

모 지역의 소아 백혈병 및 악성림프종 발병 사례와 환경적 요인의 연관성 조사

박동욱*† · 최상준** · 윤간우*** · 김소연* · 김희운**** ·

박윤경** · 김 원*** · 임상혁*** · 박지훈*****

*한국방송통신대학교 환경보건학과, **대구가톨릭대학교 산업보건학과,
노동환경건강연구소, *경희대학교 사회학과, *****서울대학교 보건환경연구소

Association of the Risk of Leukemia and Non-Hodgkin's Lymphoma (NHL) with Environmental Agents

Dong-Uk Park*†, Sangjun Choi**, Kanwoo Youn***, So-Yeon Kim*, Hee-Yun Kim****,
Yun-Kyung Park**, Won Kim***, Sanghyuk Iim***, and Jihoon Park*****

*Department of Environmental Health, Korea National Open University

**Department of Occupational Health, Daegu Catholic University

***Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health

****Department of Sociology, Kyunghee University

*****Institute of Health and Environment, Graduate School of Public Health, Seoul National University

ABSTRACT

Objective: A total of five students at same middle school were reported to be diagnosed with pediatric leukemia (n=2), non-Hodgkin's lymphoma (NHL, n=1) and aplastic anemia (n=2) between 2016 and 2017. The aims of this study are to assess exposure to environmental hazardous agents known to be associated with the risk of leukemia and to examine whether the environment of school is associated with the risk leukemia.

Method: A total of 11 environmental agents causing childhood leukemia were monitored using international certified method in schools where patients had ever attended. Radon & Thoron detector was used to monitor real-time airborne radon and thoron level (Bq/m³). Clinician interviewed two among nine patients who agreed to participate in this study in order to examine the association of demographic and genetic factors by individually. Leukemia, NHL, and aplastic anemia were grouped into lymphohematopoietic disorder (LHP).

Results: Except for airborne radon level, no environmental agents in school and household where patients may be exposed were found to higher than recommended airborne level. Clinical investigation found no individual factors that may be associated with the risk of LHP. Higher airborne radon level than Korea EPA's airborne radon criteria (148 Bq/m³) was monitored at most of several after-class room of one elementary school, where two leukemia patients graduated. Significant radon level was not monitored at class-room. Significant exposure to radon of patients was not estimated based on time-activity pattern.

Conclusions: Our results have concluded that there have been no environmental factors in school and household environment that may be associated the risk of LHP.

Key words: Benzene, radon, environmental disease, environmental agents

†Corresponding author: Department of Environmental Health, Korea National Open University, 86 Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul 03087, Republic of Korea, Tel: +82-2-3668-4707, Fax: +82-2-741-4701, E-mail: pdw545@gmail.com
Received: 29 May 2019, Revised: 13 June 2019, Accepted: 17 June 2019

I. 서 론

특정 시기(16-17년)에 모 지역 1개 중학교 학생 5명이 혈액관련 질병(급성 림프구성 백혈병 2명, 재생 불량성 빈혈 2명, 악성림프종 1명)에 걸렸다. 이 지역 전체 18세 이하 학생을 대상으로 2004년부터 혈액관련 질병 사례(이하 질병사례자)를 파악하면 초등학생 2명(백혈병), 중학생 6명(백혈병 3명, 재생 불량성 빈혈 2명, 악성림프종 1명), 그리고 고등학생 1명(백혈병)으로 총 9명이었다. 18세 이하 어린이와 청소년의 백혈병과 악성림프종 발생자 수는 10만 명당 약 두 세 명 정도로 흔치 않은데, 일개 중학교의 학생 수를 고려하면 혈액관련 암의 발생수준은 전국 대비 수십 배 높은 수준이다. 따라서 백혈병과 악성 림프종이 특정 시기와 지역, 주변환경에서 전국 평균보다 높게 발생된 것으로 의심할 수 있다.

백혈병과 악성림프종의 개략적인 질병 잠재기(Latency period)를 고려하여 질병 사례자들이 생활한 학교, 가정, 주변 환경에서 혈액관련 질병에 영향을 미칠 수 있는 환경적 요인(이하 환경요인)에 대한 발생과 노출 가능성을 종합적으로 조사하여 그 관련성을 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구의 목적은 혈액 관련 질병 사례자의 개인 및 환경 요인 간 연관성을 규명하는 것이며, 세부 목적은 첫째, 질병 대상자의 가정, 학교, 주변 환경에서 혈액 관련 질병 발생 위험이 있는 환경 요인에 대한 발생 및 노출 가능성을 파악한다. 둘째, 개인 환경에 대한 조사결과를 근거로 혈액관련 질병과의 연관성을 파악하는 것이다. 본 연구에서 사용한 환경조사 전략과 과정은 향후 특정 인구 집단에서 발생한 환경성 질환에 대한 개인 및 환경 위험인자의 연관성을 규명하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 질병사례자 조사

조사 대상 질병 사례자는 2016년 및 2017년에 걸쳐 질병이 발생한 A 중학교 학생 6명을 포함하여 2015년 이전에 비슷한 질병에 걸린 3명으로 총 9명이다. 이 중 연구 참여에 동의한 2명의 질병 사례자에 대해 임상 인터뷰 조사를 실시하였으며, 다른 질병 사례자는 참여 거부(2명), 연락처 확인 불가능(5명)의 이유로 제외하였다. 연구에 참여한 질병 사례자 2명은 2017년 A 중학교 재학(1학년 1명, 3학년 1명) 중에 급성 림프구성 백혈병으로 진단 받았다.

질병 사례자를 대상으로 임상 관련 주요 내용과 가족력, 부모 직업력, 유전적 요인, 과거 질병력 등 인터뷰를 통해 파악하였다. 가족력에 대한 조사 대상 범위는 사례자를 포함하여 형제, 부모, 부모의 형제까지로 하였고, 직업력, 농약 사용, 유기용제 노출, 환자 임신 중 특이사항, 약물복용, 감염력, 주거 환경과 취미 등 개인 환경에 대한 정보를 파악하였다.

본 조사 참여에 동의한 질병 사례자를 대상으로 심층면접조사를 수행하였고, 질병사례자의 장소 및 활동별 환경 유해요인에 대한 노출 특성을 조사하였다. 주된 활동 반경 내에 유해요인 유무를 확인하기 위해 혈액암과 관련이 있다고 알려진 벤젠, 농약, 포름알데하이드, 라돈, 극저주파자기장 등에 직, 간접적 노출 유무 확인 용도의 서면 조사지를 면담에 활용하였다. 주요 조사 내용은 다음과 같다.

- 1일 시간 별 주요 활동 장소 및 환경 특성
- 가정환경에서 거주 장소 등 특성
- 가정환경에서 환경요인 발생 및 노출 특성
- 학교환경에서 공간별(수업/방과후 활동 등) 주요 활동
- 가정과 학교 외 주요 활동 공간 및 특성 등

2. 환경 요인 조사

2.1. 대상

조사 대상 환경은 질병 사례자의 가정, 학교 그리고 주변으로 한정하였다. 학교 범위는 질병 잠재기를 고려하여 진단 당시 학교를 포함하여 이전에 재학했던 학교 모두를 대상에 포함시켰다. 가정환경은 본 연구조사 참여에 동의한 사례자의 가정으로 한정하였다. 환경조사 대상은 질병 사례자들이 재학 했던 4개 학교로 선정하였으며, 질병 진단 당시 재학중이었던 학교 분포는 B 초등학교 4명, C 초등학교 3명(진단 당시 2명 포함)이었다(Table 1).

2.2. 환경인자 선정

혈액 관련 질병 발생과 연관이 있는 환경 요인을 두 가지 범주에서 선정하였다(Table 2). 첫째, 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)가 사람에게 백혈병 등 혈액 관련 암을 일으킬 위험이 확실하다고 분류한 그룹(Group 1, carcinogenic to humans), 상당한 요인으로 분류한 그룹(Group 2A, probably carcinogenic to humans), 그리고 가능한 요인으로 분류한 그룹(possible, 그룹 2B)에 해당하는 환경적 요인들이다.¹⁾ 이 그룹들에 해당하는 환경 요

Table 1. The distribution of patients by school where patients graduated and attended at diagnosis (n=9)

School	Number at diagnosis (year diagnosed)	School attended
“A” middle school	- 4 (2016) - 2 (2017)	- “B” elementary school (n=4) - “C” elementary school (n=1) - No information (n=1)
“B” elementary school	No	Not applicable
“C” elementary school	2 (2009 & 2015)	Not applicable
“E” high school	1 (2006)	No information

Table 2. A total of eleven environmental hazardous agents associated with the risk of leukemia and non-Hodgkin’s lymphoma (NHL)

Category	Agents	Leukemia	NHL	References
Chemical agent	Benzene	Group 1	Group 1	IARC Monographs ¹⁾
	1,3-butadiene	Group 1	Group 1	
	Ethylene oxide	Group 1	Group 1	
	Formaldehyde	Group 1	Group 1	
	Polyvinyl chloride	Group 1	Group 1	
	Trichloroethylene	Group 1	Group 1	
	Lindane (pesticide)	Group 1	Group 1	
	Antineoplastic drug	Group 1	Group 1	
Physical agent	X-ray & γ -ray	Group 1	Group 1	
	ELF-MF	Group 2B	Limited evidence	
	Radon	Not consistent (controversial)	No report	16-23)
Behavioral agent	Parental smoking/ drinking, exposure to other chemicals	Not consistent (controversial)	No report	2-15)

Definition and abbreviation: Group 1, definitely carcinogenic to humans; Group 2A, probably carcinogenic to humans; Group 2B, possibly carcinogenic to humans; NHL, non-Hodgkin’s lymphoma; ELF-MF; Extremely low frequency-magnetic field.

인은 2019년 6월 현재 벤젠(Benzene), 1,3-부타디엔(1,3-Butadiene), 포름알데히드(Formaldehyde, HCHO), 에틸렌옥사이드(Ethylene oxide), 트리클로로에틸렌(Trichloroethylene), 이온화 방사선(엑스레이 등), 극저주파자기장(Extremely low frequency magnetic field, ELF-MF)이다(<https://www.iarc.fr/>). WHO 등 국제기관에서 혈액 암 발생 위험인자로 공식적으로 분류하지 않았지만 동료 연구자 심사(Peer-review)를 거쳐 보고된 연구에서 혈액 관련 질병 위험과 연관이 있다고 알려진 환경적 요인들로 부모의 흡연,²⁻⁵⁾ 음주,^{3, 6)} 농약 및 기타 화학물질 노출과¹⁰⁻¹⁵⁾ 라돈이다.¹⁶⁻²³⁾

2.3. 측정 및 분석

혈액 관련 질병 발생 위험에 영향을 미치는 것으로

선정된 환경 요인에 대한 노출 가능성 평가는 두 단계로 실시하였다. 첫 단계는 정성적 평가(Qualitative assessment)로 예비조사를 통해 각 환경 요인의 발생 원 유무를 조사하고, 발생원이 없다고 판단되는 경우 정량적 평가(Quantitative assessment)는 생략하였다. 다음으로 정량 평가가 필요한 환경 요인을 대상으로 학교와 가정에서 측정 등을 근거로 노출 가능성을 파악하였다. 정량적 평가는 공기 중 농도를 측정하였고, 필요한 경우 고형 시료(Bulk sample)도 채취하여 분석하였다. 정량평가 대상 요인과 주요 측정 및 분석 방법은 다음과 같다(Table 3).

2.3.1. 총휘발성유기화합물

공기 중 총 휘발성 유기화합물(TVOCs)은 실시간

Table 3. A summary of sampling and analytical methods for environmental hazardous agents causing leukemia

Agent	Method	Sampling media/instrument
VOC	Direct reading	- ppb-RAE 3000 (Model. PGM-7340)
Benzene	- Active sampling - Instrumental analysis	- Sampling: Low flow pump and Tenax TA tube - Sample analysis: GC-MSD
Formaldehyde	Direct reading	- Multi-RAE (Model. PGM-6208)
ELF-MF	Direct reading	- EMDEX-II monitor
Radon & thoron	Direct reading	- Radon & Thoron detector (Model. EQF-3220)

Abbreviations: VOC, volatile organic compounds; GC-MSD, gas chromatography-mass spectrometry detector; ELF-MF, extremely low frequency-magnetic field.

측정 기기(Model: ppb-RAE 3000, PGM-7340, Sunnyvale, CA, USA)를 이용하여 매 5초 간격으로 연속 측정하였다. 학생들이 주로 생활하는 학교 내 교실 및 기타 공간에서 중앙 바닥으로부터 약 1 m 높이에서 60분 이상 측정하였다. 측정 당시 실내는 창문이 모두 닫혀 있고 환기가 잘 되지 않았다.

2.3.2. 포름알데히드

공기 중 포름알데히드(HCHO)는 실시간 측정기기(Model: MultiRAE Lite PGM-6208/6208D, Sunnyvale, CA, USA)를 이용하여 매 5초 간격으로 연속 측정하였다. 학생들이 주로 생활하는 학교 내 교실 및 기타 공간에서 중앙, 바닥으로부터 1 m 정도 높이에서 20분 이상 측정하였다.

2.3.3. 벤젠

공기 중 벤젠은 저유량 펌프(Model: SKC 210-1002 Pocket Pump, SKC Inc., PA, USA)와 스테인레스 재질의 고체흡착관(Tenax TA tube, Supelco, St. Louis, MO, USA)을 연결하여 0.1 L/min 정도의 유량으로 채취하였다. 가스크로마토그래피 질량분석기(Gas chromatography-mass spectrometry detector, GC-MSD, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)를 이용하여 채취된 시료에서 정성과 정량 분석하였다. 학교 운동장의 인조잔디와 우레탄 트랙에서 벤젠 발생 가능 여부를 파악하기 위해 바닥으로부터 약 10 cm 거리에 측정기를 위치시켜 60분 이상 측정하였고, 일반 교실 및 학교 주변 공기 중 벤젠 농도도 측정하였다. 학교 운동장의 인조잔디와 우레탄 트랙에서 지면 온도가 가장 높은 시간대(12:00-15:00)에 측정하였다.

2.3.4. 극 저주파 자기장(Extremely low frequency-magnetic field)

극 저주파 자기장은 극 저주파 영역의 주파수 범위에 대한 자기장 강도 측정이 가능한 실시간 측정기기(Model: EMDEX-II, Energetech Consultants, Campbell, CA, USA)로 측정하였다. EMDEX-II는 40-800 Hz 주파수 영역에 대한 자기장 강도를 실시간으로 측정할 수 있으며, 1.5초 간격으로 측정결과를 저장할 수 있다. 극 저주파 자기장은 학교의 변전소를 포함한 건물 외곽(운동장, 건물 주변)과 교내 건물 1층 복도 및 교실 공간에서 측정하였고, 건물 외곽 및 교내 1층 복도는 공간 내 극 저주파 자기장 분포 지도를 그릴 수 있는 프로그램과 별도의 부속 장치(LINDA wheel)를 이용하여 측정하였다.

2.3.5. 라돈

공기 중 라돈은 학교와 가정에서 모두 측정하였다. 공기 중 라돈은 고감도 실시간 라돈 측정 센서가 장착된 라돈아이플러스(Model: RD200M, FTLab, Korea)로 모니터링하여 그 수준이 50-60 Bq/m³ 이상 검출된 학교와 장소만을 대상으로 다음과 같은 방법으로 정밀 조사를 실시하였다.

첫째, 공기 중 라돈과 토론은 Radon & Thoron detector (Model: EQF-3220, SARAD GmbH, Germany)를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 이 장비는 공기 중 라돈과 토론, 그리고 이들의 딸 핵종 농도까지 동시에 측정할 수 있으며, 공기 중 라돈이 챔버 내부로 유입된 후 딸 핵종으로 붕괴되는 것을 측정하는 원리이다.²⁴⁻²⁵⁾ 호흡기 노출 영역을 고려하여 약 1 m 높이에 측정 장비의 공기 흡입구를 두고, 2 시간 간격으로 약 24시간 이상 연속으로 측정하였다.

라돈이 붕괴되어 생기는 딸 핵종 Po-218과 Po-214가 모두 측정되는 느린(slow) 모드 상태의 결과를 활용하였다. 이는 짧은 시간에 주로 딸 핵종 Po-218만 측정되는 빠른(fast) 모드 결과에서는 공기 중 라돈은 과소평가될 수 있기 때문이다. 공기 중 라돈 측정 자료 중 부등호(<)로 표시된 값은 검출한계 미만으로 평가하고, 공기 중 농도 자료 분석에서 제외하였다.

둘째, 시간적분식 라돈측정기(Model:α-Track (D40 mm/H35 mm), Rn-tech Co., Ltd., Korea)로 2개월 이상 누적하여 공기 중 라돈 농도를 측정했다. 각 공간의 천장으로부터 30 cm 아래 위치에서 측정하였다. 측정이 완료된 시료는 Bowser-momer로 부터 인증 받은 전문분석기관에 의뢰하여 분석을 진행하였다. 알파트랙은 라돈이 붕괴하면서 발생하는 알파선의 전리작용을 이용하는 시간 적분형 라돈검출기다. 알파선에 의해 LR-115 표면에 생성된 분자구조결함을 화학 에칭(10% NaOH solution)을 통하여 확대한 후 현미경으로 판독하여 단위 면적당 비적의 수를 라돈 농도로 환산하는 원리이다.

본 연구에서는 혈액 관련 질병 외 다른 질병에 대한 조사는 제외하였다. 이는 특정 장소(학교)와 시기에 집중되거나 다수 사례가 발견되지 않았고, 전국 발생 수에 비해 유의하게 높지 않았기 때문이다. 연구 대상자의 개인정보와 관련된 내용은 연구과정, 목적, 필요성, 방법 등에 대해 한국방송통신대학교의 생명윤리위원회 심의를 거쳐 승인 후 진행하였다(IRB No. ABN01-201807-11-10).

III. 결 과

1. 질병 사례자별 임상 인터뷰 조사 결과

과거 및 현재 부모 직업에서 환경적 요인에 노출 될 만한 사실은 없었다. 가족력, 출생 당시 부모 나이 등에서도 특이 소견은 없었다. 사례자 질병력에서도 급성림프구성 백혈병 발생에 영향을 미칠만한 감염력과 의료가기 노출은 없는 것으로 파악되었다. 가정 및 주변 활동에서도 질병 발생에 영향을 미칠 요인에 대한 노출은 없었다. 공기 중 라돈, 극 저주파 자기장, 기타 화학물질 등 개인별 환경 영향 요인에 대한 유의미한 노출 결과도 확인할 수 없었다.

2. 환경 요인 조사 결과

2.1. 학교

환경 요인 중 공기 중 라돈만이 B 초등학교 일부

장소에서 유의하게 발생하는 것으로 확인되었다. 라돈의 발생 수준은 우리나라 환경부 환경기준 및 교육부의 유지기준(148 Bq/m³), WHO 권고기준(100 Bq/m³)을 초과하였다. TVOCs의 교내 평균 농도는 79.25 ppb로 학교보건법의 유지·관리 기준인 400 ppb 보다 훨씬 낮은 수준이었고, 포름알데히드의 교내 평균 농도도 90.43 ppb로 학교보건법의 유지·관리 기준인 123 ppb (100 µg/m³)에 비해 상대적으로 낮은 수준이었다. 운동장 내 인조잔디와 우레탄 트랙에서 30°C 이상의 온도 조건에서 측정된 벤젠은 미량(0.33 ppb) 검출되었으나, 교실과 기타공간에서 측정된 0.85 ppb 보다 낮았고, 대기환경기준인 16 ppb에 비해서도 매우 낮은 수준이었다. 변전소를 포함하여 교내에서 측정된 극 저주파 자기장의 평균 수준과 평균값들의 최대값은 각각 0.04, 0.12 µT였다. 이는 WHO에서 소아백혈병 위험도를 2배 이상 높일 수 있다고 판단했던 상시 노출 수준(0.4 µT)에 비해 낮은 것으로 평가하였다(Fig. 1).

2.2. 가정

2명의 질병 사례자 가정을 방문하여 수행한 면담, 측정 결과에 따르면 혈액관련 질병과 관련된 환경 요인의 유의미한 연관성을 확인할 수 없었다. 가정집에서 1일 이상 연속 측정된 공기 중 라돈 농도는 50 Bq/m³ 이하였다. 본 연구 참여에 동의하지 않았거나(4명), 접촉하지 못했던 질병 사례자(3명) 가정은 환경 위험요인의 발생이나 노출 수준은 평가할 수 없었다.

2.3. 학교 및 가정 주변환경

학교 주변 반경 2 km 이내에 혈액 관련 질병과 관련된 환경 요인이 유의미하게 발생할 수 있는 시설(공장, 송전탑, 주유소 등)은 존재하지 않았다. 질병 사례자 1명의 주거 환경 근처에 식용 오일을 생산하는 공장이 있었지만 혈액 관련 위험 시설은 아닌 것으로 판단하였다.

2.4. 공기 중 라돈 및 토론 발생 수준

B 초등학교의 본관동, 후관동, 별관 1층에서 시간 별로 측정된 공기 중 라돈수준은 우리나라 환경부 기준 및 교육부 유지 기준인 148 Bq/m³와 WHO 기준 100 Bq/m³을 대부분 초과하였다. 공기 중 라돈과 토론에 대한 장소 및 시간대 별 평균 농도 수준과 실시간 농도 변화는 Fig. 2와 3에 나타내었다. 라돈과 토론의 농도는 본관동에서 가장 높았으나, 각 건물 2

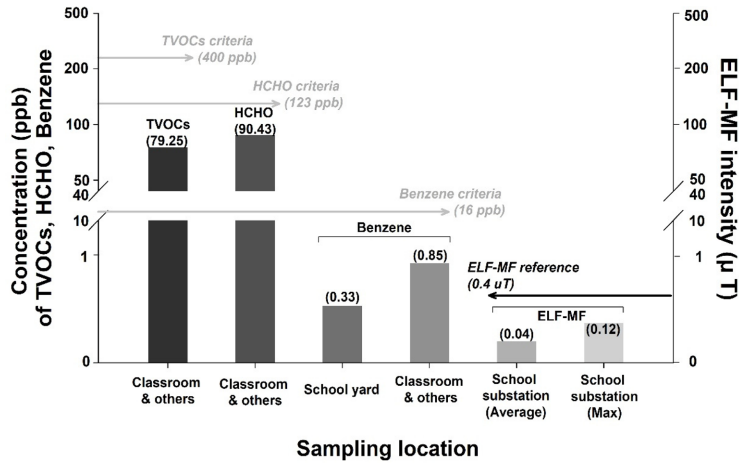


Fig. 1. Airborne levels of environmental agents measured at middle & elementary schools

층과 3층에서 공기 중 라돈 발생 수준은 100 Bq/m³ 이하로 낮았다(Fig. 2). 공기 중 라돈과 토론의 농도는 대체로 낮 보다는 밤에 높은 수준으로 검출되었는데, 이는 보통 낮에 환기가 수시로 이루어지기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 3).

8월부터 2개월 동안 누적해서 측정한 공기 중 라돈 결과는 Fig. 4와 같으며, 시간 별 공기 중 라돈 결과와 유사하였다. 사례자 중 5명이 재학한 A 중학교의 별관 일부 장소에서 공기 중 라돈농도는 교육복지실과 도읍실에서 저녁과 새벽 시간대에 WHO 권고기준인 100 Bq/m³을 넘었다. 기타 C 초등학교와 E 고등학교에서 라돈아이 플러스로 측정된 결과 모두 11-51 Bq/m³이었기 때문에 정밀조사는 생략하였다.

IV. 고 찰

모 지역에서 발생한 혈액 관련 질병 사례자(9명)를 대상으로 백혈병과 악성 림프종 발병과 환경 요인과의 연관성을 조사하였다. 사례자가 재학했던 학교 환경과 본 연구 참여에 동의한 2명의 질병 사례자 가정 환경을 조사한 결과, 혈액 관련 질병 발생 위험이 있는 환경 및 개인적 요인을 확인할 수 없었다.

공기 중 라돈이 B 초등학교의 방과 후 일부 교실인 본관/후관/별관 1층에서 높은 수준으로 발생되었다. 공기 중 라돈 발생은 우리나라 환경부 환경기준 및 교육부의 유지 기준(148 Bq/m³), WHO의 기준(100 Bq/m³)을 훨씬 초과한 수준이었다. 공기 중 라

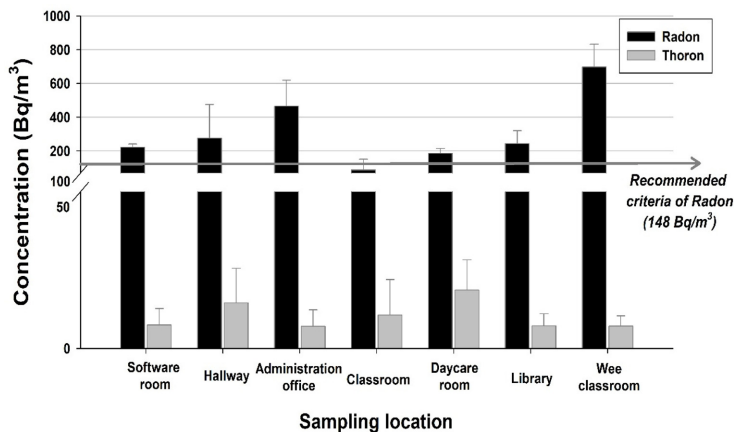


Fig. 2. Airborne radon and thoron levels monitored at “B” elementary school

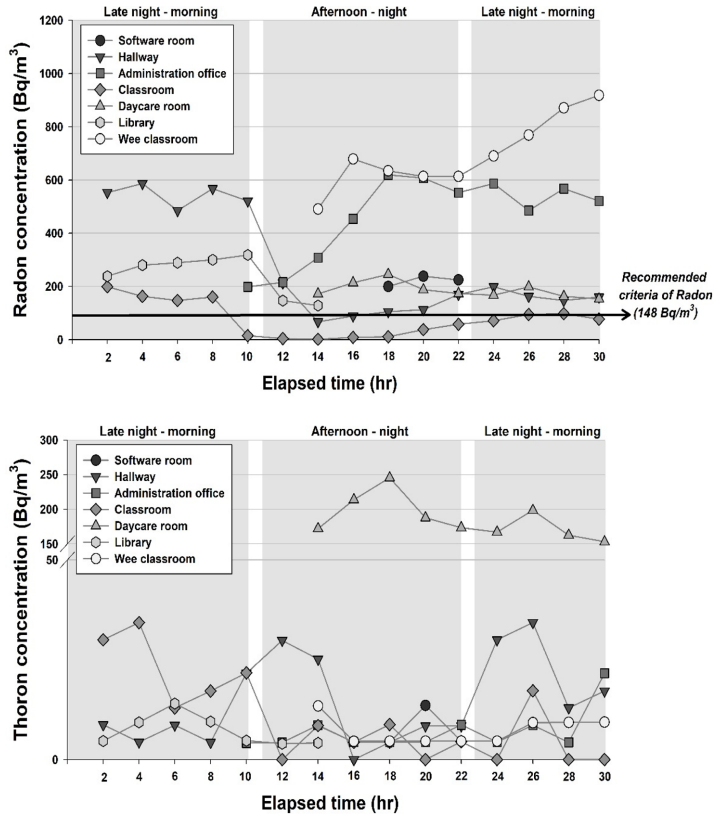


Fig. 3. Daily variations of airborne radon and thoron levels monitored at “B” elementary school

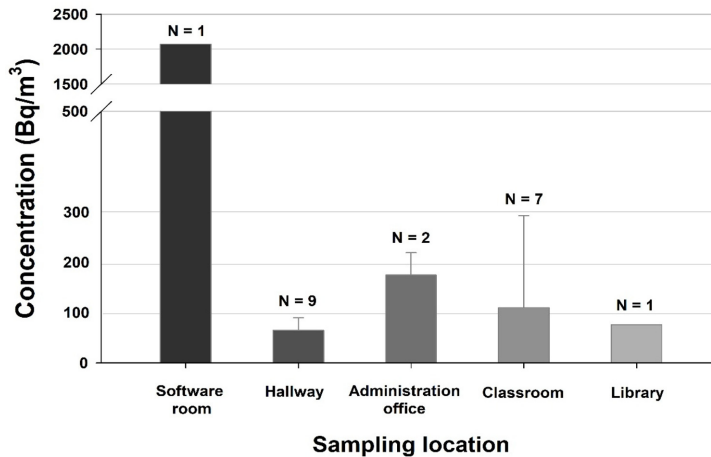


Fig. 4. Accumulated airborne radon levels measured by alpha track at “B” elementary school (Aug 1-Oct 1, 2018)

돈 농도가 환기 상태, 계절 및 지형적 요인 등에 따라 변화가 심하다는 점을 감안해도 높은 수준이다. 2004년부터 혈액관련 질병에 걸린 18세 미만 학생들

중 진단 받았던 때의 학교 분포는 E 고등학교 1명, A 중학교 6명, C 초등학교 2명으로 총 9명이었다. 조사에 참여한 2명은 림프구성 백혈병으로 A 중학교

때 진단을 받았고 모두 B 초등학교를 졸업하였다 (Table 1). B 초등학교를 제외한 A 중학교, C 초등학교, E 고등학교에서는 공기 중 라돈 농도는 유의하게 높지 않아 정밀조사를 수행하지 않았다. B 초등학교의 공기 중 라돈이 백혈병 등 혈액 관련 질병 발생과 연관이 있는지는 평가했다.

본 연구에서는 현재까지 국제적으로 인정된 사실에 근거할 때 공기 중 라돈 노출과 혈액관련 질병 발생 위험의 직접적 연관을 확정한 근거는 없는 것으로 판단하고, 그 이유는 다음과 같다. 먼저, WHO와 ICRP는 아직까지 라돈과 백혈병, 악성림프종의 발생 위험과 연관 및 인과관계를 받아들이지 않고 있다. 1960년대 무렵부터 라돈 노출과 소아 백혈병 위험의 연관을 규명하기 위한 역학연구는 꾸준히 진행되어 왔으나, 주로 생태학적 역학연구를 통해 특정 지역에서 소아 백혈병의 발생이 그 지역의 라돈 농도와 연관이 있다고 보고하였다.^{26,27} 구체적인 라돈 노출과 소아 백혈병 발생과의 인과관계를 규명하기 위한 사례-대조군(Case-control) 연구에서는 일관성이 없었다.^{18,21,23} 이에 따라 현재까지 IARC는 라돈을 백혈병 등 혈액 암 환경위험인자로 분류하고 있지 않고 있다. 그러나 라돈 노출과 혈액 관련 질병에 대한 향후 연구 결과가 누적되면 인과관계 여부를 규명할 수 있을 것으로 기대된다. B 초등학교에서의 라돈 발생이 사례자별 질병 발생에 유의미하게 영향을 미쳤는지 여부를 평가할 필요가 있다.

18세 미만 혈액 관련 질병 사례자 9명 중 4명은 B 초등학교를 졸업하였는데, 혈액 관련 질병 사례자수를 재학생 수(2018년 기준)에 근거해서 비교하면 큰 차이가 없었다. 즉 B 초등학교의 재학생 수 1,116명(현재 재학생 수) 대비 질병 발생자 수가 4명, C 초등학교는 재학생 수 566명(현재 재학생 수) 대비 질병 발생자 수가 3명 이었다. B 초등학교에서는 질병 발생 환자 4명이 방과후 교실이 있는 본관을 이용한 시간과 빈도 등을 고려한 노출 수준이 백혈병 발생에 유의한 영향을 미쳤는지 여부를 과학적으로 규명하는 것은 어렵다. 또한 집단 역학조사를 진행하는 것도 발생자 수가 매우 적어 의미가 없다. 따라서 B 초등학교 일부 장소에서 높게 검출된 공기 중 라돈이 백혈병 등 혈액관련 질병의 발생 위험과 직접적인 연관성을 확정한 수 없는 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 어린이들의 라돈 노출을 줄이기 위한 긴급한 몇 가지 조치를 제안하였고 관계기관(교육청, 학교)은 이에 따라 다음과 같은 조치를 취하였다.

B 초등학교의 본관 1층에 위치한 위클래스(Wee class)와 전산실 등을 대상으로 전체 환기시설을 설치하였다. 또한, 지역 내 다른 학교(A 중학교, C 초등학교, E 고등학교 등)를 대상으로 공기 중 라돈 발생 수준에 대한 정밀 조사를 수행할 것을 요청 하였다. 예비 조사에서는 높지 않은 수준으로 확인되었으나, 이는 특정 시간대에 조사한 것으로, 공기 중 라돈 농도의 발생 수준을 대표하기에는 한계가 있기 때문이었다. 지역 내 모든 학교는 같은 광물 및 지질 대이므로 공기 중 라돈 발생 수준을 종합적으로 조사할 필요가 있다.

V. 결 론

특정 지역 18세 미만 소아 9명에게서 발생한 혈액 관련 질병 위험과 환경 요인과의 관계를 규명하였다. 혈액 관련 질병 위험인자로 알려지거나 의심되는 11가지 환경요인을 질병 사례자들이 재학했던 학교를 중심으로 조사하였다. 질병 사례자 2명의 개인적 요인과 가정 환경에서는 유의미한 개인적, 환경적 위험인자를 확인할 수 없었다. 환경 요인 중 공기 중 라돈만이 사례자 4명이 재학했던 B 초등학교의 본관 1층 일부 방과후 교실에서 우리나라 환경부 환경기준 및 교육부의 유지 기준인 148 Bq/m³와 WHO의 기준 100 Bq/m³을 초과한 것으로 확인되었다. 결론적으로 현재까지 WHO의 라돈에 의한 백혈병 발생 위험 평가, 두 초등학교에서의 백혈병 유병율, B 초등학교 본관에서의 라돈 노출 수준 등을 근거로 했을 때, 모 지역에서 발생한 혈액관련 질병 발생과 라돈 등 환경 요인의 연관성은 낮은 것으로 결론을 내렸다.

References

1. International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC Monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans. 2019. Available at: <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/Table4.pdf>.
2. Shu XO, Ross JA, Pendergrass TW, Reaman GH, Lampkin B, Robison LL. Parental alcohol consumption, cigarette smoking, and risk of infant leukemia: a Childrens Cancer Group study. *JNCI-J Natl Cancer I.* 1996; 88(1): 24-31.
3. Orsi L, Rudant J, Ajrouche R, Leverger G, Baruchel A, Nelken B, et al. Parental smoking, maternal alcohol, coffee and tea consumption during pregnancy, and childhood acute leukemia: the ESTELLE

- study. *Cancer Cause Control*. 2015; 26(7): 1003-1017.
4. Metayer C, Petridou E, Aranguré JMM, Roman E, Schüz J, Magnani C, et al. Parental tobacco smoking and acute myeloid leukemia: the childhood leukemia international consortium. *Am J Epidemiol*. 2016; 184(4): 261-273.
 5. Chang JS, Selvin S, Metayer C, Crouse V, Golembesky A, Buffler PA. Parental smoking and the risk of childhood leukemia. *Ame J Epidemiol*. 2006; 163(12): 1091-1100.
 6. van Duijn CM, van Steensel-Moll HA, Coebergh J, van Zanen GE. Risk factors for childhood acute non-lymphocytic leukemia: an association with maternal alcohol consumption during pregnancy? *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*. 1994; 3(6): 457-460.
 7. Menegaux F, Steffen C, Bellec S, Baruchel A, Lescoeur B, Leverger G, et al. Maternal coffee and alcohol consumption during pregnancy, parental smoking and risk of childhood acute leukaemia. *Cancer Detect Prev*. 2005; 29(6): 487-493.
 8. McNally RJ, Parker L. Environmental factors and childhood acute leukemias and lymphomas. *Leukemia Lymphoma*. 2006; 47(4): 583-598.
 9. Ferreira JD, Couto AC, Emerenciano M, Pombo-de-Oliveira MS, Koifman S. Maternal alcohol consumption during pregnancy and early age leukemia risk in Brazil. *Biomed Res Int*. 2015; ID 732495: 1-9.
 10. Yu CM. Occupational exposure to pesticides towards the danger of childhood leukemia in China. *Biomed Res*. 2018; 29(1): 9-14.
 11. Van Maele-Fabry G, Lantin AC, Hoet P, Lison D. Residential exposure to pesticides and childhood leukaemia: a systematic review and meta-analysis. *Environ Int*. 2011; 37(1): 280-291.
 12. Van Maele-Fabry G, Gamet-Payraastre L, Lison D. Household exposure to pesticides and risk of leukemia in children and adolescents: Updated systematic review and meta-analysis. *Int J Hyg Env Health*. 2019; 222(1): 49-67.
 13. Pérez-Saldivar ML, Fajardo-Gutiérrez A, Sierra-Ramírez JA, Núñez-Villegas N, Pérez-Lorenzana H, Dorantes-Acosta EM, et al. Parental exposure to workplace carcinogens and the risk of development of acute leukemia in infants. Case-control study. *Arch Med Res*. 2016; 47(8): 684-693.
 14. O'Leary LM, Hicks AM, Peters JM, London S. Parental occupational exposures and risk of childhood cancer: a review. *Am J Ind Med*. 1991; 20(1): 17-35.
 15. Maryam Z, Sajad A, Maral N, Zahra L, Sima P, Zeinab A, et al. Relationship between exposure to pesticides and occurrence of acute leukemia in Iran. *Asian Pac J Cancer Prev*. 2015; 16(1): 239-44.
 16. Oancea SC, Rundquist BC, Simon I, Swartz S, Zheng Y, Zhou X, et al. County level incidence rates of chronic lymphocytic leukemia are associated with residential radon levels. *Future Oncol*. 2017; 13(21): 1873-1881.
 17. Schüz J, Erdmann F. Environmental exposure and risk of childhood leukemia: an overview. *Arch Med Res*. 2016; 47(8): 607-614.
 18. Tong J, Qin L, Cao Y, Li J, Zhang J, Nie J, et al. Environmental radon exposure and childhood leukemia. *J Toxicol Env Heal B*. 2012; 15(5): 332-347.
 19. Ha M, Hwang S, Kang S, Park NW, Chang BU, Kim Y. Geographical correlations between indoor radon concentration and risks of lung cancer, non-Hodgkin's lymphoma, and leukemia during 1999–2008 in Korea. *Int J Env Res Public Health*. 2017; 14(4): 344.
 20. Schwartz GG, Klug MG. Incidence rates of chronic lymphocytic leukemia in US states are associated with residential radon levels. *Future Oncol*. 2016; 12(2): 165-174.
 21. Raaschou-Nielsen O. Indoor radon and childhood leukaemia. *Radiat Prot Dosim*. 2008; 132(2): 175-181.
 22. Laurier D, Valenty M, Tirmarche M. Radon exposure and the risk of leukemia: a review of epidemiological studies. *Health Phys*. 2001; 81(3): 272-288.
 23. Teras LR, Diver WR, Turner MC, Krewski D, Sahar L, Ward E, et al. Residential radon exposure and risk of incident hematologic malignancies in the Cancer Prevention Study-II Nutrition Cohort. *Environmen Res*. 2016; 148: 46-54.
 24. SARAD GmbH. Manual for RTM2200-RPM2200-EQF3200-EQF3220-A2M4000. 2012; 1-24.
 25. SARAD GmbH. EQF3220-Radon/Thoron Gas & Decay Product-Monitor for attached and unattached decay products. 2013: 1-3.
 26. Simmonds J, Robinson C, Phipps A. Risks of leukaemia and other cancers in Seascale from all sources of ionising radiation exposure from National Radiological Protection Board Report. 1995.
 27. Harley NH, Robbins ES. Radon and leukemia in the Danish study: another source of dose. *Health Phys*. 2009; 97(4): 343-347.

<저자정보>

박동욱(교수), 최상준(교수), 윤간우(부소장),
김소연(연구원), 김희윤(연구원), 박윤경(대학원생),
김원(측정팀장), 임상혁(전임연구위원),
박지훈(박사후 연구원)