

준정적인 발파 가스압에 의한 암반의 손상 영역 예측

Damage zone induced by quasi-static gas pressure during blasting

심영중¹⁾, Youngjong Sim, 조계춘²⁾, Gye-Chun Cho, 김홍택³⁾, Hong-Taek Kim

¹⁾ 한국토지주택공사 토지주택연구원 책임연구원, Research Fellow, Land, Housing & Urban Research Institute, Korea Land & Housing Corporation

²⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KAIST

³⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

SYNOPSIS : It is essential to predict a blasting-induced excavation damage zone (EDZ) beyond the proposed excavation line of a tunnel because the unwanted damage area requires extra support system for tunnel safety. Complicated blasting process which may hinder a proper characterization of the damage zone can be effectively represented by two loading mechanisms. The one is a dynamic impulsive load generating stress waves outwards immediately after detonation. The other is a gas pressure that remains for a relatively long time. Since the gas pressure reopens up the arrested cracks and continues to extend some cracks, it contributes to the final formation of EDZ induced by blasting. This paper presents the simple method to evaluate EDZ induced by gas pressure during blasting in rock. The EDZ is characterized by analyzing crack propagation from the blasthole. To do this, a model of the blasthole with a number of radial cracks of equal length in an infinite elastic plane is considered. In this model, the crack propagation is simulated by using three conditions, the crack propagation criterion, the mass conservation of the gas, and the adiabatic condition. As a result, the stress intensity factor of the crack generally decreases as crack propagates from the blasthole so that the length of the crack is determined. In addition, the effect of rock properties, initial number of cracks, and the adiabatic exponent are investigated.

Keywords : Blasting, Crack Propagation, Excavation Damage Zone (EDZ), Gas Pressure, Stress Intensity Factor

1. 서론

최근 고속철도 및 고속도로의 건설로 터널이나 암반사면의 굴착을 위한 발파가 많이 실시되고 있는 실정이다. 이러한 굴착을 위한 발파시, 특히 터널의 경우, 발파로 인한 암반의 손상영역을 적절히 예측하는 것은 터널의 안전성과 경제성을 위해 매우 중요하다. 특히, 필요이상의 암반이 손상을 가해졌을 경우 적절한 보강이 이루어져야 하며, 이에 따른 공비의 증가 등의 문제점이 발생하기 때문이다.

수치해석(이인모 등, 2000; 김태훈 등, 2003), 확률론적 연구(이인모 등, 2004), 그리고 직접 실험(장수호 등, 2000) 등을 통하여 발파로 인한 손상영역을 시도하는데 많은 연구가 국내에서도 시도되고 있다. 그러나 복잡한 발파거동은 손상영역을 적절히 예측하는데 상당한 어려움을 주고 있다. 이러한 어려움을 효과적으로 해결하기 위해 발파하중을 동적인 응력파와 준정적인 가스압으로 분리한 많은 연구가 진행되었다(예, Brinkman, 1987). 발파 후, 응력파는 발파공 주위에 그림 1과 같이 분쇄환(crushing annulus)과 파쇄균열대(fracture zone)를 형성시키며, 상당시간 지속되는 준정적인 가스는 파쇄균열대의 닫힌 균열내부에 침투하여 균열을 다시 진행시켜 이산균열대(Discrete Fragment Zone), 즉, 교란영역을 형성하는 역할을 하게 된다. 비록, 동적인 응력파가 파쇄균열대를 형성시키며 발파공 주위 암반에 가장 큰 손

상을 일으키지만, 가스압은 응력파에 의해 생성된 균열을 다시 진행시켜 발파공으로부터 가장 원거리까지 암반에 손상을 가하는데 기여를 하여 최종적인 암반의 손상영역을 형성한다고 볼 수 있다. 따라서 본 논문은 이러한 가스압에 의해 생성되는 균열의 최종 진행 길이를 예측함으로써 발파로 인한 최종 손상영역을 간단하게 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

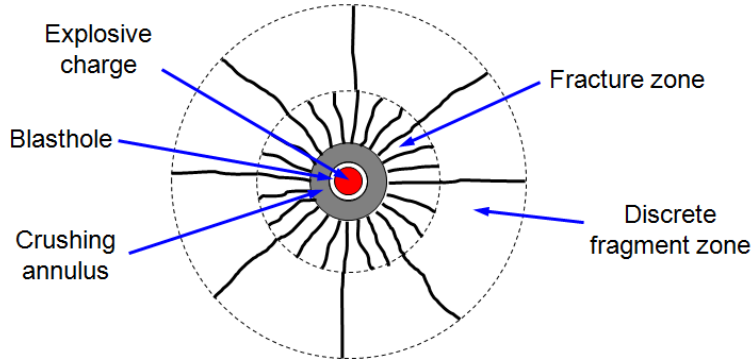


그림 1. 발파공 주위 암반의 손상 영역 구분 (Whittaker et al., 1992)

실제로 가스압에 의한 발파가 손상영역의 주요인으로 간주하고 많은 연구가 시행되었다(예, Nilson et al., 1985; Paine and Please, 1994 등). 그러나 이들의 연구는 많은 조건과 그 복잡성으로 인하여 실제 발파에 응용하는데 많은 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 암반의 손상영역을 비교적 간단하게 예측할 수 있는 방법을 이론적으로 제시하였다.

2. 가정사항 및 모델선정

균열이 최종적으로 진행할 수 있는 길이를 계산하기 위하여 그림 2와 같이 무한 탄성평면에 발파공과 그 주위에 대칭으로 형성되는 방사균열의 모델을 사용하였다. 균열은 가스압에 의해 동일한 길이로 진행하며, 발파공 벽면과는 수직을 이루고 있는 것으로 가정하였다. 생성되는 균열의 수는 Garnsworthy(1990)에 의해 실험적으로 3개에서 8개의 균열이 생성된다고 보고되었다. 본 논문에서는 균열이 네 개($N=4$)와 여덟 개($N=8$)인 경우에 대해 모델을 선정하고 분석을 실시하였다(그림 2).

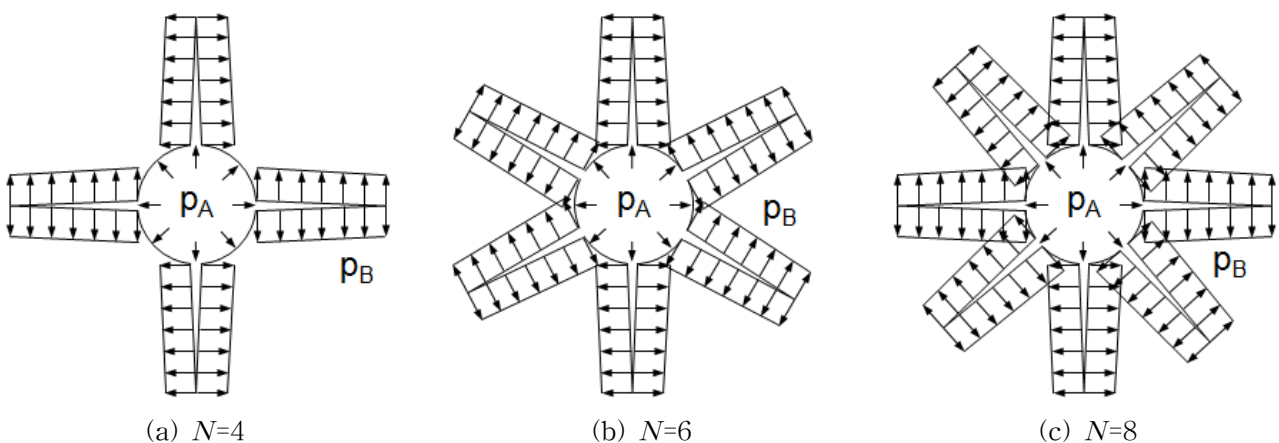


그림 2. 발파공과 발파공주위의 균열

그림 2에서 p_A 와 p_B 는 각각 발파공과 균열에 작용하는 가스압으로, 그 크기는 발파공벽과 균열내부벽에 일정하게 작용한다고 가정하였다. 또한, 발파에 의한 가스압의 크기가 주위의 암반에 존재하는 현장 응력보다 아주 크기 때문에 중력에 의한 영향은 무시하였다.

3. 정식화

가스압에 의해 균열이 진행된 길이를 해석적으로 계산하기 위해 세 가지 조건이 사용된다. 첫째 조건은 발파로 인해 생성된 가스의 총질량이 보존되어야 하는 조건이다($\Delta M=0$). 둘째 조건은 균열의 진행 조건이다. 즉, 가스압에 의해 균열이 진행하기 위해서는 균열의 응력확대계수, K_I 이 암반의 mode I 파괴인성(K_{Ic})보다 커야 한다($K_I \geq K_{Ic}$). 이 파괴인성은 암반 균열상수로써 실험으로부터 구할 수 있다. 마지막으로 본 발파과정은 단열과정(adiabatic process)이므로 단열기체 이상상태방정식이 사용되어야 한다. 이러한 세가지 조건을 사용하여 가스압에 의해 최종적으로 균열이 진행할 수 있는 길이를 계산함으로써 형성되는 암반의 손상영역을 예측하였다.

우선 첫째 조건인 발파시 생성되는 가스의 총 질량은 일정하게 유지되어야 하는 조건은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$M_{blasthole} + M_{crack} = M_i \quad (1)$$

여기서, $M_{blasthole}$ 과 M_{crack} 은 각각 발파공과 균열내에 존재하는 가스의 질량이며, 이는 최대 가스압이 발생하여 대부분의 가스가 생성된 초기의 가스질량인 M_i 와 동일해야 하며 각각 다음과 같은 식으로 표현가능하다.

$$M_{blasthole} = V_{blasthole}\rho_g \quad (2)$$

$$M_{crack} = V_{crack}\rho_g \quad (3)$$

$$M_i = V_i\rho_{gi} \quad (4)$$

여기서, $V_{blasthole}$ 와 V_{crack} 는 가스압에 의한 발파공과 균열의 체적이며, V_i 는 초기 발파공의 체적이다.

또한, 가스의 밀도, ρ_g 는 다음과 같이 단열과정의 기체상태방정식을 도입하여 초기 가스의 밀도인 ρ_{gi} 의 관계를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho_g = \left(\frac{p}{p_i}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \rho_{gi} \quad (5)$$

여기서, γ 는 단열지수(adiabatic exponent), 즉, 정압비열과 정적비열의 비를 나타내며, 그 값은 발파과정에서 1.2 - 3정도이다(Paine and Please, 1994; Persson et al., 1994).

발파공과 균열내부에 작용하는 가스압의 크기가 동일하다고 가정할 때, 즉,

$$p_A = p_B = p_0 \quad (6)$$

이면, 식 (2)-(5)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V_{blasthole} \left(\frac{p_0}{p_i}\right)^{\frac{1}{\gamma}} + V_{crack} \left(\frac{p_0}{p_i}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = V_i \quad (7)$$

식 (7)에 나타난 바와 같이 그림 2의 제시된 모델에서 임의의 압력에 따른 발파공과 균열의 체적을 계산해야 한다. 이를 위해, 그림 3과 같이 두 개의 보조 문제, 즉 Problem A와 Problem B로 분리하여 단순화하였다. Problem A는 발파공내에 가스압 p_0 만 작용하고 균열내부에는 가스압이 작용하지 않은

경우이며, Problem B는 발파공내에 가스압은 존재하지 않고 균열내부에 가스압 p_0 만 작용하는 경우이다. 즉, Problem A와 Problem B는 각각 한 개의 하중인 p_0 의 영향만을 받게 된다.

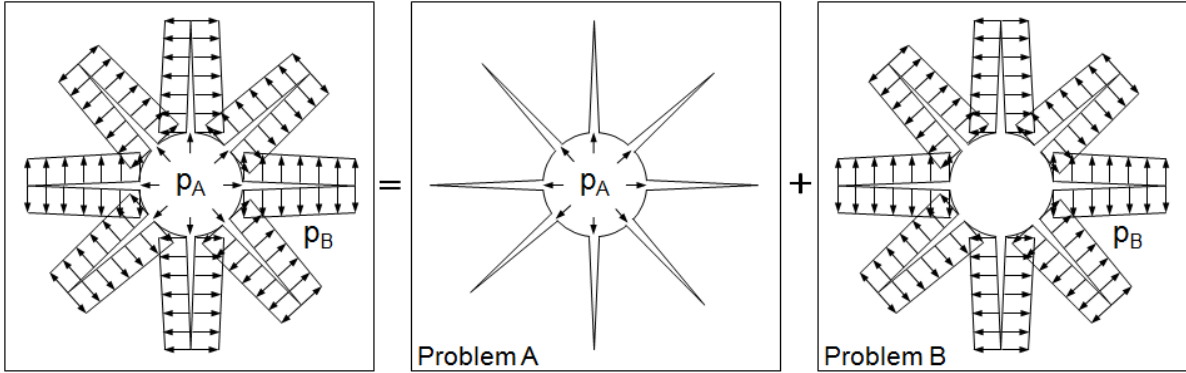


그림 3. 균열이 여덟개인 경우($N=8$) 두 개의 보조문제로의 분리

두 보조문제, 즉, Problem A와 Problem B에서 균열의 응력확대계수와 임의의 가스압에 의해 변형된 발파공과 균열의 체적을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_{IZ} = p_0 \sqrt{\pi r} k_{IZ} \left(\frac{l}{r} \right) \quad (8)$$

$$V_Z^{crack} = \frac{p_0 r^2}{E} f_z^{crack} \left(\nu, \frac{l}{r} \right) \quad (9)$$

$$V_Z^{blasthole} = \frac{p_0 r^2}{E} f_z^{hole} \left(\nu, \frac{l}{r} \right) \quad (10)$$

여기서, Z는 Problem A 또는 Problem B를, K_{IZ} 은 Problem Z에서 균열의 응력확대계수를, 그리고 V_Z^{crack} 와 $V_Z^{blasthole}$ 은 Problem Z에서 균열과 발파공의 체적을 각각 나타낸다. l 과 r 은 균열이 진행한 길이와 발파공의 반경을, E와 ν 는 암반의 탄성계수와 포아송비를 나타낸다. 또한, k_{IZ} , f_z^{crack} , 그리고 f_z^{hole} 은 무차원값으로 균열의 길이(l)의 함수이며 유한요소 프로그램인 FRANC2D(Wawrzynek and Ingraffea, 1987)를 사용하여 결정된다. 식 (8)–(10)의 세 개의 무차원 값이 Problem A와 Problem B에서 각각 정해지면 중첩의 원리를 적용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_I = \left(p_0 k_{IA} \left(\frac{l}{r} \right) + p_0 k_{IB} \left(\frac{l}{r} \right) \right) \sqrt{\pi r} \quad (11)$$

$$V_{crack} = \frac{p_0 c^2}{E} f_A^{crack} \left(\nu, \frac{l}{r} \right) + \frac{p_0 c^2}{E} f_B^{crack} \left(\nu, \frac{l}{r} \right) \quad (12)$$

$$V_{blasthole} = \frac{p_0 c^2}{E} f_A^{hole} \left(\nu, \frac{l}{r} \right) + \frac{p_0 c^2}{E} f_B^{hole} \left(\nu, \frac{l}{r} \right) \quad (13)$$

식의 표현을 단순화하기 위해서 다음과 같은 함수를 도입하면

$$f_Z = f_Z^{crack} \left(\nu, \frac{l}{r} \right) + f_Z^{hole} \left(\nu, \frac{l}{r} \right) \quad (14)$$

발파공과 균열의 총체적은 식 (12)-(14)를 사용하여 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$V = V_{crack} + V_{blasthole} = \frac{p_0 r^2}{E} f_A\left(\nu, \frac{l}{r}\right) + \frac{p_0 r^2}{E} f_B\left(\nu, \frac{l}{r}\right) \quad (15)$$

초기에 최고 가스압이 발생하면서 대부분의 가스가 발생될 때의 초기 발파공의 체적은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_i = \frac{p_i r^2}{E} f_A\left(\nu, \frac{l_i}{r}\right) \quad (16)$$

여기서, p_i 는 초기에 발생된 최대 가스압을 의미하며, l_i 는 응력파로 인해 발생된 초기 균열길이를 나타낸다. 따라서, 균열이 진행함에 따른 총체적변화량은 식 (15)와 식 (16)의 차이인 다음과 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta V = \frac{p_0 r^2}{E} f_A\left(\nu, \frac{l}{r}\right) + \frac{p_0 r^2}{E} f_B\left(\nu, \frac{l}{r}\right) - \frac{p_i r^2}{E} f_A\left(\nu, \frac{l_i}{r}\right) \quad (17)$$

한편, 발파공의 체적변화량($\Delta V_{blasthole}$)은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\Delta V_{blasthole} = V_{blasthole} - V_i \quad (18)$$

식 (18)를 식 (7)에 대입하여 정리하면 총체적변화량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta V_{blasthole} + V_{crack} = \Delta V = V_i \left(\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (19)$$

따라서, 식 (17)과 식 (19)로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$p_0 f_A(l) + p_0 f_B(l) - p_i f_A(l_i) = f_A(l_i) p_i \left(\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (20)$$

식 (20)으로부터 가스압 p_0 는 다음과 같이 정리된다.

$$p_0 = p_i \left(\frac{f_A(l_i)}{f_A(l) + f_B(l)} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \quad (21)$$

또한 균열이 가스압에 의해 계속 진행하려면 다음과 같은 조건을 또한 만족해야 한다.

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (22)$$

여기서, K_{Ic} 는 mode I 파괴인성이다. 또한, 식 (22)에 의해 식(11)은 다음과 같이 표현되며 최종 균열길이(l)을 구할 수 있다.

$$K_I = \left(p_0 k_{IA} \left(\frac{l}{r} \right) + p_0 k_{IB} \left(\frac{l}{r} \right) \right) \sqrt{\pi r} \geq K_{Ic} \quad (23)$$

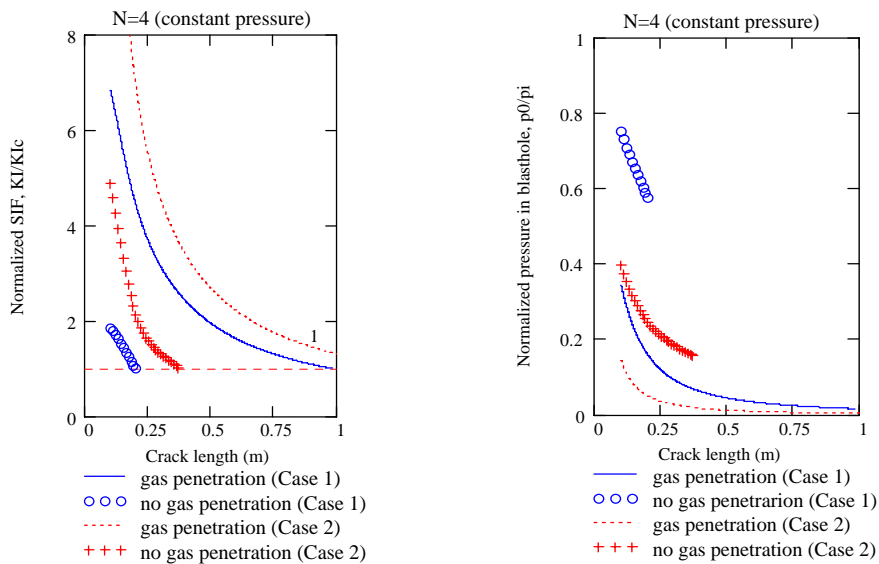
4. 비교 및 분석

표 1은 비교 및 분석을 위하여 사용된 두 암반의 탄성계수, 포아송비, 파괴인성(K_{Ic}) 값이다. 비교를 위하여 동일한 크기의 가스압인 100MPa를 사용하였다. 또한, 단열지수는 $\gamma=3$ 을, 초기 균열길이는 $l_i=0.1m$ 로 가정하였다. 여기에서 Case 1과 Case 2는 각각 경암과 풍화암의 경우에 해당한다.

표 1. 분석을 위해 사용된 두 암반의 물성치와 초기가스압

| 물성치 | E (Pa) | ν | K_{Ic} ($Pa \cdot m^{1/2}$) | p_i (MPa) |
|--------------|----------|-------|---------------------------------|-------------|
| Case 1 (경암) | 21E9 | 0.2 | 2.5E6 | 100 |
| Case 2 (풍화암) | 2.5E6 | 0.28 | 0.5E6 | 100 |

그림 4는 균열의 갯수가 네 개($N=4$)인 경우의 결과를 나타내고 있다. 그림 4a는 정규화된 응력확대계수(K_I/K_{Ic})를 나타내고 있는데 균열은 정규화된 응력확대계수가 1보다 클 때, 즉, $K_I/K_{Ic} \geq 1$ 일 때 계속 진행하게 된다. 그 결과, 풍화암인 경우(Case 2) 발파공으로부터 1.3m까지 진행하여 경암의 경우인 1.0m보다 더 진행하여 최종손상영역이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 가스압이 균열내부에 진입하지 못할 경우(no gas penetration) 예상한 바와 같이 균열이 진행한 경우보다 훨씬 균열이 진행하지 못한 것을 알 수 있다. 그림 4b는 발파공과 균열내부의 가스압의 변화를 나타내는 그림으로 균열이 진행할수록 발파공내의 가스압은 계속 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.



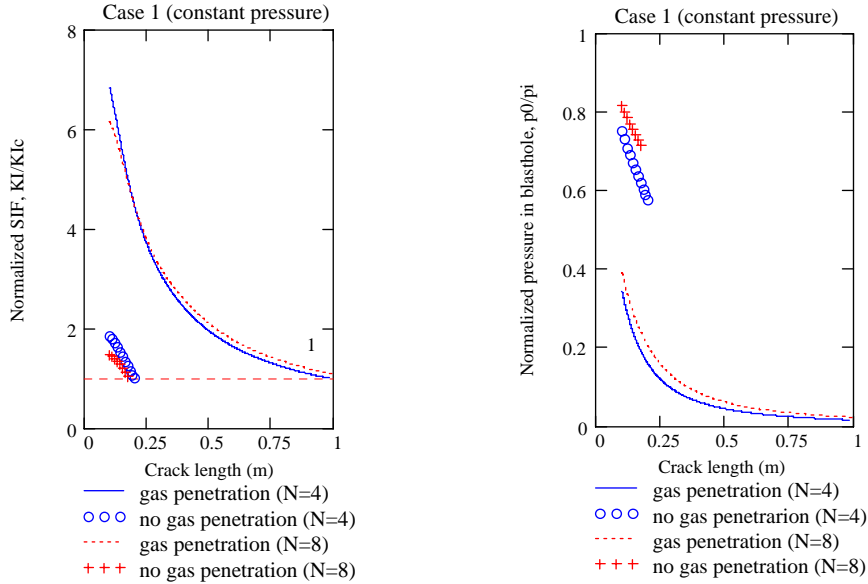
(a) 응력확대계수

(b) 발파공내 가스압의 변화

그림 4. 경암과 풍화암인 경우의 결과 비교($N=4, \gamma=3$)

그림 5는 $N=4$ 인 경우와 $N=5$ 인 경우를 비교한 결과이다. 모든 경우에 있어 $N=8$ 인 경우에도 균열은

비슷하게 진행함을 알 수 있다. 이는 $N=8$ 인 경우 균열간의 기계적 상호작용, 즉, 균열간 균열폭이 더욱 넓게 벌어지는 현상을 서로 억제하여 가스압이 각 균열내부에 $N=4$ 인 경우보다 덜 침투되었기 때문인 것으로 분석된다. 표 2는 $N=4$ 인 경우와 $N=8$ 인 경우 균열이 진행된 길이는 모두 나타낸 결과이다.



(a) 응력확대계수

(b) 발파공내 가스압의 변화

그림 5. $N=4$ 인 경우와 $N=8$ 인 경우의 결과 비교(Case1, $\gamma=3$)

표 2. 분석결과

| Number of cracks | $N=4$ | | $N=8$ | |
|------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | Case 1 (경암) | Case 2 (풍화암) | Case 1 (경암) | Case 2 (풍화암) |
| Property | | | | |
| Gas penetration (m) | 1.0 | 1.3 | 1.0 | 1.2 |
| No gas penetration (m) | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.4 |

표3은 $N=4$ 인 경우 단열지수의 변화($\gamma=2.0-3.0$)에 따른 계산된 균열의 최종길이를 나타낸다. 그 결과, 단열지수가 크면 클수록 최종 생성되는 균열의 길이는 작게 나오는 경향을 알 수 있다.

표 3. 단열지수 변화에 따른 생성된 균열의 최종 길이 ($N=4$)

| γ | Case 1 | | Case 2 | |
|----------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| | Gas penetration | No gas penetration | Gas penetration | No gas penetration |
| 2.0 | 1.7m | 0.21m | N/A | 0.45m |
| 2.5 | 1.21m | 0.205m | 1.74m | 0.403m |
| 3.0 | 1.0m | 0.2m | 1.3m | 0.38m |
| ∞ | 0.36m | 0.18m | 0.39m | 0.24m |

5. 결론

본 논문에서는 발파에 의한 암반의 손상영역을 예측하기 위해 준정적인 가스압에 의해 생성되는 균열의 최종 진행 길이를 계산하였다. 이를 위해 한 개의 발파공과 그 주위에 생성되는 네 개($N=4$)와 여덟 개($N=8$)의 대칭 방사 균열을 모델로 사용하였다. 그 결과 응력확대계수는 균열이 진행함에 따라 지속적으로 감소하여 균열의 최종길이를 예측할 수 있었다. 발파공내의 가스압도 예측한대로 균열이 진행함에 따라 계속 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 경암과 풍화암의 경우를 비교한 결과, 예상한 바와 같이 풍화암의 경우 최종 균열의 길이가 더욱 확장되어 최종손상영역이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 진행되는 균열의 개수가 서로 다르더라도 기계적 상호작용에 의해 진행되는 균열의 크기는 서로 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김태훈, 전석원, 박광준(2003), “발파공 주변의 균열생성특성에 관한 연구”, *KTA 2003 Annual Conference*, May, pp.299-306.
2. 이인모, 최종원, 김상균, 김동현, 이두화, 김영옥(2000), “유한요소해석을 이용한 터널 발파설계의 최적화”, *한국지반공학회지*, 제16권, 제5호, pp.63-74.
3. 이인모, 박봉기, 박채우(2004), “터널발파로 인한 굴착선주변 암반거동의 확률론적 연구”, *한국지반공학회지*, 제20권, 제4호, pp.89-102.
4. 장수호, 신일재, 최용근, 이정인(2000), “발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역 평가에 관한 연구”, *한국지반공학회지*, 제16권, 제5호, pp.129-140.
5. Brinkman, J.R. (1987), "Separating shock waves and gas expansion breakage mechanisms". *Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Keystone, CO, pp.6-15.
6. Garnsworthy, R.K. (1990), "The mathematical modeling of rock fragmentation by high pressure arc discharges", *3rd Int. Symp. On Rock Frag. Blasting*, Brisbane, Australia, pp.143-147.
7. Nilson, R.H., W.J. Proffer, R.E. Duff (1985), "Modelling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22, No. 1, pp.3-19.
8. Paine, A.S., C.P. Please (1994), "An improved model of fracture propagation by gas during rock blasting-some analytical results", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 31, No. 6, pp.699-706.
9. Persson, P.-A., R. Holmberg, J. Lee (1994), "Rock blasting and explosive engineering", CRC Press.
10. Wawrzynek, P.A., A.R. Ingraffea (1987), "Interactive finite element analysis of fracture processing: an integrated approach", *Theo. App. Fract. Mech.*, Vol. 8, pp.137 - 150.
11. Whittaker, B.N., R.N. Singh, G. Sun (1992), "Rock fracture mechanics: principles, design and applications", *Development in Geotechnical Engineering*, 71, Elsevier.