

중첩 모델링을 통한 발파진동의 특성에 관한 연구

강추원^{1)*}, 김승현²⁾, 박현식³⁾

A Study on the Characteristics of Blasting Vibration by Superposition Modeling

Choo-Won Kang, Seung-Hyun Kim and Hyun-Sik Park

Abstract In this study, the vibration waveform of the single hole which is not interfered from the different blasting holes is separated, the each dominant frequency which is determined through the Fast Fourier Transform (FFT) is measured. Also the separation waveform executed a superposition modeling which changes to delay time from 1ms to 80 ms in 1ms interval and controls the number of blasting holes from 2 holes to 15 holes in order to investigate the effect of PPV according to the duration time of the vibration and the number of blasting holes. As a result of analysis, the longer the duration time of the vibration, the longer the delay time which is not interfered from the different blasting holes and the effect regarding the number of blasting holes from inside identical delay time did not appear a lot.

Key words Superposition modeling, Dominant frequency, Blasting vibration, 8 ms Criterion

초 록 본 연구에서는 측정된 진동파형을 토대로 다른 발파공들로부터 간섭을 받지 않은 단일공의 진동파형을 분리 하였고, 이를 FFT 주파수 분석을 통하여 우세 주파수를 분석하였다. 또한 진동의 지속시간과 발파공수가 PPV에 미치는 영향을 검토하기 위해 분리된 진동파형을 2~15공으로 발파공수를 조절하면서 1~80 ms까지 1 ms의 간격으로 지연시차에 변화를 주며 발파진동에 중첩 모델링을 실시하였다. 그 결과 진동의 지속시간이 길어질수록 다른 발파공들로부터 간섭받지 않기 위한 지연시차 또한 길어졌고, 동일 지연시차 내에서의 발파공수에 관한 영향은 크게 나타나지 않았다.

핵심어 중첩 모델링, 우세 주파수, 발파진동, 8 ms 기준

1. 서 론

발파진동의 전파특성을 결정짓는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있으며, 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등을 말하고, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭발원과 측정간의 거리 등을 말한다.¹⁾

이 요인들 모두가 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치게 되며, 이 중에서 특히 지발당 장약량과 측

점간의 거리가 가장 중요한 요인으로 작용한다. 하지만 측정간의 거리는 조절 불가능한 변수인 반면 지발당 장약량은 조절 가능한 변수로서 동일한 발파조건일 경우 발파진동의 크기를 결정짓는 가장 중요한 요인이 된다.

현재 우리나라의 지발당 장약량은 발파진동의 특성을 배제한 채 단순히 8 ms 지연시차 이내의 최대 장약량으로 규정하고 있는 실정이다. 이 기준은 1960년 Duvall 등에 의해 실시된 연구²⁾를 바탕으로 마련된 것으로 지금까지는 커다란 문제 제기 없이 받아들여지고 있었으나, 더욱 심해지는 발파 소음진동의 규제에 의해 8 ms의 한계성이 대두되고 있다.

외국의 경우에는 발파진동의 특성을 이용한 진동 저감 방법 등이 연구 되어 현장 실무에 이용되고 있으며, 안전 발파의 한계를 보다 명확하게 설정하기 위해 발파진동의 주파수 분석과 지반 및 구조물의 변형에 대한 연구가 이루어져 왔다.^{3,4)}

또한 국내의 경우에도 발파에 의한 지반진동의 수준

¹⁾ 정희원, 조선대학교 자원공학과 교수

²⁾ 조선대학교 일반대학원 자원공학과 석사과정

³⁾ 조선대학교 일반대학원 자원공학과 박사수료

* 교신저자 : cwkwang@mail.chosun.ac.kr

접수일 : 2006년 6월 29일

심사 완료일 : 2006년 7월 21일

및 주파수 특성 예측과 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구를 수행하는 등 많은 연구가 진행되어 오고 있다.^{5),6)}

이처럼 발파진동의 특성을 배제한 8 ms 기준에 의한 뇌관 시차설계는 더욱 심해지는 발파 소음·진동의 규제에서 벗어나기 힘든 실정이고, 이는 발파작업의 수행을 저해하는 결과를 초래 하게 될 것이다.

그러므로 본 연구에서는 발파진동을 특성을 알아내기 위해 측정된 진동파형을 토대로 다른 발파공들로부터의 간섭받지 않는 단일공의 진동파형을 분리하였으며, 이를 FFT 분석을 통해 우세 주파수를 분석하였다. 또한 분리된 진동파형을 2~15공으로 발파공수를 조절하면서, 1~80 ms까지 1 ms의 간격으로 지연시차에 변화를 주어 발파진동의 중첩 모델링을 실시하였다. 이로 인해 진동 지속시간의 길이와 지연시차와의 연관성, PPV (Peak Particle Velocity)에 미치는 발파공수의 영향 등을 분석하였으며, 또한 우세 주파수와 지연시차와의 관계를 검토하였다.

2. 발파진동에 관한 이론

2.1 Langefors의 시차이론

지발 뇌관을 사용함에 있어서 고려해야 할 것은 발파진동의 주기(T)와 사용 뇌관의 시차관계이다.

Langefors의 시차이론은 다음과 같다.

$$\tau = HT \quad (1)$$

여기서, τ : 지발뇌관의 시차

H : 상수

T : 발파진동의 주기

H 값이 0.5, 1.5, 2.5일 때 진동의 감쇠가 가장 좋고, H 값이 정수일 때 진동의 증폭이 가장 크다. 또 $\tau > 3T$ 일 때, 다른 단차간의 협동은 없다. 그러므로 서로 다른 단차간의 협동은 $\tau > 3T$ 일 때 일어나지 않는다고 가정할 수 있다.⁶⁾

2.2 8 ms 기준에 대한 고찰

회귀분석에 이용되는 환산거리(Scaled Distance, $R/W^{1/2}$, $R/W^{1/3}$)는 발파진동의 측정지점에서부터 가장 가까운 발파공까지의 거리(R)를 8 ms 지연시차마다 총장약량의 제곱근($W^{1/2}$), 또는 세제곱근($W^{1/3}$)으로 나누어 준 것으로 정의된다.

8 ms 기준은 1960년에 Duvall, Johnson, Meyer 그리고 Devine에 의해 실시된 연구로 제시되었으며, 1963

년에 미광무국(USBM)의 RI 6151로 간행되어졌다.²⁾

그 연구는 한 곳의 석회석 채석장에서 실시되었으며, 150~3000 ft의 거리에서 공당장약량 200 pound로 하여 8번의 제발 발파와 9, 17, 34 ms의 지연시차로 11번의 지발 발파를 수행하였고, 8곳의 지점에서 발파진동을 계속하였다.

이 연구 결과에 의해 Duvall 등은 진동파형이 구조적으로 간섭하지 않게 하기 위해서는 8 ms의 지연시차를 사용해야 한다고 주장했고, 그 당시에는 타당한 이론으로 받아들여졌다.

하지만 8 ms 기준의 한계는 주파수의 영향이 고려되지 않았다는 점이다. 주파수는 인간과 구조물의 응답에 있어서 진동속도와 동등하게 중요한 매개변수로서 진동속도와는 상호 의존적인 관계이기 때문에 주파수의 영향이 고려되지 않은 8 ms 기준은 한계에 도달할 수밖에 없다. 물론 8 ms 기준은 그 연구지역에서의 주파수 대역(20~50 Hz)을 갖는 곳에서 적합한 기준이 될지는 모르지만, 저주파수의 현장에서는 진동이 분리되기에는 너무 짧은 시간이며 불합리적이다.⁷⁾

또한 8 ms 기준은 뇌관의 기폭 정확도를 고려하지 않았는데, Davey Bickford USA에 의해 시행된 Conventional shock tube initiators의 기폭 정확도 시험에 의하면 400ms의 비전기식 뇌관의 점화 오차는 -4.25%에서 +7%(383~428 ms)로 나타났다. 그리고 연결용 뇌관(지연시차 9, 17, 25, 34, 42 ms)에 각각 400 ms 뇌관을 10개씩 연결하여 기폭순서를 검토한 결과 9 ms 배열은 50%, 17 ms 배열은 40%, 25 ms 배열은 20%의 뇌관이 기폭순서에 맞지 않게 기폭 되었고, 34 ms 배열은 인접한 두 공이 동시 기폭 되었으며, 42 ms 배열만이 올바른 기폭순서대로 기폭 되었다.⁸⁾ 이처럼 뇌관의 기폭오차가 큰 만큼 Duvall 등에 의해 시행된 연구도 설계된 시차대로 발파작업이 수행되지 않았을 가능성이 크며, 오차가 포함된 연구 결과의 타당성은 의문점이 제기될 수밖에 없다.

또한 외국의 경우에 Douglas Anderson은 1989년 Explosives and Blasting Technique의 제 15회 정기 총회에서 8 ms 기준에 대한 적용가능성의 의문점을 발표⁹⁾하는 등 많은 논쟁을 진행해왔다.

3. 시험발파개요

본 연구지역은 광주광역시 북구 각화동 일대의 「○○배수지 시설공사」 구간의 노출된 암반 제거 작업을 위한 곳으로 발파조건은 Table 1과 같이 천공경 45 mm, 공간격 1.0 m, 저항선 0.9 m, 천공장 2.5 m 조건으로 약경 32 mm Newmite Plus I(250 g/EA)을 사용하여 1

Table 1. Summary of test blasting

Conditions	NO.	1	2
	Drilling diameter (mm)		45
Drilling depth (m)		2.5	3.3
Burden (m)		0.9	1.2
Spacing (m)		1.0	1.3
Holes per delay		1	1
Number of holes		15	15
Charge per hole (kg)		0.75	1.60
Charge per delay (kg)		0.75	1.60
Total charge (kg)		11.25	24.00

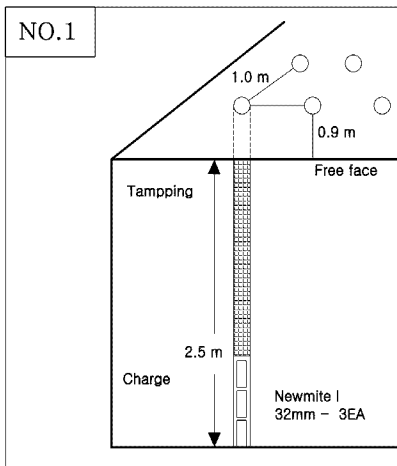


Fig. 1. Conditions of test blasting

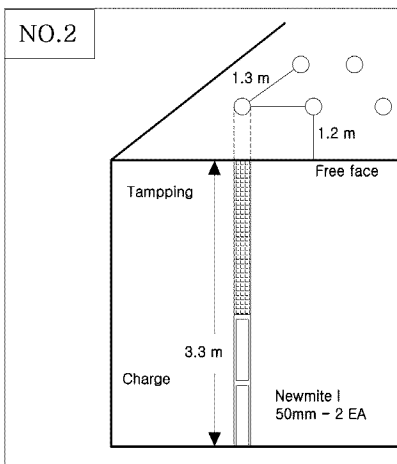


Fig. 2. Conditions of test blasting

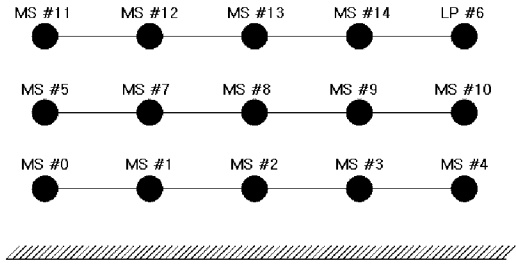


Fig. 3. Firing pattern

회 발파, 천공경 75 mm, 공간격 1.3 m, 저항선 1.2 m, 천공장 3.3 m의 조건으로 약경 50 mm Newmite Plus I(800 g/EA) 1회 발파, 총 2회 발파를 실시하였으며, Fig. 1과 Fig. 2에 각 시험발파의 조건을 도시하였다.

사용 뇌관은 Fig. 3과 같이 Hideto Plus MS 시리즈 전기뇌관과 발파진동파형 분리 분석을 위해 지연시차가 긴 LP 시리즈 전기뇌관을 사용하였다.

4. 측정 결과 및 분석

4.1 발파진동 측정결과

본 연구를 위하여 2대의 진동 측정기를 설치하였으며, 총 2회의 시험발파를 실시하였다. 그 결과 총 4개의 진동측정 자료를 획득하였으며 각각의 자료에 Sample Number를 부여하였다.

측정된 진동의 범위는 Table 2와 같이 수직성분 (Vertical)의 경우 0.683~9.14 mm/s, 접선성분(Transverse)의 경우 0.714~13.7 mm/s, 진행성분(Longitudinal)의 경우 1.06~16.1 mm/s로 나타났다.

4.2 발파진동 파형의 분리

측정된 4개의 자료 중 발파진동의 파형 분리가 양호한 Sample Number 1(이하 SN. 1으로 표기)과 Sample Number 4(이하 SN. 4로 표기)를 분석 자료로 선택하였으며, 선택된 2개의 자료로부터 다른 발파공의 간섭을 받지 않는 600~800 ms 시간대를 분리하여 분리된 단일공의 수직·접선·진행성분의 PPV(Peak Particle Velocity)를 측정하였다.

그 결과는 다음 Table 3과 같으며, SN. 1의 분리된 발파진동 파형에서는 접선성분이 5.08 mm/s, SN. 4에서는 진행성분이 1.413 mm/s로 다른 성분의 PPV보다 높게 측정되었으며, 본 연구에서는 진동의 해석에 있어서 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 이 성분들을 분석에 이용하였다.

Fig. 4에 SN. 1의 접선성분의 전체 진동파형을 나타내었고, Fig. 5에 다른 발파공들로부터 간섭을 받지 않은

600~800 ms 시간대의 분리 진동파형을 나타내었으며, 분리 진동파형의 PPV는 5.080 mm/s로 측정되었다.

Fig. 6에 SN. 4의 진행성분의 전체 진동파형을 나타내었고, Fig. 7에 다른 발파공들로부터 간섭을 받지 않은 600~800 ms 시간대의 분리 진동파형을 나타내었으며, 분리 진동파형의 PPV는 1.413 mm/s로 측정되었다.

4.3 FFT 분석에 의한 우세 주파수 결정

진동파형 분리 분석을 통해 얻어진 2개의 단일공 자

료에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 실시하여 우세 주파수(Dom. Frequency)를 결정하였다. 해석에 사용된 프로그램은 Instanet사의 Blastware Version 8.01이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 SN. 1과 SN. 4의 분리 진동파형에 대한 FFT 분석 결과로서, 각각의 우세 주파수는 164Hz와 79Hz로 나타났다.

Table 2. Result of vibration monitoring

Sample Number (SN.)	Max. Charge per delay (kg)	Distance (m)	Peak Particle Velocity (mm/s)			Measuring instrument
			Transverse	Vertical	Longitudinal	
1	0.75	30	5.08	1.65	4.06	Minimate Plus
2	0.75	70	0.714	0.683	1.06	DS-477
3	1.60	29	13.70	9.14	16.10	Minimate Plus
4	1.60	69	2.64	2.16	3.40	DS-477

Table 3. Result of separation waveform

Sample Number (SN.)	Peak Particle Velocity (mm/s)		
	Tran.	Vert.	Long.
1	5.08	1.27	3.43
4	0.523	1.032	1.413

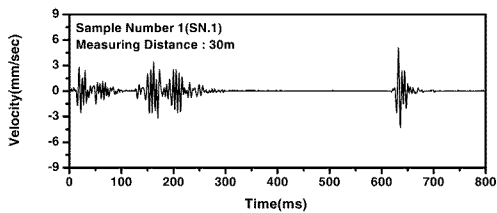


Fig. 4. Full waveform of SN. 1

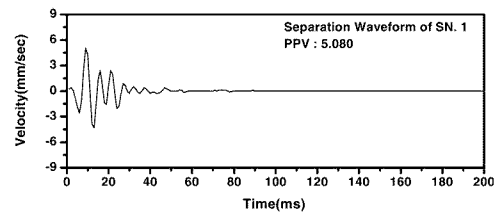


Fig. 5. Separation waveform of SN. 1

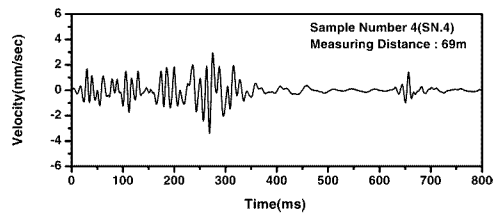


Fig. 6. Full waveform of SN. 4

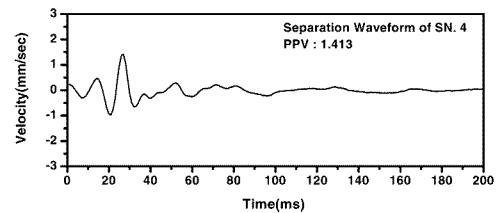


Fig. 7. Separation waveform of SN. 4

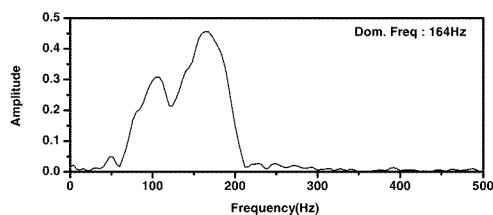


Fig. 8. Result of FFT analysis (SN. 1)

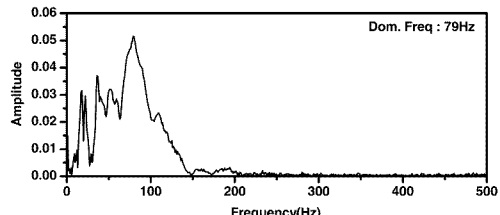


Fig. 9. Result of FFT analysis (SN. 4)

5. 중첩 모델링에 의한 발파진동 파형 분석

진동의 지속시간과 지연시차의 연관성 및 발파공수의 변화가 PPV에 미치는 영향 등을 검토하기 위하여 SN. 1과 SN. 4로부터 획득한 분리 진동파형을 각각 2~15 공으로 발파공수를 조절하면서 발파공들 사이의 지연시차를 1 ms부터 80 ms까지 1 ms 간격으로 증가시켜 중첩 모델링을 실시하였다. 중첩 모델링 설계에 사용된 프로그램은 Instancel사의 Blastware Version 8.01이다.

5.1 진동의 지속시간과 지연시차의 연관성 검토

발파 진동은 크게 충격진동과 매질의 탄성적인 성질에 의한 자유진동으로 구분할 수 있으며, 이러한 관점에서 발파진동의 지속시간은 충격진동의 지속시간과, 매질의 탄성적인 성질에 의한 자유진동의 지속시간이 합해진 것으로 해석할 수 있다.¹⁰⁾

하지만 본 연구에서는 단순히 진동 지속시간의 길이와 지연시차와의 연관성을 알아보기 위해 임의적으로 분리 진동파형 PPV의 20%이상의 진동(SN. 1 : 1.016 mm/s, SN. 4 : 0.283 mm/s)이 발생하는 시점까지만 진동의 지속시간으로 구분하였으며, 이를 통해 SN. 1은 25 ms, SN. 4는 70 ms로 진동 지속시간이 결정되었다.

또한 Fig. 10과 Fig. 11로부터 SN. 1은 지연시차 25 ms, SN. 4는 지연시차 70 ms를 기준으로 그 지연시차 이후 발파공수에 관계없이 분리 진동파형의 PPV와 같거나 거의 차이가 나타나지 않았다.

이는 진동의 지속시간과 발파공 사이의 간섭이 없어지는 지연시차가 일치함을 보여주며, 진동의 지속시간이 길어질수록 다른 발파공들에 의한 간섭을 받지 않기 위해서는 발파공들 사이의 지연시차 또한 길어져야 할 것으로 판단된다.

5.2 발파공수의 변화가 PPV에 미치는 영향

PPV에 미치는 발파공수의 영향을 알아보기 위하여 동일 지연시차대의 2~15공의 PPV를 비교 분석하였으며, 그 결과 SN. 1의 경우 지연시차 7~23 ms 사이에서 최대 PPV와 최소 PPV의 차가 분리 진동파형 PPV의 10%(0.508 mm/s) 내로 측정되었고, 24~80 ms 사이에서는 발파공수에 관계없이 동일한 PPV로 측정되었다.

또한 SN. 4의 경우에는 지연시차 5~58 ms 사이의 동일 지연시차 내에서 최대 PPV와 최소 PPV의 차가 대부분 분리 진동파형 PPV의 20%(0.283 mm/s)내로 측정되었고, 59~80 ms 사이에서는 발파공수에 관계없이 같은 지연시차 내에서 동일한 PPV로 측정되어 발파

공수의 영향은 크게 작용하지 않는 것으로 판단된다.

그리고 SN. 1의 지연시차 6 ms 이내와 SN. 4의 지연시차 4 ms 이내의 측정결과는 발파공수에 따라 진폭의 편차가 크게 측정되었으나, 발파공수의 증가에 따라 진폭이 커지지 않았다는 점에서 발파공수의 영향보다는 발파공들 사이의 진동의 보강 간섭과 상쇄 간섭에 의한 영향이 더욱 크게 작용되었을 것으로 판단된다.

위의 분석 자료를 토대로 PPV는 발파공수의 변화보다는 발파공들 사이의 지연시차에 의한 진동의 중첩, 즉 보강간섭과 상쇄간섭으로 인한 영향이 더욱 중요한 매개변수로 작용했다고 판단된다.

5.3 Langefors의 시차이론을 통한 결과 검토

FFT 분석에 의한 결과로서 SN. 1의 우세 주파수는 164 Hz, SN. 4의 우세 주파수는 79 Hz로 분석되었고, 식 $f=1/T$ 에 의해 주기 T 는 각각 약 6 ms와 13 ms가 된다.

Langefors 시차이론의 타당성 검토를 위하여 SN. 1과 SN. 4의 0.5T, 1T, 1.5T, 2T, 2.5T, 3T 및 이후의 특징적인 지연시차에서의 PPV를 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었으며, Fig. 10과 Fig. 11에 지연시차에 따른 PPV의 변화를 도시하였다.

SN. 1의 경우 0.5T의 지연시차에서 분리 진동파형 PPV(5.080 mm/s)의 25~42.5%의 감소를 보였으며 1.5T, 2.5T의 지연시차에서는 동일하거나 거의 차이(2% 증가)가 나지 않았다. 그리고 발파공수와는 크게 상관없이 1T에서는 200%, 2T에서는 47.5%, 3T에서는 20%의 증가를 보였다.

SN. 4의 경우 또한 0.5T의 지연시차에서 분리 진동파형 PPV(1.413 mm/s)의 20~47% 감소, 1.5T에서 5.6%의 감소에서 25.8% 증가, 2.5T에서 9% 증가를 보였으며, 1T에서 32~60%, 2T에서는 18~45%, 3T에서 3.4~11% 증가를 보였다.

그리고 3T 이상의 지연시차에서는 SN. 1이 분리 진동파형 PPV의 0~12.5%(5.080~5.715 mm/s), SN. 4는 0~25.8%(1.413~1.778 mm/s) 증가를 보였다.

이 분석 결과는 H 값이 0.5, 1.5, 2.5 일 때 진동의 감쇠가 가장 좋고, H 값이 정수일 때 진동의 증폭이 가장 크다는 Langefors의 시차이론과 잘 부합된다. 그리고 3T를 초과하는 지연시차에서 최대 25.8%의 증가(SN. 4)를 보였으나, 이는 SN. 4의 진동 지속시간이 상대적으로 길고, 분리 진동파형 PPV(1.413 mm/s)가 상대적으로 낮기 때문인 것으로 생각된다.

Table 4. PPV of SN. 1 per period (unit : mm/s)

SN.1	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
0.5T (3ms)	3.175	3.810	2.794	3.683	2.921	2.921	2.921	2.921	2.921	2.921	2.921	2.921	2.921	2.921
1T (6ms)	6.604	8.890	9.779	10.033	10.160	10.160	10.160	10.160	10.160	10.160	10.160	10.160	10.160	10.160
1.5T (9ms)	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207	5.207
2T (12ms)	7.493	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747
2.5T (15ms)	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080	5.080
3T (19ms)	5.715	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096	6.096
23ms	5.588	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715
28ms	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461
38ms	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461	5.461

Table 5. PPV of SN. 4 per period (unit : mm/s)

SN.4	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
0.5T (6ms)	0.921	1.016	0.762	0.968	1.080	1.000	0.873	0.762	0.746	0.921	1.095	1.127	1.111	1.048
1T (13ms)	1.873	2.096	2.080	2.191	2.159	2.223	2.207	2.207	2.238	2.238	2.238	2.238	2.254	2.254
1.5T (19ms)	1.334	1.524	1.445	1.635	1.572	1.572	1.683	1.683	1.667	1.667	1.730	1.699	1.730	1.778
2T (26ms)	1.667	1.889	2.016	2.000	2.096	2.048	2.048	2.048	2.048	2.048	2.048	2.048	2.048	2.048
2.5T (32ms)	1.461	1.540	1.540	1.540	1.540	1.540	1.540	1.540	1.540	1.540	1.540	1.540	1.540	1.540
3T (39ms)	1.476	1.461	1.461	1.461	1.508	1.508	1.508	1.508	1.540	1.572	1.572	1.572	1.572	1.572
46ms	1.588	1.651	1.699	1.699	1.730	1.746	1.778	1.778	1.778	1.778	1.778	1.778	1.778	1.778

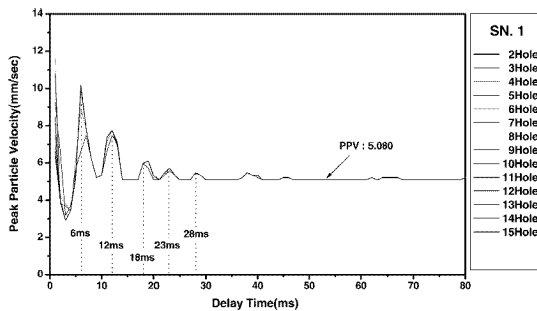


Fig. 10. Relationship between PPV and delay time by SN. 1

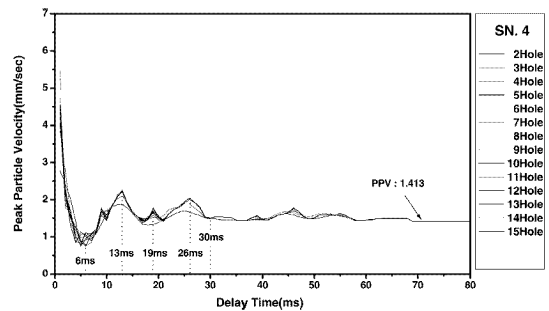


Fig. 11. Relationship between PPV and delay time by SN. 4

6. 결 론

본 연구는 발파진동의 중첩모델링을 통한 발파진동의 특성을 알아보기 위해 측정된 발파진동 파형을 토대로 다른 발파공들로부터 간섭받지 않는 단일공의 진동파형을 획득하였으며, FFT 분석을 통해 이 진동파형의 우세 주파수를 결정하였다. 또한 분리된 진동파형을 2~15 공으로 발파공수를 조절하면서 1~80 ms까지 1 ms의 간격으로 지연시차에 변화를 주어 발파진동을 중첩 모델링하였다. 이로 인해 변화하는 발파진동의 특성을 비교 분석한 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 측정된 발파진동 SN. 1과 SN. 4를 분리 분석하여 각각의 수직·접선·진행성분의 PPV(Peak Particle Velocity)를 측정하였다. 분리한 진동파형의 성분별 PPV는 SN. 1에서 접선성분이 5.08 mm/s, SN. 4에서 진행성분이 1.413 mm/s로 가장 크게 측정되었으며, FFT 주파수 분석에 의해 각각의 우세 주파수는 164 Hz와 79 Hz로 나타났다.
- 2) 본 연구에서의 진동 지속시간은 SN. 1이 25 ms, SN. 4는 70 ms로 결정되었으며, 이 지속시간은 분리 진동파형의 PPV와 동일하거나 거의 차이가 나타나지 않기 위한 최소의 지연시차와 일치하였다.
- 3) 발파공수를 2~15공으로 변화시키면서 1 ms 간격으로 80 ms까지 진동 중첩 모델링을 실시한 결과, SN. 1의 경우 지연시차 7 ms 이상에서 동일 지연시차 내의 최대 PPV와 최소 PPV의 차가 분리 진동파형 PPV의 10%(0.508 mm/s), SN. 4의 경우에는 지연시차 5 ms 이상에서 분리 진동파형 PPV의 20%(0.283 mm/s)내로 측정되었다. SN. 1의 지연시차 6 ms, SN. 4의 지연시차 4 ms 이하에서의 측정결과는 발파공수에 따라 진폭의 편차가 크게 측정되었으나, 발파공수의 증가에 따라 진폭이 증가하지 않았다.
- 4) Langefors의 시차이론과의 비교·분석을 위하여 SN. 1과 SN. 4의 0.5T, 1T, 1.5T, 2T, 2.5T, 3T 및 이후의 특징적인 지연시차에서의 PPV를 검토한 결과, SN. 1과 SN. 4 모두 0.5T, 1.5T, 2.5T의 지연시차에서는 분리 진동파형의 PPV보다 조금 증가하거나 오히려 감소하는 경향을 보였고, 1T, 2T, 3T의 지연시차에서는 상당히 증가하는 경향을 보였다.

위의 분석내용을 토대로 진동의 감쇠가 가장 좋은 0.5T, 1.5T, 2.5T의 지연시차를 사용함이 타당하나 자유롭지 못한 뇌관의 기폭초시와 거리에 따라 다양하게 변화하는 우세 주파수 때문에 3T를 초과하는 기폭초시 설계가 가장 바람직할 것으로 판단되며, 획일적인 지발당 장약량의 8 ms 기준에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 2005년 조선대학교 교비지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강추원 「발파공학 A to Z」, 구미서관, 2005, pp. 397-398
2. W.I Duvall, C.F. Johnson, A.V.C. Meyer and J.F. Devine, "Vibrations From Instantaneous and Millisecond-Delayed Quarry Blasts", U.S. Bureau of Mines RI 6151, 1963, pp. 1-34
3. Siskind, D.E., stachura, V.J., Nutting, M.J., "Low-Frequency Vibrations Produced by Surface Mine Blasting over Abandoned Underground Mines", USBM RI 9028, 1987, pp. 58
4. Charles H. Dowding, "Blast Vibration Monitoring and Control", 1984, pp. 7-22, 24-40
5. 박정봉, 「MS발파에서 파형분석과 FFT분석을 통한 협동장약 결정에 관한 연구」, 조선대학교 석사학위논문, 2005, pp. 23-31
6. 강추원, 김종인, 박정봉, "협동장약을 고려한 MS 지발 발파 특성 연구", 「대한화약발파공학회」 23 : 11-18, 2005 집, pp. 132-141, 1995
7. Siskind, David, Vibrations from Blasting : International Society of Explosives Engineers, 2000, pp. 17-30
8. W. Reisz, R. McClure and D. Bartley, "Why the SMS Doesn't Work", International Society of Explosives Engineers, 2 : 1-11, 2006
9. D. Anderson, "The 8 Millisecond Criterion : Have We Delayed Too Long in Questioning It?", International Society of Explosives Engineers, 1989
10. 임한욱, 김진수, "진동이력분석을 응용한 발파 진동파형의 특성에 관한 연구", 「한국암반공학회」, 9 : 36-37, 1999



강추원

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



김승현

2004년 조선대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
Tel: 062-230-7876
E-mail: roach902@naver.com
현재 조선대학교 자원공학과 석사과정



박현식

1997년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2000년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사
Tel: 062-230-7876
E-mail: phs821@shbiro.com
현재 조선대학교 자원공학과 박사수료