

## **점도변화와 흡착현상을 고려한 시멘트계 그라우트재의 새로운 침투 기준** **A New Groutability Criterion of Cement-based Grout with Consideration of Viscosity and Filtration Phenomenon**

김종선<sup>1)</sup>, Jong-Sun Kim, 이인모<sup>2)</sup>, In-Mo Lee, 이문선<sup>3)</sup>, Munseon Lee, 최항석<sup>4)</sup>, Hangseok Choi

- <sup>1)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University  
<sup>2)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University  
<sup>3)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University  
<sup>4)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**SYNOPSIS** : The groutability depends on the properties of the grout, its injection processes, and on the mechanical properties of the soil formation. During the process of pouring cement-based grouting into a porous medium, a variation with time occurs in the viscosity of grout suspension. In addition the particle filtration phenomenon will limit the expansion of the grouted zone because cement particles are progressively stagnant within the soil matrix. In this paper, a closed-form solution was derived by implementing the mass balance equations and the generalized phenomenological filtration law, which can be used to evaluate the deposition of cement-based grout in the soil matrix. The closed-form solution relevant to a particular spherical flow was modified by a step-wise numerical calculation, considering the variable viscosity caused by a chemical reaction, and the decrease in porosity resulting from grout particle deposition in the soil pores. A series of pilot-scale chamber injection tests was performed to verify that the developed step-wise numerical calculation is able to evaluate the injectable volume of grout and the deposition of grout particles. The results of the chamber injection tests concurred well with that of the step-wise numerical calculation. Based on the filtration phenomenon, a new groutability criterion of cement-based grout in a porous medium was proposed, which might facilitate a new insight in the design of the grouting process.

**Keywords** : grouting, groutability, filtration, injection test, cement-based grout

### **1. 서론**

많은 건설현장에서 지하수의 유출을 방지하거나 지반의 물성을 개선하기 위해 그라우팅공법이 적용되고 있으며, 지반의 개량강도나 경제성을 이유로 시멘트계 그라우트재가 광범위하게 이용되고 있다. 그러나 시멘트계 그라우트재는 조립토 이외의 지반에는 적용되기 힘들다는 단점이 있으며, 이를 개선하기 위해 마이크로 시멘트가 개발되었다. 최근에는 이러한 마이크로 시멘트의 주입 특성을 평가하기 위한 연구가 진행되고 있다(Dupla 등, 2005).

시멘트계 그라우트재의 주입가능성은 실험적 방법 통해 많은 연구가 진행되었다. 일반적으로 그라우

트재의 입경은 주입가능성과 밀접한 관계를 지니고 있으며, 그라우트재의 농도, 지반의 상대밀도, 그리고 주입압 등도 주입가능성에 영향을 준다. Burwell(1958)은 다음과 같이 그라우트재와 흙입자의 입경비로서 주입가능성(N)을 평가하였다.

$$N = \frac{D_{15}(\text{base soil})}{d_{85}(\text{cement grout})} \quad (1)$$

여기서,  $D_{15}$ 는 통과량 15%에 해당하는 흙입자의 크기이며,  $d_{85}$ 는 통과량 85%에 해당하는 그라우트재의 입경이다. Burwell은 N값이 25이상일 경우 성공적인 주입이 가능하다고 평가하였으며, N값이 11 미만일 경우 충분한 주입이 불가능하다고 평가하였다. 또한 N값이 25이상인 경우에도 아래와 같은 추가 조건을 만족할 때, 성공적인 주입이 가능하다고 평가하였다.

$$\frac{D_{10}(\text{base soil})}{d_{95}(\text{cement grout})} > 11 \quad (2)$$

여기서,  $D_{10}$ 은 통과량 10%에 해당하는 흙입자의 크기이며,  $d_{95}$ 는 통과량 95%에 해당하는 그라우트재의 입경이다.

실제적으로 시멘트계 그라우트재의 지반으로의 침투에 있어서 흡착현상은 가장 지배적인 현상이다 (Saada 등, 2005). 또한 시멘트계 그라우트재에 급결제가 포함될 경우, 그라우트재의 점도는 수화반응으로 인해 시간에 따라 급격한 증가를 보인다(김 등, 2007). 위와 같은 현상이 발생할 경우, 시멘트계 그라우트재의 침투능(permeability)은 입자의 흡착과 그라우트재의 점도변화에 따라 변화하게 되며, 최종적으로 지반의 간극이 폐색되는 현상이 발생하게 된다.

시멘트계 그라우트재의 침투 모델은 Bouchelaghem과 Vulliet(2004)에 의해 제시된 바 있으며, Maghous 등(2007)은 입자의 흡착현상에 중점을 두어 한계 침투 반경을 제시한 바 있다. 그러나 이들이 제시한 모델은 흡착계수를 상수로 평가 하고 있으며, 그라우트재와 지반의 특성에 따라 주입가능성을 평가하기에는 보다 발전된 모델이 요구된다. 흡착계수는 흐름유체의 농도와 흡착량을 연관시켜주는 계수로서 흡착량은 흡착계수에 민감하게 영향을 받는다. Reddi 등(1997)은 'Particle capture probability approach'를 적용하여 이론적으로 흡착계수  $\lambda$ 를 구하는 방법을 제시하였으며, 흡착계수는 간극유속, 간극튜브의 유효길이, 간극반경의 대수정규분포에서의 평균과 표준편차, 유동입자의 크기, 그리고 lumped parameter로 표현될 수 있다. 이 모델은 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 물리화학적 특성을 함수로 표현하는데 적합하지만, 시멘트계 그라우트재의 주입가능성을 평가하기 위해서는 입자의 흡착에 의한 변화를 고려할 필요성이 있다.

본 논문에서는 그라우트재의 점도변화와 흡착현상을 고려하여 시멘트계 그라우트재의 주입가능성을 평가하였으며, 시멘트계 그라우트재의 침투를 이론적으로 모델링 하였다. 또한 이론적인 시멘트계 그라우트재의 침투 모델과 주입 실험결과를 비교하여 새로운 시멘트계 그라우트재의 침투 주입 기준을 제시 하였다.

## 2. 시멘트계 그라우트재의 침투 모델

### 2.1 모델의 기본 가정

시멘트계 그라우트재의 침투 모델을 구성하기 위해 아래와 같은 기본 가정을 하였다.

- (i) 그라우트재는 구면 침투의 흐름 방향을 갖는다.
  - (ii) 시멘트계 그라우트재의 점도는 수화 반응에 의해 시간에 따라 증가한다.
  - (iii) 흡착된 시멘트 입자는 다시 이탈되지 않는다.
  - (iv) 그라우트재가 지반으로 침투될 때, 흙입자는 이탈되지 않으며 흙모체는 변형되지 않는다.
  - (v) 시멘트 입자의 확산 및 분산에 의한 영향은 무시할 수 있다.
- 그라우트재의 흐름 방향은 선단 주입장치의 형태와 관련이 있다. 선단 주입 장치의 주입구가 실린더

형태라면 그라우트재의 흐름 형태는 원주형에 가까울 것이다. 반면에 주입구가 길이가 짧은 실린더라면 그라우트재의 흐름 형태는 원주형 보다는 구형에 가까울 것이다.

시멘트계 그라우트재의 점도는 급결제가 들어가는 경우와 그렇지 않은 경우로 평가 할 수 있다. 급결제가 사용되지 않은 경우, 주입이 이루어지는 동안 수화 반응에 의한 점도 증가는 기대할 수 없다. 오히려, 시멘트 입자의 흡착이 발생된다면 시멘트계 그라우트재의 점도는 흐름이 진행될수록 감소하는 형태를 보일 것이다(Sadda 등, 2005). 반면에 급결제가 사용되는 경우, 주입이 이루어지는 동안 수화 반응에 의해 그라우트재의 점도는 매우 급격하게 증가 된다(김 등, 2007). 급결제의 사용 여부를 벗어나 시멘트 입자에 의한 지반 간극 폐색은 그라우트재의 침투를 어렵게 하는 지배적인 현상이다. 그러나 지반의 간극 크기가 큰 경우, 흡착에 의한 지반 간극의 폐색보다 점도 증가에 의한 침투능 감소가 그라우트재의 침투를 지배할 수도 있다.

확산 및 분산효과는 다공질매체를 통한 유체의 흐름에 있어서 중요한 요소이다. 그러나 확산과 분산 효과는 용매에 녹아있는 용질의 흐름에 있어서 중요한 사항이며, 시멘트 입자의 확산 및 분산 효과는 미세한 범주의 속하며, 시멘트 입자의 흡착현상이 지배적이므로 시멘트계 그라우트재의 침투 모델에 있어서 입자의 확산 및 분산 효과는 고려하지 않았다.

## 2.2 점도변화에 대한 고려

시멘트계 그라우트재의 점도는 온도, 농도, 그리고 수화반응 속도에 따라 변화하게 된다. 그라우트재에 급결제가 포함되어 주입될 때는 수화반응 속도에 지배되어 점도가 변화한다. 급결제가 이용될 경우는 주로 2-shot형태로 주입이 이루어지며, 급결제가 혼합되는 시점부터 수화 반응에 의해 급격하게 그라우트재의 농도가 증가하게 된다.

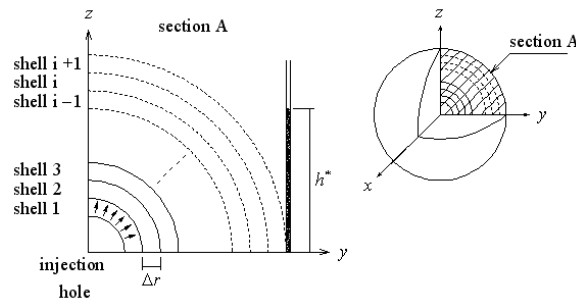


그림 1. 시간 단계 별 형성되는 침투 영역

그림 1과 같이 그라우트재가 구면침투를 이루는 경우 그라우트재의 침투 영역은 시간에 따라 반지름이 증가되는 형태로 묘사할 수 있으며, 침투 영역을 미소 증가분의 합으로 생각할 경우 영역별로 다른 점도 값을 적용할 수 있다. 이때  $i$ 번째 침투 영역이 형성되는데 요구되는 시간은 아래와 같이 표현할 수 있다(김 등, 2007).

$$\Delta t_i = \{ \Delta r \cdot \mu_g \left( \sum_0^{i-1} \Delta t_i \right) \} / (r_g \cdot K_{int} \cdot \bar{i}) \quad (3)$$

여기서,  $\Delta t_i$ 는  $i$ 번째 침투영역이 형성되는데 걸리는 시간,  $\mu_g$ 는 시간에 따른 그라우트재의 점도함수,  $r_g$ 는 그라우트재의 단위 중량,  $K_{int}$ 는 흐름유체의 특성이 반영되지 않은 본래의 투수계수, 그리고  $\bar{i}$ 는 평균 동수경사를 나타낸다. 구면침투 시 동수경사는 실제적으로 주입지점의 거리로부터 비선형적인 분포를 보이며, 유체의 점도 및 흐름매체의 간극 특성에 따라 변화된 분포를 갖는다. 그러나 본 논문에서는 주입지점과 전수두 변화가 거의 없는 임의의 지점 사이에서의 동수경사를 평균 동수경사로 가정하였다.

### 2.3 흡착량 산정

시멘트계 그라우트재의 지반으로의 구면 침투 시 지배 방정식은 연속법칙과 임의의 영역에서의 입자의 동적 평형 상태를 고려할 때, 다음과 같이 유도될 수 있다(김 등, 2007).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 c V_r + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

여기서,  $\sigma$ 는 단위 간극 부피 당 흡착량,  $c$ 는 시멘트의 농도,  $V_r$ 은 반경방향 간극유속을 나타낸다. 간극 내 유체의 흐름 속도가 일정하며, 흡착량은 시멘트 농도에 비례한다고 가정하면 식 (4)는 식 (5)와 같이 표현 가능하다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{2}{r} c V_r + \frac{\partial}{\partial r} c V_r + \lambda c = 0 \quad (5)$$

여기서,  $\lambda$ 는 흡착계수를 나타낸다. 식 (5)는 편미분 방정식으로 특성함수를 이용하여 상미분 방정식으로 유도하여 해를 구할 수 있으며, 초기 조건과 경계 조건을 적용할 경우 식 (6)과 같은 해를 얻을 수 있다 (Gruesbeck and Collins, 1982).

$$c(r, t) = c_0 \cdot \frac{(r_0)^2}{\exp[-\frac{\lambda}{V_r} r_0] \cdot r^2} \exp[-\frac{\lambda}{V_r} r] U(t - \frac{r}{V_r}) \quad (6)$$

여기서,  $t$ 는 주입시간을 나타내며,  $c(r, t)$ 는 시간과 공간에 따른 시멘트의 농도,  $c_0$ 는 시멘트의 초기 농도를 나타내며, 그리고  $U$ 는 Heaviside unit step function을 나타낸다. 단위 시간 당 흡착량이 시멘트의 농도에 비례한다는 가정으로부터 단위 간극 부피 당 흡착량  $\sigma$ 는 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma(r, t) = \lambda c_0 \cdot \frac{(r_0)^2}{\exp[-\frac{\lambda}{V_r} r_0] \cdot r^2} \cdot \exp[-\frac{\lambda}{V_r} r] \cdot (t - \frac{r}{V_r}) \quad (7)$$

그림 2와 그림 3은 식(7)로부터 계산된 시간과 거리에 따른 흡착량을 보여준다. 식(7)로부터 계산된 흡착량은 시간에 비례하여 증가되며, 거리에 따라 지수적 감수분포를 보인다. 그림 2와 그림 3에서 볼 수 있듯이 흡착이 가장 많이 발생하는 곳은 주입구와 근접한 지반 간극이다. 흡착된 시멘트 입자는 지반 간극의 감소를 유발하여 그라우트재의 침투능을 감소시키며, 결과적으로 주입구 주변 지반 간극을 폐색시킨다. 그러나 실제적으로 흡착량은 폐색이 완료될 시점까지만 증가될 수 있으며, 흡착량이 더 이상 증가하지 못하는 시점이 이론적으로 지반 간극이 완전하게 폐색된 시점이다. 또한 흡착이 진행될수록 지반의 간극 특성이 변화됨으로 시간에 따른 흡착량은 비선형적인 형태를 보일 것이다.

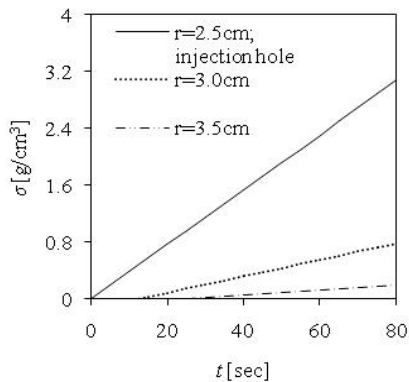


그림 2. 시간에 따른 흡착량-식(7)적용

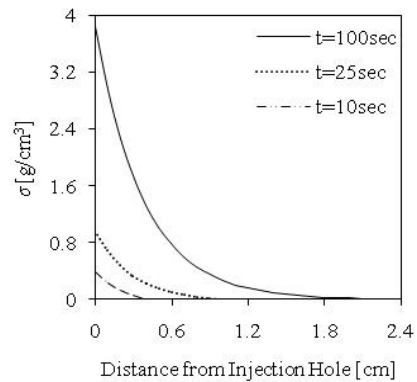


그림 3. 거리에 따른 흡착량-식(7)적용

## 2.4 흡착계수의 산정

흡착계수  $\lambda$ 는 흐름유체의 농도와 흡착량을 연관시켜주는 계수로서 흡착량은 흡착계수  $\lambda$ 에 민감하게 영향을 받는다. Reddi 등은 'Particle capture probability approach'를 적용하여 이론적으로 흡착계수  $\lambda$ 를 구하는 방법을 제시하였으며,  $\lambda$ 는 식 (8)과 같이 표현될 수 있다(Reddi and Bonala, 1997).

$$\lambda = \frac{V}{\alpha^* e^{2(b^2+m)}} \left[ 4K_1 - 4K_2 e^{(b^2-2m)/2} + K_3 e^{2(b^2-m)} \right] \quad (8)$$

여기서,  $V$ 는 간극유속,  $\alpha^*$ 는 간극튜브의 유효길이,  $m$ 과  $b$ 는 간극반경  $r$ 의 대수정규분포에서의 평균과 표준편차를 나타내며,  $K_1$ ,  $K_2$ , 그리고  $K_3$ 는 lumped parameter  $\Theta$ 와 유동입자의 크기  $a$ 로 표현되는 값이다.

흡착이 진행될 경우 간극유속과 간극반경의 분포가 변화되며, 이는 흡착계수의 변동을 가져온다. 간극유속은 투수계수와 연관되어 있으며, Kozeny-Carman equation을 근간으로 판단할 때, 투수계수는 간극률의 고차 함수이므로 흡착으로 인한 간극률 변화는 간극유속에 더 많은 영향을 줄 것이다. 다음절에서는 흡착으로 인한 간극률 변화와 그에 따른 투수계수, 간극유속의 변화, 그리고 점도 변화를 고려한 주입량을 이론적으로 산정하는 과정에 대한 서술을 하고자 한다.

## 2.5 주입량 산정

그라우트재의 침투능과 관련된 지반의 간극률, 지반의 투수계수, 그라우트재의 점도, 그리고 흡착계수는 주입이 진행되면서 모두 변화한다. 그러나 매우 작은 침투 범위를 고려할 경우 각 각의 인자들 상수로 간주할 수 있을 것이다. 따라서 미소 침투 범위를 설정하고 단계별로 인자들의 변화를 고려하여 주입 시간을 산정하고자 한다.

식(3)으로부터 그림 1에서 임의의 침투영역의 간극을 그라우트재로 채우는데 소요되는 시간은 아래와 같다.

$$\Delta t_{i,j} = \{Q_{j,j} \cdot n_{j,j} \cdot (\mu_g)_{i,j}\} / \{(\gamma_g)_{i,j} \cdot K_{i,j} \cdot \bar{i} \cdot A_{i,j} \cdot n_{i,j}\} \quad (9)$$

여기서,  $i$ 는 위치를 나타내며  $j$ 는 단위 시간을 나타내며,  $Q_{j,j}$ 는  $j$ 번째 침투영역의 부피를 나타낸다.  $j$ 값이 동일할 경우 동시에 발생하는 흐름이므로  $\Delta t_{1,j}$ 부터  $\Delta t_{i,j}$ 까지는 같은 값이어야 한다. 또한 임의의 침투영역에서 흡착으로 인한 간극률 감소 또는 점도 증가로 인하여 침투성이 감소될 경우, 침투성이 가장 크게 감소된 영역에서의 투과 시간이  $j$ 번째 침투 소요시간을 지배할 것이다. 따라서  $j$ 번째 단위 시간  $\Delta t_j$ 는 식 (9)로부터 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\Delta t_j = \max(\Delta t_{1,j}, \Delta t_{2,j}, \dots, \Delta t_{j,j}) \quad (10)$$

간극유속은 단위 시간 별 침투 소요시간으로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{i,j} = (Q_{j,j} \cdot n_{j,j}) / (\Delta t_j \cdot A_{i,j} \cdot n_{i,j}) \quad (11)$$

흡착량은 침투거리에 따라 지수적 감소분포를 보이지만 미소의 범위에서는 평균 흡착량 만큼 동일하게 간극률이 저하되었다고 할 수 있을 것이며, 미소 범위의 평균 흡착량은 다음과 같이 표현될 수 있을 것이다.

$$\bar{\sigma}_{i,j} = \sigma \left( r_i + \frac{\Delta r}{2}, t_j \right) \quad (12)$$

단위 간극 부피 당 흡착량은 주입시간이 증가함에 따라 증가하는 함수이지만 주입시간에 따라 흡착계수의 값이 변화함으로 주입시간과 정비례관계에 있다고 할 수 없다. 따라서 단위 간극부피 당 흡착량을 식 (7)로부터 직접적으로 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  $\Delta t_j$ 동안의 흡착량을 산출하여 다음과 같이

계산되어야 한다.

$$\sigma_{i,j} = \sum_{n=i}^j \Delta\sigma_{i,n} \quad (13)$$

지반의 간극률 변화는 계산된 흡착량으로부터 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$n_{i,j+1} = n_0 - (\bar{\sigma}_{i,j}) / (G_g \cdot \gamma_w) \quad (14)$$

투수계수는 Kozeny-Carman equation을 근간으로 하여 식(15)와 같이 변화량을 평가하였다.

$$(K_{int})_{i,j+1} = (K_{int})_{i,j} \cdot \frac{(1-n_{i,j})^2}{(n_{i,j})^3} \cdot \frac{(n_{i,j+1})^3}{(1-n_{i,j+1})^2} \quad (15)$$

시멘트계 그라우트재는 많은 이온들을 포함하고 있으며, 흡착된 시멘트 입자와 흐르는 입자들 사이에는 여러 가지 물리적, 화학적, 전기화학적 힘이 존재 할 수 있으므로, Kozeny-Carman equation을 이용하여 흡착된 입자의 부피만큼 발생한 간극률의 변화로부터 투수계수의 변화를 평가하는 것은 타당성이 부족할 수도 있다. 즉, 식(15)과 같이 투수계수 변화를 평가하는 것은 실제 보다 투수계수 변화량이 다소 작게 평가될 수도 있다.

Reddi와 Bonala(1997)가 제안한 이론적인 흡착량은 흐름유체의 입자 농도가 낮은 경우에는 적용성이 있으나 시멘트계 그라우트재와 같이 흐름유체의 입자 농도가 높은 경우에는 적용성이 부족하다. 그러나 본 논문에서 제시한 이론적 흡착량 계산법은 흡착에 의한 간극률 변화를 고려하였으므로 시멘트 그라우트재의 흡착과정을 보다 현실적으로 모사할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 4와 그림 5는 본 논문에서 제시한 이론적 계산법에 의한 시간과 거리에 따른 흡착량을 보여준다. 그림 6은 시간에 따른 주입량을 보여주며, 그림 6에서 볼 수 있듯이 흡착으로 인한 그라우트재의 침투능 감소로 인해 단위시간당 주입량이 감소하여 최종주입량이 수렴함을 찾아 볼 수 있다. 그림 7은  $\theta$ 에 따른 최종 주입량 분포를 보여주며,  $\theta$ 에 따라 흡착계수가 변화됨으로 최종주입량이 변화함을 알 수 있다.

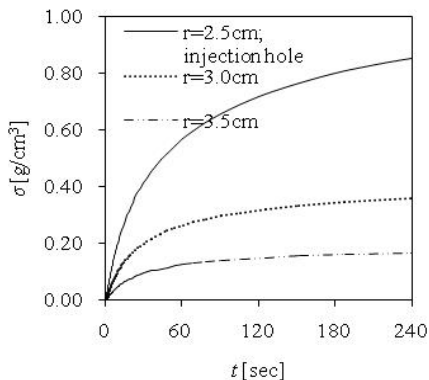


그림 4. 시간에 따른 흡착량

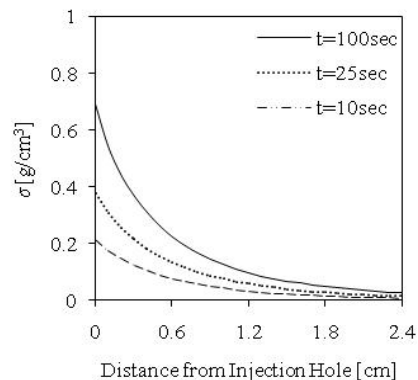


그림 5. 거리에 따른 흡착량

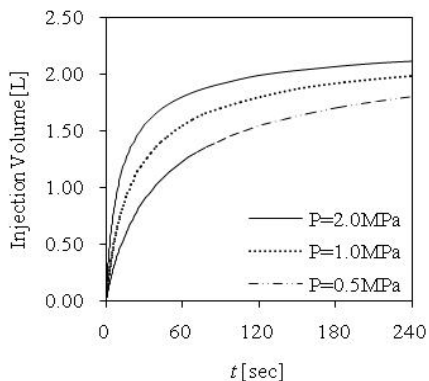


그림 6. 시간에 따른 주입량

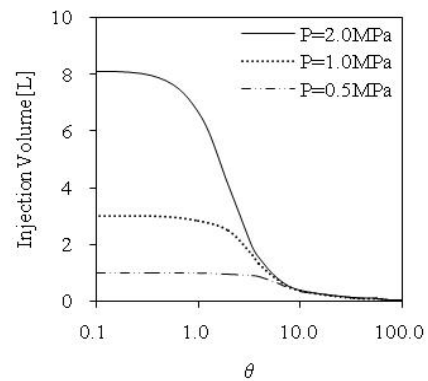


그림 7.  $\theta$ 에 따른 최종주입량

### 3. 주입 실험

#### 3.1 실험 장비의 구성 및 실험 조건

시멘트계 그라우트재의 침투 특성을 파악하고, 본 논문에서 제시한 이론적인 주입량을 검증하기 위해 주입실험을 실시하였다. 개략적인 실험 장치의 구성은 그림 8과 같으며, 실험 장비는 직경 60cm, 높이 약 60cm의 실린더 형 모형지반을 형성할 수 있는 챔버, 급결제와 시멘트계 그라우트재를 주입하기 위한 주입장치, 챔버에 구속압을 주기위한 장치, 그리고 선단 주입장치로 구성하였다.

여과 사리용 주문진사를 이용하여 모형지반을 형성하였으며, 흙 쌓기 중간 일정한 위치에 선단 주입 장치를 설치하였고, 흙 쌓기 완료 후 0.44MPa의 구속압을 가해줌으로 지중 상태를 모사하였다. 실험에 사용된 흙과 그라우트재의 특성 치는 표 1과 표 2에 나타내었다. 시멘트 입자와 급결제는 무게비가 5:2 가 되도록 하였으며, 현탁액 상태의 시멘트 그라우트재와 급결제의 부피비 일정하게 유지하도록 주입을 실시하였다. 시멘트 그라우트재와 급결제가 혼합되었을 때의 점도는 점도계를 이용하여 측정하였으며, 측정된 점도는 그림 9와 같다. 주입량은 주입챔버에 기록된 부피를 통해 측정하였다.

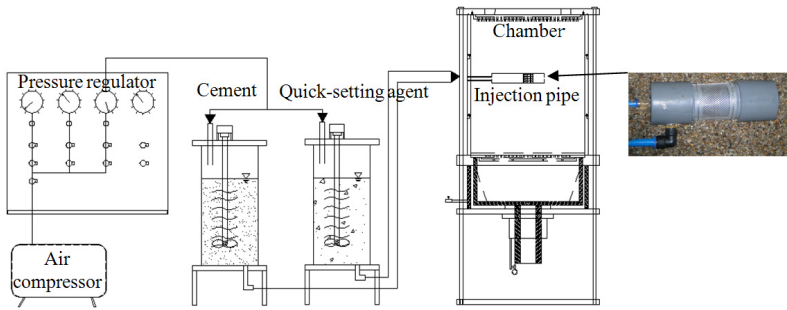


그림 8. 실험 장치 개략도

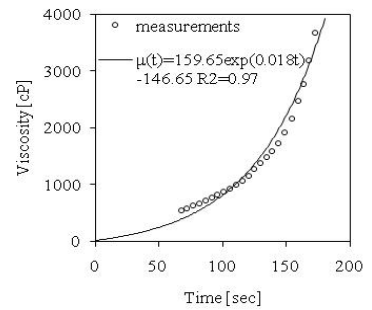


그림 9. 시간에 따른 점도 변화



그림 10. Soil A에 형성된 구근



그림 11. Soil B에 형성된 구근

표 1. 실험에 사용된 흙의 특성

	$m$	$b$	$n_0$	상대밀도(%)	$D_{10}$ (mm)	$D_{15}$ (mm)	$K_{int}$ (cm/sec)
Soil A	-1.51	0.357	0.44	35	0.60	0.64	0.1065
Soil B	-0.0202	0.224	0.43	16	2.10	2.22	0.3510

표 2. 그라우트재의 입경, 농도 그리고 Groutability(N)

	$d_{85}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{95}$ ( $\mu\text{m}$ )	$c_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	N(Soil A)		N(Soil B)	
				$D_{15}/d_{85}$	$D_{10}/d_{95}$	$D_{15}/d_{85}$	$D_{10}/d_{95}$
시멘트	16	27	0.220	40	22	138	77
급결제	37	70	0.550	17	-	56	30
시멘트:급결제(5:2)	20	39	0.385	32	15	111	53

### 3.2 실험 결과와 이론해

그라우트재의 경화 또는 지반 간극의 폐색에 의하여 그라우트재가 더 이상 주입이 되지 않을 때까지 주입을 실시하였으며, 주입압을 변화시켜가며 실험을 반복 수행하였다. 그림 10과 그림 11은 각각 Soil A와 Soil B에 형성된 구근을 보여준다. 형성된 구근은 구형을 취하고 있었으며, 따라서 그라우트재의 침투방향 또한 구면 침투를 보인 것으로 판단되었다.

실험결과 나타난 주입량과 앞서 서술한 이론적인 주입량의 비교를 통해  $\theta$  값을 평가하였으며,  $\theta$  값은 그림 12와 같은 분포를 보였다.  $\theta$  값은 흐름유체의 속도에 의해 크게 변화되지 않았으며, Soil A와 Soil B에서의 평균  $\theta$  값은 3.240과 3.425로 나타났다. 따라서  $\theta$  값이 간극유속에 거의 독립적이므로 식 (10)에서 제시한 흡착계수를 간극유속으로 일반화한 값( $\lambda/V$ )은 상수로 가정할 수 있을 것이다. 그림 13과 그림 14는  $\lambda/V$ 에 따른 이론적 주입량과 실험결과로부터 얻어진 주입량을 비교한 것이다. 비교 결과 Soil A와 Soil B에서의 평균  $\lambda/V$  값은 각각  $0.0289\text{cm}^{-1}$ ,  $0.00208\text{cm}^{-1}$ 로 평가되었다.

Soil A와 Soil B에서 지반 간극이 폐색되는 메커니즘에는 차이가 있다. Groutability(N)를 기준으로 판단할 때, 표2에 제시된 것과 같이 Soil A와 Soil B에서 모두 원활한 침투가 예상되었다. 그러나 Soil A에서는 예상과 실험결과가 일치하지 않았다. 이는  $\lambda/V$ 값의 차이에 의해 발생된 결과로 판단되며, Soil A에서는 흡착으로 인한 지반 간극 폐색이 빠르게 진행된 것으로 판단된다. 그림 15는 시간에 따른 주입량을 보여 주며, 그림 15에서 알 수 있듯이 Soil A에서는 시멘트 입자의 흡착으로 인해 주입 초기 지반 간극이 폐색되어 단위 시간당 주입량이 초기에 감소된 것을 알 수 있다. 반면에 Soil B에서는 그 보다 더 늦은 시점에서 지반 간극이 폐색되었음을 알 수 있으며, 그림 9와 그림 15의 비교를 통해 Soil B에서 지반 간극이 폐색된 시점은 그라우트재의 점도가 급격하게 증가된 시점과 유사함을 알 수 있다.

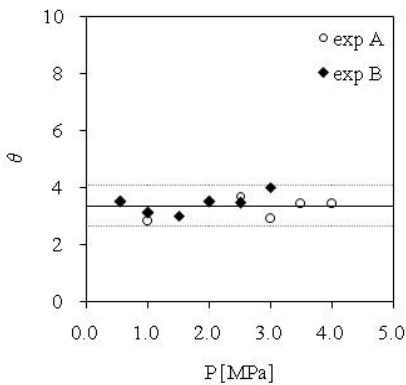


그림 12. 산출된  $\theta$  값

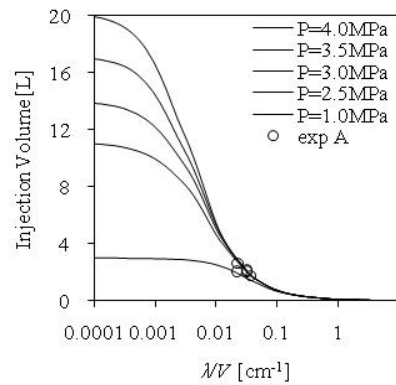


그림 13. Soil A에서  $\lambda/V$ 에 따른 주입량

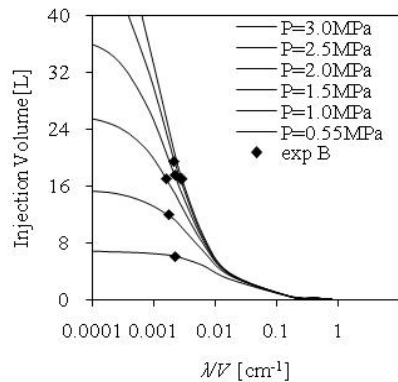


그림 14. Soil B에서  $\lambda/V$ 에 따른 주입량

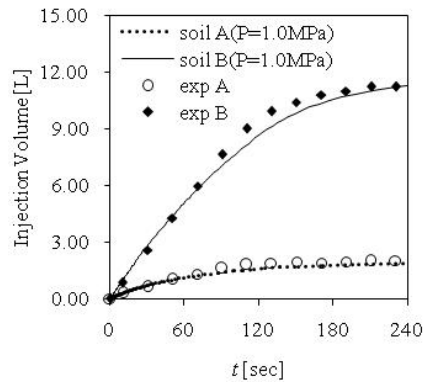


그림 15. Soil A와 Soil B에서의 주입량 비교



## 4. 흡착현상을 고려한 시멘트계 그라우트재의 새로운 침투 기준

### 4.1 침투 기준(Groutability Criterion; GC)

침투주입공법에 있어서 일정 범위 이상의 주입범위를 형성해야 하므로 그라우트재의 침투 기준은 일정 수준 이상의 주입량을 보일 수 있는지가 되어야 한다. 따라서 시멘트계 그라우트재의 침투 기준은 그라우트재와 흙의 입경뿐만 아니라 흡착과 관련된 인자를 포함하여 평가되어야 한다. 그림 13과 그림 14에서 볼 수 있듯이 주입량은  $\lambda/V$  값에 따라 많은 변화를 보인다.  $\lambda/V$ 는 지반과 그라우트재의 특성에 따라 결정되는 값으로 지반 간극 분포, 그라우트재의 입자 크기, 그리고 lumped parameter  $\Theta$ 에 의해 결정된다. 본 논문에서 제시된 침투 기준(GC)은  $\lambda/V$ 를 근간으로 하는 값으로 식 (16)과 같이 제안하였으며, GC에 따른 침투 주입 가능성을 표 3에 서술하였다.

$$GC = \frac{1}{9.11e^{2(b^2+m)}} [4(a\theta)^2 - 4(a\theta)^3 e^{\frac{(b^2-2m)}{2}} + (a\theta)^4 e^{(b^2-m)}] \quad (16)$$

### 4.2 새로운 기준의 적용

본 논문에서 제안된 침투 기준은 흙의 종류에 상관없이 적용할 수 있을 것으로 예상되며, 그라우트재와 지반 사이에 작용하는 물리화학적 힘을 나타내는  $\Theta$ 를 주입실험을 통해 산출했을 경우, 흙입자의 입도분포와 간극비로 결정되어지는  $m$ 과  $b$ 값을 산출하여 침투 주입 가능성을 평가할 수 있다.

Akbulut 등(2002)은 지반과 그라우트재의 입경, 주입압, 농도 등을 변화시켜가며 다수의 주입실험을 실시하였다. 표 4는 Akbulut 등이 주입실험을 수행한 모형지반 조건에 대하여 본 논문에서 사용한 그라우트재를 이용할 경우 침투 가능성을 평가한 것이며, 몇몇의 경우를 제외하고는 평가의 일치를 보였다.

표 3. 흡착현상을 고려한 침투 주입가능성

GC 범위 [cm <sup>-1</sup> ]	침투 주입 가능성
I GC < 0.001	시멘트 입자의 흡착 영향은 거의 없으며 충분한 주입을 할 수 있다. 흡착현상 이외에 그라우트재의 점도특성에 의해 주입량이 제한될 수 있다.
II 0.001 ≤ GC < 0.01	시멘트 입자의 흡착 영향이 약간 있으며, 주입압 조절을 통해 충분한 주입을 할 수 있다.
III 0.01 ≤ GC < 0.1	시멘트 입자의 흡착 영향으로 충분한 주입을 할 수 없다.
IV 0.1 ≤ GC	침투 주입이 불가능하다.

표 4. Groutability Criterion(GC)의 적용

case	m	b	GC	GC 범위	Groutability(Akbulut 등, 2002)	비교
S1	0.61	0.18	0.00059	I	성공적인 주입	일치
S2	-0.34	0.23	0.00370	II	성공적인 주입	비교적 일치
S3	-1.45	0.25	0.03114	III	성공적인 주입	불일치
S4	-2.39	0.24	0.18000	IV	거의 주입 불가	일치
S5	-1.73	0.56	0.03168	III	거의 주입 불가	일치
S6	0.61	0.94	0.00010	I	성공적인 주입	일치
S7	-0.96	0.92	0.00247	II	거의 주입 불가	비교적 불일치
S8	-0.76	1.16	0.00616	II	불충분한 주입	비교적일치
S9	-0.50	0.96	0.00087	I	불충분한 주입	불일치
S10	-0.65	1.08	0.00045	I	성공적인 주입	일치

## 6. 결론

본 연구에서는 시멘트계 그라우트재의 주입량을 이론적으로 평가하였다. 구면 침투의 경우에 대하여 입자의 미소평형방정식을 유도하였으며, 본 논문에 제시된 주입량은 흡착계수와 점도의 변화를 고려하여 평가되었다. 또한 시멘트계 그라우트재의 주입실험을 실시하였으며, 이론해와 실험 결과의 비교로부터 시멘트계 그라우트재의 침투 기준을 제시하였다.

일반적으로 이용되었던 Groutability(N)를 기준으로 침투가 양호할 것이라고 예상되는 시료에서의 주입실험 결과, Soil B에서는 예상과 같이 원활한 침투 주입이 이뤄졌으나 Soil A에서는 원활한 침투 주입을 보이지 못 했다. 이러한 결과는 흡착현상의 영향으로 유발된 것으로 판단되며, Soil A와 Soil B에서 간극유속으로 일반화된 흡착계수는 약 10배 차이를 보였다.

흡착현상을 고려하여 시멘트계 그라우트재의 새로운 침투 기준을 제시하였으며, 본 논문에서 제시된 기준은 주입가능성 및 주입량을 이론적으로 산출할 수 있다. 그러나 그라우트재의 흐름 방향이 일차원 혹은 원주상의 흐름 형태일 때에는 주입가능성은 평가될 수 있으나, 본 논문에서 이론적으로 제시하고 있는 주입량과는 차이를 보일 것이다. 또한 제시된 GC의 범위 중 II과 III의 경계는 주관의 개입이 있을 수 있으며, 주입가능성을 평가하고자 할 시에는 주입량을 고려하여 평가해야 될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술 C01)과 BK21 글로벌 건설기술양성사업단에 의해서 이루어진 것으로, 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 김종선, 최용기, 박종호, 이상백, 이인모 (2007), “점도변화와 폐색현상을 고려한 그라우트재의 침투 특성”, *지반공학회논문집*, Vol. 23 No. 4, pp.5-13.
2. Akbulut, S., Saglamer, A. (2002), “Estimating the groutability of granular soils: a new approach.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 17 No. 4, pp. 371-380.
3. Bouchelaghem F., Vulliet L., (2001), “Mathematical and numerical filtration - advection - dispersion model of miscible grout propagation in saturated porous media.” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 25, pp. 1195 - 1227.
4. Burwell, E. B., (1958), “Cement and clay grouting of foundations. Practice of the corps of engineering.” *J. Soil Mech. Foundation Div. ASCE*, Vol. 84, pp. 1551/1 - 1551/22.
5. Dupla J. C., Canou J., Gouvenot D., (2005), “Injectability properties of a sand by ultra fine cement grout.” *In: Proceedings(CD-ROM) of the 16th International Conference on Soilmechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, September, pp. 12 - 16.
6. Gruesbeck, C., Collins, R.E., (1982), “Entrainment and deposition of fine particles in porous media.” *Society of Petroleum Engineers Journal* , Vol. 22 No. 6, pp. 847-856.
7. Maghous, S., Saada, Z., Dormieux, L., Canou, J., Dupla, J.C., (2007), “A model for in situ grouting with account for particle filtration.” *Computers and Geotechnics*, Vol. 34, pp. 164-174.
8. Reddi, L.N., 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. 1143-1152.
9. Saada, Z., Canou, J., Dormieux, L., Dupla, J.C., Maghous, S., (2005), “Modelling of cement suspension flow in granular porous media.” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 29 No. 7, pp. 691-711.