

Effects of KCl and Lime Application on Root Uptake of ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr and ^{137}Cs Deposited during Growth of Major Crop Plants

Yong-Ho Choi, Jae-Seong Jo*, Myung-Ho Lee, Geun-Sik Choi and Jeong-Ho Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

* Chungnam National University

(Received 6 October 1995; Accepted 19 December 1995)

염화칼리와 석회의 동시살포가 주요 작물의 생육중에

침적한 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs 의 뿌리흡수에 미치는 영향

최용호, 조재성*, 이명호, 최근식, 이정호

한국원자력연구소, * 충남대학

Abstract—The effects of a simultaneous application of KCl and lime on the root uptake of ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr and ^{137}Cs by rice, soybean, Chinese cabbage and radish were investigated through 2 years' greenhouse experiments. At their early growth stages, 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 and 83 g/m² of fertilizer KCl and 200 g/m² of slake lime were applied to the surfaces. Distribution of radioactivities among plant parts and change in uptake pattern with plant species were not, on the whole, significantly affected by the application. It reduced effectively soil-to-plant transfer factors of ^{85}Sr and ^{137}Cs for rice, of all for Chinese cabbage and of ^{54}Mn , ^{60}Co , and ^{137}Cs for radish without their growth inhibition. In rice, ^{85}Sr showed the highest decrease (~60%) while, in Chinese cabbage and radish, ^{54}Mn did (~80%). The experimental results can become valuable reference data to establish countermeasures against a radioactive contamination of farm-land during plant growth.

Key words : KCl. Lime. Radionuclide. Crop plant. Root uptake. Transfer factor. Contamination countermeasure.

요약—2년간의 온실실험을 통하여 벼, 콩, 배추, 무의 생육초기에 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs 의 혼합용액을 산성 양질사토로 상층부를 채운 재배상자내 담수 또는 토양의 표면에 가한 후 비료용 염화칼리와 소석회를 각각 m² 당 200g 및 83g 수준으로 동시에 처리하고 흡수억제 효과를 조사하였다. 칼리와 석회 처리시 각 핵종의 작물체 부위간 농도분포 및 작물에 따른 흡수양상의 변화는 대체로 무처리시와 비슷한 경향이였다. 토양-작물체간 핵종의 전이계수는 칼리와 석회 처리에 의해 벼에서는 ^{85}Sr 와 ^{137}Cs , 배추에서는 네 핵종 모두, 무에서는 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{137}Cs 의 경우

생육장애 없이 꽤 크게 감소하였으나 이밖의 경우에는 감소효과를 인정할 수 없었다. 벼에서 전이계수의 감소 정도는 ^{85}Sr 가 60% 정도로 가장 컸고 배추와 무에서는 ^{54}Mn 가 80% 정도로 가장 컸다. 본 연구결과는 작물 생육중 농경지의 방사능 오염시 대책 수립을 위한 기초정보로 이용될 수 있다.

중심단어 : 염화칼리, 석회, 방사성 핵종, 농작물, 뿌리흡수, 전이계수, 오염 대책

서 론

화석연료가 절대 부족한 우리나라에서는 원자력에 대한 의존도가 날로 높아져 좁은 국토 면적에도 불구하고 가동중인 원자력발전소의 수가 현재 10개에 달하고 앞으로도 계속 증가할 전망이다. 이에 따라 핵연료가공공장이나 방사성폐기물 처분장과 같은 시설도 가동 또는 건설계획 중에 있다. 한편 각종 산업체에서의 동위원소 이용도 증가하는 추세에 있다. 이와 같은 시설들에서 만일의 사고가 발생하면 다량의 방사능이 환경으로 방출되어 농경지를 오염시킬 수 있다. 또한 인접국인 중국, 일본, 북한 러시아 등에도 다수의 원자력 시설이 가동중에 있어 Chernobyl 사고와 같은 대형 사고 발생시 우리나라에 큰 영향을 미칠 수 있다.

농경지가 방사능으로 오염되면 방사성 핵종이 재배 작물의 뿌리흡수에 의해 작물체내에 축적되고 인간의 식생활을 통해 인체에까지 도달하여 방사선 내부 피폭을 일으키게 된다[1,2]. 따라서 농경지의 방사능 오염시 영향을 최소화하기 위한 대책의 하나로 농작물의 방사성 핵종 흡수를 억제하는 방법을 수립할 필요가 있다. 여기에는 오염토양 제거와 같은 물리적인 방법과 각종 흡수억제 물질을 살포하는 방법 등이 있다[2, 3, 4]

오염 토양을 제거하면 방사성 핵종의 흡수를 거의 완전히 방지할 수 있으나 한편으로는 다량의 방사성 폐기물이 발생하고 작토층의 제거로 인하여 토양의 비옥도가 감소하게 된다. 또한 이 방법은 작물의 생육중 토양오염시에는 적용할 수 없다는 단점이 있다. 반면에 흡수억제 물질의 살포는 오염토양 제거에 비해 효과는 낮지만 위와 같은 문제점 없이 작물의 생육중에도 적용할 수 있다.

이러한 흡수억제 물질로서 많이 보고되어 있는 것은 석회, 점토류, 및 유기물 등이다. 이외에 방사성 핵종과 화학적으로 유사한 원소들도 작물체에 의한

경쟁적 흡수로 인해 효과가 있는 것으로 알려져 있는데 그 대표적인 예로는 방사성 Sr에 대한 Ca의 작용[5~8]과 방사성 Cs에 대한 K의 작용[6,9,10]을 들 수 있다. 석회를 사용하면 토양 pH의 하강으로 대체로 원소들의 흡수가 감소하고 특히 Sr에 대해서는 Ca가 유사원소로도 작용하여 흡수가 억제될 수 있다[2]. 점토류나 유기물을 살포하면 이들에 의해 방사성 핵종이 흡착, 고정되어 흡수 억제 효과가 나타나는 경우도 있다.[7, 11, 12].

여러가지 흡수억제 물질중에서 석회와 비료용 염화칼리는 농가에서 널리 사용하는 물질이므로 유사시에 손쉽게 구할 수 있고 어느 정도까지는 토양개량이나 작물의 생육에도 도움이 되어 일석이조의 효과도 기대할 수 있다.

본 연구에서는 온실실험을 통하여 우리나라의 주식작물인 벼, 콩, 배추 및 무의 생육초기에 방사선 환경영향 평가시 주요 핵종으로 취급되고 있는 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{90}Sr (^{85}Sr 로 대체) 및 ^{137}Cs 의 혼합 용액을 담수 또는 토양의 표면에 처리한 후 소석회와 비료용 염화칼리를 동시에 살포하여 토양-작물체간 전이계수를 측정하고 흡수억제 효과를 조사하였다. 여기서 두 물질을 동시에 살포한 것은 핵실험이나 원자로 사고시에는 여러 종류의 방사성 핵종이 동시에 방출되고 [13, 14] 또한 Ca와 K는 대체로 서로 독립적 혹은 상승적으로 작용하는 것으로 보고[8, 15]되어 있기도 하므로 두가지를 함께 처리하는 것이 보다 효율적인 것으로 판단하였기 때문이다.

재료 및 방법

실험작물 및 재배토양

실험작물은 벼, 콩, 배추 및 무로서 그들의 품종은 각각 동진벼, 황금콩, 맛나배추 및 백경무였다. 재배토양은 한국원자력연구소 부근에서 60cm 깊이의

토양을 20cm 깊이의 세 층위로 나누어 채취하였다. 작물체의 뿌리흡수와 밀접한 관계가 있는 최상층 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 점점 감소하였고 pH와 점토 함량은 점점 증가하였다.

재배상자 준비

재배용 상자는 하부에 배수장치를 갖춘 철제 상자로서 가로, 세로, 높이는 각각 0.6m, 0.6m, 1.0m였다. 이 재배상자를 온실내에 1.3m 정도의 깊이로 건조한 호수에 30cm 높이의 지지물을 깔고 장치하였다. 상자의 바닥에서 20cm정도까지는 직경 1~3cm 가량의 인조석을 깔았고 그 위에 세 층위의 토양을 아래에서부터 각각 30cm, 30cm, 20cm의 깊이로 채우고 물이 배수될 때까지 급수하였다. 급수후 상자내 지표면은 15cm 정도 하강하였다. 이후 파종 또는 이식 전까지 며칠간 급수량을 조절하면서 표토의 수분 함량을 적절히 유지하였다. 비의 이식시 수심은 3~4cm 정도였다.

작물 파종(이식) 및 관리

작물 파종 또는 이식 하루전에 다음과 같이 밑거름을 사용하였다. 비는 상자당 요소 6g, 용과린 21.5g, 염화칼리 5.0g (10a 당 각각 N 7.8kg, P_2O_5 12kg, K_2O 8.3kg에 해당), 석회 36g, 퇴비 360g (10a 당 각각 100kg 및 1000kg에 해당)을 담수의 표면에 고루 살포한 다음 날 길이가 15cm인 모종용 삽으로 토양과 혼합하였다. 콩은 상자당 요소 3.2g, 용과린 12.6g, 염화칼리 3.6g, 석회 54g, 퇴비 360g을 토양 표면에 고루 살포한 다음 위와 같은 방법으로 섞어 주었다. 그리고 배추와 무는 상자당 요소 10g, 용과린 36g, 염화칼리 15g, 붕사 0.5g, 석회 36g, 퇴비 540g씩을 위와 같이 사용하였다.

비는 '93년 5월 26일에 32일 모를 1주4본식으로 상자당 16주 이식하였고 콩도 같은 날에 상자당 두줄로 한줄에 12립씩 24립을 약 3cm 깊이로 파종하고 복토한 다음 출아후 생육초기에 속아 상자당

12개체만 서게 하였다. 배추와 무는 '92년 8월 27일에 상자당 네 구멍에 각각 구멍당 10~15립씩 및 6~7립씩을 약 2cm 깊이로 파종하고 출아후 생육 정도에 따라 작물체를 속아 최종적으로 구멍당 한 개체씩만 서게 하였다. 따라서 본 실험에서의 재식밀도는 m^2 당 비가 44주, 콩이 33본, 배추와 무가 11본씩으로 실제 재배에서의 밀도[16, 17, 18]보다 다소 높게 계산되었다. 그러나 본 실험에서는 재배상자 내의 작물과 주변 작물 간에 공간적 경쟁이 거의 없었다는 점이 고려될 필요가 있다.

비는 이식후 생육단계에 따라 수확 2주전까지 적절한 수심을 유지하도록 관개하였고 '93년 7월 13일부터 7월 18일까지는 중간급수를 실시하였으며 비 재배기간중 관개수의 지하삼투량이 평균 약 550mm[16]인 점을 고려하여 5~7일 간격으로 상자당 9ℓ 씩 21회 배수하였다. 나머지 작물은 파종후 표토와 작물체의 상태를 고려하여 대체로 2~3일에 한 번씩 적당량의 수분을 토양 표면에 공급하였다.

추비는 비의 경우 분얼비로 상자당 요소 2.4g을 6월 8일에, 이삭비로는 상자당 요소 2.4g과 염화칼리 2.2g을 7월 26일에 그리고 알비로는 상자당 요소 1.2g을 8월 30일에 사용하였다. 배추와 무의 추비로는 9월 17일과 10월 12일에 상자당 요소 5g씩을 1ℓ의 물에 녹여 토양 표면에 살포하였다. 콩은 추비를 하지 않았다.

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

방사성 동위원소 및 칼리와 석회 처리

^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs 의 무담체 원액을 적정량의 0.5M HCl 용액에 모두 혼합하여 적정 농도(파종일 기준으로 ml당 각 핵종 약 50,000Bq)로 희석한 다음 작물의 파종 또는 이식 13일 후에 상자당 64ml씩의 희석용액을 균등하게 나눈 64곳의 담수(비) 또는 토양 표면에 마이크로 피펫을 이용하여 1ml씩 고루 살포하였다.

각 작물에 대하여 두 상자씩 위와 같이 동위원소를 처리하고 세 시간이 경과한 다음 그중 한 상자에 30g의 염화칼리와 72g의 소석회를 담수 또는 토양의 표면에 고루 살포하였다. 여기서 경과시

간을 세 시간으로 한 것은 농경지 오염사고 발생후 사고 발생을 인지하고 살포 준비를 하기까지 필요한 최단시간을 세 시간으로 보았기 때문이다. 이러한 경과시간의 영향에 대해서는 알려진 바가 거의 없지만 빨리 처리할수록 효과가 클 것이라는 예상하에 실험을 수행하였다.

시료 전처리 및 방사능 분석

벼는 '93년 10월 11일, 콩은 '93년 9월 20일, 배추는 '92년 11월 6일, 무는 '92년 11월 10일에 한 상자내의 육성개체들을 4등분하여 수확한 다음 부위별로 나누어 배추와 무 시료는 생체중을 측정하고 또한 벼와 콩의 줄기와 잎, 콩의 꼬투리, 그리고 배추와 무의 경엽부와 뿌리는 잘게 절단하여 온실내에서 2주 이상 천일건조하였다. 건조후 벼는 현미와 왕겨를 분리하였다. 벼와 콩의 뿌리는 조사대상에서 제외하였다.

건조시료중 벼의 잎을 제외한 시료들은 직경 5cm, 높이 10cm의 플라스틱 계측용기에 담고 벼의 잎은 500ml 플라스틱병에 담고 건조중을 측정하고 방사능 계측용 시료로 하였다.

시료의 방사선 계측은 고순도 Ge 검출기를 이용한 γ -spectrometry 법으로 네 핵종에 대하여 동시에 실시하였다. 계측시간은 시료에 따라 0.5~2 시간 정도였다.

토양-작물체간 전이계수 계산

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

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

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

칼리와 석회의 무처리와 처리시 방사성 핵종의 뿌리흡수 정도 및 작물체내 농도분포는 위와 같이 구한 전이계수로 비교하였다.

결과 및 고찰

벼에서의 방사성 핵종 전이계수는 염화칼리와 소석회의 처리 유무에 관계없이 종실에서는 $^{54}\text{Mn} > ^{85}\text{Sr} > ^{137}\text{Cs} > ^{60}\text{Co}$ 의 순이었고 경엽부에서는 $^{54}\text{Mn} > ^{85}\text{Sr} > ^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs}$ 의 순이었다(그림1). 부위간에는 무처리와 처리시 모두에서 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr 의 경우 잎 > 줄기 > 왕겨 > 현미의 순이었으나 ^{137}Cs 의 경우는 현미에서 타 부위에 비해 50% 이상 낮았을 뿐 타 부위들 간에는 차이가 거의 없었다.

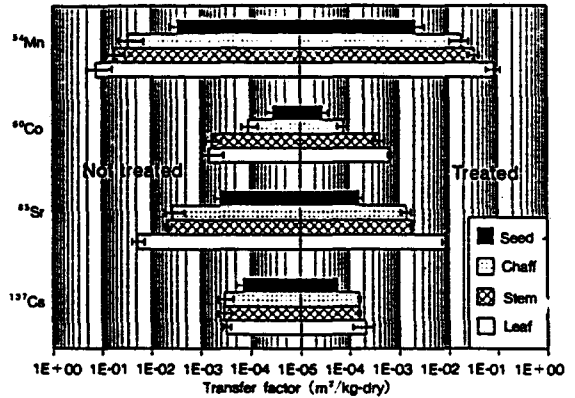


Fig. 1. Change in soil-to-plant transfer factors of the radionuclides for different parts of rice by KCl+lime application.

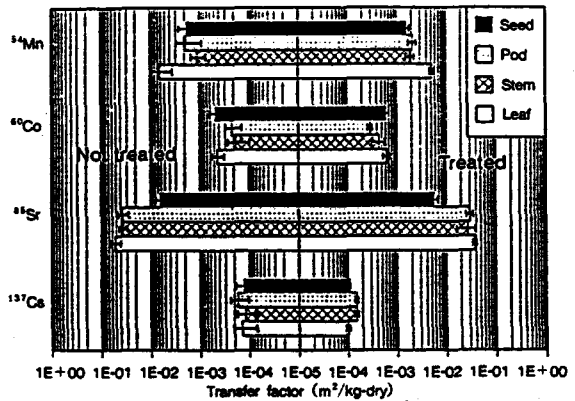


Fig. 2. Change in soil-to-plant transfer factors of the radionuclides for different parts of soybean by KCl+lime application.

잎과 현미간 전이계수의 차이가 가장 큰 핵종은 무처리와 처리시 모두 약 50배의 차이를 나타낸 ^{85}Sr 였다.

콩에서는 전이계수가 어느 경우이나 $^{85}\text{Sr} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs}$ 의 순이었고 부위간 차이는 벼에 비해 크게 낮아 비교적 고른 체내 분포를 보였다.(그림2). 특히 ^{60}Co 의 경우 종실에서의 전이계수가 무처리와 처리시 모두 잎과 비슷한 수준으로 꼬투리나 줄기보다 높았으며 ^{137}Cs 의 종실 전이계수도 타 부위와 큰 차이가 없었다. 콩에서도 벼에서와 마찬가지로 칼리와 석회의 동시살포에 의해 각 핵종의 부위간 농도분포 경향이 크게 변하지 않았다.

배추에서도 콩에서와 같이 어느 경우이나 전이계수가 $^{85}\text{Sr} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs}$ 의 순이었고 부위간에는 뿌리가 경엽부보다 높았다.(그림3). 두 부위간 차이가 가장 큰 핵종은 무처리와 처리시에서 모두 10여배의 차이를 보인 ^{60}Co 이었고 차이가 가장 작은 핵종은 2배 미만의 차이를 보인 ^{85}Sr 였다. ^{54}Mn 의 경우 칼리와 석회 무처리시에는 두 부위간에 약 6배의 차이가 있었으나 처리시에는 차이가 크게 감소하여 약 2배 정도에 불과하였다. 이외에는 처리시 부위간 농도분포에 있어서 뚜렷한 변화를 관찰할 수 없었다. 칼리와 석회 처리시 배추 경엽부와 뿌리간 ^{54}Mn 의 농도 차이가 크게 감소한 것은 흡수된 ^{54}Mn 의 경엽부로의 이행율은 93.1%에서 96.8%로 약간 증가하였음에도 불구하고 체적이 경엽부에 비해 매우 작은 뿌리에서의 농도는 경엽부에서보다 훨씬 크게 감소한 데 따른 것이다. 이와 같은 이행율의 증가가 칼리와 석회 처리의 영향인지를 명확히 구명하기 위해서는 보다 세밀한 실험이 뒤따라야 할 것이다.

무에서의 방사성 핵종 전이계수도 배추와 마찬가지로 어느 경우이나 $^{85}\text{Sr} > ^{54}\text{Mn} > ^{60}\text{Co} > ^{137}\text{Cs}$ 이었으나 부위간에는 배추와는 반대로 어느 경우이나 경엽부에서 뿌리보다 비교적 크게 높았다.(그림 4). ^{137}Cs 의 두 부위간 차이는 무처리시 약 7배, 처리시 약 6배로 타 핵종에 비해 약간 컸다. 네 핵종 모두 처리시 두 부위간 전이계수의 차이는 무처리시보다 다소 작았다.

작물체내 Mn, Co, Sr, Cs의 이행 및 농도분포에

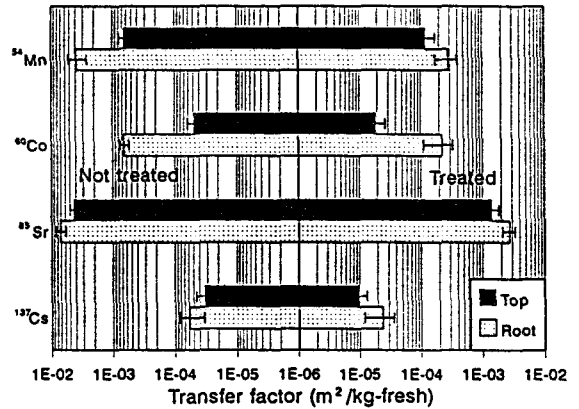


Fig. 3. Change in soil-to-plant transfer factors of the radionuclides for top and root of Chinese cabbage by KCl+lime application

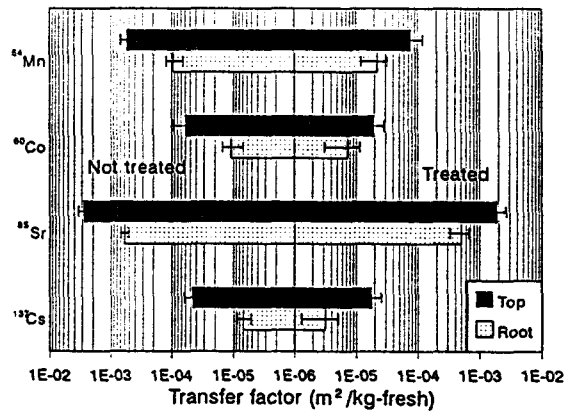


Fig. 4. Change in soil-to-plant transfer factors of the radionuclides for top and root of radish by KCl+lime application.

미치는 석회나 칼리의 영향에 대해서는 강남콩의 양액재배 실험에서 Ca 농도가 어느 정도 이상일 경우 새로운 발육부위로의 ^{85}Sr 이행이 다소 억제되었음을 보여준 Wallace[19]의 보고외에는 알려진 바가 거의 없다.

칼리와 석회의 동시 살포시 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs 의 전이계수($\text{m}^2/\text{kg-dry}$)는 부위에 따라 벼에서는 각각 $2.2 \times 10^{-3} \sim 8.7 \times 10^{-2}$, $2.8 \times 10^{-5} \sim 6.6 \times 10^{-4}$, $1.6 \times 10^{-4} \sim 8.3 \times 10^{-3}$, $5.8 \times 10^{-5} \sim 2.1 \times 10^{-4}$ 의 범위였고 콩에서는 각각 $1.6 \times 10^{-3} \sim 5.1 \times 10^{-3}$,

Table 1. Soil-to-plant transfer factors of the radionuclides at KCl+lime application as shown in percent of controls

Plant species	Plant part	Transfer factor ^a (% of cntrol)			
		⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	⁸⁵ Sr	¹³⁷ Cs
Rice	Seed	78.2± 52.3	77.0± 38.1	41.8± 15.8	43.1± 17.8
	Chaff	60.8± 40.1	72.0± 32.8	37.2± 18.6	47.7± 16.8
	Stem	61.5± 30.1	70.6± 30.0	39.0± 6.4	45.7± 13.9
	Leaf	64.5± 39.9	99.6± 48.7	43.7± 13.9	68.2± 32.9
Soybean	Seed	87.9± 41.0	131.5± 46.1	91.1± 27.6	91.1± 38.7
	Pod	110.3± 61.9	137.1± 53.8	79.8± 23.2	85.3± 34.0
	Stem	174.6± 66.6	240.9± 131.4	72.7± 32.1	128.0± 59.2
	Leaf	79.3± 36.9	144.0± 44.6	72.6± 18.8	74.8± 39.7
Chinese cabbage	Top	18.7± 8.6	40.4± 19.9	32.2± 11.5	29.2± 15.1
	Root	7.3± 3.7	32.8± 17.4	37.1± 10.8	41.5± 26.6
Radish	Top	14.7± 8.7	34.3± 25.5	66.8± 30.2	40.2± 21.2
	Root	23.6± 13.2	64.3± 43.9	83.7± 30.8	46.3± 30.5

a: All data are mean± standard deviation.

$2.8 \times 10^{-4} \sim 6.3 \times 10^{-4}$, $5.7 \times 10^{-3} \sim 3.8 \times 10^{-2}$, $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ 의 범위를 보여 대체로 ⁵⁴Mn는 벼가 콩보다 높았고 ⁸⁵Sr는 그 반대였으며 ⁶⁰Co과 ¹³⁷Cs은 두 작물간 차이가 부위에 따라 다른 양상을 보였다.(그림 1 및 2). 칼리와 석회 처리시 두 작물간 전이계수 차이에 있어서의 이러한 경향은 무처리시 벼에서 콩보다 전체적으로 다소 높은 값을 보인 ¹³⁷Cs을 제외하고는 무처리시와 비슷한 것이다. 배추와 무간 각 핵종의 전이계수는 무처리시나 처리시 네 핵종 모두 뿌리에서는 배추가 무보다 훨씬 높았고 경엽부에서는 두 작물간에 큰 차이가 없었다.

칼리와 석회의 처리시 벼, 콩, 배추, 무에서 ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁸⁵Sr, ¹³⁷Cs의 작물체 부위별 전이계수를 무처리에 대한 백분율로 표시한 것은 표 1에서 보는 바와 같다.

벼에서 전이계수의 감소 정도가 가장 큰 핵종은 전 부위에 걸쳐 약 60% 정도 감소한 ⁸⁵Sr였고 그 다음으로는 잎을 제외하고는 대체로 55% 정도 감소한 ¹³⁷Cs이었다. ⁵⁴Mn와 ⁶⁰Co의 경우도 전반적

으로 다소 감소하였으나 어느 부위에서도 유의한 감소효과를 인정하기 어려웠다.

김[6]이 포트재배로 다섯가지 토양에 대하여 수행한 흡수실험에서는 10a당 300kg의 소석회 처리시 벼의 ⁹⁰Sr 흡수는 대체로 20% 정도밖에 감소하지 않았으나 10a당 16kg의 K 처리시에는 토양에 따라 수습%에서 10여배 정도까지 감소하였다. 김은 대조구에 석회 또는 K를 전혀 사용하지 않았으나 본 실험에서는 대조구에도 비료로서 소석회와 염화칼리를 사용하였으므로 두 실험의 결과를 비교하기는 곤란하나 다음과 같은 설명은 가능할 것으로 본다. 본연구에서 소석회의 처리수준은 10a당 200kg로 김의 실험에 비해 낮았으나 Sr의 흡수가 더 크게 감소한 것은 주로 처리방법의 차이와 염화칼리의 동시처리 때문인 것으로 사료된다. 김은 소석회와 염화칼리를 벼의 이식전에 단독으로 처리하여 토양과 섞어 주었다. 한편 본 연구에서 K 처리수준은 10a당 40kg 정도로 김의 실험에 비해 훨씬 높았으나 Cs 흡수의 감소 정도는 김이 공시한 대부분의 토양에서보다 오히려 훨씬 낮았다. 이것은

두 실험간 토양의 차이에 크게 기인하는 것으로 생각된다.

콩에서는 칼리와 석회 처리시 네 핵종 모두 전이계수가 어느 부위에 있어서도 효과적으로 감소하지 않았으며 ⁶⁰Co의 경우는 오히려 부위에 따라 30~140% 정도 증가하였고 ⁵⁴Mn도 줄기에서 약 75% 증가하였다.

배추에서는 칼리와 석회 처리에 의해 ⁵⁴Mn의 전이계수가 가장 크게 감소하여 경엽부에서는 약 80%, 근부에서는 약 93% 감소하였고 나머지 핵종들의 경우에는 전반적으로 60~70% 정도 감소하였다.

무에서도 칼리와 석회 처리에 의해 배추에서와 비슷하게 ⁵⁴Mn의 전이계수가 가장 크게 감소하여 대체로 80% 정도 감소하였고 ⁶⁰Co과 ¹³⁷Cs의 경우 핵종 및 부위에 따라 40~60% 정도 감소하였으나 ⁸⁵Sr에 대한 효과는 배추에 비해 크게 낮아 경엽부에서만 30% 정도 감소하였을 뿐 뿌리에서는 거의 감소하지 않았다.

이상과 같이 본 실험에서 칼리와 석회 처리에

의한 흡수억제 효과가 작물간 및 핵종간에 다르게 나타난 것은 각 작물의 흡수생리 및 재배조건, 석회첨가에 따른 pH 변화에 대한 작물체의 생리적 대응[20, 21] 및 핵종의 화학적 반응, 각 핵종의 K 또는 Ca와의 화학적 유사성 등에 있어서의 차이들이 복합적으로 작용한 결과로 보여 진다.

Loensjoe 등[15]은 pH 5.6의 양질사토에 10a당 20kg의 K 처리와 400kg의 CaO 처리를 병행하였을 때에도 목초류의 방사성 Cs 전이계수가 K 단독 처리와 비슷한 정도로 감소하였음을 관찰하고 K와 석회의 효과는 상호 독립적인 것으로 판단하였다. Wiklander[8]는 산성 식양토에서 밀, 보리, 레드클로바 등에 의한 ⁹⁰Sr 흡수는 석회처리에 의해 40~50% 감소하였으나 K 처리에 의해서는 뚜렷한 감소가 없었고 두가지 혼합처리의 경우에는 레드클로바에 있어서는 석회 단독처리에 비해 감소 정도가 약간 더 컸으나 밀과 보리에 있어서는 거의 차이가 없었음을 보여 주었다. 이런 것들로 판단할 때 본 실험에서도 소석회와 염화칼리 두 물질의 혼합처리가 다른 하나의 효과를 감소시켰을 가능

Table 2. Effect of KCl+lime application on biomass production of the crop plants

Plant species	Plant part	Biomass production ^a (g)		
		Control	Treated	No Rl ^b
Rice	Seed	10.0± 0.3	11.3± 0.3	9.9± 0.6
	Chaff	2.3± 0.1	2.5± 0.1	2.2± 0.2
	Stem	3.4± 0.5	4.0± 0.5	3.8± 0.5
	Leaf	11.6± 0.5	13.4± 0.6	12.7± 0.6
Soybean	Seed	7.9± 1.5	9.5± 0.7	8.0± 1.5
	Pod	4.0± 1.2	5.8± 0.9	4.2± 0.7
	Stem	3.4± 1.1	4.7± 1.4	3.8± 0.7
	Leaf	3.8± 0.9	4.8± 0.6	4.1± 1.1
Chinese cabbage	Top	520± 342	933± 47	790± 177
	Root	6.7± 4.3	13.1± 3.0	11.1± 1.9
Radish	Top	232± 60	266± 84	193± 25
	Root	231± 65	325± 84	255± 83

a : weight of four dry plants in a hill for rice, one dry plant for soybean and one fresh plant for the others.
 : All data are mean± standard deviation.
 b : neither treated with radioisotopes nor treated with KCl+lime.

성은 거의 없다고 하겠다.

칼리와 석회 무처리 및 처리시, 그리고 방사성 동위원소 무처리시 네 작물의 부위별 발육량을 조사한 것은 표 2에 나타나 있다.

벼, 배추, 무의 발육 정도는 칼리와 석회 처리시 무처리에 비해 다소 증가하여 방사성 핵종의 흡수억제 효과와 함께 약간의 수량증대까지도 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 콩의 경우는 칼리와 석회 처리시 생육개체의 발육은 다소 향상하였으나 한상자내 육성개체수의 1/4인 3개체가 칼리와 석회의 과잉해로 추정되는 장해로 고사하여 흡수억제 효과도 없었을 뿐만 아니라 수량까지 감소한 것으로 나타났다.

Haghiri와 Sayre[5]의 보고에 의하면 세 가지의 산성 미사질양토에 10a 당 1,000kg에 해당하는 석회 처리로 콩 경엽부에서의 ^{90}Sr 농도가 40~60% 정도 감소하였고 생육장해의 증거도 없었다. 본 실험에서의 결과가 이와 다른 것은 석회의 처리량, 처리 시기 및 방법, 염화칼리의 영향, 재배조건의 차이 등에 기인하는 것으로 보인다.

배추에서는 칼리와 석회 무처리 및 처리시 모두 방사선 장해로 추정되는 결과가 하나씩 발생하였지만 생존 개체들의 발육은 처리시에 크게 향상되었다.

결 론

작물의 생육초기 방사성 핵종이 토양에 침적하였을 때 10a 당 200kg의 소석회와 83kg의 비료용 염화칼리를 지표에 함께 살포함으로써 벼의 ^{85}Sr 와 ^{137}Cs 전이계수, 배추의 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs 전이계수, 무의 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{137}Cs 전이계수를 작물의 생육장해 없이 효과적으로 감소시킬 수 있었다. 이와 같은 결과는 작물 생육중 농경지의 방사능 오염사고 발생시 환경영향 경감대책 수립을 위한 기초정보로서 가치가 있다고 하겠다.

반면에 벼의 ^{54}Mn 와 ^{60}Co 전이계수, 콩의 네 핵종 모두의 전이계수, 무의 ^{85}Sr 전이계수에 대해서는 칼리와 석회의 동시첨가에 의해 효과적인 감소를 기대할 수 없는 것으로 나타났으며 콩 종실에서의 ^{60}Co 전이계수는 오히려 증가하였다.

따라서 이러한 경우들에 대해서는 다른 방법에 의한 흡수억제 대책이 강구되어야 할 것이다. 칼리와 석회 이외에 각종 점토류 및 퇴비와 같은 유기물 등의 흡수억제 효과에 대해서도 많은 보고[7, 11, 12]가 이루어져 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다고 본다.

각종 흡수억제 물질의 효과는 작물 및 핵종, 토양 및 재배조건, 오염의 시기 및 유형 등에 따라 크게 달라질 수 있으므로 광범위한 기초실험이 계속 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. IAEA, *Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Routine Release*, Safety Series No. 57, Vienna (1982).
2. J. E. Till and H. R. Meyer (Eds). *Radiological Assessment, A Textbook on Environmental Dose Analysis*, NUREG/CR-3332, ORNL-5968 (1983).
3. IAEA, *Environmental Contamination Following a Major Nuclear Accident*, Proc. of an Intern. Symp., Vienna, 16~20 Oct. 1989, Vol.2, IAEA, Vienna (1990)
4. G. Desmet, P. Nassimbeni and M. Belli (Eds.), *Proc. of the Workshop on 'The Transfer of Radionuclides in Natural and Semi-Natural Environments'*, Villa Manin, Italy, 11~15 Sept. 1989, CEC (1990).
5. F. Haghiri and J. D. Sayre, " ^{90}Sr uptake by plants as influenced by soil types and liming," *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **25**, 120-130 (1961).
6. 김재성, ^{90}Sr 과 ^{137}Cs 의 답토양별 흡. 탈착과 수도체의 흡수양상에 관한 연구, 고려대학교 박사학위 논문 (1985).
7. J. F. Lembrechts, J. H. Van Ginkel, J. H. De Winkel and J. F. Stoutjesdijk, "The effects of some agricultural techniques on soil to plant transfer of radionuclides under field conditions," in : Ref. 3, 163-171 (1990).
8. L. Wiklander, "Uptake, adsorption and leaching of radiostrotium in a lysimeter experiment," *Soil*

- Sci.* **97**, 168-172 (1964)
9. A. Grauby, A. Jouve and B. Legrand, "Study of the possibility of attenuating soil-plant transfer after an accident by application of manure to the soil and by foliar spraying," in : Ref. 4, 403-410 (1990).
 10. S. Yonezawa and S. Mitsui, "Depressing effect of fertilizers and soil conditioners on ^{90}Sr and ^{137}Cs uptake by rice plant," *J. Sci. Soil Manure, Japan* **36**, 135-139 (1965).
 11. H. Nishita and R. M. Haug, "Influence of clinoptilolite on ^{90}Sr and ^{137}Cs uptake by plants," *Soil Sci.* **114**, 149-157 (1972).
 12. 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, 57-113(1984).
 13. UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiations*, 1977 Report to the General Assembly, United Nations, New York (1977).
 14. IPSN, *The Tchernobyl Accident*, Rapport IPSN 2/86, Rev. 3, CEA (1986).
 15. H. Loensjoe, E. Haak and K. Rosen, "Effects of remedial measures on long term transfer of radiocesium from soil to agricultural products as calculated from Swedish field experimental data," in : Ref. 3, 151-162 (1990).
 16. 이은웅 등, 사정 수도작, 향문사.(1988)
 17. 조재영 등, 사정 전작, 향문사.(1989)
 18. 표현구 등, 채소원예각론 향문사.(1986)
 19. A. Wallace, "Effect of calcium levels on redistribution of ^{85}Sr in bush bean plants," *Plant and Soil* **35**, 415-420 (1971).
 20. E. G. Bollard and G. W. Butler, "Mineral nutrition of plants," *Ann. Rev. Plant Physiol.* **17**, 76-112 (1966).
 21. H. Marschner, *Mineral Nutrition in Higher Plants*, Academic Press (1986).