

노치 형상 및 장약조건의 변화에 따른 균열발생양상에 관한 연구

박승환¹⁾, 조상호^{2)*}, 김승곤²⁾, 김광염³⁾, 김동규⁴⁾

Study on the Crack Generation Patterns with Change in the Geometry of Notches and Charge Conditions

Seung-Hwan Park, Sang-Ho Cho, Seung-Kon Kim, Kwang-Yeom Kim and Dong-Gyou Kim

Abstract Crack-controlled blasting method which utilizes notched charge hole has been proposed in order to achieve smooth fracture plane and minimize the excavation damage zone. In this study, the blast models, which have a notched charge hole, were analyzed using dynamic fracture process analysis software to investigate the effect of the geometry of a notched charge hole and decoupling indexes of the charge hole on crack growth control in blasting. As a result, crack extension increased and damage crack decreased with the notch length. Ultimately, stress increment factors and resultant fracture patterns with different notch length and width were analyzed in order to examine the effect factors on the crack growth controlling in rock blasts using a notched charge hole.

Key words Notched charge hole, Crack growth control, Geometry of notch, Stress increment factor, Decoupling Index, Dynamic fracture process analysis

초 록 암반발파에서 평활한 파단면을 확보하고 굴착손상영역을 제어하기 위하여 노치장약공을 이용한 균열제어 공법이 제안되었다. 본 연구에서는 노치형상과 장약조건이 균열발생 및 성장에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 날개형 노치장약공을 갖는 발파모형을 구축하고 동적 파괴과정 해석법을 이용한 암반 파괴과정 해석을 수행하였다. 그 결과, 노치 길이가 증가함에 균열의 성장 길이가 증가하며 파단면의 거칠기가 감소하고 장약공 상하부에 손상균열의 발생이 억제되는 경향을 보였다. 해석결과로부터 노치 길이 및 개구 폭에 따른 응력집중계수의 변화 및 균열발생 양상을 비교 분석하여 균열제어에 미치는 영향인자에 대하여 고찰하였다.

핵심어 노치 장약공, 균열발생제어, 노치 형상, 응력집중계수, 장약지수, 동적파괴과정해석

1. 서 론

제어발파는 암반터널이나 지하공동 굴착에서 널리 사용되고 있는 발파공법으로서, 여굴을 최소화하여 굴착면의 안정성을 높이고, 불필요한 굴착에 따른 추가보강을 감소시킬 수 있다. 제어발파공법에는 스무스블라스팅, 프리스플리팅, 쿠션블라스팅, 라인드릴링과 같은 전통적인 공법과 장약공의 형태를 바꾸어 균열을 적극적으로

로 제어하는 새로운 발파공법이 제안되고 있다.

노치효과를 이용하여 균열제어효과를 높이고, 평탄한 파단면을 얻기 위한 연구는 국내외에서 꾸준히 연구되어오고 있다. Fournery 외 (1978)는 발파에서 이상적으로 균열제어 또는 파단면을 형성시키기 위해서는 폭원부근의 균열발생 수, 균열발생위치, 균열전파방향 및 응력장을 제어할 필요가 있다고 지적하였다. 飯星 외 (1987)는 워터젯을 이용하여 암반 내 천공벽면에 노치를 새긴 장약공을 이용한 현장 발파실험을 수행하여 노치 장약공의 파단제어 가능성을 보여주었다. 中村 외 (1992)는 노치 장약공 내 폭발가스의 유동과 노치 선단에서의 응력 집중현상으로부터 노치 장약공의 균열제어효과를 설명하였으며(Fig. 1), 날개형 노치를 갖는 장약홀더를 이용한 발파실험을 수행하여 노치의 균열제어효과를 실험적으로 규명하였다. 楳木 외 (1992)는 한

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 석사

²⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

³⁾ 한국건설기술연구원 선임연구원

⁴⁾ 한국건설기술연구원 책임연구원

* 교신저자 : chosh@chonbuk.ac.kr

접수일 : 2010년 2월 12일

심사 완료일 : 2010년 2월 23일

게재 확정일 : 2010년 2월 24일

번의 공정으로 노치 장약공을 착공할 수 있는 링홀 드릴비트를 제작하여 채석장 및 터널현장에 적용하여 노치의 파단면 제어효과를 검토하였다. 백승규 외 (1999)는 노치 장약공 형상을 고려한 유한요소모델을 대상으로 발파 하중 하에서의 탄소성 유한요소해석을 실시하여 장약공 노치는 균열발생 및 전파에 유효하다는 것을 수치 해석적으로 보여주었다. 최용근과 이정인 (2000)은 장약공에 균열유도 방향으로 인공균열을 만든 노치 장약공과 화약폭발력을 일정방향으로 유도하도록 고안된 장약홀더를 아크릴 모형 시험편과 시멘트 모르타르 시험편에 설치하여 균열제어실험을 수행하였다. 김광염 외 (2008)는 일반 천공과 노치 장약공을 설치한 화강암 블록에 대하여 발파실험을 수행하고 발생한 파단면에 대하여 화상측량을 수행하여 표면 거칠기를 비교분석하였다. 조상호 외 (2009)는 날개형 노치 장약공을 이용한 SB발파에서 암반 내 파괴과정을 모사하여 파단면 제어에 미치는 영향인자에 대하여 고찰하고, 해석결과를 바탕으로 날개형 노치장약공과 전자뇌관을 이용한 ED-Notch SB 발파법을 제안하였다.

본 연구에서는 노치 장약공을 이용한 암반의 균열제

어발파에서 노치의 형상 및 장약조건이 균열발생에 미치는 영향을 검토하기 위하여 김광염 외 (2008)에 의하여 수행된 현장발파실험을 바탕으로 노치 장약공 발파 모델을 작성하여 동탄성 응력해석 및 파괴과정해석을 수행하였다. 해석결과로부터 노치 형상에 따른 응력집중계수의 변화 및 균열발생 양상을 비교 분석하여 균열 제어에 미치는 영향인자에 대하여 고찰하였다.

2. 동적파괴과정 해석법 및 해석조건

2.1 동적파괴과정해석법 개요

본 연구에서 적용하는 동적파괴과정해석법(Dynamic Fracture Process Analysis)은 동적유한요소해석법에 균열발생의 비선형 거동을 도입하여 암석의 파괴실험 및 현장발파에 성공적으로 적용되어오고 있다(조상호 외, 2008, 2009). 간략히 설명하면, 이 해석법은 인장균열은 요소 경계 변을 분리시켜 발생, 성장, 결합 등을 모사하고 있으며, 압축파괴의 여부는 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였으며, 압축 파괴 요소는 응력 수정하여 파괴 후 거동을 모사한다. 암반의 파괴에 영향

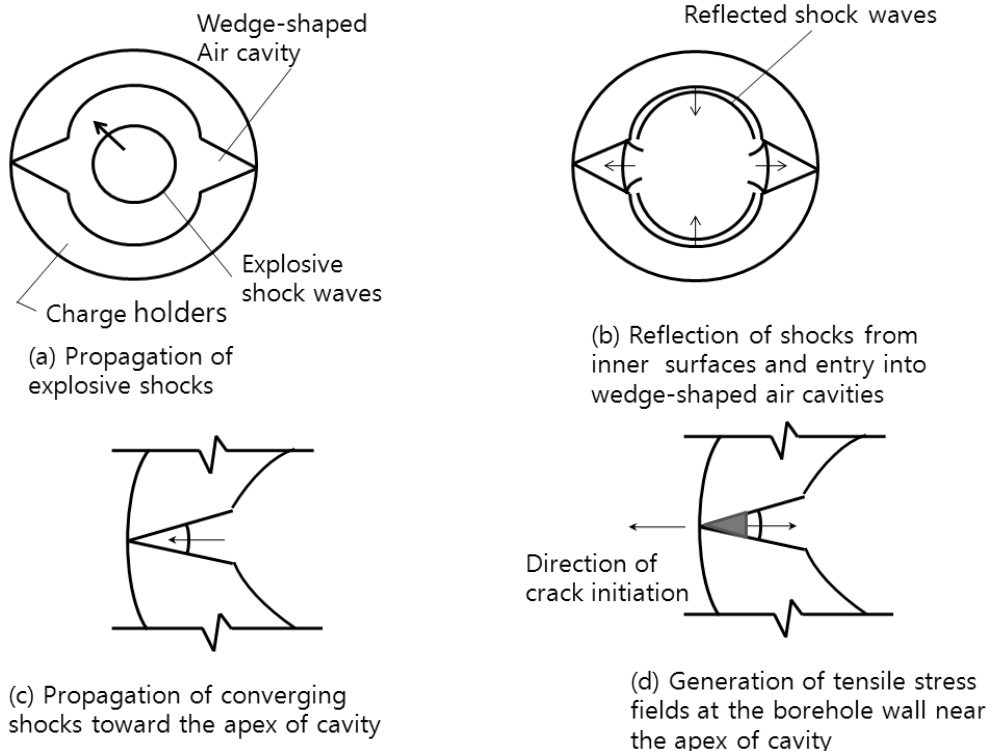


Fig. 1. Shock converging effects produced by charge holders with wedge-shape air cavities and the mechanism of controlled crack (after Nakamura *et al.* 1992).

을 미치는 것으로 잘 알려진 구성광물의 불균질성과 암반 불연속면을 모두 고려한 엄밀한 수치해석은 극히 곤란하므로, 본 해석에서는 미시적 요소에 강도분산을 고려하는 미시적 강도개념을 도입하여 암반의 불균질성을 표현하였다.

본 해석에서는 복수균열의 발생 및 성장을 해석하기 위해 균열선단주변에서 파괴프로세스 영역을 유한한 강도를 가진 균열 면으로 가정하여 취급하는 인장연화 모델을 적용하였다. 균열은 분리된 두개의 경계 변으로써 취급되므로 균열면에 수직방향으로 압축응력이 작용한 경우에는 개구변위가 음으로 되는 경우가 발생하게 된다. 이러한 과도폐합이 발생하는 경우에는 균열면상에 대응하는 절점에 대해서 접촉 압에 상응하는 절점력을 작용시켜 균열의 개구변위가 영으로 되도록 반복 계산하도록 하였다.

2.2 해석모델 및 해석조건

Fig. 2는 원형장약공과 노치 장약공을 설치한 화강암 블록(1 m³)에 대하여 발파실험을 수행하여 최종파단면을 비교한 결과이다(김광영 외, 2008). 분석결과, 장약공의 형상에 관계없이 모든 경우에 자유면과 직각 방향으로 파단면이 형성되었으나 노치 장약공을 사용한 경우에 파단면의 거칠기가 감소하는 경향을 보이고 있다. 암석과 같이 불투명하고 불균질한 재료에 대한 발파실험의 경우, 얻을 수 있는 정보가 한정되어 있고 재현이 어려운 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 앞에서 설명한 화강암 블록 발파실험에서 적용한 실험조건과 노치의 형상을 고려하여 Fig. 3과 같이 직경 $\phi 50$ mm의 원형공에 날개형 노치가 대칭이 되도록 설치한 노치 장약공을 가진 원형모델을 작성하였다. 해석모델의 외곽경계를 원형으로 한 이유는 특정방향으로 반사파가 집중하는 현상을 방지하고 균

열발생 및 성장에 영향을 줄이기 위함이다. 노치 형상과 장약조건에 따른 균열제어효과를 검토하기 위하여 노치의 길이, 노치의 개구폭 및 장약지수를 변경시켜 Table 1과 같이 해석모델을 결정하였다. 특히 Model 2의 노치형상은 화강암 블록 발파실험에서 사용한 노치형상과 유사하며 본 해석에서 기준모델로 취급하여 설명한다. 이 모델에서 노치길이는 10 mm, 노치 개구 폭은 12 mm로 하였으며, 장약지수는 2.9로 하였다. 여기서 장약지수는 실험발파에서 사용된 장약공경($\phi 50$ mm)과 폭약경($\phi 17$ mm)를 참고하여 결정되었으며, 해석모델의 장약공벽에 작용하는 폭발하중은 장약공과 폭약의 체적비로부터 계산된다. Model 8는 원형 장약공 해석모델로서 노치 장약공 주변의 응력상태와 비교를 위하여 추가적으로 해석이 수행되었다. 요소크기가 파괴과정에 미치는 영향을 최소화하기위해서 장약공 주변은 1 mm이내의 크기로 세분화하고, 전체 요

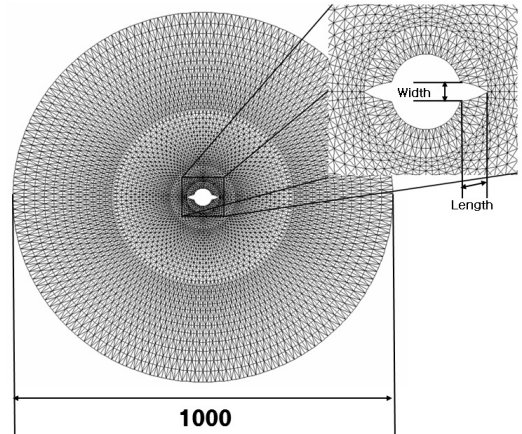
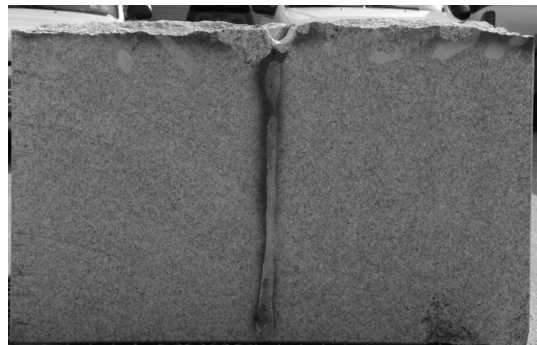


Fig. 3. Finite element layout for the analysis model having a notched charge hole (unit: mm).



(a)Circle charge hole



(b)Notched charge hole

Fig. 2. Granite block blast test utilizing a notched charge hole (after Kim et al, 2008).

Table 1. Types of analysis models considering the geometry of notches and charge conditions.

Model type	Notch length L (mm)	Notch width W (mm)	Decoupling Index (DI)	Remarks
Model 1	5	12	2.94	1. Notched charge hole 2. Dynamic fracture process analyses and elastic stress analyses
Model 2	10	12	2.94	
Model 3	15	12	2.94	
Model 4	10	9	2.94	
Model 5	10	15	2.94	
Model 6	10	12	3.85	
Model 7	10	12	2.27	
Model 8	0	0	2.94	1. Circle charge hole 2. Only stress analysis

Table 2. Input parameters for the analysis models.

Parameters	Value
Density (kg/m^3)	2140
Elastic modulus, E (GPa)	77
Poisson's ratio ν	0.346
Mean compressive strength, Sc (MPa)	101
Mean tensile strength, St (MPa)	8.5
P wave velocity, Cp (m/s)	3400

소수를 줄이기 위하여 외곽영역으로 갈수록 요소의 크기가 증가하도록 작성하였다. 해석모델의 절점 수는 7254개, 요소 수는 14148개이며, 계산시간증분은 $0.1\mu\text{s}$ 이내로 설정하였다.

Table 2는 해석모델에서 적용된 물성 값을 보여주고 있으며 압축강도 및 P파속도 3400 m/s 는 앞서 설명한 화강암 블록 발파실험을 참고하였다.

장약실 내 작용하는 폭발하중을 적용하기 위하여 장약실 내의 폭발생성가스가 등 엔돌피 팽창을 한다고 가정하여 장약공벽에 작용하는 폭발하중을 다음과 같은 JWL 상태방정식을 적용하였다.

$$P_{jwl}(V(t)) = A \exp(-R_1 V(t)) + B \exp(-R_2 V(t)) + CV(t)^{-w+1} \quad (1)$$

여기서 $V(t)$ 는 시간에 따른 장약공과 폭약의 체적의 비이다. A, B, C, R_1, R_2, w 는 실험으로 구해지는 실험 상수로, Table 3에는 본 해석에서 적용된 에멀전계 폭약에 대한 실험값을 보여주고 있다. 계산된 폭발압력은 하중경계조건으로서 무차원 사각파-시간곡선에 적용되며 장약공이 팽창함에 따라 압력 값이 감소하게 된다.

Table 3. JWL Parameters for emulsion explosive (after Cho *et al.*, 2004).

Parameters	Value
A (GPa)	254
B (GPa)	5.578
C (GPa)	0.914
R_1	5.660
R_2	1.489
w	0.317

3. 노치 형상 및 장약조건에 따른 암반 파괴과정 해석결과

3.1 노치 장약공 발파에서 암반파괴과정

Fig. 4(a)와 (b)는 기준모델인 Model 2의 해석결과로서 각각 최대주응력 분포와 균열발생과정을 보여주고 있다. 그림 내 시간은 장약공 내 압력이 작용하기 시작한 후 경과된 시간을 의미한다. 기폭 후 $10\mu\text{s}$ 의 최대주응력 분포를 살펴보면 장약공 주변에 압축파가 동심원상으로 전파하고 있으며, 노치 선단과 장약공 상하부에 인장응력이 집중되어 있다. $30\mu\text{s}$ 경과후에 노치 선단으로 발생한 인장균열이 좌우 방향으로 전파하고 있으며, 장약공 상하부에도 균열이 발생하여 전파하고 있다. $500\mu\text{s}$ 경과 후 노치 선단으로부터 발생한 인장균열은 자유면 까지 도달하였으나, 장약공 상하부의 균열은 $50\mu\text{s}$ 이후에는 더 이상 성장하지 않았다. 여기서 장약공 상하부의 균열은 현장 적용 시 파단면 배면에 발생하는 손상균열로 볼 수 있다. 최종적인 균열패턴을 살펴보면, 오른 쪽 노치 선단으로부터 전파된 균열에 굴곡이 보이는 데 이것은 자유면으로부터 반사된 접선방향 인장응력파가 균열선단에 도달하여 균열성장을 가속시켜 발

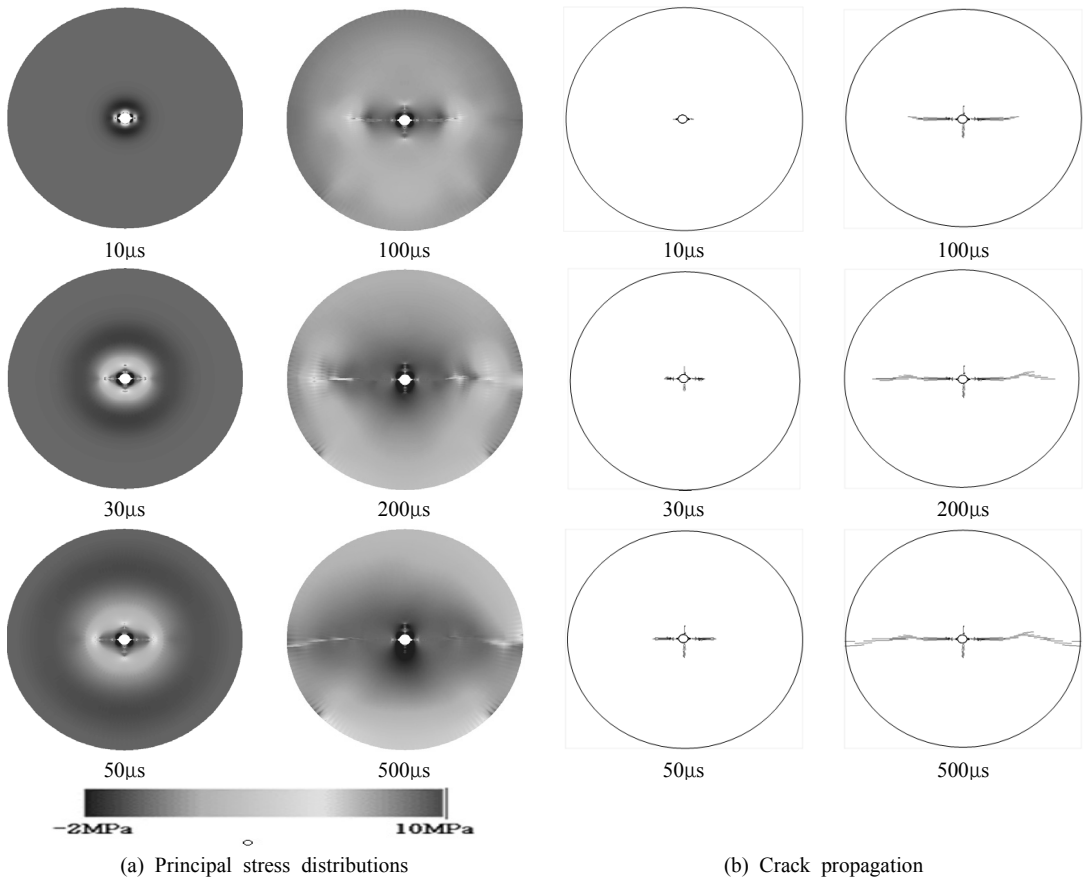


Fig. 4. Maximum principal stress distributions and crack propagation in Model 2.

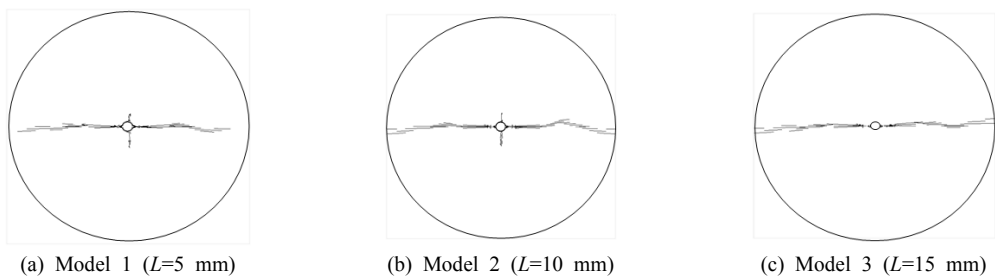


Fig. 5. Resultant fracture patterns with different notch lengths when $DI=2.94$ and $W=12$ mm.

생된 것으로, 이러한 현상은 실험실 규모의 발파실험 (Nakamura *et al.* 2004)에서도 살펴볼 수 있다.

3.2 노치 형상 및 장약조건의 변화에 따른 암반파괴과정

Fig. 5는 장약공벽에 설치하는 노치 길이의 변화에 따른 최종파단면을 보여주고 있다. 여기서 노치 개구 폭과 장약지수는 각각 12 mm, 2.95로 고정하였다. Fig.

5(a)는 노치의 길이가 가장 짧은 해석모델로서 노치 방향의 균열은 자유면에 도달하지 못하고 자유면 부근에서 성장이 멈추었으며, 장약공 상하부 방향의 균열은 장약공경의 약 2배 거리까지 성장하였다. Fig. 5(b)는 앞 절에서 설명한 해석결과이며, Fig. 5(c)는 노치길이가 15 mm일 때의 최종파괴패턴을 보여주고 있다. 살펴보면, 노치길이가 증가함에 따라 균열의 성장 길이가

증가하며 파단면의 거칠기가 감소하고 장약공 상하부에 손상균열의 발생이 억제되는 경향을 보였다.

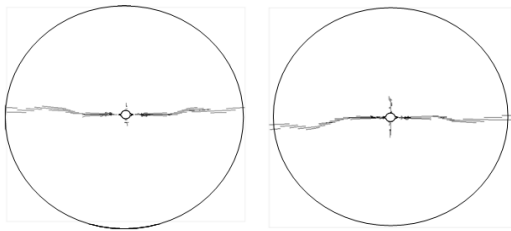
Fig. 6은 노치길이와 장약지수가 동일한 조건(기준모델)에서 노치 개구 폭의 변화에 따른 균열패턴을 보여주고 있다. 살펴보면, 노치 개구 폭이 증가함에 따라 장약공 상하부의 손상균열의 길이가 증가하는 경향을 보이고 있으나 노치 방향으로 발생한 파단면은 비슷한 전파양상을 보이고 있다.

Fig. 7은 동일한 노치 길이와 노치 개구 폭을 가진 해석모델(기준모델)에 장약지수를 달리하여 해석한 결과를 보여주고 있다. 장약지수가 3.85일 때 즉 폭발압력이 낮은 경우에는 노치 방향으로 발생한 균열은 장약공과 자유면의 중간 부근에서 성장이 멈추었으나 장약지수가 2.95의 경우(Model 3)에는 노치 방향으로 발생한 균열에 의하여 원활한 파단면이 형성되었으며 장약지수가 2.27의 경우에는 방사상 방향으로 다수의 인장균열이 발생하였다. 이 결과로부터, 노치 장약공을 이용한 암반발파에서 노치의 균열제어효과를 높이기 위해서는 적절한 장약조건을 고려해야 한다는 것을 알 수 있다.

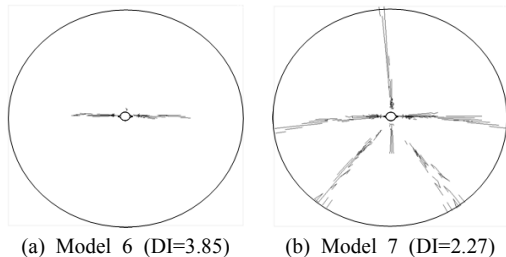
4. 노치 장약공의 균열제어효과에 관한 고찰

4.1 노치 형상에 따른 응력집중계수의 변화

노치형상에 따른 노치 선단에서의 응력 집중도를 평



(a) Model 4 ($W=9$ mm) (b) Model 5 ($W=15$ mm)
Fig. 6. Resultant fracture patterns with different notch widths when $DI=2.94$ and $L=10$ mm.



(a) Model 6 ($DI=3.85$) (b) Model 7 ($DI=2.27$)
Fig. 7. Resultant fracture patterns with different Decoupling Indexes when $L=10$ mm and $W=12$ mm.

가하기 위하여 Table 1에서 보여준 해석모델을 이용하여 탄성응력해석을 수행하였다. 여기서 응력집중도는 원형공 주변의 최대 인장응력과 노치 선단 부근의 최대 인장응력의 비로서 표시하는 응력집중계수(stress increment factor, *SIF*)를 적용하여 평가할 수 있다.

Fig. 8은 노치 개구 폭이 각각 9 mm, 12 mm, 15 mm인 해석모델에 노치길이를 5 mm에서 15 mm까지 변화시키며 계산된 응력집중계수를 보여주고 있다. 살펴보면, 노치 길이 전반에 걸쳐 노치 개구 폭이 좁아질수록 일정한 응력집중계수를 보이고 있으나, 일정한 노치 개구 폭에서 응력집중계수는 노치 길이가 10 mm까지 급하게 증가하는 경향을 보이다가 그 이후에 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 다시 말하면, 노치의 균열제어효과를 높이기 위해서는 가급적 노치의 폭을 줄일 필요가 있으며 과도한 노치 길이를 사용하는 것 보다는 적절한 노치 길이를 선정할 필요가 있음을 알 수 있다.

4.2 응력집중계수와 손상균열 길이의 관계

Fig. 5 및 Fig. 6의 결과를 살펴보면, 장약공 상하부의 손상균열은 노치 길이가 증가함에 따라 감소하며 노치 개구 폭이 좁아지면서 감소하는 경향을 보이고 있다. 다시 말하면, 손상균열의 발생은 노치 선단의 응력집중계수와 밀접한 관계가 있음을 시사하고 있는데, 비교를 위하여 Fig. 9에 응력집중계수와 손상균열 길이를 나타내었다. 살펴보면, 응력집중계수는 손상균열의 길이가 증가하면서 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이것은 노치 장약공을 이용한 발파에서 노치 선단에서의 응력 집중도를 증가시키면 손상균열의 발생을 억제하면서 동시에 노치 선단방향으로 균열제어효과를 높일 수 있음을 보여주고 있다.

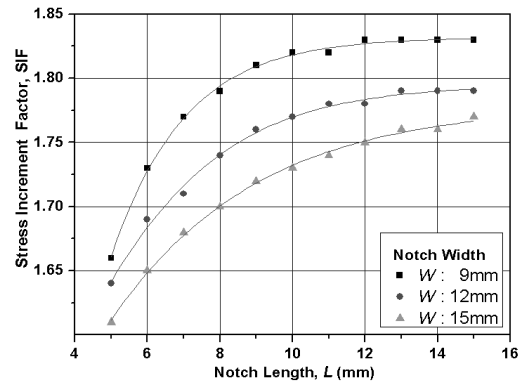


Fig. 8. Stress Increment Factor variation with different shape of notches.

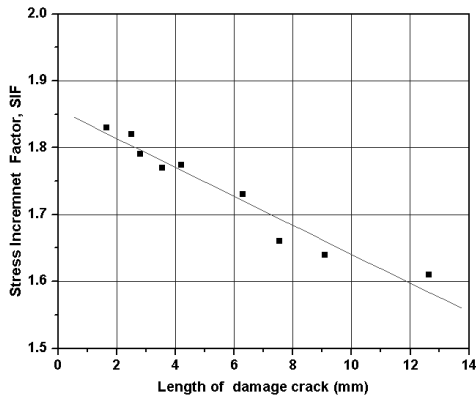


Fig. 9. Relationship between Stress Increment Factor (SIF) and length of damage cracks.

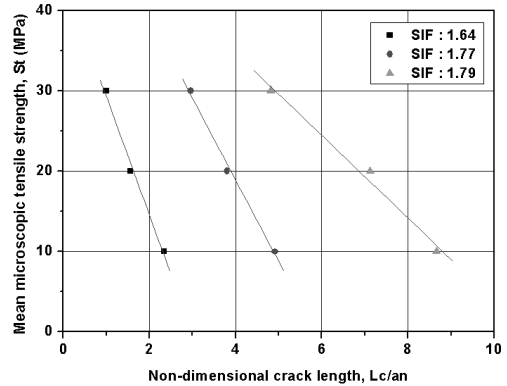


Fig. 10. Relationship between mean microscopic tensile strength S_t and non-dimensional crack length

4.3 노치 장약공을 이용한 암반발파설계에 관한 고찰

앞에서 설명한 해석모델의 직경이 1 m로서 노치 장약공을 이용한 경우에 균열길이가 해석모델의 반경을 초과하므로 균열의 최대길이를 측정할 수 없다. 본 절에서는 암반강도의 변화를 고려하여 평균 미시인장강도를 10 MPa, 20 MPa, 30 MPa(평균 압축강도는 인장강도의 10배)로 변화시켰다. 장약공벽의 노치 개구 폭은 12 mm로 고정하였으며 노치 길이를 5 mm, 10 mm, 15 mm로 증가시켜 해석을 수행하였다. Fig. 10은 응력 확대계수 별 평균 미소인장강도 S_t 와 무차원 균열길이의 관계를 보여주고 있다. 여기서 무차원 균열길이는 노치 방향 균열길이를 공반경 an 으로 나눈 값이다. 살펴보면, 균열길이는 인장강도와 반비례관계를 보이며 응력확대계수가 증가함에 따라 균열길이가 증가하고 있음을 보이고 있다.

향후 노치 장약공을 이용한 암반발파설계를 수행할 경우, 대상 암반의 평균 미시인장강도를 평가할 수 있다면 먼저 Fig. 8을 이용하여 노치 형상에 따른 응력집중계수를 평가한 다음, Fig. 10으로부터 균열길이를 예측하고 노치 장약공의 간격 및 최소 저항선의 결정에 적용 될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

노치 장약공을 이용한 암반의 균열제어발파에서 노치의 형상 및 장약조건이 균열발생에 미치는 영향을 검토하기 위하여 화강암 블록 노치 장약공 발파실험을 참고하여 기준모델을 결정하고, 노치 길이와 노치 개구 폭, 장약지수에 변화를 주어 암반 파괴과정해석을 수행하

였다. 본 연구로 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 노치 길이가 증가함에 균열의 성장 길이가 증가하며 파단면의 거칠기가 감소하고 노치와 직각인 방향에서 손상균열의 발생이 억제되는 경향을 보였다.
- 2) 노치 개구 폭이 증가함에 따라 노치와 직각인 방향에서 손상균열 길이가 증가하는 경향을 보이고 있으나 노치 방향으로 발생된 파단면은 비슷한 전파양상을 보였다.
- 3) 장약지수가 3.85일 때 노치 방향으로 발생한 균열은 장약공과 자유면의 중간 부근에서 성장이 멈추었으나 기준모델인 장약지수가 2.94의 경우(Model 2)에는 노치 방향으로 발생된 균열에 의하여 원활한 파단면이 형성되었으며 장약지수가 2.27의 경우에는 방사상 방향으로 다수의 인장균열이 발생하였다.
- 4) 노치 형상 및 응력집중계수의 관계로부터, 노치의 균열제어효과를 높이기 위해서는 가급적 노치의 폭을 줄일 필요가 있으며 과도한 노치 길이를 사용하는 것 보다는 적절한 노치 길이를 선정할 필요가 있음을 지적하였다.
- 5) 응력집중계수와 손상균열 길이의 관계로부터, 노치 장약공을 이용한 발파에서 노치 선단에서의 응력집중도를 증가시키면 손상균열의 발생을 억제하면서 동시에 노치 선단방향으로 균열제어효과를 높일 수 있음을 보여주었다.
- 6) 끝으로, 응력확대계수 별 평균 미소인장강도 S_t 와 무차원 균열길이의 관계로부터, 균열길이는 인장강도와 반비례관계를 보이며 응력확대계수가 증가함에 따라 균열길이가 증가하고 있음을 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 건설 교통기술 연구 개발 사업(과제번호: 06건설핵심 C02)중 첨단도시 개발사업(06~09) ‘노치비트 시스템 최적화 연구’ 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. Fourney, W.L., J.W Dally and D.C Holloway, 1978, Controlled blasting with ligamented charge holders, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 15 pp. 121-129.
2. 飯星 茂, 川上 純, 五十嵐孝文, 中尾健兒, 1987, 切り欠きを有する發破孔を用いた平滑發破, 日本工業火藥 48.6, pp. 369-377.
3. 中村 裕一, 松永 博文, 山本 雅昭, 住吉 和洋, 1992, 裝藥ホルダーを使用したき裂制御御發破工法, 日本工業火藥, 53.1, pp. 31-36.
4. 椋木淳二, 大原直, 秋吉直義, 國武誠二, 1992, 新しい

發破工法の開發 ウィングビット, ウィングホールブスティング工法, トンネルと地下 23.7, pp. 41-45.

5. 백승규, 김재동, 임한욱, 류창하, 1999, 노치성형 발파공을 이용한 균열제어 발파방법의 균열발생 특성에 대한 수치해석적 고찰, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제9권, 제1호, pp. 64-71.
6. 최용근, 이정인, 2000, 장약공 노치와 장약홀더를 이용한 발파균열의 제어에 관한 연구, 한국자원공학회지, 제37권, 제5호, pp. 315-326.
7. 김광염, 김동규, 정동호, 조상호, 2008, 노치발파공에 의한 파단면 제어효과에 관한 연구, 대한화약발파공학회지 제26권, 제1호, pp. 57-66.
8. 조상호, 정윤영, 김광염, 가네코 카츠히코, 2009, SB발파에서 파단면 제어의 고도화에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제19권, 제4호, pp. 366-372
9. Nakamura Y., S.H.Cho, M. Yoneoka, M. Yamamoto and K. Kaneko, 2004, Model experiments on crack propagation between two charge holes in blasting, Science and Technology of Energetic Materials, 65.2, pp. 34-39

박 승 환



2007년 전북대학교 공과대학 자원·에너지공학과 공학사
2010년 전북대학교 대학원 자원·에너지공학과 공학석사

Tel: 063-270-4636
E-mail: twoc011@jbnu.ac.kr
현재 전북대학교 자원에너지공학과 석사

조 상 호



1998년 전북대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2000년 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2003년 북해도대학교 대학원 공학연구과 공학박사

Tel: 063-270-4636
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr
현재 전북대학교 자원 에너지공학과 교수

김 승 곤



1977년 전북대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1980년 전남대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
2003년 전남대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 063-270-2364
E-mail: skkim@jbnu.ac.kr
현재 전북대학교 자원 에너지공학과 교수

김 광 염



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사

Tel: 031-910-0225
E-mail: kykim@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 선임연구원

김 동 규



1993년 한양대학교 토목공학과 공학사
1996년 한양대학교 토목공학과 공학석사
1999년 The Ohio State Univ. 토목공학과 공학석사
2004년 The Ohio State Univ. 토목공학과 공학박사

Tel: 031-910-0238
E-mail: dgkim2004@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 선임연구원