

## 노치 형상 변화에 따른 균열 전파 양상에 관한 연구

박승환 · 조상호<sup>1)\*</sup> · 김광염 · 김동규<sup>2)</sup> · 나카무라 유이치<sup>3)</sup> · 카네코 카즈히코<sup>4)</sup>

### 1. 서론

노치장약공 또는 장약홀더를 이용한 제어발파는 파단설계면을 따라 파단면을 형성시키거나 터널 등의 발파에서 주변암반의 손상을 최소화하기 위해 제안되었고, 지속적으로 연구되고 있다. 발파에서 균열의 성장 방향이나 길이를 보다 더 정밀하게 제어하기 위하여 노치장약공에서 노치의 형상의 변화에 따른 응력장의 변화 및 균열발생에 관한 연구가 필요하다. 원활한 파단면을 형성시키기 위하여 국내·외에서도 많이 수행되었음에도 불구하고 암석이나 콘크리트 등과 같은 불균질한 물질의 내부에서 발파에 의한 완벽한 균열성장에 관한 실험연구는 많은 어려움을 가지고 있다(최용근과 이정인, 2000; 정동호 외, 2008; 조상호 외, 2008).

본 연구에서는 노치장약공을 이용하여 파단면 및 균열전파를 보다 효과적으로 제어하기 위한 목적으로 노치형상 중 길이변화에 따른 균열발생 및 성장 과정을 수치 실험하였다. 수치실험에는 동적파괴과정해석법(Dynamic Fracture Process Analysis)을 적용하였다.

### 2. 동적파괴과정해석법(DFPA)

본 연구에는 동적 유한요소법과 비선형 파괴역학을 기초로 하는 동적파괴과정해석법(조상호 외, 2004)을 적용하였다. 이 방법은 균열의 발생, 성장, 결합을 모사하기 위하여 요소경계면의 파괴로서 취급하고, 요소경계면의 응력은 그 응력경계면을 포함하는 요소들의 응력 평균값을 계산하고 평균값과 요소경계면의 인장강도 비(국소위험율)를 비교하여 인장파괴를 판정한다. 또한, 압축파괴의 판정에는 Mohr-Coulomb 파괴기준 식을 사용하였다.

해석모델은 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 모델 외곽경계는 반경이 100mm인 원형이고, 원형장약공의 중심부에는 반경이 10mm인 원형공에 썩기모야의 노치가 양쪽에 설치되어 있다. 장약공 주변은 1mm 이내의 크기로 세분화하고, 전체 요소수를 줄이기 위하여 외곽영역으로 갈수록 요소의 크기가 증가하도록 모델화하였다. 해석모델의 절점수는 7,254개, 요소수는 14,148개이며, 계산시간증분은 0.1 $\mu$ s로 설정하였다.

1) 전북대학교 자원·에너지공학과

2) 한국건설기술연구원

3) Yatsushiro National College of Technology, Japan

4) Hokkaido University, Japan

\* Corresponding author : Tel: +82 63 270 4636 ; E.mail address: chosh@chonbuk.ac.kr

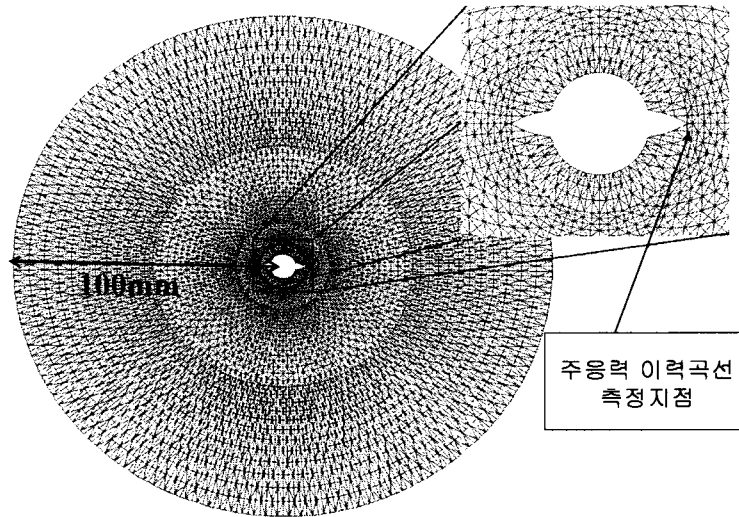


Fig. 1. Finite element layout for the analysis model.

장약실 내의 폭발생성 가스는 등엔돌피 팽창하는 것을 가정하여 장약공벽에 작용하는 폭발하중은 JWL 상태방정식을 적용하였다. 여기서  $V$ 는 장약공과 폭약의 체적의 비이다.

이식은 장약공의 체적변화에 따른 압력변화로 표현된다. 본 해석에서는 전기뇌관의 침장약을 고려하여 PETN폭약의 JWL변수를 사용하였다. (Cho 외, 2004) 해석모델에서 사용된 물성치는 밀도가  $2,170\text{kg/m}^3$ , 탄성계수는  $31.6\text{GPa}$ , 포아송비는  $0.18$ , P파속도는  $4000\text{m/s}$ 로 가정하고 있다.

$$P(t) = A \exp(-R_1 V(t)) + B \exp(-R_2 V(t)) + C V(t)^{-(\omega+1)} \quad (1)$$

Table 1. JWL parameters for PETN explosive

Parameters	Value
A (GPa)	1032.00
B (GPa)	90.57
C (GPa)	3.73
$R_1$	6.00
$R_2$	2.60
$\omega$	0.57

노치길이의 변화가 균열발생 및 성장과정에 미치는 영향을 비교·분석하기 위하여 한쪽 노치의 길이가 각각  $7.5\text{mm}$  (Model-1),  $3\text{mm}$  (Model-2)인 해석모델을 모델화하였다.

### 3. 파괴과정해석결과

동적파괴과정해석결과를 Fig. 2에 보여주고 있다. 노치길이가 7.5mm(Fig. 2 (a))인 경우의 파괴패턴은 노치 선단에서부터 수많은 균열들이 발생하여 자유면 경계까지 이어져 있음을 확인할수 있다. 노치길이가 3mm인 경우 (Fig. 2 (b))에는 노치 선단의 주변뿐만 아니라 노치 공의 상하방향으로도 많은 균열이 발생하였음을 알 수가 있다. 이러한 원인을 분석하기 위하여 노치선단에서 1mm 떨어진 지점(Fig. 1 참조) 최대주응력을 계측하여 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 (+)값은 인장응력을 의미한다. 노치길이가 7.5mm인 경우에 발생된 접선 인장응력은 3mm인 경우보다 1.23배 높은 인장응력이 발생하였다.

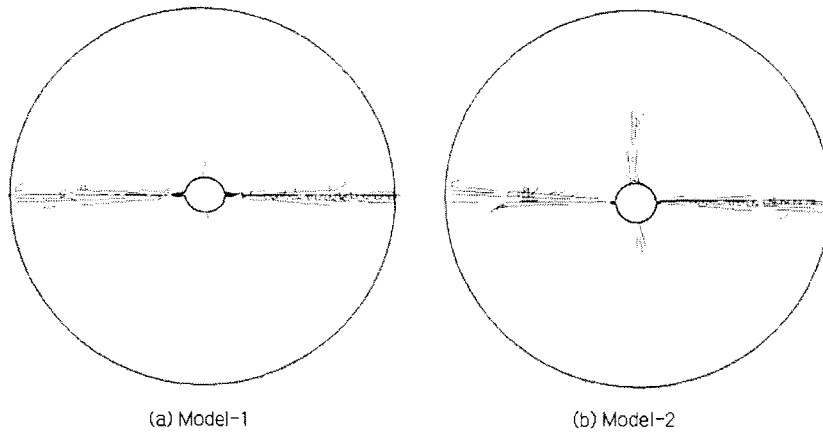


Fig. 2. Comparing the simulation results of from blasting models having different notch lengths

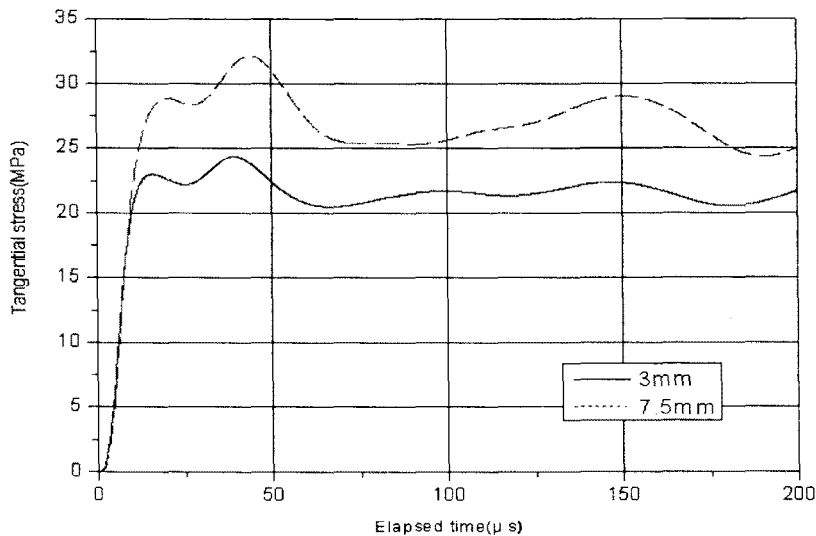


Fig. 3. Tangential stress-histories at specific positions toward side boundary

#### 4. 결론

원활한 파단면을 형성시키기 위한 방법으로 노치장약공을 이용하여 파단면 및 균열전파를 보다 효과적으로 제어하기 위한 목적으로 노치의 형상의 변화에 따른 균열발생 및 성장 과정을 수치 실험하였다. 수치실험에는 동적파괴과정해석법(DFPA)을 적용하였다.

노치길이가 7.5mm인 경우 노치선단에서부터 수많은 균열들이 자유면 경계까지 발생하였으며, 노치길이가 3mm인 경우에는 노치뿐만 아니라 노치공의상하방향으로도 균열이 발생하였다. 노치길이가 7.5mm인 경우에 발생한 접선 인장응력은 3mm인 경우보다, 1.23배 높은 인장응력이 발생하였다.

##### 감사의글

이 논문은 건설 교통기술 연구 개발 사업중 첨단도시 개발사업(06~09) '노치비트 시스템 최적화 연구'연구결과의 일부입니다.

##### 참고 문헌

1. 최용근, 이정인, 장약공, 2000 노치와 장약홀더를 이용한 발파균열의 제어에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 37, No. 5, pp. 315-326.
2. 정동호, 문상조, 안대진, 정원준, 김은관, 김동규, 2007 발파공해 해소 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 개발에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol. 17, No. pp. 216-224
3. 조상호, 박승환, 김광엽, 나카무라 유이치, 카네코 카츠히꼬, 2008, 노치 장약공을 이용한 발파제어에 관한 수치해석적 연구, 화약·발파공학회, Vol. 26, No. 1, pp. 49-55
4. Cho, S. H, Nakamura, Y. and Kaneko, K., 2004, Dynamic fracture process of rock subjected to stress wave and gas pressurization, Int. J Rock Mech. and Mining Sci., Vol. 96m 41, No. 3, pp. 439.