

# Improvement on the Method of Estimating Radionuclide Concentrations in Agricultural Products for the Off-Site Internal Dose Calculation for Operating Nuclear Facilities

Y.H. Choi · K.M. Lim · W.T. Hwang · G.S. Choi ·  
H.J. Choi and C.W. Lee  
Korea Atomic Energy Research Institute

## 가동중 원자력 시설 주변 주민의 내부피폭선량 계산을 위한 농산물내 핵종 농도 평가법 개선

최용호 · 임광목 · 황원태 · 최근식 · 최희주 · 이창우  
한국원자력연구소

(2003년 6월 18일 접수, 2004년 3월 29일 채택)

**Abstract** - The Reg. Guide 1.109 model was reviewed against its applicability to calculating radionuclide concentrations in agricultural products for operating nuclear facilities and an improved method was proposed. The model was so modified that the radionuclides deposited since the start of operation could be considered in assessing the root uptake. Translocation factors were introduced in the equation for calculating the concentrations in edible parts due to direct plant deposition. Values specific to Korea were set up for the input parameters of the modified model. The concentrations of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in rice seeds, Chinese cabbage and radish root were calculated for various hypothetical deposition histories using the Reg. Guide 1.109 model and the modified model with parameter values in the guide and those specific to Korea put in alternately. Through comparisons among the results, it could be expected that the use of the modified model with the input of parameter values specific to Korea would result in a more reasonable and realistic assessment.

**Key words** : agricultural product, radionuclide concentration, Reg. Guide 1.109 model, input parameter, improvement, operating nuclear facilities

**요약** - Reg. Guide 1.109의 농작물내 핵종농도 계산모델을 가동중인 원자력 시설에 적용함에 있어서의 문제점을 분석하고 개선 방안을 제시하였다. 뿌리흡수 평가에 있어서는 가동개시후 침적한 방사성 핵종이 고려될 수 있도록 모델을 변형하였다. 직접침적에 의한 가식부위내 농도 계산식에는 전류계수를 도입하였다. 변형모델의 입력변수에 대하여 국내 특성치를 설정하였다. Reg. Guide 1.109 모델과 변형모델에 동 지침서의 변수치와 국내 특성 변수치를 번갈아 입력하여 쌀알, 배추, 무 뿌리 내  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도를 다양한 가상의 침적 이력에 대해 계산, 비교하였다. 이를 통해 변형모델에 국내 특성 변수치를 사용함으로써 보다 합리적이고 현실적인 평가가 이루어 질 것으로 기대할 수 있었다.

**중심어** : 농산물, 방사성 핵종 농도, 규제지침 1.109 모델, 입력변수, 개선, 가동중 원자력시설

## 서 론

원자력발전소와 같은 원자력 시설을 운영하는 사업자는 매년 시설 운영에 따른 주민의 방사선 피폭선량을 평가하여 관계당국에 보고해야 한다. 주민의 방사선 피폭은 외부피폭과 내부피폭으로 구분되며 이중 내부피폭의 상당 부분은 농산물의 섭취에 기인한다[1,2]. 따라서 주민의 연간 내부피폭 선량을 평가하기 위해서는 부지 주변에서 생산되는 농작물내 방사성 핵종의 농도를 합리적으로 예측하는 것이 중요하다.

우리나라 원자력발전소의 온배수는 전부 해양으로 방출되기 때문에 액체상 방출물은 농작물에 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다. 반면에 기체상 방출물은 대기로부터 농경지에 침적되어 뿌리를 통하여 작물체에 흡수되거나 직접 작물체의 지상부에 침적한다[1,2]. 원자력 시설의 정상 가동시 위와 같은 기체상 방출물의 영향은 방사성 물질이 년중 균일하게 방출되어 매일 일정량 지상으로 침적하는 것으로 보고 평가한다[2-4].

원자력 시설 주변에서 생산되는 농작물내 방사성 핵종의 농도 계산은 우리나라의 경우 기본적으로 미국 NRC의 Reg. Guide 1.109[3]에 제시된 모델에 입각하여 수행하고 있다[5-7]. 그러나 Reg. Guide 1.109 모델은 원래 시설의 설계를 위해 만들어진 것이기 때문에 가동전 평가에 적합한 것으로 가동후 실제 방출에 대한 평가에는 부적합한 점이 있다. 한편 NRC[3]는 모델의 입력변수로 근거가 확실한 부지 특성치가 있을 경우 그것을 사용하도록 권고하고 있다. 우리나라에서도 과거 약 15년 동안 국내 고유의 농작물 핵종 이동인자들이 많이 생산되었으나[8-10] 제대로 이용되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 현재 가동중인 원자력 시설 주변에서 생산되는 작물체내 방사성 핵종의 농도를 보다 현실적으로 계산할 수 있는 모델을 수립하고 그 계산 결과를 Reg. Guide 1.109 모델의 결과와 비교함으로써 가동중 섭취선량 평가에 대한 개선 방안을 제시코자 하였다. 모델 입력변수에 대해서는 국내 특성치와 상기 지침서에 제시된 변수치를 번갈아 사용하여 계산결과를 비교하였다. 대상 작물은 한국인의 주식작물인 벼, 배추, 무의 세 가지로 하였고 대상 핵종은 원전 가동시 주요 섭취경로 핵종으로 알려져 있는  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 네 가지로 하였다.

## 적용 모델

### Reg. Guide 1.109 모델

Reg. Guide 1.109 모델에서는 원자력 시설의 정상가동시 기체상 방출물로 인한 작물체내 방사성 핵종 농도를 식 (1)과 같이 계산한다.

$$C_{iv} = d_i \left[ \frac{r [1 - \exp(-(\lambda_w + \lambda_i) T_e)]}{Y_v (\lambda_w + \lambda_i)} + \frac{B_w [1 - \exp(-\lambda_i T_b)]}{P \lambda_i} \right] \quad (1)$$

여기서,

$C_{iv}$ : 작물체  $v$  내 핵종  $i$  농도 ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )

$d_i$ : 핵종  $i$ 의 침적율 ( $\text{Bq m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$r$ : 차단계수(또는 보유계수)

$\lambda_w$ : 환경제거상수 ( $\text{d}^{-1}$ )

$\lambda_i$ : 핵종  $i$ 의 붕괴상수 ( $\text{d}^{-1}$ )

$T_e$ : 작물체의 노출기간 (d)

$Y_v$ : 작물체  $v$ 의 수량 ( $\text{kg m}^{-2}$ )

$B_w$ : 핵종  $i$ 의 작물체  $v$  대한 토양-작물체 전이계수

$T_b$ : 핵종의 토양축적 기간 (d)

$P$ : 토양의 유효표면 밀도 ( $\text{kg m}^{-2}$ )

식 (1)에서 대괄호 속 첫번째 항은 작물체 직접 침적 경로에 관한 것이고 두번째 항은 뿌리흡수에 관한 것이다.

위와 같은 Reg. Guide 1.109 모델로는 가동 시작 년도부터 평가년도까지 매년 핵종의 침적율 ( $d_i$ )이 같은 경우가 아니라면 현재까지 토양에 축적된 핵종의 뿌리흡수 농도를 제대로 평가할 수 없다. Reg. Guide 1.109에서는  $T_b$ 를 명목상 15년(원전 수명의 반 정도)으로 함으로써 그 기간 동안 매년 침적율이 동일한 것으로 가정하고 있다. 이것은 가동전 허가단계의 경우에는 장래의 장기적인 가동 기간에 대해 다소 보수적으로 결정한 하나의 침적율로 평가할 필요가 있으므로 합당하다고 볼 수 있으나 이미 서로 다른 환경 방출량에 의한 년도별 침적 이력을 갖고 있는 가동중 평가의 경우에는 비현실적이다. 즉 가동중에는 평가년도까지 토양에 실제로 축적된 핵종량으로 평가해야 되는 것이지 앞으로 축적될 핵종량으로 평가하는 것은 평가목적에 부합되지 않는다.

IAEA[4]도 식 (1)과 유사한 모델에 대해서 원자력 시설의 가동전 단계에서 사용될 의도로 제시하는 것임을 분명히 하고 있다.

식 (1)에서는 수확시 방사성 핵종이 작물체 지상부중 종실, 열매, 뿌리 등의 가식부위에 존재하는 분율(전류계수, translocation factor)[2,11-13]을 고려하지 않고 있다. 이것은 수확시에 작물체에 남아있는 방사능의 전부가 위와 같은 특정부위에 들어 있다는 것과 같으므로 과대평가의 요인이 될 수 있다.

**변형 모델**

원자력 시설이 정상적으로 가동된다 하더라도 방사성 핵종의 방출량이나 기상 조건이 매년 다를 것이고 그 결과 침적율도 매년 다를 것이다. 따라서 가동중 평가에 있어서는 가동 시작 년도부터 평가년도까지 매년의 침적에 의한 축적량으로부터 토양에서의 경과년수에 따라 침적 년도별로 현재의 토양 농도를 구하고 뿌리흡수 농도에 대한 침적 년도별 기여분을 계산하여 합해야 한다.

토양내 핵종의 농도는 지하로의 용탈에 의해 서서히 감소하므로 변형 모델에서는 식 (2)와 같은 용탈상수[14,15]를 도입하였다.

$$\lambda_i = \frac{V_w}{D \left(1 + \frac{K_d G}{W}\right)} \quad (2)$$

- 여기서,
- $\lambda_i$ : 용탈상수 ( $d^{-1}$ )
- $V_w$ : 토양수의 침투속도 ( $cm\ d^{-1}$ )
- $D$ : 경토의 흩갈이 깊이 ( $cm$ )
- $K_d$ : 핵종 분배계수 ( $ml\ g^{-1}$ )
- $G$ : 토양의 가밀도 ( $g\ cm^{-3}$ )
- $W$ : 토양의 수분함량 ( $ml\ cm^{-3}$ )

작물체가 방사성 핵종을 흡수하면 토양중 농도가 그만큼 감소한다. 따라서 변형모델에서는 불필요한 과대평가를 방지하기 위하여 이와 같은 농도 감소를 고려하였다. IAEA[4]와 Hoffman과 Baes III 등[15]도 토양-작물체 전이계수( $B_{iv}$ )가 클 경우 뿌리흡수로 인한 농도 감소를 고려할 필요가 있다고 지적하였다. 한편 핵종의 토양-작물체 전이계수는 토양에 의한 고정으로 인하여 침적 후 해가 갈수록 감소하는 경향이 있다. 이러한 경향은 특히 방사성 Cs에서 현저하고 또한 방사

성 Cs의 고정은 침적후 대체로 3~4 년 이상 계속되는 것으로 알려져 있다[16-18]. 따라서 방사성 Cs에 대해서는 이와 같은 것들을 고려함으로써 보다 현실적인 평가가 이루어지도록 하였다. 작물체의 특정 부위에 대해서는 전류계수를 적용함으로써 과대평가 요인을 제거하였다. 한편 작물체는 수확후 처리, 가공 및 조리 과정 중에 농도가 감소하게 되므로 변형모델에서는 이러한 것도 반영될 수 있도록 하였다.

이상에서 언급한 바대로 아래와 같은 농도 계산식을 수립하였다.

$$C_{iv} = \sum_{j=1}^n C_{iv}(j) \quad (3)$$

여기서,

- $C_{iv}$ : 작물체  $v$  내 핵종  $i$  농도 ( $Bq\ kg^{-1}$ )
- $C_{iv}(j)$ :  $C_{iv}$ 에 대한 가동  $j$  차년도 침적의 기여분 ( $Bq\ kg^{-1}$ )
- $n$ : 평가년도까지의 가동횟수

$C_{iv}(n)$  은 다음과 같이 계산한다.

$$C_{iv}(n) = d_i(n) \left[ \frac{r L_{iv} [1 - \exp(-(\lambda_w + \lambda_i) T_d)]}{Y_v (\lambda_w + \lambda_i)} + \frac{B_{iv} [1 - \exp(-\lambda_i 365)]}{P \lambda_i} \right] F_v \quad (4)$$

여기서,

- $C_{iv}(n)$ : 가동  $n$  차년도, 즉 평가년도 침적에 의한 작물체  $v$  내 핵종  $i$  농도 ( $Bq\ kg^{-1}$ )
- $d_i(n)$ : 평가년도 핵종  $i$ 의 침적율 ( $Bq\ m^{-2}\ d^{-1}$ )
- $L_{iv}$ : 작물체  $v$ 에서 핵종  $i$ 의 가식부 전류계수
- $F_v$ : 작물체  $v$ 의 가공인자

식 (4)에서는 뿌리흡수 농도 평가시 방사성 핵종이 평가년도 365일 내내 침적한 토양에서 작물을 재배하는 것으로 되어 다소 과대평가를 초래할 가능성이 있다.

한편, 평가년도 이전에 침적한 핵종들은 평가년도에 재배되는 작물에 직접 침적하는 일은 없고 뿌리흡수만 일어나므로  $C_{iv}(1)$ 에서  $C_{iv}(n-1)$ 까지, 즉  $1 \leq j \leq n-1$  일 경우  $C_{iv}(j)$ 는 다

음 식과 같다.

$$C_{iv}(j) = d_i(j) \left[ \frac{[1 - \exp(-\lambda_i \cdot 365)]}{P \lambda_i} \right] (1 - A_{iv})^{n-j} \exp[-(\lambda_i + \lambda_w)(365(n-j-0.5))] B_{iv} (1 - R_i)^m F_v \quad (5)$$

여기서,

$C_{iv}(j)$  : 가동  $j$  차 년도 침적에 의한 평가년도 작물체  $v$  내 핵종  $i$  농도 (Bq kg<sup>-1</sup>)

$d_i(j)$  : 가동  $j$  차 년도 핵종  $i$  의 침적율

$A_{iv}$  : 토양중 핵종  $i$  농도의 연간 뿌리흡수 감소 인자

$R_i$  : 방사성 Cs의 연간 전이계수 감소인자 (따라서, 타 핵종일 경우  $R_i = 0$ )

$m$  :  $R_i$  의 적용 횟수 (단,  $n - j < m$  이면  $m = n - j$ )

식 (5)에서는 계산의 간편성을 위하여 작물의 구별없이 평가년도의 중간점에서의 토양농도를 기준으로 뿌리흡수를 평가하도록 하였다. 대부분의 작물은 년중 후반기에 수확되므로 이러한 방법은 핵종의 붕괴나 용탈 등을 고려할 때 약간이나마 과대평가의 요인이 될 것이다.

**입력변수**

표 1~3에는 Reg. Guide 1.109 모델과 변형모델에 다 같이 포함되어 있는 입력변수들에 대한 Reg. Guide 1.109 값과 국내 특성치가 주어져 있다. 본 연구에서 국내 특성치라 함은 편의상 우리나라에서 실험을 통하여 생산된 것, 국내 문헌에

의한 것, 국내·외 자료를 바탕으로 우리나라의 환경특성을 고려하여 다소 직관적으로 정한 것 등을 총망라하고 있다.

Reg. Guide 1.109 모델에서는 대기로부터 지표로 침적하는 방사성 물질이 작물체에 의해 차단·포획되는 분율인 차단계수( $r$ )에 대해서 iodine을 제외한 입자상 핵종에는 어느 작물이나 0.2를 사용하고 있다. 이것은 작물체의 전체 생육기간(노출기간,  $T_e$ )을 대표하는 것으로 건침적과 습침적을 모두 반영하고 있는 것이다.

Hoffman과 Baes III[15]가 여러 보고 자료들로부터 도출한 작물체의 전체 생육기간을 대표하는  $r$  값은 평균 0.47이었다. 한편 최 등[13] 및 최 등[19]의 연구 결과에 입각하면 전 생육기간을 대표하는  $r$  값으로 세 작물 모두 0.6 정도는 되어야 할 것으로 보인다. 그러나 이러한 값들은 강우에 의한 습침적시 작물체에 차단된 방사성 핵종이 빗물과 함께 흘러 내려 작물체로부터 이탈하는 현상을 반영하지 못하고 있다.

강우에 의한 습침적 시에는 이러한 이탈현상에 의해 초기 작물체 침적량이 감소하고 그 감소정도는 우량의 증가에 따라 커지게 된다[14,20]. 황 등[21]이 기 보고된 자료를 근거로 분석한 결과에 의하면 대체로 10~20 mm 이상의 강우에서는 강우량에 따른 차단계수의 변화가 미미하였고 8월 15일에 100 mm의 강우에 의한 습침적시에는 건침적시에 비해 벼에서의 <sup>137</sup>Cs 및 <sup>90</sup>Sr에 대한 차단계수가 각각 5 배 및 2 배 정도 감소한 것으로 나타났다.

건침적과 습침적을 함께 반영하는  $r$  값은 핵종의 건침적량과 습침적량, 작물체 생육기간 중의

Table 1. Values of the parameters appearing both in the Reg. Guide 1.109 model and in the modified model.

Parameter	Notation	Unit	Parameter value	
			Reg. Guide	STK
Interception factor	$r$	-	0.2	0.4
Weathering loss constant	$\lambda_w$	d <sup>-1</sup>	0.0495	0.0495
Exposure time	$T_e$	d	60	Table 2
Crop yield	$Y_v$	kg m <sup>-2</sup> -wet	2.0	Table 2
Transfer factor	$B_{iv}$	-	Table 3	Table 3
Effective soil surface density	$P$	kg m <sup>-2</sup> -wet	240	180

STK : Specific to Korea.

Table 2. Values for the exposure time ( $T_e$ ) and crop yield ( $Y_v$ ) specific to Korea.

Plant type	Parameter values	
	$T_e$ (d)	$Y_v$ (kg m <sup>-2</sup> ) <sup>a</sup>
Rice seeds	140	0.5
Chinese cabbage	90	8.0
Radish root	90	5.0

<sup>a</sup> Dry weight for rice seeds and wet weight for the others.

Table 3. Soil-to-plant transfer factors given in the Reg. Guide 1.109 and those specific to Korea.

Plant type	Element	Transfer factor ( $B_w$ ) <sup>a</sup>			
		Reg. Guide	Domestically produced		
			Lee[8]	Choi[26,27]	STK
Rice seeds	Mn	$2.9 \times 10^{-2}$	$2.4 \times 10^{-1}$	$2.2 \times 10^{-1}$	$2.4 \times 10^{-1}$ <sup>c</sup>
	Co	$9.4 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-3}$ <sup>c</sup>
	Sr	$1.7 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-1}$ <sup>b</sup>	$3.1 \times 10^{-2}$	$7.6 \times 10^{-2}$ <sup>d</sup>
	Cs	$1.0 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2}$ <sup>c</sup>
Chinese cabbage	Mn	$2.9 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-1}$	$2.2 \times 10^{-1}$	$2.1 \times 10^{-1}$ <sup>d</sup>
	Co	$9.4 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-2}$ <sup>d</sup>
	Sr	$1.7 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^0$	$1.5 \times 10^0$	$1.8 \times 10^0$ <sup>d</sup>
	Cs	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$2.3 \times 10^{-2}$	$6.7 \times 10^{-2}$ <sup>d</sup>
Radish root	Mn	$2.9 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2}$	$5.4 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-2}$ <sup>d</sup>
	Co	$9.4 \times 10^{-3}$	$8.8 \times 10^{-3}$	$6.5 \times 10^{-3}$	$7.7 \times 10^{-3}$ <sup>d</sup>
	Sr	$1.7 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-1}$	$3.8 \times 10^{-1}$	$4.0 \times 10^{-1}$ <sup>d</sup>
	Cs	$1.0 \times 10^{-2}$	$4.7 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-2}$ <sup>d</sup>

STK : Specific to Korea

<sup>a</sup> on the basis of dry-weight concentration for rice seeds and wet-weight concentration for Chinese cabbage and radish root

<sup>b</sup> mean of the two measurements resulting from two different soil concentrations in single soil instead of the higher value of the two, that is,  $1.7 \times 10^{-1}$ , which was chosen by Lee et al.[8].

<sup>c</sup> directly from the proposal made by Lee et al.[8], which was based on the experiment with various soils.

<sup>d</sup> means of the values in the 2 preceding columns, both of which were based on the experiment with single soils.

강우 시간 및 세기, 핵종 등을 고려하여 결정해야 하나 현실적으로 이것은 매우 어렵고 또한 불확실성이 따르는 일이다. 하지만 위와 같은 보고들로 볼 때 습침적을 감안하더라도  $r$  값으로 0.2는 낮은 것으로 생각되며 적어도 0.2와 0.6 사이의 값이 되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 다소 보수적인 견지에서 Reg. Guide

1.109 치의 2 배인 0.4를 국내 특성치로 하였다. 이에 대해서는 차후 침적속도와 함께 보다 세밀한 연구가 이루어져야 할 것으로 본다.

환경제거상수( $\lambda_w$ )는 일반적으로 14~15 일의 반감기에 해당하는 값을 사용하고 있다[3,4,11]. 환경제거상수는 비나 바람과 같은 기상 요인에 크게 영향을 받으나 우리나라에서는 야외에서 조

사한 결과가 전무한 실정이므로 Reg. Guide 1.109와 같이 14 일의 반감기에 해당하는  $0.0495 \text{ d}^{-1}$ 을 특성치로 하였다. 작물체의 방사성 물질 침적에 대한 노출기간 ( $T_e$ ), 즉 생육기간과 작물체의 수량 ( $Y_p$ )에 대해서 Reg. Guide 1.109에서는 식용작물 전체에 대하여 하나의 값을 적용하고 있으나 본 연구에서는 국내의 문헌[22-25]에 입각하여 표 2와 같이 작물별로 특성치를 정하였다.

토양-작물체 전이계수 ( $B_{iw}$ )에 대해서는 Reg. Guide 1.109의 경우 작물에 따른 차이는 없이 핵종 간에만 다른 값을 적용하고 있으나 본 연구에서는 이 등[8], 최 등[26] 및 최 등[27]의 보고에 입각하여 작물별 및 핵종별로 특성치를 결정하였다(표 3). 이때 쌀알에 대한 Mn, Co, Cs 전이계수는 이 등[8]이 우리나라 대표치로 제안한 값이 다수의 토양에서 조사한 결과에 입각한 것이므로 그대로 사용하였고 나머지 경우에는 이 등[8]이 한가지 토양에서 조사한 것이므로 최 등[26] 및 최 등[27]이 역시 한 가지 토양에 대해서 보고한 값과의 평균치를 사용하였다.

토양의 유효표면밀도( $P$ )는 흙갈이의 깊이와 토양의 가비중에 의해 결정된다. 우리나라의 경우 흙갈이 깊이 15 cm, 가밀도  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ 로 보고 유효표면밀도에 대한 특성치를  $180 \text{ kg m}^{-2}$ 로 하였다. 이 등[23]에 의하면 10여 년 전에 조사된 우리나라 전국 논에서의 흙갈이 깊이는 평균 11 cm였으나 비슷한 시기에 일본의 경우 15 cm 정도로 조사되었고 우리나라에서도 그 동안 기계화가 많이 진척된 점을 고려해 흙갈이 깊이를 논, 밭 모두에 대해 15 cm로 보았다. 한편 가밀도는 조 등[28]에 의하면 전남 지역 밭의 경우 평균  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$  정도였고 논인 경우 이보다 조금 낮았으나 큰 차이는 아니었으므로 본 연구에서는 논, 밭 모두  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ 로 하였다.

변형모델에만 포함되어 있는 입력변수에 대한 국내 특성치는 표 4~6과 같고 이 중 용탈상수

( $\lambda_i$ )를 계산하기 위하여 식 (2)에 사용된 입력변수치는 표 7 및 8과 같다.

표 7에서 토양수의 침투속도 ( $V_w$ )  $0.3 \text{ cm d}^{-1}$ 은 Hoffman과 Baes III[15]가 다수의 측정 결과에 입각하여 발표한 평균치에 따른 것이다. 논인 경우 담수관개를 하므로 년 평균으로 보더라도 밭보다 침투속도가 다소 높을 것으로 판단되나 이에 대한 국내의 조사결과가 거의 전무하므로 보수적인 견지에서 밭과 같이  $0.3 \text{ cm d}^{-1}$ 로 하였다. 참고로 Müller와 Pröhl[14]은 ECOSYS-87 모델에서  $V_w$  값으로  $2 \text{ m yr}^{-1}$  ( $0.55 \text{ cm d}^{-1}$ )를 사용하였다. 흙갈이 깊이( $D$ )와 토양의 가밀도( $G$ )는 위에서 설명한 바와 같다.

토양의 수분 함량( $W$ )은 토양 공극이 물로 어느 정도 채워져 있는가에 달려 있다. 토양의 공극율은 가밀도가 낮을수록 큰데 가밀도  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$ 에서 55% 정도인 것으로 보고되어 있다[28]. 밭 토양의 경우 기상 공극율이 일반적으로 32~35% 정도이므로[28] 액상 공극율, 즉 일정 토양 부피 중 물로 채워져 있는 공간의 비율은 20~23% 정도로 볼 수 있다. 따라서 밭토양의 함수량에 대한 국내 특성치를  $0.2 \text{ ml cm}^{-3}$ 으로 하였고 논 토양에 대해서는 재배기간 중에는 담수상태인 점을 고려하여  $0.3 \text{ ml cm}^{-3}$ 으로 하였다.

표 8에는 분배계수( $K_d$ )에 대하여 여러 연구자들[14,15,29]이 사용하였거나 조사한 결과 및 그것들을 참조하여 다소 보수적으로 결정한 국내 특성치가 나타나 있다. ECOSYS-87 모델[14]과는 달리 본 연구에서는 Mn과 Co에 대한  $K_d$  값을 Sr보다 2 배로 높게 정하였다. 이것은 Baes III 등[29]이 발표한  $K_d$  값의 핵종간 차이와 Mn과 Co의 지하침투 속도가 Sr보다 낮았다는 최 등[30]의 연구결과에 입각한 것이다.

위와 같은 변수치로 계산한  $\lambda_i$  값은 표 4에서 보는 바와 같이 논에서 밭보다 약간 높았다. 한편

Table 4. Leaching loss constants of elements for two different types of the field.

Element	Leaching loss constant ( $\lambda_i, \text{d}^{-1}$ )	
	Paddy field	Upper-land field
Mn	$2.51 \times 10^{-5}$	$1.67 \times 10^{-5}$
Co	$2.51 \times 10^{-5}$	$1.67 \times 10^{-5}$
Sr	$5.01 \times 10^{-5}$	$3.34 \times 10^{-5}$
Cs	$5.02 \times 10^{-6}$	$3.35 \times 10^{-6}$

Table 5. Translocation factors of elements for rice seeds and radish root

Element	Translocation factor ( $L_{iv}$ ) <sup>a</sup>	
	Rice seeds	Radish root
Mn	$1.6 \times 10^{-2}$ ( $6.9 \times 10^{-4} \sim 3.8 \times 10^{-2}$ )	$7.5 \times 10^{-3}$ ( $6.0 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-2}$ )
Co	$1.2 \times 10^{-1}$ ( $3.6 \times 10^{-3} \sim 1.6 \times 10^{-1}$ )	$3.8 \times 10^{-1}$ ( $1.2 \times 10^{-1} \sim 4.7 \times 10^{-1}$ )
Sr	$2.3 \times 10^{-2}$ ( $5.8 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-2}$ )	$1.2 \times 10^{-2}$ ( $5.4 \times 10^{-3} \sim 2.2 \times 10^{-2}$ )
Cs	$1.7 \times 10^{-1}$ ( $3.2 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-1}$ )	$2.6 \times 10^{-1}$ ( $1.4 \times 10^{-1} \sim 3.1 \times 10^{-1}$ )

<sup>a</sup> Values in front of parentheses are determined to be specific to Korea, which are the second highest ones of the measurements for 5~6 different times of the radioactive application which gave the ranges in parentheses.

Table 6. Annual absorption loss factor ( $A_{iv}$ ), annual Biv-reducing factor ( $R_i$ ) and processing factor ( $F_v$ )

Element	Crop type	$A_{iv}$ <sup>a</sup>	$R_i$ <sup>b</sup>	$F_v$ <sup>d</sup>
Mn	Rice seeds	0.025	-	0.5
Sr	Chinese cabbage	0.04	-	-
Sr	Radish root	0.025	-	-
Cs	All	-	0.2 <sup>c</sup>	-
All	Rice seeds	-	-	0.5

<sup>a, b</sup>  $A_{iv}$  and  $R_i$  are zeros in the cases where values are not given.

<sup>c</sup> 0.2 only for 4 successive years following the year of deposition

<sup>d</sup> 1.0 was used for the other crop types.

Table 7. Parameter values for determining the leaching loss constant ( $\lambda$ )

Parameter	Notation	Value
Water-percolating velocity	$V_w$	0.3 cm d <sup>-1</sup>
Ploughing depth	$D$	15 cm
Distribution coefficient	$K_d$	Table 8
Soil bulk density	$G$	1.2 g cm <sup>-3</sup>
Soil water content	$W$	0.3 or 0.2 ml cm <sup>-3 a</sup>

<sup>a</sup> 0.3 for paddy field and 0.2 for upland field.

전류계수 ( $L_{iv}$ )는 최 등[13]의 연구결과에 입각하여 표 5와 같이 특성치를 결정하였다. 여기서는 생육중 5~6 시기별로 측정된 전류계수중 두 번째로 높은 값을 택함으로써 과소평가할 가능성이 거의 없도록 하였다.

표 3과 같은 전이계수의 국내 특성치에 의하면 매년 비의 Mn 흡수율이 5%, 배추와 무의 Sr 흡

수율이 각각 8% 및 5% 정도로 예상되어(벼와 무의 경우 경엽부와 가식부위 간 전이계수의 차이 [26,27]를 고려하여 지상부 전체에 대해 추정) 이에 따른 연간 토양 농도 감소인자( $A_{iv}$ )를 표 6과 같이 정하였다. 여기서  $A_{iv}$ 를 연간 예상 흡수율의 반으로 한 것은 작물의 유체나 퇴비 등을 통하여 작물체내 방사성 핵종의 상당 부분이

Table 8. Distribution coefficients of elements from different sources and those specific to Korea.

Element	Distribution coefficient ( $K_d$ , ml g <sup>-1</sup> )			
	ECOSYS-87	Hoffman[15] <sup>a</sup>	Baes III[29] <sup>b</sup>	STK
Mn	70	-	65	200
Co	-	-	47	200
Sr	100	81	37	100
Cs	1000	370	1000	1000

STK : Specific to Korea

<sup>a, b</sup> geometric means of a number of reported values.

토양으로 환원될 가능성을 반영한 것이다. 세 가지 이외의 경우에는 흡수율이 1% 이하로 예상되어 뿌리흡수로 인한 토양중 농도 감소를 무시하였다. 한편 Cs의 경우 토양중 고정으로 인하여 침적후 4년 동안 전이계수가 매년 20%씩 감소하는 것으로 보고 연간 전이계수 감소인자( $R_i$ )를 0.2, 그 적용횟수( $m$ )를 4로 하였다. 이것은 여러 연구자들[16,17,31,32]의 보고에 입각하여 다소 보수적으로 결정한 것이다.

Tsumura 등[33] 및 Kobayashi 등[34]의 보고에 의하면 현미에 대한 백미의 <sup>137</sup>Cs 및 <sup>90</sup>Sr의 농도비가 대체로 0.5 이하이고 Müller와 Pröhl [14]도 이와 유사하게 밀가루내 방사성 핵종의 농도를 밀알의 반으로 보고 있다. 이러한 사실들에 입각하여 쌀알에 대한 가공인자( $F_v$ )를 0.5로 정하였다. 배추와 무에 있어서도 다듬기, 세척, 김치담그기 등의 과정을 통하여 농도가 감소할 것으로 예상되나 참고자료가 매우 제한적이므로 보수적 견지에서  $F_v$ 를 1로 하였다.

## 예제 및 계산

### 침적 유형 및 이력 설정

원자력발전소의 수명을 30년으로 보고 실제로 가동한 기간이 5년인 것과 25년인 것을 가상하였다. 이 두 가지 가동년수에 대해서 다음과 같은 세 가지 침적 유형을 설정하였다.

- 가동기간 전체에 걸쳐 동일한 침적율
- 평가년도 이전 년도까지는 침적율이 동일하다가 평가년도에는 2배 증가
- 평가년도 이전 년도까지는 침적율이 동일하다가 평가년도에는 2배 감소

위에서 A는 가동기간 전체에 걸쳐 매우 안정적인 방출관리가 이루어진 것을 모사한 것이고 B는 평가년도에 예년에 비해 다소 과방출이 일어난 것을, C는 평가년도에 예년에 비해 방출이 다소 감소한 것을 모사한 것이다. 방출이 아무리 안정적으로 관리된다 하더라도 실제 침적율은 매년 조금씩 다를 것이나 본 연구에서는 계산의 간단·명료성을 위하여 위와 같이 가상하였다. 가동년수와 침적 유형을 조합하여 5-A, 5-B, 5-C, 25-A, 25-B, 25-C의 여섯 가지 침적 이력을 설정하였다.

평가년도의 침적율은 어느 경우에도 각 핵종 공히 1 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>로 하였고 따라서 이전 년도의 침적율은 침적 유형 A의 경우 1 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, B의 경우 0.5 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, C의 경우 2 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>로 하였다.

### 계산방법 선정

앞에서 언급한 Reg. Guide 1.109 모델과 변형 모델을 이용하여 다음과 같이 네 가지 가능한 방법으로 계산하였다.

- Reg. Guide 1.109 모델에 동 지침서에 제시된 입력변수치 적용 (R-R)
- Reg. Guide 1.109 모델에 국내 특성 입력변수치 적용 (R-K)
  - 단, Reg. Guide 1.109 모델에만 포함되는 입력변수  $T_b$ 에 대해서는 동 지침서의 값을 적용함.
- 변형모델에 국내 특성 입력변수치 적용 (M-K)
- 변형모델에 Reg. Guide 1.109 입력변수치 적용 (M-R)
  - 단, 변형모델에서만 고려되는 입력변수에 대해서는 국내 특성치를 적용하나 뿌리흡수 농도계산시  $A_{iw}$  및  $R_i$ 는 무시함.



Reg. Guide 1.109 모델을 사용하는 1)과 2)의 경우 평가년도 이전의 침적은 고려할 필요가 없으므로 침적이력을 구별하지 않고 한 번만 계산하였고 3)과 4)의 경우 여섯 가지 침적 이력 각각에 대해서 계산하였다.

### 계산결과 및 고찰

#### 뿌리흡수 농도

5년간 가동한 원자력 시설 주변에서 생산되는 쌀알, 배추, 무 뿌리에 있어서 작물체의 뿌리흡수에 따른 방사성 핵종의 농도를 침적유형 A, B, C에 대하여 상기 네 가지 방법으로 계산한 결과는 각각 그림 1~3과 같고 25년간 가동한 시설에 대한 계산 결과는 각각 그림 4~6과 같다.

Reg. Guide 1.109 모델을 이용한 계산(R-R, R-K)에서는 작물체내 핵종의 뿌리흡수 농도가 가동 기간이나 침적 유형에 따른 차이 없이 일정하다. 현재 농경지에 축적되어 있는 방사성 핵종의 농도는 가동 개시후 현재까지 매년의 침적량에 의해 결정되므로 뿌리흡수 농도는 가동 했수나 년간 침적량에 따라 달라져야 할 것이다. 따라서 위와 같은 계산 결과는 Reg. Guide 1.109 모델의 뿌리흡수 농도 계산법이 가동중인 원자력 시설에 대한 평가에는 불합리한 것임을 명백하게 보여 주는 것이라고 할 수 있다. 특히 R-R의 경우에는 작물체 간에도 농도가 동일한 것으로 계산되어 작물별 특성을 전혀 고려하지 못하고 있다.

이에 반해 변형 모델을 이용한 계산(M-K, M-R)에서는 가동했수가 같을 때는 과거의 침적률이 높을수록 농도가 높고 과거의 침적률이 같을 때는 가동했수가 길수록 농도가 높아지는 합리적인 결과를 보여 주고 있다. 따라서 변형모델이 구조상 Reg. Guide 1.109 모델에 비해 현실세계를 보다 적절히 묘사하고 있다고 볼 수 있다. 이것은 올바른 입력변수를 사용하면 변형모델이 보다 참값에 가까운, 즉 보다 현실적인 평가결과를 제공한다는 것을 의미한다.

Reg. Guide 1.109 모델에 국내 특성 입력자료를 적용한 계산(R-K)에서는 Reg. Guide 1.109 모델에 동 지침서의 입력자료를 적용한 계산(R-R)에 비해 쌀알과 무 뿌리의  $^{60}\text{Co}$  농도를 제외하는 수 배에서 백여 배까지 높은 농도를 나타내었다. 이것은 전이계수( $B_{iv}$ )의 국내 특성치가 Reg. Guide 1.109 치에 비해 쌀알과 무 뿌리에 대한  $^{60}\text{Co}$  전이계수를 제외하고는 수 배에서 백 배 가

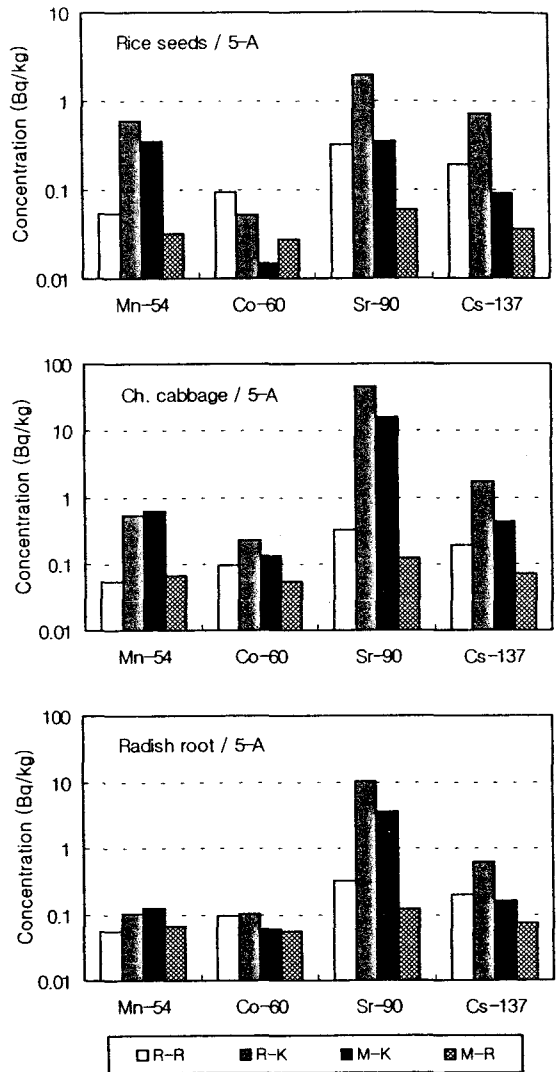


Fig. 1. Radionuclide concentrations due to root uptake calculated in 4 different methods for the deposition history of 5-A (  $1 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  for 5 years).

량 높기 때문이다(표 3).

Reg. Guide 1.109에 제시된 전이계수는 주로 구미 각국에서 많이 소비되는 작물을 대상으로 한 것이므로 우리나라 특유의 주식작물인 벼, 배추, 무 등에는 맞지 않을 가능성이 크다. 특히 Reg. Guide 1.109에서는 식용작물 전체에 대하여 동일한 전이계수를 적용함으로써 현실을 너무 단순화하고 있다. 한편 국내 생산 전이계수는 전부 온실내에서 한정된 크기의 용기에 작물을 재배하여 조사하였고 안치기간도 비교적 짧았으므로 다소 과대평가 되었을 가능성을 배제할 수 없다

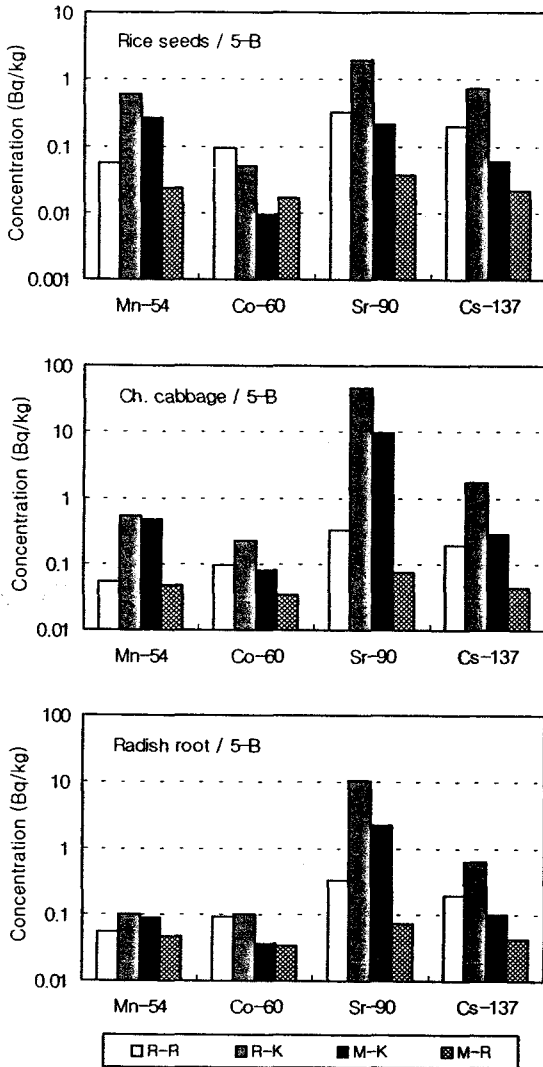


Fig. 2. Radionuclide concentrations due to root uptake calculated in 4 different methods for the deposition history of 5-B (  $0.5 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  for the first 4 years and  $1 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  for the last 1 year).

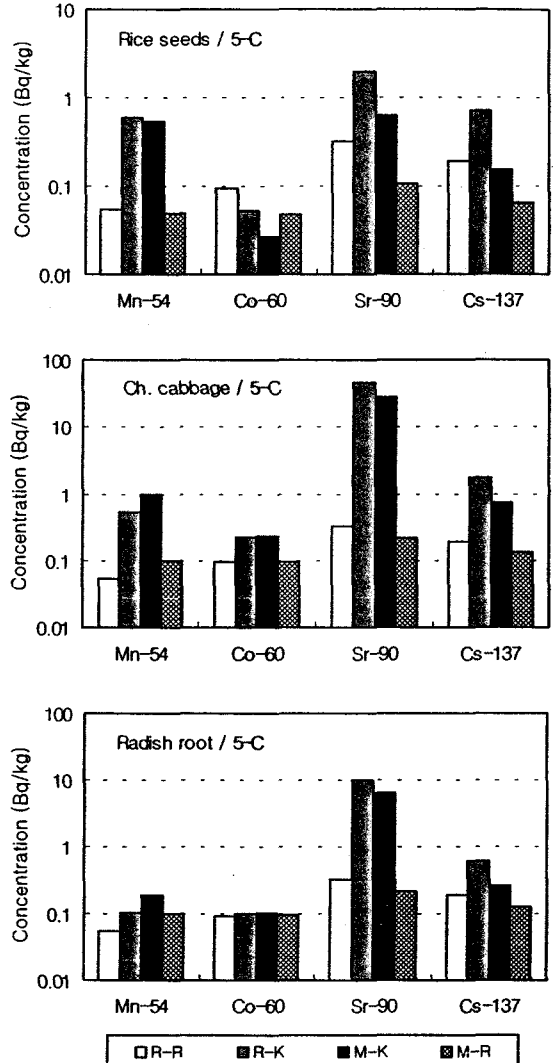


Fig. 3. Radionuclide concentrations due to root uptake calculated in 4 different methods for the deposition history of 5-C (  $2 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  for the first 4 years and  $1 \text{ Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  for the last 1 year).

[10]. 그러나 위와 같은 전이계수의 차이는 이러한 과대평가 요인보다는 구미와 우리나라 간의 토양 및 재배작물의 차이에 훨씬 크게 기인하는 것으로 보아야 할 것이다. 특히 배추에 대한  $^{90}\text{Sr}$  전이계수는 국내 특성치가 Reg. Guide 1.109 치에 비해 백 배 가량 높다. Ng 등[35]은 Reg. Guide 1.109의 Sr 전이계수 0.017이 여러 가지 토양-작물의 조합에 대한 값들과 비교할 때 너무 낮으며 이 대신 Baker 등[36]이 제안한 0.2가 일반치로 더 적당하다고 하였다. 이 값은 쌀알과 무

뿌리에 대한 국내 특성치의 평균과 비슷한 수준이다.

변형 모델에 국내 특성 입력자료를 적용한 계산(M-K)에서는 R-R에 비해 뿌리흡수 농도가 대체로 쌀알의  $^{60}\text{Co}$ 과  $^{137}\text{Cs}$  농도, 그리고 무 뿌리의  $^{60}\text{Co}$  농도만 제외하면 핵종 및 작물체에 따라 최고 250 배 정도까지 높았고 이러한 증대현상은 가동기간이 길수록, 그리고 과거의 침적물이 높을수록 현저한 경향이었다. 이것은 모델 구조의 개선으로 과거의 침적이 합리적으로 반영된 것과

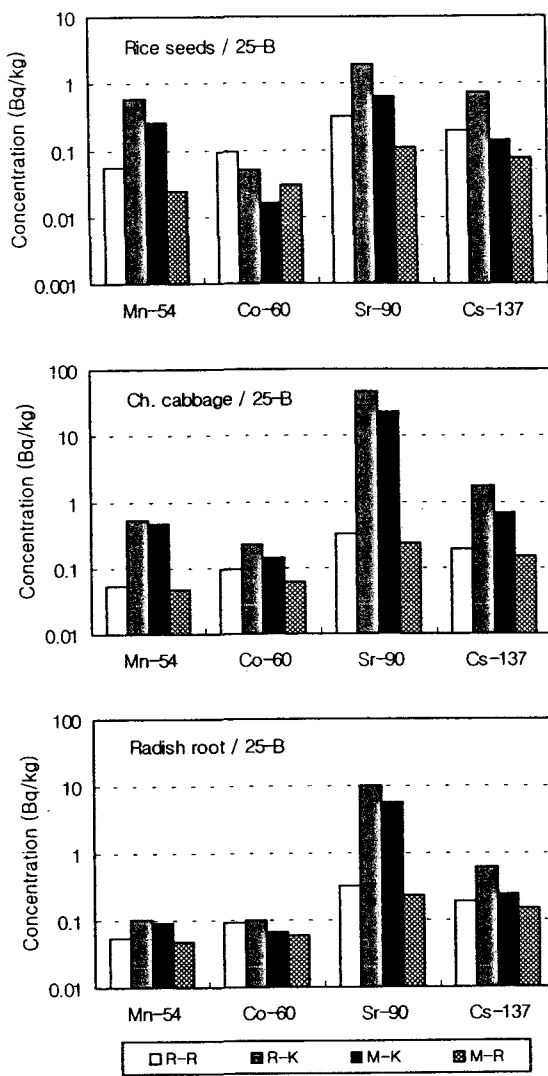
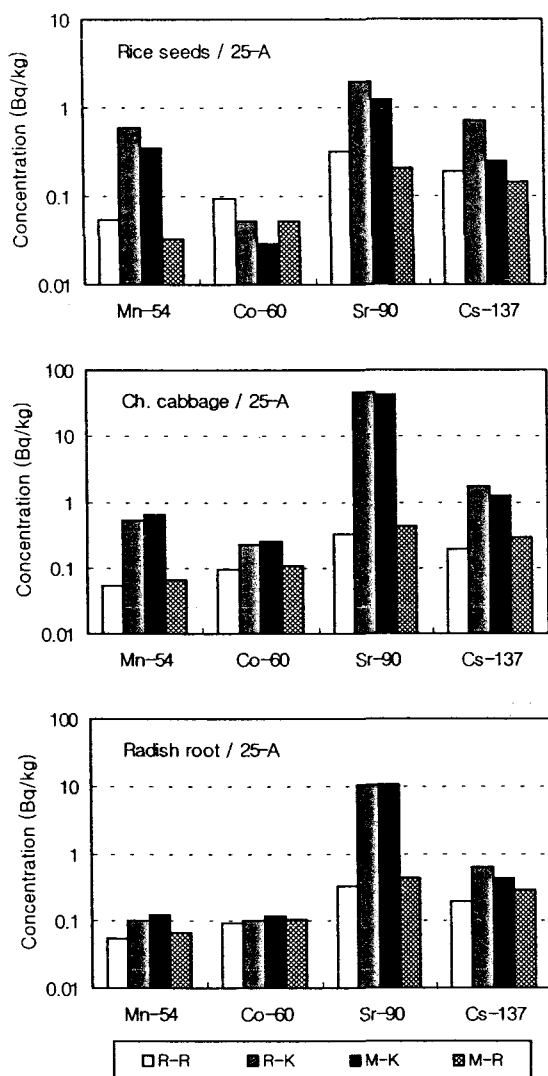


Fig. 4. Radionuclide concentrations due to root uptake calculated in 4 different methods for the deposition history of 25-A ( 1 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> for 25 years).

Fig. 5. Radionuclide concentrations due to root uptake calculated in 4 different methods for the deposition history of 25-B ( 0.5 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> for the first 24 years and 1 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> for the last 1 year).

국내 특성 전이계수치 사용에 따른 결과이다. 이에 반해 R-R 방식에 의하면 불합리한 모델 구조로 인하여 가동기간이 비교적 길면서 평가년도의 방출량이 예년에 비해 감소한 경우 뿌리흡수 농도를 더욱 과소평가할 위험이 있다고 하겠다.

M-K와 R-R 간 차이 중 특히 주목할 만한 것은 배추의 <sup>90</sup>Sr 농도가 M-K에서 R-R에 비해 침적 이력에 따라 수십 배에서 수백 배까지 높았다는 점이다. 이것은 <sup>90</sup>Sr의 선량환산인자가 비교적 높다[37]는 사실과 배추의 <sup>90</sup>Sr 전이계수치가 통상 타 작물이나 핵종보다 크고 배추의 소비량도

비교적 많다는 점을 고려할 때 타 핵종에 비해 <sup>90</sup>Sr의 침적량이 크게 낮지 않을 경우에는 M-K 방식에 의한 배추내 <sup>90</sup>Sr 농도 계산결과가 평가선량 증대의 주요 요인이 될 수 있음을 암시한다. 따라서 여러 종류의 토양에 있어서 배추의 <sup>90</sup>Sr 전이계수를 안치기간 별로 조사하고 그 결과에 따라 국내 특성치를 하향 조정할 수 있다면 변형 모델에 의한 평가선량을 낮추는 데 도움이 될 것이다.

R-K에서는 M-K에 비해 평가농도가 침적이력

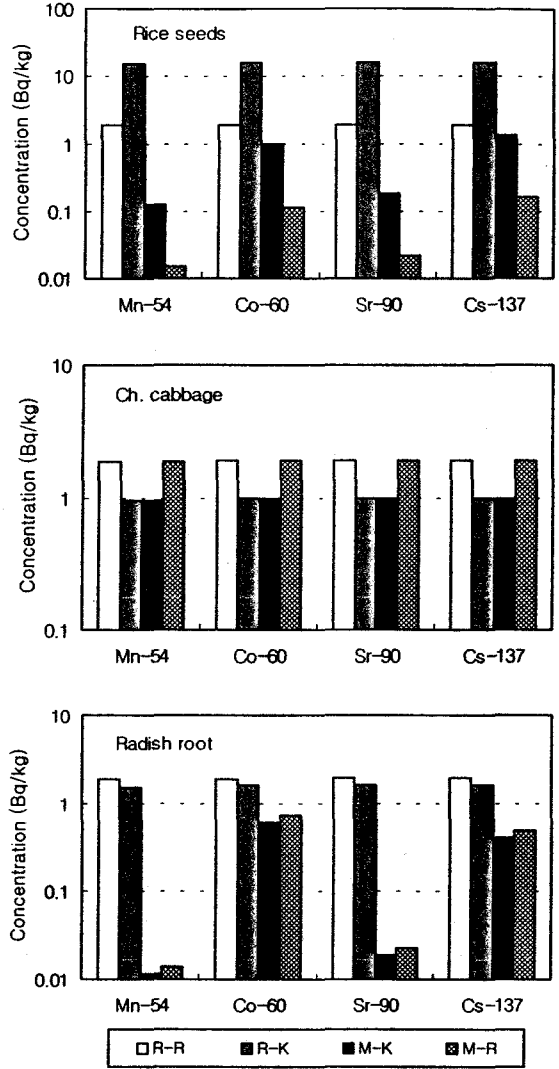
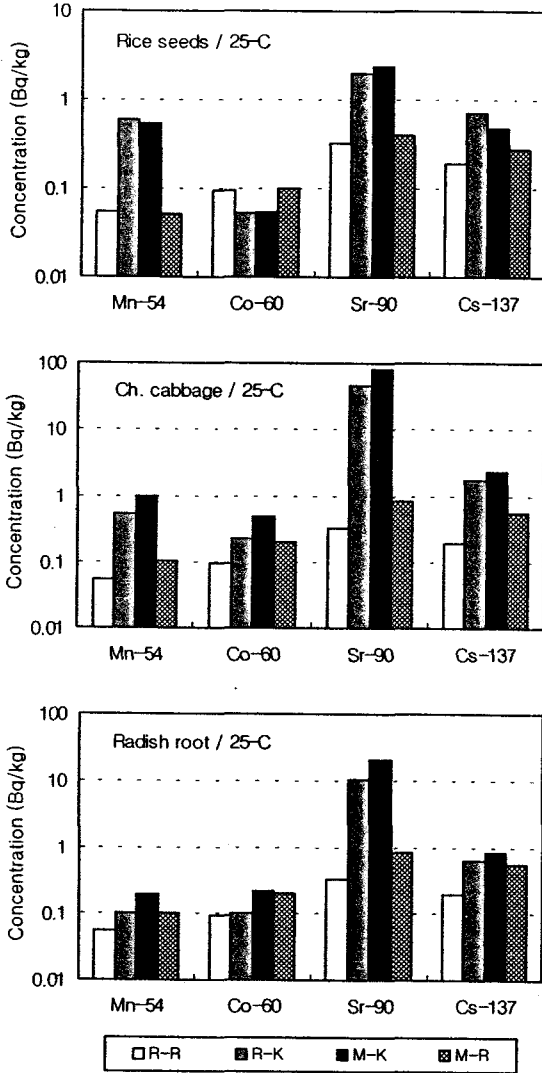


Fig. 6. Radionuclide concentrations due to root uptake calculated in 4 different methods for the deposition history of 25-C ( 2 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> for the first 24 years and 1 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> for the last 1 year).

Fig. 7. Radionuclide concentrations due to direct plant deposition calculated in 4 different methods for a deposition rate of 1 Bq m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

25-C에서의 배추와 무 뿌리의 경우 다소 낮았고 그 이외의 경우에는 대체로 비슷하거나 수 배 정도 높았다. 또한 변형모델에 Reg. Guide 1.109 입력변수를 적용한 계산(M-R)에서는 M-K에 비해 쌀알의 <sup>60</sup>Co 농도만 다소 높았을 뿐 나머지 경우에는 농도가 최고 130 배 정도까지 낮게 평가되었다. 이러한 사실들은 모델구조의 개선과 환경특성에 적합한 입력변수의 사용이 함께 이루어져야만 보다 현실적인 평가가 가능하다는 것을 보여주는 것이라 하겠다. M-R에서는 입력변수  $A_{iv}$

와  $R_i$ 는 적용하지 않았다. 이것은 Reg. Guide 1.109에서 제안된  $B_{iv}$  치가 이러한 변수들을 종합적으로 고려하여 결정할 것일 수도 있다는 판단에 따른 것이다. 반대로 M-K에서는 농도를 감소시키는 요인인  $A_{iv}$  와  $R_i$ 를 적용했음에도 불구하고 뿌리흡수 농도가 M-R에 비해 대체로 높게 계산됨에 따라 전이계수의 국내 특성치가 과대평가되었던가 아니면 위의 변수들이 부적절하게 적용되었을 가능성을 배제할 수 없다.

최 등[10]의 보고에 의하면 방사성 Cs의 전이계수는 3 년만에 세 작물 모두 1차 년도의 15% 내외로 감소하였고 방사성 Mn, Co, Sr의 전이계수도 작물에 따라서는 재배년차가 증가할수록 꽤 크게 감소하는 경향이 있었다. 이러한 사실은 전이계수에 대한 국내 특성치로 표 3과 같은 값을 사용한다면  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우  $R_i$ 를 0.2보다 크게 하고 또한  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ 에 대해서도  $R_i$ 를 적용하는 것이 보다 현실적일 수 있음을 나타내고 있다. 국내 생산 전이계수의 과대평가 요인에 대해서는 위에서 언급한 바와 같다.

### 직접침적 농도

방사성 물질의 작물체 지상부로의 직접침적에 따른 쌀알, 배추, 무 뿌리내 방사성 핵종의 농도는 그림 7과 같다. 직접침적 농도는 평가년도 이전의 침적과는 무관하므로 침적 이력에 따른 차이는 없다.

Reg. Guide 1.109 모델에 동 지침서의 변수치를 사용한 계산(R-R)에서는 세 가지 작물 모두에 대해 농도가 똑 같이 계산되고 핵종 간에도 붕괴에 따른 반감기에 의한 미미한 차이만 나타나 작물이나 핵종의 특성이 완전히 무시된 평가를 하고 있다. Reg. Guide 1.109 모델에 국내 특성 입력자료를 적용한 계산(R-K)에서는 작물간 차이는 나타났으나 핵종간 차이는 역시 무시할 수 있을 정도였다. R-K에서는 R-R에 비해 쌀알의 경우 각 핵종의 농도가 8 배 가량 높게 계산되었으나 배추와 무 뿌리의 경우 다소 낮게 계산되었다. 이것은 R-K에서 쌀알의 경우에는 차단계수의 상향조정과 수량의 하향조정에 따른 상승작용으로 농도가 매우 높게 계산되었고 배추와 무 뿌리의 경우에는 차단계수의 상향조정 효과보다 수량의 상향조정에 따른 농도감소 효과가 더 컸기 때문이다.

변형모델에 국내 특성 입력자료를 적용한 계산(M-K)에서는 가식부 전류계수( $L_w$ )를 도입함으로써 쌀알과 무 뿌리의 경우 R-K에 비해 핵종에 따라 농도를 최고 130 배 정도까지 낮출 수 있었으나 전류계수가 적용되지 않는 배추의 경우에는 R-K와 차이가 없었다. 이와 같은 사실은 직접침적 농도 계산 모델에 전류계수를 도입하지 않고 기존의 입력변수에 대해서만 Reg. Guide 1.109에서 권고하는 대로 국내 특성치를 사용하면 쌀알과 무 뿌리의 경우 농도를 크게 과대평가 할 수 있다는 것을 보여 준다. 이처럼 몇몇 입력변수에 대해서 비교적 신뢰도 높은 특성치의 사용에도

불구하고 모델에 대한 전반적인 개선이 선행되지 않는다면 원래보다 더 비현실적인 계산결과를 얻을 수 있다는 점에 유의할 필요가 있다.

M-K에서는 R-R에 비해서도 직접침적 농도가 거의 비슷하거나 최고 160 배 정도까지 낮게 계산되었다. 이때 쌀알과 무 뿌리의 경우  $^{60}\text{Co}$ 와  $^{137}\text{Cs}$  농도의 M-K와 R-R 간 차이는  $^{54}\text{Mn}$ 나  $^{90}\text{Sr}$ 보다 훨씬 작았다. 이것은  $^{60}\text{Co}$ 와  $^{137}\text{Cs}$ 의 전류계수가  $^{54}\text{Mn}$ 나  $^{90}\text{Sr}$ 에 비해 수~수 십 배 크기 때문이다. 본 연구에서 사용한 전류계수는 앞에서 언급한 바와 같이 대체로 과대평가 되었을 가능성이 높다. 앞으로 전생육기를 대표하는 전류계수치를 보다 현실적으로 도출하는 방법을 모색할 필요가 있다고 본다. 한편 변형모델에 Reg. Guide 1.109 입력변수를 적용한 경우(M-R)에는 평가농도가 M-K에 비해 쌀알의 경우 8 배 가량 감소하였으나 배추와 무 뿌리의 경우 다소 증가하였다.

각 핵종의 뿌리흡수 농도에 대한 직접침적 농도의 비는 R-R에서는 작물이나 침적이력에 따른 변화 없이 항상  $^{54}\text{Mn}$ 가 34,  $^{60}\text{Co}$ 이 20,  $^{90}\text{Sr}$ 이 6,  $^{137}\text{Cs}$ 이 10으로 나타나 직접침적의 영향이 뿌리흡수에 비해 훨씬 컸다. 이에 반해 M-K에서는 상기의 비가 핵종뿐만 아니라 작물이나 침적이력에 따라서도 다르게 나타났다. 즉, 쌀알의 경우  $^{54}\text{Mn}$ 와  $^{90}\text{Sr}$ 은 침적이력에 따라 1보다 최고 13 배 정도까지 낮았으나  $^{60}\text{Co}$ 와  $^{137}\text{Cs}$ 은 1보다 3~100 배 정도 높았다. 한편, 배추의 경우에는  $^{90}\text{Sr}$ 은 상기 비가 1보다 최고 80 배 가량 낮았으나 나머지 세 핵종은 대체로 침적 이력 25-A와 25-C에서의  $^{137}\text{Cs}$ 만 제외하면 최고 12 배 정도까지 높았다. 무 뿌리의 경우에는  $^{54}\text{Mn}$ 와  $^{90}\text{Sr}$ 은 상기 비가 1보다 1,000 여 배 정도까지 낮았으나  $^{60}\text{Co}$ 와  $^{137}\text{Cs}$ 은 침적 이력 25-A와 25-C에서의  $^{137}\text{Cs}$ 만 제외하면 20 배 정도까지 높았다.

이상으로 M-K에 있어서는 작물 및 핵종의 특성이 적절히 반영된 계산이 이루어졌다고 할 수 있겠다. 즉, 지상부 전체가 가식부인 배추의 경우 토양-작물체 전이계수가 높은  $^{90}\text{Sr}$ 은 뿌리흡수의 영향이 컸고 전이계수가 비교적 낮은 나머지 핵종들은 대체로 직접침적의 영향이 컸다. 또한, 이에 반해, 작물체의 특정부위인 쌀알과 무 뿌리의 경우 작물체내에서의 이동성이 높은  $^{137}\text{Cs}$ 이나  $^{60}\text{Co}$ 은 대체로 직접침적의 영향이 컸고 작물체내 이동성은 낮으나 토양-작물체 전이계수가 비교적 높은  $^{90}\text{Sr}$ 이나  $^{54}\text{Mn}$ 은 뿌리흡수의 영향이 크게 나타났다.

## 계산 방식 간 농도비

표 9는 Reg. Guide 1. 109 모델에 국내 특성 입력변수 치를 적용한 계산(R-K)과 변형모델에 국내 특성 입력변수 치를 적용한 계산(M-K)의 결과를 Reg. Guide 1.109 모델에 동 지침서의 입력변수 치를 적용한 계산(R-R)의 결과에 대한 비로 나타낸 것이다.

R-K에서는 배추와 무 뿌리의  $^{54}\text{Mn}$ 과  $^{60}\text{Co}$  농도만 제외하고는 어느 경우에도 R-R에 비해 농도가 높게 계산되었다. 특히 쌀알의 경우에는 내핵종 모두 농도가 R-R에 비해 8 배 내외 높았고 배추와 무 뿌리의 경우에는  $^{90}\text{Sr}$  농도가 각각 20 배 및 5 배 가량 높았다. 이것은 R-K에서 R-R에 비해 쌀알의 경우 직접침적의 영향이, 그리고 배추와 무 뿌리의 경우  $^{90}\text{Sr}$ 에 대한 뿌리흡수의 영향이 훨씬 크게 평가되었기 때문이다. 여기에 대해서는 앞에서 설명한 바와 같다.

M-K 방식의 계산결과는 쌀알에 있어서는 전반적으로 R-R에 비해 낮았고 배추와 무 뿌리에 있

어서도  $^{90}\text{Sr}$ 만 제외하면 대체로 R-R과 비슷하거나 낮았다.  $^{90}\text{Sr}$  농도는 M-K 방식으로 계산한 것이 R-R에 비해 침적이력에 따라 배추의 경우 최고 37 배 정도까지 높았고 무 뿌리의 경우 9 배 정도까지 높았다. 이상과 같은 M-K와 R-R 방식 간 평가농도의 차이가 내부피폭선량의 계산 결과에 미치는 영향은 각 핵종의 실제적인 침적량과 선량환산인자 및 각 식품의 소비량 등에 좌우될 것이다. M-K 방식에서 앞에서 언급한 과대평가 요인들을 보완한다면 작물체내 농도를 보다 낮게 평가할 것이다.

R-R에 대한 M-K 방식의 결과비는 어느 경우에도 침적 이력 25-C에서 가장 높았고 침적 이력 5-B에서 가장 낮았다. 이것은 과거에 이루어진 침적이 평가년도의 작물체내 핵종 농도에 기여하는 정도가 침적 이력 25-C에서 가장 컸고 침적 이력 5-B에서 가장 작았기 때문이다. 따라서 R-R 방식으로 평가하면 과거의 방출을 적절하게 고려치 못하는 관계로 25-C처럼 가동횟수가 많고

Table 9. Ratios of radionuclide concentrations calculated using the Reg. Guide 1.109 model (R-K) and the modified model with the parameter values for Koreans (M-K) to those calculated using the Reg. Guide 1.109 model with the parameter values in the guide (R-R).

Plant type	Calculation code	Concentration ratio to R-R			
		$^{54}\text{Mn}$	$^{60}\text{Co}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$
Rice seeds	R-K	$8.45 \times 10^0$	$8.05 \times 10^0$	$8.06 \times 10^0$	$7.99 \times 10^0$
	M-K-5-A	$2.49 \times 10^{-1}$	$4.89 \times 10^{-1}$	$2.42 \times 10^{-1}$	$6.92 \times 10^{-1}$
	M-K-5-B	$2.01 \times 10^{-1}$	$4.86 \times 10^{-1}$	$1.79 \times 10^{-1}$	$6.78 \times 10^{-1}$
	M-K-5-C	$3.46 \times 10^{-1}$	$4.94 \times 10^{-1}$	$3.67 \times 10^{-1}$	$7.25 \times 10^{-1}$
	M-K-25-A	$2.53 \times 10^{-1}$	$4.96 \times 10^{-1}$	$6.29 \times 10^{-1}$	$7.73 \times 10^{-1}$
	M-K-25-B	$2.03 \times 10^{-1}$	$4.89 \times 10^{-1}$	$3.73 \times 10^{-1}$	$7.16 \times 10^{-1}$
	M-K-25-C	$3.53 \times 10^{-1}$	$5.10 \times 10^{-1}$	$1.14 \times 10^0$	$8.77 \times 10^{-1}$
Chinese cabbage	R-K	$7.81 \times 10^{-1}$	$6.09 \times 10^{-1}$	$2.10 \times 10^1$	$1.29 \times 10^0$
	M-K-5-A	$8.37 \times 10^{-1}$	$5.60 \times 10^{-1}$	$7.50 \times 10^0$	$6.82 \times 10^{-1}$
	M-K-5-B	$7.47 \times 10^{-1}$	$5.35 \times 10^{-1}$	$4.78 \times 10^0$	$6.07 \times 10^{-1}$
	M-K-5-C	$1.01 \times 10^0$	$6.10 \times 10^{-1}$	$1.29 \times 10^1$	$8.25 \times 10^{-1}$
	M-K-25-A	$8.42 \times 10^{-1}$	$6.25 \times 10^{-1}$	$1.93 \times 10^1$	$1.06 \times 10^0$
	M-K-25-B	$7.47 \times 10^{-1}$	$5.70 \times 10^{-1}$	$1.07 \times 10^1$	$7.96 \times 10^{-1}$
	M-K-25-C	$1.03 \times 10^0$	$7.40 \times 10^{-1}$	$3.66 \times 10^1$	$1.57 \times 10^0$
Radish root	R-K	$8.60 \times 10^{-1}$	$8.45 \times 10^{-1}$	$5.28 \times 10^0$	$1.05 \times 10^0$
	M-K-5-A	$7.05 \times 10^{-2}$	$3.31 \times 10^{-1}$	$1.62 \times 10^0$	$2.71 \times 10^{-1}$
	M-K-5-B	$5.32 \times 10^{-2}$	$3.20 \times 10^{-1}$	$9.91 \times 10^{-1}$	$2.45 \times 10^{-1}$
	M-K-5-C	$1.05 \times 10^{-1}$	$3.54 \times 10^{-1}$	$2.87 \times 10^0$	$3.23 \times 10^{-1}$
	M-K-25-A	$7.21 \times 10^{-2}$	$3.60 \times 10^{-1}$	$4.82 \times 10^0$	$4.05 \times 10^{-1}$
	M-K-25-B	$5.42 \times 10^{-2}$	$3.35 \times 10^{-1}$	$2.58 \times 10^0$	$3.12 \times 10^{-1}$
	M-K-25-C	$1.08 \times 10^{-1}$	$4.11 \times 10^{-1}$	$9.24 \times 10^0$	$5.92 \times 10^{-1}$

과거의 침적율이 평가년도에 비해 높을 경우 내부피폭 선량을 과소평가할 가능성이 상대적으로 커진다는 점에 주의할 필요가 있다.

한편 M-K에서는 R-K에 비해 방사성 핵종의 농도가 쌀알에 있어서는 어느 경우에도 수~수십 배 낮았고 배추에 있어서는 침적 이력 25-C를 제외하고는 대체로 비슷하거나 다소 낮았으며 무 뿌리에 있어서는 침적 이력 25-C에서의 <sup>90</sup>Sr 농도를 제외하고는 어느 경우에도 다소 낮았다. 따라서 M-K의 경우 모델의 구조와 입력변수를 함께 개선함으로써 입력변수만 개선한 R-K에 비해 핵종의 섭취량을 대체로 낮게 평가한다고 할 수 있겠다. 반대로 R-K의 경우 모델 구조의 개선 없이 입력변수치만 변경함으로써 경우에 따라서는 더욱 왜곡된 평가를 하였다고 볼 수 있다.

이상과 같은 논의에도 불구하고 현실 묘사에 대한 모델 구조의 한계성과 입력변수들의 불확실성으로 인하여 M-K 방식이 다른 방식에 비해 반드시 참값에 가까운 평가결과를 제공한다고 말하기는 어렵다. 이에 대해서 확실한 결론을 얻기 위해서는 야외 실험이나 측정을 통하여 모델의 타당성을 검증하는 것이 필요하다. 그러나 정상 가동시의 장기간 연속방출에 대해서 실험을 하는 것은 현실적으로 매우 곤란하고 실제 가동하고 있는 시설로부터 방출된 핵종의 농도를 측정하는 것도 농도가 너무 낮아 거의 불가능하다[15]. 하지만 앞에서도 언급한 바와 같이 변형모델을 사용할 때 Reg. Guide 1.109 모델과는 달리 침적 이력에 따른 평가농도의 차이가 합리적인 경향으로 나타났고 또한 변형모델에 포함된 입력변수 전반에 대해서 비교적 신뢰도 높은 국내 특성치를 적용함으로써 M-K 방식이 참값에 보다 가까운 평가농도를 제공할 가능성이 높을 것으로 생각된다. 이에 따라 M-K 방식을 채택하고자 할 때에는 적어도 모델의 불확실성을 분석하여 평가 결과가 어느 수준에 위치하는지 조사해 보아야 할 것이다.

#### 기타 보완 요구사항

위에서 언급한 여러 가지 사항 이외에 앞으로 보완이 요구되는 부분은 다음과 같이 크게 세 가지로 볼 수 있다.

Reg. Guide 1.109 모델이나 변형모델 모두 토양에 침적한 방사성 핵종의 대기로의 재부유에 따른 작물체의 오염을 고려하지 않고 있다. ECOSYS-87 모델[14]에서는 목초에 있어서 이러한 재부유의 영향을  $1.0 \times 10^{-3}$ 의 토양-작물체 전이

계수에 해당하는 것으로 추정(재부유계수 :  $2.5 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$ , 침적속도 :  $86.4 \text{ m d}^{-1}$ , 목초 수량 :  $1 \text{ kg-wet m}^{-2}$ , 환경제거상수 :  $0.0495 \text{ d}^{-1}$ 로 봄)하여 모든 작물체에 대해 동일하게 적용하고 있다. 우리나라의 경우 논은 벼의 일생 동안 거의 내내 담수상태로 있으므로 쌀알에 대해서는 재부유를 고려할 필요가 없다고 본다. 한편 밭작물에 있어서는 배추와 무의 지상부 수량이나 무의 경우 뿌리로의 핵종 이동 정도로 볼 때 ECOSYS-87 모델보다 적어도 수 배 정도 낮은 값을 적용하는 것이 적절할 것이다. 배추와 무 뿌리에 있어서 이 정도의 전이계수는 표 3의 국내 특성 전이계수와 비교할 때 대체로 무시해도 좋을 것이나 재부유계수는 변이가 매우 큰 변수이므로 신뢰도 높은 평가를 위해서는 우리나라의 환경특성에 적합한 재부유계수를 찾아내어 재부유의 영향이 보다 현실적으로 반영되도록 할 필요가 있다.

최 등[38]은 원자력 시설 가동중 특정 년도의 식생활에 의한 피폭선량 계산시 농산물의 생산년도와 소비년도가 다를 경우 이를 적절히 고려할 필요가 있음을 지적한 바 있다. 예를들면 쌀알의 경우 평가 년도 소비량의 대부분이 전년도에 생산된 것이고 전년도 생산분 내 핵종의 농도는 평가년도가 아니라 전년도의 침적량과 전년도까지의 축적량으로 평가해야 한다. 따라서 평가 년도의 핵종 침적량이 전년도와 크게 다를 경우 생산년도의 고려 여부에 따른 차이가 비교적 클 것이므로 이와 같은 것이 적절히 반영될 수 있도록 모델의 구조를 개선할 필요가 있다. 또한 이렇게 하면 전년도 생산분에 대해서는 수확에서 소비까지의 기간을 올해 생산분에 비해 훨씬 길게 잡을 수 있게 되어 단란감기 핵종에 대해서는 불필요한 과대평가를 상당히 억제할 수 있다.

원자력 발전소의 정상 가동시에도 purge 시와 같이 짧은 시간 동안 다량의 방사성 핵종이 방출되어 방출량의 피크가 형성되는 경우가 있다. 이와 같은 경우는 년중 균일한 방출로 보기 어려우므로 방출시의 기상이나 작물체의 생육상태를 고려한 별도의 평가가 이루어지도록 하는 것이 바람직하다. 앞에서 언급한 평가방법 대로라면 피크 방출의 시기나 방출시의 기상에 따라 상당한 과소평가 또는 과대평가의 위험성이 있다. 그러나 적어도 피크 방출의 시기가 농한기이거나 방출방향이 해양쪽일 경우에는 과대평가의 가능성만 생각해도 좋을 것이다. 따라서 피크 방출이 그 영향을 최소화하기 위해 가능한 한 농한기에 해양쪽으로 이루어지고 있다고 본다면 이에 적합한 평

가기법을 도입함으로써 섭취피폭에 대한 평가선량을 낮출 수 있는 여지가 크다고 하겠다.

## 결 론

가동중 원자력 시설 주변 농산물내 방사성 핵종의 농도 계산에 통상적으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.109 방식의 문제점을 해결하기 위하여 모델의 구조를 개선하고 국내 환경특성을 반영한 입력변수치를 적용한 결과, 보다 합리적이고 현실적인 평가가 가능함이 시사되었다. 또한 평가의 현실성 향상을 위해서는 모델과 입력변수의 개선이 함께 이루어져야 하고 입력변수의 개선도 특정 입력변수에 대해서만이 아니라 입력변수 전반에 대해서 이루어져야 한다는 것이 확인되었다.

핵종, 작물체 종류, 침적이력 등의 조합에 따른 여러 가지 예제에 대하여 개선된 방식(M-K)으로 계산한 작물체내 핵종의 농도는 Reg. Guide 1.109 모델을 이용하여 계산한 것(R-R, R-K)에 비해 낮은 경우가 높은 경우보다 훨씬 많았다. 앞으로 개선된 방식에 남아 있는 몇 가지 과대평가 요인의 해소, 즉 핵종의 토양-작물체 전이계수와 그것의 년차적 감소인자, 용탈상수, 전류계수, 가공인자 등에 대하여 보다 현실적인 값을 도입하고 농산물의 생산년도를 고려함으로써 평가농도를 더욱 낮출 수 있을 것으로 본다. 재부유의 영향을 반영한다면 평가농도가 약간 증대하겠지만 증대 정도는 이와 같은 감소 정도보다 훨씬 작을 것으로 예상된다.

배추와 무 뿌리내  $^{90}\text{Sr}$  농도는 M-K 방식이 R-R 방식에 비해 대체로 수~수십 배 높게 평가하고 있다. 따라서 R-R 방식을 사용하면 두 식품의 소비량으로 볼 때 방사성 Sr 침적에 따른 내부피폭선량을 과소평가할 가능성이 크고 또한 이러한 위험성은 가동기간이 길거나 평가년도의 침적률이 예년에 비해 낮아수록 커진다는 점에 유의해야 할 것이다. 한편으로  $^{90}\text{Sr}$ 의 토양-작물체 전이계수에 대한 국내 특성치가 과대평가 되었을 가능성에 대해서도 면밀히 조사해 볼 필요가 있다.

원자력 시설의 정상가동시 농산물내 방사성 핵종의 농도 평가는 모델을 이용한 계산에 의존할 수밖에 없다. 모델을 이용한 평가의 신뢰성을 확보하기 위해서는 모델이 갖고 있는 과대평가 및 과소평가의 요인을 모델 전반에 대한 검토를 통

하여 제거 또는 수정해야 한다. 따라서 가동전 평가에 적합한 구조로 되어 있는 Reg. Guide 1.109 방식을 가동중 평가에까지 계속 사용해도 좋은 것인지 검토하고 아울러 본 연구에서 제시한 것과 같은 보다 현실적인 평가방법의 도입에 대해서 연구할 필요가 있다고 본다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. J. E. Till and H. R. Meyer (Eds.), *Radiological Assessment*, NUREG/CR-3332, ORNL-5968, U.S. Nuclear Regulatory Commission(1983)
2. 최용호, 정규희, 김진규, 이정호, "FOOD III 코드를 이용한 섭취경로 내부피폭 비교해석," 대한방사선방어학회지, 13(2), 41-51(1988)
3. U. S. Nuclear Regulatory Commission, *Regulatory Guide 1.109 : Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Appendix I*, Revision 1(1977)
4. International Atomic Energy Agency, *Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases*, Safety Series No. 57, IAEA, Vienna(1982)
5. 장시영, 김창규, "주민피폭선량 평가지침(안) 및 검증코드(INDAC) 개발," 대한방사선방어학회 2000년도 춘계 학술발표회 및 심포지움 논문집, pp. 176-181, 2000. 4. 21, 경희대학교 수원캠퍼스(2000)
6. 정양근, 이갑복, 김위수, 홍광표, 서장수, "신원전주변 주민선량 평가지침 및 프로그램," 대한방사선방어학회 2000년도 추계 학술발표회 논문집, pp. 241-246, 2000. 11. 3-4, 조선대학교(2000)
7. 황원태, 한문희, 김은한, 서경석, 최영길, 대덕 원자력시설의 운영중 방사선 환경영향평가 (2001년보), KAERI/CR-126/2002, 한국원자력연구소(2002)



8. 이정호 등, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부 피폭선량 평가 코드 개발, KAERI/RR-998/90, 한국원자력연구소(1991)
9. 최용호 등, 방사선 환경 방호기술 개발 : 육상 생태계 사고영향 평가기술 개발, KAERI/RR-2035/99, 한국원자력연구소(2000)
10. 최용호 등, 한국인의 섭취 피폭선량 평가를 위한 농작물 핵종 이동인자, KAERI/TR-1993/2001, 한국원자력연구소(2001)
11. R. Zach, *FOOD II : An Interactive Code for Calculating Concentrations of Radionuclides in Food Products*, AECL-6305, Whiteshell Nuclear Research laboratory, Atomic Energy Canada Limited(1978)
12. 이창우, 최용호, 천기정, 이정호, "육상식품 섭취경로에 의한 선량계산 모델에서 파라메타의 불확실성 및 민감도 분석," 대한방사선방어학회지, 16(2), 67-74(1991)
13. Y. H. Choi, K. M. Lim, D. Yu, H. G. Park, Y. G. Choi and C. M. Lee, "Transfer pathways of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{103}\text{Ru}$  and  $^{134}\text{Cs}$  in rice and radish plants directly contaminated at different growth stages," *Annals of Nuclear Energy*, 29, 429-446 (2002)
14. H. Müller and G. Pröhl, "ECOSYS-87: a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents," *Health Physics*, 64, 232-252(1993)
15. F. O. Hoffman and C. F. Baes III (Eds.), *A Statistical Analysis of Selected Parameters for Predicting Food Chain Transport and Internal Dose of Radionuclides*, NUREG/CR-1004, ORNL/NUREG/TM-282, Oak Ridge National Laboratory(1979)
16. H. M. Squire and L. J. Middleton, "Behavior of  $^{137}\text{Cs}$  in soils and pastures : a long-term experiment," *Radiation Botany*, 6, 413-425 (1966)
17. H. Noordijk, K. E. van Bergeijk, J. Lembrechts and M. J. Frissel, "Impact of ageing and weather conditions on soil-to-plant transfer of radiocesium and radiostrontium," *J. of Environmental Radioactivity*, 15, 277-286 (1992)
18. N. A. Beresford, B. J. Howard and C. L. Barnett, "The uptake by vegetation of Chernobyl and aged radiocaesium in upland West Cumbria," *J. Environmental Radioactivity*, 16, 181-195 (1992)
19. 최용호, 임광묵, 박효국, 이원운, 이창우, " $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ 의 엽면처리 시기에 따른 배추의 방사능 오염," 대한방사선방어학회지, 23, 219-227(1998)
20. R. P. Kinnersley, A. J. H. Goddard, M. J. Minski and G. Shaw, "Interception of caesium-contaminated rain by vegetation," *Atmospheric Environment*, 31, 1137-1145 (1997)
21. 황원태, 김은한, 한문희, 최용호, 이한수, 이창우, "원자력 사고 중 강우에 의한 음식물 오염을 고려한 역동학적 섭취경로 모델 개선," 대한방사선방어학회지, 27, 21-26(2002)
22. 농림부, 농림수산통계연보, 31000-51023-26-01(1996)
23. 이은용 등, 4정 수도작, 향문사(1996)
24. 표현구 등, 채소원예각론, 향문사(1996)
25. 양산시, 제 38회/2000 통계연보(2000)
26. 최용호, 조재성, 이창우, 홍광희, 이정호, "벼 재배 기간중 침적시기에 따른  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 뿌리흡수," 대한방사선방어학회지, 20, 255-263(1995)
27. Y. H. Choi, C. W. Lee, S. R. Kim, J. H. Lee and J. S. Jo, "Effect of application time of radionuclides on their root uptake by Chinese Cabbage and radish," *J. of Environmental Radioactivity*, 39(2), 183-198 (1998)
28. 조성진, 박천서, 엄대익 등, 3정 토양학, 향문사(1997)
29. C. F. Baes III, R. D. Sharp, A. L. Sjoreen and R. W. Shor, *A Review and Analysis of Parameters for Assessing the Transport of Environmentally Released Radionuclides through Agriculture*, Report ORNL-5786, Oak Ridge National Laboratory(1984)
30. 최용호, 조재성, 이창우, 이명호, 김상복, 홍광희, 최근식, 이정호, "주요 작물의 생육중에 침적한  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 지하이동," 대한방사선방어학회지, 21, 51-58(1996)
31. D. C. Adriano, K. W. McLeod and T. G. Ciravolo, "Long-term root uptake of radiocesium by several crops," *J. Plant Nutrition*, 7, 1415-1432(1984)

32. 이정호 등, 방사선 환경안전 연구 : 육상 방사선 환경생태 해석기술 개발, KAERI/RR-1741/96, 한국원자력연구소(1997)
33. A. Tsumura, M. Komamura and H. Kobayashi, "Behavior of radioactive Sr and Cs in soils and soil-plant system," in: *Report of National Institute of Agricultural Science - B*, No 36, pp. 57-113 (in Japanese)(1984)
34. H. Kobayashi, M. Komamura and A. Tsumura, "The behavior of  $^{90}\text{Sr}$  from environment to cereal crops by analyzing the radioactivity survey data in Japan," in: *Report of National Institute of Agricultural Science - B*, No 36, pp. 115-170 (in Japanese)(1984)
35. Y. C. Ng, C. S. Colsher and S. E. Thompson, "Transfer factors for assessing the dose from radionuclides in agricultural products," in: *Biological Implication of Radionuclides Released from Nuclear Industries, Proc. Symposium*, Vienna, Mar. 26-30, 1979, vol. 2, pp. 295-318(1979)
36. D. A. Baker, G. R. Hoenes and J. K. Soldat, *FOOD : An Interactive Code to Calculate Internal Radiation Doses from Contaminated Food Products*, USERDA Report BNWL-SA-5523, Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA.(1976)
37. International Atomic Energy Agency, *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna(1996)
38. Y. H. Choi, C. W. Lee, J. K. Kim, M. H. Lee and J. H. Lee, "Improvement on the KFOOD code for more realistic assessment of the annual food chain radiation dose due to operating nuclear facilities," *J. Kor. Nucl. Soc.*, 25(3), 437-446(1993)