

갑상선 내부피폭선량 측정치 보정을 위한 몬테카를로 모의실험 코드 (CALEFF) 개발 및 검출효율 계산

— Development of a Monte Carlo Simulation Code (CALEFF) for Calibrating Thyroid Internal Dose Measurement and Detection Efficiency Calculation —

연세대학교 원자력기초공동연구소* · 연세대학교 방사선학과**

안기수* · 조효성**

— 국문초록 —

1999년 개정된 국내 원자력법 시행령 제2조 5항에 의하면 2003년부터 원전 작업종사자들에 대해 외부 피폭 선량뿐만 아니라 내부피폭 선량도 합산하여 평가하도록 하였으며 또한 각 선량평가에 대한 오차도 50% 이내로 유지되어야 한다고 규정한 바 있어 전신이나 갑상선 계측기와 같은 내부피폭선량 측정 장비의 정밀한 계측이 요구되고 있다. 이러한 국내 원자력법의 개정에 부합하여 본 연구에서는 내부피폭 선량측정 결과치의 정확도를 향상시키기 위해서 현재 개발 중인 갑상선 내부피폭선량 측정 시스템의 검출효율을 계산하기 위한 몬테카를로 모의실험 코드(CALEFF)를 개발하였으며, 이 코드를 사용하여 다양한 실험조건에서 검출효율을 계산하였다. 향후 갑상선 내부피폭선량 측정 시스템의 보정인자로 사용하고자 한다.

중심 단어 : 갑상선, 내부피폭선량, 방사선계측, 몬테카를로 모의실험, 검출효율

I. 서 론

국제방사선방호위원회(ICRP)는 기존의 방사선방호와 관련된 권고인 ICRP-26을 대폭 수정하여 1990년 ICRP-60으로 대체 발표하였다. 또한 국제원자력기구(IAEA)는 ICRP-60을 방사선방호 실무에서 이용하기 쉽게 “방사선방호에 관한 기본안전 기준”을 1996년에 새로이 제정하여 IAEA 회원국이 사용하도록 권고하고 있다. 이러한 방사선방호의 국제적 규범에 대응하여 미국, 프랑스, 일본 등을 비롯한 방사선/원자력 관련 산업의 선진국들은 자체적으로 체내·외 방사선 피폭선량의 정밀한 측정 및 평가를 위하

여 오래 전부터 다양한 노력을 해오고 있다. 국내에서도 1999년 개정된 국내 원자력법 시행령 제2조 5항에 내부 피폭선량 및 외부피폭선량의 합산과 각 선량에 대한 측정 및 평가 오차는 50% 이내로 유지되어야 한다고 규정한 바 있어, 전신이나 갑상선 계측기와 같은 내부피폭선량 측정 장비의 정밀한 계측이 요구되고 있다¹⁾. 지금까지 국내에서 실시된 내부피폭선량 측정 및 평가기술은 외국에서 전량 수입된 장비와 자국민을 기준으로 작성된 교정절차를 그대로 적용함으로써 내국인의 내부피폭선량 측정 결과에 무시 못할 오차를 내포하고 있다. 본 연구에서는 방사선방호 신개념에 부합하여 내부피폭선량 측정 결과치의 신뢰도를 향상시키기 위하여 표준한국인 관련자료에 기초한 갑상선 내부피폭선량 측정 시스템을 개발하고 있으며, 개발 중인 시스템의 선량측정치 보정에 필요한 검출효율을 계산하기 위한 몬테카를로 모의실험 코드 CALEFF를 개발하여 다양한 실험조건에서 검출효율 계산 및 그 특성을 고찰하였다.

- 본 연구는 2004년도 산업자원부 전력산업연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임

*이 논문은 2005년 3월 18일 접수되어 2005년 5월 11일 채택 됨

책임저자 : 조효성, (220-710) 강원도 원주시 흥업면 매지리 234
연세대학교 보건과학대학 방사선과
TEL : 033-760-2428, 011-9055-5481
FAX : 033-760-2815
E-mail : hscho@dragon.yonsei.ac.kr

II. CALEFF 코드의 계산 알고리즘

CALEFF 모의실험 코드에 사용된 감상선 내부피폭선량 측정 시스템의 구조는 감마선원이 균일하게 분포된 감상선 팬텀, 감상선 부위를 모사하기 위한 10 cm×10 cm×10 cm 크기의 물 팬텀, 그리고 3"×3" 크기의 원통형 NaI(Tl) 검출기로 구성하였다(그림 1).

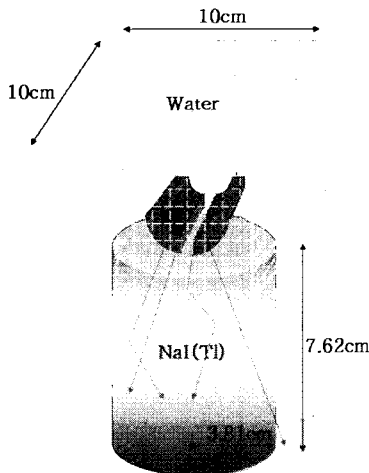


그림 1. CALEFF 모의실험 코드에 사용된 감상선 내부피폭선량 측정 시스템의 구조

1. 균일한(homogeneous) 매질 내에서의 반응거리 계산

초기 입사된 감마선이나 팬텀 내에서 산란된 감마선은 팬텀 내에서 상호작용하거나 또는 외부로 투과된다. 이러한 과정을 모사하기 위해 감마선의 현재 지점에서 다음 반응 지점까지의 거리를 계산하여야 한다. 매질이 반응거리 내에서 균일할 때, 감마선이 현 위치에서 거리 s 만큼 이동하였다면 거리 s 와 $s+ds$ 사이에서 반응이 일어날 확률 $p(s)ds$ 은 식 (1)과 같이 표현된다:

$$p(s)ds = \sum_i(E) e^{-\sum_i(E)s} ds \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $\sum_i(E)$ 는 에너지 E 를 가진 감마선에 대한 반응 매질의 총선형감약계수(total linear attenuation coefficient)를 나타낸다. 거리 $s=0$ 에서 ∞ 까지의 $p(s)$ 의 적분 값은 1이 되므로 $p(s)$ 는 확률밀도함수(probability density function)가 되며, 이 함수의 누적분포함수(cumulative distribution function)는 식 (2)와 같이 계산된다:

$$P(s) = \int_0^s p(s')ds' = 1 - e^{-\sum_i(E)s} \dots\dots\dots (2)$$

감마선의 현 지점에서 다음 반응 지점까지 이동한 거리 s 는 역변환법(inverse transformation method)을 사용하여 계산할 수 있으며 그 결과는 식 (3)과 같다²⁾:

$$s = P^{-1}(\xi) = -\frac{1}{\sum_i(E)} \ln \xi \dots\dots\dots (3)$$

여기서 ξ 는 0과 1사이에서 일정한 확률분포를 갖는 무작위수(random number)이다. 임의의 반응 위치 $r_1(x_1, y_1, z_1)$ 에서 $\omega(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 방향으로 감마선이 산란될 때 다음 반응 위치 $r_2(x_2, y_2, z_2)$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + s \omega_x \dots\dots\dots (4) \\ y_2 &= y_1 + s \omega_y \\ z_2 &= z_1 + s \omega_z \end{aligned}$$

여기서 ω 는 방향 단위벡터(directional unit vector)이며, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 는 각각 ω 의 $x-, y-, z$ -성분이다. 만약 다음 반응 위치 r_2 가 팬텀의 외부에 위치하게 되면 계산은 종료되고 다음 계산 pass가 새로이 시작된다.

2. 비균일한(heterogeneous) 매질 내에서의 반응거리 계산

반응 거리 내에서 매질이 비균일할 때, 식 (3)의 역변환법을 사용하여 반응거리를 계산하면 그 계산값이 과대 평가하게 되어 무시 못 할 오차를 수반하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 가상 평균자유행로(virtual mean-free path)법을 사용하여 반응거리를 계산하였다³⁾.

그림 2에서와 같이 감마선이 이동하는 경로 상에 놓인 팬텀이 n 개의 서로 다른 매질로 구성되어 있을 때 구성 매질 각각의 총선형감약계수를 각각 $\sum_{t1}, \sum_{t2}, \dots, \sum_{tn}$ 이라 하고 매질 i 에서 투과거리를 d_i 라 하면, 첫째, 현재 감마선이 위치한 매질 1에서의 가상 평균자유행로 l_1 은 확률밀도함수로부터 다음과 같이 구해진다:

$$l_1 = -\ln(x) \dots\dots\dots (5)$$

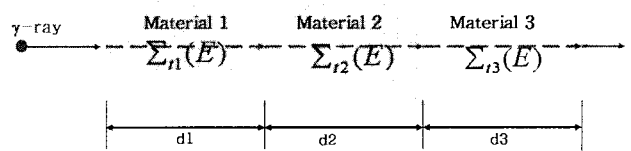


그림 2. 비균일한 매질 내에서의 반응거리 계산. 가상 평균자유행로법

여기서 x 는 0과 1사이에서 일정한 확률분포를 갖는 무작위수를 나타낸다. 그 다음, l_1 은 현재 감마선이 위치한 매질 1에서의 실제 평균자유행로(actual mean-free path) ($\Sigma_{t1} \cdot d_1$)와 비교한다. 만약 ($\Sigma_{t1} \cdot d_1$) $\geq l_1$ 이면, 반응거리는 (l_1/Σ_{t1})이 되고, 그렇지 않으면 매질 1을 통과한다고 가정한다. 이런 경우 통과한 감마선에 대해서 매질 2에서의 가상 평균자유행로 l_2 를 다시 계산하고 매질 2에서의 실제 평균자유행로 ($\Sigma_{t2} \cdot d_2$)와 비교한다. 이러한 과정을 l_i 가 ($\Sigma_{ti} \cdot d_i$)보다 작게 될 때까지 반복하여 계산한다. 이러한 과정을 거쳐 최종적으로 다음 반응 위치는 매질 i 내에 있게 되고 이 때 반응거리 s 는 식 (6)과 같다:

$$s = \sum_{j=1}^{i-1} d_j + \frac{l_i}{\Sigma_{ti}} \dots\dots\dots (6)$$

3. 상호작용 유형 선택

선원에서 방출되는 감마선은 등방향성(isotropic)을 가진다고 가정하였으며, 감마선과 팬텀과의 상호작용은 고전산란(coherent scattering; COH), 광전흡수(photoelectric absorption; PA), 콤프턴산란(Compton scattering; CS)으로 제한하였다. 감마선과 팬텀과의 상호작용 유형 선택은 다음과 같이 결정하였다: 0과 1사이에서 임의의 값을 갖는 무작위수 ξ 를 생성한 후, $\xi \leq [\Sigma_{COH}(E)/\Sigma_{total}(E)]$ 이면 감마선이 그 지점에서 고전산란을, $[\Sigma_{COH}(E)/\Sigma_{total}(E)] \leq \xi \leq [(\Sigma_{COH}(E)+\Sigma_{PA}(E))/\Sigma_{total}(E)]$ 이면 광전흡수를, 그 외의 경우에는 콤프턴산란을 일으킨다고 가정한다. 여기서 $\Sigma_{total}(E) = \Sigma_{COH}(E) + \Sigma_{PA}(E) + \Sigma_{CS}(E)$ 이다.

4. 산란 감마선의 방향 계산

감마선이 팬텀 내에서 광전흡수 반응을 일으키면 그 감마선은 완전히 흡수되어 사라지는 반면, 콤프턴산란을 일으키면 자신의 에너지 중 일부를 잃고 산란하게 된다. 그러므로 산란된 감마선의 새로운 방향과 에너지를 계산해야 된다. CALEFF 코드에서는 감마선의 산란각을 계산하기 위하여 Kahn의 거절법(rejection method)을 사용하였다⁴⁾. 그림 3은 입사 감마선 에너지(10 keV, 140 keV, 1 MeV)에 대해 Kahn의 거절법을 사용하여 계산된 콤프턴산란의 각도분포를 보여주며, 감마선의 에너지가 증가할수록 산란 방향은 전방을 향함을 알 수 있다.

또한 산란된 감마선의 에너지 E' 은 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있다:

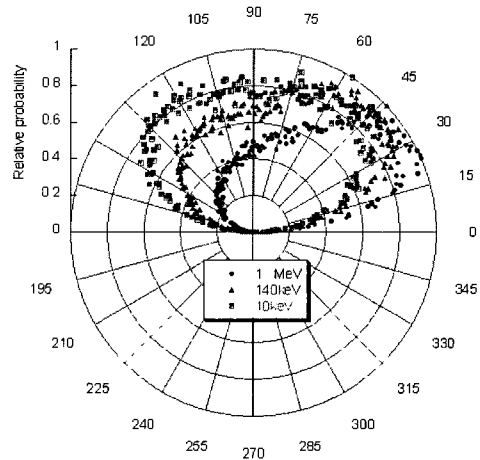


그림 3. Kahn의 거절법을 사용하여 계산한 콤프턴 산란각도 분포

$$E' = \frac{m_0c^2}{1 - \mu + 1/\alpha} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 m_0c^2 은 전자의 정지질량 에너지(0.511 MeV)이며, α 는 전자의 정지질량 에너지 단위로 표시된 산란된 감마선의 에너지를 나타낸다.

5. 갑상선 팬텀 모델링 : KMIRD

CALEFF 코드에 사용된 갑상선 팬텀의 모델링은 수학적 한국표준형 갑상선 모델인 KMIRD를 사용하였다⁵⁾. 그 구조는 그림 4에 나타난 바와 같이 반지름이 2.2 cm인 외부원에서 반지름이 1.6 cm인 내부원을 제외하고 수직축 중심으로 좌우 0.2 cm에 해당하는 부분과 수평축 중심 1 cm 아래보다 큰 부분을 제거한 영역으로 되어 있다($x^2+y^2 < 2.22$, $x^2+y^2 > 1.62$, $x < -0.2$, $x > 0.2$, $y+1 < 0$, $0 < z < 5$). 여기서 단위는 cm이다.

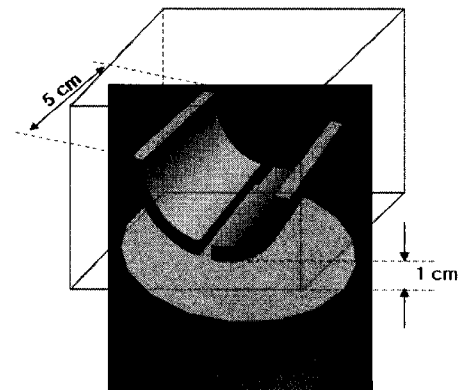


그림 4. CALEFF 코드에 사용된 갑상선 팬텀 모델링: 수학적 한국표준형 갑상선 모델인 KMIRD

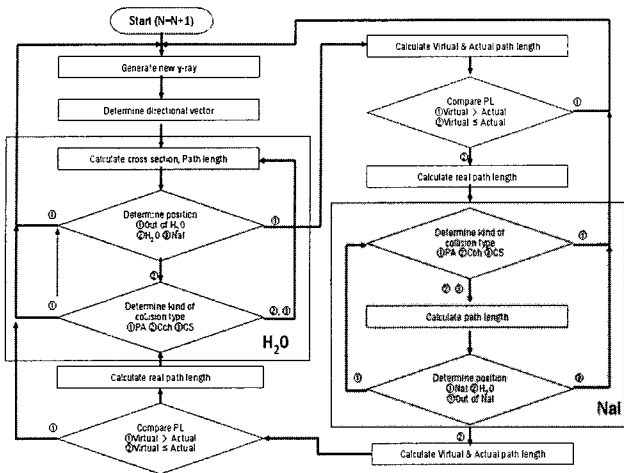


그림 5. CALEFF 코드의 개략적인 계산과정 흐름도

상기 기술한 내용을 바탕으로 입사 감마선이 팬텀과 상호작용하는 전 과정을 모사하는 모의실험 코드를 Visual C++ 프로그래밍 언어를 사용하여 구현하였으며, 그림 5는 CALEFF 코드의 개략적인 계산과정 흐름도를 나타낸다.

III. 모의실험 결과 및 고찰

1. CALEFF 코드의 유효성 검증

CALEFF 코드의 유효성을 검증하기 위하여 해석적으로 검출효율을 계산할 수 있는 점 선원(point source)에 대해 해석적 검출효율 값과 CALEFF 코드의 계산값을 비교하였다. 점 선원에 대한 해석적 검출효율은 그림 6의 기하학적 구조에 대하여 식 (8)과 같이 유도된다⁶⁾. 여기서 d는 점 선원과 검출기 사이의 거리이며, L과 R은 검출기의 길이 및 반경을 각각 나타낸다. 그림 7은 점 선원에 대해 선원과 검출기 간 거리의 함수로 계산된 해석적 검출효율과 CALEFF 코드의 계산값을 보여 준다. 주어진 계산조건(1 cm 거리, 0.412 MeV)에서 각각의 결과값은 오

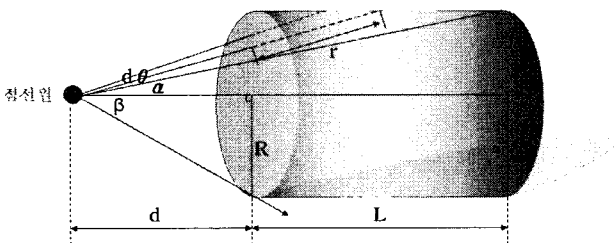


그림 6. 점 선원에 대한 해석적 검출효율을 계산하기 위한 기하학적 구조

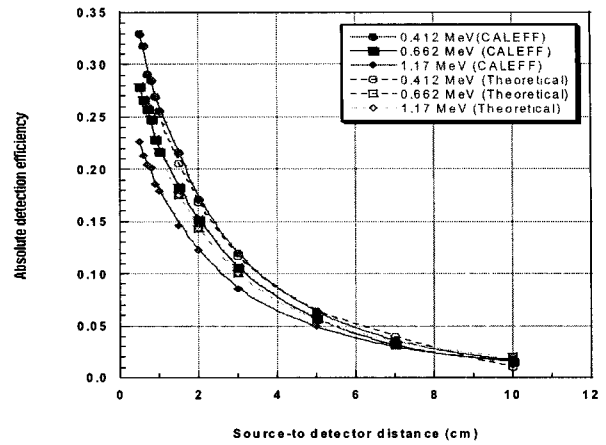


그림 7. 점 선원에 대해 계산된 해석적 검출효율과 CALEFF 코드의 계산값 비교

차범위 1% 이내에서 일치함을 보였으며, 점 선원과 검출기 사이의 거리가 멀수록, 점 선원의 에너지가 높을수록 검출효율이 떨어짐을 알 수 있다.

$$e_{abs}(E) = \frac{1}{2} \left\{ \int_0^\alpha [1 - \exp(-\mu(E) \frac{L}{\cos\theta})] \sin\theta d\theta + \int_\alpha^\beta \{1 - \exp[-\mu(E)(\frac{r}{\sin\theta} - \frac{d}{\cos\theta})]\} \sin\theta d\theta \right\}$$

$$\alpha \equiv \tan^{-1}[r/(d+L)]$$

$$\beta \equiv \tan^{-1}[r/d]$$

..... (8)

2. 갑상선 팬텀의 위치에 따른 검출효율 변화

검출기에 대한 갑상선 팬텀의 상대적 위치에 따른 검출효율의 변화를 알아보기 위해 갑상선 팬텀 선원과 검출기의 상대적인 위치를 변화시켜 가면서 검출효율을 계산하였다. 그림 8은 검출기를 갑상선 팬텀 선원에서 1cm 떨어진 정 중앙에 고정시키고 갑상선 팬텀을 0.2cm 간격으로 좌우 1cm까지 이동시키면서 검출효율을 계산한 결과를 보여 준다. 그림 8에 나타난 바와 같이 검출기의 정 중앙에 갑상선 팬텀 선원을 위치시켰을 때 검출효율은 가장 높게 계산되었으며, 또한 x-, y-방향으로 이동시켰을 때 평균 0.04%/mm로 감소하였다.

그림 9는 갑상선 팬텀 선원과 검출기 간의 거리에 따른 검출효율의 변화를 알아보기 위해 검출기 정 중앙에 갑상선 팬텀 선원을 위치시킨 상태에서 축 방향으로 2mm 간격으로 2cm까지 변화시키며 계산한 결과를 보여준다.

여기서 검출효율은 세 가지로 구분하여 계산하였다: ① 절대 검출효율(absolute efficiency)은 선원에서 입사된 감

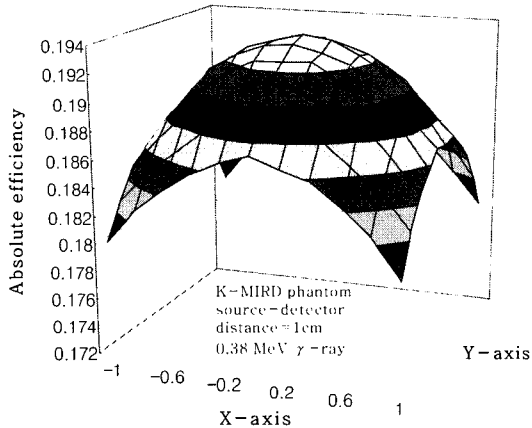


그림 8. 갑상선 팬텀 선원의 횡방향에 따른 검출효율 변화 (x-, y-축의 단위: cm)

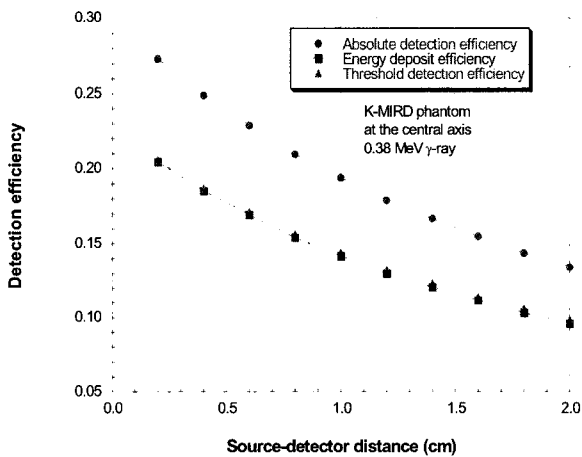


그림 9. 갑상선 팬텀 선원의 축방향에 따른 검출효율 변화

마선이 검출기 내에서 임의의 상호작용을 일으키면 100% 검출된다고 가정할 때의 검출효율을 말하며, ② 에너지축적 검출효율(energy deposit efficiency)은 선원에서 입사된 감마선이 검출기 내에서 반응하여 검출기 물질로 전달한 에너지에 비례해서 검출된다고 가정할 때의 검출효율을, 그리고 ③ 임계 검출효율(threshold efficiency)은 이때 전달된 에너지가 신호처리회로의 판별기(discriminator)에서 설정된 0.7V의 판별준위 이상의 출력을 낼 때의 검출효율을 의미한다. 그림 9에서 나타낸 바와 같이 갑상선 팬텀 선원과 검출기 간의 거리에 따른 검출효율은 평균 0.4%/mm로 감소하였으며, 검출기와 상대적 위치에서 횡방향보다는 축방향 이동에 대해 약 10배 정도 더 민감함을 알 수 있다; 그 이유는 선원에서 방출되는 감마선

은 등방향적으로 검출기로 입사되므로 선원과 검출기 간의 거리의 제곱에 반비례하기 때문이다.

IV. 결 론

방사선방호 신개념과 부합하여 현재 개발 중인 갑상선 내부피폭선량 측정 시스템의 검출효율을 계산하기 위해 몬테카를로 모의실험 코드인 CALEFF 코드를 Visual C++ 프로그래밍 언어를 사용하여 개발하였다. CALEFF 코드 계산과정의 유효성을 검증하기 위해 동일한 조건에서 점선원에 대한 해석적 검출효율과 CALEFF 코드 계산치와 비교하였으며, 결과는 1% 이내에서 잘 일치하였다. 모의실험 결과에 의하면 갑상선 내부피폭측정 시스템의 검출효율은 선원과 검출기 사이의 거리가 멀수록 그리고 선원의 에너지가 높을수록 감소하며, 또한 검출기와 갑상선 팬텀 선원의 상대적 위치에 따른 검출효율은 횡방향보다는 축방향 이동에 대해 약 10배 정도 더 민감하였다(횡방향으로의 평균 검출효율 변화율 = 0.04%/mm, 축방향으로의 평균 검출효율 변화율 = 0.4%/mm). 본 연구의 결과는 향후 개발중인 갑상선 내부피폭선량 측정 시스템의 보정인자로 사용할 계획이다.

참 고 문 헌

1. 한국전력공사: 선량환산계수의 변경과 규제영향에 관한 KINS 보고서 검토결과, 한국전력공사보고서, 1999
2. A. Rose: Concepts in Photoconductivity and Allied Problem, Interscience Pub., New York, 1963
3. Sang Hoon Lee: Use of Differential Operators in the Monte Carlo-Library Least-Square Method for X-Ray Fluorescence Applications, Ph.D Thesis, 1999
4. R. H. Bube: Photoconductivity of Solids, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960
5. 과기부: 방사선방호를 위한 표준한국인 설정연구, 방사선 안전규제 기술개발 최종보고서, 2002
6. Nicholas Tsoulfanidis, McGraw-Hill: Measurement and Detection of Radiation, 1978

• Abstract

Development of a Monte Carlo Simulation Code (CALEFF) for Calibrating Thyroid Internal Dose Measurement and Detection Efficiency Calculation

Ki Soo Ahn¹⁾ · Hyo Sung Cho^{1,2)}

Basic Atomic Energy research institute, Yonsei University¹⁾ · Dept. of Radiological Science, Yonsei University²⁾

According to the Para. 5 of Art 2 of the Korean Nuclear Safety Regulations, which was revised in 1999, internal dose assessment as well as external one should be performed by law for employees at a nuclear power plant from 2003, and their estimate errors should also be within 50%. Thus, more accurate internal dosimetry becomes important. Corresponding to such regulation revision, we are developing a more accurate thyroid-uptake internal dosimetric system and have developed a Monte Carlo simulation code, the so-called CALEFF, to calculate the detection efficiency of the dosimetric system. In this paper, we calculated detection efficiencies with various test conditions by using the CALEFF code and discussed their characteristics. We may use the detection efficiency calculated by the code in calibrating the thyroid internal dose from measured data.

Key words : thyroid, internal exposure, radiation measurement, Monte Carlo simulation, detection efficiency