

Annual Transfer of ^{90}Sr to Rice from Paddy Soils Collected around Yonggwang and Ulchin Nuclear Power Plants

Kwang-Muk Lim · Yong-Ho Choi · Hyo-Guk Park ·
Hee-Suk Kang · Heui-Joo Choi and Han-Soo Lee
Korea Atomic Energy Research Institute

영광 및 울진 원전 주변 논 토양으로부터 벼로의 년차별 ^{90}Sr 전이

임광묵 · 최용호 · 박효국 · 강희석 · 최희주 · 이한수
한국원자력연구소

(2003년 3월 27일 접수, 2003년 11월 13일 채택)

Abstract - Soil blocks were taken into culture boxes from 12 paddy fields within 5 km radii of Yonggwang and Ulchin NPPs and ^{90}Sr was applied to the surface water at a pre-transplanting stage and 1~2 days before the start of heading. Following the pre-transplanting application, transfer factors were investigated for 2~4 years. In the year of application, transfer factors ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}\text{-dry}$) of ^{90}Sr applied before transplanting, showing no regionally distinguishable trend, varied with soils by a factor of about 2 with averages of 2.6×10^{-4} for hulled seeds and 1.3×10^{-2} for straw. Transfer factors of ^{90}Sr applied shortly before heading were about 2 times greater than those applied before transplanting. Transfer factors tended to decrease with increasing soil pH and exchangeable Ca. Generic values of ^{90}Sr transfer factors in the year of deposition were proposed for the Korean paddy fields. In the second year compared with the first year, the transfer factor decreased more in Ulchin soils, which were on the whole higher in sand content, than in Yonggwang soils. For Yonggwang soils as a whole, the annual decrease in transfer factor was well described by an exponential equation with a half-life of about 2.2 years.

Key words : Yonggwang, Ulchin, paddy soil, ^{90}Sr , rice, transfer factor, annual decrease

요약 - 영광 및 울진 원전 반경 5 km 내 12 곳의 논토양 블록을 재배상자에 채취하여 벼의 이식 전과 출수 시작 1~2 일 전에 ^{90}Sr 을 담수의 표면에 처리하였다. 이식 전 처리에 있어서는 전이계수를 2~4 년 간 조사하였다. 이식전 처리시 당년도 ^{90}Sr 의 전이계수($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}\text{-dry plant}$)는 지역 간에 이렇다할 차이없이 토양에 따라 2 배 정도의 변이를 보였고 평균은 쌀알의 경우 2.6×10^{-4} , 벃짚의 경우 1.3×10^{-2} 였다. 출수 전 처리시 전이계수는 이식전 처리에 비해 대체로 2 배 정도 높았다. 토양의 pH와 치환성 Ca 함량이 높을수록 ^{90}Sr 전이계수가 감소하는 경향이었다. 우리나라 논에 대하여 침적 당년도 ^{90}Sr 전이계수의 대표치가 제안되었다. 처리 1차 년도에 대한 2 차 년도 전이계수의 감소 정도는 대체로 모래함량이 높은 울진 토양에서 영광 토양보다 높았다. 영광 토양 전체로 볼 때 년차에 따른 전이계수의 감소는 반감기가 2.2년 정도의 지수함수로 묘사될 수 있었다.

중심어 : 영광, 울진, 논토양, ^{90}Sr , 벼, 전이계수, 년차 감소

서 론

대기 중으로 방출된 방사성 핵종은 작물체 지상부에 침적하는 직접오염경로와 지표면 침적후 뿌리에 의해 흡수되는 간접오염경로를 따라 작물체에 전이되고 농산물의 소비를 통하여 인체에까지 도달하게 된다. 이러한 직접오염경로와 간접오염경로의 상대적 중요도는 핵종 및 작물의 종류, 침적 시기 등에 따라 달라진다[1,2].

여러 가지 방사성 핵종 중에서 방사성 Sr은 토양-작물체 전이계수가 가장 높은 핵종에 속하므로 간접오염경로의 중요도가 통상적으로 타 핵종에 비해 높다[2]. 한편, 농경지에 침적된 방사성 핵종은 물리적 붕괴나 지하용탈 등에 의해 근권에서 사라질 때까지 장기간에 걸쳐 작물체에 흡수된다. 따라서 간접오염경로에 대해서는 장기간의 영향을 평가해야 하므로 다년간의 핵종 전이 자료가 요구된다. 반감기가 28 년으로 비교적 긴 ^{90}Sr 은 이러한 점에서도 매우 중요하게 취급될 필요가 있다.

뿌리흡수를 통한 작물체내 방사성 핵종의 농도는 일반적으로 일정 깊이의 토양 단위무게당 핵종 농도에 대한 작물체 단위무게당 핵종 농도의 비로 정의되는 토양-작물체 전이계수(TF_{mix})로 평가하고 있다[1,3,4]. 이것은 작물을 심기 전에 흙갈이를 하여 방사성 핵종과 토양이 일정 깊이로 섞여 있는 경우에 적합한 것으로서 작물의 생육 중에 방사성 핵종이 침적한 경우와 같이 방사성 핵종이 지표 부근에 머물러 있을 때에는 불합리하다[5,6]. 이 때에는 최 등[5,6]이 제안한 대로 작물의 생육중 지표면 침적량 기준의 전이계수(TF_{area} , $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)를 사용하는 것이 합리적이다. 또한 TF_{area} 는 핵종의 지하 농도 분포와 관계없이 초기 지표면 침적량 기준으로 구할 수 있으므로 생육전 침적시나 장기적인 평가에도 초기 침적량만 알면 편리하게 적용할 수 있다.

벼는 주로 아시아권에서 재배되는 작물이기 때문에 우리나라, 일본, 중국, 인도 등 아시아 국가를 중심으로 방사성 핵종의 흡수실험이 수행되어 왔다. 우리나라에서 벼에 대한 방사성 Sr의 TF_{mix} 에 관련된 실험들은[7,8] 몇 가지 토양에 대해서 수행되었으나 TF_{area} 의 경우에는 양질사토 한 가지 토양에 대한 것[9]이 전부이다. 토양-작물체 전이계수는 토양에 따라 차이가 크므로[10] 여러 가지 토양에 대해서 조사할 필요가 있다.

본 연구에서는 영광 및 울진 원자력발전소 주변 12 곳의 논토양을 재배상자에 채취하여 한국

원자력연구소 내 실험온실로 운반한 후 벼의 이식 전과 생육중에 ^{90}Sr 을 토양에 처리하고 전이계수(TF_{area})를 측정하였다. 이식전 처리의 경우 2~4 년 간 전이계수를 조사하여 년차별 변화를 관찰하였다. 한편, 토양의 물리·화학적 특성이 전이계수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전이계수와 토양 특성간의 상관관계를 조사하였다.

재료 및 방법

토양채취 및 준비

영광 및 울진 원전 주변 반경 5 km 내에 분포하는 12 곳의 논(표 1)에서 가로 30 cm, 세로 30 cm, 높이 30 cm의 토양블록을 재배상자에 원형대로 채취하였다. 각 지점에서 채취된 토양의 물리·화학적 특성은 표 2와 같다. 재배상자의 구조 및 재질, 토양채취 방법, 벼 이식을 위한 사전 준비 등은 최 등[6]이 보고한 바와 같다.

Table 1. Addresses of sampling points for paddy soils

NPP site	Soil code	Address
Yong-gwang	YA	전북 고창군 삼하면 자룡리 38
	YB	전남 영광군 홍농읍 가곡리 119
	YC	전남 영광군 홍농읍 성산리 252
	YD	전남 영광군 법성면 진내리 808
	YE	전남 영광군 홍농읍 칠곡리 월곡 525
Ulchin	UA	경북 울진군 북면 주인2리
	UB	경북 울진군 북면 부구2리 386
	UC	경북 울진군 북면 금성리 51
	UD	경북 울진군 북면 나곡2리 421
	UE	경북 울진군 북면 신화2리
	UF	경북 울진군 죽변면 후정리 580
	UG	경북 울진군 북면 고목리 411

벼의 이식 및 관리

영광 논토양의 경우 4 년('99~'02), 울진 논토양의 경우 2 년('01~'02)에 걸쳐 5월 21일 ~ 5월 25일 경에 동진벼의 모를 재배상자당 4 주(주당 4 본)씩 이식하였다. 이식 20 여 일 전에 상자당 부숙퇴비 20 g씩을 시비한 후 모종삽으로 상층토와 섞어 주었고 이식 2일 전에는 상자당 복합비료 3.5 g(N:P:K = 21%:17%:17%)과 석회 9 g씩을 살포하고 위와 같이 섞어 주었다. 이후 생육시기에 따라 3 회에 걸쳐 적당량의 복합비료를

Table 2. Physicochemical properties of the experimental soils

Soil code	pH (1:2.5)	O.M. ^a (%)	CEC ^b (cmol)	EC (cmol) ^c		T-N ^d (ppm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture
				K	Ca					
YA	4.9	3.88	14.5	0.43	4.45	2300	21	54	25	SiL
YB	5.1	3.32	11.1	0.43	4.39	1800	36	45	19	L
YC	6.1	3.12	13.7	0.35	8.77	2000	23	60	17	SiL
YD	5.8	2.45	10.7	0.75	5.12	1500	27	64	9	SiL
YE	5.9	2.84	11.4	0.79	2.51	1700	18	68	14	SiL
UA	4.7	4.08	12.2	0.45	1.71	1900	39	40	22	L
UB	5.1	2.27	13.0	0.38	1.91	1300	40	37	24	L
UC	5.5	3.54	10.6	0.39	2.41	2000	61	29	10	SL
UD	5.2	3.63	9.5	0.55	2.90	1900	61	26	13	SL
UE	6.1	1.70	10.9	0.94	3.52	1200	58	28	15	SL
UF	5.6	1.36	13.1	0.57	4.15	900	67	23	10	SL
UG	5.1	2.27	11.7	0.64	1.57	1200	81	14	5	LS

^a Organic matter, ^b Cation exchange capacity, ^c Exchangeable cation, ^d Total nitrogen.

추가로 공급하였다.

재배상자는 9월 말까지 관개하여 담수상태를 유지하였고 논에서 일어나는 관개수의 지하침투를 모사하여 1 주일에 1 회씩 상자당 2.6~2.7 l 의 물을 배수하였다. 이것은 우리나라에서 벼 재배기간 동안 평균 약 550 mm의 관개수가 지하로 침투하는 것[11]을 모사한 것이다. 온실의 창문은 모두 제거하여 환기를 최대화하였고 병충해 방제를 위하여 살균제와 살충제를 2~3 회씩 살포하였다. 1999년부터 2002년까지 년도별 출수 시작일은 각각 8월 13일, 8월 13일, 8월 14일 및 8월 14일이었다.

⁹⁰Sr 처리

영광 및 울진 토양 모두 1차 년도 이식하기 약 2 주 전 및 출수 시작 1~2 일 전(수잉기에 해당)에 ⁹⁰Sr 용액을 처리하였고 이 중 이식 전 처리에 대해서는 ⁹⁰Sr의 추가처리 없이 년차별 실험을 수행하였다. 영광 논 토양의 경우 이식 전 처리 일자 는 5월 4일(이식 전 17 일), 수잉기 처리일자는 8월 12일이었고 울진의 경우에는 각각 5월 10일(이식 전 12 일)과 8월 13일이었다.

⁹⁰Sr 처리는 일회성 사고침적을 모사하기 위하여 각 처리시기에 마이크로피펫을 이용하여 재배상

자의 수표면 상에 균등하게 분포하는 25 개의 점을 향해 1 ml씩의 방사성 용액(46 kBq ml⁻¹, carrier free in chloride form)을 가하였다. 이러한 방법은 담수관개 중인 논에 대하여 용해도가 매우 높은 입자상 방사성 물질의 건침적 또는 습침적을 모의한 것으로 볼 수 있다. 이식 전 처리의 경우에는 ⁹⁰Sr이 비료와 함께 약 15 cm 깊이로 표층토와 혼합되었다. 2~4차 년도에도 ⁹⁰Sr으로 오염된 표층토가 이식 전 논갈이에 의해 매년 섞이게 되었다. 실험은 2 반복으로 수행하였다.

시료 채취 및 분석

매년 10월 11일~10월 15일 사이에 하부 7~8 cm 정도만 남기고 벼를 채취하고 이삭과 벧짚으로 분리한 후 온실 내에서 3 주 이상 자연 건조시켰다. 건조된 이삭은 왕겨와 쌀알로 분리하였고 벧짚은 약 1 cm 길이로 잘게 절단하였다. 쌀알과 벧짚 시료를 500 °C에서 16 시간 동안 회화시킨 후 회분시료 100 mg을 지름 5 cm의 계측용 planchet에 담아 적당량의 증류수와 잘 섞은 다음 적외선 등 하에서 증발·건고시켰다.

위와 같이 조제된 회분 시료에 대해 low-background α/βcounter (LB-5100, TENNELEC)를 이용하여 전 β 방사능을 측정하였다. 환경

background의 영향을 제거하기 위하여 대조구 (⁹⁰Sr 무처리 재배상자) 시료에 대한 계수치를 공제하여 순계수치를 구하였다. 계측시간은 30 분이 었다. 회분 시료에 대한 β 방사선 계측은 작물체 채취 후 한 달 정도 경과하여 ⁹⁰Sr과 딸핵종인 ⁹⁰Y의 농도가 같아졌다고 볼 수 있을 때 시작하 였고 계측효율도 방사평형 상태에 있는 두 핵종 의 합에 대한 것을 구하여 적용하였다. 이렇게 계 산된 농도의 반을 ⁹⁰Sr 농도로 하였다.

쌀알 및 벧짚에 대한 ⁹⁰Sr의 전이계수(TF_{area}, m² kg⁻¹-dry)는 다음 식으로 계산하였다[5,6,9].

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

결과 및 고찰

1차 년도 전이계수

영광 및 울진 논 토양에 대하여 벼의 이식 전 및 수잉기에 ⁹⁰Sr을 처리하고 조사한 토양-작물체 전이계수(m² kg⁻¹-dry)는 표 3과 같다.

⁹⁰Sr의 토양-벼 전이계수는 영광, 울진 두 지역 간에 전반적으로는 큰 차이가 없었다. 이식전 처 리의 경우 쌀알 및 벧짚 전이계수는 두 지역 모 두 토양에 따른 변이가 2 배 정도였고 벧짚 전이 계수가 쌀알보다 40~60 배 높았다. 벧짚의 ⁹⁰Sr 전이계수는 최 등[6]이 보고한 ¹³⁷Cs 전이계수보 다 수십 배 정도 높았으나 쌀알의 경우에는 비슷 하거나 수 배 정도 높은 데 그쳤다. 이것은 토양 으로부터의 흡수는 ⁹⁰Sr이 ¹³⁷Cs보다 훨씬 용이하

Table 3. Transfer factors of ⁹⁰Sr for hulled rice seeds and rice straw in Yonggwang and Ulchin paddy soils contaminated at 2 different times

Date of ⁹⁰ Sr ^a application	Soil	Transfer factor (m ² kg ⁻¹ -dry)		B/A
		Seeds (A)	Straw (B)	
May 4 (PTS)	YA	2.1×10 ⁻⁴ ±4.6×10 ⁻⁵	1.1×10 ⁻² ±8.2×10 ⁻⁵	52
	YB	2.5×10 ⁻⁴ ±3.1×10 ⁻⁵	1.5×10 ⁻² ±2.0×10 ⁻³	60
	YC	1.7×10 ⁻⁴ ±5.1×10 ⁻⁵	9.5×10 ⁻³ ±2.0×10 ⁻³	56
	YD	3.2×10 ⁻⁴ ±2.8×10 ⁻⁵	1.4×10 ⁻² ±3.4×10 ⁻⁴	44
	YE	1.8×10 ⁻⁴ ±3.3×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻² ±9.2×10 ⁻⁴	56
	Mean	2.3×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻²	54
Aug. 12 (BTS)	YA	4.1×10 ⁻⁴ ±2.4×10 ⁻⁵	1.4×10 ⁻² ±2.2×10 ⁻³	34
	YD	7.8×10 ⁻⁴ ±4.7×10 ⁻⁷	1.6×10 ⁻² ±6.9×10 ⁻⁴	21
	Mean	6.0×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻²	28
May 10 (PTS)	UA	3.0×10 ⁻⁴ ±4.9×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻² ±7.2×10 ⁻⁴	50
	UB	3.5×10 ⁻⁴ ±2.8×10 ⁻⁵	2.1×10 ⁻² ±4.6×10 ⁻³	60
	UC	3.6×10 ⁻⁴ ±1.5×10 ⁻⁵	1.7×10 ⁻² ±3.2×10 ⁻³	47
	UD	3.1×10 ⁻⁴ ±8.5×10 ⁻⁵	1.5×10 ⁻² ±2.0×10 ⁻³	48
	UE	2.1×10 ⁻⁴	8.2×10 ⁻³	39
	UF	1.8×10 ⁻⁴	8.8×10 ⁻³ ±2.8×10 ⁻⁴	49
	UG	3.0×10 ⁻⁴ ±1.8×10 ⁻⁵	1.4×10 ⁻² ±9.1×10 ⁻⁴	47
	Mean	2.9×10 ⁻⁴	1.4×10 ⁻²	49
Aug. 13 (BTS)	UB	6.6×10 ⁻⁴	2.3×10 ⁻²	35
	UD	1.1×10 ⁻³	3.3×10 ⁻²	30
	UE	2.5×10 ⁻⁴	1.9×10 ⁻²	76
	Mean	6.7×10 ⁻⁴	2.5×10 ⁻²	47

^a PTS : Pre-transplanting stage, BTS : Booting stage (around the start of heading).

나 흡수후 쌀알로의 이동은 반대로 ¹³⁷Cs이 ⁹⁰Sr보다 용이하다는 것을 나타낸다. 이러한 사실은 Abbazov 등[12], 김[7] 및 최[9] 등이 보고한 바와 같다.

수잉기 처리에서는 쌀알의 ⁹⁰Sr 전이계수가 이식전 처리에 비해 토양에 따라 대체로 2~3 배 정도 증가한 반면 벼짚의 ⁹⁰Sr 전이계수는 증가 정도가 미미하거나 최고 2 배 정도에 불과하였다. 이에 따라 수잉기 처리에서는 쌀알 전이계수에 대한 벼짚 전이계수의 비가 대체로 30 정도로 이식전 처리에 비해 낮았다. 이것은 수잉기에 담수의 표면에 처리한 ⁹⁰Sr은 이식전 처리에 비해 작물체의 기부를 통한 흡수가 많이 일어날 수 있다는 사실과 관련이 있을 것으로 추정된다. 즉 수잉기는 작물체의 기부(담수관개시 물에 잠기는 부분)의 발육이 거의 완료된 때로서 담수표면에 처리한 ⁹⁰Sr이 기부를 통해 흡수될 기회가 매우 높다. 이러한 사실이 상대적으로 높은 쌀알 전이계수를 가져온 요인이 되기 위해서는 벼의 기부를 통해서 흡수된 ⁹⁰Sr이 뿌리를 통해서 흡수된 것보다 더 쉽게 쌀알로 이동해야만 한다. 최 등[6]이 실험한 ¹³⁷Cs 전이계수에 있어서도 이와 같은 것이 암시되었으나 확실한 결론을 얻기 위해서는 세밀한 기초실험이 수행될 필요가 있다.

토양의 특성이 ⁹⁰Sr의 쌀알 및 벼짚 전이계수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 토양의 특성과 전이계수 간 상관계수(r)를 구한 것은 표 4와 같다. 토양 pH(X₁)와 벼짚 전이계수(Y₁= -4.6×10⁻³X₁+3.8×10⁻²) 그리고 치환성 Ca(X₂)와 쌀알 전이계수(Y₂= -1.9×10⁻⁵X₂+3.3×10⁻⁴) 간에만 유의성 있는 상관관계가 인정될 수 있었다. 일반적으로 토양의 pH가 높을수록 불용성의 침전이 많이 형성되어 원소의 흡수가 저해되고 Ca는 작물체의 흡수에 있어서 Sr과 경쟁적 관계에 있으므로 토양의 Ca 함량이 높을수록 Sr의 흡수가 억제되는 것으로 알려져 있다[10,13]. 본 연구에서도 이

와 유사하게 토양의 pH 및 치환성 Ca 함량이 높을수록 ⁹⁰Sr 전이계수가 감소하는 경향이였다.

위와 같은 실험 결과에 입각하여 침적 1차 년도 ⁹⁰Sr의 쌀알 및 벼짚 전이계수에 대한 우리나라 대표치를 표 5와 같이 제안하고자 한다. 여기에서 대표치는 이식전 침적의 경우 두 지역 평균 전이계수의 산술평균치로 하였고 수잉기 침적의 경우 위에서 설명한 처리시기에 따른 차이를 고려하여 쌀알에 대해서는 이식전 침적의 2.5 배, 벼짚에 대해서는 이식전 침적의 1.5 배로 하였다. 이 대표치는 새로운 연구 결과가 나오는 대로 계속 수정·보완되어야 할 것이다.

이식전 처리에서는 ⁹⁰Sr이 표층토와 약 15 cm 깊이로 혼합된 것으로 볼 수 있으므로 표 5의 값에 유효표면토양밀도(우리나라 논토양의 경우 대체로 180 kg m⁻²[6])를 곱해줌으로써 대략적으로 토양 농도 기준의 전이계수(TF_{mix}, unitless)로 환산할 수 있다. 이렇게 하면 TF_{mix}가 쌀알의 경우 4.7×10⁻², 벼짚의 경우 2.3×10⁰이 된다. 이 등[8]은 쌀알에 대하여 우리나라의 특성치로 1.7×10⁻¹을 제안한 바 있다. 이 값은 단일 토양에서의 측정치에 입각한 것이므로 대표치로서의 신뢰도가 낮을 뿐 아니라 본 실험결과와 비교할 때 쌀알내 ⁹⁰Sr의 농도에 대하여 과대평가를 초래할 가능성이 매우 높을 것으로 예상된다. 한편, 김[7]이 소형 포트 실험으로 다섯 종류의 흙(포트 당 건토 10 kg)에 ⁹⁰Sr을 전층 처리하고 실험한 결과에 의하면 쌀알 전이계수가 토양에 따라 대체로 3.0×10⁻²~1.0×10⁻¹의 범위인 것으로 추정할 수 있다. 일반적으로 포트의 크기가 작을수록 전이계수가 커진다는 점을 고려할 때 본 연구 결과와 김의 실험 결과에 입각하여 TF_{mix}의 대표치로 쌀알의 경우 5.0×10⁻², 벼짚의 경우 2.5×10⁰ 정도가 적당할 것으로 판단된다.

Table 4. Correlation coefficients between soil properties and ⁹⁰Sr transfer factors for rice seeds and straw

Transfer factor	Soil properties							
	pH	O.M.	CEC	Ex. K	Ex. Ca	Sand	Clay	Silt
Seeds	-0.466	0.232	-0.453	-0.242	-0.547*	0.322	-0.106	-0.338
Straw	-0.579**	0.298	-0.225	-0.494	-0.486	0.112	0.190	-0.199

* statistically significant at p=0.1

** statistically significant at p=0.05.

Table 5. Proposed generic values for ⁹⁰Sr transfer factors in Korean rice fields

Time of Deposition	Generic value (m ⁻² kg ⁻¹ -dry)	
	Seeds ^a	Straw
PTS ^b	2.6×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻²
BTS ^c	6.5×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻²

^a hulled but unpolished rice seeds
^b Pre-transplanting stage
^c Booting stage : around the start of heading.

2~4차 년도 전이계수

영광 논 토양에 대하여 1차 년도에 이식전 처리 실험을 수행하고 2~4 차 년도에 조사한 쌀알 및 볏짚 전이계수를 1차 년도 전이계수에 대한 백분율로 나타낸 것은 각각 그림 1 및 2 와 같고 울진 논 토양에 있어서 2차 년도 전이계수를 1차 년도 전이계수에 대한 백분율로 나타낸 것은 그림 3과 같다.

침적 2차 년도 전이계수는 영광 논 토양의 경우 토양에 따라 1차 년도 전이계수의 75~90% 정도였고 울진 논 토양의 경우에는 55~80% 정도였다. 이와 같이 감소 정도가 지역 간에 다른 것은 주로 토양 특성의 차이에 의한 것으로 판단된다. 영광 논 토양에 있어서는 해가 감에 따라 전이계수가 점점 감소하여 침적 4차 년도에는 대체로 1차 년도의 30~40% 정도에 불과하였다.

본 실험에서 ⁹⁰Sr의 전이계수가 해가 감에 따라 감소하는 원인으로는 ⁹⁰Sr의 토양에 의한 고정, 작물 흡수에 따른 제거 및 지하이동을 생각할 수 있다. 방사성 Sr은 방사성 Cs와는 달리 토양 침적 후 수년 이상이 경과하여도 토양에 의해 고정되어 불가급태로 되는 비율이 10% 미만인 것으로 알려져 있다[14,15]. Squire[16]는 9 가지 토양에 ⁹⁰Sr을 처리하고 5~7 년이 지난 후에 가급도는 평균 6% 정도만 감소하였다고 보고한 바 있다. 본 연구에서 토양에 처리한 ⁹⁰Sr 중 벼에 흡수되어 제거된 분율은 1차 년도 기준으로 최고 2% 정도에 불과하였다. 한편 방사성 Sr은 고정은 잘 되지 않는 반면에 지하로의 이동은 비교적 용이한 것으로 알려져 있다[15,17,18].

최 등[19]이 벼 재배상자에 사질양토(표층은 양질사토)를 약 0.8 m 깊이로 채운 다음 벼의 이식수일 전 담수의 표면에 방사성 Sr을 처리하고 2년 간 조사한 결과에 의하면 처리한 방사성 Sr

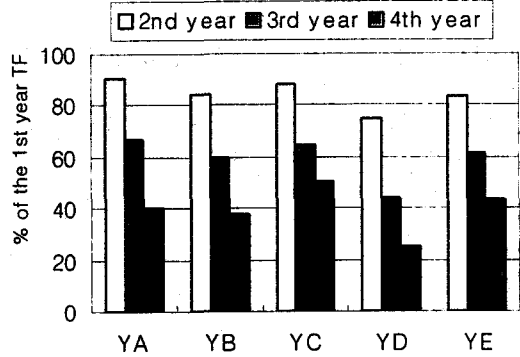


Fig. 1. Annual variations in ⁹⁰Sr transfer factors for hulled rice seeds after its pre-transplanting application onto Yonggwang paddy soils in the first year.

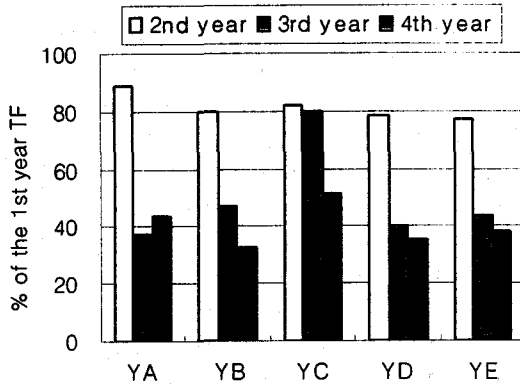


Fig. 2. Annual variations in ⁹⁰Sr transfer factors for rice straw after its pre-transplanting application onto Yonggwang paddy soils in the first year.

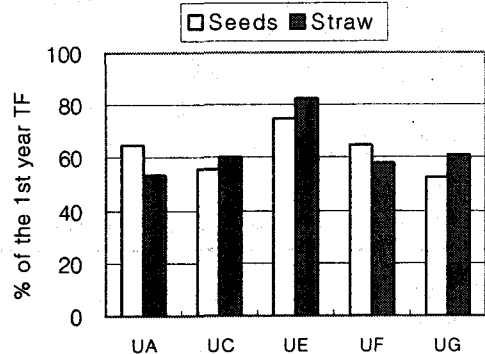


Fig. 3. The second year's ⁹⁰Sr transfer factors for hulled rice seeds and rice straw in Ulchin paddy soils after its pre-transplanting application in the first year.

의 3~5%가 매년 재배기간 동안 침출수와 함께 상자 밖으로 배출되었다. 이와 같이 ⁹⁰Sr이 지하 깊은 곳으로 이동하면 뿌리의 권역으로부터 벗어나 흡수가 불가능하게 된다. 또한 벼 뿌리는 지하로 갈수록 분포밀도가 낮아지므로 ⁹⁰Sr이 뿌리의 분포 범위 내에 있다하더라도 지하로 내려 갈수록 흡수율이 감소하게 된다. 이런 것으로 볼 때 논에 있어서 ⁹⁰Sr 전이계수의 감소는 토양에 의한 고정이나 흡수에 따른 제거보다는 ⁹⁰Sr의 지하 이동에 더 크게 기인한 것으로 판단된다. 이것은 영광 토양에 비해 대체로 모래 함량이 높은 울진 토양에서 침적 2차 년도에 전이계수의 감소 정도가 컸다는 사실에 의해서도 암시되고 있다. 일반적으로 모래 함량이 높을수록 방사성 Sr이 토양에 잘 흡착하지 못하고 지하로 쉽게 이동하는 것으로 보고되어 있다[20,21].

전이계수의 년차변화식

영광 토양에 대하여 4년간 ⁹⁰Sr의 쌀알 및 벗짚 전이계수를 조사하고 침적 년차에 따른 전이계수의 변화식을 구한 것은 그림 4 및 5와 같다.

이러한 관계식을 토양별로 구하여 실제로 주민 섭취선량 평가나 사고 영향 예측에 이용하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이므로 본 연구에서는 1차 년도 전이계수에 대한 각 년차별 전이계수의 백분율에 대하여 다섯 가지 토양에 대한 평균값을 사용하였다.

쌀알의 경우 침적년차(X)와 1차 년도 전이계수에 대한 각 년차별 전이계수의 백분율(Y) 간에 직선적 fitting에 의해서는 $Y = -20.7X + 122.4$ ($r = -0.9966$), 지수적 fitting에 의해서는 $Y = 146.3e^{-0.315X}$ ($r = -0.9853$)라는 관계식이 구해졌다. 벗짚의 경우에는 각각 $Y = -21.1X + 120.5$ ($r = -0.9818$) 및 $Y = 142.1e^{-0.3219X}$ ($r = -0.9848$)로 나타났다. 쌀알의 경우에는 직선적 fitting이, 벗짚의 경우에는 지수적 fitting이 보다 양호한 것으로 나타났으나 직선적 fitting의 경우 침적 4년차 이후의 전이계수에 대해 과소평가할 가능성이 높을 것으로 추정되므로 두 부위 모두 지수적 fitting을 취하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 이렇게 할 경우 전이계수의 반감기는 쌀알과 벗짚 모두 2.2년 정도가 된다. 이 반감기는 세 가지 과정, 즉 ⁹⁰Sr의 지하이동, 토양에 의한 고정, 작물체 흡수에 따른 농도 감소를 동시에 고려하고 있다. 따라서 이것을 사용하면 세 가지 과정에 대하여 일일이 예측할 필요가 없으므로 매우 편리할 것이다. 모래 함량이 높은 울진 지역의 경우 1차 년도와 2

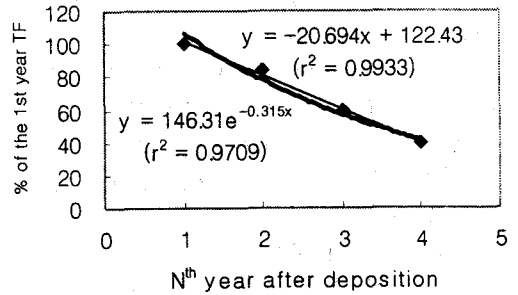


Fig. 4. Relationships between ⁹⁰Sr transfer factor for hulled rice seeds and elapsed time after ⁹⁰Sr deposition onto Yonggwang soils as a whole.

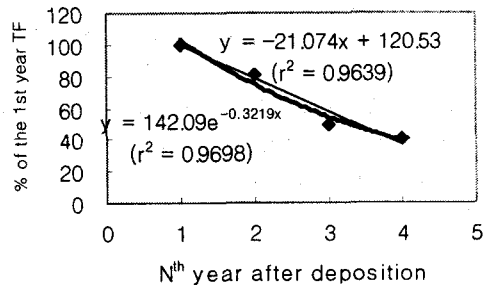


Fig. 5. Relationships between ⁹⁰Sr transfer factor for rice straw and elapsed time after ⁹⁰Sr deposition onto Yonggwang soils as a whole.

차 년도 간 전이계수의 차이로만 볼 때 반감기가 1.5년 정도로 계산되어 영광 지역에 비해 짧았다.

여기서, 한번 더 주의할 점은 위와 같이 조사된 반감기는 초기 지표면 침적량 기준의 전이계수에 대한 것이라는 점이다. 만약에 전이계수를 매년 작물의 수확시 일정 깊이의 토양내 ⁹⁰Sr의 농도 기준으로 구한다면 반감기는 2.2년보다 훨씬 길어질 것이다. 이것은 표층 토양내 ⁹⁰Sr의 농도가 지하이동 및 작물체 흡수에 의해 매년 감소하기 때문이다. 즉 이 경우에는 ⁹⁰Sr의 고정에 따른 전이계수의 감소만을 측정하게 되는 것이다. 따라서 이 때에는 ⁹⁰Sr 전이계수 감소 이외에 ⁹⁰Sr의 지하 이동 및 작물체 흡수에 따른 표층 토양내 농도 감소도 별도로 예측해야 한다.

최 등[2]은 ⁹⁰Sr이 논에 침적한 후 50년간의 쌀알내 농도를 예측함에 있어서 토양에 의한 고정 및 작물체의 흡수에 따른 농도 감소는 고려하지 않고 지하침투에 의한 흙갈이층내 농도 감소

만을 고려하여 용탈을 상수로 $9.1 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$ 를 적용한 바 있다. 이렇게 하면 토양내 ^{90}Sr 농도의 반감기는 약 21 년이 되어 본 연구 결과와 비교할 때 장기적으로 매우 과대평가하였던 것으로 볼 수 있다. 따라서 논에서의 ^{90}Sr 의 용탈을 상수를 결정할 때 보다 현실적인 접근이 필요함과 동시에 위와 같은 반감기 사용을 고려해 볼 필요가 있다고 본다.

참고로 PATHWAY 모델[22]에서는 ^{90}Sr 에 대하여 작물체 흡수에 따른 제거와 지하침투에 의한 농도감소(용탈을 상수 : $6.6 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$)를 고려하고 있고 ECOSYS-87 모델[1]에서는 지하침투에 의한 농도감소(용탈을 상수 : $3.1 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$)와 고정에 의한 흡수감소(고정을 상수 : $9.0 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$)를 고려하고 있다. 이러한 방식들로 벼에 있어서 ^{90}Sr 의 년차별 뿌리흡수 농도를 예측하여도 본 실험결과보다 높은 값을 얻게 될 것이다. PATHWAY나 ECOSYS-87 모델은 서양에서 만들어진 것으로 밭에서의 핵종 거동에 입각한 것이므로 논에 대해서 그대로 사용하는 것은 적절치 않다고 본다.

결 론

영광 및 울진 원전 주변 12 곳의 논토양을 재배상자에 원상대로 채취하여 온실로 운반한 후 벼의 이식 약 2 주 전 및 출수 시작 1~2일 전에 ^{90}Sr 을 담수의 표면에 처리하고 2~4 년에 걸쳐 전이계수를 조사하였다.

처리 1차 년도 벼의 ^{90}Sr 전이계수는 토양 및 처리시기에 따른 차이가 두 지역 모두 2 배 정도에 불과하였고 이렇다할 지역적인 경향도 나타나지 않았다. 따라서 두 지역 토양들에 대한 전체 실험 결과에 입각하여 ^{90}Sr 의 침적시기별 및 벼의 부위별로 우리나라 전역에 대한 대표치를 산출·제안하였다. 차후 새로운 자료들이 생산되는 대로 대표치를 보완·갱신해야 할 것이다. 벼의 ^{90}Sr 전이계수는 대체로 토양의 pH 및 치환성 Ca 함량이 증가할수록 감소하였으므로 평가목적에 따라서는 이러한 토양 특성들을 고려하여 전이계수를 결정할 필요도 있을 것이다.

처리 1차 년도에 대한 2차 년도 전이계수의 감소 정도는 두 지역 간에 다소 다르게 나타나 장기적인 영향 평가에 있어서는 지역별로 달리 해야 할 필요가 있음이 예견되었다. 영광 토양의 경우 침적후 4 년간 년차의 증가에 따른 전이계수

의 감소는 반감기가 2.2 년 정도의 지수함수로 잘 표현되었다. 논에서 ^{90}Sr 전이계수의 년차에 따른 감소는 ^{90}Sr 의 지하이동에 가장 크게 기인하는 것으로 추정되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 증강기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. H. Müller and G. Pröhl, "ECOSYS-87: a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents," *Health Phys.*, 64, 232-252 (1993)
2. 최용호, 임광목, 황원태, 이한수, 이창우, "원자력 사고후 쌀알과 배추내 ^{90}Sr 및 ^{137}Cs 농도 예측," 대한방사선방어학회지, 27, 127-146 (2002)
3. USNRC, "Calculation of annual doses to man from routine releases of reactor effluents for the purpose of evaluating compliance with 10 CFR 50," Appendix I, *Regulatory Guide 1.109* (1976)
4. IAEA, *Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases*, Safety Series No. 57, IAEA, Vienna (1982)
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. 최용호, 임광목, 박효국, 최희주, 이한수, "고리 및 영광 논토양에 대한 ^{137}Cs 의 모의사고 침적시 토양-벼 전이계수," 대한방사선방어학회지, 27, 207-215 (2002)
7. 김재성, Strontium-90과 cesium-137의 담토양별 흡·탈착과 수도체의 흡수 양상에 관한 연구, 박사학위논문, 고려대학교 (1985)
8. 이정호, 이창우, 최용호 등, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭선량 평가 코드 개발, KAERI/RR-998/90, 한국원자력연구소 (1991)
9. 최용호, 조재성, 이창우, 홍광희, 이정호, "벼 재배기간중 침적시기에 따른 ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr ,

- ^{137}Cs 의 뿌리흡수," 대한방사선방어학회지, 20, 255-263 (1995)
10. J. E. Till and H. R. Meyer (Eds.), *Radiological Assessment*, NUREG/CR-3332, ORNL-5968, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1983)
 11. 이은웅 등, 4정 수도작, 향문사, 서울 (1996)
 12. M. A. Abbazov, I. D. Dergunov and R. G. Mikulin, "Effect of soil properties on the accumulation of ^{90}Sr and ^{137}Cs in crops," *Soviet Soil Sci.*, 10, 52-56 (1978)
 13. A. J. Andersen, "Influence of liming and mineral fertilization on plant uptake of radiostromtium from Danish soils," *Soil Sci.*, 95, 52-59 (1963)
 14. C. W. Francis, *Radiostromtium Movement in Soils and Uptake in Plants*, TID-27564 (1978)
 15. J. F. Cline and W. H. Rickard, "Radioactive strontium and cesium in cultivated and abandoned field plots," *Health Phys.*, 23, 317-324 (1972)
 16. H. M. Squire, "Long-term studies on strontium-90 in soils and pastures," *Radiat. Bot.*, 6, 49-67 (1966)
 17. B. Salbu, D. H. Oughton, A. V. Ratnikov, T. L. Zhigareva, S. V. Kruglov, K. V. Petrov, N. V. Grebenshakikova, S. K. Firsakova, N. P. Astasheva, N. A. Loshchilov, K. Hove and P. Strand, "The mobility of ^{137}Cs and ^{90}Sr in agricultural soils in Ukraine, Belarus and Russia, 1991" *Health Phys.*, 67, 518-528 (1994)
 18. A. L. Kliashtorin, F. A. Tikhomirov and A. I. Shcheglov, "Lysimetrical study of radionuclides in the forests around the Chernobyl nuclear power plant," *J. Environ. Radioactivity*, 24, 81-90 (1994)
 19. Y. H. Choi, K. M. Lim, H. G. Park, D. W. Park and W. Y. Lee, "Long-term behaviors of ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{85}Sr and ^{137}Cs in a simulated rice field," in: *Proc. of Intern. Symp. on Radiation Safety Management '99*, pp. 128-136, Taejon, Korea, Nov. 4-6 (1999)
 20. A. Tsumura, M. Komamura and H. Kobayashi, "Behavior of radioactive Sr and Cs in soils and soil-plant system," *Report of National Institute of Agricultural Science - B*, No. 36, pp. 57-113 (1984) (in Japanese)
 21. Y. A. Ivanov, N. Lewyckyj, S. E. Levchuk, B. S. Prister, S. K. Firsakova, N. P. Arkhipov, A. N. Arkhipov, S. V. Kruglov, R. M. Alexakhin, J. Sandalls and S. Askbrant, "Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr from Chernobyl fallout in Ukrainian, Belarussian and Russian soils," *J. Environ. Radioactivity*, 35, 1-21 (1997)
 22. F. W. Whicker and T. B. Kirchner, "PATHWAY: a dynamic food-chain model to predict radionuclide ingestion after fallout deposition," *Health Phys.*, 52, 717-737 (1987)