

## 발파에서 가이드공의 균열제어 유효성에 관한 실험적 연구

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

### A Study on the Effectiveness of a Guide Hole on Crack Growth Control in Blasting

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

**Abstract** Model blast experiments of mortar blocks were performed to investigate the effect of the guide hole on crack growth. The mortar block specimens have a blast charge hole and 8 guide holes. Two of circular guide hole, notched guide hole, diamond shaped guide hole and diamond shaped guide holder are installed around 110 mm, 165 mm and 220 mm apart from the charge hole for each specimen. From the blast experiments, it was revealed that all the guide hole used in this study were effective for controlling the crack growth at the fracture control.

**Key words** Model blast experiments, Guide hole, Dynamic fracture process analysis code, Effectiveness of the fracture control

**초 록** 화약류를 이용한 발파에서 가이드공의 균열제어효과를 검토하기 위하여 모르타르 공시체를 이용한 발파 실험을 수행하였다. 모르타르 블록의 중앙에 장약공을 설치하고 주변에 방사상으로 4종류의 가이드공을 각각 두 개씩 설치하였다. 4종류의 가이드공은 원형, 노치형, 다이아몬드형, 다이아몬드 홀더형이며, 장약공과 가이드공의 간격은 각각 110 mm, 165 mm, 220 mm으로 하여 3가지 형태의 모르타르 공시체를 제작하였다. 발파 실험 후 공시체에 대한 분석결과, 적용된 가이드공 모두 균열제어효과를 보였으며 같은 폭발압력에서는 노치 가이드공이 보다 높은 균열제어효과를 나타내었다.

**핵심어** 모델발파 실험, 가이드공, 동적파괴과정해석법, 균열제어효과

#### 1. 서 론

제어발파공법에는 스무스블라스팅(smooth blasting), 프리스플리팅(pre-splitting), 라인 드릴링(line drilling), 쿠션 발파(cushion blasting)등이 있으며, 암반 내에 평탄한 파단면을 형성시키고 동시에 주변 암반 손상을 최소화 시키며 굴착 경비의 경감 효과를 높이기 위한 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있다. 70년대에는 가이드공의 균열제어효과에 대하여 부정적인 견해가 있었으나, 中川浩二 외(1982)는 아크릴 공시체와 모르타르 공시체의 중심에 장약공을 설치하고, 장약공 좌·우측에 원

형 가이드공을 설치하여 장약공과 원형 가이드공 사이의 거리에 변화를 주어 축소모형 발파 실험을 수행한 결과를 바탕으로 가이드공의 균열제어효과를 설명하였다.

Nakamura 외(1997)는 Q 스위치 루비레이저를 광원으로 이용하는 가시화시스템을 사용하여 노치형 가이드공과 원형 가이드공에서 간섭하는 응력파를 관찰하여 노치형 가이드공의 유효성을 입증하였다. Nakamura 외(2004)와 Cho 외(2008)는 파단면 제어 발파에서 가이드공의 유효성을 평가하기 위하여 실험 및 수치해석적 연구를 수행하였다. 최근 Fukuda 외(2009)는 대구경 원형 가이드공을 이용한 새로운 가이드공 스무스블라스팅을 터널 외각공 발파에 적용하여, 대구경 원형 가이드공의 현장 적용성을 검토하였다. 그러나 가이드공을 이용한 제어발파기술의 실용화를 위해서는 가이드공의 형상 및 장약조건에 따른 균열제어 성능에 관한 기초적 연구가 필요하다.

본 연구에서는 가이드공의 형상이 균열제어효과에 미

<sup>1)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 석사

<sup>2)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

<sup>3)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 조교수

\* 교신저자 : chosh@jbn.ac.kr

접수일 : 2010년 4월 12일

심사 완료일 : 2010년 4월 21일

게재 확정일 : 2010년 4월 22일

치는 영향을 검토하기 위하여 모르타르 공시체를 이용한 발파 실험을 수행하였다. 본 연구를 위하여 모르타르 공시체의 중앙에 장약공을 설치하고 주변에 방사상으로 원형, 노치형, 다이아몬드형, 다이아몬드 홀더형 4 종류의 가이드공을 각각 두 개씩 설치하였다. 모르타르 공시체는 장약공과 가이드공의 간격을 각각 110 mm, 165 mm, 220 mm로 하여 제작하였다. 발파 실험 후 공시체에 발생한 균열양상을 비교하여 가이드공의 균열 제어효과를 검토하였다.

## 2. 가이드공을 이용한 균열제어 발파 실험

### 2.1 모르타르 공시체 제작

가이드공 형상의 변화에 따른 균열 발생 특성을 살펴 보기 위하여 모르타르 공시체에 원형 가이드공, 노치형 가이드공, 다이아몬드형 가이드공 및 다이아몬드 홀더형 가이드공을 설치하였다. Fig. 1(a)는 원형 가이드공으로서 공경(D)  $\phi 38$  mm이고, PVC 파이프를 이용하여 고정된 뒤 콘크리트 타설 후 PVC 파이프를 제거하여 형성시켰다. Fig. 1(b)는 노치형 가이드공으로서 공경  $\phi 38$  mm, 노치는 선단의 길이는 10 mm, 각도는  $30^\circ$ 이다.

PVC 파이프를 이용하여 원형의 공을 만들었으며, 아연 강판을 이용하여 노치형상을 만들었고, 콘크리트 타설 후 PVC파이프 및 아연 강판을 제거하였다. Fig. 1(c)는 다이아몬드형 가이드공으로서 크기는  $37.4 \text{ mm} \times 23.28 \text{ mm}$ (가로 $\times$ 세로)이다. 모형 재료는 아연 강판을 이용하여 제작하였고, 고정된 뒤 콘크리트 타설 후 모형을 제거하였다. Fig. 1(d)는 다이아몬드 홀더형 가이드공으로서 규격은 다이아몬드형 가이드공과 동일하게 제작하였으며, PVC 파이프를 이용하여 원형 공을 만들었으며 콘크리트가 완전히 양생된 후 다이아몬드형 가이드공에 사용한 것과 동일하게 제작된 아연 강판 모형을 이용하여 원형 공에 삽입한 뒤 그 주위에 모래 또는 앵커 고착용 접착제로 충전하였고, 아연 강판은 제거하지 않았다. Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 모르타르 공시체의 크기는  $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ (가로 $\times$ 세로 $\times$ 높이)로 하였으며 또한 가이드공은 장약공을 중심으로 동심원 상에 배치하였다. Table 1은 모르타르 공시체 종류별 장약공과 가이드공 사이의 거리(S), 공간격/공경(S/D) 및 공시체 수를 보여주고 있다. 장약공의 천공장과 공경은 각각 150 mm,  $\phi 38$  mm으로, 장약공은 PVC 파이프를 이용하여 고정된 뒤 콘크리트 타설 후 PVC

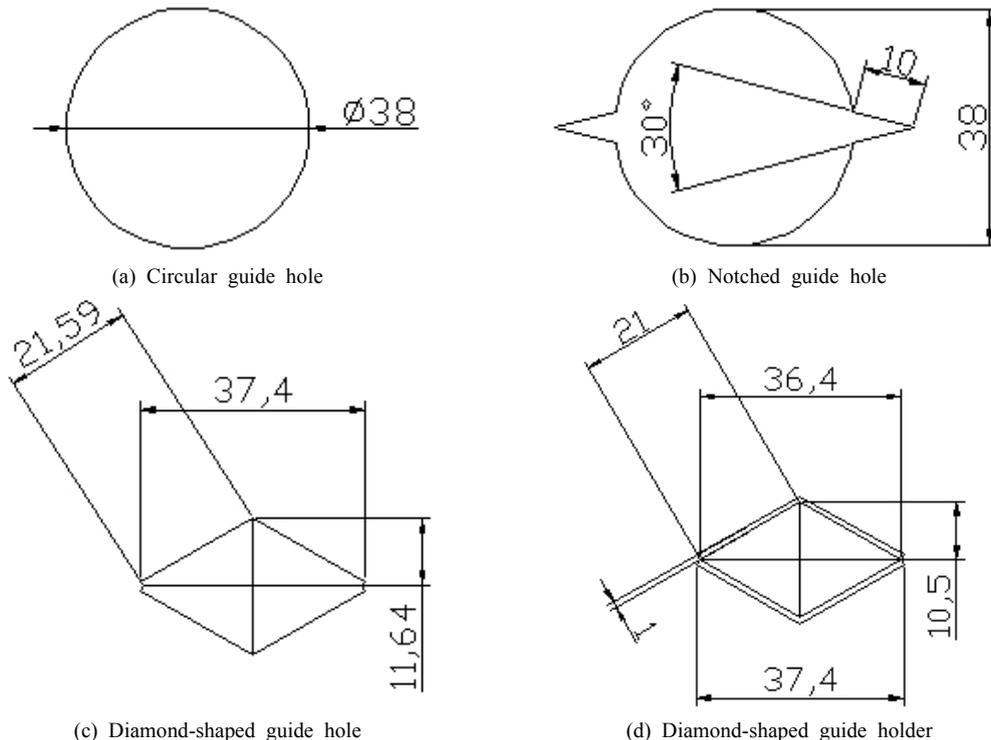


Fig. 1. Description of the guide holes (unit: mm)

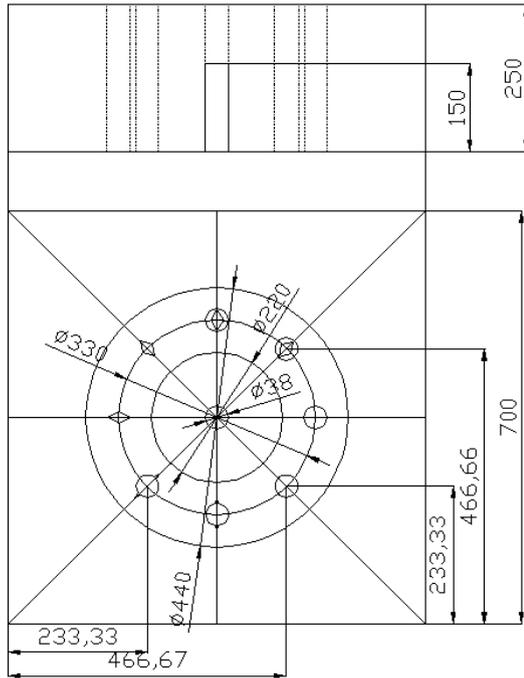


Fig. 2. Geometry of a mortar specimen (unit: mm)

Table 1. Type of mortar specimen

Type	Spacings between the guide holes and the charge hole, S (mm)	S/D	The number of specimen (EA)
I	110	2.9	1
II	165	4.3	1(+1)
III	220	5.8	1

파이프를 제거하여 형성시켰다. 양생기간이 30일 경과한 모르타르 공시체의 P파 속도는 3379 m/s였으며, 일축압축강도는 20.4MPa로 나타났다.

## 2.2 장약조건

장약공 주변의 파쇄영역을 최소화 시키면서 가이드공에 균열을 발생시키기 위해서는 미소폭약량의 디커플링 장약이 필요하다. 본 실험에서는 10 g/m 도폭선 5 g을 주장약으로 하였으며 기폭에는 전기뇌관이 사용되었다. 디커플링 장약을 위하여 Fig. 3과 같이 도폭선과 뇌관의 상·하단에 두꺼운 마분지를 이용하여 스킵트를 설치하였다. 전색장이 짧은 경우 모래와 같은 전색재로는 폭발압력을 충분히 구속하기 어려우므로 앵커 고착용 접착제를 주입하여 전색하였다.



Fig. 3. Detonating fuse and electric detonator

## 2.3 발파 실험 결과

Fig. 4(a)는 S/D가 2.9인 Type I 모르타르 공시체의 발파 후 균열 양상을 보여준다. 장약공을 중심으로 방사상의 인장균열이 발생하였으며, 특히 자유면과의 최단거리가 되는 수직과 수평방향에서는 원형 가이드공, 노치형 가이드공, 다이아몬드형 가이드공의 방향으로 파단면이 형성되었음을 관찰할 수 있다. 자유면과 최장거리가 되는 대각선 방향으로서는 원형 가이드공과 장약공이 연결되는 균열이 발생하였다. 균열의 진전 양상을 살펴보면, 직선성이 떨어지며 비교적 거칠게 형성되어 있음을 알 수 있다. 이것은 장약공으로부터 발생한 점선방향 인장응력파의 영향과 자유면의 변위에 의한 수직균열의 영향에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 4(b)는 S/D가 4.3인 Type II 모르타르 공시체의 발파 후 균열 양상을 보여주고 있다. 공구 주변에 작은 크기의 누두공이 형성되었으며, 장약공을 중심으로 방사상의 인장균열이 발생하였다. 특히 자유면과의 최단거리가 되는 수직과 수평방향에서는 원형 가이드공, 노치형 가이드공, 다이아몬드 홀더형 가이드공의 방향으로 장약공과 가이드공이 연결되는 균열이 발생하였으며 이 중에서 노치형 가이드공과 다이아몬드 홀더형 가이드공 방향으로 파단면이 형성되었음을 관찰되었다. 자유면과 최장거리가 되는 대각선 방향으로서는 노치형 가이드공, 다이아몬드형 가이드공, 다이아몬드 홀더형 가이드공의 방향으로 장약공과 가이드공 사이에 균열이 발생하였다.

Fig. 4(c)는 S/D가 5.8인 Type III 모르타르 공시체의 발파 후 균열 양상을 보여주고 있다. 자유면과의 최단

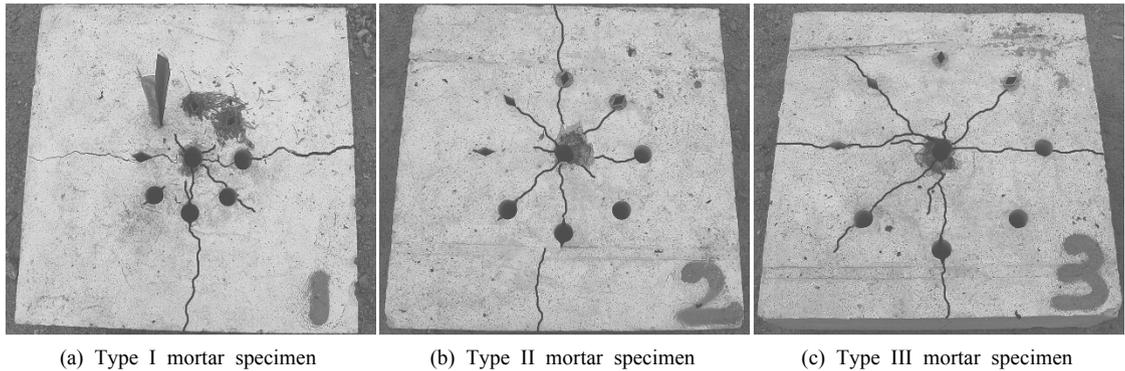


Fig. 4. Fracture pattern of blasted specimens (weight charge=5 g)

거리가 되는 수직과 수평방향에서는 원형 가이드공, 노치형 가이드공, 다이아몬드형 가이드공의 방향으로 장약공과 자유면을 연결하는 인장균열이 발생하였다. 자유면과 최장거리가 되는 대각선 방향으로서는 노치형 가이드공, 다이아몬드형 가이드공, 다이아몬드 홀더형 가이드공의 방향으로 장약공과 가이드공을 연결하는 균열이 발생하였다. 특히 노치형 가이드공과 다이아몬드형 가이드공은 대각선 방향 노치 선단에 각각 46 mm, 80 mm의 인장 균열을 보여주는데, 이것은 노치 선단의 응력집중에 의한 제어균열로 판단된다.

### 3. 가이드공의 균열제어에 미치는 영향 인자에 관한 고찰

#### 3.1 장약조건

발파 실험 결과를 살펴보면, 본 연구에서 적용한 원형, 노치형, 다이아몬드형, 다이아몬드 홀더형 가이드공 모두에서 균열제어 가능성을 보여주었다. 이때 충격파의 규모 즉 장약조건 변화가 균열제어효과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Type II 모르타르 공시체를 추가 제작하여 10 g을 장약하고 발파 실험을 수행하였다 (Fig. 5). 실험 결과에 의하면 장약공 주위로 파쇄영역이 형성 되었으며, 공구 방향으로 누두공이 형성되었다. 파단면은 장약공으로부터 설치되어 있는 8개의 가이드공을 지나 자유면까지 연결되었다. 이 결과는 원형, 노치형, 다이아몬드형, 다이아몬드 홀더형 가이드공 모두 균열제어효과가 있는 것을 의미하며 균열제어효과를 높이기 위해서는 적절한 장약조건을 고려해야 한다는 것을 지시한다.

#### 3.2 가이드공 주변의 응력상태

본 연구의 결과로부터 현장에서의 시공성을 고려하면



Fig. 5. Fractures of Type II specimen (weight of charge=10 g)

본 연구에서 적용한 가이드공 중에서 원형 가이드공과 노치형 가이드공이 현장 적용성이 높을 것으로 판단된다. 여기서 노치형 가이드공은 椽木 외(1992)가 개발한 워그홀 비트와 정동호 외(2008)가 소개한 노치비트시스템을 이용하여 천공이 가능하다.

Fig. 4(c)에서 보여주는 바와 같이 대각선 방향의 노치형 가이드공 노치 선단에 균열이 발생되었으나 원형 가이드공 주변에는 균열이 발생하지 않았다. 이러한 결과는 원형 보다 노치형 가이드공의 균열제어효과가 더 좋은 것을 보여주고 있으며, 이것은 가이드공의 형상에 따라 발생하는 응력상태에 기인된 것으로 판단된다. 발파하중에 의한 원형과 노치형 가이드공 주변의 응력상태를 파악하기 위하여 동적응력해석을 수행하였다. 동적응력해석은 조상호 외(2004)가 제안한 동적파괴해석

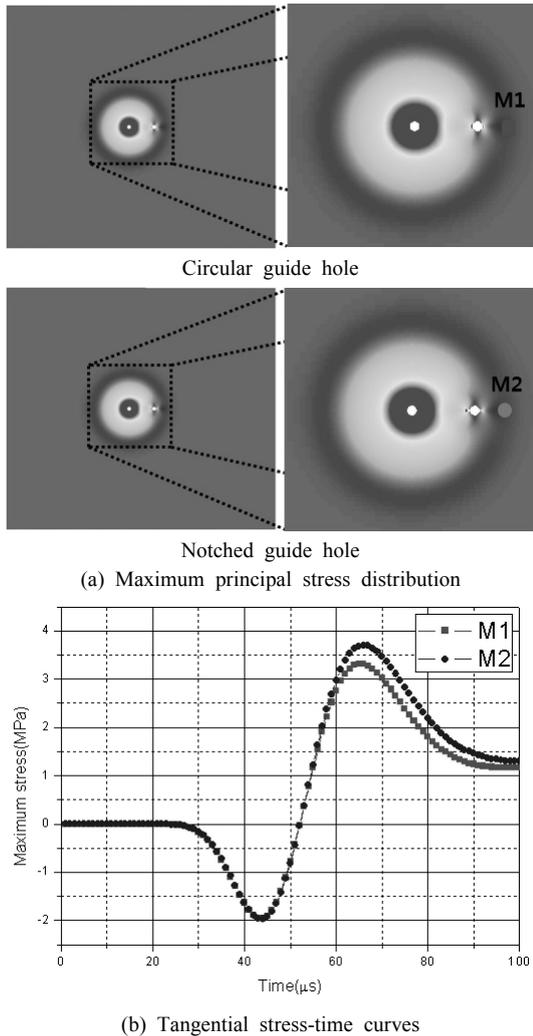


Fig. 6. Stress concentration around the circular guide hole and the tip of the notched guide hole

코드를 이용하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 해석모델에서 장약공과 가이드공의 거리(S)는 Type III 공시체와 동일하게 220 mm으로 하였으며, 물성값은 中村 외(1992)가 측정한 결과를 참고하여 입력하였다. Fig. 6(a)는 원형 가이드공과 노치형 가이드공의 최대주응력 분포를 보여준다. 즉 장약공 주변으로 접선인장응력파가 동심원상으로 전파하여 가이드공에 도달한 후의 주응력분포를 나타낸다. 가이드공 주변의 응력상태를 비교하기 위하여 원형 가이드공과 노치 가이드공의 우측으로 30 mm 이격된 지점(M1, M2)에서 접선방향 응력을 측정하였다. Fig. 5(b)는 원형 가이드공과 노치

형 가이드공 주변의 접선방향응력의 시간이력곡선을 보여준다. 여기서 인장응력은 정(+) 값을 나타낸다. 원형 가이드공과 노치형 가이드공의 최대인장응력값을 비교하면 노치형이 원형 가이드공보다 10% 높은 값을 보였다. 이것은 노치형 가이드공이 원형 가이드공보다 균열제어효과가 높다는 것을 지시한다.

#### 4. 결론

가이드공의 형상이 균열제어효과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 4가지 가이드공 형태의 모르타르 공시체를 제작하여 발파 실험을 수행한 본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) S/D가 2.9인 Type I 모르타르 공시체의 발파 후 균열 진전 양상을 살펴보면 직선성이 떨어지며 비교적 거칠게 형성되어 있는데 이것은 장약공으로부터 발생된 접선방향 인장응력파의 영향과 자유면의 변위에 의한 수직균열의 영향을 받은 것으로 판단된다.
- 2) S/D가 5.8인 Type III 모르타르 공시체의 발파 후 균열 양상을 보면 자유면과 최장 거리가 되는 대각선 방향으로 노치형 가이드공, 다이아몬드형 가이드공, 다이아몬드 홀더형 가이드공의 방향으로 장약공과 가이드공을 연결하는 균열이 발생하였으며 특히 노치형 가이드공과 다이아몬드형 가이드공은 대각선 방향 노치 선단에 각각 46 mm, 80 mm의 인장균열을 보여주는데, 이것은 노치 선단의 응력집중에 의한 제어균열로 판단된다.
- 3) 결과적으로 원형, 노치형, 다이아몬드형, 다이아몬드 홀더형 가이드공 모두 균열제어효과가 있는 것으로 판단되며, 가이드공의 균열제어에 미치는 영향 인자 중 적절한 장약 조건을 고려해야 균열제어효과를 높일 수 있음을 제시한다.
- 4) 현장 적용성이 높을 것으로 판단되는 원형 가이드공과 노치형 가이드공에 대하여 동적응력해석을 수행하였고, 원형과 노치형 가이드공 주변의 최대 접선방향인장응력을 비교한 결과 노치형 가이드공이 10% 높은 값을 보여주어 원형 가이드공보다 균열제어성능이 높다는 것을 설명하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 (유)고창산업개발 발파현장에서 수행되었으며 실험을 위하여 많은 도움을 주신 전형기 사장, 전문기 사장, 안희용 소장 등 관계자 여러분에게 깊은 감

사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 中川浩二, 坂本, 佐, 吉開亮介, 1982, 스프스블라스팅에서 가이드공의 이용에 관한 기초실험, 일본화약학회, 43.2, pp.75-82.
2. 中村裕一, 岩本誠治, 大原 直, 椛木淳二, 1997, 폭파 균열 제어에서 노치 가이드공의 유효성에 관한 모델실험, 일본 화약학회, 58.3, pp.131-137.
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, pp.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, pp.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 tanner-blasting, 2009, Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, pp.125-134.
6. 椛木淳二, 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, pp.41-45
7. 정동호, 문상조, 안대진, 정원준, 김은관, 김동규, 2008, 발파공해 해소 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 개발에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 17.3, pp.216-224.
8. 조상호, 양형식, 金子 勝比古, 2004, SB발파에서 지발뇌관의 기폭조시오차가 암반파괴과정에 미치는 영향, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 14.2, pp.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 자원·에너지공학과 석사

### 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