

암반 절리의 거칠기와 절리 간극 크기 변화에 대한 그라우트 주입압 변화에 대한 수치해석적 연구

전기환, 류동우*, 김형목*, 박의섭*, 송재준
서울대학교, 서울특별시 관악구 신림동

*한국지질자원연구원, 대전광역시 유성구 가정동
york49@snu.ac.kr

1. 서론

그라우트의 주입은 절리군이 많이 포함된 암반의 강도를 강화시키거나, 지하수의 흐름을 차단하기 위한 목적으로 수행된다. 그라우트 주입 시에 쓰이는 cement paste는 Bingham 유체로서, 고유의 흐름 특성을 가진다. 이 연구에서는 전산유체역학 코드인 FLUENT를 이용한 수치해석을 통해, Bingham 유체로서의 그라우트의 유동을 모사해 보았으며, 그라우트 물질의 유동이 일어나는 암반 내 절리의 특성(간극 크기와 절리의 거칠기)이 그라우트의 주입에 어떠한 영향을 주는지 연구하였다.

2. FLUENT 이용한 그라우트 유동의 해석

2.1 Cement paste의 속도 profile

그라우트 주입 시에 사용되는 cement paste는 뉴턴 유체와는 달리, 항복응력의 물성을 가진다. 주입압에 의해 유체에 발생한 전단력이 이 항복응력보다 작은 부분에서는 strain rate 이 0의 값을 가지며, 속도 profile은 이 영역에서 plug의 형상을 가진다. FLUENT에서는 이러한 Bingham 유체의 유동 모사를 위해서 Herschel-Belkley 모델을 적용할 수 있다. 일단 FLUENT가 제공하는 Herschel-Belkley 모델이 그라우트 물질의 유동을 잘 모사할 수 있는지, 1992년 Hässler et al.에 의해 제안된 Bingham 유체의 유동 equation과 비교해 보았다. 왼쪽의 equation 1 ~ 4에 cement paste의 물성으로 항복응력을 1.3 Pa, 점성을 0.12 Pa·s를 대입하였으며, 그라우트 주입이 일어나는 채널의 형상은 길이 1 m, 간극 크기를 0.6 mm로, 주입압은 1 MPa의 값을 주었다. 이때 속도 profile 중 plug 부분에서의 최대 속도는 0.37 m/sec의 값을 가졌으며 이는 동일한 물성, 동일한 채널 형상과 주입압을 적용하여 FLUENT 해석을 했을 때의 속도 분포와 거의 일치하는 것을 알 수 있었다.

$$\text{equation.1 } \frac{dr(z)}{dz} = -\frac{dP}{dx}, \quad Z = -\frac{r_0}{\frac{dP}{dx}}$$

$$\text{equation.2 } -\frac{dP}{dx} \cdot Z - \mu_B \cdot \frac{dv}{dz} = -z \cdot \frac{dP}{dx}$$

$$\text{equation.3 } v(z < Z) = v_{\max} = \frac{1}{\mu_B} \frac{dP}{dx} \left(Z \frac{b}{2} - \frac{1}{2} Z^2 - \frac{b^2}{8} \right)$$

$$\text{equation.4 } v(z \geq Z) = \frac{1}{\mu_B} \frac{dP}{dx} \left(\frac{1}{2} Z^2 - Zz + Z \frac{b}{2} - \frac{b^2}{8} \right)$$

2.2 3D 주입모드 해석과 실험실 test 결과 비교를 통한 FLUENT 해석의 신뢰도 검증

FLUENT 해석을 통해서 얻어진 결과의 신뢰도를 위해서 실제 실험실에서 행해진 실험(Håkansson, 1987)과 비교검증해 보았다. 1200×1000×15mm의 크기를 지니는 두 개의 plexiglass 판 사이에, 1×5mm의 크기를 가지는 채널들로 주입압에 따라서 유동이 일어날 수 있는 network를 구성하였다. 똑같은 크기의 메쉬를 FLUENT 전처리 프로그램인 GAMBIT을 이용하여 구성한 다음, 같은 물성과 경계조건을 대입하여 수치해석 하였다. 결과는 그림 1과 같다.(왼쪽: 수치해석 결과, 오른쪽: 실험실 test 결과)

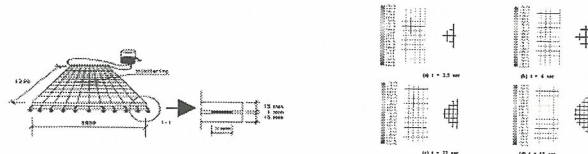


그림 1. 그라우트 주입의 수치해석과 실험실 test 결과의 비교검증

2.3 암반 절리 거칠기와 간극 크기 변화에 대한 그라우트 주입압의 변화

암반 절리의 거칠기 정도는 1979년 Tze & Cruden이 제안한 $z_r = \left[\frac{1}{M(D_r)^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{1/2}$ 식에 의해서 정량화될 수 있으며, 다음의 식 $JRC = 24.58 + 35.41 \log Z_2$ 에 의해서 절리 거칠기 계수(JRC)와 연관지을 수 있다. 이 연구에서는 JRC 값이 2,3,6,8,10,12,14,16,18,20 인 경우에 대해 평균 간극 크기가 0.3, 0.6, 0.9

mm 인 절리를 발생시켰으며, inlet boundary에 3L/min의 그라우트를 주입할 때 요구되는 주입압의 크기를 수치해석을 통해서 알아보았다.

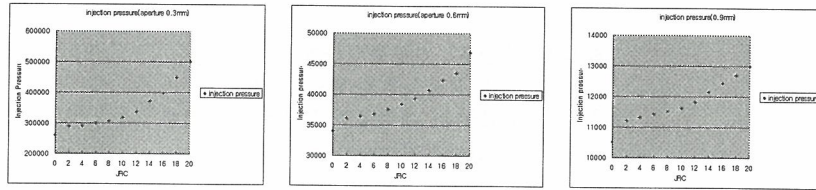


그림 2. 절리 거칠기와 간극 크기 변화에 대한 그라우트 주입압의 변화

해석 결과는 절리 간극 크기가 가장 작은 경우인 0.3 mm 인 경우, 절리 거칠기를 고려하지 않은 경우와 절리 거칠기 계수 JRC 값이 20인 경우의 주입압의 차이가 간극 크기가 0.6, 0.9 mm 인 경우보다 눈에 띄게 큰 것으로 나타났다. 절리 간극 크기가 0.3 mm 인 경우 절리면의 거칠기를 최고로 고려한 경우가 그렇지 않은 경우보다 분당 3 L 의 그라우트를 주입할 때 요구되는 주입압이 90 % 정도 더 큰 것으로 나타났다. 절리 간극 크기가 0.6 mm 인 경우에는 같은 상황에서 38 %, 절리 간극 크기가 0.9 mm 인 경우에는 23 % 의 주입압 증가를 나타내는 것으로 해석되었다.

3. 결론

본 연구에서는 비뉴어턴 유체인 Bingham 유체의 특성을 가지는 그라우트 물질의 유동 특성을 파악하기 위해 전산유체역학 코드인 FLUENT를 이용한 전산모델링을 수행하였다. FLUENT에서 제공하고 있는 Herschel-Belkley 모델과 이론식(Hässler et al.,1992)으로부터 얻은 각 속도 profile을 비교·검토하였으며, 적용 모델이 이론식과 잘 일치함을 확인하였다. 또한, 주입 모드의 타당성을 검증하기 위해 실험실 실험(Håkansson, 1987) 결과와 비교 검증한 결과, 각 주입 경과 시간에서의 그라우트 주입액의 확산이 거의 유사하게 이루어졌음을 확인하였다. 마이크로 채널의 성격을 가지는 암반 내 절리에서의 그라우트 유동은 절리의 거칠기와 간극 크기에 영향을 받으며, 이를 정량화하기 위해 다양한 거칠기와 간극을 가지는 절리에 대해 수치모델링을 수행하였다. 그 결과 절리의 간극이 작을수록 절리 거칠기 인자가 절리 내부를 통과하는 그라우트의 유동에 보다 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 절리 간극과 절리 거칠기의 정보로부터 합리적인 차수 목적의 그라우팅 설계에 활용할 수 있다.

4. 참고문헌

1. Shinji Kobayashi, Real Time Grouting Control Method, Development and application using Äspö HRL data, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., October 2008, Pages 11-14.
2. Lars Hässler, Ulf Håkansson, Håkan Stille, Computer-simulated flow of grouts in jointed rock, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 7, Issue 4, October 1992, Pages 441-446.
3. FLUENT User's guide, Ansys corporation.
4. Tahsin Engin, Umit Dogruer, Cahit Evrensel, Effect of wall roughness on laminar flow of Bingham plastic fluids through microtubes, Journal of Fluids Engineering, Volume 126, Issue 5, Technical briefs, September 2004, Pages 880-883.
5. Pekka Sarkka, P. Eloranta, International Society for Rock Mechanics, Rock mechanics: a challenge for society : proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001, Espoo, Finland, 4-7 June 2001, Pages 217-222.
6. Kambiz Nazridoust, Goodarz Ahmadi, Duane H. Smith, A new friction factor correlation for laminar, single-phase flows through rock fractures, Journal of Hydrology, Volume 329, Issues 1-2, September 2006, Pages 315-328.
7. R.Tse, D. M. Cruden, Estimating joints roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 16, Pages 303-307.

5. 사사

본 연구는 건설교통부 산하 한국건설교통기술평가원의 해저시설물 차폐기술개발 연구단의 지원을 받아 수행하였습니다.