

# Soil Applications of Slaked Lime and Organic Fertilizer for Reducing $^{99}\text{Tc}$ Transfer from Soil to Rice Seeds

## $^{99}\text{Tc}$ 의 토양-쌀알 전이 감소를 위한 소석회와 유기질 비료의 토양첨가

Yong-Ho Choi\*, Kwang-Muk Lim, In Jun, Byung-Ho Kim and Dong-Kwon Keum  
Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

최용호\*, 임광목, 전인, 김병호, 금동권  
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received September 14, 2012 / Revised November 12, 2012 / Approved December 28, 2012)

To see if slaked lime and organic fertilizer applications to soil are useful as countermeasures for reducing  $^{99}\text{Tc}$  concentrations in rice seeds after  $^{99}\text{Tc}$  contamination of paddy fields, pot experiments were performed for two different paddy soils in a greenhouse. The upper soils for a depth of about 20 cm were treated with the agricultural materials and  $^{99}\text{Tc}$  15 d before transplanting. The effects were compared using the transfer factor (TF) defined as the ratio of the plant concentration to the soil concentration. In the case of control plants, TF values for brown rice in the two soils were  $4.1 \times 10^{-4}$  and  $4.3 \times 10^{-4}$ . Of various types of the application, only the application of slaked lime at a lower dose (about  $0.6 \text{ kg m}^{-2}$ ), which led to a 60% reduction in the TF value for one soil, seemed to be worth using as a countermeasure. Little effect of the same application was found in the other soil so it is important to determine the effect averaged for a number of soils. Organic fertilizer applications at both of two different doses increased the TF value. It is considered necessary to perform experiments for slake lime applications at doses lower than the above.

Key words:  $^{99}\text{Tc}$ , Paddy soil, Rice seeds, Transfer factor, Slaked lime, Countermeasure

논의  $^{99}\text{Tc}$  오염 시 소석회와 유기질 비료의 토양 첨가가 쌀알 내  $^{99}\text{Tc}$  농도 저감 대책으로서 유용한지 알아보기 위하여 온실 내에서 두 가지 논토양에 대해 포트실험을 수행하였다. 모내기 15 일 전에 약 20 cm 깊이에 해당하는 상부 토양을 상기 농용 물질과  $^{99}\text{Tc}$ 로 처리하였다. 처리 효과는 토양 중 농도에 대한 작물체 내 농도의 비로 정의되는 전이계수(TF)로 비교하였다. 대조 작물체의 경우 두 토양에서 현미 TF 값은  $4.1 \times 10^{-4}$  및  $4.3 \times 10^{-4}$ 였다. 각종 유형의 첨가 중에서 한 토양에 대해 60% 정도의 TF 값 감소를 나타낸 소석회 저수준 첨가(약  $0.6 \text{ kg m}^{-2}$ )만이 대책으로서 이용 가능성이 있을 것으로 판단되었다. 다른 한 토양에서는 동 첨가의 효과가 거의 없었으므로 다수의 토양에 대한 평균적인 효과를 알아내는 것이 중요하다. 두 가지 다른 수준의 유기질 비료의 첨가는 모두 TF 값을 증가시켰다. 위보다 더 낮은 수준의 소석회 첨가에 대해 실험을 수행할 필요가 있을 것으로 사료되었다.

중심단어: 테크네튬-99, 논토양, 쌀알, 전이계수, 소석회, 대책

\*Corresponding Author . E-mail: yhchoi1@kaeri.re.kr, Tel: +82.42.868.2392

## 1. 서론

테크네튬(Tc)의 동위원소 중에서 <sup>99</sup>Tc는 반감기가 2.1×10<sup>5</sup> 년으로 매우 길고 원자로 내에서 핵분열 시 생성물(약 6.2%)이 비교적 높을 뿐만 아니라 의료용 <sup>99m</sup>Tc의 방사성 붕괴에 의해서도 흔하게 생성되므로 방사성 폐기물 처분에 있어서 중요한 관심 핵종이다[1-3]. 또한 <sup>99</sup>Tc는 사용 후 핵연료에 꽤 많이 함유되어 있으므로 재처리 시설의 가동에 따른 환경방출이 우려되는 핵종이다[4]. 한편, Chernobyl 사고 시에는 주변 환경에서 상당히 높은 준위의 <sup>99</sup>Tc가 측정되기도 하였다[5]. 따라서 만일의 사고 등으로 인하여 방사성 폐기물 처분장이나 재처리 시설 및 원자력 발전소로부터 다량의 <sup>99</sup>Tc가 주변 환경으로 방출될 가능성을 배제할 수 없다.

<sup>99</sup>Tc는 순수 베타선 방출체이므로 인체의 외부에 존재할 때는 영향이 거의 없지만 환경으로 방출된 <sup>99</sup>Tc가 농경지에 침적되어 작물체에 흡수되고 이 작물체의 섭취를 통하여 인체 속으로 들어오면 방사선 내부피폭을 일으킬 수 있다[6,7]. 벼를 주식으로 하는 우리나라에서는 논이 국토 면적의 10% 정도에 달하고 있고 방폐장이나 원자력 발전소 주변에도 논이 많이 분포하고 있다[8]. 따라서 논에 <sup>99</sup>Tc 오염에 대비하여 쌀알 내 <sup>99</sup>Tc 농도 저감화 기술을 개발하는 것은 의의가 크다고 하겠다.

논은 벼 재배 기간 동안에는 거의 내내 물에 잠겨 있으므로 미생물의 작용에 의해 산소가 고갈되어 토양이 환원상태로 된다[9,10]. 환원상태의 토양에서는 Tc가 주로 TcO<sub>2</sub>와 같은 환원형으로 존재하게 되고 TcO<sub>2</sub>는 용해도가 매우 낮아 침전되거나 유기물 또는 점토 광물과 같은 토양 고형물에 용이하게 결합, 흡착된다[11-14]. Bennett와 Willey[11]는 이러한 흡착이 토양의 pH가 높을 때 보다 잘 일어나는 것으로 보고하고 있다. 한편, Kumar 등[3]은 흡착실험을 통하여 환원형 Tc가 부식산에 강하게 결합되어 복합체를 형성하고 이것이 다시 토양의 주요 구성 성분인 알루미늄에 용이하게 흡착되는 것을 관찰하였다. 이 실험에서는 pH 6

까지는 pH의 증가에 따라 흡착이 증가하였으나 pH 7 이상에서는 흡착이 크게 감소하여 알칼리 영역에서는 위의 보고와 일치하지 않았다. 따라서 pH 조절의 효과는 토양에 따라 차이가 있을 것으로 보이나 석회와 유기물의 첨가로 <sup>99</sup>Tc의 토양 흡착이 증가한다면 작물체의 뿌리흡수에 대한 가용도가 낮아져 흡수가 억제되는 것을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 위와 같은 기대에 입각하여 농가에서 널리 사용하는 농용물질인 소석회와 유기질 비료의 토양첨가가 쌀알 내 <sup>99</sup>Tc 농도에 미치는 영향을 조사하고 논토양의 <sup>99</sup>Tc 오염 시 대책으로서 유용한지 확인하고자 하였다. 이를 위한 벼 재배실험은 한국원자력연구원 내 동위원소 실험온실에서 수행하였다. 평소에 농민들이 많이 사용하고 있는 물질이 효과가 있는 것으로 드러나면 유사시 구하기 쉽고 취급이 용이하여 큰 어려움 없이 대책에 이용할 수 있을 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험토양 채취

2011년 4월에 경주 방사성 폐기물 처분장으로부터 5 km 이내에 있는 두 곳(구길리, 읍천리)의 논에서 삼과 중장비를 이용하여 지표 20 cm 정도의 표층토를 채취하고 실험온실로 운반하였다. 운반한 토양은 실외에서 자연 건조한 다음 자갈이나 작물의 유체 등을 골라내고 실험에 사용하였다. 토양의 물리·화학적 특성은 Table 1과 같다. 두 토양은 모두 미사질 양토로서 물리·화학적 특성이 유사하였다.

### 2.2 <sup>99</sup>Tc 및 농용물질 처리

실험 토양을 아래와 같이 <sup>99</sup>Tc 및 농용물질로 처리한 다음 재배 포트(높이 35 cm, 지름 25 cm의 원통형, stainless 철제)에 담았다. 그전에 미리 포트의 바닥에 약 4 cm 높이로 쇠책을 깔고 그 위에 비오염 건조 토양을 포트 당 3.4 kg

Table 1. Physicochemical properties of the experimental soils

Soil	pH (1:5)	OM <sup>a</sup> (%)	CEC <sup>b</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )	EC <sup>c</sup> (cmol kg <sup>-1</sup> )			Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Texture
				Ca	Mg	K				
Gookil-ri	5.65	3.70	31.94	10.28	5.70	0.79	14.89	68.90	16.21	Silt loam
Eopcheon-ri	5.61	3.56	26.94	10.40	5.54	0.78	16.13	67.10	16.77	Silt loam

<sup>a</sup> Organic matter

<sup>b</sup> Cation exchange capacity

<sup>c</sup> Exchangeable cation

씩 넣어 두었다. 모내기하기 15 일 전 포트 당 11.2 kg의 건조 토양과 0.4 kg의 전혼합토(premix)를 V자 형 토양혼합기에 넣고 소석회(slaked lime, Ca(OH)<sub>2</sub>)와 유기질 비료를 Table 2와 같이 여섯 가지 유형으로 첨가한 다음 10 분 간 작동시켜 고르게 섞었다. 전혼합토는 위의 작업 하루 전에 포트 당 건조토양 400 g과 <sup>99</sup>Tc 수용액 30 ml (271 kBq/ml)을 반구형 혼합기를 이용하여 5 분 간 고르게 섞어서 제조하였다.

이 등[9]에 의하면 우리나라 논토양에 대한 소석회의 최소 권장 살포량은 75-100 g m<sup>-2</sup> (재배면적 비로 환산하면 pot 당 3.7-4.9 g)이므로 실제 살포량은 통상 그보다 높을 것이고 본 연구에서는 저수준 처리라도 실제 살포량보다 대체로 몇 배 높았을 것으로 추정된다. 이는 본 연구가 1차 시도로서 그 결과에 따라 차후 최적 살포량을 구하기 위한 실험의 설계 시 처리 수준을 정하는 데 필요한 기초 정보를 얻고자 함이었다. 참고로, 조 등[15]에 의하면 토양 pH 교정 목표치를 6.5로 할 경우 본 실험 토양을 중화시키는 데 필요한 순수 Ca(OH)<sub>2</sub>의 첨가 수준은 대략 300 g m<sup>-2</sup>이고 이는 본 실험에 사용된 소석회의 첨가 수준으로 환산하면 350 g m<sup>-2</sup> (재배면적 비로 환산하면 pot 당 17.2 g) 정도가 된다.

실험을 3 반복으로 수행하기 위하여 토양혼합기를 36 회 (2 토양 × 6 유형 × 3 반복) 작동하여 매회 하나씩, 도합 36 개의 오염 처리된 재배 포트를 마련하였다. 이외에 두 토양에 대해 <sup>99</sup>Tc와 농용물질을 첨가하지 않고 비료만 공급하여 두 개씩의 포트를 더 마련하였다. 위와 같이 마련된 도합 40 개의 포트를 동위원소 실험온실 내에 완전임의 배치법으로 배치하고 3-4 cm 깊이로 관개하여 논과 같이 만들었다. 관개 후 포트 내 오염 토양층은 지표로부터 약 20 cm 깊이로 형성되었다.

Table 2. Types of slaked lime and organic fertilizer applications to soils

Code of application types	Applied material	Dosage (g/pot)
SL-H	Slaked lime (SL) <sup>a</sup>	60
SL-L		30
OF-H	Organic fertilizer (OF) <sup>b</sup>	600
OF-L		300
S/O-H	SL + OF	60 + 600
Control	-	-

<sup>a</sup> containing about 46% Ca

<sup>b</sup> fermented compost containing more than 25% organic matter.



Fig. 1. Rice plants at their post-heading stage.

### 2.3 작물체 육성

위와 같이 준비된 재배 포트에 호프벼의 모를 6월 3일에 포트 당 12 개(3주 4본)씩 이식하였다. 비료는 기비로 토양 혼합 시에 포트 당 2 g의 비농사용 복합비료(N : P : K = 21% : 17% : 17%)를 첨가하였고 추비로 동 복합비료를 생육 중 3 회에 걸쳐 1-2 g씩 수표면에 살포하였다.

벼의 생육중 우리나라 논에서의 평균적인 관개수 지하침투(5.5 mm/d)[9]를 모사하기 위하여 매 포트로부터 2 주에 3.77 L씩의 침출수를 하부의 배수공을 통하여 배출하였다. 온실의 창문과 문은 최대한 개방하고 세 대의 환기팬을 작동시켜 실내의 온도 상승을 최소화하였다. 벼의 생육 과정에 따라 살균제와 살충제를 서너 차례 살포하였다. 출수는 8월 20일에 시작하였다. Fig. 1은 출수 후 벼가 자라는 모습을 보여 주고 있다.

### 2.4 시료 처리 및 계측

벼를 수확하기 위해 모내기 후 137일(10월 18일)에 지표로부터 약 10 cm 높이에서 낫으로 줄기를 베어 작물체를 채취한 다음 온실에서 3 주 정도 자연 건조하였다. 건조 후 가위로 이삭과 벧짚을 분리하고 이삭으로부터 낱알을 떼어내어 막자사발에 담아 부드럽게 문질러서 껍질(왕겨)을 벗겨내고 쌀알(현미)을 얻었다.

쌀알 시료를 믹서기 등을 이용하여 분말 상태로 만든 다음 Wigley 등[15]의 방법대로 일정량의 시료에 암모니아수(비중 0.88, 시료 1 g 당 3 ml 비율)를 가하고 건조시킨 후 500℃(250℃에서 한 시간 경과 후 서서히 온도 상승)의 전기로에서 12 시간 가열하여 회분 시료를 얻었다. 이와 같이

암모니아를 처리하고 회화하면 산화, 증발에 따른 <sup>99</sup>Tc의 손실을 방지할 수 있는 것으로 보고되어 있다[16,17].

각 포트에 대한 쌀알의 회분 시료를 직경 5 cm planchet 에 200 mg씩 담고 증류수를 가하여 골고루 편 다음 적외선 등 하에서 건조시키고 low-background alpha/beta counter (LB-5100, TENNELEC)를 이용한 전베타 계수법으로 측정하였다[16]. 여기서 <sup>99</sup>Tc 농도는 비오염토 포트에서 생산된 회분 시료 200 mg에 대해 같은 방법으로 구한 베타선의 background 계수치를 뺀 순계수치로부터 산출하였다. 측정 시간은 1,800 ~ 3,600 초였고 측정 오차는 시료에 따라 5 ~ 10% 정도였다.

### 2.5 전이계수 계산

토양 및 작물체 내 <sup>99</sup>Tc 농도로부터 <sup>99</sup>Tc의 토양-작물체 전이계수(TF, dimensionless)를 아래와 같이 계산하였다 [7,16].

$$TF = \frac{\text{작물체 내 농도 (Bq / kg-dry)}}{\text{토양 내 농도 (Bq / kg-dry)}} \quad (1)$$

식 (1)에서 작물체 내 농도는 수확 시 쌀알 내 농도이고 토양 내 농도는 토양과 핵종의 혼합 시 농도를 작물의 수확일 기준으로 붕괴 보정한 것이다. 이에 따른 토양 내 <sup>99</sup>Tc 농도는 701 kBq kg<sup>-1</sup>-dry로 긴 반감기로 인하여 토양혼합 시와 차이가 없었다. 각 처리에 대한 <sup>99</sup>Tc의 전이계수는 3 반복의 산술평균과 표준편차로 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 농용물질 무첨가시 <sup>99</sup>Tc의 토양-쌀알 전이 계수

농용물질 무첨가 시 토양별 <sup>99</sup>Tc의 쌀알(현미) 전이계수 (TF) 값은 Table 3과 같다. 두 토양의 TF 값은 큰 차이가 없었다. 이것은 두 토양이 대체로 유사한 물리·화학적 특성

Table 3. Transfer factors of <sup>99</sup>Tc for brown rice of the control plants

Soil	Transfer factor (dimensionless) <sup>a</sup>
Gookil-ri	4.1×10 <sup>-4</sup> ±9.6×10 <sup>-5</sup>
Eopcheon-ri	4.3×10 <sup>-4</sup> ±4.8×10 <sup>-5</sup>

<sup>a</sup> mean ± standard deviation for 3 replications.

(Table 1)을 가진 데 따른 결과인 것으로 판단된다. 한편, 본 조사치는 최 등[17]이 이전에 동일 지역 내 네 곳의 논토양을 대상으로 조사한 값들보다 다소 낮았다. 이는 벼의 품종이 서로 달랐다는 사실과 어느 정도 관련이 있을 것으로 추정된다[18]. 동일 식물종이라도 품종이 다르면 유전적 특질이 다르므로 핵종의 흡수, 체내 이동 및 축적에 관련된 발육 및 생리적 특성이 달라져서 TF 값도 차이가 날 것으로 판단된다.

### 3.2 농용물질 첨가에 따른 쌀알 내 <sup>99</sup>Tc 농도 저감 효과

Fig. 2와 3은 각각 구길리와 읍천리 논토양에 대하여 위와 같은 농용물질 무첨가 시(control) <sup>99</sup>Tc의 쌀알 TF 값과 각

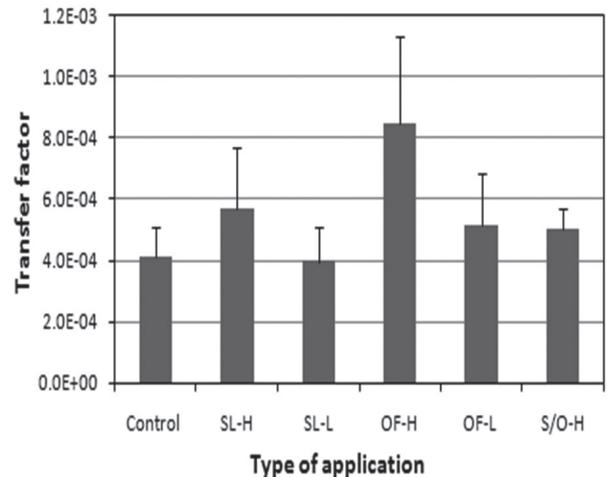


Fig. 2. Soil-to-brown rice transfer factors of <sup>99</sup>Tc for different applications of slaked lime and organic fertilizer to a Gookil-ri paddy soil.

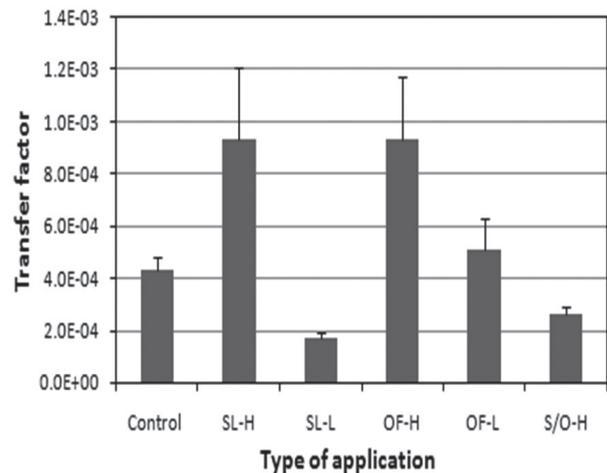


Fig. 3. Soil-to-brown rice transfer factors of <sup>99</sup>Tc for different applications of slaked lime and organic fertilizer to an Eopcheon-ri paddy soil.

중 유형의 첨가 시 쌀알 TF 값을 함께 보여 주고 있다. 구길리 토양에서는 어떠한 유형의 소석회와 유기질 비료의 첨가에서도 TF 값이 무첨가에 비해 감소하지 않았다. 이는 농용물질 첨가에 따른 쌀알 내 <sup>99</sup>Tc 농도의 저감 효과가 없었다는 것을 의미한다. 반면에, 읍천리 토양에서는 TF 값이 소석회의 저수준 첨가(SL-L)에 의해 60% 정도, 소석회와 유기질 비료의 고수준 동시첨가(S/O-H)에 의해 40% 정도 감소한 것으로 나타났다. 소석회 저수준 첨가의 경우에는 구길리 토양에서도 다른 어떠한 유형의 첨가나 무첨가보다 TF 값이 높지는 않았다. Table 1과 3에서 보는 바와 같이 두 토양의 특성과 TF 값은 큰 차이가 없었으나 농용물질의 효과가 위와 같이 서로 다르게 나타나는 것에 대해서는 이유를 찾지 못하였다.

이상으로 볼 때, 조사한 첨가 유형 중에서는 소석회 저수준 첨가(약 600 g m<sup>-2</sup>)만이 논토양의 <sup>99</sup>Tc 오염 시 쌀알 내 <sup>99</sup>Tc 농도 저감화 대책으로서 이용 가능성이 있을 것으로 판단된다. 하지만 600 g m<sup>-2</sup> 정도의 소석회 첨가의 경우 위에서 본 것처럼 토양에 따라 이렇다 할 효과가 없을 수도 있으므로 다수의 토양에 대한 추가적인 실험을 통하여 평균적인 효과를 구해서 유사 시 대책 수립에 참조하는 것이 중요하다. 한편으로 보다 적절한 소석회 첨가 수준을 탐색하기 위하여 차후 다수의 토양에 대해 600 g m<sup>-2</sup>보다 3 배 정도까지 낮은 수준의 첨가 실험을 수행할 필요가 있다고 본다. 이는 위와 같은 조사 결과로 볼 때 소석회 첨가의 수준이 본 연구의 저수준 첨가보다 낮은 경우 구길리 토양에서도 농도 저감 효과가 나타날 수 있고 읍천리 토양에서는 효과가 더 커질 수도 있다는 기대가 가능하기 때문이다. 또한 첨가량이 적을수록 처리 비용이 낮아지는 것도 중요한 이유가 된다. 위에서 3 배 정도 낮은 것으로 한 것은 석회질 비료로서 소석회는 비농사 시 적어도 100 g m<sup>-2</sup> 정도는 시용해야 한다[15]는 데 근거하여 대략적으로 판단한 것이다.

소석회의 고수준 첨가(SL-H)에서는 두 토양 모두 TF 값이 증가하였다. 이는 pH의 과도한 상승에 의한 작물 뿌리의 기능 변화나 환원형 <sup>99</sup>Tc의 토양흡착 감소에 따른 결과인 것으로 추정된다[3]. 유기질 비료의 경우 고수준 첨가(OF-H)에서는 두 토양 모두 TF 값이 2 배 이상 증가하였으나 저수준 첨가(OF-L)에서는 고수준에 비해 TF 값이 크게 감소하여 무첨가와 큰 차이가 없었다. 기대와는 달리 유기질 비료의 첨가에 의해 TF 값이 상승한 것은 부식산(humic acid)이나 풀빅산(fulvic acid)과 같은 가용성 유기물의 증가에 따른 chelation 작용의 증진으로 환원형 <sup>99</sup>Tc의 용해도가 높아졌기 때문인 것으로 추정된다[15,19,20]. 따라서 유기질 비료의 첨가로 효과를 보기 위해서는 원료 유기물

의 종류나 분해 정도 등이 적당해야 할 것으로 판단된다. 부식산이나 풀빅산이 아닌 비가용성의 유기 물질에 <sup>99</sup>Tc가 흡착되면 뿌리흡수가 억제되어 오염 저감화 효과가 있을 것으로 예상되므로 그러한 물질을 증가시킬 수 있는 방법에 대해 연구할 필요가 있다고 본다. 위와 같은 유기질 비료의 첨가 시 결과는 부식산과 환원형 Tc의 복합체가 알루미늄에 용이하게 흡착하였다는 Kumar 등[3]의 실험 결과와는 일치하지 않는 것으로 볼 수 있다. 또한 유기질 비료의 첨가량이 적정량을 초과했을 가능성을 배제할 수 없다. 환원형 Tc, 유기산, 점토 광물의 삼원결합은 여러 가지 토양 환경 요인들의 복잡한 상호작용에 의해 그 정도가 결정될 것으로 사료된다.

소석회와 유기질 비료의 고수준 동시첨가(S/O-H)의 경우 두 토양에서 모두 어느 단일물질의 고수준 첨가보다 TF 값이 비교적 크게 낮았고 읍천리 토양에서는 무첨가에 비해 TF 값이 감소하기도 하였다. 이것은 두 물질의 상호작용에 따른 결과로서 그 기작에 대해서 정확히 설명하기는 어려우나 부분적으로는 유기물에 의한 토양의 완충능 증대와 관련이 있을 것으로 판단된다. 즉 완충능의 증대로 석회에 의한 pH의 상승이 둔화되어 소석회 고수준 첨가에 따른 TF 값의 상승이 다소 억제되었을 것으로 추정해 볼 수 있다[15]. 이와 같은 두 물질의 고수준 동시첨가 시의 결과와 두 물질 각각의 저수준 첨가 시 고수준 첨가에 비해 TF 값이 낮았다는 사실은 본 동시첨가 수준보다 낮은 수준의 동시첨가에 의해 비교적 큰 효과를 기대할 수 있다는 것을 시사하고 있다.

#### 4. 결론

두 가지 논토양을 소석회와 유기질 비료로 처리하고 벼의 <sup>99</sup>Tc 흡수실험을 수행한 결과 소석회의 저수준 첨가(0.6 kg m<sup>-2</sup> 내외)만이 쌀알 내 <sup>99</sup>Tc 농도 저감화 대책으로서 이용 가능성이 있는 것으로 나타났다. 토양에 따라서는 소석회 저수준 첨가의 효과가 없을 수 있으므로 차후 다수의 토양에 대한 추가 실험을 통하여 평균적인 효과를 조사하고 유사 시 대책 수립에 참조하는 것이 중요하다.

농도 저감 효과의 증대 및 대책실행 비용의 절감을 위하여 위의 수준보다 3 배 정도까지 낮은 수준의 소석회 첨가에 대해 조사할 필요가 있을 것으로 판단되었다. 유기질 비료의 경우 비가용성 유기물을 많이 공급할 수 있는 것을 사 용해야 효과가 있을 것으로 추정되었다. 두 물질 동시첨가의 경우에도 보다 낮은 수준의 첨가가 더 효과적일 것으로 보였다.

## 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부가 시행한 원자력중장기연구개발사업의 결과물입니다.

## REFERENCES

- [1] S.H. Sung, Y.Y. Jeong and K.H. Kim, "Radwaste characteristics and disposal facility waste acceptance criteria", J. Kor. Radioactive Waste Society, 6(4), pp. 347-356 (2008).
- [2] C.W. Lee, K.H. Chung, Y.H. Cho, M.J. Kang, W. Lee, H.R. Kim and G.S. Choi, "Analysis of <sup>99</sup>Tc and its activity level in the Korean soil", J. Kor. Radioactive Waste Society, 7(1), pp. 25-31 (2009).
- [3] S. Kumar, N. Rawat, A.S. Kar, B.S. Tomar and V.K. Manchanda, "Effect of humic acid on sorption of technetium by alumina", J. Hazardous Materials, 192, pp. 1040-1045 (2011).
- [4] Q.H. Hu, J.Q. Weng and J.S. Wang, "Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review", J. Environ. Radioactivity, 101, pp. 426-437 (2010).
- [5] S. Uchida, K. Tagami, E. Wirth, W. Ruehm, "Concentration levels of technetium-99 in forest soils collected within the 30-km zone around the Chernobyl reactor", Environ. Pollution 105, pp. 75-77 (1999).
- [6] K. Tagami and S. Uchida, "Concentration of global fallout <sup>99</sup>Tc in rice paddy soils collected in Japan", Environ. Pollution, 95, pp. 151-154 (1997).
- [7] J.E. Till and H.R. Meyer (Eds.), Radiological Assessment. U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-3332, ORNL-5968 (1983).
- [8] Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Korea, Food, Agriculture, Forestry and Fisheries Statistical Yearbook, 11-1541000-000078-10 (2011).
- [9] E.W. Lee, Rice Culture, Hyangmoon Press, Seoul (1996).
- [10] H. Marschner, Mineral Nutrition in Higher Plants, Academic Press, London (1986).
- [11] R. Bennett and N. Willey, "Soil availability, plant up-take and soil to plant transfer of <sup>99</sup>Tc - A review", J. Environ. Radioactivity, 65, pp. 215-231 (2003).
- [12] K. Tagami and S. Uchida, "Chemical transformation of technetium in soil during the change of soil water conditions", Chemosphere, 38, pp. 963-971 (1999).
- [13] N. Ishii, H. Koiso, H. Takeda and S. Uchida, "Environmental conditions for the formation of insoluble Tc in water ponds located above paddy fields", J. Environ. Radioactivity, 99, pp. 965-972 (2008).
- [14] J.D.C. Begg, I.T. Burke and K. Morris, "The behaviour of technetium during microbial reduction in amended soils from Dounreay, UK", Science of the Total Environment, 373, pp. 297-304 (2007).
- [15] S.J. Cho, C.S. Park and D.I. Uhm, Soil Science, Hyangmoon Press, Seoul (1997).
- [16] F. Wigley, P.E. Warwick, I.W. Croudace, J. Caborn and A.L. Sanchez, "Optimised method of the routine determination of technetium-99 in environmental samples by liquid scintillation counting", Analytica Chimica Acta, 380, pp. 73-82 (1999).
- [17] Y.H. Choi, K.M. Lim, I. Jun, D.W. Park, D.K. Keum and M.H. Han, "Soil-to-rice seeds transfer factors of radioiodine and technetium for paddy fields around the radioactive-waste disposal site in Gyeongju", J. Kor. Radioactive Waste Society, 8(4), pp. 329-337 (2010).
- [18] W. Schimmack, U. Gerstmann, W. Schultz, M. Sommer, V. Tschöpp and G. Zimmermann, "Intra-cultivar variability of the soil-to-grain transfer of fallout <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr for winter wheat", J. Environ. Radioactivity, 94, pp. 16-30 (2007).
- [19] J. Wu, L.J. West and D.I. Stewart, "Effect of humic substances on Cu(II) solubility in kaolin-sand soil", J. Hazardous Materials, B94, pp. 223-238 (2002).
- [20] K. Geraedts and A. Maes, "The lanthanum precipitation method. Part 1: A new method for technetium(IV) speciation in humic rich natural groundwater", Chemosphere, 73, pp. 484-490 (2008).