

발파하중 및 비석의 충격에 의한 광주의 지반진동의 예측 연구

이상곤¹⁾, 강추원^{2)*}, 장호민³⁾, 류복현³⁾, 김장원³⁾, 송하림³⁾, 김승은³⁾

Estimation of Ground Vibrations Around a Pillar Due to Blast Loading and the Impact of Flyrocks

Sang-Gon Lee, Choo-Won Kang, Ho-Min Chang, Pog-Hyun Ryu, Jang-Won Kim,
Ha-Rim Song and Seung-Eun Kim

Abstract In blasting for lighting, fatigue behaviors of pillars such as destruction and deformation may occur due to blasting vibration and flyrock, which may cause collapses of cavities.

This study aims to identify dynamic behavior of pillars to maintain efficient safety of cavities in large drafts. when they collide with flyrocks under blasting for the excavation. For the purpose, we compared ground vibration around pillar when flyrock collided with the pillar and that when explosive blast happened for the excavation. we conducted fragmentation analysis of the flyrock and compared impact vibration obtained from empirical equation with ground vibration obtained from regression analysis of real vibration data. also we compared those with results analyzed from numerical analysis.

Key words Blasting vibration, Impact vibration, Flyrock, Pillars

초 록 채광을 위한 발파작업 시 발파진동 및 비석에 의한 광주의 피로현상에 의해 주변에 위치한 광주의 변형 및 파괴가 발생할 수 있으며, 이로 인해 채굴공동의 붕락현상이 발생되기도 한다. 본 연구는 대규모 갱내 채굴공동의 효율적인 안정성 유지를 위해, 갱도 굴착에 따른 발파 작업 시 비산과의 충돌에 의한 광주의 역학적 특성을 파악하기 위한 것으로서 발파로 인한 광주와 비석의 충돌 시 광주 주변의 지반진동을 비교하였다. 이에 비석의 파쇄입도분석을 실시하였으며, 경험식에 의한 충격진동과 실제 데이터의 회귀분석에 의한 지반진동을 비교하였다. 또한 이것을 수치해석에 의해 분석된 결과와도 비교하였다.

핵심어 발파진동, 충격진동, 비석, 광주

1. 서 론

국내 석회석 광산은 환경문제 등으로 인하여 노천 채광에서 지하채굴로 전환되면서, 노천채광과 같은 대량생산을 유지하기 위하여 대형 장비에 의한 기계

화 채굴과 무궤도 운반인 Ramp way system이 채택되고 있다. 이와 같은 갱내 현대화 개발은 필수적으로 대규모 채굴 공동 및 운반궤도를 유지해야 함으로 갱도 및 작업장의 안정성 문제와 적정 광주의 보존이 문제가 되므로 채광설계에서 붕락의 방지와 안전한 채광작업을 위해 채굴공동과 광주의 설계가 매우 중요시 되고 있다(대한광업진흥공사, 2005).

일반적으로 발파공법은 짧은 시간동안 많은 양의 가스가 방출되어 고압의 상태로 암반을 파쇄하거나 암괴를 이동시켜 암반을 굴착하는 공법으로 발파에 의해 생긴 암석의 파쇄조각은 그것에 주어진 에너지

¹⁾ (주)쏘일테크엔지니어링

²⁾ 조선대학교 에너지자원공학과 교수

³⁾ 조선대학교 에너지자원공학과

* 교신저자 : ghdhk@naver.com

접수일 : 2010년 5월 17일

심사 완료일 : 2010년 6월 14일

게재 승인일 : 2010년 6월 21일

크기에 따라 원위지에서 불규칙한 방향으로 날아서 상당히 먼 곳까지 비산하며 이를 비석이라고 부르고 있다. 비석은 방향이나 거리 여하에 따라서 인체나 구조물 등에 대해 피해를 주게 된다. 채광을 위한 발파 작업 시 발파진동 및 암괴의 비산에 의한 광주의 피로 현상에 의해 주변에 위치한 광주의 변형 및 파괴가 발생될 수 있으며, 이로 인해 채굴공동의 붕락현상이 발생되기도 한다.

이에 본 연구는 대규모 갱내 채굴공동의 효율적인 안정성 유지를 위해 갱도 굴착에 따른 발파 작업 시 비석과의 충돌에 의한 광주의 특성을 파악하기 위해 광주와 인접하여 발파작업이 수행되고 있는 갱도를 대상으로 진행하였으며, 비석의 파쇄입도분석을 통해 비석이 광주에 충돌할 때 광주가 받는 충격진동을 Perkin(1989) 경험식에 의한 예측값과 실제 진동데이터의 회귀분석을 통해 얻어진 발파진동 예측식에 의한 발파진동 예측값과 수치해석에 의해 분석된 결과를 비교하여 광주 설계시의 충격진동의 영향을 고려하고자 하였다.

2. 발파진동의 예측

2.1 발파패턴 및 비산

본 연구지역인 석회석 광산의 갱도는 폭(B) 6~10m 이고 높이(H) 6m 규격의 막장을 천공경 $\phi 45\text{mm}$, 공

간격 0.8~1.8m, 최소저항선0.8~1.6m로 JUMBO DRILL 를 이용하여 천공하였다. 그리고 과광회수율을 높이기 위한 V-Cut방식을 채택하고, 심발각도는 60~70°, 천공장은 3.8m, 굴진장은 3.5m이다. 공당 장약량은 전폭약 New Emulite 150($\Phi 25$) 1ea(0.1kg)과 ANFO 3.00~3.33kg/hole을 사용한다. (Fig. 1)

연구 지역의 석회석 광산에서 발파에 의한 비산거리 및 비산속도 측정은 인명 혹은 구조물에 대한 피해 방지를 위한 측정보다는 광주의 안정성에 영향을 미치는 정도를 알기위해 비산거리를 측정하였다.

터널에서의 비산속도 및 비산거리는 Dupont사에서 제시한 V-cut의 경우의 비산거리 실험식으로서 식 (1), (2)와 같은 공식으로 이론적인 비산속도 및 비산거리를 산출하였다.

$$V_o = 34(LD)^{-0.5} [m/sec] \quad (1)$$

$$L = V_o \sqrt{\frac{2h}{g}} [m] \quad (2)$$

여기서, LD : 폭약 단위중량당 채석중량(t/kg)

h : 심빼기 위치높이(m)

g : 중력가속도($=9.8m/sec^2$)

석회석 광산 갱도의 이론적인 비산속도 및 비산거리는 Table 1과 같다.

2.2 현장실험 및 결과분석

본 연구에서는 Fig. 1의 발파조건과 천공 및 점화 패턴으로 7회에 걸쳐 실시된 발파진동 계측결과 총 26개의 자료를 획득하였으며 계측된 자료는 Table 2와 같다. 그리고 발파진동 계측은 총 4대의 계측기를 사용하여 발파지점과 22~242m의 거리에서 행해졌다.

본 연구에서 측정된 Table 2의 진동(peak particle velocity) 데이터의 회귀분석을 통해 입지상수 K, n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1

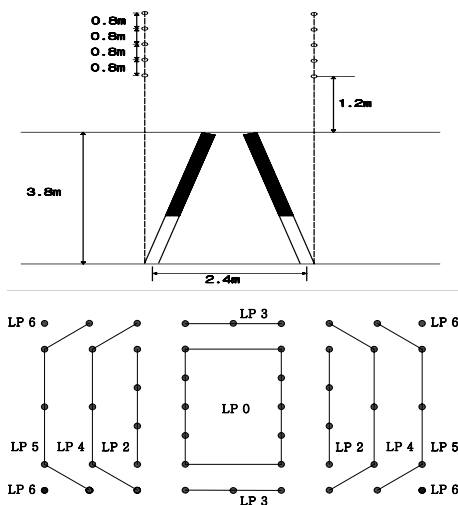


Fig. 1. Blasting pattern in study area.

Table 1. theoretical flyrock velocity and flyrock distance

Excavation weight (ton)	LD (t/kg)	Flyrock velocity (m/sec)	Flyrock distance (m)
36.29	1.06	33.02	16.34

Table 2. Measured peak particle velocities with distance

NO.	PPV (cm/s)	Charge (kg/delay)	Distance (m)	NO.	PPV (cm/s)	Charge (kg/delay)	Distance (m)
1	1.23	34.30	102	14	2.64	34.30	65
2	2.86	34.30	85	15	1.49	34.30	72
3	4.37	34.30	32	16	1.41	34.30	90
4	8.53	34.30	22	17	1.19	34.30	95
5	1.22	34.30	124	18	1.16	34.30	105
6	1.54	34.30	111	19	0.91	34.30	110
7	5.52	34.30	71	20	1.09	34.30	80
8	4.71	34.30	61	21	0.34	34.30	157
9	0.43	34.30	163	22	0.27	34.30	227
10	0.58	34.30	141	23	0.56	34.30	239
11	0.43	34.30	167	24	0.43	34.30	242
12	0.60	34.30	123	25	0.57	34.30	138
13	4.85	34.30	47	26	0.47	34.30	147

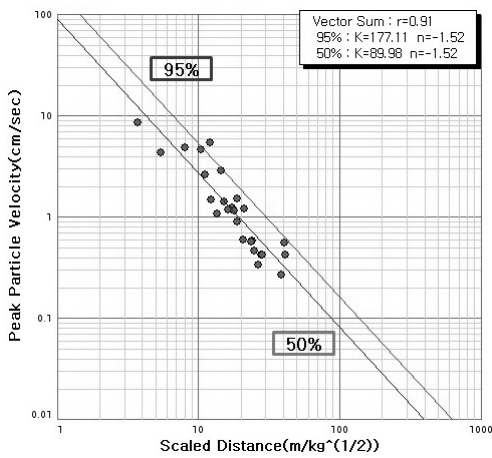


Fig. 2. Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance

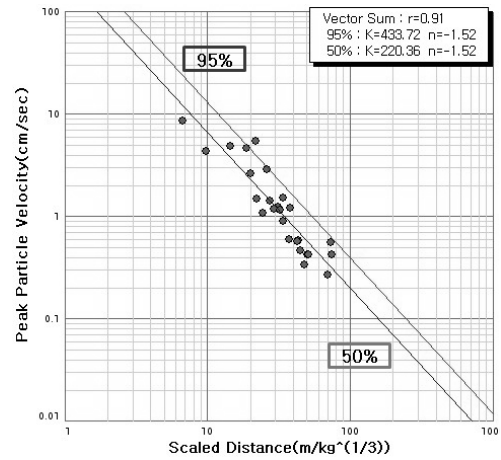


Fig. 3. Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance

차 상관관계를 이용하여 전산처리 한 결과는 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 나타났으며 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리에 따른 발파진동 예측식은 식 (3)과 식 (4)로 나타났다.

$$V = 177.11 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.52} \quad r = 0.91 \quad (3)$$

$$V = 433.72 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.52} \quad r = 0.91 \quad (4)$$

예측식은 모두 95%의 신뢰도를 가지는 식으로 K 값은 자승근이 177.11, 삼승근은 433.72로 나타났으며, n 값은 모두 -1.52로 나타났다. 그리고 상관계수는 자승근과 삼승근 모두 0.91로 모두 높은 상관성을 보여주고 있다.

본 연구에서는 근거리에서 더 보수적으로 적용되는 삼승근 환산거리에 따른 발파진동 예측식을 이용하여 이론 비산거리(16.34m)와 수치해석에서 적용된 막장면과 광주사이의 거리(14.95m)에서 발파진동을 예측하였다.

이론적 비산거리에서의 발파진동의 예측

$$V = 433.72 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.52}$$

$$= 433.72 \left(\frac{16.34}{\sqrt[3]{34.30}} \right)^{-1.52} = 37.23 \text{ cm/s}$$

수치해석 적용거리에서의 발파진동

$$V = 433.72 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.52}$$

$$= 433.72 \left(\frac{14.95}{\sqrt[3]{34.30}} \right)^{-1.52} = 42.62 \text{ cm/s}$$

3. 충격진동의 예측

3.1 파쇄입도 분석

개요

- 본 연구는 파쇄입도 분석을 Split Engineering사의 Split Desktop을 사용하였다.
- Split는 발파나 파쇄된 암석의 입도 분석을 위한 영상 분석 시스템이다.
- 분석의 단계는 영상의 입력, 영상처리 및 연산, 결과 분석, 출력단계로 나누어진다.
- 야외에 고정으로 설치된 camera나 camcorder로부터의 영상 그리고 사진 혹은 디지털 파일등으로부터의 영상 사용이 가능하다.
- 영상에 나타난 각각의 파쇄된 암석들의 경계부분들을 EDV(Edge Detection Variable)로 최적화하여 가장자리를 탐색하며, 가장자리의 탐색의 신뢰도를 높이기 위하여 수작업에 의한 수정도 가능하다.
- 이 시스템은 2차원 net의 측정을 통하여, 기하학적 확률을 이용하여 3차원적인 분포를 추정할 수도 있다.

영상처리 시스템(Image processing system)의 특징

다수의 영상자료를 신속한 처리와 분석이 가능하며, 저렴한 비용으로 다양한 샘플링 오차를 최소화 할 수 있다. 파쇄암괴의 크기에 영향을 거의 받지 않으며,

비파괴 시험이기 때문에 체질에서 파쇄 되기 쉬운 석탄이나 방해석과 같은 연약한 암석이나 광물의 경우에도 적합하다. 또한 영상처리의 속도가 빠르기 때문에 생산에 영향을 주지 않는다.

분석 시 고려하여 할 사항

파쇄암에 대한 Data-sampling은 평가의 방법, 범위, 발파 암의 용도 등을 고려한 가장 대표성을 가지는 영역을 설정하였다. 분석 시 가장 중요한 고려 사항은 다음과 같다.

- ① 전체적인 발파 암에 대한 평가인가, 국부적인 영역에 대한 평가를 먼저 계획해야 한다.
- ② 동일 대상에 근거리와 원거리 사진을 비교분석한다.
- ③ 사진의 명암에 주의해서 Sampling한다.
- ④ 사진의 각도에 주의하며 각도설정 시 가중치를 부여한다.
- ⑤ 다른 파쇄도 평가와 Feed-back을 실시하여 보정한다.

영상 처리 순서

영상처리는 파쇄암석편의 영상을 탐색하여 암석편 외곽선들의 망을 구성하는 binary image로 전환하기 위해서 사용한다.

- ① block의 인식
- ② Edge Detection Variables (영상처리의 각 단계에서 모서리 찾는 과정을 최적화하기 위해 EDV라는 요소들을 사용자가 쉽게 사용할 수 있음)
- ③ net의 신뢰도 향상을 위한 수정편집

Schuhmann model, Rosin-Rammler model

입도분포의 적용을 위해 사용되는 함수이며, 두 모델 이외에 로그정규분포함수가 있는데, Rosin-Rammler model은 분쇄산물 등에 주로 적용되며, 로그정규분포 함수는 체를 통한 분석에 주로 사용된다.

- Schuhmann model

$$\% \text{ volume} < \text{size } X = 100 \times (X / TOP)^m \quad (5)$$

여기서, $TOP = top \text{ size}$, m 은 재료 상수(Slope)

- Rosin-Rammler model

$$\% \text{ volume} < \text{size } X = 100 \times (1 - \exp(-0.693(X/X50)^n)) \quad (6)$$

여기서, $X50 = 50\%$ 통과 크기,
 n 은 균등성(Uniformity)

각각의 모델에 나오는 두개의 변수는 사이즈 분포에서 알아낸 fine cutoff에서 다른 하나는 fine cutoff보다 약간 큰 것을 통해서 알아 낼 수가 있다(선우 춘외, 2001).

파쇄입도 분석 결과

본 연구에서는 Split Desktop을 사용하여 파쇄입도 분석을 실시한 결과는 Table 3과 Fig. 4와 같다. Rosin-Rammler model 및 Schuhmann model의 평균 파쇄입도($X50$)는 각각 18.58cm와 20.68cm이며 Schuhmann

model에 비해 Rosin-Rammler model이 결정계수(R^2)는 0.9914로 상대적으로 높은 상관성을 가지는 것으로 분석되었고, 파쇄암석 전체 무게(%)에 해당하는 각각의 입도분석 결과 50%수준의 파쇄입도는 17.57cm이고 최대 파쇄입도는 49.83cm로 분석되었다.

분석 결과 높은 빈도로 발생하는 파쇄입도와 충격량이 커서 광주에 많은 영향을 미칠 것으로 생각되어지는 40~100%범위인 15.12~49.83cm의 입도를 이용하여 구의 부피로 계산하여 비석의 질량을 구하여 2장에서 구한 비산속도와 함께 충격에너지 및 충격진동을 산정하였다.

3.2 충격진동

본 연구에서는 국내에서 보편적으로 사용하는 식 (7)의 충격진동 경험식을 사용하였으며 지반의 상태를 나타내는 상관계수 K 는 석회석 광산의 암반이므로 0.85를, 경험계수 n 은 일반적으로 사용하는 -0.5를

Table 3. Result of fragmentation analysis

Passing percentage (%)	Size (cm)		Uniformity	1.95	
F 10	7.63	Rosin-Rammler model	$X50$	18.58	
F 20	10.43		Slope	0.9914	
F 30	12.80			Slope	1.32
F 40	15.12				Schuhmann model
F 50	17.57		R-Squared	0.9319	
F 60	20.36				
F 70	23.61				
F 80	28.03				
F 90	35.86				
F 100	49.83				

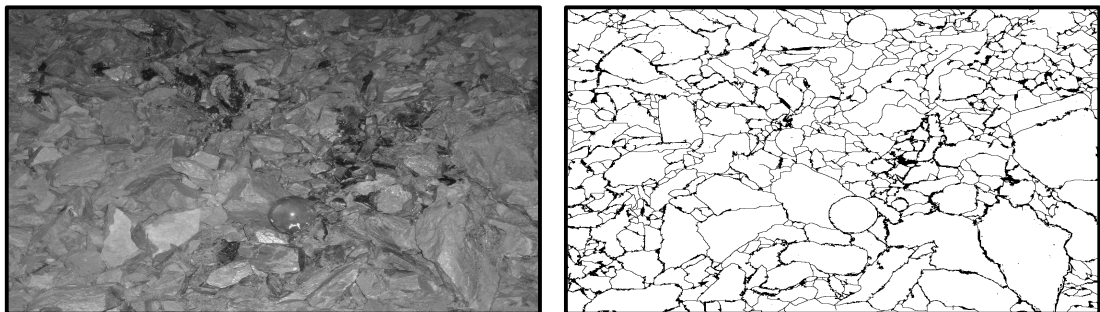


Fig. 4. Digital image processing result for the fragment size distribution

적용하여 F 40, 50, 70, 90, 100에서의 충격진동을 예측하였다. 거리 d 는 충격중심으로 부터의 거리(단위 거리)로써 파쇄암이 광주와 충돌했을 때 예상충격진동이 발생하는 지점으로 광주의 표면에서 단위거리로서 0.01 m를 적용하여 예측하였다.

$$V = \left(\frac{d}{\sqrt{K \cdot E}} \right)^n \quad (7)$$

여기서 V : 최대 진동 속도(mm/sec)

d : 충격 중심으로 부터의 거리(m)

K : 지반 상태를 나타내는 상관계수(0.0~1.0)

E : 충격에너지(Joules)

$$[E = mgh + \frac{1}{2}mv^2]$$

n : 경험계수(-0.5 적용이 일반적)

여기서 K 는 충격진동이 발생하는 대지의 토질에 따라 모래질의 경우는 0.5내외, 일반 토사일 경우 0.6~0.7, 그리고 암반일 경우에는 0.8~0.9를 적용하며, E 는 부재의 질량과 낙하높이, 속도에 의해 계산된 충격 에너지를, n 은 경험계수로써 일반적으로 -0.5를 적용하여 충격진동(V)을 예측한다(임대규 외, 2004).

발파진동속도에 근거한 암반손상권은 Langefors 의 여러 학자들에 의해 연구되어왔으며 그 기준은 대략 25.4~100cm/s에서 암반의 손상이 일어난다고 보고 되어 왔다(장수호 외, 2000). 식 (7)에 의해 예측된 충

격진동은 Table 4와 같이 6.94~16.96cm/s의 범위로 발파진동속도에 의한 암반손상 기준에 미치지 못하는 것으로 예측되었다. 하지만 이것은 단지 하나의 비석을 기준으로 물리량에 의한 충격진동을 발파진동속도에 의한 암반손상권의 기준과 비교 했을 뿐이므로 비석에 의해 광주가 받게 되는 실제적인 표면의 충격과 파괴 및 각각의 비석이 발생시키는 충격진동의 중첩은 고려되지 않았으므로 진동속도의 비교만으로는 광주가 안정하다고 단정 지을 수는 없다.

4. 수치해석 분석

4.1 개요

본 연구에서 광주에 인접한 발파작업 수행에 따른 광주의 영향을 검토하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 이로 인해 발파동해석 수행으로 얻어진 광주의 입자진동 속도를 통하여 광주의 영향을 검토하였다. 검토 방법으로는 Fig. 5와 같이 광주와 인접하여 발파작업이 수행되고 있는 막장을 검토 단면으로 선정하였고, 터널 막장의 복잡한 발파패턴의 모사가 어려움에 따라 굴착예상단면에서 최대지발당 장약량이 나오는 부분을 모사하여 발파하중을 적용하였고, 발파공벽에 작용하는 작용압력을 최대지발당 장약량이 나오는 부분에 작용하는 압력으로 환산하여 수치해석을 수행하였다. 발파로 인한 광주의 영향과 비석에 의한 광주의 영향을 검토하기 위해 광주 좌측면 4 지점에서의 진동속도를 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 6과

Table 4. Impact vibration by flyrock

Passing percentage (%)	K	n	E(joules)	V(mm/s)
F 40	0.85	-0.5	2723.34	69.36
F 50			4271.58	77.63
F 70			10364.28	96.88
F 90			36305.63	132.54
F 100			97416.48	169.63

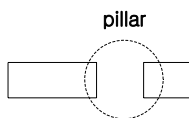


Fig. 5. Geometry of the dynamic analysis model.

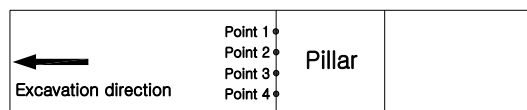


Fig. 6. Measuring point.

같다. 본 연구에서 적용된 적용프로그램은 지반 범용 해석 프로그램인 VisualFEA를 사용하였다.

본 해석에서는 탄성모델을 적용하여 dynamic 해석을 수행하였고, 경계조건은 점성경계를 적용하였다. 총 element 1864개, node는 996개를 사용하였으며, 폭약의 기폭으로 발생하는 발파하중 뿐만 아니라 발파로 인한 비석이 광주에 충격이 가했을 때의 하중을 계산하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 지반 동적물성치는 Table 5와 같으며, 발파 비석에 의한 충격하중은 Table 6과 같다.

4.2 해석결과

수치해석결과 각 측정지점에서 방향별 최대 진동은 Table 7과 Table 8과 같이, 광주에서 발파로 인한 X 방향 진동속도의 경우 Point 1은 28.81cm/s, Point 2

는 30.49cm/s, Point 3은 30.37cm/s, Point 4는 28.92cm/s, Y 방향 진동속도의 경우 Point 1은 5.65cm/s, Point 2는 2.06cm/s, Point 3은 1.89cm/s, Point 4는 5.30cm/s로 분석되었다.

또한, 발파로 인해 비석에 의한 굴착방향 후방의 광주에 가해지는 이론적인 충격진동속도는 최대 파쇄입도(49.83 cm)에서 16.96 cm/s로 산정되었으며, 유한요소 해석을 통한 충격진동속도 분석결과 광주에서 X 방향 진동속도의 경우 Point 1은 12.91 cm/s, Point 2는 14.94cm/s, Point 3은 15.22cm/s, Point 4는 12.86cm/s, Y 방향 진동속도의 경우 Point 1은 0.67cm/s, Point 2는 0.28cm/s, Point 3은 0.28cm/s, Point 4는 0.36m/s로 분석되었다. Fig. 7과 Fig.8은 발파와 비석에 의해 발생하는 지반진동의 분포를 보여준다. Fig. 9에서 보

Table 5. Properties of the analysis model

Rock type	Limestone
V_p (m/sec)	5163
V_s (m/sec)	2832
Dynamic young's modulus(MPa)	29850000
Dynamic poisson's ratio	0.261

Table 6. Impact pressure by flyrock

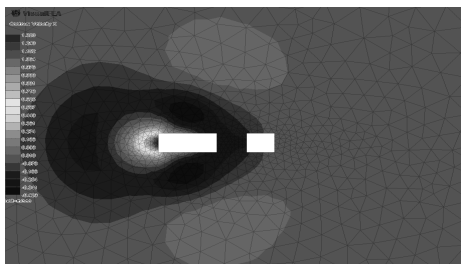
Maximum fragmentation size (cm)	49.83
Mechanical energy(Joules)	97416.48
Volume (m^3)	0.06478
Energy density ($Joules/m^3$)	1503804.88
Impact pressure (MPa)	7.705

Table 7. Calculated maximum particle velocities due to blasts

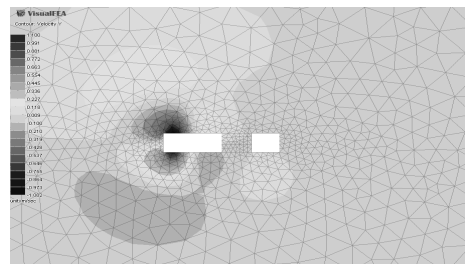
	Velocity (cm/sec)	
	X-direction	Y-direction
Point 1	28.81	5.65
Point 2	30.49	2.06
Point 3	30.37	1.89
Point 4	28.92	5.30

Table 8. Calculated maximum particle velocities due to the impact of flyrocks

	Velocity (cm/sec)	
	X-direction	Y-direction
Point 1	12.91	0.67
Point 2	14.94	0.28
Point 3	15.22	0.28
Point 4	12.86	0.36



(a) X-direction



(b) Y-direction

Fig. 7. Distribution of ground particle velocity due to blast.

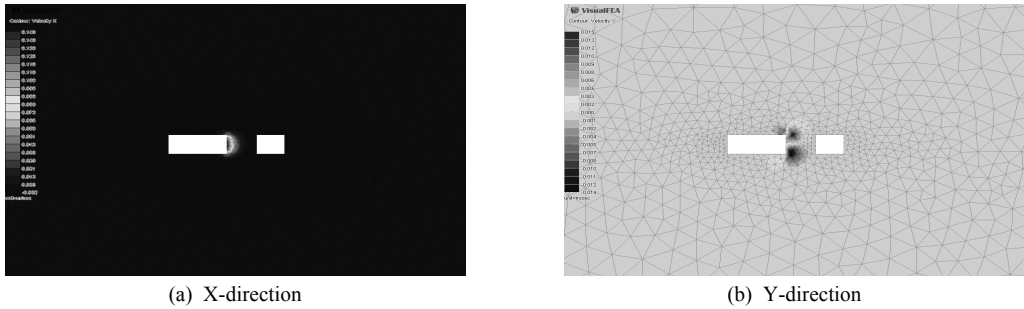


Fig. 8. Distribution of ground particle velocity due to the impact of flyrocks.

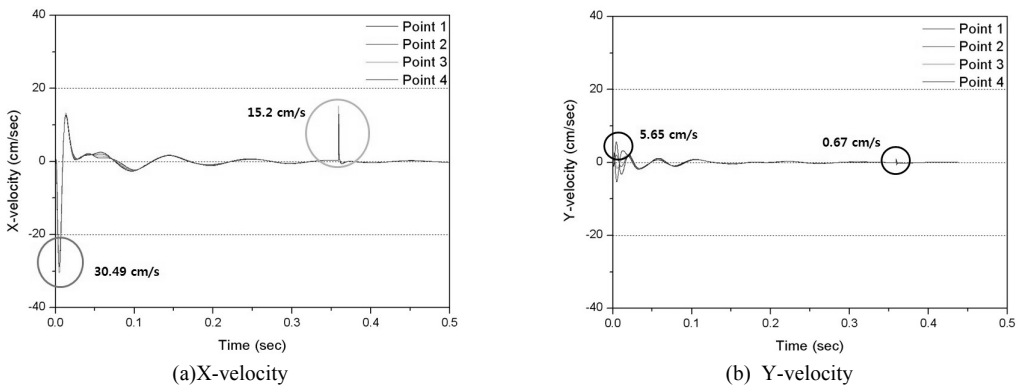


Fig. 9. Vibration velocity of pillar

여지는 바와 같이 발파로 인한 최대진동속도는 Point 2에서 30.49cm/s로 분석되었으며, 비석에 의한 최대 충격진동속도는 Point 3에서 15.22cm/s로 분석되었다.

5. 결론

본 연구는 대규모 갱내 채굴광산의 효율적인 안정성 유지를 위해 갱도 굴착에 따른 발파 작업 시 비석에 의한 광주의 영향을 파악하기 위한 연구로써 발파로 발생된 비석이 인접한 광주에 미치는 충격진동을 예측하고, 실제 진동데이터의 회귀분석을 통해 얻어진 발파진동 예측식에 의한 발파진동 예측값과 수치해석에 의해 분석된 결과를 비교해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연구지역 갱도의 발파를 수행한 결과 Rosin-Rammler model 및 Schuhmann model의 평균 파쇄입도 (X50)는 각각 18.58cm와 20.68cm이며 Schuhmann

model에 비해 Rosin-Rammler model이 결정계수 (R^2)는 0.9914로 상대적으로 높은 상관성을 가지는 것으로 분석되었고, 파쇄암석 전체 무게(%)에 해당하는 각각의 입도분석 결과 50%수준의 파쇄입도는 17.57cm이고 최대 파쇄입도는 49.83cm로 분석되었다.

- 2) 파쇄암의 역학적에너지는 40, 50, 70, 90, 100%의 파쇄입도에 따라 각각 2723.34, 4271.58, 10364.28, 36305.63, 97416.48 Joules로 나타났으며, 이 파쇄암이 광주에 미치는 충격진동은 각각 6.94, 7.76, 9.69, 13.25, 16.96cm/s로 나타났다.
- 3) 발파진동 예측식에 의한 이론적인 비산거리(16.34m)와 수치해석 상의 적용거리(14.95m)에서의 발파진동은 37.23cm/s, 42.62cm/s로 산출되었고 이는 최대 충격진동인 16.96cm/s에 비해 높게 예측되었다.
- 4) 폭약의 기폭으로 발생하는 발파하중 뿐만 아니라 발파로 인한 파쇄석이 광주에 충격을 가했을 때의 하중을 계산하여 수치해석을 수행한 결과 광주에

서 발파로 인한 X 방향 진동속도는 Point 1은 28.81cm/s, Point 2는 30.49cm/s, Point 3은 30.37 cm/s, Point 4는 28.92cm/s, Y 방향 진동속도의 경우는 Point 1은 5.65cm/s, Point 2는 2.06cm/s, Point 3은 1.89cm/s, Point 4는 5.30cm/s로 분석되었다.

- 5) 비석에 의한 충격진동속도는 X 방향 경우 Point 1은 12.91cm/s, Point 2는 14.94cm/s, Point 3은 15.22cm/s, Point 4는 12.86cm/s, Y 방향 충격진동속도의 경우 Point 1은 0.67cm/s, Point 2는 0.28 cm/s, Point 3은 0.28cm/s, Point 4는 0.36cm/s로 분석되었다.

현장실험을 통해 획득한 발파진동 예측식에 비해 비석에 의한 충격진동이 낮게 예측되었으며, 수치해석 분석결과도 이와 유사한 경향을 나타내어 지하채굴공동의 발파지점으로부터 인접한 광주의 손상 및 변형은 비석의 충격진동에 의한 영향 보다 발파진동에 의한 영향이 더 큰 것으로 분석되었다. 하지만 광주로부터 매우 근접거리의 발파작업 시, 비석에 의해

광주가 받게 되는 실제적인 충격은 보다 클 것으로 예상되고, 최대 파쇄입도가 아닌 전체 파쇄입도 및 막장 단면에서 발생하는 전체 비석에 따른 충격진동의 중첩효과를 고려한다면 광주에 가해지는 충격진동은 더욱 커질 것으로 예상되므로 충격진동에 의한 영향 또한 광주 설계 시 중요한 인자로 다뤄져야 할 것이다. 또한 추가적으로 비석의 충격진동에 따른 구조물의 균열 발생 및 피로거동에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 대한광업진흥공사, 2005, 대규모 채굴공동 굴착 시 발파에 의한 광주의 변형거동 연구.
2. 선우 춘, 류창하, 최병희, 2001, 영상처리기법에 의한 발파 파쇄압의 파쇄도 측정, 화약발파19.2, pp. 6-8.
3. 임대규 외, 2004, 발파해체 시 낙하충격진동 예측에 관한 연구, 대한화약발파공학회지, Vol22, pp. 45-46.
4. 장수호, 신일재, 최용근, 이정인, 2000, 발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역평가에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, Vol. 16, pp. 130-132.
5. M.A. Perkin, 1989, Explosives Engineering Handbook.



이 상 곤
(주)쓰일테크 엔지니어링

Tel : 062)230-7876
E-mail : ghdlk@naver.com



강 추 원
조선대학교 에너지 자원공학과 교수

Tel : 062)230-7117
E-mail : cwkwang@mail.chosun.ac.kr



장 호 민
조선대학교 에너지 자원공학과 박사
과정

Tel : 062)230-7876
E-mail : swessil@hanmail.net



류 복 현
조선대학교 에너지 자원공학과 박
사과정

Tel : 062)230-7876
E-mail : pogryu@hanmail.net



김 장 원
조선대학교 에너지 자원공학과 석사
과정

Tel : 062)230-7876
E-mail : dodori7@hanmail.net



송 하 림
조선대학교 에너지 자원공학과 석
사과정

Tel : 062)230-7876
E-mail : ever0620@hanmail.net



김 승 은
조선대학교 에너지 자원공학과 석사
과정

Tel : 062)230-7876
E-mail : happyday1030@hanmail.net