

무결함 재료의 크기에 따른 강도와 탄성계수의 변화에 관한 연구

A study on the Change of Uniaxial Compressive Strength and Young's Modulus According to the Specimen Size of Intact Material

이승우*¹, 송재준²

Lee, Seung Woo · Song, Jae Joon

Abstract

Rock and discontinuities are main factors consisting of a rock mass and the physical properties of each factor have direct effects on the mechanical stability of artificial structures in the rock mass. Because physical properties of the rock and discontinuities change a lot according to the size of test materials, a close attention is needed when the physical properties, obtained from laboratory tests, are used for the design of field structures. In this study, change of physical properties of intact materials due to the change of their size are studied. Six kinds of artificial materials including crystal, instead of an intact rock, are adopted for the study to guarantee the homogeneity of specimen materials even with relatively large size. Uniaxial strength and Young's modulus of each artificial material are checked out for a size effect and compared with the predicted values by Buckingham's theorem - dimensional analysis. A numerical analysis using PFC (Particle Flow Code) is also applied and primary factors influencing on the size effect are investigated.

Keywords : Dimensional analysis, size effect, intact material, crystal, particle flow code

요 지

암석과 불연속면은 암반을 구성하는 주요소이며 각각의 주요 물성들은 암반 구조물의 역학적 안정성에 직접적인 영향을 미친다. 암석 및 암반 불연속면의 물성은 시료의 크기에 따라 변화하는 양상을 보이므로 실험실 시험에서 얻은 물성을 현장 구조물 설계에 적용할 때는 세심한 주의가 필요하다. 이러한 이유로 실험실에서 얻은 암석 및 불연속면의 물성을 이용하여 현장규모의 암석 및 불연속면의 물성을 합리적으로 예측하는 방법을 확립할 필요가 있다. 본 연구에서는 암반의 크기 효과에 대한 기초 연구로서 불연속면을 제외한 무결함 부분의 크기에 따른 물성 변화를 알아보려고 한다. 무결함에 가까운 재료를 택하기 위해 암석 대신 최대한 균질성이 보장될 수 있는 인공재료를 선택하였고 이러한 인공 재료에 대한 크기 변화에 따른 강도 및 탄성계수의 변화양상에 대해 살펴보았다. Buckingham's theorem을 이용한 차원해석을 통해 이상적인 무결함 재료의 크기에 따른 강도 및 탄성계수의 변화 양상을 파악하였고 이를 실험을 통해 검증해보기 위해 총 6가지의 재료를 대상으로 일축압축강도 실험을 실시하였다. 또한 3차원 입자결합모델을 이용한 상용프로그램인 PFC3D (Particle Flow Code 3-Dimension)를 사용하여 무결함 시료에 대해서 크기에 따른 강도 및 탄성계수 등의 물성 변화 양상을 수치해석을 통해 확인하고 그 영향요소를 분석하였다.

주요어 : 차원해석, 크기효과, 무결함 재료, 크리스탈, 입자결합모델

*1 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석사과정 (snulsw@hanmail.net)
 2 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 조교수

1. 서론

암반은 크게 암석과 불연속면으로 구성되며 각각의 주요 물성들은 암반 구조물의 역학적 안정성에 있어서 매우 중요하다. 이러한 물성들은 현장과 실내 실험실을 통해 구하게 되는데 여기에서 구한 물성은 구조물의 수치 해석 및 암반평가에 입력변수로 사용되어 결과적으로 구조물의 설계에 작간접적인 영향을 미치게 된다. 암석 및 암반 불연속면의 물성은 시료의 크기변화에 따라 변화하는 양상을 보이므로 실험실 시험에서 얻은 물성을 현장 구조물 설계에 적용할 때는 세심한 주의가 필요하다. 이러한 이유로 실험실에서 얻은 암석 및 불연속면의 물성을 이용하여 현장규모의 암석 및 불연속면의 물성을 합리적으로 예측하는 방법을 확립할 필요가 있다.

암반 불연속면의 다양한 속성들로 인하여 불연속면이 포함된 암반의 크기 효과(Cunha, 1990)를 규명하기 위해서는 먼저 무결암 부분에 대한 크기효과를 분석한 후 여기에서의 연구결과를 바탕으로 불연속 암반의 크기효과를 분석하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 불연속면을 제외한 무결암 부분의 크기 효과에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 우선 Buckingham's theorem(1914)을 이용한 차원해석을 통해 이상적인 무결암 재료의 크기에 따른 물성 변화를 파악하였고 가능한 한 무결암에 가까운 재료를 대상으로 하기 위해 여러 인공 재료들을 선택하였다. 선택한 각각의 재료에 대해서 일축압축 실험을 실시하여 크기의 변화에 따른 강도 및 탄성계수 등의 물성을 측정하였다. 또한 수치해석을 통해 무결암 상태에서의 시료에 대해서 강도와 탄성계수의 크기효과를 확인하고 그 영향요소를 분석하기 위해 3차원 입자 결합모델을 이용한 상용프로그램인 PFC3D(Particle Flow Code 3-Dimension)를 사용하였다.

2. 차원해석 (Dimensional Analysis)

물리공간의 세 가지 기본 차원인 길이[L], 시간[T], 질량[M]을 이용하여 차원해석을 실시, 강도 및 탄성계수의 크기효과를 분석해 보았다(Hobbs, 1966). 먼저 현장

과 실험실의 증력가속도는 같다는 가정하에 길이와 시간과의 관계를 알아보면 다음과 같다.

$$\frac{L}{T^2} = K_1$$
$$T = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{K_1}} \quad (K_1 : \text{일정계수}) \quad (1)$$

다음으로 질량에 대한 차원 해석을 위해 실내실험 재료와 현장 재료가 동일하면 두 재료의 밀도는 같다는 사실을 이용한다. 밀도의 차원은 $[ML^{-3}]$ 이므로 이를 이용하여 길이와 질량과의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{M}{L^3} = K_2$$
$$M = K_2 L^3 (K_2 : \text{일정계수}) \quad (2)$$

이를 정리해보면 시간은 길이의 제곱근에 비례하고 질량은 길이의 3제곱에 비례한다. 시료 크기가 50 mm인 가상의 시료를 기준으로 2배, 3배, 4배, 5배, ..., 600배로 크기를 증가시킬 때 강도 및 탄성계수의 변화는 표 1 및 그림 1과 같다. 표 1과 그림 1에서 보면 무결암 재료의 강도 및 탄성계수는 크기에 정비례함을 알 수 있다.

3. 크기효과 검증을 위한 물리 실험

차원해석으로 분석한 크기에 따른 강도 및 탄성계수 변화 현상을 물리 실험을 통하여 검증해보고자 하였다. 본 연구에서는 총 6가지의 인공 재료를 이용한 시험을 수행하였다.

3.1 테프론(Teflon)을 이용한 물리 실험

테프론(Teflon)은 대량 생산을 통해 균질한 제품을 얻을 수 있고 가압면의 마찰각이 작아 하중기 접촉면 부근에서의 봉압 효과를 크게 감소시킬 수 있다는 장점을 고려하여 첫 실험 재료로 선택하였다. 직경이 각각 50 mm, 100 mm이고 직경 대 길이비가 1 : 2이며 평균밀도

표 1. 시료 크기에 따른 차원 변화

Physical parameter	Specimen size						
	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	...	30 m
Length [L]/ 50mm	1	2	3	4	5	...	600
Time [T]	1	2 ^{1/2}	3 ^{1/2}	4 ^{1/2}	5 ^{1/2}	...	600 ^{1/2}
Mass [M]	1	2 ³	3 ³	4 ³	5 ³	...	600 ³
Density [ML ⁻³]	1	1	1	1	1	...	1
Strength [ML ⁻¹ T ⁻²]	1	2	3	4	5	...	600
Young's modulus [ML ⁻¹ T ⁻²]	1	2	3	4	5	...	600

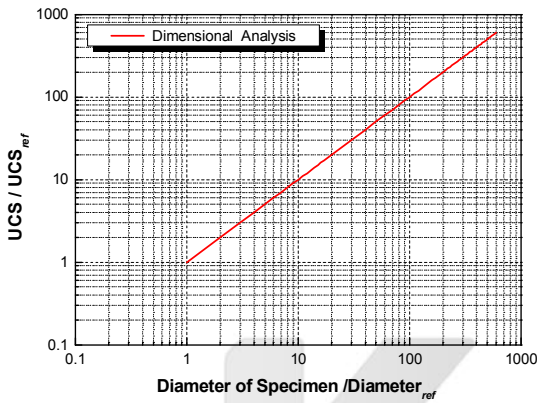


그림 1. 시료 크기와 무차원화된 일축압축강도와의 관계

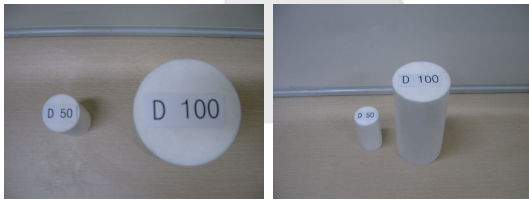
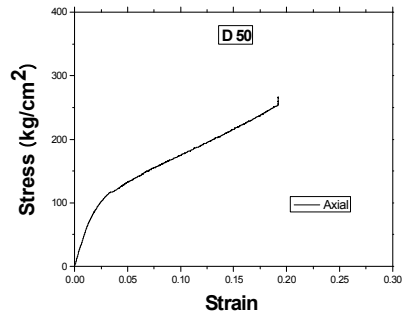


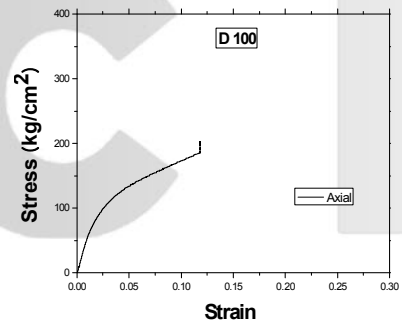
사진 1. 테프론 블록 시료

가 2.15g/cm³ 인 테프론 블록에 대해 일축압축실험을 실시하였다(사진 1).

그러나 시험 시 하중을 증가시켰을 때 하중이 올라가는 속도가 매우 작고 뚜렷한 파괴점을 찾기 어려웠다. 즉, 테프론 블록의 경우 연성 거동을 보임에 따라 테프론 블록에 대한 최대 강도 측정이 곤란하였다. 탄성계수 역시 연속적으로 변화하는 양상을 보여 판단하기에 어려움이



(a) 직경 50mm
(Young's modulus = 602.0 MPa)



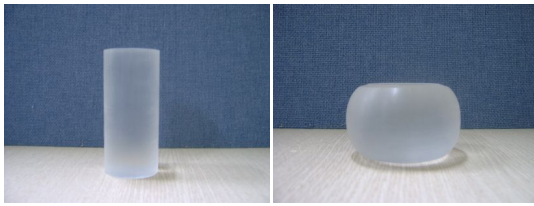
(b) 직경 100mm
(Young's modulus = 624.8 MPa)

그림 2. 테프론 블록 응력-변형률 그래프

있으나 소폭 상승하는 경향을 보였다(그림 2).

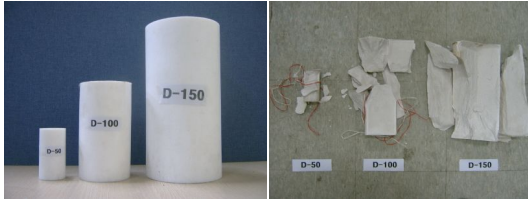
3.2 아크릴(Acryl)을 이용한 실험

아크릴을 선택하여 일축압축실험을 수행하였다. 테프



(a) 실험전 (b) 실험후

사진 2. 아크릴 실험



(a) 실험전 (b) 실험후

사진 3. 다이아스톤 시료

론 블록과 유사한 결과가 나올 수도 있다는 판단 하에 먼저 지름 50 mm의 아크릴로 실험을 수행하였다. 예상대로 아크릴 역시 연성거동을 보임으로 인하여 본 연구에는 부적합한 재료로 판정하였다. 아크릴의 실험 전·후의 모습은 사진 2와 같다.

3.3 공업용 석고(Diastone MR-150)를 이용한 실험

(주)삼우화학의 공업용석고 Diastone MR-150을 사용하여 물과 다이아스톤을 중량비 26 : 100 으로 혼합하고 성형틀에 부어 시료를 제작하였다. 직경이 각각 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm이고 직경 대 길이비가 1:2인 시료에 대하여 일축압축실험을 실시하였다. 150 mm 시료는 그라인딩의 문제 등으로 인하여 결과의 신뢰성이 상대적으로 낮아졌다. 실험 결과 크기의 증가에 따라 어느 정도 강도와 탄성계수가 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. 그러나 성형 시 세심한 주의를 기울여도 무결한 시료를 만드는 데는 어려움이 있고 실험의 재현성이 좋지 못해 같은 배합비의 시료에서도 다른 양상을 보이는 등 본 연구를 위한 재료로는 한계가

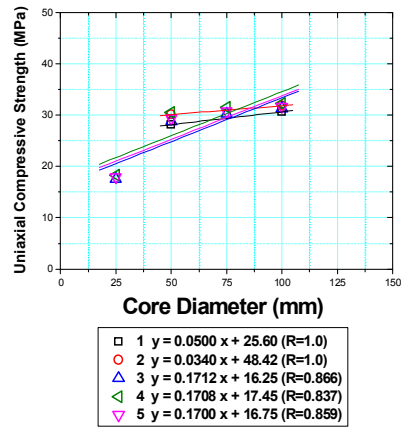


그림 3. 시료 크기에 따른 강도변화

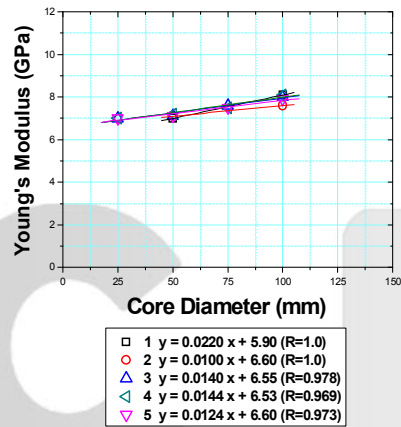
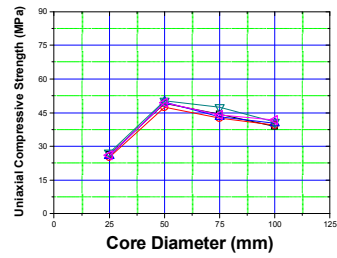
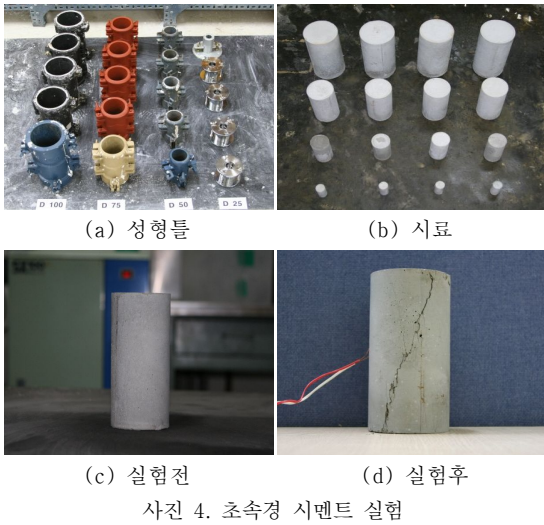


그림 4. 시료 크기에 따른 탄성계수변화

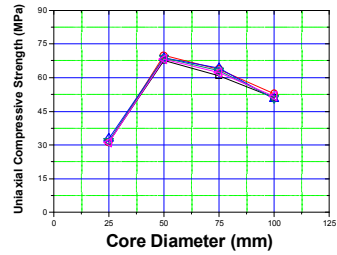
있었다. 실험 전·후의 시료의 모습은 사진 3에 나와 있으며 실험 결과는 그림 3과 그림 4에 나타나 있다.

3.4 초속경시멘트를 이용한 실험

비교적 암석과 비슷한 강도를 지니며 성형시간이 짧은 (주)제트콘 코리아의 초속경시멘트 MR#-7000을 재료로 선정하였다. 직경이 각각 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm이고 직경 대 길이비가 1:2인 시료에 대하여 일축압축실험을 실시하였다. 가능한 한 암석과 유사한 강도를 갖는 시료를 제작하고 그 시료들의 크기에 따른 강



(a) case 1



(b) case 2

그림 5. 초속경 시멘트 실험 결과

도 및 탄성계수의 변화를 알아보기 위해 다음과 같이 4가지의 case로 나누어 실험을 하였다. 각 case 별로 강도를 달리하기 위해 다음과 같이 물 배합비와 양생 시간에 변화를 주었다. Case 1은 물과 초속경시멘트의 중량비를 15 : 100로 하여 3일 동안 양생을 시켰고, Case 2는 물과 초속경시멘트의 중량비를 15 : 100로 하고 7일 양생하였다. Case 3은 물과 초속경시멘트의 중량비를 11 : 100로 3일 양생하였으며 마지막으로 Case 4는 물과 초속경시멘트의 중량비를 11 : 100로 하고 7일 양생하였다. 각각의 case마다 5 set 씩 총 20개, 전체 80개의 시료를 성형하였다. 실험에 사용한 성형틀과 성형된 시료 및 실험 전·후의 시료의 모습은 사진 4와 같다. 물 배합비가 11% 이고 3일 양생한 Case 3과 물 배합비가 11% 이고 7일 양생한 Case 4는 제작과정에서 공극이 많이 발생하였고 외관상으로도 무결함 시료로 부적합하였다. 이 case들은 Case 1과 Case 2의 경우보다 더 큰 강도를 보일 것으로 예상했지만 오히려 강도가 매우 낮게 나왔다. 이는 성형틀 주입 및 기포 제거에 어려움이 있기 때문인 것으로 판단된다. Case 1과 Case 2의 경우 실험 후 강도 변화는 그림 5와 같다. 두 경우 모두 시료직경 25 mm ~ 50 mm 에서는 크기 증가에 따라 강도가 증가하였으나 그보다 큰 시료에서는 강도가 감소하였다. 이는 Hawkins (1998)가 7 종류의 퇴적암에 대하여 건

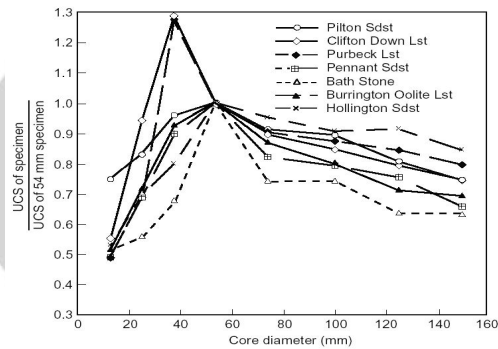
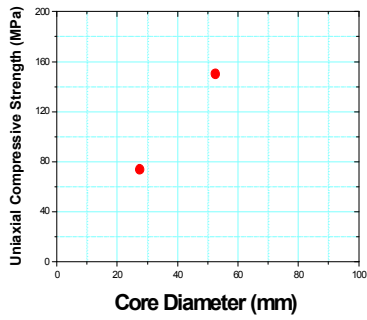
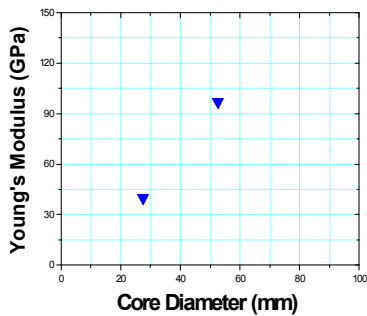


그림 6. 7 종류의 퇴적암에 대한 크기 변화에 따른 일축압축강도 변화 (Hawkins, 1998)

조 상태의 일축압축강도와 시험편 지름의 관계를 연구한 결과(그림 6)와 비슷한 결과이다. 이 실험에서는 초속경 시멘트 성형 시 세심한 주의를 기울였음에도 불구하고 앞선 다이아스톤의 경우처럼 시료가 커질수록 결함의 양이 늘어나 강도가 감소한 것으로 판단된다. 그러나 다이아스톤과 초속경시멘트 시험에서 내부 결함이 적은 소규모 시료에서는 크기 증가에 따라 강도 및 탄성계수 증가 현상이 나타남에 따라 차원해석을 통한 이론적인 크기

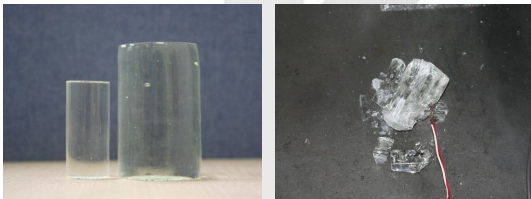


(a) 일축압축강도



(b) 탄성계수

그림 7. 유리 실험 결과



(a) 실험전

(b) 실험후

사진 5. 유리 실험

효과를 일부 확인할 수 있었다.

3.5 유리를 이용한 실험

무결함 실험 재료로서 유리를 선택하여 일축압축실험을 수행하였다. 직경은 각각 27 mm, 52 mm이고 직경과 높이의 비는 1:2와 1:1.4였다. 두 시료의 직경 : 높이 비가 일치하지는 않지만 이 실험에서는 그림 7과 표 2에서 보는 바와 같이 크기가 커짐에 따라 일축압축강도 및 탄성계수 증가현상이 매우 뚜렷이 나타났다. 그러나 본

표 2. 유리 실험 결과

Sample	Size (D×H)(mm)	Density (g/cm ³)	Strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
1	27.5 × 54.7	2.31	73.5	40.0
2	52.6 × 76.1	2.49	150.0	97.0

실험에서 사용한 유리의 경우 소형 주형틀에 주입하여 제작하는 제작과정의 특성으로 인해 시료 성형 시 기포를 완전히 제거하기 어렵고 기존 성형틀을 이용하는 관계로 원하는 형태의 시료를 얻기 어렵다는 단점이 있다. 사진 5는 유리의 실험 전·후의 모습이다.

3.6 크리스탈(Crystal)을 이용한 실험

크리스탈 역시 기성품을 대상으로 길이만 조정하여 구매하였으므로 코어형태가 아닌 직육면체 시료를 사용하게 되었지만 유리와 달리 공기방울등의 결함이 없고 균일한 재료, 동일한 조건으로 대량 생산이 가능하여 연구를 위한 무결함 시료로 가장 적합한 것으로 판단하여 실험재료로 선택하였다. 실험에 사용된 재료는 한 번의 길이가 22 mm, 46 mm, 66 mm 인 각주형 크리스탈이다. 크리스탈은 취성이 큰 재료여서 시료가 일정하중에 다다랐을 때 급격하게 산산 조각이 나는 폭발적인 파괴가 발생하였고 파괴 후 대부분의 시료의 형태는 가루가 될 정도로 매우 균질한 파괴가 발생하였다. 크기가 증가함에 따라 일축압축강도 증가현상이 뚜렷하고 차원해석에 비교적 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 차원해석에 의한 강도-길이의 기울기가 1인 반면 크리스탈의 경우 그림 8에 나타난 바와 같이 대략 0.8의 기울기를 얻을 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 균질하고 결함이 최소화되어 있는 재료의 경우 차원해석의 결과와 같이 크기가 증가함에 따라 강도도 선형적으로 증가할 것으로 판단된다. 사진 6은 크리스탈의 실험 전·후의 모습이고 표 3은 실험 결과를 나타내고 있다.

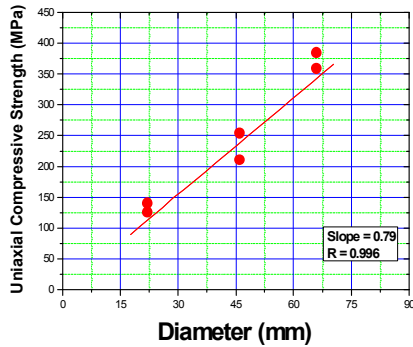


그림 8. 크리스탈 실험 결과

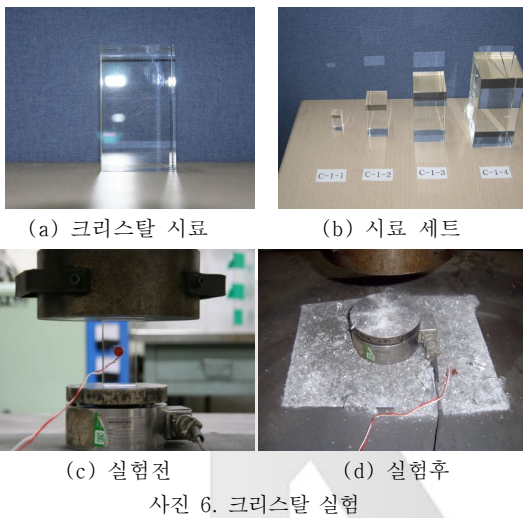


사진 6. 크리스탈 실험

표 3. 크리스탈 실험 결과

Sample	Loaded surface size (mm)	Height (mm)	Density (g/cm ³)	Strength (MPa)
C-1-1	22.6 × 22.7	41.0	2.50	125.7
C-2-1	21.7 × 21.4	41.5	2.54	140.0
C-1-2	46.0 × 46.0	80.4	2.53	210.3
C-2-2	45.9 × 46.2	81.2	2.49	253.7
C-1-3	66.0 × 66.7	120.8	2.51	358.5
C-2-3	68.5 × 68.4	121.0	2.53	384.2

4. PFC3D를 이용한 크기효과 검증

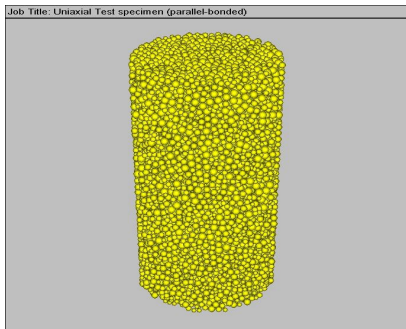
PFC (Particle Flow Code) 3D를 이용한 수치 실험을 수행하여, 시료의 크기에 따른 강도 및 탄성계수의 변화를 확인하고 크기에 따른 물성의 변화에 영향을 미치는 파라미터를 분석하였다(Itasca, 2003; Potyondy & Cundall, 2004).

4.1 해석모델구성

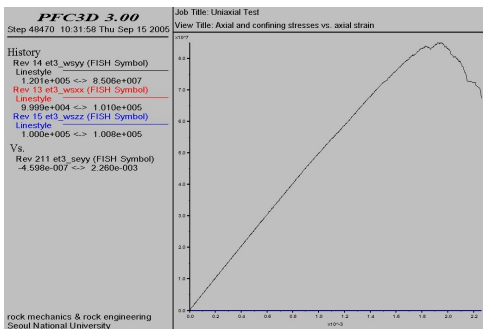
암석의 특성을 고려할 수 있는 Parallel-bond 모델을 적용하였다. Parallel-bond 모델 구성에 필요한 입자 물성은 표 4와 같다. 최대 입자와 최소 입자의 비는 1.66이며 최소 입자의 반지름은 1.8 mm로 설정하였다. 모델의 생성 과정은 먼저 내부 압력이 1 MPa이 되도록 입자를 다진 후 입자의 다짐을 위해 사용되었던 측면벽을 제거하고 NX시료로 만드는 과정으로 진행되었다(그림 9). 또한 가압 속도는 0.05m/sec를 사용하였고, 최대 강도의 20%수준 정도로 강도가 떨어지면

표 4. PFC 모델링에 사용된 입력 변수

Parameter	Description
ρ	ball density [kg/m ³]
E_c	ball-ball contact modulus [Pa]
k_n/k_s	ball stiffness ratio
$\bar{\lambda}$	parallel-bond radius multiplier
\bar{E}_c	parallel-bond modulus [Pa]
\bar{k}_n/\bar{k}_s	parallel-bond stiffness ratio
μ	ball friction coefficient
σ_c (mean)	parallel-bond normal strength, mean [Pa]
$\bar{\sigma}_c$ (std. dev.)	parallel-bond normal strength, standard deviation [Pa]
τ_c (mean)	parallel-bond shear strength, mean [Pa]
$\bar{\tau}_c$ (std. dev.)	parallel-bond shear strength, standard deviation [Pa]

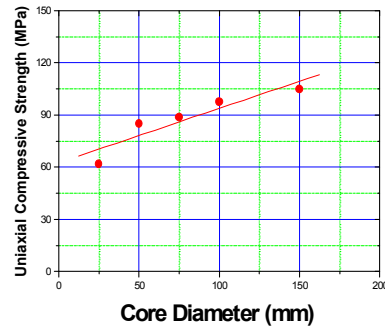


(a) 일축압축강도 시험 시료

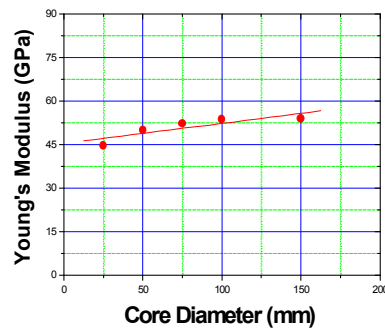


(b) 응력-변형률 곡선

그림 9. 해석 모델링



(a) 일축압축강도



(b) 탄성계수

그림 10. 시료 크기에 따른 강도 및 탄성계수의 변화

시험을 종료하였다.

4.2 실험 결과 및 고찰

4.2.1 시료 크기(core size)의 증가에 따른 일축 압축강도와 탄성계수 변화

지름 50 mm, 길이 100 mm 이고 일축압축강도가 85 MPa, 탄성계수는 50 GPa인 가상의 무결함 시료를 시행 착오(trial and error)의 방법을 사용해서 얻었다. 이 시료를 기준으로 25 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm 시료에 대해 크기에 따른 일축압축강도 및 탄성계수의 변화 양상을 파악해보았다. 모든 물성은 동일하게 맞추고 시료의 직경과 길이만 일정 비율로 변화 시켰다. 해석 결과 차원해석과 같은 기술기는 아니지만 시료의 크기가 커짐에 따라 일축압축 강도 및 탄성계수의 증가 현상을 확인할 수 있었다(그림 10).

4.2.2 크기에 따른 강도 및 탄성계수 증가에 영향을 주는 파라미터(parameter) 분석

Parallel-bond에서 강도 및 탄성계수를 결정하는 파라미터(parameter)에는 본드(bond)의 전단, 수직강도의 평균값의 비($E(\tau_c) / E(\sigma_c)$), 본드(bond)의 수직강도와 전단강도의 평균값에 대한 분산($S(\sigma_c), S(\tau_c)$), parallel-bond radius multiplier($\bar{\lambda}$), 마찰계수(μ), 본드(bond)의 수직강도의 평균($E(\sigma_c)$), 본드(bond)의 전단강도의 평균($E(\tau_c)$), 볼(ball)의 관련요소인 E_c 와 k_n/k_s , 본드(bond)와 관련요소인 \bar{E}_c 와 \bar{k}_n/\bar{k}_s 등 총 10 가지의 요소가 존재한다. 이 10가지 파라미터에 대하여 나머지 요소들은 고정시키고 각각의 해당 요소들만 변화 시켜가면서 크기에 따른 강도와 탄성계수 변화에 영향을 미치는 파라미터를 분석하였다. 표 5는 파라미터해석을 위한 기본 시료 물성치를 나타내고 있다.

표 5. 기본 해석 시료들의 물성치

Diameter [mm]	Height [mm]	Density [kg/m ³]	Rmin [mm]	Rmax / Rmin	μ	$\frac{E_c}{\bar{E}_c}$ [GPa]	$\frac{k_n/k_s}{\bar{k}_n/\bar{k}_s}$	$\bar{\lambda}$	σ_c (mean) [MPa]	σ_c (std. dev.) [MPa]	τ_c (mean) [MPa]	τ_c (std. dev.) [MPa]
25	50	2,700	1.8	1.66	0.5	70.0	2.1	1.0	100.0	25.0	100.0	25.0
50	100	2,700	1.8	1.66	0.5	70.0	2.1	1.0	100.0	25.0	100.0	25.0
75	150	2,700	1.8	1.66	0.5	70.0	2.1	1.0	100.0	25.0	100.0	25.0
100	200	2,700	1.8	1.66	0.5	70.0	2.1	1.0	100.0	25.0	100.0	25.0
150	300	2,700	1.8	1.66	0.5	70.0	2.1	1.0	100.0	25.0	100.0	25.0

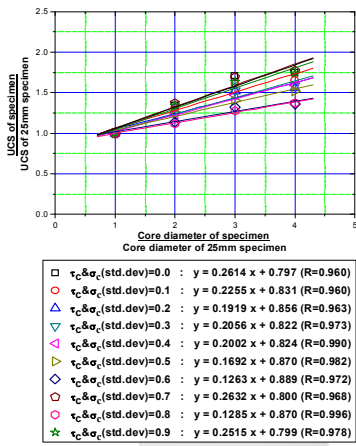


그림 11. 정규화 된 시료 크기에 따른 강도변화

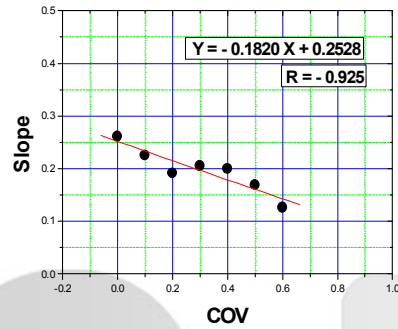


그림 12. COV에 따른 강도 기울기의 변화

(1) 크기에 따른 강도 변화에 영향을 주는 파라미터 분석

각 파라미터(parameter)들에 대하여 분석해 본 결과 크기에 따른 강도 변화에 영향을 주는 파라미터는 $S(\sigma_c)$ 및 $S(\tau_c)$ 와, $\bar{\lambda}$, \bar{E}_c , \bar{k}_n/\bar{k}_s 로 나타났다.

① 본드의 수직강도와 전단강도의 평균값에 대한 분산 ($S(\sigma_c)$, $S(\tau_c)$)

그림 11은 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm의 일축 압축강도를 25 mm의 일축압축강도로 나누어 표준화 시켰을 때 본드(bond)의 수직강도와 전단강도의 평균값에 대한 분산(분산/평균=COV, Coefficient Of Varia-

tion)이 크기에 따른 강도의 증가율에 미치는 영향을 보여준다. 볼의 결합강도의 분산이 0.0~0.6인 범위에서 그림 11의 강도 변화에 대한 회귀직선의 기울기와 COV와의 상관관계(그림 12)를 살펴보면 분산이 작을수록 즉, 취성이 클수록 시료의 크기증가에 따른 강도 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다.

② Parallel-bond radius multiplier($\bar{\lambda}$)

그림 13은 parallel-bond radius multiplier($\bar{\lambda}$)가 시료크기 증가에 따른 강도의 증가율에 어떤 영향을 미치는지를 나타내는 그림이다. 이 때 COV는 0.25로 일정하게 유지하였다. 그림 15에서 보는 바와 같이 $\bar{\lambda}$ 가 증가할수록 시료의 전체 강도는 증가하지만 25 mm 직경시료의 일축압축강도를 기준으로 정규화 한 후 구한 강도 변화 기울기는 $\bar{\lambda}$ 증가에 따라 오히려 감소하는 경향을

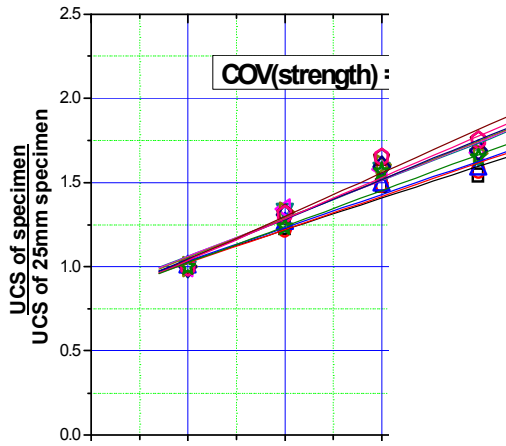


그림 13. 정규화 된 시료 크기에 따른 강도변화

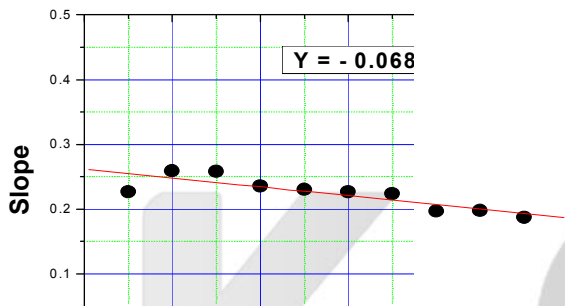


그림 14. $\bar{\lambda}$ 에 따른 강도 기울기의 변화

보였다(그림 14). 부연 설명을 하면 $\bar{\lambda}$ 가 작아질수록 즉, 본드(bond)의 폭이 작아질수록 시료 크기 증가에 따른 강도 증가율이 커진다는 것이다. 그러나 $\bar{\lambda}$ 가 작아질수록 입자간의 결합력이 줄어들어 granular material 에 가깝게 되고 강도는 현저하게 낮아지게 된다. 그러나 현저하게 감소한 일축압축강도를 기준으로 정규화 하여 구한 강도 증가율의 경우 작은 오차에 대하여 민감하게 반응하게 되므로 $\bar{\lambda}$ 가 강도의 크기 효과에 미치는 영향평가에는 세심한 주의가 필요하다고 생각된다.

③ \bar{E}_c (parallel-bond modulus)

그림 16은 parallel bond modulus (\bar{E}_c)가 강도의 크기 효과에 미치는 영향을 보여준다. 그림 17을 분석해보

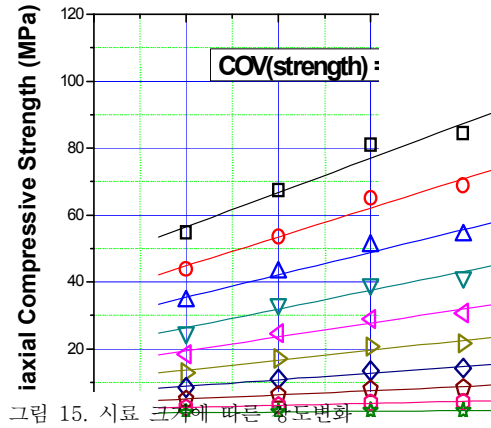


그림 15. 시료 크기에 따른 강도변화

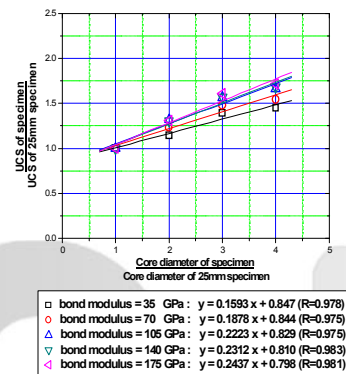


그림 16. 정규화 된 시료 크기에 따른 강도변화

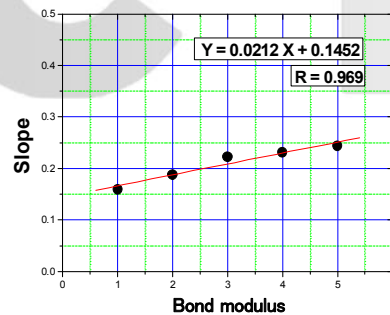


그림 17. \bar{E}_c 에 따른 강도 기울기의 변화

면 \bar{E}_c 가 증가할수록 크기에 따른 강도 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다.

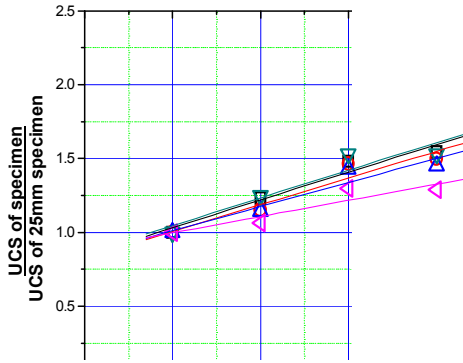


그림 18. 정규화 된 시료 크기에 따른 강도변화

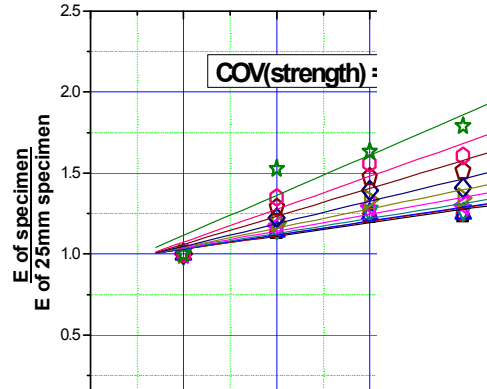


그림 20. 정규화 된 시료 크기에 따른 탄성계수 변화

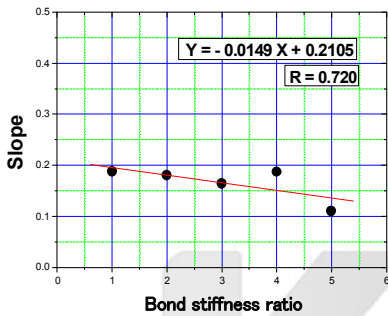


그림 19. \bar{k}_n/\bar{k}_s 에 따른 강도 기울기의 변화

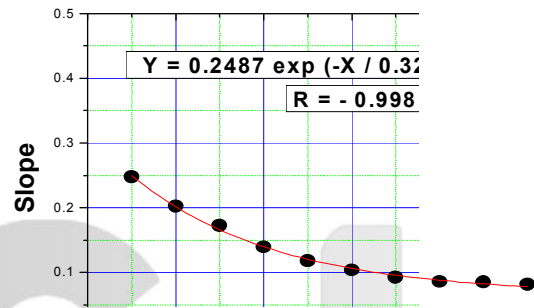


그림 21. $\bar{\lambda}$ 에 따른 탄성계수 기울기의 변화

④ \bar{k}_n/\bar{k}_s (parallel-bond stiffness ratio)

그림 18은 parallel-bond stiffness ratio(\bar{k}_n/\bar{k}_s)가 강도의 크기 효과에 미치는 영향을 보여준다. 그림 19를 분석해보면 \bar{k}_n/\bar{k}_s 가 감소할수록 크기에 따른 강도 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다.

(2) 크기에 따른 탄성계수 변화에 영향을 주는 파라미터 분석

각 파라미터(parameter)들에 대하여 분석해 본 결과 크기에 따른 탄성계수 변화에 영향을 주는 주요 파라미터는 $\bar{\lambda}$, \bar{E}_c , \bar{k}_n/\bar{k}_s 등 인 것으로 나타났다.

① Parallel-bond radius multiplier($\bar{\lambda}$)

그림 20은 parallel-bond radius multiplier($\bar{\lambda}$)가

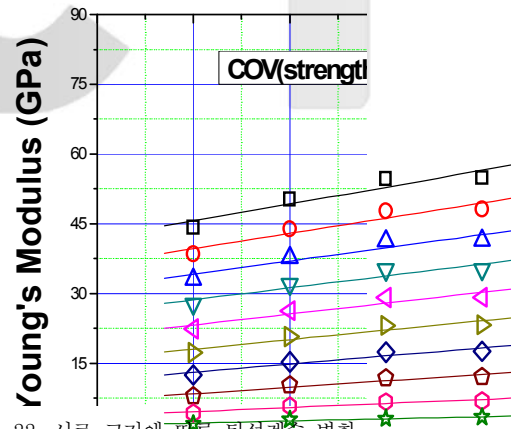


그림 22. 시료 크기에 따른 탄성계수 변화

시료크기 증가에 따른 탄성계수의 증가율에 어떤 영향을 미치는지를 나타내는 그림이다. 그림 22에서 보는 바와

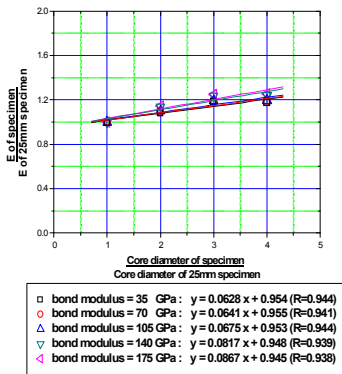


그림 23. 정규화 된 시료 크기에 따른 탄성계수 변화

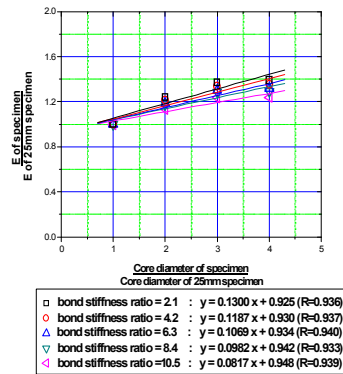


그림 25. 정규화 된 시료 크기에 따른 탄성계수 변화

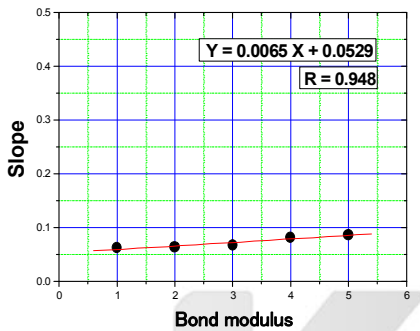


그림 24. \bar{E}_c 에 따른 탄성계수 기울기의 변화

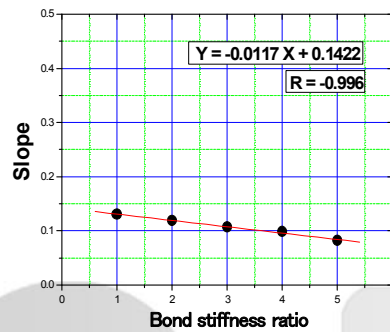


그림 26. \bar{k}_n/\bar{k}_s 에 따른 탄성계수 기울기의 변화

같이 $\bar{\lambda}$ 가 증가할수록 시료의 전체 탄성계수는 증가하지만 25 mm 직경시료의 탄성계수를 기준으로 정규화 한 후 구한 탄성계수 변화 기울기는 $\bar{\lambda}$ 증가에 따라 오히려 감소하는 경향을 보였다(그림 21). 부연 설명을 하면 $\bar{\lambda}$ 가 작아질수록 즉, 본드(bond)의 폭이 작아질수록 시료 크기 증가에 따른 탄성계수 증가율이 커진다는 것이다. 그러나 현저하게 감소한 탄성계수를 기준으로 정규화 하여 구한 탄성계수 증가율의 경우 작은 오차에 대하여 민감하게 반응하게 되므로 $\bar{\lambda}$ 가 탄성계수의 크기 효과에 미치는 영향평가 역시 세심한 주의가 필요하다고 생각된다.

② \bar{E}_c (parallel-bond modulus)

그림 23은 parallel bond modulus (\bar{E}_c)가 탄성계수의 크기효과에 미치는 영향을 보여준다. 그림 24를 분석

해보면 \bar{E}_c 가 증가할수록 크기에 따른 탄성계수 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다. 강도의 경우와 유사한 경향을 보였다.

③ \bar{k}_n/\bar{k}_s (parallel-bond stiffness ratio)

그림 25는 parallel-bond stiffness ratio(\bar{k}_n/\bar{k}_s)가 탄성계수의 크기 효과에 미치는 영향을 보여준다. 그림 26을 분석해보면 \bar{k}_n/\bar{k}_s 가 감소할수록 크기에 따른 탄성계수 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다. 역시 강도의 경우와 유사한 경향을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 차원해석을 통해 얻은 결과를 토대로 무결함 재료의 크기에 따른 강도 및 탄성계수의 변화를

알아보기 위해 6가지 인공재료에 대해서 일축압축실험을 실시하였고 PFC3D를 이용하여 시료의 크기 및 각종 모델 파라미터 변화에 따른 강도 및 탄성계수의 변화를 파악해 보았다.

1. 현장과 실험실의 중력가속도가 동일하고 실내실험 재료와 현장 재료가 동일하다는 조건하에 차원해석을 하였을 때 시료의 크기가 커짐에 따라 강도 및 탄성계수는 대상 시료의 크기에 정비례하여 증가하는 것으로 나타났다.
2. 물리 실험에서 6가지 인공재료 중 크리스탈의 경우에는 기포 없는 시료를 얻을 수 있었으며 크기가 증가함에 따라 일축압축강도 증가현상이 뚜렷이 나타나 차원해석의 결과와비교적 가까운 결과를 얻을 수 있었다.
3. PFC3D를 이용하여 수치해석을 수행한 결과 볼(ball) 크기는 일정하게 하고 시료 크기만 증가시킨 경우 시료 크기가 증가할수록 강도 및 탄성계수도 증가하는 경향을 보였다.
4. 시료 크기 증가 시 강도 및 탄성계수의 증가에 영향을 미치는 10가지 파라미터를 분석해 본 결과 강도 증가에 영향을 미치는 주요 파라미터는 $S(\sigma_c)$ 및 $S(\tau_c)$, $\bar{\lambda}$, \bar{E}_c , \bar{k}_n/\bar{k}_s 로 크게 4가지로 탄성계수 증가에 영향을 미치는 주요 파라미터는 $\bar{\lambda}$, \bar{E}_c , \bar{k}_n/\bar{k}_s 의 3가지로 나타났다.
5. 파라미터 분석결과 결합부의 수직강도와 전단강도의 평균값에 대한 분산(COV)이 강도 변화에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터로 판단되었는데 이는 분산이 작을수록 즉, 강도가 균질하여 취성의 경향이 커질수록 크기에 따른 강도 증가율이 커진다는 것을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술 C01)에 의하여 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Cunha, A.P.(1990), "Scale effects in rock mechanics", Proceedings of the 1st International Workshop on Scale Effects in Rock Masses, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 3-27.
2. Buckingham, E.(1914), "On physically similar systems: Illustrations of the use of dimensional equations", Physical Review, Vol. 4(3), pp. 345.
3. Hawkins, A.B.(1998), "Aspects of rock strength", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Springer-Verlag, Vol. 57, pp. 17-30.
4. Hobbs, D.W.(1966), "Scale model studies of strata movement around mine roadways: apparatus, technique and some preliminary results", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol 3, pp. 101-127.
5. Itasca Consulting Group Inc.(2003), PFC3D User's Manual.
6. 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.



이승우

서울대학교 공과대학
지구환경시스템공학부 석사과정
snulsw@hanmail.net



송재준

서울대학교 공과대학
지구환경시스템공학부 교수
songjj@snu.ac.kr