

발파진동 예측방법에 관한 연구

A Study on the Prediction Method of Blasting Vibration

이연수†

Yeon-Soo Lee

Key Words : Blasting Vibration(발파진동), Vibration Level(진동레벨), Vibration Acceleration Level(진동가속도레벨), Vibration Velocity(진동속도).

ABSTRACT

In order to predict method of blasting vibration in ground and it's resident located around blasting field in urban area, blasting vibration characteristics were measured the vibration velocity(cm/sec), vibration acceleration(cm/sec²), vibration acceleration level(dB) and vibration level(dB(V)). The charged powder were used to 1.25kg and measuring sites were 25 points from 4m to 90m at the ground.

The correlation of vibration velocity, vibration acceleration, vibration acceleration level and vibration level by square root scaled distance and cube root scaled distance were investigated. The correlation of PPV(peak particle velocity) velocity by SRSD(square root scaled distance) and CRSD(cube root scaled distance) was 0.85 and 0.86 and the correlation of PVS(peak vector sum) velocity by SRSD and CRSD was 0.82. Also vibration acceleration, vibration acceleration level and vibration level by SRSD and CRSD was 0.61, 0.62 and 0.82, respectively. As results, the vibration velocity and vibration level(dB(V)) was showed good correlation, but the vibration acceleration and vibration acceleration level was not showed good correlation.

1. 서 론

암반중으로 전달되는 탄성파는 입체파인 종파와 횡파 그리고 표면파로 나뉘어 진다. 지반진동에서 종파는 진행방향 성분으로, 횡파는 접선방향성분으로, 표면파는 수직방향성분으로 측정된다. 이 3가지 요소의 상대적 크기는 암반, 지형 및 발파조건에 의하여 생성된 탄성파들의 상호간섭에 따라 변한다. 지반진동속도에 영향을 미치는 요소로는 발파효과, 지반상태, 폭약의 종류, 계측방향 등이 있으며 이들에 따라 현저한 차이가 발생한다. 특히 발파효과는 저항선과 장약량에 의해 그 크기가 판단되는 것으로 장약량에 비해 저항선이 큰 경우는 적절한 조건보다 발파진동이 크지만 반대로 장약량에 비해 저항선이 작은 경우는 진동이 크지 않다(1)고 알려져 있다.

적절한 발파조건을 찾기 위한 작업을 시험발파라 한다. 시험발파는 폭풍압과 발파현장의 지반진동에 대한 감쇠관계를 제시하여 발파현장의 안전성을 위하여 실시하지만, 대

부분 민원 발생소지가 있을 것으로 예상되거나 공사중에 민원이 발생할 때 실시하는 경우가 대부분이다. 그래서 암반조건과 발파조건에 따른 발파진동의 전파특성(2-4) 및 발파관련 소음진동허용기준 설정 및 인축에 미치는 영향(5-7)에 대한 논문들이 다수 발표되었다.

지금까지의 발파진동속도 예측은 지발당 장약량과 거리가 변화할 때 최대입자속도와 세 성분의 벡터합을 이용하여 회귀분석을 통해 발파진동의 경향을 분석하는 것(8)이었다. 그러나 본 연구는 지금까지 입지상수 K값에 의한 진동속도 예측식으로만 발파조건을 설계한 패턴을 자승근 환산식 및 삼승근 환산식을 이용하여 발파진동속도뿐만 아니라 발파진동가속도, 발파진동가속도레벨, 발파진동레벨 환산식을 고찰하고, 이들의 상관성을 고찰하고자 하였다.

2. 측정방법

발파조건은 표 1과 같이 설계했으며, 높이에 따른 다양한 변화가 예상되어 시험발파 장소는 평탄한 지면을 선정하였다. 계측지점간 거리는 4m 간격으로 90m 까지 구분하였고, 1지점에서 3회 측정하였다.

† 서울시보건환경연구원 소음진동팀
E-mail : lys39393@hanmail.net
Tel : (02)570-3138, Fax : (02)570-3350

Table 1. Specifications of blasting field.

Class	Measurements
Drill hole diameter(mm)	45
Drill hole depth(m)	3.0
Burden(m)	1.5
Hole space(m)	1.0
Charge per hole(kg)	1.25
Sub-drilling(m)	0.2
Stemming(m)	1.5
Explosives	Newmite Plus 32
Detonators	Hi-DETO MS ID

3. 결과 및 고찰

3.1 발파진동속도 예측

발파진동은 폭발 후 5~20%의 잔여 압력이 지반을 통하여 transverse, vertical 및 longitudinal 방향으로 전파되는데 이 3성분 중 어느 한 성분이 우월하게 나타나게 되며, 진동속도는 특정한 시간대에서 단일 성분의 최대값과 합성 성분의 백터값으로 표현된다. 진동속도와 환산거리의 관계를 선형 회귀분석하여 기울기와 절편으로부터 K값과 n 값을 구하고, 장약지수 b는 자승근환산거리(square root scaled distance)와 삼승근환산거리(cube root scaled distance)의 회귀선 중 접합도가 좋은 쪽을 택하여 최종 발파진동 추정식(9,10)을 결정하는데 사용한다.

진동속도 예측식은 계측자료의 백터합과 환산거리와의 관계를 양대수(log-log) 도면에 나타내고 이들의 관계를 최소자승법에 의해 회귀분석하여 중앙치에 해당하는 직선식을 다음과 같은 형태로 도출한다.

$$V = K(SD)^n \tag{1}$$

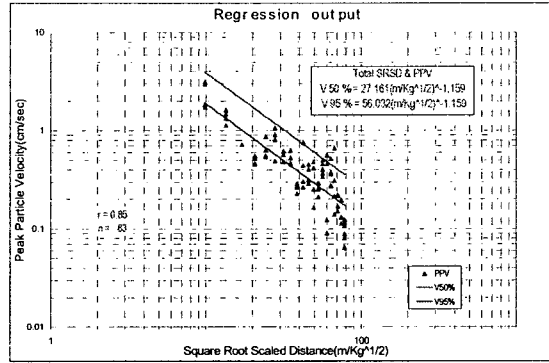
- V : 진동속도(cm/sec, mm/sec)
- K : 입지상수
- SD : 환산거리($D/W^{1/2}$ m/kg, $D/W^{1/3}$ m/kg)
- D : 폭원과 수신점간의 거리(m)
- W : 지발당 최대 장약량(kg)
- n : 감쇠지수

상기와 같은 식으로 도출하기 위하여 계측자료의 진동속도 V와 환산거리 SD(scaled distance)를 상용대수값으로 취하면 $\log V = \log K + n \log (SD)$ 의 형태를 취한다. 일반적으로 진동속도와 환산거리와의 관계는 역상관 관계를 갖고 있으며 상관계수가 최소한 $R^2 \geq 0.7$ 이상이 되어야 비교적 균일한 지반에서 정상적인 발파가 이루어진 것으로 판단(1)한다.

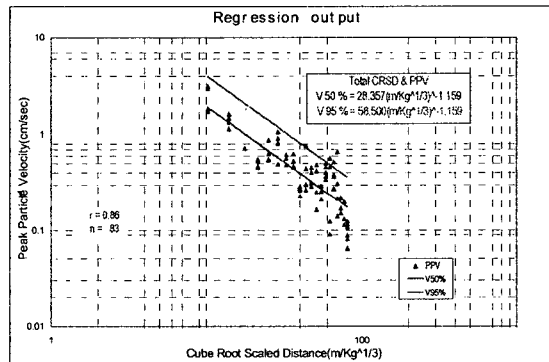
식 (2)는 식 (1)식을 기초로 한 건설교통부의 ‘암발파공법 설계적용기준개정(안)(11)으로 보안 시설물의 진동기준 및 이격거리에 맞는 지발당 장약량을 구하고 이에 적합한 발파공법을 선정하도록 하는 기준이다.

$$V = 160(D/W^{1/2})^{-1.6} \tag{2}$$

- V : 예상진동속도(cm/sec)
- D : 폭원에서의 이격거리(m)



(a)



(b)

Fig. 1. The correlation of (a) PPV and SRSD, (b) PPV and CRSD.

그림 1-(a)는 진동속도인 PPV(peak particle velocity)와 자승근, 그림 1-(b)는 PPV와 삼승근 환산거리에 의한 예측식을 나타낸 것으로 상관계수는 0.85 및 0.86이었으며 예측식은 아래와 같았다.

$$V_{50\%} = 27.161(m/kg^{1/2})^{-1.159} \tag{3}$$

$$V_{95\%} = 56.032(m/kg^{1/2})^{-1.159} \tag{4}$$

$$V_{50\%} = 28.357(m/kg^{1/3})^{-1.159} \tag{5}$$

$$V_{95\%} = 58.500(m/kg^{1/3})^{-1.159} \tag{6}$$

그림 2-(a)는 진동속도인 PVS(peak vector sum)와 자승근, 그림 2-(b)는 PVS와 삼승근 환산거리에 의한 예측식을

나타낸 것으로 상관계수는 0.82를 보였고 예측식은 아래와 같았다.

$$V_{50\%} = 22.065(m/kg^{1/2})^{-1.068} \quad (7)$$

$$V_{95\%} = 46.491(m/kg^{1/2})^{-1.068} \quad (8)$$

$$V_{50\%} = 22.065(m/kg^{1/3})^{-1.068} \quad (9)$$

$$V_{95\%} = 46.491(m/kg^{1/3})^{-1.068} \quad (10)$$

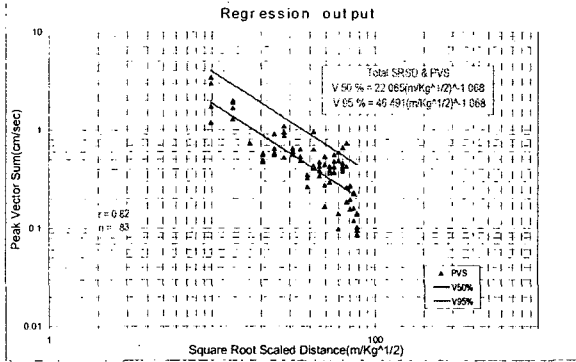
와 삼승근 환산거리에 의한 예측식을 나타낸 것으로 상관계수가 0.61로 진동속도와의 비교보다 0.2정도 낮았으며 예측식은 아래와 같았다.

$$VA_{50\%} = 0.429(m/kg^{1/2})^{-0.456} \quad (11)$$

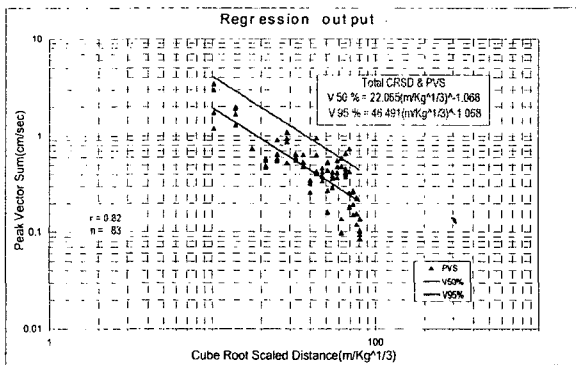
$$VA_{95\%} = 0.758(m/kg^{1/2})^{-0.456} \quad (12)$$

$$VA_{50\%} = 0.436(m/kg^{1/3})^{-0.456} \quad (13)$$

$$VA_{95\%} = 0.771(m/kg^{1/3})^{-0.456} \quad (14)$$



(a)



(b)

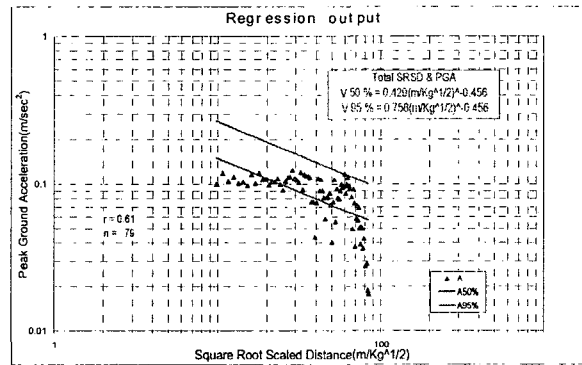
Fig. 2. The correlation of (a) PVS and SRSD, (b) PVS and CRSD.

상관계수 $R^2 \geq 0.7$ 이상인 0.85, 0.86 및 0.82로 나타나 정상적인 발파가 이루어 졌다는 것을 알 수 있었고, PPV에 의한 상관계수가 PVS에 의한 상관계수보다 0.03정도 높게 나타났다. 그리고 PPV와 자승근 및 삼승근 환산거리에 의한 예측식에서 중앙치 입지상수 K값은 27, 28이었고 PVS와 자승근 및 삼승근 환산거리에 의한 예측식에서 중앙치 입지상수 K값은 22이었다. 이와 같이 입지상수가 다른 원인은 진동속도가 이미 정해진 상태에서 감쇠지수 n값이 -1.068로 -1.6보다 크기 때문으로 판단된다.

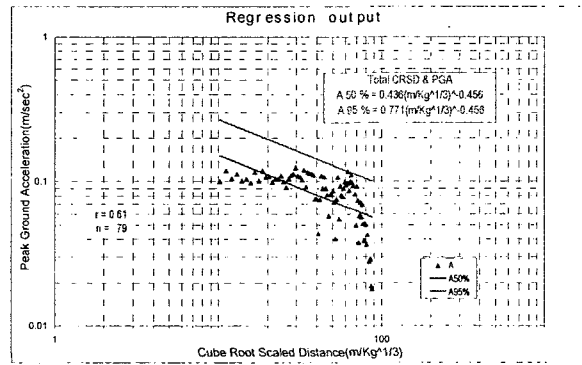
3.2 발파진동가속도 예측

그림 3-(a)는 진동가속도와 자승근, 30(b)는 진동가속도

그리고 진동가속도와 자승근 및 삼승근 환산거리에 의한 예측식에서 중앙치 입지상수 K값도 0.429 및 0.436으로 진동속도의 값보다 매우 낮았는데 그 원인은 진동가속도가 정해진 상태에서 감쇠지수 n값이 -1.6보다 큰 -0.456이었기 때문으로 판단된다. 그리고 상관계수 $R^2 \geq 0.7$ 보다 낮은 0.61로 나타나 정상적인 발파작업이 이루어 졌다고 할 수 없으며, 감쇠지수가 다양하기 때문에 진동가속도를 이용하여 발파설계를 하는 것은 무리가 있을 것으로 판단되었다.



(a)



(b)

Fig. 3. The correlation of (a) vibration acceleration and SRSD, (b) vibration acceleration and CRSD.

그림 4-(a)는 진동가속도레벨과 자승근, 4-(b)는 진동가속도레벨과 삼승근 환산거리에 의한 예측식으로 상관계수는 0.62로 진동속도와의 비교보다는 상당히 낮은 상관계수를

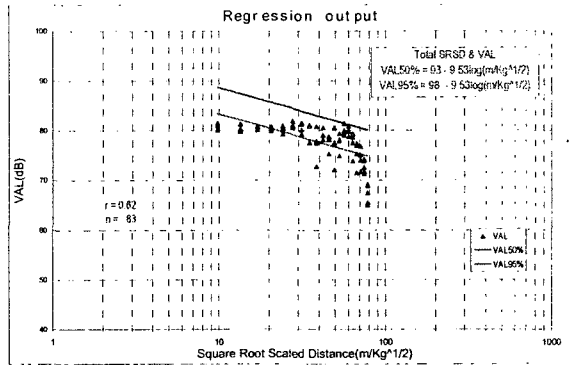
보였으나 진동가속도와 비슷한 상관계수를 보여 정상적인 발파가 이루어지지 않았음을 알 수 있었으며 예측식은 아래와 같았다.

$$VAL\ 50\% = 93 - 9.53 \log(m/kg^{1/2})^{\wedge} \quad (15)$$

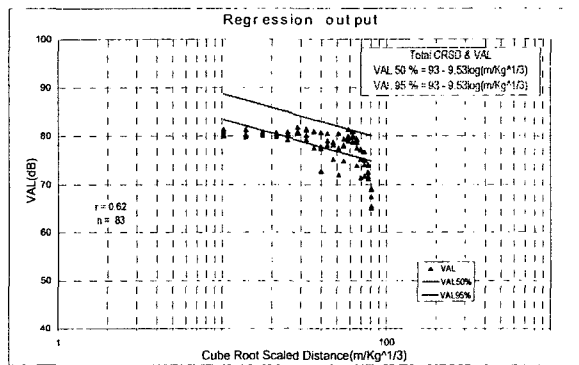
$$VAL\ 95\% = 98 - 9.53 \log(m/kg^{1/2})^{\wedge} \quad (16)$$

$$VAL\ 50\% = 93 - 9.53 \log(m/kg^{1/3})^{\wedge} \quad (17)$$

$$VAL\ 95\% = 93 - 9.53 \log(m/kg^{1/3})^{\wedge} \quad (18)$$



(a)



(b)

Fig. 4. The correlation of vibration acceleration level and SRSD, (b) vibration acceleration and CRSD.

3.3 발파진동레벨 예측

그림 5-(a)는 진동레벨과 자승근, 5-(b)는 진동레벨과 삼승근 환산거리에 의한 예측식으로 상관계수는 0.82로 양호하게 나타났다.

$$VL\ 50\% = 105 - 24.28 \log(m/kg^{1/2})^{\wedge} \quad (19)$$

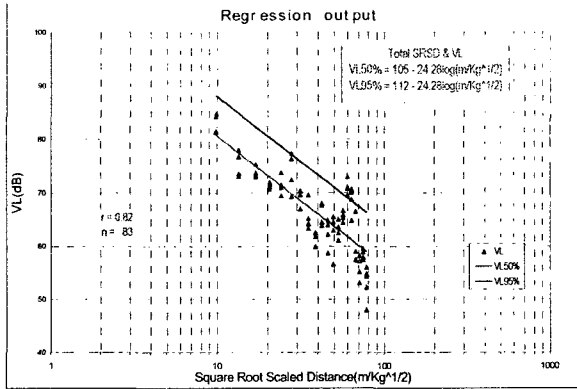
$$VL\ 95\% = 112 - 24.28 \log(m/kg^{1/2})^{\wedge} \quad (20)$$

$$VL\ 50\% = 105 - 24.28 \log(m/kg^{1/3})^{\wedge} \quad (21)$$

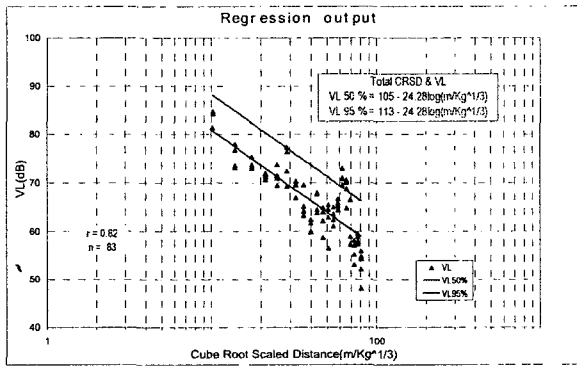
$$VL\ 95\% = 113 - 24.28 \log(m/kg^{1/3})^{\wedge} \quad (22)$$

한편 예측식에서 상관계수 $R^2 \geq 0.7$ 이면 정상적인 발파가 이루어진 것으로 판단할 수 있으므로 PPV, PVS 및 진

동레벨 등의 상관계수가 0.82~0.86으로 상당히 양호한 결과를 얻었지만, 진동가속도 및 진동가속도레벨과의 상관성은 0.61 및 0.62로 좋지 않은 결과를 보였다. 특히 10~30m의 근접장에서 거리에 따라 진동가속도 및 진동가속도레벨값의 차이가 없었기 때문에 상관성이 낮았던 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 5. The correlation of (a) vibration level and SRSD, (b) vibration level and CRSD.

4. 결론

자승근 환산식 및 삼승근 환산식을 이용하여 발파진동속도, 발파진동가속도레벨, 발파진동레벨 환산식을 고찰하고, 이들의 상관성을 구한 결과 아래와 같았다.

1. 진동레벨과의 자승근 및 삼승근 환산거리에 의한 상관계수는 0.82로 PPV 및 PVS에 의한 상관계수 0.85, 0.86와 차이가 없고, $R^2 \geq 0.7$ 로 나타나 발파설계에 적용하여도 무방하다고 판단되었다.
2. 진동가속도와 진동가속도레벨과의 자승근 및 삼승근 환산거리에 의한 상관계수는 0.61, 0.62로 PPV 및 PVS에 의한 상관계수 0.85, 0.86와 차이가 크고, $R^2 \leq 0.7$ 로 나타나 발파설계에 적용하는 것은 무리라고 판단되었다.

참 고 문 헌

- (1) 기경철, 김일중, 2002, 발파공학, 동화기술, 서울.
- (2) 이경운, 1984, “화약, 암석강도 및 발파유형이 발파진동에 미치는 영향-서울 도심지발파를 중심으로”, 대한광산학회지, Vol.21, No.4. pp.334-339.
- (3) 이경운, 김민규, 1987, “석회석 채석장의 대규모 발파에 대한 발파진동”, 대한광산학회지, Vol.24,, pp.320-327.
- (4) 양형식, 주재성, 1990, “노천굴 발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구”, 한국자원공학회지, Vol.27, pp.316-323.
- (5) 안명석, 김중대, 황소중, 2001, “발파진동과 소음이 가축에 미치는 영향에 관한 사례연구”, 한국소음진동공학회지, Vol.11, No.1, pp.104-110.
- (6) 김재영, 홍용기, 박홍민, 박영민, 2001, “주민 생활환경에 있어서 진동레벨에 의한 발파진동의 평가”, 대한환경공학회 2001 춘계학술연구발표회 논문집(II). pp.141-144.
- (7) 양형식, 1997, “암 발파에서의 소음진동 규제기준과 저감방안”, 한국소음진동공학회지, Vol.7, No.4, pp.555-560.
- (8) 강추원, 추영래, 박현식, 2001, “최대 실벡터합과 최대 벡터합의 적용성에 관한 연구”, 화약발파, 대한화약기술학회, Vol. 19. No. 2, pp.19~26.
- (9) 정동호 등, 2001, “지중변전실 하부통과를 위한 터널설계 및 시공사례”, 화약발파, 대한화약기술학회, Vol. 19. No. 1, pp.11~29.
- (10) 박연수 등, 1999, “차량하중하에서 가스관의 진동측정 및 평가”, 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 572 ~ 577.
- (11) 건설교통부, 2002, 암발파공법설계적용기준(안).