



## 3차원 입자 결합 모델에서 콘크리트의 일축압축실험 모사 적용성 연구

이희광<sup>1)\*</sup> · 전석원<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부

### A Study for the Adaptation of Simulation of Uniaxial Compressive Strength Test for Concrete in 3-Dimensional Particle Bonded Model

Hee-Kwang Lee<sup>1)\*</sup> and Seok-Won Jeon<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>School of Civil and Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

**ABSTRACT** In an uniaxial compressive test of a concrete standard specimen (150×300 mm) the crack initiation and extension with the stress increase are the major reason of the failure, which is similar to the breakage of the particle bonding in the simulation by using particle bonded model, especially particle flow code in 3 dimensions (PFC3D) developed by Itasca Consulting Group Inc. That is the main motive to study the possibility of an uniaxial compressive strength test simulation. It is important to investigate the relationship between the micro-parameters and the macro-properties because the 3-dimensional particle bonded model uses the spherical particles to analyze the physical phenomena. Contact bonded model used herein has eight micro-parameters and there are five macro-properties; Young's modulus, Poisson's ratio, uniaxial compressive strength and the crack initiation stress and the ratio concerning the crack propagation with the stress. To simulate the compressive test we made quantitative relationships between the micro-parameters and the macro-properties by using the fractional factorial design and various sensitivity analyses including regression analysis, which result in the good agreement with the previous studies. Also, the stress-stain curve and the crack distribution over the specimen given by PFC3D showed the mechanical behavior of the concrete standard specimen under the uniaxial compression. It is concluded that the particle bonded model can be a good tool for the analyzing the mechanical behavior of concrete under the uniaxial compressive load.

**Keywords :** particle bonded model, uniaxial compressive strength, Young's modulus, regression analysis, fractional factorial design

#### 1. 서 론

일반적으로 콘크리트에 대한 역학적 특성은 대부분의 시방서에서 설계기준강도로 삼는 일축압축강도가 그 척도가 되고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 비교적 균질한 모르타르 외에도 골재의 종류나 공시체의 크기 및 형상 그리고 배합비 등의 영향에 따라 서로 다르게 나타나므로 콘크리트의 재료적 특성이라고 보기에는 무리가 있다<sup>2,3)</sup>. 이는 콘크리트의 비균질성 (heterogeneity) 및 콘크리트 공시체의 파괴가 새로운 균열의 진행 (crack propagation)에 의한 것이라는 파괴역학적인 개념을 도입함으로써 설명된다. 재료 특성상 존재할 수밖에 없는 골재와 모르타르 사이의 부착균열들이 압축하중 하에서 확장을 하며, 일정 하중 이상을 받게 되면서 모르타르에서도 새로운 균열이 발생하고 이러한 몇몇 균열에 의해서 결국에 파괴에 이르게 된다는 것이 밝혀졌다<sup>4)</sup>. 이러한 콘크리트 공시체의

균열확장에 의한 파괴역학적인 거동은 개별요소법 (discrete element method)에 기반을 둔 3차원 입자결합모델 (3-dimensional particle bonded model)에서 입자 간에 작용하는 힘이 결합강도를 초과할 경우 그 결합이 깨지면서 집합체의 균열을 모사하면서 파괴거동을 나타내는 것과 유사하다고 볼 수 있다<sup>5)</sup>. 이에 본 연구에서는 3차원 입자결합모델의 하나인 PFC3D (particle flow code in 3 dimensions)를 이용하여 콘크리트 표준 공시체의 일축압축실험을 모사하고자 하였다.

PFC에서 콘크리트 표준 공시체에 대한 일축압축실험을 모사하기 위해 적용한 모델은 접촉결합모델 (contact bond model)로 두 입자간의 접촉점에서 힘 (force)만을 전달하는 모델이다. 이 모델에서 실제 일축압축실험에서 얻어지는 거시물성 (macro-property)인 일축압축강도 및 탄성계수를 얻기 위해서는 각 입자간의 접촉점에서의 접촉결합에 대한 강도 및 강성 등을 결정해주어야 하는데 이를 미시변수 (micro parameter)라 한다<sup>6)</sup>. 입자결합모델에서는 미시변수가 변함에 따라 거시물성이 변하므로 결국 PFC를 이용하여 일축압축실험을 모사한다는 것은 이

\*Corresponding author E-mail: babala@snu.ac.kr  
Received May 14, 2007, Accepted December 7, 2007  
©2008 by Korea Concrete Institute

러한 미시변수 값을 결정하는 것으로 귀결된다고 볼 수 있다. 그러나 접촉결합모델의 경우 미시변수의 종류가 다양하고 각 변수의 변화에 따른 거시물성의 영향이 상이하여 Itasca에서 제시한 방법에 따라 일련의 시행오차법 (trail and error)을 이용한 단순한 반복 과정을 거쳐야 하는 것이 현실이다<sup>7)</sup>. 또한 미시변수의 결정에 대한 연구는 콘크리트보다 압축강도가 큰 경암 (hard rock)에 대하여 이루어져<sup>8-10)</sup> 콘크리트 공시체에 대한 일축압축실험의 모사에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단순 반복 과정을 줄이고자 거시물성에 대한 미시변수의 영향을 알아보기 위해 실험계획법의 하나인 부분배치법을 사용하여 거시물성에 영향을 미치는 중요한 미시변수를 결정하였다. 또한 각각의 미시변수와 거시물성간의 민감도 분석을 위한 회귀분석을 실시하여 원하는 콘크리트 표준공시체의 거시물성-탄성계수, 일축 압축강도, 포아송비를 위한 미시변수 관계식을 도출하고 참고문헌으로부터 얻은 일축압축강도를 구현하기 위해 도출된 관계식을 이용하여 수치적으로 일축압축시험을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

이를 바탕으로 콘크리트 공시체의 일축압축실험 모사의 결과로서 얻어지는 미시변수 값을 적용하면 향후 PFC3D를 이용하여 외력을 받는 콘크리트구조물 및 부재의 균열발생 메커니즘 및 역학적 거동 모사 연구의 초석이 될 것으로 판단된다.

## 2. 입자결합모델 개요

Itasca Consulting Group에서 개별요소법을 기반으로 개발한 상용프로그램인 PFC는 Cundall & Strack(1979)이 원형 입자의 이동과 상호작용을 모사하는 것으로부터 그 기본 개념이 정립되었다. 일반적으로 입자결합모델은 해석대상을 구성하는 입자들은 각각 독립적으로 움직이며, 두 입자간의 상호작용은 그 입자들이 이루는 접촉점에서만 이루어진다고 본다. 이 때 입자가 일정한 강성을 갖고 그 강성에 따라 접촉점에서의 거동이 결정된다면, 이 입자들로 이루어진 모델의 역학적 거동은 각 입자들의 운동과 입자들이 이루는 접촉점에서의 입자간의 힘을 이용하여 설명될 수 있다. Fig. 1은 이러한 PFC의 기본 계산 원리를 나타내는 것으로 힘-변위 법칙을 각 접촉점에 적용하여 두 입자간의 상대적인 변위에 기초한 접촉력을 계산하고 접촉구성모델을 갱신한 후, 운동 법칙을 각 입자에 적용하여 접촉력과 물체력에 의해 얻어지는 힘과 모멘트로부터 입자의 속도와 위치를 다시 계산하는 과정이 반복적으로 나타나게 된다<sup>5)</sup>.

각 입자들 간의 접촉에 작용하는 구성 모델은 크게 접촉-강성 모델 (contact-stiffness model), 미끄러짐 모델 (slip model), 그리고 결합 모델 (bonding model) 세 가지로 구성된다<sup>5)</sup>. 접촉-강성 모델은 각각 수직방향과 전단방향의 접촉력과 상대변위로부터 힘-변위 관계식을 이용하여 수직 접촉력과 전단 접촉력을 계산하며, PFC에서는 선형

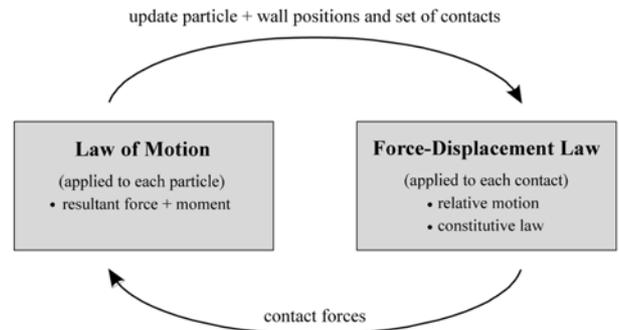


Fig. 1 Calculation cycle in PFC<sup>7)</sup>

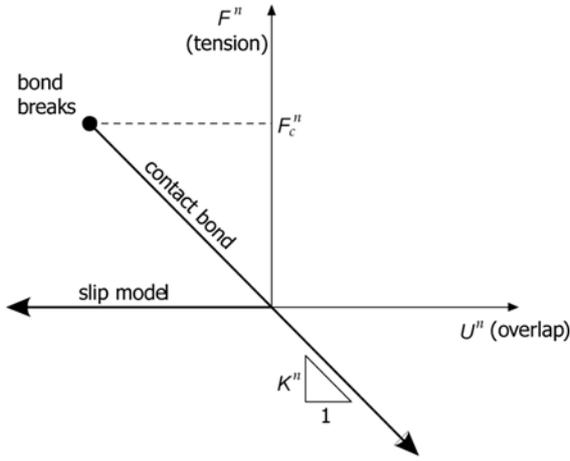
모델 (linear model)과 Hertz-Midlin model을 제공하고 있으나 본 연구에서는 접촉수직강성 ( $k_n$ )과 접촉전단강성 ( $k_s$ )으로 정의되는 선형 모델을 사용한다. 미끄러짐 모델은 입자간의 결합력이 작용하지 않을 경우 수직 접촉력과 전단 접촉력 사이의 관계를 나타내는데 마찰계수 ( $\mu$ )를 도입함으로써 최대 허용전단응력을 정하고 접촉부에서 계산된 전단력이 이 값을 넘으면 미끄러짐이 발생한다. 결합모델은 각 입자의 접촉점에서 결합강도를 가질 수 있도록 접촉결합 모델 (contact-bond model)과 병행결합 모델 (parallel-bond model)로 나누어진다. 접촉결합 모델은 두 입자의 접촉점에서 힘만을 전달하는데 반하여 병행결합 모델은 접촉점을 포함하는 원기둥 모양의 결합물질 (cementitious material)이 있어 힘과 모멘트를 함께 전달한다. 두 입자간의 결합이 생성되면, 결합이 깨어질 때까지 접촉은 유지되며, Fig. 2는 결합 모델에서의 변형 및 파과거동을 보여주고 있다.

## 3. 미시변수와 거시물성 간의 관계

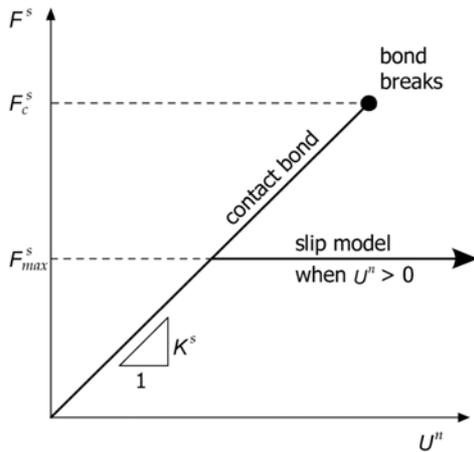
PFC3D에서는 입자간 접촉에 관련된 미시변수를 이용하여 거시물성을 재현하는데 다양한 종류의 거시물성을 동시에 재현할 수 있도록 미시변수를 설정하는 과정은 쉽지 않다. 그럼에도 Itasca에서는 경암의 일축압축실험을 통하여 얻을 수 있는 거시물성을 얻기 위한 반복 과정을 제안한 바 있으며<sup>7)</sup> 여러 연구자들에 의해서 특정 지역의 암석에 대하여 정성적 또는 정량적인 관계를 얻었다<sup>8-10)</sup>. 이에 압축강도 및 탄성계수가 암석보다 작은 콘크리트에 대하여 미시변수 및 거시물성 간의 정량적인 관계를 도출하고자 하였다.

### 3.1 미시변수 및 거시물성

본 연구에서 사용하기로 한 접촉결합 모델에서의 미시변수는 PFC3D에서 해석 대상을 구성하는 입자간의 접촉의 특성을 결정하는 8개의 변수로, 입자 밀도 (A), 입자 최소반경 (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)이며



(a) Normal component of contact force



(b) Shear component of contact force

**Fig. 2** Constitutive behavior for contact occurring at a point<sup>7)</sup> ( $F^n/F^s$ : normal/shear contact force,  $F_c^n/F_c^s$ : normal/shear contact bond strength,  $K^n/K^s$ : normal/shear stiffness at the contact, and  $U^n$ : relative normal displacement, where  $U^n > 0$  indicates overlap)

(Table 1 참고), 일축압축실험을 통해 알 수 있는 거시물성은 탄성계수 (Y1), 포아송비 (Y2), 일축압축강도 (Y3), 균열 개시 응력 (Y4), 일축압축강도에 대한 균열 개시 응력의 비 (Y5)이다. 일축압축실험은 원주형 표준 공시체 ( $\phi 150 \times 300$  mm)로 수치 실험을 실시하며, 미시변수 값의

**Table 1** Micro parameters for generation of a contact bonded in PFC3D

Micro-parameter	Unit	Abbrevi.	Factor levels		
			Low(-1)	High(+1)	Average
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	A	2,000	2,500	2,250
$r_{\min}$	mm	B	3	5	4
$\mu$	-	C	0.3	0.7	0.5
$CM$	GPa	D	20	80	50
$k_n/k_s$	-	E	1	3	2
$\sigma_c(\text{mean})$	MPa	F	20	80	50
$\tau_c(\text{mean})$	MPa	G	20	80	50
s.d./mean ( $\sigma_c, \tau_c$ )	-	H	0.1	0.3	0.2

범위를 결정하기 위한 거시물성 값의 범위를 살펴보았다.

일반적으로 콘크리트의 표준 공시체의 일축압축강도는 보통강도 콘크리트와 고강도콘크리트를 포함하여 20~83 MPa (미국 ACI 기준) 범위에 있다. 탄성계수는 각 국의 시방서마다 일축압축강도에 의한 추정식이 존재하는데 미국 ACI 에서는 강도수준에 따라 다음과 같이 정의하고 있다<sup>11,18)</sup>.

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_c'}, (f_c' < 42 \text{ MPa}) \quad (1)$$

$$E_c = 0.03 w_c^{1.5} \sqrt{f_c'} + 7,000 \quad (\text{MPa})$$

$$(42 < f_c' < 83 \text{ MPa})$$

여기서  $w_c$ 는 콘크리트의 단위중량 (kg/m<sup>3</sup>),  $f_c'$ 는 일축압축강도 (MPa), 그리고  $E_c$ 는 콘크리트의 탄성계수 (MPa)이다.

위의 식 (1)에 의해서 20~83 MPa에 해당하는 일축압축강도를 대입하여 구한 탄성계수의 범위는 콘크리트의 단위중량을 155 kg/m<sup>3</sup>로 가정했을 경우 대략 20~40 GPa에 해당된다. 한편, 포아송비의 경우 일축압축강도 및 재료배합 등과 관련이 있으나 일축압축강도의 70% 이하에 해당하는 강도수준에서 대략 0.15에서 0.20 사이의 값을 가지며, 0.18의 평균값이 널리 사용되고 있다<sup>11,12)</sup>. 마지막으로 균열 개시 응력의 경우 공시체에 이미 존재하는 골재와 모르타르 간의 부착균열 이외에 축하중이 가해지면서 새롭게 모르타르에서 균열이 발생하는 응력 수준으로 대략 일축압축강도의 60~80%에 이르는 응력 수준을 말하며, 평균적으로 일축압축강도의 70%에 해당하는 값으로 정한다<sup>4)</sup>. 한편 본 연구에서 사용한 PFC에서의 균열 개시 응력은 파괴시 발생된 총 균열 개수의 1%에 해당하는 균열이 발생하는 응력 수준으로 정의하였다<sup>6)</sup>.

이상의 거시물성 범위에 대하여 미시변수가 거시물성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 실험 계획법의 하나인 부분배치법을 수행하였다.

### 3.2 부분배치법

8개의 미시변수가 거시물성에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 각 인자들의 값을 변화시키면서 256번 (=2<sup>8</sup>)의 모델링을 실시하여야 하나, 미시변수 간 고차의 상호작용 영향이 작아 무시할 수 있을 경우, 그 중 일부만을 수행하여 주 영향 (main effect)과 저차의 상호작용 영향 (interaction effect)을 결정하는 부분배치법 (FFD, fractional factorial design)을 수행할 수 있다<sup>13)</sup>. 여기서 주 영향은 미시변수의 변화가 거시물성에 미치는 영향을 의미하며, 상호작용 영향은 어떤 미시변수의 변화가 다른 미시변수의 거시물성에 대한 영향에 미치는 영향을 의미한다. 이러한 부분배치법은 완전배치 실험의 2<sup>k</sup>회 실험 중에서 1/2<sup>p</sup>의 비율만큼 줄인, 2<sup>k-p</sup>번의 실험을 수행하며 간단히 2<sup>k-p</sup> FFD라고 불린다. 여기서 k는 설계변수의 수이고 p는 실험설계의 해상도를 결정하는 변수이다<sup>20)</sup>.

본 연구에서는 거시물성에 영향을 미치는 미시변수의 수가 8개이므로 설계변수 k가 8인 부분배치법을 적용하며, 실제로 적용가능한  $2^{8-1}$  FFD,  $2^{8-2}$  FFD,  $2^{8-3}$  FFD, 그리고  $2^{8-4}$  FFD 중에서 적절한 해상도 (해상도 V)를 구현하고 주 영향과 2차의 상호작용 영향이 서로 다른 2차의 상호작용의 영향을 반영하지 않는<sup>13)</sup> 부분배치법인  $2^{8-2}$  FFD를 적용하였다. 여기서 각 미시변수들 간의 거시물성에 대한 3차 이상의 상호작용은 무시할 수 있는 수준으로 가정하였으며, 이는 이차 중 회귀분석의 결과로 얻어지는 결정계수의 값으로써 그 타당성이 입증된다<sup>13)</sup>. 또한 부분배치법을 수행하기 위해 미시변수들의 값을 -1과 +1로 변환시킬 필요가 있는데 이 과정에서 앞 절에서 논의된 거시물성의 적정 범위를 구현하기 위한 미시변수의 값의 범위를 결정해야 한다. 이는 기존의 연구 결과 및 수차례의 일축압축실험 모사 결과를 분석-각각의 미시변수의 변화에 대한 거시물성의 변화를 단순회귀분석-한 자료를 바탕으로 적절히 결정하였으며, Table 1에 정리하였다. 식 (2)는 미시변수를 -1과 +1로 변화시키기 위한 변환식을 미시변수 A에 대하여 예시적으로 나타낸 것이다.

$$X = \frac{A - 2, 250}{(2, 500 - (2, 000))/2} \quad (2)$$

여기서, A는 Table 1에서 밀도를 나타내는 변수이고, 이 밀도값을 -1과 +1 사이의 값으로 변환시킨 값을 임의의 변수 X로 나타낸 것이다.

### 3.3 거시물성에 대한 미시물성의 영향

$2^{8-2}$  FFD 수행 및 민감도 분석을 수행하기 위하여 상

용통계프로그램인 MINITAB을 이용하였다. Fig. 3은 부분배치법의 수행 결과인 미시변수의 주 영향과 2차의 상호작용 영향을 정규확률지 (normal probability paper)에 나타낸 것이다. 미시변수의 영향 값이 정규확률지 상의 직선으로부터 위치에 관계없이 멀리 떨어질수록 그 미시변수가 거시물성에 더 많은 영향을 미치는 변수임을 의미한다<sup>14)</sup>. Fig. 3의 각 그래프에서 직선으로부터 멀리 떨어져 있어 유의하다고 판별된 (유의수준 1%) 미시변수가 나타나 있음을 확인할 수 있다.

탄성계수 (Y1)는 입자간 접촉계수 (D)의 영향을 가장 많이 받아 이 값이 증가할수록 증가하는 경향을 보이고, 입자강성비 (E)와 이 두 미시변수의 상호작용 (D·E)의 영향이 차례로 큰 영향을 미친다. 입자강성비 (E) 및 상호작용 (D·E)은 그 값이 증가할수록 탄성계수 (Y1)가 감소하였다. 포아송비 (Y2)는 입자강성비 (E)에 영향을 크게 받으며 그 값이 증가할수록 같이 커지는 경향을 보이고 있다. 또한 입자최소반경 (B)이 증가함에 따라 다소 증가하며 접촉결합 평균전단강도 (G) 및 입자간 접촉계수 (D)의 영향과 상호작용 (D·E, B·E)에도 영향을 받는다.

일축압축강도 (Y3)는 접촉결합의 평균수직강도 (F)와 접촉결합의 평균전단강도 (G) 및 이들 미시변수의 상호작용 (F·G)이 영향력이 크며 입자최소반경 (B)과 접촉결합의 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비 (H)가 커질수록 감소하는 경향을 나타냈다. 균열 개시 응력 (Y4)은 일축압축강도 (Y3)와 비슷한 경향성을 보이고 있으나 접촉결합의 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비 (H)가 상대적으로 일축압축강도에 미치는 영향보다 더 큰 영향을 주고 있었으며 이는

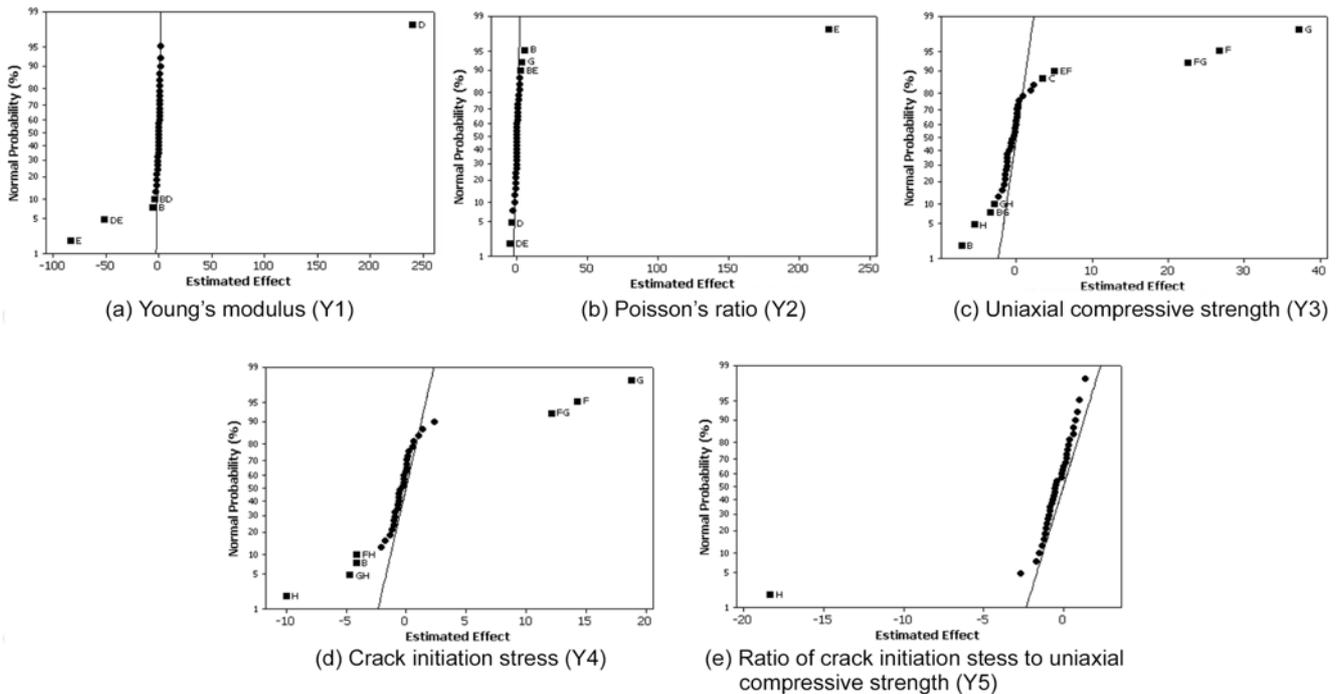


Fig. 3 Normal probability plot of the effect for  $2^{8-2}$  FFD

**Table 2** Significant micro-parameters affecting each macro-property

	Significant micro-parameters
Y1	D >> E > D · E B > B · D
Y2	E >> B > D · E > D > G > B · E
Y3	G > F > F · G B > H > E · F > C > B · G > G · H
Y4	G > F > F · G > H G · H > B > F · H
Y5	H

일축압축강도에 대한 균열 개시 응력의 비 (Y5)에서 확실하게 드러나고 있다. 접촉결합의 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비(H)가 일축압축강도에 대한 균열 개시 응력의 비에 가장 큰 영향을 미치는 미시변수로 나타남을 확인할 수 있었다(Table 2 참고).

이상의 결과로부터 8개의 미시변수 중 각 거시물성에 중요한 영향을 미치는 변수를 알 수 있었으며, 이는 모든 미시변수가 각 거시물성에 동일한 영향을 미치는 것이 아님을 의미한다. 따라서 원하는 거시물성을 도출하기 위한 미시변수를 결정하기 위해서는 거시물성에 중요한 영향을 미치는 미시변수는 거시물성과의 정량적인 관계를 통해 정해야 하며, 그렇지 않은 미시변수들은 부분배치법에서 수행하였던 평균값을 이용하여도 무방하다. 구체적으로 입자 밀도 (A), 입자 최소 반경 (B), 그리고 입자 마찰계수 (C)는 거시물성에 거의 영향이 없거나 있다 하더라도 각 거시물성에 지대한 영향을 주는 미시변수에 비하면 그 역할이 매우 미미하다고 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서 입자 밀도의 경우 일반적인 콘크리트의 밀도인 2,324 kg/m<sup>3</sup> (ACI 기준)<sup>11)</sup>, 입자 마찰계수는 평균값 0.5를 사용하였다. 입자 최소 반경의 경우 평균값인 4 mm를 적용하여 해석상 최대 입자 크기는 직경 13.28 mm (PFC에서 입자 최소 반경의 1.66배를 입자 최대 반경으로 정하여 최대 입자 직경은 4 × 1.66 × 2 = 13.28 mm임) 이다. 공시체의 직경이 150 mm 인 점을 감안하면, 실제 공시체에서의 최대 골재 크기가 직경의 1/10 이하라고 볼 수 있으므로 입자 최소 반경으로 평균값인 4 mm를 사용하는 것이 적절하다고 판단되었다.

한편 본 연구에서 3차 이상의 상호작용 영향은 무시할 수 있다는 가정의 타당성을 검증하기 위해 모든 미시변수로써 식 (3)을 이용하여 2차 다항회귀분석을 수행하여 결정계수(R<sup>2</sup>)를 살펴보았다<sup>15)</sup>.

$$y = c + \sum_i c_i x_i + \sum_i \sum_j c_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

**Table 3** Coefficient of determination of each second-order polynomial regression model

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
R <sup>2</sup>	0.9996	0.9994	0.9904	0.9705	0.9311

여기서 y는 거시물성을, x<sub>i</sub>, x<sub>j</sub>는 8개의 미시변수를 의미하며 c, c<sub>i</sub>, c<sub>ij</sub>는 회귀계수, ε은 오차이다.

Table 3은 미시변수를 이용하여 2차 다항회귀분석을 한 결과로 0.9311 이상의 높은 결정계수 값을 보이고 있으며 이는 주 영향 및 2차의 상호작용 영향만으로 거시물성의 변화를 매우 잘 설명할 수 있다는 증거이다. 따라서 3차 이상의 상호작용 영향은 무시할 수 있을 정도로 작다고 한 가정이 타당하다고 볼 수 있다.

### 3.4 미시변수와 거시물성의 정량적 관계 도출

Table 2로부터 각 거시물성에 상당한 영향을 미치는 미시변수 및 그 중요도를 파악할 수 있으며 이를 기초로 그들 사이에 회귀분석을 실시하여 정량적인 관계를 도출하였다. 회귀분석 시 특별히 언급되지 않은 미시변수들은 입자 밀도(A)를 제외하고 Table 1에서의 평균값을 사용하였다.

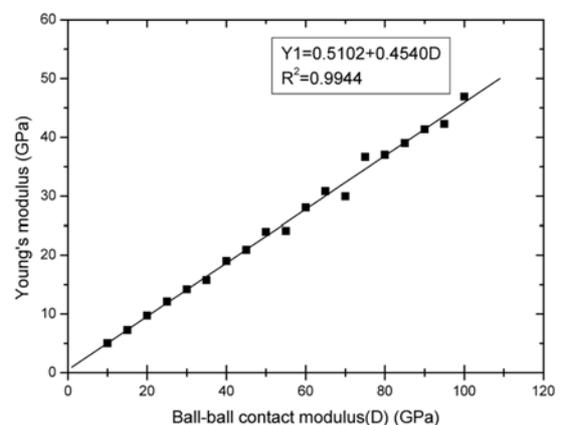
#### 3.4.1 탄성계수 (Y1)

탄성계수는 부분배치법의 결과 입자 접촉계수 (D)의 영향이 상당히 크므로 입자 접촉계수를 10 GPa에서 100 GPa까지 5 GPa씩 증가시켜가면서 일축압축실험을 수행하여 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 탄성계수와 입자 접촉계수 간에는 선형적인 관계가 있음을 확인하였으며, 그 결과로써 도출되는 탄성계수는 콘크리트 공시체의 일반적인 탄성계수의 범위에 존재하였다. Fig. 4는 일축압축실험을 수행한 결과를 도시한 것이며 회귀식은 다음의 식 (4)와 같이 구해지며 여기서 D 및 Y1의 단위는 GPa이다.

$$Y1 = 0.5102 + 0.4540D \quad (R^2=0.9944) \quad (4)$$

#### 3.4.2 포아송비 (Y2)

포아송비는 부분배치법의 결과 입자 강성비(E)에 의한 영향이 기타 다른 미시변수보다 월등히 크며 상호작용에 의한 영향 또한 유의하지 않은 낮은 수준이므로 부분배치법에 의한 회귀식을 직접 사용하여 정량적인 관계를



**Fig. 4** Plot of macro property Y1 versus micro-parameter D

도출하여 식 (5)와 같이 나타내었다. 부분배치법에서 도출된 식이므로 미시변수 입자강성비 (E)의 경우 식 (2)에서와 같은 방법으로 변환된 값을 대입해야한다.

$$Y2 = 0.155 + 0.0628E \quad (R^2=0.9970) \quad (5)$$

그러나 콘크리트의 경우 포아송비는 평균적으로 0.18을 사용하므로 식 (5)에 의하여 이에 해당하는 입자강성비  $k_n/k_s$  값은 2.3981로 주어진다.

### 3.4.3 일축압축강도 (Y3)

일축압축강도의 경우 접촉력 평균 수직강도 (F)와 접촉력 평균 전단강도 (G)의 영향 및 상호작용의 영향이 주된 변수이며, 이를 바탕으로 여러 가지 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과 2개의 상호작용이 있는 경우 F를 고정하고 G를 변화시키거나 G를 고정하고 F를 변화시킬 경우 일축압축강도가 G 혹은 F가 커질수록 증가하는 경향을 보이기는 하나 어떤 미시변수를 변화시키냐에 따라 다른 경향을 보였다. 이 경우 F와 G를 같은 값을 가정하여 변화시키면 상호작용이 있더라도 일축압축강도의 증가 경향이 일정함을 관찰할 수 있다. Fig. 5는 F와 G를 10 MPa에서 100 MPa까지 5 MPa 간격으로 증가시키면서 실험을 수행한 결과로 도출된 회귀식 (식 (6))이 높은 결정계수 값을 가짐을 확인하였다. 여기서 Y3 및 F의 단위는 MPa이다.

$$Y3 = 1.1482F + 0.1796 \quad (R^2=0.9993) \quad (6)$$

### 3.4.4 균열 개시 응력 (Y4) 및 일축압축강도와의 비 (Y5)

균열 개시 응력의 경우 일축압축강도와 비슷한 미시변수의 영향을 보이고 있으나 접촉결합의 수직강도와 전단강도의 평균에 대한 표준편차의 비 (H)의 영향이 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 이는 일축압축강도와의 비에서 주 영향만으로 명확하게 나타났음을 앞 절에서 확인할 수 있었다. 그러나 부분배치법에 의해 얻어진 회귀식의 경우 결정계수값이 0.8550으로 일반적으로 원하는 수

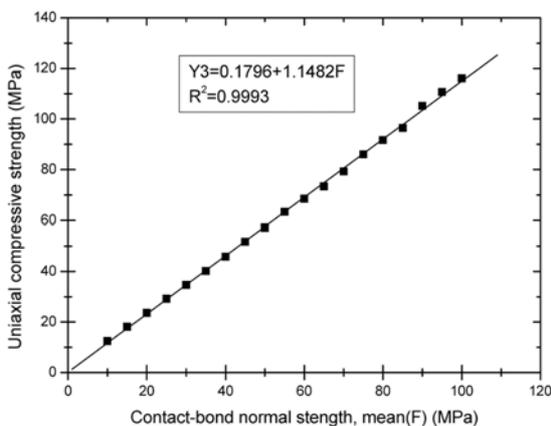


Fig. 5 Plot of macro property Y3 versus micro-parameter F

준의 값을 얻지 못하였다. 이는 단순히 일축압축강도로써 정규화된 값 자체는 H의 영향만으로 설명할 수 있으나, 물리적으로 다양한 상호작용의 영향이 존재하는 강도를 모사하면서 회귀식의 설명력이 낮게 나온 것으로 판단된다. 많은 수치실험 결과 H값이 0.1근방에서 강도수준에 상관없이 균열 개시 응력이 평균 70% 정도로 수렴하므로, 접촉결합의 수직강도와 전단강도의 표준편차와의 비 (H)는 평균값의 10%로 정하였다.

## 4. 일축압축실험 모사

### 4.1 강도수준에 따른 가상시료의 일축압축실험

일반적인 보통강도콘크리트와 70 MPa 이상 압축강도를 갖는 고강도콘크리트에 대하여 3차원 입자 결합 모델을 이용하여 강도 수준별로 일축압축시험을 모사하였다. 먼저 거시물성으로 일축압축강도를 20 MPa에서부터 85 MPa까지 5 MPa 간격으로 가정하였으며, 강도수준에 따른 탄성계수를 식 (1)의 탄성계수 추정식을 이용하여 결정하였다. 동시에 포아송비는 평균값인 0.18, 균열 개시 응력은 일축압축강도의 70%로 결정한 14개의 가상의 콘크리트 원주형 표준공시체 시료를 3차원 입자 결합 모델을 이용하여 일축압축실험을 실시하였다. 그 결과 나타나는 탄성계수, 포아송비, 일축압축강도를 가정한 값과 비교하는 방법으로 모사 적용성을 판단하고자 하였다. Table 4는 가정된 콘크리트 시료의 거시물성을 나타낸 것이다. Table 4의 거시물성을 모사하기 위해 식 (4)~(6)을 이용하여 정한 입자결합모델의 미시변수 값을 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 정한 미시변수 값을 대입하여 총 14번의 일축압축시험을 수행한 결과 Table 6과 같은 결과를 얻었으며, Fig. 6에 각 거시물성별 상대오차를

Table 4 Macro-properties of Young's modulus (Y1) and uniaxial compressive strength (Y3) of the virtual specimens

No.	Y1 (GPa)	Y3 (MPa)
1	21.4	20
2	23.92	25
3	26.21	30
4	28.31	35
5	30.26	40
6	29.18	45
7	30.38	50
8	31.53	55
9	32.62	60
10	33.67	65
11	34.68	70
12	35.66	75
13	36.6	80
14	37.52	85

Note) Y2 = 0.18, Y4 = Y3 × 0.7

**Table 5** Macro-properties for the simulation of uniaxial compressive test in the particle bonded model

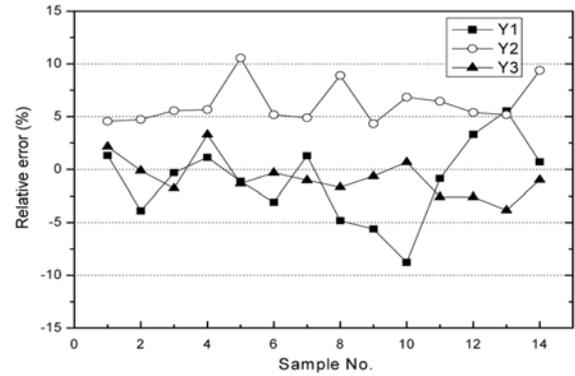
No.	D (GPa)	F = G (MPa)	H (MPa)
1	46.01	17.26	1.73
2	51.56	21.62	2.16
3	56.61	25.97	2.60
4	61.23	30.33	3.03
5	65.79	34.68	3.47
6	63.15	39.04	3.90
7	65.79	43.39	4.34
8	68.33	47.74	4.77
9	70.73	52.10	5.21
10	73.04	56.45	5.65
11	75.26	60.81	6.08
12	77.42	65.16	6.52
13	79.49	69.52	6.95
14	81.52	73.87	7.39

Note) A = 2,324 kg/m<sup>3</sup>, B = 4 mm, C = 0.5, E = 2.3981

**Table 6** Macro-properties after the uniaxial compressive test in the particle bonded model

No.	Y1 (GPa)	Y2	Y3 (MPa)	Y4 (MPa)	Y5 (%)
1	21.68	0.1882	20.43	12.55	61.43
2	22.99	0.1885	24.97	16.87	67.56
3	26.13	0.1900	29.46	19.86	67.41
4	28.63	0.1902	36.15	24.69	68.30
5	29.92	0.1990	39.46	24.40	61.83
6	28.28	0.1893	44.85	29.41	65.57
7	30.77	0.1888	49.49	34.93	70.58
8	30.01	0.1960	54.07	35.69	66.01
9	30.79	0.1878	59.62	39.22	65.78
10	30.72	0.1923	65.44	50.09	76.54
11	34.38	0.1916	68.19	41.16	60.36
12	36.84	0.1897	73.06	48.89	66.92
13	38.63	0.1893	76.93	48.70	63.30
14	37.52	0.1969	84.16	53.08	63.07

도시하였다. 탄성계수, 포아송비, 일축압축강도의 경우 5% 내외의 상대오차를 보이고 있으나 포아송비의 경우 대체로 0.19에 근접하는 값을 보이며 입자의 10% 이상의 상대오차를 갖기도 하나 그 값이 0.15와 0.20 사이에 있으므로 일반적인 콘크리트의 값을 잘 모사한다고 볼 수 있다. 또한 Table 6에서 Y4와 Y5의 값들로부터 균열 개시 응력의 경우 일축압축강도의 70% 수준에서 조절하였으나 실제 결과는 평균적으로 66%인 다소 낮은 값을 보이고 있어 좀 더 높은 수준으로 모사하기 위해서는 H 값을 좀 더 낮추어야 할 것으로 보인다. 그러나 이론적으로 60~80% 사이에 균열이 새로이 발생한다고 알려져 있으므로<sup>4)</sup> H를 그대로 사용하여도 무방하다고 판단된다.



**Fig. 6** Relative errors for each macro-properties

#### 4.2 일축압축실험 모사

일축압축실험을 실제로 실시한 참고문헌의 자료로부터 압축실험을 모사하였다. 그러나 거시물성 중 일축압축강도에 관한 자료가 대부분이어서 탄성계수는 식 (1)을 이용하여 추정하였고 포아송비나 균열 개시 응력도 앞 절에서 가정된 대로 0.18과 일축압축강도의 70%로 하여 모사를 실시하였다. 그러나 일부 자료에서 콘크리트의 밀도가 주어지지 않아 그 값을 입자 밀도로 사용하였다. Table 7은 실제로 수행한 일축압축실험의 결과로서 주어지는 거시물성을 나타내며 여기서 인용된 값은 병기된 참고문헌으로부터 얻은 값이다. Table 8에는 거시물성을 도출해내기 위해 식 (4)~(6)을 이용하여 구한 미시변수의 값

**Table 7** Macro-properties of the target specimens\*

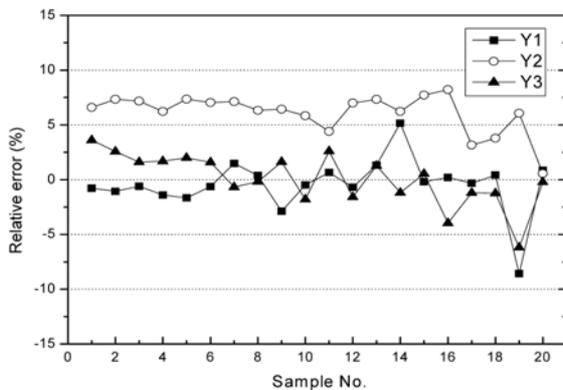
No.	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
1	2,324	22.81	23.01
2	2,324	24.00	23.6
3	2,324	25.40	24.28
4	2,324	26.78	24.93
5	2,324	27.17	25.11
6	2,324	29.00	25.94
7	2,350	34.89	28.26
8	2,330	35.97	28.69
9	2,290	40.57	30.48
10	2,270	42.73	28.61
11	2,310	43.90	28.9
12	2,350	44.98	29.17
13	2,200	46.94	29.65
14	2,270	48.90	30.12
15	2,350	57.72	32.13
16	2,324	62.62	33.18
17	2,310	63.01	33.26
18	2,260	64.48	33.57
19	2,324	66.25	33.93
20	2,290	66.35	33.95

\* These values are from the references of [2], [16], [21], [22] and are sorted by the magnitude of the strength.

**Table 8** Micro-parameters for the simulation of uniaxial compressive test in the particle bonded model

No.	A (kg/m <sup>3</sup> )	D (GPa)	F = G (MPa)	H
1	2,324	49.56	19.71	1.97
2	2,324	50.86	20.75	2.08
3	2,324	52.36	21.97	2.20
4	2,324	53.79	23.17	2.32
5	2,324	54.18	23.51	2.35
6	2,324	56.01	25.10	2.51
7	2,350	61.12	30.23	3.02
8	2,270	61.89	37.06	3.71
9	2,330	62.07	31.17	3.12
10	2,310	62.53	38.08	3.81
11	2,350	63.13	39.02	3.90
12	2,200	64.18	40.73	4.07
13	2,270	65.22	42.43	4.24
14	2,290	66.01	35.18	3.52
15	2,350	69.65	50.12	5.01
16	2,324	71.96	54.38	5.44
17	2,310	72.14	54.72	5.47
18	2,260	72.82	56.00	5.60
19	2,324	73.61	57.54	5.75
20	2,290	73.66	57.63	5.76

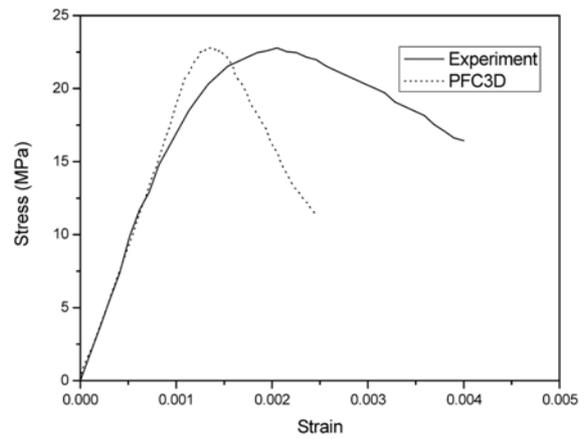
Note) B = 4 mm, C = 0.5, E = 2.3981



**Fig. 7** Relative errors for each macro-properties

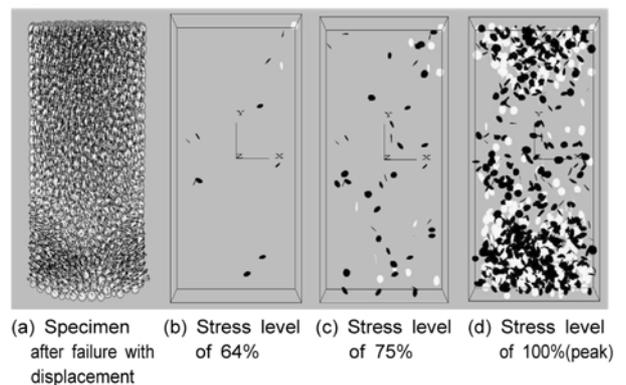
을 제시하였다. Fig. 7은 각 거시물성별로 상대오차를 도 시한 것으로 탄성계수 및 일축압축강도는 높은 강도 수 준에서 대하여 10% 가까운 차이가 보이기도 하나 비교 적 5% 이내의 상대오차를 보이고 있다. 포아송비의 경 우 앞서와 마찬가지로 평균 0.19의 값에서 10% 정도의 값을 보이고 있으나 0.15와 0.20 사이의 범위에 들기 때 문에 일반적인 콘크리트의 포아송비를 잘 묘사한다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 No. 1의 시료에 대한 응력-변형률곡선을 나타 낸 것이다. 일축압축강도의 30%, 50%, 75%, 100% 강도 수준일 때 변형률은 각각 0.00035, 0.0006, 0.0009, 0.0014 로 나타났다. 일반적인 콘크리트 공시체의 응력-변형률 곡 선에서는 변형률이 대략 0.002에서 최대강도를 보이며<sup>4,19)</sup>,



**Fig. 8** Stress-strain curve of No.1 specimen in Table 8

압축응력이 30%에서 50%에 이를 때 변형률은 0.0005로 알려져 있으나 본 수치실험에서는 이보다 낮은 0.0015 부근에서 최대강도를 보이고 있으며, 최대강도의 40%에 이르러서 0.0005의 변형률을 나타내고 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 최대강도의 65% 수준인 15 MPa 부근에서 수치실험의 결과와 실제 실험의 결과가 차이가 나기 시작하여 최대강도에 다다르면서 실제 발생하는 변형률이 실제보다 적은 변형률에서 최대강도에 이른 것으로 나타났다. 이는 입자결합모델의 특성상 파괴시 결합이 깨 어지지 않은 입자간의 결합력이 최대강도에 이른 시편의 비선형거동을 묘사하지 못한데 기인한 것으로 판단된다. Fig. 9는 최대강도 도달시의 시료의 모습을 각 입자의 변 위벡터와 함께 보여주고 있으며 또한, 각 응력 수준별로 발생균열의 위치 및 종류를 나타내고 있다. 균열 개시 응력 수준인 64%에서는 총 12개의 균열이 발생하였고 이후 75%, 100% (최대강도) 에서는 각각 54개, 1,058개 의 균열이 발생하였다. 그림에서 흰색은 인장균열, 검정 색은 전단균열을 의미하는데, 시료의 상단과 하단에 인 장균열과 함께 전단균열이 군집되어 있으며, 시료 전체 적으로 대각선방향으로 전단균열이 분포하는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 콘크리트 공시체의 전단에 의한 파괴 와 유사한 거동이라고 판단된다<sup>12,17)</sup>.



**Fig. 9** Specimen and the crack distribution in the specimen according to its stress level of 63%, 75%, 100%.

## 5. 결 론

본 연구에서는 3차원 입자 결합 모델인 상용 소프트웨어 PFC3D를 이용하여 콘크리트 표준형 공시체 (150×300 mm)의 일축압축실험을 수치해석적으로 모사하였다. 입자 결합모델의 특성상 입자간의 미시변수로부터 거시물성을 조절하는 과정이 시간이 많이 걸리는 단순 반복 작업이기 때문에 이들 미시변수와 거시물성간의 정략적인 관계를 도출하여 한 두 번의 수치실험으로 일축압축강도 및 탄성계수, 포아송비를 원하는 콘크리트 물성으로 맞출 수 있었다. 본 연구에서 사용된 접촉 결합 모델은 8개의 미시변수가 있으나 일부는 (입자 밀도 (A), 입자 최소 반경 (B), 입자 마찰계수 (C))는 거시물성에 별다른 영향을 미치지 않았으며, 입자간 접촉계수 (D)는 탄성계수에, 접촉결합 평균 수직강도 (F)와 전단강도 (G)와 이들의 상호작용 (F·G)은 일축압축강도에, 그리고 입자 강성비 (E)는 포아송비에 각각 영향을 주는 것으로 부분배치법 수행 결과 알 수 있었다. 한편 균열 개시 응력이 일축압축강도의 60~70% 수준으로 나타나 축하중 재하시 콘크리트 공시체에서의 균열발생과 유사한 거동을 보임을 확인할 수 있었다. 그러나 입자 결합 모델의 특성상 응력-변형률 곡선에서의 최대강도에 이르는 부근에서의 비선형거동을 모사하지 못하는 단점을 보이고 있어 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다. 이러한 개선점이 보완된다면, PFC3D가 외력을 받는 콘크리트구조물 및 부재의 균열발생 메커니즘 및 역학적 거동 수치해석에 적절한 도구가 될 수 있다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원 (과제번호:06건설핵심B04)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 김희성, 진치섭, 어석홍, “강도수준을 고려한 원주형 공시체에 대한 콘크리트 압축강도의 크기 효과”, 콘크리트학회지, 11권, 2호, 1999, pp.95~103.
2. 양은익, 최중철, 이성태, “콘크리트의 압축강도에 공시체의 크기와 형상이 미치는 영향”, 콘크리트학회 논문집, 16권, 3호, 2004, pp.375~382.
3. 박석균, 최육, 오광진, “콘크리트 코어 공시체의 압축강도에 미치는 각종 시험인자의 영향과 특성에 관한 검토”, 콘크리트학회지, 13권, 4호, 2001, pp.76~83.
4. 김진근, 조수연, 어석홍, 문영호, “실린더 크기에 따른 콘크리트 압축강도의 변화”, 대한건축학회논문집, 3권, 6호,

- 1987, pp.225~234.
5. Itasca Consulting Group Inc., *Theory and Background in PFC 3D*, Minneapolis, USA, 2003, pp.1-1~2-19.
6. 정용훈, 발파에 의한 굴착순상영역의 수치해석적 산정, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원, 2006, pp.35~90.
7. Itasca Consulting Group Inc., *FISH in PFC 3D*, Minneapolis, USA, 2003, pp.3-1~67.
8. Potyondy, D. O. and Cundall, P., A. “A Bonded-Particle Model for Rock”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, Vol.41, No.8, 2004, pp.1329~1364.
9. Boutt, D., F. and McPherson, B., J., O., L., “Simulation of Sedimentary Rock Deformation: Lab-Scale Model Calibration and Parameterization”, *Geophysical Research Letters*, Vol.29, No.4, 2002, pp.13-1~4.
10. Hazzard, J., F., Young, R., P., and Maxwell, S., C., “Micro-mechanical Modeling of Cracking and Failure in Brittle Rocks”, *Journal of Geophysical Research*, Vol.105, No.B7, 2000, pp.16683~16697.
11. Nilson, A., H., *Design of Concrete Structures*, McGraw-Hill Companies, Inc., 1997, pp.30~66.
12. 조효남, 심종성, *철근콘크리트 구조설계*, 구미서관, 1995, pp.27~55.
13. Box, G. E., P. and Draper, N., R., *Empirical Model-Building and Response Surfaces*, Tronto: John Wiley & Sons, Canada, 1987, pp.105~181.
14. Minitab Inc., *Factorial Designs*, Minitab Inc., USA, 2003, pp.7~44.
15. 박성현, 회귀분석, 민영사, 2003, pp.281~318.
16. 이세현, 서치호, “고강도 영역의 재생골재 콘크리트의 물리적 특성”, 콘크리트학회 논문집, 13권, 6호, 2001, pp.575~583.
17. 김진근, 어석홍, 이성태, “비표준형 실린더 공시체에 대한 콘크리트 압축강도의 크기효과”, 콘크리트학회지, 9권, 1호, 1997, pp.105~113.
18. 임동환, “2축 압축을 받는 고강도 콘크리트 및 강섬유보강 고강도 콘크리트의 역학적 거동 특성”, 콘크리트학회 논문집, 17권, 5호, 2005, pp.803~809.
19. 오태근, 이성태, 김진근, “콘크리트의 강도와 재령을 고려한 응력-변형률 관계식의 개발”, 콘크리트학회 논문집, 13권, 5호, 2001, pp.447~456.
20. 정용훈, 이정인, “PFC2D 활용을 위한 정량적 미시변수 결정법”, 터널과 지하공간, 한국암반공학학회지, 16권, 4호, 2006, pp.334~346.
21. 송영찬, 심종우, 전명훈, 이세현, 이도현, “재생골재 콘크리트 실구조물의 비파괴 시험에 의한 압축강도 추정에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회 논문집, 18권 1호, 2006, pp.125~128.
22. Arshad, A., K., William, D., C., and Denis, M., “Early Age Compressive Stress-Strain Properties of Low, Medium, and High-Strength Concretes”, *ACI Material Journal*, Vol.92, No.6, 1995, pp.617~624.

---

**요 약** 콘크리트의 일축압축실험에서 축하중이 발생함에 따라 새로운 균열이 발생하고 이 균열의 확장이 파괴의 주된 원인이 되는 경우가 대부분인데 이는 입자 결합 모델에서 입자간의 결합이 파괴되어 해석 대상체의 균열 모사와 유사하게 해석될 수 있어 콘크리트의 표준 공시체에 대하여 일축압축실험의 모사 가능성을 연구하였다. 그러나 입자 결합 모델은 해석 대상체를 입자간의 집합체로 모사하기 때문에 입자간의 결합을 결정하는 미시변수에 의해서 해석 대상의 거시물성이 변하게 되어 이들 변수간의 정량적인 관계를 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서 사용된 접촉 결합 모델에서는 총 8개의 미시변수가 있어 이들 변수와 일축압축실험결과 나오는 거시물성-탄성계수, 일축압축강도, 포아송비-와 콘크리트의 압축파괴거동에 관련이 있는 균열 개시 응력과 일축압축강도와의 비로서 5개의 거시물성에 대하여 부분배치법 및 회귀분석을 통하여 이들 간의 정량적인 관계를 도출하였고 그 결과 일축압축강도를 가정한 가상시료 및 조사 자료로부터 얻은 일축압축강도를 비교적 잘 모사할 수 있었다. 또한 해석을 수행한 공시체의 응력-변형률 곡선이나 응력 수준별 균열 발생의 빈도 및 파괴거동을 관찰한 결과 일반적인 콘크리트의 일축압축하중 하에서의 파괴거동과 상당부분 유사함을 보여 입자 결합 모델을 이용하여 콘크리트 공시체에 대한 일축압축실험을 잘 모사할 수 있다고 본다.

핵심용어 : 입자결합모델, 일축압축강도, 탄성계수, 회귀분석, 부분배치법