Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 2, pp. 195-200, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.2.195

Original article

ICRP 118 권고 이후 수정체 선량평가 기술기준 변화와 각국의 제도화 비교 분석

최원철[1,2] · 한창희[2] · 김광표[2,*]

[1]한국원자력안전기술원, [2]경희대학교 원자력공학과

Comparative Analysis of Technical Standard Changes and International Regulatory Implementation of Eye Lens Dosimetry following ICRP 118 Recommendations

Won Chul Choi[1,2], Chang Hee Han[2], and Kwang Pyo Kim[2,*]

[1]Korea Institute of Nuclear Safety, 62 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34142, Republic of Korea
[2]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deogyeong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

ABSTRACT The International Commission on Radiological Protection (ICRP), through Publication 118, recommended a significant reduction in the equivalent dose limit for the lens of the eye from 150 mSv y^{-1} to an annual average of 20 mSv over 5 years based on epidemiological evidence of lower threshold doses for tissue reactions. This change demands the introduction of Hp(3), a new operational quantity reflecting the anatomical depth of the eye lens, moving beyond the conventional protection system focused on the whole-body dose equivalent, Hp(10). This study examines the core technical standard changes in eye lens dosimetry changed since the ICRP 118 recommendations from a technical perspective, and comparatively analyzes the regulatory implementation trends and practical applications of major advanced countries. The analysis of Dose Conversion Coefficients (DCC) based on ICRP Publication 116 quantitatively confirmed that Hp(3) is up to 42% higher than Hp(10) in the low-energy region below 100 keV, indicating a risk of underestimation when solely applying whole-body dosimeters. Furthermore, it was confirmed that technical blind spots in conventional dosimetry methods could arise under high-energy beta radiation fields such as $^{90}Sr/^{90}Y$ due to differences in the physical range between the two operational quantities, thereby suggesting the technical necessity of introducing dedicated dosimeters. Additionally, it was discussed that the cylindrical phantom specified in the ISO(International Organization for Standardization) 4037-3 standard reproduces backscattering dose contributions more precisely than the slab phantom under angular incidence conditions by simulating the curvature of the human head. It was also noted that major countries, including those in Europe and Japan, flexibly operate direct measurement and indirect evaluation systems through a graded approach based on risk levels. The comparative results of this study are expected to be utilized as key technical baseline data for establishing a rational safety regulation guideline for eye lens dosimetry and developing the supporting technical infrastructure tailored to domestic conditions.

Key words: Eye lens dosimetry, ICRP 118, Hp(3), Dose conversion coefficient, Safety regulation system

1. 서 론

방사선작업종사자의 방호에 있어 수정체(Lens of the eye)는 오랫동안 결정론적 영향(조직반응)을 일으키는 문턱선량이 비교적 높은 장기로 인식되어 왔다. 그러나 체르노빌 원전 사고 복구 작업자, 원폭 생존자, 그리고 방사선 중재적 시술을 수행하는 의료종사자 등을 대상으로 한 최근의 역학 연구 결과들은 기존의 문턱선량보다 훨씬 낮은 선량 수준에서도 수정체 혼탁 및 백내장이 발생할 수 있음을 지속적으로 보고하였다. 이러한 과학적 근거를 바탕으로 국제방사선방호위원회(ICRP)는 2012년 ICRP 간행물 118 (ICRP Publication 118)을 통해 직업적 노출에 대한 수정체 등가선량 한도를 연간 150 mSv에서 5년 평균 연간 20 mSv (단, 어느 한 해라도 50 mSv를 초과할 수 없음)로 대폭 하향 조정할 것을 권고하였다[1]. 국제원자력기구(IAEA) 역시 이를 반영하

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

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Kwang Pyo Kim
Tel: +82-31-201-2560, Fax: +82-31-273-3592, E-mail: kpkim@khu.ac.kr

Received 19 May 2026 Revised 6 June 2026 Accepted 15 June 2026

여 국제기본안전기준(GSR Part 3)을 개정하였으며[2], 이에 따라 전 세계적으로 수정체 선량 관리의 중요성이 그 어느 때보다 부각되고 있다.

수정체 선량 한도의 급격한 하향 조정은 단순한 규제 수치의 변화를 넘어, 선량 평가를 위한 기술적 기준의 패러다임 전환을 요구한다. 과거 선량 한도가 높았던 시기에는 심부선량당량인 Hp(10)이나 표층선량당량인 Hp(0.07)을 수정체 선량의 보수적인 대체 지표로 활용하는 것이 가능했다. 하지만 연간 20 mSv라는 엄격한 한도를 정확하게 평가하기 위해서는 수정체가 위치한 깊이를 고려한 3 mm 심부선량당량, 즉 Hp(3)를 직접적으로 측정하고 평가해야만 한다. 이를 위해서는 측정기기의 에너지 의존성, 평가용 팬텀의 기하학적 특성, 그리고 선량환산인자(Dose Conversion Coefficient, DCC)의 적용 등 새로운 기술적 요건들이 확립되어야 한다.

현재 주요 선진국들은 ICRP 118 권고를 자국의 법령에 반영하고 실질적인 선량평가 체계를 구축하기 위해 다양한 제도적, 기술적 접근을 시도하고 있다. 그러나 국가별로 처한 방사선 산업 환경과 규제 인프라가 다르기 때문에, 제도의 도입 시기 및 기술기준의 적용 방식에서 차이를 보이고 있다.

본 논문에서는 ICRP 118 권고 이후 변화된 수정체 선량평가의 핵심 기술기준을 기술적 관점에서 고찰하고, 주요 국가들의 제도화 동향 및 적용 사례를 비교 분석하고자 한다. 이와 관련하여 국내에서도 수정체 방호 규제 및 기술기준에 관한 선행 검토가 수행된 바 있으며[3,8], 본 연구는 이를 확장하여 향후 국내 수정체 선량평가 기술의 현황과 수준을 분석하고, 국제적 기준에 부합하는 합리적인 수정체 선량평가 안전규제 체계의 제도적 구축 및 이행에 요구되는 기술적 기반을 마련하는 데 필요한 핵심 사항들을 도출하고자 한다.

2. 재료 및 방법

수정체 선량 한도 하향 조정에 따른 국제적인 규제 변화와 기술적 대응 현황을 분석하기 위하여, 본 연구에서는 국제기구의 권고안, 국제 표준 문서, 그리고 주요 선진국의 원자력 관련 법령 및 기술 지침을 검토하여 비교 분석하였다. 특히, 새로운 기술기준인 Hp(3)의 도입이 실제 각국의 안전규제 체계 내에서 어떻게 반영되고 이행되는지를 확인하기 위해 다음과 같은 방법론을 적용하였다.

2.1. 국제 권고 및 각국 법령 자료의 분석

국제적인 수정체 선량평가 기술기준의 변화와 제도화 현황을 파악하기 위해 다각적인 자료 조사를 수행하였다. 우선, ICRP Publication 118을 포함하여 IAEA의 국제기본안전기준(GSR Part 3), 유럽연합의 기본안전기준(Euratom BSS, Directive 2013/51/Euratom) 등 국제기구의 최신 권고 및 지침서를 대상으로 검토·분석하였다.

각국별 규제 이행 현황 분석을 위해서는 영국, 프랑스, 일본, 미국, 캐나다 등 주요 선진국의 원자력 안전 관련 법령(Nuclear Safety Act), 시행령 및 시행규칙, 그리고 규제기관의 고시 및 기술 가이드라인을 분석하였다. 법령 검토 시에는 수정체 선량 한도의 수치적 반영 여부와 더불어, 선량계 착용 의무화 규정 및 판독 서비스 기관의 기술적 요건 등 실제 규제 체계의 하부 이행 구조를 중점적으로 검토하였다.

2.2. 수정체 선량평가 기술기준 및 물리적 파라미터 분석

제도화의 기술적 근거가 되는 Hp(3)의 물리적 특성을 분석하기 위해 ISO 4037 등 국제표준화기구의 기술 문서를 검토하였다. 기존의 Hp(10) 또는 Hp(0.07)을 활용한 간접 평가 방식과 Hp(3)를 이용한 직접 평가 방식의 기술적 차이를 정량적으로 분석하기 위해 다음과 같은 파라미터를 주요 분석 항목으로 설정하였다.

첫째, 수정체 선량환산계수(DCC)의 경우 ICRP Publication 116 및 122에서 제시된 최신 데이터를 바탕으로[5,6], 광자선 및 베타선 에너지 대역별 변환 특성을 검토하였다. 둘째, 선량계의 성능 시험 및 교정의 기준이 되는 팬텀의 기하학적 구조(원통형 팬텀 대 평판팬텀)가 선량 평가의 불확도에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 물리적 데이터는 향후 결과 섹션에서 각국의 기술기준을 비교하는 정량적 지표로 활용된다.

2.3. 국가별 규제 체계 및 기술 인프라의 비교 분석 방법

각국의 법령 및 기술 자료를 체계적으로 비교하기 위해 기술적·제도적 분석 매트릭스를 구성하였다. 이는 결과 및 고찰 섹션에서 심도 있게 다룰 항목들로, 다음과 같은 기준으로 분류하였다.

1. **법령 체계 반영 수준:** 수정체 선량 한도의 법적 명문화 및 단계적 적용 방식
2. **기술적 관리 요건:** 선량계 착용이 요구되는 작업 환경 정의 및 개인선량계의 기술적 규격(에너지 의존성 등)
3. **기술적 이행 기반:** Hp(3) 선량계의 성능 검증 체계 및 기준 조사 시설(Reference Calibration Facilities)의 구축 현황

이러한 비교 분석을 통해 각국이 채택하고 있는 규제 방식의 기술적 타당성을 파악하고, 이를 바탕으로 국내 방사선 안전규제 체계와 기술 인프라가 갖추어야 할 핵심 요소들을 도출하였다.

3. 결 과

국제적인 수정체 선량 한도 하향 조정에 따른 주요국의 제도화 현황과 이를 이행하기 위한 기술적 요건들을 분석한 결과는 다음과 같다.

3.1. 주요국별 수정체 선량 한도 및 제도화 현황 분석

ICRP 118 권고에 따른 수정체 선량 한도의 제도적 반영은 국가별 방사선 이용 환경과 규제 체계에 따라 단계적으로 진행되고 있

다. 분석 대상 국가들 중 유럽연합(EU) 회원국들은 국제 기준을 가장 선제적으로 수용하였으며, 일본과 캐나다 등이 그 뒤를 잇고 있다.

유럽연합은 2013년 개정된 기본안전지침(Euratom BSS)을 통해 [4] 2018년까지 모든 회원국이 연간 20 mSv의 한도를 법제화하도록 강제하였다. 이에 따라 영국[7], 프랑스, 독일 등은 방사선 작업 종사자의 수정체 선량 평가를 위한 전용 선량계 보급과 관리 체계를 구축 완료하였다. 일본의 경우, 2021년 4월부터 개정된 법령을 시행하며 특히 의료분야의 중재적 시술(Interventional Radiology) 종사자들에 대한 집중 관리를 수행하고 있다. 주요 국가들에 대한 수정체 선량한도의 제도적인 반영현황은 Table 1과 같다.

국내의 경우, 현재 원자력안전법령 및 관련 고시에서 연간 150 mSv의 한도를 유지하고 있으나, 국제적 기준에 부합하는 안전규제 체계 구축을 위해 단계적 도입 방안을 검토 중이다. 제도화 과정에서는 단순히 수치만 조정하는 것이 아니라, 고노출 작업군 식별, Hp(3) 전용 선량계의 형식승인, 그리고 산업계의 수용성을 고려한 이행 시기 조율이 핵심적인 쟁점으로 파악되었다.

3.2. 선량환산계수(DCC)의 에너지 의존성 및 기술적 분석

수정체 선량평가의 기술적 정밀도를 확보하기 위해서는 실용량인 Hp(3)와 기존 지표인 Hp(10) 간의 기술적 차이에 대한 명확한 이해가 선행되어야 한다. 수정체 선량평가의 정확성을 확보하기 위해 ICRP 116에서 제시된 Hp(3) 선량환산계수(DCC)를[5] 기존의 전신 선량평가 지표인 Hp(10)과 비교 분석하였고, 이 과정에서 원통형 팬텀 및 인체 두부 모델을 활용하여 Hp(3) DCC를 도출한 주요 선행 연구들[9,10]의 물리적 거동 특성도 함께 고찰하였다. ICRP 116 선량환산계수(DCC)를 바탕으로 분석한 결과는 Table 2와 같다.

분석 결과, 100 keV 이하의 저에너지 영역으로 갈수록 두 계수 간의 차이가 급격히 벌어지는 것을 확인할 수 있다. 특히 30 keV 대역에서는 Hp(3) 값이 Hp(10)보다 약 42% 높게 나타나며, 15 keV 이하에서는 2배 이상의 차이를 보인다. 이는 30 keV 에너지 영역에서 전신 선량계(Hp(10))만을 착용하여 수정체 선량을 갈음할 경우, 실제 수정체 선량(Hp(3))의 약 70% 수준만 측정되어 결과적으로 약 30% 과소평가됨을 의미한다.

따라서 새로운 안전규제 체계 하에서는 작업 환경의 방사선 에너지 스펙트럼을 고려한 전용 Hp(3) 선량환산계수 적용이 필수적이다. 이는 선량계 판독 알고리즘 개선뿐만 아니라, 다양한 에너지 대역에서 신뢰성을 보장할 수 있는 선량계 소자 및 필터 설계의 기술적 기반이 되어야 한다.

광자선 외에 ^{90}Sr/^{90}Y 등에서 방출되는 고에너지 베타선의 거동 역시[16-18] 수정체 선량평가에서 신중하게 다루어져야 한다. ^{90}Y의 최대 베타 에너지는 약 2.28 MeV로, 조직 등가 물질 내에서 수 mm 이상을 투과할 수 있는 물리적 특성을 가진다. 이러한 고에너지 베타선은 안구 수정체의 해부학적 깊이인 3 mm 깊이(Hp(3))에는 충분히 도달하여 직접적인 피폭을 유발하는 반면, 10 mm 깊이(Hp(10))까지는 도달하지 못하고 감쇠된다. 이로 인해 베타선이 지배적인 작업 환경에서는 심부선량당량인 Hp(10) 지표가 거의 유의미하게 측정되지 않음에도 불구하고, 수정체 선량인 Hp(3)는 상당한 수준으로 평가될 수 있는 물리적 특성을 나타낸다.

Table 1. Status of regulatory implementation for eye lens dose limits by country

Category	Regulatory Basis	Dose Limit (Occupational)	Status of Implementation
EU (UK, France, etc.)	Euratom BSS (Directive 2013/59)	20 mSv y^{-1}	Fully Implemented (2018)
Japan	Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards	100 mSv over 5y (Max 50 mSv y^{-1})	Fully Implemented (2021)
Canada	Radiation Protection Regulations	20 mSv y^{-1}	Fully Implemented
USA (NRC)	10 CFR Part 20	150 mSv y^{-1}	Under Review
South Korea	Nuclear Safety Act and NSSC Notice	150 mSv y^{-1}	Preparing for Implementation

Table 2. Comparison of Dose Conversion Coefficients (DCC) between Hp(10) and Hp(3) for photons

Energy (MeV)	Hp(10) DCC (pSv cm^{-2})	Hp(3) DCC (pSv cm^{-2})	Ratio (Hp(3)/Hp(10))
0.015	0.25	0.58	2.34
0.030	0.81	1.15	1.42
0.060	1.54	1.72	1.12
0.100	1.81	1.85	1.02
0.662	3.54	3.55	1.00
1.250	4.64	4.64	1.00
2.000	5.86	5.86	1.00

Table 3. Classification of eye lens dose monitoring approaches by workplace field in major countries

Country/Organization	Primary Radiation Field	Exposure Risk Level	Regulatory Monitoring Approach	Technical Basis
EU (France, Germany, Etc.)	Low-energy X-ray (Scatter)	High (>6 or 15 mSv y^{-1})	Direct Measurement (Dedicated Hp(3) dosimeter)	Graded approach based on prior radiological risk assessment
	High-energy Gamma	Low (<6 mSv y^{-1})	Indirect Evaluation (Whole-body Hp(10) conversion)	Consistent with uniform whole-body exposure
Japan (MHLW/NRA)	Medical Interventional Radiology (IR)	High Potential	Direct Measurement (Worn at head or neck level)	Significant dose divergence due to lead apron shielding effects
	Nuclear Power Plants (NPP)	Low Potential	Indirect Evaluation (Galvanized by chest Hp(10))	High-energy photon field where Hp(3)/Hp(10) DCC ratio approaches 1.00
UK (HSE)	Highly Inhomogeneous Fields	Evaluated Task	Direct Measurement (Hp(3) personal dosimetry)	Mandated for non-uniform exposure scenarios
	Homogeneous Photon Fields	Low/Controlled	Indirect Evaluation (Hp(10) with correction factors)	Authorized through workplace specific field characterization

3.3. 선량평가용 팬텀 및 교정 체계의 기술적 요건

제도적 한도 하향의 실질적인 이행을 위해서는 선량계의 성능을 검증하고 교정할 수 있는 기술적 인프라가 뒷받침되어야 한다. ISO 4037-3 (2019) 표준은[11] 수정체 선량계의 특성 시험을 위해 기존의 평판팬텀이 아닌 원통형 팬텀(Cylindrical Phantom) 사용을 규정하고 있다[12].

원통형 팬텀은 인체 두부의 기하학적 형상을 모사함으로써, 입사각에 따른 방사선의 산란 및 흡수 특성을 평판팬텀보다 훨씬 정교하게 재현한다. 특히 방사선이 측면에서 입사하는 경우, 평판팬텀과 원통형 팬텀 간의 반응도 차이는 더욱 두드러지게 나타난다.

국내 안전규제 체계 이행을 위해서는 표준조사 시설에서 이러한 전용 팬텀을 확보하고, 국제 표준에 부합하는 표준 교정 절차를 확립하는 것이 필수적이다. 또한, 개인선량계 판독 서비스 기관들이 Hp(3) 측정에 대한 기술적 역량을 확보할 수 있도록 성능시험(Intercomparison) 체계를 마련[15]하고, 기술적 가이드라인을 제공하는 것이 제도 안착의 핵심 요소로 분석된다.

4. 고 찰

4.1. 국가별 규제 도입 시차와 방사선 산업 구조의 기술적 연계성

본 연구의 Table 1에서 확인된 주요 선진국 간의 수정체 선량한도 제도화 시차는 Table 2에서 도출된 선량환산계수(DCC)의 기술적 특성 및 국가별 방사선 산업 구조의 차이에서 그 원인을 찾을 수 있다. 유럽연합(EU)과 일본이 각각 2018년과 2021년에 수정체 선량 한도를 연간 20 mSv로 이행한 배경에는 자국 내 의료분야 중재적 시술(IR) 종사자 비중이 높고, 이들에 대한 방호 시급성을 인지했기 때문이다. Table 2에 제시된 바와 같이, 의료 현장의 주된 방사선장인 30 keV 대역에서 Hp(3)와 Hp(10)의 DCC 비율은 1.42에 달하여, 기존 전신 선량계(Hp(10)) 지표를 그대로 적용할 경우 실제 안구 수정체가 받는 방사선량을 약 30% 과소평가하게 되는 기술적인 문제가 존재한다. 유럽과 일본은 이러한 저에너지 영역에서의 불일치 위험성을 규제 체계에 선제적으로 반영하여 의료 종사자를 보호하기 위한 법제화를 신속히 완료한 것으로 분석된다.

반면, 미국(NRC)이 현재까지 기존 연간 150 mSv의 한도를 유지하며 유보적인 입장을 취하고 있는 것은 원자력 발전 및 대형 산업용 조사시설 중심의 산업조직적 특성이 반영된 결과로 판단된다. 대형 원전 환경의 주된 선원인 ^{137}Cs (0.662 MeV) 및 ^{60}Co (1.25 MeV) 영역에서는 Hp(3)와 Hp(10)의 DCC 비율이 1.00에 수렴하므로, 기존 전신 개인선량계 측정값을 수정체 선량으로 준용하더라도 기술적 안전성이 저해되지 않는다. 즉, 미국은 고에너지 방사선장이 지배적인 자국의 산업적 특성상 규제 변화에 따른 기술적인 시급성이 상대적으로 낮기 때문에 대대적인 선량계 교체 비용 대신 규제 검토 단계를 장기화하는 전략을 취하고 있는 것으로 해석된다[13]. 이러한 대조적 경향은 향후 국내 규제 도입 시에도 일률적인 기준 적용이 아닌, 주된 방사선 에너지 스펙트럼에 따른 차별화된 이행 로드맵이 수립되어야 함을 시사한다.

4.2. 기술기준 변화에 따른 팬텀 다변화와 주요국의 인프라 수용성 비교

국제 표준(ISO 4037-3)이 제시한 원통형 팬텀 기술기준을 자국 규제 체계에 수용하는 과정에서도 주요국들은 기술 인프라의 성숙도에 따라 상이한 대응 양상을 나타내고 있다. 유럽연합의 경우, 제도화 이전부터 ORAMED (Optimization of Radiation Protection of Medical Staff) 프로젝트 등[14] 범유럽 차원의 공동 연구를 통해 원통형 팬텀 기반의 Hp(3) 선량계(예: EYE-D 등) 성능 검증과 표준 참조 방사선장 확립을 선행하였다. 이러한 선제적 기술 인프라 확보는 2018년 Euratom BSS 지침의 법적 강제화가 대다수 회원국에서 기술적 마찰 없이 안착할 수 있었던 원동력이 되었다.

이와 대조적으로, 기존 전신 선량계 검증용 평판팬텀 체계의 기술적 관성이 강한 국가들에서는 새로운 원통형 팬텀 수용에 일정 기간의 기술적 과도기를 겪고 있다. 일본의 경우 2021년 법령 시행과 더불어 국가 표준기관을 중심으로 원통형 팬텀 기반의 표준 교정 절차를 순차적으로 마련하였으나, 민간 판독 서비스 기관들의 교정 시스템 전환 비용과 기술적 불확도를 해소하는 데 상당한 행정적 자원이 소모된 것으로 파악된다. 이러한 국제적 사례는 기술기준의 변화가 단순히 법령의 자구 수정만으로 이뤄지지 않으며, 법적 판독 기관들의 기술적 역량을 상호비교(Intercomparison)하고 지원할 수 있는 국가적 표준조사 인프라의 사전 성숙도가 제도화의 성패를 결정짓는 핵심 요인임을 보여준다.

4.3. 불균일 방사선질 및 베타선 환경에서의 선량 감시 방식과 규제 실효성

안구 수정체 선량 한도 하향에 따른 실질적인 규제 실효성을 확보하기 위해 주요 국가들이 채택하고 있는 선량 감시 방식(직접 측정 대 간접 평가)의 비교 분석은 규제 집행의 현실적 타당성을 고찰하는 데 중요한 시사점을 제공한다[16]. 유럽연합(EU) 회원국들의 경우, 유라톰 기본안전지침(Euratom BSS)에 따라 사전 위험도 평가를 제도의 중심에 두고 있다. 프랑스 등에서는 연간 수정체 피폭 선량이 일정 임계치를 초과할 가능성이 있는 고위험 작업군에 한해서만 Hp(3) 전용 선량계 착용을 통한 직접 측정을 의무화하고, 임계치 미만의 저위험 작업군에 대해서는 기존 전신선량계(Hp(10)) 측정값을 활용하는 간접 평가를 허용하는 차등 적용(Graded Approach) 방식을 채택하고 있다. 일본 역시 납 앞치마 착용으로 불균일 피폭 위험이 큰 의료기관의 중재적 시술 환경에는 전용 선량계를 통한 직접 측정을 규정하는 반면, 전신 피폭이 비교적 균일한 원자력 발전소 등의 환경에서는 기존 개인선량계 측정값으로 이를 갈음할 수 있도록 유연성을 부여하고 있다. 이러한 국제적 경향은 기술적 엄밀성과 규제 경제성 사이의 균형을 맞추기 위한 결과이며, 향후 국내 제도 수립 시에도 작업 환경별 특성을 반영한 합리적인 가이드라인 마련이 필요함을 시사한다.

이러한 방사선장의 공간적 불균일성뿐만 아니라, 선원의 핵종 특성에 따른 기술적 특성 역시 감시 체계 수립 시 신중하게 고려되어야 한다. 특히 $^{90}Sr/^{90}Y$과 같은 고에너지 베타선원의 존재 가능성은 수정체 피폭 관리의 중요한 요소이다. 고에너지 베타선은 수정체 깊이인 3 mm (Hp(3))를 투과하여 직접적인 피폭을 일으키지만, 10 mm 깊이(Hp(10))까지는 도달하지 못하고 감쇠되는 물리적 특성을 가진다. 이로 인해 기존의 전신 개인선량계 중심 관리 체계만으로는 수정체 피폭을 감지하지 못하는 기술적 사각지대가 발생할 수 있다. 광자선장에서는 에너지 대역에 따라 전신선량계 측정값을 안전성 확보의 기반으로 활용할 여지가 존재하지만, 베타선장에서는 두 실용량 간의 거동 차이로 인해 이러한 준용이 성립하지 않는다. 따라서 해당 분야나 공정에서 발생할 수 있는 수정체 방사선피폭이 정확하게 측정되고 신뢰성이 구축된 제도하에서 검증되어 수정체를 실질적으로 방호할 수 있도록, 고에너지 베타선 환경에 대한 차별화된 기술기준과 감시 체계 구축이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 ICRP 118 권고에 따른 안구 수정체 등가선량 한도의 하향 조정에 대응하여, 새로운 방사선 방호 실용량인 Hp(3)의 기술적 특성을 분석하고 주요 선진국의 제도화 동향을 비교 고찰하였다. ICRP 116 지침의 선량환산계수(DCC)를 분석한 결과, 고에너지 광자선장(^{137}Cs, ^{60}Co) 환경에서는 Hp(3)와 Hp(10)의 DCC 비율이 1.00에 수렴하여 현행 전신선량(Hp(10)) 규제 체계가 안구 수정체 안전 확보의 기본적인 기술적 기반이 될 수 있음을 확인하였다. 반면, 100 keV 이하의 저에너지 영역, 특히 30 keV 대역에서는 Hp(3)가 Hp(10)에 비해 42% 높게 나타나 현행 전신 선량계(Hp(10))를 수정체 대체 지표로 활용하게 되면 약 30%의 선량평가 결과가 과소평가됨을 기술적으로 확인하였다. 또한, ISO 4037-3 표준에 부합하는 원통형 팬텀이 실제 인체 두부 곡률을 모사하여 경사 입사 조건에서의 후방산란 특성을 평판팬텀보다 정밀하게 재현함을 확인하였으며, 주요국들이 자국의 산업 구조와 방사선 이용 환경에 따라 이를 차별화하여 수용하고 있는 경향성을 확인하였다.

이러한 기술적 분석 결과와 국제적 규제 동향을 바탕으로 향후 국내 실정에 적합한 안구 수정체 선량평가 안전규제 체계를 수립하기 위해서는, 각 작업 환경의 방사선장 특성과 실제 작업 방식에 따른 위험도를 종합적으로 고려하여야 한다. 새로운 규제 체계는 기존 전신선량 체계의 방호 효과를 합리적으로 활용하되, 저에너지 엑스선에 의한 산란선 피폭 위험이 크고 선량 평가의 정밀한 보정이 요구되는 의료기관의 중재적 시술(IR) 환경 및 특정 방사성동위원소 취급 공정 등을 면밀히 검토할 필요가 있다. 이를 통해 해당 분야나 공정에서 발생할 수 있는 수정체 방사선피폭이 정확하게 측정되고 신뢰성이 구축된 제도하에서 검증되어, 종사자의 수정체를 실질적으로 방호할 수 있는 방향으로 체계가 구축되어야 한다.

새로운 규제 체계의 도입에 따라 안구 수정체의 해부학적 깊이를 물리적으로 재현할 수 있는 전용 수정체 선량계의 도입과 기술적 기반 확보가 요구된다. 이를 위해 국내 작업 환경의 방사선 스펙트럼을 고려한 Hp(3) 전용 개인선량계의 형식승인 기준을 정립하고 판독 알고리즘의 최적화를 달성하여야 한다. 특히 기존 전신선량 관리 체계로는 피폭 확인이 어려운 고에너지 베타선장에 대응할 수 있도록 선량계 소자 및 필터 설계의 기술적 검증이 수반되어야 한다. 이와 동시에, 기존 평판팬텀을 활용하여 운용 중인 개인선량계 성능검사 체계 내에 ISO 4037-3 표준 규격을 만족하는 원통형 팬텀 기반의 참조 방사선장(Reference Radiation Fields) 도입과 교정 시스템의 보완이 이루어져야 한다. 이러한 기

술적 기반 위에서 국내 법적 판독 서비스 기관들이 수정체 선량 측정에 대한 기술적 신뢰성을 확보할 수 있도록 표준 교정 절차서를 개발 및 보급하고, 정기적인 판독 성능검사 및 상호비교(Intercomparison) 프로그램 체계가 필요할 것으로 보인다.

최종적으로는 이러한 기술적 검증 결과와 기술 인프라를 원자력안전법령 하부의 기술기준 고시 및 가이드라인에 유기적으로 반영하여 제도화를 완성하여야 한다. 비현실적인 규제 강제화로 인한 산업계의 행정적 부담을 방지하면서도 방호의 실효성을 극대화하기 위해서는, 작업 환경별 기술적 특성을 명확히 반영한 가이드라인이 마련되어야 한다. 원칙적으로 수정체 선량평가의 신뢰성을 담보할 수 있는 전용 선량계 도입 기술기준을 수립하되, 현행 전신선량 관리 체계와의 유기적인 연계를 도모함으로써 규제의 공백을 방지하고 집행의 유연성을 확보하여야 한다. 이러한 기술 개발, 인프라 구축, 그리고 법령 반영이 유기적으로 연계된다면 우리나라는 종사자의 방호 실효성을 극대화하는 동시에 국제적 수준에 부합하는 합리적이고 신뢰성 있는 안구 수정체 선량평가 안전규제 체계를 성공적으로 갖출 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국원자력안전기술원(KINS)의 자체연구사업과 방사선안전규제 총괄관리사업의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection. 2012. ICRP Statement on Tissue Reactions/Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs — Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context: ICRP Publication 118. *Annals of the ICRP*, **41**(1-2):1-322.
2. International Atomic Energy Agency. 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna.
3. Kim SY, Hwang SJ, Kim JS and Son JK. 2024. Review on Regulatory and Technical Standards of Radiation Protection for Lens of the Eye. *Journal of Radiation Industry*, **18**(1):41-47.
4. European Union. 2014. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Official Journal of the European Union*, **L13**:1-73.
5. International Commission on Radiological Protection. 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures: ICRP Publication 116. *Annals of the ICRP*, **40**(2-5):1-257.
6. International Commission on Radiological Protection. 2013. Radiological Protection in Interventional Procedures: ICRP Publication 122. *Annals of the ICRP*, **42**(4):1-148.
7. Health and Safety Executive. 2018. Ionising Radiations Regulations 2017: Guidance on Regulations. Approved Code of Practice and Guidance L121 (Second edition). HSE Books, London.
8. Son SH, Lee KB and Lee YJ. 2019. Technical feasibility analysis for the domestic adoption of eye lens dose limits. *Journal of Radiation Protection and Research*, **44**(2):65-72.
9. Mariotti F, Gricene M and Gualdrini G. 2015. Evaluation of Hp(3) conversion coefficients for photons and electrons using an anthropomorphic head model. *Radiation Protection Dosimetry*, **164**(3):290-297.
10. Behrens M and Henniger J. 2010. Dose conversion coefficients for the operational quantity Hp(3) for electrons and photons based on a new cylindrical phantom. *Radiation Protection Dosimetry*, **140**(1): 13-21.
11. International Organization for Standardization. 2019. Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy and angle of incidence — Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the determination of their response as a function of energy and angle of incidence. ISO Standard No. ISO 4037-3:2019, Geneva.
12. Daures J, Gualdrini G, Bordy JM, Ankerhold U, Bedogni R, d'Errico F and Fantuzzi E. 2009. A new cylindrical phantom for eye lens dosemeter calibrations. *Radiation Protection Dosimetry*, **136**(4):223-229.
13. National Council on Radiation Protection and Measurements. 2018. Management of Exposure to Ionizing Radiation: Radiation Protection Guidance for the United States. NCRP Report No. 180, Bethesda, MD.
14. Carinou E, Ferrari P, Bjelac OC, Gricene M, Merce MS, O'Connor U and Sans Merce M. 2011. Optimization of Radiation Protection of Medical Staff (ORAMED) project: Results and conclusions on eye lens dosimetry. *Radiation Measurements*, **46**(11):1251-1254.
15. European Radiation Dosimetry Group. 2017. Intercomparison of Radiation Protection Dosemeters for the Eye Lens. EURADOS Report No. 2017-01, Braunschweig, Germany.
16. Bordy JM, Clairand I, Daures J, Donadille L, Gualdrini G and Carinou E. 2015. Eye lens dosimetry: From ICRP recommendations to practical implementation. *Radioprotection*, **50**(3):185-192.
17. U.S. Environmental Protection Agency. 1993. External Dose-Rate Conversion Factors for Calculation of Dose to the Public. Federal Guidance Report No. 12 (FGR-12), Washington, D.C.
18. U.S. Environmental Protection Agency. 1999. Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. Federal Guidance Report No. 13 (FGR-13), Washington, D.C.