

## Root Uptake of $^{54}\text{Mn}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{85}\text{Sr}$ and $^{137}\text{Cs}$ Deposited at Different Times during the Growing Season of Rice

Yong-Ho Choi, Jae-Seong Jo\*, Chang-Woo Lee, Kwang-Hee Hong and Jeong-Ho Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

\* Chungnam National University

(Received 6 October 1995; Accepted 19 December 1995)

### 벼 재배 기간중 침적시기에 따른 $^{54}\text{Mn}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{85}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ 의 뿌리흡수

최용호, 조재성\*, 이창우, 홍광희, 이정호

한국원자력연구소, \* 충남대학교

**Abstract**—Root uptakes of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  by rice were studied through a greenhouse experiment in which the upper 20 cm of the culture box was filled with an acidic loamy-sandy soil and a mixed solution of the radionuclides was applied to the surface water on the soil 2 days before, and 5 different times after, transplanting. Percent uptakes of the radionuclides to rice tops varied 3.4~13.7%, 0.03~0.1%, 0.6~1.5%, 0.02~0.15%, respectively, with application time. Among radionuclides, soil-to-plant transfer factors decreased, on the whole, in the order of  $^{54}\text{Mn} > ^{85}\text{Sr} > ^{60}\text{Co} \geq ^{137}\text{Cs}$ , and among plant parts, in the order of straw > chaff > hulled seed. Transfer factors ( $\text{m}^2/\text{kg-dry}$ ) in hulled seed were, depending on application time,  $1.2 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$  for  $^{54}\text{Mn}$ ,  $1.6 \times 10^{-5} \sim 2.6 \times 10^{-4}$  for  $^{60}\text{Co}$ ,  $1.1 \times 10^{-4} \sim 7.6 \times 10^{-4}$  for  $^{85}\text{Sr}$  and  $5.2 \times 10^{-5} \sim 7.0 \times 10^{-4}$  for  $^{137}\text{Cs}$ . The highest factors of all the radionuclides in straw came from the application at 67 days after transplanting while those of  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{85}\text{Sr}$  in hulled seed appeared at later applications. The data from this study can be referred to in assessing the radiological impact of an accidental contamination during the rice growth.

*Key words*: root uptake, transfer factor, radionuclide, rice, deposition during plant growth

**요약**—온실내에서  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 혼합용액을 벼의 이식전 및 이식후 다섯 차례에 걸쳐 상부 20cm를 산성 양질사토로 채운 재배상자의 담수표면에 처리하고 흡수실험을 수행하였다. 네 핵종의 벼 지상부로의 흡수율은 처리시기에 따라 각각 3.4~13.7%, 0.03~0.1%, 0.6~1.5%, 0.02~0.15%의 범위로 모두 이식후 67일 처리에서 최고였다. 토양-작물체간 전이계수는 대체로 핵종간에는  $^{54}\text{Mn} > ^{85}\text{Sr} > ^{60}\text{Co} \geq ^{137}\text{Cs}$ , 부위간에는 벃짚 > 왕겨 > 현미의 순이었다. 현미에서의 전이계수( $\text{m}^2/\text{kg-dry}$ )는 처리시기에 따라  $^{54}\text{Mn}$ 가  $1.2 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 이  $1.6 \times 10^{-5} \sim 2.6 \times 10^{-4}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ 가  $1.1 \times 10^{-4} \sim 7.6 \times 10^{-4}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 이  $5.2 \times 10^{-5} \sim 7.0 \times 10^{-4}$ 였다. 벃짚에서는 네 핵종 모두 이식후 67일 처리에서 전이계수가 최고였고 현미에서는  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ 의 경우 이보다 다소 늦은

처리에서 최고였다. 본 연구에서 구한 전이계수는 벼의 생육중 사고로 인한 농경지의 방사능 오염시 환경영향 평가를 위한 기초자료로 이용될 수 있다.

중심단어 : 뿌리흡수, 전이계수, 방사성 핵종, 벼, 생육중 침적.

## 서 론

벼는 우리나라의 주식작물로 가장 널리 재배되는 작물이고 생육기간도 120~180일[1]로 비교적 길어 생육중에 방사능에 의한 토양오염에 노출될 가능성이 가장 높은 작물중의 하나이다.

논이 방사능으로 오염되면 방사성 핵종이 벼의 뿌리에 의해 흡수되어 벼의 각 기관에 전류, 축적되고 수확한 쌀의 직접 소비나 오염된 볏짚을 사료로 섭취한 가축의 소비를 통하여 인체에까지 도달하게 된다.

뿌리흡수에 의한 농작물내 방사성 핵종의 농도는 일반적으로 작물의 생육전에 토양과 방사능이 일정한 깊이로 혼합된 상태에서 구한 전이계수를 이용하여 평가하고 있다[2~5]. 이러한 평가는 원자력 시설의 정상 가동시의 평가에 적합한 것으로 작물의 생육중에 일시적으로 일어나는 사고 침적에 대해서는 적합하지 못하다. 왜냐하면 이때에는 대부분의 방사능이 지표 부근에 분포하고[6~9] 또한 침적시기에 따라 흡수기간이 달라지며 생육단계에 따라 작물의 흡수력도 크게 변하기 때문이다. 따라서 작물의 생육중 사고 침적에 대해서는 침적시기별로 핵종의 지표면 침적량 대비 작물체중 농도( $m^2/kg$ )로 정의되는 전이계수를 구하여 평가에 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 이와 같은 자료는 전세계적으로 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 벼의 생육중 논외 방사능오염 사고시 환경영향 평가 및 합리적인 대책수립을 위한

기초자료를 제공하기 위하여 벼를 우리나라에서 흔히 볼수 있는 산성 사양토[1, 10]로 작토층을 채운 재배상자에서 육성하면서 원자료에서의 생성율이 비교적 높고 반감기도 긴 편인  $^{54}Mn$ ,  $^{60}Co$ ,  $^{90}Sr$ ( $^{85}Sr$ 로 대체),  $^{137}Cs$ 의 네 핵종[11]을 생육 단계별로 담수의 표면에 처리하여 핵종의 침적시기에 따른 작물체 흡수 정도 및 토양-작물체간 전이계수를 조사하였다.

## 재료 및 방법

실험에 사용한 벼의 품종은 동진벼였다. 재배토양은 한국원자력연구소 부근에서 0~20cm, 20~40cm, 40~60cm의 세 층위별로 채취하였다. 층위별 재배토양의 물리, 화학적 특성은 표 1에 나타나 있다.

재배용 상자는 하부에 배수장치를 갖춘 철제 상자로서 가로와 세로는 각각 0.6m이고 높이는 1m이다. 이 재배상자를 온실내에 1.3m 정도의 깊이로 건조한 호속에 장치한 다음 상자의 바닥에서 20cm 정도까지 직경 1~3cm 가량의 인조석을 깔고 그 위에 차례로 C, B, A 층위의 토양을 각각 30cm, 30cm, 20cm의 깊이로 채우고 물이 배수될 때까지 급수하였다.(그림 1). 급수후 상자내 지표면은 15cm 정도 하강하였다. 이후 이식 전까지 며칠간 급수량을 조절하면서 이식시에 수심이 3~4cm 정도 되게 하였다.

벼의 이식 하루전에 밀거름으로 상자당 요소 6g,

Table 1. Physico-chemical properties of the soil used in the experiment

Layer code	Depth (cm)	pH (1:5)	O.M. (%)	Avail. phosphate (ppm)	C.E.C (me/100g)	E.C.(me/100g)			Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture
						Ca	Mg	K				
A	0~20	5.2	0.91	86.9	4.2	1.84	0.69	0.12	79.0	17.0	4.0	Loamy sand
B	20~40	5.4	0.45	16.9	4.1	1.62	0.53	0.04	72.2	19.8	8.0	Sandy loam
C	40~60	5.8	0.40	13.0	5.7	2.23	1.14	0.10	66.7	19.3	12.0	Sandy loam

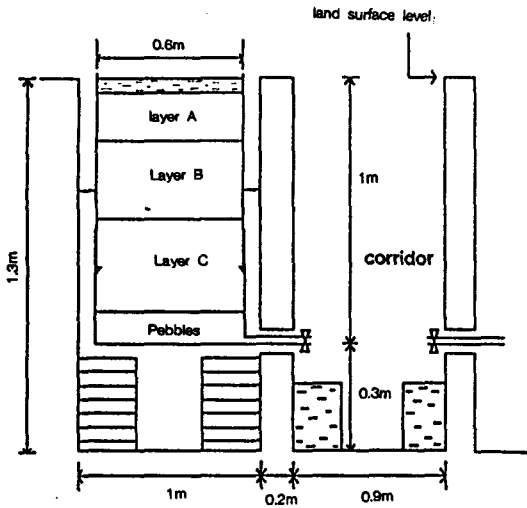


Fig. 1 Sectional diagram of the culture box installed in the greenhouse

용과린 21.5g, 염화칼리 5.0g (10a 당 각각 N 7.8kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12kg, K<sub>2</sub>O 8.3kg에 해당), 석회 36g, 퇴비 360g (10a 당 각각 100kg 및 1000kg에 해당)을 담수의 표면에 고루 살포한 다음 날의 길이가 15cm인 모종용 삽으로 토양과 혼합하였다.

'93년 5월 26일 32일 모를 1주 4분식으로 상자당 16주 이식하였다. 이식후 생육단계에 따라 수확 2주전까지 적절한 수심을 유지하도록 관개하였고 '93년 7월 13일부터 7월 18일까지 중간낙수를 실시하였다. 벼의 생육중 5~7일 간격으로 상자당 9ℓ 씩 21회 배수하였는데 이것은 약 550mm에 달하는 지하삼투[1]에 해당한다.

추비는 상자당 요소 2.4g을 6월 8일에, 요소 2.4g과 염화칼리 2.2g을 7월 26일에 그리고 요소 1.2g을 8월 30일에 사용하였다.

병충해 방제를 위하여 살충제와 살균제를 두세 차례씩 살포하였다. 온실의 창문은 최대한 열어 두어 실내의 온도상승을 가능한 한 억제하였다.

<sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co, <sup>85</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs의 무담체 원액을 적정량의 0.5M HCl 용액에 모두 혼합하여 적정 농도(과중일 기준으로 mℓ 당 각 핵종 약 50,000 Bq)로 희석한 다음 이식 2일전 및 이식후 생육중 다섯 시기에 걸쳐 상자당 64mℓ 씩의 희석용액을 균등하게 나누어 64곳의 담수 표면에 마이크로 피펫을 이용하여 1mℓ 씩 고루 살포하였다. 이식 전에 처

리된 방사능은 그 다음날 밑거름과 함께 토양과 혼합하였으나 이식후 처리의 경우 그대로 두었다. 이식후 방사능 처리일자는 '93년 6월 9일, 7월 6일, 8월 2일, 8월 24일, 9월 16일이었다.

'93 10월 11일 한 상자내의 육성개체들을 4등분하여 지상부만 채취한 다음 온실내에서 2주 이상 천일건조하였다. 건조후 현미, 왕겨 및 벃짚으로 분리하여 건조중을 측정하고 적정 크기의 계측용기에 담았다.

시료의 방사선 계측은 고순도 Ge 검출기를 이용한  $\gamma$ -spectrometry 방법으로 네 핵종에 대하여 동시에 실시하였다. 계측시간은 시료에 따라 0.5~2시간 정도였다.

벼 지상부로의 방사성 핵종 흡수율(U, %)은 재배상자별로 다음과 같은 식으로 산출하였다.

$$U = \frac{\text{한 상자에서 수확된 전체 작물체내 핵종의 양(Bq)}}{\text{수확시로 붕괴보정한 상자당 핵종의 처리량(Bq)}} \times 100 \quad (1)$$

위의 식에서 분모를 수확시로 붕괴보정한 처리량으로 한 것은 방사성 핵종의 물리적 붕괴에 의한 영향을 제거하기 위한 것으로 이것은 목표 핵종의 동위원소를 추적자로 이용하여 실험한 결과를 그 핵종에 적용하고자 할 때 필요하다. 본 연구에서는 <sup>90</sup>Sr의 대용으로  $\gamma$ -spectrometry 방법으로 분석이 가능한 <sup>85</sup>Sr를 사용하였다.

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

$$TF = \frac{\text{수확시 작물체내 핵종 i의 농도(Bq/kg)}}{\text{수확시로 붕괴보정한 단위면적당 핵종 i의 처리량(Bq/m<sup>2</sup>)}} \quad (2)$$

한 상자에서의 토양-작물체간 방사성 핵종의 전이계수는 4등분한 시료들에 대한 값들의 평균과 표준편차로 표시하였다.

### 결과 및 고찰

벼의 이식 2일전 및 이식후 생육중 다섯 차례에 걸쳐 담수의 표면에 방사성 핵종을 처리하고 수확시에 조사한 각 핵종의 흡수율은 표 2에서 보는 바와 같이 대체로 <sup>54</sup>Mn > <sup>85</sup>Sr > <sup>60</sup>Co ≥ <sup>137</sup>Cs의

Table 2. Percent uptakes of the radionuclides from soil to rice tops as influenced by their application time

Application* time (DAT)	Percent uptake(%)			
	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>85</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
-2	4.5	0.028	0.60	0.017
13	8.2	0.046	1.10	0.031
40	7.5	0.054	1.23	0.056
67	13.7	0.100	1.48	0.154
89	6.2	0.070	0.91	0.099
112	3.4	0.095	0.59	0.022

DAT : days after transplanting  
 \* : '-' means days before transplanting.

순으로 핵종간 변이가 최고 수백 배 정도였다. 처리시기에 따라서는 <sup>54</sup>Mn는 3.4~13.7%, <sup>85</sup>Sr는 0.6~1.5%, <sup>60</sup>Co은 0.03~0.1%, <sup>137</sup>Cs은 0.02~0.15%의 범위를 보였다. 가장 높은 흡수율은 네 핵종 모두 벼의 생육이 가장 왕성한 이식후 67일 처리에서 나타났고 그 이후 처리가 늦어질수록 <sup>54</sup>Mn, <sup>85</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs의 흡수율은 점점 감소하는 경향이었으나 <sup>60</sup>Co의 흡수율은 마지막인 이식후 112일 처리에서 다소 증가하였다.

<sup>54</sup>Mn의 <sup>85</sup>Sr의 흡수율은 일반적으로 <sup>60</sup>Co이나 <sup>137</sup>Cs의 흡수율보다 높은 것으로 보고[12, 13]되어 있다. 벼의 <sup>54</sup>Mn 흡수율이 특히 높은 것은 Mn의 가급도는 Mn의 산화, 환원 정도에 크게 좌우되고 수분과 토양에서는 Mn의 환원이 두드러져 Mn의 흡수가 증대된다는 보고[14, 15]와 관계가 있을 것으로 생각된다. <sup>85</sup>Sr의 흡수율이 높은 것은 토양내에서 Sr의 가급태로의 존재비율이 높다[12, 16, 17]는 사실외에도 Sr이 작물체에 의한 요구도가 비교적 높은 Ca와 화학적으로 매우 유사한 원소인 것과도 관계가 있을 것으로 판단된다.

한편, Verfaillie 등[18]은 양액재배 실험을 통하여 벼가 <sup>90</sup>Sr보다 <sup>137</sup>Cs을 4배나 많이 흡수하였음을 관찰하고 벼는 생리적으로는 Sr보다 Cs를 훨씬 많이 흡수할 수 있으나 토양내에서는 Cs의 강하고정으로 인하여 흡수가 크게 억제되는 것이라고 하였다. 즉 토양으로부터의 흡수에 있어서는 작물 요인보다는 토양 요인이 훨씬 중요하게 작용한다고

볼 수 있다. Kodaira 등[19]도 이와 유사한 경향을 보고한 바 있다.

이식 2일전 처리시의 흡수율과 이 처리와 시기적으로 가장 가까운 이식후 13일 처리시의 흡수율이 큰 차이를 보이고 있는데 이것은 주로 두 처리시간에 방사성 핵종의 지하분포 상태가 다르기 때문인 것으로 생각된다. 즉 이식 2일전 처리의 경우 방사능과 토양이 일정 깊이로 혼합되었으나 이식후 처리의 경우 담수 표면에 적하한 후 그대로 두었으므로 대부분의 방사능이 지표부근에 분포하였을 것으로 추정된다. 벼에서 토양과의 혼합이 방사성 핵종의 흡수를 억제하는 것으로 나타난 것은 지표부근에 밀집하는 벼 뿌리의 분포 특성과 관계가 있을 것으로 보여지나 본 연구에서는 정확한 원인을 규명할 수 없었다.

벼 지상부로의 흡수율은 작물수확에 의한 농경지로부터의 방사성 핵종 제거 정도를 나타내는 것으로 <sup>54</sup>Mn와 <sup>85</sup>Sr를 제외하고는 무시할 수 있는 수준이었다. 제거 정도가 높은 핵종에 대해서는 장기적인 환경영향 평가시 토양중 핵종농도의 과대평가를 피하기 위하여 제거율을 고려해 줄 필요가 있다.

방사성 핵종의 처리시기에 따른 벼 부위별 네 핵종의 전이계수는 그림 2~5에서 보는 바와 같이 어느 경우에도 <sup>54</sup>Mn가 가장 높았고 그 다음은 대체로 <sup>85</sup>Sr였으며 <sup>60</sup>Co 또는 <sup>137</sup>Cs이 가장 낮았다. <sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co, <sup>85</sup>Sr 전이계수는 어느 처리 시기에

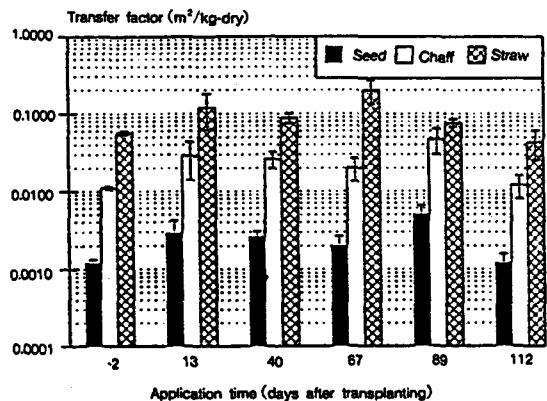


Fig. 2. Transfer factors of <sup>54</sup>Mn for different parts of rice plant varying with application time.

있어서나 모두 벼짚 > 왕겨 > 현미의 순으로 높았고,  $^{137}\text{Cs}$  전이계수는 왕겨가 벼짚보다 다소 높거나 거의 비슷하였다. 또한  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 현미에서의 전이계수도 다른 부위와의 차이가 비교적 작아 작물체 내에서 이동성이 높은 핵종인 것[20~22]으로 나타났다. 벼짚과 현미간 전이계수의 차이가 가장 큰 핵종은  $^{54}\text{Mn}$ 로서 처리시기에 따라 수십~백배에 달하는 차이를 보였고 그 다음은 대체로 수십배의 차이를 보인  $^{85}\text{Sr}$ 였으며  $^{137}\text{Cs}$ 은 수 배 정도의 차이만 나타내었다.

벼의 종실과 경엽부간 방사성 Sr 전이계수의 차이 즉 농도비에 대해서는 Abbazov 등[23], Tensho 등[24], 최 등[25]이 본 실험과 대체로 유사한 경향을 보고한 바 있고 방사성 Cs의 농도비에 대해서도 Abbazov 등[23], Verfaillie 등[18]이 유사한 보고를 한 바 있다.

이식후 처리의 경우 처리시기에 따른 각 핵종의 부위별 전이계수( $\text{m}^2/\text{kg-dry}$ ) 변화 경향은 다음과 같다.

$^{54}\text{Mn}$  전이계수(그림 2)는 현미에서  $1.2 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^3$ , 왕겨에서는  $1.2 \times 10^2 \sim 4.7 \times 10^2$ , 벼짚에서는  $4.3 \times 10^2 \sim 2.0 \times 10^1$ 의 범위를 보였다. 벼짚에서는 벼의 잎이 가장 왕성한 생육을 보이는 이식후 67일 처리에서 최고였고 종실(현미+왕겨)에서는 왕겨가 형성되고 왕겨내에 물질 축적이 시작되는 이식후 89일 처리에서 최고였다. 세 부위 모두 가장 낮은 전이계수를 보인 것은 수확 25일 전인 이식후 112일 처리에서였다.

$^{60}\text{Co}$  전이계수(그림 3)는 현미, 왕겨, 벼짚에서 각각  $3.0 \times 10^5 \sim 2.6 \times 10^4$ ,  $8.5 \times 10^5 \sim 4.5 \times 10^4$ ,  $6.2 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^3$ 의 범위였다. 벼짚에서는  $^{54}\text{Mn}$ 와 같이 이식후 67일 처리에서 최고였으나 종실에서는 이식후 112일 처리에서 크게 상승하여 최고였다. 최저치를 보인 처리시기는 벼짚에서는 이식후 40일 처리, 종실에서는 이식후 67일 처리였다.

$^{85}\text{Sr}$  전이계수(그림 4)는 세 부위에서 각각  $1.1 \times 10^4 \sim 7.6 \times 10^4$ ,  $1.6 \times 10^3 \sim 5.1 \times 10^3$ ,  $6.2 \times 10^3 \sim 1.7 \times 10^2$ 의 범위였다. 각 부위에서 최고치와 최저치가 나타난 처리시기는  $^{54}\text{Mn}$ 와 동일하였다.

$^{137}\text{Cs}$  전이계수(그림 5)는 세 부위에서 각각  $5.2 \times 10^5 \sim 7.0 \times 10^4$ ,  $2.3 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^3$ ,  $2.3 \times$

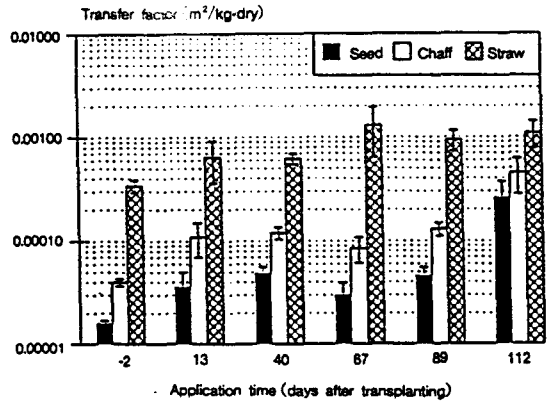


Fig. 3. Transfer factors of  $^{60}\text{Co}$  for different parts of rice plant varying with application time.

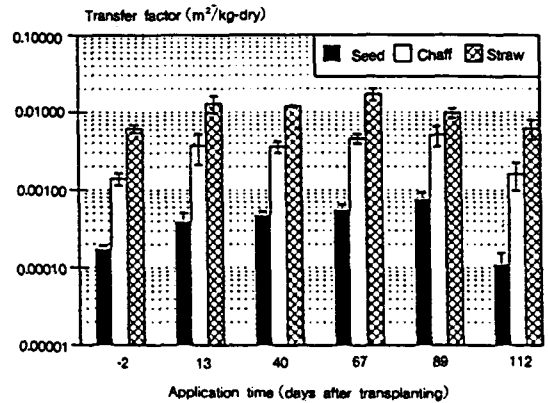


Fig. 4. Transfer factors of  $^{85}\text{Sr}$  for different parts of rice plant varying with application time.

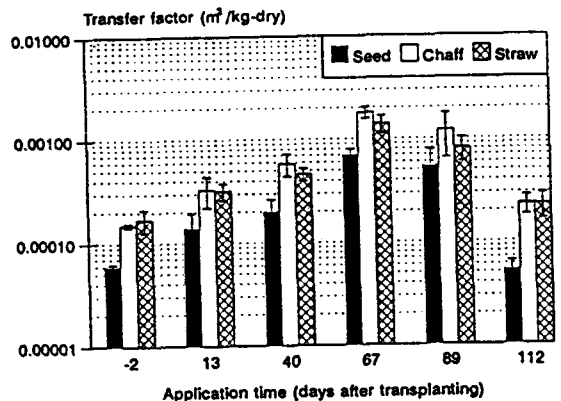


Fig. 5. Transfer factors of  $^{137}\text{Cs}$  for different parts of rice plant varying with application time.

Table 3. Soil concentration-based transfer factors of the radionuclides mixed with topsoil before transplanting rice.

Rice part	Transfer factor*			
	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>85</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
Seed	2.2×10 <sup>1</sup>	2.9×10 <sup>3</sup>	3.1×10 <sup>2</sup>	1.1×10 <sup>2</sup>
	2.4×10 <sup>1</sup> [26]	4.5×10 <sup>3</sup> [26]	6.5×10 <sup>2</sup> [26]	2.0×10 <sup>2</sup> [26]
	3.2×10 <sup>1</sup> [27]	6.0×10 <sup>3</sup> [27]	7.0×10 <sup>2</sup> [25]	1.0×10 <sup>2</sup> [28]
	2.3×10 <sup>1</sup> [27]	2.2×10 <sup>3</sup> [27]	1.7×10 <sup>1</sup> [25]	4.0×10 <sup>2</sup> [28]
	1.2×10 <sup>1</sup> [27]	5.9×10 <sup>3</sup> [27]	—	6.1×10 <sup>2</sup> [27]
	5.2×10 <sup>1</sup> [27]	—	—	1.8×10 <sup>2</sup> [27]
	—	—	—	3.0×10 <sup>2</sup> [27]
Chaff	2.0×10 <sup>0</sup>	7.2×10 <sup>3</sup>	2.5×10 <sup>1</sup>	2.7×10 <sup>2</sup>
Straw	1.0×10 <sup>1</sup>	6.1×10 <sup>2</sup>	1.1×10 <sup>0</sup>	3.1×10 <sup>2</sup>

\* Bq/g-dry plant

Bq/g-dry soil

Note 1) Values to which reference numbers are attached came from literature.

2) Sr-85 values from literature were measured with Sr-90.

10<sup>4</sup>~1.4×10<sup>3</sup>의 범위로 위의 세 핵종들과는 달리 종실과 벃짚에서 모두 이식후 67일 처리에서 최고치가 나타났다. 종실의 <sup>137</sup>Cs 전이계수가 종실의 발육기 이전 처리에서 최고로 나타난 것은 <sup>137</sup>Cs의 작물체내 이동성이 비교적 높다는 사실과 관계가 있을 것으로 생각된다. 두 부위에서 모두 최저치가 나타난 처리시기는 <sup>54</sup>Mn나 <sup>85</sup>Sr와 같이 이식후 112일 처리에서였다.

벼의 이식 2일전에 방사성 핵종을 처리하고 그 다음날 토양과 혼합한 경우 전이계수는 네 핵종 모두 이식후 1차 처리시 전이계수보다 비교적 크게 낮았다. 이것은 흡수율에서의 경향과 같은 것이다.

이식전에 방사능과 토양을 일정 깊이로 혼합하여 구한 전이계수는 일반적으로 건조 토양 단위무게 당 핵종농도 기준으로 표시하고 있다. 본 실험에서 이식 2일전 처리에서 구한 전이계수를 건조 토양 단위무게 당 농도 기준으로 나타내기 위해서는 근사적으로 각 수치지들을 넓이 1m<sup>2</sup>, 깊이 15cm, 가비중 1.2에 해당하는 토양의 무게(kg)인 180으로 곱해주면 된다. 이와 같이 환산한 핵종별, 부위별 전이계수와 지금까지 우리나라에서 보고된 현미에서의 핵종별 전이계수[25~28]는 표 3에서 보는 바와 같다. 기 보고된 값들은 핵종에 따라 3~

10배의 변이를 보이고 있다. 본 연구에서 얻은 각 핵종의 전이계수는 대체로 낮은 편이나 <sup>85</sup>Sr를 제외하고는 모두 해당 변이의 범위내에 속하고 있다. <sup>85</sup>Sr 측정치가 범위를 벗어난 것은 기 보고된 값들의 수가 가장 적었다는 사실과 무관치 않을 것으로 사료된다.

이 등[29]은 위의 기 보고된 값들에 입각하여 쌀에 대한 방사성 Mn, Co, Sr, Cs 전이계수치의 대표값을 제안한 바 있다. 표 3에서 보는 바와 같이 전이계수는 실험조건 및 재배토양 등의 차이에 따라 비교적 크게 변하므로 다양한 환경조건을 충분히 반영하는 대표값을 얻을 수 있도록 광범위한 조사, 연구가 계속적으로 수행되어야 할 것이다.

津村 등[30]은 포트재배를 통하여 수행한 방사성 추적자 실험으로부터 현미에 있어서의 <sup>90</sup>Sr과 <sup>137</sup>Cs 전이계수가 생체중 기준으로 실험조건에 따라 각각 0.016~0.025 및 0.006~0.029였다고 보고하였다. 본 실험의 결과(표 3)는 <sup>137</sup>Cs의 경우 그들의 범위에 속하고 <sup>85</sup>Sr의 경우는 약간 벗어나는 것으로 볼 수 있으나 큰 차이는 아니었다.

작물의 생육시기별 농경지 침적 핵종의 토양-작물체간 전이계수는 원자력 사고가 작물의 생육 중에 발생했을 때 뿌리흡수로 인한 작물체 가식

부위내 방사성 핵종의 농도를 평가하는 데 매우 유용한 자료가 될 수 있다. COMIDA[31]나 ECO-REA[29]와 같은 현존하는 대부분의 동적 섭취경로 선량평가 모델에서는 이러한 자료의 부족으로 인하여 작물의 이식 또는 파종전에 방사성 핵종과 토양을 일정 깊이로 혼합하고 작물을 재배하여 구한 전이계수를 생육중 어느 시기에 있어서나 작물체의 뿌리흡수 및 특정 부위에서의 축적 속도는 작물체의 생물량증가 속도에 비례한다는 가정에 대입하여 작물 생육중 방사성 핵종의 침적시 뿌리흡수를 통한 작물체내 농도를 예측, 평가하고 있다.

이러한 방법에 의하면 물리적으로 불합리한 전이계수의 사용과 검증되지 않은 불확실한 가정의 적용으로 인하여 현실과 거리가 먼 평가를 할 가능성이 적지 않다. 작물의 생육중 방사성 핵종의 침적시 뿌리흡수 경로를 평가하는 데 본 실험에서와 같은 방법으로 구한 전이계수를 사용한다면 보다 현실적으로 평가할 수 있을 것으로 본다.

침적시기에 따른 전이계수의 변화 경향은 동일 작물, 동일 핵종에 있어서도 토양, 기상 및 각종 재배조건에 따라 차이가 있을 것이므로 다양한 재배환경에 대하여 실험을 수행하여 기초 자료를 축적함으로써 평가의 현실성 및 대표성을 높일 수 있도록 해야 할 것이다.

## 결 론

우리나라의 주식작물인 벼의 이식전 및 이식후 생육단계별로  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 혼합용액을 재배토양의 담수 표면에 처리하여 흡수 정도를 조사하고 부위별로 토양-작물체간 전이계수를 측정하였다.

작물의 생육중 토양에 침적한 방사성 핵종의 전이계수 자료는 전세계적으로 거의 전무하므로 작물의 생육중 방사능 누출 사고로 인한 농경지의 오염시 뿌리흡수의 영향을 합리적으로 평가하는 것이 어려운 실정이다.

이를 위해서는 본 실험에서와 같이 작물의 생육단계별로 처리하여 구한 방사성 핵종의 전이계수 자료에 입각하여 침적시기와 전이계수간 최적의 관계를 설정, 모델링하는 등의 시도가 필요하다고

본다.

이식전에 방사성 핵종을 처리하여 구한 전이계수는 원자력 시설의 정상가동시 환경영향 평가를 위한 입력변수 데이터파일에 반영하여 KFOOD와 같은 한국형 섭취선량 평가 코드의 대표성을 높일 수 있도록 해야 할 것이다.

작물의 생육중 사고 침적시에는 뿌리흡수뿐만 아니라 작물체 표면으로의 직접 침적 경로도 고려해야 하므로 이에 대한 연구도 시급히 이루어져야 한다. 한편 농경지에 침적된 핵종은 계속되는 재배를 통하여 장기간 동안 작물체에 흡수될 수 있으므로 침적된 핵종에 대한 장기적인 추적실험도 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. 이은웅 등, 사정 수도작, 향문사(1988)
2. 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).
3. R. Zach, *Food II: An Interactive Code for Calculating Concentrations of Radionuclides in Food Products*, AECL Report, AECL-6305, WNRE(1978).
4. 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., US-NRC(1982).
5. R. Zach, *Transfer Coefficients to Terrestrial Food Products in Equilibrium Assessment Models for Nuclear Installations*, AECL Report, AECL-6449, WNRE(1980).
6. G. B. Jones, D. S. Riceman and J. O. McKenzie, "The movement of Co and Zn in soils as indicated by radioactive isotopes." *Aust. J. Agric. Res.* **8**, 190-201(1957).
7. 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).
8. 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)
  9. H. M. Squire, "Long-term studies of  $^{90}\text{Sr}$  in soils and pastures." *Radiat. bot.* **6**, 49-67(1966).
  10. 조백현 등, 신고 토양학, 향문사(1980).
  11. S. Glasstone and W. H. Jordan, *Nuclear Power and Its Environmental Effects*, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois(1980).
  12. J. F. Cline and W. H. Rickard, "Radioactive strontium and cesium in cultivated and abandoned field plots." *Health Phys.* **23**, 317-324 (1972).
  13. W. Steffens, W. Mittelstaedt and F. Fuehr, "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).
  14. P. J. Coughtrey and M. C. Thorne, *Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial Ecosystems - A Critical Review of Data*, A. A. Balkema, Rotterdam(1983).
  15. H. Marschner, *Mineral Nutrition in Higher Plants*, Academic Press(1986).
  16. H. Nishita, A. J. Steen and K. H. Larson, "Release of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  from Vina loam upon prolonged cropping." *Soil Sci.* **86**. 195-201 (1958).
  17. L. Wiklander, "Uptake, adsorption and leaching of radiostrontium in a lysimeter experiment." *Soil Sci.* **97**, 168-172(1964).
  18. G. Verfaillie, C. Myttenaere and P. Bourdeau, "Factors involved in the accumulation of fallout radionuclides in irrigated rice and meadow plants", in : B. Aberg and F. P. Hungate (Eds.), *Radioecological Concentration Processes*, Proc. Int. Symp., Stockholm, 1966, pp. 429-436, Pergamon Press(1967).
  19. K. Kodaira, A. Tsumura and H. Kobayashi, "Uptake of radioactive strontium and caesium in rice plants. Part 1, accumulation of strontium and caesium in rice grains through roots." *J. Radiat. Res.* **14**, 31-39(1973).
  20. J. J. Koranda and W. L. Robinson, "Accumulation of radionuclides by plants as monitor system." *Environ. Health Perspect.* **27**, 165-179(1978).
  21. H. Nishita, E. M. Romney and K. H. Larson, "Uptake of radioactive fission products by crop plants." *Agric. Food Chem.* **2**, 101-106(1961).
  22. H. B. Tukey, S. H. Wittwer and M. J. Bukovac, "Absorption of radionuclides by above-ground plant parts and movement within the plant." *Agric. and Food Chem.* **9**, 106-113(1961).
  23. M. A. Abbazov, I. D. Dergunov and R. G. Mikulin, "Effect of soil properties on the accumulation of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in crops." *Soviet Soil Sci.* **10**, 52-56(1978).
  24. K. Tensho, K. Yeh and S. Mitsui, "The uptake of  $^{90}\text{Sr}$  and calcium by lowland and upland rice from soil and their distribution in the plants." *Soil Plant Food* **5**, 1-9(1959).
  25. 최용호, 이창우, 이강석, 이정호, 조재성, "벼와 콩에 의한  $^{90}\text{Sr}$  흡수, 축적 및 토양-작물체간 전이계수." 원자력학회지, **24**(2). 121-129 (1992).
  26. 이정호 등, 고리 주변 환경 종합평가 및 관련 모델 개발-환경특성 조사, 한국에너지연구소 (1989)
  27. 최용호, 김국찬, 이창우, 이강석, 이정호, 박찬걸, 조용우, "벼, 콩 및 채소류에 대한 Mn-54, Co-60, Zn-65, Cs-137의 토양-작물체간 전이계수." 대한방사선방어학회지, **16**(2). 55-65(1991)
  28. 유준, 안종성 등, 원자력 시설 주변의 환경영향 평가 연구(II), KAERI/RR-386-1/82, 한국에너지연구소(1983)
  29. 이정호 등, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부 피폭선량 평가코드 개발, KAERI/RR-998/90,



- 과학기술처(1991).
30. 津村昭人, 駒村美佐子, 小林宏信, 土壤及び土壤-植物系における放射性ストロンチウムとセシウムの挙動に関する研究, 農技研報告 B. 36號, pp. 57-113(1984).
31. M. L. Abbott and A. S. Rood, "COMIDA : A radionuclide food chain model for acute fallout deposition." *Health phys.* **66**, 17-29(1994).