

PFC3D에서의 폭원모델링 기법의 개발 및 적용

최병희,¹⁾ 양형식,²⁾ 류창하¹⁾

Development and Application of an Explosion Modeling Technique Using PFC

Byung-Hee Choi, Hyung-Sik Yang and Chang-Ha Ryu

ABSTRACT. An explosion modeling technique was developed by using the spherical discrete element code, PFC3D, which can be used to model the dynamic stress wave propagation phenomenon. The modeling technique is simply based on an idea that the explosion pressure should be applied to a PFC3D particle assembly not in the form of an external force (body force), but in the form of a contact force (surface force). According to this concept, the explosion pressure is applied to the wall particles by the scheme of radius expansion/contraction of inner-hole particles. The output wall force is compared to the input hole pressure in every time step, and a correction routine is activated to control the radius multiplier of the inner-hole particles. A comparative blast simulation for a cement mortar block of 80×90×80 mm was conducted by using the conventional explosion modeling method and the new one. The results of the simulation are presented in a qualitative fashion.

Key words : explosion modeling, PFC, blasting, cement mortar.

초 록. 본 연구에서는 PFC3D를 사용한 폭원모델링 기법을 제안하고, 제안된 기법을 시멘트 모르타르와 같은 연약재료의 발파에 적용하여 그 적용성을 시험해 보았다. PFC3D는 개별요소법(DEM)을 기반으로 하고 있어 응력파의 전파와 재료의 동적 파괴현상을 모사하는데 적합한 코드로 분류된다. 폭원모델링 과정에서는 공내입자들의 반경을 팽창/수축시키는 기법을 통해 공벽입자들에 접촉력의 형태로 폭발압력을 부여하는 방법을 사용하였으며, 입력하중에 따라 공벽에서 유발되는 접촉력을 계산단계마다 측정 및 보정함으로써 폭발압력의 크기를 제어할 수 있도록 하였다. 시멘트 모르타르 블록의 발파모델링 과정에서는 기존의 외력을 이용하는 방법과 본 연구에서 제안하고 있는 접촉력을 이용하는 기법을 각기 적용함으로써 연약재료의 파괴과정을 정성적으로 비교하여 보았다. 해석결과, 제안된 폭원모델링 기법을 적용한다면 암석이나 콘크리트와 같은 공학재료가 발파과정에서 보이는 파괴거동을 수치적으로 보다 유사하게 모사할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : 폭원모델링, PFC, 발파, 시멘트 모르타르.

1. 서 론

본 연구에서는 Cundall & Strack[1979]이 개별요소법(DEM)을 사용하여 구상입자의 운동과 상호작용을 모사한데서 비롯된 상용의 해석프로그램인 PFC^{3D}를 사용하여 시멘트 모르타르의 발파과정에서 나타나는 폭발과 파괴현상을 모사하여 보았다. PFC^{3D} 코드는 해석대상을 개별적인 입자들의 집합

체로서 모델링하는 개별요소법의 원리를 기본으로 하고 있어 정적 및 동적해석이 가능하며, 특히 발파에서와 같이 해석모델이 입자 내지 블록 단위로 파괴, 분리되는 과정을 시각적으로 잘 모사할 수 있는 특징이 있다.

모델링 과정에서는 폭발과 파괴현상을 모사하는데 필수적인 폭원모델링, 즉 폭발압력의 작용과정에 대한 모델을 먼저 정립한 후 시멘트 모르타르 블록을 대상으로 기존의 외력을 적용한 폭원모델링과 본 연구에서 제안하고 있는 모델링기법을 각기 적용해 봄으로써 서로 비교될 수 있도록 하였다.

1) 한국지질자원연구소

2) 전남대학교 건설지공환경공학부

접수일 : 2004년 12월 21일

2. 기존의 발파모델링

발파모델링 분야의 많은 연구자들 가운데 Fournery[1993]는 화약발파에 의한 암반의 파괴메커니즘과 관련하여 응력파와 가스압이 중요한 역할을 하는 것으로 보고하였으며, Preece[1994]는 충격파에 의한 암석의 파쇄도를 예측하고 가스팽창에 의한 암반의 이동에 관한 연구를 수행하기도 하였다. Brinkman[1987, 1990]은 발파공 벽면에 금속의 라이너(liner)를 붙인 실험을 통해 발파공 인접부에서의 균열발생 및 파괴는 주로 충격파의 에너지에 의해 발생하며, 이후 가스체가 팽창함으로써 균열을 더욱 진전시키고 암반을 파쇄하면서 저항선이 전체적으로 이동하는 것으로 보고하였다.

Sarracino[1994]는 폭약이 폭발할 때 발파공 인접부의 암반은 강한 압축력을 받아 유체의 거동을 보이면서 극도로 파쇄되며, 이 영역을 넘어서면 소성 압축대가 형성되고, 두 영역을 지나면 인장균열대가 형성되는 것으로 보았다. 하지만, 이 인장균열대는 가스체의 침투가 없으면 파괴정도가 미미한 것으로 생각하였다. 위에 언급한 Preece[1994]는 2차원 개별요소법을 사용하여 암반의 이동과 가스체의 흐름을 모사하는 수치모델을 개발하였지만, 이 모델에서는 균열이 이미 발생된 것으로 간주하고 충격파에 의한 암반파쇄는 모사하지 않았다. 이와 유사한 연구로서 Munjiza[1994]는 변형률연화(strain softening) 현상에 기초하여 유한요소법을 이용한 파괴모델(fracture model)을 개발하였다. 발파공으로부터 방사상으로 퍼져나가는 인장균열을 모사하기 위해 Schatz[1987]는 폭발하중을 화약과 폭약으로 구분하여 부여하고 균열이 전개되어 나가는 양상을 모사하였으나, 충격파에 의한 파쇄는 모사하지 않았다.

또한, Potyondy[1996]는 PFC^{3D}를 이용하여 처음에는 충격압만을 부여하고, 이후 충격압의 가중에 따라 발생된 균열들의 기하학적 배열이 일정조건을 만족하면 파이프라인을 따라 가스압이 부가되는 방식으로 폭원을 모델링한 바 있다.

3. 폭원모델링 기법의 개발

본 연구에서 제안하고 있는 폭원모델링 기법에서는 폭약의 폭발기구에 따라 공벽에 작용하는 폭발압력은 기존의 연구결과들을 채택하여 적용하며, 이로부터 산출된 폭발압력을 대상모델에 가중하는 방법만을 PFC^{3D}에서 제공하는 FISH를 사용하여 구현하는 방식을 취하였다.

3.1 기존의 가중방법

연속체역학을 기반으로 하는 유한요소법과 같은 코드에서는 일반적으로 폭원에서 발생된 폭발압력을 그대로 공벽에 가하면 되지만 개별요소법을 기반으로 하는 PFC^{3D}에서는 콘크리트와 같은 고체재료가 개별적인 입자들의 결합체로 구성되므로 압력을 그대로 적용할 수는 없고 대신 압력에 상응하는 힘을 각 입자들의 질점에 부여하는 방식이 많이 사용되고 있다. 예를 들면, 발파로 인한 폭발압력을 부여할 때에는 먼저, 공벽면적에 대한 폭발압력의 크기를 결정하고, 결정된 압력을 공벽면을 구성하고 있는 입자들의 단면적의 크기에 따라 배분한 뒤, 각 입자에 배분된 압력에 그 입자의 단면적을 곱하여 구한 힘을 각 입자의 질점에 외력(external force)으로서 부여한다.

하지만, 이 방법을 그대로 적용할 경우 재료에 따라서는 가중시간과 재료의 변형과의 관계로부터 경계입자들을 추적하는데 어려움을 겪을 수도 있다. 즉, PFC^{3D}의 입자들은 자유로운 운동이 가능하며, 또한 강체(rigid body)로 정의되어 변형은 가능하나 파괴될 수는 없다. 따라서 공벽입자들에 지속적으로 폭발충격과 같이 큰 힘을 가하면 힘을 받은 입자는 Fig. 1(a)에서와 같이 인접입자들 사이의 결합을 파괴하면서 그 사이로 진입하게 된다. 이런 경우에는 가압을 중단할 시점이 중요한 요소가 되며, 만일 이 입자에 계속해서 외력이 가해진다면 입자는 마치 탄환이 유리를 관통하듯이 주변 입자들과는 거의 무관하게 자유면 바깥으로까지 튀어나가게 된다. 발파현상에서와 같이 입자들 사이의 결합이 끊어진 상태에서도 지속적인 가압이 필요

한 경우에는 대상재료가 화강암과 같이 강도가 큰 암석이라 하더라도 이런 현상은 발생할 수 있으며, 콘크리트와 같이 강도가 약한 재료일 경우에는 동일한 폭발충격임에도 불구하고 비현실적인 결과를 초래할 수 있다. 특히 발파공의 경계를 이루는 공벽입자들이 Fig. 1(b)와 같이 배치된 상태에서는 모델링 과정에서 폭발압력을 가해줄 공벽입자를 추적하는 일이 난제가 될 수도 있다.

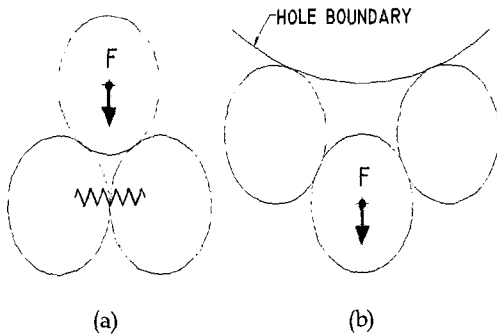
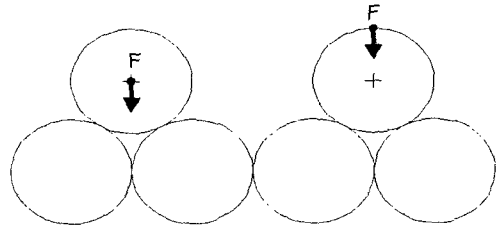


Fig. 1. Tensile failure and difficulties in applying forces to boundary particles

3.2 새로운 가중방법

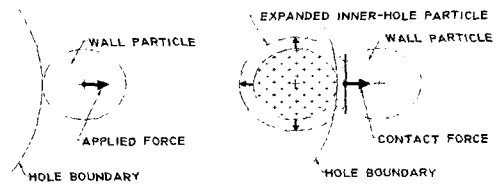
(1) 가중원리

일반적인 수치해석 코드에서는 압력과 힘이 서로 동등하게 변환되지만 PFC^{3D}에서는 입자의 운동이 완전히 허용되므로 어떤 입자에 가해진 힘이 인접입자들에 큰 변위를 일으킬 수 있는 조건이라면 압력과 힘이 서로 동등하게 변환되지 않을 수도 있다. 또한 PFC^{3D}의 사용자 인터페이스에서는 직접적으로 압력을 부여할 수 없는 대신 외력을 부여할 수 있도록 되어 있는데, 이 때문에 압력을 가할 필요성이 있을 때 보통 압력 대신 뉴턴의 힘으로 변환하여 가하게 된다. Fig. 2는 뉴턴의 힘과 후크의 힘이 입자들에 작용되는 방식을 비교한 그림으로 뉴턴의 힘은 입자의 질점에 작용하는 외력(물체력)으로서 힘을 받은 입자의 운동을 일으키며, 후크의 힘은 입자의 표면에 작용하는 접촉력(표면력)으로서 그 작용점에서의 변위를 발생시킨다.



(a) Applied force (b) Contact force

Fig. 2. Applied (external) force and contact force



(a) Conventional (b) New

Fig. 3. Pressure loading schemes

본 연구에서는 이 개념에 따라 발파로 발생되는 폭발압력을 공벽을 구성하는 입자표면에서의 접촉력의 형태로 부여하는 폭원모델링 기법을 제안하였다. 즉, Fig. 3(a)에서 보듯이 일반적으로 발파현상을 모델링 할 때에는 천공된 발파공을 모사하기 위해 먼저 발파공 내부에 해당하는 입자요소들을 제거하는 것이 통례이다. 하지만 본 모델에서는 Fig. 3(b)에서와 같이 공벽입자들에 접촉력을 부여하기 위하여 발파공 내부에 위치하는 공내입자들을 제거하지 않고 오히려 이들을 일종의 제어기(controller)로 활용한다. 즉, 공벽입자에 필요한 만큼의 접촉력을 발생시키기 위하여 공내입자들의 반경을 제어기로 이용하여 그 크기를 팽창 또는 수축시키는 기법을 사용한다.

(2) 가중시간의 결정

본 모델에서는 폭발가스가 발파공 내에 구속된 상태에서 발파공 벽면에 압력을 가함으로써 최초 균열에 의해 구획되는 잠재블록들의 상대운동에

의해 새로운 균열을 발생시키거나 기존균열의 성장을 촉진하는 것으로 가정한다. 따라서, 가스체에 대하여 별도의 파괴기구를 정의하지 않으며 모든 폭발하중은 발파공의 벽면에만 작용하는 것으로 간주한다. 폭발압력은 시료에 아무런 균열이 없는 상태에서 가해지기 시작하며, 폭발압력의 크기는 폭발압력으로부터 유도된 공벽에 대한 최대압력과 기존의 경험적인 감소함수의 시간이력으로부터 구한다. 다만, 구속압의 작용이 중단되는 시점을 결정하기 위하여 폭발압력이 최초로 가해질 때부터 매 사이클마다 지속적으로 균열발생을 추적한다. 폭발압력이 최대치에 도달한 후 그 크기가 저하되기 시작하고 일정 시간이 흐르면 균열발생량이 줄어들다가 더 이상 균열이 발생되지 않는 단계에 이르게 되는데, 이 시점을 구속압의 작용이 종결되는 시점으로 정의한다. 이는 처음에는 폭발하중에 대하여 재료가 저항함으로써 재료내부에 전단 및 인장 균열들이 발생, 성장하다가 이 시점에 이르면 재료가 더 이상 견디지 못하고 저항선이 항복하여 나가는 것으로 볼 수 있기 때문이다. 물론 이 시점 이후에도 가스체가 완전히 분출할 때까지 지속적으로 폭발압력이 작용할 수 있으며 모델링에서는 이 시점을 자유롭게 제어할 수 있다. 일단 지정한 가중시간이 종결되면 폭발하중의 작용을 중단시키되 공벽면에서의 접촉력이 급격하게 저하되지 않도록 제어기로 사용하였던 공내입자들을 제거하지 않는 대신 입자의 강성(stiffness)과 밀도, 마찰력을 유체의 수준으로 저하시킨다.

(3) 접촉력의 측정 및 보정

한편, 폭발압력을 가할 때에는 압력을 직접 부여하지 못하는 PFC^{3D}의 특성상 제어기를 사용하여 한 단계를 더 거치므로 실제 공벽에서 발생하는 폭발압력을 가능한 한 입력치와 같아지도록 만들어주는 루틴이 요구된다. 이를 위하여 먼저 발파공 벽면에 대한 폭발압력의 시간이력으로부터 압력에 상응하는 힘을 구한다. 힘은 압력이 작용하는 면적으로부터 구할 수 있으므로 Fig. 4에 예시한 바와 같이 모든 공벽입자들의 단면적의 합을 공벽면적

으로 정의한다. 단, 사이클이 진행됨에 따라 공내입자들이 계속적으로 팽창 또는 수축함에 따라 이들 공내입자들과 접촉하는 공벽입자들이 지속적으로 변화될 수 있으므로 공벽입자들의 단면적을 구하기 위해서는 각 계산단계에서 공벽입자들을 결정하는 과정이 선행되어야 한다. 이를 위하여 최초 단계에서 공내입자들과 접촉하고 있는 외부입자들을 공벽입자로 설정한 다음, 이후부터는 매 사이클마다 공내입자들의 접촉을 조사하여 이들과 접촉하고 있는 외부입자들을 새로운 공벽입자로 설정한다.

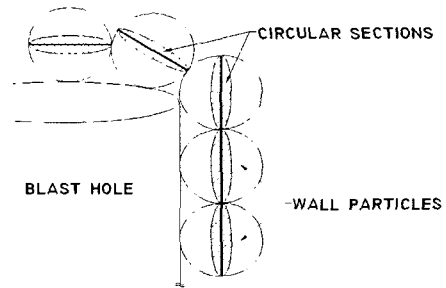


Fig. 4. Surface area of blasthole

폭발압력의 시간이력곡선으로부터 발파공 벽면에 작용시킬 힘이 산출되면 이 힘을 공벽입자에 가해 주기 위하여 아래와 같이 각 계산단계마다 공내입자의 반경팽창율을 계산, 적용 및 보정하는 과정을 반복한다:

(i) Fig. 5에서와 같이 공벽면을 사이에 두고 서로 접촉하고 있는 수직강성 스프링들에서는 후크의 법칙이 성립하므로 공벽면 전체에 작용하는 접촉력은 각 스프링에 작용하는 힘을 모두 더한 합력과 같다.

$$\Sigma f = \Sigma(kx) = (\Sigma k)x \quad (1)$$

식에서 좌변의 힘 Σf 는 주어진 시각에서 공벽 전체에 작용하는 힘으로서 폭발압력의 시간이력으

로부터 결정된다. 강성 $\sum k$ 는 공내입자들과 공벽 입자들 사이의 접촉점들에서의 수직강성들의 합이다. 따라서, 이들로부터 발파공의 반경증분 x 를 결정할 수 있다.

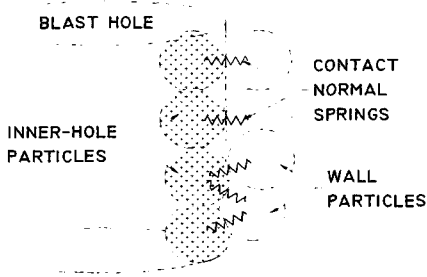


Fig. 5. Contacts between hole and wall particles

(ii) 위항에서 결정된 반경증분 x 는 발파공의 반경증분이므로 공내입자의 반경과는 별개이다. 더욱이 공내입자들의 반경은 최소치와 최대치 사이에서 균등분포하고 있어 그 크기도 서로 다르다. 또한, 한 가지 고려할 사항은 전체 모델에서 경계입자를 제외하면 거의 모든 입자들이 적어도 3개 이상의 접촉들을 지니고 있으며, 이들 각 접촉마다 두 개의 볼이 각기 하나씩의 수직강성 스프링을 지니고 있다. 따라서 공내입자들의 반경이 증가하게 되면 이들 강성스프링들이 각각의 방향에서 모두 수축됨으로, 각 접촉에서 직렬로 연결된 두 스프링에 의해 결정되는 접촉강성의 크기에 따라 접촉에서의 수직압축 접촉력이 증가하게 된다. 본 모델에서는 이와같이 원통형의 발파공 내에 불규칙적으로 분포되어 있는 접촉스프링들을 단순화하여 이들이 정육면체 내에서 직교배열의 형태로 배치되어 있는 것으로 가정한다. 그러면, 정육면체의 각 변의 길이가 x 만큼 증가할 때의 입자반경의 증분을 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta r = \frac{x}{\sqrt{3ofn_{cp}}} \quad (2)$$

식에서 n_{cp} 는 공내입자들이 지닌 총 접촉수이다.

(iii) 위의 두 단계를 거쳐 발파공 벽면에 작용하는 힘과 공내입자의 반경팽창율이 결정되면, 실제로 반경을 팽창시키고 다음 계산단계로 넘어간다. 하지만, 이와 같이 몇 가지 가정을 토대로 반경팽창율을 근사하여 적용하여도 실제로 발파공 벽면에서 발생하는 접촉력의 크기는 의도한 크기와는 다르게 된다. 따라서, 이 오차를 보정해 주기 위하여 계산단계마다 공내입자와 공벽입자 사이의 접촉력을 측정하여 측정치와 입력치 사이의 차이에 따라 반경팽창율을 가감해 주는 기법을 사용한다. 이와 같이, 공내입자의 반경을 사이클 단위로 조절하면 공벽면에서 측정되는 접촉력의 크기는 입력치를 중심으로 진동하는 양상을 보이지만 그 오차는 작은 편이다. 한편, 공벽입자들에 필요한 만큼의 접촉력을 부여하기 위해 공내입자들의 반경을 조절하면 모든 공내입자들의 반경이 일정한 비율로 증감하므로 원칙적으로 이 방법은 집중장약에 적합한 것으로 볼 수 있다. 하지만, 집중장약이 아니더라도 발파공 길이방향에서의 폭발압력이 축방향에서의 압력에 비해 매우 작은 것으로 가정하고 발파공 양단에 위치하는 공내입자들에 대하여 축방향의 변위를 구속한다면 장장약의 경우에도 이 기법을 그대로 적용할 수 있을 것이다.

4. 폭원모델링 기법을 적용한 모르타르 블록의 발파모델링

4.1 해석모델의 구성 및 입력물성의 선정

암석에 비하여 강도가 떨어지는 시멘트 모르타르와 같은 연약한 재료에 대하여 외력을 이용한 폭원모델링 기법과 접촉력을 이용한 기법을 해석을 통하여 간단히 비교하여 보았다. Fig. 6 및 7에 보인 모델들은 80×90×80 mm 크기의 시멘트 모르타르 블록을 나타내는 입자결합체로서 병행결합(parallel bond)을 사용하였으며, 수치시험을 통하여 결정된 모르타르의 미시적 성질들은 Table 1에 열거하였다. 폭약은 모르타르 블록의 중앙에 위치하며 직경은 20 mm이고, 길이는 y축 방향에서 30 mm이다. Fig. 6은 기존의 방법에 따라 발파공 내

부에 위치하는 입자들을 제거한 모습이며, Fig. 7은 새로운 폭원모델링 기법에 따라 공내입자들을 제어기로 활용하기 위해 그대로 유지시킨 상태이다.

Table 1. Micro-properties of cement mortar

ρ	2000 kg/m ³
E_c	19e9 Pa
k_n/k_s	1.3
μ	0.5
$\bar{\lambda}$	1.0
$\overline{E_c}$	19e9 Pa
$\overline{k^n/k^s}$	1.3
$\overline{\sigma_c}(\text{mean})$	24e6 Pa
$\overline{\tau_c}(\text{mean})$	
$\overline{\sigma_c}(\text{std. dev.})$	6e6 Pa
$\overline{\tau_c}(\text{std. dev.})$	

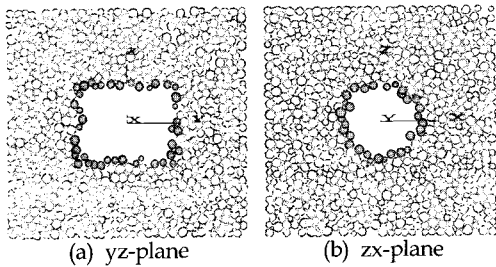


Fig. 6. Conventional method

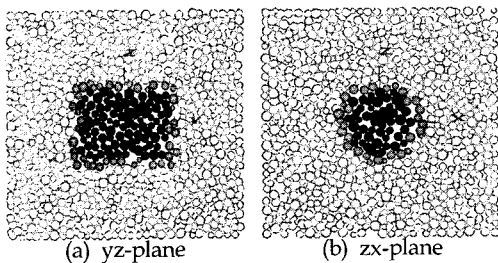


Fig. 7. New method

4.2 폭발압력의 산정

폭발압력은 Potyondy[1996]가 제안한 감쇠함수를 이용하고 폭굉압 분포의 평균값[Henrych, 1979; Sadin, 1965]을 최대압력으로 취한 다음 식으로부터 구하였다.

$$p(t) = \frac{\rho_0 D^2}{8} 10^{-3} \begin{cases} t/t_r, & t < t_r \\ 1.0, & t_r \leq t < t_f \\ (0.76 + 2000t)^{-2}, & t_f \leq t \end{cases} \quad (3)$$

식에서 $p(t)$ 는 폭발압력[MPa], ρ_0 는 폭약밀도 [g/cc], D 는 폭속[m/s]을 의미한다. 아울러 $t_r = 0.6 \times 10^{-4}$ [sec]는 폭발압력이 상승하는 구간에 해당하는 시간이며, $t_f = 1.2 \times 10^{-4}$ [sec]는 폭발압력이 하강하기 시작하는 시각을 표시하며, Potyondy [1996]가 제안한 값이다. 시멘트 모르타르가 연약 재료임을 감안하여 밀도 $\rho_0 = 1.0$ g/cc, 폭속 $D = 2500$ m/s인 폭약을 사용하는 것으로 가정하면 폭발압력의 시간이력은 식 (3)에 따라 Fig. 8과 같이 된다.

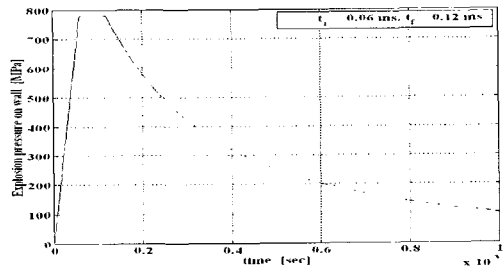


Fig. 8. Explosion pressure

4.3 해석결과 및 검토

본 폭원모델링에서는 폭발압력을 공내입자의 반경팽창을 통해 공벽입자들에 부여하기 때문에 폭발압력의 입력치와 공벽에서 유발되는 접촉력의 측정치 간의 상대적인 크기를 비교하여 볼 필요가 있다. Fig. 9는 발파공 벽면에 부여한 힘과 벽면에서 측정된 접촉력의 크기를 비교한 그래프로서 공벽에서 유발되는 접촉력이 입력치를 중심으로 진동하는

모습을 보이고 있으나 그 차이는 작은 편이다. 그림에서 대략 0.23ms 이후에는 공벽에 작용하는 힘이 일정하게 유지되는 것처럼 보이지만 실제로는 위의 폭원모델링 기법에 따라 이 시점부터는 공벽에 더 이상의 힘을 가하지 않으며, 공벽에서의 접촉력 또한 측정되지 않는다.

한편, 본 접촉력을 이용한 폭원모델링 기법에서는 Fig. 8에 도시한 폭발하중의 시간이력을 일정한 공벽면적에 작용하는 발파압력으로 간주함으로써 폭발로 인하여 발파공의 체적이 팽창하면 그에 따른 표면적 증가도 아울러 고려하고 있다. 따라서, Fig. 8과 9에 보인 그래프의 형태가 서로 다르게 나타난 것이며, 재료의 강도가 증가할수록 원래의 폭발압력의 시간이력과 유사해지게 된다.

Fig. 10은 폭원모델링에서 언급한 공내입자들의 반경팽창율의 변화를 보인 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 약 800MPa에 달하는 발파압력을 구현하는데 필요한 반경팽창율은 입자간의 수직강성에 따라 달라지지만 전 단계에서의 입자반경의 ± 1.002 배 이내에 지나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 11은 외력을 이용한 폭원모델링 기법을 적용하였을 때 0.1ms 간격으로 나타나는 모르타르 블록의 파괴양상을 zx 평면상에서 도시한 것이며, 그림의 화살표는 공벽입자들에 작용시킨 외력을 단위벡터로 표시한 것이다. Fig. 12는 접촉력을 이용한 폭원모델링 기법을 적용하였을 때 모르타르 블록이 보이는 단계별 파괴양상이며, 그림의 화살표는 기폭이후 공벽입자들이 보이는 변위를 단위벡터로 표시한 것으로서 공벽입자들의 운동방향을 가리킨다. 그림에서 보듯이 기폭이후 시간의 흐름에 따라 나타나는 발파공 벽면의 기하학적 형태는 Fig. 12의 접촉력을 이용한 폭원모델링 기법에서는 비교적 연속적으로 유지되는 반면, Fig. 11과 같이 외력을 적용하는 방법에서는 저항선이 이동하거나 재료에 큰 변형이 발생하면 공벽입자의 위치가 상대적으로 급변할 수 있어 폭발압력을 부여할 공벽입자를 추적하기 어려워지는 문제점이 발생할 수도 있다.

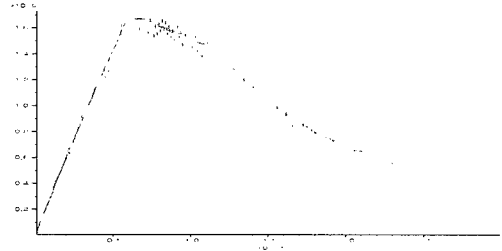


Fig. 9. Input and induced contact forces[N] on blasthole wall

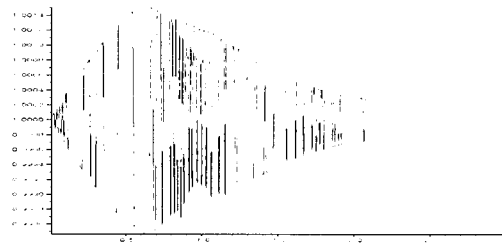


Fig. 10. Variation of radius multiplier

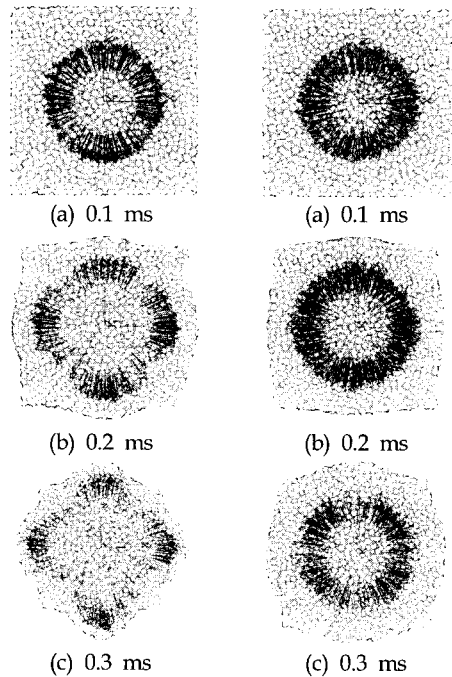


Fig. 11. Applied force Fig. 12. Contact force

6. 결 론

본 연구에서는 개별요소법을 기반으로 하는 PFC^{3D} 상에서 FISH를 이용한 폭원모델링 기법을 제안하고, 제안된 기법을 시멘트 모르타르 블록의 발파모델링에 간단히 적용하여 보았다. 연구로부터 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 폭원모델링 과정에서는 기존의 이론적, 실험적인 폭발하중의 함수로부터 계산된 폭발압력을 발파공의 벽면을 구성하는 입자요소들에 접촉력의 형태로 부여하는 기법을 사용하였다.

(2) PFC^{3D}에서 접촉력을 부여하는 루틴에서는 공내입자들의 반경을 팽창/수축시킴으로써 공내입자들과 공벽입자들 사이에 수직접촉력의 형태로 폭발하중을 유발하는 기법을 사용하였다. 유발된 접촉력과 입력하중의 크기는 매 계산단계마다 서로 비교되며, 이로부터 다음 단계에서 사용할 공내입자들의 반경을 조절함으로써 폭발압력의 크기를 제어할 수 있도록 하였다.

(3) 시멘트모르타르 블록을 대상으로 외력을 적용하는 기존의 폭원모델링 기법과, 본 연구에서 제안한 기법을 각각 적용하여 발파과정을 모사하여 보았다. 모사결과 대상재료에서 큰 변형이나 파괴가 발생하지 않는 탄성영역 부근에서는 두 기법 모두 응력과의 전파특성이나 균열의 발생양상의 측면에서 서로 유사한 결과를 보이지만, 연약한 재료에서 큰 변형이 발생될 때에는 외력을 적용할 경우 공벽을 이루는 경계입자들을 적절한 루틴을 사용하여 추적하지 않으면 실제와는 다소 상이한 결과가 나타날 수 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Brinkmann, J. R., 1987, Separating Shock Wave and Gas Expansion Breakage Mechanisms, Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, W. L. Fournery and R. D. Dick, Eds., Bethel, Connecticut, Society for Experimental Mechanics, pp. 6-15.
2. Brinkmann, J. R., 1990, An Experimental Study of the Effects of Shock and Gas Penetration in Blasting, Proc. 3rd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting.
3. Cundall, P. A. and O. D. L. Strack, 1979, A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol. 29, pp. 47-65.
4. Fournery, W. L., 1993, Mechanism of Rock Fragmentation by Blasting, Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice and Projects, J. A. Hudson, Ed. Oxford, Pergamon Press, pp. 39-69.
5. Henrych, J., 1979, The Dynamics of Explosion and Its use, Elsevier Scientific Company.
6. Munjiza, A., D. R. J. Owen, N. Bicanic and J. R. Owen, 1994, On a Rational Approach to Rock Blasting, Computer Methods and Advances in Geomechanics, H. J. Sirowardane and M. M. Zaman, Eds., Rotterdam, Balkema, pp. 871-876.
7. Potyondy, D. O., and P. A. Cundall, 1996, Modeling of Shock- and Gas-Driven Fractures Induced by a Blast Using Bonded Assemblies of Spherical Particles, Rock Fragmentation by Blasting, Balkema, Rotterdam, pp. 55-61.
8. Preece, D. S., B. J. Thorne, M. R. Baer and J. W. Swegle, 1994, Computer Simulation of Rock Blasting: A Summary of Work from 1987 through 1993, Sandia National Laboratories, Report No. SAND 92-1027.
9. Sadin, L. D., and N. M. Junk, 1965, Measurement of Lateral Pressure Generated from Cylindrical Explosive Charges, USBM, RI 6701.
10. Sarracino, R. S., and J. R. Brinkmann, 1994, Modeling of Blasthole Liner Experiments,

- Computer Methods and Advances in Geomechanics, H. J. Siriwardane and M. M. Zaman, Eds., Rotterdam, Balkema, pp. 871-876
11. Schatz, J. F., B. J. Zeigler, R. A. Bellman, J. M. Hanson, M. Christianson and R. D. Hart, 1987, Prediction and Interpretation of Multiple Radial Fracture Stimulations, Science Applications International Corporation (SAIC), Report to Gas Research Inst. (GRI), SAIC Report No. SAIC087/1056, GRI Report No. GRI-87/0199.