

## 흙 필터재의 폐색으로 인한 투수성 저하 모델 개발

### Modelling of Permeability Reduction of Soil Filters due to Clogging

이인모<sup>1)</sup>, In-Mo Lee, 박영진<sup>2)</sup>, Young-Jin Park, Reddi, Lakshmi.N<sup>3)</sup>.

<sup>1)</sup> 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea University

<sup>2)</sup> 대본 엔지니어링, Engineer, Daebon Engineering Co.

<sup>3)</sup> Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kansas State University, U.S.A

**SYNOPSIS** : Soil filters are commonly used to protect the soil structures from eroding and piping. When filters are clogged by fine particles which are progressively accumulated, these may lead to buildup of excessive pore pressures also leading to instability in 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 their drainage capacity. In this thesis, 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 is 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), respectively. The results of coupled and uncoupled test are compared with among others. In the theoretical phase of the investigation, 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 theoretical investigations were in good agreement. It is observed that the amount of deposited particles of the coupled test matches fairly well with that of the uncoupled test, which indicates that the prediction of permeability reduction is possible by performing the uncoupled test instead of the coupled test, and/or by utilizing the theoretical model.

**Key words** : 흙필터, 필터 폐색, 투수능, Kozeny hydraulic radius model, 풍화잔적토

## 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 논문에서는 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 시험(Coupled Test)을 통해 필터의 투수능 저하 현상을 관찰하였고, 같은 투수 조건하에서 미세입자의 농도를 조절할 수 있는 분리형 시험(Uncoupled Test)을 수행하여 두 시험방법 간의 상관성을 비교 검토하였다.

## 2. 흙필터의 투수능 저하 모델

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 입자 사이에 표면력이 작용하여 유동입자가 필터입자에 부착하게 되고, 그로 인하여 필터입자 사이의 간극을 매우게 되는데 이 과정이 입자의 퇴적으로 인한 필터의 폐색현상(filter clogging)이다. 폐색 현상은 필터의 투수특성을 변화시키고 간극수압을 유발하여 필터의 투수능 저하로 표현되어 진다. 그림 1과 같이 필터의 간극을 통한 유체흐름을 다양한 크기를 갖는 튜브관을 통한 흐름으로 가정하고 필터간극과 퇴적 입자간의 관계를 통해 필터의 투수능 저하현상을 예측할 수 있게 하는 이론적인 모델을 구성할 수 있다.

흙필터의 투수능을 구하기 위해 'Kozeny hydraulic radius model'을 사용하였다. 이 모델은 Hagen-Poiseuille의 방정식으로부터 유도되었으며 필터의 간극을 통한 유체의 흐름에 적용되어 왔다(Garcia-Bengochea et al., 1979). 이 모델은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기에서  $k$ 는 투수계수,  $C_s$ 는 원통형 간극의 형상계수(=1/32)이며,  $n$ 은 간극율을,  $\gamma$ 는 물의 단위중량을 의미한다. 그리고  $\mu$ 는 물의 점성계수를,  $d_i$ 는  $i^{\text{th}}$ 간극의 직경,  $f(d_i)$ 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.

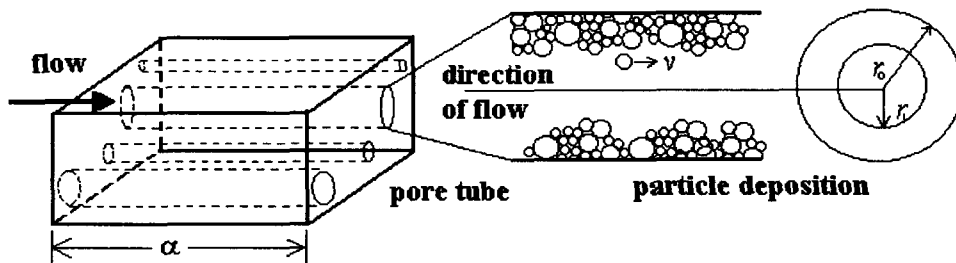


그림 1. 다양한 직경을 갖는 평행한 튜브

유효길이,  $a^*$ 는 입자가 지나가는 간극튜브의 길이로서, Arya와 Dierolf (1989)에 의해 여러 가지 시료에 대해서 0.3에서 1.5cm의 범위의 값으로 제안된 바 있다. 간극의 직경이 시간에 따라 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.

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

여기에서,  $C(a_j)$ 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.

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

여기에서,  $J$ 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 제안된 바 있다.

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

여기에서  $\theta$ 는 튜브에서 발생하는 간섭효과로서 중력, 수리동역학적 힘, 전기적 이중층 및 Van der Waals 힘 등에 의해 영향을 받는 계수이며, 식(5)와 같이 표현된다.

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

여기에서  $\theta_0$ 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 퇴적의 발생형태로 표현하기보다는 퇴적으로 인해 발생하는 현상으로부터 유추해 낼 수 있다. 원통형 튜브에서 개별 입자에 의해 유발되는 압력의 변화는 Happel과 Brenner(1973)에 의해 식(6)과 (7)로 정리된 바 있다.

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

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

식 (6)과 (7)은 원통형 튜브의 층류흐름에 대해 적용할 수 있으며, 폐색된 간극을 통해 발생하는 압력차이로부터 일정시간 후 새로운 튜브의 직경을 식(8)을 사용하여 구할 수 있다.

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

여기에서  $M$ 은 이탈된 입자의 수를 의미하며 첨자  $0$ 는 폐색이 발생되기 전 간극반경을,  $i'$ 은 입자폐색에 의한 간극반경을 의미한다. 퇴적이 발생됨으로서 줄어드는 간극율의 감소는 새로운 간극의 체적으로부터 구할 수 있다. Arya 와 Dierolf(1989)에 의해 제안된 바 있는 식(9)를 사용하여 필터의 간극분포를 구할 수 있다. 여기에서  $e$ 는 필터의 간극비이다.

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

유효길이  $a^*$ 는 조립토에 대해 제안된 0.911cm를 사용하였으며, 실험결과와 수치해석의 회귀분석을 통해 재조정되었다.  $\theta_0$ 는 Rege와 Fogler (1988)가 증류수에 대해 적용한 값인 3.0을 사용하였다. 입자폐색이 발생되지 않는 한 계속도인  $v_{cr}$ 은 Gruesbeck 과 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. 실험조건으로 주어진 건조단위중량과 함수비로부터 정적다짐을 통해 일정한 크기를 갖는 공시체를 성형하였다. 시료의 입도분포 형태 및 필터 설계 기준에 따라 설계한 필터는 그림 2와 같으며, 시료의 역학적 특성들은 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1. 시료의 물리적 특성(고, 1997;김, 1998)

시료	간극율	최대 건조 단위 중량 ( $kN/m^3$ )	#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

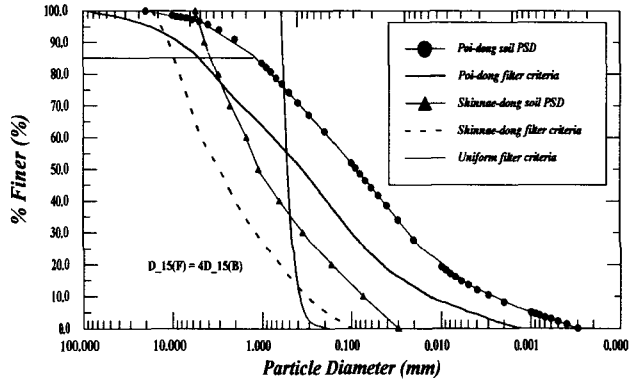


그림 2. 포이동과 신내동시료의 입도분포와 필터설계

### 4. 실험 방법

결합형 시험의 경우 직경 10 cm, 길이 6 cm의 공시체를 제작하고 같은 치수의 필터층을 결합하여 그림 3과 같이 투수 환경을 구성하며, 유출농도를 측정하는 것과 동시에 유량제어의 경우 간극수압을, 압력제어의 경우 유출유량을 측정하였다. 분리형 시험의 경우도 결합형과 마찬가지로 유출농도 및 간극수압 혹은 유출유량을 측정하며, 압력제어의 경우 결합형 시험의 압력제어 시험 결과를 참고하여 투수 환경을 구성하였다. 그림 4는 유량제어에 따른 분리형 시험의 개략도이다.

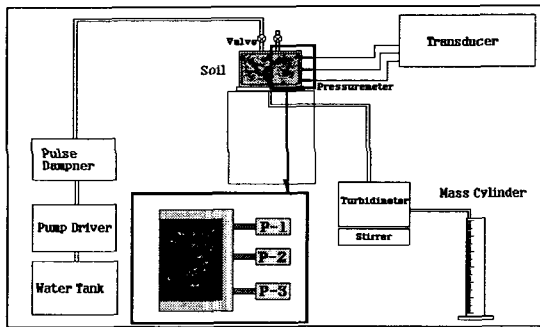


그림 3. 결합형 시험의 개략도(압력제어)

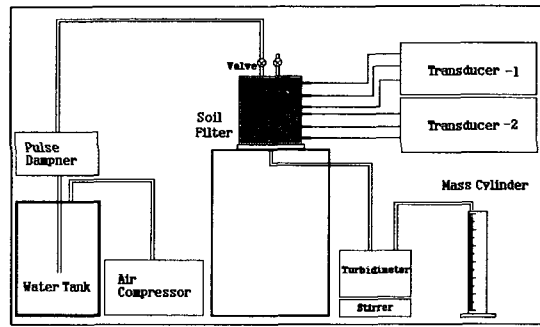


그림 4. 분리형 시험의 개략도(유량제어)

### 5. 풍화 잔적토의 입자유동 특성

결합형 시험에서 필터에 퇴적되는 미세입자의 양은 실험의 조건상 구할 수 없다. 이 값은 결합형 시험에서 필터를 통과해서 유출된 미세입자의 농도와 흙모체만으로 구성된 공시체에서 유출된 농도와의 차이로부터 구할 수 있다. 이를 위하여 풍화 잔적토의 입자유동 실험을 실시하였으며 흙모체로부터 유출된 입자의 가적농도와 유출입자의 입도분포가 그림 5, 6에 실려 있다. 풍화 잔적토의 유출입자 크기를 결정하기 위해 다음과 같이 유출용액에 포함된 미세입자의 입도를 분석하였다. 유동되는 미세입자의 크기는  $0.001 \mu m \sim 1.0 \mu m$  (Buddemeier and Hunt, 1987) 혹은  $80 \mu m$

(Chapuis, 1986) 이하인 것으로 알려져 있다. 그러나 입도분포 분석 결과에서처럼 100~850  $\mu\text{m}$  이상의 입자도 상당 수 유출되는 것을 알 수 있다.

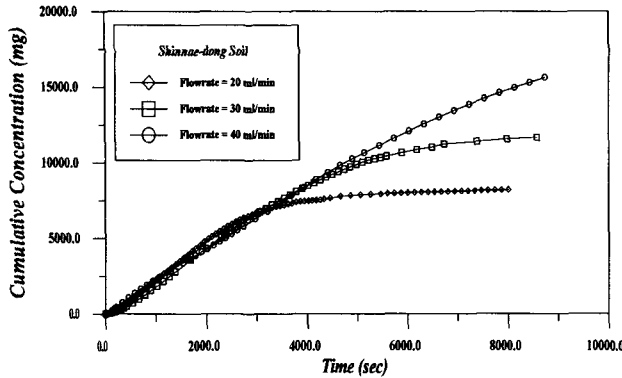


그림 5. 신내동 시료의 유량별 가적입자유출 특성

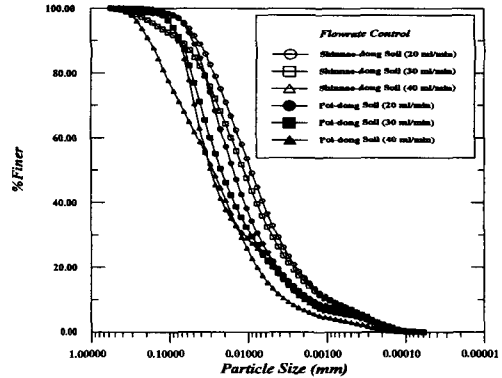


그림 6. 유량제어시 유출입자의 입도분포

## 6. 실험 결과 및 고찰

실험을 통해 계측된 값들은 시간에 따른 유출농도와, 간극수압 그리고 유출유량이다. 그러나 본 실험은 다양한 흡-필터 시스템과 투수조건으로 구성되어 있으므로 결과를 상호 비교하기 위하여 한 유체가 어떤 매체를 1회 통과하는데 걸리는 시간인 pore volume을 기준으로 결과를 정리하였다.

### 6.1 결합형 시험(Coupled Test) 결과

일정한 유량조건에서 결합형 시험의 투수능 저하곡선은 그림 7과 8에 나타나 있다. 그림 7은 유량별 투수능 저하 곡선으로서 유량이 감소할수록 투수능 저하율이 증가하며 보다 적은 pore volume에서 일정한 값에 수렴한다. 필터 시스템에 따른 투수능 저하 양상은 그림 8에서 확인할 수 있다. 시간이 경과함에 따라 필터의 투수능은 100 pore volumes에서 초기 투수계수의 10~20% 수준으로 감소하며 일정한 값에 수렴하는 양상을 보여주고 있다. 그림으로부터 신내동 필터 시스템에 비해 포이동 필터 시스템의 투수능 저하율이 큰 값을 보임을 알 수 있다.

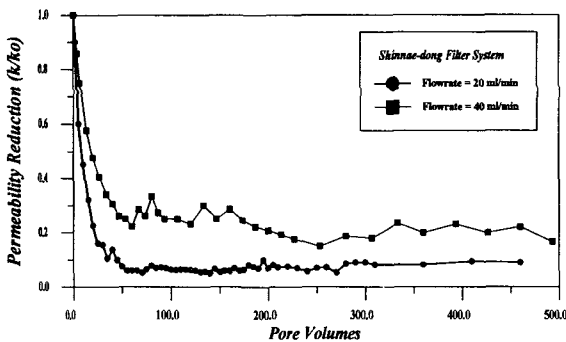


그림 7. 유량별 투수능 저하곡선(신내동필터)

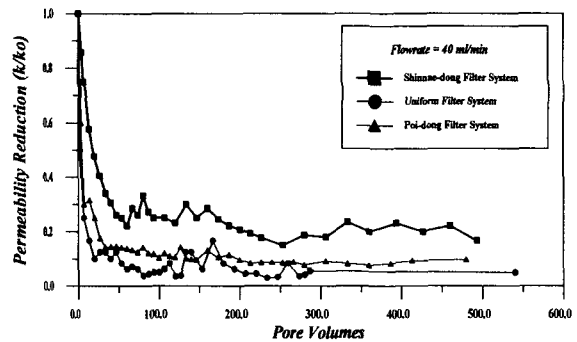


그림 8. 필터별 투수능 저하 곡선(유량제어)

압력제어는 유량제어와 비교하여 다소 적은 투수능 저하율을 보이고 있으며 600 pore volumes 이상에서 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 그림 9는 서로 다른 동수경사 하에서 필터의 투수능 저하 곡선을 의미하며, 그림 10은 각기 다른 필터 시스템에서 투수능 저하곡선을 의미한다. 동수경사가 증가할수록 필터 폐색은 적게 발생하며, 신내동 필터시스템에 비해 포이동 필터 시스템의 투수능 저하가 현저하게 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

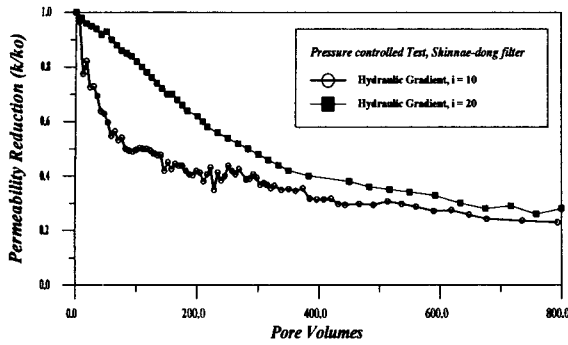


그림 9 동수경사별 투수능 저하곡선(신내동필터)

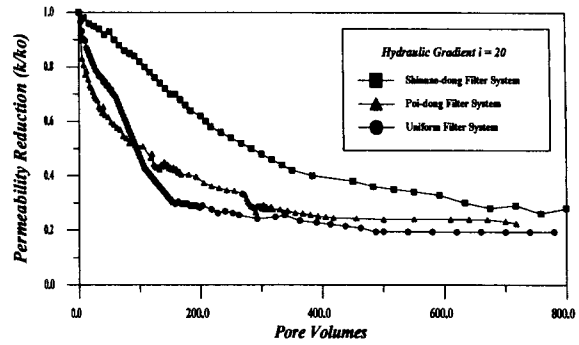


그림 10. 필터별 투수능 저하곡선(압력제어)

## 6.2 분리형 시험(Uncoupled Test) 결과 및 결합형 시험과의 비교

만약 필터가 충분히 효율적이라면 필터 간극에는 어떠한 수압도 작용하지 않을 것이다. 그러나 결합형 시험에서 확인하였듯이 흙모체로부터 이탈된 입자는 필터 간극에 퇴적되어 필터내 간극수압의 증가를 유발시킨다. 그러므로 분리형 시험에 있어서 유량제어 시험은 동일한 투수조건으로 구성되는 것에 반하여 압력제어 시험은 필터 폐색에 의해 유발되는 수압 만큼을 필터에 작용시켜 입자의 퇴적 현상 및 투수능의 저하 현상을 관찰하는 것이 적절한 것으로 보인다. 결합형 시험 결과에 따라 신내동 필터시스템의 경우 동수경사,  $i$ 를 약 2로, 포이동 필터 시스템의 경우 동수경사,  $i$ 는 약 3으로 조정하였다. 서로 다른 투수 조건하에서의 실험 결과와 이론적 모델에 의한 예측 결과가 그림 11, 12에 실려 있다. 이론적 모델과 비교할 때, 초기 저하 현상에서의 불일치에도 불구하고 수렴이 발생하는 구간에서 근소한 차이를 보임을 알 수 있다. 유입되는 현탁액의 농도가 증가할수록, 필터에 작용하는 압력이 증가할수록 투수능의 저하 현상이 보다 급격히 발생함을 알 수 있다.

분리형 시험을 통해 결합형 시험을 모사하기 위하여 두 시험간의 결과를 비교 검토하였다. 우선, 분리형 시험에 있어서 유입되는 입자와 퇴적되는 입자의 총량을 구하였다. 결합형 시험의 경우, 흙모체만을 모사한 입자유동시험을 통해 구한 유출농도를 필터로 유입되는 농도로 가정하고, 필터를 통과해서 유출되는 입자의 양을 제하여 구하였다. 분리형 시험의 경우, 유입농도와 유출농도의 차이로부터 필터 간극에 퇴적되는 입자의 총량을 구하였으며 그림 13, 14는 유량제어 조건에서 그림 15, 16은 압력제어 조건에서 각각 신내동과 포이동 필터에 퇴적되는 미세 입자의 총량을 구한 그래프이다. 분리형과 결합형 시험의 퇴적 총량 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

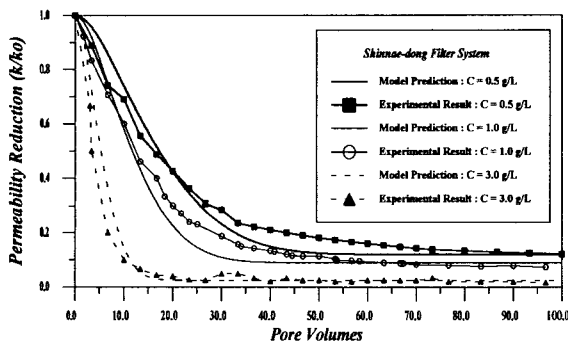


그림 11. 주입 현탁액별 투수능 저하곡선과 모델 예측(유량제어 및 신내동 필터시스템)

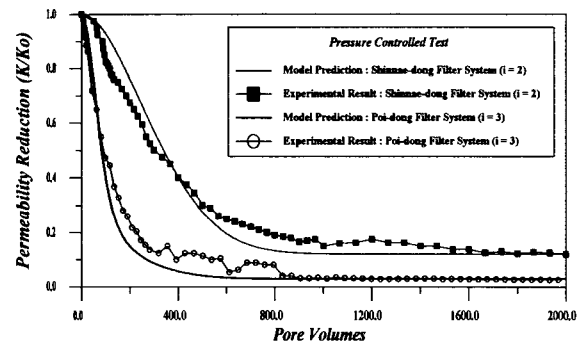


그림 12. 필터별 투수능 저하곡선과 모델예측 (압력제어)

이론적 모델에 의한 예측에서 유효길이  $\alpha^*$ 는 신내동 필터의 경우 0.512, 포이동 필터의 경우 0.286, 균등 필터의 경우 0.342cm의 값을 사용하였다.

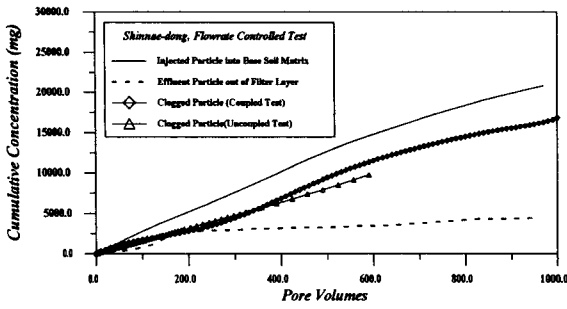


그림 13. 신내동필터의 가적 퇴적곡선(유량제어)

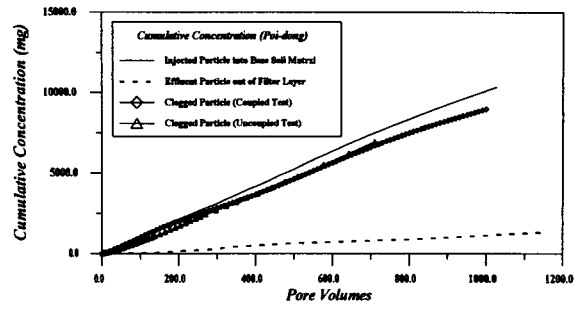


그림 14. 포이동필터의 가적 퇴적곡선(유량제어)

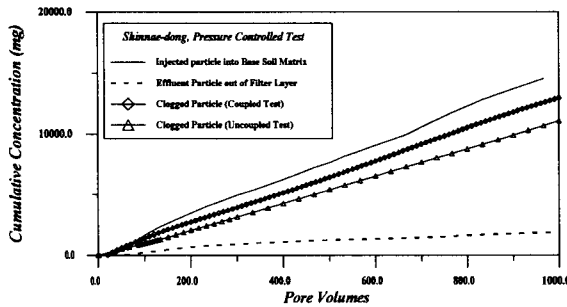


그림 15. 신내동필터의 가적 퇴적곡선(압력제어)

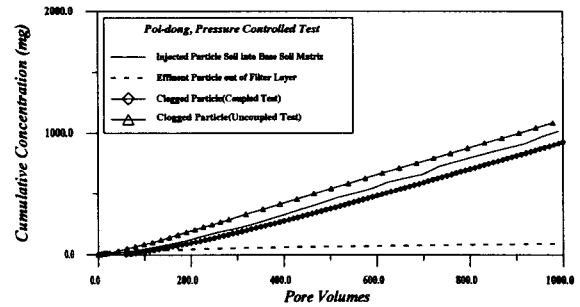


그림 16. 포이동필터의 가적 퇴적곡선(압력제어)

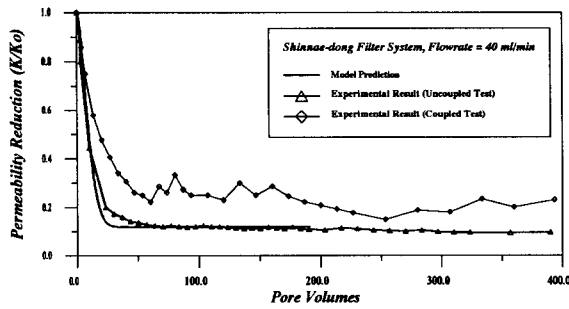


그림 17. 신내동필터의 투수능 저하곡선(유량)

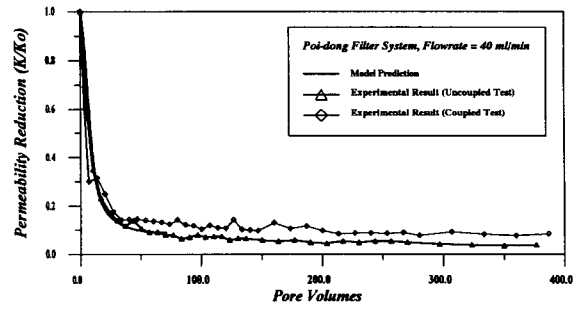


그림 18. 포이동필터의 투수능 저하곡선(유량)

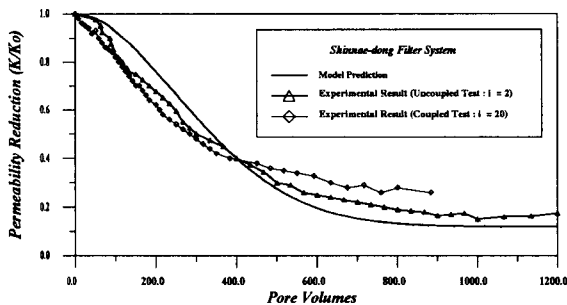


그림 19. 신내동필터의 투수능 저하곡선(압력)

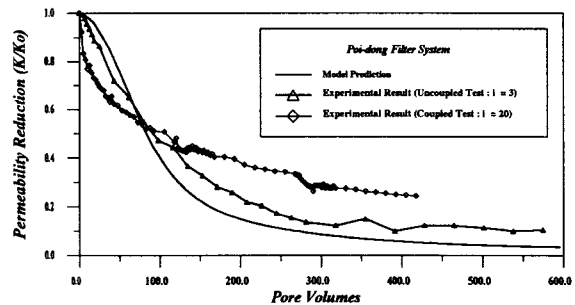


그림 20. 포이동필터의 투수능 저하곡선(압력)

그림 17, 18, 19, 20은 분리형 시험 결과와 결합형 시험 결과를 비교한 그래프이다. 분리형 시험의 투수능 저하가 결합형 시험에 비해 크게 발생함을 알 수 있다. 그러나 저하 양상이 동일하고  $0.1 k_0$ 까지 도달되는 데 필요한 시간이 유량제어의 경우 50~100, 압력제어의 경우 300~600 pore volumes으로 유사한 값을 보임을 알 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는 흙필터의 폐색으로 인한 투수능의 저하 현상을 실험을 통해 고찰하였다. 흙모체로부터 이탈되는 입자는  $80\ \mu\text{m}$  이하의 미세입자 뿐만 아니라  $100\sim 850\ \mu\text{m}$  의 조립성 입자도 포함되어 있었다. 일반적으로 투수능은 10% 이하로 저하되었으며 압력제어보다 유량제어에서 투수능 저하현상을 잘 관찰할 수 있었다. 유량이 증가할수록 투수능 저하율은 감소하는 것을 알 수 있었으며 이는 낮은 유량에서 필터 폐색이 더욱 뚜렷함을 보여주는 것이다. 흙필터에 퇴적된 입자의 총량을 pore volumes에 따라 누적한 결과 결합형 시험과 분리형 시험이 거의 일치함을 알 수 있었고 이는 분리형 시험으로부터 실제 지반을 모사한 결합형 시험을 예측할 수 있게 하는 것으로 보인다. 분리형 시험결과와 필터폐색 현상에 대한 물리적 모델이 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며, 제안된 모델을 통해 필터의 투수능 저하현상을 모사하는 것이 매우 유용하리라는 것을 알 수 있다. 필터 폐색은 필터 설계기준을 따르지 않은 균등 필터에서 보다 뚜렷한 양상을 보였다. 투수능 저하현상은 결합형 시험에서 적게 발생하였는데, 이것은 모델예측이 보다 안전측 설계에 가깝다는 것을 의미하며, 분리형 시험을 통한 접근도 필터 폐색 현상을 관찰하는 데에 적절한 방법이 될 수 있음을 보여준다.

## 8. 감사의 글

본 연구는 과학재단의 '98 국제 공동 연구(KOSEF와 NSF간)의 연구 내용 중 일부임을 밝히며, 본 연구를 위하여 협조하여 주신 관계당국과 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

## 9. 참고문헌

1. 고재신. (1997), "용액의 성질에 따른 풍화잔적토의 유동특성에 대한 실험적 연구," 고려대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 김형섭. (1998), "풍화잔적토의 입자유동으로 인한 필터의 막힘 현상에 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 H. Brenner. (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.