

진동레벨과 진동속도의 상관성 분석 등에 관한 연구

2010. 10

연구기관 : 원앤비기술사사무소

환 경 부
중 앙 환 경 분 쟁 조 정 위 원 회

진동레벨과 진동속도의 상관성 분석 등에 관한 연구

2010. 10

연구기관 : 원앤비기술사사무소

환 경 부
중 양 환 경 분 쟁 조 정 위 원 회

제 출 문

중앙환경분쟁조정위원회 위원장 귀하

본 보고서를 “진동레벨과 진동속도의 상관성 분석 등에 관한 연구”의 최종 보고서로 제출합니다. 업무를 수행하는 동안 적극적으로 협조하여 주신 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

2010년 10월

연구 기관 : 원앤비기술사사무소

책임 연구원 : 원 연 호 (원앤비기술사사무소 대표, 공학박사)

연구 원 : 김 일 중 (앤-토비기술사사무소 대표, 공학박사)

김 태 섭 (한국구조안전기술원 원장, 공학박사)

오 이 환 (원앤비기술사사무소 팀장, 자원기술사)

소 성 호 (한국구조안전기술원 소장, 건축구조기술사)

장 호 민 (조선대학교 박사과정, 화약기사)

김 재 훈 (원앤비기술사사무소 과장, 화약기사)

자 문 : 강 추 원 (조선대학교 교수, 공학박사)

김 하 근 (한국환경설계 대표, 공학박사)

천 영 수 (LH공사 주택연구원, 공학박사)

목 차

1. 서 론

| | |
|--------------------------|---|
| 1.1 연구의 목적 및 필요성 | 1 |
| 1.2 연구의 방법 및 범위 | 1 |
| 1.3 연구 결과에 따른 기대효과 | 3 |

2. 기존 연구 결과에 대한 검토

| | |
|-------------------------------------|----|
| 2.1 개요 | 4 |
| 2.2 진동추정에 관한 기존방식 검토 | 5 |
| 2.2.1 발파진동 | 6 |
| 2.2.2 건설장비진동 | 9 |
| 2.3 진동레벨과 진동속도 환산에 관한 기존방식 검토 | 15 |
| 2.4 발파음압과 소음레벨 환산에 관한 기존방식 검토 | 17 |
| 2.5 소결 | 18 |

3. 진동 추정 방안

| | |
|--------------------------------------|----|
| 3.1 개요 | 21 |
| 3.2 발파진동계측 및 추정 | 21 |
| 3.2.1 계측 일반사항 | 23 |
| 3.2.2 현장 계측자료 회귀분석을 통한 추정방식 제안 | 27 |
| 3.3 건설장비 진동계측 및 추정 | 30 |
| 3.3.1 계측 일반사항 | 30 |
| 3.3.2 현장 계측자료 회귀분석을 통한 추정방식 제안 | 31 |
| 3.4 소결 | 34 |

4. 진동레벨과 진동속도 환산방안

| | |
|---------------------------------|----|
| 4.1 개요 | 36 |
| 4.2 발파진동레벨과 진동속도 환산방안 | 36 |
| 4.3 건설장비와의 충격에너지를 이용한 진동레벨 예측방안 | 43 |
| 4.4 건설장비 진동레벨과 진동속도 환산방안 | 45 |
| 4.5 진동레벨 환산식의 고찰 | 50 |
| 4.5.1 발파진동레벨 환산식 | 50 |
| 4.5.2 건설장비와의 환산거리에 따른 진동레벨 예측식 | 54 |
| 4.5.3 건설장비 진동레벨 환산식 | 56 |
| 4.6 소결 | 62 |

5. 발파 소음레벨 환산방안

| | |
|---------------------------|----|
| 5.1 개요 | 65 |
| 5.2 폭음 발생요소 | 65 |
| 5.3 발파음압과 소음레벨 현장측정 | 66 |
| 5.4 계측자료 회귀분석을 통한 환산방식 제안 | 68 |
| 5.4.1 발파 소음레벨 예측 | 68 |
| 5.4.2 발파 음압레벨 예측 | 71 |
| 5.4.3 발파 음압레벨과 소음레벨 환산방안 | 72 |
| 5.5 소결 | 73 |

6. 진동피해 평가 프로세스 고찰

| | |
|-------------------|----|
| 6.1 개요 | 74 |
| 6.2 진동발생에 대한 검토 | 74 |
| 6.3 진동전달경로에 대한 검토 | 76 |
| 6.4 수진체에 대한 검토 | 76 |
| 6.5 각종 자료에 대한 검토 | 77 |

7. 결 론

| | |
|------------------------------|----|
| 7.1 진동 추정방안 | 79 |
| 7.2 진동레벨과 진동속도 환산방안 | 80 |
| 7.3 발파 음압레벨과 소음레벨 환산방안 | 82 |
| 7.4 진동피해 평가 프로세스 | 82 |
| 7.4.1 진동발생원에 대한 검토 | 82 |
| 7.4.2 진동전달경로에 대한 검토 | 84 |
| 7.4.3 수진체에 대한 검토 | 84 |
| 7.4.3 각종 자료에 대한 검토 | 85 |

참고문헌

1. 서론

1.1 연구의 목적 및 필요성

근래 우리나라는 기간시설의 확충에 따라 고속도로, 철도, 지하철, 항만, 택지조성 및 재개발 등이 증가되고 있다. 그러한 공사를 수행하기 위해서는 암반 절취와 파쇄를 포함한 지반굴착, 지중천공과 항타, 지반다짐 등이 포함될 수밖에 없으며, 이 과정에서 필연적으로 수반되는 진동, 소음, 분진 등에 의한 환경피해 역시 지속적으로 증진됨으로써 이제 환경분쟁사건은 사회갈등을 유발하는 주요한 요소의 하나로 자리 잡고 있는 상황이다.

이 중 진동은 소음과 더불어 대표적인 환경피해 요인으로 꼽을 수 있는데, 그 유형이 인체에 대한 정신적 피해와 구조물에 대한 물적 피해로 구분될 수 있는 바, 인체 감응에 미치는 영향은 진동레벨로, 구조물에 미치는 물리적 영향은 진동속도로 평가하는 것이 합리적이라고 보고되고 있다.

이에 따라, 국내에 있어서도 진동영향 평가 시 인체 피해와 물적 피해로 각각 구분하여 고려하도록 설정되어 있으나, 정부 부처간(환경부-국토해양부-경찰청) 규제단위가 상이하고 관련자료 등이 부족하여 사전 시공관리 또는 사후 피해평가 과정에서 혼선이 야기되는 경우도 혼한 실정이다.

특히, 환경분쟁조정 업무는 그 속성상 짧게는 수개월 길게는 수년 전의 상황을 다루어야 되는 것이 일반적이나, 과거의 한정된 자료만을 근거로 당시 발생하였던 진동의 크기를 진동레벨과 진동속도 단위로 각각 구분하여 평가하기에는 상당한 어려움이 있다.

실례로, 발파의 경우 현장에서는 대부분 진동속도 단위로 측정하고 있는데, 이를 사후에 진동레벨 단위로 환산하는 과정에서 특정조건(진동유형, 주파수영역 등)에서만 사용할 수 있는 변환식들을 임의 적용함으로써 그 환산치와 실측치를 비교할 때 상당한 차이를 나타낸다는 연구결과도 제시되고 있다.

한편, 건설장비에 의한 진동속도를 추정하는 방식은 아직까지도 수십 년 전 외국에서 제안된 일부 자료만을 근거로 하고 있는 바, 현재 국내에서 사용되고 있는 장비들에 대한 실측치와 상기 자료에 의한 추정치를 비교할 때 역시 상당한 차이가 있는 것으로 나타나고 있다.

따라서, 국내외 최근 연구 결과에 대한 조사·분석과 함께 현장에서의 계측과 실험을 통해 실제와 최대한 부합되는 진동추정 및 단위 환산방식 등을 제안함으로써 환경분쟁조정 업무의 합리성 개선을 위한 자료를 제공하는데 본 연구의 목적이 있다.

1.2 연구의 방법 및 범위

1) 진동추정의 정확도 향상방안 제안

○ 환경분쟁조정 업무의 특성상, 진동은 현장에서의 실 계측보다 기존 자료를 바탕으로 추정·평가하는 경우가 더욱 많다고 할 수 있는데, 과거의 연구결과를 근거로 평가할 수밖에 없는 부분도 없지 않아 그러한 경우 추정치의 정확도가 의문시되는 상황이다.

○ 이에 따라, 국내외 관련자료에 대한 조사와 함께 현장계측 및 자체실험을 통한 다수의 실측자료를 확보한 후, 이를 회귀분석하여 발생원(발파 및 주요 건설장비)별로 실제와 근접되는 진동 추정방안을 제안하기로 한다.

2) 진동레벨과 진동속도 환산의 신뢰도 향상방안 제안

○ 진동피해 평가에 있어, 인체 피해에 대해서는 진동레벨 단위, 주변시설물 피해에 대해서는 진동속도 단위로 평가하는 것이 합당하나, 기존의 변환식으로는 그러한 환산에 문제가 있어 환경분쟁조정 업무를 원활히 수행하는데 어려움이 있는 것이 사실이다.

○ 이에, 관련 자료의 수집과 현장에서의 계측·실험을 통해 다수의 실측치를 확보한 후 이를 회귀분석 함으로써 각 발생원(발파 및 주요 건설장비)별로 진동속도와 진동레벨 단위간의 환산방식을 고찰·제시하기로 한다.

3) 발파음압과 발파 소음레벨의 환산방식 제안

○ 국내 발파현장에서 사용되는 측정기 대부분은 발파진동 전용측정기로서, 발파음압을 Peak치로 측정한 후 소음레벨로 환산하는 방식을 채택하고 있으나, 이 경우 형식승인된 소음 전용측정기에 의한 측정치와는 상당한 차이를 나타내고 있다. 따라서, 발파소음에 따른 정신적 피해를 평가하기 위해서는 음압레벨에서 소음레벨로 변환되는 방식의 신뢰도 향상이 요구되는 실정이다.

○ 이에, 기존 자료에 대한 검토와 함께 현장에서의 계측 및 실험을 통해 다수의 실측치를 확보한 후 이를 회귀분석 함으로써 실제에 최대한 부합되는 발파음압과 소음레벨 환산방식을 고 고찰·제안하기로 한다.

4) 진동피해 평가 프로세스(process) 제안

○ 현재 진동피해 평가와 관련하여 명확한 지침이 미흡한 바, 주로 전문가의 경험에 의지하

고 있는 실정이다.

○ 이에 따라, 전문가의 판단 착오 및 주관적 요소가 개입될 가능성을 배제할 수 없으므로 그 개선을 위해 “진동피해 평가 프로세스(안)”을 고찰·제안하기로 한다.

○ 업무처리 흐름도, 현지조사 체크리스트 제시

○ 당사자가 제출하여야 하는 서류 및 근거 제시

1.3 연구결과에 따른 기대효과

○ 진동피해 평가 프로세스(안) 제안

⇒ 진동피해 평가자별 결과의 편차 및 오류를 줄임으로써 객관성을 확보하여 궁극적으로 환경분쟁조정 업무에 대한 국민들의 신뢰도 향상을 도모한다.

○ 각 발생원별(발파 및 주요 건설장비) 진동 추정방식 제안

⇒ 진동 추정치의 정확도 증진과 함께, 해당 분야에서의 기술력 향상을 도모한다(국내외적으로, 근래 개발된 건설장비를 대상으로는 진동속도 추정방식이 제시되어 있지 않은 상황임).

○ 진동레벨과 진동속도 단위간의 환산방식 제안(발파 및 주요 건설장비)

⇒ 진동피해 사건과 관련하여 제공받은 자료가 제한적인 상황에서도 인체 피해와 물적 피해를 구분·평가할 수 있는 근거자료를 제공함으로써 환경분쟁조정 업무의 합리성 증진을 도모한다(특히, 건설장비 사용에 의해 발생하는 진동의 경우는, 국내외적으로 진동속도와 진동레벨 간의 환산방안이 제시되어 있지 않은 상황임).

○ 발파 음압과 소음레벨 추정방식 제안

⇒ 발파소음에 의한 정신적 피해평가가 용이하도록 발파음압 dB(L)과 소음레벨 dB(A)의 추정방식을 제안함으로써 환경분쟁조정 업무의 합리성 증진을 도모한다.

2. 기존 연구결과에 대한 검토

2.1 개요

진동이란, 물체가 동적인 외력을 받아 운동적 평형상태에서 시간의 경과와 함께 반복적으로 위치가 변화되는 운동현상을 말한다.

진동은 지진과 같이 자연적으로 발생하는 경우도 있지만 여기에서는 논외로 하며, 환경분쟁 조정 업무와 관련하여 일반적으로 문제시되고 있는 인위적 진동은 다음과 같이 요약된다.

1) 기계·설비 진동

공장 등에 설치되어 있는 기계 설비류에서 발생하는 진동으로서 거주자에게 미치는 영향 또는 해당건물 자체에 발생하는 결함이 문제시될 경우가 많다. 적절한 방음, 방진 및 차폐 등을 통하여 어느 정도 기술적 제어가 가능하다.

2) 교통 진동

도로 주행차량으로부터 노면에 가해지는 충격이 지반을 통해 전파되는 것으로 차종, 중량, 주행속도, 도로 및 지반 조건 등이 변수로 된다. 일반적으로 진동보다 소음 부분이 더욱 문제시되는 분야이나, 간혹 주변 건축물 등에 진동피해를 발생시키는 경우도 있다.

3) 건설공사 진동(채석장, 탄광 등에서의 발파 포함)

건설공사에 있어서는 진동의 주발생원으로 다음과 같은 항목들을 들 수 있다.

가) 발파 진동

우리나라의 경우 지질적으로 고생대 및 중생대의 견고한 암반이 지표 가까이 노출된 경우가 많고 지형적으로 산지와 구릉지대가 발달되어 있어, 각종 건설공사 등에 발파작업이 수반될 때가 많다.

폭약이 장약공 내에서 폭발하면 강력한 폭굉충격과 함께 발생에너지가 주위의 암반으로 전달된다. 이러한 충격과 에너지로 주변 암반을 파괴하게 되며, 발파에 의한 에너지의 5~20%는 탄성파의 형태로 암반 중에 전파되어 지반진동을 발생시키게 된다.

발파에 의한 피해로는 응력파에 의한 지반진동 및 발파풍압(공중충격파), 비석 등을 들 수 있으며, 폭원과 어느 정도 이격되어 위치하는 건축물에 발생하는 피해는 주로 지반진동에 기

인한다. 일반적으로 발파진동은 인위적으로 발생하는 진동 중에서 주변에 미치는 영향도가 가장 큰 것으로 평가된다.

나) 기초 및 토공사용 기계 진동

말뚝기초 공사에 있어, 주변 건축물에 영향을 미칠 수 있는 수준의 진동은 주로 기성말뚝의 타입 시 발생하며, 그 정도는 말뚝 및 항타 장비의 종류 등에 따라 다양한 양상을 나타낸다. 항타에 의한 진동은 충격적인 특성이 있고 일반적으로 차량주행 등에 의한 진동보다 큰 값을 나타내므로 주변 건축물에 피해를 미칠 가능성이 그만큼 높다고 할 수 있다.

과거 직타공법 적용 시 인근 가옥에서 민원이 빈번히 발생되었던 바, 이의 개선을 위해 국내의 경우 도심지 공사에서는 Pre-boring과 같은 대체공법을 적용하는 경우가 대부분이다.

기타, 진동롤러, 브레이커 등에 의한 토공사 및 H형강 등을 사용한 흙막이 공사에서 발생하는 진동이 문제시될 경우도 많다.

다) 해체공사

철근콘크리트조 등과 같은 중량 구조물의 해체에는 브레이커나 강구를 이용한 파쇄 및 발파, 전도 등과 같은 다양한 공법이 적용될 수 있다.

강구, 발파 등에 의한 건물의 해체 시에는 주변에 큰 피해를 야기할 수도 있으며, 이에 따라 유압식 압쇄기 등을 사용한 저진동·저소음 공법 또는 무진동에 가까운 정적파쇄공법 등이 개발·적용되고 있다.

상기와 같은 상황에서 발생된 파동은 진동원으로부터 주변으로 전파되면서 인체 및 건축물 등에 피해를 유발하게 되며 중국적으로는 기하감쇄 및 내부감쇄 등의 과정을 거쳐 소멸하게 된다.

이하 본 연구에서 검토하고자 주요 과제들에 대한 기존 연구는 다음과 같이 요약된다.

2.2 진동추정에 관한 기존방식 검토

전파된 진동의 크기는 이론적으로 진동원이 갖고 있는 에너지에 비례하고 거리의 제곱에 반비례하나, 현실적으로는 지반의 충격 흡수성, 탄성과 속도와 매질의 밀도 등으로 표현되는 임피던스 등에 따라서도 크게 달라지게 된다. 특히, 충격에 의해 발생하는 진동의 크기 자체가 지반의 특성에 따라 달라질 수 있는 근본적 문제도 있다 할 것이다.

따라서, 이러한 지반의 특성 등이 고려되지 않은 상태에서 특정 수식을 적용하여 추정된 진동의 특성치에 큰 의미를 두기는 어렵다. 그러나 현실적 제약으로 진동 추정치를 보조적 수단으로 사용하는 것이 불가피한 경우가 있으며, 다음은 이와 관련한 기존의 연구 결과를 요약한 것이다.

2.2.1 발파진동

진동과 관련된 변수의 차원해석과 발파진동의 측정경험 등을 토대로 몇 가지 발파진동 예측식이 제시되어 있다.

발파진동의 크기 즉, 속도성분을 표시하는 방법이 학자마다 조금씩 다르기 때문에 아직 이론적 전개가 완전하다고 보기는 어렵지만, 현재 국·내외로 가장 많이 적용하고 있는 경험식은 미 광무국(USBM)에서 발표한 식(2.1)이라 할 수 있다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^{-n} \quad (2.1)$$

- 여기서 V : 발파 진동속도 (cm/sec)
- D : 폭원으로부터의 이격거리 (m)
- W : 지발당 최대장약량 (kg)
- K : 자유면의 상태, 화약의 종류, 압질 등에 따른 상수
- n : 감쇄지수
- b : 장약지수

상기 식에서 거리와 지발당 장약량의 비(D/W^b)를 환산거리(Scaled Distance : SD)라 하고, $b=1/2$ 이면 자승근 환산거리(Square Root Scaled Distance : SRS), $b=1/3$ 이면 삼승근 환산거리(Cube Root Scaled Distance : $CRSD$)라 한다.

발파작업에 있어서는 대상지역에서 미리 시험발파를 실시하여 입지상수인 K 와 n 의 값을 결정하는 것이 중요한데, 시험발파에서 얻어진 자료들을 회귀분석하기 위해 식(2.1)의 양변을 log화하면 식(2.2)와 같이 되고, Log-Log Scale 좌표 상에 X 축에 SD 를 Y 축에 V 값을 취함으로써 기울기 $-n$ 값과 절편 K 를 가지는 직선을 나타낼 수 있으며 이를 회귀직선이라 한다.

이 식은 식(2.3)과 같은 단순선형회귀모형을 따르게 된다.

$$\log V = \log K - n \cdot \log \left(\frac{R}{W^b} \right) \quad (2.2)$$

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + e_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2.3)$$

여기서 e_i : 오차, n : 자료의 개수, Y_i : 자료의 y 값, x_i : 자료의 x 값

위의 단순모형에서 미지의 직선관계를 나타내는 $Y = \alpha + \beta x$ 를 모회귀직선(母回歸直線, Population regression line)이라고 하며, 모회귀직선을 생성할 때 발생하는 오차(e)들의 제곱합을 최소로 하게 하는 추정방법을 최소제곱법(Method of least squares)이라고 한다.

최소제곱법으로 구해진 모회귀직선의 계수인 α, β 와 n, K 는 식(2.4)와 같은 관계를 가지게 된다.

$$K = 10^\alpha, \quad n = \beta \quad (2.4)$$

이러한 방법으로 산출된 발파진동식에서는 자료의 50%가 진동식의 윗부분에, 나머지 50%는 진동식의 아랫부분에 위치하게 된다. 즉, 50% 신뢰도를 가지는 진동식이 산출되어지는 것이다. 그러나 안전성과 신뢰도를 높이기 위해서는 자료의 95%를 대표할 수 있는 식, 즉 95% 신뢰도의 발파진동식을 산출하는 것이 필요하다. 이를 위해 위에서 구해진 회귀직선식의 기울기(β)를 동일하게 한 상태에서 y 절편(α)를 이동시켜, 새로운 y 절편을 계산하여 구할 수 있으며, 이 값을 산출하는 방법은 다음과 같다.

절편 α 의 표준오차(SE)는 식(2.5)와 같이 계산된다.

$$SE = \left(\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^{-2}}{\sum x^2 - (\sum x)^2}} \right) \cdot \sigma \quad (2.5)$$

식(2.5)에서 σ 는 오차항의 표준편차로 식(2.6)과 같이 구해진다.

$$\sigma^2 = \left[(\sum y^2) - \frac{(\sum y)^2}{n} - \frac{\left((\sum xy) - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n} \right)^2}{(\sum x^2) - \frac{(\sum x)^2}{n}} \right] \times \frac{1}{n-2} \quad (2.6)$$

이 때 절편 α 는 t 분포를 따르며, 95% 신뢰 값은 식(2.7)과 같다.

$$\alpha(95\%) = \alpha + t_{\alpha}(n-2) \times SE \quad (2.7)$$

위 식에서 $t_{\alpha}(n-2)$ 는 t 분포 표에서 자유도가 $n-2$ 이고 신뢰구간이 $(100-\alpha)\%$ 인 경우의 값을 나타낸다. 이때 구하고자 하는 신뢰 값이 95%이므로 α 는 5%값이 된다.

이와 같은 이론을 근거로 시험발파를 통해 얻은 계측자료를 회귀분석함으로써 발파진동 전파 추정식을 산출할 수 있으며, 이를 근거로 발파진동허용수준에 따라 보안물건과 이격거리별 지발당장약량을 기준으로 발파설계를 수행하게 되며 역으로 이 식을 인용하여 발파 진동속도를 예측할 수도 있다.

한편, 우리나라 국토해양부(구 건설교통부)에서도 발파진동 예측식을 제안한 바, 이는 전술한 미광무국(USBM)에서 발표한 식을 근간으로 하고 있으며, 효율적인 설계추진을 위해 예측진동을 중심으로 설계단계에서 제시된 발파진동 전파 추정식이라 할 수 있다.

국토부는 2003년 2월 암발파 설계 및 시험발파잠정지침(안)을 통하여 $K=160$, $n=-1.6$ 을 사용한 신뢰도 75%의 식(2.8)을 1차 발표하였다.

$$V=160 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.60} \quad (2.8)$$

이어 2006년 12월에는 국내의 지반매질 특성 반영에 의한 신뢰도 향상을 위해 국토부 산하 각 지방청에서 발주한 국내 도로공사 현장의 실 계측 자료로부터 구한 $K=200$, $n=-1.6$ 을 사용한 신뢰도 84%의 식(2.9)를 “도로공사 노천발파 설계·시공 지침”에 수록하여 발표하였다.

$$V=200 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.60} \quad (2.9)$$

이로써, 노천 암발파 현장에서 증가되고 있는 발파진동에 의한 분쟁을 줄이고 암발파 설계 및 시공시 혼선을 방지하여 일관된 과업수행이 이루어지도록 하기 위한 표준 발파패턴 계획 과정이 어느 정도 제시되었다고 볼 수 있으며, 해당 식이 상당히 많은 실측 데이터를 근거로 하고 있다는 점에서 안전 측면에서의 신뢰도 역시 비교적 높은 것으로 평가되고 있다.

다만, 이러한 식들은 사전 발파설계 단계에서 주변에 미칠 수 있는 피해를 예방하기 위한 차원에서 제안된 것으로, 사후 환경분쟁사건이 발생된 상황에서 발파진동을 추정하기 위한 자

료로 활용하기 위해서는 여러 차원에서의 주의가 요망된다.

한편, 발파의 경우는 이상과 같은 진동속도 추정식들이 국내외적으로 다수 제안되어 있으나, 발파 시의 진동레벨과 관련된 연구는 거의 이루어지지 않은 상태인 바, 지금으로서는 우선 발파 진동속도를 추정한 후 단위환산식을 인용하여 진동레벨을 평가하는 것이 현실적이라 사료된다.

2.2.2 건설장비 진동

건설장비에 의한 진동은, 발파의 경우와 달리 진동레벨의 발생수준에 관해서는 어느 정도 성과물이 제시되어 있는 상태이나[표(2.2.1) 참조], 진동속도와 관련한 연구는 매우 미흡한 실정인데, 아래에 이에 관한 기존 연구결과를 소개하기로 한다.

식(2.10)은 항타작업 시 발생하는 진동을 에너지의 관점에서 환산거리로 일반화시킨 추정식을 나타낸 것으로, Wiss(1967)와 Attewell and Farmer(1973) 등에 의하여 제안되었다. 이는 앞서 서술한 발파진동에 있어서의 무차원화된 변화량을 묘사하기 위한 방법과 동일한 개념에 근거한다.

$$V = K \left(\frac{R}{E^{1/2}} \right)^n \quad (2.10)$$

여기서, V : 최대 진동속도(Peak particle velocity)

R : 이격거리

E : 충격에너지

K, n : 경험적 상수

충격에너지 E 는 램이나 햄머의 낙하충격에 의한 위치에너지로 식(2.11)에 의해 구할 수 있다.

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (2.11)$$

여기서, E : 충격에너지(Joule)

m : 램 또는 햄머의 중량(kg)

g : 중력가속도(m/sec²)

h : 낙하높이(m)

항타장비로부터 발생하는 진동은 장비의 중량, 타격속도, 타격진동수, 파일의 형태, 주변지반과 하부지반, 파일의 단면적, 파일의 직립정도, 그리고 타격 시의 편심도 등에 영향을 받게 된다. 아울러, 항타 진동은 전파되는 지반의 토질에 따라 그 전파 양상이 달라지는데, 그 예를 [그림 2.2.1]과 [그림 2.2.2]에 제시하였다. 항타에 의한 지반진동의 주파수 범위는 보통 2~15 Hz 정도이며, 발파에 의한 주파수보다 훨씬 낮다고 할 수 있다.

항타나 동다짐과 같은 건설장비에 의한 진동 역시 지반에서의 흡수성이나 탄성파의 속도와 매질의 밀도로서 표시되는 임피던스 등에 따라 그 전파양상이 크게 달라지므로, 지반특성이 고려되지 않은 임의의 추정식을 특정상황에 적용하는 것은 무리가 있다.

그러므로, 건설장비에 의한 진동속도의 추정 역시 발파진동의 경우와 마찬가지로 실 계측을 우선으로 하며, 충격시험 등으로 먼저 지반진동의 특성을 구한 뒤 그 결과를 참조하여 진동속도를 추정하는 것이 바람직하다.

[그림 2.2.2], [그림 2.2.3], [그림 2.2.4]에 “거리 및 환산거리에 따른 건설장비 진동의 변화”와 관련한 국외 연구결과를 수록하였으며, 표(2.2.2)에는 주요 건설장비 사용 시 진동속도를 추정하기 위한 국내 연구결과가 소개되어 있다.

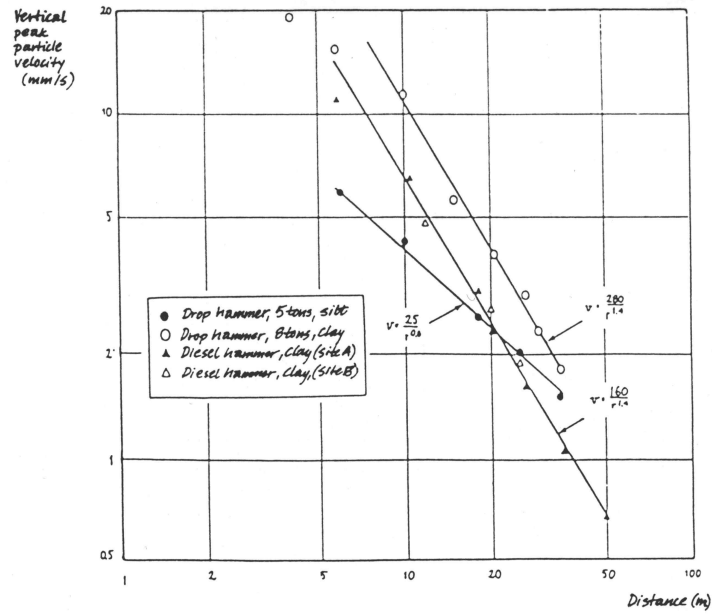
전술한 바와 같이 국내의 경우 건설장비를 대상으로 진동레벨의 수준을 추정한 자료는 근래에 들어서 식(2.12)와 같이 일부 제시되고 있으나(2007년 11월 연구기관 한국환경정책·연구평가원), 진동속도를 평가한 자료는 거의 없는 실정인 바, 이와 관련한 연구가 필요한 상황이라 하겠다.

$$\begin{aligned}
 VL_1 &= VL_o - 20 \cdot \text{Log}(r/r_o)^n \\
 VL_2 &= 0.98 \cdot VL_1 - 1.35
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

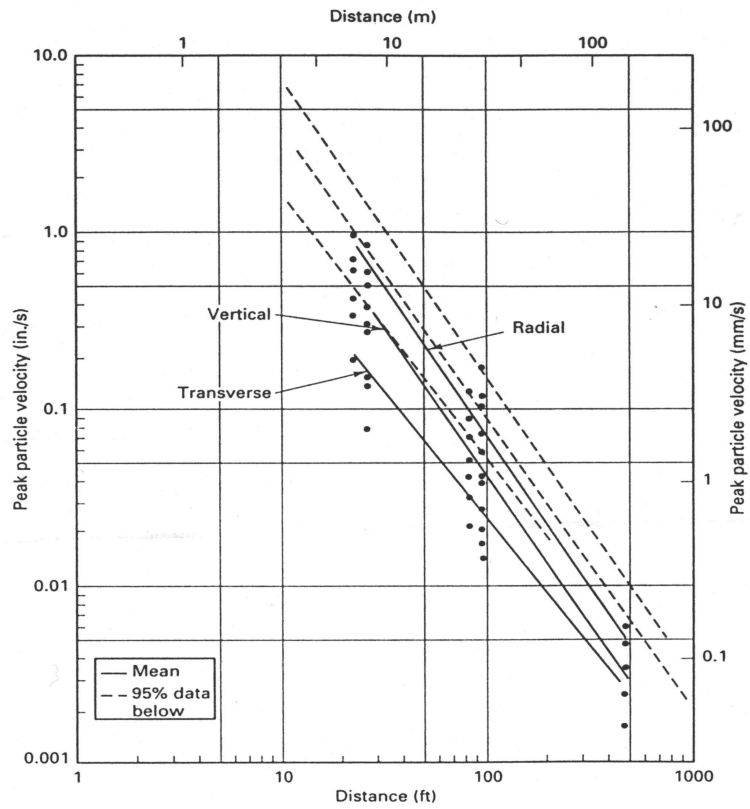
- 여기서 VL_1 : 진동 거리감쇄식의 적용을 통한 r 만큼 이격된 지점의 진동레벨 [dB(V)]
 VL_2 : 건설장비 진동의 예측치와 실측치의 분포를 통한 보정된 r 만큼 이격된 지점의 진동레벨 [dB(V)]
 VL_o : 진동원과 r_o 만큼 이격된 지점의 진동레벨 [dB(V)]
 r : 진동원과 예측지점까지 이격거리(m)
 r_o : 진동원과 기준 측정지점까지 이격거리(7.5m, 15m)
 n : 기하 감쇄정수(평균값 : 0.81)

표 2.2.1 건설장비에 의한 진동레벨 평가사례

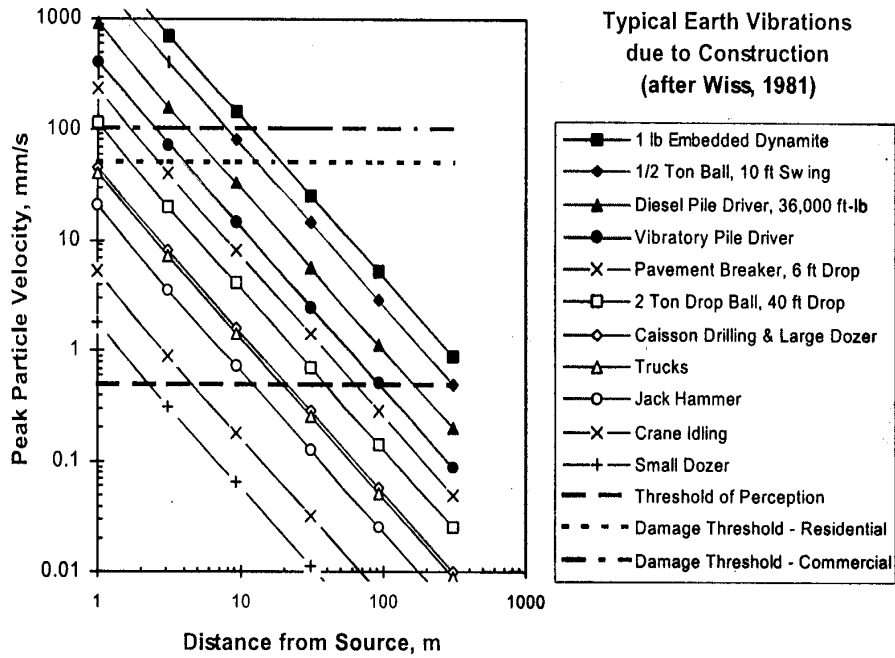
| 공 종 | 기계 | 동력(HP) | 가동상태 | 이격거리별 진동도, <i>dB</i> V | |
|-----------|----------|---------|--------|------------------------|-----------|
| | | | | 7.5m(대수평균) | 15m(대수평균) |
| 지반정지공사 | 굴삭기 | 75미만 | 무부하 | 36.7 | 35.6 |
| | | 75-140 | 무부하 | 33.5 | 31.4 |
| | | 140-280 | 무부하 | 40.5 | 38.7 |
| | | | 작업 | 39.9 | 21.3 |
| | 280이상 | 무부하 | 34.6 | 28.6 | |
| | | 불도저 | 50-240 | 무부하 | 38.9 |
| | 작업 | | | 55.4 | - |
| | 로우더 | 140이상 | 주행 | 37.9 | 35.5 |
| | 그레이더 | 120-170 | 작업 | 36.6 | 30.5 |
| | 탠덤 로울러 | 75이상 | 작업 | 34.6 | 34.0 |
| | 진동 로울러 | 75이상 | 무진동작업 | 36.1 | 21.7 |
| | | | 진동작업 | 73.8 | 70.5 |
| | 타이어 로울러 | 75이상 | 작업 | 26.3 | 27.3 |
| | 탐핑 로울러 | 75이상 | 무진동작업 | 42.9 | 33.5 |
| 진동작업 | | | 71.7 | 53.2 | |
| 범면다짐기 | 180 | 무부하 | 45.3 | 38.1 | |
| | | 작업 | 66.5 | 59.9 | |
| 기초공사 | 어스오거 | - | 무부하 | 45.9 | - |
| | | | 작업 | 61.1 | 53.0 |
| | | | 항타 | 54.7 | 52.4 |
| | 항타기 | | 작업 | 73.9 | 69.6 |
| | 진동항타기 | | 작업 | 67.9 | 61.2 |
| | 소구경 천공기 | | 작업 | 48.7 | 42.0 |
| | 천공기 | | 작업 | 44.6 | 27.3 |
| 콘크리트공사 | 콘크리트 펌프카 | 305-340 | 공회전 | 26.2 | 20.1 |
| | | | 무부하 | 29.9 | 15.4 |
| | | | 작업 | 33.3 | 26.1 |
| | 콘크리트 피니셔 | | 작업 | 33.8 | 27.5 |
| 포장공사 | 아스팔트 피니셔 | | 무부하 | 25.4 | 27.1 |
| | | | 작업 | 32.6 | 32.4 |
| 파괴 및 해체공사 | 브레이커 | 500kg미만 | 작업 | 57.9 | 45.9 |
| | | 500kg이상 | 무부하 | 37.8 | 15.1 |
| | | | 작업 | 68.4 | 60.0 |
| 기타 | 크레인 | - | 무부하 | 27.2 | 20.0 |
| | | | 작업 | 31.4 | 24.0 |



[그림 2.2.1] 향타에 의한 점토와 실트질 지반에서의 진동속도 감소
(Martin, 1980)



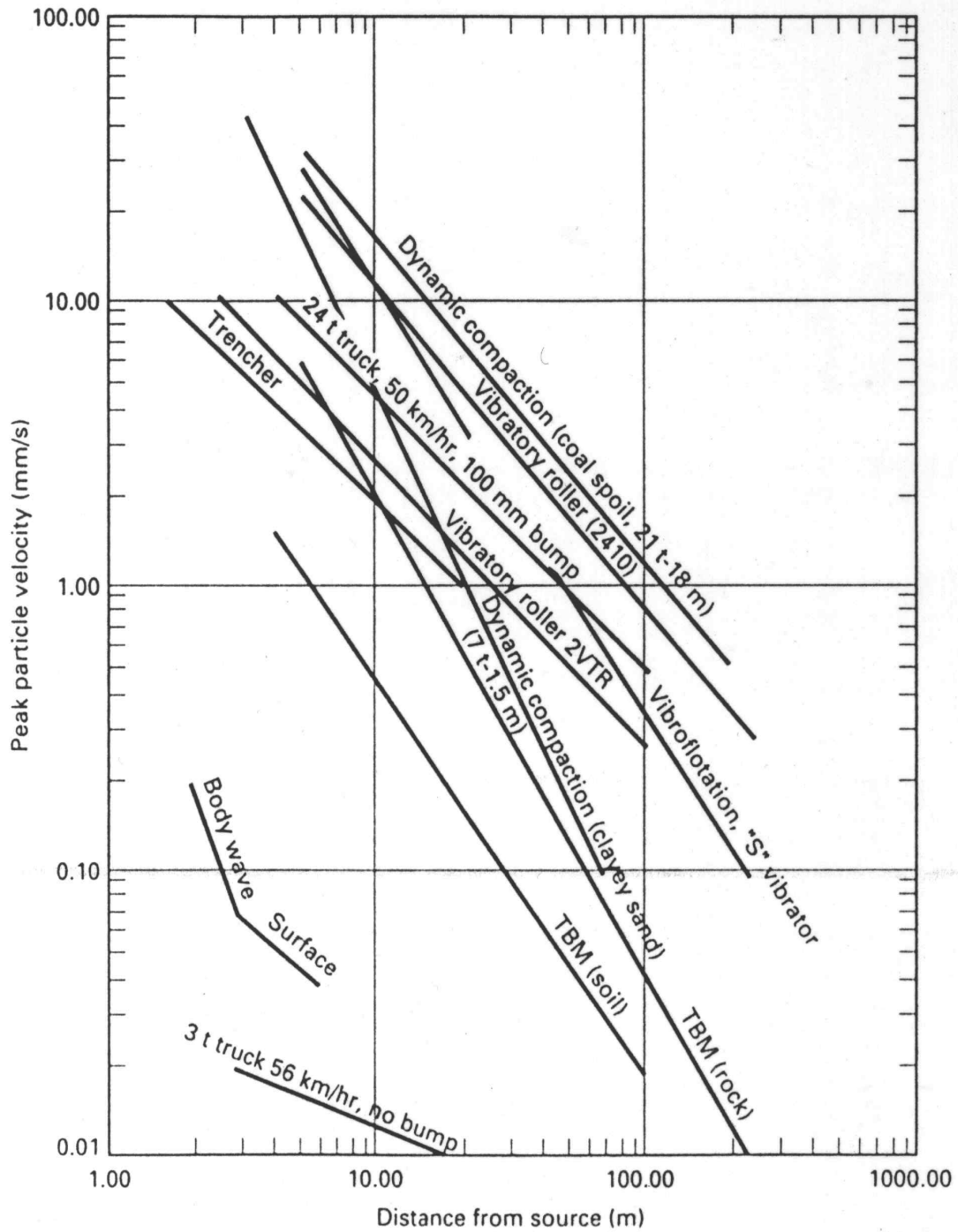
[그림 2.2.2] 모래와 자갈지반에서 H파일 향타에 의한 진동속도의 거리 감쇄
(Phoenix, MKT 디젤햄머)



[그림 2.2.3] 거리에 따른 각종 건설장비의 진동속도 감소(Wiss)

표 2.2.2 건설장비에 의한 진동속도 추정식

| 제안자 | 추정식 | 비 고 |
|------------------|--|--|
| 대한주택공사 (1990) | $V = 50.55 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.54}$ | 낙하물 충격진동 (v=mm/s, E=t.m, R=m) |
| Mayne | $V = 15 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.7}$ | 낙하물 충격진동 (v=mm/s, E=t.m, R=m) |
| 김중훈 (1997) | $V = 0.0045 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.15}$ | 철추의 자유낙하에 의한 낙추진동 화강편마암, (v=mm/s, E=Joule, R=m) |
| 김남수 (1999) | $V = 87 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.3}$ | 경부고속철도 3공구 건설현장 DHK 7 유압햄머(v=mm/s, E=t-m, R=m) |
| 최신훈 (1999) | $V = 22.43 X^{-0.85}$ | 디젤향타기, (V=cm/s, X=m) |
| | $V = 391.57 X^{-1.887}$ | 유압향타기, (V=cm/s, X=m) |
| | $V = 9.31 X^{-1.09}$ | 오거보오링, (V=cm/s, X=m) |
| | $V = 0.0004 X^2 - 0.066 X + 2.806$ | SIP공법 향타기, (V=cm/s, X=m) |
| 박현성 (2001) | $V = 0.152 \left(\frac{R}{\sqrt{E}} \right)^{-1.83}$ | 암반 굴착시의 브레이크 진동, 화강암 |



[그림 2.2.4] 거리에 따른 각종 건설장비의 진동속도 감소
(Dowding, from Construction Vibrations(Book, 1996))

2.3 진동레벨과 진동속도 환산에 관한 기존방식 검토

시간의 경과에 따른 진동의 변화를 표현하기 위하여 많은 척도들이 제안되어 있으며, 확정적 진동과 노이즈 진동, 정상 진동과 과도진동 등 그 특성에 따라 서로 다른 척도들이 사용되게 된다.

진동문제를 다루는데 있어 가장 중요한 부분의 하나는 바로 적정척도를 사용하는 것으로 이것은 인체 또는 건축물 등에 미치는 영향과 상응하는 정현함수를 찾는 문제라 할 수 있다. 아울러 적용하는 척도에 따라 서로 다른 차원을 갖는 스펙트럼이 형성되므로 상이한 척도를 사용하여 도출된 결과를 직접적으로 비교하는 것은 원칙적으로 불가능하다 할 것이다.

즉, 진동량의 단위인 cm, cm/s, cm/s² 등은 선형적 척도로서 주변 시설물에 미치는 물리적 영향을 평가하기 위해서는 그러한 척도의 적용이 가능하나, 인체감각에 미치는 영향은 전술한 선형적 척도로 평가할 수 없는 바, 대수척도인 가속도레벨 또는 수직보정 진동레벨 등을 사용하여 할 것이다.

다만, 현실적 필요성에 의해 진동레벨과 진동속도의 관계로부터 도출된 변환식이 일부 제시되어 있는데, 다음은 이와 관련한 기존의 연구 결과를 정리한 것이다.

◇ 진동레벨과 진동속도의 상관관계로부터 도출된 변환식의 예

아래와 같은 식들이 제안되어 있으며, 정확하게 일치할 수는 없다는 근본적 문제점은 지니고 있지만 현실적 필요성에 의해 널리 사용되고 있는데, 진동 유형 및 주파수 영역 등을 고려한 특정조건에서만 사용할 수 있으므로 그 적용에 주의를 요하는 것으로 알려져 있다.

- 江島 식(8Hz 이상의 정현진동의 경우)

$$VL = 20 \cdot \text{Log}V + 91$$

- Vanmarcke 식(발파진동의 경우)

$$VL = 20 \cdot \log(V) + 10 \cdot \log(1 - e^{-T_d/0.63}) + 85$$

여기서, VL : 진동레벨[dB(V)]

V : 진동속도(cm/sec)

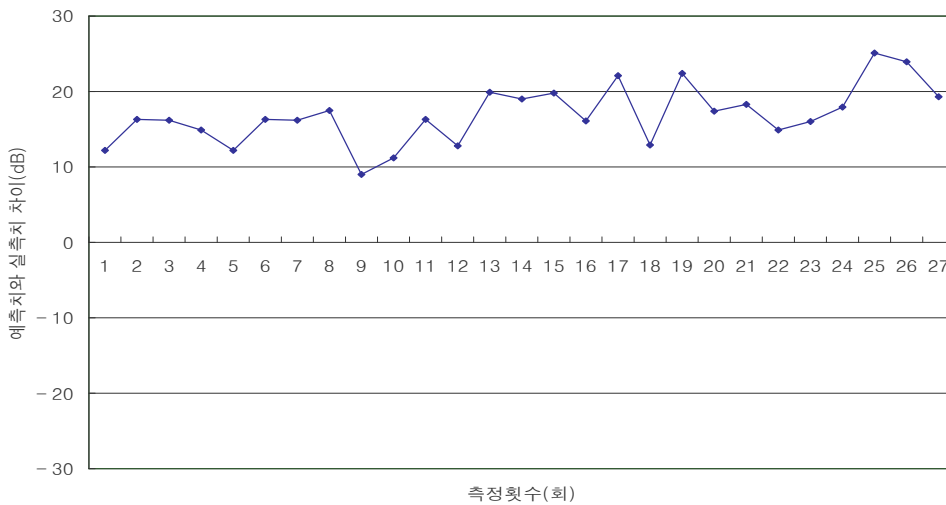
T_d : 진동과형의 연속시간(sec)

○ 한국환경정책·연구평가원(발파진동의 경우)

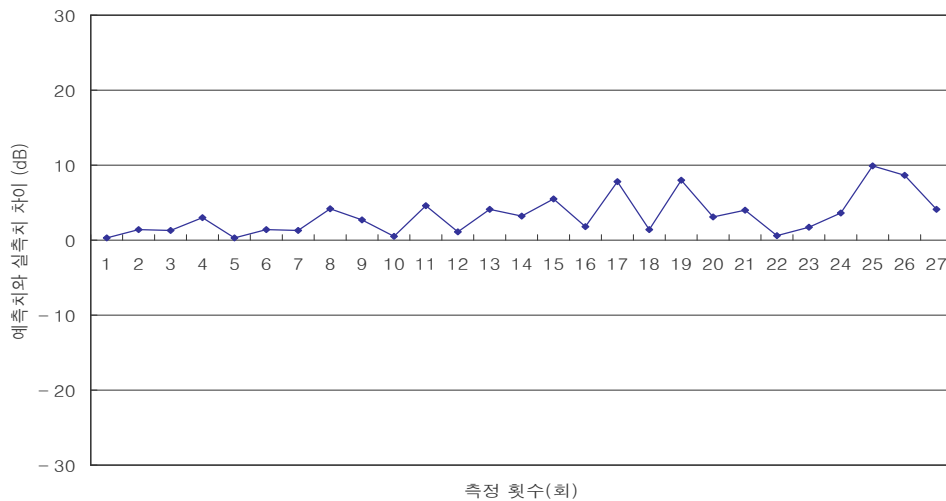
$$VL=13.54 \cdot \text{Log}V+72.33$$

여기서, V : 최대 발파 진동속도(cm/sec)

발파현장에서의 진동레벨 실측치와 기존 예측식에 의한 추정치의 비교에 관한 일례는 [그림 2.3.1]~[그림 2.3.2]와 같으며(건설현장의 소음·진동·분진 평가 및 저감대책에 관한 연구 - 발파공사를 중심으로 - 대한주택공사 주택연구소, 1999. 11), 그 결과 실측치와 비교하여 Vanmarcke 식은 0~10dB(V)의 편차를, 江島 식은 9~25dB(V)의 편차를 나타내는 것으로 검토되었다.



[그림 2.3.1] 江島 식에 의한 진동레벨 예측치와 실측치의 비교



[그림 2.3.2] Vanmarcke 식에 의한 진동레벨 예측치와 실측치의 비교

즉 상기 연구결과에 의하면, 흔히 사용되고 있는 江島 식의 경우는 정현진동에 근사하는 연속진동에 대하여는 상당 수준의 신뢰도를 갖는 것으로 평가되고 있으나, 충격진동의 경우는 진동레벨이 상당 수준 과대평가되는 것으로 나타나고 있다.

한편, Vanmarcke 식의 경우 발파 시의 충격진동에 대해서는 江島 식보다 작은 편차를 나타내는 것으로 검토되었다. 그러나, Vanmarcke 식의 적용을 위해서는 선행적으로 발파진동의 연속시간인 T_0 값을 구해야 하는데, 발파공사의 종류, 형식, 회수 및 지역 특성 등의 차이로 인해 그 값이 다양한 분포를 나타낸다는 점을 감안할 때, 과거 사건을 주 대상으로 하는 환경분쟁사건의 특성상 실제 적용에 상당한 문제가 있을 수 있다.

한국환경정책·연구평가원에서 제안한 진동레벨 환산식에서의 진동속도는 최대 발파 진동속도(실 벡터합 : true sum of particle velocity)로서, 그 결과는 인체감각 특성과 관련된 “V” 방향 성분 진동속도의 결과와 차이가 있을 수 있다.

이상과 같이, 기존 환산식들 각각에 대해 결과치의 오차, 적용의 제한성 등과 관련한 의문이 제기되고 있는 바, 이에 대한 검증이 요구되는 상황이라 하겠다.

2.4 발파음압과 소음레벨 환산에 관한 기존방식 검토

발파소음은 주로 발파원으로부터의 거리, 지발당장약량, 전색길이, 암질, 발파매트 사용여부 등에 영향을 받으며, 아울러 발파지점의 지형 및 온도, 풍속과 풍향 등의 기상조건 등도 큰 요인으로 작용하는 바, 그 예측에 상당한 어려움이 있는 것이 사실이다.

대표적인 발파소음(폭풍압) 예측식으로 국외의 경우 Siskind 식 및 SveDeFo 식이 있는데, Siskind 식의 경우는 발파원으로부터의 거리 및 지발당장약량을 제외한 다른 변수를 K 및 n 값으로 반영하고 있으며, SveDeFo 식의 경우는 K 값만을 반영하고 있는 상태이다.

Siskind 등에 의하면 발파음압의 전파와 관련하여 자승근환산거리보다 삼승근환산거리를 채택하여 추정하는 것이 바람직하다고 보고하고 있다.

한편, 발파음압을 인체감응에 대응하는 소음레벨로 환산하기 위해 다음과 같은 식들이 제시되어 있다.

$$P = K \cdot (D/W^{1/3})^n \quad SPL = 20 \cdot \text{Log}(P/P_0)$$

여기서 P : 폭원에서 D 만큼 이격된 지점에서 최대음압(P_a)

P_0 : 최저 가청음압 2×10^{-5} (P_a) L : 폭원으로부터 예측지점까지 거리(m)

W : 지발당 최대장약량(kg) n : 감쇄지수 SPL : 발파 음압레벨(dB)

○ 건설현장의 소음·진동·분진평가 및 저감대책에 관한 연구, 대한주택공사 주택연구소, 1999.11 SveDeFo)

- 소음레벨 = 음압레벨-12

국내학자들의 대표적인 이론식 [폭풍압 dB(L) 및 발파소음 dB(A)]

○ $dB(L) = 164.4 - 24 \cdot \text{Log}(D/W^{2/3})$ --- 산·학인을 위한 발파공학(기경철외 1인 저)
이 때, $dB(A) = dB(L) - 35$

○ $dB(L) = 151.9 - 19.6 \cdot \text{Log}(D/W^{2/3})$ --- 대한화약발파공학회지 논문(양형식)
이 때, $dB(A) = dB(L) - 32$

전술한 바와 같이, 발파소음은 여러 요인들로 인해 그 예측에 상당한 어려움이 있으며, 현장에서의 실측치와 추정치를 비교·검토한 기존 결과를 참조할 때 상당한 편차를 나타내고 있는 것으로 보고되고 있다. 또한, 발파음압을 소음레벨로 환산함에 있어서도 아직까지는 그다지 신뢰도가 높은 방식이 제시되지 않은 것으로 평가되고 있다.

그러한 상황 및 장비 보급현황 등 현재의 국내 실정을 종합할 때, 현 단계에서는 우선적으로 발파음압을 소음레벨로 환산하는 기법을 정립하고, 추후 발파조건 등을 근거로 발파음압을 추정하는 방안을 모색하는 것이 보다 현실적일 것으로 사료된다.

2.5 소 결

앞서 서술한 바와 같이, 기존 연구에 대한 검토 결과를 근거로 할 때, 현 시점에서 요구되는 주요 과제는 다음과 같이 요약되며, 이를 참조하여 본 연구의 주된 방향을 설정·진행하고자 한다.

1) 진동 추정의 신뢰도 문제

환경분쟁조정 업무의 특성상, 진동은 현장에서의 실 계측보다 기존 자료를 바탕으로 추정·평가하는 경우가 더욱 많을 수밖에 없는 실정이다.

아울러, 주로 인체에의 정신적 피해로 국한되는 소음과 달리, 진동의 경우 정신적 피해는

물론 주변 구조물에 대한 물적 피해로도 이어지게 되므로 사후평가에 있어서는 진동레벨과 함께 진동속도 양자에 대한 추정이 동시에 요구된다 하겠다.

이와 관련하여 우선 발파의 경우는, 일반적으로 시험발파 과정을 통해 해당 현장의 지반특성에 부합되는 진동속도 추정식들이 제시됨은 물론, 진동속도 추정을 위한 일반식들이 국내외적으로 다수 제안되어 있는 상황이다.

그러나, 발파에 따른 진동레벨 추정식에 대해서는 거의 연구가 이루어지지 않은 상태인 바, 이에 대한 보완이 필요한 상황으로 분석된다.

한편, 건설장비의 경우는 발파와 달리 진동레벨의 발생수준에 관해서는 어느 정도 성과물이 제시되어 있으나, 진동속도와 관련한 연구는 매우 미흡한 실정인 바, 이와 관련한 연구가 요망되는 상황이라 하겠다.

특히, 근래 개발·사용되고 있는 건설장비를 대상으로는 국내외적으로 진동속도 추정방식이 거의 제시되어 있지 않은 상황이므로 이에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

2) 진동단위 간 환산의 신뢰도 문제

진동과 관련한 분쟁사건의 처리에 있어서 인체에 대하여는 진동레벨, 주변 건물에 대하여는 진동속도 척도로써 평가하는 것이 합리적이다.

다만, 과거의 한정된 자료만을 근거로 진동레벨과 진동속도 단위로 구분하여 평가하기에는 상당한 어려움이 있으므로 양자간의 환산식을 사용하는 것이 불가피할 경우도 **많다고** 할 것이다.

그러나, 앞서 살펴본 바와 같이, 흔히 사용되고 있는 江島 식의 경우는 정현진동에 근사하는 연속진동에 대하여는 상당 수준의 신뢰도를 갖는 것으로 평가되나, 충격진동의 경우는 진동레벨이 과대평가되는 경향을 갖는다는 보고도 이에 대한 검증이 요구된다 하겠다.

또한, Vanmarcke 식 역시 발파 시의 충격진동에 대해서는 어느 정도 신뢰도를 확보하는 것으로 평가되나, 그 적용성에 따른 문제와 함께 추가 검증이 **요구되는** 실정이라 하겠다.

3) 발파소음 환산의 신뢰도 문제

국내 발파현장에서는 사용기기의 특성상 보통 음압 Peak치인 dB(L)이 측정치로서 제시되고 있으나, 발파소음에 따른 정신적 피해를 평가하기 위해서는 상기 값을 인체 감응도에 부합하는 소음레벨 dB(A)로 변환하는 조치가 요구된다.

이를 위해 SveDeFo 환산식, 기경철 외 1인 환산식, 양형식 환산식 등이 인용되고 있으나,

실제와 상당한 차이를 나타내는 경우가 많아 발파소음에 따른 정신적 피해를 평가하는데 문제가 있는 상황인 바, 추가 연구가 요구되고 있다.

3. 진동속도 추정방안

3.1 개요

각종 건설현장에서 폭약을 사용한 발파작업이나 건설기계로 작업을 하는 동안 이들로부터 발생한 진동은 매질을 따라 다양하게 변화하면서 주변으로 전파된다.

특히, 발파에 의한 피해로는 응력파에 의한 지반진동 및 발파풍압(공중충격파), 비석 등을 들 수 있으며, 폭원과 어느 정도 이격되어 위치하는 시설물에 발생하는 피해는 주로 지반진동에 기인한다.

일반적으로 발파진동은 인위적으로 발생하는 진동 중에서 주변에 미치는 영향도가 가장 큰 것으로 평가된다.

주변으로 전파된 진동의 크기는 이론적으로 진동원이 갖고 있는 에너지에 비례하고 거리의 제곱에 반비례하나, 현실적으로는 지반의 충격 흡수성, 탄성과 속도와 매질의 밀도 등으로 표현되는 임피던스 등에 따라서도 크게 달라진다. 특히, 충격에 의해 발생하는 진동의 크기 자체가 지반의 특성에 따라 달라질 수 있는 근본적 문제도 있다.

이러한 지반의 특성 등이 고려되지 않은 상태에서 특정 수식을 적용하여 추정된 진동의 특성치에 큰 의미를 두기는 어렵다. 그러나 현실적 제약으로 진동 추정치를 보조적 수단으로 사용하는 것이 불가피한 경우도 많다.

따라서 기존 자료의 수집과 현장에서의 계측·실험을 통해 실측치를 다수 확보한 후 이를 회귀분석 함으로써 각 진동 발생원(발파 및 주요 건설장비)별로 진동속도를 고찰하여 추정치의 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다.

3.2 발파진동 계측 및 추정

암반 내 밀폐된 상태에서 폭약이 폭발하면 5~20만 기압의 충격하중이 발생하며, 발생한 총 에너지 중 상당 부분은 암반을 파괴시키는데 이용되지만, 이 중 5~20%가 탄성파로 변화되어 진폭과 주기를 갖는 진동으로 지중이나 지표면을 따라 전파해간다.

발파에 의해 발생한 지반진동은 시간의 경과와 함께 그 크기가 변화되는데, 수학적으로는 시간에 따른 물체의 운동과 같은 방법으로 표현될 수 있으며, 물리적으로는 진동하는 매질의 변위(displacement : D), 입자속도(particle velocity : V), 가속도(acceleration : A) 성분과 주파수(frequency : f)로 표시될 수 있다.

발파진동의 전파특성에 영향을 미치는 주요조건은 두 가지(입지조건과 발파조건)로 크게 나

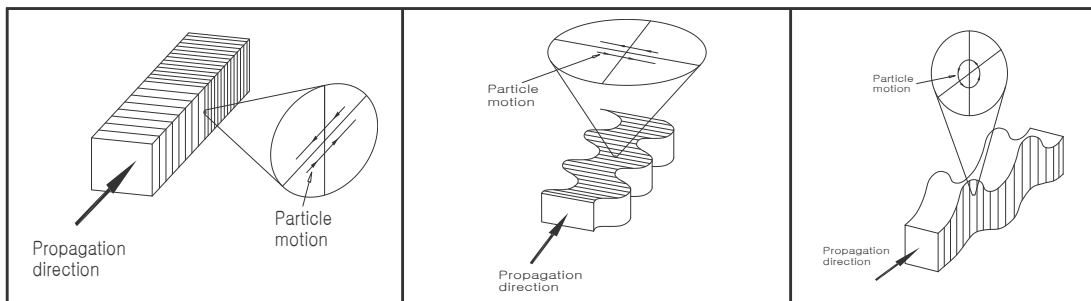
눌 수 있다.

입지조건으로는 발파대상 암반의 지질학적 특성과 역학적 성질 및 지형 등을 들 수 있으며, 발파조건으로는 사용하는 폭약의 종류, 지발당장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수와 발파공 간격, 폭원과 계측기간의 이격거리 등을 들 수 있다.

발파에 의해 발생하는 파들은 그림과 같이 크게 압축파(compressive wave), 전단파(shear wave), 표면파(surface wave)의 세 가지로 나눌 수 있다. 세 개의 중요 파형은 암석이나 토양 속을 진행하는 물체파(body wave)와 상부 지표면을 따라 전파하는 표면파의 두 종류로 나눈다. 이 때 폭원에서의 전달거리가 멀어지면 R로 표시되는 레일리파(Rayleigh wave)가 주를 이루나, 폭원과 짧은 거리에서는 물체파가 더욱 문제시되는데, 이는 다시 P로 표시하는 압축파(압축/인장)와 S로 표시하는 비틀림파(전단파)로 세분된다. 이러한 물체파들은 다른 암석, 토양층이나 지표면과 같은 경계면에서 전단 및 표면파가 생성된다.

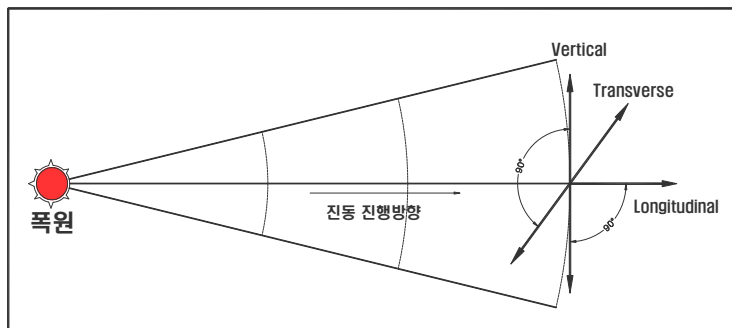
파동을 완전하게 설명하기 위해서는 세 방향의 직교성분 즉, 보통 수평이나 폭원으로부터 반경방향인 종방향 성분(longitudinal : L), 그리고 반경방향에 대해 직교하는 연직성분(vertical : V)과 횡방향 성분(transverse : T)을 측정하여야 한다.

특히, 발파 진동속도와 진동레벨과의 상관관계를 분석하는데 있어서는, 인체의 진동감각에 대해 보정하여야 하므로 “V”방향 성분의 진동이 중요하다.



물체파인 압축파(P로서 표기) 물체파인 전단파(S로서 표기) 표면파(Rayleigh 파)

파형에 따른 입자운동



파형의 3가지 방향성분

3.2.1 계측 일반사항

◆ 시험발파

본 시험발파는 폭원과의 이격거리와 지발당장약량 및 진동속도(PVS)와의 상호관계로 발파 진동속도 전파 추정식을 산출하기 위해 실시한다.

○ 암반조건

- 화강암질 등 다양
- 암석강도 : 약 850~1,320kg/cm²

○ 발파규모와 천공패턴 및 발파횟수

| 발파 패턴 (TYPE) | 지발당 장약량 (kg) | 공당 장약량 (kg) | 계단 높이 H(m) | 천공장 L(m) | 최소 저항선 B(m) | 공간격 S(m) | 전색 길이 (m) | 발파 횟수 (회) | 발파패턴 적용공법 |
|--------------|--------------|-------------|------------|----------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 2 | 0.250 | 0.250 | 1.60 | 1.80 | 0.60 | 0.75 | 1.505 | 10 | 정밀 진동제어 |
| 3 | 1.000 | 1.000 | 2.40 | 2.75 | 0.95 | 1.25 | 1.570 | 10 | 소규모 진동제어 |
| 4 | 1.600 | 1.600 | 2.65 | 3.10 | 1.15 | 1.50 | 2.340 | 8 | 중규모 진동제어 |
| | 2.400 | 2.400 | 2.90 | 3.35 | 1.35 | 1.75 | 2.210 | 8 | |
| | 3.200 | 3.200 | 3.10 | 3.65 | 1.50 | 1.95 | 2.130 | 8 | |
| | 4.000 | 4.000 | 3.40 | 3.95 | 1.60 | 2.10 | 2.050 | 6 | |

○ 사용 화약류 및 발파기




| 구 분 | 약 경 (mm) | 약 장 (mm) | 중량/본 (kg/EA) | 폭 속 (m/sec) | 폭발열 (kcal/kg) | 형 식 | 비 고 |
|----------------------------|----------|----------|--------------|-------------|---------------|--------|---------|
| 에멀전 계열 폭약 (NewMITE Plus-I) | 50 | 380 | 0.800 | 5700 | 880 | 지포장 | 408 kg |
| | 32 | 295 | 0.250 | | | | 62.5 kg |
| 전기식 뇌관 | - | - | - | - | - | MS 전기식 | 250개 |

○ 발파 진동속도 추정식 산출을 위해 회귀분석에 이용한 계측자료

- 총 261개(비정상적인 자료 제외시킴)

○ 발파 및 건설 진동속도 측정기 사양

- 본 과업수행 실험 중 진동속도 측정에 사용한 계측기 사양

| | | | |
|-----------|-------------------|---|---|
| 진 동 | 최소~최대 측정범위 | 0.127~254mm/sec |  |
| | Trigger Levels | 0.13~254mm/sec steps of 0.01mm/sec | |
| | 가속도 | 0.01~30g's calculated | |
| | 변 위 | 0.00254~38.1mm calculated | |
| 발파풍 "L" 형 | 측정범위 | 100~148 dB(L) | |
| | Trigger Levels | 100~148 in steps of 1 dB(L) | |
| 소음도 "A" 형 | 측정범위 | 50~110dB | |
| | Trigger Levels | 50~110dB in steps of 0.1dB | |
| 주파수 | 표본 추출률 | 1,024 samples/second, all channel, all record types | |
| | 주파수 응답 | Seismic and Linear Air 2~300Hz | |
| 파형 기록 | Record Modes | Manual, Single Shot, Continuous, Auto | |
| | Fixed Record Time | 1~10 sec, selectable 1 sec | |
| | Auto Record Time | 1~100, 300, 500 sec | |

○ 발파 진동속도 계측(지반조건 : 암반)



○ 현장 시험발파 후 암반상태



3.2.2 현장 계측자료 회귀분석을 통한 추정방식 제안

1) 현장 시험발파 결과식

(1) 발파진동 전파 추정식의 형태

폭원과 계측기간의 이격거리를 변수로 한 환산거리를 독립변수로 하고, 최대 진동속도인 PVS(실 벡터합 ; true vector sum of particle velocity)를 종속변수로 하여 발파진동의 크기를 예측할 수 있는 환산식의 기본 형태는 다음과 같다.

$$V=K \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^n$$

여기서 V : 지반진동속도(cm/sec)

n : 감쇄지수

K : 발파진동 입지상수

W : 지발당장약량(kg)

D : 폭원과 측정점간의 거리(m)

(2) 과업수행 시험발파 결과식

에밀전 계열 폭약을 사용한 시험발파를 실시하였으며, 그 결과로부터 얻은 281개의 계측자료를 회귀분석한 결과는 다음과 같다.

- 그림은 지반진동속도(PVS)와 자승근환산거리와의 관계
- 상관계수(R) : 0.940
- 표준오차(S.E) : 0.194046

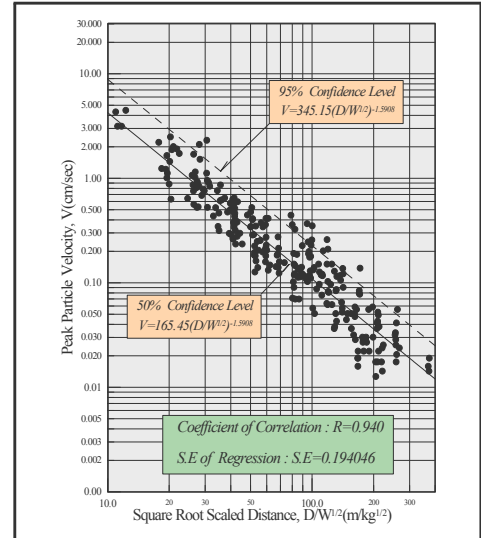
◆ 발파 진동속도 전파 추정식(자승근 환산식)

- 신뢰수준 50%에 해당하는 식

$$V_{50} = 165.45 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

- 신뢰수준 95%에 해당하는 식

$$V_{95} = 345.15 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908} \quad (3.1)$$



진동속도와 자승근환산거리와의 관계

2) 발파진동 전파 추정식의 검토

○ 지발당장약량과 폭원과의 이격거리를 기준으로 각 방위별 예측지점(D)에서의 진동속도를 과업수행 결과식 (3.1)을 이용하여 예측할 수 있다.

○ 과업수행 결과식을 이용함에 있어서 진동 예측지점이

- 자유면 배면에 위치하면 상기 식을 그대로 적용
- 자유면 측방에 위치하면 K값을 상기 식의 약 81% 적용
- 자유면 전방에 위치하면 K값을 상기 식의 약 62% 적용

○ 국토해양부에서는 실시설계 단계에서 다음과 같은 식을 인용하여 진동속도를 예측하고 있다.

$$V = 200 \cdot (D/W^{1/2})^{-1.600}$$

○ 본 과업 시험발파 결과식과 국토해양부 실시설계 기준식을 비교하면 다음과 같다.

※ 발파진동 성분에 따라 추정식의 K값과 n값이 달라지나, 본 과업수행 결과식에서는 자유

면 배면(후방)에서 측정한 PVS를 기준으로 회귀분석한 K값을 사용하였으며, 배면에서 PPV의 K값은 PVS(true vector sum of particle velocity)의 약 90%, V방향 성분은 약 80% 수준이므로 K값만 조정하여 적용하도록 한다.

| 예측지점 과의 이격거리 $D(m)$ | 지발당 최대 장약량 $W(kg)$ | 예측 진동속도 (cm/sec) | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 국토 해양부 | 과업수행 결과 | | | | | | | | |
| | | | PVS | | | PPV | | | V | | |
| | | | 배면 | 측방 | 전방 | 배면 | 측방 | 전방 | 배면 | 측방 | 전방 |
| 20 | 0.5 | 0.95 | 1.69 | 1.27 | 1.05 | 1.52 | 1.23 | 0.94 | 1.35 | 1.09 | 0.84 |
| 50 | 1.0 | 0.38 | 0.68 | 0.55 | 0.42 | 0.61 | 0.49 | 0.38 | 0.54 | 0.44 | 0.34 |
| 100 | 1.6 | 0.18 | 0.33 | 0.27 | 0.21 | 0.30 | 0.24 | 0.19 | 0.26 | 0.21 | 0.16 |
| 200 | 2.4 | 0.08 | 0.15 | 0.12 | 0.09 | 0.13 | 0.11 | 0.08 | 0.12 | 0.10 | 0.07 |

○ 상기 표에서와 같이 진동 성분과 진동 전파방향에 따라 그 값이 차이를 보이고 있다.

○ 현장마다 발파진동전파 추정식의 K값과 n값이 다른 바, 이는 현지 암석의 종류와 전파되는 암반의 상태, 지형조건 및 지질구조 등이 상이한데 그 원인이 있으므로 본 과업수행 결과식을 인용하여 모든 현장의 진동속도를 예측하는 데에는 한계가 있다.

따라서, 현장에서 직접 실시한 시험발파 결과식을 인용하되 회귀분석에 적용한 진동속도 성분을 확인하여 필요로 하는 진동성분에 대한 K값으로 변환하고 이를 예측지점의 방향에 따라 K값을 다시 변환하여 진동속도를 예측하는 것이 합리적이라 판단된다.

한편, 현장에서 시험발파를 실시하지 않은 경우에는 본 과업수행 결과식을 필요한 진동성분과 예측지점의 방향에 따라 적절하게 적용한다.




3.3 건설장비 진동계측 및 추정

3.3.1 계측 일반사항

1) 사용계측기

본 실험에 사용한 진동속도 계측기는 발파진동 측정에서의 기기와 동일한다.

2) 계측기 설치 및 계측

| 건설장비 종류 | 계측기 설치 및 측정전경 | 건설장비와 이격거리 | 계측 자료 수 | 설치장소 지반조건 | 설치방법 |
|---------|--|------------------|---------|-----------------------|---------------------------|
| 진동 로울러 |  | 7, 7.5, 15m | 184 | 진동 밀실 다짐한 노면 | 진동속도 및 진동레벨측정기 동일한 위치에 설치 |
| 바이브로 햄머 |  | 7.5, 15.0, 30.0m | 179 | 파일링 작업장 주변 풍화토 및 토사지반 | |
| 브레이커 |  | 7.5, 15.0m | 120 | 모암파쇄 작업장 주변 토사지반 | |

3) 건설장비 및 측정 전경

○ 건설장비

| 진동 로울러 | 바이브로 햄머 | 브레이커 |
|---|---|---|
|  |  |  |

○ 건설장비 사양

| 진동 로울러 | | 바이브로 햄머 | | 브레이커 | |
|---------|---------------------------------|---------|------------|---------|----------------------------|
| 중량 | 5,700kgf | 충돌 에너지 | 6,080 Jule | 작동유압 | 180~240kgf/cm ² |
| 고진폭/저진폭 | 0.0017/0.0008(m) | 램 중량 | 4,000kgf | 로드직경 | 158mm |
| 진동수 | 33 Hz | 램 스트로크 | 0.19~1.52m | 브레이커 중량 | 2,650kgf |
| 정지압 | 0.63~0.69(kgf/cm ²) | | | 스트로크 | 0.05m |

3.3.2 현장 계측자료 회귀분석을 통한 추정방식 제안

현장 실험에서, 각 건설장비의 작업에 적합한 적정출력으로 작업하는 동안 얻은 자료를 회귀분석 하였으며, 건설장비와의 자승근환산거리($r/E^{1/2}$)에 따른 진동속도(“V”방향 성분) 예측식은 다음과 같다.

- 진동 로울러

$$V_V = 0.321 (r/E^{1/2})^{-0.6624} \quad (3.2)$$

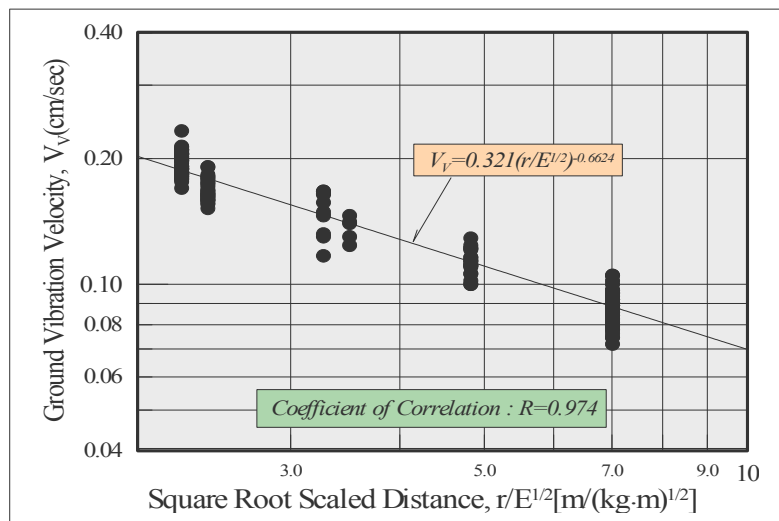
- 바이브로 햄머

$$V_V = 0.306 (r/E^{1/2})^{-0.720} \quad (3.3)$$

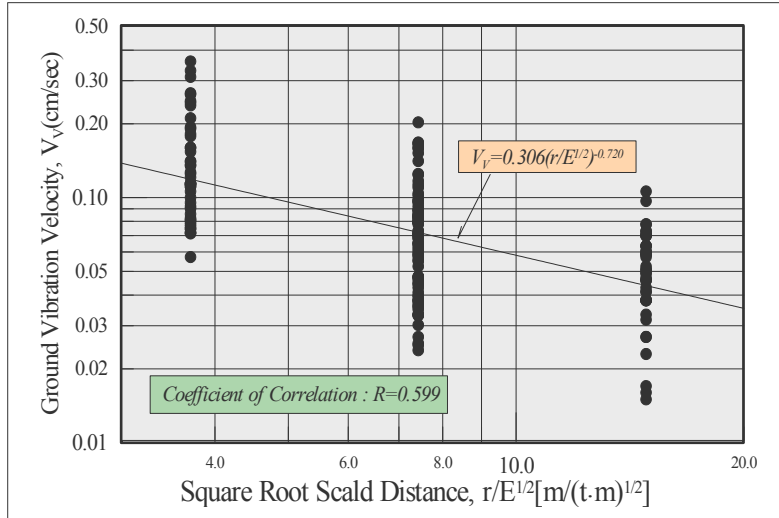
- 브레이크

$$V_V = 0.984 (r/E^{1/2})^{-1.372} \quad (3.4)$$

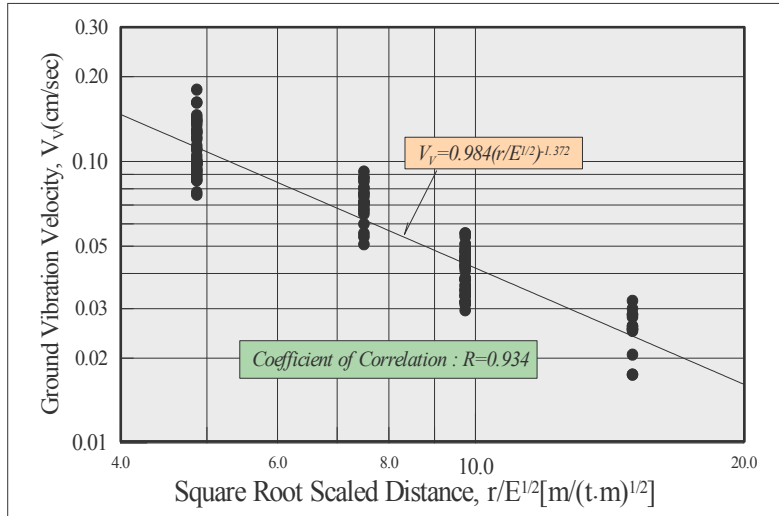
여기서 V_V : 연직방향의 진동속도(cm/sec), r : 건설장비와 이격거리(m),
 E : 충격에너지(kg · m), (t · m)



진동속도-자승근환산거리와의 관계(진동 로울러)



진동속도-자승근환산거리와의 관계(바이브로 햄머)



진동속도-자승근환산거리와의 관계(브레이커)

건설장비와 이격거리에 따른 예측 진동속도는 다음과 같이 산출된다.

()안의 수치는 실측한 진동속도 범위를 나타내고 있다.

| 환산거리 (m/\sqrt{E}) | 2.25 | 2.41 | 3.27 | 3.51 | 4.82 | 7.00 | 비 고 |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 진동 로울러 | 0.19 (0.17~0.23) | 0.18 (0.15~0.19) | 0.15 (0.13~0.17) | 0.14 (0.12~0.15) | 0.11 (0.10~0.13) | 0.09 (0.07~0.11) | 진동속도 (cm/sec) |

| | | | | |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------|
| 환산거리 (m/\sqrt{E}) | 3.50 | 7.50 | 15.00 | 비 고 |
| 바이브로 햄머 | 0.124 (0.0572~0.360) | 0.072 (0.0238~0.203) | 0.044 (0.015~0.106) | 진동속도 (cm/sec) |

| | | | | | |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| 환산거리 (m/\sqrt{E}) | 4.87 | 7.50 | 9.74 | 15.00 | 비 고 |
| 브레이크 | 0.112 (0.075~0.185) | 0.062 (0.05~0.093) | 0.043 (0.029~0.058) | 0.024 (0.018~0.032) | 진동속도 (cm/sec) |

환산거리에 따른 진동 감소율은 진동 로울러가 가장 낮고 브레이크가 가장 높았다.

이는, 진동 로울러의 경우 밀실하게 다진 노상을 따라 표면파가 직접 전파되는 상태에서 측정된 결과이나, 바이브로 햄머의 경우는 진동이 지중에서 물체파로 전파하다 지표면에서 표면파로 변화되어 전파되는 상태에서 측정된 결과이고, 브레이크의 경우는 암반을 따라 전파하던 진동이 이중매질인 토사부분으로 전달되면서 급격히 감소된 상태(본 실험에서는 브레이크로 암반파쇄 시 주변 토사 상부에 계측기를 설치하였음)에서 측정된 결과라는 사실에 기인한 것으로 사료된다.

즉, 상기의 결과는 각 장비가 해당 상황에서 적절한 출력으로 작업하는 동안 측정된 진동속도를 근거로 하는 바, 사용조건의 변화로 가동 출력의 변화가 있거나 또는 진동매질의 종류나 측정위치의 상태 등에 따라 예측 진동속도가 달라질 수 있으므로 그 적용에 주의를 요한다.

3.4 소결

1) 발파진동 추정

○ 과업수행 결과 발파진동 전파 추정식(신뢰수준 95%에 해당하는 식)

$$V_{PVS} = 345.15 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

○ PPV값 산출 시 K=310.64, V방향 성분값 산출 시 K=276.12를 적용하여 예측지점의 진동속도를 추정한다.

이때 진동 예측지점이

- 자유면 배면에 위치하면 추정된 값을 그대로 적용
- 자유면 측방에 위치하면 추정된 값의 약 81% 적용(K값 조정)
- 자유면 전방에 위치하면 추정된 값의 약 62% 적용(K값 조정)

○ 발파작업 현장에서 시험발파를 실시하지 않은 경우에는 상기 과업수행 결과식을 필요한 진동성분과 예측지점의 방향에 따라 적절하게 적용한다.

○ 현장별로 발파진동 전파 추정식의 K값과 n값이 다르게 나타났다. 이는 각 현장마다 암석의 종류와 전파되는 암반의 상태, 지형조건 및 지질구조 등이 상이한 것에 기인하므로 본 과업수행 결과식을 모든 현장에 인용하는 데에는 한계가 있다.

○ 따라서, 현장에서 시험발파를 직접 실시한 경우에는 시험발파 결과식을 인용하되 회귀분석에 적용한 진동속도 성분을 확인해야 하며, 필요로 하는 진동성분에 대한 K값의 비율에 의해 변환하고 이를 예측지점의 방향에 따라 K값을 다시 변환하여 진동속도를 예측하는 것이 합리적이라고 판단된다.

2) 건설장비 진동 추정

자승근환산거리로부터 진동속도(V_V)를 예측하기 위한 본 과업수행 결과식

○ 진동 로울러 : $V_V=0.321 (r/\sqrt{E})^{-0.6624}$

○ 바이브로 햄머 : $V_V=0.306 (r/E^{1/2})^{-0.720}$

○ 브레이크 : $V_V=0.984 (r/E^{1/2})^{-1.372}$

상기의 결과는 각 장비가 해당 상황에서 적정한 출력으로 작업하는 동안 측정된 진동속도를 근거로 하는 바, 사용조건의 변화로 가동 출력의 변화가 있거나 또는 진동매질의 종류나 측정위치의 상태 등에 따라 예측 진동속도가 달라질 수 있으므로 그 적용에 주의를 요한다.

4. 진동레벨과 진동속도 환산방안

4.1 개요

각종 건설현장에서 폭약을 사용한 발파작업이나 건설기계를 사용하여 작업을 하는 동안 이들로부터 발생한 진동은 매질을 따라 다양하게 변화하면서 전파된다. 진동과 관련한 분쟁사건의 처리에 있어서 인체피해에 대하여는 진동레벨 단위로, 주변시설물 피해에 대하여는 진동속도 단위로 평가하는 것이 합리적이다.


일반적으로 발파현장에서는 진동속도 측정기를 사용하여 주요 시설물에 전파된 진동속도의 크기를 측정하고 있는데, 이를 인체피해를 평가하는 척도로 사용하기에는 무리가 있으므로 진동레벨로 환산하는 **방법이 필요하다.**

이에 따라, 기존 자료의 수집과 현장에서의 계측·실험을 통해 다수의 실측치를 확보한 후 이를 회귀분석 함으로써 각 진동 발생원(발파 및 주요 건설장비)별로 진동속도와 진동레벨 단위간의 환산방식을 고찰하여 신뢰도를 제고할 필요가 있다.

한편, 본 실험에 사용한 진동속도 계측기는 앞서 언급한 기기와 동일하며, 진동레벨 측정에 사용한 계측기의 사양은 아래와 같다.

진동레벨 측정기 사양

| | | |
|-----------|---|--|
| 적용 규격 | 측정 방법 JIS C 1510 - 1995 | |
| 측정 기능 | 진동 레벨 (Lv), 진동 가속도 레벨 (Lva) 시간 비율 수준 (Lx), 파워 평균 (Leq), 최대 (Lmax) | |
| 측정 레벨 범위 | 진동 진동 가속도 레벨 30 ~ 120dB | |
| 주파수 범위 | 측정 방법 진동 진동 가속도 레벨 1 ~ 80Hz | |
| | JIS / 진동 진동 가속도 레벨 1~ 80Hz | |
| 주파수 보정 회로 | 측정 방법 또는 JIS 규격에 의한 수직 진동 특성 및 JIS 규격에 의한 수평 진동 특성 평탄 특성, JIS 규격에 의한 평탄 특성 | |
| RMS 회로 | True RMS 검출 회로, 동특성 0.63s | |
| 자기 잡음 | 진동, 진동 가속도 레벨 24dB 이하 | |
| 연산 | 시간 비율 수준 | L5 L10 L50 L90 L95 누적 도수 분포는 3 방향 동시에 연산 |
| | 최대치 | 지정된 시간에 진동이나 진동 가속도 레벨 2 승 평균 3 방향 동시에 연산 |
| | 연산시간 | 10, 500 초, 1, 5, 10, 15 분, 1, 8, 24 시간 및 매뉴얼 (최대 99 시간 59 분 59 초)하지만, 시간 비율 수준의 연산 시간은 최장 1 시간 |
| 샘플링주기 | 10ms (파워 평균, 최대) | |
| | 100ms (시간 비율 수준 그러나 연산 시간 500 초의 경우 5 초) | |
| 숫자 표시 | 4 자리, 표시주기 1 초 분해능 0.1dB X, Y, Z 수동 전환 | |
| 막대 그래프보기 | 눈금 범위 50dB, 표시주기 0.1 초, 분해능 10dB X, Y, Z 동시 표시 | |
| 사용 습도 범위 | -10 ~ +50 °C, 90 % RH 이하 | |
| 전원 | 단 2 형 건전지 4 개 | 연속 약 17 시간 (망간 전지) 연속 약 35 시간 (알카라인) 단, 백라이트 꺼짐 |
| | AC 어댑터 | NC - 34 (옵션) 소비 전류 약 110mA 그러나 백라이트 꺼짐 |
| 치수 | 200 (W) × 70 (H) × 180 (D) mm | |



VM-52

| | | |
|-----------|---|---|
| 형식 승인 번호 | 제 W031 호 | |
| 적용 규격 | 측정 방법 진동 레벨 계 JIS C 1510:1995 | |
| 측정 기능 | 진동 레벨 (L v), 진동 가속도 레벨 (L va), 진동 레벨 진동 가속도 레벨의 최대값 홀드 | |
| 작업 측정 | 진동 레벨 진동 가속도 레벨의 파워 평균 (Lveq 또는 Lvaeq) 진동 레벨 진동 가속도 레벨의 시간 비율 수준 (L 5 L 10 L 50 L 90 L 95) 진동 레벨 진동 가속도 레벨의 최대치 (L max), 최소 (L min) * 측정 기능 임의의 1 방향 3 방향 측정 가능 | |
| 측정 주파수 영역 | 진동 레벨 : 1 ~ 80Hz, 진동 가속도 레벨 : 1 ~ 80Hz | |
| 측정 레벨 범위 | 진동 레벨 L v - Z25 ~ 120dB, L v -X/Y30 ~ 120dB 진동 가속도 레벨 L va a0 ~ 120dB (OdB = 10 -5 m / s 2) | |
| 자기 잡음 수준 | L v - Z19dB 이하 L v -X/Y24dB 이하 L va 24dB 이하 (OdB = 10 -5 m / s 2) | |
| 주파수 보정 | 수직 진동 특성 (측정 방법 또는 JIS에 의한), 수평 진동 특성 (JIS에 의한), 평탄 특성 (JIS에 의한) | |
| 레벨 범위 | 10dB 6 단계 레인지 스위치, 3 방향 독립 10 ~ 70, 20 ~ 80, 30 ~ 90, 40 ~ 100, 50 ~ 110, 60 ~ 120dB | |
| 리니어리티렌지 | 70dB | |
| 측정 시간 | 설정된 측정 시간 동안 연산 측정이 가능하다. 500 초, 10 초, 1 분, 5 분, 10 분, 15 분, 30 분, 1 시간, 4시간, 8 시간, 24 시간, 수동 (최대 199 시간 59 분 59 초) | |
| RMS 검출 회로 | 디지털 연산 방식, 동특성 : 0.63 초 | |
| 연산 | 디지털 방식 | |
| 샘플링주기 | 78µs (파워 평균, L max, L min, 최대값 홀드) 100ms (L x) 단, 측정 시간 500 초 케이스 L x 5 초 | |
| 오토스토아 1 | CF 카드 | 최대 199 시간 59 분 59 초 1 파일로 여러 파일의 기록이 가능 (CF 카드의 제한) |
| | 내부 메모리 | 1 방향 측정 : 최대 86,400 개, 3 방향 (X / Y / Z) 측정 : 최대 86,400 개 (28800 × 3 방향) |
| 오토스토아 2 | CF 카드 | 1 파일 최대 4,500 세트로 복수 파일 |
| | 내부 메모리 | 1 방향 측정 : 최대 4,500 세트, 3 방향 (X / Y / Z) 측정 : 최대 1,500 세트 |
| 포즈 기능 | 측정 시간마다 각 연산 값 (Lveq 또는 Lvaeq, Lmax, Lmin, L5, L10, L50, L90, L95)을 1 세트로 연속 측정하고 저장 타이머의 시작 시간, 종료 시간 설정이 가능한 간격을 이용한 매 정시 연속 측정 가능 Timer Auto1/Timer Auto2에서 포즈 기능이 해제 | |
| 비교 기능 | 진동 레벨, 진동 가속도 레벨의 설정 수준 (30 ~ 120dB, 1dB 단위)을 초과하면 비교기 출력이 ON된다 | |
| | 해당 채널 | 메인 화면에서 설정되는 1 방향 |
| | 비교기 출력 | 오픈 콜렉터 출력, 최대인가 전압 : 24V |
| 비교기 설정 | Delay Time : 0 ~ 9sec의 1sec 단위, 오토리 세트 : ON / OFF 설정 가능, 오토리셋, 오토타이머 : 0 ~ 90 초 동안 1 초 간격 | |
| 시계 기능 | 오토스토아 1, 오토스토아 2에서 시작 시간과 끝 시간을 설정 가능 | |
| 출력 교정 신호 | 내부발전기 (31.5Hz sinusoidal), 외부 접속 기기를 교정 | |
| 치수 | 200 (W) × 56 (H) × 175 (D) mm | |
| 중량 | 약 1kg (건전지 포함) | |
| 진동 픽업 | 모델 | PV - 83C (3 방향 형식) (특허 제 2581901 호) |
| | 기준 감도 | 60mV/m/s2 |
| | 크기 | φ67 × 40.7mm |



VM-53

○ 발파진동속도와 진동레벨 동시계측(지반조건 : 토사, 암반 및 콘크리트 지반)



4.2 발파 진동레벨과 진동속도 환산방안

현장에서의 실험 및 계측을 통해 얻은 자료 789개를 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 주파수를 배제한 환산방식 제안

주파수를 배제한 환산방식이라 함은 발파 진동속도의 주파수를 고려하지 않고 진동레벨로 환산하는 방식을 의미한다. 진동속도와 진동레벨은 주파수에 영향을 받지만 진동속도 환산식에 의해 추정된 진동속도 또는 주파수를 모르는 측정치들을 이용하여 기준 지점에서의 진동레벨을 예측하기 위한 방식이다.

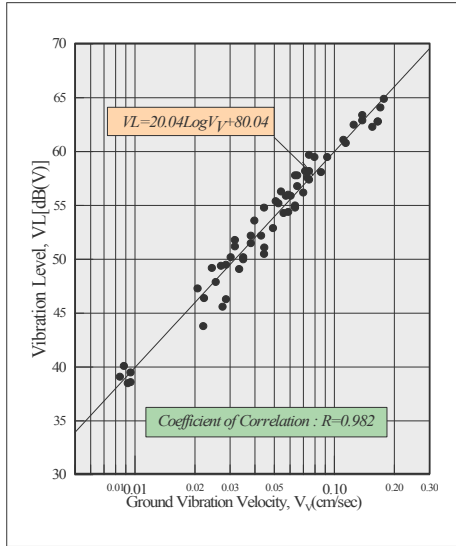
◆ 발파 진동레벨 환산식의 산출 과정

- 주파수를 배제한 전체 자료를 분석한 결과와 발파진동 주파수를 8개 대역(10~90Hz를 10Hz 간격)으로 분리하여 분석한 결과를 상호 비교해 보기 위해,
- 그 주파수 대역에 해당하는 발파 진동속도와 진동레벨 계측자료를 분리 및 정리
- 그 주파수 대역에 해당하는 발파 진동속도와 진동레벨과의 상관관계를 회귀분석한 발파 진동레벨 환산식은 다음과 같다.

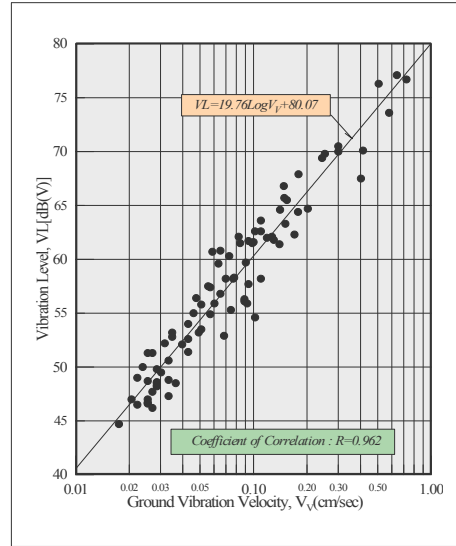
| 주파수 대역 $f(Hz)$ | 발파 진동레벨-진동속도 관계식 |
|-------------------|---|
| $10 < f \leq 20$ | $V_L = 20.04 \cdot \text{Log}V_V + 80.04$ |
| $20 < f \leq 30$ | $V_L = 19.76 \cdot \text{Log}V_V + 80.07$ |
| $30 < f \leq 40$ | $V_L = 19.99 \cdot \text{Log}V_V + 80.00$ |
| $40 < f \leq 50$ | $V_L = 19.97 \cdot \text{Log}V_V + 80.00$ |
| $50 < f \leq 60$ | $V_L = 19.80 \cdot \text{Log}V_V + 80.08$ |
| $60 < f \leq 70$ | $V_L = 20.00 \cdot \text{Log}V_V + 80.03$ |
| $70 < f \leq 80$ | $V_L = 20.00 \cdot \text{Log}V_V + 80.08$ |
| $80 < f \leq 90$ | $V_L = 19.99 \cdot \text{Log}V_V + 80.00$ |

(4.1)

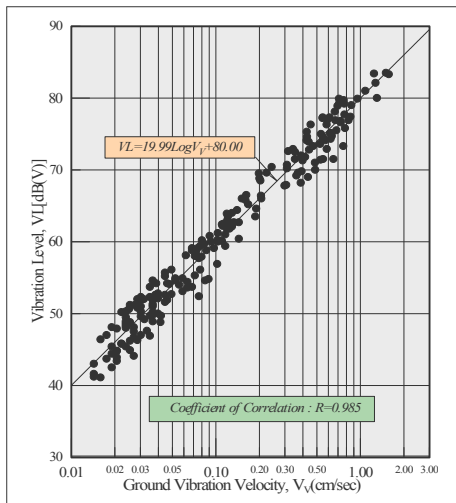
아래 그림은 주파수를 배제한 상태에서 대역별 진동레벨과 진동속도와 관계를 나타내고 있다.



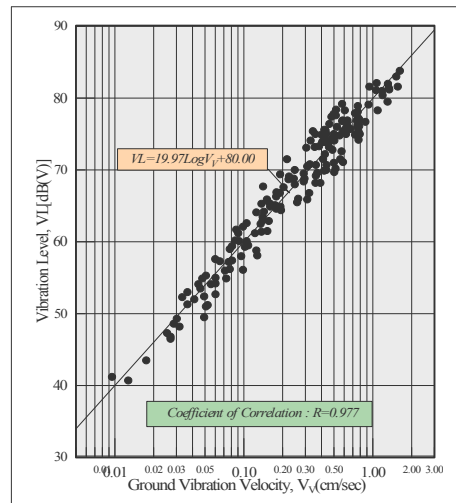
주파수 배제(주파수 대역 $10 \leq f \leq 20$)



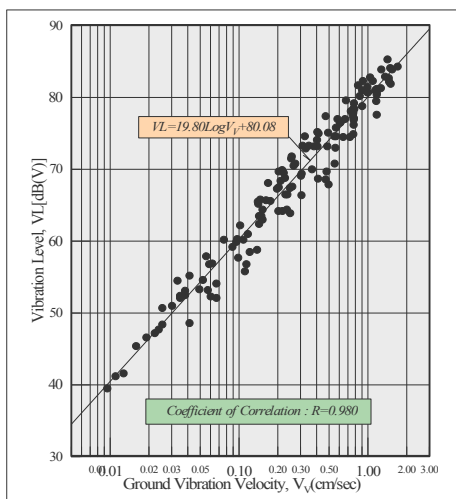
주파수 배제(주파수 대역 $20 \leq f \leq 30$)



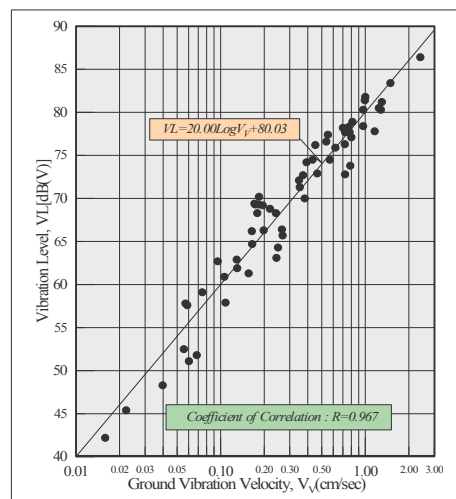
주파수 배제(주파수 대역 $30 \leq f \leq 40$)



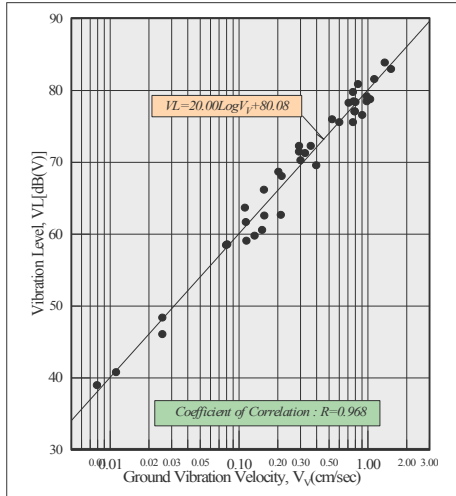
주파수 배제(주파수 대역 $40 \leq f \leq 50$)



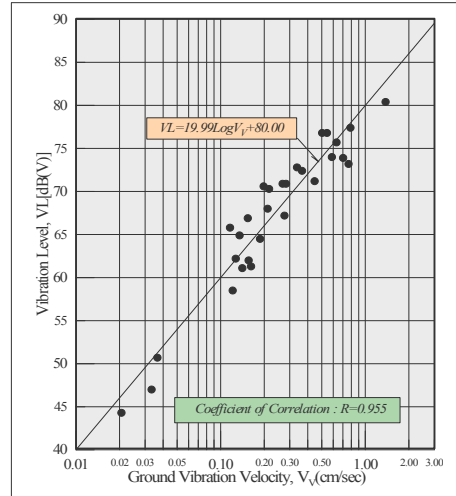
주파수 배제(주파수 대역 $50 \leq f \leq 60$)



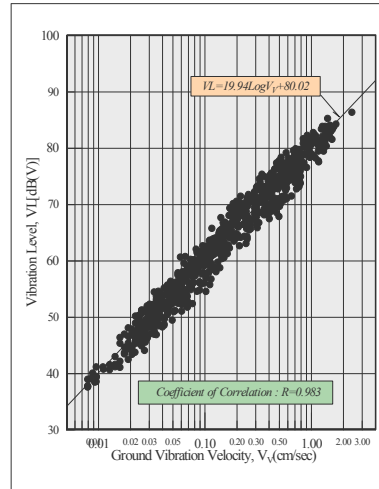
주파수 배제(주파수 대역 $60 \leq f \leq 70$)



주파수 배제(주파수 대역 $70 \leq f \leq 80$)



주파수 배제(주파수 대역 $80 \leq f \leq 90$)



주파수 배제(주파수 대역
 $10 \leq f \leq 90$)

◆ 발파 진동레벨 환산식의 단순화

○ 우측 그림은 주파수를 배제한 전체 자료를 대상으로 할 때의 발파 진동레벨과 진동속도와의 관계를 나타내고 있다.

○ 주파수를 배제한 전체 자료를 대상으로 발파 진동속도와 진동레벨과의 관계를 회귀분석하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$VL=19.94 \cdot \text{Log}V_V+80.02$$

○ 상기 식과 발파 진동레벨 환산식 (4.1)을 적용이 편리하도록 상수가 소수점 이하인 다음 식으로 단순화시켰다.

$$VL=20 \cdot \text{Log}V_V+80.0 \tag{4.2}$$

◆ 주파수를 배제한 발파 진동레벨 환산방법

- 발파 진동레벨을 환산하는 4가지 방법

① 발파 진동레벨 예측지점에서 측정된 주파수를 알 수 없는 경우, “V”방향 성분의 진동속도를 식(4.2)에 입력하여 발파 진동레벨을 구하는 방법

② 발파현장에서 실시한 시험발파를 통해 “V”방향의 진동속도 전파 추정식을 산출하였다면, 그 식을 인용하여 폭원과의 거리 및 지발당 최대장약량의 관계로부터 해당 지점에서의 “V”방향 진동속도(V_V)를 구하고 그 값을 식(4.2)에 입력하여 발파 진동레벨을 예측하는 방법

③ “V”방향의 진동속도 전파 추정식이 없고 현장에서 발파진동을 측정된 자료가 있으면, 현장 계측자료를 이용하여 “V”방향의 진동속도 전파 추정식을 재산출하여 폭원과의 거리 및 지발당 최대장약량의 관계로부터 해당 지점에서의 “V”방향 진동속도(V_V)를 구하고 그 값을 식(4.2)에 입력하여 발파 진동레벨을 예측하는 방법

④ “V”방향의 진동속도 전파 추정식이 없고 현장 계측자료도 없는 경우에는 n값 -1.5908을 적용한 과업수행 결과식을 이용하되, 진동 예측지점이

- 자유면 배면에 위치하면 약 K=276
- 자유면 측방에 위치하면 약 K=224
- 자유면 전방에 위치하면 약 K=171

을 적용하여 해당 지점에서의 진동속도를 구하고 그 값을 이용하여 발파 진동레벨을 예측하는 방법

예) ④의 경우 자유면 배면(후방), 측방 및 전방방향의 발파 진동속도 전파 추정식을 인용하여 “V”방향의 진동속도를 산출한다.

○ 상기 식으로 구한 예측지점에서의 “V”방향 진동속도를 다음 식에 입력하여 발파 진동레벨을 평가한다.

$$VL=20 \cdot \text{Log}V_V+80$$

예) ④의 발과 진동레벨 추정 결과. ()안의 수치는 실측치의 범위이다.

| 구분 연번 | 폭원과 예측 지점과의 이격거리 D(m) | 지발당 최대장약량 W(kg) | 자승근 환산거리 (m/kg ^{1/2}) | 장약지수 | 입지상수 (K) | 감쇄지수 (n) | 발과 진동속도 V _v (cm/sec) | 예측 진동레벨 VL[dB(V)] |
|----------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|------|-------------|-------------|---------------------------------------|-------------------------|
| 1 | 50 | 0.25 | 100.0 | 0.5 | 276 | -1.5908 | 0.182 | 65.20 (64.0~70.1) |
| | | | | | 224 | | 0.147 | 63.35 (62.8~66.8) |
| | | | | | 171 | | 0.113 | 61.06 (56.1~63.3) |
| 2 | 60 | 1.00 | 60.00 | 0.5 | 276 | -1.5908 | 0.410 | 72.26 (68.0~74.3) |
| | | | | | 224 | | 0.332 | 70.42 (69.1~73.8) |
| | | | | | 171 | | 0.254 | 68.10 (65.5~71.8) |
| 3 | 70 | 2.40 | 45.18 | 0.5 | 276 | -1.5908 | 0.643 | 76.16 (72.0~77.1) |
| | | | | | 224 | | 0.522 | 74.35 (71.9~76.0) |
| | | | | | 171 | | 0.398 | 72.00 (67.5~74.9) |
| 4 | 80 | 6.40 | 31.62 | 0.5 | 276 | -1.5908 | 1.136 | 81.11 (76.9~83.9) |
| | | | | | 224 | | 0.921 | 79.29 (79.1~81.6) |
| | | | | | 171 | | 0.704 | 76.95 (74.9~77.2) |

2) 주파수를 고려한 환산방식 제안

○ 각종 진동원으로부터 발생하는 진동은 물리적으로는 진동하는 매질의 변위(displacement : D), 입자속도(particle velocity : V), 가속도(acceleration : A)성분과 주파수(frequency : f)로 표시된다.

○ 발과 진동속도를 진동레벨로 환산하는데 있어 “V”방향 진동 성분의 주파수를 인체감각 특성에 대해 보정하는 방법은 다음과 같다.

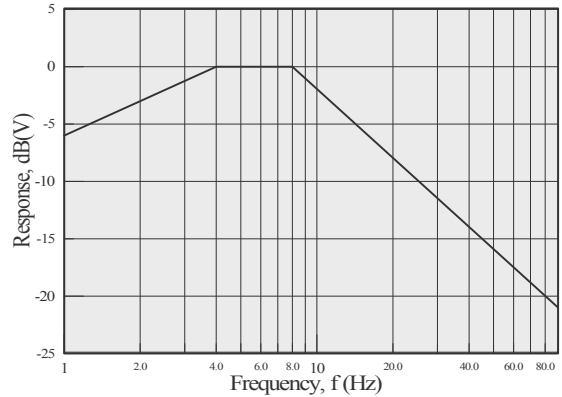
○ 인체감각에 대한 주파수별 보정 방법

연직방향의 진동 주파수가 $8 \leq f \leq 90\text{Hz}$ 인 경우에 대한 인체 감각특성의 보정

$$W_n = 20 \cdot \text{Log}\left(\frac{A}{A_0}\right) = 20 \cdot \text{Log}\left(\frac{8}{f}\right) (dB)$$

여기서, 가속도 실효치 : $A = 1.0 \cdot 10^{-5} \text{m/sec}^2$

기준치 : $A_0 = 0.125 \cdot 10^{-5} \text{m/sec}^2 \cdot f$



진동레벨계의 응답 보정치

◆ 발파 진동레벨 환산식의 산출 과정

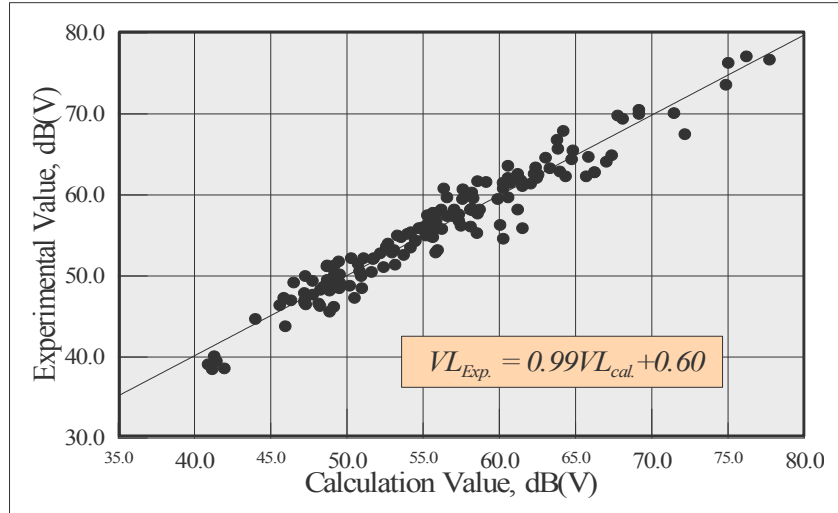
- 연직방향의 발파진동 주파수를 3개 대역 ($10 < f \leq 30$, $30 < f \leq 60$, $60 < f \leq 90$)으로 분리
- 그 주파수 대역에 해당하는 발파 진동속도와 진동레벨 계측자료 분리 및 정리
- 발파 진동속도와 주파수를 고려한 진동레벨과의 상관관계 회귀분석
- 인체감각에 대한 주파수 보정치 (W_n)를 반영하여 발파 진동레벨 환산식 산출

식(4.3)은 발파 진동속도를 진동레벨로 환산하는 식이다.

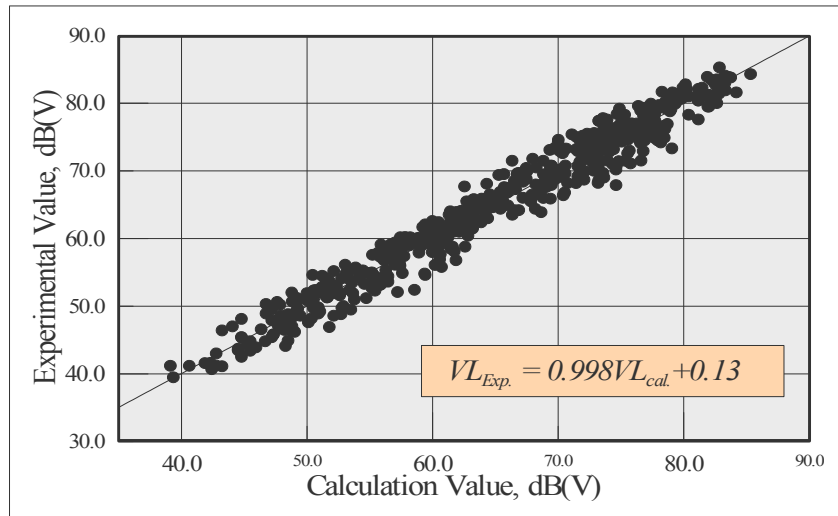
| 주파수 대역 $f(\text{Hz})$ | 발파 진동레벨-진동속도 관계식 |
|--------------------------|---|
| $10 < f \leq 30$ | $V_L = 20.0 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.0625} + 90.49 + W_n$ |
| $30 < f \leq 60$ | $V_L = 20.0 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.039} + 95.22 + W_n$ |
| $60 < f \leq 90$ | $V_L = 20.0 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.9925} + 98.20 + W_n$ |

(4.3)

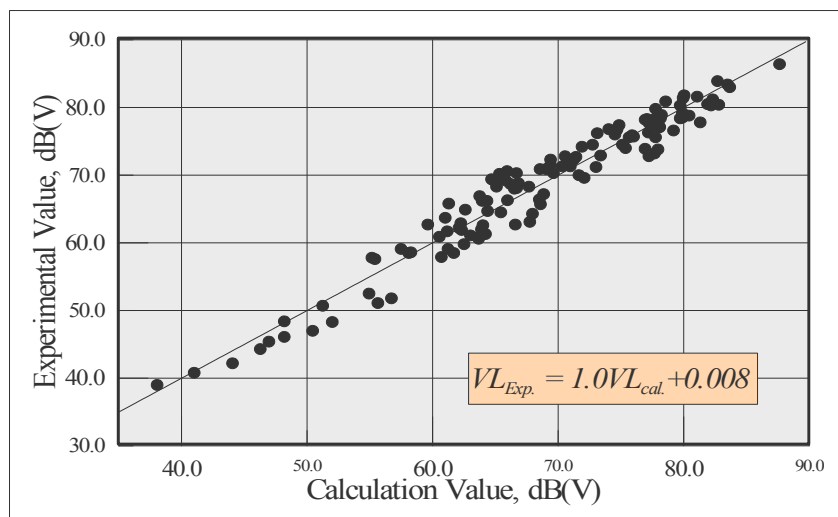
다음 그림은 실측치(Experimental Value)와 식(4.3)에 의해 산출한 예측치(Calculation Value)와의 관계이다. 그림에서 보는 바와 같이 예측치와 실측치는 거의 유사한 결과를 나타내고 있으므로 식(4.3)을 인용하여 주파수 대역별 진동속도에 대한 진동레벨을 예측하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.



발파 진동레벨 실측치와 예측치와의 관계(주파수 대역 $10 < f \leq 30$)



발파 진동레벨 실측치와 예측치와의 관계(주파수 대역 $30 < f \leq 60$)



발파 진동레벨 실측치와 예측치와의 관계(주파수 대역 $60 < f \leq 90$)

◆ 주파수를 고려한 발파 진동레벨 환산방법

• 예측순서

- ① 발파 진동레벨 예측 위치에서 측정된 “V”방향 진동속도와 주파수 확인
- ② 주파수 대역에 해당하는 발파 진동레벨 환산식 선택
- ③ 예측지점에서의 “V”방향 진동 주파수를 이용하여 인체감각에 대한 보정치(W_n) 산출
- ④ 진동속도로부터 산출한 진동레벨 값에 인체감각 보정치(W_n)를 반영하여 해당 지점에서의 발파 진동레벨 예측

예) 발파 진동레벨 환산 결과. ()안의 수치는 실측한 값의 범위이다.

| 구분 연번 | 주파수 f(Hz) | 주파수 대역별 진동레벨 환산식 선택 | 예측지점의 진동속도 V_V (cm/sec) | 인체감각 보정치 W_n [dB(V)] | 예측지점의 진동레벨 V_L [dB(V)] |
|----------|--------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 20 | $10 < f \leq 30$ | 0.30 | -7.96 | 71.42 (69.8~72.2) |
| 2 | 40 | $30 < f \leq 60$ | 0.30 | -13.98 | 70.37 (65.7~73.1) |
| 3 | 75 | $60 < f \leq 90$ | 0.30 | -19.44 | 68.38 (68.3~69.2) |

4.3 건설장비의 충격에너지를 이용한 진동레벨 예측방안

1) 진동레벨 추정식 산출

건설장비로부터의 이격거리와 충격에너지를 변화시켜 측정된 결과를 회귀분석하여 얻은 건설장비 진동레벨 예측식은 다음과 같다.

$$\bigcirc \text{진동 로울러} : VL = 79.73 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.539} \quad (4.4)$$

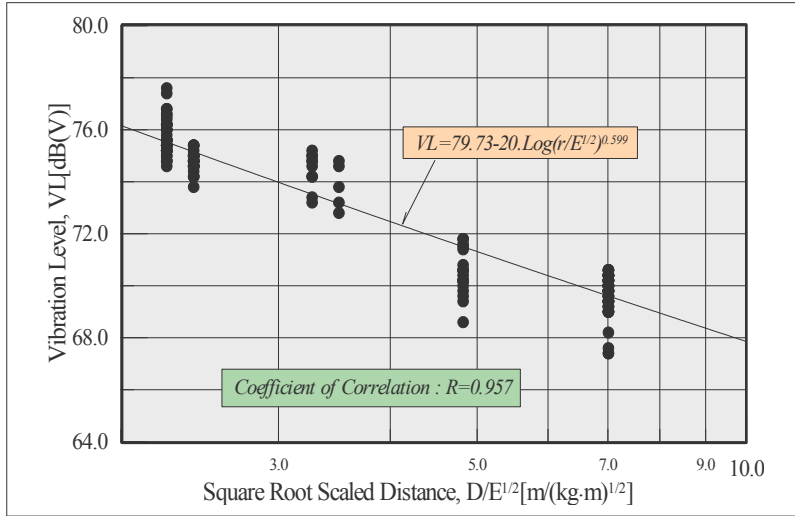
$$\bigcirc \text{바이브로 햄머} : VL = 82.50 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.887} \quad (4.5)$$

$$\bigcirc \text{브레이크} : VL = 92.33 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{1.666} \quad (4.6)$$

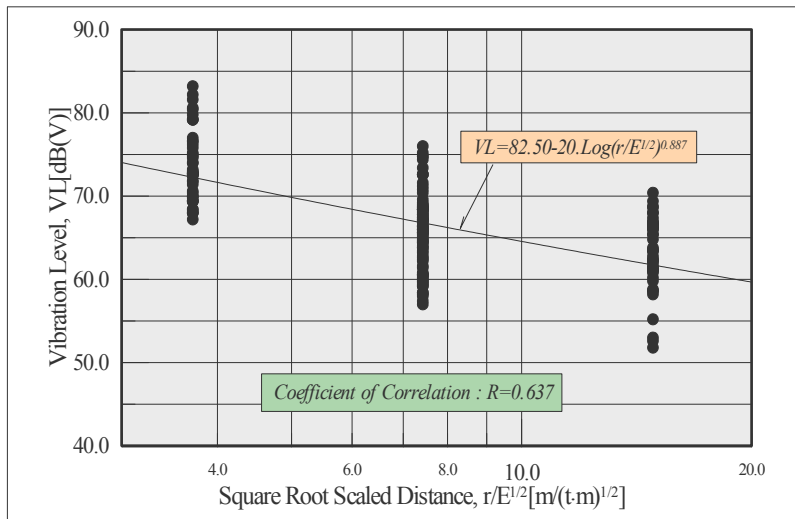
상기 식에서 V_L : 건설장비와 r만큼 이격된 지점에서의 진동레벨 [dB(V)]

r : 건설장비와 예측지점까지의 이격거리(m)

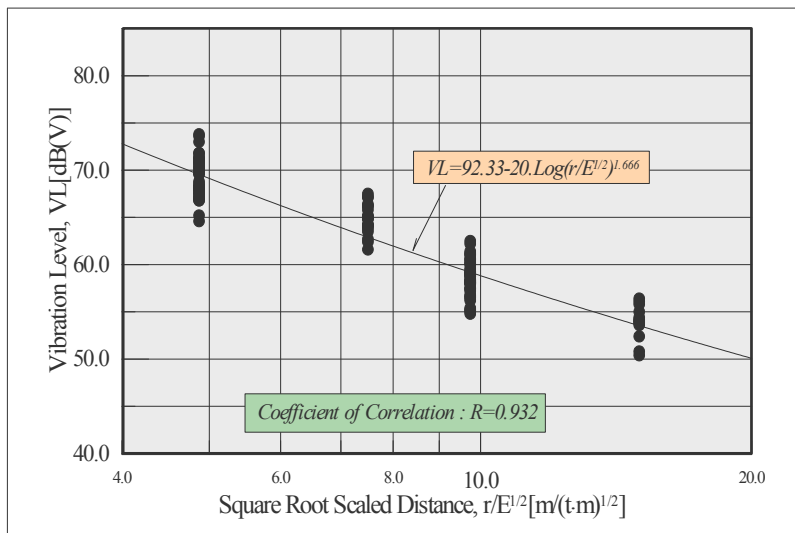
E : 건설장비와 충격에너지(kg·m, t·m)



기준지점의 진동레벨(진동 로울러)



기준지점의 진동레벨(바이브로 햄머)



기준지점의 진동레벨(브레이커)

2) 건설장비의 충격에너지를 이용한 진동레벨 추정방법

○ 진동 로울러 : $VL=79.73 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.599}$

○ 바이브로 햄머 : $VL=82.50 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.887}$

○ 브레이크 : $VL=92.33 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{1.666}$

※ 충격에너지를 이용한 진동레벨 추정 결과. ()안의 수치는 실측치 범위이다.

| 건설장비 | 진동레벨 상수 [dB(V)] | 충격 에너지 E(Joule) | 예측지점 거리 r (m) | 환산거리 (r/\sqrt{E}) | 감쇄 지수 | 예측 진동레벨 VL[dB(V)] | 장비 투입대수 (대) | 합성 진동레벨 VL[dB(V)] |
|---------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------------|-------|---------------------|-------------|-------------------|
| 진동 로울러 | 79.73 | 4.56 | 15 | 7.00 | 0.599 | 69.6 (67.3~70.8) | 1 | 74.7 |
| | | 9.69 | | 4.80 | | 71.6 (68.5~71.9) | 1 | |
| 바이브로 햄머 | 82.50 | 4.00k | 15 | 7.50 | 0.887 | 67.0 (56.8~76.0) | 1 | |
| 브레이크 | 92.33 | 1.00k | 15 | 15.0 | 1.666 | 53.1 (50.4~57.0) | 1 | |
| | | 2.35k | | 9.80 | | 59.3 (55~62.5) | 1 | |

4.4 건설장비 진동레벨과 진동속도 환산방안

1) 주파수를 배제한 환산방식 제안

건설장비에 의한 진동이 매질을 통해 전파되는 과정에서 “V”방향의 진동속도(V_V)와 진동레벨(VL)과의 관계를 회귀분석하여 얻은 건설장비 진동레벨 환산식은 다음과 같다.

- 진동 로울러

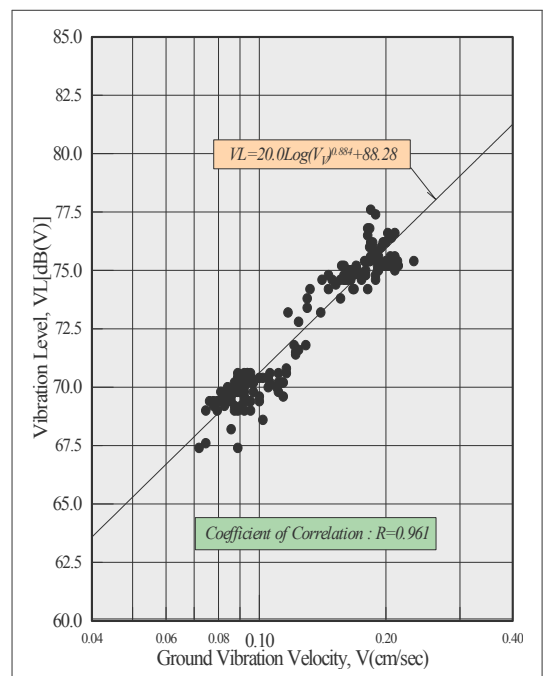
$$VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.884}+88.28 \quad (4.7)$$

- 바이브로 햄머

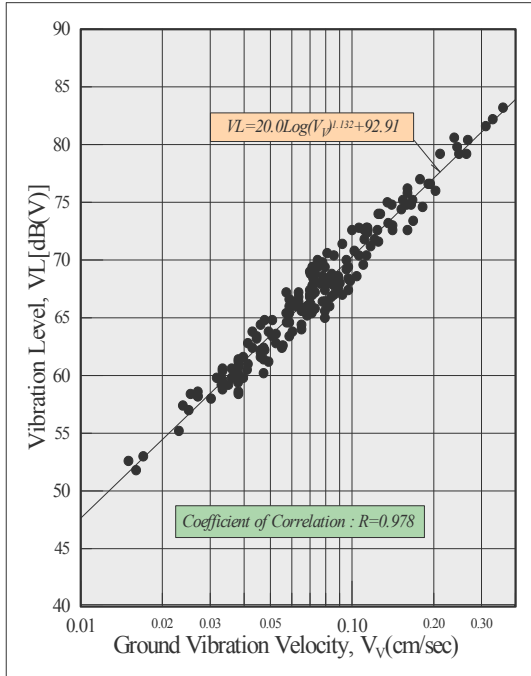
$$VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.132}+92.91 \quad (4.8)$$

- 브레이크

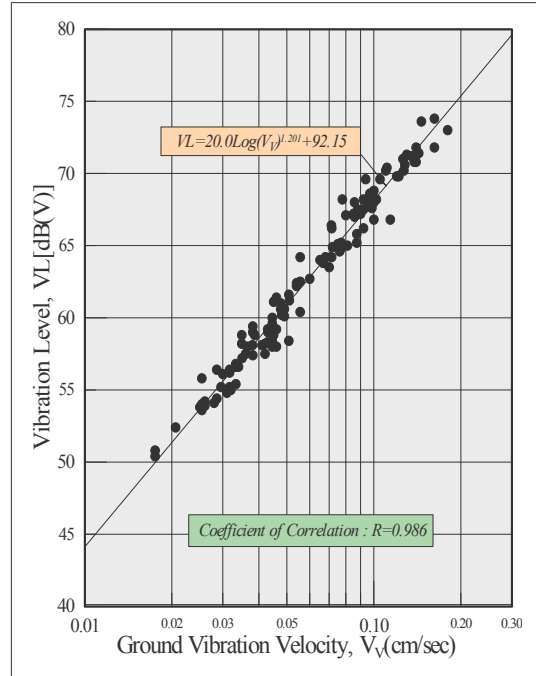
$$VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.201}+92.15 \quad (4.9)$$



진동레벨과 진동속도와의 관계
(진동 로울러, 주파수 배제)



진동레벨과 진동속도와의 관계
(바이브로 햄머, 주파수 배제)



진동레벨과 진동속도와의 관계
(브레이커, 주파수 배제)

◆ 예측지점의 진동속도(주파수 배제)를 이용한 건설장비별 진동레벨 환산방법

● 예측순서

① 다음과 같은 과업수행 결과식을 각각 인용하여 건설장비별 충격에너지 값으로 예측지점(r)에서 “V”방향의 진동속도(V_v) 산출

- 진동 로울러 : $V_v = 0.321 (r/\sqrt{E})^{-0.6624}$
- 바이브로 햄머 : $V_v = 0.306 (r/\sqrt{E})^{-0.720}$
- 브레이커 : $V_v = 0.984 (r/\sqrt{E})^{-1.372}$

② 건설장비별로 예측지점(r)에서의 진동속도(V_v)를 다음과 같은 진동레벨 환산식에 입력하여 예측지점(r)에서의 진동레벨(VL) 산출

- 진동 로울러 : $VL = 20 \cdot \text{Log}(V_v)^{0.884} + 88.28$
- 바이브로 햄머 : $VL = 20 \cdot \text{Log}(V_v)^{1.132} + 92.91$
- 브레이커 : $VL = 20 \cdot \text{Log}(V_v)^{1.201} + 92.15$

예) 진동 주파수를 배제한 건설장비 진동레벨 추정 방법

○ 과업 실험식을 인용하여 예측지점 $r=15m$ 에서 건설장비의 충격에너지 값을 이용하여 예측 진동속도(V_p) 산출

○ 산출된 진동속도를 진동레벨 환산식에 입력하여 해당 지점(r)에서의 진동레벨(VZ) 예측

※건설장비 진동레벨 환산 결과. ()안의 수치는 실측치의 범위이다.

| 건설장비 | 예측지점 거리 $r(m)$ | 충격 에너지 (Joule) | 거리 감쇄지수 | 예측 진동속도 $V_p(cm/s)$ | 진동속도 지수 | 진동레벨 상수 | 예측 진동레벨 $VZ[dB(V)]$ | 합성 진동레벨 $VZ[dB(V)]$ |
|------------|----------------------|----------------------|------------|---------------------------|------------|------------|---------------------------|---------------------------|
| 진동 로울러 | 15 | 4.56 | -0.6624 | 0.09 (0.070~0.11) | 0.884 | 88.28 | 69.8 (67.3~70.8) | 74.7 |
| | | 9.69 | | 0.113 (0.11~0.13) | | | 71.5 (68.5~71.9) | |
| 바이브로 햄머 | 15 | 4.00K | -0.720 | 0.072 (0.024~0.203) | 1.132 | 92.91 | 67.0 (56.8~76.0) | |
| 브레이커 | 15 | 1.00K | -1.372 | 0.024 (0.018~0.032) | 1.201 | 92.15 | 53.4 (50.4~57.0) | |
| | | 2.35K | | 0.043 (0.029~0.058) | | | 59.3 (55.0~62.5) | |

2) 주파수를 고려한 환산방식 제안

(1) 건설장비 진동레벨 환산식의 산출 과정

○ 건설장비별 “V”방향의 진동 주파수를 대역별로 분리

- 진동 로울러 : $20 < f \leq 30$, $30 < f \leq 40$

- 바이브로 햄머 : $10 < f \leq 20$, $20 < f \leq 30$

- 브레이커 : $20 < f \leq 40$

○ 그 주파수 대역에 해당하는 건설장비 진동속도와 진동레벨 계측자료 분리 및 정리

○ 건설장비 진동속도와 진동레벨과의 상관관계 회귀분석

○ 인체감각에 대한 주파수 보정치(W_n)를 이용하여 건설장비 진동레벨 환산식 산출

상기와 같은 과정을 통해 얻은 건설장비별 진동속도와 진동레벨 환산식은 다음과 같다.

○ 진동 로울러

- 진동 주파수 $20 < f \leq 30$

$$VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.990} + 101.12 + W_n \quad (4.10)$$

- 진동 주파수 $30 < f \leq 40$

$$VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V) + 102.06 + W_n \quad (4.11)$$

주파수 보정에 의한 편차를 감소시키고자 중심 주파수 $f=25\text{Hz}$ 와 $f=35\text{Hz}$ 에 대해 상기 식(4.10), (4.11)을 다음과 같이 보정하였다.

- 식(4.10) 보정식

$$VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.990} + 100.45 + W_n \quad (4.12)$$

- 식(4.11) 보정식

$$VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V) + 102.84 + W_n \quad (4.13)$$

○ 바이브로 햄머

- 진동 주파수 $10 < f \leq 20$

$$VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.143} + 101.19 + W_n \quad (4.14)$$

- 진동 주파수 $20 < f \leq 30$

$$VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.092} + 100.39 + W_n \quad (4.15)$$

상기 식(4.14)을 주파수 보정에 의한 편차를 감소시키고자 중심 주파수 $f=15\text{Hz}$ 에 대해 다음과 같이 보정하였다.

- 식(4.14) 보정식

$$VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.143} + 99.14 + W_n \quad (4.16)$$

○ 브레이크

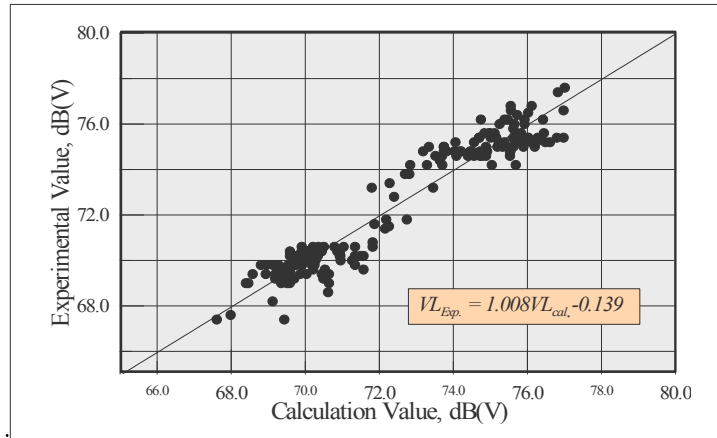
- 진동 주파수 $20 < f \leq 40$

$$VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.217} + 103.6 + W_n \quad (4.17)$$

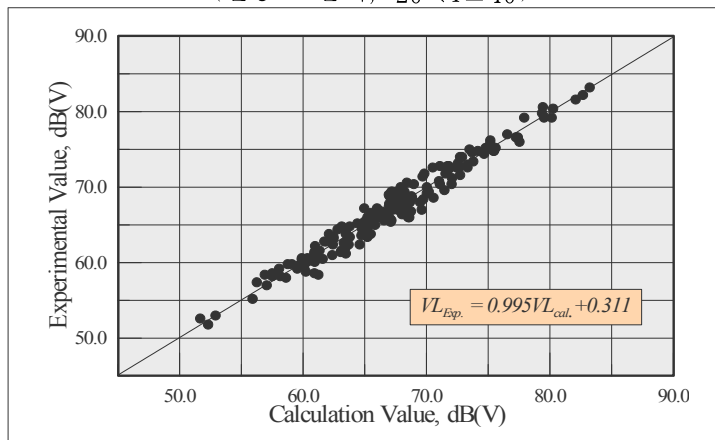
상기 식에서 V_V : “V” 방향 성분 최대 진동속도(cm/sec)

W_n : 인체감각에 대한 주파수별 보정치(dB)

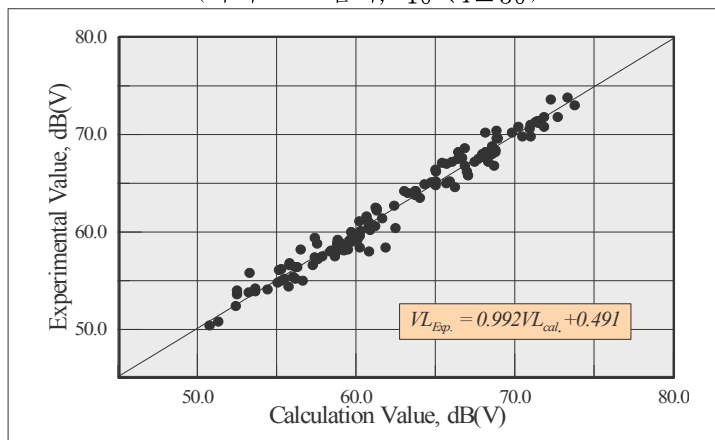
다음 그림은 실측치(Experimental Value)와 상기 식들에 의해 산출한 예측치(Calculation Value)와의 관계이다. 그림에서 보는 바와 같이 예측치와 실측치는 거의 유사한 결과를 나타내고 있으므로 상기 식들을 이용하여 주파수 대역별 진동속도에 대한 진동레벨을 예측하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.



진동레벨 실측치와 예측치와의 관계
(진동 로울러, $20 < f \leq 40$)



진동레벨 실측치와 예측치와의 관계
(바이브로 햄머, $10 < f \leq 30$)



진동레벨 실측치와 예측치와의 관계
(브레이커, $20 < f \leq 40$)

(2) 진동 주파수를 고려한 건설장비의 진동레벨 환산방법

• 예측순서

- ① 건설장비 진동레벨 예측지점에서 측정한 “V”방향 진동속도와 주파수 확인
- ② 주파수 대역에 해당하는 진동레벨 환산식 선택
- ③ 예측지점의 “V”방향 진동 주파수를 이용하여 인체감각에 대한 보정치(W_n) 산출
- ④ 진동속도로부터 산출한 진동레벨 값에 인체감각 보정치(W_n)를 반영하여 해당 지점에서
의 건설장비 진동레벨 예측

예) 진동주파수를 고려한 건설장비 진동레벨 예측 ()안의 수치는 실측치임

| 건설장비 | 확인 주파수 $f(Hz)$ | 건설장비별로 주파수 대역별 진동레벨 환산식 선택 | 예측지점에서 측정한 진동속도 $V_v(cm/sec)$ | 인체감각 보정치 $W_n[dB(V)]$ | 예측지점 진동레벨 $VZ[dB(V)]$ | 합성 진동레벨 $VZ[dB(V)]$ |
|------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 진동 로울러 | 28 | $20 < f \leq 30$ | 0.10 | -10.88 | 69.77 (68.2~70.6) | 74.1 |
| 바이브로 햄머 | 25 | $20 < f \leq 30$ | 0.088 | -9.90 | 67.44 (66.4~68.4) | |
| 브레이커 | 34 | $20 < f \leq 40$ | 0.14 | -12.57 | 70.25 (69.8~73.6) | |

4.5 진동레벨 환산식의 고찰

4.5.1 발파 진동레벨 환산식

1) 기존 환산방식(주파수 배제)과의 비교

발파 진동속도를 진동레벨로 환산하는 한국환경정책·평가연구원 식, 江島 식, Vanmarcke 식들과 본 과업을 통해 산출한 진동레벨 환산식인 (4.2)을 인용하여 발파 진동속도별 진동레벨 값을 산출하면 다음과 같다. ()안의 수치는 실측치 범위이다.

(1) 진동속도 0.05~0.50cm/sec 범위에서 江島 식은 한국환경정책·평가연구원 식에 비해 약 10.3~16.7dB(V) 높으며, Vanmarcke 식에 비해서는 약 9.3~14.3dB(V) 높다. 그리고 진동레벨 환산식인 (4.2)보다는 약 11.0dB(V) 높다. 즉, 정현진동에 적합한 江島 식을 충격진동 평가에 적용하면 과대평가되는 경향이 있다.

| 예측 진동속도 (cm/sec) | 한국환경정책 평가연구원 [dB V] | 江島 식 [dB V] | Vanmarcke 식 [dB V] | | | 진동레벨 환산식(4.2) [dB V] |
|------------------------|---------------------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| | | | T _d =0.1 | T _d =0.2 | T _d =0.4 | |
| 0.05 | 54.7 | 65.0 | 50.6 | 53.3 | 55.7 | 54.0 (49.5~57.9) |
| 0.10 | 58.8 | 71.0 | 56.7 | 59.4 | 61.7 | 60.0 (54.1~62.6) |
| 0.20 | 62.9 | 77.0 | 62.7 | 65.4 | 67.7 | 66.0 (64.4~71.6) |
| 0.30 | 65.3 | 80.5 | 66.2 | 68.9 | 71.3 | 69.5 (68.0~73.1) |
| 0.40 | 66.9 | 83.0 | 68.7 | 71.4 | 73.8 | 72.0 (67.5~74.9) |
| 0.50 | 68.3 | 85.0 | 70.7 | 73.3 | 75.7 | 74.0 (67.2~76.3) |

(2) 한국환경정책·평가연구원 식은 진동속도 0.05~0.20cm/sec 범위에서 비교적 정확도가 높은 Vanmarcke식의 진동파형 연속시간 0.1sec 이내에 해당하는 진동레벨 값보다 높으나, 그 이상의 진동속도에서는 낮은 값을 나타내며, 진동파형의 연속시간 0.4sec에 해당하는 진동레벨 값보다 전체적으로 낮은 경향을 보인다.

(3) 진동레벨 환산식인 (4.2)는 Vanmarcke식의 진동파형의 연속시간 약 0.23초에 해당하는 진동레벨 값과 같다.

(4) 한국환경정책·평가연구원 식에 의한 진동속도별 진동레벨은 Vanmarcke식과 차이가 일정하지 않으나, 진동레벨 환산식인 (4.2)와는 일정한 차이를 나타내고 있다.

따라서

○ 江島 식은 정현파와 근사한 연속진동에는 적정하게 이용될 수 있으나, 발파와 같은 충격 진동의 경우에는 진동레벨이 과대평가되는 문제가 있을 수 있다.

○ Vanmarcke식은 충격진동을 진동레벨로 환산하는데 이용 가능하나, 발파공사의 종류, 뇌관의 종류와 1회 사용 지발단수, 진동이 전파되는 지역의 지질조건 등이 다양함에 따른 정보를 확보하지 못할 경우 그 적용에 어려움이 있을 수 있다.

2) 과업수행 결과 환산식들의 비교

(1) 주파수를 배제한 진동레벨 환산식

주파수 대역별 진동레벨 환산식을 단순화시킨 아래의 진동레벨 환산식 (4.2)를 이용할 경우, 진동레벨 환산식 (4.1)과 진동속도별 평균 진동레벨 값의 차이는 다음 <표>에서 보는 바와 같이 최대 0.1dB 이내이다. 그러므로 진동 주파수를 배제하고 진동속도에 대한 진동레벨을 예측하는데 있어서 다음과 같은 진동레벨 환산식을 이용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

$$VL=20 \cdot \text{Log}V_v+80.0$$

| 식 구 분 | 발과 진동속도(cm/sec) | | | | | | | 비 고 |
|----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 1.00 | |
| 진동레벨 환산식 (4.1) | 54.1 | 60.1 | 66.1 | 69.6 | 72.1 | 74.0 | 80.0 | 단위 dB(V) |
| 진동레벨 환산식 (4.2) | 54.0 | 60.0 | 66.0 | 69.5 | 72.0 | 74.0 | 80.0 | |

(2) 주파수를 고려한 진동레벨 환산식

인체감각에 대한 주파수별 보정치(w_f)를 반영한 진동레벨 환산식 (4.3)을 인용하여 임의의 발과 진동속도에 대한 주파수 대역별 진동레벨의 범위를 예측하면 다음과 같다.

()안의 수치는 중심 주파수에 대한 진동레벨이다.

| 주파수 대역 $f(\text{Hz})$ | 발과 진동속도(cm/sec) | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 1.00 |
| $10 < f \leq 30$ ($f=20$) | 51.4~60.8 (54.9) | 57.8~67.2 (61.3) | 64.2~73.6 (67.7) | 67.9~77.4 (71.4) | 70.6~80.0 (74.1) | 72.6~82.1 (76.1) | 79.0~88.5 (82.5) |
| $30 < f \leq 60$ ($f=45$) | 50.7~56.7 (53.2) | 56.9~62.9 (59.4) | 63.2~69.2 (65.7) | 66.9~72.9 (69.4) | 69.5~77.5 (72.0) | 71.5~77.5 (74.0) | 77.7~83.7 (80.2) |
| $60 < f \leq 90$ ($f=75$) | 51.4~54.9 (52.9) | 57.3~60.8 (58.9) | 63.3~66.8 (64.9) | 66.8~70.3 (68.4) | 69.3~72.8 (70.9) | 71.2~74.7 (72.8) | 77.2~80.7 (78.8) |

◆ 주파수 범위별 진동레벨 값의 변화

발파 진동속도 0.05~1.00cm/sec 범위에 대하여

- 동일한 진동속도에서도 주파수가 낮을수록 진동레벨 값은 증가한다.
- 동일한 주파수에서도 진동속도 증가에 따라 진동레벨 값은 증가한다.
- 진동레벨 환산식인 (4.3)은 동일한 주파수 대역에서도 최대와 최소 주파수에 따라 진동레벨 값의 차이가 발생하며, 주파수가 낮은 대역에서 진동레벨 값의 차이가 더 크게 되는데, 그 차이는 약 3.5~9.5dB(V) 범위에 있다.
- 동일한 진동속도에서도 주파수 대역에 해당하는 환산식 선택 오류 시에는 진동레벨 값의 차이가 발생한다.
- 진동레벨 환산식인 (4.2)와 진동레벨 환산식인 (4.3)과는 $10 < f \leq 30 \text{ Hz}$ 주파수 대역에서 진동속도 1.0cm/sec에서 최대 약 1.0~8.5dB(V) 차이가 있다.

(3) 진동레벨 환산식인 (4.3) 적용상 유의점

○ 11 Hz인 0.2cm/sec의 진동을 인체감각에 대한 주파수 보정치를 반영하여 진동레벨 값으로 변환하는데 있어서 주파수 대역 $10 < f \leq 30$ 에 해당하는 식을 적용하면 약 72.9dB(V)로 산출되는데 반해, 주파수 대역을 고려하지 않고 $60 < f \leq 90$ 에 해당하는 식을 적용하면 약 81.3 dB(V)로 산출되어 8.4dB(V)의 차이가 나게 된다. 그러므로 주파수 대역에 적합한 식을 인용하여야 한다.

○ 동일 주파수 대역 내에서도 11 Hz와 30 Hz로 다른 경우, 주파수 대역 $10 < f \leq 30$ 에 적용할 수 있는 진동레벨 환산식(4.3)을 이용하여 0.2cm/sec의 진동속도를 진동레벨 값으로 환산하게 되면, 주파수 11 Hz의 경우는 약 72.9dB(V)로 산출되는데 반해 주파수 30 Hz에서는 약 64.2dB(V)로 산출되어 8.7dB(V)의 차이가 나게 된다. 그러므로 동일 대역에서도 주파수 적용에 유의해야 한다.

예를 들어 생활진동 규제기준이 65dB(V)인 지역에서 현행대로 1일 평균 10회 발파하는 경우 11 Hz인 0.2cm/sec의 진동속도는 약 72.9dB(V)로 환산되어 규제기준을 초과하는 것으로 평가될 수 있으나, 주파수가 30 Hz인 경우에는 약 64.2dB(V)로 환산되어 규제기준 이하로 평가될 것이다.

4.5.2 건설장비와의 환산거리에 따른 진동레벨 예측식

1) 진동 로울러

다음과 같은 과업수행 결과식인 (4.4)와

- $V_L = 79.73 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.599}$

기존 진동레벨 예측식인 (4.18)을 인용하여 기준 측정지점 $r_o(7.5\text{m})$ 의 거리에서 기준 진동레벨 $V_{L_o} = 73.20\text{dB(V)}$ 와 75.15dB(V) 인 경우로 가정하고 진동원으로부터 이격거리에 따른 진동레벨(V_{L_2})을 산출하면 아래 <표>와 같다.

$$V_{L_1} = V_{L_o} - 20 \cdot \text{Log}\left(\frac{r}{r_o}\right)^{0.81}$$

$$V_{L_2} = 0.98V_{L_1} - 1.35 \tag{4.18}$$

식(4.18)에서 거리지수 0.81은 향타기, 브레이커, 굴삭기, 천공기, 디젠키, 발전기의 평균값으로 진동 로울러의 자승근환산거리 지수 0.590과는 상이한 바, 예측 진동레벨은 과업수행 결과식인 (4.4)가 기존 방식보다 2.13~4.03dB(V) 높게 산출된다.

아래 표를 참조할 때, 다짐작업을 하고 있는 진동 로울러와의 이격거리(r)에 따라 밀실 다짐된 노상이나 토사지반에서 진동레벨을 예측하는데 있어 진동 로울러의 충격에너지(E)를 알고 있는 경우 식(4.4)을 인용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다. ()안의 수치는 실측치이다.

| 진동원과 이격거리 $r(m)$ | 자승근 환산거리 (r/\sqrt{E}) | 예측 진동레벨 VL[dB(V)] | | 진동원과 이격거리 $r(m)$ | 자승근 환산거리 (r/\sqrt{E}) | 예측 진동레벨 VL[dB(V)] | |
|------------------------|-------------------------------|----------------------|--------|------------------------|-------------------------------|----------------------|--------|
| | | 식 4.4 | 식 4.18 | | | 식 4.4 | 식 4.18 |
| 5 | 2.34 | 75.31 | 73.18 | 11 | 5.15 | 71.20 | 67.75 |
| | 1.61 | 77.25 | 75.09 | | 3.53 | 73.17 | 69.66 |
| 7.5 | 3.51 | 73.20 (72.7~74.8) | 70.39 | 13 | 6.09 | 70.33 | 66.59 |
| | 2.41 | 75.15 (73.7~75.5) | 72.30 | | 4.18 | 72.29 | 68.51 |
| 9 | 4.22 | 72.24 | 69.13 | 15 | 7.02 | 69.59 (67.3~70.8) | 65.61 |
| | 2.89 | 74.21 | 71.04 | | 4.82 | 71.55 (68.5~71.9) | 67.52 |

2) 바이브로 햄머

다음과 같은 과업수행 결과식인 (4.5)와

- $VL=82.50 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.887}$

기존 진동레벨 예측식인 (4.18)을 인용하여 기준 측정지점 $r_0(7.5m)$ 의 거리에서 기준 진동레벨 $VL_0 = 72.40dB(V)$ 인 경우로 가정하고 진동원으로부터 이격거리에 따른 진동레벨(VL_2)을 산출하면 아래 <표>와 같다.

식(4.18)에서 거리지수 0.81은 항타기, 브레이커, 굴삭기, 천공기, 디젠기, 발전기의 평균값으로 바이브로 햄머의 자승근환산거리 지수 0.887과는 상이한 바, 예측 진동레벨은 과업수행 결과식인 (4.4)가 기존 방식보다 2.2~3.1dB(V) 높게 산출된다.

아래 표를 참조할 때, 파일링 작업을 하고 있는 바이브로 햄머와의 이격거리(r)에 따라 풍화토 및 토사지반에서 진동레벨을 예측하는데 있어 바이브로 햄머의 충격에너지 (E)를 알고 있는 경우 식(4.5)을 인용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다. ()안의 수치는 실측치이다.

| 진동원과 이격거리 $r(m)$ | 자승근 환산거리 (r/\sqrt{E}) | 예측 진동레벨 VL[dB(V)] | | 진동원과 이격거리 $r(m)$ | 자승근 환산거리 (r/\sqrt{E}) | 예측 진동레벨 VL[dB(V)] | |
|------------------------|-------------------------------|----------------------|--------|------------------------|-------------------------------|----------------------|--------|
| | | 식 4.5 | 식 4.18 | | | 식 4.5 | 식 4.18 |
| 5 | 2.48 | 75.50 | 72.40 | 11 | 5.45 | 69.44 | 66.96 |
| 7.5 | 3.71 | 72.40 (67.0~83.5) | 69.60 | 13 | 6.44 | 68.15 | 65.81 |
| 9 | 4.46 | 70.98 | 68.35 | 15 | 7.43 | 67.05 (56.8~76.0) | 64.82 |

3) 브레이크

다음과 같은 과업수행 결과식인 (4.6)과

- $VL=92.33 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{1.666}$

기존 진동레벨 예측식인 (4.18)을 인용하여 기준 측정지점 $r_0(7.5m)$ 의 거리에서 기준 진동레벨 $VL_0 = 70.19\text{dB(V)}$ 와 64.05dB(V) 인 경우로 가정하고 진동원으로부터 이격거리에 따른 진동레벨(VL_2)을 산출하면 아래 <표>와 같다.

식(4.18)에서 거리지수 0.81은 향타기, 브레이크, 굴삭기, 천공기, 디젤기, 발전기의 평균값으로 브레이크의 자승근환산거리 지수 1.666과는 상이한 바, 예측 진동레벨은 과업수행 결과식인 (4.6)이 약 11m 이내에서는 기존방식보다 높고 그 이후에서는 낮은 경향을 나타내고 있다. 즉 과업수행 결과식이 기존방식보다는 5m에서는 약 5.5dB(V) 높게 산출되고 15m에서는 약 2.32dB(V) 낮게 산출된다.

아래 표를 감안할 때, 모암 파쇄작업을 하고 있는 브레이크와의 이격거리(r)에 따라 토사지반에서 진동레벨을 예측하는데 있어 브레이크의 충격에너지(E)를 알고 있는 경우 식(4.6)을 인용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다. ()안의 수치는 실측치이다.

| 진동원과 이격거리 $r(m)$ | 자승근 환산거리 (r/\sqrt{E}) | 예측 진동레벨 VL[dB(V)] | | 진동원과 이격거리 $r(m)$ | 자승근 환산거리 (r/\sqrt{E}) | 예측 진동레벨 VL[dB(V)] | |
|------------------------|-------------------------------|----------------------|--------|------------------------|-------------------------------|----------------------|--------|
| | | 식 4.6 | 식 4.18 | | | 식 4.6 | 식 4.18 |
| 5 | 3.25 | 75.79 | 70.23 | 11 | 7.14 | 64.74 | 64.80 |
| | 5.00 | 69.74 | 64.22 | | 11.00 | 58.67 | 58.78 |
| 7.5 | 4.87 | 70.19 (64.4~74.0) | 67.44 | 13 | 8.44 | 62.39 | 63.64 |
| | 7.50 | 64.05 (61.5~68.1) | 61.42 | | 13.00 | 56.33 | 57.63 |
| 9 | 5.84 | 67.56 | 66.18 | 15 | 9.74 | 60.38 (55.0~62.5) | 62.66 |
| | 9.00 | 61.49 | 60.16 | | 15.00 | 54.32 (50.4~57.0) | 56.64 |

4.5.3 건설장비 진동레벨 환산식

1) 진동 로울러

● 주파수를 배제한 진동레벨 환산식

다음과 같은 과업수행 결과 진동레벨 환산식인 (4.7)을 인용하여 주파수를 알 수 없는 상태에서 예측한 진동속도에 대한 예측 진동레벨을 산출하여 아래 <표>에 나타냈다.

- $VL=20 \cdot \text{Log}(V_v)^{0.884} + 88.28$

● 주파수를 고려한 진동레벨 환산식

본 과업수행에 사용한 진동 로울러의 진동 주파수 대역은 20~40Hz 범위에 있었으며, 진동레벨 환산식인 (4.12), (4.13)를 인용하여 임의의 진동속도에 따른 주파수 범위별로 예측 진동레벨을 산출하여 아래 <표>에 나타냈다. ()안의 수치는 江島 식에 의한 결과이다

- 진동 주파수 $20 < f \leq 30$

$$VL=20 \cdot \text{Log}(V_v)^{0.990} + 100.45 + W_n$$

- 진동 주파수 $30 < f \leq 40$

$$VL=20 \cdot \text{Log}(V_v) + 102.84 + W_n$$

| 식 구분 | 주파수 대역 | 진동 로울러 임의의 진동속도(cm/sec) | | | | | |
|--------|------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 |
| 식 4.7 | 주파수 배제 | 65.28 (64.98) | 70.60 (71.0) | 73.71 (74.52) | 75.92 (77.02) | 77.64 (78.96) | 79.04 (80.54) |
| 식 4.12 | $20 < f \leq 30$ | 63.21 ~ 66.73 | 69.17 ~ 72.69 | 72.66 ~ 76.18 | 75.13 ~ 78.61 | 77.05 ~ 80.57 | 78.62 ~ 82.14 |
| 식 4.13 | $30 < f \leq 40$ | 62.84 ~ 65.34 | 68.86 ~ 71.36 | 72.38 ~ 74.88 | 74.88 ~ 77.38 | 76.82 ~ 79.32 | 78.40 ~ 80.90 |

진동 로울러의 다짐 작업으로 인해 발생한 진동속도 0.05~0.30cm/sec의 범위에서

○ 주파수를 배제한 식과 江島 식의 진동레벨은 거의 유사하나, 진동속도가 증가하면서 편차도 증가하여 진동속도 0.3cm/sec에서는 약 1.5dB(V)의 편차가 발생한다.

○ 주파수 영역 $20 < f \leq 30$ 범위의 진동레벨은 주파수를 배제한 진동레벨에 비해, 낮은 주파수 영역에서는 약 1.45~3.10dB(V) 편차가 있고, 상대적으로 높은 주파수 영역에서는 약 0.42~2.07dB(V)의 편차를 보인다.

○ 주파수 영역 $30 < f \leq 40$ 범위의 진동레벨은 주파수를 배제한 진동레벨에 비해, 낮은 주파수 영역에서는 약 0.06~1.86dB(V) 편차가 있고, 상대적으로 높은 주파수 영역에서는 약 0.64~2.44dB(V) 편차를 보인다.

○ 주파수 영역 $20 < f \leq 30$ 범위의 진동레벨은 江島 식에 비해, 낮은 주파수 영역에서는 약 1.75~3.10dB(V) 편차가 있고, 상대적으로 높은 주파수 영역에서는 약 0.38~1.77dB(V) 편차를 보인다.

○ 주파수 영역 $30 < f \leq 40$ 범위의 진동레벨은 江島 식에 비해, 낮은 주파수 영역에서는 약 0.36~0.40dB(V) 편차가 있고, 상대적으로 높은 주파수 영역에서는 약 1.31~3.54dB(V) 편차를 보인다.

○ 진동레벨 예측지점에서 주파수가 확인된 진동속도를 주파수 대역이 다른 진동레벨 환산식에 적용하면 오차가 발생한다.

따라서

◆ 진동레벨 예측지점에서 추정된 진동속도를 이용해야 하는 경우에는 식(4.7)을 인용하여 진동레벨을 구할 수 있으며,

◆ 진동레벨 예측지점에서 주파수가 확인된 경우의 진동속도를 이용하는 경우에는 주파수 대역별 진동레벨 환산식인 (4.15), (4.16)을 각각 인용하여 진동레벨을 구할 수 있다.

2) 바이브로 햄머

● 주파수를 배제한 진동레벨 환산식

진동레벨 환산식 (4.8)을 인용하여 주파수를 알 수 없는 상태에서 예측한 진동속도에 대한 진동레벨을 산출하여 아래 <표>에 나타냈다. ()안의 수치는 江島 식 결과이다.

- $V_L = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.132} + 92.91$

● 주파수를 고려한 진동레벨 환산식

본 실험에서 바이브로 햄머의 진동 주파수 대역은 10~30Hz 범위에 있었으며, 진동레벨 환산식 (4.15), (4.16)을 인용하여 임의의 진동속도에 따른 주파수 범위별로 예측 진동레벨을 산출한 결과를 아래 <표>에 나타냈다.

- 진동 주파수 $10 < f \leq 20$

$$V_L = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.143} + 99.14 + W_n$$

- 진동 주파수 $20 < f \leq 30$

$$V_L = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.092} + 100.39 + W_n$$

| 식 구분 | 주파수 대역 | 바이브로 햄머 임의의 진동속도(cm/sec) | | | | | |
|--------|------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 |
| 식 4.8 | 주파수 배제 | 63.45 (64.98) | 70.27 (71.0) | 74.3 (74.52) | 77.09 (77.02) | 79.28 (78.96) | 81.07 (80.54) |
| 식 4.16 | $10 < f \leq 20$ | 61.44~ 67.46 | 68.32~ 74.34 | 72.35~ 78.37 | 75.20~ 81.22 | 77.42~ 83.44 | 79.23~ 85.25 |
| 식 4.15 | $20 < f \leq 30$ | 60.50~ 64.02 | 67.07~ 70.59 | 70.92~ 74.44 | 73.64~ 77.16 | 75.76~ 79.28 | 77.49~ 81.01 |

파일링 작업으로 인해 발생한 진동속도 0.05~0.30cm/sec의 범위에서

○ 주파수를 배제한 식과 江島 식의 진동레벨은 소수점 이하의 값으로 차이가 나지만, 진동속도 0.05cm/sec에서는 주파수를 배제한 과업수행 결과식이 약 1.53dB(V) 낮게 나타난다.

○ 주파수 영역 $10 < f \leq 20$ 범위의 진동레벨은 주파수를 배제한 진동레벨에 비해, 낮은 주파수 영역에서는 약 4.01~4.18dB(V) 편차가 있고, 상대적으로 높은 주파수 영역에서는 약 1.84~2.01dB(V) 편차를 보인다.

○ 주파수 영역 $20 < f \leq 30$ 범위의 진동레벨은 주파수를 배제한 진동레벨에 비해, 낮은 주파수 영역에서는 약 0.06~0.57dB(V) 편차가 있고, 상대적으로 높은 주파수 영역에서는 약 3.05~2.95dB(V) 편차를 보인다.

○ 주파수 영역 $10 < f \leq 20$ 범위의 진동레벨은 江島 식에 비해 저주파수에서 약 2.48~6.71dB(V) 편차가 있고, 고주파수에서는 약 1.31~3.54dB(V) 편차를 보인다.

○ 주파수 영역 $20 < f \leq 30$ 범위의 주파수에서 약 3.05~4.48dB(V) 편차가 있고, 저주파수에서 최대 약 0.96dB(V) 편차를 보인다.

○ 진동레벨 예측 지점에서 주파수가 확인된 진동속도를 주파수 대역이 다른 진동레벨 환산식에 적용하면 오차가 발생한다.

따라서

◆ 진동레벨 예측지점에서 추정된 진동속도를 이용해야 하는 경우에는 부득이 식(4.8)을 인

용하여 진동레벨을 예측할 수 있으며,

◆ 진동레벨 예측 지점에서 주파수가 확인된 진동속도를 이용하는 경우에는 주파수 대역별 진동레벨 환산식인 (4.15), (4.16)를 각각 인용하여 진동레벨을 예측할 수 있다.

3) 브레이커

● 주파수를 배제한 진동레벨 환산식

진동레벨 환산식 (4.9)을 인용하여 주파수를 알 수 없는 상태에서 예측한 진동속도에 대한 예측 진동레벨을 산출하여 아래 <표>에 나타냈다. ()안의 수치는 江島 식 결과이다.

- $V_L = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.201} + 92.15$

● 주파수를 고려한 진동레벨 환산식

본 실험에서 브레이커의 진동 주파수 대역은 20~40Hz 범위에 있었으며, 진동레벨 환산식 (4.17)을 인용하여 임의의 진동속도에 대한 예측 진동레벨을 산출하여 아래 <표>에 나타냈다.

- $V_L = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.217} + 103.6 + W_n$

| 식 구분 | 주파수 대역 | 브레이커 임의의 진동속도(cm/sec) | | | | | |
|--------|-------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 |
| 식 4.9 | 주파수 배제 | 60.90 (64.98) | 68.13 (71.00) | 72.36 (74.52) | 75.36 (77.02) | 77.69 (78.96) | 79.59 (80.54) |
| 식 4.17 | 20 < f ≤ 40 | 57.95~ 63.97 | 65.28~ 71.30 | 69.57~ 75.59 | 72.61~ 78.63 | 74.97~ 80.99 | 76.89~ 82.91 |

브레이커 작업으로 인해 발생한 진동속도 0.05~0.30cm/sec의 범위에서

○ 주파수를 배제한 식의 진동레벨은 江島 식에 비해 약 0.95~4.08dB(V) 낮게 산출되는 것으로 나타났다.

○ 주파수 영역 $20 < f \leq 40$ 범위의 진동레벨은 주파수를 배제한 진동레벨에 비해, 주파수가 낮은 영역에서는 약 3.07~3.32dB(V) 편차가 있고, 상대적으로 주파수가 높은 영역에서는 약 2.70~2.95dB(V)의 편차를 보인다.

○ 주파수 영역 $20 < f \leq 40$ 범위의 진동레벨은 江島 식에 비해, 주파수가 낮은 영역에서는 약 1.01~2.37dB(V) 편차가 있고, 상대적으로 주파수가 높은 영역에서는 약 3.65~7.03dB(V)의 편차를 보인다.

따라서

◆ 추정된 진동속도를 이용해야 하는 경우에는 식(4.9)을 인용하여 해당 지점에서의 진동레벨을 예측하고,

◆ 주파수가 확인된 진동속도를 이용하는 경우에는 진동레벨 환산식인 (4.17)을 인용하여 해당 지점에서의 진동레벨을 예측할 수 있다.

4.6 소결

1) 발파진동

(1) 주파수를 배제한 진동레벨 환산식

○ 인체에 대한 피해평가 방법

- 현장에서 시험발파를 실시한 경우 시험발파 결과로부터 산출된 발파진동 전파 추정식 (“V”방향 성분의 최대치를 기준으로 산출한 추정식)을 이용하여 예측한 진동속도(V_V)를 진동레벨 환산식에 입력하는 방법

- 발파공사를 진행하면서 발파현장 주변에서 계측한 자료(“V”방향 성분 최대치)들을 분석함으로써 산출한 발파진동 전파 추정식을 인용하여 예측한 진동속도(V_V)를 진동레벨 환산식에 입력하는 방법

- 발파공사 현장에서 측정한 자료가 없는 경우 발파진동 전파 추정식

$$\text{배면 : } V_V = 276.12 (D/W^{1/2})^{-1.5908}$$

$$\text{측면 : } V_V = 223.66 (D/W^{1/2})^{-1.5908}$$

$$\text{전방 : } V_V = 171.19 (D/W^{1/2})^{-1.5908}$$

을 인용하여 예측한 진동속도(V_V)를 진동레벨 환산식에 입력하는 방법

$$\blacklozenge \text{ 진동레벨 환산식 : } VL = 20 \cdot \text{Log} V_V + 80$$

○ 구조물에 대한 피해평가

발파공사 현장에서 측정한 자료가 없는 경우

- 발파진동(PVS) 전파 추정식

$$\text{배면 : } V_{PVS} = 345.15 (D/W^{1/2})^{-1.5908}$$

$$\text{측면 : } V_{PVS} = 279.57 (D/W^{1/2})^{-1.5908}$$

전방 : $V_{PVS} = 213.99 (D/W^{1/2})^{-1.5908}$ 을 인용하여 예측한 진동속도를 이용하는 방법

- 발파진동(PPV) 진파 추정식

배면 : $V_{PPV}=310.64 (D/W^{1/2})^{-1.5908}$

측면 : $V_{PPV}=251.62 (D/W^{1/2})^{-1.5908}$

전방 : $V_{PPV}=192.60 (D/W^{1/2})^{-1.5908}$ 을 인용하여 예측한 진동속도를 이용하는 방법

- 현장에서 시험발파를 실시한 경우 시험발파 결과로부터 산출된 발파진동 진파 추정식을 인용하여 진동속도를 예측하는 방법

(2) 주파수를 고려한 진동레벨 환산식

- 발파공사를 진행하면서 예측지점에서 계측한 자료 중 “V”방향 성분의 최대 진동속도와 주파수를 진동레벨 환산식에 입력하는 방법

- 주파수 대역에 적합한 발파 진동레벨 환산식을 선택하고 주파수 보정치(W_n)를 반영하여 발파 진동레벨을 예측

○ 진동레벨 환산식

| 주파수 대역 $f(Hz)$ | 발파 진동레벨-진동속도 관계식 |
|-------------------|---|
| $10 < f \leq 30$ | $V_L=20.0 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.0625} + 90.49 + W_n$ |
| $30 < f \leq 60$ | $V_L=20.0 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.039} + 95.22 + W_n$ |
| $60 < f \leq 90$ | $V_L=20.0 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.9925} + 98.20 + W_n$ |

2) 건설장비 진동

(1) 주파수를 배제한 진동레벨 예측식

◆ 건설장비의 충격에너지(E)를 이용하여 예측지점(r)의 진동속도(V_V) 예측식

○ 진동 로울러 : $V_V=0.321 (r/\sqrt{E})^{-0.6624}$

○ 바이브로 햄머 : $V_V=0.306 (r/\sqrt{E})^{-0.720}$

○ 브레이크 : $V_V=0.984 (r/\sqrt{E})^{-1.372}$ 를 인용하여 해당 지점에서 산출한 진동속도를 다음과 같은 진동레벨 환산식에 입력함으로써 진동레벨 산출

◆ 진동레벨 환산식

○ 진동 로울러 : $VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.884}+88.28$

○ 바이브로 햄머 : $VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.132}+92.91$

○ 브레이커 : $VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.201}+92.15$

◆ 건설장비의 충격에너지(E)를 이용하여 예측지점(r)의 진동레벨 예측식

○ 진동 로울러 : $VL=79.73-20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.599}$

○ 바이브로 햄머 : $VL=82.50-20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.887}$

○ 브레이커 : $VL=92.33-20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{1.666}$

(2) 주파수를 고려한 진동레벨 환산식

진동레벨 예측지점에서 측정한 건설장비의 진동속도(V_V)를 이용하여 진동레벨로 환산하는 건설장비별 주파수 대역에 따른 진동레벨 환산식

○ 진동 로울러

• $20 < f \leq 30$: $VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.990}+100.45+W_n$

• $30 < f \leq 40$: $VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)+102.84+W_n$

○ 바이브로 햄머

• $10 < f \leq 20$: $VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.143}+99.14+W_n$

• $20 < f \leq 30$: $VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.092}+100.39+W_n$

○ 브레이커

• $20 < f \leq 40$: $VL=20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.206}+101.98+W_n$

5. 발파소음레벨 환산방안

5.1 개요

발파소음은 주로 발파원으로부터의 거리, 지발당장약량, 전색길이, 암질, 발파매트 사용 여부 등에 영향을 받으며, 아울러 발파지점의 지형 및 온도, 풍속과 풍향 등의 기상조건도 큰 요인으로 작용하는 바, 그 예측에 상당한 어려움이 있는 것이 사실이다.

대표적인 발파소음(폭풍압) 예측식으로 국외의 경우 Siskind 식 및 SveDeFo 식이 있는데, Siskind 식의 경우는 발파원으로부터의 거리 및 지발당장약량을 제외한 다른 변수를 K 및 n 값으로 반영하고 있으며, SveDeFo 식의 경우는 K 값만을 반영하고 있는 상태이다.

Siskind 등에 의하면 발파음압의 전파와 관련하여는 자승근환산거리보다 삼승근환산거리를 채택하여 추정하는 것이 바람직하다고 보고되고 있다.

전술한 바와 같이, 발파소음은 여러 요인들로 인해 그 예측에 상당한 어려움이 있으며, 현장에서의 실측치와 추정치를 비교한 기존 결과에 의하여도 상당한 편차를 나타내고 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 발파음압을 소음레벨로 환산함에 있어서도 아직까지는 그다지 신뢰도가 높은 방식이 제시되지 않은 것으로 평가되고 있다.

현재의 국내 실정을 종합할 때, 발파조건 등을 근거로 발파풍압을 추정하고 발파풍압을 소음레벨로 환산하는 기법을 정립할 필요가 있다.

5.2 폭음발생 요소

폭약의 폭발로 인해 발생하는 폭음의 주요 구성요소는

- APP(air pressure pulse)

발파지점의 직접적인 암반자체의 변형으로 인한 기압파

- RPP(rock pressure pulse)

폭원과 약간 떨어진 곳의 지반진동으로 인한 반압파

- GRP(gas release pulse)

발파공으로부터 방출되는 가스 누출파

- SRP(stemming release pulse)

불완전한 전색으로 인해 전색물이 분출되면서 발생하는 전색물 분출파 등을 들 수 있다.

일반적으로 기압파는 각각의 발파공에서 발생하여 각 지발마다 각각 정점을 형성한다. 거리

가 멀어지면 각각의 지발 정점은 서로 합해진다. 반압파는 지반의 수직진동에 의하여 생성되는데, 지반진동과 함께 동시에 도달한다. 반압파는 기압파보다 작으며 발파풍압의 하한을 형성한다.

각 파동의 크기는 누출가스파와 전색물 분출파에 의해 조절되며 공발의 가능성에 좌우된다. 이 공발은 보통 예기치 않은 높은 발파소음과 발파풍의 원인이 된다. 공발은 발파공 상부의 전색이 부적절하거나 약장약시 가끔 발생한다.

5.3 발파음압과 소음레벨 현장측정

발파공사 중인 현장에서 발파음압과 소음레벨을 측정하였다.

- 암반조건 : 화강암질 암반
- 발파규모 : 소규모 진동제어발파 : 지발당장약량 0.75kg
중규모 진동제어발파 : 지발당장약량 2.00kg
- 사용폭약 : 에멀전 계열 폭약
- 폭원과 이격거리 : 약 30~90m 범위
- 사용계측기 : - 발파진동 측정기
- 소음 전용측정기
- 소음측정기 사양

| 구 분 | 제 원 |
|---------------------|---|
| Microphone | 1/2" removable prepolarised condenser microphone (P-05) |
| Functions | Fast (LF), Slow (LS), Pico (Lpk), equivalent continuous sound level (LeqT) and their maximums, statistical measurements, percentiles (L10,L50, L90). Clock (indicates the duration of the measurement). |
| Standards | IEC 60651:1979 (A1:1993), UNE-EN 60651:1996 (A1:1997), IEC 60804:1985 (A1:1989, A2:1993), UNE-EN 60804:1996 (A2:1997) all as Class 2. Spanish regulations governing legal metrology (Pattern approval no.99007) |
| Background noise | <21 dBA without microphone |
| Outputs | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Serial (RS-232) at 9,600 bauds for printer and PC connect ▶ AC non-weighted output direct from the preamplifier (max. 2.7 V RMS) ▶ DC output equivalent to 10 mV/dB display |
| Frequency weighting | A and C for all functions except Lpk (C only) |
| Peak range | Up to 140 dBC |
| Measurement range | 26.5 to 137 dB(A) |
| Indications | Overload and flat battery |
| Battery | 1 6LF22-type 9 V alkaline or lithium battery |
| Dimesions | 260 x 82 x 19 mm |
| Weight | 600 gr with battery |



(SC-15c)

| 구 분 | 제 원 |
|---------------------|--|
| Microphone | ▶ 1/2" removable 200 V polarised condenser microphone (C-130) ▶ or 1/2" removable prepolarised condenser microphone (C-250) |
| Measurement range | ▶ LF, L5, LI, LE and Leq ▶ Limits: 0 - 137 dB ▶ Upper Limit superior crest factor 3, 5 and 10: 130, 126 and 120 dB ▶ Limits Lpeak: 0 -140 dB |
| Frequency weighting | Complies with the UNE-EN 60651 type 1 standard. weightings A, C and Z. |
| Time weighting | LI, LF and LS according to class 1 tolerances. |
| Standards | EN 60651:94 (A1:94/A2:01) type 1. EN 60804:00 type 1. IEC 1260:95 type 1. |
| Mark | CE |
| Electrical noise | 14, 5 and 22,0 db (typical) with Frequency weighting A and C. |
| AC Output | ▶ Lineal frequency weighting ▶ Sensitivity to 137 dB and 1 KHz of 7,4 Vrms (typical, with 0 dB Gain) ▶ Upper limit of 9,5 Vrms (typical) ▶ Output impedance 100 ▶ Gain of 40 ±0,2 dB |
| Octave filters | Type 1 according to IEC 1260:95 Nominal octave bands central frequency: 31'5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz |
| Battery | 1 6LF22-type 9 V alkaline or lithium battery |
| Dimesions | 340 x 82 x 19 mm |
| Weight | 627 gr with battery |



(SC-310)

◆ 발파 소음레벨과 음압레벨 계측



5.4 계측자료 회귀분석을 통한 환산방식 제안

5.4.1 발파 소음레벨 예측

1) 미광무국 실험식

$$SPL = 20 \cdot \log(P/P_0)$$

$$P = 18.636 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.20}$$

$$SPL[dB(A)] = 119.39 - 20 \cdot \log \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{1.20}$$

여기서 SPL : 소음레벨 [dB(A)]

L : 폭원과의 이격거리 (m)

W : 지발당 최대장약량 (kg)

P : 폭원과 D (m)만큼 이격된 지점에서 측정된 음압 (P_a)

P_0 : 최저 가청음압 ($2 \times 10^{-5} P_a$)

2) 한국환경정책·평가연구원 식

미광무국 실험식을 근간으로 산출한 발파 소음레벨 (SPL)을 다음과 같이 보정하여 제시하고 있다.

$$SPL_1 = 0.94 \cdot SPL + 3.42$$

3) 과업수행 결과식

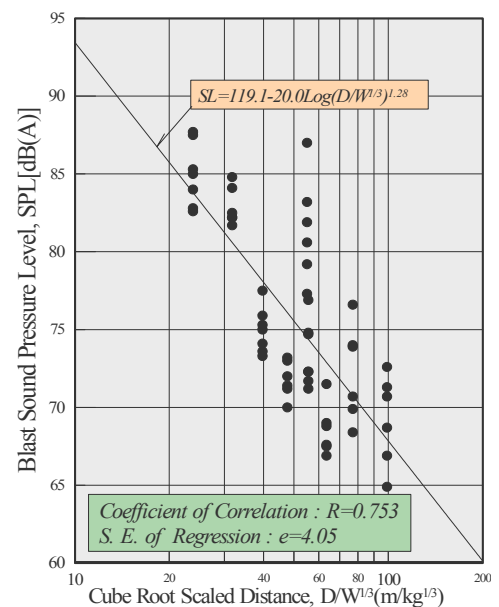
현장에서 얻은 발파 소음레벨 계측자료를 회귀분석하여 다음과 같은 식을 산출하였다.

$$SPL = 20 \cdot \log(P_f/P_0)$$

$$SPL[dB(A)] = 119.1 - 20 \cdot \log \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{1.28} \quad (5.1)$$

$$P_f = 18.03 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.28}$$

여기서 P_f 는 발파소음 예측식을 산출한 후 역 계산



발파 소음레벨과 삼승근환산거리 관계

한 예측 음압이다.

그림은 발파 소음레벨과 삼승근환산거리와의 관계를 나타내고 있다.

4) 발파 소음레벨 예측식 비교

미광무국 실험식과 한국환경정책·평가연구원 식 및 과업 실험식을 인용하여 각각의 삼승근 환산거리에 대해 예측한 발파 소음레벨은 아래 표와 같다.

| 삼승근환산거리 ($\frac{D}{\sqrt[3]{W}}$) | 발파 소음레벨 [dB(A)] | | | 비고 |
|--|-----------------|----------------|----------|----|
| | 미광무국 실험식 | 한국환경정책·평가연구원 식 | 과업수행 결과식 | |
| 10 | 95.4 | 93.1 | 93.5 | |
| 13 | 92.7 | 90.5 | 90.6 | |
| 20 | 88.2 | 86.3 | 85.8 | |
| 30 | 83.9 | 82.3 | 81.3 | |
| 40 | 80.9 | 79.5 | 78.1 | |
| 60 | 76.7 | 75.5 | 73.6 | |
| 80 | 73.7 | 72.7 | 70.4 | |
| 100 | 71.4 | 70.5 | 67.9 | |
| 120 | 69.5 | 68.7 | 65.9 | |
| 150 | 67.2 | 66.6 | 63.4 | |
| 200 | 64.2 | 63.7 | 60.2 | |

○ 한국환경정책·평가연구원 식을 인용하여 예측한 발파 소음레벨은 미광무국 실험식을 인용한 결과에 비해 전반적으로 낮은 경향을 보이거나, 삼승근환산거리 약 400에서 동일한 소음레벨이 된다.

○ 과업 실험식을 인용하여 예측한 발파 소음레벨은 삼승근환산거리 약 13 미만에서 한국환경정책·평가연구원 식을 인용한 결과보다 높으나, 그 이상의 삼승근환산거리에서는 낮아지는 경향을 보이고 있다. 또한 전반적으로 미광무국 실험식보다 낮은 경향을 보인다.

점음원과의 이격거리에 따른 음압레벨의 변화 기본식은 다음과 같다.

$$SPL = SPL_o - 20 \cdot \text{Log}(r/r_o)$$

여기서 SPL_o 는 소음원과 이격거리 r_o 에서 음압레벨이고, SPL 은 예측지점(r)에서의 음압레벨이다. r 이 r_o 의 2배인 경우 약 6.0dB(A)가 감쇄된다.

지발당장약량이 동일한 경우 이격거리가 2배이면 삼승근환산거리도 2배가 되며 이때 약 6.0dB(A)가 감쇄되어야 한다.

○ 과업 실험식은 소음원과 이격거리에 따른 음압레벨이 약 7.7dB(A) 변화하고 있다.

5) 합성소음도 산출 공식

몇 개의 소음원에서 발생하는 각각의 소리의 세기를 소음원과 이격된 임의의 지점에서의 합성 소음도는 다음과 같이 구할 수 있다.

소리의 세기를 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 으로 나타낼 때,

이 때 소리 세기의 총합은 $I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$ 이 되고, 이 소리의 세기레벨 $SL_i (i = 1 \sim n)$ 는 다음과 같이 된다.

$$SL_1 = 10 \cdot \text{Log} \frac{I_1}{I_o} \quad \text{에서} \quad I_1 = I_o \cdot 10^{(SL_1/10)}$$

$$SL_2 = 10 \cdot \text{Log} \frac{I_2}{I_o} \quad \text{에서} \quad I_2 = I_o \cdot 10^{(SL_2/10)}$$

$$SL_3 = 10 \cdot \text{Log} \frac{I_3}{I_o} \quad \text{에서} \quad I_3 = I_o \cdot 10^{(SL_3/10)}$$

. . .
.
.

$$SL_n = 10 \cdot \text{Log} \frac{I_n}{I_o} \quad \text{에서} \quad I_n = I_o \cdot 10^{(SL_n/10)}$$

따라서

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \\ &= I_o [10^{(SL_1/10)} + 10^{(SL_2/10)} + 10^{(SL_3/10)} + \dots + 10^{(SL_n/10)}] \end{aligned}$$

이것을 dB로 나타내면

$$\begin{aligned}
L_c &= 10 \cdot \text{Log} \frac{I}{I_o} \\
&= 10 \cdot \text{Log} \left[10^{(SL_1/10)} + 10^{(SL_2/10)} + 10^{(SL_3/10)} + \dots + 10^{(SL_n/10)} \right] \\
&= 10 \cdot \text{Log} \left(\sum_{i=1}^n N_i \times 10^{\frac{SL_i}{10}} \right) \tag{5.2}
\end{aligned}$$

여기서 I : 음의 세기(W/m^2) n : 사용된 장비의 수
 I_o : 기준음의 세기($10^{-12} W/m^2$) N_i : 장비별 대수
 L_c : 합성 소음도[$dB(A)$] SL_i : 장비별 소음도[$dB(A)$]

※ 합성 진동레벨 또한 합성 소음도와 같은 방식으로 구할 수 있다.

5.4.2 발파음압레벨 예측

○ 기존 발파 음압레벨 예측식

$$\begin{aligned}
SPL &= 20 \cdot \log(P/P_o) \\
P &= 3320 \cdot \left(\frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-1.20} \\
SPL[dB(L)] &= 164.4 - 24 \cdot \log \left(\frac{D}{3\sqrt{W}} \right) \tag{5.3}
\end{aligned}$$

여기서 SPL : 음압레벨 [$dB(L)$]
 L : 폭원과의 이격거리(m)
 W : 지발당장약량(kg)
 F : 폭원과 $D(m)$ 만큼 이격된 지점에서 보정된 음압(P_a)
 P_o : 최저 가청음압($2 \times 10^{-5} P_a$)

○ 발파 음압레벨 예측식(과업수행 결과식)

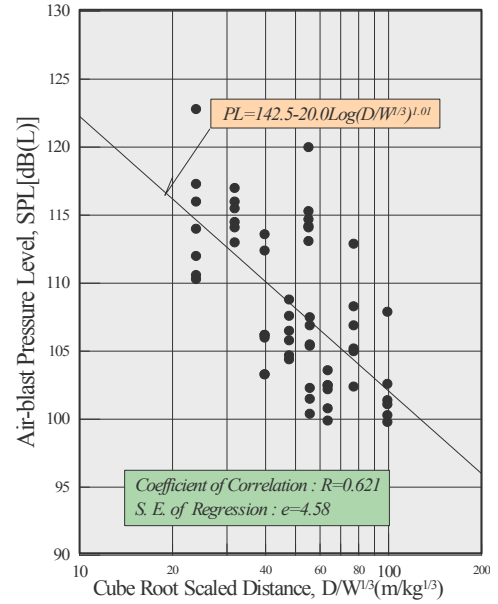
현장에서 얻은 발파 폭풍압 계측자료를 회귀분석하여 다음과 같은 식을 산출하였다.

$$\begin{aligned}
SPL &= 20 \cdot \log(P_c/P_o) \\
SPL[dB(L)] &= 142.5 - 20 \cdot \log \left(\frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{1.01} \tag{5.3}
\end{aligned}$$

$$P_c = 266.7 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.01}$$

여기서 P_c 는 발파 폭풍압 예측식을 산출한 후 역계산한 예측 음압이다.

과업수행 실험식의 발파 폭풍압은 미 광무국 실험식보다 전반적으로 낮은 경향을 나타내고 있는데, 미광무국 식은 거리가 2배가 되면 약 7.2dB(L) 감소되나, 과업수행 실험식은 약 6dB(L) 감소된다. 이는 Wiss and Linehan's 연구(1978)에서 약 7.7dB(L) 감소되는 결과와도 약간의 차이가 있다.



발파폭압과 삼승근환산거리와의 관계

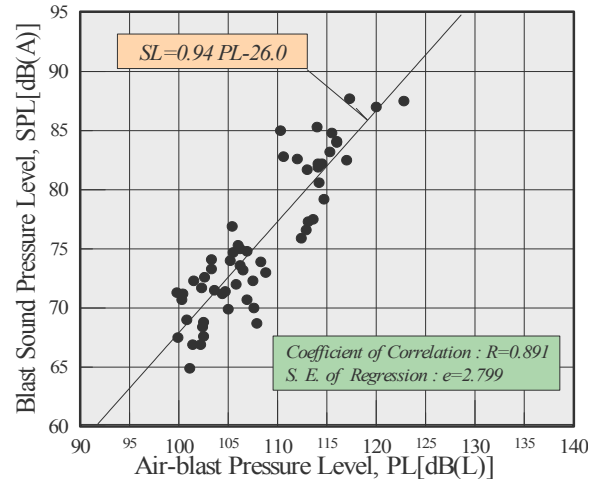
5.4.3 발파음압레벨과 소음레벨 환산방안

발파현장에서 측정된 발파 음압레벨[dB(L)]과 소음레벨[dB(A)]을 측정하여 이들의 상관관계를 회귀분석한 결과는 다음과 같다.

$$SPL[dB(A)] = 0.94 \cdot SPL[dB(L)] - 26.0 \quad (5.4)$$

○ 그림은 발파 소음레벨과 음압레벨과의 관계를 나타내고 있다.

○ 발파 음압레벨과 소음레벨과의 상관계수는 0.891이고, 회귀식의 표준오차는 2.799이다.



발파 소음레벨과 음압레벨과의 관계

○ 과업수행 결과식의 음압레벨에 따른 소음레벨의 보정치

| 음압레벨 [dB(L)] | 소음레벨 [dB(A)] | 소음레벨 보정치 | 음압레벨 [dB(L)] | 소음레벨 [dB(A)] | 소음레벨 보정치 |
|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|
| 110 | 77.4 | -32.6 | 140 | 105.6 | -34.4 |
| 120 | 86.8 | -33.2 | 150 | 115.0 | -35.0 |
| 130 | 96.2 | -33.8 | 160 | 124.4 | -35.6 |

- 발파 음압레벨 110~160dB(L)범위에서 소음레벨과는 32.6~35.6dB 차이를 보인다.

5.5 소결

- 발파 소음레벨은 예측식은 다음과 같이 산출되었다.

$$SPL[dB(A)] = 119.1 - 20 \cdot \log\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{1.28}$$

- 발파 음압레벨 예측식은 다음과 같이 산출되었다.

$$SPL[dB(L)] = 142.5 - 20 \cdot \log\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{1.01}$$

- 발파 음압레벨[dB(L)]과 소음레벨[dB(A)]과는 다음과 같은 관계로 산출되었다.

$$SPL[dB(A)] = 0.94 \cdot SPL[dB(L)] - 26.0$$

- 합성소음도 산출 공식

$$L_C = 10 \cdot \text{Log}\left(\sum_{i=1}^n N_i \times 10^{\frac{SPL_i}{10}}\right)$$

※ 합성 진동레벨 또한 합성 소음도와 같은 방식으로 구할 수 있다.

6. 진동피해평가 프로세스 고찰

6.1 개요

본 장에서는 환경분쟁조정사건에서 진동피해를 평가하는데 검토가 요망되는 주요 항목을 실무적 차원에서 정리하고자 한다.

진동으로 인한 피해는 진동원의 특성, 수진 측과의 지반전달 특성 그리고 그 대상이 건물인 경우에는 해당 구조물의 응답특성 등에 따라 크게 달라지며, 이러한 요소들이 서로 간섭하여 더욱 많은 변수를 초래하게 된다.

따라서, 평가 결과의 신뢰도 제고를 위해서는 진동이 발생하여 수진체에 작용하기까지의 과정을 단계적으로 구분하여 관련 자료를 체계적으로 확보한 후 이를 종합적으로 평가하는 것이 요구된다.

진동피해 평가를 위한 현장조사 시 조사해야 할 항목은 크게 “진동 발생원과 관련한 자료”, “전파경로와 관련한 자료”, “수진체와 관련한 자료” 및 “기존 측정결과와 관련한 자료” 등으로 분류될 수 있다.

6.2 진동발생원에 대한 검토

진동 발생원은 크게 “건설현장에서의 굴착 및 석산에서의 채광, 채석 등을 위한 발파로 인한 진동”과 “건설현장 등에서 사용하는 장비에 의한 진동”, 그리고 “차량 운행 등에 의한 교통진동”으로 나눌 수 있으며 각 발생원별 검토 항목은 다음과 같이 요약된다.

1) 발파진동

일반적으로, 발파진동은 인위적으로 발생하는 진동 중에서 주변에 미치는 영향도가 가장 큰 것으로 평가되는데, 현장조사 시에는 지질조사보고서, 시험발파보고서, 발파작업일지 등의 관련 자료를 참조하여 아래와 같은 사항을 확인하도록 한다.

- 발파 대상지역의 지질 및 암질 확인
- 시험발파 자료 확인

⇒ 관리목표치, 진동전파 추정식(회귀분석 자료 수 검토),

이격거리별 지발당 최대허용장약량

- 발파패턴 및 제원 확인(발파일지 검토 ⇒ 시험발파 보고서와 본 발파 시의 비교)
- 발파지점별 실제 사용된 지발당 최대장약량 확인
- 발파유형(노천, 터널, 터파기 등) 및 공법 확인
- 사용화약류(폭약종류 및 뇌관종류 등) 수량 확인
- 발파 보호공(안전매트)의 사용 유무와 규격 확인
- 현장 계측위치 및 자료 확인
- 발파기간 및 빈도 확인 등

2) 건설장비 진동

건설장비에 의한 발생 진동의 수준은 발파의 경우보다는 그 정도가 경미하다고 할 수 있으나, 소음은 발생원의 수가 많고 지속적이기 때문에 인체는 물론 건축물 피해 관련 민원도 빈번히 제기되고 있는 실정이다.

현장조사 시에는 지반조사보고서, 사용 장비 내역, 작업일보 등의 관련 자료를 참조하여 아래와 같은 사항을 확인하도록 한다.

- 대상지역의 지반상태 확인
- 적용공종 등 공사내용 확인(설계도서 검토)
- 적용공종별 사용 장비 종류, 용량 및 대수 확인
- 장비사용 위치 확인
- 각 장비별 사용기간, 작업시간대, 빈도 확인
- 사용 장비 중 최대진동 유발원 선별 등

3) 교통진동

도로 주행차량 등으로부터 노면에 가해지는 충격이 지반을 통해 전파되는 것으로 일반적으로 진동보다 소음 부분이 더욱 문제시되는 분야이나 간혹 주변 거주자 및 건축물에 진동피해를 발생시키는 경우도 있다. 현장조사 시에는 관련자료 등을 참조하여 아래와 같은 사항을 확인하도록 한다.

- 운행차종 및 중량 확인

- 적재물의 종류 및 운행속도 확인
- 도로 및 지반조건, 도로 폭, 노면상태, 과속방지턱 등 확인
- 도로 파손상태 및 보수이력 확인
- 운행시기 및 빈도 확인 등

6.3 진동전달 경로에 대한 검토

지반을 전파매체로 하는 진동의 경우에는 매체경로가 되는 지반의 조건에 따라 그 진동 전파양상은 크게 영향을 받게 된다.

즉, 진동은 지반의 층격 흡수성과 매질의 밀도, 지형 및 지질구조, 고저차이 등과 같은 경로의 제반조건에 따라 전파되는 진동의 크기가 달라질 수 있다.

현장조사 시에는 건설현장 도면, 지질조사보고서, 개황도 및 현장관찰 등 관련 자료를 참조하여 아래 사항을 확인하도록 한다.

- 피해대상(수진·수음체)과의 이격 사거리 확인(CAD 도면 입수)
- 진동·소음 발생지점과 피해대상과의 고저차이 확인(CAD 도면 입수)
- 음원 주변 상태(음의 분산이나 반사 등에 영향을 줄 수 있는 요소)파악
- 전파경로상의 지반조건 및 지형 파악
- 전파경로 상의 진동·소음 증감요인 확인(파로효과 영향, 구거, 암거, 옹벽 및 인공 장애물 종류 및 규격 등)
- 전파경로 상에 위치한 타 시설물 및 도로의 상태 확인 등

6.4 수진체에 대한 검토

피해대상이 인근 거주자로 국한될 경우에는 관련서류를 참조하여 대상 인원수 등을 파악하면 될 것이나, 그 대상에 건물이 포함될 경우에는 관련자료 및 대상건축물에 대한 면밀한 조사를 통해 아래와 같은 사항을 확인하도록 한다.

특히, 1997년 7월 공포된 건설기술 관리법 시행령(제 46조의 2 내지 제 46조의 3)에서 “지하 10m 이상 굴착하거나 폭발물 사용공사로서 20m안에 시설물이 있을 경우 또는 100m안의 양육가축에 영향이 예상되는 건설공사”에 대하여는 안전관리 계획을 수립하도록 한 바, 근래

에 들어서는 해당공사의 건설업자가 피해가 예상되는 부분에 대한 현황조사를 착공 이전의 시점에서 제 3자에 의뢰·실시하게 함으로써 균열 등의 결함을 객관적으로 자료화시켜 놓은 경우도 상당하므로 이를 확보할 경우 진동피해 정도를 판단하는데 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

- 건물개요 확인(용도, 규모, 준공시기, 증축 여부 등)
- 설계도면 보유 여부 확인
- 지반상태, 기초상태, 구조형식 등 확인
- 건물에 발생한 결함조사(발생 원인에 대한 개략적 평가 포함)
- 대상건물 사전 현황조사 및 진단, 감정 실시 여부 확인
- 균열계이지 등을 통한 기존 결함의 진전도 조사 여부 확인
- 건물의 시공성 및 노후도 확인
- 건물 각 부위별 재하상태 확인(필요시, 결함 위치와 연관·평가 요망)
- 주변에 위치한 타 건물 상태 확인
- 최대진동 수진시기 확인
- 건물 보수이력 및 용도·구조변경 여부 확인
- 보수·보강 견적서 확인(적정성 평가 포함)
- 민원발생 이력 확인 등

6.5 각종 자료에 대한 검토

진동피해를 평가하는데 있어 중요한 척도인 진동속도 및 진동레벨은 추정을 통한 값보다 실 측정된 값을 우선적으로 고려하는 것이 당연하다고 할 것이다. 그러나, 이 경우에도 측정 장비 및 위치 등에 따른 변수도 상당하므로 아래 사항에 대한 검토가 요구된다.

- 측정 장비 및 상태 확인
- 측정위치의 적정성 확인
- 측정조건 및 시간 확인
- 측정데이터 분석(주파수대역, V방향 성분, PPV, PVS 등)
- 측정치와 추정치의 비교·검토 등

7. 결론

7.1 진동 추정방안

1) 발파진동 추정

(1) 진동 예측지점이 자유면 배면(후방)에 위치하는 경우

○ 발파진동(PVS, PPV, V)전파 추정식

$$V_{PVS} = 345.15 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

$$V_{PPV} = 310.64 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

$$V_V = 276.12 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

(2) 진동 예측지점이 자유면 측방에 위치하는 경우

$$V_{PVS} = 279.57 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

$$V_{PPV} = 251.62 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

$$V_V = 223.66 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

(3) 진동 예측지점이 자유면 전방에 위치하는 경우

$$V_{PVS} = 213.99 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

$$V_{PPV} = 192.60 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

$$V_V = 171.19 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5908}$$

○ 현장에서 시험발파를 실시하지 않은 경우에는, 상기 과업수행 결과식을 필요한 진동성분과 예측지점의 방향에 따라 적절하게 적용한다.

○ 본 과업수행 결과식은 확률적으로 100회 발파에서 약 5회 정도는 예측한 진동속도를 초과할 수 있는 발파진동 전파 추정식이다.

○ 각 발파현장마다 암석의 종류와 진동이 전파되는 암반의 상태 및 지형조건, 지질구조 등이 상이하므로 시험발파 결과식의 K값과 n값이 달라질 수밖에 없으며, 따라서 본 과업수행 결과식을 모든 현장에 그대로 적용하여 예측지점의 진동속도를 예측하는 데에는 한계가 있을 수 있다.

따라서, 현장에서 직접 실시한 시험발파 결과식을 이용하여 예측지점의 진동속도를 예측하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 단 현장에서 시험발파를 실시하지 않은 경우에는 과업수행 결과식을 필요한 진동성분과 예측지점의 방향에 따라 적절하게 적용한다.

2) 건설장비 진동 추정

예측지점(r)에서 건설장비 진동(“V”방향 성분)을 추정하기 위해 다음과 같은 식들을 적용할 수 있다.

○ 진동 로울러 : $V_V=0.321 (r/\sqrt{E})^{-0.6624}$

○ 바이브로 햄머 : $V_V=0.306 (r/\sqrt{E})^{-0.720}$

○ 브레이커 : $V_V=0.984 (r/\sqrt{E})^{-1.372}$

7.2 진동레벨과 진동속도 환산방안

1) 발파 진동레벨

○ 진동 주파수를 배제한 진동레벨 환산식

$$VL=20 \cdot \text{Log}V_V+80$$

○ 진동 주파수를 고려한 진동레벨 환산식

- 발파공사를 진행하면서 예측지점에서 실시한 계측자료 중 “V”방향 성분의 최대 진동속도(V_V)와 주파수를 이용하는 진동레벨[dB(V)] 환산식 적용

| 주파수 대역 $f(Hz)$ | 발파 진동레벨-진동속도 관계식 |
|-------------------|---|
| $10 < f \leq 30$ | $V_L = 20.0 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.0625} + 90.49 + W_n$ |
| $30 < f \leq 60$ | $V_L = 20.0 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.039} + 95.22 + W_n$ |
| $60 < f \leq 90$ | $V_L = 20.0 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.9925} + 98.20 + W_n$ |

2) 건설장비 진동레벨

(1) 주파수를 배제한 진동레벨 환산식

◆ 진동속도만을 이용한 진동레벨 환산식

과업수행 결과식인 건설장비 진동 추정식으로 구한 진동속도(V_V)를 아래 식에 입력하여 해당 지점에서의 진동레벨을 예측하는 진동레벨 환산식 이용

○ 진동 로울러 : $V_L = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.884} + 88.28$

○ 바이브로 햄머 : $V_L = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.132} + 92.91$

○ 브레이커 : $V_L = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.201} + 92.15$

◆ 충격에너지(E)를 이용한 해당 지점(r)에서의 진동레벨 예측식

○ 진동 로울러 : $V_L = 79.73 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.599}$

○ 바이브로 햄머 : $V_L = 82.50 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{0.887}$

○ 브레이커 : $V_L = 92.33 - 20 \cdot \text{Log}(r/\sqrt{E})^{1.666}$

(2) 주파수를 고려한 진동레벨 환산식

예측지점에서 측정한 진동속도(V_V)를 이용하여 진동레벨을 구하는데 있어, 다음과 같은 건설장비별 주파수 대역에 따른 진동레벨 환산식 이용

○ 진동 로울러

- $20 < f \leq 30$: $VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{0.990} + 100.45 + W_n$
- $30 < f \leq 40$: $VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V) + 102.84 + W_n$

○ 바이브로 햄머

- $10 < f \leq 20$: $VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.143} + 99.14 + W_n$
- $20 < f \leq 30$: $VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.092} + 100.39 + W_n$

○ 브레이커

- $20 < f \leq 40$: $VL = 20 \cdot \text{Log}(V_V)^{1.206} + 101.98 + W_n$

7.3 발파 음압레벨과 소음레벨 환산방안

○ 폭원과 예측지점과의 이격거리(D)와 지발당 최대장약량을 이용한 발파 소음레벨 [dB(A)] 예측식

$$SPL[dB(A)] = 119.1 - 20 \cdot \log\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{1.28}$$

○ 발파 음압레벨[dB(L)] 예측식

$$SPL[dB(L)] = 142.5 - 20 \cdot \log\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{1.01}$$

○ 발파 음압레벨[dB(L)]과 소음레벨[dB(A)]과의 관계식

$$SPL[dB(A)] = 0.94 \cdot SPL[dB(L)] - 26.0$$

○ 합성소음도 산출 공식

$$L_c = 10 \cdot \text{Log}\left(\sum_{i=1}^n N_i \times 10^{-\frac{SPL_i}{10}}\right)$$

※ 합성 진동레벨 또한 합성 소음도와 같은 방식으로 구할 수 있다.

7.4 진동피해 평가 프로세스

7.4.1 진동발생원

1) 발파진동

현장조사 시에는 지질조사보고서, 시험발파보고서, 발파작업일지 등의 관련 자료를 참조하여 아래와 같은 사항을 확인하도록 한다.

- 발파 대상지역의 지질 및 암질 확인
- 시험발파 자료 확인
⇒ 관리목표치, 진동전파 추정식(회귀분석 자료 수 검토),
이격거리별 지발당 최대허용장약량
- 발파패턴 및 제원 확인(발파일지 검토⇒시험발파 보고서와 본 발파 시의 비교)
- 발파지점별 실제 사용된 지발당 최대장약량 확인
- 발파유형(노천, 터널, 터파기 등) 및 공법 확인
- 사용화약류(폭약종류 및 뇌관종류 등) 수량 확인
- 발파 보호공(안전매트)의 사용 유무와 규격 확인
- 현장 계측위치 및 자료 확인
- 발파기간 및 빈도 확인 등

2) 건설장비 진동

현장조사 시에는 지반조사보고서, 사용 장비 내역, 작업일보 등의 관련 자료를 참조하여 아래와 같은 사항을 확인하도록 한다.

- 대상지역의 지반상태 확인
- 적용공종 등 공사내용 확인(설계도서 검토)
- 적용공종별 사용 장비 종류, 용량 및 대수 확인
- 장비사용 위치 확인
- 각 장비별 사용기간, 작업시간대, 빈도 확인
- 사용 장비 중 최대진동 유발원 선별 등

3) 교통진동

현장조사 시에는 관련자료 등을 참조하여 아래와 같은 사항을 확인하도록 한다.

- 운행차종 및 중량 확인
- 적재물의 종류 및 운행속도 확인
- 도로 및 지반조건, 도로 폭, 노면상태, 과속방지턱 등 확인
- 도로 파손상태 및 보수이력 확인
- 운행시기 및 빈도 확인 등

7.4.2 진동전달 경로

현장조사 시에는 건설현장 도면, 지질조사보고서, 개황도 및 현장관찰 등 관련 자료를 참조하여 아래 사항을 확인하도록 한다.

- 피해대상(수진·수음체)과의 이격 사거리 확인(CAD 도면 입수)
- 진동·소음 발생지점과 피해대상과의 고저차이 확인(CAD 도면 입수)
- 음원 주변 상태(음의 분산이나 반사 등에 영향을 줄 수 있는 요소)파악
- 전파경로상의 지반조건 및 지형 파악
- 전파경로 상의 진동증감요인 확인(파로효과 영향, 구거, 암거, 옹벽 및 인공 장애물 종류 및 규격 등)
- 전파경로 상에 위치한 타 시설물 및 도로의 상태 확인 등

7.4.3 수진체

- 건물개요 확인(용도, 규모, 준공시기, 증축 여부 등)
- 설계도면 보유 여부 확인
- 지반상태, 기초상태, 구조형식 등 확인
- 건물에 발생한 결함조사(발생 원인에 대한 개략적 평가 포함)
- 대상건물 사전 현황조사 및 진단, 감정 실시 여부 확인
- 균열게이지 등을 통한 기존 결함의 진전도 조사 여부 확인
- 건물의 시공성 및 노후도 확인
- 건물 각 부위별 재하상태 확인(필요시, 결함 위치와 연관·평가 요망)

- 주변에 위치한 타 건물 상태 확인
- 최대진동 수신시기 확인
- 건물 보수이력 및 용도·구조변경 여부 확인
- 보수·보강 견적서 확인(적정성 평가 포함)
- 민원발생 이력 확인 등

7.4.4 각종 자료에 대한 검토

- 측정 장비 및 상태 확인
- 측정위치의 적정성 확인
- 측정조건 및 시간 확인
- 측정데이터 분석(주파수대역, V방향 성분, PPV, PVS 등)
- 측정치와 추정치의 비교·검토 등

참 고 문 헌

1. 김태섭 외, “진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구”, 중앙환경분쟁조정위원회, 2002
2. 선호성 외, “공사장 환경분쟁사건 소음·진동도 산출방법 개선 연구”, 중앙환경분쟁조정위원회, 2007.
3. 김홍식 외, “건설현장의 소음·진동·분진 평가 및 저감대책에 관한 연구”, 대한주택공사 주택연구소, 1999.
4. 김홍식 외, “공사장 소음·진동 관리지침서”, 환경부 생활공해과, 2006.
5. 기경철, 김일중, “산·학인을 위한 발파공학”, 동화기술, 2002.
6. 기경철, 김일중, “계단식발파에 있어서 자유면 전·후방의 지반진동에 관한 연구” 대한화약발파공학회, 화약·발파, 2002.
7. 김재수 외, “건설소음·진동”, 세우출판사, 2002.
8. 오금호, “발파하중이 주변구조체에 미치는 영향에 대한 개별요소해석” 연세대학교 대학원 토목공학과(석사학위논문), 2001.
9. 이창훈, “발파공수에 따른 진동속도 특성에 관한 연구” 조선대학교 대학원 자원공학과(석사학위논문), 2001.
10. 김태원, “항타진동이 인접구조물에 미치는 동적 영향 및 대처방안에 대한 연구” 부산대학교 산업대학원 토목공학과(석사학위논문), 2001.
11. 박현성, “암반굴착에 따른 발파진동과 브레이커진동의 특성에 관한 연구” 강원대학교 대학원 지구시스템공학과(석사학위논문), 2001.
12. 한용희, “건설공사시 발파소음·진동에 의한 인근 주민 피해의식 및 반응에 관한 연구” 연세대학교 대학원 환경공학과(석사학위논문), 2001.
13. 김동완, “건설공사장의 지반진동 영향 평가 및 진동예측 프로그램 개발” 경희대학교 대학원 토목공학과(석사학위논문), 2000.
14. 안상용, “지중발파하중이 주변구조물에 미치는 영향에 대한 2차원 및 3차원 해석의 비교 연구” 연세대학교 대학원 토목공학과(석사학위논문), 2000.
15. 박상근, “고속철도 운행에 의한 진동전달특성 및 인접건물에 미치는 영향에 관한 연구” 부경대학교 대학원(석사학위논문), 2000.
16. 김남수, “건설소음·진동의 예측기법과 그 적용에 관한 연구”

- 전남대학교 대학원 자원공학과(박사학위논문), 1999.
17. 김영환, “도심지 미진동 제어발파에서 진동분석에 의한 안전발파설계에 관한 연구”
동아대학교 대학원 자원공학과(석사학위논문), 1999.
 18. 최신훈, “항타에 의한 지반진동의 영향 분석”
영남대학교 산업기술대학원 건설공학과(석사학위논문), 1999.
 19. 안명석, “건설현장에서 안전성 향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에
관한 연구”
동아대학교 대학원 자원공학과(석사학위논문), 1999.
 20. 정지문, “근거리 발파진동으로 인한 구조물의 피해 한계 수준 평가”
전남대학교 대학원 자원공학과(석사학위논문), 1999.
 21. 추영래, “최대 실벡터합과 최대 벡터합의 적용에 관한 연구”
조선대학교 환경보건대학원 환경계획학과(석사학위논문), 1998.
 22. 은정환, “석산발파시 진동속도변화에 관한 연구”
서울시립대학교 산업대학원 환경공학과(석사학위논문), 1998.
 23. 고영선, “발파조건이 지반진동에 미치는 영향에 관한 연구”
청주대학교 대학원 자원공학과(석사학위논문), 1998
 24. 정덕훈, “서울화산암 및 편마암에서 바닥 발파시 발파 진동상수와 감쇄지수의 관계에 관
한 연구”
한양대학교 산업대학원 자원공학과(석사학위논문), 1998.
 25. 이상주, “지표발파시 주파수 특성에 관한 연구”
조선대학교 대학원 자원공학과(석사학위논문), 1998.
 26. 박연수, 박선준, 강성후, “발파진동 추정식의 신뢰성에 대한 연구”
대한토목학회 논문집, 제18권, 제I-1호, 1998. pp143-152
 27. 김종훈, “발파와 낙하충격에 의한 지반진동의 주파수 특성 및 점성 감쇄율에 관한 연구”
강원대학교 대학원(석사학위논문), 1997.
 28. 임수빈, “발파에 의한 터널 굴착에 있어서 발파공 인접 암반의 동적 손상 평가”
경희대학교 대학원 토목공학과(박사학위논문), 1996.
 29. 한국자원연구소, “진동으로 인한 피해의 인과관계 검토기준 및 피해액 산정방법에 관한
연구” 환경부, 1996
 30. 양형석, “발파진동학”, 1992.
 31. 양형석, 주재성, “노천굴발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구”

한국자원공학회지 제 27권, 1990, pp.320-327

32. ANSI standard, "Vibration of buildings-guidelines for the measurement of vibration and evaluation of their effects on buildings", ANSI S2.47, 1990.
33. Ciesielski, R. SWD, "Criterion for building damage from ground vibrations", Proceedings of Symp. on serviceability of buildings, Canada, Vol.1, 1988, pp.579-588
34. DIN 4150-Part 3, "Structural Vibration in Buildings : Effects on Structures", 1986.
35. Dowding, C.H., "Construction Vibrations", Prentice Hall, U.S.A., 1996.
36. Duvall, W.I. and Fogelson, D.E., "Reviewing of criteria for estimating damages to residence from blasting vibrations", USBM, RI 5968, 1969, pp.20-27
37. Holmgerg, R. et al., "Vibrations generated by traffic and building construction activities", Swedish council for building research, Stockholm, Sweden, D15, 1984.
38. Heckl, M., "Structure-borne sound and vibration from rail traffic", J. of sound and vibration, Vol.193, No.1, 1996, pp.175-184
39. Langefers, Ulf et al., "Ground vibrations in blasting", Water Power, 1958, pp.335-338
40. Langefors, U. Kihlstrom, B., "The modern technique of rock blasting", 3rd Ed., Wiley & Sons, 1978, pp.258-293
41. Naruse, H., "Transmission of road vibration", 1st Symp. on environmental vibration architectural institute of Japan, 1983.
42. Northwood, et al., "Blasting vibrations and their effects on structures", US Bureau of Mines Bulletin 656, 1980.
43. Polish standard, "Evaluation of the harmfulness of building vibration due to ground motion", PN/B-02170.
44. Siskind, D.E. et al, "Low-frequency vibrations produced by surface mine blasting over abandoned underground mines", USBM RI 9028, 1987.
45. Siskind, D.E. et al, "Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting", USBM RI 8507, 1980.
46. Siskind, D.E. et al, "Structure response and damage produced by airblast ibration from surface mine blasting", USBM RI 8485, 1980.
47. Sen, G.C. et al., "Ground vibration generated by blasting and by construction equipment", J. of Explosive Engineering, Vol.13, No.4, 1993, pp.25-32
48. Swedish standard, "Vibration and shock guidance levels for blasting-induced vibration

in building", SS 460 48 66, 1991.

49. Schweizer Norm SN 640 312a, "The effects of blasting vibrations on buildings", 1993.
50. USBM, "Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting", USBM Bulletin 656, 19