

## Assessment of Effective Doses in the Radiation Field of Contaminated Ground Surface by Monte Carlo Simulation

Jai-Kwon Chang, Jai-Ki Lee\*, Si-Young Chang  
Korea Atomic Energy Research Institute, \*Hanyang University

### 몬테칼로 시뮬레이션에 의한 지표면 오염 방사선장에서의 유효선량 평가

장재권 · 이재기\* · 장시영

한국원자력연구소, \*한양대학교

(1999년 12월 2일 접수, 2000년 3월 6일 채택)

**Abstract** - Effective dose conversion coefficients from unit activity radionuclides contaminated on the ground surface were calculated by using MCNP4A code and male/female anthropomorphic phantoms. The simulation calculations were made for 19 energy points in the range of 40 keV to 10 MeV. The effective doses  $E$  resulting from unit source intensity for different energy were compared to the effective dose equivalent  $H_E$  of previous studies. Our  $E$  values are lower by 30% at low energy than the  $H_E$  values given in the Federal Guidance Report of USEPA. The effective dose response functions derived by polynomial fitting of the energy-effective dose relationship are as follows:

$f(\epsilon) [tSv m^2] = 0.0634 + 0.727\epsilon - 0.0520\epsilon^2 + 0.00247\epsilon^3$ , where  $\epsilon$  is the gamma energy in MeV.

Using the response function and the radionuclide decay data given in ICRP 38, the effective dose conversion coefficients for unit activity contamination on the ground surface were calculated with addition of the skin dose contribution of beta particles determined by use of the DOSEFACTOR code. The conversion coefficients for 90 important radionuclides were evaluated and tabulated. Comparison with the existing data showed that a significant underestimates could be resulted when the old conversion coefficients were used, especially for the nuclides emitting low energy photons or high energy beta particles.

**Key words:** Effective dose, Conversion Coefficient, Phantom, MCNP4A, DOSEFACTOR

**요약** - 지표에 오염된 방사성핵종의 단위방사능당 유효선량환산계수를 남성과 여성 인형모의피폭체와 MCNP4A 코드를 이용하여 계산하였다. 모사실험은 40 keV에서 10 MeV 영역의 19개 단일 에너지에 대한 유효선량 계산을 수행하였다. 에너지에 따른 단위 선원강도에 대한 유효선량  $E$ 를 기존 연구자들의 결과물인 유효선량당량  $H_E$ 와 비교한 결과, 본 연구의  $E$ 값이 USEPA의 FGR에 주어진  $H_E$ 값에 비해 30%의 편차를 보였다. 에너지와 유효선량의 관계를 polynomial fitting을 통해 구한 유효선량 감응함수는 다음과 같다.  $f(\epsilon) [tSv m^2] = 0.0634 + 0.727\epsilon - 0.0520\epsilon^2 + 0.00247\epsilon^3$  여기서,  $\epsilon$ 는 감마선의 에너지(MeV)이다.

감응함수와 ICRP 38의 방사성핵종 붕괴 자료를 이용하여 지표면과 공기 오염의 단위 방사능농도에 대한 유효선량환산계수를 계산한 후 DOSEFACTOR코드를 사용하여 계산한 베타선에 의한 피부선량을 합하여 90개의 중요 핵종들에 대한 환산계수를 평가하여 도표로 제시하였다. 기존 자료들과 비교를 통해 기존 환산계수를 사용할 경우 특히 저에너지 감마선이나 고에너지 베타선을 방출하는 핵종에 대해서 상당한 과소평가가 이루어질 수 있음을 확인할 수 있었다.

**중심어:** 유효선량, 환산계수, Phantom, MCNP4A, DOSEFACTOR

## 서 론

원전 등과 같은 원자력시설의 운영 또는 사고 등으로 인해 대기로 방출된 방사성핵종이 침적함에 따라 방사성핵종에 의한 지표면의 오염이 발생할 수 있다. 이와 같이 지표면침적 방사성핵종에 노출되는 사람들에 대한 유효선량의 평가는 원자력 시설의 인허가 단계에서의 안전성 평가나 사고시 비상대응을 위한 의사결정 등에서 중요한 의미를 지닌다. 그러나 현실적으로 광활한 면적의 표면선원을 실현하기 어렵기 때문에 지표면 오염에 대한 선량평가는 실험적으로 도출하기보다는 방사선수송에 의한 이론적 평가에 의존할 수 밖에 없다. 이전부터 오염된 지표면에 대한 선량환산계수에 대해서는 많은 연구자들이 독자적인 기법들을 사용해 왔다. Kocher[1,2]등은 무한영역의 지표면 오염을 가정하여 공기와 토양에서 감마선의 비충돌(uncollided) 및 산란에 의한 선량기여분을 설명하기 위해 산란효과를 도입하는 점커널 기법을 사용하고 있다. 계산방법은 지표상 1 m 높이에 놓여있는 점 피사체에서의 공기커마(kerma)를 평가한 후, 인형모의피폭체에 등방향(ISO)으로 입사하는 피폭환경에 대해 O'Brien[3]등이 계산한 공기커마에 대한 유효선량당량에 대한 환산계수의 자료를 이용하고 있다.

Jacob[4,5]등은 토양내 핵종의 이동을 고려하여 지표면 아래 3 mm 깊이에 선원이 놓여있는 것으로 가정하고 있다. Jacob은 토양과 공기에서의 방사선 수송을 몬테칼로 기법을 이용하여 지표면위 1 m 높이의 미소체적( $1\text{cm}^3$ )에서 방사선의 에너지와 방향에 따른 방사선장을 산출한 후 Kramer[6]등이 인체에 6개 방향(등방향, 상반구 등방향, 상부평행, 하부평행, 측면회전, 상부  $15^\circ$  회전평행)으로 입사하는 것을 가정하여 계산한 유효선량당량에 대한 환산계수를 각 방향별로 내삽하여 지표면 오염에 대한 환산계수를 계산하고 있다.

Chen[7]은 500 m 범위의 유한 오염 영역을 갖는 기하학적 조사환경을 가정으로 토양과 공기에서의 감마선의 수송과정을 몬테칼로기법을 이용하여 지표면 위 1 m 높이에서의 공기의 흡수선량을 산출한 후 ICRP 51[8]에서 발표하고 있는 ROT에 대한 환산자료를 이용하여 평가하고 있다. Chen이 Kocher와는 달리 ROT의 기하학적 조사환경에 대한 환산계수를 사용한 이유는 지표면오염의 선원으로부터 인체에 입사하는 방사선장은 인체의 몸통에 수직으로 입사하는 방사선장이 좀더 지배적일 것이라는 다른 연구자[4,5]들의 결과에 근거하

고 있다. 이와 같은 피폭환경에 대한 기하학적 조사환경의 차이로 전체적으로 Chen의 계산결과와 Kocher의 결과값에 비해 최대 30%까지 큰 결과를 보이고 있다. 그러나 이와 같은 연구자들의 기법은 피폭상황을 지나치게 단순화하고 있으며 점커널 기법과 같은 일부 계산방법은 정밀한 선량평가를 수행하는 데 한계가 있다.

최근 Federal Guidance Report 12[9](이하 FGR로 칭한다)에서는 좀더 정교한 방법을 제안하고 있다. 이들 방법은 인체를 포함할 수 있는 크기의 실린더 표면에서의 방사선장을 각분할법(DOM)을 이용하여 산출한 후 계산된 방사선장이 남성과 여성을 하나의 모의피폭체로 표현하는 양성(인형) 모의피폭체에 입사하는 것을 가정으로 선량환산계수를 계산하고 있다. 이와 같은 방법은 기존의 연구자들에 비해 지표면 위의 높이별 방사선장의 차이를 좀더 정확히 평가하고 있지만 방사선장을 산출하는 과정에서 인체가 놓여있지 않는 환경에서 방사선장을 산출하고 있기 때문에 인체와 같이 상당한 체적을 갖는 물체가 방사선장에 놓여있을 경우 발생하는 방사선장의 교란(perturbation)현상을 고려하지 않고 있다.

이와 같이 방사선장과 인체의 감응을 2 단계로 분리하여 선량을 평가하는 방법은 과거 몬테칼로 기법이 가지는 많은 이점에도 불구하고 계산결과와 통계적 신뢰성과 계산 시간의 문제로 인해 선택한 차선택이었다. 그러나 최근 계산속도의 향상과 확장된 메모리분야 등 컴퓨터분야의 발전으로 이와 같은 문제점은 많이 사라졌다.

따라서, 본 연구에서는 무한영역의 선원으로 간주할 수 있는 유한 영역의 오염을 가정으로 방사선장에 직접 서 있는 남성과 여성의 인형 모의피폭체를 대상으로 몬테칼로 수송계산을 통해 외부 피폭에 대한 유효선량환산계수를 계산하고자 한다.

## 유효선량 및 계산방법

### 유효선량

국제방사선방호위원회(ICRP)에서 정의하고 있는 유효선량을 산출하기 위해서는 양성(인형) 모의피폭체가 필요하다. ICRP60[10]에서는 12개 주요 개별 장기와 10개의 기타 장기에 대한 조직가중치( $w_T$ )를 권고하고 있다. 그러나 남성모의피폭체의 경우 위원회에서 권고하고 있는 장기중 일부 장기가 없기 때문에 유방에 대한 가중치는 남성의 경우 0으로 여성의 경우 0.1, 기타장기에서 자궁이

없기 때문에 9개 장기에 가중치를 할당하였다. 유효선량은 ICRP 74[11]에서 제시하고 있는 아래 식에 의해 계산하였다.

$$E = w_{breast}H_{breast, female} + \sum_{i \neq breast} w_T \left[ \frac{H_{T, male} + H_{T, female}}{2} \right]$$

**인형 모의피폭체 및 계산 수단**

본 연구에서는 MIRD5[12] 남성모의피폭체(질량 70 kg, 몸통의 폭 40 cm와 두께 20 cm)와 Cristy[13] 등이 개발한 여성모의피폭체(질량 57 kg, 몸통의 폭 34.5 cm와 두께 19.6 cm)를 사용하였다. 계산수단은 일반목적의 몬테칼로 코드인 MCNP4A[14]를 사용했고 감마선 단면적 자료는 ENDF[15]의 데이터를 사용하였다.

**기하학적 조사 환경 및 모사 실험**

인형 모의피폭체와 선원간의 기하학적 모델은 그림 1과 같이 공기가 채워져 있는 실린더와 일정한 두께의 토양이 있는 공간으로 구성하였다. 남성과 여성의 인형 모의피폭체는 그림 1에서와 같이 오염된 지표면 위에 놓여있으며 지표면으로부터 단일에너지의 감마선이 방출되는 것을 가정하였다.

공기의 밀도는 Kocher와 FGR에서 설정한 환경과 동일한 상온 20°C와 750 mmHg 기압상태에 해당되는 1.189×10<sup>-3</sup> g/cm<sup>3</sup>를, 토양의 밀도는 토양내 공극과 수분함량에 따라 차이가 있기 때문에 일반 토양의 밀도인 1.6×10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>를 가정하였다 [1,2,9]. 공기와 토양의 각 구성성분과 질량분율은 표 1과 같다.

**Table 1.** Element and mass weight fraction of air and soil.

Element	Air(%)	Soil(%)
C	0.012	
N	75.52	
O	23.18	
Na		1.03
Mg		1.03
Al		14.69
Si		68.29
Ar	1.28	
K		2.90
Ca		3.10
Ti		1.03
Fe		8.28

표 2는 반경 500, 1000와 2000 m 범위의 지표면 오염을 가정으로 10 MeV 에너지를 갖는 감마선원에 대한 유효선량의 계산결과이다. 500 m와 2000 m의 오염범위에 대한 계산결과와의 차이는 상대적으로 3%이내로서 계산과정에서 발생하는 오차 범위 이내의 결과를 보이고 있다. 이와 같은 계산결과를 고려할 때 지표면 오염에 대한 선량평가에 있어서 오염원을 500 m 이상의 범위에서 설정할 경우에 조사환경 범위의 설정에 따른 유효선량 계산결과와의 차이는 거의 발생하지 않을 것이다.

**Table 2.** Effective Dose in Three Irradiation Geometries for 10 MeV.

Source Plane Radius(m)	500	1000	2000
Effective Dose (fSv m <sup>2</sup> )	4.32	4.40	4.45

지표면 오염에 대한 기하학적 조사환경의 범위는 표 2의 계산결과와 ICRU 53[16]에서 in situ 상황에서 반무한의 반구의 범위를 70 m로 설정하고 있는 점과 Chen[7]등이 설정하고 있는 기하학적 모형, 지표면 오염에 의한 기하학적 모형에 따른 계산과정의 효율성과 공기내 감마선의 비정거리를 고려하여 본 연구에서는 이를 감마선의 에너지에 따라 다르게 설정하였다. 먼저 1 MeV 이하의 감마선원에 대해서는 선원이 반경 700 m의 평면에 균일하게 분포하는 것을 가정하였으며 1 MeV 이상의 감마선에 대해서는 반경 1000 m를 가정하였다. 지표면 위 대기권은 1 MeV 이하의 감마선원에 대해서는 300 m를, 1 MeV 이상의 감마선에 대해서는 500 m를 설정하였다. 토양의 두께는 감마선의 에너지에 무관하게 2 m를 가정하였다. 이러한 조건에서 기하학적 범위를 초과하는 범위의 선원이나 모델 밖의 공기나 토양에서 산란된 감마선에 의한 선량의 기여는 무시할 만큼 작다.

환경내 분포하고 있는 선원에서 방출되는 감마선에 대한 유효선량환산계수를 산출할 때, 관심있는 각 핵종에 대해 개별적으로 방출되는 정확한 감마선 에너지 스펙트럼 정보를 이용하여 일일이 계산하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 원자력시설로부터 환경으로 방출될 수 있는 여러 핵종들의 에너지 영역을 대표할 수 있는 40 keV~10 MeV의 19개 단일에너지에 대한 환산계수를 산출하여 이들 계산결과를 통해 각 핵종들의 환산계수를 산출하였다.

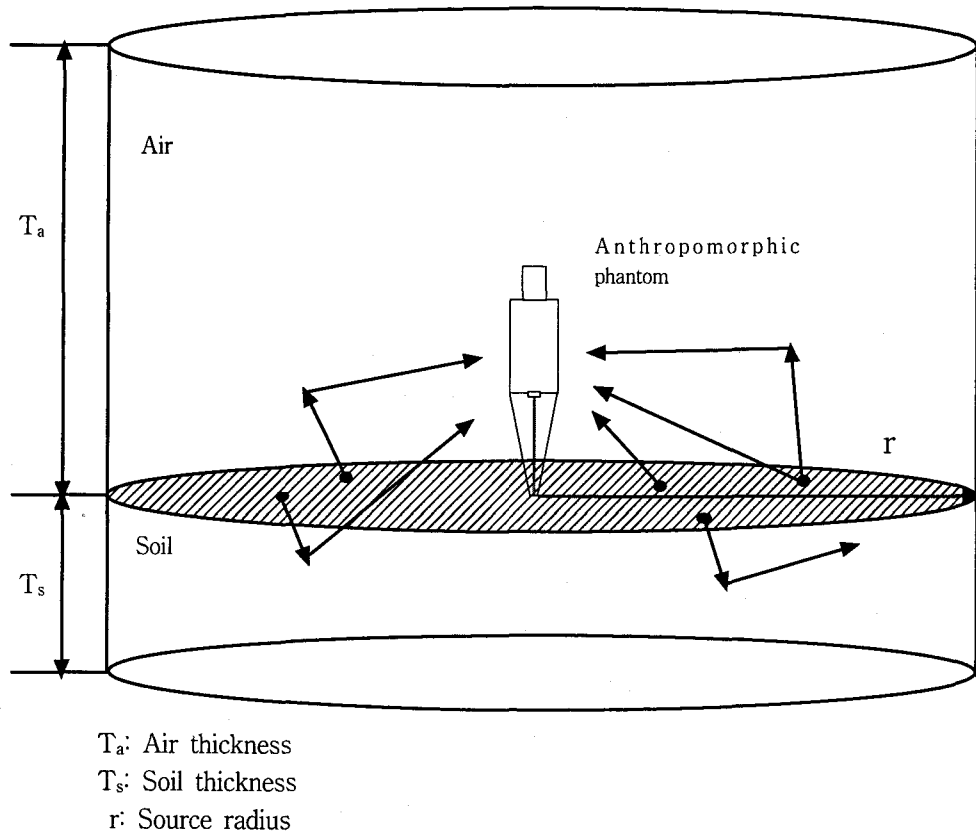


Fig. 1. Source/Anthropomorphic phantom configuration for calculation of effective dose from photon sources distributed in finite ground surface.

## 결과 및 논의

### 단일에너지의 감마선에 대한 선량환산계수

몬테칼로 모사실험에서 계산결과의 신뢰성은 통계적 오차에 의해 결정된다. 특히 본 연구에서와 같은 피폭환경에서 계산결과를 신뢰성 있는 범위 내의 통계적 오차로 줄이기 위해서는 많은 계산시간이 필요하다. 통계적 오차는 감마선의 에너지, 기하학적 모형, 모의피폭체의 크기와 모의피폭체 내 장기가 놓여있는 위치 및 크기에 영향을 받는다. 계산결과에서 폐, 간 및 위 등과 같이 비교적 체적이 큰 장기의 경우 100 keV 이상의 에너지 영역에서 계산과정에서 발생하는 통계적 오차는 5% 이내였다. 반면에 낮은 에너지 영역과 갑상선과 난소 등과 같은 작은 장기의 경우 20% 이내의 통계적 오차를 갖고 있다. 유효선량 기여도 측면을 고려할 때 통계적 오차가 큰 장기의 경우 선량값이 매우 작으며 따라서 실질적으로 유효선량에

미치는 영향은 미미할 것이다.

그림 2는 감마선 에너지 함수로서 본 연구에서 계산한 유효선량과 FGR과 Jacob이 계산한 유효선량당량과의 비교를 보여주고 있다. Jacob의 결과와 비교시 본 연구의 결과치가 약간 큰 결과를 보이고 있는데 이는 Jacob은 토양내 핵종의 이동을 고려하기 위해 선원이 3mm 깊이의 토양에 분포하고 있는 것을 가정하고 있기 때문에 토양에 의한 방사선의 자기차폐에 기인한 것으로 해석된다. 에너지가 증가함에 따라 이러한 차이는 점차 감소하고 있다.

FGR의 결과와 비교시 본 연구에서 계산된 결과값이 FGR의 평가치에 비해 상대적으로 약 20~30% 정도 작은 결과를 보이고 있다. 이러한 차이를 정량화하는 것은 용이하지는 않지만 방사선장의 산출방법, 사용된 인형 모의피폭체와 조직가중치의 할당방법의 차이에 기인한 것으로 해석된다.

첫째 방사선장의 산출과정에서 본 연구에서는 문

테칼로 기법을 통해 직접 방사선을 모사하고 있는 반면에 FGR의 경우 DOM기법을 통해 인체를 포함할 수 있는 크기의 실린더 표면에서의 방사선장을 산출하고 있다. 방사선장을 계산하는 과정에서 인체가 놓여있지 않은 환경에서 방사선장을 계산하는 관계로 인체와 같이 상당한 체적을 갖는 물체가 방사선장에 놓여 있음으로써 발생하는 방사선장의 교란(perturbation)현상을 고려하지 못하고 있다.

둘째 인형 모의피폭체의 경우 FGR에는 양성의 인형 모의피폭체를 사용하고 있는 반면에 본 연구에서는 남성과 여성이 분리된 인형 모의피폭체를 통해 선량을 평가하고 있다. 일반적으로 성별 인형 모의피폭체는 남성과 여성의 각 장기의 선량값을 평균하여 평가하기 때문에 체적이 작은 여성이 포함되는 관계로 양성의 인형 모의피폭체에서 평가된 결과에 비해 크다. 그러나 FGR의 양성 인형 모의피폭체에서는 골수, 갑상선과 생식기 등의 장기에 대해 성별 모의피폭체와 다른 방법으로 선량을 평가하고 있다.

골수의 경우 FGR의 양성 인형 모의피폭체에서는 골수의 비균질성을 고려하기 위해 플루언스의 환산계수를 사용하고 있는 반면 본 연구에서는 뼈의 선량값에서 골수의 질량가중을 통해 평가하고 있다. 갑상선의 경우 양성의 인형 모의피폭체가

MIRD형에 비해 목부위를 가늘게 수정하고 있기 때문에 갑상선의 선량이 성별로 구분된 모의피폭체의 결과에 비해 크다. 생식선의 선량값도 탄소와 고환중 선량값이 높은 장기의 선량값을 통해 평가하고 있다. 이와 같은 장기의 선량평가 방법의 차이로 전체적으로 성별 인형 모의피폭체로부터 얻어진 결과에 비해 FGR의 양성 인형 모의피폭체의 선량값이 좀더 크게 평가되는 것으로 알려졌다[9]. 셋째 본 연구에서는 ICRP 60에서 권고하고 있는 조직가중치를 이용하고 있는 반면에 FGR에서는 ICRP 26[17]에서 권고한 조직가중치를 사용하고 있다. 이와 같은 조직가중치의 차이는 기타조직의 가중치의 할당 방법의 차이로 인해 저에너지 영역을 제외하고는 유효선량당량의 값이 유효선량에 비해 약간 큰 결과를 가져온다[9,11].

본 연구에서 얻은 19개의 단일에너지에 대한 유효선량 환산계수와 감마선 에너지와의 관계를 3차 스플라인 보간법으로 보간한 다음 다시 3차 함수식의 맞춤을 통해 유효선량에 대한 감응함수  $f(\epsilon)$ 를 얻었다. 즉,

$$f(\epsilon) = 0.0634 + 0.727\epsilon - 0.0520\epsilon^2 + 0.00247\epsilon^3$$

이때 여기서,  $f(\epsilon)$ 는  $\text{fSv m}^2$ 의 단위를 가지며  $\epsilon$ 는 MeV 단위의 광자에너지이다.

그림 3은 이 감응함수  $f(\epsilon)$ 를 도시한 것이다.

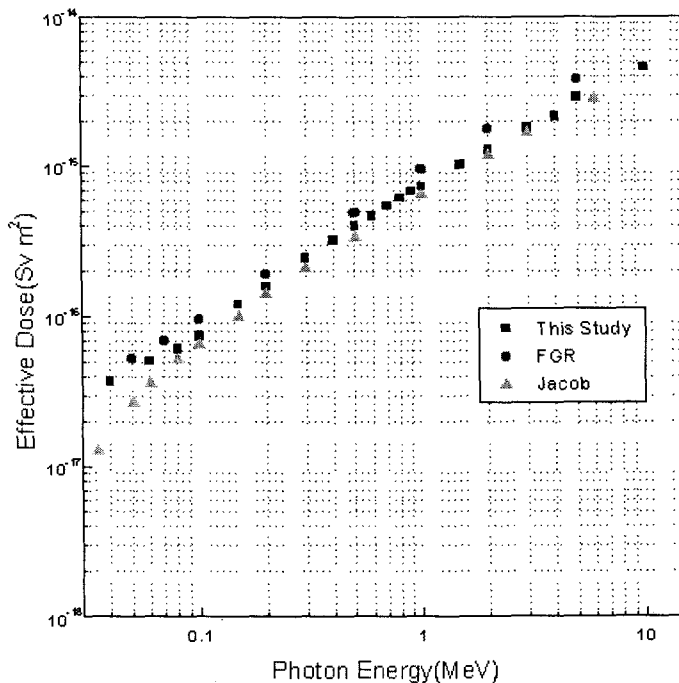


Fig. 2. The Comparison of Calculated Effective Dose with Effective Dose Equivalent Given in FGR and Jacob.

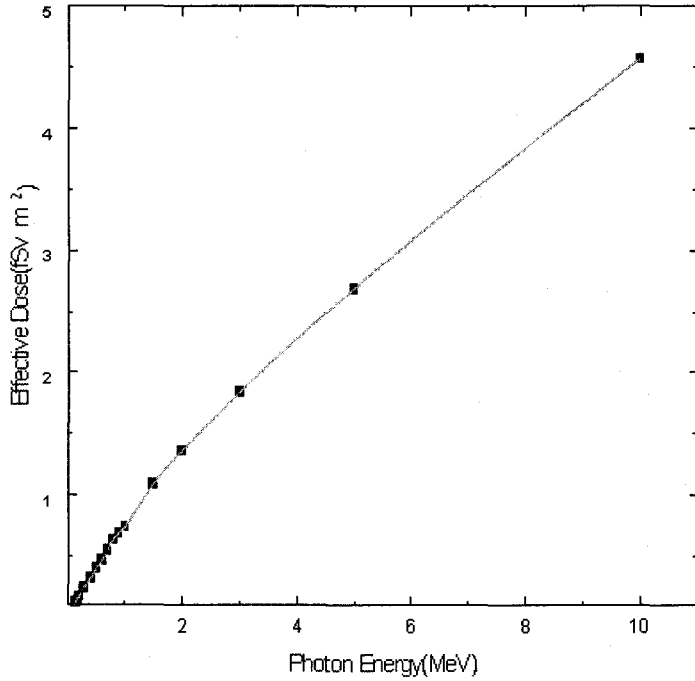


Fig. 3. Graphical Representation of the Effective Dose Response Function,  $f(\epsilon) = 0.0634 + 0.727\epsilon - 0.0520\epsilon^2 + 0.00247\epsilon^3$ , of Unit Surface Source Intensity.

**핵종들에 대한 단위 방사능농도당 유효선량 환산계수**

본 연구에서는 자연에 존재하는 천연 방사성핵종과 원전 등 방사선시설 운영으로 인한 영향평가 시 방사선선량학적 측면에서 중요한 핵종들을 선정하여 90개 핵종들에 대한 단위 표면 방사능에 대한 유효선량환산계수를 산출하였다.

각 핵종들에 대한 선량환산계수는 핵종의 붕괴당 방사선 방출데이터와 유효선량에 대한 감응함수를 이용하여 산출하였다.

$$DCC = \sum_i y_i f(\epsilon_i)$$

여기서,  $y_i$ : 핵종의 붕괴시 방출하는 에너지  $\epsilon_i$  인 감마선의 분율이다.

감마선외에 베타선을 동반 방출하는 방사성핵종에

대해서는 베타선이 인체내에서 비정이 짧기 때문에 피부의 선량만을 평가하였다. 베타선의 선량평가에는 Kocher등이 개발한 DOSFACTOR 코드 [18]를 이용하여 산출한 후 감마선의 결과에 합산하였다. 각 핵종들에 대한 선량환산계수를 계산하기 위해 사용된 감마선과 베타선의 에너지와 강도는 ICRP 38[19]의 자료를 이용하였다. 방사선의 에너지와 방출분율을 곱한 값이 전체적으로 0.1% 이하의 값을 보이는 데이터는 계산과정에서 제외 (cut-off)하였다.

표 3은 본 연구에서 계산한 90개 핵종들의 지표면오염에 대한 유효선량 환산계수 값과 FGR 결과물과의 상대오차를 보여주고 있다. 많은 핵종들이 상대오차 30%이내의 편차를 보이고 있으나, 한편 편차가 거의 없는 핵종과 상대오차가 100%에 가까운 핵종들이 보인다. 특히, 저에너지 감마선과 베타선을 방출하는 몇몇 핵종의 경우 상대오

차가 매우 큰 결과를 보여주고 있다. 이러한 차이가 발생한 이유는 FGR의 계산결과는 ICRP 26의 조직가중치의 적용에 따라 피부의 선량값이 포함되지 않는 유효선량당량인 반면에 본 연구에서는 ICRP 60의 가중치를 적용한 유효선량으로서 피부의 선량값이 포함되고 있기 때문이다.

신체규격이 작은 아동에 대한 유효선량의 차이를 평가하는 연구가 필요할 것이다.

## 결 론

방사성핵종의 지표면 오염에 따른 외부피폭에 대한 유효선량환산계수를 남성과 여성 인형모의피폭체와 MCNP4A 코드를 이용하여 계산하였다. 방사선장과 인체의 감응을 2단계로 분리하여 선량을 평가하는 기존의 연구자들의 방법과는 달리 방사선 수송을 직접 몬테칼로 기법으로 모사하였다. 40 keV~10 MeV까지 에너지영역의 19개 단일에너지에 대한 결과를 삼차원 스플라인 보간법으로 보간한 다음 다항식 맞춤을 통해 유효선량에 대한 아래와 같은 감응함수를 도출하였다.

지표오염:

$$f(\epsilon) = 0.0634 + 0.727\epsilon - 0.0520\epsilon^2 + 0.00247\epsilon^3$$

여기서,  $f(\epsilon)$ 는  $fSv m^2$ 의 단위를 가지며  $\epsilon$ 는 MeV 단위의 광자에너지이다.

도출된 감응함수와 ICRP 38의 핵종별 방사선 방출자료를 이용하여 단위 방사능 오염밀도당 유효선량환산계수를 산출하였다. 이때 동반 방출되는 베타선에 대해서는 Kocher 등이 개발한 DOSFACTOR 코드를 이용하여 피부 선량을 산출하여 합하였으며, 환산계수 산출대상 핵종은 환경내 존재하는 천연핵종과 원전 등의 방사선 영향평가에 중요한 핵종들로서 90개 핵종들을 선정하였다. 여기서 산출된 단위 방사능 오염당 유효선량 환산계수는 기존 데이터와 비교시 대체로 20%정도 작게 나타났으며 고에너지 베타선을 방출하는 핵종의 경우에 있어서는 상당히 차이가 컸다. 본 연구에서 제시되지 않은 핵종에 대한 유효선량 환산계수는 위의 유효선량 감응함수와 핵종의 붕괴도식 정보, 그리고 DOSFACTOR 코드를 이용하여 용이하게 산출할 수 있다.

본 연구에서는 시범적인 예로서 지표면 오염에 대한 선량만을 평가하였으나, 향후에는 방사성핵종의 토양내 이동을 고려할 때 일정한 깊이를 갖는 체적선원과 지표면 위 높이별 방사선장 차이가 상당히 발생된다는 점을 고려할 때 성인에 비해

Table 3. Effective Doses Conversion Coefficients for Exposure to Contaminated Ground Surface.

Nuclide	Conversion Coefficient (fSv m <sup>2</sup> )	Relative deviation* (%)	Nuclide	Conversion Coefficient (fSv m <sup>2</sup> )	Relative deviation* (%)	Nuclide	Conversion Coefficient (fSv m <sup>2</sup> )	Relative deviation* (%)
<sup>7</sup> Be	0.411	15.9	<sup>62</sup> Cu	0.949	15.9	<sup>137</sup> Cs	0.480	22.0
<sup>11</sup> C	0.870	13.8	<sup>64</sup> Cu	0.170	10.3	<sup>143</sup> Pr	0.0194	96.3
<sup>13</sup> N	0.847	19.1	<sup>62</sup> Zn	0.398	8.0	<sup>148</sup> Pm	0.0352	67.9
<sup>22</sup> Na	1.67	25.4	<sup>65</sup> Zn	0.448	23.3	<sup>154</sup> Eu	0.957	24.2
<sup>24</sup> Na	2.73	31.9	<sup>69m</sup> Zn	3.54	16.5	<sup>159</sup> Gd	0.0727	31.0
<sup>26</sup> Mg	0.105	23.8	<sup>66</sup> Ga	1.77	25.3	<sup>160</sup> Ho	0.0879	65.7
<sup>28</sup> Al	1.32	22.6	<sup>74</sup> As	0.640	16.6	<sup>177</sup> Lu	0.0461	26.6
<sup>38</sup> Cl	1.13	18.5	<sup>73</sup> Se	0.101	6.3	<sup>182</sup> W	0.000382	51.9
<sup>41</sup> Ar	0.952	26.0	<sup>80</sup> Br	0.00131	39.6	<sup>192</sup> Ir	0.721	11.2
<sup>40</sup> K	0.146	0.3	<sup>85</sup> Kr	0.0137	80.6	<sup>205</sup> Tl	1.58	20.0
<sup>42</sup> K	0.325	18.0	<sup>85m</sup> Kr	0.191	20.6	<sup>210</sup> Pb	2.07	88.0
<sup>47</sup> Ca	0.785	27.4	<sup>88</sup> Kr	1.32	31.5	<sup>214</sup> Pb	0.273	10.7
<sup>49</sup> Ca	2.00	31.5	<sup>88</sup> Rb	0.619	3.9	<sup>214</sup> Bi	0.107	31.3
<sup>44</sup> Sc	1.70	21.8	<sup>95</sup> Zr	0.573	26.2	<sup>210</sup> Po	0.0000675	26.0
<sup>46</sup> Sc	1.49	29.7	<sup>95</sup> Nb	0.590	26.5	<sup>214</sup> Po	0.000639	27.2
<sup>45</sup> Ti	0.747	15.2	<sup>99</sup> Mo	0.153	4.2	<sup>215</sup> Po	0.00015	15.9
<sup>48</sup> V	2.16	28.4	<sup>103</sup> Ru	0.392	18.2	<sup>210</sup> Po	0.000013	27.3
<sup>49</sup> Cr	0.974	6.8	<sup>106</sup> Rh	0.292	27.4	<sup>222</sup> Rn	0.000338	16.7
<sup>52m</sup> Mn	1.81	27.0	<sup>110</sup> Ag	1.42	25.3	<sup>226</sup> Ra	0.0103	37.7
<sup>54</sup> Mn	0.636	27.7	<sup>115</sup> Cd	0.213	8.1	<sup>230</sup> Th	0.000676	88.9
<sup>52</sup> Fe	0.667	9.0	<sup>123</sup> Sn	0.0496	83.1	<sup>231</sup> Th	0.0815	77.3
<sup>59</sup> Fe	0.853	31.3	<sup>127</sup> Te	0.0127	59.4	<sup>234</sup> Th	0.019	56.3
<sup>56</sup> Co	2.51	31.2	<sup>129</sup> I	0.0666	61.2	<sup>234m</sup> Pa	0.0843	81.8
<sup>57</sup> Co	0.188	39.0	<sup>131</sup> I	0.336	11.9	<sup>234</sup> U	0.00803	90.6
<sup>58</sup> Co	0.912	4.1	<sup>133</sup> I	0.510	17.0	<sup>235</sup> U	0.186	20.4
<sup>60</sup> Co	1.79	31.0	<sup>133m</sup> Xe	0.500	58.7	<sup>235</sup> U	0.00664	90.2
<sup>56</sup> Ni	1.39	19.6	<sup>133</sup> Xe	0.0872	47.1	<sup>238</sup> U	0.00653	91.5
<sup>57</sup> Ni	1.40	28.2	<sup>133m</sup> Xe	0.0484	16.0	<sup>238</sup> Pu	0.0084	90.0
<sup>65</sup> Ni	0.444	15.9	<sup>135</sup> Xe	0.257	64.9	<sup>240</sup> Pu	0.00802	89.9
<sup>61</sup> Cu	0.701	16.3	<sup>134</sup> Cs	1.22	24.5	<sup>241</sup> Am	0.0882	68.8

\* Relative error in % =  $\frac{\text{this study} - \text{FGR}}{\text{this study}} \times 100$



## 참고문헌

1. D. C. Kocher, "Dose-Rate Conversion Factors for External Exposure to Photons and Electron," *Health Phys.* 45, 665-686(1983)
2. D. C. Kocher, Sjoreen, A. L., "Dose-Rate Conversion Factors for External Exposure to Photon Emitters in Soil," *Health Phys.* 48, 193-205(1985)
3. Keran O'Brien and Robert Sanna, "The Distribution of Absorbed Dose-Rates in Humans from Exposure to Environmental Gamma Rays," *Health Phys.* 30, 71-78(1976)
4. P. Jacob, H. G. Paretzke, H. Rosenbaum and M. Zankl, "Effective Dose Equivalent for Photon Exposures from Plane Sources on the Ground," *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol 14, No 4, 299-310(1986)
5. P. Jacob, H. G. Paretzke, H. Rosenbaum and M. Zankl, "Organ Doses From Radionuclides on the Ground. PART I. Simple Time Dependences," *Health Phys.* 54, 617-633(1988)
6. R. Kramer, *The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and monte-carlo methods*, GSF 885;(1982)
7. S. Y. Chen, "Calculation of Effective Dose-Equivalent Responses for External Exposure from Residual Photon Emitters in Soil," *Health Phys.* 60, 411-426(1991)
8. International Commission on Radiological Protection, *Data for Use in Protection Against External Radiation*, ICRP Publication 51, Pergamon Press(1987)
9. K. F. Eckerman and J. C. Ryman, *External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil*, Federal Guidance Report NO. 12(1993)
10. International Commission on Radiological Protection, *1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Pergamon Press,(1990)
11. International Commission on Radiological Protection, *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation*, ICRP Publication 74, Pergamon Press (1996)
12. W. S. Snyder, M. R. Ford, G. G. Warner, *Estimates of Specific Absorbed Fraction for Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom*, Society of Nuclear Medicine, New York, MIRD Pamphlet No. 5. Revised(1978)
13. M. Cristy, *Mathematical Phantoms for Use in Reassessment of Radiation Dose to Japanese Atomic-Bomb Survivors*, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-9487, (1985)
14. LANL Group X-6, *MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4A*, LA-12625-M(1993)
15. J. H. Hubbell, W. J. Veigele, E. A. Briggs, R. T. Brown, D. T. Cromer and R. J. Howerton, "Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions, and Photon Scattering Cross Sections," *J. Phys. Chem.*, Ref. Data 4, 471(1975)
16. International Commission on Radiation Units and Measurement, *Gamma-Ray Spectrometry in the Environment*, ICRU Report 53(1994)
17. International Commission on Radiological Protection, *Recommendation of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26, Pergamon Press(1977)
18. D. C. Kocher and K. F. Eckerman, External Dose-Rate Conversion Factors for Calculation of Dose to the Public, DOE/EH-0070,(1988)
19. International Commission on Radiological Protection, *Radionuclide Transformations Energy and Intensity of Emissions*, ICRP Publication 38, Pergamon Press,(1983)