# 폐색효과를 고려한 사질토의 시멘트 침투 그라우팅 거동 특성

서종우[1] · 이인모[2] · 김병규[3] · 권영삼[4*]

[1]비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정
[2]정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 정교수
[3]비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료
[4]비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료

# Behavior of cement-based permeation grouting in cohesionless soil considering clogging phenomena

Jong-Woo Seo[1] · In-Mo Lee[2] · Byung-Kyu Kim[3] · Young-Sam Kwon[4*]

[1]Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
[2]Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
[3]Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
[4]Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***Corresponding Author :** Young-Sam Kwon, bchkasu@korea.ac.kr

## Abstract

The behavior of cement-based permeation grouting is divided into three different groups depending on the grain size distribution of the soils: (1) zone of cement-based permeation grouting not feasible; (2) zone of cement-based permeation grouting feasible; and (3) zone in which an accelerating agent should be added to limit the penetration depth. In the cement-based permeation grouting feasible zone, the concept of a representative pore radius was proposed. The ratios of the representative pore radius to the mean pore radius were obtained by performing laboratory test and comparing with clogging theory; these values were in the range of 1.07 and 1.35 depending on the grain size distribution of the soils. In addition, a functional relationship between the lumped parameter ($\theta$), the representative pore radius and the w/c ratio were derived by comparing and matching experimental results with predictions from theory. In the zone in which the accelerating agent should be added, the controlling process of gel time to limit the penetration depth was experimentally verified. The test results matched well with those obtained from theory utilizing the developed grout penetration program on condition that the viscosity increasing tendency of grout suspension with time is properly taken into account.

**Keywords:** Cement-based permeation grouting, Clogging, Lumped parameter, Representative pore radius, Viscosity of grout

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(2)485-500(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.2.485

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

**Received** February 12, 2018
**Revised** March 5, 2018
**Accepted** March 8, 2018

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

## 초 록

사질토에서의 시멘트 침투 그라우팅 거동 특성을 실내 챔버 모형실험 결과를 토대로 흙의 입도분포에 따라 시멘트 침투 그라우팅 불가 영역, 시멘트 침투 그라우팅 가능 영역, 그리고 급결제 혼합 필요 영역으로 구분하였다. 시멘트 침투 그라우팅 가능 영역에서는 대표 간극 반지름의 개념을 제안하였고 사질토에서의 평균 간극 반지름에 대한 대표 간극 반지름의 비를 실내실험 결과와 폐색 이론식을 비교함으로 구할 수 있었으며, 입도분포에 따라 1.07에서 1.35 정도가 됨을 알 수 있었다. 또한 실험 조건 별로 실험결과와 이론식을 비교하여, lumped parameter ($\theta$)를 흙의 대표 간극 반지름과 시멘트 그라우트재의 물시멘트비로부터 구할 수 있는 관계식을 제안하였다. 급결제 혼합 필요 영역에서는 겔화 시간의 조절을 통한 주입 깊이의 제한과정을 실험적으로 검증하였고 그 실험값이 시간에 따른 점도 변화 함수를 적용한 이론값과 일치하는 것을 확인하였다.


**주요어:** 시멘트 침투 그라우팅, 흡착 현상, 집중 상수, 대표 간극 반지름, 그라우트의 점도

## 1. 서 론

해저 및 하저터널과 대규모 지하공간의 활용에 대한 필요성은 급격한 인구 증가와 지상 구조물의 밀도 증가로 인해 계속적으로 언급되고 있다. 그와 함께 지하 구조물 시공 시 안정성 확보에 대한 관심도 증가되고 있어 지반 보강 공법에 대한 연구가 광범위하게 진행되고 있으며 그 중 가장 보편적이며 차수효과 및 보강효과를 동시에 획득할 수 있는 그라우팅 공법에 대한 관심이 증가되고 있다. 그에 따라 해저터널 시공 시 그라우팅으로 인해 발생하는 차수효과와 전단강도 증가효과에 대한 분석 (You, 2011)과 해저터널에서의 그라우팅 설계에 대한 수치해석적 연구 (Joo et al., 2010) 등 해저터널에서의 그라우팅 공법의 적용에 대한 연구가 동반되고 있다. 또한, 암반터널 내 그라우팅 전 · 후의 투수계수 변화 및 그라우팅 주입량과 Q분률법의 파라미터들 간의 상관관계 분석 (You et al., 2012)과 암반 그라우팅 시 설계변수가 주입성능에 미치는 영향 분석 (Lee et al., 2017) 등 암반 터널에서의 그라우팅에 대한 이론적 또는 수치해석적 연구가 다수 진행되어 왔다. 그와 함께 사질토 지반에서의 그라우팅 공법의 적용에 대한 이론적인 연구도 함께 진행되어 왔다. Kim et al. (2009)은 가장 보편적으로 사용되는 시멘트계 그라우트의 주입 거동이 흡착현상에 의한 지반 간극률 감소와 수화반응에 따른 점도 증가에 의해 지배적으로 영향을 받는다고 보고 흡착현상과 점도변화를 고려한 이론적인 시멘트 그라우트의 침투 모델을 도출하였다.

그러나 사질토 지반에서 시멘트 침투 그라우팅 공법 적용 시 지반 및 그라우트 조건에 따른 주입 거동 특성과 각 거동별 침투 그라우팅 적용 가이드라인에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한, 시멘트 그라우트 침투 모델을 주입 거동의 예측 목적으로 이용하기 위해서는 기본적인 지반조사 이외에도 현장 지반에 대한 추가적인 실내 주입실험을 수행하여 입자의 퇴적에 미치는 영향을 포괄적으로 고려한 상수인 lumped parameter ($\theta$)를 도출해야 하므로 예측보다는 주입 결과의 분석 목적으로만 이용되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 시멘트 그라우트가 뉴턴 유체로 거동하여 시멘트 침투 그라우팅의 적용 가능성이 높은

w/c = 1.25 이상인 조건(Yang et al., 2011)에서 실내 챔버 모형실험을 실시하여 사질토 지반의 입도분포에 따른 시멘트 그라우트의 거동 특성을 분석하고자 한다. 또한, 시멘트 침투 그라우팅이 가능한 조건에서 lumped parameter ($\theta$)에 대한 경험식을 제안하고 급결제가 필요한 조건에서는 실험값과 점도 변화 함수를 적용한 이론값이 일치함을 보여 각 거동에서 그라우트 침투 모델을 통한 주입 성능 예측의 가능성을 검증하고자 한다.

## 2. 일차원 그라우트 침투 프로그램

본 논문의 실험 및 연구는 모두 일차원 흐름을 기반으로 이루어졌으므로 Kim et al. (2009)의 그라우트 침투 모델 중 일차원 흐름에 관련된 이론식을 바탕으로 일차원 그라우트 침투 프로그램에 대하여 단계적으로 설명하고자 한다. 먼저 그라우트 침투 프로그램이란 주입영역을 미소영역으로 분할하고 미분된 주입시간 동안 발생되는 그라우트의 점도 변화, 그라우트 입자의 흡착으로 인한 간극률, 투수계수, 간극유속, 그리고 흡착계수의 변화를 고려하고 주입시간에 대해 적분 개념을 적용하여 주입시간에 따른 주입량, 그라우트 입자의 흡착량, 지반의 투수계수 및 간극률을 단계적으로 계산하는 프로그램이다. 해당 프로그램의 가정 사항은 다음과 같다.

1. 그라우트가 지반에 침투 시 지반 변위는 무시될 수 있으며 흙 입자는 이탈되지 않는다.
2. 급결제를 혼합한 그라우트의 점도는 수화반응 시간의 함수이다.
3. 흡착된 그라우트 입자는 다시 이탈되지 않는다.
4. 시멘트 입자의 분산과 확산은 무시할 수 있다.
5. 주입압은 일정한 크기로 유지 된다 (등압주입 조건).
6. 초기 지반 간극은 물로 포화되어 있다.

그라우트가 일차원 침투 되는 경우 Fig. 1과 같이 그라우팅 영역을 미소한 단위의 shell로 나누어 고려하고 각 shell에 주입이 완료되는데 소요되는 시간을 단위 주입시간으로 고려한다.

일차원 그라우트 침투 프로그램의 계산 과정을 단계적으로 설명하면 먼저 지반의 물성치(간극률, 투수계수, 간극 크기의 대수 정규분포의 평균 및 표준편차), 그라우트의 물성치(초기농도, 시멘트 비중, 시멘트 입자의 유효입경), 그리고 lumped parameter ($\theta$)와 주입압 및 shell 두께를 입력해야 한다.

설정된 조건에서 원통형의 그라우팅 영역에서 발생하는 일차원 흐름을 고려하였을 때 단위 shell을 채우는데 필요한 주입량 $Q_{i,j}$와 흐름 단면적 $A_{i,j}$는 각각 식 (1), 식 (2)와 같이 계산된다.

$$Q_{i,j} = (\pi R^2 \triangle z) \cdot n \tag{1}$$

$$A_{i,j} = \pi R^2 \tag{2}$$

여기서, i는 위치, j는 단위 시간을 의미하고, R은 토조의 반경, n은 지반의 간극률, 그리고 $\triangle z$는 단위shell의 두께이다.

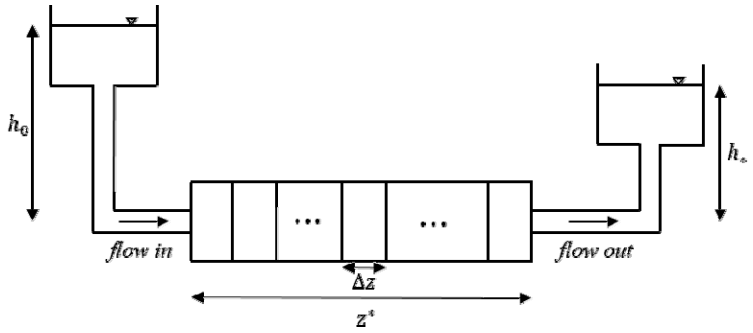



**Fig. 1.** One-dimensional flow of grout

다음 단계로 점도 변화와 흡착 현상에 따른 간극률 변화를 반영한 단위 shell의 주입시간을 계산한다. 그를 위해서 동수경사의 계산이 선행되어야 한다. 그라우트재가 주입될 때의 동수경사는 흡착현상 및 그라우트의 점도증가에 의해 침투 깊이에 따라 변화된다. 그러나 이 모든 변화를 이론적으로 반영하는 것에는 어려움이 있으므로 주입지점으로부터 임의의 한 지점 $z*$까지 선형적으로 동수경사가 감소한다고 가정하여 동수경사를 식 (3)과 같이 평균 동수경사의 형태로 표현할 수 있다.

$$\bar{\iota} = (h_0 - h^*)/z^* \tag{3}$$

여기서, $\bar{\iota}$는 평균동수경사, $h_0$는 주입면의 전수두, $h*$는 임의의 위치 $z*$에서의 전수두이다.

따라서 평균동수경사와 점도변화가 반영된 단위 shell의 주입시간은 식 (4)와 같다.

$$\triangle t_{i,j} = (Q_{i,j} \cdot n_{i,j}) / \left( \frac{(\gamma_g)_{i,j}}{\mu_{i,j}} \cdot K_{i,j} \cdot \bar{\iota} \cdot A_{i,j} \cdot n_{i,j} \right) \tag{4}$$

여기서, K는 고유투수계수, $\mu$는 그라우트재의 점도, $\gamma_g$는 그라우트재의 단위중량, n은 간극률이다. j값이 동일하다는 것은 동시에 발생하는 흐름을 의미하므로 $\triangle t_{1,j}$부터 $\triangle t_{i,j}$까지는 동일한 값을 가져야 한다. 그 중 단위 shell의 침투 소요시간이 가장 큰 경우가 지배적인 영향을 미치므로 j번째 시간 step에서의 주입시간은 식 (5)와 같이 계산될 수 있다.

$$\triangle t_j = \max(\triangle t_{1,j}, \triangle t_{2,j}, \cdots, \triangle t_{i,j}) \tag{5}$$

각 시간 step에서의 주입시간이 계산되면 식 (6)과 같이 임의의 시간과 위치에서의 간극유속을 계산할 수 있다.

$$V_{i,j} = (Q_{j,j} \cdot n_{j,j})/(\triangle t_j \cdot A_{i,j} \cdot n_{i.j}) \tag{6}$$

다음으로 그라우트 입자의 흡착 현상에 지배적인 영향을 미치는 흡착계수 ($\lambda$)는 흡착계수는 그라우트의 유동 입자 중 지반에 흡착되는 입자의 비율을 의미하며 아래 식으로 계산한다(Reddi and Bonala, 1997).

$$\lambda = \frac{v}{\alpha^* e^{2(b^2+m)}}[4(a\theta)^2 - 4(a\theta)^3 e^{\frac{b^2-2m}{2}} + (a\theta)^4 e^{2(b^2-m)}] \tag{7}$$

여기서, V는 간극유속, $\alpha^*$는 간극 튜브의 유효길이, a는 유동입자의 크기, m과 b는 간극 크기의 대수 정규 분포에서의 평균과 표준편차, 그리고 $\theta$는 입자의 퇴적에 미치는 영향을 포괄적으로 고려한 lumped parameter를 의미한다. 흡착계수를 구성하는 각 인자들 중 간극 튜브의 유효길이 ($\alpha^*$)는 Arya and Dierolf (1992)의 연구결과에 의해 그 값을 0.911 cm로 하였을 때 실험값과 예측 값이 가장 근접하는 것으로 나타났다. 또한, Arya and Dierolf (1992)는 식 (8)과 같이 흙 입자의 반경($R_i$)과 간극 반경($r_i$)과의 관계를 제안하였고 식 (8)과 지반의 입도분포를 고려하여 m과 b 값을 결정할 수 있다.

$$r_i = \left[\frac{4 \cdot e \cdot R_i^3}{3 \cdot \alpha^*}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

여기서, e는 지반의 간극비를 의미한다. 그리고 a는 그라우트재의 체분석을 통해 유효입경 값으로 결정할 수 있고, lumped parameter ($\theta$)는 시간-주입량 곡선의 실험값과 이론값을 비교하여 결정할 수 있으며 그 방법은 3.4절에서 설명하고자 한다.

이와 같이 흡착계수가 결정되면 식 (9)를 이용하여 일차원 그라우트 침투 발생 시 임의의 시간과 임의의 위치의 shell에서의 평균 단위간극부피당 흡착량을 결정할 수 있다.

$$\overline{\sigma_{\iota,j}} = \Sigma_{n=i}^{n=j} \lambda_{i,j} c_0 \exp\left[-\frac{\lambda_{i,j}}{(V_z)_{i,j}}\left(z_i + \frac{\triangle z}{2}\right)\right]\left(\triangle t_n - \frac{\frac{\triangle z}{2}}{(V_z)_{i,j}}\right) \tag{9}$$

여기서, $c_0$는 그라우트의 초기농도, $V_z$는 z방향 간극유속을 의미한다. 식 (9)는 흡착량이 침투 거리에 따라서 선형적으로 감소한다는 가정과 임의의 shell에서의 흡착량은 침투거리에 따라서 감소하지만 shell의 두께가 충분히 작을 경우 그 값은 평균 단위간극부피당 흡착량과 동일하다는 가정을 포함한다.

마지막으로 식 (9)와 같이 임의의 시간, 위치에서의 그라우트 입자의 흡착량이 계산되면 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 간극률 감소 값과 투수계수 감소 값을 반영한다.

$$n_{i,j+1} = n_0 - (\overline{\sigma}_{i,j})/(G_g \cdot \gamma_w) \tag{10}$$

$$(K)_{i,j+1} = (K)_{i,j} \cdot \frac{(1-n_{i,j})^2}{(n_{i,j})^3} \cdot \frac{(n_{i,j+1})^3}{(1-n_{i,j+1})^2} \tag{11}$$

각 시간 step별 마지막 단계에 폐색현상에 의한 주입 중단 여부를 판단하게 되고 주입이 중단될 때까지 위와 같은 계산과정을 반복하게 된다. 주입이 중단되면 시간-주입량 곡선, 주입 깊이-흡착량 곡선, 최종 주입 깊이 결과 등이 결과 값으로 도출된다.

## 3. 실내 챔버 모형실험

### 3.1 실험장비의 구성 및 실험 방법

실내 모형실험의 장비 구성은 크게 모형 지반이 구성되는 챔버, 그라우트를 교반하고 주입하기 위한 주입장치와 주입관, 주입압을 가해주기 위한 Air compressor와 압력을 제어하기 위한 컨트롤 장치, 그리고 주입되는 그라우트의 시간에 따른 주입량을 측정하기 위한 Load cell, Power Supply, Data Logger, AVR 등의 계측 장비로 이루어진다. 본 논문에서는 그라우트의 일차원 흐름을 기반으로 이론값과 실험값을 비교하기 위하여 해당 실험의 챔버를 직경 14 cm, 높이 115 cm의 실린더 형태로 제작하였다. 또한, 그라우트 주입장치의 경우 전동 프로펠러를 설치하여 재료분리를 방지하며 주입할 수 있다. 실험 전경은 Fig. 2와 같다.

일차원 그라우트 주입실험은 포화된 주문진사를 대상으로 실시되며 시멘트 그라우트만을 주입하는 실험과 급결제를 혼합 주입하는 실험으로 총 두 가지 방식으로 진행 되었다. 두 가지 실험은 급결제를 위한 주입장치가 추가로 필요하다는 것을 제외하고는 실험 방식과 순서가 동일하다. 먼저 건조된 시료를 대상으로 총 5층으로 나누어 다짐을 실시하여 건조단위중량 16~17 kN/m$^3$의 모형지반을 조성한 후 포화 조건을 만들어준다. 포화가 완료되면 그라우트를 조성하고 주입장치 내에서 일정한 속도로 교반시켜 재료분리를 방지하며 모형지반으로 주입한다. 그라우트의 주입량은 포화조건에서 그라우트 주입에 따라 발생된 유출수의 양과 동일하다는 가정 하에 시간에 따른 유출수의 양을 Data Logger를 이용하여 측정해 구한다.

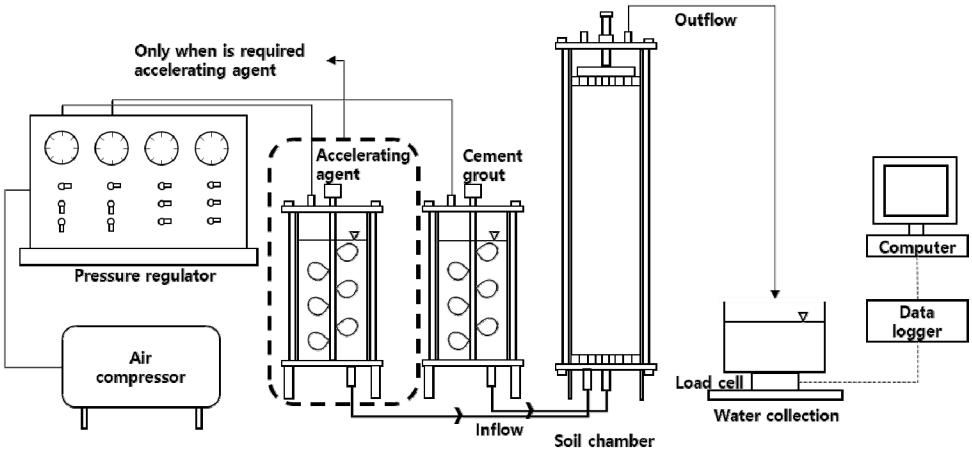



**Fig. 2.** Schematic of one-dimensional grout injection test setup

주입압은 100 kPa 그리고 200 kPa이 적용되었고, 시멘트 그라우트의 물시멘트비(w/c Ratio)는 시멘트 그라우트가 뉴턴 유체로 거동(Yang et al., 2011)하는 1.25, 1.65, 2.0의 3가지 경우로 나누어 시행하였다. 해당 영역에서는 그라우트의 흐름을 발생시키는데 극복하여야 하는 초기 전단응력이 없기 때문에 침투 그라우팅이 발생할 가능성이 크다. 또한, 물시멘트비 2.0 이상의 그라우트는 현장에서의 적용성이 낮기 때문에 최대 물시멘트비를 2.0으로 정하여 실험을 진행하였다. 급결제 혼합 실험에서는 급결제와 시멘트 그라우트를 동량 · 동압조건에서 2-shot system으로 혼합 주입하였다. 최종적으로 각 실험 조건에서의 시간-주입량 곡선을 도출하고 그라우트의 주입 깊이를 별도로 측정하여 시멘트 그라우트의 주입 거동을 분석하였다. Fig. 3은 그 결과의 한 예로 주입압 200 kpa, 물시멘트비 1.65 조건에서 급결제를 사용하지 않은 실험의 시간-주입량 곡선이다.

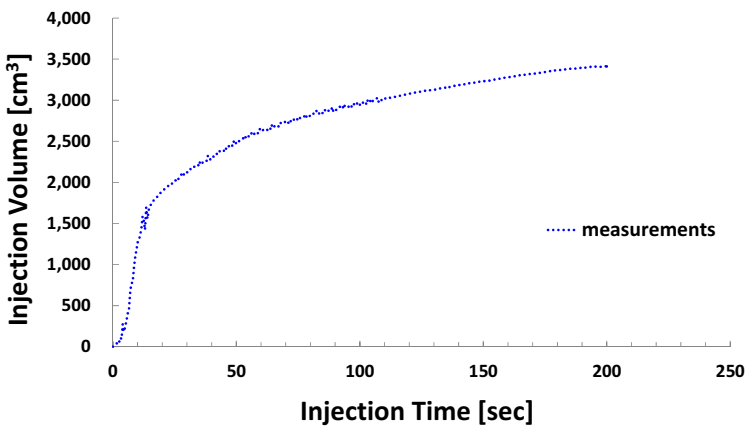



**Fig. 3.** Grout injection volume curve

## 3.2 시료 및 그라우트 조건

실내 챔버 모형실험에 사용된 시료들의 체분석 시험 결과는 Fig. 4와 같다. 총 5가지 시료에 대하여 주입가능성을 평가하였으며, 실험에 사용된 시료들의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

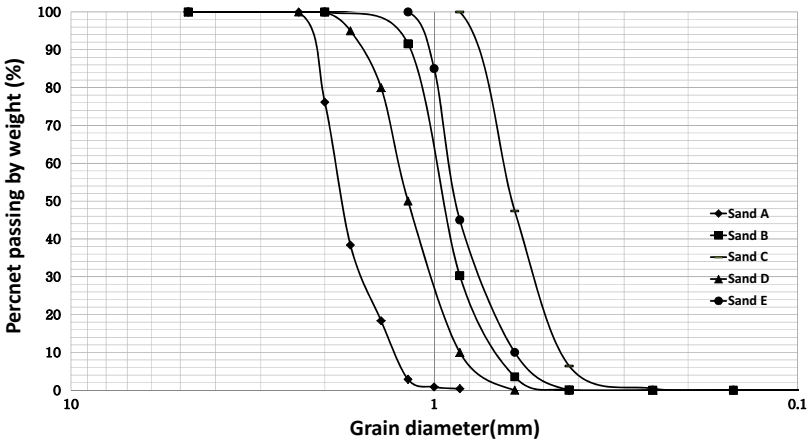



**Fig. 4.** Grain size distribution curves of tested sands

**Table 1.** Physical properties of soils

| Parameters | Sand A | Sand B | Sand C | Sand D | Sand E |
|---|---|---|---|---|---|
| $D_{10}$ (mm) | 1.42 | 0.85 | 0.68 | 0.6 | 0.45 |
| $D_{30}$ (mm) | 1.69 | 1.08 | 0.85 | 0.75 | 0.53 |
| $D_{60}$ (mm) | 1.95 | 1.35 | 0.98 | 0.91 | 0.65 |
| $C_u$ | 1.37 | 1.59 | 1.44 | 1.52 | 1.44 |
| $C_c$ | 0.81 | 1.47 | 1.70 | 2.02 | 2.73 |
| k (cm/s) | 0.31 | 0.12 | 0.08 | 0.05 | 0.03 |
| m | -1.625 | -2.360 | -2.815 | -2.871 | -3.382 |
| b | 0.3023 | 0.3329 | 0.5645 | 0.6169 | 0.3846 |

시멘트 그라우트는 단위중량 30.9 kN/m$^3$의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 조성했다. 주입 결과를 이론적으로 분석할 때 시멘트 그라우트만 주입할 경우는 주입 진행 중에 점도 값의 변화가 미미하여 그 값을 일정하게 반영하였으나 급결제를 혼합할 경우 주입 진행 중에 급격한 점도 변화가 발생하기 때문에 점도 실험을 통해 측정한 시간에 따른 점도 값을 반영하였다. 점도 실험 결과는 Fig. 5와 같고 급결제를 혼합 실험에서 그라우트의 배합 비와 겔화 진행 구간의 점도 함수를 정리한 것은 Table 2와 같다. Table 2의 점도 함수는 주어진 시멘트 그라우트와 급결제의 배합비에서 겔화가 진행되는 동안의 시간에 따른 점도 값의 변화를 나타낸다.

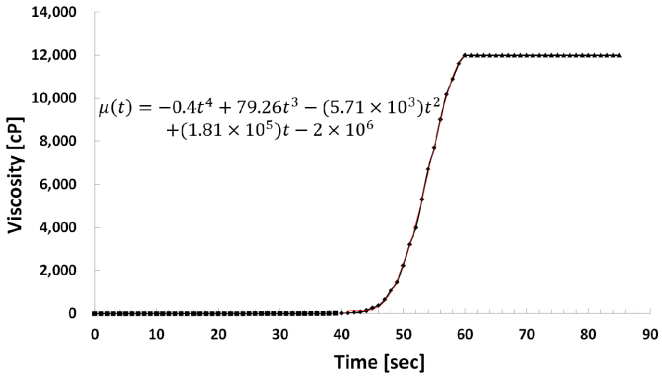



**Fig. 5.** Viscosity of grout suspension with time

**Table 2.** Mixing ratio of accelerating agent and cement-based grout and viscosity function

| Liquid A, 7000 ml | | Liquid B, 7000 ml | | | Viscosity function, cP (40≤t≤60) |
|---|---|---|---|---|---|
| Sodium silicate (ml) | Water (ml) | Cement (kg) | Water (kg) | w/c | |
| 3500 | 3500 | 4.42 | 5.53 | 1.25 | $\mu(t) = -0.4t^4 + 79.26t^3 - (5.71 \cdot 10^3)t^2 + (1.81 \cdot 10^5)t - 2 \cdot 10^6$ |

## 3.3 입도분포에 따른 시멘트 침투 그라우팅 거동 특성

먼저 다양한 입도분포에서 일차원 그라우트 주입실험을 실시하여 주입 깊이 및 시간-주입량 곡선을 분석한 결과 사질토의 주입 거동은 그라우트 주입이 1 m 이상 발생하고 시멘트 그라우트만으로는 침투 깊이의 조절이 불가능하여 급결제 혼합이 필요한 영역, 주입 깊이가 1 m 이내로 형성되고 시멘트 그라우트만으로 폐색현상 및 필터케익 형성이 가능한 영역 그리고 그라우트 주입이 5 cm 이내로 발생하여 시멘트 침투그라우팅이 불가능한 영역으로 구분된다. 시행한 실험 케이스별 주입 깊이 결과는 Table 3과 같다.

**Table 3.** Test results of sand A, sand B, and sand C

| No. | Sample | Dry unit weight (kN/m$^3$) | Injection pressure (kPa) | w/c | Penetration depth (cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | A | 16.11 | 200 | 1.25 | More than 115 |
| 2 | A | 16.03 | 200 | 1.65 | More than 115 |
| 3 | A | 16.01 | 200 | 2.0 | More than 115 |
| 4 | B | 15.59 | 200 | 1.25 | 33 |
| 5 | B | 15.60 | 200 | 1.65 | 52 |
| 6 | B | 15.58 | 200 | 2.0 | 66 |
| 7 | C | 15.20 | 200 | 1.25 | 1.2 |
| 8 | C | 15.18 | 200 | 1.65 | 2.5 |
| 9 | C | 15.20 | 200 | 2.0 | 3.3 |

앞선 9가지 실험 케이스의 시료는 급결제 혼합 필요 영역, 시멘트 침투그라우팅 가능 영역, 시멘트 침투그라우팅 불가능 영역을 각각 대표한다. 각 영역을 입도분포에 따라 명확히 구분하기 위하여 시멘트 그라우팅의 거동이 변화하는 경계 입도분포를 찾는 연구를 진행하였다. 시행 착오법으로 입도분포를 변화시켜가며 그라우트 주입실험을 실시하였고 주입거동의 경계 결정 기준은 다음과 같다.

1. 급결제 혼합 필요 영역과 시멘트 침투그라우팅 가능영역의 경계
   : w/c = 2.0, 주입압 = 200 kPa 조건에서 대략 1 m 정도의 주입이 발생하는 시료
2. 시멘트 침투그라우팅이 가능한 영역과 불가능한 영역의 경계
   : w/c = 2.0, 주입압 = 200 kPa 조건에서 최소 30 cm 내외의 주입이 발생하는 시료

일반적으로 그라우트 시공 시 주입공은 1~1.5 m 사이의 간격을 두고 설치되므로 그라우트의 침투깊이는 1 m 내외로 발생하여 다음 주입공에 영향을 미치지 않고 시공되는 것이 이상적이다. 따라서 기준 (1)은 계획한 실험 조건 중 침투 효율이 가장 높은 w/c = 2.0 조건에서 주입 깊이가 이상적으로 1 m에 가깝게 조절이 되는 경우를 찾고자 설정하였고 기준 (2)는 해당 조건에서 적어도 30 cm 내외의 주입이 발생해야 현장에서 해당 입도분포의 지반을 대상으로 할 때 주입압 및 물시멘트비를 조절해서라도 원하는 침투 효율을 얻을 수 있다고 판단했기 때문에 설정하였다. 결과적으로 기준 (1), (2)는 시멘트 침투그라우팅이 가능하다고 판단 할 수 있는 한계의 입도분포를 찾고자 설정된 것이다. 실험을 통해 도출한 시멘트 침투 그라우팅 거동의 경계에 해당하는 입도분포는 시료 D, 시료 E와 같고 시행한 실험 케이스별 주입 깊이 결과는 Table 4와 같다.

**Table 4.** Test results of sand D and sand E

| No. | Sample | Dry unit weight (kN/m$^3$) | Injection pressure (kPa) | w/c | Penetration depth (cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | D | 15.65 | 200 | 1.25 | 41.5 |
| 11 | D | 15.84 | 200 | 1.65 | 71 |
| 12 | D | 15.80 | 200 | 2.0 | 101 |
| 13 | E | 15.42 | 200 | 1.25 | 19 |
| 14 | E | 15.42 | 200 | 1.65 | 23 |
| 15 | E | 15.42 | 200 | 2.0 | 27 |

입도분포를 미세하게 바꿔가며 다수의 실험을 수행한 결과 시료 D보다 입경이 커지게 되면 전 층 침투가 발생하며 폐색 현상이 관찰되지 않는다. 또한, 시료 E보다 입경이 작아지게 되면 그라우트 주입이 거의 발생하지 않는다. 따라서 기준 (1), (2)를 만족하는 시료 D, E가 시멘트 침투 그라우팅 거동의 변화를 결정짓는 경계의 입도분포라고 볼 수 있다. 결과를 종합하여 입도분포에 따른 시멘트 침투 그라우팅의 거동 특성을 영역별로 표시한 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

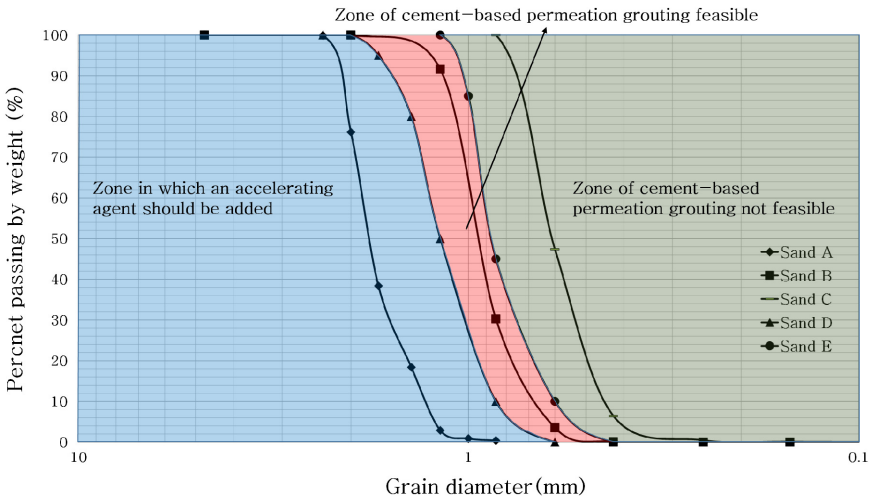



**Fig. 6.** Behavior of cement-based permeation grouting with grain size of sands

## 3.4 시멘트 침투 그라우팅 가능 영역의 주입특성

일차원 그라우트 침투 프로그램을 이용하여 그라우트의 침투 거동을 예측하기 위해 필요한 입력 데이터 중 lumped parameter ($\theta$)는 기본적으로 수행되는 지반조사 및 간단한 물성실험 이외의 추가적인 주입 실험을 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 lumped parameter ($\theta$)에 영향을 미치는 주된 요소를 시멘트 그라우트의 물시멘트비와 지반의 간극 반지름으로 보고 물시멘트비, 간극 반지름, 그리고 lumped parameter ($\theta$)의 관계식을 도출하여 별도의 실험 없이 lumped parameter ($\theta$)를 결정하고자 한다.

먼저 lumped parameter ($\theta$)에 대한 간극 반지름의 영향을 고려하기 위하여 대표 간극 반지름이라는 개념을 제안하였다. 대표 간극 반지름은 대표 간극 반지름으로만 이루어진 지반과 다양한 크기의 간극 반지름으로 구성되는 지반에서 동일한 시멘트 그라우트 주입 거동이 발생하도록 하여 산정하는 단일한 값이다.

각 시료별 간극 크기의 대수 정규분포에서의 평균 m과 표준편차 b는 폐색이론 적용 시 지반 간극의 크기를 반영하는 요소이다. 대표 간극 반지름은 일차원 그라우트 침투 프로그램에서 m과 b를 제외한 데이터는 고정시켜놓고 b를 0으로 바꾼 후에 m값을 변화시켜가며 시간-주입량 곡선의 실험값과 이론값을 비교하여 결정하였다. 이 결정 방법이 의미하는 바는 다음과 같다. 먼저 표준편차 b를 0으로 놓은 후의 이론적인 거동은 단일한 간극반경을 가지는 지반에 의한 것이라고 볼 수 있다. 또한 b = 0 조건에서 m값을 바꿔가며 실험값과 이론값을 비교하는 것은 간극 반지름이 분포를 가지는 경우와 단일한 간극반경을 가지는 경우가 동일한 거동을 하도록 하는 m 값을 찾는 과정이다. 그러나 다음과 같이 대표 간극 반지름을 산정하기 위해서는 추가적인 실내 챔버 모형실험이 필요하므로 본 연구의 목표에 부합하지 않는다. 따라서 지반의 입도분포, 간극비를 알면 Arya and Dierolf (1992)가 제안한 식 (8)을 이용하여 간단하게 구할 수 있는 평균 간극 반지름을 이용하여 그 참고 값을 제안할 필요가 있다. 따라서 시료 B, 시료 D, 시료 E에 대해 산정한 대표간극반지름 결과와 평균 간극 반지름에 대한 대표 간극 반지름의 비

를 Table 5에 정리하였다. 결론적으로 평균 간극 반지름에 대한 대표 간극 반지름의 비는 시료 B, 시료 D, 시료 E의 입도분포에서 각각 1.07, 1.23, 1.35 정도의 값을 가진다. 또한, 흙 시료의 크기가 클수록 그 비는 작아짐을 알 수 있다.

**Table 5.** Representative pore radii for sand D, sand B, and sand E

| Sample | w/c | Before fitting | | After fitting | | Representative pore radius (mm) | Mean pore radius (mm) | (representative pore radius)/ (mean pore radius) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | m | b | m | B | | | |
| D | 1.25 | -2.871 | 0.6169 | -2.240 | 0 | 0.1064 | 0.0994 | 1.07 |
| | 1.65 | -2.871 | 0.6169 | -2.240 | 0 | 0.1064 | 0.0994 | 1.07 |
| | 2.0 | -2.871 | 0.6169 | -2.243 | 0 | 0.1061 | 0.0994 | 1.07 |
| B | 1.25 | -2.360 | 0.3329 | -2.466 | 0 | 0.0848 | 0.0689 | 1.23 |
| | 1.65 | -2.360 | 0.3329 | -2.472 | 0 | 0.0844 | 0.0689 | 1.22 |
| | 2.0 | -2.360 | 0.3329 | -2.475 | 0 | 0.0842 | 0.0689 | 1.22 |
| E | 1.25 | -3.382 | 0.3846 | -2.480 | 0 | 0.0814 | 0.0603 | 1.35 |
| | 1.65 | -3.382 | 0.3846 | -2.484 | 0 | 0.0812 | 0.0603 | 1.35 |
| | 2.0 | -3.382 | 0.3846 | -2.486 | 0 | 0.0811 | 0.0603 | 1.34 |

물시멘트비, 대표간극반지름, 그리고 lumped parameter ($\theta$)의 관계 분석을 위하여 시멘트 침투 그라우팅 가능 영역에 속하는 시료 B, 시료 D, 그리고 시료 E를 대상으로 lumped parameter ($\theta$)를 산정하였다. 실험 조건별 lumped parameter ($\theta$) 값은 시간-주입량 곡선의 이론값과 실험값을 비교하여 결정하였다. 그 예로 시료 B의 w/c = 2.0조건에서 lumped parameter ($\theta$)의 결정 과정을 Fig. 7에 나타내었다.

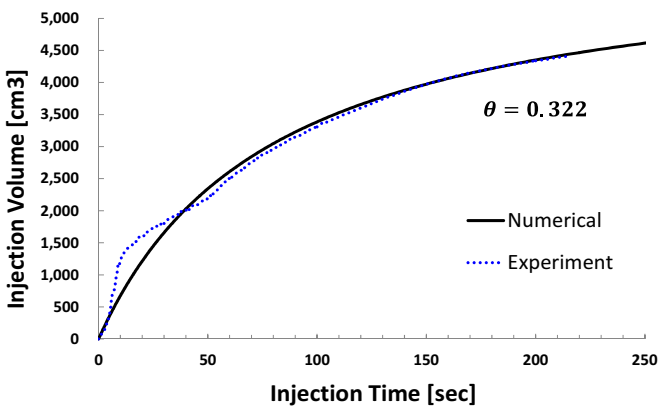



**Fig. 7.** Lumped parameter ($\theta$) of sand B (w/c = 2.0)

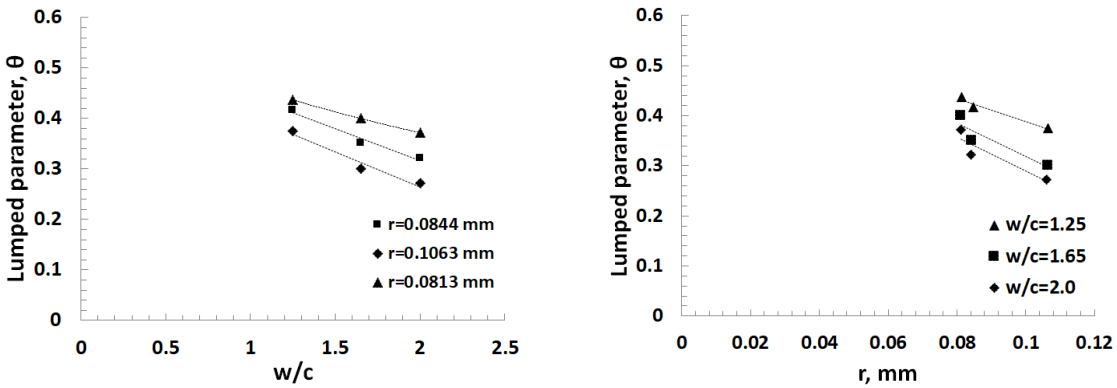
시료 B, 시료 D, 시료 E에 대하여 물시멘트비와 간극 반지름에 따른 lumped parameter ($\theta$) 결과를 정리한 것은 Table 6과 같고 그 결과를 Fig. 8에 그래프로 도시하였다. 결과적으로 lumped parameter ($\theta$)는 시멘트 그라우트의 물시멘트비와 지반의 대표 간극 반지름이 감소할수록 증가한다. Table 6의 데이터를 기반으로 회귀분석을 통하여 도출한 물시멘트비, 대표 간극 반지름 그리고 lumped parameter ($\theta$)의 관계식은 식 (12)와 같다.

$$\theta = 0.83 - 3.00 \cdot (\text{representative pore radius}) - 12(\text{w/c}) \tag{12}$$

식 (12)를 이용하여 시멘트 침투 그라우팅 영역의 lumped parameter ($\theta$)를 사전에 결정할 수 있으며 설계단계에서의 추가적인 실내 주입실험을 생략하여 하나의 공정을 단축할 수 있다는 의의가 있다.

**Table 6.** Results of w/c, representative pore radius, and lumped parameter ($\theta$)

| Sample | Dry unit weight (kN/m$^3$) | w/c | Representative pore radius (mm) | Lumped parameter ($\theta$) |
|---|---|---|---|---|
| D | 15.65 | 1.25 | 0.1064 | 0.375 |
| | 15.84 | 1.65 | 0.1064 | 0.3 |
| | 15.80 | 2.0 | 0.1061 | 0.272 |
| B | 15.58 | 1.25 | 0.0848 | 0.417 |
| | 15.59 | 1.65 | 0.0844 | 0.351 |
| | 15.59 | 2.0 | 0.0842 | 0.322 |
| E | 15.42 | 1.25 | 0.0814 | 0.437 |
| | 15.42 | 1.65 | 0.0812 | 0.41 |
| | 15.42 | 2.0 | 0.0811 | 0.372 |




(a) $\theta$ v.s. w/c (b) $\theta$ v.s. r

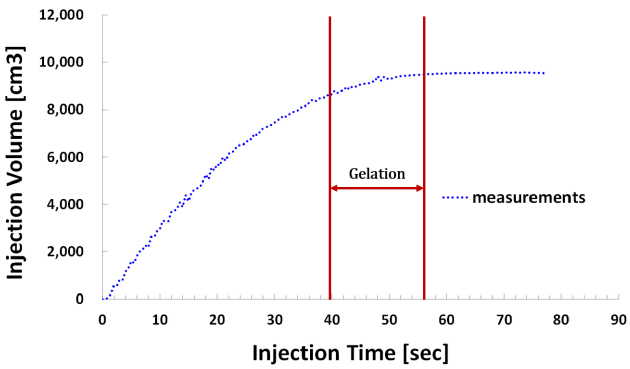
**Fig. 8.** Relationship between w/c, representative pore radius, and lumped parameter ($\theta$)

### 3.5 급결제 혼합 필요 영역의 주입특성

급결제 혼합 필요 영역에 속하는 지반은 시멘트 그라우트에 급결제를 혼합하여 겔화시간의 조절을 통해 주입 깊이를 제한할 필요가 있다. 시료 A는 주입 거동의 경계 근처에 분포하며 시멘트 그라우트만으로는 저압 그라우팅을 실시하여도 폐색이 전혀 발생하지 않으므로 급결제 혼합 필요 영역의 대표적인 시료라고 볼 수 있다. A액(급결제)과 B액(시멘트 그라우트)의 배합 비를 바꿔가며 시료 A에서 그라우트의 겔화시간 내에 1 m 내외로 주입 깊이가 조절되는 경우를 찾았다. 실험에 사용된 A액과 B액의 배합비와 주입 조건 그리고 실험 결과를 Table 7에 정리하였고 주입량 곡선과 주입 후의 모형지반 형상은 Fig. 9와 같다.

**Table 7.** Experimental conditions and test results (with an accelerating agent)

| No. | Sample | Dry unit weight, kN/m$^3$ | Injection pressure, kPa | Liquid A, 7000 ml | | Liquid B, 7000 ml | | | Gel time, sec | Penetration depth, cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Sodium silicate, ml | Water, ml | Cemen, kg | Water, kg | w/c | | |
| 16 | A | 16.23 | 100 | 3500 | 3500 | 4.42 | 5.53 | 1.25 | 56 | 92 |




(a) Injection volume curve

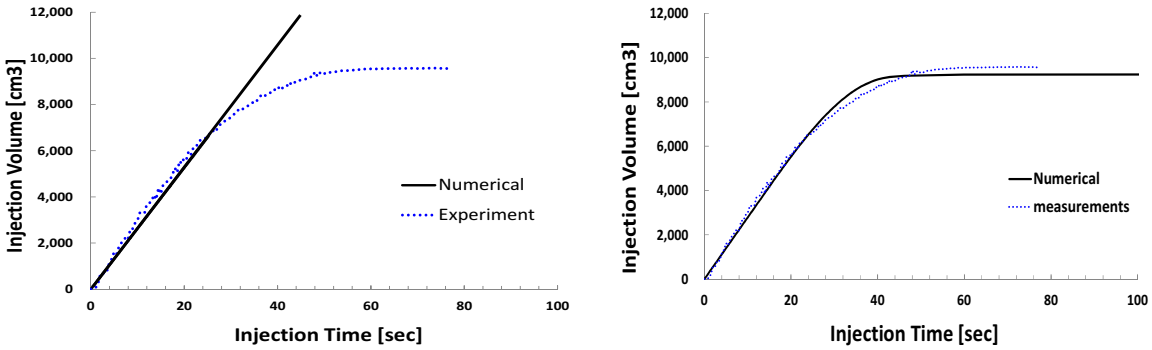
(b) Measurement of penetration depth

**Fig. 9.** Experimental test results (case of accelerating agent added)

시간-주입량 곡선의 경우 겔화가 진행됨에 따라 기울기가 점점 감소하며 완전히 고결된 이후에 주입이 중단되는 것을 확인할 수 있다. 실험 결과 겔화 시간은 56초, 최종 주입 깊이는 92 cm로 측정되어 급결제를 혼합하여 주입 깊이를 1 m 이내로 조절하는 과정을 실험적으로 검증하였다.

급결제 혼합 실험 결과를 이론적으로 분석하는 과정은 두 단계로 나누어진다. 먼저 일차원 그라우트 침투 프로그램에 해당 실험 데이터를 입력한 후 lumped parameter ($\theta$)를 결정한다. 다음으로 급결제 첨가로 인한 주입 깊이 조절은 lumped parameter ($\theta$)의 값이 변하는 것이 아니라 그라우트의 점도가 급격이 증가함에 따라 발생하는 것이므로 lumped parameter ($\theta$)는 동일하게 설정하고 Table 2의 그라우트의 점도변화함수를 이용하여 시간에 따른 점도 값을 적용한다.

No. 16 실험에서 lumped parameter ($\theta$)는 0.1 이하의 매우 작은 값을 가지는 것으로 분석되었으며 대표 간극반지름은 0.2 mm로 결정되었다. 그리고 점도 변화함수의 적용 전과 후의 이론값과 실험값의 비교 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 점도 변화함수 적용 전에는 이론값이 감소하는 구간 없이 선형적으로 증가하지만 점도 변화함수를 적용하게 되면 겔화가 진행되는 현상이 반영되어 이론값과 실험값이 비교적 일치하는 것을 확인할 수 있다.




(a) Before applying viscosity function (b) After applying viscosity function

**Fig. 10.** Comparison of numerical and experimental values (case of accelerating agent added)

## 4. 결 론

본 논문에서는 사질토에서의 시멘트 침투 그라우팅 거동 특성을 입도분포에 따라 분류하고 각 거동을 일차원 그라우트 침투 프로그램을 이용해 사전에 예측하기 위한 연구를 진행하였다. 연구수행 결과를 종합하면 다음과 같고 연구 내용을 바탕으로 사질토에서의 시멘트 침투 그라우팅 거동을 예측하고 분석하여 설계에 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

1. 다양한 입도분포에서의 실내 주입 실험을 통하여 사질토에서의 시멘트 침투 그라우팅 거동의 경계를 결정짓는 입도분포를 도출하였고 입도분포로 나타낸 시멘트 침투 그라우팅 거동의 분류는 Fig. 6과 같다.
2. 급결제 혼합 필요영역과 시멘트 침투그라우팅 가능영역의 경계에 해당하는 입도분포, 시멘트 침투 그라우팅 가능 영역의 대표 입도분포, 그리고 시멘트 침투 그라우팅 가능 영역과 시멘트 침투 그라우팅 불가 영역의 경계에 해당하는 입도분포에서 평균 간극반지름에 대한 대표간극반지름의 비는 각각 1.07, 1.23, 1.35 정도로 결정되었다. 또한 흙 시료의 크기가 클수록 그 비는 작아짐을 확인하였다.
3. 실험 조건별로 시간-주입량 곡선의 이론값과 실험값의 비교를 통하여 폐색거동에 영향을 미치는 핵심 인자인 lumped parameter ($\theta$)를 산정한 결과 물시멘트비와 지반 간극의 크기가 감소할수록 그 값이 증가한다는 경향성을 파악하였다. 별도의 주입실험 없이 lumped parameter ($\theta$)를 결정하기 위해 물시멘트비, 대표간극반지름, 그리고 lumped parameter ($\theta$)의 관계식을 '$\theta = 0.83 - 3.00 \cdot (representative\ pore\ radius) - 0.12(w/c)$'

와 같이 제안하였다.

4. 급결제를 혼합한 그라우팅 실험의 경우 주입이 진행되는 동안 시간에 따른 그라우트의 점도 변화가 급격하게 발생하여 겔화 시간이 약 56초, 침투 깊이는 92 cm 정도로 조절되는 것을 확인하였다. 또한, 실험을 실시한 배합 비에서의 시간에 따른 점도변화함수를 측정하여 일차원 그라우트 침투 프로그램에서 적용한 결과 시간-주입량 곡선의 이론값과 실험값이 일치함을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(17SCIP-B066321-05)” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. Arya, L.M., Dierolf, T.S. (1992), “Predicting soil moisture characteristics from particle-size distributions: an improved method to calculate pore radii from particle radii”, Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, University of California, Riverside, CA, pp. 115-124.
2. Joo, E.J., Kim, Y.K., Shin, J.H., Kwon, O.Y. (2010), “Numerical study for the optimum grouting design of subsea tunnels”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 12, No. 5, pp. 349-358.
3. Kim, J.S., Lee, I.M., Jang, J.H., Choi, H. (2009), “Groutability of cement-based grout with consideration of viscosity and filtration phenomenon”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 33, No. 16, pp. 1771-1797.
4. Lee, J.W., Kim, H.M., Yazdani, M., Park, E.S. (2017), “Influence of design parameters of grout injection in rock mass using numerical analysis”, Tunnel and Underground Space, Vol. 27, No. 5, pp. 324-332.
5. Reddi, L.N., Bonala, M.V.S. (1997), “Analytical solution for fine particle accumulation in soil filters”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 12, pp. 1143-1152.
6. Yang, Z.Q., Hou, K.P., Guo, T.T. (2011), “Study on the effects of different water-cement ratios on the flow pattern properties of cement grouts”, Applied Mechanics and Materials, Vol. 71, pp. 1264-1267.
7. You, K.H. (2011), “Analysis on the effect of strength improvement and water barrier by tunnel grouting reinforcement”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 13, No. 4, pp. 291-304.
8. You, K.H., Jie, H.K., Seo, K.W., Kim, S.J., You, D.W. (2012), “A study on the correlation between the rock mass permeability before and after grouting & injection volume and the parameters of Q system in a jointed rock mass tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 6, pp. 617-635.