

경주 방폐장 주변 논토양 내에서의 방사성 Tc 거동 해석

임광목, 전인, 최상도, 최용호, 금동권
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150
 kmlim@kaeri.re.kr

1. 서론

원자력시설로부터 대기로 누출된 핵종은 결국 강이나 호수, 또는 토양에 침적하게 된다. 토양에 침적된 핵종은 핵종의 화학적 성질에 따라 토양에 고착되어 식물의 뿌리에 흡수되거나 사람 및 동식물의 외부피폭에 영향을 주거나, 물과 함께 빠르게 심부 토양으로 이동되어 지하수를 오염시키기도 한다. 따라서 토양에 따른 핵종 이동 현상을 이해하는 것은 핵종으로 인한 사람 및 동식물의 피폭 선량 평가에 중요하다. 본 연구에서는 토양 내에서 핵종 거동 특성을 조사하기 위하여 경주 처분장 주변의 논토양을 채취하여 ⁹⁹Tc 이동 실험을 수행하였으며 ⁹⁹Tc 토양 거동평가를 토양 핵종이동모델과 비교하였다.

2. 재료 및 방법

먼저 토양 핵종이동모델은 대표적인 해석모델인 convective-dispersive flow 모델¹⁾을 적용하였다. 깊이 z, 시간 t에서의 토양내 핵종의 총농도(residence concentration) C_i (Bq/m³)는 다음과 같다.

$$\text{경계조건: } u_s C_i(0^+, t) - D_s \frac{\partial C_i}{\partial z} \Big|_{z=0^+} = C_d \delta(t), \quad C_i(\infty, t) \rightarrow 0 \text{ 일 때}$$

$$C_i(z, t) = C_d e^{-\lambda t} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi D_s t}} \exp\left[-\frac{(z - u_s t)^2}{4 D_s t}\right] - \frac{u_s}{2 D_s} \exp\left[-\frac{u_s z}{D_s}\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{z + u_s t}{2 \sqrt{D_s t}}\right) \right\} \dots\dots\dots (2-1)$$

C_d : 토양 표면에 침적된 핵종농도 (Bq/m²)
 D_s : apparent dispersion coefficient (cm²/y)
 u_s : effective Darcy velocity (cm/y)

경주 방사성 폐기물 처분장 주변 구길리에 있는 논토양을 채취하여 토양내 ⁹⁹Tc의 지하이동 특성을 조사하였다. 토양의 물리·화학적 특성은 표 1과 같다.

Table 1. Physicochemical properties of the soils used in the experiment

Sampling place	pH (1:5)	O.M. (%)	A.P. (mg/kg)	CEC (cmol/kg)	Ca (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	K (cmol/kg)	Na (cmol/kg)	Soil texture
Googilri	5.07	4.20	15.91	27.68	10.87	3.94	0.48	0.47	silty loam

O.M. : Organic matter, A.P. : Available phosphorus, CEC : Cation exchange capacity.

3 개의 실험포트(30cm×30cm×40cm)에 건조한 토양을 31 kg씩 채우고 표면수의 깊이가 3 cm 내외가 되도록 관개한 다음 6월 5일 수표면에 마이크로피펫을 이용하여 ⁹⁹Tc 용액을 포트 당 25 ml(250 kBq/ml)씩 처리하였다. 실험포트들에 대해서 관개와 배수 등 필요한 관리를 하면서 약 30~40일 간격으로 3회에 걸쳐 토양 시료를 채취하여 ⁹⁹Tc의 지하농도 분포를 조사하고 시간 경과에 따른 차이를 분석하였다. 물로 포화된 토양을 채취하여 제대로 처리하는 것은 불가능하므로 시료 채취 대상 포트에서 물을 뺀 다음 1 주 정도 경과시켜 토양의 수분이 적당히 감소되었다고 보여 질 때 지름 5 cm의 core sampler를 이용하여 3 반복으로 25 cm 깊이의 토양을 채취하였으며 이를 층위별(0-1, 1-3, 3-6, 6-10, 10-15, 15-25cm)로 절단하였다. 층위별 토양 시료는 온실 내에서 충분히 자연건조 시킨 다음 막자사발을 이용하여 곱게 갈아서 일정량(100 mg)을 planchet에 취하고 전베타 방사선 계측법으로 ⁹⁹Tc 농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 시간 경과에 따라 토양 깊이별 ⁹⁹Tc 농도의 분포 형태가 변하는 모습을 보여주고 있다. 대체로 처리 후 시료의 채취 시기가 늦어질수록 상층부 분포는 감소하고 하층부 분포는 점점 증가하여 시간 경과에 따른 지하 이동의 증대가 확인되었으나 세 조사 시기 간에 ⁹⁹Tc의 전체적인 분포 형태는 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 처리 후 33일(7월 8일) 및 77일(8월 21일) 경과 시에는 총량의 90% 정도가 지하 6cm 이내에 분포하였으나 처리 후 113일(9월 26일) 경과 시에는 지하이동의 증대로 인하여 75% 정도만 6cm 이내에 분포하고 하부에서의 분포가 그만큼 증가하였다. 세 조사 시기에서 모두 상층부 토양에서는 토양 깊이에 따라 ⁹⁹Tc 농도가 급하게 감소하였고 하층으로 갈수록 점점 완만하게 감소하여 대체로 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이상으로 볼 때 표면수로부터 ⁹⁹Tc의 지하이동은 대부분이 처리 초기 이동성이 높은 산화형으로 존재할 때 이루어 졌고 이후 지속적인 관개로 환원상태가 발달되어 지하이동이 크게 억제된 것으로 판단된다.

그림 2에서는 실험결과와 토양 핵종이동모델 중 해석모델인 convective-dispersive flow 모델과의 비교를 보여주고 있다. 핵종이동 시간이 경과함에 따라 토양은 더욱 compact하게 되며 토양내 convection에 의한 핵종이동은 상대적으로 약해지고, 확산(diffusion에 의한 확산)의 영향은 점차 크게 나타난다. 8월 21일 채취한 토양의 실험 결과 일부 데이터가 확산만을 고려한 모델과 비교적 잘 일치함을 보여주는 것이 하나의 반증이다. 더욱이 4개월이 경과한 9월 26일 채취한 시료의 경우 확산에 의한 핵종이동이 8월 21일 결과보다 토양 내에서 더욱 넓은 범위로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

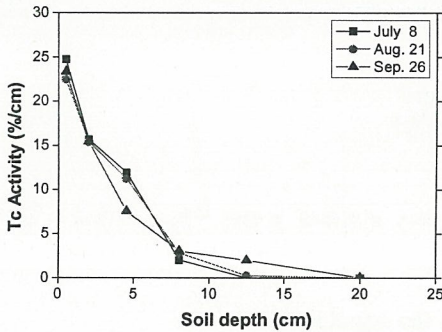


그림 1. 토양 깊이별 핵종이동 시간별 농도

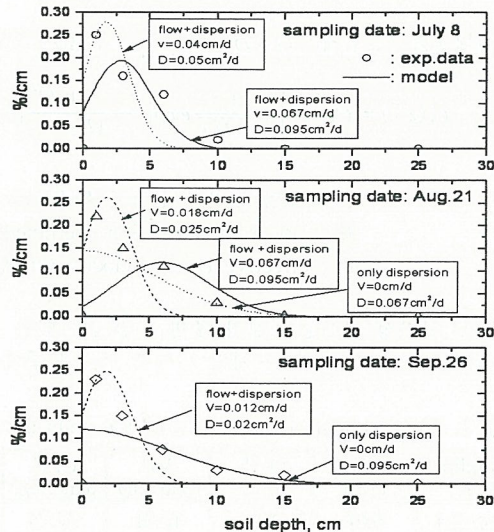


그림 2. 토양 핵종이동 모델링과 실험 결과의 비교

4. 결론

경주 방폐장 부근 논토양을 대상으로 토양내 ⁹⁹Tc의 지하이동 실험을 수행하여 특성을 조사하였으며 ⁹⁹Tc 토양 거동평가를 토양 핵종이동모델과 비교하였다. 실험결과는 한 곳의 토양에 대한 측정치에 입각한 것이므로 차후 환경특성을 보다 충분히 반영할 수 있도록 더 많은 곳에 대한 조사가 이루어 질 필요가 있다.

감사의 말씀

이 논문은 교육과학기술부의 원자력 연구개발 중장기계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Modeling the migration of fallout radionuclides in soil using a transfer function model. Health physics. v.74 no.1 78-85 (1998).