

## 지표면 오염에 의한 방사선장에서의 유효선량 평가

### Assessment of Effective Doses in the radiation field of contaminated Ground Surface

장재권, 이재기, 이춘식

한양대학교

서울시 성동구 행당동 17

#### 요 약

지표에 오염된 방사성핵종의 단위방사능당 유효선량환산계수를 남성과 여성 인형모의피폭체와 MCNP4A 코드를 이용하여 계산하였다. 방사선장과 인체의 감응을 분리하여 2단계로 평가한 기준의 선량평가 방법과는 달리 방사선수송을 직접 모사하였다. 감마선 에너지는 40 keV~10 MeV 범위에서 19개 단일에너지에 대한 계산을 수행한 다음 방사선영향 평가에 중요한 90개 핵종의 감마선 스펙트럼에 대해 유효선량환산계수를 산출하였다. 단일에너지에 대한 계산결과를 Jacob과 FGR 결과물과 비교한 결과 Jacob의 결과 값은 본 연구의 결과치에 비해 작은 결과를 보이고 있는데 이는 토양내 0.5 g/cm<sup>2</sup>(3mm)의 유효 깊이에 선원이 놓여있는 것을 가정하고 있기 때문이다. FGR의 결과값은 본 연구에 비해 약 30%까지 큰 결과를 보이고 있는데 이는 사용된 모의피폭체와 방사선장의 산출방법 및 조직가중치 할당방법의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

#### Abstract

Effective dose Conversion coefficients for radionuclides contaminated on the ground surface were calculated by using MCNP4A code and male/female anthropomorphic phantoms. Different from the two step approaches of previous workers where were determined the radiation field first then the phantom responses, the more exposure situation has been directly simulated. Responses to 19 of mono energies ranging from 40keV to 10MeV were used for calculation of the effective dose conversion coefficient for 90 radionuclides important in radiological assessments. The comparison the results for mono energy with those of Jacob and FGR(Federal Guidance Report) show that the results of Jacob are less than our results, particularly at low energy, while FGR results are higher by around 30%. The deviation of the former may be due to the assumption that the source was located at 0.5g/cm<sup>2</sup>(3mm) deep in the ground. The deviation of the latter may be attributed to the differences in the phantoms used, the radiation field calculation method, the assigning method of tissue weighting factor.

## 1. 서 론

국제방사선방호위원회(ICRP)[1]에서는 개인의 방사선피폭으로 인한 확률론적 영향을 평가하는 지표로서 유효선량을 권고하고 있다. 유효선량은 방사선피폭에 따른 인체내에서 일어나는 생물학적 현상등을 개념적으로 잘 설명하고 있으며 각국의 방사선방호프로그램의 기준이 되고 있다. 국내의 방사선방호 프로그램에서도 1997년을 기점으로 선량을 유효선량으로 평가하도록 제도권내에서 규정하고 있다. 따라서 원자력시설로부터 방출되거나 또는 방사성폐기물처분장내 가스형태의 유출물로 인한 환경내 지표면 오염에 따른 대중의 외부피폭에 대한 유효선량 평가는 매우 중요하다. 전형적인 지표면 오염에 대한 선량평가는 방사성물질의 환경내 거동을 모사하는 확산모델을 이용하여 계산하거나, 실측을 통해 측정된 방사성핵종의 방사능과 선량환산계수와의 연계를 통해 이루어지고 있다. 오염된 지표면에 대한 선량환산계수의 계산을 위한 많은 연구가 진행되어오고 있다. Kocher[2]등은 무한영역의 토양오염을 가정으로 point-kernel 기법을 통해 환산계수를 산출하고 있다. 즉, 토양내 1m 높이에 놓여있는 점 피사체에서 공기에 대한 커마를 평가한 후 무한 공기영역에서 입사하는 ISO의 방사선장을 가정으로 몬테칼로기법과 인형모의피폭체를 통해 계산된 O'Brien[3]등의 공기커마에 대한 유효선량당량 환산계수를 이용하여 평가하고 있다.

Chen[4]은 토양과 공기에서의 감마선의 수송과정을 몬테칼로기법을 이용하여 지표면 위 1m 높이에서의 공기의 흡수선량을 산출한 후 ICRP51[5]의 ROT에 대한 환산자료를 이용하여 평가하고 있다. Jacob[6]등은 몬테칼로 기법을 이용하여 지표면위 1m 높이에서의 방향과 에너지별 방사선장을 산출한 후 Kramer[7]등이 인체내 6개 방향에서 입사하는 방사선장을 가정으로 계산한 선량환산계수를 이용하여 유효선량당량을 산출하고 있다. 그러나 이러한 평가방법들은 피폭상황등을 과도하게 단순화하고 있기 때문에 많은 부분에서 개선의 여지가 있다.

최근 FGR(Federal Guidance Report 12)[8] 보고서에서는 좀더 정교한(sophisticated) 방법을 제안하고 있다. 이들 방법은 인체를 둘러싸고 있는 실린더에서의 방사선장을 불츠만 수송방정식을 수치해석적으로 해를 구하는 DOM 기법을 이용하여 계산한 후 계산된 감마선장이 인형모의피폭체에 입사하는 것을 모사하여 선량환산계수를 계산하였다. 그러나 방사선장 계산시 인체와 같이 상당한 체적을 갖는 물질이 공간상에 놓여있을 때 발생하는 방사선장의 교란(Perturbation)현상은 고려하지 않고 있다.

이와 같은 2단계의 선량평가 방법은 과거 몬테칼로 기법이 가지는 많은 이점에도 불구하고 계산결과의 통계적 신뢰성과 컴퓨팅 시간의 문제로 인해 선택한 차선책이었다. 그러나 최근 계산속도의 향상과 확장된 메모리분야 등 컴퓨터분야의 발전으로 이와 같은 문제점은 많이 사라졌다. 또한 방사성핵종의 지표면 오염으로 인해 실질적으로 선량에 영향을 미칠 수 있는 오염영역은 지역학적 요인과 방사선의 공기내 투과력으로 인해 한정될 수밖에 없다. 따라서 과거에 연구자들이 사용해왔던 2단계의 근사적인 선량평가 방법이 아닌 실제 피폭상황을 좀더 정확하게 모사하여 선량을 평가할 수 있는 기법이 가능하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 시범적인 예로서 무한영역의 선원으로 간주할 수 있는 유한 영역의 오염을 가정으로 남성과 여성의 인형모의피폭체와 MCNP코드를 이용하여 외부피폭에 대한 선량환산계수를 계산하였다.

## 2. 유효선량 및 계산방법

### 유효선량

국제방사선방호위원회(ICRP)에서 정의하고 있는 유효선량을 산출하기 위해서는 양성의 인형모의피폭체가 필요하다. ICRP60에서는 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[9]에서 제시하고 있는 아래 식에 의해 계산하였다.

$$E = w_{breast} H_{breast,female} + \sum_{t \neq breast} w_T \lfloor \frac{H_{T,male} + H_{T,female}}{2} \rfloor$$

### 인형모의피폭체 및 계산수단

본 연구에서는 MIRD5[10] 남성(ADAM) 모의피폭체(질량70 kg, 몸통의 폭40 cm과 두께 20 cm)와 Cristy[11]등이 개발한 여성(EVA) 모의피폭체(질량 57 kg, 몸통의 폭34.5 cm과 두께19.6 cm)를 사용하였다. 계산수단은 일반목적의 몬테칼로 코드인 MCNP4A[12]를 사용했고 감마선 단면적 자료는 ENDF[13]의 데이터를 사용하였다.

## 2. 유효선량 및 계산방법

### 유효선량

국제방사선방호위원회(ICRP)에서 정의하고 있는 유효선량을 산출하기 위해서는 양성의 인형모의피폭체가 필요하다. ICRP60에서는 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[9]에서 제시하고 있는 아래 식에 의해 계산하였다.

$$E = w_{breast} H_{breast,female} + \sum_{t \neq breast} w_T \lfloor \frac{H_{T,male} + H_{T,female}}{2} \rfloor$$

### 인형모의피폭체 및 계산수단

본 연구에서는 MIRD5[10] 남성(ADAM) 모의피폭체(질량70 kg, 몸통의 폭40 cm과 두께 20 cm)와 Cristy[11]등이 개발한 여성(EVA) 모의피폭체(질량 57 kg, 몸통의 폭34.5 cm과 두께19.6 cm)를 사용하였다. 계산수단은 일반목적의 몬테칼로 코드인 MCNP4A[12]를 사용했고 감마선 단면적 자료는 ENDF[13]의 데이터를 사용하였다.

### 기하학적 조사환경 및 모사실험

인형모의피폭체에 대한 선원의 기하학적 조사환경은 그림 1과 같이 공기가 채워져 있는 실린더와 일정한 두께의 토양이 있는 매개체로 가정하였다. 공기의 밀도는 상온 20°C와 750 mmHg 압력상태에 해당되는  $1.189 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>를, 토양의 밀도는 토양내 공극과 수분함량에 따라 차이가 있기 때문에 일반 토양의 밀도인  $1.61 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>를 가정하였으며 공기와 토양의 각 구성성분과 질량분율은 표 1과 같다.

기하학적 조사환경은 계산과정의 효율성과 공기내 감마선의 비정거리를 고려하여 감마선의 에너지에 따라 다르게 설정하였다. 먼저 1 MeV이하의 감마선원에 대해서는 선원이 반경 700 m의 평면에 균일하게 분포하는 것을 가정하였으며 1 MeV이상의 감마선에 대해서는 반경 1000 m를 가정하였다. 지표면 위 대기권은 1 MeV이하의 감마선원에 대해서는 300 m를, 1 MeV이상의 감마선에 대해서는 500 m를 설정하였다. 토양의 두께는 감마선의 에너지에 무관하게 2m를 가정하였다. 본 연구에서 고려한 이러한 기하학적 조사환경을 초과하는 범위에서 공기나 토양에서 산란된 감마선에 의한 선량의 기여는 무시할 만큼 작을 것으로 생각된다.

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

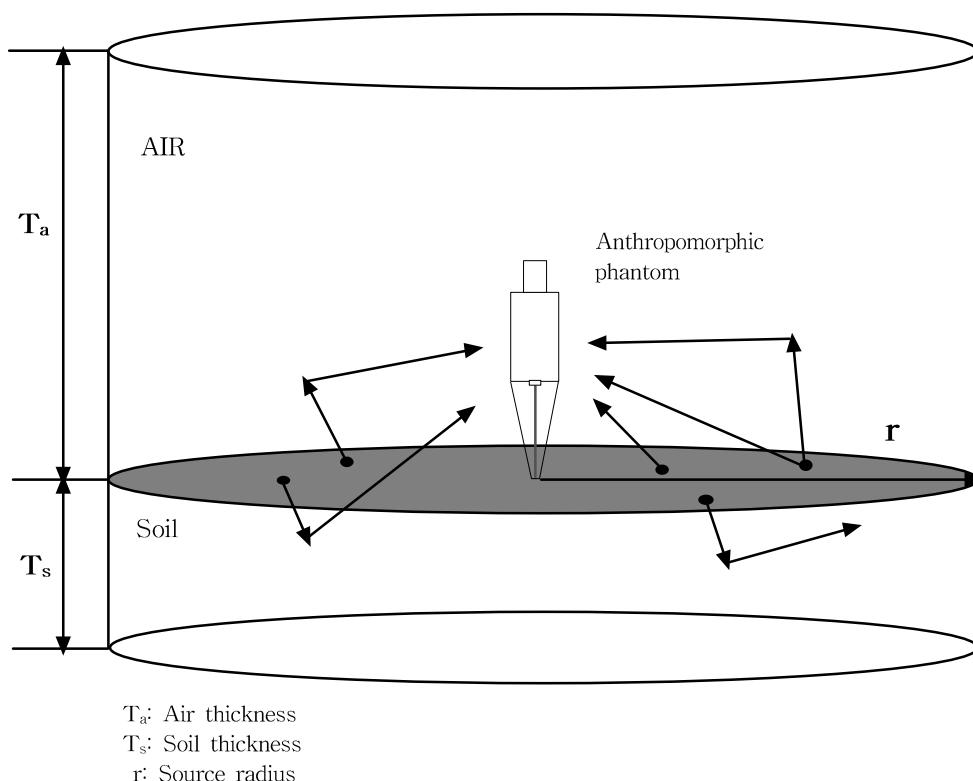


Fig. 1. Source/Anthropomorphic phantom configuration for calculation of effective dose from photon sources distributed in finite ground surface.

환경내 분포하고 있는 선원에서 방출되는 감마선에 대한 유효선량환산계수를 산출할 때, 관심 있는 각 핵종에 대해 개별적으로 방출되는 정확한 감마선 에너지스펙트럼 정보를 이용하여 계산하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 원자력시설로부터 환경으로 방출될 수 있는 많은 여러 핵종들의 에너지 영역을 나타낼 수 있는 40 keV~10 MeV의 19개의 단일에너지에 대한 환산계수를 산출하여 이를 계산결과를 통해 각 핵종들의 환산계수를 산출하였다.

### 3. 결과 및 논의

#### 단일에너지의 감마선에 대한 선량환산계수

몬테칼로모사실험에서 계산결과의 신뢰성은 통계적 오차에 의해 결정된다. 특히 본 연구에서와 같은 기하학적 조사환경에서 계산결과를 신뢰성 있는 범위내의 통계적 오차로 줄이기 위해서는 많은 계산시간이 필요하다. 통계적 오차는 감마선의 에너지와 인체내 장기가 놓여있는 위치와 크기에 영향을 받는다. 본 연구의 계산결과에서 폐(lung), 간(liver)과 위(stomach) 등과 같은 큰 장기의 경우 100 keV 이상의 에너지 영역에서 계산과정에서 발생하는 통계적 오차는 5%이내였다. 반면에 낮은 에너지 영역과 갑상선과 난소 등의 작은 장기의 경우 오차는 20%이내의 통계적 오차를 갖고 있다. 통계적 오차가 큰 장기의 경우 선량값이 매우 작으며 따라서 실질적으로 유효선량에 미치는 영향은 미미할 것이다.

그림 2는 본 연구에서 계산한 유효선량과 FGR과 Jacob 등이 계산한 유효선량당량과의 비교 결과를 보여주고 있다. Jacob의 계산결과는 남성과 여성의 성별로의 피폭체의 평균값으로부터 계산된 결과로서 지표면 3mm 깊이에 선원이 놓여있는 것을 가정으로 계산된 결과이다. Jacob의 결과와 비교시 본연구의 결과값이 약간 큰 결과치를 보여주고 있는데 이는 감마선의 토양내에서의 흡수에 원인이 있다. 그러나 에너지가 증가함에 따라 토양내 감마선의 투과력의 증가로 인해 이러한 차이는 점차 감소하고 있다. 이러한 점을 고려할 때 같은 조사환경에서는 본연구의 결과와 유사한 결과를 얻을 것으로 생각된다.

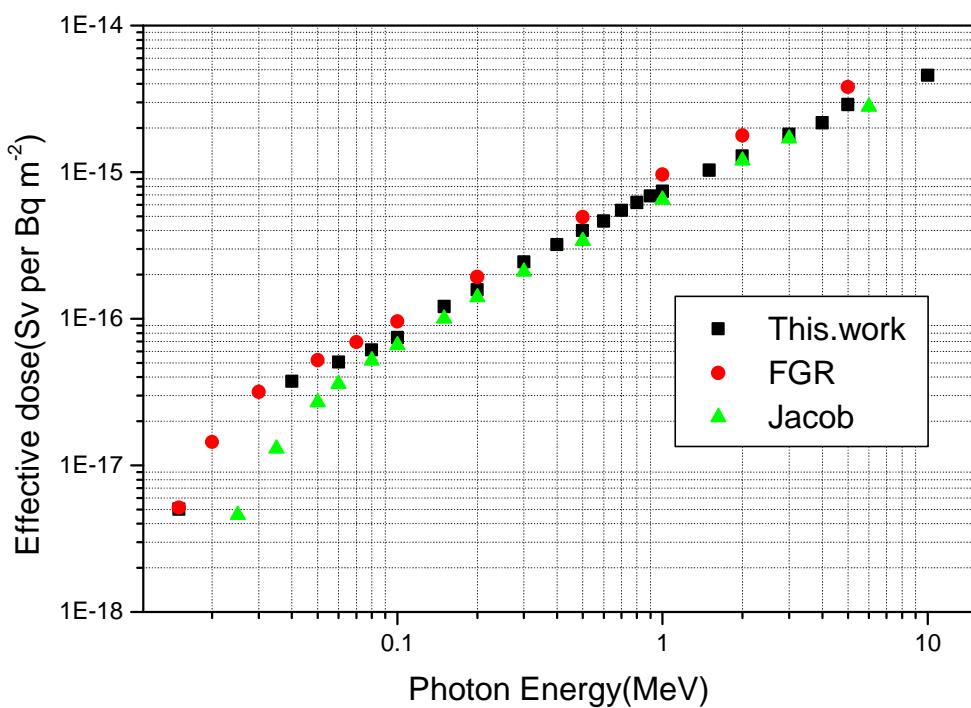


Fig. 2. The comparison of effective dose calculated in this study with effective dose equivalent obtained by FGR and Jacob.

오염된 지표면 위에 양성의 73kg 인형모의피폭체가 놓여있는 것을 가정으로 계산된 FGR의 계산 결과는 본 연구결과 값에 비해 큰 결과를 보여주고 있다. 이러한 차이는 사용된 모의피폭체와 방사선장의 차이에 기인한다. FGR에서는 인체에 임사하는 방사선장을 DOM 기법에 의해 산출하고 있으며 인체에

의한 방사선장의 교란현상은 고려하지 않고 있다.

또한 양성과 성별인형모의피폭체는 선량산출의 방법에 있어서도 차이가 있다. 일반적으로 성별인형모의피폭체는 남성과 여성의 각 장기의 선량값을 평균하여 평가하기 때문에 체격이 작은 여성이 포함되는 관계로 양성의 인형모의피폭체에서 평가된 결과에 비해 크다. 그러나 FGR의 양성 인형모의피폭체에서는 골수, 갑상선과 생식기 등의 장기에 대해 성별모의피폭체와 다른 방법으로 선량을 평가하고 있다.

골수의 경우 FGR의 양성 인형모의피폭체에서는 골수의 비균질성을 고려하기 위해 플로언스의 환산계수를 사용하고 있는 반면 본 연구에서는 뼈의 선량값에서 골수의 질량가중을 통해 평가되고 있다. 갑상선의 경우 양성의 인형모의피폭체에서는 MIRD형에 비해 목부위를 잡게 수정하고 있기 때문에 갑상선의 선량값이 성별특성화된 모의피폭체의 결과에 비해 크며 생식선의 선량값도 난소와 고환중 선량값이 높은 장기의 선량값을 통해 평가하고 있다. 이와같은 장기의 선량평가 방법의 차이로 전체적으로 성별인형모의피폭체로부터 얻어진 결과에 비해 FGR의 양성인형모의피폭체의 선량값이 좀더 크게 평가되는 것으로 알려졌다. 이외에도 유효선량과 유효선량당량의 조직가중치를 선정하는 방법에 있어서 기타조직에 대한 선정방법이 차이로 일부 저에너지 영역을 제외하고 유효선량당량이 유효선량에 비해 에너지에 따라 차이가 있으나 약간 큰 결과차 갖게 된다.

그림 3은 본 연구에서 수행한 19개의 에너지에 대한 환산계수와 감마선의 에너지와의 관계를 Cubic Spline 방법을 통해 얻은 데이터를 polynomial 함수식의 형태로 나타내고 있으며 각 핵종들에 대한 환산계수는 이 함수식을 이용하여 산출할 수 있다.

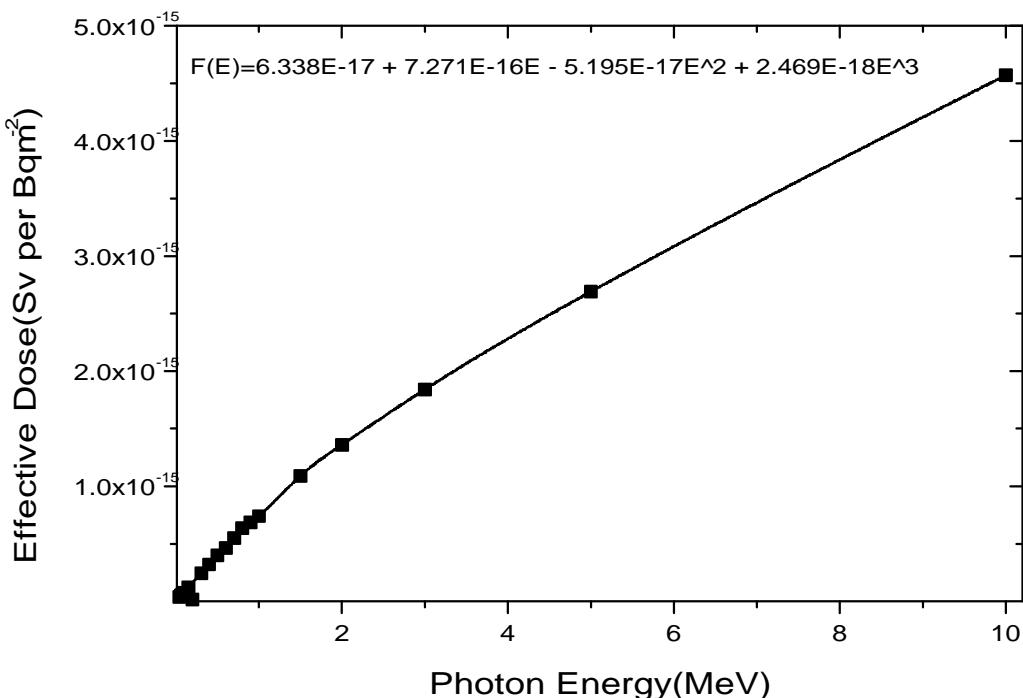


Fig. 3. The conversion coefficients of effective dose calculated from monoenergies and the equation of polynomial.

#### 핵종들에 대한 선량환산계수의 계산

각 핵종들에 대한 선량환산계수는 그림 3에 유도된 감마선에너지 함수식을 이용하여 산출하였다. 먼

저 각 핵종들의 감마선 에너지 스펙트럼과 방출율을 식에 곱한 후 합산하였다.

$$DCC = \sum_i y_i^N \cdot F(E)$$

식에서  $y_i^N$  (in  $\gamma \cdot s^{-1} \cdot Bq^{-1}$ )는 N 핵종의 봉괴당 에너지( $E_i$ ) 분율을 의미한다.

방사성 핵종으로부터 방출되는 베타선의 경우 조직내에서 짧은 비정으로 인해 피부이외의 장기들에 대한 선량은 평가하지 않았다. 베타선에 의한 피부의 선량평가는 Kocher[14]등이 개발한 DOSFACTER 코드를 이용하여 산출하였으며 이를 결과치를 윗식에 합산하였다. 각 핵종들에 대한 선량환산계수를 계산하기 위해 사용된 감마선과 베타선의 에너지와 강도는 ICRP 38[15]의 자료를 이용하였다.

표 2는 본 연구에서 계산한 환경내 지표면 오염에 따른 선량평가에서 잠재적인 중요도를 갖는 약 90 개의 핵종들에 대한 유효선량 환산계수와 FGR 결과물과의 상대오차를 보여주고 있다. 전체적으로는 상대오차 25% 이내의 값을 보이는데 저에너지 감마선과 베타선을 방출하는 몇몇 핵종의 경우 상대오차가 매우 큰 결과를 보여주고 있다. 이러한 차이는 FGR의 유효선량당량에서는 피부의 선량값이 포함되지 않는 반면에 유효선량에서는 피부의 선량값이 포함되기 때문이다. 이와같은 결과를 고려할 때 베타선을 방출하거나 극히 낮은 저에너지 감마선을 방출하는 핵종들에 대해 기존의 환산계수를 사용하여 선량을 평가할 경우 과소평가가 이루어질 수 있다.

Table. 2. Doses Conversion coefficients for exposure to contaminated ground surface.

Effective Dose(Sv per $Bq m^{-2}$ ) and relative error(%)								
Be-7	4.11E-16	15.9 %	Cu-62	9.49E-16	5.1	Ba-137m	4.80E-16	18.0
C-11	8.70E-16	13.8	Cu-64	1.70E-16	9.3	Pr-143	1.94E-17	2675
N-13	8.47E-16	16.1	Zn-62	3.98E-16	7.4	Pm-149	3.52E-17	211
Na-22	1.67E-15	20.3	Zn-65	4.48E-16	18.9	Eu-154	9.57E-16	19.5
Na-24	2.73E-15	24.2	Zn-69m	3.54E-16	14.1	Gd-159	7.27E-17	44.9
Mg-28	1.05E-16	19.2	Ga-66	1.77E-15	20.1	Ho-166	8.79E-17	192
Al-28	1.32E-15	18.4	As-74	6.40E-16	14.2	Lu-177	4.61E-17	36.2
Cl-38	1.13E-15	15.6	Se-73	1.01E-16	5.9	W-185	3.82E-19	108
Ar-41	9.52E-16	20.6	Br-80	1.31E-16	65.6	Ir-192	7.21E-16	10.1
K-40	1.46E-16	0.3	Kr-85	1.37E-17	417.9	Tl-209	1.58E-15	16.7
K-42	3.25E-16	22.0	Kr-85m	1.91E-16	26.0	Pb-210	2.07E-17	735
Ca-47	7.85E-16	21.5	Kr-88	1.32E-15	23.9	Pb-214	2.73E-16	12.3
Ca-49	2.00E-15	23.9	Rb-88	6.19E-16	4.1	Bi-214	1.07E-16	23.8
Sc-44	1.70E-15	17.9	Zr-95	5.73E-16	20.7	Po-210	6.75E-21	20.6
Sc-46	1.49E-15	22.9	Nb-95	5.90E-16	21.0	Po-214	6.39E-20	21.4
Ti-45	7.47E-16	13.2	Mo-99	1.53E-16	4.5	Po-215	1.50E-19	14.3
V-48	2.16E-15	22.1	Ru-103	3.92E-16	15.4	Po-216	1.30E-20	21.5
Cr-49	9.74E-16	6.3	Rh-106	2.92E-16	37.8	Rn-222	3.38E-19	14.3
Mn-52m	1.81E-15	21.2	Ag-110	1.42E-15	20.2	Ra-226	1.03E-17	60.5
Mn-54	6.36E-16	21.7	Cd-115	2.13E-16	7.5	Th-230	6.76E-18	802
Fe-52	6.67E-16	8.2	Sn-123	4.96E-17	492.6	Th-231	8.15E-17	340
Fe-59	8.53E-16	23.8	Te-127	1.27E-17	146.7	Th-234	1.90E-17	128
Co-56	2.51E-15	23.7	I-129	6.66E-17	158.3	Pa-234m	8.43E-17	451
Co-57	1.88E-16	64.0	I-131	3.36E-16	10.7	U-234	8.03E-18	974
Co-58	9.12E-16	4.0	I-133	5.10E-16	14.5	U-235	1.86E-16	25.7
Co-60	1.79E-15	23.0	Xe-131m	5.00E-17	142.2	U-236	6.64E-18	922
Ni-56	1.39E-15	16.2	Xe-133	8.72E-17	89.2	U-238	6.53E-18	1086
Ni-57	1.40E-15	22.5	Xe-133m	4.84E-17	19.0	Pu-238	8.40E-18	902
Ni-65	4.44E-16	13.7	Xe-135	2.57E-16	39.3	Pu-240	8.02E-18	898
Cu-61	7.01E-16	14.0	Cs-134	1.22E-15	19.6	Am-241	8.82E-17	220

#### 4. 결 론

방사성핵종의 지표면 오염에 따른 감마선의 외부피폭에 대한 유효선량환산계수를 남성과 여성 인형 모의피폭체와 MCNP4A코드를 이용하여 계산하였다. 감마선외에 베타선을 방출하는 핵종에 대해서는 DOSFACTER 코드를 이용하여 베타선으로 인한 피부의 선량을 평가하여 합하였다. 기준 연구자들의 2 단계 선량평가 방법과는 달리 피폭상황을 직접 모사함으로서 인체가 공간상에 위치하고 있음으로서 발생되는 방사선장의 교란현상등을 포함한 실제 방사선장에서 유효선량을 평가하였다. 본 연구에서 도출된 감마선의 에너지와 선량환산계수의 함수식은 관심있는 방사성핵종의 지표면오염에 따른 유효선량의 산출에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서는 시범적인 예로서 지표면 오염에 대해 직접적인 몬테칼로 모사실험을 통해 선량을 평가하였으나 향후에는 오염된 공기 또는 방사성핵종의 토양내 이동(migration)을 고려할 때 일정한 체적을 갖는 지표면 체적선원등과 같은 다양한 선원들에 대한 평가도 필요하다.

#### 5. 참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press (1990).
2. D. C. Kocher, Dose-Rate Conversion Factors for External Exposure to Photons and Electron, Health Phys. 45, 665-686 (1982).
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. S. Y. Chen, Calculation of Effective Dose-Equivalent Responses for External Exposure from Residual Photon Emitters in Soil, Health Phys. 60, 411-426 (1991).
5. International Commission on Radiological Protection, Data for Use in Protection Against External Radiation, ICRP Publication 51, Pergamon Press (1987).
6. 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).
7. Kramer, R. The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and monte-carlo methods. GSF 885;1982
8. K. F. Eckerman and J. C. Ryman, External Exposure to Radionuclides in Air, Water, And Soil, Federal Guidance Report NO. 12(1993).
9. International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation, ICRP Publication 74, Pergamon Press (1996).
10. 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).
11. 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).
12. LANL Group X-6, MCNP-A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4A, LA-12625-M (1993).
13. J. H. Hubbell, W. J. Veigle, 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).
14. D. C. Kocher and K. F. Eckerman, External Dose-Rate Conversion Factors for Calculation of Dose to the Public, DOE/EH-0070, (1988).
15. International Commission on Radiological Protection, Radionuclide Transformations Energy and Intensity of Emissions, ICRP Publication 38, Pergamon Press, (1983).