

점도 변화와 폐색 현상을 고려한 그라우트재의 침투 특성

Effect of Viscosity and Clogging on Grout Penetration Characteristics

김 종 선¹ Kim, Jong-Sun

최 용 기² Choi, Yong-Ki

박 종 호³ Park, Jong-Ho

우 상 백⁴ Woo, Sang-Baik

이 인 모⁵ Lee, In-Mo

Abstract

Many construction projects adopt grouting technology to prevent the leakage of groundwater or to improve the shear strength of the ground. Recognition as a feasible field procedure dates back to 1925. Since then, developments and field use have increased rapidly. According to improvement of grout materials, theoretical study on grout penetration characteristics is demanded. Fluid of grout always tends to flow from higher hydraulic potential to lower one and the motion of grout is also a function of formation permeability. Viscosity of grout is changed by chemical action while grout moves through pores. Due to the increment of viscosity, permeability is decreased. Permeability is also reduced by grout particle deposits to the soil aggregates. In this paper, characteristics of new cement grout material that has been developed recently are studied: injectable volume of new grout material is tested in two different grain sizes of sands; and the method to calculate injectable volume of grout is suggested with consideration of change in viscosity and clogging phenomena. The calculated values are compared with injection test results. Viscosity of new grout material is found to increase as an exponential function of time. And lumped parameter θ of new grout material to be used for assessing deposition characteristics is estimated by comparing deposit theory with injection test results considering different soil types and different injection pressures. Injection test results show that grout penetration rate is decreased by the increase of grout viscosity and clogging phenomena.

요 지

1925년 이후 지반개량공법은 많은 발전을 거듭해 왔으며, 많은 건설현장에서 차수의 목적 또는 지반강도 증진의 목적 등으로 그라우팅이 적용되어왔다. 지반개량공법의 발전과 더불어 그라우트재의 종류 또한 그 수가 증가되었으며, 그라우트재의 침투 특성과 관련된 이론적인 연구의 필요성이 요구되었다. 전수두차에 의해 그라우트재의 흐름이 발생되며, 그라우트재의 이동은 지반의 투수계수의 영향을 받는다. 그라우트재가 지반의 간극을 지날 때, 그라우트재의 화학반응에 의해 점도가 변화되며, 따라서 점도 증가로 인하여 투수계수는 감소하게 된다. 또한 현탁액형의 그라우트재의 경우 그라우트재 입자에 의한 지반 간극의 폐색으로 투수계수가 감소하게 된다. 본 논문에서는 새로 개발된 그라우트재의 물리적·화학적 특성을 연구하고, 입경이 다른 두 종류의 모형지반에서 실시된 신개발 그라우트재의 주입실험 결과와 비교하여 점도변화와 폐색현상을 고려한 그라우트재의 침투 가능성을 이론적으로 제시하고자 한다. 측정된 신개발 그라우트재의 점도는 시간의 지수함수 형태를 보였으며, 실험결과와 비교하여 폐색현상과 관련된 계수 θ 를 추정하였다. 그라우트재의 점도 변화는 시간에 따른 주입량에 많은 영향을 주는 것으로 나타났으며, 간극의 크기가 작은 지반에서 주입실험을 실시한 결과 폐색현상의 영향으로 주입량이 현저하게 감소되는 것으로 나타났다.

Keywords : Change in viscosity of grout, Clogging, Grouting, Grout penetration characteristics

1 정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사과정 (Member, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 윈컨설팅 대표이사 (Member, Win Consulting)

3 정회원, 평화지오택(주) 사장 (Member, Pyounghwa Geotec Co., Ltd.)

4 정회원, 지오ENG 대표이사 (Member, Geo Eng)

5 정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수 (Member, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr, 교신지자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 우리나라에서는 고속철도, 고속도로, 지하철, 댐, 항만 등 대형건설공사가 진행되면서 약액주입공법의 작용사례가 급증하고 있다. 그러나 내구성 저하, 공해 발생, 주입효과 저하, 인접구조물 손상 등 해결해야 할 주입공법의 본질적인 문제점이 많이 노출되고 있다 (김, 2001). 비약액계 중에서 가장 대표적인 시멘트는 강도나 경제적인 측면에서 가장 일반적이지만 조립토 이외의 지반에는 주입되기 힘들며, 경화하기까지 많은 시간이 요구되므로 긴급을 요하는 용수, 누수 등의 차수목적의 시공으로는 부적합한 면이 있다. 그러나 최근 시멘트의 분쇄분급기술이 급속히 발전하여 용액형에 가까운 침투력을 발휘할 수 있는 입경의 주입재 제조가 가능하게 되었으며, 시멘트계를 주재료로 하여 급결을 이룰 수 있는 새로운 그라우트재가 개발 중에 있어 시멘트계 주입재가 가지고 있는 문제점이 개선될 것이라 기대되고 있다. 또한 이러한 재료적인 발전과 더불어 그라우트재의 침투 특성과 관련된 이론적인 연구가 요구된다.

2. 신개발 그라우트재의 특성

2.1 신개발 그라우트재의 입도분포

신개발 그라우트재는 개발단계에 있는 그라우트재이며, 아직 제품명이 확정되지 않아 본 논문에서는 ‘신개발 그라우트재’라고 지칭하였다. 신개발 그라우트재는 무기질계 시멘트를 주원료로 한 주입재로서 급결시멘트와 초미립시멘트로 구성되어 있으며, 약액의 분류상 현탁액계로 구분지어 질 수 있다. 신개발 그라우트재의 입도분석은 입자 크기 분석기를 이용해서 이뤄졌으며,

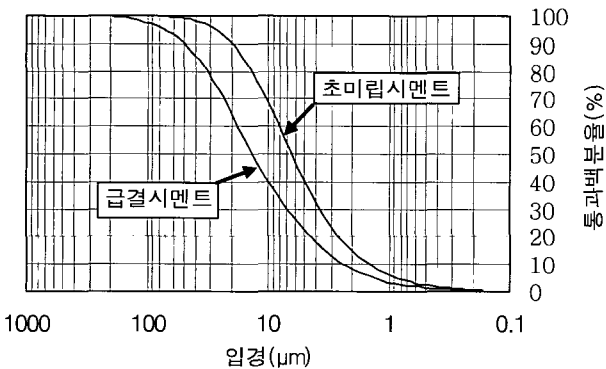


그림 1. 신개발 그라우트재의 입경

급결시멘트와 초미립시멘트의 입도분포는 그림 1과 같다. 신개발 그라우트재의 구성요소인 초미립 시멘트의 D_{85} 는 약 $16\mu m$ 이며, 포틀랜드 시멘트의 D_{85} 가 약 $37\sim 40\mu m$ 인 것을 감안한다면 입자의 크기가 작아진 만큼 침투능의 향상을 기대할 수 있다.

일반적으로 그라우트재의 입경은 그라우트재의 침투 한계와 밀접한 관계를 지니고 있다. 미 육군 공병단에서는 Groutability Ratio(GR)를 통해 침투가능성을 예상하였다. GR은 식 (1)로 표현되며, GR이 11 미만일 경우 침투 불능, 11에서 19 사이의 값을 갖을 경우 침투 가능, 19에서 24 사이의 값을 갖을 경우 충분한 침투 가능, 그리고 24 이상일 경우 침투 양호로 평가하였다.

$$GR = \frac{D_{15}(\text{지반})}{D_{85}(\text{주입재})} \quad (1)$$

신개발 그라우트재의 경우, 실제 지반으로 침투가 발생될 때에는 두 가지 주입재가 혼재되어 있는 상태이므로 주입 상태의 입자는 급결시멘트와 초미립시멘트 사이의 입도분포를 보일 것이다. 그러나 신개발 그라우트재는 물과 혼합되어 주입되므로 수용되는 부분이 발생될 수도 있으며, 그라우트재 입자 상호간의 흡착으로 예상하지 못했던 크기의 입자가 발생될 수도 있다. 또한 급결시멘트와 초미립시멘트의 수화반응으로 새로운 물질이 생성되므로 주입되고 있는 상태에서의 그라우트재의 입자 크기를 결정하는 것에는 어려움이 따른다. 따라서 수화반응 이전의 그라우트재 입자 크기영향 이외에, 수화 반응 이후 발생하는 그라우트재의 변화는 화학적인 원인으로 인한 결과이므로 다른 지표를 사용하여 평가되어야 하며, 실험을 통하여 그라우트재의 침투성이 확인되어야 한다.

2.2 신개발 그라우트재의 점도

흐름 유체가 지반의 흠 입자 사이를 흘러갈 때의 투수계수에는 본래 지반의 특성 이외에도 흐름 유체의 특성이 반영된다. Kozeny-Carman Equation을 살펴보면, 투수계수는 흐름 유체의 점도에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 그라우트재의 점도가 증가한다는 것은 단위 시간 당 그라우트재가 이동할 수 있는 거리가 감소됨을 나타낸다.

신개발 그라우트재의 점도는 저점도 전용 점도계를 이용하여 측정하였으며, 표 1과 같은 배합비로 실험을

표 1. 점도 측정을 위한 신개발 그라우트재의 배합비

case	급결시멘트 현탁액		초미립시멘트 현탁액		그라우트재의 농도(g/cm ³)	
	급결시멘트	물	초미립시멘트	물		
급결형	무게(g)	22.0	92.0	55.0	82.0	0.385
	부피(cm ³)	7.7	92.0	18.0	82.0	

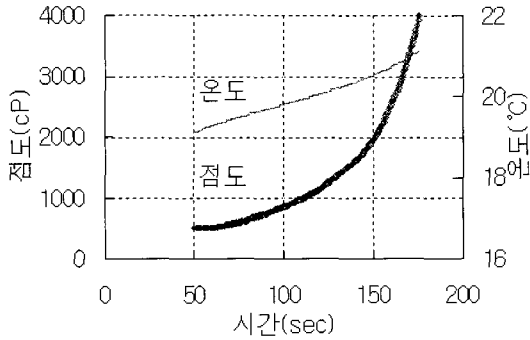


그림 2. 신개발 그라우트재의 점도

수행하였다. 시멘트의 수화반응의 결과로 열이 발생되며 이는 시료의 온도 변화를 유발한다. 따라서 시간에 따른 온도 변화는 수화반응의 진행정도를 간접적으로 파악할 수 있는 지표로 사용될 수 있을 것이다. 그림 2는 급결형 배합비로 혼합한 신개발 그라우트재의 점도 변화를 보여준다. 신개발 그라우트재의 점도 측정 결과 혼합후 시간이 경과함에 따라 점도가 급격하게 증가하는 양상을 보였다.

2.3 신개발 그라우트재의 겔화

신개발 그라우트재의 조성은 표 2와 같으며, 포틀랜드 시멘트에서와 같은 수화반응이 발생하여 경화된다. 수화반응 과정 중 초기 강도와 경화시간 등에 밀접한 관계를 지닌 것이 에트린자이트(Ettringite)의 생성이다. 에트린자이트는 황산염광물로서, 콘크리트 관련 문헌들에서 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$ 혹은 $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26(H_2O)$ 으로 표기되는 칼슘설포알루미늄산 수화물이며(Day, 1992), $[Ca_3[Al(OH)_6] \cdot 12H_2O]^{3+}$ 을 단위로 하는 column 들로 구성되어 있음을 나타내는 $\{Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot 24H_2O\} \cdot [(SO_4)_3 \cdot 2H_2O]$ 로 에트린자이트의 화학조성을 표기 할 수 있다(이, 2003). 이와 같은 에트린자이트의 형성에 필수적인 요소는 황산염의 공급이며, 신개발 그라우트재가 짧은 시간 내 경화 될 수 있는 이유는 급결시멘트 내 포함된 황산염 광물과 촉매제에 있다. 따라서 신개발 그라우트재는 급결시멘트와 초미립시멘트의 배합비 및 초기 온도에 따라서 겔화가 진행되는 시간과 경화가 되는 시간이 결정된다. 그림 3은 급결된 신개발 그라우트재의 모습을 보여주며, 그림 4는 신개발 그라우트재의

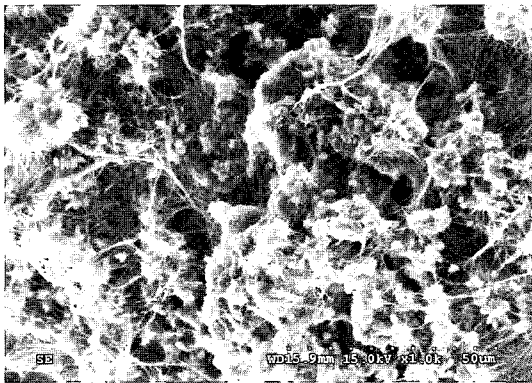


그림 3. 경화된 신개발 그라우트재

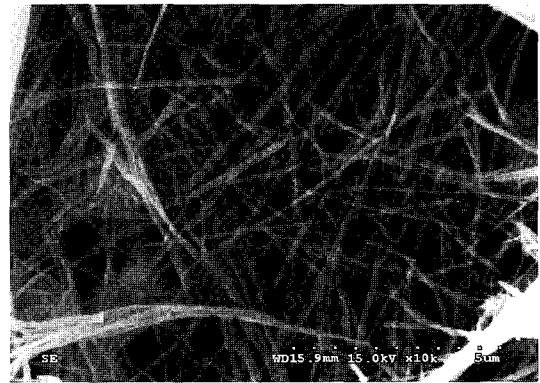


그림 4. 그라우트재 내 에트린자이트

표 2. 신개발 그라우트재의 화학적 조성

급결시멘트	성분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
	조성중량비	3.5~5.5	18~25	-	33~39	-	14~19
초미립시멘트	성분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
	조성중량비	20.16	6.64	1.6	59.36	4.08	2.56

경화과정에 발생된 에트린자이트를 보여준다.

3. 그라우트재의 침투 현상

3.1 그라우트재의 침투 현상

그라우트재는 크게 지반을 변형시키면서 주입되는 경우와 지반에 변형을 발생시키지 않으면서 주입되는 경우로 나누어 생각해볼 수 있다. 할렬주입이나 복합주입의 경우가 전자에 해당되며 침투주입의 경우 후자에 해당된다. 또한 주입재의 특성에 따라서 용액 형이 침투하는 경우와 현탁액 형이 침투하는 경우로 나누어 생각할 수 있다. 미세한 크기의 입자들로 구성된 그라우트재를 주입할 경우 용액 형과 같은 침투를 보일 것으로 예상되나 이는 대상지반의 간극의 크기와 그라우트재 입자 크기의 상대적 차이에 의해서 흐름형태가 결정될 것이므로 미세한 입자로 이루어진 그라우트재라 할지라도 침투 형태는 대상지반의 상태에 따라서 변화될 것이다.

그라우트재가 지반에 침투된다고 하였을 때, 전수두 차에 의해 그라우트재의 흐름이 발생된다. 그러나 그라우트재의 점도변화와 그라우트재 입자에 의한 간극 폐색 등의 영향으로 주입시간에 따라 침투환경이 변화될 것이다. 그라우트재의 점도가 시간에 따라 급격하게 변화된다면, 점도증가로 인하여 투수계수가 감소될 것이며, 점도가 매우 커진 그라우트재는 더 이상 침투되지 못하고 경화될 것이다. 또한 현탁액형의 그라우트재의 경우 물리적 또는 화학적 원인들로 인하여 그라우트재 입자가 지반에 흡착될 것이다. 따라서 흡착으로 인하여 지반의 간극비가 감소되면, 투수계수가 감소되어 이후 주입되는 그라우트재의 흐름에 영향을 줄 것이다.

3.2 점도변화를 고려한 그라우트재의 침투

그라우트재가 구면침투 되는 경우, 그림 5와 같이 형성되는 그라우팅 영역은 시간 단계에 따라서 반지름이 점차 증가되는 형태로 모사 가능하며, 이때 증가되는 그라우팅 영역은 시간 단계 별로 형성된 shell로 생각할 수 있다. 증가되는 반지름을 미소한 크기로 생각할 경우 그라우팅 영역이 증가되는 시간 또한 미소한 크기가 되어 각각의 시간 단계에 따라 다른 점도 값을 적용할 수 있다.

주입압이 일정하다면 주입지점으로부터 거리에 반비례하여 전수두는 감소하게 되며, 흐름 단면적이 변화하지 않

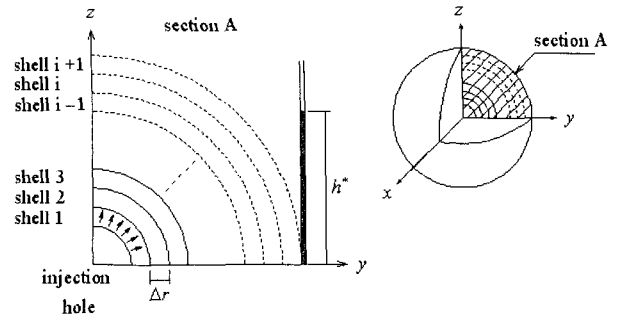


그림 5. 시간 단계 별 형성되는 침투 영역

을 때의 선형적인 감소와는 차이가 있을 것이다. 그러나 shell과 shell 사이의 간격이 충분히 작을 경우, shell과 shell 사이에서의 그라우트재의 전수두는 선형적으로 감소한다고 할 수 있을 것이다. 또한 그라우트재가 대상지반을 교란하지 않고 침투된다면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

시간 단계 Δt 동안 주입된 그라우트재의 부피가 Q 라고 하면, 단위 시간 당 주입량은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$q = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{4}{3} \pi [(r + \Delta r)^3 - r^3] \frac{1}{\Delta t} \cdot n \quad (2)$$

여기서, Δr 은 증가된 반지름이며, n 은 간극률이다. 또한, 그라우트재의 침투가 Darcy의 가정을 만족한다면, 단위 시간 당 그라우트재의 주입량은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$q = K_g \cdot i \cdot A \cdot n \quad (3)$$

여기서, K_g 는 투수계수, i 는 동수경사, 그리고 A 는 흐름 단면적을 나타낸다. 또한, 식 (3)에서 동수경사 i 는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$i = (h_r - h_{r+\Delta r}) / \Delta r \quad (4)$$

식 (4)에서 hr 은 주입 중심으로부터 거리가 r 인 지점에서의 전수두를 나타내며, $hr+\Delta r$ 은 주입 중심으로부터 거리가 $r+\Delta r$ 인 지점에서의 전수두를 나타낸다. 그러나 그라우트재가 구면침투 될 때의 동수경사는 침투반경과 그라우트재의 점도에 따라서 변화된 값을 갖는다. 따라서 이러한 변화를 모두 반영하기에는 어려움이 있으므로 주입지점으로부터 임의의 한 지점 r^* 까지 선형적으로 동수경사가 감소한다고 가정하여 동수경사를 식 (5)와 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$\bar{i} = (h_0 - h^*) / (r^* - r_0) \quad (5)$$

또한, shell의 간격이 미소할 경우 임의의 shell에서 단면적의 변화는 크지 않음으로 식 (6)과 같은 평균 단면적 \bar{A} 를 적용해도 무방할 것이다.

$$\bar{A} \approx \frac{1}{\Delta r} \left[\frac{4}{3} \pi (r + \Delta r)^3 - \frac{4}{3} \pi (r)^3 \right] \quad (6)$$

따라서 연속법칙에 의해 식 (2)와 식 (3)은 같으므로 식 (7)을 유도할 수 있다.

$$\Delta t_i = \{ \Delta r \cdot \mu_g \left(\sum_0^{i-1} \Delta t_i \right) \} / (r_g \cdot K_{int} \cdot \bar{i}) \quad (7)$$

여기서, Δt_i 는 i 번째 shell이 형성되는데 걸리는 시간, $\mu_g \left(\sum_0^{i-1} \Delta t_i \right)$ 는 i 번째 shell에 도달한 그라우트재의 점도, 그리고 K_{int} 는 흐름유체의 특성이 반영되지 않은 본래의 투수계수를 나타낸다. 따라서 시간에 따른 점도 변화함을 알 수 있는 경우, shell 마다 소요 주입시간을 계산하여 주입 시간에 따른 점도변화를 고려한 구근의 반경 및 주입량을 산출할 수 있다.

3.3 폐색 이론

임의의 영역 u 안에서 임의의 성분 E가 증가되는 비율은 영역의 경계를 통해 유입되는 순 유입량과 영역 안에서 발생하는 비율의 합으로 표현될 수 있으며, 이로부터 식 (8)과 같은 미소 미분 평형방정식을 구할 수 있다(Bear, 1991).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot cV^E - \rho\Gamma^E = 0 \quad (8)$$

여기서, c 는 임의의 성분 E의 농도, V^E 는 임의의 성분 E의 속도, ρ 는 상밀도, 그리고 Γ^E 는 임의의 성분 E의 순 발생비율을 나타내며, 방사형의 침투가 발생하는 경우는 식 (9)와 같이 간략하게 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 c V_r^E - \rho\Gamma^E = 0 \quad (9)$$

여기서, V_r^E 는 임의의 성분 E의 반경방향 속도를 나타낸다. 식 (9)에서 세 번째 항은 영역 u 에서 흡착되어 유동성을 잃는 성분 E의 비율과 침식되어 유동성을 얻는 성

분 E의 비율로 표현 가능하며, 침식되어 유동성을 얻는 성분 E의 비율이 흡착되어 유동성을 잃는 성분 E의 비율과 비교하여 무시할 수 있을 정도의 값이라 하면, 식 (9)는 식 (10)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 c V_r^E + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

여기서, σ 는 단위 간극 부피 당 흡착량을 나타낸다. 간극 내 유체의 흐름 속도가 일정하며, 흡착량은 성분 E의 농도에 비례한다고 가정하면 식 (10)은 식 (11)과 같이 표현가능하다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{2}{r} c V_r^E + \frac{\partial}{\partial r} c V_r^E + \lambda c = 0 \quad (11)$$

여기서, λ 는 흡착계수를 나타낸다. 식 (11)은 편미분 방정식으로 특성함수를 이용하여 상미분 방정식으로 유도하여 해를 구할 수 있으며, 초기 조건과 경계 조건을 적용할 경우 식 (12)와 같은 해를 얻을 수 있다(Gruesbeck and Collins, 1982).

$$c(r, t) = c_0 \frac{(r_0)^2}{\exp\left[-\frac{\lambda}{V_r^E} r_0\right] \cdot r^2} \exp\left[-\frac{\lambda}{V_r^E} r\right] U\left(t - \frac{r}{V_r^E}\right) \quad (12)$$

여기서, t 는 주입시간을 나타내며, $c(r, t)$ 는 시간과 공간에 따른 성분 E의 농도, C_0 는 성분 E의 초기 농도를 나타내며, U 는 Heaviside Unit Step Function을 나타낸다. 단위 시간 당 흡착량이 성분 E의 농도에 비례한다는 가정으로부터 단위 간극 부피 당 흡착량 σ 는 식 (13)과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma(r, t) = \lambda c_0 \frac{(r_0)^2}{\exp\left[-\frac{\lambda}{V_r^E} r_0\right] \cdot r^2} \exp\left[-\frac{\lambda}{V_r^E} r\right] \left(t - \frac{r}{V_r^E}\right) \quad (13)$$

3.4 흡착 계수 λ

흡착계수 λ 는 흐름유체의 농도와 흡착량을 연관시켜 주는 계수로써 흡착량은 흡착계수 λ 에 민감하게 영향을 받는다. Reddi는 'Particle capture probability approach'를 적용하여 이론적으로 흡착계수 λ 를 구하는 방법을 제시하였으며, λ 는 식 (14)와 같이 표현될 수 있다(Reddi, 1997).

$$\lambda = \frac{V}{\alpha^* e^{2(b^2+m)}} \left[4K_1 - 4K_2 e^{(b^2-2m)/2} + K_3 e^{2(b^2-m)} \right] \quad (14)$$

여기서, V는 간극유속, α^* 는 간극튜브의 유효길이, m과 b는 간극반경 r의 대수정규분포에서의 평균과 표준편차를 나타내며, K_1 , K_2 , 그리고 K_3 는 lumped parameter θ 와 유동입자의 크기 a로 표현되는 값이다. 이 방법은 지반을 필터라고 고려할 때 입자가 간극을 통과하며 필터에 입자가 부착될 가능성을 평가하는 것으로, 입자가 필터를 통과할 때 발생하는 퇴적현상으로부터 필터의 공학적 특성, 유동입자와 간극 유체의 물리·화학적 특성을 함수로 표현하는데 적합하다.

식 (14)를 살펴보면 λ/V 는 흡착량 계산에 있어서 중요한 값이며, λ/V 값에 따라서 거리에 따른 흡착량 분포가 변화된다. λ/V 는 주입재의 입경과 주입대상 지반의 입경 그리고 lumped parameter θ 에 의해 결정됨으로 실험을 통하여 lumped parameter θ 와 주입재의 입경이 결정된 경우 주입 대상토질의 입도분포 자료만으로도 침투능 평가가 가능할 것이라 기대된다.

3.5 그라우트재의 주입범위 산정

대부분의 그라우트재는 시간이 경과함에 따라 점도가 증가되는 특성을 보이며, 침투에 있어서 폐색 현상에 의한 영향을 무시할 수 없다. 따라서 시간에 따른 그라우트재의 점도 변화와 폐색 현상에 의한 지반의 간극률 감소를 고려한 침투 범위가 제시되어야 한다.

그림 2로부터 식 (15)와 같은 시간에 따른 점도 함수를 산출할 수 있으며, 이를 근간으로 그림 5와 같이 침투 범위를 일정한 두께의 shell로 나누어 생각한다면 i번째 shell까지의 주입시간으로부터 i+1번째 shell에 침투되는 그라우트재의 점도를 추정하여 점도변화를 고려할 수 있다.

$$\mu(t) = 159.65 \cdot \exp(0.018 \cdot t) - 146.65 \quad (15)$$

지반에 그라우트재가 흡착되는 경우 흡착된 그라우트재는 더 이상의 유동성을 갖지 않는다고 하면, 초기 간극률에서 흡착된 그라우트재의 부피만큼 지반의 간극률이 감소될 것이며, 간극률의 감소는 투수계수의 감소로 이어져 그라우트재의 침투능이 감소될 것이다.

흡착량 계산에 필요한 변수들은 그라우트재가 침투되면서 변화되는 값이지만 해석범위를 매우 작은 단위로 한다면 해석 범위 안에서는 상수 값으로 적용 가능할

것이다. 식 (2)와 식 (3)으로부터 j번째 shell의 간극 부피만큼의 그라우트재가 각각의 shell을 통과하는데 소요되는 시간 $\Delta t_{i,j}$ ($1 \leq i \leq j$)는 식 (16)과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta t_{i,j} = \{Q_{j,j} \cdot n_{j,j} \cdot (\mu_g)_{i,j}\} / \{(\gamma_g)_{i,j} \cdot K_{i,j} \cdot i \cdot A_{i,j} \cdot n_{i,j}\} \quad (16)$$

여기서, i는 위치를 나타내며 j는 단위 시간을 나타내며, $Q_{j,j}$ 는 j번째 shell의 부피를 나타낸다. j값이 동일할 경우 동시에 발생하는 흐름이므로 $\Delta t_{1,j}$ 부터 $\Delta t_{i,j}$ 까지는 같은 값이어야 한다. 또한 임의의 shell에서 흡착으로 인한 간극률 감소 또는 점도 증가로 인하여 침투성이 감소될 경우, 침투성이 감소된 shell에서의 투과 시간이 j번째 침투 소요시간을 지배할 것이다. 따라서 j번째 단위 시간 Δt_j 는 식 (16)으로부터 식 (17)과 같이 표현 가능하다.

$$\Delta t_j = \max(\Delta t_{1,j}, \Delta t_{2,j}, \dots, \Delta t_{j,j}) \quad (17)$$

또한 간극유속은 단위 시간 별 침투 소요시간으로부터 식 (18)과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{i,j} = (Q_{j,j} \cdot n_{j,j}) / (\Delta t_j \cdot A_{i,j} \cdot n_{i,j}) \quad (18)$$

흡착량 계산에 있어서 문제는 간극의 크기를 결정하는데 있으며, 흡 입자의 크기와 간극 크기와의 관계를 알아내는 것이 중요하다. 이와 관련하여 Arya와 Dierolf(1989)는 식 (19)와 같은 흡 입자의 반경과 간극 반경과의 관계를 제시하였다.

$$r_i = \left[\frac{4 \cdot e \cdot R_i^3}{3 \cdot \alpha^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

여기서, r_i 는 간극의 반경, R_i 는 흡 입자의 반경, e는 간극비를 나타내며, α^* 는 간극튜브의 유효길이를 나타낸다.

임의의 shell에서의 흡착량은 침투거리에 따라 감소되는 분포를 보이지만 shell의 두께가 충분히 작은 크기라면 임의의 shell에서의 평균 흡착량 만큼 동일하게 간극률이 저하되었다고 할 수 있을 것이다. 또한, shell의 두께가 충분히 작은 크기라면 거리에 따른 흡착량은 근사적으로 선형으로 변화함으로 평균 흡착량은 식 (20)과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\sigma}_{i,j} = \sigma \left(r_i + \frac{\Delta r}{2}, t_j \right) \quad (20)$$

단위 간극 부피 당 흡착량은 주입시간이 증가함에 따라 증가하는 함수이지만 주입시간에 따라 흡착계수 의 값이 변화하므로 주입시간과 정비례관계에 있다고 할 수 없다. 따라서 단위 간극부피 당 흡착량을 식 (13)으로 부터 바로 얻을 수 없으며, t_j 에서의 단위 간극 부피 당 흡착량을 구하기 위해서는 단위 시간 별 흡착량의 합으로부터 산출되어야 한다. 즉, t_j 가 아닌 Δt_j 동안의 흡착량을 산출하여 식 (21)과 같이 계산되어야 한다.

$$\sigma_{i,j} = \sum_{n=i}^j \Delta \sigma_{i,n} \quad (21)$$

따라서 j 번째 단위시간까지 각각의 shell에 흡착된 그라우트재의 무게를 산출할 수 있으므로 $j+1$ 번째 단위시간동안 적용될 지반의 간극률은 식 (22)와 같이 표현될 수 있다.

$$n_{i,j+1} = n_0 - (\bar{\sigma}_{i,j}) / (G_g \cdot \gamma_w) \quad (22)$$

또한, Kozeny-Carman equation을 근간으로 하여 본래의 투수계수는 간극비에 가장 민감하므로 간극비의 변화만을 고려한다면 간극률 변화로 인한 투수계수의 변화는 식 (23)과 같이 산출될 수 있다.

$$(K_{int})_{i,j+1} = (K_{int})_{i,j} \cdot \frac{(1-n_{i,j})^2}{(n_{i,j})^3} \cdot \frac{(n_{i,j+1})^3}{(1-n_{i,j+1})^2} \quad (23)$$

4. 주입 실험

4.1 실험 장비의 구성과 실험 조건

그림 6은 개략적인 실험 장치의 구성을 보여주고 있다. 실험 장비는 직경 60cm, 높이 약 60cm의 실린더형 모형지반을 형성할 수 있는 챔버, 급결시멘트와 초미립 시멘트를 주입하기 위한 주입장치, 챔버에 수직방향으로 구속압을 주기위한 장치, 간극수의 흐름을 발생시킬 물을 공급할 물탱크, 배출되는 물을 수집할 수집조 그리고 주입장치와 가압장치에 주입되는 공기압을 제어하는 컨트롤 장치로 구성하였다.

여과 사리용 주문진사를 이용하여 모형지반을 형성 하였으며, 흙 쌓기 중간 일정한 위치에서 스트레이너 형 식과 유사한 선단 주입장치를 설치하였으며, 또한, 흙 쌓기 완료 후 0.44MPa의 구속압을 가해줌으로 지중 상태를 모사하였다. 표 1의 급결형 배합비에 맞추어 급결 시멘트 현탁액과 초미립시멘트 현탁액을 만들어 재료 분리를 방지하면서 그라우트재를 주입하였다. 그라우트 재 주입 후 약 20시간이 지난 후 챔버를 분리하고 구근 을 확인하였으며, 그라우트재가 주입된 흙과 그라우트 재가 주입되지 않은 흙을 분리하여 그라우트재의 주입 범위를 측정하였다. 유로입경이 다른 두 가지의 시료를 사용하였으며, 지반 모사에 사용된 시료의 물리적 특성은 표 3과 같다.

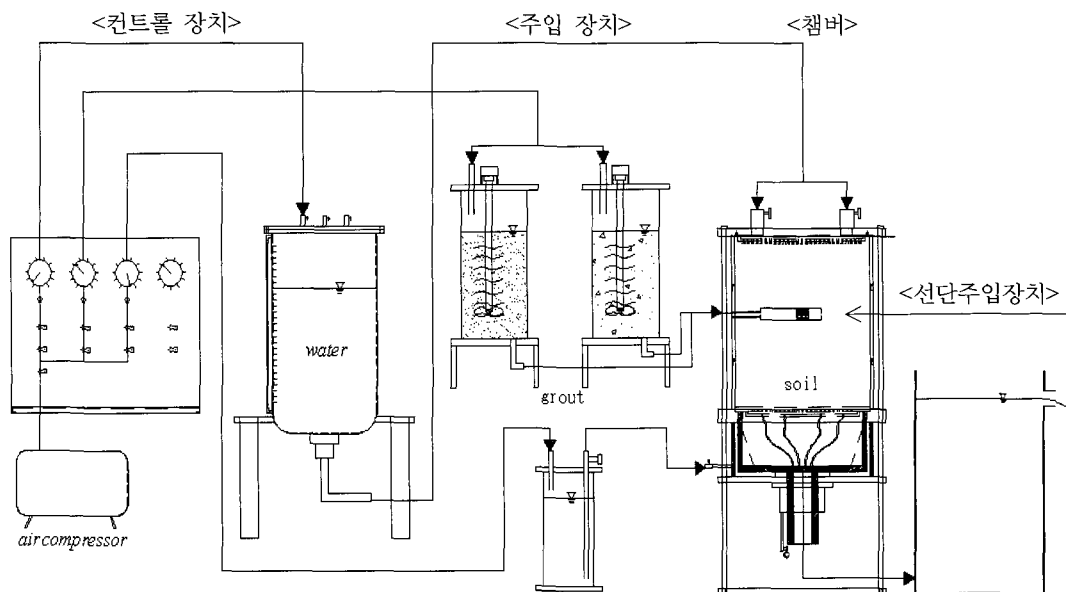


그림 6. 실험 장치 개략도

표 3. 시료의 물리적 특성

구분	D ₁₀ (mm)	D ₁₅ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Gs
시료 A	0.61	0.64	0.71	0.81	0.89	2.62
시료 B	2.12	2.22	2.55	3.10	3.37	2.63
구분	분류	m	b	e	Dr(%)	D ₈₅ (mm) 주입재
시료 A	SP	-1.51	0.357	0.75~0.79	30~40	0.0205
시료 B	SP	-0.0202	0.224	0.71~0.74	7~25	0.0205

4.2 실험 결과와 이론해

그라우트재의 경화 또는 지반 간극의 폐색에 의하여 그라우트재가 더 이상 주입이 되지 않을 때까지 주입을 실시하였으며, 그림 7과 그림 8은 각각 시료 A와 시료 B에 형성된 구근을 보여준다. 시료B에서는 비교적 원활한 침투주입이 가능하였으며, 시료A에서는 시료B에서와 비교하여 많은 양의 그라우트재를 침투 주입할 수는 없었다.

주입압을 변화시켜가며 실험을 반복 수행하였으며, 그림 9는 주입압에 따라 주입된 그라우트재의 부피를 보여준다. 점은 실험 결과를 나타내며, 선은 해석결과에 의한 최대 주입량을 나타낸다. 비교적 침투주입이 원활하였던 시료B에서의 실험결과를 바탕으로 적절한 동수경사를 가정하였으며, 폐색현상의 영향이 많았던 시료A에서의 실험결과를 바탕으로 lumped parameter θ 를 산출하였으며, 그 값은 약 3.4로 해석되었다.

표 3에 제시된 값을 식 (1)에 적용하면 실험에 사용된 시료A와 시료B에 대한 신개발 그라우트재의 GR값은 모두 24이상으로 시료A($GR \approx 31$)와 시료B($GR \approx 108$)에서 모두 원활한 침투를 보여야 한다. 그러나 실험 결과 시료B의 경우 주입압이 증가됨에 따라서 선형에 가깝게 주입량이 증가되었으나, 시료A의 경우 주입압이 증

가하여도 주입량은 크게 변화되지 않았다. 시료A에서의 주입 실험에서는 시료B에서와 비교하여 폐색현상으로 인하여 침투주입이 잘 이뤄지지 못했던 것으로 판단된다. 시료A에서의 실험 결과는 GR값은 충분히 크지만 폐색현상 등으로 인하여 침투가 원활하지 않을 수 있으므로 단순히 지반의 입경과 주입재의 입경만을 비교하여 침투성을 판단할 수 없다는 것을 보여준다. 따라서 그라우트재의 물리적인 특성과 화학적인 특성 모두를 고려해야 그라우트재의 침투능 판단이 현실성 있을 것이라 판단된다.

폐색 이론에 근거한 흡착량 계산에 있어서 λ/V 는 중요한 계수로서 λ/V 가 클수록 더 많은 흡착이 발생되어 간극이 폐색되기 쉬어짐을 나타낸다. 즉 주입대상지반의 간극의 크기가 작을 수록 그라우트재의 침투능이 감소하며, 그라우트재와 지반 사이의 끌림력이 클수록 그라우트재의 침투능이 감소하게 된다.

그림 10은 λ/V 값이 매우 작아 흡착이 거의 발생되지 않을 때의 최대 주입량을 기준으로 λ/V 값에 따라 계산된 최대 주입량과의 비를 근거로 침투능을 제시한 것이다. 시료B에서의 경우 흡착의 영향이 없을 경우와 비교하여 약 60%정도 주입량을 보인 후 지반 간극의 폐색으로 인하여 더 이상 침투주입이 불가능 하였으며, 시료A에서의 경우 GR값을 기준으로 원활한 침투를 보일 것



그림 7. 시료A에 형성된 구근

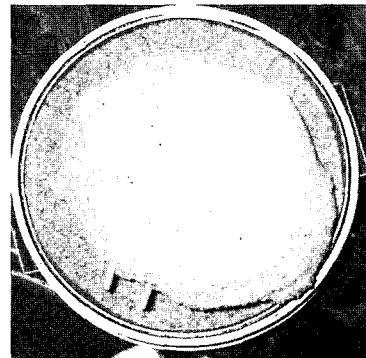


그림 8. 시료B에 형성된 구근

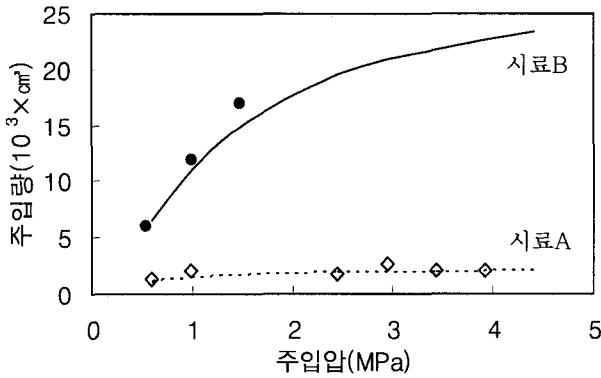


그림 9. 주입압에 따른 주입량

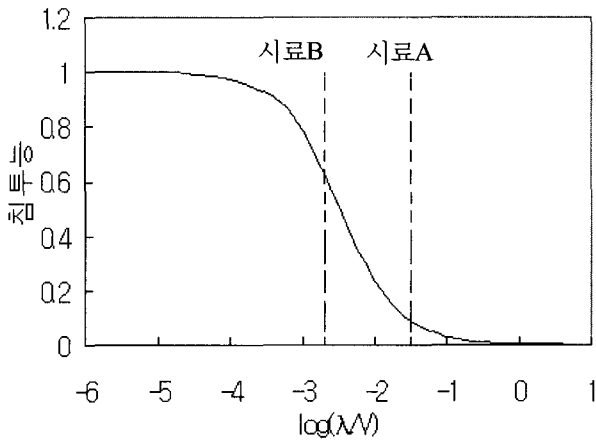


그림 10. 신개발 그라우트재의 침투능

이라 예상되었지만 흡착의 영향이 없을 경우와 비교하여 약 10% 정도의 주입량을 보인후 더 이상의 침투주입이 불가능 하였다.

5. 결론

본 연구에서는 물유리계를 사용하지 않고 시멘트계를 주재료로 하는 새로운 그라우트재가 개발됨에 따라 신개발 그라우트재의 물리적 화학적 특성을 연구하였으며, 점도 변화와 폐색현상을 고려한 그라우트재의 침투 특성을 연구하였다. 연구수행 결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) 점도 실험 결과 신개발 그라우트재의 점도는 시간이 경과함에 따라 지수함수의 형태로 증가되는 것으로 나타났다. 이와 같이 그라우트재의 점도가 변화되는 경우, 주입 시간에 따른 그라우트재의 주입량을 산출할 수 있는 방법을 제시하였다.

(2) 침투가 양호할 것이라고 예상되는 두 종류의 모래

시료에서 신개발 그라우트재의 주입실험을 실시한 결과, GR 값이 약 108이었던 시료B에서는 비교적 원활한 침투주입이 이뤄졌으며, GR 값이 약 31이었던 시료A에서는 GR 값을 기준으로 원활한 침투가 예상되었으나 폐색현상의 영향으로 원활한 침투 주입이 이뤄지지 못했다고 판단된다. 이를 폐색이론을 적용하여 설명하였으며, λ/V 값을 기준으로 침투능을 평가하였다.

(3) 점도변화와 폐색현상은 시멘트계 그라우트재가 사질토 지반에 침투함에 있어 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 그라우트재 입자에 의한 지반 간극의 폐색은 그라우트재의 침투 한계에 많은 영향을 준다. 따라서 지반과 주입재의 입경비로 침투가능성을 판단하는 것과 비교하여 점도변화와 폐색현상을 고려하여 그라우트재의 침투능을 평가하는 것이 보다 구체적인 평가가 될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술 C01)과 대원토질(주)에 의해서 이루어진 것으로, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김진춘, 최영철, 정종주, 신상재, 윤남식 (2001), "그라우팅 기술동향과 MSG공법의 특징", *지반*, Vol.17, No.3, pp.40-49.
2. 이효민, 황진영 (2003), "에트린자이트/사우마사이트의 형성 및 안정도와 콘크리트 성능저하에 미치는 영향", *한국광물학회지*, 제16권 제1호, pp.75-90.
3. Arya, L.M., and Dierolf, T.S. (1989), "Predicting soil moisture characteristics from particle-size distributions: An improved method to calculate pore radii from particle radii", *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*, M.T. Van Genuchten and F.J. Leij eds., U.S. Salinity Laboratory, Riverside, Calif., pp.115-124.
4. Bear, J. and Bachmat Y. (1991), "Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media", Kluwer Academic Publishers.
5. Gruesbeck, C. and Collins, R.E. (1982), "Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media", *Society of Petroleum Engineers Journal*, December 1982, pp.847-85.
6. Reddi, L.N. and Bonala, M.V.S. (1997), "Analytical Solution for Fine Particle Accumulation in Soil Filters", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.12, pp.1143-115.

(접수일자 2006. 4. 17, 심사완료일 2007. 4. 10)