

Model for assessing the contamination of agricultural plants by accidentally released tritium

Dong-Kwon Keum · Han-Soo Lee · Hee-Suk Kang ·

Young-Ho Choi and Chang-Woo Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

삼중수소 사고유출로 인한 농작물 오염 평가 모델

금동권 · 이한수 · 강희석 · 최용호 · 이창우

한국원자력연구소

(2004년 11월 12일 접수, 2005년 2월 21일 채택)

Abstract - A dynamic compartment model was developed to appraise the level of the contamination of agricultural plants by accidentally released tritium from nuclear facility. The model consists of a set of inter-connected compartments representing atmosphere, soil and plant. In the model three categories of plant are considered: leafy vegetables, grain plants and tuber plants, of which each is modeled separately to account for the different transport pathways of tritium. The predictive accuracy of the model was tested through the analysis of the tritium exposure experiments for rice-plants. The predicted TFWT(tissue free water tritium) concentration of the rice ear at harvest was greatly affected by the absolute humidity of air, the ratio of root uptake, and the rate of rainfall, while its OBT(organically bound tritium) concentration the growing period of the ear, the absolute humidity of air and the content of hydrogen in the organic phase. There was a good agreement between the model prediction and the experimental results for the OBT concentration of the ear.

Key words : tritium, accidental release, dynamic compartment model, TWFT, OBT, rice

요약 - 원자력시설로부터 삼중수소 사고 누출시 시설 주변 농작물의 삼중수소 오염 평가를 위한 동적격실모델 ECOREA-H3를 개발하였다. 모델의 격실은 크게 대기, 토양, 농작물로 구성되며 농작물은 엽채류 곡물류, 근근류의 3개 소그룹으로 분류하여 각각 독립적으로 모델링하였다. 벼에 대한 삼중수소 피폭실험 해석을 통해 모델의 예측 정확도가 조사되었다. 모델링 결과 추수시 벼 이삭의 TFWT 농도는 입력데이터 중 공기의 절대습도, 뿌리흡수비, 강우량에, OBT 농도는 공기의 절대습도, 이삭의 성장기간, 유기물의 수소함량의 영향을 상대적으로 크게 받는 것으로 나타났다. 벼이삭 OBT 농도에 대한 모델 계산과 실험 측정값은 잘 일치하였다.

중심어 : 삼중수소, 사고유출, 동적격실모델, TFWT, OBT, 벼

서 론

삼중수소 섭취모델은 삼중수소로 오염된 음식물 소비로 인한 내부 피폭 선량 계산을 위한 것으로 농작물, 육류 등 일상생활을 영위하는데 필요한 식품군에 포함된 삼중수소의 평균 농도를 선량환산인자로 환산함으로써 피폭의 정도를 나타낸다. 따라서 삼중수소 누출에 의한 농작물오

염 평가는 선량계산을 위한 필수적인 단계이다.

원자력발전소의 정상 가동시에는 평형모델인 비방사능모델(specific activity model)로부터 주변 환경 및 농작물에 대한 삼중수소 오염 정도를 평가하고, 사고 유출 시에는 동적모델(dynamic model)을 이용하여 시간에 따른 삼중수소 변화를 평가하는 것이 일반적이다. 삼중수소 오염평가를 위한 동적모델은 크게 상세모델[1-3]과 선형

격실모델[4-6]로 구분할 수 있다. 상세모델은 비교적 실시간 (보통 1시간 간격)으로 풍속, 강우량, 일조량, 온도, 습도 및 광합성 효과를 반영하여 삼중수소 이동속도를 계산하기 때문에 정교하게 누출효과를 평가할 수 있다. 그러나 상세모델은 막대한 양의 기상 및 부지 특성 데이터, 모델의 복잡성 및 오랜 계산시간으로 인한 단점으로 누출 후 일주일 이내의 단기적인 평가에 주로 활용되고 있다. 한편 선형격실모델은 환경시스템을 몇 개의 대표적 격실로 구분하여 격실간 삼중수소 교환을 선형미분방정식으로 표현한다. 기상조건 등 부지특성데이터는 일반적으로 작물 생육기간의 평균값을 사용하므로 입력데이터 수가 상세모델에 비해 현저히 적고, 모델 적용이 쉬워 장기평가에 주로 활용된다.

국내의 경우 주요 농작물에 대한 삼중수소 모의 누출 실험은 다수 수행되었으나[7-9], 사고 유출시 시설 주변의 농작물로 전이된 삼중수소 오염 정도를 평가할 수 있는 동적 모델의 개발은 거의 이루어지지 않았다[10]. 본 논문은 삼중수소 사고 유출로 인한 국내 농작물의 오염을 종합적으로 평가하기 위해 개발된 동적격실모델 ECOREA-H3에 대한 개요 및 벼에 대한 삼중수소 모의 누출실험에 대한 모델 적용 결과이다.

ECOREA-H3

모델의 일반 개요

육상 생태계에 존재하는 식물들은 생육형태에

따라 곡물류(벼, 보리, 밀, 콩류), 엽채류(배추, 상추, 시금치 등), 근근류(감자, 고구마, 무우 등)로 크게 분류할 수 있다. 그림 1에 모델 ECOREA-H3에 대한 구성격실(compartment)과 이동경로(pathway)를 보여준다. 대기는 2개 격실 (HTO 및 HT(g))로 구성되고, 토양은 깊이에 따라 다른 뿌리흡수율을 고려하기 위하여 3개 격실로 나누었으며, 침적(deposition)과 증발(evaporation)은 표면토양/표면수(벼의 경우)를 통하여 일어난다고 가정한다. 작물은 종류에 따라 구성 격실이 다르다. 곡물류(grain plant)는 벼, 밀, 보리, 콩과 같이 알곡을 가지며 가식부가 지상에 위치하는 식물군이다. 곡물식물은 크게 몸체(body)와 알곡(grain)으로 나누어지며, 몸체와 알곡은 다시 각각 OBT 격실과 HTO 격실 2가지로 구분된다. 대기로부터의 HTO 침적과 호흡 및 증산(assimilation and transpiration)은 몸체 HTO 격실을 통해서 일어난다고 가정한다. 몸체 HTO 격실은 몸체 OBT 및 알곡 HTO 격실과 서로 삼중수소를 교환할 수 있다. 그러나 알곡 OBT 격실로 전환된 삼중수소는 세포조직에 비가역적으로 고정된다는 가정과 함께 알곡 OBT 격실에서 몸체 HTO 격실로의 이동은 고려하지 않는다. 토양으로부터의 뿌리흡수는 몸체 HTO 격실을 통해서만 일어난다고 가정한다. 다른 발작물 곡물류와는 다르게 벼의 경우는 관개담수로 인한 표면수가 존재하므로 표면수로부터의 물의 흡수에 의한 줄기기부흡수가 존재한다. 한편 고구마, 감자와 같은 근근류 (tuber plant)는 가식부가 땅 밑에 존재하므로 식물의 몸체 뿐 아니라 열매를

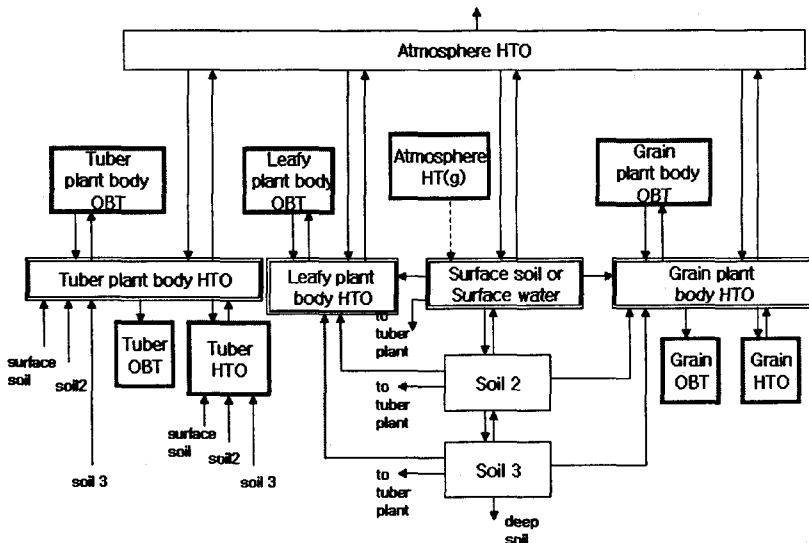


Fig. 1. Compartments and pathways of ECOREA-H3 compartment model.

통해서도 수분을 흡수한다는 점에서 곡물류와 다르다. 따라서 근근류의 경우 격실의 수는 곡물류와 동일하나 이동경로는 3개가 더 많다. 상추, 배추, 시금치와 같은 엽채류 (leafy vegetables)는 가식부가 전부 지상에 존재하며 열매가 없다. 이 경우 작물은 몸체 HTO 및 OBT 격실로만 구성된다.

격실 사이의 삼중수소의 이동은 각 격실의 삼중수소 농도와 전달속도상수의 곱에 비례한다는 가정과 함께 다음과 같이 일반적으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dA}{dt} = (\mathbb{K} - \lambda_d)A \quad (1)$$

여기서 A 는 격실의 삼중수소 농도 벡터, \mathbb{K} 는 전달속도상수 매트릭스, λ_d 는 삼중수소의 붕괴상수 ($6.44 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$)이다. 누출이 시작되기 전 각 격실의 삼중수소 농도는 0이다. 삼중수소가 누출되는 동안 대기격실의 삼중수소 농도는 누출평균농도로 일정하게 유지된다고 가정한다. 대기에서 가스 상태의 HT(g)가 HTO로 산화되는데 장기간(8~10년)이 소요되므로 대기에서 HT(g)→HTO(l)로의 변화는 무시하였다[4]. 가스 상태의 삼중수소는 광합성에 직접 참가하지 않을 뿐 더러 물에 대한 용해도도 매우 낮아 습침적이 일어나지 않으며, 토양에 건침적된 후에도 토양 미생물에 의해 HTO로 빠르게 산화되어 물의 순환 사이클에 직접 포함되지 않으므로 HT(g)는 토양침적만 한다고 가정한다. 원자력발전소에서 HT(g) 형태로 배출되는 삼중수소는 HTO 형태에 비해 상대적으로 매우 작고[11], 토양 침적속도가 HTO 보다 작은 것을 감안하면 HT(g)의 영향은 실제로는 크게 나타나지 않을 것으로 예측된다.

식물성장 방정식

식물이 성장하면 함유수분과 유기질의 양이 변화하므로 작물의 삼중수소 농도와 이동 플럭스에 영향을 미친다. 작물은 가식부와 비가식부로 구분되는데 열매식물(곡물류, 근근류)의 경우 가식부는 열매(콩, 벼, 보리, 고구마, 무우 등), 비가식부는 식물의 몸체이다. 가식부와 비가식부는 성장속도와 성장시점, 성장기간이 서로 상이하므로 각각 독립적인 성장방정식을 적용하는 것이 합리적이다. 식물 성장 효과를 고려하기 위

하여 몸체와 열매에 대해 각각 다음과 같은 전형적인 S자 형태의 성장방정식을 적용하였다

- 몸체

$$B_{body}(t) = \frac{B_{body, max} B_{body, i}}{(B_{body, max} - B_{body, i})e^{-k_{bg} t_g} + B_{body, i}} \quad (2)$$

- 열매

$$B_{fruit}(t) = \frac{B_{fruit, max} B_{fruit, i}}{(B_{fruit, max} - B_{fruit, i})e^{-k_{fg} t_g} + B_{fruit, i}} \quad (3)$$

여기서

$B_{body, max}$: 추수시 몸체의 생체량 (kg/m^2)

$B_{fruit, max}$: 추수시 열매의 수확량 (kg/m^2)

$B_{body, i}$: 몸체의 초기 생체량 (kg/m^2)

$B_{fruit, i}$: 열매의 초기 생체량 (kg/m^2)

k_{bg} : 몸체의 성장상수 (h^{-1})

k_{fg} : 열매의 성장상수 (h^{-1})

t_g : 성장시점으로부터의 시간 (h)

엽채류(상추, 시금치, 배추 등)는 열매가 존재하지 않고 몸체가 바로 가식부이므로 식(2)만이 성장함수로 적용된다. 식(2) 및 식(3)에 포함되어 있는 상수들은 식물의 고유 특성인자이며 입력데이터이다.

전달속도상수(transfer rate)

격실 사이의 삼중수소 전달속도상수는 국부평형(local equilibrium)을 가정하여 격실간 물질수지식으로부터 구할 수 있다[1,2]. 이와 같이 유도된 곡물류에 대한 격실간 전달속도상수를 표1에 나타내었다. 곡물류에 속하는 벼는 재배기간 동안 관개담수를 하므로 토양 격실간의 삼중수소 이동경로가 밭에서 생산되는 곡물과 조금 다르다. 즉 관개수로 인해 논토양은 물에 포화된다. 이 경우 표면토양 건조로 발생하는 토양심부에서 토양표면으로의 물의 상방향 이동은 실제로 일어나지 않으므로 $K_{s2,s3}$ 및 $K_{s3,s2}$ 값은 0으로 가정할 수 있다. 또한 심부토양으로 사라지는 물의 이동속도 $K_{s3,s3}$ 의 값으로 서구 발작물에 대한 평균값 [1] 대신 국내 논토양에 대한 물의 침투속도 (W_{inf})를 이용하여 구하였다.

Table 1. Transfer rates between compartments for grain plants.

Transfer rate ^{a)}	from	to	Value in h ⁻¹
$K_{a,a}$	Atmosphere HTO or HT(g)	Outside	0.693 (Raskob, 1990, 1993)
$K_{s3,s3}$	soil 3	Deep soil	3.42×10^{-4} (Raskob, 1990, 1993) for dry farming plant $W_{ir}/d_1/\theta$ for rice
$K_{bh,a}$	Body HTO	Atmosphere HTO	$0.139/\mu$ (t) ^{b)} based on 0.347 for $\mu=0.4 \text{ kg/m}^2$
$K_{a,bh}$	Atmosphere HTO	Body HTO	$R_a K_{bh,a} M_{bh}/M_a$
$K_{a,ss}$	Atmosphere HTO or HT(g)	surface soil	$V_{d,HTO}/H_m + 0.11 \times R_{rain}/M_a$ for HTO $V_{d,HT}/H_m$ for HT(g)
$K_{ss,a}$	surface soil	Atmosphere HTO	$(K_{a,ss}M_a - K_{s3,s2}M_{s3} - (1-R_a)/R_a K_{a,bh}M_a)/M_{ss}$
$K_{ss,bh}$	surface soil/water	Body HTO	$(1-R_a)/R_a K_{a,bh}M_a/M_{ss}F_1$
$K_{s2,bh}$	soil 2	Body HTO	$(1-R_a)/R_a K_{a,bh}M_a/M_{s2}F_2$
$K_{s3,bh}$	soil 3	Body HTO	$(1-R_a)/R_a K_{a,bh}M_a/M_{s3}F_3$
$K_{s2,ss}$	soil 2	surface soil/water	$K_{s3,s3}M_{s3}/M_{s2}$ for dry farming grain plant 0 for rice
$K_{s3,s2}$	soil 3	soil 2	$K_{s3,s3}M_{s3}/M_{s2}$ (= $K_{s3,s3}$) for dry farming grain plant 0 for rice
$K_{ss,s2}$	surface soil/water	soil 2	$(K_{a,ss}M_a + K_{s2,ss}M_{s2})/M_{ss} - (K_{ss,bh} + K_{ss,a})$
$K_{s2,s3}$	soil 2	soil 3	$(K_{ss,s2}M_{ss} + K_{s3,s2}M_{s3})/M_{s2} - (K_{s2,ss} + K_{s2,bh})$
$K_{bh,bo}$	Body HTO	Body OBT	$0.693/T_{bo}$
$K_{bo,bh}$	Body OBT	Body HTO	$K_{bo,bh}M_{bo}/M_{bh}$
$K_{bh,fh}$	Body HTO	fruit HTO	$0.693/T_{bh}$
$K_{fh,bh}$	fruit HTO	Body HTO	$K_{bh,fh}M_{bh}/M_{fh}$
$K_{bh,fo}$	Body HTO	fruit OBT	$1.386 \times M_{fo}/T_{ff}/M_{bh}$

a) a : atmosphere, ss : surface water, s2 : soil 2, s3 : soil 3, bh : body HTO, bo: body OBT, fh : fruit(ear) HTO, fo : fruit OBT.

b) water content of body(μ) = $B_{body} \times f_{bh}$ or $B_{body}(\text{fresh}) - B_{body}(\text{dry})$.

전달속도상수를 구하기 위해서는 각 격실의 수소 함량(inventory)을 알아야 한다. 단위 면적당 공기 및 토양 격실의 수소 함량은 다음과 같이 계산된다.

$$M_a(\text{kg/m}^2) = H_m(\text{m}^3/\text{m}^2) \times \rho(\text{kg/m}^3) \times 11\% \quad (\text{공기 격실}) \quad (4)$$

$$M_{ss}(\text{kg/m}^2) = 1000(\text{kg/m}^3) \times d_1(\text{m}) \times \theta \times 11\% \quad (\text{표면 토양 격실}) \quad (5)$$

$$M_{s2}(kg/m^2) = 1000(kg/m^3) \times d_2(m) \times \theta \times 11\% \quad (6)$$

(토양2격실)

$$M_{s3}(kg/m^2) = 1000(kg/m^3) \times d_3(m) \times \theta \times 11\% \quad (7)$$

(토양3격실)

여기서

H_m : 삼중수소 대기 plume의 높이 또는 대기의 혼합영역 높이 (m)

ρ : 공기의 절대습도 (kg/m^3)

d_1, d_2, d_3 : 각각 표면토양, 토양2 및 토양3의 두께 (m)

θ : 토양의 평균 수분 함수율 (-)

벼의 경우 표면토양을 대신하는 표면수격실의 수소 함량은 다음과 같다.

$$M_{ss}(kg/m^2) = 1000(kg/m^3) \times d_{sw}(m) \times 11\% \quad (8)$$

(표면수격실)

단 $d_{sw}(m)$ 는 표면수의 평균 깊이이다. 한편 식물의 몸체와 열매(콩, 벼, 보리, 고구마, 감자 등)의 생체량이 수분을 포함한 무게로 주어질 때 HTO 및 OBT 격실의 수소함량은 다음과 같이 구한다.

$$M_{bh}(kg/m^2) = B_{body}(t) \times f_{bh} \times 11\% \quad (9)$$

(몸체 HTO격실)

$$M_{bo}(kg/m^2) = B_{body}(t) \times (1 - f_{bh}) \times f_{org} \quad (10)$$

(몸체 OBT격실)

$$M_{fh}(kg/m^2) = B_{fruit}(t) \times f_{fh} \times 11\% \quad (11)$$

(열매 HTO격실)

$$M_{fo}(kg/m^2) = B_{fruit}(t) \times (1 - f_{fh}) \times f_{org} \quad (12)$$

(열매 OBT격실)

여기서 f_{bh} 는 몸체의 수분 함량비, f_{fh} 는 열매의 수분 함량비, f_{org} 는 유기물의 수소함량비로 작물별로 다른 값을 가진다. 일반적으로 유기물의

수소 함량비는 해당 농작물의 유기물(지방, 단백질, 탄수화물)구성비와 각 유기물의 수소 함량비(지방 : 12%, 탄수화물 : 7%, 단백질 : 6%)의 곱으로부터 구할 수 있으나 본 연구에서는 평균적으로 유기물의 약 8%가 수소로 구성되어 있다고 가정하였다 [1,2]. 식(9)~식(10)을 이용하여 작물의 삼중수소의 함량을 성장단계별로 구하기 때문에 본 모델은 작물의 생육단계에 따른 삼중수소 오염 효과를 예측할 수 있는 장점이 있다.

모델의 응용

벼 생육 중에 수행된 삼중수소 모의 피폭실험에 ECOREA-H3를 적용하였다. 모의실험에 사용한 벼는 장안벼로 야외에서 플라스틱 포트에 재배되었다. 벼의 이식일은 5월26일, 이삭의 출수일은 8월14일이었으며, 추수일은 10월10일이었다. 삼중수소 피폭은 벼를 특별히 제작한 밀폐된 피폭상자를 이용하여 수행하였다. 삼중수소 피폭은 이삭의 성장 단계에 따라 8월25일, 9월1일, 9월10일 세 번에 걸쳐 독립적으로 수행하였다. HTO 용액을 피폭상자 내의 가열판 위에 놓고 오전 9시경 1시간동안 가열 증발시켰으며 팬을 작동시켜 피폭상자 내부에 골고루 퍼지게 하였다. 피폭하는 동안 측정된 공기의 온도, 상대 및 절대습도, 공기수분(air moisture)의 평균 HTO 농도의 값들을 표2에 요약하여 놓았다. 피폭 종료 직후부터 벼 몸체와 이삭을 적당한 시간 간격으로 채취하여 각각 동결건조법과 산화연소장치를 이용하여 분석용 시료를 추출하였으며, 각 시료의 HTO 및 OBT를 액체섬광계수기(LSC)로 측정하였다 [12].

입력 데이터

표3에 계산을 위한 입력데이터가 주어진다. 벼의 성장함수 데이터는 벼를 재배하면서 채취한 벼 몸체와 이삭의 건조생체량과 식(2)와 (3)을

Table 2. Air humidity and mean HTO concentration during exposure.

실험 번호	피폭일	온도 (°C)	피폭시 포화공기의 절대습도(kg/m^3)	피폭시 공기의 평균 상대습도(%)	공기수분의 평균 HTO 농도 $C_a \times 10^3$ (Bq/kgH ₂ O)
D1	8월25일	30.7	3.87×10^{-2}	90	55634
D2	9월1일	30.2	4.35×10^{-2}	92	63361
D3	9월10일	33.1	3.83×10^{-2}	79	62972

Table 3. Input data for rice-plant.

input data	value
공기의 혼합층 높이 (H_m)	1000 m
생육중 공기의 평균절대습도 (ρ)	0.012 kg/m ³
대기로부터 HTO 토양 침적속도 ($V_{d,HTO}$)	5 x 10 ⁻³ m/s
대기로부터 HT(g) 토양 침적속도 ($V_{d,HT}$)	1.5 x 10 ⁻³ m/s
생육중 평균강우량 (R_{rain})	0.07 kg/m ² h
표면수 평균 깊이 (d_1)	0.03 m
토양2 두께 (d_2)	0.10 m
토양3 두께 (d_3)	0.15m
수분의 토양 침투속도 (W_{inf})	2.3x10 ⁻⁴ (m/h)
토양의 공극률 (θ)	0.4
표면수로부터 기부 흡수율 (F_1)	0.2
토양2로부터 뿌리 흡수율 (F_2)	0.4
토양3로부터 뿌리 흡수율 (F_3)	0.4
식물과 대기 평형 비율 (R_a)	0.5
이삭의 성장기간 (T_{ff})	1200h (50 days)
몸체의 OBT→HTO 방향 수소 손실의 반감기 (T_{bo})	240h (10 days)
몸체HTO→이삭HTO 방향 수소 손실의 반감기 (T_{bh})	2h
벼 몸체의 수분 함량비 (f_{bh})	0.65
이삭의 수분 함량비 (f_{fh})	0.35
유기물의 수소 함량비 (f_{org})	0.08%
추수시 몸체의 생체량 $B_{body, max}$	1.55 kg/m ²
추수시 열매의 수확량 $B_{fruit, max}$	0.82 kg/m ²
몸체의 초기 생체량 $B_{body, i}$	0.1 kg/m ²
열매의 초기 생체량 $B_{fruit, i}$	0.01 kg/m ²
몸체의 성장상수 k_{bg}	0.1 d ⁻¹
열매의 성장상수 k_{fg}	0.17 d ⁻¹

fitting하여 구하였다. 공기의 절대습도는 우리나라와 비슷한 기후의 일본 데이터를 적용하였으며 [13], 강우량은 기상탑에서 측정된 벼 생육 기간 동안의 평균값이며, 수분함량비는 벼의 건조 및 습윤 생체량 차이로부터 구하였다. 벼 이삭이 출수 한 후 성장하는 기간은 약 50일로 가정하였으며, 몸체OBT격실에서 몸체HTO격실 방향 및 몸체HTO격실에서 이삭HTO격실 방향의 수소손실의 반감기는 밀의 경우와 유사한 것으로 보아 UFOTRI[1,2]와 동일한 값을 적용하였다. 표면수 깊이, 뿌리토양두께, 토양의 공극률, 물의 농도양 침투속도 등은 국내 벼농사 재배환경과 부합되는 값으로 문헌으로부터 인용하였다 [14,15]. 이외 별도로 언급되지 않은 데이터는 국내자료 미비로 UFOTRI[1,2]를 참조하였다. 상기 모의실험의 경

우 HT(g) 형태의 삼중수소는 발생되지 않으므로 HT(g)에 의한 선원항 및 토양침적은 고려하지 않았다.

입력데이터에 대한 이삭의 TFWT 및 OBT 농도의 민감도

주요 입력데이터에 대한 가식부(이삭)의 TFWT 및 OBT 농도의 민감도 조사를 위해 대표적으로 피폭실험 D1(피폭일 : 8월25일)에 대한 추수시 이삭의 TFWT 및 OBT 농도를 입력인자 변화와 함께 계산하였다. 그 결과는 그림 2에서 보여준다. 민감도 조사에 적용된 입력데이터의 범위는 표4에 있다. 농도는 피폭시 공기수분의 평균 농도(C_a^0 , Bq/kgH₂O)에 대한 추수시 이삭의 TFWT (Bq/kgH₂O) 및 OBT (Bq/kgH₂O) 농도의

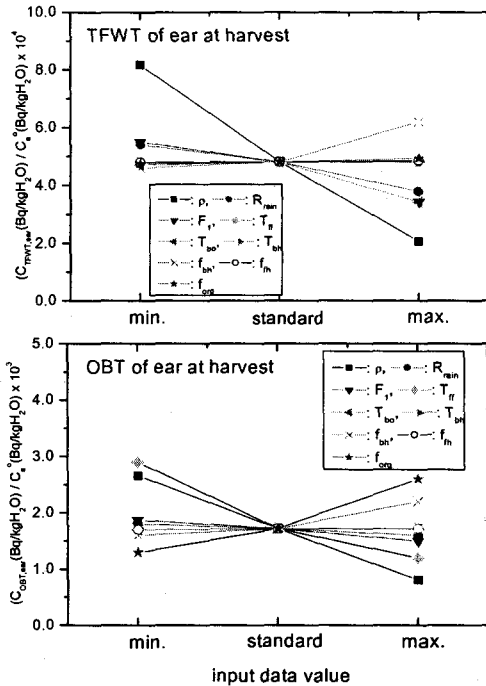


Fig. 2. Sensitivity of the TFWT and OBt concentration of the ear at the harvest on the input data.

상대비로 표현하였다. 추수시 이삭의 TFWT 농도는 대략적으로 누출시 공기의 삼중수소 농도의 0.01% 수준으로 감소하였으나 OBt 농도는 그보다 10배 정도 큰 0.1% 수준으로 감소되었다. 이와 같이 수확되는 이삭의 OBt 농도는 TFWT 농도보다 더 크고, 장기간 식물조직 내에 남아 있으므로 섭취에 의한 선량을 결정하는 주요 인자가 된다.

추수시 이삭의 TFWT 농도는 입력데이터 중 공기의 절대습도(ρ), 줄기부흡수비(F_1), 강우량(R_{rain}), 물체의 수분함량비(f_{bh})의 영향을 상대적으로 더 크게 받았다. 공기의 절대습도가 커지면 공기 단위부피당 수분함량이 커지므로 농도의 희석 효과가 생기고 작물로 침적되는 속도 또한 감소하므로 TFWT 농도는 감소한다. 일반적으로 공기의 절대습도 값이 작을수록 큰 선량값이 계산된다. 현재 국내발전소의 삼중수소 선량계산시 공기의 절대습도를 $0.008(\text{kg}/\text{m}^3)$ 에서 국내기후 현실에 맞게 $0.012(\text{kg}/\text{m}^3)$ 로 개정하려는 움직임이 있다. 이럴 경우 계산되는 선량값은 약 2~3배 낮아질 것으로 예측된다. 줄기부흡수비(F_1)가 작을수록 (뿌리흡수비 ($F_2 + F_3$)가 클수록) TFWT 농도는 더 크게 나타났다. 삼중수소 누출초기에는 공기의 농도가 토양보다 크나 대기확산으로 농도

는 급격히 감소하여 대체적으로 누출 종료 후 수십 시간이 경과하면 공기의 농도는 토양농도보다 작아지게 된다. 따라서 누출 후 약 45일 경과한 추수시 얻어지는 작물의 TFWT 농도는 뿌리로부터의 물의 흡수에 지배적으로 영향을 받는다. 뿌리흡수가 작물의 농도를 지배적으로 결정할 때 줄기부흡수비가 커짐에도 불구하고 TFWT 농도가 감소하는 것은 줄기부흡수 증가에 의한 HTO 흡수량 증가보다 뿌리흡수 감소에 따른 HTO 흡수량 감소가 더 커 전체 흡수량이 감소하기 때문이다. 한편 강우량이 커지면 토양 침적속도 증가로 인해 누출 초기에 토양의 농도가 다소 증가하나, 전달속도가 커진 만큼 토양과 대기 사이의 물의 순환속도도 증가하여 평형에 도달하는 시간이 단축된다. 따라서 강우량이 클수록 누출초기에는 토양농도가 더 크고, 누출후기에는 오히려 토양농도가 더 작게 된다. 따라서 피폭실험 DI의 추수 시점 (누출 후 약 45일)에서 관찰된 토양농도는 강우량이 클수록 더 작게 나타난다. 뿌리흡수의 크기는 토양농도에 비례하므로 결과적으로 강우량이 클수록 작물의 물의 TFWT 농도는 감소하였다. 누출초기에는 이와 반대 현상이 나타나지만 이때는 공기의 삼중수소 농도가 작물의 농도를 지배하므로 뿌리흡수에 간접적인 영향을 주는 강우량의 효과는 실제적으로 나타나지는 않을 것으로 예측된다. 벼 몸체로부터 대기 중으로 방출되는 HTO 손실속도는 벼의 수분함량과 반비례하기 때문에 벼의 수분 함량비가 클수록 몸체와 평형관계에 있는 이삭의 HTO 농도는 더 커지게 된다.

이삭 OBt 농도는 공기의 절대습도, 이삭의 성장기간($T_{\#}$), 유기물의 수소함량비(f_{org}) 변화에 크게 반응하였다. TFWT 농도와 마찬가지로 공기의 절대습도가 커지면 농도를 희석시키는 효과가 있으므로 이삭의 OBt 또한 감소한다. 한편 이삭의 성장기간이 상대적으로 짧으면 벼 몸체의 TFWT가 이삭의 OBt로 빠르게 전환되므로 동일한 시간이라도 더 큰 OBt 농도를 갖게 된다. 유기물의 수소함량비가 커지면 당연히 삼중수소의 농도도 커지게 된다. 삼중수소 선량평가에서 가장 중요한 것은 사람이 실제로 섭취하는 가식부의 OBt (이삭의 OBt) 농도이고, 이는 모델의 입력인자 중 공기의 절대습도, 이삭의 성장기간 및 유기물의 수소 함량비에 주로 영향을 받으므로 이들 데이터의 신뢰성 제고가 요구된다.

Table 4. Range of input data used for the sensitivity study.

input data	values		
	min.	standard	max.
공기의 절대습도 (p), kg/m^3	0.008	0.012	0.024
생육중 평균강우량 (R_{rain}), kg/m.h	0.05	0.07	1.0
표면수로부터 기부 흡수율(F_1)	0.0	0.2	0.5
이삭의 성장기간(T_{ff}), days	30	50	70
몸체의 OBT→HTO 방향 수소 손실의 유효반감기 (T_{bo}), days	5	10	20
몸체HTO→이삭HTO 방향 수소 손실의 유효반감기(T_{bh}), hours	0.5	2	10
벼 몸체의 수분 함량비(f_{bh})	0.3	0.65	0.9
이삭의 수분 함량비(f_{fh})	0.1	0.35	0.5
유기물의 수소 함량비(f_{org}) (%)	0.06	0.08	0.12

실험과 모델의 비교

그림3과 4에서 삼중수소 피폭 후 시간에 따라 측정된 이삭의 TFWT($\text{Bq/kgH}_2\text{O}$) 및 OBT($\text{Bq/kgH}_2\text{O}$) 농도에 대한 실험과 모델의 비교를 보여준다. 모든 농도는 피폭시 공기수분의 평균농도(C_a^0)에 대한 상대농도로 표시되었다. OBT농도는 Bq/gDW 로 측정되나 단위 통일을 위해 건조시료 1g당 0.6mL의 산화수가 생기는 것을 가정하여 $\text{Bq/kgH}_2\text{O}$ 로 환산되었다. 실험결과 TFWT 농도는 초기 100시간 내에서는 급격히 이후부터는 매우 완만하게 감소하고 있다. 삼중수소 누출 기간 동안 광합성 작용으로 급격히 증가한 작물의 삼중수소 농도는 누출 종료 후 대기확산으로 공기의 삼중수소 농도가 급격히 감소하면서 증산작용과 호흡으로 다시 빠른 속도로 감소한다. 시간이 경과하여 공기의 삼중수소 농도가 토양의 삼중수소 농도보다 작아지게 되면 작물의 TFWT 농도는 뿌리흡수에 의해 전적으로 영향을 받는다. 이와 같이 작물 TFWT 손실 유효 반감기가 손실 속도를 결정하는 프로세스에 따라 서로 다른 2~3개 구역으로 구분되는 결과는 다른 연구에서도 자주 나타난다[16,17]. 이삭의 TFWT 농도의 모델 예측값은 누출 초기에 실험데이터와 비교적 잘 일치하나 시간이 지나 추수기에 가까우면서 측정값과 다소 괴리감을 보여준 반면 선량계산시

중요한 이삭 OBT 농도의 모델 예측값은 이삭의 생육단계별로 측정된 실험데이터와 최대 2배 이내에서 잘 일치하였다. 본 실험에서 생체량 측정을 위해 채취된 추수시 벼 몸체는 토양 아래의 뿌리와 기부줄기는 포함되지 않았으므로 이를 근거로 유도된 성장함수는 실제보다 작은 값의 생체량을 가진다. 따라서 모델에 의한 벼 몸체의 TFWT 농도는 측정치보다 과대평가될 수 있다. 왜냐하면 동일한 피폭양일 경우 생체량이 클수록 농도는 희석효과에 의해 감소하기 때문이다. 그에 반해 이삭의 경우는 채취시 손실되는 부분이 없으므로 이러한 오차 효과는 존재하지 않은 것으로 보인다. 작물 섭취 선량 평가시 중요한 부분은 가식부(이삭)이고 곡물 내에 오래 동안 남아있는 삼중수소는 OBT임을 감안하면 이삭 OBT에 대한 예측값과 실험값의 비교 결과는 본 모델이 삼중수소 사고 유출시 쌀 섭취에 의한 선량 평가에 합리적으로 적용될 수 있음을 보여주는 것이다.

결론

원자력시설로부터 삼중수소 사고 누출시 시설 주변 토양 및 농작물의 삼중수소 오염 평가를 위한 동적격실모델 ECOREA-H3를 개발하였다. 모델

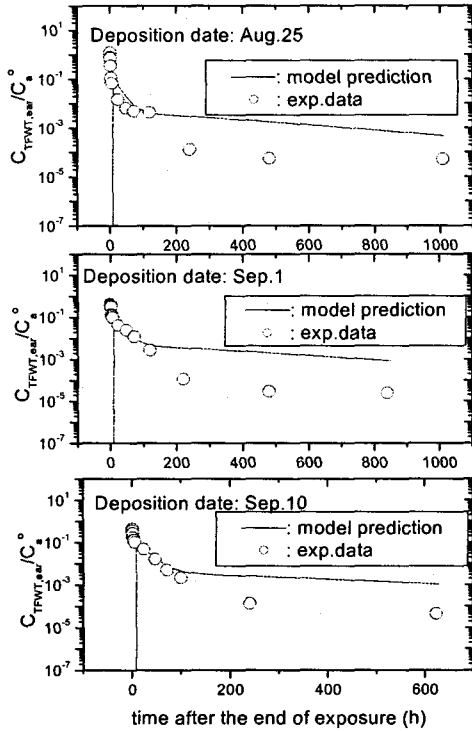


Fig. 3. Comparison of model predictions with experimental data for the TFWT concentration of the rice ear.

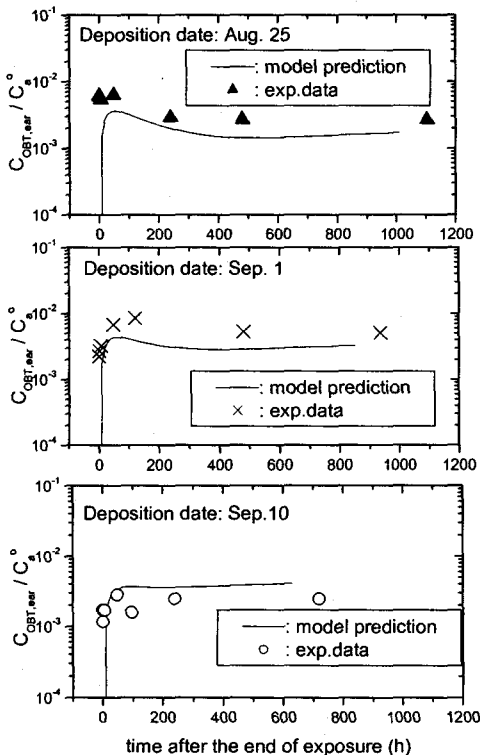


Fig. 4. Comparison of model predictions with experimental data for the OBT concentration of the rice ear.

검증의 일환으로 생육중 벼에 대한 삼중수소 모의 피폭실험에 모델을 적용한 결과 다음의 결론을 얻었다. 1) 피폭 후 수십일이 지난 후 추수된 벼 이삭의 TFWT 농도는 공기의 절대습도, 뿌리 흡수비, 강우량 변화에, 이삭 OBT 농도는 공기의 절대습도 및 이삭의 성장기간에 큰 영향을 받는다. 2) 삼중수소로 오염된 농작물 섭취로 인한 선량 평가시 공기의 절대습도 및 곡물의 성장기간이 매우 중요한 입력데이터이며 본 연구에서 제시한 모델 ECOREA-H3는 평가에 유용하게 적용될 수 있다.

향후 본 연구에서 제시한 벼 뿐 아니라 무우, 콩, 배추, 감자 등 우리나라 주요 농작물의 삼중수소 모의 누출 실험을 통한 모델 검증과 입력데이터의 개선을 통해 평가 코드의 신뢰성 제고를 지속적으로 추진할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 원자력연구개발기금의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

1. Raskob, W., UFOTRI : Program for assessing the offsite consequences from accidental tritium releases, Report KfK-4605, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany(1990)
2. Raskob, W., Description of the new version 4.0 of the tritium model UFOTRI including user guide, Report KfK-5194, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany(1993)
3. Russel, S.B. and G.L. Ogram, ETMOD : A new environmental tritium model, Fusion Technology, 21, 645-650(1992)
4. Smith, G.M., P.C. Robinson and M.J. Stenhouse, H3 food chain modeling following short-term release to atmosphere. Report IE3947-1, Version 2.0, Intera Information Technologies, Chiltern Housem 45 Station Rd, Henley-on-Thames, Oxfordshire, U.K(1995)
5. Higgins, N.A., TRIF-An Intermediate Approach to Environmental Tritium Modeling, J. of Environmental Radioactivity, 36, 253-267 (1997)
6. Barry, P.J., B.M. Y. Watkins, Y. Belot, P.A. Davis, O. Edlund, D. Galeriu, W. Raskob, S.

- Russell, and O. Togawa, Intercomparison of model predictions of tritium concentrations in soil and food following acute airborne HTO exposure, *J. of Environmental radioactivity*, 42, 191-207(1999)
7. Kim, S.B., W.Y. Lee, Y.H. Choi and J.H. Lee, Organically bound tritium in the plants acute HTO exposure, *J. Korean Association Radiat. Prot.*, 23(1), 25-32(1998)
 8. Kim, S.B., M.H. Lee, G.S. Choi, Y.H. Choi and C.W. Lee, Investigation into tritium behavior in Chinese cabbage and rice after a short-term exposure of HTO, *J. of Korean Association Radiat. Prot.*, 23(2), 75-82(1998)
 9. Choi, Y.H., K.M. Lim, W.Y. Lee, S. Diabate and S. Strack, Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmosphere HTO vapor under semi-outdoor conditions, *J. of Environmental Radioactivity*, 58, 67-85 (2002)
 10. Choi, H.J., H.S. Kang and H.S. Lee, Verification of a dynamic compartment model for the tritium behavior in the plants after short HTO release using a BIOMOV5 II scenario, *J. of the Korean Nuclear Society*, 35(2), 171-177(2003)
 11. Peterson, S.R., R.A. Davis and P.R. Rao, Modeling dose from tritium and ^{14}C in the environment, TR.95ZJ15. J1998.71, Environmental Research Branch, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario, Canada(1997)
 12. Choi, Y.H., K.M. Lim, W.Y. Lee, H.S. Kang, H.J. Choi, H.S. Lee, S. Diabate and S. Strack, TFWT and OBT concentrations in rice plants exposed to HTO vapor during daytime and nighttime at different seed-developing stages, *J. of Korean Association Radiat. Prot.*, 28, 9-18(2003)
 13. Shinohana, K., Assessment of radiological effects on the regional environment due to the operation of the Tokai reprocessing plant, *J. of Environmental Radioactivity*, 72, 299-322(2004)
 14. Keum, D.K., H.S. Lee, H.J. Choi, K.M. Lim, Y.H. Choi, and C.W. Lee, A dynamic compartment mode for assessing the transfer of radionuclide deposited onto flooded rice-fields, *J. of Environmental Radioactivity*, 76(3), 349-367(2004)
 15. Lee, E.W., T.S. Kwak, M.S. Lee, and K.H. Kim, Rice culture, Hyangmun Press(1996)
 16. Diabate, S. and S. Strack, Doses due to tritium releases by NET-Data base and relevant parameters on biological tritium behavior, KFK 4713, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany(1990)
 17. Guenot, J. and Y. Belot, Assimilation of ^3H in photosynthesizing leaves exposed to HTO, *Health Physics*, 47, 849-855(1984)