고피폭 예상 불균일 방사선장하에서 복수선량계를 이용한 피폭방사선량 평가에 대한 고찰

김희근[1] · 공태영[2] · 동경래[3,*] · 신지윤[3] · 최은진[4]

[1]위덕대학교 에너지전기공학부, [2]한수원중앙연구원 방사선환경연구소,
[3]광주보건대학교 방사선과, [4]동신대학교 보건의료학과

A Review on the Application of Two-dosimeter Algorithm to Estimate the Effective Dose in an Inhomogeneous Radiation Field and High Dose Rate

Hee-Geun Kim[1], Tae-Young Kong[2], Kyung-Rae Dong[3,*], Ji-Yun Shin[3] and Eun-Jin Choi[4]

[1]*Division of Energy & Electrical Engineering, UiDuk University, 261, Donghae-daero, Gangdong-myeon, Gyeongju-si, Gyeongsangbuk-do 38004, Republic of Korea*
[2]*Radiation & Environmental Laboratory, KHNP-CRI, 70, Yuseong-daero 1312 Beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34101, Republic of Korea*
[3]*Department of Radiological Technology, Gwangju Health University, 73, Bungmun-daero, 419 Beon-gil, Gwangsan-gu, Gwangju 62287, Republic of Korea*
[4]*Department of Public Health and Medicine, Dongshin University Graduate School, 185, Geonjae-ro, Naju-si, Jeollanam-do 58245, Republic of Korea*

Abstract - Maintenance on the water chamber of steam generator during outages has a likelihood of high radiation exposure to workers in nuclear power plants (NPPs). In such work, the radiation source geometry is formed vertically from top to bottom, and the radiation is generally scattered due to the narrow and limited space inside the water chamber of the steam generator. Thus, high radiation dose rates and non-uniform radiation fields can cause high radiation exposure to workers even short time period of task. In Korean NPPs, radiation workers who work in non-uniform radiation fields typically wear two dosimeters on the chest and back to evaluate their exposure precisely. This paper investigates the applicability of two-dosimeter approaches to medical workers who participate in the radiation diagnosis or handle radioisotopes in a hospital.

Key words : NPPs, High radiation dose rates, Non-uniform radiation fields

서 론

국제방사선방호위원회(ICRP)는 2007년 방사선방호에 대한 권고를 개정하여 ICRP 103으로 발간하였다(ICRP 1990; ICRP 2007). 국제원자력기구(IAEA)는 이를 바탕으로 2015년 방사선방호 및 방사선원 안전을 위한 기본안전표준을 개정하여 일반안전원칙(GSR) Parts 3로 발간하였다(IAEA 1996; IAEA 2014). 이에 따라 국내에서는 ICRP 103과 IAEA GSR Parts 3을 원자력안전법령에 도입하기 위한

* Corresponding author: Kyung-Rae Dong, Tel. +82-62-958-7668, Fax. +82-62-958-7669, E-mail. krdong@hanmail.net

연구를 진행 중에 있다(원자력안전위원회 2016). 이 중에서 유효선량 평가는 ICRP 103과 IAEA GSR Parts 3에서 핵심으로 다루고 있는 내용으로 방사선작업종사자의 피폭방사선량 평가에 큰 영향을 미치고 있다.

원전 증기발생기 수실은 공간이 좁은 지역으로, 위쪽에 위치한 전열관에서 아래 방향으로 방사선이 발생하여 산란된다. 이러한 증기발생기 수실은 방사선량률이 높으며 불균일하게 나타나는 지역이다. 이에 따라 이곳에 출입한 작업자는 짧은 시간 동안의 작업에도 불구하고, 높은 방사선량을 피폭 받을 수 있어 피폭방사선량 평가와 작업관리에 매우 신중을 기해야한다. 이러한 점을 고려하여 원전에서는 두 개의 열형광선량계(이 논문에서는 복수선량계라 칭함)를 가슴 부위와 등 부위에 동시에 패용하여 방사선작업종사자가 받는 피폭방사선량을 정확하게 평가하도록 선량평가 절차가 개선되었다(Kim and Kong 2010; Kim *et al*. 2017).

이 논문은 원전의 고피폭 불균일 작업에서 두 개의 복수선량계를 패용하여 원전종사자의 피폭방사선량 평가를 체계적으로 개선한 경험을 정리하였다. 또한 두 개의 복수선량계를 이용하여 원전종사자 선량평가에 적용중인 방법에 대해, ICRP 103의 선량평가 개념에 부합하는지를 검토하였다. 이러한 경험을 바탕으로 방사성동위원소 분배 작업과 같이 유사한 고피폭 불균일 방사선 작업에서 복수선량계의 적용 가능성을 고찰해 보았다. 이 논문에서 기술되는 내용은 새로이 시험을 실시한 것이 아니며, 피폭방사선량 평가에 대한 이해를 돕고자 과거에 국내외 저널에 게재된 것을 편집하여 투고하였다.

재료 및 방법

원전 불균일 방사선장하에서 고피폭이 예상되는 방사선작업을 수행하는 종사자 대상으로 정확한 피폭방사선량평가를 위해 문헌조사를 통해 6개의 복수선량계 후보 알고리즘을 선정하였다. 이들 후보 알고리즘의 공통적인 특성을 분석하였고, 그 결과 알고리즘 특성에 따라 머리, 가슴 및 등에 개인선량계를 패용하고, 이들 개인선량계 판독 값 중에서 2개를 이용하여 피폭방사선량을 평가하는 점을 발견하였다. 이에 따라 원전 고피폭예상 작업에 참여하는 방사선작업종사자를 대상으로 방사선작업종사자의 신체 3곳에 열형광선량계(Thermoluminescent dosimeter; TLD)를 패용하고 판독하였다. 이 판독 값 중에서 후보 알고리즘 특성에 따라 피폭방사선량을 계산하였고, 다양한 분석을 통해 복수선량계 알고리즘을 선정하였다. 또한 원전 피폭방사선량평가 실무자, 외부전문가, 규제기관 관련자를 대상으로 의견수렴과 대외 발표를 통해 선정된 알고리즘의 선정 타당성을 확인하였다. 이 결과는 국내 규제지침에 반영되었고, 해외 워크샵과 저널 투고를 통해 선정된 알고리즘의 기술적 배경을 강화하였다.

결 과

1. 복수선량계 알고리즘 검토

미국국립표준기술협회(ANSI)는 고피폭 불균일 방사선장에 적용할 복수선량계 알고리즘 지침을 제시하였다(ANSI 1997). 이 알고리즘은 가슴과 최대 방사선량을 받을 곳으로 예상되는 조직에 여러 개의 개인선량계를 패용하여, 조직가중계수와 피폭방사선량의 곱으로 유효선량당량(Effective Dose Equivalent: EDE)을 산출하도록 규정하고 있다. 유효선량당량의 계산을 위해 머리가 받은 선량에 11% 가중치, 가슴 이하 조직이 받은 선량에 89% 가중치를 부여하고 이를 합산해 유효선량당량을 평가하고 있다. 이 알고리즘은 증기발생기 수실과 같이 방사선장이 상하로 형성되는 것을 전제로 하여 지침을 제시하고 있다.

미국방사선방호위원회(NCRP)는 가슴과 등에 각각 복수선량계를 패용하고, 이들 판독 값을 기준으로 유효선량당량을 평가하는 복수선량계 알고리즘 두 가지를 제안하였다(NCRP 1995). 알고리즘 중 하나는 가슴이 받은 피폭방사선량에 70% 가중치, 등이 받은 선량에 30% 가중치를 부여하여 유효선량당량을 계산하였고, 다른 하나는 가슴이 받은 선량에 55% 가중치, 등이 받은 선량에 50% 가중치를 부여하여 유효선량당량을 계산하도록 권고하였다. 한편 미국원자력규제위원회(USNRC)는 방사선작업종사자의 전면(가슴)과 후면(등)에 패용한 선량계 판독 값에 가중치를 부여해 유효선량당량을 계산하는 방법을 제안하였다(USNRC 2004). 또한 Lakshmanan과 Kim 등은 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 통해 NCRP나 USNRC에서 제안한 알고리즘과 유사한 복수선량계 알고리즘을 제시하였다(Lakshmanan *et al*. 1991; Kim 1998). 이러한 내용을 Table 1에 요약하였다.

2. 복수선량계 알고리즘 개선 적용

2006년 이전 국내원전에는 복수선량계 알고리즘을 적용하는 절차가 통일되어 있지 않았다. 특히 두 개의 복수선량계 판독 값 중에서 높은 값을 유효선량당량 또는 유효선량(이하 유효선량당량으로 표기함)으로 평가하였다(Kim and Kong 2010; Kim *et al*. 2017). 이러한 보수적인 선량평가는, 방사선작업종사자의 선량한도가 50 mSv·년$^{-1}$에서 연평균 20 mSv·년$^{-1}$으로 하향 조정되기 전에는 피폭방사선량 관리에 여유가 있어, 크게 문제되지 않았다. 그러나 2003년 이후 ICRP 60 적용에 따라 선량한도가 연평균 20 mSv 수준으로 낮아짐에 따라 복수선량계를 이용한 피폭방사선량 평가의

Table 1. Two-dosimeter Algorithms

Developer	Two-Dosimeter Algorithm
American National Standard Institute (ANSI)	$H_E(estimate) = 0.11H_P(10)_{head} + (0.89)H_P(10)_{torso}$
National Council Radiation Protection and Measurement (NCRP)	$H_E(estimate) = 0.70H_P(10)_{front} + 0.30H_P(10)_{back}$ $H_E(estimate) = 0.55H_P(10)_{front} + 0.50H_P(10)_{back}$
Electric Power Research Institute (EPRI) & Nuclear Regulatory Commission (NRC)	$EDE_{ex} = \frac{1}{2}(Hi + Mean) = \frac{3}{4}Hi + \frac{1}{4}Lo$
Lakshmanan	$H_E(estimate) = \frac{[H_P(10)_{front} + H_P(10)_{back}]}{1.5}$
Kim	$H_E(estimate) = h(H_E)[0.58H_P(10)_{front} + 0.42H_P(10)_{back}]$ where, $h(H_E) = \frac{0.9H_E(AP)}{0.58H_{front}(AP) + 0.42H_{back}(AP)}$

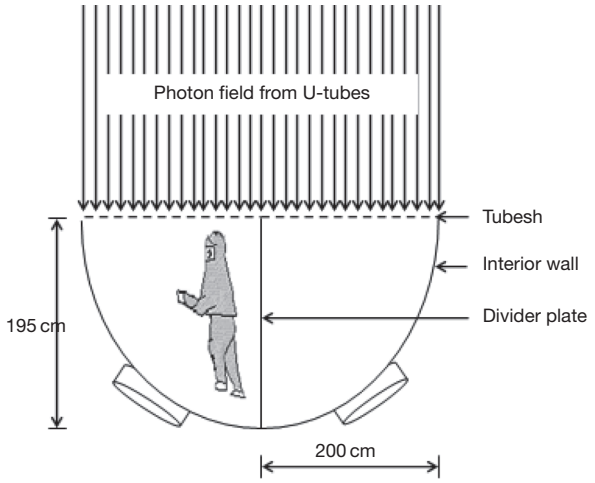

Fig. 1. Source geometry of steam generator.

개선 필요성이 대두되었다.

복수선량계 알고리즘 중에서 원전에 적용할 최적의 알고리즘을 선정하고자 국내원전 두 곳에서 현장시험을 실시하였다(Kim and Kong 2010; Kim *et al*. 2017). 고피폭이 예상되고 불균일 방사선장이 형성되는 방사선작업으로 증기발생기 수실작업을 선정하였다. Fig. 1에 증기발생기 수실에서 방사선장의 형성을 개략적으로 나타내었다(Kim and Kong 2010; Kim *et al*. 2017).

이 작업에 참여한 작업종사자에게 각각 3개의 열형광선량계(TLD)와 전자보조선량계(ADR)를 지급하였고, 이를 머리, 가슴, 등에 각각 TLD와 ADR을 동시에 패용하였다. 이렇게 3개의 TLD를 패용한 이유는, 일부 알고리즘은 머리와 가슴에 패용한 TLD 판독 값을 필요로 하며, 일부 알고리즘은 가슴과 등 부위에 패용한 TLD 판독 값이 필요하므로, 유효선량당량 계산에 필요한 TLD 판독 값을 얻고자 함이었다. 현장시험은 증기발생기 노즐댐 설치작업 등 고방사선 피폭이 예상되고 불균일한 방사선장이 형성되는 작업을 대상으로 하였다. 작업 전 TLD와 ADR을 작업종사자에게 지급하면서 시험의 취지와 필요성을 사전에 설명하여 협조를 구했다. 작업 후에는 즉시 TLD와 ADR을 회수하여 판독하였고, 3개의 TLD 판독 값 중에서 알고리즘 특성에 따라 2개의 TLD 판독 값을 기준으로 유효선량당량을 계산하였다. 이 경우 ADR 판독 값은 TLD 판독 값을 보증하는 수단으로 활용하였다. 이 시험 결과를 Table 2에 나타내었다(Kim and

Table 2. TLD and ADR readouts for the installation of a steam generator nozzle dam at Nuclear Power Plant (NPP)

User[a]	TLD readout			ADR readout		
	Head	Chest	Back	Head	Chest	Back
A	4.25	2.96	3.68	4.47	3.36	4.03
B	2.60	2.09	2.71	2.85	2.25	2.99
C	2.41	1.90	2.13	2.65	1.97	2.57
D	2.29	1.57	2.07	2.68	1.93	2.37
E	3.57	2.73	3.69	4.02	2.94	4.16
F	2.73	1.80	2.25	2.87	1.99	2.75
G	3.51	2.62	3.02	4.03	2.68	3.65
H	2.00	1.75	2.00	2.23	1.79	2.18
I	2.19	1.81	2.09	2.53	1.90	2.42
J	1.93	1.71	2.04	2.26	1.87	2.30
K	2.34	1.71	2.24	2.56	1.77	2.42
L	1.82	1.52	1.86	2.06	1.61	2.17
M	2.02	1.50	1.97	2.28	1.73	2.21
N	4.22	3.64	4.66	4.88	3.71	5.83
O	2.21	1.69	2.11	2.50	1.84	2.43
P	1.88	1.44	1.85	2.30	1.50	2.17
Q	1.31	0.96	1.18	1.44	0.99	1.45
R	0.73	0.48	0.65	0.74	0.51	0.71
S	1.23	0.92	1.00	1.44	0.97	1.19
T	0.76	0.54	0.65	0.85	0.61	0.77
U	1.51	1.00	0.34	1.69	0.80	0.50
V	0.00	0.10	0.00	0.08	0.12	0.08
W	0.12	0.18	0.08	0.19	0.24	0.13
X	0.12	0.11	0.00	0.17	0.15	0.11
Y	0.11	0.13	0.00	0.15	0.12	0.10
Z	0.12	0.15	0.13	0.19	0.20	0.16

[a]Iindicates the radiation workers (26 persons) who participated in the installation of a steam generator nozzle dam at Yonggwang NPP.

Table 3. Calculated effective dose equivalents from the installation of a steam generator nozzle dam at NPP

No. of TLD wearers[a]	Effective dose equivalent (mSv)						
	Maximum[b]	ANSI	NCRP (70 : 30)	NCRP (55 : 50)	EPRI (Xu)	Lakshmanan	Kim
1	4.66	3.70	3.95	4.33	4.41	5.53	4.27
2	4.25	3.09	3.18	3.47	3.50	4.43	3.43
3	3.69	2.81	3.02	3.35	3.45	4.28	3.29
4	3.51	2.71	2.74	2.95	2.92	3.76	2.93
5	2.73	1.89	1.94	2.12	2.14	2.70	2.09
6	2.71	2.14	2.28	2.50	2.56	3.20	2.47
7	2.41	1.95	1.97	2.11	2.07	2.69	2.10
8	2.34	1.77	1.87	2.06	2.11	2.63	2.03
9	2.29	1.64	1.72	1.90	1.95	2.43	1.87
10	2.21	1.74	1.82	1.98	2.01	2.53	1.96
11	2.19	1.85	1.89	2.04	2.02	2.60	2.02
12	2.04	1.73	1.81	1.96	1.96	2.50	1.94
13	2.02	1.55	1.64	1.81	1.85	2.31	1.78
14	2.00	1.78	1.83	1.96	1.94	2.50	1.95
15	1.88	1.48	1.56	1.72	1.75	2.19	1.69
16	1.86	1.55	1.62	1.77	1.78	2.25	1.75
17	1.51	1.05	0.80	0.72	0.84	0.89	0.76
18	1.31	1.00	1.03	1.12	1.13	1.43	1.11
19	1.23	0.95	0.94	1.01	0.98	1.28	1.00
20	0.76	0.56	0.57	0.62	0.62	0.79	0.62
21	0.73	0.51	0.53	0.59	0.61	0.75	0.58
22	0.18	0.17	0.15	0.14	0.16	0.17	0.14
23	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.19	0.15
24	0.13	0.13	0.09	0.07	0.10	0.09	0.08
25	0.12	0.11	0.08	0.06	0.08	0.07	0.07
26	0.10	0.09	0.07	0.06	0.08	0.07	0.06

[a]Indicates the radiation workers (26 persons) who participated in the installation of a steam generator nozzle dam at NPP. Indicates the maximum TLD readout from the head, chest, or back.

Kong 2010; Kim *et al*. 2017).

TLD와 ADR 판독 값을 비교하여 피폭방사선량을 확인하였고, 선량율과 작업시간을 고려해 피폭방사선량을 다시 검증하였다. 복수선량계 알고리즘 특성에 따라 머리와 가슴 또는 머리와 등 TLD 판독 값을 기준으로 알고리즘에 따라 유효선량당량을 계산하였다. 이를 Table 3에 제시하였다 (Kim and Kong 2010; Kim *et al*. 2017).

복수선량계 알고리즘의 특성을 규명하고자 다양한 분석과 함께, 유효선량당량이 큰 순서에서 낮은 순으로 배열하였다. 이 경우 Lakshmanan 알고리즘을 제외하고는 유효선량당량의 평가 결과에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다 (Kim and Kong 2010; Kim *et al*. 2017). 이를 Fig. 2에 나타내었다.

이 중에서 Lakshmanan 알고리즘을 이용하여 계산한 유효선량당량은 3개 TLD의 최대값에 비해 높게 나타나 복수선량계 알고리즘 선정 후보군에서 제외하였다. 한편 NCRP에서 머리와 가슴에 패용하는 복수선량계 알고리즘은 방사선원이 위쪽이 아닌 작업종사자의 앞쪽이나 뒤쪽에 위치할 경우 유효선량당량을 정확하지 못하게 평가 될 수 있다는 의견을 제시하고 있어, 선량계를 머리와 가슴에 패용하는 ANSI 알고리즘은 후보 알고리즘에서 제외하였다(NCRP

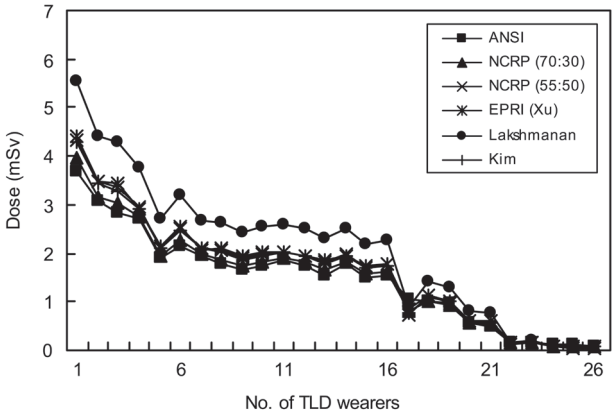

Fig. 2. Application of a two-dosemeter algorithm for the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP. No. of TLD wearers"indicates the total number of radiation workers (26 persons) who participated in the installation of a steam generator nozzle dam at Hanbit NPP. The results are displayed from high to low effective dose equivalent using six two-dosemeter algorithms based on TLD readouts from the head and chest or from the chest and back.

1995; Kim and Kong 2010; Kim *et al*. 2017). 또한 복수선량계를 패용하고 적용성 시험에 참여한 작업종사자와의 인터뷰에서, 가슴과 등에 패용하는 경우 작업의 편리성을 가져

Table 4. Summary of dose distribution and difference

Nuclear power plants (Types)	Items of radiation work	General trend of dose distribution[a]	Dose difference[b]
Kori (PWR)	Installation of Steam Generator Nozzle Dam	Chest < E < Back	10~30%
Kori (PWR)	Penetration Test of a Reactor Head	Chest < E < Back	5~15%
Hanbit (PWR)	Installation of Steam Generator Nozzle Dam	Chest < E < Back	10~30%
Hanbit (PWR)	Plugging and Nozzle Dam Removal	Chest < E < Back	10~30%
Wolsong (PHWR)	Ultrasonic Test of Feeder Pipe	Back < E < Chest	5~15%

[a]Chest = TLD readout on the chest, back = TLD readout on the back, E = calculated effective dose. [b]Dose difference = (maximum dose on the chest or back - minimum dose on the chest or back) / calculated effective dose.

올 수 있고, 이로 인한 작업의 품질 향상을 기할 수 있다는 의견을 제시하여, 머리와 가슴에 TLD를 패용하는 방식은 후보 알고리즘에서 제외하였다(Kim and Kong 2010; Kim *et al*. 2017). 특히 USNRC와 NCRP 등에서 가슴과 등 부위에 선량계를 패용하도록 제안하고 있어, 국내원전에서도 이러한 가슴과 등에 패용하는 국제 기준과 추세를 따르기로 결정하였다. 한편 가슴과 등에 패용한 TLD 판독 값을 기준으로 하는 복수선량계 알고리즘에 대한 기술적 특성, 방사선원 위치에 따른 저에너지 방사선원의 저평가 가능성과 유효선량당량 계산의 상대적 보수성 등을 종합적으로 고려한 결과 NCRP에서 권고한 NCRP (55 : 50) 알고리즘이 가장 적절한 것으로 평가되었다(Kim and Kong 2010; Kim *et al*. 2017).

복수선량계의 지급조건은 미국원자력발전사업자협의회(INPO)의 방사선방호지침을 검토하여 정하였다(INPO 1995). INPO에서는 특정 신체부위의 선량이 가슴부위의 선량에 비해 50%를 초과할 가능성이 있으면서 1 mSv·hr^{-1} 이상 작업구역에서는 TLD 패용 위치를 가장 높은 선량을 받을 것으로 예상되는 부위에 변경하여 패용하도록 권고하고 있다. 또한 예상 피폭방사선량률이 특정 신체부위 선량률의 50%를 초과하면서 작업구역 선량률이 1 mSv·hr^{-1} 이상으로 변화할 가능성이 있거나 또는 단일작업으로 3 mSv 이상의 피폭을 받을 것으로 예상될 때는 복수선량계를 지급하도록 규정하고 있다. 그런데 INPO의 방사선방호지침이 1990년대에 발행된 지침이고, 미국에서 ICRP 60 선량한도를 적용하지 않고, 국내는 ICRP 60 선량한도를 적용하고 있음을 고려하여, 단일작업에 대해 2 mSv를 초과하면서 선량율 변화조건이 30% 이상인 경우에 복수선량계를 지급하는 것으로 결정하였다(Kim and Kong 2010; 한국원자력안전기술원 2004).

이러한 결정에 대해 원전의 피폭방사선량 평가 담당자(또는 차장)와 방사선안전팀장 검토를 거쳤으며, 국내 전문가의 검토와 자문을 통해 의견을 수렴하였다. 또한 규제기관과 여러 차례 협의하였고, 원자력안전정보회의와 같은 워크샵 등에도 발표하였으며, 실무적용에 따른 의견을 충분히 수렴하였다(한국원자력안전기술원 2004). 그 결과 복수선량계 알고리즘은 원전종사자 피폭방사선량 평가절차에 반영되었고, 2006년 이후 전면 적용 중에 있다. 이에 따라 ICRP 60의 방사선방호 및 선량평가 개념에 따라 방사선작업종사자의 피폭방사선량 평가가 이루어지고 있다. 이로 인해 보수적인 선량평가 대신에 합리적으로 피폭방사선량을 평가하도록 조치하였고, 또한 종사자의 선량도 10~30% 수준에서 저감하는 효과를 나타내었다(Kim and Kong 2009). 이 결과를 Table 4에 나타내었다.

고 찰

1. ICRP 103 적용성 검토

국내원전에서는 2006년 이후 고피폭 불균일 방사선장에서 NCRP (55 : 50) 복수선량계 알고리즘을 적용하여 피폭방사선량을 평가해오고 있다. 그런데 이 알고리즘은 ICRP 26 방사선방호 및 선량평가 개념에 기반을 두고 개발된데 비해, 현재 국내에서는 피폭방사선량 평가에 ICRP 60이 적용되고 있다. 따라서 ICRP 26의 유효선량당량 평가 개념을 ICRP 60의 유효선량 평가 개념에 무리 없이 적용할 수 있는가를 따져볼 필요가 있다(Kim and Kong 2010; Ju *et al*. 2017; Kim *et al*. 2017; Song *et al*. 2017). 이러한 점은 복수선량계 알고리즘에 대해 해외저널인 Radiation Protection Dosimetry (RPD)에 투고 후 심사과정에서 추가로 질의를 받은 사항이었다(Kim and Kong 2010; Ju *et al*. 2017; Kim *et al*. 2017; Song *et al*. 2017). 최종적으로 RPD에서는 이 알고리즘을 이용해 계산된 유효선량당량은 동일한 계수를 적용해 ICRP 60의 유효선량 평가에도 적용이 가능하다고 밝히고 있다(Kim and Kong 2010; Ju *et al*. 2017; Kim *et al*. 2017; Song *et al*. 2017).

현재 국내에서 ICRP 103의 법령 도입을 검토 중에 있어, 현재 적용중인 복수선량계 알고리즘의 ICRP 103 적용성을 검토해볼 필요가 있다(kim and Kong 2011). 이에 따라 과거에 수행된 복수선량계 알고리즘 선정을 위한 현장시험 결과와 자료를 이용하여, NCRP (55 : 50) 알고리즘에 근거한 ICRP 26의 유효선량당량을 계산하였고, 이 값을 Kim

등이 ICRP 103 기반에 따라 제안한 복수선량계 알고리즘의 유효선량 계산 값과 비교하였다(Kim and Kong 2011; Kim *et al*. 2011). 그 결과 두 복수선량계 알고리즘 계산 값의 차이는 5% 미만으로 거의 유사하게 나타났으며, 따라서 현재 원전에서 적용중인 복수선량계 알고리즘은 ICRP 103의 법령반영 이후에도 적용이 가능한 것으로 평가되었다(ICRP 2007). 이를 요약하여 Tables 5, 6에 제시하였다(Kim and Kong 2011).

2. 원전 이외 고피폭 불균일 작업에의 적용성 검토

최근 갑상선암 환자에 대한 건강보험의 확대와 암 진단을 위한 양전자 컴퓨터 단층촬영검사(PET-CT)의 증가로 병원에서 방사성동위원소나 방사선발생장치를 취급하는 방사선작업종사자의 피폭방사선량이 증가 추세에 있다. 특히 핵의학적 검사 환자와 방사선작업종사자 간 가까운 거리에서 검사가 불가피하게 이루어지고 있어 피폭방사선량 평가의 중요성이 커지고 있다. 방사선작업종사자는 개인선량계를 가슴에 패용하나, 방사선원의 위치는 종종 개인선량계 패용 방향과 다른 방사선작업종사자의 뒤쪽에 위치하는 경우가 발생하고 있다. 이런 경우 피폭방사선량을 과소평가할 우려가 있어 복수선량계의 패용이 요구되기도 한다. 이런 경우를 고려하여, 원전 고피폭 방사선장하에서 유효선량 평가를 위해 실시하였던 유사한 복수선량계 패용 시험이 국내 병원 방사선작업종사자를 대상으로 시행하였다(Song *et al*. 2017). 여기에서는 병원의 고피폭 예상 방사선작업종사자를 대상으로 가슴 앞면과 뒷면에 복수선량계를 패용하고 앞뒤 선량계 판독 값을 기준으로 유효선량을 계산하였다. 그 결과 복수선량계 알고리즘을 적용하면 보다 정확하게 유효선량을 평가할 수 있을 것으로 확인되었다.

Table 5. TLD readouts of field tests in 2004~2005 (Installation of a Steam Generator Nozzle Dam at Yonggwang NPPs Unit 4 during the Maintenance Period)

Personal name	TLD readout (mSv)[a]			ADR readout (mSv)[b]		
	Head	Chest	Back	Head	Chest	Back
A	4.25	2.96	3.68	4.47	3.36	4.03
B	2.60	2.09	2.71	2.85	2.25	2.99
C	2.41	1.90	2.13	2.65	1.97	2.57
D	2.29	1.57	2.07	2.68	1.93	2.37
E	3.57	2.73	3.69	4.02	2.94	4.16
F	2.73	1.80	2.25	2.87	1.99	2.75
G	3.51	2.62	3.02	4.03	2.68	3.65
H	2.00	1.75	2.00	2.23	1.79	2.18
I	2.19	1.81	2.09	2.53	1.90	2.42
J	1.93	1.71	2.04	2.26	1.87	2.30
K	2.34	1.71	2.24	2.56	1.77	2.42
L	1.82	1.52	1.86	2.06	1.61	2.17
M	2.02	1.50	1.97	2.28	1.73	2.21

[a]Thermoluminescent Dosimeter, [b]auto Dosimetric Reader.

결 론

원전에서 고피폭이 예상되는 불균일 방사선장하에서 복수선량계를 패용하고, 피폭방사선량평가 알고리즘을 적용할 경우 과대 및 과소평가를 방지하고 정확한 선량평가가 가능함을 확인하였다. 이 결과는 원전 피폭방사선량평가 절차서와 규제기준에 반영되어 원전 방사선작업종사자의 선량평가에 지속적으로 적용되고 있다. 한편 이러한 복수선량계를 이용한 피폭방사선량 평가 방법은 원전 이외 방사선동위원소를 취급하거나 진단과정에서 적용이 가능한 것으로 판단되었다.

Table 6. Comparison of calculated EDE and E based on the TLD readouts of field tests in 2004~2005 (Installation of a Steam Generator Nozzle Dam at Yonggwang NPPs Unit 4 during the Maintenance Period)

Personal name	TLD readout (mSv)			EDE[a] or E[b] (mSv)		
	Head	Chest	Back	Maximum dose	NCRP (55 : 50) TDA (EDE)	Kim TDA (2011) (E)
A	4.25	2.96	3.68	4.25	3.47	3.38
B	2.60	2.09	2.71	2.71	2.50	2.43
C	2.41	1.90	2.13	2.41	2.11	2.07
D	2.29	1.57	2.07	2.29	1.90	1.84
E	3.57	2.73	3.69	3.69	3.35	3.24
F	2.73	1.80	2.25	2.73	2.12	2.06
G	3.51	2.62	3.02	3.51	2.95	2.89
H	2.00	1.75	2.00	2.00	1.96	1.92
I	2.19	1.81	2.09	2.19	2.04	2.00
J	1.93	1.71	2.04	2.04	1.96	1.92
K	2.34	1.71	2.24	2.34	2.06	2.00
L	1.82	1.52	1.86	1.86	1.77	1.72
M	2.02	1.50	1.97	2.02	1.81	1.76

[a]Effective Dose Equivalent, [b]effective Dose based on ICRP 103.

사 사

This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Radiation Safety Foundation (KORSAFe) and the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), Republic of Korea (Grant No. 1305033).

참 고 문 헌

원자력안전위원회. 2016. ICRP 103 신권고 및 IAEA GSR Part 3 국내 도입을 위한 기술기준 최적화 연구개발. 제2016-25호.

한국원자력안전기술원. 2004. 2004 원자력안전기술정보회의. 방사선분과.

ANSI. 1997. An American National Standard Criteria for Performing Multiple Dosimetry. Report No. HPS N13.41.

IAEA. 1996. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA Safety Series No. 115, Vienna.

IAEA. 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources : International Basic Standards. General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3.

ICRP. 1990. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Pergamon Press, New York.

ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Pergamon Press, New York.

INPO. 1995. Institute of Nuclear Power Operations, Guidelines for Radiological Protection at Nuclear Power Stations. INPO 91-014 (Revision 01).

Ju YJ, Dong KR, Choi EJ, Kwak JG, Ryu JK and Chung WK. 2017. A Study on Exposure Dose from Injection Work and Elution Work for Radiation Workers and Frequent Workers in Nuclear Medicine. *J. Radia. Ind.* **11**(1):19-25.

Kim CH. 1998. Use of Two Dosimeters for Better Estimation of Effective Dose. College Station. TX: Texas A&M University.

Kim CH, Cho S, Jeong JH and Bolch WE. 2011. Reece WD, Poston W, Development of New Two-Dosimeter Algorithm For Effective Dose in ICRP Publication 103, *Health Phys.* **100**(5):462-467.

Kim HG and Kong TY. 2009. Operational Experience of Two-Dosimeter Algorithm for Better Estimation of Effective Dose at Korean Nuclear Power Plants. *J. Radiat. Prot.* **34**(4):165-169.

Kim HG and Kong TY. 2010. Selection of the most Appropriate Two-Dosimeter Algorithm for Estimating Effective Dose Equivalent during maintenance in Korean Nuclear Power Plants. *Radiat. Prot. Dosim.* **140**(2):171-181.

Kim HG and Kong TY. 2011. Application of the Two-Dosimeter Algorithm for Effective Dose Evaluations based on ICRP Publication 103. *J. Radiat. Prot.* **36**(3):133-139.

Kim HG, Kong TY, Dong KR and Choi EJ. 2017. A Review of Radiation Field Characteristics and Field Tests for Estimating on the Extremity Dose under Contact Tasks with Radioactive Materials. *J. Radiat. Ind.* **11**(3):123-130.

Lakshmanan AR, Kher RK and Supe SJ. 1991. Estimation of Effective Dose Equivalent Using Individual Dosemeters. *Radat. Prot. Dosim.* **35**(4):247-252.

NCRP. 1995. Use of Personal Monitors to Estimate Effective Dose Equivalent and Dose to Workers for External Exposure to Low-LET Radiation. NCRP Report No.122, Bethesda.

Song HJ, Ju YJ, Jang H, Dong KR, Kang KW, Choi EJ, Kwak JG, Ryu JK and Chung WK. 2017. Estimation of Lens Dose of Radioactive Isotopes Using ED3. *J. Radia. Ind.* **11**(1):19-25.

USNRC. 2004. NRC Regulatory NRC Regulatory Issue Summary 2004-01, Method for Estimating Effective Dose Equivalent from External Radiation Sources Using Two Dosimeters. Report No. RIS 2004-01.

Received: 27 October 2017
Revised: 17 November 2017
Revision accepted: 19 November 2017