

## Variations in Soil-to-Red Pepper Transfer Factors of Radionuclides with Time of Their Application and Fruit Harvest

Yong-Ho Choi, Won-Yun Lee, Kwang-Muk Lim, Doo-Won Park, Myung-Ho Lee,  
Chang-Woo Lee, Hyun-Duk Lee and Jeong-Ho Lee

*Korea Atomic Energy Research Institute*

### 고추 재배시 방사성 핵종 처리 및 열매수확 시기에 따른 토양-작물체간 전이계수의 변이

최용호 · 이원윤 · 임광묵 · 박두원 · 이명호 · 이창우 · 이현덕 · 이정호

한국원자력연구소

**Abstract**—A mixed solution of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  was applied to the soil of culture boxes in a greenhouse 2 days before transplanting red pepper and at 3 different times during its growth for investigating transfer factors ( $\text{m}^2/\text{kg-dry}$ ) for its green and red fruits. Transfer factors varied with radionuclide, application time and harvest time by factors of about 20~100. They decreased mostly in the order of  $^{85}\text{Sr} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs}$  while  $^{54}\text{Mn}$  and  $^{60}\text{Co}$  was higher than  $^{85}\text{Sr}$  when time lapse between application and harvest was short. Transfer factors of  $^{85}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  at the last application were lower than those at the previous one by factors of 3~20 depending on harvest time. Variations in  $^{54}\text{Mn}$  and  $^{60}\text{Co}$  transfer factors with application time after transplanting were comparatively low. Transfer factors of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{85}\text{Sr}$  mixed with topsoil before transplanting were up to 3~9 times higher than those for the application onto soil surface 2 days after transplanting while there was no difference in  $^{137}\text{Cs}$ . The present results can be referred to in estimating root-uptake concentrations of the radionuclides in red pepper fruit and taking proper measures for its harvest and consumption at the event of an accidental release during the growing season of red pepper.

**Key words** : Radionuclide, Red pepper, Deposition during growth, Root uptake, Transfer factor, Ingestion Pathway.

**요약**—고추의 이식 2일전 및 이식후 세 차례에 걸쳐  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 혼합용액을 온실내 재배상자의 토양에 처리하고 고추의 청과와 적과에 대한 전이계수( $\text{m}^2/\text{kg-dry}$ )를 조사하였다. 전이계수는 핵종, 처리시기 및 수확시기에 따라 20~100배 정도의 변이를 보였다. 핵종간에 전이계수는 대체로  $^{85}\text{Sr} > ^{54}$

Mn<sup>60</sup>Co<sup>137</sup>Cs의 순이었으나 처리에서 수확까지의 기간이 짧을 경우 <sup>54</sup>Mn와 <sup>60</sup>Co 전이계수가 <sup>85</sup>Sr보다 높았다. <sup>85</sup>Sr와 <sup>137</sup>Cs 전이계수는 가장 늦은 처리에서 그 전 처리에 비해 수확시기에 따라 3~20배 정도 감소하였다. <sup>54</sup>Mn와 <sup>60</sup>Co 전이계수는 이식후 처리시기에 따른 변이가 비교적 적었다. 이식전 토양과의 혼합처리시 전이계수는 이식 2일후 토양 표면 처리에 비해 <sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co, <sup>85</sup>Sr의 경우 최고 3~9배 정도 높았으나 <sup>137</sup>Cs의 경우 차이가 없었다. 본 연구 결과는 고추의 재배기간중 사고발생시 고추 열매내 방사성 핵종의 뿌리흡수 농도를 예측하고 고추의 수확 및 이용대책을 수립하는 데 활용될 수 있다.

중심어: 방사성 핵종, 고추, 생육중 침적, 뿌리흡수, 전이계수, 섭취경로.

## 서 론

고추는 우리나라에서 국민의 기호성에 알맞아 다양한 형태로 비교적 많이 소비되는 작물이므로 한국인에 대한 육상 섭취경로 피폭선량 평가시 중요하게 고려될 필요가 있다. 원자력 시설로부터 대기로 방출된 방사성 핵종이 농경지에 침적한 후 작물의 뿌리흡수를 통하여 가식부에 축적되는 것은 농산물의 주요 오염 경로 중의 하나이다. 섭취 피폭선량 평가모델에서 이러한 뿌리흡수 경로는 일반적으로 토양-작물체간 전이계수라는 매개변수에 의해 평가되고 있다[1-4].

토양-작물체간 전이계수는 대개 토양 단위무게당 핵종 농도에 대한 작물체 가식부위 단위무게당 핵종 농도의 비로 정의되며 작물의 생육전에 토양과 방사성 핵종이 일정한 깊이로 균일하게 혼합된 상태에서 측정된다[5-7]. 이러한 전이계수는 발갈이에 의해 방사능이 일정한 깊이의 표층토와 균일하게 섞여 있는 것으로 볼 수 있는 원자력 시설의 정상가동시나 작물의 생육전 사고침적시에 적합한 것으로 작물의 생육중에 발생하는 사고침적에 대해서는 사용하기 곤란하다. 왜냐하면 이때에는 침적한 방사능이 대부분 지표 부근에 분포하기[8-10] 때문이다. 이러한 상태에서는 핵종의 지표면 침적량에 대한 작물체중 핵종 농도의 비로 정의되는 전이계수를 사용하는 것이 적절할 것이다. 이와 같은 전이계수는 토양중 핵종의 존재량이 Bq/m<sup>2</sup>로 표시될 경우 표층토양과 방사능이 혼합되어 있을 때에도 사용될 수 있다.

한편, 작물체는 생육단계에 따라 뿌리의 활력이 크게 변하고 생육중 침적시기에 따라 흡수기간이 다르므로 방사성 핵종의 전이계수도 침적시기에 따라 달라질 것으로 예상된다. 그러므로 작물의 생육중에

발생하는 사고침적의 영향을 예측하기 위해서는 작물의 생육중 침적시기별로 구한 전이계수 자료가 필요하다. 그러나 이러한 자료는 전세계적으로 매우 부족한 실정이다. 따라서 대부분의 사고시 섭취선량 평가모델[3,4,11]에서는 작물체내 핵종의 농도는 흡수기간 또는 흡수기간 동안의 작물체중 증가량에 비해한다는 가정하에 원자력 시설의 정상가동시에 사용하는 전이계수로 작물의 생육중 일시적으로 침적한 방사성 핵종의 뿌리흡수 농도를 예측하고 있다. 그러나 이러한 방법의 타당성은 검증되어 있지 않다.

본 연구에서는 원전의 정상가동시나 사고시 섭취 피폭경로에서 주요핵종으로 간주되고 있는 <sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co, <sup>90</sup>Sr(<sup>85</sup>Sr로 대체), <sup>137</sup>Cs[12,13]의 네 핵종을 방사선 작업 온실내에서 고추의 이식전 및 생육중 수차례에 걸쳐 재배상자의 토양에 처리하고 열매에 대하여 핵종의 처리시기에 따른 토양-작물체간 전이계수를 조사하였다. 또한 고추는 한 작물체에서의 열매라도 성숙기가 서로 달라 몇차례에 나누어 수확하는 것이 보통[14]이므로 수확시기에 따른 전이계수의 차이도 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 재배상자 준비

바닥에 배수장치를 갖추고 가로, 세로, 높이가 각각 0.6m, 0.6m, 1.0m인 철제 상자를 온실내에 1.3m 깊이로 건조한 호속에 30cm 높이의 지지물로 받쳐 장치하였다. 상자의 바닥에서 20cm까지는 직경 1~3cm 가량의 인조석을 깔았고 그 위에 야외에서 채취한 세 층의 토양을 아래에서부터 각각 30cm, 30cm, 20cm의 깊이로 채우고 물이 배수될 때까지 급수하였다. 급수후

상자내 지표면은 15cm 정도 침강하였다. 이후 작물의 이식전까지 며칠간 급수량을 조절하면서 표토의 수분함량을 적절히 유지하였다.

작물의 생육과 직접적인 관계가 있는 최상위 20cm 깊이의 토양은 pH가 5.2, 유기물 함량 0.91%, 유효태인산 함량 86.9ppm, 양이온치환용량 4.2me/100g, 치환성 Ca 함량 1.84me/100g, 치환성 K 함량 0.12me/100g, 모래 함량 79.0%, 점토 함량 4.0%인 양질사토였고 하부로 갈수록 유기물 함량, 유효태인산 함량, 모래 함량 등은 감소하였고 pH와 점토 함량은 증가하였다.

### 이식 및 관리

실험에 사용한 고추의 품종은 금탑고추(홍농교배)였다. 이식 하루 전에 밀거름으로 상자당 요소 19.6g, 용과린 25.5g, 염화칼리 12.7g, 석회 36g, 퇴비 360g을 토양의 표면에 고루 살포하고 날의 길이가 15cm인 모종용 삽으로 토양과 혼합하였다.

'94년 5월 10일에 3개월 된 고추 모를 상자당 네 구멍에 구멍당 두 개씩 이식하였다. 생육초기에 작물체를 생육 정도에 따라 적절히 솎아 상자당 네 개씩 육성하였다.

표토와 작물체의 상태를 고려하여 2~3일 간격으로 상자당 4.5ℓ의 수돗물을 공급하였고 병충해 방제를 위하여 살충제와 살균제를 두세 차례씩 살포하였다. 온실의 창문은 최대한 열어 두어 실내의 온도상승을 가능한 한 억제하였다. 덧거름으로 8월 중순경 약간의 칼리액을 엽면살포하였다.

### 방사성 동위원소 처리

<sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co, <sup>85</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs의 무담체 원액을 0.5M HCl 용액에 모두 혼합하여 적정 농도(이식일 기준으로 ml당 각 핵종 약 40,000Bq)로 희석하였다. 이 희석 용액을 이식 2일전 한 차례 및 이식후 생육단계에 따라 세 차례에 걸쳐 재배상자당 균등하게 분포하는 64곳의 토양 표면에 마이크로 피펫을 이용하여 한 곳에 1ml씩 살포하였다.

이식전에 처리된 방사능은 그 다음날 밀거름과 함께 토양과 혼합하였으나 생육중 처리의 경우에는 그대로

두었다. 고추의 생육중 방사능 처리일자는 5월 12일, 6월 23일, 8월 9일(각각 이식 2일후, 44일후, 91일후)이었다. 이식전 처리상자는 작물의 이식 직후에 그리고 생육중 처리상자는 방사성 동위원소 처리 직후에 직경 1~3cm의 인조석으로 지표면을 덮어 토양 입자의 부유에 의한 작물체의 오염을 방지하였다.

### 시료 채취 및 방사능 분석

한 상자내에서 개체별로 '94년 7월 11일(이식 62일후)에 5개의 청과를, 8월 26일(이식 108일후)에는 먼저 익은 적과들을 수확하였고, 10월 7일(이식 150일후)에는 청과와 적과를 나누어 최종 수확하였다. 수확된 열매들은 생체중량을 측정된 다음 적당히 잘라 온실내에서 건조시켜 수분 함량이 크게 감소하였을 때 다시 잘게 절단하여 1개월간 자연건조하였다.

건조시료는 직경 5cm, 높이 10cm의 플라스틱 계측용기에 담아 건조중량을 재고 방사능을 측정하였다. 시료내 방사능 측정은 고순도 Ge 검출기를 이용한  $\gamma$ -spectrometry 법으로 실시하였다. 사용된 hardware와 software는 EG&G ORTEC사 제품이었고 계측시간은 시료에 따라 1~2 시간 정도였다.

### 토양-작물체간 전이계수 계산

방사성 핵종의 토양-작물체간 전이계수(TF, m<sup>2</sup>/kg-dry)는 아래와 같이 계산하였다.

$$TF = \frac{\text{수확시 열매중 핵종 } i \text{의 농도(Bq/kg-dry)}}{\text{수확시료 붕괴보정한 단위면적당 핵종 } i \text{의 처리량(Bq/m}^2\text{)}}$$

분자로 사용한 수확시 열매중 핵종 농도는 비교의 목적상 청과와 적과 모두 건조중량 기준으로 구하였다. 한 상자에서의 토양-작물체간 방사성 핵종의 전이계수는 개체별 시료들에 대한 값들의 평균과 표준편차로 표시하였다.

## 결과 및 고찰

### 토양-작물체간 핵종 전이계수

표 1은 방사성 핵종 처리시기별 및 수확시기별

고추 작물체당 열매 생산량을 나타내고 있다. 청과의 생산량은 처리시기간에 다소 차이가 있었으나 적과의 경우 생산량은 처리시기간에 이렇다할 차이가 없었고 또한 수확시기간에 큰 차이가 없었다. 청과와 적과를 합하면 작물체당 생산 갯수가 50~60개, 건조중량이 대체로 70~80g의 범위로 처리시기간에 큰 차이가 없었다.

위와 같이 수확된 고추 청과와 적과의 수확시기별 방사성 핵종의 처리시기에 따른 토양-작물체간 전이계수( $m^2/kg-dry$ )는 그림 1~4에서 보는 바와 같다.

이식 62일후에 수확한 고추의 청과에서  $^{54}Mn$ ,  $^{60}Co$ ,  $^{85}Sr$ ,  $^{137}Cs$ 의 전이계수는 처리시기에 따라 각각  $4.7 \times 10^{-4} \sim 3.3 \times 10^{-3}$ ,  $3.2 \times 10^{-4} \sim 2.6 \times 10^{-3}$ ,  $4.3 \times 10^{-4} \sim 3.6 \times 10^{-3}$ ,  $1.7 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-4}$ 의 범위로 대체로 7~8배 정도의 변이를 나타내었다(그림 1). 최고치는 네 핵종 모두 이식 2일전 토양과의 혼합처리에서 관찰되었는데  $^{54}Mn$ ,  $^{60}Co$ ,  $^{85}Sr$ 의 경우에는 이후에 수확한 청과나 적과(그림 2~4)에 있어서도 같은 결과를 보였다. 이식 2일전 및 이식 2일후 방사성 핵종 처리의 경우 전이계수가  $^{85}Sr > ^{54}Mn > ^{60}Co > ^{137}Cs$ 의 순이었으나 수확시기에 가장 가까운 이식 44일후 처리에서는  $^{85}Sr$ 와  $^{137}Cs$  전이계수는 크게 감소하고  $^{54}Mn$ 와  $^{60}Co$  전이계수는 비교적 크게 증가하여  $^{60}Co > ^{54}Mn > ^{85}Sr > ^{137}Cs$ 의 순으로 변하였다. 수확시기에 가장 가까운 처리에서  $^{85}Sr$ 와  $^{137}Cs$ 의 전이계수가 비교적 크게 감소하여 처리시기간에 가장 낮은 값을 보인 것은 이후에 수확한 청과나 적과에 있어서도 마찬가지였다. 이러한 사실은 고추의 뿌리를 통하여 흡수된  $^{85}Sr$ 와  $^{137}Cs$ 이 열매로 이동, 축적되는 데 걸리는 시간이  $^{54}Mn$ 와  $^{60}Co$ 에 비해 길다는 것을 암시하고 있다.

이식 62일후에 수확한 청과의  $^{54}Mn$ ,  $^{60}Co$ ,  $^{85}Sr$  전이계수는 이식 2일전 토양과 방사성 핵종의 혼합처리에 이와 시기적으로 가장 가까운 이식 2일후 처리에 비해 각각 7배, 8배 및 3배 정도나 높았다. 이것은 방사성 핵종과 표층토의 혼합으로 방사성 핵종과 뿌리 흡수부위의 접촉면적이 넓어져 흡수가 촉진되었기 [15] 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 흡수 촉진 효과에 의한 전이계수의 증가 정도는 수확이 늦어질수록 낮아져  $^{85}Sr$ 의 경우 이식 150일후에 수확한

열매에서는 두 처리간에 차이가 거의 없었다(그림 2 및 4). 한편  $^{137}Cs$ 에서는 어느때 수확한 열매에서도 표층토와의 혼합처리에 의한 흡수촉진 효과가 관찰되지 않았다. 따라서 고추의  $^{137}Cs$  흡수는 타 핵종에 비해 상대적으로 낮은 뿌리에서 활발한 것으로 추측해 볼 수 있으나 정확한 설명은 보다 세밀한 실험이 뒤따라야 가능할 것이다.

이식 150일 후에 수확한 청과에서의 전이계수는 처리시기에 따라  $^{54}Mn$ 가  $5.9 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ ,  $^{60}Co$ 이  $2.5 \times 10^{-4} \sim 5.4 \times 10^{-4}$ ,  $^{85}Sr$ 가  $5.7 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-3}$ ,  $^{137}Cs$ 이  $1.7 \times 10^{-5} \sim 1.8 \times 10^{-4}$ 의 범위로  $^{137}Cs$ 을 제외하고는 이식 62일후에 수확한 청과에 비해 처리시기에 따른 변이가 적었다(그림 2). 이식후 처리만 보면  $^{54}Mn$ 와  $^{60}Co$ 의 경우 처리시기간에 변이가 거의 없었고  $^{85}Sr$ 와  $^{137}Cs$ 도 생육 전반기의 두 처리시기간에는 변화가 없었으나 이식 91일후 처리에서는 이식 44일후 처리에 비해 각각 3배 및 11배 정도나 감소하여 가장 낮았다. 핵종간 전이계수는 대체로 어느 처리시기에 있어서나  $^{85}Sr > ^{54}Mn > ^{60}Co > ^{137}Cs$ 의 순이었다.

이식 150일후에 수확한 청과에서는 이식 62일후에 수확한 청과에 비해 이식전 처리시  $^{54}Mn$ ,  $^{60}Co$  및  $^{85}Sr$ 의 전이계수가 각각 2배, 5배 및 2배 정도 감소하였고 이식 2일후 처리시  $^{54}Mn$ 의 전이계수가 2배 정도 증가하였으며 이식 44일후 처리시  $^{60}Co$ 의 전이계수가 5배 정도 감소하였고  $^{85}Sr$ 와  $^{137}Cs$ 의 전이계수가 각각 4배 및 11배 정도 증가하였으나 나머지 경우들에서는 두 수확시기간에 큰 차이가 없었다. 이식 44일후 처리시 이식 150일후 수확에서 이식 62일후 수확에 비해  $^{85}Sr$ 와  $^{137}Cs$ 의 전이계수가 크게 증가한 것은 방사능 처리와 수확까지의 기간이 매우 길었기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 이식 150일후 수확에서는 방사능 처리와 수확까지의 기간이 106일로 청과의 발육기간 내내  $^{85}Sr$ 와  $^{137}Cs$ 이 열매로 이동, 축적된 반면 이식 62일후 수확에서는 열매로의 두 핵종 이동, 축적기간이 18일에 불과해 앞에서 열매로 이동, 축적되는 데 비교적 긴 시간이 필요한 것으로 추정된  $^{85}Sr$ 와  $^{137}Cs$ 의 농도가 두 수확시기간에 큰 차이를 보인 것으로 해석할 수 있다. 한편,  $^{60}Co$ 의 경우 이 두 핵종들과는 반대로 이식 44일후 처리시 이식 62일후 수확에서 이식 150일후

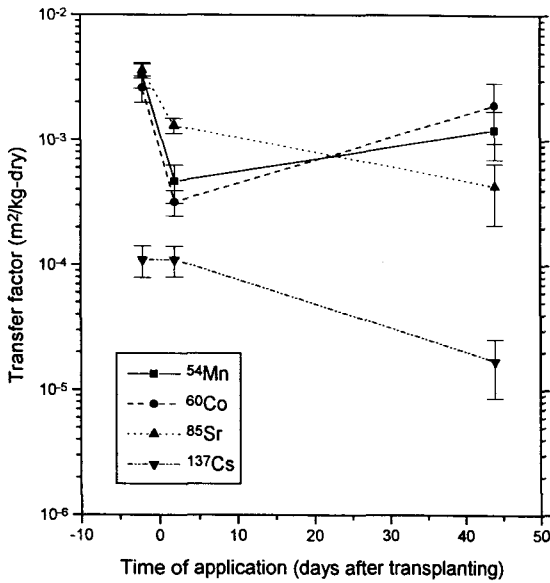


Fig. 1. Variations in transfer factors of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  with their application time in the green fruit of red pepper harvested 62 days after transplanting.

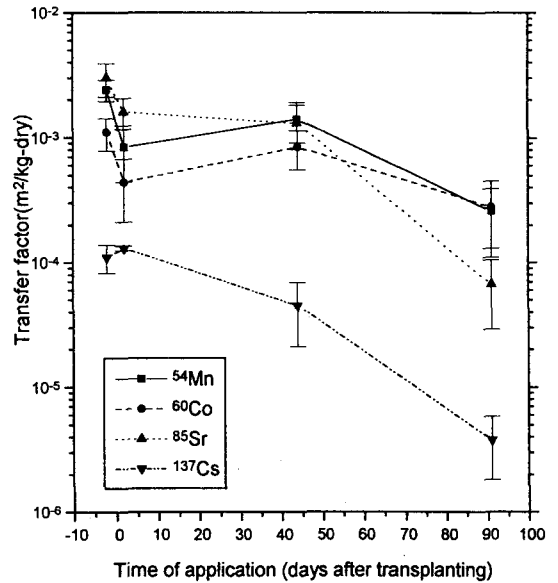


Fig. 3. Variations in transfer factors of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  with their application time in the red fruit of red pepper harvested 108 days after transplanting.

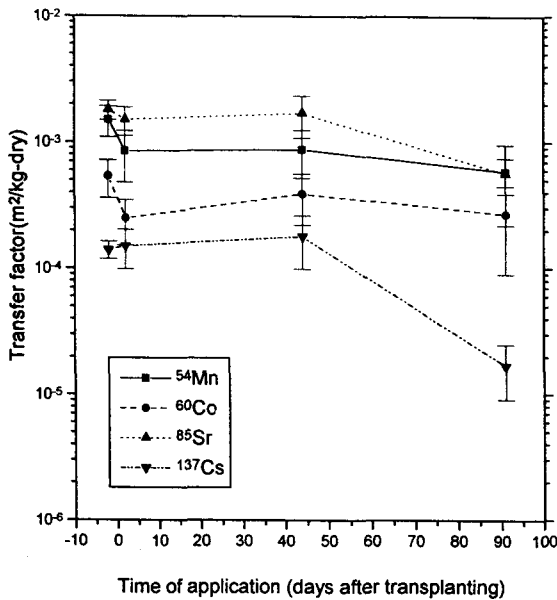


Fig. 2. Variations in transfer factors of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  with their application time in the green fruit of red pepper harvested 150 days after transplanting.

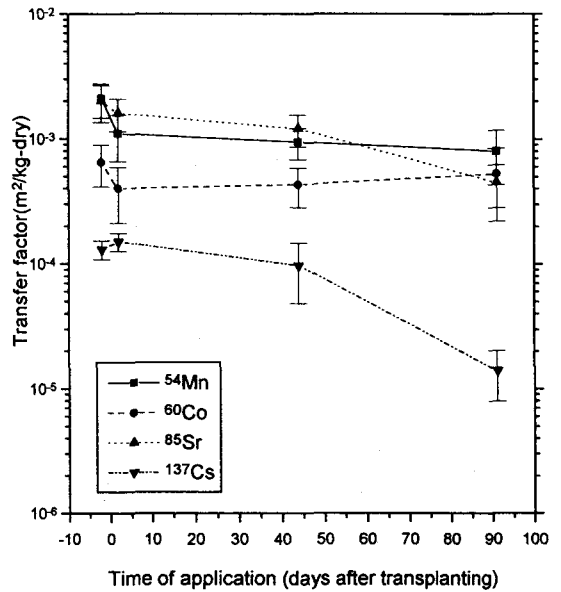


Fig. 4. Variations in transfer factors of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  with their application time in the red fruit of red pepper harvested 150 days after transplanting.

Table 1. Fruit yield of red pepper.

Time of RI <sup>a</sup> application (DAT)	Time of <sup>b</sup> Harvest	Yield per plant( $\bar{x} \pm S.D.$ )				
		Green fruit			Red fruit	
		Number	Fresh wt.(g)	Dry wt.(g)	Number	Dry wt.(g)
-2	1st	5.0±0.0	73.7± 8.7	9.6± 1.6	23.0± 6.2	32.7± 7.4
	2nd	18.5± 9.5	89.8± 48.2	11.0± 5.9	14.8± 3.3	22.0± 7.4
	Sum	23.5± 9.5	163.5± 51.9	20.6± 6.6	37.8± 6.7	54.7± 9.2
2	1st	5.0±0.0	72.8± 9.2	8.3± 1.3	16.8± 7.0	23.8± 10.9
	2nd	26.8± 9.1	170.5± 37.5	21.0± 4.2	14.0± 7.8	20.4± 12.1
	Sum	31.8± 9.1	243.3± 44.0	29.3± 4.9	30.8± 14.7	44.2± 22.9
44	1st	5.0±0.0	63.5± 10.4	7.7± 1.5	19.0± 2.2	27.7± 3.8
	2nd	9.8± 3.6	66.6± 10.0	8.8± 1.3	15.3± 7.9	25.8± 14.9
	Sum	14.8± 3.6	130.1± 16.5	16.5± 2.8	34.3± 6.4	53.5± 13.6
91	1st	5.0±0.0	73.6± 11.2	9.4± 1.9	20.0± 7.5	27.6± 13.6
	2nd	16.8± 5.6	121.0± 20.2	17.0± 1.2	18.0± 10.9	25.1± 14.2
	Sum	21.8± 5.6	194.6± 22.5	26.4± 2.5	38.0± 15.6	52.7± 22.8

DAT : days after transplanting.

a '-' means 'days before transplanting'.

b 1st harvest was made 62 days and 108 days after transplanting for green fruit and red fruit, respectively. 2nd harvest was made 150 days after transplanting for both.

수확에 비해 5배 정도 높은 것으로 볼 때  $^{60}\text{Co}$ 은 열매의 발육초기 처리시 또는 열매를 수확하기 비교적 단기간전 처리시 열매로의 전이가 활발한 것으로 추측해 볼 수 있다. 이것은 이식 62일후 수확한 청과에서 이식 44일후 처리시의  $^{60}\text{Co}$  전이계수가 열매의 생성 전인 이식 2일후 처리에 비해 6배 정도 높았다는 사실과도 부합하고 있다.

청과는 수분이 보존된 상태로 소비되므로 청과의 소비를 통한 인체의 방사성 핵종 흡수량을 추정하기 위해서는 신선중량 기준의 전이계수가 필요하다. 신선중량 기준의 전이계수를 구하기 위해서는 그림 1과 2에 나타나 있는 값들을 각각 신선중량 대 건조중량의 비(표 1)로 나누어 주면 된다. 이렇게 구한 신선중량 기준의 전이계수는 건조중량 기준에 비해 7~9배 정도 낮아지게 된다.

이식 108일후에 수확한 적과에서의  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  전이계수는 처리시기에 따라 각각  $2.6 \times 10^{-4} \sim 2.4 \times 10^{-3}$ ,  $2.8 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-3}$ ,  $6.7 \times 10^{-5} \sim 3.8 \times 10^{-3}$ , 3.8

$\times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-4}$ 의 범위로  $^{85}\text{Sr}$ 와  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 수십 배까지의 변이를 보였다(그림 3). 이식후 처리에서 전이계수는  $^{54}\text{Mn}$ 와  $^{60}\text{Co}$ 의 경우 이식 44일후 처리에서 가장 높았다가 이식 91일 처리에서 각각 5배 및 3배 정도 감소하여 가장 낮았다.  $^{85}\text{Sr}$ 와  $^{137}\text{Cs}$  전이계수는 대체로 처리시기가 늦어질수록 점점 감소하여 이식 91일후 처리에서는 44일후 처리에 비해 각각 20배 및 12배 정도 낮은 값을 보였다. 이와 같이 이식 91일후 처리시 전이계수가 네 핵종 공히 크게 감소한 것은 방사성 핵종 처리와 열매 수확까지의 기간이 짧았기 때문인 것으로 생각된다. 여기에서도  $^{85}\text{Sr}$ 와  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수 감소 정도가 특히 큰 것은 앞에서 설명한 이유 때문인 것으로 볼 수 있다. 핵종간 전이계수는 이식전 및 이식후 생육 전반기 처리에서는 대체로  $^{85}\text{Sr} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs}$ 의 순이었으나 생육후기 처리시에는  $^{60}\text{Co} > ^{54}\text{Mn} > ^{85}\text{Sr} > ^{137}\text{Cs}$ 의 순으로 변하였다.

이식 108일후 수확한 적과에서 이식 91일후 처리시

방사성 핵종 처리일로부터 수확까지의 기간은 17일로 이식 62일후 수확한 청과에서의 이식 44일후 처리와 거의 같지만  $^{60}\text{Co}$  전이계수는 크게 낮았다. 이와 같은 사실은 열매의 발육후기에는 열매로의  $^{60}\text{Co}$  전이가 활발하지 못하다는 것을 암시한다. 따라서 이식 44일후 처리시 이식 62일후 수확한 청과에서  $^{60}\text{Co}$  전이계수가 특히 높은 것은 수확하기 비교적 단기간전에  $^{60}\text{Co}$ 이 처리되었다는 사실보다는 열매의 발육초기에 처리되었다는 사실과 밀접한 관련이 있을 것으로 추정된다. 이런 것들로 볼 때 고추 열매에서의  $^{60}\text{Co}$  축적은 열매의 발육초기에 흡수되어 곧바로 열매로 전류되는  $^{60}\text{Co}$ 에 크게 좌우된다고 하겠다. 이런 경향이  $^{54}\text{Mn}$ 에서도 어느 정도 관찰되고 있다.

이식 150일후에 수확한 적과에서의  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  전이계수는 처리시기에 따라 각각  $8.0 \times 10^{-4} \sim 2.1 \times 10^{-3}$ ,  $4.0 \times 10^{-4} \sim 6.5 \times 10^{-4}$ ,  $4.5 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-3}$ ,  $1.4 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ 의 범위로  $^{137}\text{Cs}$ 의 변이 정도가 가장 컸다(그림 4). 이식후 처리에서만 보면  $^{54}\text{Mn}$ 와  $^{60}\text{Co}$  전이계수는 처리시기에 따른 변이가 거의 없었으며  $^{85}\text{Sr}$ 와  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우는 처리시기가 늦어질수록 감소하는 경향이었으나 생육 전반기 두 처리시기간에는 큰 차이가 없었다. 이와 같은 핵종별 처리시기에 따른 전이계수의 변화 양상은 대체로 같은 날에 수확한 청과(그림 2)와 비슷한 경향이였다. 핵종간에 전이계수는 이식전 및 생육 전반기 처리시에는 대체로  $^{85}\text{Sr} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs}$ 의 순이었으나 생육후기 처리에서는  $^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} > ^{85}\text{Sr} > ^{137}\text{Cs}$ 의 순으로 나타났다.

이식 150일후에 수확한 적과에서는 이식 108일후에 수확한 적과에 비해 이식 91일후 처리의 경우  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  전이계수가 각각 3배, 2배, 7배, 4배 정도 증가하였다. 여기서도  $^{85}\text{Sr}$ 와  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수가 비교적 크게 증가한 것은 위에서 설명한 것과 같은 이유 때문인 것으로 볼 수 있다. 한편 나머지 경우에는 이식 44일후 처리한  $^{137}\text{Cs}$  전이계수를 제외하고는 이식 108일후에 수확한 적과에 비해 다소 감소하였거나 차이가 거의 없었다. 이와 같은 적과에서의 두 수확 시간차이는 청과에서의 그것보다 전반적으로 작은 것인데 그 가장 큰 이유는 적과에서는 두 수확시간 일수가 42일로 청과에서 보다 훨씬 짧았기 때문인

것으로 판단된다. 이식 150일후에 수확한 적과와 같은 날에 수확한 청과에서의 전이계수는 핵종 및 처리시기에 따라 몇몇 경우 최고 2배 정도의 차이가 있었으나 전체적으로는 비슷한 수준이었다.

청과와 적과를 합친 세 번의 수확시기에 따른 전이계수의 변이양상은 핵종간 및 처리시간에 다르게 나타났는데  $^{54}\text{Mn}$ 와  $^{85}\text{Sr}$ 의 경우 이식 91일후 처리에서 수확시기에 따른 변이가 각각 3배 및 9배 정도로 가장 컸고  $^{60}\text{Co}$ 과  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 이식 44일후 처리에서 각각 5배 및 10배 정도로 가장 컸다.

고추의 청과는 수시로 수확하여 바로 소비하지만 적과는 보통 생육 후반기 동안 두세 차례에 걸쳐 수확한 열매들을 다 합쳐 건과용으로 쓰고 있다[14]. 따라서 적과의 경우에는 서로 다른 시기에 수확한 열매들을 다 합쳐 전이계수를 측정하는 것도 의미있을 것이다. 이와 같은 전이계수는 상기의 실험결과들로부터 1차와 2차에 수확한 적과의 생산량에 대한 두 전이계수의 가중평균을 구하면 얻을 수 있다. 이렇게 구한 전이계수는 표 2에서 보는 바와 같다. 이때 처리시간 전이계수의 변화양상은  $^{54}\text{Mn}$ 와  $^{60}\text{Co}$ 의 경우 1차 수확한 적과와 비슷하였고  $^{85}\text{Sr}$ 와  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 2차 수확한 적과와 비슷하였으며 핵종간 전이계수의 차이양상은 전반적으로 2차 수확한 적과에서와 비슷한 경향이였다.

Table 2. Transfer factors for the sum of red fruits harvested at two different times.

Time of RI application (DAT)	Transfer factor (m <sup>2</sup> /kg-dry)			
	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>85</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
-2	$2.2 \times 10^{-3}$	$8.4 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-4}$
2	$9.9 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-4}$
44	$1.1 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$7.5 \times 10^{-5}$
91	$5.7 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-4}$	$9.7 \times 10^{-6}$

DAT : days after transplanting

조사된 전이계수의 의의

본 연구에서 조사된 고추의 생육중 각 핵종의 침적시기별 토양-작물체간 전이계수는 고추의 생육중

사고 발생시 뿌리흡수로 인한 고추의 열매내 핵종의 농도를 예측하는 데 매우 유용한 자료로 활용될 수 있다. 현재 대부분의 사고시 섭취선량 평가코드[3,4, 11]에서는 이러한 자료의 부족으로 작물체의 뿌리흡수는 흡수기간 또는 작물체중 증가량에 비례한다는 가정하에 작물의 이식이나 파종 전에 핵종을 토양과 혼합하여 구한 전이계수를 사용하여 작물의 생육중에 침적한 핵종의 뿌리흡수 농도를 평가하고 있다. 이렇게 하면 대체로 작물의 생육중 침적시기가 빠를수록 뿌리흡수 농도가 높게 평가되고 생육 후반기 침적시에는 매우 낮은 농도가 예측된다. 본 실험에서는  $^{137}\text{Cs}$  전이계수가 어느 정도 이와 비슷한 양상을 보였으나 다른 핵종들은 차이가 크거나 반대되는 양상을 나타 내기까지 하였다. 또한 본 실험에서 이식전 토양과의 혼합처리와 이식 직후 처리간 전이계수의 차이로 볼 때 작물의 생육중 침적시 전이계수에 대한 초기값으로 이식전 혼합처리의 것을 사용하는 것은 합리적이지 못한 것으로 판단된다. 따라서 본 실험에서 구한 것과 같은 생육중 침적시기별 전이계수 자료를 축적하여 평가모델에 적절히 반영하는 방안을 모색할 필요가 있다.

고추의 수확시기에 따른 전이계수의 변이 경향은 고추밭 오염사고 발생시 열매의 수확 및 소비 대책을 수립하는 데 필요한 기초정보가 된다. 즉, 위와 같은 실험 결과들로 볼때 고추의 생육 후반기에 고추밭이 방사성 핵종으로 오염되면 적과의 경우 가능한 한 빨리 수확하고 사고 발생후 한 달 가량 지난후에는 수확을 포기하는 것이 적과의 소비를 통한 내부피폭 선량 감소에 도움이 될 것으로 생각된다. 특히 원전 사고시 섭취피폭경로에서 대표적인 관심핵종인  $^{90}\text{Sr}$ 과  $^{137}\text{Cs}$ [13]의 경우 상기의 감소효과가 더욱 클 것으로 예상된다는 점에 유의할 필요가 있다. 또한  $^{85}\text{Sr}$ 와  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우에는 생육중 침적시 청과도 가능한 한 빨리 수확한 것만 소비하는 것이 좋을 것이다.  $^{54}\text{Mn}$ 와  $^{60}\text{Co}$ 의 경우에도 고추밭의 오염 직후에 바로 청과를 수확하면 열매내의 핵종 농도가 매우 낮을 것이나 어느 정도 기일이 경과한 이후에는 오히려 일찍 수확하는 열매의 핵종농도가 더 높을 가능성도 있으므로 주의해야 할 것이다. 한편 고추의 이식전  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,

$^{85}\text{Sr}$ 가 침적되어 발갈이에 의해 토양과 혼합되었을 경우에는 초기에 수확한 청과를 폐기하는 것이 바람직하며 적과도 늦게 수확한 것만 이용하는 것이 선량감소에 다소 유리할 것으로 판단된다.

고추의 생육중 사고 발생시 방사성 핵종의 침적시기 및 열매의 수확시기에 따른 각 핵종 전이계수의 변화양상은 토양, 기상, 영농관행 등에 따라 다를 것이므로 다양한 재배환경에 대해 실험을 수행하여 기초 자료를 충분히 확보함으로써 사고시 영향평가의 현실성을 높이고 합리적인 대책 수립을 가능케 해야 할 것이다.

#### 기보고 전이계수와의 비교

지금까지 보고된 방사성 핵종의 토양-작물체간 전이계수는 거의 전부가 작물의 이식 또는 파종전에 방사능과 토양을 일정 깊이로 혼합한 상태에서 조사한 것으로 토양 단위무게당 핵종 농도에 대한 작물체 단위무게당 핵종 농도의 비로 나타나[5-7] 있다. 따라서 본 실험에서 고추의 이식전 토양과의 혼합처리에서 얻은 전이계수들을 토양 단위무게당 농도 기준으로 환산한다면 기 보고된 값들과 비교할 수 있다. 이와 같이 환산하기 위해서는 근사적으로 측정치에 180(넓이 1m<sup>2</sup>, 깊이 15cm, 가비중 1.2에 해당하는 토양의 무게(kg))을 곱해 주면 된다. 이렇게 구한 고추의 청과와 적과에 대한 핵종별 전이계수는 표 3에 나타나 있다.

표 4는 최 등[16]이 직접 발표하였거나 Ng 등[5]이 여러 연구자들[17-21]의 다양한 실험 결과를 정리하여 발표한 과채류 가식부위의 핵종별 전이계수를 보여 주고 있다. 이 표에서와 같이 지금까지 과채류중 고추에 대한 실험결과는 거의 전무하였다. 조성이 같은 토양 내에서의 핵종간 전이계수는 토마토의 경우  $^{85}\text{Sr}$ 가  $^{60}\text{Co}$ 이나  $^{137}\text{Cs}$ 보다 높았고 호박의 경우에는 대체로  $^{54}\text{Mn}$ 가  $^{60}\text{Co}$ 이나  $^{137}\text{Cs}$ 보다 높았다. 본 실험에서도 이식전 토양과의 혼합처리시  $^{54}\text{Mn}$ 나  $^{85}\text{Sr}$ 의 전이계수는 어느때 수확한 열매에 있어서도  $^{60}\text{Co}$ 이나  $^{137}\text{Cs}$ 의 전이계수보다 높았다. 이와 같이 방사성 Mn이나 Sr의 뿌리흡수가 일반적으로 방사성 Co나 Cs의 뿌리흡수보다 크다[15, 22,23]는 것은 잘 알려져 있는 사실이다.



**Table 3.** Soil-to-red pepper transfer factors on a mass basis for the radionuclides mixed with topsoil before transplanting.

Plant part	Time of harvest (DAT)	Transfer factor <sup>a</sup>			
		<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>85</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
Green fruit	62	5.9×10 <sup>-1</sup>	4.7×10 <sup>-1</sup>	6.5×10 <sup>-1</sup>	2.0×10 <sup>-2</sup>
	150	2.7×10 <sup>-1</sup>	9.7×10 <sup>-2</sup>	3.2×10 <sup>-1</sup>	2.5×10 <sup>-2</sup>
Red fruit	108	4.3×10 <sup>-1</sup>	2.0×10 <sup>-1</sup>	5.4×10 <sup>-1</sup>	2.0×10 <sup>-2</sup>
	150	3.8×10 <sup>-1</sup>	1.2×10 <sup>-1</sup>	3.6×10 <sup>-1</sup>	2.3×10 <sup>-2</sup>
	Sum	4.0×10 <sup>-1</sup>	1.5×10 <sup>-1</sup>	4.3×10 <sup>-1</sup>	2.2×10 <sup>-2</sup>

DAT : days after transplanting.

<sup>a</sup>  $\frac{\text{Bq/kg-dry plant}}{\text{Bq/kg-dry soil}}$

표 3과 표 4의 전이계수를 비교해 보면 고추의 핵종별 전이계수는 <sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co, <sup>85</sup>Sr의 경우 토마토보다 다소 높았으나 <sup>137</sup>Cs의 경우 토마토의 전이계수 범위 내에 속하였고 오이에 비해서는 3~4배 정도 낮은 편이었다. 한편 호박에 비해서 고추의 핵종별 전이계수는 신선중량 기준으로 환산하여 비교할 때 <sup>137</sup>Cs의 경우 약 10배 정도 낮았으나 <sup>54</sup>Mn의 경우 호박의 전이계수 범위내에 속하였고 <sup>60</sup>Co의 경우에는 호박보다 다소 높은 편이었다. 이처럼 같은 과채류에 속하는 작물끼리도 핵종에 따라 전이계수가 꽤 크게 차이나므로 원자력 시설의 가동에 따른 농산물 섭취선량 평가의 현실성을 제고하기 위해서는 여러 종류의 과채류에 대해서 실험을 수행하여 전이계수 데이터베이스를 확장할 필요가 있다.

**Table 4.** Transfer factors of Mn, Co, Sr and Cs for the edible part of fruit vegetables reported by Choi et al. and Ng et al.

Nuclide <sup>a</sup>	Crop species	Soil <sup>b</sup> texture	Culture method	Transfer factor <sup>c</sup>		Reference
				Fresh plant	Dry plant	
Mn	Tomato	FSL	Pot	6.9×10 <sup>-3</sup>	1.1×10 <sup>-1</sup>	[17]
<sup>54</sup> Mn	Squash	SL	∕	1.2×10 <sup>-1</sup>	—	[16]
	∕	LS	∕	1.7×10 <sup>-2</sup>	—	[16]
<sup>60</sup> Co	Tomato	SL	Field plot	4.6×10 <sup>-3</sup>	7.0×10 <sup>-2</sup>	[18]
	Squash	SL	Pot	1.9×10 <sup>-2</sup>	—	[16]
	∕	LS	∕	4.6×10 <sup>-3</sup>	—	[16]
<sup>85</sup> Sr	Tomato	SL	Lysimeter	2.0×10 <sup>-2</sup>	3.1×10 <sup>-1</sup>	[19]
	∕	Loam	∕	2.5×10 <sup>-3</sup>	3.8×10 <sup>-2</sup>	[19]
	∕	Clay	∕	1.1×10 <sup>-2</sup>	1.7×10 <sup>-1</sup>	[19]
	∕	SC	∕	2.7×10 <sup>-3</sup>	4.2×10 <sup>-2</sup>	[20]
<sup>137</sup> Cs	Cucumber	Loam	Pot	4.1×10 <sup>-3</sup>	8.3×10 <sup>-2</sup>	[21]
	Tomato	SL	Lysimeter	5.5×10 <sup>-3</sup>	8.4×10 <sup>-2</sup>	[19]
	∕	Loam	∕	3.0×10 <sup>-5</sup>	4.6×10 <sup>-4</sup>	[19]
	∕	Clay	∕	1.1×10 <sup>-3</sup>	1.7×10 <sup>-2</sup>	[19]
	∕	Loam	∕	1.7×10 <sup>-4</sup>	2.6×10 <sup>-3</sup>	[20]
	∕	∕	Pot	2.2×10 <sup>-3</sup>	3.4×10 <sup>-2</sup>	[21]
	Squash	SL	∕	3.9×10 <sup>-2</sup>	—	[16]
	∕	LS	∕	2.5×10 <sup>-2</sup>	—	[16]

<sup>a</sup> Mn denotes stable Mn.

<sup>b</sup> FSL : Fine sandy loam, SL : Sandy loam, LS : Loamy sand, SC : Silty clay

<sup>c</sup>  $\frac{\text{Bq/g-plant}}{\text{Bq/g-dry soil}}$

## 결 론

한국인이 비교적 많이 소비하는 작물인 고추의 이식 2일전 및 이식후 세 차례에 걸쳐  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 을 온실내에 장치한 재배상자의 토양에 처리하고 처리시기별 및 수확시기별 고추 청과와 적과에 대한 방사성 핵종의 토양-작물체간 전이계수를 측정하였다.

조사된 전이계수는 핵종, 처리시기 및 수확시기에 따라 20~100배 정도의 변이를 보였다. 처리시기에 따른 전이계수의 변화양상은 핵종간에 차이가 있었다. 작물의 생육중 침적한 방사성 핵종의 뿌리흡수 정도를 예측하기 위해서는 본 실험에서 구한 것과 같은 작물의 생육중 토양표면 처리시기에 따른 전이계수 자료를 충분히 확보하여 평가모델에 반영하는 방안을 모색할 필요가 있음이 확인되었다.

고추의 수확시기에 따른 전이계수의 변이경향은 고추 생육중 고추밭 오염사고 발생시 열매의 수확 및 이용 대책을 수립하기 위한 기초정보로 활용될 수 있다. 본 연구결과에 의하면 고추밭 오염시에는 최단시간 내에 열매를 수확하는 것이 유리하나 청과내  $^{54}\text{Mn}$ 와  $^{60}\text{Co}$ 의 농도는 어느 정도 기일이 경과한 후에는 오히려 일찍 수확하는 열매에서 더 높을 수도 있으므로 주의해야 할 것이다.

고추의 생육중 사고 발생시 방사성 핵종의 침적시기 및 열매의 수확시기에 따른 전이계수의 변화양상은 토양, 기상, 재배법 등에 따라 다를 것이므로 다양한 재배환경에 대해 실험을 수행하여 기초자료를 충분히 확보함으로써 사고시 영향평가의 현실성을 높이고 합리적인 대책 수립을 가능케 해야 한다. 또한 다른 주식작물들에 대해서도 조사하여 자료를 축적하고 사고에 대비해야 할 것이다.

### 감사의 글

\* 이 연구는 과학기술처가 시행한 원자력중장기연구 개발사업의 결과입니다.

## 참 고 문 헌

1. IAEA, *Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases*, Safety Series No. 57, Vienna (1982).
2. R. Zach, *FOOD II: An Interactive Code for Calculating Concentrations of Radionuclides in Food Products*, AECL Report, AECL-6305, WNRE (1978).
3. F. W. Whicker and T. B. Kirchner, "PATHWAY: A dynamic food chain model to predict radionuclide ingestion after fallout deposition." *Health Phys.* 52, 717-737 (1987).
4. 이정호 등, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭 선량 평가코드 개발, KAERI/RR-998/90, 과학기술처 (1991).
5. Y. C. Ng, C. S. Colsher and S. E. Thompson, *Soil-to-Plant Concentration Factors for Radiological Assessments*, Report NUREG/CR-2975, UCID-19463, Lawrence Livermore Lab., USNRC (1982).
6. R. Zach, *Transfer Coefficients to Terrestrial Food Products in Equilibrium Assessment Models for Nuclear Installations*, AECL Report, AECL-6449, WNRE (1980).
7. IAEA, *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments*, Technical Reports Series No. 364, Vienna (1994).
8. F. R. Livens, A. D. Horrill and D. L. Singleton, "Distribution of radiocesium in the soil-plant systems of upland areas of Europe." *Health Phys.* 60, 539-545 (1991).
9. B. Salbu, D. H. Oughton et al., "The mobility of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in agricultural soils in the Ukraine, Belarus, and Russia, 1991." *Health Phys.* 67, 518-528(1994).
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", 대한방사선방어

- 학회지. 21(1), 51-58 (1996).
11. M. L. Abbott and A. S. Rood, "COMIDA : A radionuclide food chain model for acute fallout deposition." *Health phys.* 66, 17-29 (1994).
  12. S. Glasstone and W. H. Jordan, *Nuclear Power and Its Environmental Effects*, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois (1980).
  13. P. Renaud and H. Maubert, "Agricultural countermeasures in the management of a post-accidental situation." *J. of Environ. Radioactivity* 35, 53-69 (1997).
  14. 표현구 등, *채소원예각론*, 향문사 (1986).
  15. J. F. Cline and W. H. Rickard, "Radioactive strontium and cesium in cultivated and abandoned field plots." *Health Phys.* 23, 317-324 (1972).
  16. 최용호, 김국찬, 이창우, 이강석, 이정호, 박찬걸, 조용우, "벼, 콩 및 채소류에 대한  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 토양-작물체간 전이계수." *대한방사선방어학회지* 16(2), 55-65 (1991).
  17. A. K. Furr, W. C. Kelly, C. A. Bache, W. H. Gutemann and D. J. Lisk, "Multielement absorption by crops grown in pots on municipal sludge-amended soil." *J. Agr. Food Chem.* 24, 889-892 (1976).
  18. W. E. Grummitt, "Transfer of cobalt-60 to plants from soils treated with sewage sludge," in: *Radioecology and Energy Resources*, Proc. of the Fourth National Symposium on Radioecology, May 12-14, 1975, Oregon State Uni., Corvallis, Oregon, pp 331-335, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., Stroudsburg, PA (1975).
  19. J. D. Sartor, W. B. Lane and J. J. Allen, *Uptake of Radionuclides by Plants*, AD-649009, Stanford Research Institute, Menlo Park, CA (1966).
  20. J. D. Sartor, P. G. Kruzic, W. B. Lane and J. L. Mackin, *Experimental Investigation of Plant Uptake Contamination Factors, Final Report*, AD-694531, Stanford Research Institute, Menlo Park, CA (1968).
  21. E. J. Evans and A. J. Dekker, "Comparative  $^{137}\text{Cs}$  content of agricultural crops grown in a contaminated soil." *Can. J. Plant Sci.* 48, 183-188 (1968).
  22. 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(4), 255-263 (1995).
  23. W. Steffens, W. Mittelstädt and F. Führ, "The transfer of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{54}\text{Mn}$  from soils to plants-results from lysimeter experiments", in: *Radiation Protection-A Systematic Approach to Safety*, Proc. of the 5th Congress of the Intern. Radiation Protection Society, Jerusalem, March 1980, pp. 1139-1143 (1980).