

파형합성 프로그램 개발 및 현장 적용성 평가

윤지선¹⁾, 우택규^{2)*}, 배상훈³⁾

A Development of Waveform Composition Program and Evaluation of Application on Site

Ji-Sun Yoon, Taek-Gyu Woo and Sang-Hoon Bae

Abstract Recently, as a reduction method of vibration and noise, an electronic detonation which has an accuracy of time and a freedom of input delay time was introduced. A waveform composition program can determine a delay time and accomplish simulation under environment similar to real blast using a delay time. In this study, optimum delay time which controls vibration is obtained and real measurement vibration level is estimated by a waveform composition program.

Key words Electronic detonation, Waveform composition program, Optimum delay time

초 록 최근 진동·소음을 저감하는 공법으로 초시의 정확성과 초시부여의 자율성을 가진 전자뇌관을 이용하는 공법(OBM ; Orchestra Blasting)이 소개되었다. 파형합성프로그램은 전자뇌관의 지연초시를 결정할 수 있으며 결정된 초시를 이용하여 실 발파와 유사한 환경에서의 시뮬레이션을 수행, 최적초시 상태의 진동 속도를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 파형합성프로그램을 통해 진동을 제어하는 최적초시를 얻고 실제 발파작업 시의 진동치를 예측하고자 하였다.

핵심어 전자뇌관, 파형합성프로그램, 최적초시

1. 서 론

최근 도로, 철도 터널의 대단면화와 도심 근접시공이 증가하고 있지만 국민들의 인식 변화와 환경에 대한 중요성이 부각됨에 따라 진동·소음 및 발파 영향에 따른 환경문제가 민감한 문제로 대두되고 있다. 환경에 대한 공사현장 주변의 주민들이 발파에 대해 민감하고 무조건적으로 거부함에 따라 진동·소음을 저감시키려는 여러 방법들이 소개되어 왔으며 최근 전자뇌관을 이용하여 이를 제어하는 공법이 소개되었다.

국내에서는 전자뇌관의 수급 불균형과 가격 등의 문제로 상용화 되지 않고 있지만 국외의 경우 제 4세대 뇌관으로 소개 되면서 시험적 단계를 거쳐 남아프리카의 대규모 노천광산 및 여러 정밀 시공 발파 현장에서 적용되고 있다(윤지선 외, 2001; 배상훈, 2009). 전자뇌관은 기존뇌관의 정형화된 초시가 아닌 현장암질에 적합한 최적초시를 도출하여 발파진동·소음을 최소화하는 시간에 대한 단차별 정밀도와 지연시차의 부여방법에서 기존의 시스템과 많은 차이를 보인다.

본 연구에서는 전자뇌관의 초시부여의 자율성을 이용한 현장암반에 적합한 최적초시를 찾기 위한 파형합성프로그램(PBW ; Program of Blasting Waveform)의 소개와 합성방법, 프로그램을 이용해 도출한 최적 지연초시의 현장 적합성 등을 파악하고자 한다.

¹⁾ 인하대학교 토목공학과 교수

²⁾ 인하대학교 토목공학과 석사과정

³⁾ 태진건설(주) 대표

* 교신저자 : bmw615@naver.com

접수일 : 2009년 4월 20일

심사 완료일 : 2009년 5월 22일

게재 승인일 : 2009년 6월 4일

2. 파형합성 및 초시결정

$$\text{Vector Sum} = \sqrt{T^2 + V^2 + L^2} \quad (2.1)$$

2.1 파형합성의 원리

파형과 관계없이 전형적인 발파진동은 종선을 따라 시간이나 거리에 따라 변하는 사인파로 근사할 수 있다. 이 근사는 입자속도로부터 변형률과 가속도를 계산하기가 유용하다.

이 정현파(正弦波)의 시간차를 조절하면 수치합성에 의해 간섭 효과로 진동이 제어되도록 한다.

시차별 발파진동을 상호 간섭시켜 진동소음을 저감시키는 발파로서 보다 상세하게는 복수의 진동원에서 진동을 적극적으로 중복시켜 상호간섭을 통하여 발파진동을 저감시킨다.

단발발파로 얻은 발파데이터에서 독립적인 파형을 분리한 후 파형의 각성분인 T,V,L 성분별로 1ms 단위로 가감한다. 최외곽공에 대한 데이터는 확대공 발파에서 얻어진 데이터를 이용하였다.

합성 진동치(3성분의 vector의 합)는 실벡터 합으로 하였으며 다음 식으로 구할 수 있다.

파의 간섭원리를 이용하여 발파진동 저주파음을 경감할 수 있고, 정밀한 기폭에 의해 매우 깨끗한 굴착면을 실현하고 또 암을 손상하지 않기 때문에 공동의 안정성을 높일 수 있다.

또한, 암중에 맞는 단발 초시 설계를 함으로써 파쇄입도를 작게 하여 소할, 적재시간, 2차 파쇄의 경감을 유도할 수 있다.

합성하고자 하는 정현파(正弦波)의 시간차를 조절하여 임의의 시간대에서 +, - 수치를 가감의 수치합성을 수행함으로써 각 파형간의 간섭 효과로 진동이 제어되도록 한다(Fig. 1 참조).

2.2 파형합성 방법

파형합성 프로그램은 노천발파에 적용 가능한 단순 파형합성의 방법과 자유면 수의 증가와 지발당 장약량의 차이를 보이는 터널발파에서 적용 가능한 누적 파형합성으로 최적초시를 결정할 수 있으며 그 원리

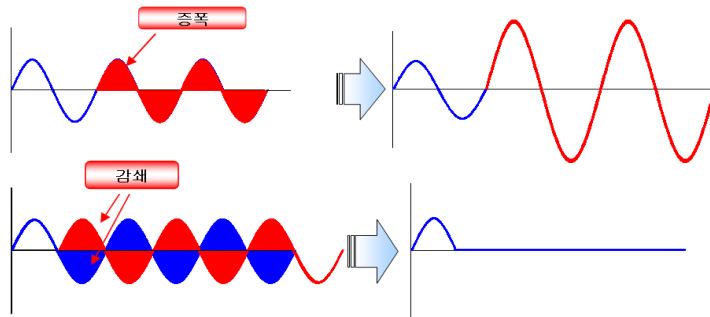


Fig. 1. Principles of waveform synthesizing.

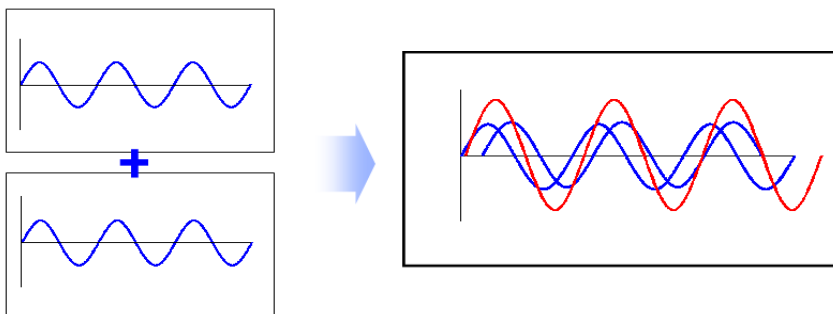


Fig. 2. Diagram of simple waveform synthesizing.

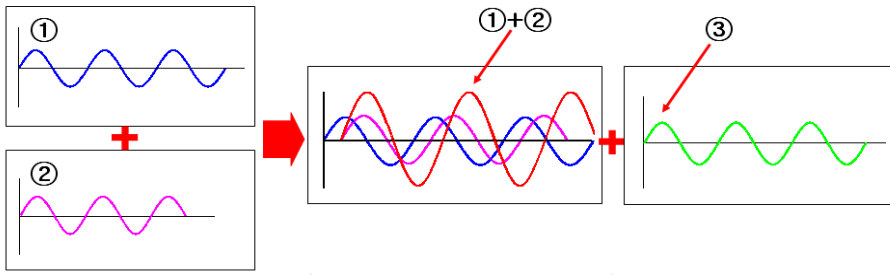


Fig. 3. Diagram of accumulated waveform synthesizing.

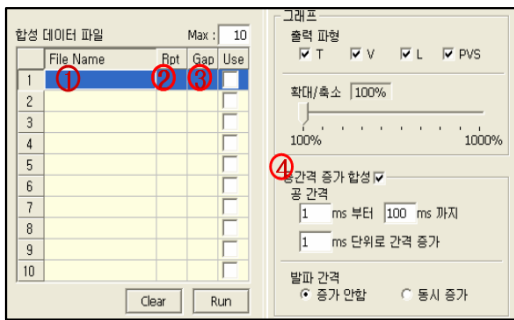


Fig. 4. Data input window.

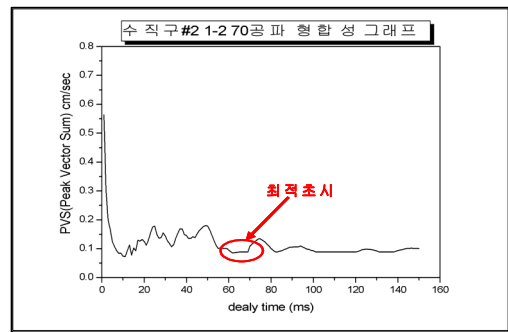


Fig. 5. Example of waveform synthesizing graph.

는 다음과 같다.

- 단순파형합성

단순파형합성은 각 발파공이 동일한 자유면의 수를 갖는다는 전제하에 합성을 수행하는 방법으로서 단공 시험발파를 통해 획득한 한 개의 단공발파파형을 이용하여 최적초시를 도출하고자 하는 방법이다. 단순 파형합성 모식도는 다음 Fig. 2와 같다.

- 누적파형합성

실 발파 작업 시 변화하는 자유면의 수를 고려하기 위해 적용된 합성개념으로서 Fig. 3과 같이 심발 발파 시 9개의 발파공들의 단발파형을 획득하여 ①파형과 ②파형을 합성한 후 ①+②의 새로운 파형을 획득한다. 이후 ③파형을 합성하는 작업을 반복 수행함으로써 실제 발파의 공수뿐만 아니라 단발발파 실험 시 발 파 순서도 고려하여 파형합성을 수행함으로써 자유면 효과를 최대한 반영한 발파시물레이션을 구현하는 방법이다.

3. 프로그램 사용방법 및 결과

3.1 프로그램의 사용방법

단발파형은 현장에서 단공시험발파를 실시하여 얻을 수 있으며 발파진동 계측기로 측정된 결과를 텍스트파일로 변환시킨다. 변환된 텍스트파일을 파형합성 프로그램에 입력(Fig. 4 ①)하고 1ms부터 100ms까지 1ms단위로 시차를 늘려가며 합성(Fig. 4 ④)을 수행함으로써 최소진동레벨을 갖는 임의의 초시를 획득할 수 있다.

입력된 텍스트 파일은 현장에서 수행하는 발파 패턴과 동일하게 자유면 효과가 나타나는 각각의 공당 파형을 각 성분별(T, V, L)로 중첩하여 합성할 수 있고 이를 통해 각 성분별 최대값과 PVS 최대값을 나타낼 수 있다. 또한 각 단공파형의 반복횟수 (Fig. 4 ②)와 각 공간, 지발간 간격(Fig. 4 ③)을 입력함으로써 실제 발파 시 공수와 지발시간을 표현할 수 있다.

Table 1. Comparison of the seismic wave velocity

Electronic detonator	Electric detonator
Optimum delay 10ms → 0.07 cm/s	conventional delay 20ms → 0.12 cm/s
Optimum delay 60ms → 0.08 cm/s	conventional delay 25ms → 0.17 cm/s

3.2 최적초시 도출

1ms에서 100ms 까지 1ms 단위로 초시를 증가시켜 합성한 결과, 각 지연초시별 최대벡터합 (PVS)을 Fig. 5 와 같이 표현한 후 가장 낮은 최대벡터합 (PVS)을 나타내는 초시를 찾음으로써 최적초시를 결정할 수 있다. Fig. 5의 경우 10ms 전후에서도 최적초시가 나타나지만 1ms 단위로 급격한 PVS의 변화를 보이기 때문에 보다 안전한 영역의 60ms 전후의 최적초시를 선택하였다. 또한 Table 1과 같이 실험 암반에서 동일 조건으로 최적초시 적용 전자뇌관과 기존 뇌관의 정

형화된 초시인 20ms, 25ms와의 비교 시 최저 50% ~ 최대 141%의 진동저감효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

3.3 예측치 도출을 위한 발파 시뮬레이션(최적초시 적용)

단공발파로 얻어진 독립파형을 누적 파형합성 방법으로 얻어진 각 최적초시와 실제 현장에서 적용할 공수에 맞게 파형합성 프로그램 상에 수치를 대입하여 시뮬레이션 해봄으로써 발파 진동치(PVS)를 예측할 수 있다. Fig. 6, 7은 예측치 시뮬레이션의 모식도와 실제 프로그램상의 input data window와 graph를 나타낸다.

3.4 예측치와 실제 계측치의 비교 분석

실제 시험발파의 수행 후 진동계측 프로그램을 이용하여 실제 파형과 진동치를 획득 한 후 실제 발파 수행 전에 시뮬레이션 했었던 예측진동치(PVS)와 비

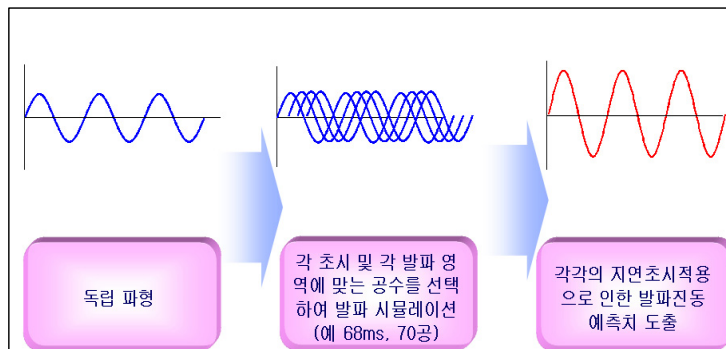


Fig. 6. Diagram of prediction simulation.

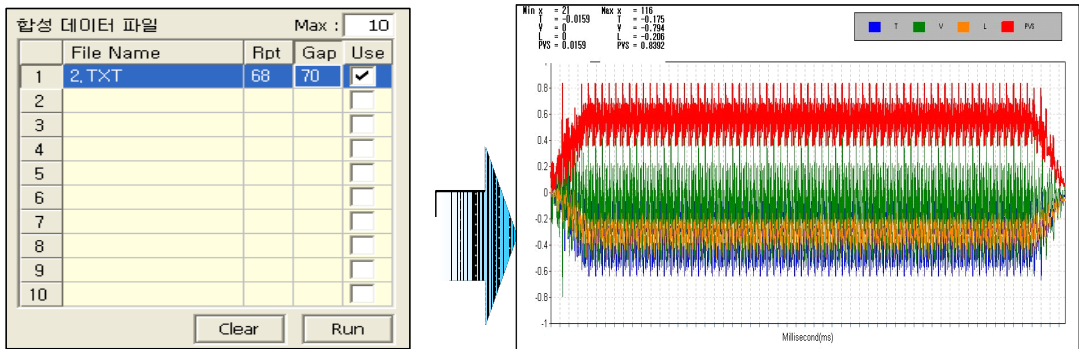


Fig. 7. Input data and output graph.

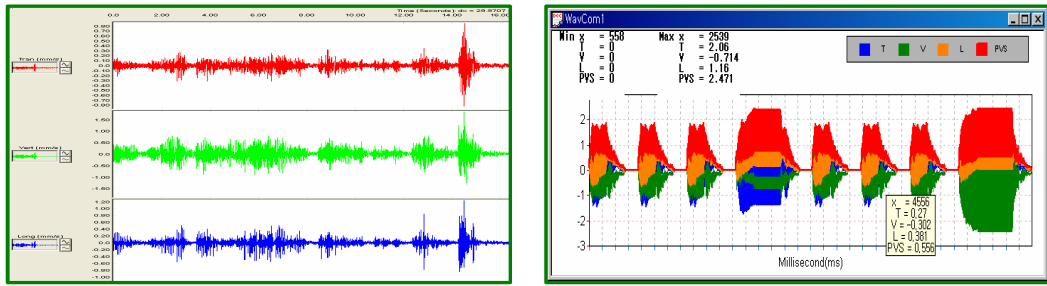


Fig. 8. Comparison of real-blasting and blasting simulation using OBM.

Table 2. Change of input data window

버전-1	버전-2	버전-3
<ul style="list-style-type: none"> · 단순파형합성 개념 도입 · 단공파형합성 시 1공만 입력 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 누적파형합성 개념 도입 · 파형 입력 갯수 추가 	<ul style="list-style-type: none"> · 여러 단공파형 자동 합성 가능 · 다양한 출력자료 구현

교를 해봄으로써 오차범위를 확인하고 이를 토대로 원인을 고찰할 수 있다. Fig. 8의 진동데이터를 비교해 보면 연주식(OBM) 발파공법 적용시의 진동 데이터로 진폭을 통해 기록리듬감 확인 및 진동 우세성분을 확인할 수 있다.

3.5 각 버전 별 특징 및 변화

프로그램은 파형합성의 기본개념 및 사용자의 편의와 요구사항에 맞춰 3번의 업그레이드가 되어왔다. Table 2는 각 버전 별 특징과 Data input window의 변천사를 나타내고 있다.

4. 현장 적용

현장 적용 실험은 기본적으로 발파공법의 차이와 현

장요건들의 차이를 감안하여 크게 3가지 발파현장으로 구분을 두었다. 그 구분은 노천, 터널, 노천과 터널의 복합적인 모델인 수직구 현장으로 하였고, 각각의 현장에서 본 실험발파 수행 전 단일공의 파형 및 누적파형합성을 위한 기폭공들의 파형을 획득하였다. 획득한 파형을 기초로 현장 발파공 수와 같은 수로 시물레이션을 수행하여 얻은 예측 진동치(PVS)와 실험발파의 실측 계측치(PVS)의 오차범위를 확인하는 단계로 실험을 수행하였다. 파형합성프로그램을 통한 최적도시 도출과 실제 발파와의 비교분석의 전체적인 흐름은 다음과 같다(Fig. 9 참조).

4.1 수직구 발파

도심에 위치한 수직구 발파현장(Table 3, Fig. 10 참조)에서 단발파형을 획득한 후 프로그램을 통해 도출

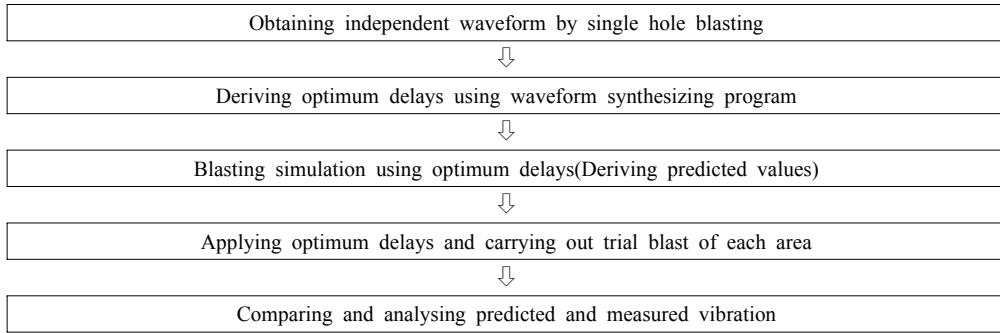


Fig. 9. Flow Chart of PBW(Program of Blasting Waveform).

Table 3. Specification of OBM in shaft

Blasting specifications
Number of holes : 300 holes
Hole diameter : Ø45
Hole length(m) : 1.5m
Charge per hole(kg): Stopping hole 0.5kg
Total charge(kg) : 145.5kg
Specific charge : 0.727kg/m ³
Optimum delay : 68ms
Time lag between areas : 500ms

Table 4. Predicted vibration values of shaft blasting(cm/s)

Optimum delay	PVS (cm/s)
68ms	0.164

Table 5. Measured vibration values of shaft blasting(cm/s)

Distance(m)	PVS (cm/s)
25	0.198
35	0.162
40	0.135

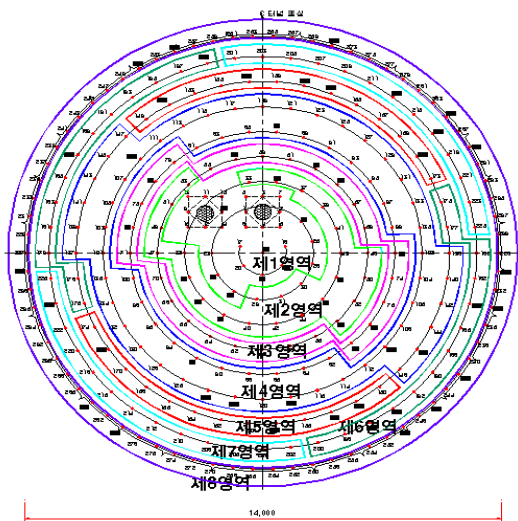


Fig. 10. Design drawing of OBM in shaft.

한 초시는 68ms였으며 이 지연초시를 이용하여 실 발파와 동일한 조건으로 시뮬레이션을 한 결과 예측된

PVS값은 0.164cm/s이었다(Table 4 참조). 이 후 실제 발파 시 수직구 중심으로부터 25m를 이격한 후 25m, 35m, 40m 간격으로 3대의 계측기를 설치하여 진동치를 1회 계측하였으며 가장 가까운 위치에서 나타난 최대 진동치는 0.198cm/s였다. 수직구에서의 예측 진동치(PVS)와 실측 계측치(PVS)의 오차는 18% 이내였으며 파형합성 시뮬레이션을 통해 실측치와 근접한 예측치를 알 수 있었다. Table 5는 계측 거리별 진동치를 나타낸다(윤지선 외, 2007).

4.2 터널 발파

터널 발파(Table 6, Fig. 11 참조) 시 심발부에서 단공 파형을 획득한 후 파형합성프로그램을 이용하여 17ms와 21ms, 45ms, 66ms를 획득하였다. 도출된 각각의 초시를 실제 발파 시의 공수와 동일한 154공으로 시뮬레이션 한 결과는 다음 Table 7과 같다. 실제 발파 시 각 최적초시를 심발부 확대부 외곽부로 나누어 각각을 조합하여 사용하였다. 계측은 터널 내부 막장으

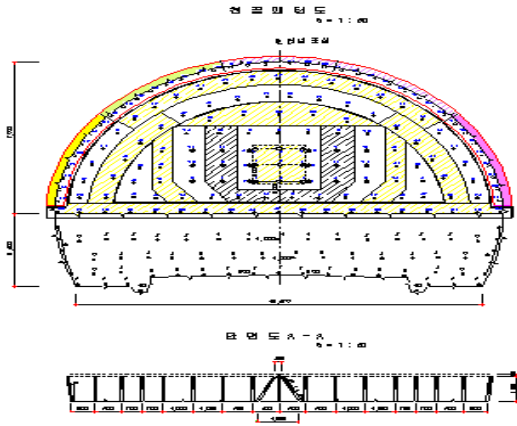


Fig. 11. Design drawing of OBM in tunnel.

Table 6. Specification of OBM in tunnel

Blasting specifications	
Number of holes : 154 holes	
Hole diameter : Ø 45	
Hole length(m) : 1.5m	
Charge per hole(kg) : 1.5 kg	
Total charge(kg) : 130 kg	
Optimum delay : 17, 21, 45, 66ms	
areas : 12 EA	
Time lag between areas : 800ms	

Table 7. Predicted vibration values of tunnel blasting(cm/s)

Optimum delay	100m PVS (cm/s)
17ms	0.27
21ms	0.27
45ms	0.28
66ms	0.27

Table 8. Measured vibration values of tunnel blasting(cm/s)

Application of electronic detonator	100m PVS (cm/s)
17, 45, 17ms	0.89
17, 17, 17ms	1.11
21, 66, 21ms	0.73
21, 66, 21ms	0.78

로부터 100m이격하여 측정하였으며 결과는 Table 8과 같다. Table 7, 8에서 파형합성 프로그램을 통한 예측 진동치(PVS)와 비교할 때 최적초시 조합을 통한 실제 계측치(PVS)가 현저히 높은 수치를 보이고 있다 (윤지선과 김도현, 2006). 이는 영역별 각각의 최적초시 조합시 공간격과 장약량의 차이를 예상 하지 못했고, 당시 파형합성프로그램이 버전-1으로써 단순 파형합성의 기능만을 수행했었으므로 단공 기폭으로 인한 자유면 확대를 고려하지 못한 것에 기인한다고 사료된다.

4.3 노천 벤치 발파

노천 벤치 발파(Table 9, Fig. 12 참조)에서 가장 먼 저 발파가 이루어지는 공에 근접한곳에서 단공파형을 획득한 후 파형합성프로그램을 이용하여 16ms와 45ms의 최적초시를 획득하였다. 계측은 1열로부터 50m 이격 후 20m 간격으로 5대의 계측기를 설치하여 계

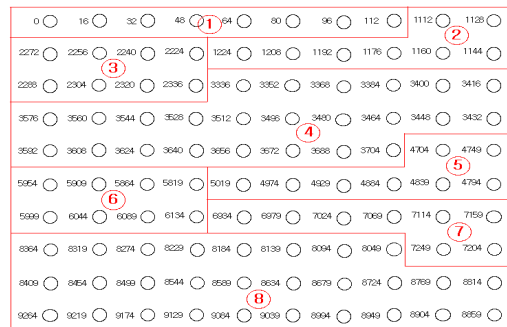


Fig. 12. Design drawing of OBM in open-cut.

Table 9. Specification of OBM in open-cut

Blasting specifications	
Hole diameter : Ø 76	
Bench length(m) : 7.2 m	
Hole length(m) : 8 m	
Number of holes : 100 holes	
Charge per hole(kg) : 12 kg	
Total charge(kg) : 1200 kg	
Optimum delay : 16, 45ms	
Time lag between areas : 800, 1000ms	

Table 10. Predicted vibration values of open-cut bench blasting(cm/s)

Optimum delay	PVS (cm/s)
16ms	1.62
45ms	2.12

Table 11. Measured vibration values of open-cut bench blasting (50m)(cm/s)

Optimum delay	PVS (cm/s)
16ms	1.72
45ms	1.53

측하였으며 16ms와 45ms 적용 시 예측 진동치(PVS)와 실제 진동치(PVS)는 Table 10, 11과 같고, 실측 진동치는 발파원에서 가장 가까운 50m 계측기의 진동치를 나타낸다. 가장 큰 차이를 보인 45ms 적용 시 예측치와 실측치의 오차는 28%를 보였다. 예측치와 실측치의 오차는 단공 시험과 실제 발파에서의 천공장 차이로 인한 암반내 물성치오차와 장공 발파로 인한 암반의 하부 구속도의 차이로 실제 발파 진동치가 시뮬레이션을 통한 예측진동치(PVS)보다 다소 높은 수치를 보인 것으로 사료된다(배상훈, 2009).

5. 결론

최근 발파 진동·소음 저감과 굴진효율개선을 위해 전자뇌관의 사용이 소개되었다. 전자뇌관은 매우 정밀한 시차로 발파가 이루어지며 시차의 부여가 자유롭다는 특징을 가지고 있다. 이 같은 특징을 이용해 실제 발파가 이루어지는 현지 암반에 적합한 초시를 찾고자 파형합성프로그램을 개발하였으며 프로그램을 통해 얻은 최적초시를 이용하여 실제 발파를 수행함으로써 프로그램의 적합성을 판단하고자 하는 것이 본 논문의 목적이라 할 수 있다. 최적초시의 도출과정과 실제 발파 적용에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 파형합성프로그램을 통해 단일공을 이용한 합성뿐 만 아니라 실제발파와 유사한 자유면 수의 변화와 발파 순서에 따른 변화를 고려하여 최적초시를 도출할 수 있었으며 실제 공수와 공과 영역간의 지

연시차를 입력함으로써 실제발파를 표현하여 예측 진동치를 추정할 수 있었다.

- 2) 현장 적용은 수직구와 터널, 노천 벤치에서 실시하였으며, 수직구와 노천 벤치발파의 경우 프로그램을 통해 20~30%의 오차 범위 안에서 예측이 가능하였다. 터널의 경우에는 실측치와 예측치 사이에 다소 큰 오차를 나타내었는데 이는 일정한 초시를 사용한 시뮬레이션과 다르게 실제 발파 시에는 초시를 조합하여 사용하였으며 터널 굴착에 따라 막장이 전방으로 이동하기 때문에 단공파형을 획득한곳의 암반과 실제 발파가 이루어진 암반이 다르기 때문으로 사료된다. 또한 터널 내에서의 계측으로 폐쇄된 장소에 따른 영향이 예측 진동치(PVS)와 실측 계측치(PVS)의 큰 차이를 보였다고 판단된다.
- 3) 최적초시 결정에 있어서 수직구 및 노천의 경우 발파가 이루어지는 암반을 대표할 수 있는 곳에서 단공파형을 획득하는 것이 매우 중요하며 터널의 경우 막장의 이동에 따른 암질의 변화를 고려하여 최적초시를 변화시켜야 할 것이다. 또한 최적초시 도출 시 다수의 초시가 나타난 경우도 있었으며 이때 초시의 결정은 많은 경험을 통해 이루어져야 할 것이다.
- 4) 추후 파형합성프로그램을 이용하여 도출한 최적초시의 적용횟수가 증가한다면 여러 암질과 암반등급에 알맞은 각각의 최적초시들을 결정할 수 있을 것이며 예측 진동치(PVS)의 정확도 또한 증가할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 배상훈, 2009, 전자뇌관을 이용한 연주식 발파공법 적용성에 관한 연구, 박사학위논문, 인하대학교, 인천.
2. 윤지선, 김도현, 2006, 발파진동 파형합성을 이용한 전자뇌관의 최적지연초시에 관한 연구, 터널기술논문집(한국터널공학회지), Vol. 8, No. 2, pp.129-139.
3. 윤지선, 김수현, 배상훈, 2007, 전자뇌관을 이용한 수직구 전단면 다단시차 분할 발파에 대한 연구, 터널기술논문집(한국터널공학회지), Vol. 10, No. 2, pp.177-184.
4. 윤지선, 조영근, 이형원, 2001, 외국의 전자뇌관의 시공 사례와 그 실효성에 관한 고찰, 대한토목학회 초청 및 구두발표논문 초록집, pp.1-4.

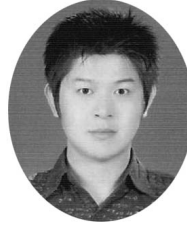


윤 지 선

인하대학교 토목공학과 교수

Tel : 032)756-7557

E-mail : jyoona@inha.ac.kr



우 택 규

인하대학교 토목공학과 석사과정

Tel : 032)876-7556

E-mail : bmw615@naver.com



배 상 훈

인하대학교 토목공학과 공학박사
(주)태진건설발파엔지니어링 대표

Tel : 031)623-0205

E-mail : teajin@teajin.com