

암반 그라우팅 주입 설계변수가 주입성능에 미치는 영향의 수치해석적 평가

이종원, 김형목*, Mahmoud Yazdani, 박익섭

Influence of Design Parameters of Grout Injection in Rock Mass using Numerical Analysis

Jong Won Lee, Hyung Mok Kim*, Mahmoud Yazdani, Eui-Seob Park

Abstract In this paper, a numerical analysis of one-dimensional viscous fluid flow in a rock joint using UDEC code is performed to evaluate the effect of design parameters on injection performance. We consider injection pressure, fluid compressibility, time dependence of yield strength and viscosity of injected grout fluid, and mechanical deformation of joint as the design parameters, and penetration length and flow rate of injection are investigated as the injection performance. Numerical estimations of penetration length and flow rate were compared to analytical solution and were well comparable with each other. We showed that cumulative injection volume can be over-estimated by 1.2 times than the case that the time-dependent viscosity evolution is not considered. We also carried out a coupled fluid flow and mechanical deformation analysis and demonstrated that injection-induced joint opening may result in the increment of cumulative volume by 4.4 times of that from the flow only analysis in which joint aperture is kept constant.

Key words Viscous fluid flow, Grouting, UDEC, Injection performance, Penetration length, Injection rate

초 록 본 연구에서는 암반 절리 내 점성유체 주입시 주입 설계변수가 주입 성능에 미치는 영향을 평가할 목적으로 UDEC 프로그램을 사용하여 1차원 선형유동 해석을 수행하였다. 주입 설계변수로는 주입 압력, 유체 압축률, 주입재의 항복강도 및 점성도의 시간의존성, 주입 압력에 의한 절리의 역학적 변형을 설정하였으며, 주입재의 침투거리 및 주입 유량을 통해 주입 성능을 평가하였다. 수치해석 결과는 이론해를 통하여 파악한 주입 성능 양상과 유사한 결과를 보였다. 주입재의 항복강도 및 점성도의 시간의존성을 고려하지 않을 경우, 주입재의 누적 주입량은 시간의존성을 고려한 해석에 비하여 약 1.2배 크게 평가되었다. 또한, 수리-역학 연계해석결과로부터 주입 압력에 의한 절리의 역학적 변형이 발생하는 경우, 절리 간극이 일정한 수리유동 해석에 비하여 누적 주입량이 약 4.4배 늘어나는 결과를 보였다.

핵심어 점성유체유동, 그라우팅, UDEC, 주입 성능, 침투거리, 주입 유량

1. 서론

최근 방사성 폐기물 및 이산화탄소 심지층 처분 공간으로 심부 지하에 대한 관심이 증대하고 있다. 지하공간은 거주공간으로부터 독립되어 외부의 환경 영향을 최소화 가능한 장점을 지니기 때문에 기피현상을 보이는 사회인프라 시설을 설치하는데 특히 유리하다. 하지만, 심부 지하 암반에는 굴착 공동에 작용하는 높은 지압에 의하여 암반의 굴착 및 굴착공동의 안정성 유지

Received: Oct. 13, 2017

Revised: Oct. 19, 2017

Accepted: Oct. 19, 2017

***Corresponding Author:** Hyung Mok Kim

(Tel) +82234084387, (Fax) +82234083671

E-Mail) hmkim@sejong.ac.kr

Department of Energy & Mineral Resources Engineering,
Sejong University

등을 위해서는 점성유체인 그라우트를 주입하여 암반의 강도 특성을 인위적으로 제고할 필요성이 있다. 또한, 주변 암반의 투과특성(permeability)을 저감시킴으로써 지하 시설물의 차수 능력을 향상시킬 필요가 있다.

암반 절리 내 유체 유동은 주입공과 교차되고 연결된 불연속(discontinuous) 절리(joint)를 따라 주로 발생한다. 이에 따라 지하 굴착공동 주변에 절리가 불균질하게 분포하는 경우 주입재가 침투하지 않거나 당초 설계한 범위를 초과하여 주입이 과다하게 발생할 수 있다(Fig. 1). 또한, 암반 절리 내 점성유체의 고압의 주입 과정에서는 초기 공극 유체 압력보다 높은 압력으로 주입을 실시하기 때문에 절리의 역학적 변형이 발생하여 주입 점성유체의 유동 양상이 달라질 수 있다. 고압의 점성유체 주입으로 인해 발생하는 암반 절리 내 유효응력 변화는 기존 절리의 간극이 증가하거나 새로운 절리의 생성 등과 같은 역학적 변형을 발생시킬 수 있다(Rafi and Stille, 2014).

국내의 그라우팅 관련 연구는 지반 및 암반을 연속체로 가정한 경우가 대부분이며, 다수의 불연속면을 포함한 균열 암반을 대상으로 한 연구 결과는 제한적인 상황이다. 대표적 연구 사례로는 광산 개발과정에서의 지반침하 보강 목적으로 개발된 급결그라우트 및 뒤채움재료의 적절 주입량 산정을 위한 불연속모델 해석이 수행되었으며(Lee et al., 2009), 암반 절리 내 거칠기 특징이 그라우트재 유동에 미치는 영향에 대한 수치해석 결과가 보고된 바 있다(Jeon et al., 2010; Ryu and Sagong, 2014).

국외의 경우, 스웨덴, 노르웨이, 프랑스나 일본과 같이 기후적, 지형적 측면에서의 약점을 극복하기 위하여 터널 및 지하공간 굴착과 관련한 연구가 진행되어 왔다(Lombardi and Deere, 1993; Stille, 2012; Rafi, 2014). 균열 암반 내에서 그라우트 침투거리를 파악하기 위한 수치모델 개발 및 그라우트 주입재 성능 평가 연구

(Hassler, 1991; Mutoh et al., 1999), 그라우팅 과정 중 시멘트 그라우트의 막힘 현상을 시뮬레이션하기 위한 수치해석 기법 개발 사례 등이 있다(Eriksson et al., 2000; Aoki et al., 2006).

본 연구에서는 개별요소법(distinct element method, DEM)에 기반한 UDEC (Itasca, 2014)을 사용하여 암반 절리 내 점성유체 주입을 위한 1차원 수리-역학 거동 해석을 실시하고, 주요 주입 설계 변수가 주입 성능에 미치는 영향에 대한 수치해석적 검토를 실시하였다. 주입재의 침투거리(penetration length) 및 주입 유량(injection rate)을 주입 후 성능평가를 위한 지표로 설정하여 주입 압력, 유체 압축률, 주입재 점성도의 시간 의존성, 절리의 역학적 변형이 주입 성능에 미치는 영향을 이론해와 해석 결과를 비교·분석하였다.

2. 1차원 선형유동 모델의 이론해

시멘트 현탁액으로 대표되는 암반 그라우트 주입재의 유동모델로는 Bingham 모델이 가장 많이 사용된다. Bingham 유동모델에서의 시간에 따른 침투거리는 식 (1)과 같다.

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{dp}{dx} \frac{b^2}{12\mu_g} \left(1 - 3 \times \frac{Z}{b} + 4 \times \left(\frac{Z}{b}\right)^3\right) \quad (1)$$

여기서, I 는 유체의 침투거리(m), t 는 주입 시간(s), p 는 주입 압력(Pa), b 는 초기간극(m), μ_g 는 점성도(Pa·s)를 나타낸다. Z 는 절리 내 침투 주입재의 높이(m)이고 $Z = \tau_0 \left| \frac{dp}{dx} \right|^{-1}$ 로 유동개시를 위한 항복강도(yield strength)인 τ_0 의 존재가 일반적인 뉴턴(Newtonian) 유체와의 가장 큰 차이에 해당한다 (Fig. 2). 뉴턴 유체에서의 시간에 따른 유체의 침투거리는 $dI/dt = -dp/dx \frac{b^2}{12\mu_g}$ 와 같다.

단위 침투거리당 압력 차이는 침투거리 및 절리 내

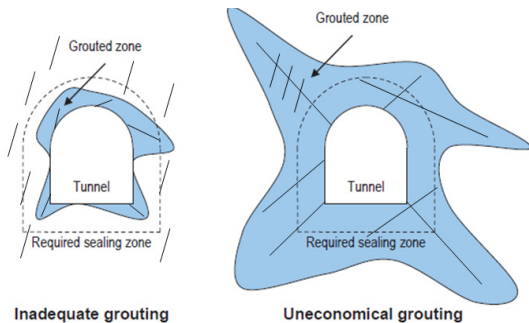


Fig. 1. Grout penetration around excavated tunnel in jointed rock mass (after Kobayashi and Stille, 2007)

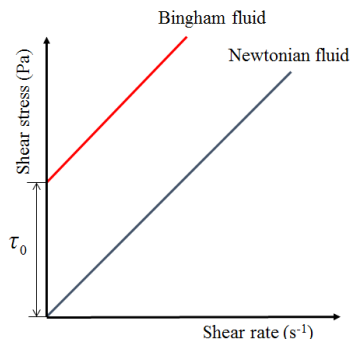


Fig. 2. The characteristics of Bingham fluid

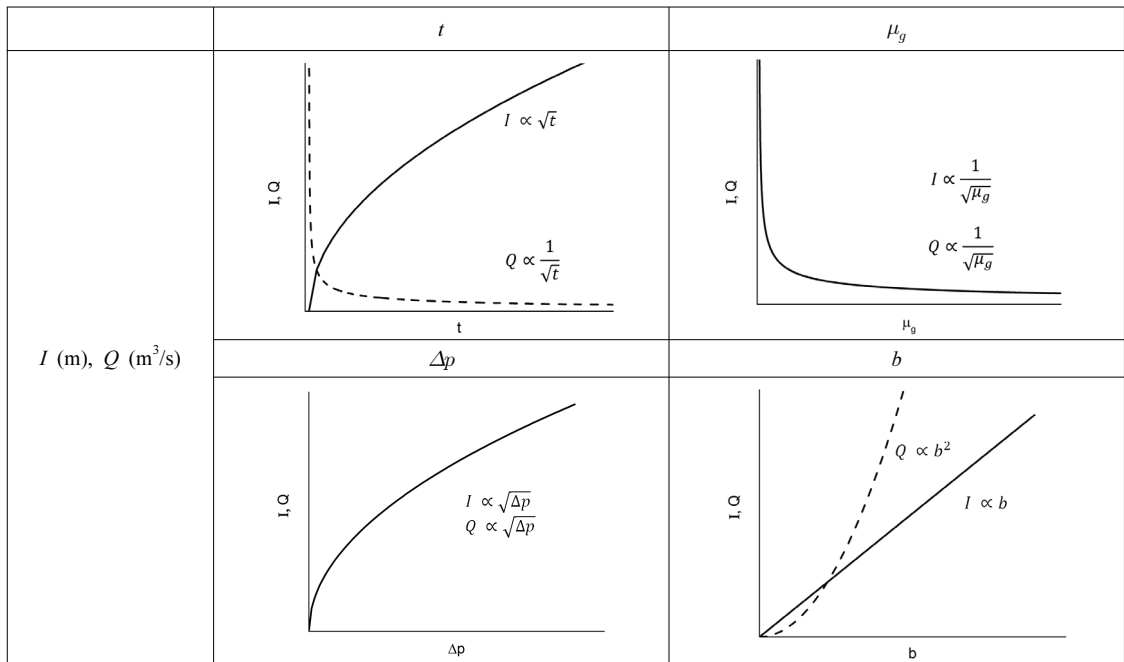


Fig. 3. Correlation of design parameters between penetration length and flow rate (solid line: penetration length (I), dashed line: flow rate (Q))

유체와 그라우트재 주입 압력의 차이(Δp)의 함수로 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{\Delta p}{I} \frac{b^3}{12\mu_g} \tag{6}$$

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{p_g - p_w}{I} = \frac{\Delta p}{I} \tag{2}$$

여기서, p_g 는 그라우트 주입압력이고 p_w 는 절리 공극유체의 초기압력을 나타낸다.

식 (1)과 (2)를 침투거리에 대하여 식 (3)과 같다.

$$I = b \sqrt{\frac{\Delta p t}{6\mu_g}} \tag{3}$$

주입재의 부피(V) 및 주입 유량(Q)은 절리의 폭(w)과 초기 간극(b)의 함수로 식 (4), (5)와 같다.

$$V = I \times w \times b \tag{4}$$

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{dI}{dt} \times w \times b \tag{5}$$

식 (3)과 (5)를 주입 유량에 대하여 정리하면 다음과 같다.

이들 이론식으로부터 침투거리 및 주입 유량과 주입 설계변수 사이의 관계는 Fig. 3과 같이 요약된다. 주입재의 침투거리는 주입 시간의 제곱근에 비례, 주입 압력의 제곱근에 비례, 초기 절리 간극에 선형 비례, 주입재 점성도의 제곱근에 반비례한다. 반면, 주입 유량은 주입시간의 제곱근에 비례, 주입 압력의 제곱근에 비례, 초기 절리 간극의 제곱에 비례, 주입재 점성도의 제곱근에 반비례하는 결과를 보인다.

3. 수치해석개요

암반 절리 내 점성유체는 불연속 절리를 통해 유동한다. 따라서, 절리 암반 내 주입재 거동을 모사하고 주입 성능을 예측하기 위해서는 개별 절리의 기하학적 특징과 분포 특성을 재현할 수 있는 불연속체 유동 해석모델을 사용하는 것이 효과적이다. 또한, 주입재의 고압 주입 과정에서는 암반 절리 내 응력 변화로 기존 절리의 확장 및 새로운 절리의 생성 등과 같은 역학적 변형이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 UDEC 프로그램을

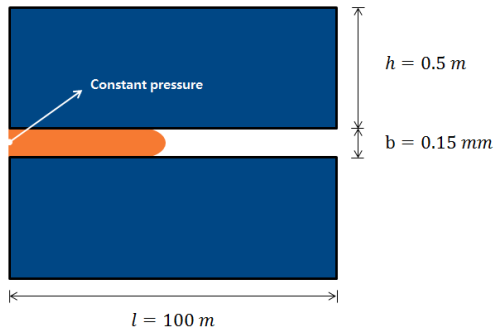


Fig. 4. Model for numerical simulation of viscous fluid injection in a single rock joint (Lee, 2017)

이용하여 수리-역학 연계해석을 실시하고 암반 절리 내 점성유체 주입 설계변수의 주입 성능에의 영향을 분석하였다.

3.1 수치해석 모델 및 조건

본 연구에서 사용한 점성유체 주입에 따른 주입 성능 평가를 위한 기본 해석모델은 단일 절리 내에서의 1차원 선형유동(linear flow)에 해당한다(Fig. 4). 해석모델에서 절리의 초기 간극은 0.15 mm, 절리의 길이는 100 m에 해당한다.

기본 해석에 사용된 주요 물성은 Table 1과 같다. 기본 해석에서는 점성유체 주입조건으로 일정 압력(constant pressure) 주입조건을 설정하고 주입압력은 3 MPa로 하였다. 절리 상하부는 불투수성 암석 블록으로 주입 유체

는 절리를 통해서만 이동하며, 절리 내부는 건조 상태를 가정하여 모델링하였다.

3.2 기본 해석 결과

기본 해석에서는 주입 지속시간 30분($t = 1,800$ s) 동안의 점성유체 주입과정에서 절리 내 주입재의 침투거리 및 주입 유량을 이론해의 결과와 비교하였다(Fig. 5). 이론해에서는 주입재의 침투거리 및 주입 유량이 각각 주입시간의 제곱근에 비례 및 반비례하여(Fig. 3), 기본 수치해석 결과에서도 이론해와 매우 유사한 결과를 보였다. 이후 해석에서는 주입 조건, 주입재의 물성, 절리의 역학적 변형과 같은 주입 설계변수의 변화가 침투거리 및 유량과 같은 주입 성능에 미치는 영향을 기본 해석 결과와 비교 분석하였다.

4. 해석결과

4.1 주입 압력이 주입 성능에 미치는 영향

주입 압력에 따른 주입재의 침투거리와 주입유량 변화를 파악할 목적으로 주입 압력을 6 MPa로 설정한 결과를 기본해석과 비교하였다(Fig. 6). 이는 기본 해석($p = 3$ MPa)의 2배에 해당하는 주입 압력이다. 주입 압력을 2배로 증가시킬 경우, 주입 개시 1,800초 후 주입재 침투거리의 증가 비율($84\text{ m}/58\text{ m} \approx \sqrt{2}$)과 주입유량 증가 비율($3.389 \times 10^{-6}\text{ m}^3\text{s}^{-1} / 2.399 \times 10^{-6}\text{ m}^3\text{s}^{-1} \approx \sqrt{2}$)은 각각 주입 압력 증가비의 제곱근($\sqrt{6 \div 3}\text{ MPa} \approx \sqrt{2}$)에 비례하는 결과를 보였다. 이는 이론해를 통한 연구에서 파악한 결과와 동일한 결과에 해당한다. 또한 주

Table 1. Material properties used as a reference case for the numerical analysis

Intact rock block properties	
Density [kg/m^3]	3,000
Bulk modulus [GPa]	10
Shear modulus [GPa]	3
Fluid properties	
Density [kg/m^3]	1,290
Bulk modulus [GPa]	2
Viscosity [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	0.0056
Yield strength [Pa]	0.296
Joint properties	
Normal stiffness [GPa/m]	3
Shear stiffness [GPa/m]	1
Residual hydraulic aperture [mm]	0.1
Aperture at zero normal stress [mm]	0.15

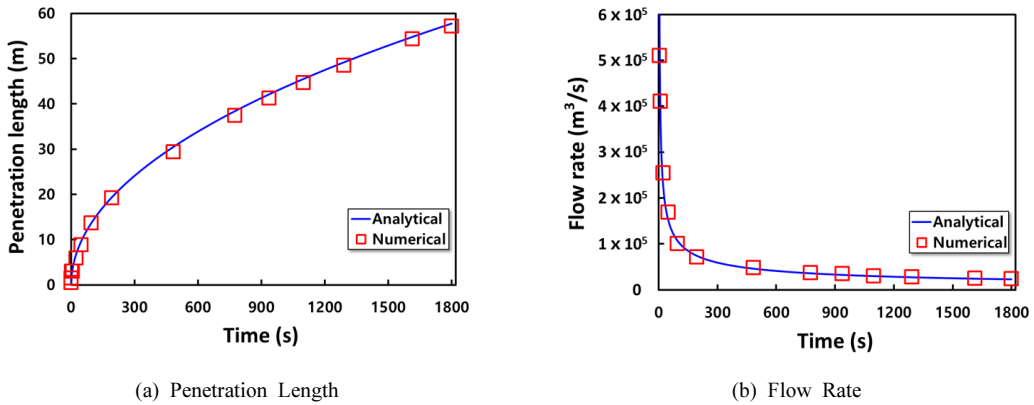


Fig. 5. Results of the base case simulation

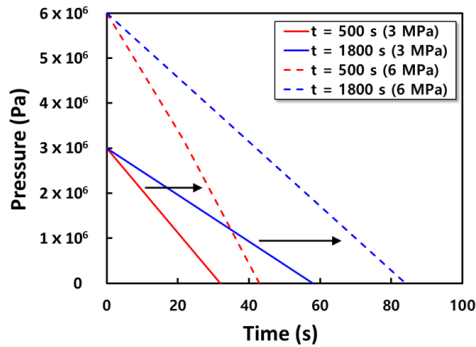
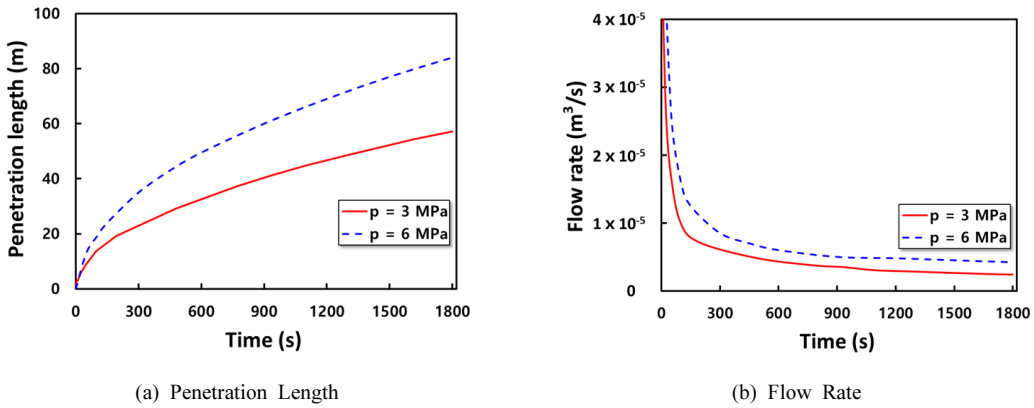


Fig. 6. The influence of injection pressure on the grout injection performance

입 압력이 3 MPa, 6 MPa일 때 모두 절리 내 압력은 주입 후 시간 경과에 따라 주입재의 침투거리가 증가하고 주입유체 압력은 선형적으로 감소하는 양상을 확인할 수 있다(Fig. 6c). 따라서, 주입 압력에 비례하여 주

입재의 침투거리는 증가하고 주입재 침투 영역 내에서 압력감소 거동은 주입 시간 및 주입 압력에 상관없이 선형적임을 알 수 있다.

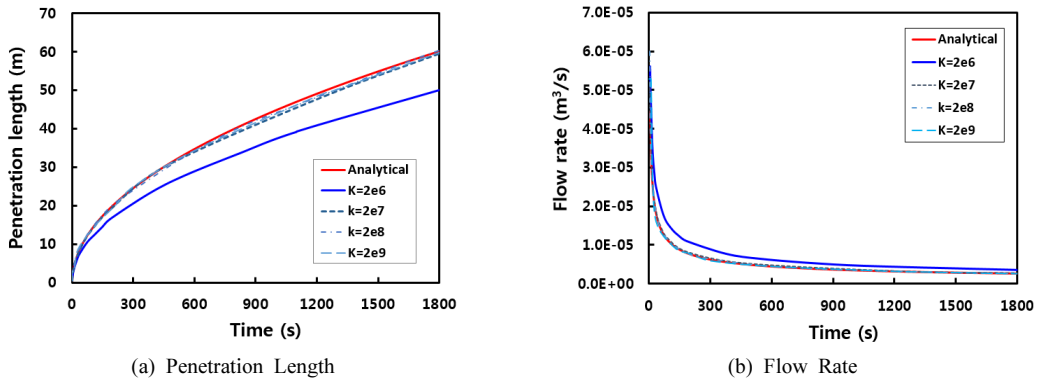


Fig. 7. The influence of fluid compressibility on the grout injection performance

4.2 유체의 압축률이 주입 성능에 미치는 영향

Fig. 7은 유체의 압축률(compressibility)이 주입재의 침투거리와 주입유량에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 압축률과 체적계수(bulk modulus, K)는 역수 관계에 있으므로, 해석에서는 체적계수를 변화시켜가며 침투거리와 유량 변화를 파악하였다. 유체의 체적계수가 2.0E6 이상인 압축성 조건에서는 침투거리 및 유량 모두 이론해와 큰 차이를 보이지 않는다. 이후 해석에서는 계산에 소요시간이 상대적으로 짧은 비압축성 유체의 체적계수값 2.0E9 조건에서 해석을 실시하였다.

4.3 주입재 물성의 시간의존성이 주입 성능에 미치는 영향

시멘트 그라우트 주입재는 양생이 진행됨에 따라 항복강도 및 점성도가 점진적으로 증가한다. 기본 해석에서는 주입재의 항복강도 및 점성도를 일정한 것으로 가정하였다. 본 해석에서는 주입재의 항복강도 및 점성도가 주입 후 경과시간의 함수로 증가하는 모델(Kobayashi and Stille, 2007)을 적용하여 해석을 실시하였다(Fig. 8). 해석에 사용된 주입재의 항복강도 및 점성도는 지수 함수로 표현되며, 주입 초기($t = 0$ s)에는 각각 0.296 Pa, 0.0056 Pa·s이며 주입 종료 단계($t = 1,800$ s)에는 각각 0.608 Pa, 0.012 Pa·s로 초기 값보다 약 두 배 증가하는 모델이다.

점성도의 시간의존성을 고려한 해석에서는 그렇지 않은 경우에 비하여 주입재의 침투거리 및 주입 유량이 감소하는 것으로 예측되었다(Fig. 9). 본 해석모델 결과에서는 주입 종료 시점에 침투거리는 약 18% 감소하고, 주입 유량도 약 45%까지 감소하는 결과를 보였다. 이는 주입재 물성의 시간의존성을 반영하지 않은 설계에서 주입 성능을 과대 평가할 수 있음을 의미한다. 누적

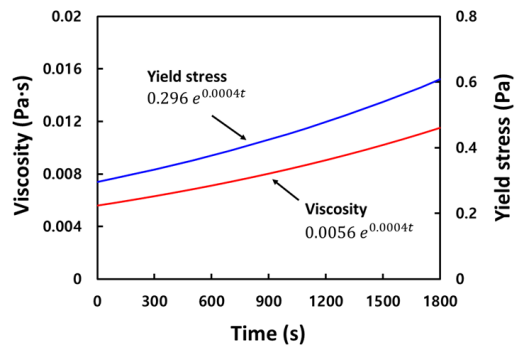


Fig. 8. Time dependent model of yield stress and viscosity of injected grout (after Kobayashi and Stille, 2007)

주입량은 시간의존성을 고려하지 않은 해석에서 약 1.2 배($0.0085 \text{ m}^3 / 0.0071 \text{ m}^3 = 1.2$) 크게 평가되었다(Fig. 9c). 이는 주입재 물성의 시간의존성을 고려하지 않을 경우 현장 시공 시 주입량을 과다하게 산정할 수 있을 뿐만 아니라 목표 그라우팅 범위에 주입재가 도달하지 못할 수 있음을 시사한다. 그라우팅 재료 및 배합 비율은 각각의 현장 상황에 따라 다르기 때문에 본 해석에 사용한 시간의존성 모델 및 해석결과는 일반적인 것은 아님에 유의해야 한다.

4.4 절리의 역학적 변형이 주입 성능에 미치는 영향

암반 절리 내 점성유체 주입 시 절리의 간극 변화가 주입 성능에 미치는 영향은 수라역학 연계해석(Hydraulic-Mechanical coupled analysis)과 기본해석에서의 주입재 침투거리 및 주입 유량과 비교분석을 통해 실시하였다(Fig. 10). 기본해석은 일정한 절리 간극에서 유동해석만을 실시한 결과에 해당한다. 주입압에 의해 간극

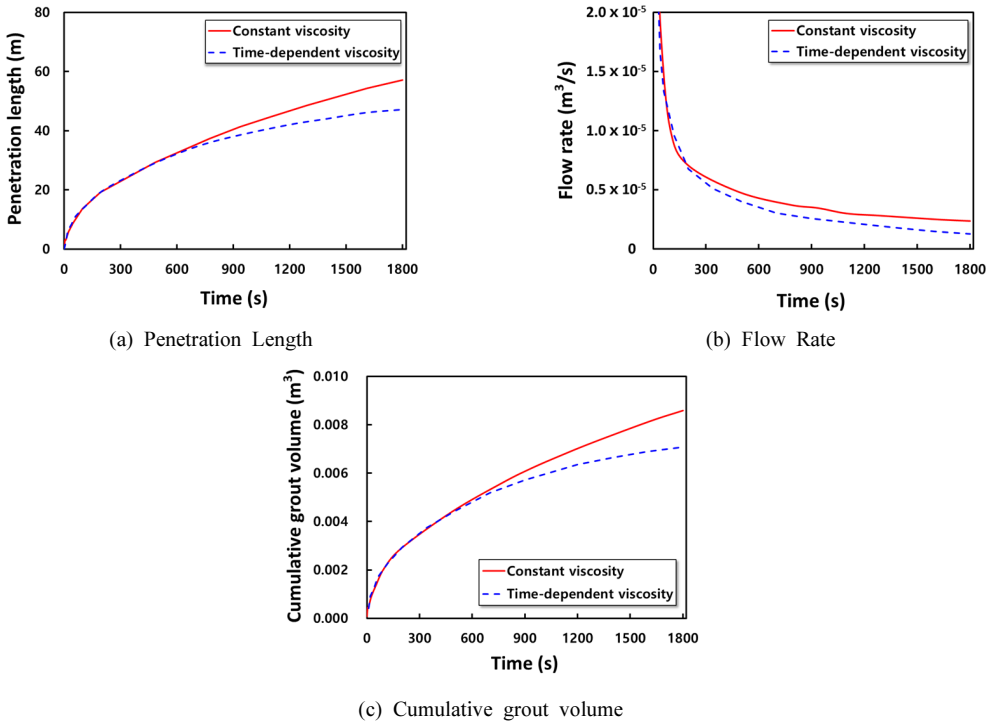


Fig. 9. Results of time-dependent viscosity model analysis

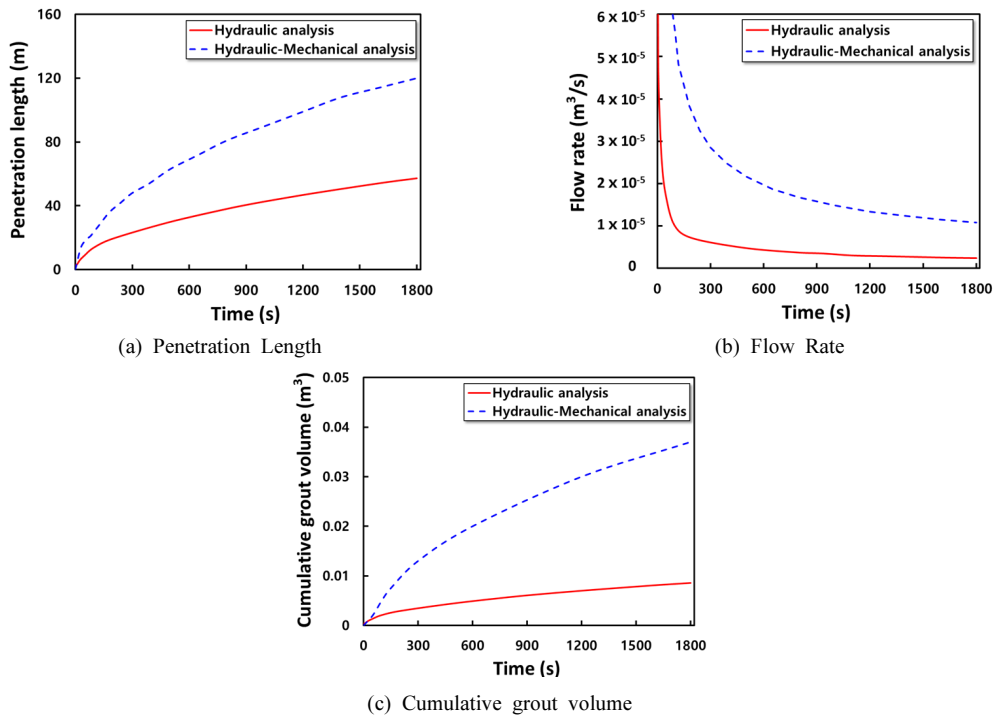


Fig. 10. Results of penetration length and flow rate in the coupled hydraulic-mechanical analysis

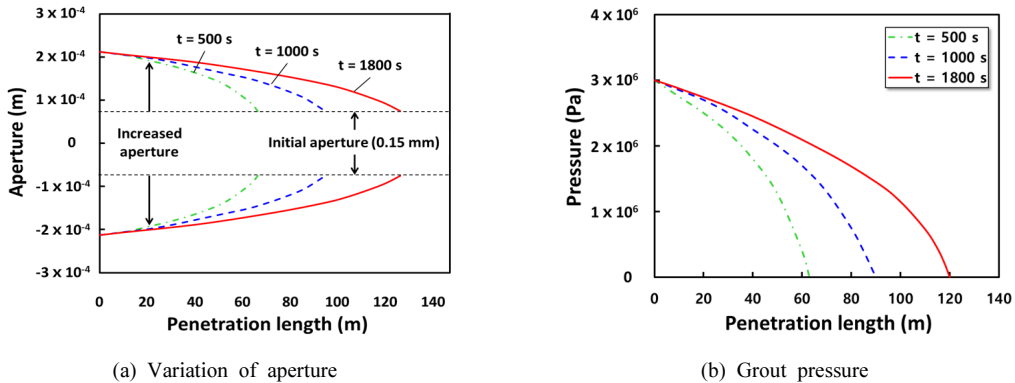


Fig. 11. Results of the coupled hydraulic-mechanical analysis

크기가 증가하는 경우, 간극 크기의 변화가 없는 단순 수리 유동 해석에 의한 예측 결과보다 주입 종료 시점($t = 1,800$ s) 기준으로 침투거리 및 주입 유량은 각각 약 2.1배, 4.6배 높게 예측되었다. 또한, 누적 주입량 비교에서는 수리-역학 해석의 경우에서 주입 종료 시점에 약 4.4배($0.0373 \text{ m}^3 / 0.0085 \text{ m}^3 = 4.4$) 많은 결과를 보였다. 현장 주입설계 시 주입 압력에 따른 절리의 역학적 변형이 무시될 경우 주입 성능을 과소 평가 할 수 있음을 의미한다.

수리-역학 연계해석에서 주입재 압력 및 유량 변화는 기본 해석과 달리 비선형적인 양상을 보인다(Fig. 11). 이는 수리-역학 해석에서 주입압의 영향으로 최초 간극 크기가 0.15 mm에서 주입지점에서 최대 0.42 mm까지 비선형적으로 증가함에 따라 침투거리, 침투거리 내 압력 및 유량 역시 비선형적 변화 양상을 보인다. 따라서, 주입재 압력 수준에 따라서는 수리-역학 연계해석을 이용한 절리의 역학적 변형을 고려한 주입재 침투 성능 평가가 필요하다.

5. 결론

온실가스의 심지층 처분, 환경위해폐기물의 지하저장, 심부지열에너지개발, 에너지 지하비축 저장 등 친환경 미래에너지 확보와 연계하여 심부 지하공간 활용 및 개발에 대한 사회적 필요성이 증가하고 있다. 이러한 지하공간의 안전하고 경제적 활용을 위해서는 활용 목적에 부합하도록 그라우팅을 통해 대상 암반의 강도 및 투수특성을 인위적으로 개선할 필요가 있다.

본 연구에서는 UDEC 에서의 점성유체 유동 모델과 암석 절리의 역학적 변형 해석을 연계하고 암반 절리 내 그라우트재 주입 설계변수가 주입 성능에 미치는 영

향을 파악하였다. 주입 성능에 미치는 주요 설계변수는 주입 압력, 유체 압축률, 주입재 점성도의 시간의존성, 절리의 역학적 변형을 고려하였다.

암반 절리에의 점성유체 주입 시 주입재의 침투거리 및 주입 유량은 이론해를 이용한 연구와 마찬가지로 주입 압력의 증가비의 제공근에 비례하여 증가하는 것으로 파악되었다. 주입 후 시간 경과에 따른 점성도의 증가 및 주입압에 의한 절리 간극의 변화를 고려하지 않을 경우 이론해와는 큰 차이를 보였다. 시멘트 주입재의 경화에 따른 점성도 증가를 고려하지 않은 해석에서는 주입 종료 시점 기준 누적주입량은 약 1.2배 크게 평가되었으며, 고압의 주입압에 의한 절리 간극 증가를 포함한 수리-역학 연계해석에서는 수리 유동만을 고려한 해석에 비해 누적주입량이 약 4.39배 늘어나는 결과를 보였다.

본 연구에서는 단일 절리 내 1차원 수리-역학 해석만을 진행하였다. 본 연구 결과를 통해 파악된 주입 설계변수와 침투거리 및 주입 유량 간의 상관관계를 바탕으로 다차원 균열망 해석 모델로 확장하고 절리면 거칠기 및 방향성 등의 상세 지질구조를 반영한 추가 연구를 수행할 예정이다.

사 사

이 논문은 이종원의 2017년도 석사학위 논문의 일부이며 한국지질자원연구원의 주요사업 ‘시추공 기반 심지층 특성규명 InDEPTH 요소기술 개발(과제번호: GP2017-16)’의 일환으로 수행되었습니다. 저자 중 일부는 2017년도 한국연구재단 이공분야기초연구사업(과제번호: NRF-2017 R1A2B4002280)의 지원을 받았습니다.

References

1. Aoki, K., Mito, Y., Nakamura, Y., Inoue, Y., 2006, Application of dynamic injection technique for low-permeable rock mass, 35th Symposium of Rock Mechanics 2006, JSCE, 243-248.
2. Eriksson, M., Stile, H., Andersson, J., 2000, Numerical calculations for prediction of grout spread with account for filtration and varying aperture, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15(4), 353-364.
3. Hassler, L., 1991, Grouting of Rock: Simulation and classification, Ph.D. Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology.
4. Itasca, 2014, Universal distinct element code, UDEC Version 6 User's Guide, Minneapolis, Minnesota, USA.
5. Jeon, K. H., Ryu, D. W., Kim, H. M., Park, E. S. and Song, J. J., 2010, Numerical analysis of grout flow and injection pressure affected by joint roughness and aperture, Tunnel and Underground Space, Vol. 20(2), 82-91.
6. Kobayashi, S., Stille, H., 2007, Design for rock grouting based on analysis of grout penetration analysis, SKB Report R-07-13.
7. Lee, J.W., 2017, Performance analysis on the design parameters of viscous fluid penetration in rock joint, Ms.C. Thesis, Sejong University, Seoul, Korea.
8. Lee, B. Y., Jeon, S. W., Kim, T. H., Cho, J. W., Kim, K. I., Kim, T. H., Kim, S. L., 2009, A Study on the Determination of Grout Injection Volume according to the Angle of Mine Cavity, Tunnel and Underground Space, Vol. 19(2), 107-122.
9. Lombardi, G., Deere, D., 1993, Grouting Design and Control Using the GIN Principle, International Water Power and Dam Construction, Vol. 45(6), 15-22.
10. Mutoh, K., Kikuchi, K., Hirano, I., Mito, Y., 1999, Experimental study on grouting mechanism in jointed rock masses using transparent tubes, Journal of Japan Society of Dam Engineers, Vol. 9(1), 29-38.
11. Rafi, J. Y., 2014, Study of pumping pressure and stop criteria in grouting of rock fractures, Ph.D, Dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
12. Rafi, J. Y., Stille, H., 2014, Control of rock jacking considering spread of grout and grouting pressure, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 40, 1-15.
13. Ryu, S. H., Sagong, M., 2014, Study on the Estimation of Pressure loss Coefficient of Grout Flow according to the JRC using CFD, Proceedings of the Korean Society for Railway, 1501-1506.
14. Stille, H., 2012, Rock grouting in tunnel construction-models and design, ISRM International Symposium-EUROCK 2012, International Society for Rock Mechanics.

이종원



2015년 세종대학교 공과대학 에너지자원
공학과 공학사
2017년 세종대학교 대학원 에너지자원
공학과 공학석사

Tel: 031-995-0852
E-mail: leejongwon@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 전임연구원

Mahmoud Yazdani

1992년 Tehran University 공학사
1995년 Tehran University 공학석사
2002년 The University of Tokyo 공학
박사

Tel: +98-21-82883343
E-mail: myazdani@modares.ac.ir
현재 Tarbiat Modares University 조교수

김형목



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2002년 동경대학교 대학원 사회기반
공학과 공학박사

Tel: 02-3408-4387
E-mail: hmkim@sejong.ac.kr
현재 세종대학교 에너지자원공학과
부교수

박의섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 전략기술연
구본부 심지층연구단장