

여굴 제어를 위한 입체사진측량기법 분석

김병렬¹⁾, 정민수²⁾, 진연호²⁾, 최성웅^{1)*}

Stereo-photogrammetry Analysis for Over-break Control

Byung-Ryeol Kim, Min-Su Jeong, Yeon-Ho Jin, Sung-Oong Choi

Abstract When an underground limestone mine selects room-and-pillar mining method, in which the stability of mine openings is maintained by leaving safety pillars, the stability of safety pillars is always incompatible with their productivity. Therefore, the engineering decision for stability and productivity is essential. In this study, a progress of excavation faces by conventional blasting pattern has been examined in field for investigating over-break and stereo-photogrammetry method has been applied to this field measurement for improvement of accuracy. Also this result has been reflected instantly to composite blasting pattern by feedback, for minimizing overbreak. Field tests showed the relevant results that 3.5m² in over-break out of 70m² in total excavation face has been decreased, that is 5% of reduction rate in maximum.

Key words Room-and-pillar mining method, Productivity, Over-break, Stereo-photogrammetry method

초 록 광체의 일부를 안전광주로 남겨둠으로써 채광장의 안정성을 유지하는 주방식 채광법이 갱내 석회석 광산에 적용될 경우, 안전광주의 안전율과 광체의 채수율은 서로 상반될 수 밖에 없으며, 이에 대한 공학적 판단은 생산성과 안정성에 필수적인 요소이다. 본 연구에서는 현장조사를 통해 일반적인 발파패턴에 의한 굴진 단면의 진행과정을 살펴봄으로써 여굴 또는 미굴의 발생여부를 검토하였으며 이때 입체사진측량기법을 동원하여 굴착단면 측정의 정확성을 도모하였다. 또한 이 결과를 바탕으로 국부적인 압박조건을 고려한 혼합발파패턴을 즉각적으로 반영함으로써 여굴을 최소화할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 현장 적용을 통해 단면기준으로 최대 5% 가량의 여굴 감소 효과 (70m²의 단면을 발파할 경우 최대 3.5m²의 여굴 감소 효과)라는 유의미한 결과를 도출할 수 있었다.

핵심어 주방식 채광법, 채수율, 여굴, 입체사진측량기법

1. 서 론

갱내채광을 위한 주방식 채광법(room-and-pillar mining method)은 수평한 광체 또는 30°이하의 완만한 광체에 적용되는 채광법으로, 인위적인 지보재를 이용하지 않고 광석의 일부를 수직 안전광주로 남겨 놓아 상반을 지탱하는 방법이다. 이러한 주방식 채광

법에서 안정성이 확보된 높은 채수율을 달성하기 위해서는 채광장과 수직 안전광주의 형상을 유지하는 것이 매우 중요하며, 이를 위해서는 발파작업으로부터 발생하는 손상대에 대한 제어가 필수적이다.

손상대 영역에 대한 연구는 대부분 안정성과 기밀성이 높고 요구되는 국내외의 지하연구시설, 방사성 폐기물 지하처분시설 등을 대상으로 하고 있으며, 손상대의 규모에 대한 평가를 주요 연구내용으로 수행되고 있다(Olsson *et al.*, 2004; Tsang *et al.*, 2004, 2005; Kwon and Cho, 2007, 2008; Kwon *et al.*, 2009).

손상대에 대한 평가는 연구현장에서 채취한 암석코어를 이용한 실내실험적인 방법, 현장에서의 조사 및

¹⁾ 강원대학교 에너지자원·산업공학부

²⁾ ㈜한화

* 교신저자 : choiso@kangwon.ac.kr

접수일 : 2018년 3월 15일

심사 완료일 : 2018년 3월 21일

게재 승인일 : 2018년 3월 26일

시험으로부터 암반특성 변화를 측정하는 방법, 전산 해석을 이용하는 방법 등이 있다(Jang, 2002; Cho *et al.*, 2004; Jung, 2006; Kang and Ryu, 2006; Kwon *et al.*, 2016; Park and Kwon, 2017).

이러한 발파 손상대는 계획된 단면 이상의 단면이 발파되는 여굴의 발생에 주요한 영향을 미치며, 터널의 시공과정에서 발생하는 여굴은 5 ~ 30 %의 공사비용과 기간을 증가시킨다(Verma *et al.*, 2016).

본 연구에서는 손상대에 의한 여굴을 제어하고 그 영향을 파악하기 위하여 전자뇌관과 최외곽공 사이에 무장약공을 천공하는 혼합 발파패턴을 적용하여 발파를 수행하였다. 발파 이후의 굴진단면의 여굴을 분석하기 위하여 3차원 입체사진측량기법(stereo-photogrammetry)과 발파전문 사진측량 소프트웨어인 Blastmetrix3D를 이용하였으며, 발파조건 변화에 따른 여굴을 정량적으로 비교분석하였다.

2. 현장개요 및 시험발파 조건

2.1 현장개요

본 연구의 대상광산은 강원도 삼척시 신기면 대평리에 위치한 대성MDI 동해광산이며, 고생대 풍촌층의 석회석을 대상으로 채광하고 있다. 시험발파가 수행된 영역은 대평지구의 Lv520 채광장이며, 본 연구에서의 제어 요소인 뇌관의 종류와 최외곽공의 발파 패턴 이외의 환경적인 요인에 의하여 발생하는 오차를 최소화하기 위하여, 동일한 갱도를 대상으로 굴진하며 시험발파를 수행하였다(Fig. 1).

본 시험영역에 분포하는 절리군의 분포특성을 파악하기 위하여, 매 시험발파마다 절리의 방향성을 조사하고, 지질구조해석 프로그램인 Rocscience의 Dips를 이용하여 시험영역을 대표하는 절리군의 분포와 방향성을 분석하였다. 분석된 절리군의 분포는 Fig. 2와 같으며, 본 시험영역에는 180~197 °의 경사방향과 69~72 °의 급경사를 갖는 절리군의 분포가 가장 우세하며, 동일한 갱도에서 순차적으로 시험발파가 수행되었기 때문에 유사한 절리군의 방향성을 갖는 것으로 확인되었다. 또한 조사된 절리의 대부분이 Set-1과 Set-2의 절리군에 속하며, 기타 방향이나 무작위로 분포하는 절리가 없는 등 매우 규칙적인 분포상태를 보

이고 있는 것으로 나타났다.

2.2 시험발파 조건 및 발파패턴

시험발파가 수행되는 굴진단면의 발파패턴은 대상광산에서 사용 중인 발파패턴에 최외곽공에 조절발파를 적용한 기본 발파패턴(Fig. 3(a))과 조절발파를 위한 최외곽공 사이에 무장약공을 추가한 혼합 발파패턴(Fig. 3(b))으로 나뉜다. 모든 발파 패턴은 높이 7m와 너비 10m의 단면을 기준으로 설계되었으며, 발파공의 직경은 45mm이다. 또한 1 회 발파시의 굴진장은 4m이며, 공당 장약량과 뇌관의 기폭순서, 지연시차는 모든 발파패턴에 동일하게 적용하였다. 조절발파를 적용한 기본 발파패턴은 총 88 공의 발파공이 위치하고 있으며, 조절발파를 위한 최외곽공 사이에 무장약공을 추가한 혼합 발파패턴은 30 공이 추가된 118 공의 발파공이 위치하고 있다.



Fig. 1. Photograph of excavation face at Lv520.

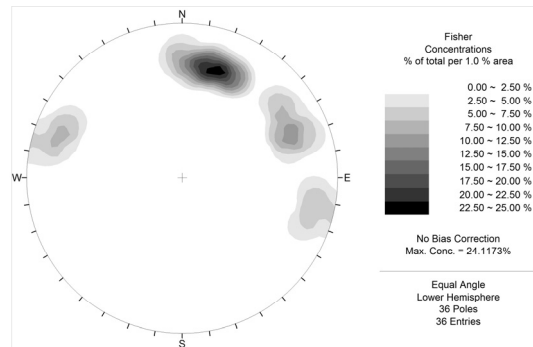
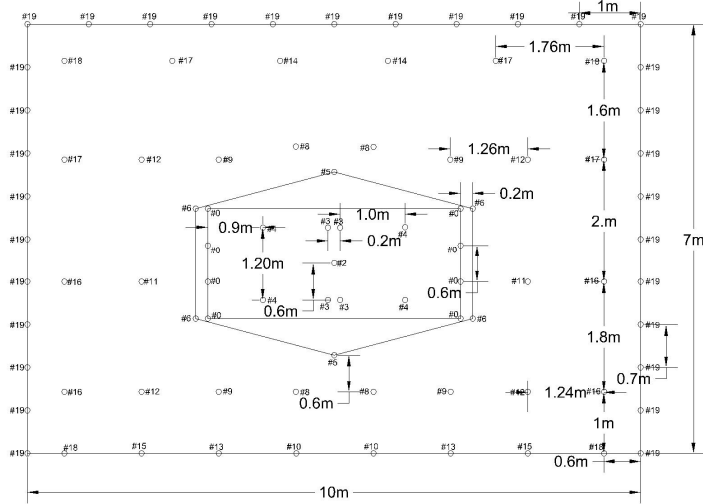
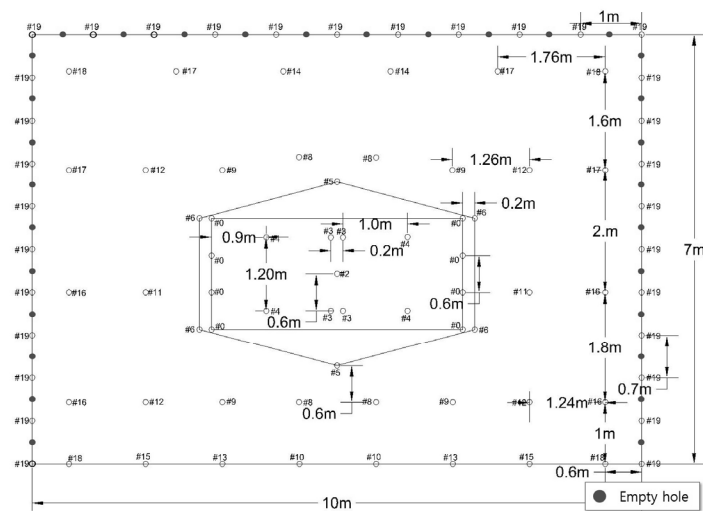


Fig. 2. Joint distribution pattern at Lv520.



(a) Basic blast pattern



(b) Combination blast pattern

Fig. 3. Blast pattern at Lv520.

3. 입체사진측량기법을 이용한 여굴 분석

3.1 Blastmetrix3D 촬영 시스템

본 연구에서는 손상대에 의한 여굴을 제어하기 위하여 뇌관의 종류와 발파패턴을 변경하며 시험발파를 수행하였으며, 그 영향을 파악하기 위해 입체사진측량기법을 이용하여 시험영역의 굴진단면에 대한 여굴을 분석하였다.

입체사진측량기법은 동일 피사체에 대해 서로 다른

측정위치와 방향에서 얻은 2개 이상의 화상정보를 분석함으로써 피사체 표면의 3D 좌표를 얻어내는 기법으로서, 본 연구에서는 굴진단면의 측량과 발파설계를 계획하는데 최적화된 3GSM 사의 Blastmetrix3D 시스템을 이용하였다.

Blastmetrix3D 시스템은 보정된 상용 DSLR 카메라를 통해 취득된 좌우 스테레오 영상을 이용하여 정합과정을 거쳐 점군(point cloud)에 기초한 3차원 영상을 생성하고 후에 작업자가 분석을 실시하는 시스

템으로, Blastmetrix3D 시스템의 하드웨어적인 구성은 Fig. 4와 같다.

카메라는 Canon 사의 EOS 7D MarkII, 렌즈는 Tamron 사의 SP AP 17-50mm F/2.8 XR di II A16 을 사용하였다. Table 1과 Table 2는 카메라와 카메라의 렌즈에 대한 제원을 나타낸다. 프로그램 제조사



Fig. 4. Camera system of Blastmetrix3D.

Table 1. Specification of Canon EOS 7D MarkII

Type of camera	Digital single-lens reflex camera
Effective pixels	20.20 million
Image sensor	22.3 × 14.9 mm CMOS
Image Size (pixels)	5472 × 3648(large), 3648 × 2432(medium)
Shutter speed	30 to 1/8000 s

Table 2. Specification of Tamron SP AP 17-50mm F/2.8 XR di II A16

Focal length		17 ~ 50 mm
F-number		F/2.8
Picture angle	Diagonal	78° 45' ~ 31° 11'
	Horizontal	68° 37' ~ 26° 70'
	Vertical	49° 10' ~ 17° 22'
Minimum focus range		0.27 m
Maximum reproduction ratio		1:4.5 (at f=50 mm, MFD=0.27 m)
Filter attachment size		67 mm
Lens construction		16 element in 13 groups

에서 카메라 및 렌즈의 왜곡에 대한 보정 정보를 제공하였으며, 여기에는 본 연구에 사용된 카메라와 렌즈의 모든 줌 및 초점 거리 등에 대한 보정 정보가 포함되어 있어, 이 정보를 통하여 렌즈 왜곡에 대한 보정을 수행한다. 카메라는 약 2천만 화소수를 가지는 디지털 방식의 일안 반사식(single reflex) 카메라이며, 연구에는 최대 크기(L)의 영상을 이용하였다. 렌즈는 일반적으로 사용되는 표준 줌렌즈로서, 초점거리는 17~ 50mm, 화각은 78° 45'~ 33° 11'의 범위를 갖는다.

3.2 Blastmetrix3D 촬영 시스템의 촬영방법과 결과처리

Blastmetrix3D 촬영 시스템의 사진촬영은 소프트웨어를 이용한 분석 시, 길이를 참고하기 위하여 1개의 Pole과 1개의 Delimiter를 굴진단면 하단의 양끝에 위치시킨 후 수행되었으며, 카메라의 초점거리를 17mm로 고정하고, 수평을 유지하여 굴진단면 중심의 기준 위치로부터 좌측과 우측의 동일한 거리에서 두 장의 사진을 촬영하였다. 또한 입체사진측량기법의 정확도를 향상하고 그림자에 의한 왜곡효과를 최소화하고자 Han *et al.*(2009)의 연구결과를 반영하여, 굴진단면에 200 lux 이상의 밝기를 출력할 수 있는 조명을 설치하였다. 천공이 종료되고 장약 작업이 수행되기 전에 사진촬영을 수행하였으며, 촬영된 두 장의 사진과 Blastmetrix3D 프로그램을 이용하여 3차원 영상처리를 수행하였다(Fig. 5).

3.3 입체사진측량기법을 이용한 여굴 분석결과

본 연구에서는 기본 발파패턴에 전기뇌관을 이용한 2회의 발파와 전자뇌관을 이용한 3회, 그리고 혼합 발파패턴에 전자뇌관을 이용한 3회, 총 8회의 발파를 수행하였으며, 매 시험발파마다 굴진단면 전방의 좌우측에서 두 장의 사진을 획득하였다.

Fig. 6에서와 같이, 전체 굴진단면은 Blastmetrix3D 모델의 굴진단면 전체와 측벽이 만나는 지점을, 천공단면은 최외곽공과 바닥공을 외부경계로 설정하였으며, 프로그램 상에서 경계내부의 영역에 대한 면적을 산정하였다. 또한 이전의 발파에서 예정된 천공단면과 천공 단면의 5 % 수준으로 계산된 Look-out의 면적을 합하여 발파의 이후에 생성되는 굴진단면의 전체 단면과 비교하였으며, 굴진단면의 전체 단면이 계

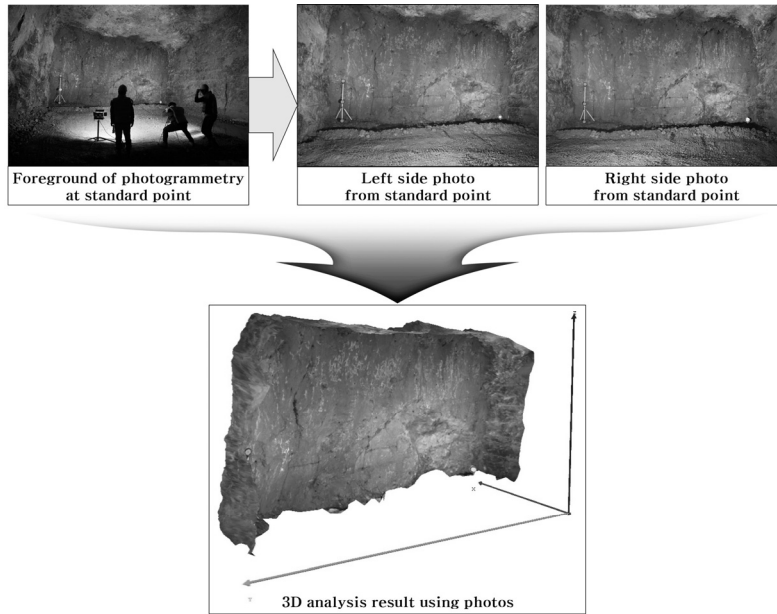


Fig. 5. Photographic method and processing sequence of Blastmetrix3D.

Table 3. Result of shape analysis on excavation faces by Blastmetrix3D and site investigation

Blast No.	Detonator + Blast pattern	Field survey			Stereo-photogrammetry					
		Height (m)	Width (m)	Area (m ²)	Height (m)	Width (m)	Drilling area (m ²)	Calculated lookout area (m ²)	Total area (m ²)	Overbreak area (m ²)
1	Electric + BP ¹⁾	7.50	10.25	76.82	7.32	9.77	75.5	3.78	88.3	10.8
2	Electric + BP	7.09	10.14	71.87	6.99	9.82	70.1	3.51	90.1	12.2
3	Electronic + BP	6.28	10.30	64.68	6.44	10.53	63.8	3.19	85.8	7.3
4	Electronic + BP	6.63	11.19	74.15	6.65	10.97	73.1	3.66	74.3	6.4
5	Electronic + BP	6.64	10.93	72.54	7.10	10.95	71.2	3.56	83.2	9.3
6	Electronic + CP ²⁾	6.74	10.69	72.05	6.80	10.59	68.3	3.42	84.1	6.1
7	Electronic + CP	6.39	10.37	66.26	5.67	9.85	65.5	3.28	77.8	5.6
8	Electronic + CP	6.19	10.25	63.40	5.95	9.97	64.1	3.21	74.4	5.8

¹⁾ BP : Basic blast pattern, ²⁾ CP : Combination blast pattern



Fig. 6. Total area and drilling area at excavation face (fourth blast).

획된 천공단면과 Look-out의 면적의 합한 것보다 큰 경우 여굴로 평가하였고, 반대로 합이 작을 경우 미굴로 평가하였다.

Table 3은 시험영역에서 수행된 8회의 시험발파에 대한 Blastmetrix3D의 굴진단면 분석결과이며, Fig. 7~9는 입체사진측량 분석결과를 굴진방향과 순서를 고려하여 나열한 것이다. 실측에 의한 굴진단면의 높이와 너비를 사진측량기법으로부터 분석된 높이 및 너비와 비교하여 입체사진측량기법의 정확도를 분석

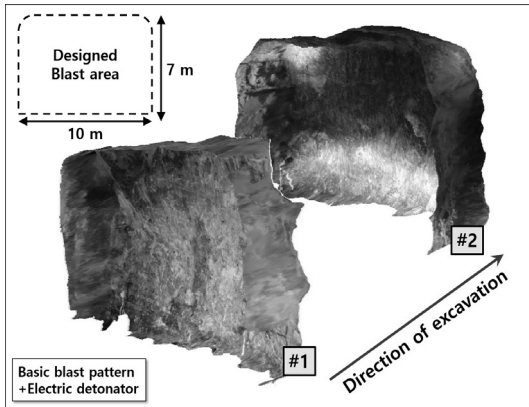


Fig. 7. 3D image analyzed by Blastmetrix3D (basic blast pattern+electric detonator).

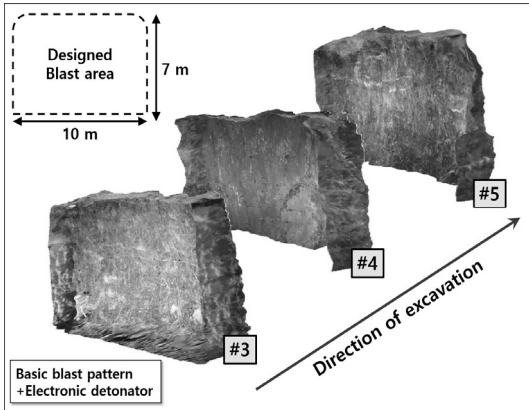


Fig. 8. 3D image analyzed by Blastmetrix3D (basic blast pattern+electronic detonator).

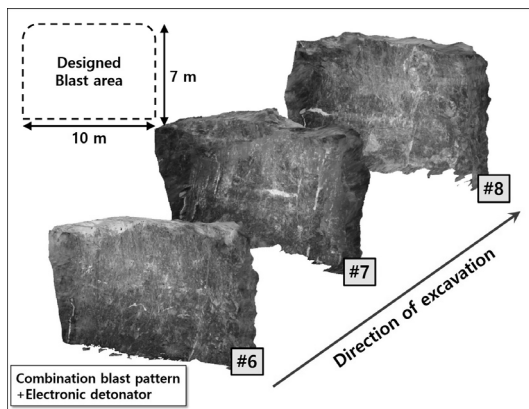


Fig. 9. 3D image analyzed by Blastmetrix3D (combination blast pattern+electronic detonator).

하고자 하였으며, 분석결과 0.02 ~ 0.72m의 차이를 나타내고 있음을 확인하였다. 이는 사진촬영 당시의 굴진단면 천반과 바닥 그리고 좌우측면이 고르지 못한 상태인 것을 감안할 때, 비교적 높은 정확도를 나타내는 것으로 판단된다.

전체 시험발파에서 6.5 ~ 12.2m²의 여굴이 발생한 것으로 분석되었으며, 이는 Fig. 10과 같이 시험지역에 분포하고 있는 급경사의 주절리굴이 발파시 이완되어 발파단면 외의 암반이 이탈되기 때문인 것으로 보인다.

기본 발파패턴을 적용하였을 때, 전기뇌관을 이용하여 발파를 수행한 경우 전자뇌관을 이용한 경우보다 3.5 ~ 5.7m², 평균 3.8m²의 여굴이 더 발생하는 것으로 나타났다. 이는 전기뇌관의 특성상 ± 5 ~ 10 % 이상의 시차오차를 갖기 때문에, 0.001 %의 정밀도를 갖는 전자뇌관을 사용하였을 때보다 발파공간의 시차를 정확하게 구현하지 못한 것이 원인으로 생각되며, 이로서 발파효과가 단면 전체에 고르게 발현되지 않고 오차에 의해 생성된 짧은 시차의 방향으로 발파가 집중되었기 때문인 것으로 판단된다.

전자뇌관에 혼합 발파패턴을 적용한 경우, 전자뇌관에 기본 발파패턴을 적용한 경우 보다 0.3 ~ 3.5m², 평균 2.0m²의 여굴이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 혼합 발파패턴을 적용 시, 굴착 경계선을 따라 추가된 무장약공이 발파시 발생하는 진동의 전파를 흡수하는 완충재 역할과 발파에 의한 균열의 발생을 굴착 경계선으로 유도하는 역할을 하였기 때문인 것으로 판단된다.



Fig. 10. Photograph of steeply dipping joints in test area.

4. 결론

본 연구에서는 여굴을 제어하기 위하여, 전자뇌관과 최외곽공 사이에 무장약공을 천공하는 혼합 발파 패턴을 적용하여 시험발파를 수행하였으며, 그 영향을 파악하기 위해 3차원 입체사진측량기법을 이용하여 시험영역의 굴진단면에 대한 여굴을 분석하였다.

시험영역의 굴진단면의 높이와 폭을 실측한 결과와 Blastmatrix3D로 분석한 결과를 비교해본 결과, 0.02 ~ 0.72m의 차이를 갖는 것으로 분석되었다. 이러한 차이는 굴진단면의 천반과 바닥이 고르지 않기 때문에 실측시 발생한 오차라 판단되며, 이러한 점을 감안할 때 Blastmatrix3D에 의한 분석결과는 비교적 높은 정확도를 갖는 것으로 판단된다.

뇌관의 종류에 따른 여굴과 미굴의 제어 영향을 확인하기 위하여, 기본 발파패턴에 전기뇌관과 전자뇌관 사용 시의 굴진단면의 여굴 면적을 비교분석하였으며, 전기뇌관을 사용할 경우 3.5 ~ 5.7m²의 여굴이 더 발생하였다. 이는 두 뇌관이 갖는 정밀도에 기인한 것으로 판단되며, 정확한 초시를 구현할 수 있는 전자뇌관이 여굴량을 절감시키는데 효과적임을 확인하였다.

최외곽공의 사이에 무장약공을 추가한 혼합 발파패턴의 여굴을 제어하는 영향을 확인하기 위하여, 기본 발파패턴과 혼합 발파패턴에 전자뇌관을 적용하여 굴진단면의 여굴과 미굴의 면적을 분석하였다. 전자뇌관에 혼합 발파패턴을 적용한 경우, 전자뇌관에 기본 발파패턴을 적용한 경우 보다 평균 2.0m², 최대 3.5m²의 여굴이 감소하는 것으로 나타났다. 혼합 발파패턴에서 추가된 무장약공이 발파 진동을 제어하는 완충재 역할을 하기 때문인 것으로 생각되며, 이로부터 혼합 발파패턴의 적용이 여굴의 제어에 유의미한 효과가 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서의 여굴을 제어하는 발파기법과 입체사진측량기법을 이용한 여굴과 미굴의 정량적인 분석방법은 높은 안정성을 요구하는 터널, 지하구조물 등의 시공 및 유지관리에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 자원개발특성화대학사업 산학협력연구단의 “광물자원 탐사개발 연구단”과 강원대학교의

“2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호-520160350)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Cho, W. J., J. H. Park and S. Kwon, 2004, Basic Design of the Small Scale Underground Research Tunnel ,KAERI/TR-2769/2004.
2. Han, J. H., J. J. Song and Y. D. Jo, 2009, Effect of Photographing Light Intensity on Rock Joint Survey in Mine Tunnels using Stereophotogrammetry, Tunnelling and underground space, Vol. 19, No. 6, pp. 517-525.
3. Jang, S. H., 2002, Characterization of stress-induced damage in rock and its application on the analysis of rock damaged zone around a deep tunnel, Ph. D Thesis, The Seoul National University, Korea
4. Jung, Y. H., 2006, Numerical estimation of excavation damaged zone by blasting, Ph. D Thesis, The Seoul National University, Korea.
5. Kang, C. W. and P. H. Ryu, 2006, A Study on the Characteristics of Blasting Vibration from Different Excavation Methods in Underground Mine, Explosives & Blasting, Vol. 24, No. 1, pp. 1-8.
6. Kwon, M. H., S. O. Choi and C. O. Kim, 2016, A study on stability analysis of large underground limestone openings considering excavation damaged zone, Tunnelling and underground space, Vol. 26, No. 2, pp.131-142.
7. Kwon, S. and W. J. Cho, 2007, Investigation of excavation disturbed zone around a tunnel by blasting, Explosives & Blasting, Vol. 25, No. 1, pp. 15-29.
8. Kwon, S. and W. J. Cho, 2008, Investigation of the development and the effect of an excavation damaged zone at KAERI underground research tunnel, KAERI, TR-3533.
9. Kwon, S., C. S. Lee, S. J. Cho, S. W. Jeon and W. J. Cho, 2009, An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel, Tunnelling and underground space technology, Vol. 24, No. 1, pp.1-13.
10. Olsson, M., B. Niklasson, L. Wilson and C. Andersson, 2004, Experiences of blasting of the TASQ tunnel, SKB, TR-04-73.
11. Park, S. and S. Kwon, 2017, Status of Researches of Excavation Damaged Zone in Foreign Underground Research Laboratories Constructed for Developing High-level Radioactive Waste Disposal Techniques, Explosives & Blasting, Vol. 35, No. 3, pp. 31-54.
12. Tsang, C. F., F. Bernier and C. Davies, 2004, Geohydromechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and

- indurated and plastic clays, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., pp.1-40.
13. Tsang, C. F., F. Bernier and C. Davies, 2005, Geohydromechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays-in the context of radioactive waste disposal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 42, No.1, pp.109-125.
 14. Verma, H. K., R. D. Dwivedi, P. P. Roy and P. K. Singh, 2016, Cause, impact and control of overbreak in underground excavations, Recent Advanced in Rock Engineering, pp. 29-34.



김 병 렬

강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 박사과정

Tel: 033-255-6253
E-mail: shingcore@kangwon.ac.kr



정 민 수

(주)한화 부장

Tel: 033-576-0593
E-mail: minsu.j@hanwha.com



진 연 호

(주)한화 차장

Tel: 033-576-0593
E-mail: jyh0924@hanwha.com



최 성 웅

강원대학교 공과대학 에너지자원·산업공학부 교수

Tel: 033-250-6253
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr