

토양 및 농작물에서 방사능물질의 거동분석모델에 대한 불확실성분석

Uncertainty Analysis of the Dynamic Model for Assessing the behavior of a Radionuclides in Soil and Plants

유동한, 강희석, 이한수

한국원자력연구소

국문요약

원자력시설에서 대기 중으로 누출된 방사능물질은 주변 토양 및 농작물에서 침적되고 이러한 오염된 농작물을 인체가 섭취하는 경우 인체노출이 일어나게 된다. 본 연구에서는 이러한 토양 및 농작물에서의 방사능물질의 거동을 분석하는 ECOREA-II, 라 불리는 평가코드를 개발하였다. 또한 개발된 ECOREA-II 코드에 입력인자들의 정량적인 불확실성 분석모델과 불확실성분석결과를 바탕으로 한 입력인자들의 중요도분석을 할 수 있는 모델을 추가개발하였다. 개발된 코드를 사용하여 본 논문에서는 ECOREA-II 코드를 활용하여 방사능물질인 Cs-137의 토양침적시 주요한 작물체인 벼에 대한 토양-쌀알 전이계수를 분석하기 위해 주요입력변수에 대한 불확실성분석을 수행하였다. 또한 기수행된 실험자료와 비교하여 문제점을 파악하고 이러한 결과에 영향을 주는 입력인자들의 중요도를 평가하여 보았다.

1. 서론

원자력시설의 사고시 대기중으로 누출된 방사능물질에 의해 오염된 토양으로부터 재배된 농작물로 인한 인체노출은 각종 환경오염물질에 의한 인체영향 연구결과에 보듯이 직접적인 방사능에 의한 인체노출 못지 않게 상당히 중요하다. 이러한 섭취경로를 통한 노출은 각 나라마다 서로 다른 토양조건 및 작물체종류의 다양성등 다른 양상을 보이고 있어, 연구가 수행된 미국이나 유럽등지의 평가방법을 그대로 사용하면 국내의 토양에서 재배되는 농작물이나 이를 이용한 축산물에 따른 한국인의 독특한 섭취양상을 충분히 고려하여 평가하기 어려울 수 있다.

본 연구에서는 방사능물질의 섭취경로를 통해 간접적인 인체노출을 보다 정량적으로 평가하기 위해서 국내실정에 맞게 토양 및 농작물에서의 방사능물질의 거동을 분석하는 모델인, 일명 ECOREA-II, 라 불리는 분석코드를 개발하였다[1]. 이 코드에서는 방사능물질의 누출후 농작물과 토양에서 방사능물질의 거동을 수학적으로 평가하기 위해 우선 compartment에서 mass balance 방정식을 세워 접근하였다. 또한 기존 모델에서는 고려하지 않았던 농작물의 성장을 고려한 성장회색모델을 추가하여 개발하였다. 또한 최근 이렇게 개발된 ECOREA-II 코드에 입력인자들의 정량적인 불확실성 분석모델과 불확실성분석결과를 바탕으로

한 입력입자의 중요도분석을 할 수 있도록 모듈을 추가하여 보완, 개선작업을 하였다.

본 논문에서는 이렇게 개발된 ECOREA-II 코드를 활용하여 방사성물질인 Cs-137의 토양 침적시 주요한 작물체인 벼에 대한 토양-쌀알 전이계수를 분석하여 보았다. Cs-137은 원자력발전소 사고시 지상침적량이 많은 핵종중 하나이고 벼는 우리나라에서 재배면적이 제일 넓고 소비량이 많은 주요 작물이다. 또한 주요입력변수에 대한 불확실성분석을 수행한 후 기수행된 실험자료와 비교하여 문제점을 파악하고 이러한 결과에 영향을 주는 입력인자들의 중요도를 평가하여 보았다.

2. 연구방법

2.1 ECOREA-II 코드의 모델링 소개

현 ECOREA-II코드에서 사용한 수학적 모델에서는 토양에서의 방사성물질의 이동을 보다 자세히 평가하기 위해 아래와 같이 토양을 4 가지로 나누어 모델링한다.

- 표면토양 (0-1 cm),
- root zone 토양 (농작 토양: 1-25 cm; 목초지 토양: 1-15 cm),
- fixed soil (농작 토양: 1-25 cm; 목초지 토양: 1-15 cm),
- 심층토양 (농작 토양: > 25 cm; 목초지 토양: > 15 cm)

그림 1에서는 현 모델에서 고려하려는 각 compartment에서의 여러 이동 메카니즘을 보여주고 있다.

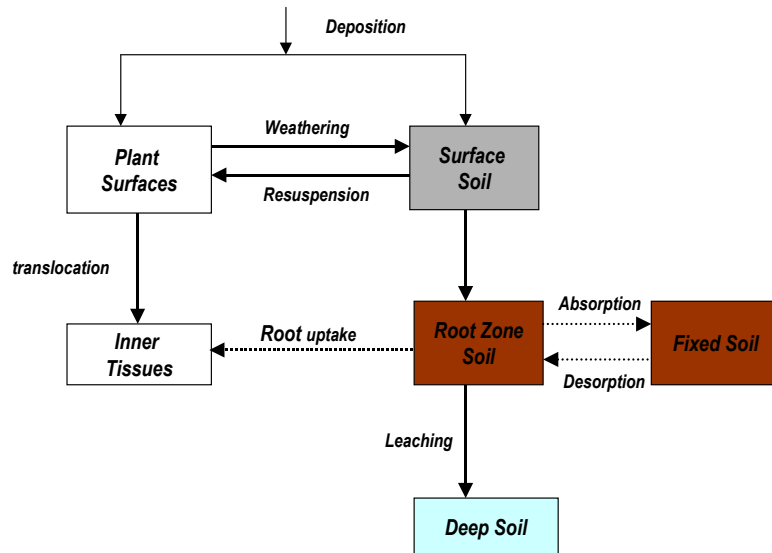


그림 1. ECOREA-II 코드에서의 토양과 농작물간의 이동 메카니즘

1) 작물체의 엽면부 (Q_{ps})

작물체 엽면부에서는 방사성물질의 재부유현상과 강우시 발생가능한 rainsplashing 효과를 고려하였고 바람이나 기타 현상으로 엽면부에서의 방사성물질의 다른 곳으로 이동하는 weathering, 그리고 엽면부에서 작물체의 식용부위로 이동하는 현상인 translocation 을 고려하여 아래와 같은 모델식을 수립할 수 있다.

$$\frac{dQ_{ps}}{dt} = (K_{res} + K_{rs}) \frac{Q_{ss}}{B_f} - (K_w + K_{Tr} + \lambda_d) Q_{ps} \quad (1)$$

이때, 초기조건은 $Q_{ps}(0) = \frac{fF}{B_f}$ 이다. 여기서 Q_{ps} 는 단위무게당 activity (Bq/kg), Q_{ss} 는 단위면적당 activity (Bq/m^2), B_f 는 단위면적당 작물체의 무게 (kg/m^2) 을 의미한다.

차단계수 f 는 대기로부터 침적되는 방사성물질의 일부는 지표에 도달하기 전에 식물체에 의해 차단되어 식물체 표면에 잔류하는 율을 표시한 것으로 아래와 같이 정의하였다.

$$f = 1 - e^{-\alpha B_f} \quad (2)$$

여기서 α 는 앞에 의한 차단계수를 의미하고 B_f 는 biomass를 의미한다. α 는 2.3 ~ 3.3 $m^2/dry\text{-kg}$ 이며 현 모델에서는 과일을 제외한 모든 작물체에는 3 $m^2/dry\text{-kg}$ 을 사용하고 과일에 대해서는 0.3 $m^2/dry\text{-kg}$ 을 사용하고 있다.

단위면적당 작물체의 Biomass를 구하는 식은 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\frac{dB}{dt} = k_g B \left(\frac{B_{max} - B}{B_{max}} \right) \quad (3)$$

여기서 k_g 는 성장계수를 의미하며, B 는 현재 biomass를, B_{max} 는 최대 biomass를 의미한다. k_g 는 모든 작물체에 대해 0.12를 사용하고 있다.

(3)식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$B(t) = \frac{B_{max} B_0}{(B_{max} - B_0) e^{-k_g t} + B_0} \quad (4)$$

여기서 B_0 는 작물체의 최초 biomass를 의미하는데 현 모델에서는 목초에 대해서는 0.07 $dry\text{-kg}/m^2$, 타 작물체에 대해서는 0.015 $dry\text{-kg}/m^2$ 을 사용하고 있다.

방정식 (1)은 엽면부에서의 방사성핵종의 농도계산은 기본적으로 단위 질량당 농도를 바탕으로 하여 이루어진다. 다시 말하면, 각 구역에서는 방사성핵종의 specific activity (Bq/Kg 또는 Bq/m²)를 기준으로 분포변화를 계산하게 된다. 그러나 이러한 접근방법은 토양구역에서는 문제가 없으나 실제 농작물이 성장하면서 이루어지는 엽면부에서의 성장희석과정 (Growth Dilution Process)를 제대로 반영하기 어렵다는 문제가 발생한다. 이러한 성장에 따른 성장희석효과를 효과적으로 반영하는 모델을 개발하고 평가하는 노력이 필요하다. 이를 위해 다음과 같은 성장희석을 고려한 새로운 방정식을 유도하였다.

$$\frac{dQ_{ps}}{dt} = (K_{res} + K_{rs}) \frac{Q_{ss}}{B_f} - (K_w + K_{Tr} + K_{gs} + \lambda_d) Q_{ps} \quad (5)$$

방정식 (5)에서 새로 고려된 인자는 성장희석계수 (growth dilution rate constant)라 명명하고 이를 K_{gs} 로 표시하며 다음과 같이 정의하여 사용한다.

$$K_{gs} = \frac{dB_f}{dt} / B_f = k_g \frac{B_{max} - B_f(t)}{B_{max}} \quad (6)$$

엽면부에서 바람에 의해 재부유와 더불어 rainsplash는 표층의 토양에서 식물체의 표면으로 방사능 핵종이 이동하는 주요한 메카니즘이라는 것이 알려져 있다. 또한 weathering constant는 바람이나 water removal에 의해 식물체표면에서 토양 표면으로 방사능 물질이 이동하는 것을 모델링하기 위해 사용한다.

2) 작물체의 식용부 (Q_{it})

작물체의 식용부에서의 방사성물질에 대한 모델식은 우선 작물체엽면부에서 이동해 온 율과 뿌리흡수 토양층으로부터 뿌리로부터 흡수된 율등을 고려하여 아래와 같은 식을 세울 수 있다.

$$\frac{dQ_{it}}{dt} = K_{Tr} \frac{B_f}{B_e} Q_{ps} + \frac{K_{up}}{B_e} Q_{rs} - \lambda_d Q_{it} \quad (7)$$

여기서 초기조건은 $Q_{ss}(0) = (1-f)F$ 이며, K_{up} 는 뿌리흡수에 의해 Inner Tissue로 이동된 율을 의미하며 이것은 작물체의 성장속도 ($\frac{dB}{dt}$)와 plant-to-soil concentration ratio (CR)에 관계하는 아래와 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$K_{up} = \frac{CR}{X_{rs} \rho_{rs}} \frac{dB}{dt} \quad (8)$$

윗식에서 X_{rs} 는 root zone soil의 두께이며 ρ_{rs} 는 bulk density을 의미한다.
식용부에서도 엽면부에서와 마찬가지로 성장희석을 고려하여 다음과 같은 새로운 방정식을 사요하기로 한다.

$$\frac{dQ_{it}}{dt} = K_{Tr} \frac{B_f}{B_e} Q_{ps} + \frac{K_{up}}{B_e} Q_{rs} - (K_{gi} + \lambda_d) Q_{it} \quad (9)$$

방정식 (7)에서 사용된 계수는 식용부에서의 성장희석계수라 칭하고 K_{gi} 라 표시하고 다음과 같이 정의한다.

$$K_{gi} = \frac{dB_e}{dt} / B_e = k_g \frac{B_{max} - B_e(t)}{B_{max}} \quad (10)$$

성장희석을 고려한 식용부나 엽면부에서의 새로운 모델은 성장초기 또는 말기에서보다는 성장중기에 빠른 성장률을 보이는 작물체의 성장특성을 제대로 반영할 수 있는 장점을 갖고 있다. 또한, 성장희석과정을 고려한 기존모델에서 사용한 일정한 성장희석계수를 고려한 경우보다 훨씬 현실적인 모델이라고 판단된다.

3) 표면토양층 (Q_{ss})

토양의 표층부분에서 방사능물질이 root-zone 토양방향으로 움직이는 현상을 percolation이라 하는데 이에 대한 속도상수 (K_{per}) 를 이용하여 아래와 같이 모델링하였다.

$$\frac{dQ_{ss}}{dt} = K_w B_f Q_{ps} - (K_{res} + K_{rs} + K_{per} + \lambda_d) Q_{ss} \quad (11)$$

4) 뿌리흡수토양층 (Q_{rs})

$$\frac{dQ_{rs}}{dt} = K_{per} Q_{ss} + K_{des} Q_{fs} - (K_{leach} + K_{ads} + \lambda_d + K_{up}) Q_{rs} \quad (12)$$

여기서는 deep soil로 이동하는 leaching 효과도 고려하였다. Leaching은 root zone토양에서 deep soil로 방사성물질을 이동시키므로 root uptake가 불가능하게 된다. 이것은 장

기적인 과정이므로 다음과 같은 연평균 인자들로 표시할 수 있다.

$$K_{leach} = \frac{P + I - E - R}{\theta X_{rs} (1 + \frac{\rho K_{dj}}{\theta})} \quad (13)$$

여기서 P = 연평균강수량 (m/d), E = 연평균 증발량 (m/d), I = 연 평균 관개량 (m/d), R = 연 평균 토양 runoff (m/d), X_{rs} = labile 토양의 깊이, θ = 연 평균 단위 부피 당 토양의 수분 부피, ρ = 토양 밀도 (g/cm^3), 그리고 K_{dj} = 각 핵종의 토양내 분배계수를 의미한다.

방사성물질중 Cs-137 의 경우, root-zone토양과 fixed soil사이에 고착현상이 실험적으로 관찰되었다. 이를 모의하기 위해 이들에 대한 속도상수들 (K_{ads} , K_{des})을 사용하였다.

5) 고정토양층 (Q_{fs})

$$\frac{dQ_{fs}}{dt} = K_{ads} Q_{rs} - (K_{des} + \lambda_d) Q_{fs} \quad (14)$$

6) 심층토양층 (Q_{ds})

$$\frac{dQ_{ds}}{dt} = K_{leach} Q_{rs} - \lambda_d Q_{ds} \quad (15)$$

2.2 ECOREA-II 코드 사용자편의 부분

기존의 평가코드들은 섭취 경로에 대한 수학적 모델을 fortran을 바탕으로 프로그램하여 사용자가 입출력자료의 handling에 있어서 많은 어려움이 있었다. 개발하고자 하는 ECOREA-II 평가코드는 우선 앞서 언급한 섭취경로에 대한 수학적 평가모델 자체의 개선과 더불어 사용자들이 보다 쉽게 입력자료를 수정하거나 평가된 결과를 보다 쉽게 볼수 있도록 하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 이를 위해 우선 수학적인 모델식을 프로그램하는데 있어 기존의 fortran보다는 보다 사용자편의부분이 고려된 MS Excel을 바탕으로 한 VBA version으로 개발하였다. 특히 다양한 자료의 입·출력 및 핵종별/식품군별 입력자료의 원활한 관리 및 입·출력의 GUI를 위하여 Excel의 Sheet와 Cell을 이용하였으며, 출력 또한 Excel파일의 sheet를 바탕으로 하였다. (그림 2, 그림 3 참조)



그림 2. Ecorea-II의 Main GUI 구성



그림 3. 결과보기 지정창 GUI 구성

2.3 Ecorea-II에서의 불확실성분석 모듈

일반적으로 불확실성은 다음과 같이 크게 두 종류로 나눌 수 있다.

■ stochastic variability에 의한 불확실성:

이 불확실성은 물리적으로 측정할 수 있는 값들이 실제로 임의의 행동 (random motion)로 인해 발생하게 된다. 이러한 stochastic variability의 예제는 날씨의 변동성, 각 공장의 특정 부품의 고장시간의 분포, 또는 원자력발전소 사고시 각 지역의 방사선량 등을 들 수 있다. 따라서 이 경우는 표현하고자 하는 값의 임의의 행동 (randomness)으로 야기되는 분포를 정의하여야 하며 이 분포가 확정되면 이러한 인자로 이루어진 시스템의 전체 불확실성을 분석할 수 있다. 따라서 우리가 원하는 불확실성의 정량화는 이러한 분포들의 연산 과정으로 표현되어 분석할 수 있게 된다. 이러한 경우 불확실성을 줄일 수 있는 경우는 존재하지 않고 다만 전체적인 불확실성의 분포의 윤곽을 파악할 수 있다.

■ 불충분한 지식으로 인한 불확실성

이 불확실성은 해석하고자 하는 값의 모호함 (vagueness) 또는 부정확함 (imprecision)으로 표현되는 것을 의미한다. 이런 불확실성은 기본적으로 우리들 지식의 부족으로 야기된다. 다시 말하자면 우리가 좀 더 많은 지식과 정보를 가질수록 이러한 불확실성은 점점 줄어들게 된다. 이러한 불확실성의 예제로는 어떤 포인트 값으로 존재하나 예측하기 힘든 값의 불확실성, 또는 해석모델의 적합성에 대한 불확실성을 들 수 있다. 따라서 이 경우는 실제 우리가 원하는 값은 포인트 값으로 존재하나 우리의 지식이 현재 이 값을 정확히 예측하지 못하여 일어나는 불확실성을 분석한다. 따라서 이 경우에는 주로 주관적인 값의 구간으로 표현하여 원하는 값이 이 구간 사이에 존재하는 것으로 불확실성을 표현하게 된다. 이런 경우 이 구간이 넓으면 상대적으로 불확실성이 커지고 구간이 좁아지면 불확실성은 줄어들게 된다. 궁극적으로 우리들의 지식이 늘어나면 예측하고자 하는 값이 존재하는 구간이 좁아져서 결과적으로 이상적인 경우 포인트 값으로 표현될 수 있으며 이 때는 이 경우 불확실성은 제로가 된다. 따라서 이 경우는 불확실성을 감소시키는 방안으로 각 인자들의 불확실성의 구간을 줄이면 결과는 전체적으로 불확실

성이 감소하는 방향으로 진행한다.

불확실성분석이란 다음과 같은 입력자료들 (X_i)과 이로부터 얻어지는 최종결과치(Y_i)의 함수관계 또는 모델을 통해 전파되는 불확실성을 정량화하는 작업이다(그림 4 참조).

$$Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \text{ or } Model(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (16)$$

이 경우 입력자료들(X_i)는 확률밀도분포인 pdf (probability density function)으로 표현된다. 우선적으로 입력인자들의 확률밀도함수로부터 얻어지는 입력자료 set을 마련하여야 하는데 이를 위해 **LHS (Latin Hyper-cube Sampling)기법을 사용한다.** 이러한 sampling을 통해 얻어진 입력자료들의 set은 대개 100 - 200 개정도 준비하여 이로부터 최종 결과치의 불확실성분포를 결정하게 된다. 결정된 최종치의 분포로부터 평균치 (mean) 또는 불확실성의 분포 (예를 들어, 5th 또는 95th percentile)등이 정량화하게 된다.

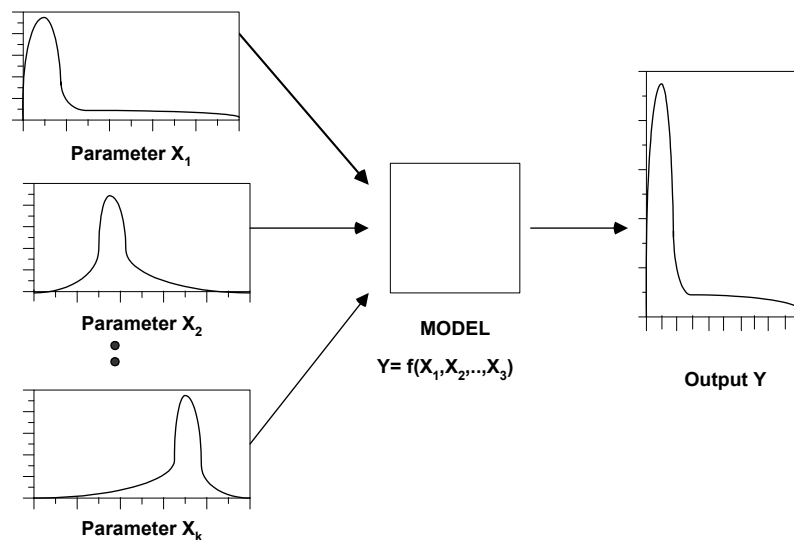


그림 4. 불확실성분석의 개념도

현재 ECOREA-II에서 취급하는 불확실성은 두 번째 불확실성에 해당하며 이 부분에 대한 분석결과에 대한 분석결과만이 의미가 있다고 할 수 있다.

전년도에 개발된 ECOREA-II코드의 불확실성평가를 위해 코드에서 사용한 중요입력인자들의 데이터 샘플링을 위한 모듈, 생성된 입력인자들에 의한 결과의 불확실성분석을 계산하는 모듈 및 결과에 대한 입력인자들의 중요도를 계산하는 모듈들을 개발하여 추가하였다. 이를 위해 입력자료의 샘플링을 위해서는 상용화된 코드인 Crystal Ball의 [DefineAssumND], [Simulation], [ExtractData] 등 3개의 모듈을 사용하여 ECOREA-II의 매크로를 구성하였다.

불확실성 분석모듈은 6개의 Compartment와 선량에 대한 시간에 따른 계산 결과를 Crystal Ball을 사용하여 분석하기 위한 모듈이다. 그림 5에 나타낸 것과 같이, 주어진 시간대에 대

한 각 compartment에 대한 계산 결과를 함수로 구성하여 CB의 [Simulation] 매크로를 이용하여 계산 및 분석할 수 있도록 하였다. 그림 6은 실제로 수행중 Ecorea-II코드에서의 불확실성 분석과정과정을 보여주고 있다.



그림 5. 불확실성 분석모델 실행예

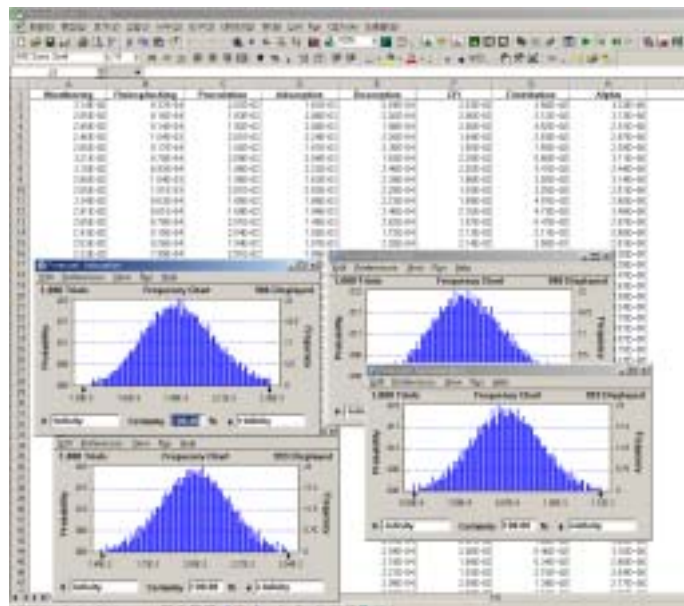


그림 6. 수행중인 Ecorea-II코드의 불확실성 분석과정

2.4 Ecorea-II에서의 중요도분석

중요도분석이란 최종결과에 가장 영향을 주는 입력자료를 파악하는 것이다. 이때 중요도란 최종결과의 샘플과 불확실한 입력자료의 샘플로부터 얻어지는 rank-order correlation을 말한다. 여러 종류의 rank-order correlation이 있으나 많은 경우 Spearman rank-order correlation이 가장 흔히 쓰여지는데 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum (x_i - y_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (17)$$

이 ρ 의 절대값을 취해 표시하는데 이 값이 크다는 것은 입력자료의 불확실성이 최종 결과치에 커다란 영향을 주는 것을 의미하게 된다. 따라서 입력자료들에 대해 이러한 spearman rank-order correlation을 구한 후 이를 순위화하면 최종결과에 영향을 주는 중요 입력자료들의 순위를 얻을 수 있다.

3. 연구 결과

3.1 사례연구

Cs-137은 원자력발전소 사고시 지상침적량이 많은 핵종중 하나이고 벼는 우리나라에서 재배면적이 제일 넓고 소비량이 많은 주요 작물이다. 방사성물질이 성장기전의 토양에 침적하는 경우, 작물체의 뿌리흡수는 통상 토양 단위무게당핵종농도에 대한 작물체 단위무게당 핵종농도비로 정의되는 토양-작물체 전이계수로 평가한다.

본 연구에서는 앞서 소개한 ECOREA-II 코드의 불확실성분석모듈을 활용하여 방사성물질인 Cs-137의 토양침적시 주요한 작물체인 벼에 대한 토양-쌀알 전이계수를 분석하기 위해 주요입력변수에 대한 불확실성분석을 수행하여 보았다.

이러한 분석결과를 원자력연구소에서 기수행한 실험결과와 비교하기로 한다. 기수행된 실험에서는 고리 및 영광 원자력발전소 주변의 토양을 채취하여 연구소내 실험온실로 운반 한 후 벼의 이식 전에 토양에 방사성핵종 Cs-137를 처리한 후 가을에 추수하여 토양-쌀알의 전이계수를 측정하였다. 이때 토양에 침적된 양은 1 Bq/m^2 이고, 5월20일쯤 벼를 토양에 이식하였고 추수는 10월12일에 실시하였다. 수행된 실험에서는 토양-쌀알 전이계수는 측정된 값으로부터 다음과 같이 계산하였다.

$$TF = \frac{\text{concentration in fresh plant at harvest}(\text{Bq} / \text{kg})}{\text{applied activity in unit area}(\text{Bq} / \text{m}^2)} \quad (18)$$

본 연구에서는 정량적인 불확실성분석에 앞서 수행한 민감도분석의 결과로부터 표 1과 같은 인자를 선정하여 분석을 시작하였다.

	분포	하한치	중간치	상한치
Kw	삼각형	1.73×10^{-2}	2.77×10^{-2}	3.47×10^{-2}
Alpha (α)	“	2.0	3.0	4.0
K _{per}	“	6.93×10^{-3}	9.90×10^{-3}	1.98×10^{-2}
K _{ads}	“	1.9×10^{-4}	3.8×10^{-4}	1.9×10^{-3}
K _{des}	“	1.9×10^{-5}	3.8×10^{-5}	2.1×10^{-4}
K _{trans}	“	4.62×10^{-3}	5.5×10^{-3}	6.93×10^{-3}

표 1. 불확실성분석을 위한 입력인자의 분포값

3.2 분석결과

그림 7는 ECOREA-II 코드의 불확실성모듈을 사용하여 벼에 대해 침적후 1년차, 2년차, 3년차 토양에서 쌀알로의 전이계수에 대한 불확실성을 정량화하여 보여주고 있다. 결과를 보면 첫째해와 둘째해에서는 전이계수의 정량적인 불확실성범위내에 연구소에서 자체수행한 실험결과가 놓여있는 것으로 나타났으나 둘째해의 경우는 입력인자들의 불확실성을 포함한 평가결과의 범위밖에 실험결과가 놓여 있음을 알 수 있다.

코드에서는 가능한 입력인자들의 불확실성을 고려하였기 때문에 평가결과와 실험치의 다른 점은 둘째해 실험결과의 오차일 수 가능성이 있을 수 있다. 만약 실험결과의 오차가 아니라면 ECOREA-II 코드에서 고려하지 못한 메카니즘이 토양층에서 존재할 가능성이 있다. 이에 대해서는 추후 심도있는 연구가 필요한 부분이라 판단된다.

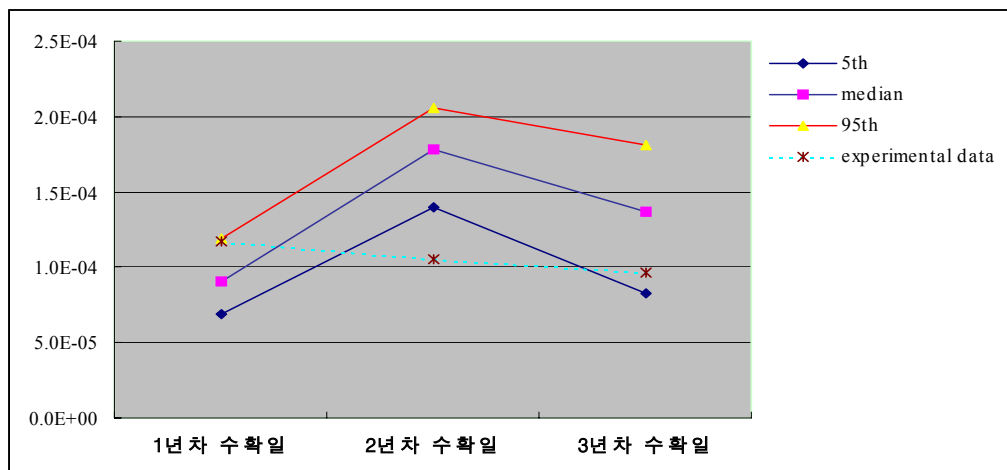


그림 7. 불확실성이 포함된 전이계수 계산결과와 실험치 비교

그림 8은 각 추수년도에 따라 불확실성분석결과에 대한 입력인자들의 중요도를 표시하였다. 분석결과를 보면 첫째해에는 표층토양으로부터 뿌리흡수토양층으로의 이동을 결정하는 percolation 계수가 가장 큰 영향을 주는 것으로, 그리고 둘째해부터는 뿌리흡수층에서 고정층토양으로의 adsorption계수에 대한 영향이 결과에 큰 영향을 주는 것을, 다음으로

translocation계수가 영향을 미치는 것을 보여주고 있다. 이러한 결과는 침적 첫해에는 방사성물질이 표층토양에서 뿌리흡수층으로 이동하여 이에 뿌리흡수로 인해 작물체에 전이되는 것이 이러한 전이계수의 결정에 중요한 인자로 나타남을 나타내고 있다. 그러나 둘째해부터는 상대적으로 느린 현상인 뿌리흡수층에서의 Cesium고정(고정층으로의 이동)이 농작물의 뿌리흡수, 나아가서 쌀알에 방사성물질의 축적에 영향을 미침을 보여주고 있다.

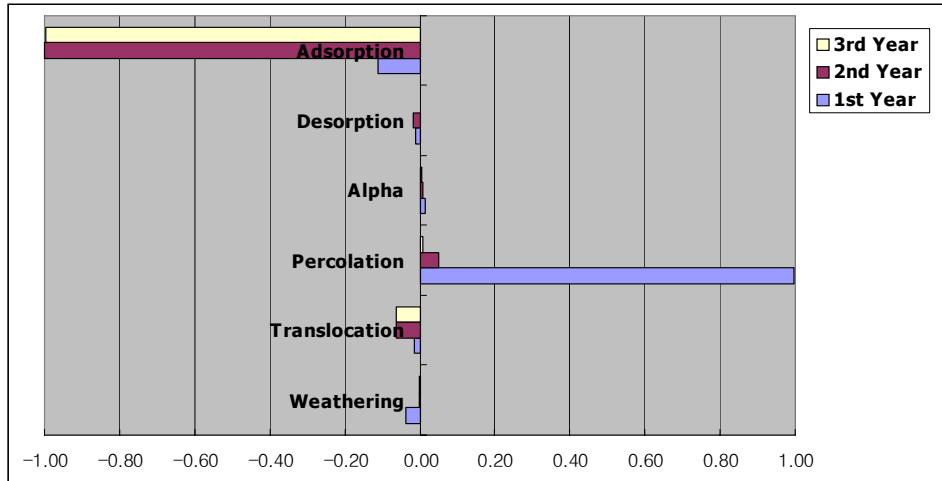


그림 8. 불확실성분석결과에 따른 입력인자들의 중요도분석

4. 결론

원자력시설에서 대기로 누출된 방사능물질은 시설의 주변 토양 및 농작물에서 침적이 일어나고 궁극적으로 오염된 농작물을 인체가 섭취하여 인체노출이 일어나게 된다. 따라서 이러한 인체노출을 평가하기 위해서는 방사성물질의 토양과 농작물에서의 거동을 수학적으로 평가하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 토양 및 농작물에서의 방사성물질의 거동을 분석하는 Ecorea-II, 라 불리는 평가코드를 개발하였다. 그리고 개발된 Ecorea-II코드에 입력인자들의 정량적인 불확실성을 분석하는 모듈과 불확실성분석결과를 바탕으로 한 입력인자의 결과에 영향을 미치는 인자들의 중요도분석을 할 수 있는 모듈을 추가하여 개발하였다.

본 논문에서는 개발된 코드 Ecorea-II코드를 사용하여 방사성물질인 Cs-137의 토양침적시 주요한 작물체인 벼에 대해 토양-쌀알 전이계수를 분석하고 주요입력변수에 대한 불확실성분석을 수행하였다. 첫째해와 세째해에서는 전이계수의 정량적인 불확실성범위내에 연구소에서 자체수행한 실험결과가 놓여있는 것으로 나타났으나 둘째해의 경우는 입력인자들의 불확실성을 포함한 평가결과범위밖에 실험결과가 놓여 있음을 알 수 있다. 이는 코드에서는 가능한 입력인자들의 불확실성을 고려하였기 때문에 평가결과와 실험치의 다른 점은 둘째해 실험결과의 오차일 수 가능성이 있을 수 있으나 추후 보다 자세한 평가가 필요하다고 판단된다.

또한 이러한 결과에 영향을 주는 입력인자들의 중요도를 평가하여 보았다. 중요도분석결

과를 보면 첫해에는 표층토양으로부터 뿌리흡수토양층으로의 이동을 결정하는 percolation 계수가 가장 큰 영향을 주는 것으로, 그리고 둘째해부터는 뿌리흡수층에서 고정층토양으로의 adsorption계수에 대한 영향이 결과에 큰 영향을 주는 것을, 다음으로 translocation계수가 영향을 미치는 것을 보여주고 있다. 이는 침적 첫해에는 방사성물질이 표층토양에서 뿌리흡수층으로 이동하여 이어 작물체에 전이되는 것이 이러한 전이계수의 결정에 중요한 인자로 나타나나 둘째해부터는 상대적으로 느린 현상인 뿌리흡수층에서의 Cesium고정(고정층으로의 이동)이 쌀알에 방사성물질의 축적에 영향을 미침을 보여주고 있다.

참고문헌

[1] D. Yu and H.S. Lee (2002), Development of ECOREA-II Code for the Evaluation of Exposures from Radionuclides through Food Chain, the First AOCRП conference, Seoul, Korea