

최대 실벡터합과 최대 벡터합의 적용성에 관한 연구

A Study on the Application of True Maximum Vector Sum and Maximum Vector Sum in Vibration Monitoring of Blast

강 추원, 추 영래, 박 현식

Choo-Won Kang, Young-Rae Choo, Hyun-Sik Park

조선대학교 자원공학과

초 록

국토의 효율적 활용을 위한 각종 토목·건설공사나 석재 및 골재생산 등을 위해 암반을 굴착함에 있어 다양한 산업용 화약류가 이용되고 있다. 그러나 화약의 사용으로 인해 수반되는 발파진동은 인체 및 구조물 등에 피해를 발생시켜 인근의 주민과 마찰을 일으키게 된다.

본 연구에서는 발파진동속도 data를 취합하여 분석 사용함에 있어서 V, T, L 성분의 최대 실벡터합을 사용하는 경우와 최대 벡터합을 사용하는 경우를 비교하여 실제 현장 시험시 적용성을 높이고자 하였다. 진동속도는 최대 실벡터합에 비해 최대 벡터합에 의해 구해진 진동속도의 크기가 자승근에서는 24.6 %, 삼승근에서는 26.1 %가 증가하는 것으로 나타났으며, 단일성분의 최대치, 최대 실벡터합, 최대 벡터합의 안전율은 1 : 1.154 : 1.359로 나타났다.

핵심어 : 최대 실벡터합, 최대 벡터합, 회귀분석, 발파진동예상식

1. 서 론

현재 화약류를 사용하는 현장은 광산에서부터 지하철공사, 도로공사, 택지조성, 산업단지 등과 같이 발파작업을 필요로 하는 곳의 범위가 넓어지고 있고 활용이 증가하고 있다.

발파작업이 증가함에 따라 그에 따른 효과적인 작업을 위한 여러 가지 발파기법들이 개발

되어지고 있으나, 발파작업으로 인한 발파진동이나 소음 및 비산 등의 공해는 여전히 문제시되고 있다. 특히 도심지에서의 발파로 인한 진동은 민가나 지반 구조물이 밀집되어 있는 관계로 민원의 원인이 되기도 한다.

이 때문에 발파를 필요로 하는 공사 현장에서는 발파진동이나 발파소음 및 비산 등의 피해를 최소화 할 필요가 있으며, 발파 설계에서

부터 작업에 이르기까지 여러 가지 방법들이 강구되어져야 한다.

이러한 방법1)들로는 첫째로, 시험발파를 통해 계측된 진동속도를 기준치와 비교, 해석하고, 장약량이나 최소저항선과 공간격, 발파공들 사이의 지연시간을 적절히 조절하는 등, 발파설계를 수정하는 방법이 있고, 둘째로, 제어발파법을 적용하거나, 저폭속·저비중 폭약 또는 특수화약류를 이용하는 방법이 있다. 셋째로, 발파로 인해 전파하는 진동을 차단하기 위해서 일정한 길이의 방진구나 지표면에 인공균열을 형성하는 등 여러 가지 방법들이 있다.

본 연구에서는 진동속도 data를 취합하여 분석 사용함에 있어서 V, T, L 성분의 최대 실벡터합을 사용하는 경우와 최대 벡터합을 사용하는 경우를 비교하여 실제 현장 시험시 적용성을 높이고자 한다.

2. 연구지역의 지질 및 개요

2.1 지질

본 연구지역이 위치하고 있는 곳의 기반암은 주로 광주 Granite로 이루어져 있다. 광주 Granite는 광주 지역을 중심으로 화순, 나주, 담양, 해남 일부지역까지 넓게 분포하며 지질연대는 주로 백악기에서 유라기 사이의 암반이다. 본 연구지역의 암석은 광주 Granite 중에서도 각섬석을 많이 함유하고 있어 각섬석질 화강섬록암 또는 각섬석질 화강암으로 명할 수 있으며, 입자의 조성은 조립질이며, 등립질로서 일반적인 화강암보다는 입자간의 결합력이 떨어진다.

본 연구지역의 일축압축강도는 1300~1400kg/cm² 정도로 비교적 경암에 속하며, 암석의 주향은 N75°W, 경사는 43°SW이다.

3. 발파진동의 이론적 고찰

3.1 발파진동의 특성

암반중으로 전달되는 탄성파는 입체파(물체파 : body wave)인 종파(압축파, 1차파, P파)와 횡파(전단파, 2차파, S파), 그리고 표면파로(surface wave)로 나뉜다. 이러한 탄성파가 암반중을 전파하면서 지반진동을 일으키게 되는데 한 점에서의 지면의 운동은 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다. 이와 같은 발파에 의한 지반진동은 변위(displacement), 속도(particle velocity), 가속도(acceleration)의 3종류로 표시되고 있다.

지반진동의 측정^{2,3)}은 그 방향에 따라 Fig. 3.1과 같이 수직방향성분(vertical), 진행방향성분(longitudinal or radial), 그리고 이 두 파의 방향과 직각을 이루는 접선방향성분(transverse)의 세 방향으로 이루어진다.

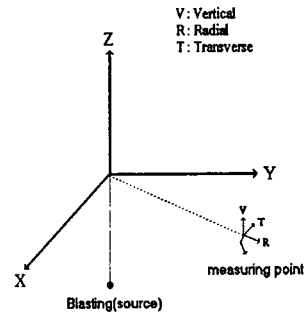


Fig. 3.3 Three components of blasting vibration measured in surface

발파 진동의 측정시 주로 종파는 진행방향성분으로, 횡파는 접선방향성분으로, 표면파는 수직방향성분으로 측정된다. 또한 이 3가지 요소의 상대적 크기는 암반, 지형 및 발파에 의하여 생성된 탄성파들의 상호간섭에 따라 변한다.

3.2 발파진동속도와 장약량, 거리와의 관계

발파진동을 결정하는 요소는 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파장소와 인근 구조물의 기하학적 형태 및 해당지역의 국부적인 지질, 암반의 종류 및 상태 등의 요인에 의해 결정되고, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파 유형, 폭발원과 측정간의 거리 등의 요인에 의해 결정된다.

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

발파진동은 주로 장약량(charge weight)과 거리(distance)에 의해 결정되고, 기타의 요인들은 발파지역의 특정한 발파 상수(blasting constant)로 결정된다. 장약량은 동시에 폭발하는 폭약량이나 지발당 사용되는 폭약량(charge per delay)을 뜻하고, 거리는 발파점 또는 폭원에서 측정이나 인접구조물과의 거리를 의미한다.

복잡한 지반을 대상으로 한 발파진동식⁴⁾의 이론적 전개는 아직 완전히 이루어지지 않고 있지만 일반적으로 많이 사용되고 있는 발파진동 예상식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V = K \left(\frac{R}{W^b} \right)^n \quad (3.1)$$

여기서,

V : 지반진동속도(particle velocity, mm/sec)

R : 폭원으로부터의 거리 (distance, m)

W : 지발당장약량(charge per delay, kg)

K : 발파진동 상수

n : 감쇠지수

b : 장약지수

U.S.B.M.의 Devine(1966)은 식 3.1의 장약지수 b값에 대해 실험적으로 1/2의 값을 제안하

였고, 이를 square root scaling이라 한다. 그리고 b의 값을 1/3로 둘 때, 이를 cube root scaling이라 하며, 이는 차원 해석결과 나온 이론적인 값이다.

또 환산거리(scaled distance, SD)를 식 3.2로 두고

$$SD = \left(\frac{R}{W^b} \right) \quad (3.2)$$

b = 1/2이면, 이를 자승근 환산거리(square root scaled distance), b = 1/3이면, 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라 한다. 이 둘 사이에는 장약량이 작은 경우에는 별 차이가 없다. 그러나 장약량이 많아지면 그 차가 점점 커지므로 이때는 각각에 대해 실험으로부터 얻어진 자료의 상관관계를 고려하여 적합한 식을 사용해야 한다.

3.3 최대 실벡터합과 최대 벡터합과의 관계

지반진동으로 인해 구조물이 반응했을 때 최대치의 표시 방법에는 세 성분중 최대값이 발생하는 시점(Fig 3.2에서 실선으로 표시된 부분)에서의 세 성분의 벡터합으로 나타내는 최대 실벡터합(true maximum vector sum)과 각 성분의 최대값(Fig 3.2의 ①,②,③)의 벡터합으로 나타내는 최대 벡터합(maximum vector sum)이 있다. 벡터합의 공식은 식 3.3과 같으며, 식 3.3에 의해 얻어진 최대 벡터합은 최대 실벡터합 보다 크며, 최대 실벡터합 역시 단일성분의 최대치보다 약 5~10% 더 큰 값을 가진다. 일반적으로 발파진동에 의한 균열발생을 경험적인 방법으로 관측, 기록할 때는 단일성분의 최대치를 사용해 왔으므로 최대 벡터합의 최대치를 사용하게 되면 안전율이 대단히 커지게 된다.⁵⁾

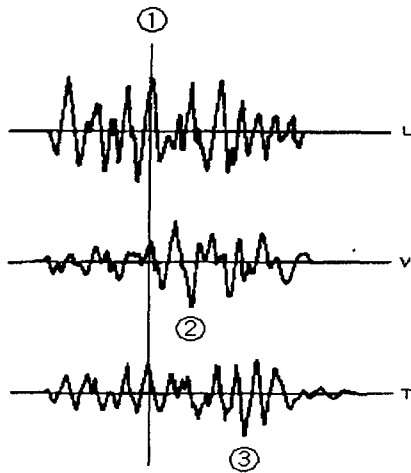


Fig. 3.2 Typical blast vibration time histories

$$V = \sqrt{V_T^2 + V_V^2 + V_L^2} \quad (3.3)$$

여기서,

V_L : 진행진동성분 (Longitudinal, radial)

V_V : 수직진동성분 (vertical)

V_T : 접선진동성분 (transverse)

4. 측정결과 및 해석

4.1 개요

본 연구지역은 아파트 구조물의 시설을 위한 지하 터파기를 위해 노출된 암반을 제거할 목적이 있다. 발파조건은 연구지역의 주변여건을 고려하여 Table 4.1과 같이 설계하였다.

또한 발파진동의 계측은 G.L에서 5~7m의 표고차를 이룬 지역에서 진동계측기를 설치하여 조사하였으며, 폭원과 측정간의 거리는 18~49m이고, 최대 진동속도의 최대 실벡터합은 0.4~8.2mm/sec를 나타내었으며, 최대 벡터합은

0.6~10.4mm/sec를 나타내었다.

진동계측에 사용된 data의 수는 90개였으며 이를 모두 분석에 이용하였다.

Table 4.1 연구지역의 발파조건

설계사항	발파조건
천공장 (m)	2.0~2.7
천공경 (mm)	φ45
공간격 (m)	0.7~0.8
저항선 (m)	0.6~0.8
사용폭약	dynamite φ25mm, φ32mm
사용뇌관	MSD 전기뇌관
지발당 장약량 (kg)	0.375~0.625

4.2 예상진동식을 이용한 결과 해석

본 연구지역에서 측정된 계측치를 회귀분석에 의해 입지상수 K, n을 구하기 위하여 최대 진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리 하였다. 최대 실벡터합에 의해 얻어진 자승근 및 삼승근으로 환산한 결과는 Fig. 4.1의 (a), (b)와 같으며, 최대 벡터합에 의해 얻어진 자승근과 삼승근으로 환산한 결과는 Fig. 4.2의 (a), (b)와 같다. 또한 식 3.1에 의한 회귀분석 결과는 다음과 같으며, 결정계수는 0.673~0.720으로 분석에 사용된 data의 수가 많아 낮은 값을 나타냈었다.

최대 실벡터합

$$V = 9427.3746 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-2.058} \quad R=0.706$$

$$V = 8777.4344 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-2.110} \quad R=0.720$$

최대 벡터합

$$V = 8077.7683 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.963} \quad R=0.673$$

$$V = 7561.0735 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-2.012} \quad R=0.683$$

위 식에 의해 얻어진 진동속도는 최대 실백터합에 비해 최대 백터합에 의해 구해진 진동속도의 크기가 자승근에서는 24.6%, 삼승근에서는 26.1%가 증가하는 것으로 나타났다. 진동계측 data를 분석할 때 대개의 경우 안전율을 고려하여 95%의 측정자료를 포함하는 최대 실백터합을 적용하나 본 연구에서는 V, T, L 성분 중에서 단일성분의 최대치, 최대 실백터합 및 최대 백터합과 안전율과의 관계를 비교하였다. 비교 기준은 단일 성분의 최대치를 안전율 1.0으로 설정하였다. Table 6.2는 단일성분의 최대치, 최대 실백터합, 최대 백터합을 나타내었으며, 안전율에 대한 결과 값을 아래에 나타내었다.

단일성분의 최대치 : 최대 실백터합 : 최대 백터합 = 1.0 : 1.154 : 1.359

그 결과, 단일성분의 최대치보다는 최대 실백터합이 최대 실백터합보다는 최대 백터합이 안전율이 높은 것으로 나타났다. 그러므로 중요구조물이 있는 현장에서 안전율을 높이기 위해서는 최대 백터합에 의한 예상진동식을 산출한다면 발파진동에 의한 구조물의 안전을 더욱 도모할 수 있을 것이다.

4.2 노모그램을 이용한 결과 해석

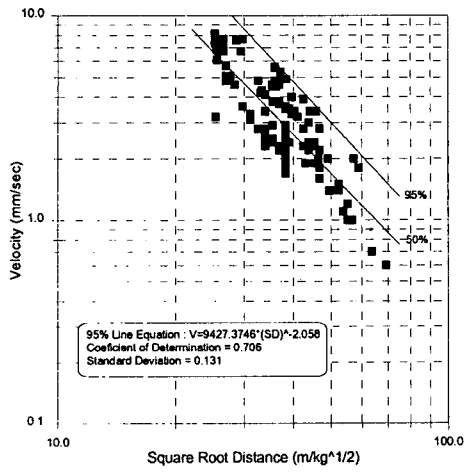
발파 현장에 적합한 발파 진동식을 구하는 것은 발파 작업장의 주변구조물에 피해를 발생시키지 않는 범위에서 발파작업이 안전하게 이루어질 수 있도록 지발당 장약량을 합리적으로 조절하기 위한 것이다. 발파현장에 적합한 발파진동식을 도출하고, 발파작업장의 주변 구조물에 피해를 발생시키지 않을 한계진동치를 결정한 후, 이를 기준으로 폭원과 구조물간의 거리

에 따라 지발당 최대 허용장약량을 구할 수 있다. 발파작업이 진행됨으로써 발파작업장 주변의 구조물과 폭원과의 거리가 변하게 되고, 발파진동식에서 산출된 최대 허용장약량도 변하게 된다.

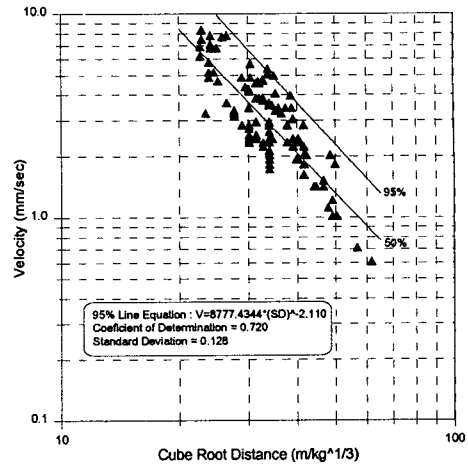
발파진동속도는 지발당 최대 허용장약량과 폭원으로 부터의 거리를 변수로 하는 환산거리의 함수로 표시 될 수 있는데 그 관계식은 식 4.1과 같다. 이 식에서 진동속도와 환산거리는 비선형적 관계이나 양변에 로그를 취하면 다음과 같은 선형식으로 만들 수 있다.

$$\log V = \log K + n \log (SD) \quad (4.1)$$

발파진동의 안전기준치를 1.0 mm/sec 및 3.0 mm/sec로 설정하여 최대 실백터합과 실백터합을 상호 비교하였다. 이를 기준으로 95%의 신뢰수준을 갖는 식을 이용하여 폭원과 구조물간의 거리에 따른 지발당 최대 허용장약량을 산출하였으며, Fig. 4.3의 (a)와 (b)는 안전기준치를 1.0mm/sec로 하였을 때, 최대 실백터합과 최대 백터합의 자승근 및 삼승근에 의한 지발당 최대 허용장약량과 거리와의 관계를 나타내는 노모그램이며, Fig. 4.4는 안전기준치를 3.0mm/sec로 하였을 때, 최대 실백터합과 최대 백터합의 자승근 및 삼승근에 의한 지발당 최대 허용장약량과 거리와의 관계를 나타내는 노모그램이다

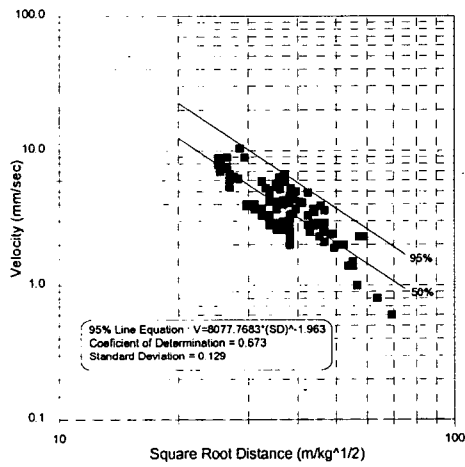


(a)

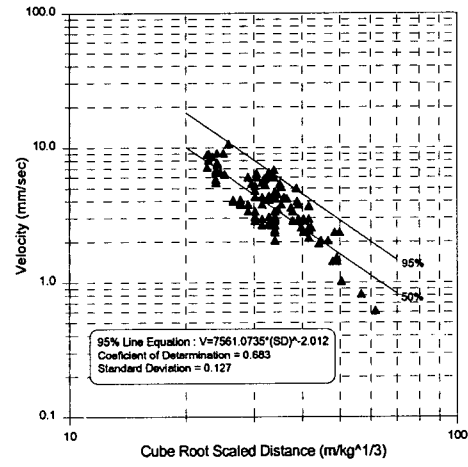


(b)

Fig. 4.1 Relationship between peak particle velocity and root scaled distance (a), cube root scaled distance (b) of true maximum vector sum

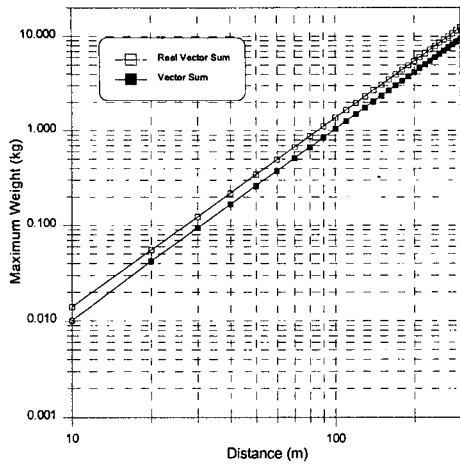


(a)

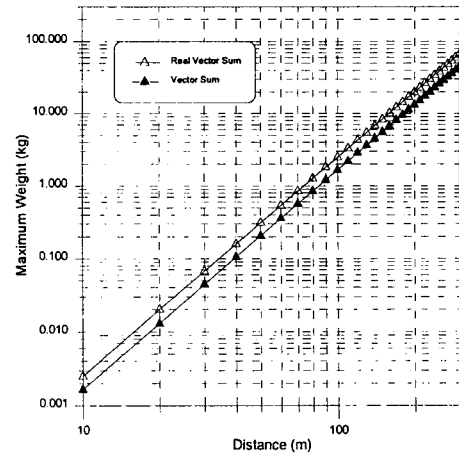


(b)

Fig. 4.2 Relationship between peak particle velocity and root scaled distance (a), cube root scaled distance (b) of maximum vector sum

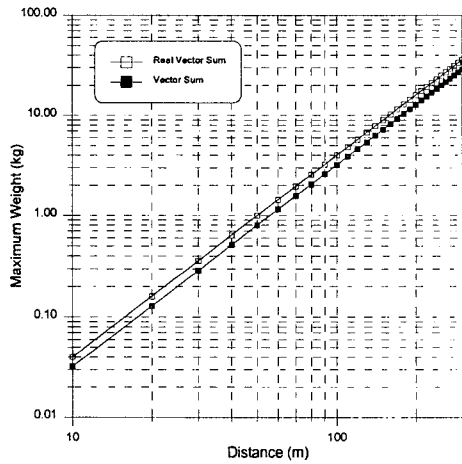


(a)

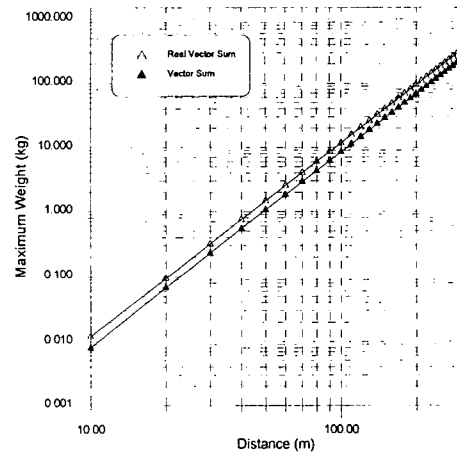


(b)

Fig. 4.3 Maximum charge weight per delay vs distance from blasting point to sensor by square root scaled distance (a) and cube root scaled distance (b) (using 1mm/sec)



(a)



(b)

Fig. 4.4 Maximum charge weight per delay vs distance from blasting point to sensor by square root scaled distance (a) and cube root scaled distance (b) (using 3mm/sec)

5. 결 론

본 연구에서는 시험발파를 실시하여 측정된 진동계측 data를 회귀분석에 사용할 때 최대 실백터합과 최대 백터합을 진동속도식에 의해 그 크기를 비교하였으며, 단일성분의 최대치와 최대 실백터합, 최대 백터합의 안전율을 비교하였다.

- 1) 본 연구대상 지역의 95 %의 신뢰수준으로 최대 실백터합과 최대 백터합의 자승근 및 삼승근 환산식은 다음과 같다.

최대 실백터합

$$V = 9427.3746 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-2.058} \quad R=0.706$$

$$V = 8777.4344 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-2.110} \quad R=0.720$$

최대 백터합

$$V = 8077.7683 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.963} \quad R=0.673$$

$$V = 7561.0735 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-2.012} \quad R=0.683$$

- 2) 진동속도는 최대 실백터합에 비해 최대 백터합에 의해 구해진 진동속도의 크기가 자승근에서는 24.6 %, 삼승근에서는 26.1 %가 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 단일성분의 최대치, 최대 실백터합, 최대 백터합의 안전율은 1 : 1.154 : 1.359로 나타났다.
- 4) 중요구조물이 있는 현장에서 안전율을 높이기 위해서는 최대 백터합에 의한 예상진동식을 산출한다면 발파진동에 의한 구조

물의 안전을 더욱 도모할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 伊藤一郎, 發破にともなう振動, 騒音, 飛石に連する諸問題, 工業火藥協會誌, Vol.34, No.1, pp. 4-21, 1974.
2. U. Langefors and B. Kihlstrom, The modern technique of Rock Blasting third edition, 1978, pp. 258-293
3. Charles H. Dowding, Blast Vibration Monitoring and Control, 1984, pp.17-21
4. 양형식·주재성, “노천굴 발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구”, 「한국자원공학회지」, Vol. 27, 1990, pp. 316-32
5. 임한욱외, “암발파 설계기법에 관한 연구”, 「한국토지개발공사」, pp. 246~253, 1993.