

# 무장약 가이드 공의 균열제어 유효성 평가를 위한 수치해석적 연구

이희광\* · 김승곤 · 조상호<sup>1)</sup>

## 1. 서론

최근 암반 내 파단면 및 균열을 보다 더 정밀하게 제어하기 위하여 전자 지발뇌관 및 노치 장약공, 무장약공 등을 이용한 새로운 발파 기술들이 개발되고 있다.(조상호 외, 2009; 조상호 외, 2008; 조상호 외, 2004)

본 연구에서는 장약공 주변에 무장약 가이드 공을 설치하여 균열의 전파 방향 및 길이를 제어할 목적으로 동적파괴과정해석을 수행하였다. 먼저 무장약 가이드 공의 유효성을 평가하기 위하여 단일 장약공 모델에 균열전파 양상을 분석한 뒤, 원형 및 노치 무장약 가이드 공에서의 암반의 물성 변화에 따른 균열전파양상을 분석하고 균열제어에 미치는 영향인자에 관하여 검토하였다.

## 2. 동적파괴과정해석법(DEPA) 및 해석모델

본 연구에는 동적유한요소법과 비선형 파괴역학을 기초로 하는 동적파괴과정해석법(조상호 외, 2004)을 적용하였다. 이 방법은 균열의 발생, 성장, 결함을 모사하기 위하여 요소경계면을 파괴로서 취급하고, 요소 경계면의 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.

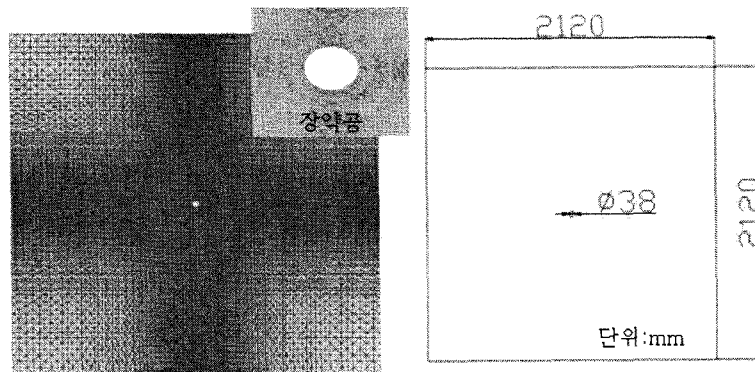


그림 73 단일 장약공 모델(모델 I)

1) 전북대학교 자원·에너지공학과

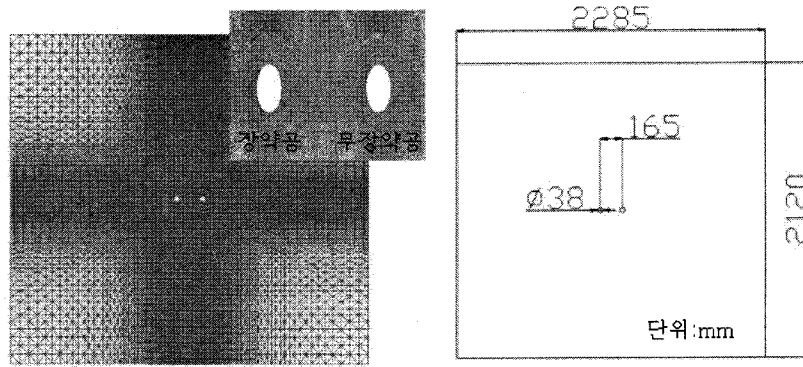


그림 74 원형 무장약 가이드 공 모델(모델 II)

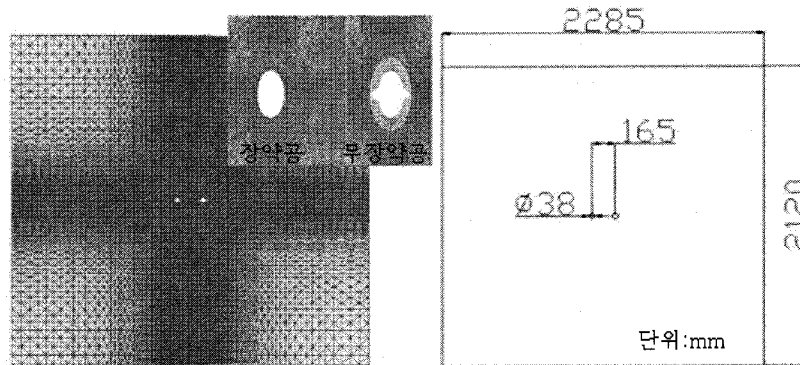


그림 75 노치 무장약 가이드 공 모델(모델 III)

해석모델은 무장약 가이드 공의 유무와 형태에 따라 그림 1, 그림 2, 그림 3과 같이 단일 장약공 모델, 원형 무장약 가이드 공 모델, 노치 무장약 가이드 공 모델로 하여 각각 모델 I, 모델 II, 모델 III 나누었다. 그림 1은 모델 I로 절점 수는 55512개, 요소 수는 110024개이며, 외곽경계는 2120×2120mm이다. 그림 2는 모델 II로 절점 수는 59381개, 요소 수는 117648개며, 외곽경계는 2285×2120mm이다. 그림 3은 모델 III로 절점 수는 59291개, 요소 수는 117468개이며, 외곽경계는 2285×2120mm이다. 모든 원형공의 반경은 18mm이며, 노치 무장약 가이드 공은 같은 반경에 쉼기형태의 노치를 양쪽에 설치하였다. 모든 해석모델의 계산시간 증분은 1μs로 설정하였다.

장약실 내의 폭발생성 가스는 등엔트로피 팽창하는 것을 가정하여 장약공벽에 작용하는 폭발하중은 JWLS상태방정식으로 적용하였다.

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

여기서  $V(t)$ 는 장약공과 폭약의 체적의 비이다. 이식은 장약공의 체적변화에 따른 압력 변화로 표현된다. 본 해석에서는 에멀전계 폭약의 JWLS변수를 사용하였다.(Cho외, 2004). 해석모델에서 사용된 암반의 물성 치는 밀도 2700Kg/m<sup>3</sup>, 탄성계수 81.1GPa, 포아송비 0.18, P파속도 6000m/s를 가정하고 있으며 암반의 물성 변화에 따른 균열전파양상을 분석해보기 위

하여 각각의 모델에 인장강도( $St$ )를 5MPa, 10MPa, 20MPa 압축강도는 인장강도의 10배로 가정하여 해석하였다.

표 76. 에틸렌계 폭약의 JWL 변수

Parameters	Value
A(GPa)	254.8
B(GPa)	5.5
C(GPa)	0.9
$R_1$	5.6
$R_2$	1.4
$w$	0.3

### 3. 해석 결과 및 가이드 공의 균열제어 효과에 관한 고찰

그림 4는 각 모델별 인장강도에 따른 최종 균열 패턴을 보여주고 있으며, 해석 결과를 바탕으로 균열제어 예정 방향(무장약 가이드 공 방향)에 대한 균열길이를 평가한 결과를 표 2에 정리하였다.

모델 I에서 인장강도가 5MPa인 경우 가이드 공 방향의 균열 길이는 308mm이며, 인장 균열은 방사상으로 성장하는 것을 볼 수 있다. 10MPa인 경우 가이드 공 방향의 균열 길이는 232mm이며, 20MPa인 경우 가이드 공 방향의 균열 길이는 44mm이다. 인장강도가 증가할수록 방사상의 인장균열은 길이는 짧아지는 경향을 볼 수 있다.

모델 II에서 인장강도가 5MPa인 경우 균열은 원형 무장약 가이드 공 방향으로 우세하게 성장하는 것을 볼 수 있으며, 그 길이는 667mm로 모델 I의 해석결과와 비교하여 약 2.17배 증가되었음을 알 수 있다. 원형 가이드 공 상·하부의 균열길이는 짧아지는 경향을 볼 수 있으며, 모델 I과 같이 인장강도가 증가할수록 인장균열의 길이는 짧아지는 경향을 볼 수 있다. 인장강도가 20MPa인 경우 단일 장약공 모델과 거의 유사한 균열 패턴을 보이며 균열제어 효과가 현저히 감소함을 알 수 있다.

표 77 인장강도( $St$ )에 따른 최종 균열 길이의 비교

해석 모델	인장강도 (MPa)	가이드 공 방향의 균열길이 (mm)	가이드 공 방향의 균열길이 / 가이드 공 방향의 균열길이(모델 I)
모델 I	5	308	1
	10	232	1
	20	44	1
모델 II	5	667	2.17
	10	424	1.83
	20	339	7.70
모델 III	5	984	3.19
	10	483	2.08
	20	419	9.52

마지막으로 모델 III에서 인장강도 5MPa인 경우 균열은 노치 무장약 가이드 공 방향으로 우세하게 성장하는 것을 볼 수 있으며, 노치 무장약 가이드 공 방향의 균열길이는 984mm로 모델 I의 해석결과와 비교하여 약 3.19배 증가되었음을 알 수 있다. 모델 II의 경우와 같이 가이드 공 상·하부의 균열길이는 짧아진 것을 볼 수 있으나, 모델 III에서는 장약공 상·하부로 균열이 성장하는 것을 볼 수 있다. 이러한 원인은 노치 무장약 가이드 공 방향으로 인장응력이 집중되면서 가이드 공 상·하부는 압축영역이 되고 이로 인해 장약공 상·하부는 다시 인장응력이 집중되어 균열이 성장하는 것으로 사료된다. 모델 III에서도 다른 모델들과 같이 인장강도가 증가할수록 인장균열의 길이는 짧아지는 경향을 볼 수 있다.

그림 5는 각 모델별 인장강도에 따른 가이드 공 방향의 균열 길이를 나타내고 있다. 단일 장약공보다 무장약 가이드 공이 있을 경우 균열 성장 길이는 길어지는 경향을 보여주며, 원형 무장약 가이드 공 보다 노치 무장약 가이드 공이 있을 경우 균열 성장 길이가 길어지는 경향을 보여준다.

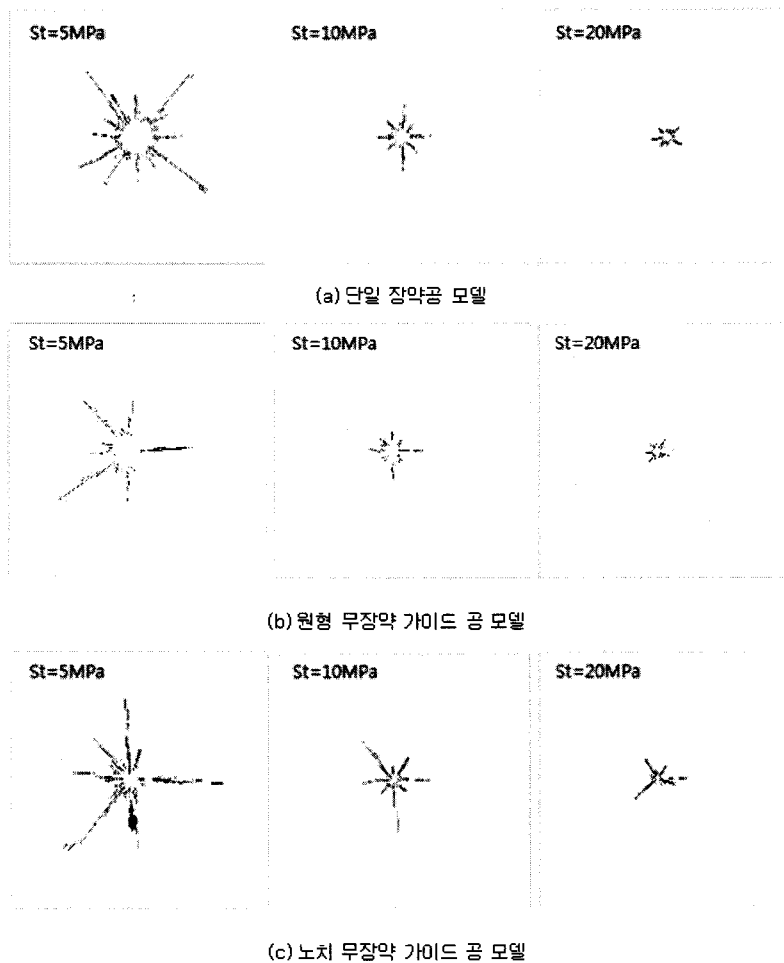


그림 78 인장강도(St)에 따른 최종 균열 패턴의 비교

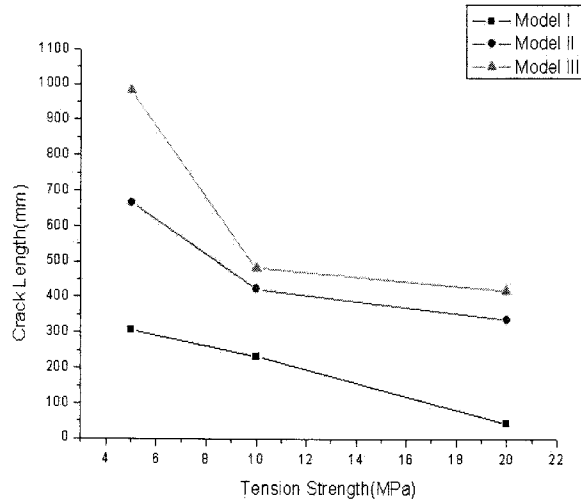


그림 79 가이드 공 방향의 균열길이

#### 4. 결론

암반 내 파단면을 정밀하게 제어하기 위하여 본 연구에는 단일 장약공 모델, 원형 무장약 가이드 공 모델, 노치 무장약 가이드 공 모델을 수치 실험 하였다.

모든 모델에서 균열길이는 인장강도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 단일 장약공 모델의 경우 균열은 방사상으로 성장하였다. 인장강도 5MPa에서 원형 무장약 가이드 공 모델의 가이드 공 방향의 균열길이는 단일 장약공 모델의 가이드 공 방향의 균열길이보다 2.17배 증가 하였으며, 노치 무장약 가이드 공 모델의 가이드 공 방향의 균열길이는 단일 장약공 모델의 가이드 공 방향의 균열길이보다 3.19배 증가하였다. 무장약 가이드 공 상·하부의 균열은 짧아 졌으며, 노치 무장약 가이드 공 모델의 장약공 상·하부는 응력 집중에 의해 균열이 성장하였다. 노치 무장약 가이드 공 모델의 경우가 원형 무장약 가이드 공 모델의 경우보다 가이드 공 방향으로 균열 성장 길이가 더욱 길어지는 경향을 보였다.

#### 참고문헌

1. 조상호, 정윤영, 김광염, 가네꼬 카츠히꼬, 2009, SB발파에서 파단면 제어의 고도화에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 19, No. 4, pp. 366-372.
2. 조상호, 박승환, 김광염, 나카무라 유이치, 가네꼬 카츠히꼬, 2008, 노치 장약공을 이용한 발파균열제어에 관한 수치해석적 연구, 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 26, No. 1, pp. 49-55.
3. 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. 41, No. 3, pp. 439.