전산유동역학을 이용한 절리 거칠기 및 주입재 특성에 따른 그라우트 주입 시 압력 손실 해석

사공명[1*] · 류성하[2]

[1]정회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목연구본부 책임연구원
[2]비회원, 풍산 시설팀 사원

Numerical analyses using CFD on the pressure losses of the grout flow with variation of joint roughness and grout features

Myung Sagong[1*] · Sung-ha Ryu[2]

[1]Principal Researcher, Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute
[2]Staff, Facility Team, Poongsan Corporation

***Corresponding Author :** Myung Sagong, rockcore@krri.re.kr

Abstract

Grouting for the rock joint is to strengthen the rock strata by infiltrating cement grout materials into the rock joints. Grouting is one of a field of study which is difficult to develop deterministic and quantitative design approach because of multiphase behaviors of grout materials and 3 dimensional features of rock joints. Therefore, GIN (Grouting Intensity Number) can be a good index with appropriate monitoring of pressure and volume of grout. In this paper, we investigate the effects of joint roughness (JRC) and rheology of cement material during the infiltration of cement grout material into rock joint through CFD (computational fluid dynamics) analyses. With rough joint surface and increase of WC ratio, the frictional resistance during the grouting increases. The results have been summarized with polynomial correlations.

Keywords: Grouting, GIN, Rock joint, CFD analyses

초 록

암반 내 그라우팅은 불연속면 내부에 시멘트 그라우트재를 주입하여 주변지반을 강화하는 목적으로 사용된다. 현장에서 다상의 그라우트재의 주입 시 거동특성 및 주입경로인 3차원 절리면의 형태가 사전파악되지 않으므로 정량적인 설계가 어려운 분야중 하나

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(6)989-1002(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.989

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received August 23, 2018
Revised October 4, 2018
Accepted October 17, 2018

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 ⓒ2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

이다. 따라서 현장에서의 그라우트 주입 거동특성을 나타내는 GIN (Grouting Intensity Number) 지표를 이용하여 주입 모니터링을 통해 적절한 시공관리를 수행하는 것이 최적이 방안이다. 본 논문에서는 그라우팅 주입 시 절리면의 거칠기 등급과 물시멘트(W/C)비에 따라 발생하는 압력의 손실을 전산유동해석을 수행하여 조사하였다. 절리면이 거칠수록 그리고 물시멘트비가 높을수록 주입 시 마찰저항은 크게 발생하였으며 해당 결과를 각 조건별 상관식으로 정리하였다.

주요어: 그라우팅, GIN, 암반절리, 전산유동해석

1. 서 론

암반 내 그라우팅은 지하수 유동성을 낮추거나 지반재료의 부착 강도를 높여 불안정한 지반상태를 안정적인 상태로 조성하는 목적으로 자주 사용된다. 특히 터널의 안정성 확보, 기초 보강, 지반보강 및 차수의 목적으로 공극 혹은 절리 등을 충전시켜 원재료간의 접착력을 높이며 원지반의 강도를 높여 지하수의 침투를 감소시키고 목적으로 사용된다. 이처럼 그라우팅은 지반구조물의 안정성에 중요한 역할을 하고 있지만, 우리는 그라우트재의 주입 및 경화단계에 있어서의 여러 현상에 대해서 상세히 파악하고 못하고 있다. 물함수비와 주변 환경에 따라 시간의존적으로 변하는 그라우팅재료의 특성과 주입대상인 암반 내 존재하는 절리, 불연속면 혹은 공극의 기하학적 구조 및 배치에 따른 그라우팅 현상과 효과에 대한 정확한 정보가 없다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 그라우팅 재료의 개발(Park and Kim, 2017; Park et al., 2017) 주입압과 주입량에 대한 제어가 가능한 시공장비의 개발(Kim et al., 2014), 진동주입을 통한 기준 압력주입의 한계를 극복하려는 시도(Han et al., 2014), 운영중인 철도노반 보강을 위한 그라우팅의 적용성에 대한 연구(Jung et al., 2017) 등 다양한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 그럼에도 불구하고 현재 현장에서 시행되고 있는 그라우팅 시공은 그라우팅 과정에 대한 이해를 바탕으로 설계 및 시공이 이루어지는 것이 아니라 결과값(주입압-주입양)을 모니터링하여 주입의 정도를 추정하는 수준이다. 이 한계를 극복하기에는 그라우팅 대상 암반 내 절리의 상태를 나타내는 주입 대상의 물리적 특성값과 시멘트 배합비에 따른 Bingham 재료의 거동을 고려한 설계 및 시공기술이 개발되어야 할 것이다. 그러나 이처럼 그라우팅 과정에 발생하는 다양한 현상을 반영한 설계법을 도출하기에는 물리적으로 한계가 있으므로 현재까지 제안된 그라우팅 설계법 중 타당한 논리적 근거를 가지고 있는 것이 GIN (Grouting Intensity Number) 방법이다(Turcote et al., 1994). GIN은 그라우팅 과정에서 투입된 에너지의 개념으로서 주입단계에서의 압력과 그라우트재의 주입 체적의 곱으로 표현된다. GIN 개념을 적용함으로 인하여 그라우팅시 수압 파쇄(hydro fracturing) 혹은 들뚬(hydro jacking)의 발생 가능성을 최소화 한다. GIN에 적용되는 압력과 체적은 측정 가능한 물리적 계측값이며, 주입 시 그라우팅 펌프로부터 실시간으로 측정이 가능하다. 다만 장비에서 측정된 값과 실제 암반 내 주입 시 압력과 체적의 값은 상이하므로 이를 보정하기 위하여 손실계수를 사용하고 있다.

2. GIN (Grouting Intensity Number)의 개념

암반 내 그라우팅은 다양한 형태의 불연속면을 그라우트재로 밀실하게 채우는데 그 목적이 있다. 이를 위해서는 절리의 틈과 암반의 강성을 고려하여 수압파쇄나 들뚫이 발생하지 않는 수준에서의 주입압과 재료의 주입이 이루어져야 한다. 이처럼 그라우팅 제어를 위하여 GIN 개념을 적용하고 있으며 GIN은 앞서 언급한 바와 같이 각 단계별 주입압(P)과 단위 길이당 주입체적(V)의 곱이며 주입 시점에서의 주입 에너지와 같다(식 (1) 참고).

$$GIN = P \times V \tag{1}$$

Fig. 1과 같이 지반조건에 따라 산정된 GIN 포락선(①)을 경계면으로 하여 실시간으로 계측되는 그라우팅 주입압과 주입체적의 곱으로 표현된 주입 궤적(④)은 GIN 목표점(③)이나 포락선의 경계를 넘지 말아야 한다. Zero Flow Path (ZFP ②)는 한계상태에서 그라우트재의 주입이 진행되지 않는 상태의 궤적을 나타내고 있으며, 주입단계에서 주입의 궤적은 ZFP 상부에 위치하여야 한다. 이러한 GIN 포락선과 목표점의 산정에 대한 이론적 배경은 다음과 같다.

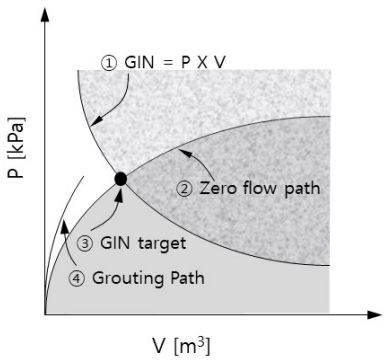


Fig. 1. GIN envelope, target and zero flow path for the controlled grouting process

단일 불연속면 조건의 경우는 Fig. 2와 같다.

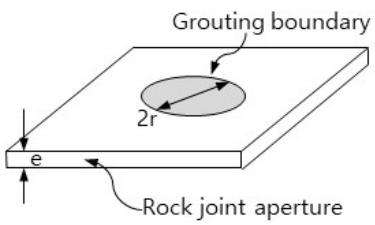


Fig. 2. Schematic of grout injection

$$r = (Pe)/2C \rightarrow P = 2rC/e \tag{2}$$

$$V = \pi r^2 e \tag{3}$$

$$GIN = PV = 2\pi Cr^3 \tag{4}$$

여기서, r은 그라우트 주입반경, P 주입압, e 절리틈, C 점착력, V 주입 체적이다. 주입 도중에 상향의 hydro jacking이 발생하지 않기 위한 조건은 다음과 같다.

$$F = (\pi r^2 P)/3 = VP/3e = GIN/3e < F_{allow} \tag{5}$$

$$F_{allow} = \gamma ghr^2 \pi \tag{6}$$

여기서, F_{allow}는 상향의 들뜸의 허용한계값이며, 들뚫의 형태는 원통형 조건을 가정하였다.

복합 불연속면을 고려하여 절리의 개수를 고려하고 현장의 여건을 반영하여 절리면을 통과함에 따른 압력손실과 주입압에 따른 절리벽의 팽창에 따른 효과를 감안하면 GIN은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$GIN = PV = 2\pi Cr^3 nk_p k_v \tag{7}$$

여기서, n은 절리의 개수, K_p는 압력손실계수, K_v는 체적증가 계수이다. 식 (7)과 같이 물리적 모델을 바탕으로 그라우팅의 이론적 모델을 제시하더라도 현장에서의 적용과는 많은 차이가 있을 수 있으며 그 요인중하나가 압력손실과 체적증가분에 대한 내용이며 이러한 현상에 대한 논리적 근거를 제시하기에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 절리의 틈과 거칠기 조건(Joint Roughness Coefficient, JRC)에 따른 압력손실계수의 산정 방안에 대해서 논의 하고자 한다.

3. 압력손실계수의 산정

수치해석을 통한 압력손실계수의 산정을 위하여 JRC를 반영한 인공절리와 전산 유동해석을 통하여 거칠기에 따른 절리 내 흐름 조건에서 발생하는 압력손실계수를 수치해석상으로 산정하고자 한다.

3.1 인공절리 형성

암반 내 절리의 상태 및 거칠기는 암반 자체의 역학적 거동뿐만 아니라 절리를 통한 유체의 흐름에도 큰 영향을

미친다. 특히 절리의 거칠기는 흐름에 영향을 미치는 중요한 물리적 변수중 하나이다. 절리의 거칠기가 증가함에 따라 절리 내 투수계수도 감소하므로 동일 주입량 조건 시 더 많은 에너지가 소요된다. 암반 절리의 거칠기는 JRC로 표현해 왔으며 JRC를 정량적인 절리의 거칠기로 표현하기 위하여 다양한 경험적 상관관계가 제안되었다. 통계적 변수 Z_2, 거칠기 상수 Rp, 그리고 프랙탈 차원을 통하여 표현되어왔으며 가장 많이 인용되는 방법은 Z_2 (Tse and Cruden, 1979; Yang et al., 2001) 이다. Z_2 의 정의는 다음과 같다.

$$Z_2 = RMS\left(\frac{\triangle y}{\triangle x}\right) = \frac{1}{L}\sqrt{\int_{x=0}^{x=L}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \tag{8}$$

RMS (Root-mean square)는 제곱근으로 나눈 평균값, Fig. 3에서와 같이 L은 전체 샘플링 구간의 길이, ⊿x는 샘플링 구간의 길이, ⊿y는 인근하는 샘플링 두 점간의 고저차이므로 ⊿y/⊿x는 절리의 경사이다.

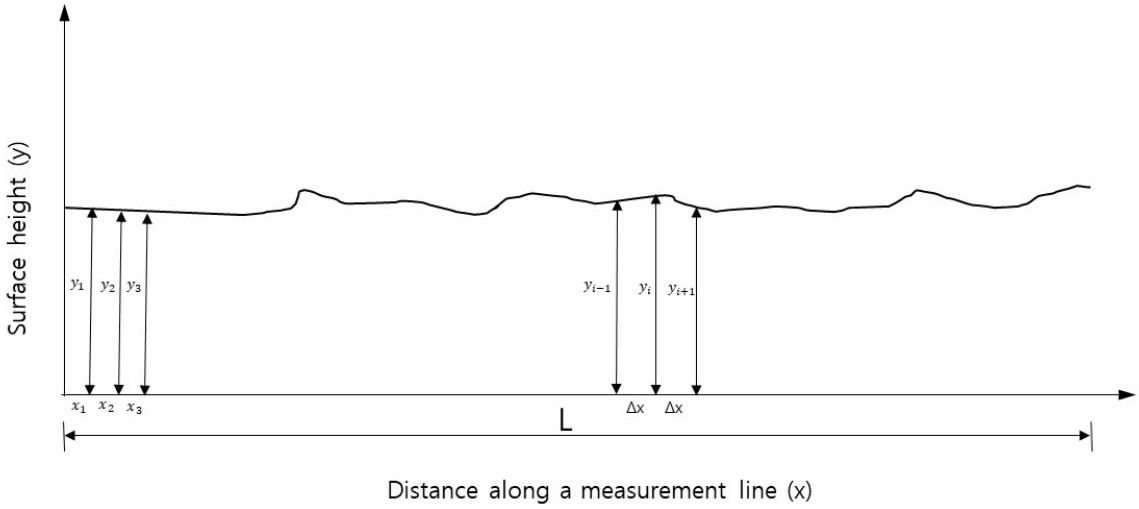


Fig. 3 Topographic profile of a joint along x-axis

절리 채널들의 에 해당하는 JRC의 값을 산정하기 위하여 Cravero et al. (2001) 이 제시한 와 JRC 값에 대한 상관식 (9)를 적용하였다.

$$JRC = 24.59 + 35.41\log Z_2 \tag{9}$$

절리 거칠기를 2차원상의 좌표로 구현하기 위한 정규분포를 따르는 렌덤 숫자를 생성하여 식 (10)과 같이 생성하였다. 절리간격이 0.3 mm일 때 x축 좌표의 간격(△x)를 0.1 mm로 총 길이 100 mm로 하여 절리를 2차원상의

좌표로 나타내었다. 상부 절리면은 y축 좌표의 평균을 0.15 mm로 하여 식 (10)을 통하여 y축의 랜덤 좌표값을 추출하였다.

$$y\text{축의 랜덤 좌표값} = \text{평균값} + \text{표준편차 X RandN(n,1)} \tag{10}$$

RandN(n,1)는 평균값과 표준편차의 관계에서 n행 1열의 수를 임의의 난수로 발생 시키는 함수이다. 평균값은 평균 절리간극이며 표준편차는 반복시행과정을 통하여 산정하였다. 하부 절리면은 y축 좌표의 평균을 -0.15 mm로 하였으며, 나머지는 동일한 방법으로 1000개의 난수를 발생시켰다. 1000개 난수를 y축의 좌표 범위를 0~0.2 범위에서 원하는 JRC가 나올 때 까지 반복시행과정을 통해 계산하였으며 표준편차와 Z_2의 상관관계 Fig. 4와 Table1과 같다.

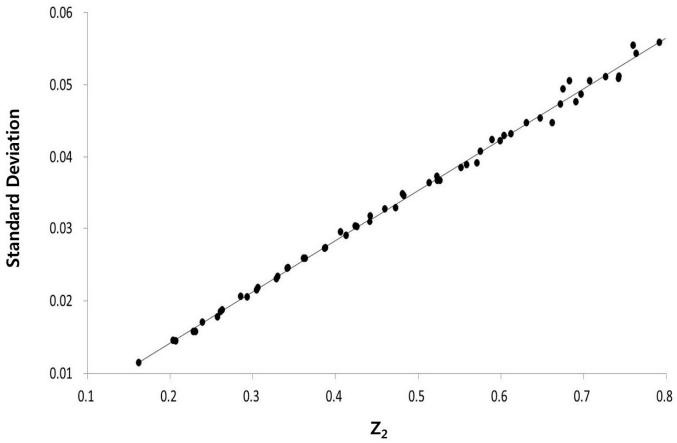


Fig. 4. A correlation between standard deviation and Z_2

Table 1 A correlation between Standard deviation, Z_2 and JRC

Y axis range	Average	Standard deviation	Z_2	JRC
0～0.065	0.032	0.019	0.263	4.039
0～0.085	0.042	0.025	0.341	8.055
0～0.110	0.055	0.032	0.442	12.025
0～0.145	0.069	0.041	0.575	16.079
0～0.185	0.090	0.051	0.743	20.010

2000개의 난수발생으로 생성된 좌표를 Pre-Process를 이용하여 2000개의 Node point 생성 후 각 Node point간 연결을 통해서 절리를 형성하고 형성된 절리에 Mesh를 생성하여 절리면의 프로파일을 Fig. 5와 같이 형성 하였다.

Step	Grid generation process
Node point	
Joint	
Mesh	

Fig. 5. Grid generation process (aperture = 0.3 mm)

이러한 방법으로 형성된 JRC별 절리의 형태는 Fig. 6과 같다.

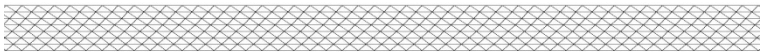
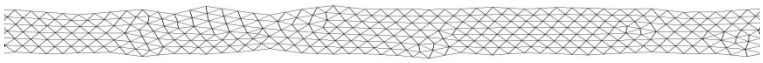
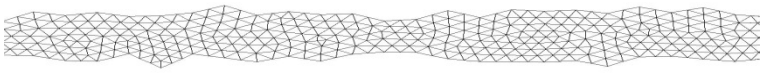
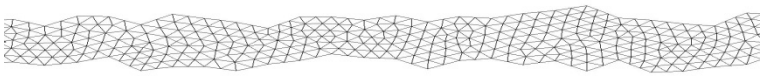
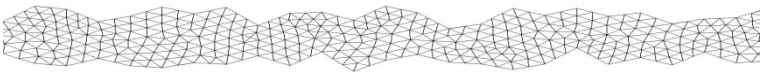
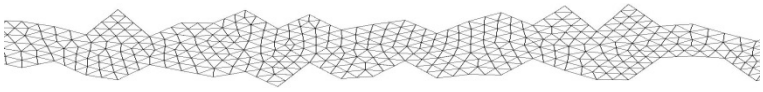
JRC	Joint surface profile
JRC0	
JRC4	
JRC8	
JRC12	
JRC16	
JRC20	

Fig. 6. Joint surface profile according to the JRC (aperture = 0.3 mm)

3.2 전산유동해석(Computational Fluid Dynamics, CFD)

효과적인 그라우팅 유동해석을 하기 위해서는 그라우팅 재료의 물성의 구성모델이 중요하다. 특히 그라우팅 재료는 시간의존성이 Bingham 유체모델을 적용하였으며 그라우트재의 유동경로시 물성변화를 반영할 수 가진 Herschel-Bulkley 모델과 VOF (Volume OF Fluid) 모델을 적용하였다.

3.2.1 Herschel-Bulkley 모델

그라우트재는 Bingham 유체 특성을 보이며 Bingham 유체는 비뉴튼 유체로서 항복응력 이상이 되어야 유동이 시작되는 특성과 전단속도에 비례하는 소성유체의 특성을 가지고 있다. 일반적으로 그라우트 주입 시 사용되는 시멘트 페이스트는 Fig. 7과 같이 전단속도에 비례하지 않는 Power-law 유동의 성질 또한 가지고 있다. 본 연구에서는 Bingham 유체와 Power-law 유동 특성을 결합시켜 놓은 Herschel-Bulkley 모델을 통해 이러한 그라우트 주입재의 특성을 모사하였다.

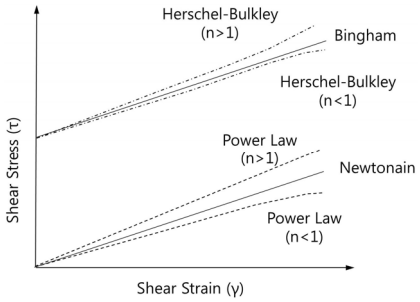


Fig. 7. Herschel-Bulkley, Power-Law model of the shear stress and shear rate of change

Herschel-Bulkley 모델의 구성모델은 식 (11)과 같다.

$$\tau = \tau_o + k\gamma^n \tag{11}$$

여기서, k는 Consistency Index, n는 Power law index, τ_o는 Yield shear stress, γ'는 Shear rate, τ는 Shear stress를 의미한다.

그라우트재의 특성은 물/시멘트(W/C)비율에 크게 영향을 미친다. 주입 시 그라우트재는 초기 배합비에 따라 일정한 특성을 가지고 있는 것으로 가정하여 주입이 이루어지나 실제 시간의 경과에 따라 유동학적 특성과 퇴적특성이 변화하기 때문에 이에 대한 고찰이 필요하다. 본 연구에서 사용된 주입재의 특성은 Rosquoët et al. (2003)이 제시한 보통 포틀랜트 시멘트의 W/C에 따른 시멘트 페이스트의 전단속도에 따른 전단응력 및 점성변화에 관한 실험결과를 참조하였다. Herschel-Bulkley 모델의 적용을 위하여 사용한 물성값은 Table 2와 같다.

Table 2. Grout material properties

Properties \ W/C ratio	W/C = 0.4	W/C = 0.5	W/C = 0.7	W/C = 1.0
Consistency index. K	1.359	1.021	0.29	0.071
Power law index. n	0.57	0.55	0.61	0.73
Yield stress threshold (pa)	9	5	2	1

3.2.2 VOF 모델의 적용

그라우트 주입 거동은 절리 등의 불연속면 내부의 지하수나 공기를 밀어내며 유동하는 다상 유체 거동을 보인다. 따라서 그라우트 주입 유동을 모사하기 위해서는 다상 유동 해석 방법인 VOF (Volume of Fluid) 모델을 사용하여야 한다. VOF 방법은 자유면 모델링 기법으로서, 유체체적 비율을 통해 밀도가 다른 두 유체를 한꺼번에 계산할 수 있는 수치 해석 기법으로서 유체 체적(Volume Fractional, f)은 재료들 간의 체적차이가 큰 혼합물을 다룰 때 사용 가능하며 격자내 밀도가 서로 다른 두 유체의 체적 비율을 통해 두 유체의 경계인 자유면의 위치를 추적이 가능하다.

셀의 체적함수 F는 유체가 완전히 채워져 있을 경우 1, 기체만 존재할 경우 0, 그이외의 경우는 $0 < F < 1$로 표현할 수 있으며 체적함수가 식 (12)를 만족하는 상태를 추적하면 결국 유체와 기체의 경계면에 대한 추적이 가능하다.

$$\frac{\partial F}{\partial} + u \cdot \triangle f = 0 \tag{12}$$

여기서, u는 속도 벡터이다.

3.2.3 FLUENT 수치해석

FLUENT는 전산 유동해석이 가능한 프로그램으로서 공기 및 유체의 흐름해석 뿐만 아니라 유동, 난류, 열전달 및 반응등 다양한 조건에 대한 해석이 가능하다. 따라서 FLUENT를 이용하여 JRC에 따른 그라우트 유동의 영향을 알아보기 위해 3 l/min를 주입할 때 요구되는 주입압을 계산하였다. 흐름 조건은 압력변동이 생기는 부정류(Transient flow) 상태로 가정 하였다. 격자망의 우측 경계는 관의 출구로 압력조건을 “0”으로 경계조건(pressure outlet)을 설정하였으며, 주입부인 좌측의 경계 조건은 속도경계(velocity inlet) 조건(Table 3 참고)으로 하여 수치해석을 수행하였다.

Table 3. Boundary condition

Boundary condition aperture (mm)	Velocity inlet (m/s)	Pressure outlet (Pa)
0.3	0.166	0
0.5	0.099	0
0.7	0.071	0
1.0	0.050	0

이상의 경계조건과 물성값을 적용하여 수치해석을 수행하였으며 Fig. 8은 절리의 틈이 0.3 mm일 때 절리 내 속도 프로파일을 나타내고 있다. 각 절리의 거칠기 조건별 최대속도 값은 JRC가 0일 때 0.215 m/s, JRC가 12일

때 0.404 m/s, JRC가 20일 때 0.767 m/s가 발생하였다. 해석상 주입은 정량주입형태 이므로 절리면이 거칠수록 흐름상의 속도는 더 높아지는 현상을 보인다.

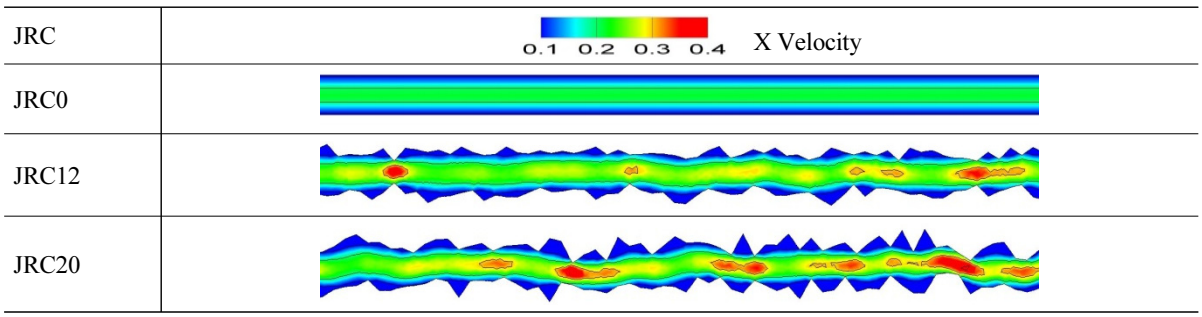


Fig. 8. The velocity profile of joint surface (W/C = 1, aperture = 0.3)

Fig. 9는 W/C = 1, 절리간극 0.3 mm일 때의 각 지점별 압력을 나타내고 있다. 압력의 최대값은 JRC가 0일 때 47.12 kPa, JRC가 12일 때 61.58 kPa, JRC가 20일 때 89.28 kPa로 확인되었다. 거칠수록 유입속도는 빨라지며 이에 따라 요구되는 주입압도 증가하는 것이 확인되었다.

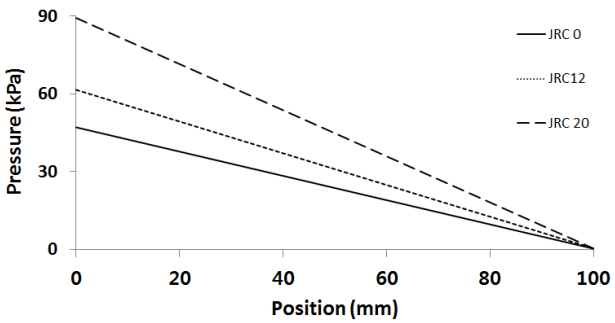


Fig. 9. Pressure by position along the joint (kPa)

W/C비, 절리간극, JRC에 따라 일정한 양의 주입이 되기 위한 요구되는 주입압력은 Table 4와 같다.

절리의 틈이 작을수록, W/C비가 낮을수록, 그리고 절리의 거칠기가 클수록 요구되는 주입압은 더욱 큰 것으로 확인되었다. 주입압의 비는 절리가 매끈한 조건을 기준으로 볼 때 가장 거친 조건(JRC = 20)에서의 요구 압력은 대략 1.1~1.85배 수준임을 보인다. 물/시멘트(W/C), 절리틈, 절리거칠기중 주입압에 가장 큰 영향을 미치는 것은 절리의 틈인 것으로 확인되었다. 절리틈에 따라 최대 23배 이상의 주입압 변동이 발생하며, 절리의 거칠기에 따라서는 최대 2.0배 수준의 변동이 발생한다. 물/시멘트비는 최대 11배 정도의 차이가 발생한다. 따라서 현장에서 주입 시 절리의 틈에 대한 정확한 파악으로도 압력 변동의 문제를 어느 정도 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Required pressures for a constant grout injection of 3 l/min with different joint apertures and roughness (kPa)

(a) W/C = 0.4

E (mm) \ JRC	0	4	8	12	16	20
0.3	409	422	462	499	586	757
0.5	138	143	152	162	177	201
0.7	69	71	73	77	79	83
1.0	33	33	34	35	36	37

(b) W/C = 0.5

E (mm) \ JRC	0	4	8	12	16	20
0.3	294	302	329	355	414	531
0.5	104	108	114	121	136	149
0.7	54	56	58	60	62	65
1.0	28	28	29	29	30	31

(c) W/C = 0.7

E (mm) \ JRC	0	4	8	12	16	20
0.3	105	108	118	127	150	198
0.5	34	35	37	39	43	49
0.7	17	17	18	18	20	20
1.0	8	8	8	8	8	9

(d) W/C = 1.0

E (mm) \ JRC	0	4	8	12	16	20
0.3	47	48	53	58	69	94
0.5	14	15	16	17	18	22
0.7	7	7	7	7	8	8
1.0	3	3	3	3	3	4

3.3 압력손실계수 산정(K_p, coefficient for pressure losses)

이상의 과정을 거쳐 그라우팅 주입 시 절리의 틈과 거칠기에 따른 압력손실을 수치해석상 도출한 결과는 다음과 같다. 해석결과를 살펴보면 JRC 값의 증가에 따라 요구되는 주입압은 증가하는 경향을 보이며 절리틈의 증가에 따라서는 감소하는 경향을 보인다. JRC = 0인 조건을 기준으로 각 JRC 조건에서의 요구되는 압력값을 정규화시킨 값과 JRC 간의 상관성을 도출하면 Fig. 10과 같다.

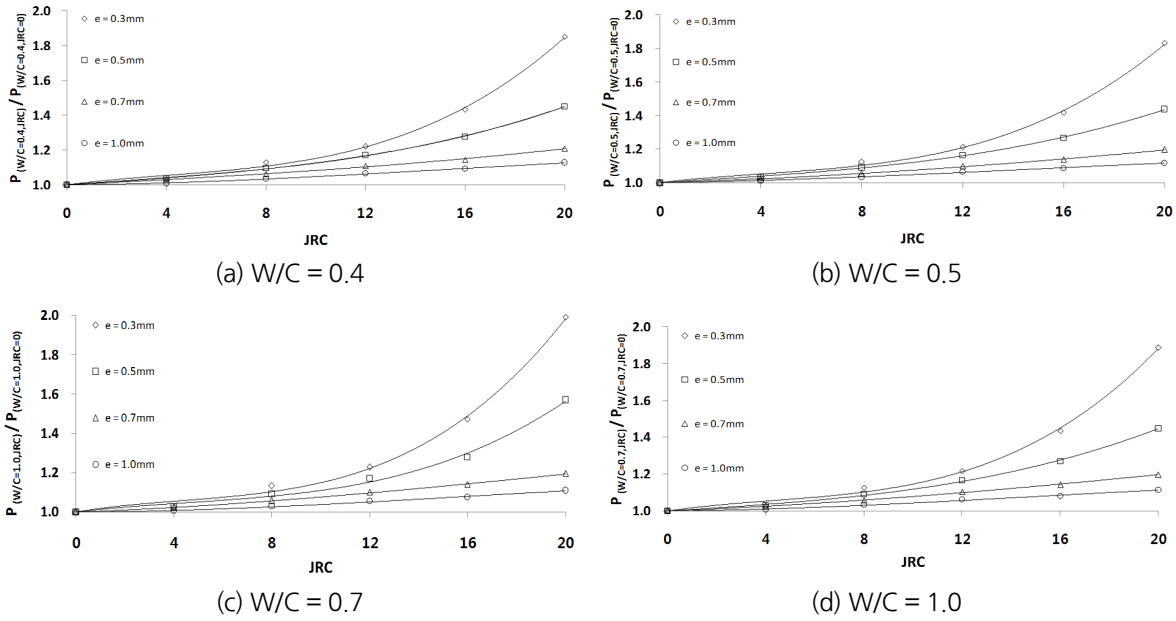


Fig. 10. Variation of required injection pressure affected by W/C, aperture and JRC (kPa)

이와 같은 압력손실은 총 길이 100 mm 절리에 대한 결과이며 절리의 길이에 따른 압력은 절리 100 mm를 기준으로 해당하는 해당절리의 길이 비율만큼 곱한 값이 요구압력 수준이 된다. 본 연구에서 도출하고자 하는 압력손실계수는 JRC가 0인 조건을 기준으로 각 절리조건에서 매끈한 절리(JRC = 0)를 나눈 값이다. 즉 $K_p = P_{JRC}/P_o$가 되며 Table 4와 같이 각 조건에서의 상관관계는 다항식으로 표현할 수 있다.

Table 4. Correlations of K_p with aperture and JRC

(a) W/C = 0.4

Aperture (mm)	K_p equations <W/C = 0.4>
0.3	$P_{JRC}/P_0 = 1.5 \times 10^{-4}\ JRC^3 - 1.9 \times 10^{-3}\ JRC^2 + 1.9 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
0.5	$P_{JRC}/P_0 = 3.3 \times 10^{-5}\ JRC^3 + 9.4 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
0.7	$P_{JRC}/P_0 = 1.1 \times 10^{-5}\ JRC^3 - 1.0 \times 10^{-4}\ JRC^2 + 8.0 \times 10^{-3}\ JRC + 1$
1.0	$P_{JRC}/P_0 = 7.3 \times 10^{-6}\ JRC^3 + 3.6 \times 10^{-3}\ JRC + 1$

(b) W/C = 0.5

Aperture (mm)	K_p equations <W/C = 0.5>
0.3	$P_{JRC}/P_0 = 1.5 \times 10^{-4}\ JRC^3 - 1.8 \times 10^{-3}\ JRC^2 + 1.7 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
0.5	$P_{JRC}/P_0 = 3.4 \times 10^{-5}\ JRC^3 + 8.4 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
0.7	$P_{JRC}/P_0 = 7.9 \times 10^{-6}\ JRC^3 + 6.8 \times 10^{-3}\ JRC + 1$
1.0	$P_{JRC}/P_0 = 5.5 \times 10^{-6}\ JRC^3 + 3.9 \times 10^{-3}\ JRC + 1$

Table 4. Correlations of K_p with aperture and JRC (continue)

(c) W/C = 0.7

Aperture (mm)	K_p equations <W/C = 0.7>
0.3	$P_{JRC}/P_0 = 1.8 \times 10^{-4}\ JRC^3 - 2.5 \times 10^{-3}\ JRC^2 + 2.1 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
0.5	$P_{JRC}/P_0 = 4.0 \times 10^{-5}\ JRC^3 - 1.4 \times 10^{-4}\ JRC^2 + 9.1 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
0.7	$P_{JRC}/P_0 = 7.9 \times 10^{-6}\ JRC^3 + 6.8 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
1.0	$P_{JRC}/P_0 = 4.1 \times 10^{-6}\ JRC^3 + 3.9 \times 10^{-2}\ JRC + 1$

(d) W/C = 1.0

Aperture (mm)	K_p equations <W/C = 1.0>
0.3	$P_{JRC}/P_0 = 2.0 \times 10^{-4}\ JRC^3 - 2.4 \times 10^{-3}\ JRC^2 + 2.0 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
0.5	$P_{JRC}/P_0 = 1.1 \times 10^{-4}\ JRC^3 - 1.6 \times 10^{-3}\ JRC^2 + 1.6 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
0.7	$P_{JRC}/P_0 = 7.9 \times 10^{-6}\ JRC^3 + 6.8 \times 10^{-2}\ JRC + 1$
1.0	$P_{JRC}/P_0 = 5.3 \times 10^{-6}\ JRC^3 + 3.4 \times 10^{-2}\ JRC + 1$

4. 결 론

암반 내 그라우팅 주입시공 시 주입재의 물/시멘트 비, 절리의 틈, 거칠기 등에 따라 정량 주입조건 시 요구되는 주입압은 상이할 것이다. 암반 내 그라우팅은 이상의 변수에 의해서 주입설계와 현장주입 시 상이한 거동을 보일 것이다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통하여 그라우팅 주입 시의 W/C 비, 절리 틈, 절리 거칠기 등이 그라우팅에 미치는 영향에 대하여 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

암반 내 그리우팅은 시간의존적으로 변화하는 주입재의 특성과 주입경로인 암반 내 절리에 대한 정확한 파악 없이 수행되므로 사전 설계의 개념보다는 현장에서의 대응이 더욱 중요한 요소가 된다. 따라서 주입압과 주입량을 제어하면서 지반 조건별 GIN 값을 확인하고 주입과정을 모니터링을 하면서 진행해야 한다.

1. 주입 시 발생하는 압력의 변동에 영향을 미치는 물/시멘트비, 절리의 틈, 절리거칠기를 변수로 하여 최대 16개의 조건을 고려하였으며, 각 경우별 6 종류의 JRC 값을 해석하여 총 96개의 경우에 대한 해석이 수행되었다.
2. 또한 6 종류의 거칠기를 표현하기 위하여 2,000개 이상의 노드를 무작위로 생성하여 해석하고자 하는 거칠기를 표현하는 인공절리면을 생성하였으며 해당 절리면을 이용하여 정량 주입조건을 반영하여 수치해석적으로 그라우팅 주입을 시행하였으며 그 과정에서 정량 주입이 가능하도록 요구되는 주입압을 모니터링 하였다.
3. 물/시멘트비, 절리 틈, 절리거칠기를 변수로 해석을 수행한 결과 절리의 틈(최대 23배)이 주입압 변동에 가장 큰 영향을 미쳤으며 물/시멘트비(최대 11배), 절리 거칠기(최대 2배) 순으로 확인되었다. 절리의 틈이 작을수록 그리고 물/시멘트비가 작을수록 절리 거칠기의 영향은 더욱 크게 확인되었다.

본 연구에서는 제한적인 조건에서 절리의 기하학적 특성(틈, 거칠기)과 물/시멘트비에 따른 주입특성을 검토

하였다. 절리틈의 크기가 주입에 있어 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 현재 그라우팅 주입 설계시 절리틈이나 절리의 특성을 고려한 설계법은 없는데 후속연구를 통하여 본 연구에서 도출 된 결과를 정량적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후속 논문에서는 본 논문에서 도출된 연구결과를 정량적으로 적용하여 GIN 값의 도출 및 시공시 모니터링을 통한 최적의 그라우팅 기술의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도시설공단 “철도건설 경쟁력 확보를 위한 제반 연구”와 한국철도기술연구원 자체사업인 “응력집중공을 이용한 저진동 터널굴착 기초기술개발”의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Cravero, M., Ferrero, A.M., Iabichino, G. (2001), “Evaluation of joint roughness and dilatancy of schistosity joints”, Rock mechanics - a challenge for society Proceedings of Eurock 2001, Espoo Finland, 4-7 June 2001, pp. 217-223.
2. Han, S., Yea, G., Kim, H. (2014), “Improvement effects of cement grouting using vibration method through a field test”, Journal of the Korea Geo-Environmental Society, Vol. 15, No. 5, pp. 23-29.
3. Jung, H.S., Han, J.K., Moon, J.S., Yoon, H.H. (2017), “Grouting performance for the reinforcement of operating railway roadbed”, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 18, No. 12, pp. 13-23.
4. Kim, D.Y., Lee, H.S., Lee, S.J., Sim, B.K., Jung, J.H. (2014), “Case study on cut-off grouting for subsea tunnel construction using automated multi grouting system and grouting design software”, Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 - Tunnels for a better life Foz Do Iguacu, Brazil.
5. Park, I., Kim, D. (2017), “A study of field mixing ratio using bio-grouting injection material”, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 16, No. 2, pp. 47-54.
6. Park, S.Y., Shim, H.G., Kang, H.J., Lim, O.B., Sami, G.F., Kim, Y.S. (2017), “A study on hybrid grout material for reservoir embankment reinforcement”, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 16, No. 3, pp. 21-30.
7. Rosquoët, F., Alexis, A., Khelidj, A., Phelipot, A. (2003), “Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation”, Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 5, pp.713-722.
8. Turcote, L., Savard, B., Lombardi, G., Jobin, H. (1994), “The use of stable grout and G.I.N. technique in grouting for dam rehabilitation”, Annual Meeting Canadian Dam Safety Conference CSDA and CANCOLD Winnipeg, Manitoba, pp. 137-161.
9. Tse, R., Cruden, D. (1979), “Estimating joint roughness coefficient”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 16, No. 5, pp. 303-307.
10. Yang, Z.Y., Lo, S.C., Di, C.C. (2001), “Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z_2”, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 34, No. 3, pp. 243-251.