

발파진동 및 비산충격에 대한 광주 안정성 분석

박현식¹⁾, 김지수^{1)*}, 류복현¹⁾, 강추원²⁾

Analysis of Pillar Stability for Ground Vibration and Flyrock Impact in Underground Mining Blasting

Hyun-Sik Park, Ji-Soo Kim, Bok-Hyun Ryu and Choo-Won Kang

Abstract These days, mining industry prefers underground development for large mining because of exhaustive minning resources and large drafts and mining cavities thanks to extensive distribution of heavy excavation machines. In a mining design, to control collapse of cavities and secure stability, design of cavities and pillars are considered as very important. Therefore, this study obtained a prediction equation of blasting vibration through instrumentation for underground cavities. And we obtained theoretical shock vibration imposed on pillar through fragmentation analysis and measurement of flyrock distance. To examine the influence of pillar in underground mining blasting, we carried a finite element analysis and compared the result with prediction equation of blasting vibration, and shock vibration of flyrock when a impact was imposed on pillar and theoretical shock vibration.

Key words Mining design, Pillar, Blasting vibration, Shock vibration

초 록 최근 광업계는 지하개발이 주로 이루어지며, 대형 굴착장비의 보급으로 인해 갱도 및 채굴공동이 지하심부화되고 있다. 채광설계 시 채굴공동의 붕락방지와 채광작업의 안전성 확보를 위해 채굴공동 및 광주의 설계가 매우 중요하게 대두되고 있다. 이에 본 연구는 지하채굴공동의 발파진동계측을 통한 발파진동 예측식 도출을 수행하였고, 채굴공동의 발파시 발생하는 비산석의 파쇄입도 분석과 비산거리 측정을 통하여 광주에 가해지는 이론적인 충격진동을 산정하였다. 지하채굴공동의 발파에 따른 광주의 영향을 검토하기 위하여 유한요소해석을 수행하여 발파진동 예측식과 비교하였으며, 채굴공동의 발파로 인해 발생하는 비산석이 광주에 충격이 가해질 때의 충격진동과 이론적인 충격진동을 비교, 분석하였다.

핵심어 채광설계, 광주, 발파진동, 충격진동

1. 서 론

광주의 설계는 경험식에 의해 설계 및 채굴을 시행하고 있기 때문에 주요한 자원을 사장시키는 경우도 있다. 또한 채광을 위한 발파작업시 발파진동 및 암편의 비산과 계속되는 발파작업으로 인한 광주의 피로

현상에 의해 주변에 위치한 광주의 변형 및 파괴가 발생되며, 이로 인해 채굴공동의 붕락현상이 발생되기도 한다. 따라서 채광장에서 발파암의 비산 및 발파진동으로 인한 광주의 안정성을 확보해야 하며, 이를 위해서는 채광장 발파단면의 암질을 조사, 반영한 발파설계 패턴에 따른 광주의 변형거동을 파악하여 채광광주 보호를 위한 안정적인 채광발파 설계가 필요하다.

채광장에서 발파작업시 발생하는 발파진동과 비산되는 발파암의 충격에 의한 채광장 광주의 거동을 분석하고 이를 발파설계에 반영함으로써 안정적인 광주 설계를 수행하여 안전한 채광작업, 효율적인 광산개

¹⁾ 솔하발파환경시스템

²⁾ 조선대학교 에너지자원공학과

* 교신저자 : feelluveii@naver.com

접수일 : 2012년 12월 12일

심사 완료일 : 2012년 12월 26일

게재 승인일 : 2012년 12월 28일

발파 채광실수율을 증가시킬 수 있을 것이다. 또, 광주의 2차 채굴을 포기하여 영구히 남겨두는 영구광주법을 채택한 채광장이라면 채수율을 크게 할 필요가 있어 설계된 광주의 크기를 최소로 제한하고 채굴폭을 증가시켜 광산실수율을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

이에 본 연구는 지하채굴공동의 발파진동계측을 통한 발파진동 예측식을 도출하였고, 채굴공동의 발파시 발생하는 비산석의 파쇄입도 분석과 비산거리 측정을 통하여 광주에 가해지는 이론적인 비산석의 충격진동을 산정하였다. 지하채굴공동의 발파에 따른 광주영향에 대한 수치해석 검토를 위해 유한요소해석을 수행하여 발파진동 예측식, 비산석이 광주를 충격하였을 때의 충격진동과 이론적인 비산석의 충격진동식을 비교, 분석하였으며, 또한 광주규격에 따른 진동 특성을 반영하여 지하채굴공동의 발파시 발파진동 및 비산석의 충격진동을 고려한 광주설계의 인자로 사용할 수 있도록 제안하였다.

2. 연구지역의 지질

본 연구지역은 충북 ○○ 일대에 속하는 석회석 광산으로써 광산 일대의 지질은 고생대 오오도비스기(조선누층군)의 영흥층을 부정합으로 피복한 석탄기(평안누층군)의 갑산층, 중생대 쥐라기 및 백악기에 관입한 제천화강암 및 맥암류로 구성된다. 갑산층은 N25°~35°W 방향의 축을 가지고 발달하는데 수 회 변성작용을 받아 복잡한 양상으로 분포된다. 갑산층



Fig. 2. Pillar of study area.

은 하부사질대-중부석회암대-상부호층대로 대분되고, 개발 가능한 석회암은 중부석회암대에 발달되는 석회암으로 25~35m의 층 후, 연장 약 2km정도를 가지고 담회-회색, 미정-세립질 과상석회암이 발달하나, 수 cm의 암회색 세일이 일부구간 협재되며, 방해석 세맥, 석영맥 및 실리카 등이 여러 개 협재되어 있다 (Fig. 1).

광체 양상은 가창산 향사, 두학동 복향사 및 기동리 향사 구조로 대분되며 현재 가창산 향사 구역에 갱도를 개설하여 1·2·3 중단, 하 1·2·3단에서 채광중이다.

연구지역의 광주전경을 Fig. 2에 나타내었다.

3. 현장실험

3.1 발파진동 측정

발파패턴

본 연구지역인 석회석 광산은 N30°E 방향으로 연

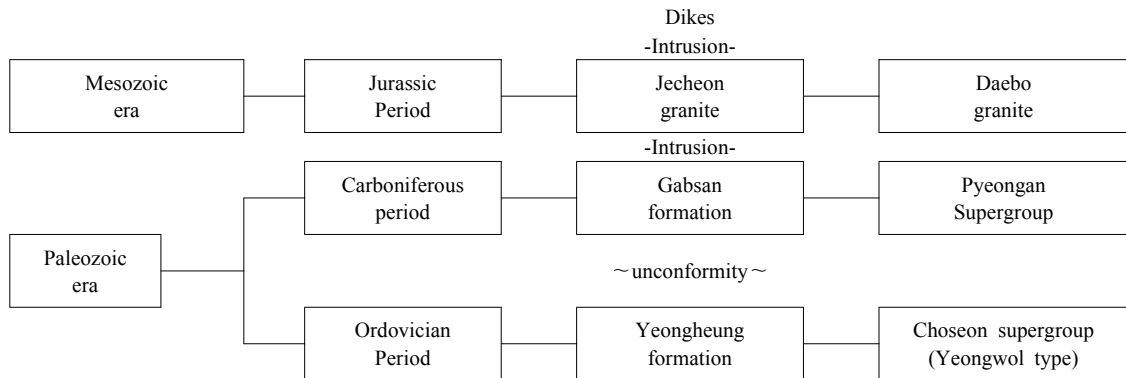


Fig. 1. Geology genealogy of study area.

장 360m의 주횡갱도(ADIT)를 개설, 갑산층 중부석 회암대를 착맥하여 향사구조 2개맥을 개발하고, 향사 습곡부를 따라 상·하향 경사로(ramp way)를 개설하여 1·2·3 중단 및 하 1·2·3단을 채광하는 중단채굴법(sublevel stoping)을 적용하여 채광 중이다. 상·하단 간격을 20~25m를 유지하고, 6~10(B)m×6(H)m 규격의 중단갱도를 개설 후 막장은 점보드릴로 천공한다. 발파패턴은 천공경 $\phi 45\text{mm}$, 공간격 0.8~1.8m, 최소저항선은 0.8~1.6m이다. 그리고 심발공법은 V컷, 심발각도 60~70°, 천공장 3.8m, 굴진장 3.5m이다. 공당 장약량은 전폭약 New Emulite 150($\phi 25$) 0.1kg (1 EA)과 ANFO 3.00~3.33kg/hole을 사용하였다. 그리고 ANFO 장전기를 사용하여 장전, 발파를 실시하였다.

뇌관은 MS 전기뇌관과 LP 전기뇌관이 사용되었으며 천공패턴, 뇌관 배열도, 단면도는 Fig. 3과 같다.

발파진동 계측

본 연구에 사용된 발파진동 계측기기로는 InstanTel INC.의 BlastMate Series인 Blastmate II와 Minimate

plus를 사용하였다. 계측기기는 광주를 기준으로 하여 일직선상으로 10~20m의 일정한 간격을 두고 설치하였으며, 계측기의 센서는 갱도 바닥에 드릴로 천공하여 암반에 고정하였다.

연구지역 대상 갱도의 발파는 Fig. 3의 천공 및 점화 패턴으로 7회를 수행하였으며, 총 4대의 계측기를 사용하여 발파지점과 22~242m의 거리에서 측정하였다. 발파진동 계측결과 총 26개의 자료를 획득하였으며 최대입자속도(PPV, Peak Particle Velocity)는 0.27~8.53cm/s로 계측되었다.

비산거리 측정

본 연구에서는 Dupont사에서 제안한 V컷에 대한 비산의 실험식인 아래 식 (1)을 이용하여 비산속도를 구하였고, 식 (2)를 통해 이론적인 비산거리를 산정하였다.

$$V_0 = 34(LD)^{-0.5} \tag{1}$$

$$L = V_0 \sqrt{\frac{2h}{g}} \tag{2}$$

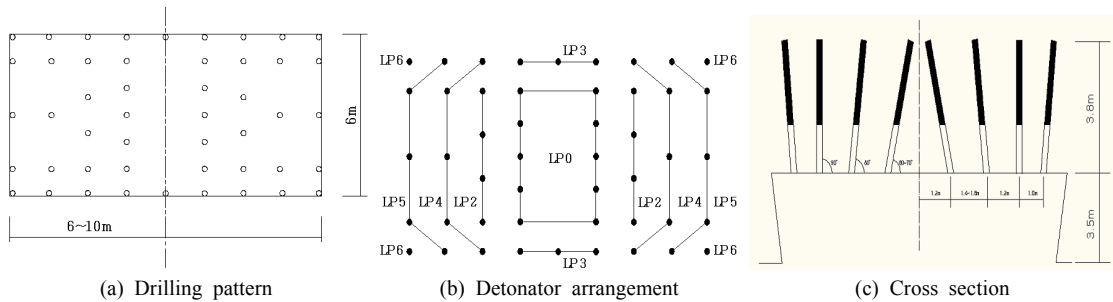
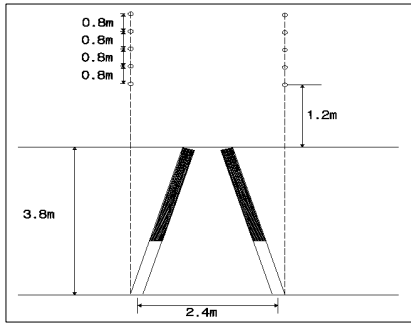


Fig. 3. Standard blasting pattern.

Table 1. Throwing distances of flyrocks

No.	Theoretical distance (m)	Measured distance (m)
1	16.34	31
2	16.34	35
3	16.34	33
4	16.34	53
5	16.34	49
6	16.34	34
7	16.34	46



$$h = 1.2 \text{ m, 암석밀도} = 2.7 \text{ ton/m}^3$$

$$\text{폭약량} = 3.43/\text{공} \times 10\text{공} = 34.3\text{kg}$$

$$\text{굴착중량} = (2.4 \times 3.2 \times 3.5) \times 2.7/2 = 36.288 \text{ ton}$$

$$LD = 36.288/34.3 = 1.05795 \dots \approx 1.06 \text{ ton/kg}$$

$$V_o = 34(LD)^{-0.5} = 34(1.06)^{-0.5} = 33.02371 \dots \approx 33.02 \text{ m/s}$$

$$L = V_o \sqrt{2h/g} = 33.02 \times \sqrt{2 \times 1.2/9.8} = 16.34066 \dots \approx 16.34 \text{ m}$$

Fig. 4. Detailed drawing of V-cut.

여기서, V_o 는 최대 비산속도(m/s), LD 는 폭약 단위 중량 당의 채석중량(t/kg), L 은 수평 비산거리(m), h 는 심빼기 발파 높이, g 는 중력가속도(9.8m/s^2)이다. Table 1에서 이론적 비산거리는 Fig. 4와 같은 조건으로 구하였다. 7회 발파시 실제 측정한 발파시의 비산거리는 이론적인 비산거리보다 멀었다. 이에 대한 1차적 요인은 본 현장 채굴공동 발파의 특성상 심빼기의 과장약과 ANFO 사용으로 장약장의 증대에 따른 장약비중 및 장약밀도의 상승, 2차적 요인은 비산석의 최초 낙하거리가 아닌 갱도 바닥에서의 이동거리로 인한 것으로 판단된다.

에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용하여 통계처리로 도출한 지반진동 수준 예측식은 다음 식 (3), (4)와 같다. Fig. 5는 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타낸 그림이다.

현장계측에 의해 획득한 진동 자료를 바탕으로 회귀분석을 실시한 발파진동 예측식은 자승근과 삼승근 모두 0.83으로 높은 결정계수를 나타내고 있다. 자승근, 삼승근 환산거리에 따른 발파진동 예측식인 식 (3)과 (4)의 50% 신뢰수준 예측식을 이용하여 이론적인 비산거리의 범위에서 식 (5), (6)과 같은 진동속도를 구하였다.

4. 분석

4.1 발파진동 회귀분석 및 예측

회귀분석에 의해서 입지상수 K 와 n 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상

$$V_{50} = 89.98 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.52}$$

$$V_{95} = 177.11 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.52} \quad (3)$$

$$r^2 = 0.83$$

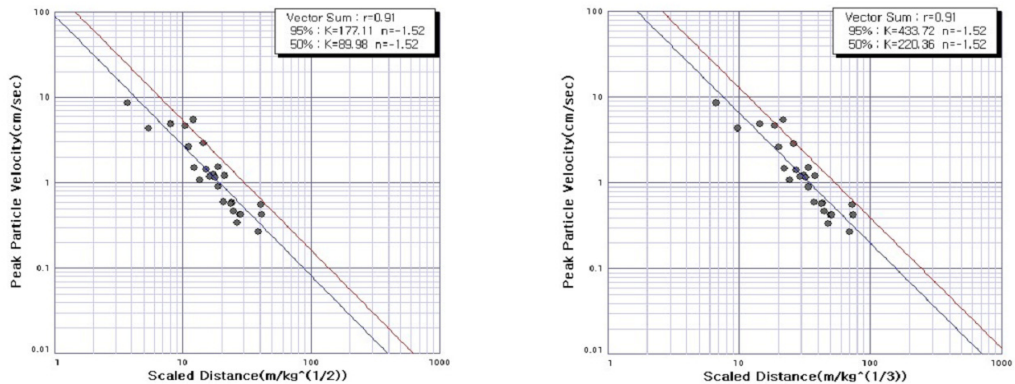


Fig. 5. Relationship between peak particle velocity and scaled distance.

$$\begin{aligned}
 V_{50} &= 220.36 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.52} \\
 V_{95} &= 433.72 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.52} \\
 r^2 &= 0.83
 \end{aligned} \tag{4}$$

계산 결과 본 현장에 사용된 최대 지발당장약량을 적용하여 이론적 비산거리에서의 진동속도는 18.92 cm/s로 예측되었다.

$$\begin{aligned}
 V &= 89.98 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.52} = 89.98 \left(\frac{16.34}{\sqrt{34.30}} \right)^{-1.52} \\
 &= 18.92 \text{ cm/s}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 V &= 220.36 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.52} = 220.36 \left(\frac{16.34}{\sqrt[3]{34.30}} \right)^{-1.52} \\
 &= 18.92 \text{ cm/s}
 \end{aligned} \tag{6}$$

4.2 파쇄입도 분석

본 연구는 파쇄입도 분석을 Split Engineering사의 Split Desktop을 사용하였다(Fig. 6).

연구지역 경도의 발파 후 파쇄입도 분석 결과, Rosin-

Rammler model 및 Schuhmann model의 평균 파쇄입도(X_{50})는 각각 18.58cm와 20.68cm이며 Schuhmann model에 비해 Rosin-Rammler model이 $r^2=0.99$ 로 상대적으로 높은 상관성을 가지는 것으로 분석되었고, 파쇄암석 전체 무게(%)에 해당하는 각각의 입도분석 결과 평균 파쇄입도는 17.57cm이고 최대 파쇄입도는 49.83cm로 분석되었다(Table 2).

4.3 비산석의 충격진동 예측

Table 2의 파쇄입도 분포에서 발생빈도가 높고 입도가 커서 충격량이 클 것으로 예상되는 F_{40} , F_{50} , F_{60} , F_{70} , F_{80} , F_{90} , F_{100} 을 대상으로 하여 비산된 파쇄암의 충격에너지를 산출하였으며, 국내에서 보편적으로 사용하는 충격진동 예측식인 식 (3)의 경험식을 사용하였다.

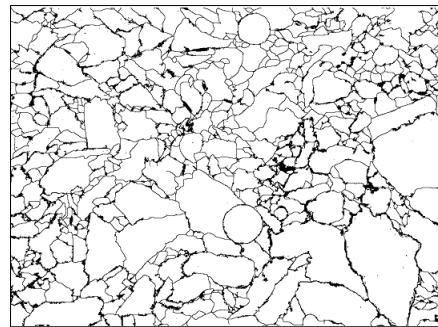
$$E = \frac{1}{2}mv^2 + mgh \tag{4}$$

$$V = \left(\frac{d}{KE} \right)^n$$

여기서, V 는 최대진동속도(mm/s), d 는 충격중심으



(a) Fragmentation



(b) Digital image processing

Fig. 6. Digital image processing of fragmentation.

Table 2. Results of fragmentation analysis

RosRam model				Schuhmann model		
Uniformity	X_{50}	R-squared		Slope	X_{50}	R-squared
1.95	18.58	0.9914		1.32	20.68	0.9319
F_{40}	F_{50}	F_{60}	F_{70}	F_{80}	F_{90}	Top size
15.12cm	17.57cm	20.36cm	23.61cm	28.03cm	35.86cm	49.83cm

Table 3. Shock energy and shock vibration with fragmentation size

Fragmentation size (cm)		Shock energy (J)	Shock vibration (cm/s)
F ₄₀	15.12	2,723	6.94
F ₅₀	17.57	4,272	7.76
F ₆₀	20.36	6,644	8.67
F ₇₀	23.61	10,364	9.69
F ₈₀	28.03	17,337	11.02
F ₉₀	35.86	36,306	13.25
F ₁₀₀	49.83	97,416	16.96

로부터의 거리(m), 지반의 상태를 나타내는 상관계수 K 는 석회석 광산의 암반이므로 0.85를, 경험계수 n 은 일반적으로 사용하는 -0.5, 거리 d 는 충격중심으로 부터의 거리(단위거리)로써 비산되는 파쇄암이 광주와 충돌했을 때 예상충격진동이 발생하는 지점으로 광주의 표면을 적용하여 F₄₀, F₅₀, F₆₀, F₇₀, F₈₀, F₉₀, F₁₀₀ 충격에너지와 충격진동은 Table 3과 같이 산출되었다.

발파진동속도에 근거한 암반손상은 Langefors 의 여러 학자들에 의해 연구되어 왔으며 그 기준은 약 25.4~100cm/s에서 암반의 손상이 일어난다고 보고 되어 왔다. 식 (3)에 의해 예측된 충격진동은 6.94~16.96cm/s의 범위로 발파진동속도에 의한 암반손상 기준에 미치지 못하는 것으로 예측되었다.

5. 광주의 안정성 해석

본 연구에서는 광주와 인접한 갱도의 발파작업 수

행에 따른 광주의 영향을 검토하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 이로 인해 발파동해석 수행으로 얻어진 광주의 입자진동 속도를 통하여 광주의 영향을 검토하였다.

검토 방법으로는 Fig. 7과 같이 광주와 인접하여 발파작업이 수행되고 있는 갱도를 검토 단면으로 선정하였으며, 막장면으로부터 광주까지의 거리는 14.59m, 광주의 크기는 7.5(B) × 6(H)m이다. 그리고 터널 막장의 복잡한 발파패턴의 모사가 어려움에 따라 진동에 큰 영향을 미치는 최대지발당 장약량을 이용하여 발파 폭굉압력을 산정하였고, 발파공벽에 작용하는 압력을 예상굴착면에 작용하는 압력으로 환산하여 수치해석을 수행하였다. 그리고 발파비산하중의 적용은 광주와 실제 발파지점과의 거리를 고려하여 예상굴착면에 발파폭굉하중 적용 후 0.359초에 광주의 좌측벽면에 적용하였다.

수치해석시 분석된 자료의 측정(Face) 위치는 Fig. 8과 같다.

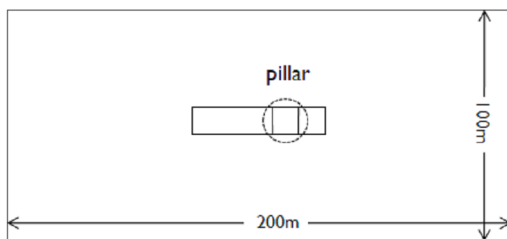
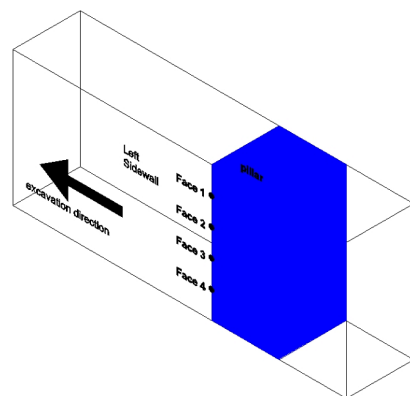
**Fig. 7.** Dynamic analysis model (side view).**Fig. 8.** Analysis point (side detail view).

Table 4. Input parameters

Rock type	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Dynamic Young's modulus (kPa)	Dynamic Poisson's ratio
Limestone	5163	2832	29,850,000	0.26

Table 5. Shock pressure by flyrock

Maximum fragmentation size (cm)	Mechanical energy (J)	Volume (m ³)	Energy density (J/m ³)	Shock pressure (MPa)
49.83	97416	0.065	1503805	7.7

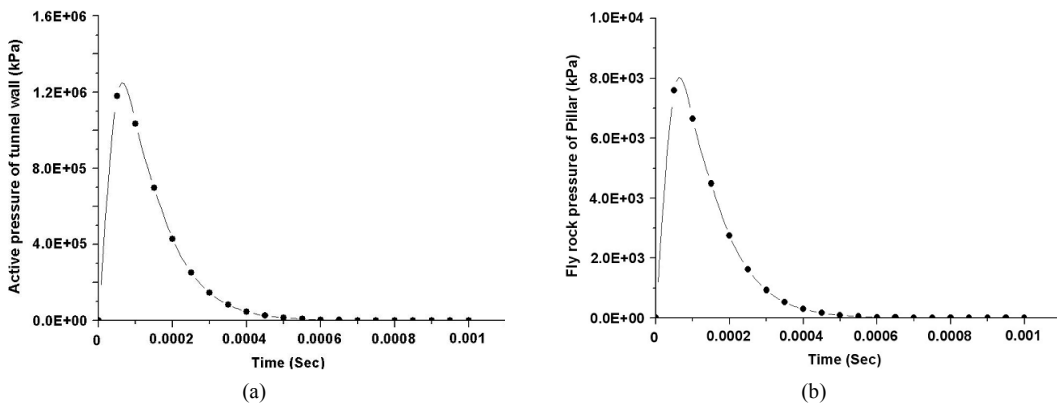


Fig. 9. Loading curve of time-pressure.

5.1 해석조건

본 해석에서는 탄성모델을 적용하여 동해석을 수행하였고, 경계조건은 점성경계를 적용하였다. 총 절점 (node)은 996개, 요소(element) 1864개를 사용하였으며, 폭약의 기폭으로 발생하는 발파하중 뿐만 아니라 발파로 인한 비산석이 광주를 충격하였을 때의 하중을 계산하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 지반 동적물성치는 Table 4에 나타내었고, 발파 비산석에 의한 충격하중은 Table 5와 같다.

Fig. 9(a)는 굴착면에 작용하는 지속시간에 따른 터널 벽면에 작용하는 압력에 대한 하중곡선을 나타내었고, Fig. 9(b)는 광주 좌측면의 지속시간에 따른 광주 벽면에 작용하는 압력에 대한 비산하중곡선을 나타냈다.

5.2 발파하중에 의한 해석결과

발파진동속도

수치해석에 의한 광주 주변의 X, Y 방향의 진동속

도를 Fig. 10에 나타내었으며, 수치해석지점인 광주의 좌측벽면에서의 시간에 따른 X, Y 방향의 진동을 Fig. 11에 도시하였다. 발파진동속도 분석결과 광주 좌측벽면에서 X 방향 진동속도의 경우 Face 1은 28.81cm/s, Face 2는 30.49cm/s, Face 3은 30.37cm/s, Face 4는 28.92cm/s, Y 방향 진동속도의 경우 Face 1은 5.65cm/s, Face 2는 2.06cm/s, Face 3은 1.89cm/s, Face 4는 5.30cm/s로 분석되었다.

수치해석에 의한 광주 좌측벽면에서의 최대 진동속도는 모두 X 방향 진동속도가 더 크게 나타났으며, 최대 진동속도는 광주 좌측벽면 Face 2 지점에서 30.49cm/s로 나타났다.

비산석의 이론적 비산거리(16.34m)와 최대 지발당 장약량(34.30kg)을 사용하여 현장계측과 회귀분석에 의해 도출된 자승근 및 삼승근 환산거리를 적용한 발파진동 예측식에 적용한 결과 발파진동은 18.92cm/s로 나타났으며(식 5, 6), 수치해석에 적용된 지하채굴 공동의 막장에서 광주까지의 거리(14.59m)를 발파진

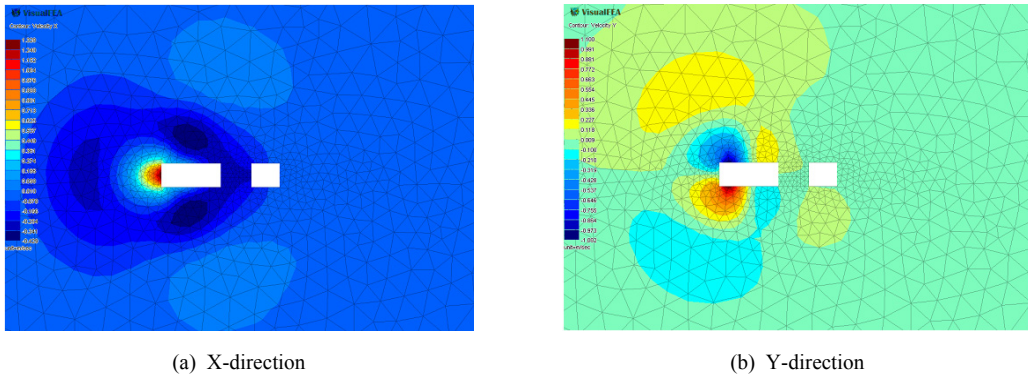


Fig. 10. Contour of maximum vibration velocity.

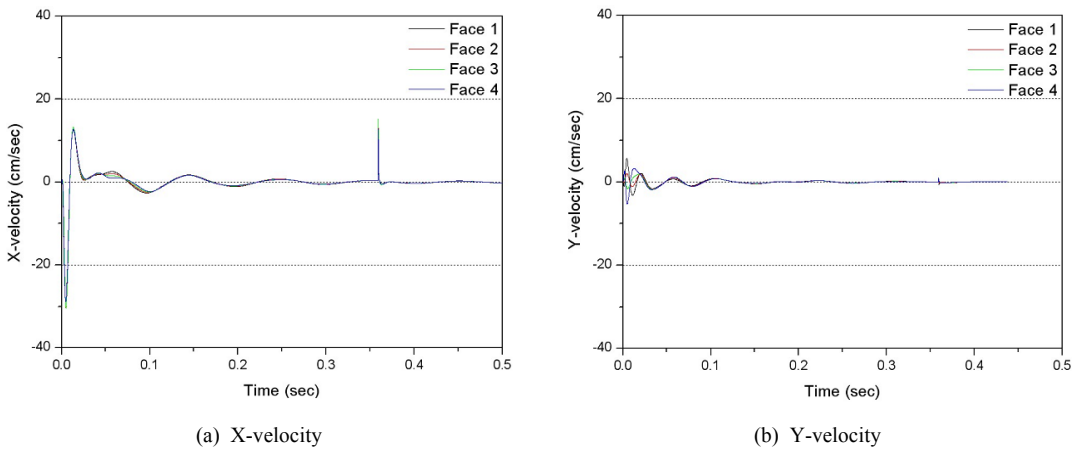


Fig. 11. Vibration velocity of left sidewall in pillar.

동 예측식에 적용시 발파진동은 22.47cm/s로 산정되었다. 또한 수치해석에 의한 발파진동속도의 최대치는 광주 좌측 벽면의 Face 2지점에서 30.49cm/s로 나타나 수치해석에 의한 발파진동이 현장계측을 통한 발파진동보다 높게 나타난 것을 알 수 있다.

5.3 비산석의 충격하중에 의한 해석결과

충격진동속도

비산석의 충격진동에 의한 광주 주변의 X, Y 방향 진동속도를 Fig. 12에 도시하였다. 충격진동속도 분석 결과 광주 좌측면에서 X 방향 진동속도의 경우 Face 1은 12.91cm/s, Face 2는 14.94cm/s, Face 3은 15.22cm/s, Face 4는 12.86cm/s, Y 방향 진동속도의 경우 Face 1은 0.67cm/s, Face 2는 0.28cm/s, Face 3은 0.28cm/s, Face 4는 0.36cm/s로 분석되었다.

발파에 의한 파쇄암의 파쇄입도 분석 결과, 최대 파쇄입도(49.83cm)의 비산석이 광주를 충격하였을 때의 이론적인 충격진동은 16.96cm/s가 산정되었으며 (Table 3), 수치해석에 의한 광주 좌측벽면의 최대 충격진동은 Face 3지점에서 X 방향진동속도 15.22cm/s가 발생된 것으로 분석되었다.

현장계측과 회귀분석을 통한 발파진동 예측식에 비해 비산암의 충격진동이 낮게 예측되어 광주의 손상 및 변형은 비산암의 충격진동보다 발파진동에 의한 영향이 더 클 것으로 판단된다. 그러나 광주에 충돌하는 실제 비산암편으로 인한 충격진동의 중첩효과를 고려한다면 광주에 가해지는 충격진동은 커질 것으로 예상되므로 발파진동 뿐만 아니라 충격진동 또한 광주설계시 중요한 인자로 사용되어야 할 것으로 사료된다.

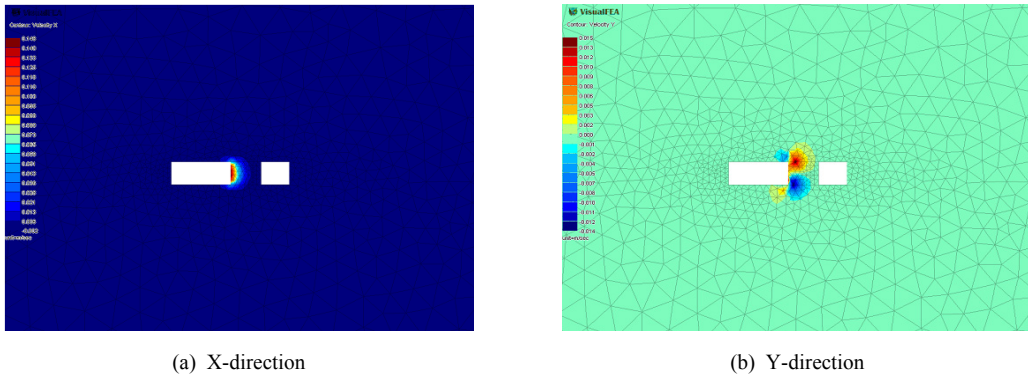


Fig. 12. Contour of vibration velocity by flyrock impact.

5.4 광주의 폭에 따른 진동속도

광주의 폭에 따른 진동속도 특성을 파악하기 위해 광주의 폭을 1.5~7.5m까지 1m 간격으로 변화시켜 분석을 수행하였다.

발파진동속도 분석결과, 광주 좌측면에서 X 방향

진동속도의 경우 Face 2 지점, Y 방향 진동속도의 경우 Face 1 지점에서 가장 높게 발생할 것으로 분석되었으며, 광주 폭이 1.5m에서 5.5m로 증가 시 발파진동속도가 감소하는 경향을 보였으며, 광주 폭이 6.5m 이상인 경우 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다.

Table 6. Maximum blasting vibration velocity

(unit: cm/s)

Direction	Analysis point	Pillar width (m)						
		1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
X	Face 1	43.36	40.24	37.28	34.62	32.48	28.79	28.81
	Face 2	47.69	43.58	39.96	36.75	34.32	30.13	30.49
	Face 3	47.20	43.21	39.78	36.61	34.19	30.04	30.37
	Face 4	42.15	39.47	36.92	34.33	32.21	28.59	28.92
Y	Face 1	8.97	8.07	7.26	6.61	6.12	5.33	5.65
	Face 2	3.30	2.91	2.60	2.38	2.20	1.93	2.06
	Face 3	3.14	2.93	2.64	2.34	2.14	1.82	1.89
	Face 4	8.87	7.87	7.12	6.43	5.94	5.16	5.30

Table 7. Maximum shock vibration velocity

(unit: cm/s)

Direction	Analysis point	Pillar width (m)						
		1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
X	Face 1	17.91	14.13	13.32	13.15	13.12	13.11	12.91
	Face 2	22.47	16.12	15.01	14.78	14.74	14.73	14.94
	Face 3	22.20	16.04	14.96	14.74	14.70	14.69	15.22
	Face 4	17.34	13.85	13.10	12.94	12.91	12.91	12.86
Y	Face 1	2.75	1.75	1.10	0.81	0.78	0.77	0.67
	Face 2	1.29	0.79	0.61	0.58	0.57	0.56	0.28
	Face 3	1.09	0.72	0.44	0.28	0.27	0.27	0.28
	Face 4	2.72	1.62	1.03	0.65	0.46	0.36	0.36

충격진동속도 분석결과, 발파진동속도와 동일하게 광주 좌측면에서 X 방향 진동속도의 경우 Face 2 지점, Y 방향 진동속도의 경우 Face 1 지점에서 가장 높게 발생될 것으로 분석되었으며, 광주 폭이 1.5m에서 2.5m로 증가 시 충격진동속도가 매우 크게 감소하는 경향을 보였으며, 광주 폭이 3.5m 이상인 경우 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다.

광주의 폭에 따른 발파 및 충격하중에 의한 광주 좌측 벽면에서의 최대 진동속도는 Table 6, 7에 나타내었다.

6. 고찰

광주규격(폭/높이)과 최대 발파진동 및 충격진동속도에 따른 상관식을 Table 8, 9에 나타내었다. 광주규격과 최대 발파진동속도에 대한 상관계수는 X, Y 방향 모두 $r=0.96\sim0.99$ 로 매우 높게 나타났으며, X

방향의 경우 광주 좌측벽면 Face 2 지점, Y 방향의 경우 Face 1 지점의 발파진동속도가 다른 지점에 비해 높게 나타날 것으로 분석되었다.

광주규격과 최대 충격진동속도에 대한 상관계수는 X 방향의 경우 $r=0.67\sim0.74$, Y 방향의 경우 $r=0.85\sim0.90$ 으로 Y 방향 충격진동 상관계수가 상대적으로 높게 나타났으며, X 방향의 경우 광주 좌측벽면 Face 2 지점, Y 방향의 경우 Face 1 지점의 충격진동속도가 다른 지점에 비해 높게 나타날 것으로 분석되었다. 광주규격에 따른 발파진동속도와 충격진동속도 중 최대 발생지점인 Face 2와 Face 1의 관계를 Fig. 13, 14에 나타내었다.

광주규격에 따른 수치해석 결과 최대 발파진동이 발생된 Face 2 지점의 상관식($y=-18.03x+51.08$)과 Langefors and Kilhstrom(1973)의 발파진동 피해 수준을 적용하여 광주의 높이와 폭에 따른 피해상태를 Fig. 15에 도시하였다.

Table 8. Equation of relationship between maximum blasting vibration and pillar size

Direction	Analysis point	Equation	Coefficient of correlation
X	Face 1	$y=-15.29x+46.55$	$r=0.99$
	Face 2	$y=-18.03x+51.08$	$r=0.98$
	Face 3	$y=-17.66x+50.59$	$r=0.99$
	Face 4	$y=-14.18x+45.29$	$r=0.99$
Y	Face 1	$y=-3.55x+9.52$	$r=0.97$
	Face 2	$y=-1.30x+3.46$	$r=0.96$
	Face 3	$y=-1.38x+3.45$	$r=0.98$
	Face 4	$y=-3.71x+9.45$	$r=0.98$

(note) y : vibration velocity (cm/s), x : pillar width / pillar height

Table 9. Equation of relationship between maximum shock vibration and pillar size

Direction	Analysis point	Equation	Coefficient of correlation
X	Face 1	$y=-3.69x+16.72$	$r=0.74$
	Face 2	$y=-5.49x+20.23$	$r=0.70$
	Face 3	$y=-5.12x+19.92$	$r=0.67$
	Face 4	$y=-3.32x+16.19$	$r=0.73$
Y	Face 1	$y=-1.83x+2.60$	$r=0.86$
	Face 2	$y=-0.75x+1.23$	$r=0.87$
	Face 3	$y=-0.75x+1.04$	$r=0.85$
	Face 4	$y=-2.18x+2.66$	$r=0.90$

(note) y : vibration velocity (cm/s), x : pillar width / pillar height

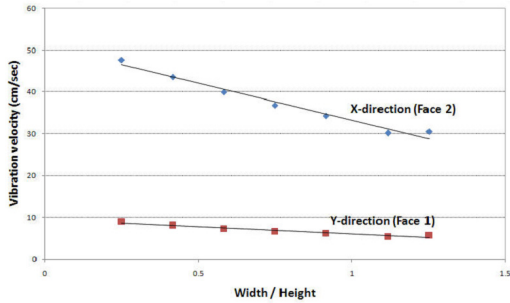


Fig. 13. Relationship between maximum blasting vibration velocity and pillar size.

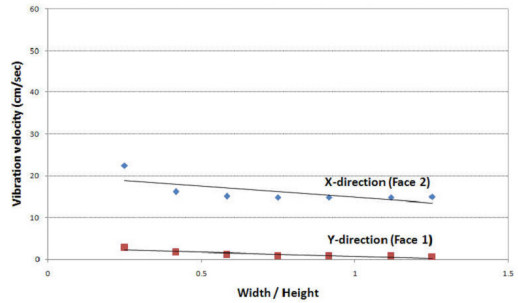


Fig. 14. Relationship between maximum shock vibration velocity and pillar size.

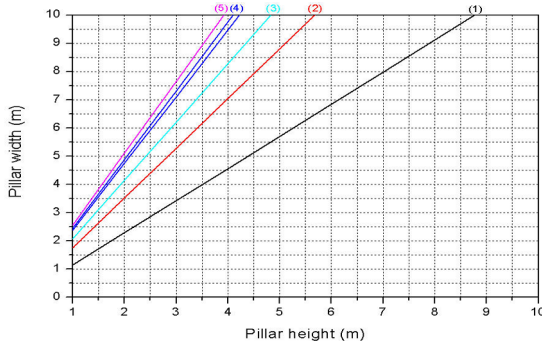


Fig. 15. Damage level by pillar width and pillar height.

- (1) PPV = 30.48cm/sec; fall of rocks in unlined tunnels
 - (2) PPV = 19.30cm/sec; 50% Probability of major plaster damage
 - (3) PPV = 13.72cm/sec; 50% Probability of minor plaster damage
 - (4) PPV = 7.11~8.38cm/sec; threshold of damage from close-in blasting
 - (5) PPV = 13.72cm/sec; safe blasting criterion for residential structures recommended by U.S.B.M
- (note) (1)~(5); nature of damage by Langefors and Kihlstrom(1973)

7. 결론

- 1) 발파압의 파쇄입도 $F_{40} \sim F_{100}$ 을 대상으로 하여 비산석이 광주의 표면과 충돌했을 때의 충격진동은 6.94~16.96cm/s로 산출되어 발파진동 예측식에 비해 최대 75 %의 진동수준이 발생할 것으로 나타났다.
- 2) 수치해석에 적용된 지하채굴공동의 막장에서 광주까지의 거리(14.59m)를 발파진동 예측식에 적용시 발파진동은 22.47cm/s로 산정되었다. 또한 수치해석에 의한 발파진동속도의 최대치는 30.49cm/s로 나타나 수치해석에 의한 발파진동이 예측식에 의한 발파진동 보다 높게 나타날 것으로 분석되었다.
- 3) 비산석이 광주에 충돌했을 때, 수치해석에 의한 광주 좌측벽면의 최대 충격진동은 15.22cm/s로 나타났으며, 비산석의 최대 입자크기에 따른 이론적인 충격진동인 16.96cm/s의 90%로서 유사한 진동수준으로 분석되었으며, 발파진동 예측식의 68% 진

동수준으로 분석되었다. 현장계측과 회귀분석을 통한 발파진동 예측식에 비해 비산암의 충격진동이 낮게 예측되어 광주의 손상 및 변형은 비산암의 충격진동보다 발파진동에 의한 영향이 더 클 것으로 판단된다. 그러나 광주에 충돌하는 실제 비산암편으로 인한 충격진동의 증첩효과를 고려한다면 광주에 가해지는 충격진동은 커질 것으로 예상되므로 발파진동 뿐만 아니라 충격진동 또한 광주 설계 시 중요한 인자로 사용되어야 할 것으로 사료된다.

- 4) 광주규격(폭/높이)에 따른 발파진동 및 충격진동의 특성을 유한요소해석을 통하여 분석한 결과, 발파진동속도는 광주규격이 0.25에서 0.92로 증가시 발파진동속도가 감소하는 경향을 보이고, 1.08 이상인 경우 큰 변화가 없는 것으로 분석되었으며, 충격진동속도는 광주규격이 0.25에서 0.42로 증가시 충격진동속도가 매우 크게 감소하는 경향을 보이고, 0.58 이상인 경우 큰 변화가 없는 것으로 분

석되었다. 따라서, 광주규격과 좌측벽면에서의 최대 진동속도(Face 2)의 상관식을 통해 발파진동 피해 수준(Langefors and Kihlstrom, 1973)에 따른 광주규격을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

지하채굴공동에서 광주설계 시 발파진동 예측식의 적용 뿐만 아니라 이론적인 비산석의 충격진동, 수치해석에 의한 광주에 가해지는 충격진동을 고려하여 발파설계를 수행한다면 근접한 광주의 안정성이 증가할 것이며, 지하채굴공동, 수직구, 터널 등의 암반 및 인공구조물에 대해 발파진동 및 비산석에 의한 충격진동의 영향을 검토하는데 유용할 것으로 판단된다. 또한 비산속도, 암중, 심발공법 및 발파패턴 등에 따른 충격진동의 특성에 대한 현장실험과 충분한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문 또는 저서는 지식경제부 자원개발특성화대학사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강추원, 2009, 제2판 발파공학 A to Z, 구미서관.
2. 고영선, 이기락, 김종우, 1996, 낙하충격에 의한 지반진동특성에 관한 연구, 산업과학연구. Vol. 14.
3. 대한과업진흥공사, 2002, 정밀조사보고서 (석회석, 영월-토교·제천-두학지구).
4. 선우춘, 류창하, 최병희, 2001, 영상처리기법에 의한 발파 파쇄암의 파쇄도 측정, 대한화약발파공학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 6-8.
5. 이재영, 안성울, 2006, 실무 유한요소해석 입문, VisualFEA 기초에서 실무, (주)싸이텍이엔씨.
6. 조규용, 강추원, 고진석, 2008, 충격진동 예측방법에 관한 새로운 방법 제안, 대한화약발파공학회지, Vol. 26, No. 1, pp. 15-21.
7. Atlas power company, 1987, Explosive and rock blasting, Atlas power company.
8. Dupont Co., 1980, Blaster's Hand Book, 16th Edition.
9. Langefors, U. and B. Kihlström, 1978, The Modern Technique of Rock Blasting, Third edition.



박 현 식

솔하발파환경시스템 대표이사

Tel: 062)230-7876
E-mail: phs821@hanmail.net



김 지 수

조선대학교 대학원

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



류 복 현

조선대학교 대학원

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



강 추 원

조선대학교
에너지자원공학과 교수

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