

## 주 주파수를 고려한 협동장약 특성에 관한 연구

강추원<sup>1)\*</sup>, 김종인<sup>2)</sup>

### A Study on the Characteristics of Cooperating Charge considering Dominant Frequency

Choo-Won Kang and Jong-In Kim

**Abstract** As a result of waveform analysis, the separation of waveform found that high frequency well accomplishes but low frequency doesn't accomplish that. The data which measured less than 60 Hz and more than 60 Hz was analysed to examine the relation between cooperating charge and frequency. The measured data of more than 70 Hz was also analysed to consider the characteristics of high frequency.

**KeyWords** Waveform analysis, Cooperation charge, Frequency

**초 록** 파형 분석결과에 의하면 파형의 분리는 높은 주파수에서는 잘 이루어지지만 낮은 주파수에서는 파형분리가 잘 이루어지지 않는다. 협동장약과 주파수의 관계를 규명하기 위하여 측정된 자료를 60 Hz 미만의 경우와 60 Hz 이상의 경우로 분리하여 분석하였으며, 고주파 성분의 특성을 고려하기 위하여 70 Hz 이상의 측정 자료에 대해서도 분리하여 분석하였다.

**핵심어** 파형분석, 협동장약, 주파수

## 1. 서 론

발파로 인한 지반진동에 관한 사항은 환경 규제치와 더불어 국내외적으로 다양한 연구가 이루어져 왔고, 우리나라의 경우에도 도심지의 지반 기초굴착공사, 채석장, 석회석 광산, 터널 발파공사 등에서 많은 연구가 수행되었다. 이들 대부분의 연구는 측정된 진동 계측자료를 취합하여 통계처리를 하는 형식으로 이루어졌으며, 발파 진동파의 특성에 관한 연구는 다소 미흡한 편이다.

외국의 경우 이들 진동파의 특성을 이용한 진동 저감 방법 등이 연구<sup>1)</sup> 되어 현장 실무에 이용하고 있으며, 안전 발파의 한계를 보다 명확하게 설정하기 위해 진동파의 주파수 분석과 지반 및 구조물의 변형에 대한 연구<sup>2)</sup>가 이루어져 왔다. 또 Stig O. Olofsson의 저서<sup>3)</sup>와 Jaimin Lee, Per-Anders Persson, Roger Holmberg는 그들의 저서<sup>4)</sup>에서 주파수와 지발 단차에 따른 협동장

약(cooperating charge)을 설명하고 있다.

국내의 경우 양형식<sup>5)</sup> 등은 터널 공사시 지중발파의 진동 특성에 관한 연구를 수행하였고, 임한욱, 김재동, 류창하, 김대상<sup>6,7)</sup> 등은 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구를 수행하였다.

발파 진동의 수준은 동일한 현장의 발파에 대해서 전파경로 및 측정 대상지질의 상태, 그리고 측정대상의 위치에 따라 변화할 수 있다. 즉, 동일한 현장 내에서 측정을 하더라도 동일한 방향에서 원거리의 진동 수준보다 근거리의 진동수준이 작은 경우, 또는 방향이 서로 다른 동일한 거리에서의 진동이 서로 차이를 보이는 경우 등은 전파 경로 및 측정대상의 지반조건이 상이한 경우로 설명 될 수 있다고 생각된다.

이와 같은 경우 진동의 증감요인을 규명하기 위해서는 이에 대한 파형 분석과 주파수 분석이 요구된다.

그러므로 본 연구에서는 MS지발 전기 뇌관을 사용하는 발파형태에서 푸리에 주파수 변환(FFT)을 통한 주파수를 결정하고 40MS(millisecond)간격으로 서로 분리되어 기록되는 장약들의 파형분석을 통해 협동장약의 정도를 분석하였다. 또 FFT의 결과를 토대로 60 Hz 이하, 60 Hz 이상, 그리고 70 Hz 이상으로 분석된 자료들을 분리하여 분석하였다.

1) 현재 조선대학교 자원공학과 교수

2) 현재 조선대학교 자원공학과 박사수로

\* 교신저자 : cwkang@chosun.ac.kr

접수일 : 2005년 8월 5일

심사 완료일 : 2005년 8월 23일

## 2. 협동장약 이론

협동장약(cooperating charge)<sup>1,3,4)</sup>이란 동일한 지연시차(동일한 뇌관번호)를 갖는 여러 개의 발파공이 동시에 기폭 될 때 발파 진동 파형이 하나의 파형으로 기록되는 것을 의미한다.

Fig. 1과 같이 동일한 지연시차(동일한 뇌관번호)를 갖는 1과 2의 두 발파공에 대해 가까운 거리의 A지점에서 측정한 결과 파형이 분리되어 두 발파공이 협동하지 않았으며, 먼 거리인 B지점에서 측정한 결과는 파형이 분리되지 않아서 두 발파공은 협동하였다.

협동장약을 고려한다면 장약량이 많은 긴 천공장의 장약공을 장약량이 적은 여러 개의 짧은 천공장의 장약공으로 바꾼다면 Table 1의 감소 인자를 곱하여 지발당 장약량을 산정할 수 있다.

즉, 지연시차가 25 ms인 1~10단 뇌관을 각각 6개씩 사용하여 공당 1 kg으로 총 60공을 발파 할 경우 협동장약을 고려할 경우의 지발당 장약량은 3 kg이며 협동장약을 고려하지 않을 경우의 지발당 장약량은 6 kg이다.

그러나 Table 1은 주파수가 60 Hz 이하일 경우에는 사용할 수 없다.

협동장약의 표현은 발파 진동을 측정하고 파형분석과 주파수 분석을 통해 정확한 거리를 확인할 때만 적용될 수 있다.

미국의 미광무국(USBM)에서는 두 장약이 분리된

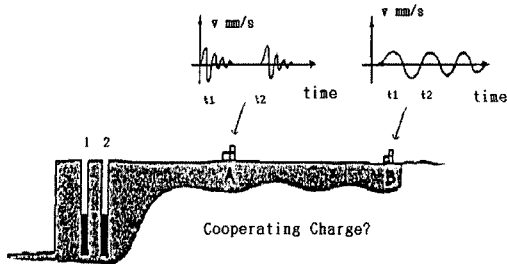


Fig. 1. Cooperating charge

Table 1. Reduction factors for the number of charges (F>60Hz)

Interval Time	Interval No.	Reduction Factor
25 ms	1 ~ 10	1/2
25 ms	11 ~ 20	1/3
500 ms	> 20	1/6

장약으로 간주되어지기 위해서는 지연시차가 8 ms(millisecond)와 동일하거나 이보다 커야한다고 말한다. 이러한 근거로 현재 우리나라에서는 협동장약을 고려하지 않고 지발당 장약량을 산정하고 있다.

## 3. 현장 시험 발파

본 연구 지역은 지층은 기반암이 사암으로 풍화작용에 의하여 토양화가 되어 가는 과정의 지층으로 실트질의 매우 조밀한 지층이다. 지표면하의 지층은 사암과 셰일의 호층과 사암을 기반으로 하는 연암층의 균열부위를 따라 풍화가 상당히 진척되어 대부분의 광물이 다소 풍화된 상태로서 균열이 없는 곳은 다소 신선한 상태를 유지하고 있다.

발파 장소는 도로확장 및 포장공사 현장의 IC 개설구간이며 발파 진동의 측정은 4대의 측정기를 사용하여 Fig. 2와 같이 동일한 방향의 동일 선상에서 측중하였다.

발파작업은 Fig. 3과 같이 45 mm의 천공경에 Emulsion 계 폭약( $\phi$  32 mm)을 사용하였으며, 천공장 2.7 m, 공간격 0.9 m, 최소저항선 0.9 m의 조건으로 발파를 실시하였다.

발파작업에 사용된 뇌관은 Table 2와 같이 MS전기 뇌관으로 1번부터 19번까지 격번식(당당 40MS)으로 모두 10단의 뇌관을 사용하여 각 회 10공을 발파하였으며 공당 장약량은 0.875kg이다.

## 4. 측정 결과 및 분석

### 4.1 측정 자료 및 FFT분석

측정 결과 총 50개의 자료를 획득하였다. 측정된 자료는 Table 3과 같으며, 최대 입자 속도의 경우 수직 성분



Fig. 2. Test site

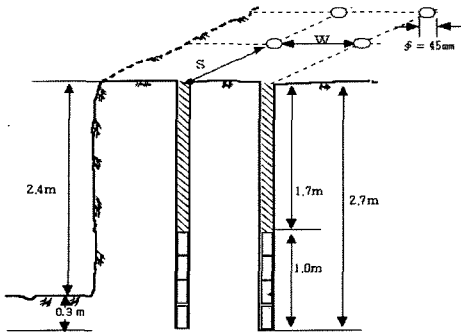


Fig. 3. Blasting pattern

Table 2. Blasting condition

Drilling Length(L)	2.7 m
Drilling Diameter(D)	φ 45 mm
Burden(W)	0.9 m
Hole Distance(S)	0.9 m
Explosives	Emulsion(φ 32 mm)
Weight per Hole	0.875 kg/hole
Weight per Delay(W)	0.875 kg/delay
Hole Number per Round	10 hole
Delay Time	40 MS

(V) 0.921~10.3 mm/sec, 접선성분(T) 1.25~19.7 mm/sec, 진행방향(L) 성분은 1.81~18.8 mm/sec로 측정되었다. 또한 주파수 특성도 분석되었다.

4.2 파형 분석에 의한 협동장약 검토

본 연구에서 측정된 50개의 자료 중 거리별 파형분석 결과에 대한 일례를 나타내면 Fig. 4와 같으며 이것은 접선방향 성분을 나타낸 것이다. 이때 파형은 진동 시간이력에서 진동 속도를 1 ms 간격으로 샘플링(sampling) 하여 도시하였다.

분석 결과 대부분 7단, 8단의 분리가 이루어 졌으며 115 m의 경우 7단, 40 m의 경우 8단의 분리가 이루어 졌다. 근거리의 경우가 원거리의 경우보다 파형의 분리가 잘 이루어지는데, 이것은 파형의 분리가 잘 이루어 지는 고주파가 우세하기 때문인 것으로 생각된다.

이것은 동일 방향 동일 선상의 계측기의 배열이라도 계측기의 위치에 따라 달라지는 지반의 변화에 의해 분리되어 기폭되는 10단의 기폭이 서로 협동되어 중첩 또는 감쇄되어진 결과로 생각된다.

Stig O. Olofsson<sup>3)</sup>은 아주 낮은 주파수에서는 다른 단간에 협동이 발생하며, 미 광무국(USBM)에서는 8ms

이상의 간격으로 기폭 할 경우 분리된 장약으로 간주 하고 있다.

그러나 본 연구에서는 모든 파형이 10단으로 분리 되지는 않았으며 60 Hz 이상의 고주파수와 40 ms의 시차로도 중첩이 이루어졌다. 이들 파형의 중첩은 기폭지점의 공 배열상태(각 공과 계측센서와의 거리), 모암에서 진동의 전달속도, 그리고 국내 전기뇌관의 기폭오차 등에 의한 것이거나 진동 지속시간의 영향에 의한 것으로 생각된다.

5. 주파수 특성을 고려한 협동 장약의 분석

5.1 주파수 특성을 고려하지 않은 경우

발파진동의 경로는 3차원에서 지반이 타원형적으로 움직이도록 힘을 가하게 되는데, 이 운동을 정의하려면 진행방향(Longitudinal), 접선방향(Transverse), 수직방향(Vertical)의 세 방향 직교성분들로 측정하여야한다. 분석에 사용하는 진동속도는 실 벡터 합, 최대 벡터 합과 세 성분 PPV(Peak Particle Velocity) 중의 최대치를 취하는 세 가지 방법이 있다. 이 세가지중 실 벡터 합과 최대 벡터 합은 안전율이 고려된 진동속도이며 실제 계측 점의 진동치 보다는 높게 평가된다. 본 연구에서는 계측 점의 실제 응답특성을 고려하기 위하여 모든 분석은 PPV 만을 해석에 사용하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 주파수 특성을 고려하지 않았을 때로서 측정된 50개의 모든 측정 자료에 대한 각각 자승근 및 삼승근 환산거리에 의한 회귀분석결과이다.

분석결과 95%의 신뢰 구간을 갖는 발파 진동 전파식은 다음식과 같다.

$$V = 90214 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.08}$$

$$r^2 = 0.778 \tag{1}$$

$$V = 86137 \left( \frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-2.08}$$

$$r^2 = 0.778 \tag{2}$$

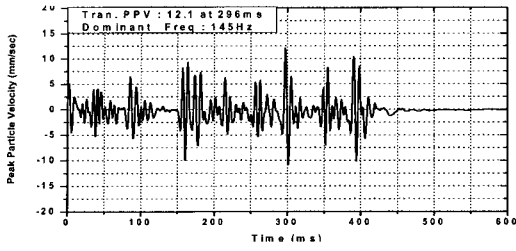
5.2 주파수 특성을 고려한 경우

협동장약(cooperating charge)을 고려한 지발당 장약량의 산정<sup>3)</sup>에서 감소인자(Reduction Factor)의 적용은 60 Hz을 기준으로 하여 60Hz이상에 대해서 적용하였으며 60 Hz이하에서는 감소인자가 1에 가까워져서 모든 장약이 협동하는 것으로 간주 하였다.

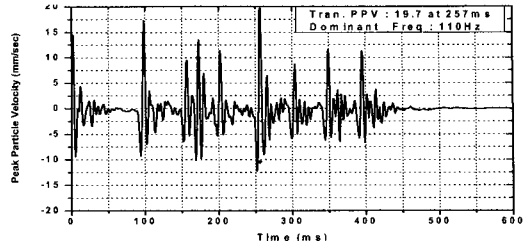
본 연구에서도 협동장약과 주파수의 관계를 규명하기 위하여 측정된 자료를 60 Hz 미만의 경우와 60 Hz 이

Table 3. Measuring and FFT analysis data

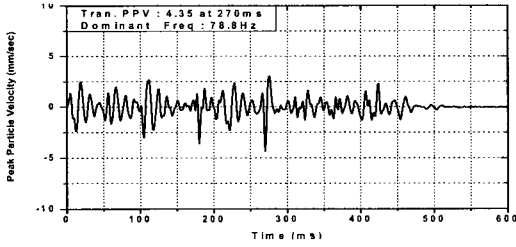
No.	Vertical		Transverse		Longitudinal		Distance(m)
	PPV (mm/sec)	Dom. F(Hz)	PPV (mm/sec)	Dom. F(Hz)	PPV (mm/sec)	Dom. F(Hz)	
1	8.76	44.5	5.46	33.8	7.87	44.3	68
2	7.78	35.8	4.18	36	9.27	28	65
3	5.1	37.5	5.67	37.8	6.16	31.8	62
4	6.68	45.8	4.54	37	9.14	23.5	58
5	5.27	51.8	7.11	64.8	7.92	70	55
6	8.13	47.5	5.97	47.5	11.4	74.8	52
7	9.14	52	11.3	57.3	14.4	65.5	50
8	9.91	46.5	5.84	35.8	13.7	23.8	48
9	6.22	33.8	4.7	33.5	8.89	28.3	45
10	6.86	46.8	8.26	68.8	10.4	78	42
11	7.49	44.3	13.3	99.3	8	65	58
12	8.76	32.5	6.99	116	9.14	67.3	55
13	7.49	32.3	8.89	126	11	59	53
14	7.37	43.5	11.3	96.8	14.4	201	50
15	10.3	68.8	13.8	97.5	14.2	206	47
16	9.91	64.8	19.7	110	18.8	133	45
17	7.37	42.8	12.1	145	17.8	58.3	40
18	2.48	26.3	3.21	56.5	3.48	26.3	75
19	2.11	35.5	2.16	34	3.19	26	80
20	1.46	38	2.17	2	2.29	25.5	85
21	1.25	40	1.49	140	1.81	27.8	90
22	1.78	39.4	1.89	147	3.33	23.6	95
23	2.92	64	8.26	63.8	6.21	90.5	80
24	4.54	65	6.35	75.8	7.89	65.8	78
25	2.29	67	5	67.5	6.87	67.5	75
26	3.33	59	6.29	62.5	7.56	82.8	72
27	5.05	43.5	4.35	78.8	7.81	78.8	70
28	3.22	57.8	5.6	75.3	7.35	69.3	68
29	5.33	40.3	7.24	85.8	11.4	70.3	65
30	4.19	58.3	8.13	74.3	13.3	73.5	62
31	5.08	43.5	8.76	79.5	17.5	57.3	60
32	4.57	56	7.11	90.5	9.53	66.3	58
33	2.73	61	5.13	79.8	5.72	67.8	55
34	3.56	77.8	9.91	78	8.76	78.3	52
35	2.59	65.5	5.79	85.8	7.21	65.5	50
36	4.57	39.6	8.26	83	13	63	47
37	0.921	92.3	1.32	63.3	2.29	92.5	115
38	0.921	41.5	1.68	65	2.52	92.3	113
39	0.984	48.5	1.33	27.3	2.62	80.5	110
40	1.24	32	1.25	58.5	2.05	57.5	107
41	1.32	30	1.05	23	2.22	43.5	105
42	1.17	37	1.44	69	2.67	23.3	103
43	1.95	39	1.75	70	2.71	70	100
44	1.37	74	1.51	124	3.44	74.3	97
45	2.29	34.8	2.11	94.8	3.76	72.5	95
46	1.54	31.8	1.57	66.8	3.32	23.5	93
47	1.13	28.5	1.3	154	2.65	91	90
48	1.27	78.3	1.7	77.8	3.29	78	87
49	1.08	40.3	1.67	40.3	2.27	85.5	85
50	1.62	39.4	2	83.4	3.33	23.6	83



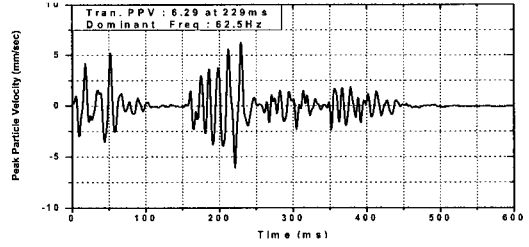
(a) 40 m



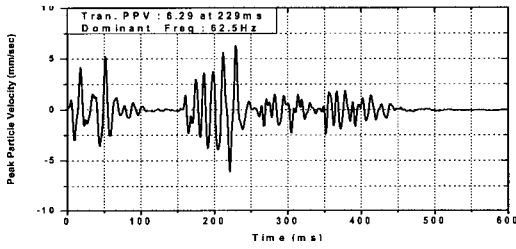
(b) 42 m



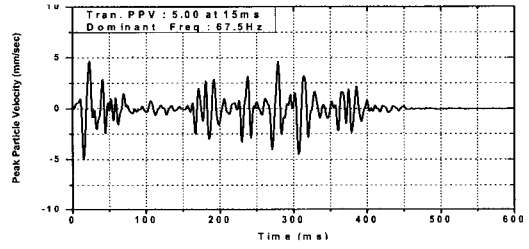
(c) 45 m



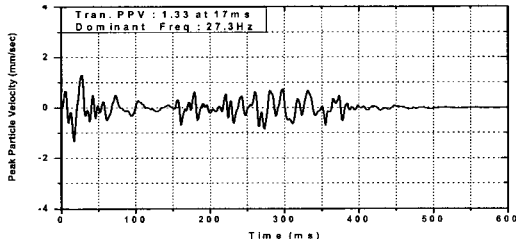
(d) 70 m



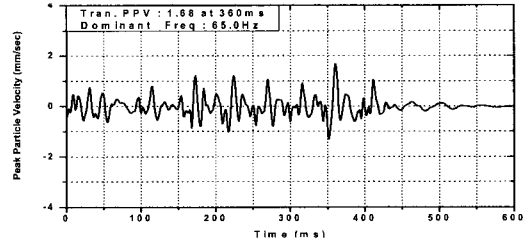
(e) 72 m



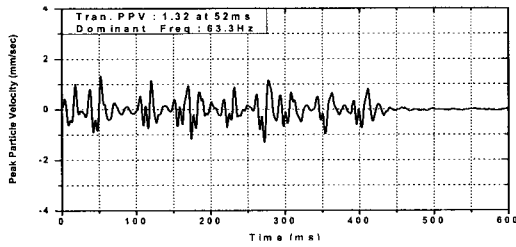
(f) 75 m



(g) 110 m



(h) 113 m



(i) 115 m

Fig. 4. Transverse velocity waveform by 40~115 m distance

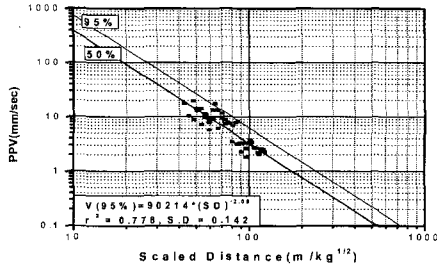


Fig. 5. Relationship of PPV and square root scaled distance

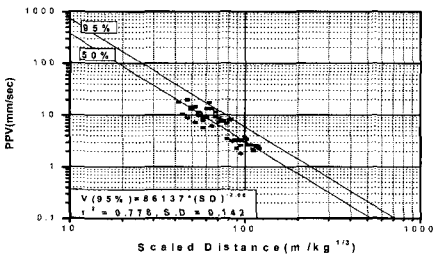


Fig. 6. Relationship of PPV and cube root scaled distance

상의 경우로 분리하여 분석하였으며, 고주파 성분의 특성을 고려하기 위하여 70 Hz 이상의 측정 자료에 대해서도 분리하여 분석하였다.

주파수 특성을 고려하여 측정 자료 중 60 Hz 미만, 60 Hz 이상, 그리고 70 Hz 이상의 자료들을 분리하여 분석한 결과 95%의 신뢰 구간을 갖는 발파 진동 전파식은 식(3)~식(8)과 같다.

Fig. 7~Fig. 12는 주파수 특성을 고려한 경우의 각 주 주파수별 각각 자승근 및 삼승근 환산거리에 의한 회귀분석결과이다.

60 Hz 미만의 경우

$$V = 212094 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.30}$$

$$r^2 = 0.812 \tag{3}$$

$$V = 201512 \left( \frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-2.30}$$

$$r^2 = 0.812 \tag{4}$$

60 Hz 이상의 경우

$$V = 434654 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.90}$$

$$r^2 = 0.765 \tag{5}$$

$$V = 41664 \left( \frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-1.90}$$

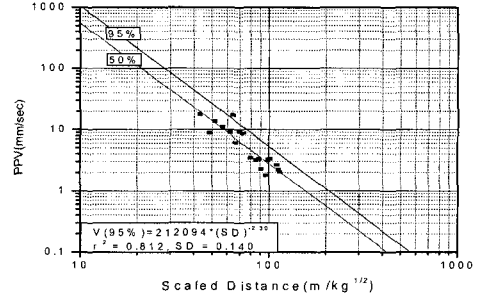


Fig. 7. Relationship of PPV and square root scaled distance (<60Hz)

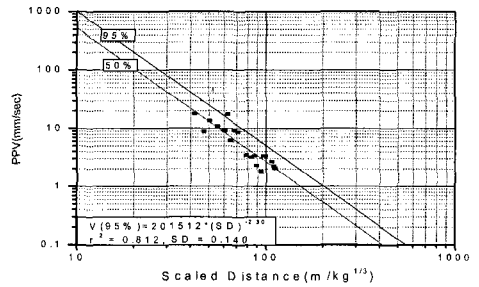


Fig. 8. Relationship of PPV and cube root scaled distance (<60 Hz)

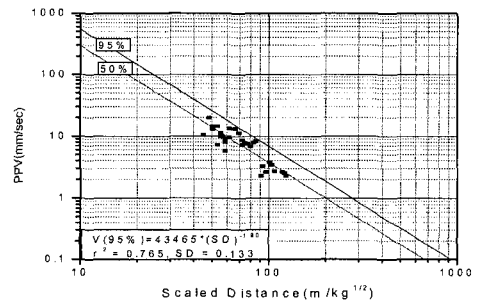


Fig. 9. Relationship of PPV and square root scaled distance (≥ 60 Hz)

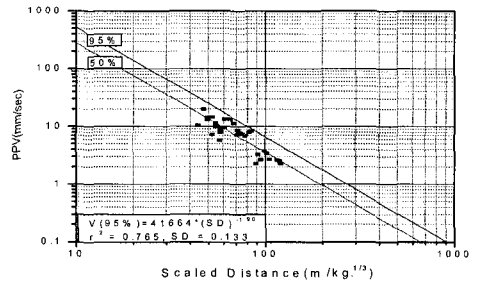


Fig. 10. Relationship of PPV and cube root scaled distance (≥ 60 Hz)

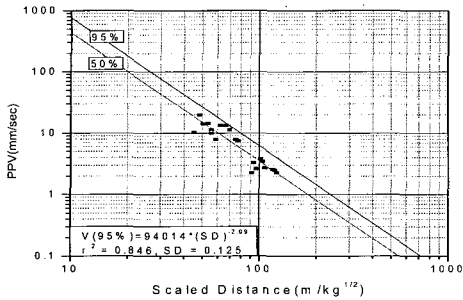


Fig. 11. Relationship of PPV and square root scaled distance ( $\geq 70$  Hz)

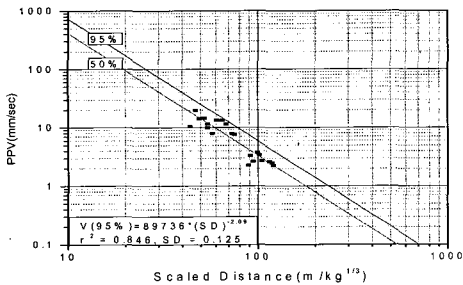


Fig. 12. Relationship of PPV and cube root scaled distance ( $\geq 70$  Hz)

$$r^2 = 0.765 \quad (6)$$

70 Hz 이상의 경우

$$V = 94014 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.09} \quad (7)$$

$$V = 89736 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.09} \quad (8)$$

### 5.3 분석결과

주 주파수에 따른 협동장약의 분석을 위해 전체자료와 주 주파수별(<60 Hz,  $\geq 60$  Hz,  $\geq 70$  Hz) 회귀분석을 하였다. 분석결과 Table 4와 같이 측정된 50개의 전체 자료를 분석한 결과 결정계수(Coefficient of Determination,  $r^2$ )의 값은 0.778로 나타났으며, 60 Hz 미만과 60 Hz 이상의 결정계수는 각각 0.812, 0.765로 나타났다. 또 60 Hz 이상의 측정자료 중 70 Hz미만의 자료를 제외한 70 Hz 이상의 측정 자료를 분석한 결과 결정계수의 값은 0.846으로 가장 높게 나타났다.

전체 자료의 결정계수가 낮은 이유는 서로 다른 주파수 특성을 가진 자료를 한꺼번에 처리한 결과라고 판단

Table 4. Coefficient of Determination

	All data	<60Hz	$\geq 60$ Hz	$\geq 70$ Hz
$r^2$	0.778	0.812	0.765	0.846

된다.

또 60 Hz 미만의 결정계수와 70 Hz 이상의 결정계수가 상대적으로 높은 이유는 주파수 특성에 따른 협동장약을 잘 설명해 주는 결과로 생각된다. 그리고 60 Hz 이상의 자료를 포함한 분석에서 결정계수가 가장 낮았는데 이것은 60 Hz~70 Hz 대역으로 측정된 진동 속도들은 증폭과 감쇄의 차가 커서 측정 자료를 분산시킨 결과로 판단된다.

결과적으로 어떤 지역의 진동 측정 자료를 분석하는데 있어서 신뢰도를 높이기 위해서는 주 주파수를 고려하여 발파진동 전파식을 설정해야 할 것으로 생각된다.

## 6. 결 론

본 연구는 40 ms 간격으로 분리되어 기록되는 계측 자료들의 주 주파수를 고려한 협동장약 특성을 알아보기 위해 파형 분석을 하였다. 또한 주 주파수별로 회귀 분석하여 결정계수를 비교 분석한 결론은 다음과 같다.

- 1) 파형분석 결과 115 m의 경우 7단, 40 m의 경우 8단의 분리가 이루어 졌다. 근거리의 경우가 원거리의 경우보다 고주파수가 우세하기 때문에 파형의 분리가 잘 이루어 진 것으로 생각된다.
- 2) 측정된 50개의 전체 자료를 분석한 결과 결정계수의 값은 0.778로 나타났으며, 60 Hz 미만과 60 Hz 이상의 결정계수는 각각 0.812, 0.765로 나타났다. 또 60 Hz 이상의 측정자료 중 70 Hz미만의 자료를 제외한 70 Hz 이상의 측정 자료를 분석한 결과 결정계수의 값은 0.846으로 가장 높게 나타났다.
- 3) 결정계수는 전체 자료를 분석한 결과에 비해 60 Hz 미만과 70 Hz 이상으로 분리하여 분석한 결정계수가 상대적으로 높은 것은 주파수에 따른 협동장약의 특성을 잘 설명해 주는 결과로 생각된다.
- 4) 60 Hz 이상의 자료를 포함한 분석에서 결정계수가 가장 낮았는데 이것은 60 Hz~70 Hz 대역으로 측정된 진동 속도들은 증폭과 감쇄의 차가 커서 측정 자료를 분산시킨 결과로 판단된다.

결론적으로 신뢰성이 높은 발파 진동 측정 자료를 분석하기 위해서는 주 주파수를 고려하여 발파진동 전파

식을 설정해야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 2003년 조선대학교 교비 지원에 의하여 시행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) U. Langefors and B. Kihlstrom, The modern technique of Rock Blasting, Third edition, 1978, pp. 258~293.
- 2) Charles H. Dowding, Blast Vibration Monitoring and

- Control, 1984, pp. 7~22, 24~40.
- 3) Stig O. Olofsson, Applied Explosives Technology for Construction and Mining, 1990, pp. 219-221.
- 4) Per-Anders Persson, Roger Holmberg, Jaimin Lee, Rock blasting and explosives engineering, 1992, pp. 361-365.
- 5) 양형식, 범진삼, 주재성, "진주 나동 터널 지중발파의 진동 특성에 관한 연구", 한국 자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집, pp. 3-7.
- 6) 류창하, "발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측", 한국자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집, 1995, pp. 132-141.
- 7) 김대상 외, "발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구", 한국자원공학회지, Vol. 28, 1991, pp. 444~454.



강추원

1973년 조선대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1981년 조선대학교 공과대학 자원공학과  
공학석사  
1999년 강원대학교 대학원 자원공학과 공  
학박사  
Tel: 062-230-7117  
E-mail: cwkang@mail.chosun.ac.kr  
현재 조선대학교 자원공학과 교수



김종인

1994년 조선대학교 자원공학과 공학사  
1996년 조선대학교 자원공학과 공학석사  
Tel: 062-230-7876  
E-mail: nam4tin@nate.com  
현재 조선대학교 대학원 자원공학과 박  
사수료