

## 단일공 발파에서 생성된 균열망에 작용하는 가스압의 수치해석적 산정

정용훈<sup>1)\*</sup>, 이정인<sup>2)</sup>

### Numerical Simulation of Gas Flow within a Radial Fracture Created by Single-Hole Blasting

Yong-Hun Jong and Chung-In Lee

**Abstract** In order to explain entirely dynamic fracture process induced by blasting in rock mass, it needs to consider detonation pressure and gas pressure acting on blasthole wall simultaneously. In this study, prior to simulating the coupling between gas flow and rock mass, we analyzed effects of gas pressure-time history, length of cracks and equation of state adopted to calculate the gas pressure on the gas flow within a radial fracture created by single-hole blasting. The effects were investigated on two assumptions: (a) the radial fracture was composed of 5 cracks which were 0.01 m in length and 0.001 m in asperity each and (b) the PETN explosive which diameter was 36 mm was charged in a blasthole of 45 mm diameter. It was concluded that the maximum gas pressure and its travel time were dependent on characteristics of charged explosives and geometrical properties of radial fracture.

**Key words** Gas pressure, Gas flow, Radial fracture, Single-hole blasting, Numerical simulation

**초 록** 발파에 의한 암반의 동적 파괴 과정을 설명하기 위해서는 발생한 폭굉압과 가스압의 작용을 동시에 연구해야 한다. 발파 과정에서 폭굉압과 가스압의 발파공 벽면에서의 작용을 동시에 모델화하여 이에 따른 암반과의 상호 작용을 수치해석하는 연구에 앞서, 본 연구에서는 단일 발파공에서 생성된 단일 균열망에서의 가스 유동에 미치는 가스압 이력, 균열 길이 그리고 가스압을 산정하기 위해 적용한 상태 방정식의 영향에 대해 분석하였다. 이를 위하여 단일공 발파에 의해 길이 0.01 m, 간극 0.001 m으로 동일한 5개의 균열로 구성된 단일 균열망이 생성되었다고 가정하였다. 또한 지름이 45 mm인 발파공에 지름이 36 mm인 PETN을 장약하였다고 가정하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과, 균열망을 구성하는 개별 균열에 작용하는 최대 가스압력과 그 도달시간은 사용 폭약의 특성과 균열망의 기하학적 특성에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

**핵심어** 가스압, 가스유동, 균열망, 단일공 발파, 수치모사

## 1. 서 론

발파에 의한 파괴 메커니즘을 설명하기 위한 이론을 살펴보면, 폭약의 폭굉에서 발생하는 충격파와 가스팽창의 영향에 의해 암반의 파쇄와 손상이 야기됨을 알 수 있다. 응력파의 작용에 의해 발파공 주위에 균열이 발생하고, 가스압의 작용에 의해 생성된 균열이 확대 또는 확장될 수 있다. 그러나 발파에 의한 손상이나 파쇄에 관한 기존의 연구들은 대부분 충격파와 가스팽창

의 영향을 독립적으로 모델화하여 수행하였거나, 가스 팽창의 영향이 충격파의 영향에 비하여 작은 것으로 나타났지만<sup>1,2)</sup>, 발파에 의한 파괴 메커니즘을 완전히 이해하기 위해서는 두 메커니즘을 같이 연구해야 한다.

많은 연구자들<sup>3,4)</sup>은 암반에서의 발파 메커니즘을 수치적으로 모사함에 있어서 가스압과 암반의 상호작용에 초점을 둔 연구들을 수행하였다. 특히 Cho *et al.*<sup>9)</sup>는 기존의 연구들<sup>3,4)</sup>에 기초하여 응력파와 가스압에 의한 암석의 동적 파쇄 특성에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 기존의 연구들은 폭약에 의한 암반의 파쇄 작용을 모사하는 대신 수치 계산의 초기에 암반을 파쇄된 상태인 것으로 가정하였거나<sup>6)</sup>, 균열이 존재하는 암반 내 가스의 유동을 모델화하지 않았거나<sup>7)</sup>, 발파공 주위의 단순화된 반경방향 균열망에서의 가스 유동과 이에 의한

<sup>1)</sup> 서울대학교 에너지자원신기술연구소 박사후연구원

<sup>2)</sup> 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

\* 교신저자 : wizard@rockblast.net

접수일 : 2006년 9월 21일

심사 완료일 : 2006년 10월 24일

압반에의 영향만을 연구하였다<sup>9)</sup>.

발파 과정에서 발생한 폭굉압과 가스압의 발파공 벽면에서의 작용을 동시에 모델화하여 이에 따른 압반과의 상호 작용을 수치해석하는 연구에 앞서, 본 연구에서는 단일 발파공에서 생성된 단일 균열망에서의 가스 유동을 산정하였다. 일반적으로 폭약의 화학 반응에 의해 생성되는 가스가 발파공 벽면에 작용하는 압력은 시간에 따라 변하게 된다. 따라서 본 연구에서는 발파공 벽면에 작용하는 가스압의 이력에 의해 반경방향 균열망에 발생하는 압력의 변화를 살펴보았다. 또한 균열망을 구성하는 각 균열의 길이와 가스압의 산정 방법이 가스 유동에 미치는 영향도 분석하였다.

## 2. 가스압의 산정 방법

### 2.1 JWL-EOS에 기초한 가스압의 산정

Jones-Wilkins-Lee 상태방정식(JWL-EOS)은 폭굉 물질과 관련된 압력-부피 관계를 모사하기 위해 사용되는 경험적 수식이다. 이 상태방정식은 정상 압력·기체밀도 조건에서의 화학 반응 직후의 고압·고밀도 조건에서 팽창하는 폭굉 물질의 상태를 계산하는데 널리 사용된다<sup>10)</sup>. 특히 등엔트로피 조건의 JWL-EOS는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P_{gas} = A \exp\left(-\frac{R_1}{V}\right) + B \exp\left(-\frac{R_2}{V}\right) + C V^{-(\omega+1)} \quad (1)$$

위 식은 상대 비용(relative specific volume)  $V = v/v_0$ 에 대한 압력  $P$ 를 표현한 것이다. 비용  $v_0$ 은 폭약의 초기 밀도에 대한 역수이고, 비용  $v$ 는 독립변수이다. 또한  $A, B, C$ 는 압력 계수,  $R_1, R_2$ 는 고유치 그리고  $\omega$ 는 상수이다.

따라서 발파공에 장약된 폭약이 폭발했을 때, 화학 반응 직후 발파공 벽면에 작용하는 최대 가스압은 식 (1)의 상대 비용  $V$ 에 디커플링 지수( $D.I.$ )와의 관계식 (2)로 계산된 값을 대입함으로써 산정될 수 있다.

$$V = \frac{v}{v_0} = (D.I.)^2 \quad (2)$$

### 2.2 AN-EOS에 기초한 가스압의 산정

Abel-Nobel 상태방정식(AN-EOS)으로부터 폭약이 발파공 내에서 폭발했을 때, 발파공 내에서 작용하는 가스팽창압력  $P_{gas}(\text{kgf/cm}^2)$ 는 식 (3)과 같이 계산할 수 있다<sup>11)</sup>.

$$P_{gas} = \frac{f \cdot L}{V - \alpha L} = \frac{f}{(D.I.)^2 / \rho_e - \alpha} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1.5}{1.26 + 1.33\rho_e} \quad (4)$$

여기서  $f, L, \alpha, V, D.I., \rho_e$ 는 각각 폭약의 비에너지 ( $\text{l} \cdot \text{kgf/cm}^2/\text{kg}$ ), 장약량(kg), 코볼륨(covolume), 발파공 부피( $l$ ), 디커플링 지수, 그리고 폭약의 밀도( $\text{g/cm}^3$ )이다. 장약된 폭약의 질량을 고려한 발파공의 밀도를  $\rho_B$ 라 하면, 식 (3)에서  $(D.I.)^2 / \rho_e = 1 / \rho_B$ 이 된다. 따라서 AN-EOS에 기초한 가스팽창압력은 식 (5)에 의해 산정할 수 있다.

$$P_{gas} = \frac{f}{1/\rho_B - \alpha} \quad (5)$$

### 2.3 상태방정식에 따른 가스압의 비교

식 (1)과 (3)를 이용하여, 발파공에 장약된 디커플링 지수에 따른 압력의 변화를 살펴보면 Fig. 1과 같다. 이때 폭약은 PETN으로 가정하였으며, 이 폭약에 대한 JWL-EOS의 상수를 Table 1에 제시하였다. 또한 PETN의 폭발열은  $6.12 \text{ kJ/g}$ 이므로 발생한 폭발열 전부가 에너지로 변환된다고 가정하면 비에너지  $f = 62406.63 \text{ l} \cdot \text{kgf/cm}^2/\text{kg}$ 이다.

Fig. 1에 의하면 밀장약된 경우, 즉 디커플링 지수가 1.0인 경우, AN-EOS에 기초한 방법이 JWL-EOS에 기초한 방법에 비하여 약 3배 더 큰 가스압으로 산정되었다. 일반적으로 폭약에서 발생한 가스압을 계산하기 위해 사용할 수 있는 JWL-EOS에 기초한 방법과 AN-EOS에 기초한 방법 중에서 JWL-EOS에 기초한 방법이 더 널리 사용되고 있다<sup>10)</sup>. 그러나 JWL-EOS를 이용하여 가스압을 계산하기 위해서는 사용 폭약에 대한 Table 1에 제시된 관련 상수값을 알아야 한다.

## 3. 발생 균열망에 작용하는 가스압

### 3.1 가스 유동의 수치해석

발파 과정에서 생성한 폭굉압과 가스압이 발파공 벽면에 작용함에 따라 압반에는 응력파가 생성된다. 이 응력파에 의해 반경방향 균열망이 생성하고 생성된 가스는 이를 관통하여 유동하게 된다. 발생한 반경방향 균열망에 작용하는 가스압을 계산하기 위하여, 본 연구에서는 Cho *et al.*<sup>9)</sup>이 사용한 알고리즘을 적용하였다. 그들은 균열망을 통한 가스 유동을 계산하기 위하여 유한차분법을 적용하였다. 발생한 가스는 생성된 균열망

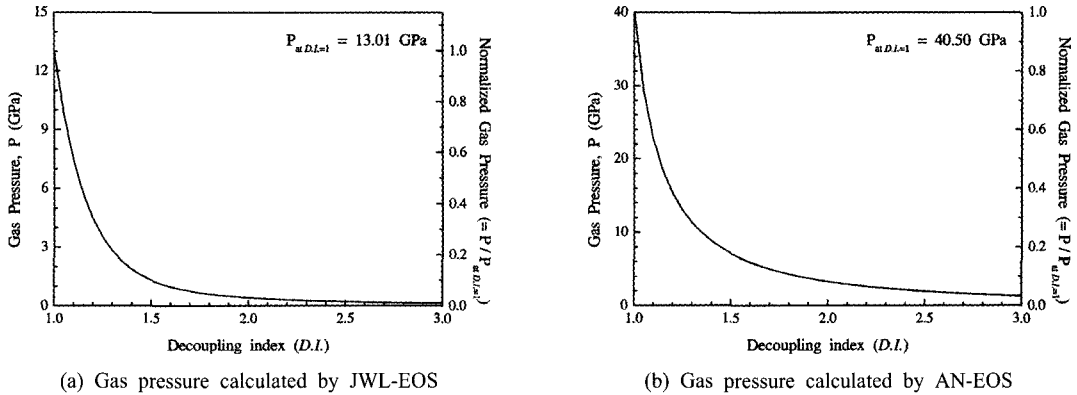


Fig. 1. Gas pressure according to the decoupling index (D.I.) for PETN explosive

Table 1. JWL-EOS's parameters for PETN explosive (after Cho et al.<sup>12)</sup>)

Parameter	$\rho_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	A (GPa)	B (GPa)	C (GPa)	R <sub>1</sub> -	R <sub>2</sub> -	$\omega$ -
Value	1.763	1032.16	90.57	3.73	6.0	2.6	0.57

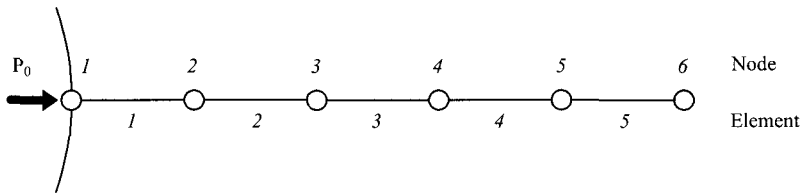


Fig. 2. Example for gas flow calculation in a single crack-chain

만을 따라 유동하고, 균열을 통한 가스의 일차원 유동은 질량 보존법칙과 운동량 보존법칙을 따른다고 가정하였다.

발생 균열망에 작용하는 가스압의 산정 알고리즘을 이용하여 5개의 균열이 이어진 하나의 균열망(Fig. 2)에 작용하는 가스압의 이력을 계산하였다. 이 때 각 균열의 길이는 0.01 m, 간극은 0.001 m으로 동일하다고 가정하였다. 충류의 계산에 사용되는 점성계수로는  $2 \times 10^{-5}$  Pa·s를 적용하였다<sup>3,9)</sup>. 또한 지름이 45 mm인 발파공에 지름이 36 mm인 PETN을 장약하였다고 가정하였다.

### 3.2 가스압 이력의 영향

#### 3.2.1 정압조건

발파공 내에 작용하는 가스압이 일정하게 유지되는 정압 조건 하에서 JWL-EOS에 의해 산정된 가스압( $P_0$ )

은 3.50 GPa이다. 단일 균열망을 구성하는 격자점에서의 시간에 따른 가스 속도의 변화는 Fig. 3과 같이 계산되었다. 충류 조건과 난류 조건 모두 첫 번째 격자점을 제외하고는 시간에 따라 가스 속도가 증가하다가 최고점 이후 감소하는 경향을 보이나, 충류 조건의 가스 속도는 난류 조건의 가스 속도에 비하여 매우 컸다. 또한 Fig. 4는 단일 균열망을 구성하는 5개의 균열에 작용하는 가스압 이력으로, 발파공에서 인접한 균열부터 가스압이 작용하는 것을 확인할 수 있었다. 충류 조건의 경우 5번째 균열에 작용하는 가스압이 최대치에 도달하는데 걸리는 시간은 약 270 ps인 반면에, 난류 조건의 경우 64  $\mu$ s이었다.

충류 조건과 난류 조건에서의 가스 속도 이력과 가스압 이력을 종합하여 고려하면, 난류 조건이 충류 조건보다 가스 유동 해석에 더 현실적으로 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

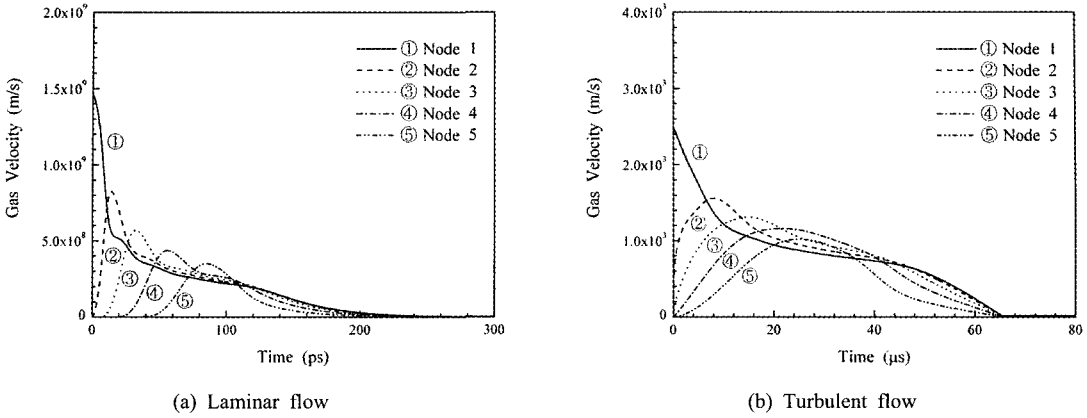


Fig. 3. Gas velocity-time histories in a single crack under constant  $P_0$

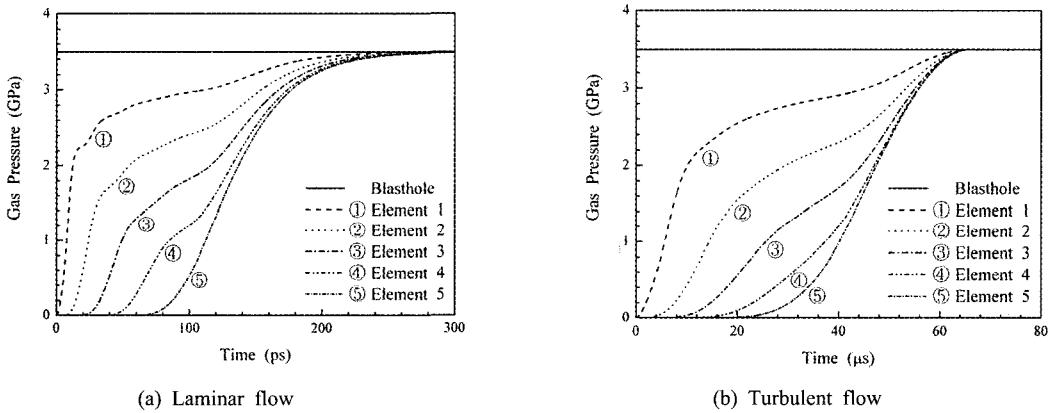


Fig. 4. Gas pressure-time histories in a single crack under constant  $P_0$

3.2.2 변압조건

앞 절은 발파공에서 작용하는 가스압이 일정하다는 정압 조건 하에서의 단일 균열망을 구성하는 균열에 작용하는 가스압을 산정하였다. 그러나 발파공에서의 가스압은 시간에 따라 변하게 된다. 즉 발파공에서의 가스압이 변압 조건인 경우를 고려해야 하며, 본 연구에서는 식 (6)의 시간에 따른 감쇠함수를 적용하였다<sup>13)</sup>.

$$F_{decay} = \frac{t}{t_r} \exp\left(1 - \frac{t}{t_r}\right) \quad (6)$$

여기서  $t$ 는 폭약의 폭굉 이후 시간이고  $t_r$ 은 가스압의 최대압력 도달시간이다. 가스압의 최대압력 도달시간은 식 (7)로부터 계산될 수 있다<sup>13)</sup>.

$$t_r = \frac{1}{D_e} \frac{\gamma + 1}{\gamma} r_b + \frac{l_e - l_x}{D_e} \quad (7)$$

여기서  $D_e$ 는 폭약의 폭굉속도,  $\gamma$ 는 비열비,  $r_b$ 는 발파공 반지름이고,  $l_e$ 와  $l_x$ 는 발파공과 폭약의 길이와 관련된 변수이다.

따라서 발파공의 장약장이 1.0 m이고, 발파공 바닥에서 0.5 m만큼 떨어진 위치에서의 해석을 가정한다면 이 지점에 작용하는 가스압의 최대압력 도달시간( $t_r$ )은 약 82  $\mu$ s이다.

가스 유동 해석에서는 난류 조건이 층류 조건에서보다 더 현실적이므로, 변압 조건에서는 난류 조건에 대해서만 해석을 수행하였다. Fig. 5는 난류 조건에서의 (a) 단일 균열망을 구성하는 격자점에서의 가스 속도 이

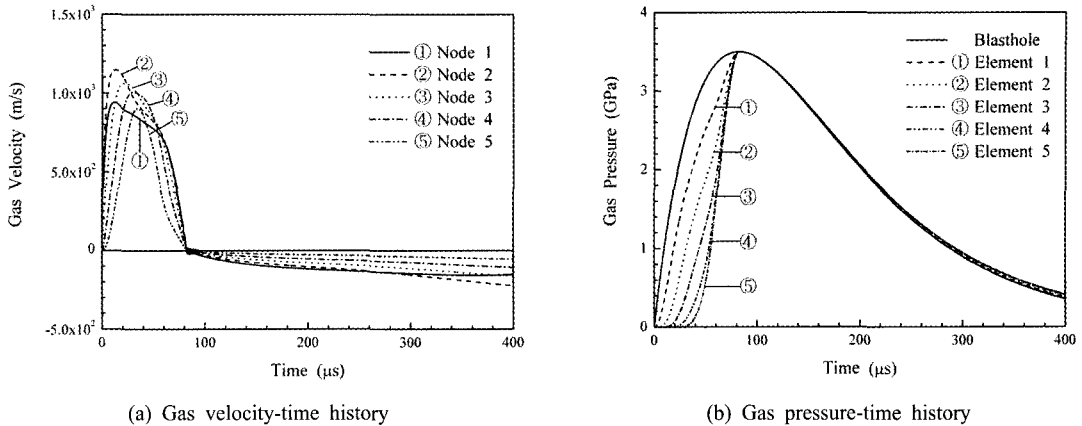


Fig. 5. Gas velocity-time history and gas pressure-time history in a single crack under varying  $P_0$  (Turbulent flow)

력과 (b) 단일 균열망을 구성하는 균열에 작용하는 가스압 이력을 도시한 것이다.

가스 속도 이력(Fig. 5(a))은 1번 격자점에서의 가스 속도가 폭굉 직후 급격히 증가하다가 점점 감소하는 경향을 보인다는 점과 이 차이에 의해 모든 격자점에서의 가스 속도가 0이 되는 시간이 약 18  $\mu$ s 지연된다는 점을 제외하고는 정압 조건에서의 가스 속도 이력(Fig. 3(b))과 유사하였다. 그러나 폭굉 후 시간  $t_r$  이후에는 발파공 내에 작용하는 가스압이 감소함에 따라 가스 속도가 음의 방향으로 바뀌었다. 이는 가스 흐름의 방향이 발파공을 향하고 있음을 의미한다.

단일 균열망을 구성하는 균열에 작용하는 가스압 이력(Fig. 5(b))도 마찬가지로 최대압력 도달시간까지는 정압 조건의 가스압 이력과 일치하였다. 그러나 균열에 작용하는 가스압이 최대치에 도달하여 평형 상태가 된 이후에는 발파공 내에 작용하는 가스압과 거의 동일하게 변함을 확인할 수 있었다.

### 3.3 균열 길이의 영향

균열에 작용하는 가스압에 영향을 미치는 변수는 크게 발파와 관련된 변수와 균열의 기하학적 특성과 관련된 변수로 구분할 수 있다.

발파와 관련된 변수는 최대압력 도달시간으로 이는 발파공의 지름, 발파공의 길이, 폭약의 지름 그리고 폭약의 폭굉속도에 의해 결정된다. 이러한 변수는 PFC2D를 이용한 수치해석 과정에서 결정된 입력변수로 설정할 수 있다. 반면에 균열의 기하학적 특성과 관련된 변수는 균열의 길이와 간극이다. 이 변수들은 개별 균열에 작용하는 가스압을 산정하는 데 상당한 영향을 미치

는 변수이며, 특히 개별 균열의 길이는 수치모델을 생성하는 과정에서 사용되는 입자의 반지름에 의해 결정된다.

균열의 길이에 따른 균열에 작용하는 가스압의 변화를 살펴보았다. Fig. 4와 Fig. 5(b)는 균열의 길이가 0.01 m인 5개의 균열로 구성된 단일 균열망에서 각각 정압 조건과 변압 조건에서의 가스압 이력을 나타낸 것이다. 이와 동일한 조건에서의 균열의 길이만 0.015 m와 0.020 m로 변경한 경우의 가스압 이력을 산정하면 Fig. 6(정압 조건)과 Fig. 7(변압 조건)과 같다.

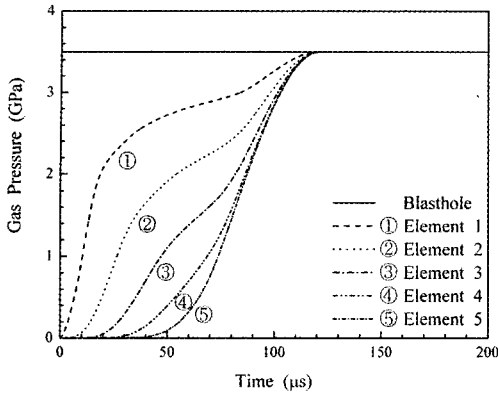
정압 조건에서는 균열의 길이가 증가함에 따라 균열에 작용하는 가스압이 최대치에 도달하는 시간이 증가하는 경향만을 보였다.

반면에 변압 조건에서는 균열의 길이가 증가할수록 균열에 작용하는 가스압의 평형 상태에 도달하는 시간이 길어지고, 이에 따라 균열에 작용하는 가스압의 최대치도 발파공 내에 작용하는 가스압의 최대치보다 작은 값을 나타냈다. 특히 균열의 길이가 0.020 m인 경우(Fig. 7(b)), 첫 번째 균열의 경우 평형 상태에 도달하는 시간이 아닌 그 전에 균열에 작용하는 압력이 최대치를 보였다. 이는 가스압의 평형 상태에 도달하는 시간이 발파공 내에 작용하는 가스압의 최대치에 도달하는 시간보다 길어짐에 의한 영향으로 판단된다.

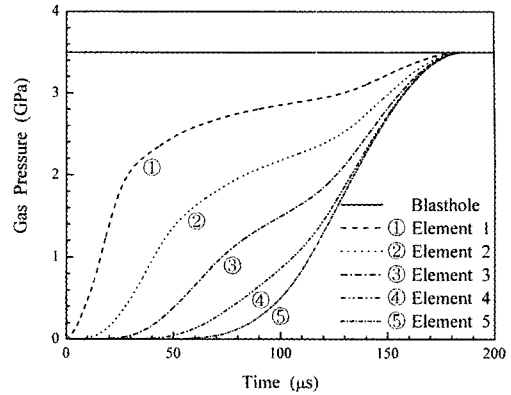
즉 변압 조건에서 균열에 작용하는 최대 가스압과 최대압력 도달시간은 발파공 벽면에 작용하는 압력 이력과 균열의 기하학적 특성 등에 의해 좌우됨을 확인하였다.

### 3.4 상태방정식의 영향

발파공 내에 작용하는 가스압이 일정하게 유지되는

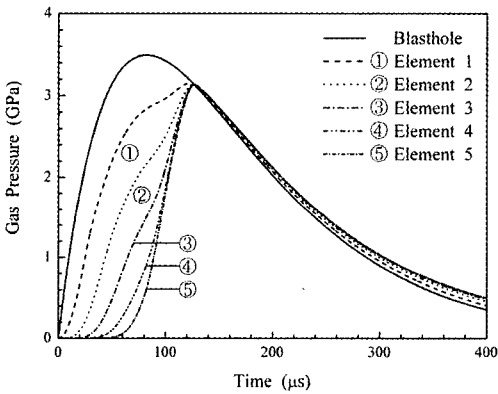


(a) Length of cracks = 0.015 m

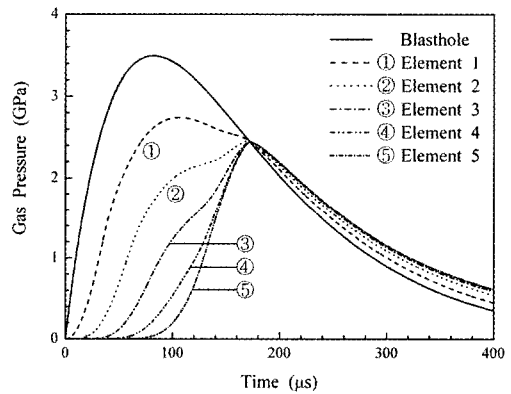


(b) Length of cracks = 0.020 m

Fig. 6. Gas pressure-time history in a single crack under constant  $P_0$  (Turbulent flow)



(a) Length of cracks = 0.015 m



(b) Length of cracks = 0.020 m

Fig. 7. Gas pressure-time history in a single crack under varying  $P_0$  (Turbulent flow)

정압 조건 가정 하에서 JWL-EOS에 의해 산정된 가스압( $P_0$ )은 3.50 GPa이다. 그러나 발생한 폭발열 전부가 에너지로 변환된다는 가정 하에서 AN-EOS에 의해 산정된 가스압( $P_0$ )은 약 3.72배 큰 13.02 GPa이다(Fig. 1).

정압 조건 하에서 AN-EOS에 기초하여 가스팽창압력을 산정한 결과(Fig. 8(a))를 JWL-EOS에 기초하여 산정한 결과(Fig. 4(b))와 비교하면, 약 3.72배 증가한 가스압( $P_0$ )의 영향에 의해 가스의 유동 속도는 더 빨라지고, 이로 인해 각 균열에 작용하는 가스압의 최대값 도달시간이 짧아지는 현상을 보였다. 이 현상은 변압 조건(Fig. 9(b))에서도 동일하게 나타났다.

즉, PETN에 대하여 JWL-EOS 대신 AN-EOS에 기초하여 가스팽창압력을 산정하면 발파공에서의 최대

가스압( $P_0$ )이 증가하게 되며, 이 영향으로 각 균열에 작용하는 가스압의 최대값 도달시간이 빨라지거나(정압 조건) 평형 상태 도달시간이 빨라지게 된다(변압 조건).

동일한 최대 가스압( $P_0$ ) 상태에서의 JWL-EOS와 AN-EOS에 기초한 가스압 산정식에 의한 각 균열에 작용하는 가스압의 차이를 살펴보기 위하여, AN-EOS에 의해 산정된 가스압을 JWL-EOS에 의해 산정된 가스압과 동일하게 3.50 GPa로 설정하였다. 즉 PETN에서 발생한 폭발열 중 약 27%만이 발파공 벽면에 작용하는 에너지로 변환된 경우의 단일 균열망에 작용하는 가스압을 산정하였다.

각 균열에 작용하는 가스압은 정압 조건과 변압 조건 각각에 대하여 Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)에 제시하였으며,

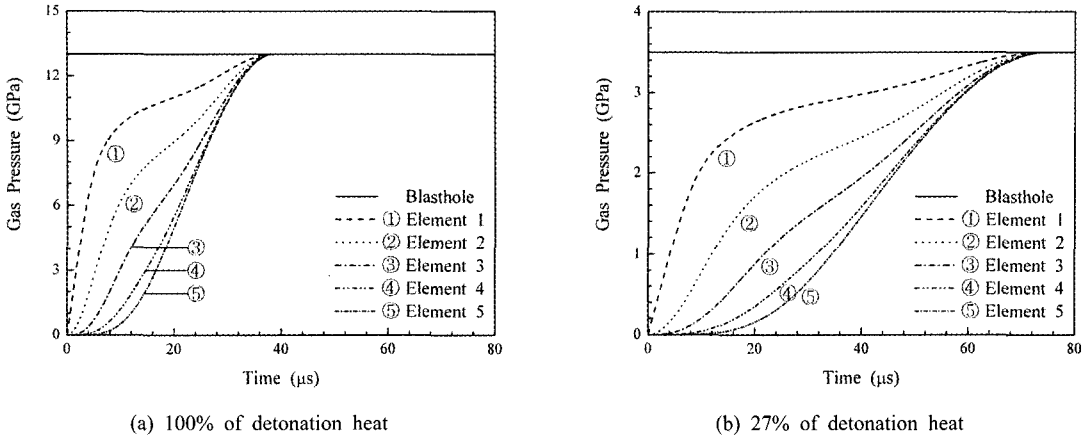


Fig. 8. Gas pressure-time histories in a single crack under constant  $P_0$  (Turbulent flow / AN-EOS)

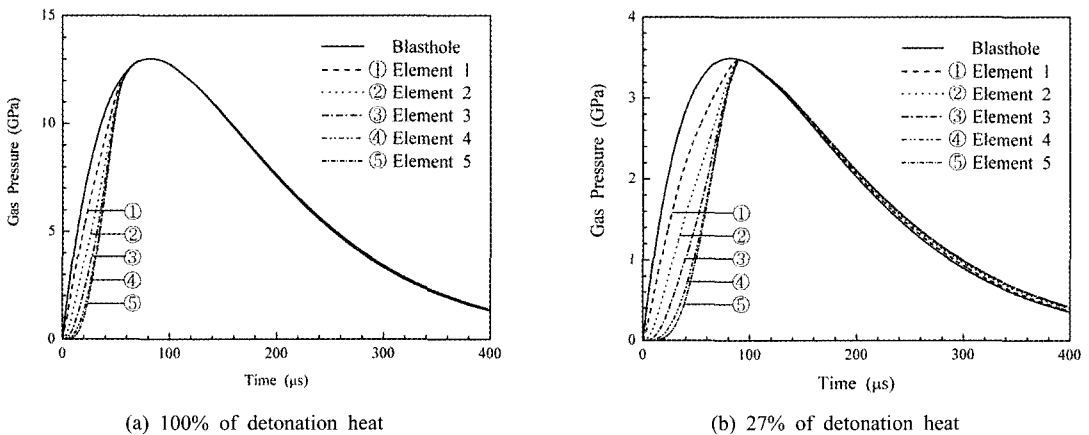


Fig. 9. Gas pressure-time histories in a single crack under varying  $P_0$  (Turbulent flow / AN-EOS)

이들을 앞에 제시한 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)와 비교하였다. 각 균열에 작용하는 가스압 이력은 상태방정식의 종류에 상관없이 매우 유사한 경향을 보였다. 그러나 정압 조건의 경우, 동일한 최대 가스압( $P_0$ )에 도달하는 시간은 JWL-EOS를 적용한 경우 약  $64 \mu\text{s}$ 이고 AN-EOS를 적용한 경우는 약  $72 \mu\text{s}$ 으로, AN-EOS를 적용한 경우에 약 12.5% 더 느려졌다. 또한 변압 조건의 경우, 균열에 작용하는 가스압이 평형 상태에 도달하는 시간은 JWL-EOS를 적용한 경우 약  $82 \mu\text{s}$ 이고 AN-EOS를 적용한 경우는 약  $91 \mu\text{s}$ 으로, AN-EOS를 적용한 경우에 약 11.1% 더 느려졌다.

즉, 최대 가스압이 동일한 경우 JWL-EOS와 AN-EOS에 기초한 가스압의 산정 방법 모두 최대 가스압에 도

달하는 시간(정압 조건)이나 평형 상태에 도달하는 시간(변압 조건)이 증가한다는 점을 제외하고 균열 내에 작용하는 가스압을 유사하게 산정하였다.

#### 4. 논 의

폭약의 화학 반응에 의해 생성된 폭발압과 가스압의 발파공 벽면에서의 작용을 동시에 모델화하여 이에 따른 암반과의 상호 작용을 수치해석하는 연구에 앞서, 단일 발파공에서 생성된 단일 균열망에서의 가스압과 가스 속도를 계산하였다. 그러나 실제 단일공 발파에서 하나의 균열망만이 생성되는 것은 아니다. 특히 단일 발파공 벽면에 동일한 최대 압력이 작용한 경우 반경방향

균열망의 수가 많을수록 보어홀 압력은 더 천천히 감소하고, 균열망의 길이는 더 작아지는 경향을 보인다<sup>3)</sup>.

또한 발파공 벽면에 작용하는 압력 이력은 발파 진행 중 발파공의 단면적이 일정하게 유지된다는 가정 하에 입력 변수로 적용되었다. 그러나 실제 발파에서의 발파공은 폭약의 폭굉 순간 이후 생성된 가스에 의해 확대된다. 이 때 발파공의 확대 정도는 폭약 특성과 암반 상태에 의해 좌우된다<sup>13)</sup>. 이러한 발파공 단면적의 변화는 발파공 벽면에 작용하는 압력의 감소와 최대압력 도달 시간의 감소를 야기할 수 있다<sup>13)</sup>. 이에 의해 반경방향 균열망을 유도하는 가스의 거동 또한 변함을 인식해야 한다.

## 5. 결 론

발파 과정에서 발생한 폭굉압과 가스압의 발파공 벽면에서의 작용을 동시에 모델화하여 이에 따른 암반과의 상호 작용을 수치해석하는 연구를 수행하기에 앞서, 본 연구에서는 단일 발파공에서 생성된 단일 균열망에서의 가스 유동에 미치는 가스압 이력, 균열 길이 그리고 가스압을 산정하기 위해 적용한 상태 방정식의 영향에 대해 분석하였다.

균열망에 작용하는 가스 유동의 해석에서는 난류 조건이 층류 조건에 비해 더 합리적이었다. 또한 균열망을 구성하는 개별 균열에 작용하는 최대 가스압력과 그 도달시간은 사용 폭약의 특성과 균열망의 기하학적 특성에 의해 결정됨을 확인하였다. 특히 발파공 벽면에 작용하는 최대 가스압력과 가스압 이력이 동일한 경우, 개별 균열에 작용하는 가스압의 최대압력 도달시간은 균열의 길이가 길어질수록 늦어지고 JWL-EOS를 적용한 경우보다 AN-EOS를 적용한 경우에 더 늦어짐을 확인하였다. 따라서 발파에 의한 동적 파괴 과정에 대한 수치해석적 연구에서는 발생 균열망의 간극과 길이 등과 같은 기하학적 특성과 가스압 산정 방법의 선정이 중요하다고 판단된다.

## 참고문헌

1. 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.
2. 최병희, 2005, PFC 폭원모델링과 콘크리트 기둥 발파에의 적용 연구, 공학박사학위논문, 전남대학교 대학원.
3. Nilson, R.H., Proffer, W.J., Duff, R.E., 1985, Modelling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 22, No. 1., pp. 3-19.
4. Nilson, R.H., 1988, Similarity solutions for wedge-shaped hydraulic fractures driven into a permeable medium by a constant inlet pressure, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 12, pp. 477-495.
5. Roberts, J.M., Swenson, D.V., Numerical model of gas-driven dynamic fractures with an application to borehole simulation, Computers in Engineering 1988, Vol. 3, pp. 1-6.
6. Preece, D.S., Thorne, B.J., Baer, M.R., Swegle, J.W., 1994, Computer simulation of rock blasting: a summary of work from 1987 through 1993, Report No. SAND92-1027, Sandia National Laboratories.
7. Munjiza, A., Owen, D.R.J., Bicanic, N., Owen, J.R., 1994, On a rational approach to rock blasting, Computer Methods & Advances in Geomechanics, pp. 857-862.
8. Munjiza, A., Latham, J.P., Andrews, K.R.F., 2000, Detonation gas model for combined finite-discrete element simulation of fracture and fragmentation, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 49, pp. 1495-1520.
9. Cho, S.H., Nakamura, Y., Kaneko, K., 2004, Dynamic fracture process analysis of rock subjected to stress wave and gas pressurization, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, No. 3 (CD-Rom).
10. Urtiew, P.A., Hayes, B., 1991, Parametric study of the dynamic JWL-EOS for detonation products, Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 27, No. 4, pp. 126-137.
11. 윤지선, 1992, 최신 발파기술, 구미서관, 216 p.
12. Cho, S.H., Risei, K., Kato, M., Nakamura, Y., Kaneko, K., 2002, Development of numerical simulation method for dynamic fracture propagation due to gas pressurization and stress wave, Proceedings of 2002 ISRM Regional Symposium (3rd Korea-Japan Joint Symposium) on Rock Engineering Problem and Approaches in Underground Construction, Seoul (Korea), pp. 755-762.
13. 정용훈, 2006, 발파에 의한 굴착순상영역의 수치해석적 산정, 서울대학교 공학박사학위논문, 255 p.





**정용훈**

1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사

2001년 서울대학교 대학원 지구환경시스  
템공학부 공학석사

2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스  
템공학부 공학박사

Tel: 02-880-7234

E-mail: wizard@rockblast.net

현재 서울대학교 에너지자원신기술연구  
소 박사후연구원



**이정인**

1963년 서울대학교 공과대학 광산학과,  
공학사

1965년 서울대학교 대학원 광산학과, 공  
학석사

1974년 일본 도호쿠대학(東北大學) 대  
학원 자원공학과, 공학박사

Tel: 02-880-7221

E-mail: cilee@snu.ac.kr

현재 서울대학교 공과대학 지구환경시  
스템공학부 교수