

## 주택의 라돈

연간 전세계 암 사망률은 760만 명이다. 세계에서 매년 150만 명에 이르는 폐암이 발생하여 120만 명이 사망하여 전세계 암 사망의 18%에 이른다. 폐암은 미국에서 암으로 인한 사망 원인의 30%를 차지하는 가장 흔한 암 사망 원인이다. 전세계 및 미국 폐암 사망자의 약 90%가 흡연으로 인한 것이다. 우라늄 광산, 제분소 또는 가공작업에 근접한 인구 집단에서 모든 암 발병률과 폐암 발생률은 증가하지 않는다 [3].

1988년 캐나다의 최대 실내 라돈 농도는 800 Bq/m<sup>3</sup> (21 pCi/L)로 설정되었다. 미국의 지침은 148 Bq/m<sup>3</sup> (4 pCi/L)로 설정되었다 [54]. 캐나다 온타리오 주 정부는 현재 법안을 논의하고 있다. 가정의 라돈을 미국과 비슷한 수준으로 규제하는 ‘라돈 인식 및 예방법’. 이 법은 가정의 가치와 판매에 영향을 줄뿐만 아니라 부당한 불안, 스트레스, 방사능공포증을 초래할 것이다. 이것은 EPA의 과잉 규제로 인해 이미 미국에서 발생했다. 실내 공기에서 라돈을 완전히 제거하는 것은 현실적이지 않다. 라돈 저감 시스템은 현재 1000 달러에서 5000 달러 사이에서 주택 소유자가 이용할 수 있다.

지하 우라늄 광산에서 발견되는 라돈 수준이 매우 높은 곳에서 폐암의 선형 외삽법은 역학 및 동물 연구에서 거짓으로 판명되었다. 가정에서 폐암 위험 예측을 위한 EPA 라돈 가스의 활동 수준은 1999년 National Academy of Sciences에 의해 적용된 것처럼 높은 라돈 함유 우라늄 광산에서 폐암 관련 데이터로부터 대부분 취해진다. EPA는 라돈 수치가 100 pCi/L 미만인 비흡연자의 라돈으로 인한 폐암을 발견하지 못했다. 미국의 금연 우라늄 광부에서 60 pCi/L 미만의 폐암을 발견되지 않았다. [각주 9: Dr. Geno Saccomanno, 콜로라도 고원의 미국 우라늄 광부 병리학자 HG Bosco, 회장, Hot Springs Lodge and Pool, Glenwood Springs.]

EPA는 주거용 라돈으로 인해 매년 21,600 명의 폐암으로 사망한다는 가정하에 LNT 가정에 근거하여 미국 내 가정 및 기타 거주지에서 라돈 노출 한도를 설정했다 (그림 6.7). 이것은 가정에서의 낙상, 익사 및 집안 화재로 인한 사망 이상의 것이다. 실내 방사선 라돈 폐암 사망에 대한 EPA 평가는 방사선 방호 기관에 의해 입증되지 않은 집단 선량의 사용에 의해 얻어졌다.

**Fig. 6.7** Calculation of radon related lung cancer deaths from determination of collective dose

$$\begin{aligned}
 & 240,000,000 \text{ persons (approximate size of U.S. population)} \times \frac{0.25 \text{ WLM}}{y} = 60,000,000 \text{ person-WLM} \\
 & 60,000,000 \text{ person-WLM} \times \frac{360 \text{ deaths}}{1,000,000 \text{ person-WLM}} = 21,600 \text{ deaths due to radon each year} \\
 & \quad \quad \quad \text{(age-averaged rate of radon-induced lung-cancer deaths).}
 \end{aligned}$$

라돈에 대한 두려움 때문에 지난 50년 동안 재정적으로 이익을 얻었기 때문에 LNT의 현상 유지를 선호하는 다수의 후원자가 있다. 여기에는 규제 기관 및 자문 기관이 포함된다. 대학; 방사성 물질 저감에 사용되는 방사선 보안 및 서비스 제품 제조업 자 등이 포함되며 이들 세미나, 심포지엄 또는 기타 과학 회의를 후원하여 도전할 가능성은 매우 낮다. LNT에서의 "유리한" 입장. 라돈의 치료는 돈을 요하고 가능한 가정 구매자를 두려워하며 대부분의 경우 폐암의 위험을 증가시키면서 가정의 가치를 떨어 뜨린다. 1994년 미국 가정에서 저감장치 설치 비용은 500억 달러로 추산되었다. 라돈 저감을 위한 자금을 추적하라. 4 pCi/L의 활동수준을 사용하여 "절감된" 평균 수명 비용은 70만 달러이며, 실제로는 4 pCi/L 이상의 라돈 수준에 노출되어 연장될 수 있는 다른 생명을 불필요하게 차지하는 비용이다. 높은 비용의 라돈 정화는 저농도의 라돈을 제거함으로써 삶의 인건비가 매우 높은 재정적인 혼란이다.

EPA는 방사능이 공기 1 리터당 4 pCi를 초과하면 모든 방사선이 암으로 당신을 죽일 수 있다고 생각하고 라돈 테스트와 치료를 권장한다. 인간은 자연적으로 약 200,000 pCi의 방사능을 함유하고 있음을 주목하라. EPA의 라돈 죽음은 LNT라 불리는 무효 이론에 근거하고 있다. 그들은 술 취한 운전 사망 및 다른 것과는 달리 관찰되지 않는다 [57,58].

환경 라돈에 대한 수많은 역학 연구는 세계의 높은 라돈 지역에 거주하는 이점을 분명히 보여 주었다. HBRA 지역에서의 생활과 관련된 조기 사망 또는 암과 관련성이 없다. 최근 연구에 따르면 스위스에 살고 있는 어린이들은 비교적 높은 수준의 실내 라돈에 노출되어 연간 20 mGy (미국의 평균 라돈 용량은 약 1 mGy)이다. 스위스 어린이들에게 흔한 암의 경우 약 10%의 위험 감소가 관찰되었다 (표 6.2) [59]. 폴란드의 암 사망률은 모든 암 사망자에 대해 1.2 %/mGy/년, 폐암 사망자의 경우 0.82%/mGy/년으로 라돈 수치가 높은 지역에서 더 낮다. [60] 헝가리에서의 높은 라돈 노출은 61 세 미만 여성의 전반적인 암 위험을 낮춘다 [61].

[각주 10]

Thomas M (2016) 방사능 치료법. Sentinelblog. <https://sentinelblog.com/2016/01/091-the-radioactive-remedy/>. 토마스(2016)의 구절 "광산기술자인 루이스(Lewis)의 할아버지가 Free Enterprise 우라늄 광산을 상업적 목적으로 개점한 후 얼마 지나지 않아 광산을 방문한 한 여성이 활액낭염 (bursitis) - 힘줄 및 관절 근처의 근육에 염증 - 이 크게 개선된 것을 발견했다. 뉴스가 빠르게 퍼졌다. 1952년 이 지역에 12개가 넘는 보건 광산이 생겨 2년 만에 10만 명이 넘게 다녀갔다. 오늘날, 단지 3개의 다른 건강 광산이 남아 있다. 여전히 방사선 피폭은 어렵다. 루이스는 Free Enterprise에서의 사업이 1980년대 후반의 10분의 1로 떨어졌다고 말했다. 그녀의 손익분기점은 약 300명의 고객이다. 그녀는 올해 200명을 기대하고 있다. "시간이 지남에 따라 약이 좋아지지만 완벽하지는 않습니다."라고 말한다. 몬타나 주 볼더의 프리 엔터프라이즈 건강 광산에 있는 방문객 대부분은 심한 고통을 겪고 있다. 커피 컵을 쥐고, 관절염의 징후로 고통받는 손들 - 울퉁불퉁한 관절, 비틀 거리고 비뚤어진 다리들로 대기실에서 어슬렁거린다. 대부분은 조용하다. 엘크 사냥을 계속하는 이야기와 오래된 오티스 엘리베이터의 겸손한 이야기, 광산 터널 입구의 일부 85 ft 아래에 .... 몇백 명의 후원자들이 매년 이곳에 앉아서 숨을 쉬기만 하면 된다. 그들은 나라의 먼 구석에서 그들을 괴롭히는 질병을 치료하러 온 것이다. ... 라돈 치료사 자유 기업 (Free Enterprise)은 저용량 방사선 노출이 만성 통증의 완화를 포함하여 심대한 치료 효과가 있다고 믿고 있다. 환경 보호국은 공

기 1 리터 당 4 pCi보다 높은 라돈 수준은 교정해야 한다고 한다. Free Enterprise에서는 라돈 수준이 평균 약 1700pCi/L이지만 700-2200pCi/L 사이에서 변동한다. "우리는 최후의 수단입니다. 나는 이렇게 계속해서 살 수 없다는 말을 많이 들었습니다." 고객이 문을 통과 할 무렵, 프리 엔터프라이즈 매니저 패트리샤 루이스는 자살을 생각할만큼 고통을 겪고 있는 사람들도 있다고 설명한다. 매력적인 옵션 "내 머리 속의 총알처럼 고통스럽다." 그녀의 할아버지, 웨이드(Wade)는 1950년대 초, 몬타나에서 최초로 건강 광산을 설립했다. "우리는 최후의 수단이다. 여러 번 '나는 이렇게 살 수는 없다' 건강 검진은 매년 수백 명의 방문객을 끌고 그들의 매력에 대한 증거가 된다. 볼더를 방문할 다른 이유는 거의 없다 ... 일부 연구에 따르면 염증성 류마티스 질환, 류마티스 성 관절염 및 관절염과 같은 퇴행성 관절 질환과 같은 척추골을 융합시킬 수 있는 관절염의 유형인 강직성 척추염을 비롯한 라돈에 대한 노출로부터 이익을 얻는다 광산 방문자는 매년 몇 차례의 방문으로 처방 의약품에 크게 의존하지 않을 만큼 고통을 덜어준다. 다른 사람들은 약물 치료의 부작용을 견뎌 낼 수 없기 때문에 라돈으로 향한다. 아니면 그들이 다른 어떤 것도 효과가 없다는 것을 발견했기 때문에 ... 루이스는 라돈에 대한 매일의 노출에 대해 신경쓰지 않는 것 같다. "내가 스스로 앉아있을 수 없다면 ... " 그녀가 어깨를 으쓱하며 말한다. 그녀가 산책 할 때, 지팡이에 다리를 질질 끌고 다니는 노인이 라돈 방으로 들어간다. 원래의 우라늄 광산을 바닥으로 여행하지 못하는 밀실 공포증 환자를 대상으로 한 이 방에는 라돈 가스를 밀어 넣어주게 설계 되어 있다.

**Table 6.2** Mean radon levels in homes and radon action level in countries of Europe and the USA

Country	Mean radon in homes (pCi/L)	Radon action level (pCi/L)
USA	1.2	4.0
Czech Republic	3.7	5.3
Norway	1.5	5.3
UK	0.5	5.3
Germany	1.3	6.7
Sweden	2.9	10.7
Switzerland	1.9	26.7

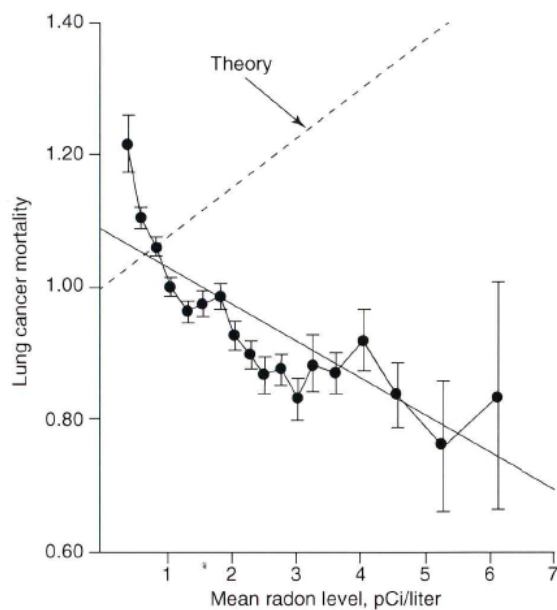
저자가 현재 살고 있는 콜로라도는 미국에서 주택 라돈 농도가 가장 높다. 우라늄 광산 주변에 건설된 콜로라도 주의 여러 도시에서 건물에서 가장 높은 라돈 수치가 관찰되었다. 콜로라도 주 62개 카운티 중 50개 카운티는 실내 라돈 수치가 4 pCi/L보다 높다. 미국의 평균 라돈 수치는 1.2 pCi/L이다. 콜로라도에서는 7.3 pCi/L이다. EPA에 의해 공포된 규정에 따르면 콜로라도 주 전체는 1년에 1000명이 폐암으로 사망하는 것을 피하기 위해 집을 고치거나 대피해야 한다. 그러나 콜로라도의 폐암으로 인한 사망률은 전국 사망률보다 25% 낮다. 2014년 1월에 모든 암에 대한 10만 명당 미국 사망률은 192 명인 반면 콜로라도 주에서는 70 명이었다. 암 사망률이 가장 낮은 미국의 10개 카운티 중 6개 카운티가 콜로라도 로키에 있다. 2014년 미시시피 매디슨 카운티의 유방암과 결장 직장암의 사망률은 콜로라도 주 서밋 카운티보다 5배 더 높았다 [62].

폐암을 예방하는 최선의 방법은 담배를 끊는 것이다.

슬픈 사실은 4 pCi/L 수준으로 실내 라돈을 유지하면 폐암으로 미국에서 연간 21,600 명의 생명을 "구하지" 못한다는 것이다. 2-10 pCi/L로 라돈 농도를 유지하는 것은 불필요하고 조기 사망을 초래하는 것과 훨씬 비슷하다. 라돈을 저농도로 흡입하면 폐암 형성을 예방하는 방사선 호르메시스를 유도하기 때문이다. 폐암의 90%는 흡연으로 인한 것이다. 폐암을 예방하는 가장 좋은 방법은 담배를 끊지 못한다면 매년 10-20 mGy의 전신선량을 제공하는 구형 CT 스캔을 받거나 하루에 몇 시간 동안 우라늄 광산에 10일 동안 앉아 있는 것이다. 이 방법이 흡연자와 비 흡연자의 폐암 위험을 줄일 가능성이 있다 [43].

라돈과 그 붕괴 생성물과 관련된 방사성 물질에 노출되면 폐암의 위험이 증가한다는 생각은 지난 25년 동안 일반적인 인식의 일부였다. EPA와 BEIR IV와 VI는 미국에서 가정용 라돈의 폐암 위험에 관한 자료를 잘못 발표했다. 일부는 그것을 라돈 사기라고 부른다 [63]. 1995년 버나드 코헨(Bernard Cohen, 1923-2013)은 흡연과 다른 사회 경제적 요인을 조정한 후에도 라돈 노출과 폐암 사망률 간에 유의미한 음의 상관관계를 발견했다. 이 연구는 1600개 카운티에서 약 30만 건의 라돈 측정을 포함하여 미국의 모든 카운티 중 90 %를 대표한다. 이 결과는 교란조건에 대해 조사된 500가지 이상의 요인으로 광범위하게 조정되었다. Cohen은 이 연구에서 저농도 라돈이 폐암을 일으킨다는 어떠한 증거도 없다고 결론지었다. Cohen이 관찰한 것은 폐암의 현저한 감소였다. 이것은 Cohen조차도 그의 연구를 시작할 때 예상하지 못한 결론이었다.

James Muckerheide는 Bernie Cohen의 작업과 그의 작업에 대한 부당한 공격에 대해 탁월한 리뷰를 발표했다. Cohen의 작업은 지적 편향된 연기가 제거된 후에 옳은 것으로 판명되었다. Cohen은 모든 회의론자들에 대한 주거용 라돈의 이점을 압도적으로 보여 주었고 평생 방사선 방호 정책과 계속해서 싸웠다 (그림 6.8). Mukerheide의 말을 거의 그대로 아래에 보였다.



**Fig. 6.8** Lung cancer mortality rates compared with mean home radon levels in US counties and comparison with linear model by BEIR IV adopted by the EPA [64] (with kind permission by Springer, Charles L Sanders: Radiation Hormesis and the Linear-No-Threshold Assumption, © 2010)

1980년대 피츠버그 대학의 버나드 코헨(Bernard Cohen) 박사는 1973년 원자력위원회(AEC)의 후계자, ERDA, 후기 DOE 및 NRC)가 종결한 것과 유사한 자연 방사선 조사를 개인적으로 수행했다. 그는 주거용 라돈의 변형과 비교하여 중요한 폐암 데이터를 사용하여 LNT를 테스트했다. 처음 그는 펜실베이니아 주 컴벌랜드 카운티의 고농도 라돈 지역에서 폐암 발병률이 펜실베이니아 평균보다 낮다는 것을 발견했다 [66]. 다른 많은 연구에서도 비슷한 결과가 나타났다.

카운티 수준에서 라돈 데이터가 존재하지 않았기 때문에 코헨 박사는 폐암 발생률이 가장 낮은 16개 대형 카운티와 가장 높은 비율을 보이는 25개 카운티에서 최소 100개의 라돈 측정치를 획득했다. 그는 또한 101개 대학의 450명의 대학 물리학 교수가 가정용 라돈 측정을 얻으려는 그의 노력을 지원한 다양한 무작위 군에서 동일한 결과를 발견했다.

코헨 박사는 그 후 미국 정부가 가장 인구가 많은 미국 카운티의 272,000 가정에서 라돈을 측정하고 폐기한 라돈과 폐암에 관한 개인적인 노력에 성공했다. 이 데이터는 또한 "모든 농촌"카운티, "모든 도시"카운티와 같은 수십 개의 독립적인 연구에서 일관되게 역결과를 보여준다 [64]. 세계적으로 유명한 전염병 학자인 하버드 대학의 그레이엄 콜디츠(Graham Colditz) 박사는 카운티별 데이터의 중간 분석에 기여했다. 그는 이 자료의 역학적 분석의 타당성을 확인했다.

Bernie Cohen은 그의 초기 결과를 믿지 않았다. 그는 자신의 연구 결과가 반 직관적인 결과를 보이도록 만드는 교란 영향을 찾는 의도로 통계학자의 도움을 구했다. 그들은 함께 500 가지 이상의 교란 인자를 조사했다. 그 결과 라돈은 폐암 발생률을 낮추는 경향을 보였다.

코헨 박사는 또한 약 2억 명의 미국인 경험을 대표하는 모든 EPA 및 주 라돈 데이터를 획득했다. 이 자료는 라돈 수치가 높을수록 폐암 발병률이 낮다는 것을 보여주었다. 전체 데이터를 보면 역상관 정도는 BEIR IV의 예측과 비교하여 20 표준편차를 넘는다. 오류의 가능성은 우주의 모든 전자에서 하나의 오류와 동일하다! 어떤 교란 요소도 (1) 흡연보다 훨씬 더 크고, (2) 라돈과 역상관 관계가 있으며, (3) 인식할 수 없는 요인이어야 한다. 이것은 하나의 가정을 제외하고는 상상할 수 없다. 정상적인 배경 수준의 범위에서 라돈 투여는 폐암으로부터 보호하기 위해 폐 조직 기능을 자극한다.

방사선 방호 이익집단은 코헨 등이 확인한 결과를 단지 "생태학적 연구"라고 주장하면서 무시한다; 이러한 비평가들은 이 자료를 논박할 과학적 근거를 제공하지 못하고 있다. 사실 코헨 박사의 연구 결과에 대한 과학적 비판은 없고, 이 하나의 연구가 왜 맞지 않는지 대하여 전혀 맞지 않는 이유로 일반적인 합리화를 할 뿐이다. 실제로 코헨 박사는 일관된 수십 개의 별개의 연구 결과를 냈지만 그럼에도 불구하고 방사선 방호 이익집단은 근거 없는 진술을 사용하여 코헨 박사의 자료가 반박된 사실을 대중에게 허위 진술한다.

Lawrence Livermore National Laboratory의 Kenneth Bogen 박사는 EPA 카운티의 환경(거주 지역이 아닌) 라돈 데이터를 사용하여 2821 미국 카운티에서 40세에서 80세 사이와, 60세에서 80세 사이의 여성에서 폐암 사망률을 독립적으로 비교했다. 그 역시 폐암과 라돈의 역상관 관계를 확인했다. Bogen 박사의 생물학적 모델은 역상관 관계가 알려진 생물학적 반

응과 일치한다는 것을 보여주기 위해 세포 반응 데이터를 적용했다 [68, 69].

LNT 지지자들은 "사례 대조군" 연구가 "더 나은" 것이라고 잘못 주장한다. 그러나, 그러한 연구의 정확성은 개별 선량의 정확성에 전적으로 의존합니다. 이것은 선량/피폭을 측정하고 통제하는 대부분의 환자 - 대조군 연구에서 사실이다. 그러나 대부분의 라돈 사례 - 대조군 연구에서 개별 선량은 잘 알려져 있지 않기 때문에 ... "선량 그룹"은 개별 선량을 모른 채 통계적인 추정치일 뿐이다. 표본의 수가 적으면 상관관계의 불확실성과 합해져서 큰 오류가 발생한다. 대규모 인구집단 연구와 달리 사례 통제 연구는 정확하거나 재현성 있는 선량-반응 결과를 만들 수 없다. 사실, 대조적으로, 통계학의 특성은 폐암발생률과 비교한 평균선량을 나타내는 더 엄밀한 통계를 적용하기 때문에 큰 생태학 연구에서 통계적 힘을 제공한다.

또한 대부분의 라돈 사례 - 대조군 연구에서의 불확실한 선량은 고선량 영역에서보다 큰 편향을 일으킨다. 고농도 그룹에는 저용량 군이 포함될 가능성이 있지만 저용량 그룹에는 고용량 군이 있을 가능성이 낮다. 따라서 고농도 그룹에서는 낮은 라돈 피폭으로 암이 과도하게 생기는 것으로 편향된 결과를 보이게 된다. 또한, 사례-대조군 연구는 매우 낮은 라돈 지역의 사례를 적절하게 취급하지 못하지만, Cohen 박사의 자료(그리고 다른 보다 확정된 인구 조사에서의 자료)에서는 잘 보여주고 있다. 그러나 사례 대조군 연구의 모든 문제에도 불구하고 코헨 박사와 다른 연구자가 보고한 결과에 위배되지 않는다는 것이 입증되었다.

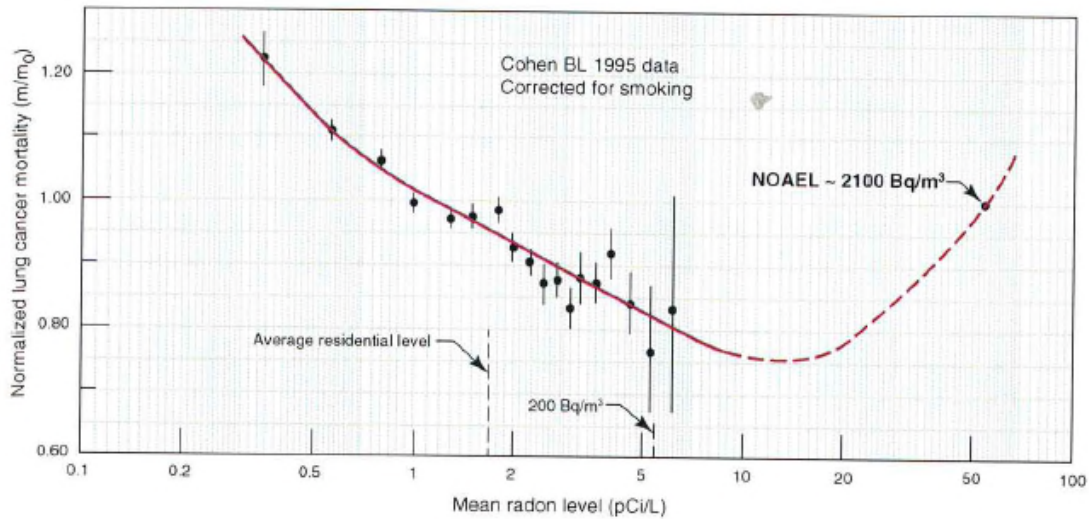
자연 배경 복사는 지리적 위치에 따라 최대 3배(0.7-700 mGy/년)까지 다양하다. 고용량 지역에 거주하는 사람들은 사망률의 증가나 수명의 감소가 관찰되지 않았다. 모든 방사선원에서 정상적인 배경 방사선을 받는 사람들이 변함합니다. 인간 세포는 삼중 수소의 약한  $\beta$ 입자와 코발트-60의 강한  $\gamma$ 선의 차이를 모르는 듯 하다. 폐암에 대한 강력한 보호 효과는 라돈 수준 > 2-6 pCi/L에서 발견되었습니다. 그러나 폐암 사망률은 1 pCi/L 미만의 라돈 수준에서 25%까지 증가했다. 이것은 방사선 결핍의 유해한 영향을 보여준다. 이러한 관찰은 최적의 건강을 달성하기 위해 우리가 최소한의 전리 방사선 요구량을 필요로 한다는 것을 나타낸다.

실내 라돈 수준을 4 pCi/L 미만으로 낮추면 폐암의 감소가 아니라 폐암의 위험이 60% 증가하는 것을 경험할 수 있다.

흥미롭게도 환경 보호국의 4 pCi/L 활동 수준에서 가정용 라돈에 일생에 노출되는 것은 라돈 수준이 매우 낮은 경우에 비해 폐암 사례가 평균 60% 이상 감소하는 것과 관련이 있다. BEIR-IV (EPA) 선형 모델 (이론적인 점선)은 라돈 수치가 증가함에 따라 폐암 위험이 증가하는 것을 보여준다 [64, 66, 67]. 미국의 카운티에서 주택 내  $^{222}\text{Rn}$  수준 대비 연령 조정 폐암 비율은 남성과 여성 모두 폐암이 비슷한 감소를 보였다.

Cohen의 폐암 사망률 데이터는 LNT 이론을 테스트한 결과, 흡입된 라돈 분해 제품이 폐암의 과도한 사망률을 유발하기 시작한 NOAEL(no observed adverse effect level)에 미치지 않는다. 가정의 라돈 수준에 대한 우려가 있기 때문에 건강 혜택을 잃을 위험을 피하기 위해 NOAEL 근처의 라돈 한계를 설정하는 것이 중요하다. 라돈 유발 폐 종양에 대한 NOAEL은 약 2100 Bq/m<sup>3</sup>으로 추정되었다. 미국 환경 보호국은 라돈 활동 수준을 150에서 적어도 1000 Bq/m<sup>3</sup>으로 높이는 것을 고려해야 한다. 300 Bq/m<sup>3</sup>에서 폐로의 연간 평균 흡수선량은

7.1 mGy이다. 2100 Bq m<sup>3</sup>의 연간 평균 폐 선량은 50 mGy이다. 흡입된 라돈의 NOAEL은 2100 Bq/m<sup>3</sup> 또는 50 pCi/L로 추정되었다 (그림 6.9) [72].



**Fig. 6.9** The ratio of lung cancer mortality for residential radon levels was compared to that for US average residential level of 1.7 pCi/L. Residential radon prevents lung cancer at levels which the EPA says should be avoided. At radon levels <1 pCi/L that the EPA recommends remediating, there is a substantial increase in lung cancer (with kind permission of Jerry Cuttler) [72]

그림 6.9 가정내 라돈 수준에 따른 폐암사망률 비율을 미국 평균 가정 수준인 1.7 pCi/L와 비교되었다. 주거지 라돈은 EPA가 피하여야하는 수준에서 폐암을 예방한다. EPA가 치료를 권고하는 1 pCi/L 미만의 라돈 수준에서는 폐암이 상당히 증가한다. (Jerry Cuttler의 허가) [72]

따라서 주거지 라돈은 폐암을 일으키지 않으며 노출 수준에 따라 담배 연기 관련 발암 물질과 산소 라디칼을 보호한다. 라돈 노출은 또한 폐암과 관련된 부정적인 연관성과 유사하게, 흡연에 의해 유발된 입, 후두 및 식도암에 대해 매우 강한 음의 상관관계를 제공한다.

루빈(Lubin)과 보이스(Boice)가 발표한 연구와 같은 실내 라돈에서 폐암 연구에 대한 메타 분석에는 많은 함정이 있다. 이 연구는 자료 조작, 부정확, 특히 선량 측정 및 흡연과 같은 교란 요인에 대한 적절한 고려, 자료를 LNT에 강제로 적용하는 등의 오류를 범했다. 전 세계적으로 거의 30건의 사례 대조군, 역학, 실내 라돈 연구가 이루어졌다. 28개의 라돈 연구에 대한 집합 베이스 분석은 저용량 범위에서 폐암 위험 증가에 대한 증거가 없다는 것을 보여준다 [75]. 대부분은 흡연 상태 및 선량 측정을 제대로 통제하지 않았다. [3, 43]. 우라늄 광부와 마찬가지로 대부분의 폐암은 흡연으로 인해 흡연 상태를 통제하는 것이 중요하다. 20건의 대조군 연구의 메타 분석에서 실내 라돈 노출과 폐암의 상대적 위험 사이의 관계는 라돈 수준의 증가와 함께 폐암의 위험 증가와 상관관계가 없음을 보여 주었다 [3].



너무 적은 라돈 노출은 재난이며, 폐암 위험을 현저하게 증가시킨다. 또 폐암 위험을 EPA가 예측한 것보다 크게 낮추는 라돈 건강효과를 보지 못하게 된다. 더 높은 라돈 노출에서만 폐암의 위험이 증가 할 것으로 기대된다 [72,76].

1000 Bq/m<sup>3</sup>의 라돈 농도는 사람에서 91년 후에 2.3 Gy의 누적폐선량을 주는데, 이는 폐암의 위험 증가에 대한 명백한 기준이다 [77]. 기존의 모든 라돈 연구는 하나의 메타 연구로 쉽게 분석될 수 있어 800 Bq/m<sup>3</sup> 이하에서 폐암 위험에 대한 증거는 없다고 결론 내렸다. 분석에서 흡입된 라돈의 이점을 입증하는 연구를 제외해도 위험이 증가한다는 증거는 없다 [78].

최고의 실내 라돈 케이스-컨트롤 연구는 처음에 EPA 라돈 규제와 LNT 가정을 지지한 Thompson에 의해 수행되었다. 그의 연구는 집에서 광범위하게 1년 내내 라돈 선량측정법을 사용한 9가지 범주의 흡연에 대해 통제되었다. 4가지 라돈 노출 수준은 방사선 호르메시스의 유의한 증거를 보였다 (표 6.3). 선형 스플라인은 선형 반응 곡선을 따라 선형 세그먼트를 연결하여 형성된 통계적 연속 함수이다. Thompson의 연구에서 라돈 노출은 비선형성을 모델링하기 위해 선형 스플라인을 사용하여 평가되었다. 폐암 및 라돈 농도에 대해 평활화된 데이터에 선형 스플라인이 중첩되어 라돈 수치가 400 Bq/m<sup>3</sup> 이상인 경우 폐암 발생률이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 600-800 WLM의 폐암 형성 임계값과 동일하다.

**Table 6.3** Most case-control indoor radon studies were poorly controlled for smoking status and dosimetry

Radon (Bq/m <sup>3</sup> )	RR	95% CI
<25	1.00	-
25-49	0.53*	0.24-1.13
50-74	0.31**	0.13-0.73
75-149	0.47*	0.20-1.10
150-249	0.22*	0.04-1.13
>249	2.50	0.47-13.46

This study was controlled for nine categories of smoking with extensive year-long dosimetry. The controls were individually matched to cases. The authors claim that this study is among the most careful ones in both data collection and analysis and that they were totally surprised by the results (\**p* <0.1 \*\**P* <0.05) [131]

값 주민들의 실내 라돈과 폐암에 관한 최근의 연구는 Thompson [79]에 의해 제시된 것과 유사한 반응을 보였다. 3 pCi/L에서 18 pCi/L까지의 수준을 초과하는 라돈 농도는 폐암과 부정적인 상관관계를 보여 호르메시스 효과를 강하게 시사했다. 코헨(Cohen)의 결과와 유사하게 용량-반응 곡선에서 2 pCi L 미만의 라돈 수치는 폐암 발생률이 현저히 증가한 것과 관련이 있다. 선형 상관관계는 P<0.005 수준에서 유의하였다 [81]. 다른 유럽의 연구들도 폐암과 낮은 라돈 농도 사이에 상관관계가 없거나 음의 상관관계가 있음을 보여 주었다 [19, 82]. 독일의 실내 라돈 연구는 폐암 발병 위험에 20 pCi/L를 넘는 확실한 문턱치를 제시한다 [3].