

터널필터재의 폐색현상과 배수성능 평가

Clogging Phenomenon and Drainage Capacity of Tunnel Filters

이 인 모*¹ 유 승 현*²
Lee, In-Mo Yu, Seung-Hun

박 광 준*³ 이 석 원*⁴
Park, Kwang-Joon Lee, Seak-Won

김 홍 택*⁵
Kim, Hong-Taek

Abstract

The geotextile filter, which is installed between the ground and the lining and used as a tunnel drainage system, should have sufficient groundwater drainage capacity so that water pressure does not act on the lining. The clogging may have a serious effect on the long term behaviour of geotextile filters. Two typical weathered residual soils in Korea, Shinnae-dong soil and Poi-dong soil, were chosen to investigate the in-plane flow characteristics of the soils with varying degree of compressive stresses applied on the geotextiles and with various conditions of hydraulic gradient. The Shinnae-dong soil is a relatively coarse material classified as 'SW-SM'; on the other hand, the Poi-dong soil is much finer and is classified as 'SC'. Based on the comparison of the O_{95} of geotextile to the D_{15} of residual soils, existing clogging criteria were reviewed, and a tentative clogging criterion for the in-plane flow of the residual soil through filters was proposed. The Shinnae-dong soil showed noticeable clogging phenomenon, while the clogging of the Poi-dong soil was not so serious. The Poi-dong soil seemed to be hindered in particle transport by its cohesiveness.

요 지

터널의 배수재로 이용되는 지오텍스타일 필터는, 터널 내로 유입되는 지하수를 충분히 배수시키어 터널

*1 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

*2 정회원, (주) 도담엔지니어링, 연구원

*3 정회원, (주) 덕천엔지니어링, 상무

*4 정회원, 한국건설기술연구원, 지하구조물 그룹 선임연구원

*5 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

라이닝에 수압이 작용되지 않도록 해야 한다. 그러나, 지오텍스타일의 막힘현상으로 인하여 필터재의 통수능력이 우선적으로 감소하게 되고 막힘현상은 이를 더욱 심각하게 만든다. 본 연구에서는 서울시의 신내동과 포이동에서 채취한 시료에 대하여 터널 필터재의 평면흐름을 모사하여 폐색현상을 고찰하였다. 신내동 시료는 SW-SM으로 분류되는 사질토에 가까운 시료이며, 반면에 포이동 시료는 SC로 분류되고 점성이 강한 흙이다. 필터재의 이론적인 간극분포곡선과 O_{35} 로부터 본 실험결과를 근거로 폐색방지기준을 설정하였다. 포이동 시료에 비하여 신내동 시료가 더 뚜렷한 폐색경향을 나타냄을 알 수 있었으며, 이는 포이동 시료에 비하여 점성이 없어 잔입자가 쉽게 이탈되고 필터재에 쌓이는 원인으로 판단되었다.

Keywords : Geotextile, Filter, Clogging, Tunnel, Residual soil

1. 서론

터널 배수시스템을 목적으로 숏크리트와 라이닝 사이에 지오텍스타일로 필터를 설치한다. 이때 필터재로 유입된 지하수는 필터재를 따라 평면흐름(in-plane flow)이 발생한다. 만일 터널이 토사 지반에 설치된다면, 흙/부직포의 유출특성에 따라 터널필터재의 통수능력에 문제가 발생할 수 있다. 흙/부직포 시스템에서 일반적인 유출특성을 고려해 보면 흙속의 미세한 입자들이 지오텍스타일을 통과해서 빠져나감으로서 시스템의 유량이 증가하는 경우와, 지오텍스타일에 인접한 지반에서 이탈한 입자가 지오텍스타일간극을 메우면서 유량이 감소하는 경우가 있다. 지오텍스타일의 폐색효과(clogging)는 토립자의 침전이나 유기물질이나 염분, 미생물들이 간극속에서 간혀서 성장하는 등 여러 가지 요인을 들 수 있다. 지오텍스타일에 폐색이 발생하면서 투수계수의 저하를 초래하게 되면 구조물의 안정에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 본 연구에서는 토립자가 지오텍스타일의 간극을 메움으로서 발생하는 투수계수의 저하에 초점을 두어, 터널배수재의 통수능력을 검토하고자 하였다.

토사터널 지반으로서 국내의 대표적인 풍화잔류토 지반인 신내동, 포이동 시료를 중심으로 수

행하였으며, 본 연구를 수행하기 위해 풍화 잔류토 지반의 각종 토질 정수들에 대한 분석을 실시하였다. 실험은 동수경사를 변화시켜감과 동시에, 필터에 가해지는 수직응력도 다각도로 변화시켜가면서, 풍화잔적토의 평면흐름에 관한 흐름특성 및 유출특성 파악에 초점을 두어 실험을 수행하였다. 지오텍스타일의 간극분포곡선을 이론식으로부터 구하였고, 이 이론식으로부터 구한 유효간극 크기를 이용하여 기존에 연구에서 제시된 폐색방지기준(clogging criteria)과 비교를 수행하였으며, 신내동시료를 중심으로 지오텍스타일 평면흐름에서 지오텍스타일의 유효간극크기와 흙입경과의 비에 따른 흐름특성 및 유출특성을 파악하고자 투수실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 시료

2.1 시험 장치

본 시험에 사용된 장비는 그림 1에 나타낸 바와 같으며, 각각의 기능은 다음에 나타내었다. 그림 2는 평면투수시험기의 규격을 나타낸다.

- 1) 펌프드라이브 - 유량을 공급하는 역할을 한다.
- 2) 탁도계 - 시료에서 유출된 점토입자의 농도를

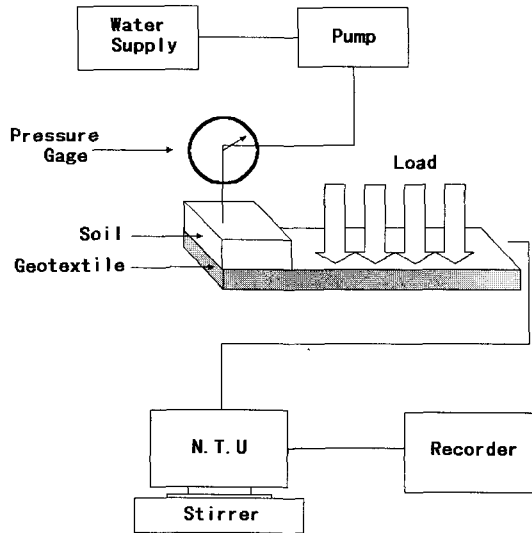


그림 1. 시험장치의 구성도

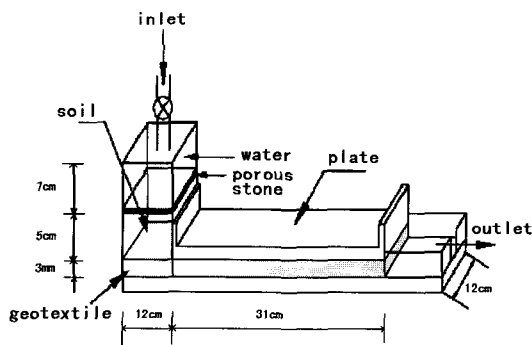


그림 2. 시험장치의 규격

측정하는 장치로서 점토입자의 농도는 N.T.U의 단위로 측정되며 이는 다시 입자의 농도로 계산된다.

3) 수조 - 펌프드라이브에 물을 공급하는 역할을 한다.

4) 기록계 - 탁도계에서 나오는 계측치를 자동으로 기록하는 역할을 한다.

5) 유출수 교란장치(stirrer) - 탁도계의 셀에서 점토입자의 퇴적을 막기 위해서 셀 밑부분에서 자기

력에 의한 셀 내의 유출액을 계속해서 교반시켜주는 역할을 한다.

6) 정수두 평면 투수시험기 - 일정한 수두가 유지 되도록 하며 시료를 통과한 물은 배수재를 통과하게 되며 배수재에 하중을 가할 수 있도록 되어 있다. 직접적인 실험이 수행되는 곳이다.

2.2 시료의 성형방법 및 포화방법

본 실험에 사용된 시료로서는, 풍화잔적토의 재성형시료를 사용하였다. 시료가 균일성을 갖도록 일정 함수비를 유지하고, 최적함수비의 85% 정도로 건조축이 되도록 정적다짐한 시료를 사용하였다. 각 실험은 흡속을 통과하는 용액의 흐름을 줄이기 위해서 높이는 5cm, 면적은 12×12cm로 하였다. 토목섬유시료는 12cm×30cm로 성형하여 24시간 이상 수침시킨후 사용하였다.

시료의 포화는 10cm수두차에 의해서 물의 흐름이 일정하게 유지될 때까지 방치하여 물의 흐름이 정상상태가 될 때 이 시점을 시료가 포화된 것으로 가정하였다. 성형된 시료의 상부에는 수압에 의한 상부의 흡입자 세굴을 방지하기 위해, 세굴방지 장치로서 아크릴로 제작한 다공질판(porous stone)을 설치하였다.

2.3 시험 방법

동수경사를 5, 10, 15로 변화를 주었으며 지오텍스타일에 가해지는 하중을 0.075kg/cm², 0.15kg/cm², 0.3kg/cm², 0.6kg/cm² 으로 변화시켜서 수행하였다. 유입부와 유출부의 수두차를 일정하게 유지시켜주기 위해서 유입부의 물이 월류하도록 하였다. 유출되는 유량은 탁도계를 이용하여 N.T.U로 측정하였으며 탁도계를 빠져나온 유량은 시간별로 계속해서 측정되었다. 실험이 완료된 지오텍스타일을 건조로에서 24시간 이상 건조시킨 후 무게를 측정함으로써 실험전후의 무게차이를 측정하였

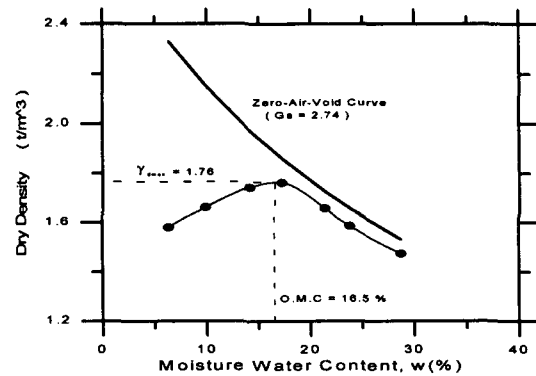
고, 이로부터 지오텍스타일에 폐색된 양을 정량적으로 산정하였다. 지오텍스타일의 유효간극크기와 흙의 입경과의 관계를 파악하는 실험을 수행하여 배수특성 및 유출특성을 규명하였다. 흙은 소요입도 곡선에 맞도록 중량비율로 배합하였으며 동수경사 15, 하중조건 0.3kg/cm^2 을 기준으로 수행하였다.

2.4 시료의 특성

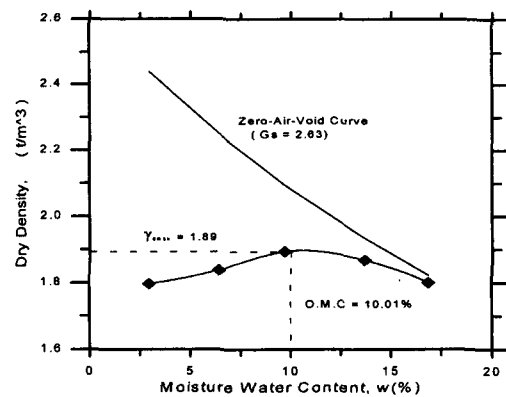
본 시험에 사용된 시료는 김(1993), 이(1994), 한(1996) 및 김(1996)등에 의해 토성 특성이 파악된 서울의 신내동, 포이동 지역에서 채취한 풍화잔적토 시료를 이용하였다. 신내동 시료는 1997년 10월 서울특별시 신내동 ○○공사현장에서 채취하였다. 포이동 시료는 1996년 1월 서울시 포이동 지역에서 건설중인 도시 고속도로 현장입구에서 채취하였다. 각각의 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해서 액·소성시험, 체분석 시험, 비중시험 및 다짐시험을 실시하였다. 실험에 사용한 풍화잔적토의 KS F 2312 A-1 다짐시험에 의한 다짐특성은 그림 3에 나타낸 바와 같이 포이동 시료는 최적함수비(O.M.C)가 16.5%이고 최대건조단위중량, γ_{max} 는 1.76 t/m^3 이다. 신내동 시료는 최적함수비(O.M.C)가 10.01%이고 이때의 최대건조단위중량, γ_{max} 는 1.89 t/m^3 이며, 풍화잔적토의 물리적 성질은 표 1과 같다.

습윤 체분석 및 비중계 시험으로부터 입도 분포를 파악하였고 그 결과는 그림 4와 같다. 그림 4의

입도 분포곡선으로부터 포이동지역의 흙은 통일 분류법상 "SC"로 분류되나 No.200체(0.075mm) 통과량이 47.36%이고, 압밀시험으로부터 산정된 투수계수는 $9.02 \times 10^{-6} \sim 5.35 \times 10^{-7}\text{ cm/sec}$ 의 값을 보이는 것으로 보아 포이동 지역의 풍화잔적토지반은 사실상 점성토와 같이 거동할 것임을 추



(a) 포이동



(b) 신내동

그림 3. 실험에 사용된 시료의 다짐특성

표 1. 시료(풍화잔적토)의 특성

시료	KS F 2312 A-1(표준다짐)		액·소성(%)			#200체 통과량 (%)	Gs	통일 분류
	γ_{dmax} (t/m^3)	O.M.C (%)	액성 한계	소성 한계	소성 지수			
포 이 동	1.76	16.5	34.0	19.84	14.16	47.36	2.74	SC
신 내 동	1.89	10.0	NP			10.05	2.63	SW-SM

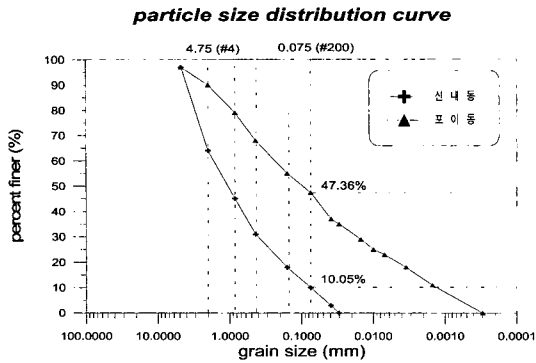


그림 4. 입도분포시험 결과

정할 수 있다. 신내동 시료의 경우 No.200 표준망체(0.075mm) 통과율이 10.05%이고 통일 분류법상 SW-SM으로서 사실상 사질토와 같이 거동할 것으로 보인다.

2.5 지오텍스타일의 특성

흙/토목섬유 시스템의 배수특성시험에 사용한 지오텍스타일은 니들펀칭 장섬유 부직포를 대상으로 하였는데, 국내의 우수 생산업체인 K사에서 생산되는 제품 중에서 배수 및 필터 용도로 많이 사용되고 있는 부직포를 선정하여 사용하였다. 선정된 장섬유 부직포는 P.E.T (polyester)의 재질로 제조되었으며 물성은 표 2와 같다. 표 2의 물성은 한국원사직물시험연구소의 역학적 시험장치를 사용하여 측정하였다.

본 시험에서는 지오텍스타일의 하중에 의한 두께 변화를 구하기 위해서 지오텍스타일을 2cm이상의 두께가 되도록 접친 다음 각 하중 단계에서의 시료의 두께를 다이얼 게이지(dial gauge)로 측정된 다음 해당되는 지오텍스타일의 개수로 나눈 평균값을 구하였다. 그림 5는 지오텍스타일의 압축응력에 대한 두께의 변화를 도시한 것이다.

표 2. 실험에 사용된 지오텍스타일의 물성

중량 (g/m ²)	311.2	인장강도 (kg/cm)	36.6
인장신도 (%)	60~100	수직투수계수 (cm/sec)	2.1×10 ⁻¹
두께 (mm)	2.8	EOS (mm)	0.103
비중	1.35	섬도(denier)	4.74

평면 투수계수를 계산할 경우 압축응력에 따른 지오텍스타일의 두께의 변화는 식 (1)의 hyperbolic 관계식을 이용하였다.

$$\epsilon_n = \frac{\sigma_n'}{a + b \sigma_n'} \quad (1)$$

그림 5의 실험결과를 이용하여 curve fitting으로 구해본 결과 a = 0.00515446, b = 0.0101039의 결과를 얻었으며, a와 b는 압축응력과 변형량의 관계로 계산되어진 지오텍스타일에 관계된 상수이다

배수용 지오텍스타일의 투수성은 물이 지오텍스타일의 평면을 따라 흐르는 평면투수성으로 고려되어지며 수류의 통수단면은 지오텍스타일의

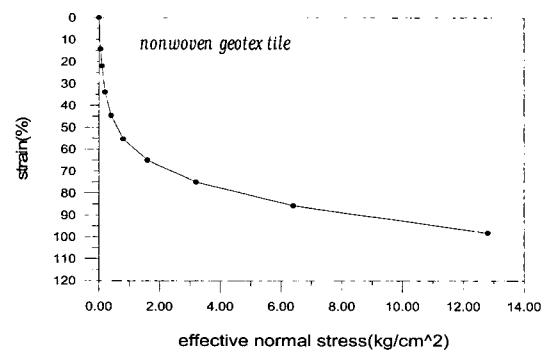


그림 5. 지오텍스타일의 하중에 따른 변형률

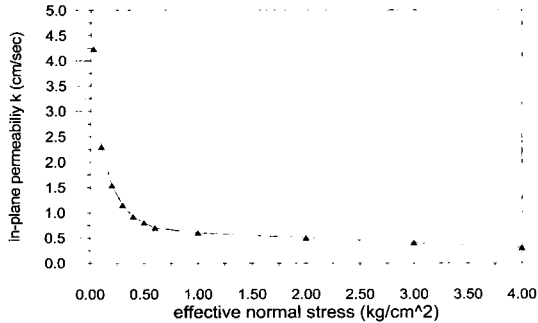


그림 6. 압축력에 따른 평면투수계수의 변화

단면이 된다. 또는 평면투수계수에 두께를 곱한 전수성(transmissivity)이 지오텍스타일의 배수능력을 평가하는 기준이 될 수 있다. 식 (2), (3)를 이용하여 압축응력에 따른 평면 투수계수를 구해 보면 그림 6과 같다.

$$k_p = \frac{q_p L}{A h} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{q_p L}{W h} \quad (3)$$

여기서 θ = 전수성계수(transmissivity)

k_p = 평면투수계수

q_p = 유량 (L^3/T)

A = 지오텍스타일의 단면 ($W \times t$)

t = 지오텍스타일의 두께

h = 지오텍스타일 양단에서의 수두차

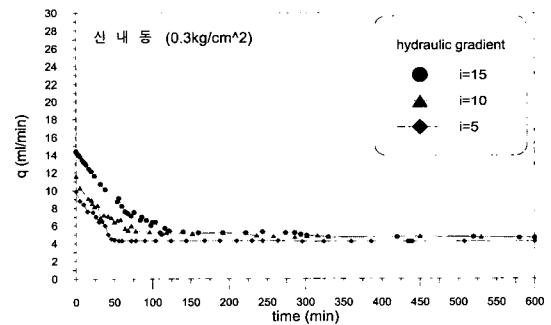
그림 6으로부터 지오텍스타일의 평면 투수계수는 압축응력 0.5 kg/cm^2 이하에서 급격한 감소를 보이다가 0.5 kg/cm^2 이후에는 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

3. 실험 결과

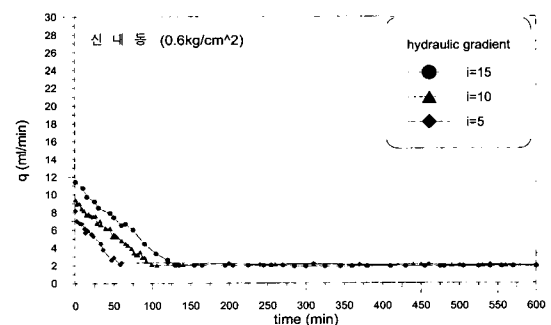
3.1 일정 동수경사와 하중에서 시간에 따른 유량의 변화

흙/부직포 시스템에서 일반적인 유출특성을 고려해 보면 흙속의 미세한 입자들이 지오텍스타일을 통과해서 빠져나감으로서 시스템의 유량이 증가하는 경우와, 지오텍스타일에 인접한 미세한 입자가 운반이 되면서 좀 더 큰 입자는 지오텍스타일에 막히거나 걸리게 됨으로서 유량이 감소하게 되는 경우를 생각할 수 있다. 더 이상의 입자의 이동이 발생하지 않을 경우에 시스템은 평형상태에 도달한다. 신내동 시료 및 포이동 시료에 대하여 동수경사·하중조건별로 정수두 배수시험을 수행한 다음 유량의 변화특성을 연구하였다. 각 실험조건별로 실험의 지속시간은 대략 10~12시간 정도였으며 시간이 지남에 따라 유량이 일정해지는 구간에서 실험을 종료하였다.

3.2 신내동 시료(사질토)



(a) 0.3 kg/cm^2



(b) 0.6 kg/cm^2

그림 7. 하중·동수경사별 유량의 변화 (신내동 시료)

그림 7에 나타낸바와 같이, 신내동 시료의 경우 유량 변화특성을 보면 수압을 가하기 시작한 초기에서 최대 유량이 발생하고 시간이 흐름에 따라서 점차적으로 유량의 감소가 발생함을 알 수 있다. 이는 간극수에 포함된 세립분이 지오텍스타일의 간극을 메우는 폐색효과가 발생하여 지오텍스타일의 투수계수가 저하된 것으로 볼 수 있다. 흡에 가해지는 수압이 높을수록 흡/부직포 경계면에서의 수두가 커지므로 최대유출유량이 커짐을 알 수 있으며 50~100분이 경과한 후에는 일정한 유량이 계속해서 유지됨을 알 수 있다. 그림 7의 각 경우를 비교해보면 정상상태에 도달한 경우의 유량은 지오텍스타일에 가해지는 하중이 증가할수록 작아짐을 알 수 있다. 이는 하중이 증가할수록 지오텍스타일의 압축효과에 의해 투수계수가 감소된 것으로 볼 수 있다. 또한 주어진 하중조건에서 정상상태의 유량은 동수경사에 상관없이 거의 비슷한 값을 보인다. 이는 동수경사에 대한 영향은 있으나 지오텍스타일에 가해지는 하중에 의한 영향이 더 큼을 알 수 있다.

그림 8은 하중 및 동수경사별 흐름의 효율(정상상태의 유량/초기 최대유량)을 나타내고 있으며, 하중 및 동수경사가 증가할수록 흐름효율이 낮은 값을 보임을 알 수 있다. 이는 동수경사가 증가할수록 간극속에서 흐름의 속도가 증가하여 이동가능한 세립분의 양이 많아지며, 지오텍스타일의 간극을 메우는 효과가 더 심하게 발생한 것으로 보인다. 또한 하중이 증가할수록 지오텍스타일에 퇴적되는 양이 더 많아지면서 투수계수가 저하된 것으로 볼 수 있다.

0.3kg/cm²을 기준으로 유출특성을 살펴보면, 그림 9(a)에서 보는 바와 같이 동수경사가 증가할수록 침투농도의 값이 커짐을 알 수 있으며, 그림 9(b)에 보이는 대로 동수경사가 증가함에 따라 가적량이 증가함을 알 수 있다. 그림 10(a)는 동수경사 i=15를 기준으로 해서 하중에 따른 가적입자

유출량을 나타내고 있다. 지오텍스타일에 가해지는 하중이 증가할수록 유출 유량이 감소하는 것으로 보인다. 표 3은 신내동시료의 실험결과를 정리한 것이다.

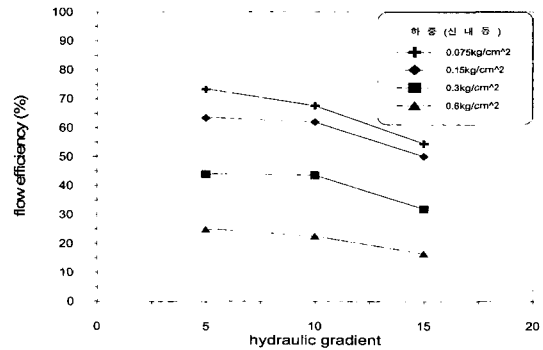
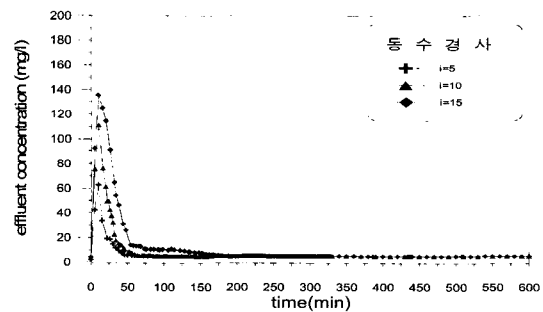
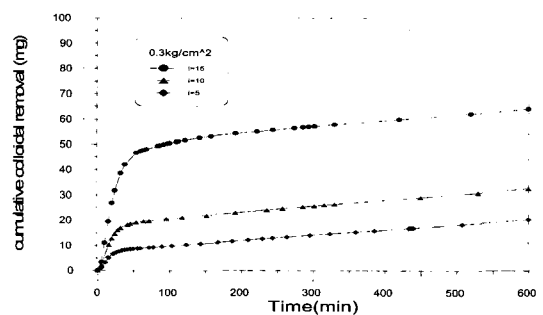


그림 8. 하중과 동수경사에 따른 신내동 시료 흐름 효율

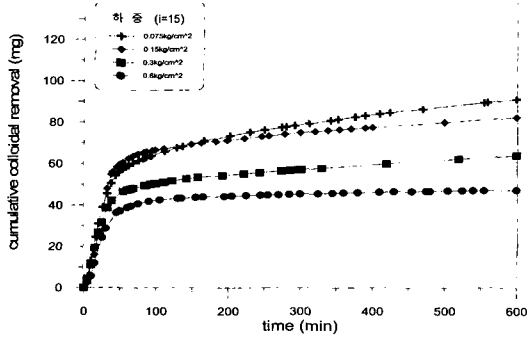


(a) 동수경사의 변화에 따른 유출특성

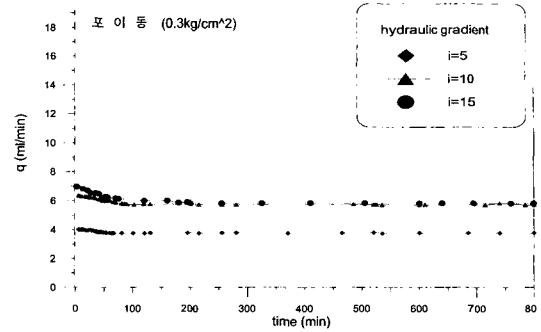


(b) 가적 입자유출량

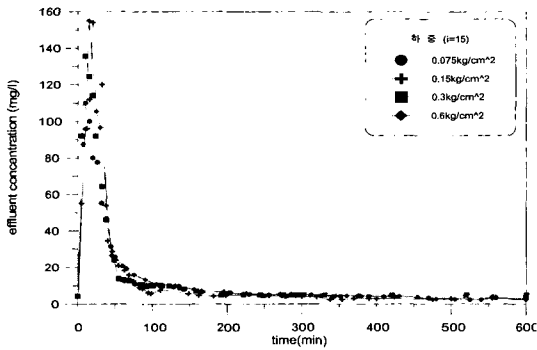
그림 9. 동수경사에 따른 유출특성과 가적 입자 곡선 (신내동 시료, 0.3kg/cm²)



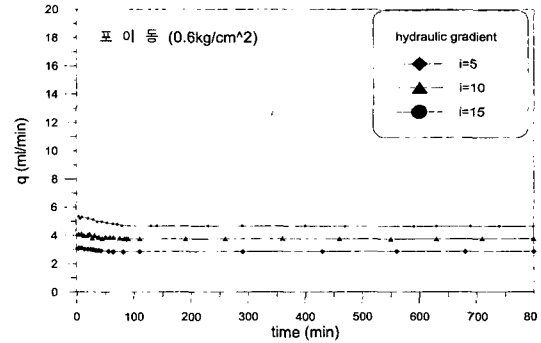
(a) 가적 입자유출량 (i=15)



(a) 0.3 kg/cm²



(b) 유출특성 (i=15)



(b) 0.6 kg/cm²

그림 10. 일정동수경사에서 하중에 따른 가적입자유출량 및 유출특성(신내동 시료)

그림 11. 하중·동수경사별 유량의 변화 (포이동 시료)

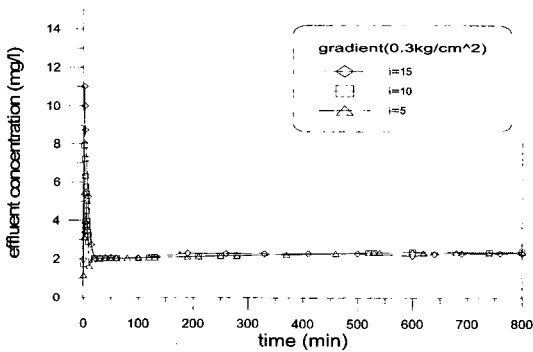
표 3. 신내동 시료의 실험결과 정리

하중 (kg/cm ²)	동수경사 (hydraulic gradient)	초기 유량 (ml/min)	정상상태에서 유량 (ml/min)	흐름효율 (%)	정상상태에 이르는 시간 (min)	간극매움 중량비* (%)
0.075	5	16.5	12.1	73.33	50	27.2
	10	17.9	12.1	67.59	70	35
	15	20.2	11	54.45	100	45
0.15	5	12.5	7.9	63.5	55	31.2
	10	14.38	8.87	61.94	75	31.2
	15	16.28	8.14	50	100	52.63
0.3	5	9.9	4.4	44	55	30.8
	10	11.58	5.04	43.5	80	43.2
	15	14.38	4.60	31.9	120	43.6
0.6	5	8.2	2.05	25	60	28.5
	10	9.3	2.1	22.5	100	37.42
	15	11.4	1.9	16.5	130	47.4

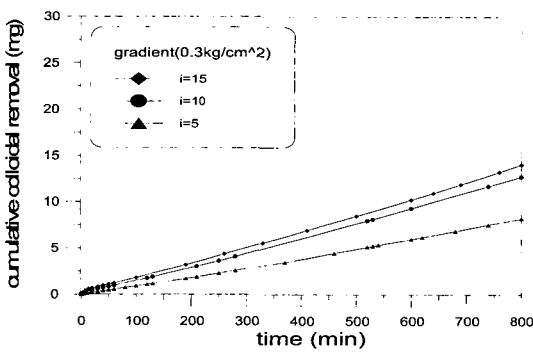
*주) 정의참조(식4)

3.3 포이동 시료(점성토)

그림 11은 포이동시료의 경우에 대하여 재하하중별·동수경사별 유량의 변화특성을 나타낸 것이다. 하중조건과 상관없이 유출유량의 급격한 감소는 발생하지 않았으며 초기의 유량이 계속해서 유지되거나 약간의 감소현상을 나타냈다. 이는 포이동 시료의 경우 입자의 점착성분 때문에 입자의 이탈이 적은 것이 주된 원인으로 사료되며 간극의 크기가 작아 토립자의 유송현상이 저하된 것도 한 원인으로 사료된다. 세립분이 지오텍스타일의 간극을 메우는 효과와 유출되는 효과는 신내동 시료



(a) 동수경사의 변화에 따른 유출특성



(b) 가적 입자유출량

그림 12. 동수경사에 따른 유출특성과 가적입자유출량 (포이동 시료, 0.3kg/cm²)

에 비해 적은 것으로 나타났다. 신내동 시료에서와 같이 동수경사가 증가할수록 흐름의 효율(정상상태에서의 유량/초기의 최대 유량)은 감소하는 경향이 있으나 그 차이가 심하지 않은 것으로 나타났다. 초기의 최대유량에서 정상상태의 유량이 되기까지 시간은 대략 1~2시간 정도가 되며 이는 신내동의 경우와 비슷한 것으로 나타났다. 그림 12는 0.3kg/cm²을 기준으로 하여 동수경사에 따른 침투농도의 변화를 보이고 있으며, 동수경사가 증가하더라도 침투농도의 변화의 폭이 신내동 시료에 비해 훨씬 덜 민감하게 나타났다. 가적입자 유출량은 신내동의 가적입자유출량과 비교해 볼 때 훨씬 적은 양이 유출되었음을 알 수 있다. 표 4는 포이동시료의 실험결과를 정리한 것이다.

3.4 동수경사와 간극메움 중량비

실험 완료후 지오텍스타일의 간극메움량을 산정하기 위해서 간극메움 중량비(R_c)를 식 (4)와 같이 정의하였다

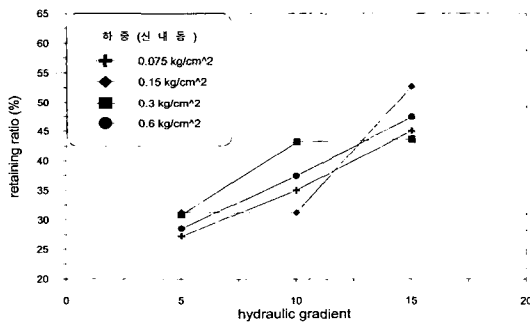
$$R_c = \frac{\text{건조후 단섬유부직포에 박힌 세립토의 중량}}{\text{실험전 건조시 단섬유부직포시료의 중량}} \quad (4)$$

그림 13은 하중 및 동수경사별 간극메움 중량비를 보여주고 있다. 동수경사가 증가할수록 흡속의 간극내 유속이 증가하게 되므로 이탈되는 세립분의 양도 증가하게 되며, 따라서 간극메움 중량비도 증가함을 알 수 있다. 또한 대체적으로 하중이 증가할수록 지오텍스타일에 퇴적되는 양이 많아지므로 간극메움 중량비가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 신내동시료와 포이동시료를 비교하였을 경우 같은 동수경사에서 신내동시료가 포이동시료보다 간극메움 중량비가 훨씬 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 신내동 시료의 경우 $O_{95}/D_{15} = 0.43$ 이며 포이동시료의 경우 $O_{95}/D_{15} = 49$ 로서 신내동시료가 지오텍스타일의 유효간극크기와의 비

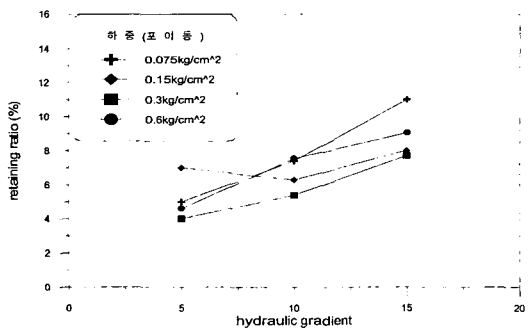
표 4. 포이동 시료의 실험결과 정리

압력 (kg/cm ²)	동수경사 (hydraulic gradient)	초기 유량 (ml/min)	정상상태 에서 유량 (ml/min)	흐름효율 (%)	정상상태에 이르는 시간 (min)	간극메움 중량비* (%)
0.075	5	7.85	7.45	95	60	5
	10	10.908	9.81	90	110	7.4
	15	11.49	9.88	86	150	11
0.15	5	5.52	5.29	96	70	7
	10	7.34	6.53	89	100	6.3
	15	7.83	6.89	88	170	8
0.3	5	4.02	3.77	94	66	4
	10	6.36	5.78	91	90	5.4
	15	6.96	5.84	84	200	7.7
0.6	5	3.06	2.84	93	64	4.6
	10	4.08	3.75	92	105	7.54
	15	5.34	4.64	87	150	9.04

*주) 정의참조(식4)



(a) 신내동 시료



(b) 포이동 시료

그림 13. 동수경사별 간극메움 중량비

가 훨씬 작아서 지오텍스타일의 간극속에 갇히게 되는 흡입자의 양이 많아진 것으로 판단되며, 또한 포이동시료의 경우 점착성분 때문에 흡입자로부터 이탈되는 세립분의 양이 상대적으로 적기 때문인 것으로 판단된다.

4. 필터 설계에의 응용

배수목적으로 사용되는 지오텍스타일의 경우 폐색현상에 의해 투수계수의 감소를 초래하게 되는 경우, 원래의 제 기능을 발휘하지 못하게 될 수 있다. 평면흐름에서 지오텍스타일의 폐색방지기 준을 살펴보고 토류구조물에 설치된 지오텍스타일의 배수성능을 평가해 보고자 한다.

4.1 폐색 방지기준(Clogging Criteria)

4.1.1 지오텍스타일의 간극분포곡선

하중에 따른 지오텍스타일의 간극분포를 구하기 위해서, Brochier(1984)는 이미지 분석(image analysis) 방법등을 사용하였다. 지오텍스타일에

가해지는 하중에 의해서 지오텍스타일의 구조에 변화가 발생하게 되며 수리역학적인 물성에도 변화를 미치게 된다. 특히 직포의 경우보다는 부직포의 경우 하중에 의한 영향을 더 받게 된다. 부직포에 가해진 하중은 두께를 감소시키고 간극률을 감소시키며 전수성계수(transmissivity), 투수계수 및 간극의 분포에도 변화를 초래한다. 본 실험에서 사용한 부직포의 간극분포를 구하기 위해서 Faure(1988)가 제시한 식 (5)를 사용하였다

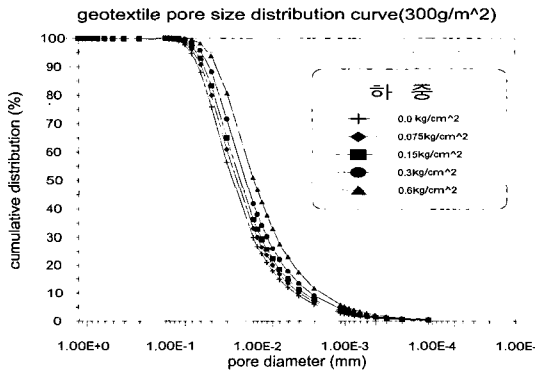


그림 14. 지오텍스타일의 간극분포곡선

$$PSDC(d) = 1 - \left[\frac{4\mu d}{D_f(4\mu + 2\pi T_g \rho_f)} + 1 \right]^{\frac{2T_g}{D_f}} \times \text{EXP} \left[-\frac{4\mu d}{\pi D_f^2 \rho_f} \right] \quad (5)$$

여기서,

PSDC(d) : 부직포(needle-punched geotextile)의 간극분포

d : 간극의 직경(pore diameter) (m)

D_f : 섬유 직경(fiber diameter) (m)

T_g : 부직포의 두께(thickness) (m)

μ : 부직포의 단위면적당 중량(mass per unit area of geotextile) (kg/m^2)

ρ_f : 부직포의 단위질량(mass per unit volume of fibers) (kg/m^3)

지오텍스타일의 간극분포를 구하기 위해서 사용한 물성은 표 2와 같다. 현미경법에 의한 섬유 직경을 시행한 결과 지오텍스타일의 섬유 직경은 4.74 denier 정도이었으며, 이로부터 지오텍스타일의 섬유 직경을 구하였다. 그림 14는 Faure(1988)가 제시한 식을 사용하여 하중조건에 따라서 구한 지오텍스타일의 간극분포곡선을 나타내고 있다.

ASTM (D4751) 에 의한 건식분석법에서 구한 O_{95} 값은 0.103mm이었다. O_{95} 가 0.103mm라는 것은 지오텍스타일의 간극의 95%가 0.103mm이거나 이 값보다 작음을 뜻하게 된다. ASTM (D4751) 에서 규정한 실험방법으로 구한 O_{95} 값과 그림 14에서 구한 O_{95} ($\sigma = 0$) 값이 유사한 값을 보임을 알 수 있다.

4.1.2 폐색 방지기준

표 5는 기존의 연구에서 제시된 흙/부직포 시스템에서의 폐색 방지기준을 나타내고 있다.

표 5. 폐색 방지기준 (Christopher 와 Fisher (1992))

A. Critical/severe applications
Perform soil/fabric filtration tests
B. Less critical/nonsevere applications
1. Perform soil/fabric filtration tests.
2. Minimum Pore Sizes Alternatives for soils containing fines, especially in a noncontinuous matrix:
(a) $O_{95} > 3D_{15}$ for $C_u > 3$ (Christopher & Bolts, 1985, 1989)
(b) $O_f > 4D_{15}$ (French Committee of Geotextiles, 1986)
(c) $O_{15}/D_{15} > 0.8 \sim 1.2$ $O_{50}/D_{50} > 0.2 \sim 1.0$ (Fischer 등, 1990)
3. For $C_u < 3$ fabric with maximum opening size from retention criteria should be specified.
4. Apparent open area qualifiers Woven fabrics : Percent Open Area : >4% to 6% (Koerner, 1994) Nonwoven fabrics : Porosity >30% to 40% (Christopher & Holtz, 1985 ; Koerner, 1994)

건식 체분석법에 의한 유효간극(O_{95}) 크기가 그림 14에서 구한 유효간극(O_{95}) 크기보다 다소 크게 나왔으나 그 값 차이가 크지 않았다. 이를 토대로 기존의 연구에서 제시된 폐색 방지기준과의 비교를 위해서 식 (5)를 이용하여 구한 간극분포곡선을 이용하여 O_{95} , O_{50} , O_{15} 값을 구하였다. 그림 14로부터 구한 O_{95} , O_{50} , O_{15} 값은 각각 0.055mm, 0.016mm, 0.005mm이었다.

1) 신내동 시료(사질토)

신내동 시료의 경우 C_u 값은 14.4이고 $D_{15} = 0.24\text{mm}$, $D_{50} = 1.8\text{mm}$ 로서 지오텍스타일의 간극 크기와 비교하였을 경우 표 6의 Christopher와 Holtz가 제안한 $O_{95} > 3D_{15}$ [표 6의 2(a)] 조건에 부적합하며, John(1987)이 제안한 습식과 건식분석과의 관계식인 $O_f = 0.7 \cdot O_{95}$ 을 이용한다면 O_f 값이 0.0385mm가 되어 표 6의 French Committee of Geotextiles의 제안식 2(b)와 Fisher등이 제안한 2(c)기준에도 부적합한 것으로 나타났다. 표 6에 기존의 연구에서 제시된 폐색방지기준과의 비교결과를 정리해 놓았다

2) 포이동 시료(점성토)

포이동 시료의 경우 $D_{15} = 0.0021\text{mm}$, $D_{50} = 0.1\text{mm}$ 이며, 지오텍스타일의 간극크기와 비교하였을 경우 Christopher와 Holtz등이 제시한 표 6의 2(a)제안식인 $O_{95} > 3D_{15}$ 의 조건에 적합하며, 표 6의 제안식 2(b)를 만족시켰다. Fisher등이 제시한 3(c) 조건식에는 부적합한 것으로 나타났다. 표 7에 기존의 연구에서 제시된 폐색방지기준과의 비교결과를 정리해 놓았다. 기존의 연구에서 제시된 기준은 지오텍스타일의 수직흐름(cross-plane)에 관한 기준들이며 이 기준들이 평면흐름(in-plane)에 적용될 경우 Christopher와 Holtz가 제시한 $O_{95}/D_{15} > 3$ 가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

표 6. 폐색기준 비교 결과(신내동 시료)

기준(criteria)	제안기관	비교치	비교 결과
$O_{95}/D_{15} > 3$	Christopher & Holtz	$O_{95}/D_{15} = 0.23$	부적합
$O_f/D_{15} > 4$	French Committee of Geotextiles	$O_f/D_{15} = 0.16$	부적합
$O_{15}/D_{15} > 0.8 \sim 1.2$	Fisher등	$O_{15}/D_{15} = 0.02$	부적합
$O_{50}/D_{50} > 0.2 \sim 1.0$	Fisher등	$O_{50}/D_{50} = 0.008$	부적합

표 7. 폐색기준 비교 결과(포이동 시료)

기준(criteria)	제안기관	비교치	비교 결과
$O_{95}/D_{15} > 3$	Christopher & Holtz	$O_{95}/D_{15} = 26.19$	적합
$O_f/D_{15} > 4$	French Committee of Geotextiles	$O_f/D_{15} = 18.33$	적합
$O_{15}/D_{15} > 0.8 \sim 1.2$	Fisher등	$O_{15}/D_{15} = 2.38$	부적합
$O_{50}/D_{50} > 0.2 \sim 1.0$	Fisher등	$O_{50}/D_{50} = 0.16$	부적합

한편, 부직포의 조건으로서 Christopher와 Holtz, Koerner가 $n > 30 \sim 40\%$ 을 제시하였다. 이 제안 조건식과의 비교를 위하여 실험에 사용한 부직포의 간극률(porosity) 값을 구하였으며, 이를 위해 다음 식을 사용하였다.

$$n = 1 - \frac{m}{\rho t} \quad (6)$$

여기서, n = 간극비

m = 부직포의 단위면적당 중량

ρ = 부직포의 비중

t = 부직포의 두께

$m = 311.2 \text{ g/m}^2$ 과 $\rho = 1350 \times 10^3 \text{ g/m}^3$ 그리고 두께 $t = 0.0028\text{m}$ 를 식(6)에 대입하면 $n=91.77 \%$ 를 얻을 수 있다. 최고 악조건으로서 압축응력이 0.6 kg/cm^2 이 작용한다고 가정하면, 그림 5로부터 구한 지오텍스타일의 두께는 0.001277m 이며, 이로부터 구한 지오텍스타일의 간극을 값은 82% 로서 표 6에서 제시된 지오텍스타일의 기준을 충분히 만족시키고 있다. 이 결과를 보건대 흙과 부직포의 상호 연관성을 고려하지 않고 부직포에 관한 기준만으로는 폐색방지에 대한 기준으로서 미흡한 것으로 판단된다.

3) 폐색기준에 대한 고찰

신내동 시료의 경우 흐름의 효율이 $16.33\% \sim 73.33\%$ 로서 비교적 폐색현상이 뚜렷하게 발생하였으며 기존의 연구에서 제시된 폐색방지기준이 잘 부합하는 것으로 나타났다. 포이동 시료의 경우 흐름효율이 $84\% \sim 96\%$ 로서 뚜렷한 폐색현상이 발생하지는 않았다. 이러한 사실로 볼 때 Christopher와 Holtz가 제시한 폐색방지기준이 잘 부합하였으며, Fisher가 제시한 폐색방지기준은 부합하지 않은 것으로 나타났다. 본 논문에서는 Christopher와 Holtz가 제시한 기준을 중심으로, 지오텍스타일의 유효간극크기와 흙 입경 D_{15} 와의 비에 따른 유출 특성 및 흐름특성을 추가로 살펴보았다. 이 결과는 다음절에 상세히 수록하였다.

4.1.3 흙/부직포 시스템에서 유효간극크기와 입경 D_{15} 와의 관계

본 실험은 지오텍스타일의 유효간극크기와 모체 흙 입경 D_{15} 와의 비에 따른 유출 특성 및 흐름 특성을 파악하고자 실시하였다. 지오텍스타일의 유효간극크기는 ASTM (D-4751)의 건식체분석법에서 구한 값을 사용하였으며, 흙은 신내동 흙을 사용하여 소요입도 곡선에 맞도록 중량비율로 배합하여 흙 시료를 제조하였다. 실험에 사용된

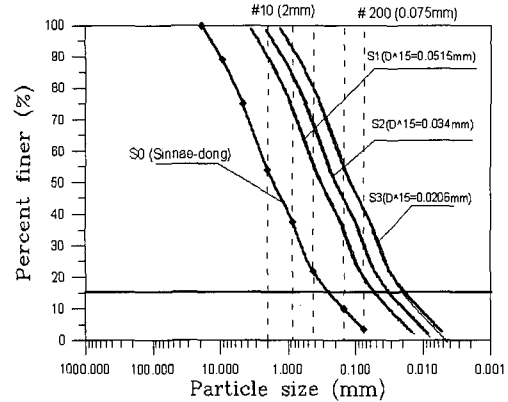
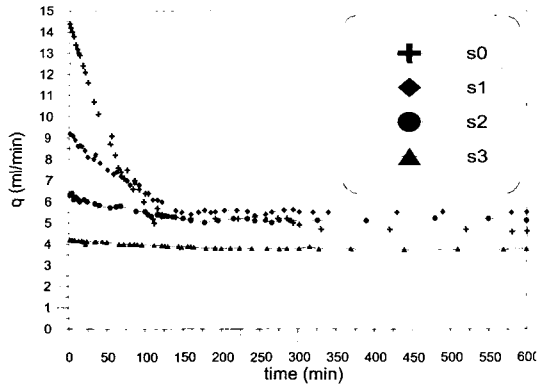


그림 15. D_{15} 의 변화에 따른 입경가적곡선

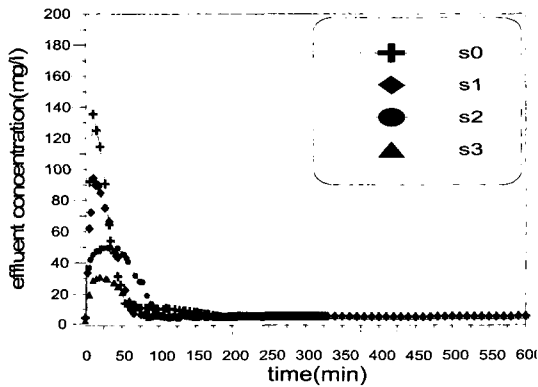
흙의 입도 분포곡선은 그림 15와 같다

실험에 사용한 조건으로서, O_{95}/D_{15} 비를 각각 2, 3, 5배로 해서 이를 각각 시료 S1, S2, S3으로 명명하였고, 원래의 신내동 시료는 S0로 명명하였다. 표 9는 실험에 사용된 조건들을 나타내고 있다. 신내동 시료를 사용하여, 하중조건이 0.3kg/cm^2 , 동수 경사를 15로 기준으로 하였으며, 그림 16은 시간이 흐름에 따른 유량의 변화 및 유출특성곡선을 나타내고 있다.

그림 16에서 보는바와 같이 D_{15} 의 값이 작아질수록 세립분의 양이 많은 것을 뜻하게 된다. 먼저 유량변화를 살펴보면, 신내동시료(S0)의 유출유량은 초기의 최대유량에서 점차적으로 감소하여 정상상태의 유량으로 될 때까지 변화의 폭이 가장 큰 것으로 나타났다. 즉 흐름의 효율이 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 신내동시료(S0)의 경우 O_{95}/D_{15} 의 값은 0.43이며 다른 시료에 비해서 비교적 큰 입자가 많이 포함되어 있어서 지오텍스타일의 구멍입구를 막는 블록킹(blocking) 현상이나 폐색(clogging) 현상이 보다 많이 발생한 것으로 판단된다. O_{95}/D_{15} 가 증가할수록 흐름의 효율은 증가하게 되는데, S3의 경우 정상상태의 유량이 초기의 유량의 90%정도가 됨을 알 수 있다. 이는 S3으로 갈수록 유효간극크기보다 작은 세립분의



(a) 시간에 따른 유량의 변화 ($\sigma = 0.3 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우)



(b) 유출특성의 변화 ($\sigma = 0.3 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우)

그림 16. 입경 (D_{15})의 변화에 따른 유출유량 및 유출특성의 변화

표 8. 흙의 입경 및 유효간극크기와의 비

시료번호	S0	S1	S2	S3
D_{15} (mm)	0.24	0.0515	0.034	0.0206
O_{95}/D_{15}	0.43	2	3	5

양이 많아서 폐색이 되는 정도도 적어지며 지오텍스타일을 통과해서 빠져나가는 세립분의 양이 더 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 16의 유출특성을 살펴보면 S3의 경우 세립분의 양이 많이 포함되어 있기 때문에 침투농도에서 정상상

태에 이르기까지 시간이 더 길어짐을 알 수 있다, S0의 경우는 다른 시료에 비해 상대적으로 세립분의 양이 적기 때문에 침투농도에서 정상상태의 농도의 변화가 가장 단시간에 발생함을 알 수 있다. 각각의 시료의 침투농도값을 비교해보면 S0가 가장 큰 침투농도의 값을 나타내고 있으며 S3가 가장 적은 침투농도의 값을 나타내고 있다. 이는 S3의 경우에는 세립분이 많이 포함되어 있기 때문에 같은 건조단위중량에서도 투수계수가 가장 작아 흡속을 통과하는 흐름의 유속이 가장 적기 때문인 것으로 판단된다. 이상에서 지오텍스타일의 평면흐름에서 흙의 입경 및 지오텍스타일의 유효간극크기와의 관계를 살펴보았다. 흙/부직포 시스템에서 어느정도 폐색은 발생하는 것으로 판단이 되며, 주어진 현장조건에서 과도한 폐색효과가 발생하지 않도록 하는 것이 중요한 것으로 사료된다. S1, S0의 경우 흐름효율이 매우 낮은 값을 나타내며 S2의 경우 흐름효율은 80%로서, $O_{95}/D_{15} > 3$ 의 기준이 지오텍스타일의 평면흐름에 관한 기준으로서 무난할 것으로 사료된다.

4.3 솟크리트의 효과

터널의 배수재는 터널의 내부 라이닝 배면에 설치된 방수막과 솟크리트 사이에 설치된다. 터널의 배수재는 일반적으로 얇은 부직포 (nonwoven geotextile)를 사용하게 되는데 다음과 같은 2가지의 주된 기능을 갖게 된다. 내부 콘크리트 라이닝 타설시 방수막이 찢어지는 것을 방지하는 완충재의 역할을 한다. 둘째 배수터널에서의 내부라이닝이 침투수압에 견디도록 설계되지 않았을 경우에는 원활한 배수층의 역할을 하여 국부적인 수압이 내부라이닝에 작용하지 않도록 하는 기능을 담당한다.

솟크리트의 효과를 모사하기 위하여 흙과 부직포 사이에 높이 1cm의 다공질판을 설치하여 시

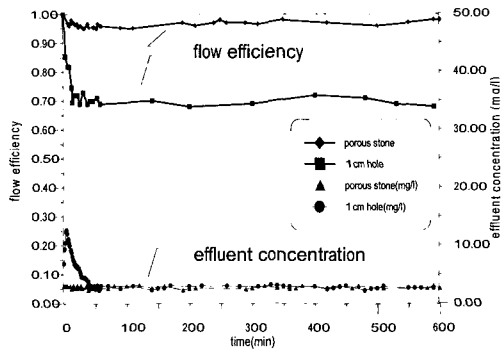


그림 17. 숯크리트 설치시 흐름효율 및 유출특성

간의 경과에 따른 유출특성과 유출유량의 변화를 측정하였으며, 동수경사 5, 하중조건 0.3kg/cm^2 를 기준으로 하였다. 그림 17에서 알 수 있는 것처럼 시간의 경과에 따른 흐름효율의 급격한 감소는 나타나지 않았으며 대략 90%정도의 흐름효율을 나타내었다. 유출특성도 뚜렷한 침투농도의 값을 나타내지 않고 정상상태의 값을 나타내었다.

숯크리트 손상에 따른 토사유출 및 폐색현상을 검토하기 위하여 다공질판의 중앙에 직경 1cm의 구멍을 뚫은 다음 실험을 추가로 수행하였다. 이때, 흐름의 효율은 대략 65%로서, 유출특성은 뚜렷한 침투농도의 값을 나타낸 다음 정상상태로 줄어들었다. 이는 구멍이 뚫린 부분과 접촉이 되있는 지오텍스타일에서 간극 막힘현상에 의해 흐름의 효율이 감소한 것으로 판단된다. 본 실험에서 숯크리트의 균열을 모사한 것은 통상시공되어 있는 숯크리트의 균열을 모사하는데는 한계가 있으며, scale효과를 감안해야 하나, 터널에서의 균열에 의해서 지오텍스타일의 폐색현상이 발생할 수도 있음을 알 수 있다

5. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 사질토로 분류되는 신내동 시료의 경우 유출특

성은 동수경사가 증가할수록 침투농도의 값이 증가하였다. 점성토로 볼 수 있는 포이동 시료의 경우 신내동 시료의 경우보다 No. 200번체 통과량이 훨씬 많으나 입자의 점착성분 때문에 침투농도의 값이 신내동보다 작았으며 신속히 정상상태의 유출농도로 줄어들었다.

- 2) 두 시료 모두 동수경사가 증가할수록 유출유량이 정상상태의 유량으로 되는데 소요되는 시간이 길어짐을 알 수 있었다. 동수경사가 커지면 간극내 흐름의 속도가 증가하게 되어 간극속에서 이동가능한 세립분의 양이 많아지며, 간극속을 통과한 세립분이 지오텍스타일에 폐색되는 정도가 더 심하게 발생한 것으로 볼 수 있다.
- 3) 두 시료 모두 하중 및 동수경사가 증가할수록 흐름의 효율이 낮게 측정되었다. 하중이 증가할수록 지오텍스타일에 퇴적되는 양이 많아지면서 투수계수가 저하된 것으로 볼 수 있다. 신내동 시료의 경우 부직포의 폐색현상이 심각하게 발생하였음을 알 수 있었다. 반면에, 포이동 시료는 점착성분 때문에 신내동 시료에 비해 입자의 이탈이 비교적 적게 발생했으며, 입자의 이탈로 인한 부직포의 폐색현상도 뚜렷하지 않은 것으로 볼 수 있다.
- 4) 평면흐름시험이 종료된 후에, 필터재에 폐색되어 있는 흙입자의 중량을 재어본 결과 신내동 시료가 포이동 시료에 비하여 훨씬 양이 많음을 알 수 있었다. 이는, 신내동 시료가 지오텍스타일의 유효간극크기와의 비가 훨씬 작아서 지오텍스타일의 간극속에 갇히게 되는 흙입자의 양이 많아진 것으로 판단되며, 또한 포이동 시료의 경우 점착성분 때문에 흙 입자로부터 이탈되는 세립분의 양이 상대적으로 적고, 이탈된 세립분 입자도 작아서 지오텍스타일을 쉽게 빠져 나올 수 있는 것이 주된 원인으로 판단된다.
- 5) 본 연구에서는 평면흐름에 대한 필터재의 폐색 방지 기준을 모형실험을 통하여 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 '96년도 건설교통 연구과제의 지원사업으로 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드린다.

참고 문헌

1. 고재신, "용액의 성질에 따른 풍화잔적토의 유동특성에 따른 풍화잔적토의 유동 특성에 대한 실험적 연구", 고려대학교 석사학위 논문, 1997.
2. 김병민, "풍화잔적토의 입자유동에 관한 실험적 연구", 고려대학교 석사학위논문 1996
3. 김용진, "구성방정식을 이용한 다짐화강토의 공학적 특성", 고려대학교 박사학위 논문, 1993.
4. 이승철, "다짐 잔적토의 거동특성 연구", 고려대학교 석사학위논문, 1994.
5. 한신인, "풍화잔적토의 이방성이 지하구조물 거동에 미치는 영향 연구", 고려대학교 석사학위논문, 1996.
6. Brochier, A. M., "Comportement des Geotextiles en Filtration et en Separation", M.S.C.A. Thesis, Chemical Engineering Dept., Ecole Polytechnique de Montreal, Canada, pp. 217, 1984.
7. Christopher, B. R. and Fisher, G. R., "Geotextile Filtration Principles, Practices and Problems", Geotextiles and Geomembranes, pp.337-353, 1992.
8. Christopher, B. R. and Holtz, R. D., "Geotextile Engineering Manual", Report No. FHWA-TS-86/203, US Federal Highway Administration, Washington. DC., 1985.
9. Christopher, B. R., and Holtz, R. D., "Geotextile Construction and Design Guidelines. HI-89-050", prepared for Federal Highway Administration, Washington. DC., 1989.
10. Faure, Y. H., "Approach Structure Comportment Filtrant des Geotextiles", Ph.D. Thesis, University Joseph Fourier-Grenoble 1, France, pp. 344, 1988
11. French Committee of Geotextiles and Geomembranes, "Recommendations for the Use of Geotextiles in Drainage and Filtration Systems". Institut Textile de France, Boulogne-Billancourt, France, 1986.
12. John, N. W. M., Geotextiles, Blackie, New York, pp. 347, 1987.
13. Koerner, Robert M., "Designing with Geosynthetics", Prentice Hall, 3rd Edition, 1994

(접수일자 1998. 10. 23)