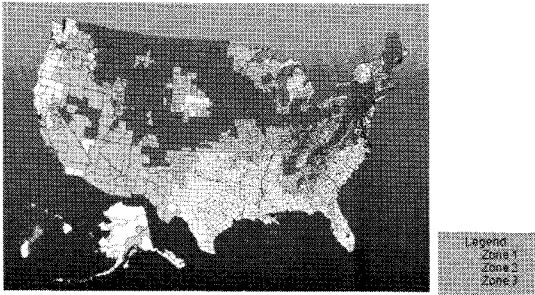
펄스형 이온화챔버, 섬광셀 검출기와 실리콘 검출기 등 연속형 라돈 검출기들은 휴대가 가능하고, 측정 현장에서 결과를 알 수 있으며, 측정된 결과가 상대적으로 정확하고, 측정 동안에 발생할 수 있는 샘플링 조건의 변화가 추적 가능하고 측정 시간을 유연하게 조정 가능하다는 등의 장점이 있으나, 타 장치에 비해 고가이고, 검출기의 정기적인 교정과 작동하는 사람의 전문성이 요구되며, 펄스형 전리함의 경우 습도에 영향을 받을 수 있다는 등의 단점이 있다.

2. 라돈의 분포현황

2.1 국외 라돈의 분포현황

국가적 라돈 조사는 지질학적 분포에 대한 정보도 제공할 수 있지만, 개인에 대한 노출분포와 지역적 분포를 동시에 확인할 수 있다. 북아메리카와 유럽에서는 실내 라돈 가스 측정이 가장 일반적인 조사수단으로 쓰인다(Synnott and Fenton 2005a).

International Commission on Radiological Protection (ICRP)에서도 이 방법을 선호한다(ICRP 1994). 정확한 조사를 통해 얻어진 정보는, 국가 라돈 정책을 실행하는데 있어서 유용한 자료로 쓰일 수 있다. 라돈 지도는 라돈 농도가 높은 주택가 지역에 효과적



* Zone 1,2,3 순으로 라돈 고농도 지역을 표시하였음. 현재까지 18,000,000 가구 정도 라돈을 조사하였고, 약 800,000 가구가 저감화 조치를 하였음.

그림 6. 미국 EPA에서 수행한 지역별 라돈분포 현황

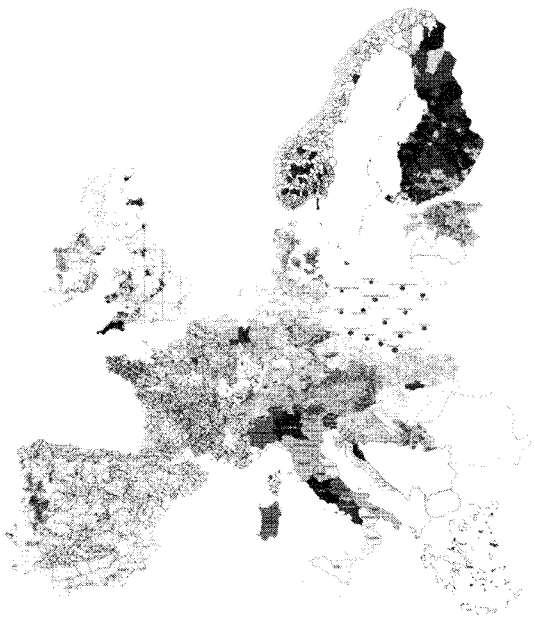


그림 7. 유럽 각국에서 수행된 실내 라돈 농도 분포도 (라돈지도) 종합

으로 활용될 수 있으며, 건설 기간 동안 특수 저감 조치가 필요한 지역을 알리는 수단으로 사용되어야 한다. 전국의 실내 라돈 측정을 근거로 한 라돈 지도는 영국, 미국, 아일랜드 등에서 작성되었다(Miles et al. 2007, USEPA 1993, Fennell et al. 2002). 미국

의 경우, 실내 측정, 지질학적 특성, 대기 중의 방사능, 토양의 침투성 및 토대의 타입 등을 고려하여 라돈 지도를 작성하였고(USEPA 1993), 독일의 경우에는, 토양가스를 고려하여 작성하였다. 오스트리아에서는 일정한 지역의 평균 라돈 농도를 기준으로 하여 작성되었다(Friedmann 2005). 다양한 국가별 실내 라돈 농도 분포도에서 볼 수 있듯이 국가마다 그 조사 전략에 많은 차이가 있으며 조사 결과를 표현하는 방식에도 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 오랫동안 라돈 조사를 수행해온 선진국의 경우 체계적인 전국 실내라돈 조사계획을 수립하여 시행하고 이 조사 자료를 토대로 정부에서는 라돈 저감화 방법과 가이드를 제시하고 여러 가지 홍보 전략을 동원하여 일반국민들에게 홍보하고 있다.

2.2 국내 라돈의 분포현황

1999년 4월부터 2005년 2월까지 한국원자력안전기술원을 통해 실시된 전국 15개 시·도 지역의 약 3,500개 지점에 대한 라돈농도 측정결과는 다음과 같다. 결과는 가옥형태별, 지역별 주택 농도, 지역별 공공건물 내 농도로 나타내었다.

- 계절별 라돈농도는 여름에 가장 낮고, 겨울에 가장 높은 경향을 보임.
- 충북 및 강원도 지역이 다른 지역에 비해 높은 라돈농도를 나타냄
: 단독 한옥, 양옥 비율이 높고, 토양중 라돈농도가 높기 때문으로 판단

표 3. 전국의 가옥형태별 연평균 라돈농도

(단위 : Bq/m³)

구분	한옥	양옥	아파트	연립주택	반지하주택
가옥수	904	1067	1539	246	110
산술평균	69.5±71.2	70.0±52.7	40.5±20.4	43.0±28.6	38.8±18.0
기하평균	54.5±1.9	56.6±71.8	36.7±1.5	37.6±1.6	35.9±1.5
중간값	51.4	52.7	35.8	35.2	35.5

표 4. 지역별 주택 내 연평균 라돈농도

(단위 : Bq/m³)

지역명	지점수	최저치	최고치	산술평균	기하평균	증양값
서울	636	11.1	1055	44.8±53.2	37.5	35.1
강원	210	19.7	533	74.1±57.8	61.4	56.5
인천	211	10.3	530	45.6±47.3	37.3	37.0
경기	645	14.0	338	53.4±39.5	45.7	43.5
충북	165	20.4	1350	84.8±144.9	58.6	50.9
충남	212	17.6	573	75.1±67.5	60.6	54.1
대전	116	16.0	231	51.4±34.5	44.6	42.6
대구	158	14.8	130	42.7±22.5	38.1	34.2
경북	280	13.6	411	54.3±39.5	45.9	42.9
부산	262	14.8	165	37.8±20.4	34.0	32.6
경남	289	13.4	315	51.8±37.7	44.1	40.5
전북	223	16.7	857	72.9±71.2	59.2	54.6
전남	234	16.7	556	69.0±57.8	56.0	51.0
광주	105	16.7	202	56.5±31.3	50.3	79.0
제주	55	16.7	240	52.5±38.8	44.2	39.9
울산	65	18.5	118	41.1±21.9	36.9	35.1
전국	3866	10.3	1350	55.5±56.0	45.4	42.6

표 5. 지역별 공공건물 내 연평균 라돈농도

(단위 : Bq/m³)

지역명	지점수	최저치	최고치	산술평균	기하평균	증양값
서울	68	16.75	137	38.4±21.3	34.7	33.3
강원	11	21.3	67.5	37.1±13.9	35.0	31.5
인천	12	17.6	165	46.9±41.4	36.6	26.8
경기	42	16.0	99.0	41.4±18.5	38.0	35.0
충북	13	21.9	98.1	44.1±24.8	38.7	31.5
충남	16	20.4	116	44.6±24.9	39.8	38.4
대전	14	21.0	85.1	41.1±16.7	38.4	37.5
대구	26	19.4	125	40.8±26.8	35.0	29.1
경북	22	19.4	84.2	44.4±20.3	40.2	37.9
부산	36	12.3	59.2	27.5±10.6	25.9	24.8
경남	29	16.7	150	41.2±26.5	35.9	33.3
전북	12	27.8	213	71.4±55.0	57.6	49.0
전남	13	13.9	126	46.0±33.9	36.4	35.2
광주	11	7.40	213	43.5±57.2	29.2	28.4
제주	4	23.1	56.4	37.3±15.3	35.0	34.8
전국	329	7.40	213	41.0±26.8	35.6	32.4

- 가옥 내 라돈농도에 비해 낮음: 공공건물의 경우 사람이 빈번히 왕래하는 곳으로 출입문 및 창문을 여는 빈도가 높아 실내 공기가 외부공기와 자주 순환되기 때문에 판단됨

- 학교건물이 타 건물에 비해 높은 값을 보임, 백화점이 가장 낮음.

: 학교건물 내 라돈농도가 높은 이유는 수업시간이나 방학기간 동안 교실 문이 닫힌 상태로 유지되기 때문에 판단됨

2.3 라돈 저감방법

2.3.1 노출 경로별 사전 예방과 저감방안

실내에 존재하는 라돈을 제어하는 방법에는 크게 발생원의 제거, 발생원을 조절, 그리고 공기를 청정하는 방법이 있다. 먼저 발생원을 제거하기 위해, 토양 내의 라돈의 농도가 높을 경우 건물 아래의 토양을 교환하는 경우가 있으나, 이는 비용이 많이 든다. 또한 실내에 사용되는 건축자재 중의 라돈

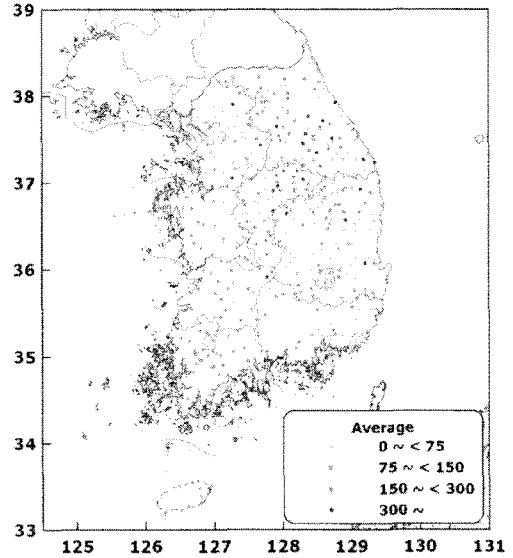
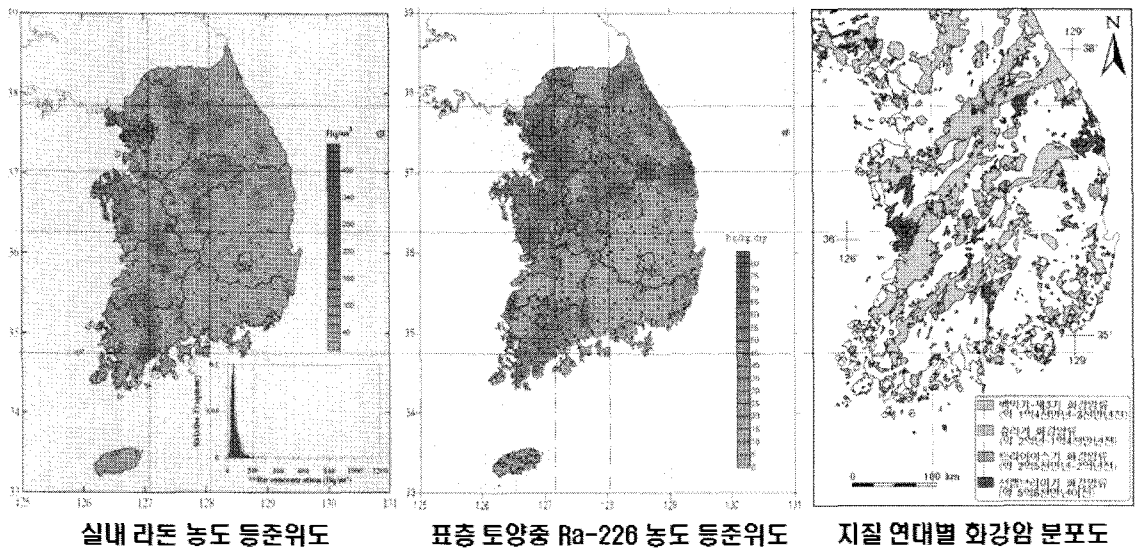


그림 8. 국내 라돈분포 현황

방출 수준을 평가하여, 가능하면 라돈 발생량이 적은 자재를 사용하도록 해야 한다. 이를 위하여, 토



실내 라돈 농도 등분위도

표층 토양중 Ra-226 농도 등분위도

지질 연대별 화강암 분포도

* 실내라돈농도가 높은 지역은 표층 226Ra 농도가 높은 지역과 일부 유사하, 또한 지질연대별 화강암 분포도와도 일부 일치함을 알 수 있다.

그림 9. 실내 라돈농도 분포 등분위도

양으로부터 유발된 다양한 건축자재의 라돈 방출 수준을 국가가 관리하고 가이드 할 필요가 있다.

그 외 물리적 장벽을 설치하여 토양과 건물의 기초가 직접 접촉하는 것을 방지하거나 토양 중 라돈의 농도가 낮은 곳을 건축지로 선택하는 방법이 있다. 발생원을 조절하는 방법에는 먼저 라돈의 유입 경로(배수구, 속이 빈 콘크리트 벽, 벽과 바닥의 교차 부분과 바닥재의 이음새, 열에 의한 팽창과 재료들의 수축에 의한 틈, 지하실 바닥의 틈, 건물의 갈라진 틈 등을 차단하거나 배출파이프를 지하실 slab 밑에 넣어 소위 sub-slab 환기를 시켜 주는 방법이 있다. 후자는 가장 효과적인 라돈 경감 대책 중의 하나이다. 또한 지하실에서 지상으로 라돈이 유입되는 것을 방지하기 위해 지하실 쪽으로 약 3~4 Pa 정도의 약한 압력을 걸어주어 지상 실내의 라돈 농도를 4 pCi/L 이하로 감소시킬 수 있다.

공기를 청정함으로써 라돈을 제어할 때 주의할 것은, 대부분의 공기청정기는 부유 분진과 이에 부착된(attached) 라돈의 자핵종만 제거하므로 공기 중에 많은 양의 제거되지 않은 비부착(unattached) 라돈이 존재할 수 있다. 비부착(unattached) 라돈은 부착된(attached) 라돈보다 더욱 미세한 입자라서 체내로 유입 시 걸러지지 않고 폐 깊숙이 침투할 수 있기 때문에 인체에 더욱 위험할 수도 있다. 또한 건물의 환기율을 증가시킴으로써 실내 라돈 농

도를 세배까지 줄일 수 있으나 에너지효율에 문제가 있을 수 있다. 실내 공기를 순환시킬 때는 반드시 실내분진의 농도를 낮추어 가능한 한 라돈의 자핵종들이 부착되지 않도록 하여야 한다. 이외에도 실내공기청정 방식으로써 활성탄베드를 가장 흔히 사용하는데 이때 먼저 molecular sieve 등을 이용해 수분과 CO₂를 제거하여야 그 흡착 효율이 높아진다. 실내에 흔히 존재하는 isooctane, ethylene, chloride, formaldehyde 등에 의해 흡착이 방해될 수 있으나 toluene은 라돈의 흡착 능력을 향상시킨다. 실내청정설비의 습도조절 시스템에 carbon-based 시스템을 통합하여 운영하면 라돈제어가 효과적일 수 있다. 그러나 이러한 시스템은 라돈 흡착 능력이 커야함은 물론이고 습기나 다른 VOC 들에 의한 간섭이 최소화 되어야 하며 반복 사용을 위해 재생하여 사용할 수 있어야 한다.

2.3.1.1 토양에서 유입되는 라돈의 저감방법

라돈 저감 기술은 건축물의 기초 토대나 지역적 특성에 따라 다양하지만 가장 기본적인 요소는 그림 10과 같다.

2.3.1.2 지하수 중 라돈의 저감 방법

수중 라돈을 저감시키는 방법은 폭기 장치와 GAC(Granular Activated Carbon) 처리 중 하나를

- A. 가스 침투층 - 이 층은 건물의 Slab 또는 마루 바닥 하부에 토양가스가 자유롭게 유동할 수 있도록 약 10cm 두께로 깨끗한 자갈을 깔아놓는 층이다.
- B. Plastic Sheeting - Plastic Sheeting은 가스 침투층과 건물의 바닥 사이에 설치하며, 토양가스가 집 내부로 유입되지 않도록 플라스틱 시트로 막아주는 장치이다.
- C. Sealing and Caulking - 건물의 갈라진 틈새나 파이프 등의 이음매 부분을 확실히 밀봉하여 건물 내부로의 가스침투를 차단한다.
- D. 배기관 설치 - 흔히 사용하는 PVC 파이프를 가스 침투층에서 건물의 지붕까지 연결·설치하여 건물 하부의 라돈가스가 배기관을 통하여 지붕 위로 빠져나갈도록 한다.
- E. 접합기 설치 - 추후 라돈가스의 저감이 원활하지 않아 팬을 설치해야 할 경우를 대비하여 전기 접합기를 설치해 놓는다.

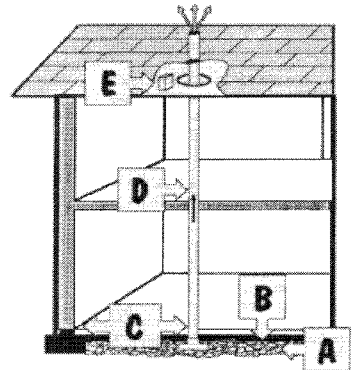


그림 10. 토양에서 유입되는 라돈의 저감방법

이용하여 저장한다.

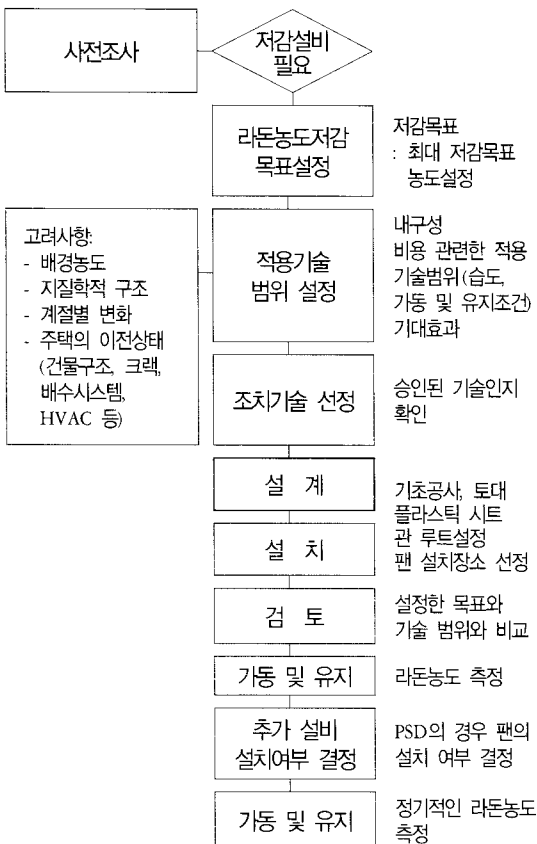
▶ 폭기 장치를 이용한 저감 방법

폭기 장치라 함은 라돈을 함유한 수중에 공기를 불어넣어주는 장치이다. 공기를 불어 넣어줌으로써 수중에 녹아 있는 라돈을 분리시키고 배기장치를 통해 외부로 배출시킨다.

▶ GAC(Granular Activated Carbon) 처리

GAC(Granular Activated Carbon)가 처리된 필터에 물을 통과시키면 수중에 녹아있던 라돈은 흡착능력이 강한 Activated Carbon에 흡착된다. GAC 필터는 위에 언급한 폭기 장치에 비해 비용은 적게 들지만 흡착된 라돈과 그 외의 오염물질에 대해 2차적인 처리가 필요하다는 단점이 있다.

2.3.2 라돈 저감을 위한 전략수립 계통



2.3.3 Passive Sub-slab Depressurization (PSD)

PSD의 효율은 환기관 내의 공기온도 차에 의한 부력과 주거건물 하부의 토양을 약하게 감압하는 효과에 의존한다. 효과적이기 위해서는 다음 사항이 고려되어야 한다.

- 지반과 직접적으로 닿는 부분의 하부에 침투성이 있는 층이 있어야 한다.
- 환기관은 주로 건물 내 난방이 되는 부분을 지나 가도록 설계가 되어야 하고 난방이 되지 않는 부분을 지날 시에는 단열처리를 해주어야 한다.
- 환기관의 경로는 PSD 시스템이 충분한 라돈 저감효과를 보이지 않을 시, 사용할 팬을 설치하기에 용이하도록 설계되어야 한다.
- 배출지점은 지붕의 가장 높은 곳에 위치하여야 한다.
- 시스템은 다른 배수설계와의 혼동을 피하기 위해 라벨링이 되어야 한다.
- 토양과 접촉하는 건물의 바닥 부분은 토양가스가 침투하지 않도록 모두 밀폐되어야 한다.

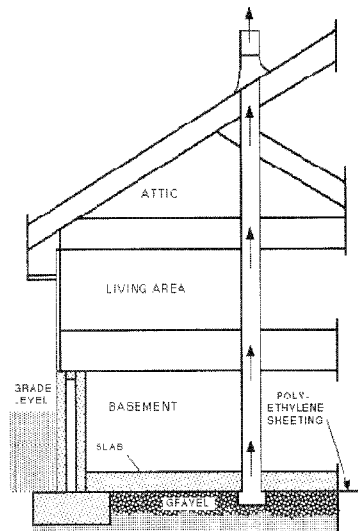


그림 11. Passive Sub-slab Depressurization

· 환기관과 주거 공간 간의 기압차가 매우 작기 때문에, 시스템작동을 모니터하기 위해서는 주기적 혹은 연속적인 라돈 모니터링을 해야 한다.

신축건물에서는, PSD 시스템이 라돈을 약 50%까지 저감한다고 알려져 있다(Dewey and Nowak 1994). PSD 시스템이 적절히 설계되고 설치되었다면, 시스템을 활성화하기 위해 작은 크기의 팬이 사용될 수 있다(Saum 1991, ASTM 2007). 가능하면 더 작은 팬을 사용할수록 에너지와 관련하여 작동비용을 절약할 수 있다.

2.3.4 Active Sub-slab Depressurization (ASD)

더욱 효과적인 라돈의 저감을 위해서는 PSD 시스템에 추가적으로 In-line 팬(fan)을 설치할 수 있다. ASD 시스템은 팬(fan)을 사용하여 건물 바닥과 토양사이에 저기압 공간을 형성 한다. 토양에서 나오는 라돈 함유 가스는 건물 바닥의 저기압 공간 쪽으로 이동하게 되며, 건물 내부로 들어가지 못하고 건물 지붕까지 연결해놓은 흡입 파이프를 통해 밖으로 배출 되게 된다.

또한 저기압 공간이 지반 전체에 형성되면, 실내 공기는 건물 틈새를 통해 토양 쪽으로 흐르게 되면

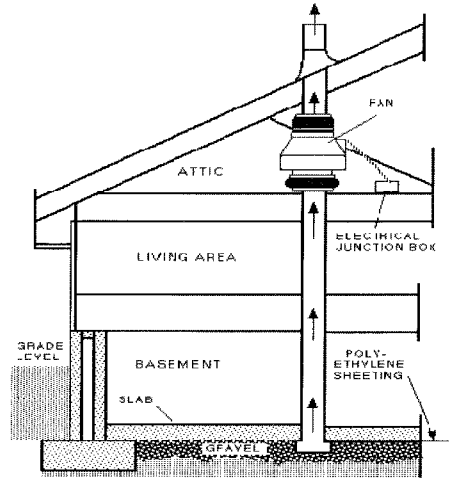


그림 12. active Sub-slab Depressurization

서 매우 효과적으로 라돈의 틈새 유입을 막는다.

2.4 라돈 저감 시공사례

이전까지 국내에서는 라돈저감 시공사례가 전무하였으나, 2010년 환경부 의 실내라돈저감시험사업을 연세대학교가 주관하고 한국환경공단과 공조설비회사와 함께하여 공공건물 내 라돈저감설비를

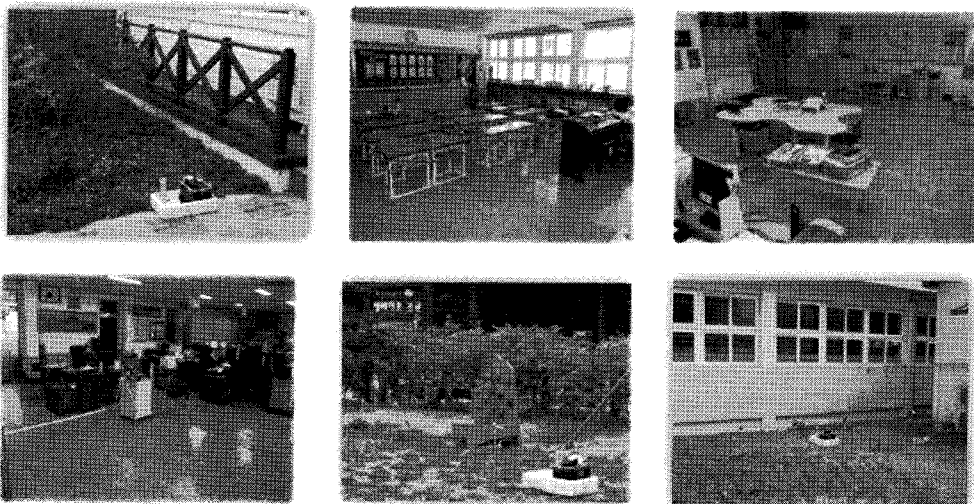


그림 13. 라돈 정밀진단 실시

구축하였다. 먼저 저감사업은 고농도 시설을 선정하는 과정부터 시작되었다. 국립환경과학원과 교육과학기술부에서 실시한 전국 실내 라돈 측정결과를 바탕으로 학교 시설 및 관공서의 고농도 상위 17개 시설을 선정한 다음, 육안관찰 및 관리자와의 직접 면담 등 기초자료 수집과 고농도 예상지점의 라돈

측정결과를 통해 정밀진단 대상 10개 시설을 선정하였다. 그 후, 실내공간 48시간 동안 연속측정 및 E-perm 측정장비를 이용한 1주일 노출, 지하수 및 토양 측정 데이터를 종합하여 저감대상 5개 시설을 선정한 뒤, 시설의 특성에 맞는 저감방법을 설계하여 시공하였고, 시공 후 저감효율을 시험하였다.

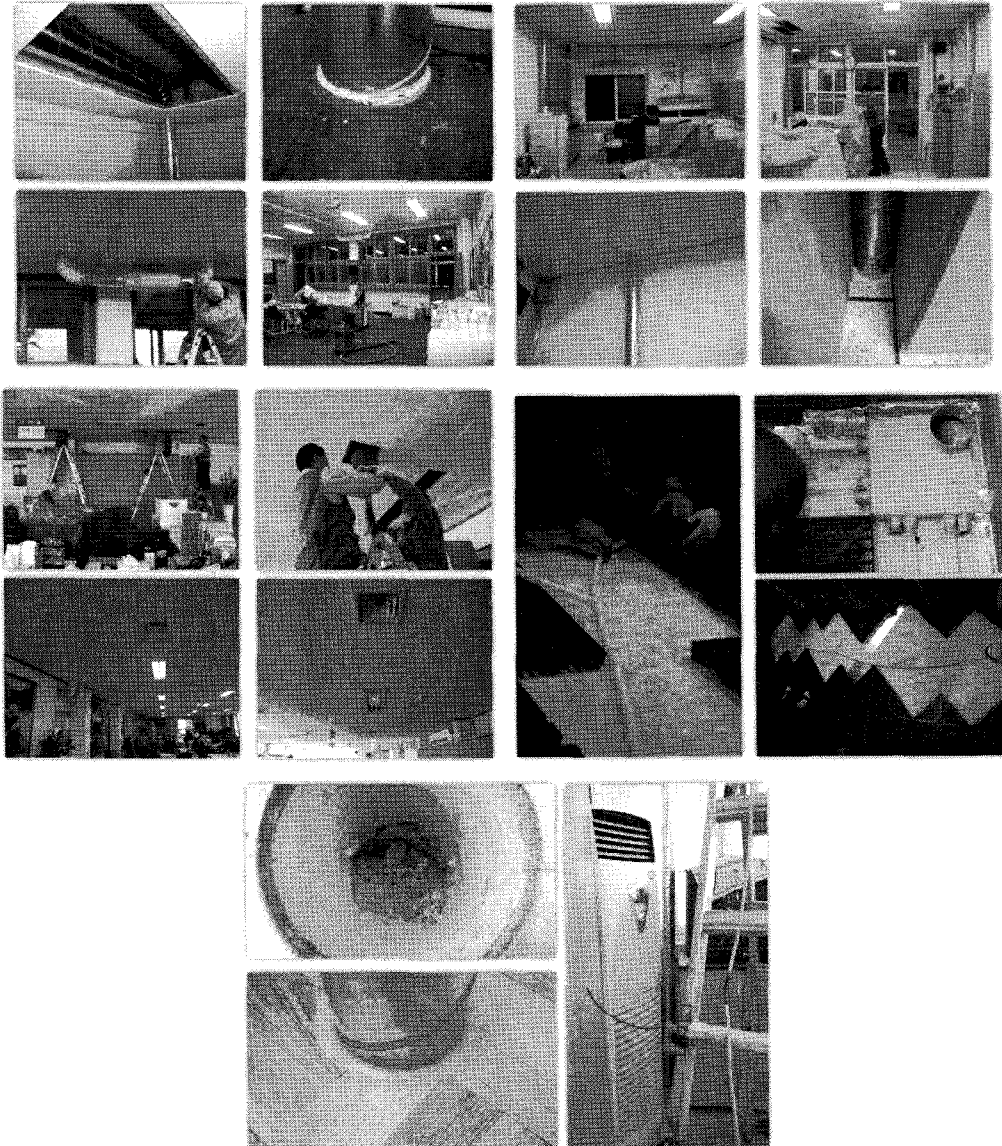


그림 14. 라돈저감시설 시공

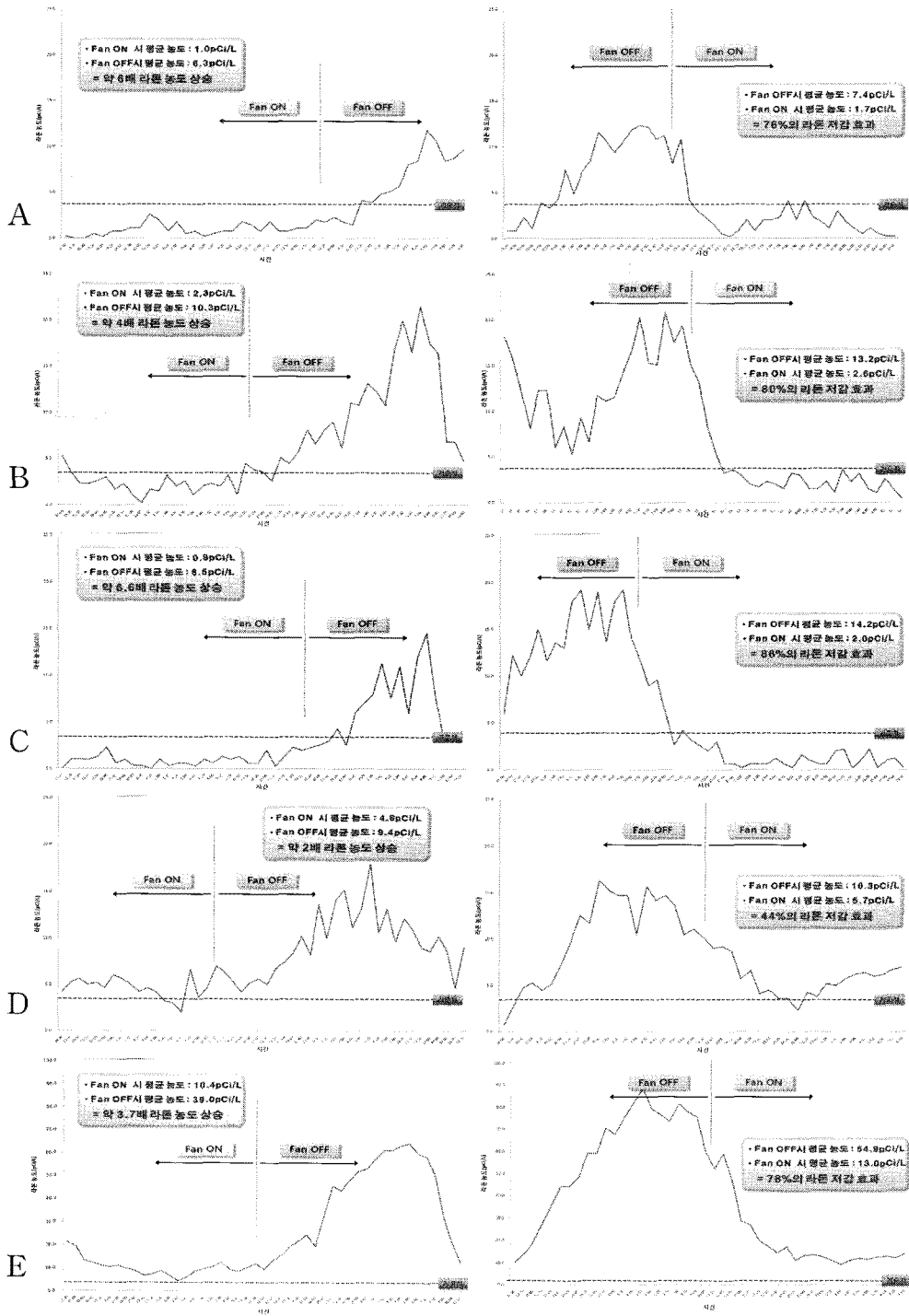


그림 15. 라돈 저감시설 설치 후 팬 작동 유무 간 라돈농도 측정

D와 E, 두 시설을 제외한 모든 시설이 저감 팬 가동 시 기준치인 4 pCi/L 이하의 농도를 유지하였고, 모든 시설이 저감 팬 가동 시 평균 약 80%의 저감효율을 보였다. 저감팬을 가동하지 않았을 때, 약 2~6배 정도의 라돈농도가 상승하는 결과를 보였으나, 팬 가동에 따른 에너지 비용이 크지 않기 때문에 상시 가동하여도 무리가 없다. A와 E 시설은 초기에 배기팬으로 설치를 하였으나, 설치 후 오히려 라돈농도가 높아지는 경향을 보여, 급기팬으로 교체하였다. 급기팬으로 교체 후, 높은 저감효율을 보였기 때문에, 추후 배기로 인한 라돈저감효율이 높지 않은 경우에는 급기방식을 도입할 수 있을 것이다. 즉, 시설 특성에 따라 적절한 공법을 적용하여 최대한의 효율을 높이는 것이 중요하다.

3. 맺 음 말

라돈은 자연에 존재하는 방사성 기체이며, 라돈과 이로 인해 생성된 라돈의 자손핵종을 장기간 누적하여 호흡할 경우 폐암의 위험이 있으며, 담배 다음으로 폐암의 원인이 되고 있다. 국제적으로도 라돈에 대한 관심이 증가하고 있으며, 그 관리 농도 기준을 강화하고 있는 추세이다. 이에 국민을 라돈의 위해성으로부터 보호하기 위한 관리 방안을 수립하는 것이 시급하다.

라돈은 우리 주변에 상시 존재하는 천연 방사성 물질이라서, 이로 인한 위험성을 간과할 수도 있으며, 그 관리를 소홀히 할 수도 있고, 위해도 저감 노력의 책임을 회피하기도 쉽다. 그러나 라돈으로 인한 위험성은 더욱 강조되고 있으며, 상시 불거져 나올 수 있는 위험이다. 그러나 다양한 선진 사례에서 볼 수 있듯이, 충분히 관리가 가능한 물질이기도 하다.

라돈은 우리 주변의 토양과 지하수, 공기 중에 항상 존재하면서, 관리가 부족하면, 가장 위험한 발암 물질의 형태로 우리 체내로 유입될 수 있는 라돈의 관리를 위해서는, 정부의 여러 관련 부처의 정책적, 예산적 지원, 다양한 분야의 전문가는 물론, 일반인

들의 지속적인 관심, 이에 기초한 꾸준한 대책 마련과 그 실행이 핵심이다. 라돈 관리의 단계별 체계 구축과 완성을 위해서는 국가적 라돈 관리 집중화와 부처별 소통이 필수적으로 요구되는 시점이다.

라돈의 관리를 효율적으로 이룸으로써, 에너지를 많이 소비하는 건물 관리 분야에서 건물 에너지 사용과 인간의 건강을 최적화시킴으로써 에너지 저감에도 일조할 수 있을 것이다.

이러한 과정을 통해, 발전하는 국가 수준에 맞는 국민 건강을 우선으로 하는 라돈 관리 체계가 구축이 되며, 국가적 선진화가 이루어 질 것이다.

- 참고문헌 -

1. UNSCEAR 1977, Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1977 Report to the General Assembly, United Nations, New York.
2. USEPA, 1991, The Department of Health Services, Geologic Controls on the Distribution of Radon in California
3. USEPA, 1993, Radon Measurement in School
4. USEPA, 1994, Radon Mitigation Standard
5. USEPA, 1994, Radon Prevention in the Design and Construction of Schools and Other Large Buildings
6. USEPA, 1994, Reducing Radon in Schools: A Team Approach
7. USEPA, 1997, National radon proficiency program, Guidance on quality assurance
8. USEPA, 2001, Building Radon Out: A Step-by-Step Guide on How To Build Radon Resistant Homes
9. USEPA, 2008, Indoor Air Vapor Intrusion Mitigation Approaches
10. WHO, 2009, WHO Handbook on Indoor Radon