

시공단계의 진동레벨 단위적용에 관한 사례 연구

최형빈^{1)*}, 김동연²⁾

A Case Study on the Application of Vibration Level Units in the Construction Phase

Hyung-Bin Choi and Dong-Yeon Kim

Abstract Ground vibration induced by a bench blasting in the construction site should cause the damage to the structure and indirect damage to a human body, and the vibration level is most practical descriptor for regulating the damage to human body and peak particle velocity is the descriptor for direct damage assesment of the structure. Meantime, the vibration level has not been considered for the blasting design but this study is the case that apply not only peak particle velocity but also vibration level on the blasting design. Also, we strongly believe that this study will be helpful for the management in the blasting site which some civil appeal is concerned. Total 232 measurements of both ppv and vibration level was used to estimate the scale distance. When the regulating threshold was ppv 0.3 cm/s and vibration level 75 decibel, the charge per delay to be estimated with vibration level could be recommended by 1.2~1.4 times than it of ppv. So, it is proven that considering vibration level on the blasting design is reasonable for not only prevention of the civil appeals but also effective blasting. Again, the blasting design which follows the law, 「Noise and Vibration Control Act」 can actually serve good condition to carry much more economical and effective blasting. The instruments used for this study are the SV-1 model, as first instrument in korea which can measure vibration velocity and vibration level at the same time.

Key words Dench blasting, Vibration velocity, Vibration level, Simultaneous measurement

초 록 건설현장의 노천발파로 발생하는 지반진동은 인체의 간접피해 및 구조물의 물적 피해를 동반하며, 인체는 진동레벨, 구조물은 진동속도 단위로 평가한다. 본 연구는 실시단계 진동기준 중 진동속도 외 누락된 진동레벨 단위를 추가, 진동속도 및 진동레벨을 동시 측정할 적용사례로서 추후 민원이 예상되는 현장관리에 도움이 될 것으로 여겨진다. 발파진동 및 진동레벨 추정식 도출을 위한 표본수는 총 232개가 사용되었으며, 진동속도 0.3 cm/s와 진동레벨 75 dB(V) 기준의 지발당장약량을 비교한 결과, 후자가 20.0~40.9% 여유가 있음을 입증하여 진동레벨 단위적용도 추가는 전혀 문제되지 않음을 언급하였다. 소음·진동 관리법이 우선된다면 노천발파 시공비용은 훨씬 저감될 것으로 생각된다. 본 연구에서 사용된 계측기기는 국내에서 처음으로 진동속도 및 진동레벨을 동시 측정할 수 있는 특성을 지닌 SV-1모형을 사용하였다.

핵심어 노천발파, 진동속도, 진동레벨, 동시측정

1. 서론

건설현장의 시공단계 깎기부 굴착방법은 대부분 효율성 및 경제성이 뛰어난 발파공법을 택하고 있으나 근접발파로 발생하는 지반진동으로 인하여 부득이 인체의 간접피해 및 구조물의 물적 피해를 동반하며, 소

¹⁾ High ENC 기술사 사무소 대표

²⁾ ㈜SVS 대표이사

* 교신저자 : pebin@daum.net

접수일 : 2012년 12월 9일

심사 완료일 : 2012년 12월 22일

게재 승인일 : 2012년 12월 26일

음·진동으로 인한 환경피해 발생은 2011년 말까지 86%(2,234건)로 계속 증가하고 있는 추세에 있다.

발파환경 피해 중에서 진동으로 인한 물질 피해는 진동속도, 인적 피해는 진동레벨 단위로 평가(환경부 중앙 환경 분쟁 조정위원회, 2010)하는 것이 적합한 것으로 보고 있으며, 두 단위관계는 국가기관(국토해양부, 환경부, 경찰청)의 학문적 차이로 사실 이원화되어 있다. 민원예방을 위한 진동기준은 설계단계에서부터 진동속도 및 진동레벨을 설정하여 소음·진동 관리법의 보호를 받을 수 있는 현장관리가 행해져야함에도 불구하고 진동레벨 단위 누락으로 혼선을 빚고 있어 국가기관 진동기준 설정의 일원화가 시급하다.

특히, 환경부 중앙 환경 분쟁 조정위원회에서는 과거사건에 대해 생활진동 규제기준 초과여부 및 인체의 간접피해를 판단하는 목적으로 진동속도로부터 진동레벨로 변환하는 진동레벨 환산식을 임의 적용하고 있는데 과대평가하는 불편함 때문에 국내 다수 환산

식(환경부 중앙 환경 분쟁 조정위원회, 2010; 송하림 외, 2011; 김일중 외, 2009; 김과 양, 2007; 임과 이, 2005; 노상림 2005)들의 연구가 끊임없이 거듭되고 있다.

본 연구는 4개 현장의 설계단계에서 누락된 진동레벨 단위를 시공단계에서 추가 적용한 사례로서 진동속도 및 진동레벨을 동시 측정하는 현장관리를 통하여 환경 분쟁 발생 시 소음·진동 관리법의 보호를 받을 수 있도록 하였다. 또한, 암종별 진동레벨 환산식을 구하여 기존 환산식들과 상관성을 비교하였으며, 이를 생활 진동 규제법의 초과여부 판단 목적으로 이용하는 방법은 오류를 범할 수 있어 단위변환 참고자료로만 활용토록 하고 민원예방을 위한 현장관리는 발파진동 및 진동레벨 추정식을 직접 도출하여 목적물에 대해 구분, 평가토록 언급하였다. 더불어 진동기준을 고려한 시공단계 깎기부 굴착방법 선정은 진동레벨 기준 장약량이 진동속도 기준 장약량보다 여유

표 1. 암석의 실내시험 결과

암종구분	지역구분	일축압축강도 (kgf/cm ²)	비 중	탄성파속도 (P파, m/s)	포아송비
화강암	a지역	748	2.70	2,750	0.27
	b지역	795	2.71	2,890	0.28
	c지역	697	2.60	2,345	0.29
편마암	d지역	652	2.61	2,285	0.26

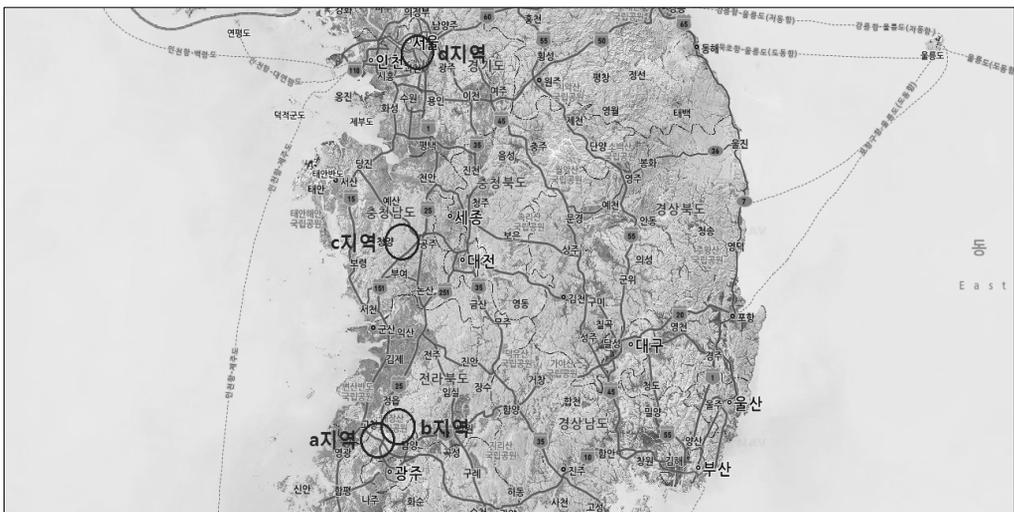


그림 1. 현장시험 대상지역.

가 있음을 입증하여 진동레벨 단위기준 추가는 전혀 문제되지 않음을 고찰하였다.

그동안 진동레벨 환산식을 구하기 위하여 사용된 측정기기는 Blastmate series, VM-52, VM-53, VM-1220E 등 수입 제품이었으나 본 연구에서는 국내 처음으로 진동속도 및 진동레벨을 동시 측정할 수 있는 특성을 지닌 SV-1모형을 사용하였다.

2. 현장시험 대상지역

2.1 대상지역 구분

현장시험을 위한 대상지역은 익산지방 국토관리청에서 발주한 전남 장성군 북이면 00현장, 한국철도 시설공단에서 발주한 전남 장성군 서삼면 00현장, 대전지방 국토관리청에서 발주한 충남 청양군 정산면 00현장, 한국 토지주택공사에서 발주한 서울 송파구 창곡동 00현장의 4개 지역이며, 그림 1과 같이 순서대

로 a지역, b지역, c지역, d지역이라 칭하였다.

2.2 지질 및 암반조건

a, b지역은 중생대 쥐라기 편상 화강암, c지역은 중생대 쥐라기 흑운모 화강암, d지역은 선 캄브리아기 호상 흑운모 편마암이 기반암을 이루고 있으며, 광의의 화강암과 편마암으로 대별된다. a, b, c지역을 화강암구역, d지역을 편마암구역으로 구분하였으며, 실내 시험 결과 얻어진 암석의 물성은 일축압축강도 652~795kgf/cm², 비중 2.60~2.71, 탄성파속도(P파) 2,285~2,890m/s, 포아송비 0.26~0.29이며, 표 1과 같다.

3. 진동레벨 단위척도

3.1 생활진동 규제기준

우리나라 발파진동의 규제기준은 인체의 간접피해를 우선으로 하는 진동레벨 단위로 하고 있으며, 표

표 2. 생활진동 규제기준

dB(V)

대상지역	시간대별	주 간(06:00~22:00)	심 야(22:00~06:00)
주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락 지구 및 관광·휴양개발진흥지구, 자연환경 보전지역, 그 밖의 지역에 소재한 학교·병원·공공도서관		65 이하	60 이하
그 밖의 지역		70 이하	65 이하

1. 진동의 측정 및 평가기준은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조 제1항 제2호에 해당 하는 분야에 대한 환경오염공정시험기준에서 정하는 바에 따른다.
2. 대상 지역의 구분은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른다.
3. 규제기준치는 생활진동의 영향이 미치는 대상 지역을 기준으로 하여 적용한다.
4. 공사장의 진동 규제기준은 주간의 경우 특정공사의 사전신고 대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 2시간 이하일 때는 +10dB을, 2시간 초과 4시간 이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.
5. 발파진동의 경우 주간에만 규제기준치에 +10dB을 보정한다.

표 3. 발파진동 기준

구 분	기관 허용기준		사례기준	지 역
	기 관	허용기준		
문화재, 컴퓨터시설물 주변	DIN 4150 지하철공사 대한주택공사 노동부고시	0.2cm/s	-	-
주택·아파트(실금이 있는 정도)		0.5cm/s	0.2cm/s	b
		1.0cm/s	0.3cm/s	a, c, d
상가(실금이 없는 정도)		1.0cm/s	0.3cm/s	d
철근 콘크리트 빌딩 및 공장		1.0~4.0cm/s	1.0cm/s	b, d
가 측	중앙환경분쟁조정위원회	0.1cm/s	0.1cm/s	a
인 체	소음·진동 관리법	75dB(V)	75dB(V)	a, b, c, d

2와 같이 생활 진동 규제기준(생활소음·진동의 규제 기준 제20조 제3항 관련, 소음·진동 관리법 개정 2010. 6. 30) 중 발파진동의 경우 주간에 한하여 대상 지역에 따라 75~80dB(V)로 규제하고 있다.

3.2 발파진동기준 적용사례

국내의 발파진동 기준은 외국의 허용 기준치보다 매우 엄격한 안전성을 고려하여 0.5cm/s 이하로 적용한 것도 오래된 과거가 되었으며, 환경오염 피해분쟁 조정사례집(1993)의 발파진동에 대한 건축물 피해 인과 관계 판단기준을 0.3cm/s로 인정하면서부터 구조물에 대한 물적 피해기준 0.3cm/s는 보편화 되었고 특히, 철도 시공현장의 경우는 환경영향 평가가 선행되어 이보다 낮은 0.2cm/s를 요구하고 있어 더욱이 발파시공의 어려움을 겪고 있다. 표 3의 a, b, c, d 지역은 환경 분쟁 발생이 심각한 지역으로 소음·진동 관리법의 진동레벨 75dB(V)를 적용한 사례이다.

3.3 진동레벨의 응답

진동가속도 레벨은 단순한 물리량이며, 식(1)로부터 구할 수 있다(정일록, 1988).

$$VAL = 20 \log \left(\frac{A_{rms}}{A_r} \right) \quad (1)$$

여기서, VAL은 진동가속도 레벨(dB), A_{rms} 는 진동가속도 실효치(A_{rms} , m/s^2), A_r 은 진동가속도 기준치 (A_{ref} , $1.0 \times 10^{-5} m/s^2$)이다.

진동평가 시 진동가속도 레벨을 주파수에 따른 인체진동 감각을 보정하여 인체가 느끼는 진동의 크기를 식(2)와 같이 표현하는데 이를 진동레벨이라 정의할 수 있으며, 생활 진동 규제법의 주파수별 인체감각 보정은 수직방향(Z축) 진동에 대한 상대응답이다.

$$VL = VAL + W_n \quad (2)$$

여기서, VL은 진동레벨[dB(V)], VAL은 진동가속도 레벨(dB), W_n 은 주파수 대역별 인체감각 보정치(dB)이다.

ISO 규정(ISO R-2631)의 1/3옥타브 밴드(Octave band) 수직진동특성 기준 응답곡선은 그림 2, 주파수 대역별 물리량은 표 4와 같고 식 (3), 식 (4)의 관계가 성립한다.

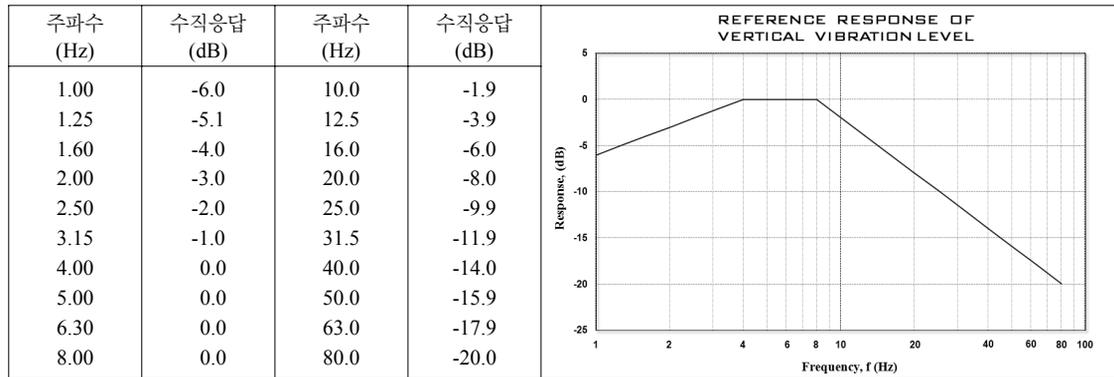


그림 2. 수직진동 특성의 응답곡선(ISO R-2631).

표 4. 주파수대역에 따른 진동가속도 실효치

주파수 대역(Hz)	진동가속도 실효치(dB)
$1 \leq f \leq 4$	$A_{rms} = \frac{2.0 * 10^{-5} m/s^2}{\sqrt{f}}$
$4 \leq f \leq 8$	$A_{rms} = 1.0 * 10^{-5} m/s^2$
$8 \leq f \leq 80$	$A_{rms} = 0.125 * 10^{-5} m/s^2 \cdot f$

수직진동 주파수별 인체감각에 대한 보정치(W_n)는 $1 \leq f \leq 4$ 일 때 식(3), $4 \leq f \leq 80$ 일 때 식(4)로부터 유도할 수 있으며, 주파수 대역에 따라 인체는 실제보다 진동을 덜 느끼지만 4~8 Hz 대역에서는 수직진동 응답곡선이 평탄하여 인체가 그대로 진동을 느끼는 주파수 대역이다.

$$W_n = 20 \log\left(\frac{A_{rms}}{A_r}\right) = 20 \log\left(\frac{2 \cdot 10^{-5} m/s^2}{\sqrt{f} \cdot 1 \cdot 10^{-5} m/s^2}\right) = 20 \log\left(\frac{2}{\sqrt{f}}\right) \quad (3)$$

$$W_n = 20 \log\left(\frac{A_{rms}}{A_r}\right) = 20 \log\left(\frac{0.125 \cdot 10^{-5} m/s^2 \cdot f}{1 \cdot 10^{-5} m/s^2}\right) = 20 \log\left(\frac{f}{8}\right) \quad (4)$$

진동레벨(Vibration Level·VL)과 환산거리(Scaled distance·SD)의 함수관계가 성립하며, 진동레벨은 기울기(n)와 절편(K)으로부터 식 (5)의 선형관계(환경부 중앙 환경 분쟁 조정위원회, 2010)로 구할 수 있다.

$$VL = K + 20 \log\left(\frac{D}{W^b}\right)^{-n} \quad (5)$$

여기서, VL은 진동레벨[dB(V)], D는 폭원과 수신점간 거리(m), W는 지발당 장약량(kg/delay), K는 지반 조건에 의해 결정되는 입지상수, b는 장약지수(Square or Cube root scaled), n는 감쇠지수이다.

4. 현장시험

4.1 진동측정 기기

본 연구를 위해서 사용된 진동 측정기기는 변위·진동속도(x, y, z축의 PPV 및 PVS)·진동가속도레벨(VAL)·진동주파수(Hz)·진동레벨(VL)·소음레벨(SL)을 동시측정 할 수 있는 국내의 SV사 제품인 SV-1모델로서 국립환경과학원으로부터 “환경 분야 시험·검사 등에 관한 법률” 제9조 5항 및 국립환경과학원 고시 제2010-12호의 규정을 만족하는 환경진동측정기(형식승인 NESM-169)를 사용하였다. 특히, 진동속도 측정 방식은 가속도를 적분한 방식이 아닌 MEMS센서(Micro Electro Mechanical System)의 1Hz~200Hz까지 선형적 특성을 이용한 진동속도를 직접 측정하는 방식으로서 국가공인 시험기관에서 표 5와 같이 정밀도 1% 이내로 검증되었으며, 주요 측정기기의 특성은 표 6과 같다.

4.2 측정방법

표본수 추출을 위하여 사용된 측정기기는 거리와 지발당 장약량을 달리하면서 4개 현장에서 지역별 6~9대를 측점에 고정시켜 진동속도(cm/s) 및 진동레벨[dB(V)]을 동시 측정하였다.

4.3 측정결과

지역별 지발당 장약량과 거리를 달리하면서 측정한 PPV는 10.2~546.9m에서 0.010~3.124cm/s, Vv는 0.006~2.650cm/s, VL은 39.02~88.36dB(V)의 값을 얻었으며, 진동속도 및 진동레벨의 표본수 외 분포표를 정리하면 표 7과 같고 여기서 PPV는 x, y, z축 방

표 5. 교정성적서[한국인정기구(KORAS)]

주파수(Hz)	속도(mm/s, peak)		
	기준값	지시값	상대확장불확도(%)
20	30.00	30.0	2.6
30	30.00	29.9	2.5
40	30.00	30.0	2.5
50	30.00	30.0	2.4
60	30.00	29.8	2.4

※형식 SV-1, 신뢰수준 95%, k=2

표 6. 측정기기의 특성

구 분		세부내용
진동속도계 & 환경소음계	진동측정범위	0.1mm/s~100mm/s
	트리거레벨	0.1mm/s 단위설정
	측 정 모 드	Manual, Single, Continuous
	측 정 시 간	1~10s, 1·5·30min, 1·4·8·24hr, 사용자 정의
	소음측정범위	29~130dB
	소 음 특 성	A특성, L특성
	주파수범위	1~250Hz
환경진동계	측 정 범 위	35~120dB
	트리거레벨	Manual, Single, Continuous
	측 정 모 드	512 samples/second
	측 정 시 간	1~10s, 1·5·30min, 1·4·8·24hr, 사용자 정의
	데이터저장	SD 메모리카드
	진동레벨(Lv)	Instantaneous, L _v eq, L _v max, L _v min(X, Y, Z축)
	통계진동레벨	L5, L10, L50, L90, L95 for Lv, Lva(3축 동시측정)
	주파수범위	1~80Hz

표 7. 데이터 분포표

암종구분	지 역	표본수	측 점	지발당장약량(kg)	거리(m)	PPV(cm/s)	Vv(cm/s)	VL[dB(V)]
화강암	a	66	8	0.125~0.500	10.2~ 90.5	0.026~2.253	0.019~2.253	48.11~88.36
	b	36	6	0.250~0.500	24.8~143.1	0.016~0.909	0.009~0.909	39.02~83.05
	c	72	8	0.750~2.000	11.5~174.5	0.013~3.124	0.006~2.650	41.95~77.10
소 계		174				-		
편마암	d	58	9	0.500~6.800	37.8~546.9	0.010~0.821	0.006~0.821	42.21~85.20
소 계		58				-		

향 성분의 최대진동속도, Vv는 z축 방향성분의 최대 진동속도, VL은 진동가속도레벨로부터 인체감각 보정을 행한 z축 방향성분의 진동레벨을 의미한다.

4.4 주 주파수 대역

화강암(편마암)구역에서 진동속도로부터 얻어진 단일성분 최대 입자 속도의 주 주파수 발생범위는 그림 3, 4와 같이 21~30Hz, 31~40Hz, 41~50Hz(11~20Hz, 21~30Hz, 31~40Hz)의 3가지 대역으로 나타났고 31~40Hz(21~30Hz)의 주파수 대역이 가장 우세한 분포도를 보였다. 이는 전형적인 발파진동으로 생성되는 진동주파수로서 거리가 멀어질수록 고주파수 대역은 암반 중에서 쉽게 소멸되고 상대적으로 에너지 수준이 높은 저주파수 대역의 진동만이 멀리 전파되는

특성에 기인된다. 진동레벨은 가속도레벨의 주파수 범위에 따른 수직진동의 인체 감각특성을 보정하여 dB(reference $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$)로 지시한다. 신호처리방식, 반응시간, 기준 리스폰스(Response)는 서로 다를 수 있으나 진동속도 신호처리방식으로 얻어진 주파수 범위 화강암구역 13~73Hz, 편마암구역 13~57Hz를 고려할 때 가속도 레벨의 인체가 가장 민감하게 반응하는 4~8Hz를 벗어나기 때문에 인체의 간접피해는 구조물의 물적 피해보다 오히려 4.0~19.0dB(V) 정도가 여유 있음을 알 수 있다. 위의 주파수 범위는 연암 조건에서 얻어진 대표 값이며, 지질 및 불연속면 등 암반조건, 연·경암 조건, 가속도계 센서(Sensor) 설치 조건 등에 따라 주파수 대역은 다소 차이를 가져올 수 있으므로 주 주파수 분포는 시공단계 현장에 대하여

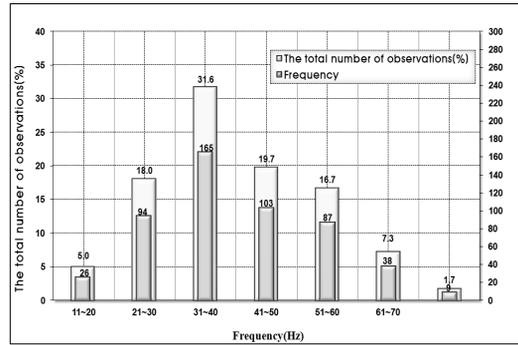
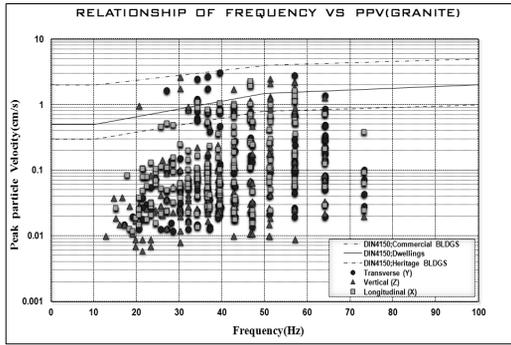


그림 3. PPV와 주파수의 관계(화강암구역).

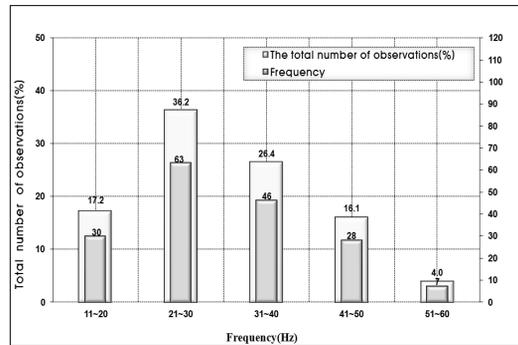
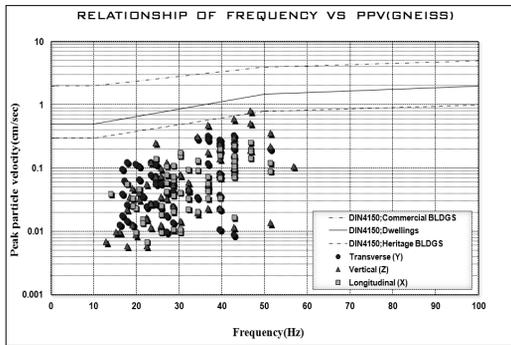


그림 4. PPV와 주파수의 관계(편마암구역).

별도 자료처리를 행하여야 한다.

5. 표본추출의 회귀분석 결과

이미 언급했듯이 a, b, c지역을 화강암구역, d지역을 편마암구역으로 구분하였으며, 진동속도 및 진동레벨의 실 계측 값은 화강암구역 174개, 편마암구역 58개의 표본수로 자료 처리하였다. 지반을 통하여 3차원으로 운동하는 발파진동은 3방향의 PPV(최병희 외, 2008) 성분 중 어느 한 성분이 우월하게 나타나며, 특정시간대에서 단일성분의 최대입자속도와 합성성분 실 벡터 합으로 기록된다.

발파진동 추정식은 PPV와 환산거리(D/W^b)의 관계를 최소제곱법의 선형 회귀분석(김우철 외, 1992; 양형식 외, 1992)으로 통계 처리하여 기울기(n)와 절편(log K)으로부터 진동상수(k), 감쇠지수(n)를 구하였으며, 장약지수(b)는 지발당 장약량의 비교의 단순화를 위해 국토해양부(2006)의 평방근 환산거리 회귀선

을 택하였고 t분포에 의한 95%신뢰구간을 포함시켰다.

진동레벨 추정식은 진동레벨[$dB(V)$]과 환산거리(D/W^b)의 관계를 진동속도 추정과 같은 통계처리 방법을 택하되 y축의 진동레벨 변화폭이 크지 않으므로 x축 환산거리(D/W^b)의 Log함수와 달리 일반함수 관계로 처리한 것이 특징적이다.

진동레벨 환산식은 V_v 을 x축 Log함수, V_L 을 y축 일반함수 관계로 처리, 인체감각보정을 행한 환경진동레벨 주파수 범위와 진동속도로부터 얻어진 주파수 대역에서 수직진동속도와 진동레벨의 상관성 고찰을 위하여 도출하였다.

여기서, PPV와 환산거리(D/W^b) 관계를 발파진동 추정식, V_L 과 환산거리(D/W^b) 관계를 진동레벨 추정식, V_L 과 V_v 의 관계를 진동레벨 환산식으로 명명하였다.

5.1 발파진동 추정식

PPV와 환산거리(D/W^b)관계의 회귀분석 결과는 그

표 8. 발파진동 추정식

암종구분	b	n	r ²	r	발파진동추정식(신뢰도 50%)	발파진동추정식(신뢰도 95%)
화강암 구역	1/2	-1.693	0.84	0.92	$V_{50\%} = 272.436 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.693}$	$V_{95\%} = 685.514 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.693}$
편마암 구역		-1.629	0.87	0.93	$V_{50\%} = 120.305 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.629}$	$V_{95\%} = 236.406 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.629}$

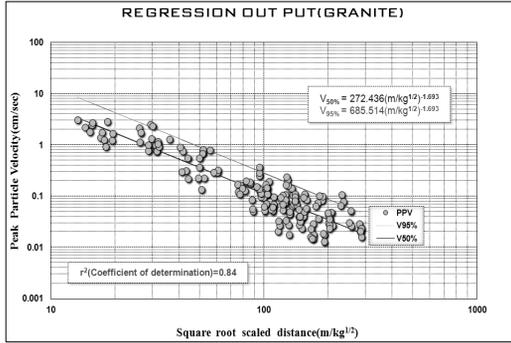


그림 5. PPV와 평방근 환산거리 관계(화강암구역).

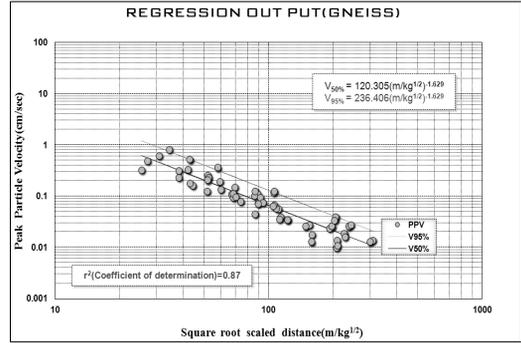


그림 6. PPV와 평방근 환산거리 관계(편마암구역).

림 5~그림 6과 같이 결정계수는 표 8과 같이 화강암 구역에서 0.84, 편마암구역에서 0.87의 회귀직선 기여율로 높은 상관관계를 보였다.

5.2 진동레벨 추정식

VL[dB(V)]과 환산거리(D/W^b) 관계의 회귀분석 결과는 그림 7~그림 8과 같이 결정계수는 표 9와 같이 화강암구역에서 0.82, 편마암구역에서 0.87의 회귀직

표 9. 진동레벨 추정식

암종구분	b	n	r ²	r	진동레벨추정식(신뢰도50%)	진동레벨추정식(신뢰도95%)
화강암 구역	1/2	-1.877	0.82	0.91	$VL_{50\%} = 135.814 + 20 \log \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.877}$	$VL_{95\%} = 145.202 + 20 \log \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.877}$
편마암 구역		-1.816	0.87	0.93	$VL_{50\%} = 131.052 + 20 \log \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.816}$	$VL_{95\%} = 137.828 + 20 \log \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.816}$

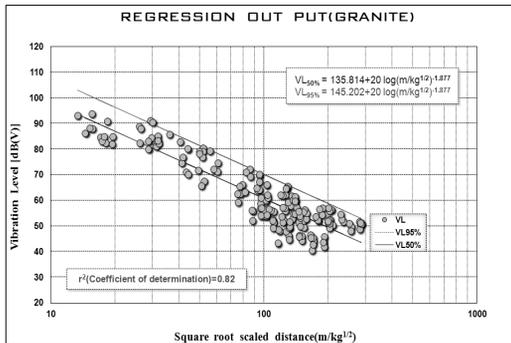


그림 7. VL과 평방근 환산거리 관계(화강암구역).

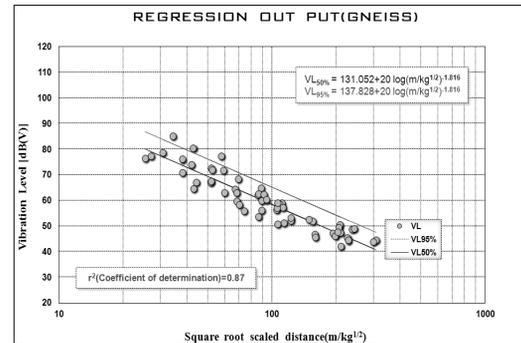


그림 8. VL과 평방근 환산거리 관계(편마암구역).

표 10. 진동레벨 환산식

암종구분	K	b	n	r ²	r	진동레벨 환산식
화강암 구역	83.227	½	19.313	0.98	0.99	VL = 19.313 log Vv + 83.227
편마암 구역	84.370		19.401	0.97	0.98	VL = 19.401 log Vv + 84.370

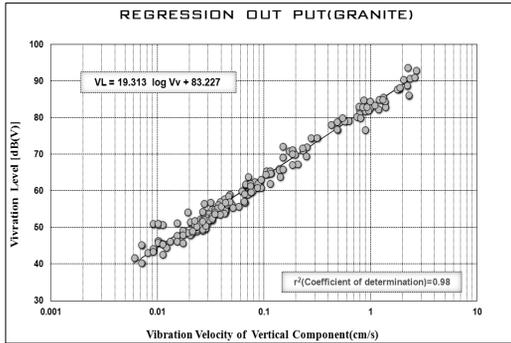


그림 9. VL과 Vv의 관계(화강암구역).

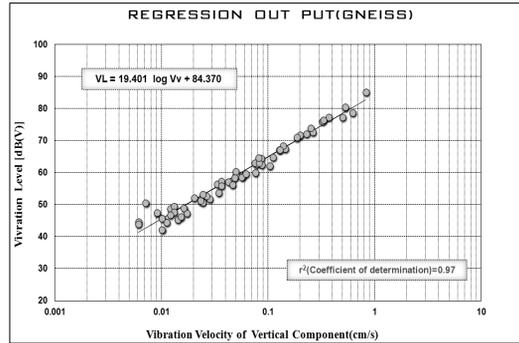


그림 10. VL과 Vv의 관계(편마암구역).

선 기여율이 높은 상관관계를 보였다.

5.3 진동레벨 환산식

VL과 Vv 관계의 회귀분석 결과는 그림 9~그림 10과 같고 결정계수는 표 10과 같이 화강암구역에서 0.98, 편마암구역에서 0.97의 회귀직선 기여율로 높은 상관관계를 보였다.

6. 진동레벨-진동속도의 상관성 고찰

6.1 기존 진동레벨 환산식과의 비교

본 연구를 위하여 화강암 및 편마암구역에서 통계 처리한 진동레벨 환산식은 0.98이상의 높은 상관계수를 보였으므로 기존 진동레벨 환산식의 2가지 유형 즉, 江島식(윤지선 역, 1993)과 환경부식(환경부 중앙 환경 분쟁 조정위원회, 2010), 기 발표된 진동레벨 환산식(김과 양, 2007; 임과 이, 2005; 노상립 2005)과

상관성을 비교하였다.

표 11과 같이 진동속도 0.3cm/s일 때 江島식은 80.53dB(V)로 과대평가되어 진동레벨 기준 75dB(V)를 5.53dB(V) 초과하였고 환경부식은 69.58dB(V), 기존 환산식 중 KNS식은 66.64dB(V), LYK식은 63.15dB(V), NSL식은 63.07dB(V)로 진동레벨 기준은 초과하지는 않았으나 -5.42~-11.93dB(V)로 큰 차이를 보였다. 본 연구 결과 얻어진 진동레벨은 화강암구역에서 73.12dB(V), 편마암구역에서 74.22dB(V)로서 -0.78~-1.88dB(V)의 차이로 진동레벨 75dB(V)에 가장 유사한 값을 보였으며, 단, 환경오염 공정시험기준의 보정발파횟수(N)에 따른 보정량(+10logN ; N>1) 관계는 고려하지 않았다. 진동레벨에 따른 진동속도는 표 12와 같고 기존 진동레벨 환산식 및 기 발표된 진동레벨 환산식과 비교 도시하면 그림 11과 같다.

진동속도 및 가속도 레벨계의 주파수 범위, 신호처

표 11. 진동속도에 따른 진동레벨 비교

진동속도 (cm/s)	진동레벨[dB(V)]						
	화강암구역	편마암구역	江島	환경부	KNS	LYK	NSL
0.3	73.12	74.22	80.53	69.58	66.64	63.15	63.07

표 12. 진동레벨에 따른 진동속도 비교

진동레벨 [dB(V)]	진동속도(cm/s)						
	화강암구역(Vv)	편마암구역(Vv)	江島(PPV)	환경부(Vv)	KNS(PPV)	LYK(PPV)	NSL(PPV)
50	0.019	0.017	0.009	0.031	0.027	0.070	0.070
55	0.035	0.031	0.016	0.056	0.056	0.122	0.122
60	0.063	0.055	0.028	0.099	0.115	0.212	0.212
65	0.114	0.100	0.050	0.176	0.237	0.369	0.369
70	0.207	0.182	0.089	0.314	0.487	0.642	0.642
75	0.375	0.329	0.158	0.560	1.000	1.117	1.117
80	0.681	0.595	0.282	0.998	2.054	1.945	1.945

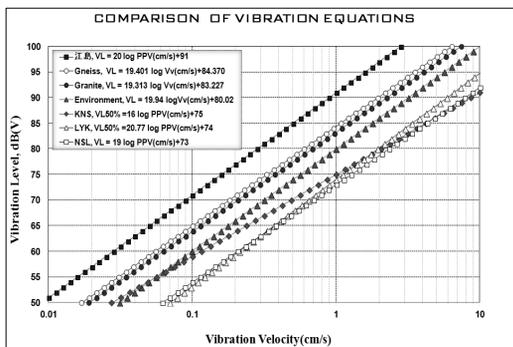


그림 11. 기존 진동레벨 환산식 비교.

리방식, 반응시간, 기준 리스폰스(Response), 주파수 대역에 따른 인체 감각특성 상대 응답차이 등으로 진동속도와 진동레벨의 상관성은 큰 차이를 가져올 수 있으므로 언급한 바와 같이 단위변환은 참고자료일 뿐이고 시공 현장에서 진동속도 및 진동레벨을 동시 측정하여 지질 및 암반특성 등에 의해 결정되는 발파 진동 추정식과 진동레벨 추정식을 직접 도출, 평가함이 타당하다.

6.2 지발당 장약량의 비교

본 연구 결과, 평방근 환산거리의 지발당 장약량은

표 13. 거리별 지발당 장약량 비교

거리 (m)	지발당 장약량(kg)			
	진동속도		진동레벨	
	평방근환산거리 95%(0.3cm/s)		평방근환산거리 95%[75dB(V)]	
	화강암구역	편마암구역	화강암구역	편마암구역
10	0.011	0.028	0.018	0.035
20	0.043	0.111	0.073	0.139
30	0.097	0.250	0.164	0.313
40	0.172	0.445	0.291	0.556
50	0.269	0.695	0.455	0.869
60	0.387	1.001	0.655	1.251
70	0.527	1.362	0.892	1.703
80	0.689	1.779	1.165	2.224
90	0.872	2.252	1.474	2.814
100	1.076	2.780	1.820	3.475
150	2.421	6.255	4.094	7.818
200	4.305	11.120	7.278	13.898
250	6.726	17.374	11.373	21.716
300	9.686	25.019	16.377	31.271
350	13.183	34.054	22.290	42.563
400	17.219	44.479	29.114	55.593
450	21.793	56.293	36.847	70.360
500	26.905	69.498	45.490	86.864

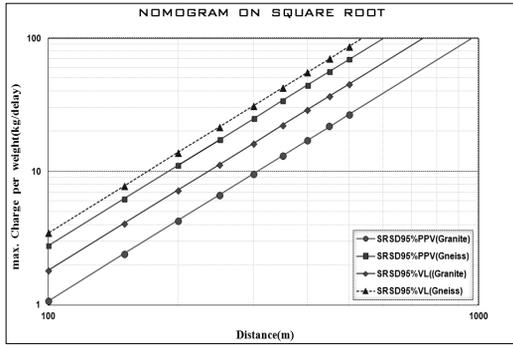


그림 12. 거리별 지발당 장약량 비교.

표 13, 그림 12와 같이 진동속도 0.3cm/s일 때 화강암 구역 < 편마암구역, 진동레벨 75dB(V)일 때 화강암 구역 < 편마암구역 순으로 나타났다.

진동속도 기준의 지발당 장약량은 진동레벨 기준의 지발당 장약량 보다 화강암구역에서 59.1%, 편마암구역에서 80.0%의 보수적인 값을 보였는데 이는 진동 주파수($1 \leq f \leq 80\text{Hz}$)에 따른 인체 수직진동 감각 보정이 반영된 것으로 사료된다. 결국 진동속도 기준의 지발당 장약량을 적용하여 현장관리가 이루어진다면 지발당 장약량이 여유가 있는 진동레벨 단위의 피해는 없는 것으로 해석할 수 있다. 이와 달리 소음·진동 관리법이 우선된다면 깎기부 시공비용은 훨씬 저감될 것으로 생각된다.

6.3 표준 발파공법 영역 비교

표 14와 같이 본 연구 결과 얻어진 국토해양부(2006)의 표준 발파공법 영역은 화강암구역, 편마암구역 모두 진동속도 기준이 보수적인 결과를 보임에 따라 결국 발파공법 선정은 진동레벨 단위보다 진동

속도 단위기준이 될 수밖에 없으므로 진동레벨 단위를 추가하는 것은 오히려 공법구분에 여유가 있음을 입증하였다. 따라서 진동레벨 측정을 진동속도와 병행함으로써 소음·진동 관리법으로부터 보호를 받을 수 있는 것으로 생각된다.

표준 발파공법 영역 보다 연구결과가 예민한 것은 신뢰구간(신뢰구간 84% VS. 95%)과 Y절편의 표준오차 차이가 가장 큰 것으로 판단된다.

7. 결론

발파 굴착으로 발생하는 지반진동은 물적, 인적 피해를 동반하므로 이에 대한 현장관리가 요구된다. 본 연구 결과 얻어진 발파 진동기준 적용사례는 추후 민원발생이 예상되는 관련 현장관리에 도움이 될 것으로 여겨지며, 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구의 발파진동추정식, 진동레벨 추정식, 진동레벨 환산식 도출을 위한 표본수는 화강암구역에서 174개, 편마암구역에서 58개 Data를 추출하였으며, 사용된 계측기기는 특성상 진동속도 및 진동레벨을 동시 측정할 수 있는 제품을 사용하였다.
- 2) 연구결과, 진동레벨 환산식을 인용하면 진동속도 0.3cm/s에 해당되는 진동레벨은 화강암구역에서 73.12dB(V), 편마암구역에서 74.22dB(V)로서 생활 진동 규제기준치 75dB(V)를 초과하지 않은 것으로 예측되나 진동속도-진동레벨 단위변환은 진동속도 및 레벨계의 주파수 범위, 신호처리방식, 반응시간, 기준 리스폰스, 주파수 대역별 인체 감각특성의 상대 응답 등 차이를 가져올 수 있으므로 상관성은 낮은 것으로 판단된다.

표 14. 표준 발파공법 영역 비교

		TYPE	II	III	IV	V
구분	진동속도 0.3cm/s 기준	국토해양부	20~40m	40~ 70m	70~130m	130~220m
		화강암구역	35~69m	69~122m	122~216m	216~374m
		편마암구역	22~43m	43~ 76m	76~135m	135~233m
진동레벨 75dB(V) 기준	화강암구역	27~53m	53~ 94m	94~166m	166~288m	
	편마암구역	19~38m	38~ 68m	68~120m	120~208m	

- 3) 시공현장의 발파진동 관리는 진동속도 및 진동레벨을 동시 측정하여 지질 및 암반특성 등에 의해 결정되는 발파진동 추정식과 진동레벨 추정식을 직접 도출, 평가함이 타당한 것으로 사료된다.
- 4) 화강암(편마암)구역에서 진동속도 신호처리방식으로 얻어진 PPV의 주 주파수 대역 31~40Hz(21~30Hz)를 고려할 때 인체의 간접피해는 구조물의 물적 피해보다 오히려 4.0~19.0dB(V) 정도 여유 있음을 알 수 있었다. 인체 피해 평가를 위한 진동레벨은 가속도레벨의 주파수 범위에 따른 수직진동의 인체 감각특성을 가속도레벨계가 이미 보정하였기 때문에 광의의 주파수 대역(1~80 Hz)으로 평가하여도 문제가 없는 것으로 본다. 향후 구조물의 물적 피해 평가를 위한 진동속도는 주 주파수 대역을 고려한 설계단계 기준설정도 필요한 것으로 생각된다.
- 5) 연구결과, 국토해양부 도로공사 노천발파 설계·시공 지침(2006. 12)의 표준 발파공법 영역은 진동기준 중 진동속도보다 진동레벨 단위가 여유가 있음을 입증하였으므로 설계단계에 진동레벨 단위추가는 현장관리에 전혀 문제가 없음을 알 수 있었다. 이와 달리 소음·진동 관리법이 우선된다면 깎기부 시공비용은 훨씬 저감될 것으로 생각된다. 따라서 국토해양부 설계단계에서 진동레벨의 기준 반영은 진동속도와 동일한 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.
- 6) 마지막으로 건설현장의 소음·진동 관리법의 보호와 합리적인 발파진동 관리를 위해서 각 기관(국

토해양부-환경부-경찰청)에서 운영하는 진동 규제 기준의 일원화가 필요한 것으로 생각되어진다.

참고문헌

1. 환경부 중앙 환경 분쟁 조정위원회, 2010, 진동레벨과 진동속도의 상관성 분석 등에 관한 연구, pp. 47-51.
2. 송하림, 노영배, 강추원, 2011, 진동레벨과 진동속도의 상관성에 관한 비교연구, 화약·발파, 대한화약발파공학회 제29권 제2호, pp. 43-50.
3. 김일중, 기경철, 조영동, 2009, 발파진동속도와 진동레벨과의 관계식 연구, 화약·발파, 대한화약발파공학회 제27권 제1호, pp. 79-87.
4. 김남수, 양형식, 2007, 진동속도와 진동레벨의 변환기법 연구, 제4회 한화 발파기술 심포지움 논문집, (주)한화, 대한화약발파공학회, pp. 154-162.
5. 임영기, 이연수, 2005, 진동속도와 진동레벨의 상관관계 연구, 제3회 한화 발파기술 심포지움 논문집, (주)한화, 대한화약발파공학회, pp. 106-115.
6. 노상림, 2005, 암중에 따른 진동속도와 진동레벨의 상관성 분석, 제3회 한화 발파기술 심포지움논문집, (주)한화, 대한화약발파공학회, pp. 271-281.
7. 환경오염피해분쟁 조정사례집, 1993, 환경부 중앙 환경 분쟁 조정위원회, pp. 57-79.
8. 정일록, 1988, 소음·진동 이론과 실무, pp.121~124.
9. 최병희, 유창하, 이경진, 양형식, 2008, PPV, PVS에 의한 지반진동 허용기준의 설정에 관한 고찰, 추계학술발표회 논문, 대한화약발파공학회, pp. 31-38.
10. 김우철 외, 1992, 현대통계학, 영지문화사, pp. 219-247.
11. 양형식 역, 1992, 발파진동학, 구미서관, pp. 24-36.
12. 윤지선 역, 1993, 최신 발파기술, 구미서관, pp. 165-166.
13. 국토해양부, 2006. 도로공사 노천발파 설계·시공지침, pp. 9-12.



최형빈

High ENC
기술사 사무소 대표

Tel: 02)2057-1891
E-mail: pebin@hanmail.net



김동연

(주)SVS
대표이사

Tel: 02)6747-8249