

## 발파에서 가이드공의 균열제어 유효성에 관한 수치 해석적 연구

이희광<sup>1)</sup>, 김학만<sup>2)</sup>, 김승곤<sup>3)</sup>, 조상호<sup>4)</sup>\*

### A Numerical Study on the Effect of a Guide Hole on Crack Propagation Control in Blasting

Hee-Gwang Lee, Hak-Man Kim, Seung-Kon Kim, Sang-Ho Cho

**Abstract** The model experiments, which employ a charge hole and guide hole, are simulated to examine the effect of the guide hole on the crack propagation control in blasting. Crack patterns resulted from the analysis models, which consider the distance between the charge hole and guide hole, were compared. From the simulation analysis for the model experiments, it was revealed that all the guide holes used in this study were effective for controlling the crack propagation in blasting.

**Key words** Guide hole, dynamic fracture process analysis code, crack propagation control

**초 록** 무장약 가이드공의 균열제어 효과를 파악하기 위하여 무장약 가이드공을 적용한 콘크리트 블록 발파실험 결과를 바탕으로 동적파괴과정해석을 수행하였다. 장약공과 노치형 및 원형 무장약 가이드공을 가진 해석모델을 작성하고 공간격, 암반강도, 폭발하중속도에 따른 최종균열을 분석하였다. 모든 해석모델에서 무장약 가이드공이 설치되어 있는 방향으로 탁월균열이 형성되었으며, 이것은 무장약 가이드공이 균열제어에 효과가 있음을 입증하며 실험결과와도 일치한다.

**핵심어** 가이드공, 동적파괴과정해석, 균열전파제어

## 1. 서 론

교통망의 고속화와 직선화로 인하여 기존 도로터널의 선형개량 및 확장공사가 증가함에 따라 근접터널 굴착 사례가 빈번히 발생하고 있으며, 해저 및 하저터널을 건설하기 위한 계획이 세워지면서 주변암반의 손상을 최소화시키며 소음과 진동의 제어가 가능한 암반굴착 공법에 대한 관심이 증대되고 있다. 최근까지 워터젯이나 노치비트를 이용하여 발파공에 인공균열을 형성시켜 폭발력을 한 방향으로 유도하여 원활한 파단면을 형성시키는 제어발파공법에 관한 연구가 진행되어 오고

있다(椋木 외; 1992, 정동호 외; 2008). 이러한 제어발파공법은 일반 발파공법에 비하여 비교적 적은 장약량이 사용되므로 진동이 감소하는 효과를 보이나, 고가의 장비 및 도구가 필요하여 현장적용에 많은 한계점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하면서 원활한 파단면을 형성하기 위한 발파실험연구가 활발히 진행되고 있다(Nakamura 외; 2004, Cho 외; 2008, Fukuda 외; 2009, 이희광 외; 2010). 특히 콘크리트 블록의 중심부에 장약공을 설치하고 주변에 다이아몬드형, 원형, 노치형 무장약 가이드공을 설치하여 발파실험을 수행한 결과, 가이드공 모두 균열제어효과를 보였으나 노치형 무장약 가이드공이 가장 높은 균열제어 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 콘크리트 블록 발파실험(이희광 외; 2010)을 바탕으로 장약공과 노치형 및 원형 무장약 가이드공을 가진 해석모델을 작성하고 공간격, 암반강도, 폭발하중속도에 따른 균열발생 패턴과 길이를 분석하였다. 또한 무장약 가이드공을 이용한 제어발파의 설계에 중요한 정보인 발파하중조건과 무차원 균열길이의 관계를 제안하고자 한다.

<sup>1)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 석사

<sup>2)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 석사

<sup>3)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

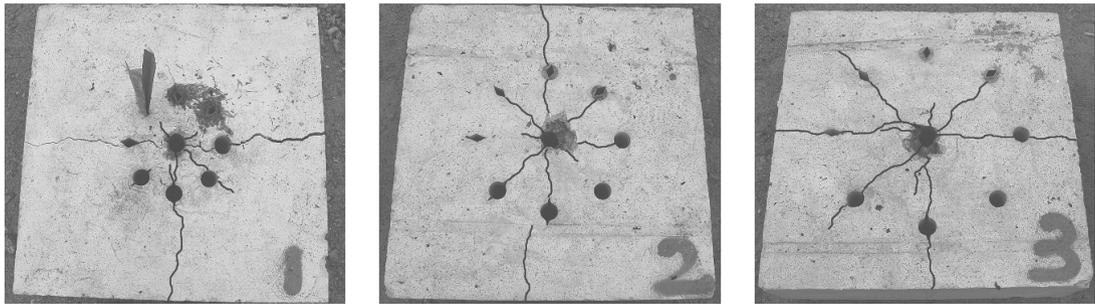
<sup>4)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 조교수

\* 교신저자 : chosh@jbnu.ac.kr

접수일 : 2010년 8월 18일

심사 완료일 : 2010년 8월 20일

게재 확정일 : 2010년 8월 25일



(a) 공간격 110 mm                      (b) 공간격 165 mm                      (c) 공간격 220 mm

그림 1. 콘크리트 블록 발파실험결과(이희광 외; 2010)

2. 가이드공을 이용한 균열제어 발파실험

이희광 외(2010)는 모르타르 블록의 중앙에 장약공을 설치하고 주변에 방사상으로 3가지 형태의 가이드공을 각각 두 개씩 설치하였다. 가이드공은 원형, 노치형, 다이아몬드형으로 장약공과 가이드공의 간격은 각각 110mm, 165mm, 220mm으로 하여 3가지 형태로 모르타르 공시체가 제작되었다. 그림 1은 장약공과 무장약 가이드공의 간격이 다른 콘크리트 블록에 대한 최종 균열 패턴을 보여준다. 분석결과, 적용된 가이드공의 모두에서 균열제어효과가 나타났으며, 특히 낮은 폭발압력에서는 노치 가이드공이 보다 높은 균열제어효과를 나타냈다. 이러한 결과에 근거하여 본 연구에서는 무장약 가이드공으로 원형과 노치형을 고려하는 것으로 하였다.

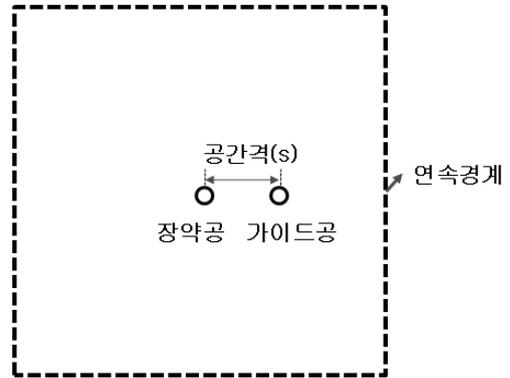


그림 2. 동적 파괴과정 해석모델의 형상

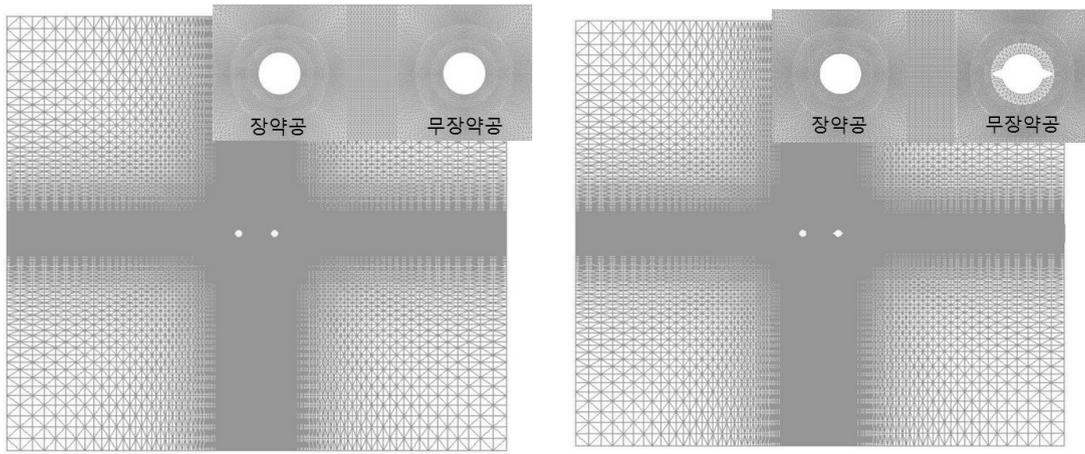
3. 동적파괴과정해석

3.1 해석모델 및 해석조건

본 연구에서 적용한 동적파괴과정해석법(Dynamic Fracture Process Analysis)은 동적유한요소해석법에 균열발생의 비선형 거동을 도입한 것으로서 암석의 파괴실험 및 현장발파에 성공적으로 적용되고 있다(조상호 외; 2004). 즉, 이 해석법에 있어서 인장균열은 요소 경계 변을 분리시켜 발생, 성장, 결합하는 것을 모사하고, 압축파괴의 여부는 Mohr-Coulomb파괴기준식을 사용하였으며, 압축 파괴 요소는 응력 수정하여 파괴 후 거동을 모사한다. 암석의 파괴는 그 조직과 밀접한 관계가 있으므로 암석의 파괴를 고려하기 위해서는 암석의 미세구조를 모델화할 필요가 있으나 이러한 엄밀한 수치해석은 곤란하므로, 미시적 크기를 가진 요소의 집합체로써 근사시켜 모델링을 한다. 특히 암석의 미세구조는 극히 불균질하지만 이것은 강도와 탄성률의 불균질성으로써

표현된다. 본 해석에서는 복수균열의 발생 및 성장을 해석하기 위해 균열선단주변에서 파괴 진행 영역을 유한한 강도를 가진 균열면으로 가정하여 취급하는 인장연화모델을 적용하였다. 균열은 분리된 두 개의 경계면으로써 취급되므로 균열면에 수직방향으로 압축응력이 작용한 경우에는 개구변위가 음으로 되는 경우가 발생한다. 이러한 과도폐합이 발생하는 경우에는 균열면상에 대응하는 절점에 대해서 접촉력이 0으로 되도록 반복계산을 하였다. 연립방정식의 계산에는 ICCG법을 적용하여 계산시간이 감소되도록 하였다.

해석모델은 장약공과 하나의 무장약 가이드공을 가지며 가이드공의 형상은 원형과 노치형 두 종류를 적용하고 공간격(S)의 변화를 고려하였다. 모델은 외곽경계는 응력파의 반사가 되지 않도록 연속경계조건을 주었다. 그림 2는 해석모델의 개요를 보여준다. 그림 3(a)는 원형 무장약 가이드공 해석모델의 유한요소 배치도를 보여주며 있으며, 그림 3(b)는 노치형 무장약 가이드공 모델의 유한요소를 나타낸다.



(a) 모델 I(원형 무장약 가이드공)

(b) 모델 II(노치형 무장약 가이드공)

그림 3. 유한요소 모델 및 장약공 주변 확대도

표 1. 해석모델

모델	장약공과 무장약 가이드공의 간격, S(mm)	공간격(S)/공경(D)	가이드공의 형상
I-a	110	2.9	원형
I-b	165	4.3	
I-c	220	5.8	
II-a	110	2.9	노치형
II-b	165	4.3	
II-c	220	5.8	

표 2. 입력물성

변수	값
평균 미세인장강도(MPa)	10
공내 최대 작용 압력(MPa)	150
밀도(Kg/m <sup>3</sup> )	2700
탄성계수(GPa)	81.1
P파 속도(m/s)	4000
포아송비	0.25

표 3. 에멀전 폭약의 JWL 변수

변수	값
A(GPa)	254.8
B(GPa)	5.5
C(GPa)	0.9
R1	5.6
R2	1.4
w	0.3

표 1은 해석모델에 대한 변수조건으로 가이드공의 형상과 공간격에 따라 구분하고 있다. 여기서 공간격은 콘크리트 블록 발파실험과 거의 동일하게 각각 110mm, 165mm, 220mm로 하였다. 표 2는 해석모델에 적용된 물성값을 나타낸다. 여기서 평균 미세인장강도는 유한요소해에 개별적으로 적용되는 Weibull분포의 평균값을 의미하며, 공내 최대 작용압력은 폭발압력이 아닌 등가압력을 의미한다. 또한 압축강도는 인장강도의 10배를 적용하였다.

### 3.2 장약조건

발파하중은 장약 공내에서 등엔탈피가 팽창하는 것을 가정하여 다음과 같이 JWL상태방정식을 적용하였다 (조상호 외; 2004).

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

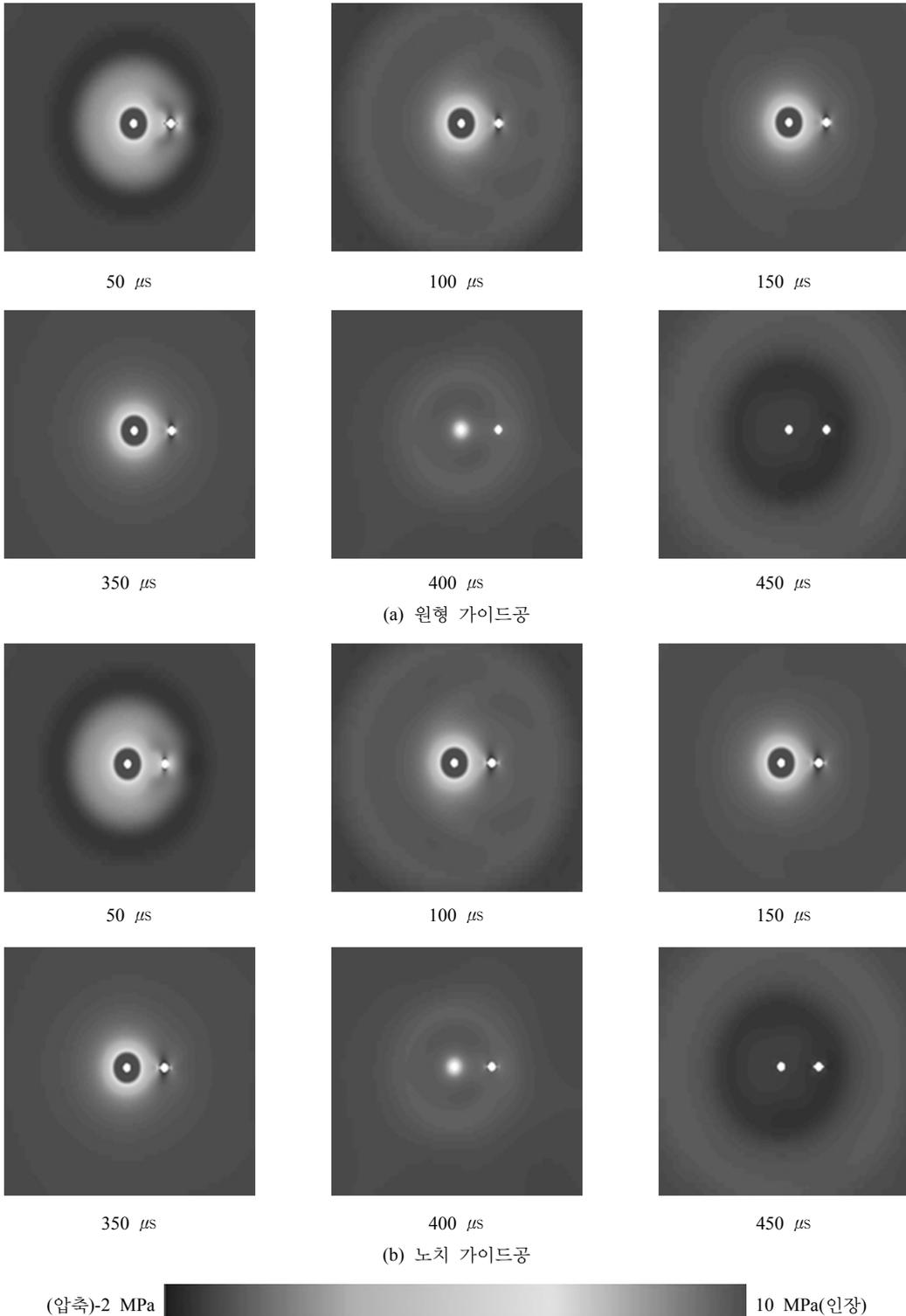


그림 4. 무장약 가이드공의 형상에 따른 최대 주응력 분포

여기서  $V(t)$ 는 시간에 따른 장약공과 폭약 체적 비이다. A, B, C,  $R_1$ ,  $R_2$ , W는 실험으로 구해지는 실험 상수로, 표 3은 본 해석에 적용된 에멀전계 폭약에 대한 실험값을 나타낸다. 계산된 폭발압력은 하중 경계조건으로 적용되며 장약공이 팽창함에 따라 압력 값이 감소하게 된다.

### 3.3 파괴과정 해석결과

그림 4는 파괴를 고려하지 않은 동적해석모델에 대한 최대주응력 분포도를 보여준다. 그림 4의 (a)는 원형 가이드공 해석모델로서 발파하중이 작용하기 시작하여  $50 \mu s$  후에 압축응력파는 가이드공을 통과하여 동심원상으로 전파되고 있으며, 가이드공의 좌우에 인장응력이 집중되고 있다. 그리고 시간이 경과함에 따라 가이드공 주변의 인장응력의 집중도는 감소하였다. 그림 4의 (b)는 노치형 가이드공의 해석결과를 보여주고 있다. 원형 가이드공 해석모델의 결과와 비교하면, 기폭 후  $400 \mu s$ 에서 여전히 노치형 가이드공의 좌우에

인장응력이 집중되고 있음을 보여준다. 이것은 노치형 가이드공이 원형 가이드공에 비하여 균열발생에 유리함을 입증한다.

그림 5는 장약공과 무장약 가이드공의 간격에 따른 최종 균열 패턴을 보여준다. 그림 5(a)는 원형 무장약 가이드공 모델의 해석결과로서, 공간격이 길어짐에 따라서 탁월균열의 수가 증가하고 균열의 길이가 감소하는 경향을 보였다. 장약공 주변은 압축파괴영역으로 균열이 발생하지 않고 있다. 그림 5(b)는 노치형 무장약 가이드공 모델의 해석결과로서, 공간격이 증가함에 따라서 균열의 길이가 감소하고 탁월균열의 수가 증가하는 경향을 보였다. 특히 원형 무장약 가이드공의 결과와 비교하면, 공간격이 가장 짧은 110 mm의 경우 노치형 무장약 가이드공 모델이 보다 더 긴 균열길이를 보였다. 또한 모든 모델에서 무장약 가이드공이 설치되어 있는 방향으로 탁월균열이 형성되고 있는데, 이것은 무장약 가이드공이 균열제어에 효과가 있음을 입증하며 실험결과와도 일치한다.

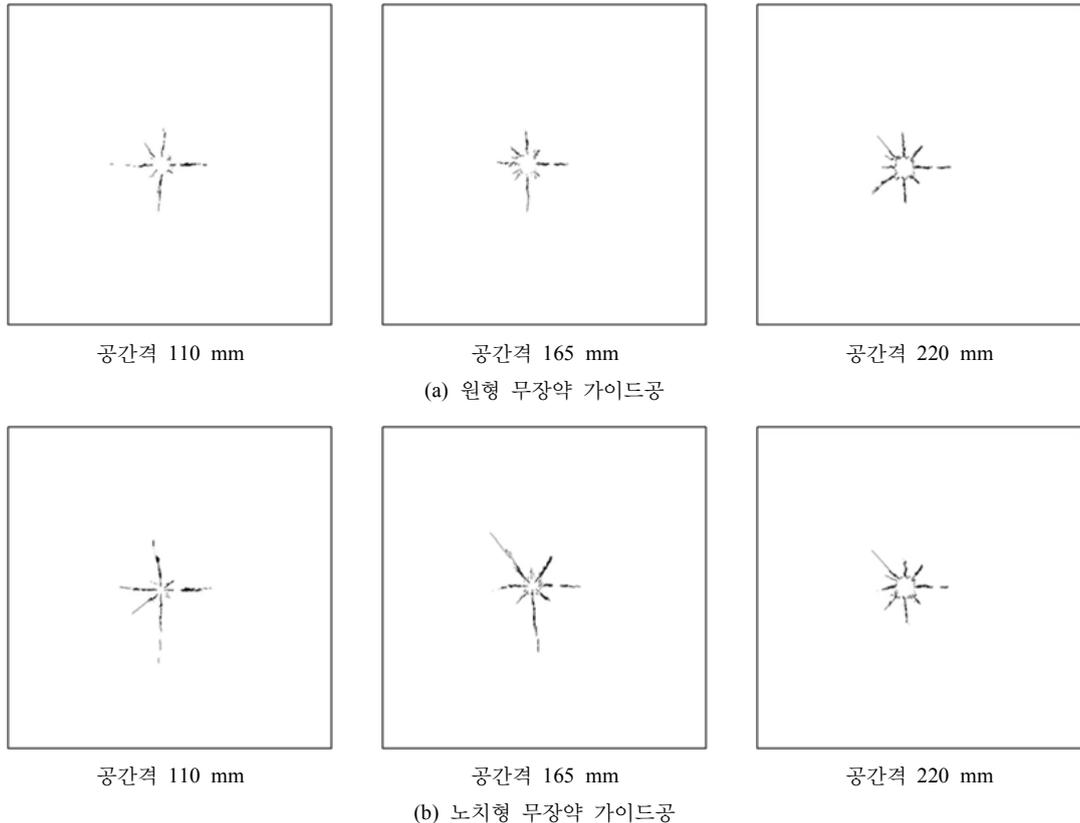


그림 5. 무장약 가이드공에 의한 최종 균열 패턴

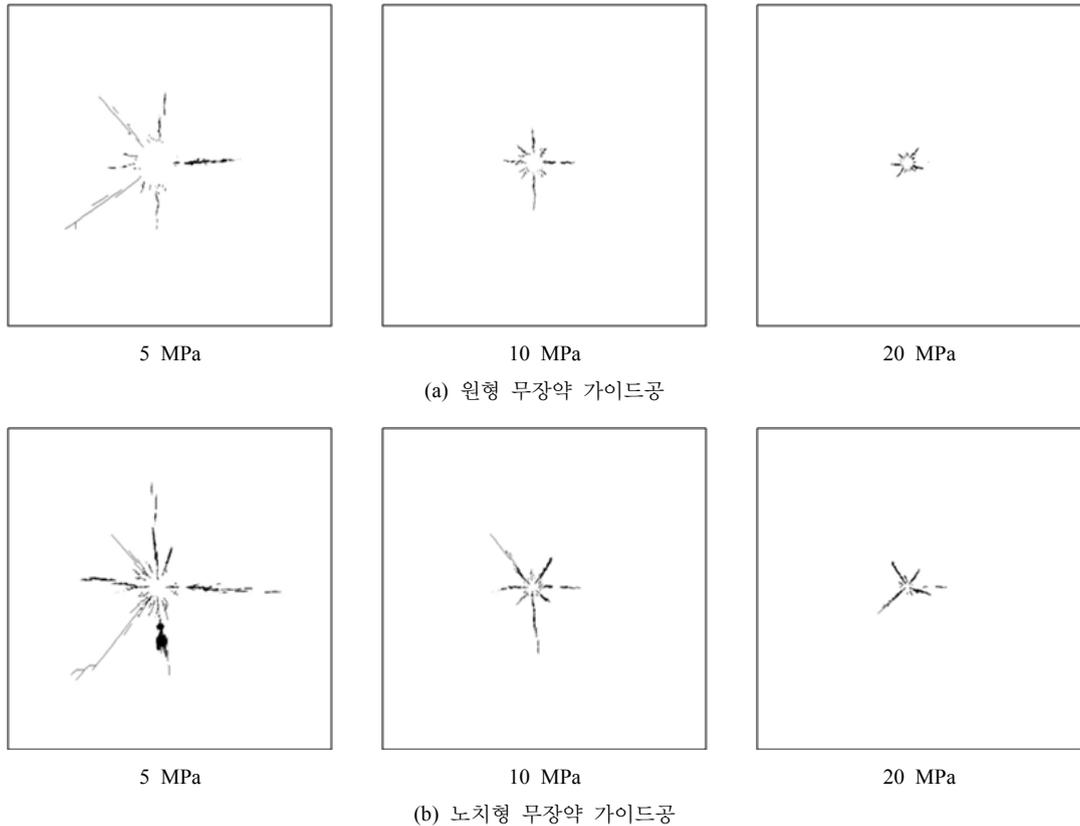


그림 6. 재료강도 변화에 따른 최종 균열 패턴

#### 4. 무장약 가이드공의 균열제어 효과에 미치는 영향인자 및 고찰

##### 4.1 재료강도의 영향

그림 6은 재료의 강도가 최종균열 형성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 5 MPa, 10 MPa, 20 MPa의 평균 인장강도를 고려하여 추가해석을 수행하였다(그림 6). 그 결과를 살펴보면 인장강도가 증가함에 따라 균열의 길이는 현저히 감소하였으며, 노치형 무장약 가이드공의 경우가 균열제어 효과가 높게 나타났다.

##### 4.2 하중속도의 영향

하중속도의 변화를 고려하기 위하여 그림 7과 같이 공내 작용압력의 최대값을 변경시켰다. 이때 하중속도는 각각 100 MPa/us, 150 MPa/us, 200 MPa/us가 된다. 그림 8은 하중속도의 변화에 따른 최종균열 패턴을 비교한 것이다. 하중속도가 증가함에 따라 탁월균열의 길이가 증가하고 있으며 가이드공의 균열제어효과가

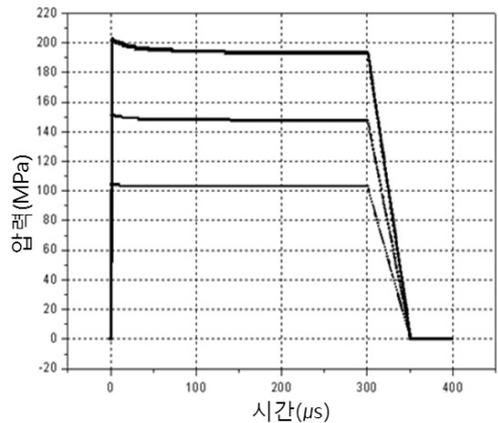


그림 7. 최대압력의 변화에 따른 발파하중 이력곡선

높아지고 있음을 보여준다. 노치형 무장약 가이드공의 경우에는 원형 가이드공에 비하여 보다 높은 균열효과를 나타냈다.

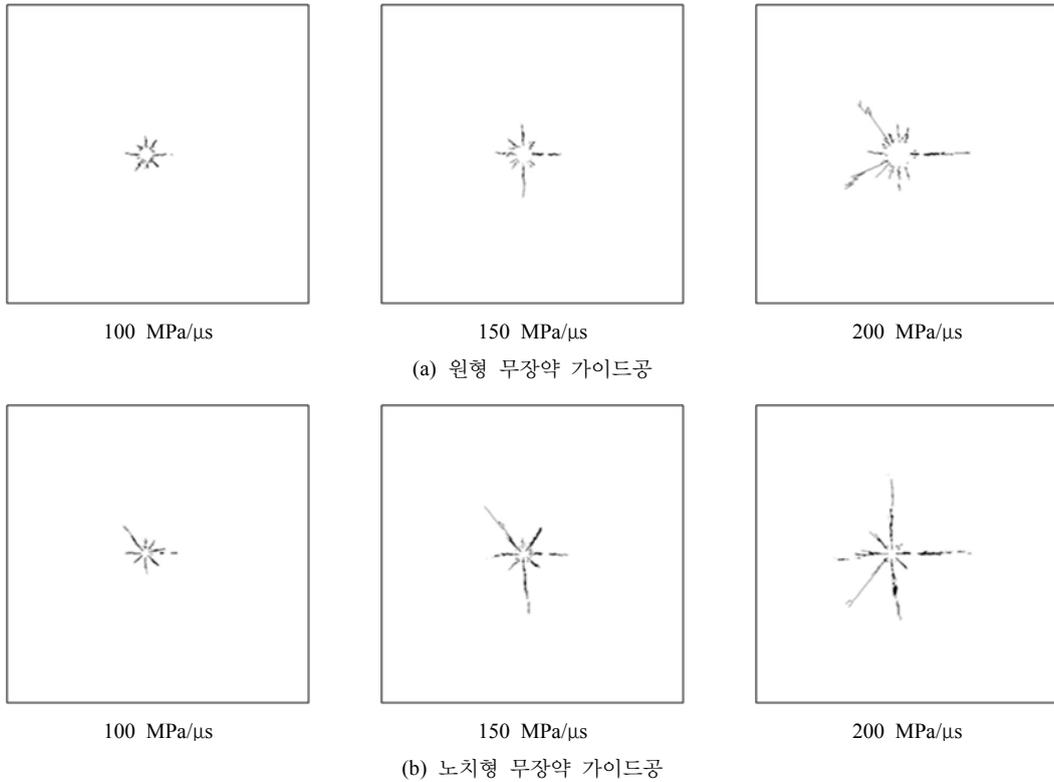


그림 8. 하중속도 변화에 따른 최종 균열 패턴

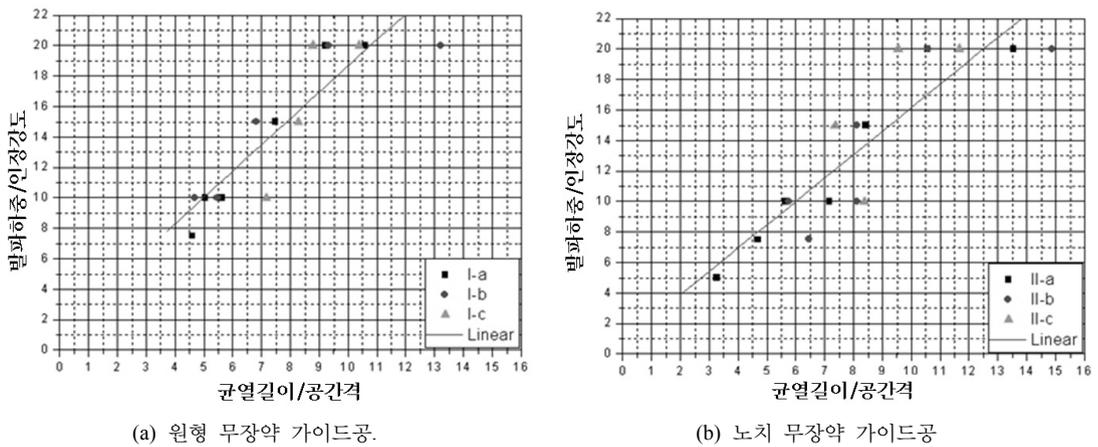


그림 9. 무차원 발파압력과 무차원 균열길이와의 관계

4.3 무장약 가이드공의 균열길이 제어에 관한 고찰

가이드공을 이용하여 균열 또는 파단면을 제어하는 발파의 설계에 있어서, 장약조건에 해당하는 발파하중 조건과 대상재료의 강도는 중요한 변수이다. 그림 9의

(a), (b)는 그림 5, 6과 8의 해석결과를 이용하여 공내 작용압력의 최대값과 평균 인장강도의 비를 무차원 발파압력으로, 가이드공 방향의 균열길이와 공간격의 비를 무차원 균열길이라고 하여 나타낸 것이다. I-a는 무장

약가이드공의 형상이 원형으로 공간격이 110 mm, I-b는 165 mm, I-c는 220 mm이며, II-a, II-b, II-c는 노치형 가이드공으로 공간격이 110 mm, 165 mm, 220 mm이다. 그 결과를 살펴보면 동일한 무차원 발파압력에서 노치형 무장약 가이드공이 원형 무장약 가이드공보다 더 큰 무차원 균열길이를 보이는데, 이것은 노치형 무장약 가이드공이 균열제어효과가 높다는 것을 의미한다.

## 5. 결론

무장약 가이드공의 균열제어 효과를 파악하기 위하여 무장약 가이드공을 적용한 콘크리트 블록 발파실험 결과를 바탕으로 동적파괴과정해석을 수행하였다. 장약공과 노치형 및 원형 무장약 가이드공을 가진 해석모델을 작성하고 공간격, 암반강도, 폭발하중속도에 따른 균열 발생 패턴과 길이를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 파괴를 고려하지 않은 동적해석결과, 노치형 가이드공의 경우 원형 가이드공 보다 긴 시간동안 가이드공의 좌우방향에 인장응력이 집중하는 현상을 보였다.
- 2) 콘크리트 블록 발파실험의 파괴과정해석결과, 원형 무장약 가이드공 모델의 경우 공간격이 길어짐에 따라서 탁월균열의 수가 증가하고 균열의 길이가 감소하는 경향을 보였다. 노치형 무장약 가이드공 모델의 경우 또한 공간격이 증가함에 따라서 균열의 길이가 감소하고 탁월균열의 수가 증가하는 경향을 보였다. 특히 공간격이 가장 짧은 110 mm의 경우, 노치형 무장약 가이드공 모델이 원형 무장약 가이드공보다 더 긴 균열길이를 보였다. 모든 해석모델에서 무장약 가이드공이 설치되어 있는 방향으로 탁월균열이 형성되었으며, 이것은 무장약 가이드공이 균열제어에 효과가 있음을 입증한다.
- 3) 무장약 가이드공의 균열제어 효과에 미치는 영향인자로서 재료강도와 하중속도의 결과에서, 인장강도가 증가함에 따라 균열의 길이는 현저히 감소하며, 노치형 무장약 가이드공의 경우 균열제어 효과가 높

게 나타났다. 하중속도의 경우, 하중속도가 증가함에 따라 탁월균열의 길이가 증가하였으며 가이드공의 균열제어효과가 높아졌다. 이것은 노치형 무장약 가이드공은 원형 가이드공에 보다 높은 균열효과가 있음을 의미한다.

- 4) 공내 작용압력의 최대값과 평균 인장강도의 비를 무차원 발파압력으로, 가이드공 방향의 균열길이와 공간격의 비를 무차원 균열길이라고 하여 분석한 결과, 동일한 무차원 발파압력에서 원형 무장약 가이드공에 비하여 노치형 가이드공이 보다 더 큰 무차원 균열길이를 보였다. 이것은 노치형 무장약 가이드공이 균열제어효과가 높다는 것을 의미한다.

## 참고문헌

1. 椋木淳二, 大原直, 秋吉直義, 国武誠二, 1992, 新發破工法の開發, 윙그홀 비트, 윙그홀 블라스팅공법, 터널과 지하, 일본터널기술협회지, 23.7, 41-45.
2. 정동호, 문상조, 안대진, 정원준, 김은관, 김동규, 2008, 발파공해 해소 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 개발에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 17.3, 216-224.
3. Nakamura, Y., S.H. Cho, M. Yoneoka, M. Yamamoto, K. Kaneko, 2004, Model Experiments on crack propagation between two charge holes in blasting, Science and Technology of Energetic Materials, 65.2, 34-39.
4. Cho, S.H., Y. Nakamura, B. Mohanty, H.S. Yang, K. Kaneko, 2008, Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting, Engineering Fracture Mechanics, 75, 3966-3984.
5. Fukuda, D., K. Kaneko, K. Ishiyama, M. Naitoh, S.H. Cho, 2009, Numerical method for achieving smoothness of fracture plane and minimizing overbreak in tunnel-blasting, 2009, Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, 125-134.
6. 이희광, 김승곤, 조상호, 2010, 발파에서 가이드공의 균열제어 유효성에 관한 실험적 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 20.2, 125-130.
7. 조상호, 양형식, 金子勝比古, 2004, SB발파에서 지발뇌관의 기폭초시오차가 암반파괴과정에 미치는 영향, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 14.2, 121-132.

**이 희 광**



2006년 전북대학교 공과대학 자원·에너지공학과 공학사  
2010년 전북대학교 대학원 자원·에너지공학과 공학석사

Tel: 063-270-2358  
E-mail: heegwang@jbnu.ac.kr  
현재 전북대학교 자원에너지공학과 석사

**김 학 만**



2008년 전북대학교 공과대학 자원·에너지공학과 공학사  
2010년 전북대학교 대학원 자원·에너지공학과 공학석사

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

**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

**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 조교수