

# 논토양에 대한 K와 Ca의 동시처리가 벼의 Radiocaesium과 Radiostrontium 흡수에 미치는 영향

최용호, 임광목, 전인, 금동권, 김인규

한국원자력연구원

2012년 3월 20일 접수 / 2012년 5월 9일 1차 수정 / 2012년 5월 10일 채택

Radiocaesium과 radiostrontium에 대한 벼의 흡수억제 대책으로서 K와 Ca의 동시처리 효과를 조사하기 위하여 온실 내에서 방사성 추적자 실험을 수행하였다. 흡상자에 담긴 논토양(pH 6.5의 양토)에  $^{137}\text{Cs}$ 와  $^{85}\text{Sr}$ 을 가하고 농업용 KCl과  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 사용하여 K와 Ca를 처리한 다음 모내기하였다. 대조 작물체의 쌀알에 대한  $^{137}\text{Cs}$ 와  $^{85}\text{Sr}$ 의 토양-작물체 전이계수(TF,  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}\text{-dry}$ )는 각각  $7.4 \times 10^{-5}$  및  $2.1 \times 10^{-4}$ 였고 벚짚의 경우에는 각각  $2.6 \times 10^{-4}$  및  $2.2 \times 10^{-2}$ 였다. K와 Ca의 동시처리 수준(K/Ca,  $\text{g m}^{-2}$ )이  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 33.6/322까지,  $^{85}\text{Sr}$ 의 경우 48.0/460까지 증가할수록 전이계수가 점점 감소하였다. 최고 감소율은 두 핵종 모두 60% 정도였다.  $^{85}\text{Sr}$  전이계수는 33.6/322 처리에서도 60% 가까이 감소하였다. 당 처리에서는 벼의 생산성도 양호하였다. 이로써 본 실험에서는 33.6/322 처리가 최적인 것으로 판단되었다. 최적 처리 수준은 각종 요인에 따라 다를 수 있으므로 차후 다양한 조건에 대한 실험이 수행될 필요가 있다.

중심어: 벼, Radiocaesium, Radiostrontium, 흡수, K, Ca

## 1. 서론

원자로 사고에 의해 대기로 방출된 방사성 핵종은 농경지에 침적되어 농작물에 흡수될 수 있다[1,2]. 여러 가지 방출 핵종 중에서  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{90}\text{Sr}$ 은 반감기가 각각 30년 및 28년으로 비교적 길고 지표 침적량도 큰 편이므로 원자로 사고로 인한 농경지 오염 시 농산물 섭취에 따른 인체의 내부피폭 선량 경감대책에 있어서 매우 중요시 되고 있는 핵종이다[3].

K는 Cs와, 그리고 Ca는 Sr과 화학적으로 유사하여 작물체의 뿌리흡수에 대해 경쟁적인 관계에 있는 원소, 즉 경쟁원소인 것으로 알려져 있다[1,4,5]. 따라서 K와 Ca를 함유하는 물질들의 토양 첨가에 따른 radiocaesium과 radiostrontium의 작물체 흡수 억제에 대하여 많은 조사가 이루어져 왔고 Chernobyl 사고 시에는 실제로 적용되어 큰 효과를 나타내기도 하였다[3-7]. 그러나 이와 같은 일은 주로 밭작물에 국한된 것이고 우리나라의 주식작물인 벼에 대해서는 김[8] 및 최 등[9]의 보고를 제외하면 조사가 거의 전무한 실정이다.

원자로 사고시 토양첨가 물질은 농민들이 구하기 쉽고 사용하는 데 거부감이 없어야 한다. 이 점에 있어서 농업용 KCl과  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 는 평소에 농민들이 비료 또는 토양 개량제로 많이 사용하는 물질이므로 사고시 각각 K와 Ca의 급원으로서 적절하다고 하겠다[7,9]. 한편, 원자로 사고시

에는 Chernobyl의 예[10]에서 보듯이 농경지가 radiocaesium과 radiostrontium 두 가지 모두로 오염될 수 있으므로 혼합오염에 대한 K와 Ca의 동시처리 효과를 조사할 필요가 있다[7].

본 연구에서는 radiocaesium과 radiostrontium에 의한 논오염시 일반인의 식품 섭취에 따른 방사선 내부피폭 경감대책으로서 K와 Ca의 동시처리가 벼의 radiocaesium과 radiostrontium 흡수에 미치는 영향을 조사코자 하였다. 이를 위해  $^{137}\text{Cs}$ 와  $^{85}\text{Sr}$ 로 오염시킨 논토양에 농업용 KCl과  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 함께 첨가하고 벼를 재배하여 방사성 추적자 흡수실험을 수행하였다. 이 실험은 한국원자력연구원이 보유하고 있는 동위원소 실험온실에서 이루어졌다. 원자력 사고 시 방출되는 radiostrontium 중 주된 방사선 피폭 관점에서 가장 중요한 것은  $^{90}\text{Sr}$ 이나 본 연구에서는 실험의 편의상  $^{85}\text{Sr}$ 를 사용하였다[3,5,7,9].

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 토양 및 흡상자

영광군의 한 논에서 논물을 대기 전에 지표로부터 약 30 cm 깊이까지의 토양을 여섯 개의 철제 흡상자 안에 온전한 블록 형태로 채취하여 한국원자력연구원 내 동위원소 실험온실로 운반하였다. 흡상자는 처음에 몸통과 밑바닥이 분리되어 있었고 몸통은 토양 블록을 채취할 수 있도록 위와 아래가 뚫려 있었다. 토양 블록으로 채워진

책임저자 : 최용호, yhchoi1@kaeri.re.kr  
대전시 유성구 대덕대로 1045 한국원자력연구원 원자력환경안전연구부

Table 1. Physicochemical Properties of the Soil Used in the Experiment.

pH (1:5)	OM* (%)	CEC† (cmol kg <sup>-1</sup> )	EC* (cmol kg <sup>-1</sup> )			Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture
			Ca	Mg	K				
6.5	3.1	9.8	4.8	0.6	0.2	39	43	18	Loam

\*Organic matter

†Cation exchange capacity

‡Exchangeable cation.

몸통을 약 3 cm 깊이로 쇠석이 깔린 밑바닥에 엷고 틈새를 남뻘으로 봉합한 다음 관개하여 물을 댄 논과 같이 만들었다. 두 부위가 결합된 흙상자의 가로, 세로, 높이는 각각 30, 30, 40 cm였다. 담수관개하기 하루 전에 상자당 부숙퇴비 20 g을 살포하고 흙갈이를 실시하였다. 흙상자의 최하부에는 배수공을 내고 수도꼭지를 연결하여 필요시 배수할 수 있도록 하였다. 실험 토양의 물리·화학적 특성은 표 1과 같다.

### 2.2. 방사성 핵종 및 경쟁원소 처리

벼의 모내기 전에 원자로 사고가 발생하여 단기적인 방사성 침적이 일어나는 것을 모사하기 위하여 모내기 1 일 전에 <sup>137</sup>Cs와 <sup>85</sup>Sr의 혼합용액(ml 당 각각 68 및 180 kBq)을 마이크로 피펫을 이용하여 흙상자의 수표면 25 곳에 1 ml씩 떨어뜨렸다. 이는 단위면적 당으로 보면 <sup>137</sup>Cs의 경우 19 MBq m<sup>-2</sup>, <sup>85</sup>Sr의 경우 50 MBq m<sup>-2</sup>의 침적 처리에 해당한다. 이러한 침적밀도는 Chernobyl 사고에 관한 특정 조사 보고[10]에 의거하면 동 사고 시 부지 주변 토양에 대해서 조사된 침적밀도의 범위를 크게 초과하는 것이다. 이와 같이 높은 준위의 방사능으로 실험하는 것은 가능한 한 계측오차를 줄여서 신뢰도가 높은 조사를 얻을 수 있도록 하기 위해서다. 이러한 방법은 방사성 핵종의 토양 중 농도와 작물체 내 농도는 서로 직선적으로 비례한다는 가정을 전제로 하고 있다. 이 직선성의 가정은 적지 않은 논란에도 불구하고 방사성 핵종의 섭취경로 영향 평가에 널리 적용되어 오고 있다[11,12].

위와 같이 핵종을 처리하고 나서 세 시간 후에 표 2와 같이 K와 Ca의 동시처리 수준이 다섯 가지가 되도록 농업용 KCl과 Ca(OH)<sub>2</sub>를 함께 수표면에 살포하고 모종용 삽으로 상층토와 잘 섞어 주었다. 이 때 기본 비료로서

Table 2. Levels of the Simultaneous Application of K and Ca.

Grade of level	Dosages of K and Ca (g m <sup>-2</sup> )	
	K*	Ca†
Control	0	0
Level 1	7.2	69
Level 2	19.2	184
Level 3	33.6	322
Level 4	48.0	460
Level 5	72.0	690

\*applied as fertilizer KCl (48% of K)

†applied as slaked lime (46% of Ca).

모든 상자에 대해 벼 재배용 복합비료(N:P:K=21%:17%:17%)를 상자 당 3.5 g씩 가하였다. 대조용 흙상자는 방사성 핵종 처리 후 경쟁원소 함유물은 첨가하지 않고 기본 비료만 살포하고 위와 같이 섞어 주었다.

### 2.3. 벼 재배

담수관개 7일 후인 6월 5일에 남평벼의 모를 상자당 16 개(주 당 4개씩 4주)씩 이식하였다. 이식 후 수확 2 주 전까지 표면수의 깊이가 통상 3-5 cm 정도 되도록 관개하였다. 우리나라 논에서 일어나는 관개수의 지하침투(0.55 cm d<sup>-1</sup>)[13]를 모사하기 위해서 매 상자로부터 1 주에 한번씩 3.5 L의 물을 배수공을 통하여 배수하였다. 이식 후 14, 50, 80일 된 날에 추비로서 상기 복합비료를 상자 당 1.2 g씩 표면수에 공급하였다. 살충제와 살균제를 벼의 생육 경과에 따라 서너 차례 살포하였다. 온실의 창문은 최대한 열어 두고 환기용 팬을 가동시켜 환기를 꾀하고 실내의 온도 상승을 억제하였다. 벼의 출수는 이식 후 79일이 경과한 8월 23일에 시작하였다.

### 2.4. 시료 처리 및 계측

작물체의 수확은 이식 후 133 일에 실시하였다. 지표로부터 10 cm 정도 상부에서 줄기를 낫으로 자른 다음 벗겉과 이삭으로 나누어 온실 내에서 약 2 주 간 자연 건조하였다. 건조 후 벗겉은 가위로 잘게 잘라 고무 섞었다. 이삭의 경우 떼어 낸 종실을 막자사발에 담아 부드럽게 문질러 껍질(왕겨)을 벗겨내고 쌀알(현미)을 취하였다. 이와 같이 처리하여 얻은 벗겉과 쌀알 시료를 적절한 크기의 계측용기에 담고 감마 스펙트로메트리를 실시하여 <sup>137</sup>Cs와 <sup>85</sup>Sr를 동시에 계측하고 농도를 측정하였다. 사용된 검출기는 HPGe 검출기(EG&G ORTEC)였고 계측시간은 1-2 h, 계측오차는 10% (2σ) 이하였다. 작물체에 의한 <sup>137</sup>Cs와 <sup>85</sup>Sr의 흡수 정도는 아래와 같이 정의되는 전이 계수(TF: transfer factor, m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>-dry) [7,14,15]로 나타내었다.

$$TF = \frac{\text{작물체 내 방사성 핵종 농도 (Bq kg}^{-1}\text{-dry)}}{\text{방사성 핵종의 단위면적 당 침적량 (Bq m}^{-2}\text{)}} \quad (1)$$

식 (1)에서는 방사성 붕괴에 대한 보정을 위해서 분자와 분모 모두 실험 핵종의 반감기에 따른 작물체 수확일 기준의 값을 사용하였다. 따라서 본 TF 값은 <sup>137</sup>Cs과 <sup>85</sup>Sr 이외의 radiocaesium (<sup>134</sup>Cs 등)이나 radiostrontium (<sup>90</sup>Sr

등)에도 똑 같이 적용되어 수확시 작물체 내 농도를 예측하는 데 이용될 수 있다. 단, 이 때 침적량은 식 (1)에서와 같이 반감기를 고려하여 작물체 수확일 기준으로 환산한 값을 사용해야 한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 경쟁원소 무처리시 토양-작물체 전이계수

표 3은 경쟁원소 무처리 흡상자에서 조사된 <sup>137</sup>Cs와 <sup>85</sup>Sr의 토양-작물체 전이계수( $m^2 kg^{-1}$ -dry), 즉 대조용 작물체에 대한 전이계수를 나타내고 있다. 이 값들은 대체로 최 등[14,15]이 우리나라 각지의 논토양에 대해서 조사한 radiocaesium과 radiostrontium 전이계수 값들의 범위 내에 속하고 있다.

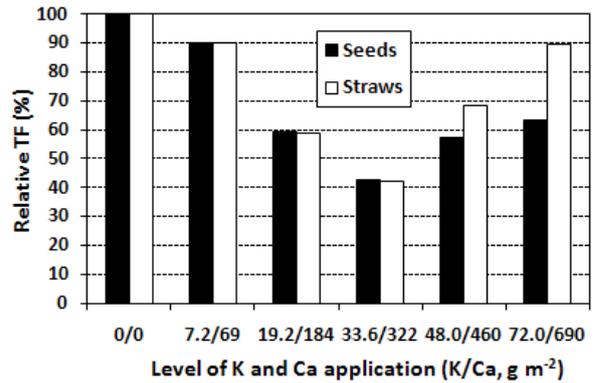
**Table 3.** Transfer Factors of <sup>137</sup>Cs and <sup>85</sup>Sr for the Straws and Hulled Seeds of the Control Plants.

Radionuclide	Transfer factor ( $m^2 kg^{-1}$ -dry)		B/A
	Straws (A)	Hulled seeds (B)	
<sup>137</sup> Cs	$2.6 \times 10^{-4}$	$7.4 \times 10^{-5}$	0.29
<sup>85</sup> Sr	$2.2 \times 10^{-2}$	$2.1 \times 10^{-4}$	0.0093

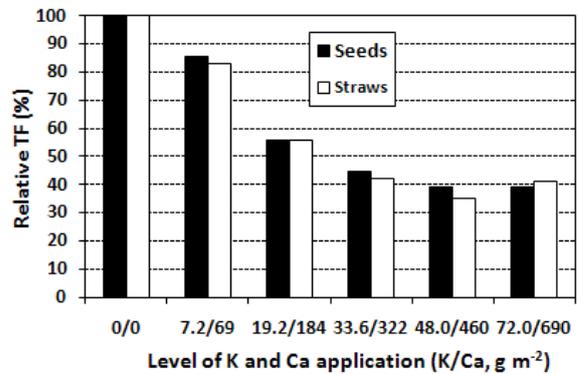
<sup>137</sup>Cs의 전이계수는 <sup>85</sup>Sr에 비해 벗짚의 경우 80 배, 쌀알의 경우 3 배 정도 낮았다. 이것은 Cs이 Sr보다 훨씬 용이하게 토양 기질에 흡착·고정되어 작물체에 의해 흡수되기 어렵기 때문이다. 이러한 경향은 벗짚만 아니라 다른 작물들에 대해서도 많이 보고되어 있다[7,16-18]. 한편, 벗짚 전이계수는 쌀알 전이계수보다 <sup>85</sup>Sr의 경우 100 배 정도나 높았으나 <sup>137</sup>Cs의 경우 4 배 정도만 높아 벗짚 전이계수에 대한 쌀알 전이계수의 비는 <sup>137</sup>Cs이 <sup>85</sup>Sr보다 30 배 정도 높았다. 이것은 작물체에 흡수되고 난 다음 종실 부위로의 이동성은 radiocaesium이 radiostrontium보다 훨씬 높다는 것을 나타낸다. 이처럼 작물체 내에서 radiocaesium이 radiostrontium보다 특정 부위인 종실이나 열매, 피경 등으로 훨씬 잘 이동하는 것은 많은 연구자들[9,17-19]이 관찰한 바 있다.

#### 3.2. 경쟁원소 처리에 따른 전이계수의 변화

그림 1과 2는 각각 경쟁원소의 동시처리 수준(K/Ca,  $g m^{-2}$ )에 따른 <sup>137</sup>Cs과 <sup>85</sup>Sr 전이계수 값을 무처리(0/0) 시의 값에 대한 백분율로 나타낸 것이다. <sup>137</sup>Cs의 경우 K와 Ca의 처리 수준이 33.6/322까지 높아질수록 전이계수가 점점 감소하여 최고 60% 가까이 감소하였으나 그 이상에서는 처리 수준이 높아짐에 따라 전이계수가 오히려 점점 증가하였다. <sup>85</sup>Sr의 경우에도 이와 유사하게 처리 수준이 48.0/460까지 높아짐에 따라 전이계수가 계속 감소하여 최고 60% 넘게 감소하였으나 그보다 높은 처리 수준에서는 더 이상 감소하지 않았다.



**Fig. 1.** Relative transfer factors of <sup>137</sup>Cs at various levels of the simultaneous application of K and Ca by comparison with the control.



**Fig. 2.** Relative transfer factors of <sup>85</sup>Sr at various levels of the simultaneous application of K and Ca by comparison with the control.

위와 같이 K와 Ca의 동시처리가 어느 수준을 초과하면 radiocaesium과 radiostrontium의 전이계수가 더 이상 감소하지 않는 것은 작물의 생육에 필수적인 K와 Ca의 흡수가 어느 수준 이상에서는 처리량이 증가하여도 별로 증가하지 않고 또한 K와 Ca는 뿌리흡수 뿐만 아니라 토양 흡착에 대해서도 Cs 및 Sr과 경쟁하기 때문인 것으로 추정된다[9,20,21]. 한편, Ca는 토양의 pH를 상승시켜 Cs나 Sr과 같은 양이온의 토양 흡착이나 불용성 침전 형성을 증대시킴으로써 뿌리흡수를 감소시키는 역할을 한다 [1,3,4,7,22]. 그러나 이러한 효과는 Ca를 과다하게 처리하여 pH가 어느 선을 넘어 가면 더 이상 증대하지 않거나 오히려 감소할 수도 있을 것으로 나타났다[22,23]. <sup>137</sup>Cs의 경우 48.0/460 처리부터는 벗짚에 비해 쌀알에서의 전이계수 감소 정도가 더 컸다. 이것은 주로 K의 작물체 내 농도가 어느 수준 이상으로 상승하여 흡수된 <sup>137</sup>Cs의 쌀알로의 이동 효율이 낮아 졌기 때문인 것으로 추정된다. 다시 말해, 화학적으로 서로 유사한 K와 Cs는 작물체 내 이동에 있어서도 경쟁적인 관계에 있을 수 있다는 것이다. K와 Ca의 과다 처리 시 영향에 대해서 보다 명확히 설명할 수 있기 위해서는 토양학적 및 작물생리학적 기초실험이 필요할 것으로 사료된다.

김[8]은 포트실험을 통하여 벗의 <sup>90</sup>Sr 흡수에 대해서는

Ca를 600 g m<sup>-2</sup> 수준까지, <sup>137</sup>Cs 흡수에 대해서는 K를 16 g m<sup>-2</sup> 수준까지 처리하고 억제 효과를 관찰하였다. 여기서 벼의 <sup>90</sup>Sr 흡수는 Ca 처리가 300 g m<sup>-2</sup>까지 증가할수록 대체로 점점 감소하였다가 600 g m<sup>-2</sup> 처리에서는 300 g m<sup>-2</sup>에 비해 큰 차이가 없거나 오히려 다소 증가하였고 벼의 <sup>137</sup>Cs 흡수는 K의 처리가 16 g m<sup>-2</sup>까지 증가할수록 계속 감소하였다. 이와 같은 흡수억제 효과의 변화 양상은 본 실험과 대체로 비슷하다고 할 수 있겠으나 억제 효과의 크기는 차이가 있었다. 즉, 김의 실험에서 <sup>90</sup>Sr 흡수는 다섯 가지 토양에서 최고 25% 정도밖에 감소하지 않았고 <sup>137</sup>Cs의 흡수는 토양에 따라 50~90% 정도 감소하였다.

K는 뿌리흡수에 있어서 방사성 Cs 뿐만 아니라 방사성 Sr과도 경쟁적일 수 있는 것으로 알려져 있다(6,24). 김[8]은 Ca 처리 실험에서 K를 기본 비료로만 공급함으로써 K에 의한 <sup>90</sup>Sr의 흡수억제 효과가 매우 제한적이었을 것이다. 이와 달리 본 실험에서는 Ca와 K의 동시 처리에 의해 <sup>90</sup>Sr의 흡수가 보다 크게 억제되었을 것으로 추정된다. 한편 김[8]의 실험에서 K 처리량에 따른 <sup>137</sup>Cs의 흡수 억제율이 본 실험보다 컸던 것은 대조 작물체에 대해서는 기본 비료로서의 K도 공급하지 않았다는 사실과 관련이 있을 것으로 판단된다. 이처럼 경쟁원소 처리의 효과는 토양, 시비 등 여러 가지 재배·환경적 요인에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 재배 현장에 적용코자 할 때에는 이러한 점을 주의 깊게 고려할 필요가 있다.

### 3.3. 경쟁원소 처리의 적정 수준

본 연구에서 K와 Ca의 최적 동시처리 수준은 목표 핵종에 대한 흡수억제 효과로 볼 때 <sup>137</sup>Cs의 경우 33.6/322로, <sup>85</sup>Sr의 경우 48.0/460으로 볼 수 있다. 두 핵종을 함께 고려할 경우에는 33.6/322 처리가 48.0/460 처리보다 바람직할 것으로 판단된다. 이는 33.6/322 처리에서는 48.0/460 처리에 비해 <sup>137</sup>Cs의 전이계수는 꽤 크게 낮으면서도 <sup>85</sup>Sr의 전이계수는 그렇게 크게 높지 않았고 또한 처리 비용면에서도 33.6/322 처리가 더 유리하기 때문이다. 또한, Chernobyl 사고시 radiocaesium의 단위면적당 침적량, 즉 침적밀도가 radiostrontium에 비해 대체로 수배 이상 높았다[10]는 사실에 비추어 볼 때 33.6/322 처리로 radiostrontium의 흡수억제에 대한 기대치를 다소 낮추는 대신에 radiocaesium의 흡수억제에 대한 기대치를 최고로 하는 것이 보다 합리적인 대응이 될 수 있을 것으로 사료된다. 만약, radiostrontium의 침적밀도가 radiocaesium보다 높을 경우에는 처리량을 조금 늘리는 것도 고려할 필요가 있다고 본다.

흡수억제 효과와 처리 비용 외에 또 하나 중요한 고려사항은 농작물의 생산성이다. 흡수억제 효과가 아무리 크다 하더라도 농작물의 생산성에 문제가 있다면 농민들로서는 받아들이기 어려운 대책이 될 것이다. 표 4는 경쟁원소의 동시처리 수준에 따른 벼짚과 쌀알의 단위면적당 생산량을 보여 주고 있다. 7.2/69 처리에서는 대조 작물체에 비해 생산량이 다소 감소하였으나 19.2/184 처리에서는 거의 같았고 33.6/322 이상 처리에서는 모두 대조 작물체보다 생산량이 높았다. 따라서 7.2/69 처리에서 생

**Table 4.** Crop Productivities at Different Levels of the Simultaneous Application of K and Ca.

Dosage (K/Ca, g m <sup>-2</sup> )	Biomass production (g-dry m <sup>-2</sup> )	
	Straws	Seeds
0/0 (control)	819	691
7.2/69	627	433
19.2/184	796	679
33.6/322	1,066	1,032
48.0/460	918	885
72.0/690	764	797

육이 저조했던 것은 경쟁원소의 첨가에 의한 것이라기보다 다른 재배·환경적 요인에 의한 것일 가능성이 크다고 하겠다. 이처럼 K와 Ca의 처리에 의해 생산성이 향상한 것은 이들 원소가 작물의 생육에 필수적인 원소이고 또한 Ca에 의해 토양의 pH가 작물의 생육에 보다 적합하게 조절되었기 때문인 것으로 보인다[20,25]. 최대 생산량은 33.6/322 처리에서 나타났고 그 이상에서는 처리 수준이 높을수록 생산량이 점점 감소하였다. 이것은 48.0/460 이상 처리에서는 토양의 pH가 너무 높았기 때문인 것으로 판단된다.

이상으로 33.6/322 처리가 radiocaesium과 radiostrontium의 혼합침적에 대한 흡수억제 효과에 있어서 가장 우수하였을 뿐만 아니라 작물체의 생산성도 가장 높았고 또한 농용물질의 첨가량도 너무 과도한 편은 아니었으므로 최적의 동시처리 수준이었다고 하겠다. 그러나 경쟁원소 처리의 최적 수준은 토양의 특성 및 오염경로, 작물의 종류 및 재배·관리법 등에 따라 달라질 수 있다는 점을 유념할 필요가 있다.

## 4. 결론

논토양이 radiocaesium과 radiostrontium으로 동시에 오염되었을 때 농업용 KCl과 Ca(OH)<sub>2</sub>의 사용을 통한 K와 Ca의 동시처리가 벼의 두 가지 방사성 원소 흡수를 효과적으로 감소시킬 수 있다는 것이 확인되었다. K와 Ca의 최적 동시처리 수준(K/Ca, g m<sup>-2</sup>)은 두 핵종(<sup>137</sup>Cs과 <sup>85</sup>Sr) 모두에 대해 60% 정도의 전이계수 감소효과를 나타낸 33.6/322로 판단되었다. 이 수준에서는 벼의 생산성 증가도 기대되므로 농민에 의한 수용성이 비교적 높을 것으로 예상된다. 경쟁원소의 효과는 토양의 특성, 처리 방법, 오염경로 및 재배법 등에 따라 차이가 있을 것이므로 차후 다양한 조건에서의 조사가 수행될 필요가 있다.

### 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부가 시행한 원자력중장기연구개발사업의 결과물입니다.

### 참고문헌

1. Till JE, Meyer HR. Radiological Assessment. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3332,

- ORNL-5968. 1983.
2. 최용호, 임광목, 황원태, 이한수, 이창우. 원자력 사고 후 쌀알과 배추내  $^{90}\text{Sr}$  및  $^{137}\text{Cs}$  농도 예측. 방사선 방어학회지. 2002;27:127-146.
  3. Fesenko SV, Alexakhin RM, Balonov MI, Bogdevitch IM, Howard BJ, Kashparov VA, Sanzharova NI, Panov AV, Voigt G, Zhuchenka YM. An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident. *Sci. Tot. Environ.* 2007;383: 1-24.
  4. Nisbet AF, Konoplev AV, Shaw G, Lembrechts JF, Merckx R, Smolders E, Vandecasteele CM, Lönsjö H, Carini F, Burton O. Application of fertilizers and ameliorants to reduce soil to plant transfer of radiocaesium and radiostrontium in the medium to long term - a summary. *Sci. Tot. Environ.* 1993;137:173-182.
  5. Vidal M, Camps M, Grebenshikova N, Sanzharova N, Ivanov Y, Vandecasteele C, Shand C, Rigol A, Firsakova S, Fesenko S, Levchuk S, Cheshire M, Sauras T, Rauret G. Soil- and plant-based countermeasures to reduce  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  uptake by grasses in natural meadows: the REDUP project. *J. Environ. Radioact.* 2001;56:139-156.
  6. Lembrechts J. A review of literature on the effectiveness of chemical amendments in reducing the soil-to-plant transfer of radiostrontium and radiocaesium. *Sci. Tot. Environ.* 1993;137:81-98.
  7. Choi YH, Lim KM, Jun I, Keum DK, Lee CW. Effects of the simultaneous application of potassium and calcium on the soil-to-Chinese cabbage transfer of radiocaesium and radiostrontium. *J. Environ. Radioact.* 2008;99:1853- 1858.
  8. 김재성.  $^{90}\text{Sr}$ 과  $^{137}\text{Cs}$ 의 답토양별 흡·탈착과 수도체의 흡수양상에 미치는 연구. 고려대학교 박사학위 논문. 1985.
  9. Choi YH, Lim KM, Choi HJ, Choi GS, Lee HS, Lee CW. Plant uptake and downward migration of  $^{85}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  after their deposition on to flooded rice fields: lysimeter experiments with and without the addition of KCl and lime. *J. Environ. Radioact.* 2005;78:35-49.
  10. International Advisory Committee. The International Chernobyl Project. Technical Report. IAEA, Vienna. 1991.
  11. Gerzabek MH, Strebl F, Temmel B. Plant uptake of radionuclides in lysimeter experiments. *Environ. Poll.* 1998;99:93-103.
  12. Tuovinen TS, Roivainen P, Makkonen S, Kolehmainen M, Holopainen T, Juutilainen J. Soil-to-plant transfer of elements is not linear: Results for five elements relevant to radioactive waste in five boreal forest species. *Sci. Tot. Environ.* 2011; 410-411:191-197.
  13. 이은웅. 수도작(사정). 향문사. 서울. 1996.
  14. Choi YH, Lim KM, Park HG, Park DW, Kang HS, Lee HS. Transfer of  $^{137}\text{Cs}$  to rice plants from various paddy soils contaminated under flooded conditions at different growth stages. *J. Environ. Radioact.* 2005;80:45-58.
  15. Choi YH, Kang HS, Jun I, Keum DK, Park HG, Choi GS, Lee HS, Lee CW. Transfer of  $^{90}\text{Sr}$  to rice plants after its acute deposition onto flooded paddy soils. *J. Environ. Radioact.* 2007;93:157-169.
  16. Nishita H, Romney EM, Larson KH. Uptake of radioactive fission products by crop plants. *Agric. Food Chem.* 1961;2:101-106.
  17. Carini F, Lombi E. Foliar and soil uptake of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  by grape vines. *Sci. Tot. Environ.* 1997; 207:157-164.
  18. 최용호, 임광목, 전인, 금동권. 감자의 재배기간 중 토양에 침적한  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 의 작물체로의 전이. 방사선방어학회지. 2008;33:105-112.
  19. Nisbet AF, Shaw S. Summary of a five-year lysimeter study on the time-dependent transfer of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  to crops from three contrasting soil types: 2. Distribution between different plant parts. *J. Environ. Radioact.* 1994;23: 171-187.
  20. Marschner H. Mineral Nutrition in Higher Plants. Academic Press. 1986.
  21. Smolders E. Concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  and K in soil solution predict the plant availability of  $^{137}\text{Cs}$  in soils. *Environ. Sci. Technol.* 1997;31:3432-3438.
  22. Massas I, Skarlou V, Haidouti C, Giannakopoulou F.  $^{134}\text{Cs}$  uptake by four plant species and Cs-K relations in the soil-plant system as affected by  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  application to an acid soil. *J. Environ. Radioact.* 2010;101:250-257.
  23. Giannakopoulou F, Haidouti C, Chronopoulou A, Gasparatos D. Sorption behavior of cesium on various soils under different pH levels. *J. Haz. Mater.* 2007;149:553-556.
  24. Anderson AJ. Influence of liming and mineral fertilization on plant uptake of radiostrontium from Danish soils. *Soil Sci.* 95;1963:52-59.
  25. 조성진, 박천서, 엄대익. 토양학(삼정). 향문사. 서울. 1997.

## Effect of Simultaneous K and Ca Application to Paddy Soil on the Uptake of Radiocaesium and Radiostrontium by Rice

Yong-Ho Choi, Kwang-Muk Lim, In Jun, Dong-Kwon Keum, and In-Gyu Kim  
Korea Atomic Energy Research Institute

**Abstract** - A radio-tracer experiment was performed in a greenhouse to investigate the effectiveness of the simultaneous application of K and Ca as a countermeasure for reducing the radiocaesium and radiostrontium uptake by rice. Paddy soil (loam of pH 6.5) in soil boxes was spiked with  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$ , and treated with K and Ca in the forms of KCl and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , respectively, at agrochemical grades before transplanting. For the seeds of the control plants, soil-to-plant transfer factors (TF,  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ -dry) of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  were  $7.4 \times 10^{-5}$  and  $2.1 \times 10^{-4}$ , respectively, whereas the corresponding values for the straws were  $2.6 \times 10^{-4}$  and  $2.2 \times 10^{-2}$ , respectively. The TF values of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{85}\text{Sr}$  kept decreasing as the level of the simultaneous application of K and Ca ( $\text{K}/\text{Ca}$ ,  $\text{g m}^{-2}$ ) increased up to 33.6/322 and 48.0/460, respectively. The maximum rate of the decrease was around 60% for both radionuclides. Nearly 60% reduction in the TF value of  $^{85}\text{Sr}$  was observed even at the dosage of 33.6/322, which was considered the optimum dosage based on crop productivity as well as reduction in the radiocaesium and radiostrontium uptake by rice. The optimum dosage may depend on various factors so further experiments need to be made for many different conditions.

**Keywords** : Rice, Radiocaesium, Radiostrontium, Uptake, K, Ca