

# 진동주입이 그라우트재의 침투 특성에 미치는 영향 연구

## Effect of Vibratory Injection on Grout Permeation Characteristics

이 문 선<sup>1</sup> Lee, Mun-Seon

김 중 선<sup>2</sup> Kim, Jong-Sun

이 성 동<sup>3</sup> Lee, Sung-Dong

최 영 준<sup>4</sup> Choi, Young-Joon

양 재 만<sup>5</sup> Yang, Jae-Man

이 인 모<sup>6</sup> Lee, In-Mo

### Abstract

To improve the grout penetration characteristics, a vibratory grout injection technique was adopted in this study. It is a technique of grout injection in which an oscillating pressure is added to the steady-state pressure as an injection pressure. By applying the vibration during grout injection, cement particles will become less adhesive and the clogging tendency will be decreased. A series of pilot-scale chamber tests were performed to verify the enhancement of the groutability by applying the vibratory grout injection; assessment on the change of the lumped parameter  $\theta$  which represents a barometer of clogging phenomenon was made. Moreover, the effect of vibratory grout injection through the joint was also investigated using artificially made rock joints. Experimental results as well as analytical results show that the grout penetration depth can be substantially improved by vibratory grouting. Moreover, it was found that enhancement of the permeation grouting due to vibratory injection is more dominant at grouting pressure less than 400 kPa.

### 요 지

그라우트재의 침투 특성을 개선하기 위하여 진동 주입을 적용하였다. 진동주입공법은 진동하는 주입압을 부가하여 주입하는 그라우팅 기술로서 이를 적용할 경우, 그라우트재의 점성과 그라우트재 입자의 흡착 현상이 감소하게 된다. 본 연구에서는 진동 주입에 의한 그라우트재의 침투 특성 개선을 검증하기 위하여 모형 주입 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 흡착 현상을 평가하는 계수인  $\theta$ 를 산정하여 침투 특성 개선 정도를 제시하였다. 또한 인공 절리면에 대한 주입 실험을 수행하였다. 모형 실험 및 인공절리면의 실험 결과와 이론적인 해석 결과를 통해 진동 주입 시 그라우트재의 침투능이 증가됨을 검증하였으며, 특히 400kPa 이하의 저압으로 주입하였을 때 진동 주입의 효과가 최대를 나타남을 확인하였다.

**Keywords :** Clogging, Groutability, Grouting, Permeation, Vibratory injection

## 1. 서 론

최근 우리나라에서는 고속철도, 고속도로, 지하철, 댐,

항만 등 대형 건설공사가 진행되면서 약액주입공법의 적용사례가 급증하고 있다. 그러나 내구성 저하, 공해 발생, 주입효과 저하, 인접구조물 손상 등 해결해야 할

1 두산건설 토목사업본부 사원 (Civil Engineer, Doosan Engr. & Construction Co., Ltd.)

2 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Ph. D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

3 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

4 삼수개발 기술연구소 이사 (Director, Samsoo Development Co., Ltd. Research Institute)

5 삼수개발 기술연구소 고문 (Advisor, Samsoo Development Co., Ltd. Research Institute)

6 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr. 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

주입공법의 문제점이 노출되고 있다. 그 중에서도 주입 범위 제한에 대한 문제점은 근본적으로 해결해야 될 과제로 지적되고 있다.

비약액계 그라우트 중에서 가장 대표적인 시멘트는 강도나 경제적인 측면의 장점으로 가장 일반적으로 사용되고 있지만 조립토 이외의 지반에는 주입되기 힘들며, 경화하기까지 많은 시간이 요구되므로 긴급을 요하는 용수, 누수 등의 차수목적의 시공으로는 부적합한 면이 있다. 입경이 작아진 마이크로 시멘트 또한 실트질 모래와 같이 간극의 크기가 작은 지반에서는 주입범위가 제한적이다.

시멘트계 주입재의 주입가능성에 대한 많은 연구가 진행되었다. 일반적으로 주입재의 입경은 주입가능성과 밀접한 관계를 지니며, 주입재의 농도, 지반의 상대 밀도, 그리고 주입압 등도 주입가능성에 영향을 준다. Burwell(1958)은 다음과 같이 주입재와 흡입자의 입경 비로서 주입가능성( $N$ )을 평가하였다.

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

여기서,  $D_{15}$ 는 통과량 15%에 해당하는 흡입자의 입경이며,  $d_{85}$ 는 통과량 85%에 해당하는 주입재의 입경이다. Burwell은  $N$ 값이 25이상일 경우 성공적인 주입이 가능하다고 평가하였으며,  $N$ 값이 11미만일 경우 충분한 주입이 불가능하다고 평가하였다.

최근에는 마이크로 시멘트의 주입 특성을 평가하기 위한 연구가 진행되었으며, 시멘트 입자의 흡착현상(clogging)이 시멘트계 주입재의 주입범위 제한과 관계가 깊다는 연구 결과가 발표되었다(Dupla 등, 2005). 또한 Kim 등(2009)은 지반의 간극크기와 주입재의 입경뿐만 아니라 지반과 주입재 상호간의 흡착현상을 고려한 침투 기준인 GC(Groutability Criterion)를 제안하였다.

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

여기서,  $a$ 는 유동입자의 크기, 즉 그라우트 입자의 반경을 의미하며,  $m$ 과  $b$ 는 간극반경의 대수정규분포에서의 평균과 표준편차를 나타내며, 그리고  $\theta$ 는 lumped parameter로서 유동입자와 흡입자 사이의 물리 화학적 힘을 의미한다. GC는 지반의 간극 크기, 그라우트재의 입경 그리고

지반과 그라우트재의 물리화학적 특성이 고려된 침투능 판별 기준으로서, 그라우트재의 입경이 클수록, 지반 간극의 크기 또는 절리 간격이 작을수록, 그리고 시멘트 입자와 지반 사이의 물리 화학적인 인력이 클수록 침투능이 작게 평가된다.

시멘트계 주입재의 침투능을 증가시키기 위한 진동주입 모델은 Date 등(2003)에 의해 제시된 바 있다. 이들이 제시한 모델은 진동수, 진폭 및 주입재의 점도 변화에 대한 실험적인 결과에 근거하고 있으며, 흡착 이론에 대한 고려가 이루어지지 않아 보다 발전된 연구가 요구된다.

본 연구는 시멘트계 그라우트재의 침투능을 향상시키기 위한 연구로서, 정압주입형태를 기준으로, 주입압의 크기가 일정한 진폭과 주기를 갖는 진동주입공법을 적용하여 그라우트의 침투능 변화를 실험적으로 평가하였다. 또한 흡착현상을 고려한 그라우트재의 침투 기준(GC)에 근거하여 진동주입 시 개선된 침투능을 이론적으로 평가하였다.

## 2. 그라우트재의 침투현상

### 2.1 흡착에 의한 영향

그라우트재가 침투 주입됨에 따라 지반의 물리적 또는 화학적 원인으로 인하여 그라우트재 입자의 흡착이 발생하므로 지반의 간극비는 감소하게 된다. 이 때 식(3)의 Kozeny-Carman 식에서 알 수 있듯이 투수계수는  $\frac{e^3}{1+e}$ 에 비례하므로, 그라우트재의 흡착에 의한 간극비 변화는 지반의 투수계수를 급격하게 변화시킨다. 따라서, 지반 투수계수 변화 특성을 파악하기 위하여 입자 흡착에 대한 폐색 이론을 소개하고자 한다.

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{1}{C_s S_0^2 T_0^2} \frac{e^3}{1+e} \cdot S^3 \quad (3)$$

### 2.2 폐색이론

그림 1과 같이 초기 조건으로 일정한 농도( $C_i$ )를 가진 현탁액을 지반에 흘려보낼 때, 입자유동에 관한 지배방정식은 다음과 같다(Bear and Bachmat, 1991).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

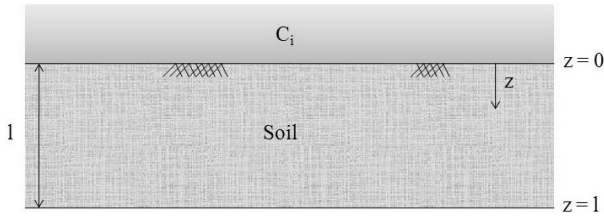


그림 1. 상부 흙모체를 제거했을 때의 개념도

여기서,  $C$ 는 간극수 내의 세립자 농도,  $\sigma$ 는 단위간극부피당 퇴적된 입자의 양,  $V$ 는 간극 내 유속( $v/n$ ),  $z, t$ 는 공간, 시간의 좌표이다. 식 (4)에서 세 번째 항은 유동 입자의 이탈 및 흡착에 관련된 항으로서, 유동 입자의 이탈을 무시할 수 있고 흡착량이 흐름 유체의 농도와 비례할 경우 다음 식과 같이 나타낼 수 있다(Reddi and Bonala, 1997).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial z} + \lambda C = 0 \quad (5)$$

여기서,  $\lambda$ 는 흡착계수(particle deposition coefficient)를 나타낸다. 식 (5)는 흙모체에서의 유동입자의 퇴적에 관한 지배방정식으로서, 식 (6)과 같은 특성함수(characteristic function)를 이용하여 상미분 방정식으로 변환하여 해를 구할 수 있다(Gruesbeck and Collins, 1982).

$$\eta(z, t) = t - \frac{z}{V} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 적용하여 정리하면, 단위간극부피당 흡착량은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\sigma(z, t) = \lambda C_i e^{-\lambda z/V} (t - \frac{z}{V}) \quad (7)$$

흡착계수는 흐름유체의 농도와 흡착량을 연관시켜주는 계수로서, 흡착량은 흡착계수에 민감하게 영향을 받는다. Stein(1940)은 간극에 흡착되는 양을 구하기 위해 ‘Particle capture probability approach’를 도입하였으며, Rege and Fogler(1988)는 ‘network simulation’을 통해 Stein의 이론을 발전시켰다. 또한, Reddi and Bonala(1997)는 ‘Particle capture probability approach’를 적용하여 흡착계수  $\lambda$ 를 구하는 식을 제안한 바 있다.

### 2.3 흡착을 고려한 그라우트재의 침투

일차원 형태의 그라우트재의 침투가 발생하는 경우,

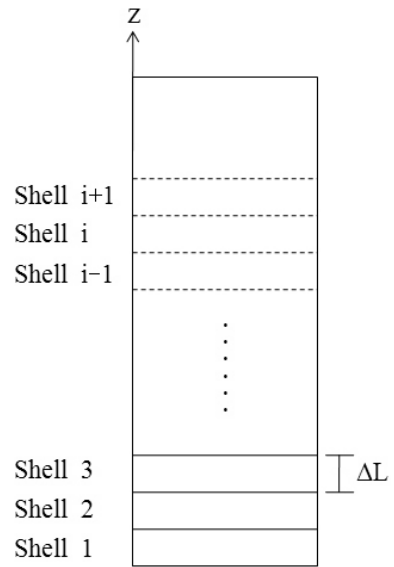


그림 2. 시간 단계 별 형성되는 침투 영역

그림 2와 같이 형성되는 그라우팅 영역은 시간 단계에 따라서 그 범위가 점차 증가되는 형태로 모사 가능하며, 이때 증가되는 그라우팅 영역은 시간 단계 별로 형성된 shell로 생각할 수 있다. 증가되는 두께를 미소한 크기로 생각할 경우 그라우팅 영역이 증가되는 시간 또한 미소한 크기가 되어 각각의 시간 단계에 따라 변화된 특성값을 적용할 수 있다.

시간 단계  $\Delta t$  동안 주입된 그라우트재의 부피가  $Q$ 라고 하면, 다음 식 (8)이 성립한다.

$$Q = \Delta L \cdot A \cdot n \quad (8)$$

여기서,  $\Delta L$ 은  $\Delta t$  동안 증가되는 침투 영역의 높이이다. 또한, 그라우트재의 침투가 Darcy의 가정을 만족한다면, 그라우트재의 주입량은 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$Q = K_g \cdot i \cdot A \cdot n \quad (9)$$

여기서,  $A$ 는 흐름단면적,  $i$ 는 동수경사이다.  $K_g$ 는 지반에 대한 그라우트재의 투수계수로서, 다음 식 (10)과 같다.

$$K_g = \frac{\gamma_g}{\mu_g} K \quad (10)$$

여기서,  $K$ 는 지반의 투수계수이며  $\gamma_g$ 는 그라우트재의 단위중량,  $\mu_g$ 는 그라우트재의 점도이다. 식 (8)과 식 (9) 모두  $Q$ 에 관한 식이므로 이를 연립하면 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta t = \frac{n}{K_g} \frac{\Delta L}{i} \quad (11)$$

해석에 적용되는 침투 영역의 높이  $\Delta L$ 과 동수경사  $i$ 는 변화하지 않는 상수 값으로 볼 수 있다. 반면, 간극률  $n$ 과 투수계수  $K_g$ 는 그라우트재의 침투가 진행됨에 따라 변화하는 값이다. 식 (10)을 보면  $K_g$ 는 그라우트재의 단위중량인  $\gamma_g$ 에 비례하며,  $n$ 과  $\gamma_g$ 는 시간에 따른 흡착량  $\sigma$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$n = f(\sigma) \quad (12)$$

$$\gamma_g = f(\sigma) \quad (13)$$

즉, 그라우트재 주입에 따른 흡착량을 산정하고 매 시간단계 별로 변화된 간극률과 투수계수를 적용하여 이론적인 그라우트 침투량을 산정하게 된다.

### 3. 모형실험

#### 3.1 실험 장비 구성

실험장비는 압력 공급장치, 그라우트재 주입장치, 진동 펌프, 모형 지반이 형성되는 챔버, 유출량 측정 수조의 총 5개 부분으로 구성되었다. 그림 3은 개략적인 실험 장치를 보여준다.

모형지반 챔버는 지름 150mm, 높이 950mm인 아크릴 원형 실린더로서 깊이별 간극수압 변화를 측정하기 위해 7개의 간극 수압계를 설치하였다. 모형지반 바닥면을 기준으로 삼았을 때, 수압계는 기준으로부터 0mm,

25mm, 85mm, 205mm, 445mm, 565mm, 815mm 위치에 각각 설치하였다. 또한 그라우트 주입 시 진동 및 압력에 의해 흙 시료가 느슨해질 염려가 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 흙 시료 상부에 상재하중을 모사할 수 있는 구속부를 별도로 제작하였다. 유출량 측정 수조에는 로드셀을 설치하여 시간에 따른 유출량을 측정하였다.

#### 3.2 실험 조건

모형지반 조성에 사용된 시료는 여과 사리용 주문진 사이며, 유효입경이 다른 두 가지 종류의 시료를 사용하였다. 실험에 사용된 시료의 물리적 특성은 표 1과 같다.

일반 포틀랜드 시멘트와 분말도 6000의 마이크로 시멘트를 사용하여 주입재를 조성하였으며, 배합비는 질량 기준, 물과 시멘트 비율을 3:1로 일정하게 유지하였다. 실제 현장에서는 주입상태에 따라 배합비를 변화시키지만, 본 연구에서는 주입압 특성에 따른 침투특성을 비교하기 위해 배합비를 변인통제 하였다. 주입압은 정압상태와 진동상태로 나누어 실험을 실시하였으며, 주입압은 200kPa, 400kPa, 600kPa의 세 종류를 적용하였

표 1. 시료의 물리적 특성

	세사1	세사2
$D_{15}$	0.48	0.31
$D_{85}$	1.33	0.72
m (lnr)	-1.984	-2.774
b (lnr)	0.664	0.614
건조 단위중량	1.432	1.409
투수계수 (cm/sec)	0.1395	0.0557

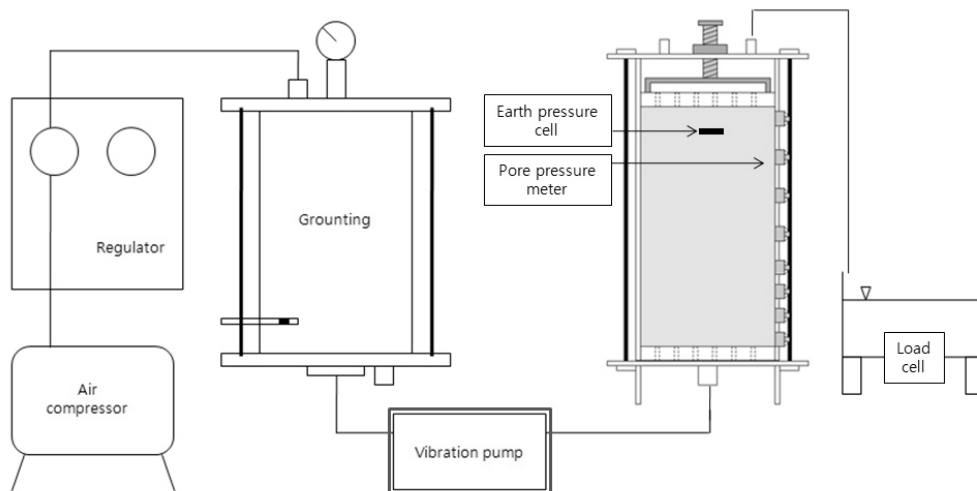


그림 3. 실험장치 개략도

다. 또한, 진동 상태의 특성에 따른 주입특성을 비교하고자 진동 주기를 5, 10 그리고 15Hz로 변화시켜 실험을 수행하였다.

### 3.3 실험 과정

매회 동일한 단위중량의 모형지반을 조성하였으며, 시료체를 하방향으로부터 물로 포화시킨 이후 모형지반의 투수계수를 측정하였으며, 이를 기준으로 조성된 지반의 동일성을 판단하였다. 에어컴프레셔와 레귤레이터를 이용하여 그라우트 챔버에 정압을 가하였으며, 진동 펌프를 이용하여 주입압이 일정하게 변화되도록 하였다. 주입 시, 데이터로거를 이용하여 간극수압 데이터와 유출되는 간극수의 무게를 0.1초 간격으로 기록하였다. 그라우트재가 모형지반을 완전히 통과하여 나오거나 또는 그라우트재가 모형지반에 더 이상 주입되지 않아 유출량이 거의 없을 경우, 주입을 마쳤으며, 주입 후 시료체를 분리하여 주입 정도를 확인하였다.

### 3.4 모형 지반 주입실험 결과

#### 3.4.1 실험 결과의 비교

모형지반이 간극수로 포화된 상태이므로 간극수의 유출량과 그라우트의 유입량은 같은 부피를 갖는다. 따라서 주입량은 유출량의 무게를 시간별로 기록하고, 이를 간극수의 단위 중량을 이용하여 부피로 환산하여 측정하였다. 그라우트가 모형지반을 완전하게 통과된 이후에는 그라우트 입자로 인하여 유출되는 유체의 단위

중량이 간극수의 단위 중량보다 증가되므로 이를 고려하여 주입량을 환산하는 것이 보다 정확한 결과를 보일 것으로 예상되지만, 대부분의 그라우트 입자가 모형지반에 여과되어 그라우트가 지반을 통과한 이후에도 유출수의 단위 중량은 초기 간극수의 단위 중량과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았으며, 유출량으로부터 주입량을 산정할 수 있었다. 그림 4는 세사1로 조성한 모형지반에 일반 시멘트를 주입하였을 때 시간에 따른 주입량을 비교한 그래프이며, 이로부터 가진의 영향을 판단할 수 있다. 주입초기에는 원활한 주입이 이루어지므로 진동 여부와 관계없이 초기 기울기가 유사하다. 이후 지반의 폐색이 발생함에 따라 주입량에 차이가 나타나는데, 진동을 가하지 않은 경우에 약 3초 후 주입량이 급감하였으며 진동을 가한 경우 약 14초 후 주입량이 급감하였다. 일반 주입에 비하여 진동 주입 시 주입량이 크게 증가됨을 확인할 수 있다.

주입과정 중에 투수계수는 동수경사와 투수속도를 이용하여 측정하였다. 동수경사는 간극수압계로부터 획득된 시간별 간극수압 데이터와 간극수압의 위치를 고려하여 산출하였으며, 투수속도는 시간별 주입량 데이터와 모형지반의 단면적을 고려하여 산출하였다. 그림 5는 주입과정 중에 나타난 투수계수의 변화를 보여준다. 주입이 시작되면서 투수계수는 급격하게 감소되었으며, 일정 시간이 지난 후에는 더 이상 감소되지 않고 일정한 크기를 보였다. 투수계수의 감소가 수렴되는 시점은 그림 4에 나타난 시간별 주입량이 급격하게 변화되는 시점과 유사하였으며, 이 시점을 그라우트입자의 흡착현상으로 인하여 지반 간극이 폐색된 시점으로 판

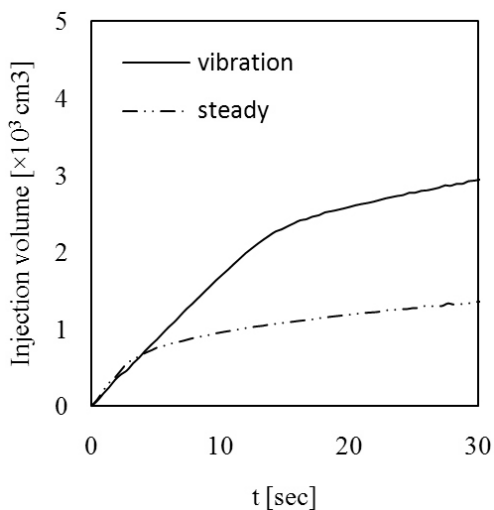


그림 4. 세사1에 일반시멘트 주입 시 유량 변화(P=200kPa)

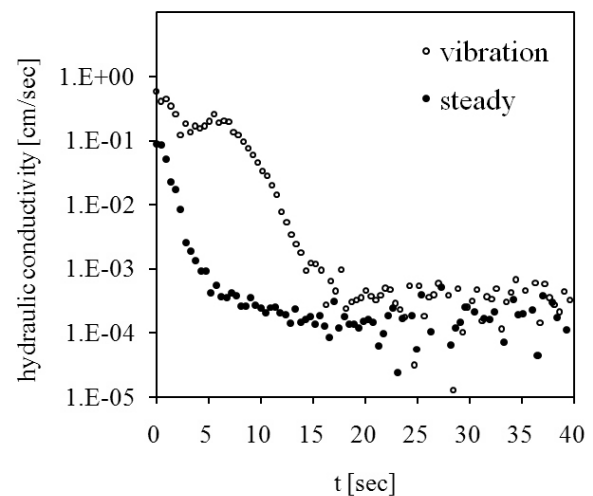


그림 5. 세사1에 일반시멘트 주입 시 투수계수 변화(P=200kPa)

단하였다. 또한, 그림 6에서 알 수 있듯이 일반 시멘트를 200kPa의 주입압으로 주입하였을 때, 무진동 주입의 경우 약 4초 동안 주입된 이후에 폐색이 발생되었으며, 진동주입의 경우 약 14초동안 주입이 이루어진 이후 지반 간극이 폐색된 것으로 판단되었다. 무진동주입과 진동주입 모두 수렴되는 투수계수의 크기가 유사하였으며, 주입압과 주입재를 변화시켜 실시한 실험에서도 수렴되는 투수계수는  $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ 의 값으로 수렴되었다.

폐색이후 그라우트 입자는 더 이상 지반으로 침투되지 못하며, 그라우트에 포함된 자유수와 이온만이 모형 지반으로 침투된다. 따라서 폐색이후 나타나는 추가 주입량은 보강 효과를 보이기 어려우므로 최대 주입량은 폐색이 이루어진 시점까지의 주입량으로 판단하여야 할 것이다. 주입량 그래프를 기준으로 할 경우, 폐색 시점은 주입량 그래프가 급격하게 변화되는 시점을 폐색 시점으로 판단하는 것이 타당할 것이며, 투수계수 그래프를 기준으로 할 경우에는 투수계수가 급격하게 변화되는 시점을 폐색시점으로 판단하는 것이 타당할 것이다. 그러나 주입량 변화 그래프와 투수계수 변화 그래프

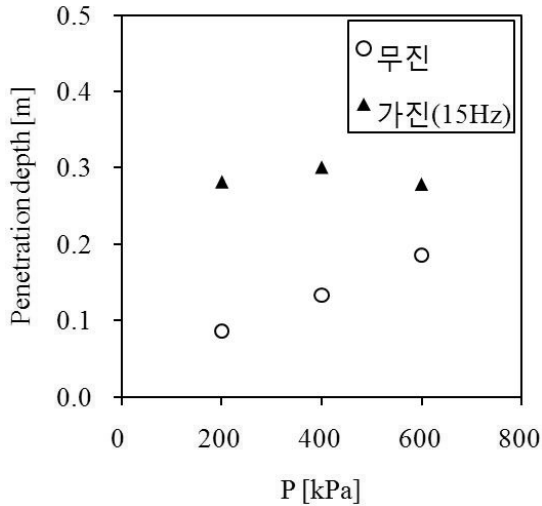


그림 6. 세사1에 일반시멘트 주입 시 침투깊이 비교(P=200kPa)

표 2. 세사1에 일반시멘트 주입 결과(압력 별)

	시료	압력(kPa)	진동수(Hz)	주입량 ( $\text{cm}^3$ )	침투깊이(m)	N값 평가	GC의 등급
1	세사1	200	0	693	0.086	침투 가능	IV
2	세사1	400	0	1071	0.133	침투 가능	IV
3	세사1	600	0	1505	0.186	침투 가능	IV
4	세사1	200	15	2270	0.282	침투 가능	III
5	세사1	400	15	2424	0.301	침투 가능	III
6	세사1	600	15	2186	0.279	침투 가능	III

를 통해 추측된 폐색 시점은 유사하지만 약간의 차이를 보였다. 본 논문에서는 보다 급격한 변화를 보인 투수계수 그래프를 근거하여 폐색 시점을 추정하였다. 또한 주입압과 그라우트의 입경을 변화시킨 경우에도 수렴되는 투수계수는 유사한 값을 보였으며,  $1 \sim 3 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 의 투수계수를 보인 실트 모형지반에서 시멘트 그라우트가 주입되지 않은 경우를 고려하여 투수계수가  $10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 감소되는 시점을 폐색시점으로 판단하였다. 폐색 시점을 일정한 투수계수 값으로 정할 경우 약간의 주입량 오차가 발생할 수 있으나 지반의 투수계수가  $10^{-3} \text{cm/sec}$  이하로 감소된 이후에는 주입량의 변화가 매우 작으므로 주입량 판단에 큰 영향은 없을 것으로 판단된다.

그림 6은 세사1에 일반시멘트를 주입한 경우 압력별 침투깊이를 나타낸 그래프이다. 침투 깊이는 지반 간극이 폐색된 시점까지의 주입량과 지반의 간극률을 고려하여 산정하였으며, 진동 주입 시, 침투 깊이가 약 2배 정도 증가함을 확인할 수 있었다.

표 2는 세사1을 대상으로 실시한 주입시험 결과 나타난 주입량, 침투 깊이, N값, 그리고 GC의 등급을 보여주고 있다. N 값을 기준으로 침투능을 판단할 경우, 주입압의 진동 영향을 고려할 수 없으므로 동일한 침투능이 예상되었으며, GC를 기준으로 침투능을 판단할 경우에는 진동 주입 시 GC의 등급이 한 단계씩 상향되는 결과를 보였다. 이는 GC의 경우 흡착현상을 고려한 침투능 기준이므로 진동 주입 시 흡착현상으로 인한 지반 간극의 폐색이 지연되었음을 알 수 있으며, 보다 자세한 GC의 산정 과정은 3.5절에서 서술하고자 한다.

진동 주기에 따른 주입 특성변화를 파악하기 위하여, 진동을 발생시키는 모터의 회전수를 변화시켜 세사1로 조성한 모형지반에 일반시멘트를 0, 5, 10, 15Hz의 진동 주기로 주입하였다. 여기서, 진동수 0Hz는 무진동 주입을 의미한다. 그림 7은 세사1로 조성한 모형 지반에 일반 시멘트를 주입한 경우, 진동수별 침투깊이를 보여주고 있다.

표 3. 세사1에 일반시멘트 주입 결과(진동수 별)

	시료	압력(kPa)	진동수(Hz)	주입량( $cm^3$ )	침투깊이(m)	N값 평가	GC의 등급
1	세사1	200	0	693	0.086	침투 가능	IV
2	세사1	200	5	1696	0.211	침투 가능	III
3	세사1	200	10	2014	0.250	침투 가능	III
4	세사1	200	15	2270	0.282	침투 가능	III

표 4. 세사2에 마이크로시멘트 주입 결과(진동수 별)

	시료	압력(kPa)	진동수(Hz)	주입량( $cm^3$ )	침투깊이(m)	N값 평가	GC의 등급
1	세사2	200	0	782	0.0984	충분한 침투 가능	III
2	세사2	200	5	4090	0.5149	충분한 침투 가능	III
3	세사2	200	10	1890	0.2379	충분한 침투 가능	III
4	세사2	200	15	1560	0.1964	충분한 침투 가능	III

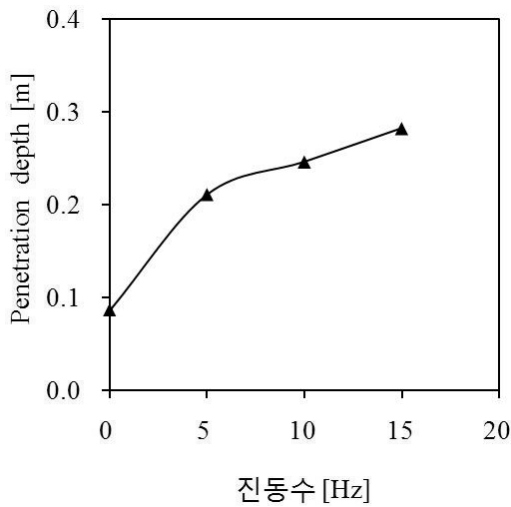


그림 7. 세사1에 일반시멘트 주입 시 진동수별 침투깊이 비교(P=200kPa)

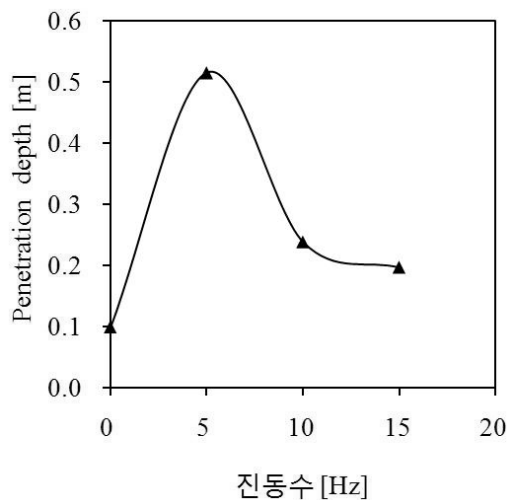


그림 8. 세사2에 마이크로시멘트 주입 시 진동수별 침투깊이 비교 (P=200kPa)

진동 주입 시 일반 주입에 비해 약 2배 큰 주입량과 침투 깊이를 보이며, 진동수가 클수록 보다 원활한 주입

이 이루어지는 것으로 판단된다. 표 3에 주입 결과가 나타나 있으며, 진동 주입 시 GC의 등급이 한 단계씩 상향되었다.

다음으로, 세사2로 조성한 모형지반에 마이크로시멘트를 0, 5, 10, 15Hz로 각각 주입하였다. 진동수 5Hz로 주입 시 일반 주입에 비해 약 5배 큰 침투깊이가 나타났으며, 10Hz 및 15Hz로 주입한 경우에도 일반 주입에 비해 약 2배 정도 큰 값을 보였다. 표 4에 주입 결과가 나타나 있다.

N값 평가 및 GC 등급에서는 모든 경우 동일하게 나타났으나, GC의 값으로 비교하면 진동수 5Hz인 경우 ( $GC=0.0111$ ), 0Hz인 경우( $GC=0.0824$ )에 비해 약 1/8배로 감소되었다.

결과적으로, 동일한 조건에서 주입이 이루어지더라도 진동수에 따라 주입량과 침투 깊이가 작게는 10%에서 크게는 520%까지 증가된다. 다만, 두 모형지반에 있어서 최대 침투깊이를 보이는 진동수가 다르게 나타난 것으로 보아 최적의 진동수는 주입 조건의 조합에 따라 달라지는 것으로 판단된다.

### 3.4.2 최적의 주입 조건

실험 결과를 살펴보면, 주입압 200kPa 및 400kPa과 비교하여 600kPa의 경우 진동 주입에 의한 주입량 및 침투 깊이 증가 효과가 상대적으로 작게 나타난다. 이러한 실험 결과로부터 진동 주입에 최적의 주입 조건과 상한 조건이 존재함을 확인할 수 있다. 주입압 별 주입량 증대효과의 차이는 각 주입압에 대한(진동폭/주입압)의 차이로부터 기인한 것으로 예상된다.

세사1과 세사2 각각에 15Hz로 일반시멘트를 주입하

표 5. 세사1에 일반시멘트 주입시의 유량증가비 비교

압력(kPa)	200	400	600
진동수(Hz)	15	15	15
진동폭(kPa)	a	a	a
진동폭 주입압	$\frac{a}{200}$	$\frac{a}{400}$	$\frac{a}{600}$
유량증가비	3.28	2.26	1.45

\* 유량증가비 =  $\frac{Q_{진동주입}}{Q_{일반주입}}$

표 6. 세사2에 일반시멘트 주입시의 유량증가비 비교

압력(kPa)	200	400	600
진동수(Hz)	15	15	15
진동폭(kPa)	a	a	a
진동폭 주입압	$\frac{a}{200}$	$\frac{a}{400}$	$\frac{a}{600}$
유량증가비	2.77	2.97	1.32

\* 유량증가비 =  $\frac{Q_{진동주입}}{Q_{일반주입}}$

는 경우, 이때의 진동폭을 a라고 한다면 진동폭과 주입 압의 비를 표 5 및 표 6과 같이 나타낼 수 있다. 진동수가 같다면 진동폭이 동일하므로 주입압이 클수록 진동 폭과 주입압의 비는 작은 값을 가지게 된다.

세사1의 경우, 그림 9에 나타난 바와 같이 [진동폭/주입압]의 값이 클수록 무진주입 대비 진동주입 시 유량 증가 또한 크게 나타난다. 즉, 동일한 진동폭의 진동을 가할 때 주입압이 작을수록 진동의 영향을 보다 크게 받는다는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 세사2의 경우에도 200kPa과 400kPa의 주입압을 적용하였을 때, 600kPa의 주입압에 비해 2~3배 큰 유량증가비를 보인다. 따라서 진동 주입은 400kPa 이하의 저압으로 주입할 때 효율성이 증대되며 최적의 효과가 나타날 것으로 판단된다.

### 3.5 진동에 의한 침투 특성의 변화

#### 3.5.1 이론해 적용을 위한 초기 조건

주입압 진동의 유무에 따른 침투 특성의 변화를 평가하고자 흡착 현상과 관련된 인자를 산출하였다. 표 7은 주입 실험에 적용된 조건 중에 흡착현상을 고려한 침투량 평가를 위한 초기값을 보여주고 있다. 주입농도, 투수계수, m, b, 그리고 입경은 반복 실험을 통해 도출된 실측값이다.  $\alpha^*$ 는 간극튜브의 유효길이로서 Arya와 Dierolf(1989)의 연구결과를 근거하여 가정하였으며, 그리고  $\Delta h$ 는 shell의 두께로서 계산 과정에서 발생하는 오차를 축소하고

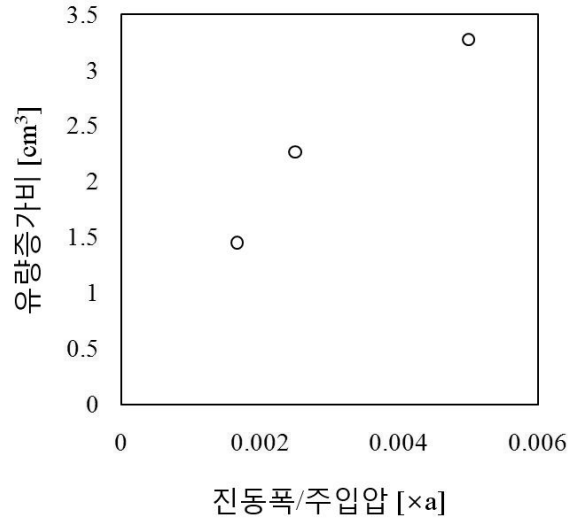


그림 9. 세사1에 일반시멘트 주입 시 유량 증가비

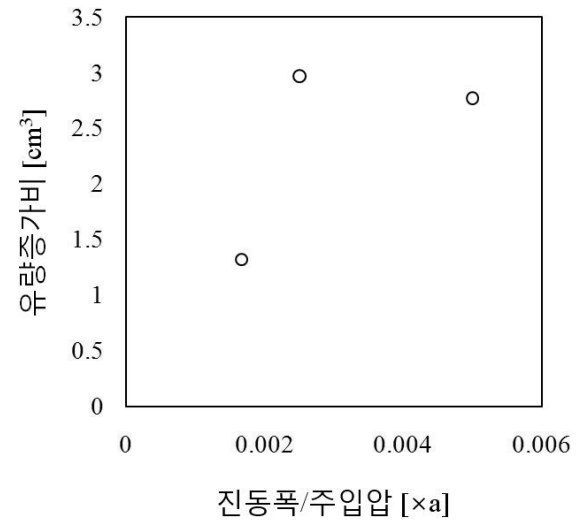


그림 10. 세사2에 일반시멘트 주입 시 유량 증가비

표 7. 초기 값

	세사1	세사2	
주입농도( $g/cm^3$ )	0.3	0.3	
투수계수( $cm/sec$ )	0.1395	0.0557	
$m$ (lnr)	-1.984	-2.774	
$b$ (lnr)	0.664	0.614	
그라우트재 입경(mm)	일반	0.017	0.017
	마이크로	0.006	0.006
$\alpha^*$ (mm)	0.911	0.911	
$\Delta h$ (cm)	0.2	0.2	

자 충분히 작은 값으로 가정하였다. 흡착현상을 고려한 이론적인 주입량을 도출하기 위해서는 표 7에 제시된 값들 이외에  $\theta$  (lumped parameter) 값이 요구되며,  $\theta$  값은 실험결과 나타난 시간에 따른 주입량 그래프와 표 7에 나타난 초기값을 적용하여 도출된 시간에 따른 주



입량의 이론값과 비교하여  $\theta$  값을 산정하였다.

### 3.5.2 결과의 비교

해석을 통해 얻은 결과는 표 8에 나타나있다.

그림 11은 세사1에서 일반 시멘트를 주입하였을 때, 나타난 진동수에 따른  $\theta$ (lumped parameter), GC, 그리고 침투 깊이(P.D.; Penetration Depth)를 보여주고 있으며, 그림 12는 세사2에서 마이크로 시멘트를 주입하였을 때, 나타난 결과를 보여주고 있다.  $\theta$ 는 입자 간에 작용하는 여러 힘들이 입자 퇴적에 미치는 영향을 고려하는

항이며, GC는 지반의 간극 크기, 그라우트재의 입경 그리고 지반과 그라우트재의 물리화학적 특성이 고려된 침투능 판별 기준이다. 이 두 항은 모두 그 값이 작을수록 주입이 원활하게 이루어짐을 나타내며, 침투 깊이는 증가하게 된다. 세사1에 200kPa의 주입압으로 일반시멘트를 주입한 경우, 그림 11과 같이 진동수가 증가함에 따라  $\theta$  및 GC 값이 감소하며 침투 깊이는 증가하는 양상을 보인다. 이 경우 진동수가 증가할수록 침투 특성이 보다 개선되는 것으로 판단된다. 세사2에 200kPa의 주입압으로 마이크로 시멘트를 주입한 경우, 그림 12와 같

표 8.  $\theta$ 값의 비교

	시료	그라우트재	압력(kPa)	진동수(Hz)	$\theta$	$\theta$ 변화율*	GC	GC의 등급
1	세사1	일반	200	0	2.4	100	0.1093	IV
2	세사1	일반	200	5	1.6	66.7	0.0553	III
3	세사1	일반	200	10	1.6	66.7	0.0553	III
4	세사1	일반	200	15	1.4	58.3	0.0437	III
5	세사1	일반	400	0	2.3	100	0.1020	IV
6	세사1	일반	400	15	1.5	65.2	0.0494	III
7	세사1	일반	600	0	2.3	100	0.1020	IV
8	세사1	일반	600	15	1.8	78.3	0.0677	III
15	세사2	일반	200	0	1.5	100	0.2053	IV
16	세사2	일반	200	15	1	66.7	0.1089	IV
17	세사2	일반	400	0	1.4	100	0.1853	IV
18	세사2	일반	400	15	1	71.4	0.1089	IV
19	세사2	일반	600	0	1.4	100	0.1853	IV
20	세사2	일반	600	15	1.2	85.7	0.1461	IV
21	세사2	마이크로	200	0	2.4	100	0.0824	III
22	세사2	마이크로	200	5	0.8	33.3	0.0111	III
23	세사2	마이크로	200	10	1.4	58.3	0.0317	III
24	세사2	마이크로	200	15	2	83.3	0.0601	III

\*  $\theta$  변화율\* : 일반 주입(fr=0Hz)시의  $\theta$ 를 100으로 하였을 때, 각  $\theta$ 의 크기를 나타냄.

\* 폐색이 발생하지 않은 경우에 대해서는  $\theta$ 를 산정하지 않음.

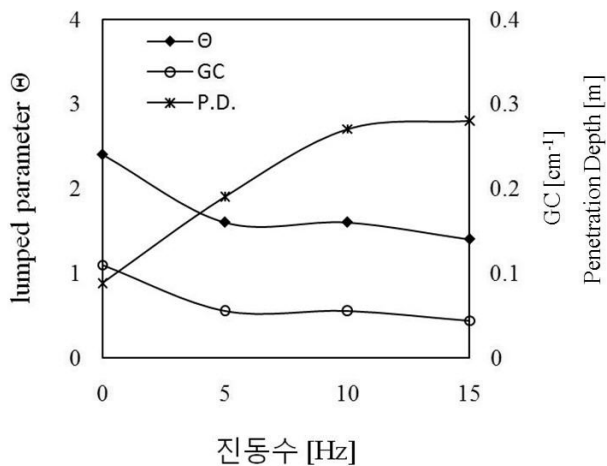


그림 11. 세사1에 일반시멘트를 주입한 경우(P=200kPa)

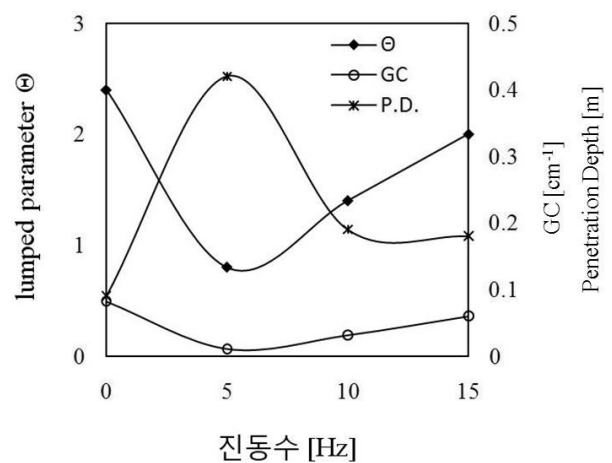


그림 12. 세사2에 마이크로시멘트를 주입한 경우(P=200kPa)

이 진동수 5Hz일 때 가장 효과적인 침투 주입이 이루어진다. 즉 세사2에 마이크로시멘트를 주입하는 경우에는 낮은 진동수를 적용하였을 때 침투 특성이 보다 개선되는 것으로 판단된다.

#### 4. 인공절리면 주입 시험

##### 4.1 시험 장비의 구성 및 시험 조건

인공절리면 주입 시험의 장비는 모형지반 실험과 유사하게 구성된다. 다만 모형지반을 모사하기 위한 챔버 대신 인공 절리면이 자리하고 있다는 것이 차이점이다. 실험장비는 압력 공급장치, 그라우트재 주입장치, 진동 펌프, 인공 절리면, 유출량 측정 수조의 총 5개 부분으로 구성되었다. 인공절리면은 길이 3000mm, 두께 50mm의 강철 블록 2매를 상하로 포개고, 그 사이에 두께 0.1~0.2mm의 동박(銅箔)을 삽입하여 길이 3000mm, 폭 6mm의 절리면을 모사하도록 제작되었다. 또한, 강철 블록의 양면에 사포를 부착하여 절리면의 미세한 요철을 모사하였다.

인공절리면을 배치 및 조립하고 물을 주입하여 절리면을 포화시킨 후, 절리면의 투수계수를 측정한다. 일정 배합비의 그라우트재를 조성하여, 무진동 주입과 진동 주입의 각 케이스에 맞추어 펌프를 가동하며 그라우트재를 주입하였다. 그라우트재가 인공절리면을 완전히 통과하여 나오거나 또는 그라우트재가 인공절리면에 더 이상 주입되지 않아 그 유출량이 일정한 값으로 수렴하는 시점에 주입을 마쳤으며 주입 완료 후 인공절리면을 해체하여 주입 정도를 확인하였다.

그라우트재는 분말도 6000의 마이크로 시멘트를 사용하였으며, 배합비는 질량 기준, 물과 시멘트 비율을 1:1로 적용하였다. 또한 실험 시에 주입압은 300kPa, 500kPa, 700kPa의 세 종류였으며, 진동수는 5, 7.5, 10, 12.5, 15Hz를 각각 적용하여 실험을 수행하였다.

##### 4.2 주입시험 결과

매회 실험 시 발생하는 미세한 두께 차이를 고려하기 위하여  $kA$  ( $k$ 는 투수계수,  $A$ 는 흐름단면적) 값에 대하여 분석을 수행하였다. 동일한 조건의 그라우트재를 사용하였으므로 각 경우의 투수계수는 동일할 것이며, 따라서  $kA$  값은 인공절리면의 두께에 비례한다.

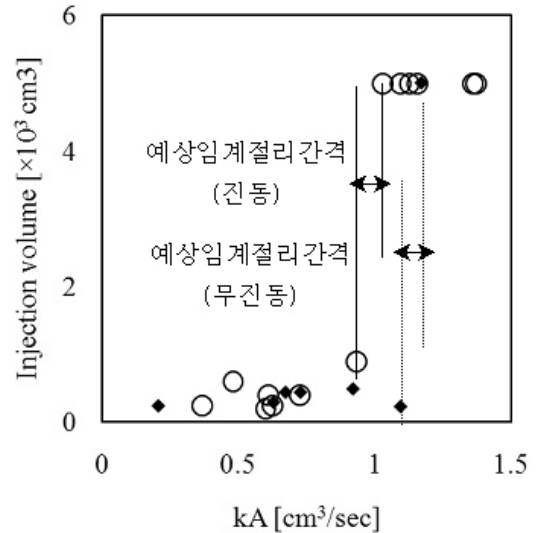


그림 13.  $kA$ 값에 따른 주입량

$$kA = kw d \quad (14)$$

여기서,  $w$ 는 유로폭,  $d$ 는 절리면 두께를 나타낸다. 인공 절리면의 간격이 증가될수록 침투 깊이가 증가되며, 절리면 흐름에 있어서 임계 절리 간격보다 큰 절리면에서는 그라우트 입자에 의한 폐색 현상보다 절리면의 간격이 더 지배적이다. 그림 13에서 볼 수 있듯이 무진동 주입 시의 임계 절리간격을 기준으로 할 때, 진동 주입 시의 임계 절리간격은 약 87% 정도의 값을 보였으며, 이는 진동 주입 시 보다 더 작은 절리면으로의 원활한 침투를 유도할 수 있음을 의미한다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 진동주입에 의한 그라우트재의 침투성 증대 효과를 확인하기 위하여 모형지반 및 인공 절리면을 대상으로 주입 실험을 실시하였으며, 이론적으로 침투능(Groutability)을 산정하여 침투 특성 개선 정도를 검증하였다. 여기서 검토된 결과는 다음과 같다.

- (1) 흡착현상을 고려하여 일차원 흐름 시 그라우트의 침투량 산정법을 제시하였으며, 실험 결과와 이론해를 비교하여 흡착과 관련된 인자를 평가하였다. 진동 주입 시 흡착현상과 관련된 인자 중에 그라우트 입자와 흡입자 사이의 물리화학적 힘을 의미하는 lumped parameter  $\theta$ 가 감소되는 것으로 나타났다.
- (2) 세사1로 조성한 모형 지반에 일반시멘트를 주입하는 경우, 진동주입 시 침투깊이가 약 2배 증가되었

으며, 침투능을 나타내는 GC 등급도 1단계씩 상향되었다. 마찬가지로 세사2로 조성한 모형 지반에 마이크로시멘트를 주입하는 경우, 진동 주입 시 침투 깊이가 2~5배 증가하였다.

- (3) 세사1 및 세사2로 조성한 지반에 있어서, 두 경우 모두 400kPa 이하의 저압으로 진동 주입 시 침투 특성 개선 효과가 보다 크게 나타남을 확인하였다.
- (4) 인공절리면 주입시험의 경우 무진동 주입 시의 임계 절리간격을 기준으로 할 때, 진동 주입 시의 임계 절리간격은 약 87%정도의 값을 보였으며, 이로써 진동 주입 시 보다 더 작은 절리면으로의 원활한 침투를 유도할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. 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.
2. Bear, J. and Bachmat, Y. (1991), "Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media", *Theory and Applications of Transport in porous Media*, Vol.4, Kluwer Academic Publisher,

Boston, USA.

3. Burwell, E.B. (1958), "Cement and Clay Grouting of Foundations", *J. Soil Mech. Foundation Div. ASCE*, Vol.84, pp.1551/1-1551/22.
4. Date, K., Wakita, S., Yamamoto, T., NaKashima, Y., Hoshino, Y., Aoki, K. and Mito, Y. (2003), "Development of Dynamic Grouting Technique for the Ground Improvement", *Proc. of the ITA World Tunnelling Congress 2003: (RE)Claiming the Underground Space*, Amsterdam, The Netherlands, pp.929-936.
5. Dupla, J. C., Canou, J. and Gouvenot, D. (2005), "Injectability Properties of a Sand by Ultra Fine Cement Frou", In: *Proceedings (CD-ROM) of the 16th International Conference on Soilmechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, Japan, September, pp.12-16.
6. 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.
7. Kim, J.S., Lee, I.M., Jang, J.H., and Choi, H.S. (2009), "Groutability of Cement-based Grout with Consideration of Viscosity and Filtration Phenomenon", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.33, pp.1771-1797.
8. 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. 1143-1152.
9. Rege, S.D. and Fogler, H.S. (1988), "A Network Model for Deep Bed Filtration of Solid Particles and Emulsion Drops", *AIChE Journal*, Vol.34(11), pp.1761-1772.
10. Stein, P.C. (1940), "A Study of the Theory of Rapid Filtration of Water through Sand", D.Sc. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

(접수일자 2010. 4. 23, 심사완료일 2010. 7. 8)