

건축물의 라돈농도 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristic of the Radon Gas in Buildings

○ 박진철, 이언구*

Park, Jin-chul, Rhee, Eon-ku

Abstract

This study aims to improve the Indoor Air Quality (IAQ) in Buildings. Especially, to investigate the concentration of Radon Gas, the document survey, the laboratory experiment and the field study were conducted. The results of this study can be summarized as follows: Sources of indoor radon include the soil and rock, water supplies, natural gas, and building materials (concrete, brick, gypsumboard, clay). Especially, the laboratory experiment of radon emission rate from unit surface area of various materials showed that radon gas was most emitted from the clay and gypsumboard. And according to the wide field measurement of buildings, the concentration of radon gas was most detected in both houses made of clay and underground buildings. However, the concentration of radon was much reduced if the space was ventilated. Therefore, building designers, constructors and engineers should recognize that the reasonable selection of building materials can make a great contribution to reduce the concentration. Also, to control the emitted radon gas efficiently, appropriate ventilation including mechanical equipment and opening planning are required.

키워드 : 라돈가스, 건축재료(황토, 석고보드, 콘크리트), 건축물(주택, 지하공간) 실내공기환경

keywords : Radon Gas, Building Materials (clay, gypsumboard, concrete), Buildings (houses, underground), IAQ

1. 서론(연구의 목적)¹⁾

최근 우리 사회는 새로운 천년을 맞이함과 동시에 현대문명에 대한 경고를 접하고 있다. 즉, 산업문명은 우리에게 물질적인 풍요와 번영을 가져왔지만 그 한편으로는 에너지와 자원의 고갈, 기후의 변화 및 산성비와 환경오염 등 지구의 환경문제는 감당할 수 없는 수준에 이르렀다.

이와같이 전 세계적으로 관심이 되고 있는 환경오염의 문제와 결부되어 건축물 내에서의 실내공기환경(IAQ)문제는 현대인이 하루 중 80% 이상을 건물 내에서 생활하고 있음을 고려할 때 특히, 국민건강과 복지의 측면에서 무엇보다도 먼저 중요하게 다루어져야 할 것이다.

실내공기환경(IAQ)에 영향을 미치는 오염원은 주로 건축자재, 연소가스, 생활용품, 접착제, 의약품, 화장품 및 흡연 등을 들 수 있으며 이외에도 각종 가구설비와 생활용품의 설치, 그리고 재실자의 생활행태에 따라서는 다양한 오염물질이 발생하고 있다.

본 연구에서는 우물, 지하수, 동굴, 바위 등 자연환경 외에도 흙, 시멘트, 콘크리트, 대리석, 진흙, 벽돌, 석고보드 등과 같은 건축자재 등에 존재하여 공기 중으로 방출

되어 인체 흡입시 폐암을 유발함으로써 그 유해성이 새롭게 제기되고 있는 라돈가스를 중심으로 특히, 다양한 건축물내에서의 라돈농도분포를 측정하고 분석 및 정리함으로써 건물의 실내공기환경을 개선하는 기초적 자료가 되고자 하였다.

2. 라돈가스의 발생원, 인체영향 및 기준치

2.1 라돈가스의 발생원

라돈(Rn-222)은 라듐(Radium)의 자연붕괴시 생성되는 것으로 무색, 무미, 무취의 지구상에 존재하는 가장 무거운 비활성가스 즉, 매우 짧은 시간내에 붕괴되는 가스(반감기 3.82일)로서 농도의 차이는 있지만 인간이 존재하는 어떠한 자연환경에서도 발견될 수 있는 천연방사성가스로 알려져 있다.

따라서, 건물내 라돈가스의 주요 원인은 토양가스에 기인하고 배수펌프, 우물, 배수로, 린세 및 기초물 통해서도 유입되며 특히, 토양을 원료로 하는 시멘트, 콘크리트, 대리석, 진흙, 벽돌 등 건축자재 등에서 방출되고 있다. 또한, 최근에는 산업폐기물로 제조되는 건축자재인 석고보드에서도 라돈이 다량으로 방출되고 있다고 한다.

* 정회원, 경민대학 건축설비과 조교수, 공학박사

** 정회원, 중앙대학교 건축학과 교수, 건축학박사

지하수의 경우에 다량의 라돈이 함유(100-10,000 pCi/L)되어 있다고 하는데, 물속의 라돈농도 10,000pCi/L는 공기 중 라돈농도 약 1pCi/L를 증가 시킨다고 한다. 한편, 건물내 라돈가스의 유입은 압력차에 의해 이루어지고 특히, 계절별 발생률에서는 외기온이 높은 여름철보다도 추운 겨울철에 그 발생률이 한 층 증가하고 있으며, 지역별 발생률에서는 미국북부, 캐나다, 스웨덴 및 우리나라의 북부지방 등 비교적 추운지역에서 많이 발생되고 있다.

2.2 라돈가스의 인체영향

라돈의 건강위험은 비활성 기체자체보다도 바로 짧은 기간의 α 붕괴에 의한 방사능의 미세한 입자를 인체 흡입시에 폐질환의 발생률이 매우 높은 것으로 보고되고 있다. 즉, 라돈이 발견된 후 처음에는 의학에서 류마티스 등 인체질환 치료로 이용되기도 하였으나, 짧은 반감기를 갖고 붕괴되는 고체상의 라돈의 낭핵종(radon daughter)인 미세한 α 입자가 인체흡입시에 폐암의 발생률이 높은 것으로 보고 되어 그 위해성이 새롭게 제기되고 있다.

라돈농도가 5pCi/liter에서 1년간 생활할 경우 1백만명 중 약 4백명 정도가 폐암발생을 나타내고, 200pCi/liter 일 경우에는 약 44%로 높은 폐암발생을 보이는 것으로 알려져 있다. 또한, 184pCi/liter는 하루에 담배 4갑을 피우는 것과 같고 4pCi/liter의 농도에서는 비흡연자라 할지라도 폐암에 걸릴 확률이 3배이상 높은 것으로 보고되고 있다. (표 2.1 참조).

표 2.1 라돈가스의 위해평가 도표

피폭농도 (pCi/L)	1000명당 잉여 폐암 사망자수	위해성
200	440-770	하루 담배4갑 흡연자
100	270-630	비흡연자 보다 60배이상 위해성
40	120-380	년 20,000장의 X-Ray촬영
20	60-100	하루 담배2갑 흡연자
10	30-120	비흡연자 보다 5배이상 위해성
4	13-50	년 200장의 X-Ray촬영
1	3-13	비흡연자의 폐암발생

EPA의 조사에 따르면 미국내 가정의 라돈가스의 평균 농도는 1.0pCi/liter로 추정되며 약 8%(8백만 가구)가 기준치(4.0pCi/liter)를 초과하고 더욱이 매년 15,000명 정도가 라돈가스의 노출로 인한 폐암으로 사망하고 있다고 보고됨으로써 라돈가스의 위해성을 증명해 주고 있다.

2.3 라돈가스의 환경기준 고찰

공기환경의 질을 나타내는 단위는 일반적으로 ppm이나 ppb 또는 mg/m³을 사용하지만, 라돈의 경우는 그 기준을 WL(Working Level, 1WL=100pCi/liter)로서 나타낸다. 이는 우라늄 광산에서 광부들의 건강상태를 연구하면서

라돈이 인체에 미치는 위해성에 의해 만들어진 것이다. 라돈가스의 국내의 환경기준치를 고찰해 보면 다음과 같다(표2.2 참조).

표 2.2 라돈가스의 기준치

구분	기준치	비고
외국환경 기준	1.9 pCi/L	스웨덴(신축건물)
	5.4 pCi/L	스웨덴(개축건물)
	10.8 pCi/L	스웨덴(기존건물)
	22 pCi/L	캐나다
	22 pCi/L	영국(기존건물)
	9.7 pCi/L	핀란드(기존건물)
	4.1 pCi/L	미국(기존건물)
	4.0 pCi/L	EPA*
국내환경 기준	2.0 pCi/L	ASHRAE**
	30 pCi/L	원자력시설에서 작업환경
	3 pCi/L	원자력시설에서 일반인

* EPA : Environmental Protection Agency
 **ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

외국의 실내공기환경(LAQ) 기준은 유럽에서는 WHO를 중심으로 1987년에 Air Quality Guidelines을 설정하여 실내공기환경과 건강 측면의 여러 연구결과를 축적해 오고 있고, 특히 스웨덴 등을 중심으로 각 건물에 따른 라돈가스의 기준치를 설정하여 적용하고 있다. 또한, 미국에서는 EPA와 ASHRAE를 중심으로 재실자를 위한 온열환경조건과 실내공기질을 고려한 실내공기환경 유지를 위한 환기규정 등을 제시하고 있으며, 특히 이미 지난 88년 이후에는 실내라돈방지법이 제정 되어 건물에서의 라돈에 관한 정보를 제공하도록 규정하고 있다.

표 2.3 지하생활공간 공기질관리기준

항목	기준치	비고
미세먼지 (PM-10)	0.25mg/m ³ 이하 (24시간평균; 1999/12/31까지)	1) 0.2mg/m ³ 이하; 2001.12.31 까지 2) 2002년부터; 0.15mg/m ³ 이하
일산화탄소(CO)	250ppm/시간 이하	
이산화탄소(CO ₂)	1000ppm/시간 이하	
아황산가스(SO ₂)	0.25ppm/시간 이하	
이산화질소(NO ₂)	0.15ppm/시간 이하	
포름알데히드	0.1ppm/24시간 이하	
납	3 μ g/m ³ 24시간 이하	

지하생활공간 공기질관리 시행규칙 (환경부, 1998.1.26제정 1998.12.31 개정)

한편, 국내의 실내공기환경 관련기준은 현재 보건복지부(위생관리법)와 건설교통부(건축법)에서는 일산화탄소,

이산화탄소, 분진 등의 세 가지 오염물질에 대해서만 규정하고 있고, 노동부(산업안전보건법)에서는 근로자의 8시간 작업환경에 대하여 다루고 있다. 또한, 환경부에서는 지난 1998년 1월에 지하공간 공기질 관리법 시행령 및 시행규칙을 제정(1998. 12.31 개정)하여 사용하고 있지만 그동안 권고치로 설정되어 있었던 라돈가스(4.0 pCi/L)는 자연방사능물질이라는 점을 내세워 규정항목에서 제외하는 등, 아직까지 실내공기환경에 대한 구체적인 기준치 설정이 되어 있지 않은 실정이다(표 2.3 참조).

3. 라돈가스의 농도변화 특성

3.1 개요

본 장에서는 라돈가스의 농도변화 특성에 관하여 살펴보고자 특히, 라돈가스의 주요 원인이 토양뿐만 아니라, 건축구조재 및 마감재료 등에서 방출되고 있음을 고려하여 먼저 각종 건축재료로부터 발생되는 라돈가스의 발생 정도를 파악하였고, 이와같은 재료들이 설치된 각 실내공간에서의 라돈농도 분포 측정자료에 대하여 기술하였다.

3.2 각종 건축재료에서 발생되는 라돈가스의 방사량

라돈가스의 주요 원인이 토양뿐만 아니라, 건축구조재 및 마감재료 등에서도 방출되고 있음을 고려하여 다음과 같이 실험실측정을 실시하였다(표 3.1 참조). 즉, 현재 구조재로 사용 중인 R.C 및 P.C 벽체를 비롯하여, 실내마감재인 석고보드 그리고 최근 주택의 내부 및 바닥마감재로 사용되고 있는 황토(진흙) 등의 재료를 대상으로 라돈가스의 방사량을 측정하였다.

표3.1 실험실 측정 개요

실험실크기 및 구성요소	실험건축재료	측정방법
크기 1m ³ (1.0m*1.0m*1.0m) 50mm철재앵글 프레임에 합석마감	콘크리트, 운모, 석고보드, 황토(진흙)	단위표면적당 발생되는 라돈가스방사량 측정

표3.2 각종 건축재료별 발생되는 라돈가스의 방사량*

건축재료		평균 라돈가스 방사량(pCi/m ² ·h)		방사량순위
콘크리트	R.C	600	515	3
	P.C	430		
운모	원석	387	410	4
	쇄석	433		
석고보드		2180.1		2
황토(진흙)		3105.2		1

*: 이언구, 박진철, 건축재료에서의 실내공기오염물질 발생농도 측정 연구, 1998. 6, 한국건축설비학회 창간호, pp.125-137.

라돈가스농도 측정은 Alpha 알파 입자를 감지하여 실내 라돈의 평균 농도를 계산하는 Radon WL(Working

Level) meter의 기기를 사용하여 최소 8시간 이상 포집하였다. 단위표면적(m²)당 발생되는 라돈가스의 방사량 측정결과는 다음과 같다(표3.2 참조).

즉, 밀폐된 실험실에서의 각종 건축재료를 대상으로한 라돈가스 방사량은 황토(진흙)-석고보드-콘크리트-운모의 순으로, 즉 황토(진흙)에서 라돈농도가 가장 높게 방출되고 있었으며 석고보드에서도 높은 농도로 방사되고 있음을 알 수 있었다.

따라서, 라돈가스가 인체 폐암의 원인이 되고 있음을 고려할 때, 밀폐된 실내에서의 황토(진흙) 및 석고보드 재료의 사용은 신중하게 다루어져야 할 것이다.

3.3 건축물의 라돈가스 농도 변화

다음의 표3.3과 3.4는 국내의 건축물내에서 측정된 라돈가스 농도 분포 자료들을 정리한 것이다

표3.3 외국의 라돈가스 농도분포 자료

국가별	실내공간별	평균 라돈농도 (pCi/L)
미국내 ¹⁾ 50개주	지상층	1.56(최대:3.3)
	지하층	2.81(최대:5.49)
중국 ²⁾	지상층(115개 건물)	0.37(최대:0.8)
	지하층(51개 건물)	1.56(최대:16.71)
스웨덴 ³⁾ (1360개)	지상층(single-family & apartment)	1.51(최대:105.5)
일본 ⁴⁾ (나고야)	지하층(환기장치 가동 무)	1.19(최대:7.5)
	지하층(환기장치 가동 유)	0.65(최대:2.41)

- 1) Anthony L.Hines, Indoor AIR Quality and Control. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993. pp.166-167
- 2) Wen Deng, et.al, Radon Study in underground buildings in China, Indoor Air '93. Helsinki, Finland: 1993, Vol.4.
- 3) Gun Astri Swedjemark, et.al, Radon Study in underground buildings in China, Indoor Air '93. Helsinki, Finland: 1993, Vol.4.
- 4) Takao Iida & Yukimasa Ikebe, Indoor Thoron & Radon Concentration measurements with passive cup monitors, Indoor Air '93. Helsinki, Finland: 1993, Vol.4.

즉, 표 3.3에서 알 수 있듯이 미국, 중국 및 스웨덴 등의 나라에서 측정된 라돈가스의 농도는 지상층인 경우에 평균 0.37 pCi/L에서 1.56pCi/L의 분포를 나타냈고, 비교적 추운 지역인 스웨덴에서 높게 검출되고 있었다. 특히, 지하층인 경우에는 평균 1.19pCi/L에서 2.81pCi/L의 값으로 지상층보다 약 2-3배의 높은 분포를 보이고 있었다. 그러나, 일본 나고야에서 측정된 자료에 의하면 지하층일 경우라도 환기장치의 가동에 따라 라돈가스의 농도는 약 1/2이하로 줄어들고 있음을 알 수 있었다.

표 3.4는 국내에서 측정된 라돈가스 농도분포를 나타낸 것으로, 먼저 공동주택인 경우 신축아파트에서 최고 4.57pCi/L, 평균 1.98 pCi/L, 기존아파트는 최고 2.7pCi/L,

평균 0.93 pCi/L, 또한, 기존아파트에 최근 땅이 시공되고 있는 황토로 바닥과 내벽을 마감한 곳의 농도는 최고 4.34pCi/L, 평균 1.96 pCi/L의 분포를 보이고 있었다. 특히, 다세대주택의 반지하세대에서는 평균 2.42pCi/L의 분포를 보였으며 습도가 높고 환기가 잘안되는 세대에서 최고 6.64pCi/L의 매우 높은 값을 나타내고 있었다.

단독주택인 경우, 황토주택은 최고 12.3pCi/L, 평균 3.4 pCi/L, 시멘트 및 적벽돌주택이 최고 3.1pCi/L, 평균 1.1 pCi/L 그리고 슬라브와 한옥구조인 경우는 평균 1.59pCi/L(최고4.69pCi/L)의 값을 나타내고 있었다. 특히, 단열재가 사용된 기밀한 주택과 지하실에서 높은 라돈농도에 폭로되고 있었다.

표3.4 국내의 라돈가스 농도분포 자료

건물유형 및 실내공간별		평균라돈농도 (pCi/L)
공동주택	황토아파트 ¹⁾ 기존주택에 황토로 도포 시킨 개축아파트(1층) (두께:약 10mm/ 벽:3mm)	1.96 (최대:4.34) * 타세대: 0.75
	일반아파트 ²⁾ 신축(전국 10개주택) * 3층이상-15층이하 기존(전국 21개주택) * 3층이상-15층이하	1.98 (최대:4.57) 0.93 (최대:2.7)
	다세대주택 ³⁾ 반지하	2.42 (최대:6.64)
단독주택	황토주택 ⁴⁾ 신축(1층 규모)	3.4(최대 12.3)
	시멘트 및 적벽돌주택 ⁵⁾ (1층규모) ⁶⁾	1.1 (최대 3.1)
	슬라브 및 한옥 ⁵⁾ * 1층 기준	1.59 (최대:4.69)
	단열재의 사용유무에 따라 ⁵⁾	단열재 (유) 지하실 :3.34 1층거실:1.96 단열재 (무) 지하실 :2.84 1층거실:1.36
지하역사	1,2,3,4호선 ⁷⁾ 대합실 및 승강장	3.37 (최대:17.2)
	5호선 ⁷⁾ 대합실 및 승강장	최대:35.6 최소:8.49

었다.

한편, 지난 90년대 이 후 서울시의 지하철역사에서의 라돈가스에 대한 노출정도는 최고17.2pCi/L, 평균 3.37pCi/L로 높은 분포를 나타내고 있었으며 특히, 지난해 수해로 인하여 지하역사가 침수시에 최고 35.6pCi/L의 농도를 보임으로써 라돈은 토양 외에도 지하수 등에도 다량으로 함유되어 있음을 확인 할 수 있었다.

4. 결론(연구결과종합)

지금까지의 연구를 종합해 볼 때, 라돈의 자연붕괴시 생성되는 라돈가스는 무색, 무미, 무취의 지구상에 존재하는 천연방사성 가스로서 인체 흡입시에 폐암의 원인으로 알려져 있다.

따라서, 라돈가스의 건축물내의 주요 발생원인은 토양에 기인하며 특히, 토양을 원료로 하는 시멘트, 콘크리트, 벽돌, 석고보드, 황토(진흙) 등의 건축재료 등에서 방출되고 있는데, 이 중 황토 및 석고보드에서 높은 방사량을 보이고 있음을 밝혀내었다. 또한, 이와같은 건축재료에 의해 지어진 건축물내에서의 라돈가스 농도도 역시 황토주택에서 가장 높은 값으로 검출되고 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 토양으로 둘러 쌓인 지하공간에서의 라돈가스는 매우 높은 농도분포를 보이고 있었고, 환기장치 가동에 따라 그 농도는 약 1/2정도의 수준까지 감소되고 있음을 알 수 있었다.

그러므로 설계가나 기술자는 건축물내에서의 라돈가스를 줄일 수 있는 재료선택에 무엇보다도 세심한 주의를 기울여야 할 것이며 환기 등의 적절한 방법을 통하여 오염농도를 최대한 줄여나가야 할 것이다.

참고문헌

- 1) 박진철, 이언구, 다세대주택의 실내공기환경 개선에 관한 연구, 한국건축설비학회 학회지 제 2권 2호, pp.102-109, 1998.6
- 2) 박진철, 이언구, 지하공간에서 라돈가스의 특성에 관한 연구, 1999. 4, 한국건축설비학회, Vol.2 No.1.
- 3) 박진철, 이언구, 건축재료에서의 실내공기오염물질 발생농도 측정 연구, 1998. 6, 한국건축설비학회, 창간호, Vol.1 No.1, pp.125-137.
- 4) 박진철, 이언구, 공동주택의 실내공기환경 개선에 관한 연구, 1996. 6, 공기조화냉동공학회, Vol.8 No.3, pp.397-412.
- 5) Anthony L.Hines, Indoor AIR Quality and Control. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993. pp.166-167
- 6) Indoor Air '93. Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Helsinki, Finland: 1993, Vol 2.
- 7) Indoor Air '96. Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Japan: 1996, Vol 2-3.

- 1) 1999년 12월 측정, 경기도 성남시 S아파트(완공 후 10년경과/황토벽 및 바닥으로 개수 후 15일 경과, 1층)
- 2) 이언구, 박진철, 이상형, 「공동주택의 실내공기환경 개선에 관한 연구」, 공기조화냉동공학회 논문집, 8권 3호, pp.397-412, 1996.
- 3) 이언구, 박진철, 방정현, 다세대주택 반지하세대의 실내공기환경 측정에 관한 연구, 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 15권 1호, 1998. 10.
- 4) 1998년 11월 측정, 전남 장진군 군동마을(완공후 2개월 경과)
- 5) 한국과학재단, 실내의 공기질의 유효평가 관리 및 기준치 개발에 관한 연구, 1991. 9.
- 6) 김동술 외, 경희대 환경공학과, 1998.10

따라서, 국내의 주택내에서 라돈가스 농도분포는 황토로 시공된 주택이 가장 높은 값을 보이고 있었고 특히, 신축인 경우 기존보다 약 2배 이상의 농도 값을 나타냈다. 또한, 황토로 개보수한 세대와 환기가 불량하고 토양으로 둘러 쌓인 반 지하세대에서 매우 높게 검출되고 있