



저선량 방사선이 인체에 미치는 영향

도 경 현* | 울산대학교 의과대학 서울아산병원 영상의학과

The health effects of low-dose radiation exposure

Kyung-Hyun Do, MD*

Department of Radiology, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Seoul, Korea

*Corresponding author: Kyung-Hyun Do, E-mail: kyunghyundo@gmail.com

Received November 10, 2011 · Accepted November 20, 2011

Low dose radiation has been defined as doses in the range under 100 mSv of low linear energy transfer (low-LET) radiation. There are two sources of ionizing radiation: natural and artificial radiation. Medical radiation exposure is the most common artificial radiation exposure. The frequency and volume of medical radiation exposure has markedly increased because of recent developments in medical technology. Radiation protection is now a concern due to the increasing use of computed tomography (CT) scans and diagnostic X-rays. This article introduced several models and hypotheses regarding the possible carcinogenic risks associated with low-LET radiation. Although opinions vary on the health effects of low level radiation exposure, current studies of medical radiation rely on exposure information collected prospectively, including cohort studies such as atomic bomb survivor studies. Although there are differences in perspective, the majority of studies have supported 'linear-no-threshold model without threshold' between low-LET radiation and the incidence of cancer risk. There is a need for further studies on medical radiation exposure including CT and positron emission tomography in order to understand the health effects of low-LET radiation, including the cancer incidence.

Keywords: Low-dose radiation; Cancer risk; Medical radiation exposure

서 론

저선량 방사선이란 자연방사선과 같이 낮은 선량의 방사선을 말하며 일반적으로 100 mSv 이하의 방사선을 의미한다[1]. 이는 연간 자연방사선 피폭량인 2.4-3 mSv의 30-40배에 해당하며, 일반적인 chest computed tomography (CT) 검사 20회 정도의 양이다. 방사선의 위험도는 방사선 영향을 측정할 수 있는 단위인 시버트(sievert, Sv)로

표시한다. Sv는 방사선의 형태와 관계없이 어떠한 방사선이든지 그 방사선으로 인한 생물학적 효과를 나타내는 단위이다. 종래에는 렘(rem)이라는 단위를 사용하였는데 1 Sv는 100 rem에 해당하고 1 mSv는 0.1 rem, 즉 100 mrem에 해당한다. 현재까지 대부분의 역학연구에서 100 mSv이하의 방사선 피폭에서 직접적인 암 발생 등의 증가 등을 증명하지는 못하였으나 일반인이나 의료방사선 노출은 대부분 이 범위에서 일어난다. 미국 국립과학아카데미의 저선량 방사선

© 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.

의 생물학적 영향(health risks from exposure to low levels of ionizing radiation, BEIR VII) 보고서[1]에서는 암 발생 위험이 저선량에서도 문턱값(threshold) 없이 선형으로 올라가면 최소 선량에서도 인간에게 추가위험의 증가를 일으킬 잠재성이 있다는 문턱값 없는 선형비례이론(linear-no threshold [LNT] model)을 지지하고 있다[1]. 현재는 대부분의 국제기구의 보고서에서 저선량 방사선에 의한 암과 유전적 장애는 문턱값이 없다고 간주하고 있다[1,2].

방사선의 종류

방사선은 크게 자연방사선과 인공방사선으로 나눌 수 있다. 자연 중에, 공기 중에, 우리가 일상에서 먹고 있는 음식물에도 방사성 물질이 존재하고 있어 우리는 알게 모르게 방사선과 접하고 있다. 이렇게 자연 중에 존재하는 방사선을 자연방사선이라 하고 검사에 이용하기 위해 만들어진 방사성 물질을 인공방사선이라 한다.

자연방사선은 지구가 생성되던 때부터 오늘날에 이르기까지 우리들의 환경에 존재해 왔다. 우리가 1년 동안 흡이나 공기, 음식물, 그리고 우주로부터 받을 수 있는 자연방사선량은 대략 2.4 mSv가 된다[2].

우리가 살고 있는 대지는 칼륨, 우라늄, 토륨 등 여러 가지 방사성원소들을 포함하고 있다. 따라서 우리는 필연적으로 지각(대지)으로부터 방사선을 받는다. 우리가 받는 자연방사선 중 대표적인 것은 감마선이며 그 세기는 어느 장소의 흙이나 암석 등의 성분에 따라 다르다. 우주선은 대기층을 뚫고 들어오기 때문에 높은 곳에 올라가면 우주선을 막아주는 대기층이 얇아져서 방사선을 더 많이 받게 된다. 해변에서 30 m씩 위로 올라갈 때마다 연간 1 mrem (0.01 mSv)을 더 받게 된다. 남미에 있는 해발 4,000 m인 안데스산맥의 산자락에 사는 주민이나 높은 하늘을 날아가는 제트기 승객은 우주선을 더 많이 받는다. 따라서 서울-뉴욕을 제트기로 왕복할 경우 평지에 있는 사람보다 0.1 mSv 정도 더 받는다. 1년간 우주선을 받는 양은 평균 0.35 mSv이다. 우리 자신들의 몸 안에 있는 방사성 물질(주로 음식을 통해 몸 안에 들어온 것)로부터 연간 받는 방사선량은 약 0.35 mSv이

다. 이처럼 대지, 우주, 음식물 등으로부터 받는 자연방사선량의 합계는 연간 0.8-1.25 mSv에 달한다. 그 밖에도 공기 중에 있는 라돈가스(알파 방사선 방출)를 사람이 흡입함으로써 받는 방사선량은 연간 약 1.3 mSv이다. 우라늄이 붕괴되면서 중간산물로 생기는 기체상태의 라돈가스는 인류가 받는 전체 방사선의 50% 정도인 약 1.3 mSv로 가장 큰 부분을 차지한다.

인공방사선의 대표적인 것이 엑스선이고, 핵실험 후에 하늘에서 떨어지는 방사성 낙진 그리고 원자력발전소 같은 원자력 시설에서 나오는 방사선과 방사성 물질 폐기물(찌꺼기)이 인공방사선에 속한다. 인공방사선은 의료용 방사선이 대부분을 차지하며 TV, 형광등, 컴퓨터 등 전자제품이나 기계, 운송수단 등 모든 제품에서 발생하는 방사선으로부터 전체의 약 3-4% 정도를 받는다. 과학의 발전으로 병원 이외의 많은 분야에서 방사선이 이용되고 있다. 원자료를 이용한 발전, 동위원소의 생산, 산업현장에서의 비파괴검사, 공항에서의 수화물 검사, 곡물의 장기 저장을 위한 방사선조사, 생명공학에서의 방사선의 이용 등 헤아릴 수 없이 많은 분야에서 방사선이 이용된다.

저선량 방사선의 생물학적 효과

방사선이 유전자에 닿으면 유전자를 구성하고 있는 원자와 원자 사이의 결합을 끊어 버리는 작용이 일어나고 이를 유전자 손상(radiation-induced DNA-damage)이라고 한다. 그러나 이러한 유전자 손상은 노출된 방사선 양이 적은 경우에는 비교적 단시간에 복구(copy and DNA repair)된다. 방사선 양이 많고 유전자 손상이 동시에 많이 일어나는 경우에는 모든 손상이 제대로 복구되지 않고 그 중 일부가 잘못 복구될 수도 있다.

유전자는 아주 긴 분자로 2개의 사슬로 연결되어 있다. 한쪽의 사슬만 절단된 경우는 바르게 복구된다. 두 개의 사슬도 한 곳만 절단되면 문제없다. 그러나 두 개의 사슬이 여러 군데 동시에 절단되면 유전자 전체의 연결에서 떨어져 나가거나 원래와 반대로 연결되어 복구되지 못하고 문제가 발생한다. 그러한 일이 일어나면 세포가 사멸되거나 기능이 변

화가 생긴다. 그리고 극히 드물게 암 유전자가 생기거나 암 억제 유전자의 손상이 일어날 수 있다[1].

1. 방사선 선량과 효과와의 관계

방사선의 생물에 대한 효과는 방사선의 선량에 따라 다르다. 세포의 사멸 빈도와 선량과의 관계에 대해서 많은 정량적인 연구가 이루어지고 있다. 세포의 어떤 집단에 방사선을 쬐이면 일부분의 세포만이 사망한다. 이 사망하는 세포의 수(또는 전체에서 차지하는 비율)는 선량에 달려있다. 선량과 세포의 사망 비율이 비례하는 경우가 있으나 대부분의 경우 단순한 비례관계는 아니고 보다 복잡한 관계이다. 어느 경우든지 사망하는 세포의 비율은 선량의 증가와 함께 증가한다. 선량과 생물학적 효과의 관계(선량-효과곡선)는 일반적으로 2종류이다.

어떤 효과에서는 효과가 어떤 선량의 범위 내에서 선량에 비례한다. 이때는 아무리 적은 선량일지라도 그 선량에 대한 영향(효과)이 나타난다고 생각할 수 있다. 대표적인 것으로 유전자의 돌연변이 발생이 있다. 또한 방사선에 의한 백혈병 발생에 관해서도 이와 같은 비례관계를 가정하고 있다.

한편 어떤 효과에서는 어떤 선량 이하에서는 효과가 나타나지 않는다. 이 효과가 나타나지 않는 경계 선량을 한계선량(threshold 선량)이라고 부른다. 포유동물에 대한 치사효과가 이 예에 해당된다. 선량-효과 관계는, 여러 가지 효과를 대상으로 저선량에 대한 연구가 이루어지고 있다. 효과의 빈도 또는 정도는 선량과 직접 관계가 있지만, 극저선량에서는 효과가 아주 적어서 세포의 수나 동물의 수를 많이 해야 비로소 그 효과를 증명할 수 있다.

2. 선량률과 효과와의 관계

방사선의 양이 동일하더라도 방사선을 받는 시간이 긴지 짧은지 또는 1회 조사인지 분할조사인지 연속조사인지 등 조사시간의 경과에 따라 영향의 정도가 크게 달라진다. 같은 양의 선량을 1회 받은 경우가 몇 회로 나누어 받은 경우의 영향보다 일반적으로 크다. 방사선을 조금씩 받게 되면 대부분의 경우 회복되어 영향이 적어진다. 이는 시간이 경과하면서 방사선의 효과가 소실되기 때문이다.

3. 방사선의 종류, 에너지와 효과와의 관계

방사선의 양과 선량률이 같은데도 방사선에 의해 일어나는 개개의 전리가 생체 내에서 상호 공간적으로 접근해서 일어나는지, 떨어져서 일어나는지에 따라 방사선의 영향은 크게 달라진다. 예를 들어 중성자선은 통과하는 통로에 연해서 일어나는 2차 전자의 전리 밀도(수중 1 μm 당 전리의 수로 표시함)가 큰데, 백혈병의 유발의 경우 전리 밀도가 작은 γ 선에 비해 효과가 몇 배나 크다.

방사선(종류나 에너지가 다른 방사선)의 종류에 따라 나타나는 생물학적 효과의 정도를 표시하기 위해서 생물학적 효과비(relative biological effectiveness, RBE)라는 비율이 사용되고 있다.

4. 주요 용어의 정의(위험도)

방사선피폭과 암 발생관련 연구결과를 좀더 명확히 이해하는데 필요한 위험도 평가 지표는 다음과 같다.

1) Absolute risk vs. relative risk

Absolute risk (AR)는 방사선 피폭군에서 생긴 특정질환의 전체 수를 의미한다. 흔히 person-years당 몇 명에서 질환이 발생했는지 표시한다. 반면 relative risk (RR)는 피폭을 받은 그룹과 받지 않은 그룹에서 질환이 발생하는 비율이다. 원폭생존자에서 백혈병의 RR은 약 5-6인데 이는 백혈병 발생 정도가 5-6배 높았다는 의미이다. 이는 고형암의 RR인 1.5보다 높다. 반면 AR은 백혈병에서 90-100 정도이고 고형암은 850으로 고형암에서 더 높다. 이는 백혈병이 고형암에 비해 상대적으로 드물기 때문이다.

2) Excess absolute risk vs. excess relative risk

Excess absolute risk (EAR)는 피폭군의 AR에서 대조군의 AR를 뺀 수치이다. 즉 피폭에 의해 추가로 발생한 absolute risk를 의미한다. Excess relative risk (ERR)는 RR에서 1을 뺀 수치이다. 예를 들어 1.0 Gy에 노출된 그룹에서 ERR이 0.5였다면 그 그룹에서 암 발생 정도는 1.5배 증가하였다는 의미이다.

3) Lifetime risk

방사선 피폭에 의한 암 발생의 효과를 요약해서 표시하기 위해 개발되었다. 이 지표는 피폭그룹을 모니터링한 기간에 독

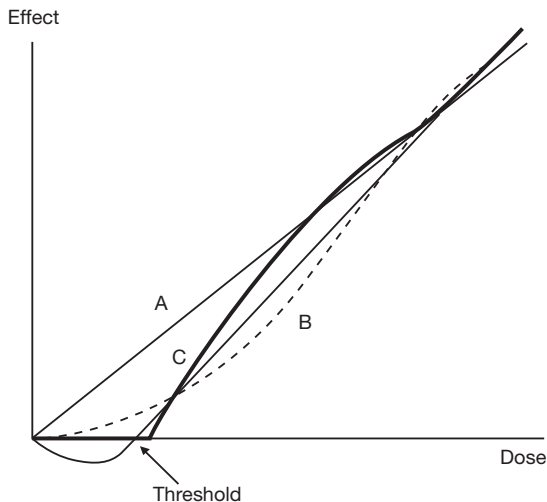


Figure 1. A hypothetical extrapolated dose response model for cancer risk estimation in low-dose radiation exposure. (A) Linear-no-threshold model, (B) linear quadratic model, (C) linear model with a threshold, (D) hormesis.

립적이며, 서로 다른 인구집단에서 피폭의 효과를 비교할 수 있다. BEIR VII 보고서에서는 0.1 Gy에 피폭된 100,000명 당 암 발생률 및 사망률에 대해 연령별, 성별, 장기별 데이터를 제시하고 있는데 이를 이용하여 각 특수 상황 별로 암 발생률 및 암 사망률을 추정할 수 있다. 예를 들어 10세 남아가 복부 CT를 찍어 10 mGy (0.01 Gy) organ dose를 colon에 받았다고 가정할 때 BEIR VII 보고서에 제시된 표에서 10세 남아가 colon에 0.1 Gy을 받은 경우 암 발생률(lifetime attributable risk for cancer incidence)가 241 per 100,000로 나와 있다. 그렇다면 이 환자의 암발생률은 $(0.01/0.1) \times 241 = 24.1$ per 100,000 (약 4,000명당 1명)으로 계산할 수 있다[1].

4) 선량-선량율 효과 인자(Dose and dose-rate effectiveness factor)

저선량 방사선 피폭으로 인한 위험도를 예측하는데 있어서 대개 고선량 피폭에 의한 생물학적 자료를 외삽하여 수학적으로 추정하는 모델을 만들어 사용한다. 그러나 고선량 피폭에 의한 위험도를 단순히 선형 외삽하는 경우 실제의 영향보다 과대평가될 가능성이 높으므로 이를 보정하는 상수를 사용한다. BEIR VII 보고서에서는 선량-선량율 효과 인

자 값을 1.5로 사용하였다.

저선량 방사선의 효과에 대한 가설

1. 저선량 방사선에 의한 non-targeted delayed effects

1) Bystander effects

직접 방사선에 노출되지 않은 인접 세포가 방사선 노출 세포에서 분비하는 신호전달물질에 의하여 방사선에 노출된 세포에서 일어나는 손상이 생기는 것을 말한다.

2) Abscopal effects

방사선 피폭을 받은 신체 부위와 떨어져 있는 조직에서 나타나는 변화를 말한다.

3) Radiation-induced genomic instability

세포가 방사선을 받은 후 생존하게 되면 딸세포가 방사선을 받지 않더라도 세대에 걸쳐 염색체 이상이 발생된다는 것이다. 이 현상은 방사선 피폭 후 생존 세포의 딸세포들에서 발생한다. Genome의 변화에는 염색체 수 변화, 돌연변이, 체세포 복제 시 세포 수 감소 등이 포함된다.

4) Clastogenic factors

방사선 피폭을 받은 동물이나 인체의 혈장에는 방사선 노출을 받지 않은 세포에 염색체 손상을 유발하는 clastogenic factor라는 물질이 포함되어 있다.

5) Heritable effects

부모가 방사선 피폭을 받은 후 태어난 후손에서 생기는 효과를 의미한다.

2. 저선량 방사선 피폭과 암 발생의 관계에 대한 가설

원폭생존자들을 대상으로 한 연구에서 암 발생은 100 mSv 이상의 피폭생존자에게서 의미 있게 증가하였다. 하지만 특수한 상황이 아니면 보통사람이 100 mSv 이상의 방사선에 피폭되는 경우는 매우 드물며, CT 촬영에서와 같이 저선량 방사선 피폭에서 방사선 피폭과 암의 관계를 추정하는 것이 중요하다. 100 mSv 이하에서 암 발생위험도를 추정하기 위해서는 알려진 데이터(100 mSv 이상에서 암 발생률)를 이용한 외삽(extrapolation)이 필요한데, 이를 위해서 아래의 그림과 같은 적합한 모델이 필요하다(Figure 1).

1) LNT model은 방사선 피폭량과 암 발생 위험도가 선형관계를 보이고 암 발생을 위한 문턱선량은 없다고 추정하는 모델이다. 아무리 작은 선량의 방사선이라도 암 발생의 확률이 있으며 이는 방사선의 양과 비례하며 역치는 없다. BEIR VII 보고서에서는 고품암의 발생 위험이 이 모델을 따른다고 추정하였다.

2) Linear quadratic model은 방사선 피폭량이 증가함에 따라 암 발생의 위험도도 증가하나 좀더 완만한 관계를 보이는 모델이다. BEIR VII 보고서에서는 백혈병의 발생 위험이 이 모델을 따른다고 추정하였다.

3) Linear model with a threshold은 어떤 문턱값이 존재하여 그 이하에서는 암 발생이 증가하지 않지만 이 값을 넘어서는 피폭을 받을 때에는 암 발생 위험도가 방사선 피폭량에 비례하여 증가한다는 모델이다.

4) Hormesis은 소량의 방사선을 받았을 때는 오히려 암 발생이 감소하여 인체에 유리한 영향을 미친다는 모델이다. BEIR VII 보고서에서는 이 모델을 채택하고 있지 않다.

저선량 방사선과 암 발생

우리 일상생활에서 여러 가지 발암유발 인자가 있다. 방사선도 이 중 하나이며 국제암학회 발암물질 grade I으로 정해져 있다[3]. 일본 원자폭탄 노출자를 대상으로 한 코호트연구에서 암 발생의 빈도는 고품암과 혈액암 모두에서 증가되었다는 결과를 얻었다[4]. 또한 1986년 발생한 체르노빌 원자력발전소 사고로 인하여 심각한 방사선 노출이 초래되었다. 화재를 진압하고 방사능 물질을 격리하는 과정에서 투입된 인원 중 비교적 초기에 투입되었던 20만 명은 높은 수준의 방사능에 노출되었다. 공식 보고에 따르면 이들 중 25,000명이 사망했다고 한다. 사고 이후에도, 우크라이나에서만 1,800건 이상의 소아갑상선암 사례가 보고되고 있다. 국제보건기구의 보고서에 따르면, 체르노빌 주변 지역의 0-17세 사이의 소아 중에서 5,000건 가량의 소아갑상선암이 보고되었으며, 앞으로 50년간 5,000-45,000건 정도의 사례가 더 보고될 가능성이 있는 것으로 예측되고 있다. 갑상선암 이외에도 노출 주변 지역의 주민은 백혈병, 유방암

등의 증상 발생이 빈번하게 보고된 바 있다[5]. 그린피스의 발표에 따르면, 체르노빌 사건의 직, 간접적인 영향에 의해서 27만 명의 암 발생과 함께 이들 중 90,000명 정도는 치명적인 것이라고 예상하였다[6]. 공식적인 발표에 의하면 체르노빌의 원자력발전소 폭발 사건으로 인하여 유럽 여러 국가에서 많은 여성이 인공유산을 받았다고 하였다[7-9]. 이는 방사선 노출에 대한 태아에 미칠 영향에 대한 필요 이상의 두려움이라고 할 수 있겠다.

같은 양의 방사선이라도 급격하게 받은 경우(급성노출)와 조금씩 장시간에 걸쳐 완만하게 받는 경우(만성노출)는 나타내는 영향의 정도가 달라진다. 천천히 받는 쪽이 암 발생률이 적다. 이것은 조금씩 시간을 들여서 받는 경우는 일단 세포 유전자가 상처를 받아도 세포가 본래 갖고 있는 복구 기능에 의해 원래대로 회복시킬 여유가 있어 암에 걸릴 확률이 적어진다. 따라서 실질적인 관찰로부터 낮은 선량에서 피폭과 암 치사와의 관계를 얻고자 하는 것은 본질적으로 한계가 있다.

대개 저선량 영역에서의 암 발생은 고선량에서의 자료를 외삽하여 암 발생 위험도를 추정한다. 그럴 수 밖에 없는 것이 0.01 Sv당 생애 암 위험이 5/10,000라면 통계적으로 충분히 신뢰성 있는 자료를 얻기 위해서는 아마도 0.01 Sv 정도의 피폭을 받는 집단이 100,000명 정도(예상 암 치사자수 50명) 있어야 하고 이들을 수십 년 동안 추적해야 한다. 그런데 자연적인 암 치사율이 대개 20% 정도이므로 그 집단 십만 명 중 20,000명 안팎이 자연적 암에 의해 사망할 것으로 예상되고 있다. 여기서 20,000명 안팎이란 18,000명이 될 수도 있고 21,000명이 될 수도 있다는 뜻이므로 방사선 피폭으로 인한 초과 사망자 수(기대치) 50명은 자연 암 치사의 통계적 요동과 구분되기 어려워진다. 또한 암의 발생은 세포 안에 있는 유전자에 일어난 변화로 시작되어 몇 년 또는 몇 십 년이라는 잠복기를 거쳐 암 세포로 변화할 가능성이 있다. 고품암의 경우는 심지어 40년의 잠복기를 보고하고 있다.

저선량 방사선이 인체에 미치는 영향에 대한 연구들

저선량 방사선(<100 mSv)에 의한 암 발생에 대한 LNT

Table 1. Different positions of various societies about cancer risk of linear no-threshold (LNT) model at <100 mSv radiation exposure

Basically supportive
US National Research Council Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR) VII Phase 2 (2006) [1]
International Commission on Radiological Protection (2005) [11]
US National Council on Radiation Protection and Measurements (2001) [12]
United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2006) [2]
UK National Radiological Protection Board (1995) [13]
LNT is oversimplification; risk estimates should not be used at <50 mSv
Health Physics Society (2004) [14]
LNT overestimates risk
France Academy of Sciences/National Academy of Medicine (2004) [15]
American Nuclear Society (2001) [16]

From Einstein AJ, et al. JAMA 2007;298:317-323, with permission from AMA-ASSN [10].

model에 대하여 각종 학회와 연구기관에서는 다양한 견해를 발표하고 있다. Einstein 등[10]은 2007년 발표한 논문에서 이 견해들을 각각 LNT model의 지도도에 따라 정리하였다(Table 1).

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 보고서

UN과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) 등 방사선 관계 국제기관에서는 현재 저선량방사선이 암을 비롯한 이외 질환에 의한 사망률에 어떤 영향을 미치는지에 대해 연구가 진행 중이다. 암 이외의 질환으로 사망률을 증가시키는 요인으로는 방사선에 의한 염증이 있을 것으로 생각되고 있다.

UNSCEAR은 1982년의 보고서[17]에서 저선량 방사선에 서는 암 이외의 다른 사망 위험 요인은 없다고 생각하였다. 그러나 이후의 일련의 동물실험은 암으로 인한 사망이 방사선과 관련된 수명 손실을 모두 설명할 수는 없었다. 더욱이 일본 원폭 생존자의 수명연구에서 얻은 최근 몇 년간의 데이터는 이러한 가능성이 높음을 보여주고 있다. 그러나 최근 2010년에 발표한 보고서에 따르면 백내장의 발생이 저선량 방사선 피폭과 관계되며 심혈관계 질환에 있어서도 계속적으로 연구할 필요가 있다고 하였다[18].

2. BEIR VII 보고서의 요약

1) 원폭생존자들 가운데 100 mSv 초과 방사선에 노출

된 사람들에게서 방사선에 의한 암 발생이 유의하게 증가하였다. 백혈병, 유방암/갑상선암/소화기(식도, 결장, 위, 간장)암/폐암/난소암/피부암/방광암 등의 고형암의 발생이 증가하였다.

2) 자궁 안에서 10 mSv 초과 방사선에 노출된 소아에게서 암 발생이 유의하게 증가하였다. 지금은 거의 시행하지 않지만 과거 50-70년대까지는 pelvimetry와 fetal position을 검사하기 위한 obstetric abdominal radio-

graph을 빈번히 시행하였다. 이 데이터를 이용하여 태내에서 방사선을 조사받은 아이들에게서 암이 발생하는 확률이 조사받은 방사선량과 밀접한 연관이 있다는 것이 여러 연구를 통해 알려지게 되었다. 이러한 연구들의 결과를 종합하여 내린 결론은 다음과 같다. 자궁 내에서 10 mGy 이상의 방사선을 조사받은 태아의 경우 소아암의 발생이 증가하고, 6% per Gy의 excess risk를 보인다[19].

3) 100 mSv 이하의 방사선 노출 시 암 발생과의 영향을 추정할 때는 다음의 요소를 고려해야 한다. 고형암에서는 LNT model, 그리고 백혈병에서는 linear-quadratic model 이 reasonable fit을 보였다. 선량-선량을 효과 인자는 1.1-2.3으로 추정되었고 위험도분석을 위해 1.5를 사용하였다.

4) 암 발생률과 암 사망률에 대한 ERR과 EAR을 11개의 specific cancer sites에 대하여 추정하였고 이를 표로 제시하였다.

3. 저선량 방사선과 암 발생의 유의성이 높다고 추정하는 연구

2004년 Berrington de Gonzalez와 Darby [20]가 Lancet에 영국을 비롯한 15개의 나라 자료를 바탕으로 하여 진단용 엑스선 검사가 암 발생에 미치는 영향을 추정한 논문을 발표하였다. 영국에서 75세까지 발생하는 cumulative cancer risk의 약 0.6%가 진단용 방사선 피폭과 연관될 수 있다고 발표하였다. 이는 한 해에 약 700명의 암 발생을 의미한다. 그 외 다른 13개국에서의 비율은 0.6에서 1.8% 수준이

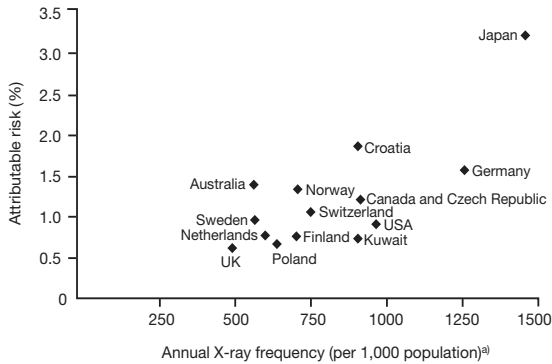


Figure 2. Risk of cancer attributable to diagnostic X-ray exposures versus annual X-ray frequency (From Berrington de Gonzalez A, et al. Lancet 2004;363:345-351, with permission from Elsevier) [20]. ^{a)} Taken from worldwide survey.

고, 일본의 경우 가장 높아 3% 정도이다. 이는 각 국의 방사선 검사의 빈도와 관련이 있다고 생각된다(Figure 2).

Sodickson 등[21]의 보고에 따르면 한 병원에서의 31,462 환자를 22년 동안 추적하였을 때 33%의 환자가 5차례 이상 CT 검사를 시행받았고, 이중 15%가 100 mSv 이상의 유효선량을 받았다. 이들에서 0.7%의 암 발생이 기대된다고 하였다.

Brenner 등[22]은 소아 환자에서 CT를 시행할 때 1세 소아의 경우 1회 복부 CT 촬영에서 lifetime cancer mortality risk가 0.18%이고 따라서 1년간 60만 건의 복부와 두부 CT를 시행하였을 때 발생하는 암 발생 사망 건수는 500예에 달한다고 추정하였다. 이들과 같이 암 발생률 증가와 저선량 방사선 피폭이 유의한 영향이 있다는 연구에서는 최근 의료용 방사선 피폭이 증가하고 있다는 데 주목하고 있다. CT의 발생 빈도가 높아지면서 상당량의 방사선에 피폭되고 있고 이 양이 전체 방사선 피폭선량에서 50%까지를 차지하고 있다[23,24]. CT로 인한 피폭량을 이전 원자폭탄 생존자 등의 연구에서 나온 결과로 추정하여 볼 때 상당량의 암 발생이 방사선 피폭에서 기인한다는 주장을 하고 있다. 특히 소아 환자의 경우 성인과 같은 프로토콜을 사용할 때 과다피폭을 받으며 기대수명이 길기 때문에 암 발생의 가능성이 매우 높다[21-25].

4. 저선량 방사선과 암 발생에 대하여 유의성이 과대평가 되었다고 생각하는 연구

Aurengo, Tubiana 등을 중심으로 하는 프랑스 과학원의 경우는 고선량에서 관찰된 피폭-영향관계를 저선량까지 외삽하는 방식에 문제가 있다는 주장을 하였다[15,26]. 또한 미국의학물리학회[27]에서는 Brenner와 Hall [24]의 논문에 대한 의견으로 다음과 같은 견해를 제시하였다. 1) Brenner와 Hall의 계산이 62년 전 히로시마와 나가사키에서 다량의 방사선에 노출된 일본인을 대상으로 한 연구에 기초하고 있다. Extrapolation 등의 수학적 방법에 의해 다량의 방사선 노출에 의한 효과를 CT 소량의 방사선 노출에 의한 효과에 적용할 수 있는지 논란이 있다. 2) CT 검사를 받은 대부분의 환자는 일반 미국인에 비해 아플 가능성이 높고 그로 인해 건강상의 위험이 높았고 CT로 인한 진단적 이익이 높았다. 환자들의 비만이나 당뇨 등 다른 요소를 보정하지 않았다. 3) Brenner와 Hall의 주장처럼 의학적으로 필요한 경우에만 CT 검사를 하여야 하겠지만 의학적으로 적절한 CT 검사는 정확한 진단과 환자 치료, 인류의 건강향상을 가져올 것이다. 4) Brenner와 Hall의 주장은 통계적 추측이나 통계에 기초를 하고 있지 실제로 CT 검사에 의해 사망한 사람을 관찰한 것은 아니다.

결론

고선량 방사선 피폭에 의한 확정적 영향과 발암 유발에 대해서는 잘 알려져 있으나, 100 mSv 이하의 저선량 방사선에 대해서는 아직 인체에 직접적으로 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 과학적으로 증명되지는 않은 상태이다. 저선량 방사선에 의한 실험환경(in vitro)에서의 염색체 손상은 증명되었으나, 실제 인체 내에서 발병에 이르기까지의 인과관계에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다. 많은 연구에서 암 발생에 있어서 문턱선량이 없는 LNT model을 지지하고 있으나, 그에 대한 반대 의견을 주장하는 연구도 있다. 의료기기의 발달로 의료방사선에 의한 피폭선량이 현저히 늘어가고 있고, 따라서 저선량 방사선의 피폭영향에 대하여 좀더 많은 연구와 관심이 필요한 시점이다.

핵심용어: 저선량 방사선; 발암효과; 의료방사선폭폭

REFERENCES

- National Research Council (US); Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII phase 2. Washington DC: National Academies Press; 2006.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effect of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 report to the general assembly with scientific annexes. Vienna: United Nations; 2006.
- International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Ionizing radiation: part 1. X- and gamma-radiation and neutrons. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2000.
- Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, Mabuchi K, Kodama K. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat Res* 2007;168:1-64.
- Bennett B, Repacholi M, Carr Z; World Health Organization. Health effects of the Chernobyl accident and special health care programmes. Geneva: World Health Organization; 2006.
- Greenpeace International. The Chernobyl catastrophe: consequences on human health. Amsterdam: Greenpeace; 2006.
- Czeizel AE. Incidence of legal abortions and congenital abnormalities in Hungary. *Biomed Pharmacother* 1991;45:249-254.
- Knudsen LB. Legally induced abortions in Denmark after Chernobyl. *Biomed Pharmacother* 1991;45:229-231.
- Odlind V, Ericson A. Incidence of legal abortion in Sweden after the Chernobyl accident. *Biomed Pharmacother* 1991; 45:225-228.
- Einstein AJ, Henzlova MJ, Rajagopalan S. Estimating risk of cancer associated with radiation exposure from 64-slice computed tomography coronary angiography. *JAMA* 2007;298: 317-323.
- Valentin J. Low-dose extrapolation of radiation-related cancer risk. *Ann ICRP* 2005;35:1-140.
- National Council on Radiation Protection and Measurements. Evaluation of the linear-nonthreshold dose-response model for ionizing radiation. Bethesda (MD): National Council on Radiation Protection and Measurements; 2001.
- National Radiological Protection Board. Risk of radiation-induced cancer at low doses and low dose rates for radiation protection purposes. Chilton: National Radiological Protection Board; 1995.
- Radiation risk in perspective: position statement of the Health Physics Society [Internet]. McLean (VA): Health Physics Society; 2004 [cited 2011 Nov 18]. Available from: <http://hps.org/documents/radiationrisk.pdf>.
- Tubiana M. Dose-effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation: the joint report of the Academie des Sciences (Paris) and of the Academie Nationale de Medecine. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2005;63:317-319.
- Health effects of low-level radiation: position statement [Internet]. La Grange Park (IL): American Nuclear Society; 2001 [cited 2011 Nov 18]. Available from: <http://www.ans.org/pi/ps/docs/ps41.pdf>.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Ionizing radiation: sources and biologic effects. Vienna: United Nations; 1982.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report of the United Nations scientific on the effects of atomic radiation. Vienna: United Nations; 2010.
- Doll R, Wakeford R. Risk of childhood cancer from fetal irradiation. *Br J Radiol* 1997;70:130-139.
- Berrington de Gonzalez A, Darby S. Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. *Lancet* 2004;363:345-351.
- Sodickson A, Baeyens PF, Andriole KP, Prevedello LM, Nawfel RD, Hanson R, Khorasani R. Recurrent CT, cumulative radiation exposure, and associated radiation-induced cancer risks from CT of adults. *Radiology* 2009;251:175-184.
- Brenner D, Elliston C, Hall E, Berdon W. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. *AJR Am J Roentgenol* 2001;176:289-296.
- Brenner DJ, Doll R, Goodhead DT, Hall EJ, Land CE, Little JB, Lubin JH, Preston DL, Preston RJ, Puskin JS, Ron E, Sachs RK, Samet JM, Setlow RB, Zaider M. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: assessing what we really know. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003;100:13761-13766.
- Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography: an increasing source of radiation exposure. *N Engl J Med* 2007;357:2277-2284.
- Little MP, Wakeford R, Tawn EJ, Bouffler SD, Berrington de Gonzalez A. Risks associated with low doses and low dose rates of ionizing radiation: why linearity may be (almost) the best we can do. *Radiology* 2009;251:6-12.
- Tubiana M, Feinendegen LE, Yang C, Kaminski JM. The linear no-threshold relationship is inconsistent with radiation biologic and experimental data. *Radiology* 2009;251:13-22.
- The AAPM statement on radiation dose from computed tomography, in response to the Brenner and Hall NEJM article published Nov 29, 2007 [Internet]. College Park (MD): American Association of Physicists in Medicine; 2007 [cited 2011 Nov 18]. Available from: [http://www.aapm.org/public general/CTScans.asp](http://www.aapm.org/public_general/CTScans.asp).



Peer Reviewers' Commentary

현재 CT 검사는 질병의 진단과 치료과정에 기본적이고 필수적인 검사도구로 인식되면서 그 사용이 급증하고 있다. 그러나 작은 양의 방사선 피폭으로도 암을 발생시킬 수 있다는 점에서 CT 검사에 의한 방사선피폭의 문제점과 그에 대한 해결책을 구체적으로 제시하고 있다는 점에서 본 논문의 의의를 둘 수 있다. CT 검사 시 방사선피폭의 저감화를 위해서는 검사를 시행했을 때 환자에게 위험보다 이득이 더 크다는 정당화, 진단 가능한 적절한 화질을 얻을 수 있는 최소한의 방사선을 사용하는 최적화가 필요하다. 이를 위해 최적의 검사프로토콜, 재검사 방지를 위한 환자교육, 보호장구, 자동노출장치 사용을 하여야 하나 아직 부족한 점이 많이 있다. 본 논문이 이를 개선하기 위한 단초가 되기를 희망한다.

[정리:편집위원회]

자율학습 2011년 11월호 정답

 세기조절 방사선치료 기술의 소개(1-5번 문항)
 개원가에서의 안전한 진정(6-10번 문항)

1. ④

6. ①

2. ③

7. ④

3. ④

8. ③

4. ①

9. ③

5. ④

10. ③