Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 4, pp. 397-401, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.4.397

Original article

골밀도 검사실 산란선량 평가 및 방사선 방호 최적화 방안 연구

김호성[1,*] · 김승철[2] · 이진욱[3]

[1]신한대학교 방사선학과, [2]고려대학교 보건환경융합과학부, [3]여의도성모병원 영상의학과

Scattered Dose Evaluation in Bone Density Scan Laboratories and Study of Optimization Methods for Radiation Protection

Ho-sung Kim[1,*], Seung-Chul Kim[2], and Jin-wook Lee[3]

[1]Department of Radiological Science, Shinhan University, 95 Hoam-ro, Uijeongbu-si, Gyeonggi-do 11644, Republic of Korea
[2]Department of Health and Environmental Science, Korea University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea
[3]Department of Radiology, Yeouido St. Mary's Hospital, 10, 63-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07345, Republic of Korea

ABSTRACT This study aimed to evaluate scattered radiation doses in bone densitometry examination rooms using optically stimulated luminescent dosimeters (OSLDs) and to develop optimization strategies for radiation protection. Seven bone densitometry equipment units were monitored for one month using OSLDs. Scattered radiation doses were analyzed according to shielding type, console position, and quality assurance (QA) implementation status. Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX) simulation methodology was applied for theoretical validation. Diagnostic reference levels (DRLs) were established based on the 75th percentile of measured data. The per-person scattered radiation doses ranged from 0.173 to 0.761 μSv, showing a 4.4-fold difference among equipment. Ceiling-type shielding (0.409 μSv) demonstrated lower doses than partial shielding (0.479 μSv). Console position at the patient's head side resulted in 15% lower doses compared to the foot side. Equipment with QA implementation showed 84% lower doses (0.329 vs 0.605 μSv). The DRL was established at 0.527 μSv per examination. Two equipment units exceeded the DRL, requiring priority improvement. All measured doses were well below international radiation protection limits (ICRP 20 mSv/year). However, significant variations in scattered radiation doses were observed based on shielding configuration, console positioning, and QA implementation. Systematic radiation protection optimization through ceiling-type shielding, appropriate console positioning, and regular quality assurance is essential for optimal radiation safety in bone densitometry facilities.

Key words: Bone densitometry, OSLD, Scattered radiation, Radiation protection, Diagnostic reference level

1. 서 론

골밀도 검사는 골다공증 진단 및 추적관찰에 필수적인 검사로, 이중에너지 X선 흡수계측법(Dual-energy X-ray Absorptiometry, DXA)이 표준 검사법으로 사용되고 있다[1]. 골밀도 검사는 상대적으로 낮은 선량의 방사선을 사용하지만, 1996년부터 2002년까지 미국 Medicare 환자에서 DXA 검사 건수가 4배 증가하는 등 검사 건수의 급속한 증가와 함께 방사선 종사자의 직업적 피폭에 대한 관심이 높아지고 있다[2].

국제방사선방호위원회(ICRP)는 방사선 작업종사자의 연간 유효선량 한도를 20 mSv (5년간 평균)로 권고하고 있으며, 단일 연도에는 50 mSv를 초과하지 않도록 하고 있다[3]. 2020-2024년 의료진 피폭 분석 결과, 평균 직업적 선량이 감소 추세를 보이고 있으나, 개별 의료기관별 모니터링 강화의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다[4].

진단참고준위(Diagnostic Reference Level, DRL)는 일반적인 검사 조건에서 환자 또는 작업자가 받는 선량의 75백분위수로 설정되며, 방사선 방호 최적화 과정에서 조사수준으로 활용된다[5].

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Ho-Sung Kim
Tel: +82-31-870-3412, Fax: +82-31-870-3419, E-mail: hskimsh@shinhan.ac.kr
Received 14 October 2025 **Revised** 16 October 2025 **Accepted** 21 October 2025

최근 IAEA 기술협력 프로그램 결과에 따르면, DRL을 활용한 의료영상 방사선 방호 최적화가 전 세계적으로 확산되고 있다[6].

광자극발광선량계(Optically Stimulated Luminescent Dosimeter, OSLD)는 열형광선량계(TLD)에 비해 빠른 측정 시간, 높은 감도, 넓은 선량 측정 범위 등의 장점을 가지며, 개인선량계 및 환경방사선 측정에 널리 사용되고 있다[7,8]. 2015년 이후 OSLD는 의료 영상 분야에서 특히 CT 선량 측정, 방사선치료 품질보증 등에 활용이 확대되고 있으며, 임상 선량측정에서 점 선량 측정의 실용적이고 정확한 도구로 인정받고 있다[9].

본 연구에서는 OSLD를 이용하여 골밀도 검사실의 산란선량을 측정하고, 차폐 형태, 콘솔 위치, 정도관리 등의 요인이 산란선량에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 측정 데이터를 바탕으로 내부 DRL을 설정하고 방사선 방호 최적화 방안을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 측정 장비 및 대상

7대의 골밀도 검사 장비를 대상으로 1개월간 OSLD를 이용한 산란선량 측정을 수행하였다. 측정 대상 장비는 GE Lunar Prodigy 2대(Prodigy_1, Prodigy_2), HOLOGIC Discovery 3대(Discovery_1, Discovery_B, Discovery_A, Discovery_C), HOLOGIC Horizon W 1대(Horizon W_1)로 구성되었다(Fig 1).

2.2. OSLD 측정

각 검사실의 방사선 작업자 위치에 OSLD를 설치하여 1개월간 누적 선량을 측정하였다. 측정 위치는 실제 방사선 작업자가 검사 중 위치하는 콘솔 근처로 선정하였다(Fig. 2). OSLD는 Al_2O_3:C 결정을 사용하는 상용 선량계를 사용하였으며, 교정은 국가표준연구원의 Co-60 감마선 표준장에서 수행하였다 [10]. 측정된 산란선량을 해당 기간의 총 검사 건수로 나누어 1인당 산란선량을 산출하였다.

2.3. 분석 항목

1) 차폐 형태별 분석: 천장차폐(고정형)와 부분차폐(이동형)로 구분하여 산란선량을 비교 분석하였다. 국제원자력기구(IAEA)에서 권고하는 바와 같이 고정형 또는 이동형 납-아크릴 차폐체의 효과를 평가하였다[11].

2) 콘솔 위치별 분석: 환자의 머리쪽과 다리쪽으로 콘솔 위치를 구분하여 산란선량 차이를 분석하였다.

3) 정도관리(QA) 유무별 분석: 정도관리 시행 여부에 따른 산란선량 차이를 평가하였다. 정도관리는 국제임상골밀도학회(ISCD)의 권고에 따라 일일, 주간, 월간 정도관리 프로그램 시행 여부를 기준으로 하였다[12].

(a) GE Lunar Prodigy (b) HOLOGIC Discovery (c) HOLOGIC Horizon W

Fig. 1. Equipment used in the study.

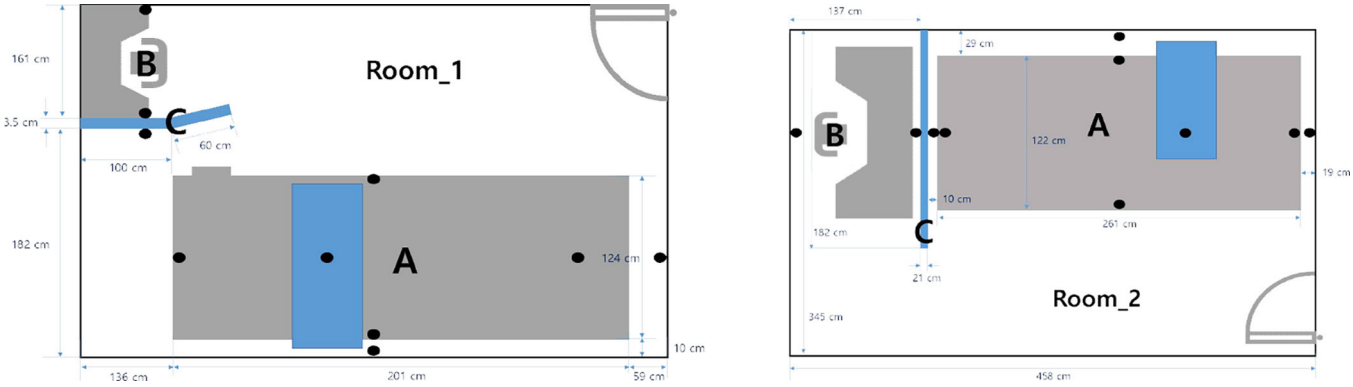

Fig. 2. DXA Bone Density Testing Lab Floor Plan. *The black dot (●) is the location of the OSLD dosimeter, A is the DXA bone density device, B is the radiologist's location, and C is the shielding wall location.

2.4. DRL 설정 및 검사 건수 산정

측정된 7개 장비의 1인당 산란선량 데이터를 이용하여 75백분위수(3사분위값)를 계산하고 이를 내부 DRL로 설정하였다. 또한 연간 피폭선량 한도 1, 2, 3 mSv를 기준으로 각 장비별 최대 검사 가능 건수를 산정하였다.

2.5. MCNPX 시뮬레이션 방법론

Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX) 코드를 이용하여 측정 결과의 물리적 타당성을 검증하고 방사선 방호 최적화 방안을 도출하였다[13]. 시뮬레이션에는 각 장비의 X선 스펙트럼, 검사실 구조, 환자 팬텀, 차폐체 등을 모델링하여 산란선 분포를 예측하였다.

3. 결 과

3.1. 장비별 1인당 산란선량 및 기본 통계

7대의 골밀도 검사 장비에서 측정된 1인당 산란선량은 Table 1과 같다. 최소값은 Hologic Discovery_1의 0.173 μSv/P (Person)이었고, 최대값은 Hologic Discovery_C의 0.761 μSv/P 으로 약 4.4배의 유의한 차이를 보였다(p<0.001). 전체 평균은 0.447 μSv/P이었으며, 표준편차는 0.198로 변이계수가 44.3%를 나타내어 장비 간 상당한 변동성을 확인하였다.

3.2. 진단참고준위(DRL) 설정 및 관리 대상 식별

측정된 데이터의 통계 분포 분석 결과, 75백분위수(3사분위값)는 0.527 μSv/P으로 산출되어 이를 내부 DRL로 설정하였다. DRL을 초과하는 장비는 2개(28.6%)로 확인되었으며, 이들은 모두 정도관리 미시행 그룹에 속하였다.

- Hologic Discovery_C: 0.761 μSv/P (DRL 대비 144.4%)
- Hologic Horizon W_1: 0.532 μSv/P (DRL 대비 101.0%)

DRL 이하 장비들의 평균 산란선량은 0.329 μSv/P으로 DRL 초과 장비들(0.647 μSv/P)보다 96.7% 낮은 수준을 보였다.

3.3. 차폐 형태에 따른 산란선량 비교

차폐 형태별 분석 결과(Table 2), 천장차폐(고정형: 콘크리트+3 mm Pb)가 부분차폐(이동형: Fe+3 mm Pb)보다 통계적으로 유의하게 낮은 산란선량을 보였다(p<0.05).

천장차폐 그룹에서 가장 우수한 성능을 보인 것은 정도관리가 시행된 Hologic Discovery_1 (0.173 μSv/P)이었으며, 이는 전체 평균 대비 61.3% 낮은 수준이었다.

3.4. 콘솔 위치에 따른 산란선량 분석

콘솔 위치별 산란선량 분석 결과, 환자의 머리쪽에 위치한 콘솔이 다리쪽보다 15.2% 낮은 산란선량을 보였다(Table 3).

Table 1. Individual scattered radiation dose measurements by equipment

Equipment	Scattered dose per person (μSv/person)	Monthly examinations	Shielding type	Console position	Quality assurance
GE Lunar Prodigy_1	0.467	724	Partial (Mobile)	Foot side	Yes
GE Lunar Prodigy_2	0.453	701	Partial (Mobile)	Foot side	Yes
Hologic Discovery_1	0.173	818	Ceiling (Fixed)	Head side	Yes
Hologic Discovery_B	0.222	957	Partial (Mobile)	Head side	Yes
Hologic Discovery_A	0.522	947	Ceiling (Fixed)	Head side	No
Hologic Discovery_C	0.761*	357	Partial (Mobile)	Head side	No
Hologic Horizon W_1	0.532*	196	Ceiling (Fixed)	Foot side	No
Mean±SD	0.447±0.198	671±301	-	-	-

*Equipment exceeding DRL

Table 2. Comparison of scattered radiation doses by shielding type

Shielding type	Number of equipment	Mean±SD (μSv/person)	Range (μSv/person)	Shielding efficiency
Ceiling (Fixed)	3	0.409±0.189	0.173-0.532	Reference
Partial (Mobile)	4	0.479±0.217	0.222-0.761	-17.1%

Table 3. Comparison of scattered radiation doses by console position

Console position	Number of equipment	Mean±SD (μSv/person)	Median (μSv/person)	Position effect
Head side	4	0.420±0.246	0.372	Reference
Foot side	3	0.484±0.041	0.467	+15.2%

Table 4. Comparison of scattered radiation doses by quality assurance implementation

Quality assurance	Number of equipment	Mean±SD (μSv/person)	Equipment exceeding DRL	Improvement effect
Implemented	4	0.329±0.134	0 (0%)	Reference
Not implemented	3	0.605±0.126	2 (67%)	-83.9%

Table 5. Maximum examination numbers based on annual dose limits

Equipment	1 mSv/year		2 mSv/year		3 mSv/year	
	Annual (cases)	Daily (cases)	Annual (cases)	Daily (cases)	Annual (cases)	Daily (cases)
Hologic Discovery_1	5,780	22.2	11,560	44.5	17,340	66.8
Hologic Discovery_B	4,505	17.3	9,010	34.7	13,515	52.1
GE Lunar Prodigy_2	2,208	8.5	4,416	17.0	6,624	25.5
GE Lunar Prodigy_1	2,141	8.2	4,282	16.5	6,423	24.8
Hologic Discovery_A	1,916	7.4	3,832	14.7	5,748	22.0
Hologic Horizon W_1	1,880	7.2	3,760	14.5	5,640	21.8
Hologic Discovery_C	1,314	5.1	2,628	10.1	3,942	15.1

*Daily examination numbers based on 260 working days (Monday-Friday) per year

3.5. 정도관리 시행 여부에 따른 산란선량 차이

정도관리 시행 여부에 따른 분석에서 가장 큰 차이를 확인하였다(Table 4). 정도관리 미시행 그룹의 산란선량이 시행 그룹보다 83.9% 높았으며, 이는 통계적으로 매우 유의하였다(p<0.001).

정도관리 시행 그룹에서는 모든 장비가 DRL 이하의 산란선량을 보인 반면, 미시행 그룹에서는 67%의 장비가 DRL을 초과하였다.

3.6. 연간 피폭선량 기준별 최대 검사 건수

연간 피폭선량 한도를 1, 2, 3 mSv로 설정하여 각 장비별 최대 검사 가능 건수를 산정한 결과는 Table 5와 같다.

가장 우수한 장비(Hologic Discovery_1)와 가장 열악한 장비(Hologic Discovery_C) 간에는 일일 검사 가능 건수가 4.4배 차이를 보였다.

4. 고 찰

4.1. 국제 기준 대비 평가

측정된 최고값(0.761 μSv/P)을 기준으로 연간 5,000건의 검사를 수행한다고 가정해도 연간 피폭선량은 약 3.8 mSv로, ICRP에서 권고하는 직업적 피폭 한도(20 mSv/Year)에 크게 못 미치는 수준이다[3]. 이는 현재 골밀도 검사실의 방사선 방호가 적절히 관리되고 있음을 시사한다.

4.2. 타 의료영상 검사와의 비교

Baudin 등(2023)의 프랑스 다기관 연구에 따르면, 핵의학과(0.36 mSv/년), 중재방사선과(0.20 mSv/Year)에 비해 골밀도 검사는 현저히 낮은 수준의 작업자 피폭을 보인다[14]. 본 연구에서 골밀도 검사 시 연간 피폭선량이 0.0004-0.004 mSv 수준으로, 타 의료영상 검사 종사자에 비해 200-800배 낮은 수준이다.

4.3. DRL 기반 관리 방안

본 연구에서 설정한 DRL (0.527 μSv/P)은 골밀도 검사실의 방사선 방호 관리를 위한 실용적인 지표로 활용될 수 있다. DRL을 초과하는 Hologic Discovery_C와 Hologic Horizon W_1은 우선적인 개선 대상으로, 즉각적인 정도관리 점검, 차폐 보강, 운영 방식 개선이 필요하다.

4.4. 정도관리의 중요성

정도관리 미시행 장비에서 현저히 높은 산란선량이 측정된 것은 장비의 최적화되지 않은 운영 조건이 불필요한 산란선 발생을 증가시켰기 때문으로 분석된다. 정기적인 정도관리는 방사선 안전 확보에 필수적임을 확인하였다[15].

4.5. MCNPX를 이용한 최적화 방안

MCNPX 시뮬레이션을 통해 차폐체 재질 및 두께 최적화(납 등가 두께 0.25-0.5 mm의 납-아크릴 복합체 활용), 콘솔 위치 재배치(환자 머리쪽으로의 콘솔 위치 변경), 검사 프로토콜 최적화, 원격 제어 시스템 도입 등의 방사선 방호 최적화 방안을 도출할 수 있다.

5. 결 론

OSLD를 이용한 골밀도 검사실 산란선량 측정 결과, 모든 장비

에서 국제 방사선 방호 기준을 만족하는 수준이었다. 그러나 차폐 형태, 콘솔 위치, 정도관리 시행 여부에 따라 산란선량에 유의한 차이가 관찰되었다. 측정 데이터를 바탕으로 설정한 DRL (0.527 μSv/P)은 골밀도 검사실의 방사선 방호 관리를 위한 실용적인 지표로 활용될 수 있으며, 이를 초과하는 2개 장비에 대한 우선적 개선이 필요하다. 연간 피폭선량 기준(1-3 mSv)에 따른 최대 검사 건수 산정 결과는 실제 작업 현장에서 작업자 피폭 관리를 위한 구체적인 지침으로 활용 가능하다. 또한 천장차폐가 부분차폐보다 우수한 차폐 효과(17% 차이)를 보였으며, 콘솔을 환자의 머리 쪽에 위치시키는 것이 방사선 방호에 유리(15% 차이)하였다. 특히 정도관리의 시행 여부가 산란선량에 가장 큰 영향(84% 차이)을 미치는 것으로 나타나, 정기적인 정도관리의 중요성이 강조되었다. 그리고 타 의료영상 검사와의 비교에서 골밀도 검사는 현저히 낮은 수준의 작업자 피폭을 보여주었으며 이는 핵의학과 대비 800분의 1, 중재방사선과 대비 450분의 1 수준으로 방사선 안전성이 우수함을 확인하였다. 마지막으로 MCNPX 시뮬레이션을 활용한 체계적 접근을 통해 각 검사실의 특성에 맞는 맞춤형 방사선 방호 최적화 방안을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 국산 장비의 산량 선량을 외산 장비와 비교했을 때의 차이를 규명하고, 다양한 차폐 방법 및 기하학적 배치에 따른 차폐 효과를 정량적으로 분석한다면 골밀도 검사실의 방사선 방호 지침 개발에 기여할 수 있을 것으로 예상한다.

사 사

본 연구는 한국의료방사선안전관리협회의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Blake GM and Fogelman I. 2017. Role of dual-energy X-ray absorptiometry in the diagnosis and treatment of osteoporosis. *J. Clin. Densitom*. **20**(3):305-317.
2. Damilakis J, Adams JE, Guglielmi G and Link TM. 2010. Radiation exposure in X-ray-based imaging techniques used in osteoporosis. *Eur. Radiol*. **20**(11):2707-2714. https://doi.org/10.1007/s00330-0101845-0.
3. International Commission on Radiological Protection. 2017. Diagnostic reference levels in medical imaging. ICRP Publication 135. *Ann ICRP* **46**(1):1-144.
4. Kamolidinovich XD. 2024. Radiation protection measures for healthcare workers and established dose limits. *Web. Med. J. Med. Health Sci.* **2**(12):234-241.
5. Järvinen H, Vassileva J and Samei E. 2017. Patient dose monitoring and the use of diagnostic reference levels for optimization. *J. Med. Imaging* **4**(3):031214.
6. Faj D, Edyvean S, Lajunen A, Katukhov A and Vassileva J. 2023. Establishment and utilization of diagnostic reference levels in medical imaging. *Phys. Med.* **107**:102538.
7. Jursinic PA. 2016. Characterization of optically stimulated luminescent dosimeters for clinical dosimetric measurements. *Med. Phys*. **43**(4):1631-1642.
8. Kry SF, Alvarez P, Cygler JE, DeWerd LA, Howell RM, Meeks S, ... and Mihailidis D. 2020. AAPM TG 191: Clinical use of luminescent dosimeters. *Med. Phys*. **47**(9):e19-e51.
9. Smith L, Haque M, Morales J and Hill R. 2015. Radiation dose measurements using optically-stimulated luminescence dosimeters. *Phys. Eng. Sci. Med*. **38**(4):559-567.
10. Yukihara EG and McKeever SW. 2016. Optically stimulated luminescence: fundamentals and applications. 2nd ed. John Wiley & Sons, Chichester.
11. International Atomic Energy Agency. 2018. Radiation protection in the design of radiotherapy facilities. Safety Reports Series No. 47. IAEA, Vienna.
12. Lewiecki EM, Binkley N, Morgan SL, Shuhart CR, Camargos BM, Carey JJ, ... and Leslie WD. 2016. Best practices for dual-energy X-ray absorptiometry measurement. *J. Clin. Densitom.* **19**(2):127-140.
13. Pelowitz DB. 2018. MCNP6 User's Manual Version 1.0. LACP-13-00634. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
14. Baudin C, Vacquier B, Thin G, Chenene L, Guersen J, Partarrieu I, ... and Bernier MO. 2023. Occupational exposure to ionizing radiation in medical staff: trends during 2009-2019. *Eur. Radiol.* **33**(8):5675-5684.
15. Guglielmi G, Diano D, Ponti F and Bazzocchi A. 2014. Quality assurance in bone densitometry. *Curr. Radiol. Rep.* **2**:33-39.