

물리적 폐색으로 인한 흙필터의 투수능 저하 Permeability Reduction of Soil Filters due to Physical Clogging

이 인 모*¹ Lee, In - Mo 박 영 진*² Park, Young-Jin
최 상 순*³ Choi, Sang-Soon 김 영 옥*⁴ Kim, Young-Uk
Reddi, L. N.*⁵

Abstract

Soil filters are commonly used to protect soil structures from eroding and piping. When filters are clogged by fine particles which are progressively accumulated, these may lead to the buildup of excessive pore pressures leading to instability in the subsurface infrastructure. A filter in the backfill of a retaining wall, a filter adjacent to the lining of a tunnel, or a filter in the bottom of an earth dam can be clogged by transported fine particles. This causes reduction in the permeability, which in turn may lead to intolerable decreases in drainage capacity. In this study, the extent of this reduction is addressed using results from both experimental and theoretical investigations. In the experimental phase, the permeability reduction of a filter was monitored when an influent of constant concentration flows into the filter (uncoupled test), and when the water flow through the soil-filter system to simulate an in-situ condition (coupled test). The results of coupled and uncoupled tests are compared with others. In the theoretical phase, a representative elemental volume of the soil filter was modeled as an ensemble of capillary tubes and the permeability reduction due to physical clogging was simulated using basic principles of flow in cylindrical tubes. In general, it was found that the permeability was reduced by at least one order of magnitude, and that the results from the uncoupled test and the theoretical investigation were in good agreement. It was observed that the amount of deposited particles in the coupled test matched fairly well with that in the uncoupled test, which indicated that the prediction of permeability reduction was possible by performing the uncoupled test instead of the coupled test, and/or by utilizing the theoretical model.

요 지

흙필터는 일반적으로 침식이나 파이프로부터 지반 구조물을 보호하기 위하여 사용된다. 세립자들이 유동하여 필터에 퇴적되는 폐색현상이 발생하는 경우, 간극수압이 증가하고 이로 인해 지반구조물의 불안정을 유발시키게 된다. 미세입자의 유동에 의한 폐색현상은 옹벽의 뒤채움재에 설치한 필터, 흙댐의 저부에 설치된 필터, 그리고 터널의 라이닝 뒤에 설치한 필터 등에서 발생할 수 있다. 폐색현상은 필터의 투수능을 저하시켜 배수능력에 상당한 위험을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 필터의 폐색으로 인한 투수능 저하 정도를 실험을 통해 관찰하고 이론적인 모델을 통해 정량화시키고자 하였다. 일정한 농도의 현탁액이 필터로 유입되는 분리형 실험과 현장상태를 모사하는 흙-필터 시스템의 결합형 실험을 통해 투수능의 저하현상이 압력 제어조건과 유량 제어조건에서 관찰되었고, 서로 비교 분석되었다. 미세입자가 통과하는 필터의 간극을 모세관으로 가정한 후 모세관에서 유체의 흐름 원리를 이용하여 물리적인 폐색에 의해 발생하는 투수능 저하현상을 이론적인 모델로 구성하였다. 일반적으로 투수능은 1/10 수준으로 감소되었으며, 분리형 실험에 의한 결과와 이론적인 모델의 결과는 잘 일치하였다. 또한, 결합형 실험결과와 분리형 실험결과가 비교적 잘 일치하여 투수능 저하예측은 분리형 실험이나

*1 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수
*2 정회원, 대본 엔지니어링 지반공학 연구소
*3 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정
*4 정회원, 고려대학교 공과대학 토목공학과 박사후 연구과정
*5 Professor, Dept. of Civil Eng., Kansas State University, U.S.A

이론적 모델에 의하여 가능하리라 판단되었다.

Keywords : Soil filter, Filter clogging, Kozeny hydraulic radius model, Permeability reduction, Particle transport

1. 서론

흙필터는 일반적으로 침식과 파이프로부터 지반구조물을 보호하는 데에 사용된다. 상대적으로 투수능이 작은 지반의 미세입자가 필터에 폐색을 유발하게 되면, 필터 폐색은 점진적으로 증가되고 지반구조물의 불안정성은 증가한다. 이것은 결국 필터의 투수능을 저하시켜 필터의 기능이 상실되는 결과를 초래한다. 본 연구에서는 국내의 대표적인 풍화잔적토 시료를 이용하여 흙모체와 필터가 결합되어 있는 지반을 모델링한 후 필터의 폐색현상과 투수능 저하 현상을 물리적인 모델을 사용하여 설명하고자 하였다. 실험결과와 이론적인 모델에 의한 예측 가능성이 검토되었으며, 이론적인 모델의 각종 변수들이 제안되었다. 실제 지반을 모사하는 결합형 실험(coupled test)을 통해 필터의 투수능 저하 현상을 관찰하였고, 같은 투수 조건 하에서 미세입자의 농도를 조절할 수 있는 분리형 실험(uncoupled test)을 수행하여 두 실험방법 간의 상관성을 비교 검토하였다.

2. 흙필터의 투수능 저하 모델

대부분의 입자유동모델 및 필터 모델은 점착력이 있는 미세입자와 조립질의 필터가 결합되어 있는 지반구조물에서 발생하는 재료간 특성의 차이에 대해 다루고 있다. 이러한 모델들은 점착성이 있는 재료의 한계전단응력 개념을 적용하고 있는 반면, 우리나라의 일반적인 지반구조물에 성토체로 사용되는 풍화잔적토에 이러한 모델을 적용하는 것은 다소 무리가 따르는 것으로 판단된다. 최근 국내에서도 풍화잔적토와 같은 비점착성 흙모체의 입자유동

및 필터의 기능 저하 현상을 규명하기 위한 노력이 선행(고, 1997; 김, 1998)되었으며, 경험적인 모델이 제안된 바 있다. 본 연구에서는 기존에 제안된 바 있는 경험적인 모델이 아닌 네트워크 모델 및 Kozeny- hydraulic radius model을 기반으로 하여 필터의 투수능 저하모델을 개발하고 실제 모형실험과 비교하여 보았다. 본 모델은 필터에 대한 물리적인 모델이므로 흙모체와 필터가 결합된 실제 지반의 모형실험에는 적용될 수 없다. 이를 극복하기 위하여 본 논문에서는 흙모체만으로 구성된 입자유동실험과 필터만으로 구성된 필터 투수능 저하실험을 별개로 실시하여 흙모체-필터의 결합형 실험 결과와 상호 비교·검토하였다.

입자는 흙모체로부터 이탈한 후 간극내 유체의 흐름에 의해 확산(diffusion), 퇴적(sedimentation), 수리동역학적 작용(hydrodynamic action) 등의 요인에 의해 이동한다. 입자의 이동이 이루어지다가 필터입자(collector)에 유동입자가 근접하게 되는 경우 두 입자사이에 표면력이 작용하여 유동입자가 필터입자에 부착하게 되고, 그로 인하여 필터입자사이의 간극을 매우게 되는데 이 과정을 입자의 퇴적으로 인한 필터의 폐색현상(filter clogging)이라 한다. 폐색 현상은 필터의 투수특성을 변화시키고 간극수압을 유발하여 필터의 투수능 저하로 표현되어 진다. 그림 1과 같이 필터의 간극을 통한 유체흐름을 다양한 크기를 갖는 튜브 관을 통한 흐름으로 가정하고 필터간극과 퇴적 입자간의 관계를 통해 필터의 투수능 저하현상을 예측할 수 있게 하는 이론적인 모델을 구성할 수 있다.

흙필터의 투수능 산정은 Kozeny hydraulic radius model을 사용하였는데, 이 모델은 Hagen-Poiseuille의 방정식으로부터 유도되었으며 필터의 간극을 통한 유체의 흐름

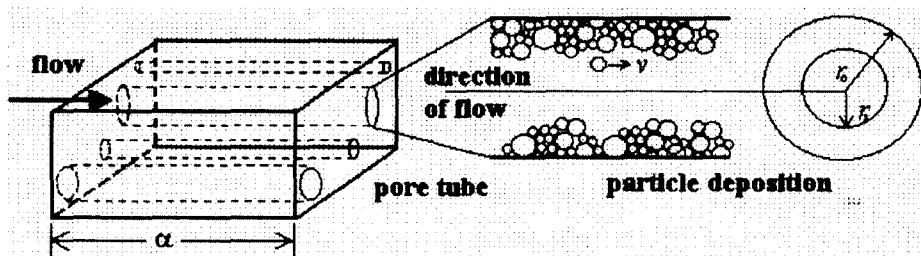


그림 1. 다양한 직경을 갖는 평행한 튜브

에 적용되어 왔다(Garcia-Bengochea et al.1979). 이 모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, k 는 투수계수, C_s 는 원통형 간극의 형상계수 ($=1/32$), n 은 간극율, γ 는 물의 단위중량, μ 는 물의 점성계수, d_i 는 i^{th} 간극의 직경, 그리고 $f(d_i)$ 는 간극직경 d_i 의 체적빈도를 나타낸다. 폐색으로 인한 간극구조의 변화는 n 과 d_i 의 변화로 표현되며, 이 식은 조립토의 투수흐름에 적절한 것으로 판단된다.

시간에 따라 간극의 직경이 감소되는 현상을 구현하기 위해 일정 시간 동안 각 간극 튜브에 퇴적되는 입자의 양, $N(r_i, a_j)$ 를 간극 튜브의 반경, r_i 와 유입되는 입자의 반경, a_j 의 함수로 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dN(r_i, a_j)}{dt} = q(r_i) p(r_i, a_j) C(a_j) \quad (2)$$

여기서 $C(a_j)$ 는 유입되는 입자의 농도이며, $q(r_i)$ 는 r_i 의 반경을 갖는 튜브를 통해 흐르는 유량으로서 Poiseuille의 법칙에 따라 식 (3)과 같이 적용할 수 있다.

$$q(r_i) = \frac{\pi \gamma J}{8\mu} r_i^4 \quad (3)$$

여기서 J 는 튜브를 통한 흐름의 동수경사이다. 그리고 $p(r_i, a_j)$ 는 a_j 의 반경을 갖는 입자가 r_i 의 반경을 갖는 튜브에 퇴적될 확률로서 Rege 와 Fogler(1988)에 의해 식 (4)와 같이 제안되었으며, 이 확률분포곡선을 도시하면 그림 2와 같다.

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

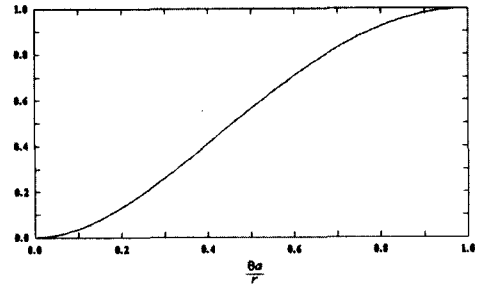


그림 2. a_j 의 반경을 갖는 입자가 r_i 의 반경을 갖는 튜브에 퇴적될 확률

여기서 θ 는 입자 사이에서 발생하는 힘으로서 중력, 수리동역학적 힘, 전기적 이중층 및 Vander Waals 힘 등에 의해 영향을 받는 계수이며, 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\theta = \theta_0 \exp[-v(r_i)/v_{cr}] \quad (5)$$

여기서 θ_0 는 이온조건에 따른 계수이고 $v(r_i)$ 는 각 튜브를 통해 흐르는 유체의 속도, v_{cr} 는 입자폐색이 발생되지 않는 한계속도이다.

입자 퇴적으로 인해 발생된 간극 반경의 감소는 퇴적으로 인해 발생하는 현상으로부터 유추해 낼 수 있다. 원통형 튜브에서 개별 입자에 의해 유발되는 압력의 변화는 Happel 과 Brenner(1973)에 의해 식 (6)과 (7)로 정리되었다.

$$\Delta J(a_j) = \frac{12\eta a_j v(r_i)}{r_i^2} \left[1 - \left(1 - \frac{a_j}{r_i} \right)^2 \right]^2 K(r_i, a_j) \quad (6)$$

$$K(r_i, a_j) = \frac{1 - 0.667 \left(\frac{a_j}{r_i} \right)^2 - 0.202 \left(\frac{a_j}{r_i} \right)^5}{1 - 2.1 \left(\frac{a_j}{r_i} \right) + 2.09 \left(\frac{a_j}{r_i} \right)^3 - 1.71 \left(\frac{a_j}{r_i} \right)^5 + 0.73 \left(\frac{a_j}{r_i} \right)^6} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)은 원통형 튜브의 층류흐름에 대해 적용할

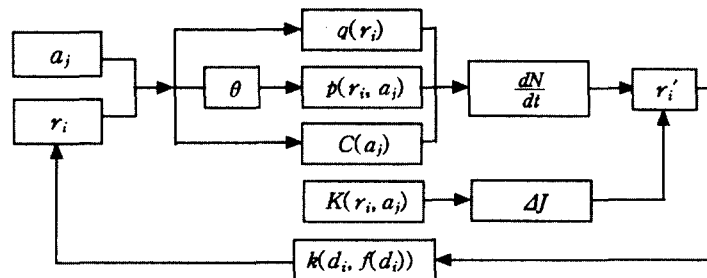


그림 3. 필터의 투수능 저하에 대한 물리적 모델의 구성 흐름

표 1. 실험에 사용된 시료의 x-ray 회절분석결과 (고, 1997)

(단위 %)

시료	1차 광물			2차 광물				
	Quartz	Feldspar	Mica	Kaolinite	Illite	Vermiculite	Chlorite	Montmorillonite
포이동	17.7	15.0	9.8	23.5	20.7	8.4	4.5	-
신내동	33.3	50.0	9.0	6.0	-	2.0	-	-

표 2. 시료의 물리적 특성(고, 1997; 김, 1998)

시료	간극율	최대 건조 단위중량 (kN/ m ³)	#200체 통과량 (%)	소성도(%)			비중	통일 분류
				액성한계	소성한계	소성지수		
포이	0.409	16.68	47.36	34.0	19.8	14.2	2.74	SC
신내	0.358	18.64	10.05	NP			2.65	SW-SM

수 있으며, 폐색된 간극을 통해 발생하는 압력차이로부터 일정시간 후 새로운 튜브의 직경을 식(8)을 사용하여 구할 수 있다.

$$\frac{1}{(r_i')^4} = \frac{1}{(r_0)^4} \left\{ 1 + 3 \sum_{j=0}^M N(r_i, a_j) \frac{a_j}{\alpha^*} \left[1 - \left(1 - \frac{a_j}{r_i} \right)^2 \right]^2 K(r_i, a_j) \right\} \quad (8)$$

여기서 M 은 이탈된 입자의 수, α^* 는 입자가 지나가는 간극튜브의 유효길이, 그리고 첨자 j 및 i 는 폐색이 발생하기 전·후의 간극반경이다. 이상의 식을 요약하면 그림 3과 같은 흐름도에 따른 전산 프로그래밍이 가능하며 필터 및 투수조건에 따른 투수능 저하곡선을 이 프로그램을 활용하여 구할 수 있다.

퇴적이 발생됨으로서 줄어드는 간극율의 감소는 새로운 간극의 체적으로부터 구할 수 있다. Arya와 Dierolf(1989)에 의해 제안된 바 있는 식(9)를 사용하여 필터의 간극분포를 구할 수 있다. 여기서 e 는 필터의 간극비, R_i 는 필터 층 토립자의 반경이다.

$$r_i = \left(\frac{4eR_i^3}{3\alpha^*} \right)^{1/2} \quad (9)$$

유효길이 α^* 는 Arya와 Dierolf(1989)에 의해 여러 가지 시료에 대해서 0.3에서 1.5cm의 범위의 값으로 제안된 바 있다. 본 연구에서는 조립토에 대해 제안된 0.911cm를 사용하였으며, 실험결과와 수치해석의 회귀분석을 통해 재조정되었다. θ_0 는 Rege와 Fogler(1988)가 증류수에 대해 적용한 값인 3.0을 사용하였다. 입자폐색이 발생되지 않는 한계속도인 v_{cr} 은 Gruesbeck과 Collins(1982)가 제안한 0.1 cm/sec를 사용하였는데, 이 값은 조립토 필터에 적절한 것으로 판단된다.

3. 시료의 물리적 특성과 필터의 설계

본 실험에 사용한 시료는 국내의 대표적인 풍화잔적토 지반으로 알려진 서울 신내동과 포이동 지역의 흙이다. 본 실험에 사용된 풍화잔적토는 고(1997)의 실험에서 사용된 것과 같으며, 이 시료의 x-ray 회절분석결과는 표 1과 같다.

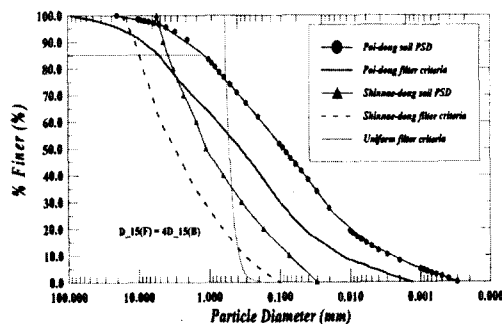


그림 4. 각 시료의 입도분포와 필터설계

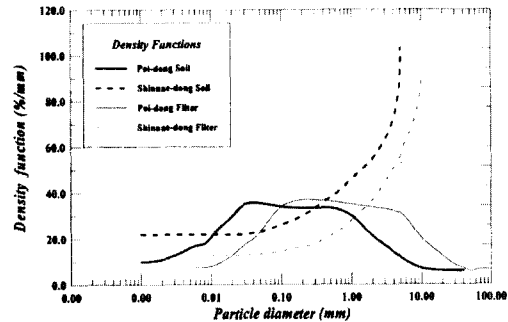


그림 5. 각 시료의 확률밀도함수 그래프

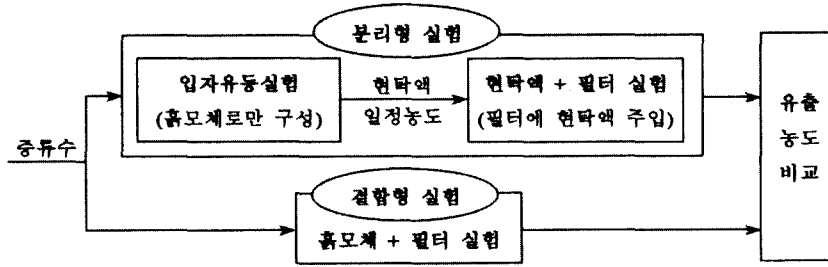


그림 6. 실험의 종류에 따른 입자의 이동 흐름도

실험조건으로 주어진 건조단위중량과 함수비로부터 정적다짐을 통해 일정한 크기를 갖는 공시체를 성형하였다. 시료의 입도분포 형태 및 필터 설계 기준에 따라 설계한 필터는 그림 4와 같으며, 시료의 기본적인 역학적 특성들은 표 2에 나타난 바와 같다.

기존의 입도분포곡선은 균등계수 및 곡률계수 등과 무관하게 서로 다른 성상의 흙시료를 구별하기 어려운 단점이 있어 실험에 사용한 시료들의 물리적 특성을 확연히 구별하기 위하여 Sivakugan(1990)이 제안한 확률밀도함수를 적용하였다. 입도분포곡선의 확률밀도 함수, $f_p(p)$ 는 다음과 같이 정의되며, 그림 5는 각 시료에 대한 확률밀도 함수 그래프를 보여준다.

$$f_p(p) = \frac{dp}{d(\log D)} \quad (10)$$

여기서 p 는 통과백분율이고 D 는 입자의 직경(단위는 mm)이다.

4. 실험 방법

그림 6은 압력 및 유량제어에 따른 결합형과 분리형 실험의 흐름도이며, 그림 7과 8은 결합형 실험 및 분리형 실험에 대한 시험장비 구성 개략도이다.

결합형 실험의 경우 직경 10 cm, 길이 6 cm의 공시체를

제작하고 같은 치수의 필터층을 결합하여 투수 환경을 구성하였으며, 유출농도를 측정하는 것과 동시에 유량제어의 경우 간극수압을, 압력제어의 경우 유출유량을 측정하였다. 분리형 실험의 경우도 결합형과 마찬가지로 유출농도 및 간극수압 혹은 유출유량을 측정하며, 압력제어의 경우 결합형 실험의 압력제어 실험 결과를 참고하여 투수 환경을 구성하였다. 입자유동 실험에서 흙모체로부터 유동되어 나오는 입자의 농도를 측정하고 동일한 일정농도의 현탁액을 필터에 주입했을 때 그 농도의 차로부터 필터에 퇴적되는 입자의 양을 구할 수 있다. 입자유동 실험은 『Melvern-particle size analyzer』를 사용하였으며, 유출된 입자의 농도는 탁도계를 사용하여 측정되었다.

5. 풍화 잔적토의 입자유동 특성

결합형 실험에서 필터에 퇴적되는 미세입자의 양은 실험의 조건상 구할 수 없다. 이 값은 결합형 실험에서 필터를 통과해서 유출된 미세입자의 농도와 흙모체만으로 구성된 공시체에서 유출된 농도와 차이로부터 구할 수 있다. 이를 위하여 풍화 잔적토의 입자유동 실험을 실시하였으며, 그림 9, 10, 11, 12는 유량제어 및 압력제어 조건에 따라 흙모체로부터 유출된 입자의 가적농도이다. 신내동 시료의 경우 유량이 증가함에 따라 가적 입자 유출량은 수렴한계값이 증가하는 경향을 보이며, 초기의 유출량은 유사

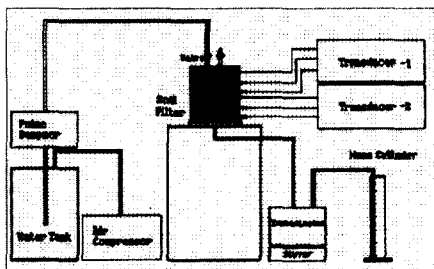


그림 7. 결합형 실험의 개략도

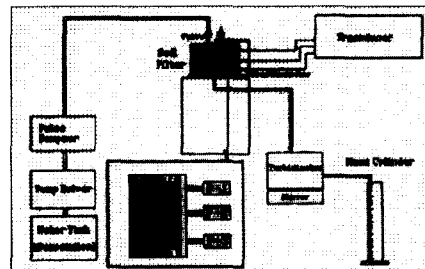


그림 8. 분리형 실험의 개략도

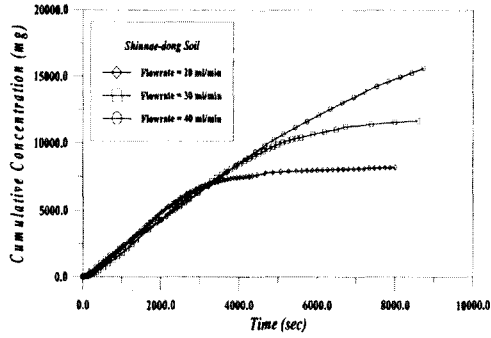


그림 9. 신내동시료의 가적입자유출량(유량제어)

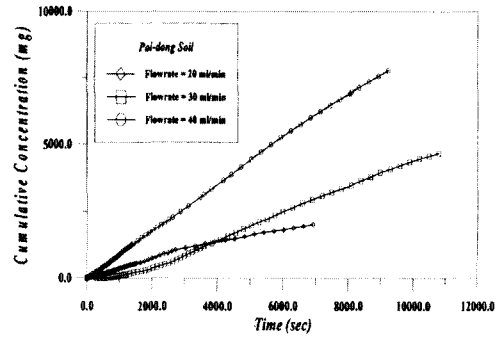


그림 10. 포이동시료의 가적입자유출량(유량제어)

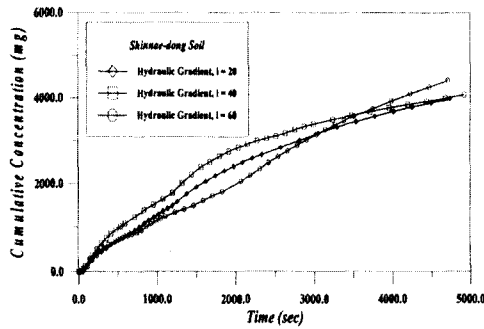


그림 11. 신내동시료의 가적입자유출량(압력제어)

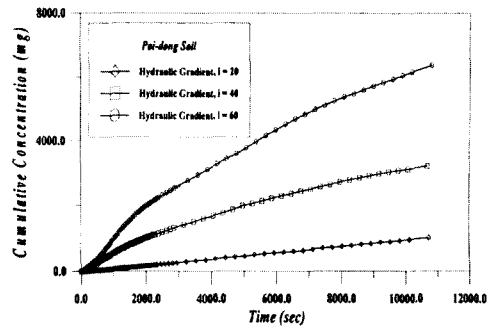


그림 12. 포이동시료의 가적입자유출량(압력제어)

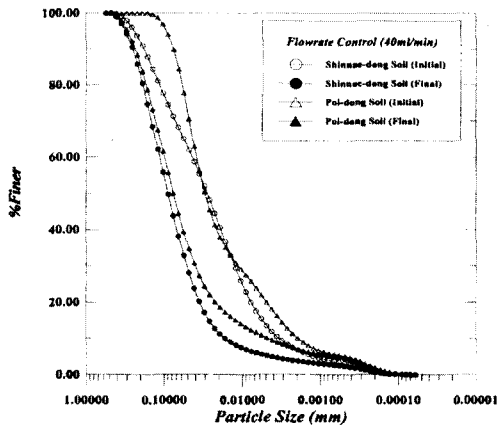


그림 13. 시료별 유출입자의 입도분포(유량제어)

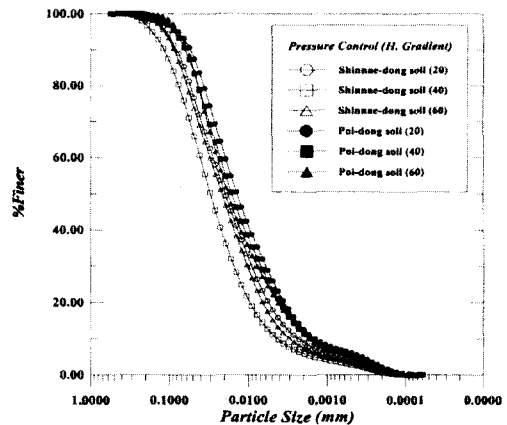


그림 14. 시료별 유출입자의 입도분포(압력제어)

한 결과를 보임을 알 수 있다. 포이동 시료의 경우, 유량이 30 ml/min ~ 40 ml/min 사이에서 한계유속이 작용하여 급격한 입자유출이 발생됨을 알 수 있다.

투수능 저하모델의 입력자료로 활용 가능한 유출된 입자의 입도분포는 그림 13, 14에 나타난 바와 같다. 신내동과 포이동 시료의 미세입자의 분포 특성은 유사한 양상을 띠지만 시간이 경과함에 따라 초기에 나타나지 않던 조립질의 입자가 유출되었다. 압력제어의 경우도 유사한 경향을 보이고 있으며, 시간에 따라 상대적으로 큰 미세입자가 유출되는 것이 확인되었다. 즉, 유출되는 미세입자의 크기

는 $0.001 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ (Buddemeier와 Hunt, 1987) 혹은 $80 \mu\text{m}$ (Chapuis, 1986) 이하인 것으로 알려진 바와 다르게 $100 \sim 850 \mu\text{m}$ 이상의 입자도 상당수 유출되는 것을 알 수 있다. 이 값은 필터 폐색현상을 예측하기 위한 투수능 저하모델의 입력값으로 사용되었다.

6. 실험 결과 및 고찰

실험을 통해 계측된 값들은 시간에 따른 유출농도, 간극수압 그리고 유출유량이다. 그러나 본 실험은 다양한 흡-

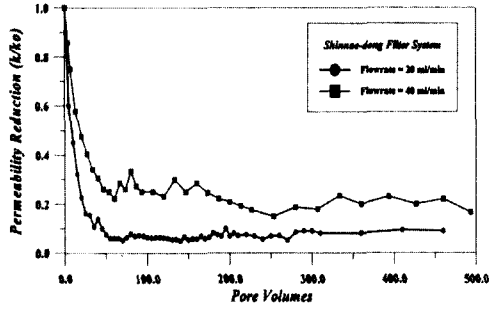


그림 15. 유량별 투수능 저하곡선(신내동필터)

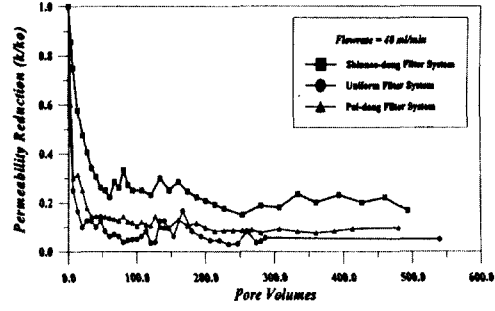


그림 16. 필터별 투수능 저하곡선(유량제어)

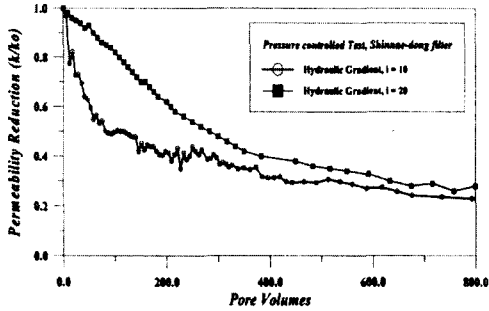


그림 17. 동수경사별 투수능 저하곡선

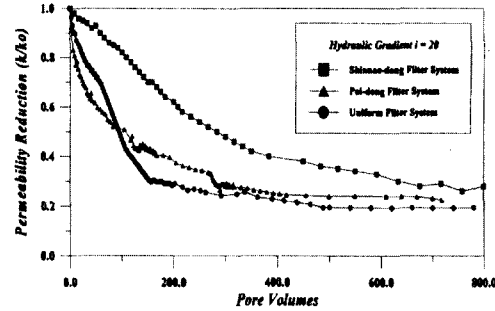


그림 18. 필터별 투수능 저하곡선

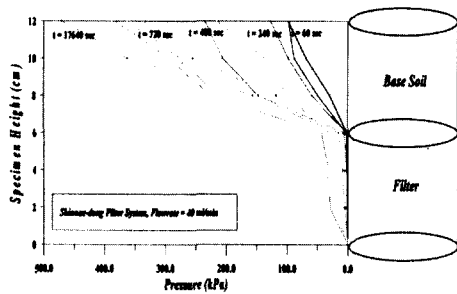


그림 19. 필터에 작용하는 간극수압(유량제어)

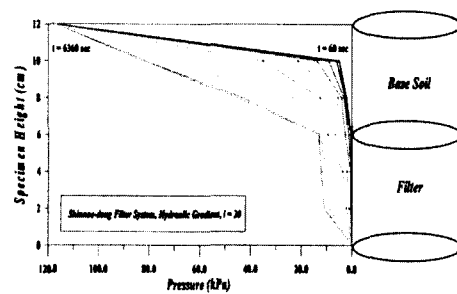


그림 20. 필터에 작용하는 간극수압(압력제어)

필터 시스템과 투수조건으로 구성되어 있으므로 결과를 상호 비교하기 위하여 한 유체가 어떤 매체를 1회 통과하는 데에 걸리는 시간인 pore volume을 기준으로 결과를 정리하였다.

6.1 결합형 실험(Coupled Test) 결과

유량제어 조건에서 결합형 실험 결과인 투수능 저하곡선이 그림 15와 16에 나타나 있다. 유량별 투수능 저하곡선에서 유량이 감소할수록 투수능 저하율이 증가하며 보다 적은 pore volume에서 일정한 값에 수렴하는 것을 확인하였다. 필터 시스템에 따른 투수능 변화는 필터재료의 종류에 관계없이 약 100 pore volumes에서 초기 투수계수의 10~20% 수준으로 감소하며 일정한 값에 수렴하는 경향

을 나타냈다. 그림으로부터 신내동 필터 시스템에 비해 포이동 필터 시스템의 투수능 저하율이 큰 값을 보임을 알 수 있다.

압력제어는 유량제어와 비교하여 다소 적은 투수능 저하율을 보이고 있으며 600 pore volumes 이상에서 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타냈다. 그림 17 및 그림 18은 동수경사 및 필터 시스템의 변화에 따른 필터의 투수능 저하 결과이며, 동수경사가 증가할수록 필터 폐색은 적게 발생하고 신내동 필터 시스템에 비해 포이동 필터 시스템의 투수능 저하가 현저하게 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

유량제어와 압력제어 실험에서 공시체의 위치별 간극수압 변화를 그림 19, 20에 도시하였는데, 이 그림으로부터 시간이 경과함에 따라 흙모체와 필터의 접촉부에서 간극수압이 서서히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 필터 시

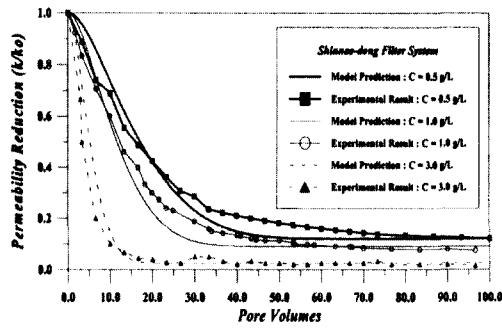


그림 21. 주입현탁액 농도에 따른 투수능 저하곡선(유량제어)

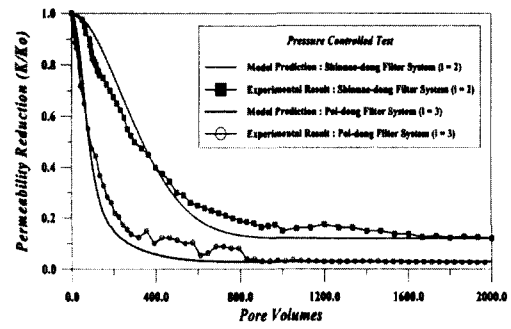


그림 22. 필터 시스템에 따른 투수능 저하곡선(압력제어)

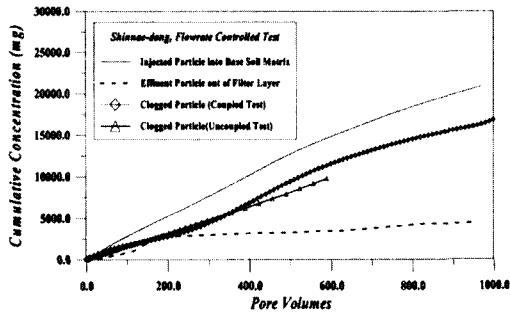


그림 23. 신내동필터의 가적 퇴적곡선(유량제어)

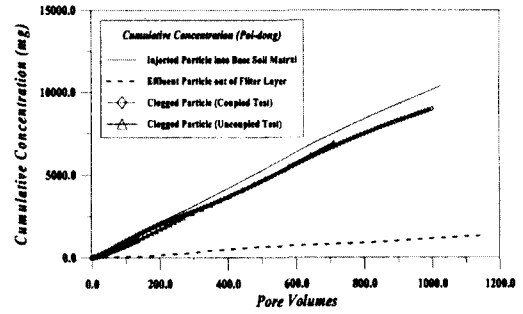


그림 24. 포이동필터의 가적 퇴적곡선(유량제어)

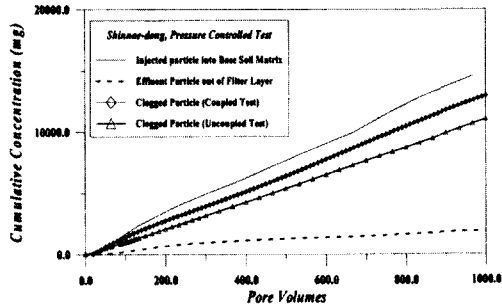


그림 25. 신내동필터의 가적 퇴적곡선(압력제어)

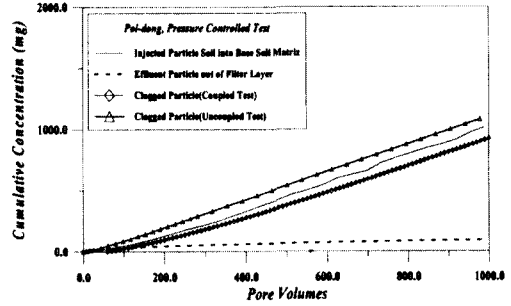


그림 26. 포이동필터의 가적 퇴적곡선(압력제어)

시스템내에서 발생하는 간극수압의 크기가 크지 않아도 이로 인하여 흙모체에는 간극수압이 크게 진행되는 것을 확인하였다.

6.2 분리형 실험(Uncoupled Test) 결과 및 결합형 실험과의 비교

만약 필터가 충분히 효율적이라면 필터 간극에는 어떠한

한 수압도 작용하지 않을 것이다. 그러나 결합형 실험에서 확인하였듯이 흙모체로부터 이탈된 입자는 필터 간극에 퇴적되어 필터내 간극수압은 증가한다. 그러므로 분리형 실험에 있어서 유량제어 실험은 동일한 투수조건으로 구성되는 것에 반하여 압력제어 실험은 필터 폐쇄에 의해 유발되는 수압 만큼을 필터에 작용시켜 입자의 퇴적 현상 및 투수능의 저하 현상을 관찰하는 것이 적절한 것으로 보인다. 결합형 실험 결과에 따라 신내동 및 포이동 필터시스템

표 3. 투수능 저하 모델에 사용된 변수들

필터의 종류	α^* (cm)	θ_0	μ (g · sec/cm ²)	n	v_{cr} (cm/sec)
신내동	0.512	3	0.00001021	0.3183	0.1
포이동	0.286	3	0.00001021	0.3714	0.1
균등 필터	0.342	3	0.00001021	0.4456	0.1

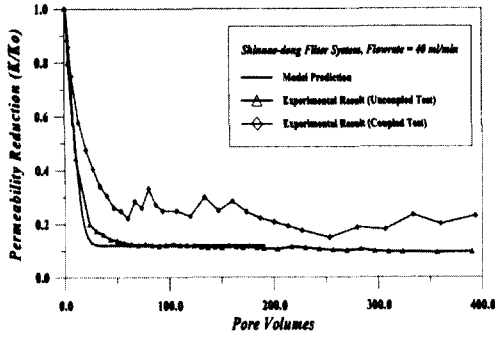


그림 27. 신내동필터의 투수능 저하곡선(유량제어)

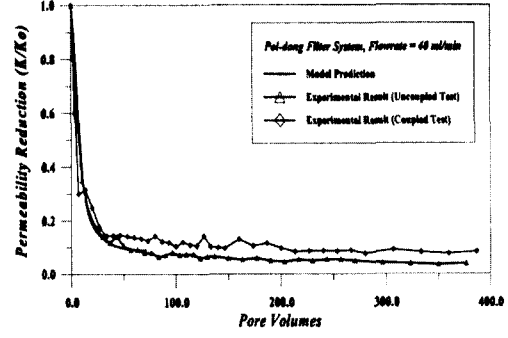


그림 28. 포이동 필터의 투수능 저하곡선(유량제어)

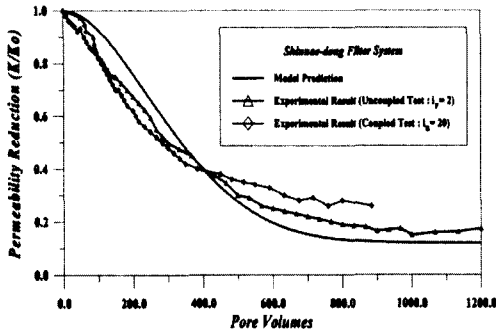


그림 29. 신내동필터의 투수능 저하곡선(압력제어)

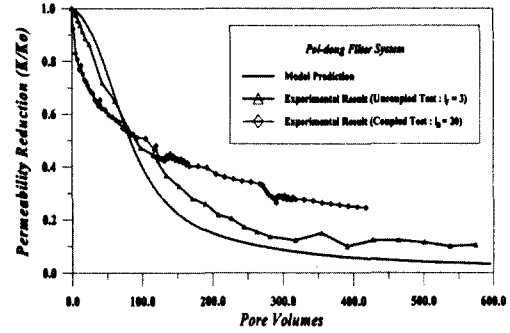


그림 30. 포이동 필터의 투수능 저하곡선(압력제어)

의 동수경사, i 를 각각 약 2와 3으로 조정하였다.

투수 조건하에서의 실험 결과와 이론적 모델에 의한 투수능 저하를 그림 21, 22에 도시하였으며, 이론적 모델에 의한 투수능 예측에서 적용한 변수들은 표 3에 정리하였다.

이론적 모델과 비교할 때, 초기 저하 구간에서의 불일치에도 불구하고 수렴 구간에서는 근소한 차이를 나타내었다. 유입되는 현탁액의 농도가 증가할수록, 필터에 작용하는 압력이 증가할수록 투수능의 저하 현상이 보다 급격히 발생함을 알 수 있다.

분리형 실험을 통해 결합형 실험을 모사하기 위하여 두 실험간의 결과를 비교 검토하였다. 우선, 분리형 실험에 있어서 유입되는 입자와 퇴적되는 입자의 총량을 구하였다. 결합형 실험의 경우, 흙모체만을 모사한 입자유동실험을 통해 구한 유출농도를 필터로 유입되는 농도로 가정하고, 필터를 통과해서 유출되는 입자의 양을 제어하여 구하였다. 분리형 실험의 경우, 유입농도와 유출농도의 차이로부터 필터 간극에 퇴적되는 입자의 총량을 구하였으며 그림 23, 24는 유량제어 조건에서 그림 25, 26은 압력제어 조건에서 각각 신내동과 포이동 필터에 퇴적되는 미세 입자의 총량을 구한 그래프이다. 분리형과 결합형 실험의 퇴적 총량 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

그림 27, 28, 29, 30은 분리형 실험 결과와 결합형 실험 결과를 비교한 그래프이다. 전체적으로 분리형 실험의 투수능 저하가 결합형 실험에 비해 크게 발생함을 알 수 있다. 그러나 저하 양상이 동일하고 0.1 k_0 까지 도달되는 데 필요한 시간이 유량제어의 경우 50~100 pore volumes, 압력제어의 경우 300~600 pore volumes.으로써 유사한 값을 보임을 알 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 흙필터의 폐색으로 인한 투수능의 저하 현상을 실험 및 이론적 모델을 통해 고찰하였다. 흙모체로부터 이탈되는 입자는 80 μm 이하의 미세입자 뿐만 아니라 100~850 μm 의 조립토도 포함되어 있었다. 일반적으로 투수능은 1/10 수준으로 감소되었으며, 압력제어보다 유량제어에서 투수능 저하현상을 잘 관찰할 수 있었다. 또한, 유량이 증가할수록 투수능 저하율은 감소하는 것으로 나타났는데 이는 한계유속 이상의 간극수 흐름상태에서는 낮은 유량조건에서 필터 폐색이 더욱 뚜렷히 진행됨을 의미한다.

흙필터에 퇴적된 입자의 총량을 pore volumes에 따라

누적인 결과 결합형 실험과 분리형 실험이 거의 일치하였는데 이는 분리형 실험으로 결합형 실험 결과를 예측할 수 있게 하는 것으로 보인다. 분리형 실험결과와 이론적 모델에 의한 예측이 잘 일치하는 것으로 나타나 제안된 모델을 통해 필터의 투수능 저하현상을 모사하는 것이 매우 유용하리라 판단되었다.

투수능 저하현상은 결합형 실험에서 적게 발생하였는데, 이것은 모델예측이 보다 안전측 설계이며 분리형 실험을 통한 접근이 필터 폐색 현상을 관찰하는 데에 적절한 방법이라는 것을 의미한다. 그러므로 분리형 실험은 실제 필터의 폐색현상을 예측할 수 있게 해준다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF, No.985-1200-001-2)과 미국과학재단(NSF, No. CMS-9713708 and INT-9734804)의 국제 공동 연구 지원에 의하여 이루어진 것으로 양 재단에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김형섭. (1998), "풍화잔적토의 입자유동으로 인한 필터의 막힘 현상에 대한 실험적 연구," 고려대학교 대학원 석사학위 논문.

2. 고재신. (1997), "용액의 성질에 따른 풍화잔적토의 유동특성에 대한 실험적 연구," 고려대학교 대학원 석사학위 논문.
 3. Arya, L.M. and Dierolf, T.S. (1989), "Predicting Soil Moisture Characteristics from Particle-size Distribution: An Improved Method to Calculate Pore Radii from Particle Radii," Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Riverside, California, October 11-13, 1989, pp.115-124.
 4. Buddemeier, R.W. and Hunt, J.R. (1988), "Transport of Colloidal Contaminants in Groundwater: Radionuclide Migration at the Nevada Test Site," Appl. Geochem., 3, pp.535-548.
 5. Chapuis, R.P. (1986), "Quantitative Measurement of the Scour Resistance of Natural Solid Clays," Canadian Geotech. J. Vol. 23., pp.132-141.
 6. Garcia-Bengochea, I., Lovell, C.W., and Altschaeffl, A.G.(1979), "Pore Distribution and Permeability of Silty Clays," ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 105(GT7): pp.839-856.
 7. Gruesbeck, C. and Collins, R. E. (1982), "Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media," Society of Petroleum Engineers Journal, December 1982, pp.847-856.
 8. Happel, J. and Brenner, H. (1973), Low Reynolds Number Hydrodynamics Noordhoff, Leyden, The Netherlands, p.320.
 9. Rege. 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.
 10. Sivakugan, N. (1990), "Inadequacy in the Classification of Coarse-grained Soils," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 13, No. 2, June 1990, pp.134-137.

(접수일자 2000. 8. 8)