Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 2, pp. 167-171, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.2.167

Original article

이중에너지 X선 흡수계측법(Dual-energy X-ray Absorptiometry, DXA) 골밀도 장비의 방사선 피폭선량 평가 및 진단 참고 준위(DRL) 설정

김 호 성[1,*]

[1]신한대학교 방사선학과

Assessment of Radiation Exposure and Establishment of Diagnostic Reference Levels for Dual-energy X-ray Absorptiometry in Bone Densitometry

Ho-sung Kim[1,*]

[1]Department of Radiological Science, Shinhan University, Uijeongbu-si 11644, Republic of Korea

ABSTRACT Standardized diagnostic reference levels (DRL) and systematic quality assurance protocols are essential for enhancing radiation safety in dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). This study aimed to quantitatively analyze radiation exposure from DXA equipment in major Korean hospitals and establish DRL compliant with international standards. Eight DXA units from three Seoul hospitals meeting International Society for Clinical Densitometry (ISCD) recommendations and FDA approval criteria with confirmed quality assurance practices were selected (GE Lunar Prodigy: 5 units, HOLOGIC Discovery: 3 units). Dose area product (DAP) measurements were performed 10 times per unit for spine (L1-L4) and femur (neck) examinations using external DAP meters. Effective doses were calculated using conversion factors, and DRL were established based on 75th percentile values. For spine examinations, mean effective doses were 0.200 μSv for GE Lunar Prodigy and 0.246 μSv for HOLOGIC Discovery, with HOLOGIC showing approximately 23% higher values than GE. For femur examinations, GE demonstrated 0.190 μSv while HOLOGIC showed 0.115 μSv, with HOLOGIC approximately 40% lower than GE. The established DRL were 0.243 μSv for spine and 0.191 μSv for femur examinations, significantly lower than international reference levels. Well-maintained DXA equipment with excellent quality assurance can achieve radiation doses substantially below international standards. This study emphasizes the importance of continuous quality assurance and radiation protection education for minimizing unnecessary exposure while maintaining diagnostic accuracy.

Key words: Dual-energy X-ray Absorptiometry, Bone Densitometry, Diagnostic Reference Levels, Effective Dose, Quality Assurance

1. 서 론

이중에너지 X선 흡수계측법(Dual-energy X-ray Absorptiometry, DXA)는 골다공증 진단의 표준으로, 세계보건기구(WHO)는 T-score −2.5 이하를 골다공증으로 정의하며[1], 국내에서도 66세 여성을 대상으로 국가건강검진에 포함되어 있다[2]. 초고령화와 더불어 골밀도 장비나 검사 건수도 계속 증가하는 추세이기 때문에 의료 방사선 피폭도 증가하리라 예상된다. 이에 DXA 기술 발전에 따른 유효선량 감소에도 불구하고 표준화된 진단 참조준위(Diagnostic Reference Levels, DRL) 설정의 필요성이 대두되었다. 국제원자력기구(IAEA) SSR-46 (2018)은 의료 방사선 절차에 대한 DRL 설정을 의무화하였으며[4], 국제 임상 골밀도학회(International Society for Clinical Densitometry, ISCD) 2023 지침은 협각 팬 빔 시스템에서의 정도관리 강화를 권고하고 있다[5].

국내 DXA 장비는 약 9,727대가 운영되고 있으나, 44.4%의 기관에서 정기 정도관리가 미흡한 것으로 보고되었다[6]. DXA 검사는 방사선량이 비교적 적으나, 정도관리 미흡 시 피폭량 증가

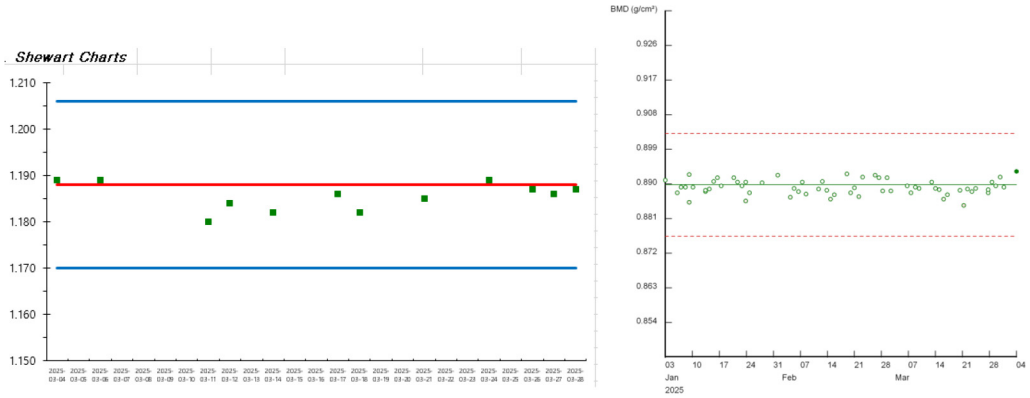
ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

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 5 June 2025 **Revised** 25 June 2025 **Accepted** 25 June 2025

(a) GE Lunar Prodigy (b) HOLOGIC Discovery

Fig. 1. Equipment used in the study



(a) GE Periodic Phantom Scan (b) HOLOGIC Periodic Phantom Scan

Fig. 2. Schwartz chart created by periodic phantom scans

우려가 있으며[7-9], 주기적 관리[10-12]와 정확한 선량 평가가 필요하다[13-15]. 본 연구는 서울시 주요 병원의 정도관리가 잘 시행되고 있는 DXA 장비에서 실제 방사선 피폭선량을 정량적으로 분석하여 진단 참고 준위가 국제 기준에 부합하는지를 확인하고 검사에 사용된 방사선의 안전성과 품질관리의 필요성을 파악하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 장비 선정

서울시에 있는 종합병원에서 ISCD 권고 및 미국식품의약국(U.S. Food and Drug Administration, FDA) 승인 기준을 만족하며, 정도관리 실시(일일 장비 점검 및 주기적인 팬텀 스캔) 및 방사선사 정도관리(Precision test)가 확인된 3개의 기관(평균 LSC는 3~5% 미만) 8대의 DXA 장비를 선정하였다. 선정된 장비는 GE Lunar Prodigy 5대와 HOLOGIC Discovery 3대였다(Fig. 1, 2).

2.2. 선량 측정 방법

면적선량계(DAP-meter)는 KermaX® plus를 사용하였다(Fig. 3). DAP-meter는 환자를 검사하는 중에 방사선량이 직접 측정되므로 환자 선량 측정을 직접적으로 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 총 8대의 골밀도 측정기를 대상으로 외부 부착형 DAP meter를 이용하여 척추(Spine, L1-L4) 및 대퇴골(Femur, Neck) 검사 시 선량면적곱(DAP, Gy·cm^2) 선량을 장비별 10회 반복 측정하였다.

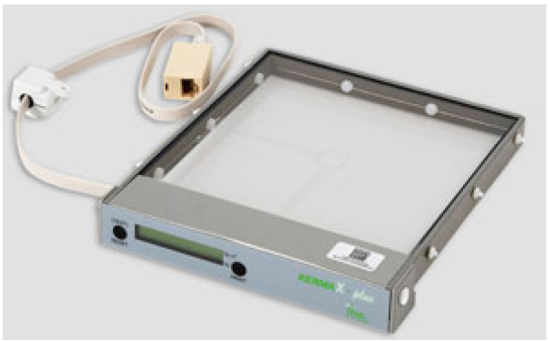


Fig. 3. DAP-meter (KermaX® plus)

2.3. 유효선량 산출

유효선량(Effective Dose, ED) 산출 시 체격 보정계수 및 나이

Table 1. DAP measurements for spine and femur examinations by equipment type

Equipment	Unit	Spine DAP (μGy · m²)	Femur DAP (μGy · m²)
GE Lunar Prodigy	Unit 1	0.934±0.012	1.017±0.015
	Unit 2	0.952±0.018	1.045±0.022
	Unit 3	0.967±0.014	1.062±0.019
	Unit 4	0.973±0.016	1.078±0.021
	Unit 5	0.945±0.013	1.082±0.024
HOLOGIC Discovery	Unit 6	1.153±0.020	0.633±0.011
	Unit 7	1.172±0.023	0.642±0.013
	Unit 8	1.186±0.025	0.647±0.014

Table 2. Effective doses for spine and femur examinations by equipment type

Equipment	Examination Site	Mean DAP (μGy · m^2)	Conversion Factor (μSv/μGy · m^2)	Effective Dose (μSv)
GE Lunar Prodigy (n=5)	Spine (L1-L4)	0.954±0.015	0.21	0.200±0.003
	Femur (Neck)	1.057±0.026	0.18	0.190±0.005
HOLOGIC Discovery (n=3)	Spine (L1-L4)	1.170±0.017	0.21	0.246±0.004
	Femur (Neck)	0.641±0.007	0.18	0.115±0.001

Table 3. Established diagnostic reference levels (DRL) for DXA examinations

Examination Site	Mean (μSv)	Median (μSv)	75th Percentile (DRL, μSv)	International Reference (μSv)
Spine (L1-L4)	0.218	0.221	0.243	0.5-1.0
Femur (Neck)	0.165	0.172	0.191	0.5-1.0

보정계수는 1로 가정하였다. 변환계수(mSv/Gy · cm^2)는 유럽연합(EUR 16260, RP 180) 및 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP) 보고된 기준에서 척추는 0.21 μSv/(μGy · m^2), 대퇴골은 0.18 μSv/(μGy · m^2)를 적용하였다[16,17].

$$ED\ (\mu Sv) = DAP\ (\mu Gy \cdot m^2) \times Conversion\ Factor\ (\mu Sv/\mu Gy \cdot m^2)$$

2.4. 진단참고준위(DRL) 설정

진단참고준위는 각 장비에서 측정된 유효선량의 3사분위(75th percentile) 값을 기준으로 설정하였다. 이는 ICRP 및 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 권고사항에 따른 것이다[18-21].

3. 결 과

3.1. 선량 면적 곱(DAP) 측정 결과

척추 검사에서 GE Lunar Prodigy 5대의 평균 DAP는 0.934-0.973 μGy · m^{2}로 장비 간 변동이 적었으며, HOLOGIC Discovery 3대는 1.153-1.186 μGy · m^{2}로 GE 대비 약 23-27% 높은 값을 보였다. 대퇴골 검사에서는 GE가 1.017-1.082 μGy · m^2, HOLOGIC이 0.633-0.647 μGy · m^{2}로 HOLOGIC이 약 40% 낮은 값을 나타냈다.

3.2. 유효선량 계산 결과

유효선량 계산 결과, GE Lunar Prodigy에서 척추 검사는 평균 0.200 μSv (0.196-0.204 μSv), 대퇴골 검사는 0.190 μSv (0.183-0.195 μSv)를 나타냈다. HOLOGIC Discovery에서는 척추 0.246 μSv (0.242-0.249 μSv), 대퇴골 0.115 μSv (0.114-0.116 μSv)로 측정되었다(Table 2).

3.3. 진단 참고 준위(DRL) 설정

전체 8대 장비의 측정값을 바탕으로 3사분위(75th percentile) 값을 산출한 결과, 척추 검사의 DRL은 0.243 μSv, 대퇴골 검사의 DRL은 0.191 μSv로 설정되었다. 이는 국제 권고치(0.5-1.0 μSv)와 비교하여 현저히 낮은 수준이다[17].

4. 고 찰

방사선 피폭선량의 정확한 평가는 의료 방사선 안전관리의 핵심 요소이다[22-25]. 특히 골밀도 검사는 정기적으로 반복 시행되는 경우[26-29]가 많아 누적 피폭선량에 대한 체계적인 관리가 요구된다[4,12]. 본 연구에서는 정도관리가 우수하게 이루어진

DXA 장비를 대상으로 실제 환자 선량을 측정하여 국제 기준보다 현저히 낮은 수준의 방사선량을 확인하였다.

장비별 특성을 살펴보면, HOLOGIC Discovery 장비는 척추 검사에서 GE Lunar Prodigy 대비 약 23% 높은 선량을 보였으나, 대퇴골 검사에서는 약 40% 낮은 선량을 나타냈다. 이는 팬 빔 구조와 128 다중검출기 등 장비 구조의 차이, 자동 노출 제어 시스템의 차이에 기인하는 것으로 분석된다[13].

정도관리의 효과는 재촬영률 감소와 불필요한 피폭 방지에서 확인할 수 있다. 선행 연구에 따르면 정도관리 강화로 피부 입사선량을 65% 감소시킬 수 있으며[30], 이는 본 연구 결과와 일치한다. DRL 초과 장비가 존재할 가능성이 있으므로 지속적인 품질관리가 필요하며, DRL은 절대적 기준이 아닌 최적화 및 자체 기준으로 활용되어야 한다.

본 연구의 한계점으로는 정도관리 미흡 상태에서의 비교 연구가 반영되지 않았으며, 향후 다양한 조건에서의 추가 연구가 필요하다. 또한 환자 체형, 검사 프로토콜, 장비 노후화 등 다양한 요인이 선량 변화에 미치는 영향에 대한 체계적 분석이 요구된다.

5. 결 론

본 연구에서는 서울시에 있는 종합병원에서 정도관리가 우수하게 이루어진 8대의 DXA 장비를 대상으로, 척추 및 대퇴골 검사 시 환자 선량 면적 곱(DAP)과 유효선량을 체계적으로 측정·분석하였다. DRL (3사분위) 값은 척추 0.243 μSv, 대퇴골 0.191 μSv로, 국제 권고치와 비교해 매우 낮은 수준임을 확인하였다.

장비별 특성으로는 HOLOGIC Discovery가 척추 검사에서 높은 선량을, 대퇴골 검사에서 낮은 선량을 보이는 등 검사 부위별 차이를 확인하였다. 따라서 정도관리가 미흡할 경우 불필요한 방사선 피폭이 증가할 수 있으므로, 주기적 품질관리와 방사선 방호 교육의 중요성이 강조된다.

본 연구에서 제시한 DRL은 국내 골밀도 검사 기관의 품질관리 및 선량 최적화 기준으로 활용될 수 있으며, 불필요한 방사선 피폭을 최소화하면서 진단적 정확성을 유지하는 데 기여할 것으로 기대된다.

Acknowledgments

본 논문은 2024년도 신한대학교 학술연구비 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

1. Blake GM and Fogelman I. 2007. The role of DXA bone density scans in the diagnosis and treatment of osteoporosis. *Postgraduate Medical Journal* **83**(982):509-517. https://doi.org/10.1136/pgmj.2007.057505.
2. Gil JW, et al. 2014. Estimation of radiation exposure and dose from radiological examinations in national health screening. *Journal of Radiation Protection and Research*. **39**(3):142-149.
3. Dimai HP. 2017. Use of dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) for diagnosis and fracture risk assessment; WHO-criteria, T-and Z-score, and reference databases. *Bone* **104**:39-47. https://doi.org/10.1016/j.bone.2016.12.016.
4. International Atomic Energy Agency. 2018. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. IAEA Safety Standards Series No. SSG-46. Vienna: IAEA. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1775_web.pdf.
5. International Society for Clinical Densitometry. 2024. 2023 ISCD Official Positions: Adult. ISCD Official Positions Document. Middletown, CT: ISCD. Available at: https://iscd.org/wp-content/uploads/2024/03/2023-ISCD-Adult-Positions.pdf.
6. Kim JS, et al. 2016. Current status of quality control for dual energy X-ray absorptiometry bone densitometry equipment. *Journal of Radiological Science and Technology*. **39**(4):527-534.
7. Lewiecki EM, Binkley N, Morgan SL, Shuhart CR, Camargos BM, Carey JJ, Gordon CM, Jankowski LG, Lee JK and Leslie WD. 2016. Best practices for dual-energy X-ray absorptiometry measurement and reporting: International Society for Clinical Densitometry Guidance. *Journal of Clinical Densitometry* **19**(2):127-140. https://doi.org/10.1016/j.jocd.2016.03.003.
8. International Atomic Energy Agency. 2010. Quality Assurance Programme for Digital Mammography. IAEA Human Health Series No. 17. Vienna: IAEA.
9. Söderholm S. 2022. Evaluation of the DXA radiation environment at Sahlgrenska University Hospital. MSc Thesis. University of Gothenburg, Sweden. Available at: https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/71702.
10. International Commission on Radiological Protection. 2017. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. *Annals of the ICRP* **37**(6):1-63. https://doi.org/10.1016/j.icrp.2008.07.001.
11. International Electrotechnical Commission. 2019. Medical electrical equipment - Requirements for the safety of X-ray equipment for bone mineral measurements. IEC 61223-3-4:2019. Geneva: IEC.
12. European Commission. 2014. Radiation Protection No. 162: Criteria for Acceptability of Medical Radiological Equipment used in Diagnostic Radiology, Nuclear Medicine and Radiotherapy. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
13. Hologic Inc. 2018. Discovery QDR Series Technical Manual: Quality Control and Radiation Safety Procedures. Bedford, MA: Hologic Inc.
14. GE Healthcare. 2017. Lunar Prodigy Advance DXA System: Quality Assurance Manual and Radiation Safety Guidelines. Madison, WI: GE Healthcare.
15. Blake GM and Fogelman I. 2009. Technical principles of dual energy X-ray absorptiometry. *Seminars in Nuclear Medicine* **27**(3):210-228. https://doi.org/10.1016/S0001-2998(97)80025-6.
16. European Commission. 1996. European Guidelines on Quality Criteria for Diagnostic Radiographic Images. EUR 16260 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
17. International Commission on Radiological Protection. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP* **37**(2-4):1-332. https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003.
18. Vañó E, Miller DL, Martin CJ, Rehani MM, Kang K, Rosenstein M, Ortiz-López P, Mattsson S, Padovani R and Rogers A. 2017. ICRP pub-

lication 135: diagnostic reference levels in medical imaging. *Annals of the ICRP* **46**(1):1-144. https://doi.org/10.1177/0146645317717209.
19. Järvinen H, Vassileva J, Samei E, Tapiovaara M and Siiskonen T. 2017. Patient dose monitoring and the use of diagnostic reference levels for the optimization of protection in medical imaging: current status and challenges worldwide. *Journal of Medical Imaging* **4**(3):031214. https://doi.org/10.1117/1.JMI.4.3.031214.
20. Vassileva J and Rehani M. 2015. Diagnostic reference levels. *American Journal of Roentgenology* **204**(1):W1-W3. https://doi.org/10.2214/AJR.14.12794.
21. International Atomic Energy Agency. 2017. Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. IAEA Human Health Series No. 32. Vienna: IAEA.
22. Johnson D, Li HH and Kimler BF. 2024. Dosimetry: Was and Is an Absolute Requirement for Quality Radiation Research. *Radiation Research* **202**(2):120-131. https://doi.org/10.1667/RADE-24-00107.1.
23. Rivera T. 2012. Thermoluminescence in medical dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes* **70**(9):2070-2082. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.02.069.
24. Ranogajec-Komor M. 2005. Thermoluminescence personal and medical dosimetry. pp. 183-195. In: Radiation Safety Problems in the Caspian Region (Cigna A and Durante M eds.). Springer, Dordrecht.
25. International Commission on Radiological Protection. 2017. Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. ICRP Publication 135. *Annals of the ICRP* **46**(1):1-144. https://doi.org/10.1177/0146645317717209.
26. Baim S, Wilson CR, Lewiecki EM, Luckey MM, Downs RW and Lentle BC. 2005. Precision assessment and radiation safety for dual-energy X-ray absorptiometry: position paper of the International Society for Clinical Densitometry. *Journal of Clinical Densitometry* **8**(4):371-378. https://doi.org/10.1385/JCD:8:4:371.
27. El Maghraoui A. 2012. Monitoring DXA Measurement in Clinical Practice. pp. 19-35. In: Dual Energy X-Ray Absorptiometry (Guglielmi G ed.). Springer, Milan. https://doi.org/10.1007/978-88-470-2565-7_2.
28. Doroudinia A and Colletti PM. 2015. Bone mineral measurements. *Clinical Nuclear Medicine* **40**(8):647-654. https://doi.org/10.1097/RLU.0000000000000846.
29. International Society for Clinical Densitometry. 2019. ISCD Official Positions - Adult. Middletown, CT: ISCD.
30. Aghahadi B. et al. 2006. Impact of quality control on radiation doses received by patients undergoing abdomen X-ray examination in ten hospitals. *Iran. J. Radiat. Res*. **3**(4):177-182.