

진동이력분석을 응용한 발파 진동파형의 특성에 관한 연구

김진수¹⁾ · 임한욱²⁾

A Study on Characteristics of Blast Vibration Waveform by Vibration Time History Analysis

Jin-Soo Kim and Han-Uk Lim

ABSTRACT For cautious controlled blasting, it is necessary to understand characteristics of the blasting vibration. In this study, a series of tests were carried out to investigate the several characteristics of blasting vibration waveform by vibration time history analysis. Separation between impulse vibration and free vibration from blasting vibration, duration time, effects of overlap of free vibration upon the level of vibration and changes of waveform according to increase of charge weight per delay etc. were studied with waveform analysis.

Key words : impulse vibration, free vibration, vibration time history analysis, duration time

초 록 세심한 제어발파를 위해서는 발파진동의 특성을 이해하는 것은 필수적이다. 본 연구에서는 진동이력분석을 응용하여 진동파의 특성을 조사하기 위해 몇가지 실험이 이루어졌다. 충격진동과 자유진동의 구분, 지속시간, 진동의 크기에 대한 자유진동의 중첩 효과, 지발당량의 증가에 따른 진동파의 변화 등이 파형분석과 함께 연구되었다.

핵심어 : 충격진동, 자유진동, 진동이력분석, 지속시간

1. 서 론

발파에 의한 암반 굴착시 지반진동 및 소음, 비석 등으로 인하여 때때로 다양한 형태의 민원이 제기되고 있다. 이와 같은 산업계의 문제점을 해결하고, 효율적으로 발파작업을 수행하기 위하여 국내에서도 이 분야에 관한 상당한 연구가 실시되고 있다. 이들 가운데는 지중발파의 진동 특성과 발파진동의 주파수 특성에 관한 연구도 몇 편 발표된 바 있다.^{1,2)} 그러나, 대부분의 연구는 측정된 진동 계측자료를 통계처리(회귀분석)하여 구한 진동 경험식으로부터 진동의 크기를 규제하는 부분에 집중되고 있다.

일반적으로 진동측정을 통하여 진동 수준을 해석하기 위해서는 지발당 장약량의 결정이 대단히 중요하다. 그러나, 현장의 작업조건 즉, 자유면의 상황, 뇌관의 기폭방법, 현지암반의 크기가 서로 다르다. 따라서 정확한 지발당 장약량의 산정과 진동의 증감요인을 규명하기 위해서는 진동파형의 분석이 필요하다.

본 연구에서는 몇 개의 현장에서 시험발파를 실시하고 구한 진동파형을 분석하여 충격진동과 자유진동을 구분하였으며, 지발발파시 진동파형의 중첩 및 지발당 장약량의 변화가 진동파형의 변화에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 특히 지면의 제한으로 많은 사례를 제시할 수 없어 몇가지 전형적인 예를 제시하기로 한다.

2. 진동의 이론적 고찰

2.1 진동의 정의

진동이란 구조물이나 지반 등이 동적인 외력의 영향을 받아 운동적 평형위치로부터 시간의 경과와 함께 반복위치(변위)가 변화되는 동적현상(動的現象)을 말한다. 구조물의 대부분은 탄성체이기 때문에 외력의 작용에

1) 정회원, SK 건설 주식회사
2) 정회원, 강원대학교 자원공학과, 교수
원고 접수일 : 1998년 8월 18일
원고 심사 완료일 : 1999년 2월 19일

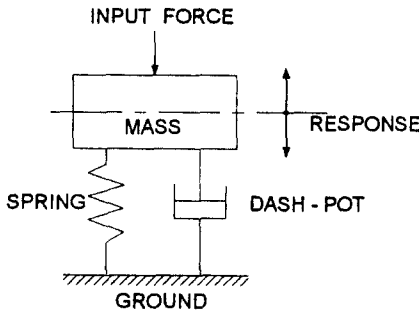


Fig. 1. Vibration system

의하여 크고 작은 진동을 하게되며, 구조물의 진동문제를 취급할 경우, 이것을 어느 한 개의 진동모델로 치환할 경우가 많은데 이것을 진동계(vibration system)라 한다.

또 이 진동계에 걸리는 외력을 그 계에 대하여 입력(input force)이라고 한다. 이 입력이 진동계에 작용하면 진동계의 가동부(可動部)가 진동을 시작한다.

이것을 입력에 대하여 응답(response)이라 한다. 이를 쉽게 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

입력이 작용하고 있을 때의 진동을 강제진동(forced vibration)이라 하고, 입력이 작용하지 않고 진동을 계속할 경우 자유진동(free vibration)이라 한다. 자유진동 중에 진동계에 어느 dash-pot 등의 작용으로 진동이 작게되어 계(系)가 정지상태로 될 때 이것을 감쇠자유진동(damping vibration)이라 한다.

더욱이, 정지하고 있는 계에 입력으로서 정현파 외력(sinusoidal force)과 같은 규칙적인 힘이 작용하여도 곧바로 계는 규칙적인 응답을 보이지 않고, 어느 시간을 경과한 후에 규칙적인 진동으로 된다. 이 규칙적인 응답이 보이지 않은 기간의 진동을 과도진동(transient

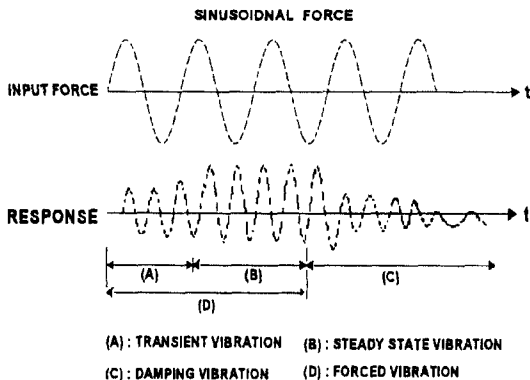


Fig. 2. Name of wave part in vibration

vibration)이라 하고, 규칙적인 진동으로 된 것을 정상진동(steady state vibration)이라 한다.³⁾ 이상적인 입력과 응답과의 관계는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다.

2.2 발파진동

발파진동은 진폭과 주기를 갖는 진동이며, 발파진동의 크기는 진동을 전달하는 매질, 즉 압반의 변위(또는 진동입자변위), 진동속도(또는 진동변위속도, 진동입자속도), 진동가속도(진동변위가속도, 진동입자가속도)로 표시할 수 있다.

진동의 형태를 일정 주기의 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 가정할 경우 진동변위, 속도 및 가속도 사이에는 다음 (1), (2)식과 같은 관계가 성립한다.

$$u = U \sin(\omega t + \theta_1)$$

$$v = du/dt = U\omega \cos(\omega t + \theta_2)$$

$$a = dv/dt = d^2u/dt^2 = U\omega^2 \sin(\omega t + \theta_3) \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi(1/T) = 2\pi f \quad (2)$$

여기서 f 는 진동주파수, T 는 진동주기, ω 는 진동수와 관련된 각속도, θ 는 위상차, u 는 변위, v 는 속도, a 는 가속도를 의미한다.

발파진동의 측정은, 그 방향에 따라 수직성분(vertical), 진행성분(longitudinal), 그리고 이 두 파의 방향과 직각을 이루는 접선성분(transverse)의 세 성분에 대해 실시된다. 일반적으로 진행성분에는 탄성파의 P파(종파, primary wave)가, 접선성분에는 S파(횡파, secondary wave)와 L파(혼합파, Love wave)가, 수직성분에는 표면파인 R파(Rayleigh wave)가 우세한 것으로 알려져 있다. 이 세 가지 성분의 상대적 크기는 압반, 지형 및 발파에 의하여 생성된 탄성파들의 상호간섭에 따라 변하나 일반적으로 가장 큰값을 나타내는 것이 수직 성분이며, 때로는 진행성분이 수직성분과 같거나 큰 경우가 있고, 접선성분은 대부분 세 성분 중에서 가장 작은 값을 나타내는 것으로 알려지고 있다.⁴⁾

발파진동을 Fig. 2에 근사시키면 강제진동에 해당하는 부분에 충격파에 의한 충격진동이 대응하게 되므로 발파진동은 크게 충격진동(impulse vibration)과 매질의 탄성적인 성질에 의한 자유진동(free vibration)으로 구분하여 해석할 수 있다.

3. 대상지역 지반의 특성 및 실험방법, 계측 장비

시험발파 대상지역의 암반의 물성 내지는 지질적 특성 등에 관해서는 세밀한 조사가 이루어져야 하지만, 일부는 시험발파 이전에 시험발파 현장 또는 현장지역 부근을 대상으로 실시된 기존의 물성시험자료를 참고하였다. 본 연구의 시험발파 대상지역은 서울지역 2개 현장(지하 터파기 1개 현장, 배수지조성공사 1개 현장), 충청지역 1개 현장(택지조성공사 현장) 등 모두 3개 현장으로서 각 지역 암반의 역학적 성질을 살펴보면 다음과 같다.

ASEM 신축공사 현장의 경우 암석 물성자료는 시험발파 이전에 실시되었던 기존의 물성시험자료를 참고하였고, 나머지 2개 현장의 경우 현장 인근에서 괴상의 암석을 채취한 후 실험실에서 물성 실험을 실시하였다. ASEM 신축공사 현장의 경우 암석은 편마암으로 이루어져 있으며, 모두 6개의 시료를 실험한 결과 심도 6.5~11.7 m의 범위에서 압축강도 85~161 MPa의 값을 나타내고 있다. 공릉동 배수지공사 현장의 경우 실험에 사용된 시료는 1개에 불과하지만 암석은 조립질 화강암으로 판명되었고, 비중은 2.61, 공극율은 0.92, 압축강도는 94 MPa, 포아송비는 0.14, 탄성계수는 60.7 GPa, 탄성과 속도는 P 파가 4260 m/sec, S 파가 2020 m/sec로 구해졌다. 공주 신관 주공 아파트 신축공사 현장의 경우 안산암이 분포하고 있으며, 2개의 시료를 실험한 결과 압축강도는 56~136 MPa, 포아송비는 0.24~0.27, 탄성계수는 40.7~53.1 GPa, P 파의 속도는 4910~5300 m/sec, S 파의 속도는 2020 m/sec로 나타났다.

시험발파는 현장의 시공작업과 병행할 수 있도록 현장 여건에 적합하게 설계하여 실시하였는데, 이 때의 계획은 Table 1과 같으며, 발파패턴도는 Fig. 3-Fig. 5와 같다.

본 시험발파시 사용한 발파진동측정기는 Canada의 Instantel 사 DS-477, DS-677 및 DS-077 기종으로 초

Table 1. Test blasting pattern

No.	Location	Pattern design
1~3	ASEM site	drilling length 2.7 m burden & spacing 1.0~1.25 m charge weight per hole 1.0 kg
4~5	Gongrungdong site	charge weight per delay 1.0 kg
6~11	Gongju site	drilling length 2.7 m burden & spacing 1.0~1.25 m charge weight per hole 1.0~1.5 kg charge weight per delay 1.0~1.5 kg

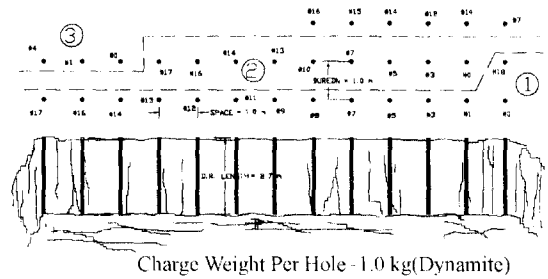


Fig. 3. The pattern of test blasting (ASEM site)

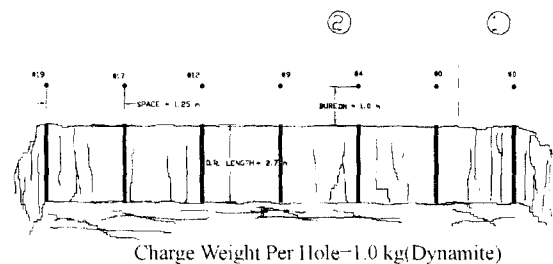


Fig. 4. The pattern of test blasting (Gongrungdong site)

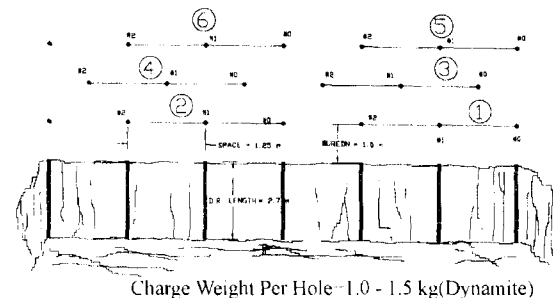


Fig. 5. The pattern of test blasting (Gongju site)

당 1,024의 data가 측정 가능하고, 프린트 시킬 수 있는 출력 주파수 응답은 1-250 Hz 범위이며, 별도의 진동파형분석 프로그램을 이용하는 경우 약 520 Hz (나이퀴스트 주파수 또는 폴딩 주파수)까지 분석이 가능하다. 이 장비는 수직방향, 진행방향 및 접선방향의 세 방향 진동을 감지하는 지오폰(geophone)과 공기중으로 전달되는 폭풍압을 감지하는 마이크로폰(microphone), 그리고 측정을 하고 기록하는 모니터로 구성되어 있다. 프린터를 통하여 각 이벤트 마다 진동시간에 따른 진동변화와 주파수의 범위 등의 기록이 가능하다. 본 연구에 사용된 진동파형 분석 프로그램은 INSTANTEL 사에서 제작한 BLASTWARE III(Ver 3.45)로서, 진동파형을 축소 확대하여 관찰할 수 있으며, 필요한 부분은 따로 떼어내

어 서로 합성시키는 등의 각 파형의 조합이 가능한 프로그램이다. 주파수와 진동의 크기만을 가지고 사인파(정현파)를 만들어 내어 서로 조합시켜 파의 특성을 분석할 수 있으며, 주파수 분석 및 속도, 가속도, 변위의 파형으로 서로 변환시킬 수도 있다.

4. 실험결과 및 해석

시험발파를 실시하여 구한 진동기록치의 분석을 통하여 충격진동과 자유진동의 구분방법과 지발발파시 진동과의 중첩, 그리고 매질과 지발당 장약량의 변화에 따른 진동파형의 변화를 검토하였다.

4.1 충격진동과 자유진동

지금까지의 연구문헌에는 발파진동의 지속시간이란 순수 충격파진동만을 의미한 것인지 아니면 매질의 자유진동까지를 포함한 것인지에 대하여는 언급되어 있지 않다. 발파진동의 전형적인 파형은 Fig. 6과 같지만 이를 Fig. 2에 근사시키면 강제진동에 해당하는 부분에 충격파에 의한 충격진동이 대응하게 되므로 발파진동은 크게 충격진동과 매질의 탄성적인 성질에 의한 감쇠

자유진동으로 구분하여 해석할 수 있다. 이러한 관점에서 발파진동의 지속시간은 충격진동의 지속시간과, 매질의 탄성적인 성질에 의한 자유진동의 지속시간이 합하여진 것으로 해석할 수 있다.

경우에 따라서는 발파진동을 충격진동과 자유진동으로 구분할 필요성이 없으며, 또한 매질의 자유진동부분의 급격한 감쇠로 인하여 충격진동과 자유진동의 구분이 뚜렷하게 나타나지 않는 경우도 있다. 그러나, 이와는 반대로 매질의 특성에 따라 다소 차이는 있겠지만 자유진동부분이 우세하게 나타나는 경우도 있다. 본 연구에서는 후자의 경우를 좀 더 확대 해석하여 검토해 보기로 한다.

일반적으로 후자의 경우 충격진동보다는 자유진동쪽에서 저주파가 우세하게 작용하는 경향을 보이게 된다. 충격진동의 주파수는 고주파(일반적으로 말하는 발파진동의 주파수가 이 부분에 해당 된다고 판단된다)의 파형인 반면에, 매질의 자유진동의 주파수는 이보다는 낮은 저주파의 파형의 양상이 일반적이다. 따라서, 본 연구에서는 충격진동과 자유진동을 주파수로 구분하기로 한다.

Fig. 6은 폭원과의 거리 10 m 지점에서 MS 0, 3, 5, 7, 10, 13, 14, 16, 17 등 9개 지발뇌관을 사용하여 발파를 실시할 때 측정된 진동기록치 중에서 MS13단 발파까지의 진동파형이다. 이 때 사용된 뇌관은 (주)한화 제품인 전기뇌관(코데이토)으로서 각 단당 시차는 25 ms~100 ms 범위에 있다.

이 중에서 전후단(前後段) 발파시 진동파형에 중첩의 영향을 받지 않고 자유진동부분이 비교적 뚜렷하게 나타난 MS 10단 발파시의 진행방향과 접선방향의 진동파형을 기준파형으로 선택하였다. 수직방향의 경우 자유진동의 구분이 뚜렷하지 않아 해석에서 제외하기로 한다.

주파수의 분석방법은 Fig. 7과 같다. 즉, P_1 에서 P_3 , 또는 P_2 에서 P_4 까지를 1주기(T)라 하며, 이 때의 주파수(Frequency)는 다음과 같다.⁵⁾

Frequency = 1/T

최대점 P_3 를 포함하는 파동의 주기는 P_2 에서 P_4 가 되고, 최대점 P_2 를 포함하는 파동의 주기는 P_1 에서 P_3 가 된다. 이러한 방법으로 각 파동에 번호를 부여하고 각 파동별 주파수, 주기 및 지속시간을 살펴보면 Table 2와 같다.

Fig. 8에서 살펴보면 각 파동에 대한 주파수가 급격

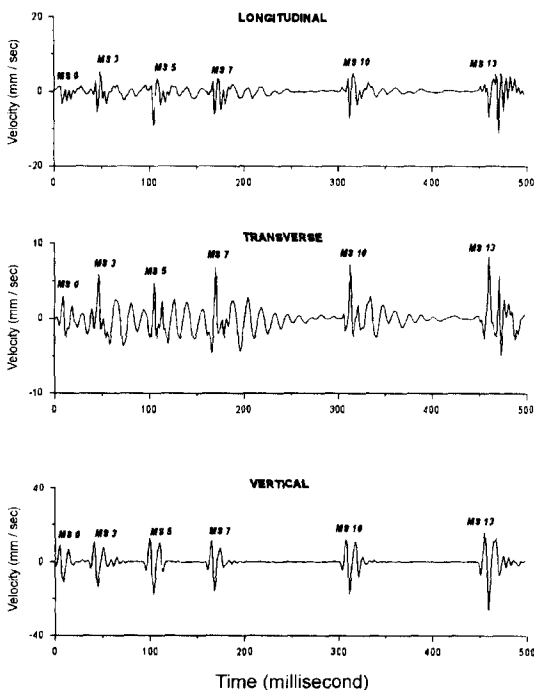


Fig. 6. Time history of blasting vibration at 10 m from blasting resource

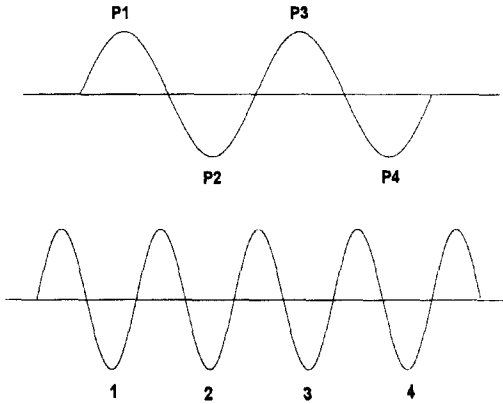


Fig. 7. Method to calculate frequency

한 감소와 더불어 비교적 평탄특성(平坦特性)을 보이기 시작하는 때는 접선방향의 경우 3번째 파동부터이고, 진행방향의 경우 4번째 파동부터이다.

전술한 바와 같이 충격진동과 자유진동을 주파수의 변화양상으로만 구분하는 것으로 한정시키고, 자유진동이 충격진동에 비하여 비교적 저주파 양상을 보이는 점을 고려하면, 각 방향별로 3 또는 4번째 파동부터 자유진동이 시작됨을 알 수 있다. 그러나, 한 질점계에서 외력이 작용한 시간과 자유진동이 시작하는 시점이 각 방향별로 다르다고는 생각할 수 없고, 주파수 분석상 어느 정도 오차의 허용을 포함시켜서 각 방향별로 자유진동의 시점을 범용성 있게 해석하더라도 본 파형분석에서는 3~4번째 파동부터 자유진동이 시작됨을 알 수 있다.

Fig. 9, Fig. 10은 각 파동에 대한 지속시간을 보여주고 있다.

Fig. 8에서 구하여진 각 방향별 3, 4번째 파동을 자유진동의 시점으로 하여 Fig. 9, Fig. 10에 대응시키면 본

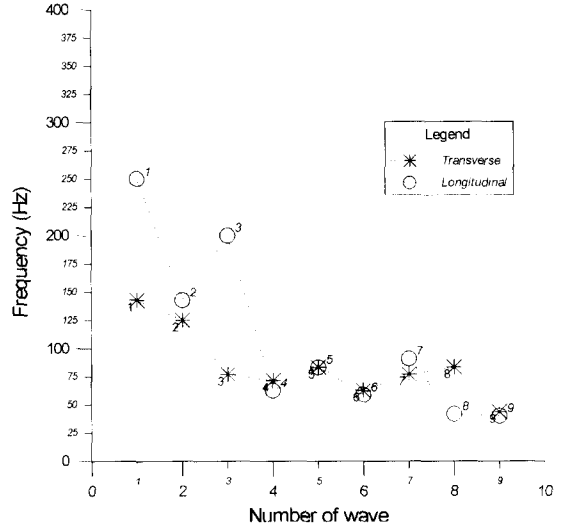


Fig. 8. Frequency of each wave

파형에서의 자유진동은 320~324 ms 정도에서 시작되는 것으로 해석할 수 있다. 이와 같은 현상은 본 연구에서 실시한 여러개의 분석에서도 유사한 결과를 보여주고 있다. 결과적으로, 본 파형에서의 충격진동의 지속시간은 15~16 ms 정도이고, 자유진동의 지속시간은 103~105 ms 정도임을 확인할 수 있다.

충격진동과 자유진동의 구분을 좀 더 확대 해석하여 관찰하기 위해서 브레이크진동도 발파진동과 같이 충격진동이란 점을 감안하여 전술한 바와 같이 각 파동에 대한 주파수, 주기 및 지속시간을 살펴보면 Table 3과 같고, 각 파동에 대한 주파수를 살펴보면 Fig. 11과 같다. 여기에서 주파수의 급격한 감소와 더불어 평탄특성을 보이기 시작하는 10~12번째 파동을 Fig. 9와 Fig. 10과 같은 방법으로 대응시키면 본 계에서의 충격진동의 지속시간

Table 2. Frequency, duration time and period of each wave

No. of wave	Duration Time (ms)		Period (ms)		Frequency (Hz)	
	Tran.	Long.	Tran.	Long.	Tran.	Long.
1	305~312	308~312	7	4	142.9	250
2	312~320	312~319	8	7	125	142.9
3	320~333	319~324	13	5	76.9	200
4	333~347	324~340	14	16	71.4	62.5
5	347~359	340~352	12	12	83.3	83.3
6	359~375	352~369	16	17	62.5	58.8
7	375~388	369~380	13	11	76.9	90.9
8	388~400	380~404	12	24	83.3	41.7
9	400~423	404~429	23	25	43.5	40

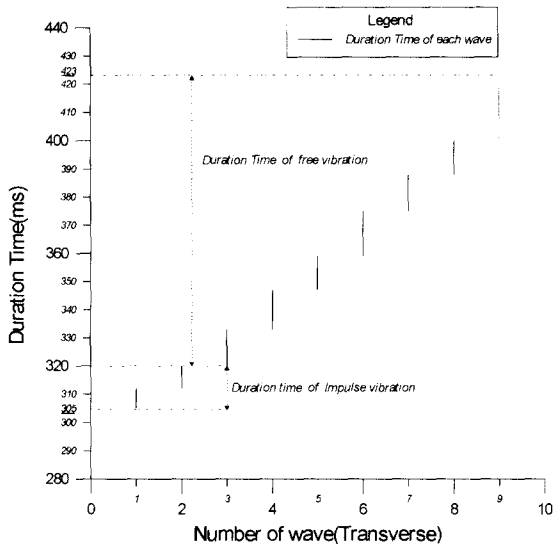


Fig. 9. Duration time of each wave (transverse)

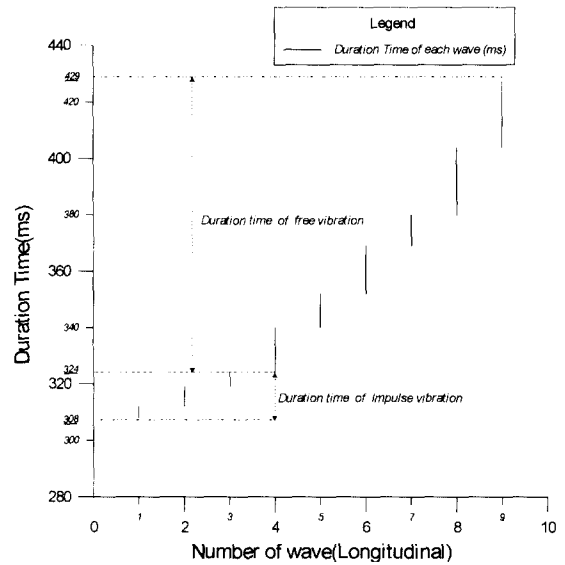


Fig. 10. Duration time of each wave (longitudinal)

은 46~54 ms 정도이고, 자유진동의 지속시간은 94~96 ms 정도임을 확인할 수 있다. 그러나, 브레이크진동의 자유진동의 경우 후단충격진동과의 중첩시점을 전단진동에서 자유진동의 한계치로 설정하였기 때문에 실제 자유진동의 지속시간은 이보다 더 클 것으로 판단된다. Fig. 12는 전형적인 브레이크진동의 속도이력을 보여준다.

4.2 지발발파의 진동파 중첩

그 동안 여러 문헌에 지발발파의 진동파 중첩에 관하여 언급이 있었으나 진동매질에 따른 진동파의 특성보

다는 발파방식(지발비판의 기폭방법)에 비중을 두어 연구가 이루어졌다.

본 연구에서는 종래의 방식과는 다르게 매질의 진동 특성에 더 많은 비중을 두어 진동파 중첩에 관한 연구를 수행하였다.

전술한 바와 같이 진동파는 크게 충격에 의한 진동과 자유진동으로 구분되며 이들이 서로 복합적으로 나타난다고 볼 수 있다. 이러한 점에서 볼 때 진동파중첩의 경우는 크게 다음 2가지 형태로 분류할 수 있다.

첫째, 전단발파의 충격진동과 후단발파의 충격진동

Table 3. Frequency, duration time and period of each wave in breaker vibration

No. of wave	Duration time (ms)		Period (ms)		Frequency (Hz)	
	Tran.	Long.	Tran.	Long.	Tran.	Long.
1	0~4	0~2	4	2	250	500
2	4~10	2~9	6	7	166.7	142.9
3	10~16	9~13	6	4	166.7	250
4	16~21	13~16	5	3	200	333.3
5	21~25	16~20	4	4	250	250
6	25~30	20~23	5	3	200	333.3
7	30~34	23~27	4	4	250	250
8	34~40	27~32	6	5	166.7	200
9	40~54	32~37	14	5	71.4	200
10	54~87	37~42	33	7	30.3	142.9
11	87~117	42~46	30	4	33.3	250
12	117~148	46~61	31	15	32.3	66.7
13		61~82		21		47.6
14		82~112		30		33.3
15		112~142		30		33.3

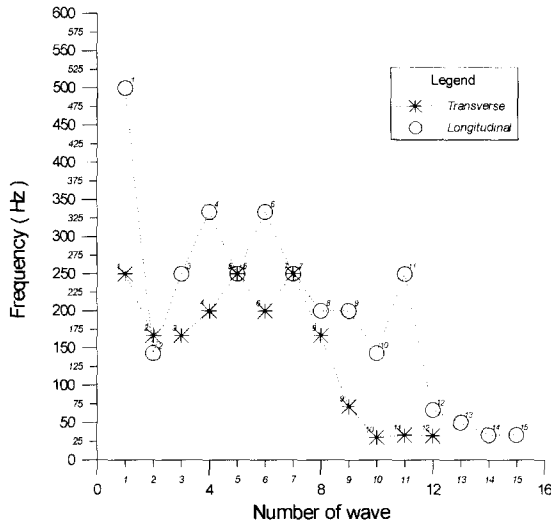


Fig. 11. Frequency of each wave in breaker vibration

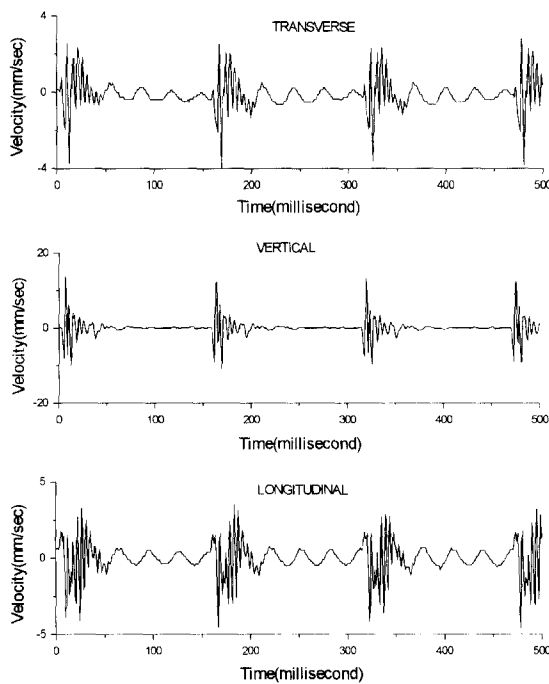


Fig. 12. Time history of typical breaker vibration

이 중첩된 경우이고, 둘째, 전단발파의 자유진동과 후단발파의 충격진동이 중첩된 경우이다.

전자의 경우에는 전단발파의 충격진동 계속시간중에 후단발파의 충격진동이 겹치는 경우이며 이때에는 겹치는 시점을 기준한 각 파형의 주파수 및 위상차에 따라 진동의 크기에 증감이 있을 수 있다. Fig. 13, Fig. 14는

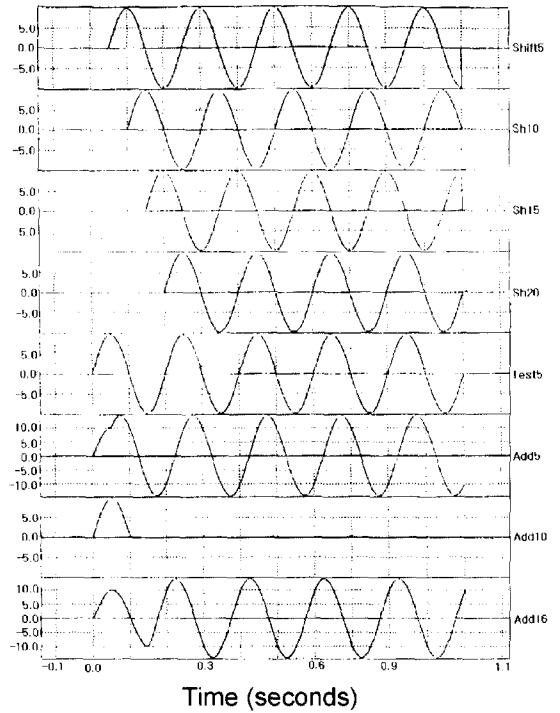


Fig. 13. Changes of wave type according to phase difference in case of same frequency

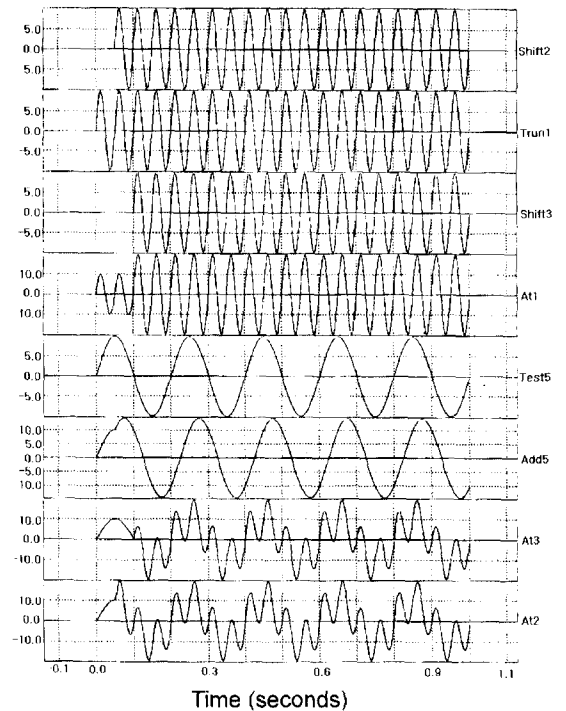


Fig. 14. Changes of wave type according to phase difference in case of different frequency

위상차 및 주파수가 서로 같은 경우와 다른 경우의 단 순조화진동의 파형을 중첩시킨 결과의 예를 보여주고 있다.

Fig. 13에서 Test 5는 기준파형이고, Sh 5~Sh 20은 기준파형과 비교시 위상지연시차가 50~200 ms 인 파형을 의미한다. Add 5, Add 10, Add 15는 기준파형에 위상지연시차가 50 ms, 100 ms, 150 ms 인 파형을 서로 중첩시킨결과를 보여주고 있다.

Fig. 14에서는 기준파형 Test 5에 주파수가 다른 Trun 1 파형을 위상지연시차를 달리하여 중첩시킨 결과를 보여주고 있다.

Add 5는 Test 5와 Trun 1, At 1은 Trun 1과 Shift 3를 각각 중첩시킨 결과이고, At 2, At 3는 Test 5에 Shift 2, Shift 3를 중첩시킨 결과를 보여주고 있다.

이 결과로 예상컨데 발파진동이 사인파 근사라는 점을 고려하면 발파작업시 발파진동파의 중첩이 이루어질 경우 중첩되는 시점을 기준하여 각 파형의 주파수 및 위상차에 따라 최대진동치의 크기 변화에 많은 영향이 미칠것으로 판단된다. 그러나, 발파진동은 정확히 사인파는 아니기 때문에 어느정도 가정이 포함되어 있지만 이와 관련하여 일본에서 수행된 실제 실험결과는 좋은 연관성이 있음을 보여주고 있는데, 이를 Fig. 15에 수록하

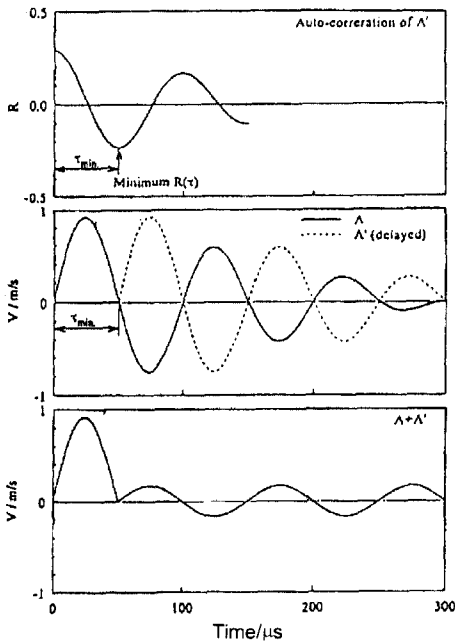


Fig. 15. Method to reduce vibration level using phase difference⁶⁾

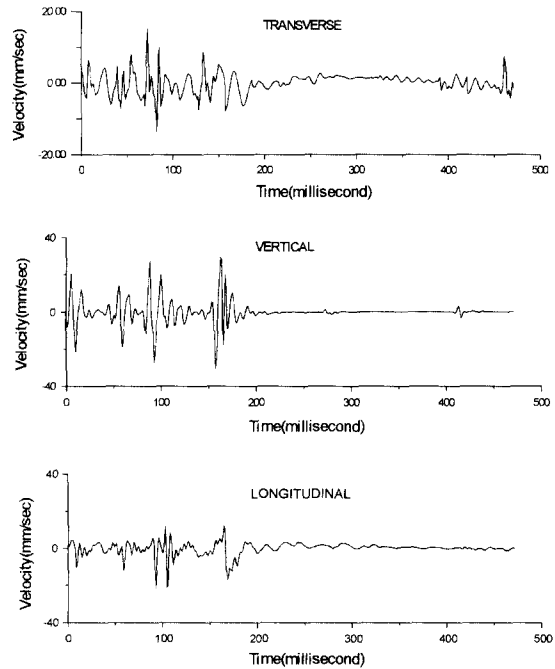


Fig. 16. Time history of blasting vibration in blasting of 9 delays at 15 m from blasting source

였다.⁶⁾

후자의 경우는 전단발파의 자유진동 계속시간중에 후단발파의 충격진동이 겹치는 경우이다. 이 때에는 주파수가 서로 상이한 두 개의 파형이 겹치게 된다. 이상과 같은 두가지의 경우에 있어서 파의 중첩형태를 살펴 보기 위하여 모델링 시험을 실시하였다. Fig. 16은 지발파관 9개 단(Hideto MS 0, 1, 4, 7, 14, Kodeto MS 12, 14, 15, 16)을 사용하여 기록시키고 15 m 떨어진 거리에서 측정한 진동파형의 일부를 보여준다.

Fig. 17은 Fig. 16에서 접선방향의 진동이력중 자유진동의 폭이 비교적 큰 MS 7단 발파시의 파형을 선택하여 기준파형으로 하고, 10 ms, 15 ms, 20 ms, 40 ms, 60 ms, 80 ms, 100 ms 시차간격으로 중첩시킨 결과이다.

기준파의 충격진동의 지속시간을 계산하기 위하여 전술한 바와 같이 각 파동에 번호를 부여하고 각 파동별 주파수, 주기 및 지속시간을 살펴보면 Table 4와 같다. 이 때 273 ms 이후에는 합성파로 나타나 본 연구에서 제시한 방법으로는 분석이 불가능하므로 273 ms 까지만 국한하기로 하되, 실제 충격진동을 포함한 전체진동의 지속시간은 350 ms 정도이다. Fig. 18은 Table 4의 자료를 이용하여 작성한 각 파동에 대한 주파수를

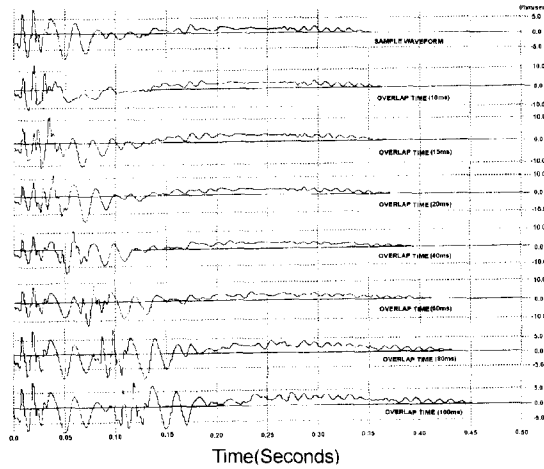


Fig. 17. Results of overlap modeling test

Table 4. Frequency, duration time and period of basic wave

No. of wave	Duration time (ms)	Period (ms)	Frequency (Hz)
1	156~163	7	142.9
2	163~171	8	125
3	171~176	5	200
4	176~199	23	43.5
5	199~220	21	47.6
6	220~239	19	52.6
7	239~255	16	62.5
8	255~273	18	55.6

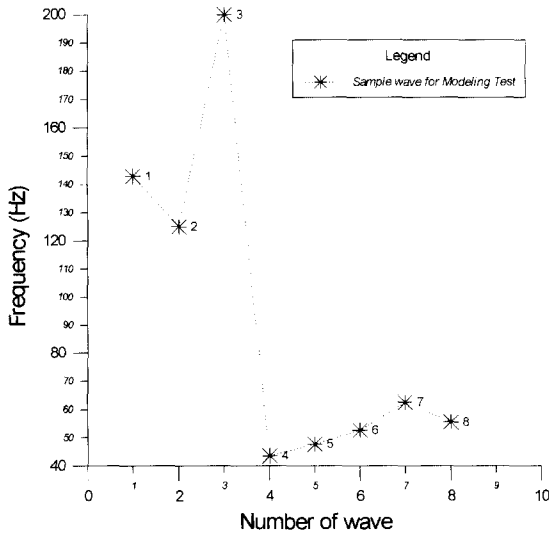


Fig. 18. Frequency of basic wave

나타낸 것으로 각 파동에 대한 주파수의 급격한 감소와

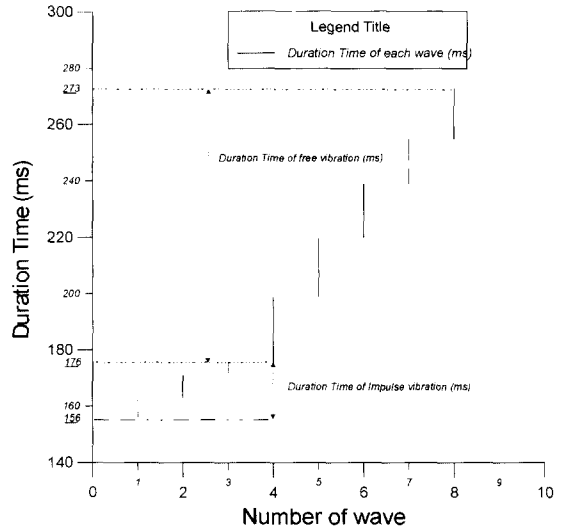


Fig. 19. Duration time of basic wave

더불어 비교적 평탄특성을 보이기 시작하는 때는 4번째 파동부터이다. 결과적으로 4번째 파동부터 자유진동이 시작됨을 알 수 있다.

Fig. 19는 각 파동에 대한 지속시간을 보여주고 있으며 여기에서 충격진동의 지속시간이 20 ms 이고, 자유진동의 지속시간이 330 ms 임을 확인할 수 있다(단, 그림에서는 전술한 바와 같이 전체 진동계속시간을 273 ms 까지만 도시하였다).

다시 Fig. 17을 살펴보면 기준파형의 입자최고속도치가 10 mm/sec 미만인 반면에 10 ms~60 ms 시차에서는 입자최고속도치가 10 mm/sec를 초과하여 나타나고 있다. 기준파형의 충격진동 지속시간이 20 ms인 점을 고려하면, 10~20 ms 시차에서는 충격진동부분이 중첩되어 기준파형보다 입자최고속도치가 증가한 것으로 판단되며, 40~60 ms 시차에서는 자유진동과의 중첩이 일어나 진동의 크기가 기준파형보다 증폭되어 나타난 것으로 판단된다.

이와 같은 결과는 매질의 자유진동도 후단발파의 충격진동과의 중첩에 의하여 진동의 증감요인이 될 수 있음을 나타내고 있다. 기준파형의 자유진동은 약 350 ms 까지 지속되고 있으나, 80 ms 이후의 자유진동은 급격한 감쇄로 인하여 후단의 충격진동에 그다지 큰 영향을 미치지 못하고 이 때부터 충격진동의 원래파형이 그대로 나타나기 시작한다.

이상 검토해 본 결과 지발발파에 의한 진동과의 중첩 시차는 바로 매질의 충격진동 및 자유진동 지속시간에

따라 결정되는 것으로 판단된다.

진동파의 중첩이 이루어진다 할지라도 실제 발파진동에서 문제가 되는 부분은 입자최대진동속도치이므로 매질의 자유진동부분이 입자최대진동속도치의 증폭에 우세한 영향을 미치지 않는한 큰 문제는 없다고 판단된다. 그러나, Fig. 16에서와 같은 지반진동의 속도이력인 경우에는 자유진동도 진동치의 증폭에 영향을 미치게 되므로 충분히 고려되어야 한다. 따라서, 정밀 제어발파를 실시하고자 할 때에는 매질의 진동파 특성에 맞는 지발뇌관의 시차를 조정함이 바람직하다고 생각된다.

4.3 지발당 장약량의 증가에 따른 파형의 변화

일반적으로 지발당 장약량이 증가하면 발파진동치는 증대된다. 발파진동을 공해문제와 결부시켜 해석하는 경우 주로 문제가 되는 것은 입자최대진동속도치이므로 사실상 지발당 장약량의 증대에 따른 파형의 변화에 대하여는 많은 관심을 두지 않았다. 그러나, 진동파의 중첩에 관한 연구를 수행하는 과정에서 지발당 장약량의 증가에 따른 매질의 충격진동 및 자유진동 파형의 변화양상도 중요한 문제로 대두되는 만큼 이에 대한 연구도 아울러 실시하였다.

Table 5는 동일 발파패턴에 지발당 장약량을 증가시키고, 수진점도 폭원과의 거리 50 m, 100 m 지점의 동일장소에 고정하여 모두 6회의 계측을 실시한 진동측정 결과치를 보여준다.

동일 지발당 장약량이라 하더라도 진동치의 변화가 크고, 지발당 장약량의 증가에 따라 진동의 크기도 증가되어야하나 오히려 감소되는 경우도 있었다.

Table 5. Results of blast vibration

Distance (m)	Charge weight per delay (kg)	Peak particle velocity(mm/sec)			
		Tran.	Vert.	Long.	PVS
50	1.0	2.22	3.30	3.75	4.16
	1.0	2.35	2.86	3.94	4.56
	1.5	4.06	3.18	4.32	5.03
	1.5	2.54	2.60	2.35	2.98
	1.0	3.43	6.22	2.79	6.84
	1.5	5.59	7.62	4.95	9.11
100	1.0	0.635	0.635	0.556	0.873
	1.0	0.714	0.651	0.635	0.921
	1.5	0.794	0.651	0.730	1.08
	1.5	0.397	0.397	0.413	0.572
	1.0	0.635	0.540	0.683	0.937
	1.5	1.27	0.746	1.05	1.56

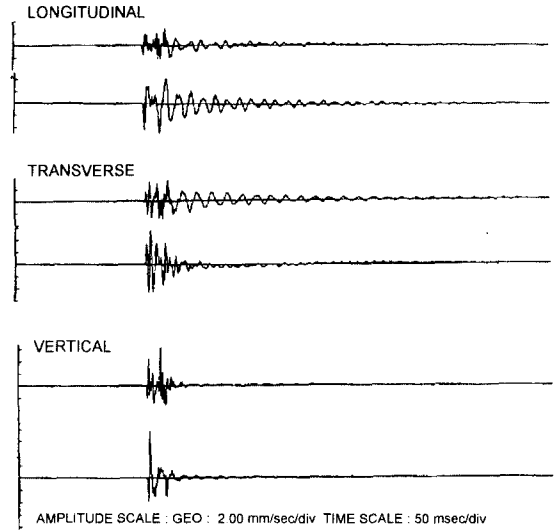


Fig. 20. Time history of blasting vibration at each position (up : 1.0 kg, down : 1.5 kg)

지발당 장약량의 증가에 따른 파형의 변화양상을 관측한다는 관점에서 6회의 시험발파 중 지발당 장약량의 변화에 다소 민감하게 반응한 5회, 6회의 진동치를 가지고, 각 방향별로 진동파의 변화양상을 비교검토하였다.

Fig. 20은 5회, 6회의 발파시 50 m 지점에서 계측된 각 방향별 진동속도이력을 보여주고 있다.

Fig. 21은 Fig. 20의 진동이력에서 횡축의 시간축을 확대하여 일정한 크기로 고정하고, 종축의 진동속도의 증감에 따른 변화정도를 축척비율(scale)로 비교하여 지발당 장약량 증가에 따른 변화양상을 관찰하였다.

그림에서 살펴본 바와 같이 전체적인 파형은 거의 동일한 형태를 보이고 있으며, 시간축의 변화는 거의 일어나지 않고 일정하다. 다만, 종축(진동속도축)의 변화만이 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 22는 종축(진동속도축)과 횡축(시간축)의 축척을 모두 동일하게 하였을 경우 폭원과의 거리 100 m 지점에서 계측된 진동파형이다. 여기에서도 전술한 바와 같이 시간축의 변화는 일정하되, 종축의 변화만이 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

이는 동일장소(동일 수진점)에서의 진동파는 지발당 장약량의 증가에 따라 주파수의 변화(또는 위상의 변화)는 거의 없고 단지, 진동 최고 입자속도(각파군의 첨두파)만이 증폭되어 변화가 일어나고 있음을 보여주고 있다.

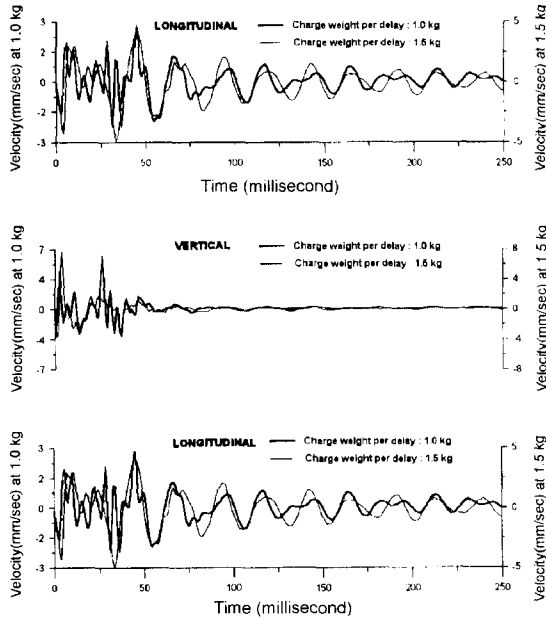


Fig. 21. Changes of blasting vibration according to increase of charge weight per delay (at 50 m)

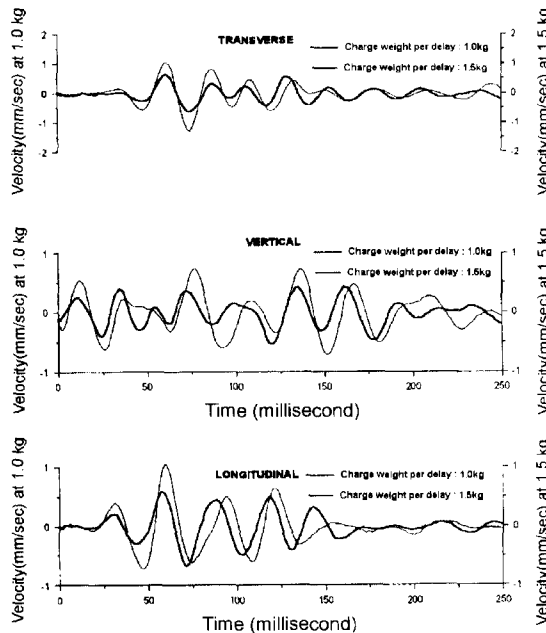


Fig. 22. Changes of blasting vibration according to increase of charge weight per delay (at 100 m)

결과적으로 동일장소(동일 수진점)에서의 진동파는 지발당 장약량의 증가에 따라 각 파군의 첨두파만이 증감되어 변화가 일어나며, 주파수의 변화는 유사한 것으

로 판단된다.

5. 결 론

잘 알려진 바와 같이 암반은 일반적으로 물성 및 역학적 특성은 물론이고 절리등 부존 조건도 서로 다르다. 따라서 동일한 발파조건에서 계속한 발파 진동치 및 그 파형 역시 미시적으로 차이를 보일 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 동일 발파에 대해 동일 수진점에서 측정된 결과를 가지고 파형분석을 실시하여 충격진동과 자유진동의 구분방법을 모색하였고, 진동파의 중첩에 대하여 검토하였으며, 또, 동일발파에 대하여 수진점의 위치는 고정시키고 지발당 장약량을 변화시켜 가면서 지발당 장약량의 증가에 따른 파형의 변화 양상에 대하여 연구를 실시하였다.

연구결과가 몇가지 특수한 경우도 있었지만, 대체로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 발파진동의 지속시간은 충격진동과 매질의 자유진동의 합으로 이루어져 있으며 수진점 매질의 특성에 따라 다소 차이는 있겠으나, 금번 실험에서는 각 파동에 대한 주파수 특성과 지속시간에 관하여 검토한 결과 발파진동의 충격진동 지속시간은 대체로 15~16 ms이며, 자유진동의 지속시간은 103~105 ms로, 전체진동 지속시간은 118~121 ms이다.

2) 발파진동을 충격진동과 자유진동으로 구분하여 시차중첩 모델링 시험을 실시한 결과 지발발파에 의한 진동파의 중첩시차는 매질의 충격진동 및 자유진동의 지속시간에 따라 결정되는 것으로 판단되며, 자유진동도 후단 발파시 발생하는 충격진동과의 중첩에 의하여 진동의 증감요인이 되는 것으로 확인되었다. 따라서, 정밀제어발파를 실시하고자 할 때에는 지발뇌관의 시차 조정이 충분히 고려되어야 한다.

3) 지발당 장약량을 1 kg에서 1.5 kg로 증가시키며 파형관찰을 실시한 결과 동일장소(동일 수진점)에서의 진동파는 지발당 장약량의 증가에 따라 각 파군의 첨두파만이 증감되어 변화가 일어나며, 주파수 및 위상의 변화는 일정한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 임한욱, 김재동, 1992, "발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구," 한국자원공학회지, Vol. 29, pp. 146-157.

2. 양형식, 범진삼, 주재성, “진주 나동터널 지중발파의 진동특성에 관한 연구,” 한국자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집, pp. 3-7.
3. 천병식, 오재응, 1993, “지반진동 이론과 실제”, 건설 연구사, pp. 11-12.
4. 임한욱, 1993, “암발파 설계기법에 관한 연구”, 한국 토지개발공사 기술연구, pp. 243-344.
5. INSTANAL INC., 1994, “Blastmate Series II User Manual”, 41p.
6. 昔哲基, 勝山邦久, 1997, “發破振動 低減手法 研究”, 일본 화약 학회지, Vol. 55, No. 4, 278p.