

## PFC2D에서의 발파에 의한 파괴 메커니즘의 수치적 모델링

정용훈<sup>1)\*</sup>, 이정인<sup>2)</sup>, 전석원<sup>3)</sup>

### Numerical Simulation of Fracture Mechanism by Blasting using PFC2D

Yong-Hun Jong, Chung-In Lee and Seokwon Jeon

**Abstract** During blasting, both shock wave and gas are generated in detonation process of explosives and the generated wave and gas expansion may create new fractures and damage rock mass. In order to explain and understand completely the fracture mechanism by blasting, we have to consider both effects of the wave and gas expansion simultaneously. In this study, we use a discrete element code, PFC2D and develop an algorithm which is capable of modeling both detonation and gas pressures acting on blasthole wall and visualizing generated cracks within rock mass. Moreover, the gas-pressure modeling method which applies a corresponding external force of gas pressure to parent particles of radial fractures is adopted to simulate a coupling between rock mass and gas penetrating created radial fractures. The developed algorithm is verified by reproducing numerical simulations of a lab-scale test blast successfully.

**Key words** PFC2D, Blasting, Fracture mechanism, Numerical simulation, Detonation pressure, Gas pressure

**초 록** 발파에 의한 암반의 손상이나 파쇄는 폭약의 폭굉 과정에서 발생하는 충격파와 가스팽창의 영향에 의해 야기된다. 발파에 의한 파괴 메커니즘을 완전히 이해하기 위해서는 두 메커니즘을 같이 연구해야한다. 본 연구에서는 개별요소법에 기초한 수치해석 프로그램인 PFC2D를 이용하여 발파공 벽면에 작용하는 폭굉압과 가스압을 동시에 모델링할 수 있고 이에 따른 암반 내 균열 발생을 확인할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 또한 시멘트-모르타르 블록에서의 모형 발파시험을 수치해석을 수행함으로써, 개발된 알고리즘을 검증하였다.

**핵심어** PFC2D, 발파, 파괴 메커니즘, 수치적 모델링, 폭굉압, 가스압

## 1. 서 론

많은 연구자들은 발파에 의한 파괴 메커니즘을 설명하기 위하여 반사파이론, 가스팽창이론, 응력파와 가스팽창이론 그리고 혼합이론 등을 제안하였다. 이러한 이론들에 의하면 암반의 파쇄와 손상은 폭약의 폭굉 과정에서 발생하는 충격파와 가스팽창의 영향에 의해 야기된다. 그러나 발파에 의한 손상이나 파쇄에 관한 대부분의 연구들은 충격파와 가스팽창의 영향을 독립적으로 모델링하였다. 반면에 일부 연구<sup>1,2)</sup>에서는 굴착손상에 미치는 가스팽창의 영향이 충격파의 영향에 비하여 작은

것으로 나타났다. 그렇지만 발파에 의한 파괴 메커니즘을 완전히 이해하기 위해서는 두 메커니즘을 같이 연구해야 한다.

본 연구에서는 개별요소법에 기초한 수치해석 프로그램인 PFC2D(Particle Flow Code 2D)에서 발파 과정 동안 발생한 폭굉압과 가스압의 발파공 벽면에서의 작용을 동시에 모델링하여 이에 따른 암반 내 균열 발생을 확인할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 폭굉압과 가스압의 이력에 따라 발파공으로 정의된 입자들의 반지름을 제어하여 경계입자들에 접촉력으로 가해주는 폭원모델링 방식을 적용하였다. 또한 생성된 반경방향 균열망을 통해 유동하는 gas와 암반의 상호 작용을 수치해석적으로 모델링하기 위하여 이전 연구<sup>3)</sup>에 제시된 균열망의 구성 입자에 외력의 형태로 가스압을 부여하는 가스압 모델링 기법을 사용하였다. 제안된 폭원 모델링 기법과 가스압 모델링 기법의 적용 가능성을 평가하기 위하여 시멘트-모르타르로 제작된 블록 시험편을 이용한 모형 발파시험을 수치 실험하였다.

<sup>1)</sup> BK21 서울대학교 에너지자원 인력양성사업단 박사 후 연구원

<sup>2)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

<sup>3)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수

\* 교신저자 : wizard@rockeng.snu.ac.kr

접수일 : 2006년 11월 13일

심사 완료일 : 2006년 12월 12일

## 2. 발파에 의한 파괴 메커니즘

발파공에 장약된 폭약이 폭굉하여 발파공 주변 암반의 손상이나 파쇄를 발생시키기까지의 과정은 시간적 순서에 따라 ① 폭굉, ② 충격파 또는 응력파의 전파, ③ 가스압의 팽창, ④ 파쇄물의 이동 등 4단계로 구분될 수 있다<sup>4)</sup>. 여기서는 각 단계들이 개별적으로 구분되었지만 실제 발파 과정 중에는 하나의 단계가 다른 단계와 동시에 수행될 수도 있다.

마지막 단계인 파쇄물의 이동을 제외하고 폭굉, 충격파 또는 응력파 전파 가스압 팽창 과정의 단계에 대해 본 연구에서 적용된 주요 변수는 다음과 같다.

최대 폭굉압력  $P_{d,max}$ 은 이상폭굉이론에 기초한 식 (1)을, 그리고 최대 가스압력  $P_{g,max}$ 은 AN-EOS에 기초한 식 (2)를 사용하여 산정하였다.

$$P_{d,max} = \frac{\rho_c}{4} D_c^2 \quad (1)$$

$$P_{g,max} = \frac{(2/3) f}{(D.I.)^2 / \rho_e - \alpha} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1.5}{1.26 + 1.33\rho_e} \quad (3)$$

여기서  $\rho_e$ 는 폭약의 밀도,  $D_c$ 는 폭굉속도,  $f$ 는 폭약의 비에너지 그리고  $D.I.$ 는 디커플링 지수이다.

## 3. PFC2D에서의 발파의 수치적 모델링

본 연구에서 개발된 PFC2D에서 발파에 의한 파괴 메커니즘의 각 단계를 모사하는 방법은 다음과 같다.

### 3.1 폭굉

개별요소법을 기반으로 하는 PFC2D에서는 폭원에서 발생된 폭굉압을 공벽면에 그대로 가할 수 없고, 대신 압력에 상응하는 힘을 각 입자들의 절점에 부여하는 방식이 많이 사용되어 왔다(Fig. 2 (a)). 즉, PFC2D에서는 직접적

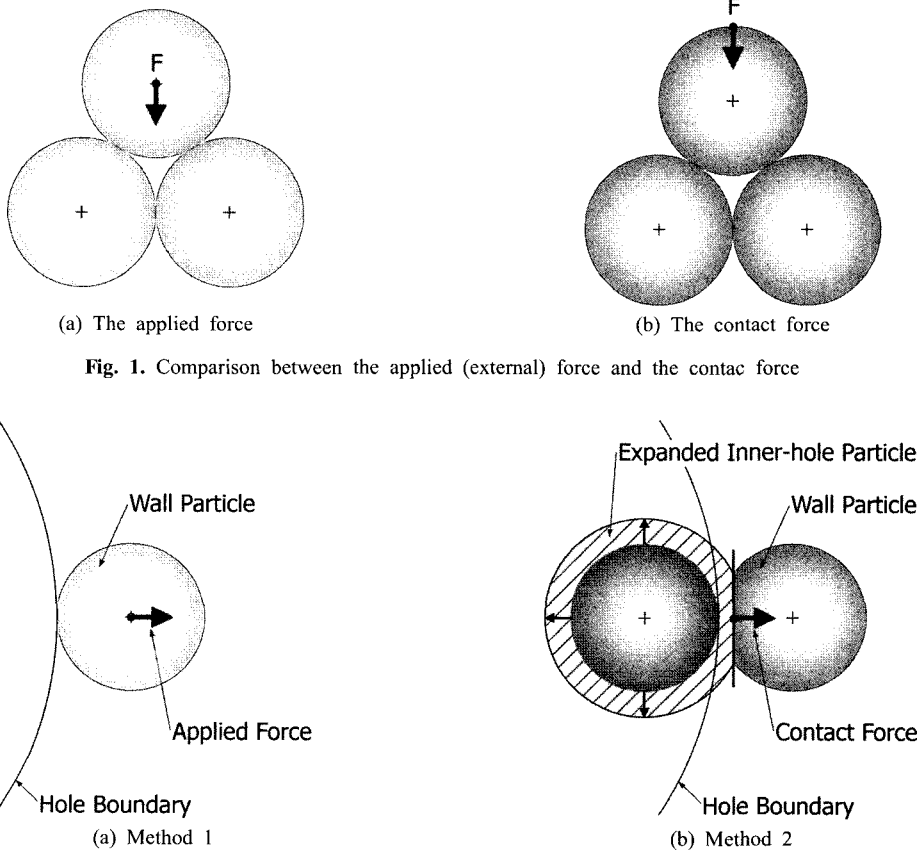


Fig. 2. Two kinds of the pressure loading schemes

으로 압력을 부여할 수 없는 대신 외력을 부여할 수 있도록 되어 있는데, 이 때문에 압력을 가할 필요성이 있을 때 보통 압력 대신 뉴턴의 힘으로 변환하여 구하게 된다. 뉴턴의 힘은 입자의 절점에 작용하는 외력(물체력)으로서 힘을 받는 입자의 운동을 일으키며, 후크의 힘은 입자의 표면에 작용하는 접촉력(표면력)으로서 그 작용점에서의 변위를 발생시킨다(Fig. 1). 이 개념을 이용하여, 최병화<sup>2)</sup>는 발파로 발생되는 폭굉압을 발파공 벽면을 구성하는 입자 표면에서의 접촉력 형태로 부여하는 폭원 모델링 기법을 제안하였다(Fig. 2 (b)).

발파 과정에 생성된 폭굉압의 발파공 벽면에 대한 작용을 모델링하는 전술한 두 재하 방법은 다음과 같이 정리된다. 첫 번째 방법은 발파공 벽면의 면적에 대한 압력을 결정하고, 결정된 압력을 벽면을 구성하고 있는 입자들의 단면적의 크기에 따라 배분한 뒤, 각 입자에 배분된 압력에 그 입자의 단면적을 곱하여 구한 힘을 각 입자의 절점에 외력(external force)으로서 부여하는 방식이다(Fig. 2 (a)). 두 번째 방법은 압력으로부터 벽면에 작용시킬 힘을 결정한 후, 이 힘을 공벽 입자에 가해주기 위하여 공내입자의 반경팽창률을 계산하여 적용하고, 측정된 접촉력을 토대로 보정하는 과정을 매 계산 단계마다 반복하는 방식이다(Fig. 2 (b)). 본 연구에서는 후자의 방법을 적용하였다.

시간에 따라 계산된 압력으로부터 발파공 벽면에 작용시킬 힘을 산출하고 그 힘을 공벽입자에 가해주기 위해서, 다음과 같이 매 계산단계마다 공내입자의 반경팽창률을 계산하여 적용하는 과정을 반복한다.

▶ Step 1. 공벽면 전체에 작용하는 접촉력 산정

Fig. 3과 같이 공벽면들 사이에 두고 서로 접촉하고 있는 수직강성 스프링들에서는 후크 법칙(Hooke's law)이 성립하므로, 공벽면 전체에 작용하는 접촉력은 각 스프링에 작용하는 힘을 모두 더한 합력과 같다.

$$\sum f = \sum (k\Delta x) = (\sum k) \Delta x \quad (4)$$

여기서 좌변의 힘  $\sum f$ 는 주어진 시간에 공벽면 전체에 작용하는 힘이며 이는 폭굉압력의 시간이력으로부터 산정될 수 있다. 강성의 합  $\sum k$ 는 공내입자들과 공벽입자들 사이의 접촉점들에서의 수직강성의 합이다. 따라서 이로부터 발파공의 반경증분  $\Delta x$ 를 결정할 수 있다.

$$\Delta x = \frac{\sum f}{\sum k} \quad (5)$$

▶ Step 2. 공내입자의 반경팽창률 산정

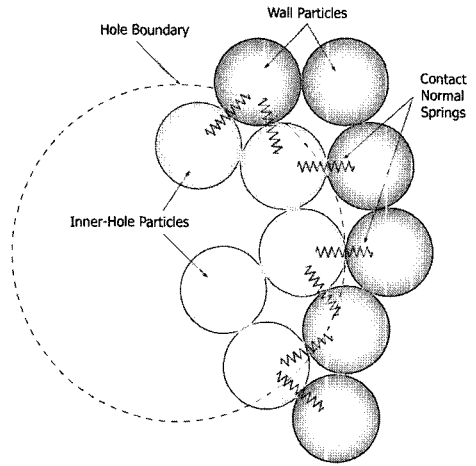


Fig. 3. Contact normal springs between inner-hole and wall particles

식 (5)에 의해 산정된 발파공의 반경증분  $\Delta x$ 를 만족시키는 공내입자들의 반경증분  $\Delta r$ 를 결정해야 한다. 본 연구에서는 원형의 발파공 내에 불규칙적으로 분포되어 있는 접촉스프링들을 단순화하여 동일한 반경을 가지는 입자들이 정사각형 내에서 직교배열의 형태로 배치되어 있는 것으로 가정한다. 정사각형의 한 변의 길이가  $2\Delta x$ 만큼 증가할 때 입자반경의 증분은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta r = \frac{\Delta x}{\sqrt{n_b}} \quad (6)$$

여기서  $\Delta r$ 은 공내입자 각각의 반경증분이고,  $n_b$ 는 정사각형 내에서 직교배열된 공내입자의 수이다.

▶ Step 3. 산정된 공내입자의 반경팽창률의 보정

PFC2D에서 식 (5)와 (6)에 의해 산정된 공내입자의 반경증분을 적용하여 얻어진 결과는 발파공 벽면에 작용하는 압력의 시간이력과는 경향은 유사하나 상당한 오차를 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 이 오차를 줄이기 위하여, 다음의 식을 이용하여 공내입자의 반경증분을 보정하는 과정을 추가하였다.

$$\Delta r_{new} = \alpha \times \Delta r \quad (7)$$

여기서  $\Delta r_{new}$ 는 보정된 공내입자의 반경증분이고,  $\alpha$ 는 다음과 같이 산정된다.

$$\alpha = 1.0 + \frac{P_b - (\sum f)/l}{\beta P_b} \quad (8)$$

여기서  $P_b$ 는 주어진 계산단계에서의 시간에 대한 발파공 벽면에 작용하는 압력,  $\sum f$ 는 직전 계산 단계에서 공내입자와 공벽입자간의 접촉력의 합,  $l$ 은 직전 계산 단계에서 산정된 발파공의 원주이다. 또한 상수  $\beta$ 는 주어진 계산단계에서의 적용하고자 하는 압력  $P_b$ 와 PFC2D에서 산정된  $(\sum f)/l$ 의 오차 한계이며, 본 연구에서는 0.025(2.5%)를 적용하였다.

### 3.2 충격파 또는 응력파 전파

동적 해석에서는 경계면에서의 반사의 영향을 최소화하는 작업이 중요하다. Hazzard<sup>5)</sup>는 PFC2D에서의 경계 조건에 따른 P파와 S파의 반사에 대한 영향을 조사하였으며, 그 결과 흡수층 경계조건에서 반사파의 크기가 가장 작게 나타났다(Table 1). 따라서 본 연구에서도 무한한 해석 모델의 경계면은 자유면 경계조건이 아닌 흡수층 경계조건으로 정의하였다.

### 3.3 가스압 팽창

발파공에서 생성된 가스는 보어홀 벽면과 더불어 충격파 또는 응력파에 의해 생성한 반경방향의 균열에도 압력을 작용한다. 보어홀 벽면에 작용하는 가스압은 충격파 또는 응력파와 함께 공내입자의 반지름을 제어함으로써 모사할 수 있다. 그러나 암반 내에 발생한 균열에 작용하는 가스압을 모사하기 위해서는 추가적인 알고리즘을 적용해야 한다. 우선 각각의 원형 또는 구형 입자로 구성된 해석 모델에서 발파의 수치모사 동안 발생하는 균열들이 발파공과 연결되어 가스압의 직접적인 작용을 받는지를 점검해야 한다. 이를 위해서는 해석 모델에서의 균열 발생과 동시에 해당 균열의 발파공과의 연결성 여부를 확인하는 동적 알고리즘을 사용해야 한다.

동적 알고리즘을 개발하기 위하여 다음과 같은 가정을 적용하였다. 발파의 수치 모사 과정에서 특정 발파

공의 중심으로부터의 반지름  $r_{pb}$  내에 위치한 모든 입자간의 접촉점에서 균열이 발생하였다고 가정한다. 반지름이  $r_{pb}$ 인 영역을 위발파공(pseudo-blasthole)이라고 부르며, 이 영역에 위치한 입자와 맞닿은 입자간의 접촉점들을 반경방향 균열의 시작점이라고 가정한다(Fig. 4).

발파가 진행됨에 따라 발생하는 균열 중 반경방향 균열의 시작점에 해당하는 균열이 생성되면, 이 시점까지 발생한 균열을 검색하여 해당 지점에서의 반경방향 균열망을 형성한다. 이 때 연결될 다음 균열을 결정하는 방법은 다음과 같다.

- ▶ Step 1. 현재 균열의 구성 입자에 대한 접촉 결정  
현재의 균열이 발생한 접촉을 구성하는 두 개의 입자 각각에 대하여, 현재 균열이 발생한 접촉으로의 벡터 방향을 기준으로 시계 방향과 반시계 방향으로 사잇각이 작은 입자의 중심에서 해당 입자에 존재하는 접촉을 하나씩 결정하여, 총 4개의 접촉을 결정한다.

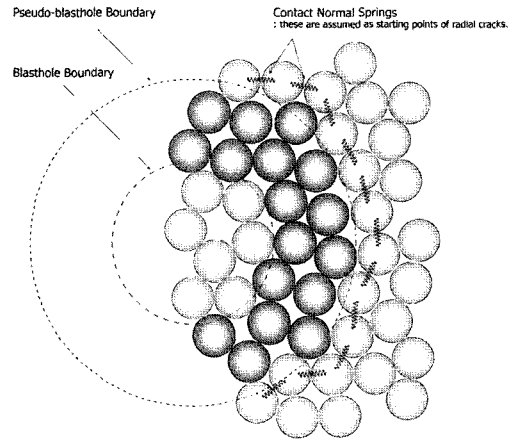


Fig. 4. Assumption of pseudo-blasthole boundary and starting points of radial cracks

Table 1. Different boundary conditions and their effects on wave reflections (after [5])

Boundary condition	Description	P-wave reflection amplitude <sup>a)</sup>	S-wave reflection amplitude <sup>a)</sup>
Free surface	-	100	100
Damped layer (2 particles thick)	Boundary particles assigned full damping	65	50
Damped layer (5 particles thick)	Boundary particles assigned full damping	61	40
Absorbing layer	Boundary particles controlled to absorb waves	27	48
Infinite elastic boundary	Boundary particles controlled to simulated infinite elastic medium	93	102

a) % of free surface

▶ Step 2. 반경방향 균열망의 진행 방향 가정

이 때, 균열이 발생한 접촉 중 해당 입자의 발파공 중심과의 거리보다 작은 위치에 있는 접촉은 제외한다. 이는 반경방향 균열이 발파공의 외부 방향으로 전파되도록 묘사하기 위함이다.

▶ Step 3. 해당 접촉의 균열 검색

발생한 균열 중 결정된 접촉의 두 입자로 구성된 균열을 검색한다.

▶ Step 4. 다음 균열의 결정

검색된 균열의 수가 없는 경우, 현재 시점에서는 다음 균열이 더 이상 존재하지 않음을 의미한다. 검색된 균열의 수가 1개인 경우 이 균열이 다음 균열로 결정된다. 그러나 검색된 균열의 수가 2, 3 또는 4개인 경우에는 균열의 생성 시간과 균열의 생성 위치를 동시에 고려하여 결정한다. 즉 균열의 생성 시간이 빠르고, 동일한 생성 시간에 발생한 균열 중에서는 현재의 균열에 대한 다음 균열의 방향이 발파공의 중심에 대한 해당 균열망의 첫 번째 균열 방향과 가장 유사한 것을 다음 균열로 결정한다.

앞에서 언급한 위발파공의 개념은 발파공에서 시작하는 반경방향 균열의 시작점을 정의하기 위해서 사용되었다. 이는 실제 발파에서의 파쇄영역에 해당하며, 특히 단일 발파공 주위의 파쇄영역의 반지름은 이상 폭발이론에 기초한 식들<sup>6-10)</sup>이나 비이상 폭발이론에 기초한 식<sup>11)</sup>을 이용하여 계산 가능하다. 특히 Esen et al.<sup>11)</sup>은 실험에서 측정된 파쇄영역의 반지름과 이 식들에 대해 비교 연구를 수행하였다. 그 결과 비이상 폭발이론에 기초한 식으로 예측한 파쇄영역의 반지름이 측정값과 가장 근사하였으며, 또한 Szuladzinski<sup>8)</sup>의 연구에서 제안한 이상 폭발이론에 기초한 식으로 예측한 값과도 유사하였다.

따라서 본 연구에서는 계산이 더 용이하다는 장점을 지닌 이상 폭발이론에 기초한 Szuladzinski 제안식의 단위를 수정한 식 (9)에 의해 산정된 파쇄영역의 반지름을 위 발파공의 최대 반지름  $r_{pb,max}$  (mm)으로 적용하였다.

$$r_{pb,max} = r_b \sqrt{\frac{4.19002}{6} \cdot \frac{\rho_c Q}{\sigma_c}} \quad (9)$$

여기서  $r_b$ 는 발파공 반지름(mm),  $\rho_c$ 는 폭약 밀도( $\text{g/cm}^3$ ),  $Q$ 는 폭약의 폭발열(kcal/kg),  $\sigma_c$ 는 암석의 정적 일축압축강도(MPa)이다.

## 4. 개발된 알고리즘의 적용성 평가

### 4.1 수치해석 모델의 생성

권지용<sup>12)</sup>은 시멘트-모르타르로 제작한 모형을 이용하여 응력파의 증첩효과와 발파에 의한 손상 영역을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 모형 발파시험에 사용된 시험편의 크기는  $1.0 \times 0.8 \times 0.5$  m(가로×세로×높이)이었다. 또한 발파공의 지름과 심도는 각각 45 mm, 0.2 m이었고, 두 발파공의 간격은 0.4 m이었다. 개지지는 발파공으로부터 0.1 m, 0.2 m 떨어진 두 지점에 설치하였다. 시멘트-모르타르 시험편의 물성은 Table 2에 제시하였다. 사용된 폭약은 조절발파용 폭약이었으며, 이 폭약의 밀도는  $1.00 \text{ g/cm}^3$ , 지름은 17 mm로 디커플링지수는 약 2.65 그리고 비에너지는  $10,000 \text{ l} \cdot \text{kgf/cm}^2/\text{kg}$ , 폭발속도는 4,000 m/s이다.

PFC2D를 이용하여 발파시험을 수치해석하기 위한 해석 모델의 크기는 모형 발파시험과 동일하게 설정하였다. 그리고 해석 모델의 생성을 위한 미시변수 결정 과정에

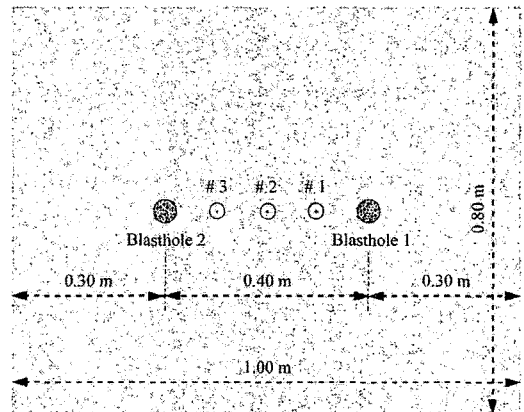


Fig. 5. Generated cement-mortar block in PFC2D

Table 2. Physical properties of a cement-mortar block

Physical property	Unit	Value	Physical property	Unit	Value
Density	$\text{g/cm}^3$	2.30	UCS	MPa	18.33
Young's modulus, static	GPa	20.42	P-wave velocity	m/s	3,990
Young's modulus, dynamic	GPa	36.60	Poisson's ratio	-	0.243

서는 발파시험을 모델링하기 위하여 정적탄성계수가 아닌 동적탄성계수를 적용하였다.

정용훈과 이정인<sup>13)</sup>이 제시한 미시변수 결정법을 이용하여 시멘트-모르타르 블록을 생성하기 위해 적용한 미시변수는 Table 3과 같이 결정되었으며, 이 미시변수를 적용하여 생성된 시험편을 이용하여 일축압축시험, 간접인장시험 그리고 탄성파속도시험을 하여 얻어진 물성은 Table 4와 같았다.

결정된 미시변수들을 이용하여 생성된 해석 모델은 Fig. 5와 같다. 그 크기는 모형 발파실험에 사용된 시멘트-모르타르 블록과 동일한 1.0×0.8 m(가로×세로)이다. 또한 적용된 입자 최소 반지름은 2.44 mm이었다. 두 발파공 사이의 세 지점에서 응력을 계측하였으며, 계측 지점 # 1, # 2 그리고 # 3은 발파공 1에서 각각 발파공간 거리(0.4 m)의 1/4, 1/2 그리고 3/4만큼 떨어진 위치이다.

#### 4.2 수치해석 결과: 폭굉압과 가스압의 변화

폭굉압과 가스압의 작용에 의해 발파공이 확대되지 않거나 위발파공 영역이 생성되지 않는 조건에서 발파공 벽면에 작용하는 최대 폭굉압은 2 MPa이고, 최대압력 도달 시간은 폭굉 시작 후 5.3  $\mu$ s이다. 또한 최대 가스압은 153 MPa이고, 최대압력 도달시간은 폭굉 시작 후 32.5  $\mu$ s이다. 각각의 압력 이력을 도시한 Fig. 6으로부터 디커플링 장약에 의해 발파공 벽면에 작용하는 압력은 대부분 가스압임을 확인할 수 있다.

그러나 수치해석 과정에서는 압력의 작용에 의한 발파공의 확대나 위발파공 영역의 생성과 확장을 고려하기 때문

에 발파공 벽면에 작용하는 최대 가스압은 감소하게 된다. 단일공 발파와 두 공의 동시 발파의 경우에 대하여 이를 고려한 발파공 벽면에 작용하는 압력의 이력, 발파공 공내입자들의 반지름 변화 그리고 경계입자의 접촉력으로 유도된 압력 이력을 살펴보았다.

##### 4.2.1 단일공 발파

공내입자의 반지름 변화에 따른 발파공의 확대와 위발파공 영역의 생성과 확장에 의해 발파공 벽면에 작용하는 최대 가스압은 145 MPa로 감소하였다.

압력 이력을 모사하기 위한 발파공 공내입자의 반지름 팽창률은 Fig. 7과 같이 변화였다. 즉 이전 단계에서의 공내입자 반지름의 최대 0.019%만을 변화시킴으로써 발파공 벽면에 작용하는 압력을 모사할 수 있었다. 이 변화에 의한 발파공과 위발파공 영역의 반지름은 Fig. 8과 같이 변화였다. 또한 이에 의한 발파공 벽면에 작용하는 압력 이력(점선)과 공내입자의 반지름 변화로 유도된 압력 이력(실선)은 Fig. 9와 같았다.

##### 4.2.2 두 공의 동시 발파

공내입자의 반지름 변화에 따른 발파공의 확장과 위발파공 영역의 생성과 확장을 고려한 수치해석 과정에서의 발파공 벽면에 작용하는 최대 가스압은 145 MPa(발파공 1)과 153 MPa(발파공 2)이었다.

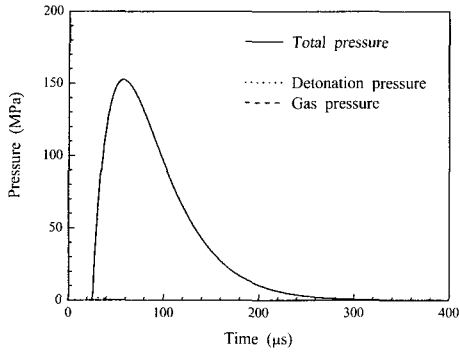
발파공 2의 공내입자의 반지름 팽창률의 변화는 Fig. 10이고, 이 변화에 의한 발파공과 위발파공 영역의 반지름은 Fig. 11과 같이 변화였다. 또한 이에 의한 발파공 벽

**Table 3.** Determined micro-parameters to generate a cement-mortar block

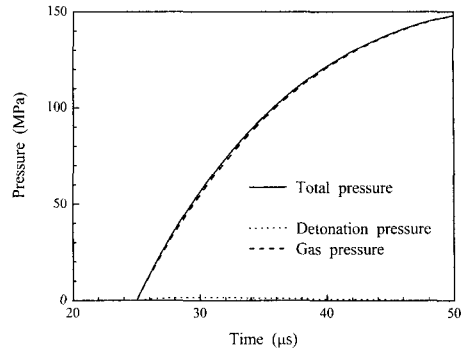
Micro-parameter	Unit	Value	Micro-parameter	Unit	Value
A ( $\rho$ )	g/cm <sup>3</sup>	2.30	F (mean of $\sigma_c$ )	MPa	85.0
B ( $r_{min}$ )	mm	0.50	G (mean of $\tau_c$ )	MPa	85.0
C ( $\mu$ )	-	0.50	H (s.d./mean of $\sigma_c, \tau_c$ )	-	0.21
D ( $E_c$ )	GPa	51.84	SFn	-	0.19
E (kn/ks)	-	2.45	SFs	-	0.18

**Table 4.** Macro-properties estimated by simulating lab-scale tests

Macro-property	Unit	Value	Macro-property	Unit	Value
Y1 (Young's modulus)	GPa	36.45	Y5 (Y4/Y3)	-	0.36
Y2 (Poisson's ratio)	-	0.249	Y6 (Tensile strength)	MPa	4.53
Y3 (UCS)	MPa	18.32	Y7 (Y6/Y3)	-	0.25
Y4 (Crack initiation stress)	MPa	6.62	Y8 (P-wave velocity)	m/s	2,400



(a) Pressure-time history



(b) Pressure-time history in the time interval [20~50]  $\mu$ s

Fig. 6. Pressure-time history acting on the blasthole wall

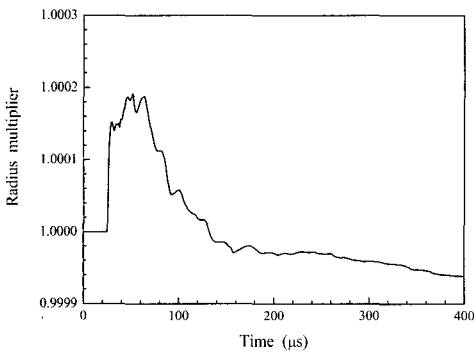


Fig. 7. Radius multiplier-time history for inner-hole particles (blasthole 1)

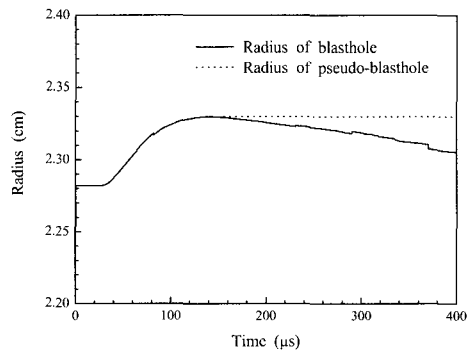


Fig. 8. Radii of a blasthole and a pseudo-blasthole (blasthole 1)

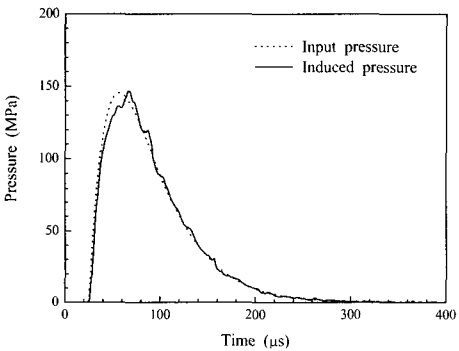


Fig. 9. Pressure-time histories in consideration for change of blasthole geometry (blasthole 1)

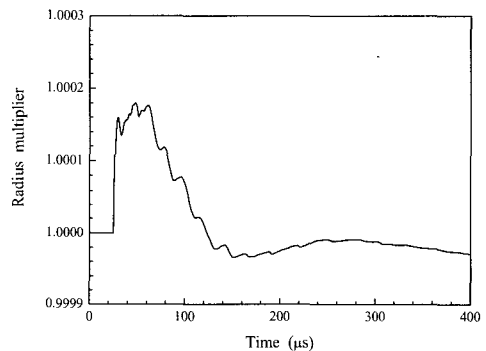


Fig. 10. Radius multiplier-time history for inner-hole particles (blasthole 2)

면에 작용하는 압력 이력(점선)과 공내입자의 반지름 변화로 유도된 압력 이력(실선)은 Fig. 12에 도시하였다. 반면에 발파공 1에 대한 정보는 단일공 발파를 수치해석한 경우와 동일하였다.

4.3 수치해석 결과: 응력파의 중첩 효과

본 연구에서 개발된 알고리즘이 동시 발파에 의한 응력파의 중첩 효과를 제대로 모사할 수 있는지를 평가하기 위하여 단일공 발파와 두 공의 동시 발파의 경우에 발파공간 거리의 1/4 지점(계측점 # 1)과 1/2 지점(계측점

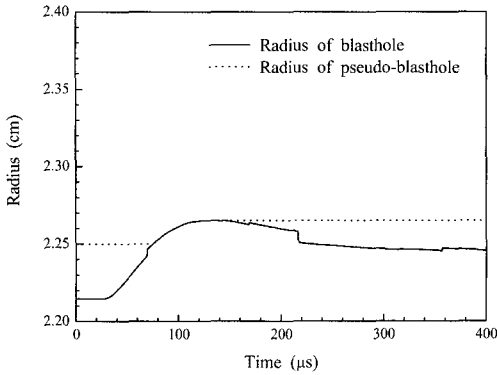


Fig. 11. Radii of a blasthole and a pseudo-blasthole (blasthole 2)

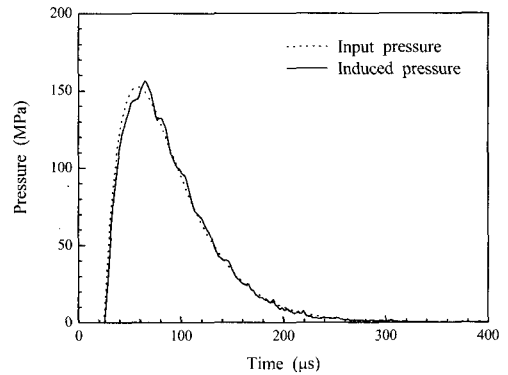
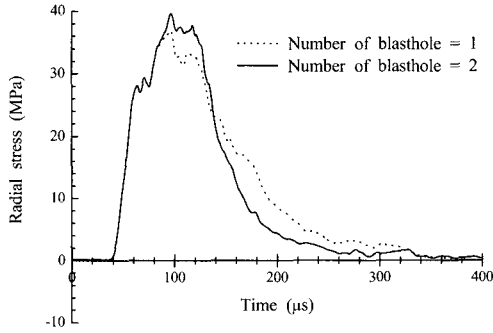
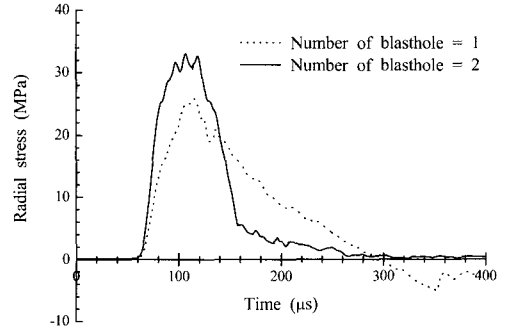


Fig. 12. Pressure-time histories in consideration for change of blasthole geometry (blasthole 2)



(a) 1/4 distance apart from the blasthole (measuring point # 1)



(b) 1/2 distance apart from the blasthole (measuring point # 2)

Fig. 13. Comparison of measured radial stress at different locations

# 2)에서 측정된 반경방향 응력을 비교하였다.

발파공간 거리의 1/4 지점에서 최대 반경방향 응력은 단일공 발파의 경우 36.9 MPa이었고 두 공의 동시 발파의 경우 39.6 MPa로 7% 증가하였다. 두 경우의 응력 이력은 최대 압력에 도달하기 전까지는 동일하였으나 그 이후는 약간 다른 양상을 보였다(Fig. 13(a)).

반면에 발파공간 거리의 1/2 지점에서 최대 반경방향 응력은 단일공 발파의 경우 25.8 MPa, 두 공의 동시 발파의 경우 33.0 MPa로 28% 증가하였다. 이 지점에서의 응력 이력은 두 공의 동시 발파의 경우 단일공 발파에서와 달리 최대 응력 이전에 급격히 증가하고 최대 응력 이후에 급격히 감소하는 양상을 보였다(Fig. 13(b)).

이러한 최대 응력의 증가와 응력 이력의 차이는 양 방향에서 전해오는 응력파의 중첩에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 14는 단일공 발파와 두 공의 동시 발파의 경우 경계면에서 응력파가 반사되는 초기 시점에서의 균열 발생 양상이다. 단일공 발파의 경우 균열은 발파공 주위에만 원형으로 발생하였다. 반면에 두 공을 동시 발파한 경우

응력파의 중첩 효과에 의해 발파공 주위가 아닌 두 발파공의 사이에서 균열이 집중적으로 발생함을 확인할 수 있었다.

실제 시멘트-모르타르 블록에서의 모형 발파시험 동안 계측점 # 1 (발파공간 거리의 1/4 지점)과 계측점 # 2 (발파공간 거리의 1/2 지점)에서 최대 반경방향 응력 도달시간은 85~90 μs이었다. 계측점 # 2에서의 반경방향 응력은 두 공의 동시 발파의 경우 단일공 발파의 경우보다 1.84배 증가하였다<sup>12)</sup>. 반면에 본 연구에서 개발된 알고리즘을 적용한 PFC2D에서의 수치 실험에서는 계측점 # 1과 # 2에서의 최대 반경방향 응력의 도달시간은 60~70 μs이었으며, 계측점 # 2에서 두 공의 동시 발파에 의한 중첩 효과에 의해 최대 응력이 1.28배 증가하였다.

이처럼 PFC2D에서 발파에 의한 파괴 메커니즘을 모델링하기 위하여 개발한 알고리즘은 해석 모델의 물성, 사용 폭약의 특성 그리고 동시에 폭발하는 발파공의 수에 따른 계측점에서의 최대응력과 최대응력 도달시간 그리



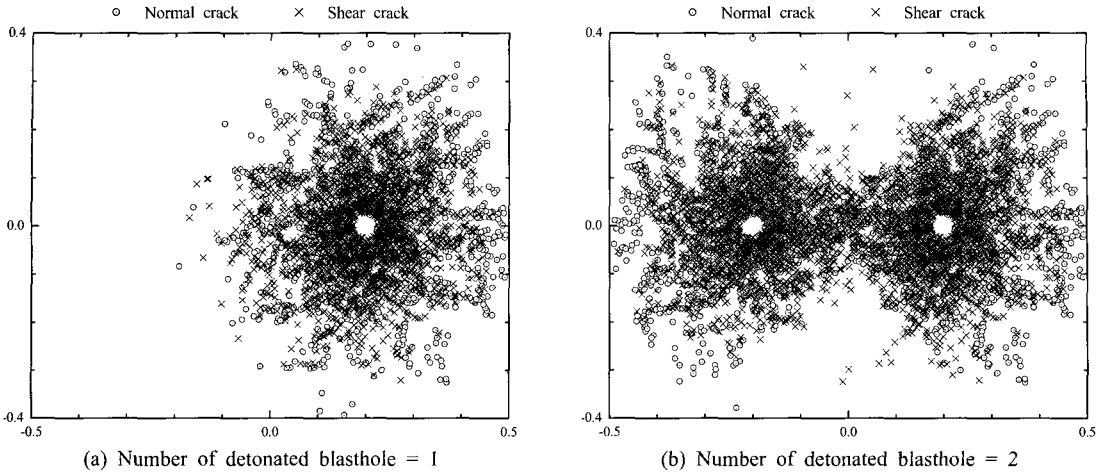


Fig. 14. Generated normal and shear cracks (at time = 160  $\mu$ s)

고 응력파의 중첩 효과를 실제 발파시험의 결과와 유사한 경향으로 모사할 수 있었다.

## 6. 결 론

개별요소법에 기초한 수치해석 프로그램인 PFC2D를 이용하여 발파에 의한 파괴 메커니즘을 수치적으로 모델링하였다. 발파 과정에서 발생한 폭발압과 가스압의 발파공 벽면에서의 작용을 동시에 모델화하여 이에 따른 암반과의 상호 작용을 반영하며 암반 내 균열 발생을 확인할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘의 주요 특징은 다음과 같다. (a) 발파공내입자의 반지름을 제어하여 발파공 벽면에 폭발압과 가스압의 이력을 작용하는 폭원 모델링 기법을 적용하였다. (b) 균열망 구성 입자에 외력의 형태로 가스압을 부여하는 가스압 모델링 기법을 적용하였다.

개발된 알고리즘을 적용하여 시멘트-모르타르로 제작된 블록 시험편에서의 모형 발파시험을 수치 실험하였다. 수치 실험 결과, 두 발파공의 중앙에서 최대 반경방향 응력의 도달시간은 60~70  $\mu$ s 이었으며, 최대 응력은 두 공의 동시 발파의 경우에 단일공 발파의 경우보다 약 1.28배 증가하였다. PFC2D에서 개발된 발파에 의한 파괴 메커니즘의 모델링 알고리즘은 해석 모델의 물성, 사용 폭약의 특성 그리고 동시에 폭발하는 발파공의 수에 따른 최대응력, 최대응력 도달시간 그리고 응력파의 중첩 효과에의 영향을 실제 발파시험과 유사하게 재현할 수 있었다.

## 참고문헌

- Singh, S.P., 1993, Prediction and determination of explosive induced damage, Proceeding of the 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast-4), pp. 183~192.
- 최병희, 2005, PFC 폭원모델링과 콘크리트 기둥 발파에의 적용 연구, 공학박사학위논문, 전남대학교 대학원.
- 정용훈, 이정인, 2006, 단일공 발파에서 생성된 균열망에 작용하는 가스압의 수치해석적 산정, 터널과 지하공간, 제16권 제5호, pp. 413~421.
- Atlas Powder Company, 1987, Explosives and Rock Blasting, 662 p.
- Hazzard, J., 2004, Dynamic Numerical Modelling Seismicity and Velocity Interferometry, 75 p.
- Il'yushin, A.A., 1971, The mechanics of a continuous medium, Izd-vo MGU, Moscow (In Russian). (Translated in Hustrulid, W., 1999, Blasting principles for open pit blasting, Vol. II, Rotterdam: Balkema, pp. 964~1009).
- Vovk, A.A., Milkhalyuk, A.V., Belinski, I.V., 1973, Development of fracture zones in rocks during camouflet blasting, Soviet Mining Science, Vol. 9 (4), pp. 383~387.
- Szuladzinski, G., 1993, Response of rock medium to explosive borehole pressure, Proceedings of the 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast-4), pp. 17~23.
- Djordjevic, N., 1999, Two-component of blast fragmentation, Proceedings of the 6th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast-5), pp. 213~219.
- Kanchibotla, S.S., Valery, W., Morrell, S., 1999, Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding, Proceedings of Explo'99 - A conference on Rock Breaking, pp. 137~134.

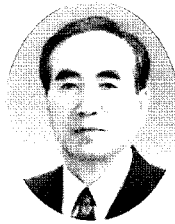
11. Esen, S., Onederra, I., Bilgin, H.A., 2003, Modelling the size of the crushed zone around a blasthole, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 40, No. 4, pp. 485~495.
12. 권지웅, 2001, 발파로 인한 암반의 손상도 파악을 위한 실험적 접근, 석사학위논문, 고려대학교 대학원.
13. 정용훈, 이정인, 2006, PFC2D 활용을 위한 정량적 미시 변수 결정법, 터널과 지하공간, 제16권 제4호, pp. 334~346.

**정용훈**



1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
2001년 서울대학교 대학원 지구환경시스템  
공학부 공학석사  
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템  
공학부 공학박사  
Tel: 02-880-7234  
E-mail: wizard@rockeng.snu.ac.kr  
현재 BK21 서울대학교 에너지자원 인력양성  
사업단 박사후연구원

**이정인**



1963년 서울대학교 공과대학 광산학과,  
공학사  
1965년 서울대학교 대학원 광산학과, 공학  
석사  
1974년 일본 도호쿠대학(東北大學)  
대학원 자원공학과, 공학박사  
Tel: 02-880-7221  
E-mail: cilee@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스  
템공학부 교수

**전석원**



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학  
석사  
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사  
Tel: 02-880-8807  
E-mail: sjeon@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부  
부교수