



라돈과 환경성질환

오 성 수^{1*} · 고 상 백¹ · 용 석 중² | 연세대학교 원주의과대학 ¹예방의학교실, ²내과학교실

Radon and environmental diseases

Sung Soo Oh, MD^{1*} · Sang Baek Koh, MD¹ · Suk Joong Yong, MD²

Departments of ¹Preventive Medicine and ²Internal Medicine, Yonsei University Wonju College of Medicine, Wonju, Korea

*Corresponding author: Sung Soo Oh, E-mail: oss0609@yonsei.ac.kr

Received December 14, 2011 · Accepted December 28, 2011

People are generally exposed to radiation from natural sources. Radon is the most important radiation source among natural sources. Radon is a naturally occurring, radioactive noble gas that is odorless and tasteless. Radon is normally found at very low levels in outdoor air and in drinking water from rivers and lakes but higher levels in indoor air in homes, schools, and office buildings, and in well water. When radon undergoes radioactive decay, it expels high-energy alpha particles. The alpha particle radiation dose from long-term exposure increases the chance of developing lung cancer. Radon is the second most important cause of lung cancer after smoking. There is no known threshold concentration below which radon exposure presents no risk. Even low concentrations of radon can result in a small increase in the risk of lung cancer. No study of the radon exposure-lung cancer association has been performed in Korea. What is needed is a large-scale prospective study of the association between residential radon exposure and lung cancer. The cumulative indoor radon exposure is an important environmental health hazard (carcinogen).

Keywords: Radon; Lung neoplasms; Radiation; Alpha particles; Environment-related diseases

서 론

역사적으로 1945년 우리나라와 인접한 국가인 일본에 미국이 제2차 세계대전에서 히로시마와 나가사키에 원자폭탄을 투하했던 사건이 있었고, 1986년 구소련의 체르노빌 원자력발전소의 폭발사건 등으로 우리나라 국민들은 방사선에 대한 두려움이 있었다. 2011년에는 일본 후쿠시마 제1원자력발전소 폭발하여 방사선 누출사고가 있었고, 우리나라에서도 서울시 월계동 아스팔트에서 세슘에 의한 방사

선이 검출되었다는 뉴스 보도에 일반 사람들은 방사선에 대하여 관심과 우려를 나타내게 되었다. 그러나 일반 사람들은 방사선과 방사선의 건강영향에 대하여 잘 모르며, 막연한 두려움과 염려를 가지고 있는 것이 사실이다.

방사선의 종류에는 자연방사선이 있고, 인공방사선이 있다. 사람들은 일상생활을 하면서 직업적으로 또는 일상 환경 속에서 방사선에 노출되면서 살아가고 있다. 직업적으로는 의료기관 종사자, 방사선과 관련된 연구자들, 군수업체, 비파괴 검사 종사자들 등이 인공방사선에 노출될 수 있고,

© Korean Medical Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

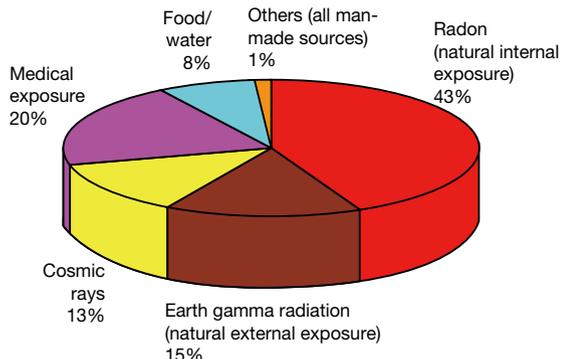


Figure 1. Sources and distribution of a average radiation exposure to the world population (From World Health Organization. Ionizing radiation in our environment [Internet]. Geneva: World Health Organization) [1].

일반 사람들은 간혹 병원 진료를 보면서 X-선 및 방사성 동위원소 등을 통해서 인공방사선에 노출될 수 있으나, 일반적으로는 자연방사선에 노출된다. 자연방사선도 여러 종류가 있는데 그 중에서도 가장 큰 부분을 차지하는 것이 바로 라돈(radon)에 의한 방사선 노출이다(Figure 1) [1]. 본 논문에서는 라돈이 무엇이며, 라돈 노출의 특성 그리고 라돈의 건강영향 특히, 폐암과의 관련성에 대해서 고찰하고자 한다.

라돈이란?

라돈은 우라늄(uranium)과 토리움(thorium)의 방사선 붕괴를 통하여 자연적으로 형성되는 방사성 동위원소이다. 우라늄과 토리움은 자연적으로 바위, 토양, 공기 그리고 물에 존재하고 있으며, 이는 처음에 라듐(radium)으로 붕괴되었다가 라듐은 라돈으로 변환된다.

가장 흔한 방사성 동위원소 형태는 radon-222(²²²Rn)이다. 라돈은 알파입자를 방출하며, polonium-218(²¹⁸Po)으로 변환된다. 이것은 또 알파입자를 방출하며 lead(²¹⁴Pb)로 변환된다. 라돈의 반감기는 3.8일이며, 라돈은 분진에 붙어서 공기 중으로 이동할 수 있고, 사람의 일상생활 환경 즉, 공기, 물, 땅 등에 어느 곳이나 존재하는 물질이 된다. 다만, 일반 외부 대기 환경과 생활용수에서의 수준은 매우 낮다. 그러나 밀폐된 공간 특히, 지하 작업 공간(광부 또는 빌딩 작

업자 등)에서 일하는 또는 생활하는 사람들은 높은 농도의 라돈에 노출될 수 있다. 또 지하수와 우물물 등을 통해서 라돈에 노출될 수 있다. 라돈이 건물의 실내로 유입되는 경로는 주로 건물 바닥의 균열된 틈을 타고 들어오는 것이다. 라돈은 공기보다 무겁기 때문에 일반적으로 건물의 낮은 층이 높은 층보다 높은 농도를 나타낸다.

라돈 노출

거주지의 실내 라돈 농도에 대한 조사를 각 나라에서 실시하고 있으며, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation에서 수집 정리하고 있다. 각 대륙별 나라들의 실내 라돈 농도는 변이가 매우 크다. 각 나라 안에서도 지역에 따라서 변이가 크다. 2000년도 Organization for Economic Co-operation and Development 국가들의 실내 라돈 농도 값을 살펴보면 전체 평균은 39 Bq/m³이며, 우리나라는 53 Bq/m³였다(Table 1) [2].

우리나라에서는 최근에 2009년 전국 실내 라돈 농도 조사가 있었다. 우리나라의 연평균 실내 라돈의 전체 산술평균은 79.3 Bq/m³로 조사되었으며 표준편차는 85.1 Bq/m³였다. 관공서의 연평균 실내 라돈 산술평균은 51.0 Bq/m³였다. 반면 초등학교의 연평균 실내 라돈 산술평균은 98.4 Bq/m³로 관공서보다 실내 라돈 농도가 높게 나타났다. 연평균 실내 라돈의 최고값은 관공서가 318 Bq/m³이며, 초등학교는 1,004 Bq/m³이었다. 지역별로 보면, 강원도와 충청북도가 전국 라돈 연평균보다 높은 결과를 보였으며, 라돈이 높게 측정된 지점은 화강암 지질학적 분포 또는 표층 토양층의 ²²⁶Ra 분포도와 대체적으로 일치하였다. 계절적으로는 4계절 중 여름에 평균 48.3 Bq/m³로 가장 낮은 농도, 겨울에 107 Bq/m³으로 가장 높은 농도를 나타내었다[3].

건물의 구조나 건축재료에 의한 영향은 크게 나타나지 않았으나, 바닥재가 마루나 니스칠한 장판인 경우, 평균 라돈 농도가 높은 경향을 나타냈다. 이는 상대적으로 토양 공기 중 라돈 가스가 실내로 많이 유입되고 있음을 의미한다. 또한 오래된 건축물에서 실내 라돈 농도가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 오래된 건축물일수록 건물의 균열 등이 많아

Table 1. Indoor radon concentrations in OECD countries

Country	Arithmetic mean	Geometric mean	Standard deviation
Australia	11	8	2.1
Austria	99	15	NA
Belgium	48	38	2
Canada	28	11	3.9
Czech Republic	140	44	2.1
Denmark	59	39	2.2
Finland	120	84	2.1
France	89	53	2.0
Germany	49	37	2.0
Greece	55	44	2.4
Hungary	82	62	2.1
Iceland	10	NA	NA
Ireland	89	57	2.4
Italy	70	52	2.1
Japan	16	13	1.8
Luxembourg	110	70	2
Mexico	140	90	NA
Netherlands	23	18	1.6
New Zealand	22	20	NA
Norway	89	40	NA
Poland	49	31	2.3
Portugal	62	45	2.2
Republic of Korea	53	43	1.8
Slovakia	87	NA	NA
Spain	90	46	2.9
Sweden	108	56	NA
Switzerland	78	51	1.8
United Kingdom	20	14	3.2
USA	46	25	3.1
Worldwide average	39	-	-

From United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes. New York: United Nations; 2000 [2].
 OECD, Organization for Economic Co-operation and Development; NA, not available.

라돈이 실내로 상대적으로 많이 유입되었음을 의미한다. 라돈 농도가 높은 초등학교의 현장 조사 결과, 바닥마감재로

마루가 주로 사용되었다. 토양 공기 중 라돈 농도가 높을수록 실내 라돈 농도가 높았으며, 토양 중 ^{226}Ra 함량이 높을수록 실내라돈 농도가 높은 것으로 확인되었다[3].

라돈과 폐암

과거 광산에서 일하는 광부들을 대상으로 한 코호트연구에서 흡연자이든 비흡연자이든지 일관되고 뚜렷한 위험의 증가를 보고하였고, 동물실험연구 등에서도 확인되었다. 이를 근거로 1988년 World Health Organization 산하기관인 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer)에서는 라돈을 명확한 발암물질(group I)로 분류하였다[4].

외국의 라돈과 폐암에 대한 역학 연구 중에서 이전에 광부들을 대상으로 한 코호트연구들과 1980년대부터 시작된 일반 사람들을 대상으로 한 북미, 유럽 및 중국에서 시행된 환자 대조군 연구들을 살펴보고자 한다.

1. 광부들을 대상으로 한 코호트연구

지하 광산에는 상대적으로 라돈 농도가 높기 때문에, 광산에서 일하는 광부들을 대상으로 사망패턴을 살펴보는 연구들이 있어왔는데, 다른 암 또는 질환에 비하여 폐암에 대한 사망률이 높은 것을 보여주었다. 11개의 선행연구를 모두 모아 분석해보면, 연구 대상자는 약 60,000명의 광부들이 되었고, 평균 누적 노출기간은 5.7년이었으며, working level month (WLM; 광부들을 대상으로 한 연구에서는 라돈 농도를 WLM로 표현하였는데, 이는 공기 1 L안에 1.3×10^5 MeV의 에너지를 방출하는 알파입자로 정의된다)로 나타낸다면 평균 164.4 WLM에 해당하였다. 이것은 일반 실내 라돈 농도로 환산해보면 약 20년 동안 $2,000 \text{ Bq/m}^3$ 의 라돈 농도에 노출되는 것에 해당한다. 연구 기간이 끝났을 때 총 2,674명의 폐암환자의 사망이 있었다. 이러한 누적 노출량과 폐암 사망과의 관계는 통계적으로 의미 있는 관련성을 보여주었다[5].

동일한 이 11개의 연구들을 다시 분석하여 WLM당 상대 초과 위험률을 산출하였을 때 0.002-0.01 (0.2-1%)의 초과 위험률이 있는 것으로 계산되었다. 100 이하의 WLM에서도



Table 2. Summary of risks of lung cancer from indoor radon based on international pooling studies that have combined individual data from a number of case-control studies and on studies of radon exposed miners

	No. of studies	No. of lung cancer	No. of controls	Exposure window (yr) ^{a)}	Percentage increase in risk of lung cancer per 100 Bq/m ³ increase in radon concentration ^{b)}	
					Based on measured radon	Based on long term average radon
Pooled analysis of studies of indoor radon in the home						
European	13	7,148	14,208	5-35	8 (3-16)	16 (5-31)
North American	7	3,662	4,966	5-30	11 (0-28)	
Chinese	2	1,050	1,995	5-30	13 (1-36)	

From World Health Organization. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2009 [7].

^{a)} Considering radon concentrations during the period starting 35 years before and ending 5 years before the date of diagnosis for cases of lung cancer, or a comparable date for controls.

^{b)} Adjusting for year-to-year random variability in indoor radon concentration

노출량이 증가할수록 상대 위험률은 증가하는 경향을 보였고, 통계적으로 유의하였다[6].

2. 일반 사람들을 대상으로 한 실내 라돈 농도와 폐암에 대한 환자-대조군 연구

앞선 광부들에 대한 연구는 연구 대상자가 모두 성인 남성이며, 라돈 노출과 흡연에 대한 정보가 불완전한 측면이 있었다. 더군다나 광부들은 라돈뿐만 아니라 호흡기계에 영향을 줄 수 있는 탄보진, 유리규산 등 많은 분진, 흙 등에도 노출되기 때문에 이들의 영향을 완전히 배제하기 어려웠다. 따라서 광부들에 대한 연구 결과들을 일반 인구에게 적용하기에는 무리가 있었다.

1980년 중반 이후 일반 사람들을 대상으로 실내 라돈 농도와 폐암과의 관련성을 보는 환자-대조군 연구들이 진행되었다. 초기의 연구 결과를 정리해보면 몇몇 연구에서는 위험률이 증가하는 것을 보여 주었지만, 그렇지 않은 연구 결과들도 있는 등 일관된 결과를 보여주지 못하였다. 그러나 초기의 환자-대조군 연구들은 많은 제한점이 있었다. 환자 수가 너무 적었으며, 폐암의 주된 요인인 흡연에 대한 보정에 있어서 문제가 있었다. 또한 계절적인 변이와 거주지 변동의 문제, 잠복기의 고려 등이 제한점으로 제시되었다. 이

러한 제한점을 극복한 연구들이 유럽, 북미 그리고 중국 등에서 실시되었다.

유럽의 많은 나라들에서 라돈 농도와 폐암에 대한 연구가 진행되었는데, 유럽 연구에서는 연구 대상자 수를 최소한 150명 이상의 환자군과 대조군이 되도록 했고, 개인의 흡연력을 자세히 조사하였으며, 15년 이상 거주한 사람들을 대상으로 하였다. 잠복기는 5년에서 35년으로 하였다. 이런 조건을 충족한 연구들을 모았을 때 13개의 연구가 있었고, 환자 수는 7,148명, 대조군은 14,208명이 되었다. 이렇게 이전 연구들의 제한점을 극복하고 분석하였을 때 통계적으로 유의하게 라돈 농도가

증가할수록 폐암 위험률이 증가하는 것을 보여주었다. 즉, 100 Bq/m³ 증가할 때마다 16% (95% confidence interval [CI], 5-31%)의 폐암 증가가 있었다. 또 이들을 나이와 성별 그리고 흡연력을 층화하여 분석하였을 때도 결과는 변하지 않았다(Table 2) [7].

북미에서의 연구는 미국과 캐나다에서 주로 실시되었고, 연구방법에 있어서는 유럽의 연구방법과 크게 다르지 않았다. 모두 7개의 연구결과가 있었는데 통계학적으로 의미 있는 결과를 보여준 Iowa의 결과 외에 다른 연구들에서는 라돈 농도가 증가할수록 위험비가 증가하기는 하였으나, 통계학적인 의미는 없었다. 그러나 이들 7개의 연구를 모두 모아서 분석하였을 때, 라돈 농도가 100 Bq/m³ 증가할 때마다 11% (95% CI, 0-28%)의 폐암환자의 증가가 있었다. 더군다나 연구 대상자들의 거주지에 대해서 1-2개 거주지로 엄격하게 적용하였을 때, 통계학적으로 유의하게 18% (95% CI, 2-43%)의 폐암 증가율이 더욱 높아졌다. 흡연력을 층화 분석하였을 때도 결과는 변하지 않았다(Table 2) [7].

중국에서도 Gansu와 Shenyang지역에서 2개의 연구가 있었는데(Table 2) [7], 이 두 연구를 모아서 분석해 보았을 때 통계학적으로 유의하게 100 Bq/m³ 증가할 때마다 13% (95% CI, 1-36%)의 폐암 증가율이 있어서 북미와 유럽의

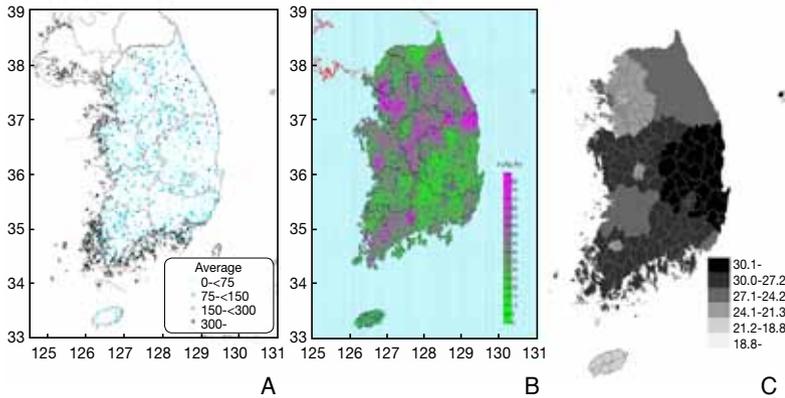


Figure 2. Comparison with regional indoor radon concentration (A), surface soil radon concentration (B) and lung cancer mortality (C) ([A,B] From National Institute of Environmental Research. National radon survey in Korea. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2009 [3]. [C] From Statistics Korea. Annual report on cause of death statistics. Daejeon: Statistics Korea; 2010 [11]).

상으로 공기먼지중 환자과 일반 인구에서 폐암 발생률의 차이를 비교 연구한 것이 있는데, 연구 결과를 보면 연령을 보정하였을 때 공기먼지중 환자에서 일반 인구에 비하여 폐암 발생률이 높음을 보고하였고, 이에 의하여 공기먼지중 환자에서 폐암이 합병증으로 발생할 경우 보상해주는 근거가 되었다. 그러나 이 연구는 라돈에 대한 측정이 이루어진 것은 아니기 때문에 폐암 발생에 라돈의 영향을 말하기가 어렵다. 하지만, 공기먼지중이 있는 탄광 근로자의 경우 탄분진 및 유리규산 등 호흡기계에 독성이 있는 분진에의 노출뿐만 아니라, 라돈에

연구결과와 유사한 결과를 보였다[8].

그동안에 진행되었던 연구들은 모두 후향적 연구들이다. 따라서 최근에 미국에서는 Cancer Society Cancer Prevention Study라는 매우 잘 설계된 대규모의 전향적 코호트 연구가 진행되었다. 이 연구결과 역시 이전에 환자-대조군 연구들과 비슷한 결과를 보였다. 라돈 농도가 100 Bq/m³ 증가할 때마다 15% (95% CI, 1-31%)의 폐암 환자의 증가가 있었다. 미국 환경청의 가이드라인 값인 148 Bq/m³을 기준으로 했을 때 기준 이하군에 비하여 기준 위의 농도값을 가진 군은 34% (95% CI, 7-68%)의 폐암 환자의 증가가 있었다[9].

3. 국내 라돈 노출과 관련된 연구 및 폐암과의 관련성

2008년 우리나라의 폐암의 연간 발생자 수는 18,774명이 고[10], 폐암 사망자 수는 69,780명이었다[11]. 아직 우리나라에서 폐암에 대한 라돈의 기여위험도에 대한 연구가 없지만, 외국의 결과를 비추어볼 때 상당수가 라돈에 의한 영향이 있을 것으로 판단된다. 즉, 우리나라와 비슷한 수준의 실내 라돈 농도값을 보이는 독일, 프랑스 및 스위스의 결과를 가지고 예측해 본다면, 현재 연간 폐암 발생자 수의 약 5%인 900여명은 라돈의 영향으로 발생한다고 볼 수 있다[7].

아직까지 국내에서는 라돈 노출 농도와 폐암과의 관련성에 대한 연구는 진행되지 않았다. 다만 탄광 근로자들을 대

의 노출도 상당한 영향을 주었을 것으로 판단된다[12].

우리나라에서 대표적인 지하공간이라 할 수 있는 지하철에서 행해진 몇몇 연구들이 있다. 대전광역시 지하철에서 시행한 연구를 보면 라돈 농도는 환기 상태에 따라서 변동이 보이며, 지하 역사의 깊이와 지하수의 흐름에 따라서 높은 경향을 보였고, 승객들에 비하여 지하철 종사자에게서 더 많은 방사선 노출이 관찰되었다[13]. 서울특별시의 지하철에서 시행한 연구를 보면, 더 오랫동안 지하공간에 머물며 종사하는 지하철 경찰관들이 일반 지하철 종사자에 비하여 상대적으로 더 높은 방사선에 노출되는 것으로 나타났다[14].

우리나라의 폐암 사망의 지역별 분포를 살펴보면, 연령을 보정하였을 때 지역별로 차이를 보이고 있다[11]. 즉, 강원도, 충청북도, 경상북도 및 전라남도에서 높은 사망률을 보이고 있는데, 이는 지역별로 흡연율의 차이, 농약 등 폐암 유해인자에 대한 차이가 있을 것이다. 또한 발생률이 아니라 사망률의 차이이기 때문에 의료기관의 분포 및 접근성 등도 관여될 것이다. 그러나 폐암 사망의 지역별 분포가 지역별 화강암대 분포 및 표층 토양 라돈 농도 분포 및 지역별 실내 라돈 농도 분포와 유사한 지역별 분포를 보이는 것은 흥미로운 사실이다(Figure 2) [3,11].

환경부에서는 2010년 7월 라돈과 폐암과의 인과성을 밝히고 국가 라돈 관리 체계 구축을 위한 자연방사능 환경보전



센터를 지정하였다[15]. 현재 폐암으로 확진된 환자의 집을 방문하여 개인수준의 실내 라돈 농도를 측정하는 프로젝트를 진행하고 있어 그 결과에 따라 향후 우리나라에서의 라돈에 의한 건강영향 특히 폐암에 대한 인과성이 밝혀질 것으로 기대된다.

라돈의 다른 건강영향

과거 광부들을 대상으로 한 연구들에서 폐암 외에 다른 암에 대해서는 증거를 얻지 못하였다[16]. 그러나 체코의 우라늄 광산 광부들에서 백혈병, 임파종, 다발성골수종의 발생률이 증가함을 보고하였다[17]. 광부들이 아닌 일반 사람들에서 라돈과 백혈병과 관련된 20개의 생태학적 연구(ecological studies)가 진행되었는데, 이 중 일부 연구에서만 백혈병의 위험이 증가함을 보고하였다[18]. 노르웨이에서 시행된 연구에서는 다발성경화증이 라돈 농도와 관련 있음을 보여주었다[19]. 이것은 일반 사람들과 광부들을 대상으로 한 환자-대조군 연구와 코호트연구에서 재확인되기도 하였다[20,21]. 라돈과 심혈관질환과의 관련성에 대한 연구도 진행되었는데 관련이 있다는 증거를 얻지 못하였다[22-26]. 식용수에 비교적 고농도의 라돈이 포함될 수 있는 지역에서 위암에 대한 환자-대조군 연구가 시행되었는데 결과는 증가된 위험률을 보여주지 못하였다[27].

아직까지 폐암 외에 다른 부위의 암과 질환에 대해서는 일관된 결과를 보여주지 못하고 있으며, 생태학적 연구들로서 많은 비뚤림(bias)이 있고, 이를 극복하기 위해 시행된 연구들도 일관된 결과를 보여주지 못하고 있으므로, 라돈이 폐암 외에 백혈병과 위암 그리고 다발성경화증 등 다른 암 및 질환을 일으키는 원인이라고 말하기에는 아직 무리가 있다.

결론

정리하면, 광부, 지하철 종사자 등의 일부 특정 직업군과 지역 및 거주지 상태에 따라서 비교적 높은 농도의 라돈에 노출될 수 있으며, 이는 폐암과 관련 있을 수 있다. 그러나 아직까지 대부분의 거주지의 실내 라돈 농도는 그렇게 높은

농도는 아닌 것으로 판단된다. 그러나 계절적, 지역적, 거주지 건물 상태 등에 따라 라돈 농도의 변이가 크며, 감수성이 있는 사람에게는 폐암 발생에 영향을 줄 수도 있으므로 가능한 한 낮게 실내 라돈 농도를 낮추는 관리가 필요하다.

우리나라에는 아직 다른 나라에서 진행된 것 같은 라돈 농도와 폐암과의 관련성에 대한 연구는 없다. 생태학적 연구의 한계를 극복하기 위해서 개인 수준의 라돈 농도를 측정하고, 흡연을 비롯한 다양한 관련 변수들을 보정할 수 있는 잘 고안된 코호트연구 또는 환자-대조군 연구가 필요하다.

핵심용어: 라돈; 폐암; 방사선; 알파입자; 환경성질환

REFERENCES

1. World Health Organization. Ionizing radiation in our environment [Internet]. Geneva: World Health Organization [cited 2011 Dec 17]. Available from: http://www.who.int/ionizing_radiation/env/en.
2. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation: UNSC-EAR 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes. New York: United Nations; 2000.
3. National Institute of Environmental Research. National radon survey in Korea. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2009.
4. International Agency for Research on Cancer. Man-made mineral fibres and radon: summary of data reported and evaluation. IARC monographs. Vol. 43 [Internet]. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 1988 [cited 2012 Feb 3]. Available from: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol43/volume43.pdf>.
5. Darby SC, Hill DC; European Collaborative Group on Residential Radon and Lung Cancer. Health effects of residential radon: a European perspective at the end of 2002. Radiat Prot Dosimetry 2003;104:321-329.
6. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for radon. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry; 2008.
7. Zeeb H, Shannoun F, editors. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2009 [cited 2012 Feb 3]. Available from: http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf.
8. Lubin JH, Wang ZY, Boice JD Jr, Xu ZY, Blot WJ, De Wang L, Kleinerman RA. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. Int J Cancer 2004;109:132-137.

9. Turner MC, Krewski D, Chen Y, Pope CA 3rd, Gapstur S, Thun MJ. Radon and lung cancer in the American Cancer Society cohort. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 2011;20:438-448.
10. Ministry of Health and Welfare; The Korea Central Cancer Registry. Annual report of cancer statistics in Korea in 2008. Seoul: Ministry of Health and Welfare; 2010.
11. Statistics Korea. Annual report on cause of death statistics. Daejeon: Statistics Korea; 2010.
12. Occupational Safety and Health Research Institute. Study of lung cancer incidence through miners with pneumoconiosis cohort. Incheon: Occupational Safety and Health Research Institute; 2002.
13. Yoon S, Chang BU, Kim Y, Byun JI, Yun JY. Indoor radon distribution of subway stations in a Korean major city. *J Environ Radioact* 2010;101:304-308.
14. Song MH, Chang BU, Kim Y, Cho KW. Radon exposure assessment for underground workers: a case of Seoul subway police officers in Korea. *Radiat Prot Dosimetry* 2011;147:401-405.
15. Natural Radioactivity Environmental Health Center [Internet]. Wonju: Environmental Health Center; 2011 [cited 2011 Dec 17]. Available from: <http://radonkorea.webmind.kr>.
16. Darby SC, Whitley E, Howe GR, Hutchings SJ, Kusiak RA, Lubin JH, Morrison HI, Tirmarche M, Tomásek L, Radford EP. Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. *J Natl Cancer Inst* 1995;87:378-384.
17. Rericha V, Kulich M, Rericha R, Shore DL, Sandler DP. Incidence of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma in Czech uranium miners: a case-cohort study. *Environ Health Perspect* 2006;114:818-822.
18. Smith BJ, Zhang L, Field RW. Iowa radon leukaemia study: a hierarchical population risk model for spatially correlated exposure measured with error. *Stat Med* 2007;26:4619-4642.
19. Bolviken B, Celius EG, Nilsen R, Strand T. Radon: a possible risk factor in multiple sclerosis. *Neuroepidemiology* 2003; 22:87-94.
20. Laurier D, Valenty M, Tirmarche M. Radon exposure and the risk of leukemia: a review of epidemiological studies. *Health Phys* 2001;81:272-288.
21. Mohner M, Lindtner M, Otten H, Gille HG. Leukemia and exposure to ionizing radiation among German uranium miners. *Am J Ind Med* 2006;49:238-248.
22. Villeneuve PJ, Morrison HI. Coronary heart disease mortality among Newfoundland fluorspar miners. *Scand J Work Environ Health* 1997;23:221-226.
23. Villeneuve PJ, Lane RS, Morrison HI. Coronary heart disease mortality and radon exposure in the Newfoundland fluorspar miners' cohort, 1950-2001. *Radiat Environ Biophys* 2007;46: 291-296.
24. Xuan XZ, Lubin JH, Li JY, Yang LF, Luo AS, Lan Y, Wang JZ, Blot WJ. A cohort study in southern China of tin miners exposed to radon and radon decay products. *Health Phys* 1993; 64:120-131.
25. Tomasek L, Swerdlow AJ, Darby SC, Placek V, Kunz E. Mortality in uranium miners in west Bohemia: a long-term cohort study. *Occup Environ Med* 1994;51:308-315.
26. Kreuzer M, Kreischer M, Kandel M, Schnelzer M, Tschense A, Grosche B. Mortality from cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study, 1946-1998. *Radiat Environ Biophys* 2006;45:159-166.
27. Auvinen A, Salonen L, Pekkanen J, Pukkala E, Ilus T, Kurtio P. Radon and other natural radionuclides in drinking water and risk of stomach cancer: a case-cohort study in Finland. *Int J Cancer* 2005;114:109-113.



Peer Reviewers' Commentary

국내에서 암 발생이 지속적인 증가 추세를 보임에 따라 암의 발생 원인에 대한 관심이 높다. 본 연구는 최근 그 중요성이 부각되고 있는 라돈 노출과 관련된 환경성질환에 대해서, 관련 역학조사 결과를 검토하여 라돈 노출에 의한 폐암 및 기타 암 발생의 위험에 대해 기술하고 있다. 또한 저자가 밝힌 대로 국내 라돈 노출이 다른 나라에 비해 그 다소 높아 특히 폐암과 관련하여 라돈 노출이 일정정도 영향을 미치고 있을 가능성도 배제할 수 없다. 또한 우리의 비슷한 라돈 노출을 보이는 독일, 프랑스 및 스위스의 결과를 가지고 예측해 본다면, 현재 연간 폐암 발생자 수의 약 5%인 900여 명은 라돈의 영향으로 발생한다고 볼 수도 있다. 하지만, 기존의 국내 연구가 모두 생태학적 연구의 한계를 지닌 것이어서, 라돈 노출에 의한 폐암 발생 규모를 예단하기 어렵다. 그러므로 이러한 한계를 극복하기 위해서 저자의 의견대로 개인 수준에서의 정확한 라돈 노출 평가와 다양한 관련 변수들을 보정할 수 있는 잘 고안된 코호트연구 또는 환자-대조군 연구가 필요하다고 하겠다.

[정리:편집위원회]