

# Evaluation of Organ Doses in Neonatal Patients During Radiography Examinations Using Monte Carlo Simulation Programs

Eunhye Kim, Cheonghwan Lim\*

Department of Radiological Science, Hanseo University

Received: November 06, 2024. Revised: December 27, 2024. Accepted: December 31, 2024.

## ABSTRACT

The number of patients worldwide undergoing diagnostic radiology is steadily increasing, and there is a significant rise in the number of patients in neonatal intensive care units (NICU) undergoing general radiological diagnostics. Newborns admitted to NICUs often have innate health vulnerabilities or are exposed to infections. Because these neonates are highly sensitive to radiation, effective radiation management based on the ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principle is essential to minimize radiation exposure. This study aimed to assess organ doses received by neonatal patients during radiological examinations using various software tools (PCXMC, MCNP, ALARA-GR, and TLD experiments). Although these software tools allow for easy assessment of organ doses, discrepancies in results present challenges in evaluating their accuracy. Consequently, organ dose assessments were compiled under various conditions, such as the neonate's position inside or outside the incubator during chest or abdominal radiography. Research using ALARA-GR and PCXMC software revealed differences in radiation exposure across various organs during chest and abdominal imaging, with 0-year-old neonates showing higher radiation sensitivity than 1-year-olds. To minimize radiation risks for neonates, it is essential to optimize conditions within the incubator, utilize the canopy appropriately, and conduct targeted imaging rather than unnecessary examinations.

Keywords: Neonatal patients, Organ doses, ALARA-GR, PCXMC, MCNP

## I. INTRODUCTION

의료의 선진화로 인해 방사선을 이용한 촬영 및 진단을 받기 위해 병원을 방문하는 환자의 수가 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 질병관리청 [2023 국민 의료방사선 평가 연보]에 따르면 우리나라 진단방사선 이용 건수는 2007년 1억 6천만 건에서 2023년 3억 9천만 건으로 17년간 2배 이상 상승한 결과를 보여주고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 결과 피폭 선량은 2007년 0.93 mSv에서 2023년 3.13 mSv로 3배 이상 상승하였다<sup>[1]</sup>. 의료방사선검사 중 제일 많은 비율을 차지하는 것이 일반촬영이다. 세계 의료방사선 촬영 건수 또한 1980년부터 2018년까지 지속적인

로 2.4배 이상 증가함을 보여주고 있다<sup>[1-3]</sup>. 이는 전 세계적으로 의료방사선 건수의 증가만을 의미하는 것이 아니라 환자에게 노출되는 선량이 증가하고 있다.

2010년부터 2020년까지 신생아 중환자실 (NICU; Neonatal Intensive Care Unit)에 입원하는 신생아 환자는 2배 이상 증가하는 추세이며, 이에 따른 진단 방사선 촬영 건수도 증가하고 있다<sup>[4]</sup>. 신생아 집중 치료실에 입원하는 환자는 대부분 태어난 직후 집중 치료와 관찰이 필요한 미숙아, 저체중아, 호흡 곤란 증후군, 선천성 기형 또는 감염에 노출된 환자의 경우이며 특별한 의료 장치의 도움을 받아야 하는 경우가 많다<sup>[5]</sup>. 이러한 신생아들이 받는 방사선 촬영 노출은 가능한 한 낮은 선량을 유지

\* Corresponding Author: Cheonghwan Lim E-mail: lch116@hanseo.ac.kr

Tel: +82-10-2495-4228

(ALARA; As Low As Reasonably Achievable)의 원칙에 따라 환자에게 가능한 낮은 선량을 사용하여 촬영을 진행하여 방사선으로부터 신생아를 보호하기 위한 적절한 방사선 관리가 매우 중요하다<sup>[6]</sup>. 이러한 중요성에 질병관리청은 [소아 영상진단 정당성 가이드라인]을 발표하여 소아뿐만 아니라 신생아 환자의 의료방사선 촬영을 진행할 때 정당화와 최적화 원칙에 따라 불필요한 방사선 피폭을 최소화하여 환자에게 노출되는 전체적인 피폭선량을 감소시키기 위해 많은 노력을 하고 있다<sup>[7]</sup>. 현재 다양한 소프트웨어를 통해서 손쉽게 환자의 장기선량을 평가할 수 있다. 이 때 신생아의 장기선량 평가도 진행할 수 있지만 결과값이 상이하여 각 프로그램의 정확성을 파악하는 데 어려움이 따른다. 이에 따라 연구에서는 다양한 프로그램을 이용하여 신생아 환자들에게 노출되는 유효선량 및 장기선량 평가를 통해 신생아에게 노출되는 장기선량 값을 계산하고 경향성을 파악하고자 하였다. 또한 인큐베이터 내부 또는 외부에 위치함에 따라 신생아 환자에게 노출되는 장기선량 변화를 알아보고자 하였고, 흉부 또는 복부 촬영에 따른 장기선량 변화를 평가하고자 하였다.

## II. MATERIAL AND METHODS

신생아 환자에게 노출되는 장기선량을 평가하기 위해 다양한 방법을 이용하였으며, 이에 따른 장기선량 결과 값을 비교하고 경향성을 파악하고자 하였다. 먼저 연구팀에서 이전에 진행했던 인큐베이터 구조에 따른 신생아의 장기선량 평가의 결과에 따라 환자에게 노출되는 장기선량이 가장 낮았던 조건인 신생아 중환자실에서 평균적으로 사용하는 선량조건으로 60 kVp와 1.25 mAs를, 삼성 포터블 촬영장치 (Samsung AccE GM85, Samsung Healthcare, Seoul, Republic of Korea)의 1.4 mmAl 고유여과, 그리고 이전 연구에서 도출한 환자의 노출선량을 최소화하는 조건인 105 cm Source to Image Distance (SID) 조건을 활용하고, International Commission on Radiological Protection (ICRP) 103 조직가중치를 사용하여 Monte Carlo N-Particle Transport (MCNP) 프로그램에 적용하여 신생아 환

자의 infantogram (흉부 및 복부) 촬영시 장기선량을 도출하였다<sup>[9]</sup>.

지난 실험에서 흉부와 복부 촬영을 분리하여 연구를 진행하지 못한 한계점을 극복하며, 질병관리청과 경희대학교 ALhPS 팀에서 제작한 As Low As Reasonably Achievable-General Radiography (ALARA-GR) 프로그램을 이용하여 0세 또는 1세 환자의 흉부 및 복부 방사선검사 시 노출되는 장기선량을 평가하고자 하였다<sup>[8]</sup>. 이때 검사 조건은 60 kVp와 1.25 mAs를 사용하였고, 1.4 mmAl 고유여과 조건을 활용하였다. 또한 이전 연구에서 도출한 환자의 노출선량을 최소화하는 조건인 105 cm SID와 신생아 환자의 촬영 시 평균적으로 사용하는 5 × 7 inch 조사야를 설정하고 ICRP 103의 조직가중치를 적용하여 선량평가를 진행하였으며, 남과 여를 나누어 계산하였지만, 궁극적으로 결과값이 거의 같아 남성 신생아 환자의 결과 데이터를 이용하여 결론을 도출하고자 하였다<sup>[9]</sup>.

세 번째로 A PC Program for X ray Monte Carlo (PCXMC) 프로그램을 이용하여 0세 아이로 설정하여 두 번째 연구와 동일한 조건을 이용하여 결과를 도출하였다<sup>[10]</sup>.

## III. RESULT

이전에 연구팀에서 진행했던 연구에서는 인큐베이터 구조에 따라 SID와 Object to Image Distance (OID) 설정이 달라지기 때문에 이에 따른 신생아 환자의 장기선량 평가를 진행하였고, 이에 따른 결과로 SID를 증가시키고 OID를 감소시키면 진단에 큰 영향을 미치지 않으면서 신생아 환자의 장기선량을 감소시킬 수 있다고 판단했다. 선량이 가장 적게 노출되는 Hospital C 조건의 결과를 참조했고, 이에 따른 결과로 신장, 피부, 부신, 폐 그리고 비장 순서로 신생아 환자의 장기선량이 높은 것을 볼 수 있다. Table 1과 같다.

질병관리청에서 제작한 ALARA-GR 프로그램을 사용하여 신생아 0세 남, 여 아이와 1세 남, 여 아이의 흉부 및 복부 방사선검사 결과는 아래 Fig. 1과 같다. 0세의 평균 신장과 몸무게는 48 cm와 3 kg으로, 1세의 평균 신장과 몸무게는 77 cm와 10

kg이다. 이러한 신장과 몸무게가 2배와 3배 증가함에 따라 1세 환자에게 노출되는 대부분의 장기선량 값이 0세 보다 낮음을 볼 수 있다. 또한 복부 방사선검사 시 몸 위쪽에 위치한 갑상샘, 유방, 침샘, 심

장, 식도 등의 장기에는 선량 노출이 0.005 mGy 이하였으며, 흉부 방사선검사 시 몸 아래쪽에 위치한 자궁과 고환에는 선량 노출이 거의 없음을 볼 수 있다. Table 1과 같다.

Table 1. Result of organ dose measurements during chest and abdomen radiographic examinations for neonates and adults using five different organ dose assessment methods

Organs (μGy)	C hospital in Incubator	1 yr Male Chest X-ray	1 yr Male ABD X-ray	0 yr Male Chest X-ray	0 yr Male ABD X-ray	1 yr Male PCXMC	Hillgan MA TLD	Hillgan MA PCXMC
Thyroid	0.65	18	0	15	0	16.26	20.10	2.30
Thymus	2.58	12	0	23	1	23.24	24.10	31.50
Heart	4.15	12	1	17	2	20.21	29.00	49.20
Esophagus	5.68	6	0	10	2	1.88	14.60	12.50
Lung	11.57	10	0	15	3	15.81	21.30	21.60
Stomach	1.64	6	6	15	15	21.17	28.00	30.30
Liver	5.41	8	7	15	13	18.84	27.70	27.00
Bile	0.46	5	12	24	25	18.15	25.10	23.20
Kidney	16.09	2	3	9	9	7.03	12.20	7.50
Adrenals	14.64	3	1	6	5	7.04	15.00	8.00

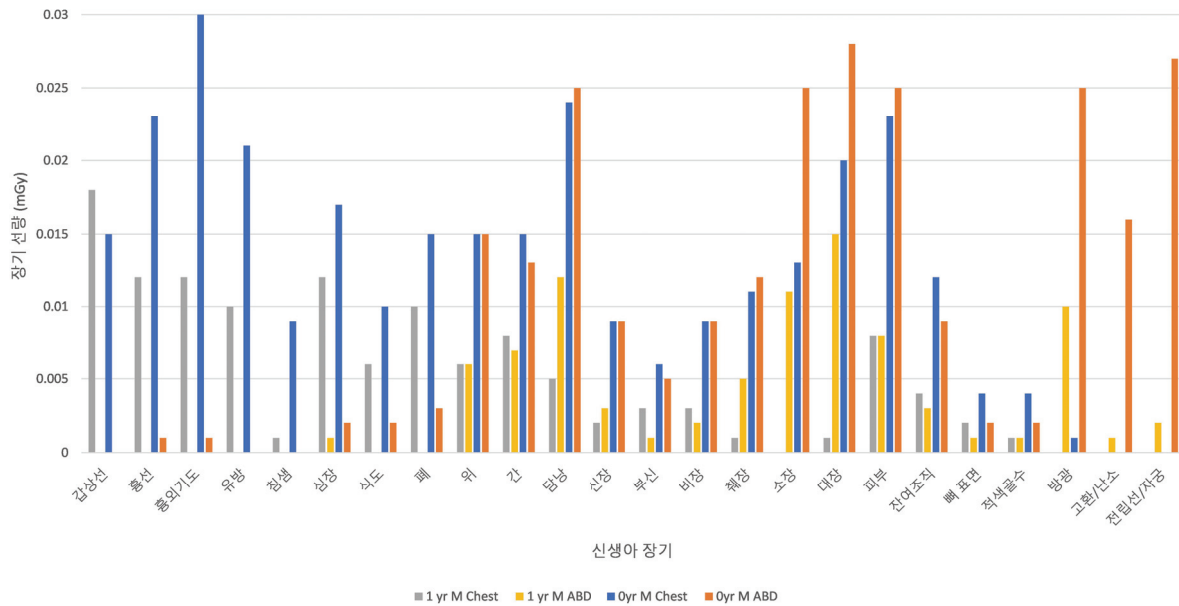


Fig. 1. Organ dose results during radiographic examinations utilizing the ALARA-GR program.

#### IV. DISCUSSION

신생아 중환자실에 입원한 아이들은 대부분 극저체중으로 태어나 인큐베이터 내에서 생활하게 된다. 아이들의 최상의 컨디션을 유지하기 위해 인큐베이터 내에서 다양한 치료 및 진료가 이루어지게 되는데, 이때 평균 10회 이상의 일반 방사선검

사도 진행되게 된다<sup>[11,12]</sup>. 이전에 본 연구팀에서 진행하였던 연구에서 인큐베이터 구조에 따라 OID와 SID가 달라짐을 확인하였고 이에 따른 신생아 장기선량 평가를 진행하였다<sup>[9]</sup>. 그 결과로 인큐베이터 구조에 따라 OID와 SID 설정이 달라지게 되고, SID를 증가시키면 진단에 큰 영향을 미치지 않으면서 전체적인 장기선량을 감소시키지만, 영상의

영상 확대에 영향을 끼칠 수 있기 때문에 적절한 SID 설정이 요구되는 바이며, 환자와 디텍터 홀더까지의 거리인 OID의 거리가 짧아질수록 그리고 캐노피 뚜껑이 존재할수록 신생아 환자에게 노출되는 장기선량의 감소를 확인하였으며, 이에 따른 적절한 인큐베이터 구조의 사용을 제안한 바가 있다<sup>[13]</sup>. 하지만 이전 연구에도 한계점이 따른다. 신생아 환자의 촬영을 흉부와 복부로 나누어 진행하지 못한점, 이에 따른 환자의 장기선량 노출을 판단하지 못한점이다. 인큐베이터 내와 같은 조건에서 촬영을 진행할 때 흉부와 복부 촬영에 따른 신생아 장기선량 평가를 ALARA-GR 프로그램을 활용하여 추가로 진행하였고, 그에 따른 결과를 도출하였다.

ALARA-GR는 MCNP를 기반으로 하는 장기선량 평가 소프트웨어로 설정한 엑스선 장비의 조건에 따라, 환자의 장기 크기와 무게에 따라, 그리고 선량의 세기에 따라 노출되는 선량 값의 차이가 있게 된다<sup>[8,10]</sup>. 그러한 이유로 결과는 조금씩 다르게 나타났지만, 전체적으로 환자의 장기에 노출된 선량의 추이를 비교할 수 있었다. 흉부 촬영시 갑상선, 흉선, 심장, 폐 등과 같은 조직에서 높은 선량에 노출됨을 확인할 수 있었고, 이는 인큐베이터 내에 위치하여 infantogram을 촬영한 경우보다 1세 환자의 경우 쓸개에 11배 그리고 갑상선에 28배 더 노출됨을 볼 수 있었다. 이 때 0세 환자인 경우 갑상샘에 23배 그리고 쓸개에 52배 더 노출됨을 볼 수 있었다. 한편 신생아 환자의 복부 촬영시 쓸개, 간, 위 등과 같은 조직에서 높은 선량에 노출됨을 확인할 수 있었고, 이는 인큐베이터 내에 위치하여 infantogram을 촬영한 경우보다 1세 환자의 경우 쓸개에 26배 더 노출됨을, 0세 환자인 경우 쓸개에 52배 더 노출됨을 볼 수 있었다. 이는 흉부 또는 복부 촬영의 경우 1세 환자보다 0세 환자의 쓸개에 방사선 민감도가 더 높음을 볼 수 있었다.

추가로 인큐베이터 외에 위치한 신생아 환자의 장기선량을 평가하기 위해 Hillgan Ma 연구팀이 진행한 신생아 팬텀에 위치시킨 TLD 선량계를 통하여 장기선량 값을 도출한 값 그리고 같은 조건에서 PCXMC 값 결과를 도출하여 본 연구의 결과와 비

교하고자 하였다<sup>[14,15]</sup>. 마지막으로 PCXMC 프로그램을 통하여 ALARA-GR에서 사용했던 것과 같은 조건을 입력한 후 전체적인 선량의 추이를 확인하고자 하였고, 이에 따른 인큐베이터 내 또는 외에 위치한 조건에 따른 흉부 또는 복부 검사에 따른 장기선량 값의 경향성을 판단하고자 하였다.

Hillgan Ma 연구팀에서 진행한 TLD 실험과 PCXMC 실험 결과, TLD는 방광, 대장, 심장, 폐 그리고 위 순서로, PCXMC는 심장, 흉선, 위, 간, 그리고 방광 순서로 높은 선량에 노출되었다. 마지막으로 PCXMC 프로그램을 이용하여 같은 조건에서 인큐베이터 외에 위치한 신생아 환자의 장기선량 노출 평가를 진행하였고, 이에 따른 결과로 흉선, 위, 방광, 심장, 그리고 간 순서로 높은 선량에 노출됨을 볼 수 있다.

연구팀에서 실시한 이전 연구의 결과의 장기선량 값이 다른 조건들의 장기선량 값보다 전체적으로 낮게 나왔는데, 이는 신생아가 위치한 인큐베이터는 상부에 아크릴 재질의 캐노피가 위치하여 방사선 촬영 시 전체적으로 감약되어 환자에게 노출된다고 판단할 수 있다. 이는 신생아 환자의 포터블 방사선 촬영시 인큐베이터 캐노피를 열고 촬영하는 대신 인큐베이터 상부에서 캐노피를 닫은 채로 100 cm 이상의 SID를 유지한 후 촬영을 진행할 경우 전체적으로 신생아 환자의 장기선량 노출을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 ALARA-GR 프로그램을 통해 진행한 흉부 또는 복부 촬영의 결과 신체의 상부 또는 하부에 선량 노출의 증가를 볼 수 있었지만 촬영을 진행하지 않는 장기에는 낮은 선량 노출을 볼 수 있었다. 이는 신생아 환자의 생명징후를 판단하기 위해 매번 infantogram을 진행하는 것이 아니라 목적에 맞는 흉부 또는 복부 검사를 진행하여야 할 것이며, 궁극적으로 신생아 환자의 방사선 촬영을 줄이기 위해서 노력해야 할 것이다.

이 연구는 실제 신생아 환자를 대상으로 진행한 실험이 아닌, 전산모사 팬텀을 이용하여 진행한 실험에 대한 결과라는 한계점을 가지고 있다.

이에 따라 인큐베이터와 이동형 방사선발생장치의 특성에 따라 방사선검사를 진행할 때 신생아는

성인보다 그리고 인큐베이터 내에 위치하지 않은 신생아보다 낮은 선량에 노출됨을 알 수 있다. 하지만 성인보다 방사선 노출에 따른 염색체 손상 확률이 더 높고 중환자이므로 병의 진행 상황을 확인하기 위해 자주 방사선검사를 진행하기 때문에, 되도록이면 장기에 노출되는 선량을 낮춰서 방사선검사를 진행하는 것이 바람직하다.

## V. CONCLUSION

연구 결과는 신생아의 장기에 노출된 선량은 매개변수와 인큐베이터 설계의 조건에 따라 달라짐을 볼 수 있다. 이러한 결과로 인큐베이터 내에 위치한 신생아가 일반적으로 아크릴 캐노피의 감쇠로 더 낮은 방사선 노출을 받는다는 것을 확인하였다. ALARA-GR 및 PCXMC를 포함한 다양한 평가 프로그램을 비교한 결과, 일부 변형이 존재하지만 장기 노출에서 일관된 패턴이 관찰되는 것으로 나타났다. 인큐베이터 구조의 설정과 장비의 조정은 노출을 줄이는 데 도움이 될 수 있지만, NICU 환자의 잦은 방사선 촬영은 환자의 높은 민감도로 인해 잠재적인 방사선 위험을 완화하기 위해 신중한 관리가 필요하다고 사료된다.

## Reference

- [1] Korea Disease Control and Prevention Agency, 2023 National Medical Radiation Assessment Yearbook, Korea Disease Control and Prevention Agency, 2023.
- [2] M. Martella, J. Lenzi, M. M. Gianino, "Diagnostic Technology: Trends of Use and Availability in a 10-Year Period (2011–2020) among Sixteen OECD Countries", *Healthcare*, Vol. 11, No. 14, pp. 2078, 2023. <http://dx.doi.org/10.3390/healthcare11142078>
- [3] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), *Health at a Glance 2023*, Paris: OECD Publishing, OECD, 2023.
- [4] Korean Statistical Information Service (KOSIS), *National Health Insurance Statistical Yearbook 2010-2020*, National Health Insurance Corporation, 2021.
- [5] J. P. Baker, *The Machine in the Nursery: Incubator Technology and the Origins of Newborn Intensive Care*, Johns Hopkins University Press, 1996.
- [6] A. J. Gislason-Lee, "Patient X-ray exposure and ALARA in the neonatal intensive care unit: Global patterns", *Pediatrics and Neonatology*, Vol. 62, No. 1, pp. 3-10, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pedneo.2020.10.009>
- [7] Korean Society of Radiology, *Guidelines for the Justification of Pediatric Imaging Diagnostics*, Korean Society of Radiology, 2023.
- [8] Advanced Laboratory for Health Physics Studies, *ALARA-GR program user manual*, Korea Disease Control and Prevention Agency, 2019. Retrieved from; <https://www.kdca.go.kr/board/board.es?mid=a2030505000&bid=0003>
- [9] E. Kim, H. Park, K. Kim, Y. Yoon, C. Lim, J. Kim, "Evaluation of radiation dose to organs of neonatal patients during portable X-ray examination in incubators: A Monte Carlo simulation study", *Journal of X-Ray Science and Technology*, Vol. 30, No. 2, pp. 333-342, 2022. <http://dx.doi.org/10.3233/XST-211091>
- [10] M. Tapiovaara, T. Siiskonen, "PCXMC: A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical X-ray examinations", STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland, 2008.
- [11] J. Lee, S. Jang, Y. Jang. "Medical radiation exposure in children CT and dose reduction", *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 14, No. 1, pp. 356-363, 2014.
- [12] A. Y. Jung, "Medical radiation exposure in children and dose reduction", *Journal of the Korean Medical Association*, Vol. 54, No. 12, pp. 1277-1283, 2011. <https://doi.org/10.5124/jkma.2011.54.12.1277>
- [13] D. N. DeMaio, T. Herrmann, L. B. Noble, D. Orth, P. Peterson, J. Young, T. G. Odle, *Best practices in digital radiography*, American Society of Radiologic Technologists, 2012.
- [14] H. Ma, I. A. Elbakri, M. Reed, "Estimation of organ and effective doses from newborn radiography of the chest and abdomen", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 156, No. 2, pp. 160-167, 2013. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/nct050>
- [15] M. T. Toosi, H. Zare, "An assessment of absorbed organ dose arising from conventional diagnostic x-ray examinations by monte carlo simulation (mcnp-4c code)", *International Radiation Protection Association*, 2004.



## 전사모사 프로그램을 이용한 신생아 환자의 방사선 검사 시 조건에 따른 환자의 장기선량 평가

김은혜, 임청환\*

한서대학교 방사선학과

### 요 약

전세계적으로 방사선검사를 통해 진단을 받는 환자의 수가 증가하고 있는 추세이며, 이 중에서 신생아 중환자실에 입원하여 일반 방사선검사를 통해 진단을 받는 환자의 수도 급격히 증가하고 있다. 신생아 중환자실에 입원한 신생아들은 건강이 선천적으로 취약하거나, 감염에 노출되어 있는 경우가 많다. 이러한 신생아들은 방사선에 취약하기 때문에 방사선으로부터 신생아를 보호하기 위한 방사선검사 노출을 최소화할 수 있는 ALARA (합리적으로 달성 가능한 낮은 수준으로) 원칙에 따른 효과적인 방사선 관리가 필요하다. 이 연구에서는 방사선 노출로부터 신생아 환자의 장기에 노출되는 선량을 다양한 소프트웨어를 통해 평가하고자 하였다 (PCXMC, MCNP, ALARA-GR, TLD 실험). 다양한 소프트웨어를 통해서 손쉽게 환자의 장기선량을 평가할 수 있지만, 결과 값이 상이하여 프로그램의 정확성을 판단하는데 어려움이 있다. 이러한 이유로 인큐베이터 내부 또는 외부에 신생아 환자가 위치함에 따라, 흉부 또는 복부 진단 방사선 촬영에 따른 장기선량 평가 등 다양한 조건에 따른 장기선량 결과를 정리하였고, 이에 따른 경향성을 파악하고자 하였다. ALARA-GR 및 PCXMC 소프트웨어를 사용한 연구 결과, 흉부 및 복부 촬영 시 신체 부위별 방사선 노출 차이가 있으며, 특히 0세 신생아가 1세보다 더 높은 방사선 민감도를 보였다. 인큐베이터 내에서 적절한 조건과 캐노피 사용을 통해 방사선 노출을 줄이고, 불필요한 검사 대신 목적에 맞는 촬영을 진행하여 신생아의 방사선 위험을 최소화해야 한다.

중심단어: 신생아 환자, 장기선량, ALARA-GR, PCXMC, MCNP

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김은혜	한서대학교 방사선학과	조교수
(교신저자)	임청환	한서대학교 방사선학과	정교수