

개별요소법의 기본개념과 이용에 대한 소고

An Article on the Basic Concepts of Discrete Element Method and Some Applications



이 상 진**
Lee, Sang-Jin

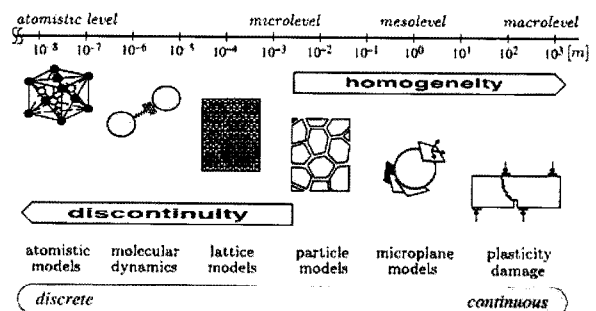
1. 서 언

지난 반세기 동안 연속체역학에 기초한 유한요소법이 구조물의 해석과 최적설계기법에 매우 활발하게 이용되어 왔다. 이제 구조물을 해석하고 설계하는데 있어 유한요소법은 필수적인 요소가 되었으며 선형탄성이론에 기초한 구조해석 프로그램은 공학 실무자들이 매일 이용하는 하나의 도구가 되었다. 그러나 많은 공학 분야에서 불연속체의 해석기법을 이용한 구조물의 해석과 관련된 연구에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 구조공학분야에서 개별요소법을 이용하고 응용하기 위해서는 개별요소법의 기본개념에 대한 이해와 적용성에 대한 파악이 필요하다. 따라서 본고에서는 개별요소법의 기본개념과 구조공학분야에 적용된 개별요소법의 연구흐름에 대해서 살펴보고 그 내용을 간략히 기술하였다.

2. 개별요소법(DEM)의 개념과 이용

개별요소법은 매질을 모래알갱이와 같은 수많은

입자로 가정하고 그 움직임을 계산하기 위한 수치 해석법의 일종으로 암반역학의 문제를 다루기 위하여 1979년 Cundall¹⁾에 의해서 개발되었으며 주로 토질역학에 관련된 문제에서 지속적으로 적용되어 왔다. 개별요소법의 개발과정은 재료의 입자를 표현 방법과 밀접한 관계를 가지고 있다. <그림 1>에 도시된 바와 같이 구조재료에 분포되어 있는 입자와 입자사이의 거리에 따라서 재료단계를 분류하고 이에 적절한 수치모델을 제시하게 된다. 특히 콘크리트 재료를 표현하는데 있어서 각 개별 입자사이의 거리값 L 을 도입하여 그 값의 크기에 따라 단계를



<그림 1> Material Level at various scales²⁾

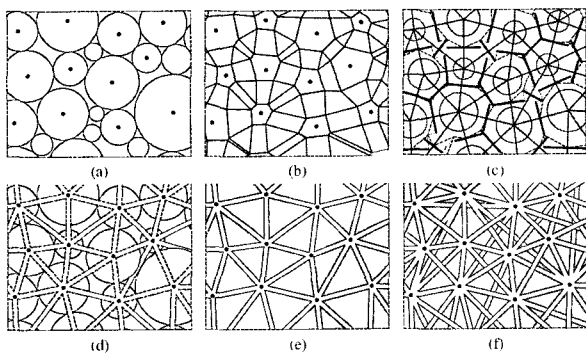
* 정희원 · 경상대학교 건축공학과 조교수, Ph.D.

나누어 재료모형을 선정한다.

개별요소법에 주로 이용되는 물질은 <그림 1>을 참조하면 불연속성(discontinuity)과 등질성(homogeneity)의 사이의 영역에 놓여 있으며 불연속성이 심화되면 입자모형을 이용하여 물질의 표현하고 등질성이 심화되는 재료의 경우에는 격자모형을 이용한다. 다시 말하면 개별입자사이의 거리($1mm \leq L \leq 10mm$)에 따라서 <그림 2>에 도시된 바와 같은 재료모형을 이용하여 이산화과정을 거친다.

<그림 2>에 도시된 바와 같이 입자간의 거리가 가까울수록 단순한 미시적 재료모형을 사용하게 되며 입자간의 거리가 멀어질수록 비선형성을 포함하는 거시적 재료모형을 이용하게 된다. 지금까지 진행된 연구결과에 의하면 미시적 재료모형($L \approx 1mm$)을 이용할 경우 명시적으로 재료모형을 표현하기 어려운 것으로 나타났으며 거시적인 모델($L \approx 10mm$)의 경우에는 미시적인 재료모형에 비해서 복잡한 재료적인 비선형성을 포함할 수 있는 장점을 나타내었다.

개별요소법은 유한요소법과 마찬가지로 시간단계별로 해를 계산하기 위해서 암시적인 해법이나 명시적인 해법을 모두 사용할 수 있다. 그러나 기존의 연구결과로부터 개별요소법의 해법절차에 병렬처리기법을 도입할 경우 명시적인 기법이 유리하고 또 프로그래밍하기에 쉬운 것으로 알려져 있다. 따라서 콘크리트와 같이 비선형성을 가지는 재료의 경우 거



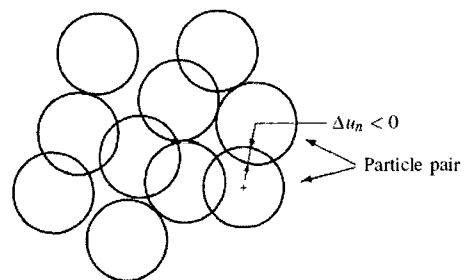
<그림 2> Discretization methods at different material scales: (a) discrete element method, (b) nonlinear interfacial zone model, (c) confinement-shear lattice model, (d) particle-lattice model, (e) classical lattice-beam fracture model, (f) random lattice-beam fracture model³⁾

시적 재료모형과 명시적인 해법을 사용하는 것이 바람직하다. <그림 2>에 도시된 재료모형들은 미시적인 재료모형에서부터, 거시적 재료모형까지를 포함하는 것으로 <그림 2(d)>의 경우는 미시적 모델과 거시적 재료모형의 중간단계인 입자와 격자를 함께 포함하는 모델이라 할 수 있다. 개별요소법에서 콘크리트재료의 파괴과정을 표현하기 위해서 가장 많이 쓰이는 재료모형은 다음과 같이 정리될 수 있다:

- 고전 원구형 개별요소 모델
- 고전 격자-보 파괴모델
- 비선형 경계구역 모델
- 구획 전단격자모델

본고에서는 위의 네 가지 모델 중에서 원구형 개별요소에 대해서 간략히 소개하고자 한다. 원구형 개별요소모델은 암반과 같은 매질을 원구형입자로 연결된 조합체로 표현하고 평형방정식에 기초하여 입자와 입자사이의 상호관계를 명시적인 수치해석 기법을 사용하여 계산하게 된다. 입자의 운동은 입자 하나하나에 대하여 적용되며 매우 작은 시간단계에서 일어나는 입자의 운동이 인접한 입자에만 영향을 미칠 수 있는 것으로 가정한다. 따라서 모든 시간단계를 통하여 입자에서 발생하는 합성력은 <그림 3>에 도시된 바와 같이 입자에 접촉하는 다른 입자와의 관계에서 계산된다. 따라서 개별요소법은 궁극적으로 매우 많은 입자가 동시에 나타내는 비선형성을 고려하여 입자간의 상관관계를 반복계산을 통하여 밝히므로 컴퓨터의 메모리에 문제가 되지 않게 적절히 표현하는 것이 매우 중요하다.

이때 입자와 입자사이에서 발생하는 힘은 뉴턴의



<그림 3> Interaction between particles³⁾

제2법칙을 이용하게 된다.

$$F = ma \tag{1}$$

위에서 정의된 뉴턴의 법칙을 이용하면 입자와 입자사이의 관계는 탄성법칙에 기초하여 다음과 나타날 수 있다(<그림 4> 참조).

$$F_n = K_n \Delta u_n \tag{2a}$$

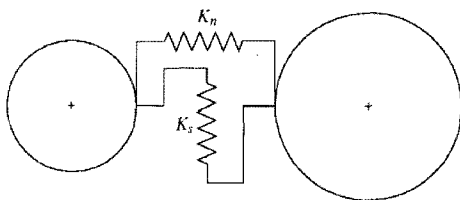
$$F_s = K_s \Delta u_s \tag{2b}$$

여기서 K_n 은 접촉에 대한 수직강성, K_s 는 전단강성을 나타낸다. 그리고 $\Delta u_n, \Delta u_s$ 는 수직강성과 전단강성에 관련된 변위증분을 그리고 a 는 가속도를 나타낸다.

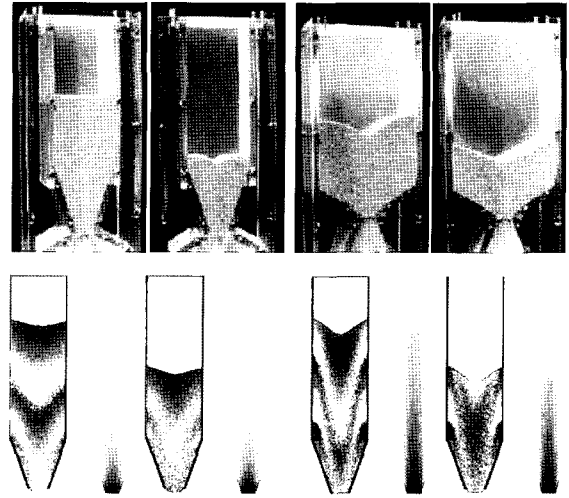
원구형 개별요소모델은 알갱이의 흐름에 대한 다양한 상황을 모사하는데 유리하며 개별요소법을 이용한 수치해석결과가 실험결과와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 특히 알갱이들이 나타내는 힘의 상관관계는 개별요소법을 이용하면 쉽게 눈으로 확인할 수 있지만 실험을 통해서서는 이러한 힘의 상관관계를 확인하는 것이 어렵다. 그러나 입자의 수가 많아질수록 계산을 위한 컴퓨터의 용량이 크게 증가하며 현재로는 백만 개정도의 입자를 이용하는 선에서 가능하다. <그림 5>는 저장고의 작동에 따른 알갱이의 흐름을 개별요소법을 이용하여 모사하고 그 양상을 실험결과와 비교한 것으로 개별요소법이 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

또한 이러한 원구형 개별요소모델은 <그림 6>에 도시된 바와 같은 수정된 Mohr-Coulomb 파괴기준을 바탕으로 콘크리트 원형시편에 적용된 바 있다.

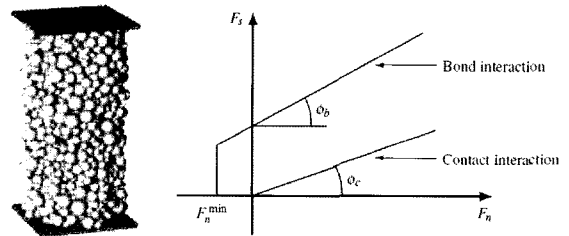
개별요소법은 구조부재인 콘크리트 보의 파괴거



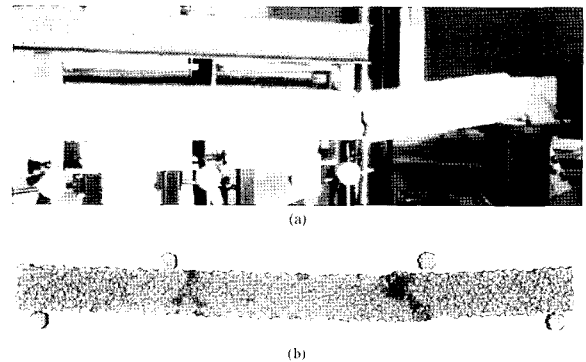
<그림 4> Particle interaction model with normal and shear springs K_n, K_s ³⁾



<그림 5> Flow pattern identification in the silo: (top) experiment, (b) DEM



<그림 6> Cylindrical concrete specimen and rupture criterion used in DEM⁴⁾



<그림 7> Reinforced concrete beam specimen and DEM simulation result⁵⁾

동을 모사하는 데도 적용된 바 있다⁵⁾. 이때 개별요소법이 실험결과와 연속체 역학을 바탕으로 하는 유한요소해석결과와 비슷한 결과를 도출하는 것으로 나타났다. 이미 유한요소법을 통하여 축적된 재료적 비선형분야에 대한 다양한 연구결과를 개별요소법에 적용하면 콘크리트구조물의 파괴과정을 심층적으로 이해하기 위해 개발되는 해석기법의 발전

에 많은 진전이 있을 것으로 보여진다.

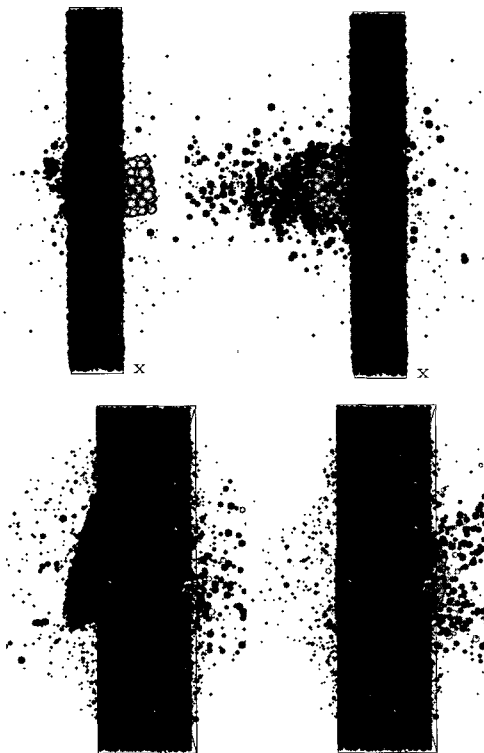
또한 개별요소법은 <그림 8>에 도시된 바와 같은 콘크리트 벽체의 관통에 대한 연구에도 응용되고 있다. 철근콘크리트구조물은 외부 물체의 충돌이나 폭발에 의해서 생기는 파편으로 인해 발생하는 충격에 대한 보호막으로 널리 이용되고 있다. 특히 원전 격납건물은 최근 세계무역센터에서 발생한 것과 같은 비행기의 충돌에도 견딜 수 있는 방어막의 역할을 하며 원전의 안전성을 보장하고 있다. 이러한 철근콘크리트구조물에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 가격물체가 철근콘크리트 벽체를 관통하는 깊이, 구조물의 박리현상 그리고 관통과 탄도의 이동한계 거리 등을 예측할 수 있는 정확한 모델을 필요로 한다. 개별요소법은 이러한 강체의 충돌을 받는 철근콘크리트 구조물의 거동을 이해하고 분석하는데 있어서 연속체 역학에 기초한 유한요소법의 의미 있는 대안으로 사용되고 있다. 개별요소법은 구조물을 불연속의 입자로 표현하기 때문에 콘크리트 구조물에

서 발생하는 균열발생지점과 균열의 전파에 대한 기본가정에 의존하지 않으며 매질이 고체의 상태에서 알갱이의 상태로 거동하는 변이과정을 표현하는 것도 매우 유리하다. 그러나 개별요소법이 가지는 한 가지 문제점은 각 요소를 알갱이로 표현해야 하며 실제의 구조물을 해석하기 위해서는 컴퓨터의 계산시간과 용량의 제약으로부터 자유로워져야 한다는 것이다.

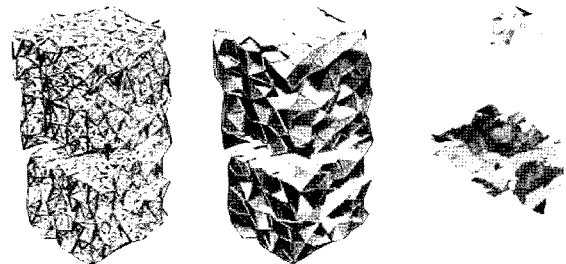
위에서 기술된 바와 같이 최근에는 많은 연구자들이 콘크리트와 같은 점착력을 가지는 토질관련재료 개별요소법을 이용하여 모델링하고 있다. 이러한 접근방법은 관통 및 박리와 같은 철근콘크리트 구조물의 파괴거동을 파악하는데 유한요소법보다 더 나은 이해를 제공해준다.

최근 이러한 일련의 연구는 또한 개별요소법과 유한요소법의 결합으로 이어지고 있다. 유한요소법과 개별요소법의 결합은 각 기법의 장점을 취하고 있는데 예를 들면 파괴에 대한 정확한 거동을 알고 싶은 부분에 대해서만 개별요소를 이용하고 나머지는 유한요소를 이용하여 구조물의 전체거동을 파악하게 된다. 공간구조의 경우에는 막구조에 물체가 충돌한다고 가정할 경우 막은 유한요소를 이용하여 연속체로 모델링하고 막에 부딪치는 물체는 개별요소를 이용하여 입자로 표현할 수도 있다.

최근에는 또한 개별요소법의 체계 내에서 격자모델을 도입하여 <그림 9>에서 도시된 콘크리트 기둥과 같은 연속체 구조물에서 일어나는 파괴거동을 유한요소법보다도 더 실제적으로 파악할 수 있는 것으로 알려져 있다.



<그림 8> Concrete wall impact simulation with DEM: (top) penetration (left), perforation (right); (bottom) scabbing for a flat nose (left), no scabbing for a conic nose (right)



<그림 9> Concrete wall impact simulation with DEM: (top) penetration (left), perforation (right); (bottom) scabbing for a flat nose (left), no scabbing for a conic nose (right)

3. 결 언

개별요소법이 개발된 이후로 암반이나 토질역학 분야에 대한 적용이 많이 이루어져 왔다. 또한 최근에는 개별요소법이 구조역학분야 특히 콘크리트 재료의 파괴거동을 모사하는데 활발히 이용되고 있다. 이러한 일련의 시도는 현재 컴퓨터 산업의 발전으로 인해 거대구조물의 해석이 가능해지는 시점이라는 점에서 개별요소법의 응용이 곧 구조공학분야 전반에 걸쳐 가능해질 것을 암시하고 있다. 더 나아가 개별요소법이 연속체역학에 기초한 유한요소법과 결합하여 사용할 경우에는 그 적용성이 한층 더 극대화될 수 있을 것으로 판단되며 공간구조와 같은 다양한 구조재료와 형식을 이용하는 건축구조물에 반드시 필요한 해석기법 중의 하나로 자리매김할 것으로 전망한다.

참고문헌

1. P. Cundall and O. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, pp.47-65, 1979.
2. G. A. D'Addetta, F. Kun, E. Ramm, and H. Herrmann. From solids to granulates discrete element simulations of fracture and fragmentation processes in geomaterials, *Lecture Note in Physics*, Vol. 569, pp. 231-258, 2001.
3. J. Kozicki, *Application of Discrete Models to Describe the Fracture Process in Brittle Materials*, Gdańsk University of Technology, 2007
4. F. V. Donze, S. A. Magnier, L. Daudeville, and C. Mariotti. Numerical study of compressive behaviour of concrete at high strain rates, *Journal for Engineering Mechanics*, pp. 1154-1163, 1999.
5. S. Hentz, L. Daudeville, and F. Donz'e. Discrete element modelling of concrete and identification of the constitutive behaviour, *The 15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, 2002.