

발 간 등 록 번 호

11-B551172-000003-14

WWW.NCC.RE.KR

VOL.1

라돈

RADON

—
발암 요인 보고서



라돈

RADON

발암 요인 보고서

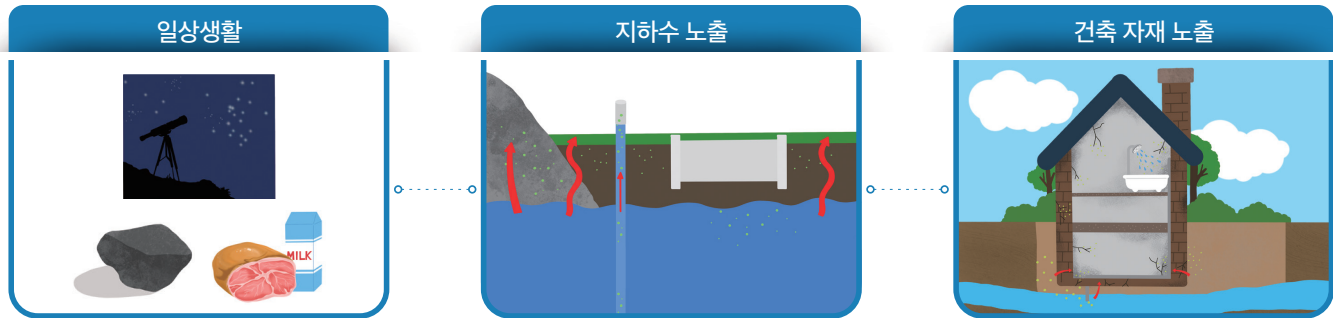
KEY FINDINGS

- IARC(국제암연구소) 발암 물질 분류에서 사람에게 발암성이 확인된 물질로 분류함(Group 1)
- 암석, 토양 및 지하수, 건축자재에서 발생하는 라돈은 대기 중이나 실내 공간으로 확산되며, 실내로 들어와 축적되는 라돈의 양이 많기 때문에 실내 라돈을 밖으로 내보내는 등 실내 라돈을 관리하는 것이 중요함
- 폐암을 일으키는 주요 원인물질로, 방사선에 노출된 폐세포가 호흡을 통해 기관지나 폐포에 머무르면 세포 중 염색체 돌연변이를 일으켜 폐암이 발생할 수 있음
- 라돈과 흡연은 폐암발생에 상승작용을 하게 되므로, 흡연자들은 금연을 하는 것이 필요함

01 노출 현황

환경적 노출

라돈은 암석이나 토양, 건축자재 등에 존재하는 우라늄이 몇 차례 붕괴를 거치는 과정에서 생성되는 방사능을 가진 기체로 무색·무취·무미의 특성을 가지며 지구상 어디에나 존재합니다. 환경적 노출은 일상생활, 지하수, 건축자재 등에서 발생할 수 있습니다.



직업적 노출



라돈은 환기가 어려운 지하 공간이나 암석/토양 인근에서 근무하는 경우 노출될 수 있습니다. 가장 대표적인 직업군은 광부이며, 이 외에도 지하 공간에서 작업을 하고 환기가 제대로 되지 않는 작업 환경에 일하는 경우 라돈 노출 위험의 대상이 될 수 있습니다.

* 우리나라 라돈 직업적 노출 위험 대상

지하 역사, 지하도 상가, 철도 역사의 대합실, 여객 자동차 터미널의 대합실, 항만 시설 중 대합실, 공항 시설 중 여객터미널, 도서관·박물관 및 미술관, 대규모 점포, 장례식장, 영화 상영관, 학원, 전시 시설, 인터넷컴퓨터게임 시설 제공업의 영업 시설, 목욕장업의 영업 시설, 의료기관, 어린이집, 산후 조리원, 노인 요양 시설, 실내 주차장

02 연구에서의 인체 발암성

라돈은 폐암을 일으키는 발암물질입니다. 세계보건기구(WHO)는 전 세계 폐암 발생의 3~14%가 라돈에 의한 것이며, 라돈을 흡연에 이은 폐암 발병 주요 원인물질로 규정하고 있습니다. 이외에도 라돈 노출이 백혈병을 유발시킬 수 있으나 뚜렷한 관계가 없다는 연구결과들이 있어 이에 대한 관련성은 일부 논란이 되고 있습니다.

03 노출기준

- 환경부 실내 라돈 권고 : 4pCi/L(148 Bq/m³)
- 고용노동부 사무실 공기 라돈 권고 기준 : 4pCi/L(148 Bq/m³)

04 노출 저감법

라돈 노출 저감의 핵심은 라돈가스의 실내유입을 차단하고, 유입된 라돈은 적극적인 환기를 통해 바깥으로 배출시키는 것입니다.



05 제언

라돈은 폐암을 일으키는 발암물질로서, 주로 라돈 노출이 높은 지역, 지하 환경 등에서 노출될 수 있습니다. 과거 지하 광산에서 근무하였던 광부들에서 노출이 높았을 것으로 생각되며, 최근에도 환기가 제대로 되지 않는 지하환경에서 근무하는 작업자에서 노출이 가능한 상황입니다. 일반인에게는 특별히 라돈이 높은 지역에 거주하는 경우가 아니라면 그 위험은 높지 않습니다. 또한 지하철 이용만으로 의미 있는 라돈의 노출이 있다고 볼 수는 없습니다. 다만 흡연을 할 경우, 폐암 발생의 위험을 더 상승시킬 수 있으므로, 라돈 노출이 가능한 직업이나 환경에 거주하는 경우, 반드시 금연해야 합니다.

라돈

Radon

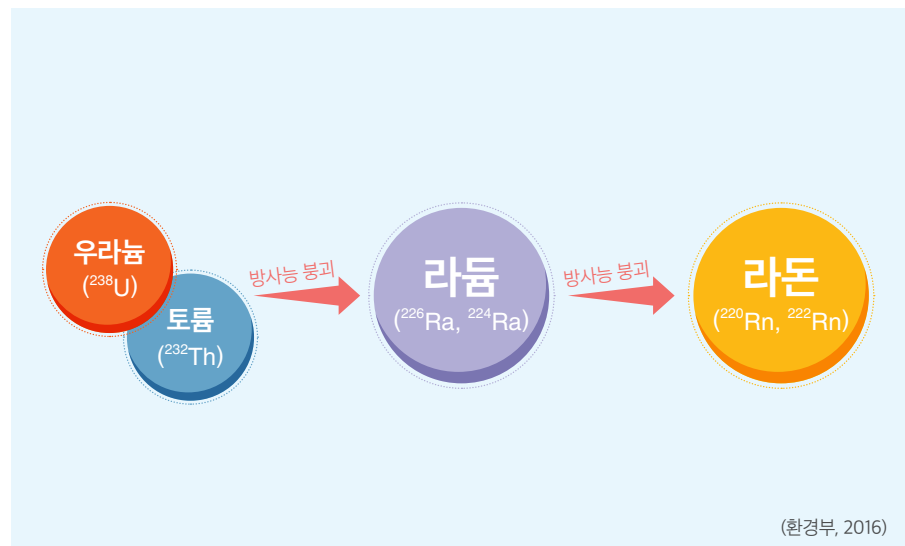
- [CAS¹⁾ 번호] 10043-92-2
- [UN²⁾ 번호] 2912
- 지구에서 우라늄 붕괴로 형성된 자연 발생 가스
- 무색무취의 기체이며 사람이 자연으로부터 평균 2.4mSv(밀리시버트)³⁾ 정도의 방사선을 받고 있으며 대부분 라돈에 의한 것임
- 호흡을 통해 기관지나 폐포에 머무르면 세포 중 염색체 돌연변이를 일으켜 폐암이 발생할 가능성이 있음
- IARC(국제암연구소) 발암 물질 분류에서 사람에게 발암성이 확인된 물질로 분류함(Group 1).

01 노출 현황

일상생활 노출

라돈은 땅에서 자연적으로 생기는 방사성 물질이다. 일상생활에서 노출되는 방사선의 85%는 암석, 별, 음식물 섭취 등 자연적으로 만들어지는 것이고, 자연적으로 만들어지는 방사선의 약 48%가 라돈에서 만들어진다. 암석, 토양 등에 있는 우라늄(²³⁸U)과 토륨(²³²Th)이 방사능 붕괴를 하면서 자연적으로 라듐(²²⁶Ra, ²²⁴Ra)이 만들어지고, 라듐이 붕괴하여 라돈(²²⁰Rn, ²²²Rn)과 같은 방사성 물질을 만든다(환경부, 2016).

학계에선 ²²²Rn을 라돈, ²²⁰Rn은 토론이라 부른다. ²²²Rn은 일반적으로 말하는 '라돈'에 해당하며 본문에서 말하는 라돈 또한 ²²²Rn을 의미한다. ²²⁰Rn은 라돈 매트리스 사건⁴⁾으로 감지된 노출 물질이다. 반감기는 55.6초로 짧지만 우리가 매일 쓰는 침대에서 기준치 이상이 검출돼 위험성이 제기된 것이다(한국산업보건학회, 2018).



1) CAS : Chemical Abstract Service Register Number, 미국 화학회에서 운영하는 고유 숫자 식별자로 화학구조나 조성이 확정된 화학 물질에 부여된 고유 번호

2) 유엔 경제사회이사회에 설치된 위험물운송 전문가위원회로부터 운송 위험 및 유해성이 있는 화학 물질에 부여된 번호

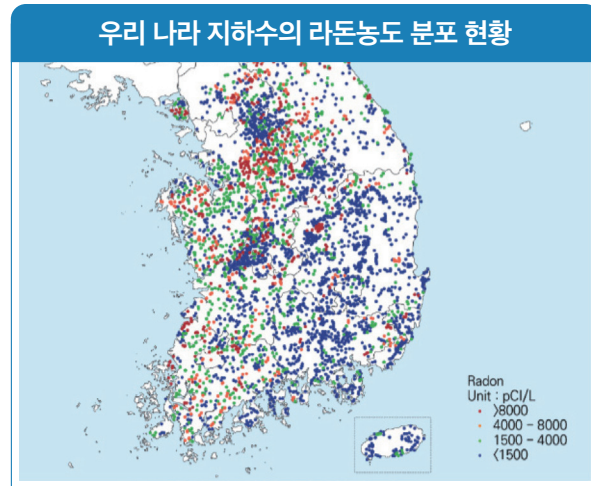
3) 일상생활에서 노출될 수 있는 방사선량을 측정하는 단위. 밀리시버트(mSv)는 X선이나 핵의학, 양전자 단층 촬영, 컴퓨터 단층 촬영 등과 같은 의료 검진 시 발생하는 유효 노출을 측정하는 경우 사용됨

4) 2018년 5월 3일 대전침대의 매트리스에서 기준치의 3배 넘는 라돈 검출 사건 기사 원문 <https://news.naver.com/main/read.naver?mode=LSD&mid=sec&sid1=102&oid=055&aid=0000637082>

5) 방사능 활동의 양을 나타내는 단위로써 피코큐리라고 하며, 1피코큐리(pCi)는 37베크렐(Bq)이다.

01 지하수 노출

우라늄이나 라듐이 포함된 암석 주변으로 지하수가 흐르면 암석 또는 토양에서 생긴 라돈이 지하수로 녹아 들어갈 수 있다. 그래서 토양에 우라늄이 많이 있을수록 지하수에서의 라돈 농도가 높은 경우가 많다. 우리나라의 마을 상수도 등을 대상으로 지하수의 라돈 농도를 조사한 결과(2007~2014년, 약 4,800개소), 주로 화강암 등 결정질암 지역에서 라돈 농도가 8,000pCi/L⁵⁾ 이상으로 높게 나타났다. 그리고 일부 변성암 및 퇴적(석회암 등) 지역에서도 라돈 농도가 높게 나타났다. 지하수의 라돈 농도가 8,000pCi/L인 경우에는 실내의 라돈 농도를 0.8pCi/L(약 29.6Bq/m³)정도 증가시키는 것으로 추정하고 있다(환경부, 2016).



출처
 지하수 중 자연방사성물질 함유실태조사 연구, 국립환경과학원(2015)

6) 국내에서 생산 가능한 화학 석고로 산업 공정에서 발생하는 부산물을 원료로 하여 생산되는 석고

02 건축 자재 노출

라돈은 토양과 인접한 단독주택이나 바닥과 벽 등에 균열이 많은 오래된 건축물, 밀폐도가 높고 환기 시설이 부족해 유입된 라돈이 잘 빠져나갈 수 없는 실내에서 농도가 높다. 토양과 직접 닿아 있지 않은 고층 건물에서 방출되는 라돈은 주로 건축 자재에서 나오는 것으로 보고 있다. 주로 석고 보드에서 라돈이 방출될 수 있는데, 인산부산석고⁶⁾를 이용하여 만든 석고 보드에서 방출된다. 인산부산석고는 라듐과 우라늄의 함량이 높아 라돈이 많이 방출될 수 있다. 또한, 고농도 라듐이 포함된 모래 또는 자갈로 만든 벽돌이나 모래, 콘크리트 등의 건축 자재에서도 라돈이 방출되어 실내 공기 중으로 들어오기도 한다(환경부, 2016).



직업적 노출

라돈은 환기가 어려운 지하 공간이나 암석/토양 인근에서 근무하는 경우 노출될 수 있다.

라돈의 직업 노출 대상은 광부이며, 현대의 경우, 지하 공간에서 작업을 하고 환기가 제대로 되지 않는 작업 환경에서 일할 경우 라돈 노출의 위험 대상이 된다.

* 우리나라 라돈 직업적 노출 위험 대상 : 아래와 같은 환경에서 근무하는 종사자

지하 역사, 지하도 상가, 철도 역사의 대합실, 여객자동차터미널의 대합실, 항만 시설 중 대합실, 공항 시설 중 여객터미널, 도서관·박물관 및 미술관, 대규모 점포, 장례식장, 영화 상영관, 학원, 전시 시설, 인터넷컴퓨터게임시설제공업의 영업 시설, 목욕장업의 영업 시설, 의료기관, 어린이집, 산후 조리원, 노인 요양 시설, 실내 주차장



02 발암성

구분	분류
IARC(국제암연구소)	Group 1(인간에게 발암성이 확인된 물질)
NTP(미국 국립 독성 프로그램)	K(인간에게 발암성이 있는 것으로 알려진 물질을 말함)

인체 발암성

라돈의 인체 발암성에 대한 역학적 증거를 살펴보면, 과거에는 높은 수준의 라돈에 노출되었던 지하 광부에 대한 코호트 연구에서 발견되었고 최근에는 낮은 수준의 주거용 라돈 피폭에 대한 환자-대조군 연구에서 발표되고 있다.

01 지하 광부들의 라돈 노출 후 발암 사례

지하 광부 코호트 연구들에서 고농도 라돈 노출이 폐암 위험과 관련성이 있는 것으로 나타났으며, 이는 인간의 발암성에 대한 충분한 근거를 제공하였다. 지하 광부 코호트 연구를 통해 여러 광산 현장에서 발생하는 암 위험을 평가할 수 있었으며, 철광석 광부 대상의 연구에서도 라돈이 폐암 위험에 미치는 영향을 확인할 수 있었다.

A. 초기 광부들의 폐암 발생 사례 연구

지하 광산에서 일한 광부들은 라돈에 대한 폐암 위험 증가와 관련된 첫 번째 직업적 노출 사례였다. 16세기 초반에 발표한 Georg Agricola⁷⁾의 논문을 보면 독일 에르츠산맥의 광부들에서 호흡기 질환으로 인한 사망률이 매우 높았음을 알 수 있다. 이후 Harting & Hesse(1879)의 림프육종으로

7) 독일의 광물학 아버지로, 금과 주석이 지하에서 어떻게 발생하는지 연구하고 저술한 책으로 유명함

분류된 광부의 흉부 내 종양에 대한 부검을 통한 관찰 연구에서 광부들의 높은 사망률도 암으로 인한 것임을 알게 되었다.

20세기 초, 광부들의 폐암 조직을 해부병리학적으로 살펴본 결과 에르츠산에서 일한 광부들 사이에서 만연한 악성 종양이 폐의 원발성 암이라는 것을 입증하고 광석의 먼지나 금속(특히 비소)에 대한 복합 노출로 인한 발암 가능성을 제시하였다(Arnstein, 1913). 이후 Pirchan & Siki(1932)은 야히모프(Jachymov-과거 독일 온천 지역으로 현재는 체코의 영토)에서 관찰된 암의 원인으로 방사능이 가장 설득력 있다고 보고하였다.

B. 광부들의 라돈과 폐암 코호트 연구

Archer et al.(1962)의 연구에서 콜로라도 고원(Colorado Plateau; 미국 남서부의 고원)에서 일하던 광부들이 라돈에 노출되어 폐암 위험이 증가한 사례가 첫 역학 연구이며, 후속 연구에서 추가 폐암 사례가 발생함에 따라 광산에서의 라돈 노출이 폐암 위험을 유발한다는 사실을 알리게 되었다(Wagoner et al., 1964, 1965). 이는 라돈 누적 노출량의 단위인 WLM(Working-level month⁸⁾)을 계산하여 라돈 자손(RDPs: Radon Decay Products)⁹누적 피폭과 폐암 위험 간의 관련성을 살펴본 연구였다.

캐나다의 뉴펀들랜드의 광산에서 흘러나온 상당한 양의 물에 라돈 가스가 포함되어 있으며 이로 인한 폐암 발병 위험이 있다고 보고되었다(de Villiers, 1966). 2010년 이전까지 라돈에 노출된 지하 광부 19개 집단의 암 발생 위험을 조사하였으며, 그 결과 각 코호트 연구들에서 라돈 붕괴 생성물에 대한 광산에서의 노출은 광부들의 폐암 위험과 관련이 있었다(Yao et al., 1994; Hornung et al., 1998; Hodgson & Jones, 1991; Tomasek et al., 2003; Rericha et al., 2006; Howe, 2006; Vacquier et al., 2009; Grosche et al., 2006; Samet et al., 1991; Villeneuve et al., 2007; Kusiak et al., 1993; Woodward et al., 1991; Sevc et al., 1988; Radford & Renard, 1984).

BEIR IV¹⁰(BEIR IV, 1988)은 미국 콜로라도 고원의 우라늄 광부, 캐나다 온타리오의 엘도라도 광산의 광부, 스웨덴 북부 광산 맘베르게트(Malmberget)의 광부에 대한 세 가지 연구를 통합 분석하여 살펴보았다.

위원회의 연구는 라돈 노출에 대한 폐암의 위험도 연구에 대한 통계적 검정력을 높이기 위해 노출 발생 시점, 연령 등 다양한 요인을 보정하고 개별 데이터들을 통합적으로 추정한 첫 연구였다. 하지만 BEIR IV에서 개발한 위험 모델은 노출 농도 또는 노출이 지속된 기간을 고려하지 않았다. BEIR VI 위원회(BEIR VI, 1999)부터 생물학적 기반 위험 모델을 적용하여 체코와 프랑스 코호트에서 라돈과 폐암 위험 관계를 설명하였다. 1999년 이전 라돈의 폐암 위험 모델은 노출 농도나 기간을 고려하지 않았으나 BEIR VI 위험 모델은 라돈의 누적 노출량이 일정하다면 노출 농도가 증가할수록(선양률 역효과: Inverse exposure-rate effect), 오랜 기간 노출될수록 폐암 발생 위험도가 감소하였다.

체코와 프랑스 우라늄 광산의 10,100명의 광부를 대상으로 한 코호트 연구에서는 대상자들이 상대적으로 낮은 수준(4 WL¹¹미만)의 라돈에 노출되었다(Tomašek et al. 2008). 또한, 체코와 프랑스 코호트 분석에서는 낮은 준위 피폭과 관련한 위험 평가치를 제공하는데 100누적워킹레벨(WLM)당 초과상대위험도(ERR; Excess relative risk)값은 2.7~3.4 사이에 있었다. 이들 위험 평가 결과는 낮은 준위의 누적 라돈 피폭과 폐암 치사율 간에 유의한 연관성을 보여 주었다 (Tomašek et al., 2008; Vacquier et al., 2008).

독일의 동독 비스트무트 회사에 고용된 총 59,001명의 남성을 대상으로 한 코호트 연구에서 첫 사망률 추적조사 시점까지 2,388명의 폐암 사망이 발생하였다. 독일에서 수행한 코호트 연구는 BEIR VI 위원회가 분석한 11개 코호트(BEIR VI, 1999)를 모두 더한 것과 같은 대규모 연구였기 때문에 매우 중요하다. 이 연구에서 WLM당 폐암 사망률은 평균 0.21%(95%CI: 0.18-0.24) 증가하는 것으로 나타났으며, BEIR VI 위험 모델처럼 고령자의 경우에는 사망률이 하락했지만, 연령에 따른 하락 기울기는 계속 감소하였다(Grosche et al. 2006).



8) WLM(Working Level Month-누적워킹레벨)은 1 WL 농도의 공기를 월 170시간 동안 호흡한 누적 피폭

9) 라돈의 붕괴 과정에서 생성되는 방사성 핵종

10) 미국 국립연구위원회 소속 회의 단체로 방사선의 영향에 관한 보고서를 발간함

11) 워킹레벨(WL: Working Level)은 공기 1m³에 1.3X10 MeV의 잠재알파에너지를 내는 임의 조합의 단수명 라돈 자손 농도로써 전통적 단위다. 1WL는 공기 중 3,700 Bq/m³ (100pCi/L)와 평형 상태에 있는 라돈의 단기 붕괴 생성물 농도를 나타낸다.

C. 광부들의 라돈과 흡연으로 인한 폐암 위험

흡연은 폐암의 강력한 위험인자이기 때문에 라돈 노출과 폐암의 위험도를 연구할 때 흡연의 영향도 함께 고려해야 한다. BEIR VI 위원회는 유효한 몇 명의 광부 조사에서 흡연 정보를 얻을 수 있었다. 연구 결과 WLM당 폐암 사망률은 평생 비흡연자(1.02%, 95%CI: 0.15-7.18)가 흡연자(0.48%, 95%CI: 0.18-1.27)보다 크지만, 그 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(NRC, 1999). 독일의 경우에는 특정 병원에서 진단을 받은 독일 우라늄 광산 회사의 전 직원에 대해 폐암에 관한 환자-대조군 연구가 수행되었다. 이 조사에서도 WLM당 폐암 사망률은 평생 비흡연자(0.20%, 95%CI: 0.07-0.48)가 현재 흡연군(0.05%, 95%CI: 0.001-0.14)보다 높았고, 금연자(0.10%, 95%CI: 0.03-0.23) 역시 현재 흡연자보다 높았다(Bruske-Hohlfeld et al. 2006).

체코 공화국의 지하 우라늄 광부 16,434명을 대상으로 1977~1992년 사이에 발생한 암 환자들을 추적 조사하여 코호트 연구를 수행한 결과, 라돈에 대한 폐암 환자 사망 100WLM당 초과상대 위험도(ERR; Excess relative risk)는 일반 사망 환자보다 0.2(95%CI: 0.10-0.37) 높았다. 또한 대부분의 폐암 사망자는 흡연자(82%)였으며 100WLM당 초과상대 위험도(ERR; Excess relative risk)는 비흡연자보다 흡연자에서 1.35(95%CI: 0.84-2.15) 높은 것으로 나타났다. 다만, 흡연자 중 100WLM당 초과상대 위험도(ERR; Excess relative risk)는 비흡연자에 비해 5~14년 동안의 라돈 노출 집단에서 3.07(95%CI: -0.04-10.32), 25년 이상의 라돈 노출 집단에서 1.05(95%CI: 0.49-1.87)로 노출 이후 시간이 지남에 따라 폐암 위험이 감소하였다(Kelly-Reif et al., 2020, 2021).

D. 철광석 광부들의 폐암 사례

《IARC 모노그래프(IARC, 1988)》의 43권에서는 “라돈에 노출된 지하 적철광 채광은 인간에게 발암성이 있다”고 명시되어 있다. 영국의 컴브리아 지역의 철광석 광부들은 1948년부터 1967년까지 폐암에 대한 표준화 사망비가 1.53으로 전체 인구에 비해 사망률이 증가했지만, 1970년 이후에는 그 이상 증가하지 않았다(SMR, 1.13). 이는 광부들이 일한 철광석에서 초반 라돈 농도가 0.35-3.2 WL 범위였고 나중에는 0.1-0.8 WL로 감소하는 것으로 나타나 라돈이 폐암의 원인 인자임을 시사하였다(Kinlen & Willows, 1988).

중국의 철광석 광부 5,406명을 대상으로 한 연구에서도 상당한 라돈 노출에 대한 위험이 폐암의 사망과 관계되어 있음을 보고하고 있으나(SMR, 3.7) 이는 29건의 폐암 사례를 근거로 하고 있으며 라돈과 철광석 광산의 먼지 간의 독립적인 영향을 평가할 수 없는 것이 연구의 한계점으로 지적되었다(Chen et al., 1990).

E. 광부들에 대한 백혈병 및 기타 암

백혈병을 포함하여 폐암 이외의 라돈 자손(RDPs) 피폭이 건강에 미치는 영향은 여러 광부 연구에서 다루어졌다. 체코의 연구에서는 라돈의 노출 기간과 관련하여 백혈병 위험의 유의한 경향이 있다는 것을 발견하였다(Tomášek et al., 1993; Tomášek & Zárská, 2004). 또 다른 체코의 23,043명의 우라늄 광부를 대상으로 한 후향적 환자-코호트 연구에서도 라돈과 라돈 자손(RDPs)에 대한 노출이 지하 우라늄 광부에서의 백혈병 위험 증가와 관련이 있는 것으로 나타났다(Rericha et al., 2006).

독일의 대규모 코호트 연구에서는 누적 라돈 피폭과 폐암 사망률 사이에 통계적으로 유의한 관계가 있었다. 이 결과는 비소, 먼지, 장수명방사성핵종(반감기가 긴 핵분열 생성물) 및 γ -방사선을 모두 보정한 후에도 나타나는 결과였다. 그 외에도 여러 특정 부위에서 암 위험 증가 추세가 나타났으나 폐암처럼 잠재적 교란 요인들을 보정한 이후에는 유의하지 않았다(Kreuzer et al., 2008).

체코에서 수행된 한 연구는 우라늄 광부들이 일반 남성 인구보다 2배에서 12배가량 기저세포암(basal cell carcinoma) 위험이 높은 것으로 보고했다(Sevcová, 1989). 대상자들의 표피 기저층(basal layer of epidermis)의 평균 등가선량은 피폭 기간에 따라 0.6~5.0Sv¹²⁾로 측정되었고(Sevcová

12) 일상생활에서 노출될 수 있는 방사선량을 측정하는 단위. 0.01Sv(시버트) = 10mSv (밀리시버트)

et al., 1978), 20년의 추적 기간 동안 관찰된 광부들의 27건 기저세포암(basal cell carcinoma)은 대조군(기저세포암에 걸리지 않은 집단) 대비 1Sv당 초과상대위험도가 2.2로 높게 보고되었다 (Sevcová, 1989).

02 실내 라돈

실내 라돈과 폐암에 대한 광범위한 환자-대조군 연구가 설계되었으나 결과적으로 실내 라돈 노출과 폐암 위험 사이의 연관성에 대한 결정적인 근거를 제공하지 못하였다. 수행된 통합 분석에는 폐암 환자 선택에 대한 명확한 규칙과 연구 대상으로서의 포함 기준이 있었다. 각 기준은 대상자의 주거 정보 수집이 유사한 방식으로 진행되었는지 여부, 라돈 농도의 장기(최소 2개월) 측정 여부, 개인 별 흡연 행태 정보의 유무였다.

A. 북미 환자-대조군 연구의 통합 분석

북미 지역에서 실시한 7회의 역학조사 결과를 종합하여 폐암 총 3,662건을 분석한 연구에서는 라돈 노출 농도 100Bq/m³ 증가 시 폐암의 상대적 위험이 11%(95%CI: 0-28) 증가하였다(Krewski et al., 2006). 또한 1WLM은 약 3,700Bq/m³에 해당하며, 50WLM은 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. 또한 Po-214(반감기: 26.8분) 및 Po-218(반감기: 3.04분) 등의 반감기가 짧은 방사성 라돈 붕괴 생성물(short-lived radon decay product)은 세포 DNA를 손상시킨다는 연구 결과가 제시된 바 있다(Krewski et al. 2006). 그러나 주거용 라돈 및 폐암에 관한 연구 사례들은 라돈 노출도와 폐암 발병률에 대한 확실한 증거를 제시하지는 못했다.

B. 유럽 환자-대조군 연구의 통합 분석

Darby et al.(2005, 2006)연구에서는 유럽 내 13개의 환자-대조군 연구를 통합하여 실내 라돈 피폭과 관계된 폐암의 상대 위험을 분석하였다. 주거지 라돈 피폭으로 인한 폐암 위험 증가를 보다 정확하게 추정하기 위하여 흡연, 연령, 성별, 요인 등의 교란 요인을 보정하였다. 연구 결과, 연구가 수행된 유럽 국가에서 실내 라돈 노출로 인한 폐암의 사망 비율이 약 9%로 나타났다.

연구 데이터는 흡연력과 라돈 농도의 장기 측정이 포함되었고, 폐암 환자 7,148명과 대조군 14,208명을 대상으로 분석되었다. 폐암 환자의 시간 가중 평균 노출¹³⁾ 주거지 실내 라돈 농도는 104Bq/m³이었다. 대조군에 대한 시간 가중 평균 노출된 주거지 실내 라돈 농도(가중치는 연구 특정 사례 수에 비례)는 97Bq/m³이었다.

본 연구의 통합 분석은 주거 라돈 농도와 폐암 위험 사이의 연관성에 대한 명확한 근거(P=0.0007)가 있음을 보여주었다. 폐암의 추정 초과상대위험(eERR)은 시간 가중 평균 관측 라돈 농도가 100Bq/m³일 때 0.08(95%CI: 0.03-0.16)로 노출-반응 관계가 양의 상관관계를 보였다. 또한 라돈 노출과 폐암 종류별로 살펴본 결과, 소세포암(Small cell cancer)에서 통계적으로 유의한 양의 노출-반응 관계를 보여주었고, 편평상피세포암(squamous cell carcinoma)의 경우 음의 상관관계를 보였으며, 샘암(Adenocarcinoma) 및 기타 유형은 양의 상관관계를 보였다.

라돈 농도 평가에서 무작위 불확실성의 영향에 대한 보정을 위해 실내 라돈을 반복 측정하였다. 이렇게 보정된 값은 100Bq/m³당 상대 위험도가 0.084(95%CI:0.030-0.158)에서 0.16(95%CI:0.05-0.31)으로 두 배 가까이 높아지는 것을 확인할 수 있었다(Krewski et al., 2005).

13) 라돈 측정치에 발생 시간을 곱하여 8시간으로 나눈 것

Lorenzo-González et al.(2019)의 연구는 2002~2017년까지 발표된 연구 중 비흡연자만을 대상으로 하는 환자-대조군 연구들을 통합하여 주거 라돈 피폭과 폐의 선암(adenocarcinoma)에 대한 위험도를 조사하였다. 지역은 스페인 북서부였고, 총 1,415명 중 523명의 노출군과 892명의 대조군으로 구성하였다. 노출 정도에 따라 그룹화하여 살펴본 결과, 100Bq/m³이하에 노출된 사람들과 비교하여 200Bq/m³ 이상에 노출된 사람들의 폐암 위험도가 1.73배(95%CI: 1.27-2.35) 높은 것으로 나타났다. 폐의 선암(adenocarcinoma)에 대한 위험도는 같은 수준의 라돈 노출군에서 대조군(선암이 아닌 집단)보다 1.52배(95% CI: 1.14-2.02) 높은 것으로 나타났다.

C. 중국 환자-대조군 연구의 통합 분석

중국에서 수행된 두 개의 대규모 라돈 연구를 나타내는 주거용 라돈에 대한 두 연구 데이터를 통합하여 분석하였다(Lubin et al., 2004). 연구는 1,050명의 폐암 환자와 1,996명의 대조군으로 구성되었고, 라돈 농도가 증가할수록 폐암의 위험도도 유의하게 증가하였다. 본인 주택의 실내 라돈 농도가 100Bq/m³당 대조군에 비해 폐암의 위험도가 1.33배(95%CI: 1.01-1.36) 높았고, 30년 이상 한집에 살았던 폐암 환자의 경우 대조군보다 폐암의 위험도가 1.32배(95%CI: 1.07-1.91) 높았다.

D. 라돈의 폐암에 대한 기여위험도

BEIR VI 위원회(BEIR VI, 1999)는 광부 데이터를 기반으로 개발된 라돈 위험 예측 모델은 미국 가정내 라돈 피폭의 폐암에 대한 기여 비율을 10~15%로 추정하였다. Brand et al.(2005)는 BEIR VI 라돈 위험 예측 모델과 캐나다 가정의 라돈 노출 자료를 사용하여 라돈 노출로 인한 폐암의 기여분율을 8%로 산출했다. 이러한 결과는 유럽과 북미에서 폐암 사망의 약 8~15%가 주거용 라돈 노출에 기인할 수 있음을 시사하였으며, 이를 토대로 흡연에 이어 라돈은 폐암 사망의 주요 원인이 될 수 있다고 보고하였다.

최근 메타분석 연구에서는 비흡연자에서 폐암에 대한 라돈의 기여위험도를 나타내는 연구들이 보고되고 있다(Garzilla et al., 2017; Malinovsky et al., 2018; Li et al., 2020). 1990년 1월 1일부터 2020년 3월 5일까지 4개의 공동 연구(24개의 환자-대조군 연구의 데이터 통합), 1개의 환자-대조군 연구, 1개의 코호트 연구를 선정하여 주거용 라돈 노출로 인한 비흡연자와 흡연자 모두에서 폐암 위험 추정치를 산출하였다. 그 결과, 라돈 100Bq/m³당 수정된 초과 상대 위험(aERR; adjusted excess relative risks)은 평생 비흡연자의 경우 0.15(95%CI 0.06-0.25), 한 번이라도 흡연을 한 경우 0.09(95%CI 0.03-0.16)이었다. 결과적으로 이 연구는 평생 비흡연자와 한 번이라도 흡연을 한 경우 주거용 라돈 피폭으로 인한 폐암 위험은 통계적으로 유의하지 않았지만 평생 비흡연자의 경우 더 높았다고 보고하였다(Cheng et al., 2021).

E. 백혈병

미국과 영국에서의 연구 결과, 소아 백혈병과 주거지 실내 라돈 농도 사이에 뚜렷한 관계가 없다고 보고되었다(Lubin et al.,1998; Kaletsch et al.,1999; Steinbuch et al.,1999; Law et al.,2000a; Cartwright et al., 2002).



덴마크에서 수행한 연구는 위의 연구들과 상반된 결과를 나타냈다. 덴마크 암 등록부를 통해 확인된 15세 미만 어린이의 백혈병, CNS 종양 및 악성 림프종의 2,400건에 대한 환자-대조군 연구를 통해 연간 160Bq/m³ 이상에 누적해서 노출된 아동의 급성 림프구성 백혈병(ALL)의 위험도가 대조군에 비해 1.63배(95%CI: 1.05-1.23) 높은 것으로 나타났다(Raaschou-Nielsen, 2008).

한 메타분석 연구는 환경적 라돈 노출이 소아 백혈병에 미치는 잠재적 영향을 평가하였다. 1995년부터 2014년까지 출판된 10개의 연구를 분석하였고, 8건은 환자-대조군 연구(10,803건 및 16,202건 대조군 포함)이며, 2건은 코호트 연구(1,428건 포함)였다. 연구 결과는 라돈 노출과 소아 백혈병 사이에 유의한 양의 관계를(1.22, 95%CI: 1.01-1.42) 보였다 (Lu et al., 2020).

F. 기타 암

독일에서 실시한 환자-대조군 연구에서는 실내 라돈과 고형암(Solid tumor) 사이의 연관성을 조사하였다. 70 Bq/m³ 이상의 라돈 노출에 대해 6개의 중추신경계 악성 종양을 바탕으로 대조군에 비해 고형암 환자의 위험도가 2.61배(95%CI: 0.96 -7.13) 높은 것으로 보고되었다(Kaletch et al., 1999).

동물 실험에서 나타난 암

종류	실험결과
 랫드(Rat)	랫드(Rat)에서 호흡기 종양이 많이 발생했고, 랫드(Rat)의 체내로 흡수된 라돈은 주로 지방 조직에 저장되는 것으로 보였다. 또한 라돈은 랫드(Rat)에서 기도암을 발생시켰다(Perraud et al., 1972).
 마우스(Mouse)	Monchaux & Morlier(2002)와 Collier et al.(2005)의 연구에서 흡연에 노출되지 않은 마우스(mouse)에서 라돈의 만성 흡입과 라돈 자손에 대한 총 노출과 노출 비율 사이의 상호작용을 조사하기 위해 라돈과 라돈 자손에 노출된 상당한 수의 동물을 사용했다. 두 연구의 결과는 높은 누적 노출(약 1000WLM)에 대해 일관된 악성 종양 위험 요인이 노출 기간이 증가함에 따라 증가하고 노출률(선량을 역효과: Inverse dose-rate effect)은 감소하였다. 그러나 낮은 누적 노출(>100WLM)의 경우 노출 기간이 증가하거나 노출률이 감소하면 폐암 위험이 감소하였다. 이러한 결과는 노출률이 높은 인구집단(일부 우라늄 광부 집단과 같은)의 결과 자료를 노출률이 낮은 집단(실내 환경에서의 노출)에 적용할 때 여러 논의가 필요함을 시사한다.
 개(Beagle; 비글)	개에서는 호흡기 흡입을 통해 폐 표피양암, 기관지 폐포암, 비점막 편평상피암을 유발하였다(Cross et al., 1982).

03

노출 기준

※ 라돈 노출 권고/규제 기준 (국외/국내)

구분	기관	기준 수치	관련 내용
국외	세계보건기구 (WHO)	3-6x10 ⁻⁵	1 Bq/m ³ 피폭에 대한 라돈 자손 위험 추정치 및 권장 조치 - 공기 중 폐암 평생 초과 위험 라돈 농도
		≥100Bq/m ³ (2.7pCi/L)	건물 내 권고되는 라돈 시정 조치 기준(연평균)
		100Bq/L (2,700pCi/L)	음용수 내 라돈 가이드라인
	국제방사선방어 위원회(ICRP)	5x10 ⁻⁴ per WLM	라돈 및 라돈 자손으로 인한 폐암 발생 명목확률 계수 ¹⁴⁾
		1.1mSv	주택 내 실내 라돈 농도 기준
		1.4mSv	작업장 내 실내 라돈 농도 기준
미국 산업위생사협회 (ACGIH)	3-10mSv	주택 및 작업장 내 실내 라돈 농도 기준(연평균)	
	4WLM/year	라돈 자손의 전리 방사선 노출에 대한 지침	

14) 라돈 선량에 의한 암 발생 확률적 영향

구분	기관	기준 수치	관련 내용
국외	미국 직업안전 건강관리청 (OSHA)	100pCi/L	연속 7일 중 주당 평균 40시간 이상 근무하는 성 인 근로자의 라돈 제한 기준
		3pCi/L	연속 7일 중 주당 평균 40시간 이상 근무하는 만 18세 미만 근로자의 라돈 제한 기준
	미국 환경청 (EPA)	≥4pCi/L	즉각적인 조치가 권장되는 실내 라돈 농도
		0.1Ci	CERCLA ¹⁵⁾ 가 지정한 라돈 위해 농도
	미국 광산안전 보건국(MSHA)	4WLM	연간 라돈 자손 노출 제한 기준(지하 광산, 연중 내내 적용)
		1WL	최대 라돈 자손 허용 기준(광산 내 작업 시)
	미국 원자력 규제 위원회 (USNRC)	10,000μCi 100μCi(or 4WLM)	방사선 작업 종사자 라돈 흡입 노출 제한 기준 - 라돈 자손 미포함 - 라돈 자손 포함
		4x10 ⁻⁶ μCi/mL 3x10 ⁻⁸ μCi/mL(or 0.33WL)	방사선 작업 종사자 파생된 공기 중 라돈 흡입 노 출 제한 기준 - 라돈 자손 미포함 - 라돈 자손 포함
		1x10 ⁻⁸ μCi/mL 1x10 ⁻¹⁰ μCi/mL	방사선 작업 종사자 연간 방출된 공기 중 라돈 흡입 노출 제한 기준 - 라돈 자손 미포함 - 라돈 자손 포함
	유럽 환경건강 정보시스템 (ENHIS)	200-400Bq/m ³	유럽 13개국 중심이며 지역별 주택별 차이가 크기 때문에 해당 권고 수준은 지역별 수준에 따라 달라 져야 함을 강조함
	노르웨이 방사선 보호국(DSA)	200Bq/m ³ 100Bq/m ³	- 학교, 새 건물 및 임대 숙박 시설 최대 제한 기준 - 라돈 저감 조치가 필요한 수준
	프랑스 방사능 연구소(IRSN)	400Bq/m ³	라돈 저감 조치가 필요한 수준(화강암 지역에서 높은 라돈 농도를 보이기 때문에 국가 기준은 상 향됨)
	독일 연방방사선 보호국(BfS)	1000Bq/m ³ 100Bq/m ³	- 3년 이내에 즉각적인 라돈 저감 조치 시행이 필요한 수준 - 라돈 저감 조치가 필요한 수준
	영국 건강보호국 (HSE)	100Bq/m ³ 200Bq/m ³	- 달성해야 할 실내 라돈 농도 수준 - 라돈 저감 조치가 필요한 수준
	이탈리아 환경보호연구소 (ISPRA)	500Bq/m ³	학교, 직장용 사무실만 규제 대상이며 해당 수치 이상인 경우 라돈 저감 조치 시행함 (일반 주택의 경우, 소유자가 라돈 측정 책임 있 음)
	스페인 원자력 안전위원회(CSN)	400Bq/m ³	기존 건물에서 라돈 저감 조치가 필요한 수준
	스위스 연방 보건국(BAG)	400-1000Bq/m ³	신축 및 기존 건물의 라돈 저감 조치가 필요한 수준
	스웨덴	400Bq/m ³ 200Bq/m ³	주거 시설에 대한 라돈 농도 제한 - 기존 주택 - 신규 주택
		400Bq/m ³	라돈 저감 조치가 필요한 수준
	국내	환경부	4pCi/L(148 Bq/m ³)
고용노동부		4pCi/L(148 Bq/m ³)	사무실 공기 라돈 권고 기준

15) 1980년에 제정된 유해 환경 대응 및 손해보상
법으로 유해 물질로 오염된 현장을 조사하고
정화하는 연방법을 지칭함

※ 우리나라를 제외한 아시아의 경우, 지역적 특성에 따른 라돈 피폭량의 차이가 커서 국가제정 기준은 따로 없고,
WHO와 EPA 권고 수준을 기준으로 한다.

「원자력안전법」에서는 「원자력안전법」시행령 제2조4호 및 「생활주변방사선 안전관리법」 제15조에 근거하여 방사성핵종별로 에너지 크기를 고려하여 방사성 물질로 보는 최소 수량과 농도를 규정하고 있다. 원자력위원회에서는 생활주변방사선안전관리법에 따라 제2차 “생활주변방사선방호 종합계획(2018~2022)”을 수립·시행 중이다.

<제2차 생활주변방사선방호 종합계획 추진전략별 중점과제 중>

[출처: 제2차 생활주변방사선방호 종합계획(안)]

1-1. 지각방사선 정책 수립·이행

□ 라돈 관리 정책 이행

- 라돈 자가 방호를 위한 라돈 측정 및 감측 서비스 체계 구축
 - 라돈 측정 기기 성능 관리 강화 등 측정 품질 관리 대책 강구
 - 취약 계층에 대한 라돈 무료 측정 및 감측 컨설팅 서비스 지속
 - 전국 주택 실내 라돈 조사 결과, 라돈 측정 기기 및 측정 전문 기관 정보, 라돈 감측 매뉴얼 등 수요자 중심 정보 제공
- 신축 공동주택 실내 라돈 농도 측정 의무화 등 라돈 안전 관리 추진

1-2. 지각방사선 방호 기반 확보

□ 지각방사선 탐사 및 토석 방사능 정밀 분석

- 전국 지각 방사선 탐사와 기여 핵종 파악을 통해 지각방사선 분포 현황을 구축하고 라돈 이동성을 반영하여 라돈 잠재 지도 작성

환경부는 「실내공기질관리법」 제6조에 지하 역사, 지하도 상가, 실내 주차장 등 다중이용시설의 쾌적한 실내 공기를 위하여 실내 라돈 조사 실시, 라돈 지도 작성, 다중이용시설 및 공동주택의 라돈 기준 권고치(라돈 기준 다중이용시설 148Bq/m³(벵크렐), 신축 공동주택 148Bq/m³ 이하(실내공기질관리법 시행규칙 별표4의 2개정 2018.10.18.) 등 규정하고 있으며, 다중이용시설의 소유자 등은 실내 공기질을 측정하여 권고 기준에 맞게 시설을 관리하도록 하고 있다.

고용노동부에서는 「산업안전보건법」 제13조제1항에 따라 사무실 공기의 오염 물질별 관리 기준, 공기 질 측정·분석 방법 등 사무실 공기를 쾌적하게 유지·관리하기 위하여 사업주에게 지도·권고할 기술상의 지침 또는 작업 환경의 표준을 정함을 목적으로 한다. 하루 8시간 시간가중평균농도 기준으로 라돈은 지상 1층을 포함한 지하에 위치한 사무실에만 적용한다.

REFERENCES

- Agricola, G. (1556). De re metallica.
- Archer, V. E., Magnuson, H. J., Holaday, D. A., Lawrence, P. A. (1962). Hazards to health in uranium mining and milling. *J Occup Environ Med*, 4(2), 55-60.
- Arnstein, A. (1913). Sozialhygienische Untersuchungen über die Bergleute in den Schneeberger Kobaltgruben. Wiener Arbeiten a, d. Gebiete d. sozialen Medizin, *Beihefte*, 5, 64-83.
- Brand, K. P., Zielinski, J. M., & Krewski, D. (2005). Residential radon in Canada: an uncertainty analysis of population and individual lung cancer risk. *Risk Anal: An International Journal*, 25(2), 253-269.
- Brüske-Hohlfeld, I., Rosario, A. S., Wölke, G., Heinrich, J., Kreuzer, M., Kreienbrock, L., & Wichmann, H. E. (2006). Lung cancer risk among former uranium miners of the WISMUT Company in Germany. *Health physics*, 90(3), 208-216.
- Cartwright, R., Law, G., Roman, E., Gilman, E., Eden, O., Mott, M., Muir, K., Goodhead, D., & Kendall, G. (2002). The United Kingdom Childhood Cancer Study of exposure to domestic sources of ionising radiation: 2: gamma radiation. *Br J Cancer*, 86(11), 1727-1731.
- Chen, S., Hayes, R., Liang, S., Li, Q., Stewart, P., & Blair, A. (1990). Mortality experience of haematite mine workers in China. *Occup Environ Med*, 47(3), 175-181.
- Cheng, E. S., Egger, S., Hughes, S., Weber, M., Steinberg, J., Rahman, B., Worth, H., Ruano-Ravina, A., Rawstorne, P., & Yu, X. Q. (2021). Systematic review and meta-analysis of residential radon and lung cancer in never-smokers. *Eur Respir Rev*, 30(159).
- Collier, C., Strong, J., Humphreys, J., Timpson, N., Baker, S., Eldred, T., Cobb, L., Papworth, D., & Haylock, R. (2005). Carcinogenicity of radon/radon decay product inhalation in rats—effect of dose, dose rate and unattached fraction. *Int J Radiat Biol*, 81(9), 631-647.
- Council, N. R. (1988). Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters: BEIR IV. National Academies Press.
- Council, N. R. (1999). Health effects of exposure to radon: BEIR VI. National Academies Press.
- Cross, F., Palmer, R., Filipy, R., Dagle, G., & Stuart, B. (1982). Carcinogenic effects of radon daughters, uranium ore dust and cigarette smoke in beagle dogs. *Health phys*, 42(1), 33-52.
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., & Hakama, M. (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, 330(7485), 223.
- Darby, S., Hill, D., Deo, H., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F., Falk, R., Farchi, S., & Figueiras, A. (2006). Residential radon and lung cancer—detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand J Work Environ Health*, 1-84.
- De Villiers, A. (1966). Cancer of the Lung in a Group of Fluorspar Miners. *Proc Can Cancer Conf*,
- Garzillo, C., Pugliese, M., Loffredo, F., & Quarto, M. (2017). Indoor radon exposure and lung cancer risk: a meta-analysis of case-control studies. *Transl Cancer Res*, 6(Suppl 5), S934-S943.
- Grosche, B., Kreuzer, M., Kreisheimer, M., Schnelzer, M., & Tschense, A. (2006). Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946-1998. *Br J Cancer*, 95(9), 1280-1287.
- Harting, G. H. (1879). Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben. *Vrhtschr gerichtl Med*, 30, 31, 296-309, 102-132.
- Hodgson, J., & Jones, R. (1991). Mortality of UK tin miners 1941 to 1986. *Radiat Pro Dosimetry*, 36(2-4), 327-329.
- Hornung, R. W., Deddens, J. A., & Roscoe, R. J. (1998). Modifiers of lung cancer risk in uranium miners from the Colorado Plateau. *Health Phys*, 74(1), 12-21.
- Howe, G. (2006). Updated analysis of Eldorado uranium miners' cohort: part I of the Saskatchewan uranium miners' cohort study. RSP-0205. New York: Columbia University, 16.
- IARC. (1988). Man-made mineral fibres. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*, 43, 39-171.
- Kaletsch, U., Kaatsch, P., Meinert, R., Schüz, J., Czarwinski, R., & Michaelis, J. (1999). Childhood cancer and residential radon exposure—results of a population-based case-control study in Lower Saxony (Germany). *Radiat Environ Biophys*, 38(3), 211-215.
- Kelly-Reif, K., Sandler, D. P., Shore, D., Schubauer-Berigan, M., Troester, M., Nylander-French, L., & Richardson, D. B. (2021). Lung and extrathoracic cancer incidence among underground uranium miners exposed to radon progeny in the Příbram region of the Czech Republic: a case-cohort study. *Occup Environ Med*.
- Kelly-Reif, K., Sandler, D. P., Shore, D., Schubauer-Berigan, M. K., Troester, M. A., Nylander-French, L., & Richardson, D. B. (2020). Radon and cancer mortality among underground uranium miners in the Příbram region of the Czech Republic. *Am J Ind Med*, 63(10), 859-867.
- Kinlen, L., & Willows, A. (1988). Decline in the lung cancer hazard: a prospective study of the mortality of iron ore miners in Cumbria. *Occup Environ Med*, 45(4), 219-224.
- Kreuzer, M., Walsh, L., Schnelzer, M., Tschense, A., & Grosche, B. (2008). Radon and risk of extrapulmonary cancers: results of the German uranium miners' cohort study, 1960-2003. *Br J Cancer*, 99(11),
- Krewski, D., Mallick, R., Zielinski, J. M., & Letourneau, E. G. (2005). Modeling seasonal variation in indoor radon concentrations. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 15(3), 234-243.
- Law, G. R., Kane, E. V., Roman, E., Smith, A., & Cartwright, R. (2000). Residential radon exposure and adult acute leukaemia. *Lancet*, 355(9218), 1888.
- Li, C., Wang, C., Yu, J., Fan, Y., Liu, D., Zhou, W., & Shi, T. (2020). Residential Radon and Histological Types of Lung Cancer: A Meta-Analysis of Case-Control Studies. *International journal of environmental research and public health*, 17(4), 1457.
- Lorenzo-González, M., Ruano-Ravina, A., Torres-Durán, M., Kelsey, K. T., Provencio, M., Parente-Lamelas, I., Leiro-Fernández, V., Vidal-García, I., Castro-Añón, O., Martínez, C., Golpe-Gómez, A., Zapata-Cachafeiro, M., Piñeiro-Lamas, M., Pérez-Ríos, M., Abal-Arca, J., Montero-Martínez, C., Fernández-Villar, A., & Barros-Dios, J. M. (2019). Lung cancer and residential radon in never-smokers: A pooling study in the Northwest of Spain. *Environ Res*, 172, 713-718.
- Lu, Y., Liu, L., Chen, Q., Wei, J., Cao, G., & Zhang, J. (2020). Domestic radon exposure and risk of childhood leukemia: A meta-analysis. *J buon*, 25(2), 1035-1041.
- Lubin, J. H., Boice, J. D., Jr., Edling, C., Hornung, R. W., Howe, G. R., Kunz, E., Kusiak, R. A., Morrison, H. I., Radford, E. P., Samet, J. M., & et al. (1995). Lung cancer in radon-exposed miners and estimation of risk from indoor exposure. *J Natl Cancer Inst*, 87(11), 817-827.

- Lubin, J. H., Linet, M. S., Boice, J. D., Hatch, E. E., Kleinerman, R. A., Tarone, R. E., Wacholder, S., Buckley, J., Conrath, S. M., & Robison, L. L. (1998). Case-control study of childhood acute lymphoblastic leukemia and residential radon exposure. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 90(4), 294-300.
- Lubin, J. H., Wang, Z. Y., Boice Jr, J. D., Xu, Z. Y., Blot, W. J., De Wang, L., & Kleinerman, R. A. (2004). Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int J Cancer*, 109(1), 132-137.
- Malinovsky, G., Yarmoshenko, I., & Vasilyev, A. (2019). Meta-analysis of case-control studies on the relationship between lung cancer and indoor radon exposure. *Radiat Environ Biophys*, 58(1), 39-47.
- Monchaux, G., & Morlier, J.-P. (2002). Influence of exposure rate on radon-induced lung cancer in rats. *J Radiol Prot*, 22(3A), A81.
- Perraud, R., Chameaud, J., Lafuma, J., Masse, R., & Chretien, J. (1972). Lung cancer induced in rats by the inhalation of radon. Comparison with the histological aspects of human cancers. *J Fr Med Chi Thorac*, 25-41.
- Pirchan, A., & Šikl, H. (1932). Cancer of the lung in the miners of Jachymov (Joachimstal): report of cases observed in 1929-1930. *Am J Cancer*, 16(4), 681-722.
- Raaschou-Nielsen, O. (2008). Indoor radon and childhood leukaemia. *Radiat Prot Dosimetry*, 132(2), 175-181.
- Radford, E. P., & Renard, K. S. C. (1984). Lung cancer in Swedish iron miners exposed to low doses of radon daughters. *N Engl J Med*, 310(23), 1485-1494.
- Rericha, V., Kulich, M., Rericha, R., Shore, D. L., & Sandler, D. P. (2006). Incidence of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma in Czech uranium miners: a case-cohort study. *Environ Health Perspect*, 114(6), 818-822.
- Samet, J. M., Pathak, D. R., Morgan, M. V., Key, C. R., Valdivia, A. A., & Lubin, J. (1991). Lung cancer mortality and exposure to radon progeny in a cohort of New Mexico underground uranium miners. *Health phys*, 61(6), 745-752.
- Sevc, J., Kunz, E., Tomasek, L., Placek, V., & Horacek, J. (1988). Cancer in man after exposure to Rn daughters. *Health phys*, 54(1), 27-46.
- Sevc, J., Placek, V., & Jerabek, J. (1971). Lung cancer risk in relation to long-term radiation exposure in uranium mines.
- Sevcova, M., & Sevc, J. (1989). Skin basalioma in workers at the risk of daughter products of radon. *Pracov Lek*, 41, 398-401.
- Sevcova, M., Sevc, J., & Thomas, J. (1978). Alpha irradiation of the skin and the possibility of late effects. *Health phys*, 35(6), 803-806.
- Steinbuch, M., Weinberg, C., Buckley, J., Robison, L., & Sandler, D. (1999). Indoor residential radon exposure and risk of childhood acute myeloid leukaemia. *Br J Cancer*, 81(5), 900-906.
- Tomášek, L., Kunz, E., Darby, S., Swerdlow, A., & Placek, V. (1993). Radon exposure and cancers other than lung cancer among uranium miners in West Bohemia. *Lancet*, 341(8850), 919-923.
- Tomasek, L., Placek, V., Muller, T., Heribanova, A., Matzner, J., Burian, I., & Holecek, J. (2003). Czech studies of lung cancer risk from radon. *Int J Low Radiat*, 1(1), 50-62.
- Tomasek, L., Rogel, A., Tirmarche, M., Mitton, N., & Laurier, D. (2008). Lung cancer in French and Czech uranium miners: radon-associated risk at low exposure rates and modifying effects of time since exposure and age at exposure. *Radiat Res*, 169(2), 125-137.
- Tomasek, L., & Zarska, H. (2004). Lung cancer risk among Czech tin and uranium miners--comparison of lifetime detriment. *Neoplasma*, 51(4), 255-260.
- Vacquier, B., Caer, S., Rogel, A., Feurprier, M., Tirmarche, M., Luccioni, C., Quesne, B., Acker, A., & Laurier, D. (2008). Mortality risk in the French cohort of uranium miners: extended follow-up 1946-1999. *Occup Environ Med*, 65(9), 597-604.
- Vacquier, B., Rogel, A., Leuraud, K., Caer, S., Acker, A., & Laurier, D. (2009). Radon-associated lung cancer risk among French uranium miners: modifying factors of the exposure-risk relationship. *Radiat Environ Biophys*, 48(1), 1-9.
- Villeneuve, P. J., Lane, R. S., & Morrison, H. I. (2007). Coronary heart disease mortality and radon exposure in the Newfoundland fluorspar miners' cohort, 1950-2001. *Radiat Environ Biophys*, 46(3), 291-296.
- Wagoner, J. K., Archer, V. E., Carroll, B. E., Holaday, D. A., & Lawrence, P. A. (1964). Cancer mortality patterns among US uranium miners and millers, 1950 through 1962. *J Natl Cancer Inst*, 32(4), 787-801.
- Wagoner, J. K., Archer, V. E., Lundin Jr, F. E., Holaday, D. A., & Lloyd, J. W. (1965). Radiation as the cause of lung cancer among uranium miners. *N Engl J Med*, 273(4), 181-188.
- Woodward, A., Roder, D., McMichael, A. J., Crouch, P., & Mylvaganam, A. (1991). Radon daughter exposures at the Radium Hill uranium mine and lung cancer rates among former workers, 1952-87. *Cancer Causes Control*, 2(4), 213-220.
- Yao, S. X., Lubin, J. H., Qiao, Y. L., Boice, J. D., Jr., Li, J. Y., Cai, S. K., Zhang, F. M., & Blot, W. J. (1994). Exposure to radon progeny, tobacco use and lung cancer in a case-control study in southern China. *Radiat Res*, 138(3), 326-336.
- 대한산업보건협회. (2018). 라돈침대의 문제 및 대책. 산업보건, 362, 6-19.
- 환경부. (2016). 생활 속 자연 방사성 물질, 라돈의 이해.

발암 요인 보고서 (라돈)

발간에 참여하신 분들

국립암센터 연구진

박은영 국립암센터 암예방사업부

김병미 국립암센터 암예방사업부

김효선 국립암센터 암예방사업부

신보혜 국립암센터 암예방사업부

영역별 참여 전문가

김형철 가톨릭대학교 서울성모병원

이철우 국립환경과학원

라돈

RADON

-
발암 요인 보고서

