Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 1, pp. 1-7, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.1.1

Original article

수정체 방사선 방호에 관한 규제기준 및 기술기준 검토

김시영[1,*] · 황석주[1] · 김재성[1] · 손중권[1]
[1]한국수력원자력 중앙연구원

Review on Regulatory and Technical Standards of Radiation Protection for Lens of the Eye

Si Young Kim[1,*], Seok-Ju Hwang[1], Jae Seong Kim[1], and Jung-Kwon Son[1]
[1]Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., Central Research Institute (KHNP CRI), 70, Yuseong-daero 1312 Beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

ABSTRACT The International Commission on Radiological Protection (ICRP) lowered the annual equivalent dose limit of lens of the eye for radiation workers from 150 to 20 mSv in April 2011. This trend of lowering the equivalent dose limit for radiation workers has been observed worldwide, including international organizations such as the International Atomic Energy Agency (IAEA), International Organization for Standardization (ISO) and the European Commission (EC). In 2016, the Nuclear Safety and Security Commission of South Korea published research results that included a proposal for lowering the equivalent dose limit of lens of the eye for radiation workers in line with the ICRP recommendation. However, as of now, South Korea's Nuclear Safety Act and related regulations still specify an annual equivalent dose limit of lens of the eye as 150 mSv for radiation workers. The IAEA and ISO have issued guidelines regarding radiation protection for lens of the eye and recommended a dose level for the lens of the eye at 5 or 6 mSv per year for periodic monitoring of the equivalent dose for the lens of the eye.

Key words: Lens of the Eyes, Dose Limit, Radiation Exposure, ICRP 118

1. 서 론

방사선작업종사자의 수정체를 보호하기위해 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection: ICRP)는 수정체 등가선량을 방호량으로 정하여 이에 대한 연간 선량한도를 제시하고 있다[1]. ICRP는 1991년 ICRP 60 권고를 통해 방사선작업종사자의 수정체 선량한도를 연간 150 mSv로 권고하였다[2]. 그후 방사선 피폭자에 대한 역학연구 결과가 축적됨에 따라 2007년 발간된 ICRP 103 권고에서는 방사선작업종사자의 수정체 선량한도 하향조정이 필요함을 밝혔다. 2011년 4월 ICRP는 성명서를 통해 구체적인 수정체 선량한도 하향 조정결과를 발표하였고 최종적으로 2012년 ICRP Publication 118 발간을 통해 수정체에 대한 피폭 선량한도를 유효선량 한도와 동일한 수치인 5년간 평균 20 mSv, 연간 최대 50 mSv로 낮추는 것을 권고하였다[3].

현재 국내 원자력안전법 관계법령에서는 ICRP 60 권고를 적용하여 방사선작업종사자의 수정체 등가선량 한도를 연간 150 mSv로 규제하고 있다. 2016년 원자력안전위원회에서는 ICRP 103 신권고 등 최신 방호기준 국내 도입을 위한 기술기준 최적화 연구를 수행하였으며 주요 연구결과 중 하나로 직무피폭 수정체 선량한도 하향조정(안)을 도출하였다[4]. 다만 현재까지 원자력안전법 관계법령에는 수정체 선량한도 하향조정(안)이 반영되지는 않고 있다.

본 연구에서는 현재까지 검토된 방사선작업종사자 수정체 방호 관련 국내외 규제기준과 기술기준을 검토하였으며, 향후 원전 종사자 수정체 방호체계 최적화를 위한 기초 자료로 활용할 예정이다.

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

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Si Young Kim
Tel: +82-42-870-5585, Fax: +82-42-870-5585, E-mail: siyoung.kim@khnp.co.kr
Received 30 November 2023 **Revised** 12 December 2023 **Accepted** 20 December 2023

2. 국내외 수정체 방사선 방호기준

2.1. 국제방사선방호위원회(ICRP Publication 118)

눈의 수정체와 같은 국부에 대한 피폭선량은 유효선량만으로 방사선 방호 목적을 달성하기 어렵기 때문에 ICRP에서는 등가선량을 이용하여 수정체와 피부등 국부에 대한 방사선 방호조치를 취하도록 권고하고 있다[1,2,3]. 등가선량(Equivalent dose)은 조직 또는 장기가 받은 평균 흡수선량에 방사선가중치를 적용한 선량으로 정의할 수 있다.

2007년 ICRP 103 권고에서는 수정체에 대한 선량한도를 기존 ICRP 60 권고의 선량한도와 일시적으로 동일하게 유지하였지만 1999년 이후 이루어진 수정체에 대한 역학연구조사 결과를 반영하여 선량한도 하향조정을 재검토 중에 있음을 밝혔다[1]. 이는 수정체에 대한 방사선 감수성이 이전에 고려되었던 것보다 높을 수 있음을 시사하고 있다. 특히, 과거 일본의 원자폭탄 생존자 및 피부 혈관종 치료 이력이 있는 어린이군에서 기존의 예상보다 낮은 수준의 선량에서 백내장이 초과 발생한 사례가 보고되었다[3,5,6]. 이러한 연구조사 결과를 바탕으로 ICRP는 2011년 4월 성명문을 통해 수정체 선량한도 하향조정 결과를 발표하였고 최종적으로 2012년 ICRP Publication 118에 하향조정된 수정체 문턱선량과 선량한도를 수록하였다. Table 1에는 ICRP 118에서 제시한 수정체에 대한 문턱선량과 등가선량 한도를 ICRP 60 권고와 비교하여 나타내었다[2,3]. ICRP에서는 유효선량인 전신선량에 대해 방사선방호 최적화의 과정을 거치듯이 수정체에 대한 방사선방호 최적화 과정이 필요함을 강조하고 있다[3].

2.2. 국제원자력기구 방사선방호 기본안전기준(GSR Part 3)

국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA)는 ICRP 103 권고를 반영하여 기존 방사선방호 기본안전기준(International Basic Safety Standards)을 2014년에 General Safety Requirement Part 3로 개정하였다[7]. IAEA는 이러한 기본안전기준을 각 회원국들이 준수하도록 요구하고 있으며, 각 국가에서도 이를 원자력법령 등에 반영하여 규제기준으로 활용하고 있다.

개정된 IAEA 방사선방호 기본안전기준에는 ICRP Publication 118에서 제시한 바와 같이 수정체에 대한 직무피폭 선량한도를 하향조정 하였다. Table 2에 IAEA 방사선방호 기본안전기준에서 규정한 수정체 선량한도를 요약하여 나타내었다[7].

2.3. 유럽연합 방사선방호 기본안전기준(Council Directive 2013/59/EURATOM)

IAEA가 방사선방호 기본안전기준 개정판(GSR Part 3)을 준비하는 것과 평행하게 유럽연합(European Union)도 ICRP 103 권고를 반영한 방사선방호 기본안전기준 개정을 진행하였다. 그리고 2013년 12월 5일 유럽연합은 개정된 기본안전기준을 Council Directive 2013/59/EURATOM으로 공표하였다[8]. EURATOM (European Atomic Energy Community)은 유럽원자력공동체로 유럽연합 회원국에 의해 만들어진 국제기구이다. IAEA 방사선방호 기본안전기준은 회원국에게 기준 준수 의무를 부과하지만 그 형식은 요건문서(Requirement)에 해당된다. 이에 비해 유럽연합 방사선방호 기본안전기준은 행정명령(Directive)이어서 법규 형식을 가지고 회원국에 대해서는 자국내 법규와 준하는 수준의 효력을 갖는다. 유럽연합 회원국은 약 5년의 유예기간을 가진 뒤 2018년 2월부터는 본 행정명령을 시행하고 있다.

Council Directive 2013/59/EURATOM는 ICRP 103 권고에 기반을 두어 방사선방호 규제를 개정하였다고 명시하고 있다. 2013/59/EURATOM도 IAEA 방사선방호 기본안전기준과 유사하게 수정체에 대한 직무피폭 등가선량 한도를 하향조정 하였다. 다만, 16~18세 사이의 수습생 종사자에 대해서는 선량한도를 보다 하향조정(연간 15 mSv)하여 일반인 수정체 선량한도와 동일한 값을 제시하고 있다. Table 2에 Council Directive 2013/59/EURATOM에서 규정한 수정체 선량한도를 나타내었다[8].

한편, 효율적인 피폭선량 감시를 위해 Council Directive 2013/59/EURATOM에서는 선량에 따라 방사선작업종사자를 2분류로 구분하여 감시를 진행할 것을 규정하고 있다. A 범주(Category A)의 종사자는 연간 6 mSv 이상의 유효선량을 받거나 또는 수정체에 대해 연간 15 mSv 이상 또는 피부와 손/발(Extremities)에 대해 연간 150 mSv 이상의 등가선량을 받는 종사자를 포함한다. B 범주(Category B) 종사자는 A 범주를 제외

Table 1. Comparison of ICRP recommendations of thresholds and occupational dose limit for lens of the eye

		ICRP 60 & 103	ICRP 118
Thresholds	Opacity	Acute Exposure: 0.5~2 Gy Chronic Exposure: 5 Gy	Acute and Chronic Expousre: 0.5 Sv (or 0.5 Gy)
	Cataract	Acute Exposure: 5 Gy Chronic Exposure: 8 Gy	
Occupational Dose Limit	Lens of the Eye	150 mSv/y	100 mSv/5y (50 mSv/y)[a]

a 20 mSv/year, averaged over defined periods of 5 years, with no single year exceeding 50 mSv

Table 2. Occupational Dose Limits for Lens of the Eyes of IAEA GSR Part 3 and Council Directive 2013/59/EURATOM

Categories		Lens of the eyes dose limits
IAEA	Over the age 18 years	20 mSv/year and averaged over defined periods of 5 years (with no single year exceeding 50 mSv)
	Apprentices of 16~18 years of ages	20 mSv in a year
EU	Adults	20 mSv/year and averaged over defined periods of 5 years (with no single year exceeding 50 mSv)
	Apprentices of 16~18 years of ages	15 mSv in a year

Table 3. Categorization of Radiation Workers in Council Directive 2013/59/EURATOM

Categories	Definition	Individual Monitoring
Category A	1) Effective dose greater than 6 mSv per year or 2) Equivalent dose greater than 15 mSv per year for lens of the eye or 3) Equivalent dose greater than 150 mSv per year for skin and extremities	Regularly monitored based on individual measurements performed by a dosimetry service
Category B	Not classified as category A workers	Confirmed that such workers are classified in category B[a]

[a]Not legally required individual monitoring by a dosimetry service

한 모든 종사자가 해당된다. A 범주 종사자의 경우 전문 판독서비스 기관을 통해 개인선량 평가를 수행하고 피폭선량 관리를 지속적으로 하도록 규정하고 있다. B 범주 종사자의 경우는 전문 판독서비스 기관의 피폭선량 관리가 요구되지 않으며 해당 종사자가 B 범주에 속한 종사자라는 것을 충분히 입증할 수 있으면 된다. Table 3에 Council Directive 2013/59/EURATOM에서 규정한 방사선작업종사자 범주의 정의와 개인선량 감시 규정을 나타내었다[8].

2.4. 미국 방사선방호측정위원회 보고서(NCRP Commentary No. 26)

미국의 방사선방호측정위원회(National Council on Radiation Protection and Measurements: NCRP)는 자국내에서 국제기구인 ICRP와 유사하게 방사선방호에 관한 지침이나 권고를 발행하는 기구이다. ICRP와 달리 NCRP는 주로 미국 내의 방사선방호와 측정에 관련된 정보 및 지침을 제공한다. 미국의 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission: NRC)는 NCRP에 ICRP의 수정체 등가선량 한도 하향조정에 대해 검토를 요청하였으며, NCRP는 2016년 말 NCRP Commentary No. 26 보고서를 발간하면서 수정체 선량한도 변경에 대한 NCRP 권고와 기술적 배경을 제공하였다[9]. 특히, NCRP Commentary No. 26 보고서는 수정체에 대한 기존의 문턱선량 및 선량한도 보다 낮은 선량에서 방사선피폭에 의한 백내장 발생 가능성 유무를 집중적으로 검토하고 관련된 최근의 역학연구조사 결과를 제공하고 있다.

수정체 등가선량 한도 하향조정과 관련하여 NCRP는 현재까지 수행된 과학적 연구결과가 많은 불확실성을 포함하고 있어 수정체에 대한 문턱선량을 수치화하는 것은 불가능하다는 결론을 내렸다. 그럼에도 불구하고 NCRP는 현재까지 수행된 다양한 역학연구에서 기존의 문턱선량 보다 낮은 선량에서 수정체 혼탁 및 백내장 발생에 관한 사례가 도출되고 있음을 확인하였다고 밝히고 있다. 따라서 NCRP는 현재의 수정체 직무피폭 등가선량 한도인 150 mSv/y를 흡수선량 50 mGy/y로 하향조정하는 것을 신중하게(Prudent) 권고하는 입장을 발표하였다. 또한 수정체에 대한 피폭선량 관리도 전신에 대한 유효선량 관리처럼 방사선방호 최적화 원칙인 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)를 적용할 것을 권고하였다. 특히, 수정체에 대한 기존의 등가선량 한도가 흡수선량 한도로 변경된 이유는 '수정체와 같이 특정 조직에 대한 방사선장해와 관련하여서는 단위면적당 흡수된 방사선에너지의 양을 나타내는 흡수선량이 더욱 적절한 선량단위이다' 라는 NCRP의 입장이 반영된 것이다. 한편, 일반인에 대한 수정체 등가선량 한도는 현재와 동일하게 15 mSv/y를 그대로 유지하는 것으로 결정하였다.

2008년 NRC는 미국 방사선방호 규제인 10 CFR (Code of Federal Regulation) Part 20을 ICRP 103 권고에 부합되도록 개정할 계획을 발표하였으며, 2014년에는 미국 관보인 Federal Register에 NRC 방사선방호 규제 개정방안을 공표하였다[9, 10]. 그러나 2016년 12월 NRC는 이해당사자(원전 및 방사선관련 산업) 의견수렴 결과를 바탕으로 ICRP 103 권고 법제화 중단을 결정하였다[11]. 따라서 수정체 등가선량 한도 하향조정 및 관련규제 개정도 ICRP 103 권고 법제화 중단과 함께 철회되었다. NRC가 10 CFR Part 20 개정을 철회한 사유로 규제 개정에

Table 4. Draft of Proposed Occupational Annual Dose Limits by Korean NSSC

Categories		Effective Dose Limit (mSv/y)	Equivalent Dose Limit (mSv/y)
Radiation Worker	Category A	20[a]	Lens of the Eye: 20[a] Hands, Feet, Skin: 500
	Category B[b]	6	Lens of the Eye: 15 Hands, Feet, Skin: 150

[a]20 mSv/year and averaged over defined periods of 5 years (with no single year exceeding 50 mSv)
[b]Other occupational exposure concenters including under 18 years old students who receive technical training

따른 비용 대비 이득의 미미함이 주요 원인으로 지목되었다[11]. 결론적으로 미국의 NRC는 자국내 방사선작업종사자의 수정체에 대한 등가선량한도를 당해연도 기준 150 mSv로 고수하고 있다.

2.5. 국내 원자력안전위원회 ICRP 103 권고 법제화 연구결과

ICRP 103 권고 및 이를 반영한 IAEA 방사선방호 기본안전기준(GSR Part 3) 발간으로 인해 국내에서는 ICRP 60 권고 기반의 방사선방호 관련법규에 ICRP 103 권고를 반영해야 할 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 이에 원자력안전위원회는 “ICRP 103 신권고 및 IAEA GSR Part 3 국내도입을 위한 기술기준 최적화 연구개발”을 수행하였다[4]. 연구결과 수정체에 대한 직무피폭 등가선량 한도를 ICRP Publication 118 및 IAEA 방사선방호 기본안전기준에서 제시한 바와 같이 하향조정 하는 것이 새로운 규제안으로 제안되었다. 특이한 점은 Council Directive 2013/59/EURATOM와 유사하게 본 연구결과에서는 예상 피폭선량에 따라 방사선작업종사자를 2분류로 구분하여 각각의 해당 선량한도를 적용할 것을 규정하고 있다. A군 종사자는 예상 연간 유효선량이 선량한도의 1/10 (연간 2 mSv)을 초과할 우려가 있는 직무피폭자로 정의하였고, B군 종사자는 A군 종사자를 제외한 모든 종사자로 지정하였다. 현재 국내 법규에서 수시출입자로 지정된 종사자들은 B군 종사자에 대부분 포함될 것으로 판단된다. Table 4에 원자력안전위원회 연구결과에서 제안한 선량한도를 요약하여 나타내었다[4].

3. 수정체 방사선방호 기술기준

3.1. 국제표준화기구 방사선방호 절차(ISO 15382:2015)

국제표준화기구(International Organization for Standardization: ISO)는 방사선작업종사자의 수정체, 피부, 말단(손과 발)에 대한 방사선감시 지침을 제공하고자 ISO 15382:2015를 발간하였다[12].

ISO 15382:2015에 따르면 불균일방사선장(Non-homogeneous exposure) 조건에서는 방사선작업종사자 전신에 대한 방사선감시가 수정체에 대한 피폭선량을 적절히 평가하지 못할 수 있다. 특히, 저에너지 감마선이나 베타선이 존재할 경우 이로 인한 수정체 피폭선량은 무시할 수준이 아니기 때문에 ISO 15382:2015에서는 불균일방사선장 조건에서의 수정체에 대한 피폭선량 관리가 필요함을 강조하고 있다. 또한 방사선피폭을 유발하는 선원이 작업종사자의 눈 주위에 위치하거나 고에너지 베타선원이 존재하는 작업장의 경우 수정체에 대한 방사선감시가 필수적임을 언급하고있다.

방사선감시의 필요성을 판단하기 위해 방사선장의 특성을 분석하는 것이 중요하다. 모든 에너지 준위의 감마 방사선장은 작업종사자의 수정체, 피부 및 말단에 방사선피폭을 유발한다. 에너지가 60 keV 이상인 베타선의 경우 신체 내 0.07 mm까지 투과할 수 있기 때문에 피부 피폭선량에 영향을 주며, 700 keV 이상의 베타선은 신체 내 3 mm까지 투과할 수 있어 수정체 피폭선량에 영향을 준다. 원전과 같은 경우 핵연료 취급 및 핵연료물질 누설 구역 등에서는 700 keV 이상의 고에너지 베타선이 예상되기 때문에 이에 대한 방사선감시가 필요하다. 수정체 피폭선량 감시가 필요한 선량 기준으로 ISO는 수정체 등가선량 한도의 3/10인 6 mSv/y를 제안하였다[12].

수정체 피폭선량 평가와 관련하여 수치 모사는 특정 피폭 시나리오에 대해 어떠한 인자들이 영향을 주는지에 대해 평가할 수 있는 방법이다. 일반적으로 몬테카를로 방법을 이용한 MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) 전산코드가 수정체 피폭선량평가 예측에 활용되고 있다. 만약 전산코드를 이용하여 피폭선량 평가를 예측한다면 실험을 통해 실 측정값과의 비교 검증이 필요하다.

수정체 선량계는 최대한 눈 주위에 가까워야 한다. 안면 마스크나 납 차폐 보호안경을 착용한다면 수정체 선량계는 마스크 또는 보호안경 뒷면에 위치하도록 한다. 만약, 적절한 착용위치가 확보되지 않아 수정체 선량계를 보호안경 밖 또는 옆에 착용한다면 선량평가 시 반드시 적절한 보정계수(Correction factors)가 반영되도록 조치한다. 일부 연구에서는 작업종사자 가슴에 착용하는 전신선량계를 이용하여 수정체 피폭선량 평가가 가능하다고 제시하고 있다[12,13]. 이는 입사하는 방사선이 균일한 고에너지 방사선장에서는 가능할 것으로 판단되나, 불균일 방사선장에서는 일반적으로 권고되지 않는다.

직접적으로 수정체 피폭선량을 평가하는 방법은 실용량인 개인선량당량 $H_p(3)$을 측정할수 있는 선량계를 이용하여 $H_p(3)$

을 직접측정하는 것이다. 만약 사전에 작업지역의 방사선장에 대한 충분한 정보를 갖고 있다면 $H_p(3)$ 측정은 다른 실용량인 $H_p(0.07)$ 또는 $H_p(10)$의 선량계를 활용하여 수정체에 대한 피폭선량을 간접적으로도 예측할 수 있다.

3.2. 국제원자력기구 수정체 방사선방호 지침(IAEA TECDOC No. 1731)

IAEA는 수정체 직무피폭 선량한도 하향조정과 관련하여 수정체 방사선방호 지침을 TECDOC No. 1731로 발간하였다[14]. 특히, TECDOC No. 1731은 수정체 등가선량이 약 5 mSv/y를 초과할 것으로 예상될 경우(ISO는 6 mSv/y를 제안) 수정체에 대한 상시 피폭선량 관리가 필요함을 기술하고 있다. 또한, TECDOC No. 1731에서는 ISO 15382:2015에서 언급하는 바와 동일하게 작업장의 방사선장을 잘 알고 있다면 $H_p(3)$은 $H_p(0.07)$ 또는 $H_p(10)$ 측정용 선량계를 활용하여 수정체에 대한 피폭선량을 적절하게 예측할 수 있다고 언급하고 있다[15]. 그러나 $H_p(0.07)$ 또는 $H_p(10)$의 선량계를 활용할 경우 $H_p(3)$ 측정의 정확성이 낮아지거나 불확도가 증가될 수도 있다.

상기 보고서에서 기술하는 수정체 피폭선량 감시방법은 수정체에 입사하는 방사선의 종류에 따라 달라지며, 1) 입사 방사선의 에너지와 입사각도, 2) 방사선장의 기하학적 구조, 3) 개인방호장구의 사용 유무 등의 주요 세 가지 인자에 의해 영향을 받게 된다.

3.3. 국제방사선방호협회 수정체 방사선방호 지침

2017년 국제방사선방호협회(International Radiation Protection Association: IRPA)는 ICRP의 수정체 등가선량 한도 하향조정과 관련하여 작업종사자의 수정체 방사선방호를 위한 실무적 지침을 제시하였다[16]. 상기 지침에는 수정체 피폭선량에 대해 언제, 어떻게 감시를 수행해야 하는지에 대한 실무적인 사항들이 기술되어 있다.

우선, 언제 수정체 직무피폭 선량을 감시해야 하는지와 관련하여 중성자와 중이온(Heavy ion) 입자는 우주비행 또는 사고시를 제외하고 방사선피폭을 주는 경우가 거의 없기 때문에 일반적으로 수정체 직무피폭 선량 감시가 불필요하다고 기술하고 있다. 그리고 방사선 감시를 위해 작업장의 방사선장과 방사선정보를 활용하여 어떠한 종사자가 수정체에 방사선피폭을 받는지에 대해 위험도평가를 수행해야 한다.

일반적으로 수정체 직무피폭이 예상되는 작업종사자는 크게 1) 전신에 대해 균일하게(Uniform) 방사선피폭을 받는 종사자(대부분의 방사선작업장이 해당됨), 2) 불균일방사선장에서 700 keV 이상의 베타선에 의해 수정체 등가선량은 높지만 유효선량은 낮은 종사자, 3) 납 앞치마 등의 개인방호장구를 활용하여 신체의 일부를 차폐하지만 불균일방사선장으로 인해 수정체에 대한 등가선량이 높은 의료 종사자 3가지로 분류된다. 이중 첫 번째 분류인 균일한 방사선장에서 작업하는 종사자의 경우, 가슴에 착용하는 전신선량계만 사용하여도 수정체 피폭선량에 대한 적절한 평가를 할 수 있다. 따라서 이 경우 별도의 수정체 선량계를 착용할 필요가 없으며 추가적인 감시 절차도 요구되지 않는다. 한편, 두 번째와 세 번째 분류의 종사자는 수정체에 대한 피폭선량 감시가 요구된다. 이 경우, 적절한 방호조치 수립을 위해 방사선장 분석과 베타선의 최대에너지를 조사할 필요가 있다.

수정체에 대한 방사선감시에 앞서 방사선작업종사자의 수정체 피폭선량이 어느 수준인지를 먼저 평가하는 것이 중요하며 이를 통해 수정체 피폭선량에 대한 정기적 감시 필요성 유무를 판단할 수 있다. 수정체 피폭선량 예측평가는 방사선장 분석, 전신선량 분석, 전산모사, 또는 확인측정 등을 통해 수행될 수 있다. 만약, 해당 작업장의 방사선장을 잘 알고 있다면 수정체 등가선량인 $H_p(3)$은 다른 실용량인 $H_p(0.07)$ 또는 $H_p(10)$ 측정을 통해 예측할 수 있다. 이 경우, 보정계수를 적용하여 $H_p(3)$과 다른 실용량 간의 차이를 보정해주는 것이 필요하다. IRPA는 수정체 직무피폭 감시가 필요한 선량 준위를 제안하였으며, 수정체에 대한 연간 예측 등가선량이 6 mSv 이상인 경우 정기적인 수정체 피폭선량 감시가 필요함을 강조하고 있다. 이는 ISO가 수정체 피폭선량 감시가 필요한 선량 기준과 동일하다[12]. 수정체 등가선량이 1~6 mSv/y로 예측되는 경우는 선량준위 확인이 필요하며 정기적인 감시에 대해 자율적으로 판단하도록 하고 있다.

수정체 피폭선량을 가장 정확하게 측정할 수 있는 방법은 선량계를 작업종사자의 눈 주위에 최대한 가깝게 위치시키고 $H_p(3)$을 직접측정하는 것이다. 균일방사선장에서는 가슴에 전신선량계를 착용하여 유효선량과 수정체 등가선량을 적절하게 평가할 수 있다. 의료 종사자와 같이 불균일방사선장에서 근무하는 경우 별도의 수정체 선량계 착용이 필요하다. 만약, 수정체 등가선량이 6 mSv/y를 초과할 것으로 예상되지만 작업종사자의 가슴이나 옷깃에 한 개의 선량계만 착용하여 유효선량과 수정체 등가선량을 평가하고자 한다면 $H_p(10)$과 $H_p(3)$과의 차이를 보정해주는 인자를 적용해야 한다.

3.4. 일본 보건물리학회 수정체 방사선방호 지침

일본에서는 ICRP 118에서 권고하는 종사자의 수정체 선량한도를 자국내 규정에 반영하기 위해 2017년부터 2018년까지 검토하였다. 그 결과 일본의 후생노동성은 ICRP 118과 동일한 수정체 등가선량한도로 자국내 관련규정을 개정하였으며 2021년 4월부터 관련 법령을 시행중이다. 일본의 관련법령 개정은 일본보건물리학회(Japan Health Physics Society: JHPS)에서 2020년 7월에 발간한 수정체에 대한 방사선 선량 감시 지침에 기반하고 있다[17].

JHPS에서 발간한 지침의 적용 범위는 광자, 700 keV 이상의 전자선 등에 대한 계획피폭 상황에서의 방사선작업자 수정체 감시로 한정 되어있다[18]. 또한, 수정체 등가선량이 $H_p(10)$ 또는

$H_p(0.07)$를 사용하여 적절하게 추정될 수 있는 경우 $H_p(3)$를 직접 측정해야 하는 것은 의무가 아님을 언급하고 있다. JHPS에서 권고하는 수정체 등가선량 감시 방법에 따르면, 우선 방사선 피폭조건이 균일 또는 불균일한지 판단하고 각각의 경우에서 선량계의 착용위치, 예상되는 피폭선량의 수준에 따라 수정체 감시에 활용되는 실용량이 결정된다. 구체적인 방법은 아래와 같다.

Case 1. 균일한 노출 시 (상체에 개인(전신)선량계 패용)

1-1. 예상 선량이 선량한도에 가깝거나 초과할 가능성이 있는 경우 상체와 눈 부근에 선량계를 패용하고 눈 근처의 선량계로 감시되는 $H_p(3)$를 수정체 등가선량으로 평가

1-2. 예상 선량이 선량한도에 가깝지 않거나 초과할 가능성이 없는 경우 상체에 패용한 개인선량계의 $H_p(10)$ 또는 $H_p(0.07)$ 중 더 높은 선량을 수정체 등가선량으로 평가

Case 2. 불균일한 노출 시 (상체 및 최대 선량 예상부위에 선량계 추가 패용)

2-1. 예상 선량이 선량한도에 가깝거나 초과할 가능성이 있는 경우 상체, 최대 선량 예상부위 및 눈 근처에 선량계를 패용하고 눈 근처의 선량계로 감시되는 $H_p(3)$를 수정체 등가선량으로 평가

2-2. 예상 선량이 선량한도에 가깝지 않거나 초과할 가능성이 없는 경우 상체와 최대 선량 예상부위에 패용한 선량계 중 눈과 가까운 위치의 개인선량계 판독값($H_p(10)$ 또는 $H_p(0.07)$ 중 더 큰 것)을 수정체 등가선량으로 평가

3.5. 캐나다 수정체 방사선방호 지침

캐나다 원자력안전위원회(Canadian Nuclear Safety Commission: CNSC)에서는 ICRP 118의 종사자 수정체 등가선량 하향조정 발표후 자국내 관련 규정 “Radiation Protection Regulations” 반영을 위해 2013년부터 이해당사자들의 의견을 적극적으로 수렴한바 있다. 최종적으로 CNSC에서는 이해당사자들의 의견을 반영하여 종사자의 수정체 등가선량한도를 연간 50 mSv로 선정하였으며 2021년 1월부터 시행되고 있다[19]. CNSC의 규제지침인 REGDOC-2.7.2 에는 수정체 등가선량 평가를 포함하여 전반적인 종사자 선량평가에 관한 지침을 제공하고 있다[20]. 상기 규제지침에서는 수정체 등가선량 평가가 필요한 상황으로 첫째 불균일 방사선장, 둘째 투과성이 약한 방사선장으로 전신선량보다 수정체 등가선량이 높을 수 있는 피폭 상황을 제시하고 있다. 투과성이 약한 방사선장의 경우 40 keV 이하의 광자, 최대 에너지가 700 keV 이상인 베타선이 해당된다.

만약 피폭 상황이 상기 두 조건중 하나이상 해당될 경우 눈인근에서 $H_p(3)$을 직접 측정하거나, 눈 인근 또는 그 외 신체 부위에서 $H_p(10)$ 또는 $H_p(0.07)$을 측정해야 한다. 그리고 눈과 가까운 위치에서 측정한 $H_p(10)$ 또는 $H_p(0.07)$ 중 하나를 수정체 등가선량으로 가정한다. 이와 반대로 두 조건 모두 해당되지 않을 경우 전신선량계의 $H_p(10)$ 또는 $H_p(0.07)$ 중 하나를 수정체 등가선량으로 가정한다.

4. 결 론

2011년 4월 ICRP가 방사선작업종사자에 대한 수정체 등가선량한도를 하향 조정안을 발표함에 따라 IAEA, EU에서도 선량한도 하향 조정안을 발표하였다. 단, 미국의 경우 ICRP의 권고를 검토하였으나 경제성 등의 이유로 최종적으로 자국의 규제요건으로는 적용하지 않았다. 우리나라의 경우 2016년 원자력안전위원회에서 수행한 ICRP 신권고 국내 도입 연구결과에서 수정체 등가선량한도 하향(안)을 발표한바 있다.

IAEA, ISO, IRPA에서는 수정체 등가선량 한도 하향에 따라 수정체 방사선방호의 중요성을 확인하고, 이에 따라 수정체 방호 지침을 발표하였다. 각 기관별 수정체 방호지침은 공통적으로 불균일방사선장, 고에너지 베타선장에서는 수정체 방사선방호가 필요하다고 언급하고 있다. 또한, ISO와 IRPA에서는 수정체 등가선량에 대한 주기적인 감시가 필요한 피폭선량 준위를 연간 6 mSv를 IAEA의 경우 연간 5 mSv를 제시하고 있다.

일본과 캐나다에서는 2021년 상반기에 ICRP 118의 수정체 등가선량한도를 자국내 상황에 맞게 각각 반영하였다. 또한, IAEA 등 국제 기구의 지침을 참고하여 자국내 수정체 방사선방호 지침을 수립하였다. 각 지침에서는 공통적으로 불균일한 방사선장을 수정체 감시가 필요한 조건으로 선정하였다. 또한, 공통적으로 ‘수정체 등가선량을 눈 인근 또는 기타 신체부위에서 측정한 $H_p(10)$ 또는 $H_p(0.07)$과 등가임을 가정할 수 있다’라고 언급하고 있다.

ICRP 신권고가 국내 원자력안전법에 도입될 경우 원전 종사자의 수정체 피폭선량 관리가 현재보다 중요해질 것으로 예상된다. 다만, 예상되는 수정체 피폭선량이 낮은 방사선작업을 포함하여 모든 종사자에게 수정체 선량계를 패용하게 하는 것은 효율적이지 못할 것으로 판단된다. 또한, 고온 다습한 원전내 작업환경에서 수정체 선량계를 눈 인근에 패용할 경우 작업자의 작업효율을 저해하는 등 불이익을 가져올 가능성도 있다. 따라서 IAEA, ISO 등 해외 국가에서 수립한 수정체 방사선방호 지침을 참고하여, 수정체 등가선량 평가가 필요할 것으로 예상되는 주요 작업을 선정하는 등 원전 종사자 수정체 방사선 방호 절차의 최적화가 필요할 것으로 예상된다.

References

1. ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP 103.
2. ICRP. 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP 60.

3. ICRP. 2012. ICRP statement of tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs - Threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP 118.
4. 원자력안전위원회. 2017. ICRP 103 신권고 및 IAEA GSR Part 3 국내도입을 위한 기술기준 최적화 연구개발. 대한방사선방어학회, 2016-25호.
5. Minamoto A, Taniguchi H, Yoshitani N *et al*. 2004. Cataracts in atomic bomb survivors. *International Journal of Radiation Biology* **80**:339-345.
6. Hall P, Granath F, Lundell M *et al*. 1999. Lenticular opacities in individuals exposed to ionising radiation in infancy. *Radiation Research* **152**:190-195.
7. IAEA. 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna, Austria: IAEA, General Safety Requirements Part 3.
8. EU. 2013. Council Directive 2013/59 EURATOM laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom.
9. U.S. NRC. 2009. Staff Requirements - SECY-08-0197 - Options to Revise Radiation Protection Regulations and Guidance with Respect to the 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, SRM-SECY-08-0197
10. U.S. Federal Register. 2014. Advance notice of proposed rulemaking; request for comments. **79**(143):43284-43300.
11. U.S. Federal Register. 2016. Rulemaking Activities Being Discontinued by the NRC. **81**(249):95410-95412.
12. ISO. 2015. Radiological protection - Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities. ISO 15382:2015. Geneva, Switzerland.
13. Lie Ø, Paulsen G, and Wohni T. 2008. Assessment of Effective Dose and dose to the lens of the eye for the interventional cardiologist. *Radiation Protection Dosimetry* **132**(3):313-318.
14. IAEA. 2013. Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye. IAEA TECDOC 1731.
15. Gualdrini G, Ferrari P, and Tanner R. 2013. Fluence to $H_p(3)$ conversion coefficients for neutrons from thermal to 15 MeV. Radiation Protection Dosimetry. https://doi.10.1093/rpd/nct126.
16. IRPA. 2017. IRPA Guidance on implementation for eye dose monitoring and eye protection of workers.
17. Yokoyama *et al*. 2022. The Japan health physics society guideline on dose monitoring for the lens of the eye. *Journal of Radiation Protection and Research* **47**(1):1-7.
18. JHPS. Guideline on dose monitoring for the lens of eye [Internet]. Tokyo, Japan; Japan Health Physics Society; 2020 [cited 2022 Mar 1]. Available from: http://www.jhps.or.jp/upimg/files/suishotai-guideline20210603%282%29.pdf.
19. Jacques Dubeau *et al*. 2022. Current stauts of eye-lens dosimetry in Canada. *Journal of Radiological Protection* **42**.
20. CNSC. 2021. Dosimetry, volume 1: Ascertaining Occupational Dose. REGCOD-2.7.2.