2004 년도 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

벼에 대한 경쟁원소의 흡수억제효과

Effects of Competition Ions on the Transfer Restraint in Rice Plants

임광묵, 최용호, 박효국, 박두원, 강희석, 이한수

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

벼에 대한 경쟁원소의 흡수억제 효과 분석을 위하여 동위원소 실험온실 내에서 영광원전 주변 2 곳의 논에서 채취한 토양에 ^{85}Sr, ^{137}Cs 의 혼합용액을 처리한 후 KCl 과 소석회를 다섯 가지 수준으로 동시에 살포하였다. 벼 이식 전 처리시 ^{85}Sr 의 경우 K 와 Ca 의 처리수준이 10a 당 K 480kg, Ca 46kg 수준까지 높아질수록 감소효과가 점점 커졌으나 그 이상 처리에서는 효과가 증대하지 않았으며 ^{137}Cs 의 경우에는 10a 당 K 336kg, Ca 32kg 수준 까지는 K 와 Ca 의 처리수준이 높아질수록 감소효과가 계속 증대하였으나 그 이상 처리에서는 효과가 오히려 점점 감소하였다. 벼 출수 전 처리시 ^{85}Sr 의 경우 처리수준이 높아질수록 감소효과가 계속 증대하였으나 ^{137}Cs 의 경우에는 별 다른 경향성이 없었다.

Abstract

For analyzing effects of competition ions on the transfer restraint in rice plants, soil blocks were taken into culture boxes from 2 paddy fields around Yonggwang NPPs and after a solution containing ^{85}Sr and ^{137}Cs was applied to the surface water, fertilizer KCl and slaked lime were added simultaneously. Following the pre-transplanting application, reducing effect of ^{85}Sr tended to increase with rising addition level until was reached K 480 kg and Ca 46 kg per 10a. Reducing effect of ^{137}Sr tended to increase with rising addition level until was reached K 336 kg and Ca 32 kg per 10a. Reducing effect of ^{85}Sr applied shortly before heading tended to increase continuously with rising addition level but reducing effect of ^{137}Sr showing no regionally distinguishable trend.

1. 서 론

원자력시설 주변에 대체로 논과 밭이 널리 분포하고 있는 우리나라에 있어서는 원자력시설의 사고로 인한 농경지의 방사능 오염 가능성이 어느 나라보다도 높다. 농경지가 방사능으로 오염되면 방사성 핵종이 재배된 농작물의 섭취경로(food chain)를 따라 인체에까지 도달하여 상당한 수준의 내부피폭을 초래하게 된다. 따라서 원자력시설의 가동으로 인한 농경지의 방사능 오염사고 시 환경영향에 대한 합리적 평가 및 이에 따른 적절한 대책기술 수립에 필요하다.

원자력 사고 후 농경지 활용을 위한 대응방안으로 오염층 제거와 같은 기계적인 제염기술과 농작물의 방사성 핵종 흡수억제 기술이 있다. 농경지의 제염기술은 고비용 및 2 차 오염 등으로 인하여 대체로 비현실적이나 핵종의 흡수억제 효과가 있는 농용물질의 살포는 효과적인 것으로 확인되고 있다.

특정 방사성 핵종과 유사한 성질의 안정원소(chemically-analogous ion)는 작물체의 흡수에 대해서 방사성 핵종과 경쟁적 관계에 있으므로 방사성 핵종의 흡수억제 물질로 많이 이용되고 있다. 이와 같은 경쟁관계의 대표적인 예는 방사성 Cs vs. K 및 방사성 Sr vs. Ca[1,2]이며 K 와 Ca 는 농업에 있어서 매우 중요한 원소로서 흔히 KCl 및 석회의 형태로 농가에 널리 공급되고 있다.

체르노빌 사고 피해 지역을 비롯한 유럽 각국에서는 자국의 주요 농작물 및 토양에 대한 칼륨과 석회의 적정 처리법에 관한 실험이 많이 수행되었다. 그러나 경쟁원소에 의한 방사성 핵종의 흡수억제 효과는 작물이나 토양에 따라 다르게 나타나므로 우리나라에서도 주식작물에 대한 국내 특성실험이 필요한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 영광 원전 주변 2 곳의 논에서 토양 블록을 재배상자에 채취하여 한국원자력연구소 내 실험온실로 운반한 후 벼의 이식 전과 생육 중에 ^{85}Sr 및 ^{137}Cs 을 동시에 처리한 후 KCl 과 소석회를 다섯 가지 수준으로 동시에 살포하고 흡수억제 효과를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

가. 작물 육성

영광 원전 주변 반경 5km 내에 분포하는 2 곳의 논에서 가로 30cm, 세로 30cm, 높이 30cm 의 토양블록을 재배상자에 원형대로 채취하였다. 각 지점에서 채취된 토양의 물리·화학적 특성은 표 1 과 같다.

2003 년 6 월 5 일에 남평벼의 모를 재배상자당 4 주(주 당 4 본)씩 이식하였다. 재배상자는 9 월 말까지 관개하여 담수상태를 유지하였고 논에서 일어나는 관개수의 지하침투를 모사하여 1 주일에 1 회씩 상자당 약 3.5ℓ의 물을 배수하였다. 이것은 우리나라에서 벼 재배기간 동안 평균 약 550 mm 의 관개수가 지하로 침투하는 것 [3]을 모사한 것이다. 온실의 창문은 모두 제거하여 환기를 최대화하였고 병충해 방제를 위하여 살균제와 살충제를 2~3 회씩 살포하였다. 출수 시작일은 8 월 19 일 이었다.

Table. 1. Physicochemical properties of the soils used in the experiment

Soil	pH (1:5)	O.M. (%)	A.P. (ppm)	CEC (cmol/kg)	EC (cmol/kg)			Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture	Density (g/cm^3)
					Ca	Mg	K					
A	6.5	3.05	6.44	9.81	4.76	0.55	0.17	39	43	18	Loam	2.59
B	5.9	4.09	6.00	10.59	4.90	0.81	0.37	41	39	20	Loam	2.58

O.M. : Organic matter, A.P. : Available phosphorus, CEC : Cation exchange capacity, EC : Exchangeable cation.

Note) Soil A and B were spiked with a solution containing ^{85}Sr and ^{137}Cs on June 4 and August 22, respectively.

Table 2. Levels of the simultaneous treatment of KCl and $Ca(OH)_2$

Treatment	Level of application (kg/10a) [a]	
	KCl	$Ca(OH)_2$
Control	0	0
Level 1	150	15
Level 2	400	40
Level 3	700	70
Level 4	1,000	100
Level 5	1,500	150

[a] as fertilizer KCl (48% of K) and slaked lime (46% of Ca).

나. RI 및 경쟁원소 처리

^{85}Sr, ^{137}Cs 의 무담체 원액을 0.005M HCl 용액에 혼합하여 적정농도(2003 년 10 월 16 일 기준 이식 전 처리시 ^{85}Sr : 45 kBq ml^{-1}, ^{137}Cs : 67 kBq ml^{-1}, carrier free in chloride form)로 희석하였다. 희석한 방사성 용액을 일회성 사고침적을 모사하기 위하여 각 처리시기에 마이크로피펫을 이용하여 재배상자의 수표면 상에 균등하게 분포하는 25 개의 점을 향해 1 ㎖씩 침적 처리하였다.

벼 이식 전 처리 일자는 6 월 4 일(이식 전 1 일), 생육 중 처리 일자는 출수 시작 2~3 일 전(수잉기에 해당)인 8 월 22 일이었으며 ^{85}Sr 및 ^{137}Cs 을 동시에 처리한 후 비료용 염화칼리(KCl)와 소석회($Ca(OH)_2$)를 표 2 와 같이 다섯 가지 수준으로 동시에 살포한 후 ^{85}Sr 및 ^{137}Cs 의 토양-작물체 전이계수를 측정, 비교하여 경쟁원소 살포의 효과를 분석하였다. 이식 전 처리의 경우 ^{85}Sr 와 ^{137}Cs 이 비료와 함께 약 15cm 깊이로 표층토와 혼합되었다. 생육 중 처리 시 처리점이 작물체 기부와 겹칠 경우 이를 피하여 가능한 한 최상의 균등분포를 이룰 수 있는 곳에 처리하였다.

다. 시료 채취 및 방사능 분석

10 월 16 일에 하부 7~8cm 정도만 남기고 벼를 채취하고 이삭과 볏짚으로 분리한 후 온실 내에서 2 주 이상 자연 건조시켰다. 건조된 이삭은 왕겨와 쌀알로 분리하였고 볏짚은 약 1cm 길이로 잘게 절단하였다. 부위별 건조시료를 계측용기에 담아 무게를 측정한 후 HPGe 검출기(EG&ORTEC)를 이용한 Γ-spectrometry 법으로 ^{85}Sr 및 ^{137}Cs 의 농도를 분석하였다. 계측시간은 시료에 따라 0.5~2 시간이었고 계측오차는 2σ로 10% 이내였다.

라. 전이계수 계산

벼 부위별 ^{85}Sr 및 ^{137}Cs 의 전이계수(TF_{area}, $m^2\,kg^{-1}$-dry)는 다음 식으로 계산하였다 [4,5].

$$TF_{area} = \frac{\text{수확시 부위별 핵종 농도}(Bq\,kg^{-1}\text{-dry})}{\text{수확시로 보정한 단위면적당 핵종 처리량}\ (Bq\,m^{-2})} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

벼의 이식 전(6 월 4 일) 및 출수 직전(8 월 22 일)에 ^{85}Sr 와 ^{137}Cs 을 재배상자에 가한 후 K 와 Ca 를 다섯 가지 수준으로 동시에 처리하고 조사한 부위별 ^{85}Sr 및 ^{137}Cs 전이계수는 각각 표 3, 4 에 나타나 있다.

^{85}Sr 전이계수는 볏짚 전이계수가 쌀알보다 대체로 100 배 정도 높게 측정되었다. K 와 Ca 무처리 시 볏짚 전이계수는 이식 전 침적의 경우 2.2×10^{-2}, 출수 직전 침적의 경우 2.0×10^{-2} 로 침적시기에 따른 차이가 거의 없었으며 쌀알 전이계수는 출수 직전 침적의 경우 2.6×10^{-4} 로 이식 전 침적보다 다소 높았다. K 와 Ca 처리시에는 이식 전 침적의 경우 Level 4 까지 처리수준이 높아질수록 전이계수가 점점 감소하다가 Level 5 에서는 다소 증가하는 경향이었으며 최저치를 보인 Level 4 에서의 볏짚 및 쌀알 전이계수는 각각 7.9×10^{-3} 및 8.2×10^{-5} 였다. 한편 출수 직전 침적의 경우에는 K 와 Ca 의 처리수준이 Level 5 까지 높아질수록 전이계수가 계속 감소하여 Level 5 에서의 볏짚 및 쌀알 전이계수는 각각 4.5×10^{-3} 및 5.4×10^{-5}로 무처리의 20% 정도에 불과하였다.

^{137}Cs 전이계수는 볏짚 전이계수가 쌀알에 비해 침적시기 및 처리수준에 따라 3~7 배 정도로만 높았다. K 와 Ca 무처리 시 이식 전 침적의 경우 볏짚이 2.6×10^{-4}, 쌀알이 7.4×10^{-5} 였고 출수 직전 침적의 경우에는 각각 7.3×10^{-3} 및 2.7×10^{-3} 으로 ^{85}Sr 와는 달리 이식 전 침적에 비해 30 배 정도나 높았다. K 와 Ca 처리시에는 이식 전 침적의 경우 ^{85}Sr 와 비슷하게 Level 3 까지는 처리수준이 높아질수록 전이계수가 점점 감소하다가 Level 4 이후에는 조금씩 증가하는 양상을 보였으며 Level 3 에서의 볏짚 및 쌀알 전이계수는 각각 1.1×10^{-4} 및 3.2×10^{-5} 였다. 출수 직전 침적의 경우에는 Level 1, Level 3 및 Level 5 처리에서는 전이계수가 부위에 따라 무처리에 비해 70% 가량 감소하였으나 Level 2 및 Level 4 에서는 별로 감소하지 않거나 오히려 증가하여 K 와 Ca 의 처리수준에 따른 전이 계수의 변화에 있어서 이렇다 할 경향성이 없었다.

Table 3. Transfer factors of ^{85}Sr for rice at various levels of the K and Ca treatment following 2 different times of the ^{85}Sr application

Date of ^{85}Sr application	Level of K and Ca	Transfer factor (m^2/kg-dry)		B/A
		Straws (A)	Hulled seeds (B)	
June 4	Control	2.2×10^{-2}	2.1×10^{-4}	0.0093
	Level 1	1.9×10^{-2}	1.8×10^{-4}	0.0096
	Level 2	1.2×10^{-2}	1.2×10^{-4}	0.0094
	Level 3	9.4×10^{-3}	9.3×10^{-5}	0.0099
	Level 4	7.9×10^{-3}	8.2×10^{-5}	0.0104
	Level 5	9.2×10^{-3}	8.2×10^{-5}	0.0089
August 22	Control	2.0×10^{-2}	2.6×10^{-4}	0.0134
	Level 1	1.4×10^{-2}	1.1×10^{-4}	0.0077
	Level 2	8.5×10^{-3}	8.4×10^{-5}	0.0098
	Level 3	6.4×10^{-3}	7.5×10^{-5}	0.0118
	Level 4	5.1×10^{-3}	6.9×10^{-5}	0.0136
	Level 5	4.5×10^{-3}	5.4×10^{-5}	0.0119

Table 4. Transfer factors of ^{137}Cs for rice at various levels of the K and Ca treatment following 2 different times of the ^{137}Cs application

Date of ^{137}Cs application	Level of K and Ca	Transfer factor (m^2/kg-dry)		B/A
		Straws (A)	Hulled seeds (B)	
June 4	Control	2.6×10^{-4}	7.4×10^{-5}	0.29
	Level 1	2.3×10^{-4}	6.7×10^{-5}	0.29
	Level 2	1.5×10^{-4}	4.4×10^{-5}	0.29
	Level 3	1.1×10^{-4}	3.2×10^{-5}	0.29
	Level 4	1.8×10^{-4}	4.2×10^{-5}	0.24
	Level 5	2.3×10^{-4}	4.7×10^{-5}	0.20
August 22	Control	7.3×10^{-3}	2.7×10^{-3}	0.37
	Level 1	2.9×10^{-3}	6.9×10^{-4}	0.24
	Level 2	1.2×10^{-2}	2.9×10^{-3}	0.23
	Level 3	4.0×10^{-3}	7.2×10^{-4}	0.18
	Level 4	1.4×10^{-2}	2.4×10^{-3}	0.18
	Level 5	8.4×10^{-3}	1.2×10^{-3}	0.15

벼 이식 전에 ^{85}Sr 및 ^{137}Cs 을 처리시 수확기에 K 와 Ca 의 처리수준에 따른 ^{85}Sr 와 ^{137}Cs 전이계수의 감소효과를 조사한 것은 각각 그림 1, 2 와 같다.

^{85}Sr 의 경우 K 와 Ca 의 처리수준이 Level 4 까지 높아질수록 감소효과가 점점 커졌으나 그 이상 처리에서는 효과가 증대하지 않았다. 또한 ^{137}Cs 의 경우에는 Level 3 까지는 K 와 Ca 의 처리수준이 높아질수록 감소효과가 계속 증대하였으나 그 이상 처리에서는 처리수준이 높아질수록 효과가 오히려 점점 감소하였다. 따라서 벼의 이식 전에 ^{85}Sr 와 ^{137}Cs 이 동시에 침적되었을 경우 벼의 방사성 핵종 흡수억제 대책으로서 K 와 Ca 의 살포량은 Level 3 정도가 적합한 것으로 판단된다. 이렇게 하면 두 핵종 모두 쌀알과 볏짚 간에 큰 차이 없이 60% 정도의 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

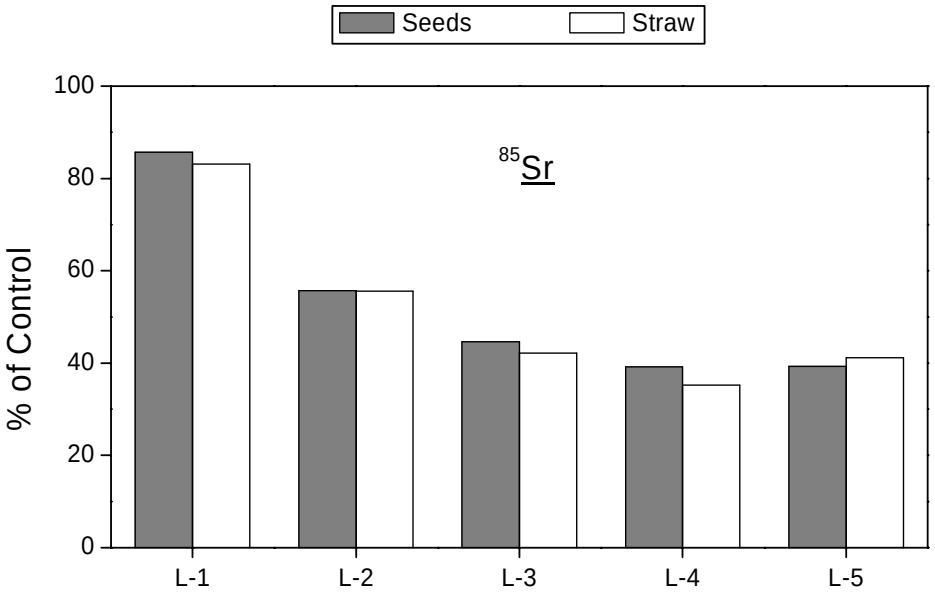

그림 1. 이식전 처리후 Ca 처리수준에 따른 ^{85}Sr 전이계수의 감소효과

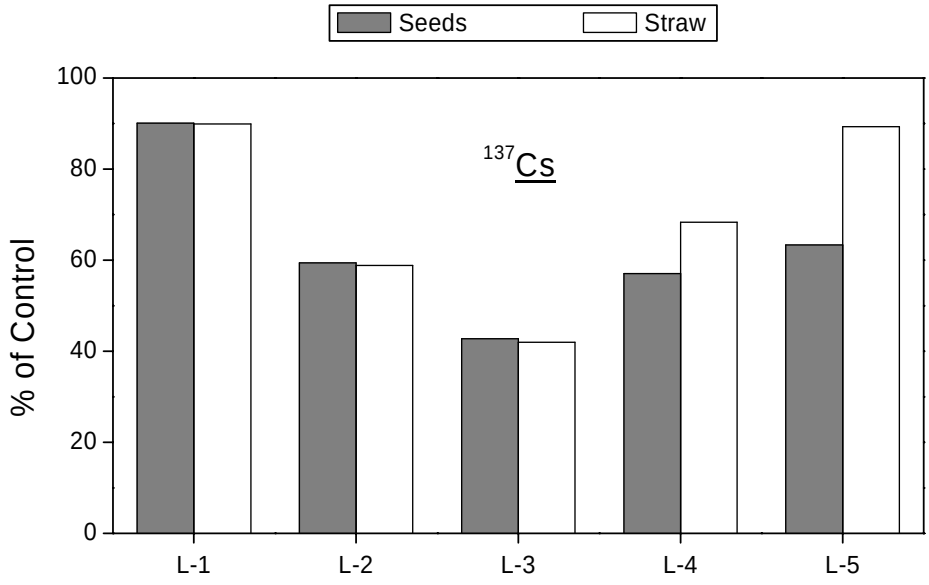

그림 2. 이식전 처리후 K 처리수준에 따른 ^{137}Cs 전이계수의 감소효과

벼 출수 직전에 ^{85}Sr 와 ^{137}Cs 을 처리시 수확기에 K 와 Ca 의 처리수준에 따른 ^{85}Sr 및 ^{137}Cs 전이계수의 감소효과를 조사한 것은 각각 그림 3, 4 와 같다.

^{85}Sr 전이계수는 이식 전 침적과 달리 K 와 Ca 의 처리수준이 Level 5 까지 높아질수록 감소효과가 계속 증대하였고 각 처리수준에서의 감소 정도도 이식 전 침적보다 컸다. 부위 간에 감소효과는 Level 2 까지는 쌀알이 컸으나 그 이상 처리에서는 쌀알과 볏짚 간에 큰 차이가 없었다. 이에 따라 Level 3 이상에서의 감소효과는 쌀알과 볏짚 전이계수 모두 70~80% 정도로 조사되었다. 한편 K 와 Ca 처리수준에 따른 ^{137}Cs 전이계수의 감소 양상에는 이렇다 할 경향성이 없었다. 쌀알의 경우 Level 1, Level 3 및 Level 5 에서, 볏짚의 경우 Level 1 및 Level 3 에서만 유의할 만한 감소가 관찰되었는데 두 부위

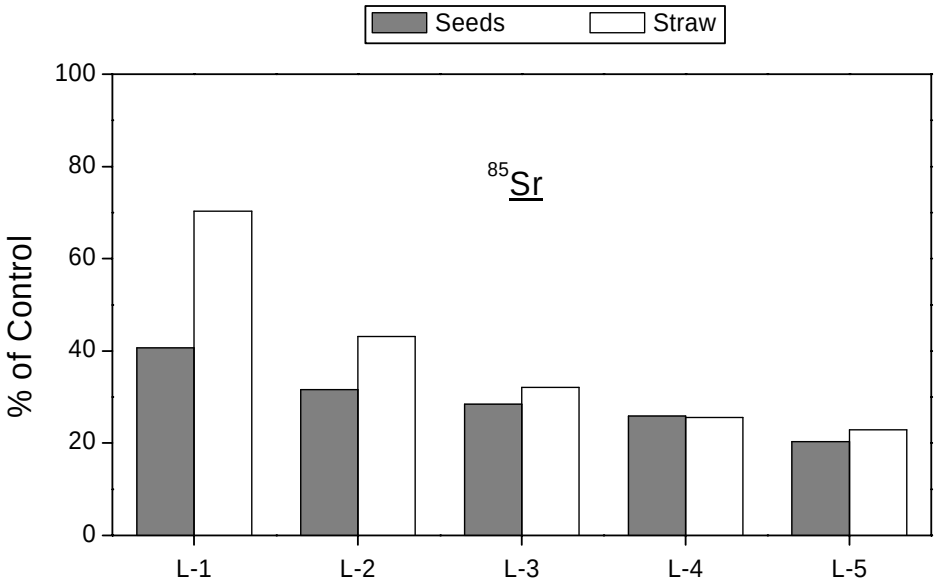

그림 3. 출수전 처리후 Ca 처리수준에 따른 ^{85}Sr 전이계수의 감소효과

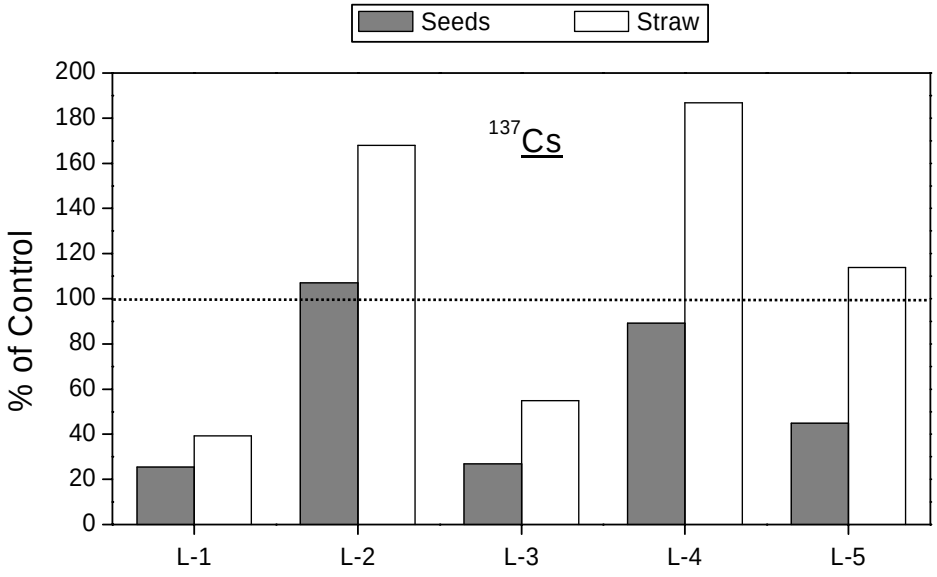

그림 4. 출수전 처리후 K 처리수준에 따른 ^{137}Cs 전이계수의 감소효과

모두 Level 1 에서 감소효과가 각각 75% 및 60% 정도로 가장 높았다. 또한 볏짚의 경우에는 Level 2 와 Level 4 에서는 전이계수가 오히려 증가한 것으로 나타났다. 위와 같은 결과들은 예상과 다른 것으로 여러 가지 여건상 반복실험이 수행되지 못한 데 기인하는 것으로 추정되며 이와 같은 일이 출수 직전 침적시의 ^{137}Cs 에만 일어난 것은 약간의 실험 조건의 차이에 의해서도 벼의 기부를 통한 ^{137}Cs 의 흡수가 비교적 큰 변이 [6]를 보이기 때문인 것으로 추정된다. 출수 직전 침적의 경우 ^{137}Cs 전이계수의 쌀알 대 볏짚비가 K 와 Ca 의 처리수준이 높아짐에 따라 점점 낮아지는 경향이 뚜렷하게 나타났으며 이것은 흡수된 ^{137}Cs 이 쌀알로 이동하는 것이 처리수준이 높아짐에 따라 점점 더 억제된다는 것을 의미한다.

4. 결 론

영광 원전 주변 2 곳의 논에서 토양을 재배상자에 원상대로 채취, 실험온실로 운반한 후 벼의 이식 전 및 출수 시작 1~2 일 전에 ^{85}Sr 와 ^{137}Cs 을 담수의 표면에 처리한 다음 K 와 Ca 를 다섯 가지 수준으로 동시에 처리하고 부위별 ^{85}Sr 및 ^{137}Cs 전이계수를 조사하였다. 벼 이식 전 침적시 ^{85}Sr 의 경우 K 와 Ca 의 처리수준이 Level 4 까지 높아질수록 감소효과가 점점 커졌으나 그 이상 처리에서는 효과가 증대하지 않았으며 ^{137}Cs 의 경우 Level 3 까지는 K 와 Ca 의 처리수준이 높아질수록 감소효과가 계속 증대하였으나 그 이상 처리에서는 오히려 점점 감소하였다. 출수 직전 침적시에는 ^{85}Sr 의 경우 이식전 침적과 달리 K 와 Ca 의 처리수준이 Level 5 까지 높아질수록 감소효과가 계속 증대하였으나 ^{137}Cs 의 경우에는 ^{137}Cs 전이계수의 감소 양상에 별다른 경향성이 없었다. 이것은 약간의 실험조건의 차이에 의해서도 벼의 기부를 통한 ^{137}Cs 의 흡수가 비교적 큰 변이를 보이기 때문인 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. J. E. Till and H. R. Meyer (Eds.), *Radiological Assessment*, NUREG/CR-3332, ORNL-5968, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1983)
2. A. J. Andersen, "Influence of liming and mineral fertilization on plant uptake of radiostrontium from Danish soils," *Soil Sci.*, 95, 52-59 (1963)
3. 이은웅 등, 4 정 수도작, 향문사, 서울 (1996)
4. 최용호, 조재성, 이창우, 홍광희, 이정호, “벼 재배기간중 침적시기에 따른 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs 의 뿌리흡수”, 대한방사선방어학회지, 20, 255-263 (1995)

5. Y. H. Choi, C. W. Lee, S. R. Kim, J. H. Lee and J. S. Jo, "Effect of application time of radionuclides on their root uptake by Chinese cabbage and radish," *J. of Environ. Radioactivity*, 39, 183-198 (1998)
6. C. Myttenaere, P. Bourdeau and M. Masset, "Relative importance of soil and water in the indirect contamination of flooded rice with radiocaesium," Health Physics 16, 701-707 (1969)