

^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 의 벼 직접오염 경로 분석

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

임광묵, 최용호, 박두원, 박효국, 이원운

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

벼의 방사성 핵종 직접오염 경로를 분석하기 위하여 동위원소 실험실내에서 ^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 의 혼합용액을 벼의 생육중 여섯 차례에 걸쳐 분무기를 이용하여 작물체 지상부에 처리하였다. 작물체에 의한 차단계수는 핵종간에 차이없이 처리시기가 수확기에 가까울수록 증가하여 최고 약 0.94에 달하였다. 작물체에 침적한 핵종의 수확시 잔류율은 처리시기에 따라 ^{85}Sr 가 19~42%, ^{103}Ru 이 23~61%, ^{134}Cs 가 11~68%의 범위로 생육전기 처리시에는 ^{103}Ru 이, 후기 처리시에는 ^{134}Cs 가 가장 높았다. ^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 의 종실 전류계수는 처리시기에 따라 각각 $5.8 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-2}$, $1.6 \times 10^{-4} \sim 7.6 \times 10^{-3}$, $3.2 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-1}$ 의 범위였고 세 핵종 모두 수확 35일전 처리에서 가장 높았다. 본 연구결과는 벼의 생육중 사고침적시 쌀알내 핵종농도 예측 및 대책 수립에 활용될 수 있다.

Abstract

For analyzing the direct contamination pathway of the radionuclide in rice, a solution containing ^{85}Sr , ^{103}Ru and ^{134}Cs was sprayed to the aerial part of the plant in a greenhouse at 6 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 0.94. The fractions of the initial deposition that remained in the rice plant at harvest were in the range of 19~42% for ^{85}Sr , 23~61% for ^{103}Ru and 11~68% for ^{134}Cs . The remaining fraction was the highest in ^{103}Ru at earlier applications while it was the highest in ^{134}Cs at later applications. Seed translocation factors of ^{85}Sr , ^{103}Ru and ^{134}Cs were in the range of $5.8 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-2}$, $1.6 \times 10^{-4} \sim 7.6 \times 10^{-3}$ and $3.2 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-1}$, respectively and the highest at the application made 35 days before harvest. These results can be utilized for predicting the radionuclide concentration in rice seed and deciding counter-measures when an accidental deposition of the radionuclides occurs during the growing season of rice.

1. 서론

원자력시설의 사고로 인하여 방사성 핵종이 다량 방출되어 농경지에 침적되면 방사성 핵종이 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 직접오염과 토양으로부터의 뿌리흡수에 의한 간접오염으로 이루어진다^{1~3)}. 뿌리흡수에 의한 작물체 오염은 사고후 장기적으로 지속된다는 측면이 있으나 일반적으로 직접오염에 비해 선량기여 정도가 훨씬 낮다. 따라서 농작물의 생육중에 사고가 발생할 경우에는 직접오염에 따른 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 등⁷⁾이 배추를 대상으로 수행한 실험을 제외하고는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 우리나라의 주식작물인 벼를 대상으로 원전사고시 주요 방출핵종 또는 그 동위원소인 ⁸⁵Sr, ¹⁰³Ru, ¹³⁴Cs를 작물생육중 여섯 차례에 걸쳐 지상부 전체에 처리한 후 작물체에 의한 핵종의 차단계수, 수확시 잔류율 및 종실 전류계수 등과 같은 핵종 이동인자를 조사하고 오염경로를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 작물 육성

'98년 5월 16일에 15일된 동진벼의 모를 재배상자에 이식하였다. 재배상자는 가로, 세로, 높이가 각각 60cm, 60cm, 100cm인 철제 상자로서 동위원소 실험온실내에 1.3m 깊이로 건조된 호속에 설치되었다. 이식시 재식밀도는 주당 4본식으로 상자당 12주로 하였다. 작물체 관리는 관행에 준하여 실시하였고 9월 말까지 표면수의 높이가 생육단계에 따라 2~5cm 정도 되도록 수돗물로 관개하였다. 온실의 창문은 최대한 열어놓아 온도상승을 억제하고 통풍을 최대화하였다.

나. RI 처리

⁸⁵Sr, ¹⁰³Ru, ¹³⁴Cs의 무담체 원액을 0.015M HCl용액에 혼합하여 적정농도 ('98년 10월 12일 기준 ml당 각각 47.5, 69.9, 17.4 KBq)로 희석하였다. 이 희석용액을 분무기에 담아 이식후 생육

단계에 따라 여섯 차례에 걸쳐 재배상자 위에 설치된 가로, 세로, 높이 각각 90cm, 90cm, 130cm의 피폭상자내에서 가정용 분무기를 이용하여 공중분사하였다. 분사높이는 작물체 최상부로부터 약 50cm였고 1회 피폭시 상자당 분사횟수는 31회, 총분사량은 14~16ml, 소요시간은 약 15초였다. 피폭일자는 6월 22일, 7월 20일, 8월 11일, 8월 24일, 9월 7일, 9월 25일(각각 수확전 112일, 84일, 62일, 49일, 35일, 17일)이었다. 피폭시 지표면 오염을 방지하기 위하여 흡습지로 상자내 지표면을 피복하였다.

강우효과를 모사하기 위하여 피폭처리후 3일 경과시부터 수확전까지 계절에 따라 3~5일 간격으로 상자당 1.8~2.0ℓ의 수돗물을 약 30cm 높이에서 뿌려 주었다. 7월 20일과 9월 7일 처리에서는 강우빈도를 위의 반으로 한 실험도 실시하여 강우빈도가 잔류율과 전류계수에 미치는 영향을 조사하였다.

다. 시료채취 및 방사능 분석

피폭 3시간 후 한 상자내 12주의 작물체중 6주의 작물체 지상부를 채취하고 흡습지를 제거하였다. 나머지 6주는 10월 12일 최종 수확하였다. 채취된 작물체 시료는 온실내에서 3주 이상 자연건조한 후 벧짚, 현미, 왕겨로 분리하여 계측용기에 담아 건조중을 측정하였다. 제거된 흡습지는 온실내에서 건조시킨 후 잘게 잘라 계측용기에 담았다.

시료내 방사능 분석은 고순도 Ge 검출기를 이용한 γ -spectrometry법으로 실시하였다. 사용된 hardware와 software는 EG&G ORTEC사 제품이었고 계측시간은 시료에 따라 0.5~2시간 정도였다.

라. 조사항목의 계산

핵종의 총침적량에 대한 작물체 침적량의 비로 정의되는 차단계수(I)는 다음과 같은 식으로 계산하였다. 이때 작물체 침적량은 피폭 3시간 후에 채취된 6주의 작물체 시료내 방사능량에 2를 곱한 값으로 하였다.

$$I = \frac{\text{작물체 침적량 (Bq)}}{\text{작물체 침적량과 흡습지 침적량의 합 (Bq)}}$$

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

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

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

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

3. 결과 및 고찰

벼의 생육단계별로 ^{85}Sr , ^{105}Ru , ^{134}Cs 의 혼합용액을 작물체에 분사 처리하고 조사한 차단계수(총 침적량에 대한 작물체 침적량의 비)는 그림 1에서와 같이 핵종간에 차이없이 처리시기가 수확기에 가까울수록 점점 증가하였다. 증가속도는 생육 전반기에는 매우 크다가 생육 후반기로 갈수록 낮아져 3차 처리(8월 11일) 이후 대체로 0.9 내외였다. 잎의 고사 및 탈락이 많이 진행되는 5차 및 6차 처리에서 차단계수가 비교적 높았던 것은 이삭이 무거워져 눕게되어 이삭에 침적되는 비율이 컸기 때문인 것으로 사료된다.

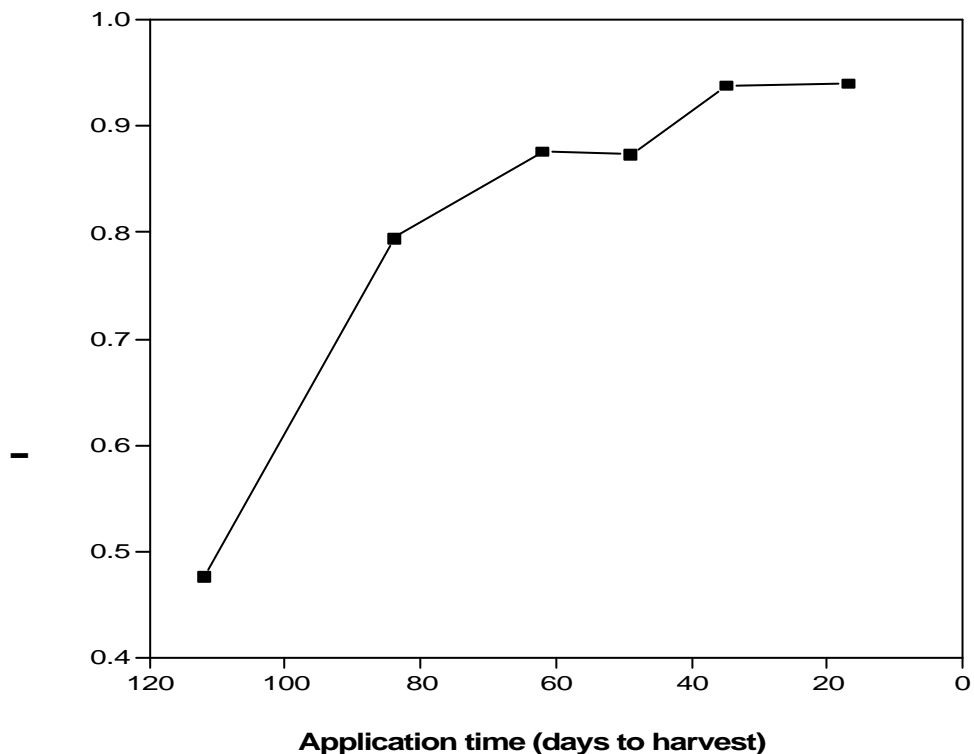


Fig. 1. Interception factors of the radionuclides by the rice plant at different growth stages.

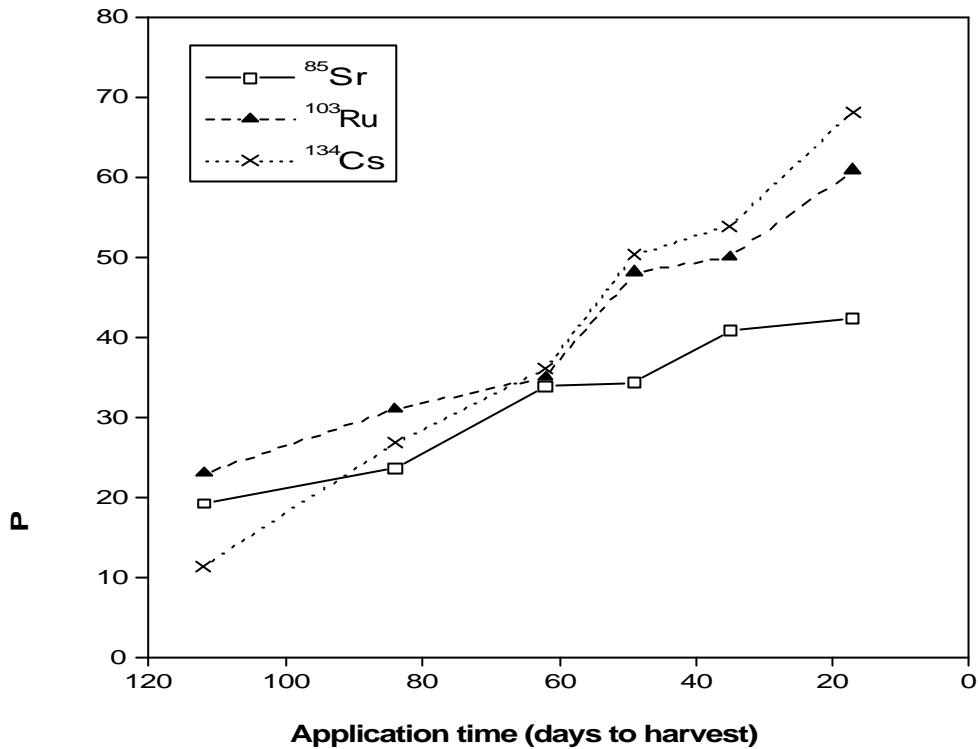


Fig. 2. Percent of initial deposition that remained in the rice plant at harvest.

수확시 각 핵종 잔류율(작물체 침적량에 대한 수확시 잔류량의 백분율)은 처리시기가 수확기에 가까울수록 증가하여 ^{85}Sr 는 19.1~42.4%, ^{103}Ru 이 22.9~60.9%, ^{134}Cs 는 11.3~68.2%의 범위를 나타내었다(그림 2). ^{134}Cs 의 잔류율은 생육초기인 1차 처리에서는 세 핵종중에서 가장 낮았으나 생육 후기인 4차 처리 이후에는 가장 높았다. 이와 같은 잔류율은 핵종 처리후 강우나 바람에 의한 환경 제거 및 작물체의 고사, 탈락 정도에 의해 결정된다. 1~6차 처리중 핵종의 제거속도가 가장 빨랐던 것은 17일 만에 핵종에 따라 31.8~57.6%가 제거된 6차 처리이다. 이러한 사실은 핵종처리 직후에는 비교적 빨리 제거되다가 시간이 경과함에 따라 제거속도가 점점 늦어진다는 것을 암시하고 있다.

^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 의 벼 종실 전류계수(수확시 핵종의 작물체 지상부 전체 존재량에 대한 현미내 존재량의 비)는 핵종 처리시기에 따라 각각 $5.8 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-2}$, $1.6 \times 10^{-4} \sim 7.6 \times 10^{-3}$, $3.2 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-1}$ 의 범위로 대체로 6~60배의 변이를 나타내었다(그림 3). 세 핵종중 ^{134}Cs 의 전류계수가 항상 가장 높았고 ^{103}Ru 의 전류계수가 가장 낮은 편이었으며 세 핵종 모두 찰알의 발육이 가장 왕성한 5차 처리에서 전류계수가 가장 높았다. 따라서 핵종의 벼 작물체내 이동성은 ^{134}Cs 가 가장

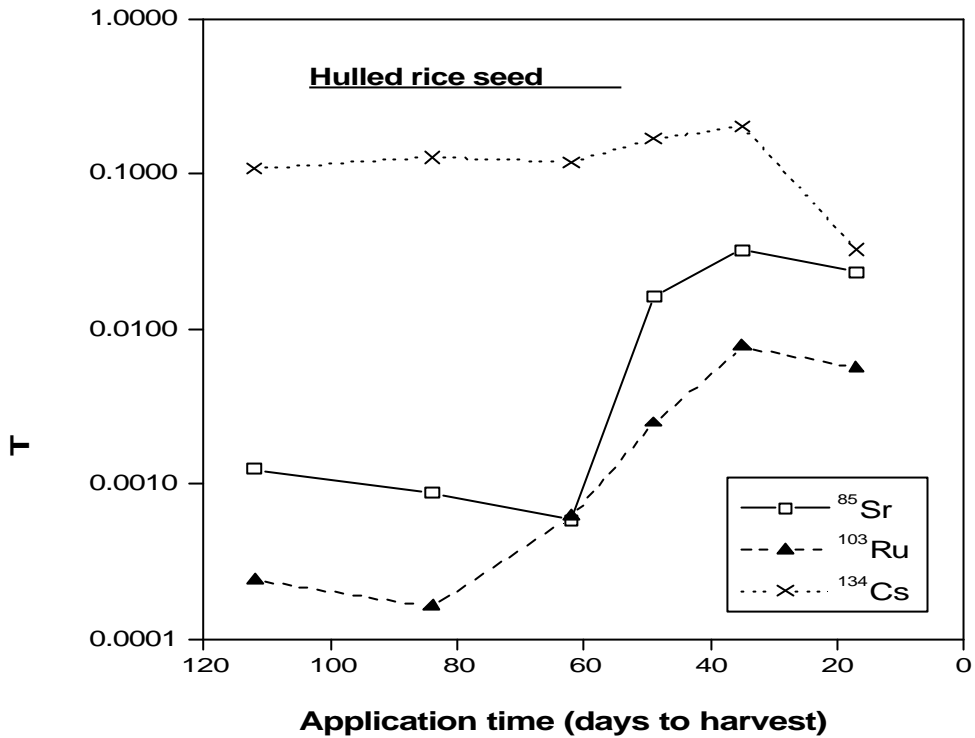


Fig. 3. Translocation factors of the radionuclides for hulled rice seed at different times of radionuclide application.

높고 ^{103}Ru 이 가장 낮다고 할 수 있다. ^{134}Cs 의 경우 5차 처리까지 처리시기가 수확기에 가까울수록 전류계수가 매우 서서히 증가하다가 마지막 6차 처리에서 크게 떨어져 가장 낮았다. ^{85}Sr 는 생육 전반기에는 처리시기가 늦을수록 전류계수가 점점 감소하여 3차 처리에서 가장 낮은 값을 보이다가 이후 5차 처리까지 매우 크게 증가하는 양상이었다. ^{103}Ru 의 전류계수도 2차 처리에서 가장 낮았다가 이후에는 5차 처리까지 비교적 크게 증가하였다.

강우효과를 조사하기 위하여 2차 처리(7월 20일)와 5차 처리(9월 7일)에서 정상 강우처리(대전 지방 예년 평균강우량 모사처리)와 약한 강우처리(처리빈도를 정상 강우처리의 반으로 함)를 실시하고 수확시 잔류율을 비교한 것은 표 1에서 보는 바와 같다. 생육 전반기인 2차 처리에서는 약한 강우처리에서 정상 강우처리에 비해 잔류율이 핵종에 따라 절대치로 3~8% 정도 높았으나 생육 후반기인 9월 7일 처리에서는 두 처리간에 거의 차이가 없었다. 이상으로 큰 기상이변이 없는 한 강우빈도의 차이에 따른 강우량 차이가 수확시 잔류율에 미치는 영향은 그리 크지 않을 것으로 예상되나 핵종의 침적시기가 빠를 경우 약간이나마 영향이 있을 것으로 보인다. 한편 종실 전류계수도 약한 강우처리와 정상 강우처리 간에 이렇다 할 차이가 없었다.

Table 1. Percent of initial deposition that remained in the mature rice plant after two different degrees of rain simulation

Date of RI application	Rain simulation	Percent of initial deposition		
		Sr-85	Ru-103	Cs-134
July 20	Normal	23,5	31,0	26,7
	Weak	30,2	38,6	29,2
Sep. 7	Normal	40,9	50,0	53,9
	Weak	39,5	49,4	54,5

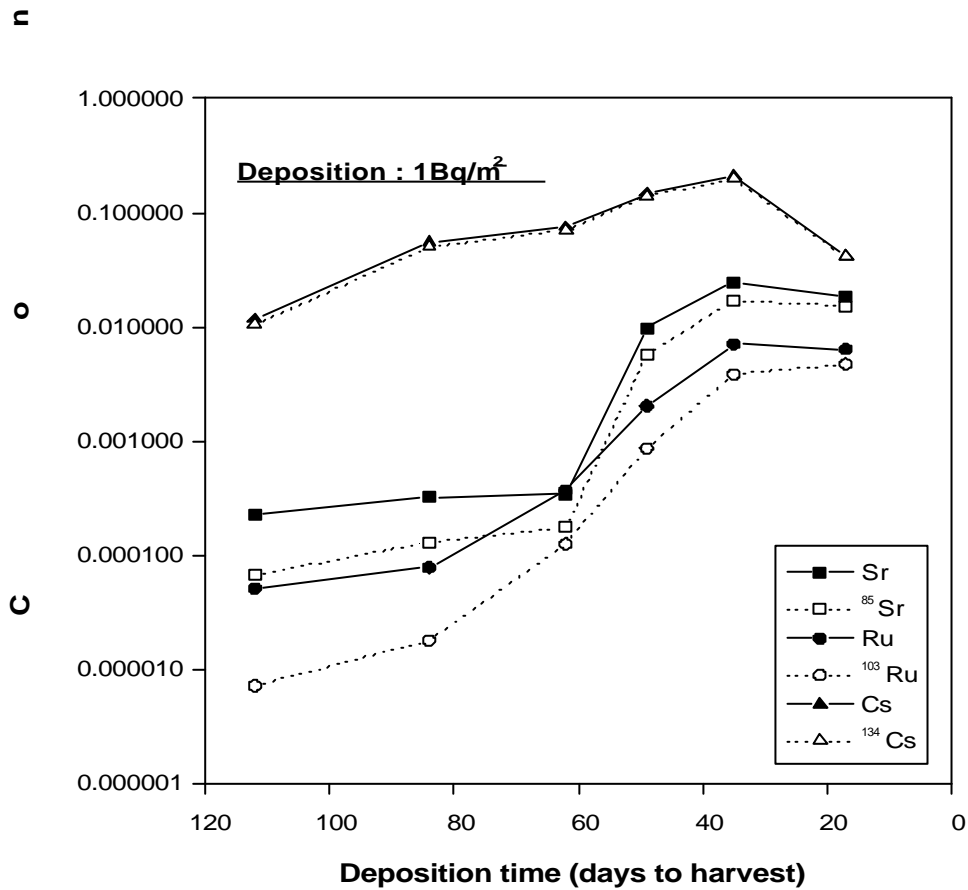


Fig. 4. Radionuclide concentrations in hulled seed of the mature rice plant calculated assuming that the level of deposition is 1Bq/m².

위에서 구한 각 핵종의 차단계수와 잔류율 및 전류계수를 이용하여 논 1m²당 1Bq의 방사능이 침적한 경우 수확시 현미내 핵종농도를 예측한 것은 그림 4에서 보는 바와 같다. 핵종농도는 어느 침적시기에 있어서나 Cs 동위원소, Sr 동위원소, Ru 동위원소의 순이었고 침적시기에 따라 Cs 동위원소와 Ru 동위원소 간에는 약 10~1000배의 차이가 있었다. 반감기가 가장 짧은 ¹⁰⁵Ru의 현미내 농도는 침적시기에 늦을수록 높았으나 나머지 경우에는 수확 35일전 침적시 가장 높았다.

4. 결 론

- 가. 벼의 생육단계별로 ⁸⁵Sr, ¹⁰⁵Ru, ¹³⁴Cs의 혼합용액을 작물체에 분사처리하고 조사한 차단계수는 핵종간에 차이없이 처리시기가 수확기에 가까울수록 점점 증가하여 최고 0.94에 달하였다.
- 나. 수확시 핵종의 작물체 잔류율은 처리시기가 수확기에 가까울수록 증가하였고 생육 전반기 처리시에는 ¹⁰⁵Ru이, 후반기 처리시에는 ¹³⁴Cs가 가장 높은 값을 보였다.
- 다. 종실 전류계수는 처리시기에 따라 ⁸⁵Sr가 약 60배, ¹⁰⁵Ru이 약 40배, ¹³⁴Cs가 약 6배의 변이를 보였고 ¹³⁴Cs의 전이계수가 항상 제일 높았다.
- 라. 강우빈도의 차이에 따른 강우량의 차이가 2배 이내인 경우 수확시 잔류율 및 종실 전류계수의 차이가 그리 크지 않을 것으로 예상된다.

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, 임광목, 박효국, 이원윤, 이창우, ^{85}Sr , ^{105}Ru , ^{134}Cs 의 열면처리 시기에 따른 배추의 방사능 오염, 대한방사선방어학회지 제23권, pp. 219-227 (1998)