

Et Cetera

선형무역치모델(Linear No Threshold Model, LNT)의 이해와 핵의학과 종사자의 방사선방호

서한경

전북대학교병원 핵의학과

Understanding of Linear No Threshold Model and Radiation Protection for Nuclear Medicine worker.

Han-Kyung Seo*

Department of Nuclear Medicine, Jeonbuk National University Hospital, Jeonju, Korea

*Corresponding Author: Han-Kyung Seo, Department of Nuclear Medicine, Jeonbuk National University Hospital, 20, Geonji-ro, Deokjin-gu, Jeonju, 03080, Republic of Korea, Tel: +82-63-250-2321, E-mail: shg@jbuh.co.kr

ABSTRACT

The Linear No Threshold Model (LNT) defines that cancer occurrence due to radiation exposure exhibits linearity without a threshold. Many research results have confirmed the clear linearity of radiation exposure and cancer risk at high doses. However, controversy exists at low doses (<100 mSv) and low dose rates (<0.1 mSv/min, <5 mSv/hour) intervals. Within the low dose range of 100 mSv or less, the LNT model assumes a linear relationship between radiation exposure and cancer risk, with no threshold dose for cancer occurrence. It suggests that even low doses of radiation carry a probability of cancer occurrence, proportional to the dose of radiation, with no threshold value. Workers in nuclear medicine work in environments where they are exposed to radiation on a daily basis. Especially with over 30 years of work, the likelihood of exposure to doses below 100 mSv is very high. Therefore, a thorough understanding of the LNT model is essential. Based on this, continuous efforts are necessary to find radiation protection methods for low doses. To this end, the author aims to assist workers in nuclear medicine by seeking out the latest data, papers, and research from international radiation-related committees, epidemiology, physics, and radiation protection studies to facilitate a precise understanding of the current LNT model.

Key Words Linear No Threshold (LNT) Model, Low Doses, Low Doses Rate, Radiation Exposure, Cancer Risk

선형무역치모델(Linear No Threshold Model, LNT)의 이해

Wilhelm Conrad Röntgen이 X-선을 Antoine Henri Becquerel이 방사능을 발견한 이래 방사선은 질병 진단 및 치료, 산업 응용, 과학 및 교육 등 인류의 삶을 개선하기 위해 다양한 분야에서 활용되고 있다. 방사선을 발견한 초기에는 많은 양의 방사선에 노출되면 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있다는 사실을 인지하지 못했다. 1945년 일본 원자폭탄 투하로 인한 방사선 재해와 헤르만 물러(Herman J. Muller)의 X-선에 대한 돌연변이 유발 연구 등 과학적 연구 덕분에 방사선에 대한 대중의 인식이 바뀌었으며, 여러 전문 기관에서 방사선 노출 보호 기준이 만들어지게 되었다.

Received May 07, 2024

Revised June 24, 2024

Accepted June 25, 2024

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons CC BY 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

20세기 초 수십 년 동안 가장 기본적인 방사선 선량-반응 관계에는 역치가 있다는 데 대중의 합의가 이루어졌으며, 많은 연구 결과 고선량 방사선 피폭에서 암 발생 위험에는 명확한 선형성 존재를 확인하였다. 방사선 방호기관은 역치 선량과 선형 모델에 따라 근로자와 일반인에게 선량 한도를 설정하였다. 그러나 이 개념(역치 선량과 선형 모델)은 원폭 생존자 데이터와 다양한 의료 피폭 그룹의 여러 연구를 통해 방사선 피폭에 대한 보호를 위해 선량 반응 모델은 방사선 반응을 유도하는 역치가 없다는 LNT 가설이 적용된 보수적인 모델로 대체되었다.

선형무역치모델 (Linear No Threshold Model, LNT)의 정의는 “방사선피폭으로 인한 암발생은 역치가 존재하지 않고, 선형성을 보인다”는 것이다. 고선량에서 방사선피폭과 암발생 위험에는 많은 연구결과로 명확한 선형성의 존재를 확인하였다. 저선량(<100 mSv), 저선량률(<0.1m mSv/min, <5m mSv/hour)구간에서 논란이 존재하지만, 100 mSv이하 저 선량구간에서 LNT 모델은 방사선 피폭과 암발생 위험도가 선형관계를 보이고 암 발생을 위한 문턱선량은 없다고 추정하는 모델이다. 아무리 작은 선량의 방사선이라도 암 발생의 확률이 있으며 이는 방사선의 양과 비례하며 문턱값은 없다고 주장한다(Fig. 1).

현재 국제방사선방호위원회 (International Commission on Radiological Protection, ICRP)등 전 세계적으로 합의된 대부분의 관련 보고서와 방사선방호 정책을 수립하고 이행하는 정부규제기관들은 LNT 모델을 지지하고 있다.

LNT모델은 아주 작은 양의 방사선일지라도 DNA 손상이 있고 돌연변이가 발생할 수 있다는 이유와, 암은 체세포가 돌연변이 결과라는 모델에 근거하여, 생겨난 돌연변이가 암을 발생시킨다고 주장한다.

하지만 자연상태 인간은 100만개/1일 이상의 유전자변형이 일어나고 대부분 원래상태로 복구된다. 저선량을 조사한 초파리 실험에서 치매억제효과가 입증되었고, 쥐에서 저선량 방사선 전치치로 류마티즘이 개선된다는 보고와 알려지반응 억제와 저선량의 방사선은 면역체계를 활성화하여 결과적으로 암 발생을 억제하기에 방사선 hormesis 효과도 주장하고 있다. 물론 이와 상반되는 연구도 존재한다.

핵의학과 종사자는 매일 방사선에 노출되는 환경에서 근무한다. 특히, 30년이상 근무 시 100 mSv 이하의 저선량에 노출될 가능성은 매우 높다. 그래서 LNT모델의 정확한 이해는 필수적이다.

이를 바탕으로 저선량의 방사선 방호방법을 찾기 위한 지속적인 노력이 필요하다. 이에 저자는 현재까지 국제적인 방사선관련 위원회와 역학, 물리학 및 방사선 방호학의 최신자료와 논문을 찾아 핵의학과 종사자들의 최신 LNT모델의 정확한 이해를 돕고자 한다.

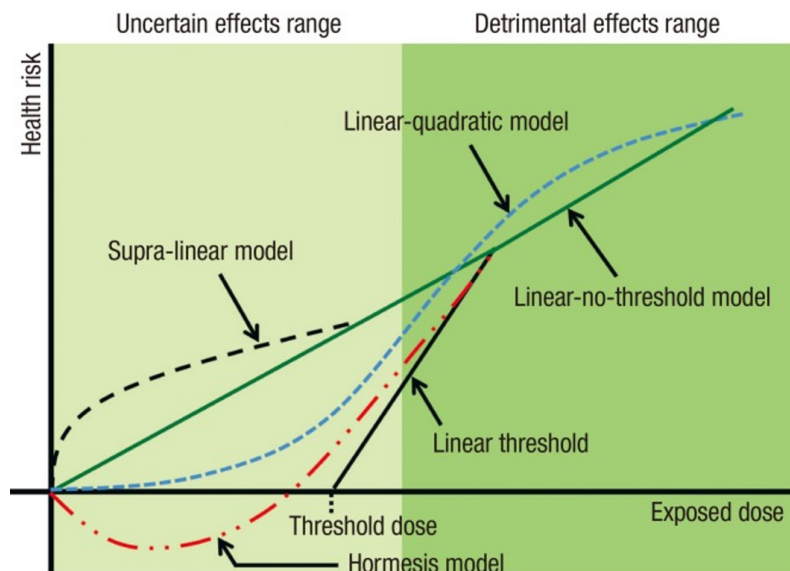


Fig. 1. Various models exist to represent radiation exposure and its associated hazards. Many epidemiological studies have been published suggesting that cancer can occur even at low doses (100 mSv) in the linear no-threshold model. (J Korean Med Sci. 2016; 31(1): 10-23.)

저선량에서 암발생 위험 관련 방사선 방호 국제 위원회 의견

미국방사선방호측정위원회(National Council on Protection and Measurements, NCRP)가 2001년에 발간한 보고서 136 “전리방사선에 대한 선형-비역치 선량-반응 모델 평가(Evaluation of the Linear-Nonthreshold Dose-Response Model for Ionizing Radiation)”는 현재까지 밝혀진 역학적 연구 성과로 몇 가지 종류의 암에서 선량-반응 관계가 선형-무역치 모델과 일치하고 기존 데이터는 선량-반응 관계의 존재를 배제하지 않는다고 보고하였다.

하지만 저선량 영역에서 선량-반응 관계를 명확히하기 위한 추가적인 연구가 매우 필요하다 라고 주장하였다(The epidemiological evidence suggests that the dose-response relationships for some, but not all, types of cancer may not depart significantly from linearnonthreshold functions. The existing data no not exclude other dose-response relationships. Further efforts to clarify the relevant doseresponse relationships in the low-dose domain are strongly warranted).

NCRP가 1980년, 1993년, 1997년 발간한 보고서에서도 일관되게 LNT선량-반응관계를 인정하고 있다(In keeping with previous reviews by the NCRP (1980, 1993, 1997), the Council concludes that there is no conclusive evidence on which to reject the assumption of a LNT dose-response relationship).

2005년에 발표된 ICRP 99에서는 특정 방사선 관련 암에서 저선량 문턱값의 존재 가능성은 있지만, 보편적인 문턱값의 존재를 증명하는 것은 아니라고 결론 지었다(The report concludes that while existence of a low-dose threshold does not seem to be unlikely for radiation-related cancers of certain tissues, the evidence does not favour the existence of a universal threshold).

일본의 히로시마, 나가사키 원자폭탄으로 인한 고선량 피폭과 암발생 인과관계는 많은 과학적 연구결과가 존재한다. 고선량 피폭 연구 결과를 바탕으로 저선량 피폭에서도 암 발생 가능성을 외삽법(extrapolation)으로 추정하였다. ICRP 60 보고서에서 선량-선량률 효과계수(Dose and Dose Rate Effectiveness Factor, DDREF)를 2로 결정하였다. DDREF가 2라는 것은 저선량률에서의 효과가 고선량률의 1/2 이 된다는 의미이다. DDREF와 결합된 LNT 가설은 저선량 및 저선량율에서 방사선 방호의 신중한 기초가 된다. 역학적 조사에서 약 10 mGy 정도의 피폭된 경우 암 발생 위험이 증가하며, 이것은 LNT 모델의 예측과 일관성을 보인다(The LNT hypothesis, combined with an uncertain DDREF for extrapolation from high doses, remains a prudent basis for radiation protection at low doses and low dose rates. There is epidemiological evidence, that the risk of cancer is raised following the receipt of doses of around 10 mGy, and that this increase is broadly consistent with the predictions of the LNT model).

유엔 방사선영향 과학위원회(The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) 2006년 보고서 VOLUME 1 이온화 방사선량의 영향(EFFECTS OF IONIZING RADIATION)은 다양한 선량 범위에서 방사선 피폭과 암 발생에 선형 또는 선형-이차모델(Linear-quadratic)(Fig. 1) 경향과 일치한다고 보고하였다(The most recent data ... largely consistent with linear or linearquadratic dose trends over a wide range of doses).

특히 골암, 비흑색종암 및 백혈병에 대한 선량반응은 상당한 상승 곡선을 보였다. 역학적조사만으로 방사선 위험에 대한 선량 문턱값의 존재를 확인할 수 없다. 역학적 방법을 사용하여 저선량에서 명확한 암발생 위험을 알 수 없지만 그점이 저선량에서 암 발생 위험이 증가하지 않는것을 의미하는 것은 아니다(Epidemiology alone will not be able to resolve the issue of whether there are dose thresholds for radiation risks. The inability to detect increased risk at very low doses using epidemiological methods does not mean that the underlying cancer risks are not elevated).

2018년 미국 국립과학학술원(National Academy of Sciences, NAS)이 발간한 “The BEIR VII Estimates of Low-Dose Radiation Health Risks Are Based on Faulty Assumptions and Data Analyses: A Call for Reassessment” 제목의 저선량방사선의 건강위험에 관한 보고서 BEIR 7(Biologic Effects of Ionizing Radiation VII)에서 현재까지 조사 및 연구된 과학적 증거가 이온화 방사선 피폭으로 인한 암 발생에 선형 선량-반응 관계가 있다는 가설과 일치한다는 결론을 내렸다. 암 발생에 문턱값 존재 가능성이 매우 적지만, 저선량 방사선 피폭의 결과로 암 발생 가능성은 낮을 것으로 판단했다(The BEIR VII committee concludes that current scientific evidence is consistent with the hypothesis that there is a linear dose-response relationship between exposure to ionizing radiation and the development of radiation-

induced cancers in humans. The committee further judges it unlikely that a threshold exists for the induction of cancers but noted that the occurrence of radiation-induced cancers at low doses will be small).

저선량에서 암발생관련논문

1. Cancer risk following low doses of ionising radiation – Current epidemiological evidence and implications for radiological protection (Rühm W, Laurier D, Wakeford R. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis Volume 873, January 2022, 503436)

최근 연구들은 전 세계적으로 매년 약 백만 명의 환자가 반복적으로 방사선영상검사를 받아 100 mSv 정도의 저 LET(Linear Energy Transfer) 방사선에 노출될 수 있다고 보고했다.

위 논문은 최근의 저 LET 방사선량에서 방사선 관련 암 발생 위험의 역학적 증거를 종합적으로 제시한다. 개별적으로는 통계적으로 유의한 방사선 관련 암발생 위험을 밝혀내지 못한 역학 연구를 포함한 집단 분석 및 메타 분석에 대한 입증자료를 검토하고 또한, 초과암 위험을 시사하는 방사선 피폭의 추가적이고 최근의 역학 연구들에서 밝혀진 증거를 요약한다(Evidence from pooled analyses and meta-analyses also involving epidemiological studies that, individually, do not find statistically significant radiation-related cancer risks is reviewed, and evidence from additional and more recent epidemiological studies of radiation exposures indicating excess cancer risks is also summarized).

본 논문에서 분석한 집단은 일본 원자폭탄 생존자, 원자력 산업 종사자, 의료 피폭 환자, 자연 방사선, 혹은 방사능 오염에 피폭된 사람을 포함하고 있다. 여기서 요약된 종합 증거는 수백만 명의 개인을 통하여 얻은 연구 성과물이며, 이 중 많은 사람들을 50년 이상 추적하였다.

요약하면, 방사선 피폭된 인간 집단의 역학적 연구에서 급성 및 장기간 피폭량이 100 mSv 이상인 경우 이온화 방사선으로 인한 암 발생 많은 증거가 발견되었으며, 100 mSv 미만의 피폭량에서도 암발생 증거가 늘어나고 있다.

장기간 피폭된 몇 백 mSv의 피폭량에서 관찰된 중요한 방사선 관련 고형암 위험(예: 원자력 산업 종사자 중에서 관찰된 것과 같이)은 오랜기간 저선량을 누적선량이 확률적 건강 효과(stochastic health effect)를 유발한다는 것을 나타낸다.

이를 바탕으로 반복적으로 이온화 방사선을 사용하는 의료 영상 검사에서 100 mSv 정도의 피폭은 방사선 방호의 관점에서 우려스러운 것으로 결론한다(On this basis, it can be concluded that doses of the order of 100 mGy from recurrent application of medical imaging procedures involving ionizing radiation are of concern, from the viewpoint of radiological protection).

2. Radiation risk in perspective (Kenneth L. Mossman, Marvin Goldman, Frank Masse, et al. Health Physics Society Position Statement March 1996)

저선량 피폭은 통계적 불확실성이 매우 크기 때문에 보건 물리 학회는 자연방사선 수준과 유사하거나 그 이하 이온화 방사선에 피폭된 사람의 건강에 위험 추정을 권하지 않는다(The Health Physics Society advises against estimating health risks to people from exposures to ionizing radiation that are near or less than natural background levels because statistical uncertainties at these low levels are great).

고선량 피폭(자연 방사선의 몇 배에 해당하는)은 많은 과학적 연구로 인체 영향을 준다는 사실은 밝혀졌다. 그러나 약 100 mSv 이하의 저선량 방사선피폭이 인체에 대한 영향은 통계적으로 0과 다르지 않다(Substantial and convincing scientific data show evidence of health effects following high-dose exposures (many multiples of natural background). However, below levels of about 100 mSv above background from all sources combined, the observed radiation effects in people are not statistically different from zero)고 주장한다.

3. The scientific basis for the use of the linear no-threshold (LNT) model at low doses and dose rates in radiological protection (Dominique Laurier, Yann Billarand, Dmitry Klovov, et al. *Journal of Radiological Protection*, Volume 43, Number 2, 024003)

약 60년 전 LNT모델이 방사선 방호 체계에 도입되었지만, 이 모델의 방사선 방호에 적용은 지금도 논란이 되고 있다(The linear no-threshold (LNT) model was introduced into the radiological protection system about 60 years ago, but this model and its use in radiation protection are still debated today).

본 글에서는 지난 10년 동안 축적된 연구 결과를 바탕으로 방사선생물학 및 역학에서 저선형에너지전달(LET) 방사선피폭 영향에 대한 결과를 제시하였으며, 저선량에서 방사선 관련 암 발생위험을 평가할 때 LNT 모델을 적용하는 데 미치는 영향을 논의하고자 한다(This article presents an overview of results on effects of exposure to low linear-energy-transfer radiation in radiobiology and epidemiology accumulated over the last decade and discusses their impact on the use of the LNT model in the assessment of radiation-related cancer risks at low doses).

지난 10년 동안 방사선생물학 및 역학 분야에서 축적된 연구 성과는 저선량에서의 암 발생위험에 대한 과학적 지식을 강화시켰다(The knowledge acquired over the past 10 years, both in radiobiology and epidemiology, has reinforced scientific knowledge about cancer risks at low dose).

방사선 생물학에서 일부 메커니즘은 선형성을 지지하지 않지만, 암 생성의 초기 단계는 돌연변이 생성이다. 이는 암 생성에서 핵심 역할을 하는 것으로 추측되며 10 mSv 만큼 낮은 선량에서부터 선형 반응을 나타낸다(In radiobiology, although certain mechanisms do not support linearity, the early stages of carcinogenesis comprised of mutational events, which are assumed to play a key role in carcinogenesis, show linear responses to doses from as low as 10 mSv).

방사선 생물학이나 역학에서 최근 연구결과는 선량 문턱값이 있다면, 그 값이 몇십 mSv를 초과할 수 없을 것으로 생각한다(Recent results, in radiobiology or in epidemiology, suggest that a dose threshold, if any, could not be greater than a few tens of mSv).

지금까지 얻은 과학적 지식을 바탕으로 도출한 결론은 “방사선 방호 체계 내에서 방사선 관련 암 위험을 평가하기 위해 LNT 모델을 적용하고, 방사선 방호 목적으로 LNT모델이 가장 적절하다”는 것이다(The scientific knowledge currently available does not contradict the use of the LNT model for the assessment of radiation-related cancer risks within the radiological protection system, and no other dose-risk relationship seems more appropriate for radiological protection purposes).

4. Cancer mortality after low dose exposure to ionising radiation in workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS): cohort study (David B Richardson, Klervi Leuraud, Dominique Laurier, et al. *BMJ* 2023, 382)

목적: 이온화 방사선에 대한 지속적인 저 선량, 저 저선량을 피폭이 암발생 위험에 미치는 영향을 평가(To evaluate the effect of protracted low dose, low dose rate exposure to ionising radiation on the risk of cancer).

대상: 국제 원자력산업 종사자 연구(INWORKS)의 주요 업데이트에 포함된 프랑스, 영국 및 미국의 원자력 산업 종사자 코호트(Cohorts of workers in the nuclear industry in France, the UK, and the US included in a major update to the International Nuclear Workers Study).

추적기간: 이온화 방사선에 대한 외부 피폭에 대한 개별 모니터링 데이터 및 총 추적 기간이 10.7백만 인년인 309,932명의 종사자(309,932 workers with individual monitoring data for external exposure to ionising radiation and a total follow-up of 10.7 million person years).

연구에는 103,553건의 사망 사례가 포함되었으며, 이 중 28,089건은 고형암이 원인이었다. 최근 10년간 받은 피폭은 제외하고 Gy 당 고형암 사망률 추정치는 누적 선량 당 52% 증가했다(90% 신뢰 구간은 27%에서 77%까지) (The estimated rate of mortality due to solid cancer increased with cumulative dose by 52% (90% confidence interval 27% to 77%) per Gy, lagged by 10 years).

저 누적 선량 범위(0-100 mGy)로 분석을 제한하면 사망률 추정치는 대략 두 배 증가했으며(동시에 신뢰 구간의 폭 증가) 직업적

외부 피폭 방사선량 추정이 보다 정확하게 기록된 최근에 고용된 종사자로 분석을 제한해도 비슷한 결과를 나타내었다(Restricting the analysis to the low cumulative dose range (0-100 mGy) approximately doubled the estimate of association (and increased the width of its confidence interval), as did restricting the analysis to workers hired in the more recent years of operations when estimates of occupational external penetrating radiation dose were recorded more accurately).

INWORKS의 주요 업데이트는 이온화 방사선에 대한 지속적인 저 선량 피폭과 고형 암 사망률 간의 관련성에 대한 직접적인 추정값을 제공하며 이는 세계에서 가장 많은 정보의 방사선 종사자 코호트 중 일부를 기반으로 한다(This major update to INWORKS provides a direct estimate of the association between protracted low dose exposure to ionising radiation and solid cancer mortality based on some of the world's most informative cohorts of radiation workers).

Gy당 초과 상대률 고형암 사망에 대한 요약 추정치는 현재 방사선 방호에 영향을 미치는 추정값보다 크며, 일부 증거는 저 선량 범위에서 선량-반응 관련성에 대한 기울기가 전체 선량 범위보다 높게 나타난다(The summary estimate of excess relative rate solid cancer mortality per Gy is larger than estimates currently informing radiation protection, and some evidence suggests a steeper slope for the dose-response association in the low dose range than over the full dose range) (Fig. 2).

이러한 결과는 현대 의료, 직업 및 환경 설정에서 주요 관심사인 저 선량 피폭에 대한 방사선 방호를 강화하는 데 도움이 될 수 있다(These results can help to strengthen radiation protection, especially for low dose exposures that are of primary interest in contemporary medical, occupational, and environmental settings).

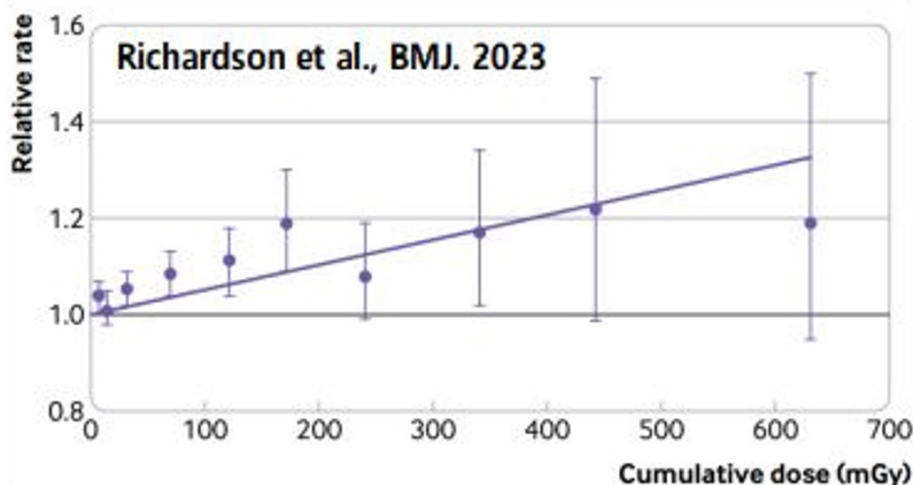


Fig. 2. Relative rate mortality due to solid cancer by categories of cumulative colon dose, lagged 10 years INWORKS. Bars indicate 90% confidence interval, and purple line depicts fitted linear model for change in excess relative rate of solid cancer mortality with dose. strata: country, age, sex, birth cohort, socioeconomic status, duration employed, neutron monitoring status

5. Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study (Michael Hauptmann, Graham Byrnes, Elisabeth Cardis, et al. The Lancet Oncology Volume 24 Issue 1, 45-53)

EPI-CT: Epidemiological study to quantify risks for paediatric computerized tomography and to optimise doses

목적: 유럽의 EPI-CT 연구는 소아 및 청소년 CT 검사로 인한 암발생 위험을 정량화하여 뇌암발생 위험을 평가한다(The European EPI-CT study aims to quantify cancer risks from CT examinations of children and young adults. Here, we assess the risk of brain cancer).

본 코호트 연구는 유럽 9개국가의 데이터를 종합하여 사용하였다. 대상자는 1977년부터 2014년 사이에 최소 한 번 이상 CT 검사

를 받은 22세 미만이며, 이전에 암 또는 양성 뇌 종양 진단을 받지 않았고, 첫 번째 CT 이후 최소 5년 동안 생존하고 암 발생 이력이 없어야 한다(Eligible participants had at least one CT examination before age 22 years documented between 1977 and 2014, had no previous diagnosis of cancer or benign brain tumour, and were alive and cancer-free at least 5 years after the first CT). 참가자는 276개 병원의 영상의학 정보 시스템을 통해 식별되었고 적격 사례자는 WHO 국제종양 질환 분류에 따른 뇌암 환자들이었다. 글리오마는 뇌암과 별도로 분석되었다(Participants were identified through the Radiology Information System in 276 hospitals. eligible cases were patients with brain cancers according to WHO International Classification of Diseases for Oncology. Gliomas were analysed separately to all brain cancers).

총 948,174 명을 확인했으며, 그 중 658,752 명(69%)이 본 연구에 적합했다. 658,752 명 중 368,721 명(56%)이 남성이었고 290,031 명(44%)이 여성이었다(We identified 948,174 individuals, of whom 658,752 (69%) were eligible for our study. 368,721 (56%) of 658,752 participants were male and 290,031 (44%) were female). 평균 5.6년 동안 165명이 뇌암 발생했고 그 중 121명(73%)이 글리오마였다. 모든 개인 중 5년 지연된(최근 5년 피폭선량제외) 누적 뇌선량의 평균은 47.4mGy (표준편차 60.9)이었고, 뇌암 환자 평균은 76.0mGy (100.1)였다(Mean cumulative brain dose, lagged by 5 years, was 47.4 mGy (SD 60.9) among all individuals and 76.0 mGy (100.1) among people with brain cancer). 모든 뇌암에 대해 유의한 선형 선량-반응 관계가 관찰되었다(100mGy당 ERR[Excess Relative Risk] 1.27 [95% CI 0.51-2.69]), 글리오마 경우에도 (100mGy당 ERR 1.11 [0.36-2.59]).

이 연구에서 CT 관련 방사선 피폭과 뇌암 사이의 유의한 선량-반응 관계가 관찰되었으며, 개별 선량 평가를 통한 주의 깊은 CT 사용과 가능한 한 낮은 선량 사용이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

6. Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in children, adolescents and young adults (Magda Bosch de Basea Gomez, Isabelle Thierry-Chef, Richard Harbron, et al. Nature Medicine 29, 3111-3119)

유럽에서는 매년 백만 명 이상의 어린이가 컴퓨터 단층 촬영(CT)을 받는다. 중, 고용량 이온화 방사선 피폭의 혈액종양 유발은 밝혀진 위험 요인이지만, CT 검사선량에서 혈액암발생 위험연구는 충분히 이루어 지지 않았다. (Although moderate- to high-dose ionizing radiation exposure is an established risk factor for hematological malignancies, risks at CT examination dose levels remain uncertain).

유럽 9개국 22세 미만의 연령에서 CT 검사를 받은 948,174 명의 다국적 코호트(EPI-CT) 추적결과 누적선량과 모든 혈액종양발생 위험 간에 연관성을 발견했으며, 100 mGy당 초과상대위험(ERR)이 1.96(95% 신뢰 구간 1.10에서 3.12)으로 나타났다(790 건). 림프암 및 골수암에서도 유사한 추정값이 도출되었다. 그 결과 검사받은 10,000 명의 어린이당(평균 선량 8 mGy), 이후 12년 동안 방사선 노출로 인한 혈액종양 발생이 1-2 명 예상된다(Results suggest that for every 10,000 children examined today (mean dose 8 mGy), 1-2 persons are expected to develop a hematological malignancy attributable to radiation exposure in the subsequent 12 years). 이 결과는 저선량 방사선 피폭으로 인한 암발생 위험이 증가하고 있음을 보여주는 증거를 나타내며, 소아CT 검사 시 지속적인 정당화와 선량 최적화의 필요성을 보여준다(Our results strengthen the body of evidence of increased cancer risk at low radiation doses and highlight the need for continued justification of pediatric CT examinations and optimization of doses).

고찰

본 논문을 작성하며 가장 어려웠던 점은, 첫번째, 역학과 의학에서 많이 사용되는 통계를 체계적으로 공부하지 못해 그 이해의 한계가 있었다. 두번째, 역학, 방사선방호와 보건물리에 관한 국외논문을 한역하는 문제였다. 그래서 독자의 이해를 높이기 위해 일부 영어논문 원문을 한글과 동반표기 하였다.

미국, 영국, 프랑스원자력산업 종사자 등을 대상으로 한 INWORKS는 2017년 작성 이후 2023년 업데이트한 자료에서 저선량에서 암발생이 고선량에서보다 더 많았고 기술기의 폭이 큰 것을 확인할 수 있었다. 더불어 최근 방사선생물과 역학연구에서 돌연변이는 암 발생에서 주요 역할을 하는 것으로 가정되며, 10 mGy에서부터 선형 반응을 보인다는 사실이 밝혀졌다.

현재 원자력의학원 국가방사선비상진료센터 방사선건강영향 평가팀에서는 국내원자력산업 종사자(핵의학과 포함) INWORKS와 같은 평가를 하고 있지만 그 결과의 확인은 50년후 가능하다 한다. 핵의학과 종사자만의 결과값도 얻을 수 있다. 하지만, 50년후 지금 이 글을 읽고 있는 독자분들 중 몇명이나 그 결과를 지켜볼 수 있을까?

지금까지 저선량에서 암발생관련 LNT모델의 지지를 각종 국제 방사선 위원회와 최신 논문들을 통해 설명했다. 더불어 LNT모델의 추가적인 연구의 필요성과 이에 반하는 논문과 의견도 병기하였다.

핵의학과 방사선작업구역내 종사자들은 저선량에서 LNT모델에 적용되는 가장 적절한 사례이다. 따라서 “Cancer mortality after low dose exposure to ionising radiation in workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS): cohort study” 논문에서 다음과 같은 권고 “These results can help to strengthen radiation protection, especially for low dose exposures that are of primary interest in contemporary medical, occupational, and environmental settings”를 잊지말고 저선량에서 방사선 방호를 강화해야한다.

국내 모병원 2023년도 핵의학과 PET/CT주사실 종사자는 분기당 1.1 mSv, 조정실 종사자는 0.5 mSv, 감마카메라실 종사자는 0.4 mSv, 체외검사실 종사자는 0.1-0.2 mSv 피폭을 받았다. 핵의학과 종사자들은 개인적인 사유로 중간에 그만두지 않는다면, 정년까지 약35년을 근무해야한다는 점을 잊지 말아야 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

논문작성과 자료수집에 도움을 주신 양산부산대학교병원 핵의학과 길상형 박사님께 감사드립니다.