

## 무결합 재료의 크기에 따른 강도와 탄성계수의 변화에 관한 연구

이승우, 송재준 (서울대학교)

### 1. 서 론

암반은 크게 암석과 불연속면으로 구성되며 각각의 주요 물성들은 암반 구조물의 역학적 안정성에 있어서 매우 중요하다. 이런 물성들은 현장 실험과 실내 실험을 통해 구해지게 되는데 여기에서 구한 물성들은 구조물의 수치해석 및 암반평가에 입력변수로 사용되어 결과적으로 구조물의 설계에 작간 접적인 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. 그러므로 실험실에서 얻은 암석 및 불연속면의 물성을 이용하여 현장규모의 암석 및 불연속면의 물성을 합리적으로 예측하는 방법을 확립할 필요가 있다.

암반 불연속면의 다양한 속성들로 인해 불연속면이 포함된 암반의 크기 효과(Cunha, 1990)를 규명하기 위해서는 먼저 무결합 부분에 대한 크기효과를 분석한 후 이 연구결과를 바탕으로 불연속 암반의 크기효과를 분석하는 것이 타당하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 불연속면을 제외한 무결합 암의 크기 효과에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 우선 Buckingham's theorem(1914)을 이용한 차원해석을 통해 크기에 따른 물성 변화를 파악하였고 가능한 한 무결합에 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 무결합 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)

세 가지 기본 차원인 길이[L], 시간[T], 질량[M]을 이용하여 차원해석을 실시, 강도 및 탄성계수의 크기효과를 분석해 보았다(Hobbs, 1969). 첫째, 현장과 실험실의 중력가속도는 같다는 가정 하에 길이와 시간과의 관계를 알아보면 다음과 같다.

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

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

$$\frac{M}{L^3} = K_2(\text{constant}), \quad M = K_2L^3 \quad (2)$$

이를 정리하면 시간은 길이의 제곱근에 비례하고 질량은 길이의 세제곱에 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 무결함 재료의 강도 및 탄성계수는 크기에 정비례함을 알 수 있다.

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 <sup>1/2</sup>	3 <sup>1/2</sup>	4 <sup>1/2</sup>	5 <sup>1/2</sup>	...	600 <sup>1/2</sup>
Mass [M]	1	2 <sup>3</sup>	3 <sup>3</sup>	4 <sup>3</sup>	5 <sup>3</sup>	...	600 <sup>3</sup>
Density [ML <sup>-3</sup> ]	1	1	1	1	1	...	1
Strength [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	1	2	3	4	5	...	600
Young's modulus [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	1	2	3	4	5	...	600

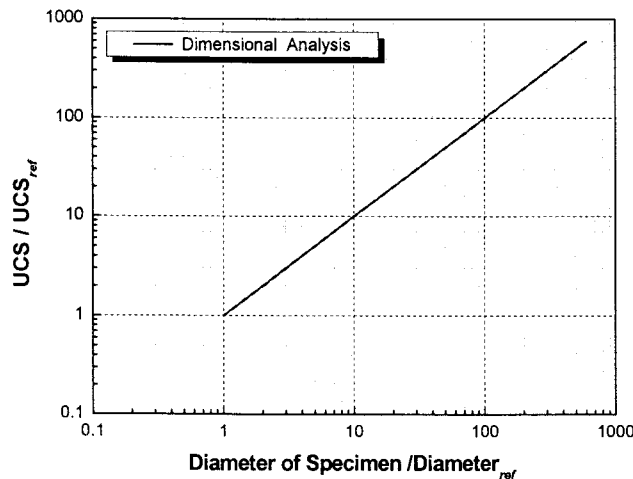


그림 1. 시료 크기와 무차원화 된 일축압축강도와의 관계

### 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) 및 아크릴(Acryl)을 이용한 물리 실험

테프론(Teflon)은 대량 생산을 통해 균질한 제품을 얻을 수 있고 가압면의 마찰각이 작아 하중기 접촉면 부근에서의 붕압 효과를 크게 감소시킬 수 있다는 장점을 고려하여 첫 실험 재료로 선택하였다. 직경이 각각 50 mm, 100 mm이고 직경 대 길이비가 1 : 2인 테프론 블록에 대해 일축압축실험을 실시하였다. 실험결과 하중을 증가시켰을 때 하중이 올라가는 속도가 매우 느리고 연성 거동을 보임에 따라 명확한 파괴점을 찾기 어려워 결국 테프론 블록에 대한 최대 강도 측정은 불가능하였다. 탄성계수 또한 연속적으로 변화하는 양상을 보여 판단하기에 어려움이 있으나 소폭 상승하는 경향을 보였다.

다음으로 아크릴을 선택하였다. 테프론 블록과 유사한 결과가 나올 수도 있다는 판단 하에 먼저 지름 50 mm의 아크릴로 실험을 하였다. 아크릴 또한 연성거동을 보임으로 인하여 본 연구에는 부적합한 재료로 판정하였다. 아크릴의 실험 전·후의 모습은 그림 2와 같다.

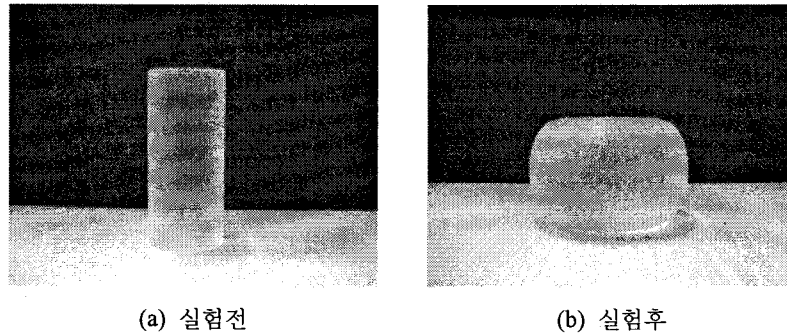
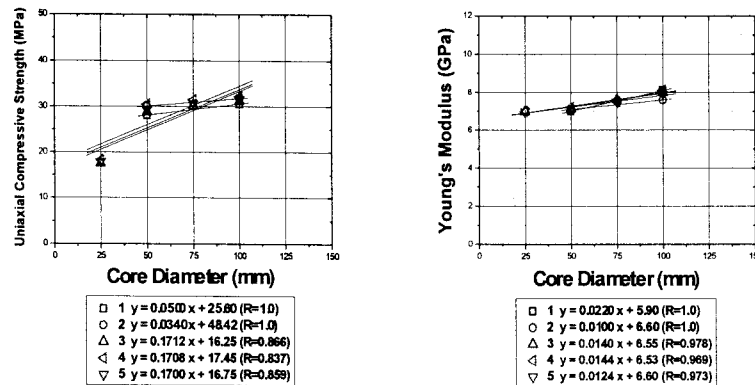


그림 2. 아크릴 실험

#### 3.2 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 직접 제작하였다. 직경이 각각 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm이고 직경 대 길이비가 1:2인 시료에 대해 일축압축실험을 실시하였는데 실험 결과 크기의 증가에 따라 어느 정도 강도와 탄성계수가 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. 그러나 성형 시 세심한 주의에도 불구하고 무결한 시료를 만드는 데는 어려움이 있고 실험의 재현성이 좋지 못해 같은 배합비의 시료에서도 다른 양상을 보이는 등 본 연구를 위한 재료로는 한계가 있었다. 실험 결과는 그림 3에 나타나 있다.



(a) 일축압축강도 (b) 탄성계수

그림 3. 다이아스톤 실험 결과

### 3.3 초속경시멘트를 이용한 실험

비교적 암석과 비슷한 강도를 지니며 성형시간이 짧은 (주)제트콘 코리아의 초속경시멘트 MR#7000을 재료로 선택하였다. 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 강도 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 양생, Case 2는 물과 초속경시멘트의 중량비를 15 : 100로 하고 7일 양생, 그리고 Case 3은 물과 초속경시멘트의 중량비를 11 : 100로 3일 양생, Case 4는 물과 초속경시멘트의 중량비를 11 : 100로 하고 7일 양생하였다. 실험에 사용한 성형틀과 성형된 시료 및 실험 후의 시료의 모습은 그림 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. Case 3, Case 4는 Case 1과 Case 2의 경우보다 더 큰 강도를 보일 것으로 예상했지만 성형틀 주입 및 기포 제거에 어려움으로 인해 오히려 강도가 매우 낮게 나왔다. Case 1, Case 2의 실험 후 강도 변화는 그림 6과 같다. 두 경우 모두 시료직경 25 mm ~ 50 mm 에서는 크기 증가에 따라 강도가 증가하였으나 그보다 큰 시료에서는 강도가 감소하였다. 이 결과는 Hawkins(1998)가 7 종류의 퇴적암에 대하여 건조 상태의 일축압축강도와 시험편 지름의 관계를 연구한 결과(그림 5)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 효과를 일부 확인할 수 있었다.

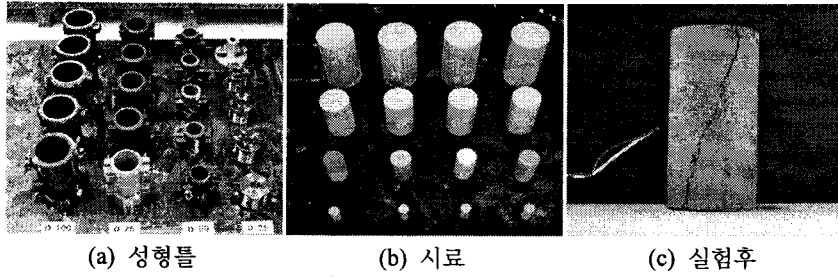


그림 4. 초속경 시멘트 실험

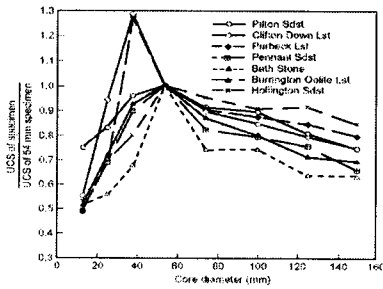
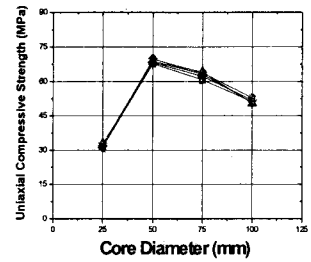
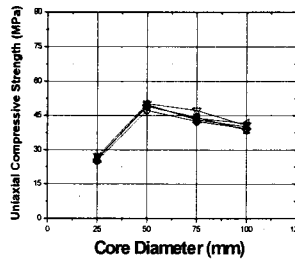


그림 5. 7 종류의 퇴적암에 대한 크기 변화에 따른 일축압축강도 변화 (Hawkins, 1998)



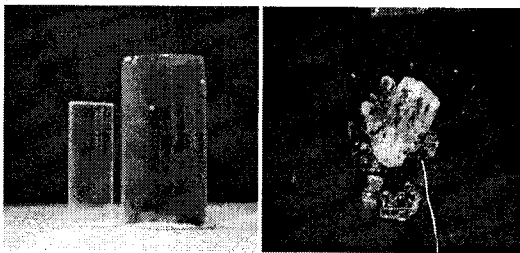
(a) case 1

(b) case 2

그림 6. 초속경 시멘트 실험 결과

### 3.4 유리를 이용한 실험

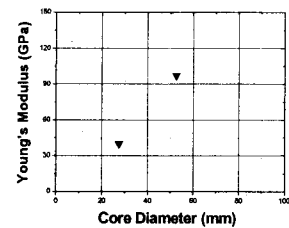
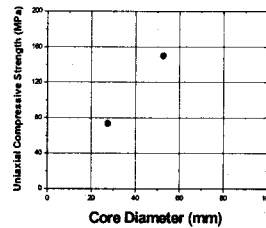
무결함 실험 재료로서 유리를 선택하여 일축압축실험을 수행하였다. 직경은 각각 27 mm, 52 mm이고 직경과 높이의 비는 1:2와 1:1.4였다. 두 시료의 직경 : 높이가 일치하지는 않지만 이 실험에서는 그림 8에서 보는 바와 같이 크기가 커짐에 따라 일축압축강도 및 탄성계수 증가현상이 매우 뚜렷이 나타났다. 그러나 유리의 경우 소형 주형틀에 주입하여 제작하는 제작과정의 특성으로 인해 시료 성형 시 기포를 완전히 제거하기 어렵고 기존 성형틀을 이용하는 관계로 원하는 형태의 시료를 얻기 어렵다는 단점이 있다. 그림 7은 유리의 실험 전·후의 모습이다.



(a) 실험전

(b) 실험후

그림 7. 유리 실험



(a) 일축압축강도

(b) 탄성계수

그림 8. 유리 실험 결과

### 3.5 크리스탈(Crystal)을 이용한 실험

크리스탈은 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 변의 길이가 22 mm, 46 mm, 66 mm 인 각주형 크리스탈이다. 크리스탈은 취성이 큰 재료여서 시료가 일정하중에서 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 10에 나타난 바와 같이 대략 0.8의 기울기를 얻을 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 균질하고 결함이 최소화 되어 있는 재료의 경우 차원해석의 결과와 같이 크기가 증가함에 따라 강도도 선형적으로 증가할 것으로 판단된다. 그림 9는 크리스탈의 시료 및 시료 세트, 실험 전·후의 모습이고 표 2는 실험 결과를 나타내고 있다.

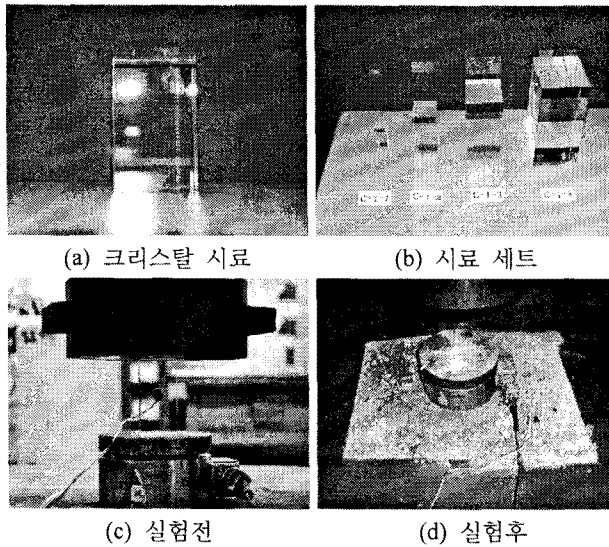


그림 9. 크리스탈 실험

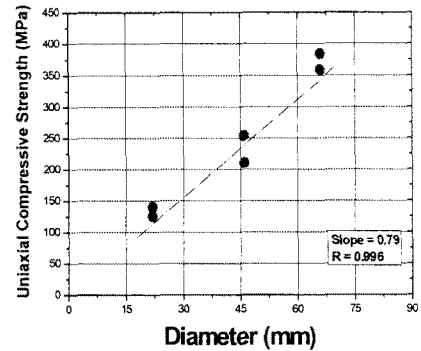


그림 10. 크리스탈 실험 결과

표 2. 크리스탈 실험 결과

Sample	Loaded surface size (mm)	Height (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	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 Consulting Group, 2003 ; Potyondy 외, 2004).

### 4.1 해석모델구성

암석의 특성을 고려할 수 있는 Parallel-bond 모델을 적용하였다. Parallel-bond 모델 구성에 필요한 입자 물성은 표 3과 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. 또한 가압 속도는 0.05m/sec를 사용하였고, 최대 강도의 20%수준 정도로 강도가 떨어지면 시험을 종료하였다.

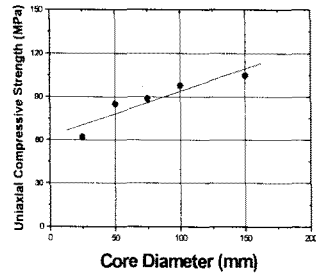
표 3. PFC 모델링에 사용된 입력 변수

Parameter	Description
$\rho$	ball density [kg/m <sup>3</sup> ]
$E_c$	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
$\mu$	ball friction coefficient
$\sigma_c$ (mean)	parallel-bond normal strength, mean [Pa]
$\bar{\sigma}_c$ (std. dev.)	parallel-bond normal strength, standard deviation [Pa]
$\tau_c$ (mean)	parallel-bond shear strength, mean [Pa]
$\bar{\tau}_c$ (std. dev.)	parallel-bond shear strength, standard deviation [Pa]

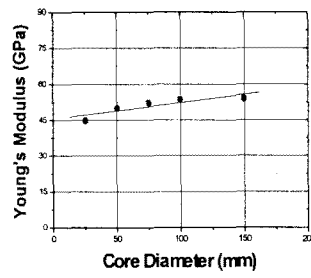
### 4.2 실험 결과 및 고찰

#### 4.2.1 시료 크기(core size)의 증가에 따른 일축압축강도와 탄성계수 변화

지름 50 mm, 길이 100 mm 이고 일축압축강도가 85 MPa, 탄성계수는 50 GPa인 가상의 무결합 시료를 시행착오(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. 해석결과 차원해석과 같은 기울기는 아니지만 시료의 크기가 커짐에 따라 일축압축 강도 및 탄성계수의 증가 현상을 확인할 수 있었다(그림 11).



(a) 일축압축강도



(b) 탄성계수

그림 11. 시료 크기에 따른 강도 및 탄성계수의 변화

#### 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, 수직 강도의 평균값의 비( $E(\tau_c) / E(\sigma_c)$ ), 본드의 수직강도와 전단강도의 평균값에 대한 분산( $S(\sigma_c)$ ,  $S(\tau_c)$ ), parallel-bond radius multiplier( $\bar{\lambda}$ ), 마찰계수( $\mu$ ), 본드의 수직강도의 평균( $E(\sigma_c)$ ), 본드의 전단강도의 평균( $E(\tau_c)$ ), 볼(ball)의 관련요소인  $E_c$ 와  $k_n/k_s$ , 본드와 관련요소인  $\bar{E}_c$ 와  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  등 총 10가지의 요소가 존재한다. 이 10가지 파라미터에 대하여 나머지 요소들은 고정시키고 각각의 해당 요소들만 변화 시켜가면서 크기에 따른 강도와 탄성계수 변화에 영향을 미치는 파라미터를 분석하였다.

##### (1) 크기에 따른 강도 변화에 영향을 주는 파라미터 분석

각 파라미터들에 대하여 분석해 본 결과 크기에 따른 강도 변화에 영향을 주는 주요 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 12는 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm의 일축압축강도를 25 mm의 일축압축강도로 나누어 표준화 시켰을 때 본드(bond)의 수직강도와 전단강도의 평균값에 대한 분산(분산/평균=COV, Coefficient Of Variation)이 크기에 따른 강도의 증가율에 미치는 영향을 보여준다. 볼의 결합강도의 분산이 0.0~0.6 인 범위에서 강도 변화에 대한 회귀직선의 기울기와 COV와의 상관관계(그림 13)를 살펴보면 분산이 작을수록 즉, 취성이 클수록 시료의 크기증가에 따른 강도 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다.

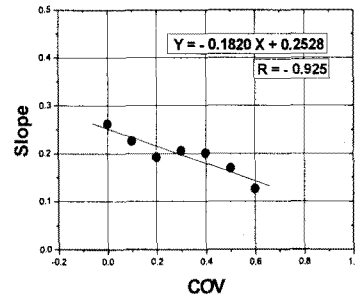
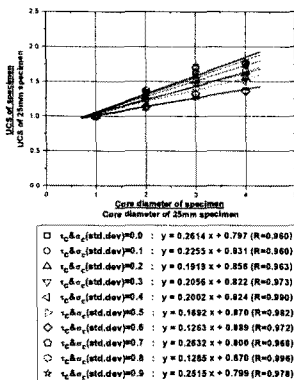


그림 12. 정규화 된 시료 크기에 따른 강도변화 그림 13. COV에 따른 강도 기울기의 변화



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

Parallel-bond radius multiplier( $\bar{\lambda}$ )가 시료크기 증가에 따른 강도의 증가율에 어떤 영향을 미치는지를 해석해보았다. 이 때 COV는 0.25로 일정하게 유지하였다. 해석결과 정규화하기 전에는  $\bar{\lambda}$ 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 보였다(그림 14). 이는  $\bar{\lambda}$ 가 작아질수록 즉, 본드의 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. 이때 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 판단된다.

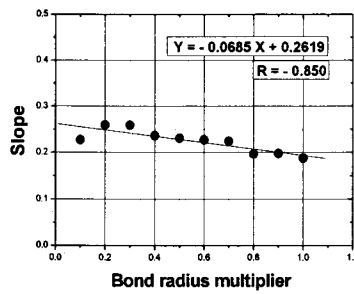


그림 14.  $\bar{\lambda}$ 에 따른 강도 기울기의 변화

③  $\bar{E}_c$ (parallel-bond modulus) &  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ (parallel-bond stiffness ratio)

Parallel bond modulus ( $\bar{E}_c$ )와 parallel-bond stiffness ratio( $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ )가 강도의 크기효과에 미치는 영향을 해석해보았다. 그림 15를 분석해보면  $\bar{E}_c$ 가 증가할수록 크기에 따른 강도 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다. 그림 16을 분석해보면  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 가 감소할수록 크기에 따른 강도 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다.

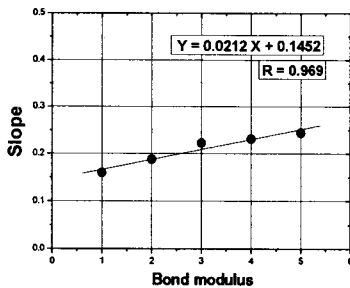


그림 15.  $\bar{E}_c$ 에 따른 강도 기울기의 변화

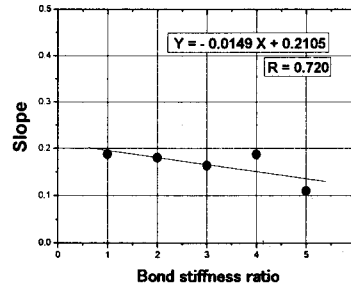


그림 16.  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 에 따른 강도 기울기의 변화

(2) 크기에 따른 탄성계수 변화에 영향을 주는 파라미터 분석

각 파라미터들에 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 17은 parallel-bond radius multiplier( $\bar{\lambda}$ )가 시료크기 증가에 따른 탄성계수의 증가율에 어떤 영향을 미치는지를 나타내는 그림이다. 해석결과 정규화하기 전에는  $\bar{\lambda}$ 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 18). 이는  $\bar{\lambda}$ 가 작아질수록 즉, 본드(bond)의 폭이 작아질수록 시료 크기 증가에 따른 탄성계수 증가율이 커진다는 것이다. 그러나 현재 하계 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 판단된다.

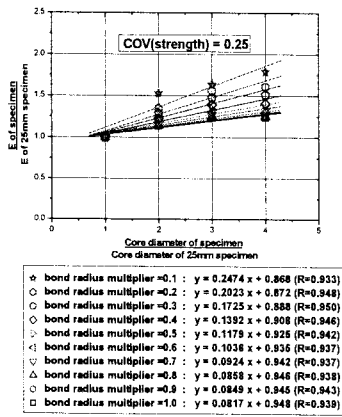


그림 17. 정규화 된 시료 크기에 따른 탄성계수 변화

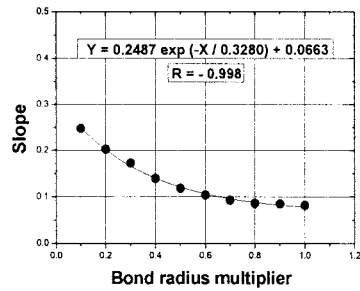


그림 18.  $\bar{\lambda}$ 에 따른 탄성계수 기울기의 변화

②  $\bar{E}_c$ (parallel-bond modulus) &  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ (parallel-bond stiffness ratio)

Parallel bond modulus ( $\bar{E}_c$ )와 parallel-bond stiffness ratio( $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ )가 탄성계수의 크기효과에 미치는 영향을 해석해보았다. 그림 19를 분석해보면  $\bar{E}_c$ 가 증가할수록 크기에 따른 탄성계수 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다. 이는 강도의 경우와 유사한 경향을 보였다. 그림 20을 분석해보면  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 가 감소할수록 크기에 따른 탄성계수 증가율이 커진다는 것을 알 수 있다. 이 역시 강도의 경우와 유사한 경향을 보였다.

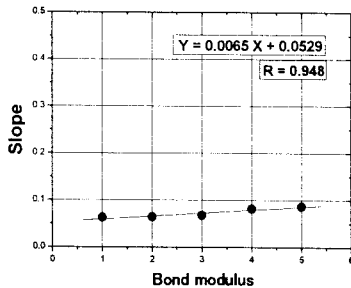


그림 19.  $\bar{E}_c$ 에 따른 탄성계수 기울기 변화

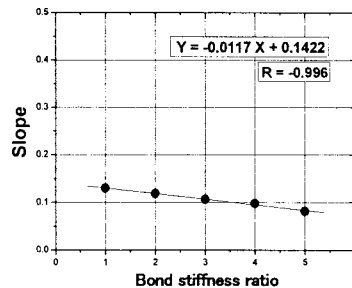


그림 20.  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 에 따른 탄성계수 기울기 변화

## 5. 결 론

본 연구에서는 차원해석을 통해 얻은 결과를 토대로 무결합 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 비교적 가장 균질한 시료를 얻을 수 있었으며 크기가 증가함에 따라 일축압축강도의 증가현상이 뚜렷이 나타나 차원해석의 결과와 비교적 가까운 결과를 얻을 수 있었다.
- 3) PFC3D를 이용해 수치해석을 수행한 결과 볼 크기는 일정하게 하고 시료 크기만 증가시킨 경우 크기가 증가할수록 강도 및 탄성계수도 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 시료 크기 증가 시 강도 및 탄성계수의 증가에 영향을 미치는 10가지 파라미터를 분석해 본 결과 강도증가에 영향을 미치는 주요 파라미터는  $S(\sigma_c)$  및  $S(\tau_c)$ ,  $\bar{\lambda}$ ,  $\bar{E}_c$ ,  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  로 4가지, 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 의미한다고 판단하였다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 2005년도 건설핵심 기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술 C01)에 의하여 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## ■ 참고문헌 ■

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

5. Hobbs, D.W., Scale model studies of strata movement around mine roadways – I: The dependence of roadway closure upon rock strength, 1968a, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 5, pp 219~235
6. Itasca Consulting Group Inc., 2003, PFC3D User's Manual.
7. Potyondy, D.O., Cundall, P.A., A bonded-particle model for rock, 2004, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 41, pp 1329~1364