

## 오이의 재배기간중 처리한 방사성 핵종의 토양-작물체간 전이계수 및 지하이동

최용호 · 박효국 · 김상복 · 최근식 · 이정호  
 한국원자력연구소 원자력환경연구팀

### Soil-to-Plant Transfer Factors and Migration of Radionuclides Applied onto Soil during Growing Season of Cucumber

Yong-Ho Choi, Hyo-Kook Park, Sang-Bog Kim, Geun-Sik Choi and Jeong-Ho Lee (*Nuclear Environmental Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute, P.O.Box 105, Yousung, Taejeon, 305-600, Korea*)

**Abstract :** In greenhouse, a mixed solution of Mn-54, Co-60, Sr-85 and Cs-137 was applied to the soil of culture boxes 2 days before sowing cucumber and at 4 different times during its growth for measuring their transfer factors (TFs) for fruit and migration in soil. TFs varied with radionuclide, application time and harvest time by factor of up to about 60. Variations in TFs with application time showed different patterns among radionuclides. TFs decreased on the whole in the order of Sr-85 > Mn-54 > Co-60 > Cs-137. TFs of Mn-54, Co-60 and Cs-137 mixed with topsoil before sowing were a little higher than those for the soil-surface application made at an early growth stage while no difference in Sr-85 TF was found. After harvest, soil concentrations of the radionuclides applied at an early growth stage were examined. They decreased with increasing soil depth and 80~99% of the radioactivity remained in top 3cm. Soil permeation of the radionuclides migration decreased in the order of Sr-85 > Mn-54 > Co-60 > Cs-137. The present data can be utilized in estimating radionuclide concentration in cucumber fruit, taking proper measures for its harvest and consumption and designing the best way of soil decontamination following an radioactive deposition during the cucummmber growing season.

**Key words :** Cucumber, Radionuclide, Soil, Transfer factor, Migration, Growing Season

## 서 론

오이는 우리나라에서 주요 과채류중의 하나로서 다양한 형태로 소비되고 있는 식품이다<sup>1)</sup>. 한편 우리나라에서는 가동중인 원자로의 수가 11 개에 이르고 주변국에서도 다수의 원자로가 가동되고 있으므로 만일의 사고로 농업생태계가 방사능으로 오염될 가능성을 배제할 수 없다. 원자력 사고로 인하여 농업생태계가 방사능으로 오염되면 농작물을 통하여 인체에까지 방사능이 흡수되어 내부피폭을 일으키게 된다<sup>2)</sup>. 따라서 사고시 합리적인 대책을 수립하여 주민과 농업생태계를 방사능으로부터 보호하기 위

해서는 농작물의 방사능 오염경로에 대한 이해가 필요하다. 그러나 우리나라에서는 지금까지 오이와 관련한 연구가 이루어진 적이 없으며 전세계적으로도 Evans와 Dekker의 보고들<sup>3,4)</sup> 외에는 그 예를 찾아 보기 힘들다.

농작물의 방사능 오염은 방사성 핵종의 작물체 표면침적과 토양으로부터의 뿌리흡수에 의해 이루어진다<sup>5,6)</sup>. 작물체 표면침적에 대해서는 작물의 생육중 방사성 핵종의 처리시기별 자료가 많이 발표되어<sup>7,8)</sup> 있으나 뿌리흡수에 대해서는 그러한 자료가 매우 부족하므로 작물의 생육중 사고 발생시 뿌리흡수에 의한 작물체내 방사성 핵종의 농축 정도를

예측하는 것이 매우 곤란한 실정이다. 한편 토양에 침적한 방사성 핵종은 물리적인 붕괴나 지하이동 등에 의해 근근에서 사라질 때까지 재배작물에 의해 다년간 흡수될 수 있다. 따라서 농경지 오염사고 시 장기적인 영향을 평가하기 위해서는 핵종의 지하이동에 관한 자료가 필요하다.

뿌리흡수에 의한 작물체내 방사성 핵종의 농도는 일반적으로 토양 단위무계당 핵종 농도에 대한 작물체 가식부위 단위 무계당 핵종 농도의 비로 정의되는 토양-작물체간 전이계수를 사용하여 평가되고 있다<sup>9-11)</sup>. 이러한 전이계수는 작물의 생육전에 토양과 방사능이 일정한 깊이로 혼합된 상태에서 작물을 재배하여 구해진다. 이와 같은 평가는 대부분의 방사능이 발갈이에 의해 표층토와 균일하게 혼합되어 있는 것으로 볼 수 있는 원자력 시설의 정상 가동시에 적합한 것으로 작물의 생육중에 일시적으로 일어나는 사고침적에 대해서는 적합하지 못하다. 왜냐하면 이때에는 대부분의 방사능이 지표 부근에 분포할 것으로<sup>12)</sup> 예상되고 또한 침적시기에 따라 흡수기간이 달라지며 생육단계에 따라 작물의 흡수력도 크게 변하기 때문이다. 따라서 작물의 생육중 사고 침적에 대해서는 침적시기별로 핵종의 침적량 대비 작물체중 농도( $m^2/kg$ )로 정의되는 전이계수<sup>13)</sup>를 구하여 평가에 사용하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 농작물 소비를 통한 방사선피폭 선량평가에서 주요핵종으로 취급되고 있는 Mn-54, Co-60, Sr-85(Sr-90의 대응), Cs-137<sup>14)</sup>의 네 핵종을 동위원소 실험온실내에서 오이의 파종전 한 차례 및 파종후 네 차례에 걸쳐 재배상자의 토양에 처리하고 전이계수를 조사하였다. 오이는 한 작물체에서의 열매라도 성숙기가 같지 않아 먼저 익은 열매부터 수확하는 것이 보통이므로 수확시기에 따른 전이계수의 차이도 조사하였다. 또한 작물의 수확 직후 핵종의 토양층위별 분포를 조사하고 지하침투 정도를 비교하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 작물 육성

동위원소 실험온실내에 건조된 1.3m 깊이의 호수에 가로, 세로, 높이가 각각 0.6m, 0.6m, 1.0m인 철판 재배상자를 30cm 높이의 지지물로 받치고 설치하였다. 상자의 바닥에서 20cm까지는 직경 1~3cm 가량의 인조석을 깔았고 그 위에 야외에서 채취한 세 층위의 토양을 아래에서부터 각각 30cm, 30cm, 20cm의 깊이로 채우고 물이 배수될 때까지 급수하였다. 급수후 상자내 지표면은 15cm 정도 하강하였다. 이후 오이(신희진주오이, 흥농종묘)의 파종전

까지 며칠간 급수량을 조절하면서 표토의 수분함량을 적절히 유지하였다.

작물의 생육과 직접 관계있는 상부 20cm 깊이의 표층토는 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.

밀거름으로 상자당 요소 11.8g, 용과린 18.0g, 염화칼리 7.5g, 석회 36g, 퇴비 360g을 토양의 표면에 고루 살포하고 날의 길이가 15cm인 모종용 삽으로 토양과 혼합하였다. 파종은 '95년 5월 10일에 상자당 두 구멍에 구멍당 4~5립씩을 약 3cm 깊이로 파종하였다. 생육초기에 작물체를 생육 정도에 따라 적절히 솎아 한 구멍에 한 개체로 하여 상자당 두 개체씩을 육성하였다. 2~3일 간격으로 상자당 4.5 l의 수돗물을 공급하였고 병충해 방제를 위하여 살충제와 살균제를 두세 차례씩 살포하였다. 온실의 창문은 최대한 열어 두어 실내의 온도상승을 가능한 한 억제하였다. 덧거름으로 6월 26일에 상자당 요소 11.8g, 용과린 18.0g, 염화칼리 7.5g을 토양에 살포하였다.

### 2. 방사성 동위원소 처리

Mn-54, Co-60, Sr-85, Cs-137의 무담체 원액을 0.5M HCl 용액에 모두 혼합하여 적정 농도(파종일 기준으로 ml당 각 핵종 약 40,000Bq)로 희석하였다. 이 희석용액을 파종 2일전 한 차례 및 파종후 생육 단계에 따라 네 차례에 걸쳐 재배상자당 64곳의 균등하게 분포하는 지점에 마이크로 피펫을 이용하여 1ml씩 살포하였다.

파종 전에 처리된 방사능은 그 다음날 밀거름과 함께 토양과 혼합하였으나 생육중 처리의 경우에는 그대로 두었다. 생육중 방사능 처리일자는 5월 23일, 6월 10일, 6월 29일, 7월 10일(각각 파종 13, 31, 50, 61일후)이었다. 파종전 처리상자는 파종후 작물의 생육초기에, 그리고 생육중 처리상자는 방사성 동위원소 처리 직후에 직경 1~3cm의 인조석으로 지표면을 덮어 토양 입자의 부유에 의한 작물체의 오염 가능성을 배제하였다.

### 3. 시료채취 및 방사능 분석

열매 수확은 1, 2차로 나누어 개체별로 실시하였다. 1차로는 7월 15일(파종 66일후)에 각 개체에서 가장 먼저 성숙한 열매 하나씩을 수확하였고 2차로는 7월 25일(파종 76일후)에 나머지 열매들을 수확하였다. 수확된 열매들은 생체중을 측정한 다음 적

당히 잘라 온실내에서 건조시켜 수분 함량이 크게 감소하였을 때 다시 잘게 절단하여 2주 이상 천일 건조하였다.

오이재배를 종료하고 2일이 경과한 7월 27일에 생육중 1차 처리 상자에서 직경 5cm의 토양채취기를 이용하여 지하 20cm 깊이까지의 토양을 3반복, 6층위별로 채취하고 한 달간 온실내에서 천일 건조하였다.

건조된 작물체 및 토양 시료는 직경 5cm, 높이 10cm의 플라스틱 계측용기에 담아 건조중을 측정하고 고순도 Ge 검출기를 이용한  $\gamma$ -spectrometry 방법으로 감마선을 계측하여 핵종 농도를 분석하였다. 이때 사용된 hardware와 software는 EG&G ORTEC사 제였고 계측시간은 시료에 따라 1~2 시간 정도였다.

4. 조사항목의 계산

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

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

한 상자에서의 토양-작물체간 방사성 핵종의 전이계수는 개체별 시료들에 대한 값들의 평균과 표준편차로 표시하였다.

방사성 핵종의 지하층위별 분포율(D, %)은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$D = \frac{\text{조사층위내 핵종 } i \text{의 존재량 (Bq)}}{\text{전 채취깊이내 핵종 } i \text{의 존재량(Bq)}} \times 100$$

층위별 분포율은 3반복 시료들에 대한 값들의 평균과 표준편차로 표시하였다.

결과 및 고찰

1. 방사성 핵종 처리시기에 따른 전이계수

표 1은 방사성 핵종 처리시기별 및 수확시기별 오이의 작물체당 열매 생산량을 나타내고 있다. 작물체당 열매 생산량은 약 930~1,470g(신선중)의 범위였다.

위와 같이 수확된 오이 열매의 방사성 핵종 처리시기에 따른 토양-작물체간 전이계수는 그림 1~3에서 보는 바와 같다.

이식 66일후 수확하는 오이의 Mn-54, Co-60, Sr-85, Cs-137 전이계수(m<sup>2</sup>/kg-fresh)는 처리시기에 따라 각각 3.6x10<sup>-5</sup>~5.7x10<sup>-4</sup>, 4.1x10<sup>-6</sup>~8.0x10<sup>-5</sup>, 1.9x10<sup>-5</sup>~9.1x10<sup>-4</sup>, 5.7x10<sup>-6</sup>~6.8x10<sup>-5</sup>의 범위로 대체로 12~50배 정도의 변이를 나타내었다(그림 1). 최고치는 Mn-54, Co-60, Sr-85의 경우 파종후 토양표면 처리

Table 1. Fruit yield of cucumber.

Time of RI application (DAS)	Yield (g-fresh/plant)		
	Harvest 1*	Harvest 2*	Sum
-2	523± 63	511± 70	1034± 6
13	411± 42	514± 82	925±124
31	469±235	988± 81	1457±316
50	393±151	780±385	1173±537
61	507± 71	964±140	1471± 69

DAS : days after sowing.

\* : Harvest 1 and harvest 2 were made 66 and 76 days after sowing, respectively.

에서, Cs-137의 경우 파종 2일전 토양과의 혼합처리에서 관찰되었다. 파종후 처리에서만 보면 Sr-85의 경우 파종 50일후 처리까지 전이계수가 거의 일정하였고 Mn-54와 Cs-137은 파종 31일후 처리에서 최고였고 Co-60은 파종 50일후 처리까지 처리시기가 늦어질수록 전이계수가 계속 증가하였다. 이후 파종 61일후 처리에서는 네 핵종 모두 전이계수가 크게 감소하여 최저치를 나타내었다. 이것은 이때가 열매를 수확하기 불과 5일전이라서 열매로의 핵종 이동이 미미했기 때문인 것으로 볼 수 있다. 핵종 간에 전이계수는 처리시기에 따라 최고 10~50배 정도의 변이를 보였는데 파종 50일후 처리까지는 대체로 Sr-85 > Mn-54 > Co-60 ≥ Cs-137의 순이었다가 파종 61일후 처리에서는 Mn-54 > Sr-85 > Cs-137 ≥ Co-60의 순으로 바뀌었다. 일반적으로

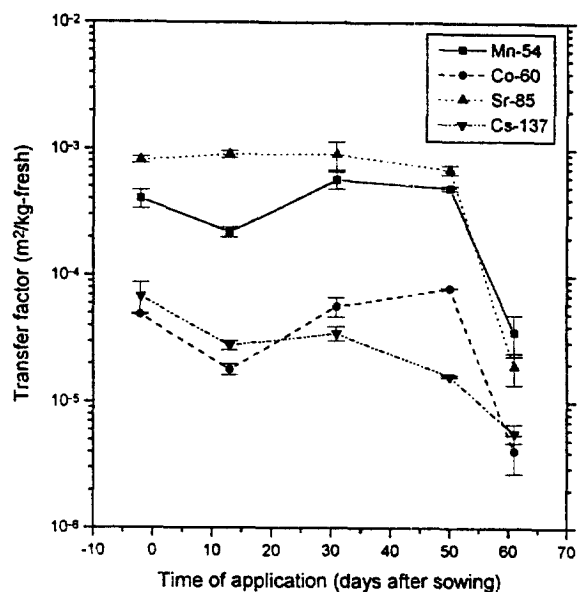


Fig. 1. Variations in transfer factors of Mn-54, Co-60, Sr-85 and Cs-137 with their application time in the cucumber fruit harvested 66 days after sowing.

방사성 Sr이나 Mn의 전이계수가 방사성 Co나 Cs의 전이계수보다 높다<sup>19-21)</sup>는 것은 잘 알려져 있는 사실이다.

Mn-54, Co-60, Cs-137 전이계수는 파종 2일전 표층토와의 혼합처리에 이와 시기적으로 가장 가까운 파종 13일후 토양표면 처리에 비해 2~3배 정도 높았다. 이것은 파종후 처리시기에 따른 전이계수의 변화경향으로 볼때 처리시기의 차이에 의한 것이라기보다 방사성 용액과 표층토와의 혼합으로 방사능과 뿌리의 접촉면적이 넓어져 흡수가 촉진되었기<sup>19)</sup> 때문으로 판단된다. 이러한 흡수촉진에 의한 전이계수의 증가 정도는 파종 76일후 수확한 오이에서는 매우 낮아져 Cs-137에서만 약간 관찰되었을 뿐이었다. 한편 Sr-85에서는 어느때 수확한 열매에서도 이러한 효과가 나타나지 않았다.

파종 76일 후에 수확한 오이에서의 전이계수 (m<sup>2</sup>/kg-fresh)는 처리시기에 따라 Mn-54가 4.2x10<sup>-4</sup> ~ 5.6x10<sup>-4</sup>, Co-60이 6.0x10<sup>-5</sup> ~ 8.2x10<sup>-5</sup>, Sr-85가 5.6x10<sup>-4</sup> ~ 1.3x10<sup>-3</sup>, Cs-137이 1.3x10<sup>-5</sup> ~ 6.1x10<sup>-5</sup>의 범위로 Mn-54와 Co-60은 변이가 거의 없었고 Sr-85와 Cs-137은 각각 2배 및 5배 정도의 변이를 보여 이식 66일후 수확에 비해 전체적으로 변이 정도가 매우 낮았다. Sr-85의 전이계수는 파종 13일후 처리에서 최고였고 Cs-137 전이계수는 파종전 처리에서 최고였으며 파종후에는 파종 50일후 처리에서 최고였다. 마지막 처리에서 Mn-54, Co-60, Sr-85 세 핵종의 전이계수는 파종 66일후 수확한 오이에서의와 달리 바로 전 처리와 거의비슷하였으나 Cs-

Table 2. Mass-based transfer factors of Mn-54, Co-60, Sr-85 and Cs-137 applied and mixed with top soil 2 days before sowing cucumber

Radionuclide	Transfer factor <sup>a</sup>
Mn-54	7.7 × 10 <sup>-2</sup>
Co-60	1.0 × 10 <sup>-2</sup>
Sr-85	1.6 × 10 <sup>-1</sup>
Cs-137	1.2 × 10 <sup>-2</sup>

a :  $\frac{\text{Bq per g-fresh plant}}{\text{Bq per g-dry soil}}$

137 전이계수는 파종 66일후 수확한 오이에서와 같이 바로 전 처리에 비해 3배 정도 감소하였다. 또한 마지막 처리시 파종 76일후 수확한 오이에서의 Mn-54, Co-60, Sr-85 전이계수는 파종 66일후 수확한 오이에 비해 핵종에 따라 15~40배 정도 증가하였으나 Cs-137 전이계수는 2배 가량 증가하는 데 그쳤다. 다른 시기 처리들에서의 전이계수는 파종 66일 수확과 76일 수확간에 핵종 및 처리시기에 따라 큰 차이가 없거나 최고 2~3배 정도 증감하는 데 그쳤다. 핵종간에 전이계수는 어느 처리시기에 있어서나 Sr-85 > Mn-54 > Co-60 > Cs-137의 순으로 Sr-85와 Cs-137 간에는 처리시기에 따라 15~55배 정도의 차이를 나타내었다.

오이의 소비단계에서는 수확기를 명확히 구분할 수 없고 또한 수확기를 나누어 섭취선량을 평가하는 것은 매우 번거롭고 복잡한 일이므로 서로 다른 시기에 수확한 열매들의 합에 대한 전이계수를 구하여 사용하는 것이 편리하다. 이를 위해서는 1차와 2차에 수확한 열매의 생산량에 대한 두 전이계수의 가중평균을 구하면 된다. 이렇게 구한 Mn-54, Co-60, Sr-85, Cs-137 전이계수는 그림 3에서 보는 바와 같이 처리시기에 따라 각각 3.5x10<sup>-4</sup>~5.3x10<sup>-4</sup>, 4.1x10<sup>-5</sup>~8.2x10<sup>-5</sup>, 4.7x10<sup>-4</sup>~1.1x10<sup>-3</sup>, 1.0x10<sup>-5</sup>~6.4x10<sup>-5</sup>의 범위로 대체로 2~6배 정도의 변이를 보였다. Cs-137을 제외한 세 핵종은 파종후 처리에서 최고치를 나타내었고 Cs-137은 파종전 처리에서 최고치를 나타내었다. 파종후 Cs-137은 파종 50일후 처리까지 큰 변화가 없다가 마지막 처리에서 비교적 크게 감소하여 최저치를 나타내었다. Co-60 전이계수는 파종후 처리시기가 늦어질수록 조금씩 증가하다가 마지막 처리에서는 약간 감소하였다. 방사능과 표층토의 혼합에 의한 전이계수의 증대는 Cs-137에서만 관찰되었다. 핵종간에는 대체로 Sr-85 > Mn-54 > Co-60 ≥ Cs-137의 순으로 Sr-85와 Cs-137 간에는 처리시기에 따라 최고 50배 정도의 차이가 관찰되었다.

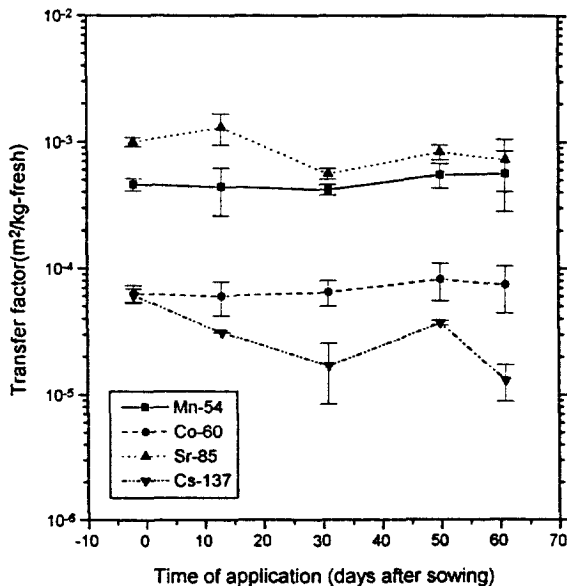


Fig. 2. Variations in transfer factors of Mn-54, Co-60, Sr-85 and Cs-137 with their application time in the cucumber fruit harvested 76 days after sowing.

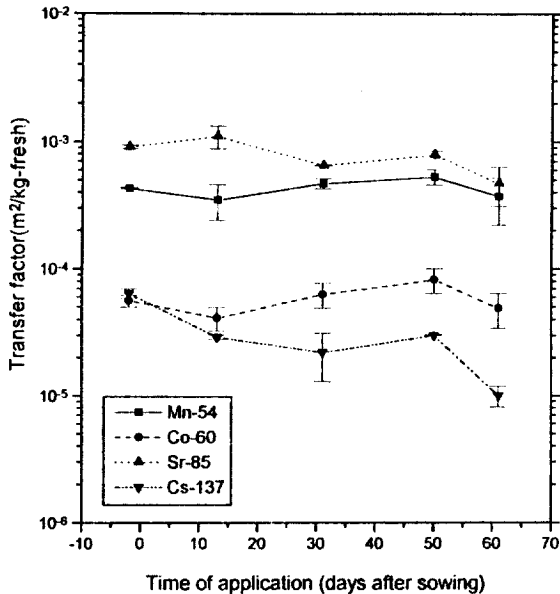


Fig. 3. Variations in transfer factors of Mn-54, Co-60, Sr-85 and Cs-137 with their application time in the sum of cucumber fruit harvested at two different times.

## 2. 타 연구자 보고치와의 비교

지금까지 조사, 보고된 방사성 핵종의 토양-작물체 전이계수는 거의 전부가 작물의 생육전에 방사능과 토양을 일정 깊이로 혼합한 상태에서 측정된 것으로 토양 단위무게당 핵종농도에 대한 작물체 단위무게당 핵종 농도의 비로 계산되어 있다<sup>2, 11)</sup>. 따라서 본 실험에서 오이의 파종전 토양과의 혼합처리에서 얻은 전이계수들을 토양 단위무게당 농도 기준으로 환산한다면 보고치들과 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. 여기서 깊이를 15cm로 한 것은 표층토의 혼합에 사용한 모종삽의 날 길이가 15cm였기 때문이다. 이렇게 구한 핵종별 전이계수는 표 2에 나타나 있다. 파종전 혼합처리에 있어서는 1차 수확과 2차 수확 간에 전이계수의 차이가 거의 없었기 때문에 1차와 2차 수확의 합에 대한 전이계수만 표시하였다.

Ng 등<sup>12)</sup>은 Evans와 Dekker<sup>7)</sup>의 실험결과에 입각하여 약알칼리성 양토에서 오이의 Cs-137 전이계수가  $4.1 \times 10^{-4}$ 이라고 보고한 바 있다. 동일한 토양에서 Evans와 Dekker<sup>7)</sup>가 수행한 또다른 실험결과에 의하면 오이의 Sr-90 전이계수는 약  $5.0 \times 10^{-5}$ 로 계산될 수 있다. 본 실험에서 얻은 오이의 Sr-85 및 Cs-137 전이계수(표 2)는 위의 값들보다 3배 정도 높았다. 이와 같은 차이는 주로 재배토양의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 토양-작물체간

방사성 핵종의 전이계수는 토양의 pH가 낮을수록 그리고 모래 함량이 많을수록 높아지는 경향이 있다<sup>13)</sup>. 또한 방사성 핵종과 토양의 혼합깊이에 따라서도 다소 차이가 있을 것으로 예상된다.

한편, 다른 과채류들에 대한 연구사례로서 최 등<sup>21)</sup>은 양질사토 및 사양토에서 호박의 Mn-54, Co-60, Cs-137 전이계수가 각각  $1.7 \times 10^{-2} \sim 1.2 \times 10^{-1}$ ,  $4.6 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^{-2}$ ,  $2.5 \times 10^{-2} \sim 3.9 \times 10^{-2}$ 였다고 발표한 바 있다. 또한 Ng 등<sup>22)</sup>이 여러 연구자들의 실험결과를 정리하여 보고한 바에 의하면 수 종류의 토양에서 토마토의 Sr-85 및 Cs-137 전이계수는 각각  $2.5 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-2}$ ,  $3.0 \times 10^{-5} \sim 5.5 \times 10^{-3}$ 의 범위였고 사양토에서 토마토의 Mn(안정원소) 및 Co-60 전이계수는 각각  $6.9 \times 10^{-3}$ ,  $4.6 \times 10^{-4}$ 이었다. 본 연구에서 조사된 오이 핵종별 전이계수(표 2)는 위와 같이 보고된 호박의 핵종별 전이계수와 비교하면 그 범위내에 속하거나 수배 정도 낮았으나 토마토에 대한 보고치에 비해서는 핵종에 따라 수~수십배 정도 높았다.

## 3. 방사성 핵종의 토양층위별 분포

오이 파종후 13일에 토양표면에 살포된 방사성 핵종의 토양 깊이에 따른 농도분포를 오이 수확 직후에 조사한 것은 표 3에서 보는 바와 같다. 네 핵종의 층위별 농도는 토심 20cm까지 처음에는 토양 깊이가 깊어짐에 따라 급히 감소하다가 점점 감소정도가 낮아지는 지수함수적인 감소경향을 나타내었다. 또한 네 핵종 모두 토심 15~20cm 사이의 분포율은 매우 낮아 20cm 이하로 침투한 방사능은 무시할 수 있을 정도이며 Sr-85를 제외하고는 토심 3cm 이내에 처리한 방사능의 거의 전부가 분포하고 있다고 할 수 있다.

토심 0~1cm 층위에서의 분포율은 Sr-85가

Table 3. Percent distributions of Mn-54, Co-60, Sr-85 and Cs-137 in different layers of the top 20cm soil after cucumber harvests

Soil layer (cm)	Percent distribution* (%)			
	Mn-54	Co-60	Sr-85	Cs-137
0~1	77.6±10.9	87.1±9.0	44.5±8.3	95.0±5.4
1~3	20.2±8.5	11.3±8.3	34.9±2.9	4.1±4.6
3~6	2.0±2.4	1.2±0.9	18.1±8.5	0.7±0.8
6~10	0.2±0.2	0.3±0.5	2.3±1.0	0.1±0.2
10~15	0.05±0.04	0.1±0.1	0.1±0.03	0.05±0.04
15~20	0.04±0.04	0.04±0.05	0.1±0.1	0.06±0.04

\* All data are mean values for 3 samples ± 1 SD. Note) RI solution was applied onto the soil surface 13 days after sowing.

44.5%로 가장 낮았고 Cs-137이 95.0%로 가장 높았으며 1~3cm 층위에서의 분포율은 반대로 Sr-85가 34.9%로 가장 높았고 Cs-137이 4.1%로 가장 낮았다. 따라서 지하로의 이동성은 Sr-85가 가장 높고 Cs-137이 가장 낮으며 Mn-54와 Co-60은 그 중간이라고 하겠다. 방사성 Sr이 방사성 Cs보다 이동성이 크다는 것은 여러 연구자들<sup>13,14,19)</sup>에 의해 보고된 바 있다.

위와 같은 방사성 핵종의 표층편재 현상에 대해서는 많은 연구자들<sup>12~14,19,22)</sup>이 유사한 경향을 보고하고 있다. 이러한 편재현상은 사고로 지표가 오염되었을 경우 수cm의 표층토 제거가 효율적인 제염대책이 될 수 있음을 시사하고 있다. 반면에 방사성 핵종이 농경지에 침적되면 토양침투 속도가 매우 늦어 장기간 동안 대부분의 방사능이 작토층에 머물면서 작물체에 의해 흡수될 가능성도 나타내고 있으므로 주의할 필요가 있다.

#### 4. 전이계수 측정자료의 의의 및 활용

본 연구에서 조사된 오이의 생육중 각 핵종의 처리시기별 토양-작물체 전이계수는 오이의 생육중 사고 발생시 뿌리흡수로 인하여 오이 열매에 축적된 핵종의 농도를 예측하는 데 매우 유용한 자료가 될 수 있다. 현재 대부분의 사고시 섭취선량 평가코드<sup>6,23,24)</sup>에서는 이러한 자료의 부족으로 작물체의 뿌리 흡수는 흡수기간 또는 흡수기간 동안의 작물체중 증가량에 비례한다는 가정하에 작물의 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 후기 침적시에는 매우 낮은 농도가 예측된다. 본 실험에서 구한 침적시기별 전이계수의 변이 양상은 어느 핵종도 이와 같지 않았고 핵종 및 침적시기에 따라서는 다소 반대되는 경향을 나타내기까지 하였다.

또한 본 실험에서 파종전 토양과의 혼합처리와 파종후 생육초기 토양표면 처리간 전이계수를 비교해 볼 때 작물의 생육중 침적시 전이계수에 대한 초기값으로 파종전 혼합처리의 것을 사용하는 것은 합리적이지 못한 것으로 판단된다. 작물의 생육중에 침적한 방사성 핵종의 뿌리흡수와 작물의 파종전 토양과 혼합된 방사성 핵종의 뿌리흡수는 물리적으로 서로 다른 조건에서 이루어 진다는 것이 위에서 살펴본 생육중 침적 핵종의 표층편재 현상에 의해서도 명백하게 입증되고 있다. 따라서 작물의 생육중 침적에 대해서는 본 실험에서 구한 것과 같은 생육중 침적시기별 전이계수 자료를 축적하여

평가모델에 적절히 반영하는 방안을 모색할 필요가 있다.

오이의 수확시기에 따른 전이계수의 변이 경향은 오이밭 오염사고 발생시 열매의 수확 및 소비 대책을 수립하는 데 필요한 기초정보가 된다. 즉, 위와 같은 실험 결과들로 볼때 오이의 생육 후반기에 오이밭이 방사성 핵종으로 오염되면 가능한 한 빨리 수확하고 뒤에 수확한 열매는 폐기하는것이 오이 소비를 통한 인체의 방사능 흡수를 감소하는 데 큰 도움이 될 것이다. 한편 생육초기에 Mn-54나 Co-60으로 오염되었을 경우에는 일찍 수확한 열매는 폐기하고 늦게 수확한 것만 소비하는 것이 내부피폭선량 감소에 다소 유리할 것으로 보인다.

오이의 생육중 사고 발생시 방사성 핵종의 침적시기 및 열매의 수확시기에 따른 각 핵종 전이계수의 변화양상은 토양 및 기상 그리고 영농법 등에 따라 다를 것이므로 다양한 재배환경에 대해 실험을 수행하여 기초자료를 충분히 확보함으로써 사고시 영향평가의 현실성을 높이고 합리적인 대책 수립을 가능케 해야 한다. 또한 기타 주요작물들에 대해서도 실험을 실시하여 자료를 축적하고 사고에 대비해야 할 것이다.

## 요 약

오이의 파종 2일전 및 파종후 네 차례에 걸쳐 Mn-54, Co-60, Sr-85, Cs-137의 혼합용액을 온실내 재배상자의 토양에 처리하고 처리시기별 및 수확시기별 열매에 대한 전이계수( $m^2/kg$ -fresh)를 측정하였다. 전이계수는 핵종, 처리시기 및 수확시기에 따라 최고 약 60배의 변이를 보였다. 처리시기에 따른 전이계수의 변화양상은 핵종간 및 수확시기간에 차이가 있었다. 핵종간에 전이계수는 대체로 Sr-85 > Mn-54 > Co-60 > Cs-137의 순이었다. 파종전 토양과의 혼합처리시 전이계수는 생육초기 토양표면 처리에 비해 Mn-54, Co-60, Cs-137의 경우 다소 높았으나 Sr-85의 경우 차이가 없었다. 생육초기 토양표면에 처리된 방사성 핵종의 토양층위별 농도는 재배종료후 토양 깊이에 따라 지수함수적으로 감소하고 처리량의 80~99%가 토심 3cm 이내에 분포하는 것으로 나타났다. 핵종의 토양침투성은 Sr-85 > Mn-54 > Co-60 > Cs-137의 순이었다. 본 연구결과는 오이의 재배기간중 토양의 방사능 오염시 열매내 방사성 핵종의 농도예측, 오이의 수확, 소비 및 오이밭 제염 대책수립에 활용될 수 있다.

## 참고문헌

1. 향문사 (1986). 재소원에각론.
2. Till, J. E. and Meyer, H. R.(Eds.) (1983). Radiological Assessment, A Textbook on Environmental Dose Analysis, NUREG/CR-3332, ORNL-5968.
3. Evans, E. J. and Dekker, A. J. (1962). Comparative Sr-90 content of agricultural crops grown in a contaminated soil, *Can. J. Plant Sci.* **42** : 252~258.
4. Evans, E.J. and Dekker, A.J.(1968). Comparative Cs-137 content of agricultural crops grown in a contaminated soil, *Can. J. Plant Sci.* **48** : 183~188.
5. IAEA(1982). Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases, Safety Series No. 57, Vienna.
6. 이정호 등 (1991). 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내 부피폭선량 평가코드 개발, KAERI/RR-98/90, 과학기술처.
7. Aarkrog A. (1975). Radionuclide levels in mature grain related to radiostrontium content and time of direct contamination, *Health Phys.* **28** : 557~562.
8. Coughtrey, P. J. and Thorne, M. C. (1983). Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial Ecosystem -A Critical Review of Data, vol 1-2, A. A. Balkema, Rotterdam.
9. Ng, Y. C., Colsher, C. S. and Thompson, S. E.(1982). Soil-to-Plant Concentration Factors for Radiological Assessments, Report NUREG/CR-2975, UCID -19463, Lawrence Livermore Lab., USNRC.
10. Zach, R. (1980). Transfer Coefficients to Terrestrial Terrestrial Food Food Products in Equilibrium Assessment Models for Nuclear Installations, AECL Report, AECL-6449, WNRE.
11. IAEA (1994). Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments, Technical Reports Series No. 364, Vienna.
12. Livens, F. R., Horrill A. D. and Singleton, D. L. (1991). Distribution of radiocesium in the soil-plant systems of upland areas of Europe, *Health Phys.* **60** : 539~545.
13. Salbu B., Oughton D. H. et. al. (1994). The mobility of Cs-137 and Sr-90 in agricultural soils in the Ukraine, Belarus, and Russia, 1991, *Health Phys.* **67** : 518~528.
14. 최용호, 조재성, 이창우, 이명호, 김상복, 홍광희. 최근식, 이정호 (1996). 주요 작물의 생육중에 침적한 Mn-54, Co-60, Sr-85, Cs-137의 지하이동, 대한방사선방어학회지. **21**(1): 51~58.
15. Lönsjö, H., Haak, E. and Rosén K. (1990). Effects of remedial measures on long term transfer of radiocesium from soil to agricultural products as calculated from Swedish field experimental data, In:Environmental Contamination following a Major Nuclear Accident. Vol 2, Proc. of an International Symp., Vienna, Oct. 1989, IAEA, p. 151~162
16. Sandalls, J. and Bennett, L.(1992). Radiocaesium in upland herbage in Cumbria, UK:a three year field study, *J. of Environ. Radioactivity* **16**:147~165.
17. Glasstone, S. and Jordan, W. H.(1980). Nuclear Power and Its Environmental Effects, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois.
18. Renaud, P. and Maubert, H. (1997). Agricultural countermeasures in the management of a post-accidental situation, *J. of Environ. Radioactivity* **35** : 53~69.
19. Cline J.F.and Rickard, W.H.(1972). Radioactive strontium and cesium in cultivated and abandoned field plots, *Health Phys.* **23** : 317~324.
20. 최용호, 김국찬, 이창우, 이강석, 이정호, 박찬걸, 조용우 (1991). 벼, 콩 및 채소류에 대한 Mn-54, Co-60, Zn-65, Cs-137의 토양-작물체간 전이계수, 대한방사선방어학회지 **16**(2) : 55~65.
21. Steffens, W., Mittelst dt W. and F hr F. (1980). The transfer of Sr-90, Cs-137, Co-60 and Mn-54 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, p. 1139~1143.
22. Jones. G. B., Riceman, D. S. and Mckenzie J. O. (1957). The movement of Co and Zn in soils as indicated by radioactive isotopes, *Aust. J. Agric. Res.* **8** : 190-201.
23. Whicker, F. W. and Kirchner, T. B. (1987). PATHWAY : A dynamic food chain model to predict radionuclide ingestion after fallout deposition, *Health Phys.* **52** : 717-737.
24. Abbott, M. L. and Rood, A. S. (1994). COMIDA : A radionuclide food chain model for acute fallout deposition, *Health Phys.* **66** : 17-29.