

Evaluation Model and Experimental Validation of Tritium in Agricultural Plant

농작물의 삼중수소 오염평가 모델 개발 및 실험검증

**Hee Suk Kang, Dong-kwon Keum, Hansoo Lee, Jun In, Yong Ho Choi
and Chang Woo Lee**

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

hskann1@kaeri.re.kr

강희석, 금동권, 이한수, 전인, 최용호, 이창우

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received July 11, 2005 / Approved August 2, 2005)

Abstract

This paper describes a compartment dynamic model for evaluating the contamination level of tritium in agricultural plants exposed by accidentally released tritium. The present model uses a time-dependent growth equation of plant so that it can predict the effect of growth stage of plant during the exposure time. The model including atmosphere, soil and plant compartments is described by a set of nonlinear ordinary differential equations, and is able to predict time-dependent concentrations of tritium in the compartments. To validate the model, a series of exposure experiments of HTO vapor on Chinese cabbage and radish was carried out at the different growth stage of each plant. At the end of exposure, the tissue free water(TFWT) and the organically bound tritium(OBT) were measured. The measured concentrations were agreed well with model predictions.

Key words : tritium, compartment dynamic model, agricultural plants

요 약

본 논문에서 사고로 누출된 삼중수소에 의한 농작물 오염평가 모델을 제시한다. 본 논문에서 제시된 모델은 동적격실모델로써 작물의 성장 방정식을 도입한 것이 특징이며, 이로부터 삼중수소 피폭시 작물의 성장단계에 따른 오염 정도를 예측할 수 있다. 시스템은 크게 대기, 토양, 작물 격실로 구성되며, 격실의 삼중수소 농도 변화는 비선형 상미분방정식으로 표현되므로 시간에 따른 각 격실의 삼중수소 농도가 계산된다. 모델의 검증을 위해 배추 및 무에 대한 삼중수소 피폭

실험을 수행하였다. 생육단계별 오염 효과를 조사하기 위해 각기 다른 생육단계에 있는 배추와 무를 독립적으로 HTO 증기에 노출시켰으며, 피폭 후 오염된 작물의 tissue free water tritium(TFWT) 및 organically bound tritium(OBT) 농도를 측정하였다. 측정된 작물 부위별 삼중수소 농도 데이터와 모델 예측 값을 대체로 잘 일치하였다.

중심단어 : 삼중수소, 동적격실모델, 농작물

I. 서론

원자력시설로부터 누출되는 삼중수소(주로 HTO)는 광합성에 의해 작물로 쉽게 흡수되고 대사작용을 통해 작물의 구성물질로 고착된다. 이렇게 고착된 삼중수소는 추수때까지 계속 작물 내에 남아 사람이 섭취하게 되면 인체에 유해하게 작용할 수 있다. 원자력 시설로부터 삼중수소가 일정량으로 지속적으로 누출되는 경우 환경 내 삼중수소는 구성 격실간 평형을 이루게 되고 이 경우, 비평형모델(SAM, specific activity model)을 활용하여 농작물 오염 정도를 충분히 효과적으로 예측할 수 있다[1-5]. 그러나 삼중수소가 불연속적으로 환경으로 방출되거나 사고로 인해 급격히 대량 방출될 때에는 농도의 시간 변위를 예측하기 위한 동적모델이 필요하게 된다. 환경내의 삼중수소 순환에 대한 동적모델링은 삼중수소가 물의 구성 성분으로 물의 순환계의 일부로 참여하므로 매우 복잡하다. 현재까지 가장 사실적이고 진보된 삼중수소 순환 모델로 UFOTRI[6]와 ETMOD[7]가 있다. 이 모델들은 시간 단위별로 기상 자료를 반영하여 환경 구성 요소의 삼중수소 농도를 예측할 수 있는 능력이 있다. 그러나 이러한 상세 모델들은 많은 입력데이터와 긴 계산 시간으로 인해 삼중수소 누출 후 수주일 또는 수개월까지 장시간 동안 삼중수소 거동 예측에는 실용적이지 못하다. 이에 대한 대안으로 상세모델과 비평형모델의 중간 성격을 가진 동적격실모델이 개발되었다. STAR-H3[8] 및 TRIF[9]가 잘 알려진 삼중수소 동적격실모델이다. 동적격실모델은 작물 성장 기간 동안의 평균 값을 입력데이터 값으로 적용하고 입력데이터 수도 상대적으로 적기 때문에 장기 평가에 효과적이다.

본 논문에서는 국내 원자력 시설로부터 사고로 단기간에 걸쳐 누출된 삼중수소에 의한 시설 주변의 농작물 오염평가를 위해 한국원자력연구소에서 독자적으로 개발된 삼중수소 농작물 오염평가를 위한 동적격실모델에 대해 기술한다. 모델의 검증을 위해 배추 및 무에 대한 삼중수소 피폭 실험을 수행하여 모델링 결과와 비교하였다

II. 모델

가. 모델의 개요

모델의 기본 개념은 그림 1 에서 보여준다. 시스템은 대기, 토양, 작물로 구성되고 작물은 다시 HTO 및 OBT 격실로 구성된다. 본 모델에서 특징적인 것은 시간 함수로 표현되는 성장방정식을 도입한 점이다. 시간함수인 성장방정식의 고려는 작물의 성장단계에 따른 삼중수소 오염 정도를 평가할 수 있게 한다. 한편, 토양 깊이에 따른 뿌리흡수 차이를 고려하기 위하여 토양은 깊이에 따라 표면토양(0~5cm), soil 2 (5-15cm), soil 3 (15-30cm)의 3종류로 구분하였다.

격실 내의 삼중수소 농도의 시간 변화는 다음과 같이 일반적으로 표시할 수 있다.

$$\frac{dA_i}{dt} = \sum_{k=1}^m K_{k,i} A_k - \sum_{j=1}^n (K_{i,j} + \lambda_i) A_i \quad \dots\dots (1)$$

$$\text{단, } A_i = 0 \text{ at } t=0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$A_a = A_{a0} \text{ for } 0 < t < \Delta t_{rel} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서 A_i (Bq m⁻³)는 격실 i의 삼중수소 방사능, $K_{k,i}$ 는 격실 k로부터 격실 i로 유입되는 플럭스의 삼중수소 전달상수, λ_i 는 삼중수소 붕괴상수($6.44 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$)이다. 초기에 모든 격실의 삼중수소 농도는 0으로

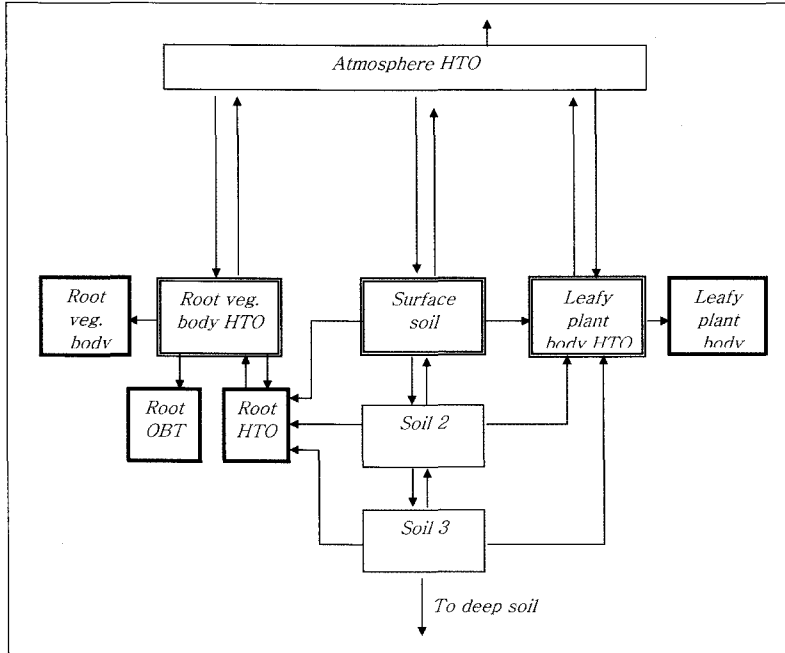


Fig.1 Compartments and pathways of the present tritium transport model

가정하였다(식(2)). 공기 중 삼중수소 농도는 누출기간(Δt_{rel}) 동안 일정하게 유지되고 (식(3)), 누출기간 동안 공기의 삼중수소 농도(A_{a0})가 다른 격실의 선원항으로 작용한다. A_{a0} 는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$A_{a0} = C_a^o R_i \rho_{s,i} H_m \quad \dots\dots\dots (4)$$

단 C_a^o (Bq kg⁻¹ H₂O)는 누출기간 동안 대기 수분의 평균 HTO 농도, R_i 은 상대 습도, $\rho_{s,i}$ (kg m⁻³)는 누출시 포화공기의 절대습도, H_m (m)은 공기 혼합층 높이이다.

나. 작물 성장 방정식

작물의 성장과 함께 수소함량은 변화하고 이것은 결국 작물과 주변 격실간의 수소 이동 속도를 변화시키는 요인이 된다. 본 연구에서 다음과 같이 3개의 파라미터를 포함하고 있는 S 자 모양의 성장 방정식을 고려하여, 작물의 성장에 따른 농도 회석 효과 및 격실간 삼중수소 이동 속도 변화를 고려하였다.

$$B(t) = \frac{B_1 B_2}{(B_1 - B_2)e^{-B_3 t} + B_2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

단 B_1 (kg m⁻²) 은 작물의 최대 성장기에서 생체량, B_2 (kg m⁻²)는 초기 생체량, B_3 (h⁻¹) 는 성장 속도상수이다.

다. 핵종 이동 경로 및 전달상수

작물의 광합성, 호흡, 증산 작용이 작물 몸체와 대기 사이의 수분(결국 삼중수소)교환을 이루는 주요 메커니즘이다. 작물 내 자유수(tissue free water)는 말 그대로 조직 내에서 자유롭게 이동하며, 대기로도 자유롭게 방출되고, 일부는 OBT로 전환되기도 한다.

작물의 유기물(지방, 단백질, 탄수화물)에 포함된 삼중수소의 일부는 교환성 OBT (exchangeable OBT)로 알려지고 이러한 교환성 OBT는 조직 내 자유수와 평형관계를 유지하고 있는 것으로 알려진다.[10] 이와 같이 조직 내 자유수와 평형관계를 이루는 교환성 OBT는 자유수와 동일한 형태로 거동하므로 자유수와 구분하여 모델링 할 필요는 없다.[11] 섭취선량을 계산할 때 OBT는 대개의 경우 비교환성 OBT로 정의된다. 왜냐하면 비교환성 OBT만이 조직의 세포 내에 고착되어 작물의 수확 이후에도 계속 작물에 남아 섭취 선량에 영향을 끼치기 때문이다

[12]따라서 본 연구에서도 OBT는 비교환성 OBT로 정의된다. 이와 같은 개념을 바탕으로 작물 몸체의 HTO 격실로부터 몸체의 OBT 격실이나 열매(무 뿌리)의 OBT 격실 방향의 삼중수소 이동은 고려하나 반대방향(즉 OBT 격실에서 삼중수소 손실을 의미하는)의 삼중수소 이동은 고려하지 않았다. 뿌리흡수는 배추의 경우는 뿌리를 포함한 잎 자체가 몸체이므로 몸체를 통해 뿌리흡수가 일어나고, 무의 경우 뿌리흡

수는 뿌리(가식부이며 열매)를 통해 일어난다는 점에서 배추와 무는 차이가 있다

격실간 삼중수소 속도는 각 격실의 수소 함량과 입력인자들의 함수로 표현되며, 배추와 무에 대해 각각 표 1에 요약되어 있다. 표1의 관계식은 격실간 국부평형(local equilibrium)의 가정과 함께 유도되었다. 대기, 토양의 수소 함량은 변하지 않지만 작물의 수소 함량은 작물의 성장과 함께 변하므로 이와 연동

Table 1 Transfer rate constants between compartments

| Transfer rate Constant(h ⁻¹) K _{i,j} ^{a)} | leafy plant | root vegetables |
|--|--|--|
| K _{a,a} | 0.693 (Raskob, 1990) | 0.693 (Raskob, 1990) |
| K _{s3,s3} | 3.42 x 10 ⁻⁴ (Raskob, 1990) | 3.42 x 10 ⁻⁴ (Raskob, 1990) |
| K _{bh,a} | 0.139/μ based on 0.347 when μ=0.4 kg/m ² | 0.139/μ based on 0.347 when μ=0.4 kg/m ² |
| K _{a,bh} | R _a K _{bh,a} M _{bh} /M _a ^{b)} | R _a K _{bh,a} M _{bh} /M _a |
| K _{a,ss} | V _{d,HTO} /H _m + (2/18) x R _{rain} /M _a | V _{d,HTO} /H _m + (2/18) x R _{rain} /M _a |
| K _{ss,a} | (K _{a,ss} M _a -K _{s3,s2} M _{s3} -(1-R _a)/R _a K _{a,bh} M _a)/M _{ss} | (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} | (1-R _a)/R _a K _{a,bh} M _a /M _{ss} F ₁ | - |
| K _{s2,bh} | (1-R _a)/R _a K _{a,bh} M _a /M _{s2} F ₂ | - |
| K _{s3,bh} | (1-R _a)/R _a K _{a,bh} M _a /M _{s3} F ₃ | - |
| K _{ss,fb} | - | (1-R _a)/R _a K _{a,bh} M _a /M _{ss} F ₁ |
| K _{s2,fb} | - | (1-R _a)/R _a K _{a,bh} M _a /M _{s2} F ₂ |
| K _{s3,fb} | - | (1-R _a)/R _a K _{a,bh} M _a /M _{s3} F ₃ |
| K _{s2,ss} | K _{s3,s3} M _{s3} /M _{s2} | K _{s3,s3} M _{s3} /M _{s2} |
| K _{s3,s2} | K _{s3,s3} M _{s3} /M _{s3} (=K _{s3,s3}) | K _{s3,s3} M _{s3} /M _{s3} (=K _{s3,s3}) |
| K _{ss,s2} | (K _{a,ss} M _a +K _{s2,ss} M _{s2})/M _{ss} -(K _{ss,bh} +K _{ss,a}) | (K _{a,ss} M _a +K _{s2,ss} M _{s2})/M _{ss} -(K _{ss,bh} +K _{ss,a}) |
| K _{s2,s3} | (K _{ss,s2} M _{ss} +K _{s3,s2} M _{s3})/M _{s2} -(K _{s2,ss} +K _{s2,bh}) | (K _{ss,s2} M _{ss} +K _{s3,s2} M _{s3})/M _{s2} -(K _{s2,ss} +K _{s2,bh}) |
| K _{bh,bo} | 1.386 x M _{bo} /T _{bb} /M _{bh} | 1.386 x M _{bo} /T _{bb} /M _{bh} |
| K _{bh,fb} | - | (1-R _a)/R _a K _{a,bh} M _a /M _{bh} |
| K _{fb,bh} | - | 2(1-R _a)/R _a K _{a,bh} M _a /M _{fb} |
| K _{bh,fo} | - | 1.386 x M _{fo} /T _{ff} /M _{bh} |

Notes:

a) Transfer rate constant from compartment i to j (a: atmosphere, ss: surface soil (surface water for rice), s2: surface 2, s3: surface 3, bh: body HTO, bo: body OBT, fb: fruit HTO, fo: fruit OBT)

b) Hydrogen inventory of compartments is calculated as follows;

- M_a=H_m × ρ_s × RH_a × (2/18)
- M_{ss}=1000 × d₁ × θ × (2/18), M_{s2}=1000 × d₂ × θ × (2/18), M_{s3}=1000 × d₃ × θ × (2/18)
- M_{bh}=B_{body}(fresh) × f_{bh} × (2/18), M_{bo}=B_{body}(dry) × f_{org} (배추, 무)
- M_{fb}=B_{body}(fresh) × f_{fb} × (2/18), M_{fo}=B_{fruit}(dry) × f_{org} (무)

된 전달상수들도 시간의 함수이다. 대기로부터 확산에 의해 멀리 사라지는 HTO 손실속도 $K_{a,a}$ 는 손실 반감기를 1시간으로 가정하여 계산하였다. 작물 몸체로부터 대기로의 HTO 손실속도($K_{bh,a}$)는 작물 몸체의 수분함량(μ)에 반비례한다고 가정하여 구하였다. 기준 값이 되는 $K_{bh,a}$ (0.347 h^{-1})은 작물의 수분함량이 0.4 kg m^{-2} 일 때 약 1시간의 손실 반감기를 가진다는 가정과 함께 유도되었다.[13] 본 모델에서 배추 및 무의 수분 함량은 생체량에 수분 함량비(몸체인 경우 f_{bh} , 열매인 경우 f_m)를 곱하여 구한다. 유기물의 삼중수소 함량비(f_{org})는 일반적으로 함유 유기물 비에 따라 약간 변하지만 본 연구에서는 모든 작물에 대해 0.08로 가정하였다.[11] 작물 몸체 HTO 격실로부터 몸체 및 열매(뿌리) OBT 격실 방향의 삼중수소 이동 속도는 각각 작물 몸체(잎)와 무 뿌리의 성장속도(성장기간에 반비례)에 지수함수로 증가한다는 가정과 함께 유도되었다. 대기에서 토양표면으로의 침적 속도($K_{a,ss}$)는 검침과 강우에 의한 습침적을 동시에 고려하였다. 토양 격실간 삼중수소 이동은 격실간의 삼중수소 물질수지에 근거하여 결정되었다. 뿌리흡수에 대해서는 다음과 같은 가정이 도입되었다. 1) 작물은 표면토양으로부터 F_1 , 토양 2로부터 F_2 , 토양 3로부터 F_3 만큼 뿌리흡수를 하고 $F_1 + F_2 + F_3$ 합은 1이다. 2) 평형조건에서, 무 뿌리의 HTO 격실의 수분의 반은 몸체 HTO 격실에서 오고, 나머지 반은 토양에서 뿌리흡수를 통해 온다고 한다.

III. 실험

실험에 사용된 배추와 무는 야외에서 플라스틱 포트에 재배하였다. 포트는 삼중수소 피폭 실험용과 생육데이터 측정용으로 구성된다. 피폭일은 배추, 무 모두 8월 24일이었고, 8월 30일경 씩이 지상부로 출현하였으며, 11월 13일 추수하였다. 작물의 생육 데이터는 성장단계별로 측정되었다. 측정된 성장 데이터와 식(5)의 성장방정식을 비교하여 Marquitz 최적화법[14]으로 성장함수의 상수들은 구하였으며, 그림 2에 계산된 성장함수상수와 측정된 성장데이터를 보여준다.

피폭실험은 생육중인 배추와 무를 생육단계별로 독립적으로 오전 10시경에 특수하게 제작된 피폭상자에 넣고 1시간 동안 HTO 증기에 노출시킴으로써 수행되었다. 피폭상자는 피폭실험동안 삼중수소의 누설을 방지하기 위해 접착제로 밀봉하였다. HTO 증기는 코일전기히터를 이용하여 HTO 용액을 가열하여 증발시켜 발생시켰다. 용액이 모두 증발되는데 약 30분이 소요되었다. 피폭상자 내의 공기를 균일하게 혼합하기 위하여 2개의 소형 팬을 피폭상자 내부에 설치하였다. 피폭상자 내의 공기는 농도 측정을 위해 5분 간격으로 포집하였다. 상자 내의 온도, 습도, 조도는 상자 내에 설치된 온도계, 습도계, 조도계를 통해 직접 읽었다. 피폭이 종료된 직후 작물 포트는 상자 내에 그대로 둔 채 피폭상자의 뚜껑을 열고 팬을 이용하여 외부의 신선한 공기를 약 5분 동안 주입하였다. 작물 포트의 표면 모양은 토양 직접 침적

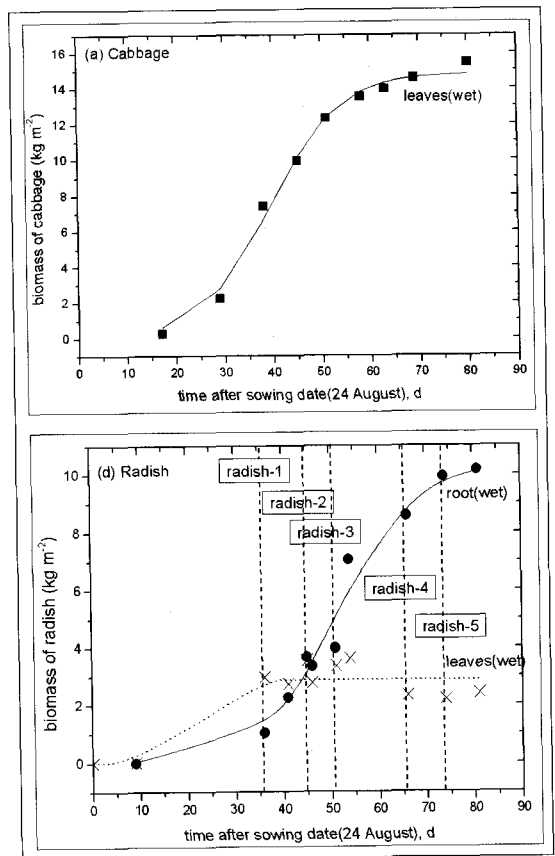


Fig.2 Biomass curves of the plants

Table 2 Measured mean temperature, mean air humidity and mean air moisture HTO concentration during exposure

| Exposure case | Exposure date | Mean temp. (°C) | Saturated air humidity during exposure R_s (kg m ⁻³) | Mean relative air humidity during exposure R_i (%) | Mean air moisture HTO concentration during exposure C_a (Bq mL ⁻¹) |
|---------------|---------------|-----------------|--|--|--|
| cabbage-1 | 23 September | 26.8 | 0.026 | 86 | 70,500 |
| cabbage-2 | 2 October | 29.1 | 0.03 | 83 | 30,200 |
| cabbage-3 | 15 October | 30.4 | 0.033 | 78 | 43,200 |
| cabbage-4 | 27 October | 19.4 | 0.017 | 89 | 147,000 |
| radish-1 | 28 September | 34.5 | 0.041 | 74 | 45,600 |
| radish-2 | 8 October | 28.5 | 0.03 | 78 | 63,000 |
| radish-3 | 16 October | 15.2 | 0.013 | 68 | 185,000 |
| radish-4 | 28 October | 26.9 | 0.026 | 70 | 112,000 |
| radish-?5 | 5 November | 19.8 | 0.017 | 76 | 95,400 |

을 방지하기 위하여 흡수포로 덮었다. 따라서 토양침적은 피폭이 종료된 후에 대기로부터의 삼중수소에 의해 일어난다.

피폭 직후와 수확시 작물의 tissue free water tritium(TFWT) 및 organically bound tritium(OBT) 농도를 전처리 과정을 거친 후에 액체섬광계수기(Quantulus 1220, Wallac)를 이용하여 측정하였다. 농도 측정에 대한 보다 상세한 내용은 타 문헌에 기술되어 있다.[15,16]

IV. 결과 및 고찰

가. 모델 예측

모델의 예측 성능을 보기 위하여 피폭실험 cabbage-1 및 radish-1에 대해 계산된 각 격실의 삼중수소 농도를 그림 3에서 보여준다. 모든 계산은 각 작물의 수확일 시간까지 수행되었고, 계산된 적용된 입력데이터는 표 3에 요약되어 있다. 구하기 어려운 입력데이터의 일부는 문헌[6,11]에서 인용하였고, 일부는 작물의 생육기간 동안 기상탑에서 측정된 기상자료와 실험조건으로부터 구해졌다. 농도는 삼중수소 피폭동안의 공기 수분의 평균농도(C_a)에 대한 각 격실의 삼중수소 농도 비로 표시되었다. 피폭실험 직후 외부 팬으로 신선한 공기를 피폭상자 내로 주입한 효과를 반영하기 위하여 대기에서 확산에 의한 삼중수소 손실속도 상수인 K_{aa} 값을 시간 구간별로 각각 200 h⁻¹ (0(t<0.1 h), 0.693 h⁻¹ (t) 0.1 h)으로 가정하였다.

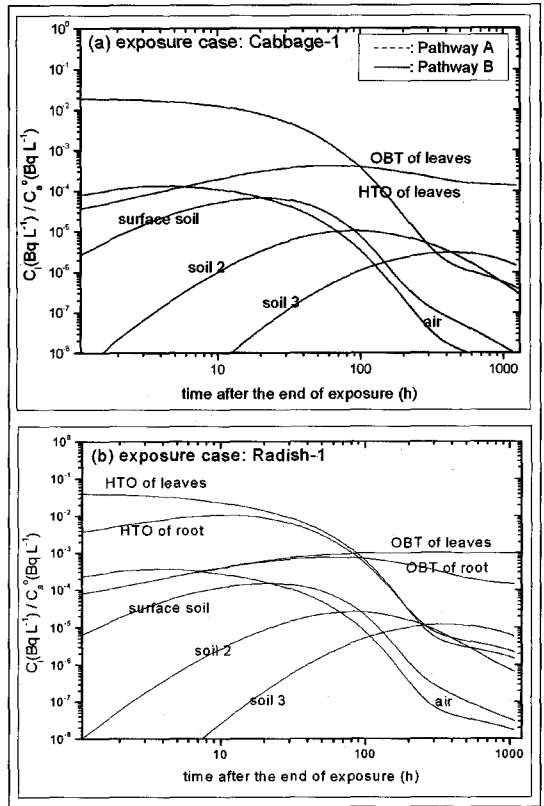


Fig.3 Calculated concentration of compartments for the exposure cases of (a) cabbage-1 and (b) radish-1

공기의 HTO 농도는 피폭 직후 외부 팬에 의해 피폭상자로 공급된 신선한 외기에 의해 피폭 종료 후 급격하게 감소하여 피폭 중 공기 수분 평균농도의 0.01% 이하로 떨어지는 것으로 예측되었다. 피폭상자 내에서 삼중수소에 작물이 노출되는 동안 포트 안의

토양을 흡수포로 덮었기 때문에 삼중수소의 토양 침적은 일어나지 않았다. 흡수포를 제거한 후부터 대기에서 토양으로 삼중수소 침적은 일어나기 시작하므로 토양의 농도는 피폭 직후부터 증가하기 시작하는 것으로 예측되었다. 피폭 후 약 20시간이 지난 후에 대기의 농도는 표면 토양보다 작아지는 것으로 예측되었는데 이 때부터 대기로부터 유입되는 삼중수소보다 표면 토양에서 뿌리흡수나 내부토양으로 손실되는 삼중수소가 더 커지게 되어 표면토양의 농도는 다시 감소하기 시작한다. 내부토양인 soil 2 및 soil 3의 농도도 시간 지연 효과에 의한 농도 peak의 크기 차이를 제외하고는 표면토양과 비슷한 거동을 보여주고 있다. 토양의 HTO 농도는 어떤 경우도 C_a^0 의 0.01%를 넘지 않는 것으로 예측되었는데 이는 삼중수소 누출 동안 토양으로 직접 침적이 없었기 때문이다. 배추와 무 잎의 HTO 농도는 피폭 동안 급격히 증가하다가 피폭 직후에 대기와의 공기 교환에 의해 단기에 대기농도 수준으로 급격히 감소한다. 이후에는 뿌리로부터의 흡수에 의한 증가효과에 의해 농도 감소 속도가 완화되어 초기보다는 상대적으로 느린 속도로 감소된다. 한편, 무 뿌리의 OBT 농도는 초기의 급격한 증가 후 거의 일정한 수준을 유지하는 것으로

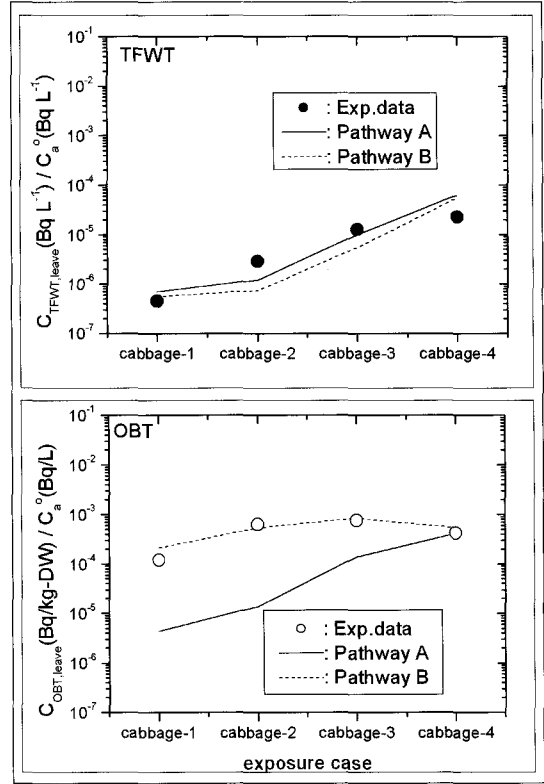


Fig.4 A comparison of model predictions with experimental results for the concentrations at harvest of the Chinese cabbage

Table 3. Input data used in the model prediction

| input data | cabbage | radish |
|---|---------|--------|
| - height of air mixing layer, H_m (m) | 1000 | 1000 |
| - mean air humidity during growing season, ρ (kg m ⁻³) | 0.012 | 0.012 |
| - deposition velocity of HTO to soil, V_{dHTO} (m h ⁻¹) | 18.0 | 18.0 |
| - mean rainfall rate during growing, R_{rain} (kg m ⁻² h ⁻¹) | 0.17 | 0.17 |
| - thickness of surface soil or depth of surface water, d_1 (m) | 0.05 | 0.05 |
| - thickness of soil 2, d_2 (m) | 0.1 | 0.1 |
| - thickness of soil 3, d_3 (m) | 0.15 | 0.15 |
| - mean water fraction in soil, θ | 0.2 | 0.2 |
| - contribution from surface soil of root absorption, F_1 | 0.2 | 0.2 |
| - contribution from soil 2 of root absorption, F_2 | 0.4 | 0.4 |
| - contribution from soil 3 of root absorption, F_3 | 0.4 | 0.4 |
| - air-plant equilibrium ratio, R_a | 0.5 | 0.5 |
| - growing period of plant body, T_{bb} (d) | 45 | 60 |
| - growing period of radish root, T_r (d) | - | 60 |
| - effective half-life of tritium loss from body HTO to fruit HTO, T_{hl} (h) | - | 2 |
| - water fraction of plant body (leaves), f_w | 0.95 | 0.90 |
| - water fraction of radish root, f_w | - | 0.87 |
| - hydrogen fraction of organic component, f_{oh} | 0.08 | 0.08 |

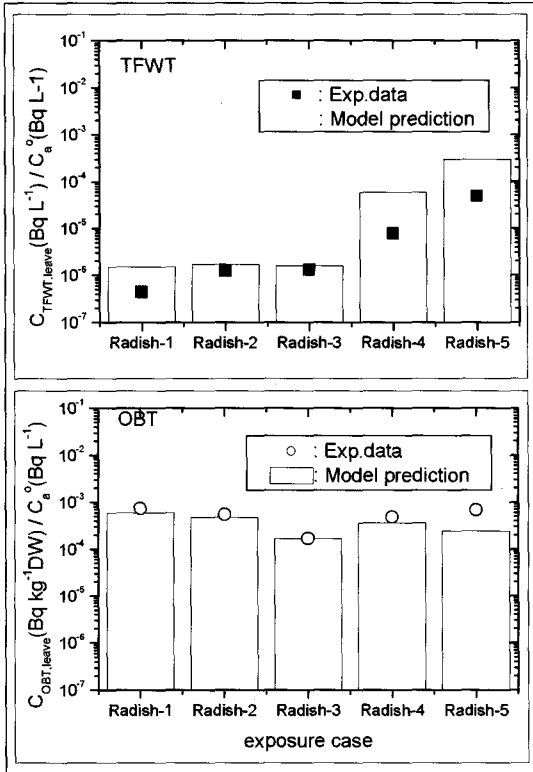


Fig.5 A comparison of model predictions with experimental results for TFWT and OBt concentrations of the radish leaves at harvest

예측되었다. 무 뿌리의 OBt는 피폭시 광합성에 의해 작물 몸체로 유입된 삼중수소의 일부가 전환된 것이다. 본 연구에서 제시한 모델은 무 뿌리의 OBt 격실은 삼중수소의 sink term으로 가정하였다. 즉 무 뿌리의 OBt 격실로 전이된 삼중수소는 다시 잎의 HTO 격실로 환원되지 않는다. 이 가정은 OBt로 일단 전환되면 삼중수소는 작물 조직에 고착되어 유효한 손실 없이 수확 때까지 작물 내에 존재한다는 개념을 대신한다. 같은 이유로 배추와 무 잎의 OBt 농도 역시 초기의 급격한 증가 후 일정한 수준을 계속 유지하는 것으로 예측되었다. 한가지 특기할 사항은 무 뿌리의 OBt 농도는 초기 증가 후 다시 약간 감소하는 경향을 보여주고 있는데 이는 무 뿌리의 성장으로 인한 희석 효과가 작용하였기 때문이다. 이와 같은 희석 효과는 성장함수 도입을 통해서만 예측이 가능하다. 한편, 피폭 경우에 따라 정도의 차이는 있지만 수확시 무우 및 배추 모두 OBt 농도가 TFWT 농

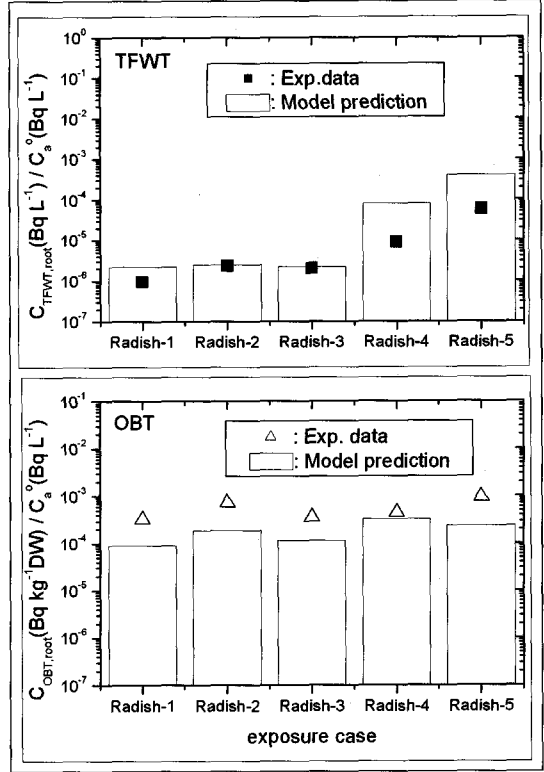


Fig.6 A comparison of model predictions with experimental results for TFWT and OBt concentrations of the radish root at harvest

도보다 더 컸다. OBt의 선량환산인자 TFWT보다 약 2~3배 큰 것을 감안하면(17,18), 농작물 섭취로 인한 선량 예측시 OBt 농도의 중요성이 다시 강조된다.

나. 실험과 모델의 비교

모델의 타당성 조사를 위해 무, 배추에 대해 측정된 실험데이터와 모델 예측값이 비교되었다. 농도 계산은 표 3에 요약된 표준입력데이터를 이용하여 수행되었으며, 실험데이터와 모델의 비교를 통한 입력데이터의 보정은 수행하지 않았다. 모든 농도는 피폭 중 대기 수분의 HTO 평균 농도에 대한 작물의 삼중수소 농도비로 표시되었다. 배추 및 무에 대한 비교 결과를 그림 4 ~ 그림6에서 보여준다.

배추 TFWT 농도의 측정치는 삼중수소 피폭 시점이 수확일과 가까울수록 증가하는 경향을 보여 주고 있는데 이는 피폭일과 수확일 간격이 상대적으로 짧아 삼중수소가 손실되는 시간이 감소되었기 때문이

다. 배추의 모든 피폭의 경우 TFWT 농도의 모델에 의한 예측치와 실험데이터는 잘 일치하고 있다. 배추의 OBT 농도는 피폭 일자에 상관 없이 비슷한 값을 보여주고 있으며 모델에 의한 예측치도 유사한 결과를 보여준다. 이는 OBT로 전환된 삼중수소는 수확일까지 유효한 손실없이 작물 내에 존재한다는 본 모델의 가정에 대한 타당성을 보여주는 것이다

무 잎의 TFWT 농도는 피폭일이 수확일에 가까울수록 커지는 것으로 관찰되었다(그림 5). 비슷한 결과가 무 뿌리의 TFWT 농도에서도 관찰되었다(그림 6). 이는 배추와 마찬가지로 삼중수소 피폭 후 수확일까지의 삼중수소 손실 시간이 상대적으로 짧았기 때문이다. 피폭실험 radish-1 ~ radish-3에 대한 경우, 잎의 TFWT 농도는 실험데이터와 모델 예측 값이 유사하였으나 radish-4 와 radish-5 경우에 대해서는 모델이 약 한 승수 높게 농도를 예측하였다. 무 잎의 OBT 농도에 대한 실험결과와 모델 예측치는 비교적 잘 일치하고 있으나, 무 뿌리의 OBT 농도는 모델에 의한 예측 값이 실험 데이터보다 2~3 배 낮게 나타났다. 이와 같이 피폭의 경우 별로 실험과 모델의 차이 정도가 다르게 나타난 것은 작물 포트별로 무의 생육 상태의 차이에 의해 기인하는 것으로 보인다. 모델에서는 동일한 작물일 경우 동일한 성장 방정식을 적용하는 반면, 피폭 실험시 각 피폭 경우별로 서로 다른 포트에서 생육중인 작물을 사용하므로 포트별로 작물의 생육 정도가 모델의 성장함수와 편차가 있으면 작물의 실제 생체량에 따라 모델링에 의한 결과는 과대 또는 과소 평가될 수 있다.

V. 결론

삼중수소 농작물 오염 평가를 위한 동적적실모델이 제시되었다. 제시된 모델의 주요 특징은 성장방정식을 도입한 점이며 이는 작물의 생육 상태에 따른 피폭 효과를 평가할 수 있는 장점이 있다. 모델 예측 결과는 본 모델이 시간에 따른 작물 농도뿐 아니라 피폭시점에서의 작물의 생육 상태에 따른 피폭 효과를 잘 예측할 수 있음을 보여 주었다. 무, 배추에 대한 피폭 실험 결과는 모델에 의한 예측값과 전반적으로

로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 동일한 생육조건에서도 작물의 생육 정도는 변화가 심한 것을 감안할 때 본 연구의 모델은 사고로 누출된 삼중수소에 의한 무 및 배추의 오염 정도, 결과적으로 섭취선량을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 원자력연구개발기금으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Anspaugh LR, Koranda JJ, Robinson WL, Martin JR. The dose to man via food-chain transfer resulting from exposure to tritiated water vapor. In: Moghissi AA and Carver MW, eds. Tritium. Messenger Graphics, Phoenix. UCRL-73195; 1973: 405-422.
- [2] Murphy CEJ. Modeling tritium transport in the environment. Rad. Prot. Dosimetry 16:51-58; 1986.
- [3] Diabate S, Strack S. Doses due to tritium releases by NET- Data base and relevant parameters on biological tritium behavior, Forschungszentrum, Karlsruhe, Germany: Report KfK 4713; 1990.
- [4] Raskob W. Descriptions of NORMTRI: A computer program for assessing the off-site consequences from air-borne release of tritium during normal operation of nuclear facilities. Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany: Report KfK 5364; 1994.
- [5] Peterson S-R, Davis PA, Tritium doses from chronic atmospheric releases: A New approach proposed for regulatory compliance. Health Physics 82:213-225; 2002.
- [6] Raskob W. Description of the new version 4.0 of

- the tritium model UFOTRI including user guide. Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany: Report KfK 5194; 1993.
- [7] Russell SB, Ogram GL. ETMOD: A new environment tritium model. *Fusion Technology* 21:645-650; 1992.
- [8] Smith GM, Robinson PC, Stenhouse MJ. ^3H foodchain modeling following short-term release to atmosphere. Intera Information Technologies, Chiltern House, 45 Station Rd., Henley-on-Thames, Oxfordshire, U.K: Report IE3947-1, Version 2.0; 1995.
- [9] Higgins NA. TRIF: An intermediate approach to environmental tritium modeling. *J. Environ. Radioactivity* 36:253-267; 1997.
- [10] Guenot J, Belot Y. Assimilation of ^3H in photosynthesizing leaves exposed to HTO. *Health Physics* 47(6):849-855; 1984.
- [11] Raskob W. UFOTRI: Program for assessing the off-site consequences from accidental tritium release. Kernforschungszentrum Karlsruhe, Germany: Report KfK 4605; 1990.
- [12] Diabate S, Strack S. Organically bound tritium. *Health Physics* 65(6):698-712; 1993.
- [13] BIOMOVES II. Tritium in the food chain: intercomparison of model predictions of contamination in soil, crops, milk and beef after a short exposure to tritiated water vapor in air. Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm, Sweden; SKB TR 8; 1996a.
- [14] Kuester JL, Mize JH. Optimization techniques with Fortran. New York: McGraw-Hill Book Company; 1973:240-250.
- [15] Choi YH, Lim KM, Lee WY, Diabate S, Strack S. Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmosphere HTO vapor under semi-outdoor conditions. *J. Environ. Radioactivity* 58:67-85; 2002.
- [16] Diabate S, Strack S. Organically bound tritium in wheat after short-term exposure to atmosphere tritium under laboratory conditions. *J. Environ. Radioactivity* 36:157-175; 1997.
- [17] International Commission on Radiological Protection. Age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides, Part 5, Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients from Part 1-4., Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 72; Ann. ICRP 26(1); 1996.
- [18] International Atomic Energy Agency. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria; Safety Series No. 115; 1996.