

## 협동장약을 고려한 MS 지발 발파 특성 연구

강추원<sup>1)</sup>, 김종인<sup>2)</sup>, 박정봉<sup>3)</sup>

### A Study on the Characteristics of MS Delay Blasting Considering Cooperating Charge

Choo-Won Kang, Jong-In Kim and Joung-Bong Park

**Abstract** : The waveform at the blasting pattern using MS delay electronic detonator depends on the interference of adjacent delay time according to the degree of distance and frequency. The degree of interference affects the size of blasting vibration at a measuring point. This study analyzed the cooperating charge characteristics of MS delay blasting separately detonated at intervals of 40ms and presented through frequency the delay time design method that is able to reduce the cooperation of blasting vibration at the MS delay blasting.

**Key words** : interference, cooperation charge, frequency, MS delay blasting

**초 록** : MS 지발 전기뇌관을 사용하는 발파형태에 있어 파형은 거리와 주파수 정도에 따라 인접 단차 간 간섭의 정도가 상이하다. 이 간섭의 정도는 계측지점에서 발파진동의 크기에 영향을 미친다. 본 연구에서는 40ms 간격으로 분리되어 기폭되는 MS 지발 발파의 협동장약 특성을 고찰하고 MS 지발 발파에서 발파진동의 협력을 최소화 할 수 있는 주파수에 따른 시차 설계 방법을 제시하였다.

**핵심어** : 간섭, 협동장약, 주파수, MS 지발 발파

#### 1. 서 론

발파공해에 관한 사항은 생활수준의 향상으로 인한 환경에 대한 관심과 더불어 국내외적으로 다양한 연구가 이루어져 왔다. 특히 발파 작업 중 진동은 가장 빈번한 환경 문제가 되고 있다. 발파 진동의 문제를 취급할 때 평가 기준으로 많이 사용되는 것이 지반진동의 수준과 주파수 이다.

발파 진동을 연구할 때 전파해오는 진동의 크기를 연구하는 분야와 전파해 온 진동이 구조물이나 인체 혹은 가축 등에 미치는 영향의 정도를 연구하는 분야로 나누어 생각할 수 있으며 두 가지 모두 시간영역과 주파수영역의 연구가 병행 되어야 하는 것은 필수적이다.

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 주파수와 지발단차에 따른 협동장약(cooperating charge)<sup>1,3,4)</sup>에 대해서도 연구가 진행되었다.

국내의 경우 임한욱, 김재동, 류창하, 김대상<sup>5,6,7)</sup> 등은 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구를 수행하였다. 또 김진수, 임한욱<sup>8)</sup>은 진동 이력분석을 응용한 발파 진동 파형의 특성연구를 시행하였다.

현재 국내에서 많이 사용되고 있는 MS지발 전기뇌관을 사용하는 발파형태에 있어 발파 진동 파형은 거리와 주파수 정도에 따라 파의 간섭 정도가 상이하다. 이 간섭의 정도는 계측지점에서 발파진동의 크기에 영향을 미치며, 주파수 특성에 따라 발파진동 전파식에 영향을 주는 것으로 연구되었다.<sup>9)</sup>

1) 조선대학교 교수

2) 조선대학교 박사수료

3) 덕원 Blast System 대표

접수일 : 2005년 9월 16일

본 연구에서는 40ms 간격으로 분리되어 기폭되는 MS지발 발파의 협동장약 특성을 연구하고 MS 지발 발파의 발파진동의 협력을 최소화 할 수 있는 주파수에 따른 시차 설계 방법을 제시하였다.

2. 협동장약과 시차

2.1 협동 장약

지반의 최대 입자 속도는 단당 최대 장약량(W), 즉 정해진 시간 내에 폭굉하는 폭약의 양과 밀접한 관계가 있다. 여기서 최대 장약량은 8ms 내에 폭굉하는 장약량으로 간주하는 것이 관례이다. 그러나 매질의 전파 속도, 장약간의 거리, 기폭 진행 방향과 같이 다른 인자와 함께 구조적으로 파가 강화되어 유효 장약량을 변화시킬 가능성도 있으며 상황에 따라 분석해야 한다.

여기서 유효 장약량을 변화시킬 가능성은 다른 단차간의 협동과 동일 단간의 협동으로 해석할 수 있다.

협동장약(cooperating charge)<sup>1,3,4)</sup>이란 장약공의 측면에서 동시에 기폭되는 장약 또는 8ms 이하의 시차로 기폭되는 장약 전체(지발당 장약량)<sup>10)</sup>를 말하며, Fig. 1과 같이 진동 파형의 의미에서는 파형의 중첩을 야기한 총장약량을 의미한다. 즉, 지발당 장약과 파형 중첩을 야기한 총 장약의 두 가지 의미를 갖는 말이라고 생각된다. 이런 의미에서 협동장약은 정확한 양적인 표현이 용이 하지 않다. Fig. 1은 동일한 지연시차(동일한 뇌관번호)를 갖는 1과 2의 두 발파공에 대해 가까운 거리의 A지점에서 계측한 결과 파형이 분리되어 두 발파공이 협동하지 않았으며, 먼 거리인 B지점에서 계측한

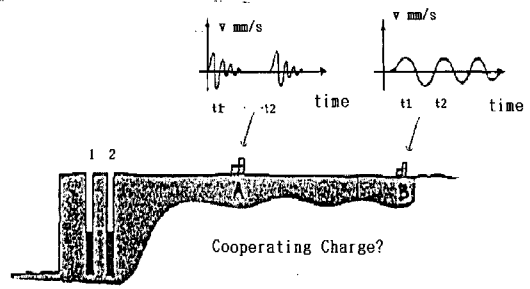


Fig. 1. Cooperation charge.

결과는 파형이 분리되지 않아서 두 발파공은 협동하였다.

2.2 Langefors의 시차이론

다른 단차간의 협동

지발뇌관을 사용함에 있어서 고려해야 할 것은 발파진동의 주기(T)와 사용뇌관의 시차관계이다. Langefors의 시차이론은 다음 식(1)과 같다.

$$\tau = HT \tag{1}$$

여기서,  $\tau$  : 지발뇌관의 시차

H : 상수

T : 발파 진동의 주기

H값이 0.5, 1.5, 2.5일 때 진동의 감쇄가 가장 좋고 H값이 정수일 때 진동의 증폭이 가장 크다. 또  $\tau > 3T$ 일 때 다른 단차간의 협동은 없다. 그러므로 서로 다른 단차간의 협동은  $\tau > 2.5T$ 일 때 일어나지 않는다고 가정 할 수 있다.

Table 1. Reduction factor by detonator delay time scatter

f (c/s)	T (ms)	v				
		$\Delta\tau = \pm 5$	$\pm 10$	$\pm 25$	$\pm 100$	$\pm 200ms$
5	200	1	1	1	1/2	1/3
10	100	1	1	1	1/3	1/6
20	50	1	1	1/2	1/6	1/6
50	20	1	1/2	1/3	1/6	1/12
100	10	1/2	1/3	1/6	1/12	1/25
200	5	1/3	1/6	1/6	1/25	1/50
500	2	1/6	1/6	1/12	1/50	1/100

**동일 단간의 협동**

발파에서의 지연시간은 대부분 뇌관의 지발에 좌우되고 있다. 불행히도 뇌관의 오차 때문에 계획된 지연시간이 현장에서 이루어지지 않는 경우가 있다. 이러한 오차들은 배열에서 일어날 수 있는 무작위 인적 오차, 제조상의 통계적 오차 및 규칙적 오차 등이 있다. 인적 오차가 가장 빈번하게 일어나는 오차인데 발화시간 오차의 가능성에 주의한다면 제조상의 오차와 마찬가지로 조절할 수 있다.<sup>2)</sup>

국내에 시판중인 MS 뇌관의 발화 시간의 오차는 5%(H사), 0.06~4.09ms (K사)로 발표되어 있다. Langefors는 Table 1과 같이 발화시간의 오차에 따른 감소 인자( $\nu$ )를 고려하여 협동 장약을 설명하였다.

**3. 현장 특성 및 계측**

**3.1 측정지역의 특성**

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

**3.2 발파 조건 및 측정 결과**

발파 장소는 도로확장 및 포장공사 현장의 IC 개설구간이며 발파 진동의 계측은 4대의 계측기를 사용하여 동일한 방향의 동일 선상에서 계측하였다.

발파작업은 Fig. 2와 같이 45mm의 천공경에 Emulsion 계 폭약( $\phi$  32mm)을 사용하였으며, 천공장 2.7m, 공간격 0.9m, 최소저항선 0.9m의 조건으로 발파를 실시하였다.

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

측정 결과 총 50개의 자료를 획득하였다. 측정된 자료는 Table 3과 같으며, 최대 입자 속도의 경우 수직 성분(V) 0.921~10.3 mm/sec, 접선성분(T) 1.25~19.7mm/sec, 진행방향(L) 성분은 1.81~18.8mm/sec로 계측되었다.

Table 2. Blasting condition

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

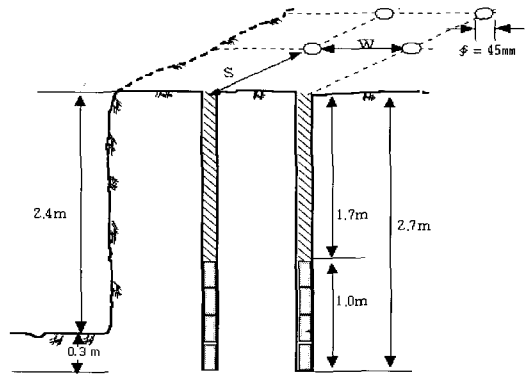


Fig. 2. Blasting pattern.

**4. 분석**

**4.1 Langefors 시차 이론의 검토**

Langefors의 시차 이론 중 다른 단차간의 협동에 의한 진동의 감소 혹은 증폭의 정도를 파형 중첩 모델링에 의하여 검토하였다.

발파 진동은 충격진동과 자유 진동으로 구분하여 해석할 수 있다.<sup>6)</sup> 또 먼저 전파해은 자유 진동은 다음단의 충격 진동과 중첩되어 협동하거나 짧은 시차 또는 저 주파수의 영역에서는 먼저 전파한 충격진동과 다음단의 충격진동과 협동할 수도 있다. 그러므로 시차 모델링은 충격진동과 자유진

Table 3. Measuring 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

동을 모두 포함하는 약 100ms의 지속시간을 갖은 단일 공 발파 파형에 대해 실시하였다. 모델링에 사용된 기준파형은 1kg의 장약량으로 33m에서 계측된 자료이며 모델링에 사용된 조건은 다음과 같다.

- 공수 : 15공
- 기준파형의 주 주파수 :  
 $f=110\text{Hz}$ ,  $T=9\text{ms}$
- 시차 결정 식 :  $\tau = HT$   
 $H=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3$

각각 상수 H에 대한 시차 모델링결과 Fig. 3과 같이 나타났으며 Fig. 4는 시차 모델링 결과 파형과 기준 파형의 FFT분석 결과이다. 기준 파형의 최대 진동속도와  $\tau$ 의 변화에 따른 최대 진동속도는 Table 4와 같다.

분석 결과에 따르면 0.5, 1.5 그리고 2.5T일 때를 제외하고 모두 진동이 증가하였으며 1T일 때 가장

큰 진동의 증폭이 발생했다.

Langefors의 시차이론에 따르면 단간 시차가 3T 이상일 경우 단차간의 협동은 없는 것으로 간주하였다. 그러나 약간의 진동의 증가하였으며 그 폭은 4%로 미소하였으며 대체적으로 Langefors의 시차이론에 잘 부합하였다.

#### 4.2 통계 처리에 의한 분석

계측된 50개의 자료를 회귀 분석하였다. 분석은 50개 자료를 모두 포함하는 결과와 60Hz 미만, 60Hz이상, 그리고 70Hz이상에 해당하는 95% 신뢰구간의 삼승근 회귀분석 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

분석 결과 60Hz 미만의 자료들이 대략 SD=50 이상에서 가장 낮은 진동 전파 특성을 보였으며, 70Hz이상과 전체자료에 대한 분석결과는 거의 일치하여 중간에 위치하였다. 또 60Hz이상에 대한 결과는 가장 높은 진동 전파특성을 보였다. 70Hz 이상의 자료들을 대표 특성이라고 볼 때 60Hz 이하의 자료들은 주로 감쇄 특성으로 60Hz

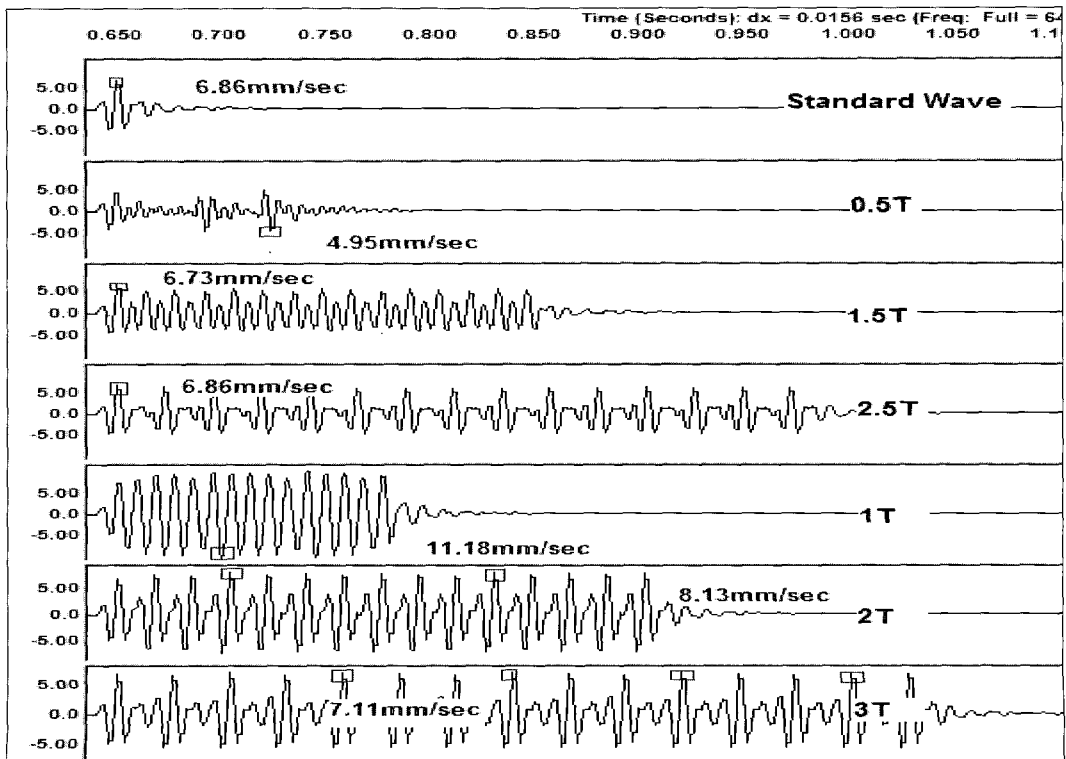


Fig. 3. Wave overlap modeling.

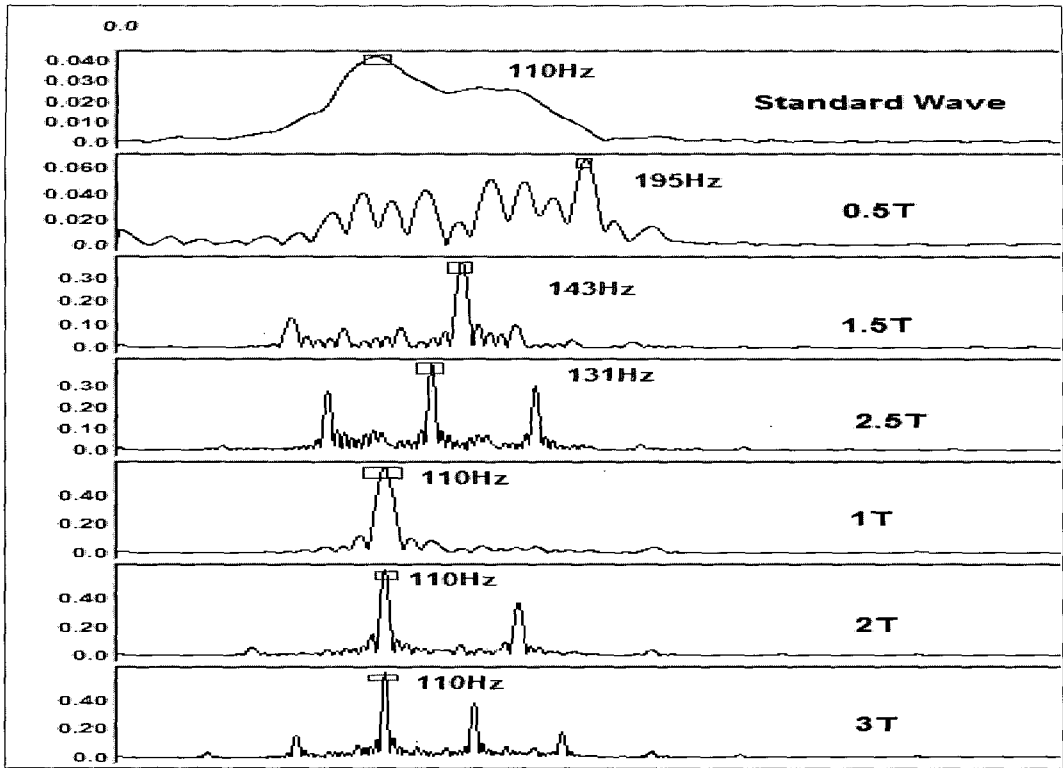


Fig. 4. FFT of delay time by 0.5T, 1T, 1.5T, 2T, 2.5T and 3T.

Table 4. Modeling result

H	$\tau$ (ms)	PPV (mm/sec)	%
Standard	0	6.86	100
0.5	5	4.95	72
1	9	11.8	172
1.5	14	6.73	98
2	18	8.13	119
2.5	23	6.86	100
3	27	7.11	104

~70Hz 사이의 자료들은 증폭 특성을 보인 결과로 생각된다.

즉, 주파수에 따른 회귀분석결과에 의하면 모든 저주파가 진동을 증폭시키지는 않으며 또 모든 고주파가 진동을 감쇄시키지는 않는 것으로 보인다. 그러므로 지발 시차가 진동의 증감에 대단히 큰 부분을 차지하는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 PPV와 주파수에 따른 거리를 도시하였으며 상단에는 FFT 주파수 분석 결과에 의한 주파수가 도시되었으며 하단에는 발파진동의 삼성분 중 가장 큰 PPV가 도시되었다.

본 연구의 MS 지발 발파의 단차 간 시차는 40ms이므로 Langefors의 시차이론에 의하면  $T=40ms(f=25, \tau=1T)$ 일 때 가장 진동의 증폭이 많

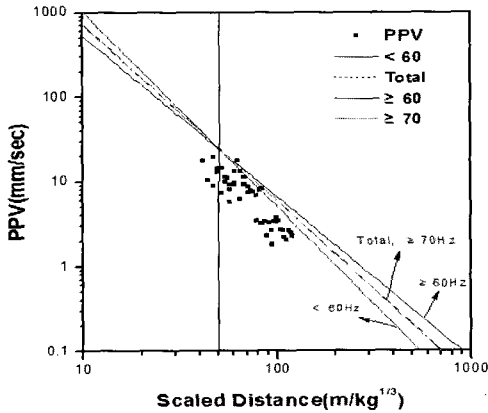


Fig. 5. Regression analysis result by frequency.

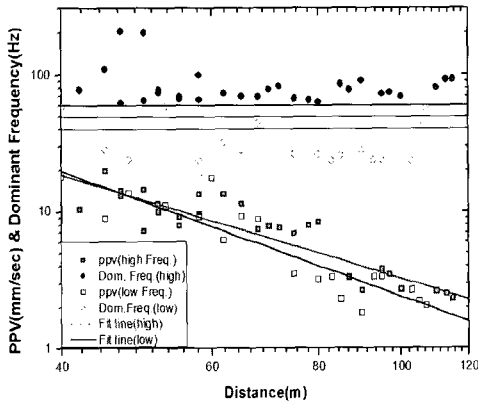


Fig. 6. Relation of PPV, dominant frequency and distance.

이 이루어질 것으로 예상 하였으나 그런 결과는 보이지 않았다. 이것은 MS 지발 발파로 주 주파수가 바뀐거나 지발뇌관의 발파 오류에 기인한 결과로 생각된다.

### 5. 주파수에 따른 시차 설계

상기에 논의 되어진 바와 같이 시험발파에 의해 분석된 주파수 특성을 통해 동일한 발파에 대해서도 다른 주파수 특성을 보이는 개개 장소의 중요도 혹은 거리에 따라서 공법의 변경 없이 발파 진동을 최소화 할 수 있는 시차 설계가 가능할 것으로 생각된다.

그러나 현재 국내 여건상 시차 조정에 있어 상

Table 5. Determination of delay time by frequency

f (c/s)	T (ms)	τ (ms)	
		H=2.5	H=2
200	5	12.5	10
125	8	20	16
100	10	25	20
70	14	35	28
60	17	42.5	34
50	20	50	40
40	25	62.3	50
30	33	82.5	66
20	50	125	100
10	100	250	200
5	200	500	400

당히 진보된 전자 뇌관의 사용이 일반화 되지 못한 점 안타깝게 생각한다. Table 5는 주파수에 따른 지발 시차의 결정에 관한 표이다.

시차 결정에 자유롭지 못하는 전기 뇌관과 비전기식 뇌관이 주로 사용되는 국내 여건과 뇌관의 발파 오차를 감안한다면  $\tau > 3T$ 에 의한 시차 설계가 바람직할 것으로 생각된다.

### 6. 결론

본 연구에서는 40ms 간격으로 분리되어 기폭되는 MS 지발 발파의 협동장약 특성을 연구하고 MS 지발 발파의 발파진동의 협력을 최소화 할 수 있는 주파수에 따른 시차 설계에 대해 연구하였다.

- 1) 분석 결과에 따르면 0.5, 1.5, 그리고 2.5T일 때를 제외하고 모두 진동이 증가하였으며 1T일 때 가장 큰 진동의 증폭이 발생했으며 대체적으로 Langefors의 시차이론에 잘 부합하였다.
- 2) 주파수에 따른 회귀분석결과에 의하면 모든 주파수가 진동을 증폭시키지는 않으며 또 모든 고주파가 진동을 감쇄시키지는 않는 것으로 보인다. 그러므로 지발 시차가 진동의 증감에 대단히 큰 부분을 차지하는 것으로 생각된다.

- 3) 시차 결정에 자유롭지 못하는 전기 뇌판과 비 전기식 뇌판이 주로 사용되는 국내 여건과 뇌판의 발화 오차를 감안한다면  $\tau > 3T$ 에 의한 시차 설계가 바람직할 것으로 생각 된다.

### 참고문헌

1. Langefors, U. and B. Kihlstrom, 1978, The modern technique of Rock Blasting, Third edition, pp. 258-293.
2. Dowding, C. H., 1984, Blast Vibration Monitoring and Control, pp. 7-22, 24-40, 241.
3. Olofsson, S. O., 1990, Applied Explosives Technology for Construction and Mining, pp. 219-221.
4. Persson, P.-A., R. Holmberg and J. Lee, 1992, Rock blasting and explosives engineering, pp. 361-365.
5. 임한옥, 김재동, 1992, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 29, pp. 146-157.
6. 류창하, 1995, 발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측, 한국자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집, pp. 132-141.
7. 김대상외, 1991, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 28, pp. 444-454.
8. 김진수, 임한옥, 1999, 진동이력분석을 응용한 발파 진동 파형의 특성에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol. 9, pp. 36-47.
9. 강추원, 김종인, 2005, 주 주파수를 고려한 협동장약 특성에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol. 15, No. 4, pp. 316-323.
10. Agnerustan, 1998, Rock Blasting Terms and symbols, pp. 40.



### 강 추 원

1973년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1981년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
1999년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학박사  
Tel : 062-230-7117

E-mail: [cwkang@mail.chosun.ac.kr](mailto:cwkang@mail.chosun.ac.kr)

현재 조선대학교 자원공학과 교수



### 김 종 인

1994년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1996년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학석사  
Tel: 062-230-7876

E-mail: [nam4tin@nate.com](mailto:nam4tin@nate.com)

현재 조선대학교 대학원 자원공학과 박사수료



### 박 정 봉

2000년 한국방송대학교 행정학과 행정학사  
2005년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학 석사

E-mail: [dukwon@paran.com](mailto:dukwon@paran.com)

현재 덕원 Blast System 대표