

Model for Transport of Accidentally Released Radionuclides onto Rice-Fields and its Comparison with Experimental Data

Dong-Kwon Keum · Han-Soo Lee · Heui-Joo Choi ·
Hee-Suk Kang · Kwang-Muk Lim · Young-Ho Choi and
Chang-Woo Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

사고시 논으로 유출된 핵종 이동 모델 및 실험결과와의 비교

금동권 · 이한수 · 최희주 · 강희석 · 임광목 · 최용호 · 이창우
한국원자력연구소

(2004년 1월 5일 접수, 2004년 5월 28일 채택)

Abstract - A dynamic compartment model was developed to evaluate the transport of accidentally released radionuclides onto rice-fields. In the model, the surface water compartment and shoot-base absorption were introduced to account for the effect of irrigation, which is essential to a rice cultivation. The soil mixing by plough and irrigation before transplanting rice was also considered, and the rate of root-uptake and shoot-base absorption were modeled in terms of the function of biomass. In order to test the validation of the model, it was applied to the analysis of some simulated ^{137}Cs deposition experiments that were performed while cultivating rice in a greenhouse using soils sampled from rice-fields around Kori, Yonggwang and Ulchin nuclear power plants. The model prediction was generally agreed within about one order of magnitude with experimental data.

Key words : accidental release, rice-plant, irrigation, surface water compartment, root-uptake, shoot-base absorption

요약 - 핵종 누출 사고시 논으로의 핵종 이동 평가를 위한 동적격실모델을 개발하였다. 개발된 모델에는 벼 재배에 필수적인 관개수를 고려하여 표면수 격실과 줄기기부흡수 개념을 도입하였고, 이식 전 쟁기질과 관개담수에 의한 토양 혼합을 고려하였으며, 벼 성장에 따른 뿌리흡수상수, 줄기기부흡수상수의 변화를 생체량의 함수로 모델링하였다. 모델의 타당성 조사를 위해 고리, 영광 및 울진 원자력 발전소 주변 지역에서 채취한 논토양으로 벼를 재배하면서 벼 생육단계별로 수행된 ^{137}Cs 모의 침적 실험 해석에 모델을 적용하였다. 모델은 대체적으로 한 승수 내에서 실험 결과와 잘 일치하였다.

중심어 : 사고유출, 논, 관개수, 표면수격실, 뿌리흡수, 줄기기부흡수

서 론

원자력시설이나 원자력발전소 사고로 방출되는 방사성핵종은 주변 지역의 농경지로 침적되어 토

양이나 농작물을 오염시킬 뿐 아니라 다양한 육상 생태계 경로를 통해 인체에 축적될 수 있다. 따라서 방사능 누출시 생태계 오염의 정량적 평가는 주민과 생태계를 방사능 오염으로부터 보호

하기 위한 안전기준 설정이나 방재대책 마련을 위해 매우 필요하다.

원자력 시설로부터 방사성 물질이 누출되면 침적 (deposition), 작물체에 의한 차단(interception), 풍화제거(weathering), 가식부로의 이동(translocation), 뿌리흡수(root-uptake), 토양침투(percolation), 재부유(resuspension), 지하용탈 (leaching), 토양고착 (fixation on soil) 같은 다양한 핵종이동 메커니즘에 의해 육상 생태계 내로 확산된다. 이러한 핵종이동 단위위험상들에 대한 연구는 과거 수십년동안 광범위하게 수행되어 왔으며, 실험 자료들을 바탕으로 육상 생태계 내의 핵종이동 평가모델들이 다양하게 개발되었다 [1~5]. 기존의 육상 생태계 핵종이동 평가모델은 서구에서 주식으로 사용 중인 밀을 포함한 밭작물을 참고로 개발되었기 때문에 토양을 표면토양, 뿌리흡수토양, 심부토양으로 구분하는 개념이 보편화되어 있다. 그러나 동아시아 지역, 특히 우리나라 지역의 주 재배 작물인 벼의 재배과정을 보면 논외 토양표면은 관개담수로 인해 생육 기간 내내 물로 채워져 있다. 이는 토양표면이 항상 건조한 상태인 밭 토양과는 다른 핵종이동 메커니즘이 존재할 것임을 시사한다. 즉 밭 토양인 경우 토양표면에 침적된 핵종은 비, 눈, 관개수로 인해 간헐적으로 토양 속으로 침투되거나, 토양이 건조한 경우에는 토양 표면 입자가 바람에 의해 재부유 되기도 하지만, 논토양인 경우에는 관개담수로 인해 토양표면 위에 항상 물이 차 있으므로 재부유는 존재하지 않으며 표면수에 잠겨 있는 줄기 기부를 통한 직접 흡수 (shoot base absorption)가 중요한 핵종이동 메커니즘으로 작용 한다 [6,7]. 따라서 밭작물의 재배환경을 참고로 개발된 기존의 모델로는 벼 재배시 핵종 침적을 정확하게 모델링 할 수 없다. 더구나 핵종이 침적된 토양에서 벼의 연속 재배시 쟁기질에 의한 토양혼합과 관개담수로 인한 핵종의 재분배 등이 중요하나 이를 고려한 모델은 아직 없다.

본 논문에서는 원자력시설로부터 핵종의 사고 누출시 논으로의 핵종 전이를 가능한 실제적으로 모사할 수 있게 핵종의 침적시기 및 벼의 생육단계를 고려한 개선된 핵종이동 모델 ECOREA-RICE [8,9]을 제시한다. 제시된 모델에서는 관개담수를 고려한 표면수 격실과 줄기 기부흡수 개념이 도입되었으며, 쟁기질에 의한 토양혼합효과가 모델에 반영되었으며, 뿌리흡수상수, 기부흡수상수를 생체량 함수로 모델링 하였다. 모델의 타당성 조사를 위해 고리, 영광, 울진 원자력 발전소 주

변 지역에서 채취한 논토양으로 벼를 재배하면서 수행된 ¹³⁷Cs 침적 실험 결과와 모델링 결과를 비교하였다.

모 델 (ECOREA-RICE)

모델의 개요

동적격실모델에 기반을 둔 ECOREA-RICE의 개념도가 그림 1에 있다. 모델은 벼의 몸체(뿌리 포함)격실, 쌀알격실, 토양표면수격실, 뿌리흡수토양격실, 토양고착격실, 심부토양격실의 총 6개로 구성되며, 격실간에 작용하는 핵종이동 메커니즘으로는 토양침투(percolation), 풍화(weathering), 가식부이동(trasnlocation), 지하용탈(leaching), 토양고착 (fixation on soil), 뿌리흡수(root-uptake), 줄기 기부흡수(shoot base absorption)가 있다. 모델의 구조는 기존모델들과 [1-5] 유사하나 표면수 격실과 줄기 기부흡수 도입이 기존 모델과 크게 다른 점이다. 격실간 일차식의 핵종이동속도를 가정하면 각 격실에 대한 방사능 농도 변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

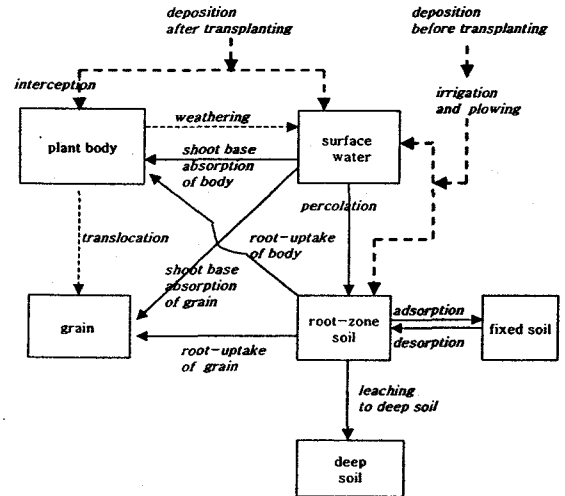


Fig. 1. Conceptual diagram for ECOREA-RICE food chain model.

벼몸체격실:

$$\frac{dA_{body}}{dt} = \lambda_{up} \cdot b \cdot A_{root} + \lambda_{sba} \cdot b \cdot A_{sw} -$$

$$(\lambda_d + \lambda_u + \lambda_{tr}) \cdot A_{body}$$

(1)

쌀알격실:

$$\frac{dA_{grain}}{dt} = \lambda_{up,g}A_{root} + \lambda_{sba,g}A_{sw} + \lambda_{tr}A_{body} - \lambda_d A_{grain} \quad (2)$$

토양표면수격실:

$$\frac{dA_{sw}}{dt} = \lambda_w A_{body} - (\lambda_d + \lambda_{sba,b} + \lambda_{sba,g} + \lambda_{pc})A_{sw} \quad (3)$$

뿌리흡수토양격실:

$$\frac{dA_{root}}{dt} = \lambda_{pc}A_{sw} + \lambda_{des}A_{fixed} - (\lambda_d + \lambda_{lc} + \lambda_{up,g} + \lambda_{up,b} + \lambda_{ads})A_{root} \quad (4)$$

토양고착격실:

$$\frac{dA_{fixed}}{dt} = \lambda_{ads}A_{root} - (\lambda_d + \lambda_{des})A_{fixed} \quad (5)$$

심부토양격실:

$$\frac{dA_{deep}}{dt} = \lambda_{lc}A_{root} - \lambda_d A_{deep} \quad (6)$$

여기서 A_{wtr} 는 벼 몸체 격실의 핵종 농도 (Bq/m^2), A_{grain} 는 쌀알 격실의 핵종 농도 (Bq/m^2), A_{sw} 는 토양표면수 격실의 핵종농도 (Bq/m^2), A_{root} 는 뿌리흡수토양격실의 핵종 농도 (Bq/m^2), A_{fixed} 는 토양고착격실의 핵종 농도 (Bq/m^2), A_{deep} 는 심부토양격실의 핵종 농도 (Bq/m^2), λ_d 는 방사능 붕괴 상수 (d^{-1}), $\lambda_{up,b}$ 는 벼 몸체의 뿌리흡수상수 (d^{-1}), $\lambda_{up,g}$ 는 쌀알의 뿌리흡수상수 (d^{-1}), λ_{tr} 는 전류상수 (d^{-1}), λ_w 는 풍화상수 (d^{-1}), λ_{lc} 는 지하용탈속도상수 (d^{-1}), λ_{pc} 는 토양침투상수 (d^{-1}), $\lambda_{sba,b}$ 는 벼 몸체의 줄기부흡수상수 (d^{-1}), $\lambda_{sba,g}$ 는 쌀알의 줄기부흡수상수 (d^{-1}), λ_{ads} 는 토양흡착상수 (d^{-1}), λ_{des} 는 토양탈착상수 (d^{-1})이다.

벼 성장률수

벼를 포함한 모든 식물은 각각의 생육특성에 따라 시기별로 생체량이 변한다. 식물의 생체량 증가는 핵종 농도를 희석시키고 식물로의 핵종 흡수 속도를 변화케 하는 요인이 된다. 벼의 경우

몸체와 이삭은 성장시기와 생체량의 크기가 서로 다르므로 다음과 같이 서로 다른 성장방정식을 적용하였다.

$$B_{body}(t) = \frac{B_{bm}B_{bi}}{(B_{bm} - B_{bi})e^{-k_{gb}t_g} + B_{bi}} \quad (7)$$

$$B_{grain}(t) = \frac{B_{gm}B_{gi}}{(B_{gm} - B_{gi})e^{-k_{gs}t_g} + B_{gi}} \quad (8)$$

여기서 B_{bm} 는 벼 몸체의 최대 생체량 ($1.55 \text{ kg-dry}/m^2$), B_{gm} 는 이삭의 최대 생체량 ($0.82 \text{ kg-dry}/m^2$), B_{bi} 는 몸체의 초기 생체량 ($0.1 \text{ kg-dry}/m^2$), B_{gi} 는 이삭의 초기 생체량 ($0.01 \text{ kg-dry}/m^2$), k_{gb} 는 몸체의 성장상수 (0.1 d^{-1}), k_{gs} 는 이삭의 성장상수 (0.17 d^{-1}), t_g 는 성장기간(d)이다. 본 연구에서 적용한 식 (7) 및 (8)의 상수들은 실험으로 측정된 생체량 데이터로부터 구하였다 [10]. 한편 벼 몸체는 이식일(5월21일)부터, 이삭은 출수일(8월16일)부터 성장이 시작된다고 가정하였다.

전달속도상수

뿌리흡수상수(λ_{up})

뿌리흡수는 식물이 성장하는 동안 더 왕성하게 일어나므로 벼의 성장속도를 고려하여 뿌리흡수상수 λ_{up} 는 다음의 식을 적용하였다 [3].

$$\lambda_{up,i} = \frac{CR_i}{d_{soil}\rho_{soil}} \frac{dB_i}{dt}, \quad i=body, grain \quad (9)$$

여기서 CR_i 은 각각 토양-몸체, 토양-쌀알의 농도비이고, B_i 는 벼의 몸체 및 이삭의 성장속도이며 식(7)과 (8)로부터 구한다. 본 연구에서 CR_{body} 및 CR_{grain} 은 각각 0.05(-), 0.02(-)를 적용하였다 [11]. 뿌리흡수토양의 깊이(d_{soil})는 0.22(m), 토양의 겉보기밀도(ρ_{soil})는 $1040(\text{kg}/m^3)$ 을 적용하였다 [4].

줄기부흡수상수(λ_{sba})

벼의 줄기부를 통한 핵종의 직접 흡수속도는 생체량에 비례한다고 가정하였다.

$$\lambda_{sba,i}(t) = \frac{B_i(t)}{B_{bm}} \times \lambda_{sba,max}, \quad i=body, grain \quad (10)$$

여기서 $\lambda_{sba,max}$ 는 벼 몸체가 최대 생체량일 때 줄기부흡수상수이다. 본 연구에서 적용한 $\lambda_{sba,max}$ 의 값은 $2 \times 10^{-4} (d^{-1})$ 이다. 이 값은 실험과 모델의 전이계수 비교를 통해 구하였다 [9].

토양혼합

모내기 전 쟁기질에 의해 토양혼합과 관개담수로 토양과 토양표면수 사이에 국부평형(local equilibrium)이 이루어진다고 가정하면 쟁기질에 의한 토양표면수의 핵종 농도는 다음과 같다.

$$A_{sw} = \frac{A_{root}}{1 + \rho_{soil} K_d d_{soil} / (d_{sw} + \phi d_{soil})} \quad (11)$$

여기서 A_{root} 는 쟁기질 전에 뿌리흡수토양의 방사능 농도이며, $d_{sw}(m)$ 는 토양표면수 깊이, $K_d (m^3/kg)$ 는 토양에 대한 핵종의 흡착평형상수, ϕ 는 토양 공극률이다. 본 연구에서 적용한 d_{sw} , ϕ , $K_d(Cs)$ 는 각각 0.03(m), 0.4(-), $1.0(m^3/kg)$ 이다 [4,10].

지하용탈상수(λ_k)

심부토양으로의 침출속도 상수 λ_k 는 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$\lambda_k = \frac{W_{inf}}{\phi d_{soil} (1 + \frac{\rho_{soil} K_d}{\phi})} \quad (12)$$

여기서 W_{inf} 은 관개담수기간동안 토양 속으로의 눈물의 평균 침투속도이며 우리나라의 경우 벼 재배 기간동안 관개수량은 강우량에 따라 차이가 있지만 벼 생육기간동안 평균침투속도는 평균 $5.5 \times 10^{-3} m/d$ 로 알려져 있다 [12].

차단계수(f)

사고로 인해 대기로 방출된 핵종은 부분적으로 식물표면에 침적된다. 총 침적량 중 식물표면에 침적된 핵종의 비를 차단계수라 하며 일반적으로 다음의 식에 의해 추정된다 [13].

$$f = 1 - e^{-aB_i(t)} \quad (13)$$

여기서 $a (m^2/kg-dry)$ 는 차단상수로 보통 3의 값을 사용하나 과일의 경우 0.3의 값을 사용한다. $B_i(t)$ 는 침적시점에서의 벼의 총 생체량이다.

토양침투상수(λ_{pc})

본 연구에서 사용된 토양침투상수는 $5.0 \times 10^{-2} (d^{-1})$ 이다. 벼의 경우 관개수로 인해 토양 표면으로부터 입자의 재부유가 존재하지 않는다. 본 연구에서 적용한 값은 재부유가 존재하는 밭토양으로부터 구한 기존 값보다 2-3배 크다 [14].

토양고착상수($\lambda_{ads}, \lambda_{des}$)

토양고착은 주로 Cs인 경우에 대해 일어난다. Whicker and Kirchner [3]에 따르면 5년동안 약 90%의 Cs이 토양에 고착된다고 하며, 이를 위해 λ_{ads} , λ_{des} 의 값으로 각각 $2.0 \times 10^{-3} (d^{-1})$, $2.1 \times 10^{-4} (d^{-1})$ 를 사용하였다.

전류계수(λ_{tr})

전류(translocation)는 식물표면에 핵종이 직접 침적되었을 때 식물의 가식부로 핵종이 이동되는 것을 말하며, Cs에 대해 $5.5 \times 10^{-3} (d^{-1})$, I에 대해 $8.5 \times 10^{-3} (d^{-1})$, Sr에 대해 $1.0 \times 10^{-3} (d^{-1})$ 값이 보통 사용된다.

풍화계수(λ_w)

일반적으로 풍화계수는 요오드를 제외한 모든 핵종에 대해 $4.95 \times 10^{-2} (d^{-1})$, 요오드(I)에 대해서는 $8.67 \times 10^{-2} (d^{-1})$ 의 값이 사용된다[15].

실 험

고리, 영광 및 울진 원자력발전소 주변 반경 5km 내에 위치하는 다섯 곳의 지역으로부터는 토양을 채취하여 한국원자력연구소 온실에서 국내 표준 방법으로 벼를 재배하였다 [16-18]. 각 토양에 대한 벼 생육일 및 침적일을 표 1에 정리하였다.

고리 토양에 대한 핵종 침적 실험은 벼의 생육 단계별로 총 3회 수행되었다. 첫째는 이식 전 침적으로 5월2일 땅이 건조한 상태에서 비료와 함께 ^{137}Cs 를 토양에 직접 침적 처리한 후 이식 전

Table 1. 벼 재배시 생육일 및 침적일

	이식일 (transplanting)	출수일 (ear-emergence)	추수일 (harvest)	침적일 (deposition)	침적방법 (treatment)	재배기간 (farming period)
고리	1998년 5월20일	8월16일	10월12일	1998년 5월2일 6월1일 8월12일	토양 침적 표면수 침적 표면수 침적	1년
영광	1999년 5월22일 2000년 5월25일 2001년 5월22일 2002년 5월22일 2002년 5월22일	8월13일	10월12일 10월11일 10월15일 10월15일 10월15일	1999년 5월4일	토양침적	5년
울진	2001년 5월22일 2002년 5월22일 2002년 5월22일	8월13일	10월15일 10월15일 10월15일	2001년 5월10일	토양침적	3년

10일 경에 관개담수와 함께 모종삽으로 토양을 약 15cm 깊이로 잘 혼합하였다. 나머지 두 경우는 생육 중 침적으로 각각 생육초기단계인 6월1일과 이삭이 생기기 시작할 무렵인 8월12일이였다. 생육 중 침적은 벼의 생육으로 인해 토양 혼합 없이 수표면 상에 ¹³⁷Cs를 고르게 직접 처리하였다. 영광 및 울진 토양에 대한 침적 실험은 토양침적으로만 하였으나, 대신 벼의 다년도 재배에 대한 전이계수 감소 정도를 조사하기 위하여 각각 5년, 3년에 걸쳐 첫해에 침적된 동일 토양으로 연속 반복 재배실험을 하고 있다. 토양 종류에 상관없이 벼 재배시 담수관개로 인해 토양 표면수는 생육 기간 동안 대략 3cm의 깊이로 일정하게 유지되다가 9월 중순이후 관개담수의 증기로 건조하기 시작하여 9월말 경에 더 이상 토양 표면수는 존재하지 않았다.

추수된 벼는 쌀알과 벃짚으로 분리하여 건조한 후 각 부분의 ¹³⁷Cs의 농도를 HPGe 검출기(EG&GORTEC)을 이용한 γ -spectrometry 법으로 측정하였다. 측정시간은 시료에 따라 0.5~2시간이었으며 오차는 10% 이내이었다.

계산 조건

이식 전에 토양 표면에 침적된 핵종이 쟁기질에 의해 토양 속으로 골고루 분산되었다고 가정하면 초기조건은 다음과 같다.

$$A_{root} = A_{dp}^0, A_{fized} = A_{body} = A_{grain} = A_{deep} = A_{sw} = 0 \quad (14)$$

생육 중 침적인 경우 침적 실험을 위해 핵종을 토양 표면수에만 균등하게 처리하였기 때문에 초기조건은 다음과 같다.

$$A_{sw} = A_{dp}^0, A_{body} = A_{grain} = A_{root} = A_{fized} = A_{deep} = 0 \quad (15)$$

초기에 토양에 침적된 총농도 A_{dp}^0 는 처리한 핵종의 양을 벼 재배 면적으로 나누어 구한다. 만약 핵종을 작물체 지상부에 처리하였다면 식물 몸체에 대한 직접 오염이 존재하므로 이 경우는 차단계수를 고려하여 표면수 격실과 벼 몸체 격실 사이에 초기 핵종의 적절한 분배가 필요하나 본 연구에서 적용한 실험은 토양표면수와 토양에 핵종을 처리한 간접 침적법을 사용하였기 때문에 차단계수는 0으로 가정한다. 또한 간접 침적시에는 식물표면에 핵종이 침적되지 않기 때문에 전류(translocation) 및 풍화(weathering)에 의한 핵종이동은 존재하지 않는다.

표 2는 토양 및 표면수로의 간접 침적시 벼의 이식전후에 따라 존재하는 핵종이동 메커니즘을 보여준다. 벼 몸체에 대한 줄기 및 뿌리흡수는 벼 이식 직후부터 시작되고, 쌀알에 대한 뿌리 및 줄기기부흡수는 출수일부터 시작되어 추수시까지 일어난다. 토양침투 및 지하용탈은 관개담수로 인한 표면수가 존재하는 9월말까지 존재한다.

Table 2. 간접 침적시 생육단계별 핵종이동 메커니즘.

<이식전 침적>

process	DP1	IP	TP	EE	NSW	HV
radioactive decay	yes	yes	yes	yes	yes	yes
percolation	no	yes	yes	yes	yes	no
root uptake						
body	no	no	yes	yes	yes	yes
grain	no	no	no	yes	yes	yes
shoot base adsorption						
body	no	no	yes	yes	yes	no
grain	no	no	no	yes	yes	no
translocation	no	no	no	yes	yes	yes
fixation on soil	no	yes	yes	yes	yes	yes
leaching	no	yes	yes	yes	yes	no

DP: deposition, IP: irrigation and plowing, TP: transplanting, EE: ear emergence, NSW: no surface water, HV: harvest

<생육중 침적>

process	DP2 or DP3	EE	NSW	HV
radioactive decay		yes	yes	yes
percolation		yes	yes	no
root uptake				
body		yes	yes	yes
grain		no	yes	yes
shoot base adsorption				
body		yes	yes	no
grain		no	yes	no
translocation		no	yes	yes
fixation on soil		yes	yes	yes
leaching		yes	yes	no

DP: deposition, EE: ear emergence, NSW: no surface water, HV: harvest

결과 및 고찰

격실별 방사능 농도

그림 2는 고리 토양의 침적 시기별 각 격실의 방사능 농도(Bq/m^2) 변화를 보여준다. 그림에서 보여주는 약어 DP, IP, TP, EE, NSW, HV는 각각 침적일, 관개담수시작일(5월11일), 이식일(5월21일), 출수일(8월16일), 토양표면건조일(9월30일), 추수일(10월12일)을 나타낸다. 이식 전(5월2일) 침적의 경우 토양표면수(surface water) 격실 농도는 이식 10일 전에 관개담수와 함께 쟁기질로 인한 토양혼합에 의해 급격히 증가한다. 관개담수에

따른 쟁기질은 토양내에 흡착되어 있던 핵종이 표면수로 탈착시키는 작용을 한다. 그 후 토양표면수 농도는 토양침투 또는 줄기부흡수에 의해 점차로 감소한다. 그러나 토양표면수 농도가 매우 작기 때문에 토양침투나 줄기부흡수 효과는 실제로는 나타나지 않는다. 생육 중(6월1일, 8월12일) 침적인 경우는 토양표면수 격실에 핵종을 처리하였으므로 침적 직후부터 줄기부흡수 및 토양침투에 의해 토양 표면수격실의 농도는 점진적으로 감소한다.

뿌리흡수토양의 방사능 농도는 5월 2일 침적의 경우 관개 및 쟁기질 시점부터 지하용탈과 토양

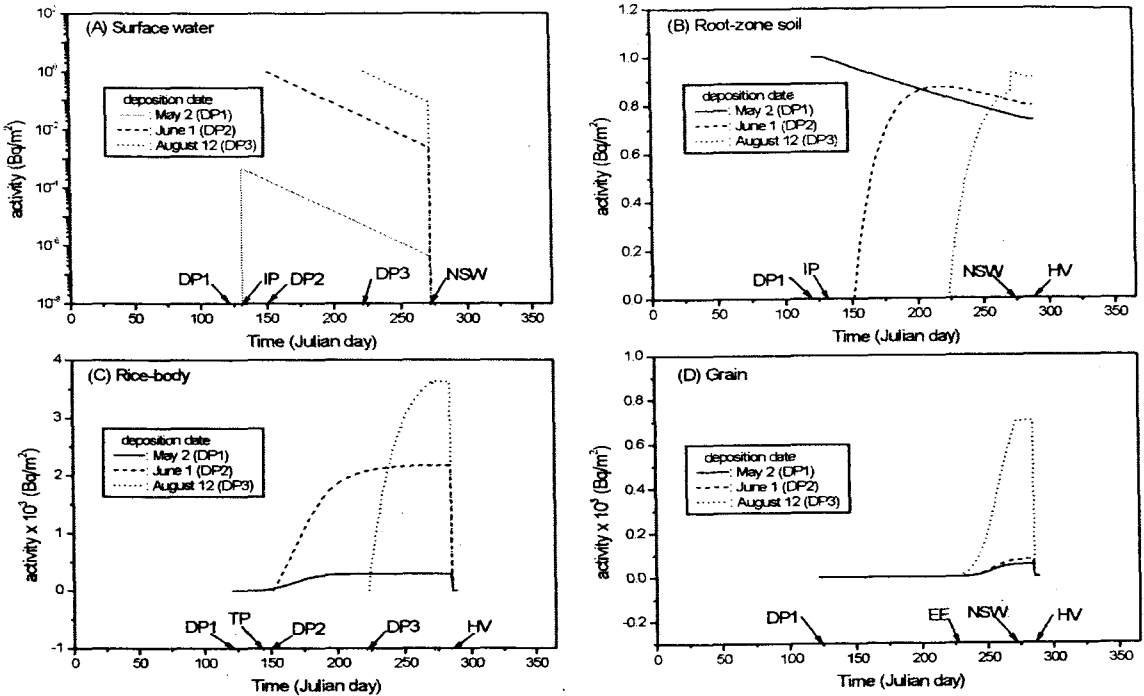


Fig. 2. Calculated activity of flooded surface water, root-zone soil, rice-body, and grain compartments (DP1: deposition (May 2), DP2: deposition (June 1), DP3: deposition (August 12), IP: irrigation and plowing (May 11), TP: transplanting (May 21), EE: ear emergence (August 16), NSW: no-surface-water (September 30), HV: harvest (October 12)).

고착으로 감소하기 시작한다. 6월1일 및 8월12일 침적의 경우 토양의 방사능 농도는 표면수격실에 존재하는 핵종이 토양침투로 이동되어 급격히 증가한 후 지하용탈과 토양 고착으로 다시 감소하는 경향을 보여준다.

벼 몸체의 방사능 농도는 침적일자 순으로 증가한다. 이는 침적일자 별로 서로 상이한 이동 메커니즘 때문이다. 그림에서 보여주지는 않지만 별도의 계산에서 이식전인 5월2일 침적인 경우, 뿌리흡수에 의한 플럭스는 줄기부흡수 플럭스보다 매우 큰 반면에 생육중 침적인 6월1일 및 8월12일 침적인 경우는 줄기부흡수 플럭스가 뿌리흡수 플럭스보다 더 크게 나타났으며 줄기부흡수 속도는 벼 몸체가 완전히 성장한 8월 12일 경우 가장 크게 나타났다. 결론적으로 줄기부흡수가 벼로의 핵종이동을 지배할 때 더 큰 방사능 농도를 가지게 되며, 특히 벼 몸체가 다 자란 후에 침적되었을 때 가장 큰 방사능 농도를 가진다.

쌀알의 방사능 농도도 벼 몸체와 유사한 결과를 보여주나 6월 1일 침적인 경우 5월 2일 침적인 경우와 큰 차이가 나지는 않았다. 이는 생육

중 침적이라도 6월1일은 이삭이 생기기 전이기 때문이다. 이삭이 생기기 전에 침적이 일어난다면 쌀알로의 핵종이동은 존재하지 않으며 벼 몸체로만 핵종이 전이된다. 이삭이 생기기 시작하면 줄기부흡수를 통한 쌀알로의 핵종이동이 존재하나 이때는 이미 표면수 격실의 농도가 토양침투나 벼 몸체로의 줄기부흡수에 의해 많이 감소된 상태이므로 쌀알의 방사능 농도는 크게 되지 않는다. 반면에 이삭이 생긴 후에 침적이 일어나면 처음부터 줄기부흡수를 통해 쌀알로 핵종이동이 일어나므로 쌀알의 방사능 농도는 커지게 된다.

입력인자에 대한 전이계수의 영향

핵종 누출 사고시 작물체로의 핵종전이는 침적 시기별로 흡수기간이 달라지며, 작물의 생육단계에 따라 흡수력이 매우 변하므로 대개 다음과 같이 정의되는 전이계수(TF)로 나타낸다[16].

입력속도상수에 대한 벼 부위별 전이계수에 대한 민감도를 분석하였다. 표준 입력값을 기준으로 각각 기준값의 0.1, 10배 만큼 입력상수를 변화시

켜 전이계수 변화를 조사하였다.

$$TF(m^2/dry.kg) = \frac{\text{수확시 부위별 건조 질량당 핵종농도 (Bq/kg-dry)}}{\text{단위면적당 핵종 침적량 (Bq/m^2)}} \quad (16)$$

그림 3은 추수시 벼 몸체의 전이계수에 대한 입력인자의 민감도를 보여준다. 이식전 침적의 경우 벼 몸체의 전이계수는 뿌리흡수속도에 가장 큰 영향이 받는다. 토양고착상수의 효과는 매우 조금 나타났으며 줄기부흡수와 토양침투상수의 영향은 나타나지 않았다. 그림 2(A)에서 보여주는 것과 같이 이식전 침적의 경우 표면수격실의 방사능 농도가 매우 낮아 줄기부흡수와 토양침투 효과는 나타나지 않았다. 한편 생육중 침적인 경우 벼 몸체의 전이계수는 줄기부흡수상수와 토

양침투상수에 매우 민감하며, 줄기부흡수와 토양침투는 서로 상반된 효과를 보여주고 있다. 토양침투가 커지면 뿌리흡수를 통한 증가효과가 발생하지만 토양침투로 인한 줄기부흡수 감소 효과가 더 크기 때문에 토양침투가 증가하면 오히려 전이계수는 감소하게 된다. 같은 줄기부흡수 효과도 8월12일 침적인 경우가 6월1일 침적에 비해 더 크게 나타났다. 왜냐하면 줄기부흡수는 벼의 생체량에 비례하므로 벼 몸체가 최대로 자란 후인 8월12일에 침적되었을 때 상대적으로 많은 핵종이 줄기부흡수를 통해 벼 몸체로 이동되기 때문이다. 요약하면, 이식전 침적의 경우는 뿌리흡수가, 이식후 침적의 경우는 줄기부흡수와 토양침투가 벼 몸체로의 핵종 이동을 지배하는 인자이다.

그림 4는 쌀알 전이계수에 대한 입력인자의 민감도를 보여준다. 이식전 침적의 경우 쌀알의 전이계수는 벼 몸체와 마찬가지로 뿌리흡수의 영향

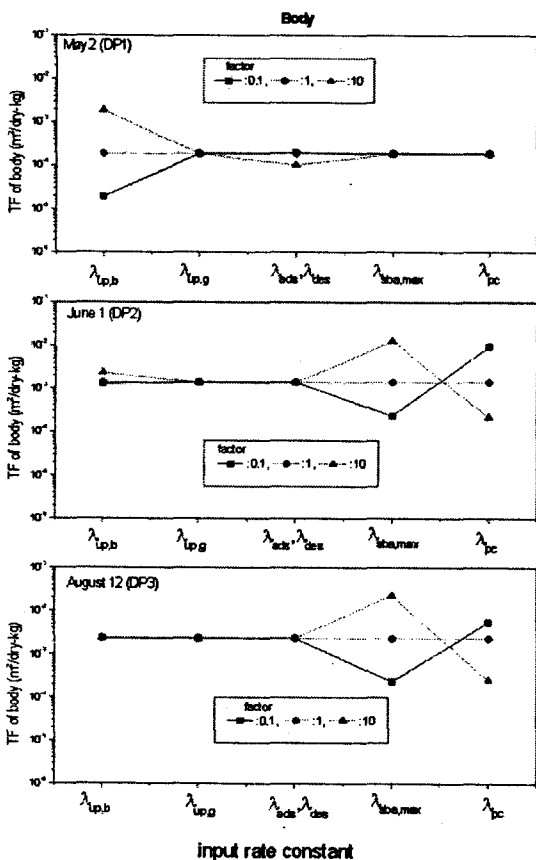


Fig. 3. Sensitivity of rice-body transfer factor to input rate constants.

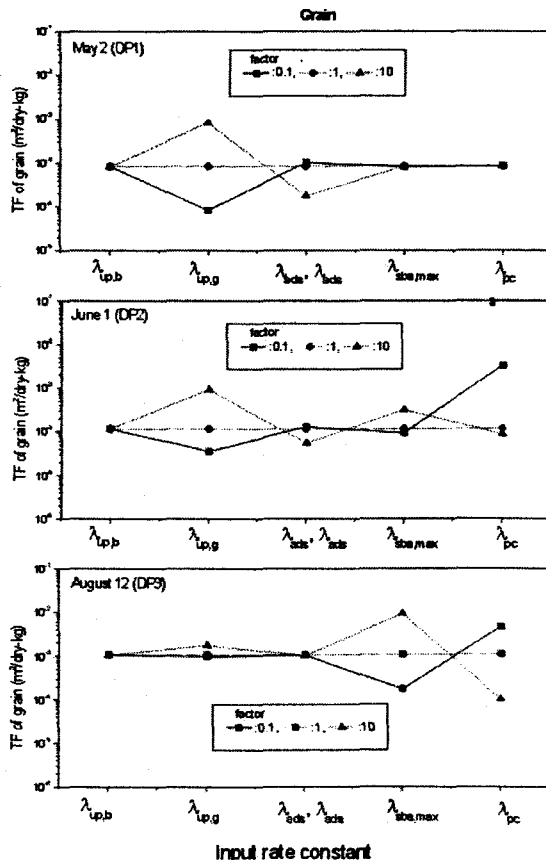


Fig. 4. Sensitivity of grain transfer factor to input rate constants.

이 지배적으로 나타난다. 동일한 침적에 대해 토양고착의 영향이 약간 존재하였으나 줄기부흡수와 토양침투효과는 나타나지 않았다. 생육초기(6월1일) 침적의 경우, 뿌리흡수의 영향이 여전히 줄기부흡수보다 크게 나타난다. 이는 줄기부흡수가 크게 존재하는 벼 몸체와는 다른 결과이다. 쌀알로의 핵종이동은 이삭이 생기기 시작하는 출수일부터 일어나기 시작하므로 벼의 생육중이라도 이삭이 생기기전에 침적이 되면 뿌리흡수가 여전히 중요하게 작용할 것이다. 그러나 만약 토양침투 속도가 매우 작다면 뿌리토양의 핵종농도가 낮아 자연히 뿌리흡수 되는 양도 작아질 것이다. 이런 경우에는 이삭이 생기기 전에 침적이 일어났더라도 줄기부흡수의 영향이 더 크게 나타난다. 토양침투상수가 기준값의 0.1인 경우를 보면 생육초기 침적이라도 줄기부흡수의 영향으로 전이계수의 값이 더 크게 나타나는 이유가 여기에 있다. 한편 벼 몸체가 다 자란 후인 8월 12일 침적된 경우는 줄기부흡수와 토양침투가 모두 중요하게 나타나지만 뿌리흡수의 영향은 무시할 수 있었다. 한편 침적이 추수일에 가깝게 일어

날수록 줄기부흡수에 의한 쌀알로의 핵종이동은 더 잘 일어난다.

실험과 모델의 비교

그림 5에 고리 토양에 대한 침적시기별로 실험으로 측정된 전이계수와 모델에 의한 예측값의 비교를 보여준다. 실험으로부터 구한 벼 몸체의 전이계수는 이식전(5월2일) 침적, 생육초기(6월1일) 침적, 생육후기(8월12일) 침적의 경우 각각 $1.3 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4}$, $2.3 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$, $1.8 \times 10^{-3} \sim 6.9 \times 10^{-3}$ 의 범위에 있었다. 쌀알의 측정된 전이계수는 이식전 침적, 생육초기 침적, 생육후기 침적의 경우 각각 $4.4 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-4}$, $1.3 \times 10^{-4} \sim 4.4 \times 10^{-4}$, $1.0 \times 10^{-3} \sim 4.2 \times 10^{-3}$ 의 범위에 있었다. 측정된 전이계수의 변화는 토양의 차이로 기인한 것으로 보인다. 일반적으로 뿌리흡수, 줄기부흡수, 지하용탈은 토양의 성질에 영향을 받는다. 그러나 토양특성과 이러한 물리화학적 메커니즘과의 관계는 아직 잘 정립되어 있지 못하다. 따라서

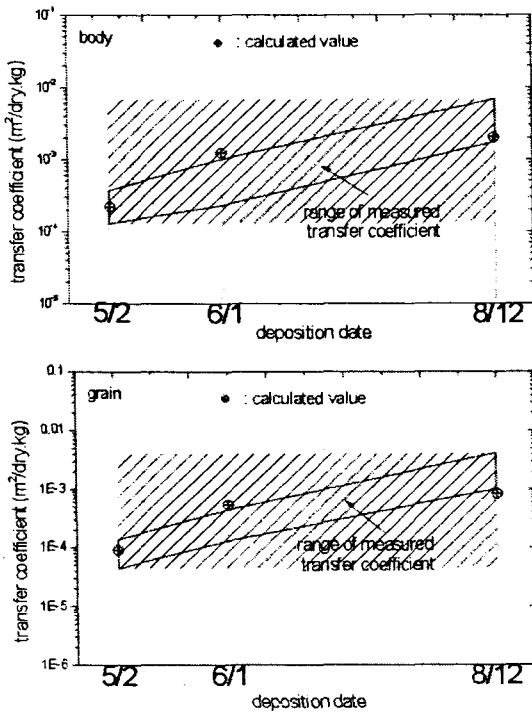


Fig. 5. Comparison of calculated transfer factors with those obtained from deposition experiments performed with Kori soil.

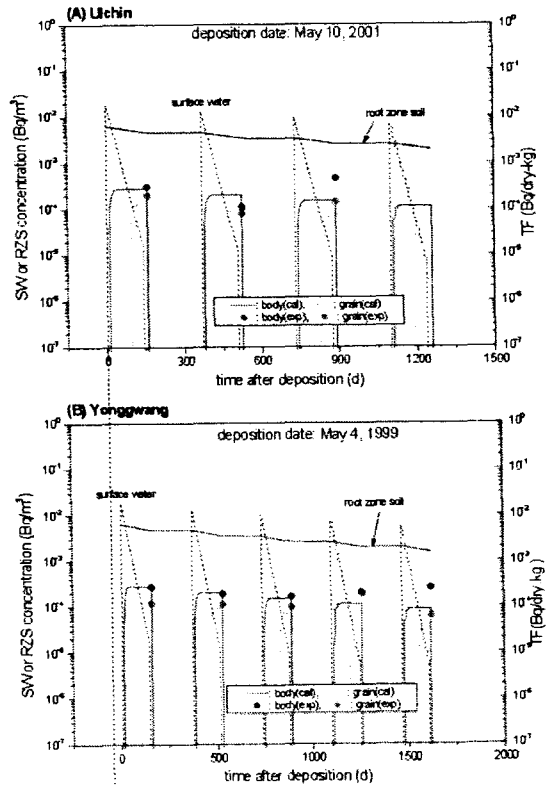


Fig. 6. Comparison of calculated transfer factors with those obtained from deposition experiments performed with Ulichin and Yonggwang soils.

본 연구에서는 토양특성 차이로 인한 효과는 모델에 반영하지 않았다.

모델에 의해 예측된 벼 몸체 및 쌀알의 전이계수는 실험값과 같은 승수 내에서 잘 일치하였다. 특히 침적일 순으로 전이계수가 증가하는 실험 결과를 모델은 잘 예측하고 있다. 이는 줄기부흡수를 고려한 본 모델로만 가능한 것이다. 만약 줄기부흡수를 통한 핵종이동을 고려하지 않는 기존 모델을 적용하였을 경우는, 표면수에 처리된 핵종은 토양침투 후 뿌리흡수를 통해서만 벼로 전이될 것이다. 이 경우는 침적일자가 빠를수록 더 많은 핵종이 벼로 전이되므로 실험에서 얻은 결과와 반대의 현상이 얻어진다. 이는 발작물을 기준으로 개발된 기존 모델로는 논으로의 핵종이동을 정확하게 평가할 수 없는 이유이다. 따라서 벼 생육중 논으로 유출된 핵종이동 평가모델에서 줄기부흡수의 고려가 매우 중요하다.

그림 6은 영광 및 울진 논토양에 대해 토양침적 후 연속적으로 재배된 벼의 부위별 전이계수의 실험 및 모델링 결과를 보여준다. 일반적으로 년차별 전이계수는 토양 중의 핵종 농도가 점차 감소하면서 벼로의 전이 또한 감소하므로 점진적으로 감소하여야 한다. 그러나 울진 3년차, 영광 토양 4, 5년차 실험 결과는 예년에 비해 다소 증가하는 비정상적 결과를 보여주는데 이는 연도별로 다른 벼의 생체량에 기인한 것으로 판단된다. 한편 모델은 일부 실험데이터와의 편차에도 불구하고 영광 5년차 쌀알의 전이계수를 포함하여 전체적으로 실험결과를 잘 예측하고 있다.

결 론

벼를 재배하는 경우 관개담수로 인해 생육기간 중 토양표면은 항상 물로 채워져 있다. 이를 위해 토양표면수 격실과 기부흡수의 개념을 도입하여 기존 모델을 개선하였으며, 벼의 생육단계별 뿌리흡수속도, 줄기부흡수속도, 가식부이동속도의 변화를 고려하기 위해 이들 속도상수를 벼의 부위별 생체량 함수로 모델링 하였다. 또한 동일 토양에 벼의 연속 재배시 쟁기질 및 관개에 의한 토양혼합효과를 고려하여 주었다.

핵종이동에 중요한 메커니즘은 핵종 침적 시기 별로 달랐다. 고리 토양의 경우 이식 전 침적의 경우 벼 몸체로의 전이는 뿌리흡수가 가장 중요하게 작용하는 반면, 생육 중 침적인 경우 줄기부흡수, 토양침투가 중요하게 작용하였다. 쌀알의

경우 이식 전 침적시 뿌리흡수와 가식부이동이 생육중 침적시 줄기부흡수, 토양침투, 가식부이동이 중요한 핵종이동 메커니즘으로 작용했다.

토양표면수 격실과 줄기부흡수를 고려한 본 연구의 모델에 의한 예측치는 침적 시기별 뿐 아니라 년차별 전이계수 변화 또한 측정된 실험데이터와 대체적으로 잘 일치하였다. 이 결과는 본 연구에서 제시한 모델이 관개담수를 필수적으로 요구하는 벼 재배시 핵종 이동 평가를 위해 매우 효과적으로 적용될 수 있음을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Müller, H. and G. Pröhl, "ECOSYS-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accident," *Health Physics*, 64, 232-252(1993)
2. Abbott, M.L. and A.S. Rood, "CORMIDA: A radionuclide food chain model for acute fallout deposition," *Health Physics*, 66, 17-29(1994)
3. Whicker, F.W. and T.B. Kirchner, "PATHWAY: A dynamic food-chain model to predict radionuclide ingestion after fallout deposition," *Health Physics*, 52, 717-737(1987)
4. Hwang, W.T., G. Cho and M.H. Han, "Development of a dynamic food chain model DYNACON and its application to Korean agricultural conditions," *J. of Nuclear Science and Technology*, 35(6), 451-461(1998)
5. 유동한, 최희주, 이한수, 섭취경로를 통한 방사성핵종의 거동분석을 위한 수학적 모델 개발에 대한 연구, KAERI/TR-2291, (2002)
6. Myttenaere, C., P. Bourdeau and M. Masset, "Relative importance of soil and water in the direct contamination of flooded rice with radiocesium," *Health Physics*, 16, 701-707(1969)
7. D'Souza, T.J., and K.B. Mistry, "Adsorption 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(1980)
8. 금동권, 이한수, 최희주, 이창우, EOCREA-RICE (version 1), 2003-01-12-5222, 프로그램 조정심의위원회(2003)
 9. Keum, D.K., H.S. Lee, H.J. Choi, H.S. Kang, K.M. Lim, Y.H. Choi and C.W. Lee, " A dynamic compartment model for assessing the transport of radionuclide deposited onto flooded rice-fields," J. Environmental Radioactivity, in press(2004)
 10. Choi, Y.H., K.M. Lim, W.Y. Lee, S. Diabate and S. Strack, TWFT and OBT in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions, J. Environmental Radioactivity, 58, 67-85(2002)
 11. Lee, J.H., Y.H. Choi, W.T. Hwang, M.H. Han, W.Y. Lee, H.K. Park, and C.W. Lee, C.W. Development of computer code for evaluating internal radiation dose through ingestion and inhalation pathways, KAERI/RR-998/90, Korea Atomic Energy Research Institute(1991)
 12. 이은웅, 4정 수도작, 향문사, 서울, 1996.
 13. Chamberlain, A.C., "Interception and retention of radioactive aerosols by vegetation," *Atmo. Env.* 4, 57-78(1970)
 14. Anspaugh, L.R., J.H. Shinn, P.L. Phelps, and N.C. Kennedy, Resuspension and redistribution of plutonium in soils, *Health Physics*, 29, 571-582(1975)
 15. Miller, C.W. and F.O. Hoffman, "An estimation of the environmental half-time for radionuclides deposited on vegetation," *Health Physics*, 731-744(1983)
 16. 최용호, 임광목, 박효국, 최희주, 이한수, 고리 및 영광 농토양에 대한 ^{137}Cs 의 모의 사고 침적시 토양 벼-전이계수, 대한방사선방어학회지, 27, 201-215(2002)
 17. 최용호, 방사선 환경 방호기술 개발:육상 생태계 사고영향 평가기술개발, 1단계 최종보고서, KAERI/RR-2035/ 99(2000)
 18. 이한수, 사고시 육상생태계 방사능 영향평가 기술개발, KAERI/RR-2346/2002(2003)