

PFC를 이용한 콘크리트기둥의 발파모델링

최병희¹⁾, 양형식²⁾, 류창하¹⁾

Blast Modeling of Concrete Column 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, PFC^{3D}, 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 PFC^{3D} particle assembly not in the form of an external force (body force), but in the form of a contact force (surface force). A test blast was conducted for a RC column, whose dimension was 600×300×1800 in millimeters. The initial velocities of the surface movements were measured to be in the range of 14~18 m/s with the initiation times of 1.5~2.0 ms. Then the blasting procedure was simulated by using the modeling technique. The particle assembly representing the concrete was made of cement mortar and coarse aggregates, whose micro-properties were obtained from the calibration processes. As a result, the modeling technique developed in this study made it possible for the burden to move with the velocity of 17~24 m/s, which are slightly higher values compared to those of the test blast.

Key words: explosion modeling, PFC, blasting, concrete

초록 : 본 연구에서는 PFC^{3D}를 사용하여 시멘트 모르타르와 굵은 골재로 이루어진 콘크리트 기둥의 발파과정에서 나타나는 폭발과 파괴현상을 모사하여 보았다. 폭원모델링 과정에서는 공내입자들의 반경을 팽창/수축시키는 기법을 통해 공벽입자들에 접촉력의 형태로 폭발압력을 부여하는 방법을 사용하였다. 현장 발파실험에서는 철근콘크리트 기둥을 대상으로 초안폭약을 사용하여 발파하고 그 파괴거동을 고속카메라를 이용하여 관찰하였다. 모사과정에서는 철근의 규격과 입자요소의 크기에 따른 해석시간을 고려하여 모르타르와 굵은 골재로 이루어진 콘크리트 기둥을 대상으로 제안된 폭원모델링 기법을 적용하여 해석을 실시하였다. 해석결과 나타난 저항선의 이동속도는 17~24 m/s로서 실험치 14~18 m/s를 약간 상회하고 있으나 제안된 폭원모델링 기법을 사용한다면 암석이나 기타 재료들에 대한 발파과정에서 나타나는 파괴거동을 수치적으로 보다 유사하게 모사할 수 있을 것으로 판단된다.
핵심어 : 폭원모델링, PFC, 발파, 콘크리트

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 모르타르와 굵은 골재로 이루어진 콘크리트 기둥의 발파과정에서 나타나는 폭발과 파괴현상을 모사하여 보았다. PFC^{3D} 코드는 해석대상을 개별적인 입자들의 집합체로서 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.

모델링과정에서는 폭발과 파괴 현상을 모사하는데 필수적인 폭원모델링, 즉 폭발압력의 작용과정에 대한 모델을 먼저 정립한 후 실규모의 철근콘크리트 기둥에 대한 발파실험을 통해 관찰된 파괴거동을 제안된 폭원모델링 기법을 적용하여 모사하였다. 하지만 본 논문에서는 철근의 규격과 입자요소의 크기에 따른 해석시간을 고려하여 모르타르와 굵은 골재로 이루어진 콘크리트 기둥에 대한 해석 및 결과만을 제시하였다.

1) 한국지질자원연구원

2) 전남대학교

접수일 : 2005년 3월 14일

2. 기존의 연구결과

발파모델링 분야의 많은 연구자들 가운데 Fournery(1993)는 화약발파에 의한 암반의 파괴메커니즘과 관련하여 응력과 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 소성압축대가 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 추가되는 방식으로 폭원을 모델링한 바 있다.

3. 폭원모델링 기법개발

본 폭원모델링 기법에서는 폭약의 폭발기구에 따라 공벽에 작용하는 폭발압력은 기존의 연구결과들을 채택하여 적용하며, 산출된 폭발압력을 대

상모델에 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 공벽면에 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, 공벽면의 면적에 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 경우에는 재료에 따라서는 가중시간과 재료의 변형과의 관계로부터 곤란한 문제가 발생할 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, 발파현상에서와 같이 입자들 사이의 결합이 끊어진 상태에서도 지속적인 가압이 필요한 경우에는 비현실적인 결과를 초래할 수도 있다. 특히 발파공의 경계를 이루는 공벽입자들이 Fig. 1(b)와 같이 배치된 상태에서는 모델링 과정에서 폭발압력을 가

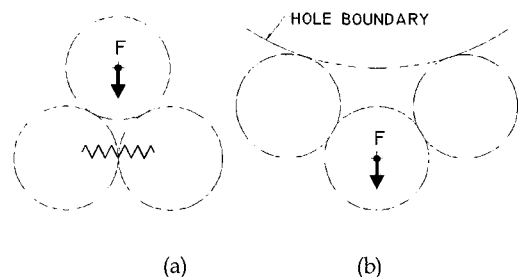
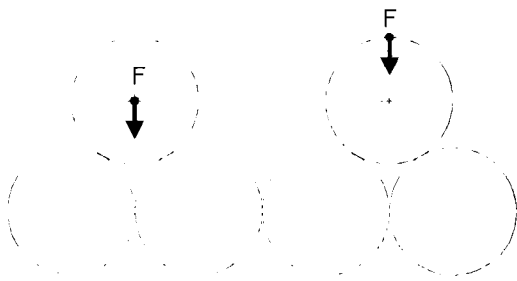


Fig. 1. Tensile failure and difficulties in applying forces to boundary particles.

해줄 공벽입자를 추적하는 일이 까다로운 문제가 될 수도 있다.

3.2 새로운 가중방법

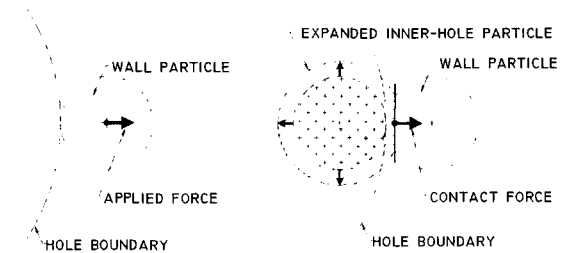
일반적인 수치해석 코드에서는 압력과 힘이 서로 동등하나 PFC^{3D}에서는 입자의 운동이 완전히 허용되므로 어떤 입자에 가해진 힘이 인접입자에 큰 변위를 일으킬 수 있는 조건이라면 압력과 힘이 서로 동등하게 변환되지 않을 수도 있다. 또한 PFC^{3D}의 사용자 인터페이스에서는 직접적으로 압력을 부여할 수 없는 대신 외력을 부여할 수 있도록 되어 있는데, 이 때문에 압력을 가할 필요성이 있을 때 보통 압력 대신 뉴턴의 힘으로 변환하여 가하게 된다. Fig. 2는 뉴턴의 힘과 후크의 힘이 입자들에 작용되는 방식을 비교한 그림으로 뉴턴의 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.

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 친공된 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 만

큼의 접촉력을 발생시키기 위하여 공내입자들의 반경을 제어기로 이용하여 그 크기를 팽창 또는 수축시키는 기법을 사용한다. 따라서 폭발압력으로부터 공벽에 작용시킬 힘이 산출되면 이 힘을 공벽입자에 가해주기 위하여 공내입자의 반경팽창율을 계산 및 적용하고, 측정된 접촉력을 토대로 보정하는 과정을 매 계산단계마다 반복하게 된다.

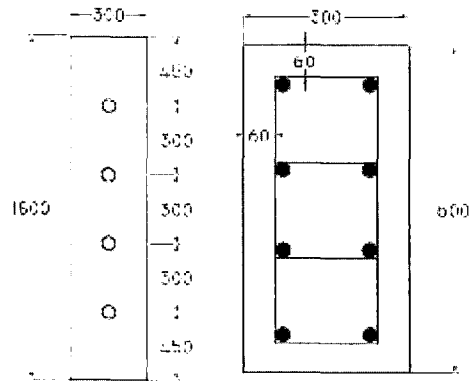


(a) Conventional (b) New
Fig. 3. Pressure loading schemes.

4. 철근콘크리트 기둥에 대한 발파실험

4.1 발파관련 설계변수

발파실험에 사용된 철근콘크리트 기둥의 규격은 600×300×1800 mm였으며, 철근의 경우 주근(main reinforcement)은 직경 18 mm 8개, 띠철근(hoop reinforcement)은 직경 10 mm의 철근을 300 mm 간격으로 배근하였다. Fig. 4(a)는 기둥의 정면도이며, (b)는 단면상에서의 철근배근도이다.



(a) Front (b) Plan
Fig. 4. RC column.

콘크리트의 강도측정용 공시체는 15×15×15cm 크기였으며, 압축강도는 330 kgf/cm²로 측정되었다. 천공패턴은 Fig. 4에서와 같이 공경 36 mm, 공깊이 400 mm, 공간격 300 mm로 하여 4공을 천공하였다. 폭약은 밀도 1.0 g/cc, 폭속 3286 m/s인 초안폭약을 사용하였으며, 비장약량은 1.3 kg/m³, 공당장약량은 70 g, 총장약량은 280 g 이었다. Fig. 5는 장약패턴도이다. 발파 시에는 고속카메라(LBS-16A)를 설치하여 기둥의 파괴에 따른 저항선의 움직임을 관찰하였다.

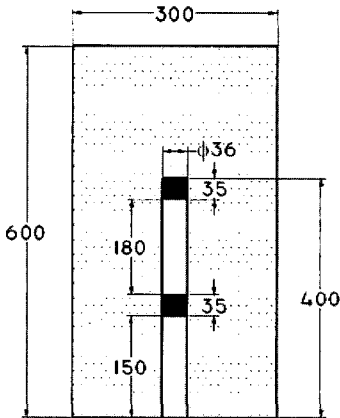


Fig. 5. Charging pattern.

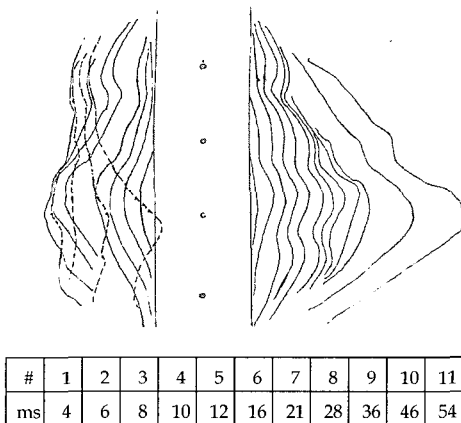


Fig. 6. Surface expansion.

4.2 실험결과

Fig. 6은 RC기둥의 저항선이 이동해 나가는 모습을 고속카메라로 촬영하여 시간대별로 도시한 것으로서 각 수치들은 기둥의 우측 자유면이 표시된 외곽선까지 팽창하는데 걸린 시간(ms)이다. Table 1은 저항선이 팽창하기 시작하는 시각과 초속도이다. 표에서와 같이 저항선의 이동속도는 1.5~2.0 ms에서 최대 14~18 m/s의 속도분포를 보이고 있다. Fig. 7은 시험기둥의 발파전후의 모습을 비교한 사진이다.

5. 콘크리트 기둥에 대한 PFC3D 발파모델링

5.1 해석모델의 구성

모델링과정에서는 대칭구조와 해석시간을 고려하여 Fig. 8과 같이 기둥의 일부분만을 대상영역으로 설정하였다.

Fig. 9(a)는 설정된 영역에 대하여 PFC^{3D}를 사용하여 구성한 입자결합 모델로서 입자반경은 7~12 mm에서 균등분포하며, 모델의 크기는 600×300×900 mm의 크기에 총 31152개의 입자가

Table 1. Surface expansion velocity

Initiation time (ms)		Initial velocity (m/s)	
t _L	t _R	v _L	v _R
2.0	1.5	18.09	14.47

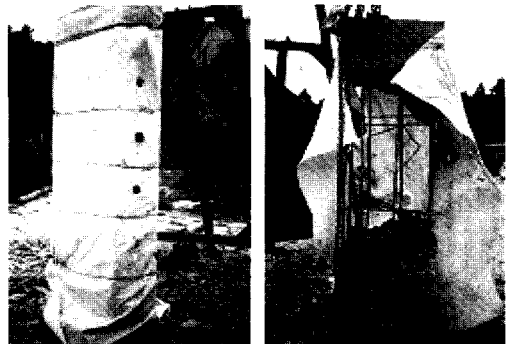


Fig. 7. RC column before and after blasting.

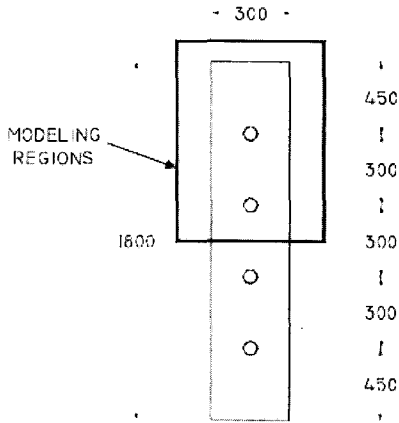


Fig. 8. Modeling region.

사용되었다. Fig. 9(b)는 폭원모델링 기법에서 언급한 공내입자와 공벽입자를 표시한 그림이다. 해석모델에서 바닥경계면은 y축 방향으로의 변위가 발생할 수 없도록 구속하였으며, 다른 경계면들은 모두 자유면이다.

5.2 폭발압력의 결정

해석과정에서 적용한 폭발압력의 함수는 Potyondy(1996)가 제안한 감쇠함수를 이용하고 폭발압 분포의 평균값(Henrych, 1979; Sadin, 1965)을 최대압력으로 취하면 다음 식과 같이 된다.

$$p(t) = \frac{\rho_0 D^2}{8} 10^{-3} \begin{cases} t/t_r, & t < t_r \\ 1.0, & t_r \leq t < t_f \\ (0.76 + 200.0t)^{-2}, & t_f \leq t \end{cases}$$

식에서 $p(t)$ 는 폭발압력(MPa), ρ_0 는 폭약밀도(g/cc), D 는 폭속(m/s)을 표시한다. 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. 본 연구에서 사용한 초안폭약($\rho_0 = 1.0$ g/cc, $D = 3286$ m/s)에 대해 위 식을 그래프로 도시하면 Fig. 10과 같이 된다.

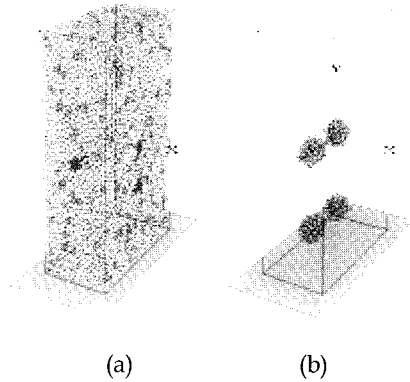


Fig. 9. Particle-bonded model.

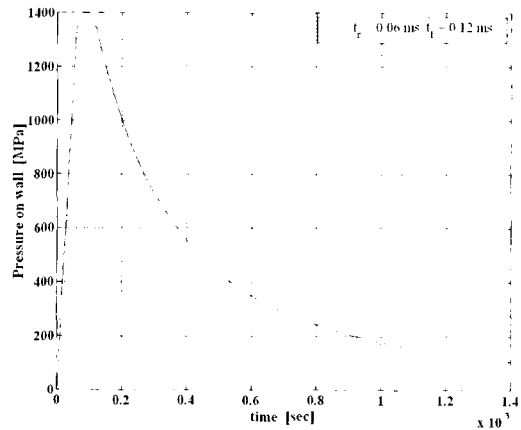
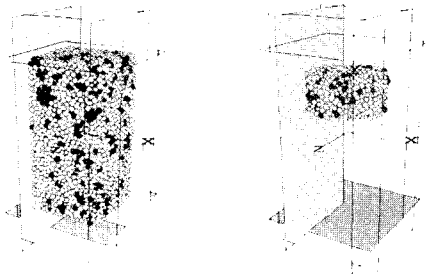


Fig. 10. Explosion pressure.

5.3 입력물성의 산정

해석모델을 구성하는 콘크리트는 시멘트 모르타르와 굵은 골재로 구성된다. 굵은 골재로는 일반적인 화강석을 가정하였으며, 실험에서 구한 콘크리트의 압축강도를 표준공시체의 물성으로 환산한 다음 모르타르와 굵은 골재를 혼합한 콘크리트 수치시험에 대하여 수치시험(calibration process)을 통하여 재료의 미시적 성질(micro-parameters)을 결정하였다. Fig. 11의 (a)는 콘크리트의 일축압축 시험용 입자결합모델이며, (b)는 간접인장시험용 시험편의 모습이다. Fig. 12는 일축압축시험에서 나타난 응력-변형률 선도이다. Table 2는 이와 같은 과정을 통해 결정된 콘크리트에 대한 미시적 성질들과 거시적 응답특성들이다.



(a) Compression (b) Tension
Fig. 11. Numerical test models

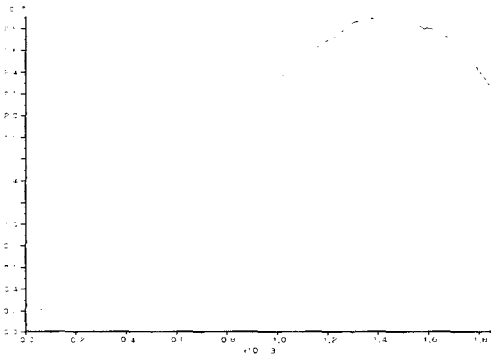


Fig. 12. Stress[Pa]-strain diagram of concrete specimen.

5.4 해석결과 및 검토

폭발압력의 변화양상

본 폭원모델링 기법에서는 폭발압력을 공내입자의 반경조절을 통해 공벽입자들에 부여하기 때문에 폭발압력의 입력치와 공벽에서 유발되는 접촉력의 측정치 간의 상대적인 크기를 비교하여 볼 필요가 있다. Fig.13은 공벽에 부여한 힘과 벽면에서 측정된 접촉력의 크기를 비교한 그래프로서 유발되는 접촉력이 입력치를 중심으로 진동하는 모습을 보이고 있으나 그 차이는 작은 편이며, 기폭 후 0.5 ms가 지나면 가압이 중단된다.

저항선의 파괴양상 및 속도벡터장의 변화

기폭이후 시간의 흐름에 따라 나타나는 기둥의 파괴양상과 속도벡터장을 Fig. 14 및 15에 각각 보았다. Fig. 16은 기둥의 우측면과 앞면에 위치시킨

Table 2. Numerical test results for concrete

Micro-parameters (for mortar)	Macro-reponses (of concrete)
$\rho=2000[\text{ kg/m}^3]$	$\rho=2087 \text{ kg/m}^3$
$E_c=19e9[\text{Pa}]$	$\sigma_y=29.2 \text{ MPa}$
$k_n/k_s=1.3[]$	$E=23.2 \text{ GPa}$
$\mu=0.50[]$	$\nu=0.17$
$\lambda=1.0[]$	$\sigma_t=7.0 \text{ MPa}$
$\bar{E}_c=19e9[\text{Pa}]$	$\sigma_{ci}=20.7 \text{ MPa}$
$\bar{k}''/\bar{k}^s=1.3[]$	
$\bar{\sigma}_c(m)=24e6[\text{Pa}]$	Coarse aggregates:
$\bar{\sigma}_c(sd)=6e6[\text{Pa}]$	- Number=602
$\bar{\tau}_c(m)=24e6[\text{Pa}]$	- Weight percent=
$\bar{\tau}_c(sd)=6e6[\text{Pa}]$	17.3%

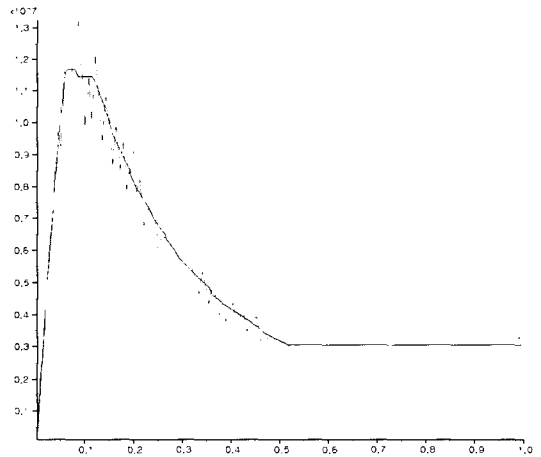


Fig. 13. Input vs induced contact forces.

측점입자들이 보이는 속도변화를 도시한 그래프이다. 우측상부 및 전방의 측정에서는 0.5 ms 부근에서 최대 22~24 m/s 정도의 속도분포를 보인 후 점감하면서 3 ms가 지나면 20 m/s 정도의 속도로 수렴한다. 우측하부에 위치한 측정에서는 0.5 ms 부근에서 최대 17 m/s의 속도를 보이다가 크기가 급감하면서 3 ms 이후에는 8 m/s 정도의 속도를 보이고 있다.

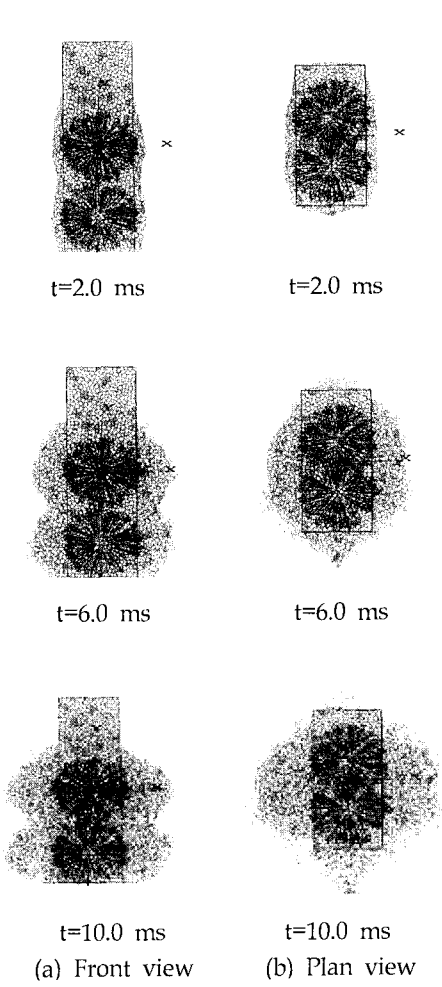


Fig. 14. Failure procedure

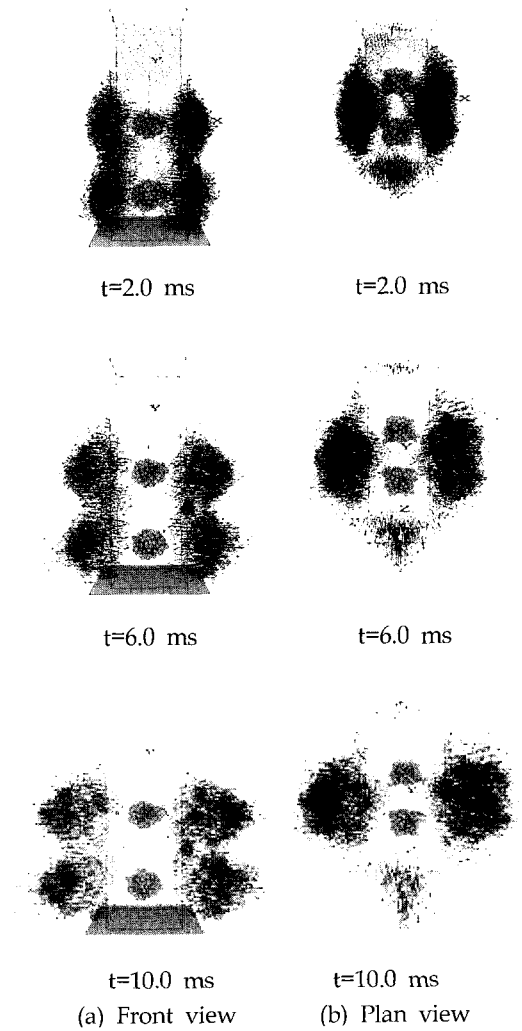


Fig.15. Velocity vector field.

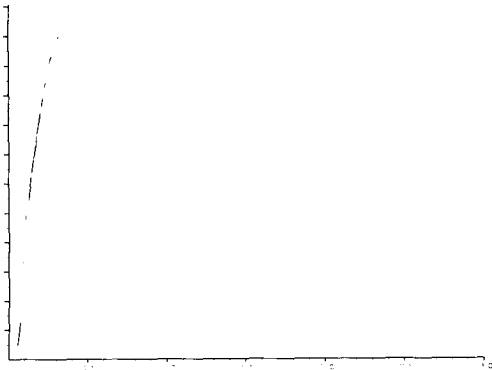


Fig. 16. Velocities of surface particles.

6. 결론

본 연구에서는 개별요소법을 기반으로 하는 PFC^{3D}를 사용하여 콘크리트 기둥에 대한 발파 및 파괴과정을 모사하였다. 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

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

(2) 기둥발파 실험에서는 600×300×1800 mm의 철근콘크리트 기둥을 사용하였다. 폭약은 밀도 1.0 g/cc, 폭속 3286 m/s의 초안폭약을 사용하였다. 실험결과 저항선이 팽창하는 초기속도는 개시시간 1.5~2.0 ms에 대하여 14~18 m/s로 측정되었다.

(3) 콘크리트의 물성산정 과정에서는 콘크리트를 시멘트 모르타르와 굵은 골재의 결합체로 간주하여 수치시험을 통하여 각각의 물성을 결정하였으며, 모르타르와 골재 사이의 결합력을 모사하기 위하여 이들의 접촉점에서는 모르타르 입자간의 접촉력의 1.05배에 해당하는 수직 및 전단 결합강도를 부여하였다.

(4) 무근콘크리트 기둥발파에 대한 해석결과 저항선의 이동속도는 개시시간 0.5 ms 부근에서 최대 17~24 m/s 정도로 나타났다. 이 수치는 실험치에 비하면 비교적 큰 값으로 볼 수 있으나 철근의 효과가 배제된 것을 감안한다면 제안된 폭원모델링 기법을 통해 암석이나 기타 재료들에 대한 발파과정에서 나타나는 파괴과정을 수치적으로 보다 유사하게 모사할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

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, pp. 871-876, H. J. Siriwardane and M. M. Zaman, Eds., Rotterdam, Balkema.
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. SAND92-1027.
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.