

광산 발파 시 인근지역에 미치는 발파영향에 대한 환경적 접근

Environmental Approach to Blasting Effect on the Surrounding Area when the Mine Blasting

정 병 훈[†] · 이 승 호¹⁾

Beonghun Jeong · Seungho Lee

Received: August 19th, 2015; Revised: September 14th, 2015; Accepted: November 10th, 2015

ABSTRACT : Since blasting noise is impact noise, it will give a sudden shock to the human. In the case, such as the blast vibration, it has given aging buildings and livestock great damage to move the vibration along ground in nearby regions. In this study, the influence of the blasting generated during excavation was analyzed for effects on regional. A couple of field and laboratory surveys about geological were carried out to figure out the geological ratio in the study-performed area. Blast vibration noise was compared to the domestic and abroad case studies and each of the institutions permissible standards established the most appropriate criteria in site condition. The vibration velocity of blasting vibration exploits the values which were measured from test blasting on the ground in order to examine blasting effect. Considering the blasting point as the shortest distance from safety facilities (farms, private houses, etc.), the examination of the influence range, which was derived from the vibration velocity of blasting vibration, was performed to figure out how the point affected the safety facilities. Three-dimensional numerical analysis was performed a time history analysis in order to analyze the behavior of the structure for a dynamic blast load, which was determined in three directions of the blast vibration value. The results of three-dimensional numerical analysis and the blasting effect of blasting vibration estimation equation blasting vibration of impact circle with accompanying test blasting were compared. And the analysis confirmed similar results figures.

Keywords : Blasting vibration, Test blasting, Blasting vibration range, Three-dimensional numerical analysis

요 지 : 발파소음은 충격음이기 때문에 인체에 갑작스런 충격을 주며, 발파진동과 같은 경우에는 지반을 따라 진동이 이동하여 인근 주변의 노화된 건물, 가축과 인체에도 큰 피해를 끼칠 수 있다. 본 연구에서는 광산 굴착 시 발생하는 발파영향이 인근지역에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 연구대상 지역의 지반현황을 파악하기 위해 지질조사, 현장시험과 실내시험 등의 지반조사를 수행하였다. 발파진동소음에 대해서는 국내·외 적용사례와 각 기관별 허용기준을 비교하여 현장조건에 가장 적합한 기준을 설정하였다. 발파영향을 검토하기 위해 발파진동 추정 식은 현장에서 시험발파를 수행하여 측정된 발파진동 값을 활용하였다. 발파진동 추정 식을 활용한 영향원의 검토는 발파지점을 보안물건(농장, 민가 등)으로부터 최단거리로 정하여 보안물건에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 3차원 수치해석을 수행하여 발파진동 영향검토를 수행하였다. 3차원 수치해석은 동적 발파하중에 대한 구조물의 거동을 해석하기 위해 시간이력해석을 수행하였으며, 3방향에 대한 발파진동 값을 구하였다. 시험발파에 따른 발파진동 추정 식을 이용한 발파진동 영향원 검토 결과와 발파영향에 대한 3차원 수치해석 값을 비교·분석한 결과, 유사한 결과 수치를 확인하였다.

주요어 : 발파진동, 현장시험발파, 발파진동 영향검토, 3차원 수치해석

1. 서 론

일반적으로 광산 발파 설계는 탐광경도 굴착마장의 기반암의 특성, 보안물건의 위치 및 종류, 주변 환경 등에 따라 발파작업에 제한조건을 고려해야 한다(Lee & Min, 2013). 이와 같은 발파영향 요소에 대하여 충분한 검토와 발파방법에 대한 설계를 통하여 경도발파의 효율성, 시공성, 안전성 등이 극대화될 수 있도록 해야 한다.

기존 선행연구로 Kawamoto et al.(1988)은 암반 초기손상,

발파압력 등을 고려하여 불연속면이 있는 암반손상을 분석하였으며, 화성암반에서의 허용진동속도 측정(Yoon et al., 2003) 및 석영암반 지역에서의 진동 예측치 연구(Jang, 2014)가 있다. 또한 Lee et al.(2006)은 실 규모 시험에서 발파진동 측정 데이터를 활용하여 경험적인 방법을 통한 영향검토를 수행하고 검증에 위한 수치해석을 이용한 검토 방법을 제안하였다.

본 연구 대상의 광산이 위치한 지역은 주변에 마을, 축사, 민가 등이 존재하여 피해 종류 대상이 다양하므로 최소한의 화약량을 적용하여 제어발파 설계가 되도록 하였다. 시추공

† Department of Civil Engineering, Sangji University (Corresponding Author : daeamsan@korea.kr)

1) Department of Civil Engineering, Sangji University

시험발파를 통해 발파진동 추정 식을 산출하여 보안물건의 영향을 검토하였다. 그러나 다양한 지형과 지층으로 구성된 곳과 발파지원과 인접한 지역의 예측이 어려운 실정이다.

본 연구에서는 발파소음에 크게 영향을 미치는 지발당 장약량과 발파지점으로부터 발파소음 측정위치와의 거리를 두 개의 독립변수로 하고 나머지를 발파를 통해 수집된 결과로부터 회귀분석을 통해 발파진동을 예측하였다. 발파진동으로 인한 인근지역의 구조물 및 시설물의 안전을 위한 국내·외에서 제시하고 있는 허용기준을 검토하여(손무락 등, 2013) 발파진동에 대한 허용기준을 산정하였다. 비교검증을 위해 발파소음을 예측 수치해석에서 널리 사용되고 있는 제안식(National highway Institute, 1991)을 활용하여 발파하중은 같은 시차를 가진 발파 예상면에 분산되어 작용하는 것으로 가정하여 공벽에 가해지는 발파 압력을 막장면 및 측벽에 하중으로 적용 3차원 수치해석을 실시하였으며, 예상 진동치를 추정하여 안정 보안 물건에 대한 발파진동 영향 평가를 수행하였다.

2. 광산 현황 및 허용 기준 검토

2.1 갱도 현황

갱도에 대한 현장조사 결과와 기존 탐광계획을 비교·검토한 결과 탐광계획방향이 다소 다르게 나타나고 있어 탐광

계획도 상의 탐광종료지점이 서로 상이하게 나타나고 있다. 갱도의 규모는 길이 약 312m, 폭은 약 4m, 높이는 약 3.5~4.0m로 나타나고 있다(Fig. 1).

2.2 지질 및 지반 현황

광산 부근의 지질은 중생대 백악기의 퇴적암층인 백야리층, 초평리층과 이를 관입한 백악기 조립흑운모화강암 및 이들을 관입한 암맥류로 구성되며, 신생대 제4기 충적층이 하천을 따라 분포하고 있다. 갱내지질조사 결과, 분포하는 주요 암종은 흑운모화강암으로 나타나고 있으며, 석영맥과 우백질 화강암의 관입체가 나타나고 있다(Fig. 2). 갱구부에 강지보가 시공되어 있으며 이외 구간에는 경암 이상 수준의 암반으로 나타나고 있다.

토사 및 풍화암은 표준관입시험 및 현장시험과 실내시험 결과를 문헌자료(Bond & Harris, 2008)와 적용사례를 비교·분석하여 합리적 검토를 하여 산정하였으며, 기반암은 시추조사에서 회수한 코어 시료를 대상으로 실내시험 및 분석을 수행하여 결정하였다. 연구대상 지역의 각 지층에 대한 지반 정수는 Table 1과 같다.

2.3 발파진동 및 소음 허용기준

국내의 발파 작업 시 발파진동에 대한 허용한계 기준은 아직 법제화가 이루어지지 않아 구체적인 별도의 허용기준

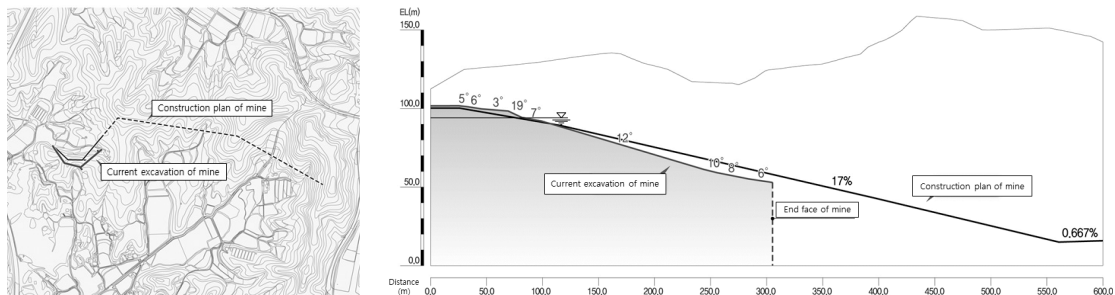


Fig. 1. Situation of mine

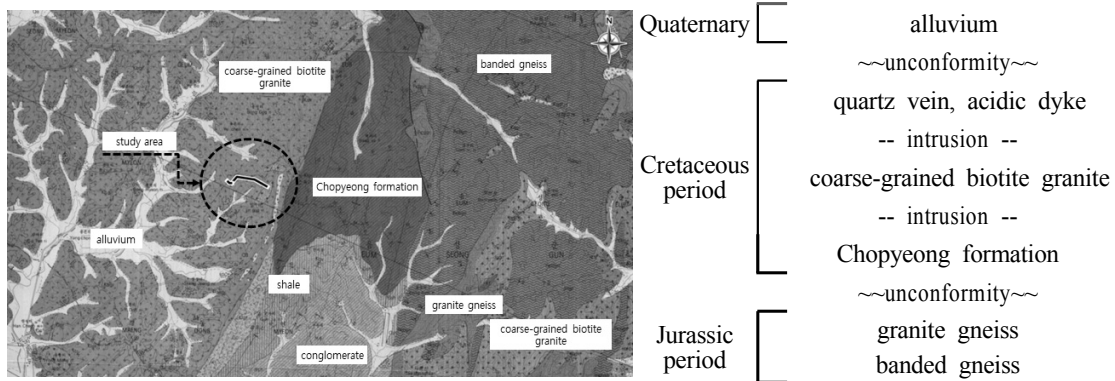


Fig. 2. Study area geological maps and geological system diagram

Table 1. Parameter by analysis application

Classification	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (ϕ , °)	Deformation modulus (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio (ν)
Burried layer	19	5	30	20	-	0.35
Colluvium soil	20	5	35	25	-	0.30
Weathered soil	20	20	30	50	-	0.33
Weathered rock	20.0	30	30	200	-	0.30
Bed rock	26.0	10,000	40	20,000	40,000	0.21
I	26.5	10,000	42	25,000	-	0.20
II	25.5	3,500	40	17,000	-	0.21
III	24.5	1,400	38	7,000	-	0.23
IV	23.5	800	36	4,000	-	0.25

Table 2. Vibration regulation standard of noise and vibration control act

Target area	Daytime (06:00~22:00)	Nighttime (22:00~06:00)
Residential areas, green area, tourism & recreation district, environmental conservation area, public institutions located in other areas	65 dB (V) or less	60 dB (V) or less
Other regions	70 dB (V) or less	65 dB (V) or less

※ In the case of blasting vibration during the day + 10 dB

이 설정되어 있지 않고 공사시방서 등에서 허용기준을 설정하여 관리하고 있으며, 노동부 고시를 통해 발파작업 표준 안전작업지침으로 관리하고 있는 정도이다.

국내에서 제정되어 관리하고 있는 발파진동에 대한 법규는 소음진동관리법이다. 소음진동관리법에서 관리하고 있는 발파진동은 『생활진동 관리기준』에 준하고 있는데, 발파진동 발생원의 지속시간 특수성을 감안하여 생활진동 규제 기준치보다 완화하여 관리하고 있다. Table 2는 소음진동관리법의 생활진동 규제기준(제20조 제3항 관련)이다.

미국광무국(USBM) 보고서에는 진동수 40Hz를 기준으로 주거지역 구조물에 대한 발파진동 허용 기준을 1.2~5.0cm/s로 나타내고 있다. 미국 내무부 노천 광업청(OSM)은 주파수의 경계를 30Hz로 낮춘 유사한 기준을 제안하였다(Table 3).

독일은 독일규격협회(DNA)의 독일 공업규격으로 제정되

Table 3. Safety standard of blasting vibration (USBM, OSM)

Classification	Blasting vibration velocity	
	> 40 Hz (USBM) > 30 Hz (OSM)	< 40 Hz (USBM) < 30 Hz (OSM)
Modern structure	1.875 cm/s	5 cm/s
Old structure	1.25 cm/s	5 cm/s

어 있다. 형태상으로는 구조물 형태, 최대진동속도, 진동주파수 및 건물에서의 진동 수치를 변수로 하여 세부적으로 표현하고 있다. 일반 산업건물 및 콘크리트 구조물에 대해서는 진동속도를 1~4cm/sec로 나타내고 있으며 문화재의 경우는 0.3cm/sec까지 제한하고 있다(Table 4).

본 연구에서 발파진동 허용기준은 국내·외 적용사례와 각 기관별 허용기준(손무락 등, 2013)을 비교하여 현장조건에 가장 적합한 기준을 적용하였다. 가축에 대한 환경 규제

Table 4. Guideline values of vibration velocity (DIN 4150 part 3)

Type of structure	Vibration velocity (cm/sec)			
	Foundation			Plane of floor of uppermost full story
	At a frequency of			
	< 10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz	Frequency mixture
Buildings used for commercial purposes, industrial buildings and buildings of similar design	2	2~4	4~5	4
Dwellings and buildings of similar design and/or use	0.5	0.5~1.5	1.5~2.0	1.5
Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, do not correspond to those listed lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. buildings that are under preservation order)	0.3	0.3~0.8	0.8~1.0	0.8

기준(57dB(V))에서 진동속도 환산 식 중 보수적인 값을 적용하여 0.02cm/sec로 설정하였다(환경부, 2009). 또한 국내·외 발파진동 허용기준은 민가 0.2cm/sec, 농장 0.02cm/sec로 현장조건에 가장 적합한 기준을 설정하였다(Table 5).

3. 시험 식에 의한 발파진동 영향검토

3.1 현장 시험발파

본 연구의 현장 시험발파는 장약량을 0.250~1.000kg으로 변화시키며 심도 약 10m 간격으로 총 6회에 걸쳐 진행하였다. 그리고 발파진동 값의 측정 위치는 발파 위치와 민가의 지근거리 5개소에서 측정하였다. 발파 실험현황과 발파패턴은 Table 6, Fig. 3과 같다.

3.2 시험발파 결과분석

발파진동소음은 발파원으로부터의 거리, 지발당 장약량,

진색길이, 암질 등에 영향을 받으며, 발파지점의 지형, 기상 조건 등이 변수로 작용하여 예측이 어려운 것이 사실이다. 본 연구에서 적용한 발파소음(폭풍암) 예측 식(Siskind et al., 1980)은 Ep. (1)과 같이 발파소음에 크게 영향을 미치는 지발당 장약량과 발파지점으로부터 발파소음 측정위치와의 거리를 두 개의 독립변수로 하고 나머지를 발파를 통해 수집된 결과로부터 회귀분석을 통해 발파소음을 예측할 수 있다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (1)$$

여기서 V : 지반진동속도(cm/sec)

n : 감쇄지수

K : 발파진동 입지상수

W : 지발당 장약량(kg)

D : 폭원과 측정점간의 거리(m)

b : 장약지수

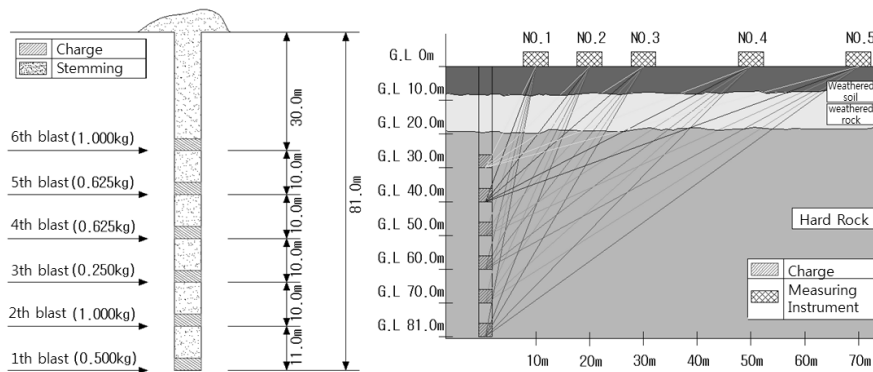


Fig. 3. Blasting pattern

Table 5. Blasting vibration and noise design specification

Classification	Vibration velocity	Vibration level	Remark
House	0.2 cm/sec	75 dB (V)	- Public institution allowable standard
Cattle shed	0.02 cm/sec	57 dB (V)	- Allowable exhaust standard for noise and vibration - Environmental dispute the Ministry of Environment damage compensation

Table 6. Situation of test blasting

Classification	Remark	Location
Hole No.	BH-4	
Rock type	Granitite	
Number of blasting	6 times	
Depth	81.7 m	
Charge per delay	0.250~1.000 kg	
Explosive	NewMITE Plus	
Method of blasting	V-cut	

Eq. (1)에서 K, b, n은 정량적으로 평가할 수 없는 요소에 의한 영향을 대표하는 값이며 현장과 발파조건에 의해 변화하므로 시험발파에 의한 계측 값을 회귀분석을 통해 현장에서 적합한 발파진동 추정 식을 구한다.

신뢰 선은 발파진동치의 분포 특성상 50% 신뢰 수준을 갖는 선을 평균진동 추정 식, 95% 신뢰 수준을 안전진동 추정 식으로 분류하였으며(Table 7), 본 연구에 적용한 현장 발파 진동 추정 식은 신뢰 수준 95%로 하는 자승근 회귀 식 Eq. (2)와 삼승근 회귀 식 Eq. (3)을 안전진동 추정 식으로 적용하였다.

$$V = 312.77 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.70} \quad (2)$$

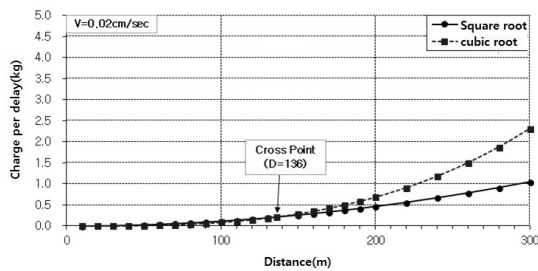
$$V = 830.60 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.96} \quad (3)$$

여기서 D : 폭원과 측점 간의 거리(m)

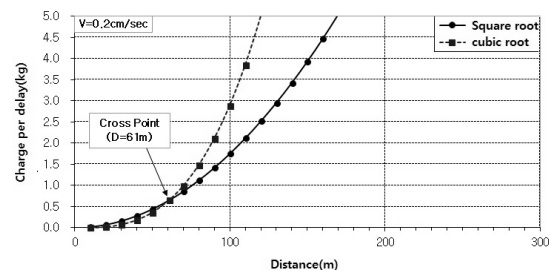
W : 지발당 장약량(kg)

자승근과 삼승근 회귀 식에 대한 교차분석 결과 중에서 발파진동 허용치별 지발당 장약량이 적게 산출된 회귀 식을 이용하여 본 과업구간의 적용 장약량으로 활용하였다(Fig. 4).

발파진동 검토 시점은 보안물건에서 최단거리 발파지점으로 하여 발파진동 영향원 검토를 수행하였다. 발파진동 영향거리 검토는 발파 원리상 진동이 가장 크게 발생하는 심발부 지발당 장약량(0.875kg/delay)을 적용하여 보안물건과



(a) 0.02 cm/sec, cross point : 136 m



(b) 0.2 cm/sec, cross point : 61 m

Fig. 4. Analysis of prediction equations

Table 7. Blasting vibration prediction equation

Classification	Square root scaled prediction equation		Cubic root scaled prediction equation	
	50%	95%	50%	95%
Confidence level	50%	95%	50%	95%
Prediction equation	$V = 146.73 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.70}$	$V = 312.77 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.70}$	$V = 398.73 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.96}$	$V = 830.60 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.96}$
Scaled distance				

Table 8. Blasting and blasting noise effects caused by the field test equation

Classification	Charge per delay	Blasting vibration	
		Distance	Result
Farm	0.875 kg/delay	281.4 m	0.019 < 0.02 cm/sec : O.K
Research institute	0.875 kg/delay	416.9 m	0.010 < 0.2 cm/sec : O.K
House 1	0.875 kg/delay	388.9 m	0.011 < 0.2 cm/sec : O.K
House 2	0.875 kg/delay	110.7 m	0.094 < 0.2 cm/sec : O.K
Hospital	0.875 kg/delay	420.2 m	0.010 < 0.2 cm/sec : O.K
Church	0.875 kg/delay	652.7 m	0.005 < 0.2 cm/sec : O.K

의 이격거리에서 갱도 심도를 고려한 사거리와 보안물건별 허용기준치(구조물 : 0.2cm/sec, 농장 : 0.02cm/sec)와 비교하였다(Table 8). 검토 결과 발파진동은 각각 농장(0.019cm/sec), 연구소(0.010cm/sec), 민가(0.011~0.094cm/sec), 병원(0.010 cm/sec), 교회(0.005cm/sec)에 발생하였으며, 허용 기준값 이내로 안전한 것으로 나타났다.

4. 3차원 수치해석을 통한 발파진동 영향 검토

4.1 수치해석을 이용한 발파진동 영향검토

4.1.1 수치해석 모델링

시험발파에 의한 발파진동 추정 식을 이용한 발파영향원 검토를 위해 수치해석을 이용한 발파진동 영향검토를 수행하였다. 다양한 지층으로 구성된 곳이나 발파진원과 인접한

곳에서의 진동의 예측이 가능한 3차원 유한요소 수치해석 프로그램(MIDAS GTS NX)을 사용하여 검토를 수행하였다. 각 보안물건 중 근거리에 위치하는 민가를 대상으로 발파영향원 검토 결과와 비교하였다. 해석 경계는 발생된 진동파가 경계면에서 반사되지 않고 흡수하는 경계조건을 적용하였고 진동파의 감쇠 효과를 적용하기 위하여 감쇠비 5%를 적용하였다(Jung et al., 2011). 해석에 적용된 물성치와 해석 모델링은 Table 9, Fig. 5와 같다.

4.1.2 발파하중 생성 및 수치해석 결과 분석

발파하중은 미국(National Highway Institute, 1991)에서 제시한 공식을 적용하고 동압력 계산은 시간에 따라 변하는 형태를 취하는 Starfield & Pugliese(1968)가 제시한 시간 이력에 대한 동압력을 적용하였다. 해석의 목적은 발파에 의해 막장에서 일정한 간격이 떨어진 곳에서의 응답을 관찰하는 것이 목적이기 때문에 발파하중은 같은 시차를 가진 발파 예

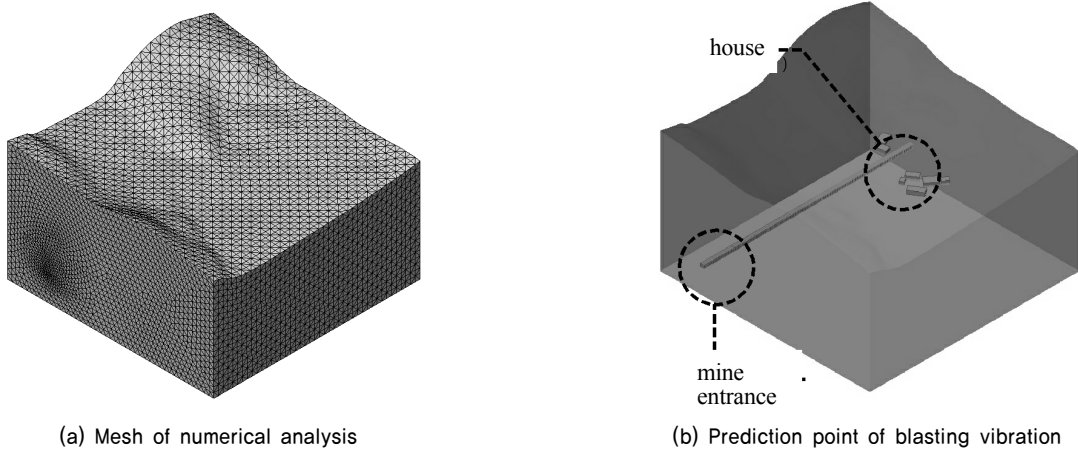


Fig. 5. Modeling of three-dimension numerical analysis

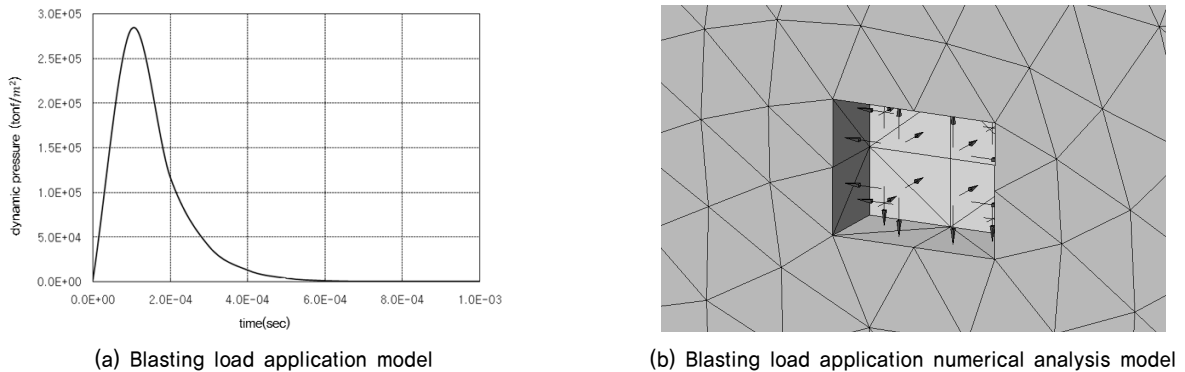


Fig. 6. Blasting load application

Table 9. Parameter by analysis application

Classification	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (ϕ°)	Dynamic elastic modulus (MPa)	Dynamic poisson's ratio (ν)
Bed rock	26.0	10,000	40	55,560	0.24

상면에 분산되어 작용하는 것으로 가정하여 공벽에 가해지는 발파 압력을 막장면 및 측벽에 하중으로 적용하였다(Fig. 6). 수치해석에서 동적하중인 발파하중에 대한 구조물의 동적거동을 해석하기 위해 수렴성이 좋은 직접적분법(Newmark, 1959)을 이용한 시간 이력해석을 수행하였다. 발파하중 적용 후 시간 이력에 따른 지반진동 전파과정 해석 결과는 Fig. 7과 같다.

3차원 수치해석을 통해 갱도접선방향, 진행방향과 수직 방향에 대하여 전달함수를 구한 결과, 발파 시 인근 민가에서 예측되는 발파진동 값은 0.065~0.141cm/sec로서 허용

치(0.2cm/sec) 이내로 감지될 것으로 분석되었다(Table 10).

4.2 발파진동 추정 식과 3차원 수치해석 비교·분석

광산 탐광 굴진 노선에서 시험발파를 수행하여 구한 발파진동 추정 식을 이용한 발파진동 영향상태를 검토 결과, 2번 민가에서 발파진동은 0.094cm/sec 발생하는 것으로 예측되었으며, 동일한 지점을 대상으로 지층구조 및 발파조건을 고려하여 3차원 수치해석을 실시한 결과, 각 성분별로 0.089~0.151cm/sec로 예측되었다(Table 11). 각각의 경우 모두 허용 기준치(0.2cm/sec) 미만의 발파진동이 예측되었

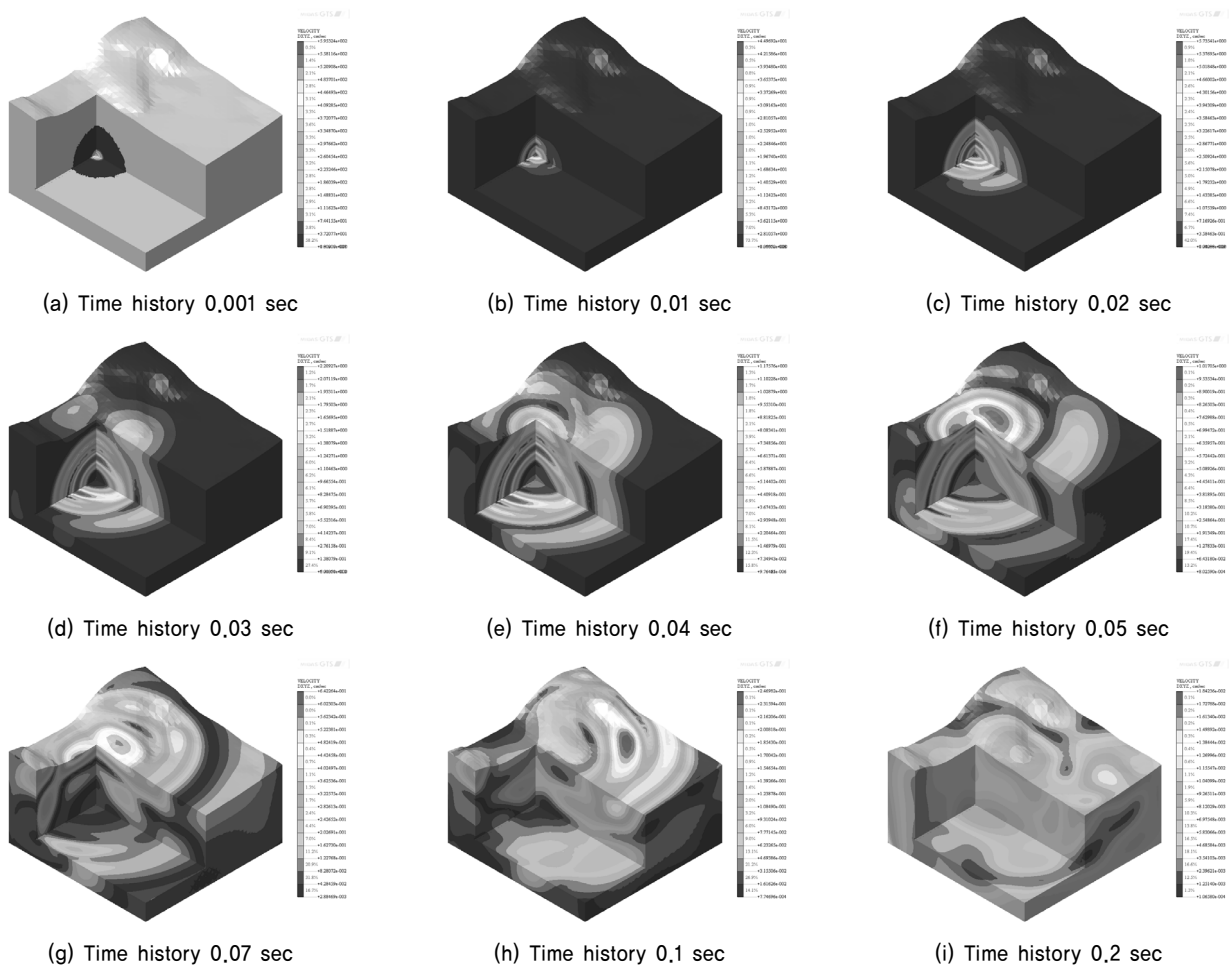


Fig. 7. Ground vibration velocity propagation process with time

Table 10. Parameter by analysis application

Classification	Vx (Tangential)	Vy (Longitudinal)	Vz (Vertical)
Analysis result			
Predictive value	0.089 cm/sec	0.151 cm/sec	0.065 cm/sec

Table 11. Comparison of the results of blasting noise effects caused by the field test equation and three-dimension analysis

Classification	Charge per delay	Blasting vibration	
		Blasting noise effects caused by the field test	Three-dimension analysis
House 2	0.875 kg/delay	0.010 < 0.2 cm/sec : O.K	V _x = 0.094
			V _y = 0.151
			V _z = 0.065
			< 0.2 cm/sec : O.K

다. 지형 및 지질조건, 발파하중에 적용되는 동압력 등의 요인으로 인하여 발파진동 추정 식 결과값에 비해 3차원 수치 해석 예측값이 오차범위 내에서 상대적으로 다소 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 광산 굴착 시 광산 탐광굴진 노선에서 시험발파를 수행하여 발파진동 추정 식을 산출하였으며, 인근 지역에 위치한 보안물건(농장, 민가 등)에 발파진동소음 영향에 대한 평가를 수행하였다. 또한 탐광굴진 경로 및 인근 민가 지층구조 및 발파조건을 고려한 3차원 수치해석을 실시하여 발파진동 예측값을 확인하여 발파진동 추정 식에 의한 발파진동 영향원 검토 결과와 3차원 수치해석 결과를 비교·분석하였다.

- (1) 총 6회 시험발파를 통해 얻어진 계측 값을 이용하여 회귀분석을 통해 신뢰 수준 95%의 발파진동 추정 식을 산정하였다. 발파진동이 가장 크게 발생하는 심발부 지발당 장약량을 적용하여 발파 인근지역 보안물건인 농장, 연구소, 민가, 마을 구조물에 대한 발파영향원 검토를 수행하였다.
- (2) 수치해석을 이용한 3차원 발파 영향검토 결과, 발파 시 인근 민가에서 예측되는 발파진동 값은 0.065~0.141 cm/sec로서 허용 기준치(0.2cm/sec) 이내로 감지된 것으로 분석되었다.
- (3) 시험발파에 따른 발파진동 추정 식을 이용한 발파진동 영향원 검토 결과와 수치해석을 이용한 3차원 발파 영향검토를 비교한 결과, 유사한 결과 수치를 나타냈고 또 허용기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 광산 탐광 경로 굴진 시 발생하는 3차원 발파진동 예측 시 관련 발파정수를 획득하여 제시할 수 있었다.
- (4) 발파진동 추정 식 결과값에 비해 3차원 수치해석 예측값이 상대적으로 다소 크게 나타났으나 오차범위 내에 분포하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 발파진동 추정 식은 양호한 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

References

1. 손무락, 정연권, 유준석, 황영철, 문두형 (2013), 국내·외 발파진동허용기준 분석, 한국지반환경공학회, 지반환경, Vol. 14, No. 4, pp. 3~13.
2. 환경부 (2009), 소음·진동으로 인한 가축피해 평가 및 배상액 산정기준의 합리적 조정방안 연구, pp. 321~323.
3. Bond, A. and Harris, A. (2008), Decoding eurocode 7, Taylor & Francis, pp. 116~119, pp. 146~147.
4. Jang, H. M. (2014), A study on the vibration - controlled blasting in quartz porphyry rock mass, Ph D. dissertation, Chosun University, pp. 79~79, pp. 85~105 (in Korean).
5. Jung, H. S., Jung, K. S., Mun, H. N., Chun, B. S. and Park, D. H. (2011), A study on the vibration propagation characteristics of controlled blasting methods and explosives in tunnelling, Korean Geo-Environmental Society, Journal of The Korean Geo-Environmental Society, Vol. 12, No. 2, pp. 5~14 (in Korean).
6. Kawamoto, T., Ichikawa, Y. and Kyoya, T. (1988), Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory, Int. J. Number. Anal. Met. Geomech. 12, pp. 1~30.
7. Lee, C. I. and Min, K. B. (2013), Effect of ground vibration on surface structures and human environments -Application of blasting vibration to induced seismicity in EGS hydraulic stimulation-, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel & Underground Space, Vol. 23, No. 6, pp. 521~537 (in Korean).
8. Lee, S., Kim, S. K. and Lee, Y. H. (2006), Study of blast ground vibration & noise measurements in-situ and effect analysis for numerical analysis, rational blasting design at an eel farm, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel & Underground Space, Vol. 16, No. 2, pp. 179~186 (in Korean).
9. National Highway Institute (1991), Rock blasting and overbreak control (NHI Course No. 13211), U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Virginia, pp. 2~6.
10. Newmark, N. M. (1959), A Method of Computation for Structural Dynamics, ASCE, Journal of Engineering Mechanics Division, Vol. 85, pp. 67~84.
11. Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W. and Dowding, C. H. (1980), Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting, USBM RI 8507, pp. 5~17.
12. Starfield, A. M. and Pugliese, J. M. (1968), Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A Comparison Between a Computer Model and Field Measurements, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 5, pp. 65~77.
13. Yoon, S. H., Ahn, M. S. and Lee, K. Y. (2003), A case study on the vibration characteristics of tunnel blasting in igneous rock, Korean Society of Explosives and Blasting Engineering, Explosives and Blasting, Vol. 21, No. 1, pp. 70~75 (in Korean).