

암반 그라우팅을 위한 점성유체의 시간의존 특성 분석

이종원¹ · 김지영² · 원조현³ · 오태민^{4*}

¹정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사수료

²비회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

³비회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 학사과정

⁴정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 부교수

Time-dependent characteristics of viscous fluid for rock grouting

Jong-Won Lee¹ · Ji-Yeong Kim² · Jo-Hyun Weon³ · Tae-Min Oh^{4*}

¹Ph.D. Candidate, Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

²MS.C. Student, Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

³Undergraduate Student, Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

⁴Associate Professor, Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

*Corresponding Author : Tae-Min Oh, geotaemin@pusan.ac.kr

Abstract

Rock grouting is important to improve the waterproof efficiency and mechanical strength of rock medium with joint for utilizing the underground rock space such as tunnel. The grouting materials typically has been used the cement materials, which represent Bingham fluid model. This model can express the relationship of viscosity and yield strength. In addition, it is dependent with elapsed time. The grouting injection performance can be deteriorated with an increase of viscosity and yield strength in the grouting process if the time dependence is ignored. Therefore, in this study, the characteristics of viscosity and yield strength were investigated according to water-cement ratio and time dependence in the laboratory test. Numerical simulation was carried out to investigate the grouting performance according to the time dependence of characteristics in terms of the viscosity model. Given the results, the grouting injected distance and cumulative grout volume were significantly decreased when the time dependence of grouting material was considered. This study, considering the characteristics according to the time dependence of viscosity and yield strength, will be meaningful to the design of grouting injection in field applications.

Keywords: Grouting, Time-dependence, Bingham fluid, Injection performance, Numerical simulation

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
24(6)465-481(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.6.465>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received September 6, 2022
Revised October 17, 2022
Accepted October 18, 2022



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 © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

터널과 같은 지하 공간을 활용하는 경우, 암반 그라우팅 공법을 통하여 암반의 차수 및 강도특성을 향상시켜 지하공간을 안전하게 활용하는 것이 중요하다. 암반 절리 내 그라우팅을 위한 주입재는 주로 Bingham 유체에 해당하는 시멘트계열의 재료를 활용하는 것이 일반적이다. Bingham 유체 모델은 점성도와 항복강도의 특성으로 표현되며, 이러한 특성은 시간 경과에 따라 달라지게 된다. 만약 시멘트 주입재료의 시간 경과에 따른 특성을 고려하지 않고 그라우팅 주입설계를 실시하는 경우, 그라우팅 과정에서 주입재의 점성도 및 항복강도의 증가에 따라 주입성능이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 그라우팅 주입재료의 물-시멘트 배합비율, 시간 경과에 따른 점성특성(점성도, 항복강도) 측정 및 분석 실내실험을 실시하였다. 실내실험을 통하여 파악한 점성모델을 이용하여 그라우팅 주입재의 시간의존 특성에 따른 그라우팅 주입 시뮬레이션을 실시하였다. 해석결과, 시간의존 특성을 고려하는 경우 단일 점성특성을 적용한 해석에 비하여 그라우팅 주입 거리 및 누적 주입량이 감소하여 주입성능이 큰 폭으로 감소하는 결과를 보였다. 본 연구를 통하여 파악된 그라우팅 주입재의 시간 경과에 따른 점성모델 및 해석결과는 향후 그라우팅 주입 현장에서 의미있게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

주요어: 그라우팅, 시간의존 특성, Bingham 유체, 주입성능, 수치 시뮬레이션

1. 서론

지하 암반 내 터널은 국토의 효율적인 사용, 환경적 제약의 극복 및 도심 과밀문제를 해결하기 위한 수단으로 활발하게 사용되고 있다. 대심도 암반은 외부 환경으로부터 독립적이기 때문에 산지 및 해양조건에 큰 영향을 받는 지상조건에 비하여 터널과 같은 구조물 설치에 유리하다(Kim et al., 2017). 국내의 경우, 도로터널은 2019년 기준 2,600여 개소 터널이 운영 중이며 총 연장길이는 약 2,000 km에 해당한다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020). 현재 운영 중인 터널의 수는 최근 10년 전에 비하여 거의 100%까지 증가하였으며, 향후 기술 및 산업의 고도화로 인하여 그 수요가 급격히 증가할 것으로 예상된다.

암반은 주로 무결함 암반(intact rock)과 절리(joint)와 같은 수많은 불연속면(discontinuity)으로 구성된다. 절리는 인장강도가 매우 낮은 암반 내 분리면에 해당하며, 터널 시공을 위하여 절리가 다수 포함된 암반의 굴착이 실시되는 경우 절리에서부터 역학적 변형이 발생될 수 있다(Meng et al., 2019). 특히, 다수의 불규칙적인 절리가 서로 연결되어 있는 경우 절리는 주변 지하수의 유동 경로에 해당하게 된다(Moon, 2013). 만약 이러한 절리를 통하여 주변 지하수가 지하공간 내 유입된다면 터널의 침수로 인하여 지하공간의 활용성이 저하되며 경제적으로 큰 피해가 발생할 것으로 예상된다(Panthi and Nilsen, 2005). 따라서, 지하공간 개발을 위해서는 암반 그라우팅과 같은 공법을 적용하여 절리 암반의 차수능력을 향상시키는 것이 필수적이다.

암반 그라우팅은 암반 절리 내부에 충전재료를 주입하여 절리의 간극(aperture)을 채우는 공법이다. 이러한 암반 절리 보강공법의 목적은 암반의 강도를 증대시키고 투수성을 감소시키는 것으로 다양한 지하공간 개발 프로젝트에서 적용되고 있다(Rafi and Stille, 2014). 암반 그라우팅은 지압, 초기 포화조건, 절리 분포, 절리 간극 및 거칠기 등과 같은 암반 절리환경 특성과 주입재료의 밀도, 체적변형률, 점성도 및 항복강도 등과 같은 주입재료 특

성에 따라 주입성능(e.g., 내구성, 침투성, 주입량 등)이 달라질 수 있다(Saeidi et al., 2013). 이외에도 그라우팅 주입성능은 주입압력, 동적주입방식, 주입시나리오 등과 같은 주입방식에 따라서도 달라질 수 있다(Mohammed et al., 2015). 이러한 영향요인 중 주입재료 특성은 주입재의 종류와 적용방식을 상대적으로 용이하게 변경 및 조절이 가능하기 때문에 그라우팅 주입설계 시 중요하게 고려할 수 있는 요인에 해당한다.

암반 절리 충진을 위한 그라우팅 주입재료는 경화제의 종류에 따라 현탁액형 및 용액형 주입재가 활용되고 있다. 현탁액형 그라우팅 주입재료는 시멘트를 경화제로 사용하며, 용액형 그라우팅 주입재료는 무기화합물 또는 유기화합물을 경화제로 사용하는 특징이 있다. 이외에도 감수제, 유동화제, 급결제 등 첨가제가 그라우팅 주입재와 함께 혼합되어 사용될 수 있다. 그러나, 암반 그라우팅 현장에서는 주입의 신속성과 편리성을 위하여 시멘트 재료를 단독으로 사용하는 것이 일반적이다(You et al., 2012). 시멘트 재료는 그라우팅 목표 주입성능 발현을 위하여 설계된 물-시멘트 배합비율(Water-Cement Ratio, W/C)로 물과 함께 배합되어 현탁액 형태로 암반 절리에 주입된다. 이처럼 시멘트 재료를 그라우팅 재료로써 단독으로 활용하는 경우 물-시멘트 배합비율은 그라우팅 주입성능을 결정하는 중요한 요소에 해당한다(Lee et al., 2017). 이외에도 시멘트 재료의 입자크기, 시간 경과에 따른 시멘트 재료의 양생정도(시간의존성)에 따라 그라우팅 재료의 주입성능이 달라질 수 있다(Kobayashi and Stille, 2007; Liu et al., 2020).

시멘트 재료를 이용하여 암반 그라우팅 주입성능을 평가한 실험적 및 수치해석적 연구가 다수 수행된 바 있다. Stille and Gustafson (2010)은 암반 그라우팅 주입현장에서 절리의 투수특성에 따라 그라우팅 주입방식을 설계하였다. 또한, 그라우팅 주입과정에서 물-시멘트 배합비율 및 주입압력을 변화시키며 주입 시나리오를 설정하여 주입성능을 향상시키는 연구를 수행한 바 있다. 이외에도 실내실험을 통하여 그라우팅 주입재료 내 미세입자의 함량에 따른 주입성능이 평가되었으며, 이산화 규소(SiO_2)가 그라우팅 재료에 포함되는 경우 절리의 기밀성능(sealing efficiency)을 향상시키는 데 효과적인 것으로 평가되었다(Liu et al., 2020). 또한, 수치해석 방법을 활용하여 불규칙 절리 네트워크에서 그라우팅 주입압력, 수치해석 메쉬의 크기에 따른 그라우팅 주입성능 평가가 실시되었다(Liu et al., 2021). 이외에도 개별요소법(Distinct Element Method, DEM)을 이용하여 절리의 간극(aperture), 수직강성(normal stiffness), 간격(spacing), 방향(orientation) 및 초기 공극압, 주입재료의 점성도와 항복강도에 따른 그라우팅 주입성능 민감도 분석이 수행된 바 있다(Saeidi et al., 2013). 이러한 선행연구의 경우 시간 경과에 따른 그라우팅 주입재의 물성(i.e., 점성도, 항복강도) 변화가 고려된 연구결과가 아니며, 물과 시멘트 배합 직후의 초기 물성을 사용한 그라우팅 주입성능만을 평가한 한계를 가진다.

본 연구에서는 시간 경과에 따라 변화하는 그라우팅 주입재료의 점성특성을 반영하여 그라우팅 주입성능을 평가하고자 하였다. 기존 암반 그라우팅에서 주로 사용되는 재료 및 배합비율을 선정하고 물과 시멘트 배합 후 점성특성을 실험적으로 평가하여 데이터베이스를 구축하였다. 이러한 실험적 데이터를 적용하여 주입재료의 시간 경과에 따른 그라우팅 주입성능을 수치해석 기법을 이용하여 평가하였다.

2. 그라우팅 주입재료 및 점성도 측정실험 방법

2.1 주입 유체의 점성특성

그라우팅 주입 유체의 유동은 뉴턴 유체(Newtonian fluid) 특성과 Bingham 유체(Non-Newtonian fluid) 특성으로 나타낼 수 있다. 뉴턴 유체의 경우, 유동 발생을 위하여 전단응력(shear stress)이 작용할 때 항복강도(yield stress)와 관계없이 전단율(shear rate)이 발생하는 특성을 지닌다(Fig. 1). 이와 반대로 Bingham 유체의 경우, 항복강도를 초과하는 전단응력이 작용될 때 전단율이 발생, 즉 유체의 유동이 발생하게 된다. 대표적인 뉴턴 유체는 물(water) 또는 화학 용액형 그라우팅 재료가 있으며, Bingham 유체로는 시멘트 현탁액이 있다. Bingham 유체는 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \tag{1}$$

여기서, τ 는 전단응력, τ_0 는 항복강도, μ 는 점성도, γ 는 전단율을 나타낸다. 점성도의 경우, 전단응력과 전단율의 비율로써 시멘트 현탁액의 물-시멘트 배합비율, 시간 경과에 따른 경화에 따라 비율이 달라진다. 따라서, 시멘트 재료를 그라우팅 주입재료로 활용하는 경우 Bingham 유체 특성에 해당하는 점성도 및 항복강도에 따라 그라우팅 주입성능이 달라질 것으로 예상되므로 이러한 주입 유체의 점성특성을 고려하는 것이 중요하다.

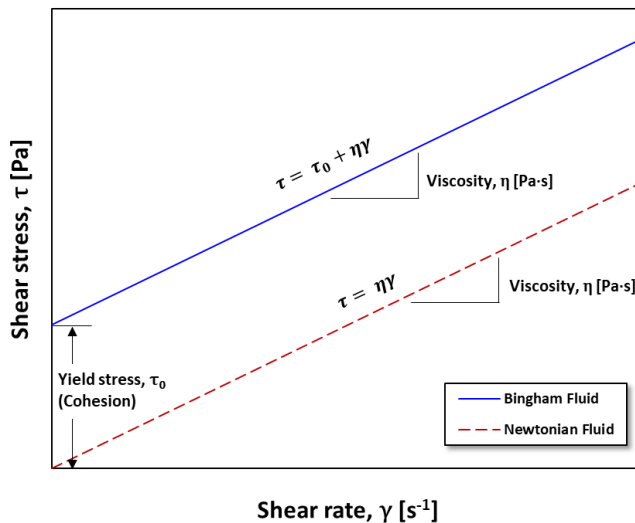


Fig. 1. Characteristics of flow model for Bingham fluid and Newtonian fluid

2.2 실험재료 준비 및 실험장비

본 연구에서는 암반 그라우팅 주입재의 시간 경과에 따른 점성특성 평가를 위한 실험재료로 마이크로시멘트(micro-cement)와 물을 사용하였다. 마이크로시멘트는 국내 S사에서 생산되는 재료를 사용하였으며, 입자크기(particle size diameter) 중 D_{95} 및 D_{50} 은 각각 $18\ \mu\text{m}$, $6\ \mu\text{m}$ 에 해당한다. 비중(specific gravity)은 2.95, 분말도(fineness)는 $6,990\ \text{cm}^2/\text{g}$ 에 해당한다. 배합수는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 온도 조건의 수돗물을 주입재 배합에 사용하였다.

그라우팅 주입재료의 배합비율에 따른 점성특성을 평가하기 위해 물-시멘트 배합비율(water-cement ratio, W/C (-))은 기존 암반 그라우팅 연구에서 사용하는 배합비율을 참고하였다. 암반 그라우팅 현장에서는 그라우팅 주입재 물-시멘트 배합비율로 1.0~2.0이 일반적으로 활용되고 있다(Jeoung et al., 2016; Mu et al., 2021). 물-시멘트 배합비율이 3.0을 초과하는 경우, 블리딩(bleeding)이 과도하게 발생하고 응결시간(setting time)이 증가하며 강도 또한 낮아지게 된다. 또한, 물-시멘트 배합비율이 1.0보다 작은 경우 점성도가 급격하게 증가하기 때문에 그라우팅 주입재로 적합하지 않다(Pantazopoulos et al., 2012). 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 그라우팅 주입재의 물-시멘트 배합비율을 1.0과 2.0으로 설정하여 점성도 측정실험을 수행하였다.

본 연구에서는 Brookfield 사의 회전형 점도계(DV2T)와 UL 어댑터(UL adapter)를 사용하여 시멘트 그라우트의 점성도를 측정하였다(Fig. 2). 회전형 점도계는 데이터 저장 및 조작 장치와 스피들(spindle)로 구성되며, 설정한 전단율로 스피들이 회전하여 발생하는 전단 저항력을 측정하는 방식에 해당한다. UL 어댑터는 챔버(chamber)와 원통형 스피들로 구성되며 회전형 점도계에 부착하여 사용된다. 일반적으로 암반 그라우팅에 사용되는 주입재료의 점성도는 폭이 좁은 암반 절리(0.5~10 mm 이내)에 주입되기 때문에 점도가 낮은 주입재료 및 배합비율을

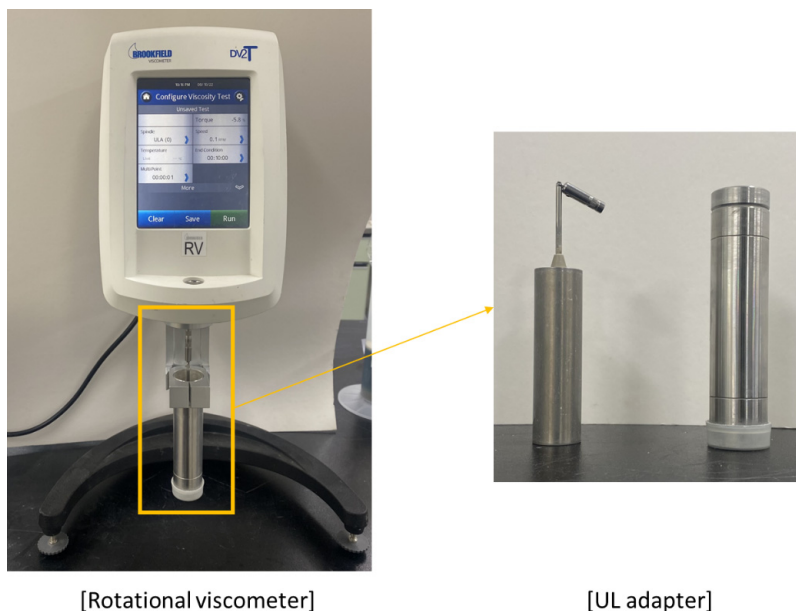


Fig. 2. Setup for viscosity measurement test

적용하는 것이 중요하다(Barton, 1978). 하지만 기존의 단순 회전형 점도계는 낮은 점도에 해당하는 암반 그라우팅 주입재의 점성도 측정에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 점도가 낮은 유체의 점성도 측정이 가능한 UL 어댑터를 사용하여 점성도 측정실험을 수행하였다.

2.3 점성도 측정실험 및 시간의존 특성 분석방법

시멘트 그라우팅 주입재는 시간 경과에 따라 점성도와 항복강도가 증가하는 재료에 해당한다. 시간 경과에 따라 발생하는 주입재의 물성 변화는 암반 절리 내 주입되는 그라우팅 주입재의 주입성능에 영향을 미친다. 따라서 그라우팅 주입설계 시 시간 경과에 따른 그라우팅 주입재의 점성특성을 사전에 파악하는 것이 중요하다.

그라우팅 주입재의 점성도 측정을 위하여 시험편은 물-시멘트 배합비율 1.0과 2.0으로 준비하였다. 배합수와 시험편의 온도는 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 를 유지하였으며, 배합 시험편은 직경 30 mm, 높이 130 mm의 점성도 측정 챔버에 16 mL의 양에 해당한다.

회전형 점도계의 스피들과 회전속도에 따라 전단율(shear rate, γ) 및 측정 가능한 점성도 범위가 달라지기 때문에 측정 재료에 적합한 스피들과 회전속도(revolution per minute, RPM)를 선택하는 것이 중요하다(Lee et al., 2021). 점성도 측정에 사용한 회전형 점도계 모델에서 측정 가능한 회전속도는 0.1~200 RPM에 해당한다. 또한, UL 어댑터를 사용하였으며, 본 연구에는 Table 1과 같이 스피들 회전속도를 설정하여 점성도 측정실험을 수행하였다. 점성도 측정실험은 600초 동안 실시하였으며, 각 케이스를 3회 측정 및 평균하여 시간의존성을 고려한 점성특성을 평가하였다.

Table 1. Values of rotational speed for viscosity measurement test in this study (based on DV2T with UL adapter)

Revolution per minute (RPM)	Shear rate (s^{-1})	Viscosity range ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)
10	12.23	0~640.0
30	36.69	0~213.3
50	61.15	0~128.0
70	85.61	0~91.4
100	122.3	0~64.0
150	183.5	0~42.7

3. 암반 그라우팅 점성유체의 시간의존 특성 측정결과

3.1 점성도 측정 결과

물-시멘트 배합비율과 시간의존 특성은 그라우팅 주입재의 점성도 변화에 영향을 미치는 주요 인자이기 때문에 암반 절리 내 주입설계 시 중요하게 고려해야 한다(Kim and Lee, 2022). 본 연구에서는 물-시멘트 배합비율을

1.0과 2.0으로 설정하여 시간 경과에 따른 그라우팅 주입재료의 점성도를 평가하였다. 시간 경과에 따른 영향은 물과 시멘트 배합 직후($t = 0$ s)와 배합 600초 후($t = 600$ s)에 각각 점성도를 측정 및 분석하였다.

3.1.1 물-시멘트 배합비율(W/C)의 영향

물-시멘트 배합비율에 따른 점성도 측정 결과, 물-시멘트 배합비율이 증가할수록(1.0 → 2.0) 점성도는 감소하는 양상을 보였다. Fig. 3은 전단율에 따른 물-시멘트 배합비율 1.0과 2.0의 점성도 측정 결과에 해당한다. 물과 시멘트의 배합 직후($t = 0$ s), 전단율이 12.23 s^{-1} 인 경우 물-시멘트 배합비율이 2.0일 때 1.0일 때보다 점성도가 91.3% 낮은 결과를 보였으며, 전단율이 183.5 s^{-1} 인 경우에는 77.3% 낮은 결과를 보였다(Fig. 3(a)). 마찬가지로 배합 600초 후($t = 600$ s)에는 전단율이 12.23 s^{-1} 인 경우, 물-시멘트 배합비율이 2.0일 때 1.0보다 점성도가 84.3% 낮은 결과를 보였으며 전단율이 183.5 s^{-1} 인 경우에는 72.3% 낮은 결과를 보였다(Fig. 3(b)). 암반 그라우팅을 위하여 물과 시멘트가 배합되는 경우 수화반응이 발생하여 경화(hardening)되며, 이때 배합에 사용된 물이 수화반응에 필요한 물보다 많이 공급된다면 주입재의 점성도가 낮아지게 된다. 이러한 결과로 물-시멘트 배합비율이 증가하는 경우 점성도는 감소한다.

점성도 측정을 위한 스피ndl의 회전속도(전단율)가 증가할수록 점성도가 감소하게 되며, 이러한 점성도 감소는 물-시멘트 배합비율이 낮을수록 큰 결과를 보인다. 배합 직후($t = 0$ s) 물-시멘트 배합비율 1.0인 경우, 전단율이 증가할 때($12.23 \rightarrow 183.5 \text{ s}^{-1}$) 점성도는 약 88.4% 감소하였으며, 물-시멘트 배합비율이 2.0인 경우에는 점성도가 약 69.6% 감소하였다(Fig. 3(a)). 이와 마찬가지로 배합 600초 후($t = 600$ s) 물-시멘트 배합비율 1.0인 경우, 전단율이 증가할 때($12.23 \rightarrow 183.5 \text{ s}^{-1}$) 점성도는 약 89.8% 감소하였으며, 물-시멘트 배합비율이 2.0인 경우에 점성도는 약 81.9% 감소하는 결과를 보였다(Fig. 3(b)).

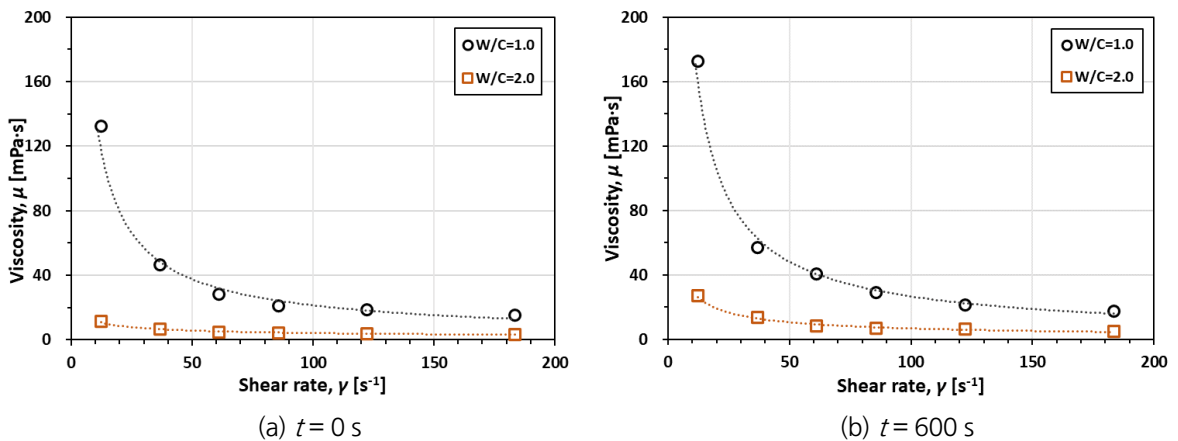


Fig. 3. Results of viscosity according to shear rate with water-cement ratio

3.1.2 시간 경과에 의한 영향

회전형 점도계를 사용하여 점성도를 측정하는 경우, 측정 시작 후 일정 시간 동안 점성도가 급격히 감소했다가 점차 증가하는 양상을 보인다(Fig. 4). 이러한 원인으로는 점성도 측정을 위한 측정 챔버 내 스피들이 회전하면서 그라우팅 주입재의 교란이 발생하여 점성도가 감소하기 때문이다(Sagong et al., 2018). 또한, 점성도 측정 과정에서 시간 경과에 따라 자중으로 인한 재료분리가 발생하여 점성도가 감소하기 때문에 판단된다(Fig. 5). 사전 실험 결과, 물-시멘트 배합 직후 약 20초 간 점성도가 감소하는 결과를 보였으며, 이후 점성도가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 본 연구에서는 시간 경과에 대한 그라우트 주입재의 점성특성을 점성도 측정 시작 20초 경과 후 분석 및 평가하였다.

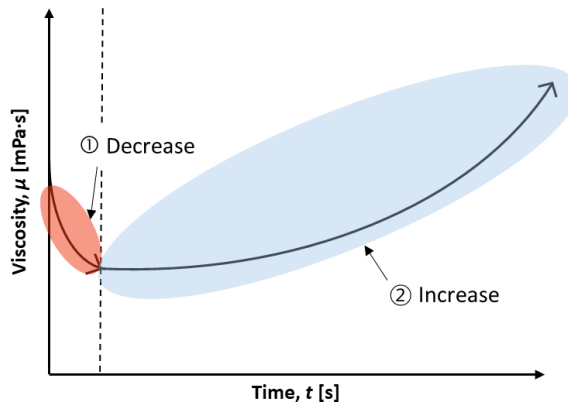


Fig. 4. Concept for variation of viscosity behavior during viscosity measurement test

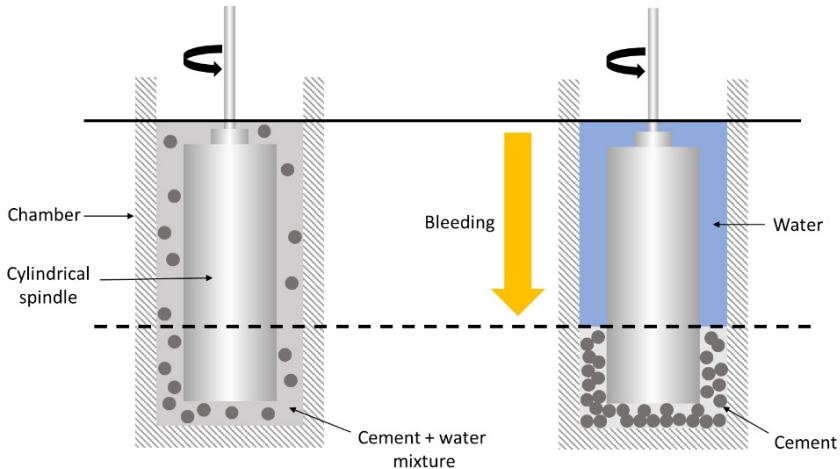


Fig. 5. Bleeding process of cement grouting material during viscosity measurement test

점성도 측정은 스피ndl의 회전속도를 10~150 RPM으로 설정하여 실시하였으며 사전실험 결과, 스피ndl의 회전속도가 과도하게 낮거나(<30 RPM) 높은 경우(>100 RPM) 시간 경과에 따른 점성도 측정값의 신뢰도가 낮은 결과를 보였다. 따라서 시간 경과에 따른 점성도 측정실험에서 스피ndl의 회전속도는 점성도 측정 가능 범위에 해당하는 30 RPM ($\gamma = 36.69 \text{ s}^{-1}$)과 100 RPM ($\gamma = 122.3 \text{ s}^{-1}$)으로 결정하여 점성특성을 분석하였다.

그라우팅 주입재 배합 후 시간 경과(20 → 600 s)에 따른 점성도 측정 결과는 Fig. 6과 같다. 물-시멘트 배합비율이 1.0인 경우, 시간 경과에 따라 30 RPM일 때 약 22.0% 증가하였으며 100 RPM일 때 약 11.4% 증가하는 결과를 보였다. 또한 물-시멘트 배합비율이 2.0인 경우, 회전속도 30 RPM과 100 RPM 각각 약 110.8% 및 65.8% 증가하는 결과를 보였다. 해당 결과에서 시간 경과에 따른 점성도 증가율은 물-시멘트 배합비율이 증가할수록(1.0 → 2.0) 높은 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 물-시멘트 배합비율이 증가할 때 시멘트 입자의 수화반응에 필요한 물을 충분히 공급할 수 있기 때문에 점성도 증가율이 높은 것으로 판단된다.

물-시멘트 배합 후 시간이 경과(20 → 600 s) 하는 경우, 회전속도에 따른 점성도 값의 차이가 증가하는 것으로 파악되었다. 회전속도 30 RPM 및 100 RPM에 따른 점성도 측정 결과 물-시멘트 배합비율이 1.0인 경우 배합 20초 후($t = 20 \text{ s}$)에서 점성도 차이는 약 27.5 mPa·s, 배합 600초 후($t = 600 \text{ s}$)에서의 점성도 차이는 약 35.6 mPa·s로 29.5% 증가하는 결과를 보였다(Fig. 6(a)). 또한 물-시멘트 배합비율이 2.0인 경우 배합 20초 후($t = 20 \text{ s}$)에서의 점성도 차이는 약 2.7 mPa·s, 배합 600초 후($t = 600 \text{ s}$)에는 7.4 mPa·s로 약 174.1% 증가하였다. 이러한 결과는 앞선 물-시멘트 배합비율에 따른 분석 결과와 유사하게 스피ndl의 회전속도에 따라 점성도가 달라지기 때문이다. 스피ndl의 회전속도가 증가할수록 그라우트가 활발하게 교란되기 때문에 시멘트 입자 간 응결이 억제되어 경화속도가 감소하게 되는 것으로 분석된다.

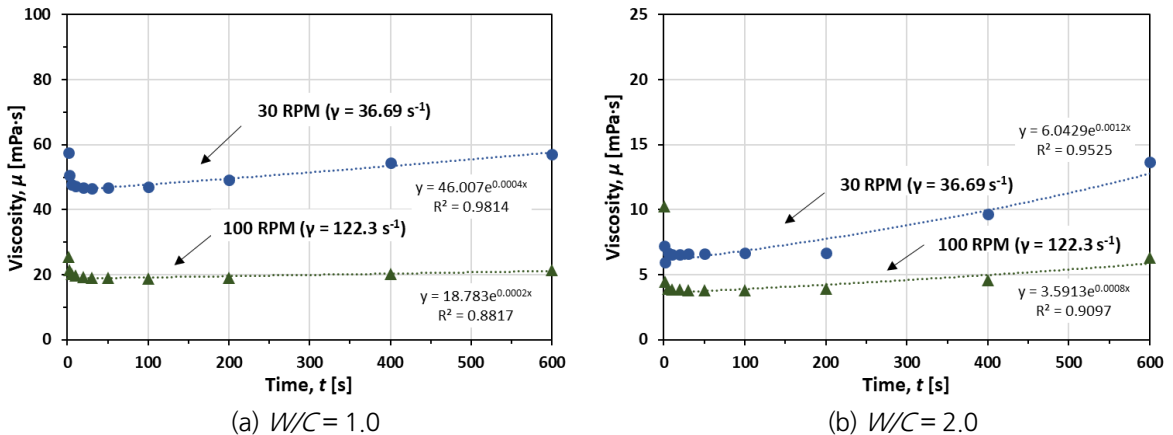


Fig. 6. Results of viscosity according to time with water-cement ratio

3.2 항복강도 측정 결과

항복강도는 유체가 흐를 수 있는, 즉 유동을 발생시키는데 필요한 최소의 전단응력 값에 해당한다. 시멘트 그라우팅 주입재료는 항복강도를 가지는 Bingham 유체에 해당하므로 암반 그라우팅을 위해서는 주입압력이 항복강도를 초과해야 한다(Håkansson et al., 1992). 이처럼 항복강도는 암반 절리 내 그라우팅 주입재 주입을 위하여 중요하게 고려되어야 하는 물성에 해당한다.

3.2.1 물-시멘트 배합비율(W/C)의 영향

물-시멘트 배합비율에 따른 항복강도 분석 결과, 물-시멘트 배합비율이 증가(1.0 → 2.0)할 때 그라우팅 주입재의 항복강도는 감소하는 것으로 파악되었다. Fig. 7은 물-시멘트 배합비율 1.0과 2.0의 전단율에 따른 전단응력을 측정된 결과에 해당한다. 배합 직후($t = 0$ s) 물-시멘트 배합비율이 2.0일 때 항복강도는 0.119 Pa로 분석되었으며, 물-시멘트 배합비율이 1.0인 경우 항복강도는 1.384 Pa로 파악되어 약 11.6배 높은 결과를 보였다. 또한, 배합 600초 후($t = 600$ s) 물-시멘트 배합비율이 1.0인 경우 항복강도는 1.962 Pa로 분석되어, 물-시멘트 배합비율이 2.0일 때 항복강도 0.334 Pa에 비하여 약 5.9배 높은 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 물-시멘트 배합비율이 증가할수록 수화반응에 필요한 물의 공급량이 충분하고 시멘트 입자 간 마찰이 감소하기 때문으로 분석된다.

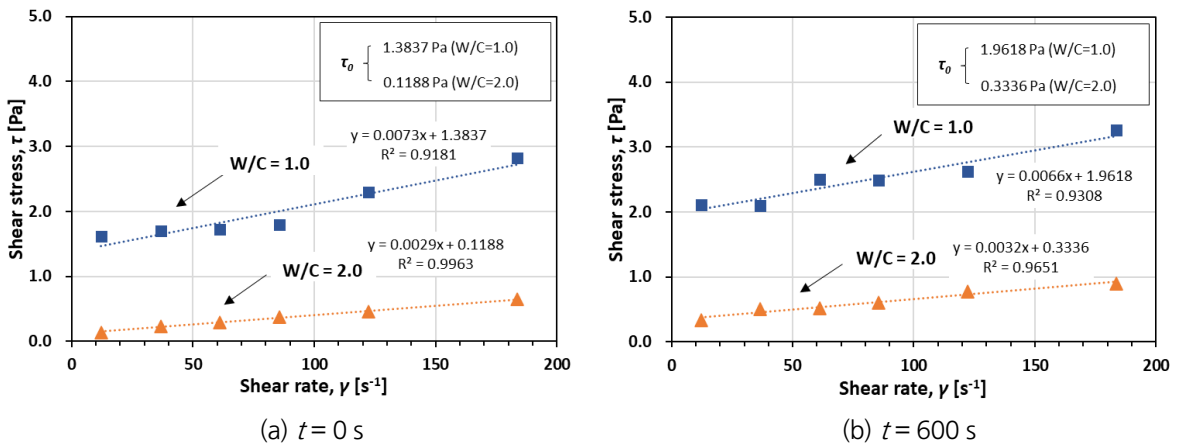


Fig. 7. Results of yield stress according to shear rate with water-cement ratio

3.2.2 시간 경과에의 영향

물과 시멘트가 배합된 후 시간 경과에 따라 수화반응이 발생하면 시멘트 입자의 응결이 발생하고 결합 구조가 강화되어 시멘트 그라우트의 항복강도가 증가하게 된다(Struble and Lei, 1995). 시간 경과에 따른 항복강도 분석 결과, 시간이 경과할수록(20 → 600 s) 항복강도는 증가하는 경향을 보이는 것으로 파악되었다(Fig. 8). 물-시멘트 배합비율이 1.0인 경우 배합 600초 후($t = 600$ s)일 때의 항복강도가 배합 20초 후($t = 20$ s)일 때보다 0.542 Pa

(36.9%) 증가하는 결과를 보였다. 또한 물-시멘트 배합비율이 2.0일 때는 시간 경과에 따라 약 0.196 Pa (115.7%) 증가하였다.

높은 물-시멘트 배합비율을 사용하는 경우, 시간 경과에 따른 항복강도 값의 증가율을 중요하게 고려해야 할 것으로 평가되었다. 물-시멘트 배합비율이 증가할수록 수화반응이 빠르게 발생하기 때문에 점성도 및 항복강도가 급격히 증가하게 된다(Nguyen et al., 2011). 비록 본 실험 결과에서는 시간 경과에 따라 물-시멘트 배합비율 1.0과 2.0의 항복강도 값의 차이는 증가하는 경향을 보였지만(Fig. 8), 이는 초기값의 차이가 너무 크기 때문으로 판단된다. 따라서 좁은 간극의 암반 절리 내 주입성능 향상을 위하여 물-시멘트 배합비율을 증가시키는 경우 이러한 항복강도 증가율의 민감도를 사전에 필수적으로 고려해야 할 것이다.

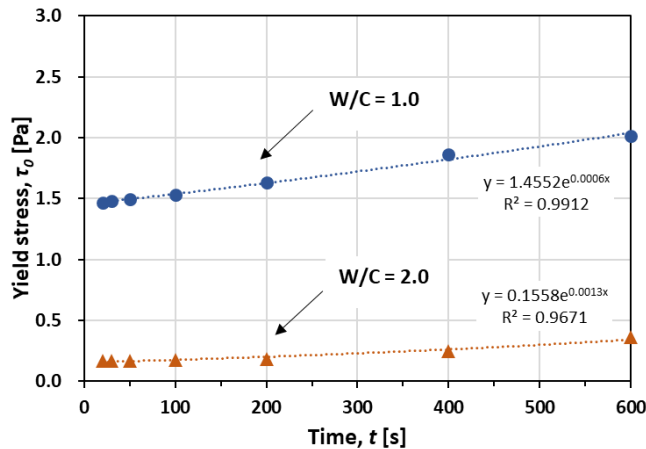


Fig. 8. Time-yield stress curve according to water-cement ratio

4. 암반 그라우팅 주입재료의 시간의존 특성 평가를 위한 주입 시뮬레이션

4.1 암반 그라우팅 주입 시뮬레이션 프로그램

암반은 무결함 암반체(intact rock) 뿐만 아니라 절리, 층리, 단층 등과 같은 다양한 형태의 구조적 불연속면(discontinuity)을 포함한다. 불연속면이 발달된 암반의 경우 불연속면의 특성에 따른 암반의 거동이 지배적이기 때문에, 암반을 대상으로 시뮬레이션을 실시하는 경우 이를 중요하게 고려해야 한다.

암반거동 수치해석을 위해 사용하는 해석기법의 종류는 유한요소법(Finite Element Method, FEM), 유한차분법(Finite Difference Method, FDM), 경계요소법(Boundary Element Method, BEM), 개별요소법(Distinct Element Method, DEM), DDA (Discontinuous Deformation Analysis) 등이 있다. 이 중 개별요소법은 불연속/불규칙적인 요소들의 분포 특성 및 기하학적 특성을 모사할 수 있으며, 암반 절리 내 그라우팅의 유동 특성을 모사하는 데 상용 해석 프로그램인 UDEC (Universal Distinct Element Code)이 주로 활용되고 있다(Zareidarmiyan

et al., 2020). 따라서 본 연구에서는 UDEC 프로그램을 사용하여 암반 그라우팅 주입재의 시간의존 특성에 따른 그라우팅 주입성능 평가 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

4.2 해석모델 및 입력물성

본 연구에서는 단일 형태의 절리를 가정하여 암반 그라우팅 주입재의 주입 거동을 모사하였다(Fig. 9). 암반 블록은 길이 50 m, 높이 1 m의 2차원 직사각형 형태로 가정하였으며, 절리는 암반 블록의 길이 방향으로 길이 50 m 간극 0.1 mm의 직선의 단일절리를 모사하였다. 암반 블록의 입력 물성은 밀도 3,000 kg/m³, 체적계수 10 GPa, 전단계수 3 GPa으로 설정하였다. Table 2는 실내실험을 통하여 측정된 그라우팅 주입재의 밀도, 점성도 및 항복강도 값에 해당하며 이를 시간의존성을 고려하지 않은 시뮬레이션 모델의 입력 물성으로 사용하였다. 또한, 시간 경과에 따른 점성도 및 항복강도는 앞서 실험적으로 도출한 점성모델을 활용하였으며, 해석프로그램 내 주입 시간 경과에 따라 변화된 값을 입력 물성으로 갱신 및 반영하였다(Fig. 6, Fig. 8). 그라우팅 주입재는 1 MPa의 일정한 압력으로 주입구를 통하여 절리의 깊이방향으로 주입을 실시하였으며. 그라우팅 주입성능은 그라우팅 주입재의 주입거리(injected distance) 및 누적 주입량(cumulative grout volume)으로 설정하여 평가하였다. 마지막으로 본 연구에서는 그라우팅 주입 시 절리의 간극이 일정한 유동 해석을 실시하여 그라우팅 주입재의 시간의존 특성에 따른 그라우팅 주입성능을 평가하였다.

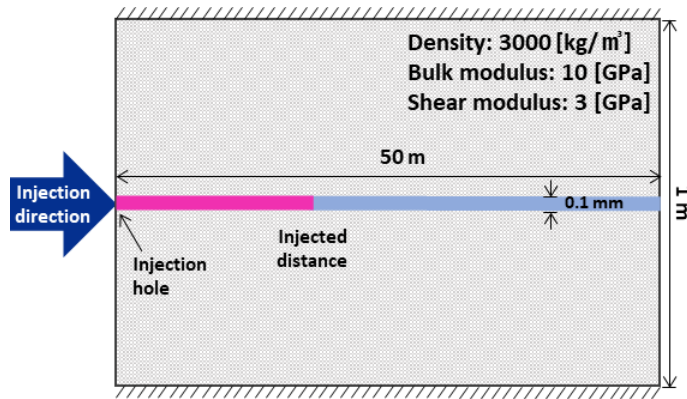


Fig. 9. Single joint model for evaluating grouting injection performance

Table 2. Input properties of grouting material for constant viscosity case

Water-Cement ratio (-)	Properties		
	Density (kg/m ³)	Viscosity (mPa · s)	Yield strength (Pa)
1.0	1,480	32.40	1.46
2.0	1,290	4.82	0.16

4.3 시간의존 특성에 따른 암반 그라우팅 주입성능 평가결과

시간의존 특성을 고려한 그라우팅 주입성능 평가결과, 시간 경과에 따라 그라우팅 주입재의 점성도 및 항복강도가 증가하여 그라우팅 주입거리 및 누적 주입량이 감소하는 것으로 파악되었다. 물-시멘트 배합비율을 1.0으로 설정하였을 때 주입 600초 후 시간의존 특성을 고려하지 않은 경우 주입거리는 5.4 m, 시간의존 특성을 고려하는 경우 주입거리는 4.7 m로 평가되어 약 12.9% 주입거리가 감소하는 결과를 보였다(Fig. 10(a)). 이와 유사하게 물-시멘트 배합비율을 2.0으로 설정하였을 때 시간의존 특성을 고려하지 않은 해석에서 주입거리는 14.2 m, 시간의존 특성을 고려한 해석에서는 10.3 m로 평가되어 약 27.5%의 주입거리가 감소하는 것으로 파악되었다(Fig. 10(b)).

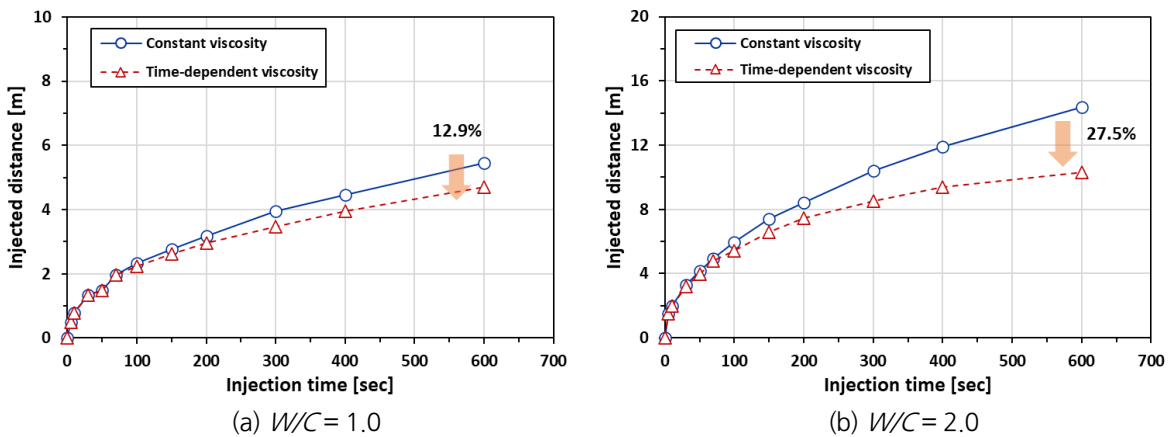


Fig. 10. Results of injected distance according to W/C considering time-dependent viscosity

그라우팅 주입재의 시간의존 특성을 고려하는 경우 주입거리와 마찬가지로 누적 주입량 또한 시간의존 특성을 고려하지 않은 해석에 비하여 감소하는 경향을 보였다. 물-시멘트 배합비율이 1.0인 경우 시간의존 특성을 고려한 주입 시뮬레이션에서 주입 600초 후 누적 그라우팅 주입량은 약 4.7% 감소하는 것으로 평가되었다(Fig. 11(a)). 또한 물-시멘트 배합비율이 2.0인 경우, 시간의존 특성을 고려한 해석에서는 누적 주입량이 약 11.7% 감소하는 결과를 보였다(Fig. 11(b)). 이러한 시간의존 특성에 따른 그라우팅 주입성능의 저하는 물-시멘트 배합비율이 높을수록 큰 것으로 판단된다.

그라우팅 주입재의 주입거리 및 누적 주입량은 물-시멘트 배합비율이 높은 해석결과($W/C = 2.0$)에서 물-시멘트 배합비율이 낮은 해석결과($W/C = 1.0$)에 비하여 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였다(Fig. 10, Fig. 11). 해당 결과에서, 그라우팅 주입설계 시 시간 경과에 따른 점성도 변화를 고려하지 않는다면 암반 그라우팅 현장에서 목표 주입거리 및 주입량을 달성하지 못하여 지하공간 활용성(e.g., 지하수 유입, 역학적 불안정 등)이 저하될 수 있다. 따라서 지하공간을 장기적으로 안전하게 활용하기 위해서는 시간의존 특성을 고려한 그라우팅 설계가 중요할 것으로 판단된다.

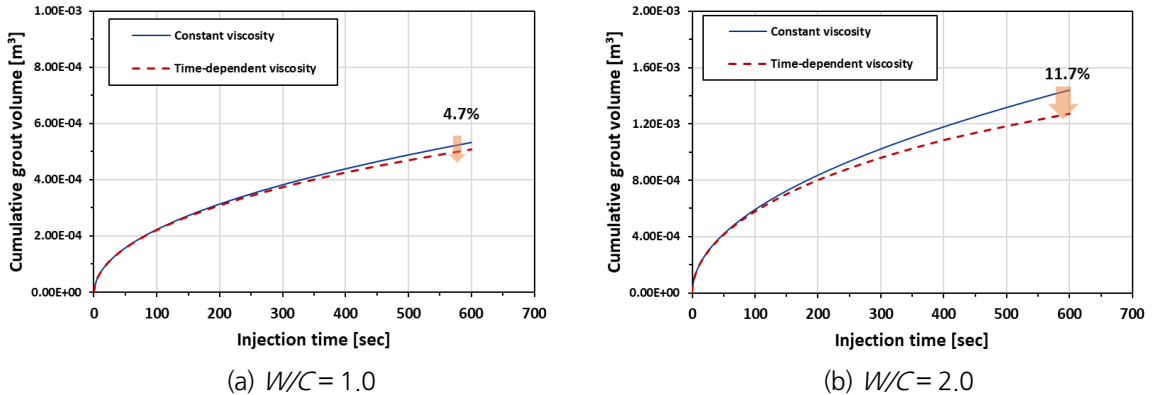


Fig. 11. Results of cumulative volume according to W/C considering time-dependent viscosity

5. 결론

지하 암반 내 터널을 설치하고 이를 장기적으로 안전하게 활용하기 위해서는 그라우팅과 같은 보강공법을 활용하여 터널 내부로의 지하수 유입과 주변 절리 암반의 강도를 증진시키는 것이 중요하다. 암반 절리 내 그라우팅 주입재료는 주로 시멘트 재료가 활용되고 있으며, 이러한 시멘트 재료는 배합 후 수화반응에 의하여 시간 경과에 따라 점성특성이 달라진다. 따라서 그라우팅 주입재의 시간의존 특성을 고려하지 않고 그라우팅 주입설계를 실시한다면 목표 주입성능(주입거리, 주입량)을 달성하지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 시간 경과에 따른 시멘트 재료 기반의 그라우팅 주입재의 점성특성을 평가하고자 하였으며, 실내실험을 통하여 파악한 물성을 이용하여 시간의존 특성에 따른 그라우팅 주입성능을 수치 시뮬레이션을 통하여 평가하였다.

1. 그라우팅 주입재료의 물-시멘트 배합비율이 증가하는 경우 점성도와 항복강도는 감소한다. 실험결과, 물-시멘트 배합비율이 증가할 때(1.0 → 2.0), 배합 직후($t = 0$ s) 설정한 전단율에 따라 점성도는 약 77.3~91.3% 감소하는 결과를 보였다. 또한, 항복강도는 약 91.4% 감소하는 것으로 파악되었다.
2. 시간 경과에 따른 그라우팅 주입재의 점성도 및 항복강도 평가결과, 그라우팅 주입재의 경화가 진행됨에 따라 점성도와 항복강도는 증가하는 경향을 보였으며 물-시멘트 배합비율이 높을수록 증가율이 높은 것으로 평가되었다. 그라우팅 주입재 배합 600초 후 점성도는 각각 11.4~22.0% ($W/C = 1.0$), 65.8~110.8% ($W/C = 2.0$) 증가하였으며, 항복강도는 36.9% ($W/C = 1.0$), 115.7% ($W/C = 2.0$) 증가하였다.
3. 그라우팅 주입재의 시간의존 특성(점성도 및 항복강도)을 고려한 주입 시뮬레이션 결과, 점성특성 변화를 고려하지 않은 해석에 비하여 그라우팅 주입거리는 12.9% ($W/C = 1.0$)~27.5% ($W/C = 2.0$) 감소하는 결과를 보였다. 또한, 누적 그라우팅 주입량은 4.7% ($W/C = 1.0$)~11.7% ($W/C = 2.0$) 감소하는 것으로 파악되어 시간의존 특성을 고려하지 않는 경우 사전에 설계한 그라우팅 주입 목표를 달성하지 못하여 장기적인 암반 내 지하공간 활용 안전성이 저해될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 본 연구에서 평가한 그라우팅 주입재의 재료, 물-시멘트 배합비율과 점성도 및 항복강도 측정 시간은 기존 보고된 연구에서 참고하였기 때문에 적용 현장에 따라 한정적일 수 있다. 하지만 본 연구를 통하여 구축된 그라우팅 주입재료의 점성특성 데이터베이스와 이에 따른 주입성능의 수치해석적 평가결과는 향후 지하 암반 공간 활용 시 신뢰성 높은 그라우팅 주입설계를 위한 기초자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2022R111A3065299) 및 2021~2022학년도 부산대학교 BK21 FOUR 대학원혁신지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

저자 기여도

이종원은 원고 작성, 실내실험 및 수치해석 데이터를 분석하였고, 김지영은 원고 작성 및 수치해석 데이터 분석을 수행, 원조현은 원고 작성 및 실내실험을 수행, 오태민은 연구개념 및 설계, 원고검토를 수행하였다.

References

1. Barton, N. (1978), "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol. 15, No. 6, pp. 319-368.
2. Håkansson, U., Hässler, L., Stille, H. (1992), "Rheological properties of microfine cement grouts", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 453-458.
3. Jeoung, J.H., Hwang, S.P., Lee, J.H., Lee, T.H. (2016), "The study on evaluation of injection performance in micro crack depending on viscosity of grouting material", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 16, No. 5, pp. 239-245.
4. Kim, J., Lee, E.K. (2022), "A fundamental study on the criteria of basic parameters for planning rock grouting", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 38, No. 2, pp. 15-27.
5. Kim, N.Y., Park, G.T., Baek, S.C., Lee, K.H., Choi, J.W., Her, Y. (2017), "Analysis of displacement behavior in fractured fault and groundwater flow under tunnel excavation", Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 1, pp. 71-82.
6. Kobayashi, S., Stille, H. (2007), Design for rock grouting based on analysis of grout penetration, Verification using Äspö HRL data and parameter analysis, No. SKB-R--07-13, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., pp. 23-34.
7. Lee, H., Oh, T.M., Park, E.S., Lee, J.W., Kim, H.M. (2017), "Factors affecting waterproof efficiency of grouting in single rock fracture", Geomechanics and Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 771-783.

8. Lee, J.W., Weon, J.H., Choi, H.Y., Oh, T.M. (2021), "Analysis of viscosity and bleeding characteristics of grouting materials according to the proportion of bentonite", *LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*, Vol. 12, No. 4, pp. 127-137.
9. Liu, X., Hu, C., Liu, Q., He, J. (2021), "Grout penetration process simulation and grouting parameters analysis in fractured rock mass using numerical manifold method", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 123, pp. 93-106.
10. Liu, Y.H., Yang, P., Ku, T., Gao, S.W. (2020), "Effect of different nanoparticles on the grouting performance of cement-based grouts in dynamic water condition", *Construction and Building Materials*, Vol. 248, No. 118663, pp. 1-9.
11. Meng, F., Wong, L.N.Y., Zhou, H., Yu, J., Cheng, G. (2019), "Shear rate effects on the post-peak shear behaviour and acoustic emission characteristics of artificially split granite joints", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 52, No. 7, pp. 2155-2174.
12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020), *Yearbook of road bridge and tunnel statistics*, pp. 13-16.
13. Mohammed, M.H., Pusch, R., Knutsson, S. (2015), "Study of cement-grout penetration into fractures under static and oscillatory conditions", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 45, pp. 10-19.
14. Moon, J.S. (2013), "Groundwater inflow rate estimation considering excavation-induced permeability reduction in the vicinity of a tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 333-344.
15. Mu, W., Wang, D., Li, L., Yang, T., Feng, Q., Wang, S., Xiao, F. (2021), "Cement flow in interaction rock fractures and its corresponding new construction process in slope engineering", *Construction and Building Materials*, Vol. 303, No. 11.
16. Nguyen, V.H., Remond, S., Gallias, J.L. (2011), "Influence of cement grouts composition on the rheological behaviour", *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 3, pp. 292-300.
17. Pantazopoulos, I.A., Markou, I.N., Christodoulou, D.N., Droudakis, A.I., Atmatzidis, D.K., Antiohos, S.K., Chaniotakis, E. (2012), "Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 5, pp. 593-603.
18. Panthi, K.K., Nilsen, B. (2005), "Significance of grouting for controlling leakage in water tunnels: A case from Nepal", *Proceedings of the ITA-AITES 2005 World Tunnelling Congress and 31st ITA General Assembly, Istanbul, Turkey*, pp. 931-937.
19. Rafi, J.Y., Stille, H. (2014), "Control of rock jacking considering spread of grout and grouting pressure", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 40, pp. 1-15.
20. Saeidi, O., Ramezanzadeh, A., Sereshki, F., Jalali, S.M.E. (2013), "Numerical modeling of the effects of joint hydraulic aperture, orientation and spacing on rock grouting using UDEC: A case study of Bakhtiary dam of Iran", *Journal of Mining and Environment*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-26.
21. Sagong, M., Lee, J.S., Park, J., Cho, C. (2018), "An experimental study on the viscosity features of sealant (bentonite-cement slurry) in umbrella arch method", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 5, pp. 773-786.

22. Stille, B., Gustafson, G. (2010), "A review of the Namntall tunnel project with regard to grouting performance", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, No. 4, pp. 346-356.
23. Struble, L.J., Lei, W.G. (1995), "Rheological changes associated with setting of cement paste", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 2, No. 6, pp. 224-230.
24. 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.
25. Zareidarmiyani, A., Salarirad, H., Vilarrasa, V., Kim, K.I., Lee, J., Min, K.B. (2020), "Comparison of numerical codes for coupled thermo-hydro-mechanical simulations of fractured media", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 850-865.