

Underground Migration of ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr and ^{137}Cs Deposited during the Growth of Major Crop Plants

Yong-Ho Choi*, Jae-Seong Jo[†], Chang-Woo Lee*, Myung-Ho Lee*, Sang-Bog Kim*,
Kwang-Hee Hong*, Geun-Sik Choi* and Jeong-Ho Lee*

*Korea Atomic Energy Research Institute

[†]Chungnam National University

(Received 17 February 1996; Accepted June 2 1996)

주요 작물의 생육중에 침적한 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs 의 지하이동

최용호*, 조재성[†], 이창우*, 이명호*, 김상복*, 홍광희*, 최근식*, 이정호*

*한국원자력연구소

[†]충남대학교

Abstract—Underground migration of ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr and ^{137}Cs in paddy and upland conditions was studied through two years' greenhouse experiment. At early and late growth stages of rice, soybean, Chinese cabbage and radish, a mixed solution of the radionuclides was applied to the water or soil surfaces of the culture boxes filled with an acidic loamy-sandy soil for the upper 20cm. Soil was sampled in layers upto 15~20cm down after harvest.

Soil concentrations of the radionuclides decreased exponentially with increasing soil depth and more than 80% of the radioactivities remained in top 3~4cm. The mobility of the radionuclides decreased in the order of $^{85}\text{Sr} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} \geq ^{137}\text{Cs}$. Downward migrations of the radionuclides were the greatest in rice soil and the lowest in soybean soil which was fertilized with the least amount of N, P and K. Differences in depth profiles between two application times indicate that the amount of daily migration from 0~1cm layer to the lower area decreases with increasing time after deposition. By a simultaneous addition of KCl and lime following the earlier application, downward migration in soybean, Chinese cabbage and radish soils changed little or retarded more or less but that in rice soil accelerated a little.

Key words : Radionuclide, Deposition, Crop plant, Underground migration, Depth profile, KCl, Lime

요약—2년간의 온실실험을 통하여 벼, 콩, 배추, 무의 생육초기와 생육후기에 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs 의 혼합용액을 산성 양질사토로 상층부를 채운 재배상자내 담수 또는 토양의 표면에 가하고 작물수확 직후에 지하 15~20cm까지 토양깊이에 따른 방사성 핵종의 농도분포를 조사하였다.

방사성 핵종의 농도는 토양깊이에 따라 지수함수적으로 감소하는 경향으로 처리한 방사능의 80% 이상이 지하 3~4cm 이내에 분포하였다. 핵종간 지하로의 이동성은 대체로 $^{85}\text{Sr} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} \geq ^{137}\text{Cs}$ 의 순이었다. 재배작물간에 이동 정도는 벼 재배토양에서 가장 높았고 N, P, K의 시비량이 가장 적었던 콩 재배토양에서 가장 낮았다. 두 처리시간 지하분포 양상의 차이는 침적후 시간경과에 따라 단위시간당 지하 1cm 밑으로 이동하는 방사능량이 감소한다는 것을 나타내었다. 작물의 생육 초기에 방사성 핵종을 가한 후 실시된 염화칼리와 석회와 동시첨가로 핵종의 지하이동은 발작물에서는 변화가 없거나 다소 억제되었으나 벼에서는 약간 촉진되었다.

중심단어 : 방사성 핵종, 침적, 농작물, 지하이동, 깊이별 분포, 염화칼리, 석회

서 론

농경지에 침적한 방사성 핵종의 지하이동 정도는 방사성 핵종의 표층토내 잔류기간을 예측하고[1] 지표 부근에 분포하는 방사성 핵종의 재부유[2]에 따른 체내 방사능 흡입량 및 침적 방사능으로부터의 외부피폭 선량을 계산하거나[3] 오염 농경지에 있어서의 최적 제염대책을 수립하는 데 필요한 정보이다.

원자력의 환경영향 평가에 있어서 주요핵종으로 취급되고 있는 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs 등[4]은 지표에 침적한 후 수년 이상 대부분의 방사능이 지하수 cm 이내에 분포한다는 보고들[5~8]이 많이 있다. 이와 같이 침적한 방사능이 지하로 이동하지 않고 장기간 표층에 존재하면 작물에 의한 뿌리흡수 기간, 나아가 농산물의 소비를 통한 인체의 내부방사선 피폭기간이 길어진다. 또한 오염된 토양 입자의 부유에 따른 방사성 핵종의 흡입량은 증대되고 토양에 의한 차폐효과 및 거리에 의한 감쇠효과는 감소되어 농부나 주민의 체내·외 방사선 피폭선량이 증가한다[3,9]. 한편 이와 같은 방사성 핵종의 표층편재 현상은 표층 수 cm의 토양만 제거해도 효과적인 제염이 가능하다는 긍정적인 측면도 내포하고 있다. 따라서 농경지에 침적한 방사성 핵종의 지하이동 경향을 이해하는 것은 농경지 오염의 환경영향 평가 및 제염대책 수립에 있어서 매우 중요한 일이다.

선진 각국에서는 각종 실험[7,10]이나 낙진 방사능의 추적·조사[1,9,11,12]를 통하여 방사성 핵종의 토양 깊이별 분포와 지하이동에 관한 조사·연구가 많이 이루어져 있으나 우리나라에서는 이러한 연구

가 매우 부족한 실정이다. 방사성 핵종의 토양내 이동성은 토양의 특성[7,11]이나 관개수량[2,13] 및 시비량[7,10] 등에 따라 차이가 있으므로 자국의 환경특성을 반영하는 자료를 많이 확보할 필요가 있다.

본 연구에서는 온실실험을 통하여 우리나라에서 흔히 볼 수 있는 산성 양질사토[14]에서 육성중인 벼, 콩, 배추 및 무의 생육초기와 생육후기에 담수 또는 토양의 표면에 가해진 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr (^{90}Sr 대용) 및 ^{137}Cs 의 토양 깊이에 따른 분포 양상을 조사하고 재배작물간 및 핵종간 지하이동 정도를 비교하였다. 각 작물의 생육초기에 방사성 핵종을 가한 직후에는 작물의 뿌리흡수를 억제하는 것으로 알려져 있는 석회와 칼리[2,10]를 함께 첨가하여 지하이동에 미치는 영향을 분석하였다.

재료 및 방법

실험작물의 품종, 재배토양의 특성, 재배상자의 준비, 작물의 파종 또는 이식, 작물관리, 방사성 동위원소 및 칼리와 석회 살포, 작물의 수확 등에 대해서는 본지 제 20권 제 4호[15]에 자세히 설명되어 있다. 기타 사항에 관한 설명은 다음과 같다.

토양 시료의 채취

작물 수확후 수일 이내에 생육초기 및 생육후기에 동위원소를 가한 상자와 생육초기에 동위원소를 가하고 칼리와 석회를 첨가한 상자에서 다양한 높이의 원통형 토양 채취기를 이용하여 지름 5cm, 깊이 15~20cm의 토양을 5~6 층위별로 상자당 세 군데에서 채취하였다. 각 작물에서 동위원소 살포시

기별 방사성 핵종의 지하이동 기간(동위원소 살포에서 토양시료 채취까지의 기간)은 표 1에서 보는 바와 같다.

Table 1. Duration of the downward migration of the radionuclides applied at early and late growth stages of four different crop plants.

Crop plant	Duration of downward migration (d)	
	Early application	Late application
Rice	127	28
Soybean	111	28
Chinese cabbage	69	26
Radish	69	24

시료의 전처리 및 방사능 분석

채취한 토양시료는 온실내에서 한 달 가량 천일 건조한 다음 직경 5cm, 높이 10cm의 플라스틱 계측용기에 담아 건조중을 측정하고 방사선을 계측하였다. 방사선 계측은 고순도 Ge 검출기를 이용한 γ -spectrometry 법으로 네 핵종에 대하여 동시에 실시하였다. 계측시간은 시료에 따라 0.5~8시간 정도였고 농도계산에 사용된 소프트웨어는 EG&G ORTEC사의 OMNIGAM 프로그램이었다.

지하층위별 핵종 분포율

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

$$D = \frac{\text{각 층위내 핵종량 (Bq)}}{\text{전 채취깊이내 핵종량 (Bq)}} \times 100 \quad (1)$$

한 상자에서의 층위별 분포율은 3반복 시료들에 대한 값들의 평균으로 표시하였다.

결과 및 고찰

논 토양에서의 지하이동

벼의 생육초기와 생육후기에 수표면에 살포된 방사성 핵종의 토양 깊이에 따른 지하 농도분포를 벼 수확 직후에 조사한 것은 그림 1에서 보는 바와 같다. 네 핵종의 지하농도는 어느 경우에도 지하 20cm까지 처음에는 토양 깊이가 깊어짐에 따라 급히 감소하다가 점점 감소 정도가 낮아져 지수함수적으

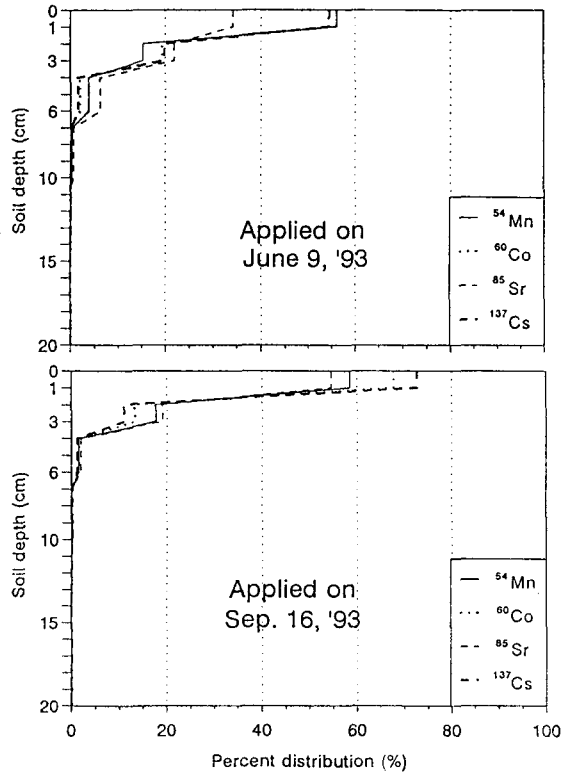


Fig. 1. Depth profiles of the radionuclides applied on the water surface over soil at two different times during the growth of rice.

로 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 어느 경우이나 지하 15~20cm 사이의 분포율은 매우 낮아 지하 20cm 이하의 토양에는 방사성 핵종이 거의 존재하지 않으며 지하 3cm 이내의 토양에 전체 방사능의 약 80~90% 이상이 분포하였음을 알 수 있다.

생육초기 살포시 0~1cm 층위에서의 분포율은 ⁸⁵Sr가 34.2%로 가장 낮았고 나머지 세 핵종들은 대체로 55% 정도로 서로 비슷하였으며 지하 1~3cm 층위에서의 분포율은 네 핵종중 ⁵⁴Mn가 가장 낮았다. 생육후기 살포시 0~1cm 층위에서의 분포율은 ⁸⁵Sr와 ⁵⁴Mn가 55~60% 정도로 비교적 낮았고 ⁶⁰Co과 ¹³⁷Cs이 70% 정도로 비교적 높았다. 따라서 지하로의 이동성은 ⁸⁵Sr > ⁵⁴Mn > ⁶⁰Co ≒ ¹³⁷Cs의 순이라고 하겠다. ⁹⁰Sr이 ¹³⁷Cs보다 이동성이 크다는 것은 여러 연구자들[8,16~18]에 의해 보고된 바 있다.

두 살포시기간 0~1cm 위에서의 분포율 차이는 ^{85}Sr 가 약 20%의 절대차를 보여 가장 컸고 다음으로 각각 약 18% 및 13%의 절대차를 보인 ^{137}Cs 과 ^{60}Co 이었다. ^{54}Mn 의 경우는 두 살포시기간에 거의 차이가 없었다. 이러한 차이들과 살포시기간별 지하 이동 기간(표 1)으로 볼때 생육초기 살포의 경우 살포량중 지하 1cm 밑으로 이동한 비율은 처음 약 한달 동안은 ^{85}Sr 가 약 45%, ^{60}Co 과 ^{137}Cs 이 약 30%, ^{54}Mn 가 약 40%로 비교적 높았으나 그후 약 100일 동안에는 ^{85}Sr 는 약 20%, ^{60}Co 과 ^{137}Cs 은 약 15%, ^{54}Mn 는 약 2~3%밖에 되지 않았던 것으로 추측해 볼 수 있다. 이것은 침적후 시간이 경과할수록 단위시간당 0~1cm 층위에서 그밑으로 이동하는 방사능량이 점점 감소한다는 것을 나타내고 있다.

밭 토양에서의 지하이동

1) 콩 재배토양

콩의 생육초기와 생육후기에 토양표면에 살포된 방사성 핵종의 수확 직후 지하 15cm까지의 농도분포는 그림 2와 같이 조사되었다. 콩에서도 네 핵종 모두 벼에서와 같이 토양 깊이에 따라 농도가 지수함수적으로 감소하여 지하 15cm 이하에는 방사능이 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다. 콩에서는 벼에서보다 지표 부근에서의 방사성 핵종 편재현상이 더욱 크게 나타나 ^{85}Sr 를 제외하고는 핵종 및 살포시기에 따라 약 85~96%가 0~1cm 층위에 분포하였다. 이와 같이 콩 재배토양에서의 방사성 핵종 지하이동 정도가 벼에서보다 낮은 것은 주로 두 작물간 관개[13] 및 시비량의 차이에 기인[7,10]하는 것으로 생각된다.

^{85}Sr 는 0~1cm 층위에서의 분포율이 생육초기 살포시 46.8%, 생육후기 살포시에는 80.4%로서 네 핵종중 가장 낮아 역시 이동성이 가장 높은 핵종으로 나타났고 두 살포시기간 차이도 타 핵종에 비해 현저하게 컸다. 나머지 핵종들의 경우 두 살포시기간 0~1cm 층위 분포율의 절대차는 5% 내외에 불과하였다. 콩에서도 이동성이 가장 낮은 핵종은 역시 ^{137}Cs 이었다.

콩의 생육초기 살포시에는 살포후 한 달 동안의 지하 1cm 밑으로의 이동량에 대한 그후 시료채취 때까지의 지하 1cm 밑으로의 이동량이 벼에 비해

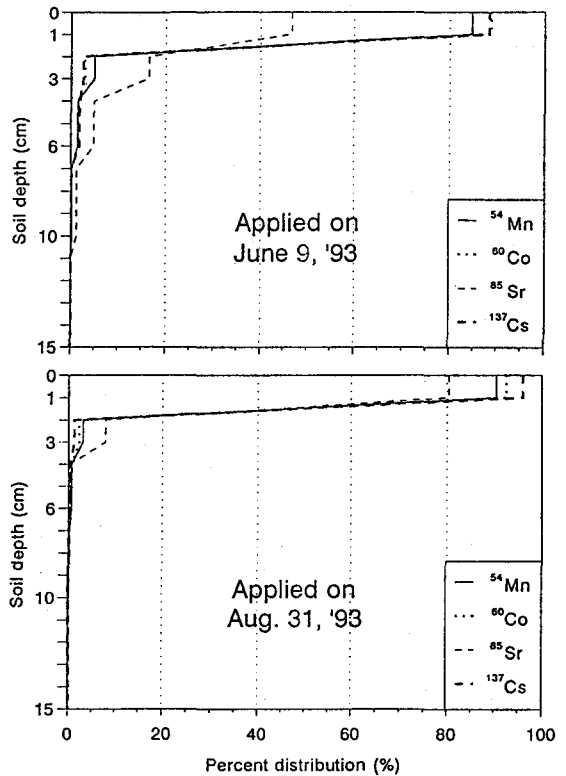


Fig. 2. Depth profiles of the radionuclides applied on the soil surface at two different times during the growth of soybean.

상대적으로 높았다고 할 수 있다. 이것은 콩 재배 토양에서는 벼 재배토양에 비해 0~1cm 층위에서 시간경과에 따른 지하이동의 감소정도가 낮았다는 것을 의미한다.

2) 배추 및 무 재배토양

배추와 무 재배토양에서 생육중에 방사성 핵종을 토양표면에 살포하고 수확 직후에 조사한 방사성 핵종의 지하분포는 각각 그림 3 및 4에 나타나 있다.

배추에서도 네 핵종의 지하농도는 어느 경우어나 토양 깊이에 따라 대체로 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내고 있고 지하로의 이동 정도는 ^{85}Sr 가 가장 높았고 그 다음이 ^{54}Mn 였으며 ^{60}Co 과 ^{137}Cs 이 가장 낮았다. 생육초기 살포시 ^{85}Sr 는 최하층인 8~15cm 층위에서의 분포율이 3.8%인 점으로 볼 때 15cm 이하에서도 약간 분포하고 있을 것으로 보이

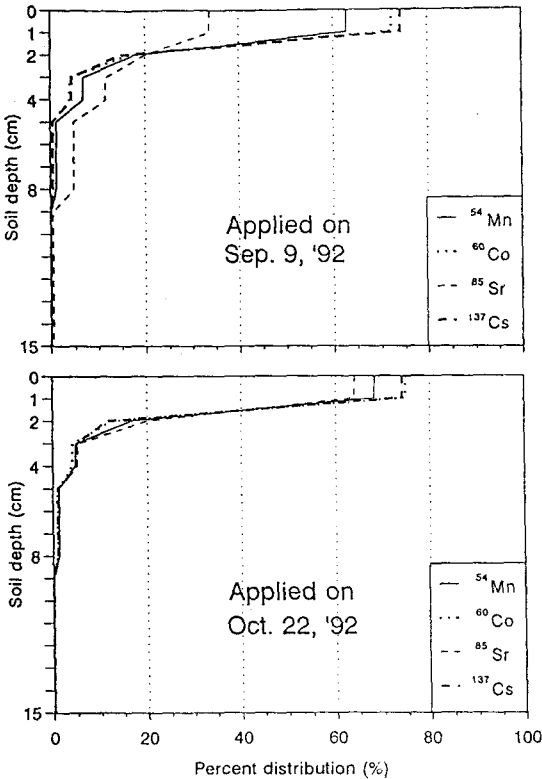


Fig. 3. Depth profiles of the radionuclides applied on the soil surface at two different times during the growth of Chinese cabbage.

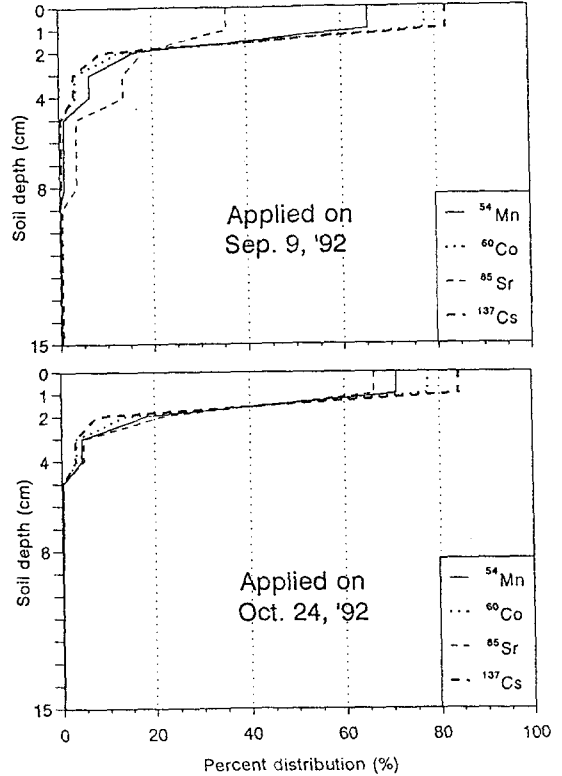


Fig. 4. Depth profiles of the radionuclides applied on the soil surface at two different times during the growth of radish.

나머지 핵종들은 15cm 이하에는 거의 분포하고 있지 않는 것으로 볼 수 있다.

^{54}Mn , ^{60}Co , ^{137}Cs 의 경우 생육초기 살포와 후기살포 간에 큰 차이없이 핵종에 따라 65~75% 정도가 지하 1cm 이내에 분포하고 있었으나 ^{85}Sr 의 경우에는 생육초기 살포시 후기살포시의 반 정도에 불과한 34%만이 지하 1cm 이내에 분포하였다. 이러한 결과로 볼 때 ^{85}Sr 는 비교적 빠른 속도로 장기간에 걸쳐 지하로 이동했다고 볼 수 있으며 나머지 세 핵종의 경우에는 침적후 단기간내에 대부분의 이동이 이루어졌고 그 이후의 이동은 매우 미미했던 것으로 추측할 수 있다.

무 재배토양에서 각 핵종의 지하 농도 분포는 대체로 배추 재배토양에서와 비슷한 경향이였으나 한 가지 차이점은 ^{137}Cs 의 0~1cm 층위에서의 분포율이 배추 재배토양에 비해 다소 높았다는 사실

이다. 이것은 ^{137}Cs 의 지하이동에 대한 무 근부의 생리적 및 기계적 작용 등을 원인으로 생각해 볼 수 있으나 본 연구에서는 확실한 원인을 규명할 수 없었다.

배추와 무 재배토양에서의 지하이동 정도가 이동기간이 더 긴 콩 재배토양에서보다 전반적으로 높았던 것은 두 작물에 대한 시비량이 콩에 대한 것보다 훨씬 많았다는 사실과 관계가 있으며[7,10] 네 작물중 벼 재배상자에서의 지하이동이 대체로 네 핵종 모두 가장 높았던 것은 관개수의 지하침투와 관계가 있을 것[13]으로 판단된다.

핵종의 토양내 이동성은 일반적으로 작물에 대한 가급도와 큰 관계가 있는 것으로 보고 있는데[2] 본 연구에서도 ^{85}Sr 는 지하로의 이동 정도가 비교적 컸고 ^{60}Co 과 ^{137}Cs 은 비교적 작아 어느정도 흡수율에서의 경향[15]과 일치하고 있다.

본 실험에서 나타난 것과 같은 방사성 핵종의 표층편재 현상에 대해서는 많은 연구자들[5~8,10, 18~20]이 유사한 경향을 보고하고 있는데 특히 방사성 Cs의 장기 거동에 관한 많은 보고들[8,18~20]은 침적후 수 년 간에 걸쳐 지하 수 cm 이내에 대부분의 방사능이 분포하고 있음을 보여 주고 있다. 이와 같은 편재현상은 사고 침적으로 토양이 오염되었을 경우 제염대책으로서 표층 토양의 제거가 효율적일 수 있음[18]을 시사하고 있다. 반면에 방사성 핵종이 농경지에 침적되면 지하이동 속도가 매우 늦어 매년 경운을 한다고 해도 장기간 동안 대부분의 방사능이 작토층에 머물면서 작물체에 의해 흡수될 수 있으므로 유의해야 할 것이다. 또한 지표 부근에 방사성 핵종이 편재하면 방사능의 재부유에 따른 내부피폭과 침적 방사능으로부터의 외부피폭이 증가하[3,9]므로 이에 대한 합리적인 대책을 강구할 필요가 있다.

일반적으로 토양의 pH가 낮을수록 원소의 용해

도가 높아지고 모래의 함량이 많을수록 배수가 촉진되므로 방사성 핵종의 지하이동 정도도 높아지는 것으로 알려져 있다[2]. 따라서 본 실험에서와 같은 산성 사양토에서의 지하이동 정도는 비교적 높은 편에 속하는 것으로 볼 수 있다. pH가 높고 모래 함량이 낮은 토양에서는 본 실험에서보다 더욱 심한 표층편재 현상이 관찰될 가능성이 크다고 하겠다.

칼리와 석회의 첨가가 핵종의 지하이동에 미치는 영향

벼, 콩, 배추, 무의 생육초기에 방사성 핵종을 가한후 10a당 83kg 수준의 비료용 염화칼리와 200kg 수준의 소석회를 동시에 첨가한 재배토양에서 작물 수확 직후 조사한 방사성 핵종의 지하농도 분포는 그림 5에 나타나 있다. 네 작물 모두 각 핵종의 전체적인 지하분포 양상은 대체로 칼리와 석회 무첨가 상자에서의 양상과 큰 차이가 없었으나 몇가지 차이점을 지적하면 다음과 같다.

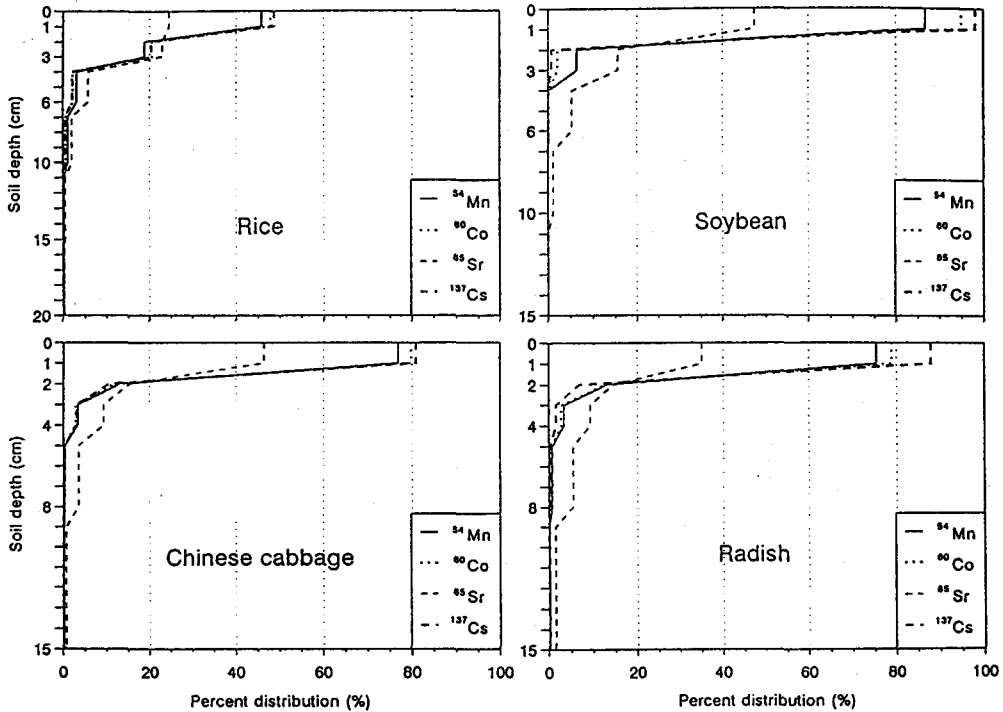


Fig. 5. Depth profiles of the radionuclides applied at early growth stages of four different crop species as affected by the KCl+lime application.

벼의 경우 첨가상자에서 무첨가 상자에 비해 네 핵종 모두 0~1cm 층위에서의 분포율은 다소 낮았고 15~20cm 층위에서의 분포율은 다소 높아 칼리와 석회 첨가가 핵종의 지하이동을 다소 촉진시킨 것으로 나타났다. 반대로 콩, 배추, 무의 경우에는 첨가상자에서 작물 및 핵종에 따라 큰 차이가 없거나 지하이동이 다소 억제된 것으로 나타났다. 무에서는 ^{85}Sr 의 0~1cm 층위에서의 분포율은 첨가상자와 무첨가상자 간에 비슷하였으나 최하부 두 층위에서의 분포율은 첨가상자에서 다소 높아 칼리와 석회 첨가가 중간층 토양에서의 ^{85}Sr 지하이동을 다소 촉진시킨 것으로 볼 수 있다. 벼와 밭작물 간에 칼리와 석회 첨가의 영향이 다르게 나타난 것은 담수의 유무에 따른 토양내 물리·화학적 작용 차이에 크게 기인하는 것으로 볼 수 있으나 본 연구에서는 정확한 원인을 규명할 수 없었다.

Squire[7]는 치환성 Ca 함량이 토양 100g 당 20 me 이상인 토양에서 ^{90}Sr 의 지하이동 정도가 가장 높았고 치환성 Ca 함량이 낮은 토양에서는 N,P,K의 시비에 의해 ^{90}Sr 의 지하이동이 촉진되었으나 Ca 함량이 높은 토양에서는 영향이 없었으며 치환성 Ca 함량이 5me/100g, pH 6.4의 사질 양토에 10a당 1, 200kg의 생석회 첨가는 N,P,K 무비시 ^{90}Sr 의 지하이동을 촉진하였으나 시비시에는 영향이 없었다고 하였다. 이에 반해 Wiklander[10]는 치환성 Ca 함량이 11.5me/100g인 산성 식질 양토에 석회를 첨가하였을 때 ^{90}Sr 의 지하이동이 억제되었고 KCl을 첨가하였을 때는 다소 촉진되었으며 두가지를 동시 첨가 했을 때는 이동이 억제되었다고 하였다. 이처럼 석회나 칼리 첨가가 방사성 핵종의 지하이동에 미치는 영향은 토양 및 재배조건에 따라 다르게 나타나지만 본 연구에서 밭작물에 대하여 얻은 결과는 대체로 위의 보고들과 유사한 경향이었다고 할 수 있겠다.

결 론

벼의 생육중 담수의 표면에, 그리고 콩, 배추, 무의 생육중 토양의 표면에 가해진 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs 의 작물 수확후 토양중 농도는 토양깊이에 따라 지수함수적으로 감소하는 경향으로 가해진 방사능의

대부분이 지하 3~4cm 이내에 분포하였다. 이것은 지표 몇 cm만 제거하여도 효율적인 제염이 가능하다는 것과 또 한편으로 1회의 작물 재배후에도 대부분의 방사능이 작토층에 잔류하여 계속적으로 작물에 의해 흡수될 수 있다는 것을 보여주고 있다. 지표 부근의 방사성 핵종 농도가 높으면 방사능의 재부유에 따른 내부피폭과 지표로부터의 외부피폭이 증가하므로 피폭감소를 위한 적절한 대책이 수립되어야 한다.

핵종간 지하이동 정도는 대체로 $^{85}\text{Sr} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} \geq ^{137}\text{Cs}$ 의 순이었다. 한편, 네 작물중 벼 재배 토양에서 이동 정도가 가장 높았는데 이것은 관개수의 작용에 의한 것으로 판단된다. 배추와 무 재배토양에서는 콩 재배토양에 비해 이동기간이 짧았음에도 불구하고 네 핵종 모두 이동 정도가 높았는데 이것은 배추나 무는 콩에 비해 N, P, K의 시용량이 훨씬 많았다는 사실과 관계가 있을 것으로 사료된다.

작물의 생육초기에 방사성 핵종을 가한 후 10a 당 각각 83kg 및 200kg 수준으로 비료용 KCl과 소석회를 담수나 토양의 표면에 동시에 첨가함으로써 핵종의 지하이동은 밭작물에서는 큰 차이가 없거나 다소 억제되었으나 벼에서는 다소 촉진되었다. 이처럼 는 상태의 토양과 밭 상태의 토양 간에 칼리와 석회의 동시첨가 효과가 반대로 나타난 것은 담수의 유무에 따른 토양내 물리·화학적 작용 차이에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

농경지에 침적한 방사성 핵종의 지하이동을 보다 정확히 예측하여 현실적인 영향평가와 합리적인 대책수립이 가능하도록 하기 위해서는 다양한 토양 및 재배조건 그리고 각종 첨가 물질 등에 대하여 광범위한 기초실험을 수행하고 관련 자료를 축적해야 할 것이다.

참고 문헌

1. K. Bunzl, H. Foerster, W. Kracke and W. Schimmack, "Residence time of fallout $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am and ^{137}Cs in the upper horizons of an undisturbed grassland soil." *J. Environ. Radioactivity* **22**, 11-27(1994).
2. P. J. Coughtrey and M. C. Thorne, *Radionuc-*

- lide Distribution and Transport in Terrestrial Ecosystems—A Critical Review of Data*, vol 1, A. A. Balkema, Rotterdam(1983).
3. D. C. Kocher and A. L. Sjoeren, "Dose-rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil." *Health Phys.* **48**, 193–205(1985).
 4. S. Glasstone and W. H. Jordan, *Nuclear Power and Its Environmental Effects*, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois(1980).
 5. S. K. Banerji, S. K. Das and K. C. Banerji, "Radiotracer studies on the mobility and retention of micronutrients in soil." *Technology* **10**, 175–181(1973).
 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. H. M. Squire, "Long-term studies of strontium-90 in soils and pastures." *Radiat. Bot.* **6**, 49–67(1966).
 8. J. F. Cline and W. H. Rickard, "Radioactive strontium and cesium in cultivated and abandoned field plots." *Health Phys.* **23**, 317–324 (1972).
 9. K. G. Andersson and J. Roed, "The behaviour of Chernobyl ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{106}Ru in undisturbed soil : implications for external radiation." *J. Environ. Radioactivity* **22**, 183–196 (1994).
 10. L. Wiklander, "Uptake, adsorption and leaching of radiostrontium in a lysimeter experiment." *Soil Sci.* **97**, 168–172(1964).
 11. N. T. Kwaratskhelia, G. G. Glonty, T. N. Arnavtsov and E. K. Gamazova, "The influence of some natural factors on the behaviour of radioactive strontium in soils", in : *Radioecological Concentration Processes*, B. Aberg and F. P. Hungate, eds., Proc. Int. Symp., Stockholm, 1966, pp. 19–24, Pergamon Presss, Oxford (1967).
 12. G. C. Bonazzola, R. Ropolo and A. Facchinelli, "Profiles and downward migration of ^{134}Cs and ^{106}Ru deposited on Italian soils after the Chernobyl accident." *Health Phys.* **64**, 479–484(1993).
 13. F. O. Hoffman and C. F. Baes III, eds., *A Statistical Analysis of Selected Parameters for Predicting Food Chain Transport and Internal Dose of Radionuclides*, ORNL, NUREG/CR-1004, ORNL/NUREG/TM-282(1979).
 14. 조백현 등, 신고 토양학, 향문사(1980).
 15. 최용호, 조재성, 이명호, 최근식, 이정호, "염화칼리와 석회의 동시살포가 주요 작물의 생육중에 침적한 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs 의 뿌리흡수에 미치는 영향", 대한방사선방어학회지. 20(4), 245–253(1995).
 16. A. L. Kliashorin, F. A. Tikhomirov and A. I. Shcheglov, "Lysimetrical study of radionuclides in the forests around the Chernobyl nuclear power plant." *J. Environ. Radioactivity* **27**, 81–90(1994).
 17. R. S. Russell, "The extent and consequences of the uptake by plants of radioactive nuclides." *Ann. Review of Plant Physiol.* **14**, 271–294(1963).
 18. B. Salbu, D. H. Oughton et. al., "The mobility of ^{137}Cs and ^{90}Sr in agricultural soils in the Ukraine, Belarus, and Russia, 1991." *Health Phys.* **67**, 518–528(1994).
 19. 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).
 20. H. M. Squire and L. J. Middleton, "Behaviour of ^{137}Cs in soils and pastures : a long-term experiment." *Radiat. Bot.* **6**, 413–425(1966).