韓國環境衛生學會誌
Kor. J. Env. Hlth. Soc.
Vol.15, No.1, 11~18, 1989

서울시 일부 지역에서의 실내 라돈 농도에 관한 조사*

김 윤 신

한양대학교 의과대학

Indoor Radon Concentrations in the Seoul Area

Yoon Shin Kim

College of Medicine, Hanyang University

Abstract

Indoor radon concentrations, measured in 34 houses and various types of underground environments in the Seoul area during February 1988 – January 1989, varied from 0.9 – 9.9 pCi/l. Radon concentrations in basements of the selected homes were about 1.5 times higher than those levels measured in the first floor. The radon level of the first floor in the energy efficient homes are signficantly higher than the conventional homes. Indoor radon levels in the underground pass were higher than any other types of underground environments. Variations among underground environments were much less than for homes, probably because there was less variability in ventilation.

I. 서 론

최근에 라돈과 그 붕괴 생성물이 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 라돈(Radon)은 자연방사능의 붕괴계열시 생성되는 물질로서 알파(Alpha)입자를 방출하며 반감기 3.8일의 불활성기체로 사람이 가장 흡입하기 쉬운 물질중의 하나이다. 라돈은 천연적으로 우라늄광, 토양, 시멘트, 콘크리크, 모래등의 건축자재 및 지하수 등에 함유되어 방출되는 것으로 알려져 있다. 따라서 라돈 함유량이 높은 건축자재를 사용하였거나 환기시설이 불량한 건물에서는 라돈 농도가 높게 나타날 수 있다.[1~2)]

일반적으로 고농도의 라돈에 노출되면 폐암 발생의 위험성이 있는 것으로 나타났다. 미국 환경청의 보고에 의하면 미국내 연간 13만건

* 본 논문의 일부는 1988년도 문교부지원 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

의 폐암사망자중 약 5천～2만명이 주택내의 라돈농도에 폭로되어 사망한 것으로 추정하고 있다.[3] 도시인의 경우 하루 생활중 80% 이상을 실내에서 생활하고 있어[4] 일반공공건물 및 주택내의 라돈농도가 높을 경우 폐암으로 사망할 확률이 높아질 수 있다 하겠다.

우리나라의 주택은 건축구조상 토양에 노출되기 쉬운 온돌주택이 많아 라돈에 폭로될 가능성이 많아 라돈농도의 측정조사연구가 요구되고 있다. 그러나 국내에서 라돈측정에 관한 조사연구는 대기중과 토양중에서의 라돈측정연구가 수편 있을 뿐이다.[5,7]

저자는 1987년 국내에서 처음으로 일반주택에서의 라돈농도를 측정한 이후 계속적으로 라돈의 실내농도의 측정 및 그 영향을 분석하고 있다.[8] 본 논문에서는 최근에 실시된 서울시 일부 주택 및 지하환경에서의 라돈의 실내농도 조사 결과를 보고하고 라돈의 영향 및 방지 대책을 고찰하였다.

Ⅱ. 조사대상 및 방법

본 조사는 1988년 2월부터 1989년 1월에 걸쳐 서울시에 소재한 일반가정과 지하환경 시설물을 택하여 실내라돈 농도를 측정하였다. 라돈의 측정은 미국 Tarradex사의 Track Etch Radon Monitor를 사용하여 3개월간 공기중에 노출시킨 후 각각 그 농도를 측정하였다.[9] 특히 주택의 경우는 모 여자대학생의 가정중 지하실이 있는 일반주택 34가구를 임의로 선택하여 지하실과 1층 거실에서의 실내라돈농도를 측정 비교하고자 하였다. 또한 지하환경시설물의 경우 일반지하상가, 지하철역, 지하도, 지하주차장 등을 대상으로 하고 측정기간은 각 장소에 따라 측정 시작일을 기준으로 3개월간으로 하고 측정위치는 주택은 지하실과 1층 거실의 천장으로부터 각 모니터를 매달도록 하였으며 많은 사람이 모이는 지하환경시설물에서는 손에 닿지 않는 천장이나 벽에 2개씩을 부착시키도록 하였다. 또한 지하시설물에서의 측정시는 온도, 습도, 기류를 동시에 조사하였다. 라돈농도의 측정은 Alter and Fleischer가 정한 분석방법에 의한 추정되었다.[10]

Ⅲ. 조사성적 및 고찰

1. 라돈의 발생원

라돈의 발생은 Fig. 1과 같이 α붕괴에 의해 라듐 A, B, C 등의 낭핵종을 생성하면서

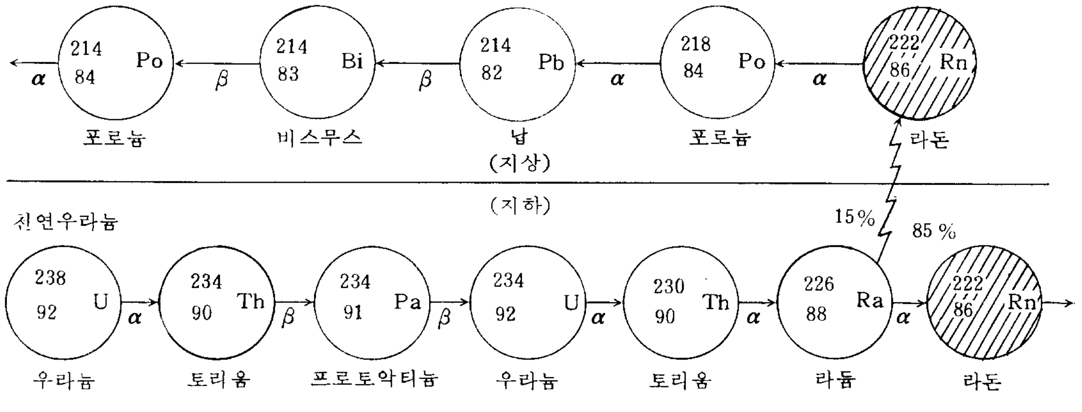
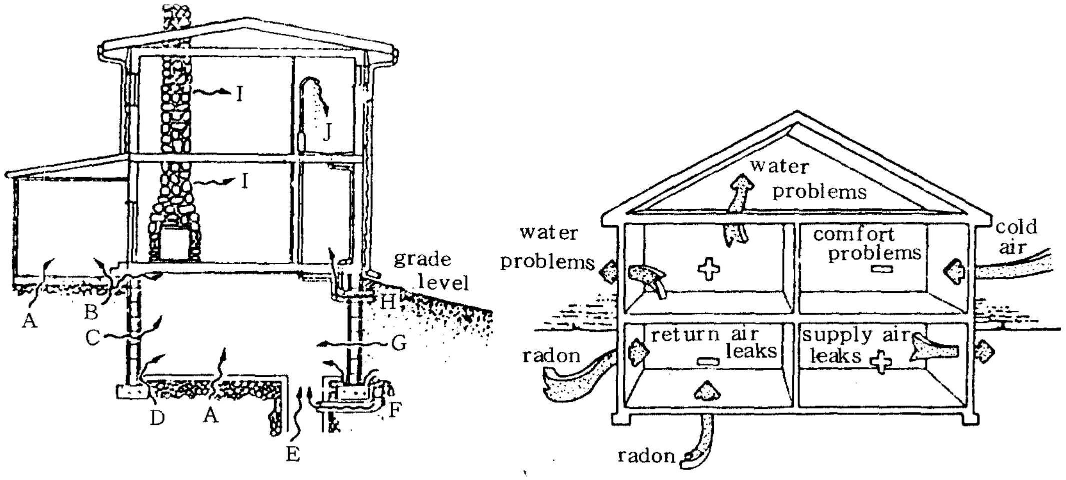


Fig. 1. 라돈의 생성경로



Key to Major Radon Entry Routes:
i) Soil gas A 콘크리트판 침투
B 콘크리트와 블록 사이로 침투
C 콘크리트 블록의 기공으로 침투
D 기둥지지대로 침투
E 물웅덩이나 토양에 노출로 침투
F 하수관의 누수
G 오르타르 접합부
H 엉성하게 조립된 파이프
ii) Building materials
I 화강암
iii) Water J 지하수

Fig. 2. 라돈가스의 주택내 주요 침투로(Source : EPA 625/5-86-019)

납(Pb)으로 변한다. 실내에서의 라돈농도는 지역 및 지상조건에 의해 외기중의 라돈의 영향을 받을 수 있고, 건물의 건축자재, 토양, 음료수 등의 라돈함유량, 건축구조,실내 기상조건 등에 따라 형성될 수 있다.

Fig. 2는 라돈가스가 주택으로 침수하는 경로를 나타낸 것이다. 토양에서 방출되는 라돈가스는 콘크리트 판이나 블록의 기공을 통하거나, 사이틈, 물웅덩이, 하수관이 누수등으로 침투하며 건축자재에서 방출되는 라돈은 화강암(I)에서 2.4~3.0 pCi/g을 방출한다. Fig. 2(오른쪽)는 주택에서 발생하는 라돈가스의 여러가지 현상을 나타낸 것이다.

2. 라돈의 평균농도

1) 주택내 라돈농도

본 연구에서 조사대상(34가구)의 지하실과 1층 거실에서의 라돈농도를 보면 Table 1과 같다. Table 1에서 보는 바와 같이 지하실의 농도는 2.64 pCi/1로 1층 거실의 농도인 1.71 pCi/1보다 약 1.5배 가량 높게 나타났다. 이 결과는 저자가 1년전 20가구를 대상으로 조사한 라돈의 농도(지하실 : 2.49 pCi/1, 1층 거실 : 0.86 pCi/1)보다 지하실은 약간 높았고 1층 거실은 약 2배 이상 높게 나타났다(Fig. 3 참조). 이것은 각 조사대상 지역의 특성 내지는 건물 구조상의 영향을 받은

Table 1. Average Radon Concentrations (pCi/1) in Korean Homes (N = 34)

	Basement	First floor
Mean	2.64	1.71
S.D.	1.97	0.48
S.E.	0.48	1.12
Range	1.49 – 9.99	1.01 – 3.16

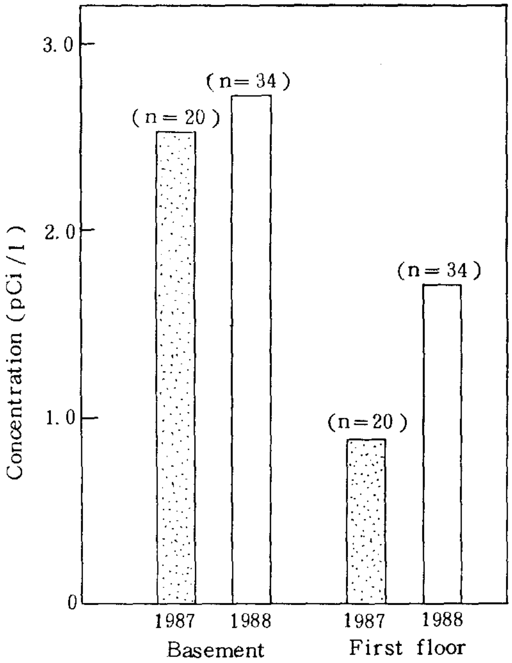


Fig. 3. Average radon concentrations in selected Korean homes in 1987 and 1988

Table 2. Average Radon Concentrations (pCi /l) by Type of Homes

Type	Basement		First floor	
	Mean	S. D.	Mean	S. D.
Energy-efficient (n = 20)	3. 34	2. 36	1. 96	0. 47
Non-energy-efficient (n= 14)	2. 84	1. 19	1. 36	0. 22

것으로 시사된다. 또한 조사대상 가구를 건축구조상에 단열재를 사용한 주택을 energy-efficient 한 주택으로, 단열재를 사용하지 않은 주택을 non-energy-efficient 한 주택으로 분류하여 각각의 라돈농도를 비교하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 단열재를 사용한 주택(n = 20)에서는 지하실에서 3.34 pCi/1, 1층 거실에서 1.96 pCi/1를 나타내고, 단열재를 사용하지 않은 주택(n = 14)에서는 지하실에서 2.84 pCi/1, 1층 거실에서 1.36 pCi/1를 나타내 단열재를 사용한 주택에서 사용하지 않은 주택보다 라돈농도가 각각 높게 나타났으며 특히 1층 거실에서는 유의한 차($p=0.007$)를 보였다. 이것은 단열재를 사용한 주택의 건물 구조상 외부공기의 침투를 막고 실내공기의 외부로의 유출을 막는다고 가정할 때 단열재를 사용한 주택에서는 높은 라돈농도에 폭로될 것을 시사한다. 이 같은 결과는 미국의 주택에서 밀폐된(tight) 주택에서 기존(conventional) 주택보다 라돈농도가 약 4배이상 높게 나타난 것과 같은 맥락을 이루고 있다.

2) 지하환경 시설물에서의 라돈농도

서울시내 일부 지하시설물에서 지하상가 및 지하철역을 비롯한 몇개 지점을 택하여 조사한 결과 라돈의 평균농도는 지하상가에서 1.5 pCi/1, 지하철역에서 1.6 pCi/1, 지하도에서 2.1 pCi/1, 지하주차장에서 1.3 pCi/1, 터널에서 1.6 pCi/1를 나타내 지하도에서의 농도가 가장 높게 나타났다. Fig. 4에서 보는바와 같이 지하철역(2호선)과 강남 지하도역 부근에서 각각 2.1 pCi/1로 가장 높게 나타났다. 그외의 지역에서 2.0 pCi/1 미만을 보이고 있다. 지하시설물에서의 라돈측정은 측정 폭로기간이 3개월 미만이 되는 것이 있어 정확한 비교는 무리가 되는 것으로 사료된다. 또한 측정지점의 실내환경 시설의 공간이 너무 넓어 라돈 농도가 희석된 것이 아닌가 시사되고 있다.

본 조사결과 지하시설물에서의 라돈 농도가 가정내 지하실의 농도보다는 낮게 나타난 것은 지하환경 시설물보다는 주택의 건물구조가 밀폐되어 실내 라돈농도가 주택내에서 외부로 방출되지 못한 것을 시사한다. 따라서 주택내에서의 라돈농도가 더욱 인체에 미칠 수 있는 영향이 큰 것을 시사해 주고 있어 이에대한 계속적인 연구가 요구되고 있다. 주택내 라돈에 관한 국내에서의 연구는 저자의 연구결과 이외는 전무한 상태로 아직 실내 라돈오염에 의한 피해사례가 보고된 바는 없다. 전체적으로 조사

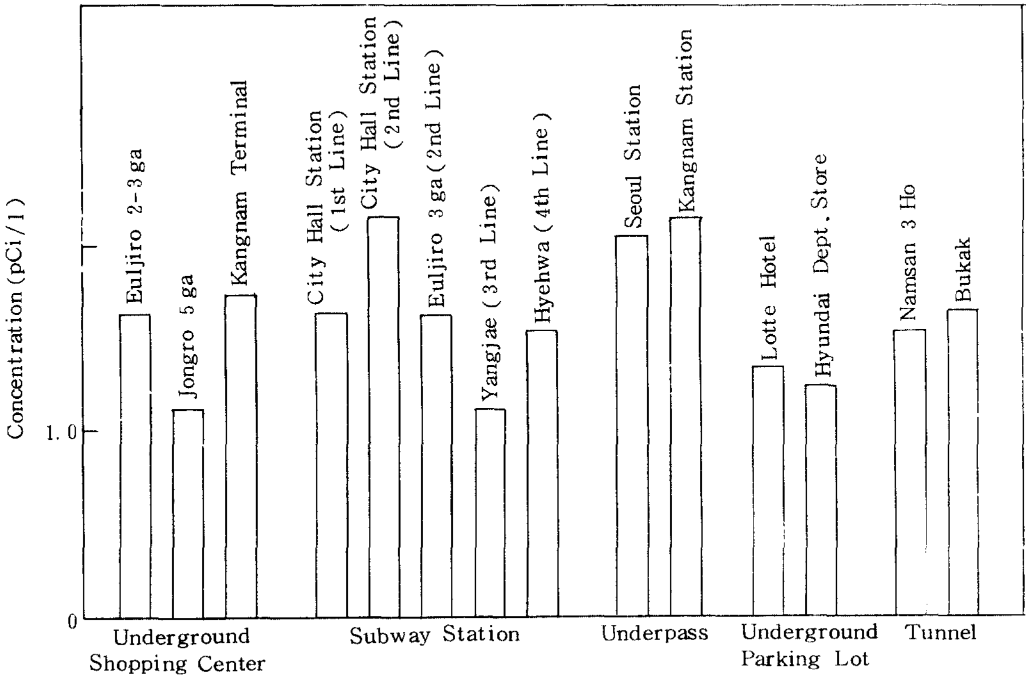


Fig. 4. Average radon concentrations in underground environments

대상중 주택의 라돈농도는 미국 및 일본의주택 내 평균 라돈농도 보다 높게 나타나고 있다. 우리 나라와 비교적 조건이 유사한 일본의 조사치에 따르면 전국주택의 실내 라돈농도의 평균치는 31.4 bq/m² (0.85 pCi/l)로 비교적 낮은 값을 보이고 있다. 그러나 특정지역의 주택내에서는 고농도의 라돈오염 사례가 간혹 보고되고 있으며, 전체 폐암 사망자중 라돈오염에 의한 사망율이 1.2%로 추정되고 있어 점차 라돈오염에 대한 관심이 고조되고 있다.

한편 국내에서는 동절기를 제외하고는 자연환기에 의한 실내통풍량이 비교적 크므로 북유럽이나 북미와 같이 년평균 기온이 낮은 지역에 비해 그 영향은 적을 것으로 생각되나 앞으로는 국내 전지역에서 라돈오염 수준을 조사하는 일이 시급하다. 최근에 수원, 오산 등에 미공군기지에서 인체에 유해한 수준인(4~20 pCi/l) 라돈가스가 검출되었다는 발표가 있어 보다 광범위하고 정밀한 역학조사를 통하여 라돈의 정확한 발생원을 파악할 필요가 있다.

3. 라돈의 영향

라돈은 α붕괴에 의하여 라듐의 낭핵종(radon daughter)을 생성하는데 이 낭핵종은 기체가 아닌 미세한 입자로 이것이 폐에 흡입되면 폐포나 기관지에 부착해 α선을 방출하기 때문에 폐암의 발생위험율을 높이는 것으로 보고되고 있다.[12] 구미 각국에서는 역학조사 및 동물실험을 통하여 라돈의 위험은 5피코큐리 에서 1년간 생활할 경우 1백만명 중에서 4백명정도의 폐암발생을 나타낸다고 발표하고 있다. 1976년 미국 환경청에서는 우라늄 광산에서 수집된 자료에 의하면 일년에 5.000내지, 20.000명의 폐암사망을 나타내며 이것은 흡연으로 인한 폐암에 이어 둘째 원인임을 보여주고 있다. 이에 따라 라돈의 기준 농도를 4 pCi/l 또는

2이하로 정하고 있다. 이 농도는 일생동안 피폭될 경우 폐암으로 사망할 위험율이 약 1～2% 정도로 추산하고 있으며, 200 pCi / 1일 경우는 약 44 %의 폐암 발생의 위험율에 도달될 수 있는 농도로 추정되고 있다. 미국내 가정의 평균 라돈농도는 1 pCi / 1 로 추정되며 미국내의 주택의 약 8 %(8백만가구)가 환경청 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 미국의 국립방사능 방어 및 측정위원회(NCRP)에서는 미국내 년간 13 만명의 폐암사망자중 약 5,000～20,000 명이 라돈농도에 폭로된 영향으로 인하여 사망한 것으로 추계되고 있다.[13] 예로서 남서부의 스타크지방에서 측정된 184 pCi / 1 은 하루에 담배 4 갑을 피우는 것과 같다(Table 3 은 라돈농도가 정상상태와 비교하여 얼마나 위험한가를 나타내고 있다). Table 3 에서 보는 바와 같이 4 pCi/1의 농도에서는 비흡연자는 폐암에 걸릴 확률이 3 배이상 높은 것을 나타내고 있다.

4. 라돈의 농도의 단위 및 환경기준치 비교

1) 라돈 농도의 단위

방사선의 단위에는 여러가지가 있으며 그중 잘 알려진 단위는 방사성 물질의 량을 나타내는 큐리(Curie)로서 이 단위는 1g의 라듐과 평형을 이루고 있는 라돈의 양을 뜻한다. 1 큐리(Ci)는 어떤 방사성 핵종이 1 초에 3.7×10^{10} 만큼의 붕괴를 할 때의 단위이다. 즉 1 초간에 370 억개의 원자핵이 붕괴되고 있는 상태를 1 큐리(Ci)라고 한다.

1 Curie(Ci) = 3.7×10^{10} Bq(Becquerel)

1 pico Curie(pCi) = 0.037 Bq 로 표시된다.

1 pCi는 1×10^{-12} Ci이며 SI 단위인 Bq 과는 37 Bq/m³ = 1 pCi / 1 의 관계에 있다. 라돈농도의 단위는 주로 pCi / 1 (pico curie per liter : 피코 큐리 퍼 리터) 또는 Bq/m³ 를 사용하고 있다. 또다른 라돈량의 기준은 WL

Table 3. Comparison of Health Risks Versus Measured Concentrations of Radon in Air*

PCi/L	Risk of death from lung cancer at measured concentrations
2000	75 times normal**
200	75 times normal
40	30 times normal
20	15 times normal
4	3 times normal

* Taken from EPA 625/5-86-019, Radon Reduction Techniques for Detached Homes

** Normal = national average lung cancer incidence for nonsmokers

(Working Level)로써 우라늄 광산에서 광부들의 건강상태를 연구하면서 라돈이 인체에 미치는 유해도에 의하여 만들어진 기준이다. 이것은 우리말로 라돈작업 피폭기준이라 할 수 있으며 비평형 상태에서의 라돈의 량을 농도로 표현한 것으로 공기 1 리터(1)당 α선의 에너지가 1.3×10^5 Mev (100 pCi / 1, 3.7 KBq / m³ 와 같다)로 방출할 때 양과 같으며, WLM(Working Level Month)은 한달 동안의(170시간) 1WL을 나타낸다.

2) 라돈농도의 기준치

미국을 포함한 독일, 영국 등에서의 조사자료에 의하면 주택 등 건물의 경우 1 pCi / 1 미만, 지하실의 경우는 2～4 pCi / 1 로 나타내며 음료수의 경우 10～100 pCi / 1, 지하수의 경우에는 100～10,000 pCi / 1 가 함유되어 있는 것으로 조사되었다. 현재까지 라돈낭핵종의 장기 저농도 피폭에 관한 국가차원의 기준이 설정되어 있는 나라로는 스웨덴을 들 수 있으며 신축주택에서는 70 Bq / m³ (1.9 pCi/1) 개축주택은 200 Bq / m² (5.4 pCi/1), 기존주택에서는 400 Bq / m³ (10.8 pCi / 1) 이하로 규정하고 있다. 다음은 라돈에 대한 현행규정과 각종 조사 결과를 나타낸 것이다.

(1) 라돈(Rn - 222)에 대한 현행규정

가. 원자력 시설에서의 공기중 최대허용 농도

한국 : 30 pCi / 1 (작업종사자), 3 pCi / 1 (일반인)

미국 : 동일

ICRP: 40.5 pCi / 1(작업종사자), 3 pCi/ 1 (일반인)

나. 자연 방사선에 대한 허용농도

한국 : 없음

미국 : 4 pCi / 1

ICRP : 5.3 pCi / 1 → 2.7 pCi / 1

영국 : 10.6 pCi / 1 → 2.7 pCi / 1

다. 독일 자연방사능 데이타

해 수 : 0.02 ~ 0.9 pCi / 1

호 수 : 10 ~ 50 pCi / 1

지하수 : 100 ~ 10,000 pCi / 1

빗 물 : 1,000 ~ 100,000 pCi / 1

음료수 : 10 ~ 100 pCi / 1

라. 미국의 조사자료 (62,000 지점 평균) : 6.48 pCi /1 (최대치 84 pCi / 1)

다. 독일의 조사자료 : 1.1 pCi / 1 (최대치 33.8 pCi / 1)

바. 영국의 조사자료 (700 가구 평균) : 8 pCi /1 (최대치 216 pCi / 1)

사. 중국의 조사자료

고층건물 : 0.84 pCi / 1(최대치 3.8 pCi/1)

연립주택 : 0.42 pCi / 1

독립가옥 : 0.48 pCi / 1

지 하 실 : 2.65 pCi / 1 (최대치 3.8 pCi /1)

(2) EPA : 주택 - 라돈농도 ≦ 4 pCi / 1 이하로 할 것, 4 pCi / 1 인 집에서 하루에 12 시간씩 생활할 경우에는 년간 0.5 WLM이하로 한다. 1985 년에는 라돈농도가 4 pCi / 1(실내기준)이 하일 때는 구조변경 요망

(3) ICRP, 39, 1988 : "자연방사선원에 의한 일반인의 피폭을 제한하기 위한 제원칙" 발표 -- 대책 기준은 200 Bq / m^3 (20 mSv 에 대하여)

5 . 라돈의 방지대책 및 제안

주택에서 라돈오염에 의한 피해를 막는 방법으로는 첫째, 토양 등에서 발생하는 외부로부터 라돈의 실내침입을 차단시키는 것이며 둘째는 실내의 라돈 및 라돈 낭핵종을 환기로서 희석, 제거하는 것이다. 라돈오염을 방지하기 위하여 건물 설계시 유의할 사항은 다음과 같다.

1) 배수구, 하수구와 연결된 기초주위의 크랙이나 틈을 코킹제나 에폭실란토로 밀봉한다.

2) 건물하부에 물웅덩이가 생기지 않게 한다.

3) 공중벽의 하단 및 상단은 콘크리트로 빈틈없이 막는다.

4) 건물하부 및 지면에 노출된 실내하부는 콘크리트 또는 투습 방지막을 설치한다.

5) 실내환기량을 증대시키며, 냉난방시 부하를 줄이기 위해 열교환기를 이용한다.

우리나라에서도 라돈에 대한 환경영향평가 및 법적기준치를 규정하기 위하여는 우리나라 주택내에서의 라돈에 관한 측정 및 역학적조사가 광범위하게 이뤄지고 대학과 연구소가 라돈 측정자료에 관한 정보교환을 원활히 하여야 한다. 또한 국민보건의 차원에서 주택내 라돈농도의 발생원 및 주택내 라돈 피폭자의 보건학적 영향평가가 정확히 파악되어야 한다고 사료된다.

Ⅳ. 결 론

서울시 일부지역에 소재한 일부 주택과 지하환경시설물을 대상으로 1988 년 2 월부터 약 1 년간에 걸쳐 실내 라돈농도를 측정하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1 . 일반 주택내 라돈 농도는 지하실 농도가 2.64 pCi / 1 로 1 층 거실의 농도(1.71 pCi / 1) 보다 높게 나타났다.

2. 조사대상 주택중 단열재를 사용한 주택에서의 라돈농도는 지하실에서 3.34 pCi /l 를, 1층 거실에서 1.96 pCi /l를 나타내는데 반하여 단열재를 사용안한 주택에서는 지하실에서 2.84 pCi /l, 1층 거실에서 1.36 pCi /l를 나타내 밀폐된 주택에서 라돈농도가 높게 나타났다.

3. 지하환경에서의 라돈의 평균농도는 지하상가에서 1.5 pCi /l, 지하철역에서 1.6 pCi /l, 지하도에서 2.1 pCi /l, 지하주차장에서 1.3 pCi /l, 터널에서 1.6 pCi /l 를 나타내 지하도에서의 라돈농도가 가장 높았다.

라돈농도는 건축자재의 특성, 건물구조의 특성, 환기율 등에 따라 나타나는 것으로 시사되어 우리나라에서도 주택내 라돈농도의 계속적인 측정조사가 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

1. Hopke, PK. Radon and Its Decay Products. ACS Symposium Series 331, 572-586, 1987.
2. APCA, Indoor Radon, Air Pollution Control Association, Pittsburgh, PA, 1986.
3. Hanson, B. EPA guideline for indoor radon levels evokes response from nuclear medicine. J. Nucl. Med. 28, 1087-1094, 1987.
4. 김윤신, 실내공기 오염에 관한 보건학적 고찰, 대한보건협회지, 9,29～39, 1983.
5. Kim, PS., Min, DK,. and Ro, SG. Measurement of radon daughters in airborne dust J. Rad. Protec. 2, 9-16, 1977.
6. Ha, CW. et al. The measurement of airborne radon daughter concentrations in the atmosphere. J. Rad. Protec. 4, 5-13, 1979.
7. 강영호 외 2인. Alpha 입자비추법에 의한 radon측정. 방사선방어학회지, 7, 17～22, 1982.
8. 김윤신. 서울시 일부지역의 실내공기 오염농도에 관한 조사연구, 환경과학논집, 9, 61～66, 1988.
9. Oswald, RA., Alter, HW., and Gingrich, JE. Indoor radon measurements with Track Etch Detectors, Presented at the 27th Annual Meeting of the Health Physics Society, Las Vegas, June 27-July 1, 1982.
10. Alter, HW and Fleischer, RL. Passive integration radon monitor for environmental monitoring. Health Phys. 40, 693-702, 1981.
11. Doyle, SM., Nazaroff, WW., and Nero, AV. Time-averaged indoor Rn concentrations and infiltration rates sampled in four U.S. cities. Health Physics. 47, 579-586, 1984.
12. Edling, C., Kling, H., and Axelson, O. Radon in homes - a possible cause of lung cancer. Scand. J. Work Environ. Health, 10, 25-34, 1984.
13. NCRP. Evaluation of Qccupational and Radon Daughters in the United States, NCRP Report No. 78, National Council on Radiation Protection and measurements, Bethesda, MD, 1984.