

플라이애쉬의 차수 및 오염물 차단 능력 평가 연구

Evaluation of Fly Ash as an Alternative to Clay Liner Material in Landfills

정 문 경*¹

Chung, Moonkyung

현 재 혁*²

Hyun, Jae-Hyuk

김 승 현*³

Kim, Seung-Hyun

Abstract

The feasibility of fly ash was evaluated as an alternative liner material to the conventional clay liner of landfills through modeling and laboratory experiments. In order to consider the effect of unsaturation on water flow through the liner, analyses were made to compare flow characteristics in saturated liner with that of unsaturated one. Contaminant migration characteristics in liners were investigated by batch experiment and modeling, in which phenol was employed as a model contaminant. Modeling was based on mass balances of water and contaminant, and the model was solved by numerical techniques of finite difference method and predictor-corrector method to deal with high non-linearity. Sequential method was used to handle the system of differential equations. Results show that the alternative liner material is more capable of cutting off water flow in unsaturated condition and in preventing phenol from passing through it. It can be seen that, under the flow conditions considered in this study, the conventional saturation approach underestimates the amount of water passing through the liner and does the cut-off capability against phenol significantly.

요 지

플라이 애쉬의 폐기물 매립장 대응 차수재로서의 적용성을 평가하기 위하여 실내 실험과 모델 연구를 실시하였다. 실제의 매립장 차수층이 불포화 상태일 수 있는 점을 고려하여, 대응 차수재와 기존의 점토 차수재에서의 포화 및 불포화 상태에서의 물 흐름 특성을 비교하였다. 차수층에서의

*1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

*2 정희원, 충남대학교 공과대학 환경공학과 조교수

*3 영남대학교 공과대학 환경공학과 조교수

오염물 이동 특성을 연구하기 위하여 오염물을 이용한 회분실험을 실시하였으며, 이때 폐놀을 대표 오염물질로 사용하였다. 모델은 물질 수지에 기초하였으며, 유한 차분법과 predictor-corrector법을 이용한 수치 해법으로 풀었고, 연립 미분방정식을 다루는데는 sequential method를 이용했다. 연구 결과 대용 차수재는 기존 차수재보다 폐놀 차단 능력이 더 크고, 또 불포화대에서의 차수능력도 더 크다는 것을 알 수 있었다. 또한, 본 연구에서 고려된 흐름조건에서는 차수층을 포화대로 해석할 경우 통과하는 물의 양이 약간 과소평가 되고 폐놀 차단 능력은 매우 과소평가됨을 알 수 있었다.

Keywords : Lanfill liner, Fly ash, Unsaturated hydraulic conductivity, Contaminant transport, Numerical modeling, Phenol, Adsorption

1. 서 론

본 연구에서는 석탄을 원료로한 전력사업에서 발생하는 플라이애쉬를 기존의 점토 대용 차수재로 활용하는 방안의 일환으로서, 플라이애쉬 차수재에서의 오염물질 및 침출수의 이동 특성을 밝힌다. 폐기물 매립시설에서 차수층 건설재료로 국내 플라이애쉬를 활용할 때, 필요한 투수계수의 확보 방법과 플라이애쉬 차수재의 저투수성 메커니즘은 정문경 등(1998)에 나타나 있으며, 플라이애쉬 차수재의 금속 및 유기물질 흡착능은 한국건설기술연구원(1997)과 허인영(1998)에 나타나 있다. 이들 기초적인 연구결과를 토대로 플라이애쉬 차수재의 차수 및 오염물질 이동 차단능력을 평가하려 한다.

위생 매립장에는 점토 차수층, 복토층, 침출수 집배수 시설, 고분자 합성수지 차수막 등을 설치하여 침출수의 주변 지반으로의 이동 및 확산을 막고 매립장 내부의 침출수 발생량을 조절하고 침출수를 처리장으로 집적한다. 매립장 침출수의 주요 근원인 빗물이 매립장 최상층의 최종 복토층을 통과할 때 복토층의 불포화 특성으로 인하여 물 흐름의 분산이 발생한다. 이로 인하여 복토층에 큰 강우 강도와 짧은 지속 시간으로 적용된 빗물이 복토층을 통과하여 빠져 나갈 때는 작은 강도의 긴 지속 시간의 흐름으로 변하게 된다. 매립장 내부의 쓰레기층과, 특히 중간 및 일일 복토층을 통과

하면서 이러한 분산이 가속되며 정상적인 매립장의 내부에서는 침출수 흐름 중 많은 부분이 불포화 흐름 상태인 것을 알 수 있으며 이는 Williams 등(1987)에 의해서도 확인될 수 있다. 또한, 지하수질 오염 방지를 위해 매립장의 점토 차수막은 보통 불포화대에 설치되며, 지하수위와 침출수 집배수시설의 운영효율에 따라서는 불포화 상태를 유지한다고 볼 수 있다.

매립장에서 점토 차수층은 물의 흐름을 차단하는 기능 외에도 오염물의 이동을 차단한다. 흠속에서의 물은 일반적으로 중력, 물과 흠 사이의 부착력, 그리고 물 입자 사이의 인력에 의해 이동하고, 오염물은 물의 이동에 의한 이류, 열에너지에 의한 분자확산, 다공 매질의 속성에 의한 기계적 분산, 그리고 점성유체의 속도분포에 의한 수력학적 분산 등의 기구에 의해 이동한다(Guymon, 1994). 오염물질은 흠속을 이동하면서 토양환경 내에서 반응을 일으키기도 하는데 여기에는 물리적, 화학적, 생물학적 반응 등이 포함된다. 이러한 반응들 중에서 본 연구에서는 화학적 반응을 주로 살펴, 이 중에서도 가수분해, 침전, 토양 입자의 용해, 2차 광물 형성, 산화 환원 등 다른 반응들은 무시하고, 다만 흠입자 표면에서의 흡착 반응만 고려한다.

흠입자 사이에 오염물질을 포함한 물이 흐를 때 오염물질이 흠입자 표면과 흡착반응한다면 오염물의 이동 속도는 물의 이동 속도보다 매우 느린 것이 보통이며, 점토 차수층 안에서

이러한 현상이 발생한다면 오염물질에 대한 이송 지연 효과를 나타낸다고 할 수 있을 것이다. 오염물질의 흡입자 표면에서의 흡착 반응은 오염물질과 흡입자의 성질에 크게 좌우되므로 본 연구에서는 기존의 차수재와 대응 차수재의 오염물질 흡착능을 평가하여 이에 의한 차단 효과를 비교하되 폐놀을 대표 오염물질로 삼는다.

요약하면, 본 연구에서는 실험과 모델링을 통하여 기존 차수재와 전력산업의 부산물이 주재료인 플라이에쉬 대응 차수재의 오염물질 이송 지연 효과를 포화 흐름에서 비교하고, 각 재료에서의 불포화 상태의 물 흐름 특성을 비교하며, 마지막으로 불포화 상태에서의 오염물질 이송 특성을 비교한다.

2. 모델 전개

2.1 물 흐름 및 오염물질 이송 모델

본 연구의 시작점은 다공 매질과 오염물질의 반응이 없는 경우에 오염물질의 이동을 묘사하는 물질 수지 방정식으로 그 일반적인 형태는

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = -\nabla \cdot J \quad (1)$$

이다. 여기서 θ 는 매질의 체적 함수비(물의 부피/전체 부피, L^3L^{-3}), C 는 오염물질의 농도(ML^{-3}), J 는 오염물질의 유동(flux, $ML^{-2}T^{-1}$)를 나타내며

$$J = \theta vC - \theta D \nabla C \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 v 는 다공 매질에서 물이 흐르는 속도 중 주흐름 방향의 성분(LT^{-1}), D 는 오염물질의 확산과 분산을 합한 분산 계수(L^2T^{-1})를 나타낸다. 매질이 물로 완전히 포화되었을 경우에는 $\theta = n$ 이 되며, n 은 매질의 간극율(L^3L^{-3})이다. 식(2)를 (1)에 대입하여 불포화 및 포화 다공 매질에서의 오염물질 이송

에 대한 1차원식을 얻으면

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\theta v C) \quad (3)$$

이 되고, 식 (3)은 포화 다공 매질에서

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

이 된다.

포화 이송 방정식 (4)에서 v 는 위치에 상관 없이 일정하지만, 불포화 이송 방정식 (3)에서 θ 와 v 는 시간과 공간에 따라 변하며, 물질 수지(mass balance)와 Darcy의 법칙을 조합한 1차원 Richards(1931)식을 변형한

$$\frac{d\theta}{d\Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

와 Darcy의 식

$$q_z = \theta v = K \frac{\partial \Psi}{\partial z} + K \quad (6)$$

그리고 $\theta - \Psi$ 및 $K - \Psi$ 관계식으로부터 구한다. 여기서 좌표축은 지표면을 기준으로 하여 연직 하방으로 z 축을 잡았으며, q_z 는 z 의 양의 방향 즉, 연직 하방으로의 Darcy의 속도($L^2L^{-2}T^{-1}$)로 단위 면적당 단위 시간당 통과한 물의 부피를 나타낸다. Ψ 는 차수층 안의 간극수압 수두(L)로 보통의 불포화대에서는 음의 수압을 가지지만 본 연구에서는 해석이 용이하도록 여기에 다시 음의 부호를 붙인 것이고, K 는 불포화대의 수리 전도도(LT^{-1})이다. $\theta - \Psi$ 와 $K - \Psi$ 관계식은 여러 연구자들에 의해 제안된 바 있으며(Russo, 1988), 이 중에서 van Genuchten (1980)식이 실제와 잘 부합하는 것으로 알려져 있다(Ritchie, 1987). 본 연구에서는 van Genuchten식을 이용하며, 이들은

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha \Psi)^N]^{1-1/N}} \quad (7)$$

$$K(\Psi) = \frac{K_s [1 - (\alpha \Psi)^{mN}][1 + (\alpha \Psi)^N]^{-m}}{[1 + (\alpha \Psi)^N]^{ml}} \quad (8)$$

이고, 여기서 $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ 로 유효 포화도 (degree of effective saturation, dimensionless) 를 나타내고, θ_s 는 흙의 간극물(L^3L^{-3}), θ_r 은 잔여 체적 함수비(irreducible volumetric water content, L^3L^{-3})를 나타낸다. α 는 공기 유입점 (air entry value)의 matric head 의 역수이고 (L^{-1}), N 은 흙의 물리적 성질에 따른 상수로 실험으로부터 구하거나 문헌으로부터 얻을 수 있다. K_s 는 포화 수리 전도도(LT^{-1})이고, $m = 1 - \frac{1}{N}$ 이며, $l = 0.5$ 를 사용한다(Guymon, 1994).

흙의 젖음과 마름의 이력 현상(hysteresis)을 고려한 θ 와 ψ 의 관계에 대해서는 Parker and Lenhard(1987)의 연구가 있으나, 이력 현상을 고려하는 것은 매우 복잡한 수식을 도입해야 할 뿐 아니라, 이력 현상을 고려하지 않고 단순 주 젖음 곡선(primary wetting curve)을 사용했을 때에도 그 오차는 크지 않으므로 (Whisler and Watson, 1969), 본 연구에서는 이력 현상을 고려하지 않는다.

포화 다공 매질의 분산 계수 D 는 유속의 함수이고, 1차원 흐름에서

$$D = \alpha_L v + D^* \quad (9)$$

로 나타낼 수 있으며, α_L 은 분산도(dispersivity, L), D^* 는 열 에너지에 의한 분자확산 계수 (L^2T^{-1})를 나타내며(Bear, 1988) 페놀의 경우 $0.89 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}(20^\circ\text{C})$ 이다. Neuman (1990)에 의하면 포화 흐름에서의 분산도, α_L 은 흐름의 길이 $L(m)$ 과 관계가 있고

$$\alpha_L = 0.0175L^{1.46} \quad (10)$$

로 나타낼 수 있으며, 차수층의 두께가 75 cm 이므로 그 분산도는 1.15cm가 되어 차수층 양 끝의 수압차가 3m 정도인 보통의 경우 분자 확산과 기계적 분산은 그 크기의 차이가 크지 않게 된다. 한편, Yeh(1995)에 의하면 불포화 흐름에서의 분산도를 예측할 때에도 포화 흐름

에서와 같은 방법을 적용할 수 있다고 한다. 또한 Jury and Fluhler(1992)에 의하면 불포화 대에서의 분산도는 흐름 거리가 증가함에 따라 증가하여, 흐름 거리가 0~4.5m 일때 분산도는 5~30cm 이고, 16 m 일때는 90cm 라고 했으며, 이로부터 식 (10)은 포화 흐름에서만 아니라 불포화 흐름의 분산도도 비교적 정확히 예측한다고 할 수 있다.

2.2 흡착 반응

오염물질을 포함한 물이 차수재와 같은 다공 매질을 통해 흐를 때 오염물질은 물의 흐름을 따라 이류되며, 다공 매질의 성질에 따라 분산된다. 또한, 오염물질은 무기질 토양 표면에 여러 가지 기구에 의해 흡착 반응하며, 무기질 토양 표면에 부착된 여러 가지 유기물의 표면에도 부착한다(Sposito, 1989). 이러한 반응을 각 반응 기구별로 정량적으로 파악하기는 매우 복잡하며 폐쇄된 계(closed system)에서의 고체상 농도는 보통 동온흡착식을 사용하여 예측한다. 동온흡착식은 여러 가지가 있으며, 페놀이 차수재에 흡착하는 양상은 Freundlich 동온흡착식으로 나타낼 수 있었고, 이를 수식으로 표시하면

$$S = K_f C^{n_f} \quad (11)$$

이 된다. 여기서 S 는 고체상에 흡착된 오염물질 농도(M/M), K_f 와 n_f 는 실험으로부터 구하는 상수들이다. 보통의 지하수에서는 오염물질의 농도가 낮으므로 식 (11)대신 선형 동온흡착식을 사용하지만 본 연구의 경우 오염물질 농도가 상당히 높은 매립장을 대상으로 하므로 식 (11)을 그대로 사용한다.

폐쇄계와는 달리 개방계(open system)에서는 오염물질의 흡탈착 뿐 아니라 물과 오염물질의 흐름도 고려되어야 한다. 오염물질의 흡탈착 속도 및 물과 오염물질의 흐름 속도를 모두 고려한 동역학적 해석법이 더 정확하지만

(Harmon et al., 1989). 그 해법이 복잡하고 또한 보통의 지하수나 매립장 차수층에서는 흐름의 유속이 흡탈착 반응 속도에 비해 매우 느리기 때문에 이의 해석시 국지평형가정(local equilibrium assumption)을 도입하는 것이 편리하다. 불포화 이송 방정식 (3)에 Freundlich 등온흡착을 이용한 국지평형가정을 적용하면 (de Marsily, 1986)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\theta C + (1-n) \rho_s K_F C^{n_F} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\theta C \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\theta v C) \quad (12)$$

이 되며, 여기서 ρ_s 는 차수재의 밀도(ML^{-3})이다. 포화 이송 방정식 (4)에 Freundlich 등온흡착식을 적용하면

$$\frac{\partial C}{\partial t} \left\{ 1 + \frac{1-n}{n} \rho_s K_F \frac{1}{n_F} C^{n_F-1} \right\} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (13)$$

이 되며, 좌변의 괄호안은 지연계수(retardation factor)라 한다. 식 (12)와 (13)을 이용하여 불포화 및 포화대에서 Freundlich 등온 흡착을 보이는 오염물질의 이송 현상을 예측할 수 있다.

3. 재료 및 실험

연구에 사용된 기존 차수재는 현재 매립장에서 널리 사용되는 점토질 흙으로 K 매립장에서 채취한 것이고, 대용 차수재는 플라야에 섞여 bentonite를 4:1(무게비)로 혼합하여 섞은 것이다. 보조 실험으로부터 플라야 섞이만으로는 투수계수를 만족시키지 못하며 bentonite와의 혼합비 4:1에서 성능면에서 최적임을 알 수 있었다(정문경 등, 1998). 기존 및 대용 차수층을 통과하는 물 흐름 및 폐놀의 이송 특성을 해석하기 위해서는 불포화 흐름의 경우 식 (5)와 (12), 포화 흐름의 경우 식 (13)을 풀어야 하고, 이를 위해서는 먼저 이들 식과 식 (7), (8), (11)에 포함된 매개 변수들을 구하여야 한다. 흙의 흐름 특성을 나타내는 변수들인

θ , α 그리고 N은 토양의 체적 함수비-간극수압의 특성 곡선으로부터 얻을 수 있으며, 토양수분 압출 장치로부터 각각의 다져진 시료에 대한 실험을 통해 얻은 자료를 식 (7)과 비교하여 구한다. 사용된 토양 수분 압출 장치는 Soil Moisture사의 LAB 052를 사용했다. 대용 차수재는 그 투수 계수가 1.0×10^{-7} cm/sec 이 되도록 다진 후 실험에 사용하였고, 기존 차수재는 대용 차수재 시료와 같은 최적 함수율에서 KS F2312-A 방법을 적용하여 다졌다. 기존 및 대용 차수재의 간극율은 약 0.5로 유사하였으며, 비중은 각각 2.56과 2.34이었다.

폐놀의 등온흡착 실험을 통해 K_F 와 n_F 를 구하였으며, 여기에는 5, 10, 20, 그리고 40 mg/L의 폐놀 용액 200mL씩과 2gr의 차수재료가 사용되었으며, 접촉 시간은 대략적인 평형 도달 시간인 32시간보다 큰 72시간으로 하였다. 흡착 시험에는 완충용액(KH_2PO_4)을 사용하여 pH를 6.8~7.0으로 조절하였다.

4. 모델의 풀이

포화대에서의 물 흐름은 유속이 일정하므로, 폐놀의 이송 양상을 예측하기 위해서는 식 (13)을 푼다. 불포화대에서의 물의 흐름을 예측하기 위해서는 식 (7)과 (8)을 이용하여 식 (5)를 풀고, 불포화대에서의 폐놀의 이송 현상을 예측하기 위해서는 불포화대에서의 물의 흐름에 식 (6)을 적용하여 식 (12)를 동시에 푼다. 식 (13), (5), 그리고 (12)는 모두 강한 비선형성을 가진 편미분 방정식일 뿐 아니라 연립 방정식이 포함되어 있으므로 이의 해석학적 풀이가 쉽지 않으므로 본 연구에서는 이의 풀이가 용이한 수치해법을 이용한다.

4.1 초기 및 경계조건

지배 방정식을 풀기 위해서는 경계 및 초기 조건이 필요하다. 먼저 포화대에서의 폐놀의

이송 방정식 (13)을 풀기 위해서는 두개의 경계 조건과 하나의 초기 조건이 필요하며 칼럼 실험을 묘사하기 위하여

$$C=0 \quad @ \quad t=0 \quad (14)$$

$$C_v - D \frac{\partial C}{\partial x} = C_0 \frac{Q_0}{nA} \quad @ \quad x=0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad @ \quad x=L \quad (16)$$

를 사용한다. 식 (14)는 초기에 칼럼 내부에 폐놀미 없다는 것을 나타낸다. 식 (15)는 전형적인 혼합형 경계 조건으로 본 연구에서와 같이 유속에 비해 확산계수가 작지 않은, 즉 Peclet 수가 작은 경우의 칼럼 실험에서 상류쪽 경계 조건을 잘 묘사하며 특히 물질 수지를 잘 만족하는 것으로 알려져 있다(van Genuchten and Alves, 1982). 여기서 C_0 는 칼럼에 들어가는 오염물질의 농도(ML^{-3}), A 는 칼럼 단면적(L^2), 그리고 Q_0 는 튜브를 통해 칼럼에 들어가는 유량(L^3T^{-1})을 나타낸다. 식 (16)은 Neumann 형태의 경계 조건으로 칼럼 출구 부근에서의 오염물질 농도를 실제보다 약간 저하시키는 단점이 있으나 계산이 용이한 장점이 있다.

불포화 흐름의 지배 방정식 (5)를 풀 때에도 두개의 경계 조건과 하나의 초기 조건이 필요하며, 다음의 식들을 이용하였다.

$$\theta=0.2 \quad @ \quad t=0 \quad (17)$$

$$\Psi=0 \quad @ \quad z=0 \quad (18)$$

$$\Psi=-3m \quad @ \quad z=L \quad (19)$$

식 (17)은 토양의 초기 함수비(물부피/전체 부피)가 0.2로 가정되었음을 나타내지만, 필요에 따라 적당한 값들을 이용하였다. 식 (18)은 상류쪽 경계 조건을 나타내는 식으로 실제로는 불포화대에서 간극 수압은 인장 응력을 나타내지만, 불포화 흐름에서의 가장 큰 토양 수분 함량을 경계 조건으로 삼음으로써 누수에 대한

안전측의 해석을 가능하게 하고, 또한 포화 흐름과의 비교도 용이하게 한다. 식 (19)는 식 (18)과 같은 Dirichlet 경계 조건으로 실제 매립장의 불포화대에서 물 흐름을 예측하기 위한 것이다. 차수층 바깥의 지반 환경에서는 그 수리 전도도가 차수재의 그것보다 훨씬 커서 차수층으로부터 흘러 나오는 물은 곧 주변의 흙으로 분산될 것이므로 하류쪽의 간극 수압을 일정하다고 본다. 여기에서 사용된 $-3m$ 는 임의로 정한 값으로, 차수층의 위치가 지하수면보다 3m 정도 위에 있다고 가정한 것이고, 필요한 경우 적당한 다른 값을 사용하였다.

불포화대에서의 오염물질 이송식 (12)의 풀이에는 식 (13)의 풀이에 사용된 초기 및 경계 조건을 그대로 사용하되, 식 (15)에서 n 대신 θ 를 사용한다.

4.2 수치해의 검증

수치해석에는 유한 차분법(backward time, centered space scheme)을 이용하고, 지배 방정식의 비선형성을 극복하기 위하여 식 (12)와 (13)은 반복법, 식 (5)는 predictor-corrector법을 이용한다(Hills, 1989). 식 (5)와 식 (12)를 동시에 풀 때는 sequential method를 적용한다.

수치해는 먼저 해석해와 비교하여 그 수학적 풀이의 타당성이 검증되어야 한다. 식 (13)은 좌변 C 에 대한 비선형항 때문에 해석해가 어려우므로 $n_f=1$ 인 경우에 대한 간략 해석해(van Genuchten and Alves, 1982)

$$C(x,t) = C_0 A(x,t) \quad (20)$$

로 쓸 수 있고, 여기서 $A(x,t)$ 는

$$A(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - vt}{2(DRt)^{0.5}} \right] + \left(\frac{v^2 t}{\pi DR} \right)^{0.5} \exp \left[\frac{(Rx - vt)^2}{4DRt} \right] - \frac{1}{2} \left[1 + \frac{vx}{D} + \frac{v^2 t}{DR} \right] \exp(vx/D) \operatorname{erfc} \left[\frac{(Rx + vt)}{2(DRt)^{0.5}} \right] + \left(\frac{4v^2 t}{\pi DR} \right)^{1/2} \left[1 + \frac{v}{4D} (2L - x + \frac{vt}{R}) \right]$$

$$\exp\left[\frac{vL}{D} - \frac{R}{4Dt}\left(2L-x+\frac{vt}{R}\right)^2\right] - \frac{v}{D}\left[2L-x+\frac{3vt}{2R}+\frac{v}{4D}\left(2L-x+\frac{vt}{R}\right)^2\right] \exp\left(\frac{vL}{D}\right)\operatorname{erfc}\left[\frac{R(2K-x)+vt}{2(2Dt)^{1/2}}\right] \quad (21)$$

이다. 이 식에서 $R=1+\frac{1-n}{n}\rho_s K_r$ 이다. 이 해는 초기의 깨끗한 칼럼에 대해, 상부에 혼합형(3rd type) 경계조건과 하부에 Neumann형태의 경계조건을 적용한 것이다. 식 (20), (21)과 흡착이 없는 경우에 대한 수치해를 비교하여 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 해석해의 앞부분에서 약간의 진동이 발생하는 것을 알 수 있으나 이는 간략 해석해를 사용하였기 때문이며, 식 (13)의 풀이에 이용된 수치해는 수학적으로 타당한 것을 알 수 있었다. 여기에 사용된 매개 변수의 값들은 $L=75\text{cm}$, $n=0.50$, $D=1.0\text{cm}^2/\text{sec}$, 그리고 $v=0.1\text{cm}/\text{sec}$ 이었고 모사 시간은 100sec 이었다. $\rho_s=0\text{gr}/\text{cm}^3$ 으로 하여 지연계수를 1로 하였기 때문에 K_r 값은 Fig. 1에 영향을 주지 않는다.

2차 미분 방정식인 식(13)을 음해법(implicit method)을 이용한 수치해로 풀 때 지배 방정식의 이산화에 의한 대수 방정식 외에도 2개의 보조 방정식이 더 필요하며, 이는 상류와 하류

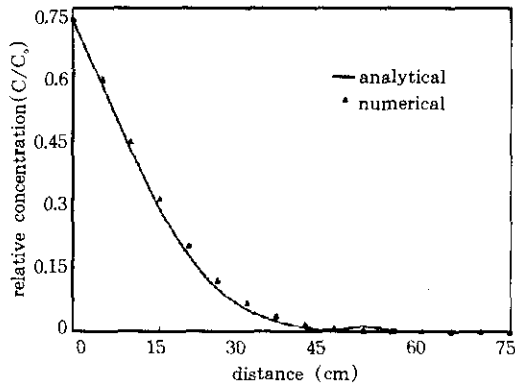


Fig.1 Comparison of Numerical with Analytical Solutions to the Transport Equation

의 경계 조건으로부터 얻는다. 여기에서는 물질 수지 오차를 없애기 위해 농도에 대한 no jump condition을 영역의 상류와 하류 끝에 적용한다. 해석영역의 상류경계면 바깥에서는 오염물의 지연효과가 없으며 경계를 넘어 영역내로 들어 온 직후에 다공 매질의 흡착에 의해 오염물은 액상과 고상에 순간적으로 평형분배를 이루고 이로 인해 오염물은 경계 밖의 이동 속도보다 줄어든다. 이때 경계면에서의 반응은 없으므로 오염물의 농도는 비약하지 못하며, 다만 경계면의 전후에서 오염물의 이동속도만 달라지게 된다. 이는 Fig.2에 나타내었다.

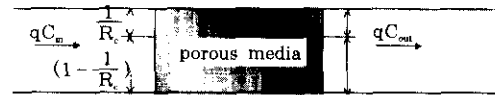


Fig.2 Boundary Conditions of Contaminant Transport in Porous Media with Equilibrium Distribution

Fig. 2는 영역에 들어오기 전의 오염물 중 $\frac{1}{R}$ 은 영역내의 액상을 통해서, 그리고 그 나머지인 $(1-\frac{1}{R})$ 은 영역 내의 고상을 통하여 이동될 양을 나타내며, 오염물의 이동 속도는 유속과 같다. 물론 고상을 통한 물질 이동은 있을 수 없으나 국지평형가정에 의하면 액상을 통한 물질 이동에 비례하여 고상을 통한 물질 이동을 가정할 수 있다. 이는 액상과 고상 사이에는 끊임없이 물질 전이가 이루어지고 있으며, 그 전이율(transfer rate) 또한 다공 매질을 통한 이동속도(transport velocity)에 비해 무한히 크므로 타당한 가정이라 할 수 있다(de Marsily, 1986). 경계에 진입하면 오염물의 이동속도는 흡착에 의해 지연되며, 물의 흐름속도보다 줄어들게 된다. 경계진입시 발생하는 오염물의 고상 흡착에 의해 액상 농도가 줄어들지 않는 것은 영역내부에서의 이러한 지체현

상 때문이며, 이로 인해 경계면에서의 no jump condition을 만족시키게 된다. 이를 식으로 나타내면

$$q \frac{C_{in}}{R_c} C_{c,0} v \theta \frac{C_{in}}{R_c} + \frac{D\theta}{R_c} \left[-\frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=0} \quad (22)$$

이 된다. 여기서 C_m 은 경계 바깥에서의 오염물의 농도, q 는 경계 바깥에서의 유입 유량, $C_{c,0}$ 는 상류측 경계에서의 오염물 농도, 그리고 θ 는 지연계수를 나타낸다. 좌변과 우변의 첫항에 포함된 $\frac{C_{in}}{R_c}$ 은 수학적 형태는 같으나 그 물리적 의미는 다르며, 좌변에서는 경계 밖의 오염물 flux 중 경계내의 액상을 통하여 흐를 양이고, 우변의 첫째항에서는 경계면에 진입 직후 액상에서의 이류에 의한 flux를 나타낸다. 그리고, 우변의 둘째항은 경계면 진입 직후 액상에서의 확산에 의한 오염물 이송을 나타낸다. 하류쪽의 경계에 대해서도 같은 논리를 적용할 수 있다.

식 (12)의 수치해는 $\theta = n$, $\rho_s = 0$ 인 경우에 식 (13)과 같은 식이 되므로 이미 Fig.1에서 부분적으로 검증되었다고 볼 수 있다.

5. 결과 및 고찰

5.1. 매개 변수 결정 및 모델 검증

사용된 흙의 토양 함수비-간극 수압 특성 곡선이 Fig. 3에 나타나 있다. 여기에서 흙의 흐름 특성 변수들인 θ , α , 그리고 N 을 구했으며, 측정 실험 결과를 식 (7)로부터 구한 모델의 예측치(그림에서 실선)와 비교하여 가장 잘 일치하는 값들을 취했다. 사용한 pressure plate의 최대 압력이 15 bar이어서 이 범위내에서의 측정값만 사용했다. 기존 및 대용 차수재의 θ 은 점토에 대한 전형적인 값인 0.07로 가정하였고, α , N 은 기존 차수재에서 각각 0.0082/cm, 1.091이었고, 대용 차수재의 경우 각각 0.0070/cm, 1.071로 전형적인 점토의 범위에

들었다(Guymon, 1994).

포화투수계수와 간극률은 두 재료가 Fig.4에 나타난 바와 같이 매체내 불포화도가 높을수록 즉 체적함수비가 작을수록 대용차수재의 불포화투수계수가 기존차수재에 비해 투수계수가 점점 작아지는 경향을 보여준다.

폐놀에 대한 등온흡착 실험 결과들은 Fig. 5에 나타내었다. 두 종류의 차수재료에서 모두 Freundlich 등온 흡착을 보였으며, 이로부터 기존 차수재의 K_F 와 n_F 은 각각 0.005와 1.136, 대용 차수재의 경우 각각 0.096과 2.273임을 알 수 있었다.

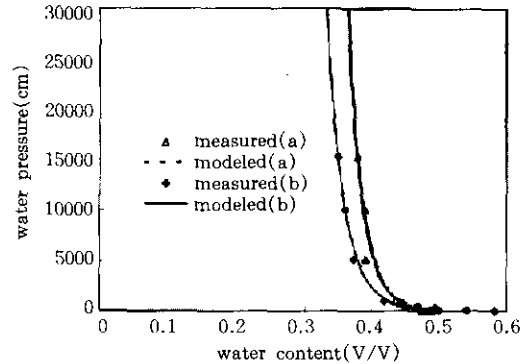


Fig.3 Determination of Unsaturated Flow Parameters for (a) Alternative (Fly Ash + Bentonite) and (b) Conventional Liners.

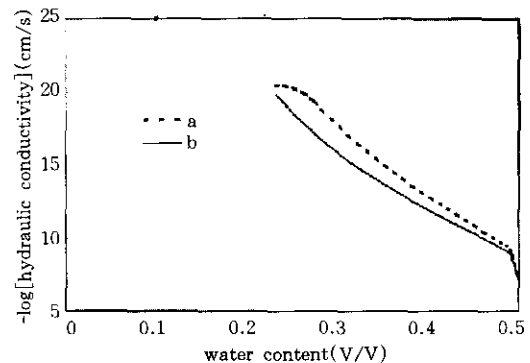


Fig.4 Comparison of Unsaturated Hydraulic Conductivities of (a) Alternative and (b) Conventional Liners.

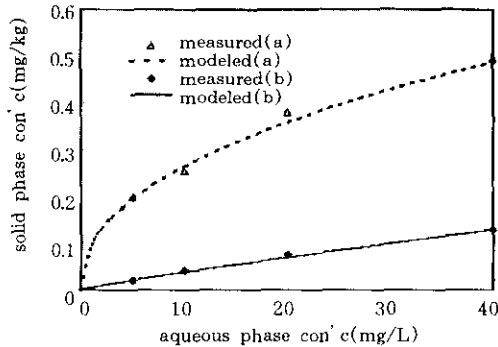


Fig.5 Isotherms of Phenol with (a) Alternative and (b) Conventional Liner Materials.

앞의 실험과 경험식들로부터 모델에 필요한 매개 변수 값들을 모두 구했으며, 이들 변수 값들을 이용한 모델 예측치와 칼럼 통과 실험 결과를 비교함으로써 모델을 검증할 수 있다. 그러나, 본 연구에서 개발한 모델의 검증실험은 매우 긴 시간을 요하고, 동일한 개념으로 선형 동온흡착 모델을 이용한 경우가 이미 검증된 바 있으며(Corapcioglu and Kim, 1995), 이는 다른 동온흡착 모델에도 그대로 확장될 수 있으므로(de Marsily, 1986) 여기서는 별도의 검증실험없이 개발된 모델을 사용한다.

또한, 본 연구에서는 기존과 대용 차수재의 비교, 포화 및 불포화 해석의 비교 등 상대적인 평가에 치중하므로 간접적인 검증만으로도 그 효용성이 충분하다고 할 수 있을 것이다.

5.2 민감도 분석

모델의 민감도 분석을 통해 몇 가지 현상에 대한 예측을 실시한다. 여기에 사용되는 매개 변수의 값들은 앞의 실험에서 구한 대용 차수재에 대한 값들을 사용했다.

두께 75cm 인 차수층의 오염물질 이송 지연 효과를 두 종류의 차수재에 대해서 비교하되, 간극율과 수리 전도도가 동일한 포화 상태로 가정하고 페놀의 이송 특성을 예측했다. 흐름

의 상류와 하류는 각각 혼합형 및 Neumann 경계 조건을 적용하였고, 길이 75cm인 차수층에 페놀이 유입된 지 10일, 500일, 그리고 1000일 후의 페놀 농도 분포를 계산하였다. 그 결과는 Fig. 6에 나타내었으며, 이로부터 물 흐름 특성이 같은 포화 차수재일 경우 대용 차수재의 페놀 이송에 대한 억제 효과가 기존의 차수재 보다 약간 더 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 이것은 오염물 유입 초기에 대한 것이고, 모사기간 1,000일의 칼럼 상류단에서의 오염물 농도는 차수재의 종류에 상관없이 1.0에 수렴하는데 이는 계속하여 오염물이 부과될 경우 차수재의 오염물 흡착능이 포화되면 오염물 차단 능력은 사라진다는 것을 나타낸다. 또한, 상류층의 오염물 농도가 모사기간 1,000일 동안에도 아직 1.0에 도달하지 않은 것을 알 수 있는데 이는 3rd type 경계조건 적용의 당위성을 나타낸 것이라 볼 수 있다.

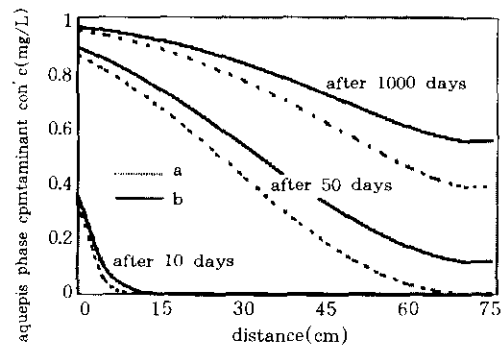


Fig.6. Contaminant Migration Profiles in Saturated Liner Materials of Different Types, (a) Alternative and (b) Conventional Liners.

매립장 내부는 강우 및 배수 조건 등에 따라 물에 잠겨 포화되거나 또는 물이 빠져서 불포화되기도 한다. 차수층의 상부가 항상 물에 젖어 있을 경우에 대해 포화 및 불포화 이론으로 해석했을 때, 정상상태의 통과유량 차이를 알아보기 위하여, 본 연구에서는 계산편의상 길이 75cm 대신 길이 10cm의 차수층 상부에 자

유수를 접촉시킨다. 매립장 내부의 침출수 누적수위는 매립장 운영상태에 따라 수 m 에 달하기도 하지만 본 연구에서는 침출수 집배수 시설의 운영이 원활히 되어 누적수위가 매우 낮다고 가정한 상태에서 분석을 하였다. 즉 불포화 해석시 상류측에는 단순히 젖어있는 상태, 즉 $\phi=0$ 을 적용한다. 하류측에는 자연지반의 투수성이 차수층보다 매우 크므로 통과한 물은 순간적으로 분산된다고 보아 일정 수압 경계조건을 적용하되 차수층 내부에서는 정상류 흐름으로 가정한다. 포화 해석시에는 상하류의 수두차를 10cm로 하였다.

사용된 재료의 특성값들은 대용 차수재에 대한 값들이다. 모사 결과, 포화 이론으로 해석한 통과 유량이 실제의 매립장 차수층 조건과 더 가까운 불포화 이론으로 해석한 결과에 비해 더 작은 것을 알 수 있다. 이로부터 포화 이론으로 해석하는 보통의 방법에 의해서는 차수층 통과 유량이 과소평가된다는 것을 알 수 있다. 이는 불포화 차수층이 강제로 물을 뽑아주는 역할을 하기 때문으로 생각할 수 있다.

Table 1에서 하류의 수압이 작아질수록 통과 유량은 커지는 것처럼 보이지만 실제로는 수압과 유량의 함수관계는 본 연구에 사용된 컴퓨터의 용량 때문에 이를 확인하지 않았다 (이 경우 매우 짧은 grid size가 필요하고 이에 따라 매우 짧은 time step이 사용되어야 함). 본 연구에 사용된 grid size는 1cm이었고, 정확한 투수속도를 계산하기 위해서는 너무 많은 컴퓨터 소요시간이 필요하기 때문이다. 본 연구에 사용된 컴퓨터는 64 bit work station (Alpha Station 200⁴¹⁰⁰, Digital)이었다.

Table 1. Steady State Flow Rate(Darcy's Velocity) through Liner under Unsaturated Conditions

Suction Head	Darcy's Velocity ($\times 10^{-7}$ cm/s)
$\phi = 200$ cm	1.032
$\phi = 300$ cm	1.104
$\phi = 400$ cm	1.162

다음으로 매립장 내부가 강우에 의해 일시적으로 젖었다 마를 경우에 차수층에서의 물 흐름을 살펴본다. 이 경우 상류측 경계에서 자유수가 접촉되고 있을 때는 $\phi=0$ 이고, 접촉이 끝난 후에는 수압이 감소하여 ϕ 는 0보다 크게 되며, 또한 상류 경계에서 물 흐름이 정지하므로 이는 다음과 같은 no flow 경계조건에 의해서 묘사한다.

$$\phi_1 = \phi_2 + \Delta x \quad (23)$$

여기서 ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각 차수층 상부와 여기에 인접한 절점에서의 수압을 나타내고, Δx 는 절점사이의 거리를 나타낸다. 차수층의 두께는 75cm로 가정하고, grid size는 1cm, 그리고 time step은 10sec로 하였다. 차수층 상류부가 24 시간 동안 자유수에 접촉한 경우 차수층 내에서 수분함량 곡선 변화를 Fig.7에 나타내었다.

Fig.7에서는 하류의 수압이 $\phi = 200$ cm 와 400cm인 2 가지 경우에 대해 살펴 보았고, 이때 차수층의 수압이 외부 토양에서의 수압과 같을 것이므로 물 접촉 이전의 차수층 내부의 초기 수압도 각각 200cm 와 400cm로 가정했다. 포화 해석의 경우는 수분함량이 포화 체적 함수비인 0.5로 일정하고 상류의 물 접촉이 끝나면 곧 물 흐름이 중단할 것이지만, 불포화층으로 해석했을 경우에는 포화층 해석보다 그 침투 유량이 작아지고, 장시간 동안에 걸쳐 물이 통과하며, 시간에 따른 통과 유량 분포는 긴 꼬리를 형성함을 알 수 있다. Fig. 7의 두 종류의 곡선들을 비교하면 차수층 내부의 초기 함수비가 더 작을 때, 즉 차수층이 지하수위에서 더 높은 곳에 있을 때 차수층을 통과하는 물 흐름 속도가 더 더딤을 알 수 있다.

또한, 불포화대 흐름으로 해석할 경우 차수층 통과 유량을 구하여 Fig. 8에 나타내었다. 여기에서도 Fig. 7에서와 같은 조건으로 차수층을 물에 접촉시켰고, 이로부터 차수층에 흘러드는 물의 시간에 따른 유속(Darcy's velocity)변화와 침투한 수심을 구하였다. 일단

차수층에 침투한 물은 결국은 차수층을 통과하여 주변 토양으로 배수된다고 볼 수 있고, 차수층 내부에서의 분산은 Fig. 7에서 이미 살펴 보았으므로 컴퓨터 사용시간이 많이 필요한 차수층 하류단에서의 실제 유출량 대신에 상류

단에서의 침투율을 구하였다. Fig. 8에서, 물과의 접촉 초기일수록 또한 차수층의 초기 ψ 가 클수록 침투하는 물의 유속이 더 커지고 물이 유입됨에 따라 즉, ψ 가 감소함에 따라 침투율이 줄어들어 포화 상태에 수렴하는 것을 알 수 있다. 24시간 동안 침투한 물의 총량은 수심으로 환산하여 포화일 경우 8.64×10^{-3} cm.

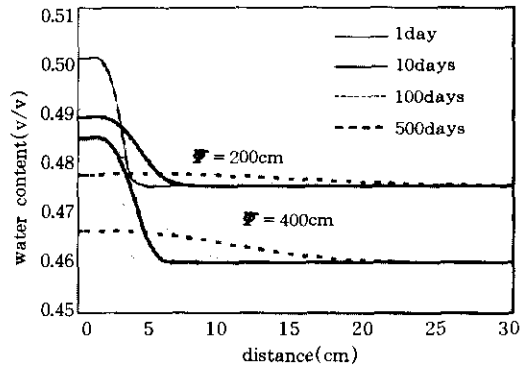


Fig.7. Water Flow Patterns (Moisture Migration Profiles) through Unsaturated Liner with Different Initial Water Pressures.

두 종류의 불포화 차수재를 통한 흐름에서 페놀의 이송 특성을 알아보기 위하여 두께 75cm, 초기 수압 -200cm 인 차수층 상류를 페놀 1mg/L를 함유한 물(자유수)에 계속 접촉시켜 차수층 내부에서 시간에 따른 페놀 농도의 변화를 계산하였다. 물 흐름에 대한 조건은 상류측에 $\psi = 0$ cm 그리고 하류측에는 $\psi = -200$ cm를 적용하였다. 이것은 초기수압 -200cm로 설치된 신설 차수층에 오염된 침출수가 계속하여 접촉하는 상황을 모사하는 것이다. 오염물에 대한 상류측 경계조건으로는 3rd type

$\psi = 200$ cm일 때 4.48×10^{-2} cm, $\psi = 400$ cm일 때 6.92×10^{-2} cm로 ψ 가 증가할수록 더 커지는 것을 알 수 있다. 이를 Fig. 7에서의 결과와 비교하면 차수층이 지하수위에서 더 높이 위치할수록 침투 유량은 더 많아지고 침투된 물의 이동 속도는 느려짐을 알 수 있다. 이 분석에 사용된 재료는 대용 차수재이지만 그 결과는 다른 점토성 재료에도 비슷하게 적용될 수 있다. 이상의 결과로부터 차수층의 정확한 물 통과 특성을 알기 위해서는 보다 자연 상태에 가까운 불포화 흐름 해석이 필요함을 알 수 있다.

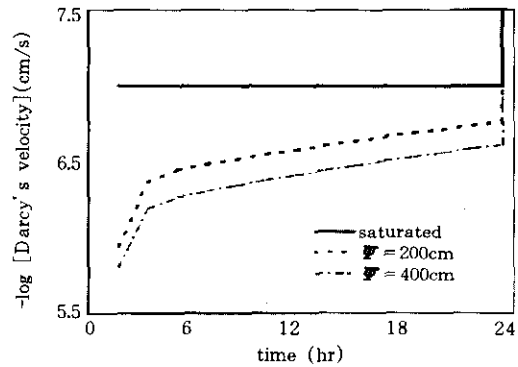


Fig.8 Infiltration at the Top of Clay Liners with Different Initial Water Pressures

경계조건을 적용하였으며 이를 수식으로 나타내면

$$C_1 = C_0 + \frac{D_1}{v_1} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (24)$$

이 된다. 여기서 아래 첨자 0과 1은 각각 경계 바깥과 경계를 나타낸다. 오염물 흐름에 대해 하류측에는 no flux 경계조건을 적용하였으며, 계산 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 이로부터 대용 차수재의 페놀 차단 능력이 기존 차수재보다 더 양호함을 알 수 있다. 또한, 포화 흐름

름에서의 페놀의 이송 특성(Fig. 6)과 비교하면, 현장 상태를 더 정확히 묘사하는 불포화대 해석시 페놀의 이송 속도가 포화대로 해석할 경우에 비해 매우 느림을 알 수 있고, Fig. 9에는 시간에 따른 페놀의 농도 분포 변화를 나타내었는데 물 흐름이 계속된다면 비록 이송 속도는 물 보다 느리지만 페놀 이송도 계속해서 일어나며, 불포화 해석에 의해서는 약 3년 후부터 농도는 낮지만 페놀이 유출되기 시작함을 알 수 있다.

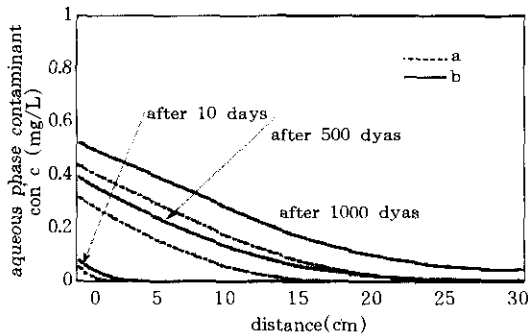


Fig.9. Transport Patterns of Phenol in Unsaturated Columns with Different Liner Materials. (a) Alternative and (b) Conventional Liners

6. 결 론

기존과 대용 차수재의 물 차단 능력은 포화 흐름에서는 같지만 실제 상태인 불포화대에서는 대용 차수재가 더 큰 것을 알 수 있었다. 또, 페놀의 이송 속도는 포화 흐름일 경우 대용 차수층에서의 이송 속도가 기존 차수재에서 보다 다소 느린 것을 알 수 있었다. 일정 기간 동안만 차수층 상부에 물이 공급될 때, 통과한 물의 총량은 불포화대 흐름일 경우 더 많아지지만, 포화대 흐름에 비해 침투 유량은 매우 작아지고 훨씬 장시간에 걸쳐 물이 통과함을 알 수 있었다. 차수층의 상부에 계속적으로 물을 공급할 경우 차수층을 통과하는 정상상태의

유량은 포화대 해석보다 불포화대로 해석할 경우 더 커짐을 알 수 있었다. 이로부터 차수층의 정확한 물 통과 특성을 알기 위해서는 보다 자연 상태에 가까운 불포화 흐름 해석이 필요함을 알 수 있었다. 또한, 포화 및 불포화 해석에서 대용 차수재의 페놀 차단 능력이 기존 차수재에 비해 더 양호함을 알 수 있었고, 페놀의 이송 속도를 포화대로 해석할 경우 이에 대한 차단 능력이 훨씬 과소평가됨을 알 수 있었다. 그러나, 물과 페놀의 유입이 계속된다면 차수층의 흡착에 의한 오염물질 차단 능력은 결국 소멸되는 것도 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경공학기술개발사업 '인공 차수재 및 복토재 개발' 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 정문경, 서경원 이용수 (1998), "플라이애쉬 혼합차수재의 투수특성과 미세구조 분석", 한국지반공학회지, 제14권 제1호, pp. 109-124.
2. 한국건설기술연구원 (1997), "플라이애쉬 재활용 차수재 개발", 인공차수재 및 복토재 개발, 환경부 환경공학기술개발사업 제2차년도 연차보고서, 환경부.
3. 허인영 (1998), "플라이애쉬의 오염물질 제거능 평가에 관한 연구", 석사학위논문, 충남대학교.
4. Bear, J.(1988), Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications, Inc..
5. Corapcioglu, M.Y., and Kim, S. (1995), "Modeling Facilitated Contaminant Transport by Mobile Bacteria", Water Resources Research, Vol. 31, pp. 2639-2647.
6. de Marsily, G. (1986), Quantitative Hydrogeology, Academic Press Inc..
7. Guymon, G.L. (1994), Unsaturated Zone Hydrology, Prentice-Hall, Inc..
8. Harmon, T.C., Ball W.P., and Roberts, P.V.

- (1989). "Nonequilibrium Transport of Organic Contaminants in Groundwater", in Reactions and Movement of Organic Chemicals in Soils, edited by B.L. Sawhney and Brown, Soil Sci. Soc. of Am. Special Publication No. 22.
9. Hills, R.G., Porro, I., Hudson, D.B., and Wierenga, P.J. (1989). "Modeling One Dimensional Infiltration into Very Dry Soils- 1. Model Development and Evaluation", *Water Resour. Res.*, Vol. 26, pp.1259-1269.
 10. Jury, W.A., and Fluhler, H. (1992). "Transport of Chemicals through Soil: Mechanisms, Models, and Field Applications", *Advances in Agronomy*, Vol. 47, pp. 141-201.
 11. Neumann, S.P. (1990), "Universal Scaling of Hydraulic Conductivities and Dispersivities in Geologic Media", *Water Resources Research*, Vol. 26, pp.1749-1758.
 12. Parker, J.C., and Lenhard, R.J. (1987), "A Model for Hysteric Constitutive Relations Governing Multiphase Flow- 1. Saturation-Pressure Relations", *Water Resour. Res.*, Vol. 23, No. 12, pp.2187-2196.
 13. Richards, L.A. (1931), "Capillary Conduction through Porous Medium", *Physics*, 1, pp. 318-333.
 14. Ritchie, E.B., Schnabel, R.R., and Hoover, J.R. (1987), "Estimation of Soil-Water Parameters from Unsaturated Steady-State Flow", in *Infiltration Development and Application*, Edited by Y.S. Fok, pp.377-387.
 15. Russo, D. (1988), "Determining Soil Hydraulic Properties by Parameter Estimation: On the Selection of a Model for the Hydraulic Properties", *Water Resour. Res.*, Vol. 24, No. 3, pp.453-459.
 16. Sposito, G. (1989), *The Chemistry of Soils*, Oxford University Press, Inc..
 17. van Genuchten, M.T. (1980), "A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *J. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 44, pp.892-898.
 18. van Genuchten, M.T., and Alves, W.J. (1982), "Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute Transport Equation", U.S.DOA, Technical Bulletin No. 1661.
 19. Whisler, F.D., and Watson, K.K. (1969), "Analysis of Infiltration into Draining Porous Media", *J. of Irrig. Drain. Div.*, 95(IR4), pp. 481-491.
 20. Williams, N.D., Pohland, F.G., McGowan, K.C., and Saunders, F.M. (1987), "Simulation of Leachate Generation from Municipal Solid Waste", USEPA-600/2-87/059.
 21. Yeah, T.-C.J. (1995), "Stochastic Modeling of Water Flow and Solute Transport in the Vadose Zone", in *Groundwater Models for Resources Analysis and Management*, Edited by A.I. El-Kadi, CRS Press, Inc.

(접수일자 1998. 7. 22)