

# 불포화 공극매질에서의 콜로이드상 오염물질이동 모델링

## Modeling Colloidal Contaminant Transport in Unsaturated Porous Media

최희철, 김광수, 장윤영\*

한국건설기술연구원, \*한국과학기술연구원

### 1. 서론

오염물질이동을 가속시키는 효과와 콜로이드상 오염물질의 지하에로의 침투 및 이동으로 인해 지하수내 콜로이드의 거동에 대한 관심이 고조되고 있으며 이에 대한 연구도 보고되고 있다<sup>1),2),3)</sup>. 공극매질내에서 콜로이드입자는 오염물질이동을 가속시키는 매체로 작용할 수 있으며 불포화 매질에서 이러한 현상의 수치적 모델은 4상(콜로이드상, 토양매질상, 액체상, 기체상)개념을 고려하여 나타낸다. 본 연구에서는 이러한 4상 개념을 도입하여 콜로이드의 이동을 나타내는 수치모델을 물질수지식에 근거하여 개발하였다. 콜로이드입자는 토양매질표면 뿐만아니라 기-액 경계면에 흡착되며 이때 콜로이드/토양매질 사이의 물질전달은 1차 동역학반응으로, 반면 콜로이드/기-액경계면 물질전달은 2차 동역학반응으로 표현하였다. 고안된 모델은 Wan과 Wilson<sup>4), 5), 6)</sup>의 실험결과에 의해 검증되었으며, 기-액경계면 존재하에 콜로이드의 이동을 잘 예측하였다. 민감도분석결과 기-액경계면에 대한 물질전달 속도상수가 모델의 거동에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타나 입자의 표면특성이 입자오염물의 이동에 결정적인 변수로 작용함을 알 수 있었다. 또한 불포화층에서 콜로이드의 이동시 기-액경계면이 흡착지로서 입자포획력이 매우 강하여 입자오염물이동을 억제하는 역할을 함을 알 수 있었다.

### 2. 모델전개

콜로이드상 오염물이 불포화공극매질을 이동할 때 현탁콜로이드에 대한 일차원공간에서의 이동방정식과 토양매질과 기-액경계면에 부착되는 콜로이드에 대한 물질수지식은 다음식 (1)-(3)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial (\theta_w C_c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D^* \frac{\partial (\theta_w C_c)}{\partial x} + q_w C_c \right] - k_1 \theta_w C_c + k_2 \rho_c \sigma_c - k_3 F \theta_w C_c + k_4 \rho_c \theta_a \sigma_c^{int} \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_c \sigma_c)}{\partial t} = k_1 \theta_w C_c - k_2 \rho_c \sigma_c \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \theta_a \sigma_c^{int}) = k_3 F \theta_w C_c - k_4 \rho_c \theta_a \sigma_c^{int} \quad (3)$$

여기서  $C_c$ 는 현탁콜로이드의 질량농도(콜로이드량/단위 액상체적),  $\rho_c$ 는 콜로이드입자의 밀도,  $\theta_a$ 는 공기함량,  $\sigma_c$ 와  $\sigma_c^{int}$ 는 토양매질과 기-액경계면에 부착된 콜로이드의 부피비율을 각각 나타낸다.  $k_1$ 과  $k_2$ 는 각각 고형매질에의 흡착과 탈착속도상수를 그리고  $k_3$ 와  $k_4$ 는 기-액경계면에의 콜로이드 흡착과 탈착속도상수를 나타낸다. 한편  $F = (\Gamma_{max} - \sigma_c^{int})/\Gamma_{max}$ 는 기-액경계면의 입자부착가능분율을 나타내며  $\Gamma_{max} (= V_c/V_a)$ 는 기-액경계면의 콜로이드흡착량을 나타내었고 여기서  $V_c$ 는 기-액경계면에 흡착된 콜로이드부피를 그리고  $V_a$ 는 총 공기부피를 각각 나타낸다.

주어진 지배방정식 (1)-(3)은 초기 및 경계조건하에서 완전 음해유한차분법으로 해를 구하고 정상흐름하에서 실제 실험결과와 비교하였다. 물의 침투방정식을 이용한 비정상흐름하에서 혐수성과 친수성콜로이드의 거동을 가상실험하여 시간에 따른 공간적 농도분포를 조사하였다

### 3. 결과 및 토론

Figures 1, 2는 모델예측치와 Wan 과 Wilson<sup>4), 5)</sup>의 실험결과를 비교한 것이다. 모델은 실험결과를 잘 예측하고 있으며 4상 개념을 이용한 모델은 타당성이 있는것으로 평가되었다. 실험결과를 모델로 예측하였을때 얻은 변수(Table 1)를 이용하여 비정상흐름하에서의 콜로이드거동을 가상실험하였다(Figure 3, 4). 물의 침투와 콜로이드주입이 끝난 후 콜로이드의 이동은 더 이상 일어나지 않았다. 이는 물이 재분배되는 동안 칼럼상부에서 함수율의 감소로 인한 기-액경계면의 증가가 콜로이드 흡착지 용량을 확대시켰기 때문인 것으로 사료된다. 여기서 입자의 표면특성이 콜로이드상오염물의 이동에 결정적인 변수로 작용함을 알 수 있었다.

### 4. 결론

불포화 공극매질내에서 4상 개념을 이용하여 기-액경계면의 영향을 중심으로 입자오염물이동을 모델화하였다. 고안된 모델은 Wan 과 Wilson<sup>15), 16), 17)</sup>의 실험결과에 의해 검증되었으며, 기-액경계면존재하에 콜로이드의 이동을 잘 예측하였다. 감응도분석결과 기-액경계면에 대한 물질전달 속도상수가 모델의 거동에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타나 입자의

표면특성이 입자오염물의 이동에 결정적인 변수로 작용함을 알 수 있었다. 또한 불포화층에서 콜로이드의 이동시 기-액경계면이 흡착지로서 입자포획력이 매우 강하여 입자오염물 이동을 억제하는 역할을 함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Corapcioglu, M. Y., and Choi, H. C., Modeling colloid transport in unsaturated porous media and validation with laboratory column data, *Water Resour. Res.*, 32, 3437-3449(1996).
2. Corapcioglu, M. Y., and Kim, S. H., Modeling facilitated contaminant transport by mobile bacteria, *Water Resour. Res.*, 31, 2639-2647 (1995).
3. Choi, H. C., and Corapcioglu, M. Y., Transport of a non-volatile contaminant in unsaturated porous media in the presence of colloids. *J. of Contam. Hydrol.*, in press, (1997).
4. McCarty, J. F., and J. M. Zachara, Subsurface transport of contaminants, *Environ. Sci. Technol.*, 23, 496-502(1989).
5. Wan, J., and J. L. Wilson, Colloid transport in unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 30, 857-864(1994a).
6. Wan, J., J. L. Wilson, and T. Kieft, Influence of the gas-water interface on transport of microorganisms through unsaturated porous media, *Appl. Environ. Microbiol.* 60, (2), 509-516(1994b).

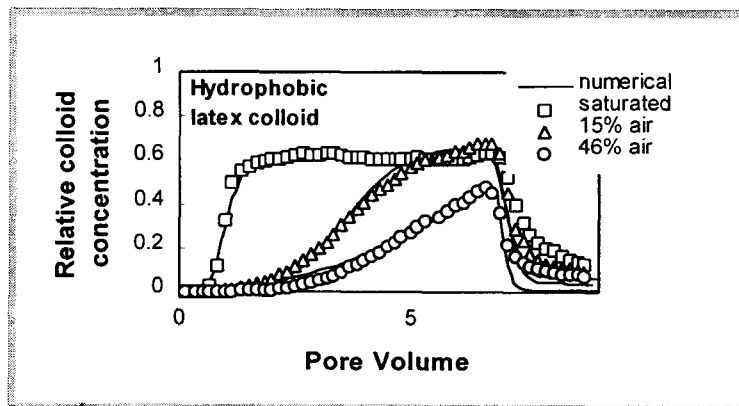


Figure 1 Comparison of simulated hydrophobic latex colloid BTC with experimental data

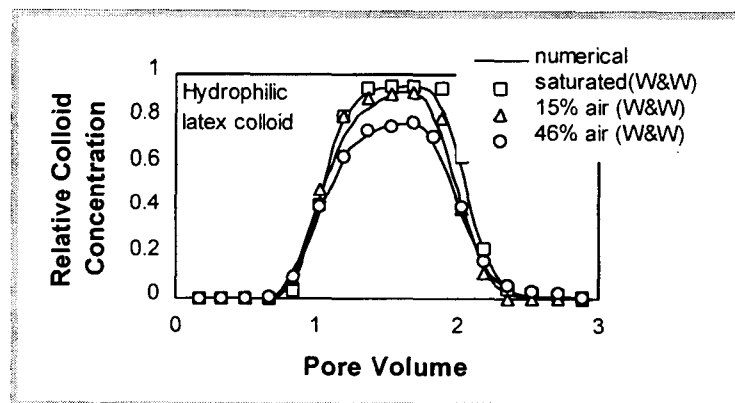


Figure 2 Comparison of simulated hydrophilic latex colloid BTC with experimental data

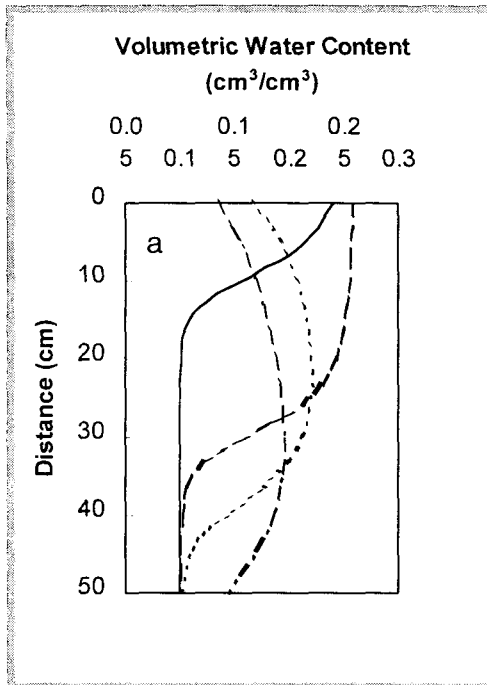


Figure 3 Water content profiles during infiltration and redistribution.

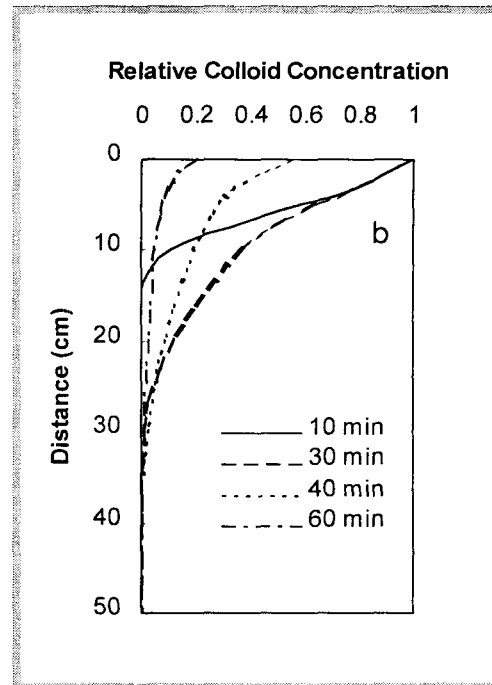


Figure 4 Spatial variation of hydrophobic colloid concentration in aqueous phase during infiltration and redistribution.

Table 1 Model Parameters Obtained from the Experiments of Wan and Wilson<sup>15), 16)</sup>

Particle Type	Air Content (%)	$k_1$ (s <sup>-1</sup> )	$k_2$ (s <sup>-1</sup> )	$k_3$ (s <sup>-1</sup> )	$k_4$ (s <sup>-1</sup> )	$\Gamma_{max}$
hydrophobic	0	$1.2 \times 10^{-4}$	$8.0 \times 10^{-6}$	-	-	-
latex colloids	15	$1.2 \times 10^{-4}$	$8.0 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-3}$	0.	$2.5 \times 10^{-7}$
	46	$1.2 \times 10^{-4}$	$8.0 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-3}$	0.	$2.7 \times 10^{-7}$
hydrophilic	0	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	-	-	-
latex colloids	15	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$	0.	$7. \times 10^{-8}$
	46	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$	0.	$1.0 \times 10^{-7}$