

방폐장 주변 논에 대한
장반감기 핵종의 토양-벼 전이계수

Soil-to-rice transfer factors of long-lived radionuclides for
paddy fields around the Radioactive Waste Disposal Facilities

KAERI

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하,

본 보고서를 2009년도 "신개념 생태계 방사능 위해도 평가 기술 개발" 과제의 일환으로 수행된 기술보고서로 제출합니다.

2009. 10



과제명: 신개념 생태계 방사능 위해도
평가기술개발

주저자: 최용호

부저자: 임광목, 전인, 박두원, 금동권

요 약

방사성 폐기물 처분에 대한 환경영향 평가 시 주요 핵종인 ^{129}I 와 ^{99}Tc 의 토양-벼 전이계수를 동위원소 추적자를 이용한 온실실험을 통하여 조사하였다. 이를 위해 경주 방폐장 주변 논토양을 2 년에 걸쳐 채취하여 KAERI 실험온실로 운반하고 재배용 흙상자를 준비하였다. ^{129}I 실험은 세 가지 논토양으로, ^{99}Tc 실험은 네 가지 논토양으로 실시하였다.

흙상자 내 토양은 두 가지 오염경로를 모사하여 두 가지 다른 방식으로 오염시켰다. 하나는 상부 약 20 cm의 토양과 방사성 핵종을 모내기 전에 혼합하는 것이었고 다른 하나는 모내기 직후 표면수에 방사성 핵종을 가하는 것이었다. 전이계수는 전자의 경우 토양중 핵종 농도(Bq kg^{-1})에 대한 작물체내 농도($\text{Bq kg}^{-1}\text{-dry}$)의 비(TF_m , dimensionless)로 나타내었고 후자의 경우 표면침적 밀도(Bq m^{-2})에 대한 작물체내 농도($\text{Bq kg}^{-1}\text{-dry}$)의 비(TF_a , $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)로 나타내었다.

전이계수 값은 핵종, 토양 및 부위 간에 상당한 차이가 있었다. 토양 간 차이는 유기물 함량이 중요한 요인인 것으로 판단되었다. 표면수 내 핵종의 농도는 TF_a 실험에서 TF_m 실험에 비해 핵종 및 조사시기에 따라 수천 배까지 높았다. 조사된 전이계수는 핵종의 뿌리흡수뿐만 아니라 표면수로부터의 기부흡수에 의한 기여분을 포함하는 것으로 추정되었다.

본 실험 결과에 입각하여 전이계수의 지역 대표치가 다음과 같이 제안되었다.— 쌀알과 벼짚에 대한 ^{129}I 의 TF_m 값은 각각 2.9×10^{-3} 과 5.4×10^{-1} , TF_a 값은 각각 1.7×10^4 과 3.1×10^3 , 그리고 ^{99}Tc 의 TF_m 값은 각각 5.4×10^{-4} 과 8.3×10^{-1} , TF_a 값은 각각 2.4×10^5 과 1.8×10^2 . 이 값들은 제한된 숫자의 실험토양에 대한 일회의 실험으로부터 도출된 것이므로 대표성이 충분치 않다. 차후 추가적인 조사를 수행하여 보다 대표성이 높은 값으로 갱신해 나갈 필요가 있다.

Summary

Soil-to-rice transfer factors of ^{129}I and ^{99}Tc , which are regarded as important radionuclides in the environmental impact assessment for radioactive waste disposal facilities, were investigated through greenhouse experiments using radiotracers. For this purpose, paddy soils were collected around the disposal facilities in Gyeonju over two years and carried to the KAERI experimental greenhouse to prepare soil boxes for rice culture. Three and four different soils were studied in the ^{129}I and ^{99}Tc experiments, respectively.

The box soils were treated to be radioactively contaminated in two contrasting ways simulating two different contamination pathways. One was to mix a radioactive solution and the top 20 cm soil before transplanting and the other was to add the same solution to the surface water in the soil boxes after transplanting. Transfer factors for the former and the latter were described as the ratio (TF_m , dimensionless) of the plant concentration ($\text{Bq kg}^{-1}\text{-dry}$) to the soil concentration (Bq kg^{-1}) and the ratio (TF_a , $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) of the plant concentration ($\text{Bq kg}^{-1}\text{-dry}$) to the surface-deposition density (Bq m^{-2}), respectively.

There were considerable differences in the values of transfer factors between the radionuclides, among the soils and between the plant parts. The organic matter content in soil was considered to be an important factor for the differences among the soils. In the surface water, radionuclide concentrations were higher for the TF_a experiment than for the TF_m experiment by a factor of up to thousands depending on the radionuclide species and the time of measurement. It is likely that the transfer factor values include not only the contribution by root uptake but also that by plant-base uptake from the surface water.

On the basis of the present results, the representative values of the transfer factors for the Gyeongju site were proposed as follows — TF_m values of ^{129}I : 2.9×10^{-3} for brown rice and 5.4×10^{-1} for straws, TF_a values of ^{129}I : 1.7×10^{-4} for brown rice and 3.1×10^{-3} for straws, TF_m values of ^{99}Tc : 5.4×10^{-4} for brown rice and 8.3×10^{-1} for straws, and TF_a values of ^{99}Tc : 2.4×10^{-5} for brown rice and 1.8×10^{-2} for straws. These values are not of sufficient representativeness because they were derived from one-year experiments using a limited number of soils. It is necessary to keep on updating the values for a higher representativeness with respect of the additional data which should be acquired from future investigations.

목 차

1. 서 론	1
2. 재료 및 방법	3
2.1. 실험 토양	3
2.2. 실험작물 육성	5
2.3. 방사성 핵종 처리	7
2.3.1. TF _m 실험	7
2.3.2. TF _a 실험	7
2.4. 시료 채취 및 분석	7
2.4.1. 작물체 시료	7
2.4.2. 표면수 시료	8
2.5. 전이계수 계산	8
3. 결과 및 고찰	9
3.1. ¹²⁹ I 전이계수	9
3.1.1. TF _m 값	9
3.1.2. TF _a 값	11
3.2. ⁹⁹ Tc 전이계수	12
3.2.1. TF _m 값	12
3.2.2. TF _a 값	15
4. 결 론	17
참고문헌	18

그림 목 차

그림 1. 경주 방폐장 주변 조사 대상 논외 위치 및 전경	4
그림 2. 벼의 생육 모습 (생육 초기 및 후기)	6
그림 3-1. TF _m 실험에서 토양별 표면수 내 ¹²⁹ I 농도 변화	10
그림 3-2. TF _a 실험에서 토양별 표면수 내 ¹²⁹ I 농도 변화	12
그림 4-1. TF _m 실험에서 토양별 표면수 내 ⁹⁹ Tc 농도 변화	14
그림 4-2. TF _a 실험에서 토양별 표면수 내 ⁹⁹ Tc 농도 변화	16



표 목 차

표 1. 경주 방폐장 주변 농토양 채취 지점의 주소 및 좌표	4
표 2. 경주 방폐장 주변 농 토양의 물리·화학적 특성 ('07 년, ^{129}I 실험)	5
표 3. 경주 방폐장 주변 농 토양의 물리·화학적 특성 ('08 년, ^{99}Tc 실험) ..	5
표 4-1. 농토양별 ^{129}I 의 쌀알 및 벚짚 전이계수(TF_m)	9
표 4-2. 농토양별 ^{129}I 의 쌀알 및 벚짚 전이계수(TF_a)	12
표 5-1. 농토양별 ^{99}Tc 의 쌀알 및 벚짚 전이계수(TF_m)	13
표 5-2. 농토양별 ^{99}Tc 의 쌀알 및 벚짚 전이계수(TF_a)	15



KAERI

1. 서론

토양-작물체 전이계수는 방사성 핵종으로 오염된 농경지에서 재배·수확된 작물체에 어느 정도의 방사능이 함유될 것인지를 나타내는 모델 매개변수로서 통상적으로 토양 내 핵종 농도($Bq\ kg^{-1}$)에 대한 작물체 내 핵종 농도($Bq\ kg^{-1}$)의 비로 정의되고 있다[1,2]. 이러한 전이계수(TF_m)는 주로 평형모델에서 사용되는 것으로 방사성 핵종이 작물의 생육 전에 일정한 깊이(흙갈이 깊이, 약 15~20 cm)까지 균일한 농도로 흙과 섞여 있다는 것을 전제로 한다[2,3].

위에서 본 것처럼 TF_m 은 농경지의 오염이 파종이나 이식을 위한 흙갈이 이전에 일어났을 때 적합하다. 농경지의 오염은 작물의 생육 중에도 일어날 수 있다. 작물의 생육 중에는 흙갈이를 하지 않으므로 방사성 핵종이 생육 중에 침적되면 대부분의 방사능이 지표 부근에 편재하게 된다. 따라서 생육 중 침적에 대해서는 TF_m 보다는 핵종의 지표면 침적밀도($Bg\ m^{-2}$)에 대한 작물체 내 농도($Bq\ kg^{-1}$)의 비로 정의되는 전이계수($TF_a, m^2\ kg^{-1}$)를 사용하는 것이 물리적으로 타당하다[4,5]. 또한 작물은 생육단계에 따라 흡수력 및 기관의 분화·발육 정도가 다르고 침적한 핵종의 작물체 흡수에 대한 가급도(availability)도 시간에 따라 변하므로 침적시기에 따라 작물체로의 전이 정도가 크게 다를 수 있다[5,6].

논은 재배 기간 동안 수 cm의 관개수(표면수)로 덮여 있는 것이 보통이므로 토양층으로부터의 뿌리흡수와 함께 작물체 기부를 통한 물로부터의 흡수, 즉 기부흡수가 일어날 수 있다[7-9]. 표면수는 오염된 관개수의 사용이나 대기로부터의 직접 침적뿐만 아니라 오염되어 있는 논토양에 대한 관개에 의해서도 오염될 수 있다. 후자의 경우 토양층으로부터 표면수로의 방사성 핵종의 확산·이동 및 썩레질에 의한 교반 등에 기인하는 것으로 TF_m 과 관계가 있다. 이처럼 벼의 전이계수는 표면수로부터의 흡수를 포함하지만 본 연구에서는 편의상 타작물과 같이 토양-작물체 전이계수로 부르기로 한다.

우리나라에서는 당 연구원에 의해 대덕, 고리, 영광, 울진 부지 주변 토양에 대해서는 주요 핵종들의 벼에 대한 TF_m 값이나 TF_a 값이 다수 조사[6, 10-12]되어 있으나 경주 폐기물 처분장 주변 토양에 대해서는 조사가 거의 전무한 실정이다. 또한 조사된 값들은 주로 방사성 Cs나 Sr에 대한 것들로 방사성 폐기물 처분에서 중요시되고 있는 ^{129}I 및 ^{99}Tc 와 같은 장반감기 핵종에 대해서는 조사가 전혀 이루어져 있지 않다. 이에 본 연구에서는 경주 방폐장 부근에서 채취한 논토양에 있어서 벼에 대한 ^{129}I 및 ^{99}Tc 의 TF_m 과 TF_a 값을 온실실험을 통하여 조사하였다. 아울러 기부흡

수에 관해 참고하기 위하여 표면수 내 ^{129}I (^{125}I 로 대체) 및 ^{99}Tc 농도를 주기적으로 측정하고 변화를 관찰하였다.



2. 재료 및 방법

2.1. 실험 토양

실험에 사용할 논토양을 선정하기 위해서 경주 방사성 폐기물 처분장 주변 반경 5 km 내에 분포하는 다섯 곳의 논(그림 1 및 표 1 참조)에서 2007년 3월에 논토양을 채취하여 물리·화학적 특성을 분석하였다. 각 논에서의 토양시료는 수 m 이상 떨어진 세 지점에서 상부 20 cm 깊이의 토양을 직경 8 cm, 높이 20 cm의 원통형 토양채취기를 이용하여 채취한 후 합하여 단일시료로 취하였다.

위와 같이 채취한 토양 시료를 실내에서 풍건한 후 흙덩이를 부수고 2 mm 체로 쳐서 큰 알맹이를 걸러내고 토양의 물리·화학적 특성을 분석한 결과는 표 2와 같다. 분석은 서울시립대학교 산업기술연구소에 의뢰하여 수행하였다. 한 시료에 대해서 3 반복으로 분석이 이루어졌다.

토양의 pH는 조사지점 간에 거의 차이 없이 5.5 내외로서 산성이었다. 유기물 함량은 2.0~4.5%로 그리 높지 않은 편이었다. 양이온치환용량은 10~20 cmol kg⁻¹의 범위였고 토양의 조성은 대체로 양토로서 점토 함량이 10~30% 정도에 불과하였다. 이상으로 경주 방사성 폐기물 처분장 부근의 논토양은 우리나라의 평균적인 논토양과 큰 차이 없이 주로 화강암의 풍화토적인 성격을 나타내고 있는 것으로 판단된다 [13].

상기 다섯 가지 토양 중에서 처분장과의 지리적 관계 및 토양의 특성 등을 고려하여 대본리(GJ-1), 구길리(GJ-2), 읍천리(GJ-3) 논 토양을 실험토양으로 선정하였다. 이 세 곳의 논에 대해서 실험에 필요한 양의 토양을 확보하기 위해서 4월 중순에 그림 1과 같이 중장비를 이용하여 상부 약 20 cm 깊이의 흙을 한 곳 당 400 kg 정도 채취하고 대전의 한국원자력연구원 실험온실로 운반하였다. 운반된 토양은 온실 내에 넓게 펼쳐서 자갈과 작물유체 등을 제거하고 1 주일 이상 건조시켰다.

이상은 방사성 iodine (¹²⁹I) 실험에 대해 기술한 것이다. ⁹⁹Tc 실험을 위해서는 2008 년 위 세 곳에 상라리(GJ-4) 논을 추가하여 실험 토양을 다시 채취하였다. 이 토양들의 물리·화학적 특성은 표 3과 같다. 대체로 동일한 논에서 전년도에 채취한 토양의 특성(표 1)과 큰 차이가 없었다. 경작지 토양의 물리·화학적 특성은 시비, 유기물 및 토양 개량제(석회 등) 살포, 객토 등과 같은 영농 행위와 작물 재배에 따른 무기양분의 감소 및 지하용탈 등의 요인에 의해 동일 장소에서도 매년 달라질 수 있을 것이다.



그림 1. 경주 방폐장 주변 조사 대상 논 위치 및 전경

표 1. 경주 방폐장 주변 농토양 채취 지점의 주소 및 좌표

논 이름	주소	좌표
GJ-1	경북 경주시 감포읍 대본리	E 129° 29' 34", N 35° 45' 04"
GJ-2	경북 경주시 양북면 구길리	E 129° 27' 46", N 35° 44' 41"
GJ-3	경북 경주시 양남면 읍천리	E 129° 28' 29", N 35° 41' 35"
GJ-4	경북 경주시 양남면 상라리	E 129° 26' 59", N 35° 43' 31"
GJ-5	경북 경주시 양남면 나산리	E 129° 27' 49", N 35° 42' 19"

표 2. 경주 방폐장 주변 논 토양의 물리·화학적 특성 ('07 년, ¹²⁹I 실험)

토양 번호	pH (1:5)	유기물 (%)	CEC ^a	치환성양이온 (cmol kg ⁻¹)			모래 (%)	미사 (%)	점토 (%)	토성 ^b
				Ca	K	Mg				
GJ-1-I	5.5	4.4	8.2	6.1	0.41	2.2	46.2	43.6	10.2	L
GJ-2-I	5.4	3.3	16.3	14.9	0.79	5.0	10.6	69.5	19.9	SiL
GJ-3-I	5.6	2.4	12.8	6.2	0.63	3.7	21.5	50.3	28.2	CL
GJ-4-I	5.4	1.9	22.2	22.2	0.62	6.5	28.1	45.1	26.7	L
GJ-5-I	5.5	2.7	10.7	10.7	0.44	2.5	44.3	43.8	11.9	L

^a 양이온치환용량 (cmol kg⁻¹)

^b L (loam: 양토), SiL (silt loam: 미사질 양토), CL (clay loam: 식양토)

주) GJ-4-I와 GJ-5-I는 실험에서 제외.

표 3. 경주 방폐장 주변 논 토양의 물리·화학적 특성 ('08 년, ⁹⁹Tc 실험)

토양 번호	pH (1:5)	유기물 (%)	CEC ^a	치환성양이온 (cmol kg ⁻¹)			모래 (%)	미사 (%)	점토 (%)	토성 ^b
				Ca	K	Mg				
GJ-1-Tc	5.5	3.7	14.5	4.5	0.29	1.9	41.3	47.7	11.0	L
GJ-2-Tc	5.1	4.2	27.7	10.9	0.48	3.9	12.8	71.8	15.4	SiL
GJ-3-Tc	5.6	3.0	17.0	6.1	0.49	3.2	22.7	53.6	23.7	L
GJ-4-Tc	5.1	4.9	43.5	20.4	0.94	7.9	34.3	41.5	24.2	L

^a 양이온치환용량 (cmol kg⁻¹)

^b L (loam: 양토), SiL (silt loam: 미사질 양토), CL (clay loam: 식양토).

2.2. 실험작물 육성

벼는 실험온실 내에 배치된 철제 흡상자(가로 30 cm, 세로 30 cm, 높이 40 cm)에서 재배·육성되었다(그림 2 참조). 이를 위해 흡상자의 바닥에 4 cm 깊이로 쇠석을 깔고 그 위에 촘촘한 그물망을 놓은 다음 건조 토양을 상자 당 30.4 kg씩 담고 표면수의 깊이가 수 cm 정도 되게 관개하였다. 흡상자의 최하부에 배수구를 뚫고 수도꼭지를 부착하여 필요시 배수할 수 있도록 하였다.

위와 같이 준비된 흡상자에 우리나라 장려품종인 주남벼의 모를 이식하였다. 이식일은 5월 22일이었고 재식밀도는 상자 당 16 개체로 네 곳에 각각 네 개체씩 모내기하였다.

모내기 4 일 전, 완숙퇴비와 소석회를 상자 당 각각 90 g 및 10 g씩 살포한 다음 모종삽을 이용하여 표층토와 섞어 주었다. 모내기 하루 전에는 수도용 복합비료 (N:P:K = 21%:17%:17%)를 상자당 3.5 g씩 살포한 다음 같은 방법으로 토양과 섞었다. 이 복합비료는 모내기 후 14, 78, 92 일에 상자 당 1.3 g씩 추비로서 더 공급되었다. 벼의 생육 중 필요에 따라 수 회에 걸쳐 살충제와 살균제를 작물체에 살포하였다. 벼의 출수는 모내기 후 79 일에 시작하였다.

관개는 이식 후 130 일까지 계속되었고 이식 후 55 일부터 1 주 간 물을 빼 중간 낙수를 실시하였다. 논에서 일어나는 관개수의 지하침투를 모사하기 위해서 매 주 상자 당 3.4 L의 물을 배수구를 통하여 배수하였다. 이는 우리나라의 논에서 관개기간 동안 하루에 평균 5.5 mm의 관개수가 지하로 침투한다는 보고[14]에 입각한 것이다.

이상은 ^{129}I 실험에 대한 설명이나 ^{99}Tc 실험의 경우에도 각종 날짜만 다소 다른 뿐 전반적으로 위와 같다. 이것은 아래에서도 마찬가지이다. ^{99}Tc 실험에서는 모내기가 조금 지체되어 6월 4일에 실시되었고 출수(이삭의 출현)는 모내기 후 70 일에 시작하였다.

실험은 ^{129}I 의 경우 3 반복, ^{99}Tc 의 경우 2 반복으로 수행되어 2007 년 ^{129}I 실험에는 21 개(TF_m 실험용 9 개, TF_a 실험용 9 개, 대조용 3 개)의 흙상자가 소요되었고 2008 년 ^{99}Tc 실험에는 20 개(TF_m 실험용 8 개, TF_a 실험용 8 개, 대조용 4 개)가 소요되었다.

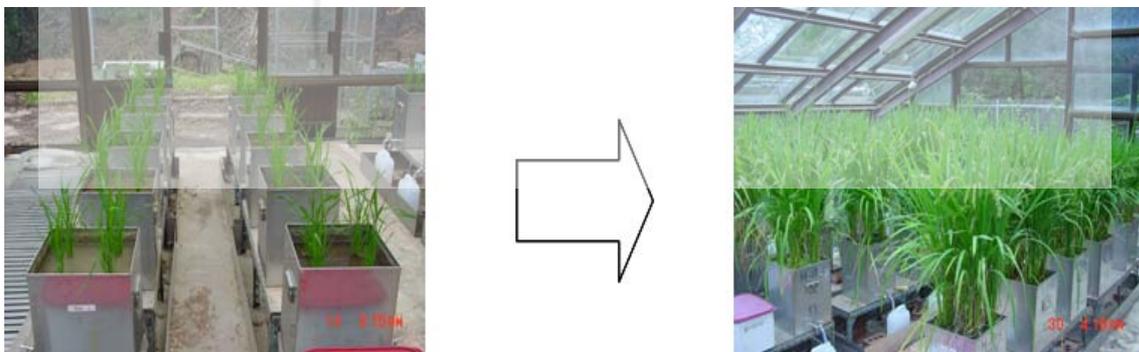


그림 2. 벼의 생육 모습 (생육 초기 및 후기)

2.3. 방사성 핵종 처리

2.3.1. TF_m 실험

모내기 27 일 전(4월 25일)에 매 상자에 대해 방사성 수용액 30 ml과 400 g의 건조토양을 반구형 혼합기로 섞어 전혼합토(pre-mix)를 제조한 다음 V 형 토양혼합기를 이용하여 흙상자의 상부 약 20 cm에 해당하는 건조토양(20 kg)과 전혼합토를 골고루 섞었다. 이렇게 조제한 오염토를 하부에 쇠석과 비오염 건조토양(10 kg)이 담겨진 흙상자에 바로 담고 9 일 후에 관개하였다. 따라서 이때부터 표면수의 오염이 시작된 것으로 본다. ⁹⁹Tc 실험에서는 모내기 26 일 전(5월 9일)에 위와 같이 흙작업을 하고 21 일 후에 관개하였다.

방사성 수용액은 ¹²⁹I의 경우 실험의 편의상 ¹²⁵I로 대체하여 제조하였고 ⁹⁹Tc의 경우에는 관심핵종을 직접 사용하여 제조하였다. 두 종류의 방사성 용액, 즉 ¹²⁵I 용액 및 ⁹⁹Tc 용액 내 핵종의 농도는 각각 143 kBq ml⁻¹ 및 250 kBq ml⁻¹이었다.

2.3.2. TF_a 실험

모내기 다음 날 TF_m 실험에서 사용했던 방사성 용액을 30.4 kg의 건조토양이 담긴 흙상자의 표면수에 상자 당 25 ml씩 처리하였다. 이 때 마이크로피펫을 사용하여 수표면 25 곳에 1 ml씩 균등하게 살포함으로써 벼의 생육 초기에 대기로부터의 침적이나 오염된 관개수의 사용에 따른 표면수의 오염을 모사하였다.

2.4. 시료 채취 및 분석

2.4.1. 작물체 시료

벼의 수확은 ¹²⁹I 실험에서는 모내기 후 146일(10월 15일), ⁹⁹Tc 실험에서는 모내기 후 132일(10월 14일)에 하였다. 지표로부터 약 10 cm 높이에서 낮으로 베어 작물체를 채취한 다음 이삭과 벧짚으로 나누어 온실에서 3 주 정도 자연 건조하였다.

건조된 벧짚은 1~2 cm 길이로 잘게 잘라 골고루 섞은 다음 ¹²⁵I 측정의 경우 그대로 계측용 용기에 담았고 ⁹⁹Tc 측정의 경우 믹서기로 갈아 분말시료를 얻었다. 낱알은 이삭으로부터 분리하여 막자사발에 담고 부드럽게 문질러서 껍질(왕겨)을 벗겨낸 다음 쌀알(현미)을 취하여 계측용기에 그대로 담거나(¹²⁵I 측정) 믹서기로 갈았다(⁹⁹Tc 측정).

^{125}I 의 농도는 HPGe detector를 이용한 감마스펙트로메트리법으로 측정하였고 ^{99}Tc 농도는 분말시료를 직경 5 cm의 planchet에 담고 전베타 계수법으로 측정하였다.

2.4.2. 표면수 시료

표면수 시료는 표면수의 오염이 시작된 이후 관개기간 전체에 걸쳐 10 회 내의 채취하였다. 제 1차 시료는 TF_m 실험의 경우 ^{129}I 에 대해서는 표면수의 오염 개시 후 12 일에, ^{99}Tc 에 대해서는 표면수의 오염 개시 후 6 일에 채취하였고 TF_a 실험의 경우에는 각각 표면수의 오염 개시 후 2 h 및 3 h 경과시 채취하였다.

흡상자 당 채취량은 ^{125}I 실험의 경우 TF_a 상자에 대한 제 1차 및 제 2차 채취에 서만 3 ml이었고 그 외에는 모두 9 ml이었으며 ^{99}Tc 실험의 경우 매회 10 ml씩 채 취하였다. 전자의 경우 흡상자 내 수표면상 세 곳으로부터 마이크로피펫으로 1 ml 또는 3 ml씩 취하여 1 반복 시료로 하였고 3 반복 시료를 합하여 단일시료를 얻었다. 후자의 경우에는 흡상자의 수표면 두 곳으로부터 5 ml씩 취하여 1 반복 시료로 하였고 2 반복 시료를 합하였다. 방사능 분석은 두 핵종 모두 작물체 시료와 동일한 방법으로 실시하였다.

2.5. 전이계수 계산

TF_m (dimensionless)과 TF_a ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)는 아래와 같이 계산되었다.

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

$$\text{TF}_a = \frac{\text{작물체 내 핵종 농도 (Bq/kg-dry)}}{\text{핵종의 토양 침적 밀도 (Bq/m}^2\text{)}}$$

위 식들에서 토양 관련 농도는 작물의 수확일 기준으로 붕괴 보정한 것을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. ^{129}I 전이계수

처분장 주변 논토양에 대하여 iodine 동위원소(^{125}I) 용액을 두 가지 방법으로 처리하고 토양-작물체 전이계수를 조사하였다. ^{125}I 는 관심 핵종인 ^{129}I 의 대용이므로 조사된 전이계수는 ^{129}I 전이계수라 칭한다.

3.1.1. TF_m 값

표 4-1은 상부 약 20 cm의 토양을 iodine 동위원소 용액과 혼합 처리한 후 관개하고 벼를 육성하여 구한 ^{129}I 의 토양-작물체 전이계수(TF_m , dimensionless)를 나타내고 있다.

세 토양에서 벼짚의 ^{129}I 전이계수는 $4.2 \times 10^{-1} \sim 6.3 \times 10^{-1}$ 의 범위로 토양 간에 큰 차이가 없었으나 대본리 토양에서 다소 낮은 편이었다. 이는 대본리 토양의 유기물 함량이 가장 높았다는 사실과 관련이 있을 것으로 보인다. 쌀알에서는 토양에 따라 $1.1 \times 10^{-3} \sim 6.4 \times 10^{-3}$ 의 범위로 벼짚에 비해 수십~수백 배 낮았고 또한 벼짚과 달리 대본리 토양에서 가장 높았다. 이로써 쌀알로의 ^{129}I 전이는 벼의 전체 생육기간보다는 일정 기간, 즉 출수 전후 및 쌀알의 발육성기 동안의 흡수에 크게 좌우되며 대본리 토양에서 이 기간 동안의 흡수가 타 토양에 비해 컸던 것으로 추정된다.

처분장 주변 논토양에 대한 쌀알과 벼짚의 ^{129}I 전이계수(TF_m)의 대표치는 각각 표 4-1에서와 같이 3.0×10^{-3} 및 5.4×10^{-1} 정도로 제안될 수 있다. 그러나 이것은 제한된 자료에 입각한 것이므로 차후 추가적인 조사가 이루어지는 대로 최신화 할 필요가 있다.

표 4-1. 논토양별 ^{129}I 의 쌀알 및 벼짚 전이계수(TF_m)

Soil	Transfer factor of ^{129}I (TF_m , dimensionless)	
	Rice seeds (dry)	Rice straws (dry)
GJ-1-I (대본리)	$6.4 \times 10^{-3} \pm 7.3 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-1} \pm 2.5 \times 10^{-2}$
GJ-2-I (구길리)	$3.4 \times 10^{-3} \pm 4.9 \times 10^{-4}$	$6.3 \times 10^{-1} \pm 3.7 \times 10^{-2}$
GJ-3-I (읍천리)	$1.1 \times 10^{-3} \pm 5.3 \times 10^{-4}$	$6.0 \times 10^{-1} \pm 1.7 \times 10^{-1}$
AM±SD	$3.6 \times 10^{-3} \pm 2.6 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-1} \pm 1.2 \times 10^{-1}$
GM/GSD	$2.9 \times 10^{-3} / 2.40$	$5.4 \times 10^{-1} / 1.26$

AM: 산술평균, SD: 표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차.

그림 3-1은 TF_m 실험에서 토양 별 표면수 내 ¹²⁹I 농도의 시간 경과에 따른 변화를 보여 주고 있다. 표면수 내 ¹²⁹I 농도는 어느 토양에서나 처음에 급히 증가한 후 실험 종료시까지 계속 감소하는 경향이였다. 최고치는 세 토양 모두 관개 후, 즉 표면수 오염 개시 후 19 일에 나타났고 최저치는 모두 맨 마지막인 관개 후 147 일에 나타났다. 이러한 농도 변화로 인하여 종료시 농도는 최고 농도에 비해 토양에 따라 220~430 배 정도 낮았다.

세 토양에서의 표면수 내 ¹²⁹I 농도는 대체로 읍천리 토양이 가장 높았고 구길리 토양이 가장 낮았다. 물 속에서 음이온으로 존재하는 방사성 iodine의 토양 내 흡착에는 유기물이 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다[15,16]. 따라서 읍천리 토양에서 표면수 내 ¹²⁹I의 농도가 가장 높은 것은 유기물 함량이 가장 낮은 것과 관련이 있을 것으로 판단된다(표 2 참조).

이상으로 지표 토양이 ¹²⁹I로 오염되어 있으면 ¹²⁹I가 표면수에 직접 침적되지 않아도 토양층으로부터 표면수로 확산·이동하여 표면수를 어느 정도 오염시킬 수 있다는 것이 확인되었다. 표면수에 녹아 있는 ¹²⁹I는 비의 기부를 통하여 작물체로 흡수될 수 있을 것으로 추정된다[7-9]. 따라서 ¹²⁹I의 TF_m 값에는 이와 같은 기부흡수의 기여분이 포함되었을 것으로 판단된다.

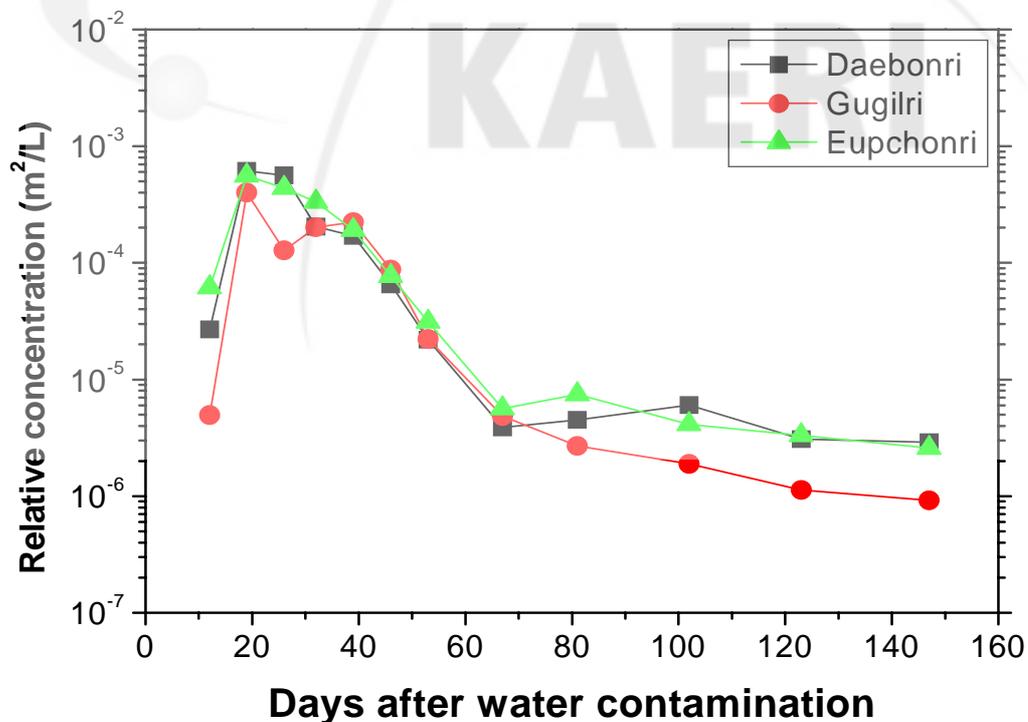


그림 3-1. TF_m 실험에서 토양별 표면수 내 ¹²⁹I 농도 변화.

3.1.2. TF_a 값

표 4-2는 모내기 다음 날 iodine 동위원소 용액을 표면수에 침적 처리하고 조사한 ¹²⁹I의 토양-작물체 전이계수(TF_a, m²kg⁻¹)를 나타내고 있다. 여기서도 부위 및 토양 간 전이계수 차이의 경향은 TF_m 실험과 대체로 유사하였으나 부위 간 차이는 10 배 정도에 불과한 반면에 토양 간 차이는 특히 쌀알에서 대본리와 읍천리 간에 30 배 정도로 TF_m 실험에 비해 훨씬 컸다. TF_a의 대표치로는 당분간 쌀알의 경우 2.0×10⁻⁴, 벳짚의 경우 3.1×10⁻³ 정도를 사용하는 것이 적절할 것으로 보인다.

TF_m과 TF_a를 비교하기 위해서는 TF_m을 TF_a와 같은 단위의 물리량으로 환산해야 한다. 이것은 TF_m에서의 작물체 내 ¹²⁵I의 농도(Bq kg⁻¹)를 단위면적당 ¹²⁵I 처리 농도(Bq m⁻²)로 나누어 줌으로써 가능하다. 이와 같이 비교하면 토양 및 부위에 따라 TF_a가 TF_m보다 대체로 수~수십 배 컸다. 그 이유는 아래와 같이 설명될 수 있다.

TF_a 실험에서는 표면수에 방사성 핵종이 직접 가해져 표면수 내 핵종의 농도가 TF_m 실험에 비해 훨씬 높아(그림 3-2 참조) 기부흡수가 크게 증가하였을 뿐만 아니라 토양층 내에서도 방사성 핵종이 주로 지표 부근에 분포함으로써 뿌리흡수도 증가하였을 것으로 추정된다. 벳 뿌리의 지하 분포밀도는 하부에 비해 지표 부근에서 높으므로[14,17] 핵종이 지표 근처에 많이 분포할수록 뿌리 표면과의 접촉이 증대되어 흡수가 증가할 가능성이 높다. 또한 TF_a 실험의 경우 TF_m 실험과 달리 작물체가 흡수를 시작하기 전에 방사성 핵종의 토양 내 숙성기간이 없었다는 점도 흡수가 증가한 한 가지 요인으로 볼 수 있다.

그림 3-2는 TF_a 실험에서 토양별 표면수 내 ¹²⁹I 농도의 시간 경과에 따른 변화를 보여 주고 있다. 여기서는 TF_m 실험과 달리 어느 토양에서나 처음에(표면수의 오염 후 2 시간 경과시) 농도가 최고였다가 이후 대체로 실험 전기에 비교적 급하게 감소한 다음 후기에는 계속 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 처음에는 침적된 핵종의 전체량이 표면수에 녹아 있다가 점점 하부로의 이동·확산, 토양 기질에의 흡착, 지하용탈 등이 진행됨에 따라 농도가 낮아진 데 따른 당연한 결과인 것으로 판단된다. 이러한 감소로 인한 농도의 변화폭은 대체로 수 천 배 정도였다. 토양 간에 농도 차이가 크지 않았으나 평균적으로 볼 때 TF_m 실험과 유사하게 구길리 토양에서 다소 낮은 편이었다.

TF_a 실험에서 표면수 내 ¹²⁹I 농도는 TF_m 실험에 비해 조사 시기에 따라 대체로 백 배 정도까지 높았다. 따라서 기부흡수의 영향은 방사성 핵종이 모내기 전에 지표층과 혼합되어 있을 경우보다는 모내기 후 표면수에 직접 침적하거나 오염된 물을 관개할 경우 그 영향이 훨씬 클 것으로 예상된다.

표 4-2. 논토양별 ^{129}I 의 쌀알 및 벚짚 전이계수(TF_a)

Soil	Transfer factor of ^{129}I ($\text{TF}_a, \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)	
	Rice seeds (dry)	Rice straws (dry)
GJ-1-I (대본리)	$7.6 \times 10^{-4} \pm 1.3 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-3} \pm 4.0 \times 10^{-4}$
GJ-2-I (구길리)	$2.1 \times 10^{-4} \pm 3.3 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-3} \pm 2.3 \times 10^{-4}$
GJ-3-I (읍천리)	$2.8 \times 10^{-5} \pm 1.2 \times 10^{-5}$	$4.4 \times 10^{-3} \pm 3.7 \times 10^{-4}$
AM±SD	$3.3 \times 10^{-4} \pm 3.8 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-3} \pm 1.0 \times 10^{-3}$
GM/GSD	$1.7 \times 10^{-4} / 5.25$	$3.1 \times 10^{-3} / 1.34$

AM: 산술평균, SD: 표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차.

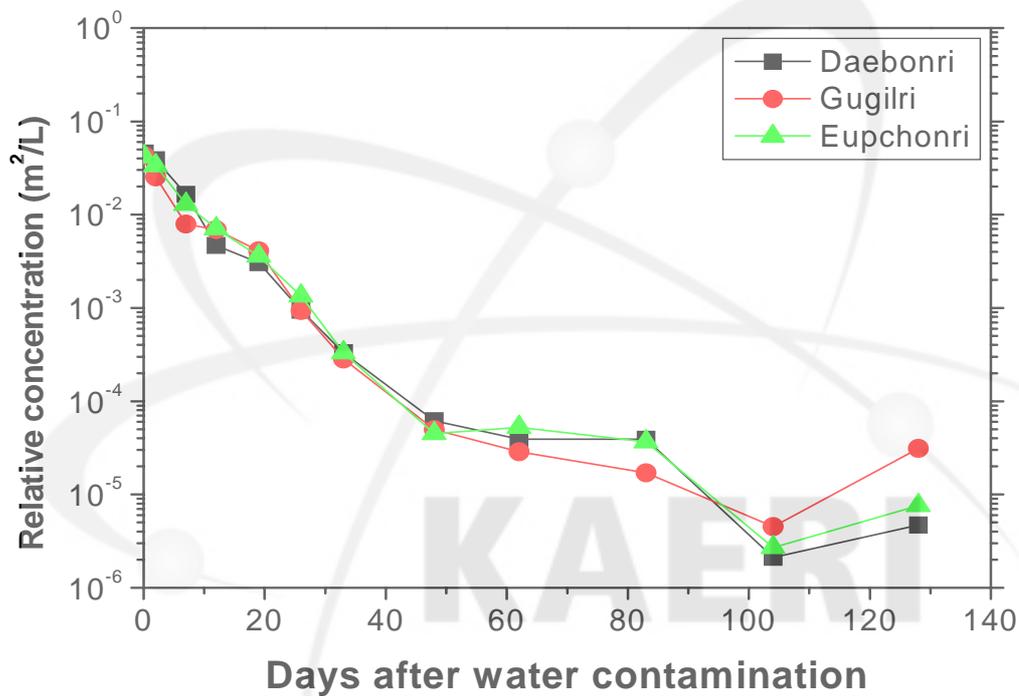


그림 3-2. TF_a 실험에서 토양별 표면수 내 ^{129}I 농도 변화.

3.2. ^{99}Tc 전이계수

처분장 주변 논토양에 대하여 Tc 동위원소(^{99}Tc) 용액을 ^{125}I 와 똑같은 두 가지 방법으로 처리하고 TF_m 값과 TF_a 값을 측정하였다.

3.2.1. TF_m 값

깊이 약 20 cm의 표층토를 ^{99}Tc 용액과 혼합 처리한 후 관개하고 벼를 재배하여 구한 ^{99}Tc 의 토양-작물체 전이계수(TF_m , dimensionless)는 표 5-1과 같다.

표 5-1. 논토양별 ^{99}Tc 의 쌀알 및 벧짚 전이계수(TF_m)

Soil	Transfer factor of ^{99}Tc (TF_m , dimensionless)	
	Rice seeds (dry)	Rice straws (dry)
GJ-1-Tc (대본리)	$1.3 \times 10^{-3} \pm 4.3 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^0 \pm 2.2 \times 10^{-1}$
GJ-2-Tc (구길리)	$1.1 \times 10^{-3} \pm 6.8 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^0 \pm 9.5 \times 10^{-2}$
GJ-3-Tc (읍천리)	$2.3 \times 10^{-4} \pm 4.4 \times 10^{-5}$	$5.3 \times 10^{-1} \pm 9.7 \times 10^{-2}$
GJ-4-Tc (상라리)	$2.6 \times 10^{-4} \pm 4.1 \times 10^{-5}$	$6.6 \times 10^{-1} \pm 2.5 \times 10^{-1}$
AM±SD	$7.3 \times 10^{-4} \pm 5.7 \times 10^{-4}$	$8.8 \times 10^{-1} \pm 3.6 \times 10^{-1}$
GM/GSD	$5.4 \times 10^{-4} / 2.54$	$8.3 \times 10^{-1} / 1.52$

AM: 산술평균, SD: 표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차.

네 토양에서 벧짚의 TF_m 값은 $5.3 \times 10^{-1} \sim 1.3 \times 10^0$ 의 범위로 대본리와 구길리 토양이 읍천리와 상라리 토양에 비해 두 배 정도 높았다. 핵종의 전이계수는 토양 용해도가 높을수록 커진다. 토양 내 ^{99}Tc 의 용해도는 일반적으로 유기물과 점토 함량은 낮을수록, 그리고 논과 같은 환원조건에서는 pH가 낮을수록 증가하는 것으로 알려져 있다[18-21]. 토양 간에 ^{99}Tc 의 전이계수 값이 다른 것은 이러한 요인들이 복합적으로 작용한 결과인 것으로 볼 수 있다.

쌀알에 대한 ^{99}Tc 의 TF_m 값은 토양에 따라 $2.3 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ 의 범위로 벧짚에 비해 대체로 천 배 정도 작았다. 이러한 종실과 경엽부 간 차이는 일반적인 경향인 것으로 보고되어 있다[18,21-23]. 토양 간에는 벧짚과 유사하게 대본리와 구길리 토양이 읍천리나 상라리 토양보다 컸다. 하지만 그 차이는 5 배 내외로 벧짚보다 현저하였다. 이것은 작물체로 흡수된 ^{99}Tc 의 쌀알 전류율이 두 그룹의 토양 간에 차이가 있었다는 것을 의미한다. 벼의 뿌리나 기부를 통하여 흡수된 물질의 쌀알로의 전류는 흡수 시기 및 부위에 따라 크게 다를 수 있을 것이다. 따라서 토양에 따라 흡수 시기별 및 부위별 흡수량의 배분이 달랐기 때문에 ^{99}Tc 의 쌀알 전류율이 달라진 것으로 추정된다. 이에 대한 명확한 결론은 세밀한 기초 연구가 있어야 얻을 수 있을 것이다.

본 실험에서 구한 ^{99}Tc 의 쌀알 TF_m 값은 IAEA[2]가 곡류에 대한 기대치로 보고한 7.3×10^{-1} 에 비해 수백~수천 배 낮다. 이것은 IAEA 값은 주로 발작물에 대한 것이기 때문이다. 밭에서는 Tc가 산화형으로 존재하기 때문에 환원형으로 존재하는 논에서 보다 전이계수가 훨씬 높은 것으로 알려져 있다[20-24].

처분장 주변 논토양에 대한 쌀알과 벧짚의 ^{99}Tc 전이계수(TF_m)의 대표치로는 각각 네 토양에 대한 기하 평균인 5.4×10^{-4} 및 8.3×10^{-1} 정도로 제안될 수 있다. 그러나 이

것은 제한된 자료에 입각한 것이므로 차후 추가적인 조사가 이루어지는 대로 최신화 할 필요가 있다.

그림 4-1은 TF_m 실험에서 토양 별 표면수 내 ⁹⁹Tc 농도의 시간 경과에 따른 변화를 보여 주고 있다. 표면수 내 ⁹⁹Tc의 농도는 네 토양에서 모두 시간 경과에 따라 감소하는 경향을 보였다. 감소 속도는 초기에 매우 빨랐다가 이후 점점 느려져서 대체로 약 두 달 지나서부터는 큰 변화가 없었다. 이것은 관개 전에 이동성이 높은 산화형으로 존재하던 ⁹⁹Tc 중 일부가 담수관개 직후 토양층으로부터 표면수로 급히 이동하였으나 계속되는 관개로 인하여 환원상태가 진행됨에 따라 ⁹⁹Tc의 이동성이 점점 감소하고 불용성의 침전 형태로 변하였기 때문인 것으로 추정된다[19,20,24].

토양별로 보면 대본리, 구길리, 읍천리 토양의 경우 처음 10일 간 급격히 감소하는 양상을 나타내었으나 상라리 토양의 경우 한 달 여에 걸쳐 비교적 서서히 감소하는 모습을 보였다. 조사기간 동안 표면수 내 ⁹⁹Tc의 농도는 대체로 대본리 ≥ 구길리 > 상라리 ≥ 읍천리의 순으로 높았다. 위와 같은 토양 간 차이는 토양 간 유기물 및 점토 함량, pH의 차이 등이 복합적으로 작용한 결과인 것으로 판단된다.

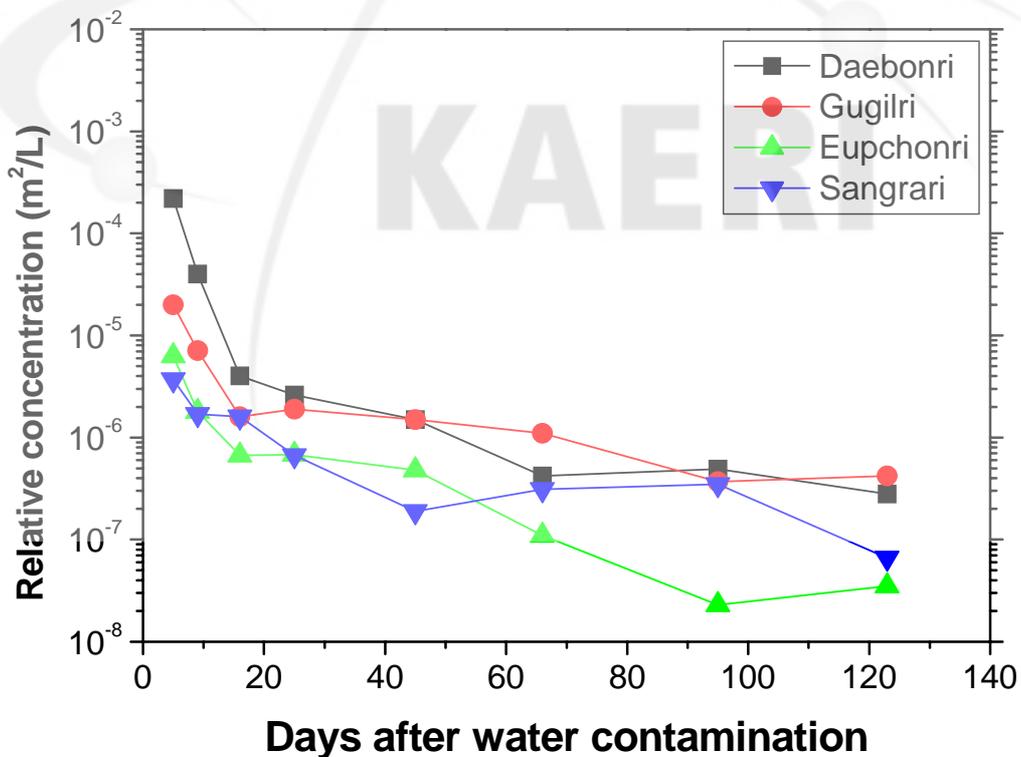


그림 4-1. TF_m 실험에서 토양별 표면수 내 ⁹⁹Tc 농도 변화.

3.2.2. TF_a 값

모내기 다음 날 ⁹⁹Tc 용액을 표면수에 침적 처리하고 조사한 방사성 ⁹⁹Tc의 전이계수(TF_a, m²kg⁻¹)는 표 5-2와 같다. 벧짚과 쌀알의 TF_a 값은 토양에 따라 각각 6.9×10⁻³~4.1×10⁻² 및 3.2×10⁻⁶~8.2×10⁻⁵의 범위로 역시 벧짚이 쌀알보다 대체로 천 배 정도 컸다. 토양 간에 TF_a 값은 TF_m 값과는 반대로 읍천리와 상라리 토양에서 대분리나 구길리 토양보다 몇 배 높았다.

TF_a 실험에서는 표면수가 직접 오염됨으로써 ¹²⁹I 실험에서와 같이 표면수 내 ⁹⁹Tc의 농도가 TF_m의 경우에 비해 훨씬 높았으므로(그림 4-1 및 4-2 참조) 작물체 기부를 통한 흡수가 전이계수에 크게 기여했을 가능성이 높다. 이런 것으로 볼 때 벧의 기부를 통한 ⁹⁹Tc의 흡수는 뿌리흡수와는 상반되는 조건 하에서 촉진되는 것이 아닌가 추정해 볼 수 있다. 이에 대해서는 차후 심도 깊은 작물생리학적 실험이 수행되어야 명확한 설명이 가능할 것이다.

TF_m 값과 TF_a 값을 비교하기 위해서는 두 가지 값을 같은 단위의 물리량으로 표시해야 한다. 이것은 ¹²⁹I 실험에서처럼 TF_m에서의 작물체 내 ⁹⁹Tc의 농도(Bq kg⁻¹)를 단위면적당 ⁹⁹Tc 농도(Bq m⁻²)로 나누어 줌으로써 가능하다. 이와 같이 비교하면 토양 및 부위에 따라 TF_a가 TF_m보다 대체로 수~수 십 배 높았다. 이것은 위에서 언급한 바와 같이 주로 표면수 직접오염 시 벧의 기부를 통한 ⁹⁹Tc의 흡수가 크게 증가하였기 때문인 것으로 추정된다. TF_a의 대표치로는 새로운 자료가 생산될 때까지 쌀알의 경우 2.4×10⁻⁵, 벧짚의 경우 1.8×10⁻² 정도가 적당할 것으로 보인다.

그림 4-2는 TF_a 실험에서 토양별로 표면수 내 ⁹⁹Tc의 농도 변화를 조사한 것이다. 네 토양에서 모두 처음부터 농도가 최고였다가 약 열흘 동안 매우 급하게 감소하였다. 이후에는 계속 매우 느리게 감소하는 경향이었다가 두 달 정도 경과시부서는

표 5-2. 논토양별 ⁹⁹Tc의 쌀알 및 벧짚 전이계수(TF_a)

Soil	Transfer factor of ⁹⁹ Tc (TF _a , m ² kg ⁻¹)	
	Rice seeds (dry)	Rice straws (dry)
GJ-1-Tc (대분리)	3.2×10 ⁻⁶ ± 1.9×10 ⁻⁷	6.9×10 ⁻³ ± 2.6×10 ⁻³
GJ-2-Tc (구길리)	1.6×10 ⁻⁵ ± 4.6×10 ⁻⁶	9.6×10 ⁻³ ± 1.8×10 ⁻³
GJ-3-Tc (읍천리)	7.5×10 ⁻⁵ ± 3.2×10 ⁻⁵	3.7×10 ⁻² ± 2.0×10 ⁻²
GJ-4-Tc (상라리)	8.2×10 ⁻⁵ ± 1.1×10 ⁻⁵	4.1×10 ⁻² ± 1.2×10 ⁻³
AM±SD	4.4×10 ⁻⁵ ± 4.0×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁻² ± 1.8×10 ⁻²
GM/GSD	2.4×10 ⁻⁵ / 4.59	1.8×10 ⁻² / 2.49

AM: 산술평균, SD: 표준편차, GM: 기하평균, GSD: 기하표준편차.

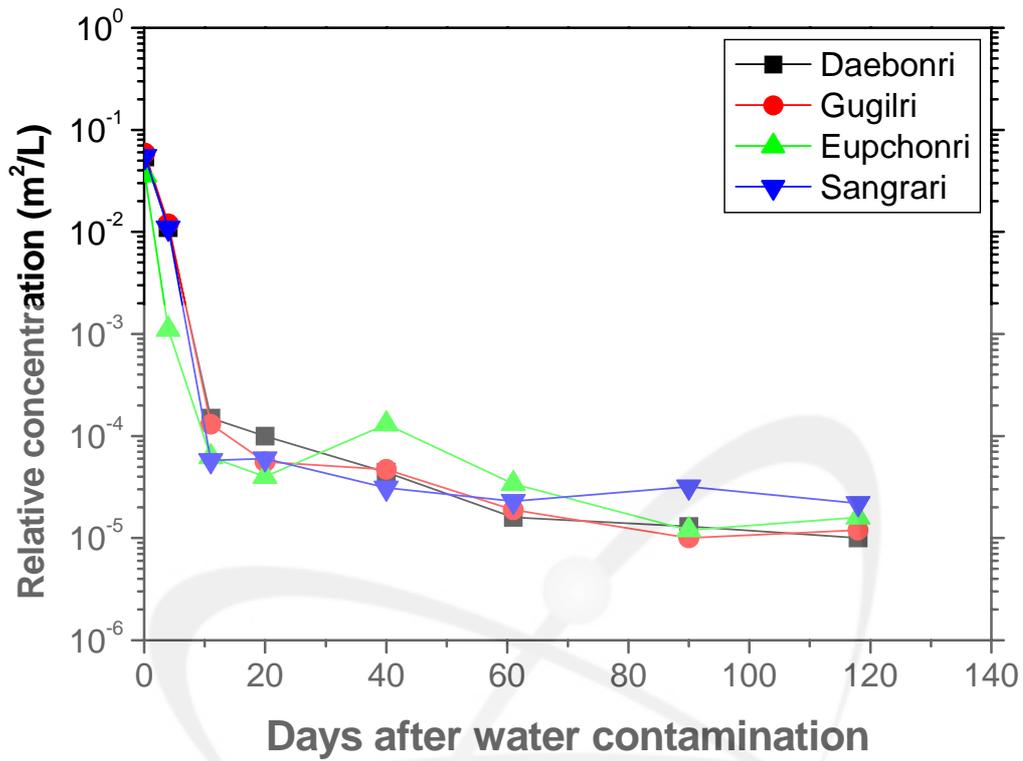


그림 4-2. TF_a 실험에서 토양별 표면수 내 ⁹⁹Tc 농도 변화.

변화가 거의 없었다. 토양 간 ⁹⁹Tc 농도의 차이는 대체로 최고 수 배에 불과하여 TF_m 실험에서보다 작았다. 하지만 표면수 내 ⁹⁹Tc 농도는 TF_m 실험에 비해 토양 및 조사 시기에 따라 대체로 수십~수천 배 정도 높았다.

4. 결 론

경주 중저준위 방사성 폐기물 처분장 부근 농토양에 대하여 비에 의한 방사성 iodine과 technetium의 흡수 실험을 수행하고 두 종류의 토양-작물체 전이계수, 즉 TF_m (dimensionless)과 TF_a ($m^2 kg^{-1}$) 값을 측정하였다. TF_m 값은 시설의 정상가동 시 주민의 연간 내부피폭선량 평가에 이용될 수 있고 TF_a 값은 비의 생육 초기 다량의 방사성 핵종이 일시적으로 대기로부터 논의 표면수에 침적하거나 관개수를 통하여 유입될 경우에 이용될 수 있다. TF_m 실험과 TF_a 실험 모두 표면수의 방사성 오염이 확인됨으로써 비의 경우 전이계수가 표면수로부터의 기부흡수에 의한 기여분을 포함할 것으로 추정되었다.

TF_m 값과 TF_a 값의 조사 결과에 입각하여 ^{129}I 와 ^{99}Tc 의 토양-비 전이계수에 대한 지역 대표치를 제안하였다. 본 대표치는 소수의 토양에 의거한 것이므로 지역의 특성을 충분히 반영한 것으로 보기 어렵다. 신뢰도가 보다 높은 영향평가를 위해서는 차후 추가적인 조사가 이루어지는 대로 대표치를 수정·보완하는 작업이 계속되어야 할 것이다. 특히 TF_a 값은 서론에서 언급한 바와 같이 비의 생육 중 핵종의 침적시기에 따라 크게 달라질 수 있으므로 앞으로 다양한 침적시기에 대한 실험이 수행될 필요가 있다.

KAERI

참고문헌

- [1] Y. C. Ng, C. S. Colsher and S. E. Thompson, Soil-to-Plant Concentration Factors for Radiological Assessments, Report NUREG/CR-2975, UCID-19463, Lawrence Livermore Lab., 1982.
- [2] IAEA, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments, Technical Report Series No. 364, 1994.
- [3] 최용호, 임광목, 황원태, 최근식, 최희주, 이창우, 가동중 원자력 시설 주변 주민의 내부피폭선량 계산을 위한 농산물 내 핵종 농도 평가법 개선, 대한방사선방어학회지 제 29권, 73-90, 2004.
- [4] 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. Environ. Radioactivity 39(2), 183-198, 1998.
- [5] Choi, Y.H., Lim, K.M., Jun, I., Park, D.W., Keum, D.K., Lee, C.W., 2009. Root uptake of radionuclides following their acute soil depositions during the growth of selected food crops. Journal of Environmental Radioactivity 100, 746-751.
- [6] Choi, Y.H., Lim, K.M., Park, H.G., Park, D.W., Kang, H.S., Lee, H.S., 2005b. Transfer of ^{137}Cs to rice plants from various paddy soils contaminated under flooded conditions at different growth stages. Journal of Environmental Radioactivity 80, 45-58.
- [7] D'souza, T.J., Mistry, K.B., 1980. Absorption of gamma-emitting fission products and activation products by rice under flooded and unflooded conditions from two tropical soils. Plant and Soil 55, 189-198.
- [8] Myttenaere, C., Bourdeau, P., Masset, M., 1969. Relative importance of soil and water in the indirect contamination of flooded rice with radiocesium. Health Physics 16, 701-707.
- [9] Tsumura, A., Komamura, M., Kobayashi, H., 1984. Behavior of radioactive Sr and Cs in soils and soil-plant system, in: Report of National Institute of Agricultural Science - B. No 36, 57-113 (in Japanese).
- [10] Choi, Y.H., Kim, K.C., Lee, C.W., Lee, K.S., Lee, J.H., Pak, C.K., Cho, Y.W., 1991. Soil-to-plant transfer coefficients of Mn-54, Co-60, Zn-65 and Cs-137

- for rice, soybean and vegetables. Journal of Korean Association for Radiation Protection 16, 55-65 (in Korean).
- [11] Choi, Y.H., Jo, J.S., Lee, C.W., Hong, K.H., Lee, J.H., 1995. Root uptake of ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr and ^{137}Cs deposited at different times during the growing season of rice. Journal of Korean Association for Radiation Protection 20, 255-263 (in Korean).
- [12] Choi, Y.H., Kang, H.S., Jun, I., Keum, D.K., Park, H.G., Choi, G.S., Lee, H.S., Lee, C.W., 2007. Transfer of ^{90}Sr to rice plants after its acute deposition onto flooded paddy soils, Journal of Environmental Radioactivity 93, 157-169.
- [13] Cho, S.J., Park, C.S., Uhm, D.I., 1997. Soil Science, Hyangmoon press, Seoul (in Korean).
- [14] Lee, E.W., 1996. Rice Culture. Hyangmoon Press, Seoul (in Korean).
- [15] Sheppard, S.C., Interpolation of solid/liquid partition coefficients, K_d , for iodine in soils, Journal of Environmental Radioactivity 70, 21-27, 2003.
- [16] Yamaguchi, N., Nakano, M., Takamatsu, R., Tanida, H., Inorganic iodine incorporation into soil organic matter: Journal of Environmental Radioactivity, in press, 2009.
- [17] Yoshida, S., 1981. Fundamentals of Rice Crop Science. International Rice Research Institute.
- [18] Bell, J.N., Minski, M.J., Grogan, H.A., Plant uptake of radionuclides, Soil use and Management 4, 76-84, 1988.
- [19] Sheppard, S.C., Sheppard, M.I., Evenden, W.G., A novel method used to examine variation in technetium sorption among 34 soils, aerated and anoxic, Journal of Environmental Radioactivity 11, 215-233, 1990.
- [20] Tagami, K., Uchida, S., Microbial role immobilization of technetium in soil under waterlogged conditions, Chemosphere 33, 217-225, 1996.
- [21] Bennett, R., Willey, N., Soil availability, plant uptake and soil to plant transfer of Tc-99—a review, Journal of Environmental Radioactivity 65, 215-233, 2003.
- [22] Yanagisawa, K., Muramatsu, Y., Transfer of technetium from soil to paddy and upland rice, Journal of Radiation Research 36, 171-178, 1995.

- [23] Uchida, S., Tagami, K., Shang, Z.R., Choi, Y.H., Uptake of radionuclides and stable elements from paddy soil to rice: a review, *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 739-745, 2009.
- [24] Ashworth, D.J., Shaw, G., Soil migration and plant uptake of technetium from a fluctuating water table, *Journal of Environmental Radioactivity* 81, 155-171, 2005.



서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-3920/2009					
제목 / 부제					
방폐장 주변 논에 대한 장반감기 핵종의 토양-벼 전이계수					
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	최용호 (원자력환경안전연구부)				
연구자 및 부서명	임광목, 전인, 박두원, 금동권 (원자력환경안전연구부)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2009. 11
페이지	20 p.	도표	있음(O), 없음()	크기	Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(O), 대외비(), ___ 급비밀		보고서종류	TR	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)					
<p>경주 방폐장 주변 논에 대해 ^{129}I와 ^{99}Tc의 토양-벼 전이계수를 동위원소 추적자를 이용한 온실실험을 통하여 조사하였다. 조사된 전이계수는 두 가지로서 하나는 토양중 핵종 농도(Bq kg^{-1})에 대한 작물체내 농도($\text{Bq kg}^{-1}\text{-dry}$)의 비($\text{TF}_m$, dimensionless)로 나타났고 다른 하나는 표면침적 밀도(Bq m^{-2})에 대한 작물체내 농도($\text{Bq kg}^{-1}\text{-dry}$)의 비($\text{TF}_a$, $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)로 나타내었다. 전이계수 값은 핵종, 토양 및 부위(쌀알과 벗짚) 간에 상당한 차이가 있었다. 토양 간 차이는 유기물 함량이 중요한 요인인 것으로 판단되었다. 표면수 내 핵종의 농도는 TF_a 실험에서 TF_m 실험에 비해 핵종 및 조사시기에 따라 수천 배까지 높았다. 조사된 전이계수는 핵종의 뿌리흡수뿐만 아니라 표면수로부터의 기부흡수에 의한 기여분을 포함하는 것으로 추정되었다. 본 실험 결과에 입각하여 전이계수의 지역 대표치가 제안되었다. 차후 추가적인 조사를 수행하여 보다 대표성이 높은 값으로 갱신해 나갈 필요가 있다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)					
방폐장, 경주, 논, 토양, 벼, ^{129}I , ^{99}Tc , 전이계수, 표면수					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-3920/2009			
Title / Subtitle			
Soil-to-rice transfer factors of long-lived radionuclides for paddy fields around the Radioactive Waste Disposal Facilities			
Project Manager and Department (or Main Author)		Yong-Ho Choi, Nuclear Environmental Safety Research Division	
Researcher and Department		Kwang-Muk Lim, In Jun, Doo-won Park, Dong-Kwon Keum	
(Nuclear Environmental Research Division)			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI
			Publication Date
			Nov.,2009
Page	20 p.	Ill. & Tab.	Yes(O), No ()
			Size
			Cm.
Note			
Classified	Open(O), Restricted(), ___ Class Document	Report Type	Technical Report
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract			
<p>For paddy fields around the Gyeongju RWD Facilities, soil-to-rice transfer factors of ^{129}I and ^{99}Tc were investigated through greenhouse experiments using radiotracers. Two different kinds of transfer factor were investigated. One was determined as the ratio (TF_m, dimensionless) of the plant concentration ($\text{Bq kg}^{-1}\text{-dry}$) to the soil concentration (Bq kg^{-1}) and the other was determined as the ratio (TF_a, $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) of the plant concentration ($\text{Bq kg}^{-1}\text{-dry}$) to the surface-deposition density (Bq m^{-2}). There were considerable differences in the values of transfer factors between the radionuclides, among the soils and between the plant parts. The organic matter content in soil was considered to be an important factor for the differences among the soils. In the surface water, radionuclide concentrations were higher for the TF_a experiment than for the TF_m experiment by a factor of up to thousands depending on the radionuclide species and the time of measurement. It is likely that the transfer factor values include not only the contribution by root uptake but also that by plant-base uptake from the surface water. On the basis of the present results, the representative values of the transfer factors for the Gyeongju site were proposed. It is necessary to keep on updating the values for a higher representativeness with respect of the additional data which should be acquired from future investigations.</p>			
Subject Keywords: RWD facilities, Gyeongju, paddy field, soil, rice, ^{129}I , ^{99}Tc , transfer factor, surface water			