

고속철도 안전확보를 위한 노선 인접 광산의 발파패턴 제안

김현기^{1*}, 이성혁², 이진욱², 최찬용²

A Suggestion of Blasting Patterns of a Mine closed to Railway Line for Securing Safety of High Speed Train

Hyun-Ki Kim^{1*}, Sung-Hyeok Lee², Jin-Wook Lee², Chan-Yong Choi²

Abstract: Recently Honam high-speed railroad line is constructed in southern part of Korea. This line is for next generation HST named HEMU-430X. But there is a limestone mine near this line and this mine will make a process to dig a passageway under the railway line. In this case, safety of railroad system and stability of mine are crucial problems on both sides. By measuring mine blasting vibration and calculating regression equation, effect of mine blasting to train running is investigated quantitatively. 0.5 kine (cm/sec) is applied as a management specification of vibration based on field measurement. In this study, changes of blasting patterns are suggested to control vibration of mine blasting. And the effect of train vibration to mine is also investigated by numerical analysis.

Keywords: High-Speed Rail, High-Speed Train, Mine Blasting, Vibration, Safety Evaluation

1. 서론

최근들어 삶의 질에 대한 향상이 사회적으로 대두되고, 업무 상 혹은 여가 및 여행 등을 목적으로 많은 국민이 여러 교통 수단을 활용하게 되었다. 특히 고속철도는 가장 안전하고 빠른 대표적인 교통 수단이므로 전 국토의 남북, 동서 방향으로 고속철도가 운행하고 있고, 이중에 호남고속철도는 경부고속철도와 더불어 우리나라 양대 기간망으로 총연장이 230.99 km에 이르며, 오송에서 목포까지 2015년 개통을 목표로 건설 중이다.

고속철도의 경우 노선의 특성상 노선의 급작스러운 변화가 어려우며, 종단면상의 구배에도 많은 제약이 발생하게 된다. 따라서 계획노선이 확정된 경우 노선의 영향 반경내에 취락 지구나 공업지구 혹은 문화재와 같은 소음 및 진동 등에 예민한 시설물이 위치할 수 있고, 이와 같은 경우에도 노선의 변경 등은 많은 제한이 있으며, 건설 당시나 혹은 운전시 소음 및 진동을 저감할 수 있는 방안을 도출하여 설계에 적용하고 있다. 한편, 신설된 고속철도의 인접 지역에서 건설 혹은 자원 재취등을 목적으로 공사가 이루어질 수 있으며 이 경우는 인위적으로 발생된 외부의 진동에 의하여 고속철도에 많은 영향을

끼칠 개연성이 있다.

당해 현장은 갱도식 석회석 광산에 인접하여 노선방향으로 채굴이 이루어지고 있는 호남고속철도 현장으로, 향후 노선을 횡단하는 연결통로 개설 및 반대측의 채굴이 지속적으로 진행될 예정이며, 이에 따라 자원 채굴을 위한 발파작업시 발생된 진동이 인접 고속철도에 전달될 것으로 예상되는 곳이다. 따라서, 광산 발파진동에 의한 고속열차 및 인프라 시설물의 안정성이 확보되어야 함과 동시에 고속열차 주행에 따른 광산의 안정성도 평가되어야 한다. 이를 위하여, 본 연구에서는 발파진동계측을 통하여 대상 지반에 적합한 발파진동추정식을 산정하여 고속철도 노선의 안정성을 검토하고, 발파진동에 의한 안전확보가 가능한 광산 발파패턴을 제안하였다. 또한, 고속열차 주행에 따른 진동이 광산에 미치는 영향을 수치해석적으로 검토하여 광산의 안정성도 확보할 수 있도록 하였다.

2. 대상지역 현황

2.1 대상지역 및 광산 현황

대상 지역은 석회석 및 편암, 화강암질 편마암 등이 출현하는 지역으로서, 인접 광산은 석회석의 채굴을 목적으로 갱도식 채굴 방식을 적용하고 있으며, 현장 지질 조사 및 탐사 결과

¹정회원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 선임연구원, 교신저자

²정회원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

*Corresponding author: hkkim@krri.re.kr

•본 논문에 대한 토의를 2015년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2015년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

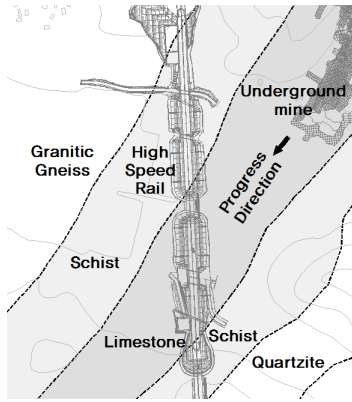


Fig. 1 Plan view of the site

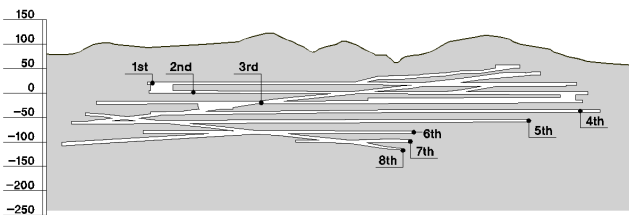


Fig. 2 Section view of the underground mining

를 토대로 검토된 현장 지질도와 노선 현황 및 채굴 광산의 평면 및 종단 현황은 Fig. 1과 2와 같다.

2.2 고속철도 노선 구조물 및 지층구성 현황

석회암층과 사교하는 고속철도의 주요 구조물은 교량, 성토층, 터널층으로 구분되어진다. 특히 석회암층 직상부 지역은 Pile 기초의 교량과 성토층이 위치하고 있으며, 단면 현황은 Fig. 3과 같다.

2.3 채굴지역 발파 현황

채굴 지역은 석회석 채굴을 목적으로 갱내 채굴을 수행하는 지역으로 Jumbo Drill을 활용하여 천공 작업을 수행한 후

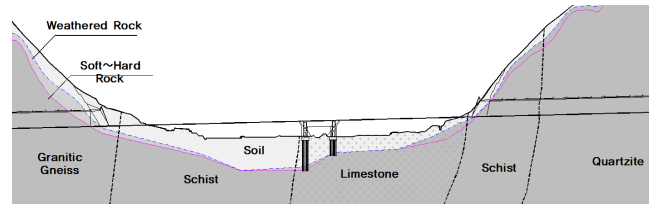


Fig. 3 Section view of the Honam HSR Line

에 멀전 폭약과 ANFO를 이용하여 발파작업을 수행하고 있다. 발파작업은 굴진구간과 확폭구간으로 구분하여 적용하고 있으며, 굴진 구간은 폭 9 m, 높이 6 m로 채굴 작업이 진행된다. 또한 굴진 후 자유면을 이용한 추가 채굴 작업을 수행하는 확폭 구간은 최대 높이 6 m 폭 18 m로 채굴 작업을 수행하고 있다. 발파작업시 최대 지발당 장약량은 약 21 kg으로서 심발부에서 최대 지발당 6공의 발파작업을 수행하고 있다. 생산 발파시 현장에서 적용되는 발파패턴 및 주요 발파 제원은 Table 1과 같다.

2.4 진동전달 특성

대상지역은 석회석 광산이 지하 채굴이 수행되어왔기 때문에 지하갱도 현황은 매우 복잡하게 형성되어 있다. 따라서 갱내 발파작업시 발파진동이 인접 고속철도에 전달되는 과정은 발파 위치에 따라 매우 상이하게 나타나게 되므로 이를 반영하여 발파지역 상부에 (a) 채굴적이 있어 발파진동이 감쇄되는 경우, (b) 채굴적이 없는 신선한 암반인 경우로 나누어 진동 전달 특성을 평가하였다(Fig. 4).

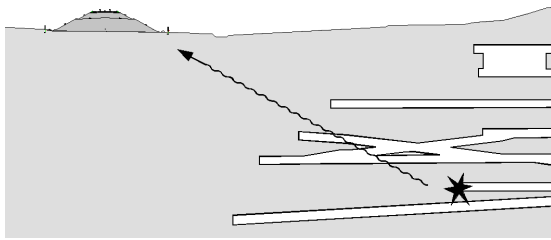
3. 지반조사 및 발파진동계측

3.1 지반조사

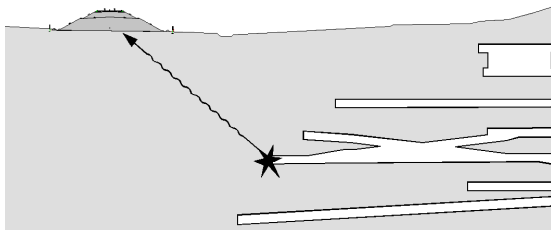
수치해석과 지반의 안정성을 명확하게 판단하기 위하여 물

Table 1 Current blasting patterns of a mine

Blasting pattern	Category	Cut	Enlarge	
	Hole depth	3.800 m	3.800 m	
	Number of hole	48	50	
	Charge /Hole	ANFO	106.0 kg	137.5 kg
		EMX	31.0 kg	12.5 kg
	Cuttung	V-Cut		
	Charge/Delay	21.0 kg	15.0 kg	



(a) Wave propagation through mine



(b) Wave propagation into intact rock mass

Fig. 4 Propagation of ground vibrations

Table 2 Material properties of the site

Soil layer	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	E (MPa)	Poisson's ratio (ν)	
Roadbed	19.0	20.0	25	30.0	0.35	
Burried Layer	18.0	10.0	28	15.0	0.35	
Alluvial Layer	18.0	0	30	20.0	0.34	
Weathered soil	19.0	15.0	30	24.0	0.33	
Weathered rock	20.0	30.0	31	170.0	0.30	
Lime stone	I	27.5	6,000	46	25,000	0.19
	II	26.5	3,000	42	15,000	0.21
	III	25.0	1,500	36	5,000	0.23
	IV	23.5	500	32	2,000	0.26
	V	21.0	80	30	300	0.28
Schist	I	27.0	4,000	46	33,000	0.20
	II	26.0	2,500	42	17,000	0.21
	III	25.0	1,000	35	8,000	0.23
	IV	23.0	400	33	2,000	0.28
	V	21.0	80	31	400	0.30

Table 3 Direction of discontinuity surfaces

Set	Direction of discontinuity surfaces	
	Dip direction	Dip angle
J1	179.05	55.77
J2	330.69	55.10
J4	19.28	76.50
J5	119.54	60.96

Distribution of discontinuity surfaces Spacing of discontinuity surfaces is 10~90 cm

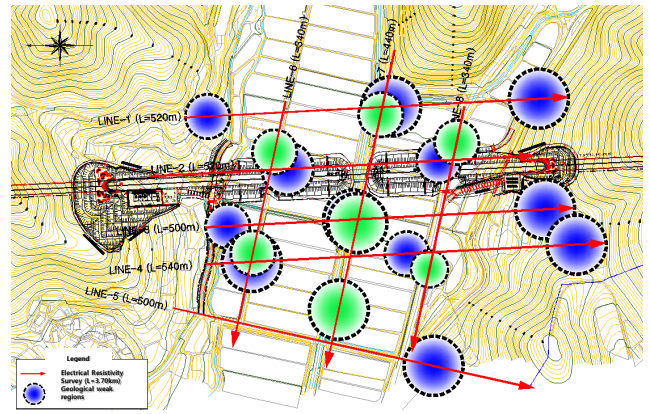


Fig. 5 Geological weak regions by Electric Resistivity Survey (ERS)

리탐사, 시추조사, 현장시험 및 실내시험을 수행하여 지반정수를 산정하였으며, 불연속면 방향성을 분석하였다(Table 2와 3). Fig. 5는 지질학적 이상개소를 나타낸 것으로, 당해 지역에는 심도별로 19개소의 이상대를 확인할 수 있었다. 고속철도 노선 하부 관통시, 불연속면 정보와 지질이상개소 정보를 이용하여 안전을 확보할 수 있는 최적개소를 선정해야 할 것으로 판단되었다.

3.2 발파 진동계측

연구 지역내 광산에서 발파시 발파진동 전달 경향은 석회석 채굴을 실시하여 공동이 형성된 구간(채굴적)을 통과하는 발파진동과 석회석 채굴을 실시하지 아니하여 공동이 형성되지 않은 구간(신선한 암반)을 통과하는 발파진동으로 구분할 수 있다. 이에 따라 발파작업시 발파원과 계측점 사이의 진동 전달 경향을 고려하여 발파원에 따른 계측 위치를 차등 적용하였다.

발파 진동계측은 10회 진행하였다. 1~7회차의 발파는 발파원과 계측점 사이에 광산 채굴이 진행된 지역과 진행되지 않은 지역이 산발적으로 위치하고 있으며(Fig. 6), 8~10회의 발파는 발파원과 계측점 사이에 채굴지역이 없는 지점(Fig. 7)을 선택하여 계측을 진행하였다. 발파진동 계측장비는 매 발파 작업시 15~19대를 설치하였다. 발파진동 계측기는 발파진동 전용 계측장비를 설치하였으며 계측시 저장은 512 Hz~1024 Hz의 빈도로 계측을 실시하였다. 발파작업시 발파원 및 계측지점을 측량을 수행하여 정확한 위치를 파악하였다. 각 발파 회차별 발파진동 계측 결과는 Fig. 8과 같다(Graph에서 표시되지 않은 DATA는 계측기의 계측하한치 미만인 DATA임).

3.3 진동관리기준 결정

국토교통부(2006), 철도설계기준(2013), 대한터널협회(1999) 등 기준과 미국 USBM(1980), 일본 화약학회(2002), 독일

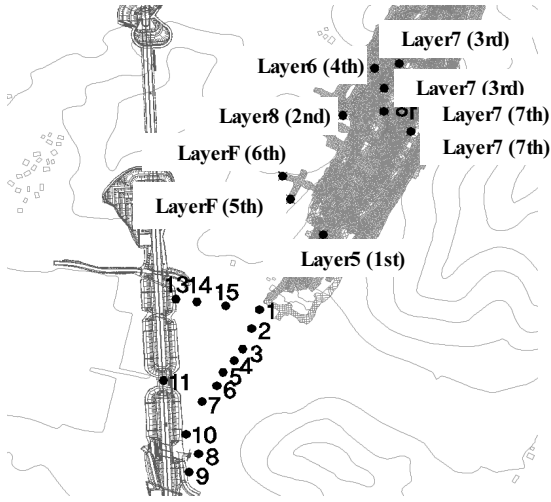


Fig. 6 Blasting and monitoring position (1st~7th blasting)

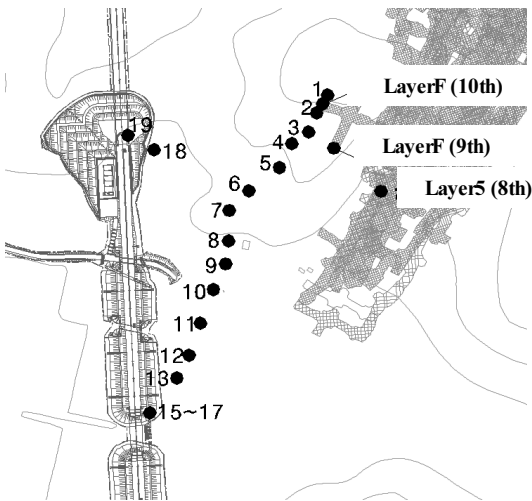


Fig. 7 Blasting and monitoring position (8th~10th blasting)

DIN4150(1970, 1986) 등의 기준을 검토하여 광산 발파진동 기준을 정의하였다. 발파에 의한 지반진동이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위해서 각 성분별 탁월 주파수(Domain Frequency, Hz)를 평가한 결과 모두 10 Hz 이상이며, 상부지반 및 구조물 발파 시에는 50 Hz 이상이 71.82%, 59.65%로 가장 우세하게 나타났다(Fig. 9).

본 계측결과를 이용하면, 독일 DIN에서 정의한 ‘진동에 예민한 구조물 등’에 대하여 10~50 Hz 주파수대역 기준을 적용할 수 있을 것으로 판단되었으며, 0.3~0.8 kine 값에 대하여 중간에 해당하는 0.5 kine을 설정하였다. 이는 일본의 구조물 피해 발생의 경계값으로 제시된 진동관리기준과 같은 값으로 정의된다. 따라서, 고속철도 노반면을 기준으로 0.5 kine을 적용하여 안정성 평가를 시행하였다.

4. 안정성 평가

4.1 발파 진동추정식 산정

국토교통부(2006)에 근거하여, 현장에서 획득한 발파진동 속도(P.P.V, Fig. 10)와 발파작업시 최대 지발당 장약량, 발파원으로부터 계측점간의 이격거리를 토대로 단순회귀분석을 수행하여 현장에 적합한 발파진동 추정식을 산출하였다.

위 기준에서 설계단계에서 예비검토를 위하여 제시하고 있는 표준 진동추정식은 $v_{84\%} = 200 \times \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.600}$ 이며, 추정

위한 회귀식도 장약량과 거리의 함수로 $v_{95\%} = K \times \left(\frac{D}{W^{0.5}} \right)^n$

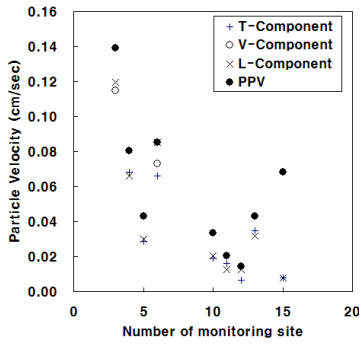
식을 이용하여 진동속도를 예측하였다. 여기서, v 는 진동 속도, K 는 발파진동 상수, D 는 폭원으로부터의 거리, W 는 지발당 장약량이며, $D/W^{0.5}$ 는 SD 라 정의하였다.

발파진동 추정식은 현장 실험 결과를 토대로 계측 위치 및 추후 적용성 등을 고려하여 2가지로 구분하여 산출하였다. CASE-1은 발파원에서 수진점 사이에 채굴적이 없는 곳에 적용되는 추정식(현장 실험 중 8~10회 발파DATA 활용)으로 검토 지역에서는 고속철도 직하부의 연결통로 및 고속철도와 광산의 근접지역 발파작업시 적용하며, 또한 CASE-2는 발파원에서 수진점 사이에 채굴적이 일부 형성되어 있거나, 형성되지 않은 곳에 적용되는 추정식(현장 실험 중 1~10회 전체 발파DATA 활용)으로서, 검토 지역에서는 기 형성된 공동을 거쳐 고속철도에 전달되는 발파작업시 적용된다(Fig. 10, 11). 발파진동 추정식의 이격거리별 허용 지발당 장약량(진동 기준 0.5 cm/sec 적용)을 산출하면 Fig. 12와 같다. 동일 이격거리에 대하여 CASE-1이 상대적으로 장약량이 적은 것은 거리에 따른 진동 감쇠가 작기 때문이다.

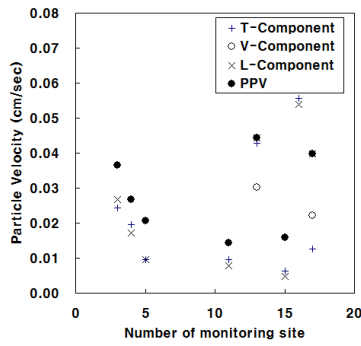
4.2 발파공법 설계 및 적용 영역 검토

발파공법 적용 영역은 공당 장약량을 토대로 산출하였으며, 발파패턴은 제한발파, 제어생산발파, 일반생산발파로 구분하여 제시하였다. 제한발파는 현재 적용되는 천공장대비 축소된 천공장을 적용하는 것이며, 제어생산발파는 현재의 천공장 및 공당 장약량을 그대로 적용하되, 보조 심발공법의 추가와 지발당 발파공수를 변경하여 적용하는 것을 의미한다 (Table 4).

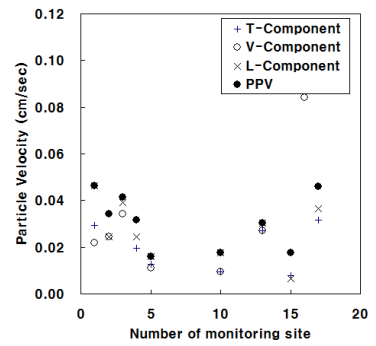
발파공법 설계는 제한발파 및 제어발파로 구분하여 적용하였으며, 제어발파패턴의 경우 너관의 재배치 및 필요시 다단식 발파기 등을 활용하여 지발당 장약량을 조절하여 발파패턴을 제한하였다(Fig. 13).



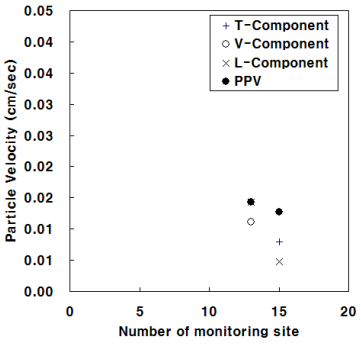
(a) 1st Blasting



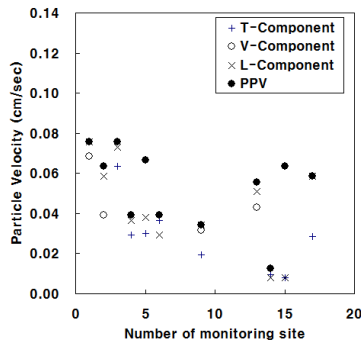
(b) 2nd Blasting



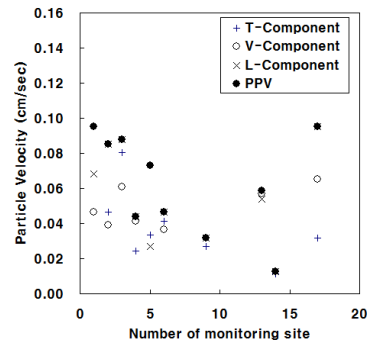
(c) 3rd Blasting



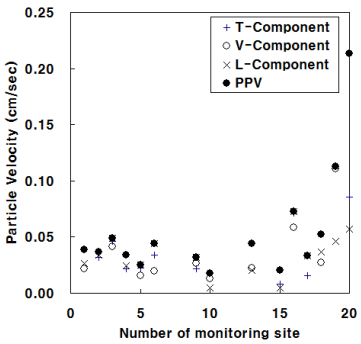
(d) 4th Blasting



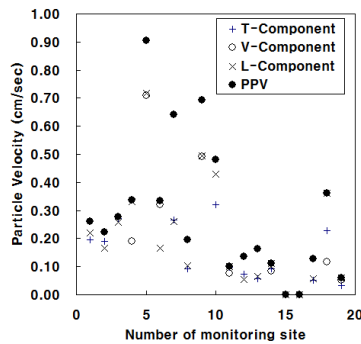
(e) 5th Blasting



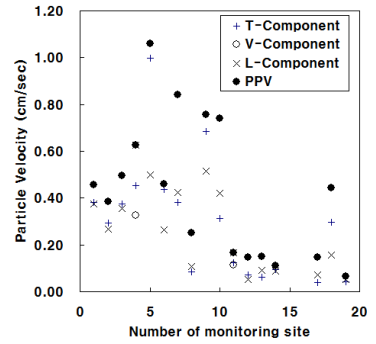
(f) 6th Blasting



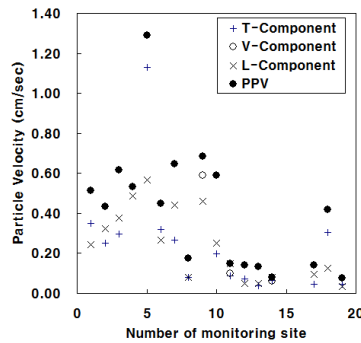
(g) 7th Blasting



(h) 8th Blasting

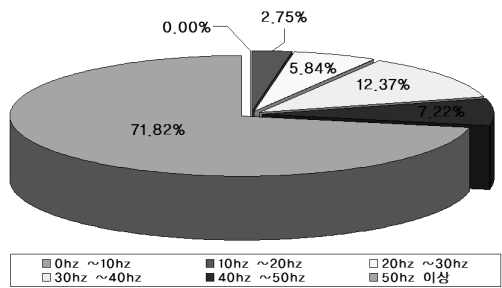


(i) 9th Blasting

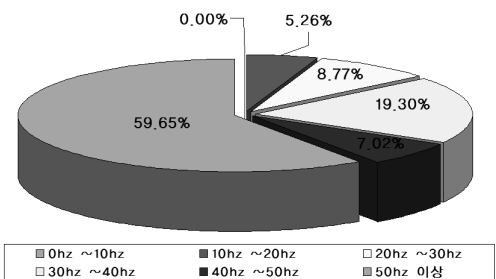


(j) 10th Blasting

Fig. 8 Praticle velocity of blasting

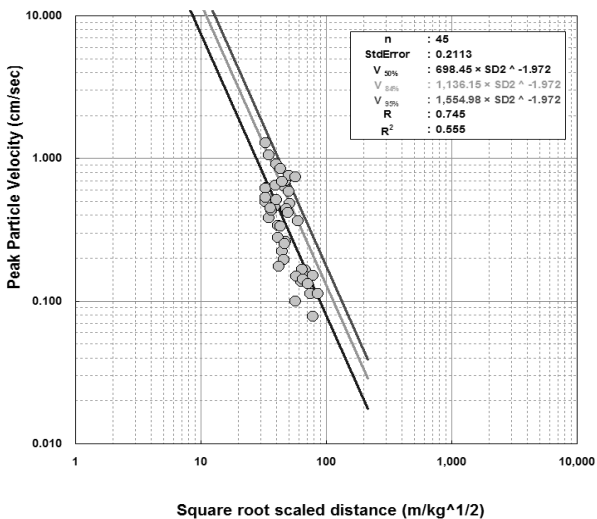


(a) Ground surface



(b) Structures (Bridge and tunnel)

Fig. 9 Domain Frequency by mine blasting

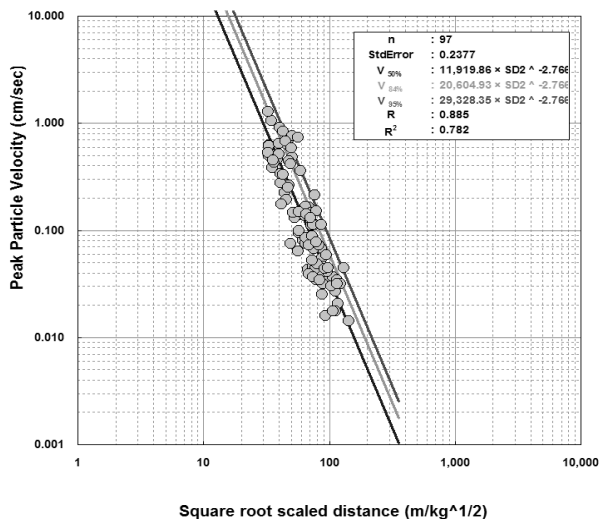


$V_{95\%} = 1,554.98 \times SD^{-1.972}$
No. of Data n : 45 > 30, Correlation factor R : 0.745 > 0.700

Fig. 10 Wave Propagation Eq. into rock mass (Case-1)

4.3 고속철도 안정성을 고려한 발파패턴

위치별로 Fig. 10과 11에 제시한 진동추정식을 이용하면, 위치에 따라 지반에서 발생하는 진동을 예측할 수 있다. 노반면에서의 진동기준 0.5 kine에 대하여 발파진동에 대한 영향 범위를 설정하였다(Fig. 14). 현재 사용하고 있는 장약량을 기준으로 하면, 최소 243 m 이상을 이격시켜야 기준을 만족하지



$V_{95\%} = 29,328.35 \times SD^{-2.766}$
No. of Data n : 97 > 30, Correlation factor R : 0.885 > 0.700

Fig. 11 Wave Propagation Eq. through mine (Case-2)

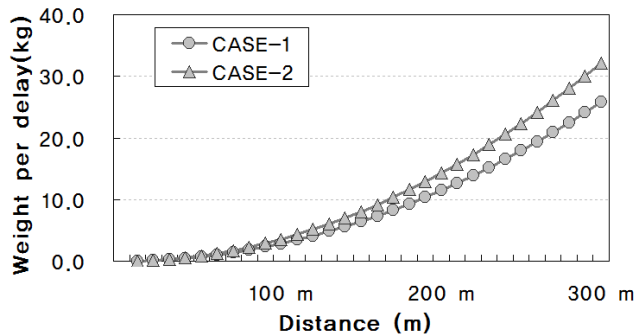


Fig. 12 Charge per delay by maximum distance (allowable vibration velocity 0.5cm/sec)

Table 4 Charge per delay of blasting

Category	Holedepth	charge/delay
Restricted Blasting	2.20 m	1.50 kg
Controlled blasting	1hole/delay	3.80 m
	2hole/delay	3.80 m
	4hole/delay	3.80 m
Existing Blasting	3.80 m	21.0 kg

만, 장약량 조정에 의하여 영향범위를 축소할 수 있어, 광산의 발파패턴 조정에 의하여 고속철도 노선의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다(Table 5, Fig. 15). 상기 조건을 이용하여, 광산 채굴에 따른 단계별 작업 영역에 대한 발파패턴을 제시하였으며, 호남고속철도를 중심으로 광산 채굴에 따른 발파패턴 평면도를 Fig. 16에 보였다.

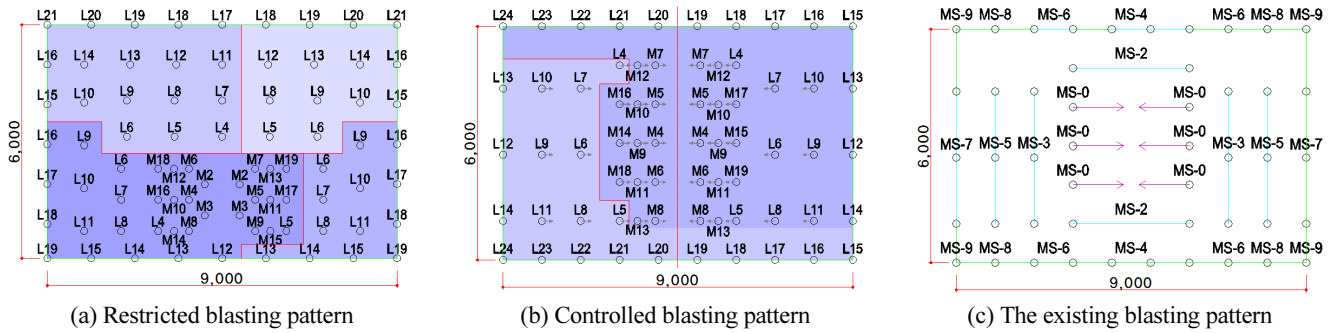


Fig. 13 The trail & existing blasting patterns

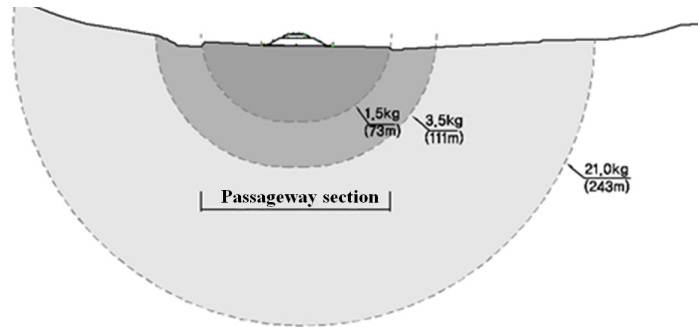


Fig. 14 Vibration influence range of charge per delay (kg/delay) for 0.5 kine

Table 5 Charge per delay for the distance from the roadbed in railway line

Charge / delay	<1.5 kg	1.5 kg	3.5 kg	7.0 kg	14.0 kg
Interval distance	<73 m	73 m~111 m	111 m~141 m	141 m~199 m	199 m~243 m
Propagation equation	CASE-1			CASE-2	

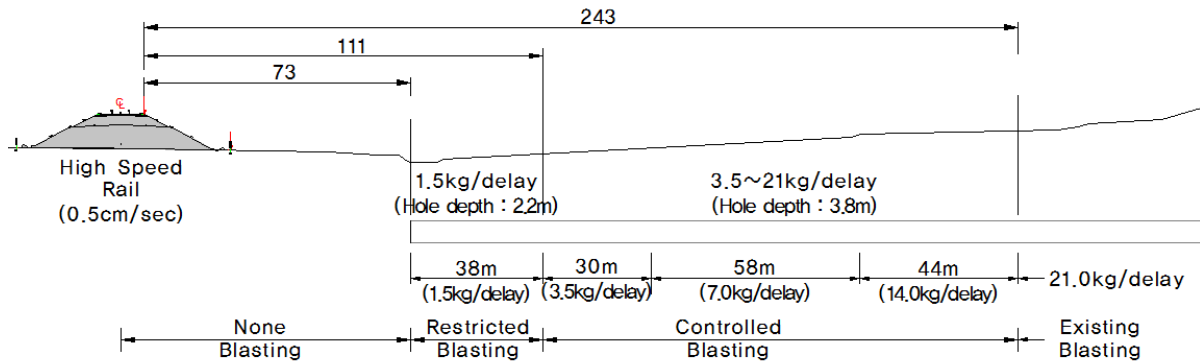


Fig. 15 A method of mine blasting (charge per delay) to secure management specification 0.5kine

4.4 고속열차 진동에 의한 연결통로 안정성 평가

호남고속철도의 설계열차하중은 KTX-II, 10량 1편성으로 최대속도 $v=350$ km/hr이며, HL 표준열차하중(Table 6)을 적용하여 열차진동에 의한 연결통로의 안정성을 평가하였다. 열차운행에 따른 이동하중의 모사를 위하여 상용프로그램인 PLAXIS 8.0을 이용하였으며, 사용한 지반물성치는 Table 2

와 같다.

열차운행시 채굴광산 안정성 평가를 위해 성토부 및 교량부의 횡단면에 대해 검토를 실시하였으며, 열차운행에 따른 열차진동의 영향이 가장 클 것으로 예상되는 하1편의 채굴광산에 대해서 안정성 검토를 실시하였다. 열차운행시 채굴광산 안정성 평가를 위한 검토단면은 다음과 같으며, 안정검토

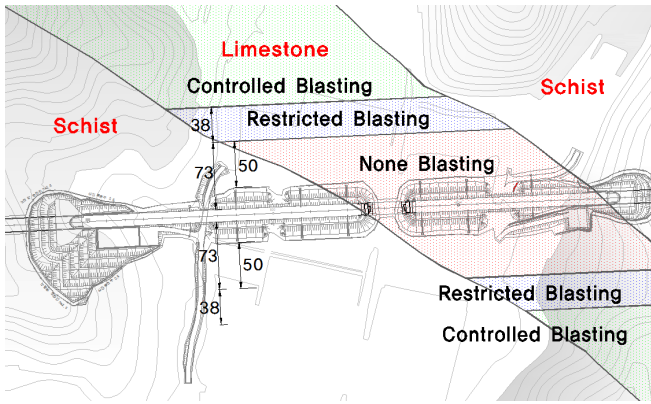


Fig. 16 The blasting pattern of study area (allowable vibration velocity 0.5cm/sec)

Table 6 Standardized load of HL

Sleeper spacing (mm)	Train velocity (km/hr)	Time interval (sec)	Axial load (kN)	Static wheel load (kN)	Running wheel load of long rail (kN)	Sleeper load for each fastening (kN)
650	350	0.00617	250	125	256.25 kN	102.50

- Running wheel load of long rail (Pd) : $Pd = Ps(1+i) = Ps(1+0.3V/100)$,
 Ps : Static wheel load, V : Train velocity
 - Sleeper load for each fastening (PR) : $PR = \alpha \cdot Pd$, α : Coefficient varied by rail type, sleeper spacing, bearing capacity of ballast and roadbed

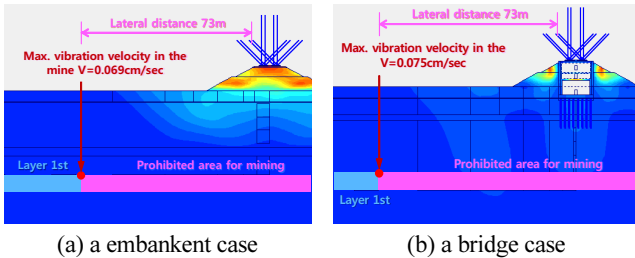


Fig. 17 Results of numerical analysis

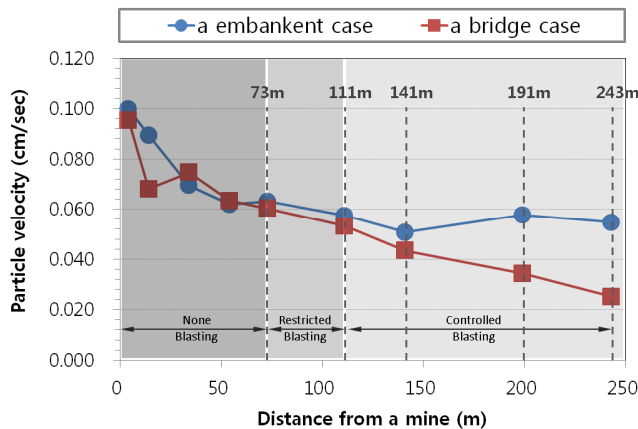


Fig. 18 Particle velocity with distance from a mine

시 석회암의 축압계수(K_0)는 1.0을 적용하였다.

성토부 및 교량부 검토결과 열차운행시 노반 상부 좌측 기준점으로부터 수평방향 이격거리가 증가함에 따라 하1편 심도에서 최대 진동속도가 감소하는 것으로 나타났으며, 광산 하1편 모든 지점에서 진동속도는 0.069 cm/sec~0.075 cm/sec로 열차운행시 열차진동에 대한 채굴광산(하1편 심도)의 영향은 미미한 것으로 평가되었다(Fig. 17과 18).

5. 결론

연구 대상 지역은 현재 갱내식 채굴 중인 석회석 광산이 위치하고 있으며, 갱내식 채굴이 예상되는 지점과 신설될 호남고속철도가 사교하게 된다. 이에 따라 신설될 호남고속철도의 안전성을 확보함과 동시에 광산내의 석회석 생산이 가능한 영역과 그 발파패턴을 도출하였으며, 열차주행에 의한 광산의 안정성도 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 발파진동 전달 경향을 고려하여 발파진동 전달 과정 중 채굴적의 형성 여부에 따라 현장에 적합한 진동 추정식을 2가지로 구분하여 제시하였으며, 진동 추정식 중 기 형성된 채굴적을 통과할 경우 진동 감쇠경향이 큰 것을 확인하였는데 이와 같은 현상은 기 형성된 채굴적이 방진구역활을 하는 것에서 기인하는 것으로 추정된다.
- 2) 발파진동 추정식을 이용하여 발파공법 검토시 크게 3개 구간(제한발파, 제어발파, 일반발파)으로 구분하여 제시하였으며, 제한발파의 경우 굴진장 축소 패턴이 적용되었고, 제어발파패턴은 보조심발공법의 추가적용과 함께 뇌관을 재배치하여 적용하였다. 일반발파패턴은 현재 광산에서 수행하는 발파패턴과 유사하여 설계하여 제시하였다.
- 3) 현장 실험 결과를 토대로 채굴 지역별 발파패턴을 차등적으로 적용함에 따라 인접 고속철도의 진동 관리기준을 준수하며, 석회석 채굴량을 극대화할 수 있는 발파공법 적용 영역 및 패턴을 제시하였다.
- 4) 고속열차 진동이 지반내부로 전달되는 영향은 적으며, 가장 가까운 하1편에서의 진동속도는 0.069 cm/sec~0.075 cm/sec로 열차운행시 열차진동에 대한 채굴광산(하1편 심도)의 영향은 미미한 것으로 평가되었다.

고속철도는 안전이 최우선이 되어야 하며, 어떤 환경도 안전을 전제로 타협될 수 없다. 따라서, 이상 진동 발생에 따른 비상대응체계를 추가적으로 수립하여야 하며, 이상 진동을 즉시 관측할 수 있는 계측시스템의 구축도 검토되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. British Standard (1993), Evaluation and measurement for vibration in buildings. BS7385 Part 2: Guide to damage levels from ground borne vibration.
2. DIN 4150-part 3 (1970, 1986), Structural Vibration in Buildings: Effects on Structure.
3. Ministry of Land, Infrastructures and Transport in Korea (2006),

- Design and construction guidelines for road construction open-air blast (in Korean).
4. Ministry of Land, Infrastructures and Transport in Korea (2013), Design criteria for railroad (road bed) (in Korean).
5. Japan Explosives Industry Association (2002), These explosions and Those explosions (in Japanese).
6. Siskind, D. E., M, S. Stagg, J. W .Kopp, and C. H. Dowding (1980), Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting, (Report of Investigations 8507.) Washington, DC: U.S. Bureau of Mines.

Received : 10/10/2014

Revised : 01/14/2015

Accepted : 05/07/2015

요 지 : 2015년도 개통을 위하여 호남고속철도 건설사업 건설이 진행되고 있으며, 이 노선은 차세대 고속열차의 HEMU-430X가 세계 최초로 주행하게 된다. 한편, 인근에 위치한 석회석 광산이 지속적인 발파작업을 시행하고 있으며, 더욱이 향후 연결통로 개설을 통하여 이 노선의 하부를 관통할 예정이다. 이 경우에 광산 발파로 인한 고속철도의 안정성과 열차주행으로 인한 광산 안정성 모두 검토되어야 한다. 이를 위하여 광산 발파진동계측을 통하여 진동추정식을 작성하였으며, 광산발파로 인한 철도 안정성을 정량적으로 검토하였다. 특히, 계측결과 분석에 의한 계측관리기준으로 0.5 kine(cm/sec)을 설정하여, 광산 발파진동을 제어하고자 하였으며, 발파진동의 제어를 통하여 고속열차의 안정성을 확보할 수 있는 광산의 발파패턴을 제안하였다. 또한, 고속열차 주행에 따른 진동이 광산에 미치는 영향을 수치해석적으로 검토하여 광산의 안정성도 확보할 수 있도록 하였다.

핵심용어 : 고속철도, 고속열차, 광산 발파, 진동, 안전성 평가
