

발파진동 및 발파소음의 측정 및 자료처리

최병희¹⁾, 류창하^{1)*}

Measurements and Data Processing for Blast Vibrations and Air-blasts

Byung-Hee Choi, Chang-Ha Ryu

Abstract Safe blast criteria based on the concept of scaled distances can be obtained from the statistical analysis on measured peak particle velocity data of blast vibrations. Two types of scaled distance widely used in Korea are the square root scaled distance (SRSD) and cube root scaled distance (CRSD). In contrast to SRSD scheme, however, the function of maximum charge per delay for CRSD increases without bound after the intersection point of these two functions despite of the similar goodness of fits. To prevent structural damage that may be caused by the excessive charge in the case of CRSD, it is suggested that CRSD be used within a specified distance slightly beyond the intersection point. On the other hand, there are several attempts that predict vibration level(VL) from the peak particle velocity(PPV) or estimate VL based on the scaled distances without considering their frequency spectra. It appears that these attempts are conducted in blasting contracts only for the purpose of satisfying the environment-related law, which mainly deals with the annoyance aspects of noises and vibrations in human life. But, in principle there could no correlation between peaks of velocity and acceleration over entire frequency spectrum. Therefore, such correlations or estimations should be conducted only between the waves with the same or very similar frequency spectra. Finally, it is a known fact that structural damage due to ground vibration is related to PPV level, the safety level criteria for structures should be defined by allowable PPV levels together with their zero crossing frequencies (ZCF).

Key words Scaled distance, Peak particle velocity, Blast vibration, Intersection point, Vibration level, Frequency spectrum

초 록 측정된 지반진동의 최대입자속도 자료에 대한 통계분석을 통해 환산거리 개념에 기초한 안전발파 설계조건식을 구할 수 있다. 국내에서 널리 사용되는 환산거리에는 자승근 환산거리(SRSD)와 삼승근 환산거리(CRSD)의 두 가지가 있다. 하지만 SRSD와는 대조적으로, CRSD의 장약량 함수는 두 회귀식의 유사한 적합도에도 불구하고 두 함수의 교점을 지나면 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 CRSD의 지나치게 많은 장약량으로 인해 발생할 지도 모를 구조물의 피해를 방지하기 위해 본 논문에서는 CRSD는 어떤 특정한 거리 이내에서만 사용하도록 제한한다. 한편, 진동의 주파수 스펙트럼에 대한 충분한 고려도 없이 PPV로부터 진동레벨(vibration level; VL)을 예측하거나 환산거리에 따라 VL을 추정하려는 시도들이 있다. 이 시도들은 발파공사 과정에서 소음진동관리법을 충족시키려는 목적으로 이루어지는 것으로 보인다. 소음진동관리법은 생활소음과 생활진동을 주로 취급하고 있다. 그러나 원칙적으로 전체 주파수 스펙트럼 상에서는 속도나 가속도 피크치 사이에는 아무런 상관관계도 존재할 수 없다. 따라서 이러한 상관관계나 추정식의 유도작업은 반드시 동일하거나 매우 유사한 주파수 스펙트럼을 지니는 파동들에 한해서 수행되어야 한다. 끝으로, 구조물의 손상은 PPV 수준과 관련이 있는 것으로 알려져 있으므로 구조물에 대한 지반진동 규제기준에서는 주파수대역별 PPV를 사용하는 것이 바람직하다고 본다.

핵심어 환산거리, 최대입자속도, 발파진동, 교차점, 진동레벨, 주파수 스펙트럼

¹⁾ 한국지질자원연구원

* 교신저자 : cryu@kigam.re.kr

접수일 : 2015년 9월 3일

심사 완료일 : 2015년 9월 9일

게재 승인일 : 2015년 9월 14일

1. 서론

발파공해로서의 발파진동과 발파소음, 그리고 이들 에 대한 제어과정에서는 여러 가지 이론적, 기술적 및 현실적 문제들이 서로 연루되어 나타난다. 이에 본 논문에서는 발파작업으로부터 발생하는 발파진동 및 발파소음을 측정하고 분석하는 방법들에 대하여 그 개념이나 배경이론, 계측상의 유의점 등을 상술함으로써 현장 실무자들이 발파공해의 속성과 자료처리 및 제어발파 설계과정을 쉽게 이해하여 신뢰성 높은 자료를 획득하고, 이를 토대로 효율적인 제어발파를 설계하는 데 도움을 주고자 하였다.

1.1 주요 용어의 정의

발파진동(blast vibration)이란 용어는 광의와 협의의 두 가지 의미로 해석할 수 있다. 광의의 발파진동이란 “발파로 인하여 발생하는 모든 진동”을 의미하며, 여기에는 대표적으로 땅의 떨림인 지반진동(ground vibration)과 공기의 떨림인 발파소음(air blast)이 있다. 아울러 지반진동이나 발파소음으로 인하여 집이나 찬장의 접시 등이 떨리는 2차, 3차 등의 진동들도 모두 광의의 발파진동에 포함된다. 협의의 발파진동이란 “발파로 인하여 발생하는 지반진동”, 즉 땅의 떨림만을 지칭하는 용어이다. 본 논문에서 발파진동이라 하면 이 협의의 발파진동(지반진동)을 뜻하며, 문맥상 혼동이 없을 때는 간단히 “진동”으로 표기한다. 한편, 발파소음도 사실상 공기의 떨림이므로 엄밀히는 ‘진동’의 일종이지만 관습상 진동이라 하지 않는 데, 본 논문에서도 이런 관습을 따른다. 발파소음과 동일한 의미로 사용되는 용어로는 “발파풍”, “발파음”, “폭풍”, “폭음” 등이 있다. 또한, 혼동의 여지가 없을 때는 발파소음도 간단히 “소음”으로 표기한다.

한편, 발파와는 별도로 사람들의 일상생활에서 발생하는 여타의 진동과 소음을 생활진동 및 생활소음이라 한다. 예를 들어, 달리는 자동차가 일으키는 지반진동은 생활진동, 그 소음은 생활소음이 된다. 아파트에서 발생하는 층간진동 및 층간소음도 각기 생활진동 및 생활소음이다. 이들 외에도 비행기 소음, 착암기 소리, 사람들의 떠드는 소리, 방문이 쿵 하고 닫힐 때의 소음이나 벽의 진동 등도 모두 생활진동이나

생활소음의 예가 된다.

1.2 발파와 발파공해

발파공해 내지 발파재해의 주요 원인으로는 (i) 발파진동, (ii) 발파소음, (iii) 파쇄암의 비산 등을 들 수 있다. 이들은 발파장소 부근의 민가나 건물, 터널, 암사면 구조물 등에 피해를 주거나 시설물의 오작동을 일으키기도 하며, 때로는 인명피해를 가져오기도 한다. 국내의 경우 1970년대만 하더라도 발파와 관련된 민원문제는 심각한 고려 대상이 아니었으나 이후 인구 밀집지역에서의 발파작업이 증가하고 경제성장과 의식구조의 변화와 더불어 발파공해에 대한 민원문제가 급증하여 안전이 발파설계의 최우선적 과제로 급부상하였다.

국내와 국외를 불문하고 빈발하는 발파민원 가운데 대다수는 사람들이 발파진동을 지진(earthquake)과 비슷한 것으로 오해하여 발파와 발파진동에 지나치게 민감한 반응을 보임으로써 발생한다. 지진은 통상적으로 관측되는 변위진폭의 크기가 수~수십 cm 정도이며, 우세주파수도 1Hz 내외로 매우 낮은 편이다(최근에 발생한 일본 도호쿠 지진을 국내에서 관측한 결과에 의하면 변위진폭은 5~10cm). 더욱이 진원에 매우 가까운 곳에서는 변위진폭의 크기가 무려 수 m에 달할 수도 있다. 이와 같이 변위진폭이 크고 우세주파수가 낮은 특성을 지니는 지진의 경우에는 건물이나 빌딩, 굴뚝 등과 같이 큰 구조물에 치명적인 영향을 끼칠 수 있어 내진설계가 되어 있지 않은 집이나 구조물들은 큰 지진이 오면 부서지거나 전체가 붕괴될 수도 있다.

하지만 통상적인 산업발파로 발생하는 발파진동은 지진의 경우와는 달리 그 변위진폭의 크기가 대부분 수 mm 이내이며, 우세주파수도 수십~수백 Hz 정도로 높은 편이다. Dowding (1996)에 의하면 발파진동의 변위진폭은 통상 0.0001~10mm 범위 내에 있다. 이와 같이 변위진폭이 작고 우세주파수가 높은 특성을 지니는 발파진동은 건물이나 구조물(단층이나 2층은 고유주파수가 10Hz 내외이고, 구조물의 높이가 이보다 커지면 고유주파수가 감소함(Dowding, 1996))에 거의 영향을 미치지 않는다. 이렇게 변위진폭이 매우 작은 발파진동이 진동에 가장 취약한 낮은 가옥에

라도 손상(damage)을 입히기 위해서는 수십 cm/s 이상의 큰 진동속도(입자속도(particle velocity))가 실제로 가져야 한다. 더욱이 발파에서 말하는 손상이란 낡은 가옥의 벽체에 실금(hairline crack)이 생기거나 연장되는 것으로 정의되며, 가옥이 붕괴하거나 크게 파손되는 것을 의미하는 것이 전혀 아니다. 그럼에도 불구하고 많은 사람들이 발파가 구조물을 파괴시킬 것이라고 생각하여 과민반응을 보이는 것은 발파와 발파진동의 속성을 잘 알지 못하기 때문이다. 따라서 발파종사자들이 주어진 발파작업을 성공적으로 완수하기 위해서는 발파와 발파진동에 대한 올바른 이해를 바탕으로 공사 지역 주변의 주민들을 잘 설득하고 그들의 이해를 적극적으로 구할 필요가 있다.

1.3 건설교통부(현 국토교통부)의 노천발파 지침

발파공해로서의 발파진동과 발파소음이 중요한 사회적 이슈로 부상함에 따라 건설교통부(현 국토교통부)는 지난 2003년에 도로건설 현장에서의 암발파로 발생하는 발파진동 및 발파소음으로 인한 민원의 예방과 경제성 있는 시공을 통한 예산 절감을 목적으로 암발파 설계 및 시험발파, 시공 등에 관한 사항을 정리하여 「암발파 설계 및 시험발파 잠정지침(안)」(건설교통부, 2003)(이하 잠정지침)으로 제정, 공포하였다. 이 지침은 건설교통부 산하의 지방국토관리청에서 시행하는 일반국도 건설공사구간 중 노천에서 시행되는 암발파 설계 및 시공에 적용하도록 한 잠정안으로서 발파진동에 근거하여 발파공법을 분류한 것이 특징이다. 아울러 제정 이후 몇 년간 국내의 여러 발파현장에 실제적으로 적용됨으로써 기본적인 발파설계나 시공 상의 효율성을 제고시켰으며, 제어발파의 설계나 공법 변경, 환경피해의 저감 등의 측면에서도 큰 역할을 수행하였다. 잠정지침이 발효되고 3년이 지난 후에 건설교통부는 다시 잠정지침의 문제점과 미비점을 보완하여 2006년 말에 본격적인 「도로공사 노천발파 설계·시공 지침」(건설교통부, 2006)으로 개정, 공포하였다. 현재 노천에서 시행되는 건설발파는 모두 이 지침의 규제를 직간접적으로 받고 있다.

1.4 환경부 소음진동관리법과 진동레벨 대 진동속도의 문제

국내의 경우, 광산과 같이 특수한 조건 하에서만 적

용되는 광산보안법을 제외하면 사실상 일반적인 건설 현장에서 발생하는 발파진동과 발파소음을 취급할 수 있는 유일한 법규가 바로 환경부의 「소음진동관리법」이다. 그러나 현행 환경부 소음진동관리법은 생활소음 및 생활진동을 주요 규제대상으로 하고 있다(표 3 참조). 발파진동과 발파소음은 충격성 진동 및 소음이라는 고유의 특성이 있음에도 이를 특별히 고려하지 않고 편의에 따라 생활소음·진동 규제기준에 +10dB 하는 것으로만 규정하고 있다.

이처럼 발파진동에 대해서는 전문화된 규제법규가 없는 관계로 근래에 들어서는 발파진동을 환경법규(소음진동관리법)에 맞추려는 시도가 종종 이루어지고 있다. 하지만 이는 발파가 지니는 충격성 및 일회성이라는 특성에 비취볼 때 바람직하지 않다고 할 수 있다. 예를 들어, 불꽃놀이 심야에 140dB(A)가 훨씬 넘는 소음을 일으키지만 사람들은 오히려 즐거워하는 반면, 주간에 90dB(A)를 겨우 넘는 단발성 발파작업에 대해서는 민원이 끊이지 않는다. 이것은 불꽃놀이나 발파작업에 맞는 새로운 법규가 필요함을 방증하는 것이다.

발파작업은 건설과정에서 불가피한 것이고, 화약을 사용하는 발파의 특성상 폭음이나 지반진동과 같은 충격성 소음·진동이 발생하지만 이들은 일회성 내지 단발성이므로 장시간에 걸쳐 지속적으로 발생하는 일반적인 생활소음·진동과는 그 성격이 판이하게 다르다. 따라서 발파진동과 같은 충격성 진동에 대해 일반 생활소음·진동에 적용하는 기준을 그대로 적용하는 것은 발파작업 자체를 원천적으로 불가능하게 만들 수 있어 매우 불합리하므로 발파진동에 대해서는 그에 맞는 새로운 규제기준을 마련할 필요가 있다.

1.5 자승근 대 삼승근 환산기법과 소위 “교차점 분석” 문제

지금까지 진동제어 발파설계를 위해 발파진동의 수준을 예측하는 회귀모형들이 많이 제안되어 있지만 이들 가운데 국내외에서 가장 많이 사용되고 있는 대표적인 회귀모형으로는 자승근 환산거리(square root scaled distance; SRSD)와 삼승근 환산거리(cube root scaled distance; CRSD)가 있다. 이들 두 모형은 오랫동안 국내외에서 가장 많이 사용되어 온 대표적인 방법들이기 때문에 이제는 사용상의 편리성이나 경향의

가시성 외에 자료의 호환성의 측면에서도 유리한 방법이 되었다. 어떤 현장에서 발파진동의 전파특성을 나타내는 진동수준 예측식은 SRSD와 CRSD 개념을 이용하여 통계처리 한 후, 그 중에서 적합도가 높은 식을 선택하는 것이 원칙이다. 예측식이 결정되면 발파작업의 진행에 따라 나타나는 보안물건에 영향을 끼치는 않는 수준에서 발파진동 허용수준을 결정한다. 그러면, 결정된 예측식과 허용수준으로부터 안전한 발파를 할 수 있는 최대 지발당장약량을 산출할 수 있는 제어발파 설계조건을 구할 수 있다.

SRSD와 CRSD를 이용한 환산거리 기법에서 제어 발파 설계는 거리별로 사용할 수 있는 최대 지발당장약량을 제한함으로써 이루어진다. 그런데 이 계산과정에서 SRSD와 CRSD의 장약량이 각각, 거리의 상승과 삼승에 비례하는 다항식의 꼴이 되므로 두 장약량 함수를 함께 도시하면 하나의 교점에서 만나게 되는데, 이 교점이 바로 소위 말하는 “교차점”이다. 따라서 이 교차점을 기준으로 폭원에 가까운 쪽에서는 SRSD의 장약량이 더 크게 설계되고, 먼 곳에서는 CRSD의 장약량이 더 커지게 된다. 특히, 회귀분석에서 나타나는 적합도는 이들 두 기법 간에 극히 근소한 차이를 보임에도 불구하고, 발파장소와 보안물건 간의 이격거리가 이 교차점 거리보다 더 멀어지면 CRSD의 장약량이 기하급수적으로 증가하는 문제가 발생한다. 장약량이 지나치게 증가하면 안전문제가 발생하므로 CRSD로 구한 예측식을 적용할 때에는 그 적용한계에 대한 지침이 필요하게 된다. 따라서 이런 문제점에 대한 고찰로부터 SRSD와 CRSD에 의한 예측식의 적용한계를 명확히 해 둘 필요가 있다.

2. 발파진동의 발생특성 및 예측방법

2.1 발파진동의 발생 및 전파

폭약이 장약공 내에서 폭발하면 주위 압반은 강력한 폭굉충격을 받으며 폭약과 접촉한 주변의 상태는 고온·고압 하에서 용융되며 유체역학적으로 거동하는 현상을 나타낸다. 장약공의 외부는 충격압에 의하여 파쇄대가 형성되면서 동시에 에너지가 전달되어 원주방향으로 균열이 생성, 전파되는 등 여러 형태의 압반파괴를 일으킨다. 어느 범위를 지나면 에너지는

압반을 파괴시키지 못할 정도로 급격히 저하되고 응력파(탄성파)의 형태로 전파된다. 즉, 힘을 받은 질량을 변형을 계속하려 하고 압반이 지닌 강성은 변형을 원래 상태로 되돌리려 하면서 변형과 회복을 반복하는 파동의 형태로서 응력파가 전달되며, 이 응력파의 도달에 따른 지반의 반응은 진폭과 주기를 갖는 진동의 형태로 나타나는데, 이를 발파진동이라 한다.

2.2 발파진동의 표시

진동의 크기

진동의 크기는 진동하는 매질의 물리적 변화의 크기를 입자변위(particle displacement, u), 입자속도(particle velocity, v) 및 입자가속도(particle acceleration, a)로 표시한다. 즉, 진동이 전달되는 어느 한 지점을 생각하면 이 점은 시간의 경과와 함께 진동량이 변화하고 있는데, 변위란 기준위치로부터의 이동거리를 나타내며, 속도는 변위의 시간에 대한 변화율이며, 가속도는 속도의 시간에 대한 변화율이다.

진동의 형태를 일정한 주기를 갖는 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 가정할 경우 다음의 관계가 성립한다.

$$u = \frac{v}{2\pi f}; v = \frac{a}{2\pi f}; f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

식 (1)에서 f 는 진동의 주파수, T 는 진동의 주기를 의미한다.

하지만 발파진동은 충격적인 진동파형으로서 식 (1)을 이용한 단순화 변환이 곤란하며, 따라서 실제로 측정된 파형자료로부터 수치적분 또는 수치미분하여 변환시키는 것이 필요하다. 단, 이 과정에서 적분의 경우에는 적분자체가 지니는 고유의 정밀성으로 인해 자료의 변환이 가능하나 미분은 그렇지 않음으로 주의하여야 한다. 즉, 진동가속도를 측정하여 진동속도, 진동변위로 차례로 적분하는 것은 신뢰성이 있으나 반대는 그렇지 않으므로 피하는 것이 좋다.

진동계측기의 경우에도 발파공해 응용을 위해서는 직접 입자속도를 측정하는 것이 이상적이겠지만 가속도 센서를 사용하여 입자가속도를 측정 후 이를 입자속도로 수치적으로 적분하여 디스플레이 할 수도 있을 것이다. 다만, 이 경우에는 수치적분이라는 이론

적인 처리과정보다는 해당 가속도 센서가 발파진동을 얼마나 정확하게 측정할 수 있느냐 하는 물리적인 능력이 장비의 성능을 좌우하는 기준이 될 것이다.

진동량의 단위

진동량은 국제표준화기구(ISO)의 규격에 따라 미터법(metric unit)으로 거의 통일되어 사용되고 있다. 하지만 관습적으로 속도의 단위로서 kine(= cm/s)을 사용하기도 하고, 가속도의 단위로서 중력가속도 g 를 사용하기도 하는데, 이와 같은 진동량의 단위를 표 1

표 1. 진동량의 단위

성분	기본단위	기타
변위	m, cm, mm, μm	
속도	m/s, mm/s	cm/s = kine, ips
가속도	m/s^2 , cm/s^2	gal = 980 cm/s^2 = 1000 gal
가속도레벨 진동레벨	dB	$\text{dB} = 20 \log \left(\frac{A}{A_0} \right)$
주파수	Hz	Hz = cycle/s (cps)

표 2. 지반진동 수준의 예측을 위해 제안된 경험식들

제안자	진동수준 예측식	비고
Morris (1950)	$a = KW^{1/2}/D$	a : 입자변위, K : 입지상수, W : 장약량, D : 폭원거리
Habberjam and Whetton (1952)	$a \propto W^{0.085}$	a : 입자변위, W : 장약량
Gustafsson (1973)	$V = K \sqrt{W/D^{3/2}}$	V : 입자속도, W : 장약량, D : 폭원거리, K : 상수(스웨덴 경암에서 약 400) * $W/D^{3/2}$: 장약수준(charging level)으로서 Langefors and Kihlstrom (1963)이 제안
Devine (1962); Devine and Duvall (1963)	$V = K(D/W^{1/2})^{-n}$	V : 입자속도, D : 폭원거리, W : 장약량, K : 상수($D/W^{1/2}=1$ 일 때 V -절편), n : 상수 * 예측식의 적용: Nicholls et al(1971); Siskind et al(1980a)
Ambraseys and Hendron (1968); Dowding (1971)	$V = K(D/W^{1/3})^{-n}$	V : 입자속도, D : 폭원거리, W : 장약량, K : 상수($D/W^{1/3}=1$ 일 때 V -절편), n : 상수 * CRSD 개념의 도입: Blair and Duvall(1954); Duvall and Petkof(1959)
Davies et al. (1964); Attewell et al. (1965)	$V = KW^aD^b$	V : 최대입자속도, W : 최대 지발당장약량, D : 폭원거리, K, a, b : 입지상수 (국부적인 지질조건, 폭약강도 관련 상수) * $V = f(W, D)$ 꼴의 이변수함수로 간주시 일반적인 식; 다중회귀분석 요함
Ghosh and Daemen (1983)	$V = K(D/W^{1/2})^{-n} e^{-\alpha D}$ $V = K(D/W^{1/3})^{-n} e^{-\alpha D}$	V : 입자속도, D : 폭원거리, W : 장약량, K, n : 상수, α : 비탄성 감쇠계수 * 환산거리 개념에 에너지 손실에 따른 비탄성 감쇠효과 반영; 다중회귀분석 요함
Pal Roy (1991)	$V = n + K(D/W^{1/2})^{-1}$	V : 입자속도, D : 폭원거리, W : 최대 지발당장약량, $n(<0)$: 입지상수, K : 설계상수 (장약량, 폭원거리, 약경, 지발시간, 저항선, 공간격, 하부천공, 전색장),

에 열거하였다.

2.3 발파진동의 예측방법

자료처리를 위한 대표적인 회귀모형

발파진동의 크기에 영향을 주는 변수들을 대별하면, i) 화약의 종류와 장약량, 장약밀도, ii) 폭원에서 측정까지의 이격거리, iii) 암반의 역학적, 구조적 특성, iv) 천공패턴, 장약방법, 기폭시차 및 기폭순서와 같은 발파방법 등이 있다. 즉, 발파진동은 지역적인 특성과 발파조건에 따라 그 발생수준이 달라지므로 대상지역 별로 발파조건에 따라 발파진동을 실측하여 그 전파 특성을 파악하여야 한다. 하지만 수없이 많은 영향변수들을 모두 고려하는 것은 사실상 불가능하며, 또한 발파로 발생하는 발파진동 측정자료는 산포하는 특성을 보이므로 발파진동의 수준을 실무적으로 예측하는데에는 통계적인 방법으로 회귀분석을 주로 사용한다. 지금까지 많은 연구자들이 다양한 경험식들을 회귀모형으로 제안하였다. Ghosh and Daemen (1983) 과 Bhandari (1997)는 당시까지 제안되었던 대표적인 경험식들을 보고한 바 있는데, 이들을 정리하면 표 2

와 같다.

표 2에서 보듯이 지금까지 발파진동의 수준을 예측하는 회귀모형들이 많이 제안되어 있지만 이들 가운데 국내외에서 가장 많이 사용되고 있는 대표적인 것으로는 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리를 이용한 모형을 들 수 있다. SRSD를 이용한 예측식은 과거 미 광무국(USBM)과 직·간접적으로 관련된 여러 연구자들(Devine and Duvall, 1963; Duvall and Petkof, 1959; Nicholls et al., 1971; Siskind et al., 1980a)이 제안하거나 채택한 것으로 긴 봉상장약(cylindrical charge)을 고려한 개념에서 비롯되었으며, CRSD 개념을 이용한 예측식은 발파진동이 암반 중에서 구상으로(spherically) 전파되는 기하학적 형태를 고려한 모형이다. 이들 두 모형은 국내외에서 가장 많이 사용되어 온 대표적인 방법들이기 때문에 사용상의 편리성이나 경향의 가시성 외에도 자료의 호환성의 측면에서도 유리한 방법이라 할 수 있다.

SRSD와 CRSD는 각각 폭원거리(D)를 최대 지발당장약량(W)의 자승근과 삼승근으로 환산한 형태로 정의되며, 다음 식 (2)와 (3)으로 표현된다.

$$D_{S2} = \frac{D}{W^{1/2}} \quad (2)$$

$$D_{S3} = \frac{D}{W^{1/3}} \quad (3)$$

환산거리(scaled distance)는 ‘장약량에 대한 거리’로 정의되므로 환산거리 값이 큰 곳은 장약량에 비해 거리가 먼 곳이고, 따라서 이런 원거리에서는 진동의 크기가 작아질 수밖에 없다. SRSD와 CRSD 개념을 이용한 예측식은 발파진동의 속도수준(V)이 환산거리(D_{S2} 또는 D_{S3})의 거듭제곱(n)에 따라 변화한다는 회귀모형이며, 다음 식 (4)와 (5)로 각기 표시할 수 있다. 진동의 크기는 거리가 멀어짐에 따라 감소하므로 지수 $n < 0$ 이 된다. 이와 같은 SRSD와 CRSD를 이용한 예측식은 로그-로그 좌표계에서는 직선이 되므로 측정자료들은 직선에 적합되어 실무적으로 사용하기 편리하다.

$$V = K(D_{S2})^n = K\left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^n \quad (4)$$

$$V = K(D_{S3})^n = K\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^n \quad (5)$$

위 식 (4)와 (5)에서 V : 발파진동의 최대입자속도(peak particle velocity), n : 감쇠지수, K : 화약특성, 발파방법, 암반특성 등에 따라 결정되는 상수이다.

발파진동 예측식의 선택

어떤 특별한 목적이 있는 현장이 아니라면 발파진동 측정자료를 통계적으로 처리하기 위해서 더 이상의 새로운 모형을 개발하기보다는 이 두 가지 모형만을 사용하더라도 자료의 획득과정에서 정확성과 정밀성을 향상시키기만 한다면 원하는 만큼의 신뢰도를 충분히 얻을 수 있을 것이다. 실제로, 표 2에 보인 기존 경험식들의 적합성에 대해 전문가들이 서로 다른 견해를 보이기도 하지만, 예측식의 선택문제와 관련하여 Siskind (2000)는 발파진동의 수준을 실무적으로 예측하는 데에는 SRSD나 CRSD 어느 쪽을 사용해도 무방하다고 보았으며, Snodgrass와 Siskind (1974)는 특정 현장에 적합한 것이라면 이들 두 가지 방법 외에 어떠한 예측식을 사용하여도 좋은 것으로 보았다. 따라서 수식을 사용하여 진동수준을 예측하는 문제는 어떠한 예측식을 사용하느냐의 문제라기보다는 주어진 예측식을 사용했을 때 나타나는 결과의 산포도, 곧 적합도가 얼마나 높으냐의 문제라 할 수 있다(Siskind, 2000).

어떤 현장에서 발파진동의 전파특성을 나타내는 진동수준 예측식은 계측된 진동자료를 최대입자속도 대 환산거리의 로그-로그 좌표계 상에 도시하고, 회귀분석을 수행한 다음 SRSD와 CRSD 중에서 적합도, 즉 결정계수(coefficient of determination)가 높은 식을 선택하면 된다. 본래 자연암반의 발파로 발생하는 발파진동 측정자료는 산포되기 마련이다. 따라서 제어 발파를 설계할 때에는 향후에 발생할 발파진동이 회귀선을 벗어나 산포될 가능성이 있음을 미리 감안하여 측정자료의 중위수준에 대한 회귀식보다는 측정된 자료의 95%나 100%를 아래로 포함하는 예측구간(prediction interval)의 상한에 해당하는 식을 예측식

으로 많이 선택한다. 즉, 단측(one-sided) 예측구간을 많이 사용한다. 그러므로 이렇게 선택된 예측식의 K 값은 회귀식의 경우보다 더 커지게 된다. 그러면 동일한 환산거리에서도 K 값의 증가에 따라 더 높은 진동 수준을 예측하게 됨으로써 어떤 현장에서 발생할 발파진동의 최대수준까지 충분히 고려한 발파설계를 할 수 있게 된다.

앞에서도 언급한 바와 같이, 일반적으로 국내에서는 계측자료를 SRSD 및 CRSD 기법으로 처리하여 각각의 전파식을 구한 후 그 가운데 적합도가 높은 식을 대상지역에서의 진동수준 예측식으로 채택하는 방법이 많이 사용되고 있다. 하지만 건설교통부의 「도로공사 노천발파 설계·시공 지침」에서는 실무적인 편의를 위해 고저차가 크지 않은 노천발파에서 상관도가 높은 것으로 알려져 있는 SRSD 기법인 식 (4)의 사용을 추천하고 있다. 아울러 발파진동 예측식(추정식)의 산출에 필요한 단순(선형) 회귀분석의 절차는 동 지침을 자세히 설명한 「도로공사 노천발파 설계·시공 요령」에 수록되어 있다.

유의할 것은 건설교통부의 「도로공사 노천발파 설계·시공 지침」이나 「요령」에서는 자료처리와 관련하여 발파진동의 최대치(PPV)에 대하여 회귀분석을 하도록 규정은 하고 있으나 발파진동의 세 성분, 즉 L, T, V 성분 가운데 어떤 성분을 대상으로 분석을 실시해야 하는 것인지에 대해서는 명시하지 않고 있다. 하지만 하나의 특정 성분, 예를 들어 수직성분이 유독 문제가 되는 경우 등을 제외한다면 일반적으로는 측정된 L, T, V 성분 전체를 대상으로 하여 진동의 중위수준(50%)을 나타내는 식과 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식(이것은 단측 95%를 말하므로 양측의 경우에는 90% 예측구간의 상한(upper limit)에 해당하는 식이 됨)을 도출하면 충분할 것으로 판단된다.

한편, 동 지침에서는 자료처리의 신뢰성을 확보하기 위하여 통계처리에 입력되는 자료의 수를 30개 이상으로 명시하였으며, 도출된 예측식의 상관계수가 0.70 미만이면 시험발파를 다시 실시하도록 규정하였다. 이는 최종적인 발파가 시험발파로부터 도출된 예측식을 기준으로 권역별로 설계되므로 발파공해 저감의 측면에서 보수적인 견지를 취한 것으로 평가된다. 상기의 자료처리 과정을 통해 당해 현장에 적합한 발파진동 예측식을 얻게 되면 실시 설계된 발파패턴의

적합성을 판단하고, 주변의 건물이나 시설물 등에 대한 영향을 검토하여 현장조건에 맞는 지발당 장약량을 구하여 최종적인 발파패턴을 설계한다. 이와 같은 제어발파 설계과정에 대해서는 다음 절에서 상술한다.

2.4 환산거리에 의한 제어발파 설계조건

자승근 환산거리 기법

어떤 현장에서 시험발파로 얻은 자료를 처리하여 SRSD에 의한 발파진동 예측식을 도출하고, 또 인근 보안물건에 영향을 끼치는 않는 발파진동 허용수준이 결정되었다면 결정된 예측식과 허용수준으로부터 안전발파가 가능한 최대 지발당장약량을 산출할 수 있는 제어발파 설계조건을 구할 수 있다.

예를 들어, SRSD를 사용하여 도출한 예측식의 그래프가 그림 1과 같다고 하자. 그림 1에서 V_0 는 어떤 보안물건의 안전을 보장할 수 있는 발파진동 허용수준이며, 허용수준 $V=V_0$ 일 때의 환산거리 $D_{S2}=a$ 이다. 따라서 환산거리 D_{S2} 가 a 보다 큰 구역, 즉 $D_{S2} \geq a$ 인 먼 곳에서는 진동수준 $V \leq V_0$ 가 성립하여 허용수준을 넘지 않으므로 당해 보안물건은 진동으로부터 안전하다는 뜻이 된다. 따라서 이 경우의 제어발파 설계조건은 다음 식 (6)과 같이 된다.

제어발파 설계조건식 (6)을 이용하면 보안물건까지의 거리 D 에 따라 발파에 사용할 수 있는 최대 지발당장약량 W 을 계산할 수 있다. 즉, 식 (6)을 W 에 대해 풀면 식 (7)이 되고, 식 (7)에서 장약량 W 를 거리 D 에 따라 도시하면 그림 2가 된다. 그림 2를 보면 보안물건까지의 거리가 D 일 때 사용할 수 있는 최대 지발당장약량이 그래프 아래가 되어야 함을 알 수 있다.

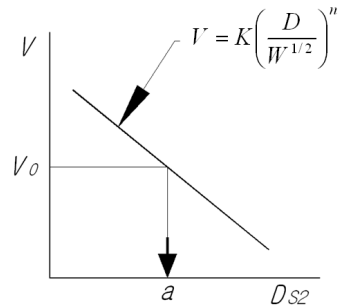


그림 1. SRSD에 의한 예측식의 그래프(허용수준이 V_0 일 때의 환산거리 값이 a 인 경우).

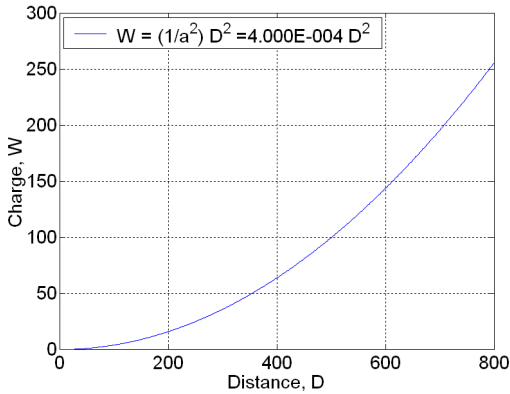


그림 2. SRSD에 의한 제어발파 설계조건에 따라 거리(D) 별로 사용가능한 최대 지발당장약량(W)을 도시한 그래프(a=50인 경우).

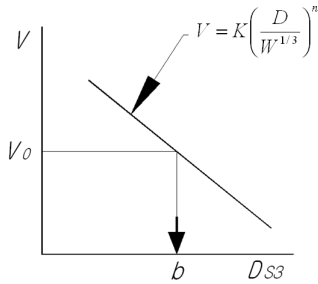


그림 3. CRSD에 의한 예측식의 그래프(허용수준이 V_0일 때의 환산거리 값이 b인 경우).

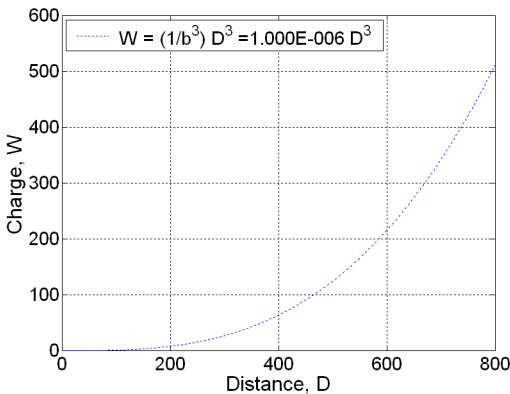


그림 4. CRSD에 의한 제어발파 설계조건에 따라 거리(D) 별로 사용가능한 최대 지발당장약량(W)을 도시한 그래프(b=100인 경우).

단, 그림 2에서 상수 a=50으로 가정하였다.

$$D_{S2} = \frac{D}{W^{1/2}} \geq a \tag{6}$$

$$W \leq \left(\frac{D}{a}\right)^2 = \left(\frac{1}{a^2}\right)D^2 \tag{7}$$

삼승근 환산거리 기법

앞 절과 동일한 가정 하에서 CRSD에 의한 발파진동 예측식의 그래프는 그림 3과 같다. 그림 3에서 V_0는 SRSD의 경우와 동일한 크기의 발파진동 허용수준으로서 V=V_0이지만, 이때의 환산거리는 D_{S3}=b가 되어 그 값이 SRSD의 경우와는 달라질 것이다. 따라서 D_{S3} ≥ b를 만족하는 먼 곳에서는 진동수준이 V ≤ V_0가 되어 허용수준 V_0을 넘지 않을 것이므로 안전한 발파가 될 것이다. 따라서 이 경우의 제어발파 설계조건은 다음의 식 (8)과 같이 된다.

이제 앞 절의 SRSD와 동일한 과정을 거쳐 CRSD의 제어발파 설계조건식 (8)로부터 식 (9)를 유도하고, 장약량 W를 거리 D에 따라 도시하면 그림 4를 얻는다. 그림 4를 보면 보안물건까지의 거리가 D일 때 사용할 수 있는 지발당장약량은 그래프 아래의 값이 되어야 함을 알 수 있다. 단, 그림 4에서 상수 b=100으로 가정하였다.

$$D_{S3} = \frac{D}{W^{1/3}} \geq b \tag{8}$$

$$W \leq \left(\frac{D}{b}\right)^3 = \left(\frac{1}{b^3}\right)D^3 \tag{9}$$

2.5 교차점 분석

그림 2와 4에 보인 결과는 각기 SRSD와 CRSD의 예측식을 채택한 경우에 적용할 수 있는 최대 지발당장약량을 보여주고 있는데, 두 그래프를 함께 도시하면 그림 5(a)와 같이 된다. 그림 5(a)를 보면, 거리 D=800일 때 SRSD의 경우에는 사용가능한 장약량 W=250인데 비해, CRSD의 경우에는 W=500 정도로서 대략 2배까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 이 경우(a=50, b=100)에 회귀모형을 SRSD 대신 CRSD를 채택하면 거리 D=800에서는 장약량을 2배까지 사용해도 무방하다는 결론이 나온다. 물론, 거리가 이보다 더 멀어지면 두 모형 사이의 장약량 차가 더욱 크게 증가할 것이다. 그림 5의 (b)는 (a)의 확대도인데, D=400에서 두 그래프는 서로 교차하며, D ≤ 400인 가

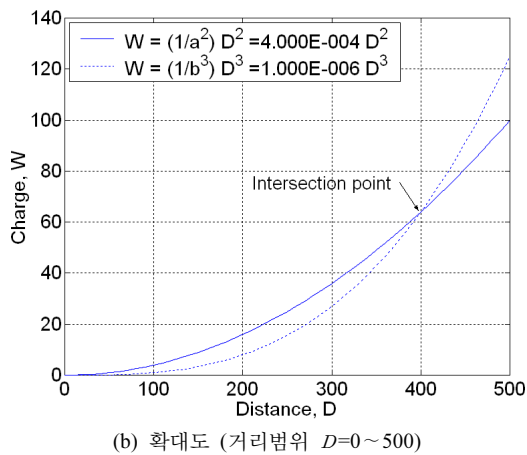
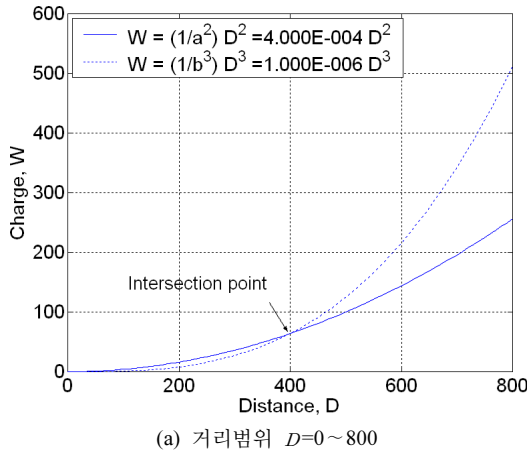


그림 5. SRSD 및 CRSD에 의한 제어발파 설계조건에 따라 거리(D)별로 사용가능한 최대 지발당장약량(W)을 비교하여 도시한 그래프($a=50, b=100$ 인 경우).

까운 곳에서는 SRSD의 경우가 사용가능한 장약량이 더 크게 나타나고, $D \geq 400$ 인 먼 곳에서는 CRSD의 장약량이 더 크게 나타난다.

이와 같은 과정을 소위 ‘교차점 분석’이라 하는데, 이런 현상은 SRSD의 경우 최대 지발당장약량 W 와 거리 D 의 함수관계가 ‘대문자-O’ 표기법으로 $W=O(D^2)$ 로서 차수(order)가 2이고, CRSD의 경우에는 $W=O(D^3)$ 으로서 차수가 3이기 때문에 나타난다. 따라서 계수인 a 와 b 의 크기에 상관없이 이 두 그래프는 항상 하나의 교점에서 만나며, 이 교점을 기준으로 가까운 쪽에서는 SRSD의 장약량이 더 크게 나타나고, 먼 곳에서는 CRSD의 장약량이 더 크게 나타난다. 여기서 중요한 점은 거리가 점차 멀어지면 CRSD의 장약량

이 기하급수적으로 증가하는 문제이다. 이러한 문제 때문에 통계적으로 구한 예측식을 적용할 때에는 그 적용한계에 대한 지침이 필요하게 된다.

그림 5를 보면 SRSD와 CRSD의 최대장약량 그래프는 안전발파의 한계를 표시하는 환산거리 값인 a 와 b (그림 1 및 3 참조)의 크기에 따라 교점의 위치가 변화함을 알 수 있다. 즉, $W-D$ 그래프의 계수들인 a 와 b 에 의해 교점의 위치가 결정되는데, 교점의 좌표 (D, W)는 앞의 식 (7)과 (9)를 연립으로 풀면 얻을 수 있다.

$$(D, W) = \left(\frac{b^3}{a^2}, \frac{b^6}{a^6} \right) \quad (10)$$

SRSD와 CRSD 개념을 이용한 예측식과 제어발파 설계기준으로부터 도출되는 SRSD의 최대 지발당장약량은 $W=O(D^2)$, CRSD는 $W=O(D^3)$ 의 차원이어서 계수인 a 와 b 의 크기에 상관없이 $W-D$ 좌표계 상에서 둘의 그래프는 항상 식 (10)에 의해 주어지는 하나의 교점에서 만난다. 이 교점을 기준으로 가까운 쪽에서는 SRSD의 장약량이 더 크게 나타나고, 먼 곳에서는 CRSD의 장약량이 더 크게 나타나는데, 특히 발파설계가 이루어지는 대상거리가 교점거리보다 더 멀어지면 CRSD의 장약량이 기하급수적으로 증가하는 문제가 발생한다.

그러므로 제어발파 설계자가 굳이 교차점 분석기법을 적용하고자 할 때에는 다음과 같은 방식을 적용하는 것이 최선이라 판단된다. SRSD가 예측식으로 선택된 경우에는 기존의 방식대로 제어발파를 설계한다. 그렇지 않고 CRSD가 예측식으로 선택된 경우에는 예측식의 적용범위를 $W-D$ 그래프 상에서 SRSD와의 교점의 D 값을 가급적 넘지 않는 것으로 정한다. 부득이 교점을 넘어가는 경우에는, 교점거리 이내에서의 SRSD와 CRSD 간의 장약량 차의 최대값을 넘지 않도록 하고, 이 범위를 넘어서는 이격거리에 대해서는 상응하는 SRSD에 의한 설계기준을 적용하는 것이 좋을 것이다(최병희, 2010).

3. 발파소음의 발생특성 및 예측방법

3.1 발파소음의 발생특성

폭약이 폭발하면 에너지의 일부는 대기 중으로 압

력파동의 형태로 전달된다. 일반적으로 압력파동의 주파수가 사람이 들을 수 있는 가청주파수 대역(20~20000 Hz)이면 음(sound) 또는 소음(noise)이라 하며, 압력파동의 주파수가 낮아서 가청주파수 대역 이하이면 충격음(concussion)이라 하여 우리가 들을 수 없다. 발파를 시행하면 소음 및 충격음이 발생하는데, 이들을 통틀어 발파소음(air blast)이라 한다. 이와 같은 소음의 세기, 곧 음압(sound pressure)은 대개 압력 단위(bar, Pa, psi)로도 표시할 수 있으나 환산단위인 데시벨 단위(dB)로도 많이 표시한다. 예를 들어, 거리에서 달리는 자동차가 일으키는 소음 수준은 대략 80~90dB 정도로 측정된다.

소음 또는 음압의 수준은 다음 식 (11)로 환산하는데, 이 식에 의한 음압레벨(Sound Pressure Level; SPL)은 dB(L) 단위(L: Linear)로 많이 표시되며 주파수에 대해 보정을 하지 않은 값으로서 구조물에 대한 영향

평가에 많이 사용된다.

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \tag{11}$$

식 (11)에서 P : 음압(Pa), P_0 : 기준압(=20 μ Pa)이다. 마찬가지로 음압을 영미단위계의 psi (pound per square inch; lb/in²) 단위로 측정한 경우에도 위의 식 (11)에 의해 음압레벨(dB(L))로 환산할 수 있다. 단, 이 경우에는 식 (11)에서 P : 음압(psi), P_0 : 기준압(= 2.9×10^{-9} psi)이 된다. 그림 6은 음압(측정된 음압은 게이지압(gauge pressure)이므로 과압(overpressure)이라고도 함)을 SI 단위계의 Pa 또는 영미단위계의 psi 단위로 측정했을 때 이를 음압레벨(dB(L))로 환산한 그래프로서 현장계측에서 소음 수준을 설정하는 작업 등에서 편리하게 사용할 수 있을 것이다.

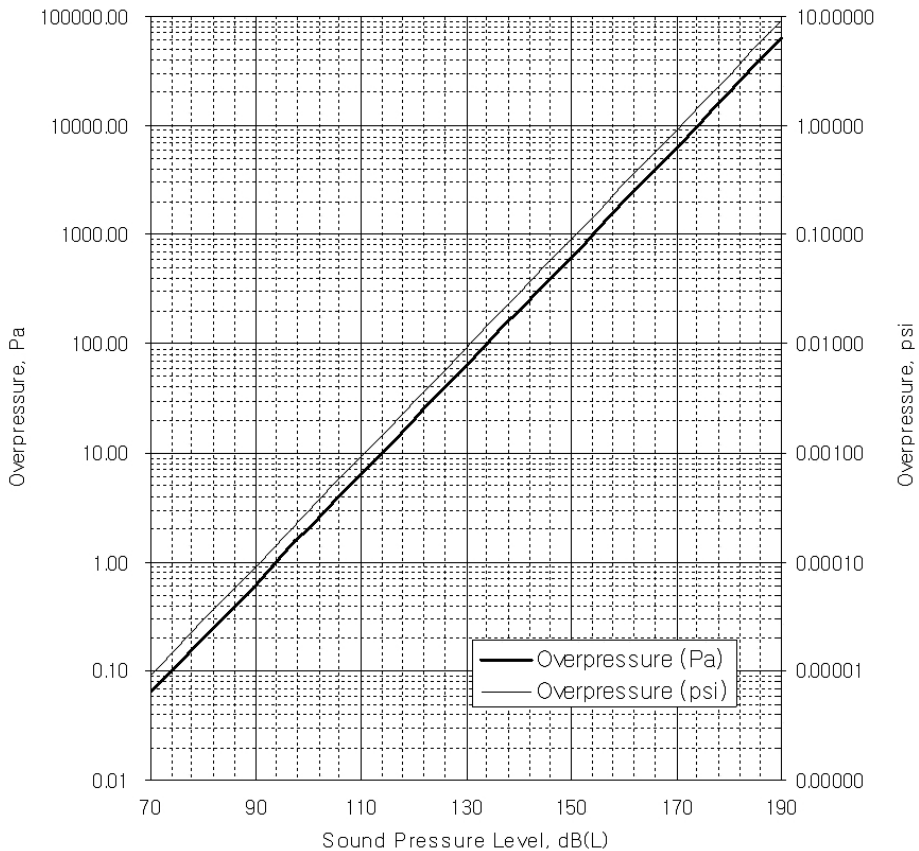


그림 6. 과압과 음압레벨의 관계.

음압레벨(SPL)이 구조물에 대한 영향평가에 많이 사용되는데 반해 인체를 대상으로 할 때는 A 가중치(A-weight)로 보정한 값으로서 다음과 같은 소음레벨(Sound Level; SL)을 많이 사용하며, 단위로는 dB(A)가 이용된다.

$$SL = SPL + L_R \quad (12)$$

식 (12)에서 SPL: 음압레벨(dB(L)), L_R : A-특성에 따른 보정치이다.

한편, 일정시간 이상 지속적으로 발생하는 소음에 대하여는 공해소음으로서 기준시간 동안 dB(A)로 측정하여 (함수)평균한 값인 등가(소음)레벨(L_{eq})를 사용한다. 국내에서 일반 건설 및 생활 소음으로 제정되어 있는 소음 규제기준을 살펴보면 등가레벨로서 다음 표 3과 같은 기준이 적용되고 있으나 폭약의 폭발로 발생하는 발파소음을 대상으로 할 때는 적절하지 못한 면이 많다.

3.2 발파소음의 예측방법

미광무국의 연구결과(Siskind et al, 1980b)에 의하면 발파소음도 발파진동의 경우와 마찬가지로 다음 식에서와 같은 환산거리를 사용하여 예측이 가능하다. 미광무국에서는 소음자료의 처리에 삼승근 환산거리를 제안하였다.

$$P = k \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^n \quad (13)$$

식 (13)에서 발파소음 P는 psi나 Pa과 같은 압력단위로 표시한다. 예를 들어, psi 단위의 경우 사용되는 수치범위가 $1 \sim 10^{-6}$ 정도로 지나치게 넓어 50~170dB 정도로 좁은 범위의 로그 단위가 많이 사용된다. 즉, 식 (13)의 양변에 로그를 취하고 음압레벨(SPL)의 정의를 이용하면 다음 식이 유도된다.

$$SPL = A + B \log_{10} \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right) \quad (14)$$

환산거리에 따른 발파소음의 크기(dB(L) 단위)를

표 3. 국내 생활소음 및 생활진동 규제기준

		[별표 8] <개정 2010.6.30>						
		생활소음·진동의 규제기준(제20조제3항 관련)						
		[단위 : dB(A)]						
대상 지역	소음원	시간대별	아침, 저녁 (05:00~07:00, 18:00~22:00)	주간 (07:00~18:00)	야간 (22:00~05:00)			
		가. 주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구·주거개발진흥지구 및 관광·휴양개발진흥지구, 자연환경보전지역, 그 밖의 지역에 있는 학교·종합병원·공공도서관		확성기	옥외설치	60 이하	65 이하	60 이하
옥내에서 옥외로 소음이 나오는 경우	50 이하				55 이하	45 이하		
사업장	공장			50 이하	55 이하	45 이하		
	동일 건물			50 이하	50 이하	40 이하		
				기타	50 이하	55 이하	45 이하	
	공사장			60 이하	65 이하	50 이하		
나. 그 밖의 지역				확성기	옥외설치	65 이하	70 이하	60 이하
					옥내에서 옥외로 소음이 나오는 경우	60 이하	65 이하	55 이하
				공장		60 이하	65 이하	55 이하
				사업장	동일 건물	50 이하	55 이하	45 이하
		기타	60 이하		65 이하	55 이하		
		공사장		65 이하	70 이하	50 이하		

표 3. 국내 생활소음 및 생활진동 규제기준 (계속)

비고

1. 소음의 측정 및 평가기준은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조제1항제2호에 해당하는 분야에 따른 환경오염공정시험기준에서 정하는 바에 따른다.
2. 대상 지역의 구분은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른다.
3. 규제기준치는 생활소음의 영향이 미치는 대상 지역을 기준으로 하여 적용한다.
4. 공사장 소음규제기준은 주간의 경우 특정공사 사전신고 대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 3시간 이하일 때는 +10dB을, 3시간 초과 6시간 이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.
5. 발파소음의 경우 주간에만 규제기준치(광산의 경우 사업장 규제기준)에 +10dB을 보정한다.
6. 2010년 12월 31일까지는 발파작업 및 브레이커·항타기·항발기·천공기·굴삭기(브레이커 작업에 한한다)를 사용하는 공사작업이 있는 공사장에 대하여는 주간에만 규제기준치(발파소음의 경우 비고 제6호에 따라 보정된 규제기준치)에 +3dB을 보정한다.
7. 공사장의 규제기준 중 다음 지역은 공휴일에만 -5dB을 규제기준치에 보정한다.
 - 가. 주거지역
 - 나. 「의료법」에 따른 종합병원, 「초·중등교육법」 및 「고등교육법」에 따른 학교, 「도서관법」에 따른 공공도서관의 부지경계로부터 직선거리 50m 이내의 지역
8. 「동일 건물」이란 「건축법」 제2조에 따른 건축물로서 지붕과 기둥 또는 벽이 일체로 되어 있는 건물을 말하며, 동일 건물에 대한 생활소음 규제기준은 다음 각 목에 해당하는 영업을 행하는 사업장에만 적용한다.
 - 가. 「체육시설의 설치·이용에 관한 법률」 제10조제1항제2호에 따른 체력단련장업, 체육도장업, 무도학원업 및 무도장업
 - 나. 「학원의 설립·운영 및 과외교습에 관한 법률」 제2조에 따른 학원 및 교습소 중 음악교습을 위한 학원 및 교습소
 - 다. 「식품위생법 시행령」 제21조제8호다목 및 라목에 따른 단란주점영업 및 유흥주점영업
 - 라. 「음악산업진흥에 관한 법률」 제2조제13호에 따른 노래연습장업
 - 마. 「다중이용업소 안전관리에 관한 특별법 시행규칙」 제2조제4호에 따른 콜라텍업

2. 생활진동 규제기준

[단위 : dB(V)]

대상 지역	시간대별	주간 (06:00~22:00)	심야 (22:00~06:00)
	가. 주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구·주거개발진흥지구 및 관광·휴양개발진흥지구, 자연환경보전지역, 그 밖의 지역에 소재한 학교·종합병원·공공도서관		65 이하
나. 그 밖의 지역		70 이하	65 이하

비고

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

log-linear 좌표계 상에서 식 (14)에 적합시키면 계측 자료를 가장 잘 표현하는 추정식을 구할 수 있어 환산 거리에 따른 발파소음의 전파경향을 예측할 수 있다. 발파소음에 대한 추정식도 발파진동의 경우와 같이 삼승근 및 자승근 환산거리로 처리한 결과 중에서 적합도가 높은 쪽을 채택할 수 있으나 건설교통부의 「도로공사 노천발파 설계·시공 지침」이나 「요령」에서는 구체적인 방법에 대해서는 언급하지 않고 있다. 따라서 일반적으로는 과거 미광무국에서 제안한 방법에

따라 삼승근 환산거리를 사용하여 회귀분석을 실시하면 충분할 것으로 판단된다. 따라서 발파소음 측정자료에 대해 음압의 증위수준(50%)을 나타내는 식과 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식을 각각 도출하도록 한다. 그림 7은 log-linear 좌표계에 표시된 발파소음 측정자료에 대한 처리결과의 일례이다. 하지만 지침에서도 언급하고 있듯이 발파소음의 경우 그 추정식은 대체로 상관계수가 매우 낮기 때문에 설계 목적보다는 감쇠경향을 파악하기 위하여 수행하는 경

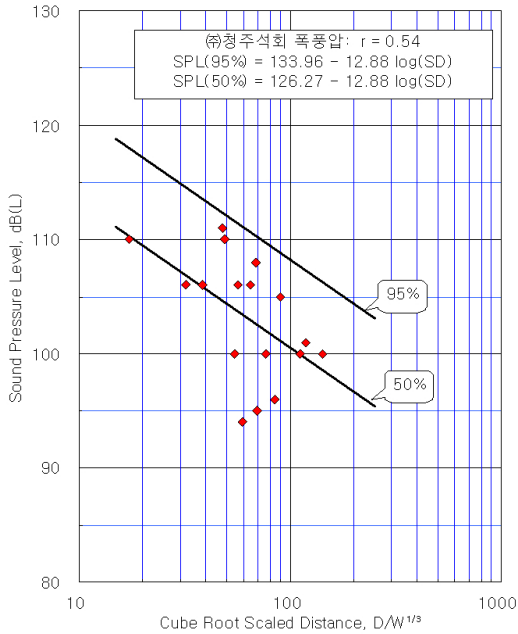
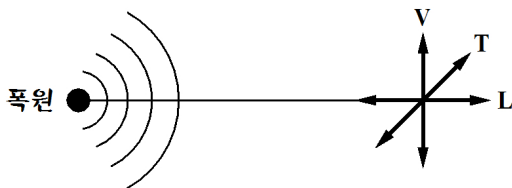


그림 7. 발파소음 자료처리 일례.



L : Longitudinal (진행방향 성분)
V : Vertical (진행방향과 수직 성분)
T : Transverse (진행방향과 접선 성분)

그림 8. 발파진동의 측정성분.

우가 많다.

4. 발파 진동·소음 계측시의 유의사항

4.1 진동의 측정성분

발파에 의해 발생하는 파의 종류에는 크게 압축파, 전단파 및 표면파의 세 가지가 있으며, 파동을 완전하게 설명하기 위해서는 그림 8과 같이 매질입자의 운동에 대한 세 가지 직교성분을 측정해야 한다.

실무적으로 발파진동을 측정할 때에는 발파진동 측정용으로 시판되는 전용장비로서 발파진동과 함께 발파에 의해 발생하는 발파소음도 측정할 수 있는 계측

장비들을 많이 사용한다. 이들 측정 장비들의 기본적인 구성은 그림 8에서와 같이 폭원에서부터 진행되어 오는 진동성분의 폭원방향에 대한 진행방향(longitudinal), 접선방향(transverse) 및 수직방향(vertical) 등 세 방향의 발파진동을 감지하는 삼축변환기(triaxial transducer)와 공기 중으로 전달되는 발파소음을 감지하는 소음계, 그리고 측정을 제어하고 기록하는 모니터로 구성되어 있다. 또한 이들 측정장비들은 통상 발생된 각각의 진동사건(vibration event)에 대하여 세 방향성분에 대한 최대입자속도, 최대입자변위, 최대입자가속도, 최대속도에서의 주파수, 최대벡터합속도 및 최대발파풍압(dB, pa 또는 psi 단위) 등에 대한 정보도 출력할 수 있도록 되어 있다.

4.2 변환기 센서의 부착문제

현장에서 진동계측기의 변환기 센서를 설치할 때에는 센서 위에 표시된 화살표가 항상 폭원 방향을 가리키도록 하고 수평으로 설치한다. 센서의 부착문제는 진동계측 과정에서 무엇보다 중요한 문제이다. 센서가 지반이나 구조물과 일체가 되어 움직이지 않으면 측정된 진동기록은 매질의 실제운동과 다른 것이 되어 사실상 신호(signal)가 아니라 노이즈(noise)가 된다. 일반적으로 견고한 지반이나 암반 등에서는 센서를 설치하는 데 별다른 문제가 없으나 설치 지점에서 이와 같은 좋은 지반이나 암반을 찾기 어려울 때에는 스파이크와 모래주머니를 이용함으로써 매질(암반)과 센서가 일체가 되어 움직일 수 있도록 조치를 취한다. 이와 같이 상태가 좋지 않은 곳에서 센서를 설치할 때에는 계측을 통해 얻은 파형을 잘 관찰하여 그림 9에서와 같은 쉬프트(shift) 현상이 발생하였는지 여부를 반드시 확인하여야 한다.

4.3 측정의 설치범위

진동의 전파특성, 즉 어떤 지역에서 주어진 발파조건(천공, 장약, 암반, 기후 등의 무수히 많은 조건)에서 거리에 따른 진동의 감쇠경향을 파악할 때에는 너무 좁은 범위에서 측정하지 않는 것이 바람직하다. 다시 말하면, 계측은 폭원으로부터 불과 수십 m 거리에서 수행하고, 이로부터 도출된 예측식을 가지고 수백 m 거리에 있는 대상물에 대한 발파영향을 외삽(extrapolate)

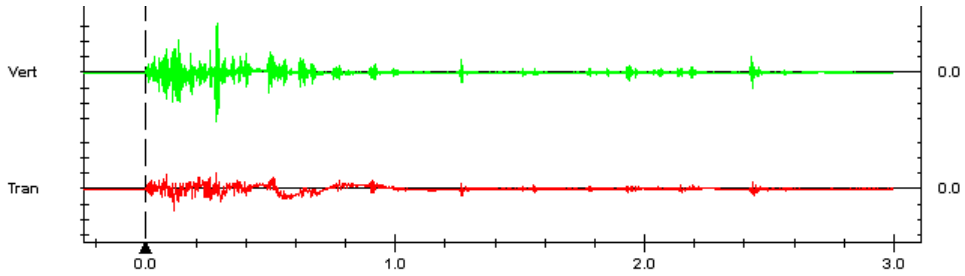


그림 9. 진동의 접선성분(Tran)에서 나타난 쉬프트(shift) 현상.

표 4. 자승근 환산에서 지발당 장약량별 폭원거리($D = SD \times W^{1/2}$)

(단위: m)

SD W (kg)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500
0.2	9	13	18	22	27	31	36	40	45	89	134	179	224
0.4	13	19	25	32	38	44	51	57	63	126	190	253	316
0.6	15	23	31	39	46	54	62	70	77	155	232	310	387
0.8	18	27	36	45	54	63	72	80	89	179	268	358	447
1	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400	500
2	28	42	57	71	85	99	113	127	141	283	424	566	707
3	35	52	69	87	104	121	139	156	173	346	520	693	866
4	40	60	80	100	120	140	160	180	200	400	600	800	1000
5	45	67	89	112	134	157	179	201	224	447	671	894	1118
6	49	73	98	122	147	171	196	220	245	490	735	980	1225
7	53	79	106	132	159	185	212	238	265	529	794	1058	1323
8	57	85	113	141	170	198	226	255	283	566	849	1131	1414
9	60	90	120	150	180	210	240	270	300	600	900	1200	1500
10	63	95	126	158	190	221	253	285	316	632	949	1265	1581
20	89	134	179	224	268	313	358	402	447	894	1342	1789	2236
40	126	190	253	316	379	443	506	569	632	1265	1897	2530	3162
60	155	232	310	387	465	542	620	697	775	1549	2324	3098	3873
80	179	268	358	447	537	626	716	805	894	1789	2683	3578	4472
100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	2000	3000	4000	5000

tion)하는 식으로 평가하는 것은 옳바르지 않다고 보는 것이다. 이런 견지에서, 개정된 건설교통부 「도로공사 노천발파 설계·시공 지침」과 「요령」에서는 동일 발파에 대하여 측점을 5개 이상 설치하고 동시에 계측하도록 규정하고 있다.

계측기의 설치 간격 및 범위와 관련하여 Siskind (2000)는 계측기들은 로그눈금 간격으로 설치하는 것이 좋으며, 실제거리이든 환산거리이든 가능한 넓은 범위에 걸쳐 계측기를 설치하도록 권고하였다. 구체적으로는 15~7500m 정도의 넓은 범위를 언급하였으나 이 범위는 가능한 넓은 범위에 걸쳐 계측기를 설치함으로써 당해 지역에서의 전파경향을 올바르게 파악

하라는 의미이며, 설치범위는 어디까지나 발파규모와 대상물의 거리에 따라 적정 수준으로 설정하면 된다. 표 4는 지발당 장약량 (W (kg))의 크기별로 합리적인 범위의 환산거리(SD)에 상응하는 폭원거리($D = SD \times W^{1/2}$)를 쉽게 얻을 수 있도록 한 표로서 현장계측 과정에서 휴대하면 편리하게 사용할 수 있을 것이다.

4.4 트리거 수준 및 방식의 설정

발파진동에 대한 계측기의 트리거 수준(trigger level)을 설정할 때에는 측점 목적에 따라 예상되는 진동속도를 고려하여 트리거 수준을 설정한다. 트리거 수준은 계측기가 발파진동을 감지했을 때 파동의 기록을

시작하게 되는 하한치(threshold value)를 말하며, 그 값을 충분히 작게 설정해 주어야 저수준의 발파진동도 감지할 수 있게 된다. 하지만 트리거 수준을 일정 이상으로 지나치게 낮게 설정하면 계측기 주변의 자동차나 사람의 통행에 의해서도 진동의 기록이 촉발될 수 있는 우려가 있다. 이와 같은 발파 외적인 요인들에 의해 노이즈가 입력되는 것을 막기 위해서는 주변 환경을 고려하여 트리거 수준을 적절하게 설정하여야 한다. 예를 들어, 일반적인 작업조건에서는 트리거 수준으로 0.5~0.7mm/s 정도가 좋으나, 이 수준으로 설정했을 때 아직 발파를 하지 않았는데도 주변 여건에 따라 쉽게 트리거가 되면 점차 수준을 높여 주어서 발파진동에 의해서만 진동기록이 촉발되도록 해준다. 물론, 폭원에서부터 거리가 가까운 경우에는 예상되는 진동수준을 감안하여 트리거 수준을 더 높여 주며, 이와 같은 구체적인 수치는 발파 기술자나 현장 실무자가 경험적으로 결정한다.

트리거 수준의 설정 외에 일반적으로 발파전용의 발파진동·소음 계측기에서는 (i) 발파진동, (ii) 발파소음, (iii) 발파진동 또는 발파소음 등 세 가지 트리거 방식이 제공된다. 즉, 트리거를 촉발하는 방식, 곧 촉발유인을 사용자가 선택할 수 있게 되어 있다. 대부분의 경우에는 지층을 통과하는 발파진동이 공기 중을 통과하는 발파소음보다 전파속도가 빠르므로 계측기에 먼저 도달하게 되는 발파진동에 의해 장비가 트리거 되도록 설정하는 것이 일반적이다. 하지만 구조물 해체발파나 붙이기 발파, 기타 특수한 경우에는 발파진동이나 발파소음의 어느 쪽에 의해서도 트리거가 될 수 있으며, 이런 경우 귀중한 자료를 잃지 않기 위해서는 ‘발파진동 또는 발파소음’에 의해 트리거가 촉발되도록 하는 편이 바람직할 것이다. 따라서 발파소음에 의해서도 계측의 기록이 촉발될 수 있도록 하고 싶을 때에는 주변의 암소음 이상으로 소음의 트리거 수준을 어느 정도 높게 설정해 놓고 마이크로폰 앞에서 손뼉을 치거나 소리를 내어 계측기가 적절히 트리거 되는지 사전에 시험해 본 다음 실측에 들어가도록 한다.

4.5 기록시간의 설정

기록시간(recording time (interval))이란 계측기가 트리거 수준을 넘어서는 신호를 감지함으로써 기록을

시작할 때부터 기록을 중단할 때까지의 경과시간을 말한다. 물론, 계측기의 기록방식은 사건(event)에 의해 촉발되는 트리거 방식도 있고, 사전에 설정한 시간이 되면 자동으로 촉발되는 방식, 일정한 시간간격으로 지속적으로 측정하는 방식 등 여러 가지가 있으나 통상 하나의 사건에 대하여 기록을 시작해서 중단할 때까지의 시간을 기록시간이라 한다. 기록시간을 설정하는 일례로, 어떤 현장에서 발파소음에는 관심이 없고 발파진동만을 계측하고자 한다면 계측기를 발파진동에 의해 촉발되도록 한 다음, 기록시간을 발파가 지속되는 시간을 감안하여 2초 정도로 설정하면 된다. 반대로 발파진동에는 관심이 없고 발파소음만 계측하는 경우라면 계측기를 발파소음에 의해 촉발되도록 하고, 기록시간은 발파진동의 경우에 준하여 설정하면 된다.

하지만 보통의 경우에는 발파진동과 발파소음을 모두 측정하므로 기록시간을 설정할 때에는 발파의 지속시간 뿐만 아니라 폭원거리와 공기 중에서의 음파의 속도까지도 고려할 필요성이 있다. 예를 들어, 지중에서의 탄성파의 속도를 3000 m/s, 공기 중에서의 음속을 340 m/s로 가정한다면 폭원에서 1000 m 되는 거리에 설치해 둔 계측기에 발파진동이 도달하는 시간은 발파 후 약 0.3초, 발파소음은 약 3초가 걸리게 된다. 따라서 이 계측기를 발파진동으로 트리거 시키고자 할 때는 발파진동이 도달한(트리거 발생) 후 발파소음이 도달하는데 걸리는 시간이 2.7초이므로 이 시간에도 발파의 지속시간 2초를 더한 시간(4.7초)을 감안하여 기록시간을 5초 정도로 설정하면 좋을 것이다.

일반적으로 기록시간은 발파의 지속시간보다 긴 2초를 기본으로 하고, 폭원거리가 300m 증가할 때마다 1초씩 추가시킨다. 대략적으로 말하면, 폭원거리가 1000m 이하일 때는 5초, 2000m 이하일 때는 10초, 그 이상은 15초 정도로 설정한다. 주의할 것은 지발발파가 되면 발파의 지속시간이 발파의 규모와 기록패턴에 따라 상당히 길어질 수 있으므로 발파의 지속시간을 고려하여 기록시간을 충분히 설정해 주도록 한다.

4.6 발파소음 측정상의 유의사항

앞에서 언급한 바와 같이 발파전용 측정장비들은 대부분 발파진동을 측정하는 세 개의 채널과 발파소

음을 측정하는 한 개의 채널을 갖추고 있다. 그 중에서 발파진동 채널의 경우에는 대부분 입자속도를 측정한다. 하지만 발파소음 채널의 경우에는 사용자가 장비를 처음 구입할 때 자신의 필요에 따라 음압레벨(Sound Pressure Level; SPL; dB(L))과 소음레벨(Sound Level; SL; dB(A)) 중 어느 하나를 측정하는 마이크로폰(microphone)을 선택하게 된다. 물론, 장비에 따라서는 두 가지 모두를 측정할 수 있는 것도 있으나 그렇지 않은 경우에는 마이크로폰의 발파소음 측정방식에 따라 본체도 이와 동일한 측정방식으로 설정해 주어야 한다. 하지만 현장에서 여러 대의 장비들을 동시에 운용하다보면 이 과정을 빠뜨리는 수가 있다. 예를 들어, 마이크로폰은 음압레벨(dB(L)) 측정용임에도 무의식적으로 또는 이를 인지하지 못하여 본체는 소음레벨(dB(A)) 측정모드로 설정해 놓는 경우가 있

다. 이런 경우에도 시스템은 별다른 여러 메시지를 발하지 않고 잘 작동하기 때문에 사용자는 아무런 의심 없이 측정작업을 계속하게 된다. 그 결과 현장에서 어렵게 측정해 온 자료가 쓸모없는 노이즈가 되어 버릴 수도 있다.

그림 10은 해체발파에서 트리거 방식을 ‘발파진동 또는 발파소음’으로 설정해 놓았을 때 계측기가 발파소음에 의해 트리거 된 이후 수초 만에 충격진동(해체 발파(demolition blasting)에서 충격진동(impact vibration)이란 발파로 붕괴 또는 전도되는 구조물이 지반을 충격함으로써 발생하는 지반진동을 말함)이 도달한 모습을 보여주는 계측결과이다. 그림 10의 (a)와 (b)에서는 마이크로폰의 측정방식에 따라 본체의 설정이 올바르게 이루어진 예들이다. 반면, 그림 10(c)의 경우에는 음압레벨(dB(L))을 측정하는 마이크로폰을

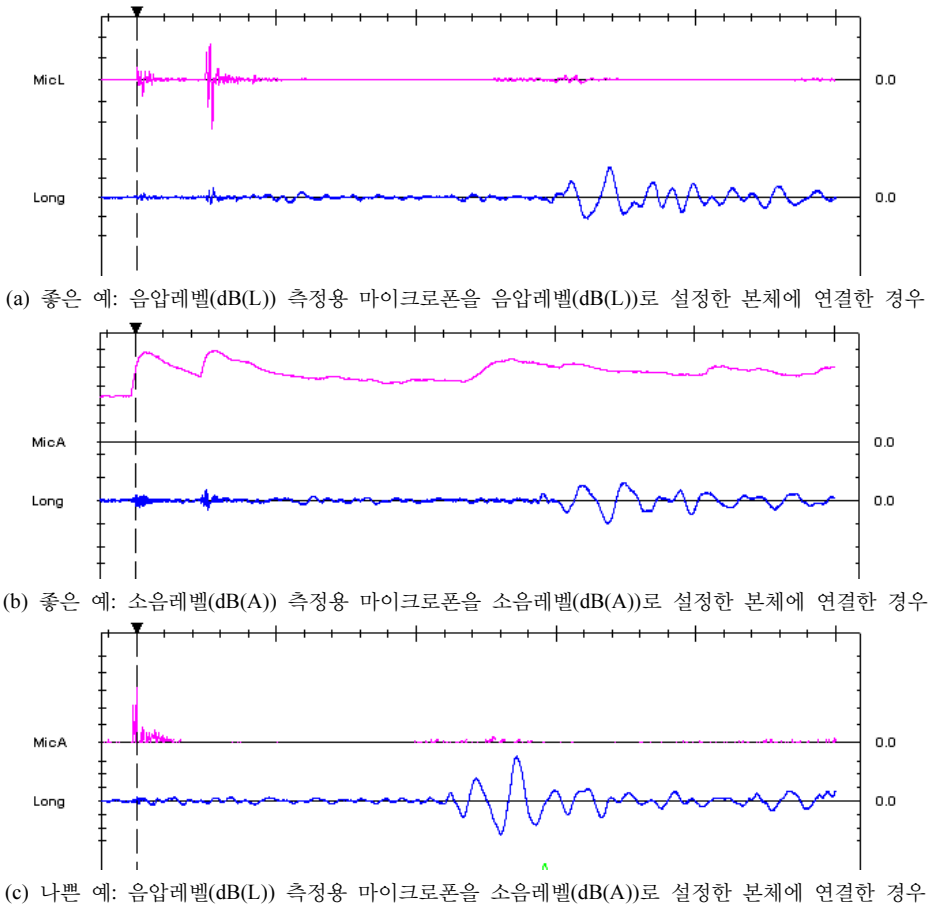


그림 10. 마이크로폰과 본체의 설정방식에 따른 발파소음 계측결과 비교.

사용하면서도 본체는 소음레벨(dB(A))로 잘못 설정한 예를 보여주고 있다. 이와 같이 본체의 측정방식을 잘못 설정함으로써 발파소음을 올바르게 측정하지 못한 경우에도 사용자가 이를 알아차리면 측정치 하나만 잃는 것이 되지만 사용자가 이를 올바른 측정치로 오인하게 되면 오히려 잘못된 결과를 낼 수도 있다. 따라서 현장계측 과정에서는 반드시 계측기의 설정상태를 사전 점검하여야 하며, 측정이 끝난 후에도 마이크로폰 센서에 대한 테스트 결과를 항상 눈여겨봄으로써 장비관리나 사용상에서의 사소한 잘못으로 인해 보이지 않는 큰 오류를 범하지 않도록 특별한 주의를 기울여야 한다.

5. 진동속도와 진동레벨

5.1 가속도레벨과 진동레벨

종래 발파진동의 영향평가에서는 구조물이 주체로서 구조물의 피해와 상관관계가 높은 진동속도 파형 중에서 최대진폭, 즉 PPV를 사용한 평가가 주를 이루고 있다. 하지만 공해진동으로서 인체영향을 대상으로 하는 진동규제법(환경부 소음진동관리법)에서는 정해진 진동가속도로부터 정의되는 진동레벨에 의한 평가가 추가 되고 있다. 따라서 현행 법규 하에서는 발파진동이 공해진동으로서 인체영향이 문제가 되는 경우 종래의 최대속도에 의한 평가와 더불어 진동레벨에 의한 평가를 병행해야 할 필요성이 있다.

가속도레벨

일반 공해진동에서는 인체의 진동감각을 보정한 다음과 같은 가속도레벨(acceleration level; AL)을 사용한다.

$$AL = 20 \log_{10} \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (15)$$

식 (15)에서 AL=가속도레벨(dB), A=가속도 실효치(m/s²), A₀=가속도 기준치(=10⁻⁵ m/s²)이다. 같은 방법으로 속도레벨(20log($\frac{V}{V_0}$), V₀=10⁻⁶cm/s), 변위레벨(20log($\frac{d}{d_0}$), d₀=10⁻¹¹ m)을 정의하기도 한다. 가

속도레벨은 대수 척도이므로 측정된 가속도(A)가 2배가 되면 가속도레벨은 20log2= 6 dB 만큼 증가하게 된다.

진동레벨

국제표준화기구(ISO)의 인체에 대한 진동기준은 위의 가속도레벨에 주파수에 따른 인체의 진동감각을 보정하여 다음 식 (16)에 의한 진동레벨(vibration level; VL)로 환산하는데, dB(V) 단위(V: vertical)로 많이 표시하며 연직방향에 대해 위의 가속도레벨의 기준치 A₀를 주파수 대역별로 보정하여 사용한다.

$$VL = 20 \log_{10} \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (16)$$

식 (16)에서 주파수(f)에 따른 가속도레벨의 기준치(A₀)는 다음 표 5와 같으며, 이를 그래프로 도시한 것이 그림 11이다.

일반적으로 인체의 진동에 대한 감지방법은 주파수에 의존하며, 연직방향의 진동에는 4-8Hz에 가장 민감하고, 수평방향의 진동에는 1~2Hz에 가장 민감하다. 진동주파수에 대한 인체의 감지방법을 표현하기 위해서는 진동레벨의 연직 및 수평 양특성을 갖는 진동감각 보정회로를 갖추어야 한다. 계측된 가속도의 입력에 대해서 1차 진동감각 보정회로에 의해서 주파수 보정이 이루어지며, 다음 지시특성회로에 의해서 지속시간에 대한 보정이 행해진 결과가 진동레벨 값이 된다.

5.2 최대입자속도(PPV)와 최대입자가속도(PPA) 간의 상관관계와 인과관계

서언에서 언급한 바와 같이, 우리나라의 경우 아직 발파진동에 대해서는 전문화된 규제법규가 없는 관계로 근래에 들어서는 발파진동을 환경법규(소음진동관리법)에 맞추려는 시도가 종종 이루어지고 있다. 하지만 종래 발파진동에 의한 구조물 영향평가는 진동속

표 5. 주파수(f)에 따른 가속도레벨 기준치(A₀)

$A_0 = \frac{2}{\sqrt{f}} \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$	$1 \leq f \leq 4 \text{ Hz}$
$A_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$	$4 \leq f \leq 8 \text{ Hz}$
$A_0 = 0.125f \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$	$8 \leq f \leq 90 \text{ Hz}$

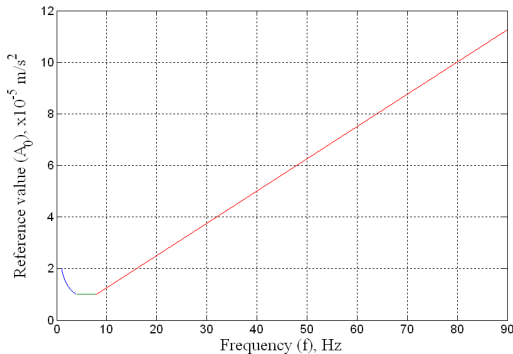


그림 11. 주파수(f)의 함수로서의 가속도레벨 기준치(A_0).

도(PPV)로 평가하는 반면, 생활진동은 인체영향을 평가하는 것을 주로 하고 있다. 따라서 여기서는 구조물에 대한 발파진동 규제기준과 관련하여 고려해야 할 사항들 중에 특히 발파진동 및 구조물의 주파수 문제를 살펴보고, 아울러 환경법에서 규정하고 있는 진동 레벨과 전통적으로 발파진동의 규제기준으로 사용되는 진동속도의 차이점을 고찰함으로써 향후 올바른 규제기준에 대한 잣대를 세우는 데 참고가 되도록 하였다.

진동의 피크치 사이의 상관관계를 고찰하기 전에 먼저, 상관관계와 인과관계의 정의부터 살펴볼 필요가 있다. 일반적으로 콜라의 소비가 많은 나라의 국민이 더 높은 삶의 질을 누리며, 더 많은 정치적 자유도 누리는 것으로 나타나고 있다. 즉, 콜라 소비량과 삶의 질이나 정치적 자유 사이에는 매우 높은 상관성이 있으며, 이를 코카콜라 지수라고도 한다. 그렇다면 콜라를 많이 마시면 삶의 질이 높아지고 정치적 자유도 늘어나는가 하면, 전혀 그렇지 않다. 즉, 콜라를 많이 마신다고 삶의 질이 개선되는 것은 아니기 때문이다. 반대로, 삶의 질이 높고 정치적 자유가 많으면 콜라를 많이 마시는가 하면, 전혀 그렇지 않다. 즉, 콜라가 아니라 녹차를 마실 수도 있기 때문이다. 이와 같이, 콜라 소비량과 삶의 질이나 정치적 자유 사이에는 높은 상관성이 있지만 아무런 인과관계도 없는 것이다(이준구와 이창용, 2011).

경제분석은 여러 경제변수들 사이에 존재하는 인과관계를 밝혀내는 일을 중요한 목표로 삼는다. 그래서 통계자료로부터 변수들 간의 상관관계를 찾은 경우에는 자료분석과 이론적 추론을 통해 이들 변수 사이에

어떠한 인과관계가 있는지 밝혀내며, 이러한 과정을 통해 새로운 경제이론이 탄생하게 되는 것이다.

진동의 피크치 간의 일반적인 상호관계

일반적으로 진동의 최대입자변위(peak particle displacement; PPD), 최대입자속도(peak particle velocity; PPV) 및 최대입자가속도(peak particle acceleration; PPA)와 같은 피크치들 사이에는 아무런 상관관계도 없다. 이는 자동차의 경우를 살펴보면 금방 알 수 있다. 정지상태에 있던 두 자동차 중에 A는 급가속 하여 10초 만에 100km/h에 도달하고, B는 천천히 가속 하여 40초 만에 200km/h에 도달하였다고 하면 최대 가속도는 A의 경우 10km/h/s로 크나 B는 5km/h/s로 작다. 즉, A는 최대속도는 작으나 최대가속도는 크고, B는 최대속도는 크나 최대가속도는 작다. 따라서 최대속도와 최대가속도 사이에는 아무런 관계가 없다고 할 수 있다.

이 관계를 좀 더 자세히 살펴보면, 진동계측기로 측정한 단일 이벤트(진동)이라도 실제로는 진폭과 주파수가 다른 무수히 많은 성분진동의 합성으로 이루어져 있다고 볼 수 있다. 이 사실은 측정된 이벤트를 푸리에 적분(Fourier integral)으로 표현한 다음 식을 보면 알 수 있다.

$$v(t) = \int_0^{\infty} [A(\omega)\cos\omega t + B(\omega)\sin\omega t] d\omega \quad (17)$$

$$a(t) = \int_0^{\infty} [\omega B(\omega)\cos\omega t - \omega A(\omega)\sin\omega t] d\omega$$

위 식 (17)에서 $v(t)$ 와 $a(t)$ 는 각각 측정된 이벤트의 속도이력 및 가속도이력이며, ω 는 (각)주파수(angular frequency)이다.

식 (17)은 어떤 진동이 진폭($A(\omega)$ 와 $B(\omega)$)과 주파수(ω)가 서로 다른 무수한 성분진동들의 합성으로 이루어져 있고, 따라서 진동의 속도와 가속도의 피크치인 v_{\max} 와 a_{\max} 사이에는 아무런 상관관계도 없음을 보여주고 있다. 즉, 전체 주파수 스펙트럼 상에서 PPV와 PPA 사이에는 아무런 상관관계가 없다. 따라서 인과관계도 없다. 이는 다음의 단순화 일례를 살펴보면 보다 쉽게 알 수 있다. 즉, 성분주파수가 각기 하나뿐인 다음 식들과 같은 두 파동을 고려한다.

$$v_1(t) = A \sin \omega_1 t$$

$$a_1(t) = \omega_1 A \cos \omega_1 t \tag{18}$$

$$v_2(t) = A \sin \omega_2 t$$

$$a_2(t) = \omega_2 A \cos \omega_2 t \tag{19}$$

위 식 (18)과 (19)에서 두 개의 속도파동 $v_1(t)$ 와 $v_2(t)$ 는 진폭 A 가 서로 같으므로 $v_{1,max} = A = v_{2,max}$ 로 서로 같다. 그러나 주파수가 ω_1 과 ω_2 로 서로 다르므로 $a_{1,max} = \omega_1 A \neq \omega_2 A = a_{2,max}$ 이다. 즉, PPV는 서로 같으나 PPA는 서로 다르다. 이로부터 진동의 피크치 사이에는 일반적으로 아무런 상관관계가 없음을 알 수 있다.

진동의 피크치 간의 특수한 상호관계

진동의 피크치 사이에 일반적인 상호관계는 없지만 어떤 특별한 상황 하에서는 이들 간에도 어떤 상호관계가 존재할 수도 있을 것이다. 예를 들어, 주파수 스펙트럼이 완전히 동일하거나 매우 유사한 진동들 사이에는 PPV와 PPA 사이에 어떤 상관관계가 존재할 수도 있을 것이다. 이 관계를 알아보기 위하여 위의 식 (18)과 (19)에서 이번에는 두 파동의 주파수가 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 로 서로 같다고 가정하자. 그러면 $v_{max} = A$ 로 서로 같을 때 $a_{1,max} = \omega A = a_{2,max}$ 로 서로 같아진다. 즉, 주파수가 하나뿐이고 그 값이 동일한 경우에는 PPV가 같을 때 PPA도 같아진다. 또한 $PPV = A$ 가 커지면 $PPA = \omega A$ 도 커지므로 피크치 사이에 어떤 특정한 상관관계가 존재할 수 있다.

그러나 주파수 스펙트럼이 다른 진동들, 예를 들면 기폭조건이 변화했거나 다른 현장에서 측정된 발파진동들에 대해서는 앞에서 구한 것과 같은 특정한 상관관계가 그대로 성립한다고 볼 수 없다. 왜냐하면 새로이 측정된 진동들의 주파수 스펙트럼이 다르다면 단 하나의 성분진동의 주파수만 달라도 이 성분진동의 진폭에 따라 합성진동의 진폭이 크게 달라질 수 있기 때문이다. 이와 같은 이유 때문에 주파수 스펙트럼이 매우 유사한 진동들 사이에서만 어떤 상관관계를 논할 수 있다. 따라서 스펙트럼이 서로 다른 진동들 사이에는 설사 어떤 상관관계가 성립하였다도 우연에 의한 것일 수 있으며, 또 반드시 그런 관계가 성립하

여야 할 인과관계도 없다.

최대입자속도와 진동레벨 간의 추정식에 대한 고찰

이론적으로 진동속도의 최대치 PPV와 진동레벨 VL과의 관계를 8Hz 이상의 주파수에 대해 연속적인 정현파를 가정하여 유도하면 다음과 같다.

$$VL = 20 \log_{10}(PPV) + 91 \tag{20}$$

식 (20)에서 VL: 진동레벨(dB), PPV: 최대진동속도(cm/s)이다.

만일 식 (20)을 발파진동에 적용할 수 있다면 PPV를 알면 VL을 알 수 있고, 또 그 역도 성립하므로 진동계측시 PPV 또는 VL 중에서 어느 한 쪽만 측정해도 되겠지만 발파진동과 같은 일회적인 충격파에 대해서는 두 평가방법 사이의 관계를 일의적으로 결정할 수는 없다는 것이 지금까지의 정설이다. 즉, VL은 가속도에 주파수별로 서로 다른 가중치(그림 11)를 부여한 것이므로 위에서 기술한 PPV와 PPA의 관계와 마찬가지로 특정 주파수 또는 매우 유사한 주파수 스펙트럼을 갖는 진동들에 대해서만 PPV와 VL 사이에 어떤 상관성을 논할 수 있다. 따라서 PPV와 VL 간의 상관관계를 도출할 때에는 측정된 모든 이벤트의 속도파형과 가속도파형에 대하여 스펙트럼 분석을 철저히 수행할 필요가 있다. 더욱이 VL은 표 5와 그림 11에 보인 바와 같이 주파수별로 부가하는 가중치가 다르므로 스펙트럼 분석 시에는 이런 특성도 주의 깊게 고려하여야 한다.

VL 추정식 적용시 유의사항

생활진동을 dB(V) 단위로 규제하고 있는 환경부의 소음진동관리법을 충족시키기 위해 PPV와 VL 간의 변환 특성에 관한 연구(양형식과 박경준, 2003)나 PPV로부터 VL을 추정하는 연구들이 보고되고 있다(김일중 외, 2009; 원연호 외, 2010; 송하림 외, 2011; 김일중 외, 2012). 하지만 PPV와 VL 사이에는 근본적으로 전체 주파수 스펙트럼 상에서는 아무런 상관관계가 없고, 또 추정치는 어디까지나 통계처리 결과이므로 PPV로부터 도출한 VL 추정치를 환경법규의 준수여부에 대한 판단기준으로 사용해서는 안 된다. 환경법규의 준수여부에 대한 판단이 필요할 때는 반

드시 진동레벨계로 실측한 값을 사용하여야 한다. 다만, 많은 실측자료와 충분한 스펙트럼 분석을 통해 다양한 주파수 스펙트럼별로 PPV-VL 추정식을 마련한다면 생활진동을 규제하는 현행 환경법 하에서 법규에 저촉되지 않는 발파설계를 하는 데는 제한적으로 이용할 수 있을 것이다. 그러나 충격성 및 일회성의 특성을 지니는 발파를 생활진동을 취급하는 현행 환경법에 맞추어 설계한다는 것은 매우 불합리하므로 발파진동에 적합한 새로운 규제기준이 시급히 마련되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 거리를 장약량에 대하여 환산한 환산거리(scaled distance; SD)로부터 VL을 추정하는 연구도 보고되고 있다(최형민, 2012). 하지만 현재 보고되고 있는 연구결과에서는 측정된 발파진동의 주파수 스펙트럼에 대한 고려가 보이지 않는다. 이는 SD와 VL 사이에 어떤 특정한 상관관계가 나타났다고 해도 그것이 모든 주파수 스펙트럼에 대하여 성립한다고는 할 수 없기 때문에 문제가 될 수 있다. 따라서 SD-VL의 상관관계를 도출할 때에도 단순히 그 크기 값 사이의 상관관계만 도출해선 안 되며, 반드시 측정된 진동의 주파수 스펙트럼을 충분히 분석하여 특정한(같거나 매우 유사한) 스펙트럼을 가지는 진동들에 한해서만 SD-VL 간의 상관관계를 찾아야 한다. 이것은 SD-VL 상관관계도 SD-PPV 상관관계와 마찬가지로 기폭조건이 변하거나 발파장소가 달라지면 먼저 구한 상관관계와 전혀 다른 관계가 나타날 수 있기 때문이다.

끝으로 구조물의 손상은 ZCF와 연관된 PPV 수준과 인과관계가 높은 것으로 알려져 있으므로 구조물에 대한 새로운 지반진동 규제기준에서는 주파수대역별 PPV를 갖대로 사용하는 것이 바람직하다고 본다.

6. 결 언

건설교통부(현 국토교통부)는 지난 2003년에 제정, 공포했던 「암발파 설계 및 시험발파 잠정지침(안)」을 수정, 보완하여 2006년에 「도로공사 노천발파 설계·시공 지침」으로 개정, 공포하였다. 본 논문에서는 개정된 지침과 요령이 규정하고 있는 시험발파 관련조항들 가운데서도 발파 진동·소음의 측정방법과 측정 결과의 분석방법에 대하여 그 개념이나 배경이론을 상술함으로써 현장 실무자들이 개정된 지침을 보다

쉽게 이해할 수 있도록 하였다. 또한, 보편적으로 알려져 있는 계측상의 지침들을 일일이 열거하기 보다는 현장에서 실제로 발파진동·소음을 측정할 때 간과하기 쉬운 사항들을 집중적으로 논의함으로써 실무자의 재량에 따른 계측상의 유연성을 제공하면서도 보다 신뢰성 있는 자료를 획득하는데 도움이 되고자 하였다.

최대입자속도(PPV)와 진동레벨(VL) 사이에는 근본적으로 전체 주파수 스펙트럼 상에서 아무런 인과관계가 없으므로 PPV-VL 추정식을 사용하기 위해서는 많은 실측자료들을 확보하고 충분한 스펙트럼 분석을 통해 다양한 주파수 스펙트럼별로 추정식을 도출하여야 신뢰성을 높일 수 있다. 그리고 PPV-VL 추정식에 의한 추정치는 어디까지나 통계처리 결과이므로 VL 추정치를 가지고 환경법규의 준수여부를 판단해서는 안 되며, 추정식은 현행 환경법 하에서 법규에 저촉되지 않는 발파설계를 하는 데 제한적으로 사용하는 것이 좋다. 그러나 충격성 및 단발성이라는 특성을 지니는 발파를 생활진동을 취급하는 현행 환경법에 맞추어 설계한다는 것은 불합리하므로 발파의 특성에 맞는 새로운 발파진동 규제기준이 시급히 마련되어야 할 것이다.

진동제어발파를 설계할 때에는 SRSD와 CRSD 개념을 이용한 예측식과 제어발파 설계기준을 사용한다. 통상적인 경우에는 SRSD와 CRSD 가운데 적합도가 높은 것을 선택하여 사용하면 된다. 한편, 최근에 소위 교차점 분석이라는 기법이 학회에서 제안되고 있는데, 여기서 교차점이란 거리(D)에 대해 도시한 SRSD 및 CRSD의 최대 지발당장약량 그래프가 W - D 좌표계 상에서 만나는 교점 $(D, W) = (b^3/a^2, b^6/a^6)$ 을 말한다. 이 교점을 기준으로 가까운 쪽에서는 SRSD의 장약량이 더 크게 나타나고, 먼 곳에서는 CRSD의 장약량이 더 크게 나타나는데, 특히 발파설계가 이루어지는 대상거리가 교점거리보다 더 멀어지면 CRSD의 장약량이 기하급수적으로 증가하는 문제가 발생한다. 이는 안전발파를 저해하는 요인이 될 수 있으므로 교차점 분석을 적용하여 제어발파를 설계할 때에는 SRSD가 예측식으로 선택된 경우에는 기존의 방식대로 제어발파를 설계하고, CRSD가 선택되면 예측식의 적용범위를 W - D 그래프 상에서 SRSD와의 교점의 D 값을 가급적 넘지 않도록 하는 것이 좋다.

끝으로, 발파현장에서 발생하고 있는 ‘구조물 파괴’와 관련된 민원들(사람들의 불쾌감과 관련된 민원은 환경법에서 취급하고 있으므로 별도의 문제임)은 발파가 지진과 비슷한 큰 변위진폭을 보일 것이라는 사람들의 오해에서 비롯되는 경우가 대부분이다. 지진은 변위진폭의 크기가 수십 cm도 될 수 있지만 발파는 변위진폭의 크기가 10 mm를 넘지 않는다. 더욱이 통상적인 발파진동의 경우에는 변위진폭이 수 mm 이내로 워낙 작기 때문에 진동속도가 매우 크지 않으면 구조물에 손상이 발생하기 어렵다. 더욱이 발파에서 말하는 손상이란 벽체에 실금이 가는 수준이므로 지진에서 말하는 건물의 파괴나 붕괴와는 그 정도가 완전히 다른 개념이다. 이상과 같이 발파와 발파진동, 발파소음은 그 나름의 고유한 특성들을 지니고 있으므로 발파공사와 관련된 민원이나 분쟁의 원활한 해결, 적절한 제어발파 설계를 위해서는 이와 같은 발파의 특성들에 대한 이해가 필수적으로 선행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2003, 암발파 설계 및 시험발파 잠정지침 (안).
2. 건설교통부, 2006, 도로공사 노천발파 설계시공 지침.
3. 김일중, 기경철, 조영동, 2009, 발파진동속도와 진동레벨과의 관계식 연구, 화약발파, 제27권 제1호, pp.79-87.
4. 김일중, 김태섭, 복진승, 2012, 발파진동속도와 진동레벨의 상관성 분석, 2012 대한화약발파공학회 춘계학술 발표회 논문집, pp. 87-95.
5. 송하림, 노영매, 강추원, 2011, 진동레벨과 진동속도의 상관성에 관한 비교연구, 화약발파, 제29권 제2호, pp.43-50.
6. 양형식, 박경준, 2003, 진동특성에 따른 수직보정 진동레벨의 변환 특성 연구, 화약발파, 제21권 제1호, pp.77-84.
7. 원연호 외, 2010, 진동레벨과 진동속도의 상관성 분석 등에 관한 연구, 환경부 중앙환경분쟁조정위원회 연구 보고서, 원앤비 기술사사무소.
8. 이준구, 이창용, 2011, 경제학 원론 제4판, 법문사, pp.31-33.
9. 최병희, 류창하, 2012, 지반진동 규제기준에서 진동레벨과 진동속도의 상호관계에 대한 고찰, 화약발파(대한 화약발파공학회지), 제30권 제2호, pp.1-8.
10. 최병희, 류창하, 정주환, 2010, 제어발파설계에서 자승근 및 삼승근 환산거리 기법의 적용한계에 대한 고찰, 화약발파(대한화약발파공학회지), 제28권 제1호, pp.27-39.
11. 최형빈, 2012, 발파환경 진동레벨 기준척도의 시공단계 적용사례 연구, 2012 대한화약발파공학회 춘계학술

발표회 논문집, pp.87-103.

12. Ambraseys, N.R. and A.J. Hendron, 1968, Dynamic Behavior of Rock Masses, Rock Mechanics in Engineering Practice (K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz, eds.), John Wiley & Sons, Inc., London, pp.203-227.
13. Attewell, P.B., I.W. Farmer and D. Haslam, 1965, Prediction of Ground Vibration Parameters from Major Quarry Blasts, Mining and Minerals Engineering, Dec., pp.621-626.
14. Bhandari, S., 1997, Engineering Rock Blasting Operations, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp.302-304.
15. Blair, B.E. and W.I. Duvall, 1954, Evaluation of Gages for Measuring Displacement, Velocity and Acceleration of Seismic Pulses, USBM RI 5073, p.21.
16. Davies, B., I.W. Farmer and P.B. Attewell, 1964, Ground Vibration from Shallow Subsurface Blasts, The Engineer, Mar. 7, pp.553-559.
17. Devine, J.F., 1962, Vibration Levels from Multiple Holes per Delay Quarry Blasts, Earthquake Notes, Vol. XXXIII, Sep. pp.32-39.
18. Devine, J.F. and W.I. Duvall, 1963, Effect of Charge Weight on vibration Levels for Millisecond Delayed Quarry blasts, Earthquake Notes, Vol. XXXIV, Jun. pp.17-24.
19. Dowding, C.H., 1971, Response of Buildings to Ground Vibrations Resulting from Construction Blasting, Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Urbana Champaign, p.204.
20. Dowding, C. H., 1996, Construction vibrations, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, US, p.84.
21. Duvall, W.I. and B. Petkof, 1959, Spherical Propagation of Explosion-Generated Strain Pulses in Rock, USBM RI 5483, p.1-20.
22. Ghosh, A. and J.J.K. Daemen, 1983, A Simple New Vibration Predictor (Based on Wave Propagation Laws), 24th US Symp. on Rock Mech., Texas, pp.151-157.
23. Gustafsson, R., 1973, Swedish Blasting Technique, SPI, Gothenburg, Sweden, pp.211-221.
24. Habberjam, J.M. and J.T. Whetton, 1952, On the Relation between Seismic Amplitude and Charge of Explosive Fired in Routine Blasting Operation, Geophysics 17(1), pp.116-128.
25. Langefors, U. and B. Kihlstrom, 1963, The Modern Technique of Rock Blasting, 3rd. ed., John Wiley & Sons Inc., New York, p.285-288.
26. Morris, G., 1950, Vibrations due to Blasting and Their Effects on Building Structure, The Engineer, London, pp.394-395.
27. Nicholls, H.R., C.F. Johnson and W.I. Duvall, 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, USBM Bulletin 656, p.105.

28. Pal Roy, P., 1991, Prediction and Control of Ground Vibrations due to Blasting, Colliery Gaurdian 239(7), pp.215-210.
29. Siskind, D.E., M.S. Stagg, J.W. Kipp and C.H. Dowding, 1980a, Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting, USBM RI 8507, pp.9-17.
30. Siskind, D.E., V.J. Stachura, M.S. Stagg, and J.W. Kopp, 1980b, Structure Response and Damage Produced by Airblast From Surface Mining, USBM RI 8485, p.111.
31. Siskind, D.E., 2000, Vibrations from Blasting, ISEE, Cleveland, OH USA, pp.14-15, pp.17-28.
32. Snodgrass, J.J. and D.E. Siskind, 1974, Vibrations from Underground Blasting, USBM RI 7937, p.31



최병기
한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3237
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr



류창하
한국지질자원연구원

Tel: 042-868-3236
E-mail: cryu@kigam.re.kr