

라돈가스의 문제점과 사례분석을 통한 해결방안

송호재¹ · 김근영¹ · 이아름¹ · 최용주¹ · 남경필¹ · 박준범^{1*}

¹서울대학교 건설환경공학부

Radon Gas Problems and Solutions through Case Analysis

Hojae Song¹ · Geunyoung Kim¹ · Aleum Lee¹ · Yongju Choi¹
Kyoungphile Nam¹ · Junboun Park^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

ABSTRACT

본 연구에서는 라돈가스의 환경적 문제점을 구체적으로 파악하였다. 각 나라별 라돈가스 환경문제 사례 분석을 통하여 국가별 라돈 가스 농도와 위험도를 조사하였다. 환경적 문제가 되는 라돈가스 유입의 방지법을 조사 및 연구하여 소개한다

Key words: 라돈가스, 사례분석, 공학적 차단기술

1. 라돈가스의 환경적 문제점

자연상태의 방사성 물질에 의한 피해 중 가장 심각한 것은 라돈(Radon, 원자번호 86)에 의한 피해라 할 수 있다. 라돈은 무색무취의 방사성 기체이며 우리나라의 자연붕괴 사슬 중에 자연적으로 발생하며 반감기는 3.82일이다. 미국 환경보호국(USEPA)에서는 라돈 기체의 흡입을 흡연 다음의 폐암 요인으로 경고하고 있다(USEPA, 2003). 라돈은 방사성 붕괴 과정 동안 14가지로 변환되는데, 각 단계에서 원자핵은 방사선 알파, 베타 입자 또는 감마선을 방출한다. 라돈은 암석이나 토양에 존재하는 우리나라의 자연붕괴로 대기 중으로 방출되거나, 물, 토양 반응에 의해 지하수로 함유되어 노출되고 인간의 흡입 및 섭취로 인체 내로 유입된다. 지하수, 암반 또는 건축 자재의 라돈은 작업공간과 생활공간에 침투되어 피해가 발생할 수 있다. 라돈은 지하수 섭취를 통해 인체로 고농도로 유입될 수는

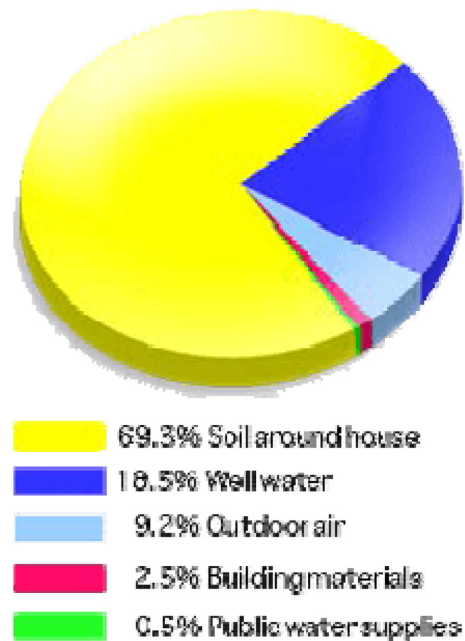


Fig. 1. Source of radon (radon.com).

있지만, 일반적으로는 암반과 흙에서 방출된 라돈의 기체 상태의 흡입이 더 큰 피해를 초래한다(그림 1).

라돈가스는 단일 원자로 구성된 가스이기 때문에 산소(O₂)분자보다 다양한 물질에 침투할 수 있다. 라돈은 일반

주저자: 송호재, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정
공동저자: 김근영, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정; 이아름, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정; 최용주, 서울대학교 건설환경공학부 부교수; 남경필, 서울대학교 건설환경공학부 교수
*교신저자: 박준범, 서울대학교 건설환경공학부 교수
E-mail: junboun@snu.ac.kr

Received : 2020. 01. 21 Reviewed : 2020. 01. 23
Accepted : 2020. 03. 09 Discussion until : 2020. 06. 30

적으로 건축물의 바닥이나 벽체의 균열이나 구멍을 통해 실내에서 감지되며, 종이, 플라스틱, 목재 및 단열재를 관통할 수 있다. 또한, 물에서의 라돈 노출 경로로는 음용수 섭취나 욕실과 주방 등에서의 물 사용이 있을 수 있다. 그러나 라돈은 휘발성이 커서 일반적으로는 음용에 의한 위해도는 호흡에 의한 위해도보다 낮은 것으로 알려져 있다. 물에 의한 영향은 전체 약 19%를 차지하며, 이 중 약 89%는 음용, 샤워, 및 설거지 등의 과정에서 호흡을 통해 이루어지고, 약 11%는 직접 섭취에 의한 것으로 알려져 있다.

라돈가스가 인체에 유입되면, 라돈의 붕괴 생성물에 의해 방출된 이온화된 라돈입자(알파 입자)는 폐의 수많은

조직과 반응하여 DNA 손상을 초래할 수 있다. 이것이 폐암의 원인이며, 이것은 매우 낮은 농도의 라돈이라도, 인체에 유해한 영향을 줄 수 있음을 나타낸다. 1998년 국제 암 연구소는 라돈에 상대적으로 높은 농도로 노출된 지하 광부에 대한 역학 연구를 통해 라돈을 폐 발암 물질 Group 1로 규정했다. 또한, 공기 중의 라돈가스에 장기적으로 노출될 경우 폐암을 발생시킬 확률이 담배 다음으로 높은 것으로 알려져 있다(USEPA, 2003).

유럽, 북미 및 중국의 세계 보건기구(WHO, World Health Organization) 연구에 따르면, 미국 환경 보호국(EPA)은 개인이 리터당 4 pCi(picocurie)의 실내 라돈농도에 평생 노출될 경우 폐암으로 사망할 위험이 23/1000(10^{-3})인 것으로 추정한다. EPA는 라돈의 노출로 인해 매년 미국에서 21,000명이 폐암으로 사망한다고 추정하고 있다(EPA, 2003). 실외 공기 수준과 비교하여 밀폐된 공간에 있는 사람, 특히 광산 및 건물의 지하 작업장에 있는 사람은 높은 농도의 라돈 및 붕괴 생성물에 노출된다. 조완근 등의 연구에 의하면 다중 이용 건물 및 지하 실내 공간의 라돈 오염도는 환기장치가 없는 지하철승강장이 가장 높은 수치 32 Bq/m³를 나타냈으며, 찜질방, 사무실 건물 지하실 및 지하 주차장 각각 14 Bq/m³로 두 번째로 높았으며, 지하상가, 보육시설, 환기장치가 있는 지하철승강장 순으로 나타났다. 또한, 대형 슈퍼마켓, 병원 1~2층, 2층 사무실 건물 2층이 낮은 라돈 농도를 나타냈다. 이는 지상 실내 공간이 지하 실내 공간의 라돈 농도

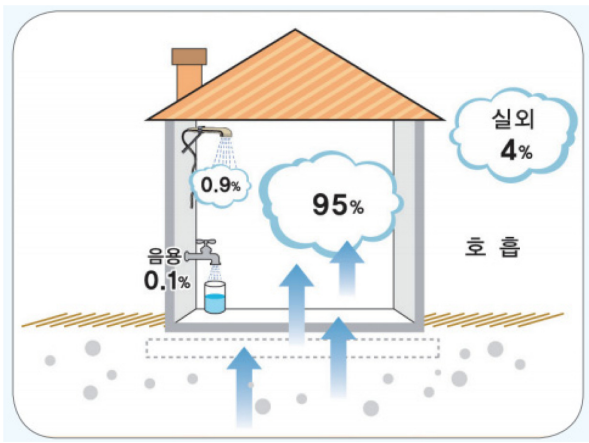


Fig. 2. Radon occurrence path in the house (WHO, 2004).

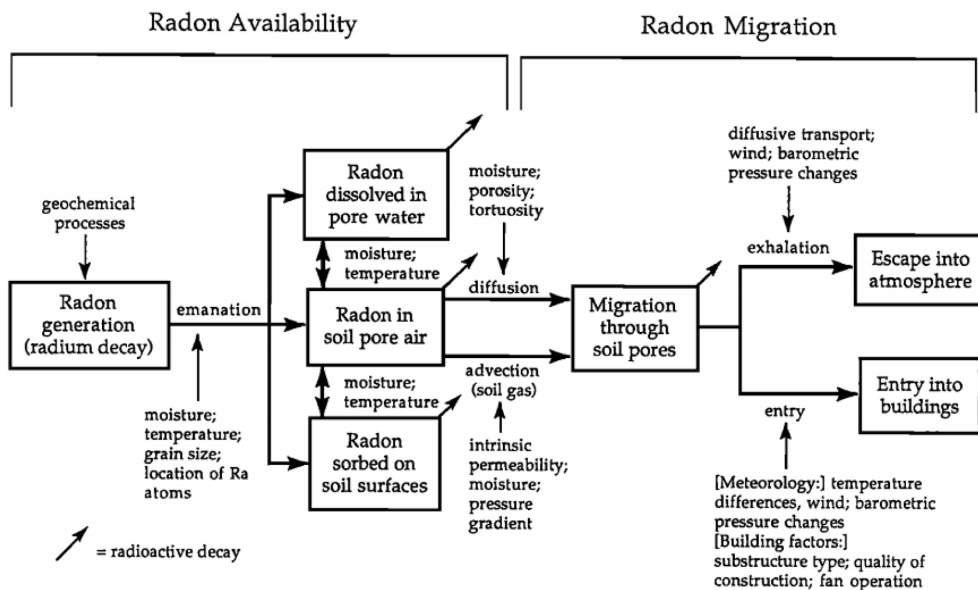


Fig. 3. Radon pathway (Nero et al., 1988).

Table 1. Radon pollution level in multi-use buildings and underground indoor spaces (Bq/m³) (조완근 et al., 2009)

장소	층	평균	표준편차	환기장치 유무
병원	1~2층	7.3	4.5	O
찜질방	2층	14.0	6.4	O
보육시설	1층	10.0	5.5	O
사무실 지상	2층	5.7	3.6	O
사무실 지하	지하	14.0	8.5	O
지하철 #1	지하	8.9	6.7	O
지하철 #2 (2005)	지하	32.0	22	X
지하철 #2 (2006)	지하	9.0	5.9	O
슈퍼마켓	1층	7.9	3.6	O
지하주차장	지하	14.0	8.1	O
지하상가	지하	12.0	6.5	O

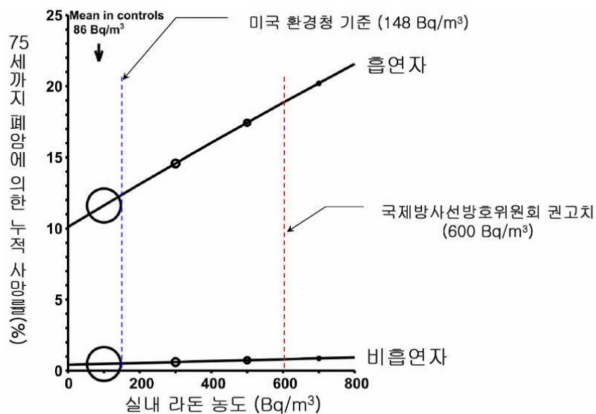


Fig. 4. Comparison of cumulative mortality from lung cancer by 75 years of age between smokers and non-smokers (Korea Atomic Energy Safety & Technology Institute, 2010).

보다 낮게 나타났으며, 저지는 지하 공간이 라돈 오염원인 토양에 보다 인접해 있기 때문으로 추정하였다(조완근 등, 2009).

폐암 7,148건을 분석한 Darby 등의 연구에 의하면 (Darby et al., 2005) 주거 노출에서 폐암의 상대적 위험은 라돈 노출 농도가 100 Bq/m³ 증가할 때마다 8.4% (95% 신뢰구간: 3.0%-15.8%) 증가했다. 북미 지역에서 실시한 7회의 역학조사 결과를 종합하여 폐암 총 3,662건을 분석한 Krewski 등(2006)의 연구에서도 이와 유사한 결과를 보고하였다(라돈 노출 농도 100 Bq/m³ 증가 시 폐암의 상대적 위험 11% 증가; 95% 신뢰구간: 0%-28%).

2. 각국의 라돈가스 환경문제 사례

2.1. 한국

생활환경 중 라돈의 농도는 한국원자력안전기술원

(KINS)에 의해 1981년부터 1989년까지 조사가 실행되어 왔으며, 2000년 이후부터 국민방사선 위해도 평가와 전국 실내라돈방사능조사연구 사업이 시행되어 왔다(한국원자력안전기술원, 2010). 또한, 환경부에서는 2020년까지 라돈 노출 취약지점을 중심으로 라돈 농도를 집중 분석하고 있다. 그림 5에 전국 주택의 실내 라돈 농도와 지체 구조가 제시되었다. 전국 주택의 실내 라돈 농도의 주요 인자는 토양 및 공기 중 라돈의 실내 유입과 건축재료에서의 방출이며, 화장암류의 분포와 유사하다. 즉, 화장암에 포함된 라듐에서 발생한 라돈가스가 높은 농도의 원인일 수 있다. 그러나, 우리나라 환경기준에 따르면 집계된 전국 주택의 실내 라돈 농도는 유해한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 우리나라의 경우 지하상가 등 17개 다중이용시설군과 학교 등에 대하여 실내 라돈 권고기준을 4 pCi/L로 설정하여 관리하고 있으며, 미국환경보호청(USEPA) 또한 실내 공간 기준치로 4 pCi/L(148 Bq/m³) 이하를 규제 기준으로 제시하였다(질병관리본부, 2016).

행정구역별 산술 평균 라돈 농도를 집계해 본 결과, 전라북도, 충청남도, 강원도의 평균 라돈 농도가 전체 평균보다 다소 높게 측정되었다(환경부, 2010). 그러나 라돈 조사지점의 개수 및 대부분의 지점에서의 농도를 고려하여 봤을 때, 환경기준치를 밀돌아, 큰 의미가 없는 것으로 보고되었다. 각 지역의 라돈 농도는 위치 등의 지역의 지리적 특성에 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

2.2. 미국

미국국립연구위원회(National Research Council) 소속 Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation(BEIR)는 라돈에 노출된 광업종사자에 대한 연구 사례를 정리하였다(BEIR VI 1999). 해당 연구 사례들은 라

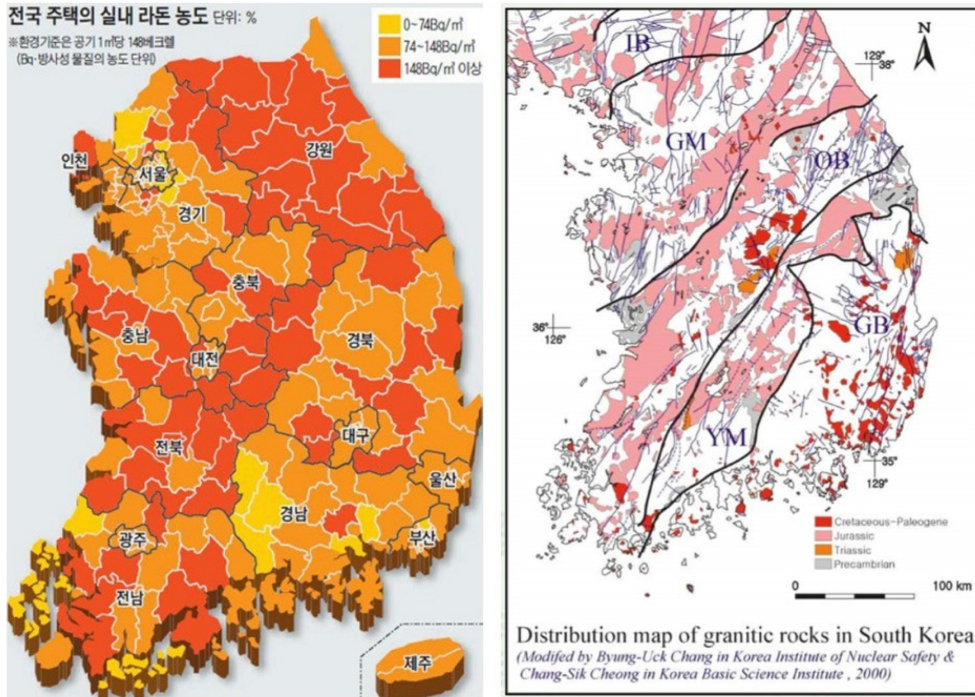


Fig. 5. Indoor Radon Concentration and Retardation Structure of National Housing (고영진, 2017).

Table 2. Arithmetic mean radon concentration by administrative area of multi-use facility (Bq/m³) (Ministry of Environment, 2010)

행정구역	지점수	여름	가을	평균	148 Bq/m ³ 초과지점수 (초과비율)
강원도	16	40.1 ± 41.2	37.7 ± 23.2	38.9 ± 31.1	-
경기도	73	25.0 ± 11.3	29.5 ± 12.8	27.4 ± 11.1	-
경상남도	8	17.7 ± 4.4	23.7 ± 6.3	20.7 ± 4.5	-
경상북도	18	18.7 ± 13.1	31.4 ± 29.9	25.1 ± 21.1	-
광주광역시	15	21.7 ± 16.9	24.3 ± 15.2	23.1 ± 15.9	-
대구광역시	26	15.5 ± 7.8	24.6 ± 10.4	20.4 ± 8.3	-
대전광역시	14	25.1 ± 17.5	30.0 ± 11.9	27.6 ± 14.2	-
부산광역시	27	14.5 ± 5.4	19.2 ± 7.3	16.1 ± 4.6	-
서울특별시	64	25.7 ± 17.2	29.3 ± 24.3	28.1 ± 20.2	1 (0.3%)
울산광역시	1	11.5 ± 0.0	5.2 ± 0.0	8.3 ± 0.0	-
인천광역시	22	22.1 ± 10.2	21.8 ± 11.0	22.0 ± 9.4	-
전라남도	13	21.0 ± 9.3	20.4 ± 6.0	20.7 ± 6.8	-
전라북도	6	43.0 ± 28.8	61.5 ± 39.3	53.2 ± 35.2	-
제주도	7	26.9 ± 18.2	34.5 ± 20.0	31.9 ± 16.0	-
충청남도	9	32.2 ± 17.7	49.8 ± 28.6	41.0 ± 22.3	-
충청북도	13	21.7 ± 13.1	39.1 ± 22.7	30.8 ± 17.4	-
전국 평균	332	23.7 ± 17.3	29.1 ± 20.0	26.7 ± 17.7	
최고값		168	189	152	
148 Bq/m ³ 초과지점수 (초과비율)		1 (0.3%)	1 (0.3%)	1 (0.3%)	

돈 노출도가 증가함에 따라 폐암발병률 또한 증가하는 양상을 나타내는 우리나라 광산을 대상으로 진행되었다. BEIR

VI 위원회는 라돈 가스에 대한 11개의 연구를 바탕으로 라돈 독성의 위험성에 대한 결과를 제시하였다. 보고서에

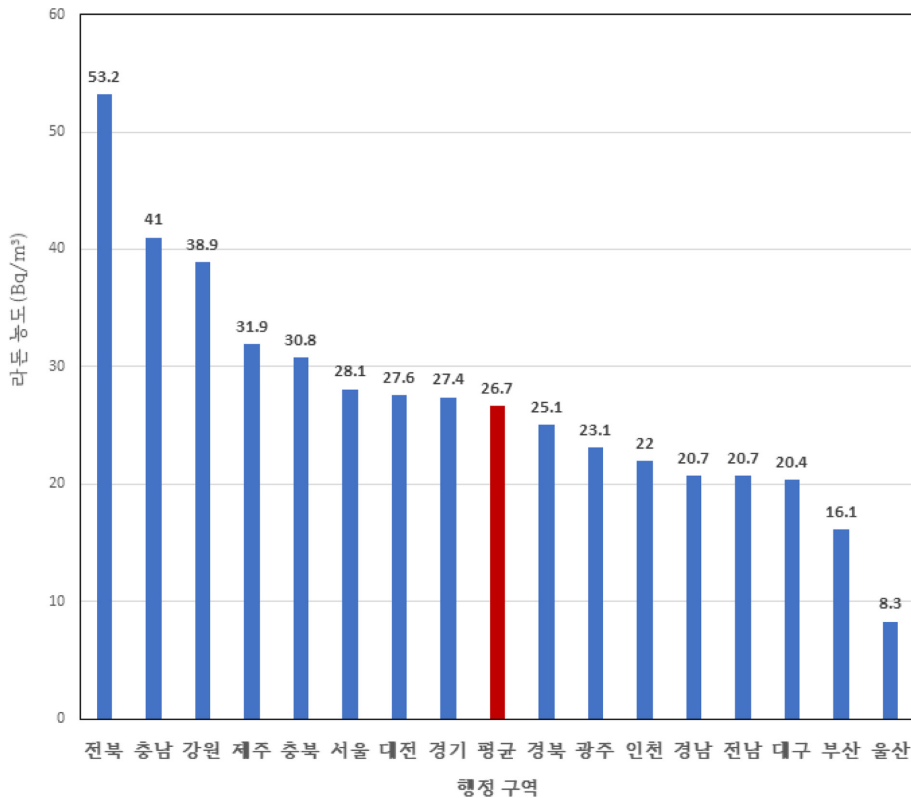


Fig. 6. Distribution of radon concentration by region (Ministry of Environment, 2010).

따르면, 광업 종사자의 WLM(working level month)당 폐암사망률은 평균 약 0.44% 증가하였고, 노출시간에 대한 가장 높은 사망률은 6~12년으로 라돈가스가 사람의 폐에 만성적인 독성을 나타내는 것으로 추정된다. 또한, 라돈 농도는 WL(working level) 단위로 표현되었으며, 낮은 라돈 농도(<0.5 WL)로 노출된 광부들이 높은 농도(>15.0 WL)로 노출된 사람들보다 사망률이 약 9.10배 더 높은 것으로 나타났다.

BEIR VI 리스크 모델에서 광업 종사자에 대한 전반적인 라돈 노출 농도의 범위를 분류하였고, 그 중 낮은 수준에 해당하는 라돈 농도는 50 WLM 이하이다. 2007년에 수행된 북미 연구에 따르면, 1 WLM은 약 3,700 Bq/m³에 해당하며, 50 WLM은 고농도의 라돈을 방출하는 주거지에서 장기간 노출하는 것과 같은 수치로 설명되었다. 광업 종사자 기반 리스크 모델을 사용하여 광산 및 주택 노출의 상관관계를 비교하였고, 그 결과에 근거한 외삽법에 따르면 주거용 라돈의 요인은 매년 폐암 사망의 거의 10-15%를 차지할 가능성이 있다고 추정된다(Krewski et al., 2006). 또한, Po-214(반감기: 26.8분) 및 Po-218(반감기: 3.04분) 등의 반감기가 짧은 방사성 라돈 붕괴 생성

물(short-lived radon decay product)은 세포 DNA를 손상시킨다는 연구 결과가 제시된 바 있다(Krewski et al. 2006). 그러나 주거용 라돈 및 폐암에 관한 연구사례들은 라돈노출도와 폐암발병률에 대한 확실한 증거가 제시되지는 않았다. 결론적으로, 해당 연구의 결과는 라돈 노출도와 광업 종사자들의 폐암 발병률의 관계성을 직접적으로 입증하지는 못하였으나 가능성을 제시하였다.

2.3. 독일

2005년 독일에서 최대규모의 사례가 연구되었다. Wichmann et al.(2005)에 따르면, 2,963건과 4,232건의 대조군으로 구성된 24세에서 75세 사이의 피실험자를 대상으로 실내 라돈에 대한 노출 농도가 50, 80, 및 140 Bq/m³ 인 3 개의 그룹으로 분류되었다. 이 연구는 라돈 노출과 폐암 사이의 선형적 반응 관계가 비흡연자보다 흡연자에서 더 명백하다는 것을 보여준다(Kreuzer et al. 2002).

2.4. 스페인

Torres-Durán 등(2014)은 스페인 갈리시아에서 192개의

폐암 사례와 329개의 대조군을 분석하고, 연구하였다. 연구 대상은 30세 이상의 흡연자를 대상으로 하였다. 이 연구는 실내 라돈과 폐암 사이의 중요한 관계를 보여주었다. 가장 높은 라돈에 노출된 개인(>200 Bq/m³)의 노출교차비 (OR)는 가장 낮은 라돈에 노출된 그룹(<100 Bq/m³)에 비해 2.42(95% CI: 1.45-4.06)를 나타냈다. 또한, 200 Bq/m³ 이상의 농도에 노출되었고 흡연자와 함께 살지 않은 개인은 1.99의 OR을 나타냈다(95% CI: 1.16-3.41). 또한, 이러한 결과는 폐암 위험에 대한 실내 라돈 노출과 간접 흡연과의 관계를 시사한다. 갈리시아의 토양은 높은 수준의 화강암이 포함되어 있기 때문에 모든 주택의 약 20%가 실내 라돈에 대한 EPA의 action level(4 pCi/L)보다 높은 것으로 집계되었다. 이 연구는 실내 라돈과 폐암 위험 사이의 연관성의 중요한 증거를 보여주었다(USEPA, 2012).

2.5. 스웨덴

라돈과 폐암 발병률에 대한 상관관계를 알아보기 위해, Pershagen 등(1994)은 1980년에서 1984년까지 폐암 발병 진단자들 중 35살부터 74살 사이의 여성 586명, 남성 774명을 대상으로 상관관계를 분석하였으며, 발병하지 않은 대조군으로서 여성 1320명, 남성 1467명을 설정하였다. 또한, 흡연 습관 등 타 요인들에 대해서도 연구된 것으로 보고된다.

생활환경 내 라돈농도에 영향을 미치는 주요인자 중 하나는 환기로서, 창문의 여닫힘이 주요 인자로 작용할 수 있다. 실험자들은 측정 가능했던 거주 기간의 평균 81.6%

동안 열린 창문 근처에서 수면을 취하였고, 이 실험자들을 분석에서 제외하였을 때, 리터당 라돈 2.7 pCi 당 초과 위험은 0.18(95% 신뢰 구간, 0.06~0.37)로 보고되었다. 열린 창 근처에서 잠을 잔 실험자와 그 외 실험자들 사이에서 폐암 위험의 명백한 차이는 보이지 않았다. 본 연구에서는 시간 가중 평균 노출도(time weighted mean exposure)을 이용하여 분석하였을 때, 폐암 발병률과 라돈의 누적된 노출량이 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다.

3. 라돈가스 유입의 방지법

특정한 지점에 적용할 라돈가스 차단 기술을 선정할 때는 라돈 농도를 위험 수준 이하로 낮출 수 있는지, 정화 과정이 안전한지, 장기적 효과가 있는지, 모니터링이 용이하며 정화과정에서 소음이 발생하는지, 설치와 운영 및 유지 보수를 위한 비용이 효율적인지를 고려해야 한다. 위와 같은 기준들을 토대로 다양한 라돈가스 처리 기술들이 존재하며 각 기술의 효과와 평가는 표 4에 정리되어 있다.

라돈가스 정화시에 가장 중요한 기술적 요소는 공기의 흐름이다. 이 흐름은 대류에 의해 토양에서 바깥공간으로 자연스럽게 이어져야 한다. 라돈은 기압의 차이에 의해 실내로 들어오는데, 이는 라돈 가스가 실내로 유입되는 가장 큰 이유이다. 그렇기에 이러한 기압의 차이를 이용한 라돈가스 정화방법 및 기술이 다양하게 연구되고 있다. 토양감압법과 같은 기술이 적용 가능하며 토양과 실내 사이의 공기는 주로 membrane으로 차단한다. 이 기술에서 사

Table 3. Relative Risk of Lung Cancer in Sweden, 1980–1984, According to Time-Weighted Mean Residential Radon Exposure since 1947 and the Habit of Sleeping near an Open Window (Pershagen et al., 1994)

창문 근처 수면	라돈 노출 농도(Bq/m ³)*										라돈 단위 당 증가한 상대 위험도 (95% CI) [†]
	≤50		>50 TO 80		>80 TO 140		>140 TO 400		>400		
	Subjects	Relative risk (CI)	Subjects	Relative risk (CI)	Subjects	Relative risk (CI)	Subjects	Relative risk (CI)	Subjects	Relative risk (CI)	
No or unknown	330	1	214	1.2	204	1.2	195	1.5	37	2.6	0.18
	716	-	418	(0.9-1.5)	386	(1.0-1.6)	315	(1.1-1.9)	41	(1.5-4.4)	(0.06 - 0.37)
Yes	122	1.2	54	0.9	68	0.8	51	1.1	6	0.8	-0.03
	236	(0.9-1.6)	143	(0.6-1.8)	182	(0.6-1.1)	121	(0.7-1.7)	18	(0.3-2.1)	(0.05) [‡]

*1 Bq/m³=37*1 pCi/L, 각 분류된 구간의 첫 줄은 실험군의 숫자, 두 번째 줄은 대조군의 숫자를 나타낸다. 상대 위험도와 95% 신뢰 구간(CI)은 연령, 직업, 성별, 흡연 습관, 주거 지역(도시, 전원) 등을 조정한 후 나타내었다.

[†]해당 카테고리에는 라돈 농도가 단위당 증가함을 나타낸다.(1 단위 = 2.7 pCi/L 또는 100 Bq/m³)

[‡]표시된 수치는 통계학적으로 유의미한 값을 나타내지 않는다(P≥0.05). 신뢰 구간에 0이 포함된 경우, 사용된 계산 방법으로는 하한을 계산할 수 없기 때문에 상한만 표시되었다.

Table 4. Radon gas treatment technology alternative and effect evaluation (USEPA, 1993)

대안	라돈 가스 저감 가능성	장기적 효과	모니터링 가능 여부	소음 및 공해	비용	
					설치	운영
토양배기법	매우 좋음	매우 좋음	라돈 테스트 필수	매우 좋음	낮음	보통
자연배출법	낮음	좋음	반복적 라돈 테스트 필수	매우 좋음	낮음	매우 낮음
표면밀봉 기술	매우 낮음	나쁨	반복적 라돈 테스트 필수	중음	보통	매우 낮음
차단막 설치 기술	(지역 특성에 따라 다름)	보통	반복적 라돈 테스트 필수	매우 좋음	보통	없음
환기법	낮음	중음	반복적 라돈 테스트 필수	매우 좋음	높음	높음

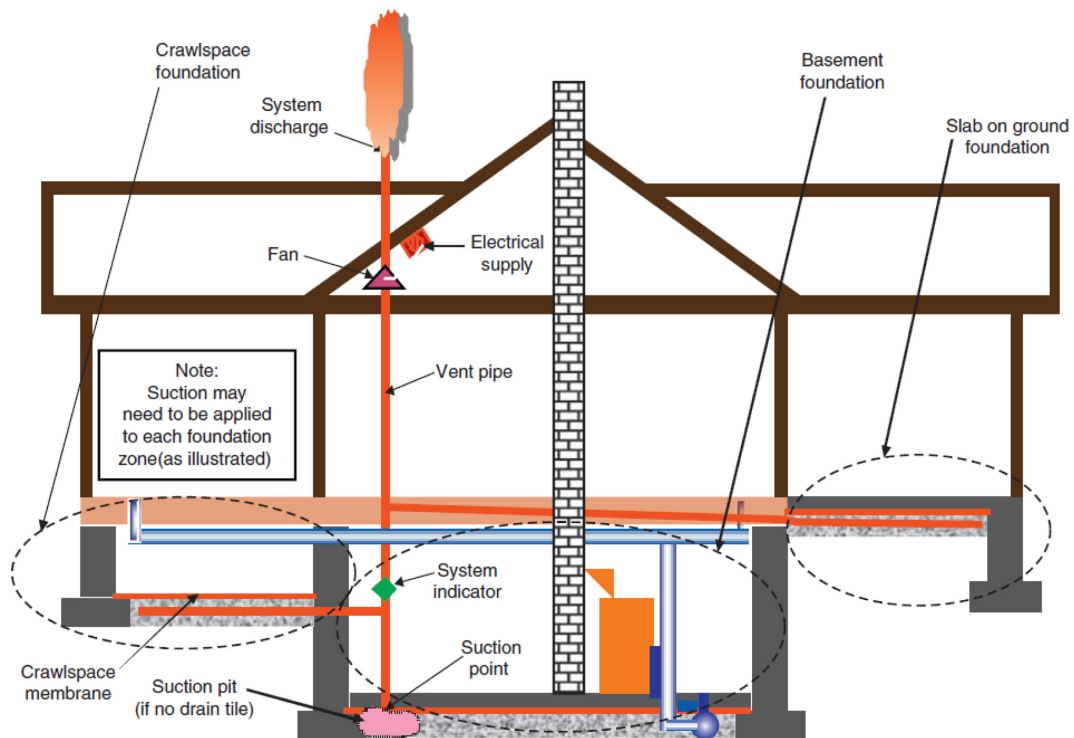


Fig. 7. Active Soil Depressurization Scheme (Angell, 2011).

용되는 membrane은 고체나 어떠한 액체도 통과할 수 없고 오로지 기체만 통과하도록 제작된 membrane을 사용한다. 또한, 특정 지역의 라돈가스의 차단 및 정화에서는 지역의 특성을 고려하여 주로 어떠한 경로로 라돈가스가 발생하고 유입되는지에 대한 공학적 분석이 필수적이다. 라돈가스 차단 및 정화기술은 다른 정화기술과 함께 적용하여 제거효율을 극대화시키기도 한다. 다음은 라돈가스 차단 및 정화기술이다.

3.1. 토양배기법(Active Soil Depressurization, ASD)

토양배기법은 토양 내 공기를 인위적으로 외부로 배출

함에 따라 기압을 상대적으로 실내보다 낮게 만들어서 토양으로부터 유입을 방지하는 기술이다. 토양배기법은 장비의 설치가 쉽고 자연배출법(Passive Soil Depressurization, PSD)에 비해 라돈가스를 더 효율적으로 제거한다(USEPA 1993). 토양배기법은 주로 건물 설계자들이 선호하는 방식이며 캐나다 과학자인 Scott에 의해 1979년에 처음으로 적용되었다. 토양배기법은 다음과 같은 요소를 포함한다.

- 공기 흡입 지점은 지하에 위치하며, 이는 집의 바닥과 접촉하고 연속 투과성 골재 층과 지하수 제어 시스템에 연결된다.

- 위의 그림과 같이 건물의 가장 높은 위치로 사람의 노출을 최소화 할 수 있는 곳에 배출 지점을 둔다. 지상으로 방출된 라돈가스가 다시 압력에 의해 집안으로 돌아들어올 수 있기 때문에 배출지점은 높은 곳에 존재해야 한다(Henschel and Scott, 1991). 가스의 농도가 낮더라도 토양배기법을 통해 관리해야 한다.
- 집 밖에 inline fan을 설치하여 연속적으로 가동하는 것이 필수적이다. 토양배기법의 가장 주요한 장점은 적은 에너지로 높은 효율을 낼 수 있다는 점이다.

본 시스템에 태양광, 혹은 풍력을 적용하여 유지관리비를 저감하는 것도 시스템 지속가능성을 확보하는 아이디어라 할 수 있다.

3.2. 자연배출법(Passive Soil Depressurization, PSD)

자연배출법은 토양배기법과 매우 유사하다. 신축 공사에서 자연배출법은 라돈을 약 50% 이상 저감 가능하다(Dewey and Nowak, 1994). 자연배출법 시스템이 정확하게 설계되고 설치되면 작은 팬을 사용하여 시스템을 활성화 할 수 있다(Saum, 1991). 팬의 크기가 작을수록 효율성은 증가하지만 제거효율이 낮아질 수 있기 때문에 적절한 크기를 선택해야 한다.

- 자연배출법 시스템은 지면에 직접 접촉하는 모든 바닥부분에 투과성 막이 설치되어야 한다. 이를 통하여 라돈이 자연배출되도록 유도한다. 대신, 다른 모든 벽체 등에 존재하는 크랙이나 틈새는 밀봉시켜서 전체적인 효율성이 유지되도록 한다.
- 통풍관을 제거하지 않으면 통풍구 유형의 파이프는 건물의 가열된 부분을 지나가야 한다.
- 자연배출법 시스템이 라돈가스를 충분히 줄이지 못하면 제거 효율을 증가시키기 위해 팬을 설치해야 한다. 즉, 토양배기법으로 전환되어야 한다.

3.3. 표면 밀봉 기술

표면 밀봉 기술은 토양배기법이나 자연배출법과 함께 사용될 때 외부 토양과 실내 공간을 분리하여 처리하므로 매우 효과적이며 최대 제거효율을 보여줄 수 있다. 즉, 표면을 밀봉함으로써 지중으로부터의 공기의 유입을 유도, 보장하고, 실내로부터 유입되는 short circuit 현상을 막아준다. 이렇게 표면 밀봉 기술은 실내에 존재하는 깨끗한 공기의 손실을 막아주는데, 그 효율이 매우 높다고 알려져 있다(Henschel, 1993). 표면 밀봉 기술은 독립적으로 적용 가능한 기술이지만, 라돈가스 제거에 있어서는 한계가 존

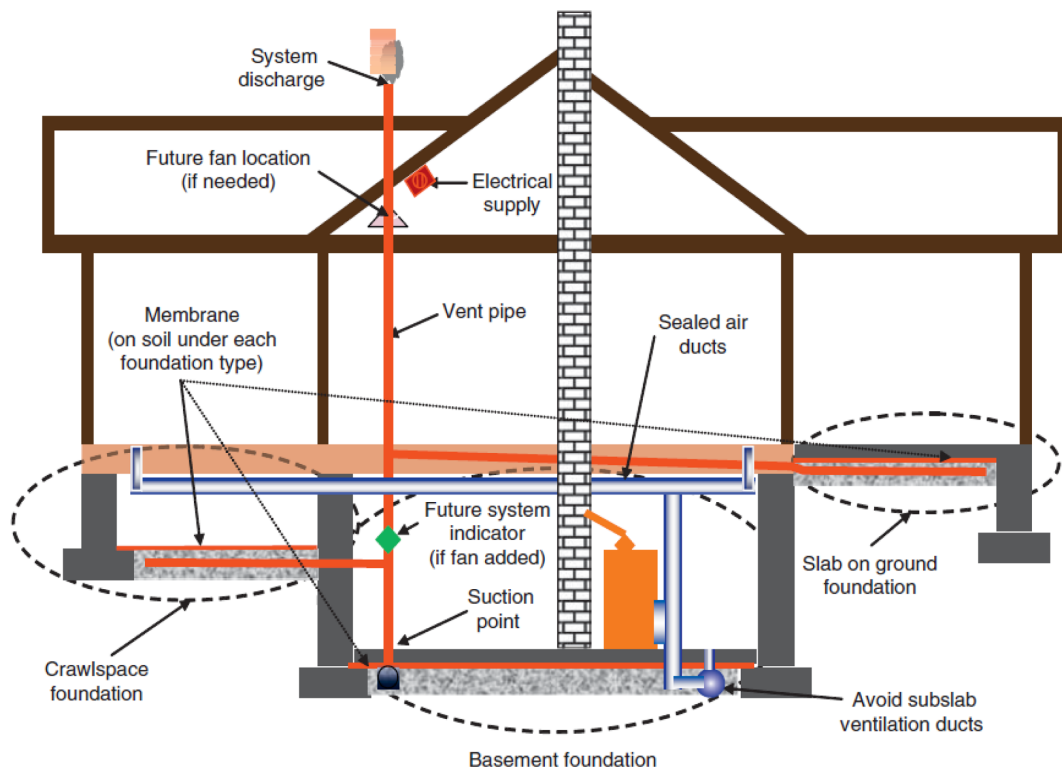


Fig. 8. Passive Soil Depressurization Scheme (Angell, 2011).



Fig. 9. Barriers and membranes (Poor and Good) (WHO, 2009).

재하여 이 기술만으로는 충분한 양의 라돈가스 저감이 불가능하다(Brennan, 1990). 즉, 타 기술의 효율을 높여주는 보조적인 기술이라 할 수 있다(Scott, 1993).

3.4. 차단막 설치 기술

토양과 실내 사이에 차단막을 설치하는 기술은 라돈가스 유입방지에 있어서 매우 효율적이며 단독 기술로도 적용 가능하다. Membrane과 같은 막은 수분이 실내로 유입되는 것도 막을 수 있어서 더 효율적이다. 차단막을 설치할 때에는 강도, 확산성, 지속성, 내구성과 같은 특성을 반드시 고려하여 결정해야 한다(SINTEF, 2007). 이 차단막 설치 기술을 토양배기법이나 자연배출법과 함께 적용할 때, 차단막은 반드시 연속적으로 전 영역에 설치 존재할 필요는 없다.

3.5. 환기법

환기법과 같은 점유 공간과 토양 사이의 빈 공간의 공기를 순환시키는 것은 실내 공기를 토양에서 분리하여 실내 라돈 농도를 줄일 때 효과적이다. 환기법은 다양한 주변 환경적 요소들에 따라 효율성이 달라지기도 한다. 실내공기와 실외공기를 성공적으로 분리할 수 있는지가 매우 중요하다. 환기법은 팬을 이용하여 빈 공간에 가압을 하여 빈 공간도 활용할 수 있어야 한다. 그러나 팬을 활용한 감압은 back drafting이나 효율성 감소와 같은 문제를 야기할 수 있으므로 주의해야 한다(ASTM, 2003). 그러므로 이렇게 건물내에 빈 공간이 많아서 환기법 적용이 어려운 경우에는 막 횡단 감압(Submembrane Depressurization, SMD)법을 적용하여 라돈 가스의 농도를 감소시켜야 한다.

4. 결 론

라돈은 우리들의 자연 붕괴로 자연적으로 발생하는 무

색 무취의 방사성 기체이며 반감기가 3.82일이다. 토양에 존재하는 우리들의 자연붕괴로 대기로 방출되거나 물, 토양 반응에 의해 지하수로 함유되어 인간에게로 노출된다. 라돈가스는 단일 원자로 구성되어 다양한 물질에 침투할 수 있다. 세계보건기구(WHO)는 전 세계 폐암 발생의 3~14%가 라돈에 의한 것이며, 라돈을 흡연에 이은 폐암 발병 주요 원인물질로 규정하고 있다. 이러한 위해성으로 우리나라의 경우 다중이용시설에 대해 실내 라돈 권고기준 4 pCi/L로 설정하여 관리하고 있으며, 환경부에서 2018년 먹는물 수질감시항목에 라돈을 포함시켜 모니터링을 실시하고 있다. 또한, 국민의 라돈 노출 최소화를 위해 라돈 무료 측정 및 컨설팅 서비스(www.radon-free.or.kr)를 제공하며 라돈에 대해 관리하고 있다.

국내 라돈 농도는 토양 및 공기 중에서의 유입과 건축 재료에서의 방출로 인해 누적되며 국내외 라돈 실내 규제 기준에 따르면 우리나라의 실내 라돈 농도는 유해한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 또한, 국외에서 실내 및 지하 광업 환경을 대상으로 폐암 발병률과 라돈 노출도에 대한 상관관계를 분석한 결과 밀접한 연관성의 가능성을 제시하였다. 라돈의 방출원과 이동 메커니즘에 따라 라돈 저감 기술 및 정책이 상이해질 것으로 판단되므로 환경에 따른 적절한 적용이 필요하다.

라돈가스가 환경적으로 인간에게 위험한 물질인 만큼, 이를 처리하기 위한 다양한 기술들이 개발되었다. 토양배기법, 자연배출법, 표면 밀봉 기술, 차단막 설치 기술, 환기법 등의 방법을 소개하였다. 문제가 발생한 각 상황에 따라 적절한 기술을 적용하여 경제적이면서 시간적으로도 효율적인 해결책을 찾는 것이 무엇보다 중요하다. 라돈가스의 위험성이 알려지면서 더욱 효율적이고 다양한 공학적 해결 기술들의 개발이 필요한 상황이다. 안전하고 빠르고 경제적으로, 인간에게 해가 되지 않도록 하기 위한 다양한 기술연구가 필수적인 상황이다.

감사의 글(Acknowledgement)

서울대학교 공학연구원의 지원에 감사를 드립니다.

References

- Advisory Group on Ionising Radiation (AGIR), 2009, Radon and public health radiation, *Chemicals and environmental hazards*, Health Protection Authority. (http://www.hpa.org.uk/web/HPAwebFile/HPAweb_C/1243838496865).
- Angell, W.J., 2011, Indoor radon prevention and mitigation, *Encyclopedia of Environmental Health*, Elsevier Inc., 208-217.
- Arvela, H. and Hoving, P., 1993, Finnish experience in indoor radon mitigation, *The Sixth International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Helsinki, IV:563-568.
- ASTM, 2003, Standard Practice for Installing Radon Mitigation in Existing Low-Rise Residential Buildings West Conshohocken, PA: *American Society for Testing and Materials International*, E2121-03.
- Biological Effects of Ionizing Radiation IV Report, (1988, Health risks of radon and other internally deposited Alpha-emitters, *BEIR*, National Academy Press, Washington D.C.
- Biological Effects of Ionizing Radiation VI Report, 1999, Health effects of exposure to indoor radon. *BEIR*, National Academy Press, Washington D.C.
- Bohac D et al., 1992, The energy penalty of sub-slab depressurization radon mitigation systems, *Proceedings of the 1992 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology*, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 2:7.37-7.55.
- Building Research Establishment, 1998, Guide to Radon Remedial Measures in Existing Dwellings: Dwellings with Cellars and Basements, *BRE*, Watford.
- Cancer Society cohort, 2011, Cancer Epidemiology and Prevention Biomarkers.
- Darby, S.C., Whitely, E., Howe, G.R., Hutchings, S.J., Kusiak, R.A., Lubin, J.H., Morrison, H.I., Tirmarche, M., Tomasek, L., Radford, E.P., Roscoe, R.J., Samet, J.M., and Yao, S.X., 1995, Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. *J Natl Cancer Inst*, **87**(5), 378-384.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., Schaffrath Rosario, A., Tirmarche, M., Tomáscaron;ek, L., Whitley, E., Wichmann, H.E., and Doll, R., 2005, Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, **330**(7485), 223-227.
- Darby, S., Hill, D., Deo, H., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Falk, R., Farchi, S., Figueiras, A., Hakama, M., Heid, I., Hunter, N., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruosteenoja, E., Rosario, A.S., Tirmarche, M., Tomášek, L., Whitley, E., Wichmann, H.E., and Doll, R., 2006, Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe, *Scand J Work Environ Health*, **32** (Suppl 1), 1-83.
- EPA, 2003, EPA Assessment of Risks from Radon in Homes, Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation and Indoor Air, EPA 402-R-03-003.
- Flater, D. and Spencer, J., 1994, Evaluation of radon mitigation systems installed in Iowa, *The 1994 Annual Radon Symposium II*, Atlantic City, NJ, (6.1-6.6).
- Font, L. and Baixeras. C., 2003. The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors, *Sci Total Environ*, **307**(1-3), 55-69.
- Font, L.I., Baixeras, C., and Moreno, V., 2008, Indoor radon levels in underground workplaces of Catalonia, Spain, *Radiat Meas*, **43**, S467-S470.
- Institute of Medicine, 1995, Case Study 39: Residential Radon Exposure and Lung Cancer in Sweden, *Environmental Medicine: Integrating a Missing Element into Medical Education*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/4795.
- Kreuzer, M., Heinrich, J., Kreienbrock, L., Rosario, A.S., Gerken, M., and Wichmann, H.E., 2002, Risk factors for lung cancer among nonsmoking women, *International Journal of Cancer*, **100**(6), 706-713.
- Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M., Alavanja, M., Catalan, V.S., William Field, R., Klotz, J.B., Létourneau, E.G., Lynch, C.F., Lyon, J.L., Sandler, D.P., Schoenberg, J.B., Steck, D.J., Stolwijk, J.A., Weinberg, C., and Wilcox, H.B., 2006, A Combined Analysis of North American Case-Control Studies of Res-

- idential Radon and Lung Cancer. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, **69**(7-8), 533-597.
- Laurier, D., Valenty, M., and Tirmarche, M., 2001, Radon exposure and the risk of leukemia: A review of epidemiological studies, *Health Phys*, **81**(3), 272-288.
- Lubin JH, 1999, Indoor radon and the risk of lung cancer. *Proceedings of the American Statistical Association Conference on Radiation and Health Radiation Research*, **151**, 105-107.
- Lubin, J.H. and Boice, J.D. Jr, 1997, Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies, *J Natl Cancer Inst*, **89**(1), 49-57.
- National Research Council (US) Committee on Health Risks of exposure to Radon, 1999, Health effects of exposure to radon, *BEIR VI*, Washington (DC): National Academies Press (US)
- Nazaroff, W.W. and Nero, A.V., 1988, Radon and its decay products in indoor air.
- Sheen, S., Lee, K.S., Chung, W.Y., Nam, S., and Kang, D.R., 2016, An updated review of case control studies of lung cancer and indoor radon-Is indoor radon the risk factor for lung cancer, *Ann of Occup and Environ Med*, **28**(9) doi:10.1186/s40557-016-0094-3
- Pershagen, G., Akerblom, G., Axelson, O., Clavensjo, B., Damber, L., Desai, G., Enflo, A., Lagarde, F., Mellander, H., Svartengren, M., and Swedjemark, G.A., 1994, Residential Radon Exposure and Lung Cancer in Sweden, *N Engl J Med*, 1994; **330**(3), 159-164. DOI: 10.1056/NEJM199401203300302
- Torres-Durán, M., Ruano-Ravina, A., Parente-Lamelas, I., Leiro-Fernández, V., Abal-Arca, J., Montero-Martínez, C., Pena-Álvarez, C., Javier González-Barcala, F., Castro-Añón, O., Golpe-Gómez, A., Martínez, C., José Mejuto-Martí, M., Fernández-Villar, A., and Barros-Dios, J.M., 2014, Lung cancer in never-smokers: a case control study in a radon-prone area (Galicia, Spain). *Eur Respir J*. **44**(4), 994-1001.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000, Sources and Effects of Ionising Radiation. *UNSCEAR Report to the General Assembly*, United Nations, New York.
- United Nations, Sources and Effects of Ionizing Radiation, 1993, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *1993 Report to the General Assembly; with scientific annexes*, United Nations sales publication, United Nations, New York, E.94.IX.2
- US Environmental Protection Agency, 2012, A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon, Washington: US Environmental Protection Agency.
- Vinson, D.S., Campbell, T.R., and Vengosh, A., 2008, Campbell TR and Vengosh A. Radon transfer from groundwater used in showers to indoors to indoor air, *Appl Geochem*, **23**(9), 2676-2685.
- WHO, 2009, WHO handbook on indoor radon: a public health perspective: *World Health Organization*.
- Wichmann, H.E., Rosario, A.S., Heid, I.M., Kreuzer, M., Heinrich, J., and Kreienbrock, L., 2005, Increased lung cancer risk due to residential radon in a pooled and extended analysis of studies in Germany, *Health Physics*, **88**(1), 71-79.
- World Health Organization, 2007, International Radon Project Survey on Radon Guidelines, *Programmes and Activities*, WHO, Geneva.
- 고영진, 2017, 생활환경 속 국내 라돈 분포 영향. 코네티크 리포트.
- 조완근, 신승호, 조완근, 2009. 다중 이용 건물 또는 지하 실내 공간의 용도에 따른 라돈 오염도 비교와 지하 공간의 시간대별 라돈 농도 변화. *환경독성보건학회*, 24(3); 203-211.
- 한국원자력안전기술원, 2010, 전국 실내라돈 실태조사, 국립환경과학원.