



저선량 방사선 노출과 건강 영향에 대한 역학적 고찰

이원진*

고려대학교 의과대학 예방의학교실

Epidemiology of Low-Dose Ionizing Radiation Exposure and Health Effects

Won Jin Lee*

Department of Preventive Medicine, Korea University College of Medicine

ABSTRACT

Low-dose radiation exposure has received considerable attention because it reflects the general public's type and level of exposure. Still, controversy remains due to the relatively unclear results and uncertainty in risk estimation compared to high-dose radiation. However, recent epidemiological studies report direct evidence of health effects for various types of low-dose radiation exposure. In particular, international nuclear workers' studies, CT exposure studies, and children's cancer studies on natural radiation showed significantly increased cancer risk among the study populations despite their low-dose radiation exposure. These studies showed similar results even when the cumulative radiation dose was limited to an exposure group of less than 100 mGy, demonstrating that the observed excess risk was not affected by high exposure. A linear dose-response relationship between radiation exposure and cancer incidence has been observed, even at the low-dose interval. These recent epidemiological studies include relatively large populations, and findings are broadly consistent with previous studies on Japanese atomic bomb survivors. However, the health effects of low-dose radiation are assumed to be small compared to the risks that may arise from other lifestyle factors; therefore, the benefits of radiation use should be considered at the individual level through a balanced interpretation. Further low-dose radiation studies are essential to accurately determining the benefits and risks of radiation.

Key words: Cancer, causality, epidemiology, ionizing radiation, risk

Received February 17, 2023

Revised February 22, 2023

Accepted February 22, 2023

Highlights:

- Low-dose radiation exposure causes increased cancer risk in the human population.
- The effect size of the cancer risk caused by low-dose radiation exposure is small compared to the baseline cancer risk.
- Radiation risks and benefits should be interpreted from a balanced perspective.

*Corresponding author:

Department of Preventive Medicine,
Korea University College of Medicine,
73 Goryeodae-ro, Seongbuk-gu, Seoul
02841, Republic of Korea
Tel: +82-2-2286-1413
Fax: +82-2-927-7220
E-mail: leewj@korea.ac.kr

I. 서 론

유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)에서는 전리방사선의 선량 구간을 나누어 고선량(high) (>1 Gy), 중간선량(moderate) (100 mGy~1 Gy), 저선량(low) (10~100 mGy), 극저선량(very low) (<10 mGy)으로 정의하고 있으며,¹⁾ 일반적으로 100 mSv 미만을 저선량 방사선(low-dose radiation)으로 간주한다. 여기서 Gy는 방사선의 흡수선량에 대한 국제 표준단위이며 등가선량이나 유효선량 단위인 Sv와 같은 에너지량을 갖는다. 저선량

기준의 수치는 임의적인 것으로서 인구집단에서 악성종양 위험도가 유의하게 증가한 선량값의 대략적인 최솟값으로 연구 결과들이 축적되면서 변경될 수 있다. 유엔방사선영향과학위원회에서는 과거에 저선량을 200 mSv 미만으로 정의한 바 있으나 2012년 이후에는 100 mSv로 변경하여 현재는 국제방사선방호위원회(ICRP)에서의 기준과 같은 값으로 통용되고 있다. 한편 방사선에 의한 건강 영향은 선량의 크기만이 아니라 선량률(dose rate)에 의해서도 영향을 받기 때문에 저선량률에 대한 정의(시간당 5 mGy 혹은 분당 0.1 mGy를 받는 경우)도 일반적으



로 함께 제시한다.

방사선 노출에 의한 건강 영향은 확률론적 영향(stochastic effects)과 조직반응(tissue reactions, 혹은 결정론적 영향[deterministic effects])으로 구별한다.¹⁾ 확률론적 영향은 악성종양과 유전질환을, 조직반응은 피부 홍반, 궤양, 탈모, 소화기 및 신경계 증상 등 각 장기의 기능 부전을 포함한다. 이러한 방사선 노출에 의한 건강 영향(특히 확률론적 영향)을 파악하는 데 있어서 주로 누적선량(cumulative dose)을 사용한다. 이는 과거에 노출된 방사선의 건강 영향은 노출이 사라졌다고 하더라도 없어지는 것이 아니라 평생 누적되기 때문이다. 마치 흡연에 의한 건강 영향을 평가할 때 처음 흡연 나이와 함께 누적된 총흡연량이 중요한 노출 지표로 사용되고 있는 사례와 유사하다. 따라서 저선량의 기준인 100 mSv는 노출원(자연 혹은 인공), 노출 형태(내부 혹은 외부) 및 노출 방식(급성 혹은 만성)과는 무관하게 총 누적된 선량을 의미한다.

방사선은 실험실적 연구뿐 아니라 역학 연구에서도 확인된 발암원(confirmed carcinogen)이다.²⁾ 그러나 저선량 방사선 노출의 경우 고선량과 달리 건강 영향에 대해 인과성 여부와 위험도의 크기에 대한 논란이 지속되고 있다. 주된 이유는 저선량에 대한 실험실적 연구는 인구집단에 관한 결과를 직접 제공하는 것이 아니며, 역학 연구에서는 위험도 크기가 대체로 작아 질병을 일으키는 다른 위험인자와 구별이 어렵기 때문이다. 그러나 최근에는 여러 역학 연구들이 저선량 방사선 노출 상황에서 인구집단을 대상으로 직접 관찰한 근거(direct evidence)들을 보고하고 있다. 따라서 이 고찰에서는 저선량 방사선 노출로 인한 건강 영향에 대한 이해를 위해서, 최근 보고된 악성종양 역학 연구 결과와 함께 저선량 방사선 노출과의 인과성, 위험도의 크기, 관리 원칙을 정리하였다.

II. 저선량 방사선 연구의 중요성

1. 사회적 관심과 해석상의 논란

저선량 방사선 노출은 일반인의 노출 수준과 형태를 실제로 반영하기 때문에 많은 관심을 받고 있으나, 그동안 직접 관찰된 결과들이 적었고 확실한 결과를 보여주지 못하였다. 이로 인해 간혹 저선량 방사선에 대한 객관적인 판단 부족으로 그 위험성을 간과하거나 반대로 과잉 반응을 보이기도 하였다. 대표적으로 체르노빌 사고 시 일부 유럽 국가들에서는 매우 적은 방사선에 노출되었음에도 태아 기형에 대한 공포(radiophobia)로 인해 불필요하게 많은 임신 중재 시술이 시행된 바 있다.³⁾ 국내에서도 후쿠시마 원전사고 시 수산물 섭취에 대한 과도한 불안감이 조성된 바 있으나, 국내 방사능 오염 자료에 근거한 추정된 암 위험도는 수산물 섭취로 인한 이익을 거부할 정도로 높은 수준은 아니었다.⁴⁾ 이와 반대로 저선량이 건강에 이로운 것으로 잘못 이해되어 폐광산에서 방출되는 라돈에 사람들을 노출

시키는 사업이 미국에서 운영되고 있으며, 영국 영상의학과 의사들의 전체 사망률이 일반인보다 감소하였다는 결과⁵⁾를 마치 저선량 방사선 노출이 건강에 이롭기 때문이라는 잘못된 해석이 제기되기도 하였다. 최근에는 역학적 근거가 부족한 상황에서 저선량 방사선을 COVID-19 환자들의 폐렴 치료에 사용하는 것이 논란이 된 바 있다.⁶⁾

저선량 방사선이 고선량 방사선보다 위험하거나 질병의 위험도를 특별히 더 높게 증가시키는 발생기전을 별도로 갖지는 않는다. 저선량 건강 영향에 대한 많은 논란은 주로 방사선 방호의 적용에 따라 소요되는 큰 노력과 비용을 둘러싼 현실적인 파급효과에 기인한다고 할 수 있다. 그리고 저선량을 둘러싼 경제적 혹은 정치적 이해관계가 마치 과학적 논란처럼 혼동된 면도 있다. 그러나 방사선의 건강 영향 그 자체는 현실적인 활동들과는 구별되어 객관적으로 이해되어야 한다.

2. 모델 사용에 따른 건강 영향 평가의 제한점

그동안 저선량 방사선 노출에 의한 건강 위험도는 상대적으로 높은 선량에 노출된 집단에서의 기존 결과를 근거로 저선량에 추정하는 방식으로 파악하였다. 이러한 추정을 통해 합리적인 위험도를 파악할 수 있었지만, 직접 관찰된 결과가 아니므로 여러 제한점을 근본적으로 갖고 있다. 첫째, 저선량 영역에서의 위험도 추정을 위해 여러 선량반응 모델(문턱없는 선형모델, 하향 및 상향 곡선, 문턱모델, 호메시스 등)들이 개발되었다.⁷⁾ 그러나 이들 중 어떤 모델이 저선량에 가장 적합한지에 대한 논란이 지속되고 있다. 둘째, 저선량 노출로 인한 위험도 산출을 위해 고선량에서의 위험도를 선량-선량률 효과인자(dose and dose-rate effectiveness factor)로 나누어주었다. 이것은 실험실적 연구를 통해 같은 양의 방사선에 노출되더라도 한 번에 많은 양을 받는 경우가 나누어 받는 경우보다 손상이 잘 회복되는 결과에 근거한다. 그러나 기존에 선량-선량률 효과인자를 2.0 혹은 1.5값을 적용하던 것이 현재는 아무런 보정을 하지 않는 추세로 바뀌었으며 적합한 값에 대한 논란이 있어왔다.⁸⁾ 셋째, 저선량 위험도에 대한 모델 대부분은 일본원폭생존자 연구 결과에 기반하고 있다. 그러나 기저위험도(baseline risk)와 특성이 다른 인구집단에 일본원폭생존자 연구 결과를 적용할 수 있는지에 대한 논란이 있으며, 현재는 상대 혹은 절대초과위험도를 조합하여 위험도 추정에 적용하고 있다.⁹⁾

이러한 제한점들은 모두 저선량 노출 상황에서의 건강 영향을 직접 관찰하지 못하고 다른 연구 결과들로부터 위험도를 추정하는 데에 생기는 불확실성(uncertainty)으로서, 직접 관찰한 저선량 역학 연구 결과가 있다면 불확실성이 감소될 수 있다. 따라서 추정이 아닌 직접 관찰된 역학 연구가 중요하며, 다양한 인구집단을 대상으로 한 개별 역학 연구들은 각각의 의미를 갖는다. 이를 통해 다양한 노출 상황에서의 저선량 방사선 노출과 건강 영향에 대한 직접적인 근거를 제공해 줄 수 있기 때문이다.

III. 최근 저선량 방사선 역학 연구

다양한 방사선 노출 형태(직업노출, 의료노출, 환경노출 등) 별로 저선량에 의한 건강 영향 결과들이 보고되고 있으며, 국제적으로 잘 알려진 일부 최근 역학 연구들은 다음과 같다.

1. 직업노출 연구

국제원전종사자 연구(INWORKS)는 영국, 미국, 프랑스의 원자력산업 종사자 약 30만 명을 대상으로 직업적 방사선 노출과 사망률을 살펴보는 후향적 코호트 연구로서, 연구 대상자들의 평균 누적 대장선량(colon dose)은 17.4 mGy로 저선량에 노출된 집단이다.¹⁰⁾ 이 연구에서 악성종양 사망이 약 2만 명 관찰되었으며 잠재기간을 10년으로 한 직업적 방사선 노출에 의한 초과상대위험도(excess relative risk)는 전체 암, 백혈병을 제외한 전체 암, 고형암에서 각각 Gy당 0.51 (90% 신뢰구간: 0.23, 0.82), 0.48 (0.20, 0.79), 0.47 (0.18, 0.79)로 모두 유의한 선형적 증가 양상을 보였다(그림 1a). 선량 구간별로 위험도를 구분하였을 때도 이러한 증가는 일관되어, 총 대상자 중 200 mGy, 150 mGy, 100 mGy까지 노출된 종사자들로 제한하였을 때도 1.04 (90% 신뢰구간: 0.55, 1.56), 0.69 (0.10, 1.30), 0.81 (0.01, 1.64)의 초과상대위험도 값을 보였다. 백혈병(CLL 제외) 사망은 531명이 관찰되었으며 잠재기간을 2년으로 설정 시 초과상대위험도는 Gy당 2.96 (90% 신뢰구간: 1.17, 5.21)으로 유의하게 증가하였다(그림 1b).¹¹⁾ 이때 평균 누적 골수선량은 15.9 mGy이고 종사자 대부분이 100 mGy 미만에 노출되었다. 선량 구간을 100 mGy 이하로 제한하였을 경우에도 백혈병 위험도가 증가하였으며, 이는 전체적으로 유의하게 증가한 위험도가 고선량 노출에 의해서 영향받지 않았음을 의미한다.

영국에서는 1955년 이후 방사선 작업자로 등록되어 근무한 약 16만 명의 종사자들을 대상으로 연구가 진행되었다.¹²⁾ 이 연

구에서 2011년 12월까지 추적한 결과 악성종양(백혈병과 비흑색종 피부암 제외) 발생의 초과상대위험도는 Sv당 0.28 (90% 신뢰구간: 0.10, 0.48)로 유의하게 증가하였고 대부분의 암종도 증가된 위험도를 보였다. 이때 방사선 노출 선량(잠재기간 10년 설정)은 평균 25.3 mSv (남자 27.5 mSv, 여자 5.6 mSv)이었다. 고노출자의 영향을 제거하기 위해 100 mSv 이하 노출자들만을 대상으로 한 경우에도 초과상대위험도가 Sv당 1.42로 유의하게 증가하였다.

2. 의료노출 연구

어린이에서 CT 노출로 인한 암 발생 위험을 직접 추정된 최초의 대규모 코호트 연구가 영국에서 보고된 바 있다.¹³⁾ 이 연구에서는 국가 방사선 정보 시스템 자료를 통해 1985년에서 2002년 동안 22세 미만에 적어도 한 번 CT를 촬영한 약 18만 명의 후향적 코호트를 구축하고 2008년까지 추적 관찰하였다. 전체 대상자의 평균 누적선량이 50 mGy 수준이었으며 2년의 잠재기를 고려한 백혈병의 초과상대위험도가 mGy당 0.036 (95% 신뢰구간: 0.005, 0.120)이며, 5년의 잠재기를 고려한 뇌종양 발생 초과상대위험도는 mGy당 0.023 (95% 신뢰구간: 0.010, 0.049)으로 유의하게 증가하였다. 이때 선량-반응 관련성은 백혈병과 뇌종양 모두 선형적인 증가 양상을 보였다.

어린이들을 대상으로 한 여러 나라의 CT 연구를 통합한 연구(pooled analysis)에서도,¹⁴⁾ 연구 대상자들의 뇌선량은 18~43 mGy이었지만 뇌종양의 초과상대위험도는 100 mGy 당 0.7~1.2였으며, 메타분석 결과 100 mGy당 초과상대위험도는 0.79 (95% 신뢰구간: 0.47, 1.11)로 유의하게 증가하였다(표 1). 골수선량은 6~12 mGy에 불과하였지만 백혈병의 초과상대위험도는 100 mGy당 0.04~13이었으며, 메타분석한 결과 초과상대위험도가 100 mGy당 1.05 (95% 신뢰구간: -0.58, 2.69)로 산출되었다. 최근 대규모 프랑스 연구에서도¹⁵⁾ 평균 뇌

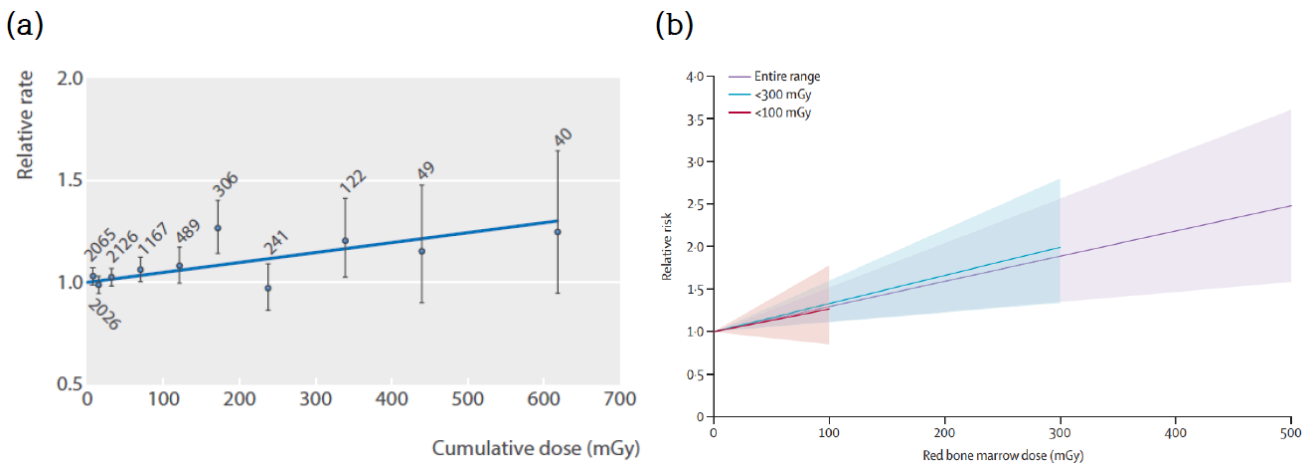


그림 1. 국제원전종사자 연구(INWORKS)에서 선량 구간별 악성종양과 백혈병 위험도 (a, 고형암; b, 백혈병)^{10,11)}

표 1. CT 촬영에 의한 뇌종양과 백혈병 위험도 연구¹⁴⁾

국가	뇌종양			백혈병		
	환자 수	평균선량 (mGy)	100 mGy당 초과상대위험도 (95% 신뢰구간)	환자 수	평균선량 (mGy)	100 mGy당 초과상대위험도 (95% 신뢰구간)
프랑스	22	18	0.7 (-0.1, 1.0)	17	7	1.6 (-2.3, 2.7)
독일	7	34	0.8 (0.4, 1.3)	12	12	0.9 (-2, 3.7)
네덜란드	84	39	0.86 (0.20, 2.22)	63	10	0.04 (-0.12, 1.6)
영국	135	43	1.2 (0.4, 3.1)	74	12	3.0 (0.3, 10.9)
핀란드	-	-	-	1,093	6	13 (2, 26)

표 2. 테차강 주민 코호트에서의 암 발생 초과상대위험도²⁰⁾

암종	환자 수 (남성)	환자 수 (여성)	100 mGy당 초과상대위험도 (95% 신뢰구간)
전체암	963	970	0.08 (0.01, 0.15)
구강암	74	33	0.03 (<0, 0.36)
식도암	50	58	0.46 (0.04, 1.2)
위암	209	156	0.13 (-0.02, 0.34)
대장암	25	40	-0.01 (<-0.02, 0.45)
직장암	47	48	-0.03 (<-0.03, 0.37)
간암	24	24	0.01 (<-0.01, 0.64)
췌장암	22	16	-0.07 (<-0.08, 0.59)
폐암	292	47	0.01 (-0.02, 0.18)
방광암	33	5	-0.08 (<-0.1, 0.75)
기타 비뇨기계암	27	22	0.00 (<-0.01, 0.57)
갑상선암	9	25	0.03 (<-0.01, 0.89)
기타	116	118	0.08 (0.00, 0.35)

선량과 골수선량이 각각 27.7 mGy, 10.3 mGy의 저선량 노출이지만 어린이들에서 암 위험도가 증가한다는 결과를 지지하였다.

3. 일본원폭생존자 연구

일본원폭생존자 약 10만 명을 1958년부터 2009년까지 추적하여 최근 보완된 선량 평가 시스템(DS02R1)을 적용한 연구에서, 초과상대위험도는 남성의 경우 Gy당 0.33 (95% 신뢰구간: 0.25, 0.42), 여성은 0.60 (0.49, 0.72)으로 관찰되었으며, 흡연을 보정한 성별 평균위험도(sex-averaged risk)는 Gy당 0.47 (0.39, 0.55)이었다.¹⁶⁾ 선량-반응 곡선이 남성에서는 선형 이차모델로 여성에서는 선형모델로 설명되었으며, 이러한 차이는 개별 암종의 이질성에 기인한 것으로 파악되었다.¹⁷⁾ 그리고 이 연구에서 100 mGy 미만 노출에서도 유의한 암 발생 위험도 증가를 보고하였다.

일본원폭생존자 연구에서 방사선 노출로 유의한 암위험도를 보이는 가장 낮은 선량(minimal level of significant exposure)이

고형암 사망의 경우 추적 기간이 1950~1985년과 1950~1990년인 연구에서는 300 mGy이던 것이, 1950~1995년까지 추적한 연구에서는 200 mGy로, 그리고 1950~2003년까지 추적한 연구에서는 150 mGy로 감소된 바 있다. 암발생의 경우 1958~1987년까지의 추적연구에서는 175 mGy였다가 1958~1998년까지는 150 mGy로, 그리고 1958~2009년까지 추적한 최근 연구에서는 100 mGy로 감소되었다.¹⁸⁾ 이와 비슷하게 체르노빌 사고 시 노출된 종사자 연구에서도 유의한 암 발생 및 사망위험도를 보이는 선량이 추적 기간의 증가에 따라 감소하였다.¹⁹⁾ 이것은 방사선에 의한 초과상대위험도가 연령 증가에 따라 감소하지만, 추적 기간이 길어짐에 따라 질병 발생자가 증가하는 현상과 관련되어 있다. 향후 각 연구에서 추적 기간을 확대함에 따라 방사선에 의해 위험도를 보이는 선량값은 더욱 낮아질 것으로 전망된다.

4. 환경노출 연구

러시아 마야크(Mayak) 지역에서 1948년부터 1982년까지 핵 무기 생산 공장이 가동되었고, 사업장에서 흘러나온 핵물질들이 인근 테차강(Techa river)에 유입되면서 주변 지역을 오염시켰다. 따라서 1950년 이전 출생자로서 테차강 주변 지역에 1956~2007년 사이에 거주한 약 1만 7천 명의 지역주민들을 대상으로 코호트 연구가 진행되었으며, 이들의 평균 누적 방사선량은 60 mGy (5년 잠재기 위선량)이었고 초과상대위험도는 100 mGy당 0.08 (95% CI: 0.01, 0.15)로 유의한 선형 관련성을 보였다(표 2).²⁰⁾

한편 일상생활에서 노출되는 저선량 자연방사선과 어린이 암 역학 연구에서도 백혈병의 경우 영국과 스위스 연구에서, 뇌종양의 경우 스위스와 독일 연구에서 유의하게 증가된 위험도를 보고한 바 있다.²¹⁾

5. 여러 역학 연구의 통합분석(pooled analysis)

국제적으로 잘 알려진 역학 연구들을 통합하여 어릴 때 저선량 방사선에 노출된 사람들에서의 백혈병²²⁾과 갑상선암²³⁾ 위험도를 살펴본 연구가 진행되었다. 이 연구에는 일본원폭생존

자 코호트를 포함하여 미국, 캐나다, 유럽의 의료노출 코호트 등 9개 연구 자료들이 통합되었다. 백혈병의 위험도는 세부 종류별로 차이가 있지만, 선량 구간별(<100 mSv, <50 mSv, <20 mSv)로 국한하여도 유의한 결과가 관찰되었다(표 3). 갑상선암의 경우에서도 전체 대상자 중 200 mGy 혹은 100 mGy 미만의 저선량에서도 암의 위험도가 선형적으로 증가하였다. 즉 개별 연구들뿐 아니라 여러 역학 연구들을 종합해도 저선량 방사선에 의해서 백혈병과 갑상선암의 위험도는 일관적으로 유의하게 증가하였다.

IV. 저선량 방사선과 악성종양과의 인과성

1. 인과성 파악의 의미

저선량 방사선과 악성종양과의 인과성을 판단하는 것은 방사선 방호 방침에 큰 영향을 준다. 그러나 인과성(causality)은 동일 집단 내에서 노출 여부에 따라 위험도를 비교하여 판단할 수 있는 것으로, 현실적으로는 노출군과 비노출군 각각에서의 연관성(association)을 근거로 추론할 수밖에 없는 제한점이 있다. 따라서 저선량 방사선과 악성종양과의 인과성을 검증하기 위해서는 여러 접근 방법들, 즉 바이어스의 파악 및 제거,²⁴⁾ 힐(Hill)의 항목 적용,²⁵⁾ 같은 주제에 대해 서로 다른 접근 방법들의 결과를 통합시켜 인과추론을 파악하는 방법(triangulation)²⁶⁾ 등이 적용되고 있다.

인과성 평가는 개인과 인구집단 간에 다른 해석이 가능하다. 인구집단 차원에서는 노출된 선량이 높아질수록 건강 영향이 나타날 확률이 높아져, 방사선 노출로 인한 암 발생의 인과성이 분명하다고 할 수 있다. 그러나 개인적 차원에서는 많은 개인적

특성에 따라 암 발생 여부가 영향을 받기 때문에 비록 방사선에 노출되더라도 암에 걸릴지 혹은 걸리지 않을지는 불분명하다. 즉 개인적 차원에서는 불확실한 인과성이 인구집단 차원에서는 분명한 인과성을 동시에 가질 수 있다.²⁷⁾

2. 인과성 항목의 적용

저선량 방사선 노출과 악성종양과의 인과성이 힐(Austin Bradford Hill)의 지침에 따라 평가된 바 있다.²⁵⁾ 전체 9개 항목 중 실험적 입증과 유사성 항목은 제외하고 7개 항목을 적용한 결과, 5개 항목(시간적 선후관계, 일관성, 양-반응 관련성, 생물학적 설명 가능성, 기존 지식과의 일치성)을 만족하였다(표 4). 즉 방사선 노출과 악성종양의 경우 합리적인 잠재기간 이전의 방사선 노출이 암 발생을 증가시킨다는 결과들이 관찰되고

표 4. 저선량 방사선 노출과 악성종양과의 인과성에 대한 Bradford Hill 항목의 적용²⁵⁾

항목	충족(적용) 여부
양-반응관계(dose-response)	충족
일관성(consistency)	충족
연관성의 강도(strength of association)	미충족
시간적 선후관계(temporality)	충족
생물학적 개연성(biological plausibility)	충족
특이성(specificity)	미충족
기존 지식과의 일치 정도(coherence)	충족
실험적 입증(experimental evidence)	미적용
기존 지식과의 유사성(analogy)	미적용

표 3. 통합된 코호트 연구에서 선량값에 따른 백혈병의 상대위험도²²⁾

종류(선량구간별)	100 mSv에서의 상대위험도(95% 신뢰구간)	백혈병 환자 혹은 사망자 수
<100 mSv		
급성 골수성 백혈병과 골수 이형성 증후군	3.09 (1.41~5.92)	87
급성 골수성 백혈병	2.56 (1.09~5.06)	79
만성 골수성 백혈병	0.36 (0.00~2.36)	36
급성 림프구성 백혈병	5.66 (1.35~19.71)	40
<50 mSv		
급성 골수성 백혈병과 골수 이형성 증후군	4.88 (1.79~10.17)	75
급성 골수성 백혈병	3.41 (0.81~7.95)	67
만성 골수성 백혈병	0.63 (0.00~5.81)	34
급성 림프구성 백혈병	11.52 (1.99~45.45)	36
<20 mSv		
급성 골수성 백혈병과 골수 이형성 증후군	0.53 (0.00~8.95)	56
급성 골수성 백혈병	0.00 (0.00~5.90)	52
만성 골수성 백혈병	0.00 (0.00~9.46)	31
급성 림프구성 백혈병	45.09 (7.86~192.50)	28

있어 시간적 선후관계(temporality)의 조건을 충족한다. 일관성(consistency)의 경우 방사선 노출과 악성종양의 경우 서로 다른 노출의 인구집단(의료노출, 직업노출, 환경 노출 등)과 연구 방법(코호트, 환자-대조군 등)에서 일관되게 증가한 위험도 값이 관찰되고 있다. 방사선과 암 위험도에 있어서 선량-반응 관련성(dose-response relationship)의 경우 방사선량 증가에 따라 위험도가 비례적으로 증가하며 이를 설명하는 여러 선량-반응 모델들이 제시되어 있어 이 조건을 충족한다. 생물학적 설명 가능성(biological plausibility)의 경우 방사선 노출에 의한 암 발생은 생물학적 연구들에서 잘 알려져 있으며 역학 연구들은 실험적 결과와 유사한 선형 반응 결과를 보여주고 있다. 그리고 저선량 방사선 노출과 악성종양의 경우 관찰된 결과들은 기존 고선량 방사선 역학 연구 및 생물학 연구들과 대체로 일치하고 있어 기존 지식과의 일치(coherence) 항목을 충족한다.

한편 연관성의 강도(strength of association)와 특이성(specificity) 항목은 충분히 충족하지 않은 것으로 평가되었다. 방사선 노출의 경우 고선량에서는 매우 높은 암 위험도를 보이지만 저선량인 경우에는 대체로 낮은 강도를 보고하고 있어 연관성의 강도는 고선량 방사선에서는 분명히 충족하나, 저선량의 경우에는 충분히 만족한다고 보기 어렵다. 그러나 질병 발생에 있어서 모든 원인 요소가 항상 큰 강도의 연관성을 갖는 것은 아니다. 예를 들어 흡연은 심장질환에 대해 인과성이 분명하지만, 그 연관성의 크기는 폐암에 비해 작다. 또한 연관성의 크기는 다른 요인들의 분포상태에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 흡연은 폐암의 원인 인자로서 라돈보다 더 큰 상대위험도 값을 갖고 있지만, 만약 모두 금연을 한다면 라돈에 의한 폐암 발생의 연관성의 강도는 증가할 수 있다.

특이성의 경우 방사선 노출은 특정 질환만이 아니라 다양한 종류의 건강 영향들과 연관성이 있어 엄격한 의미에서 이 항목을 충족한다고 할 수는 없다. 그러나 흡연을 비롯한 많은 유해 인자는 다양한 건강 영향과 인과적 연관성을 갖고 있어 특이성을 만족하지 않는 것이 비인과성을 의미하는 것은 아니다. 또한 특이성 개념은 노출과 특정 질환과의 1 대 1 연관성만이 아니라 그 발생 양상이 다른 질병과 특이적으로 다른 경우에도 적용할 수 있다. 예를 들어 방사선 노출이 백혈병만을 발생시키는

것은 아니지만, 방사선 노출에 의한 백혈병 위험도 크기는 다른 암종들보다 상대적으로 높으므로 방사선 노출과 백혈병의 발생은 특이성이 성립된다고 할 수 있다. 따라서 비록 연관성의 강도와 특이성 항목이 충분히 부합한다고 할 수는 없지만, 저선량 방사선 노출과 악성종양은 인과성이 있다고 평가된다.

3. 바이어스 파악 및 보정

저선량 방사선 노출로 인한 건강 영향은 상대적으로 효과 크기가 작아서 비인과적 요인들에 영향을 받기 쉽다. 방사선 역학 연구에서 가장 대표적인 바이어스 중 하나는 의료노출 연구에서 발생할 수 있는 역인과성(reverse causality)과 적응증에 의한 교란 작용(confounding by indication)이다. 역인과성은 의료 노출(예를 들어 CT)에 의해 암이 발생하는 것이 아니라 이미 암에 걸려 있는 초기의 환자들에서 증상이 의심되어 CT를 찍게 되면 마치 CT 노출 때문에 암이 발생한 것처럼 잘못 해석되는 경우이며, 적응증에 의한 교란 작용은 암 발생 위험을 높이는 기저질환이 있는 경우에 이 질환에 의한 암위험도가 CT에 의한 영향을 교란하는 경우를 말한다. 영국의 어린이 CT 연구에서는 이러한 논란을 극복하고자 CT를 촬영한 어린이들의 기저질환을 별도로 조사하고 후속 연구로서 암 발생의 위험을 높이는 요인(cancer-predisposing conditions)을 가진 환자와 CT 촬영 이전에 암으로 진단된 환자를 제외한 민감도 분석을 실시하여 바이어스를 보정한 바 있다.²⁴⁾ 이러한 연구는 바이어스를 파악 및 보정하면서 저선량 방사선 노출과 악성종양과의 인과성에 대한 합리적 근거를 보여주었다는 데 의미가 있다.

4. 역학 연구들에 대한 종합적 평가

저선량 방사선 노출과 악성종양과의 인과성을 판단하고자 역학 연구들에 대한 체계적인 문헌 고찰이 시행된 바 있다.²⁸⁾ 이 연구에서는 가능한 여러 종류의 잠재적 바이어스들 즉 교란 작용, 선택바이어스, 암 진단시의 오분류 가능성에 대해 평가하였고 바이어스 평가 및 메타분석을 실시하였으며 역학 연구 결과에서의 해석과 관련된 주제들을 고찰하였다(그림 2). BEIR VII 보고서 이후 2006~2017년 사이에 출판된 연구 중 평균 선량이 100 mGy 미만에 노출된 26편의 저선량 역학 연구를

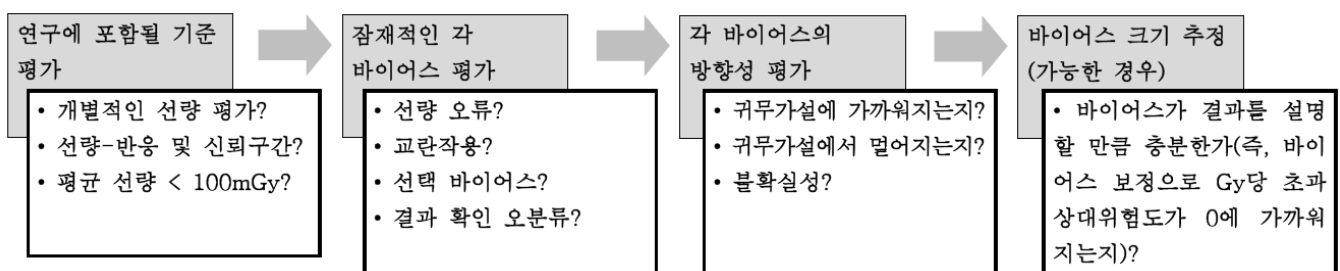


그림 2. 저선량 방사선 역학 연구에서 바이어스 평가를 위한 틀²⁸⁾

선정하여 살펴본 결과, 고행암 결과가 보고된 22편의 연구 중에서 16편이, 백혈병 결과가 보고된 20편의 연구 중에서는 17편에서 증가된 초과상대위험도를 보고하였다. 이 고찰의 주요 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다. 1) 각 개별 연구간 이질성(연구 대상자, 노출 시간, 노출평가 방식 등)이 커서 결과값을 종합하는 데는 한계를 갖는다. 2) 그러나 선정된 논문들의 결과가 심각하게 바이어스되었거나 교란작용에 영향을 받지 않았으며, 일부 바이어스와 오분류 가능성이 잠재적으로 존재하나 그것이 결과에 의미 있게 영향을 주진 않았다. 3) 대부분의 연구에서 발생 가능한 바이어스는 선량-반응 관련성이 없어지는(즉 결과를 과소평가하는) 방향으로 작용한 것으로 판단되었다. 따라서 개별 연구에 따라 가능한 바이어스 및 제한점들이 있지만, 종합적으로 저선량 방사선 노출과 악성종양과의 인과성은 인정된다고 할 수 있다.

저선량 방사선에 의한 건강 영향을 판단할 때 간혹 개별 연구 자체의 완결성에 지나치게 근거하는 경향이 있으나 저선량 역학 연구는 기본적으로 관찰연구로서의 제한점을 갖는다. 따라서 개별 연구 하나하나를 비록 완전하진 못하지만 각 연구의 경향성을 종합적으로 바라볼 필요가 있다. 예를 들어 개별 연구들이 표본수가 적어서 통계적 유의성은 없다고 하더라도 노출과 질병과의 연관성에 대해 일정한 방향을 가리키고 있다면 종합적으로는 의미 있는 결과라고 판단하는 것이 합리적이다. 저선량 방사선 역학 연구를 대상으로 검정력을 산출한 바에 의하면 대부분 80% 미만이었지만 암 위험도 증가를 보고하였으며, 이러한 통계적으로 유의하지 않지만 증가한 초과상대위험도는 낮은 검정력에 의한 것이지 방사선 노출에 의한 건강 영향이 없다는 것을 의미하지는 않는다.²⁵⁾ 역학의 특성 중 하나는 제한된 자료를 통해서 합리적인 결과를 도출하는 데 있다. 특히 저선량 분야와 같이 인과성 파악이 쉽지 않은 경우, 각 연구들에 대한 합리적이고 종합적인 평가는 반드시 검토되어야 할 ‘역학적 기준’의 하나라고 할 수 있다.

V. 저선량 방사선 건강 영향의 크기 및 관리

1. 위험도 크기

방사선이 악성종양과 인과성이 있다는 것과 그 크기가 얼마나 되는지는 별개의 주제이다. 앞에서 살펴본 역학 연구들의 저선량 방사선 노출에 의한 위험도는 대체로 문턱없는 선형모델(linear no-threshold model)에 부합하고 있다.²⁹⁾ 따라서 적은 선량이라도 그 선량값에 비례하는 만큼의 위험도가 존재한다고 할 수 있다. 다만 저선량 방사선에서 생길 수 있는 암 위험도는 다른 위험 요인들에 의해서 생길 수 있는 암 위험도에 비해서 특별히 큰 수준은 아니므로 균형 있는 해석을 하는 것이 중요하다. 간혹 100 mSv 미만의 방사선 노출에 의해서는 건강 영향이 없다고 표현되는 경우가 있지만, 이는 최근 역학 결과들

이 반영되지 않은 잘못된 해석이다. 방사선의 위험도가 ‘없다’(no risk)는 것과 위험도가 ‘작다’(low risk)는 것은 구별되어야 한다.

위험도가 적다고 해서 인과성 자체를 부정하는 것은 합리적이지 않다. 우선 저선량 방사선과 암과의 인과성은 인정하고 그 다음에 위험도가 얼마나 되는지를 설명하는 것이 바람직하다. 현실적으로 우리 생활 주변에는 방사선 외에도 흡연, 음주, 가공식품, 대기오염 등 많은 발암물질이 존재한다. 방사선의 경우 자연적으로도 노출되고 있으므로 전혀 노출되지 않고 살아가는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 방사선의 위험도와 사용으로 인한 이익을 비교하여 어느 정도의 위험성까지를 받아들일 것인가 판단하는 것이 현실적으로 중요하다. 예를 들어 우리는 비록 방사선이 발암성을 증가시킨다는 것을 알지만 질병의 진단과 치료로 인한 이익이 월등히 크기 때문에 방사선 검사와 치료를 하고 있다.

방사선에 대한 위험 인식(risk perception)은 일반인과 전문가가 방사선 노출 형태별로 다르게 가진 것으로 보고되었다.³⁰⁾ 일반인의 경우 같은 선량이라도 자연방사선 혹은 의료노출 방사선에 대해서는 덜 위험하다고 인식하지만, 원전 혹은 핵폐기물에서 나오는 방사선에 대해서는 많이 위험하다고 인식하였다. 비행기 사고의 위험이 자동차 사고보다 객관적으로는 낮음에도 불구하고 한번 발생하면 많은 사람이 희생되고 예측하기 어렵다는 이유 등으로 더 무섭게 생각하는 상황과 유사하다. 그러나 저선량 방사선으로 인한 건강 영향의 크기를 지나치게 크게 인식하는 것은 객관적이지 못하며 자칫 다른 건강 위험성을 증가시킬 수 있다.

저선량 방사선의 위험도 크기를 객관화하기 위해 몇 가지 방법들이 시도되고 있다.³¹⁾ 우선 방사선 노출량을 일반인이 쉽게 파악할 수 있는 다른 노출 형태(자연방사선, 비행기 탑승 횟수, 가슴 X-ray 등)와 비교할 수 있다. 그리고 선량값에 근거한 암발생 및 사망 위험도를 효과 크기가 잘 알려진 다른 위험 요인들(자동차 사고, 흡연 등)과 비교하기도 한다.³²⁾ 또한 암발생 및 사망의 기저위험도 크기와 비교하여 방사선 노출로 인한 추가적인 위험이 얼마나 되는지를 살펴보는 것은 저선량 방사선의 위험도 크기를 이해하는 데 도움이 된다. 물론 이러한 위험도 비교는 많은 불확실성에 근거하고 있으며 노출 상황과 대상자에 따라 다를 수 있어 비교 값을 절대적으로 받아들이기에는 이른다. 그러나 생애 암발생률이 약 40%에 이르는 상황에서 저선량에 의한 추가적인 암발생자가 매우 적은 분율을 차지하는 것을 고려하면, 저선량 방사선 위험도는 다른 생활요인들의 위험도보다 월등히 크다고 할 수는 없다.

2. 효과변경인자에 의한 차이

방사선 노출에 의한 건강 영향의 크기는 여러 효과변경인자(노출선량, 노출 형태, 성별, 노출 시 나이, 노출 후 시간, 도달

연령 등)에 따라 다르게 나타난다.³³⁾ 즉 방사선 노출에 의한 암 위험도는 높은 방사선량에 노출될수록 높으며, 방사선의 노출량 및 속도에 따라 다르다. 노출 시 연령이 어릴수록 방사선에 의한 암위험도는 높게 나타나며 위험도의 크기는 각 암종별로 다르다. 특히 갑상선암 위험도는 어릴 때 노출 시 매우 높고 20세 이후엔 적게 나타난다. 여성이 남성보다 대체로 단위 방사선량에 의한 암위험도가 높다. 노출 이후 시간이 길수록 그리고 도달 연령이 증가할수록 암위험도는 증가한다. 이때 같은 노출 이후 기간이라고 하더라도 노출 시 연령에 따라 위험도가 달라질 수 있으며 같은 도달 연령이라도 노출 기간이 긴 경우 위험도가 더 높게 나타난다. 따라서 저선량 방사선의 위험도 크기가 평균적으로는 작지만, 개인별 차이가 존재하며 특히 영유아 등 취약집단에서는 상대적으로 크게 나타날 수 있다.

인구집단 차원에서도 각 인구집단의 기저위험도의 크기와 다른 위험 요인의 존재 여부 및 크기에 따라 방사선의 위험도 크기는 달라질 수 있다. 관찰된 방사선 위험도는 방사선 자체의 영향이 해당 인구집단의 특성들과 결합하여 나타난 종합된 결과이기 때문이다. 비록 방사선 자체의 실험실적 위험도는 같다고 하더라도, 인구집단별로 실제 관찰된 방사선의 위험도는 다르게 관찰될 수 있으며, 따라서 저선량 방사선의 건강 영향의 크기를 비교 및 해석하기 위해서는 단지 노출량만이 아니라 효과 크기에 영향을 주는 다른 여러 요인(effect modifier)을 함께 고려해야 한다.

3. 방사선 관리

방사선의 건강 영향을 확률론적 영향과 조직반응(결정론적 영향)으로 구분한 것은 방사선 방호 원칙에 활용된다. 조직반응으로 인한 건강 영향은 방사선 노출을 문턱선량보다 낮게 유지함으로써 예방하며, 확률론적 영향은 문턱 없는 선형모델에 근거하고 있으므로 합리적으로 가능한 범위에서 최소한의 노출(As Low As Reasonably Achievable, ALARA)을 통해 예방한다.³⁴⁾ 즉 조직반응은 방지(avoid)하고 확률론적 영향은 합리적 수준에서 최소화(minimize)하는 것을 원칙으로 한다. 물론 합리적으로 낮출 수 있는 수준이 어디까지인지에 관한 판단은 모호하고 상황마다 다를 수 있지만 가능한 최소한으로 낮추고자 하는 방향성이 중요하다. 방사선량의 설정 기준은 안전과 안전하지 않음의 판단기준이 아니며, 단지 사회에서 허용할 수 있는 가능한 범위에서의 최저 관리기준을 의미한다. 현재 일반인 기준으로 설정된 연간 1 mSv라는 선량은 이 기준 이하로 노출되면 안전하고, 1 mSv 이상 노출되면 당장 큰 건강위험이 발생한다는 의미가 아니다.

방사선 관리에 있어서는 과학적으로 불확실한 부분이 있더라도 사전 예방적 적용은 중요하다. 예를 들어 1960년대만 하더라도 저선량 방사선과 백혈병 발생에 있어서 문턱선량의 존재에 대한 논란이 있었다. 그러나 국제방사선방호위원회는 작

은 선량이라도 그만큼의 위험도를 선형적으로 갖는다고 간주하는 것이 방사선의 위험도를 과소평가하지 않을 것으로 판단하여 방사선 방호에 적용한 바 있다.³⁵⁾ 즉 방사선 관리에 있어서 방사선 위험도의 증가 형태가 선형인지 비선형인지에 대한 학문적 주제와는 별도로 사전 예방의 적용은 저선량 방사선에 의한 건강 영향을 예방하는데 기여하였다.

방사선에 대한 관리는 개인적 차원과 인구 집단적 차원으로 구별할 필요가 있다.²⁷⁾ 개인에게는 저선량으로 인한 위험도는 매우 작고 방사선으로 인해 이익이 큰 경우가 있다. 예를 들어, 방사선 검사나 치료를 받아야 할 환자들이 존재하며, 저선량 방사선 노출이 일부 질환의 치료에 도움을 주는 것으로도 보고되고 있다. 반면 사회적 차원에서는 저선량으로 인한 위험도의 크기를 무시하기 어렵다. 예를 들어 담배 연기를 한두 번 마셨다고 개인에게 당장 큰 위험이라고 보긴 어렵지만, 인구집단 차원에서 일반인들이 불필요하게 담배 연기에 노출되지 않도록 노력하는 것(금연구역 설정 등)이 중요한 것처럼, 개인에게 비록 작은 위험도라고 하더라도 방사선 방호를 위한 국가적 차원에서의 노력은 중요하다.

VI. 결 론

최근 역학 연구를 종합하면 저선량 방사선 노출은 암 위험도를 유의하게 선형적으로 증가시킨다. 이러한 연구들은 대규모 다양한 인구집단으로부터의 결과로서 기존 일본원폭생존자 연구 결과와 대체로 일관적이다. 저선량 방사선 노출과 악성종양과의 인과성은 바이어스 및 인과성 항목에 대한 평가 등 역학적 접근 방법들을 통해서도 검증되었다. 한편 저선량 방사선 노출에 의한 암 위험도 크기는 다른 위험 요인들과 비교해 특별히 크다고 할 수는 없다. 따라서 저선량 방사선에 의한 건강 영향에 대해 개인적 차원에서 지나치게 우려할 필요는 없다. 방사선에 대한 불필요한 공포가 오히려 다른 건강 영향의 위험을 높이고 많은 시간과 비용을 낭비한 사례들도 발생한 바 있다. 방사선은 선량의 크기와는 상관없이 발암성이 확인된 물질로서, 많은 선량에 노출되면 위험도의 크기가 증가하고 적은 선량에 노출되면 위험도의 크기가 그만큼 줄어든다.

저선량 방사선의 건강 영향에 대해서 균형 잡힌 해석과 접근을 위해서는 지속적인 방사선 역학 연구가 필수적이다. 그 동안의 연구 결과들이 축적되어 현재의 학문적 체계를 만들 수 있었듯이, 지속적인 연구를 통해서 방사선과 건강 영향에 대한 더욱 정확한 근거들을 확보해야 하기 때문이다. 저선량 방사선 연구를 위해서 최근 미국국립과학원에서는 장기적 전략을 제안한 바 있으며,³⁶⁾ 여러 학회에서 주요 주제로 다루어지고 있다. 저선량 방사선 연구는 미국의 경우 관련 법(Low-Dose Radiation Research Act)을 근거로 지속적인 지원이 이루어지고 있으며, 유럽연합에서는 다양한 프로그램(Multidisciplinary

European Low Dose Initiative, MELODI) 등들이 진행되고 있다. 이러한 연구와 활동들은 학문(science)으로서 방사선에 대한 지식을 확장해 나가는 기능을 담당하고 있으며, 실무(practice)적으로 방사선의 이익과 위해를 균형 있게 비교함으로써 방사선 관리의 근거로서 활용되고 있다.

방사선이 건강에 유해하다는 것은 분명하지만 동시에 방사선 노출로 인한 피해보다는 이익이 더 큰 인구집단(방사선 검사나 치료를 받아야 할 환자 등)도 존재한다. 따라서 우선 전체 인구집단 차원에서 방사선 노출 수준을 최대한 낮추고, 방사선의 이익이 큰 집단에 대해선 방사선을 효율적으로 활용하는 것이 필요하다. 방사선은 우리 사회에서 유용하게 사용되고 있으며 앞으로도 활용 가능성이 커 방사선을 지나치게 거부하는 것은 합리적이지 않다. 반대로 방사선의 활용만을 강조하여 일반적으로 잘 알려진 방사선의 위해성을 간과하는 것은 위험하다. 방사선의 방호와 활용은 서로 상충하지 않으며 함께 진행될 수 있다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2012 Report: Report to the General Assembly Scientific Annexes A and B. New York: United Nations; 2015.
2. International Agency for Research on Cancer (IARC). Radiation: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 100D. Lyon: IARC; 2012.
3. Ministry of the Environment Government of Japan. BOOKLET to Provide Basic Information Regarding Health Effects of Radiation. Available: <https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/> [accessed 22 February 2023].
4. Moon EK, Ha WH, Seo S, Jin YW, Jeong KH, Yoon HJ, et al. Estimates of radiation doses and cancer risk from food intake in Korea. *J Korean Med Sci.* 2016; 31(1): 9-12.
5. Berrington A, Darby SC, Weiss HA, Doll R. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897-1997. *Br J Radiol.* 2001; 74(882): 507-519.
6. Little MP, Zhang W, van Dusen R, Hamada N, Bugden M, Cao M, et al. Low-dose radiotherapy for COVID-19 pneumonia and cancer: summary of a recent symposium and future perspectives. *Int J Radiat Biol.* 2023; 99(2): 357-371.
7. Brenner DJ, Doll R, Goodhead DT, Hall EJ, Land CE, Little JB, et al. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: assessing what we really know. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2003; 100(24): 13761-13766.
8. Rühm W, Woloschak GE, Shore RE, Azizova TV, Grosche B, Niwa O, et al. Dose and dose-rate effects of ionizing radiation: a discussion in the light of radiological protection. *Radiat Environ Biophys.* 2015; 54(4): 379-401.
9. National Research Council (NRC). Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase 2. Washington, D.C.: National Academies Press; 2006.
10. Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, Hamra GB, et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ.* 2015; 351: h5359.
11. Leuraud K, Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. *Lancet Haematol.* 2015; 2(7): e276-e281.
12. Haylock RGE, Gillies M, Hunter N, Zhang W, Phillipson M. Cancer mortality and incidence following external occupational radiation exposure: an update of the 3rd analysis of the UK national registry for radiation workers. *Br J Cancer.* 2018; 119(5): 631-637.
13. Pearce MS, Salotti JA, Little MP, McHugh K, Lee C, Kim KP, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet.* 2012; 380(9840): 499-505.
14. Berrington de Gonzalez A, Pasqual E, Veiga L. Epidemiological studies of CT scans and cancer risk: the state of the science. *Br J Radiol.* 2021; 94(1126): 20210471.
15. Foucault A, Ancelet S, Dreuil S, Caër-Lorho S, Ducou Le Pointe H, Brisse H, et al. Childhood cancer risks estimates following CT scans: an update of the French CT cohort study. *Eur Radiol.* 2022; 32(8): 5491-5498.
16. Grant EJ, Brenner A, Sugiyama H, Sakata R, Sadakane A, Utada M, et al. Solid cancer incidence among the life span study of atomic bomb survivors: 1958-2009. *Radiat Res.* 2017; 187(5): 513-537.
17. Cologne J, Kim J, Sugiyama H, French B, Cullings HM, Preston DL, et al. Effect of heterogeneity in background incidence on inference about the solid-cancer radiation dose response in atomic bomb survivors. *Radiat Res.* 2019; 192(4): 388-398.
18. Cologne J, Preston DL, Grant EJ, Cullings HM, Ozasa K. Effect of follow-up period on minimal-significant dose in the atomic-bomb survivor studies. *Radiat Environ Biophys.* 2018; 57(1): 83-88.
19. Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV, Lovachev SS, Kashcheeva PV, Shchukina NV, et al. Relationship between follow-up periods and the low-dose ranges with statistically significant radiation-induced risk of all solid cancers in the Russian cohort of Chernobyl emergency workers. *Radiat Environ Biophys.* 2020; 59(3): 415-421.
20. Davis FG, Yu KL, Preston D, Epifanova S, Degteva M, Akleyev AV. Solid cancer incidence in the Techa river incidence cohort: 1956-2007. *Radiat Res.* 2015; 184(1): 56-65.
21. Kendall GM, Little MP, Wakeford R. A review of studies of childhood cancer and natural background radiation. *Int J Radiat Biol.* 2021; 97(6): 769-781.
22. Little MP, Wakeford R, Borrego D, French B, Zablotska LB, Adams

- MJ, et al. Leukaemia and myeloid malignancy among people exposed to low doses (<100 mSv) of ionising radiation during childhood: a pooled analysis of nine historical cohort studies. *Lancet Haematol.* 2018; 5(8): e346-e358.
23. Lubin JH, Adams MJ, Shore R, Holmberg E, Schneider AB, Hawkins MM, et al. Thyroid cancer following childhood low-dose radiation exposure: a pooled analysis of nine cohorts. *J Clin Endocrinol Metab.* 2017; 102(7): 2575-2583.
 24. Berrington de Gonzalez A, Salotti JA, McHugh K, Little MP, Harbron RW, Lee C, et al. Relationship between paediatric CT scans and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: assessment of the impact of underlying conditions. *Br J Cancer.* 2016; 114(4): 388-394.
 25. Gilbert ES, Little MP, Preston DL, Stram DO. Issues in interpreting epidemiologic studies of populations exposed to low-dose, high-energy photon radiation. *J Natl Cancer Inst Monogr.* 2020; 2020(56): 176-187.
 26. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NAS). *Triangulation in Environmental Epidemiology for EPA Human Health Assessments: Proceedings of a Workshop.* Washington, D.C.: National Academies Press; 2022.
 27. Lee WJ. *Radiation Epidemiology.* Seoul: KU PRESS; 2022.
 28. Berrington de Gonzalez A, Daniels RD, Cardis E, Cullings HM, Gilbert E, Hauptmann M, et al. Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: rationale and framework for the monograph and overview of eligible studies. *J Natl Cancer Inst Monogr.* 2020; 2020(56): 97-113.
 29. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). *Implications of Recent Epidemiologic Studies for the Linear-nonthreshold Model and Radiation Protection.* Bethesda: National Council on Radiation Protection and Measurements; 2018.
 30. Perko T. Radiation risk perception: a discrepancy between the experts and the general population. *J Environ Radioact.* 2014; 133: 86-91.
 31. World Health Organization (WHO). *Communicating Radiation Risks in Paediatric Imaging: Information to Support Healthcare Discussions about Benefit and Risk.* Geneva: WHO Press; 2016.
 32. Kudo S, Nishide A, Furuta H, Ishizawa N, Saigusa S. A risk comparison between lifestyle, socioeconomic status, and radiation: a cohort study of cancer mortality among Japanese nuclear workers (J-EPISODE). *Health Phys.* 2022; 122(4): 469-479.
 33. Boice JD, Jr. Ionizing radiation. In: Schottenfeld D, Fraumeni JF, editors. *Cancer Epidemiology and Prevention*, 3rd ed. Oxford: Oxford University Press; 2006. p.259-293.
 34. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* ICRP publication 103. *Ann ICRP.* 2007; 37(2-4): 1-332.
 35. International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* Oxford: International Commission on Radiological Protection; 1966.
 36. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NAS). *Leveraging Advances in Modern Science to Revitalize Low-Dose Radiation Research in the United States.* Washington, D.C.: National Academies Press; 2022.

〈저자정보〉

이원진(교수)