

절리 거칠기와 간극 변화에 따른 그라우트 유동과 주입압에 관한 수치해석적 연구

전기환¹⁾, 류동우^{2)*}, 김형목²⁾, 박의섭²⁾, 송재준¹⁾

Numerical Analysis of Grout Flow and Injection Pressure Affected by Joint Roughness and Aperture

Ki-Hwan Jeon, Dong-Woo Ryu, Hyung-Mok Kim, Eui-Seob Park, Jae-Jun Song

Abstract Grouting technology is one of the ground improvement methods used in water controlling and reinforcement of rock mass in underground structure construction. It is necessarily required to find out the characteristics of grout flow through discontinuities in a rock mass for an adequate grout design and performance assessment. Laminar flow is not always applicable in simulating a grout flow in a rock mass, since the rock joints usually have apertures at a micro-scale and the flow through these joints is affected by the joint roughness and the velocity profile of the flow changes partially near the roughness. Thus, the influence of joint roughness and aperture on the grout flow in a rough rock joint was numerically investigated in this study. The commercial computational fluid dynamics code, FLUENT, was applied for this purpose. The computed results by embedded Herschel-Bulkley model and VOF (volume of fluid) model, which are applicable to simulate grout flow in a narrow rock joint that is filled with air and water, were well compared with that of analytical results and previously published laboratory test for the verification. The injection pressure required to keep constant injection rate of grout was calculated in a variety of Joint Roughness Coefficient (JRC) and aperture conditions, and the effect of joint roughness and aperture on grout flow were quantified.

Key words Grout injection pressure, Micro channel, Herschel-Bulkley model, VOF, Aperture, Joint roughness

초 록 그라우팅 공법은 지하 내 구조물을 건설 시 유입되는 지하수를 억제하거나 암반의 강도를 증대시킬 목적으로 널리 이용되는 암반 개량공의 일종이다. 암반 내 불연속면을 따라 유동하는 그라우트의 유동 특성을 파악하는 것은 이러한 그라우팅 설계 및 그 효과를 예측하는데 필수적이다. 기존의 그라우트 유동 연구에서 그라우트 유동을 층류 유동으로 가정해 왔으나, 마이크로 스케일의 간극을 가지는 좁은 절리 틈새 내에서의 유체 유동은 절리 거칠기의 영향을 받아 유동의 속도 단면이 거칠기 부분에서 변하기 때문에 일반적인 층류 유동으로 묘사하는 데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 거칠기를 가지는 절리 내의 그라우트 유동에 절리 거칠기와 간극이 미치는 영향을 수치해석을 이용하여 조사하였다. 수치해석을 위해 전산유체유동해석 코드인 FLUENT 코드를 이용하였으며 FLUENT 코드에서 제공하는 Herschel-Bulkely 모델과 VOF(volume of fluid) 모델을 적용하여 물과 공기로 채워진 좁은 절리 틈새 내의 그라우트 유동을 묘사하였다. 묘사된 결과를 그라우트 유동을 위해 제시된 분석해와 기존의 실험실 그라우트 주입 실험 결과와 비교하여 FLUENT 코드의 적합성을 검증하였다. JRC와 간극 변화에 따라 일정 그라우트 주입량 유지에 필요한 주입압을 계산함으로써 마이크로 스케일의 절리 틈새 내 그라우트 유동시 채널 벽면의 거칠기 및 채널 간극의 영향을 정량화하였다.

핵심어 그라우트 주입압, 마이크로 채널, Herschel-Bulkley model, VOF, 간극, 거칠기

¹⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부

²⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

* 교신저자 : dwryu@kigam.re.kr

접수일 : 2010년 3월 8일

심사 완료일 : 2010년 4월 5일

게재 확정일 : 2010년 4월 7일

1. 서 론

일반적으로 그라우팅 공법은 지하수 차수와 암반의 강도 증대를 목적으로 적용되어 왔다. 여러 그라우트 물질 중에서 시멘트 그라우트는 비 뉴튼 유체로서 Bingham

유체의 거동을 보인다(Warner, 2004). 그라우트 주입과 관련하여 실제 주입 작업을 통한 경험적인 내용이 많이 제시되어 왔으며, Bingham 유체로서 그라우트의 유동 특성을 고려한 이론 연구도 꾸준히 진행되어 왔다.

그라우트 주입과 관련하여 초기에는 그라우트 재료의 물성과 주입압, 채널의 형상을 고려하여 최대 주입거리와 주입량을 산정하는 연구가 수행되었다. Håkansson 등(1992)은 원형관 내부에 그라우트가 주입될 때 주입압과 그라우트 물성 변화에 따른 최대 주입거리를 산정하였으며, Hässler 등(1992)은 일정한 간극을 가지는 평행 평판에 그라우트 주입시 주입량을 산정하는 방법을 제시하였다. Gustafson and Stille(1996)은 간극이 변하는 절리 틈새로 그라우트를 주입할 경우, 간극 값이 다른 여러 개의 평판을 연결한 모델을 적용하여 간극 변화에 따른 그라우트의 주입거리 및 주입량 예측에 대한 연구를 수행하였다. Barton 등(1997)은 그라우트가 유동하는 절리 채널이 거칠기 요소를 가지고 있을 때, 절리의 물리적 간극을 JRC로 고려한 수리 간극으로 바꾸어 절리의 수리전도도를 산정하고 이에 따른 그라우트 주입성에 관한 연구를 수행하였다.

앞서 언급한 그라우트 주입 연구 분야에서 그라우트 유동은 층류 유동의 형태를 가지는 것으로 고려해 왔다. 절리면에서의 압력 손실은 유동 시의 레이놀즈 수와 관련된 함수로 계산하고, 압력 손실에 대해 절리면의 JRC가 미치는 영향은 특별히 고려하지 않았다. 또한, Nazridoust 등(2006)은 암반 절리 틈 사이의 공기와 물의 유동을 층류 유동으로 모사하였으며 유동 시 발생하는 압력 손실은 절리 내 간극 변화에 따라 발생하는 유동 거리의 증가에 의한 값으로 고려하였다.

하지만 마이크로 스케일의 간극을 가지는 채널에서의 유동은 채널 표면의 거칠기 요소가 층류 유동의 속도 단면에 영향을 주어 거칠기 요소에 의한 추가적인 압력 손실을 발생시키는 것으로 알려져 있다(Engin 등, 2004). 따라서 좁은 틈새를 가지는 암반 절리 내 그라우트 유동을 마이크로 채널 유동으로 고려할 때, 그라우트의 유동에 미치는 JRC와 절리간극의 영향을 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요하다.

거칠기, 절리간극이 그라우트 유동에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 하여 채널 내부의 모든 저항 요소를 고려한 유동 현상을 계산할 수 있는 전산유체역학 코드 FLUENT를 이용하였다. 그라우트 물질의 유체 특성을 고려할 수 있는 Herschel-Bulkley 모델과 다상유체 유동 모델인 VOF의 검증에 위해 Hässler(1991)가 제시한 그라우트 유동 방정식의 속도 단면 분석해 및 Håkansson

(1987)의 실험실 실험결과를 해석결과와 비교하였다(Eriksson, 2002). 또한, 절리 거칠기와 간극의 영향을 정량화하기 위해 각 설정된 JRC와 간극의 조건을 가진 채널 내에서의 그라우트 주입 속도를 일정하게 유지하기 위한 필요 주입압을 계산하였다.

2. Herschel-Bulkley model 검증

시멘트 그라우트는 비 뉴턴 유체로서 유체 자신의 항복 응력을 고유 특성으로 가지는 Bingham 유체의 거동을 보인다. 일반적으로 Bingham 유체의 경우 항복 응력과 점성으로 유동 모델을 표현할 수 있다.

$$\tau = -\mu_B \frac{dv}{dz} + \tau_0 \quad (1)$$

여기서 τ 는 전단응력, μ_B 는 그라우트 물질의 점성, $\frac{dv}{dz}$ 는 전단율, 그리고 τ_0 는 그라우트 물질의 항복응력이다.

Bingham 유체의 유동이 발생하기 위해서는 압력구배에 의한 유체의 전단응력이 항복응력을 초과해야 한다. 단순한 채널 형상에 대해서는 그라우트 유동을 표현하는 속도 단면이 명시적인 방정식으로 제시될 수 있으며, Hässler(1991)는 그라우트 유동에 대해 다음의 가정을 공통적으로 적용하였다(Eriksson, 2002).

- 그라우트 유체는 비압축성이고 층류 유동을 가진다.
- 그라우트 유동이 일어나는 채널은 stiff 하다.
- 그라우트 유동은 한 방향으로 일어난다.
- 유동 시에 채널 벽면의 미끄러짐 현상은 없다.

직사각형 채널 내부에서 그라우트 주입액이 유동할 때의 전단응력 분포도와 속도 단면은 Fig. 1과 같다. 그라우트 유동시 채널 내부로 유입되거나 외부로 손실되는 유체가 없어 그라우트 질량은 보존되며, 채널의 공극률과 그라우트의 밀도는 일정하다. 따라서 간단한 직사각형 채널 내부에서의 그라우트 유동은 $\delta v / \delta x = 0$ 와 같이 표현할 수 있다. 이는 x축 방향으로의 속도 변화는 없는 것을 의미하고, 그라우트 유동 속도는 z축 방향을 따라 변한다. 속도 단면은 유체의 전단 응력이 Bingham 유체의 항복 응력보다 작은 영역인 유동 단면의 중간 부분에서 일정 속도를 가지는 플러그 형상을 가지며, 이 부분에서의 전단율은 0이다. 이러한 Bingham 유체의 전단 응력 분포는 Navier-Stokes 방정식을 통해서 얻어질 수 있다.

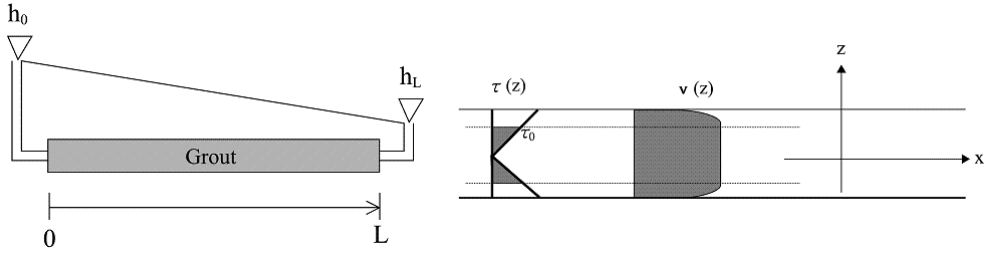


Fig. 1. Velocity profile and shear diagram of grout in a rectangular channel

$$\frac{d\tau(z)}{dz} = -\frac{dP}{dx} \quad (2)$$

식(2)를 z 축을 따라 적분하고, $z=0$ 인 지점에서 적분상수가 0인 것을 이용하여 그라우트 속도 단면에 대한 명시적인 방정식을 구할 수 있다. 또한, Bingham 유체의 속도 단면에서 플러그 길이의 절반을 Z 로 표현할 수 있으며, Z 값은 항복응력과 압력구배의 식으로 표현 가능하다.

$$Z = -\frac{\tau_0}{dP/dx} \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)을 결합하여 정리하면 속도 단면에 관한 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$-\frac{dP}{dx} \cdot Z - \mu_B \cdot \frac{dv}{dz} = -z \cdot \frac{dP}{dx} \quad (4)$$

식 (4)를 적분하면 다음 속도 단면의 일반해를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$v(z) = \frac{dP}{dx} \left(\frac{1}{2} z^2 - Z \cdot z + c \right) \cdot \frac{1}{\mu_B} \quad (5)$$

적분상수 c 는 채널 벽면($z=b/2$)에서 유동 속도가 0인 조건을 이용하여 계산할 수 있다. 속도 단면의 플러그 부분에서 가지는 최대 속도는 식 (6)과 같다.

$$v(z < Z) = v_{\max} = \frac{1}{\mu_B} \frac{dP}{dx} \left(Z \frac{b}{2} - \frac{1}{2} Z^2 - \frac{b^2}{8} \right) \quad (6)$$

일정 속도를 가지는 영역인 플러그 부분의 바깥쪽 속도 단면은 식 (7)과 같다.

$$v(z \geq Z) = v(z) = \frac{1}{\mu_B} \frac{dP}{dx} \left(\frac{1}{2} z^2 - Z \cdot z + Z \frac{b}{2} - \frac{b^2}{8} \right) \quad (7)$$

식 (6)과 (7)을 결합하여 속도 단면의 평균 속도를 구할 수 있다(Kobayashi 등, 2008).

$$\bar{v}(z) = -\frac{dP}{dx} \frac{b^2}{12\mu_B} (1 - 3Z + 4Z^3) \quad (8)$$

FLUENT 코드는 Bingham 유체의 해석을 위해 Herschel-Bulkley 모델을 지원하고 있다. Herschel-Bulkley 모델은 Bingham 유체와 Power-law 유동 효과를 결합시켜 놓은 모델로서, 전단율이 $\dot{\gamma} < \frac{\tau_0}{\mu_0}$ 일 때 매우 큰 점성을 가지는 견고한 물성을 보이는 특성을 가진다. 전단율이 점차 증가하고, 유체 내부의 전단응력이 Bingham 유체의 항복응력을 초과할 때 유동이 발생하며, 식 (9)로 표현될 수 있다.

$$\eta = \frac{\tau_0 + k \left[\dot{\gamma}^n - \left(\frac{\tau_0}{\mu_0} \right)^n \right]}{\dot{\gamma}} \quad (9)$$

여기서 k 는 consistency factor, n 은 power-law index 이다(FLUENT User's guide, 2009).

Herschel-Bulkley 모델에서 전단율에 대해 변화하는 전단응력의 변화는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 Herschel-Bulkley 모델은 consistency factor $k = \mu$, power-law index $n = 1$, 그리고 $\left(\frac{\tau_0}{\mu_0} \right) \rightarrow 0$ 으로 설정하여 Bingham 유체의 거동 모사가 가능하다(Gertzos 등, 2008).

그라우트 유동 모사를 위한 FLUENT 코드의 Herschel-Bulkley 모델의 적합성 검증을 위해 Hässler(1991)가 제시한 그라우트 유동 방정식을 통해 얻은 그라우트 유동 속도 단면 분석해와 비교하였다. 속도 단면의 비교 검증을 위하여, 길이 1 m, 절리간극 0.6 mm인 직사각형 채널을 생성하였으며, 그라우트 물성, 채널의 형상, 경계 조건은 Table 1과 같다(Eriksson, 2002).

Hässler 등(1991)가 제안한 식 (1)~(7)의 그라우트 유동 방정식으로부터 그라우트 속도 단면의 최대 속도는 Fig. 3 과 같이 0.37 m/sec으로 계산되었다. Herschel-

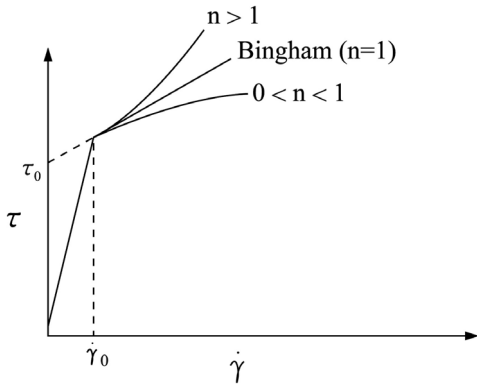


Fig. 2. Variation of shear stress with shear rate (Herschel-Bulkley model)

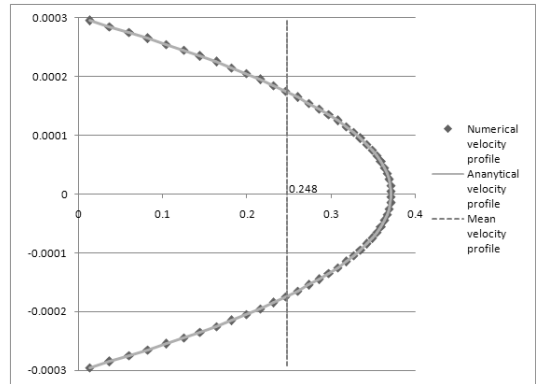


Fig. 3. Velocity profiles obtained by numerical analysis and grout flow equation

Table 1. Grout material properties, channel geometry and boundary condition

Cement paste properties		Channel geometry		Boundary condition	
Yield stress	1.3 Pa	Length	1 m	Pressure head	1 MPa
Viscosity	0.12 Pa·s	Aperture	0.6 mm		

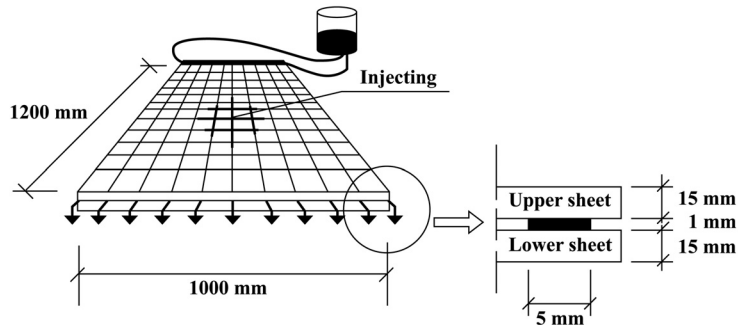


Fig. 4. Experimental set-up for grout injection by Håkansson (Eriksson, 2002)

Bulkley 모델을 통해 얻어진 그라우트 속도 단면 역시 동일한 최대 속도를 가지는 것으로 해석되었다. 두 속도 단면으로부터 계산되는 평균 속도를 비교하면 모두 0.24 m/sec의 동일한 평균 속도를 가지는 것을 확인할 수 있다.

3. 그라우트 주입 모사를 통한 VOF 모델의 검증

침투 그라우트 공법은 가장 오래되고 널리 사용되는 그라우트 기법으로 암반이나 콘크리트 구조물, 다공성 매체 내부의 절리나 균열 등을 메우는 방식으로 적용되어 왔다. 침투 그라우트 공법에서 그라우트 주입액은 절리 등의 불연속면 내부의 지하수나 공기를 밀어내며

유동하는 다상 유체 거동을 보이기 때문에 그라우트 주입 유동을 모사하기 위해서는 다상 유체 거동 메커니즘이 필요하다. FLUENT 코드는 다상 유동 해석 툴로써 VOF(Volume Of Fluid) 모델을 제공하고 있다. 그라우트 주입액의 유동 모사에 VOF 모델이 적합한지의 여부를 검증하기 위해 Håkansson(1987)이 수행한 실험실 그라우트 주입 실험 결과와 비교하였다.

그라우트 주입 실험 장치는 Fig. 4와 같이 Plexiglass 재질로 만들어진 1,200×1,000×15 mm의 규격의 두 개의 판 사이로 1×5 mm 단면을 가지는 채널을 통해 유동하는 그라우트 주입액을 관찰하기 위한 채널 네트워크를 형성하였다. 이 장치는 0.02 m/m의 수리구배를 형성하도록 수평에서 저각으로 기울어져 있다. 실험에 쓰

인 그라우트 주입액의 항복응력은 3.0 Pa, 점성은 0.035 Pas이며, 주입압은 0.48 m의 수두에 해당하는 5.6 KPa로 설정되었다. 채널 네트워크의 중앙 노드를 따라 실제 주입이 이루어졌다(Eriksson, 2002).

그라우트의 주입이 중앙 노드를 통해서 이루어지고, 실험 장치가 좌우 대칭의 형상을 가지므로, 주입 시물

레이션을 위한 격자망은 중앙 노드를 기점으로 왼쪽 부분만 형성하여 계산 해석 시간과 메모리를 감소시켰다. Fig. 5와 같이 격자망에서 오른쪽의 점선 경계는 축대칭 경계로서 이를 통해서 실제 실험과 동일 조건의 시물레이션을 수행하였다. 시물레이션에 적용된 모든 물성과 경계조건 그리고 채널 형상은 실제 실험에서의 조건들과 모두 동일하게 적용하였다.

실제 실험에서는 주입 후 2.5, 6, 22, 65, 1400 초의 시간이 경과한 후의 주입 결과가 제시되어 있다. 따라서 그라우트 주입 시물레이션 역시 실제 실험과 동일한 주입 후 2.5, 6, 22, 65, 1400 초의 시간이 경과한 후의 결과를 추출하여 실제 실험 결과와 비교하였다. Fig. 6 (a)-(e)의 좌측 그림은 VOF 코드를 통한 시물레이션 결과를, 우측 그림은 Håkansson에 의해 수행된 실험실 그라우트 주입 실험의 결과이다.

Fig. 6과 같이 실험실 실험 결과와 VOF 모델을 이용한 그라우트 주입 시물레이션 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 VOF 모델이 그라우트 유체 거동을 모사하는 모델로서 적합함을 확인할 수 있다.

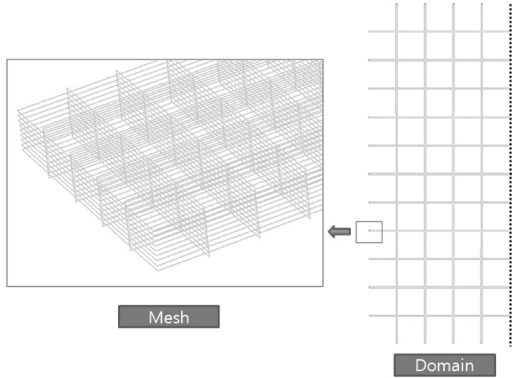


Fig. 5. Mesh for grout injection simulation

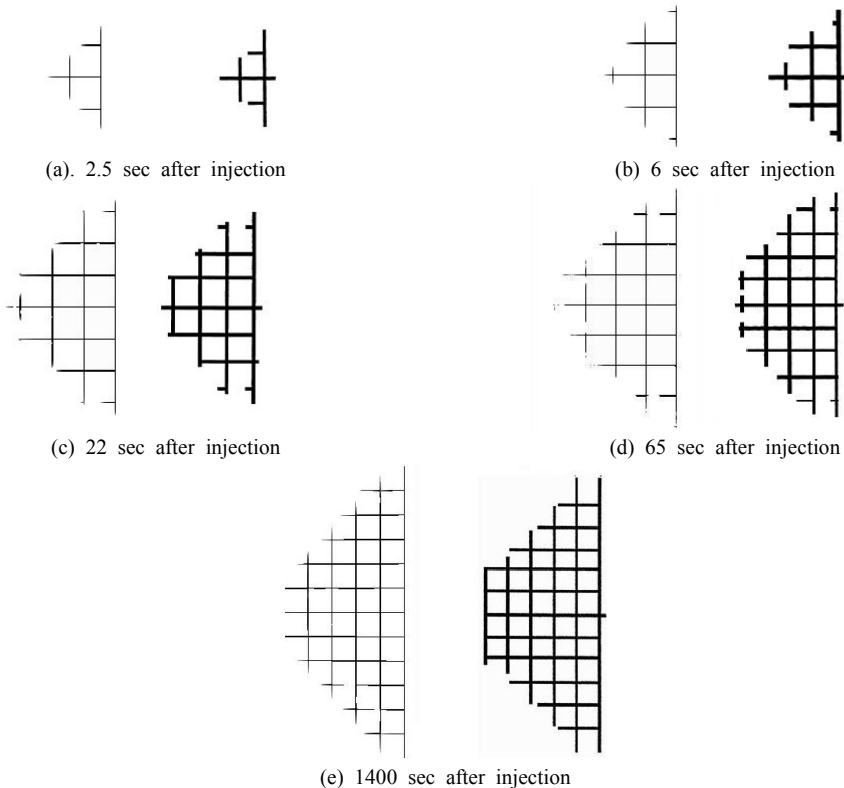


Fig. 6. Comparison of injection results: VOF model analysis (left) and Laboratory injection test results (right)

4. JRC와 절리간극을 고려한 주입압의 산정

그라우트 주입액의 유동에 JRC와 절리간극이 미치는 영향을 알아보기 위해 평균 절리간극이 0.3 mm이고 JRC 값이 2에 해당하는 2차원 절리 채널을 30개 생성하여, 3 l/min의 주입량으로 그라우트가 정량 주입될 때 요구되는 주입압을 계산하였다. 평균 절리간극 0.3 mm인 경우에 대해 JRC 값이 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20인 경우도 같은 방식을 적용하였으며, 절리간극이 0.4, 0.5, 0.6, 0.75, 0.9 mm인 경우도 역시 JRC 값을 변화시켜가며 3 l/min의 그라우트 정량 주입량에 요구되는 주입압을 계산하였다.

설정된 JRC 값을 가지도록 Z_2 파라미터를 이용하여 절리 채널을 형상화하였다. Z_2 파라미터는 절리면 스캔 프로파일에 대한 1차 미분의 RMS(root mean square) 값에 해당한다. 절리면의 거칠기 요소는 거칠기 요소가 측정된 스캔 라인의 중심선에 대한 평균 편차 값을 이용하여 정량화할 수 있다. 측정된 평균 편차 값은 식 (10)과 같이 정의되는 RMS 값으로 계산한다(Tse and Cruden, 1979).

$$RMS = \left[\frac{1}{M} \int_{x=0}^{x=M} y^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

RMS 값을 적용하여 Myers(1962)는 절리의 거칠기 요소를 정량화하기 위한 다른 파라미터를 제시하였으며 그 중의 하나가 바로 Z_2 파라미터이다. 절리 스캔 프로파일의 1차 미분의 RMS 값으로서, Z_2 파라미터는 식 (11)과 같이 이산화된 형태로 표현 가능하다.

$$Z_2 = \left[\frac{1}{M(D_x)^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

여기서 M 은 전체 스캔 라인 길이 L 를 따라 이산화한 점간 간격의 갯수, D_x 는 스캔 방향인 x 축 방향의 x 간격, $y_{i+1} - y_i$ 는 전체 스캔 라인 길이 L 를 따라 이산화한

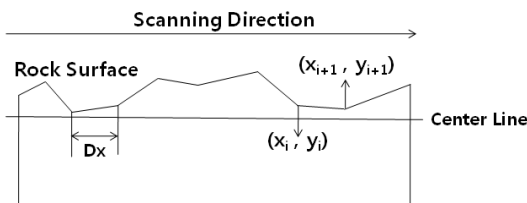


Fig. 7. Data for the calculation of Z_2 for the profile of a rock surface

절리면의 인접한 두 지점의 y 좌표값의 차를 의미한다.

Fig. 7은 1,000개의 좌표 자료를 이용해 생성한 단일 절리면을 보여준다. 평균 절리간극 0.3 mm, JRC 20인 절리 채널을 생성하기 위해 난수 발생기를 이용하여 평균과 표준편차가 각각 0.15 mm와 0.051인 2,000개의 난수를 발생시켰다. 2,000개의 난수 중에서 1,000개는 그라우트 유동을 위한 채널의 상부 절리면, 나머지 1,000개의 난수는 하부 절리면 형성에 적용하였다. 상부 절리면을 형성하기 위한 1,000개의 난수는 0부터 100 mm까지 0.1 mm의 증분을 가지는 값을 x 좌표에 대응시켜 상부 절리면의 생성을 위한 1,000개의 좌표 자료를 생성하였다. 이 좌표 자료를 이용하여 그라우트 유동을 위한 절리 채널의 상부 절리면을 발생시켰으며 나머지 1,000개의 난수에 같은 방식을 적용하여 하부 절리면을 형성하였다. 이렇게 2,000개의 난수를 이용해서 만들어진 절리 채널의 평균 간극은 0.3 mm이고, 절리 채널의 상부 절리면과 하부 절리면의 Z_2 는 각각 0.735와 0.734의 값을 가진다.

이 절리 채널들의 Z_2 에 해당하는 JRC 값을 산정하기 위해 Cravero 등(2001)이 제시한 Z_2 와 JRC 값에 대한 선형 회귀식을 적용하였다(Table 2). 절리 채널을 생성하기 위한 난수에 0.1 mm의 간격을 가지는 x 좌표들을 대입하였기 때문에 Table 2의 step 0.01 cm에 해당하는 Z_2 와 JRC의 관계식 $JRC = 24.58 + 35.41 \log Z_2$ 을 적용하여 JRC 값을 계산할 수 있다. 절리 채널의 상부 절리면과 하부 절리면의 Z_2 가 각각 0.735와 0.734인 절리면에 해당하는 JRC 값은 19.85와 19.83이며, 이는 Barton and Choubey(1977)에 의해 제시된 JRC 값 중 18 -20에 해당하는 값으로 간주할 수 있다.

상부 절리면과 하부 절리면 사이의 평균 간극은 0.3 mm이고 상하부 절리면의 거칠기 요소인 JRC 값이 20으로 생성된 절리 채널은 Fig. 8과 같다.

Table 2. Correlation equations between Z_2 and JRC (Cravero 등, 2001)

Step (cm)	Computed equations
0.01	JRC = 24.58 + 35.41 log Z_2
0.07	JRC = 25.75 + 25.04 log Z_2
0.14	JRC = 26.50 + 21.20 log Z_2
0.21	JRC = 27.45 + 21.60 log Z_2
0.3	JRC = 25.10 + 19.36 log Z_2
0.6	JRC = 29.18 + 20.67 log Z_2
1.8	JRC = 28.00 + 16.31 log Z_2
3.6	JRC = 35.80 + 18.23 log Z_2

절리간극이 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75, 0.9 mm이고 JRC 값이 0 - 20 인 절리 채널을 발생 시킨 후 FLUENT 전처리 프로그램인 GAMBIT을 이용하여 유동 해석을 위한 격자망을 생성하였다. Fig. 9 (a)는 평균 절리간극이 0.3 mm이고 거칠기가 고려되지 않은 경우의 절리 채널 격자망이며, Fig. 9 (b)는 평균 절리간극이 0.3 mm

이고 거칠기 요소가 JRC 값 20인 절리 채널 격자망이다.

격자망의 좌측 경계는 velocity inlet boundary 조건을 적용하여 절리 채널로의 정량 주입 조건을 설정하였고, 격자망의 우측 경계는 pressure outlet boundary 조건을 설정하였다. Eriksson(2002)이 제시한 값을 필요 주입압을 계산하기 위한 그라우트 주입액의 물성으로 사용하였다(Table 3).

FLUENT 코드를 이용해서 계산된 모든 경우에 대한 그라우트 필요 주입압이 Table 4에 제시되어 있으며, 절리 거칠기가 전혀 고려되지 않은 경우에 대한 거칠기 고려 시의 필요 주입압 증분이 Table 5에 제시되었다.

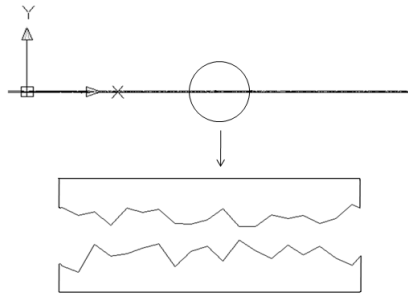


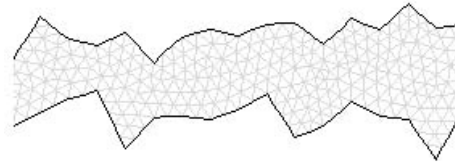
Fig. 8. Shape of created joint channel

Table 3. Grout material properties (Eriksson, 2002)

Mass	1240 kg/m ³
Yield Stress	1.3 Pa
Viscosity	0.12 Pa-s



(a) without considering JRC



(b) with considering JRC

Fig. 9. Joint channel mesh for grout flow analysis

Table 4. Required pressure for a constant grout injection of 3 l/min (KPa)

JRC \ Aperture	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
0.3 mm	289.27	291.31	299.98	306.90	317.96	336.76	371.61	398.57	448.89	501.25
0.4 mm	121.99	123.44	125.64	128.01	131.12	137.51	144.18	153.56	166.64	178.25
0.5 mm	62.80	63.75	64.68	65.65	66.95	68.97	72.19	75.44	79.73	83.90
0.6 mm	36.05	36.47	36.77	37.60	38.44	39.29	40.67	42.34	43.44	46.83
0.75 mm	19.10	19.27	19.43	19.65	19.94	20.46	20.73	21.30	22.71	23.40
0.9 mm	11.21	11.30	11.43	11.53	11.62	11.82	12.15	12.44	12.69	13.00

Table 5. Increments of injection pressure with roughness to no roughness cases (%)

JRC \ Aperture	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
0.3 mm	11.24	12.03	15.36	18.02	22.27	29.50	42.90	53.27	72.62	92.76
0.4 mm	8.80	10.10	12.06	14.17	16.95	22.65	28.59	36.96	48.63	58.98
0.5 mm	8.26	9.89	11.50	13.17	15.41	18.89	24.44	30.05	37.44	44.63
0.6 mm	6.09	7.33	8.21	10.65	13.13	15.63	19.69	24.60	27.84	37.82
0.75 mm	7.12	8.08	8.97	10.21	11.83	14.75	16.26	19.46	27.37	31.24
0.9 mm	6.16	7.01	8.24	9.19	10.04	11.93	15.06	17.80	20.17	23.11

JRC와 절리간극에 따른 그라우트 필요 주입압의 변화는 Fig. 10과 같다. 필요 주입압은 절리간극이 가장 작은 경우인 0.3 mm인 경우에 현저하게 증가하는 경향을 보였다(Fig. 10). 이는 JRC의 영향, 즉 채널의 거칠기가 유동에 미치는 영향이 절리간극에 대한 거칠기 높이(roughness height)의 비가 커질수록 증가하기 때문이다. 절리간극에 대한 거칠기 높이의 비율은 절리 표면에서 유동의 레이놀즈 수와 모멘텀 값에 변화를 주어서 절리 표면의 유동 형태의 변화시킨다.

JRC 20의 절리 거칠기를 가지고 평균 절리 간극이 각각 0.3 mm와 0.9 mm인 절리 채널 내에서의 그라우트 유동 벡터는 Fig. 11과 같다. 평균 절리 간극이 좁은 경우 절리 표면의 부분적인 난류 흐름을 볼 수 있다(Fig. 11 (a)). 마이크로 채널 유동 이론에 따르면 채널의 거칠기는 거칠기 요소를 가진 채널 표면에서 유동의 형태를 층류에서 난류 형태로 변화시킨다. 이러한 흐름

형태 변화에 기인한 역류 현상이 최소 절리간극 0.3 mm와 최대 거칠기 값인 JRC 20 의 절리 채널인 Fig. 11 (a)에서 현저하게 나타난다.

Fig. 11 (b)의 유동 벡터는 표면의 거칠기 부분에서 유동 형태의 변화로 인한 역류 현상이 Fig. 11 (a)에 비해 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이는 절리 채널이 동일한 절리 거칠기 JRC 20을 가지지만 절리간극에 대한 거칠기 높이의 비율이 상대적으로 작기 때문에 발생하는 현상으로 볼 수 있다.

최소 절리간극 0.3 mm 인 경우 JRC 2 의 절리 채널인 경우, 절리 채널 내의 그라우트 유동은 채널 표면과 평행한 방향의 유동이 나타났으며 유동의 역류 현상은 나타나지 않았다. 이를 통해 절리간극이 작은 경우에도 절리의 거칠기가 작은 경우는 거칠기가 절리 내 그라우트 유동에 미치는 영향이 미비함을 알 수 있다.

5. 결론

좁은 절리 틈새로 주입되는 그라우트 유동을 마이크로 채널 유동으로 생각할 때, 그라우트는 층류 유동으로서의 특성과 함께 마이크로 채널 유동의 특성도 가진다. 그라우트 유동은 층류 유동이므로 일반적인 매크로 스케일 채널 내부에서는 채널의 거칠기 요소에 영향을 받지 않는 것으로 간주되었으나, 마이크로 채널 유동임을 고려하면 절리 표면의 거칠기 요소에 직접적으로 많은 영향을 받는다고 할 수 있다. 전산유체역학 코드인 FLUENT 코드를 적용하여 JRC로 대변되는 절리 거칠기가 그라우트 유동에 미치는 영향을 살펴보았다.

FLUENT 코드가 Bingham 유체 유동 모델로 제공하는 Herschel-Bulkley 모델은 Hässler 등(1991)이 제시

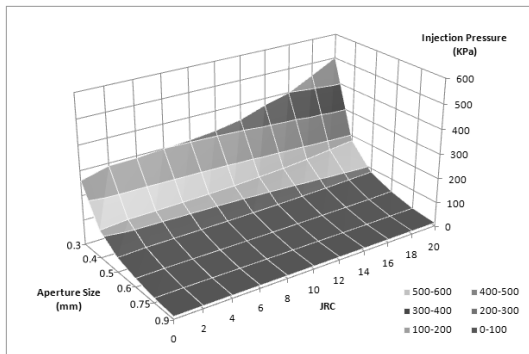


Fig. 10. Variation of required injection pressure affected by JRC and aperture

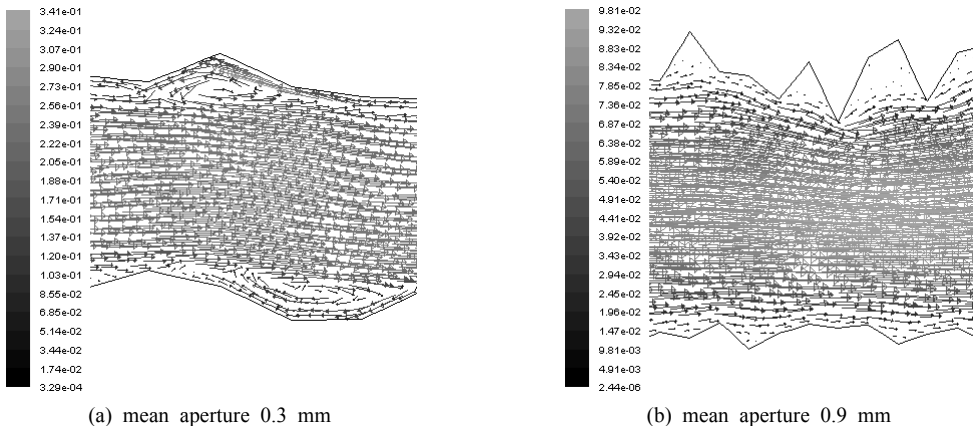


Fig. 11. Effects of the ratio of roughness height to the aperture on grout flow

한 그라우트 유동 방정식과의 비교를 통해 그라우트 물질의 유동 모사에 적합한 것으로 검증되었다. 또한 FLUENT 코드의 다상 유동 해석 모델인 VOF 모델을 적용하여 암반 절리 내에서 지하수와 공기 등을 밀어내며 주입되는 그라우트의 유동을 해석하였다. Håkansson (1987)의 실험실 그라우트 주입 실험 결과와 VOF 모델을 적용한 그라우트 주입 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 VOF 모델이 그라우트가 암반 절리 내에서의 주입 거동 모사에 적합함을 확인하였다.

Herscel-Bulkely 모델과 VOF 모델을 이용하여 마이크로 스케일을 가지는 암반 절리 내에서 절리 거칠기와 절리 간극의 영향을 정량화 시키기 위해, FLUENT 코드의 그라우트 유동 해석에 대한 적합성 검증 작업을 거친 후, 마이크로 스케일을 가지는 암반 절리 내에서 JRC와 절리간극이 그라우트 유동에 미치는 영향이 3 l/min의 그라우트 정량 주입에 대한 주입압으로 계산되었다. 절리간극을 0.3 mm에서 0.9 mm까지 변화시키면서 동시에 JRC 값을 2부터 20까지 고려하여, 절리간극에 대한 거칠기 높이 비율에 의해 그라우트 유동이 받는 영향이 필요 주입압의 변화로써 계산되었다.

JRC 가 그라우트 유동에 미치는 영향은 절리간극이 가장 작은 경우인 0.3 mm인 경우에 가장 두드러지는 것으로 나타났으며, 절리간극이 증가할수록 그 영향이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 마이크로 채널 유동 분야에서, 절리간극에 대한 거칠기 높이의 비율이 표면의 거칠기 부분에서 유동의 레이놀즈 수와 모멘텀 값의 변화를 유도하여 표면 거칠기 부분에서의 유동 형태의 변화에 영향을 주는 것에서 그 이유를 찾을 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행 한 2009년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

References

- Barton, N. and Eda F. de Quadros, 1997, Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock mass, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 34. pp. 3-4.
- Barton, N. and V. Choubey, 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, 10, pp. 1-54.
- Cravero, M., G. Iabichino and A.M. Ferrero, 2001, Evaluation of joint roughness and dilatancy of schistosity joints, *Rock mechanics – a Challenge for Society*, Särkkä & Eloranta(eds), Swets & Zeitlinger Lisse, pp. 217-222.
- Engin, T., U. Dogruer, C. Evrensel, S. Heavin and F. Gordaninejad, 2004, Effect of wall roughness on laminar flow on Bingham plastic fluids through microtubes, *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*, 12, pp. 880-883.
- Eriksson, M., 2002, Prediction of grout spread and sealing effect, KTH, Civil and Architectural Engineering, Ph.D. Thesis, pp. 35-45.
- FLUENT 12.0 User's guide, 2009, Ansys Inc., ISO 9001:2008.
- Gertzos, K.P., P.G. Nikplakopoulos and C.A. Papadopoulos, 2008, CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant, *Tribology International*, 41.12, pp. 1190-1204.
- Gustafson, G. and H. Stille, 1996, Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11.3, pp. 325-332.
- Håkansson, U., L. Hässler and H. Stille, 1992, Rheological properties of microfine cement grouts, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7.4, pp. 453-458.
- Hässler, L., U. Håkansson and H. Stille, 1992, Classification of jointed rock with emphasis on grouting, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7.4, pp. 447-452.
- Myers, N.O., 1962, Characterization of surface roughness, Engineering Department, Engineering Research Division, Mechanical Research Laboratory, *E. I. du Pont de ATemows and Co., Inc., Wilmington, Del. (U.S.A.)*, pp. 182-189.
- Tse, R. and D.M. Cruden, 1979, Estimating joint roughness coefficients, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 16.5, pp. 303-307.
- Kobayashi, S., H. Stille, G. Gustafson and B. Stille, 2008, Real time grouting control method, *Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.*, pp. 10-14.
- Nazridoust, K., G. Ahmadi and D.H. Smith, 2006, A new friction factor correlation for laminar, single-phase flows through rock fractures, *Journal of Hydrology*, 329.1-2, pp. 315-328.
- Warner, J., 2004, *Practical handbook of grouting – Soil, Rock, and Structures*, John Wiley & Sons, Inc, pp. 15-17.

전 기 환



2007년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2010년 서울대학교 공과대학 에너지시
스템공학부 공학석사

Tel: 02-880- 8713
E-mail: york49@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 박사과정

류 동 우



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3099
E-mail: dwryu@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 선임연구원

김 형 목



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2002년 동경대학교 대학원 토목공학과
공학박사

Tel: 042-868-3265
E-mail: kimh@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연
구본부 선임연구원

박 의 섭



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

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

송 재 준



1993년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 02-880-9043
E-mail: songjj@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지시스템공학부
교수