

Monte Carlo Study of MOSFET Dosimeter Dose Correction Factors Considering Energy Spectrum of Radiation Field in a Steam Generator Channel Head

Sungkoo Cho · Sang Hyoun Choi · Chan Hyeong Kim
Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

원전 증기발생기 수실 내 에너지 스펙트럼을 고려한 MOSFET 방사선검출기 선량보정인자 결정에 관한 몬테칼로 전산모사 연구

조성구 · 최상현 · 김찬형
한양대학교 원자력공학과

(2006년 6월 2일 접수, 2006년 12월 5일 채택)

Abstract - In Korea, a real-time effective dose measurement system is in development. The system uses 32 high-sensitivity MOSFET dosimeters to measure radiation doses at various organ locations in an anthropomorphic physical phantom. The MOSFET dosimeters are, however, mainly made of silicon and shows some degree of energy and angular dependence especially for low energy photons. This study determines the correction factors to correct for these dependences of the MOSFET dosimeters for accurate measurement of radiation doses at organ locations in the phantom. For this, first, the dose correction factors of MOSFET dosimeters were determined for the energy spectrum in the steam generator channel of the Kori Nuclear Power Plant Unit #1 by Monte Carlo simulations. Then, the results were compared with the dose correction factors from 0.662 MeV and 1.25 MeV mono-energetic photons. The difference of the dose correction factors were found very negligible ($\leq 1.5\%$), which in general shows that the dose corrections factors determined from 0.662 MeV and 1.25 MeV can be in a steam general channel head of a nuclear power plant. The measured effective dose was generally found to decrease by $\sim 7\%$ when we apply the dose correction factors.

Key words : MOSFET dosimeter, Dose correction factor, Effective dose, Monte Carlo

요약 - 국내에서는 현재 물리적 인형 모의피폭체와 수십 개의 소형 MOSFET 선량계를 이용하여 유효선량(Effective Dose)을 실시간으로 정확하게 측정할 수 있는 시스템을 개발 중에 있다. 이때 사용되는 MOSFET 선량계는 그 크기가 매우 작으며, 상대적으로 높은 민감도를 가지고 선량을 실시간으로 측정할 수 있다는 장점이 있는 반면, 검출부위가 조직등가 물질이 아닌 실리콘으로 이루어져 있어 저에너지 광자에 대하여 적절한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 몬테칼로 전산모사 방법을 사용하여 증기발생기 수실 내부의 에너지 스펙트럼에 대한 MOSFET 선량계의 선량보정인자 값들을 계산하였으며, 이렇게 계산된 보정인자 값들을 선행 연구에서 구한 값, 즉 0.662 MeV와 1.25 MeV의 광자만을 이용하여 구한 선량보정인자 값들과 비교하여 보았다. 비교 결과, 두 서로 다른 조건에서의 선량보정인자들은 큰 차이를 보이지 않았으며($\leq 1.5\%$), 따라서 선행 연구에서 구한 선량보정인자들을 원자력발전소의 증기발생기 수실에 그대로 적용하여도 큰 문제가 없음을 알 수 있었다. 또한, 증기발생기 수실에 대하여 결정된 선량보정인자들을

실측된 MOSFET 선량계의 선량값들에 적용하여 선량보정에 따라 유효선량이 어느 정도 변화하는가를 확인한 결과, 유효선량은 선량보정인자를 적용할 경우가 적용하지 않을 경우에 비해 약 7% 정도 낮게 평가됨을 알 수 있었다.

중심어 : MOSFET 방사선검출기, 선량보정인자, 유효선량, 몬테칼로

서 론

1991년 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에 의해서 권고된 유효선량(Effective Dose)[1]은 방사선방호의 근간을 이루는 중심적 선량계측량으로서 국내 원자력법에도 이미 도입이 되었다. 유효선량은 인체 내 각 장기 및 조직의 선량을 안다고 가정할 때 그 선량들 각각에 정해진 조직가중치를 곱하고 이를 합산함으로써 얻어진다. 유효선량의 가장 큰 이점은 방사선 피폭에 따른 건강 위험도를 평가할 수 있는 정량적인 근거를 제시하며, 또한 방사선 피폭에 따른 위험도를 다른 산업의 위험도와 직접 비교할 수 있는 정량적 근거를 제공한다는 것이다.

최근까지 미국을 포함한 전 세계 많은 수의 원전들에서는 증기발생기 수실 등과 같은 고준위 비균질 방사선장에서 작업을 수행할 경우는 가슴, 어깨, 머리 등은 몸에 여러 개의 선량계를 패용하여 각각의 선량을 측정후 그 값들 중 가장 큰 값을 택하여 전신선량(Whole-body Dose)으로 규정하고 이를 최종적으로 유효선량으로 해석하는 방법이 많이 사용되어 왔다[2,3]. 반면에 캐나다, 일본, 스웨덴 등의 국가들에서는 일찍부터 이러한 선량계들로부터 측정된 값들을 적절히 조합하여 유효선량을 평가하는 방법을 사용하여 왔다[4-6]. 1995년 미국의 국가방사선방호위원회(NCRP)는 고준위 비균질 방사선장의 경우에 작업자의 가슴과 등에 각각 한 개의 개인피폭선량계를 패용하고, 이러한 두 개의 선량계로부터 측정되는 값들에 적절한 가중치를 주어 평균함으로써 유효선량을 평가할 것을 권고 하였으며[7], 2004년 미국핵규제위원회(USNRC)에서는 이를 공식적으로 받아들여 각 원전에서 가슴과 등, 즉 두 개의 선량계를 사용하여 유효선량을 측정할 경우 이를 인정하겠다고 하였다[8]. 이에 따라, 최근 국내에서도 이를 도입하기 위한 타당성 조사가 전력연구원을 중심으로 이루어 졌다[6].

이렇게 몇 개의 선량계를 사용하여 유효선량을 평가하는 알고리즘이 개발되었고, 또한 이미 여러 나라에서 사용되고 있으나, 실제로 어떤 경우에

있어서도 몇 개의 선량계를 사용하여 유효선량을 평가할 경우 유효선량을 적절하게, 그리고 보수적으로 평가한다고 실험적으로 증명된 적은 한 번도 없다. 현재까지의 알고리즘 개발 및 보수성 증명은 모두 단순화된 피폭조건하에서의 전산모사에 근거한 것이다[9-15]. 이렇게 실험이 이루어지지 못하고 일률적으로 전산모사에 의존한 것은 유효선량의 측정이 현실적으로 매우 어렵기 때문이다. 또한, 이러한 증명은 몇몇의 측정 결과를 가지고 일반화하는 것이 거의 불가능하며, 따라서 원전의 고준위 비균질 방사선 구역들 하나하나에 대하여 각각 증명해야 하기 때문이기도 하다. 참고로, 현재까지 개발된 유효선량 측정의 거의 유일한 방법은 물리적 인형 모의피폭체에 수백 개의 TLD 소자를 삽입하여 측정하는 방법이 있는데[16,17], 이러한 방법은 그 절차가 복잡하고 막대한 시간이 소요되기 때문에 실제 현장에서 사용될 수 없다는 문제가 있다.

이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위하여 현재 국내에서는 물리적 인형 모의피폭체에 수십 개의 소형 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 선량계를 삽입하여 유효선량을 실시간으로 정확하게 측정하는 시스템을 개발 중에 있다. 동 측정 시스템에 사용되는 MOSFET 선량계 (High-sensitivity MOSFET Dosimeter, Model: TN-1002RD, Thomson and Nielson, Ottawa, Canada)는 그 크기가 매우 작으며 상대적으로 높은 민감도를 가지고 선량을 실시간으로 측정할 수 있다는 장점이 있는 반면, 검출부위가 조직등이 물질이 아닌 실리콘으로 이루어져 있어서 저에너지 광자들에 대하여 어느 정도의 에너지 의존도와 방향 의존도를 보인다[18]. 따라서 MOSFET 선량계가 인형 모의피폭체 내에 삽입되어 장기 선량 측정에 사용될 경우에는 산란 광자 등 상대적으로 낮은 에너지를 갖는 이차 광자들로 인하여 선량을 실제보다 과대하게 평가하게 된다. 실제 원전 증기발생기 수실 내부 등 대부분의 고준위 비균질 방사선장은 다양한 부식생성물에 의한 광자와 벽에 산란된 저에너지 산란 광자 등이 포함된 복잡한 방사선장으로 구성된다. 때문에 실시간 유효선량 측정시스템을 원전의 방사선장에 사용하기 위해서는 해당 방사선

장에 대한 MOSFET 선량계의 선량보정인자 (Dose Correction Factor, DCF)를 미리 결정하여 에너지 의존도와 방향 의존도에 따른 오차를 적절히 보정해주어야 한다.

본 연구에서는 실제 증기발생기 수실 내부의 에너지 스펙트럼에 대한 MOSFET 선량계의 선량보정인자들을 몬테칼로 전산모사의 방법으로 결정하고 이를 선행연구[19]에서 결정된 값, 즉 0.662 MeV와 1.25 MeV의 광자를 이용하여 결정된 선량보정인자 값들과 비교하여 봄으로써 선량보정인자들이 방사선장의 에너지 스펙트럼에 어느 정도 민감한지 조사해 보았다. 또한 결정된 선량보정인자들은 실제 방사선장에서 측정된 MOSFET 선량계의 선량값들에 적용하여 선량보정에 따른 유효선량의 변화 정도를 확인하였다.

재료와 방법

1. 증기발생기 수실 내부의 에너지 스펙트럼

원전 1차 냉각재 내 방사화 부식생성물은 노심 내부 및 노심 외부의 표면에서 발생하며 노심 내 표면에 침적되어 짧은 기간 조사된 이후에 재침식된다. 이러한 부식생성물 중 대표적인 장반감기 핵종들은 ^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Fe , ^{51}Cr , ^{54}Mn 등이 있다 [20]. 표 1은 부식생성물 중 장반감기 핵종들의 반감기 및 광자 에너지 등을 보여주고 있다. 증기발생기 수실 내부의 에너지 스펙트럼은 이러한 방사화 부식생성물에 의해 구성되는데 부식생성물 중에 ^{60}Co 와 ^{58}Co 은 증기발생기 수실 내부 방사선장의 약 95% 정도를 구성하는 것으로 알려

져 있다[21]. 그림 1은 고리 1호기 증기발생기 수실 내부의 에너지 스펙트럼을 보여준다[22]. 그림에서 보는 바와 같이 원전 증기발생기 수실 내에서의 에너지 스펙트럼은 주로 부식생성물의 고에너지 광자와 증기발생기 수실 내벽에 산란된 저에너지 산란 광자로 구성된다. 수실 내부의 저에너지 산란 광자는 주로 0.1-0.3 MeV 영역에 다량 분포함을 알 수 있다.

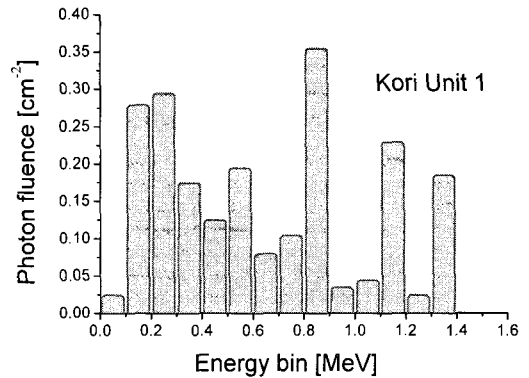


Fig. 1. Energy spectrum of the photon field in a steam generator channel head.

2. 몬테칼로 전산모사

본 연구에서는 MOSFET 선량계의 증기발생기 수실 내에서의 선량보정인자 값들을 결정하기 위하여 그림 1의 에너지 스펙트럼을 방사선원으로 사용하여 발생 확률을 적용하여 광자의 에너지가 특정 분포를 갖도록 MCNPX 코드의 Source Information

Table 1. Major Corrosion Products in a Steam Generator.

Rad.	Half-life	Energy (keV)	Yield
^{60}Co	5.27y	1173.24	99.90
		1332.50	99.98
^{58}Co	70.9d	511	29.80
		810.77	99.45
^{54}Mn	312.2d	834.84	99.98
^{51}Cr	2707d	320.1	9.92
^{59}Fe	44.5d	1099.24	56.5
		1291.59	43.2
^{95}Zr	64.0d	724.20	44.3
		756.73	54.5

(SI) 카드와 Source Probability (SP) 카드를 사용하여 정의하였다[23]. 즉, 방사선원 정의는 SI 카드에서 100 keV 단위로 에너지 구간을 나누고 SP 카드에서 각 에너지 구간별로 광자의 발생 확률을 고려하여 특정한 분포를 나타내도록 하였다.

다음으로 본 연구에서는 선행 연구에서 개발된 하이브리드 체적소 인형 모의피폭체(Hybrid Voxel Anthropomorphic Phantom, HVAP)를 사용하여 각 선량계 지점에서의 선량보정인자를 결정하였다. 개발된 하이브리드 체적소 모의피폭체는 물리적 인형 모의피폭체의 골격 구조와 외형에 MIRD형 수학적 모델의 장기를 정의함으로써 제작되었다. 현재 동 체적소 모의피폭체 내에 정의된 장기는 조직가중치가 높은($w_T \geq 0.05$) 10개의 장기이며[1], 각각의 장기는 MIRD형 수학적 모델의 장기 무게와 비교하여 검증하였다[24]. 이렇게 제작된 하이브리드 체적소 모의피폭체는 MCNPX의 Lattice 카드와 Universe 카드를 이용하여 구현하였다. 몬테칼로 전산모사에서 빔 선원은 체적소 모의피폭체 전체에 균일하게 조사되도록 반지름 50 cm의 원형으로 정의하였으며 체적소 모의피폭체로부터 선원은 거리가 200 cm인 지점에 위치시켰다. 각 선량계 지점의 에너지 플루언스는 Track length estimator인 F4 Tally를 사용하여 15 keV에서 15 MeV까지의 에너지 영역별 입자의 플루언스를 계산하였다[25]. 각 계산에 사용된 입자의 수는 1×10^8 개였으며 통계오차는 모든 경우에 있어서 5% 이하였다.

3. 선량보정인자 결정

본 연구에서는 MOSFET 선량계의 에너지 의존도와 방향 의존도에 의해 발생하는 오차를 보정해 주기 위해 선량보정인자를 결정하였다. 먼저 본 연구에서 MOSFET 선량계의 에너지 의존도인 $R(E)$ 은 단일 에너지 광자 빔이 MOSFET 선량계와 공기에 조사될 때 MOSFET 선량계에 주어지는 흡수선량과 공기에 주어지는 흡수선량의 비로 정의한다. 다음으로 에너지 스펙트럼이 고려된 상대반응인자인 R (Energy fluence-weighted relative response)은 다음과 같이 $R(E)$ 에 입사하는 광자의 에너지 스펙트럼을 곱하고 이를 모두 합하여 계산된다.

$$R = \sum_i \left(R_i(E) \times \frac{\psi_i(E)}{\sum_i \psi_i(E)} \right) \quad (1)$$

여기서 $R_i(E)$ 는 각 에너지별 MOSFET 선량계의 에너지 의존도이고 $\psi_i(E)$ [MeV/cm^2]는 i 에너지 영역의 에너지를 갖는 광자의 에너지 플루언스이다. 마지막으로 선량보정인자는 다음과 같이 다양한 조건에서 입사하는 광자빔들에 대한 R 의 분포에서 중간값의 역수를 취함으로써 결정하였다.

$$\varepsilon(DCF) = \frac{1}{\text{median}(R)} \quad (2)$$

여기서 ε 은 선량보정인자이며 $\text{median}(R)$ 은 주어진 검출기 위치에서 R 의 중간값이다.

4. 측정시스템 구성

본 연구에서는 ^{60}Co 및 ^{137}Cs 의 실제 방사선장에서 MOSFET 선량계의 선량값을 측정하였다. 먼저 ATOM 모의피폭체(ATOM Adult Male Phantom, Model: 701-C, CIRS, Virginia, USA) 내에 장기들을 정의하기 위해 MIRD형 수학적 모델의 3차원 영상을 구현하고 ATOM 모의피폭체의 각 슬라이스와 일치하는 높이에서 MIRD형 수학적 모델의 X-Y 단면 영상을 얻었다. 각각의 장기는 ATOM 모의피폭체 슬라이스의 중심과 MIRD형 수학적 모델의 X-Y 영상 중심을 일치시킨 후 가로와 세로의 거리 비를 이용하여 정의하였다. 그림 2는 MIRD형 수학적 모델의 장기를 ATOM 모의피폭체의 단면에 정의한 것이다. 다음으로 측정시스템은 32개의 MOSFET 선량계를 ATOM 모의피폭체의 정해진 장기 위치에 삽입하여 구성되었다. 그림 3은 ^{60}Co 방사선장에서 ATOM 모의피폭체와 MOSFET 선량계를 이용하여 선량을 측정하고 있는 모습을 보여주고 있다.

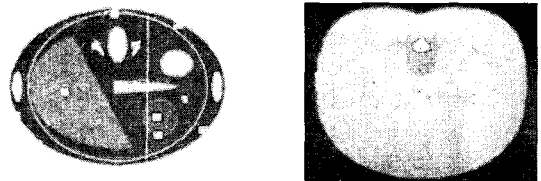


Fig. 2. Definition of the organs in the ATOM physical phantom based on the MIRD-type mathematical phantom.

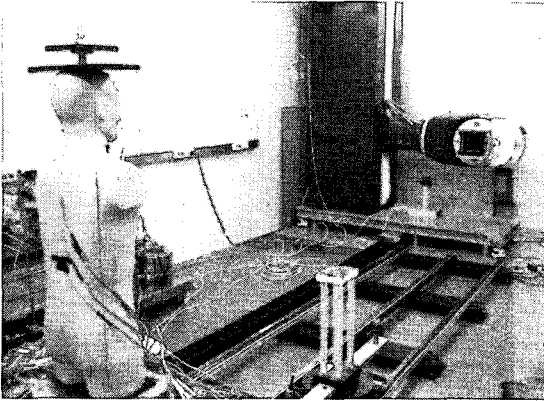


Fig. 3. Experimental setup for the ^{60}Co exposure at Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS).

결과와 논의

본 연구에서는 증기발생기 수실 내에 에너지 스펙트럼을 이용하여 선량보정인자 값들을 계산하고 이를 0.662 MeV와 1.25 MeV의 광자만을 이용하여 결정한 선량보정인자 값들과 비교하였다. 그림 4는 이러한 두 경우에서 선량보정인자의 차이를 보여주고 있다. 각 선량계 지점에서 선량보정인자 값들의 차이는 한 개의 선량계 지점, 즉 S상 결장의 선량계 지점을 제외하고는 대부분 1.5% 이내였다. 이렇게 차이가 적은 이유는 증기발생기 수실 내에 존재하는 100-300 keV 저에너지 산란 광자들은 투과력이 상대적으로 약하여 MOSFET 선량계가 위치한 지점에서 영향을 상대적으로 적게 미치기 때문으로 보인다. 결과적으로 MOSFET 선량계의 선량보정인자 값들은 증기발생기 수실 내부 방사선장의 대부분을 차지하는 ^{60}Co 과 ^{58}Co 의 고에너지 광자에 의해 주로 결정됨을 알 수 있다. S상 결장의 선량을 측정하기

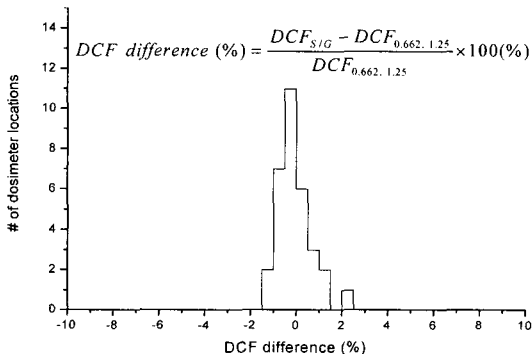


Fig. 4. The difference of the DCF values for the 32 dosimeter locations in the physical phantom.

위한 MOSFET 선량계 지점은 ATOM 모의피폭체의 정중앙에 위치함에 따라 다른 선량계 지점보다 선량보정인자의 차이가 약간 크게 나타난 것으로 보인다. 본 연구의 결과에 따르면 선량보정인자는 방사선장의 에너지 스펙트럼에 그렇게 민감하지 않은 것으로 보이며, 선행 연구에서 ^{58}Co 과 ^{60}Co 를 대표하는 0.662 MeV와 1.25 MeV 광자를 이용하여 결정한 선량보정인자들을 원자력발전소의 증기발생기 수실에 그대로 적용하여도 큰 문제가 없음을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 결정된 선량보정인자는 원전 내의 증기발생기 수실뿐만 아니라 원전의 격납용기와 보조건물 등과 같은 유사한 방사선장에서도 사용이 가능할 것으로 보인다.

본 연구에서는 ATOM 모의피폭체에 MOSFET 선량계를 삽입하여 ^{60}Co 과 ^{137}Cs 의 방사선장에서 선량을 측정된 후 각 MOSFET 선량계의 측정 선량값에 본 연구에서 결정한 선량보정인자 값들을 적용하여 봄으로써 선량보정이 측정되는 유효선량에 어느 정도의 영향을 미치는가를 확인하였다. 먼저 각 장기선량은 장기별로 선정된 MOSFET 선량계 각각의 선량에 해당 장치의 선량계별 부피비를 곱하고 이를 합하여 결정하였다. 표 2는 ^{60}Co 와 ^{137}Cs 방사선장에서 측정된 유효선량과 선량보정인자를 적용하여 계산한 유효선량을 각각 비교하여 선량보정인자의 적용 여부에 따라 발생하는 유효선량의 차이를 보여준다. 모든 경우에 있어서 선량보정인자를 적용하여 계산한 유효선량은 선량보정인자를 적용하지 않은 유효선량보다 약 7% 정도 낮게 나타났다. 이러한 결과는 선량보정인자가 MOSFET 선량계의 에너지 의존도와 방향 의존도에 의해 실제보다 높게 측정된 선량을 보정해주었기 때문으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 원전 증기발생기 수실 내부의 에너지 스펙트럼을 이용하여 MOSFET 선량계의 선량보정인자 값들을 결정하고 이를 0.662 MeV와 1.25 MeV의 광자만을 이용하여 결정된 선량보정인자 값들과 비교한 결과 거의 차이를 보이지 않았다. 따라서 선량보정인자는 방사선장의 에너지 스펙트럼에 크게 민감하지는 않다고 판단이 되며, 0.662 MeV와 1.25 MeV를 가정하여 결정된 선량보정인자를 원전 내 증기발생기 수실 및 이와 유사한 방사선장에서 적용하여도 큰 문제가 없을 것으로

Table 2. Variation of the Measured Effective Dose Values Due to DCF Correction.

Radiation source	Irradiation geometry	Effective dose before DCF correction (cSv)	Effective dose after DCF correction (cSv)	Difference (%)
¹³⁷ Cs	AP	20.56	19.07	-7.2
	PA	15.17	14.07	-7.3
	RLAT	13.60	12.63	-7.1
⁶⁰ Co	AP	17.44	16.18	-7.2
	PA	15.02	13.94	-7.2
	RLAT	13.88	12.88	-7.2

사료된다. 또한, 증기발생기 수실에 대하여 결정된 선량보정인자들을 실측된 MOSFET 선량계의 선량값들에 적용하여 선량보정에 따라 유효선량이 어느 정도 변화하는가를 확인한 결과, 유효선량은 선량보정인자를 적용할 경우가 적용하지 않을 경우에 비해 약 7% 정도 낮게 평가됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교의 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- ICRP ; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60, Annals of the ICRP. 1991 April;21(1-3):1-89.
- Hudson CG. The need for dosimetry multibadging at nuclear power plants. Radiat. Protect. Mgt. 1984 Jan;43-49.
- Nuclear Regulatory Commission. Code of Federal Regulations 10CFR20.1003 Definitions. U.S. Government Printing Office. 1992:362-367.
- Ontario Power Generation. Ontario Hydro Radiation Protection Dosimetry Programme, IR-11 (Revision 2). 1992.
- Michio Y, Seiichi M. On the Technical Guideline of Radiation Council to Assessment of External and Internal Exposure. 1999 Sep;34(3):319-322.
- 김희근, 박규준. 원전 불균일 방사선장하에서 유효선량 평가를 위한 복수선량계 알고리즘 적용 방안(Rev.2). 한국전력공사 전력연구원. 2005.
- NCRP. Use of personal monitors to estimate effective dose equivalent and effective dose to workers for external exposure to low-let radiation. NCRP REPORT No. 122. 1995:7-16.
- NRC. NRC regulatory issue summary 2004-01 method for estimating effective dose equivalent from external radiation sources using two dosimeters. U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Reactor Regulation. 2004.
- Lakshmanan AR, Kher RK, Supe SJ. Estimation of effective dose equivalent using individual dosimeters. Radiat. Port. Dosim. 1991;35(4):247-252.
- Xu X. The Assessment of effective dose equivalent using personnel dosimeters. Ph.D Dissertation, Texas A&M University. 1994.
- Claycamp HG. Optimisation of monitor weighting factors for the estimation of effective dose equivalent from external photon exposures. Radiat. Prot. Dosim. 1999;81(2):105-111.
- Kim CH, Reece WD, Poston JW. Development of a two-dosimeter algorithm for better estimation of effective dose equivalent and effective dose. Radiat. Prot. Dosim. 1999;81(2):101-112.
- Kim CH, Reece WD. Overestimation of the two-dosimeter approach and movement of radiation workers during exposure. Rad. Prot.

- Mgt. 2000 Dec;17(6):17-25.
14. Kim CH, Reece WD. Effect of angular response properties of personal dosimeters on the estimation of effective dose using two dosimeters. *Rad. Prot. Dos.* 2001;93(3):215-221.
 15. Kim CH, Reece WD. Monte Carlo simulation of single and two-dosimeter approaches in a steam generator channel head. *Health Phys.* 2002;83(2):243-254.
 16. Perisinakis K, Damilakis J, Anezinis P, Tzagaraki I, Varveris H, Cranidis A, Gourtsoyiannis N. Assessment of patient effective radiation dose and associated radiogenic risk from extracorporeal shock-wave lithotripsy. *Health Phys.* 2004 Dec;83(6):847-853.
 17. Calzado A, Ruiz Sanz S, Melochor M, Vano E. A comparison of measured and calculated organ doses from CT examinations. *Radiat. Prot. Dosim.* 1995;57(1-4):381-385.
 18. Wang B, Xu XG, Kim CH. Monte carlo study of MOSFET dosimeter characteristics: dose dependence on photon energy, direction and dosimeter composition. *Rad. Prot. Dosi.* 2005 May;113(1):40-46.
 19. Cho S, Choi SH, Na SH, Kim CH. Determination of Dose Correction Factor for Energy and Directional Dependence of the MOSFET Dosimeter in an Anthropomorphic Phantom. *J. Korean Asso. Radiat. Prot.* 2006 Jun;31(2):97-104.
 20. Vanbrabant R, Regge P. Characterization of the corrosion products in primary reactor water of PWR during normal operation and transient phases. *Water Chemistry II.* 1980; paper 41:279-284.
 21. Polley MV, Garbett K, Pick ME. A Survey of the Effect of Primary Coolant pH on Westinghouse PWR Plant Radiation Fields. *Electric Power Research Institute.* 1994 Nov;TR-104180.
 22. Lee CS, Lee JK. Characterization of Radiation Field in the Steam Generator Water Chambers and Effective Doses to the Workers. *J. Korean Asso. Radiat. Prot.* 1999 Dec;24(4):209-217.
 23. Rogers B, Montoya P, Olguin B, Lopez A, Jarlow J. MCNPX user's manual, version 2.4.0. New Mexico; RSICC. 2002:99-100.
 24. Cristy M, Eckerman KF. Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources. TM-8381. Oak Ridge. Oak Ridge National Laboratory. 1987;1:77-102.
 25. Rogers B, Montoya P, Olguin B, Lopez A, Jarlow J. MCNPX user's manual, version 2.4.0. New Mexico; RSICC. 2002:111-116.