

PFC2D 활용을 위한 정량적 미시변수 결정법

정용훈^{1)*}, 이정인²⁾

Suggested Method for Determining a Complete Set of Micro-Parameters Quantitatively in PFC2D

Yong-Hun Jong and Chung-In Lee

Abstract The discrete element code in 2-D, PFC2D, has been used as a tool to simulate various phenomena in rock mechanics and rock engineering. However, the code has an disadvantage that procedure to determine micro-parameters, namely properties of particles and contacts is repetitive and time-consuming. In this study, we analyzed the effect of micro-parameters (for generation of a contact-bonded model) on macro-properties (that were measured numerically by uniaxial compressive test). Based on the analysis, also, the time-saving and reliable method was suggested to determine a complete set of micro-parameters. In order to verify the suggested method, numerical specimens were generated in PFC2D for 10 different rock types at home and abroad. By the two trials for each specimen, in the result, the Young's modulus, Poisson's ratio and uniaxial compressive strength could be reproduced with being in relative error by about 5% to the values obtained by laboratory tests.

Key words Discrete element method, PFC2D, Young's modulus, Poisson's ratio, Uniaxial compressive strength

초 록 개별요소법을 사용한 수치해석 프로그램인 PFC2D는 암석역학에 많이 사용되고 있다. 그러나 해석 모델을 구성하는 입자와 접촉의 특성을 결정하기 위해서는 시행오차적인 지루한 반복 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 해석 모델을 정의하는 미시변수가 일축압축시험으로부터 얻어지는 거시 물성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 분석 결과에 기초하여 간단하고 신뢰할 수 있는 정량적인 미시변수 결정법을 제안하였다. 제안된 미시변수 결정법을 검증하기 위하여 10 종류의 암석 시험편을 생성하기 위한 수치 실험을 수행하였다. 그 결과 단 2회의 수치 실험만으로 탄성계수, 포아송비 그리고 일축압축강도를 실험실 시험값과의 상대오차 5% 내외로 재현할 수 있었다.

핵심어 개별요소법, PFC2D, 탄성계수, 포아송비, 일축압축강도

1. 서 론

개별요소법을 사용하여 강성 입자들로 구성된 집합체의 이동과 상호작용을 모델화한 상용 수치해석 프로그램인 PFC는 암석역학 분야에 많이 사용되고 있다. 특히 실험실 시험인 일축압축시험¹⁻⁶⁾과 직접전단시험⁷⁻¹⁰⁾에서의 변형 거동이나 파괴 특성과 터널 굴착에 의한 주변 암반의 변형 거동이나 파괴 특성¹¹⁻¹⁵⁾에 관한 연구뿐만 아니라 발파를 수치적으로 모사하는 연구¹⁶⁻¹⁹⁾에도

적용되어 왔다. 이러한 PFC에 대한 전반적인 특성은 Potyondy & Cundall²⁰⁾에 의해 정리되었다.

이전의 연구자들^{1,4,21)}은 PFC에서의 미시변수와 거시 물성간의 관계를 제시하였다. Boutt & McPherson¹⁾은 PFC2D에서 입자마찰계수를 0.5로 고정시킨 병행결합 모델을 적용하여 퇴적암 시험편을 모사하는 연구를 수행하였다. 그들은 입자마찰계수와 입자 군집(**particle clustering**)은 파괴포락선의 기울기에, 수직·인장 접촉 강성과 결합강성은 탄성계수와 포아송비에, 그리고 병행결합 수직·전단강도와 접촉결합 수직·전단강도는 일축압축강도에 크게 영향을 미침을 확인하였다. Hazzard *et al.*⁴⁾에 의하면 접촉결합 전단강도에 대한 수직강도의 비는 모델의 파괴 특성과 전단균열과 인장균열의 비에

¹⁾ 서울대학교 에너지자원기술연구소 박사후연구원

²⁾ 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

* 교신저자 : wizard@rockblast.net

접수일 : 2006년 7월 20일

심사 완료일 : 2006년 8월 10일

영향을 미친다. 일반적으로 입자 강성비 k_n/k_s 가 증가함에 따라 포아송비는 증가한다. Potyondy & Cundall²¹⁾은 Lac du Bonnet 화강암에서 대하여 k_n/k_s 와 포아송비와의 비선형적인 관계를 제시하였다.

반면에 입자의 패킹(packings)은 모델의 강성과 강도에 $\pm 5\%$ 정도의 미미한 영향을 미친다. 그리고 코드에 내장된 관계식에 의해서 입자와 시료의 크기의 비는 모델의 거동에 영향을 미치지 않는다⁴⁾.

이러한 연구들에도 불구하고, PFC의 사용자들은 Itasca²²⁾에 서술된 일련의 시행오차법을 이용하여 미시변수의 값을 결정하는 단순한 반복 과정을 수행하는데 많은 시간을 소비해야 한다. 따라서 본 연구에서 PFC2D를 암석의 변형 거동이나 파괴 특성 등을 연구하기 위한 목적으로 사용하기에 앞서, 일축압축강도, 포아송비, 탄성계수와 같은 주요 거시 물성을 동시에 재현할 수 있는 미시변수의 값을 쉽게 결정하는 방법에 대해 연구하였다.

2. 거시 물성에 대한 미시변수의 영향

본 연구에서 언급된 거시 물성은 일축압축시험에서 측정될 수 있는 5개의 물성(Table 1)을 일컬으며, 미시

변수는 PFC2D에서 해석 모델을 구성하는 입자와 접촉의 특성을 정의하는 8개의 변수로, 입자 밀도(A), 입자 최소 반지름(B), 입자 마찰계수(C), 입자간 접촉계수(D), 입자 강성비(E), 접촉결합의 평균 수직강도(F), 접촉결합의 평균 전단강도(G) 그리고 접촉결합의 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비(H)가 이에 해당한다(Table 2). 본 연구에서는 접촉결합모델을 채택하였다.

일축압축시험을 위해 생성한 수치 시험편의 너비와 길이는 각각 54 mm와 108 mm이었다.

2.1 부분배치법(Fractional Factorial Design, FFD)

PFC2D에서 모델 생성에 사용되는 미시변수가 거시 물성에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 각 인자들을 바꾸어 가면서 이들의 영향을 조사해야 한다. 8개의 미시변수가 거시 물성에 미치는 영향에 대한 민감도 분석과 각 인자들 사이의 영향을 분석하기 위해서는 각 인자들의 값을 변경시키면서 $2^8=256$ 번의 모델링을 실시하여야 한다. 하지만 미시변수간의 고차의 상호작용 영향이 미약하여 이를 무시할 수 있는 경우, 완전배치 실험의 일부만을 실행하여 주 영향(main effect)과 저차의 상호작용 영향(interaction effect)을 결정할 수 있다. 이

Table 1. Macro-properties to be investigated in PFC2D simulations

Kind of Test	Macro-property	Abbreviation
Uniaxial compressive test	Young's modulus	Y1
	Poisson's ratio	Y2
	Uniaxial compressive strength	Y3
	Crack initiation stress	Y4
	Y4/Y3	Y5

Table 2. Complete set of micro-parameters for generation of a contact bonded model in PFC2D

Micro-parameter (Factor)	Unit	Abbrev.	Factor Levels		
			Low (-1)	High (+1)	Average
ρ	kg/m ³	A	2,500	3,300	2,900
r_{min}	m	B	2.5×10^{-4}	7.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
μ	-	C	0.30	0.70	0.50
E_c	GPa	D	20	150	85
k_n/k_s	-	E	2.0	4.0	3.0
σ_c (mean)	MPa	F	20	150	85
τ_c (mean)	MPa	G	20	150	85
s.d./mean (σ_c , τ_c)	-	H	0.10	0.30	0.20

러한 부분배치법(FFD, Fractional Factorial Design) 중 에서, 2^{k-p} 회 실험을 수행하는 2^k FFD는 $1/2^p$ 비율의 2^k 설계법, 더 간단히 2^{k-p} FFD라고 불린다²³⁾. 여기서 k는 설계변수의 수이고 p는 실험 설계의 해상도를 결정하는 변수이다. 여기서 주 영향(main effect)은 미시변수의 변화에 의해 야기되는 결과인 거시 물성의 변화에 미치는 영향을 의미한다. 또한 거시 물성에 미치는 미시변수들의 영향은 다른 미시변수들의 변화에 따라 영향을 받게 되는데 이를 상호작용 영향(interaction effect)이라 한다.

본 연구에서 거시 물성에 대한 8개의 미시변수의 영향을 조사하기 위하여 부분배치법을 적용하였다. 설계 변수의 수가 8개인 경우에 사용되는 부분배치법에는 2^{8-4} FFD, 2^{8-3} FFD 그리고 2^{8-2} FFD가 있다. 이 방법 중에서 2^{8-4} FFD와 2^{8-3} FFD는 특정 2차 상호작용 영향이 몇 개의 2차 상호작용 영향을 합산하여 반영하여 산정된 경우가 있으므로²⁴⁾, 본 연구에서는 특정 2차 상호작용 영향이 다른 2차 상호작용 영향을 반영하지 않는 부분배치법인 2^{8-2} FFD를 적용하였다. 이 때 2차 초과 상호작용 영향은 무시할 수 있는 수준이라고 가정하였다. 2^{8-2} FFD를 적용하여 거시 물성에 대한 미시변수들의 주 영향과 2차 상호작용 영향을 파악하는데 64회의 실험을 수행해야 한다.

실험 설계의 적용에 앞서 사용될 8개의 미시변수에 대한 최소값과 최대값을 설정해야 한다. 이를 위해 서울대학교 암반공학연구소에서 수행한 일축압축시험에 의해 얻어진 국내 화강암과 편마암에 대한 주요 물성, 즉 탄성계수(Y1), 포아송비(Y2) 그리고 일축압축강도(Y3)의 분포를 분석하였다. Fig. 1은 각 물성치의 분포를 도시한 것이다. 탄성계수는 대부분 90 GPa 이하였

으며 평균 40 GPa이었다. 포아송비는 0.15~0.35의 범위에 분포하였고, 일축압축강도는 대부분 200 MPa 이하였다.

장수호²⁵⁾에 의하면 황등화강암과 여산대리암에 대하여 일축압축시험을 수행하여 일축압축강도(Y3)에 대한 균열개시응력(Y4)의 비($Y5=Y4/Y3$)는 각각 평균 0.333(표준편차 : 0.034)과 평균 0.365(표준편차 : 0.028)로서 유사하였다. 또한 그는 일축압축시험 중 발생한 균열의 음원을 분석하여 전단균열, 인장균열, 혼합모드 균열로 구분하였다. 그 결과 황등화강암의 경우 전체 균열 중 전단균열, 인장균열, 혼합모드 균열이 각각 57.67%, 26.55%, 15.62%를 차지하였고, 여산대리암의 경우 각각 60.21%, 25.42%, 14.54%이었다

실험 설계 방법으로 선택된 2^{8-2} FFD에 사용되는 8개의 미시변수의 단위와 설정 범위는 Table 2에 제시하였다. 여기서 미시변수의 최소값과 최대값은 기존의 연구에서 제시된 암석 물성 분포를 반영할 수 있도록 설정하였다.

또한 2^{8-2} FFD에 의해 설계된 64번의 실험에서의 미시변수 설정 방법과 PFC2D에서의 각각에 대하여 일축압축시험을 수치 실험하여 얻어진 5개의 거시 물성은 이전의 연구²⁴⁾에 제시하였다.

2.2 거시 물성에 대한 미시변수의 영향

거시 물성에 대한 미시변수의 민감도 분석을 수행하기 위해서 상용 통계프로그램인 NCSS를 사용하였다. 각각의 거시 물성에 대한 미시변수의 주 영향과 상호작용 영향을 계산하여 정규확률지에 도시하면 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 도시된 직선과 많이 떨어진 영향일수록 해당 거시 물성에 더 많은 영향을 미치는 변수임을

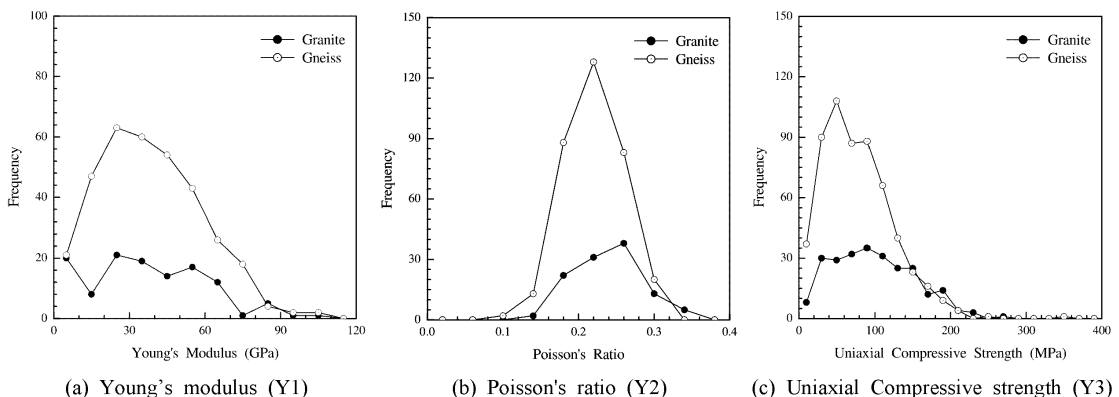


Fig. 1. Physical properties for granite and gneiss in Korea

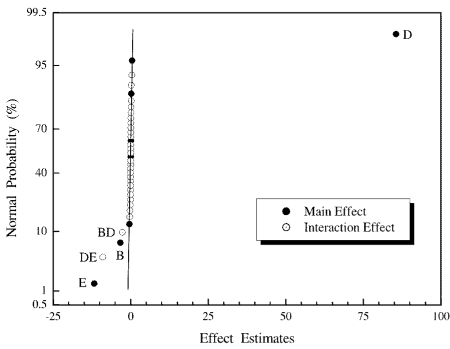
의미한다. 민감도 분석과 더불어 분산 분석을 실시하여, 그 결과에 기초하여 유의수준 0.05에서 거시 물성에 영향을 미치는 미시변수만을 선정하면 Table 3과 같다. 여기서 미시변수는 계산된 영향의 크기에 따라 계층적으로 나열하였다.

탄성계수(Y1)는 입자간 접촉계수(D)에 가장 크게 좌우되며, 그 다음으로 입자 강성비(E)와 이 두 미시변수

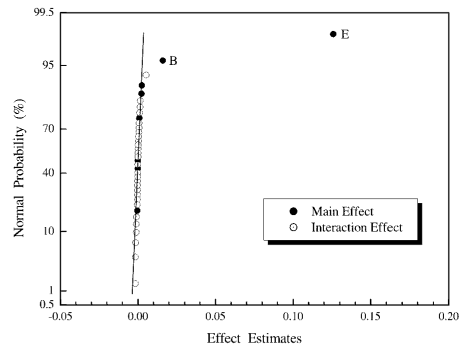
의 상호작용(D · E)에 영향을 받는다. 특히 입자간 접촉계수가 커짐에 따라 그리고 입자 강성비가 작아짐에 따라 탄성계수는 증가하였다.

포아송비(Y2)는 입자 강성비(E)가 증가함에 따라 상당히 증가하는 경향을 보였다. 이 외에 입자의 최소 반지름(B)이 커짐에 따라 포아송비도 약간 커졌다.

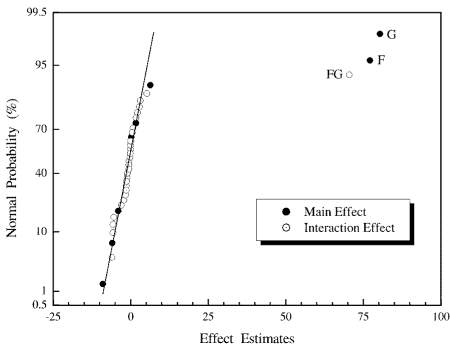
일축압축강도(Y3)는 접촉결합의 평균 수직강도(F)와



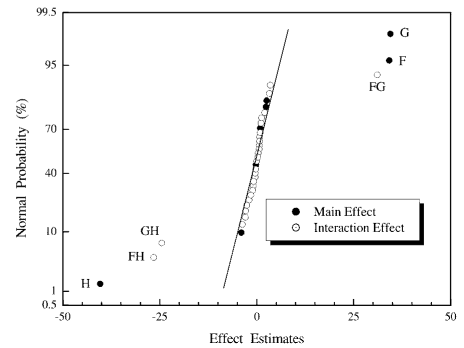
(a) Young's modulus (Y1)



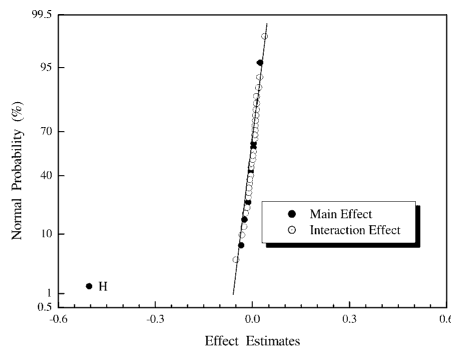
(b) Poisson's ratio (Y2)



(c) Uniaxial compressive strength (Y3)



(d) Crack initiation stress (Y4)



(e) Ratio of crack initiation stress to uniaxial compressive strength (Y5)

Fig. 2. Normal probability plot of the effect estimates for the 2^{8-2} FFD

Table 3. Significant factors determined by the analysis of variance

(a) Young's modulus (Y1).
D ≫
E > D · E >
B > B · D ≫
G > H > F · G > D · H > D · G > F > F · H > B · G
(b) Poisson's ratio (Y2).
E ≫
B > B · D > H > G > B · E = B · G = G · H > B · H = D · H > B · F = D · G > A · F
(c) Uniaxial compressive strength (Y3).
G > F > F · G ≫
H > C > F · H > D > D · F > G · H > D · G > C · F
(d) Crack initiation stress (Y4).
H > G > F > F · G > F · H > G · H
(e) Ratio of crack initiation stress to uniaxial compressive strength (Y5).
H ≫ F · H

평균 전단강도(G) 그리고 두 미시변수의 상호작용(F · G)에 크게 좌우되었다. 이 변수들이 증가함에 따라 일축압축강도도 커지는 경향을 보였다. 그리고 접촉결합의 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비(H)가 커짐에 따라 일축압축강도는 약간 감소하는 경향을 보였다.

균열개시응력(Y4)은 접촉결합의 평균 수직강도(F), 평균 전단강도(G), 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비(H) 그리고 이 세 변수들 간의 상호작용(F · G, F · H, G · H)에 좌우되었다. 특히 미시변수 H가 증가함에 따라 균열개시응력은 크게 감소하였다. 수치 실험에서 균열개시응력은 일축압축시험에서 최대 강도에 도달할 때 시험편 내부에서 발생한 균열 중 1%에 해당하는 균열이 발생한 시점의 응력으로 설정하였다.

그러나 균열개시응력을 일축압축강도에 대한 비(Y5)로 정규화하여 계산한 경우 이 거시 물성에 영향을 미치는 미시변수가 명확해졌다. 접촉결합의 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비(H) 그리고 이 변수와 평균 수직강도 또는 평균 전단강도의 상호작용(F · H, G · H)이 일축압축강도에 대한 균열개시응력의 비에 상당한 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

2.3 스케일 변수(scale factor)에 따른 거시 물성의 변화

부분배치법을 이용한 실험 설계에 기초한 민감도 분석과 분산 분석 결과를 보면 일축압축강도에 상당한 영향을 미치는 미시변수는 접촉결합의 평균 수직강도(F), 평균 전단강도(G) 그리고 두 변수의 상호작용(F · G)이었다. 만약 이 미시변수의 변화에도 불구하고 일축압축

강도를 제외한 다른 거시 물성은 변하지 않는다면, 해석 모델을 생성하는 과정에서 상당한 시간 절약의 장점을 가지게 된다. 이를 확인하기 위하여 Table 2에 제시된 평균값을 미시변수의 값으로 적용하여 하나의 시험편을 생성하였다. 생성한 시험편의 접촉결합의 평균 수직강도(F)와 평균 전단강도(G)에 각각 스케일 변수 SFn와 SFs를 곱한 후, 일축압축시험을 수행하여 거시 물성의 변화를 조사하였다.

적용한 스케일 변수 SFn와 SFs는 각각 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0이었으며, Table 4는 총 25회의 시험에서 측정된 거시 물성이다. 스케일 변수에 따른 거시 물성의 변화 양상은 Fig. 3과 같았다.

탄성계수(Y1)는 스케일 변수가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보였지만 그 영향은 무시할 수 있는 수준이었다. 포아송비(Y2)는 스케일 변수와 상관없이 거의 일정하였다. 즉 탄성계수(Y1)와 포아송비(Y2)는 스케일 변수 SFn와 SFs의 변화에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. (Fig. 3 (a), (b))

반면에 일축압축강도(Y3)는 스케일 변수에 비례하여 증가하는 경향을 보였다. 특히 SFn과 SFs가 같은 경우에는 스케일 변수가 n배 증가 또는 감소함에 일축압축강도(Y3)도 n배 증가 또는 감소하는 정비례의 관계를 보였다. (Fig. 3 (c), (d))

정규화된 일축압축강도를 스케일 변수를 이용하여 추정하는 식은 (1)과 같이 추정되었다. 여기서 “정규화”는 스케일 변수 SFn와 SFs 모두 1.0인 경우의 일축압축강도로 나눔을 의미한다.

Table 4. Change of macro-properties by the different scale factors for the two micro-parameters (F and G)

Scale Factor		Uniaxial Compressive Test			
SFn	SFs	Y1 (GPa)	Y2 -	Y3 (MPa)	Y4 (MPa)
0.1	0.1	55.49	0.277	11.66	4.53
0.1	0.5	55.47	0.283	16.30	7.07
0.1	1.0	55.44	0.282	16.43	7.07
0.1	1.5	55.44	0.282	16.43	7.07
0.1	2.0	55.44	0.282	16.43	7.07
0.5	0.1	55.36	0.281	13.75	6.13
0.5	0.5	55.57	0.286	48.67	15.90
0.5	1.0	55.71	0.286	63.31	27.47
0.5	1.5	55.67	0.286	64.85	22.16
0.5	2.0	55.67	0.285	64.90	22.16
1.0	0.1	55.36	0.281	13.75	6.13
1.0	0.5	55.63	0.285	58.33	15.97
1.0	1.0	55.91	0.286	95.62	30.48
1.0	1.5	56.00	0.286	111.94	44.09
1.0	2.0	56.04	0.286	114.17	44.09
1.5	0.1	55.36	0.281	13.75	6.13
1.5	0.5	55.63	0.286	59.73	15.97
1.5	1.0	56.02	0.286	110.75	30.48
1.5	1.5	56.15	0.286	146.68	44.09
1.5	2.0	56.17	0.286	152.16	57.89
2.0	0.1	55.36	0.281	13.75	6.13
2.0	0.5	55.59	0.286	59.73	15.97
2.0	1.0	56.01	0.286	116.69	30.48
2.0	1.5	56.22	0.285	162.44	44.09
2.0	2.0	56.29	0.285	197.33	57.89

$$\begin{aligned} \text{Normalized uniaxial compressive strength} = & \\ & 0.134+0.212(\text{SFn})-0.142(\text{SFn})^2+0.654(\text{SFs})-0.2 \\ & 86(\text{SFs})^2+0.492(\text{SFn} \cdot \text{SFs})-3.376 \times 10^{-2}(\text{SFn}/ \\ & \text{SFs})+1.689 \times 10^{-3}(\text{SFn}/\text{SFs})^2-6.634 \times 10^{-2}(\text{SFs}/\text{SF} \\ & \text{n})+2.707 \times 10^{-3}(\text{SFs}/\text{SFn})^2 \\ (\text{R}^2=0.9977) \end{aligned} \quad (1)$$

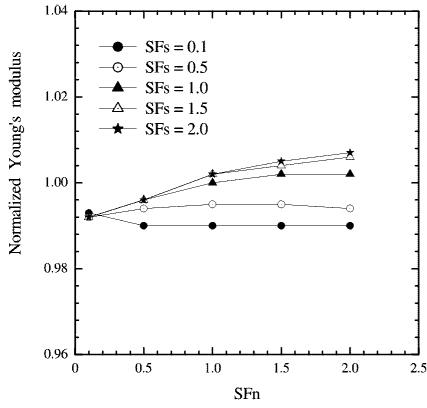
식 (1)을 스케일 변수 SFn과 SFs에 대하여 도시하면 Fig. 4와 같다. SFn과 SFs가 증가함에 따라 정규화된 일축압축강도도 증가함을 확인할 수 있다.

또한 스케일 변수의 변화에 따라 발생한 전단균열과 인장균열의 수는 각각 식 (2)와 (3)을 이용하여 추정 가능하다. 이 식들을 이용하여 추정된 균열의 수가 0개 미만인 경우에는 0개로 설정해야 한다.

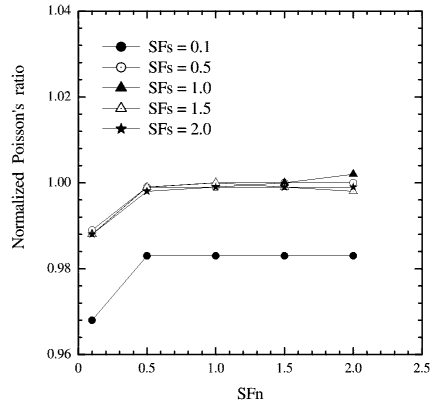
$$\begin{aligned} \text{Number of shear crack} = & 120.47-142.71(\text{SFn})+ \\ & 32.53(\text{SFn})^2-17.30(\text{SFs})-9.42(\text{SFs})^2+31.98(\text{SFn} \cdot \\ & \text{SFs})+67.81(\text{SFn}/\text{SFs})-2.30(\text{SFn}/\text{SFs})^2-19.28 \\ & (\text{SFs}/\text{SFn})-0.89(\text{SFs}/\text{SFn})^2 \\ (\text{R}^2=0.9512) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Number of tensile crack} = & 58.35+8.89(\text{SFn})-7.95 \\ & (\text{SFn})^2-132.96(\text{SFs})+19.43(\text{SFs})^2+31.03(\text{SFn} \cdot \\ & \text{SFs})-11.73(\text{SFn}/\text{SFs})+0.51(\text{SFn}/\text{SFs})^2+7.72 \\ & (\text{SFs}/\text{SFn})-2.20(\text{SFs}/\text{SFn})^2 \\ (\text{R}^2=0.9614) \end{aligned} \quad (3)$$

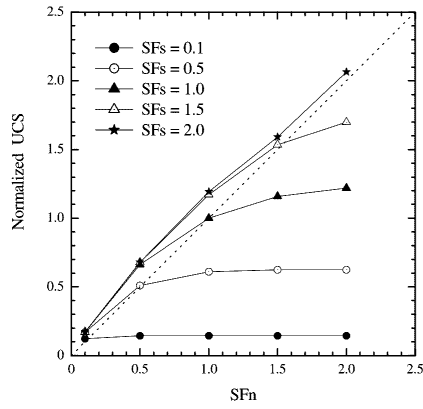
식 (2)와 (3)에 의해 예측된 전단균열과 인장균열의 수를 이용하여 발생한 전체 균열 중 전단 균열의 비율을 계산하여 도시하면 Fig. 5와 같다.



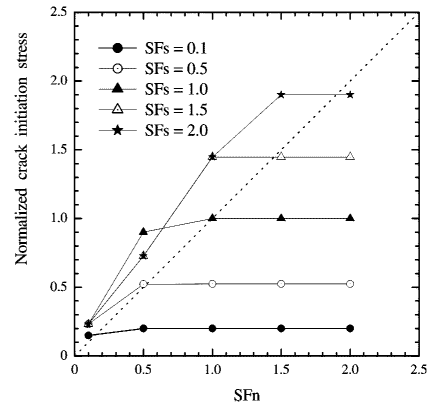
(a) Young's modulus (Y1)



(b) Poisson's ratio (Y2)



(c) Uniaxial compressive strength (Y3)



(d) Crack initiation stress (Y4)

Fig. 3. Change of normalized macro-properties by the different scale factors

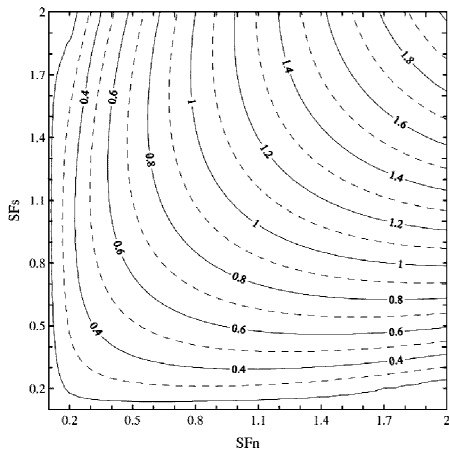


Fig. 4. Normalized uniaxial compressive strength for different scale factors

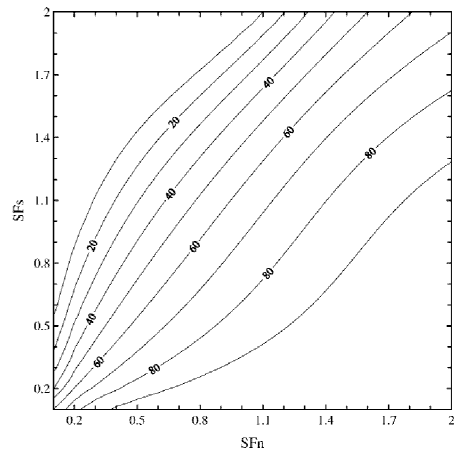


Fig. 5. Ratio of shear crack among total crack for different scale factors

장수호²⁵⁾에 의하면 일축압축시험 동안 발생한 전체 균열 중 전단균열의 비율은 약 65%이었다. 이 조건이 국내 다른 종류의 암석에 대해서도 동일하다고 가정하면, Fig. 4와 Fig. 5를 중첩한 Fig. 6을 이용하여 스케일 변수 SFn과 SFs를 쉽게 결정할 수 있다.

Fig. 6에서 전체 균열 중 전단 균열의 발생 비율이 65%가 유지되는 조건은 스케일 변수 SFn과 SFs가 서로 유사한 경우이다. 두 스케일 변수가 동일한 경우 일축 압축강도(Fig. 3 (c))와 균열개시응력(Fig. 3 (d)) 모두 스케일 변수의 변화에 따라 정비례의 관계로 변하게 된다. 이는 일축압축강도에 대한 균열개시응력의 비도 스케일 변수의 변화에 따라 정비례의 관계로 변함을 의미한다.

3. 모델 생성을 위한 미시변수 결정법

앞 장에서의 연구 결과에 기초하여, PFC2D에서 원하는 거시 물성을 가지는 해석 모델을 생성하기 위한 미시변수를 결정하는 순서와 방법을 다음과 같이 제안한다.

▶ Step 1. 입자 밀도(A), 입자 마찰계수(C)

입자 밀도(A)는 P파 속도에 약간의 영향을 주는 점을 제외하고 다른 거시 물성에는 영향을 미치지 않는 미시변수이다. 따라서 해석 대상인 암석 시험편의 밀도와 동일하게 설정해도 무방할 것으로 판단된다.

입자 마찰계수(C)는 7개의 거시 물성에는 거의 영향을 미치지 않는 미시변수이므로, 본 논문에서는 실험 설계에 사용된 값의 평균값인 0.50으로 일정하게 적용한다. 그러나 파괴 후 거동이 중요한 수치해석을 수행할 때에는 이에 대한 변수 연구를 수행한 후 적절한 값으로 설정해야 한다.

▶ Step 2. 입자 최소 반지름(B)

입자 최소 반지름은 일축압축강도에 대한 인장강도의 비에만 주로 영향을 미치는 변수로서, 입자 최소 반지름이 작아질수록 일축압축강도에 대한 인장강도의 비도 작아진다²⁴⁾. 일반적으로 정적 인장강도는 일축압축강도의 1/10 이하이다. 그럼에도 불구하고, 본 연구의 목적은 PFC2D를 이용한 일축압축시험에서 일어나는 거시 물성을 동시에 재현할 수 있는 미시변수를 결정하는데 있으므로, Table 2에 제시된 평균값, 즉 0.50 mm를 입자 최소 반지름에 대한 기본값으로 설정하였다. 이 때 일축압축강도에 대한 간접인장강도의 비는 약 0.25이었다.

▶ Step 3. 입자간 접촉계수(D), 입자 강성비(E)

입자간 접촉계수(D)와 입자 강성비(E)는 미시변수로부터 거시 물성을 추정하는 식을 이용하여 결정될 수 있다. 즉 미시변수를 이용하여 탄성계수와 포아송비를 추정하는 다음의 식을 풀으로써 입자간 접촉계수와 입자 강성비를 결정할 수 있다. 이 식에서 결정된 입자간

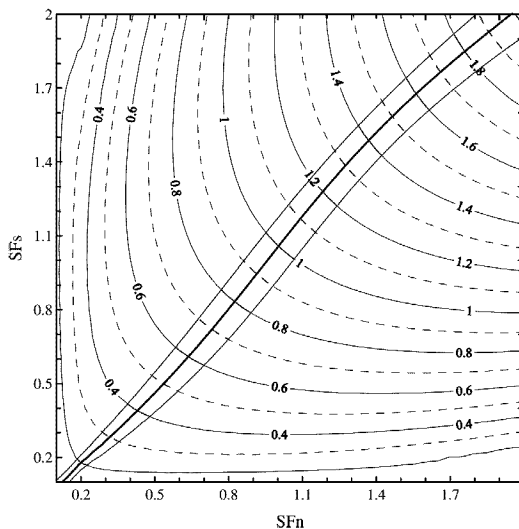


Fig. 6. Diagram to determine two scale factors, SFn and SFs at H=0.20 (The labels on curve are the normalized uniaxial compressive strength.)

접촉계수와 입자 강성비는 최소값과 최대값을 -1과 +1으로 적용한 값이므로, Table 2를 이용하여 본래의 값으로 환산해야 한다.

$$\text{Young's modulus (Y1, GPa)} = 56.433+42.776(D)-5.887(E)-4.510(D \cdot E) \\ (R^2=0.9973) \quad (4)$$

$$\text{Poisson's ratio (Y2)} = \{277.97+62.97(E)\} \times 10^{-3} \\ (R^2=0.9798) \quad (5)$$

▶ Step 4. 접촉결합 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비(H)

접촉결합 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비는 일축압축강도(Y3, MPa), 균열개시응력(Y4, MPa) 그리고 일축압축강도에 대한 균열개시응력의 비(Y5)를 이용한 다음의 식으로 결정한다. 여기서 미시변수 H는 환산하지 않은 본래의 값이다.

$$\text{Ratio of standard deviation to mean for normal and shear strength (H)} = 0.3536-0.0002(Y3)+0.0004(Y4)-0.3939(Y5) \\ (R^2=0.9259) \quad (6)$$

만약 거시 물성 Y5를 알지 못하는 경우, 미시변수 H는 다음의 식으로 결정할 수도 있다.

$$\text{Ratio of standard deviation to mean for normal and shear strength (H)} = 0.2157-8.77 \times 10^{-5}(Y3) \quad (7)$$

▶ Step 5. 접촉결합의 평균 수직강도(F), 평균 전단강도(G)

Step 1~4에서 결정된 미시변수와 접촉결합의 평균 수직강도와 평균 전단강도를 기본값으로 설정한 후 일축압축시험을 수행한다. 본 논문에서 설정한 기본값은 각각 85.0 MPa이다. 결정된 8개의 미시변수 값을 적용하여 생성된 해석 모델을 가지고서 얻어진 일축압축강도에 대한 원하는 일축압축강도의 비, 즉 정규화된 일축압축강도와 Fig. 6을 이용하여 스케일 변수 SFn과 SFs를 결정한다.

4. 미시변수 결정법의 검증

위에서 제안한 미시변수 결정법의 타당성을 검증하기 위하여 다양한 암석의 거시 물성에 대하여 재현 가능성을 점검하였다. 총 10 종류의 암석 시험편에 대하여 12회의 시험을 수행하였다.

Table 5는 거시 물성의 재현을 위해 결정된 미시변수 값을 제시한 것이고, Table 6은 실험실 시험에 의해 얻어진 거시 물성 값과 PFC2D에서 일축압축시험에 의해 얻어진 값을 비교한 것이다.

포아송비가 작은 Flechtingen 사암(Case 9)의 경우

Table 5. Complete sets of micro-parameters determined for generation of different rock models

Case	Rock type	Micro-parameter						Reference
		A (kg/m ³)	D (GPa)	E -	H -	SFn -	SFs -	
(1)	Daejeon Granite	2,640	69.83	2.08	0.21	1.72	1.82	[26]
(2)	Hwangdeung Granite	2,670	76.55	3.03	0.22	1.58	1.69	[25]
(3)	Hwangdeung Granite	2,680	72.17	2.04	0.21	1.84	1.91	[27]
(4)	Keochang Granite	2,670	79.45	2.40	0.21	1.61	1.72	[28]
(5)	Yeosan Marble	2,730	74.99	2.87	0.21	0.65	0.63	[25]
(6)	Yeosan Marble	2,720	68.84	2.87	0.22	0.58	0.54	[28]
(7)	Aue Granite	2,600	62.94	1.60	0.20	1.37	1.48	[29]
(8)	Carrara Marble	2,700	68.24	2.24	0.21	1.02	1.08	[30]
(9)	Flechtingen Sandstone	2,300	23.03	0.54	0.21	1.01	1.07	[31]
(10)	Kimachi Sandstone	2,000	8.21	1.92	0.14	0.48	0.44	[32]
(11)	Mizunami Granite	2,600	88.90	4.46	0.20	1.68	1.79	[33]
(12)	Rüdersdorf Limestone	2,610	15.26	2.08	0.22	0.67	0.65	[34]

※ default value: B=5.0×10⁻⁴ m / C=0.50 / F=G=85.0 MPa

Table 6. Verification of the suggested method for different rocks

Case	Macro-property					
	Y1 (GPa)	Y2 -	Y3 (MPa)	Y4 (MPa)	Y5 -	
(1)	(a)	50.9	0.22	161.7	-	-
	(b)	51.6	0.22	162.8	45.0	0.28
(2)	(a)	50.7	0.28	159.1	52.5	0.33
	(b)	50.5	0.29	162.3	66.1	0.41
(3)	(a)	51.0	0.24	188.0	-	-
	(b)	52.5	0.25	178.3	73.3	0.41
(4)	(a)	56.1	0.24	160.0	-	-
	(b)	57.0	0.24	165.3	54.2	0.33
(5)	(a)	50.5	0.27	61.2	22.3	0.37
	(b)	50.2	0.28	62.9	13.9	0.22
(6)	(a)	46.4	0.27	52.0	-	-
	(b)	46.3	0.28	51.3	21.8	0.43
(7)	(a)	48.0	0.19	134.0	-	-
	(b)	50.1	0.17	137.9	26.9	0.20
(8)	(a)	49.0	0.23	101.0	-	-
	(b)	49.2	0.24	103.9	35.1	0.34
(9)	(a)	21.0	0.12	96.0	-	-
	(b)	22.7	0.01	90.4	25.9	0.29
(10)	(a)	6.5	0.21	48.0	27.8	0.58
	(b)	6.2	0.21	46.4	33.5	0.72
(11)	(a)	50.0	0.37	166.0	-	-
	(b)	52.9	0.36	170.6	66.0	0.39
(12)	(a)	11.5	0.22	66.7	-	-
	(b)	11.5	0.22	67.7	17.1	0.25

※ (a) : Values obtained by experiment. (b) : Results of simulation by PFC2D.

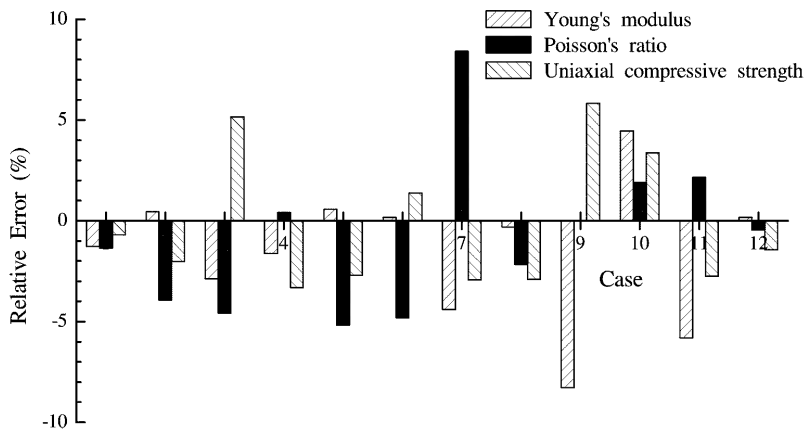


Fig. 7. Relative errors of three macro-properties (i.e., Young's modulus, Poisson's ratio and UCS)

식 (5)에 의해 계산된 입자 강성비(E)가 설정된 최소치보다 작았으며, 이에 의해 다른 사례보다 상대오차가 크게 발생하였다. 그러나 다른 모든 사례의 경우 시험편 생성을 위한 단 2회의 수치 실험의 실행만으로 탄성

계수, 포아송비 그리고 일축압축강도는 실험에 의한 값과의 상대오차가 대부분 5% 내외로 재현될 수 있었다 (Fig. 7).

5. 미시변수 결정법의 한계

본 연구에서 제안한 간단하고 정량적인 미시변수 결정법을 적용함으로써, PFC2D 사용자들은 해석 모델을 생성하기 위해 소모하는 시간을 절약할 수 있으며, 생성된 해석 모델의 일축압축강도, 탄성계수 그리고 포아송비 등과 같은 거시 물성을 신뢰할 수 있는 수준으로 재현할 수도 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 제안된 미시변수 결정법은 다음과 같은 한계점을 지닌다.

첫째, 설정된 미시변수의 범위(Table 2)를 적용하여 수행한 수치 실험의 결과²⁴에 의하면 탄성계수, 포아송비 그리고 일축압축강도의 분포 범위는 각각 11.78~113.44 GPa, 0.198~0.354 그리고 18.90~226.84 MPa이었다. 그러므로 제안된 미시변수 결정법은 Flechtingen 사암 (Case 9)의 포아송비처럼 위의 범위를 벗어난 거시 물성의 정확한 재현성에 대해서는 장담할 수 없을 것으로 판단된다.

둘째, Fig. 4는 일축압축강도에 대한 균열개시응력의 비($Y5$)가 약 0.35, 즉 접촉결합 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비(H)가 약 0.20이라는 가정 하에 얻어진 것이고, Fig. 5는 일축압축시험 동안 최대 강도 하에서 발생한 전체 균열(전단균열과 인장균열) 중 전단균열의 비가 0.60~0.70이라는 가정 하에 제안된 것이다. 생성하고자 하는 해석 모델의 거시 물성 $Y5$ 가 가장한 값과 다른 경우, 식 (6)에 의해 결정된 미시변수 H 가 변하게 되므로, 스케일 변수 SFn 과 SFs 를 결정하는 데 사용되는 Fig. 6도 변하게 된다. 따라서 균열개시응력을 보다 정확히 재현하고자 하기 위해서는 본 연구에서 가장한 값 이외의 일축압축강도에 대한 균열개시응력의 비($Y5$) 또는 접촉결합 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비(H)에 대해서도 스케일 변수(SFn , SFs)와 거시 물성의 관계를 추가적으로 연구해야 할 것으로 판단된다.

마지막으로, 제안된 결정법은 등방성인 해석 모델만을 생성할 수 있다. 그러므로 이방성 특성을 지닌 암반에 대해 해석하기 위해서는 제안된 결정법에 이방성을 고려하는 내용의 연구를 추가해야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

PFC2D를 암석의 변형 거동이나 파괴 특성 등을 연구하기 위한 목적으로 사용하기에 앞서, 탄성계수, 포아송비 그리고 일축압축강도와 같은 주요 거시 물성을 동시에 재현할 수 있는 미시변수의 값을 쉽게 결정하는 방법에 대해 연구하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요

결론은 다음과 같다.

부분배치법에 의해 설계된 일련의 수치 실험 결과를 이용한 민감도 분석과 분산 분석을 수행함으로써, PFC2D에서의 일축압축시험으로부터 얻어진 거시 물성(탄성계수, 포아송비, 일축압축강도, 균열개시응력 등)에 대한 시험편의 구성입자들의 특성을 정의하는 미시변수들의 영향을 분석하였다. 그 결과 탄성계수는 입자간 접촉계수에, 포아송비는 입자 강성비에, 일축압축강도는 접촉결합의 평균 강도에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 일축압축강도에 대한 균열개시응력의 비는 접촉결합 강도의 평균에 대한 표준편차의 비에 상당한 영향을 받았다.

거시 물성에 상당한 영향을 미치는 미시변수만을 이용하여 등방성 암석 시험편을 생성하기 위한 미시변수의 결정법을 제안하였다. 이 결정법은 일축압축강도에 대한 균열개시응력의 비가 약 0.35이고, 일축압축시험 동안 최대강도 이하에서 전단균열과 인장균열이 전체 생성된 균열 중 각각 65%와 35%이라고 가정하였다. 제안된 미시변수 결정법을 검증하기 위하여 국내외 10 종류의 암석에 대해 결정된 미시변수를 이용하여 생성된 시험편을 수치 실험한 결과, 시험편 생성을 위한 2회의 수치 실험만으로 탄성계수, 포아송비 그리고 일축압축강도를 실험실 시험값과의 상대오차 5% 내외로 재현할 수 있었다.

참고문헌

1. Boutt, D.F., McPherson, B.J.O.L., Simulation of sedimentary rock deformation: Lab-scale model calibration and parameterization, *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 4, pp. 13-1~4.
2. Hazzard, J.F., Young, R.P., 2000, Simulating acoustic emissions in bonded-particle models of rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 37, pp. 867~872.
3. Hazzard, J.F., Young, R.P., 2004b, Numerical investigation of induced cracking and seismic velocity changes in brittle rock, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, pp. L01604.
4. Hazzard, J.F., Young, R.P., Maxwell, S.C., 2000, Micromechanical modeling of cracking and failure in brittle rocks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B7, pp. 16683~16697.
5. Hunt S.P., Meyers, A.G., Louchnikov, V., 2003, Modelling the Kaiser effect and deformation rate analysis in sandstone using the discrete element method, *Computers and Geotechnics*, Vol. 30, pp. 611~621.
6. Kulatilake, P.H.S.W., Malama, B., Wang, J., 2001, Physical and particle flow modeling of jointed rock block behaviour under uniaxial loading, *International*

- Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 641~657.
7. Cundall, P.A., 2000, Numerical experiments on rough joints in shear using a bonded particle model, Aspects of Tectonic Faulting (editor: Lehner, F.K., Urai, J.L.), Springer-Verlag Telos, pp. 1~10.
 8. Kebeya, 1999, Investigation into the peak shear behaviour of rock joints using physical and numerical modelling, Proceedings of the 37th U.S. Rock mechanics Symposium, pp. 439~446.
 9. O'Sullivan, C., Cui, L., Bray, J.D., 2004, Three-dimensional discrete element simulations of direct shear tests, Proceedings of the 2nd International PFC Symposium, pp. 373~382.
 10. Wang, C., Tannant, D.D., Lilly, P.A., 2003, Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC2D, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 40, pp. 415~424.
 11. Fakhimi, A., Carvalho, F., Ishida, T., Labuz, J.F., 2002, Simulation of failure around a circular opening in rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 39, pp. 507~515.
 12. Hazzard, J.F., Young, R.P., 2002, Moment tensors and micromechanical models, Tectonophysics, Vol. 356, pp. 181~197.
 13. Hazzard, J.F., Young, R.P., 2004, Dynamic modelling of induced seismicity, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 41, pp. 1365~1376.
 14. McNearney, R.L., Barker, K.A., 1998, Numerical modeling of large-scale block cave physical models using PFC2D, Mining Engineering, Vol. 50, pp. 72~75.
 15. Wang, C., Tannant, D.D., 2004, Rock Fracture around a highly stresses tunnel and the impact of a thin tunnel liner for ground control, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 41, No. 3, Paper 2B 35.
 16. 최병희, 양형식, 류창하, 2005, PFC를 이용한 콘크리트 기둥의 발파모델링, 대한화약발파공학회지, 제23권 제1호, pp. 47~54.
 17. Jong, Y., Lee, C.-I., Jeon, S., Cho, Y.-D., Shim, D.-S., 2005, Numerical Modeling of the Circular-Cut using Particle Flow Code, Proceedings of the 31th Annual Conference on Explosives & Blasting Technique Vol. 1, (CD-Rom).
 18. Potyondy, D.O., Cundall, P.A., 1996, Modeling of shock- and gas-driven fractures induced by a blast using bonded assemblies of spherical particles, Proceedings of the 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 55~62.
 19. te Kamp, L., Konietzky, H., Guérin, F., 1998, Modelling of the Chagan underground nuclear test with the distinct element method, International Journal of Blasting and Fragmentation, Vol. 2, pp. 295~312.
 20. Potyondy, D.O., Cundall, P.A., 2004, A bonded-particle model for rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 41, pp. 1329~1364.
 21. Potyondy, D.O., Cundall, P.A., 2001, The PFC model for Rock: Predicting rock-mass damage at the underground research laboratory, Report 06819-REP-01200-10061-R00, Ontario Hydro, Nuclear Waste Management Division.
 22. Itasca Consulting Group, 2002, Fish in PFC2D, Minneapolis.
 23. Montgomery, D.C., 1997, Design and analysis of experiments, New York: John Wiley & Sons, 699 p.
 24. 정용훈, 2006, 발파에 의한 굴착손상영역의 수치해석적 산정, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
 25. 장수호, 2002, 음력수준에 따른 암석의 손상 특성과 심부 터널 주변 암반 손상영역의 해석, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
 26. 홍지수, 2004, Characteristics of Creep Deformation Behavior of Granite under Uniaxial Compression, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.
 27. 정용복, 2000, 저온하에서의 암반의 변형 거동 및 파괴 특성에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
 28. 허종식, 2001, 삼축 압축 하에서 암석의 미소파괴음 측정과 변형 파괴 특성, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
 29. Zang, A., 1999, Akustische Emissionen beim Sprödbruch von Gestein, Habilitationsschrift, University of Potsdam, Scientific Technical Report STR97/19.
 30. Alber, M., Hauptfleisch, U., 1999, Generation and visualization of microfractures in Cararra marble for estimating fracture toughness, fracture shear and fracture normal stiffness, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, pp. 1065~1071.
 31. Backers, T., 2004, Fracture toughness determination and micromechanics of rock under mode I and mode II loading, Ph.D. Thesis, University of Potsdam.
 32. Chang, S.-H., Seto, M., Lee, C.-I., 2001, Damage and fracture characteristics of Kimachi sandstone in uniaxial compression, Geosystem Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 18~26.
 33. JNC (Japan Nuclear Cycle) Development Institute, 2003, Mizunami underground research laboratory project: Results from 1996~1999 period.
 34. Alber, M., Heiland, J., 2001, Investigation of a limestone pillar failure: Part 1. stress history and application of fracture mechanics approach, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 34, pp. 187~199.



정용훈

1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과
 공학사
 2001년 서울대학교 대학원 지구환경시스
 템공학부 공학석사
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스
 템공학부 공학박사
 Tel: 02-880-7234
 E-mail: wizard@rockblast.net
 현재 서울대학교 에너지자원신기술연구
 소 박사후연구원



이정인

1963년 서울대학교 공과대학 광산학과,
 공학사
 1965년 서울대학교 대학원 광산학과, 공
 학석사
 1974년 일본 도호쿠대학(東北大學) 대
 학원 자원공학과, 공학박사
 Tel: 02-880-7221
 E-mail: cilee@snu.ac.kr
 현재 서울대학교 공과대학 지구환경시
 스템공학부 교수