

## 지반진동 규제기준에서 진동레벨과 진동속도의 상호관계에 대한 고찰

최병희<sup>1)\*</sup>, 류창하<sup>1)</sup>

### Consideration on the Relation between Vibration Level and Peak Particle Velocity in Regulation of Ground Vibration

Byung-Hee Choi and Chang-Ha Ryu

**Abstract** The only law related to airblast and ground vibration control in Korea is the Noise and Vibration Control Act enforced by the Ministry of Environment. But this law mainly deals with the annoyance aspects of noises and vibrations in ordinary human life. Hence, the law defines the safety criteria of ground vibration as the vibration level (VL) of dB(V) unit. The ground vibrations produced from blasting, however, have the unique characteristics that can be shown in shock vibrations, and the duration is also very short compared to the vibrations from machinery, tools or facilities. Hence, vibration regulations for blasting operations usually define the safety criterion as the peak particle velocity (PPV) considering the effect of ground vibrations to structural damage. Notwithstanding, there are several attempts that predict VL from PPV or estimate VL based on the scaled distances (SD; in unit of  $m/kg^{1/2}$  or  $m/kg^{1/3}$ ) without considering their frequency spectra. It appears that these attempts are conducted mainly for the purpose of satisfying the law in blasting contracts. 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 for the waves with the same or very similar frequency spectra.

**Key words** Airblast, Ground vibration, Safety criterion, Vibration level, Peak particle velocity, Frequency spectrum

**초 록** 국내에서 발파공과 지반진동을 취급하는 유일한 법규가 바로 환경부의 소음진동관리법이다. 하지만 이 법규는 생활소음과 생활진동을 주로 취급하고 있으므로 지반진동에 대한 안전기준을 dB(V) 단위의 진동레벨에 의해 규정하고 있다. 그러나 발파로 발생하는 지반진동은 충격진동에서 볼 수 있는 것과 같은 독특한 특성을 지니고 있으며, 그 지속시간도 기계류나 장비류, 시설물 등에서 발생하는 진동과 비교하여 매우 짧은 특성이 있다. 그러므로 발파작업에 대한 진동법규에서는 통상 구조물 손상에 대한 지반진동의 영향을 고려하여 안전기준을 최대입자속도(peak particle velocity; PPV)로 설정한다. 그럼에도 불구하고 진동파동의 주파수 스펙트럼에 대한 충분한 고려도 없이 PPV로부터 진동레벨(vibration level; VL)을 예측하거나  $m/kg^{1/2}$ 이나  $m/kg^{1/3}$  단위의 환산 거리에 따라 VL을 추정하려는 시도들이 있다. 이 시도들은 주로 발파공사 과정에서 소음진동관리법을 충족시키려는 목적으로 이루어지는 것으로 보인다. 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.

**핵심어** 발파공, 지반진동, 안전기준, 진동레벨, 최대입자속도, 주파수 스펙트럼

## 1. 서론

현행 환경부 소음진동관리법은 생활소음 진동을 주요 대상으로 하고 있으며, 발파진동의 경우에는 충격진동으로서의 발파진동의 특성을 특별히 고려하지 않

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원

\* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2012년 12월 8일

심사 완료일 : 2012년 12월 21일

게재 승인일 : 2012년 12월 26일

고 편의상 생활소음 진동 규제기준에 +10 dB 하는 것으로 규정하고 있다. 이처럼 발파진동에 대한 특별한 규제법규가 없다 보니 근래에 들어 발파진동을 환경법규에 맞추려는 시도가 자주 이루어지고 있으나 이는 발파가 지니고 있는 충격성·일회성 진동이라는 특성에 비춰볼 때 바람직하지 않다. 예를 들어, 불꽃놀이 심야에 140 dB(A)가 훨씬 넘는 소음을 일으키지만 사람들은 오히려 즐거워하는 반면, 주간 90 dB(A)를 발생시키는 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 일반 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 있는 것으로 매우 불합리하므로 발파진동에 대해서는 그에 맞는 새로운 규제기준을 마련할 필요가 있다.

소음진동관리법에서 규정하고 있는 발파관련 조항에 대해 합리적인 보완의 필요성과 함께 건축물에 대한 국가적 차원의 표준화된 규제기준 마련의 필요성이 오래 전부터 대두되어 왔다(이경운 외, 1995; 류창하 외, 2010; 김일중 외, 2012). 규제기준을 마련하는 과정은 개발과 환경이라는 갈등 사이에서 정부 부처간의 입장 차이가 있지만, 지속 가능한 개발을 도모하면서도 국민의 삶의 질과 환경을 보호할 수 있는 조화점을 찾아야 한다. 현재 발파와 같은 충격진동에 대해 국가 기준을 갖고 있는 나라로는 미국, 영국, 독일, 스위스, 스웨덴, 중국, 호주 등이 있다(류창하, 2005). 각국에서 설정하고 있는 수준과 형태도 다양하여 단지 기술적인 문제 외에도 다른 복합적인 요인이 기준 설정에 반영되어 있음을 추정케 한다. 인체감각을 고려한 평가 척도에 있어서도 우리나라와 일본은 주파수 대역에 따라 보정한 진동레벨을 사용하고 있으나 진동속도와 주파수를 이용하여 충분히 평가할 수 있다는 연구보고도 있다(일본환경청, 1977; Nicholls et al., 1971; Siskind et al., 1980).

본 논문에서는 구조물에 대한 지반진동 규제기준의

수립 시에 고려해야 여러 가지 사항들 중에서 특히 지반진동 및 구조물의 주파수 문제를 살펴보고, 아울러 환경법에서 규정하고 있는 진동레벨과 전통적으로 지반진동의 규제기준으로 사용되는 진동속도의 차이점을 고찰함으로써 올바른 규제기준에 대한 잣대를 제안코자 하였다.

## 2. 지반진동과 진동주파수 문제에 대한 고찰

### 2.1 지반진동 영향인자

발파공해 문제와 관련하여 지반진동의 대표적인 특성인 진폭특성과 주파수특성(Persson et al., 1994)을 결정하는 요소에는 크게 두 가지가 있다(ISEE, 1998). 첫 번째는, 폭원특성으로서 이는 지반진동을 일으키는 요인에 해당하는 소스(source)와 관련된 성질을 말한다. 두 번째는, 암반특성으로서 이는 폭원이 일으킨 지반진동을 전달하는 매질, 즉 암반과 관련된 성질을 말한다. 폭원의 특성을 결정짓는 중요한 요소로는 폭약의 종류, 장약의 위치, 지발시간 및 순서 등이 있다. 암반의 특성을 결정짓는 중요한 요소로는 암반의 종류 및 상태, 전파경로 상의 불연속면의 상태 및 조건 등이 있다. 이와 같이 지반진동의 특성은 폭원과 암반, 즉 소스와 매질이라는 두 가지 요소의 특성에 의해 결정되며, 어느 한 가지에 의해 결정되는 성질이 아니다.

### 2.2 지반진동과 구조물의 공진문제

이론적으로 여기진동(지반진동)의 주파수가 구조물의 고유주파수와 같아질 때 응답진동은 무한대로 증폭된다(Inman, 1996). 이런 현상을 공진(resonance)이라 하며, 공진의 중요성을 그림 1에 보였다. 일반적인 단층 내지 이층 가옥의 경우에는 10 Hz 전후의 고유주파수를 보이는데(Dowding, 1996), 이보다 높은 주파수의 지반진동에 대해서는 진폭이 크다 해도 가옥은 큰 영향을 받지 않을 수 있다. 대규모 사면의 경우에는 대체로 저주파(장파장)의 지반진동이 잠재적 사면블록의 질점운동을 유발시켜 불안정성을 증가시키고 중국에는 사면파괴를 일으킬 수 있을 것이다. 따라서 지반진동에 관한 규제기준의 수립 시에는 반드시 지반진동의 주파수 특성과 구조물의 주파수 특성을 함께 고려하여야 합리적인 기준을 마련할 수 있을 것이다.

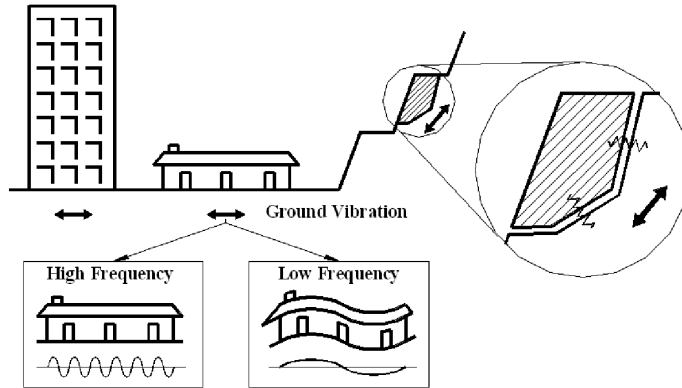


그림 1. 지반진동과 구조물의 공진 문제.

### 3. 지반진동의 진동속도와 진동레벨의 관계

#### 3.1 진동레벨

종래 지반진동의 영향평가에서는 구조물이 주체로서 구조물의 피해와 상관관계가 높은 진동속도 파형 중에서 최대진폭, 즉 PPV를 사용한 평가가 주를 이루고 있다. 하지만 공해진동으로서 인체영향을 대상으로 하는 진동규제법에서는 정해진 진동가속도로부터 정의되는 진동레벨에 의한 평가가 주가 되고 있다. 따라서 현행 법규 하에서는 지반진동이 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.

$$AL = 20 \log_{10} \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 AL=가속도레벨(dB), A=가속도 실효치(m/s<sup>2</sup>), A<sub>0</sub>=가속도 기준치(=10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>)이다. 같은 방법으로 속도레벨(20log( $\frac{V}{V_0}$ )), V<sub>0</sub> = 10<sup>-6</sup> cm/s), 변위레벨(20 log( $\frac{d}{d_0}$ )), d<sub>0</sub> = 10<sup>-11</sup> m)을 정의하기도

한다. 가속도레벨은 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 (2)에 의한 진동레벨(vibration level; VL)로 환산하는데, dB(V) 단위(V: vertical)로 많이 표시하며 연직방향에 대해 위의 가속도레벨의 기준치 A<sub>0</sub>를 주파수 대역별로 보정하여 사용한다.

$$VL = 20 \log_{10} \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서 주파수(f)에 따른 가속도레벨의 기준치(A<sub>0</sub>)는 다음 표 1과 같으며, 이를 그래프로 도시한 것이 그림 2이다.

일반적으로 인체의 진동에 대한 감지방법은 주파수에 의존하며, 연직방향의 진동에는 4~8 Hz에 가장 민감하고, 수평방향의 진동에는 1~2 Hz에 가장 민감하다. 진동주파수에 대한 인체의 감지방법을 표현하

표 1. 주파수(f)에 따른 가속도레벨 기준치(A<sub>0</sub>)

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

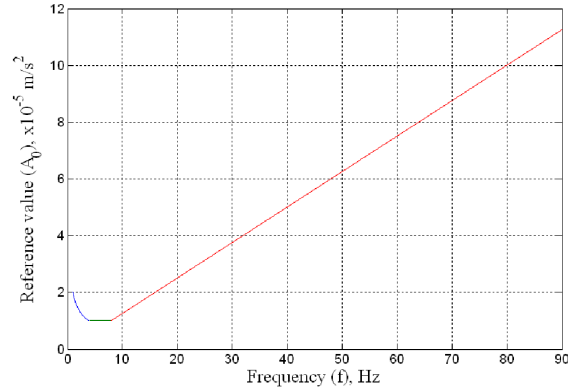


그림 2. 주파수( $f$ )의 함수로서의 가속도레벨 기준치( $A_p$ ).

기 위해서는 VL의 연직 및 수평 양특성을 갖는 진동 감각 보정회로를 갖추어야 한다. 계측된 가속도의 입력에 대해서 1차 진동감각 보정회로에 의해서 주파수 보정이 이루어지며, 다음 지시특성회로에 의해서 지속시간에 대한 보정이 행해진 결과가 VL 값이 된다.

### 3.2 PPV와 PPA 간의 상관관계와 인과관계

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 늘어난다 하거나, 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 이 변수들 간에 어떠한 인과관계가 있는지 밝혀내며, 이러한 과정을 통

해 새로운 경제이론이 탄생하게 되는 것이다.

### 진동의 피크치 간의 일반적인 상호관계

지반진동의 최대입자변위(peak particle displacement; PPD), 최대입자속도(peak particle velocity; PPV) 및 최대입자가속도(peak particle acceleration; PPA)와 같은 피크치들 사이에는 일반적으로 아무런 상관관계가 없다. 이는 자동차의 경우를 살펴보면 금방 알 수 있다. 정지상태에 있던 두 자동차 중에 A는 급가속하여 10초 만에 100 km/h에 도달하고, B는 천천히 가속하여 40초 만에 200 km/h에 도달하였다고 하면 최대가속도는 A의 경우 10 km/h/s로 크나 B는 5 km/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 이루어진다고 볼 수 있다. 이 사실은 측정된 이벤트를 푸리에 적분(Fourier integral)으로 표현한 다음 식을 보면 알 수 있다.

$$v(t) = \int_0^{\infty} [A(\omega)\cos\omega t + B(\omega)\sin\omega t] d\omega \quad (3)$$

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

위 식 (3)에서  $v(t)$ 와  $a(t)$ 는 각각 측정된 이벤트의 속도이력 및 가속도이력이며,  $\omega$ 는 (각)주파수(angular frequency)이다.

식 (3)은 어떤 진동이 진폭( $A(\omega)$ 와  $B(\omega)$ )과 주파수( $\omega$ )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.

$$v_1(t) = A \sin \omega_1 t \tag{4}$$

$$a_1(t) = \omega_1 A \cos \omega_1 t$$

$$v_2(t) = A \sin \omega_2 t \tag{5}$$

$$a_2(t) = \omega_2 A \cos \omega_2 t$$

위 식 (4)와 (5)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  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 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 (4)와 (5)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 진동들에 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 성립하였더라도 이것은 우연에 의한 것일 수 있으며, 또 반드시 그런 관계가 성립하여야 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.

$$VL = 20 \log_{10}(PPV) + 91 \tag{6}$$

식 (6)에서 VL: 진동레벨(dB), PPV: 최대진동속도(cm/s)이다.

만일 식 (6)을 발파에 의한 지반진동에 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 2)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 모든 이벤트의 속도파형과 가속도파형에 대하여 스펙트럼 분석을 철저히 수행할 필요가 있다. 더욱이 VL은 표

1과 그림 2에 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 상에서 아무런 상관관계가 없고, 또 추정치는 어디까지나 통계처리 결과이므로 PPV로부터 도출한 VL 추정치를 환경법규의 준수여부에 대한 판단기준으로 사용해서는 안 된다. 법규의 준수여부에 대한 판단이 필요할 때는 반드시 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 발파로 인한 지반진동에 적합한 새로운 지반진동 규제기준이 시급히 마련되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 거리를 장약량에 대하여 환산한 환산거리(scaled distance; SD)로부터 VL을 추정하는 연구도 보고되고 있다(최형빈, 2012). 하지만 현재 보고되고 있는 연구결과에서는 측정된 진동의 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 매우 중요한 개념이다. 따라서 SD-VL의 상관관계를 도출할 때에도 단순히 그 크기 값 사이의 상관관계만 도출해선 안 되며, 반드시 측정된 진동의 주파수 스펙트럼을 충분히 분석하여 특정한 스펙트럼을 가지는 진동들에 한하여 SD-VL 간의 상관관계를 찾아야 한다. 이 관계는 SD-PPV 상관관계와 마찬가지로 기폭조건이 변화하거나 발파장소가 변화하면 먼저 구한 상관관계와 전혀 다른 관계가 나타날 수 있기 때

문이다.

## 4. 지반진동 규제기준으로서의 잣대

### 4.1 구조물 손상과 지반진동과의 인과관계 규명 연구

1962년도 미광무국(USBM) 조사보고서인 RI 5968 (Duvall and Fogelson, 1962)에서는 지반진동을 나타내는 대표적인 진동량인 PPD, PPV, PPA 가운데 구조물 손상과의 인과관계가 가장 큰 항목은 PPV인 것으로 보고하였다. 그 이후 지반진동에 대한 규제기준은 전 세계적으로 대부분 PPV로 규제하고 있다. 아울러 RI 5968에서는 변위나 가속도로부터 피크값인 PPV를 얻는 것은 어려울 수 있으므로 입자속도를 직접 측정할 것을 권고하고 있다.

그 이후에 나온 USBM RI 8507(Siskind et al., 1980)에서는 구조물 손상에 대한 지반진동 규제기준의 잣대로서 주파수대역별 PPV를 사용할 것을 제안하였다. 이 보고서는 지반진동 규제기준에서 최초로 주파수 기준을 채택한 것으로 유명하다. 한편, RI 8507에서 정의하고 있는 주파수는 ZCF(zero crossing frequency)이며, 이는 다음의 그림 3에서와 같이 정의된다. ZCF는 PPV가 나타난 최대진폭 시간이력에서 간축을 끊는 시간간격  $T_1$ 을 반주기로 하여, 이로부터 주파수  $f$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2T_1} \quad (7)$$

이와 같은 연구결과들을 바탕으로 미국의 노천채광청(Office of Surface Mining; OSM)은 다음 세 가지

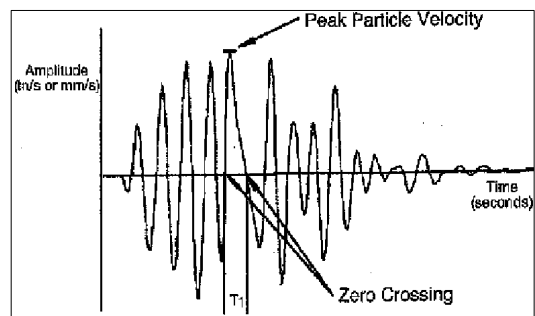


그림 3. PPV와 ZCF의 정의.

방법 중의 하나를 택하게 함으로써 지반진동을 보다 유연하게 관리할 수 있도록 하는 것을 특징으로 하는 규제기준을 마련하였다 (Atlas Power Company, 1987):

- (i) 절대거리별 PPV 규제수준에 의한 방법
- (ii) 절대거리별 PPV 규제수준에 따라 결정되는 환산거리식에 의한 방법
- (iii) 주파수에 따라 PPV 규제수준을 도시한 도표에 의한 방법

즉, OSM에서는 계측기로 측정을 할 수 있는 현장에 대해서는 표 2와 같이 절대거리별로 허용할 수 있는 PPV를 규정하고 있다. 여기서 거리가 멀어짐에 따라 허용수준을 낮게 설정한 것은 원거리에서는 진동이 저주파로 나타나서 건물에 대한 손상위험이 커지기 때문이다. 계측을 할 수 없는 현장에 대해서는 표 2에 보인 바와 같이 절대거리별로 정해진 환산거리값을 기준으로 제어발파를 설계하도록 규정하고 있다. 결과적으로 거리가 증가함에 따라 환산거리에 의한 설계기준값이 증가하는 셈이 된다.

**4.2 지반진동 규제기준으로서 진동레벨과 진동속도**

한편, PPV와 VL의 상관성은 VL과 구조물 손상과의 인과관계에 대해서는 아무런 근거를 제공하지 못한다. 만일, VL과 구조물 손상과의 인과관계를 증명하려면 구조물의 손상정도와 주파수 간의 비선형 관계를 증명해야만 한다. 예를 들어, 같은 진폭의 지반진동이라도 이를테면 주파수 대역 4~8 Hz의 진동이 다른 주파수대역의 진동보다 구조물에 더 큰 손상을 입힘을 증명해야 하는 것이다. 일반적으로 구조물 손상은 ZCF와 연관된 PPV 값과 인과관계가 있는 것으

로 알려져 있으므로 앞으로 우리나라에서 구조물에 대한 새로운 지반진동 규제기준을 마련할 때에는 주파수대역별 PPV를 갖대로 사용하는 것이 적합하다고 본다. 한편, 측정된 진동의 시간이력을 푸리에 변환 (Fourier transform) 하여 구한 우세주파수는 그림 3의 PPV가 보이는 주파수를 잘 반영하지 못하기 때문에 구조물 손상에 대한 지반진동 규제법규에서는 ZCF를 우세주파수로 사용하는 것이 일반적이다.

**5. 결 언**

지반진동이 구조물에 미치는 영향은 지반의 여기진동 주파수와 구조물의 고유주파수에 따라 달라지므로 새로운 지반진동 규제기준에서는 진동주파수에 대한 고려가 반드시 필요하다. PPV와 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 있을 것이다. 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 지반진동 규제기준이 시급히 마련되어야 할 것이다. 새로운 지반진동 규제기준에서

**표 2.** 미국 노천채광청(OSM)의 규제기준(Atlas Power Company, 1987)

측점거리	계측이 있는 현장에서 허용 가능한 최대입자속도(PPV)	계측이 없는 현장에서 사용할 수 있는 환산거리 기준
0 ~ 300 ft (0 ~ 91 m)	1.25 in./sec (31.75 mm/s)	50 ft/lb <sup>1/2</sup> (23 m/kg <sup>1/2</sup> )
301 ~ 5,000 ft (92 ~ 1524 m)	1.00 in./sec (25.40 mm/s)	55 ft/lb <sup>1/2</sup> (25 m/kg <sup>1/2</sup> )
5,001 ft ~ (1525 m ~)	0.75 in./sec (19.05 mm/s)	65 ft/lb <sup>1/2</sup> (30 m/kg <sup>1/2</sup> )

는 발파의 특성을 고려하여 사람의 안락기준보다는 지반진동이 구조물에 입힐 수 있는 물리적인 피해정도에 따라 규제기준을 정하는 것이 바람직할 것이다. 끝으로, 구조물의 손상은 ZCF와 연관된 PPV 수준과 인과관계가 높은 것으로 알려져 있으므로 구조물에 대한 새로운 지반진동 규제기준에서는 주파수대역별 PPV를 갖대로 사용하는 것이 바람직하다고 본다.

## 사 사

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(2011T100200108)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 김일중, 기경철, 조영동, 2009, 발파진동속도와 진동레벨과의 관계식 연구, 화약발파, 제27권 제1호, pp. 79-87.
- 김일중, 김태섭, 복진승, 2012, 발파진동속도와 진동레벨의 상관성 분석, 2012 대한화약발파공학회 춘계 학술발표회 논문집, pp. 87-95.
- 류창하, 2005, 구조물에 대한 발파진동 허용규제기준 분석, 화약발파, 제 23권 3호, pp. 1-10.
- 류창하, 최병희 외, 2010, IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널시공기술개발: 터널 급속시공을 위한 신개념 굴착공법 개발, 국토해양부 한국건설교통기술평가원 연구보고서, pp. 238.
- 송하림, 노영배, 강추원, 2011, 진동레벨과 진동속도의 상관성에 관한 비교연구, 화약발파, 제29권 제2호, pp. 43-50.
- 양형식, 박경준, 2003, 진동특성에 따른 수직보정 진동레벨의 변환 특성 연구, 화약발파, 제21권 제1호, pp. 77-84.
- 원연호 외, 2010, 진동레벨과 진동속도의 상관성 분석 등에 관한 연구, 환경부 중앙환경분쟁조정위원회 연구보고서, 원앤비 기술사사무소.
- 이경은 외, 1995, 진동으로 인한 피해의 인과관계검토 기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구, 중앙환경분쟁조정위원회, pp. 285.
- 이준구, 이창용, 2011, 경제학 원론 제4판, 법문사, pp. 31-33.
- 일본환경청 편집, 1977, 진동규제기술매뉴얼(일본어판), pp. 294.
- 최형빈, 2012, 발파환경 진동레벨 기준척도의 시공단계 적용사례 연구, 2012 대한화약발파공학회 추계 학술발표회 논문집, pp. 87-103.
- Atlas Power Company, 1987, Explosives and rock blasting, Atlas Power Company, pp. 344-348.
- Dowding, C. H., 1996, Construction vibrations, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, US, pp. 84.
- Duvall, W. I. and E. E. Fogelson, 1962, Review of Criterion for Estimating Damage to Residences From Blasting Vibrations, USBM RI 5968, pp. 19.
- Inman, D. J., 1996, Engineering vibration, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, US, pp. 69-70.
- ISEE, 1998, Blaster's Handbook, 17th ed., International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, USA, pp. 594.
- Nicholls, H.R., Johnson, C.F., and Duvall, W.I., 1971, Blast Vibrations and Their Effects on Structures, USBM Bulletin 656, pp. 105.
- Persson, P.A., R. Holmberg, and J. Lee, 1994, Rock blasting and explosives engineering, CRC Press, pp. 337-338.
- Siskind, D. E., M. S. Stagg, J. W. Kopp, and C. H. Dowding, 1980, Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting, USBM RI 8507, pp. 14-17, pp. 73-74.



최 병 희

한국지질자원연구원

Tel : 042-868-3237

E-mail : bhchoi@kigam.re.kr



류 창 하

한국지질자원연구원

Tel : 042-868-3236

E-mail : cryu@kigam.re.kr