

# 미세균열 그라우팅 주입성능 및 재료의 점도 측정방법 평가

## Evaluation of the Groutability through Microcrack and Viscosity Measurement Methods for Grouting Materials

진 현 우<sup>1</sup> Jin, Hyun-Woo  
유 병 현<sup>2</sup> Ryu, Byung-Hyun  
이 장 근<sup>3</sup> Lee, Jang-Guen

### Abstract

In order to develop urban underground spaces, even microcracks should be reinforced. In this paper, the grouting injection performance for microcracks was investigated considering the viscosity and particle size of the grouting materials, injection pressure, and crack width. There are two types of typical grouting materials used for filling micro-cracks. One is a chemical liquid grouting material which is a solution type and the other is a cementitious grouting material which is a suspension type. The injection performance of the grouting materials for microcracks is generally influenced by the viscosity, and the injection performance of the cementitious grouting material is additionally affected by the particle size. From laboratory tests, the viscosity was calculated inversely to provide a suitable viscosity measurement method for each grouting material. The groutability ratio based on the relationship between the crack width and the particle size was evaluated to estimate the grouting feasibility of the cementitious grouting material through microcracks.

### 요 지

도심지 지하공간 개발을 위해서는 안정성 확보를 위해 암반 또는 암주의 미세균열까지도 보강해야 한다. 본 논문에서는 그라우팅 재료의 점도 및 입경, 주입압력, 균열 폭 등을 고려한 미세균열 그라우팅의 주입성능에 대한 연구를 수행하였다. 미세균열 보강에 사용되는 대표적인 그라우팅 재료는 용액형인 약액형 그라우팅 재료와 현탁액형인 시멘트계 그라우팅 재료가 있다. 약액형 그라우팅 재료와 시멘트계 그라우팅 재료의 주입성능은 공통적으로 점도에 영향을 받으며, 시멘트계 그라우팅 재료의 주입성능은 추가적으로 주입 재료의 입경에 영향을 받는다. 실내실험을 통해 점도를 역계산하여 재료별로 적합한 점도 측정 방법을 제시하였고, 균열 폭과 재료의 입경 간의 관계를 이용한 groutability ratio로 시멘트계 그라우팅 재료의 그라우팅 가능여부를 평가하였다.

**Keywords :** Grouting, Microcrack, Viscosity, Particle size, Groutability, Laboratory test

- 1 정희원, 과학기술연합대학원대학교 스마트도시·건설융합과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Smart City & Construction Engrg., Korea Univ. of Science and Technology)
- 2 정희원, 한국건설기술연구원 박사후 연구원 (Member, Post dDoctoral Researcher, Geotechnical Engrg. Research Institute, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
- 3 정희원, 한국건설기술연구원 연구위원, 과학기술연합대학원대학교 스마트도시·건설융합 교수 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engrg. Research Institute, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology, Prof., Dept. of Smart City Construction Engrg., Korea Univ. of Science and Technology, Tel: 82-31-910-0791, Fax: 82-31-910-0211, [jlee@kict.re.kr](mailto:jlee@kict.re.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2017 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

지하공간은 터널과 같은 이동 통로로서의 기능과 함께 다양한 기능을 갖춘 활용 공간으로의 가능성이 증가하고 있다. 최근 들어 인구 밀집으로 인한 도심지의 공간 부족 현상 해결 및 토지의 효과적인 활용을 위해 유동인구가 많은 도심지의 지하공간을 개발하고자 하는 움직임이 일어나고 있다. 유동인구가 많은 도심지의 지하공간을 개발하기 위해서는 주변 지반에 영향을 최소화하려는 노력이 반드시 필요하다(Lee et al., 2013).

자원개발 분야에서 사용되고 있는 주방식 공법(room-and-pillar method)은 수평 또는 거의 수평으로 매장되어 있는 광물을 효율적으로 채광할 수 있는 공법이다(Hartman and Mutmansky, 2002; Darling, 2011). 주방식 공법이란 광물의 매장 형태에 따라 일정 간격으로 방을 형성하며 방과 방 사이에 암주(rock pillar)를 남겨 놓은 형태로 여러 곳의 작업장을 운영하는 방식이다. 따라서 주방식 공법은 기존 공간을 활용하는 동시에 새로운 공간 창출에 적합한 공법이라 할 수 있다. 미국 캔자스(kansas)에서는 주방식 공법을 활용해 광산을 물류센터, 우편물 집중국, 사무실 등 대규모 상업 지하 공간(subtropolis)으로 활용하고 있다(Lee et al., 2014). 주방식 공법은 굴착하지 않은 암주(rock pillar)가 상재하중을 지지하는 중요한 역할을 담당하고 있어 일반적인 도심지 조건에 적용하기 위해서는 보다 높은 안전성 확보가 필요하다. 따라서 향후 다양한 용도로 활용될 지하공간은 구조물의 안전성을 위협할 수 있는 미세균열까지도 그라우팅을 통해 철저히 보강되어야 한다. 특히 지하수는 소량의 누수만으로도 구조물의 안전성을 위협할 수 있기 때문에 지하수 누수에 대비해 고점도의 그라우팅 재료를 활용한 그라우팅 시공이 활발해질 것으로 예상된다(Barton, 2004).

지금까지 그라우팅 주입재료 관련해서는 입경에 초점을 맞춘 다수의 연구들이 진행되었다. Mitchell et al.(1981)은 주입대상 및 주입재료의 상대적 입경 비로 지반이 그라우트를 받아들일 수 있는 능력(groutability)을 판단하는 기준을 제시하였고, Chun et al.(2003)은 초미립자 시멘트와 보통포틀랜드 시멘트의 침투성 시험을 수행하였다. Jung et al.(2010)은 ENG(Earth Natural Grouting) 공법을 활용하여 보통시멘트의 평균입경( $15 \sim 20 \mu m$ )으로 인해 침투영역이 제한적인 부분을 보완하였고, Kong et al.(2010)은 난투수성 암반기초에 초미립자 주입재와 보통시멘트 주입재를 사용하는 경우를 검토하는 연구를

수행하였다. 그러나 암반 미세균열에 그라우팅 재료의 주입 가능성을 평가하는 연구와 그라우팅 주입성능에 영향을 미치는 또 다른 인자인 주입재료의 점도에 초점을 맞춘 연구는 아직 미미한 실정이다. Jin et al.(2016)은 그라우팅 재료의 점도 및 입경, 주입압력, 균열 폭 등을 고려할 수 있는 그라우팅 주입성능 실내실험 방법을 제시한 바 있다. 본 논문에서는 그라우팅 재료 입경에 의한 주입 가능성을 평가했으며 실내실험을 통해 그라우팅 재료의 점도가 암반 미세균열 주입에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 또한 재료별 최적 점도 측정방안을 제시하였다.

## 2. 미세균열용 그라우팅 재료의 특성

일반적으로 미세균열을 보강하기 위한 그라우팅 주입 재료로는 용액형인 약액형 주입재료와 현탁액형인 시멘트계가 사용된다. 용액형인 약액형 주입재료의 경우 점도에 영향을 받아 그라우팅 주입성능이 결정되며, 현탁액형인 시멘트계의 경우 점도 및 시멘트입자의 입경에 영향을 받아 침투할 수 있는 균열 폭과 주입성능이 결정된다. 두 재료 모두 점도에 영향을 받아 주입성능이 결정된다는 공통점이 있으며, 현탁액형인 시멘트계열의 경우 균열 폭과 그라우팅 재료의 상대적 입경으로 주입 가능성을 결정하는 groutability를 추가적으로 고려해야 한다.

### 2.1 점도의 정의

평행한 두 개의 평판 사이에 뉴턴유체(newtonian fluid)가 존재할 때, 하판을 고정시키고 상판에 힘( $\tau$ )을 주어 일정한 속도( $u$ )로 가로축과 평행하게 이동시키면 Fig. 1

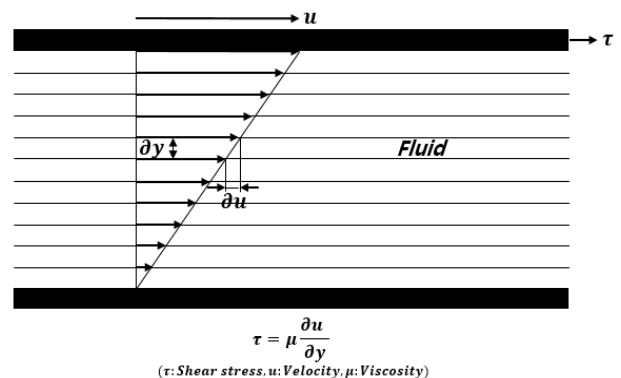


Fig. 1. Flow between two parallel plates to illustrate viscosity (Bear, 1972)

과 같은 속도 분포를 나타낸다. 상판의 속도가 빨라지면 속도 기울기가 커지고 그 영향으로 전단응력이 증가하며, 평판 사이의 거리가 멀어지면 속도 기울기는 작아지고 그 영향으로 전단응력이 감소하게 된다. 이러한 경향은 평판 사이에 존재하는 유체의 종류에 따라 달라지는데 이러한 특성을 점도( $\mu$ , viscosity)라고 하며, 식 (1)로 정의할 수 있다(Bear, 1972).

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 전단응력( $N/m^2$ ),  $\mu$ 는 점도(cenipoise,  $N \cdot s/m^2$ ),  $\partial u/\partial y$ 는 변형률의 시간변화율( $(m/s)/m$ )이다.

점도는 유체 점성의 정도, 즉 유체의 끈끈한 성질을 나타내는 물리적 단위로 역학점도(dynamic viscosity,  $\mu$ )라고 부른다. 이렇게 부르는 이유는 동점도(kinematic viscosity,  $\nu$ )라는 개념과 비교하기 위함이다. 동점도(kinematic viscosity,  $\nu$ )는 식 (2)에 나타낸 바와 같이 역학점도를 유체의 밀도

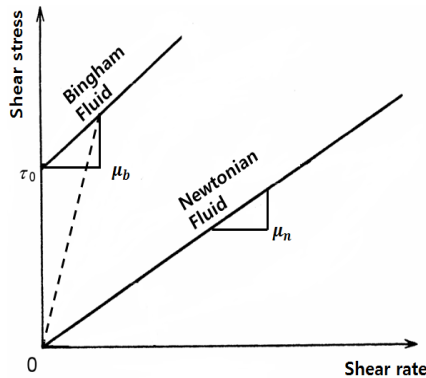


Fig. 2. Newtonian fluid vs. Bingham fluid (Clayton et al., 2005)

(density,  $\rho$ )로 나눈 값으로 정의한다. 역학점도가 유체의 전단속도에 저항하는 정도를 뜻하는 것에 반해 동점도는 유체의 유동성, 즉 얼마나 잘 흐를 수 있는지를 나타내는 지표다(Clayton et al., 2005).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

여기서  $\nu$ 는 동점도( $m^2/s$ ),  $\rho$ 는 밀도( $kg/m^3$ )이다.

## 2.2 뉴턴유체와 빙햄유체(Newtonian fluid and Bingham fluid)

전단응력( $\tau$ )이 전단변형률( $\partial u/\partial y$ )에 직접 비례하는 유체를 뉴턴유체(newtonian fluid)라 한다. 전단응력이 전단변형률에 직접 비례하기 때문에 이들 변수 간 관계는 Fig. 2에서와 같이 원점을 지나는 직선으로 나타낼 수 있으며, 이 직선의 기울기가 역학점도(dynamic viscosity)다. 어떤 유체는 전단응력이 변형률에 직접 비례하지 않는데 이러한 유체를 비뉴턴유체(non-newtonian fluid)라 한다. 비뉴턴유체의 부류에 속하는 빙햄유체(bingham fluid)는 작은 전단응력 값에 대해서는 고체와 같이 거동하고, 그보다 큰 전단응력에서는 유체처럼 거동한다. 빙햄유체(bingham fluid)에 대해서도 Fig. 2에 도시하였다 (Clayton et al., 2005).

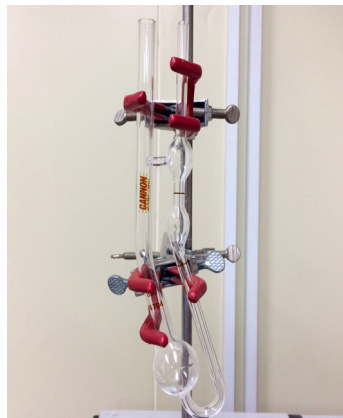
## 2.3 점도 측정 방법

### 2.3.1 회전 점도계

회전 점도계는 유체에 원통 또는 원판의 스핀들을 일



(a) Rotational viscometer



(b) Cannon-Ubbelohde viscometer



(c) Marsh funnel viscometer

Fig. 3. Viscosity measurement devices

정한 회전수로 구동하고 회전 중 발생하는 유체의 저항을 통해 점도를 측정하는 방식이다. 연속 2회 측정값이 서로 3% 이상 차이가 나지 않을 때까지 측정한 후 이 2회 측정값의 평균값을 유체의 점도로 본다. 액체 또는 그와 유사한 형태인 수지의 점도를 측정할 수 있다. Fig. 3a과 같은 형상을 하고 있으며 본 연구에서는 Brookfield 사의 DV2T Viscometer를 사용하였다(KS M ISO 2555, 2012; ASTM D2196, 2015).

### 2.3.2 모세관 점도계

모세관 점도계는 안지름이 균일한 모세관 속에 시료를 층류상태로 흐르게 하여 일정 부피의 시료가 흐르는 데 걸리는 시간을 측정하여 액체시료의 역학점도 및 동점도를 측정할 수 있다. 시료에 따라 온도의 영향이 클 수 있으므로 미리 그 변화를 조사하여 항온으로 유지하여 점도를 측정해야 한다. 본 연구에서 사용한 모세관 점도계는 캐논-펜스케 점도계(canon-fenske viscometer)로 Fig. 3b과 같은 모양을 하고 있으며, 약액형 그라우팅 재료의 점도를 측정하는데 적합하다. 동점도는 식 (3)과 같이 모세관별로 정의하고 있는 점도계 상수 및 계수, 그리고 통과시간을 사용해 계산한다(KS A 0531, 2011; ASTM D445, 2015; ASTM D446, 2012).

$$\frac{\mu}{\rho} = \nu = c_1 t - \frac{c_2}{t} \quad (3)$$

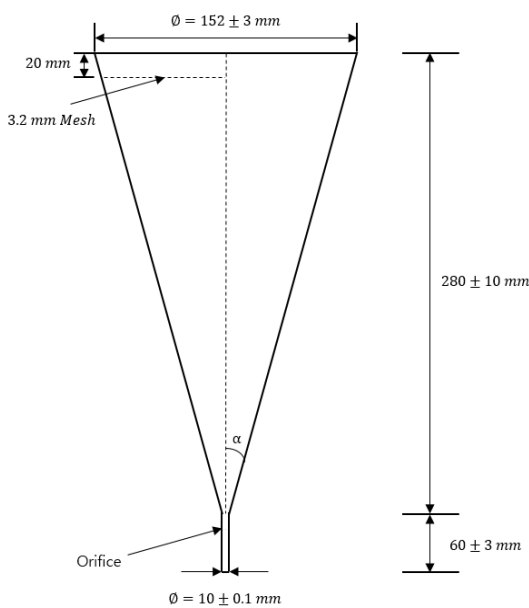


Fig. 4. Geometry of Marsh funnel (Pitt, 2000)

여기서  $c_1$ 는 점도계 상수( $mm^2/s^2$ ){cSt/s},  $c_2$ 는 점도계 계수( $mm^2$ ){cSt·s}이다.

### 2.3.3 깔때기형 점도계

깔때기형 점도계는 일정 부피의 시료가 깔때기를 통과하는 데 걸리는 시간을 측정하여 점도를 계산하는 방식이다. 슬러리 형태의 시료 점도를 측정하는데 적합한 점도계다. 본 연구에서 사용한 마야시 깔때기(marsh funnel)는 주로 고점도의 시추이수(drilling mud)의 점도를 측정하는데 사용되며 실험준비를 마친 상태의 모습은 Fig. 3c와 같다. 마야시 깔때기는 크게 원뿔 모양의 깔때기와 오리피스로 나눌 수 있고 단면도는 Fig. 4와 같다. 원뿔 모양의 깔때기는 직경  $152 \pm 3mm$ , 길이  $280 \pm 10mm$ 고, 오리피스는 직경  $10 \pm 0.1mm$ , 길이  $60 \pm 3mm$ 이다. 깔때기에 점도를 측정할 슬러리를 1500mL만큼 채우고 946mL가 통과했을 때의 시간을 측정하여 식 (4)를 이용해 시료의 점도를 계산한다(ASTM D6910, 2009; Pitt, 2010).

$$\mu = \rho(t - 25) \quad (4)$$

여기서  $t$ 는 일정 부피의 시료가 깔때기를 통과하는 시간( $s$ )이다.

## 2.4 Groutability

Groutability란 지반이 입자형 그라우트 재료를 받아들일 수 있는 능력을 말한다(Donald et al., 2005). Mitchell et al.(1981)은 Table 1에 나타낸 바와 같이 groutability ratio값으로 그라우팅 가능여부를 판단하는 기준을 제안했다. 주입대상 지반이 토질일 경우 2가지 기준을 제안했다. 첫 번째 기준은 주입대상 토질의 통과량이 15% ( $D_{15, soil}$ )일 때 입경과 그라우팅 주입재료 통과량이 85% ( $d_{85, grout}$ )일 때 입경의 비로 정의했으며, 이 값이 24보다

Table 1. Groutability criteria (Mitchell et al., 1981)

	Groutability ratio (N)	Groutable	UngROUTable
Soil	$N_1 = \frac{D_{15, soil}}{d_{85, grout}}$	> 24	< 11
	$N_2 = \frac{D_{10, soil}}{d_{95, grout}}$	> 11	< 6
Rock	$N_3 = \frac{e}{d_{95, grout}}$	> 5	< 2

클 경우 그라우팅이 가능하다고 판단하고 11보다 작을 경우 그라우팅이 불가능한 것으로 판단한다. 두 번째 기준은 주입대상 토질의 통과량이 10% ( $D_{10,soil}$ )일 때 입경과 그라우팅 주입재료 통과량이 95% ( $d_{95,grout}$ )일 때 입경의 비로 정의했으며, 이 값이 11보다 클 경우 그라우팅이 가능하다고 판단하고 6보다 작을 경우 그라우팅이 불가능한 것으로 판단한다. 주입대상 지반이 암반인 경우에는 주입대상 지반의 균열 폭( $e$ )과 그라우팅 주입재료의 95%가 통과할 때 입경( $d_{95,grout}$ )의 비로 정의했으며, 이 값이 5보다 클 때 그라우팅이 가능하다고 판단하고 2보다 작을 경우 그라우팅이 불가능하다고 판단한다.

### 3. 실내실험

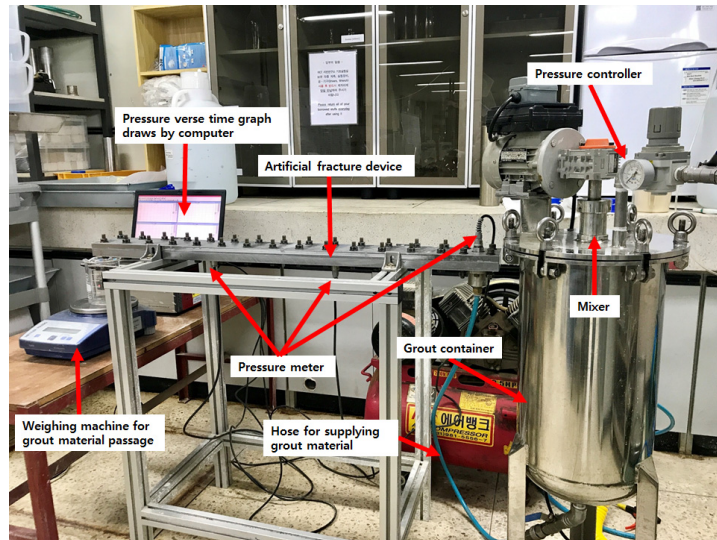
#### 3.1 평행평판형 장비

Jin et al.(2016)은 그라우트 주입부에서 급격하게 좁아지는 지반 균열을 원활하게 통과해 확산되는지를 파

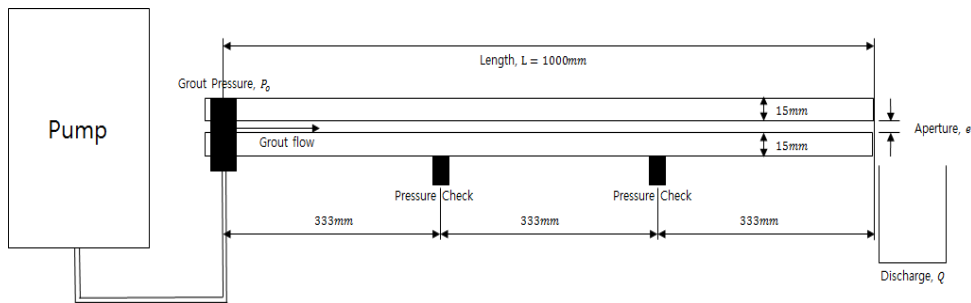
악하기 위한 목적으로 Fig. 5와 같은 평행평판형 실험장비를 제작하였다. 상판과 하판을 직사각형의 스테인리스 철판(상판두께 15mm, 하판두께 20mm, 폭 110mm, 길이 1,000mm)으로 제작하였다. 상판과 하판 사이에 다양한 두께의 공업용 필름(폴리에스테르, 열수축 1% 이하, 탄성계수  $450kgf/mm^2$ )을 설치하여 주요변수인 균열 폭을 조절하였고, 상판과 하판 체결은 균등한 압력 배분을 위해 전자식 토크렌치를 사용하였다. 그라우팅 재료는 교반장치(mixer)를 포함한 소형 챔버에서 준비되며 소형 챔버 뒷개에는 주입압력을 조절할 수 있는 압력조절 장치를 설치하였다. 또한 그라우팅 재료의 통과 상태를 확인하기 위해 3개의 압력측정 센서(그라우팅 재료 주입부에 1개, 균열모사부에 2개)를 설치하였다.

#### 3.2 해석방안

평행평판형 실험장비는 주입재료가 한 방향으로만 배출되기 때문에 통과유량을 측정하는 것이 용이하다.



(a) groutability testing apparatus



(b) Parallel plate model of fractured permeable media

Fig. 5. Experimental linear grout flow testing apparatus (Jin et al., 2016)

Witherspoon(1979) 등이 Darcy's law를 이용해 유도한 그라우팅 재료의 유량  $Q$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{e^3 \rho g D (h_o - h_w)}{12 \mu L} \quad (5)$$

여기서  $Q$ 는 통과유량( $m^3/s$ ),  $e$ 는 균열 폭(m),  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $D$ 는 균열의 수직거리(m),  $h_o$ 는 주입부의 수두(m),  $h_w$ 는 침투부의 수두(m),  $\mu$ 는 그라우팅 재료의 점도(Pa·s),  $L$ 는 침투거리(m)이다.

식 (5)에 Bernoulli's theorem을 적용하여 점도에 관한 식으로 정리하면 식 (6)과 같다(Jin et al., 2016). 시간에 따른 그라우팅 재료의 통과유량을 측정하여 계산한 점도값(식 (6))과 점도계를 통해 측정된 점도값을 비교·분석하여 주입성능 평가 결과를 해석하였다.

$$\mu = \frac{e^3 DP_o}{12 QL} \quad (6)$$

여기서  $P_o$ 는 주입압력(Pa)이다.

### 3.3 실험조건

#### 3.3.1 상온에서의 물

상온에서의 점도를 알고 있는 물(1cP, 20°C)을 주입재료로 사용하여 주입 성능평가를 수행하고 평행평판형

Table 2. Conditions for laboratory injection tests with water

Viscosity (cP)	Injection pressure (Pa)	Crack width (mm)
1 (20°C)	21,000	0.1
		0.05

Table 3. Conditions for laboratory injection tests with three different liquid materials

Viscosity (cP)	Injection pressure (Pa)	Crack width (mm)
A	52,000	0.25
B		
C		

Table 4. Measured particle sizes using laser diffraction method

Ultrasounds (s)	Fineness ( $cm^2/g$ )	Mean diameter ( $\mu m$ )	$d_{85}$ ( $\mu m$ )	$d_{95}$ ( $\mu m$ )
60	7,893	8.53	15.68	21.04

실험장비의 신뢰성을 검토하였다. 실험조건은 Table 2에 나타난 바와 같이 주입압력을 21,000Pa로 고정하고 두 개의 균열 폭 조건(0.1mm와 0.05mm)에서 주입 성능평가를 수행하였다.

#### 3.3.2 약액형 그라우팅 재료

약액형 그라우팅 재료는 점도가 주입 성능에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 서로 다른 점도를 가진 3가지 종류의 약액형 그라우팅 재료를 활용하여 주입 성능평가를 수행하였다. 실험조건은 Table 3에 나타난 바와 같이 주입압력을 52,000Pa, 균열 폭을 0.25mm로 고정하였다. 주입 성능평가를 통해 3가지 약액형 그라우팅 재료의 점도를 계산한 후 회전 점도계와 모세관 점도계로 측정된 점도와 비교하였다.

#### 3.3.3 마이크로시멘트

마이크로시멘트의 입경은 주입 성능에 영향을 미치는 핵심이기에 Fraunhofer 방식을 활용한 CILAS 1090L를 사용해 입도분석을 수행하였다(Fig. 6). Table 4에 정리한 바와 같이 초음파 조사시간은 60초, 분말도는 7,893  $cm^2/g$ 으로 나타났다. 평균입경은 8.53  $\mu m$ 로 나타났으며  $d_{85}$ 은 15.68  $\mu m$ ,  $d_{95}$ 은 21.04  $\mu m$ 로 나타났다(KS L 1614, 2001; KS L 5106, 2009).

주입 성능평가는 주입압력을 20,000Pa로 고정하고 물과 시멘트의 중량비(W/C비)를 150%, 200%, 250%로 변화시켜가며 실내실험을 수행하였다(Table 5). 각 경우에 대해 회전 점도계 및 깔때기형 점도계로 점도를 측정하

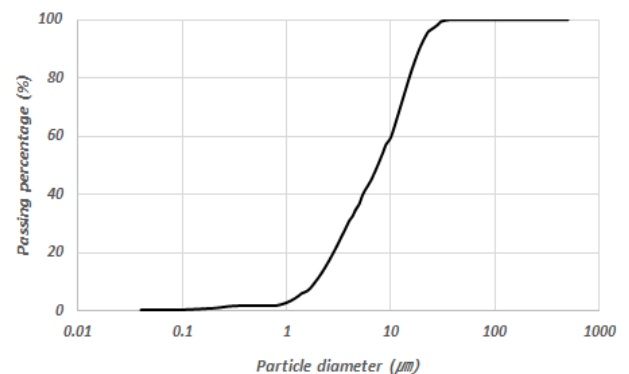


Fig. 6. Particle size distribution curve of micro-cement



Table 5. Conditions for laboratory injection tests with a mixture of water and miro-cement

Injection pressure (Pa)	W/C ratio (%)	Crack width (mm)
20,000	150	0.1
		0.25
		0.35
	200	0.1
		0.25
		0.35
	250	0.1
		0.25
		0.35

고, 평행평판형 실험장비를 이용한 주입 성능평가를 통해 계산한 점도와 비교하였다.

#### 4. 실내실험 결과

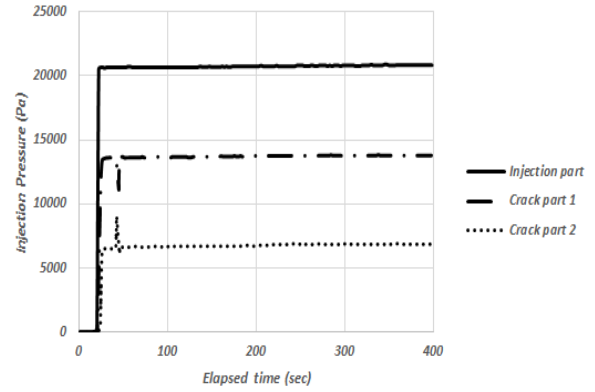
##### 4.1 평행평판형 실험장비 신뢰성 검토

Fig. 7에서 보는 바와 같이 주입압력 21,000Pa에서 균열 폭 0.1mm와 0.05mm일 때 주입부 및 균열모사부 1, 2(주입부에서 가까운 쪽이 1, 먼 쪽이 2)의 압력이 지속적으로 전달되는 것을 확인할 수 있다. 압력이 가장 크게 측정되는 부분이 주입부의 압력이며, 그라우팅 재료가 주입되는 방향으로 압력이 감소하여 압력차로 인해 그라우팅 재료가 주입되고 있다. Fig. 7a와 비교했을 때 Fig. 7b는 균열모사부에서 압력전달이 더 늦게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 균열 폭이 좁을수록 물의 주입속도가 느리다는 사실을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8에 나타난 바와 같이 시간대비 통과량 역시 균열 폭 0.05mm에서 균열 폭 0.1mm 보다 더 적은 것을 확인할 수 있다.

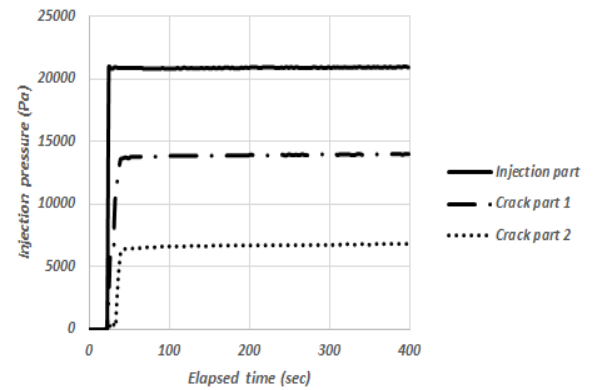
20°C에서 1cP인 물의 점도를 기준으로 식 (5)를 이용해 계산한 점도와 비교하여 평행평판형 실험장비의 신뢰성을 검토하였다. Table 6에 나타난 바와 같이 균열 폭이 0.1mm일 경우 계산한 점도는 1.060cP, 균열 폭이

Table 6. Calculated viscosity of water using experimental data

Injection pressure (Pa)	Crack width (mm)	Discharge ( $m^3/s$ )	Viscosity (cP)		Error (%)
			Reference value	Calculated value $\left(\mu = \frac{e^3 DP_o}{12QL}\right)$	
21,000	0.1	4.96E-07	1.002	1.060	5.75
	0.05	6.68E-08		0.983	1.93



(a) Crack width = 0.1 mm



(b) Crack width = 0.05 mm

Fig. 7. Measured injection pressure using groutability testing apparatus with water

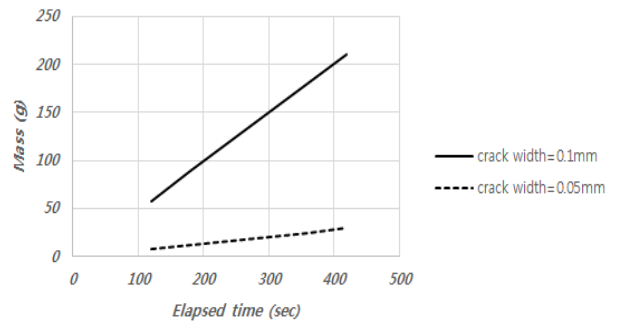


Fig. 8. Measured time vs. discharge with water

0.05mm일 경우 계산한 점도는 0.983cP이다. 기준 값과의 오차는 균열 폭이 0.1mm일 경우 5.75%, 균열 폭이 0.05mm일 경우 1.93%로 나타났다.

Table 7. Viscosity measurement results of capillary tube and rotational viscometer

Capillary tube viscometer					
Fluid	t (s)	cSt (mm <sup>2</sup> /s)	Density (g/ml)	Viscosity (cP)	Mean value (cP)
A	462	43.64052	0.83	36.22	36.2
	461	43.54606	0.83	36.14	
B	287	132.307	0.83	109.81	108.7
	281	129.541	0.83	107.52	
C	656	302.416	0.83	251.01	248.52
	643	296.423	0.83	246.03	

Rotational viscometer			
Fluid	Viscosity (cP)	Error (%)	Mean value (cP)
A	42.1	2	41.675
	41.25		
B	98	-	98
	98		
C	293.75	3	289.425
	285.1		

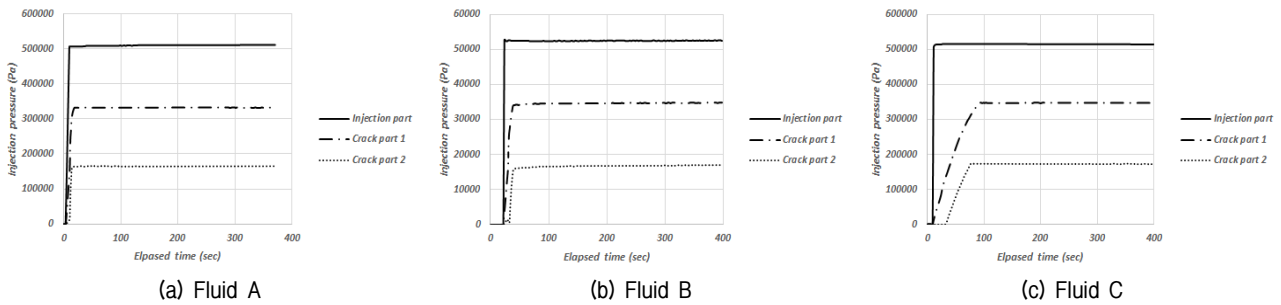


Fig. 9. Measured injection pressure using groutability testing apparatus with three different liquid materials

#### 4.2 약액형 그라우팅 재료

Fig. 9는 각각의 대상 약액별로 측정된 주입부와 균열 모사부 압력 결과이며, 동일하게 설정한 52,000Pa의 주입압력이 주입부 및 균열모사부 1, 2(주입부에서 가까운 쪽이 1, 먼 쪽이 2)에 지속적으로 전달됨을 확인할 수 있다. 물과 동일하게 압력이 가장 크게 측정되는 부분은 주입부의 압력이며 그라우팅 재료가 주입되는 방향으로 압력이 감소하여 압력차로 인해 그라우팅 재료가 주입된다. Fig. 9a에서 Fig. 9c로 갈수록 그라우팅 재료의 주입이 시작된 후 균열모사부까지의 압력전달이 더 늦게 일어나고 있으며, 이를 통해 점도가 주입 성능에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 시간대비 통과량도 점도에 따라 변하는 것을 확인할 수 있다.

서로 다른 점도를 가진 3가지 약액형 그라우팅 재료에 대한 점도 측정결과를 Table 7에 나타냈다. 약액 A의

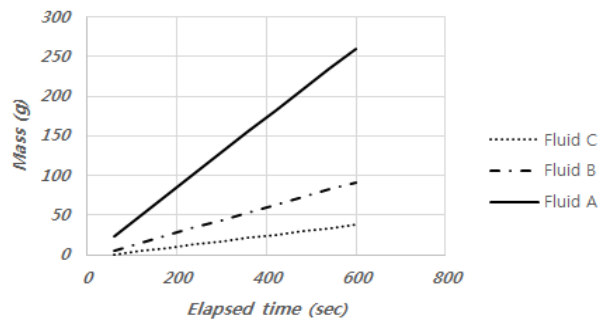


Fig. 10. Measured time vs. discharge with three different liquid materials

모세관 점도계를 통한 점도측정 결과는 평균값을 받을림한 36cP를 대푯값으로 선택했으며, 약액 B, C 역시 동일한 방법으로 109cP, 249cP를 대푯값으로 선택했다. 회전형 점도계의 경우 연속 2회 측정값의 오차가 3% 이하일 때 측정값의 평균값을 대푯값으로 설정하는데, 약액 A의 경우 평균값을 받을림해 42cP를, 약액 B, C 역시 동일한 방법으로 98cP, 289cP를 대푯값으로 선택했다.



이 결과를 식 (5)를 이용해 계산한 점도와 비교하였다 (Table 7). 약액 A의 경우 식 (5)를 이용해 계산한 점도는 39.01cP이며 계산값을 기준으로 회전 점도계 및 모세관 점도계의 오차는 각각 7.66%, 7.72%로 나타났다. 약액 B의 경우 식 (5)를 이용해 계산한 점도는 112.25cP이며 계산값을 기준으로 했을 때 회전 점도계 및 모세관 점도계의 오차는 각각 12.69%, 2.90%로 나타났다. 약액

C의 경우 식 (5)를 이용해 계산한 점도는 278.21cP이며 계산값을 기준으로 했을 때 회전 점도계 및 모세관 점도계의 오차는 각각 3.88%, 10.5%로 나타났다.

#### 4.3 현탁액형 그라우팅 재료

암반의 미세균열에 대해 마이크로시멘트의 groutability를 Table 1에 제시된 식을 이용하여 검토하였다. Table 8과 같이 균열 폭이 0.1mm일 때, N 값은 4.75로 그라우팅 가능 기준인 5보다 작고 불가능 기준인 2보다는 크게 계산되었다. 균열 폭이 0.25mm일 때와 0.35mm일 때 groutability ratio는 각각 11.88, 16.63으로 5보다 크게 나와 그라우팅에 문제가 없을 것으로 예상된다.

마이크로시멘트를 이용해 균열 폭 0.1mm를 대상으로 주입 성능평가를 수행한 결과 W/C비와 관계없이 주입 공에서 막힘 현상이 발생하였다(Fig. 11). W/C비와 관계없이 막힘 현상이 발생한다는 사실은 Table 1에서 제시하고 있는 groutability 판정 기준의 타당성을 뒷받침하고 있다. 따라서 마이크로시멘트를 주입재료로 활용하

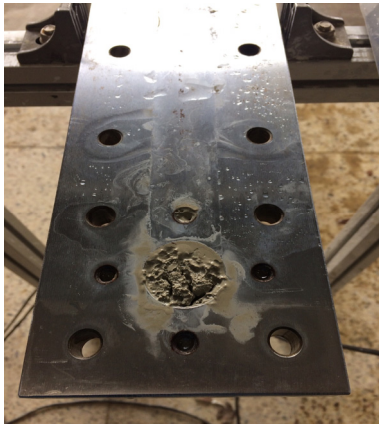


Fig. 11. micro-cement plugging at 0.1 mm of crack width

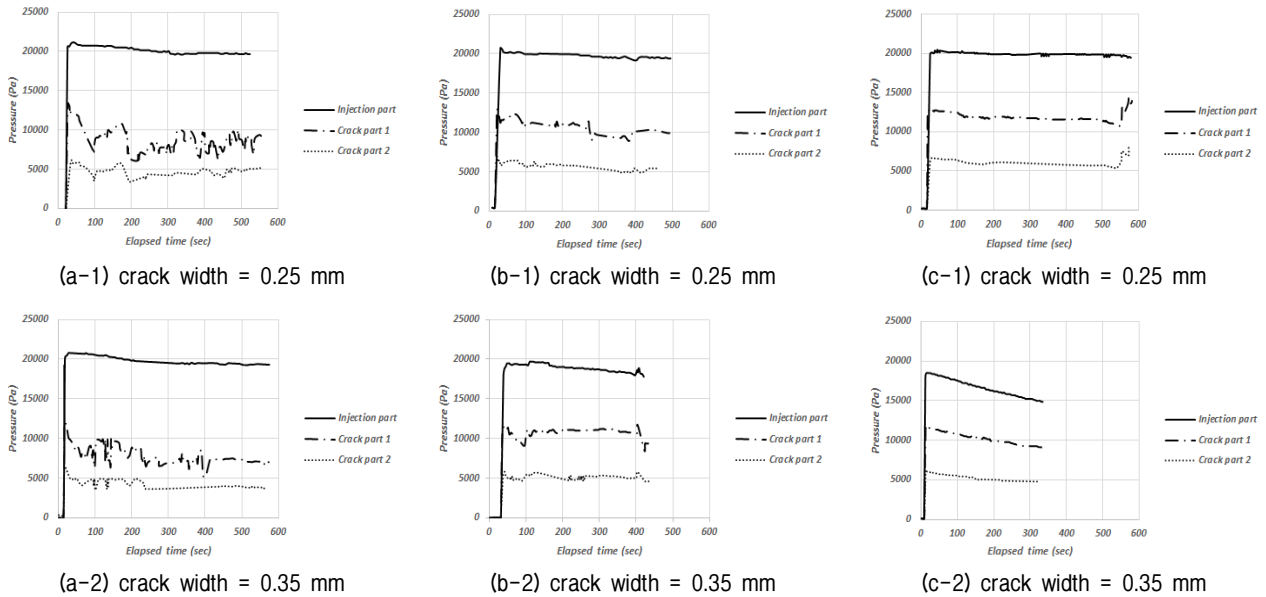


Fig. 12. Measured injection pressure using groutability testing apparatus with a mixture of water and miro-cement

Table 8. Comparison between calculated and measured viscosities of liquid materials

Injection pressure (Pa)	Crack width (mm)	Injection material	Viscosity (cP)			Error (%)	
			Calculated value $\left(\mu = \frac{e^3 DP_o}{12QL}\right)$	Measured value		Rotational viscometer	Capillary tube viscometer
				Rotational viscometer	Capillary tube viscometer		
52,000	0.25	A	39.01	42	36	7.66	7.72
		B	112.25	98	109	12.69	2.90
		C	278.21	289	249	3.88	10.5

미세균열 그라우팅 성능은 점도보다는 입경의 영향이 지배적이라고 판단된다.

균열 폭이 0.1mm인 경우를 제외하고는 Fig. 12를 통해 동일하게 설정한 20,000Pa의 주입압력이 주입부 및 균열모사부 1, 2(주입부에서 가까운 쪽이 1, 먼 쪽이 2)에 전달된다. Fig. 12a는 W/C비가 150%일 때의 주입압력으로 약액형의 균일한 침투 압력과는 달리 불안정한 압력 경향을 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 실험 중 막힘 현상을 발생하지 않고 지속적인 그라우팅 주입이 가능하였다. Fig. 12b와 Fig. 12c는 W/C비가 200%와 250%일 때의 주입압력으로 W/C비가 높아질수록 약액형과 유사하게 침투 압력이 유지되고 있다.

Fig. 13은 균열 폭 0.1mm를 제외한 균열 폭에 따른 각각의 W/C비에 따른 통과량을 시간에 따라 측정한 결

과이다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 측정된 침투 압력에서 이상 현상이 있었음에도 불구하고 시간에 따른 그라우팅 재료의 통과 유량은 일정하게 측정되므로 그라우팅 주입 성능평가 중에 막힘 현상은 발생하지 않은 것으로 관측되었다.

주입압력을 20,000Pa로 고정하고 각각의 W/C비에 대해 균열 폭을 변경해가며 주입 성능평가를 수행하고 식 (5)를 이용해 계산한 점도를 Table 9에 정리하였다. W/C비가 150%에서 균열 폭 0.25mm, 0.35mm일 때 식 (5)를 이용해 계산한 점도는 각각 4.535cP와 4.995cP로 나타났다. W/C비가 200%에서 균열 폭 0.25mm, 0.35mm일 때 식 (5)를 이용해 계산한 점도는 각각 2.795cP와 2.995cP로 나타났다. W/C비가 250%에서 균열 폭 0.25mm, 0.35mm일 때 식 (5)를 이용해 계산한 점도는 각각 1.96cP와 2.42cP로 나타났다.

Table 10은 주입 성능평가와 식 (5)로 계산한 점도와 회전 점도계 및 마아시 깔때기(marsh funnel)를 이용해 측정한 점도를 비교한 결과를 보여주고 있다. 주입 성능평가를 통해 계산한 점도는 Table 9에 제시된 점도의 평균값을 사용했다. W/C비가 150%일 때 회전 점도계와

Table 9. Estimated groutability with a mixture of water and micro-cement

Crack width (mm)	Groutability ratio (N)	Groutability
0.1	4.75 (5>N>2)	-
0.25	11.88 (>5)	Groutable
0.35	16.63 (>5)	Groutable

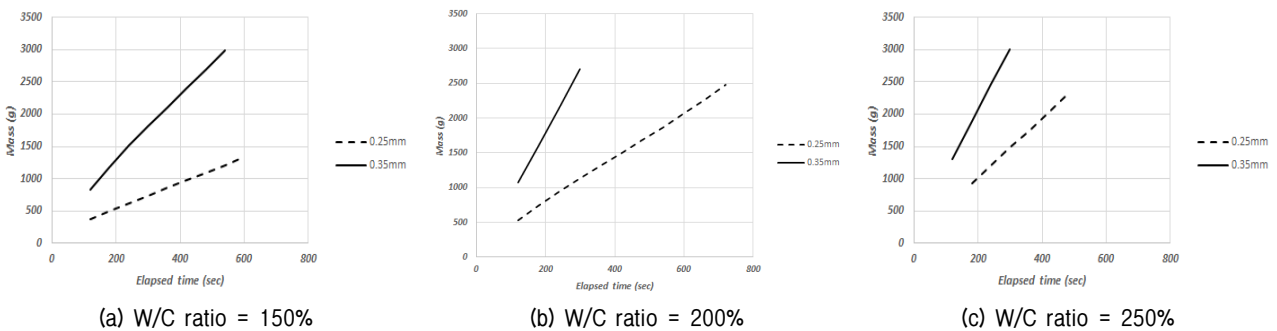


Fig. 13. Measured time vs. discharge with a mixture of water and micro-cement

Table 10. Calculated viscosities of a mixture of water and micro-cement using groutability testing apparatus

Injection pressure (Pa)	W/C ratio (%)	Crack width (mm)	Viscosity (cP)
			$\left(\mu = \frac{e^3 DP_o}{12QL}\right)$
20,000	150	0.1	Material separation
		0.25	4.535
		0.35	4.995
	200	0.1	Material separation
		0.25	2.795
		0.35	2.995
	250	0.1	Material separation
		0.25	1.96
		0.35	2.42

Table 11. Comparison between calculated and measured viscosities of a mixture of water and micro-cement

W/C ratio (%)	Viscosity (cP)			Error (%)	
	calculated value $\left(\mu = \frac{e^3 DP_o}{12QL}\right)$	Measured value			
		Rotational viscometer	Funnel viscometer	Rotational viscometer	Funnel viscometer
150	4.765	198.2	5.651	4059.5	18.59
200	2.895	52.7	2.722	1720.38	5.98
250	2.19	20.7	1.638	845.21	25.21

마아시 깔대기로 측정된 점도는 각각 198.2cP와 5.651cP로 나타났으며 실내실험을 통해 계산한 결과와의 오차는 각각 4059.5%와 18.59%로 나타났다. W/C비가 200%일 때 회전 점도계와 마아시 깔대기로 측정된 점도는 각각 52.7cP와 2.722cP로 나타났으며 실내실험을 통해 계산한 결과와의 오차는 각각 1720.38%와 5.98%로 나타났다. W/C비가 250%일 때 회전 점도계와 마아시 깔대기로 측정된 점도는 각각 20.7cP와 1.638cP로 나타났으며 실내실험을 통해 계산한 결과와의 오차는 각각 845.21%와 25.21%로 나타났다.

## 5. 결론

본 논문에서는 주방식 공법에서 발생할 수 있는 미세 균열을 보강하기 위해 그라우팅 재료의 점도 및 입경에 따른 주입 성능평가를 수행하였다. 미세균열 충전에 사용되는 각각의 그라우팅 재료에 대해 점도 및 입경에 따른 주입 성능평가 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 평행평판형 실험장비를 이용한 그라우팅 재료별 주입 성능평가를 수행하였으며, 실험장비의 신뢰성은 점도가 1cP(20°C)인 물을 주입재료로 이용하여 검증하였다. 균열 폭, 주입압력, 유량을 측정하고 이론식을 이용해 점도를 추정된 결과 오차가 6% 미만으로 나타나 점도 추정이 가능한 것으로 판단된다. 따라서 평행평판형 실험장비는 다양한 균열 폭과 주입압력에 따른 그라우팅 재료별 주입 성능평가에 적합한 장비로 판단될 뿐 아니라, 점도를 알 수 없는 용액의 기준값을 제시할 수 있을 것으로 보인다.
- (2) 용액형인 약액형 그라우팅 재료의 주입성능은 점도가 핵심이다. 점도가 다른 3가지 종류의 약액형 그라우팅 재료를 주입재료로 활용해 평행평판형 실험

장비로 주입 성능평가를 수행한 결과에 따르면 점도가 낮을수록 통과유량이 증가한다. 이론식으로 계산한 점도를 기준값으로 설정하고 이를 바탕으로 회전 점도계(DV2T viscometer) 및 모세관 점도계(canonfenske viscometer)로 측정된 점도를 비교했다. 오차는 3.88~12.69% 사이로 분석되었으며, 오차범위는 그라우팅 시공 현장에 적용할 경우 무시해도 무방한 수준으로 판단된다. 따라서 약액형 그라우팅 재료의 주입 성능을 예측하기 위해 점도 측정을 실시할 경우에는 절차가 까다로운 모세관 점도계보다는 비교적 간단하고 간편한 회전 점도계로 측정이 가능하다.

- (3) 현탁액형인 마이크로시멘트의 경우 시멘트의 입경이 주입성능을 지배하는 핵심 요소다. Mitchell(1981)이 제안한 기준으로 마이크로시멘트 입경에 기초해 groutability를 분석한 결과에 따르면 균열 폭이 0.25mm, 0.35mm일 때는 groutability ratio가 그라우팅이 가능한 기준 값인 5보다 2배 이상으로 예상돼 그라우팅이 가능하다고 판단되었다. 그러나 균열 폭이 0.1mm일 때는 groutability ratio가 4.75로 그라우팅 가능 기준 값인 5와 불가능 기준 값인 2 사이로 나타나 groutability ratio로 groutability를 판단할 수 없었다. 실내실험의 결과에 따르면 균열 폭이 0.1mm일 때는 점도와 관계없이 모두 막힘 현상이 발생하여 그라우팅이 불가능하였다. 따라서 groutability ratio로 그라우팅 가능여부 판단이 어려울 경우에는 평행평판형 실험장비가 주입재의 주입 성능을 평가하는 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 현탁액형인 마이크로시멘트 그라우팅 재료의 점도가 주입성능에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 점도를 결정하는 인자인 W/C비를 변화시켜가며 주입 성능평가를 수행한 결과 W/C비가 높을수록 통과유량이 증가하는 경향을 나타냈다. 이론식으로 계산한 점도를 기준값으로 설정하고 이를 바탕으로 회전 점도계(DV2T viscometer)로 측정된 점도와 비교한 결

과 오차가 최대 4000%까지 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 현탁액형 그라우팅 재료의 점도를 측정하는데 회전 점도계는 적합하지 않은 장비로 판단된다. 주로 고점도의 시추이수(drilling mud) 점도측정에 사용되는 마아시 깔때기(marsh funnel)로 현탁액형 그라우팅 재료의 점도를 측정하였다. 계산한 점도를 기준값으로 설정한 후 이를 비교했을 때 오차범위가 5.98~25.21%로 분석되었다. 그러나 측정된 점도 범위가 1.638~5.651cP로 실제 오차 값은 미미하다. 따라서 마아시 깔때기는 저점도의 시멘트계열 그라우팅 재료의 점도를 측정할 수 있는 정확도를 가진 장비라 판단되어 향후 시멘트계열의 그라우팅 주입성능 예측에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업인 “도심지 공간 확장형 지하굴착 핵심 솔루션 개발” 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Chun, B. S., Lee, J. Y., and Seo, D. D. (2003), The injection characteristics and environmental effects for grouting materials based on cement, *Korean Geo-Environmental Society*, Vol.19, No.2, pp.159-170.
2. Jin, H. W., Ryu, B. H., and Lee, J. G. (2016), Development and assessment of laboratory testing apparatus on grouting injection performance, *Korean Geo-Environmental Society*, Vol.17, No.10, pp.23-31.
3. Jung, M. H., Kim, Y. S., Jung, C. H., and Lee, S. (2010), Application of earth natural grouting using micro cement and inorganic material, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.14, No.1, pp.106-116.
4. Kong, J. Y., Kim, C. K., Park, J. H., and Chun, B. S. (2010), Grouting effects of microfine cement in the rock-based sites, *Korean Geo-environmental Society*, Vol.11, No.12, pp.37-45.
5. Lee, C. H., Chang, S. H., Ahn, S. Y., and Shin, H. S. (2013), A preliminary study on economical efficiency of a room-and-pillar excavation method in comparison with 2-arch tunnelling method, *Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.15, No.6, pp.599-612.
6. Lee, C. H., Hwang, J. D., Kim, E. H., and Chang, S. H. (2014), Consideration on design procedure of room-and-pillar underground structure part I: parametric study, *Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.16, No.5, pp.487-495.
7. ASTM D2196 (2015), Standard test method for rheological properties of non-newtonian materials by rotational viscometer, *American Society for Testing Materials*.
8. ASTM D445 (2015), Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity), *American Society for Testing Materials*.
9. ASTM D446 (2012), Standard specifications and operating instructions for glass capillary kinematic viscometers, *American Society for Testing Materials*.
10. ASTM D6910 (2009), Standard test method for Marsh funnel viscosity of clay construction slurries, *American Society for Testing Materials*.
11. Barton, N. (2004), The theory behind high pressure grouting – parts 1 and 2, *Tunnels and Tunneling International*, Vol.36, No. 9-10, pp.28-30, 33-35.
12. Bear, J. (1972), *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publication Inc., New york, pp.33-38.
13. Clayton, T. C., Donald, F. E., and John, A. R. (2005), *Engineering fluid mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., New york, pp.16-22.
14. Darling, P. (2011), *Mining Engineering handbook*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, INC.(SME), 3rd Edition.
15. Donald, A. B. and Grouting Committee of the Geo-Institute (2005), Glossary of grouting terminology, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.31, Issue. 12, pp.1534-1542.
16. Hartman, H. L. and Mutmansky, J. M. (2002), *Introductory Mining Engineering 2nd edition*, Wiley, New Jersey.
17. KS A 0531 (2011), Viscosity of liquid-Methods of measurement, *Korean Industrial Standards*.
18. KS L 1614 (2001), Determination of particle size distributions for fine ceramic raw powders by laser diffraction method, *Korean Industrial Standards*.
19. KS L 5106 (2009), Testing method for fineness of portland cement by air permeability apparatus, *Korean Industrial Standards*.
20. KS M ISO 2555 (2012), Plastics-Resins in the liquid state or as emulsions or dispersions-Determination of apparent viscosity by the Brookfield test method, *Korean Industrial Standards*.
21. Mitchell, J. K. and Katti, R. K. (1981), Soil Improvement – State of the Art Report, *10th ICSMFE*, Stockholm, Sweden, Vol.4, pp. 509-565.
22. Mohammed, H. M., Pusch, R., and Knutsson, S. (2014), Study of cement-grout penetration into fractures under static and oscillatory conditions, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 45, pp.10-19.
23. Pitt, M. J. (2000), The Marsh funnel and drilling fluid viscosity: A new equation for field use, *SPE Drilling & Completion*, Vol.15, No.1, pp.3-6.
24. Witherspoon, P. A., Amick, C. H., Gale, J. E., and Iwai, K. (1979), *Observations of a potential size-effect in experimental determination of the hydraulic properties of fractures*, LBNL Paper LBL-8571, Water Resources Research, Vol.15, pp.1142-1146.

Received : July 11<sup>th</sup>, 2017

Revised : August 31<sup>st</sup>, 2017

Accepted : September 5<sup>th</sup>, 2017