

절리면 거칠기와 수리특성의 상관성에 관한 수치해석적 연구

이승중, 김병렬, 최성웅*

A Numerical Study on the Correlation between Joint Roughness and Hydraulic Characteristics

Seung-Joong Lee, Byung-Ryeol Kim, Sung-Oong Choi*

Abstract Roughness, aperture and filling material of rock joint are widely considered to affect the hydraulic characteristics of joint. Among these factors, in this study, the joint roughness was examined with artificial joint profiles generated by Monte Carlo simulating on the original profiles suggested by Barton and Choubey(1977). Original profiles and revised profiles were combined to establish flow channel models, in which the hydraulic characteristics were analyzed numerically on the basis of minimum aperture changes and flow channel shapes. Maximum flow rate was identified at the growing point of flow area after passing through minimum aperture generated by the two profiles, and it was resulted that maximum flow rate is inversely proportional to minimum aperture. Maximum flow rate per unit area showed different values because flow channel shapes and minimum aperture locations are different in each model. In flow channel, mechanical aperture showed approximately 1.07 ~ 3.00 times larger than hydraulic aperture. In this study, mechanical and hydraulic aperture were concluded to be closely related to A_i value, and their relations can be denoted by $e_m = 0.519A_i^{0.7169}$ and $e_h = 0.6182A_i^{0.239}$, respectively.

Key words Joint roughness, Micro average i angle, Mechanical aperture, Hydraulic aperture, Flow rate, Flow channel

초 록 절리면의 수리특성에 영향을 미치는 요소는 절리면의 거칠기, 절리면의 틈새, 충전물 등이 있다. 본 연구에서는 절리면의 거칠기에 따른 수리특성을 분석하고자 Barton and Choubey(1977)가 제안한 표준 프로파일을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 인공 프로파일을 생성시켰다. 표준 프로파일과 인공 프로파일을 조합하여 유동채널 모델을 제작하였으며, 최소 간극의 변화와 유동채널의 형상에 따른 수리특성을 수치해석적으로 분석하였다. 두 프로파일이 이루는 최소 간극지점을 통과한 이후 유동면적이 증가하는 지점에서 최대 유동률을 나타냈으며, 최소 간극이 증가할수록 최대 유동률은 감소하였다. 또한 유동채널의 형상과 유동채널내의 최소 간극 지점의 위치가 모델마다 상이하기 때문에 단위면적당 최대 유동률은 모델마다 다른 값을 나타내고 있었다. 유동채널 내의 역학적 간극과 수리적 간극은 1.07 ~ 3.00 배 정도의 차이를 나타내고 있으며, 본 수치해석에서 분석된 A_i 값과 역학적 간극은 $e_m = 0.519A_i^{0.7169}$ 의 관계를 나타내고, 수리적 간극은 $e_h = 0.6182A_i^{0.239}$ 의 관계를 나타내는 것으로 분석되었다.

핵심어 절리면 거칠기, 미소 평균거칠각, 역학적 간극, 수리적 간극, 유동률, 유동채널

Received: Apr. 14, 2014

Revised: Apr. 23, 2014

Accepted: Apr. 23, 2014

*Corresponding Author: Sung-Oong Choi

Tel) +82332506253, Fax) +82332556253

E-Mail) choiso@kangwon.ac.kr

Dept. of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do 200-701, Korea

1. 서론

최근 해저터널 건설에 대한 관심이 증가되면서, 전 세계적으로 해저터널의 성공적인 건설을 위한 핵심기술 개발에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다.

해저터널이 육상터널과 다른 가장 큰 차이점은 굴착 중 예상치 못한 지반 조건을 만나게 될 경우 대규모 해

수의 유입 가능성이 높고, 사고시 대처 및 복구가 어렵다는 점이다. 이러한 해저터널의 안정성을 저해시키는 요소로는 암반내 존재하는 절리와 해저지반 상부에 형성되는 수압의 영향이다. 절리는 암반의 상태를 결정하는 가장 요소로서, 지반조사 단계부터 터널의 설계 및 시공단계까지 암반등급의 평가, 설계정수 도출, 지보 및 보강 대책 수립 등 터널 건설 단계의 전반적인 영역에 영향을 미친다.

절리면에 수압이 작용하게 되면, 절리면에 작용하는 유효응력이 감소되어 절리면의 틈새가 확장되고, 확장된 틈새를 통해 해수가 무한정 유입될 수 있기 때문에, 해저터널 건설시 정확한 설계 및 시공을 위해서는 절리면의 수리특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

절리면의 공학적 특성 중 투수특성에 영향을 미치는 요소는 절리면의 거칠기, 절리면의 간극, 충전물 등이 있으며, 선행 연구자들로부터 이에 대한 특성을 정량화하고자하는 시도가 이루어져왔다(Myers, 1962, Maerz, 1990, Park et al., 2012). Barton and Choubey(1977)에 의해 제시된 절리면의 거칠기 계수(joint roughness coefficient; JRC)는 절리면의 거칠기를 평가하는 대표적인 방법 중의 하나로서, 현재까지 거칠기를 평가하는 표준 지표로 널리 이용되고 있다. 이러한 거칠기의 평가 기준과 투수특성의 상관성 분석을 위해, Zaho(1997)는 JRC 와 JMC (joint matching coefficient)를 함께 고려할 것을 제안하였고, Barton et al.(1985)은 절리면의 수리전단 시험을 통해 절리면의 수리적 간극 및 역학적 간극과 JRC 의 상관식을 제안하였다. 이외에도 절리면의 수리-역학적 거동과 통계적 기법에 의한 상관성 분석 등 절리면의 투수특성을 규명하기 위한 많은 선행 연구들이 수행되어 왔다(Cheon et al., 1999, Lee and Lee, 2000, Lee, 2002, Chae et al., 2004).

암반내 존재하는 절리면은 전단하중 증가 또는 터널 굴착 등의 지반 교란이 없다면 맞물려 있는 거칠기의 형태 그대로 존재하지만, 지반교란이 발생하게 되면 절리면은 전단 및 분리 거동과 절리면 거칠기에 의해 초기 형성된 간극보다 넓고 다양한 형태의 간극이 형성되게 된다. 본 연구에서는 이러한 다양한 간극 조건, 즉 불규칙한 굴곡의 거칠기로 형성되는 절리면을 묘사하고, 간극을 형성시키는 상하 절리면의 거칠기와 투수특성을 분석하기 위해 Barton and Choubey(1977)에 의해 제시된 표준 프로파일을 기준으로 인공 프로파일을 생성시켰으며, 표준 프로파일과 인공 프로파일을 조합하여 유체 유동채널을 제작하였다. 또한 두 프로파일로부터 형성되는 최소 간극과 유동채널의 형상 변화에 따른 수리특성 변화를 수치해석적으로 규명하고자 하였다.

2. 이론적 배경

Darcy의 법칙에 따르면, 다공질 매체를 통과하는 유체흐름은 식 (1)로 정의된다.

$$Q = \frac{kA}{u} \frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

여기서 $Q(m^3/s)$ 는 유체 유동률, $k(m^2)$ 는 투수계수, $A(m^2)$ 는 단면적, $u(kg/m \cdot s)$ 는 유체점성도, $\Delta P(Pa)$ 는 압력변화, $L(m)$ 은 매체의 길이이다. 식 (1)에서 간극의 폭이 일정하고 균열면이 평활하다면, 평판모델에 의해 투수계수는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$k = \frac{e_h^2}{12} \quad (2)$$

여기서 k 는 투수계수, e_h 는 수리적 간극이다. 식 (1)에 식 (2)를 대입하고, 유체흐름의 단면적을 $A = e_h L$ 로 치환시키면, 식 (3)과 같이 Cubic law 방정식이 유도된다. 본 연구에서는 수리해석 결과를 바탕으로 Cubic law 방정식을 이용하여 수리적 간극을 산정하였으며 이를 상관성 분석에 이용하였다.

$$e_h = \left(\frac{12uQ}{\Delta P} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

3. 유체 유동채널 모델

3.1 인공 프로파일 생성

절리면의 거칠기 변화에 따른 수리특성 분석을 위해 본 연구에서는 Barton and Choubey(1977)가 제시한 표준 프로파일을 기준으로 동일한 미소 평균거칠값(A_i) 값을 갖는 인공 프로파일을 생성시켰다. 절리면의 거칠기 정량화에 대한 선행 연구사례들에서 표준 프로파일은 양끝단의 높이가 상이한 것으로 분석된 바 있다(Bryan and Giovanni, 2010; Lee et al., 2011). 실제 표준 프로파일의 양 끝단의 일치에 따른 프로파일의 회전은 1~2° 정도 작은 차이가 발생하지만, Bryan and Giovanni(2010)가 수행한 프로파일 정량화에 관한 연구에서는 프로파일의 재조정이 2차원 정량화 기법으로 프로파일 특성을 표현하는데 있어 보다 정밀한 기준을 제시할 수 있다고 보고된 바 있기 때문에, 본 연구에서는 정밀한 A_i 값의 산출을 위해 이를 재조정하여 양 끝단의 높이를 일치시

JRC grade	JRC value	A_i (°)	Original profiles (Barton and Choubey, 1977)	Revised profiles (modified Lee et al., 2011)
1	0.4	2.08		
2	2.8	2.69		
3	5.8	3.20		
4	6.7	4.86		
5	9.5	4.36		
6	10.8	5.98		
7	12.8	7.05		
8	14.5	7.35		
9	16.7	7.51		
10	18.7	8.85		

.....Original profiles — Revised profiles

Fig. 1. Roughness profiles and A_i corresponding to JRC grade

켰으며, 재조정된 표준 프로파일을 기준으로 인공 프로파일을 생성시켰다(Fig. 1).

인공 프로파일 생성을 위해 적용된 몬테카를로 기법은 높이의 표준편차와 평균값을 갖는 난수를 측정의 개수만큼 발생시켜 인공의 프로파일을 생성하는 방식이다. 높이의 분포특성은 2차원 프로파일의 일반적인 분포특성인 정규분포를 적용하였으며, 평균값은 0으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

몬테카를로 시뮬레이션만으로 프로파일을 생성시키면, 생성 간격에 따라 2차 거칠기 요소만 구현되고, 절리면의 전체 거칠기를 대표하는 1차 거칠기를 묘사할 수 없다. 본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 표준 프로파일과 동일한 미소 평균거칠각의 평균과 표준편차를 갖는 난수를 발생시키고 이를 역산하여 y 좌표를 구하는 방식을 통해 인공 프로파일을 생성하였다. 표준 프로파일에 대한 인공 프로파일의 적합성 검토를 위해, 두 프로파일에서 산출된 A_i 를 비교하는 trial & error 방법을 이용하였다.

A_i 값과 표준 프로파일은 선형적으로 비례하며 측정 간격에 따라 일차함수의 상수항이 변하는 것으로 보고된 바 있다(Zongqu and Xu, 1990). 선행 연구들에서는 측정간격을 0.5 mm로 설정하여 정량화분석에 이용하였지만, 본 연구에서는 측정간격 1.0 mm로 표준 프로파일을 수치화하여 표준 프로파일과 A_i 값의 상관식 (1)을 도출하였으며, 이를 적합성 검토에 이용하였다.

본 연구에서 측정간격을 1.0 mm로 설정한 이유는 측정된 프로파일의 좌표로부터 수치모델을 생성하기 때문에, 측정간격이 조밀해질수록 수치적 계산이 이루어지는 girdpoint와 zone이 증가되고, 이로 인해 해석시간이 증가될 수 밖에 없다. 따라서 수치해석의 효율성을 증대시키기 위하여 예비해석을 통해 측정간격을 1 mm로 설정하였다.

Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 표준 프로파일의 JRC

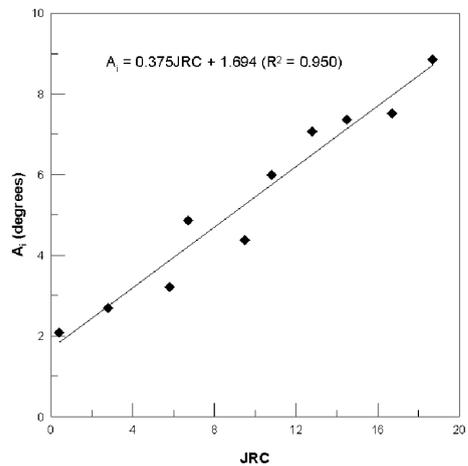


Fig. 2. Comparison of JRC with A_i value (sampling interval: 1 mm)

값으로부터 분석된 A_i 는 JRC 값과 선형적인 비례관계를 나타내고 있으나, JRC 5 등급에 해당하는 A_i 는 JRC 6 등급에 해당하는 A_i 값보다 작게 나타나는 것으로 분석되었다. 표준 프로파일은 절리면의 거칠기 형태를 육안으로 판별할 수 있도록 제한한 경험적인 평가기준이기 때문에, 정량화기법 적용시 수치적인 오차가 발생하는 것으로 보고된 바 있으며(Tse and Cruden, 1979; Kulatilake et al., 1995), 본 연구에서도 이와 동일한 결과를 확인할 수 있었다.

3.2 유동채널 모델 및 해석 조건

유체 유동채널 모델은 Fig. 3과 같이 상부에 표준 프로파일(JRC_B)을 위치시키고, 하부에 인공 프로파일(JRC_A)을 위치시키는 조합으로 모델을 생성시켰다.

각 모델별 최소 간극의 변화에 따른 수리적 간극의 변화를 분석하기 위해 두 프로파일이 접촉하는 최소점을 기준으로 모델별 최소 간극을 0.2 mm 부터 1.0 mm 까지 0.2 mm 간격 차이를 두어 표준 프로파일의 등급별 5개 모델을 생성하였으며, 총 50개 모델에 대한 수리해석을 수행하였다(Fig. 4).

동일한 A_i 값을 갖는 표준 프로파일과 인공 프로파일을 조합하더라도 프로파일의 형상에 따라 유동채널의 면적이 달라지고, 이에 따라 역학적 간극과 수리적 간극이 변화하게 된다(Fig. 5). 따라서 본 연구에서는 이에 대한 영향을 분석해보고자, 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 표준 프로파일 등급별 9개의 인공 프로파일을 추가 생성시켰으며, 위와 같은 방법으로 프로파일들을 조합하여 총 90개의 유동채널 모델을 제작하였다. 이 유동채널 모델들은 최소 간극 0.4 mm를 기준으로 제작되었으며, 앞서 제작된 50개 모델 중 동일한 최소 간극 0.4 mm를 갖는 10개 모델을 추가하여 총 100개 모델에 대한 수리해석 결과를 정리하였다.

본 연구에서 사용된 해석 프로그램은 유한요소 코드로 제작된 Itasca 사의 FLAC 2D로서, 수리해석을 위한 구성 방정식은 Darcy의 법칙에 근거하고 있다. 수리해석에 사용된 입력 물성은 Table 1과 같으며, 일반적으로 사용되는 물의 물성을 해석에 이용하였다. 또한, 모

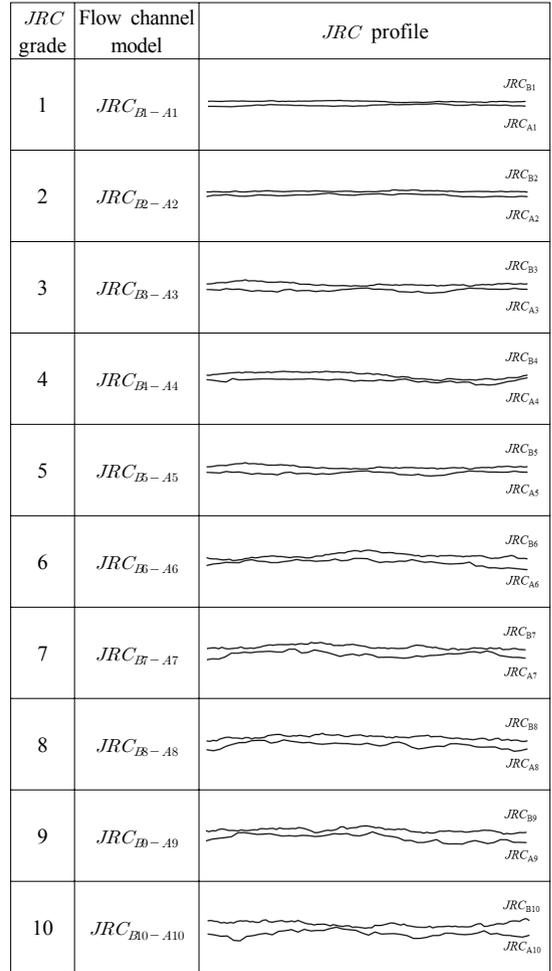


Fig. 4. JRC_{B-A} flow channel model

Table 1. Water property used in numerical simulation

Fluid	Water
Density (kg/m^3)	998.2
Viscosity ($kg/m \cdot s$)	1.0×10^{-3}
Bulk modulus (GPa)	2.0
Permeability ($m^2/Pa \cdot s$)	1.0×10^{-4}

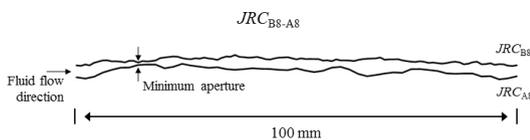


Fig. 3. JRC_{B-A8} flow channel model

든 유동채널 모델에 대하여 모두 동일한 투수율(permeability)을 갖도록 설정하였고, 채널에 주입되는 투수량도 동일하게 유지시켰으며, 채널에 주입되는 압력과 배출되는 압력을 측정하여 결과분석에 이용하였다.

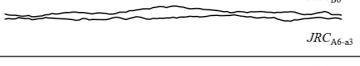
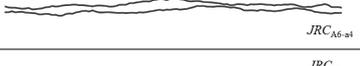
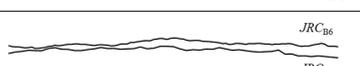
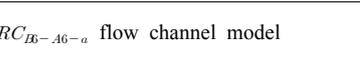
Flow channel model	JRC Profile
$JRC_{B6-A6-a1}$	
$JRC_{B6-A6-a2}$	
$JRC_{B6-A6-a3}$	
$JRC_{B6-A6-a4}$	
$JRC_{B6-A6-a5}$	
$JRC_{B6-A6-a6}$	
$JRC_{B6-A6-a7}$	
$JRC_{B6-A6-a8}$	
$JRC_{B6-A6-a9}$	
$JRC_{B6-A6-a10}$	

Fig. 5. $JRC_{B6-A6-a}$ flow channel model

4. 수치해석 결과

4.1 최소 간극의 변화에 따른 수리특성 변화

4.1.1 최소 간극의 변화에 따른 유동채널 내에서의 유체흐름

동일한 A_i 값을 갖는 표준 프로파일과 인공 프로파일을 조합하여 생성시킨 유동채널 모델에서 최소 간극의 변화를 주어 수치해석을 수행한 결과, 최소 간극의 변화에 따라 최소 간극지점 주변의 단위 면적당 유체 유동률이 변화하는 양상을 나타냈다.

Fig. 6은 JRC_{B8-A8} 유동채널 모델 중 최소 간극 0.2 mm, 0.6 mm 그리고 1.0 mm 모델의 해석결과를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 유체는 채널의 면적이 좁아지는 구간, 즉 두 프로파일이 이루는 최소 간극지점을 통과한 직후, 유동채널의 면적이 넓어지는 지점에서 단위면적당 최대 유동률을 나타냈으며, 이때 최대 유동률은 최소 간극 0.2 mm, 0.6 mm 그리고 1.0 mm 모델에서 각각 $5.856 \times 10^{-4} m^3/s$, $3.103 \times 10^{-4} m^3/s$,

$2.351 \times 10^{-4} m^3/s$ 을 나타냈다. 또한, 최소 간극 0.2 mm 모델과 1.0 mm 모델에서의 최대 유동률 차이는 $3.505 \times 10^{-4} m^3/s$ 로써, 최소 간극이 증가할수록 단위면적당 최대 유동률이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

4.1.2 최소 간극 변화에 따른 역학적/수리적 간극의 변화

Fig. 7은 JRC 등급별 모델의 A_i 값과 역학적 간극 및 수리적 간극을 각 최소 간극별로 나누어 나타낸 그래프이다. 본 연구에서 역학적 간극은 전체 유동채널의 면적에서 유동거리 나누어 산정하였고, 수리적 간극은 주입 압력과 배출압력의 차와 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

일반적으로 동일한 형상의 유동채널 모델에서 최소 간극을 증가시키면 유동면적이 증가하기 때문에 유체의 유동이 수월하게 된다. 본 연구에서도 확인할 수 있듯이 최소 간극이 증가됨에 따라 수리적 간극과 역학적 간극은 증가하는 양상을 나타냈다. 또한 A_i 값이 커질수록 거칠기 높낮이 차이가 커지기 때문에 유동채널의 면적은 증가하게 되고, 이로 인해 수리적 간극과 역학적 간극의 차이가 증가하는 양상을 나타냈다.

4.2 유동채널 형상에 따른 수리특성 변화

4.2.1 유동채널의 형상에 따른 유동채널 내에서의 유체흐름

유동채널을 이루는 두 프로파일의 높낮이에 따라 간극의 최소 지점의 위치는 모델마다 다르게 나타나며, 채널의 형상 또한 불규칙하게 나타난다. 이에 대한 영향을 살펴보고자 동일한 A_i 값을 갖는 표준 프로파일과 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 생성시킨 인공 프로파일 조합하여 최소 간극 0.4 mm 조건에서 JRC 등급별 10개의 유동채널 모델에 대한 수치해석을 수행하였다.

Fig. 8은 JRC 6등급의 2가지 $JRC_{B6-A6-a}$ 유동 채널 모델에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)의 유동채널 모델은 상부 표준 프로파일과 하부 인공 프로파일의 형상이 서로 대칭적인 모델로써, 유체의 주입부와 배출부의 간극이 중간 부분보다 작고, 최소 간극은 유체의 주입부 근처에 형성된 모델이다. 이와 반면에 Fig. 8(b)의 모델은 하부 인공 프로파일이 상부 표준 프로파일과 유사한 형태의 굴곡을 갖고 있기 때문에 유체의 유동면적이 Fig. 8(a)의 모델보다 작게 형성되었다. 또한 두 프로파일의 전체적인 굴곡은 유사하지만 부분적인 높낮이의 차이로 인하여 모델의 2/3 지점에서 최소 간극지점이 형성되었다. 두 모델에서 단위면적당 최대 유동률은 각각 $2.751 \times 10^{-4} m^3/s$ 와 $4.065 \times 10^{-4} m^3/s$ 로써 채널의 형상에 의해 서로 상이하게 나타났다.

앞서 분석된 결과로부터 확인할 수 있듯이, 하부에 조

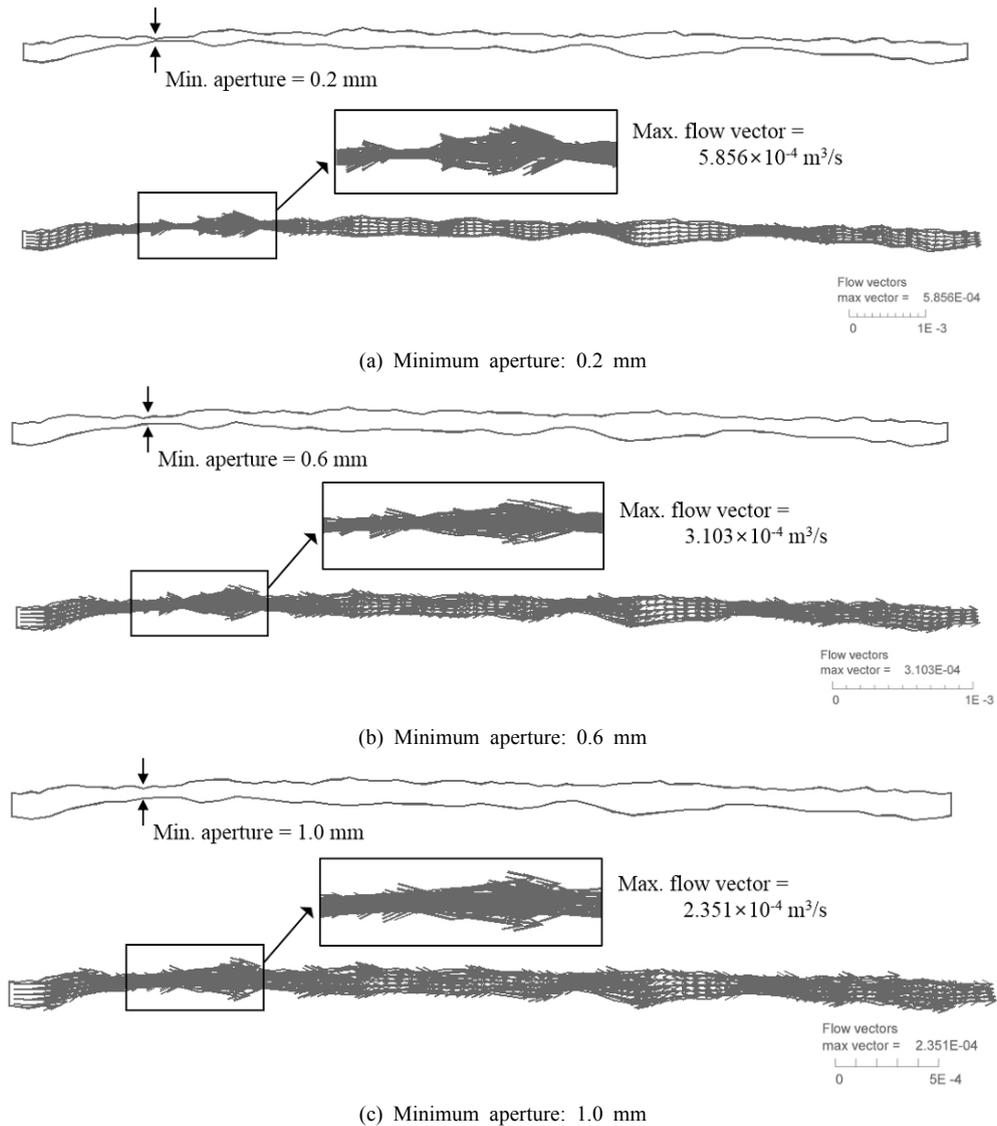


Fig. 6. Flow vector for JRC_{B-48} flow channel

합되는 인공 프로파일은 동일한 A_i 값을 갖고 있지만, 프로파일의 형상에 따라 유동채널의 형상이 다양하게 나타난다. 또한 최소 간극지점의 위치가 모델마다 다르고, 이에 따라 단위면적당 최대 유동률 또한 모델마다 다른 값을 나타낸다.

4.2.2 유동채널의 형상에 따른 역학적/수리적 간극의 변화

앞서 분석된 바와 같이 허부에 위치하는 인공 프로파일의 형상에 따라 유동채널의 단면적이 다르기 때문에,

동일한 A_i 값을 갖는 모델 내에서 역학적 간극과 수리적 간극은 다르게 나타난다.

Fig. 9와 Fig. 10으로 확인할 수 있듯이, JRC 3 등급 이하의 값을 갖는 모델들은 다른 모델들에 비해 역학적 간극과 수리적 간극의 편차가 비교적 작게 나타나지만, JRC 4 등급 이상의 값을 갖는 모델들은 그 편차의 범위가 크게 나타난다. 본 해석모델들 중에서 역학적 간극과 수리적 간극의 최소 편차를 나타내는 모델들은 JRC 1등급에 해당하는 모델들로서, 역학적 간극은 0.743 mm

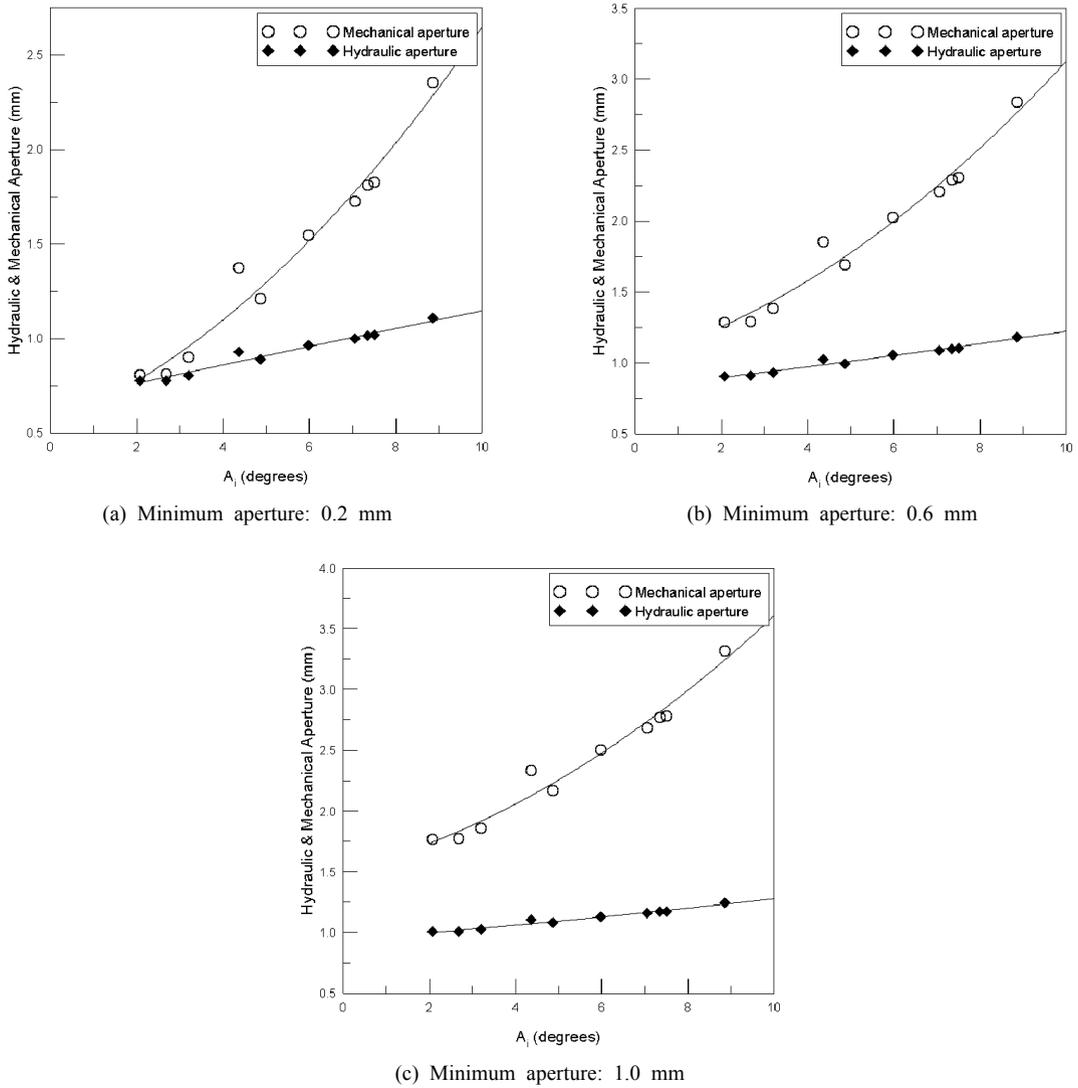


Fig. 7. Mechanical/hydraulic aperture for A_i value with different of minimum aperture

~1.113 mm, 수리적 간극은 0.697 mm~0.798 mm 의 범위 내에 분포한다(Fig. 9). 반면 최대 편차를 나타내는 모델들은 JRC 10 등급에 해당하는 모델들이며, 역학적 간극은 1.843 mm~3.508 mm, 수리적 간극은 0.943 mm~1.169 mm 의 범위 내에 분포한다(Fig. 10).

Fig. 11로부터 확인할 수 있듯이 역학적 간극은 0.743 mm~3.508 mm 범위, 수리적 간극은 0.697 mm~1.169 mm 범위 내에 분포하며, 역학적 간극은 수리적 간극에 비해 최소 1.07 배에서 최대 3.00 배 정도 큰 것으로 나타났다(Fig. 11). 결과적으로 본 수치해석에서 분석된 A_i 값과 역학적 간극은 $e_m = 0.519A_i^{0.7169}$ ($R^2 = 0.766$)의

관계를 나타내고, 수리적 간극은 $e_h = 0.6182A_i^{0.239}$ ($R^2 = 0.766$)의 관계를 나타내는 것으로 분석되었다. A_i 값과 두 간극의 상관식은 비교적 높은 $R^2 = 0.766$ 의 상관성을 나타냈다.

4.2.3 e_h/e_m 와 A_i 값의 상관관계

앞서 분석된 결과로부터 수리적 간극과 역학적 간극의 비(e_h/e_m)와 A_i 값의 상관관계를 Fig. 12와 같이 나타내었으며, e_h/e_m 은 A_i 값이 증가됨에 따라 감소하는 경향을 보였다.

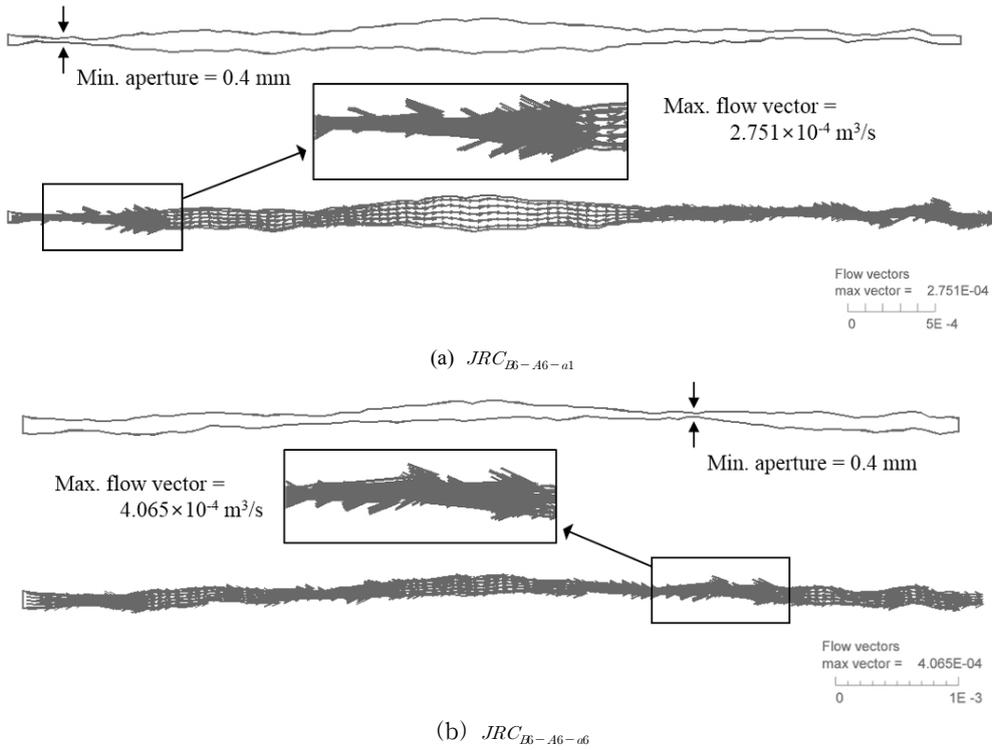


Fig. 8. Flow vector for JRC_{B-A6-a} flow channel (minimum aperture: 0.4mm)

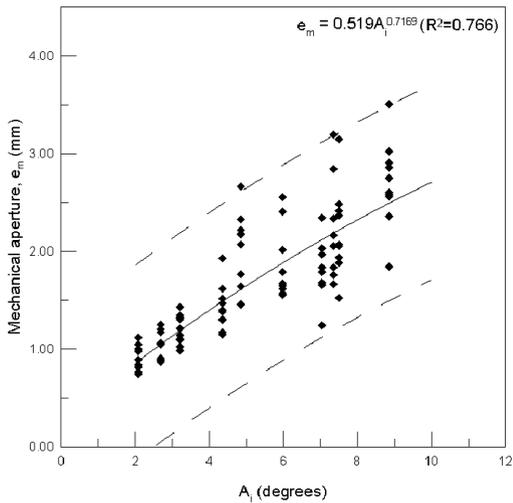


Fig. 9. Mechanical aperture for A_i value (minimum aperture: 0.4 mm)

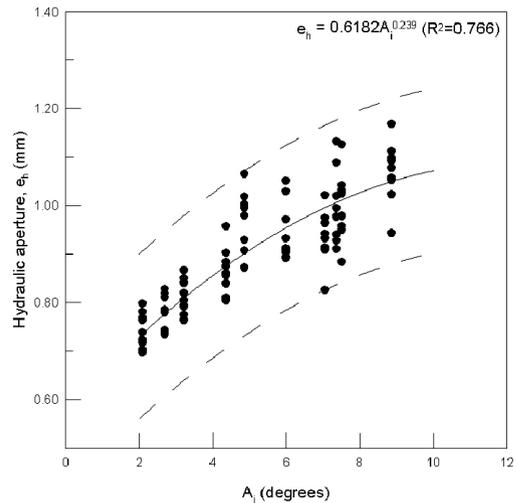


Fig. 10. Hydraulic aperture for A_i value (minimum aperture: 0.4 mm)

Fig. 9와 Fig. 10에서 분석된 바와 같이 A_i 값이 증가할수록 두 간극의 크기는 증가하는 경향을 나타내지만, A_i 값이 증가할수록 역학적 간극의 증가율이 수리적 간

극의 증가율에 비해 커지기 때문에, Fig. 12와 같이 e_h/e_m 이 감소하는 경향을 나타낸 것이다.

다시 말해 A_i 값이 큰 프로파일 일수록 거칠기의 높

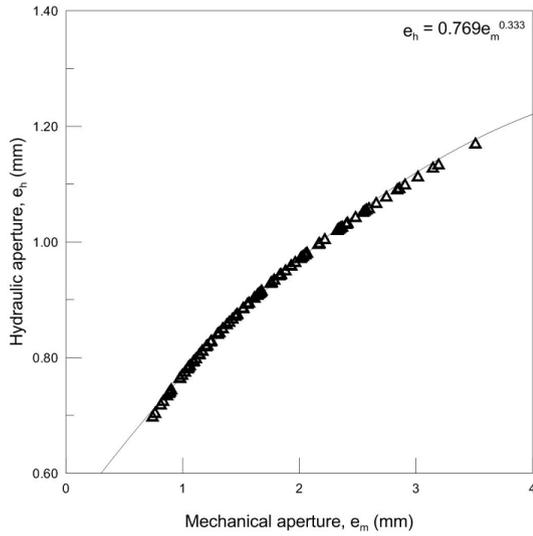


Fig. 11. Correlation between mechanical and hydraulic aperture for JRC_{B-A} (minimum aperture: 0.4 mm)

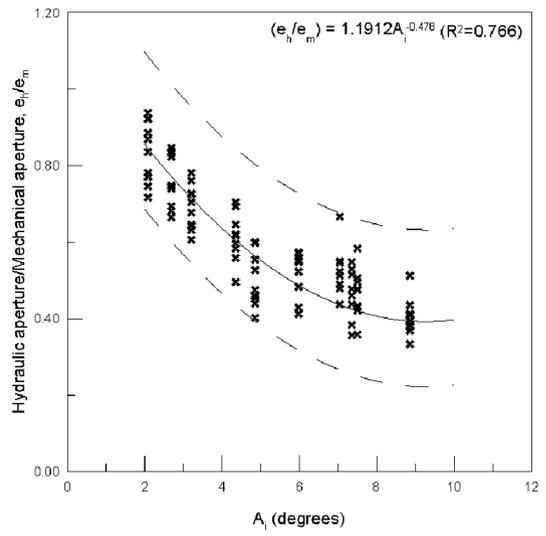


Fig. 12. Relationship between hydraulic/mechanical aperture ratio and A_i value

낮이 변화가 크기 때문에 이로 인해 형성되는 역학적 간극은 증가하는 반면, 유체는 이 역학적 간극을 따라 유동이 수월한 경로로만 이동하기 때문에, 유동을 위해 이용되는 역학적 간극, 즉 수리적 간극이 전체 역학적 간극에 비해 상대적으로 작아 이러한 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

5. 고찰 및 토의

본 연구에서 역학적 간극은 수리적 간극보다 최대 약 3배정도 큰 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 Cheon et al.(1999)가 인공 절리시험편과 회전식 전단시험기를 이용하여 수행한 수리-전단 시험결과(역학적 간극이 수리적 간극보다 약 10배정도 큼)와 다소 다른 결과를 보여주고 있다. 이는 본 연구의 결과가 2차원 수치해석에 의한 것이기 때문에 실제 암석절리면에 관한 3차원적 실험결과보다 그 비율이 작게 나타난 것으로 판단된다. 다시 말해, 절리면에 관한 3차원적 유체유동해석에서는 유체가 절리면의 전체 면적을 통과하는 것이 아니라 유동이 수월한 경로를 따라 이동하려는 경향을 보이기 때문에 수리적 간극과 역학적 간극의 차이는 상대적으로 큰 값을 보일 수밖에 없을 것이다. 반면 절리면의 거칠기와 유체유동에 관한 2차원적 해석에서는 주어진 유동채널을 따라서만 유체의 흐름이 이루어져야 하기 때문에 수리적 간극과 역학적 간극의 차이는 상대적으로 작

은 값을 보이게 되는 것이다. 따라서 이러한 2차원적 해석의 한계점을 감안한 상태에서 절리면의 역학적 간극과 수리적 간극의 상관관계를 도출한 점은 향후 3차원적 절리의 수리특성 분석시 유체유동에 관한 기초연구 자료로 활용될 수 있을 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 절리면 거칠기와 수리적 간극의 상관성을 검토해 보기 위해 Barton이 제시한 표준 프로파일을 기준으로 유사한 미소 평균거칠각(A_i)을 갖는 인공 프로파일을 몬테카를로 기법을 이용하여 생성시켰으며, 표준 프로파일과 인공 프로파일을 조합하고 최소 간극의 간격을 변화시켜 유동채널 모델을 제작하였다. 이로 부터 절리면의 거칠기와 유동채널 내의 최소 간극, 유동채널의 형상이 수리특성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 수행한 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 같은 거칠기 특성을 갖는 표준 프로파일과 인공 프로파일의 조합하여 생성시킨 유동채널 모델에서 최소 간극의 변화를 주어 수리해석을 수행한 결과, 두 프로파일이 이루는 최소 간극지점을 통과한 직후, 유동채널의 면적이 넓어지는 지점에서 단위면적당 최대 유동률을 나타냈으며, 최소 간극이 증가할수록 최대 유동률은 감소하는 것으로 확인 되었다.

2. 동일한 A_i 값을 갖는 유동채널 모델에서 최소 간극이 증가함에 따라 유동면적과 수리적 간극, 역학적 간극이 증가하는 양상을 나타냈으며, A_i 값이 커질수록 거칠기의 영향으로 유동채널 면적이 증가하며, 수치적 간극과 역학적 간극의 차이도 증가하는 것으로 나타났다.
3. 유동채널 내의 간극의 최소 지점 위치에 따른 영향을 보기 위하여, 동일한 A_i 값을 갖는 표준 프로파일과 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 생성시킨 인공 프로파일을 조합하여 최소 간극 0.4 mm 조건에서 수리해석을 수행하였다. 그 결과 하부에 조합되는 인공 프로파일은 동일한 A_i 값을 갖고 있지만, 프로파일 형상에 따라 유동채널의 형상이 다양하게 나타나고 최소 간극지점의 위치가 모델마다 다르기 때문에 단위면적당 최대 유체 유동률 또한 모델마다 다른 값을 나타냈다. 결과적으로 유동채널 내에서의 최소 간극 지점의 위치와 전후 유동 면적에 따라 단위면적당 최대 유체 유동률이 국부적으로 달라질 수 있음을 확인할 수 있었다.
4. 하부에 위치하는 인공 프로파일의 형상에 따라 유동채널의 단위면적이 다르기 때문에, 동일한 A_i 값을 갖는 모델 내에서 역학적 간극과 수리적 간극은 다르게 나타나게 된다. *JRC* 3 등급 이하의 모델들은 상대적으로 역학적 간극과 수리적 간극의 편차가 작게 나타나지만, *JRC* 4 등급 이상의 값을 갖는 모델들은 편차 범위가 비교적 크게 나타났다. 또한 역학적 간극은 수리적 간극에 비해 최소 1.07배에서 최대 3.00배 정도 크며, 본 수리해석에서 분석된 A_i 값과 역학적 간극은 $e_m = 0.519A_i^{0.7169}$ ($R^2 = 0.766$)의 관계를 나타내고, 수리적 간극은 $e_h = 0.6182A_i^{0.239}$ ($R^2 = 0.766$)의 관계를 나타내는 것으로 분석되었다.
5. 수리적 간극과 역학적 간극의 비(e_h/e_m)와 A_i 값의 상관관계를 분석해본 결과, A_i 값이 증가할수록 역학적 간극의 증가율이 수리적 간극의 증가율에 비해 커지기 때문에 e_h/e_m 이 감소하는 경향을 나타냈다. 본 연구에서의 e_h/e_m 과 A_i 값은 $e_h/e_m = 1.192A_i^{-0.478}$ ($R^2 = 0.766$)의 상관성을 갖는 것으로 분석되었다.

본 연구는 절리면의 거칠기와 수리특성에 대한 정량화를 위한 기초 연구로서 절리면의 형상과 최소 간극의 영향을 수치해석적으로 검증하고, 역학적 간극과 수리적 간극의 상관관계를 도출하였다. 이는 3차원의 절리면에 대한 거칠기와 수리특성 분석시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 3차원 절리면에 대한

수리특성 분석과 수압의 변화에 따른 절리면의 거칠기와 투수특성의 변화에 대한 연구도 진행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

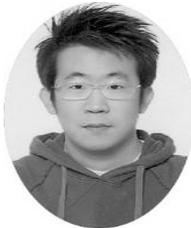
본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소기술 개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사드립니다.

References

1. Barton, N. R. and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech.*, Vol. 10, pp. 1-54.
2. Barton, N. R., Bandis, S. and Bakhtar, K., 1985, Strength deformation and conductivity coupling of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22(3), pp. 121-140.
3. Bryan, S. A. T. and Giovanni, G., 2010, A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with *JRC*, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 47, pp. 1391-1400.
4. Chae, B. G., Seo, Y. S. and Kim S. J., 2004, A study on hydraulic characteristic of rock joints dependant on *JRC* ranges, *J. of Engineering Geology*, Vol. 14(4), pp. 461-468.
5. Cheon, D. S., Lee, S. H., Lee, C. I. and Lee, H. K., 1999, A study on hydro-mechanical behaviors of rock joints using rotary shear testing apparatus, *Tunnel & Underground Space*, Vol. 9(4), pp. 328-336.
6. Kulatilake, P. H. S., Shou, G., Huangk, T. H. and Morgan, R. M., 1995, New peak shear strength criteria for Anisotropic rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 32(7), pp. 673-697.
7. Lee, D. H., Lee, S. J. and Choi, S. O., 2011, A study on 3D roughness analysis of rock joint based on surface angularity, *Tunnel & Underground Space*, Vol. 21(6), pp. 494-507.
8. Lee, H. S. and Lee, Y. K., 2000, A numerical analysis on the shear and hydraulic behavior of single rock joint roughness, *Tunnel & Underground Space*, Vol. 10(3), pp. 366-377.
9. Lee, S. D., 2002, A study of the influence of roughness on fracture shear behaviour and permeability, *Tunnel & Underground Space*, Vol. 12(4), pp. 312-320.
10. Myers, N., 1962, Characterization of surface roughness, *Wear*, Vol. 5(3), pp. 182-189.
11. Maerz, N. H., Franklin, J. A. and Bennett, C. P., 1990, Joint roughness measurement using shadow profilometry, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 27(5), pp. 329-343.

12. Park, J. W., Lee, Y. K., Song, J. J. and Choi, B. H., 2012, A new coefficient for three dimensional quantification of rock joint roughness, Tunnel & Underground Space, Vol. 22(2), pp. 106-119.
13. Tse, R. and Cruden, D. M., 1979, Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, pp. 303-307.
14. Zhao, J., 1997, Joint surface matching and shear strength part A: joint matching coefficient (JMC), Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34(2), pp. 173-179.
15. Zongqu, S. and Xu, F. M., 1990, Study of rock joint surface feature and it's classification, Proc. Int. Conf. Rock Joints., Leon, Norway, pp. 101-107.

이 승 중



2007년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2009년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 033-255-6253
E-mail: lhj3601@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 에너지·자원공학과 대학원 박사과정

김 병 렬



2012년 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학사
2014년 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 공학석사

Tel: 033-255-6253
E-mail: shingcore@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 에너지·자원공학과 대학원 박사과정

최 성 응



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-250-6253
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수
