

## 1. 발파진동의 특성

폭약이 장약공내에서 폭발하면 주위 암반은 강력한 폭격충격을 받게된다. 이때 장약된 폭약의 성질과 양에 따라 수만 내지 수백만 bar에 달하는 충격압 및 높은 열이 발생한다. 이때 집중된 암반이 고온 고압 상태에 도달되어 녹아내리게 되는 용융권, 폭격압에 의한 전단파괴가 일어난다 분쇄권, 암반의 인장파괴가 일어난다 균열권 등이 발생한다(그림1 참조). 이후 폭발에서 발생한 에너지의 0.5~20% 에 달하는 나머지 에너지는 탄성파로 전환되어 암반중을 전달되면서 변위(displacement), 속도(particle velocity), 가속도(acceleration) 상변을 갖는 지반진동을 일으키는데 이 지반진동을 "발파진동" 이라 한다.

암반중으로 전달되는 탄성파는 입체파(물체파: body wave)인 종파(압축파: compressional wave, 1차파:p파:primary wave)와 횡파(전단파:shear wave, 2차파:s파:secondary wave) 그리고 표면파(surface wave)로 나뉜다. (그림2 참조)

이러한 탄성파는 발파진동을 측정시 표면파는 수직성분(vertical) 으로, 횡파는 접선성분(transverse) 으로, 종파는 진행성분(radial) 으로 측정된다(그림3참조).

진동의 표시단위는 다음 표1과 같다.

표1. 진동의 표시단위

成 分 變 位	表 示 單 位
變 位	cm, mm, μ, inch
速 度	cm / sec, mm / sec, inch / sec (kine)
加 速 度	cm / sec <sup>2</sup> , gal ( 1 gal = 1 cm/sec <sup>2</sup> ), G ( 1G = 1,000 gal )
周 波 數	cycle / sec (c.p.s), Hz

발파진동은 변위(D), 속도(V), 가속도(A) 등의 3가지 성분들은 진동이 단순진동(simple sinusoidal harmonic motion) 이라 가정하면 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V = 2 \pi f \times D$$

$$A = 2 \pi f \times V$$

발파진동 진동과 지진진동은 다음 표2와 같은 차이가 있다.

표2. 발파진동과 지진과의 비교

	發 破 振 動	自 然 地 震
震源의 깊이	地表 또는 地表가까운 內部	地下 10 km 以上
振動週波數	數 10 ~ 數 100 Hz	1 Hz 程度 또는 그 以下
振動繼續時間	0.1 sec 程度以內	10 sec 以上, 大地震은 分單位
振動波形	比較的 單純	複 雜

표2와 같이 지진은 발파진동에 비해 그 주파수가 작고 지속시간이 길며 진원이 깊은 지층이어서 종파, 횡파, 표면파가 분리되어 지표중에 도달하나 발파진동은 발파원이 측점에 가까와 이들 각각의 파가 측점에 동시에 도달하고 또 고주파인 관계로 쉽게 감쇄가 일어나며 지진에 비하여 그 영향권이나 피해가 적다.

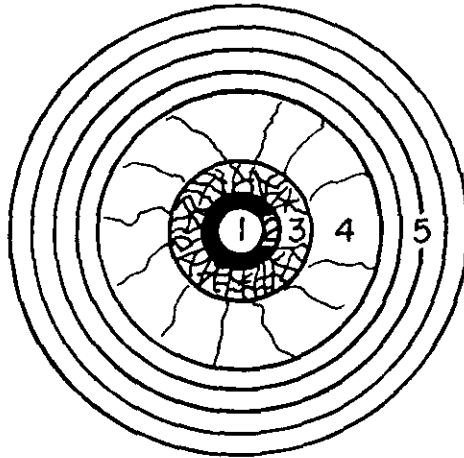
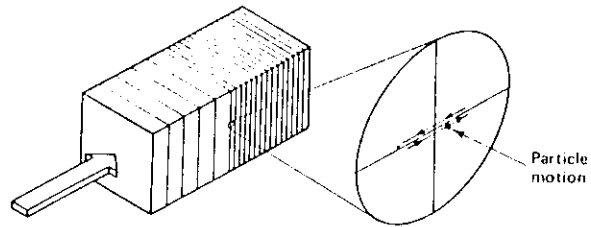
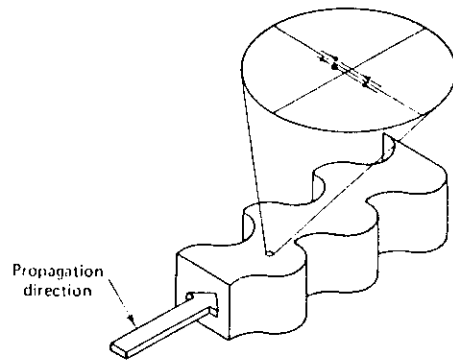


그림 1. 발파의 영향권

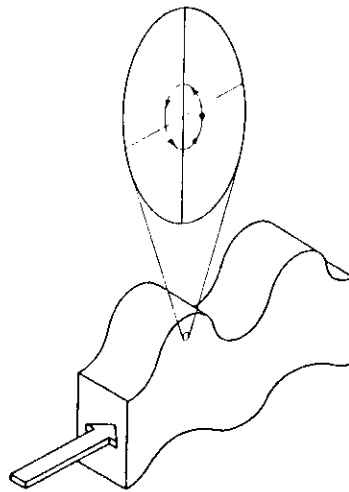
1. 폭약 2. 울충권 3. 분쇄권 4. 인장균열권 5. 탄성영역



(a)



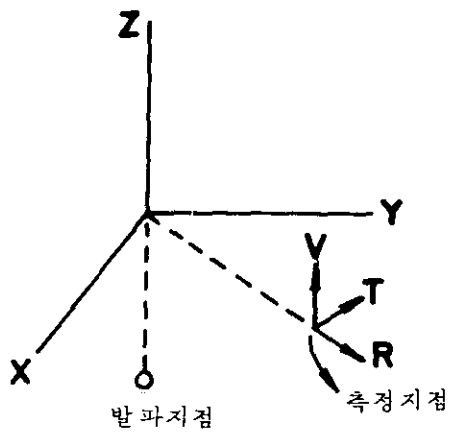
(b)



(c)

그림 2. 파형에 따른 입자의 운동

(a) 종파운동      (2) 횡파운동      (3) 표면파(Rayleigh)운동



V : Vertical (수직 성분)  
 R : Radial (진행 성분)  
 T : Transverse (접선 성분)

그림. 3 지표에서 측정한 발파진동의 3성분

## 2. 발파진동의 허용치

### 2-1. 건물에 대한 발파진동의 허용치

발파진동의 크기를 표시하거나 허용수준을 결정하기 위하여 유럽, 캐나다, 미국 등에서 수십년간 수행된 연구를 통하여 보면 인체가 발파진동에 감응하는 정도는 발파진동의 가속도치에 따라 변하고 지상이나 지하의 구조물이 받는 피해의 정도는 발파진동의 속도 성분과 직접 관련이 있는 것으로 밝혀졌다.

1962년 미광무국(U. S. B. M. : United States of Bureau of Mines)의 Duvall 과 Fogelson 이전까지 연구된바를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

시설물의 피해와 직접적인 관련이 있는 것은 발파진동의 속도 성분이다.  
그리고 피해의 수준은

- 1) 5.0cm/sec 이하 : 안전하다.
- 2) 5.0cm/sec - 13.5cm/sec : 경미한 피해가 온다.
- 3) 13.5cm/sec 이상 : 상당한 피해가 시작 된다.

5.0 cm/sec 의 피해한계점에서는 건물의 페인트가 벗겨지거나 이전에 있던 균열이 확대되거나, 벽과 창틀 등세의 회벽에 균열이 생기기 시작한다. 경미한 피해는 회벽이 떨어지거나 집들의 구조물에 균열이 생기는 정도이고 상당한 피해라함은 지상의 구조물에 사용 불능의 정도로 치명적인 피해를 주는 것을 말한다.

Duvall 등의 이러한 연구 결과는 그림4및 그림5에 나와 있다. 그림4와 그림5를 비교해보면 건물이 받는 피해는 주파수와 무관하게 발파진동의 속도치에만 의해 결정 되나 진동의 변위를 고려할 때는 주파수를 동시에 고려해야한다는 것을 알 수 있다.

그러나 1980년대 들어서 미광무국에서는 그림6과 같이 발파진동의 허용치를 수정했는데 이 그림을 보면 발파진동의 허용치는 주파수의 영향을 인정하고 있다. 이러한 이유는 가속도의 건물이 갖는 고유진동수를 고려한 것인데 일반 가속도는 5-20Hz 의 고유진동수를 갖는 것으로 알려져 있다.

그림7는 발파의 유형에 따라 우세한 주파수가 다른 것을 보여주고 있는데 석탄의 노천채굴과 석재나 석회석의 채석장 발파에서는 저주파 성분이 우세하고 토목 및 건축 현장에서의 발파는 고주파 성분이 우세한 것을 알 수 있다. 그러므로 그림6의 결과를 적용하면 토목, 건축현장에서의 발파보다 노천채굴, 채석장의 발파가 인접 시설물에 더 피해를 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

건물이 받는 피해는 건물의 지반, 견고성 등에 따라 다르다. 그리고 허용진동 수준도 건물의 중요도에 따라, 혹은 대상을 건물이나 인체냐에 따라, 혹은 인구의 밀집도에 따라 달라진다.

다음은 유럽 주요국의 발파진동 허용치이다.

1) 독일의 진동허용치(DIN 4150)

- 유적이거나 고적 등의 문화재 : 0.2 cm·sec
- 관열 등의 결합이 있는 건물, 빌딩 : 0.4 cm/sec
- 결합이 없는 빌딩 : 1.0-4.0 cm/sec
- 회벽이 없는 공업용 콘크리트 구조물 : 1.0-4.0 cm/sec

독일에서의 발파진동치는 발파진동 3성분의 vector합을 취하고 있다.

$$V = \left( V(v)^2 + V(r)^2 + V(t)^2 \right)^{1/2}$$

- 여기서 ,  $V(v)$  : 진동의 수직성분  
 $V(r)$  : 진동의 진행성분  
 $V(t)$  : 진동의 접선 성분

2) 오스트리아의 진동허용치(CA-23, 1967)

- 15Hz 이하의 주파수를 갖는 진동 : 0.02 cm (진동변위)
- 15Hz 이상의 주파수를 갖는 진동 : 1.9 cm/sec (진동속도)

3) 영국의 진동허용치

- 인구 조밀지역의 터널발파 : 1.0 cm/sec
- 인구 희박지역의 터널발파 : 2.5 cm/sec
- 주파수 12Hz 이하의 노천 석탄채광장 : 1.2 cm/sec
- 기타 : 0.5 cm/sec

이외에 일본의 경우는 각 현마다 그 기준치가 다르나 대부분 인체를 대상으로 하여 하루 중 시간대 마다 발파진동의 규제치가 다르며 인구조밀지역에서는 야간에는 발파를 금지시키거나 주간에도 0.2cm/sec의 진동허용치를 정하는등 비교적 엄격한 제한을 가하고 있다.

그러나 발파진동의 피해여부를 가리는 대상이 건물등의 시설물인 경우 Langefors, Crandell, Koheler, Edwards, U.S.B.M., 일본의 여러 학자들의 연구 결과 및 국내에서의 측정연구 결과를 종합하여 볼 때 1.0 cm/sec의 발파진동 수준이면 국내에서는 충분한 안전 발파진동 허용치인 것으로 확신된다.

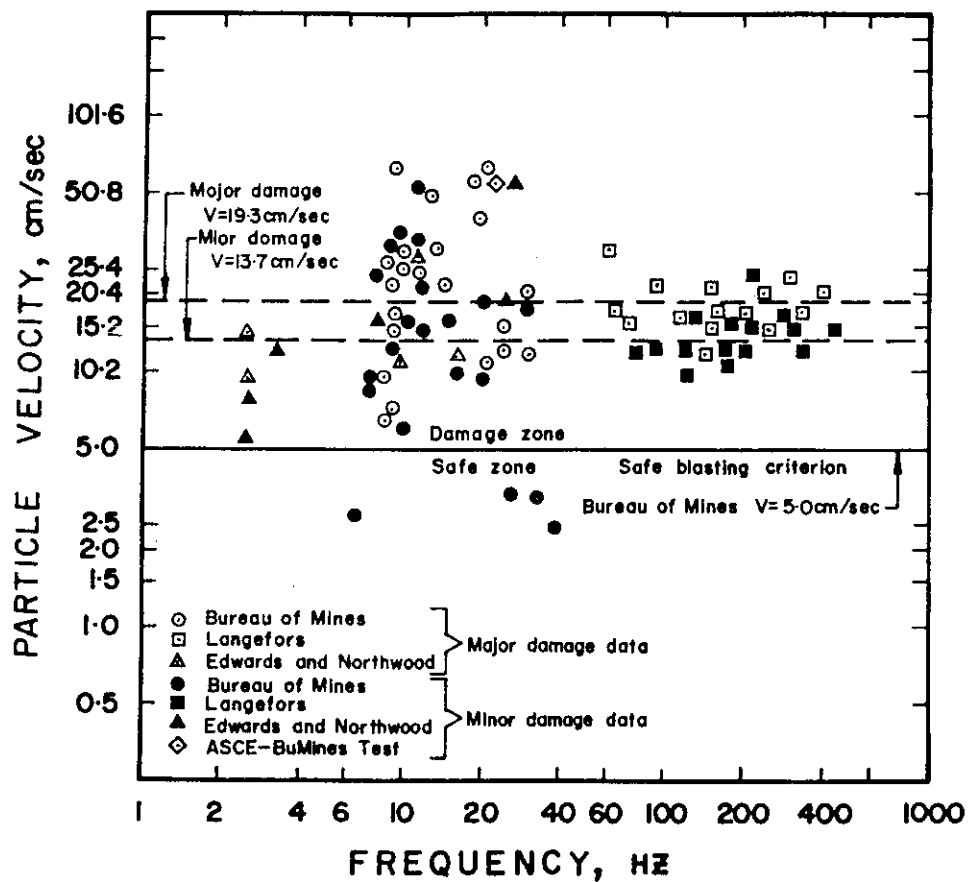


그림 4. 발파진동에 의한 건물의 피해수준 (진동속도 성분을 기준으로 할 경우)  
(from Nicholls et al., 1971)

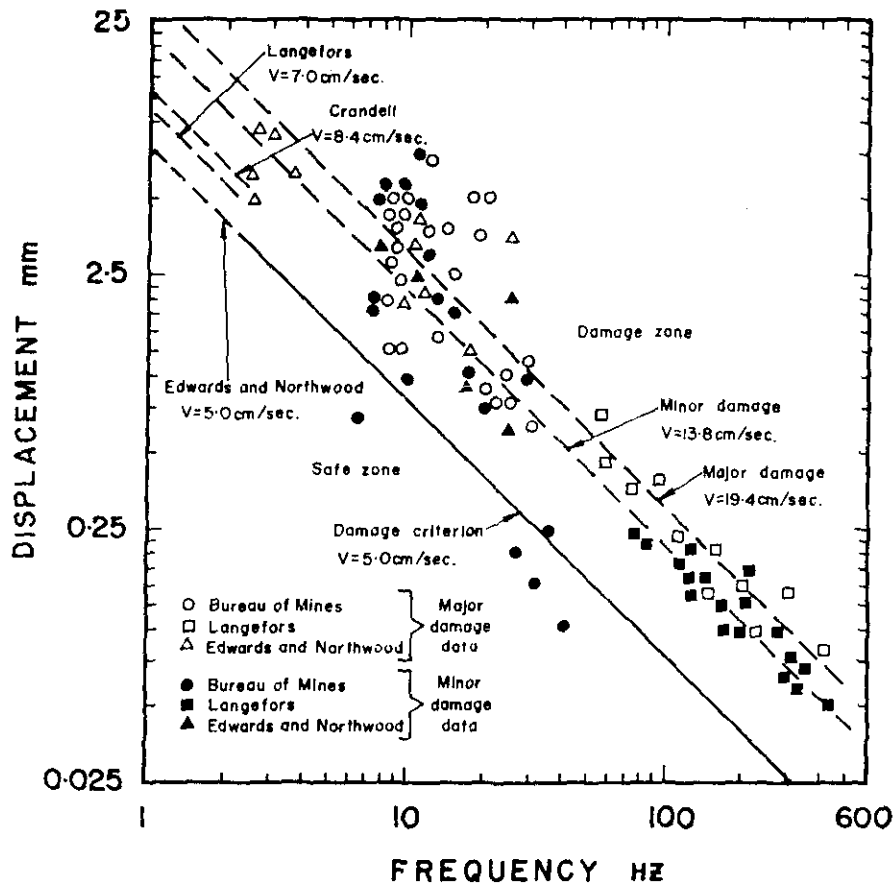


그림5. 발파진동에 의한 건물의 피해수준(진동변위 성분을 기준으로 할 경우)  
(from Nicholls et al., 1971)



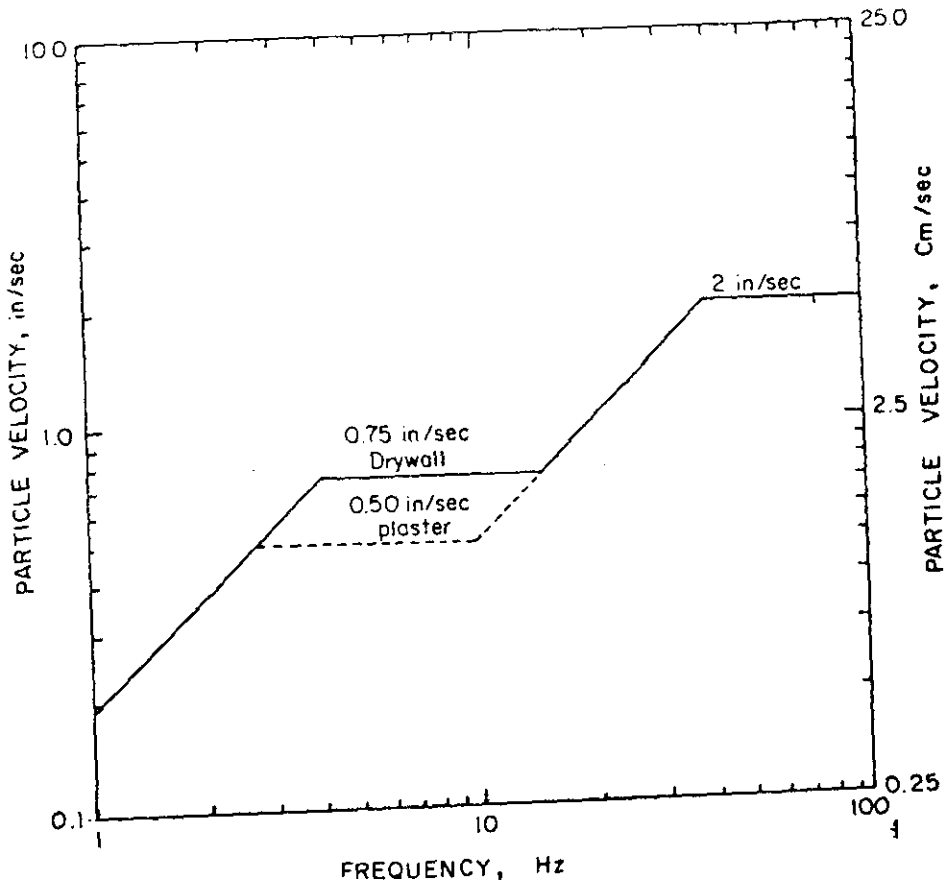


그림 6. 미광무국미 추천하는 허용발파진동치

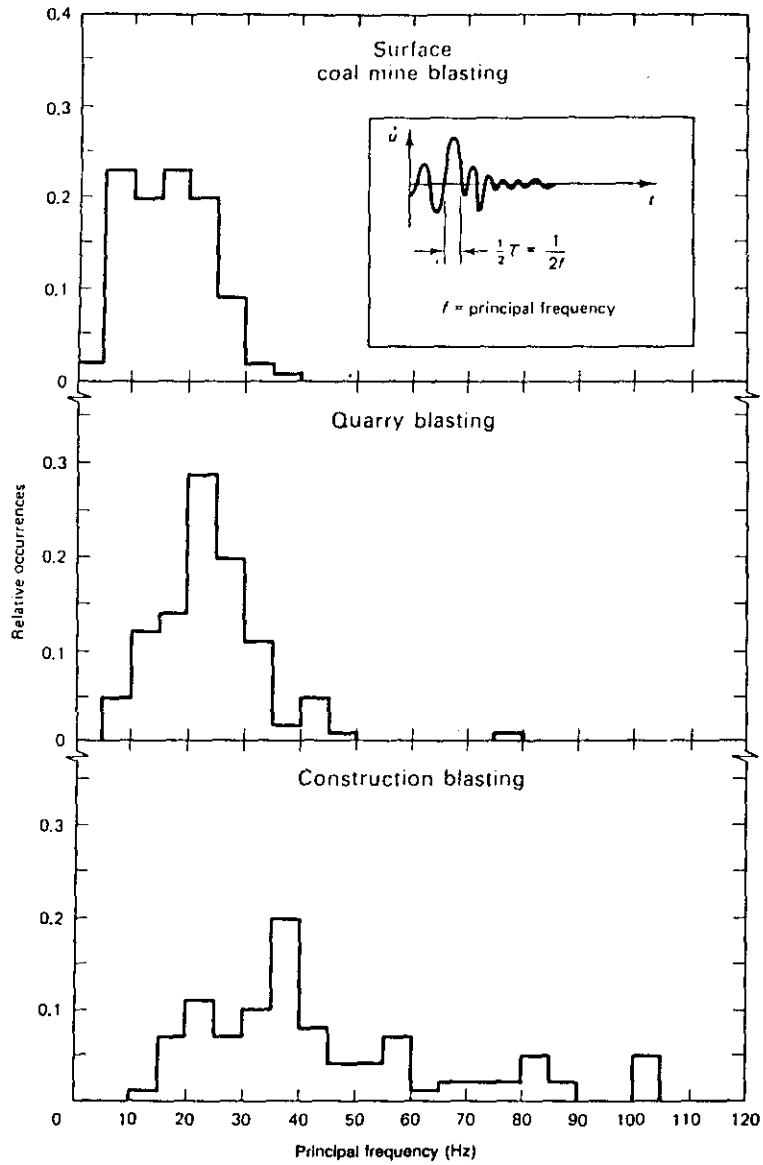


그림 7. 발파유형에 따른 주파수분석 및 유세한 주파수영역

## 2-2. 발파진동 대한 인체의 피해수준

인체는 건물보다 훨씬 민감하게 진동에 대해 반응을 보여 건물에 피해를 입하지 않는 발파진동이라 하더라도 불안감, 불쾌감, 위압감을 느끼거나 고통을 호소하게 된다. (표3 참조)

그림8은 미국의 어느 핵실험의 경우에서 조사된 통계치인데 인구의 35%가 발파진동치가 2.0cm/sec에 도달하였을 때 격렬한 항의를 하였고 진동수준이 0.2cm/sec의 경우에는 1%의 주민이 불편함을 호소하였다. Salmon은 이 결과를 감지할 수 있는 단계, 불쾌한 단계, 고통스러운 단계의 3단계로 구분하고 발파원에서 인접한 주민의 10%가 불편이나 항의를 하는 수준인 1.0cm/sec를 인체를 대상으로할 때의 한계치로 보았다.

그림9는 Goldman에 의해 작성된 결과인데 진동속도치와 관련된 진동주파수에 따라 인체가 어떻게 반응하고 있는가를 보여주고 있다. 여기서도 인체의 반응단계를 Salmon의 경우처럼 3단계로 나누고 있는데 그림에서 동일한 진동치라 하더라도 주파수가 높을수록 인체는 견디기가 힘들게 되어 있다. 그림9에서 진동속도치와 주파수를 곱하면 대략 유사한 값을 얻을 수 있는데 이는 인체가 발파진동에서 받는 영향은 가속도와치와 직접적인 연관이 있다는 것을 시사하고 있다. 즉 진동의 가속도치를 고려하면 주파수를 거의 고려하지 않아도 된다. 그러나 인체는 고유진동수가 4-8Hz에 가까워 주파수가 이와 비슷한 진동에 대해서는 훨씬 민감한 반응을 하게 된다.

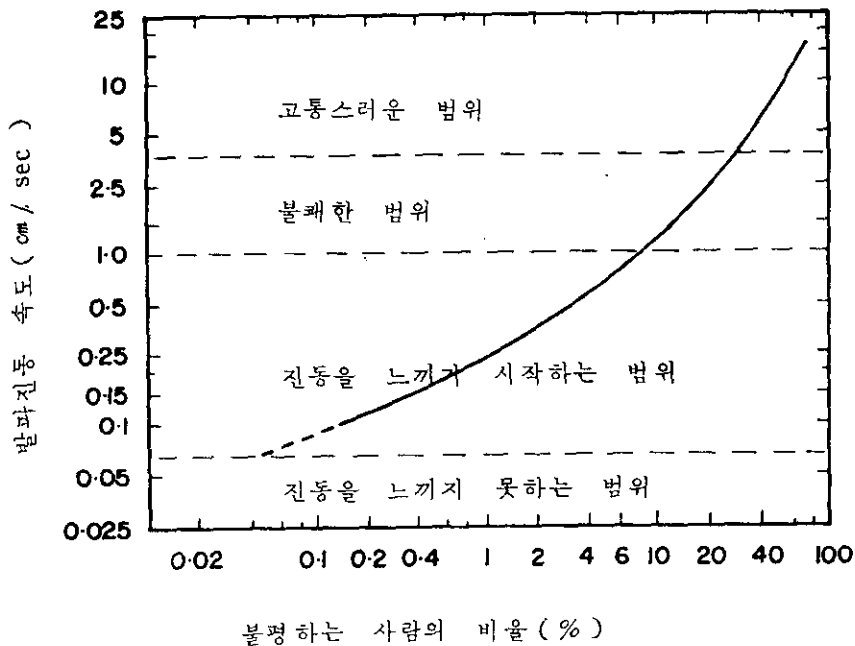


그림8. 인체가 감응하는 발파진동 속도치의 범위 및 감응정도

인체를 발파진동의 대상으로 삼을 경우에는 발파진동의 속도성분으로 대략의 반응을 상기한 바와 같이 표시할 수 있으나 보통은 발파진동의 가속도 성분을 기준으로 하여 진동의 수준을 나타내는 데시벨(decibel)단위를 취하는데 데시벨의 정의는 다음과 같다.

국제안전협회(ISO:International Safety Organization)의 규정에 의하면

$$\begin{aligned} \text{가속도 데시벨} \quad dB &= 20 \log(a/a_0), \quad a_0 = 10^{-5} \text{ m/sec}^2 \\ \text{진동속도 데시벨} \quad dB &= 20 \log(v/v_0), \quad v_0 = 10^{-9} \text{ m/sec} \end{aligned}$$

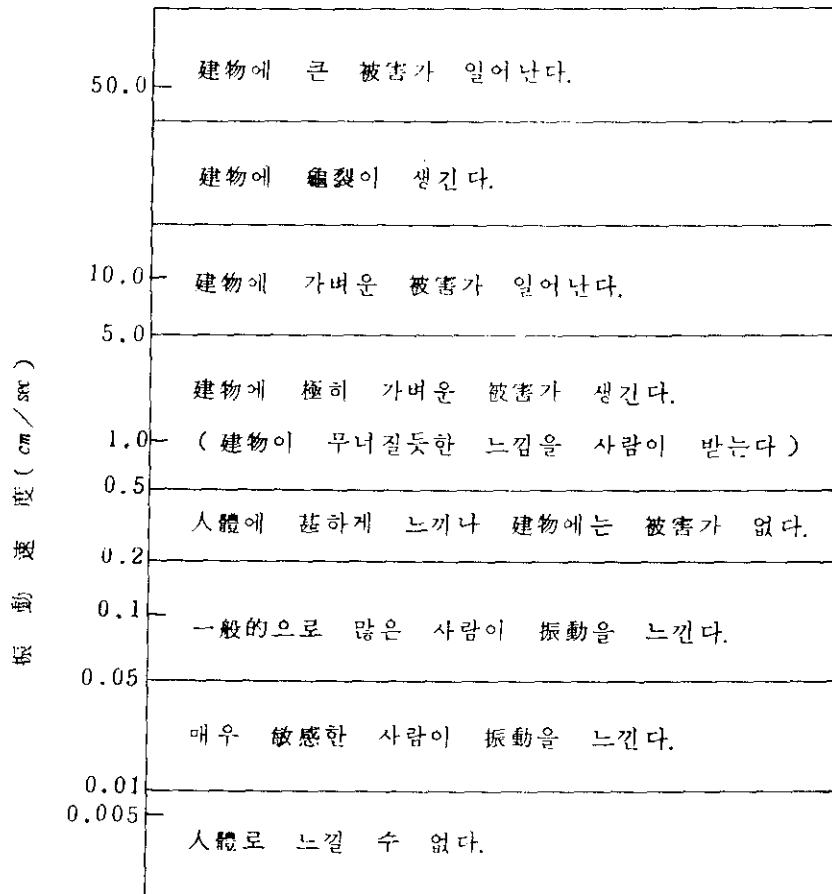
그런데 참고로 일본에서는 이 데시벨의 기준을 아래와 같이 따로 정하여 사용하고 있다.

$$\begin{aligned} a &= 10^{-5} \text{ m/sec}^2 \\ v &= 10^{-7} \text{ m/sec} \end{aligned}$$

데시벨 단위는 인체가 발파진동에 대하여 느끼는 고통은 발파진동의 기하학적 크기에 비례한다는 것을 의미한다.

인체는 발파진동의 크기에 따라 고통감이 크기는 하지만 이와 함께 발파진동이 지속되는 시간 혹은 누적되는 시간에 따라 그 고통감이 커진다. 그러므로 인체를 대상으로 하여 발파진동의 허용수준을 정하려면 발파진동의 크기와 아울러 그 지속되는 시간을 고려하여야 하며 이에 대한 규정은 나라마다 다르다. 현재 시중에서 볼수 있는 일체의 진동계기중 데시벨 기록계가 붙어있는 것은 기록장치의 회로 중에 이같이 진동의 크기 및 시간을 고려하여 일본의 법적규정에 맞게 내부의 회로를 보정하여 놓은 것이 많다.

표 3. 발파진동과 피해수준



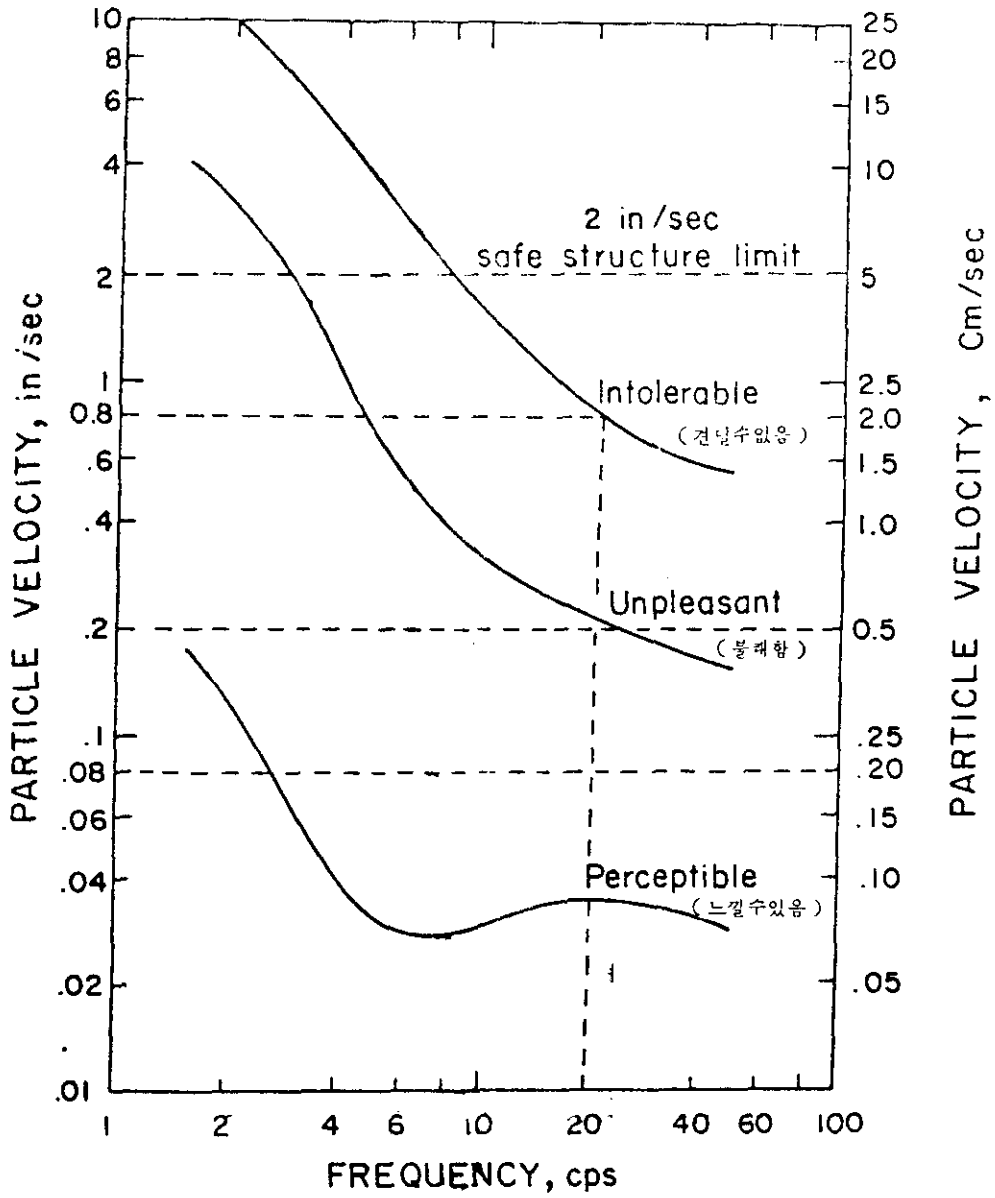


그림9. 발파진동에 대한 인체의 감응곡선 (after Goldman)

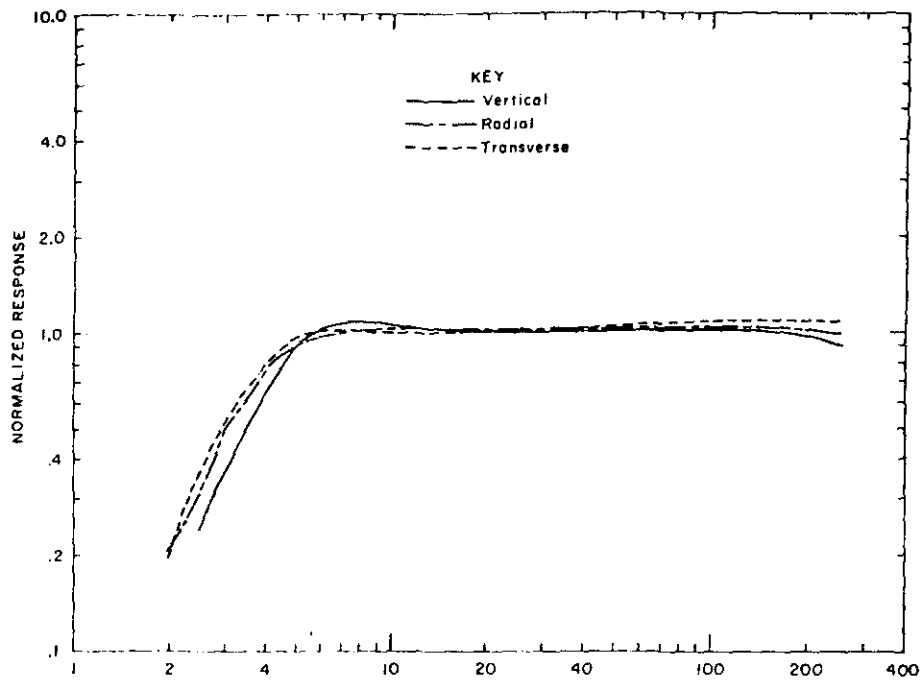


그림10. VME model-F 발파진동기의 주파수 반응곡선

### 3. 발파진동 측정기

발파진동을 감지하는 센스(sense)는 지어폰(geophone) 및 피조메터(piezometer) 타입이 있다.

지어폰은 원통형 영구자석 속에 코일이 진동을 따라 움직이면서 자장속에 코일이 움직이면 전기가 발생하는 원리를 이용한 것이고, 피조메터는 구성된 물체가 힘이나 압력을 받게 되면 전기를 발생하도록 한 것이다. 피조메터는 스트레인게이지(strain gauge)를 사용한 인공적인 것과 힘을 받으면 전기를 띄게되는 결정체를 사용한 천연적인 것이 있다. 전자를 piezoresistive accelerometer 라고 하고 후자를 piezoelectric accelerometer 한다.

이러한 발파진동 센스는 한 방향으로만 감응하기 때문에 발파진동기는 폭발원으로 부터 진행, 접선, 수직의 3방향을 각각 측정할 수 있도록 3개의 센스를 갖추고 있어야 한다. 보통은 수직 성분이 우세하다고 보고되고 있으나 반드시 그런 것은 아니고 국내 측정시에도 진행성분이 우세하거나 접선 성분이 우세한 경우가 많았다.

발파진동기에서 무엇보다 중요한 것은 발파진동 센스의 진동에 대한 평탄반응 주파수 영역이 발파진동의 발파진동의 주파수 영역을 포함할수 있어야 한다는 점이다. 보통 발파진동의 주파수 영역은 5-200Hz 이기 때문에 발파진동기도 이 주파수 영역내에서 발파진동에 대하여 평탄하게 반응을 해야한다. 평탄하게 반응을 한다함은 지어폰이나 피조메타가 진동에 비례하여 강한 전류를 발생한다는 것을 의미한다.

그림10는 발파진동기의 평탄반응 주파수 영역을 보여주는 것으로 VME-Ntro C ounsult, Inc. model F 발파진동 측정기의 검정시험 곡선이다. 수직, 접선, 진행방향으로 설치된 각 센스들은 5-200Hz 주파수 영역에서 발파진동에 대하여 평탄한 반응을 하는 전형적인 예이다.

보통 발파진동기의 센스는 1-5Hz 의 주파수 영역에서 고유진동치를 갖고 있어 5 Hz 이하의 지진과 같은 저주파를 감지하는데 사용되기에는 부적당하다.

국내에서 도입되어 사용하고 있는 발파진동기는 서울대학교 자원공학과와 VM-14(일제), 한국동력자원연구소의 VS-1200(미제), 한국지하철공사의 VME-Model F(미제) 2대, 강원대학교의 VME-Model F, Vibameter 1111(스웨덴) 등이 있고 다수의 일본 RION사의 VM-10, 12 기종들이 사용되고 있다.

발파진동기는 기종에 따라 기록장치가 감광기록, 자기테이프 기록 및 용도에 맞게 평균치를 기록하거나 인체의 감응을 보정하여 기록 처리되는 것 등 다양하기 때문에 목적에 따라 잘 선택을 하여야 한다.



#### 4. 화약장약량, 거리 와 진동속도와의 관계

발파진동을 결정짓는 요소는 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건(site factor)은 발파지와 인근 구조물의 기하학적 형태 및 해당지역의 국부적인 지질, 임반의 종류 및 상태 등을 의미하고 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 양, 기폭방법, 진색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭발원과 측정간의 거리 등이다.

이상의 요인들은 발파진동 예측을 위하여 먼저 조사되어야 할 사항이며 발파설계에도 이를 고려하여야 한다.

현재까지 연구된 바에 의하면 발파진동은 주로 장약량(charge weight)와 거리(distance)에 의해 결정되고 기타의 요인들은 발파지역의 특정한 발파상수(blasting constant)로 결정된다.

장약량은 동시에 폭발하는 폭약량이나 지발당 사용되는 폭약량(charge per delay)을 뜻하고 거리는 발파점 혹은 폭원에서 측정이나 인접 구조물과의 거리를 의미한다.

복잡한 지반을 대상으로 한 발파진동식의 이론적 전개는 아직 완전히 이루어지지 않고 있지만 현재까지의 연구결과를 종합하면 발파진동식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V = K \cdot (D/W)^{b/n} \quad (4.1)$$

- 여기서, n: 감쇄지수(attenuation constant)
- b: 장약지수(charge index)
- K: 발파상수(blasting constant)
- D: 폭원으로 부터의 거리(distance), m
- W: 지발당 장약량(charge per delay), kg
- V: 발파진동(particle velocity), cm/sec

(4.1)식에서 U. S. B. M.의 Devine(1966)은 장약지수 b값에 대해 실험적으로 1/2의 값을 제안하였고 이를 root scaling이라 한다. b의 값을 1/3로 취하면 이를 cube root scaling이라 하며 이는 차원해석 결과 나온 이론적인 값이다.

$$SD = (D/W)^{b/n} \quad \text{라 할 때}$$

SD를 환산거리 혹은 비거리 라하며 b=1/2 이면 차승근환산거리(root scaled distance), b=1/3 이면 삼승근환산거리(cube scaled distance)한다.

(4.1)의 식에서 상수 K와 n의 결정은 (4.1)식을 log-log scale로 좌표상에 도시할 때 기울기(n)와 절편(log K)로 부터 구한다.

$$\text{즉 } \log V = \log K + \log SD \quad (4.2)$$

국내의 여러 측정결과 자송근 한산거리와 심송근 한산거리중 어느 것을 사용하여도 무방하다는 것이 입증되고 있다.

발파진동의 감쇄는 발파원으로 부터의 거리에 따라 그 정도가 달라지는 경향이 있다. 그림11에서 SD가 10 이하인 경우는 감쇄가 급하나 SD가 10을 넘어서면 감쇄가 느려진다.

진동의 크기는 발파원에서 거리가 가까울 경우는 거리의 3승, 거리의 2승에, 거리의 1승에 역비례한다고 알려져 있다.

( 4.1 )식을 풀어서 다시 정리하면

$$V = K \cdot D \cdot W^{a \cdot b} \quad \text{-----} \quad ( 4.3 )$$

표4는 ( 4.3 )식의 발파진동상수 K와 지수 a, b에 대하여 국내 및 국외의 측정결과를 정리한 것이다. 표의 예상발파진동값은 지발당 장약량 28kg, 거리가 550m 떨어진 시설물 위치에서 예상되는 발파에 의한 지반의 진동치율 각 경우의 K, n를 대입하여 구해 본 것이다.

그림12는 표4의 각 상수를 대입한 발파진동식을 도식한 것이다. 국내의 측정된 결과를 보면 동일한 한산거리에서 미국이나 스웨덴 등의 외국에서 측정결과 중의 최대 발파진동치 보다 작다. 그러므로 상수 K, n를 시험발파에 의하여 구하지 못한 경우는 표3에서 최대의 진동치를 예상하고 있는 그림11의 ( 1 )식을 적용하는 것도 무방하리라 생각된다. 그림11의 ( 1 )식은

$$V = 700 (SD)^{-1.5} \quad \text{-----} \quad ( 4.4 )$$

그림12는 ( 4.4 )의 진동식을 적용하여 지발당 장약량 28kg, 거리 550m에서 발파진동치가 1.56cm/sec(SD는 59)가 되도록 지발당 장약량을 구하는 모노그램을 만든 것이다.

발파진동을 경감시키기 위해서는 지발당 장약량을 줄이면 되는데 이것은 MS, DS 등의 지발노관을 사용하면 가능하다.

정확한 발파진동치를 알고 이를 조절하려면 시험발파를 통하여 미리 지역에 특정한 발파진동치를 구하는 것이 필요하다.

표 4. 국내외의 주요 발파진동상수 및 감쇄지수

K	a	b	예상발파진동값	제안자	적용국
73	0.66	1.54	0.040	Lundborg	스웨덴
168.6	0.71	1.78	0.024	Holmberg	"
300-700	0.75	1.50	0.661	Langefors	"
70	0.7	1.5	0.056	Persson	"
12-550	0.73-1.18	1.45-2.35	0.666	U.S.B.M.	미국
208	0.53	1.60	0.050	Ambrasey	영국
71	0.68	1.56	0.036	Vurob	소련
19.3-193	0.8	1.6	0.114	Oriad	캐나다
25-100	0.67	2.0	0.003	伊藤,鈴木	일본
100-700	0.75	2.0	0.028	吉川	일본
45.24	0.90	1.80	0.011	이정인	한국(석회암)
8.24	0.60	1.19	0.033	"	"
17-87	0.50	1.50	0.036	이경운,김민규	한국(편마암)
43-138	0.57	1.70	0.020	"	" (화강암)
650	0.55	1.64	0.130	"	" (석회암)

발파진동값의 단위 : cm/sec

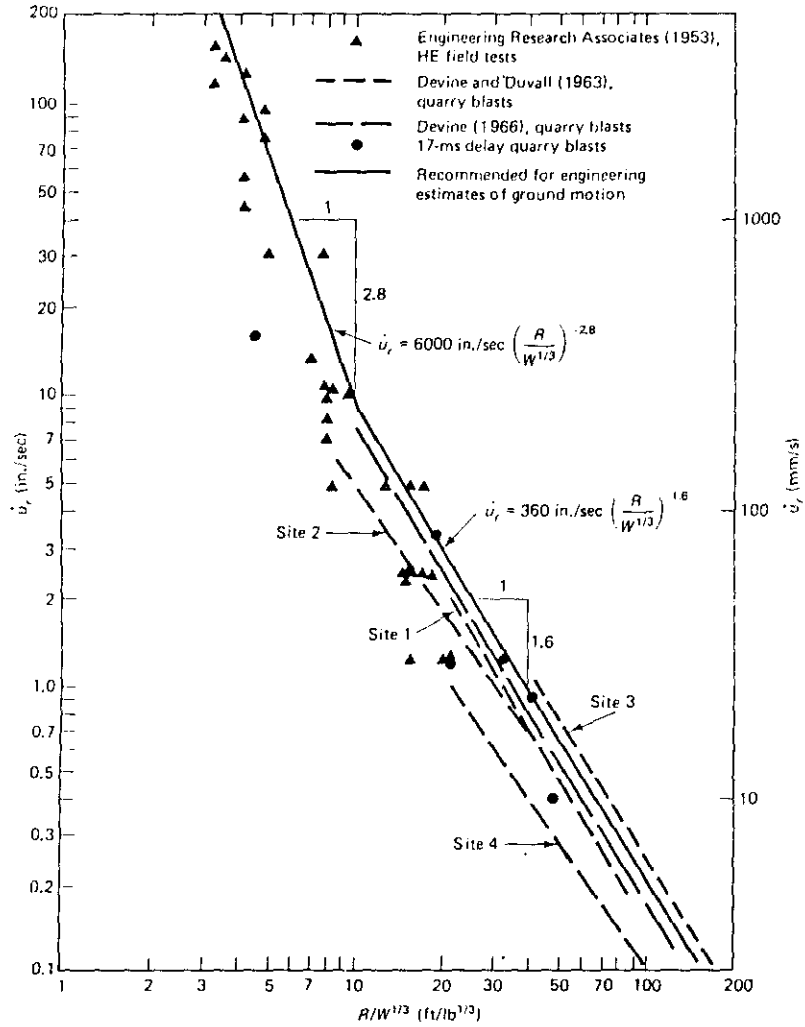


그림 11. 삼승근 환산거리로 정리된 발파진동식의 실례  
(after K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz)

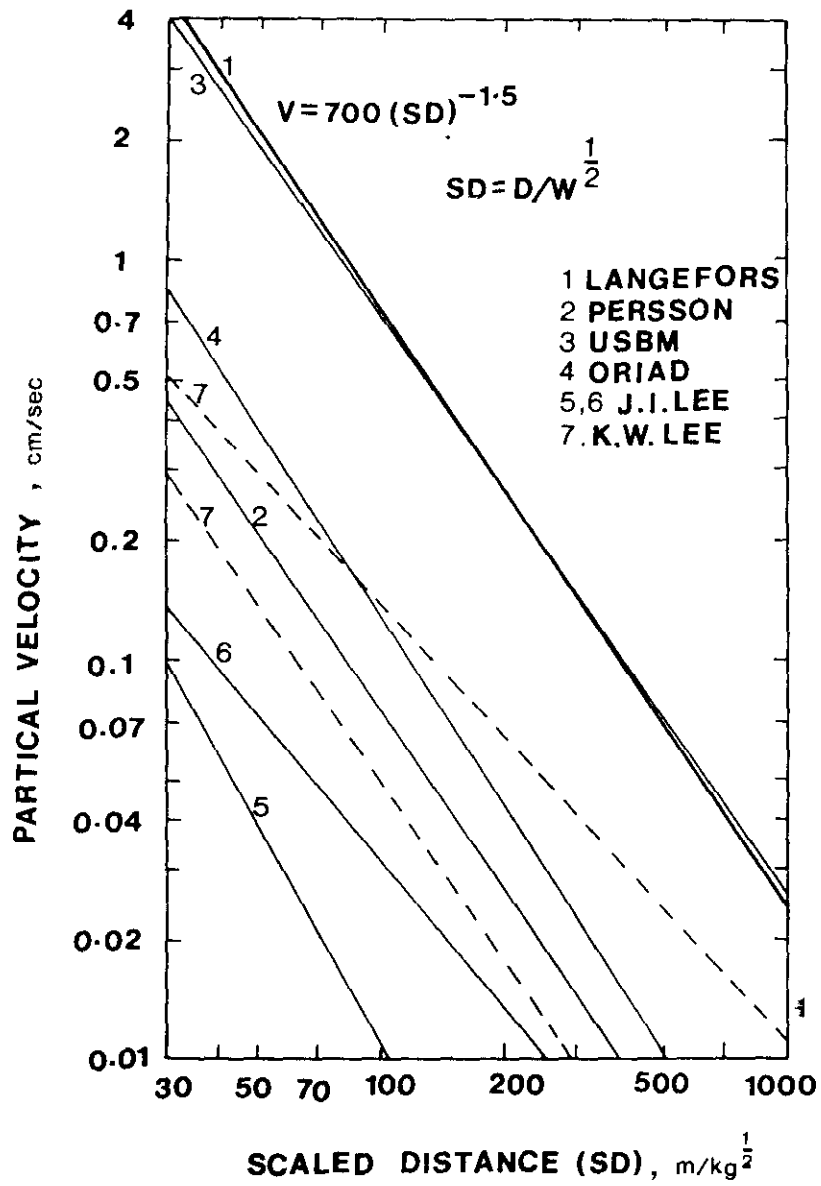


그림 12. 국내 및 국외의 주요 발파진동식의 도시

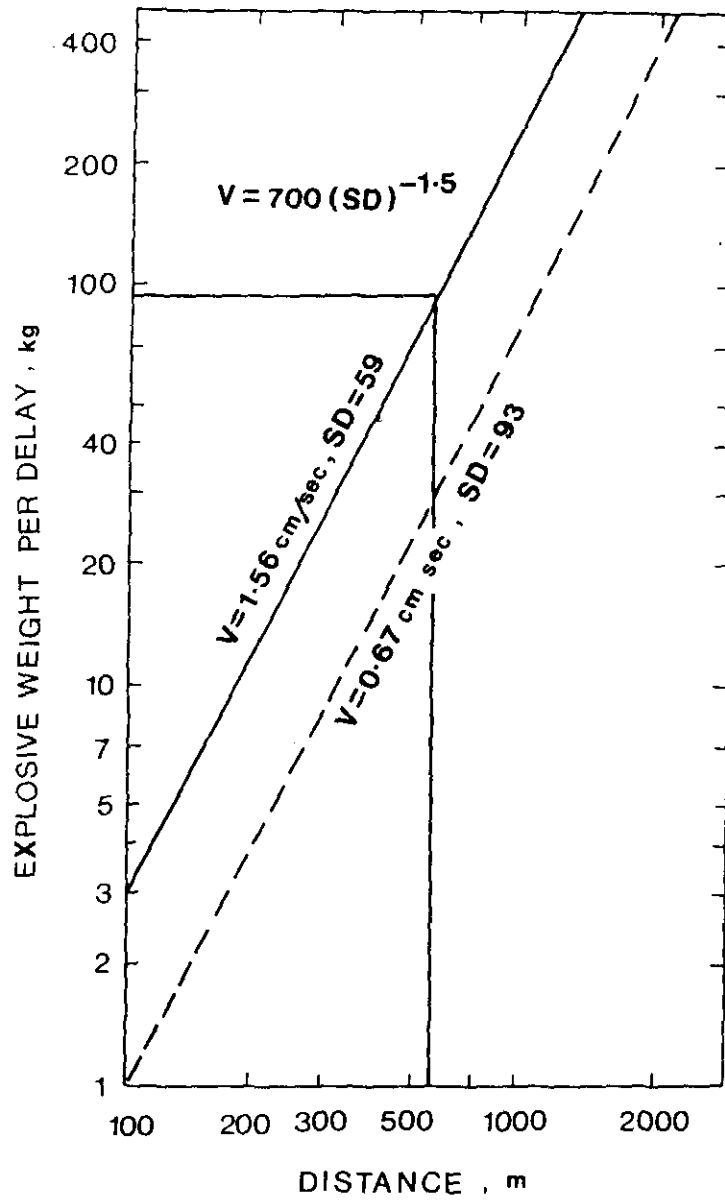


그림 13. 허용된 반파진동치에 맞는 지반당 장약량을 구하는 모노그램의 실례

## 참고문헌

1. 이정인외 2인, 1978, 동양세멘트 삼척공장 석회석 채굴 발파진동이 증설 부지상의 구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 서울대학교 생산기술연구소 보고서, RIIS-78-1
2. 이정인, 유상하, 1979, 발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향연구, 대한광산학회지, Vol. 16, pp. 42-44.
3. 김용수 외, 1983, 발파진동식 확립과 제어발파 지침 결정을 위한 연구보고서, 강원대학교 산업기술연구소.
4. 이경운 외, 1985, 무용계곡 발파진동 및 발파소음 측정에 관한 연구보고서, 한국동력자원연구소
5. 이정인, 1985, 유공 지하저장 시설공사 및 운진이 울진화력발전소에 미치는 영향검토(발파진동의 영향 및 LP가스 누출방지), 서울대학교 생산기술연구소
6. 이경운, 김만규, 1987, 석회석 채석장의 대규모 발파에 대한 발파진동, 대한광산학회지, 제24권제5호, pp. 320-327.
7. H.R.Nicholls et al., 1971, Blasting vibrations and their effects of structures, U.S.B.M., Bulletin 656.
8. D.E.Siskind et al., 1980(b), Structures response and damage produced by ground vibrations from surface blasting, U.S.B.M., RI8507.
9. M.S.Stagg and A.J.Engler, 1980, Measurement of blast-induced vibrations and seismograph calibration: U.S.B.M., RI 8506.
10. C.H.Dowding, 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Inc., London