

삼중수소의 환경방출에 따른 주민선량 규제모델의 비교

Comparison of the Regulatory Models Assessing Off-Site Radiological Dose due to the Routine Releases of Tritium

황원태, 김은한, 한문희, 최용호, 이한수, 이창우
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

W. T. Hwang, E. H. Kim, M. H. Han, Y. H. Choi, H. S. Lee and C. W. Lee
Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin, Yuseong, Daejeon

Abstract

Methodologies of NEWTRIT model, NRC model and AIRDOS-EPA model, which are off-site dose assessment models for regulatory compliance from routine releases of tritium into the environment, were investigated. Using the domestic data, if available, the predictive results of the models were compared. Among them, recently developed NEWTRIT model considers only doses from organically bounded tritium (OBT) due to environmental releases of tritiated water (HTO). A total dose from all exposure pathways predicted from AIRDOS-EPA model was 1.03 and 2.46 times higher than that from NEWTRIT model and NRC model, respectively. From above result, readers should not have an understanding that a predictive dose from NRC model may be underestimated compared with a realistic dose. It is because of that both mathematical models and corresponding parameter values for regulatory compliance are based on the conservative assumptions. For a dose by food consumption predicted from NEWTRIT model, the contribution of OBT was nearly equivalent to that of HTO due to relatively high consumption of grains in Korean. Although a total dose predicted from NEWTRIT model is similar to that from AIRDOS-EPA model, NEWTRIT model may be have a meaning in the understanding of phenomena for the behavior of HTO released into the environment.

Key words : Tritium, NEWTRIT Model, NRC Model, AIRDOS-EPA Model, Environmental Release

요약

삼중수소의 환경방출에 따른 주민선량의 규제이행을 위해 개발된 NEWTRIT 모델, AIRDOS-EPA 모델, NRC 모델의 평가 방법을 고찰하고, 활용 가능한 국내 특성자료를 사용하여 예측결과를 비교하였다. 이들 모델 중에서 가장 최근에 개발된 NEWTRIT 모델만이 tritiated water (HTO) 방출에 따른 organically bounded tritium (OBT)의 영향을 고려한다. 평가결과 삼중수소의 환경방출로 인해 모든 가능한 경로로부터 받게 되는 총 피폭선량은 AIRDOS-EPA 모델의 예측결과가 NEWTRIT 모델과 NRC 모델에 비해 각각 1.03배, 2.46배 높은 결과를 나타냈다. 이러한 결과로부터 NRC 모델로 예측되는 피폭선량이 실제 주변주민이 받을 수 있는 피폭선량을 과소 평가할 수 있다고 이해해서는 안될 것이다. 왜냐하면 삼중수소의 환경내 거동에 대한 불확실성은 매우 크기 때문에 규제이행을 위한 수학적 모델과 관련 변수 값은 극히 보수적 가정에 근거하기 때문이다. NEWTRIT 모델로 예측된 식품섭취에 의한 피폭선량에서 우리나라의 주식인 곡류의 상대적으로 많은 섭취로 OBT는 HTO와 거의 대등한 수준의 영향을 나타내었다. 삼중수소의 환경방

출에 따른 총 피폭선량에서 NEWTRIT 모델은 AIRDOS-EPA 모델과 유사한 예측결과를 나타내지만, NEWTRIT 모델은 식품섭취에 따른 OBT의 영향을 고려함으로써 환경으로 방출된 HTO 거동의 현상적 이해 등에 있어서 보다 의미가 있다고 판단된다.

중심단어 : 삼중수소, NEWTRIT 모델, NRC 모델, AIRDOS-EPA 모델, 환경방출

1. 서론

원자력시설의 운영은 미량이나마 불가피하게 방사성물질의 환경방출을 수반하게 되며, 이로 인해 주변 주민의 인체에 대한 방사능 위험을 줄 수 있다. 이러한 인체에 대한 방사능 위험을 최소화하기 위해 각 국에서는 다양한 규제 기준치를 설정하고 있다. 이러한 규제 기준치에 따라 시설이 적절히 운영, 관리되고 있는지 확인하는 절차로 시설의 운영 사업자는 주기적으로 주변 주민에 대한 피폭선량 평가를 실시하고 있다.

삼중수소는 원자력 시설의 운영 중에 환경으로 방출되어 인체에 중요한 피폭영향을 줄 수 있는 방사성 핵종이다. 삼중수소는 자연에서 빠르고 쉽게 혼합되는 특성으로 일반적으로 비방사능 모델(specific activity model)에 근거하여 농도를 예측한다. 이 모델의 기본적 개념은 인체를 포함하여 공기, 토양, 작물 등과 같은 모든 환경매체의 수분내에서 수소에 대한 삼중수소의 비 (T/H)는 동일하다는 가정에 근거한다[1]. 그러나 실제적으로 모든 환경매체의 수분내에서 T/H는 동일하지 않다. 예로 작물체 수분내에서 T/H는 공기 수분내에서 T/H에 비해 대부분 낮은 값을 나타낸다. 그 이유는 작물체의 수분흡수는 잎의 기공 뿐 아니라 많은 부분은 뿌리를 통해 이루어지고 일반적으로 토양 수분내에서 T/H는 공기 등과 같은 다른 환경매체의 수분내에서 T/H에 비해 상대적으로 낮기 때문이다[2,3]. 따라서 비방사능 모델에 의한 예측결과는 과대평가될 수 있으며 규제 이행을 위한 많은 수학적 모델에서는 이를 일부 변형하여 적용하고 있다[3,4,5,6]. 또한 삼중수소는 광합성 작용 등으로 동식물체 등의 유기물에서 다양한 화학적 결합을 갖는 형태의 삼중수소를 생성한다. 원자력시설 특히 원자력발전소로부터 방출되는 대부분 삼중수소의 화학적 형태는 tritiated water (HTO)이며, 작물체에 흡수된 HTO는 광합성 작용 등으로 일부는 organically bounded tritium (OBT) 형태로 전환된다. 그동안 OBT에 대한 지식의 부족으로 규제 목적의 대부분 수학적 모델에서는 HTO의 영향만을 고려하고 있지만 최근에는 OBT에 대한 선량환산인자를 포함한 축적된 지식과 경험 등을 통해 OBT의 영향을 반영하려는 시도가 있다. 미국 Lawrence Livermore National Lab. (LLNL)에서는 HTO의 영향만을 고려한 기존모델을 탈피하고 삼중수소에 대한 보다 과학적 이해와 신뢰성 있는 평가를 위해 OBT의 영향을 반영한 수학적 모델 NEWTRIT[3]를 개발하였다. 이 모델은 규제 활용을 위해 미국 환경보호청 (EPA)에 승인을 신청한 상태이다.

본 연구에서는 원자력시설 운영의 규제이행을 위해 개발된 삼중수소의 환경방출에 따른 대표적 주민선량 평가모델인 미국 LLNL의 NEWTRIT 모델, 미국 원자력규제위원회 모델 (NRC 모델 [4]), 미국 EPA의 AIRDOS-EPA 모델[5]의 평가 방법을 고찰하고 예측결과를 비교하였다.

2. 재료 및 방법

방사성 핵종의 환경내 거동은 물리적, 화학적으로 매우 복잡하여 수학적으로 정확하게 표현하기란 거의 불가능하다. 다시 말하면 현재의 지식수준에서 개발된 수학적 모델은 실제적 현상의 단순한 표현에 불과한 것이다. 따라서 수학적 모델에서 많은 복잡한 현상을 고려하였다고 하여 예측결과의 신뢰성이 반드시 향상되었다고 볼 수 없다. 왜냐하면 수학적 모델이 복잡할수록 많은 입력변수가 필요하게 되고, 변수 값의 불확실성으로 예측결과에 대한 신뢰성은 오히려 떨어질 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 원자력시설의 운영 규제에 활용하기 위한 수학적 모델은 최소한의 입력변수를 사용하여 환경에서 핵종의 거동을 명료하게 설명해 줄 수 있어야 하고 예측결과는 과소평가되지 않아야 한다는 기본 전제가 뒷받침되어야 한다[7]. 삼중수소의 환경방출에 대한 규제 모델

은 대부분 비방사능 개념에 근거한다. Evan은 1969년 사슴에 대한 실험결과로부터 인체를 포함하여 모든 환경매체의 수분에서 T/H는 동일하다는 비방사능 모델을 처음 제안하였는데 이는 만성적 피폭 (chronic exposure)으로 인체가 받을 수 있는 상한치를 나타낸다[1]. Evan이 제안한 비방사능모델의 지나친 보수성으로 U. S. NRC 등과 같은 여러 규제기관에서는 일부 변형된 방법을 규제에 활용하고 있다. 아울러 인체를 포함하여 동식물체에서 삼중수소의 물리적, 화학적 매카니즘이 어느 정도 규명됨에 따라 이에 대한 영향을 규제에 반영하려는 움직임도 있다.

2.1 NEWTRIT 모델

최근에 미국 LLNL에서 개발한 모델로 HTO의 환경방출에 따른 식품내 HTO 뿐 아니라 OBT의 섭취에 따른 피폭영향을 고려한다. 원자력시설로부터 삼중수소는 HTO 형태 뿐 아니라 tritiated hydrogen gas (HT) 형태로도 환경으로 방출될 수 있는데, 이 모델에서는 HT 형태의 삼중수소 방출에 따른 피폭영향도 고려한다. 원자력발전소의 경우 삼중수소는 대부분 HTO 형태로 환경으로 방출되나, 재처리시설의 경우에는 삼중수소의 총 환경 방출량 중에서 HT 형태가 약 40%를 차지한다[2]. HT는 인체 피폭에 대한 영향이 상대적으로 낮아 많은 경우 무시되기도 하지만 한편으로 HT가 토양에 있는 미생물 등과 상호작용으로 산화되어 HTO 형태로 전환되므로 결국 HTO 또는 OBT 형태로 인체에 피폭의 영향을 주기 때문에 중요할 수 있다. 그러나 본 연구는 현재 국내에서 운영되고 있는 원자력시설이 주요 관심대상이기 때문에 HT의 환경방출에 따른 피폭영향은 논의 대상에서 제외하였다.

NEWTRIT 모델은 많은 실험 자료에 근거하여 공기중 HTO의 농도로부터 작물체 수분내에서 HTO와 OBT 농도 (C_{pp} , Bq kg⁻¹-fresh)를 다음 식으로 평가한다.

$$C_{am} = \frac{C_a}{H} \tag{1}$$

$$C_{pp,HTO} = C_{am} RF_{pp} F_{wf,pp} \tag{2}$$

$$C_{pp,OBT} = C_{am} RF_1 ID_{pp} F_{dm,pp} W_{eq,pp} \tag{3}$$

여기서,

C_a : 공기중 HTO 농도 (Bq m⁻³)

H : 공기의 절대습도 (kg m⁻³)

C_{am} : 공기 수분내에서 HTO 농도 (Bq L⁻¹ 또는 Bq kg⁻¹)

RF_{pp} : T/H 감소분율

$F_{wf,pp}$: 수분 분율 (kg kg⁻¹-fresh)

RF_1 : 잎에 대한 T/H 감소분율

ID_{pp} : isotopic discrimination 인자

$F_{dm,pp}$: 건조물 (dry matter) 분율 (kg kg⁻¹-fresh)

$W_{eq,pp}$: 수분 등가인자 (L kg⁻¹)

T/H 감소분율 RF_{pp} 는 작물체 수분내에서 T/H는 공기 수분내에서 T/H와 다르다는 것을 말해주는데 그 이유는 앞서 언급한 바와 같이 작물체의 수분흡수는 잎의 기공 뿐 아니라 많은 부분은 상대적으로 농도가 낮은 토양의 뿌리를 통해 이루어지기 때문이다. 잎에 대한 T/H 감소분율 RF_1 도 이와 유사하게 설명될 수 있다. Isotopic discrimination 인자 ID_{pp} 는 작물체의 수분에서 T/H와 유기물에서 T/H의 차이를 반영하기 위해 도입되었다. 광합성 작용의 과정에서 질량의 차이로 유기물로의 이동은 삼중수소가 수소보다 느리지만 삼중수소-탄소 결합이 수소-탄소 결합보다 강하여 분해는 상대적으로 잘 이루어지지 않는다. 이러한 상반된 효과의 영향으로 작물체의 유

기물내에서 T/H는 수분내에서 T/H에 비해 약 20%~35% 정도 낮은 것으로 보고되고 있다. NEWTRIT 모델에서 적용되는 변수 값을 표 1에 나타냈다.

Table 1. Suggested parameter values in NEWTRIT model for calculating HTO and OBТ concentrations of plant products[3].

| 변수 | 작물 | 엽채류 | 과일류 | 기타작물 | 곡류 | 목초 |
|--|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| (T/H) 감소분율 (RF_{pp}) | | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.9 |
| 잎에 대한 (T/H) 감소분율 (RF_1) | | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Isotopic discrimination factor (ID_{pp}) | | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| 수분 분율 ($F_{wf,pp}$) | | 0.906 | 0.853 | 0.824 | 0.117 | 0.8 |
| 건조물 분율 ($F_{dm,pp}$) | | 0.094 | 0.147 | 0.176 | 0.883 | 0.2 |
| 수분 등가인자 ($W_{eq,pp}$) | | 0.6 | 0.59 | 0.58 | 0.577 | 0.616 |

축산물에 대한 HTO와 OBТ 농도 (C_{ap} , Bq kg⁻¹-fresh)는 다음 식으로 평가된다.

$$C_{ap,HTO} = [RF_{pp} F_{fr} + RF_1 ID_{pp} D_{fr} + W_{fr} RF_{dw} + ISA_{fr}] C_{am} F_{wf,ap} \quad (4)$$

$$C_{ap,OBТ} = [RF_{pp} F_{fr} + RF_1 ID_{pp} D_{fr} + W_{fr} RF_{dw} + ISA_{fr}] C_{am} F_{dm,ap} W_{eq,ap} \quad (5)$$

여기서,

F_{fr} : 사료 수분에 의한 물 공급분율

D_{fr} : 사료 건조물에 의한 물 공급분율

W_{fr} : 가축 공급용 음용수에 의한 물 공급분율

RF_{dw} : 공기 수분내 HTO 농도에 대한 음용수내 HTO 농도 분율

ISA_{fr} : 가축의 호흡과 피부흡수에 의한 물 공급분율

$F_{wf,ap}$: 축산물의 수분 분율 (kg kg⁻¹-fresh)

$F_{dm,ap}$: 축산물의 건조물 분율 (kg kg⁻¹-fresh)

$W_{eq,ap}$: 축산물의 수분 등가인자 (L kg⁻¹)

NEWTRIT 모델에서 축산물에 대한 HTO와 OBТ 농도를 평가하기 위해 적용되는 변수값을 표 2에 나타냈다[3].

HTO의 환경방출로 인한 인체로의 피폭경로는 식품섭취에 의한 영향 뿐 아니라 호흡, 피부흡수, 음용수 섭취에 의한 영향도 고려된다. 피부흡수에 의한 선량은 호흡에 의한 선량의 50%, 사람이 섭취하는 음용수는 10%가 오염되었다고 가정한다. 음용수를 포함한 식품섭취에 따른 피폭선량은 식품의 농도, 섭취율, 선량환산인자를 곱하여 평가한다. 또한 흡입에 의한 피폭선량은 공기중 농도, 호흡율, 선량환산인자를 곱하여 평가한다.

2.2 NRC 모델

원자력시설로부터 환경으로 방출되는 삼중수소는 모두 HTO로 가정하며, 식품의 오염은 단지 HTO 형태로 오염되어 이를 섭취함으로써 인체에 대한 피폭영향을 준다고 가정한다. NRC 모델은 Anspaugh 등에 의해 제안된 모델[8]에 근거하며, 작물체 수분내에서 T/H는 공기 수분내에서 T/H의 50% ($F_{cr} = 0.5$)로 가정한다.

Table 2. Suggested parameter values in NEWTRIT model for calculating HTO and OBT concentrations of animal products[3].

| 변수 | 축산물 | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|----------|-------|
| | 난류 | 우유 | 쇠고기 | 돼지 고기 | 가금류 |
| 작물 수분에 의한 수분 섭취분율(F_{fr}) | 0.034 | 0.371 | 0.409 | 0.031 | 0.034 |
| 작물의 건조물에 의한 수분 섭취분율 (D_{fr}) | 0.149 | 0.065 | 0.074 | 0.135 | 0.149 |
| 음용수에 의한 수분 섭취분율 (W_{fr}) | 0.781 | 0.544 | 0.490 | 0.782 | 0.781 |
| 흡입/피부흡수에 의한 수분 섭취분율 (ISA_{fr}) | 0.036 | 0.021 | 0.028 | 0.052 | 0.036 |
| 공기 수분에 대한 음용수 HTO 농도비(RF_{dw}) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 수분분율 ($F_{wf,ap}$) | 0.74 | 0.897 | 0.668 | 0.50 | 0.67 |
| 건조물분율 ($F_{dm,ap}$) | 0.26 | 0.103 | 0.332 | 0.50 | 0.33 |
| 수분 등가인자 ($W_{eq,ap}$) | 0.835 | 0.669 | 0.795 | 0.904 | 0.796 |

(주) 돼지와 가금류는 1년 내내 건조물만을 섭취하며, 젖소와 육우는 8개월은 목초를 4개월은 건조물을 섭취한다고 가정

$$C_{pp} = C_a F_{wf,pp} \left(\frac{F_{cr}}{H} \right) \tag{6}$$

여기서 작물체의 수분함량 분율 $F_{wf,pp}$ 는 작물의 종류에 관계없이 75%를 가정한다. NEWTRIT 모델에서 기술한 바와 같이 작물체의 수분 흡수는 많은 부분이 뿌리를 통해 이루어지기 때문에 NRC 모델에서는 공기 수분내에서 T/H에 대한 작물체 수분내에서 T/H를 50%로 가정하고 있는 것으로 추측된다. 축산물에 대한 농도는 사료에서 축산물로의 핵종 전이계수 F_m ($d L^{-1}$ 또는 $d kg^{-1}$)를 사용하여 평가한다.

$$C_{ap} = C_{pp} Q_F F_m \tag{7}$$

여기서,

Q_F : 가축의 사료 섭취율 (kg -fresh d^{-1})

F_m : 사료에서 축산물로의 핵종 전이계수 ($d L^{-1}$ 또는 $d kg^{-1}$ -fresh)

NRC 모델에서는 사람이 섭취하는 음용수의 오염에 따른 피폭영향 평가에 대한 지침은 제공하고 있지 않다. 이는 NRC의 규제지침에서 기술한 바와 같이 음용수에 의한 피폭선량은 원자력발전소 주변 주민이 다양한 경로를 통해 받을 수 있는 총 피폭선량의 10% 이하로 판단하기 때문인 것으로 추측된다. 피부흡수에 의한 피폭영향은 오염공기 흡입에 의한 영향의 50%로 가정하며, 이를 반영하기 위해 흡입에 의한 선량환산인자에 1.5를 곱한 값이 적용된다. 피폭선량은 NEWTRIT 모델과 마찬가지로 식품내 농도에 식품 섭취량, 호흡량 등 여러 인자를 곱하여 평가된다.

2.3 AIRDOS-EPA 모델

원자력시설의 운영으로 인해 환경으로 방출되는 삼중수소는 NRC 모델과 마찬가지로 모두 HTO로 가정하며, 식품은 단지 HTO 형태로 오염되어 이를 섭취함으로써 인체에 대한 피폭영향을 준다고 가정한다. 그러나 NRC 모델과 달리 작물체 수분내에서 T/H는 공기 수분내에서 T/H와 동일하다고 가정하며 ($F_{cr} = 1$), 식품섭취에 의한 피폭선량 (D_{fp} , $mSv yr^{-1}$)은 식품의 소비에 따른 수분의 섭취량에 근거하여 평가한다.

$$D_{fp} = 0.365 C_a \left(\frac{F_{cr}}{H} \right) U_{tw} F_{wc} DF_g \quad (8)$$

여기서,

0.365 : 단위환산인자

U_{tw} : 식품의 소비에 따른 총 수분의 섭취량 (=1,600 g d⁻¹)

F_{wc} : 식품의 섭취에 따른 수분 섭취분율 (농작물 : 0.505, 육류 : 0.185, 우유 : 0.31)

DF_g : 섭취에 의한 선량환산인자 (mSv Bq⁻¹)

사람이 섭취하는 음용수 섭취에 의한 피폭영향을 고려하며, 음용수는 1%가 오염된 것으로 가정한다. 피부흡수에 의한 피폭선량은 오염공기 흡입에 의한 영향의 50%로 가정한다. 흡입에 의한 피폭선량은 다른 모델과 마찬가지로 공기중 농도, 호흡율, 선량환산인자를 곱하여 평가한다.

3. 결과 및 고찰

원자력시설의 운영중 환경으로 방출되는 삼중수소로부터 주변주민이 받을 수 있는 피폭영향에 대해 NEWTRIT 모델, NRC 모델, AIRDOS-EPA 모델을 사용한 적용결과를 고찰하였다. 상기 언급한 3가지 모델에서는 섭취되는 오염 식품의 분율 등 부지특성 변수치를 고려할 수 있는 유연성이 있으나 본 연구의 취지상 이들 변수에 의한 영향은 고려하지 않았다. 바꾸어 말하면 피폭자는 평가하고자 하는 지점에서 일년내내 거주하고 동일지점에서 생산된 식품을 전량 소비하며, 동일지점에서 생산된 사료를 전량 가축의 사육을 위해 공급된다고 가정하였다. NRC 모델은 국내 원자력시설의 운영에 따른 주민선량평가의 기본 골격으로 사용되고 있으며[9], 식품 소비량과 호흡량 등과 같은 모델의 일부 변수 값은 국내 또는 부지 특성치를 고려하여 평가하고 있다. 국내 원자력시설의 운영에 따른 주민선량평가에 적용되고 있는 식품 소비량과 사료에서 축산물로의 전이계수 값을 표 3[9]에 나타냈으며, 모델간 예측결과의 상호비교를 위해 3가지 모델에 동일하게 적용하였다. 또한 국내 성인에 대한 호흡량은 7,400 m³ yr⁻¹이며[9], 선량환산인자는 국제 방사선방호위원회의 권고 (ICRP-60)에 따라 HTO의 섭취와 흡입에 대한 유효 선량환산인자 1.8 x 10⁻⁸ mSv Bq⁻¹, 섭취에 대한 OBT의 유효 선량환산인자 4.2 x 10⁻⁸ mSv Bq⁻¹를 적용하였다[10]. 사람이 섭취하는 음용수 섭취량은 NEWTRIT 모델에서 권고하는 440 L yr⁻¹를 적용하였다[3]. 삼중수소는 모두 HTO 형태로 환경으로 방출되며, 이 때 공기중 HTO의 연간 평균 농도는 1 Bq m⁻³으로 가정하였다.

Table 3. Parameter values to be applied for off-site dose calculation due to the operation of domestic nuclear facilities[9].

| 식품 \ 변수 | 식품 소비량 ¹⁾ (kg-fresh yr ⁻¹) | 사료에서 축산물로의 전이계수 (d kg ⁻¹) |
|-------------------|--|---------------------------------------|
| 곡류 | 188.5 | - |
| 엽채류 ²⁾ | 193.0 | - |
| 과일류 | 66.3 | - |
| 우유 | 63.0 | 1.0 x 10 ⁻² |
| 쇠고기 | 20.7 | 1.2 x 10 ⁻² |
| 돼지고기 | 12.4 | 1.2 x 10 ⁻² |
| 닭고기 | 22.0 | 1.2 x 10 ⁻² |

¹⁾ 성인에 대한 최대 소비량

²⁾ 김치 포함

그림 1은 NEWTRIT 모델에 의한 식품내 삼중수소 농도의 예측결과를 나타냈다. 대부분 식품에서 HTO 농도가 OBТ 농도보다 높게 평가되나 곡류와 돼지고기의 경우에는 OBТ 농도가 HTO 농도에 비해 높거나 유사하게 나타났다. 그 주된 이유로 곡류는 다른 식품에 비해 건조물의 함량이 약 88%로 월등히 높으며, 돼지고기는 건조물의 함량과 수분 증가인자 등이 상대적으로 높기 때문이다. 삼중수소 농도 (HTO와 OBТ 농도의 합)에 대한 OBТ 농도의 비는 농산물 식품 중에서는 곡류가 약 81.5%로 가장 높고 열채류는 약 5.3%로 가장 낮게 나타났다. 또한 축산물 식품 중에서는 돼지고기가 약 47.5%로 가장 높은 반면 우유는 약 7.1%로 가장 낮게 나타났다.

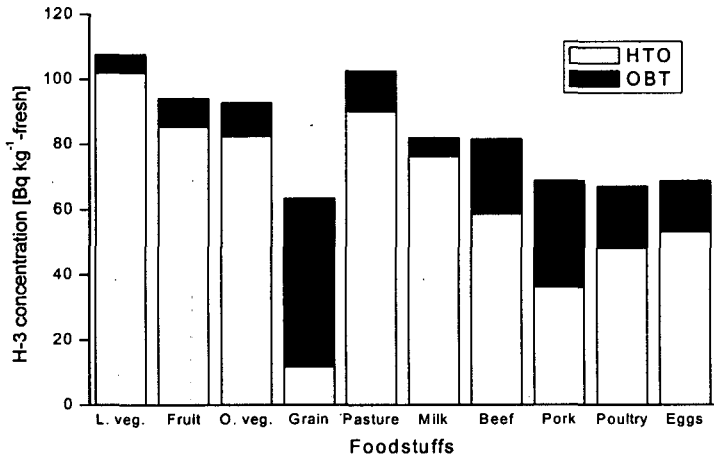


Fig. 1. Tritium concentration in foods predicted from NEWTRIT model ; It is assumed that HTO concentration in air is 1 Bq m⁻³.

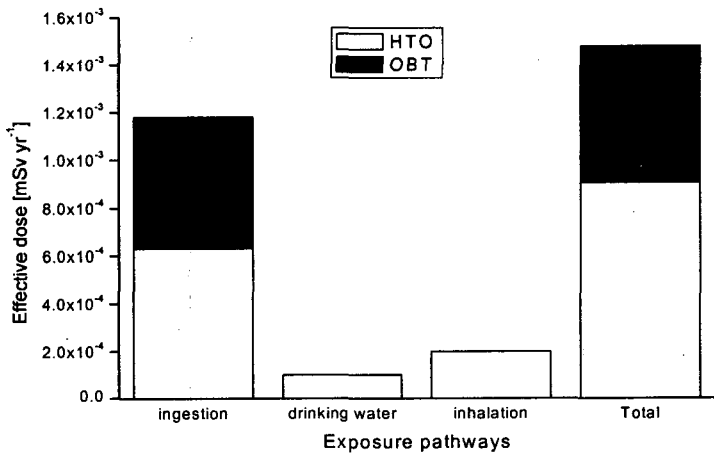


Fig. 2. Effective dose as a function of exposure pathways predicted from NEWTRIT model ; It is assumed that HTO concentration in air is 1 Bq m⁻³.

그림 3은 3가지 다른 모델을 사용하여 평가한 농산물과 축산물 식품의 섭취에 따른 피폭선량을

나타났다. HTO 영향만을 고려할 경우 농산물과 축산물 식품 모두에 대해서 AIRDOS-EPA 모델로 예측된 피폭선량이 가장 높고 NRC 모델로 예측된 피폭선량이 가장 낮게 평가되었다. 이러한 예측결과의 근본적 차이는 공기 수분에 대한 작물체 수분에서 농도간의 비에 대한 가정에 있다. 우리나라의 주식인 곡류에 대해서는 모델의 예측결과 간에 큰 차이를 나타냈다 (NRC 모델과 NEWTRIT 모델의 예측결과는 각각 $1.59 \times 10^{-4} \text{ mSv yr}^{-1}$, $4.0 \times 10^{-5} \text{ mSv yr}^{-1}$; AIRDOS-EPA 모델은 농산물의 종류를 세분화하지 않음). 이는 앞서 설명한 모델의 근본적 가정뿐 아니라 작물체의 수분함량 분율에 큰 차이를 나타내고 있기 때문이다 (NRC 모델과 NEWTRIT 모델은 각각 75%, 11.7%로 가정). 그러나 NEWTRIT 모델에서 OBT의 영향을 고려할 경우에는 전혀 다른 결과를 나타냈다. NEWTRIT 모델에서 HTO 영향만을 고려할 경우 모든 식품의 섭취에 대한 곡류의 피폭선량 기여는 약 6%에 불과하였으나 OBT의 영향을 포함할 경우에는 약 38%를 차지했으며, 이는 고려되는 여러 식품 중에서 가장 높은 피폭선량의 기여를 나타냈다. NRC 모델의 예측결과에서 모든 식품의 섭취에 대한 곡류의 피폭선량 기여는 NEWTRIT 모델의 예측결과와 유사하게 약 38%를 차지했다. NRC 모델과 AIRDOS-EPA 모델은 HTO만을 고려하고 있으며, 농산물 식품에 대해 AIRDOS-EPA 모델의 예측결과는 NRC 모델의 예측결과에 비해 약 1.8배 높게 평가되었다. 피폭선량과 직접 비례하는 농산물 식품섭취에 따른 수분 섭취량은 NRC 모델이 AIRDOS-EPA 모델의 가정보다 높은 값을 나타낸다. AIRDOS-EPA 모델에서는 농산물 식품섭취에 따른 수분 섭취량을 약 808 g d^{-1} 로 가정하며, NRC 모델에서는 모든 작물체의 수분비를 75%로 가정할 경우 환산하면 수분 섭취량은 약 920 g d^{-1} 에 해당한다. 그러나 공기 수분내에서 T/H에 대한 농산물 수분내에서 T/H의 비에 대한 가정은 AIRDOS-EPA 모델이 NRC 모델보다 2배 높다. 축산물 식품의 섭취에 따른 피폭선량은 AIRDOS-EPA 모델의 예측결과가 NRC 모델에 비해 10배 이상 높게 평가되었다. 이러한 차이는 공기 수분내에서 T/H에 대한 가축사료 수분내에서 T/H의 비, 축산물 식품섭취에 따른 수분 섭취량, 수학적 모델의 차이 (NRC 모델에서는 사료에서 축산물로의 핵종 전이계수를 사용하여 축산물의 농도로부터 피폭선량을 예측하나 AIRDOS-EPA 모델에서는 사료의 농도와 축산물 섭취에 따른 수분섭취량으로부터 직접 피폭선량을 예측함) 등에 기인한다. 이들 각 변수는 모두 AIRDOS-EPA 모델의 예측결과가 NRC 모델에 비해 높은 예측결과를 갖게 한다.

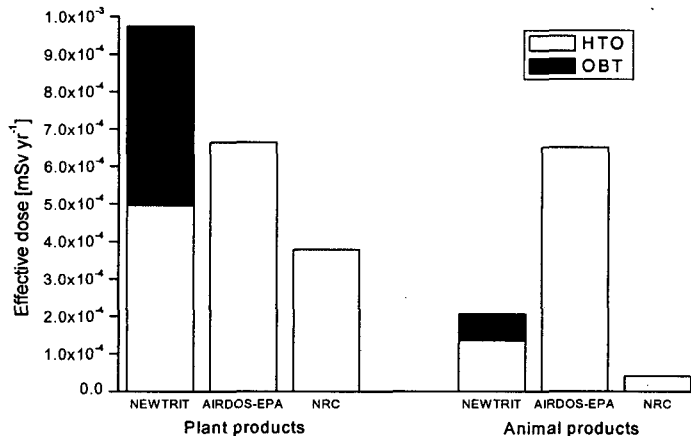


Fig. 3. Comparison of predictive results among the models for plant and animal products ; It is assumed that HTO concentration in air is 1 Bq m^{-3} .

그림 4는 3가지 다른 모델을 사용하여 평가한 피폭경로별 선량을 나타냈다. 삼중수소의 환경방출로 인해 모든 경로로부터 받게 되는 총 피폭선량은 AIRDOS-EPA 모델의 예측결과가 가장 높게 나타났다. AIRDOS-EPA 모델의 예측결과는 NEWTRIT 모델과 NRC 모델의 예측결과에 비해

각각 1.03배, 2.46배 높은 결과를 나타냈다. 피폭경로별 중요도는 3가지 다른 모델의 예측결과에 대해 일관성을 보이는데 식품섭취, 호흡, 음용수 섭취 (NRC 모델에서는 고려되지 않음)의 순으로 높았다. NRC 모델이 상대적으로 낮게 평가되고 있는데, 이러한 결과로부터 NRC 모델이 실제 주변주민이 받을 수 있는 피폭선량을 과소평가하고 있다고 이해해서는 안될 것이다. 왜냐하면 삼중수소의 환경내 거동에 대한 불확실성은 매우 크기 때문에 규제이행을 위한 주민선량 평가에서는 앞서 언급한 바와 같이 피폭자는 평가하고자 하는 지점에서 일년내내 거주하며, 동일지점에서 생산된 식품을 전량 소비한다는 현실적으로 불가능한 극히 보수적 가정에 근거하기 때문이다. 다른 모델에 비해 상대적으로 낮게 평가되는 NRC 모델의 예측결과 조차도 식품의 유통경로 등과 같은 부지 특성자료를 고려할 경우 피폭선량은 약 1/4로 낮출 수 있다고 보고되고 있다[2].

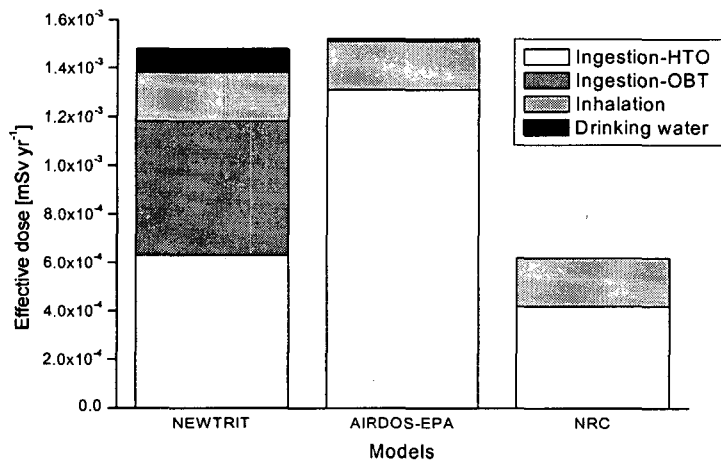


Fig. 4. Comparison of predictive results among the models as a function of exposure pathways ; It is assumed that HTO concentration in air is 1 Bq m⁻³.

4. 결론

삼중수소의 환경방출에 따른 주민선량의 규제이행을 위해 개발된 NEWTRIT 모델, NRC 모델, AIRDOS-EPA 모델의 평가 방법을 고찰하고, 활용 가능한 국내 특성자료를 사용하여 예측결과를 비교하였다.

평가결과 삼중수소의 환경방출로 인해 모든 가능한 경로로부터 받게 되는 총 피폭선량은 AIRDOS-EPA 모델의 예측결과가 NEWTRIT 모델과 NRC 모델에 비해 각각 1.03배, 2.46배 높은 결과를 나타냈다. 이러한 결과로부터 NRC 모델로 예측되는 피폭선량이 실제 주변주민이 받을 수 있는 피폭선량을 과소평가할 수 있다고 이해해서는 안될 것이다. 왜냐하면 삼중수소의 환경내 거동에 대한 불확실성은 매우 크기 때문에 규제이행을 위한 수학적 모델과 관련 변수 값은 극히 보수적 가정에 근거하기 때문이다. NEWTRIT 모델로 예측된 식품섭취에 의한 피폭선량에서 우리나라의 주식인 곡류의 상대적으로 많은 섭취로 OBT는 HTO와 거의 대등한 수준의 영향을 나타내었다. 삼중수소의 환경방출에 따른 총 피폭선량에서 NEWTRIT 모델은 AIRDOS-EPA 모델과 유사한 예측결과를 나타내지만, NEWTRIT 모델은 식품섭취에 따른 OBT의 영향을 고려함으로써 환경으로 방출된 HTO 거동의 현상적 이해 등에 있어서 보다 의미가 있다고 판단된다.

참고문헌

1. A. G. Evans, "New Dose Estimates from Chronic Tritium Exposures", Health Physics 16(1), 57-67 (1969).
2. J. E. Till and E. L. Etnier and H. R. Meyer, "Methodologies for Calculating the Radiation Dose to Man from Environmental Releases of Tritium", Nuclear Safety 22(2), 205-213 (1981).
3. S-R. Peterson and P. A. David, "Tritium Doses from Chronic Atmospheric Releases : A New Approach Proposed for Regulatory Compliance", Health Physics 82(2), 213-225 (2002).
4. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.109, Rev. 1, "Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Appendix I" (1977).
5. R. E. Moore et al., "AIRDOS-EPA : A computerized Methodology for Estimating Environmental Concentrations and Dose to Man from Airborne Releases of Radionuclides", Report EPA 520/1-79-009 (PB 90-147838), Environmental Protection Agency (1979).
6. National Council on Radiation Protection and Measurements, "Tritium in the Environment", NCRP Report No. 62 (1979).
7. J. E. Till and H. R. Meyer, "Radiological Assessment - A Textbook on Environmental Dose Analysis", U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3332, ORNL-5968 (1983).
8. L. R. Anspaugh et al., "Dose to Man Via Food-Chain Transfer Resulting from Exposure to Tritiated Water Vapor", UCRL-73195 Rev. 1 (1972).
9. 한국에너지연구소, "고리 주변 환경종합평가 및 관련모델개발 : 고리 원자력 주변 주민피폭선량 계산지침서", KAERI/NSC-397/89 (1989).
10. International Commission on Radiological Protection, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 60 (1991).