

## 토양의 방사능오염 허용기준치 설정을 위한 피폭경로모델

이창우 · 김국찬 · 이정호  
한국원자력연구소

### 요 약

토양오염의 기준치를 계산하기 위한 피폭경로 모델을 설정하고 계산방법을 설명하였다. 피폭경로는 음식물 섭취에 의한 섭취경로와 재부유물질의 호흡 및 지표로부터 직접 외부 피폭경로로 나누어 고찰하였다. 한국적인 지역특성 자료를 이용하여 계산한 결과를 다른 연구자의 결과들과 비교하고 문제점을 고찰하였다.

**Keywords** : 피폭경로 모델, 토양오염, 방사능, 기준치

### 서 론

각종 원자력 시설에서 방사성 물질이 누출되어 토양오염 사고가 발생하게 되면 필연적으로 토양에 침적되어 오염문제를 일으키게 된다. 이때 오염 정도에 따라 주거제한, 경작금지, 제염등의 방호대책을 실시해야 된다. 이를 위한 판단의 기준으로서 궁극적으로는 토양오염의 방사능 기준치가 설정되어야 할 것이다.

토양오염의 기준 설정은 오염형태, 지역환경 조건 등에 크게 영향을 받기 때문에 모든 경우에 적용할 수 있는 기준치를 설정하기는 어렵다. 따라서 일부 핵시설의 경우 그 시설 및 주변 특성에 맞는 토양에 대한 제한된 기준치만이 제시되었을 뿐이다[1].

본 연구에서는 방사성 물질에 의한 토양 오염시 한국적인 지역특성 자료 및 피폭경로 모델을 이용하여 토양의 핵종농도를 계산하였다.

#### 피폭경로 분석에 의한 허용농도 계산 모델

오염된 토양의 주변 환경조건에 따라 여러가지 가정을 도입한 피폭 시나리오를 구성할 수 있겠

지만 본 연구에서는 토양의 "비제한적 사용(Unrestricted use)"을 전제로 한 경로분석 모델을 기본으로 허용농도를 계산하였다.

비제한적 사용을 전제로하여 Kennedy 등은 Shippingport 발전소 지역의 제염을 위한 토양의 "허용 잔류 오염준위(Allowable Residual Contamination Levels; ARCL)"를 유도한바 있고[1], 근래 Till과 Moore[2]도 유사한 방법으로 계산을 시도하였다. 이 방법은 피폭선량 제한치를 정하고 각 경로모델을 이용하여 이에 상응하는 토양농도를 역산하는 방법이다. 우선 사람이 오염된 토양위에서 거주, 활동하면서 그 토양에서 재배된 음식물을 섭취한다고 가정할때 고려할 수 있는 피폭경로로는 음식물 섭취와 재부유물질의 호흡에 의한 내부피폭과 토양으로부터 직접 받는 외부 피폭으로 나눌 수 있으며 각 경로에 의한 피폭선량을 합하여 전체 피폭선량을 계산하게 된다. 이러한 모델에서는 많은 지역특성에 대한 정확한 자료가 없을 때는 큰 불확실성을 가질 수 있다.

#### 1. 오염된 식품의 섭취

오염된 토양위에서 사는 사람이 섭취하는 식품은 모두 그 오염된 토양에서 재배된다는 가정

하에 한국 실정을 고려한 8종의 식물성 식품과 5종의 동물성 식품을 선정하였다. 오염토양에서 재배된 식물중의 농도는 핵종전이계수를 매개로 다음과 같이 표시된다.

$$C_{pi} = B_{pi} C_{si} \quad (1)$$

$C_{pi}$  : 식물성 식품*f*중의 핵종*i*의 농도(Bq/kg)

$B_{pi}$  : 핵종*i*의 식물 전이계수

$C_{si}$  : 토양내 핵종*i*의 농도(Bq/kg)

또 가축이 오염된 식물을 사료로 사용한다고 가정할때 동물성 식품중의 농도는 다음과 같다.

$$C_{di} = S_{di} U_i C_{pi} \quad (2)$$

$C_{di}$  : 동물성 식품*f*중의 핵종*i*의 농도(Bq/kg)

$S_{di}$  : 핵종*i*의 동물 전이계수(y/kg)

$U_i$  : 동물의 사료 섭취량(kg/y)

$C_{pi}$  : 사료중의 핵종*i*의 농도(Bq/kg)

식 (2)에서  $C_{di}$ 는 식(1)을 이용하여 계산할 수 있다. 따라서 섭취경로에 의한 피폭선량은 다음과 같다.

$$H_g = \sum D_g U_f (C_{pi} + C_{di}) \quad (3)$$

$$H_g = \sum D_g U_f B_{pi}(1 + S_{di} U_i) C_{si} \quad (4)$$

여기서  $H_g$  : 핵종*i*의 식품섭취로 인한 피폭선량 (Sv/y)

$U_f$  : 식품 *f*의 섭취량(kg/y)

$D_g$  : 섭취 식품중 핵종 *i*에 의한 선량 전환인자(Sv/Bq)

위식의 생산에서 각 식품의 생산에서 소비까지의 소요시간은 고려하지 않았으며, 생산되는 식품이 즉시 소비된다는 가장 보수적인 입장을 고려하였다.

한편 토양으로부터 침출된 방사능은 지하수로 스며들게 되는데 이러한 과정은 토양의 성분, 지하수문학적 특성에 따라 지역적으로 아주 다르므로 복잡하고 다양한 자료를 필요로 하고 있다 [3].

본 연구에서는 오염되지 않은 상수도를 사용한다고 가정하였고 식수에 의한 경로는 계산에서 제외하였다.

## 2. 호흡에 의한 피폭

오염된 토양은 바람이나 동물들의 움직임 등에 의하여 재부유 될 수 있고 이를 사람이 호흡하면 내부피폭을 유발하게 된다. 공기 호흡에 의한 선량은 다음과 같다.

$$H_{hi} = D_{hi} U_a C_{ai} \quad (5)$$

$H_{hi}$  : 핵종 *i*의 공기호흡으로 인한 피폭선량(Sv/y)

$D_{hi}$  : 호흡 공기중 핵종 *i*에 의한 선량전환인자 (Sv/Bq)

$U_a$  : 연간 호흡량(m<sup>3</sup>/y)

$C_{ai}$  : 공기중 핵종 *i*의 농도(Bq/m<sup>3</sup>)

그런데 공기중의 핵종농도는 그 지점의 토양에 비례한다고 생각하는 아주 간단한 모델을 가정하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ai} = A C_{si} \quad (6)$$

$A$  : 재부유계수(=  $1.0 \times 10^{-7} \text{kg/m}^3$ )

## 3. 지표로 부터의 외부피폭

일정한 농도로 오염된 토양이 균일한 두께로 무한하게 펼쳐있다고 가정하면 외부피폭선량은 다음과 같다.

$$H_{hi} = D_{ahi} C_{wi} \frac{1.4}{\rho} \quad (7)$$

$H_{hi}$  : 핵종 *i*에 의한 외부피폭선량(Sv/y)

$D_{ahi}$  : 토양내 핵종 *i*의 부피농도에 대한 선량 전환 인자(Sv·cm<sup>3</sup>/Bq·y)

$C_{wi}$  : 토양 부피당 핵종 *i*의 농도(Bq/cm<sup>3</sup>)

1.4 : 기준토양의 밀도(g/cm<sup>3</sup>)

$\rho$  : 토양의 밀도(g/cm<sup>3</sup>)

한편  $C_{svi} = C_{si} \rho \cdot 10^{-3}$  (8)

$$H_t = [\sum D_{gi} U_f B_{pi}(1 + S_{af}) U_{af}] + D_{ni} U_a A + D_{bi} \cdot 1.4 \times 10^{-3} C_{si}$$
 (9)

이 모델에서는 피폭체가 지상 1m 높이에 있다고 가정하였을 경우 선원으로 부터 나오는 감마선만을 고려하였다. 방사능이 토양의 일정 두께에 균일한 농도로 분포된다고 가정하였으므로 지하에 묻혀 있는 선원은 위에 덮여 있는 토양의 차폐효과 때문에 토양표면에 존재하는 선원보다 피폭영향이 감소하게 된다. Kocher 와 Sjoreen[4]은 균일농도의 토양이 일정 두께로 덮여 있다고 가정했을 때 두께에 따른 선량전환인자를 에너지 준위 0.01~10.0MeV사이의 photon에 대해 계산하였다. 이들 계산에 의하면 토양밀도 1.4g/cm<sup>3</sup>을 기준으로 할때 지하 100cm이하에 있는 선원은 피폭에 거의 영향이 없는 것으로 나타났다. 본 계산에서는 이들의 계산 데이터를 이용하여 오염층의 두께가 50cm일 경우를 가정한 선량전환인자를 계산(각 동위원소에서 방출되는 감마에너지 준위와 방출율을 고려)하여 사용하였고 토양 밀도차이에 의한 차폐효과를 보정하였다.

4. 허용농도의 계산

피폭경로에 따른 전체 선량은 식(4), (5) 와 (7)을 합하여 다음과 같이 된다.

따라서 기준 선량 제한치를 H<sub>L</sub>이라 할때 유도 제한치인 허용농도 C<sub>si</sub>는 식(10)과 같다.

$$C_{si} = H_L / [\sum D_{gi} U_f B_{pi}(1 + S_{af}) U_{af}] + D_{ni} U_a A + D_{bi} \cdot 1.4 \times 10^{-3}$$
 (10)

여기서 기준선량 H<sub>L</sub>은 각 지역의 특성에 따라 결정해야 한다. ICRP[5]에서는 인공방사선량을 연간 100mrem으로 제한하고 있는데 각 지역 선량 제한치는 이 값 이하에서 결정되어야 할 것이다.

5. 입력 파라미터

계산에 사용한 선량전환인자는 표 1에 나타내었다. 섭식 및 호흡에 의한 선량전환인자는 성인의 50년 예탁유효선량당량으로 독일의 ISH에서 계산한 것을 사용하였다[6]. 이들은 ICRP Publication 30에서 사용한 모델을 개선한 계산치로서[7], ICRP Publication 30의 결과보다 10-30%정도 큰 값을 나타내고 있다. 토양의 외부피폭에 대한 전환인자는 Kocher 와 Sjoreen이 계산한 값[4]을 이용하여 오염층의 두께가 50cm일 경우를 가정

Table 1. Effective dose equivalent conversion factors for adults.

Nuclides	Ingestion (Sv/Bq)	Inhalation (Sv/Bq)	Ground irradiation (Sv-cm <sup>2</sup> /Bq-y)
H-3	1.60E-11	1.60E-11	0.
Co-60	7.30E-09	5.90E-08	4.26E-03
Sr-90	3.50E-08	3.50E-07	0.
Cs-134	2.00E-08	1.30E-08	2.64E-03
Cs-137	1.40E-08	8.60E-09	9.51E-04
U-235	7.20E-08	3.30E-05	2.41E-04
U-238	6.90E-08	3.20E-05	4.35E-08
Pu-238	1.10E-07	1.30E-04	2.50E-06
Pu-239	1.20E-07	1.40E-04	1.93E-07
Cm-244	3.10E-07	7.60E-05	5.58E-09

하여 계산한 것을 사용하였다.

식물성 식품과 동물성 식품의 전이계수는 표2와 표3에 나타내었다. 식물전이계수는 이제까지 발표된 값과 당 연구실에서의 실험결과를 이용하여 결정하였고[8] 동물전이계수는 FOOD II 모델에서 사용한 값을 취하였다[9].

섭취 식품의 종류와 소비량은 표4에 표시하였다. 이 자료는 국민영양조사 보고서에서 주요 소비식품을 선정하고 소비량의 전국 평균으로부터 성인환산계수를 곱하여 식품소비량을 계산하였다[10, 11].

호흡량은 성인을 기준으로 한 평균호흡량의 실측치를 조사하였다.

재부유계수는 토양의 종류 및 환경조건에 따라 큰 지역특이성을 갖고 있으나 한국에서 측정된 자료는 없다. 미국자료에 의하면 비도시지역의 년평균 값이  $9\sim 79\mu\text{g}/\text{m}^3$  정도의 범위내에 있다고 보고된 바 있다[12]. 따라서 보수적인 입장에서  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 취하면 한국실정을 반영할 수 있을 것으로 보아 이값을 계산에 사용하였다.

토양밀도는 고리주변의 발토양을 지표 15cm 깊이로 채취하여 실측한 값의 평균치  $1.2\text{g}/\text{cm}^3$  사용하였는데 이것은 전남지역의 발토양에 대한 보고치  $1.183\text{g}/\text{cm}^3$ 와 비슷한 값을 나타내고 있다[13].

Table 2. Transfer coefficients of nuclides from soil to plant.

Nuclide	(Bq/kg-wet wt)/(Bq/kg-soil)								
	Rice	Grains	Legume	L. Veget	R. Veget	F. Veget	Potato	Fruit	Forage
Co-60	5.5E-03	5.5E-03	2.5E-01	2.3E-02	7.3E-03	4.6E-02	9.4E-03	1.8E-03	9.7E-03
Sr-90	1.5E-01	1.5E-01	9.0E-01	2.0E+00	4.0E-01	1.6E-01	2.7E-02	2.0E-01	7.0E-01
Cs-134	3.3E-02	3.3E-02	1.0E-01	6.5E-02	3.3E-02	3.2E-02	1.1E-02	2.0E-03	3.0E-02
Cs-137	3.3E-02	3.3E-02	1.0E-01	6.5E-02	3.3E-02	3.2E-02	1.1E-02	2.0E-03	3.0E-02
U-235	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03
U-238	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03
Pu-238	1.0E-06	1.0E-06	3.8E-04	1.0E-04	1.0E-03	3.8E-04	3.8E-04	3.8E-04	1.0E-04
Pu-239	1.0E-06	1.0E-06	3.8E-04	1.0E-04	1.0E-03	3.8E-04	3.8E-04	3.8E-04	1.0E-04
Am-241	1.5E-05	1.5E-05	2.5E-04	1.0E-03	1.0E-03	2.5E-04	2.5E-04	2.5E-04	1.0E-03
Cm-244	1.0E-05	1.0E-05	2.5E-03	1.0E-03	1.0E-03	2.5E-03	2.5E-03	2.5E-03	1.0E-03

Table 3. Transfer coefficients for animal food.

Nuclide	Egg	Pork	Poultry	Milk	Beef
	d/kg	d/kg	d/kg	d/l	d/kg
Co-60	5.3E-02	5.0E-03	1.0E-03	1.6E-03	9.2E-03
Sr-90	2.1E-01	7.7E-03	9.0E-04	1.1E-03	1.1E-03
Cs-134	3.2E-01	1.5E-01	2.5E+00	7.8E-03	2.6E-02
Cs-137	3.2E-01	1.5E-01	2.5E+00	7.8E-03	2.6E-02
U-235	3.4E-01	6.0E-04	1.2E-03	6.1E-04	1.8E-02
U-238	3.4E-01	6.0E-04	1.2E-03	6.1E-04	1.8E-02
Pu-238	2.0E-03	1.0E-02	4.0E-03	1.0E-07	2.5E-03
Pu-239	2.0E-03	1.0E-02	4.0E-03	1.0E-07	2.5E-03
Am-241	2.0E-03	1.0E-02	4.0E-03	2.0E-05	5.0E-03
Cm-244	2.0E-03	1.0E-02	4.0E-03	2.0E-05	5.0E-03

Table 4. Food consumption rate, respiratory rate and other parameters.

Food	Consumption rate (kg/y)
Rice	122.02
Other Grains	12.34
Legume	19.36
Leafy Vegetable	46.18
Root Vegetable	23.31
Fruit Vegetable	17.81
Portatoes	16.96
Fruits	16.54
Eggs	7.64
Pork	7.38
Poultry	1.49
Milk	19.56
Beef	6.65
Drinking Water	547.0
Air	7368.5 m <sup>3</sup> /y
Effective soil density	1.2 g/cm <sup>3</sup>
Mass loading coefficient by resuspension	1.0 E-7 kg/cm <sup>2</sup>

결과 및 고찰

다양하고 많은 입력변수를 처리할 수 있고, 데이터베이스의 확장이 쉽도록 전산코드를 작성하여 경로 분석에 따른 허용농도를 계산하였다. 경수로 발전소에서 누출될 만한 핵종을 중심으로 Till과 Moore[2], Kennedy등[1]의 계산결과들과 비교를 해보기 위해 선량제한치 30mrem과 10 mrem의 경우에 대해 계산해 보았다.

표 5에서 보는 바와 같이 cobalt와 cesium은 지표에 의한 외부피폭이 주원인이고 plutonium은 재부유입자의 호흡이 주요 경로임을 알 수 있다. Sr-90의 경우는 거의 음식물 섭취에 의하여 피폭 되는 것으로 나타났다.

다른 연구자들의 계산결과들과 비교하여 본 결과 표6에서 보는 바와 같이 본 연구의 계산결과와는 Savannah River 지역의 자료를 사용한 Till과 Moore의 계산치보다 적은 수치를 보이고 있다 [2]. 섭취경로가 중요한 핵종의 경우에는 본 연구에 사용한 식품의 종류가 그들보다 많고 핵종의 전이계수가 더욱 보수적으로 설정되었기 때문일 것이다. 외부피폭에 기여하는 핵종의 경우는 우선 재부유입자가 그들에 비해 40% 이상 보수적으로

Table 5. Acceptable soil concentration calculated using pathway analysis model for 10 and 30 mrem annual dose limit.

Nuclide	Proportion of dose from pathways(%)			Acceptable soil conc. for dose limit(Bq/g)	
	Ingestion	Inhalation	Ground irradiation		
				10mrem	30 mrem
Co-60	1.0	0.0	99.0	0.017	0.050
Sr-90	100.0	0.0	0.0	0.019	0.058
Cs-134	5.8	0.0	94.2	0.025	0.076
Cs-137	10.7	0.0	89.3	0.267	0.201
U-235	11.3	6.0	82.7	0.245	0.736
U-238	65.2	34.8	0.1	1.474	4.422
Pu-238	5.7	90.9	3.3	0.949	2.848
Pu-239	6.0	93.8	0.2	0.909	2.727
Am-241	31.9	62.0	6.1	0.601	1.803
Cm-244	57.9	42.1	0.0	0.752	2.255

Table 6. The comparison of acceptable soil concentration estimated from other works.

Nuclide	(Bq/g)			
	Till and Moore <sup>1</sup>	This work		Kennedy et al. <sup>2</sup>
	dose limit <sup>3</sup> 30 mrem	dose limit <sup>3</sup> 30 mrem      10 mrem		dose limit <sup>4</sup> 10 mrem
Co-60	0.074	0.050	0.017	0.034
Sr-90	0.33	0.058	0.019	0.034
Cs-134	—	0.076	0.025	0.067
Cs-137	0.30	0.201	0.067	0.137
U-235	1.2	0.736	0.245	0.74
U-238	2.7	4.422	1.474	0.85
Pu-238	4.3	2.848	0.949	5.92
Pu-239	—	2.727	0.909	4.07
Am-241	3.3	1.803	0.601	2.63
Cm-244	7.3	2.255	0.752	—

1. soil depth 50 cm

2. unconfined soil 0-100 cm deep

3. limit of effective dose equivalent

4. limit of dose rate for critical organ

계산되었고 선량 전환인자의 결정방식의 차이 때문인 것으로 보인다. 그러나 주요 결정경로는 그들과 차이가 없었다.

Kennedy등 [1]이 Shippingport 지역을 대상으로 한 결과와는 직접적인 비교는 불가능하다. 그들은 결정장기(critical organ)를 결정하고 이들의 선량제한치를 10 mrem으로 정한뒤 organ use conversion factor에 의해 허용농도를 계산했기 때문이다. U-238을 제외한 전 대상핵종에 걸쳐 본 연구 결과들은 그들보다 적은 값으로 나타났다. U-238만이 그들 결과보다 높은 이유는 Till과 Moore는 U-238의 경우 외부피폭이 주요 경로 이었고 이들의 선량전환인자는 본 연구에서 사용된 값보다 더 보수적인데 반해 본 연구에서는 섭취 및 호흡이 주요 경로이었고 Till과 Moore의 이들 선량전환인자보다 더 낮은 값을 사용했기 때문인 것으로 사료된다.

지금까지 토양의 오염치를 결정하는 일반적인 기준이 부재하는 이유는 지역적 조건이 큰 변수가 되기 때문이다. 따라서 부지특성, 토지이용 현황, 오염된 방사능의 분포 및 양을 정확히 파악하고 피폭경로에 대한 현실성 있는 시나리오를 작성

해야 한다.

본 연구의 대상은 이들 여러 시나리오중의 하나로 분류될 수 있지만 기본 개념은 다른 경우에 대해서도 적용될 수 있기 때문에 지역적인 데이터베이스를 수립한다면 유도기준치 계산에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. W.E.Kennedy, Jr., B.A.Napier and J.K.Soldat, *Allowable Residual Cotamination Levels in Soil for Decommissioning the Shippingport Atomic Power Station Site*, PNL-4801, Battelle Pacific Northwest Laboratories, Richland, WA(1983).
2. J.E.Till and R.E.Moore, "A Pathway Analysis Approach for Determining Acceptable Levels of Contamination of Radionuclides in Soil," *Health Physics*, 55(3), 541-545(1988).
3. R.B.Codell and J.D.Duguid, "Transport of Radionuclides in Groundwater," in: *Radiological Assessment*, J.E.Till and H.R.Meyer eds., NUREG/CR-3332, ORNL-5968(1983).

4. D.C.Kocher and A.L.Sjoreen, "Dose-Rate Conversion Factors for External Exposure to photon Emitters in Soil," *Health Physics*, 48 (2), 193-205(1985).
5. ICRP, Statement from the 1985 Paris meeting of the ICRP, *Annals of the ICRP*, 15(3) (1985).
6. D. Noßke, S.Gerich and S.Langer, *Dosisfaktoren für Inhalation oder Ingestion von Radionuklidverbindungen* (Erwachsene), ISH-Helf 63, Institute für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes, Neuherberg/München(1985).
7. ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, *Annals of the ICRP*, 2(314) (1978).
8. 이정호 등, 섭식경로 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭 선량 평가코드 개발, 한국원자력연구소 보고서, KAERI/RR-820/89 (1989).
9. R.Jach, *FOOD II: An Interactive Code for Calculating of Radionuclides in Food Products*, Whiteshell Nuclear Research Establishment, AECL-6305, Canada(1978).
10. 보건사회부, 국민영양조사보고서(1987).
11. 한국인구보건연구원, 한국인영양권장량, 고문사(1985).
12. G.S.Linsley, *Resuspension of the Transuranium Elements-A Review of Existing Data*, National Radiological Protection Board, NRPB-R75(1978).
13. 조백현 등, 토양학, 향문사(1980).

## A Pathway Analysis Model for Determining Acceptable Levels of Contamination of Radionuclides in Soil

Chang Woo Lee, Kug Chan Kim and Jeong Ho Lee  
*Environmental Safety department, KAERI*

### ABSTRACT

A methodology for calculating acceptable levels of contamination of radionuclides in soil for unrestricted use was described. Pathways of exposure include direct radiation from ground surfaces, ingestion of contaminated food and inhalation of resuspended radionuclides.

Results calculated using site-specific data for Korean environment were discussed and compared with those estimated by other guidelines.

*Keywords : Pathway analysis model, Soil contamination, Radionuclide, Acceptable level*