

편마암지역에서 선대구경 수평보링 공수적용에 따른 지반진동 감쇠효과 연구

최형빈^{1)*}, 한동훈²⁾, 기경철³⁾

A Study on the Decay Effect of Ground Vibration based on the Number of PLHBM Holes in Gneiss Area

Hyung-Bin Choi, Dong-Hun Han, Kyung-Chul Ki

Abstract In this study, the field tests were performed on V-cut, PLHBM 1 hole, PLHBM 2 hole in gneiss area in order to compare the effects of the vibration decay of a tunnel cut-hole according to the number of PLHBM holes with scaled distance.

Based on the prediction equation of blasting vibration from the result of the tests, the decay rate of vibration were confirmed 21.8~61.1% using PLHBM 1 hole, 35.7~79.3% using PLHBM 2 hole for scaled distance within 10~100m/kg^{1/2} on the basis of V-cut PPV.

As the scaled distance was increased, the effect of vibration decay was decreased. The effect of vibration decay of cut-hole for initial PLHBM 1~2 hole was significantly high.

Key words Gneiss rock area, PLHBM, Ground vibrations, Cut-hole, The effect of vibration decay

초 록 본 논문에서는 PLHBM의 환산 거리별 공수에 따른 터널 심발공의 진동감쇠효과를 비교하기 위해 편마암 지역에서 V-cut, PLHBM 1공, PLHBM 2공에 대한 현장실험을 수행하였다. 시험결과 얻어진 발파진동추정식을 근거로 하였을 때 진동 감쇠율은 V-cut의 PPV를 기준으로 환산거리 10~100m/kg^{1/2}의 범위에서 PLHBM 1공 적용 시 21.8~61.1%, 2공 적용시 35.7~79.3%로 나타났다. 진동감쇠효과는 환산거리가 증가할수록 작아지는 경향을 보였으며, PLHBM 1~2공은 심발공의 진동감쇠효과가 높은 것으로 나타났다.

핵심어 편마암지역, 선대구경 수평보링공, 지반진동, 심발공, 진동감쇠효과

1. 서론

발파방법에 의한 터널굴착은 주변 보안물건과 근접 발파 조건에서 물적 피해를 주지 않고 안전시공을 수행할 수 있는 가장 경제적인 방법이지만 도심지 발파 시 도심지 특성상 피해기준 이내의 발파조건을 만족

시키기 위해서는 많은 노력이 요구된다.

국내 터널발파 시 보편적으로 사용되는 터널발파 심 발공법은 단공발파의 경우 V-cut, 장공발파의 경우 장 약공보다 큰 약 102mm 직경의 무장약공을 이용하는 Cylinder-cut을 들 수 있는데 이들 1자유면의 심발공 은 일반적으로 진동속도가 높게 나타난다. Cylinder-cut에 비해 직경 300~500mm의 무장약공의 2자유면 을 이용하는 선대구경 수평보링공법(Pre Large Hole Horizontal Boring & Blasting Method, PLHBM)은 발파효율 및 진동감쇠효과 측면에서 우수한 것으로 알려져 있고 주변공에 발생하는 지반진동 이하로 제어할 수 있는 것으로 보고되었다(이정인 외, 2000).

¹⁾ High ENC 기술사 사무소

²⁾ (주) 신발파

³⁾ 무진기술연구소

* 교신저자 : pebin@daum.net

접수일 : 2016년 4월 27일

심사 완료일 : 2016년 5월 10일

게재 승인일 : 2016년 5월 27일

기존 연구결과에 의하면 무장약공과 1st. square 발파공의 중심사이 거리인 공 간격 0.71~1.0Φ시험편에서 환산거리 10~40m/kg^{1/4}일 때 8.0~60.0%의 진동감쇠 효과가 있는 것으로 나타났다(서울대학교 공학연구소, 2000). 또한, PLHBM 1공은 V-cut에 비해 약 26~30%의 진동 감쇠효과(우준명, 2003), PLHBM 3공은 환산거리 20~50m/kg^{1/2}일 때 26.7~42.8%의 진동 감쇠 효과가 있는 것으로 보고되었다(김창섭 외, 2012). 더불어 굴진효율 최대화 및 진동·소음 최소화를 위해 천공위치, 암질 종류, 장약방법, 발파패턴에 대한 PLHBM 설계 연구가 수행된 바 있다(백종현 외, 2012). 이러한 연구들을 바탕으로 최근 터널현장에서 심발공 진동제어를 위해 PLHBM을 설계단계에 적용되고 있으나 대상지역의 지질 및 암반조건, 발파조건, 보안물건과의 환산거리 등 차이로 진동 감쇠율은 다르게 나타나기 때문에 설계 시 선대구경 천공수에 따른 발파 진동 감쇠율을 일률적으로 정하기에는 어려움이 따른다. 본 논문에서는 편마암지역에서 V-cut, PLHBM 1공, PLHBM 2공에 대한 시험발파를 수행하여 V-cut을 기준으로 PLHBM 환산거리별 공수 적용에 따른 지반 진동 감쇠효과를 정량적으로 비교하였다.

2. 대상지역

2.1 시험구간 및 현황

시험구간은 OO철도 제 O 공구 노반건설공사 중

STA.7km288.4~282.4(L=6m)구간이며, Fig. 1과 같이 본선 직상부 20.7m지점에 편도3차선 도심지 도로가 뻗어있고 NS~NE방향으로 근거리 보안물건들이 위치하고 있어 진동제어 터널발파 굴착이 요구되는 구간이다. 시험구간의 보안물건에 대한 진동기준은 보안물건①·② 0.3cm/s, 보안물건③ 0.2cm/s미만을 만족시켜야 한다.

2.2 지질 및 암반조건

시험구간 터널의 지질은 선캄브리아기(Pre-cambrian period)의 변성암류가 기반암(bed-rock)을 이루고 그 상부를 수계에 의해 형성된 신생대 제 4 기의 층적층이 부정합으로 피복하고 있으며, 기반암은 호상 혹은 편마암으로 본 지역의 경기편마암 복합체(Gyeonggi gneiss complex) 중에서 가장 광범위하게 노출되어 있다(한국철도시설공단, 2014). 실내시험 결과 얻어진 암석의 물성은 Table 1과 같이 단위중량 25.8~26.6 kN/m³, 탄성계수 6,353~12,310MPa, 일축압축강도 91.4~135, 탄성파속도(V_p) 3,116~4,519m/s, 포아송비 0.25~0.28이며, 암 판정 결과 경암에 해당된다.

3. 현장 시험발파

3.1 세부계획

PLHBM 공수 적용에 따른 심발공의 진동 감쇠율을 비교하기 위하여 현장 시험발파는 심발공 V-cut를 먼저

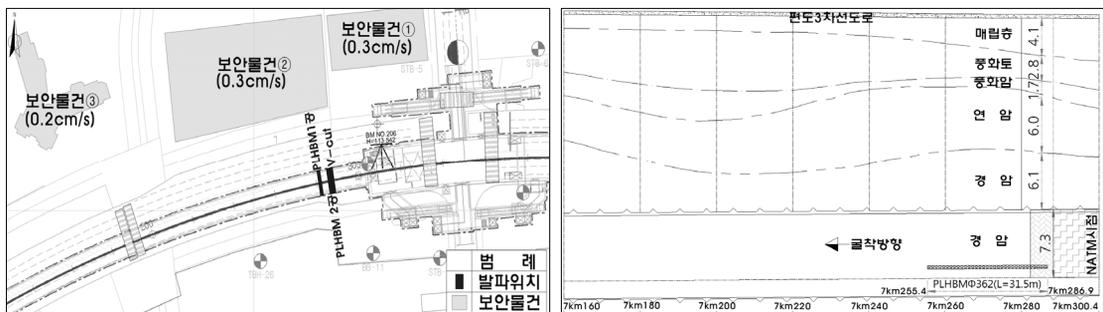


Fig. 1. 시험구간 주변현황도.

Table 1. 실내암석시험 결과

단위중량(kN/m ³)	탄성계수(MPa)	일축압축강도(MPa)	탄성파속도(V _p , m/s)	포아송비
25.8~26.6	6,353~12,310	91.4~135	3,116~4,519	0.25~0.28

Table 2. 시험발파 조건

구분	조건		
시험위치(STA.)	7km288.4	7km286.9	7km282.4
시험순서	1	2	3
발파공법	V-cut	PLHBM 2공	PLHBM 1공
굴착구분	상부반단면		
천공경(mm)	Φ45		
장약공(공)	90	98	106
무장약공(공)	-	2	1
천공장(m)	1.65	1.65	1.65
굴진장(m)	1.50	1.50	1.50
단면적(m ²)	41.428	41.428	41.428
파쇄량(m ³)	62.142	62.142	62.142
지발당장약량(kg)	1.125(심발공) · 1.000~1.125(확대공) · 1.125(바닥공)		
총장약량(kg)	79.950	83.425	96.300
단위장약량(kg/m ³)	1.287	1.342	1.550
사용화약류	Emulsion(Φ32mm×295mm×0.25kg/pcs), 정밀(Φ17mm×500mm×0.1kg/pcs)		
사용뇌관류	비전기뇌관 MS 5~19, LP 4~21, 연결뇌관 7 EA, Starter 1EA		
기폭시차(ms)	0, 17, 42, 59, 84		
전색	모래		

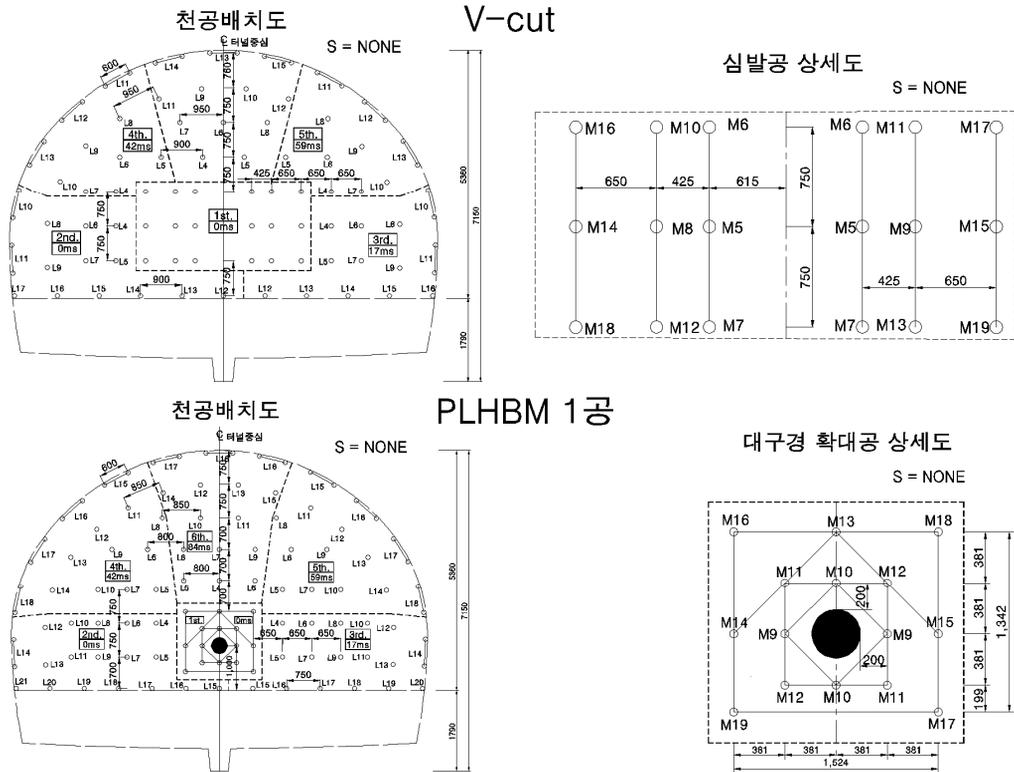


Fig. 2. 시험발파 패턴도 (1).

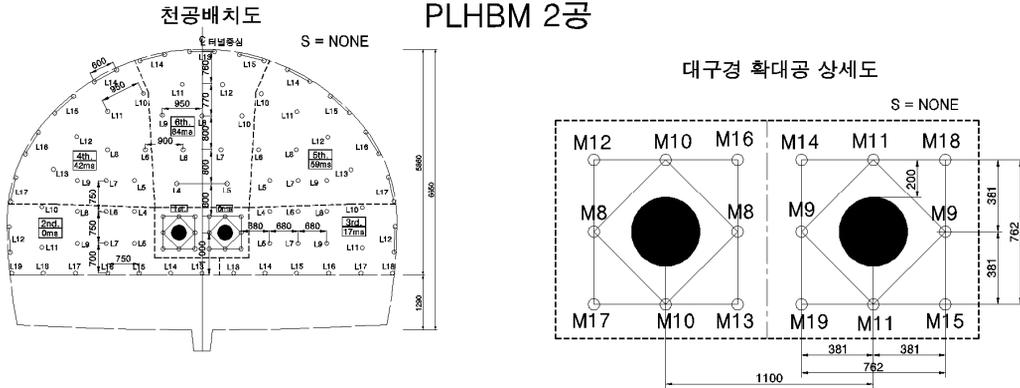


Fig. 2. 시험발파 패턴도 (2).

Table 3. 화약류 특성

<p>에멀전폭약 (Emulsion Explosives)</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 유중수적형(Water in Oil, 油中水滴型)의 에멀전폭약으로 합수폭약(含水爆藥)계열이며, 내한성 · 내수성 · 안전성(열, 마찰, 충격 등) · 후 가스가 특히 우수한 폭약 · 취급이 용이하며 약상을 자유롭게 조절이 가능 	
<p>정밀폭약 (Smooth Blasting Explosives)</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 정밀폭약이라고도 하며, 조절발파(Controlled Blasting)에 사용 · 모양 균열의 극소화, 여굴 방지, 미려한 굴착 예정선 유지 · 발파효율성 · 정밀성 · 안전성 · 경제성 향상 	
<p>비 전기 뇌관 (Non-Electric Detonators)</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 기폭력이 우수한 8호 뇌관 · Bunch Connector의 소음최소화 4호 뇌관 · 시그널튜브는 충격, 마찰, 무선전파에너지, 누설전류, 정전기에 비교적 안전 	

수행하고 PLHBM 2공, PLHBM 1공 순으로 3회 수행하였다. 시험발파 제원 및 패턴도는 Table 2, Fig. 2와 같이 에멀전(Emulsion)계열 폭약 및 비전기뇌관을 사용하였으며, 비전기뇌관은 연결뇌관(Bunch connector)에 의한 기폭시차를 부여하여 다단발파를 수행하였다.

PLHBM의 특징 중 하나는 무장약공 주변부의 공간격을 작게 하는 설계방법을 채택하게 되는데 그 결과 V-cut에 비하여 PLHBM의 천공수가 증가 하였으며, 총장약량도 증가하였다. 그러나 지발당 장약량을 일정하게 유지함으로써 데이터 분석을 용이하게 하였다.

3.2 사용 화약류 특성

터널 암반조건 및 시험발파의 목적상 진동저감 효과를 위한 사용화약류의 특성은 Table 3과 같다.

3.3 진동계측 수행

사용된 계측기기는 변위 · 진동속도 · 진동가속도 · 진동레벨 · 소음레벨 · 음압수준 · 주파수를 모두 측정할 수 있는 제품을 사용하였으며, 주요 계측기기의 특성은 Table 4와 같다. 본 기기는 Blast monitor, 연결 Cable, Sensor, Blast ware out-put 등 본체와 부속물로 구성되어 있으며, Software와 접속시켜 Full wave

Table 4. 계측기기 특성

구분		특성
진동속도 환경소음계	진동측정범위	0.1mm/s~100mm/s
	트리거레벨	0.1mm/s단위 설정
	샘플주기	0.1second
	측정모드	Manual, Single, Continuous
	측정시간	1~10s, 1m, 5m, 30m, 1hr, 4hr, 8hr, 24hr
	소음측정범위	29~130dB
	소음특성	A, Z
	주파수범위	1~250Hz
환경진동계	주파수범위	1~80Hz(진동가속도레벨 및 진동레벨)
	측정범위	35~120dB
	트리거레벨	Manual, Single, Continuous
	샘플주기	0.1second
	측정모드	1,024 samples/second
	측정시간	1~10s, 1m, 5m, 30m, 1hr, 4hr, 8hr, 24hr
	데이터저장	SD 메모리카드
	진동레벨(Lv)	Instantaneous, Lveq, Lvmax, Lvmin(X,Y,Z축)
통계진동레벨	L _s , L ₁₀ , L ₅₀ , L ₉₀ , L ₉₅ for Lv, Lva(3축동시측정)	

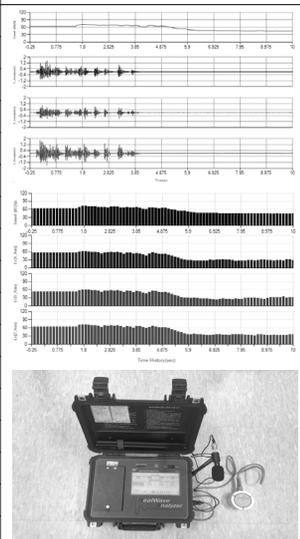


Table 5. 계측위치 선정

측점구분	거 리(m)		
	V-cut	PLHBM-2	PLHBM-1
측점①	65.2~ 69.1	66.3~ 69.0	62.0~ 64.8
측점②	44.8~ 48.6	44.2~ 49.8	48.3~ 54.1
측점③	35.1~ 36.2	31.0~ 32.4	35.2~ 37.8
측점④	48.6~ 49.3	45.2~ 48.8	48.8~ 51.4
측점⑤	81.3~ 84.5	79.4~ 83.5	75.6~ 77.3
측점⑥	110.5~110.8	104.4~105.2	103.7~106.6
측점⑦	25.9~ 29.1	27.0~ 28.0	26.9~ 27.5

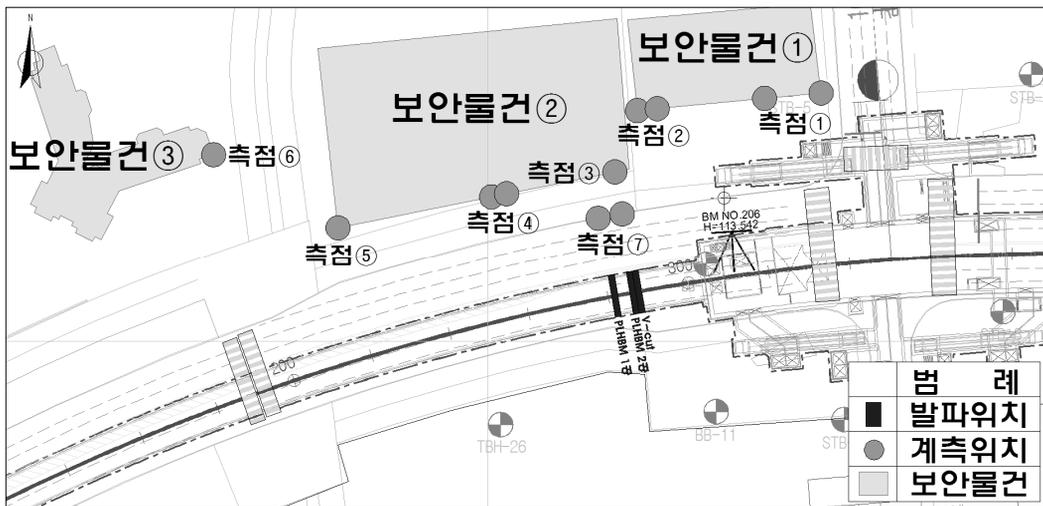


Fig. 3. 계측위치도.

forms, FFT(Fast fourier transform) 등을 정밀분석을 할 수 있다. 계측기기는 진동 감쇠율의 비교 목적으로 발파진동 추정식 도출의 입지상수 획득을 위하여 Table 5, Fig. 3과 같이 총 7개소에 측정점을 설치하였다.

4. 자료획득 및 분석

4.1 진동측정 결과

PLHBM 공수 적용에 따른 진동감쇠 효과를 비교하기 위한 표본추출은 계측기별 거리를 달리하면서 심발공에 해당되는 기폭시차별 최대입자속도를 파형분석 하였다. 파형 분석결과 각 계측 지점별로 5개의 진동 DATA를 추출하여 총 35개의 기초자료를 획득하였으며, 분석결과는 Table 6과 같다.

4.2 발파진동 추정식 도출

발파진동의 이론적인 특성을 관련된 변수의 차원해석으로 여러 가지 경험식 중 식 (1)의 이론식(김재극, 1992)을 적용하였다.

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

V : 지반진동속도(cm/s) D : 폭원과 측정점 거리(m)

K : 진동상수 W : 지발당장약량(kg)

b : 장약지수(1/2 or 1/3) -n : 감쇠지수

지반을 통하여 3차원으로 운동하는 발파진동은 3방향 단일성분 중 어느 한 성분이 우월하게 나타나며, 특정시간대에서 단일성분의 PPV(Peak Particle Velocity)

와 합성성분의 PVS(양형식 역, 1992)로 기록된다. PVS는 PPV가 나타나는 우월 성분의 시간대에서 다른 두 성분의 주파수 스펙트럼이 서로 다르기 때문에 입자속도가 합성될 수 없다. 따라서 시험구간에서는 Table 7과 같이 PPV에 대한 진동상수 및 감쇠지수를 도출하여 진동속도 상관관계를 비교하였다. PPV와 환산거리(D/W^b)의 관계를 선형회귀분석(Linear regression analysis)에 의한 통계 처리방법으로 진동상수(k) 및 감쇠지수(-n)를 구하였다. 장약지수(b)는 평방근 환산거리(Square root scaled distance)와 입방근 환산거리(Cube root scaled distance)의 회귀선(Regression line)을 구분 처리하였으며, 진동상수(k)는 95%신뢰구간(건설교통부, 2006)을 포함시켰다.

95%신뢰구간의 장약지수(b)에 따른 발파진동 추정식은 V-cut, PLHBM 1공, PLHBM 2공 순으로 식 (2)·(3), 식 (4)·(5), 식 (6)·(7)와 같고 결정계수(Coefficient of determination)는 V-cut 평방근 및 입방근환산거리, PLHBM 1공 평방근 및 입방근환산거리, PLHBM 2공 평방근 및 입방근환산거리 순으로 $0.86 \cdot 0.86$, $0.80 \cdot 0.80$, $0.86 \cdot 0.86$ 의 회귀직선의 기여율(김우철 외, 1988)을 보였으며, 결정계수와 기울기가 동일한 것은 지발당장약량의 변화가 없기 때문이다. 환산거리와 PPV의 관계그래프는 Fig. 6과 같다.

$$r^2 = 0.86, V_{95\%} = 475.268 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.152} \quad (2)$$

$$r^2 = 0.86, V_{95\%} = 495.774 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.152} \quad (3)$$

Table 6. 진동측정(파형분석) 결과

표본수	구분	지발당장약량(kg)			대표거리(m)			PPV(cm/s)		
		V-cut	P1	P2	V-cut	P1	P2	V-cut	PLHBM-1	PLHBM-2
5	측점①	1.125	1.125	1.125	69.1	66.1	72.9	0.028~0.048	0.019~0.032	0.010~0.025
5	측점②	1.125	1.125	1.125	47.7	51.7	49.8	0.053~0.122	0.022~0.067	0.030~0.051
5	측점③	1.125	1.125	1.125	35.1	39.1	38.2	0.102~0.167	0.040~0.110	0.040~0.064
5	측점④	1.125	1.125	1.125	48.9	46.2	45.8	0.031~0.063	0.027~0.030	0.029~0.046
5	측점⑤	1.125	1.125	1.125	82.6	74.0	78.5	0.010~0.021	0.010~0.018	0.010~0.015
5	측점⑥	1.125	1.125	1.125	110.5	106.3	109.8	0.011~0.022	0.010~0.019	0.010~0.012
5	측점⑦	1.125	1.125	1.125	28.3	31.1	31.5	0.176~0.336	0.116~0.139	0.062~0.082

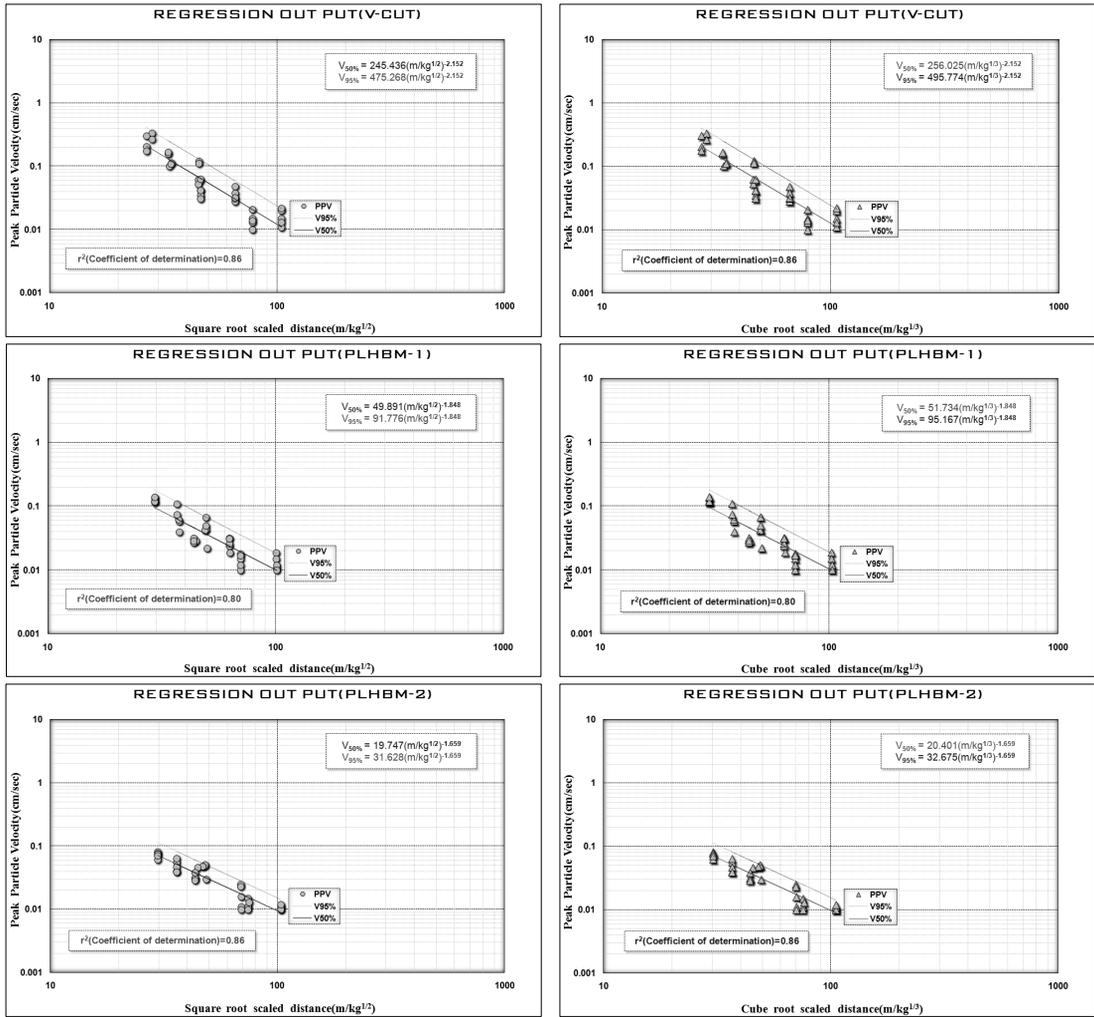


Fig. 4. 환산거리와 PPV의 관계.

$$r^2 = 0.80, V_{95\%} = 91.776 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.848} \quad (4)$$

$$r^2 = 0.80, V_{95\%} = 95.167 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.848} \quad (5)$$

$$r^2 = 0.86, V_{95\%} = 31.628 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.659} \quad (6)$$

$$r^2 = 0.86, V_{95\%} = 32.675 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.659} \quad (7)$$

4.3 PLHBM의 진동감쇠효과

시험결과와 결과에 의하여 심발공 발파진동 추정식 (2)~(7)을 근거하여 V-cut의 PPV를 100%로 볼 때 PLHBM 적용 공수에 따른 환산거리 10~100m/kg^{1/2} 일 때 PPV는 Table 7, Fig. 5와 같이 PLHBM 1공 적용시 21.8~61.1%, PLHBM 2공 적용시 35.7~79.3%의 진동 감쇠율을 보였다. PPV는 환산거리에 따라 서로 달리 나타나며 특히, 환산거리가 증가할수록 진동 감쇠는 작게 나타나고 환산거리가 감소할수록 커지는 양상을 보였는데 고온, 고압을 동반한 폭발에너지가 근거리에서 큰 감쇠를 보이기 때문으로 판단된다. 이

Table 7. PLHBM 공수에 따른 진동 감쇠율 비교

환산거리	구분	V-cut		PLHBM 1공			PLHBM 2공		
		PPV(cm/s)	%	PPV(cm/s)	%	감쇠율	PPV(cm/s)	%	감쇠율
$\frac{m}{\sqrt{W}}$	10	3.351	100	1.302	38.0	↓ 61.1%	0.693	20.7	↓ 79.3%
	20	0.754		0.362	48.0	↓ 52.0%	0.219	29.1	↓ 70.9%
	30	0.315		0.171	54.3	↓ 45.7%	0.112	35.5	↓ 64.5%
	40	0.170		0.100	59.2	↓ 40.8%	0.069	40.9	↓ 59.1%
	50	0.105		0.067	63.4	↓ 36.6%	0.048	45.7	↓ 54.3%
	60	0.071		0.047	67.0	↓ 33.0%	0.035	50.0	↓ 50.0%
	70	0.051		0.036	70.2	↓ 29.8%	0.027	53.9	↓ 46.1%
	80	0.038		0.028	73.1	↓ 26.9%	0.022	57.6	↓ 42.4%
	90	0.030		0.022	75.7	↓ 24.3%	0.018	61.0	↓ 39.0%
	100	0.024		0.018	78.2	↓ 21.8%	0.015	64.3	↓ 35.7%
$\frac{m}{\sqrt[3]{W}}$	10	3.495	100	1.350	38.6	↓ 61.4%	0.716	20.5	↓ 79.5%
	20	0.787		0.375	47.7	2.3%	0.227	28.8	↓ 71.2%
	30	0.329		0.177	53.9	↓ 46.1%	0.116	35.2	↓ 64.8%
	40	0.177		0.104	58.9	↓ 41.1%	0.072	40.5	↓ 59.5%
	50	0.110		0.069	63.0	↓ 37.0%	0.050	45.2	↓ 54.8%
	60	0.074		0.049	66.6	↓ 33.4%	0.037	49.5	↓ 50.5%
	70	0.053		0.037	69.8	↓ 30.2%	0.028	53.4	↓ 46.6%
	80	0.040		0.029	72.7	↓ 27.3%	0.023	57.0	↓ 43.0%
	90	0.031		0.023	75.3	↓ 24.7%	0.019	60.4	↓ 39.6%
	100	0.025		0.019	77.7	↓ 22.3%	0.016	63.6	↓ 36.4%

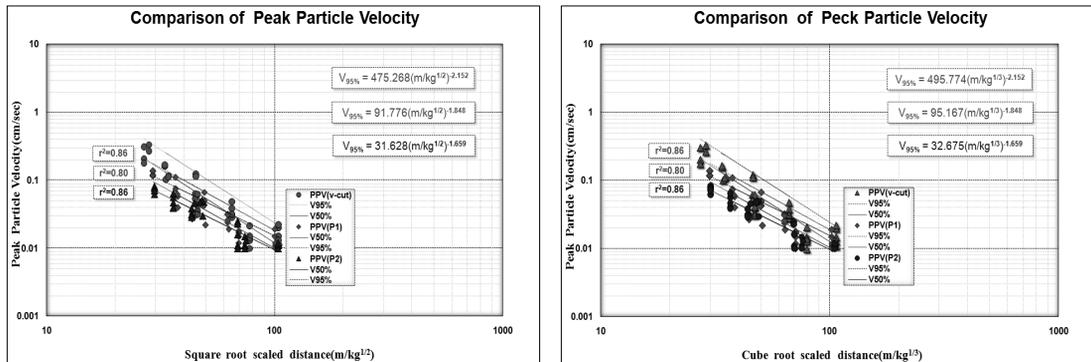


Fig. 5. PLHBM 공수에 따른 진동 감쇠율 비교.

는 동일 장약량일 때 거리변화에 따른 PPV의 차이는 시험발파 당시 계측기기별 지반조건에 의해 결정되는 입자상수 및 PLHBM 천공 후 자유면 효과에 따른 메커니즘(Mechanism) 차이인 것으로 보인다. 초기 PLHBM 1공일 때 진동 감쇠율은 매우 크게 나타났으나 이후 2공일 때에는 13.9~18.2%의 추가 진동감쇠만 발생함에 따라 추가공에 의한 진동감쇠효과는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 결국 대구경 수평보링공법(PLHBM)을 적용함으로써 환산거리에 따라 35.7~79.5%의 진동감쇠 유형효과를 얻을 수 있는 것

으로 판단된다. PLHBM 적용시 터널발파 심발공의 굴착특성상 V-cut의 1자유면 심발공은 2자유면으로 변화하기 때문에 진동 발생에너지는 크게 감소됨을 알 수 있다. 적용의 예를 들면 시험구간 최 인근 보안 물건에 대한 환산거리는 약 37m/kg^{1/2}이므로 진동 감쇠율은 PLHBM 1공일 때 42.4%, PLHBM 2공일 때 60.6%로서 PLHBM 1공의 약 1/2정도 추가 감쇠가 발생하였음을 알 수 있다.

5. 결론

편마암지역에서 V-cut, PLHBM 1공, PLHBM 2공의 심발공 3가지 유형에 대한 현장시험을 수행하고 PLHBM 환산거리별 공수 적용에 따른 지반진동 감쇠효과를 정량적으로 비교하였다.

시험구간 터널은 막장관찰결과 선캄브리아기 변성암류의 경기편마암 복합체 중 호상 흑운모편마암이며, 실내시험결과 단위중량 2.60~2.71gr/cm³, 일축압축강도 652~795kgf/cm², 탄성파속도 2,285~2,890m/s, 포아송비 0.26~0.29에 해당되는 경암 구간이다.

시험발파 결과, V-cut의 PPV대비 PLHBM의 심발공 진동 감쇠율은 환산거리 10~100m/kg^{1/2}범위에서 1공 적용시 21.8~61.1%, 2공 적용시 35.7~79.3%의 진동 저감율을 보였다. 향후 시험구간과 유사 편마암지역의 환산거리에 해당되는 PLHBM 진동 감쇠율을 설계단계에서 우선 적용하는데 유용할 것으로 보며, 추후 PLHBM 공수증가 및 화강암 등 암종별 추가연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2006, 도로공사 노천발파 설계 · 시공 지침, pp. 100.
2. 김우철 외, 1988, 현대통계학, 영지문화사, 서울, pp. 237.
3. 김재극, 1992, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부, 서울, pp. 373.
4. 김창섭, 백상현, 백종현, 원아람, 유정렬, 최형빈, 한동훈, 2012, 선대구경 공법을 적용한 터널의 진동·소음저감 사례, 대한화약발파공학회 추계학술발표회 논문집, 서울, pp. 104-117.
5. 백종현, 김창섭, 백상현, 원아람, 한동훈, 2012, 선대구경 수평보링 발파공법(PLHBM)의 설계 연구, 화약 · 발파 (대한화약발파공학회지), 제30권, 제2호, pp. 66-76.
6. 이정인, 신일재, 조혁기 2000, 선대구경 수평 보링공을 이용한 터널발파공법에 관한 연구, 서울대학교 공학연구원, pp. 1-44.
7. 우준명, 2003, 터널 심발발파시 대구경 무장약공의 효과에 관한 연구, 석사학위 논문, 서울산업대학교, 서울.
8. 양형식 역, 1992, 발파진동학, 구미서관, 서울, pp. 20.
9. 한국철도시설공단, 2014, 지반조사보고서, pp. 1.



최형빈

High ENC 기술사사무소 대표

Tel: 031-8069-2233
E-mail: pebin@daum.net



한동훈

(주)신발파 이사

Tel: 02-6446-5677
E-mail: easthun1@hanmail.net



기경철

무진기술연구소 소장

Tel: 010-3726-1426
E-mail: kkdoo@daum.net