

# Predictions of $^{90}\text{Sr}$ and $^{137}\text{Cs}$ Concentrations in Rice Seeds and Chinese Cabbage after a Nuclear Accident

Yong-Ho Choi · Kwang-Muk Lim · Won-Tae Hwang ·

Han-Soo Lee and Chang-Woo Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

## 원자력 사고 후 쌀알과 배추내 $^{90}\text{Sr}$ 및 $^{137}\text{Cs}$ 농도 예측

최용호 · 임광목 · 황원태 · 이한수 · 이창우

한국원자력연구소

(2001년 7월 18일 접수, 2002년 9월 18일 채택)

**Abstract** - A method of more realistically predicting radionuclide concentrations in crop plants varying with time after a nuclear accident was established to estimate 50 years' concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in polished rice seeds and Chinese cabbage for unit dry deposition. After non-growing season accidents, concentrations of both nuclides decreased gradually with time and  $^{90}\text{Sr}$  concentrations were higher than those of  $^{137}\text{Cs}$  throughout the whole period. Radionuclide concentrations in the 1st year after growing season accidents were on the whole higher than those after non-growing season accidents by factors of up to 30 for  $^{90}\text{Sr}$  and up to 1,000 for  $^{137}\text{Cs}$ . In polished rice seeds, the 50 years-integrated concentration was higher for  $^{90}\text{Sr}$  than for  $^{137}\text{Cs}$  after non-growing season accidents, whereas the opposite was true after growing season accidents. In Chinese cabbage, however, it was higher for  $^{90}\text{Sr}$  than for  $^{137}\text{Cs}$  after both types of the accident. Generally speaking, the dominant pathway for the integrated concentration after the growing season accident was root uptake for  $^{90}\text{Sr}$  and direct plant contamination for  $^{137}\text{Cs}$ . The effect of resuspension was negligible. Based on the predicted results, the direction of planning countermeasures was suggested for various accident conditions.

**Key words** : nuclear accident, polished rice seeds, Chinese cabbage,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , concentration, prediction, countermeasure

**요약** - 원자력 사고 후 시간경과에 따른 작물체내 핵종 농도를 보다 현실적으로 예측할 수 있는 방법을 수립하고 단위 침적에 대하여 백미와 배추내  $^{90}\text{Sr}$  및  $^{137}\text{Cs}$ 의 50년간 농도를 예측하였다. 비생육기 사고의 경우 농도는 두 핵종 모두 시간경과에 따라 서서히 감소하였고 50년 내내  $^{90}\text{Sr}$ 이  $^{137}\text{Cs}$ 보다 높았다. 생육기 사고의 경우 처음 1년간 농도는 비생육기 사고에 비해 대체로  $^{90}\text{Sr}$ 은 최고 30배,  $^{137}\text{Cs}$ 은 최고 1,000배 정도까지 높았다. 50년간의 누적농도는 백미에서는 비생육기 사고의 경우  $^{90}\text{Sr}$ 이, 생육기 사고의 경우  $^{137}\text{Cs}$ 이 더 높았으나 배추에서는 어느 경우나  $^{90}\text{Sr}$ 이 더 높았다. 생육기 사고시 50년간의 누적농도에 대한 지배적 경로는 대체로  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우 뿌리흡수,  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 작물체 직접오염이었다. 재부유의 영향은 무시할 수 있을 정도였다. 예측 결과에 입각하여 사고 조건별로 대책의 방향을 제시하였다

중심어 : 원자력 사고, 백미, 배추,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , 농도, 예측, 대책

## 서 론

원자력 사고로 방사성 물질이 대기중으로 방출

되면 일부는 지상으로 침적하여 농경지와 농작물을 오염시키고 섭취경로를 따라 인체에 흡수된다. 이와 같은 지상 침적의 영향은 년중 시기에 따라

재배 작물의 종류나 작물체의 생육 상태가 다르기 때문에 사고의 발생 시기에 크게 좌우된다. 한편, 농경지에 침적한 방사성 핵종은 방사능 붕괴나 지하 이동에 의해 지표층에서 사라질 때까지 계속하여 작물체에 흡수되므로 사고발생 후에는 앞으로 다년간의 재배를 통하여 생산될 농산물내 핵종 농도를 예측해야 한다. 이러한 점에서  $^{90}\text{Sr}$  과  $^{137}\text{Cs}$ 은 원자력발전소의 사고시 지상 침적량이 비교적 많고 반감기도 긴 편이어서 섭취경로에 있어서 매우 중요한 핵종이다[1-3].

위에서 본 바와 같이 사고시에는 사고 발생 시기를 고려하여 농산물내 핵종 농도의 장기적인 변화를 예측해야 하므로 급성, 1회 방출을 가정한 동적모델을 적용해야 한다[1,2,4]. 현존하는 대부분의 동적 섭취경로 모델[1,2,5,6]은 각 구획 (compartment) 즉, 작물체 전체, 작물체 가식부위 및 토양 간 물질 이동에 관한 연립 1차 미분 방정식을 수립하여 해를 구하는 방식으로 되어 있다. 이 방식의 문제점은 크게 다음의 두 가지로 볼 수 있다. 첫째로 미분방정식에 부합하는 실험 데이터가 부족하여 이론적으로 완벽해 보이는 모델의 현실성 추구에 어려움이 많다는 것과 둘째로 구획간 이동속도상수에 대하여 전생육기간에 걸쳐 단일한 값을 사용함으로써 작물의 발육단계

에 따른 생리활동의 변화가 고려되어 있지 않다는 것이다. 이에 반해 Müller와 Pröhl[4]은 핵종의 침적시기별 가식부위 전류계수(translocation factor)와 같은 준평형상태에서의 이동계수에 관한 실험 데이터를 이용하여 각 구획 및 경로 별로 사고 발생시기 및 사고후 시간경과에 따른 농도 예측식을 수립, ECOSYS-87 모델에 이용하고 있다. ECOSYS-87 모델은 국제적으로 타당성을 인정받아 유럽의 사고 영향평가 및 대응 체제인 RODOS[7]의 모듈로 채택되어 있다.

본 연구에서도 우리나라에서 그 동안 수행된 사고시 농작물 오염경로 해석실험 결과[3,8-13]를 활용하여 ECOSYS-87 모델과 유사한 개념의 농도 예측법을 수립하였다. 유럽과 우리나라는 자연 및 사회 환경특성이 크게 다르므로 가능한 한 우리나라의 환경특성을 반영한 국내 고유의 오염인자 값을 사용하였다. 이렇게 수립된 예측법에 따라 사고 발생 시기별로 한국인의 주요 식품인 쌀알과 배추내  $^{90}\text{Sr}$  및  $^{137}\text{Cs}$  농도의 사고후 50 년에 걸친 변화를 예측하고 작물간, 핵종간 및 오염경로간 차이를 비교, 분석하였다. 또한 이 분석결과에 입각하여 사고 조건별로 대책수립의 방향을 제시하였다.

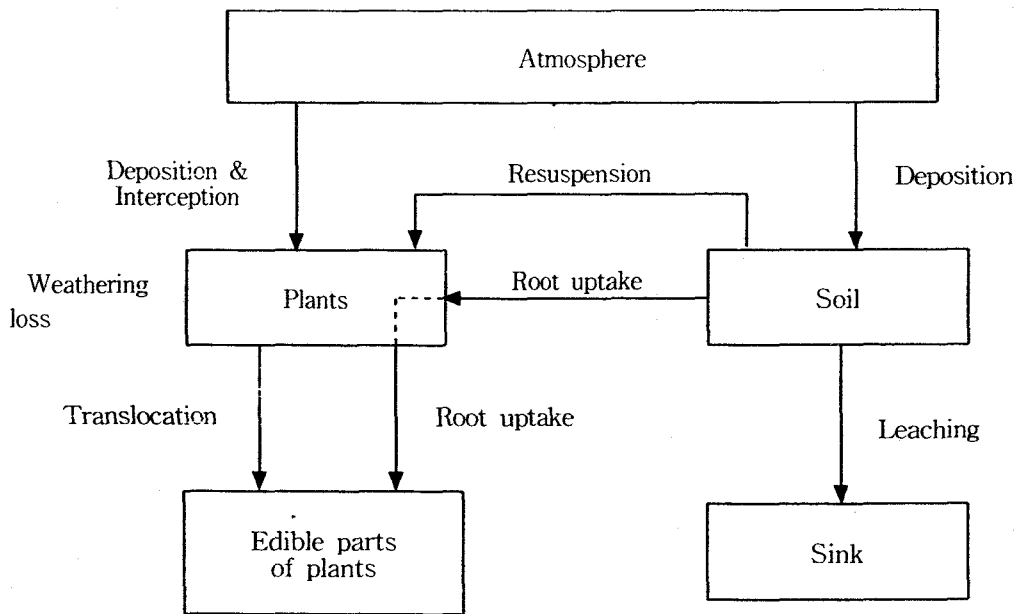


Fig. 1. Transfer of radionuclides from the atmosphere to crop plants.

### 핵종 농도 예측

#### 작물체 오염경로

원자력 사고로 인하여 대기중으로 방출된 방사성 핵종으로부터 농작물이 오염되는 경로를 모식적으로 나타내면 그림 1과 같다.

작물의 생육기에 핵종이 침적(deposition)하면 작물체는 핵종의 작물체 차단(interception)에 따른 직접오염과 토양에 침적한 핵종의 뿌리흡수(root uptake) 및 재부유(resuspension)에 의해서 오염된다. 침적이 비생육기에 일어나거나 침적후 2차 재배부터는 토양중 핵종의 뿌리흡수 및 재부유에 의해서만 작물체가 오염된다. 벼와 배추의 생육기간은 각각 5월 25일~10월 15일 및 8월 20일~11월 20일로 하고 사고 발생일은 4월 30일, 6월 30일, 8월 30일, 10월 30일의 네 가지로 가상하였다.

#### 침적량 예측

작물체 침적량은 다음과 같이 정의되는 차단계수( $f$ , interception factor)로 구한다.

$$f = \frac{A_p}{A} \quad (1)$$

여기서,

$A_p$ : 단위면적당 작물체 침적량 ( $Bq\ m^{-2}$ )

$A$ : 단위면적당 지상 총침적량 ( $Bq\ m^{-2}$ )

Chamberlain[14]은 차단계수를 작물체 생육밀도의 함수로 보고 건침적시 목초지에 대하여 다음과 같은 식을 제안한 바 있다.

$$f = 1 - \exp(-\mu B_d) \quad (2)$$

여기서,

$\mu$ : 보유계수 (retention factor,  $m^2\ kg^{-1}$ -dry) (=2.3~3.3)

$B_d$ : 건생육밀도 ( $kg$ -dry  $m^{-2}$ )

이 식은 특히 광엽성 작물 등에는 잘 맞지 않는다는 지적[15]이 있다. 본 연구에서는 Chamberlain 식에 의한 차단계수 예측 결과와 우리나라에서 수행한 작물별 실험 결과 간의 비교(그림 2)를 통하여 다음과 같이 수정, 보완하였다. 즉, 작물별  $\mu$  값으로 목초에서와는 달리 벼의 경우 건조중

기준으로 5, 배추의 경우 생체중 기준으로 1.5를 적용하였고 이렇게 계산한  $f$  값이 벼의 경우 0.9, 배추의 경우 0.85를 초과하면 각각 0.9 및 0.85로 하였다. 이 값들은 실험에서 측정된 최고치와 거의 같은 값이다.

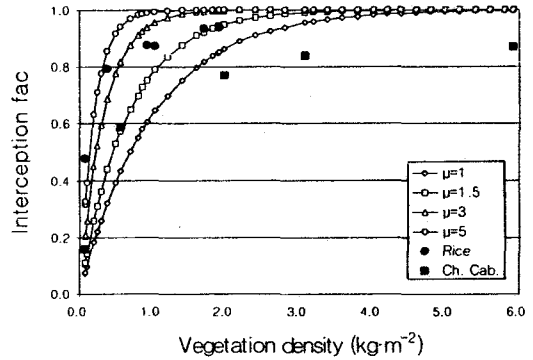


Fig. 2. Comparisons of measured and model-predicted interception factors (● & ■ : measured against dry and fresh vegetation density, respectively).

위와 같은 차단계수를 이용하여 다음과 같이 초기 작물체 침적량을 구한다. 이때 작물체의 전체 생육기간에 비하여 원자력 사고후 주 침적기간은 통상적으로 매우 짧으므로 침적은 일시적으로 일어나는 것으로 가정한다.

$$A_p = f A \quad (3)$$

따라서 지표면 침적량( $A_s$ ,  $Bq\ m^{-2}$ )은 다음과 같다.

$$A_s = A - A_p \text{ 또는 } (1 - f) A \quad (4)$$

방사성 핵종이 작물의 비생육기에 침적하면  $A_p = 0$  이므로  $A_s = A$  가 된다.

#### 작물체 성장모델

생육시기에 따른 작물체 생물량은 다음과 같은 성장식[2]으로 예측할 수 있다.

$$B(t_g) = \frac{B_{\max}}{1 + 3^{(a-rt_g)}} \quad (5)$$

여기서,

Table 1. Parameter values used in the plant growth model

Plant type	Parameter value			
	$B_{max}$ (kg · m <sup>-2</sup> ) <sup>a</sup>	$B_0$ (kg · m <sup>-2</sup> ) <sup>b</sup>	$t_{max}$ (d)	$r$ (d <sup>-1</sup> )
Rice WAG	1.3	0.01	143	0.0780
Rice US	0.5	0.01	61	0.2545
Chinese cabbage	8.0	0.01	92	0.1410

WAG : Whole above-ground part

US : Unpolished seeds

<sup>a, b</sup> on the basis of the dry weight and fresh weight for rice and Chinese cabbage, respectively

$t_g$  : 파종 또는 이식(쌀알의 경우 출수)후 경과기간 (d)

(  $0 \leq t_g \leq t_{max}$ ,  $t_{max}$  : 총생육기간)

$B_{max}$  : 최대 생물량 (kg m<sup>-2</sup>)

$a$  : 적분상수

$$a = \ln \left[ \frac{(B_{max} - B_0)}{B_0} \right]$$

$B_0$  : 초기생물량 (kg m<sup>-2</sup>)

$r$  : 생장율 상수 (d<sup>-1</sup>)

본 연구에서는 기 조사된 벼와 배추의 생장곡선[3,13]을 참고하여 식 (5)의 파라메타들에 대하여 표 1과 같은 값을 적용하였다. 이 때 최대 생물량 ( $B_{max}$ )은  $t = t_{max}$  일 때, 즉 통상적 수확기 때의 단위면적당 생물량[16]으로 한다.

**단기 농도 예측**

**토양중 농도**

경작지 토양은 깊이에 따라 다음과 같은 세 구획으로 구분할 수 있다. 즉,

0~1 cm : 표면 토양으로서 재부유가 일어나는 층 [4,6]

0~15 cm : 흙갈이의 대상으로 뿌리흡수가 이루어지는 층

15 cm 이하 : 뿌리흡수가 불가능한 토양 sink

사고가 흙갈이 전에 발생하면 지표에 침적한 핵종은 작물을 파종 또는 이식하기 전에 흙갈이를 통하여 일정 깊이의 토양과 섞이게 된다. 이 때 토양과의 혼합 깊이는 우리나라의 경우 대체로 15 cm 내외인 것으로 보고 있다[17,18]. 침적

후 흙갈이 전까지 핵종이 지하로 이동하면서 깊이에 따른 농도분포를 나타낸다. 그러나 그 이동속도는 일반적으로 매우 느리므로[10] 이 기간 동안 지하 15 cm 밑으로 내려간 방사성 핵종의 양은 무시해도 좋을 것으로 판단된다. 따라서 비생육기에 사고가 발생한 경우 흙갈이 이후 시간경과에 따른 근권 토양(0~15 cm 층) 내 핵종 농도는 다음과 같이 예측된다(그림 3).

$$X_s(t) = \left[ \frac{A \exp(-k_r t_1)}{D G} \right] \exp[-(k_l + k_r) t_2] \tag{6}$$

여기서,

$X_s(t)$  : 사고후  $t$  일 경과시 토양중 핵종 농도 (Bq kg<sup>-1</sup>-dry) ( $t = t_1 + t_2$ )

$t_1$  : 사고에서 흙갈이 즉 생육개시까지의 기간 (d)

$t_2$  : 생육개시 이후 경과기간 (d)

$D$  : 근권 토양의 깊이 (=0.15 m)

$G$  : 토양의 밀도 (=1,200 kg m<sup>-3</sup>)

$k_l$  : 근권 토양 핵종의 용탈상수 (d<sup>-1</sup>)

$k_r$  : 핵종의 붕괴상수 (d<sup>-1</sup>)

$k_l$  에 대해서는 다음과 같은 식이 제안되어 있다[4,19].

$$k_l = \frac{P_w}{\left[ D \left( 1 + \frac{K_d G}{W} \right) \right]} \tag{7}$$

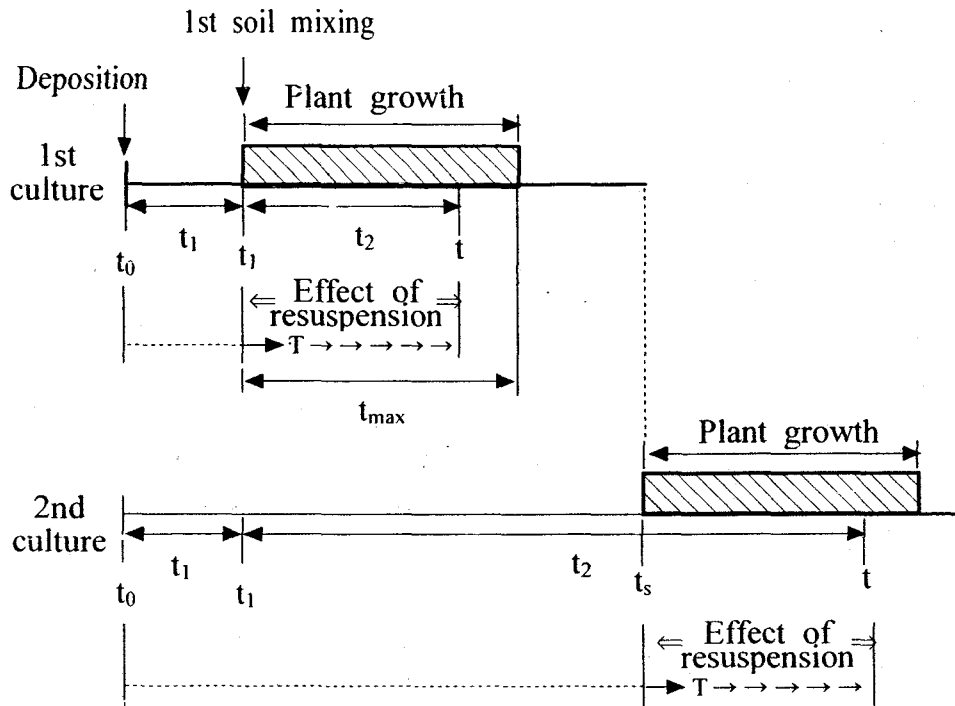


Fig. 3. Concepts of different time symbols used for the non-growing season deposition.

Table 2. Parameter values used for determining leaching rate constants

$P_w$ (cm·d <sup>-1</sup> )	D (cm)	G (g·cm <sup>-3</sup> )	W (ml·cm <sup>-3</sup> ) <sup>a</sup>	$K_d$ (ml·g <sup>-1</sup> )	
				Cs	Sr
0.55	15	1.2	0.2, 0.3	1000	100

<sup>a</sup> 0.2 for upper-land fields and 0.3 for paddy fields

Table 3. <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs leaching rate constants

Type of field	Leaching rate constant (k <sub>l</sub> , d <sup>-1</sup> )	
	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
Upper land	6.1 × 10 <sup>-5</sup>	6.1 × 10 <sup>-6</sup>
Paddy	9.1 × 10 <sup>-5</sup>	9.2 × 10 <sup>-6</sup>

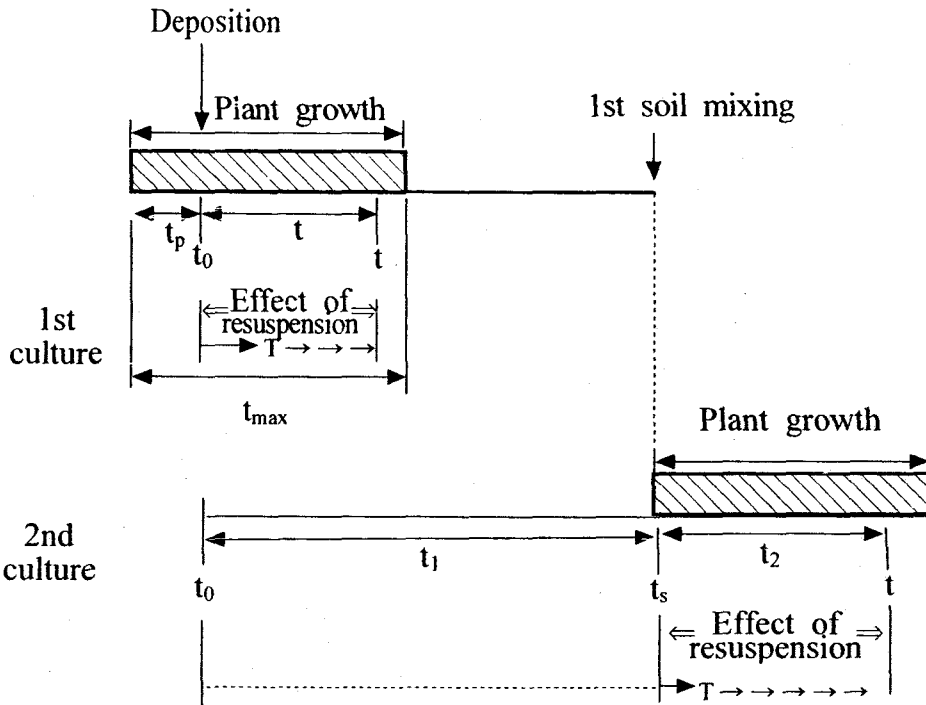


Fig. 4. Concepts of different time symbols used for the growing season deposition.

Table 4. Mass-based soil-to-plant transfer factors recommended for generic use in Korea

Plant type	Transfer factor (TF <sub>mix</sub> ) <sup>a</sup>	
	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
Rice seeds <sup>b</sup>	1.0 × 10 <sup>-1</sup>	2.8 × 10 <sup>-2</sup>
Chinese cabbage	2.0 × 10 <sup>0</sup>	1.1 × 10 <sup>-1</sup>

<sup>a</sup> Bq kg<sup>-1</sup>-plant per Bq kg<sup>-1</sup>-dry soil on the basis of dry-weight concentration for rice and fresh-weight concentration for Chinese cabbage

<sup>b</sup> Unpolished.

여기서,  
 $P_w$ : 토양수의 침투속도 (cm d<sup>-1</sup>)  
 $K_d$ : 핵종 분배계수 (ml g<sup>-1</sup>)  
 $W$ : 토양의 수분함량 (ml cm<sup>3</sup>)

식 (7)의 각 인자들에 대해서는 표 2와 같은 값 [4,17,18]을 사용하여 구한 용탈상수  $k_f$ 은 표 3과 같다.

방사성 핵종이 작물의 생육 도중에 지표에 침적하면 단기적으로는 흩날아가 없기 때문에 전량이 지표 부근(0~1 cm 층)에 분포하는 것으로 보고 다음과 같이 면적 기준으로 토양 오염도를

평가한다(그림 4).

$$X_{sa}(t) = A_s \exp(-k_r t) \quad (8)$$

여기서,

$X_{sa}(t)$  : 사고후  $t$  일 경과시 단위면적당 핵종 농도 (Bq m<sup>-2</sup>)

**경로별 작물체내 농도**

**뿌리흡수 농도**

사고가 작물의 비생육기에 발생하는 경우 작물체 부위별 뿌리흡수 농도의 시간 경과에 따른 변화는 작물의 생육전에 토양과 방사성 핵종을 혼합한 후 통상적 수확기에 조사한 토양-작물체 핵종 전이계수 ( $TF_{mix}$ ,  $TF$  : transfer factor)를 이용하여 다음과 같이 예측할 수 있다(그림 3).

$$X_{pr}(t) = \frac{X_s(t) TF_{mix} B_{max} BF}{B(t)} \quad (9)$$

여기서,

$X_{pr}(t)$  : 사고후  $t$  일 경과시 작물체내 뿌리흡수 농도 (Bq kg<sup>-1</sup>)

$TF_{mix}$  : 토양-작물체 핵종 전이계수 (Bq kg<sup>-1</sup>-plant per Bq kg<sup>-1</sup>-dry soil)

$BF$  : 흡수기간 동안의 생물량 증가분에 의한 핵종 흡수량 보정계수

$$BF = \frac{B(t) - B_0}{B_{max} - B_0}$$

$B(t)$  : 사고후  $t$  일, 즉 파종 또는 이식후  $t_2$  일 경과시 작물체 생물량 (kg m<sup>2</sup>)

식 (9)는 식 (6)에서 보는 바와 같이 방사성 핵종의 근권 토양중 농도는 방사능 붕괴의 영향을 제외하면 작물의 재배기간 동안 거의 변하지 않는다는 것과 작물체에 있어서 물질 이동량(식 (9)에서는 뿌리흡수량)은 물질 이동의 시점이 같다면 이동기간 동안의 생물량 증가에 비례한다는 가정을 전제로 한다.

이때 초기생물량  $B_0$  를 0으로 보면  $BF$  는  $B(t)/B_{max}$  이므로 식 (9)는 다음과 같이 된다.

$$X_{pr}(t) = X_s(t) TF_{mix} \quad (10)$$

$TF_{mix}$  값으로는 이 등[8]이 우리나라의 대표치로 제안한 값에 근거하여 표 4와 같은 값을 사용하였다.

사고가 생육기에 일어나면 앞에서 설명한 바와 같이 지표에 침적한 핵종은 단기적으로는 일정 깊이로 섞이지 않고 지표 부근에만 존재하므로 지표면 침적량 기준의 토양-작물체 전이계수 ( $TF_{area}$ )를 이용하여 다음과 같이 뿌리흡수 농도를 평가한다(그림 4).

$$X_{pr}(t) = \frac{X_{sa}(t) TF_{area}(t_0) B_{max} BF(t_0, t)}{B(t)} \quad (11)$$

여기서,

$TF_{area}(t_0)$  :  $t_0$  시, 즉 파종 또는 이식후  $t_p$  일 경과시 지표에 침적된 핵종의 통상적 수확기 때의 토양-작물체 전이계수 (m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>-plant)

$BF(t_0, t)$  : 사고( $t_0$ )에서 수확( $t$ )까지 생물량 증가분에 의한 핵종 흡수량 보정계수

$$BF(t_0, t) = \frac{B(t) - B(t_0)}{B_{max} - B(t_0)}$$

$B(t_0)$  : 사고시 작물체 생물량 (kg m<sup>2</sup>)

$B(t)$  : 사고후  $t$  일, 즉 파종 또는 이식후 ( $t_p + t$ )일 경과시 작물체 생물량 (kg m<sup>2</sup>)

통상적인 수확기에 작물을 수확하면  $B(t)$  는  $B_{max}$  이고 따라서  $BF(t_0, t)$  는 1이 되므로  $X_{pr}(t)$  는 단순히  $X_{sa}(t)$  와  $TF_{area}(t_0)$  의 곱이 된다. 최 등[9,11]이 pH 5.2의 사질양토에서 침적시기별로 측정된  $TF_{area}$  값과 이것들로부터 직선적 내·외삽법으로 추정된 가상의 침적일들에 대한 값은 표 5와 같다.

**작물체 직접오염 농도**

사고가 작물의 생육기에 발생하여 지상부 전체가 오염되었을 경우 (direct deposition on plants) 배추와 같이 지상부 전체가 가식의 대상인 작물체내 핵종 농도는 다음 식으로 평가한다(그림 4).

$$X_{ada}(t) = \frac{A_p \exp[-(k_w + k_r)t]}{B(t)} \quad (12)$$

Table 5. Area-based soil-to-plant transfer factors depending on deposition dates during plant growth

Plant type	Date of deposition	Transfer factor (TF <sub>area</sub> , m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	
		<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
Rice seeds	June 9	3.9 × 10 <sup>-4</sup>	1.4 × 10 <sup>-4</sup>
	June 30 <sup>b</sup>	4.5 × 10 <sup>-4</sup>	1.9 × 10 <sup>-4</sup>
	July 6	4.7 × 10 <sup>-4</sup>	2.0 × 10 <sup>-4</sup>
	Aug. 2	5.5 × 10 <sup>-4</sup>	7.0 × 10 <sup>-4</sup>
	Aug. 24	7.6 × 10 <sup>-4</sup>	5.4 × 10 <sup>-4</sup>
	Aug. 30 <sup>b</sup>	5.9 × 10 <sup>-4</sup>	4.1 × 10 <sup>-4</sup>
	Sep. 16	1.1 × 10 <sup>-4</sup>	5.2 × 10 <sup>-5</sup>
Chinese cabbage	Aug. 30 <sup>b</sup>	4.8 × 10 <sup>-3</sup>	2.7 × 10 <sup>-5</sup>
	Sep. 9	4.3 × 10 <sup>-3</sup>	3.3 × 10 <sup>-5</sup>
	Sep. 23	3.6 × 10 <sup>-3</sup>	4.1 × 10 <sup>-5</sup>
	Oct. 8	2.7 × 10 <sup>-3</sup>	3.5 × 10 <sup>-5</sup>
	Oct. 22	2.2 × 10 <sup>-3</sup>	6.2 × 10 <sup>-5</sup>
	Oct. 30 <sup>b</sup>	1.9 × 10 <sup>-3</sup>	7.7 × 10 <sup>-5</sup>

<sup>a</sup> on the basis of dry-weight concentration for rice and fresh-weight concentration for Chinese cabbage

<sup>b</sup> Transfer factors were estimated by linear interpolation or extrapolation.

여기서,  
 $X_{pda}(t)$  : 사고후  $t$  일 경과시 직접오염 농도 (Bq kg<sup>-1</sup>)  
 $k_w$  : 환경제거상수 (d<sup>-1</sup>)

환경제거상수 ( $k_w$ , weathering or field loss rate constant)로는 각종 실험 결과[13]를 참조하여 배추에 대해서 표 6과 같은 값을 사용하였다. ECOSYS-87 모델[4]에서는 경과 시간에 관계없이 방사성 Sr과 Cs의 양자에 대해서 똑같이  $2.8 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}$ 을 사용하고 있다. 상기 실험 결과들로 볼 때 본 연구에서처럼 핵종이나 경과 시간에 따

라 다른 값을 사용하는 것이 보다 적절할 것으로 판단된다.

쌀알과 같은 작물체 특정부위에 대해서는 다음 식으로 직접오염 농도를 평가한다(그림 4).

$$X_{pab}(t) = \frac{A_p \text{ TLF}(t_0) \text{ BF}(t_0, t) \exp(-k_r t)}{B(t)} \quad (13)$$

여기서,  
 $X_{pab}(t)$  : 사고후  $t$  일 경과시 특정부위내 농도 (Bq kg<sup>-1</sup>)



Table 6. Weathering loss rate constants of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs in Chinese cabbage

Days after deposition	Weathering loss rate constant (d <sup>-1</sup> )	
	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
1 ~ 28	5.0 × 10 <sup>-2</sup>	3.5 × 10 <sup>-2</sup>
28 <	2.9 × 10 <sup>-2</sup>	2.3 × 10 <sup>-2</sup>

Table 7. Translocation factors for <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs in rice seeds depending on deposition dates during rice growth

Date of deposition	Translocation factor (TLF)	
	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
June 22	2.4 × 10 <sup>-4</sup>	1.2 × 10 <sup>-2</sup>
June 30 <sup>a</sup>	2.3 × 10 <sup>-4</sup>	1.8 × 10 <sup>-2</sup>
July 20	2.1 × 10 <sup>-4</sup>	3.4 × 10 <sup>-2</sup>
Aug. 11	2.0 × 10 <sup>-4</sup>	4.3 × 10 <sup>-2</sup>
Aug. 24	5.6 × 10 <sup>-3</sup>	8.4 × 10 <sup>-2</sup>
Aug. 30 <sup>a</sup>	8.8 × 10 <sup>-3</sup>	9.5 × 10 <sup>-2</sup>
Sep. 7	1.3 × 10 <sup>-2</sup>	1.1 × 10 <sup>-1</sup>
Sep. 25	9.7 × 10 <sup>-3</sup>	2.2 × 10 <sup>-2</sup>

<sup>a</sup> Translocation factors were estimated by linear interpolation.

*TLF(t<sub>0</sub>)* : t<sub>0</sub> 시, 즉 파종 또는 이식후 t<sub>b</sub> 일 경과시 침적한 핵종의 통상적 수확기 때의 특정 부위 전류계수

*BF(t<sub>0</sub>, t)* : 생물량 증가분에 의한 핵종 전류량 보정계수 (식 (11) 참조)

최 등[3]이 쌀알(현미)에 있어서 벼의 생육중 침적시기별로 조사한 <sup>90</sup>Sr과 <sup>137</sup>Cs의 *TLF* 값과 이에 입각하여 직선적 내삽법으로 구한 값은 표 7과 같다.

상기의 식 (9), (10), (11) 및 (13)을 이용하면 통상적 수확기 이전에 수확하는 쌀알 내 핵종 농도도 예측할 수 있다. 이와 같은 방식은 사고대책

으로서 조기수확을 고려할 때 필요한 것이나 ECOSYS-87 모델에서는 결여되어 있다.

### 재부유 농도

재부유에 의한 작물체 오염은 재부유한 방사의 작물체 표면 침적에 기인한다. 이러한 과정은 작물을 수확할 때까지 계속하여 일어난다. 논에서는 관개수로 인해 재부유가 일어나지 않을 것이므로 배추에 대해서만 재부유 농도를 평가한다.

배추의 비생육기 사고시 재부유 농도는 식 (14)와 같이 예측한다(그림 3).

$$X_{ps}(t) = \sum_{T=0}^{t-t_1} \left( \frac{0.01 X_s(T) G RF V_d L f(T) \exp[-(k_w+k_p)(t-T)]}{B(t)} \right) \quad (14)$$

여기서,

$X_{ps}(t)$  : 사고후  $t$  일 경과시 재부유 농도 (Bq  $kg^{-1}$ ) ( $t_1 \leq t \leq t_1 + t_{max}$ )

0.01 : (1 cm = 0.01 m)

$X_s(T)$  : 사고후  $T$  일 경과시 토양중 농도 (Bq  $kg^{-1}$ )

$G$  : 토양 밀도 (=1,200  $kg m^{-3}$ )

$RF$  : 재부유계수 (=2.5×10<sup>-8</sup>  $m^{-1}$ )

$V_d$  : 건침적속도 (=173  $m d^{-1}$ )

$L$  : 재부유 핵종의 단위 침적기간 (1 d)

$f(T)$  : 사고후  $T$  일, 즉 이식 또는 파종후 ( $T-t_1$ )일 경과시 차단계수

$B(t)$  : 사고후  $t$  일 경과시, 즉 이식 또는 파종후 ( $t-t_1$ )일 경과시 작물체 생물량 ( $kg m^{-2}$ )

생육기 사고의 경우에는 식 (15)로 예측한다(그림 4).

$$X_{ps}(t) = \sum_{T=0}^{t-t_p} \left( \frac{X_{sa}(T) RF V_d L f(T) \exp[-(k_w+k_p)(t-T)]}{B(t)} \right) \quad (15)$$

여기서,

$X_{ps}(t)$  : 사고후  $t$  일 경과시 재부유 농도 (Bq  $kg^{-1}$ ) ( $0 \leq t \leq t_{max} - t_p$ )

$X_{sa}(T)$  : 사고후  $T$  일 경과시 토양 단위면적당 핵종 농도 (Bq  $m^{-2}$ )

$f(T)$  : 사고후  $T$  일, 즉 이식 또는 파종후 ( $t_p + T$ )일 경과시 차단계수

식 (14)와 (15)에서  $RF$  값은 ECOSYS-87 모델[4]에서 사용하는 값과 IAEA[20]의 조사 결과를 참고하여 결정하였고  $V_d$  값은 IAEA[21]의 권고치를 사용하였다. Müller와 Pröhl[4]은 위와 같은 값의 재부유계수가 목초에 있어서 0.001의 토양-작물체 전이계수( $TF_{mix}$ )에 해당하는 것으로 추정하고 ECOSYS-87 모델에서 사고 발생시기와 작물의 종류에 관계없이 토양중 농도에 이것을 곱하여 재부유 농도를 구하는 방법을 사용

하고 있다. 이것은 현실을 너무 단순화함으로써 사고 발생시기나 작물에 따라서는 실제와 거리가 먼 평가를 할 가능성이 높을 것으로 판단된다.

### 장기 농도 예측법 수립

#### 토양중 농도

사고가 비생육기에 발생한 경우에는 1차 재배에 이어 계속되는 재배에 있어서도 식 (6)과 같이 토양중 농도를 평가한다. 이 때에도  $t_1$ 은 사고에서 1차 재배 생육개시까지의 일수로,  $t_2$ 는 그 이후 경과일수로 해야 한다(그림 3).

사고가 생육기에 일어난 경우에는 2차 재배 시작 전까지 지하 15 cm 밑으로 침투한 방사성 핵종이 없는 것으로 보고 다음과 같이 예측한다(그림 4).

$$X_s(t) = \left( \frac{A_1 + F_s A_2}{D G} \right) \exp(-k_p t_1) \exp[-(k_1 + k_2) t_2] \quad (16)$$

여기서,

$F_s$  : 작물체 침적 핵종의 토양으로의 이동분율

$t_1$  : 사고에서 2차 재배 생육개시까지의 기간 (d)

$t_2$  : 2차 재배 생육개시 이후 경과기간 (d)

위에서  $F_s$ 는 핵종의 환경제거 및 그에 따른 경작지 침적 정도, 수확시 작물 유체 발생 정도, 유기질 비료 시용에 따른 토양으로의 핵종 유입 정도 등에 의해 결정된다. 따라서  $F_s$  값은 사고에서 수확까지의 일수 및 기상 조건, 시비 및 작물 수확과 같은 영농 관행에 따라 달라진다. 이와 같은  $F_s$ 에 대하여 각 상황에 적합한 현실적인 값을 얻기는 매우 어려우므로 본 연구에서는 단일치인 0.6을 사용하였다. 이와 같은 방법은  $F_s$ 를 1로 보는 ECOSYS-87 모델[4]에 비해 보다 현실적일 것으로 판단된다.

<sup>90</sup>Sr의 경우 토양으로부터 배추로의 전이계수가 매우 높아 1회 재배시 토양중 <sup>90</sup>Sr의 7.3% 정도나 흡수하였다는 보고[22]가 있다. 또한 Romney 등[23]에 의하면 같은 엽채류인 상치의 경우 <sup>90</sup>Sr 흡수율이 토양에 따라 2.0~5.1%로 조사되었다. 이러한 연구결과에 입각하여 배추밭에서의 <sup>90</sup>Sr 농도는 작물체의 흡수에 의해 2차 재배부터 매회 3%씩 감소하는 것으로 하였다. 따라서 사고후 2차 재배부터 배추밭 토양중 <sup>90</sup>Sr 농도

( $X_s(t)_{sr, cab}$ , Bq kg<sup>-1</sup>-dry)는 다음과 같다.

$$X_s(t)_{sr, cab} = 0.97^{(n-1)} X_s(t) \quad (17)$$

여기서,

$n$  : 사고후 재배차수

### 작물체내 농도

사고후 2차 재배부터는 방사성 핵종이 항상 표층토와 혼합되어 있으므로 식 (10)과 같이 뿌리흡수 농도를 평가한다. 따라서 2차 재배부터 <sup>90</sup>Sr의 뿌리흡수 농도는 식 (18) 및 (19)와 같다.

$$\text{쌀알은 } X_{pr}(t) = X_s(t) TF_{mix} \quad (18)$$

$$\text{배추는 } X_{pr}(t) = 0.97^{(n-1)} X_s(t) TF_{mix} \quad (19)$$

한편, 토양에 의해 쉽게 고정되는 <sup>137</sup>Cs의 경우 여러 연구자들[12,24-26]의 보고에 입각하여  $TF_{mix}$  값이 사고후 4년 동안 매년 20%씩 감소하는 것으로 하였다. 따라서 <sup>137</sup>Cs의 뿌리흡수 농도는 두 작물 모두 식 (20)과 같다.

$$X_{pr}(t) = 0.8^{(n-1)} X_s(t) TF_{mix} \quad (\text{단, } n > 5 \text{이면 } n = 5) \quad (20)$$

재부유에 의한 작물체내 핵종농도 ( $X_{ps}(t)$ )는 식 (14)로 예측한다. 단, 이 때  $t_1$ 은  $t_s$ (사고후 당해 재배 작물체 생육개시까지의 일수)로 해야 하고(그림 3 및 4) <sup>90</sup>Sr 농도에 대해서는  $X_s(T)$  대신에  $X_s(T)_{sr, cab}$ 를 사용해야 한다.

### 농산물내 농도 계산

#### 수확시 농도

수확시 농산물내 농도는 각 경로별 농도를 합하면 된다. 따라서 비생육기 사고에 있어서 당년도 재배작물의 수확시 핵종의 배추내 농도 ( $X_{pa}(t)$ , Bq kg<sup>-1</sup>-fresh)와 쌀알내 농도 ( $X_{pb}(t)$ , Bq kg<sup>-1</sup>-dry)는 각각 식 (21) 및 (22)와 같다.

$$X_{pa}(t) = X_{pr}(t) + X_{ps}(t) \quad (21)$$

$$X_{pb}(t) = X_{pr}(t) \quad (22)$$

생육기 사고의 경우에는 각각 다음 식과 같다.

$$X_{pa}(t) = X_{pr}(t) + X_{pda}(t) + X_{ps}(t) \quad (23)$$

$$X_{pb}(t) = X_{pr}(t) + X_{pdb}(t) \quad (24)$$

2차 년도 재배부터는 식 (21) 및 (22)와 같다.

### 소비시 농도

농산물내 핵종 농도는 수확후 저장 및 유통 기간 동안 방사능 붕괴에 의해 감소하고 처리 및 가공 과정에서 변하게 된다. 따라서 소비시 농도는 다음과 같이 구한다.

$$X(t) = X_p(t_h) PF \exp[-k_r(t-t_h)] \quad (25)$$

여기서,

$X_f(t)$  : 사고후  $t$  일 경과시 소비되는 농산물내 농도 (Bq kg<sup>-1</sup>)

$X_p(t_h)$  : 사고후  $t_h$  일 경과시, 즉 상기 농산물 수확시 핵종 농도(Bq kg<sup>-1</sup>)

$PF$  : 가공 및 조리에 의한 농도변화 인자

농작물 수확후 최초 소비까지의 기간은 벼의 경우 건조, 도정 등의 과정을 거치므로 10일로 하였고 배추의 경우에는 3일로 하였다.  $PF$ 는 쌀알 [27]을 비롯한 알곡의 경우 겨층을 깎아 내어 정곡으로 만들면 핵종의 농도가 대체로 반 정도로 감소하므로 0.5로 하였고 배추의 경우에는 세척이나 다듬기에 의한 농도감소 효과를 고려하여 0.8로 하였다[4]. 쌀은 차기 재배 작물이 출하될 때까지 계속 소비되고 배추는 김장으로 저장되어 이듬해 3월 31일까지 소비되는 것으로 보았다.

## 결과 및 고찰

### 시간경과에 따른 농도변화

<sup>90</sup>Sr과 <sup>137</sup>Cs 각 핵종 1 Bq m<sup>2</sup> 침적시 백미와 배추내 50 년간의 핵종 농도를 예측하였다. 그림 5와 6은 각각 백미와 배추에 대한 침적시기별 예측결과이다. 여기서 농도는 통상적 수확기에 수확한 작물체의 소비시 농도에 해당한다. 배추내 농

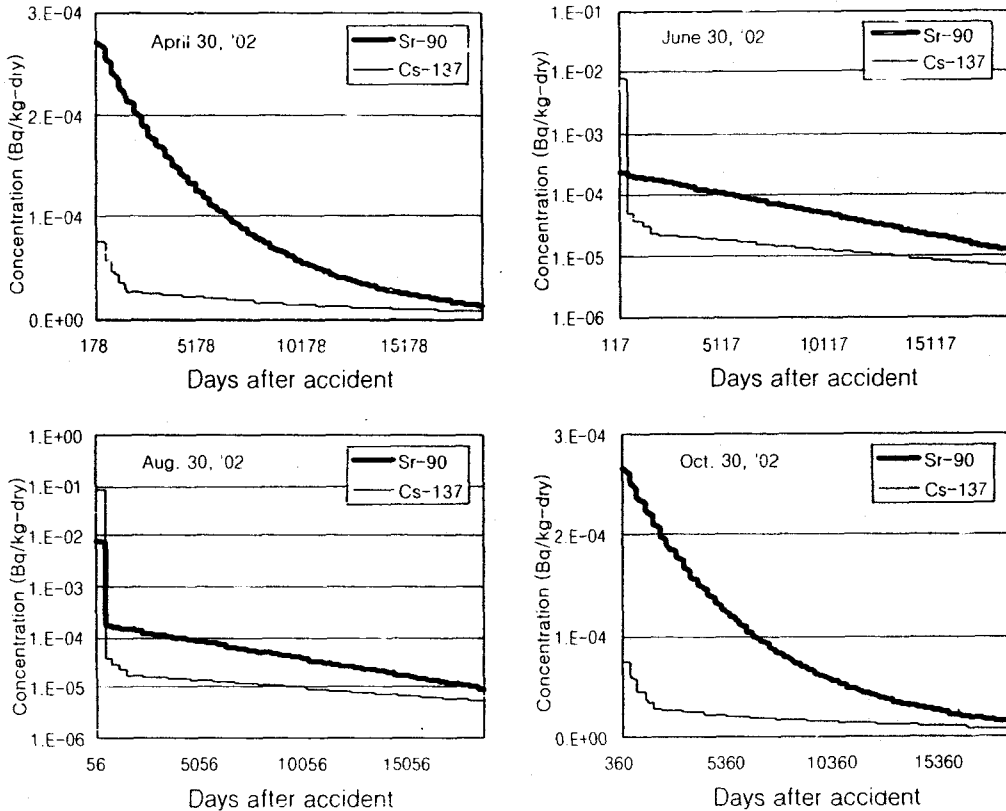


Fig. 5. <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs concentrations in polished rice seeds for 50 years' consumption period after acute dry deposition of 1 Bq m<sup>-2</sup> for each nuclide on 4 different days of the year.

도가 점선으로 나타난 것은 김장김치의 소비 기간 동안(11월 23일~3월 31일)만 배추의 소비가 이루어지는 것으로 보았기 때문이다. 한편 가로축의 시작점은 사고 발생일에서 오염 농산물의 최초 소비일까지의 일수를 나타내므로 작물 및 사고 발생일에 따라 다른 값을 보이고 있다. 세로축은 데이터의 분산정도에 따라 log scale과 linear scale 중 보다 적절한 것을 사용하였다.

두 작물에서 모두 비생육기(벼는 4월 30일과 10월 30일, 배추는 4월 30일과 6월 30일) 사고의 경우에는 두 핵종의 농도가 시간경과에 따라 서서히 감소하는 경향을 나타내었으나 감소율은 핵종 및 작물 간에 다소 차이가 있었다. 즉, 처음 4년 동안은 두 작물에서 모두 <sup>137</sup>Cs의 토양에 의한 고정 효과를 고려하여 전이계수( $TF_{mix}$ )를 매년 20%씩 감소시킨 결과 <sup>137</sup>Cs 농도가 <sup>90</sup>Sr보다 빠르게 감소하였으나 근권 토양중 <sup>90</sup>Sr의 용탈상수가 <sup>137</sup>Cs보다 훨씬 크기 때문에 그 이후에는 <sup>90</sup>Sr의

농도가 보다 빨리 감소하였다. 50년 전체 기간 동안에는 <sup>90</sup>Sr 농도가 백미에서는 약 20 배, 배추에서는 약 90 배 감소하였고 <sup>137</sup>Cs 농도는 백미와 배추 모두 9 배 정도 감소하는 데 그쳤다. 배추의 <sup>90</sup>Sr 농도가 백미보다 크게 감소한 것은 배추 재배시 매년 토양중 <sup>90</sup>Sr의 3%가 작물체의 흡수에 의해 제거되는 것으로 보았기 때문이다. 한편, 두 작물에서 모두 50년 내내 <sup>90</sup>Sr 농도가 <sup>137</sup>Cs보다 높았고 작물간에는 배추내 농도가 생체중(fresh weight) 기준임에도 불구하고 건조중(dry weight) 기준의 백미내 농도에 비해 핵종 및 경과시간에 따라 수~수십 배 높았다.

생육기(벼는 6월 30일과 8월 30일, 배추는 8월 30일과 10월 30일) 사고시 작물체내 핵종농도 및 변화경향, 작물간 및 핵종간 농도 차이의 양상은 처음 1년간은 비생육기 사고와 크게 달랐으나 그 이후부터는 비생육기 사고와 비슷하였다. 백미내 <sup>137</sup>Cs의 농도는 6월 30일 사고나 8월 30일 사고시

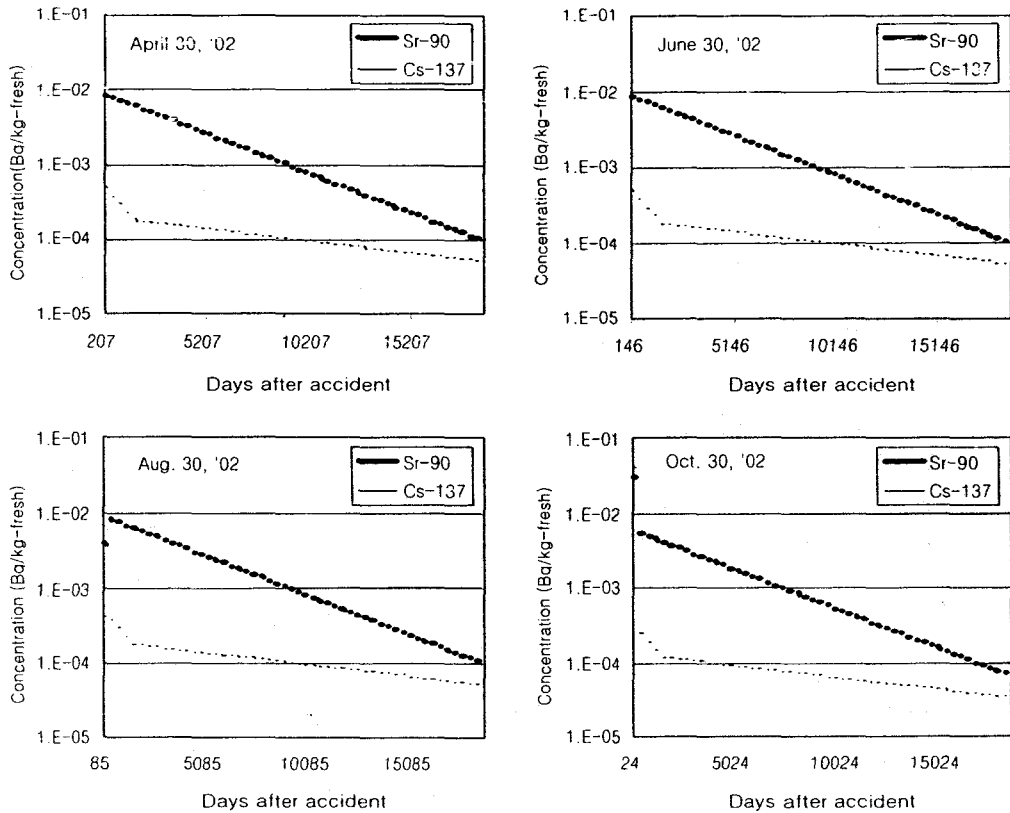


Fig. 6. <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs concentrations in Chinese cabbage for 50 years' consumption period after acute dry deposition of 1 Bq m<sup>-2</sup> for each nuclide on 4 different days of the year.

모두 처음 1년간은 직접오염의 영향으로 매우 높았다가 그 다음 해에는 수백~수천 배 감소하였다. <sup>90</sup>Sr 농도는 8월 30일 사고에서만 1차와 2차 년도간에 수십 배의 차이가 있었을 뿐 6월 30일 사고에서는 낮은 쌀알 전류계수로 인해 직접오염의 영향이 크지 않았기 때문에 1차와 2차 년도간에 차이가 거의 없었다. 핵종 간 농도는 처음 1년 동안은 쌀알 전류계수의 차이에 의해서 <sup>137</sup>Cs이 <sup>90</sup>Sr보다 대체로 수십 배 높았으나 그 다음부터는 비생육기 사고와 마찬가지로 <sup>90</sup>Sr이 <sup>137</sup>Cs보다 높았다.

이 등[1]의 예측결과에 의하면 벼의 생육기 사고시 처음 1년간 쌀알내 <sup>90</sup>Sr 농도와 <sup>137</sup>Cs 농도는 본 연구 결과와는 달리 차이가 거의 없었다. 이것은 이 등[1]의 연구에서는 자료의 부족으로 핵종에 관계없이 전생육기에 걸친 쌀알 전류계수로 단일치인 0.1을 사용하였고 이를 전생육기간으로

나누어 얻은 전류속도상수(d<sup>1</sup>)로 일정 기간 동안의 전류량을 평가하였기 때문이다. 이렇게 하면 작물체 침적량이 같을 경우 표 7의 실험 결과와는 달리 침적시기가 빠를수록 수확기까지의 전류량이 많아지게 되나 환경제거의 영향으로 6월 1일과 8월 1일 침적 간에는 그 차이가 미미할 것이다. 따라서 이 등[1]은 8월 1일 사고에서 6월 1일 사고에 비해 처음 1년간 농도가 두 핵종 모두 약간씩 높았던 것을 차단계수의 차이 때문인 것으로 보았다. 이러한 경향은 그들의 방법대로라면 사고일을 본 연구에서와 같이 8월 30일과 6월 30일로 해도 크게 달라지지 않을 것이다. 그러나 본 연구에서는 침적시기간 전류계수의 차이(표 7)에 보다 크게 기인하여 쌀알 발육기인 8월 30일 사고시 6월 30일 사고에 비해 <sup>90</sup>Sr 농도는 약 35 배, <sup>137</sup>Cs 농도는 약 10 배씩이나 높았다. 이상으로 볼 때 이 등[1]의 방법으로 예측하면 특히 벼

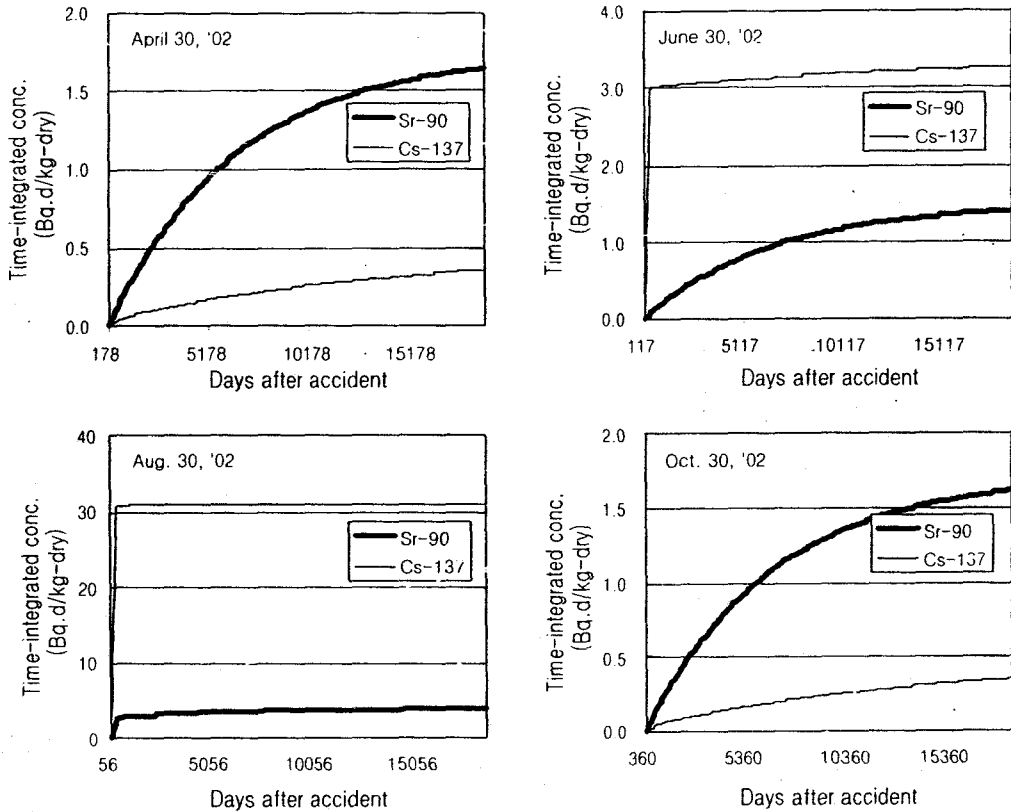


Fig. 7. Integration of daily <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs concentrations in polished rice seeds over 50 years' consumption period after acute dry deposition of 1 Bq m<sup>-2</sup> for each nuclide on 4 different days of the year.

의 생육초기 사고시에는 <sup>90</sup>Sr 농도를 과대평가할 가능성이 높고 출수기에서 쌀알 발육기 사이의 사고시에는 <sup>137</sup>Cs의 농도를 과소평가할 가능성이 높을 것으로 판단된다.

배추에서는 생육기 사고가 10월 30일에 발생할 경우 직접오염의 영향이 매우 커서 <sup>90</sup>Sr과 <sup>137</sup>Cs 모두 1차 수확 분에서는 2차 수확 분에 비해 농도가 각각 6 배 및 170 배 정도 높았다. 8월 30일에 발생할 경우에는 직접오염의 영향이 상대적으로 낮아 <sup>137</sup>Cs 농도는 1차와 2차 수확간에 큰 차이가 없었고 토양-작물체 전이계수 ( $TF_{mix}$ )가 매우 큰 <sup>90</sup>Sr 농도는 2차 수확에서 오히려 2배 가량 높았다. 여기서 1차 년도 뿌리흡수 농도 평가시 표 5와 같은 침적시기별 면적 기준의 전이계수 ( $TF_{area}$ ) 대신에 기존 모델[1,2,4-6]에서처럼

흡수기간 또는 생물량 증가율에 비례하는  $TF_{mix}$ 의 분율을 사용하였다면 본 예측결과와는 달리 두 핵종 모두 1차 수확에서 작물체 농도는 2차 수확에 비해 대체로 직접오염 농도만큼 높게 평가되었을 것이다. 한편, 10월 30일 사고시에는 8월 30일 사고와는 달리 1차 수확 분의 경우 <sup>137</sup>Cs의 농도가 <sup>90</sup>Sr보다 다소 높았다. 이것은 배추의 생육후기 침적시에는 지면 침적량이 매우 적어 핵종간  $TF_{area}$ 의 차이에 따른 농도차는 미미한 반면에 환경계저상수가 보다 낮은 <sup>137</sup>Cs의 직접오염 농도가 <sup>90</sup>Sr보다 다소 높게 평가되었기 때문이다.

생육기 사고시 사고후 2차~50차 수확 분내 농도는 두 작물 모두 생육초기 사고의 경우 비생육기 사고시 농도와 비슷하였으나 생육후기 사고의

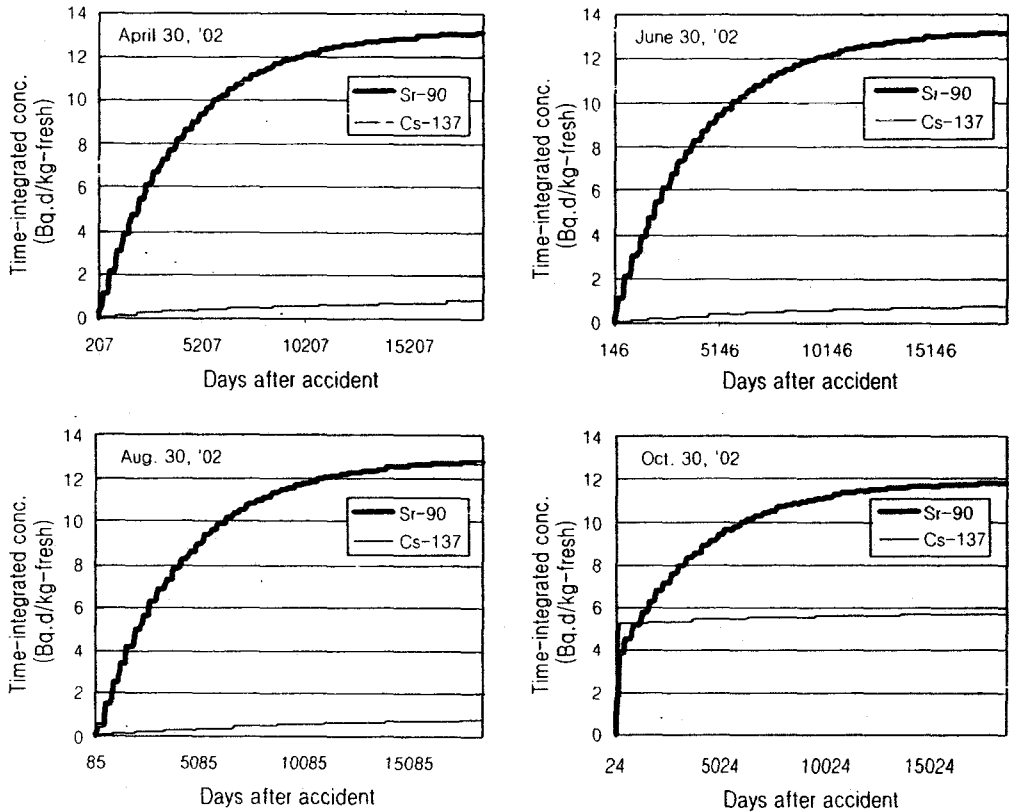


Fig. 8. Integration of daily  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in Chinese cabbage over 50 years' consumption period after acute dry deposition of  $1 \text{ Bq m}^{-2}$  for each nuclide on 4 different days of the year.

경우 비생육기 사고시에 비해 다소 낮았다. 이것은 작물체에 직접 침적한 방사성 핵종의 60%만 토양으로 환원되는 것으로 가정하였기 때문이다.

**핵종의 누적농도**

그림 7과 8은 각각 매일 소비되는 백미 및 배추 내 핵종 농도를 시간 경과에 따라 계속 가산하여 구한 누적농도의 변화 양상을 보여주고 있다. 특정 시기에서의 누적 농도(time-integrated concentration)에 1일 식품 섭취량을 곱해주면 그 시기까지 섭취한 핵종의 총량을 구할 수 있다.

백미에서의 누적농도는 비생육기 사고의 경우 두 핵종 모두 사고 발생시기에 따른 차이가 거의 없이 서서히 증가하였으나 증가율은  $^{90}\text{Sr}$ 이 높아 50년 후에는  $^{90}\text{Sr}$ 의 누적농도가  $^{137}\text{Cs}$ 보다 5 배 정도 높았다. 생육기 사고시에는  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 처음

1년 동안의 소비에서 50년간 섭취량의 90% 이상을 섭취한 것으로 나타났고  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우에도 8월 30일 사고시 처음 1년 동안 70% 가량 섭취한 것으로 나타났다. 6월 30일 사고시  $^{90}\text{Sr}$ 의 누적농도는 1차 수확 분에서 작물체 직접오염의 영향이 미미했던 관계로 비생육기 사고와 유사한 변화양상을 보이고 있다. 생육기 사고시 최종 누적농도는 비생육기 사고와 반대로  $^{137}\text{Cs}$ 이  $^{90}\text{Sr}$ 보다 수 배 높았고 사고발생 시기에 따라서는 쌀알 발육기인 8월 30일 사고에서 6월 30일 사고에 비해  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우 3 배 정도,  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 10 배 정도 높았다.

배추의 비생육기 사고와 생육초기(8월 30일) 사고에서는 백미의 비생육기 사고와 비슷하게 두 핵종 모두 사고 발생시기에 따른 차이가 거의 없이 누적농도가 서서히 증가하였고 최종적으로는

Table 8. Contribution of each pathway to  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in polished rice seeds consumed in each year for 50 years after a hypothetical nuclear accident

Date of accident	Pathway	Percent contribution (%)					
		$^{90}\text{Sr}$			$^{137}\text{Cs}$		
		1st year	2nd~50th	Total	1st year	2nd~50th	Total
April 30	RU	100	100	100	100	100	100
June 30	RU	53.4	100	97.3	0.6	100	8.9
	DC	46.6	0	2.7	99.4	0	91.1
Aug. 30	RU	0.4	100	26.8	≈0	100	0.7
	DC	99.6	0	73.2	≈100	0	99.3
Oct. 30	RU	100	100	100	100	100	100

RU : Root uptake, DC : Direct contamination

$^{90}\text{Sr}$ 이  $^{137}\text{Cs}$ 보다 15 배 정도 높았다. 이에 반해 생육후기인 10월 30일 사고시에는 최종누적농도가  $^{90}\text{Sr}$ 의 경우 비생육기나 생육초기 사고와 큰 차이가 없었으나  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 비생육기나 생육초기 사고에 비해 7 배 정도 높았다. 10월 30일 사고시 처음 1년 동안  $^{137}\text{Cs}$ 은 90% 가량,  $^{90}\text{Sr}$ 은 30% 가량 누적되는 것으로 나타났다. 배추에서는 백미와는 달리 어느 경우에도  $^{90}\text{Sr}$ 의 최종누적농도가  $^{137}\text{Cs}$ 보다 높은 것은 배추에 대한  $^{90}\text{Sr}$ 의  $TF_{mix}$ 가 특히 높기 때문이다.

위와 같은 50 년간의 최종누적농도는 황 등[6]이 DYNACON 모델로 예측한 결과에 비해 비생육기 사고시에는 핵종 및 식품에 따라 수~수십 배 높으나 생육기 사고시에는 배추의 생육초기 침적시  $^{90}\text{Sr}$ 이 수 배 높은 것을 제외하면 큰 차이가 없다. 두 방식 간에 비생육기 사고시 예측결과가 비교적 큰 차이를 보인 것은  $TF_{mix}$  및 핵종의 용탈이나 고정 효과에 대한 평가에 차이가 있었기 때문이다. 본 연구에서는 배추에 대한  $^{90}\text{Sr}$ 의  $TF_{mix}$ 가 비교적 높아서 배추내  $^{90}\text{Sr}$ 의 최종누적농도는 비생육기 사고시에 생육기 사고에 비해 약간 높았으나 DYNACON 모델에서는 직접오염의 영향이 상대적으로 높게 평가되어 생육기 사고시에 오히려 더 높았다. 한편, DYNACON 모델로 예측한 배추의 생육기 사고시 최종누적농도는  $^{90}\text{Sr}$ 과  $^{137}\text{Cs}$  간에 큰 차이가 없었으나 본 연

구에서는  $^{90}\text{Sr}$ 이  $^{137}\text{Cs}$ 보다 2~10 배 가량 높았다. 모델링 개념의 차이에도 불구하고 생육기 사고시 두 예측법 간에 쌀알내 최종누적농도의 차이는 2 배 이내였다. 그러나 사고일을 보다 여러 가지로 하여 비교하면 훨씬 큰 차이가 생길 것으로 판단 된다.

#### 경로별 기여도

표 8과 9는 각각 백미 및 배추 내  $^{90}\text{Sr}$ 과  $^{137}\text{Cs}$ 의 농도에 대한 경로별 기여도를 사고후 소비 년도별로 분석한 것이다. 1차 년도 소비에 있어서의 핵종 농도는 두 가지 농산물에서 모두 비생육기 사고의 경우 거의 전적으로 뿌리흡수에 의해 결정되나 생육기 사고의 경우에는 핵종 및 사고 발생시기에 따라 각 경로의 기여도가 다른 것으로 나타났다. 2차 년도부터는 어느 경우에도 거의 전적으로 뿌리흡수에 기인하였다.

벼의 생육초기(6월 30일) 사고 발생시  $^{90}\text{Sr}$ 의 농도에 대해서는 1차 년도 소비 분의 경우 뿌리흡수와 직접오염이 반반씩 기여하였으나 50 년 전체 소비 분에 있어서는 뿌리흡수 경로의 기여가 압도적이었다. 이에 비해  $^{137}\text{Cs}$  농도는 1차 년도 소비 분의 경우 거의 전적으로 직접오염에 따른 것이고 전체적으로도 대부분 직접오염에 기인하고 있다. 생육후기(8월 30일) 사고에서는 두 핵종 모두 1차 년도 소비 분의 경우 직접오염의 기여가 100%에 가까웠고 전체적으로 볼 때는  $^{137}\text{Cs}$



Table 9. Contribution of each pathway to <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs concentrations in Chinese cabbage consumed in each year for 50 years after a hypothetical nuclear accident

Date of accident	Pathway	Percent contribution (%)					
		<sup>90</sup> Sr			<sup>137</sup> Cs		
		1st year	2nd~50th	Total	1st year	2nd~50th	Total
April 30	RU	≈100	≈100	≈100	99.9	99.7	99.7
	RS	≈0	≈0	≈0	0.1	0.3	0.3
June 30	RU	≈100	≈100	≈100	99.9	99.7	99.7
	RS	≈0	≈0	≈0	0.1	0.3	0.3
Aug. 30	RU	95.1	≈100	99.8	5.0	99.7	93.3
	RS	0.2	≈0	≈0	2.3	0.3	0.5
	DC	4.7	0	0.2	92.7	0	6.2
Oct. 30	RU	0.8	≈100	67.8	≈0	99.7	8.4
	RS	≈0	≈0	≈0	≈0	0.3	≈0
	DC	99.2	0	32.2	≈100	0	91.6

RU : Root uptake, RS : Resuspension, DC : Direct contamination

의 경우 직접오염이 100%에 가까웠으나 <sup>90</sup>Sr의 경우에는 뿌리흡수와 직접오염이 1:3 정도였다.

배추의 생육초기(8월 30일) 사고 발생시 <sup>90</sup>Sr 농도는 어느 때나 거의 전적으로 뿌리흡수에 기인하였고 <sup>137</sup>Cs 농도는 1차 년도 소비의 경우 대부분 직접오염에 기인하였으나 전체적으로는 대부분 뿌리흡수에 기인하였다. 배추의 생육후기(10월 30일) 사고시 1차 년도 소비 분에서는 두 핵종 농도 모두 거의 전적으로 직접오염에 의한 것이었고 전체적으로는 <sup>137</sup>Cs의 경우 대부분 직접오염에 기인하였으나 <sup>90</sup>Sr의 경우 뿌리흡수의 기여도가 직접오염에 비해 오히려 2 배 가량 높았다.

배추에서 재부유 경로의 기여도는 무시할 수 있을 정도였다. 재부유 농도는 재부유계수에 의해 결정된다. 재부유계수는 변이가 매우 큰 인자로서 기상, 지표의 상태, 측정방법 등에 따라 대체로 10<sup>2</sup>~10<sup>11</sup> m<sup>1</sup>의 범위[5,28]를 보이고 있다. COMIDA[2], PATHWAY[5], DYNACON[6] 등에서는 재부유계수로 1×10<sup>5</sup> m<sup>1</sup>을 사용하여 재부

유의 영향이 꽤 큰 것으로 나타났다. 그러나 이 값은 미국의 건조지역에 대한 것이므로 우리나라에서는 적당하지 못한 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용하고 있는 값인 2.5×10<sup>8</sup> m<sup>1</sup>에 대해서도 앞으로 조사를 계속하여 보다 현실적인 값을 얻도록 해야 할 것이다.

#### 사고대책 방향 제시

이상과 같은 예측결과를 바탕으로 원자력 사고시 백미와 배추의 소비를 통한 방사성 Sr과 Cs의 인체 내부 방사선량을 효과적으로 감소시키기 위해서 사고후 단계별로 어느 경로에 대해서 집중적으로 대책을 강구할 것인지를 결정할 수 있다.

두 작물 모두 비생육기 사고시에는 뿌리흡수를 억제할 수 있는 대책을 장기적으로 시행하는 것이 필요하다. 생육기 사고시에는 비의 경우 <sup>137</sup>Cs에 대해서는 대체로 직접오염의 영향을 감소시키는 데 단기적인 노력을 집중해야 하고 <sup>90</sup>Sr에 대해서는 사고 발생시기에 따라 대책을 달리 할 필

요가 있다. 즉, 생육초기 사고의 경우에는 장기적인 뿌리흡수 억제 조치에 치중해야 하고 생육후기 사고의 경우에는 이와 함께 직접오염의 영향을 감소시키기 위한 단기적인 조치를 병행할 필요가 있다. 배추의 생육초기 사고시에는 두 핵종 모두 장기적인 뿌리흡수 억제대책에 중점을 두어야 할 것이고 생육후기 사고시에는  $^{90}\text{Sr}$ 에 대해서는 두 종류의 대책을 모두 고려할 필요가 있고  $^{137}\text{Cs}$ 에 대해서는 직접오염의 영향을 감소시키는 데 주력해야 할 것이다.

뿌리흡수 억제대책에는 유사경쟁원소(즉, Cs에 대해서는 K, Sr에 대해서는 Ca)의 살포, 석회 시용, 유기물 및 점토 살포, 심경 등 여러 방법들이 포함될 수 있다[28, 29]. 이 중에서 어떤 방법들을 사용할 것인지는 뿌리흡수 억제 정도, 소요 비용, 작물 수량에 미치는 영향 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 한다. 직접오염의 영향을 감소시키는 방법으로는 사고 직후 작물체 표면의 물세척[13], 배추의 경우 상단부 결속 및 걸잎 제거[13], 벼의 경우 핵종의 쌀알로의 전류억제 물질 살포 등을 생각해 볼 수 있다. 현재 전류억제 물질로는 특별히 보고된 것이 없지만 뿌리흡수 억제대책과 유사하게 유사경쟁원소나 알칼리성 용액 등의 효과를 시험해 볼 필요가 있다. 한편, 작물의 생육기 사고시에는  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 대체로 1차 수확을 포기하는 것만으로도 90% 이상의 영향 감소가 기대된다. 이와 관련하여 오염된 작물을 조기에 수확하여 폐기 또는 타용도로 전환하거나 그대로 갈아엎은 후 대체작물을 도입하는 등의 방법에 대해 검토가 필요한 것으로 사료된다.

## 결 론

실험을 통하여 얻은 침적시기별 핵종의 농작물 오염인자 자료를 활용하여 토양-작물계에 있어서의 각 구획 및 경로 별로 시간 경과에 따른 농도 예측법을 수립하고  $^{90}\text{Sr}$ 과  $^{137}\text{Cs}$ 의 일회성 단위 건침적에 대하여 백미와 배추내 핵종 농도의 50 년간의 변화를 예측하였다.

예측결과는 사고 발생시기, 작물 및 핵종에 따라 다양한 형태로 나타났고 기존의 한국인에 대한 동적 섭취경로 모델에 의한 것과 비교적 큰 차이가 있었다. 본 연구에서는 연립미분방정식으로 구획간 물질 이동을 해석하는 종래의 동적 모델에 비해 실측된 오염인자 자료를 보다 적절하고 광범위하게 이용하였으므로 더욱 현실적인 예측이 이루어 졌을 것으로 본다.

수립된 예측법은 기본적으로 ECOSYS-87 모델의 개념에 따른 것이다. 그러나 환경조건을 보다 사실적으로 반영하고 국내의 실험결과를 많이 활용함으로써 핵종의 작물체 침적량이나 토양중 농도, 재부유 및 뿌리흡수에 의한 작물체내 농도 등에 대하여 보다 현실적이고 합리적인 예측법을 수립할 수 있었다.

사고시에는 위와 같은 예측 결과에 입각하여 적절한 대책을 결정해야 한다. 합리적인 사고대책은 신뢰도 높은 예측결과가 있어야 가능하다. 섭취경로 영향예측의 신뢰도를 높이기 위해서는 실측을 통하여 국내 고유의 농작물 오염인자 D/B를 확충하고 그에 따라 예측모델을 지속적으로 개선해 나가야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 이창우, 최용호, 황원태, 이정호, "쌀 섭취경로에서 동적모델을 사용한 장방감기 핵종의 거동해석 및 내부피폭선량 계산," 대한방사선방어학회지, 17, 15-22 (1992).
2. M. L. Abbott and A. S. Rood, "COMIDA : a radionuclide food chain model for acute fallout deposition," Health Physics 66, 17-29 (1994).
3. 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).
4. H. Müller and G. Pröhl, "ECOSYS-87: a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents," Health Physics 64, 232-252 (1993)
5. F. W. Whicker and T. B. Kirchner, "PATHWAY: a dynamic food-chain model to predict radionuclide ingestion after fallout

- deposition," *Health Physics* 52, 717-737 (1987)
6. W. T. Hwang, G. Cho and M. H. Han, "Development of a dynamic food chain model DYNACON and its application to Korean agricultural conditions," *J. of Nuclear Science and Technology* 35, 454-461 (1998)
  7. J. Ehrhardt and A. Weis (Eds.), RODOS : Decision Support System for Off-Site Nuclear Emergency Management in Europe, EUR 19144 EN, European Commission (2000)
  8. 이정호 등, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부 피폭선량 평가 코드 개발, KAERI/RR-998/90, 한국원자력연구소 (1991)
  9. 최용호, 조재성, 이창우, 홍광희, 이정호, "벼 재배기간중 침적시기에 따른  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 뿌리흡수," *대한방사선방어학회지*, 20, 255-263 (1995)
  10. 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)
  11. 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, 183-198 (1998)
  12. Y. H. Choi, K. M. Lim, H. G. Park, D. W. Park and W. Y. Lee, "Four years' root uptake and underground distribution of  $^{60}\text{Co}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in simulated rice and Chinese cabbage fields," *Proc. of IRPA10 Congress, Hiroshima, May 2000* (2000)
  13. 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)
  14. A. C. Chamberlain, "Interception and retention of radioactive aerosol by vegetation," *Atmospheric Environment* 4, 57-78 (1970).
  15. C. W. Miller, "An analysis of measured values for the fraction of a radioactive aerosol intercepted by vegetation," *Health Physics* 38, 705-712 (1980)
  16. 농림부, 농림수산통계연보, 31000-51023-26-01 (1996)
  17. 이은웅 등, 4정 수도작, 향문사 (1996)
  18. 조성진, 박천서, 엄대익 등, 3정 토양학, 향문사 (1997)
  19. F. O. Hoffman and C. F. Baes III, 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)
  20. International Atomic Energy Agency, Modelling of Resuspension, Seasonality and Losses during Food Processing, First Report of the VAMP Terrestrial Working Group, IAEA-TECDOC-647, IAEA, Vienna (1992)
  21. 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)
  22. 최용호, 벼와 주요 밭작물에서  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 토양-작물계 내의 흡수, 이동 및 분포, 박사학위논문, 충남대학교 (1995)
  23. E. M. Romney, J. W. Neel, H. Nishita, J. H. Olafson and K. H. Larson, "Plant uptake of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{91}\text{Y}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{144}\text{Ce}$  from soils," *Soil Science* 83, 369-376 (1957)
  24. 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)
  25. D. C. Adriano, K. W. McLeod and T. G. Ciravolo, "Long-term root uptake of radiocesium by several crops," *J. of Plant*

- Nutrition 7, 1415-1432 (1984)
26. 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)
  27. 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, p.57-113 (in Japanese) (1983)
  28. J. E. Till and H. R. Meyer (Eds.), Radiological Assessment, NUREG/CR-3332, ORNL-5968, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1983)
  29. 최용호, 조재성, 이명호, 최근식, 이정호, "염화칼리와 석회의 동시살포가 주요 작물의 생육중에 침적한  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 뿌리 흡수에 미치는 영향," 대한방사선방어학회지, 20, 245-253 (1995)