

진동레벨 추정식에 관한 연구

김일중¹⁾ · 원연호²⁾ · 조영동³⁾

1. 서언

문화가 발달함에 따라 사람은 안락한 생활과 쾌적한 환경에서의 삶을 추구하고 있다. 정부에서도 국민의 생활환경을 보호하기 위해서 각종 환경 규제기준을 마련하여 시행하고 있다.

국가산업의 발달에 따라 건설현장이 증가하고 있으며 각종 건설현장에서 발생하는 건설 진동은 여러 가지 형태와 규모로 주민생활에 크고 작은 불편을 주고 있다. 특히 암반이 존재하는 건설현장에서 암반을 절취하기 위한 발파작업은 거의 필수적이라 할 수 있으며 발파작업은 지반진동을 수반하게 된다.

최근에 들어 발파작업으로 인한 진동피해를 호소하는 민원이 증가하고 있으며 중앙 환경 분쟁 조정위원회 등에서는 생활진동 규제기준의 초과여부나 진동에 의한 정신적 피해를 판단하는데 있어서 발파진동계측기로 측정한 진동 계측치를 진동레벨로 산출하기 위해 기존의 진동레벨 변환식을 이용하고 있다.

본 연구에서는 발파현장에서 발파진동 계측기로 측정한 진동 계측치(PVS, PPV, V_v)를 이용하여 진동레벨을 산출하는데 있어서 언제 어디서나 지발당장약량 및 폭원과의 이격거리에 관계없이 유효하게 적용할 수 있는 새로운 진동레벨 추정식들을 제시하는데 목적이 있다.

2. 시험대상지역

2.1 시험현장

본 시험을 실시한 지역은 국토해양부에서 발주한 전북 임실군지역의 00~00구간(3공구) 도로확장공사 현장이며, 발파현장 주변에는 민가와 컴퓨터시설물 및 축사가 발파암에 근접하여 위치하고 있다.

2.2 발파대상암반

발파대상암반은 석영질을 다량 함유한 화강암으로서 지오해머로 타격시 타격점은 암편으로 비산되는 A그룹에 속하며 1~2m 간격으로 균열이 발달된 상태이다. 발파대상 암석의 일축압축강도 $\sigma_c=122.5\text{MPa}$, Young's modulus $E=49\text{Gpa}$, Poison's ratio $\nu=0.24$, Unit weight $\gamma_t=25.5\text{kN/m}^3$ 이다.

1) 엔-토비 기술사사무소 대표
2) 원앤비 기술사사무소 대표
3) (주)무진네오테크 대표

3. 발파진동 및 진동레벨 측정

3.1 측정기기

1) 발파진동 계측기

발파진동 계측에 사용된 계측기는 Canada InstanTel사 제품인 모델명 BM-III로서 발파에 의한 3개 방향성분(Longitudinal, Transverse, Vertical)의 진동(Vibration)과 가속도(Acceleration) 및 주파수(Frequency)의 측정, 이력시간(Time history) 기록, 그리고 최대 실 벡터합(True vector sum)을 자동 산출하는 기기이다.

2) 생활진동 계측기

진동레벨을 측정하는데 사용된 일본 IMV사 제품인 환경진동 레벨계(모델명:VM-1220E)는 측정범위가 30dB(V) ~ 120dB(V)이며, 공인측정오차범위는 $\pm 0.5\text{dB(V)}$ 이내다.

3.2 측정방법

시험현장에서 발파공사를 시행하면서 3가지 종류의 지반(암반과 콘크리트 및 흙) 별로 그림 1,2,3에서와 같이 발파진동 계측기와 환경진동 계측기를 동일한 위치에 설치하여 진동속도와 진동레벨을 동시에 측정하였다. 생활진동 계측기로는 감각 보정회로인 “V” 특성의 진동레벨(VL), 발파진동 계측기로는 3개 방향성분을 측정하였고 최대 실 벡터합(PVS)은 이를 기준으로 자동 산출되었다. 그림 1은 암반에서, 그림 2는 콘크리트 지반에서, 그림 3은 흙 지반에서 진동속도와 진동레벨을 동시에 측정하는 관경이다.

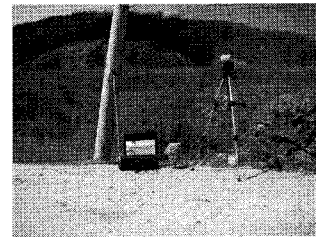
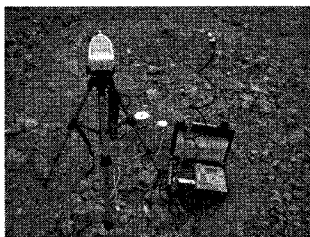


그림 1. 암반에서 측정 그림 2. 콘크리트 지반에서 측정 그림 3. 흙 지반에서 측정

3.3 측정결과

암반과 콘크리트 및 흙 지반에서 계측한 발파진동과 진동레벨 자료는 각각 436개씩 이다. 이를 진동속도와 진동레벨의 범위별로 분포수를 정리하여 표 1에 나타냈다. 표 1에서 지발당장약량과 이격거리는 변수로 작용하지 않으므로 기재하지 않았으며 발파진동속도 PVS는 최대 실 벡터합, PPV는 3개 방향의 진동성분 중 최대치, VV는 연직방향의 진동성분을 의미한다. 그림 4는 발파진동속도와 진동레벨 각각의 총 측정수량에 대한 진동범위별 빈도수를 백분율을 나타낸 것이다. 그림 4에서 진동속도에 대한 것은 하부횡축-좌측종축, 진동레벨에 대한 것은 상부횡축-우측종축을 이용한다.

표 1. 자료의 분포

범위 (cm/sec)		0.005~0.01 미만	0.01~0.05 미만	0.05~0.10 미만	0.10~0.50 미만	0.50~1.00 미만	1.00~5.00 미만	계
진동속도 값 분포 (개)	PVS		76	102	194	46	18	436
	PPV		81	118	185	39	13	436
	V _v	10	143	128	133	15	7	436
범위 [dB(V)]		30~40 미만	40~50 미만	50~60 미만	60~70 미만	70~80 미만	80~90 미만	계
진동레벨 값 분포 (개)		13	71	171	144	33	4	436

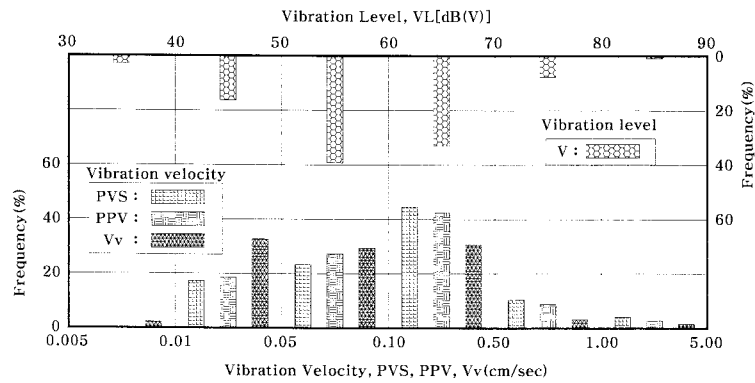


그림 4. 발파진동속도와 진동레벨의 빈도수

4. 진동레벨 추정식

4.1 회귀분석 결과

시험현장에서 실측한 자료를 3가지(VL-PVS, VL-PPV 및 VL-V_v) 관계로 회귀분석 하여 진동레벨 변환식(2)와 같은 반 대수함수 형태로 새롭게 산출한 진동레벨 추정식을 표 2에 나타냈다. 그림 5는 VL-PVS와의 관계, 그림 6은 VL-PPV와의 관계, 그림 7은 VL-V_v와의 관계를 나타내고 있다. 본 연구에서 산출한 진동레벨 추정식에서 진동 단위는 cm/sec이다, 만약 진동 단위를 mm/sec으로 이용하고자 할 경우에 절편상수는 각 식들의 계수를 뺀 값으로 이용할 수 있다.

표 2. 진동레벨 추정식

신뢰수준 50%	신뢰수준 95%	비 고
$VL[dB(V)] = 17.94 \cdot \log(PVS) + 73.35$	$VL[dB(V)] = 17.94 \cdot \log(PVS) + 79.75$	
$VL[dB(V)] = 17.76 \cdot \log(PPV) + 74.13$	$VL[dB(V)] = 17.76 \cdot \log(PPV) + 80.71$	
$VL[dB(V)] = 18.80 \cdot \log(V_v) + 78.93$	$VL[dB(V)] = 18.80 \cdot \log(V_v) + 82.56$	

계측자료를 회귀분석하여 산출한 진동레벨 추정식이 측정한 진동레벨 값에 얼마나 적합한가를 나타내는 결정계수는 VL-PPV, VL-PVS 및 VL-V_v 순으로 0.80, 0.81 및 0.93으로서 VL-V_v의 결정계수가 가장 높았다. 발파진동속도와 진동레벨과의 관계의 정도를 나타내는 상관계수는 결정계수와 같은 순서로 0.89, 0.90 및 0.96이며 VL-V_v의 상관계수가 가장 높았으며 발파진동속도와 진동레벨과는 정상관(正相關)관계를 나타내고 있다.

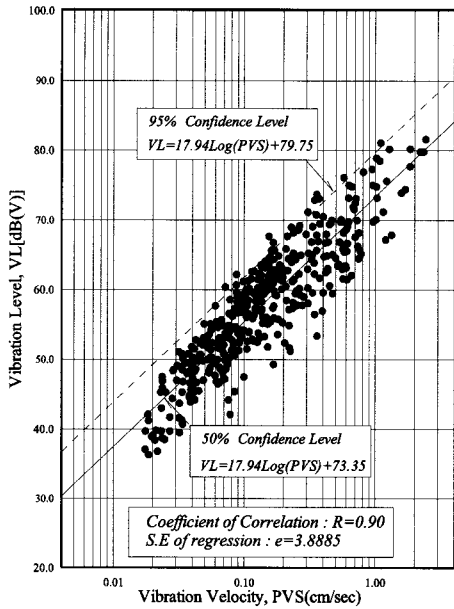


그림 5. 진동레벨과 진동속도와의 관계(PVS)

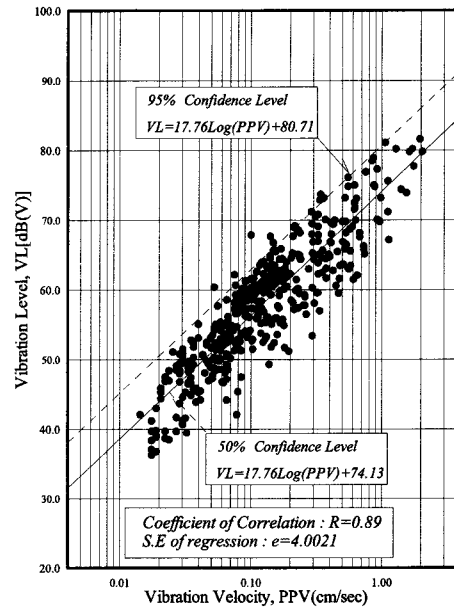


그림 6. 진동레벨과 진동속도와의 관계(PPV)

4.2 회귀계수에 대한 유의성 검정

어느 자료에 대한 회귀분석한 결과에 대해 두변수간에 상관성의 유무를 검토하기 위한 방법을 쉽게 정리한 것이 검정통계량이다. 먼저 유의수준에 대한 임계값을 정하고 검정통계량의 값을 구한 후 임계값과 검정통계량의 값을 서로 비교하여 두변수간에 상관관계가 있는지를 판단하게 된다. 어느 변수간의 관계를 나타내는 식에 대한 검정통계량의 값을 구하는데 있어서 이용한 자료의 수가 많으면 식(1)을 이용하게 된다. 따라서 본 연구에서 진동레벨 추정식을 산출하는데 이용한 자료가 많기 때문에 검정통계량의 값(t)은 진동속도에 대한 계수(β)와 표준오차(s_{β})를 적용한 식(1)로 구했다.

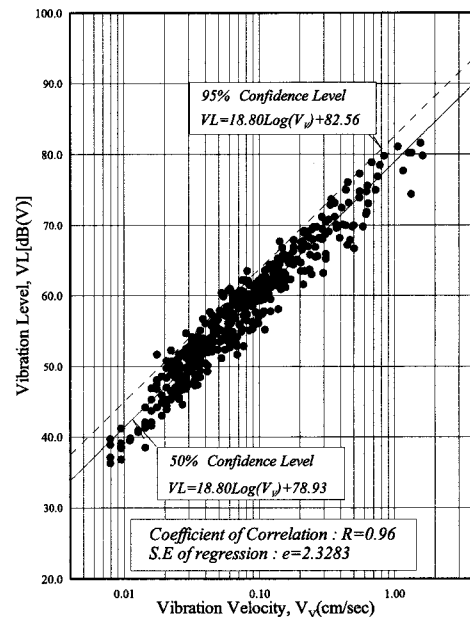


그림 7. 진동레벨과 진동속도와의 관계(V_v)

$$t = \frac{\hat{\beta}}{s_{\hat{\beta}}} \quad (1)$$

양측(兩側)검정의 유의수준 0.1은 일측(一側)검정의 유의수준 0.05에 해당한다. 양측검정의 경우 검정통계량의 값이 ±임계값 사이에 있으면 두변수간에 상관관계가 없고, 그 범위를 벗어나면 두변수간에 상관관계가 있다고 판단하게 된다. 그리고 일측검정의 경우 검정통계량의 값이 임계값보다 크게 되면 두변수간에 상관관계가 있다는 것으로 판단하게 된다.

본 연구에서 진동레벨 추정식들의 신뢰수준들은 평균 50%이하를 포함한 값들을 채택하였으므로 임계값은 일측검정의 유의수준에 해당한다. 일측검정 유의수준 0.05의 임계값은 1.645이다. VL-PVS의 계수는 17.94, VL-PPV는 17.76, VL-V_v는 18.80이고, VL-PVS의 계수표준오차는 0.417455, VL-PPV는 0.428435, VL-V_v는 0.244136이므로 VL-PVS의 검정통계량은 42.97, VL-PPV는 41.45, VL-V_v는 77.01로서 모든 추정식들은 두변수간에 상관관계가 명확히 나타나는 것으로 확인되었다.

5. 고찰

5.1 진동레벨 변환식

발파현장 주변 대상지역에서 발파진동 계측기로 측정된 진동속도를 이용하여 진동레벨을 산출하는 데에 있어서 이론적으로 주파수 8Hz 이상의 연속적인 정현진동의 경우 식(2)를 인용하고 있다. 본 연구에서는 식(2)를 “진동레벨 변환식”이라 하였다.

$$VL = 20 \cdot \log V + 91 \quad (2)$$

여기서, VL : 진동레벨[dB(V)]

V : 진동속도(cm/sec)

5.2 보정 진동레벨 산출식

1일 평균 발파횟수를 보정한 보정 진동레벨 산정에 다음과 같은 식을 이용하고 있다. 본 연구에서는 식(3)을 “보정 진동레벨 산출식”이라 하였다.

$$CVL = MVL + 10 \cdot \log N \quad (3)$$

여기서, CVL : 보정 진동레벨[dB(V)]

MVL : 측정 진동레벨[dB(V)]

N : 1일 평균 발파횟수(회)

5.3 진동레벨 추정식

표 2에 나타낸 진동레벨 추정식들에서 보는바와 같이 계수들은 VL-VV>VL-PVS>VL-PPV

의 경향을 나타내고 있으나 절편상수 크기는 $VL-PPV < VL-PPV < VL-V_V$ 의 경향을 나타내고 있다. 이는 진동레벨 추정식에서 진동속도 1.0cm/sec를 경계로 그 미만의 진동속도가 1.0cm/sec에 가까울수록 절편상수에서 빼야할 값이 작고, 진동속도가 1.0cm/sec보다 높을수록 절편상수에 더해야할 값이 커지기 때문이다.

통계량이 동일한 경우 소정의 신뢰수준에 해당하는 진동레벨 추정식의 절편상수 크기는 t-분포 값과 표준오차에 의해 영향을 크게 받기 때문에 신뢰수준 50%에 해당하는 절편상수의 크기의 순서와 동일한 경향을 나타내야만 하는 것은 아니다. 그러나 본 연구결과는 소정의 신뢰수준에 해당하는 절편상수는 신뢰수준 50%의 경향과 동일한 관계를 나타내고 있다.

본 연구에서 발파진동속도를 PVS, PPV 및 V_V 로 구분하여 산출한 진동레벨 추정식들의 계수는 기존에 인용하던 진동레벨 변환식(2)보다 전반적으로 약1.20~2.24정도 작고, 절편상수는 기존 식에 비해 전반적으로 약8.44~11.25정도 작았다.

진동레벨 측정기로 측정된 진동레벨은 각각 보정회로인 "V"특성을 측정된 자료이므로 발파진동계측기로 측정된 진동속도를 이용하여 진동레벨을 추정하는데 있어서 연직방향의 진동(V_V)을 이용한 $VL-V_V$ 의 관계식을 적용하는 것이 적절할 것으로 사료되며 상관계수 또한 높게 나타났다.

5.4 진동레벨에 따른 진동속도 산출

발파현장 주변 생활진동이 문제가 되는 위치에서 발파에 의한 진동레벨을 직접 측정된 값과 1일 평균 발파횟수를 고려하여 보정 진동레벨(CVL)을 산출하는 식(3)은 현재 규정에 의하면 적절하나 현장 실측에 의하지 아니하고 식(2)를 이용하여 변환한 진동레벨(VL)을 식(3)의 측정 진동레벨(MVL)에 대치하고 1일 평균 발파횟수를 고려하여 보정 진동레벨을 산출하는 것은 1일 평균 발파횟수를 가중하는 것을 제외하고는 기존의 진동레벨 변환식(2)를 이용하여 결과를 평가하는 것과 같다.

식(3)과 같은 보정 진동레벨 산출식에서 1일 평균 10회(N) 발파를 고려할 때 측정 진동레벨(MVL)에 $10\log N$ 을 더하는 것은 환경부의 생활진동 규제기준에 의해 주간 발파의 경우 규제기준에 10dB을 더하는 것과 상쇄시킬 수 있다. 그러므로 1일 평균 10회 발파하는 경우 발파횟수를 고려한 식(3)의 보정 진동레벨과 발파횟수를 고려하지 않는 진동레벨 변환식(2)의 진동레벨은 동일하다.

시험현장에서 실측한 자료를 분석하여 산출한 신뢰수준 95%에 해당하는 각각의 진동레벨 추정식들을 이용하여 일정 진동레벨에 해당하는 발파진동속도(PVS, PPV, V_V)와 기존에 인용하던 진동레벨 변환식(2)를 이용하여 산출한 진동속도 V는 표 3과 같다. 그림 8은 표 3의 결과를 기준으로 작성한 것이다.

표 3과 그림 8에서 보는바와 같이 진동레벨 추정식들에 의해 산출한 일정 진동레벨에 해당하는 발파진동속도는 V_V , PPV, PVS 순으로 증가하고 있다. 일정 진동레벨 60~75dB(V)의 범위에서 기존에 인용하던 진동레벨 변환식(2)에 의한 진동(V)에 비해 본 연구에서 산출한 신뢰수준 95%에 해당하는 진동레벨 추정식들을 이용하면 전반적으로 연직방향의 진동속도(V_V)는 약2.25~2.50배, PPV는 약2.43~3.02배, PVS는 약2.82~3.44배 정도 높게 적용된다.

표 3. 진동레벨에 따른 진동속도 산출

진동레벨 [dB(V)]	진동속도(cm/sec)				진동레벨 [dB(V)]	진동속도(cm/sec)			
	PVS	PPV	V _v	V		PVS	PPV	V _v	V
60	0.079	0.068	0.063	0.028	70	0.286	0.249	0.215	0.089
65	0.151	0.131	0.116	0.050	75	0.544	0.477	0.396	0.158

생활진동 규제기준 65dB(V)을 적용해야하는 장소에서 현재까지 인용하고 있는 진동레벨 변환식(2)에 본 연구에서 산출한 신뢰수준 95%에 해당하는 식에 의한 연직방향의 진동속도 $V_v=0.116\text{cm/sec}$ 를 적용하면 약 72.3dB(V), $PPV=0.131\text{cm/sec}$ 를 적용하면 약73.3dB(V), $PVS=0.151\text{cm/sec}$ 를 적용하면 약74.6dB (V)로 산출된다. 본 연구에서 산출한 진동레벨 추정식들을 이용하는 경우 표 3에서 보는바와 같이 이들 모두는 생활진동 규제기준 65dB(V)을 만족하지만 현재까지 인용하고 있는 진동레벨 변환식(2)을 적용함으로써 전체적으로 약 7.3~9.6dB(V)을 초과하는 것으로 평가할 것이다.

주간 발파에서 환경부 주거지역의 생활진동 규제기준은 +10dB(V)하여 75dB(V)이므로 1일 평균 10회 발파하는 경우에 규제기준 진동레벨 65dB(V)에 해당하는 진동속도는 본 연구결과 식을 이용하여 PVS로 약0.151cm/sec, PPV로 약0.131cm/sec, V_v 로는 약0.116 cm/sec이하를 적용하면 생활진동 규제기준을 만족할 것으로 판단된다.

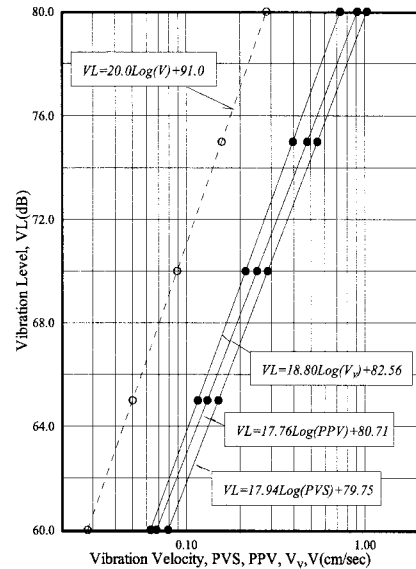


그림 8. 진동레벨과 진동속도와의 관계(신뢰수준 95%)

표 4는 발파진동속도(PVS, PPV, V_v)에 해당하는 진동레벨과 기존에 인용하던 진동레벨 변환식(2)를 이용하여 산출한 진동레벨을 나타내고 있다. 표 4에서 보는바와 같이 측정된 진동속도 0.05~0.50cm/sec 범위의 값을 기존에 인용하던 진동레벨 변환식(2)에 대입하여 산출한 진동레벨은 본 연구에서 산출한 신뢰수준 95%에 해당하는 진동레벨 추정식들에 비해 진동속도가 PVS인 경우 약8.57~10.63dB(V), PPV인 경우에는 약7.38~9.62dB(V), V_v 인 경우에는 약 6.88~8.08dB(V)만큼 높게 산출된다.

표 4. 진동속도에 따른 진동레벨 산출

진동속도 (cm/sec)	진동레벨[dB(V)]				진동속도 (cm/sec)	진동레벨[dB(V)]			
	PVS	PPV	V_v	기존식		PVS	PPV	V_v	기존식
0.05	56.41	57.60	58.10	64.98	0.20	67.21	68.30	69.42	77.02
0.07	59.03	60.20	60.85	67.90	0.30	70.37	71.42	72.73	80.54
0.10	61.81	62.95	63.76	71.00	0.50	74.35	75.36	76.90	84.98

따라서 향후 생활진동 평가와 관련된 업무수행이나 생활진동에 대한 현장관리에 있어서 본 연구에서 산출한 진동레벨 추정식들을 인용함으로써 현실적이며 신뢰성 있는 평가업무 수행과 적절한 현장관리에 도움이 될 것으로 사료된다.

6. 결론

발파현장에서 발파진동 계측기로 측정한 진동속도 값을 이용하여 진동레벨 값으로 산출하는데 있어서 본 연구에서 산출한 진동레벨 추정식들과 현재 인용하고 있는 진동레벨 변환식을 비교·검토하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 진동 계측기로 실측한 진동속도(PVS, PPV, V_v)와 환경진동 계측기로 측정한 진동레벨과를 관련지어 언제 어디서나 지발당장약량 및 폭원과의 이격거리에 관계 없이 적용할 수 있는 새로운 진동레벨 추정식들을 산출하였다.
- 2) 본 연구에서 산출한 진동레벨 추정식들의 상관계수는 VL-PVS의 경우 0.90, VL-PPV의 경우 0.89이고, VL- V_v 의 경우는 0.96으로서 상관계수가 가장 높았으며, 회귀계수에 대한 유의성 검증결과 진동레벨 추정식들의 진동레벨과 진동속도 사이에는 상관관계가 명확히 나타났다.
- 3) 본 연구에서 산출한 진동레벨 추정식들의 계수는 대동소이하고 기존에 인용하던 진동레벨 변환식보다 전반적으로 약1.20~2.24정도 작았으며, 신뢰수준 95%에 해당하는 식들의 절편상수는 약8.44~11.25정도 작았고 절편상수 크기는 VL-PVS < VL-PPV < VL- V_v 의 경향을 나타냈다.
- 4) 발파현장 주변 생활진동 규제 대상지역에서 측정한 발파 진동속도에 대응하는 진동레벨을 추정하는데 있어서 진동레벨이 각각 보정회로인 “V”특성의 값이므로 발파진동속도 중에서 연직방향의 진동(V_v)을 적용하는 것이 적절할 것으로 사료된다.
- 5) 본 연구에서 산출한 진동레벨 추정식들을 인용하면 발파진동 계측치 만을 이용해서도 생활진동 평가와 관련된 분야의 현실적이며 신뢰성 있는 업무수행에 도움이 될 것이다.
- 6) 본 연구에서 산출한 진동레벨 추정식들에 의해 계산된 일정수준의 진동레벨(생활진동 규제기준)에 해당하는 진동속도는 기존에 인용하던 진동레벨 변환식에 의한 진동속도보다 높게 적용 할 수 있다.

참고문헌

- 1) 건설공사 표준품셈, 2000, 제3장 토공, A,B 그룹의 비교, 건설연구원, 서울, pp.97~98
- 2) 김병수의 3인, 1987, SPSS를 이용한 통계자료분석, 박영사, 서울, pp.195~197
- 3) 이종원, 1993, 경제경영 통계학, 박영사, 서울, pp.518~520
- 4) 중앙 환경분쟁 조정위원회, 소음·진동으로 인한 피해분쟁사건(환조 06-3-110) 등 다수
- 5) 환경부 고시 제2008-22호, 소음·진동 환경오염 공정시험기준, 진동편, p.181