

## 단일공 발파파형 중첩모델링 자료를 이용한 지반 진동의 예측

김종인<sup>1)\*</sup>, 강추원<sup>2)</sup>

### Prediction of Ground Blasting Vibration using Superposition Modeling Data of Single Hole Blasting Waveform

Jong-In Kim and Choo-Won Kang

**Abstract** The blasting vibration prediction in the country is mainly carried out by using the scaled distance method. But, this method needs a real-scale test blasting. The blasting vibration prediction has been performed using the data measured at borehole blasting for the purpose of a geological investigation before beginning a construction of a tunnel. In this prediction method, it is difficult to reflect the propagation characteristics of ground vibration generated from a real-scale blasting. This paper presents a new method for estimating blasting vibration by using superposed data of single hole blasting waveform with a delay time.

**Key words** Blasting vibration prediction, Superposition Modeling, Scaled distance

**초 록** 국내에서는 주로 환산거리 진동예측식에 의한 발파진동 예측 방법이 사용되고 있다. 그러나 이러한 환산거리방식은 실규모의 발파가 시행되어야 할 필요성이 있다. 최근 국내에서는 터널 등의 공사 시행 전 사전 조사단계에서 발파진동의 영향권을 예측하려는 시도로써 지질 조사용 시추공 등에 장약·발파하여 지반진동을 측정하고 본 발파의 발파 진동을 예측하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 이러한 발파진동 예측 방법은 본 발파시의 진동의 전달 특성을 완전하게 반영하지는 못한다. 이러한 발파진동 예측방법의 결점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 사전 조사 단계의 단일공 파형 중첩 모델링을 통하여 발파진동을 예측하는 방법을 개발하였다.

**핵심어** 발파진동 예측, 중첩모델링, 환산거리

## 1. 서 론

발파에 의한 공해 요인 중 발파진동의 전파 특성을 결정짓는 인자는 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질을 예로 들 수 있으며, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭원과 측정간의 거리 등을 가리킨다. 이들 인자들 모두가 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치게 된다. 이 중에서 특히 지발당 장약량과 측정간의 거리가 가장 중요한 요인으로 작용하나, 측정간의 거리는 조절 불가능한 변수인 반면, 조절 가능한 변수인 지

발당 장약량이 동일한 발파작업의 조건일 경우 발파 설계에 있어 가장 중요한 인자가 된다. 이 지발당 장약량은 현재 우리나라에서 발파진동의 예측에서 대부분 사용되는 환산거리식의 주요 변수이다. 지발당 장약량은 동시에 기폭되는 장약 혹은 공간의 지연단차가 8 ms 이하인 장약들의 총합으로 정의할 수 있다. 이러한 근거는 USBM(United States Bureau of Mines)에서 발간한 RI(Report of Investigations) 6151(Duvall et al., 1963)을 바탕으로 마련된 것이다. 국내에서는 주로 이 환산거리방식에 의해 발파진동을 예측한다. 그러나 이러한 환산거리방식은 본 발파규모의 시험발파가 시행되어야 하는 단점이 있다.

발파진동을 사전에 예측하는 또 다른 방법으로 다양한 수치 해석적 모델링이 설계에 적용되고 있으나 검증이 미비하며, 결과에 대한 검증 과정이 수반되어야 할 필요가 있다(류창하, 2003). 이러한 수치 해석적 방법의 단점을 보완하기 위하여 실측진동 파형을 이용한 발파

<sup>1)</sup> 인발파환경기술사사무소 대표

<sup>2)</sup> 조선대학교 자원공학과 교수

\* 교신저자 : nam4tin@nate.com

접수일 : 2007년 11월 1일

심사 완료일 : 2007년 12월 17일

진동을 예측하는 동해석 기법에 관한 연구를 수행하였다(최성용 등, 2004).

최근 국내에서는 터널 등의 공사 시행 전 사전 조사 단계에서 발파진동의 영향권을 예측하려는 시도로서 지질 조사용 시추공 등에 장약을 하고 발파 진동을 측정하여 본 발파의 발파진동을 예측하는 방법이 사용되고 있으나 실제 터널을 굴착할 때 발생하는 진동의 전달 특성과는 차이가 있는 것으로 나타났다(임성식과 양형식, 2003).

본 연구에서는 지연단차에 의한 영향으로 발파진동이 상쇄 및 보강간섭 상태에 놓여 진동의 크기가 큰 폭으로 분산되는 점을 감안하여 단일공 파형의 중첩모델링에 의해 실제 발파에서 발생할 수 있는 진동 속도를 산출하였다. 또한, 이들 중첩모델링 자료 중 모델링 지점별 가장 큰 진동 속도를 토대로 환산거리 방식을 사용하여 발파진동을 예측하는 방법을 개발하였다.

## 2. 단일공 파형 중첩 모델링에 의한 발파진동의 예측 방법

일반적으로 시추공발파는 실제 터널의 시공단계에서의 발파와 여러 가지 조건에서 상이하다. 특히, 시공단계의 발파는 1자유면 또는 자유면이 두개이상인 상태에서 발파가 이루어지지만 시추공 발파는 무자유면에서 수행된다. 또한 시추공 발파는 지발발파를 이용하는 노천발파나 터널발파와 달리 제발발파 혹은 단일공 발파로 이루어진다. 그러나 실제의 노천이나 터널발파에서는 뇌관의 발화 오차와 발생한 탄성파의 전파속도차이로 인해 계속 지점에 도착된 진동파는 서로 간섭 상태에 놓이게 되고, 이때 상쇄간섭 혹은 보강간섭이 발생하여 큰 폭의 분산이 발생한다. 그러므로 단일공 발파인 시추공 발파자료에 의한 발파진동은 완전한 진동의 전파 특성을 포함 할 수 없을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 이러한 미비점을 보완하고 시추공 발파 자료 등에서 입수된 단일공 파형을 발파 오차 및 탄성파의 도착 시차를 고려한 중첩 모델링으로부터 발파 진동을 예측하는 방법을 개발하였으며 그 절차는 다음과 같다.

본 발파 규모의 시험발파가 어려운 암반에 대해 시추공 등의 단일공 시험 발파를 실시하여 이때 얻어진 진동파형을 예상할 수 있는 지연단차 내에서 중첩 모델링한다. 모델링 결과로 얻어진 최대 입자속도와 단일공 시험발파시의 환산거리(SD, Scaled Distance)의 자료를 토대로 최적합식(best fit line)을 구하여 발파진동을 예측한다. 이 중첩 모델링 자료에 의한 발파 진동의 예측 방법을 Fig. 1의 흐름도와 같다. 중첩 모델링 자료에 의

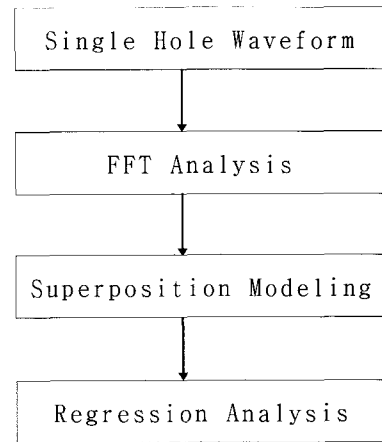


Fig. 1. Flow chart of a method for predicting blasting vibration using superposition modeling

한 예측 방법을 단계 별로 설명하면 단일공 파형을 얻는 단계, 주파수 해석단계, 중첩 모델링 단계, 회귀분석 단계로 나눌 수 있다.

- ① 단일공 파형을 얻는 단계 : 단일공 파형을 얻기 위해 시추공 혹은 발파공 등을 실제 공사가 시행될 암반에 천공하여 장약 후 기폭 시켜 민원지역 혹은 주요 보안물건 및 대표지역에 계측기를 설치하여 단일공 파형을 얻는다.
- ② 주파수 해석단계 : 획득된 단일공 파형을 고속 프리에 분석(FFT, Fast Fourier Transform)에 의해 주주파수를 산출한다.
- ③ 중첩 모델링 단계 : 1 ms(혹은 0 ms)간격을 포함하여 1주기(1T), 혹은 2주기(2 T)의 시차에 대해 모델링하여 이때의 PPV(Peak Particle Velocity)를 기록한다. 이때 모델링에서 고려 할 사항은 본 발파시의 사용뇌관의 단차, 발화 오류, 동시에 기폭시키는 단의 수, 그리고 탄성파의 도착 시간 등이며 1 ms(혹은 0 ms)의 시차는 이들을 고려한 시차이다.
- ④ 회귀분석 단계 : 중첩 모델링 단계에서 획득된 최대 입자속도와 실제 시험에 사용했던 폭약량과 거리를 사용하여 적합식을 도출한다. 이 적합식을 발파진동 예측식으로 사용한다.

## 3. 현장 실험

### 3.1 실험 지역의 지질

본 실험지역의 시추조사 결과에 따르면 흑운모 화강

암이 기반암으로 분포하고 있으며, 이들 상부에는 소량의 자갈 섞인 실트질모래 내지 점토질실트로 구성된 매립·붕적층 및 풍화작용에 의한 풍화대가 기반암을 피복하고 있다. 흑운모 화강암은 심성관입암류중 대표적인 암석으로 가장 넓은 노출면적을 보이고 현미경하에서 관찰된 주성분 광물은 칼리장석·사장석과 흑운모이며, 부성분은 각섬석·자철광·지르콘·인회석 등으로 판별되었다.

또 실험지역 암석시료에 대한 실내 시험결과 일축압축강도(P)는 840~1270 kgf/cm<sup>2</sup>, P와 속도(V<sub>p</sub>) 3230~3670 m/sec, 점착력(c) 174~219 kgf/cm<sup>2</sup>, 내부마찰각(Φ) 44~51°로 나타났다.

3.2 실험방법 및 계측 결과

현장 실험 방법

본 연구의 현장 실험지역은 광주광역시 북구 각화동 일대의 『00배수지시설공사』의 노출된 암반 제거작업을 위한 공사 현장으로서 총 12회 발파에 대한 현장 실험

을 실시하였다.

실험 조건은 Table 1과 같다. 실험에 사용된 뇌관은 MS 지발 전기뇌관과 LP 전기뇌관이 사용되었으며 천공 패턴과 점화 패턴은 Fig. 2, Fig. 3과 같다. 본 연구의 현장 실험에서는 단일공 파형을 얻기 위하여 매회 발파 중 최후의 공에 대해서는 동일하게 600 ms의 시차를 갖는 뇌관(LP6)을 사용하였다. 본 연구의 중첩모델링에 사용된 실험 자료는 3회와 6회 그리고 12회의 측정 자료이다.

현장 실험 계측 결과

Table 1의 발파조건과 Fig. 2, 3의 천공 및 점화패턴으로 총 12회에 걸쳐 실시된 발파 진동 계측 결과 총 35개의 자료를 획득하였다. 현장 실험 계측결과에 따르면 최대 입자 속도의 경우 수직성분(V)은 0.4~9.9 mm/sec, 접선성분(T) 0.4~9.4 mm/sec, 그리고 진행성분(L)은 0.6~17.9 mm/sec로 계측되었다. 주주파수는 고속 푸리에 변환을 통하여 결정하였으며 수직성분(V) 24~153 Hz, 접선성분(T) 25.3~191 Hz, 그리고 진행성분(L)은 23.3~144 Hz로 분석되었다.

Table 1. Applied design parameter for some of the shots

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Explosive	Emulsion explosive											
Explosive diameter	Φ32mm									Φ50mm		
Detonator	MS or LP Detonator											
Diameter(mm)	45									75		
Drilling Length(m)	2.5					2.9		3.1			3.3	
Burden(m)	0.9					1.0		1.1			1.2	
Spacing(m)	1.0					1.1		1.2			1.3	
Charge per hole(kg)	0.75					1.00		1.25			1.60	
Charge per delay(kg)	0.75					1.00		1.25			1.60	
Number of hole	9	12	15	9	12	15	9	12	15	9	12	15

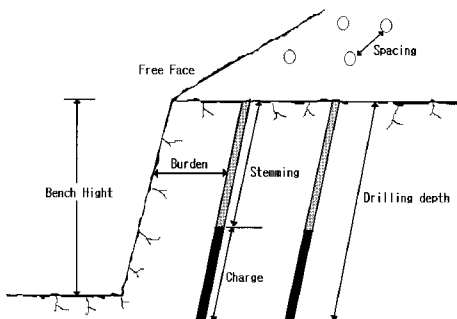


Fig. 2. Geometry of blasting pattern

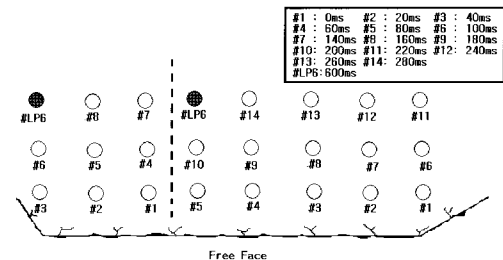


Fig. 3. Firing times of blast holes

## 4. 발파진동의 중첩모델링

### 4.1 대상 파형의 선정

본 연구의 현장실험에서는 단일공의 발파가 어려운 현장 여건을 고려하여 총 15공의 1회 발파에서 가장 최후의 공을 단일공 파형으로 하기 위하여 최후의 공과 약 300 ms의 시차를 둔 뇌관을 사용하였다. 총 12회의 시험 발파 중 각각 3회의 30 m, 6회의 33 m, 그리고 12회의 29, 69 m 거리에서 획득한 진동 측정 자료를 선정하였다.

선정된 4개의 파형은 측정된 V, T, L성분 중 가장 큰 진동속도를 보인 것으로 본 발파의 14공 발파에 의해 교란되지 않은 비교적 양호한 단일 공 파형을 보이며 최대 진동 속도의 크기가 이전 발파(14공)의 파쇄 등의 이유로 상대적으로 작은 진동을 기록하지 않은 파형이라 판단된다.

이전 장약공(14공)의 기폭에 의해 교란된 파형은 중첩모델링에서 다른 결과를 보일 것이며, 또한 상대적으로 낮은 진동 수준의 파형은 이전 발파에 의해 지향선이나 발파공 주위의 균열상태가 과다하여 다른 진동 특성을 보일 것으로 판단되어 선정에서 제외시켰다.

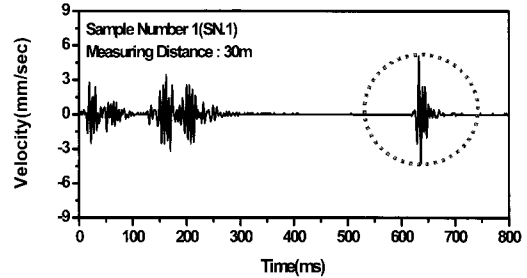
선정된 파형은 자료 처리의 편의를 위하여 각각 30, 33, 29, 69m의 파형에 대해 각각 SN. 1~4까지의 시료 번호를 부여하였다. Fig. 4~Fig. 7은 각각 SN. 1~4의 전체파형(a)과 모델링을 위해 진동 계측 자료로부터 Sampling 된 단일공 파형(b), 그리고 그 단일공 파형의 고속 푸리에 변환(FFT) 결과(c)를 보여 준다.

### 4.2 발파진동 중첩 모델링

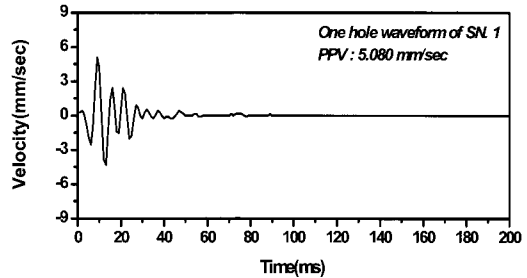
본 연구의 중첩모델링 방법으로서 지연단차는 1 ms 간격으로 1~80 ms까지 증가 시키며 모델링 하였으며 공수는 2~15공까지 증가 시켜가며 모델링을 실시하였다. 예를 들면, 15공의 중첩모델링은 먼저 1 ms 간격으로 15공의 단일공 파형을 출발시켜 중첩하였으며 최종적으로 중첩된 15공의 중첩 모델링 파형 중 가장 큰 진동속도를 기록하는 방식으로 80 ms 간격까지 모델링하여 각각 공수와 지연시차의 변화에 따른 진동의 최고치를 기록하였다. 중첩 모델링에 사용된 단일공 파형은 Fig. 4~Fig. 7의 단일공 파형(b)을 사용하였으며 총 4480개의 진동파형을 중첩 모델링하였다. 또한 SN. 1~SN. 4의 시료별로 4480개의 중첩 모델링된 진동파형 각각의 자료에 대한 지연단차와 최대 입자속도(PPV)의 분포는 Fig. 8과 같다.

### 4.3 단일공 파형 중첩모델링에 대한 고찰

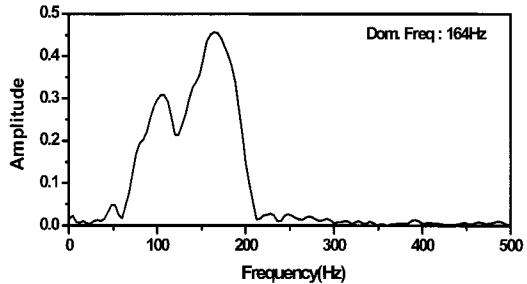
Fig. 8과 같이 단일공 파형 중첩모델링 결과 SN.



(a) Vibration time history in SN. 1 test



(b) Selected vibration time history for superposition modeling



(c) FFT spectrums of the selected vibration time history

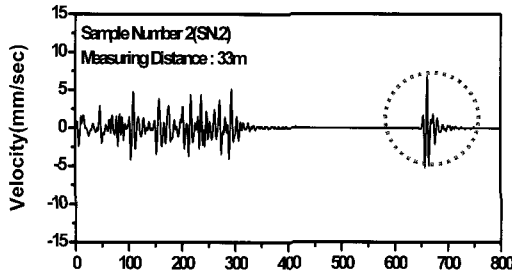
Fig. 4. Selection of vibration time history for superposition modeling(SN. 1)

1~SN. 4의 대표적 경향은 상쇄간섭 주기의 0.5, 1.5, 그리고 2.5 T의 지연단차는 상쇄간섭이 발생하여 진동이 저점으로 나타났으며 보강간섭 주기의 1, 2, 그리고 3 T의 지연시차는 보강간섭이 발생하여 진동이 고점으로 나타났다. 또 지연단차의 영향은 3 T 이상에서도 약간의 보강 간섭은 존재 하였다. 공수의 증가의 영향은 공수가 증가할수록 간섭에 의한 진동은 커졌으며 일정 공수 이상에서는 수렴되는 경향을 보였다.

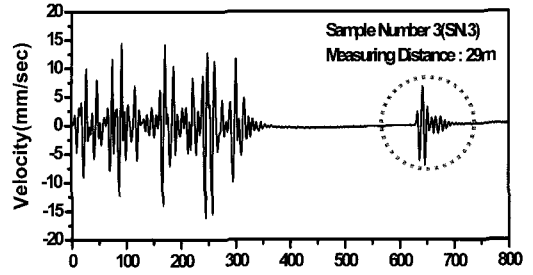
## 5. 발파 진동 예측방법의 검증

### 5.1 환산거리식 예측식에 의한 진동속도

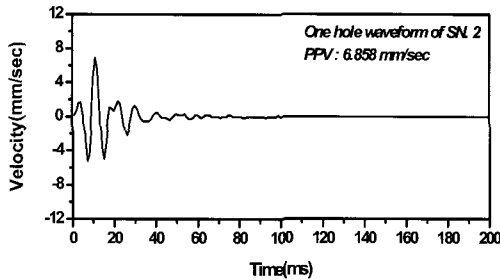
현장 실험 계측 결과 자료를 회귀분석에 의해 입지상



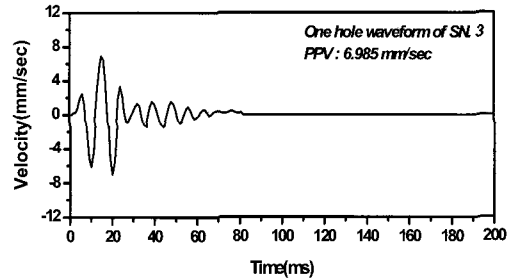
(a) Vibration time history in SN. 2 test



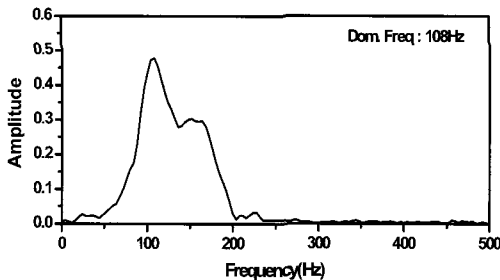
(a) Vibration time history in SN. 3 test



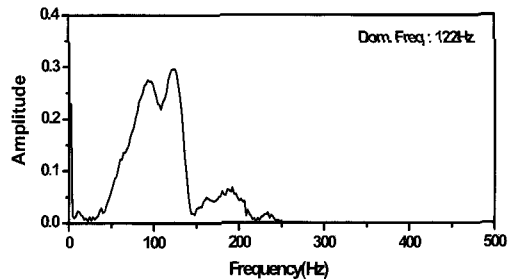
(b) Selected vibration time history for superposition modeling



(b) Selected vibration time history for superposition modeling



(c) FFT spectrums of the selected vibration time history



(c) FFT spectrums of the selected vibration time history

**Fig. 5.** Selection of vibration time history for superposition modeling(SN. 2)

**Fig. 6.** Selection of vibration time history for superposition modeling(SN. 3)

수  $K$ ,  $n$ 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리 하였다. 이때, 분석에 사용된 진동속도는 최대 입자속도를 사용하였다.

회귀분석결과에 따른 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리와 최대 입자속도와의 관계를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타냈다.

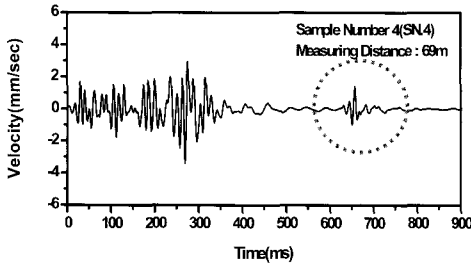
발파진동의 예측 문제에 있어서 환산거리식을 사용할 경우 안전율을 감안한 95%의 측정 자료를 포함할 수 있는 95%의 신뢰도를 갖는 식을 선택하여 발파작업에 사용된다. 결국 다음 식이 현장의 본 발파 작업에 적용될 수 있다. 식(1)과 식(2)은 각각 95%의 신뢰도를 갖는 자승근 및 삼승근 환산거리식을 나타낸다.

$$V = 9521 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.87} \quad r^2 = 0.88 \quad (1)$$

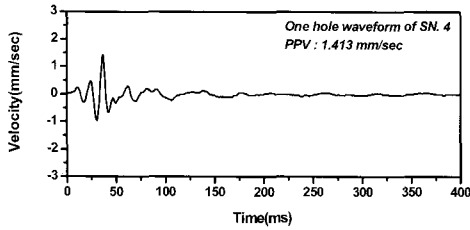
$$V = 12069 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.92} \quad r^2 = 0.87 \quad (2)$$

### 5.2 환산거리 진동예측식을 이용한 중첩 모델링 자료의 분석

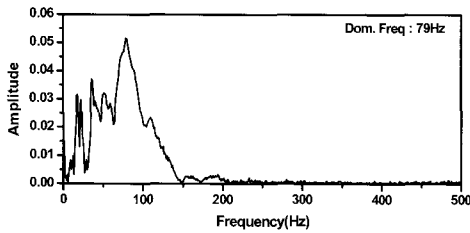
본 연구의 시험 발파 자료를 토대로 SN. 1~SN. 4의 단일공 파형을 지연시차와 공수의 증가에 따라 중첩 모델링하였다. Table 3의 SN. 1~4에 대한 단일공 파형 중첩모델에 의한 자료들은 Table 2와 같이 중첩모델링 공수와 지연단차만 다를 뿐 각각 같은 시료에 대해 동일한 SD를 갖는다.



(a) Vibration time history in SN. 4 test



(b) Selected vibration time history for superposition modeling



(c) FFT spectrums of the selected vibration time history

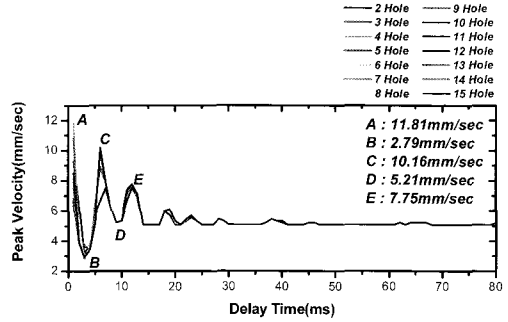
Fig. 7. Selection of vibration time history for superposition modeling(SN. 4)

Table 2. 3은 Fig. 8의 각각 SN. 1~4에서 최대 입자 속도 분포 중 1 ms (A), 1 T(C), 그리고 2 T(E)에서 가장 큰 입자속도를 기록한 자료와 0.5 T(B), 와 1.5 T(D)에서 가장 낮은 입자속도를 기록한 자료이다. 또한 각각의 시료를 획득한 거리와 지발당 장약량에 따른 자승근과 삼승근 환산거리로서 최적합식을 구하기 위한 입력 자료이다. Table 2, 3의 자료를 환산거리 개념을 사용하여 각각 최적합식을 구하고 실제 계측자료의 회귀 분석결과와 비교하였다.

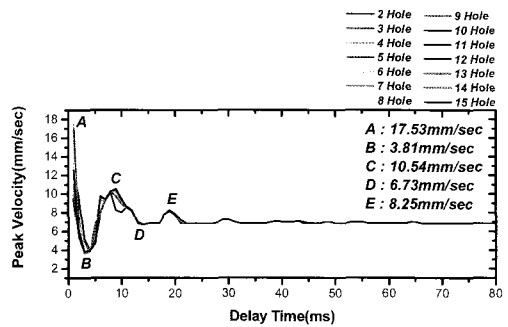
5.3 중첩 모델링 자료와 실제 계측 자료의 비교

현장에서 실제 계측된 자료를 사용한 환산거리식과 단일공 파형의 선형 중첩모델링에 의해 산출된 최대 입자 진동 중 가장 크거나 작은 진동속도를 보이는 자료에 대한 분석 결과를 비교 검토 하였다.

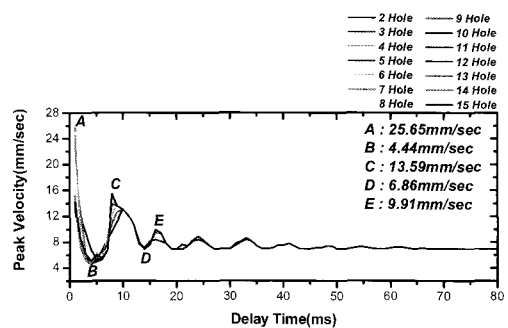
Fig. 11과 Fig. 12는 자승근 및 삼승근의 실제 계측자



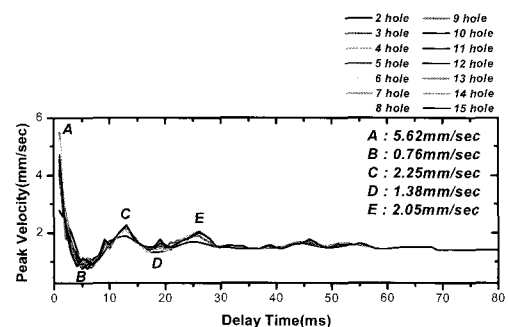
(a) SN. 1



(b) SN. 2



(c) SN. 3



(d) SN. 4

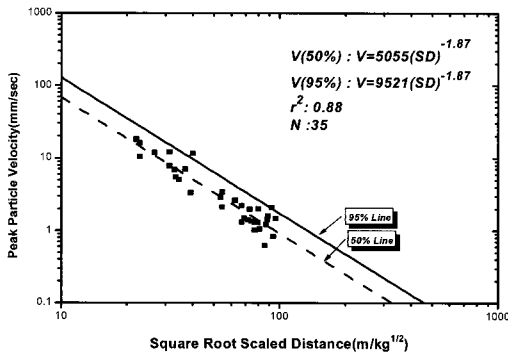
Fig. 8. Distribution of PPV by superposition result

**Table 2.** Input value of regression analysis on 1 ms peak value

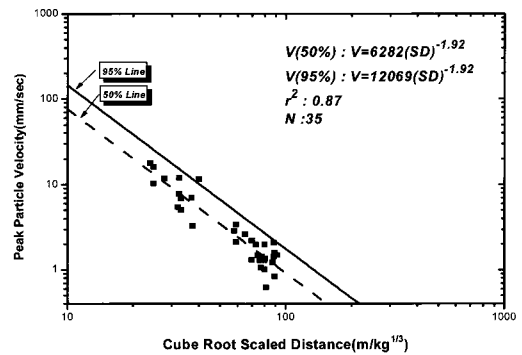
Data	Velocity (mm/sec)	Charge (kg)	Distance (m)	Square root scaled distance	Cube root scaled distance
SN. 1	11.81	0.75	30	34.64	33.02
SN. 2	17.53	1.00	33	33.00	33.00
SN. 3	25.65	1.60	29	22.93	24.79
SN. 4	5.62	1.60	69	54.55	58.99

**Table 3.** Velocity data for regression analyses

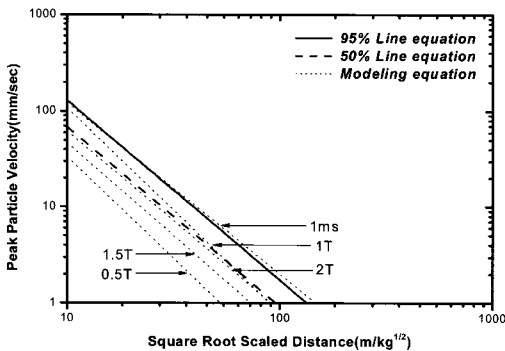
Data	Velocity (mm/sec)				
	1 ms	0.5T	1T	1.5T	2T
SN. 1	11.81	2.79	10.16	5.21	7.75
SN. 2	17.53	3.81	10.54	6.73	8.25
SN. 3	25.65	4.44	13.59	6.86	9.91
SN. 4	5.62	0.76	2.25	1.38	2.05



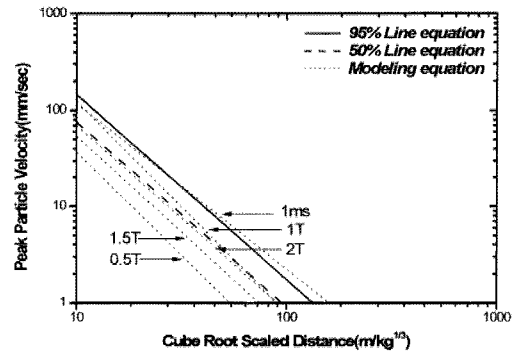
**Fig. 9.** Relationship of PPV and square root scaled distance



**Fig. 10.** Relationship of PPV and cube root scaled distance



**Fig. 11.** Relationship of real blasting and predicted vibrations with square root scaled distance



**Fig. 12.** Relationship of real blasting and predicted vibrations with cube root scaled distance

**Table 4.** Comparison of regression analysis data for the real-blasting and predicted vibrations

Equation		K	n	r <sup>2</sup>	N
50% Line equation	square root scaled distance	5055	-1.87	0.880	35
	cube root scaled distance	6282	-1.92	0.870	35
95% line equation	square root scaled distance	9521	-1.87	0.88	35
	cube root scaled distance	12069	-1.92	0.87	35
1 ms modeling equation	square root scaled distance	7300	-1.78	0.954	4
	cube root scaled distance	6178	-1.72	0.934	4
0.5T modeling equation	square root scaled distance	4276	-2.14	0.938	4
	cube root scaled distance	5057	-2.11	0.869	4
1T modeling equation	square root scaled distance	14535	-2.13	0.858	4
	cube root scaled distance	19076	-2.19	0.951	4
1.5T modeling equation	square root scaled distance	3960	-1.93	0.806	4
	cube root scaled distance	5234	-1.99	0.902	4
2T modeling equation	square root scaled distance	4600	-1.87	0.846	4
	cube root scaled distance	5926	-1.93	0.940	4

료와 중첩모델링에 의한 각각 1 ms, 0.5 T, 1 T, 1.5 T, 그리고 2 T에 해당하는 자료의 비교 그림이며 Table 4는 실제 계측자료의 회귀분석결과와 중첩모델링에 의한 회귀분석결과이다.

비교 검토 결과 95% 신뢰식의 실제 계측자료와 1 ms의 중첩 모델링 자료가 거의 일치하였으며 2 T의 중첩 모델링 자료와 50% 신뢰구간의 실 계측자료가 거의 일치하였다. 또한, 1 T의 중첩 모델링 자료는 95%신뢰구간과 50%의 신뢰구간 사이를 가로지르는 형태로 나타났다. 1 ms 중첩모델링자료와 실제 계측자료의 회귀분석결과가 거의 일치하는 것은 뇌관의 발화시간오차와 공간거리의 영향으로 지반 진동이 계측지점에 1 ms와 유사한 시간차로 도착된 결과로 판단된다.

0.5 T의 중첩 모델링 자료는 실제 계측 자료와 동떨어진 결과를 보인다. 이것은 실 계측자료가 중첩 모델링에서 나타나는 1 ms, 1 T, 1.5 T, 그리고 2 T의 지연 단차 범주 내에서 발생했음을 입증해 주는 결과로 사료된다. 또한 0.5 T의 모델링 자료에 의한 분석결과가 실제 계측 자료와 동떨어져 위치하는 것은 현장 실험의 실제 발파의 지연단차가 0.5 T의 범주 내에서는 발생하지 않았던 것으로 생각된다.

또한 단일공 파형에 의해 중첩 모델링된 최대 입자 속도에 의한 발파 진동의 예측은 실제 발파에서 얻은 자료에 의한 환산거리식과 거의 유사함을 보임으로서 발파 계획 지역에서 단일공 발파에 의한 단일공 파형을 획득하고 이 파형을 중첩 모델링하여 본 발파의 발파진동 전파식을 예측하는 방법에 대한 타당성을 확보

하였다.

그러나 계측위치 선정, 단일공 파형과 발파 대상 암반의 대표성 등의 단일공 파형을 얻는 방법과 사용뇌관의 특성, 발파 방법, 그리고 기폭방법 등에 따른 중첩 모델링방법에 대해 신중을 기하여야 할 것으로 사료된다. 또한 이러한 문제점에 대한 충분한 연구와 현장 실험이 필요할 것으로 사료된다.

## 6. 결론

현장에서 실제 계측된 자료를 사용한 환산거리식과 단일공 파형의 선형 중첩모델링에 의해 산출된 최대 입자 진동 중 가장 크거나 작은 진동속도를 보이는 자료에 대한 분석 결과를 비교 검토 하였다.

그 결과 단일공 파형에 의해 중첩 모델링된 최대 입자 속도에 의한 발파진동의 예측은 실제 발파에서 얻은 자료에 의한 환산거리식과 거의 유사함을 보임을 확인 하였다. 그러므로 발파 계획 지역에서 단일공 발파에 의한 단일공 파형을 획득하고 이 파형을 중첩 모델링하여 본 발파의 발파진동 전파식을 예측하는 방법에 대한 타당성을 확보 하였다.

그러나 계측위치 선정, 단일공 파형과 발파 대상 암반의 대표성 등의 단일공 파형을 얻는 방법과 사용뇌관의 특성, 발파 방법, 그리고 기폭방법 등에 따른 중첩 모델링방법에 대해 신중을 기하여야 할 것으로 사료된다. 또한 이러한 문제점에 대한 충분한 연구와 현장 실험이 필요할 것으로 사료된다.



## 참고문헌

1. 류창하, 2003, 수치해석적 방법의 발파설계 적용 및 문제점 고찰, 제2회 한화 발파기술 심포지움, pp.1-13
2. 임성식, 양형식, 2003, 시추공 발파 자료의 터널설계 적용성에 관한 연구, 화약·발파, Vol.21, No.2, pp.15-19.
3. 최성웅, 박의섭, 선우훈, 정소걸, 2004, 실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한연구, 터널과 지하공간, Vol. 14, No.2, pp.108-120.
4. Duvall, W., Johnson, C., Meyer, A., and Devine, J., 1963, Vibrations from Instantaneous and Millisecond Delayed Blasts, USBM, RI 6151.



## 김종인

1994년 조선대학교 자원공학과 공학사  
 1996년 조선대학교 자원공학과 공학석사  
 2006년 조선대학교 자원공학과 공학박사

Tel: 062-603-3945  
 E-mail: nam4tin@nate.com  
 현재 인발파환경기술사사무소 대표



## 강추원

1973년 조선대학교 자원공학과 공학사  
 1981년 조선대학교 자원공학과 공학석사  
 1999년 강원대학교 자원공학과 공학박사

Tel: 062-230-7117  
 E-mail: cwkwang@mail.chosun.ac.kr  
 현재 조선대학교 자원공학과 교수