

흙필터재의 막힘 현상에 대한 실험적 고찰 An Experimental Study on the Clogging of Soil Filter

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 김형섭²⁾, Hyung-Seop Kim, 박광준³⁾, Kwang-Jun Park, Lakshmi N. Reddi⁴⁾

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

²⁾ (주) 덕천엔지니어링 부설연구소, 연구원, Researcher, Duck-cheon Engrg., Co. Ltd.

³⁾ (주) 덕천엔지니어링, 상무이사, Managing Director, Duck-cheon Engrg., Co. Ltd.

⁴⁾ 미국 캔자스 주립대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Kansas State Univ., U. S. A.

SYNOPSIS : Soil filter is provided to avoid the separation of soil particles from base soils and to improve the permeability of base soil-filter system. The two basic conditions of the filter are contradictory to each other such that the size of filter particles must be large enough to pass the pore water through filter particles; it must be small enough to prevent the entrance of base soil particles into the filter. Moreover, the size of fine particles entered into the filter must be smaller than that of pore in the filter in order that fine particles pass through filter particles. In this paper, the clogging phenomena of the soil filter are studied experimentally. Filter materials that can protect weathered residual soils were chosen and the clogging of the filter due to deposition of soil particles in suspension which entered from the top of filter layer was examined. Mathematical equation which represented migration and deposition of soil particle was set up. The core of the mathematical equation is the coefficient of particle deposition. The coefficient of particle deposition represents the extent of deposition imposed by fine particles which were separated from the base soil and deposited in the filter. The coefficient of particle deposition for the selected filter was obtained experimentally and the importance of this parameter was emphasized.

Key words : soil filter, permeability, filter clogging, weathered residual soils, the coefficient of particle deposition

1. 서론

우리 나라 지반의 대부분을 차지하는 풍화화강토는 그 모양이 화강암과 화강편마암인데, 이러한 모양이 풍화되어 흙으로 변화하고 그 자리에 잔류하는 경우 이를 풍화잔적토(weathered residual soils)라고 한다. 이러한 풍화잔적토의 경우 모양의 지질학적·광물학적 성질, 풍화의 정도에 따라 그 성질이 다르며 입도 분포의 관점에서 보면 다양한 크기의 입자가 포함되어 있기 때문에 강도 및 투수특성이 다른 흙에 비해 매우 복잡한 양상을 보인다. 이러한 풍화잔적토 지반에서 강우나 지하수위의 변동으로 인하여 세립자의 유동이 발생하고, 그 결과 여러 가지 토목구조물에 설치되어 있는 필터가 막히는 경우(filter clogging)가 발생한다. 이처럼 필터가 세립자에 의해 막히는 경우 토목구조물에 심각한 피해를 입힐 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 풍화잔적토의 입자유동으로 인한 흙필터의 막힘 현상에 대한 실험과 그 결과 분석을 통해서 흙필터의 막힘 현상에 대한 이론적인 분석과

상호 비교하였으며, 막힘 현상으로 인한 필터의 투수계수 저하 정도를 예측하기 위한 방법을 제시하고자 하였다.

2. 풍화잔적토의 입자유동 이론

2.1 입자유동의 지배방정식

그림 1과 같이 흙모체(background soil)와 필터층이 있는 경우 흙모체로부터 세립자가 이탈하여 필터 내부로 이동해 들어가는 현상을 설정한다. 흐름조건은 정상류(steady-state flow)로 가정하며, 유동입자의 크기는 균일한 것으로 가정한다. 또한, 흙모체에서는 입자의 이탈만 발생하고 필터층에서는 입자의 퇴적만 일어난다고 가정하는데, 이는 현탁액 유체의 농도가 작을 경우에 한하며, 실험값 중 상한치(upper-bound value)를 얻기 위함이다.

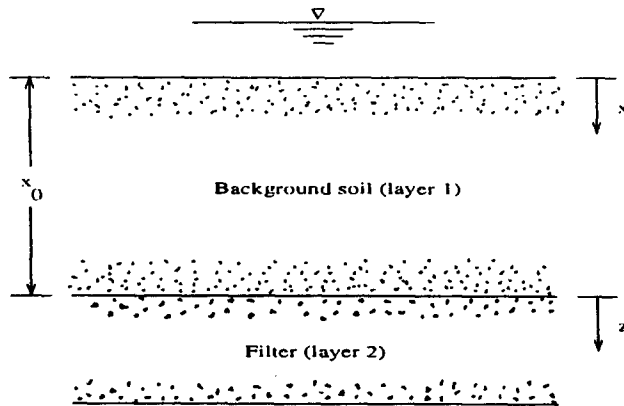


그림 1 흙모체와 필터층의 개념도
(Reddi와 Bonala, 1996)

위의 그림 1에서 상부 흙모체를 제거하고 대신 일정한 농도(초기농도, C_i)를 가지는 현탁액을 필터 상부에 주입하는 경우의 개략도는 그림 2와 같다.

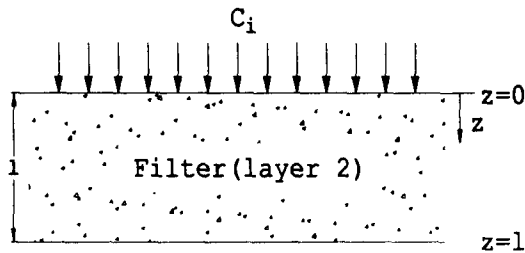


그림 2 상부흙모체를 제거했을 때의
필터 개념도

그림1과 같은 상태에서, 1번 층에서 2번 층으로 입자가 이동할 때 입자의 이동에 관한 문제는 질량보존의 법칙에 따른다. 단위부피에서의 입자를 고려하면 입자유동에 관한 지배방정식은 다음과 같

다.(Gruesbeck과 Collins, 1982)

$$\frac{\partial}{\partial t}(nC + n_i\sigma) + v\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

여기서, nC = 필터 단위부피당 현탁액 속의 입자 부피 [ML^{-3}]

$n_i\sigma$ = 필터 단위부피당 퇴적 입자의 부피 [ML^{-3}]

C = 간극수 내의 세립자 농도 [ML^{-3}]

n_i = 초기간극률

n = 입자 퇴적후의 간극률

σ = 단위간극부피당 퇴적된 입자의 양 [ML^{-3}]

v = Darcy 속도 [LT^{-1}]

z, t = 공간, 시간의 좌표

위의 식을 전개함에 있어서 유의할 점은, Gruesbeck과 Collins(1982), Saltelli 등(1984)의 연구 내용에서 밝혀진 바와 같이 분산에 의한 입자유동은 무시하고 오직 advection에 의한 입자유동만을 고려한다는 것이다. 또한, 유동 현탁액 속의 입자농도가 매우 적어서 간극률의 변화가 거의 없다고 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

여기서, V = 간극내 유속 (v/n)

위의 식 (2)에서 세 번째 항은 입자의 이탈 및 퇴적에 관련된 항인데, 여러 학자들이 제안한 식들 중에서 $(\partial \sigma / \partial t) = \lambda C$ 라는 식을 이용하고 필터에서의 퇴적현상만을 고려한다면 식 (2)는 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V\frac{\partial C}{\partial z} + \lambda C = 0 \quad (3)$$

여기서, λ = 필터계수(coefficient of particle deposition)

위의 식 (3)이 필터층에서의 입자퇴적에 관한 지배방정식이다. 위의 식 (3)을, 경계조건과 초기조건을 이용하여 풀면 다음의 식 (4)를 구할 수 있다.

$$C(l, t) = C_i e^{-\lambda l V} = C_e \quad (\text{유출농도}) \quad (4)$$

위의 식 (4)는 필터 외부로 유출되는 용액의 농도를 나타내는 식이다. 또한, 식 (4)로부터 다음의 식 (5), (6)을 유도하여, 필터계수 λ 와 필터내 단위간극부피당 입자퇴적량 σ 를 구할 수 있다.

$$\lambda = -\frac{V}{l} \ln\left(\frac{C_e}{C_i}\right) \quad (5)$$

$$\sigma(z, t) = \lambda C_i e^{-\frac{\lambda z}{V}} \left(t - \frac{z}{V}\right) \quad (6)$$

한편, 필터내에서의 입자퇴적량을 구하면 그로부터 필터내 간극 부피의 감소 정도를 알 수 있고, 따라

서 다음의 식 (7), 즉 Kozeny-Carman 공식을 이용하여 원래의 필터에서의 투수계수와 입자 퇴적 후의 투수계수를 비교할 수 있다.

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \frac{1}{C_s S_o T_o^2} \left(\frac{e^3}{1+e} \right) S^3 \quad (7)$$

- 여기서, γ = 필터내 간극액의 단위중량
 μ = 필터내 간극액의 점성도(viscosity)
 C_s = 형상계수
 T_o = 굴곡도(tortuosity)
 S_o = 단위 필터입자 부피당 윗면적(wetted surface area)
 e = 필터의 간극비
 S = 포화도(degree of saturation)

위의 식 (7)에서 볼 수 있는 바와 같이 필터내에서의 투수계수는 필터의 간극비와 관계가 있으므로 초기간극비와 입자퇴적후 간극비를 구하면 그로부터 다음의 식 (8)과 같이 필터내에서의 입자퇴적 전후의 투수계수의 비율을 알 수 있다.

$$K_r = \frac{K_d}{K_i} \quad (8)$$

- 여기서, K_d = 필터내 입자퇴적 후의 투수계수
 K_i = 필터내 입자퇴적 전의 초기 투수계수

위의 식 (8)로부터 필터내에서의 입자퇴적으로 인한 투수계수의 저하 정도를 파악할 수 있고, 따라서 필터를 설계하는데 있어서 투수성 측면에서 참고할 수 있을 것으로 생각된다.

2.2 실험 장치

풍화잔적토의 입자유동실험을 위해 필요한 장치로는 투수시험기(penetroimeter), 펌프드라이브, 탁도계(turbidimeter), 수조, 교반기(stirrer) 등이 있다. 실험 장치들의 개략적인 구성 상태는 다음의 그림 3과 같다. 투수시험기로는 다짐몰드를 이용하였는데, 필터가 장치되고 실제적인 실험이 실시되는 장치이다. 펌프드라이브는 투수시험기 내로 유량을 공급하는 장치이며 수동 또는 자동으로 유량을 제어할 수 있게 되어 있다. 탁도계는 유리로 이루어진 셀(cell) 내부에 부유해 있는 입자의 수로부터 탁도를 측정하고, 그 탁도로부터 유출용액의 농도를 측정할 수 있게끔 만들어진 장치이다. 또한 수조 내에서 교반기를 이용하여 일정한 농도를 가지는 현탁액을 만들어서 실험 도중에 일정한 시간 간격을 두고 교반하였으며, 이 현탁액을 펌프드라이브를 이용하여 투수시험기 상부에 주입하여 실험을 실시하였다.

2.3 실험 방법

본 실험에서는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 흙모체 부분을 제거하고 대신 일정한 농도를 가지는 현탁액(suspension)을 다짐몰드 상부에서 주입한 후 몰드 하부에 장치되어 있는 필터층을 통과시켜 시간에 따른 유출액의 농도를 측정하였다. 현탁액의 농도는 100, 500, 1000 mg/l의 세 가지로 설정하였고, 각 농도 단계에서 10, 20, 40 ml/min.의 세 가지 유량조건에 따라 실험을 수행하였다.

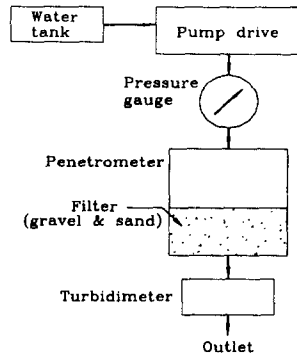


그림 3 실험장치들의 구성도

필터층은 신내동, 포이동 각 시료의 입도분포곡선으로부터 그림 4, 5와 같은 필터설계기준(Terzaghi와 Peck, 1948)에 맞추어 제작하였다. 아래의 그림들 중 실제로는 $D_{15(F)}=4D_{15(B)}$ 로 표시되는 곡선을 이용하였는데, 이는 필터의 막힘 현상을 주로 고찰하기 위한 것이다.

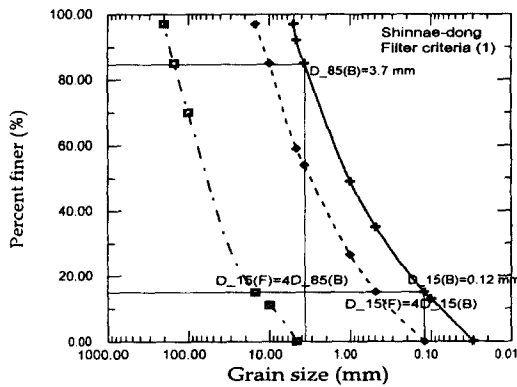


그림 4 필터설계기준 I
(신내동시료용 필터)

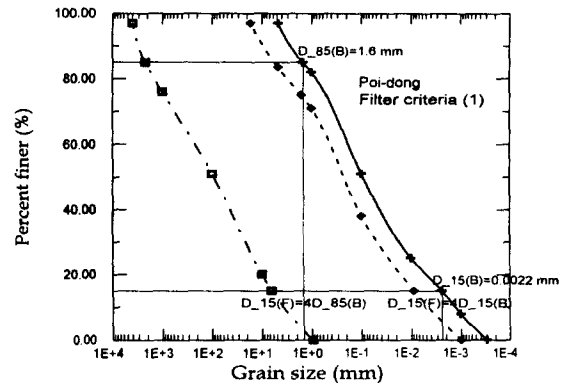


그림 5 필터설계기준 I
(포이동시료용 필터)

2.4 실험 결과

입자유동실험 결과, 시간에 따른 유출농도의 변화를 알 수 있었으며, 그로부터 앞에서 제시했던 식 (5)를 이용하여 필터계수를 구하였다. 세 가지 농도 조건 중 초기농도가 1000 mg/l인 경우의 결과를 다음의 그림 6, 7과 같이 나타내었다. 그림 6, 7의 결과를 보면 실험 시작 후 매우 짧은 시간 내에 침두값에 이른 후 정상상태에 이른 것을 알 수 있다. 따라서 각 실험 조건에서의 필터계수는 정상상태의 값으로 볼 수 있다.

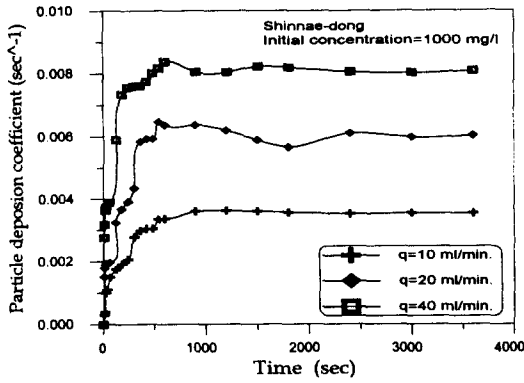


그림 6 필터계수 λ 에 대한 실험값
(신내동시료용 필터, $C_i=1000$ mg/l)

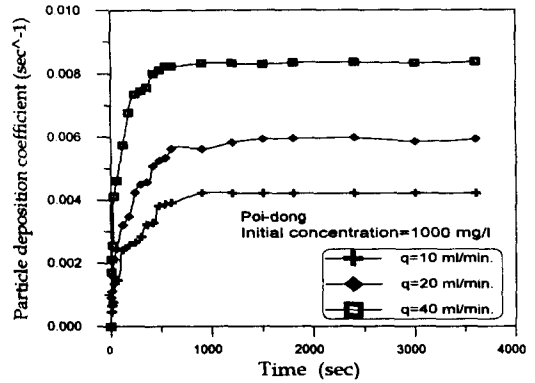


그림 7 필터계수 λ 에 대한 실험값
(포이동시료용 필터, $C_i=1000$ mg/l)

각 실험조건에서의 정상상태의 값을 필터계수로 간주하고 다음의 그림 8~11과 같은 관계를 구하였다.

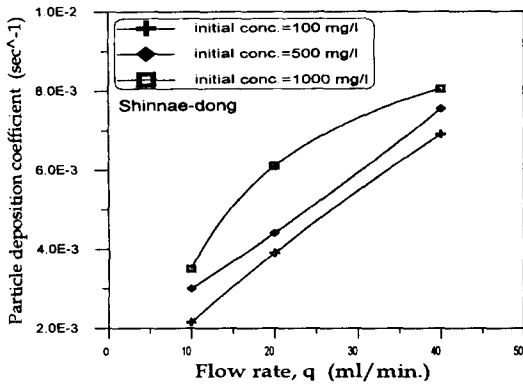


그림 8 유량에 따른 필터계수의 변화
(신내동시료용 필터)

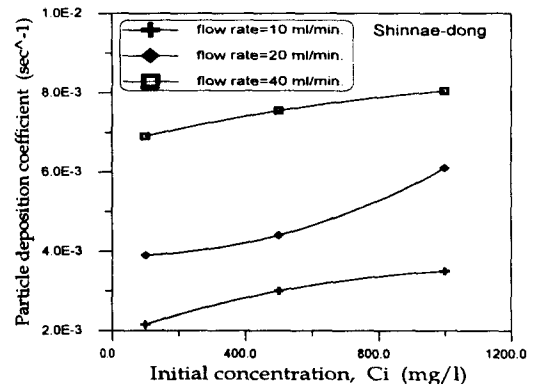


그림 9 초기농도에 따른 필터계수의 변화
(신내동시료용 필터)

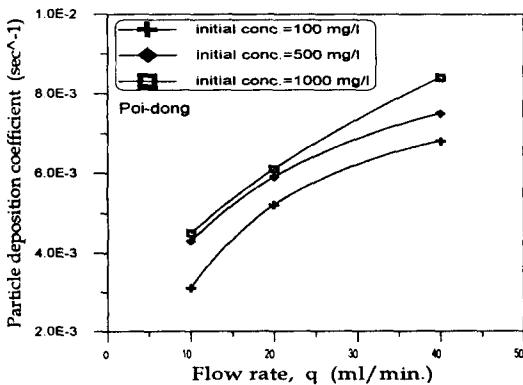


그림 10 유량에 따른 필터계수의 변화
(포이동시료용 필터)

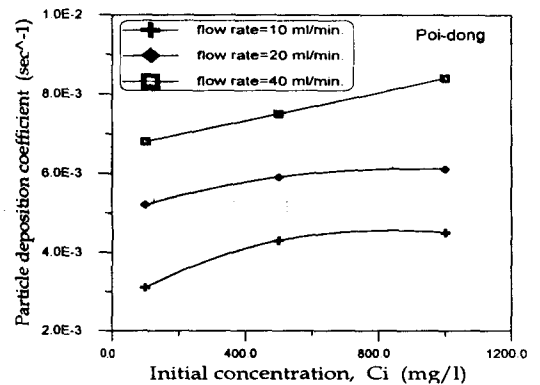


그림 11 초기농도에 따른 필터계수의 변화
(포이동시료용 필터)

위의 그림 8과 9는 신내동시료용 필터의 경우 유량과 초기농도에 따른 필터계수의 변화 양상을 나타내고 있다. 그림 8에서 초기농도가 1000 mg/l일 때의 필터계수 값이 불안정한 경향을 보인 이유는, 신내동시료용 필터의 입경이 전체적으로 크기 때문에 간극크기의 분포가 비교적 불균일함으로 인한 결과라고 생각된다. 그림 10과 11은 포이동시료용 필터의 경우를 나타내고 있는데 신내동의 경우보다 비교적 안정된 경향을 보이고 있다. 이는 앞에서 서술한 바와 마찬가지로 포이동시료용 필터의 입경이 신내동의 경우보다 작기 때문에 간극크기의 분포도 비교적 균일하기 때문인 것으로 생각된다. 위와 같이 필터계수의 변화 양상을 분석한 결과 필터계수는 초기농도가 증가할수록, 유량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.

2.5 필터의 막힘 정도에 대한 평가

Reddi와 Bonala(1996)는 다음의 식 (9)와 같이 필터계수 λ 에 대한 해석적인 해(analytical solution)를 제시하였다.

$$\lambda = \frac{V}{a^* e^{2(b^2+m)}} [4K_1 - 4K_2 e^{(b^2-2m)/2} + K_3 e^{2(b^2-m)}] \quad (9)$$

- 여기서, a^* = 필터내의 간극 형상을 튜브로 가정할 때, 튜브의 유효 길이
 m = 간극반경 r 의 대수정규분포(log-normal distribution)에서의 평균값
 b = 간극반경 r 의 대수정규분포에서의 표준편차
 θ = 필터 간극내 유동입자간에 작용하는 중력, 관성력, 수리동역학적 힘, 전기이중층 및 van der Waals 힘 등을 포괄적으로 고려하는 변수
 a = 유동입자의 반경
 $K_1 = (\theta a)^2$; $K_2 = (\theta a)^3$, 그리고 $K_3 = (\theta a)^4$

본 논문에서는 실험을 통해서 구한 필터계수 값과 식 (9)에 들어있는, 여러 가지 필터계수에 영향을 미치는 인자들을 이용하여, 필터계수 외에 필터내에서의 입자퇴적 정도를 평가할 수 있는 변수 θa 를 구하였다. 그 결과는 표 1과 같다.

표 1 필터기준 I ($D_{15(F)}=4D_{15(B)}$)을 이용한 경우의 각 변수 값과 θa 값

필터대상 시료	유량, q (ml/min.)	필터계수, λ (sec ⁻¹)	유속, V (cm/sec)	a^* (mm)	m	b	θa
신내동	10	0.003	0.0077	0.5375	-0.167	2.173	0.322
	20	0.0044	0.0154				0.298
	40	0.0075	0.0308				0.287
포이동	10	0.0043	0.00737	0.4760	-0.219	2.178	0.584
	20	0.0059	0.0147				0.532
	40	0.0075	0.0295				0.474

위의 표 1에 나타난 바를 분석해 보면, 신내동시료용 필터와 포이동시료용 필터 두 가지 경우 모두 유량이 증가할수록 필터계수가 증가했으며 유량이 비교적 큰 경우는 두 경우의 필터계수 값이 거의 일치하지만 필터내에서의 유동입자의 퇴적 가능성을 나타내는 θa 값은 비교적 큰 차이를 보였다. 이는 필터

계수의 경우 유량 조건에 많이 의존하는 경향이 있는데 반해서 θa 값은 필터입자의 크기의 변화로 인한 간극 분포에 영향을 많이 받기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 필터내에서의 입자퇴적 정도는 필터계수와 θa 값 모두를 고려해야 할 것으로 보인다. 또한 투수계수에 영향을 미치는 (식(7)참조) 간극면적 감소비율은 최대 18%로서 투수계수의 저하는 그리 크지 않을 것으로 보인다.

3. 결론

본 논문에서는 국내의 대표적인 풍화잔적토 지반에 속하는 서울 신내동과 포이동 지역의 흙을 시료로 이용한 실험을 통하여 풍화잔적토의 입자유동으로 인한 필터의 막힘 현상에 대하여 규명하고자 하였다. 본 연구에서의 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 신내동의 경우보다 포이동의 경우 필터내 입자퇴적량이 더 많은 것으로 나타났는데, 이는 포이동시료용 필터의 입경이 상대적으로 작기 때문인 것으로 생각된다.
- 2) 필터 내부를 통과하여 유출된 현탁액의 농도 특성을 보면, 정상상태농도는 유량이 증가할수록, 초기농도가 증가할수록, 필터입경이 증가할수록 점차적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 필터계수 λ 는 초기농도, 유량, 필터입경 등의 인자들에 의해 영향을 받는 것으로 나타났는데, 초기농도가 증가할수록 필터계수도 증가하는 경향을 나타냈으며 한계초기농도값을 초과하면 일정한 값으로 수렴하는 특성을 보였다. 또한 유량이 증가할수록, 필터입경이 감소할수록 증가하는 경향을 나타내었다.

이제까지 기술한 풍화잔적토의 투수 및 입자유동 특성과 입자유동으로 인한 필터의 막힘 현상에 관한 내용은 실내실험을 통한 결과이므로, 앞으로는 풍화잔적토의 공학적 특성 및 실제 현장에서의 거동 형태에 대한 보다 심도 있고 체계적인 연구가 필요할 것으로 생각되며, 또한 필터계수 λ 와 필터설계기준과의 상관관계에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

※ 감사의 글

본 연구는 한국 과학재단과 미국 과학재단(NSF)의 국제 공동 연구 과제(과제번호 985-1200-001-2)의 연구결과 중 일부로서 연구비 지원에 감사한다.

※ 참고 문헌

1. 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.
2. Reddi, L. N. and Bonala, M.(1996), "An analytical solution for filter clogging by fines", Paper Submitted to ASCE Journal of Geotechnical Eng., December 1996.
3. Saltelli, A., Avogadro, A., and Bidoglio, G.(1984), "Americium filtration in glauconitic sand columns", Nuclear Technology, 67, : pp. 245~ 254.
4. Terzaghi, K. and Peck, R. B.(1948), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, New York.