

단일절리 암반에서 그라우팅 주입거리 분석

김지영¹ · 원조현¹ · 이종원² · 오태민^{3*}

¹비회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

²정회원, 부산대학교 생산기술연구소 연수연구원

³정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 부교수

Analysis of grout injection distance in single rock joint

Ji-Yeong Kim¹ · Jo-Hyun Weon¹ · Jong-Won Lee² · Tae-Min Oh^{3*}

¹MS.C. Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

²Post-Doctoral Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University

³Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

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

Abstract

The utilization of underground spaces in relation to tunnels and energy/waste storage is on the rise. To ensure the stability of underground spaces, it is crucial to reinforce rock fractures and discontinuities. Discontinuities, such as joints, can weaken the strength of the rock and lead to groundwater inflow into underground spaces. In order to enhance the strength and stability of the area around these discontinuities, rock grouting techniques are employed. However, during rock grouting, it is impossible to visually confirm whether the grouting material is being smoothly injected as intended. Without proper injection, the expected increases in strength, durability, and degree of consolidation may not be achieved. Therefore, it is necessary to predict in advance whether the grouting material is being injected as designed. In this study, we aimed to assess the injection performance based on injection variables such as the water/cement mixture ratio, injection pressure, and injection flow using UDEC (Universal Distinct Element Code) numerical program. Additionally, numerical results were validated by the lab experiment. The results of this study are expected to help optimize variables such as injection material properties, injection time, and pump pressure in the grouting design in the field.

Keywords: Rock grouting, Micro-cement, Numerical simulation, UDEC, Grouting injection test

초 록

터널 및 에너지/폐기물 저장과 관련하여 지하공간의 활용이 증가하는 추세이다. 지하공간의 안정성 확보를 위해서는 암반균열 및 절리를 보강하는 것이 중요하다. 절리와 같은

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
25(6)541-554(2023)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.6.541>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 30, 2023

Revised November 13, 2023

Accepted November 14, 2023



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 © 2023, Korean Tunnelling and Underground Space Association

불연속면은 암반의 강도를 저하시키고, 지하공간 내부로 지하수 유입을 발생시킬 수 있다. 불연속면 주변의 암반 강도의 증대와 차수를 위해 암반 그라우팅을 활용할 수 있다. 그러나 암반 그라우팅 시 주입재료가 암반 절리 내 원활하게 주입되고 있는지 직접적인 확인에 한계가 있다. 그라우팅 주입재가 사전에 목표한 설계안과 같이 주입되지 않을 시 강도, 내구성 증대 및 차수성 향상 효과를 볼 수 없다. 따라서 실험적으로 평가가 어려운 그라우팅 주입재가 설계대로 주입되고 있는지 수치해석을 활용하여 사전에 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 개별요소 수치해석 프로그램인 UDEC (Universal Distinct Element Code)을 활용한 그라우팅 주입재의 물/시멘트 배합비, 주입압력, 주입유량과 같은 주입변수에 따른 주입성능을 평가하였다. 또한 실내실험을 통해 수치해석 결과와 비교하여 수치해석 모델의 신뢰도를 검증하였다. 본 연구결과는 향후 현장에서 그라우팅 설계 시 주입재의 물성, 주입시간, 펌프 압력과 같은 변수들을 최적화할 수 있는데 도움이 될 것으로 기대된다.

주요어: 암반그라우팅, 마이크로시멘트, 수치해석, UDEC, 주입실험

1. 서론

도시의 확장 및 신규 구조물 수요의 증가로 인해 활용 가능한 지상공간이 부족해지고 있다. 이에 따른 지하공간 활용이 높아짐에 따라 지하구조물의 수요도 함께 증가하고 있다. 도심지 공간 부족 해결 및 토지의 효과적인 활용을 위해 대규모 지하공간 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 동시에 터널 굴착 또한 증가하고 있다. 국내에서는 지하공간 활용을 위하여 깊이 40 m 이하로 굴착하였을 때 대심도로 정의한다(Yoon et al., 2021). 대심도 암반은 절리, 단층, 층리와 같은 자연발생 불연속면이 존재하며, 이는 암반 자체의 강도 저하와 절리 내부로의 지하수 유출을 발생시킬 수 있다. 또한 불연속면이 있는 암반에서 굴착을 실시하는 경우, EDZ (Excavation damage zone)와 같은 추가적인 손상이 발생할 수 있다. 암반 절리 및 균열로 인한 암반의 강도저하, 지하수 누수와 같은 사고 위험이 있기 때문에 지하에서 구조물을 건설할 때 해당 구역에서 보강공법 적용이 필수적이다(Kim et al., 2010).

그라우팅 공법은 불연속면 내부로 시멘트 또는 약액과 같은 그라우트를 직접 주입하여 보강하는 공법이다. 그라우팅의 종류는 압밀 그라우팅, 침투 그라우팅이 있으며 특히 암반의 경우, 그라우팅 재료 주입에 의하여 암반이 손상되지 않도록 하기 위해 점성도가 낮은 그라우팅 주입재와 주입압력이 1 MPa 이하에 해당하는 침투 그라우팅을 사용하고 있다(Lee and Lim, 2007; Nam et al., 2018). 기존의 그라우팅 공법은 보수 및 보강의 일부분으로 일시적 보강 및 보조공법으로 활용되었으나, 점차 영구적인 보강공법으로 사용되는 추세이다(Kim and Lee, 2022).

그라우팅 공법이 효과적으로 적용되기 위해서는 암반환경, 주입재의 재료적 특성, 유동특성, 주입펌프의 주입압력과 같은 주입성능에 영향을 미치는 다양한 영향인자들의 특성을 파악하는 것이 중요하다(Lee et al., 2022). 암반 그라우팅 주입시 중요하게 고려되는 요인으로는 주입재의 유동성, 주입압력, 주입용량이 있다. 주입재의 유동성은 점성도가 높으면 주입이 원활이 되지 않고, 점성도가 낮으면 강도 저감이 발생할 수 있다. 한편 높은 주입압력에서는 절리면 주변의 변형이 발생할 위험이 있다. 주입 용량이 높으면 시공비용이 높아져 경제적으로 불리하며, 주입용량이 낮으면 주입하고자 하는 절리로 그라우팅이 충분히 시공되지 않아 그라우팅의 효과를 제대로

볼 수 없다.

그라우팅 공법은 육안으로 그라우팅 주입재가 설계대로 주입되었는지 확인이 불가능하다. 이는 보강 및 차수 효과의 불확실성을 높인다. 그라우팅의 효과를 향상시키기 위해 국내외적으로 지반 및 암반에서의 그라우팅 주입성능 및 효과를 예측한 수치해석적 연구가 진행되어 왔다. 기존 연구에서는 암반 내부의 절리 변형에 대한 해석이 주로 진행되었고, 암석균열의 거동 및 간극의 변화를 분석하였다(Hong et al., 2021; Park et al., 2021).

그라우팅 주입에 관한 연구는 주로 암반 사이에 있는 사질토 지반과 연약지반을 포함한 풍화암과 연암의 복잡한 지반층을 대상으로 그라우팅의 침투반경을 분석한 연구가 수행되었다(Oh et al., 2018; Baek et al., 2020; Koh and Choi, 2021). 기존 연구에서는 암반 절리의 크기, 간격, 거칠기, 각도에 대한 주입해석이 진행되었다(Saeidi et al., 2013b). 또한 시간에 따른 암반 그라우팅 점성 특성을 분석한 연구가 진행되었다(Lee et al., 2022). 기존 연구에서 그라우팅 주입결과에 영향을 미치는 물/시멘트 배합비, 주입압력, 주입유량을 모두 고려한 수치해석은 제한적으로 수행되었다. 또한 수치해석 결과와 그라우팅 주입 실험을 비교하여 분석한 사례도 부족하다. 그라우팅 주입의 효과를 향상시키기 위해서는 그라우팅 주입재의 영향인자, 특히 시멘트의 물/시멘트 배합비에 따른 주입성능을 분석하고 실험을 통해 수치해석 결과에 대한 검증과 신뢰도를 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 대심도 암반에서의 그라우팅 시 주입변수에 대한 암반 그라우팅 주입성능을 수치해석을 통해 분석하였다. 주입변수로는 암반 그라우팅 공법 적용 시 중요하게 고려되는 물/시멘트 배합비, 주입압력과 주입유량으로 설정하였고, 각각의 변수에 따라 그라우팅 주입성능을 확인하였다. 또한 구축한 수치해석 모델의 검증을 위해 실내실험을 수행하여 주입거리 결과를 비교하였다. 해당 연구 결과를 활용하면, 향후 현장에서 암반 그라우팅 시공의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 암반 그라우팅 단일절리 주입 시뮬레이션

2.1 개별요소 프로그램 구성 모델

개별요소법을 기반으로 한 수치해석 프로그램 중 Itasca 사의 2차원 해석 프로그램인 UDEC (Universal Distinct Element Code)을 활용하여 암반 그라우팅 단일절리 주입시뮬레이션 해석을 수행하였다. 본 해석에서 사용한 절리모델은 Barton-Bandis (BB) 절리모델을 활용하여 모델을 구성하였다. BB모델은 기존 수치해석 모델에서 활용되는 Mohr-Coulomb (MC) 절리 모델과 비교하였을 때, 실제 암반에 적용하기에 더 적합하다고 보고되고 있다 (Barton and Choubey, 1977; Choi and Chung, 2004). Barton et al. (1974)과 Bandis et al. (1983)이 제시한 BB모델의 주요 구성요소는 절리 거칠기 계수(JRC), 절리압축강도(JCS), 절리의 잔류 마찰각이다.

그라우팅 주입재인 시멘트 주입재료는 Bingham 유체에 해당한다. Bingham 유체는 비뉴턴(Non-Newtonian fluid) 유체로 전단변형률 속도에 따라 점도가 일정한 뉴턴 유체(Newtonian fluid)와 달리 전단응력이 항복강도보다 클 때 유체의 유동이 발생하기 시작한다(식 (1)) (Kim and Choi, 2018; Lee et al., 2022).

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

여기서, τ 는 전단응력, τ_0 는 항복강도, μ 는 점성도, γ 는 전단변형을 의미한다. 이 중 항복강도와 점성도는 UDEC의 유체 유동 모델의 입력 변수로 적용된다. 해당 변수는 회전형 점도계를 활용하여 측정이 가능하며 실험방법은 Lee et al. (2022)에서 제시한 절차를 참고하였다.

2.2 단일절리 해석 모델 및 암반 물성

본 연구에서는 대심도 암반에서의 단일 형태의 절리를 가정하여 암반 그라우팅 주입재의 주입 거동을 모사하였다(Fig. 1). 암반 블록은 Lee et al. (2017)에서 수행한 수치해석 암반 모델을 참고하여 폭 50 m 높이 2 m의 직사각형 형태로 가정하였다. 암반 블록의 입력 물성은 밀도 3,000 kg/m³, 체적계수 10 GPa, 전단계수 3 GPa로 설정하였다(Table 1). 경계조건은 변위 고정조건으로 하였으며, 절리는 암반 블록의 길이 방향으로 길이 50 m 간극 0.5 mm의 직선의 단일절리를 모사하였다. 시멘트 그라우팅 주입이 가능한 기존 암반절리 수치해석 모델을 참고하여 절리 간격은 0.5 mm로 설정하였다(Jeon et al., 2010; Saeidi et al., 2013a; Lee et al., 2017). 절리 마찰계수는 고려하지 않았으며, JRC (Joint roughness coefficient) 0-2에 해당하는 단일절리로 모사하였다. 그라우팅 주입재의 주입성능은 각 주입시간 별 주입재의 주입거리(injected distance)로 평가하였다.

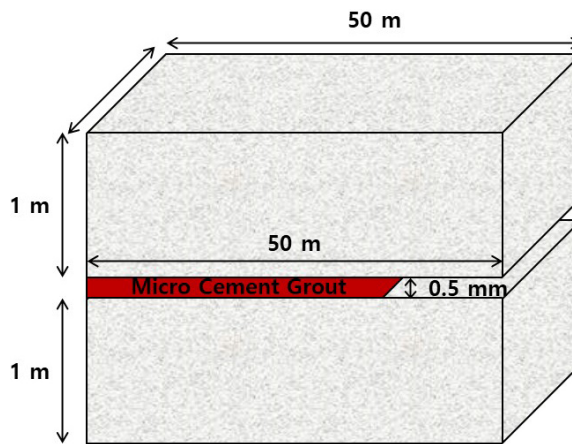


Fig. 1. Concept of rock grouting in numerical model

Table 1. Input parameters of rock model in numerical analysis

Density (kg/m ³)	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)
3,000	10	3

2.3 주입재료 입력물성

본 연구에서 수치해석에 적용한 그라우팅 주입재의 재료는 미세절리에 주입이 가능한 마이크로 시멘트로 설정하였다. 기존 암반 그라우팅에서 그라우팅의 주입 후 내구성과 주입성 모두 만족시킬 수 있는 물/시멘트 배합비는 2.0에서 4.0의 범위에서 활용되고 있다(Kim and Lee, 2022). 수치해석에 활용된 점성 물성은 기존 암반 그라우팅에 활용하는 배합비를 참고하여 회전형 점도계를 이용한 점성도 실험을 통해 측정하였다. 실험방법은 Lee et al. (2022)에서 제시한 암반 그라우팅 주입재 점성도 측정 실험을 참고하였다. Table 2는 실내 실험을 통해 확보한 주입재의 수치해석 입력 물성값이다. 물/시멘트 배합비 1.0, 2.0, 4.0에서 수치해석 시물레이션에 필요한 점성도 및 항복강도를 측정하였다.

Table 2. Input properties of grout material in numerical analysis

Water/Cement ratio (W/C) (-)	Properties		
	Yield strength (Pa)	Viscosity (mPa · s)	Density (kg/m ³)
1.0	1.4552	9.06	1,426
2.0	0.1558	2.04	1,233
4.0	0.0779	1.42	1,136

2.4 그라우팅 주입변수

기존 연구에서 암반 그라우팅의 주입압력은 지반조건에 따라 300~2,400 kPa까지 다양한 범위로 사용되고 있다 (Park and Park, 2003; Saeidi et al., 2013b; Nam et al., 2018). 대심도 절리암반 내 정수압은 심도가 깊어질수록 증가하게 된다. 그라우팅 주입펌프를 이용하여 일정한 압력으로 그라우팅 주입재를 주입할 때, 실제로 주입되는

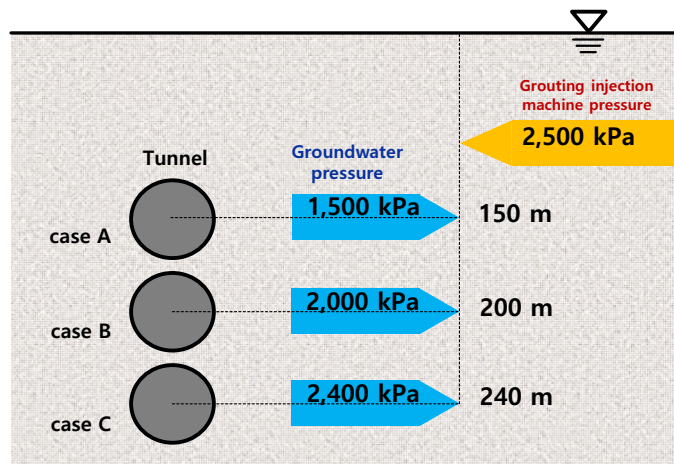


Fig. 2. Injected pressure of grouting according to the depth in fully saturation

유체의 압력은 그라우팅의 주입압력과 지하수위의 압력인 정수압의 차이에 해당한다. Fig. 2에서 굴착을 목표로 하는 터널의 상부 지표에 지하수가 있다고 가정하면 터널 Case A 심도 150 m 깊이에서의 정수압은 1,500 kPa이다. 동일하게 Case B 심도 200 m 깊이에서의 정수압은 2,000 kPa, Case C 심도 240 m 깊이에서의 정수압은 2,400 kPa으로 가정할 수 있다. 이때 그라우팅 주입 펌프의 압력을 2,500 kPa로 설정하였을 때, 심도 150 m, 200 m, 240 m에서의 그라우트가 실제 주입되는 압력은 각각 1,000 kPa, 500 kPa, 100 kPa로 산정되며, 해당 값을 유체가 주입될 때 받는 압력의 변수로 설정하여 수치해석을 수행하였다.

2.5 주입유량 산정을 위한 이론식: Hagen-Poiseuille

그라우팅 주입 시 주입 용량이 과도하게 많으면 경제적인 측면에서 불리하며, 적으면 충전재 부족으로 절리의 차수와 보강과 같은 그라우팅 공법의 효과를 온전히 기대하기 어렵다. 따라서 실험결과와의 비교 검증에 위해 일정한 유량으로 절리 내부에 그라우팅 주입재를 주입하는 해석을 수행하였다. 이를 위해 Hagen-Poiseuille 식을 이용하여 주입유량에 따른 주입압력 변화를 산출하여 해석 모델에 반영하였다(식 (2)). 본 연구에서 사용되는 수치해석은 그라우팅 주입재를 암반모델의 절리 입구에서 일정한 압력으로 주입하는 코드를 적용한다. 해당 코드에 유량을 주입변수로 적용하기 위해 그라우팅이 주입되는 각각의 구간에서 유체가 받는 압력을 해석에 적용하였다. 주입유량과 점성도 값을 활용하여 관내 그라우팅 주입재 용액에 걸린 압력을 산출하여 수치해석을 진행하였다. 그라우팅 주입재의 주입거리에 따라 압력은 변화하기 때문에 주입된 거리에 따라 그라우팅에 가해지는 압력을 산정하여 수치해석에 사용하였다.

$$\Delta p = \frac{8\mu LQ}{\pi R^4} = \frac{8\pi\mu LQ}{A^2} \quad (2)$$

Hagen-Poiseuille 식에서 μ 는 점성도, L 은 유체가 도달한 거리, Q 는 유량, R 은 관 내경을 의미한다. 각각의 물/시멘트 배합비 1.0, 2.0, 4.0에 대한 점성도는 일정하며, 유량은 1 mL/min으로 고정되었을 때, 유체가 관내로 주입된 길이와 유체가 받는 압력은 비례한다. 이를 이용하여 튜브관 길이 5 m에서, 0.5 m 간격마다 그라우팅 주입재가 받는 압력을 계산하였다. 동일한 방법으로 유량 2 mL/min, 5 mL/min에 대한 압력 값을 각각 계산하였다. 위와 같이 구한 주입압력을 수치해석의 입력물성으로 하여 각 시간에 주입결과를 확인하였다.

본 연구에서 그라우팅 주입변수는 물/시멘트 배합비, 그라우팅 주입재의 주입압력, 주입유량으로 설정하여 그라우팅 주입성능을 평가하였다(Table 3). 수치해석의 결과는 주입압력 1,000 kPa에서 물/시멘트 배합비의 변화에 따른 주입성능을 분석하였다. 그리고 물/시멘트 배합비 1.0과 4.0에서 주입압력 변화 및 주입유량 변화에 따른 주입성능을 분석하였다.

Table 3. Variables of the rock grouting for numerical analysis

Water/Cement ratio (W/C, -)	Injected pressure (Δp , kPa)	Injected flow rate (Q, mL/min)
1.0, 2.0, 4.0	100, 500, 1,000	1, 2, 5

3. 수치해석 결과

3.1 물/시멘트 배합비에 따른 영향

단일절리 암반 모델에서의 물/시멘트 배합비에 따른 주입성능을 평가하였다. 물/시멘트 배합비에 따른 영향을 분석하기 위해 주입압력을 100 kPa로 고정하고, 물/시멘트 배합비 1.0, 2.0, 4.0의 주입성능 결과를 확인하였다. 수치해석의 결과는 주입 후 5, 10, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 300초마다 주입된 거리로 분석하였다. 시멘트 그라우팅 주입재는 시간이 경과할수록 주입속도는 감소한다. 이에 따라 시간이 경과하면서 누적된 주입거리는 점차 감소하며 주입 경향성은 비선형적으로 증가한다(Fig. 3). 물/시멘트 배합비 2.0과 4.0에서는 주입 후 50초 이전까지는 시간당 주입거리가 크게 증가하였으나, 50초 이후부터 시간당 주입거리의 증가량이 감소하는 경향을 보였다.

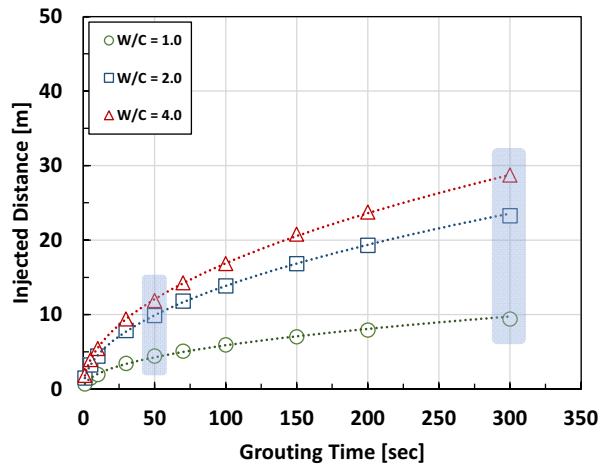


Fig. 3. Effect of Water/Cement ratio on injected distance

Fig. 4는 물/시멘트 배합비에 따른 그라우팅 주입 결과를 분석한 결과에 해당한다. 주입 후 50초일 때 물/시멘트 비 1.0에서 4.5 m, 2.0에서 9.9 m, 4.0에서 11.9 m 주입된 결과를 보였다. 주입 후 50초가 경과되었을 때, 물/시멘트 배합비가 1.0에서 2.0으로 증가하면 주입거리는 2.2배 증가하고, 물/시멘트 배합비가 1.0에서 4.0으로 증가할 때는 2.67배가 증가하였다.

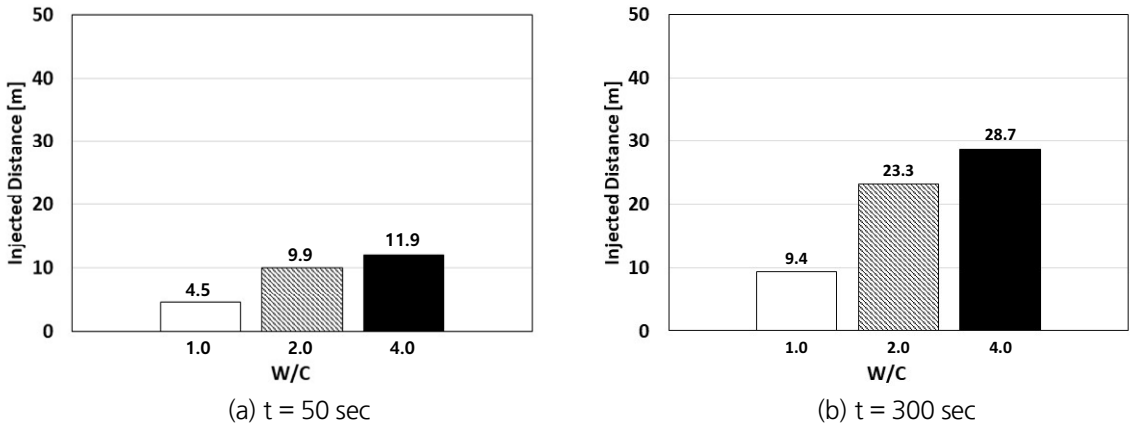


Fig. 4. Injected distance according to the W/C at the time of (a) t = 50 sec and (b) t = 300 sec

주입 후 300초 경과 시점에서 시멘트 그라우팅 주입재의 주입거리는 물/시멘트 배합비 1.0에서 9.4 m, 2.0에서 23.3 m, 4.0에서 28.7 m이다. 그라우팅 주입이 완료되는 시간인 300초 지점에서 물/시멘트 배합비가 1.0에서 2.0으로 변하는 경우 2.5배 증가하였고, 1.0에서 4.0으로 변하는 경우 3.05배 증가하였다. 주입 후 50초 경과 시점에서 물/시멘트 배합비의 증가에 따른 주입량과 비교하여, 주입 후 50초부터 300초 경과 시점에서의 물/시멘트 배합비의 증가에 따른 주입량이 더 적은 것으로 나타났다. 주입 300초 후 물/시멘트 배합비 2.0은 최종 23.3 m 도달하였고, 물/시멘트 배합비 4.0에서는 28.7 m 도달한 것으로 확인되었다. 물/시멘트 배합비가 2.0에서 4.0으로 증가했을 때 최종 주입거리의 차이는 5.4 m이다.

수치해석 결과에 따라 물/시멘트 배합비가 2.0 이하일 때, 주입성능은 급격히 낮아지고 물/시멘트 배합비 2.0 이상에서 비교적 안정적인 주입 경향성을 보인다. 물/시멘트 배합비가 2.0 이상일 경우, 주입 효율은 높으나 낮은 점성으로 그라우팅 보강 효과가 감소될 수 있다. 따라서, 현장조건에 따라 물/시멘트 배합비를 적절하게 결정하는 것이 중요하다.

3.2 주입압력 변화에 따른 영향

물/시멘트 배합비 1.0과 2.0인 경우에서 주입압력이 100 kPa, 500 kPa, 1,000 kPa로 변화함에 따른 주입성능을 확인하였다(Fig. 5). Fig. 3과 같이 초기 주입거리는 크게 증가였으며, 50초 이후 증가량이 상대적으로 줄어드는 비선형으로 증가하는 경향을 보인다. 주입압력이 100 kPa일 때 보다, 1,000 kPa일 때 50초 이후로 단위시간당 주입거리 증가량이 커진다. 물/시멘트 배합비 2.0 그라우트를 1,000 kPa로 주입하면, 절리 길이 50 m를 주입하는데 약 150초가 소요되는 것으로 분석되었다.

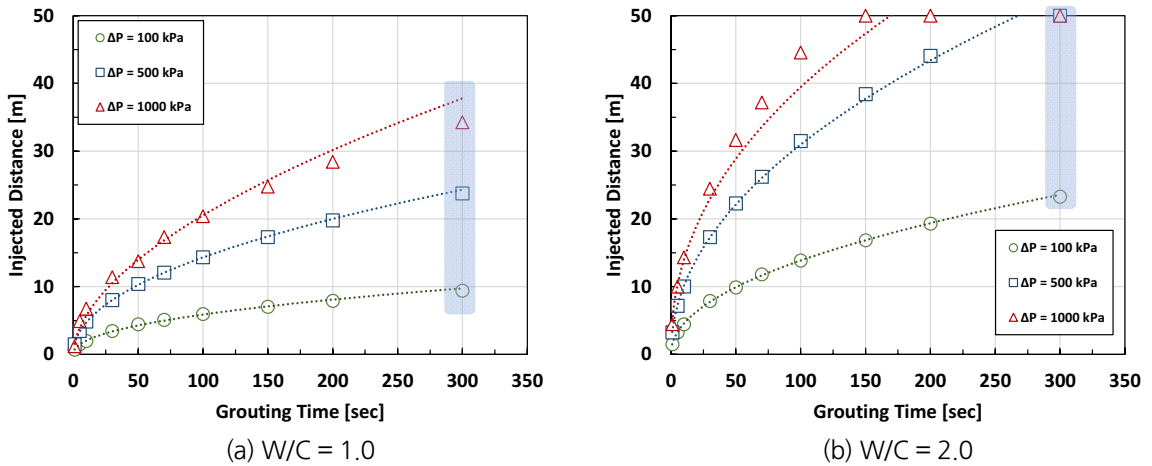


Fig. 5. Effect of injected pressure on injected distance

Fig. 6은 물/시멘트 배합비 1.0과 2.0의 주입이 완료된 시점인 300초에서의 주입결과를 보여준다. 주입압력이 증가함에 따라 주입 소요시간이 감소하는 경향을 보인다. 물/시멘트 배합비 1.0에서 주입 300초 후, 주입압력 100 kPa일 때의 주입거리는 9.4 m, 500 kPa일 때 23.8 m, 1,000 kPa일 때 34.3 m에 해당하였다. 주입압력이 100 kPa에서 500 kPa로 5배 증가하였을 때 주입거리는 9.4 m에서 23.8 m로 약 2.5배 증가하였고, 100 kPa에서 1,000 kPa로 10배 증가하였을 때 주입거리는 9.4 m에서 34.3 m로 약 3.6배 증가하였다.

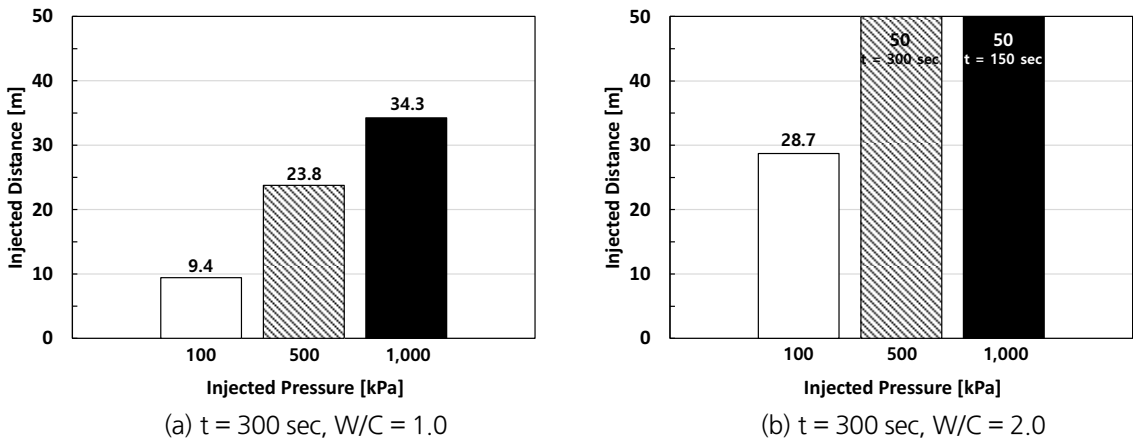


Fig. 6. Injected distance at 300 sec with (a) W/C = 1.0 and (b) W/C = 2.0

물/시멘트 배합비가 2.0일 경우, 주입 후 300초에서 주입압력 100 kPa일 때의 주입거리는 28.7 m이며, 500 kPa일 때 50 m로 그라우팅의 주입이 완료되었다. 1,000 kPa의 경우, 주입시간 150초에 목표 절리길이 50 m에 도달

하였다. 수치해석 암반절리 모델의 길이가 50 m임을 감안하였을 때, 실제 주입거리는 50 m를 초과할 것으로 예측된다. 이와 같이 실제 절리의 변형이 발생하지 않는 범위에서 그라우팅 주입압력을 증가시키면, 주입 완료시간이 감소하여 전체 시공시간을 단축시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 주입유량 변화에 따른 영향

본 연구에서는 물/시멘트 배합비 1.0과 4.0에 대하여 주입유량 1, 2, 5 mL/min 조건에서 그라우팅 수치해석을 수행하여 주입거리를 분석하였다(Fig. 7). 실제 수치해석에서는 그라우팅 압력으로 입력되기 때문에 각 유량에 해당하는 압력 변환이 필요하다. 그라우팅을 일정한 유량으로 주입하였을 때, 시멘트 유체가 받게 되는 압력은 Hagen-Poiseuille 식에 의해 주입거리가 증가함에 따라 함께 증가한다. 따라서 주입유량으로 해석을 진행할 때 주입실험과의 결과 비교를 위해 5 m까지 각 0.5 m 간격으로 각 구간에서의 주입압력을 산정하여 수치해석에 반영하였다. 이후 그라우팅 주입거리 5 m에 도달한 시간이 300초 이하인 물/시멘트 배합비는 주입경향성 확인을 위해 특정 주입시간(50, 70, 100, 150, 200, 300초)에서의 결과만을 도출하였다.

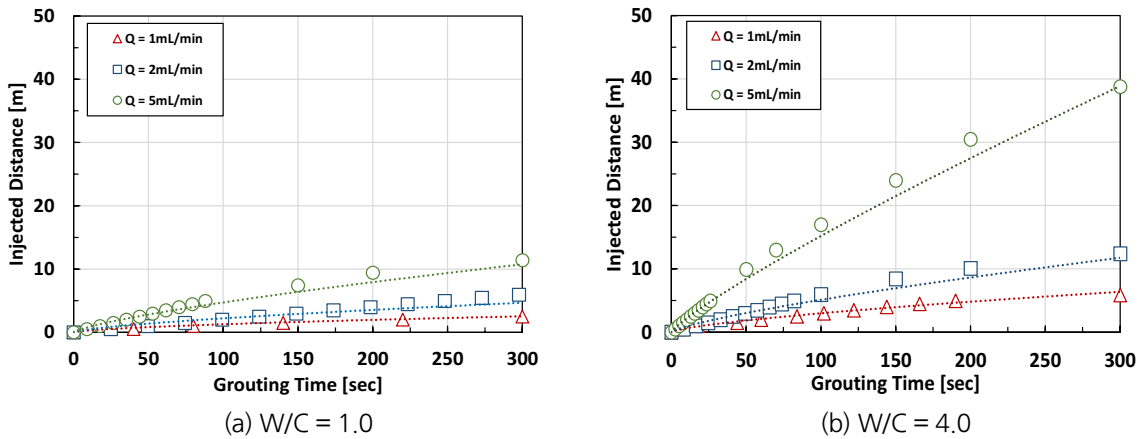


Fig. 7. Effect of flow rate on injected distance

Fig. 7은 물/시멘트 배합비 1.0과 4.0을 정량으로 주입했을 때의 수치해석 결과이다. 정압으로 주입했을 때는 주입 초기 50초 이전까지는 시간당 주입거리가 크게 증가하였으나, 50초 이후부터 시간당 주입거리의 증가 추세가 감소하였다. 그에 비해 정량으로 주입했을 때는 주입 후 50초가 경과한 이후에도 주입거리가 일정하게 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 정량주입에서 주입거리가 증가함에 따라 그라우팅에 가해지는 압력이 증가하기 때문이다. 물/시멘트 배합비 1.0과 4.0을 비교하였을 때, 시멘트의 점성도가 큰 1.0이 4.0에 비해 주입 소요시간이 유량 1 mL/min에서는 20%, 2 mL/min에서는 108.3%, 그리고 5 mL/min에서는 239.1% 증가하였다.

물/시멘트 배합비 1.0에서 1 mL/min으로 주입하였을 때, 주입유량은 적고 점성은 높아 300초 주입이 종료되었

음에도 5 m에 도달하지 못한 것으로 분석되었다. 반면 물/시멘트 배합비 4.0는 점성도가 낮기 때문에 주입성능은 높아진다. 물/시멘트 배합비 4.0에서는 모든 유량에서 주입 경과 300초 이내에 5 m까지 도달하였다. 주입유량이 1 mL/min에서 2 mL/min으로 2배 증가했을 때, 5 m에 도달하기 위한 시간은 166초에서 74초로 소요시간이 약 2.2배 감소하였다. 주입유량이 1 mL/min에서 5 mL/min으로 5배 증가했을 때, 5 m에 도달하기 위한 시간은 166초에서 23초로 소요시간은 약 7.2배 감소하였다.

4. 그라우팅 주입 실험을 통한 수치해석 결과 검증

4.1 암반 그라우팅 주입 실내 모사실험

본 연구에서 구축한 수치해석 모델의 정확도를 검증하기 위해 암반의 단일절리를 모사한 타이곤 튜브를 이용하여 그라우팅 주입실험을 수행하였다(Fig. 8). 주입실험에 사용된 튜브는 내경 0.5 mm 길이 3 m이다. 12 mL 용량의 실린지 펌프를 이용하여 상온에서 마이크로 시멘트를 주입하였다. 실린지 펌프에서 1 mL/min의 일정한 유량으로 타이곤 튜브 내에 주입되도록 설정하여 실험을 진행하였다. 물/시멘트 배합비는 수치해석과 동일한 1.0, 2.0, 4.0로 결정하였다.



Fig. 8. Experimental setup of grouting injection

4.2 실험 결과와 수치해석 결과 비교 분석

수치해석 결과를 검증하고자 실내실험 결과와 비교 분석하였다. 수치해석 결과는 실험결과와의 비교를 위해 최종 주입거리를 3 m로 설정하였다. 물/시멘트 배합비 1.0 실험에서, 1 m, 1.75 m 구간에서 막힘 현상이 발생했음을 확인하였다(Fig. 9). 이는 물/시멘트 배합비 1.0은 높은 점성 특성으로 빠른 시간에 경화되기 때문이다. 물/시멘트 배합비 2.0과 4.0에서는 막힘 현상 없는 주입이 가능함을 확인하였다.

물/시멘트 배합비 1.0을 이용한 주입실험에서, 막힘 현상이 발생하기 전인 1 m를 기준으로 수치해석 결과와 비교하였다. 1 m에 도달하기 위한 그라우팅 주입시간은 실험결과에서 90.4초가 소요되었고, 수치해석 상으로는 80

초가 소요되었다. 물/시멘트비 1.0에서는 실험과 수치해석 결과 간의 차이가 11.5% 발생하는 것으로 분석되었다. 실험결과에서 막힘 현상이 발생하지 않은 물/시멘트 배합비 2.0과 4.0에서는 3 m를 기준으로 도달한 시간을 비교하였다. 물/시멘트 배합비 2.0의 주입실험 결과는 104.6초가 소요되었고, 수치해석 결과로는 110초가 소요되었으며 오차율은 4.9%이다. 물/시멘트 배합비 4.0에서 주입실험의 결과는 107.3초, 수치해석 결과는 102초가 소요되었고 이 두 결과의 오차율은 4.9%로 물/시멘트비 2.0과 유사한 결과가 도출되었다. 물/시멘트 배합비 2.0과 4.0에서는 수치해석과 실제 실험 간의 결과 차이가 5% 이내로 1.0과 비교하여 더 정확한 결과를 보였다. 본 연구 수치해석 모델을 통해 물/시멘트 배합비 2.0과 4.0에서의 주입거리 설계를 수행한다면 충분히 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

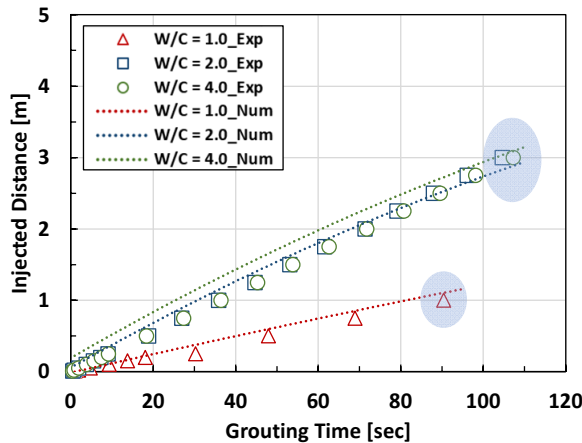


Fig. 9. Comparison of injected distance with time between experimental and numerical results

5. 결론

본 연구에서는 시멘트 그라우팅의 주입변수에 따른 단일절리 주입성능을 수치해석을 통해 분석하였으며, 실제 주입실험을 통해 수치해석 결과의 신뢰도를 높이고자 하였다. 본 연구의 주요결과는 아래와 같다.

1. 단일절리 암반 모델에서의 시멘트 그라우팅 주입재의 주입 경향성은 단위 시간당 주입거리가 감소하는 비선형으로 증가하는 경향을 보인다. 그라우팅 주입재의 물/시멘트 배합비는 증가할수록 주입거리는 증가한다. 물/시멘트 배합비가 2.0을 초과할 때 주입성능의 변화는 크지 않은 것으로 분석된다.
2. 주입압력이 100 kPa에서 500 kPa로 5배 증가할 때 주입거리는 2.5배 증가하였고, 10배인 1,000 kPa로 증가할 때 3.6배 증가하였다. 주입압력이 증가하면 그라우팅의 주입 소요시간이 감소한다. 시공현장에서 그라우팅 공법을 적용할 때 암반 절리의 변형이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다. 주입압력이 적절히 높게 유지된다면, 주입 소요시간이 감소하며 전체 시공시간을 단축시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3. 물/시멘트 배합비가 1.0일 때 수치해석 결과상으로는 막힘 현상 없이 주입이 구현되었으나, 실제 실험에서는 부분 막힘 현상이 발생하였다. 실제 현장에서 낮은 물/시멘트 배합비는 충분한 주입거리를 도달할 수 없기 때문에 주의가 필요하다.
4. 실내실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였을 때, 물/시멘트 배합비 2.0과 4.0는 결과의 오차가 5% 이내이므로 본 수치해석 결과를 신뢰할 수 있다. 따라서 실제 현장에서 마이크로 시멘트의 그라우팅 효과를 보장하기 위해서는 최소 물/시멘트 배합비는 2.0이상을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(지역대학우수과학자지원사업)의 지원(No. NRF-2022R1I1A3065299)을 받아 수행된 연구입니다.

저자 기여도

김지영은 원고 작성 및 수치해석 분석을 수행하였고, 원조현은 실내실험 및 데이터 분석을 수행하였으며, 이종원은 데이터 분석 및 원고검토를 하였고, 오태민은 연구 개념 및 설계, 원고 검토를 수행하였다.

References

1. Baek, S.H., Joo, H.W., Kwon, T.H., Han, J.T., Lee, J.H., Yoo, W.K. (2020), "Effect of permeability anisotropy on the effective radius of grout bulb in horizontal permeation grouting - numerical study", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 36, No. 11, pp. 149-156.
2. Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R. (1983), "Fundamentals of rock joint deformation", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 20, No. 6, pp. 249-268.
3. Barton, N., Choubey, V. (1977), "The shear strength of rock joints in theory and practice", *Rock mechanics*, Vol. 10, pp. 1-54.
4. Barton, N., Lien, R., Lunde, J.J.R.M. (1974), "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", *Rock mechanics*, Vol. 6, pp. 189-236.
5. Choi, S.O., Chung, S.K. (2004), "Stability analysis of jointed rock slopes with the Barton-Bandis constitutive model in UDEC", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, No. 3, pp. 581-586.
6. Hong, S.Y., Kwon, S.H., Min, K.B., Ji, S.H. (2021), "Effect of excavation and thermal stress on slip zone and aperture change around disposal hole and tunnel in fractured rock", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 31, No. 2, pp. 125-144.
7. Jeon, K.H., Ryu, D.W., Kim, H.M., Park, E.S., Song, J.J. (2010), "Numerical analysis of grout flow and

- injection pressure affected by joint roughness and aperture”, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 20, No. 2, pp. 82-91.
8. Kim, J.H., Choi, B.I. (2018), “Mechanical and microstructural analysis of cement suspension”, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 30, No. 3, pp. 33-37.
 9. Kim, J.M., 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.
 10. Kim, S.H., Kim, T.K., Choi, J.I., Yim, K.W. (2010), “A study on the injection efficiency and strength for grouting method”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 9, pp. 47-58.
 11. Koh, H.S., Cho, B.J. (2021), “Performance evaluation of injection grouting method for structure foundation ground improvement”, *Journal of Disaster and Safety*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10.
 12. 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.
 13. Lee, J.W., Kim, J.Y., Weon, J.H., Oh, T.M. (2022), “Time-dependent characteristics of viscous fluid for rock grouting”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 24, No. 6, pp. 465-481.
 14. Lee, W.H., Lim, H.D. (2007), “Analysis of fine particle transfer and shear strength increase using PFC in permeation grouting”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 23, No. 11, pp. 49-58.
 15. Nam, H.Y., Lee, W.J., Lee, C.H., Choo, H.W. (2018), “Estimation of unconfined compressive strength (UCS) of microfine cement grouted sand”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 7, pp. 5-15.
 16. Oh, J.Y., Park, H.K., Chang, S.B., Choi, H.S. (2018), “Numerical investigation on the effect of backfill grouting on ground behavior during shield TBM tunneling in sandy ground”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 2, pp. 375-392.
 17. Park, J.H., Park, Y.W. (2003), “Investigation of the optimum injection pressure in pressure grouting by laboratory model tests”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 217-225.
 18. Park, J.W., Park, C.H., Lee, C.S. (2021), “Hydro-mechanical modeling of fracture opening and slip using grain-based distinct element model: DECOVALEX-2023 Task G (Benchmark Simulation)”, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 31, No. 4, pp. 270-288.
 19. Saeidi, O., Ramezanzadeh, A., Sereshki, F., Jalali, M.E. (2013a), “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.
 20. Saeidi, O., Stille, H., Torabi, S.R. (2013b), “Numerical and analytical analyses of the effects of different joint and grout properties on the rock mass groutability”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 38, pp. 11-25.
 21. Yoon, I.K., Moon, J.H., Lee, J.S., Kim, Y.K. (2021), “Characteristics of high-viscosity grouting materials for rock joint reinforcement of deep tunnel”, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 22, No. 12, pp. 59-63.