2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

무에 대한 ^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs의 직접오염 경로 분석

Analysis of the Direct Contamination Pathway of ^{85}Sr, ^{103}Ru and ^{134}Cs in Radish

임광묵, 박두원, 박효국, 이원윤, 최용호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

무의 방사성 핵종 직접오염 경로 분석을 위하여 동위원소 실험온실내에서 ^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs의 혼합용액을 무의 생육중 다섯 차례에 걸쳐 분무기를 이용하여 작물체 지상부에 처리하였다. 작물체에 의한 차단계수는 핵종간에 차이없이 처리시기가 수확기에 가까울수록 증가하여 최고 약 0.86에 달하였다. 작물체에 침적한 핵종의 수확시 잔류율은 처리시기에 따라 ^{85}Sr가 16 37%, ^{103}Ru이 15 68%, ^{134}Cs가 35 58%의 범위로 생육초기 처리시에는 ^{134}Cs가, 후기 처리시에는 ^{103}Ru이 가장 높았다. ^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs의 근부 전류계수는 처리시기에 따라 상근부에서는 각각 3.2×10^{-3} 1.7×10^{-2}, 7.3×10^{-4} 2.6×10^{-2}, 6.6×10^{-2} 1.7×10^{-1}, 하근부에서는 각각 2.2×10^{-3} 5.5×10^{-3}, 5.1×10^{-4} 2.0×10^{-3}, 7.8×10^{-2} 1.4×10^{-1}의 범위였다. 본 연구결과는 무의 생육중 사고침적시 근부내 핵종농도 예측 및 대책 수립에 활용될 수 있다.

Abstract

For analyzing the direct contamination pathway of the radionuclide in radish, a solution containing ^{85}Sr, ^{103}Ru and ^{134}Cs was sprayed to the aerial part of the plant in a greenhouse at 5 different times before harvest. Plant interception factor showed little difference among radionuclides and increased with decreasing time interval between application and harvest with the maximum value of 0.86. The fractions of the initial deposition that remained in the radish plant at harvest were in the range of 16 37% for ^{85}Sr, 15 68% for ^{103}Ru and 35 58% for ^{134}Cs. The remaining fraction was the highest in ^{134}Cs at earlier applications while it was the highest in ^{103}Ru at later applications. Translocation factors of ^{85}Sr, ^{103}Ru and ^{134}Cs were in the range of 3.2×10^{-3} 1.7×10^{-2}, 7.3×10^{-4} 2.6×10^{-2} and 6.6×10^{-2} 1.7×10^{-1}, respectively, in upper root and in the range of 2.2×10^{-3} 5.5×10^{-3}, 5.1×10^{-4} 2.0×10^{-3} and 7.8×10^{-2} 1.4×10^{-1}, respectively, in lower root. These results can be utilized for predicting the radionuclide concentration in mature radish plant and deciding counter-measures when an accidental deposition of the radionuclides occurs during the growing season of radish.

1. 서 론

원자력시설의 사고로 인하여 방사성 핵종이 방출되어 농경지에 침적되면 농작물의 섭취경로(food chain)를 따라 인체에까지 도달하여 상당한 수준의 내부피폭을 일으킬 수 있다. 따라서 원자력시설의 사고시 환경영향을 평가하고 합리적인 대책을 수립하여 주민과 생태계를 방사능으로부터 보호하기 위해서는 농작물의 방사능 오염경로를 이해해야 한다.

농작물의 방사능 오염은 방사성 핵종의 작물체 엽면침적에 의한 직접오염과 토양으로부터의 뿌리흡수에 의한 간접오염으로 이루어진다[1-3]. 뿌리흡수에 의한 작물체 간접오염은 사고후 장기적으로 지속된다는 측면이 있으나 일반적으로 엽면침적에 의한 직접오염에 비해 선량기여 정도가 훨씬 낮다. 따라서 농작물의 생육중에 사고가 발생할 경우에는 엽면침적에 의한 농작물내 핵종농도를 보다 정확히 예측할 필요가 있다. 구미 각국에서는 1950년대부터 작물체 직접오염에 관한 실험[4-6]이 자국의 주요 농작물을 대상으로 활발히 수행되어 왔으나 우리나라에서는 최 등[7]이 배추 및 벼를 대상으로 수행한 실험을 제외하고는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 우리나라의 주요 근채류인 무를 대상으로 원전사고시 주요 방출핵종 또는 그 동위원소인 ^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs를 작물생육중 다섯 차례에 걸쳐 엽면 처리한 후 작물체에 의한 핵종의 차단계수, 수확시 잔류율 및 근부 전류계수 등과 같은 핵종 이동인자를 조사하고 오염경로를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 작물 육성

'99년 8월 23일에 백자무의 종자를 재배상자에 직접 파종하였다. 재배상자는 가로, 세로, 높이가 각각 60cm, 60cm, 100cm인 철제 상자로서 동위원소 실험온실내에 1.3m 깊이로 건조된 호속에 설치되었다. 파종시 재식밀도는 차단계수(interception factor) 조사상자에서는 상자당 2개체로 하였고 수확시 잔류율 조사상자에서는 상자당 4개체로 하였다. 작물체 관리는 관행에 준하여 실시하였고 적당량의 수돗물을 2 3일 간격으로 지표에 공급하였다. 온실의 창문은 최대한 열어놓아 온도상승을 억제하고 통풍을 최대화하였다.

나. RI 처리

^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs의 무담체 원액을 0.015M HCl용액에 혼합하여 적정농도 ('99년 11월 15일 기준 ml당 각각 32.7, 55.4, 14.8 KBq)로 희석하였다. 이 희석용액을 분무기에 담아 파종후 생육

단계에 따라 다섯 차례에 걸쳐 재배상자 위에 설치된 가로, 세로, 높이 각각 90cm, 90cm, 130cm의 피폭상자내에서 가정용 분무기를 이용하여 공중분사하였다. 분사높이는 작물체 최상부로부터 약 80cm였고 1회 피폭시 상자당 분사횟수는 31회, 총분사량은 16 17ml, 소요시간은 약 15초였다. 피폭일자는 9월 21일, 10월 4일, 10월 15일, 10월 26일, 11월 3일(각각 수확전 55일, 42일, 31일, 20일, 12일)이었다. 매회 피폭은 차단계수 조사상자와 잔류율 조사상자의 두 상자에 대하여 이루어졌고 피폭시 지표면 오염을 방지하기 위하여 흡습지로 상자내 지표면을 피복하였다.

강우효과를 모사하기 위하여 피폭처리후 3일 경과시부터 수확전까지 계절에 따라 3 5일 간격으로 상자당 1.5ℓ의 수돗물을 약 30cm 높이에서 뿌려 주었다. 2차 처리(10월 4일)에서는 강우처리와 강우 무처리를 병행 실시하여 강우가 수확시 잔류율에 미치는 영향을 조사하였다.

다. 시료채취 및 방사능 분석

피폭 3시간 후 차단계수 조사상자에서 작물체 2개체를 채취하고 흡습지를 제거하였으며 잔류율 조사상자에서는 4개체중 대각선상에 있는 2개체를 채취하고 흡습지를 제거하였다. 잔류율 조사상자에서의 나머지 2개체는 11월 15일 최종 수확하였다. 채취된 작물체 시료는 신선중을 측정하고 온실내에서 3주 이상 자연건조한 후 잘게 잘라 110℃로 조절된 전열기 내에서 16시간 건조시켜 계측용기에 담아 건조중을 측정하였다. 차단계수 조사상자에서 제거된 흡습지는 온실내에서 건조시킨 후 잘게 잘라 계측용기에 담아 계측하였다.

시료내 방사능 분석은 고순도 Ge 검출기를 이용한 γ-spectrometry법으로 실시하였다. 사용된 hardware와 software는 EG&G ORTEC사 제품이었고 계측시간은 시료에 따라 1 2시간 정도였다.

라. 조사항목의 계산

핵종의 총침적량에 대한 작물체 침적량의 비로 정의되는 차단계수(I)는 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$I = \frac{\text{작물체 총침적량 (Bq)}}{\text{작물체 총침적량과 흡습지 침적량의 합 (Bq)}}$$

피폭시 작물체 침적량에 대한 수확시 잔류량으로 정의되는 잔류율(R, %)은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$R = \frac{\text{수확시 작물체 핵종 잔류량 (Bq/plant)}}{\text{수확시로 붕괴보정한 피폭시 작물체 침적량 (Bq/plant)}} \times 100$$

수확시 작물체 전체 잔류량에 대한 부위별 함유량의 비로 정의되는 전류계수(T)는 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$T = \frac{\text{수확시 각 부위내 핵종 함유량 (Bq/plant)}}{\text{수확시 핵종의 작물체 전체 잔류량 (Bq/plant)}}$$

3. 결과 및 고찰

무의 생육단계별로 ^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs의 혼합용액을 작물체에 분사 처리하고 조사한 차단계수(총 침적량에 대한 작물체 총침적량의 비)는 그림 1에서와 같이 핵종간에 차이없이 처리시기가 수확기에 가까울수록 점점 증가하였다. 이것은 수확기에 가까울수록 작물의 생육이 증가하여 작물체에 의한 지표면 피복정도가 높아지는데 따른 결과인 것으로 사료된다. 증가속도는 생육 전반기에는 매우 크다가 생육 후반기로 갈수록 낮아져 3차 처리(수확전 31일)부터는 차단계수가 0.82 0.86의 범위로 매우 둔화되었다. 생육 전반기에는 작물의 급속한 성장에 따라 피복도가 크게 증가하여 차단계수의 증가속도가 매우 빨랐던 것이며 후반기에는 엽면의 중첩이 심하고 성장속도도 느려져 피복도의 증

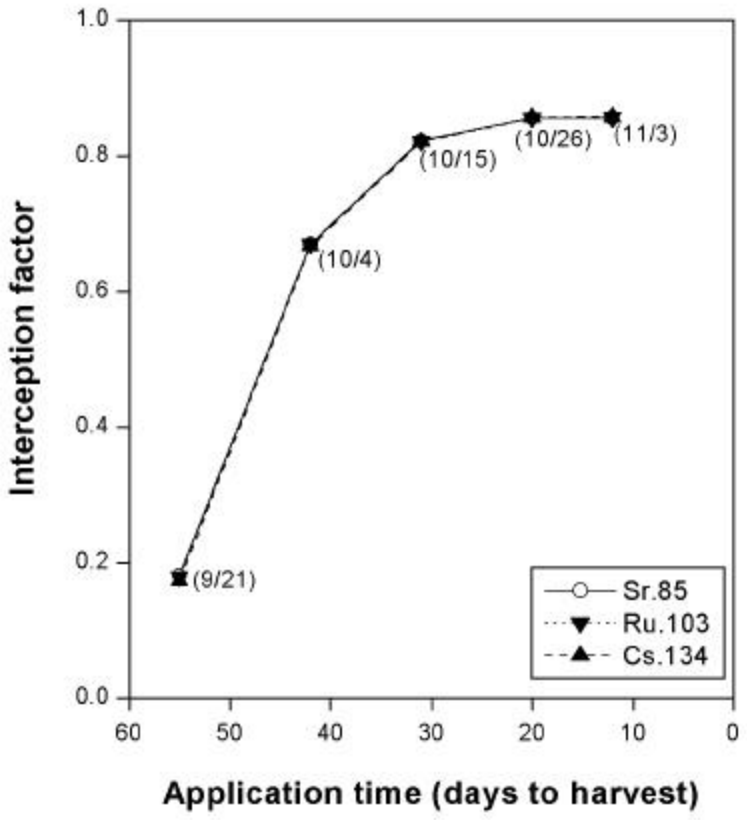
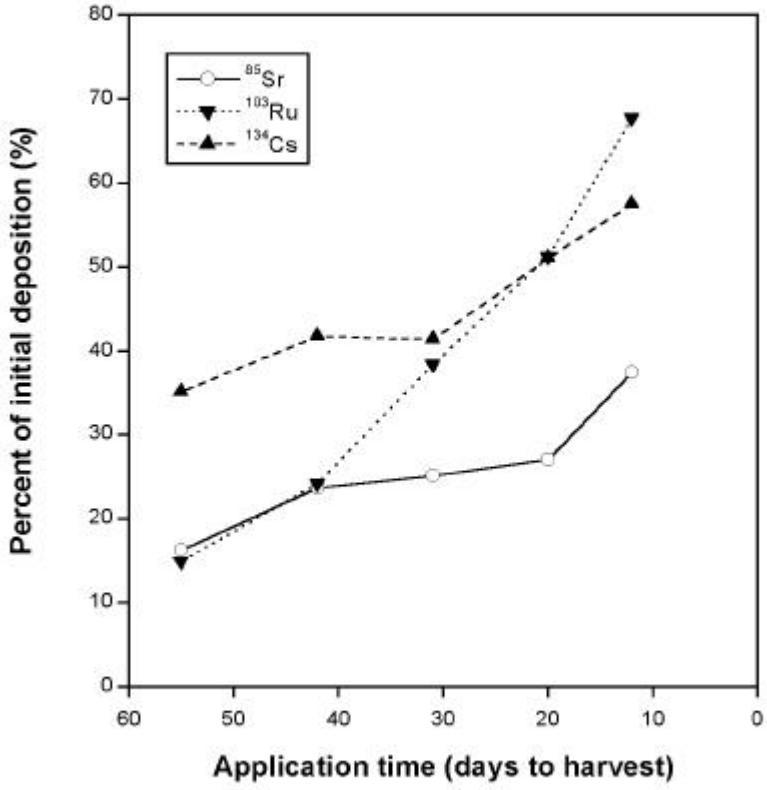


Fig. 1. Interception factors of the radionuclides by the radish plant at different growth stages.



radish plant at harvest.

수확시 각 핵종 잔류율은 세 핵종 모두 처리시기가 수확기에 가까울수록 증가하여 ^{85}Sr는 16.3 37.5%, ^{103}Ru이 15.0 67.8%, ^{134}Cs는 35.2 57.6%의 범위를 나타내었다(그림 2). 생육 초기 처리시에는 ^{134}Cs의 잔류율이 타 핵종보다 대체로 크게 높았으나 후기 처리에서는 ^{103}Ru의 잔류율이 가장 높았다. ^{85}Sr의 잔류율은 대체로 어느 처리 시기에 있으나 세 핵종중 가장 낮았다. 이와 같은 잔류율은 핵종 처리후 강우나 바람에 의한 환경 제거 및 작물체의 고사, 탈락 정도에 의해 결정된다.

^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs의 무 근부 전류계수는 핵종 처리시기에 따라 상근부에서는 각각 3.2×10^{-3} 1.7×10^{-2}, 7.3×10^{-4} 2.6×10^{-2}, 6.6×10^{-2} 1.7×10^{-1}, 하근부에서는 2.2×10^{-3} 5.5×10^{-3}, 5.1×10^{-4} 2.0×10^{-3}, 7.8×10^{-2} 1.4×10^{-1}의 범위로 대체로 상근부에서는 3 36배, 하근부에서는 2 4배의 변이를 나타내었다(그림 3). 상근부에서는 세 핵종중 ^{134}Cs의 전류계수가 항상 가장 높았고 ^{103}Ru의 전류계수가 가장 낮은 편이었으며 세 핵종 모두 처리시기가 수확기에 가까울수록 서서히 감소하는 경향을 보였는데 ^{103}Ru이 타 핵종에 비해 크게 감소하였다. 하근부에서도 ^{134}Cs의 전류계수가 항상 가장 높았고 ^{103}Ru의 전류계수가 가장 낮았으며 대체로 처리시기가 수확기에 가까울수록 서서히 감소하는 경향을 보였다. 위와 같은 핵종간 전류계수의 차이로 볼 때 무 작물체내 이동성은

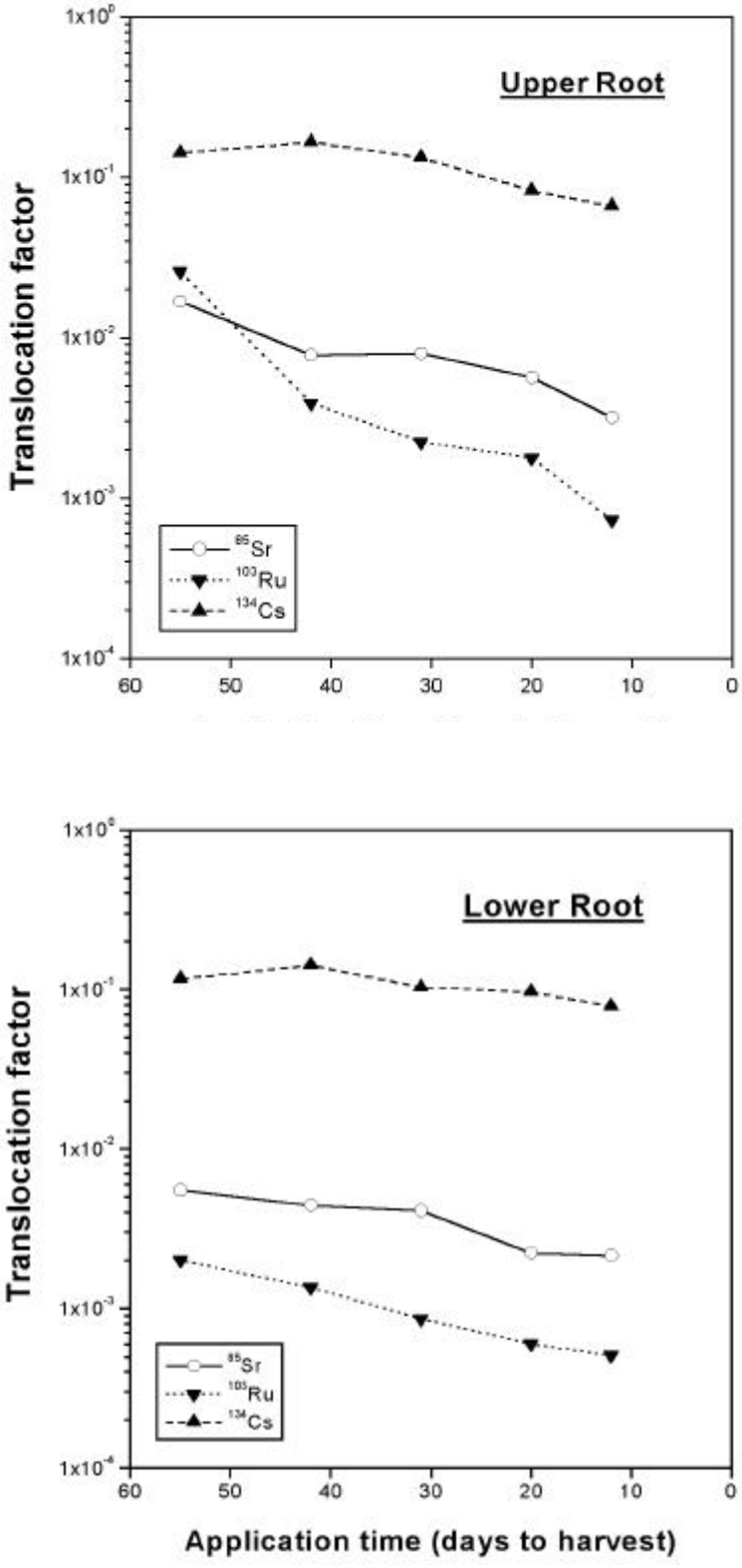


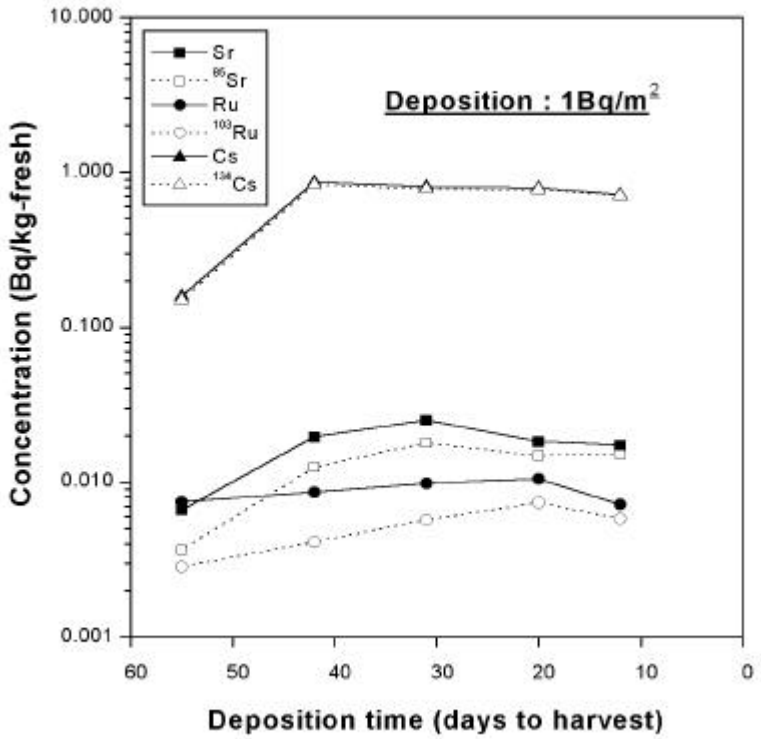
Fig. 3. Translocation factors of the radionuclides for radish root at different times of radionuclide application.

^{134}Cs가 가장 높고 ^{103}Ru이 가장 낮다고 할 수 있다. 방사성 Cs의 이동성이 방사성 Sr이나 방사성 Ru보다 높다는 것은 여러차례 보고된 바 있다[4), 8)].

강우효과를 조사하기 위하여 2차 처리(수확전 42일)에서 강우 처리와 강우 무처리(수확시까지 강우처리를 하지 않음) 실험을 실시하고 수확시 잔류율을 비교한 것은 표 1에서 보는 바와 같다. 강우처리시 잔류율은 강우 무처리에 비해 핵종에 따라 31 59% 정도 낮았다. 강우에 의한 방사능 제거 정도는 핵종의 용해도 및 잎의 성상과 부착형태 등에 따른 빗물의 작물체 잔류 정도와 같은 요인들에 의해서 결정될 것으로 판단된다. 또한 강우의 세기, 빈도 및 강우량 등에 따라서도 차이가 있을 것으로 사료된다.

Table 1. Effect of the rain simulation on the activity remaining in the mature radish plant.

Date of RI application	Rain simulation	Percent of initial deposition (%)		
		Sr-85	Ru-103	Cs-134
Oct. 4	Yes	23.7	24.3	41.8
Oct. 4	No	58.1	55.3	60.9



calculated assuming that the level of deposition is 1Bq/m^2.

위에서 구한 각 핵종의 차단계수와 잔류율 및 전류계수를 이용하여 밭 $1m^2$당 1Bq의 방사능이 침적한 경우 수확시 무 근부내 핵종농도를 예측한 것은 그림 4에서 보는 바와 같다. 핵종농도는 어느 침적시기에 있어서나 Cs 동위원소가 가장 높았으며 다음으로는 대체로 Sr 동위원소, Ru 동위원소의 순이었다. 침적시기에 따라 Cs 동위원소와 Ru 동위원소 간에는 약 50 200배의 차이가 있었다. ^{134}Cs의 경우 반감기가 2년으로 비교적 길어 안정원소 와의 차이가 매우 작았으나 ^{85}Sr나 ^{103}Ru은 차이가 다소 컸다.

4. 결 론

가. 무의 생육단계별로 ^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs의 혼합용액을 작물체에 분사처리하고 조사한 차단계수는 핵종간에 차이없이 처리시기가 수확기에 가까울수록 점점 증가하여 최고 0.86에 달하였다.

나. 수확시 핵종의 작물체 잔류율은 처리시기가 수확기에 가까울수록 증가하였고 생육 전반기 처리시에는 ^{134}Cs가, 후반기 처리시에는 ^{103}Ru이 가장 높은 값을 보였다.

다. 전류계수는 처리시기에 따라 상근부의 경우 ^{85}Sr가 약 5배, ^{103}Ru이 약 36배, ^{134}Cs가 약 3배의 변이를 보였고 하근부의 경우는 각각 약 3배, 약 4배, 약 2배의 변이를 보였으며 대체로 처리시기가 수확기에 가까울수록 감소하는 경향이었다.

라. 상근부와 하근부에서 모두 대체로 ^{134}Cs의 전류계수가 가장 높았고 ^{103}Ru의 전류계수가 가장 낮았는데 두 핵종간 차이는 최고 100여배에 달하였다.

마. 강우는 수확시 핵종의 잔류율을 결정하는데 매우 중요한 요인으로서 강우에 의한 제거작용은 ^{85}Sr와 ^{103}Ru에서 비교적 크게 나타났다.

감사의 글

* 본 논문은 과학기술부가 시행한 원자력중장기연구개발사업의 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) J. E. Till and H. R. Meyer (Eds.), Radiological Assessment, A Textbook on Environmental Dose Analysis, NUREG/CR-3332, ORNL-5968 (1983).

3) R. Zach, FOOD II: An Interactive Code for Calculating Concentrations of Radionuclides in Food Products, WNRE, AECL-6305 (1978).

4) A. Aarkrog, Radionuclide levels in mature grain related to radiostrontium content and time of direct contamination, Health Phys. 28, pp. 557-562 (1975).

5) P. J. Coughtrey and M. C. Thorne, Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial Ecosystem - A Critical Review of Data, A. A. Balkema, Rotterdam (1983).

6) J. E. Pinder III, T. G. Ciravolo and J. W. Bowling, The interrelationships among plant biomass, plant surface area and the interception of particulate deposition by grasses, Health Phys. 55, pp. 51-58 (1988).

7) **최용호, 임광묵, 박효국, 이원윤, 이창우,** ^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs**의 엽면처리 시기에 따른 배추의 방사능 오염, 대한방사선방어학회지 제**23**권**, pp. 219-227 (1998).

8) I. A. Scotti, Effect of treatment time on the ^{134}Cs and ^{85}Sr concentrations in grean bean plants, J. Environ. Radioactivity 33, 83-191 (1996).