

## 불포화대에서의 세습이동 특성 연구

김계남, 양병일, 문제권, 이근우, 정운수  
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045  
kimsum@kaeri.re.kr

### 1. 서론

원자력시설해체 후 해체부지 주변 주민들이 방사선피폭으로부터 안전할 수 있도록 해체부지를 복원하여야 한다. 이를 위해 원자력시설 주변 오염지역이 강수로 인해 지표로부터 지하수위까지의 불포화대에서의 핵종농도 분포체계를 파악하는 것이 필요하다. 불포화대에서의 핵종이동을 해석하기 위해 미국, 유럽 등의 선진외국에서는 1990년 이후 불포화대 핵종이동 코드들과 관련 기술들을 개발해왔고, 국내에서는 최근 원자력안전기술원에서는 불포화대에서 오염물질이동에 대한 다중구획모델의 단순근사 방법을 개발하였다. 본 논문에서는 불포화대에서의 핵종이동을 해석할 수 있는 수치코드를 개발하였고, 이 코드를 이용하여 모델링하기 위해 필요한 원자력시설 주변 토양의 수리파라미터를 조사하였다. 또한, 모델링을 통해 불포화특성계수가 불포화대에서의 핵종이동에 미치는 영향을 분석했다.

### 2. 핵종이동 해석 모델 개발

불포화대에서 강수의 유입을 고려할 수 있도록 Richards 식과 Van Genuchten 식을 이용하여 불포화대 물 유동 지배방정식과 경계조건식을 세웠다. 수치프로그램에서 유체유동의 Richards'equation과 오염물질이동의 convection-dispersion equation을 계산하기 위해 Galerkin finite element technique을 사용하였다. 불포화대에서 강수에 의한 유체유동과 오염물질 이동해석이 가능한 One-Dimensional Water Flow Solute Transport in Unsaturated Zone(FTUNS)코드를 개발하고 등록하였다.

### 3. 원자력시설 주변 토양 수리파라미터 측정

용적밀도, 수분함량, 공극률, 입자밀도를 측정된 결과 각각 1.478, 0.135, 2.4, 0.36이었다. 세습의 평형 흡착 Freundlich(k) 측정된 결과 7.35이었다. Column Test를 통하여 150분 동안 유출량은 182ml 이었고, 컬럼 면적은 18.85 cm<sup>2</sup> 이고, 길이는 19cm이며 총수두는 25.5 cm이었고 측정된 수리전도도는 7.98 x10<sup>-4</sup> cm/sec 이었다. Tracer test를 위해 비반응물질인 NaCl을 추적자로 사용하고 Salt meter로 농도를 측정한 후 Ogata 식을 사용하여 수리분산계수를 측정하였고 측정된 수리분산계수는 3.0 cm 이었다.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{l-qt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left( \frac{ql}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{l+qt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

KS M ISO 11275방법에 의해 불포화 특성계수 $\alpha$ 와  $n$  산정중이다. 실험장치를 이용하여 실험을 통해 시간별 압력수두  $h$  측정하고, 시간별 토양질량  $m$ 을 측정하여 아래식을 이용하여 불포화도  $\theta$ 를 산정하였다.

$$\theta_j = \frac{m_j - m_e}{\rho_w V} + \theta_e$$

$$h_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{ij}$$

$h_j$ 와  $\theta_j$  연관식 작성

$h_{ij}$ 로  $\theta_{ij}$  산정

( $m_e$ 와  $\theta_e$  : 시험끝난후 측정값 )

또한, 아래 식을 사용하여 불포화수리전도도  $k$ 를 계산하였다.

$$\frac{\Delta h_p}{\Delta z} = \frac{-\sqrt{h_{i,j+1} \cdot h_{i+1,j}} + \sqrt{h_{i,j+1} \cdot h_{i,j}}}{z_{i+1} - z_i}$$

$$v_{ij} = \frac{1}{t_{j+1} - t_j} \sum_{k=1}^i a_k (\theta_{ij} - \theta_{ij+1})$$

$$K_{ij} = \frac{v_{ij}}{\frac{\Delta h_p}{\Delta z} + 1}$$

4. 불포화특성계수가 핵종이동에 미치는 영향분석

30x30 cm면적을 가진 토양컬럼의 표면 5cm 토양을 코발트와 세슘으로 오염시킨 후 때때로 강수를 주입하였다. 일일평균 증발량 측정결과 0.08mm 이었다. 위의 모델링 결과를 통해 해체부지 제염깊이 결정이 가능하다. Fig. 1과 Fig. 2를 비교해보면 세슘은 55일간 약 1m 이동되었다. 불포화계수  $\alpha$ 가 커질수록 세슘 농도는 밀집되고 이동속도는 약간 빨라졌다. 불포화계수  $n$ 이 커질수록 세슘 농도는 밀집되었지만 이동속도는 거의변화가 없었다.

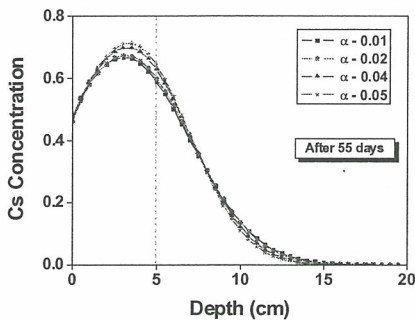


Fig. 1. Cesium concentrations along depth with a change of  $\alpha$  in the site after 55 days

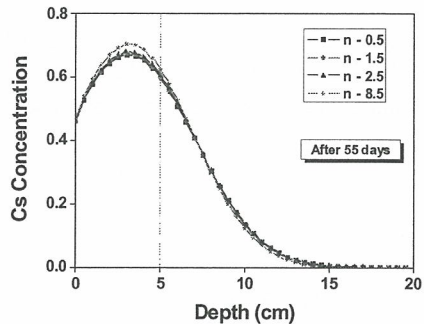


Fig. 2. Cesium concentrations along depth with a change of  $n$  in the site after 55 days

5. 결론

불포화대에서 불포화 특성을 나타내는 불포화 특성계수의 변화에 따른 세슘이동특성을 모델링한 결과 세슘은 55일간 약 1m 이동되었다. 불포화계수  $\alpha$ 가 커질수록 세슘 농도는 밀집되고 이동속도는 약간 빨라졌다. 불포화계수  $n$ 이 커질수록 세슘 농도는 밀집되었지만 이동속도는 거의변화가 없었다.

REFERENCE

1. Jae Hah Cheong, " Simplified approximation method of the multi-compartments model on the migration of contaminant through unsaturated zone", J. of Korean Radioactive Waste Society, Vol. 5(1), pp. 29-37, 2007
2. D. L. Streng, M. A. Smith, "Multimedia Environmental Pollutant Assessment System (MEPAS)", Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-16164, 2006.
3. The Multimedia Contaminant Fate, Transport, and Exposure Model, Environmental Protection Agency, USA, 2002
4. C. Yu, A.J. Zielen, J.-J. Cheng, D.J. LePoire, E. Gnanapragasam, S. Kamboj, J. Arnish, A. Wallo III, W.A. Williams, and H. Peterson, "User's Manual for RESRAD Version 6", Argonne National Laboratory, 2001.