

폐색으로 인한 흙/부직포 시스템의 투수능 저하 모델

Permeability Reduction Model of Soil-Geotextile System Induced by Clogging

이 인 모*¹ Lee, In-Mo

김 주 현*² Kim, Joo-Hyun

Lakshmi N. Reddi*³

Abstract

In this study, the permeability reduction in the soil-filter system due to clogging phenomenon was evaluated. An extensive research program was performed using two typical weathered residual soils which were sampled at Shinnae-dong and Poi-dong area in Seoul. Two separate simulation tests with weathered residual soil were performed: one was the filtration test (cross-plane flow test); and the other was the drainage test (in-plane flow test). Needle punched non-woven geotextiles were selected since they are often used as a drainage material in the field. The compatibility of the soil-filter system was investigated with emphasis on the clogging phenomenon. The hydraulic behaviour of the soil-filter system was evaluated by changing several testing conditions. Also, experimental results of the permeability reduction are compared with the results obtained from the theoretical model which can monitor the spatial variation of the permeability with time.

요 지

흙 필터를 대신한 토목섬유의 사용량이 점차 증가하고 있다. 따라서 흙과 결합된 복합체계에 대한 메카니즘 연구가 활발히 진행되고는 있지만 이러한 복합체의 거동은 흙과 사용 필터재의 상호작용으로 인한 여러 가지 영향인자들 때문에 실제의 필터 설계는 경험적인 방법에 의존하고 있다. 본 연구에서는 흙/부직포 시스템에서 세립자 이동에 의한 폐색 현상을 규명하고자 하였다. 국내의 대표적인 풍화잔적토 지반에 속하는 서울의 신내동과 포이동 지역의 흙을 시료로 이용한 본 실험은 필터재 내에서의 흐름방향에 따라 수평흐름과 수직흐름으로 나누어 실내 시험을 실시하였다. 필터재로서는 현장에서 배수재로 광범위하게 쓰이는 토목섬유를 사용하였다. 흙 모체와 필터가 결합된 복합체의 적합성 여부를 필터재의 흐름에 따라 비교, 분석하고 기존에 제안된 폐색 방지 기준을 적용하여 보았다. 이러한 실험결과를 토대로 하여 수평 흐름 시 발생하는 공간적 투수 계수 변화를 예측할 수 있는 모델을 제안하고 실내에서 실시한 모형실험과 이론적 모델예측의 비교를 통하여 투수능 저하 현상의 시간적, 공간적 변화양상을 파악하였다.

Keywords : Geotextile, Filter, In-plane flow, Cross-plane flow, Clogging

*1 김희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

*2 케일렌저니어링 지반공학부

*3 Professor, Dept of Civil Engineering, Kansas State University, U.S.A

1. 서론

토목섬유(geosynthetics)는 토질공학적 용도로 쓰이는 고분자 합성제품의 총칭으로 지오텍스타일, 지옴브레인, 지오그리드 등의 제품이 있다. 지오텍스타일의 기능을 크게 대별해 보면 배수기능, 필터기능, 보강기능, 분리기능 등을 들 수가 있다. 이중 배수기능이라 함은 높은 투수성을 가진 지오텍스타일이 그것을 둘러싼 불투수성 재료로부터 물을 흡수하여 밖으로 배출시키는 지오텍스타일의 평면 흐름(in-plane)을 말한다. 배수목적으로 사용되는 지오텍스타일의 성패를 결정짓는 것은 여러 요인을 들 수 있는데 그 중에서도 지하수 흐름에 의한 지반층의 세립토사가 지오텍스타일의 간극을 메우는 폐색효과(구멍막힘 현상)는 지오텍스타일 필터의 장기간 거동에 심각한 영향을 미칠 수 있으며 저하된 투수계수로 인하여 생성된 수압은 토류구조물에 막대한 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 폐색 현상에 초점을 맞추어 수평 흐름 시 공간적으로 변화하는 필터의 투수 계수 감소를 예측할 수 있는 모델을 제안하여 실제의 실험결과와 비교, 검토하였다. 또한 필터재의 이방성에 대한 조사를 위하여 평면 흐름과 대비되는 수직 흐름 시험을 실시하였다.

2. 제안된 모델

평면 흐름에 의한 투수 계수 저하예측 모델의 가장 핵심적인 사항은 필터에서의 공간적 입자 이동이 일어나는 현상을 고려하는 것이다. 흙필터의 투수능 저하 현상을 모사하기 위하여 본 모델의 기본 방정식을 이용한 바 있다 (Park, Y., 1999). 이 모델은 'Kozeny hydraulic radius model'을 근간으로 하여 동수 경사 작용시 발생하는 세립자의 이동으로 인한 폐색, 즉 투수계수 감소 현상에 대하여 필터재 내에 존재하는 간극을 원형 튜브관으로 모사한 후 이탈 입자와 필터 간극간의 관계를 이용하여 필터 투수능 저하 현상을 예측할 수 있도록 모델을 구성하였다. 지오텍스타일 필터재의 투수능을 구하기 위하여 Kozeny의 동수 반경 모델을 이용하였는데 식(1)과 같다.

$$k = C_s n \left(\frac{\gamma}{\mu} \right) \left[\frac{1}{4 \sum_i \frac{f(d_i)}{d_i}} \right]^2 \quad (1)$$

여기서 k 는 투수계수, C_s 는 원통형 간극의 형상계수

($=1/32$)이며, n 은 간극율, γ 는 물의 단위 중량, μ 는 물의 점성계수를 의미한다. 그리고 d_i 와 $f(d_i)$ 는 각각 필터의 간극직경과 간극직경, d_i 의 체적 빈도를 의미하게 되는데 본 모델의 경우 지오텍스타일의 간극분포를 구하기 위해서 Faure(1988)가 제시한 식(2)를 사용하였다.

$$PSDC(d) = 1 - \left[\frac{4\mu d}{D_f(4\mu + 2\pi T_g \rho_f)} + 1 \right]^{\frac{2T_g}{D_f}} \times \exp\left(-\frac{4\mu d}{\pi D_f^2 \rho_f}\right) \quad (2)$$

PSDC(d)는 부직포의 간극분포를 의미하며, d 는 간극의 직경, D_f 는 섬유 직경, T_g 는 부직포의 두께, μ 는 부직포의 단위 면적당 중량을 나타내며 ρ_f 는 부직포의 단위 질량을 의미한다.

지오텍스타일 필터의 간극직경이 시간에 따라 감소되는 현상을 모사하기 위하여 일정 시간 동안 각 간극 튜브에 퇴적되는 입자의 양, $N(r_i, a_i)$ 를 표현하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있는데 여기에서 $C(a_i)$ 는 유입되는 입자의 농도이며, $q(r_i)$ 는 r_i 의 반경을 갖는 튜브를 통해 흐르는 유량으로서 식(4)와 같다.

$$\frac{dN(r_i, a_i)}{dt} = q(r_i) p(r_i, a_i) C(a_i) \quad (3)$$

$$q = \frac{\pi \gamma S r^4}{8\mu} \quad (4)$$

$P(r_i, a_i)$ 는 원형 튜브관으로 모사되어진 필터의 간극 반경 r_i 에서 a_i 의 반경을 갖는 입자가 퇴적될 확률을 의미하게 된다.

$$p(r_i, a_i) = 4 \left[\left(\frac{\theta a_i}{r_i} \right)^2 - \left(\frac{\theta a_i}{r_i} \right)^3 \right] + \left(\frac{\theta a_i}{r_i} \right)^4 \quad (5)$$

여기에서 θ 는 θ_0 라는 이온 조건에 따른 계수의 영향을 받게된다.

$$\theta = \theta_0 \exp[-v(r_i)/v_{cr}] \quad (6)$$

이러한 원형 튜브에서 개별 입자에 의해 유발되는 압력 변화는 Happel과 Brenner(1973)에 의해 식(7)로 정리된 바 있다.

$$\Delta J(a_i) = \frac{12na_i v(r_i)}{r_i^2} \left[1 - \left(1 - \frac{a_i}{r_i} \right)^2 \right]^2 K(r_i, a_i) \quad (7)$$

여기서, $K(r_i, a_i)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$K(r_i, a_i) = \frac{1 - 0.667 \left(\frac{a_i}{r_i} \right)^2 - 0.202 \left(\frac{a_i}{r_i} \right)^5}{1 - 2.1 \left(\frac{a_i}{r_i} \right) + 2.09 \left(\frac{a_i}{r_i} \right)^3 - 1.71 \left(\frac{a_i}{r_i} \right)^5 + 0.73 \left(\frac{a_i}{r_i} \right)^6} \quad (8)$$

따라서 식(9)을 통하여, 흙모체로부터 이탈된 세립자의 간극 반경내에서의 폐색 현상으로 인해 감소된 새로운 튜브의 직경을 구해낼 수 있게 된다.

$$(r_i')^4 = (r_i)^4 \left\{ 1 - 3 \sum_{j=0}^M N(r_i, a_j) \frac{a_j}{a^*} \times \left[1 - \left(1 - \frac{a_j}{r_i} \right)^2 \right]^2 K(r_i, a_j) \right\} \quad (9)$$

여기서 a^* 는 튜브관의 유효 길이를 의미하며, M 은 이탈된 입자의 수, r_i 는 입자 폐색에 의한 일정 시간 후 새로운 튜브의 직경, 그리고 r_i 는 폐색이 발생하기 전 간극 반경을 나타낸다.

공간적 폐색 현상을 예측하기 위하여 그림 1과 같이 본 모델을 구성하였다. 이전의 많은 입자 이동 모델들은 공간적인 개념을 무시한 시간 의존적인 필터 거동과 필터에서는 단지 폐색 현상만 일어난다는 가정을 하였다. 따라서 실제로 필터에서 공간적으로 변화되는 투수계수의 상태를 시간적으로 고려하지 못하였다. 하지만 본 모델에서는 그림 1과 같이 공간적, 시간적 변화를 고려한 흙/부직포 시스템에서의 투수계수 감소를 모사할 수 있다. 우선 필터 내부에서는 일차원 흐름이라는 가정하에 흐름 방향으로 지

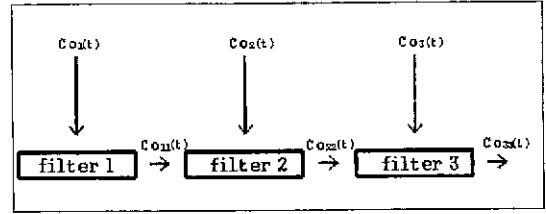


그림 1. 모델의 필터 개념도

오텍스타일 필터를 3개의 요소로 나누어서 고려한다. 이는 각각의 요소가 서로 다른 압력수두 상태에 있으므로 이를 기준으로 하여서 산정한 것이다. 또한 각각의 압력수두에 따른 농도의 시간적인 변화를 고려할 수 있도록 하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 각 필터 요소에 따라 흙모체로부터 유출되는 농도 C_{01} , C_{02} , C_{03} 의 변화를 고려하였다. 또한 필터 요소에서는 농도의 입력과 동시에 유출도 발생한다. 필터 요소 1의 경우 C_{01} 이라는 입력 농도와 동시에 C_{011} 이라는 유출 농도를 발생시키게 되는데 C_{011} 이라는 필터 요소 1에서의 유출농도는 다시 필터 요소 2의 입력 농도가 된다. 따라서 필터 요소 2의 경우는 두가지 입력 농도를 고려하여야만 한다. 필터 요소 3의 경우도 유사한 형태로 처리된다. 모델 예측에 의하여 각 필터 요소에서의 투수계수 감소비가 계산되어질 수 있으며 결과의 신뢰성 검증을 위하여 실제 실험 결과와 비교하였다.

3. 실내 시험

3.1 시험 장치 및 실험 방법

필터재 내에서의 흐름방향에 따라 각각 수평 흐름 시험 (in-plane flow test)과 수직 흐름 시험(cross-plane flow test) 두가지로 나누어 시험을 실시하였다. 흙모체와 사용 필터재에서의 발생 수압 변화를 측정하기 위하여 압력계를 설

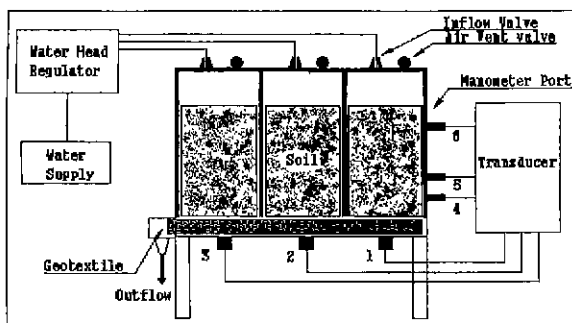


그림 2. 수평 흐름 시험 개략도

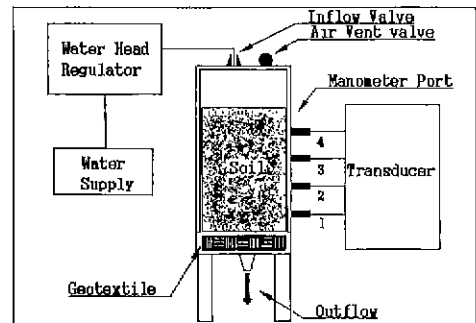


그림 3. 수직 흐름 시험 개략도

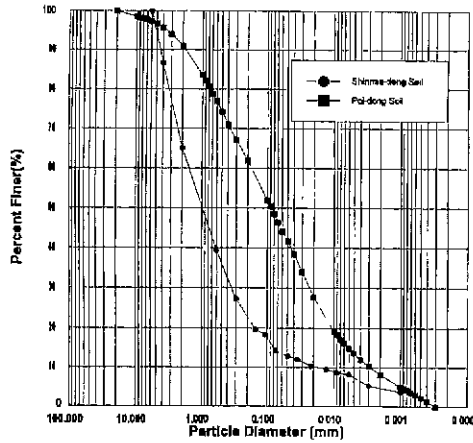


그림 4. 입도분포곡선

치하였고 수평 흐름 시험의 경우 동일한 단위중량의 공시체를 각 셀에 위치하여 동수 경사를 조절할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다. 유출 부에서 가장 멀리 위치한 곳에 최대 동수 경사를 가하고 점차 유출부에 가까워질수록 등 간격으로 동수 경사를 줄여서 가하였다. 그림 2은 수평 투수 시험기의 개략도이며, 그림 3은 수직 투수 시험기에 해당한다.

본 실험에 사용된 시료는 풍화 잔적토의 재성형시료를 사용하였으며 오븐에서 건조시킨 후 시료를 주어진 건조 단위 중량과 함수비로부터 정적다짐을 통해 일정한 크기의 공시체를 형성하였다. 이후 시료와 토목 섬유를 증류수 용기 안에서 24시간 이상 수침시킨 후 사용하였다. 각 실험에서의 셀안에 위치시키는 흙 모체의 크기는 가로, 세로 6×8cm 이며 높이는 10cm이다.

3.2 시료의 특성

본 시험에 사용된 시료는 서울의 신내동, 포이동 지역에서 채취한 풍화 잔적토를 이용하였다. 각각의 시료의 공학적 특성을 파악하기 위해서 액·소성시험, 체분석 시험, 비중시험 및 다짐시험을 실시하였다. 포이동 시료의 지질 형태는 지체구조상 경기 육괴에 해당하는 지역으로 모암

이 편마암이며 풍화정도가 심하고, 찰 성분이 많이 포함되어 붉은 색을 보이고 있다. 신내동 시료는 모암이 화강암으로서 일차광물성분인 석영과 장석이 주성분을 이루고 있다. 풍화 잔적토의 공학적 성질은 표 1과 같다. 습윤 체분석 및 비중계 시험으로부터 입도 분포를 파악하였고 그 결과는 그림 4에 제시하였다. 입도 분포곡선으로부터 포이동 지역의 흙은 통일 분류법상 “SC”로 분류되며 No.200체 통과량이 47.36%이다. 신내동 시료의 경우 통일 분류법상 SW-SM으로서 사실상 사질토와 같이 거동할 것으로 판단된다.

3.3 토목섬유

흙/부직포 시스템의 배수특성실험에 사용한 지오텍스 타일은 니들펀칭 장섬유 부직포를 대상으로 하였다. 사용한 장섬유 부직포는 폴리에스터(P.E.T)의 재질로 제조되었으며 물성은 표 2와 같다.

4. 실내 시험 결과

4.1 수평 흐름 (in-plane flow) 시험 결과

흙 모체에 비하여 필터의 투수능이 크기 때문에 일반적으로는 필터 내로 유입되는 유량에 대하여 수압이 생성될 수 없다. 하지만 수평 시험 결과 흙/부직포 시스템에서는 필터내에서의 구멍 막힘 현상에 의한 필터 간극의 감소로 일정량의 수압 생성 즉 잔류수압과 흙 모체에서의 수압증가를 보였다. 신내동 흙/필터 시스템의 경우에는 실험 초기에 급격한 잔류수압의 증가를 보였으나 포이동 시료는 거의 잔류수압이 관찰되어지지 않았다. 이러한 거동의 차이는 신내동 시료가 포이동 시료에 비하여 주어진 동수경사에 대해 흙 자체 내에서의 이탈률이 크기 때문이다. 반면에 포이동 시료의 경우 점착력 성분이 주어진 동수경사에 비하여 크기 때문에 흙 모체가 배수시에도 안정된 구조를 갖게 된다. 그림 5, 6, 7, 8은 수평 흐름 시험 결과이다.

표 1. 흙 시료의 공학적 특성

시료	간극율	최적 함수비 (%)	최대 건조 단위 중량 (kN/m ³)	#200체 통과량 (%)	소성도(%)			비중	통일분류
					액성 한계	소성 한계	소성 지수		
포이동	0.409	16	16.68	47.36	34.0	19.8	14.2	2.74	SC
신내동	0.358	10	18.64	14.23	NP			2.65	SW-SM

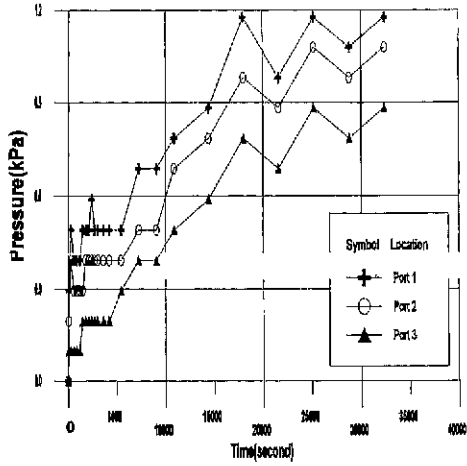


그림 5. 필터재에서의 잔류 수압(신내동시료)

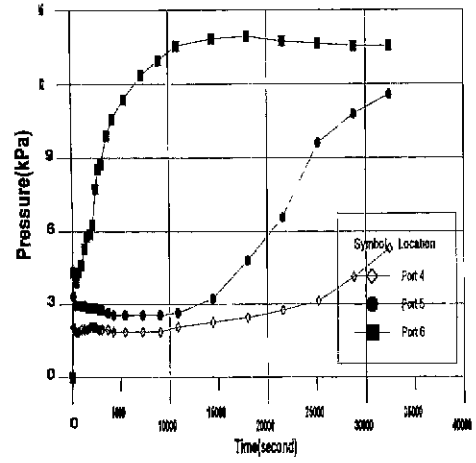


그림 7. 흙 모체의 발생 수압(신내동시료)

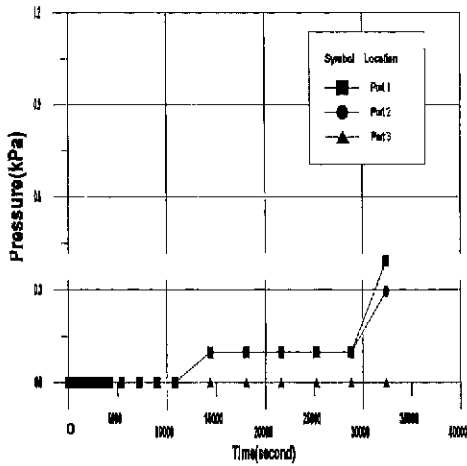


그림 6. 필터재에서의 잔류 수압(포이동시료)

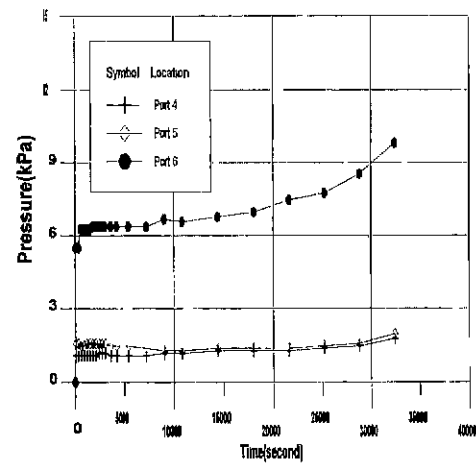


그림 8. 흙 모체에서의 발생 수압(포이동시료)

표 2. 지오택스타일 물성

토목섬유종류	부직포	
섬도(Denier)	4 50	
단위 질량(g/cm ³)	1.38	
수직투수계수(cm/sec)	3.6×10 ⁻¹	
전달성(m ² /sec)	10kPa	2.0×10 ⁻⁵
	300kPa	1.1×10 ⁻⁵
유효간극크기(μm)	75	
중량(g/m ²)	300	

수평 흐름 시 흙 모체로부터 이탈되어지는 세립분에 의해서 흙 모체와 지오택스타일 필터에는 압력 수두 변화가 유발되었다. 본 실험 결과를 깊이에 따라서 선형적으로 압력 수두가 감소되는 이상적인 경우와 비교하였다. 또한

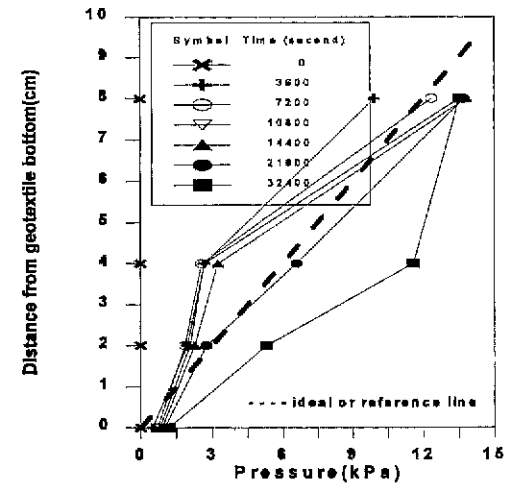
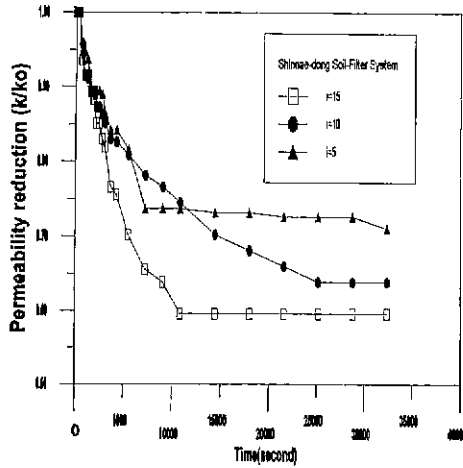
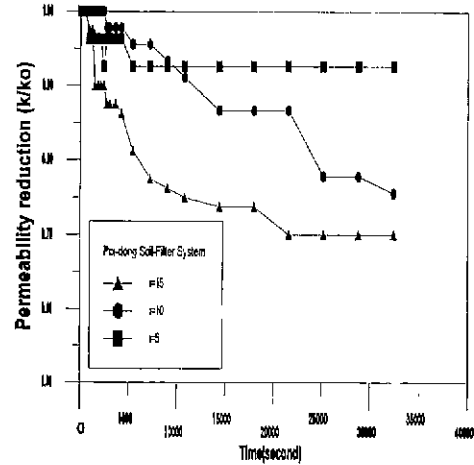


그림 9. 신내동 흙 모체의 발생 수압

ASTM에 제시된 동수경사비(gradient ratio)의 정의와 일



(a) 신내동 흙/부직포 시스템



(b) 포이동 흙/부직포 시스템

그림 10. 수평 흐름 시 투수 계수 감소비

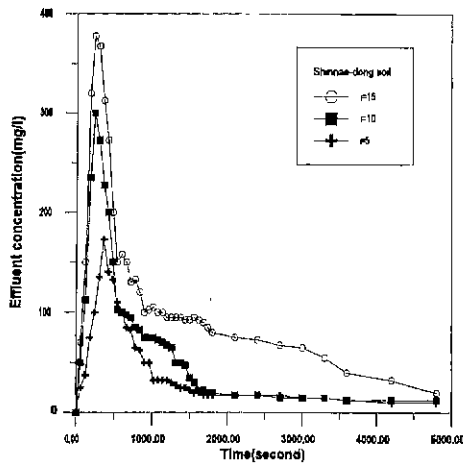


그림 11. 신내동 시료의 유출 농도

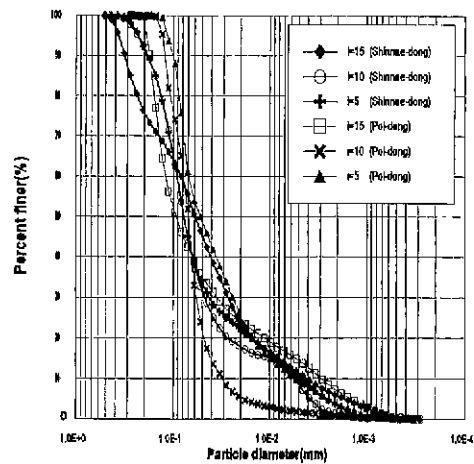


그림 12. 유출 입자의 입도 분포

치하지는 않지만 본 실험의 각 port별 위치가 ASTM에서 제안한 압력계의 위치와 유사하므로 적용하여 보았다. 그림 9는 신내동 흙 모체에서의 발생 수압 결과를 보여주고 있다. Port 1번, 4번, 6번에서 측정된 수압으로부터 다음식을 이용하여 동수경사비(gradient ratio, G.R)를 구하였다.

$$G.R = \frac{\Delta h_{1-4} / S_{1-4}}{\Delta h_{4-6} / S_{4-6}} \quad (10)$$

여기서,

Δh_{1-4} : Port 1번과 4번의 수두차

Δh_{4-6} : Port 4번과 6번의 수두차

S_{1-4} : Port 1번과 4번의 거리차이

S_{4-6} : Port 4번과 6번의 거리차이

계산된 동수경사비는 시스템의 평형상태에서 약 1.5 정도의 값을 갖게 된다.

따라서 신내동 흙/부직포 시스템의 경우 제안된 기준에 의하면 시스템 내부에서 배수 거동시 폐색 현상이 발생되었다고 판단된다. 또한 시간 경과에 따라 지오텍스타일 상부에 위치한 흙 모체의 경우 폐색 효과에 의해서 그 영향 범위가 흙 모체 아래 부분에서 상부 쪽으로 전파되고 있음을 알 수 있다.

흙/부직포 시스템의 동수 경사 변화에 따른 투수 계수 감소 변화 형태는 다음과 같다. 그림 10은 시간 경과에 따른 투수 계수 감소비를 보여주고 있다. 그림에서 제시된 바와 같이 동수경사의 증가에 따라 투수계수는 감소하는 경향을 보인다.

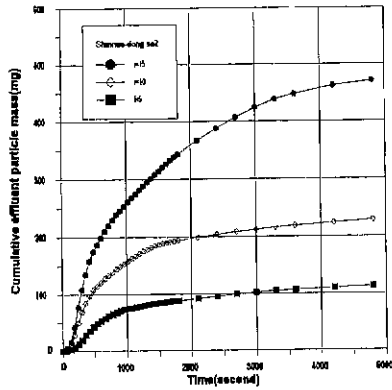


그림 13. 신내동 시료의 가적입자유출 특성

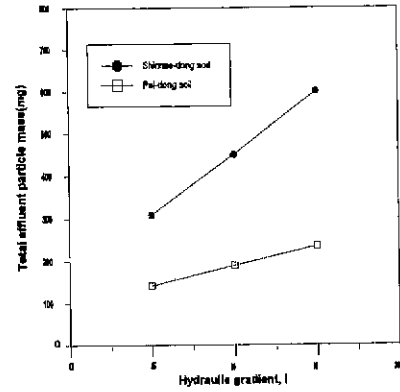


그림 14. 전체 가적입자 유출량

4.2 분리형 실험

분리형(uncoupled) 실험의 목적은 흙 모체로부터 유출되는 농도와 입도 분포의 변화량을 얻기 위함이다. 결합형(coupled) 실험은 흙 모체로부터 직접적으로 이러한 변화량을 얻어낼 수 없기 때문에 분리형 실험이 필요하다.

동수 경사의 변화에 따른 유출 농도의 시간적 변화와 그에 따른 입도 분석 결과를 그림 11과 그림 12에 제시하였다. 그림 11은 동수 경사 변화에 의한 신내동 시료 유출 농도의 시간적 분포를 보여주고 있다. 전반적으로 실험 초기 구간(400초 이내)에서 급격한 농도의 증가를 보이고 있으며 점차 시간 흐름에 따라 감소되는 형태를 보인다. 이러한 결과는 역시 초기의 급격한 동수 경사의 작용으로 흙 시료의 이탈률 증가를 유발하며 시간 경과에 따라 각각의 해당 동수 경사에 따른 이탈률은 동수 경사의 차이에도 불구하고 수렴된다. 하지만 실험 초기 구간 내에서 작용 동수 경사에 비례하여 농도 증가는 상당한 차이를 보이며 이는 작용 동수 경사에 비례한 이탈률 증가를 의미한다. 따라서 신내동 흙/부직포 시스템의 초기 구간에서의 투수 계수 감소가 다른 구간에 비하여 상대적으로 중요하게 된다.

그림 12는 유출 용액으로부터 얻어진 입도 크기 분포를 보여 주고 있다. 신내동, 포이동 시료 동수 경사의 증가에 따라 입도가 큰 세립분들의 양이 조금씩 증가되는 현상을 보였다. 또한 신내동 시료의 유출 입자의 크기가 포이동 시료에 비하여 전반적으로 크게 이루어져 있음을 알 수 있다.

그림 13과 그림 14는 시간 변화에 따른 가적입자유출량과 실험 종료 후 유출된 전체 가적입자유출량을 동수 경사에 따라 나타낸 것이다. 역시 시간 경과에 따라 이탈률의 감소 현상을 볼 수 있다. 이는 이탈률의 감소 효과와 더불어

흙 자체 및 필터에서 폐색현상으로 인하여 이탈된 입자가 다시 퇴적되기 때문이다. 상대적으로 포이동 시료의 경우는 흙 시료로부터 이탈된 양이 점착력 성분으로 인하여 적음을 볼 수 있다.

4.3 수평과 수직 흐름 시험 결과 비교

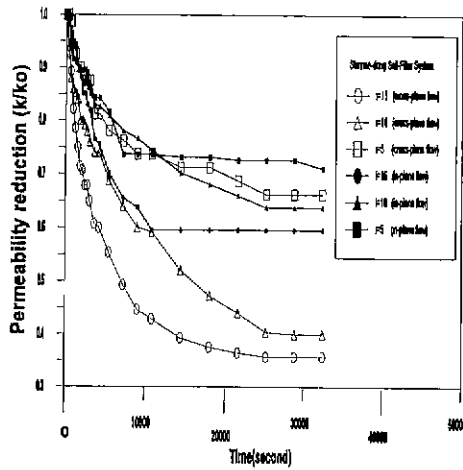
흙/부직포 시스템의 수직 흐름에 대한 투수 계수 감소비를 조사하였다. 그림 15의 (a)와 (b)는 각 흙/부직포 체계에서의 시간 경과에 따른 투수 계수 감소비를 보여주고 있다. 시험 결과로부터 수직 흐름 대한 거동 파악과 동시에 수평 흐름과의 비교를 통하여 필터재의 이방성을 관찰할 수 있다.

수직 흐름 시험 결과 역시 동수 경사의 증가에 따라 투수 계수 감소가 증가하였다. 그러나 수평 흐름 시험 결과와 비교하여 볼 때 투수 계수 감소는 훨씬 증가된 것으로 나타났다.

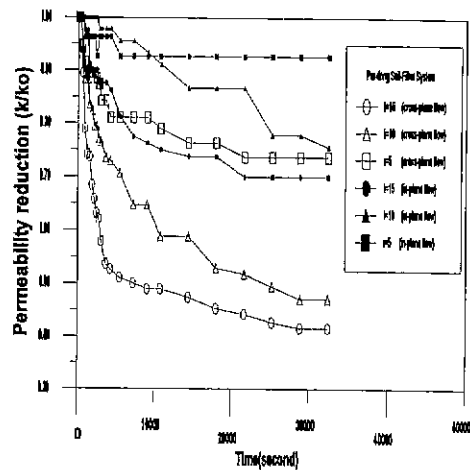
이는 필터재 자체의 이방성에 기인한다. 필터재 자체의 전달성(transmissivity)이 투수성(permeability)에 비하여 흐름 효율이 크기 때문에 필터재 내에서의 입자 운동은 필터 수직 방향보다는 수평 흐름 방향으로 일어나게 된다. 따라서 수평 흐름 시험의 경우 입자의 이동이 자유로운 반면 수직 흐름 시험에서는 입자의 필터재 내로의 수평 이동이 구속됨과 동시에 필터재 자체의 수직 투수 계수가 작기 때문에 상대적으로 수직 흐름 시 투수 계수 감소가 증가한다.

5. 모델 예측과 실내 시험과의 비교

본 절은 실험으로부터 얻은 결과와 모델 예측 결과와의 비교를 통하여 입자의 필터 내에서의 유동과 퇴적에 대해 제안된 모델의 타당성을 검토하기 위함이다. 시간에 따른



(a) 신내동 흙/부직포 시스템



(b) 포이동 흙/부직포 시스템

그림 15. 필터재의 흐름 방향에 따른 투수 계수 감소비

투수계수의 감소 비를 각 위치별로 계산해 보았다. 주어진 각각의 동수 경사에 따라 발생하는 이탈 입자의 간극내에서의 이동과 퇴적을 통하여 실제의 입자운동을 모사하였다. 이미 기술한 바와 같이 필터를 개개의 요소로 나누어 각각의 필터 내에서의 이동을 모사하였다. 모델에 적용되어진 각 매개 변수들은 표 3에 제시되었다.

C_s 는 원통형 간극의 형상 계수이며, μ 는 물의 점성 계수, a^* 는 입자가 지나가는 간극튜브의 길이인 유효 길이를 의미한다. 또한 v_{cr} 는 입자폐색이 발생되지 않는 한계속도를 나타내며 θ_0 는 Rege와 Fogler (1998)가 염분이 존재하지 않는 유체에 대하여 제안된 값3을 적용하였다. θ_0 는 주로 이온 강도와 pH에 의하여 지배를 받는다. 한계 속도와 간극튜브의 유효 길이는 시험결과와 제안된 모델결과를 비교하여 curve fitting 방법으로 결정하였다.

그림 16의 (a)부터 (f)까지는 실험으로부터 얻어낸 투수 계수 감소비와 모델에 의하여 예측된 결과를 제시하고 있다. 필터의 각 위치에서 계산되어진 세 곳의 투수계수 감소비는 시험결과와 함께 시간에 따른 입자의 이동과 퇴적 현상을 설명해 준다.

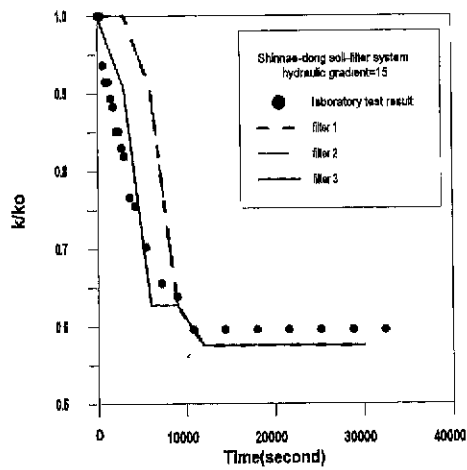
신내동 흙/필터 시스템에 최대 동수 경사가 15인 경우는 그림 16 (a)에 제시되었다. 모델에 의한 예측 결과를 살펴보면 각 필터 요소는 시간 변화에 따라 투수계수의 변화형상에 차이가 발생하였는데 필터 요소 1과 2는 초기에 투수 계수의 감소가 극히 미미하였고 필터 요소 3의 경우에는 초기에 투수 계수 감소가 심하게 일어났다. 약 10000초 이후에는 각 필터 요소에서의 차이가 거의 없었으며 이는 필터 전구간에 걸쳐서 거의 동일한 투수계수를 갖게 된다는

의미이다. 이후 투수계수 감소 비가 곧 수렴된다. 실험결과로부터 얻어지는 투수계수 감소는 필터의 유출부 끝 부분에서 보이는 투수계수 감소량에 따라 그 거동이 지배될 가능성이 크기 때문에 공간적인 고려없이 단지 시간 변화에 따라 모델로 예측된 투수계수 감소 비와 비교하려면 필터 요소 3에서의 변화량과 비교함이 합리적일 것으로 판단된다.

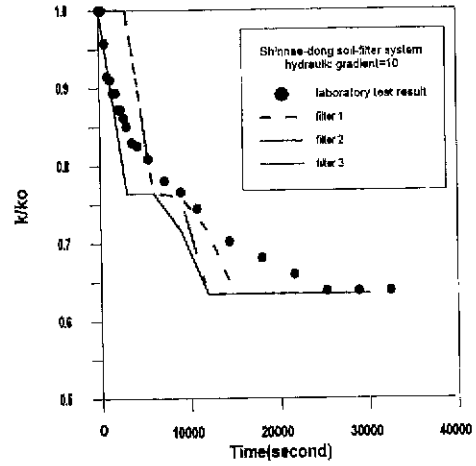
모델로부터 예측되어진 결과는 다음과 같은 의미를 내포한다. 이동 입자의 퇴적은 필터의 끝부분에서 주로 일어나게 되는데 다시 말하면 필터 요소 1과 2에서는 대부분의 입자들이 퇴적보다는 이동의 경향이 있으며 필터 요소 3에서 퇴적될 가능성이 크다는 것이다. 특히 필터 요소 3에서는 작용 동수 경사가 클수록 필터 요소 1과 2로부터 이탈되는 입자량이 필터 요소 3내부로부터 이동되어지는 양보다 훨씬 과다하게 이루어진다.

작용 동수 경사가 적어질수록 예측되는 필터 요소 2의 거동에 변화가 생기게 되는데 즉 투수계수 감소비 곡선 모양이 필터 요소 1에서 이탈되어 필터 요소 3의 거동 쪽으로 이동함을 관찰할 수 있다. 특히 작용되어지는 동수 경사가 5인 경우에는 필터 요소 2의 거동이 거의 필터 요소 3의 거동과 유사함을 알 수 있다. 이것이 의미하는 바는 작용 동수 경사가 작아질수록 필터 내에서의 입자의 이동거리가 짧아짐을 알 수 있다.

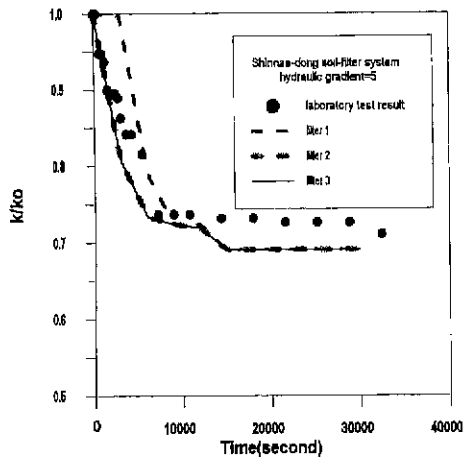
그림 16의 (a)부터 (f)까지 실험결과를 각 모델의 예측결과와 비교하여 볼 때 어느 정도의 두 결과가 서로 일치함을 알 수 있다.



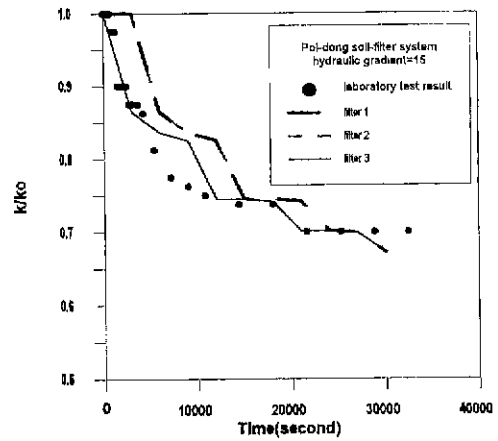
(a) 신내동 흙/부직포 시스템($i=15$)



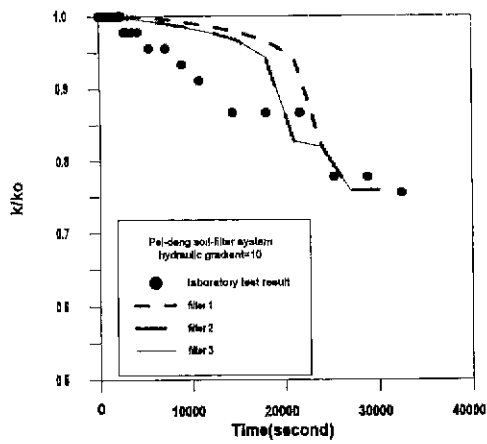
(b) 신내동 흙/부직포 시스템($i=10$)



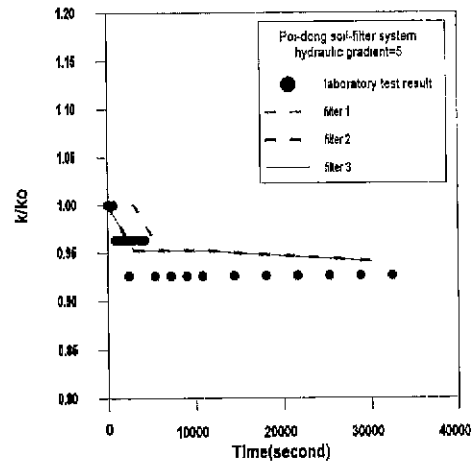
(c) 신내동 흙/부직포 시스템($i=5$)



(d) 포이동 흙/부직포 시스템($i=15$)



(e) 포이동 흙/부직포 시스템($i=10$)



(f) 포이동 흙/부직포 시스템($i=5$)

그림 16. 모델링 결과와 실내 시험의 비교

표 3. 모델링에 사용된 매개 변수

흙 모체	θ_0	α^* (cm)	V_{cr} (cm/sec)	μ (g · sec/cm ²)	Cs
신내동	3	0.042	0.7	1.021×10^{-5}	1/32
포이동	3	0.024	0.7	1.021×10^{-5}	1/32

6. 결론

흙 모체로부터 이탈되는 세립자로 인하여 지오텍스타일 필터의 폐색 현상을 공간적으로 고려할 수 있도록 모델을 개발하였으며 이를 검증하기 위하여 실내 시험도 부가적으로 실시하였다. 실내 시험의 경우는 필터의 이방성을 조사하기 위하여 수평 흐름에 대비한 수직 흐름 시험을 부가적으로 실시하였다. 시험과 이론적인 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

신내동 시료의 경우는 포이동 시료에 비하여 입자 이탈량이 크게 나타났다. 이는 신내동 시료의 경우 사질토에 가까운 거동을 보이며, 한계동수경사이내서도 입자이탈이 자연적으로 일어나며, 반면 포이동 시료는 점착력 성분에 의하여 입자 이탈량의 감소를 보이기 때문이다. 이러한 이탈량의 차이는 포이동 시료에 비하여 신내동 흙/부직포 시스템의 폐색 현상을 가속화시킨다. 이러한 결합형 시스템의 투수 계수 및 입자 유동 특성에 영향을 미치는 인자들은 흙 모체의 이탈률, 필터내의 퇴적률, 흙과 부직포의 상호 작용, 흙 모체에 작용하는 동수 경사 등이다. 그리고 수평 흐름보다 수직 흐름의 경우에 필터 폐색 현상이 더 심하게 일어나는데 이는 필터재의 이방성과 필터재 내에서의 세립자 운동 거리에 따라 좌우된다.

제안된 모델을 통하여 실제의 폐색 현상 과정을 비교적 근접하게 예측할 수 있었다.

모델 예측에 따른 필터재의 흐름 방향으로 거리별 투수 계수의 변화는 초기에 큰 차이를 보였지만 필터재의 끝부분에서 시작되는 투수 계수의 감소는 결국 최종 수렴 구간에서 균일한 투수 계수 저하를 보이게 된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단(KOSEF; Project No.985-1200-001-2)과 미국과학재단(NSF; Project No. CMS-9713708 & INT-9734804)의 국제공동연구지원에 의하여 이루어진 연구의 일부로서 두 재단에 감사드린다.

참고 문헌

1. Fannin, R.J., Vaid, Y.P., and Shi, Y.C. (1994), "Filtration behaviour of nonwoven geotextiles", Can. Geotech. J. Vol. 31, pp. 555-563.
2. Faure, Y. H. (1988), "Approach Structure Comportment Filtrant des Geotextiles" Ph.D. Thesis, University Joseph Fourier-Grenoble I, France, pp. 344.
3. Fischer, G.R., Christopher, B.R., and Holtz, R.D. (1990), "Filter criteria based on pore size distribution", Proc. 4th International Conference on Geotextile, The Hague, The Netherlands, pp. 289-294.
4. Gardoni, M.G., and Palmeira, E.M. (1998), "The performance of a geotextile filter in tropical soil", Proc. 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia, pp 1027-1032.
5. Happel, J., and H. Brenner (1973), Low Reynolds Number Hydrodynamics. Noodhoff, Leyden, The Netherlands, p.320.
6. Park, K. J. (1999), "Analysis of particle mobilization and impact on filter performance in drainage tunnels", Ph.D. Dissertation. Korea University, Seoul, Korea.
7. Park, Y. J. (1999), "Permeability reduction of soil filters due to physical clogging", M.S. Thesis. Korea University, Seoul, Korea.
8. Regc. S. D., and Fogler, H. S. (1988), "A network model for deep bed filtration of solid particles and emulsion drops," AIChE Journal, 34(11), pp.1761-1772

(접수일자 2000. 2. 15)