

폐색으로 인한 부직포의 투수능 저하 현상

Permeability Reduction of Geotextile Filters Induced by Clogging

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 김주현²⁾, Joo-Hyun Kim, Lakshmi N. Reddi³⁾

¹⁾ 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea University

²⁾ 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea University

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

SYNOPSIS : The mechanism of soil-geotextile system has been studied among researchers since the application of geotextile as a replacement of graded granular filters is rapidly growing. The interaction of soils with geotextile is rather complicated so that its design criteria are mostly based on empiricism. Hence, it is essential to study the characteristics of fine particles transport into geotextile induced by the groundwater flow. In this study, the permeability reduction in the soil-filter system due to clogging phenomenon is evaluated. An extensive research program is performed using two typical weathered residual soils which are sampled at Shinnae-dong and Poi-dong area in Seoul. Two separate simulation tests with weathered residual soil are performed: the one is the filtration test(cross-plane flow test); and the other is the drainage test(in-plane flow test). Needle punched non-woven geotextiles are selected since it is often used as a drainage material in the field. The compatibility of the soil-filter system is investigated with emphasis on the clogging phenomenon. The hydraulic behaviour of the soil-filter system is evaluated by changing several testing conditions.

Key words : 토목섬유, 폐색 현상, in-plane flow, cross-plane flow

1. 서론

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 영향 인자들 때문에 실제의 필터 설계는 경험적인 방법에 의존하고 있다. 본 연구에서는 흙/부직포 시스템에서 세립자 이동에 의한 폐색 현상을 규명하고자 하였다. 지오텍스타일에 인접한 지반에서 이탈한 입자가 필터의 간극을 매우면서 발생하는 폐색 현상은 투수계수 감소를 초래하면서 구조물의 안정성에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 국내의 풍화잔적토 지반은 수리학적 거동이 매우 불안정한 것으로 알려져 있다. 따라서 국내의 대표적 풍화잔적토 지반에 속하는 서울의 신내동과 포이동 지역의 흙을 시료로 이용한 본 실험은 필터재 내에서의 흐름방향에 따라 수평 흐름과 수직 흐름으로 나누어 실내 시험을 실시하였으며 필터재로는 현장에서 배수재로 광범위하게 쓰이는 토목섬유를 사용하였다. 흙 모체와 필터가 결합된 복합체의 적합성 여부를 필터재의 흐름에 따라 비교, 분석하고 기존에 제안된 폐색 방지기준을 적용하여 보았다.

2. 실험방법 및 시료

2.1 실험방법

필터재 내에서의 흐름방향에 따라 각각 수평 흐름 시험(in-plane flow test)과 수직 흐름 시험(cross-plane flow test) 두 가지로 나누어 시험을 실시하였다. 흙 모체와 사용 필터재에서의 발생 수압 변화를 측정하기 위하여 압력계를 설치하였고 수평 흐름 시험의 경우 동일한 단위중량의 공시체를 각 셀에 위치하여 동수 경사를 조절할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다. 그림 1과 2는 이에 대한 시험 장치의 개략도이다. 각 시료의 지오택스타일 폐색효과를 파악하기 위하여 흙 모체에 가해지는 동수 경사를 15, 10, 5로 변화를 주었으며 수평 흐름 시험의 경우 유출부에서 가까워질수록 동수경사를 감소 시키도록 하였다.

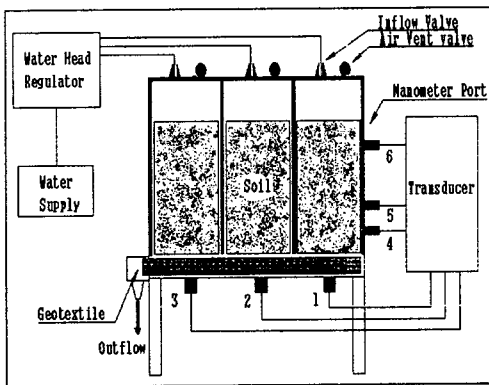


그림 1. 수평 흐름 시험 개략도

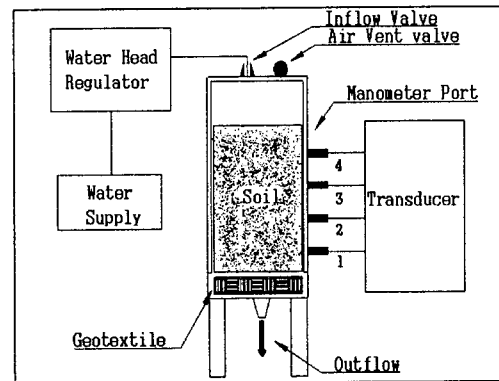


그림 2. 수직 흐름 시험 개략도

2.2 흙 시료

국내의 대표적인 풍화 잔적토 지반으로 알려진 서울의 신내동과 포이동 지역의 시료를 채취하여 본 실험에 사용하였다. 시료가 균일성을 갖도록 일정한 함수비를 유지하고, 정적다짐한 재성형 시료를 사용하였다. 시료의 역학적 특성은 표 1에 나타내었다.

표 1. 흙 시료의 물리적 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

2.3 토목 섬유

흙/부직포 시스템의 배수특성실험에 사용한 지오택스타일은 니들펀칭 장섬유 부직포를 대상으로 하였다. 국내의 우수 생산업체인 K사에서 생산되는 제품중에서 배수 및 필터 용도로 많이 사용되고 있는 부직포를 선정하였는데 P.E.T(polyester) 재질로 제조되었으며 물성은 표 2와 같다.

표 2. 실험에 사용된 지오텍스타일 물성

토목섬유	NP-1		NP-2	
섬도(Denier)	4.50		5.45	
단위 질량(g/cm ³)	1.38		1.37	
수직투수계수(cm/sec)	3.6×10 ⁻¹		4.2×10 ⁻¹	
전달성(m ² /sec)	10kPa	2.0×10 ⁻⁹	10kPa	2.8×10 ⁻⁹
	300kPa	1.1×10 ⁻⁹	300kPa	1.9×10 ⁻⁹
유효간극크기(μm)	75		50	
중량(g/m ²)	300		600	

3. 필터재의 물리적 특성

사용된 지오텍스타일 필터의 수리학적 거동에 영향을 주는 인자로서 가장 중요한 것은 필터재의 투수 계수이다. 특히 부직포의 경우 직포와 달리 투수계수의 변화가 압축응력 작용에 상당히 민감하기 때문에 필터 설계시 현장상태에 대한 필터의 변화 상태를 고려할 필요가 있다. 즉 압축변형률에 따른 두께의 감소는 필터재의 간극 크기 분포에 영향을 미치게 되는데 표 2에 제시한 바와 같이 수평투수계수는 압축응력의 작용에 따라 감소하는 것으로 조사되었다. 따라서 사용 필터재의 압축응력에 따른 두께변화와 이에 따른 간극분포를 그림 3, 4, 5, 6에 제시하였다. 식(1)을 통하여 정규화 시키면 압축응력에 따른 지오텍스타일 필터재의 두께변화를 쉽게 산출 할 수 있다. 이는 식(2)에 제시하였다.

$$Cr = \frac{H_0 - H_s}{H_0} \times 100 \quad (1)$$

$$Cr(\%) = 10.2 \ln \sigma \text{ (kPa)} + 13.56 \quad (2)$$

여기서 Cr은 압축률을 의미하고 H₀는 압축응력이 작용되지 않을 경우의 필터의 두께, H_s는 특정 압축 응력 상태에서의 필터 두께를 나타낸다.

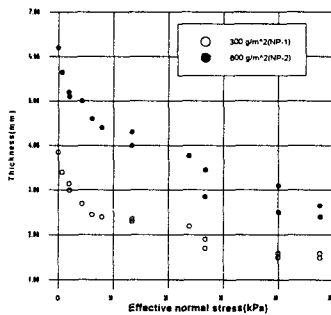


그림 3. 압축응력에 따른 두께 변화

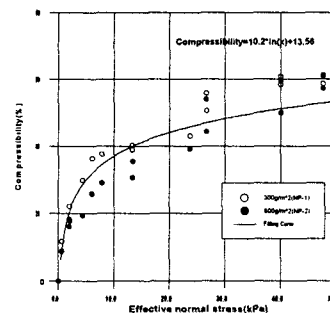


그림 4. 압축응력에 따른 압축률

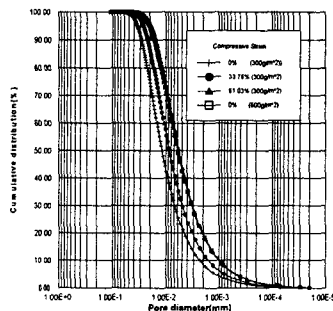


그림 5. 압축응력에 따른 간극분포

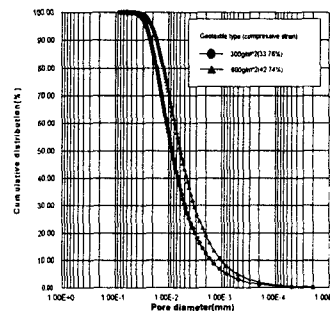


그림 6. 사용 필터재의 간극분포

4. 결과 분석 및 고찰

필터재 흐름 방향에 따른 흡/부직포로 이루어진 결합체의 배수 거동을 살펴보고 각 실험 결과를 여러 가지 제안 기준에 적용하여 폐색 현상을 관찰하였다.

4.1 수평 흐름 시험 (In-Plane Flow Test) 결과

흡 모체에 비하여 필터의 투수능이 크기 때문에 일반적으로는 필터 내로 유입되는 유량에 대하여 잔류 수압이 생성될 수 없다. 하지만 수평 시험 결과 흡/부직포 시스템에서는 필터내에서 잔류 수압이 생성과 흡 모체에서의 수압증가를 보였다. 신내동 흡/필터 시스템의 경우에는 실험 초기에 급격한 잔류 수압의 증가를 보였으나 포이동 시료는 거의 잔류수압이 관찰되어지지 않았다. 이러한 거동의 차이는 신내동 시료가 포이동 시료에 비하여 주어진 동수경사에 대해 흡 자체 내에서의 이탈률이 크기 때문이다. 또한 신내동 흡은 배수 시험시 단일 입자의 구조로 거동하기 때문에 입자 이동에 의하여 필터와 흡 모체에 압력 수두의 증가가 이루어진다. 반면에 포이동 시료의 경우 점착력 성분이 주어진 동수 경사에 비하여 크기 때문에 흡 모체가 배수시에도 안정된 구조를 갖게된다. 그림 7, 8, 9, 10은 시험결과이다.

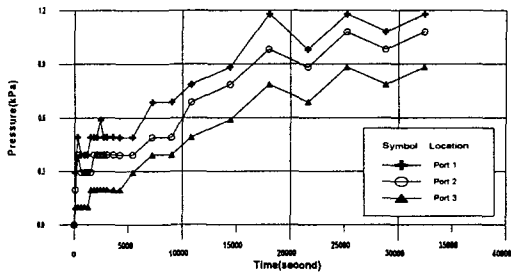


그림 7. 필터재에서의 잔류 수압(신내동)

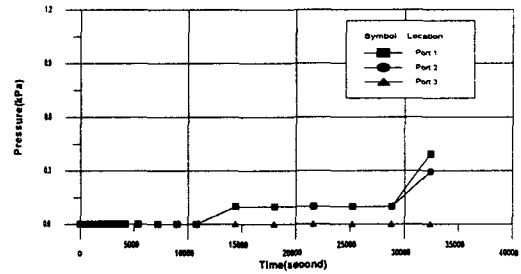


그림 8. 필터재에서의 잔류 수압(포이동)

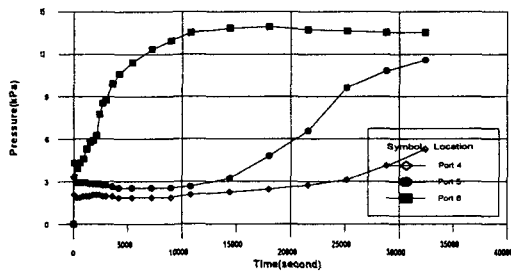


그림 9. 흡 모체의 발생 수압(신내동)

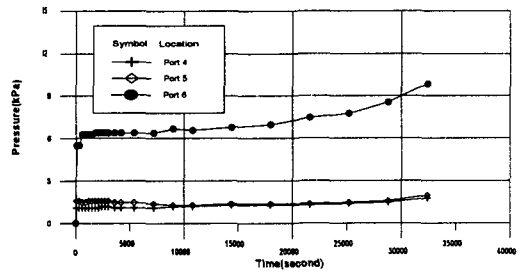
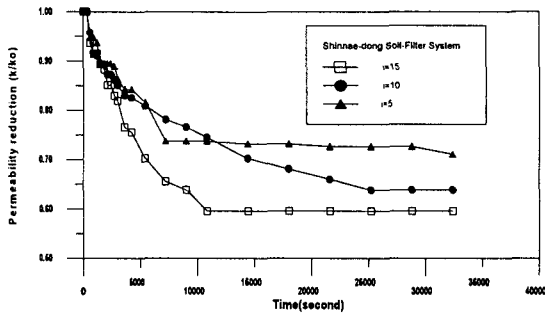


그림 10. 흡 모체에서의 발생 수압(포이동)

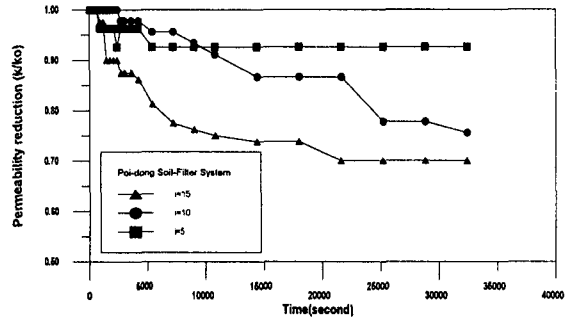
흡/부직포 시스템의 동수 경사 변화에 따른 투수 계수 감소 변화 형태는 다음과 같다. 그림 11의 (a)와 (b)는 시간 경과에 따른 투수 계수 감소비를 보여주고 있다. 그림에서 제시된 바와 같이 동수경사의 증가에 따라 투수계수는 감소하는 경향을 보인다. 이처럼 작용 동수 경사는 흡 시료의 이탈률에 큰 영향을 미친다. 이탈률은 흡의 밀집도, 세립분 함유량, 점착력, 작용 동수 경사 등에 좌우되는 흡의 고유 특성 중의 하나이다.

입도 분석 실험은 크게 두 가지로 나누어서 실시하였다. 지오택스타일 필터에서 검출된 세립자의 분석과 필터재를 통과하여 유출된 세립자의 경우로 나누어 보았다. 신내동 시료를 흡 모체로 사용한 경우 필터재내로의 입자 이동과 퇴적 현상에 의하여 각 필터 조각에서 검출된 입도 분포 차이가 발생하였으며 시간 경과에 따라 폐색 과정에 의한 유출 세립자의 크기 감소가 관찰되었다. 그림 12, 13은 신내동 시료를 사용한 경우의 세립자의 입도 분포를 나타내고 있다. 포이동 흡/부직포 시스템의 경우 필터재에

서 검출된 세립자의 입도 분포는 다음과 같다. 그림 14에서 제시된 바와 같이 비교적 필터재의 각 위치에서 보여주는 폐색 입자들의 입도 분포는 거의 유사한 형태를 띄우고 있다. 이는 포이동의 경우 신내동 시료와 달리 흙 모체로부터 이탈되는 미세 입자의 크기가 전반적으로 필터재의 간극 크기와 비슷하거나 적기 때문에 필터재에 폐색되기 보다는 이동되거나 필터재를 통과해버리는 경향을 보여준다. 필터로부터 유출되어지는 미세 입자의 분석은 그림 15에 제시하였다. 신내동의 경우 시간 경과에 따라 유출 입자 크기의 감소를 보여준 반면에 포이동 시료의 결과는 이와는 약간 다른 경향을 보였다. 즉 시험 시작 후 일정시간이 흐른 이후에 비교적 큰 입자들이 유출되었는데 이는 점착력 성분에 때문에 비교적 입도가 큰 경우에는 흙 모체로부터 이탈되어지는데 시간이 소요되기 때문이다.



(a) 신내동 흙/부직포 시스템



(b) 포이동 흙/부직포 시스템

그림 11. 수평 흐름시 투수계수 감소비 곡선

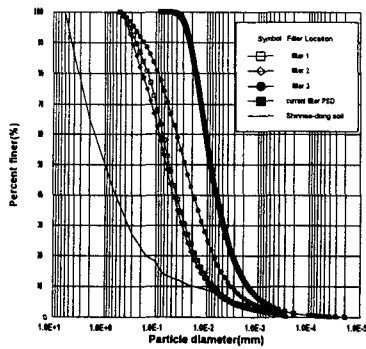


그림 12. 필터재에 폐색된 입도 분포(신내동)

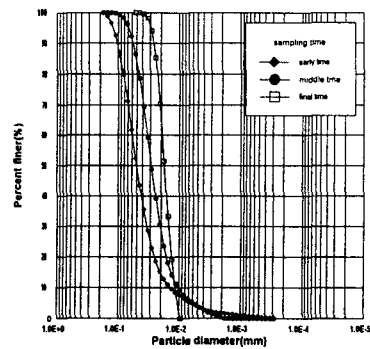


그림 13. 유출입자의 입도 분포(신내동)

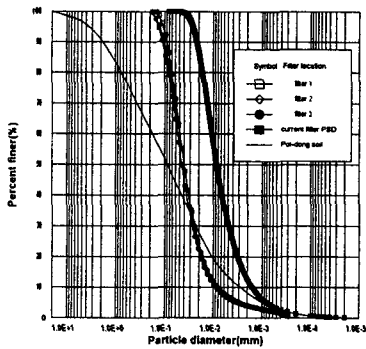


그림 14. 필터재에 폐색된 입도 분포(포이동)

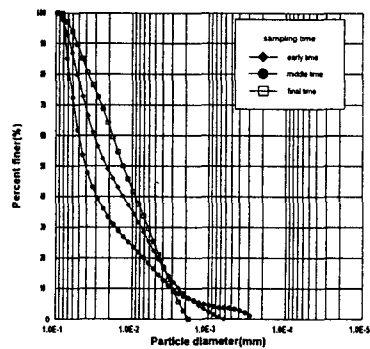


그림 15. 유출입자의 입도 분포(포이동)

4.2 수직 흐름 시험 (Cross-plane flow test) 결과 및 필터재의 이방성 검토

흙/부직포 시스템의 수직 흐름에 대한 거동 파악과 동시에 필터재의 이방성을 조사하였다. 필터재의 수직흐름은 지오텍스타일의 평면에 수직하게 유체의 흐름이 발생하는 경우인데 주로 도로에서 배수재의 용도나 위생 매립지에서의 침출수 필터재 사용시 지오텍스타일의 수직 흐름 거동이 중요시된다. 현재까지 필터재 자체의 수직 흐름에 대한 거동 연구는 많이 이루어 졌으나 흙 모체와 결합된 복합체의 거동 분석은 미미한 실정이다. 수직 흐름 내의 흙/부직포 시스템의 거동분석 역시 수평 흐름 실험과 마찬가지로 투수 계수 감소, 동수경사비, 간극메움중량비, 유출 세립자 입도 분석 등을 통한 비교, 검토를 실시하였다.

그림 16과 17은 각 흙/부직포 체계에서의 시간 경과에 따른 투수 계수 감소비를 보여주고 있다. 동수경사의 증가에 따라 수직, 수평 흐름 시험 모두 투수 계수의 감소가 이루어 졌고 수평흐름에 비하여 수직 흐름 시험이 투수 계수 감소가 증가하였는데 이는 필터재의 이방성으로 기인한 것이다. 필터재 자체의 전달성(transmissivity)이 투수성(permittivity)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.

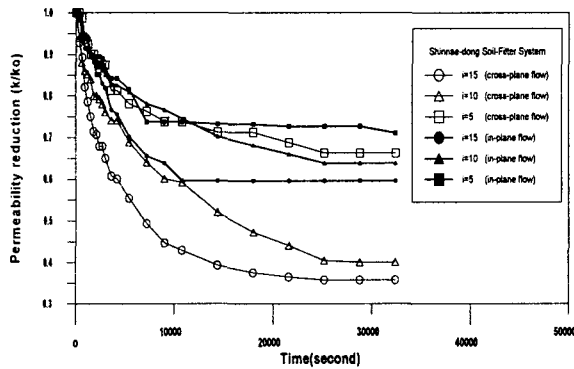


그림 16. 신내동 흙/부직포의 투수계수 감소비

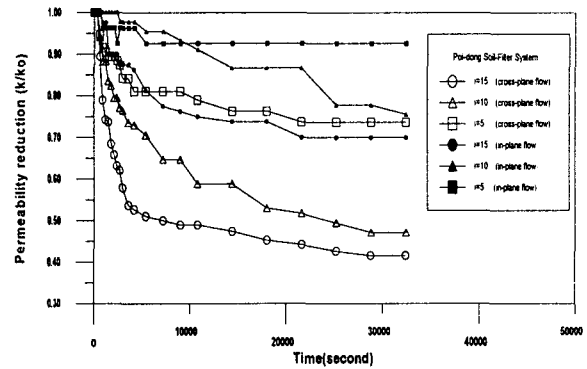


그림 17. 포이동 흙/부직포의 투수계수 감소비

수직 흐름 체계의 신내동 흙/부직포 시스템은 동수 경사 15, 10, 5에서 동수경사비는 1.57, 1.38, 0.32로 계산되었다. 포이동 흙/부직포 시스템의 경우에는 발생 수압의 분포가 신내동과 큰 차이를 보이지 않았으며 동수경사비는 역시 신내동과 거의 유사한 값으로 계산되었다. 발생 수압 분포와 계산된 동수경사비는 분석에 의하면 수직 흐름 내의 동수 경사 15, 10에서 흙/부직포 시스템의 적합성에 대한 문제 검토가 요구되고 있음을 시사한다. 또한 수직 흐름 시험을 통한 발생 압력으로부터 계산된 동수경사비는 수평 흐름 시험에서 계산된 동수경사비에 비하여 약간 증가된 수치를 보여주고 있다. 이러한 동수경사비의 차이는 투수 계수의 감소비 경향과도 일치하는 것이다. 따라서 흙/부직포의 적합성을 판별하는데 있어서 현재 사용된 동수경사비는 흐름방향에 상관없이 적합한 기준이 될 것으로 판단된다. 그림 18은 동수경사 변화에 따른 각 흙/부직포 시스템에서의 동수경사비의 변화를 제시하였다.

그림 19는 동수 경사에 따른 간극메움중량비의 변화를 보여주고 있다. 간극메움중량비의 정의는 식 (3)과 같다.

$$\text{간극메움중량비} = \frac{\text{필터재에 폐색된 입자의 무게}}{\text{사용 지오텍스타일 필터의 무게}} \quad (3)$$

수직, 수평 시험 모두 흙 모체의 종류 구분 없이 작용 동수 경사에 비례하여 간극메움중량비도 증가

하는 것으로 나타났다. 그러나 수직 흐름 시험에 의한 포이동 흙/부직포 시스템의 경우 수평 시험에 비하여 소량의 간극메움비가 증가됨에도 불구하고 시험 종료시 수렴된 투수계수 감소폭이 상당히 증가하였다. 이는 필터재에 폐색된 입자의 크기에 좌우된다(그림 21 참조)

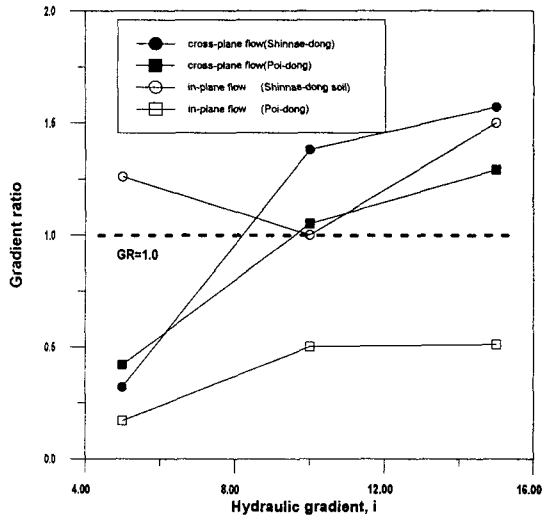


그림 18. 동수 경사비의 비교

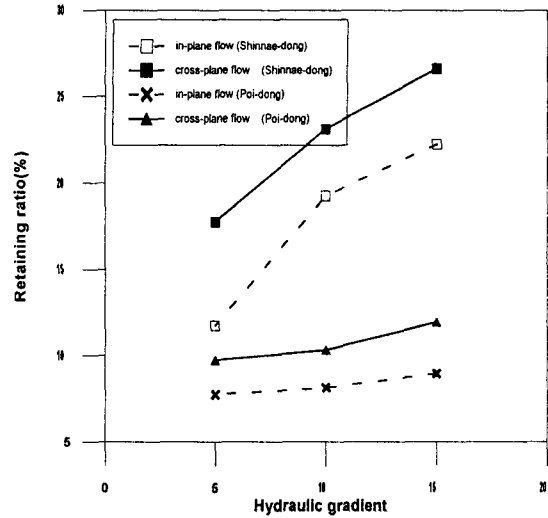


그림 19. 간극메움중량비의 비교

수직 흐름시 폐색 현상에 의하여 필터에서 검출된 세립자에 대한 입도 분석은 그림 20과 그림 21에 제시하였다. 포이동 시료의 경우 수직 흐름 시험 시 필터재의 최대 간극 크기 보다 큰 입자의 양이 증가되어 간극메움중량비의 미소 증가에도 불구하고 수평 흐름과 비교하여 상대적으로 과다한 투수 계수 감소가 이루어진다.

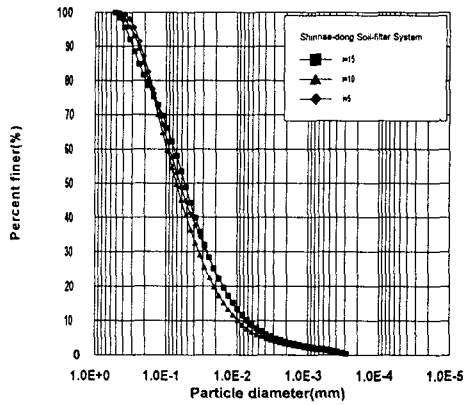


그림 20. 필터재에 폐색된 입도 분포(신내동)

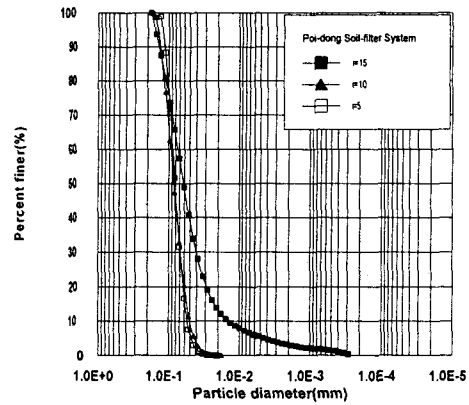


그림 21. 필터재에 폐색된 입도 분포(포이동)

5. 결론

- 1) 신내동 시료의 경우 포이동 시료에 비하여 입자 이탈량이 크게 나타났다. 이는 신내동 시료의 경우 사질토에 가까운 거동을 보이고 포이동 시료는 점착력 성분에 의하여 입자 이탈량의 감소를 보인다. 이러한 이탈량의 차이는 신내동 시료를 흙 모체로 사용한 경우 포이동 시료에 비하여 흙/부직포 복합체 내에서 폐색 현상을 심하게 발생시킨다.

- 2) 흙/부직포 시스템의 경우 투수 계수 및 입자 유동 특성에 영향을 미치는 인자들은 흙 모체의 이탈률, 필터내의 퇴적률, 흙과 부직포의 상호작용, 흙 모체에 작용하는 동수 경사 등이다. 특히 수평흐름 (in-plane flow)의 경우 필터재 내로의 세립자 이동과 퇴적 현상이 중요한 영향 인자가 된다.
- 3) 동수 경사가 증가될수록 투수 계수 감소, 간극메움증량비, 동수경사비, 흙 시료내의 발생압력이 증가된다.
- 4) 흙 모체로부터 이탈되는 세립자의 입도 분석 결과 신내동 시료의 경우는 최대 세립자의 크기가 450 μm 에서 500 μm 정도의 크기를 갖으며 포이동 시료의 경우는 180 μm 에서 200 μm 사이의 크기를 갖는 것으로 조사되었다.
- 5) 수평흐름보다 수직 흐름의 경우에 필터 폐색 현상이 더 심하게 일어난다. 이는 필터재의 이방성과 세립자 운동 거리에 따라 좌우된다.

6. 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 일부로서 두 재단에 감사드린다.

7. 참고문헌

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. 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.
3. 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.
4. Park, K. J. (1999), "Analysis of particle mobilization and impact on filter performance in drainage tunnels", Ph.D dissertation. Korea University, Seoul, Korea.
5. Park, Y. J. (1999), "Permeability reduction of soil filters due to physical clogging", M.S. Thesis. Univ. of Korea, Seoul, Korea.
6. 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.