

전자뇌관을 이용한 수직구 전단면 다단시차 분할 발파에 대한 연구

윤지선¹, 김수현^{2*}, 배상훈³

A study on full-face sequential blasting using electronic detonator

Ji-Sun Yoon, Su-Hyun Kim, Sang-Hoon Bae

Abstract In this study, in order to reduce appeals regarding vibration and noise from blasts, the optimum delay-time of the electronic detonator, which can minimize blast vibration, is found through blast-waveform composition and blasting simulation, and we have developed the Full-face Sequential Blasting Method based on the studies of damping properties of full-face section blasting. The optimum delay-time of the electronic detonator and Full-face Sequential Blasting Method using electronic detonator was applied to the Gyeongbu high-speed railway construction site to test the feasibility of this method.

Keywords: Electronic detonator, optimum delay time, blast-waveform composition full-face sequential blasting method

요지 본 연구에서는 발파 진동 및 소음에 관한 문제를 최소화하기 위해 발파진동 파형합성과 발파 시뮬레이션을 통해 진동을 최소화 시킬 수 있는 전자뇌관의 최적초시를 찾고, 또한 전단면 분할 발파의 감쇄특성에 대한 연구를 토대로 하여 전단면 다단시차 분할 발파기법을 개발하였다. 경부고속철도 OO공구 수직구 시공현장에서 전자뇌관을 이용한 파형합성 최적초시적용과 전단면 다단시차 분할발파를 동시에 수행하는 발파기법을 현장에 적용함으로써 그 타당성을 검토하였다.

주요어: 전자뇌관, 최적 지연초시, 파형합성, 전단면 다단시차 분할발파

1. 서론

대형·대단면 지하공간 창출에 대한 수요가 점차 증가하고 있는 가운데 터널의 규모 확대에 따른 굴착에 있어서 굴진효율 증가, 진동·소음민원, 막장의 안정화 등의 당면한 문제가 커지고 있는 실정이다. 특히 발파굴착에 있어서 진동으로 인한 민원은 국토면적이 작은 국내 현실에 비추어 볼 때 도심근접지 및 도심지 굴착이 증가할 수밖에 없는 상황에서 피해갈 수 없는 시공장에 요소이다. 이에 대한 대책으로 진동을 줄이기 위해 분할 발파를 하여 지발당 장약량을 줄여 발파하거나 기계굴착시공을 하고 있다. 그러나 이는 굴진효율의 감소를 가져오고 또한 공사비용과 시간에 지장을 초래할 수 있다.

본 연구에서는 발파로 인한 민원감소를 최소화 하면서 굴진효율을 증대할 수 있는 방안으로써 전자뇌관을 사용해 진동을 저감할 수 있는 파형합성을 통한 최적 지연초시적용과 전단면 다단시차 분할발파를 동시에 수

행할 수 있는 발파기법을 개발하여 이를 터널 현장에 적용함으로써 그 타당성을 검토하고자 하였다¹⁾.

2. 연주식발파 공법의 원리

2.1 연주식 발파법(OBM) 개요

음악과 소음의 차이는 공기 중에 전달되는 파동의 합인 파형이 전체적으로 주기적 성질을 가지면서 세기가 너무 크지 않으면 쾌적한 감정을 불러일으키는 음악이 되고 파형이 비주기적이면 불쾌한 느낌을 주면 소음으로 되는 것이다. 연주식 발파법(Orchestra Blasting Method, OBM)은 이를 발파 기법에 응용해 발파 파형에 일정한 리듬을 주어 사람이 소음으로 느끼던 발파음을 보다 쾌적한 감정으로 느끼게 하고자 하는데 그 목적이 있다.

2.2 파형합성의 원리

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

¹정회원, 인하대학교 토목공학과 교수

²인하대학교 토목공학과 대학원

³정회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정

*교신저자: 김수현 (wolfgang121@naver.com)

정현파(正弦波)의 +, - 수치를 조정하여 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 1 ms 단위로 가감한다. 합성 진동치(3성분의 vector의 합)는 실벡터 합으로 하였으며 다음 식으로 구하였다.

$$\text{Vector Sum} = \sqrt{T^2 + V^2 + L^2}$$

2.3 연주식 발파 방법

연주식 발파법의 핵심은 전자뇌관에 있다. 전자뇌관의 초시 자율성과 정밀도를 이용하여 발파에 의한 진동과 소음을 저감시킬 수 있는 최적의 초시를 구하여 초시조절과 발파 영역구분으로 발파음의 분할과 주기를 만들 수 있으며 이를 이용해 발파파형을 제어 할 수 있다. 또한, 장약량의 조절로 파형의 세기를 조절하여 발파파형의 세기를 조절한다.

3. 현장 실험

3.1 개요

도심지 수직구 굴착현장에서 단공발파를 실시하여 파형을 획득한 후 파형합성 프로그램을 이용하여 합성초시를 구하고 이를 적용하여 전자뇌관과 합성초시의 유효성을 입증하고자 한다. 또한 개발된 연주식 발파공법을 전단면에 걸쳐 현장에 적용하여 전단면 다단시차 분할발파에 대한 적용성을 평가하고자 한다.

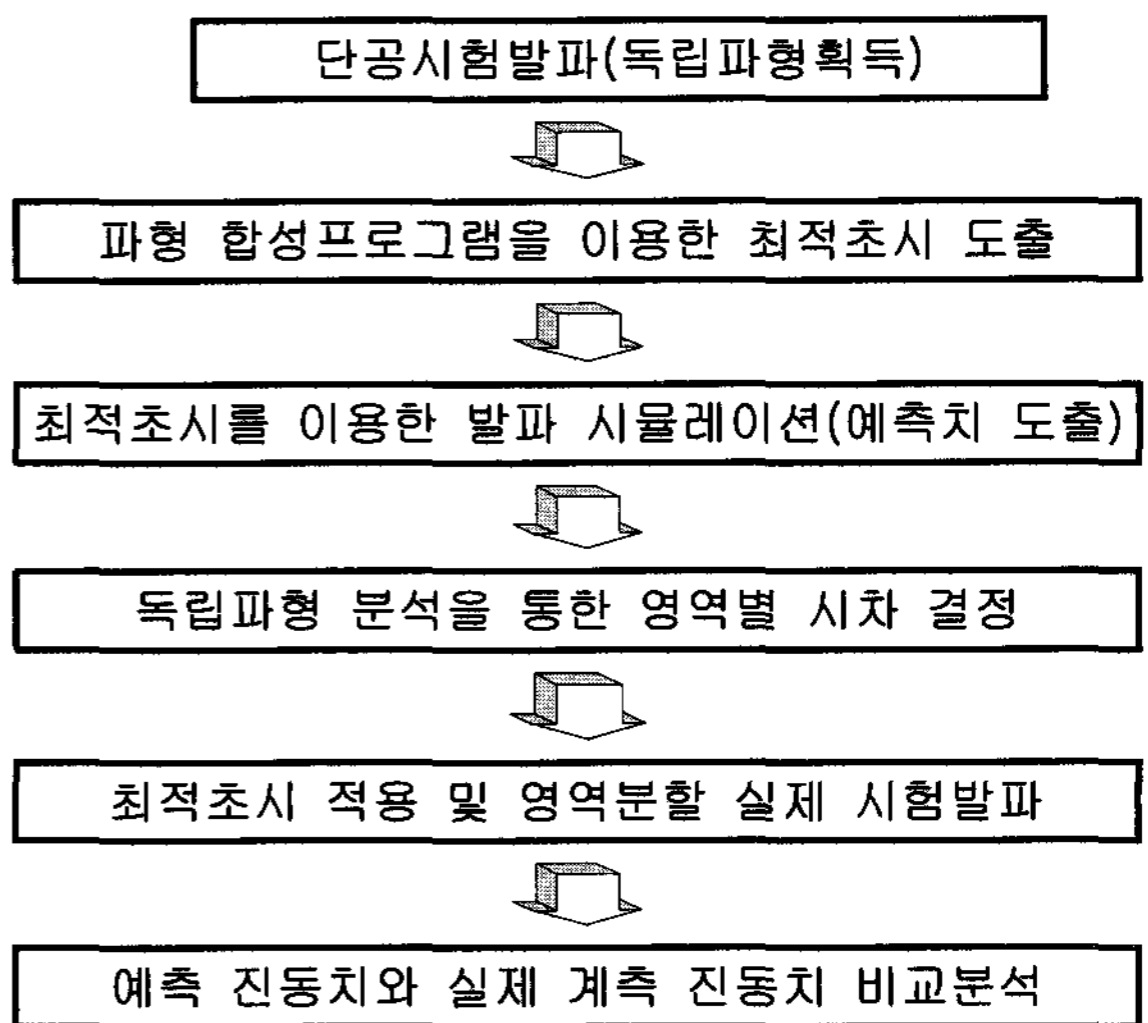
(1) 현장 및 지질 개요

본 연구에서는 경부고속철도 노반 시설인 수직구에서 실험하였으며, 또한 주변지역은 경상분지의 주요 구조

선인 북북동 방향의 동래단층이 인접하고 있으며, 경상 누층군의 유천층군에 해당하는 안산암, 안산암질 응회암과 이를 관입한 반려암, 화강섬록암 및 흑운모 화강암이 분포하고 있다. 안산암 및 화강암은 1000 kg/cm² 이상의 높은 강도 특성을 보이며, 반려암은 500 kg/cm² 이하의 낮은 강도 특성을 보이고 있다.

(2) 시험 절차 및 방법

국내 암반에 대해 전자뇌관의 적용에 따른 발파효과에 대한 현장 실험을 실시하고 다음의 개념으로 연구를 수행하였다. 현장에서의 실험은 크게 수직구 #2에서의 심발·확대부 전자뇌관 적용 발파와 수직구 #2의 전단면에 OBM을 적용하여 예측치 및 기존 뇌관 발파와 비교하였다.



3.2 단공 발파

단공발파를 하여 각각의 파형 간에 중첩이 생기지 않도록 하기 위해 500 ms의 뇌관 지연시차를 두고 발파하여 독립파형을 얻는다. 이는 각각의 수직구에 동일하게 적용되며, 발파제원은 표 1과 같다.

표 1. 단공 발파 제원

| 구분 | 천공장 | 천공경 | 천공수 | 사용뇌관 | 공당 약량 | 총 장약량 |
|-------|-------|-----|------|------|---------|--------|
| 기본 발파 | 1.5 m | Ø45 | 8~12 | 전자뇌관 | 0.45 kg | 5.4 kg |

3.3 단발파형 수집

500 ms의 지연시차를 주어 8~12공을 발파하여 단발파형을 얻은 데이터를 초시합성에 이용한다.

수직구 #2에서 5대의 계측기로 7개의 단발파형을 얻었다.

3.4 발파 시뮬레이션

수직구에서 얻은 각각의 독립파형을 각 초시 및 각 발파 영역에 맞는 공수를 선택하여 시뮬레이션 함으로써 발파진동을 예측하여 실제 발파와 비교하였고, 또한 각 delay time 별로 시뮬레이션 해봄으로써 최적의 초시를 찾을 수 있었다.

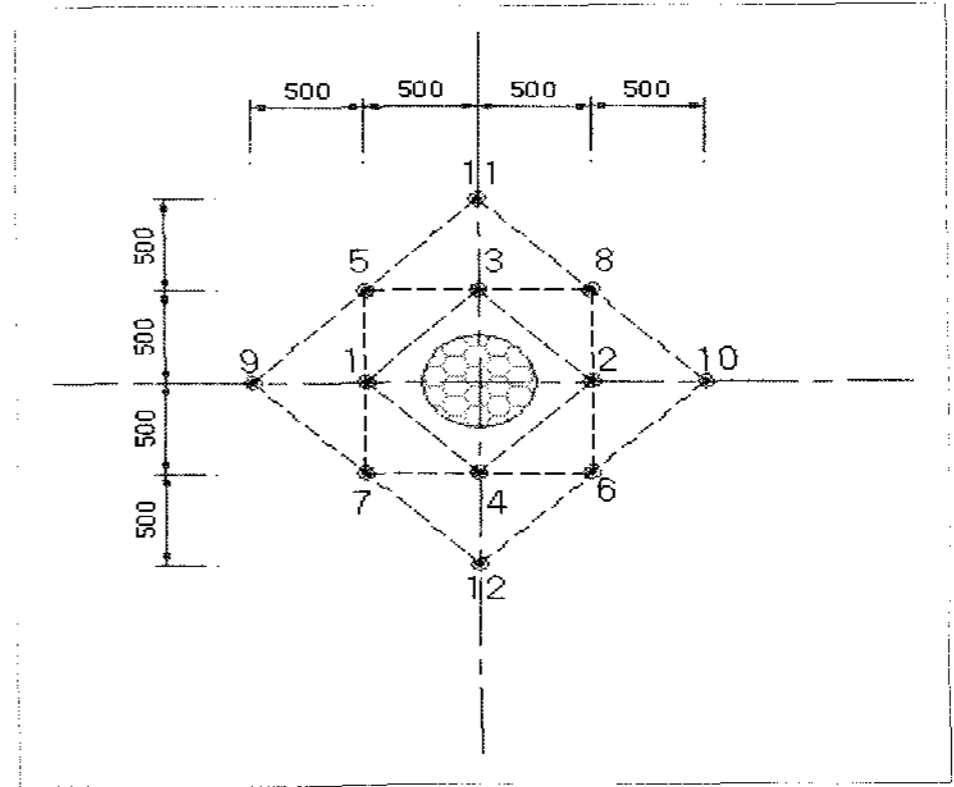


그림 1. 단공 발파 패턴도

(1) 수직구 #2 심발·확대부 발파 시뮬레이션 결과 및 경향 분석

동일한 독립파형을 1 ms~150 ms까지 70공의 심발·확대부를 발파 시뮬레이션 하여 각 delay time별 최대 PVS값을 비교 분석하여 최적 초시를 결정한다.

발파 시뮬레이션 결과 초기에 최소치가 나오는 경우와 60~70 ms 사이에서 최소치가 나오는 경우가 나왔다. 초기에 나오는 초시는 발파진동 데이터의 오차 및 Peak 변화폭이 큼을 고려해 일정한 진동치를 유지하는 60~70 ms 사이에 나오는 최적초시 분석 결과 68 ms로 결정하였다.

표 2. 획득된 단발파형

| 계측기 번호 | 수직구 #2 |
|--------|--------|
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |

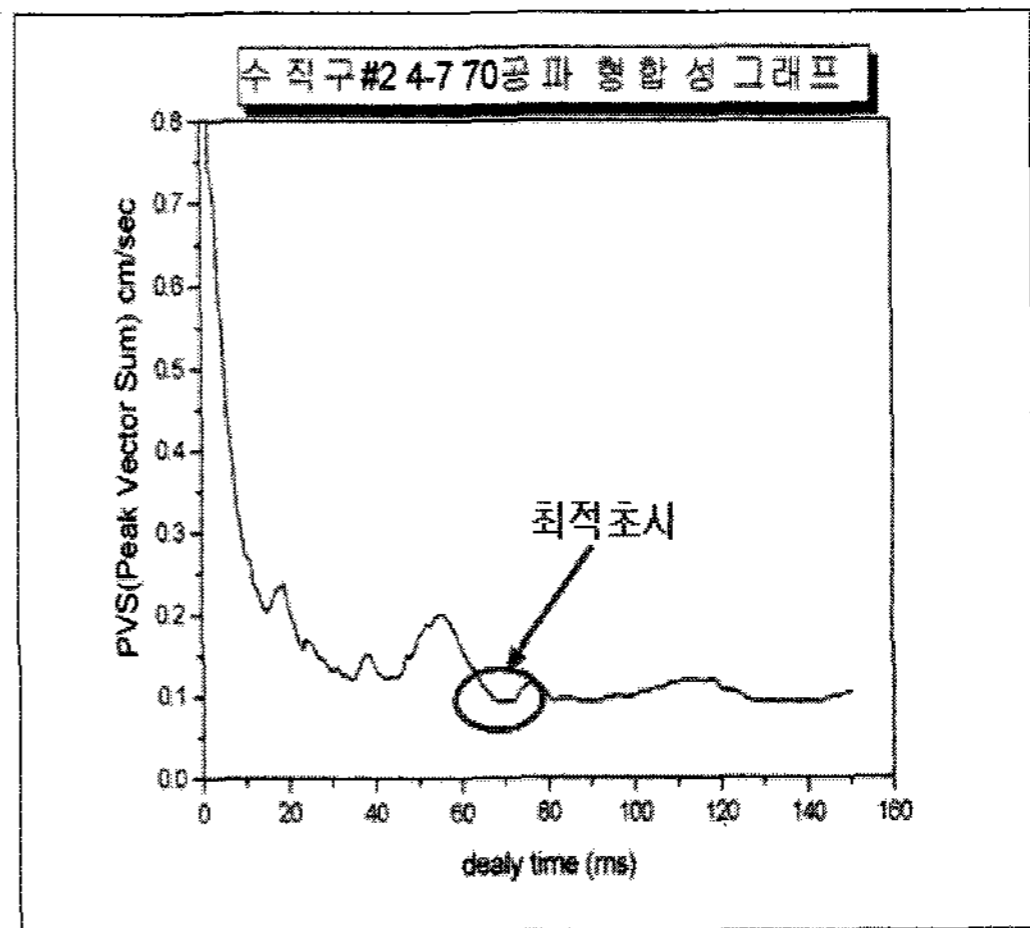
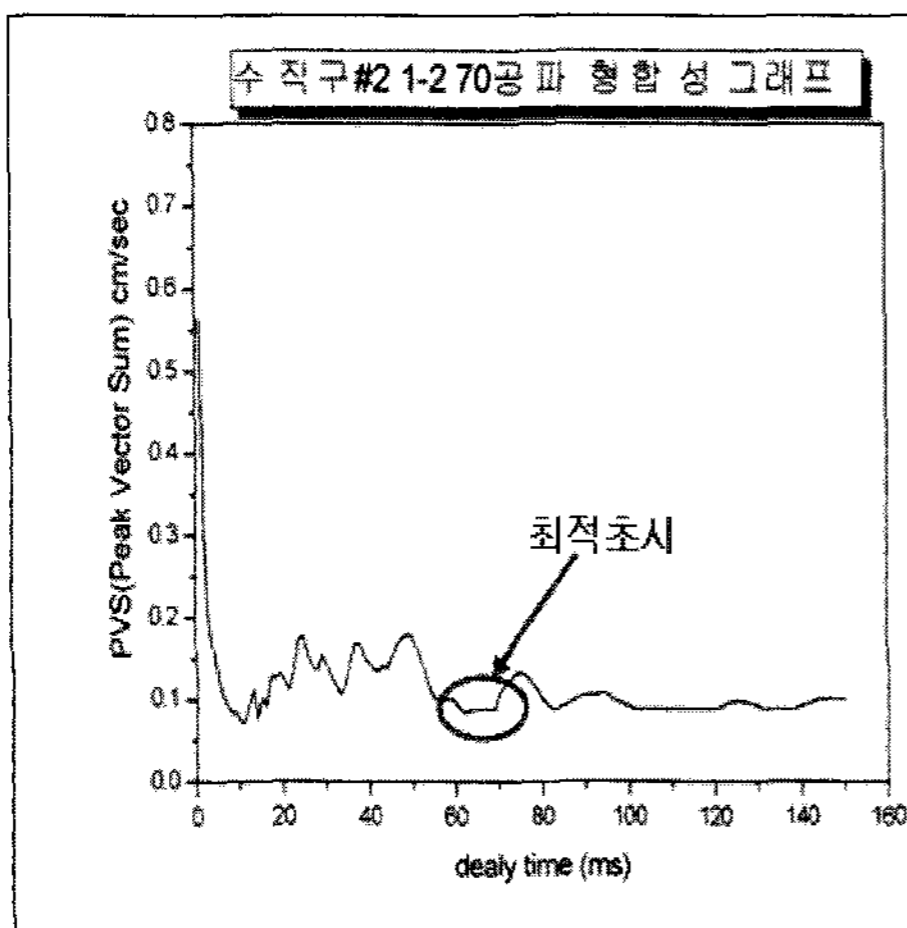


그림 2. 시뮬레이션을 통한 수직구#2에서의 최적초시

3.5 심발·확대부 발파 실험

(1) 수직구 #2 심발·확대부 발파패턴

수직구 #2에서의 발파 시뮬레이션 결과 최적 지연초시는 68 ms이며, 발파 제원은 표 3과 같다.

(2) 계측현황

계측은 다음의 그림과 같은 형태로 실시하였다. 계측 기간 설치 간격은 5 m 등간격 직선 형태로 설치하였다. 다음은 계측기와 폭원 간 이격거리를 나타낸다.

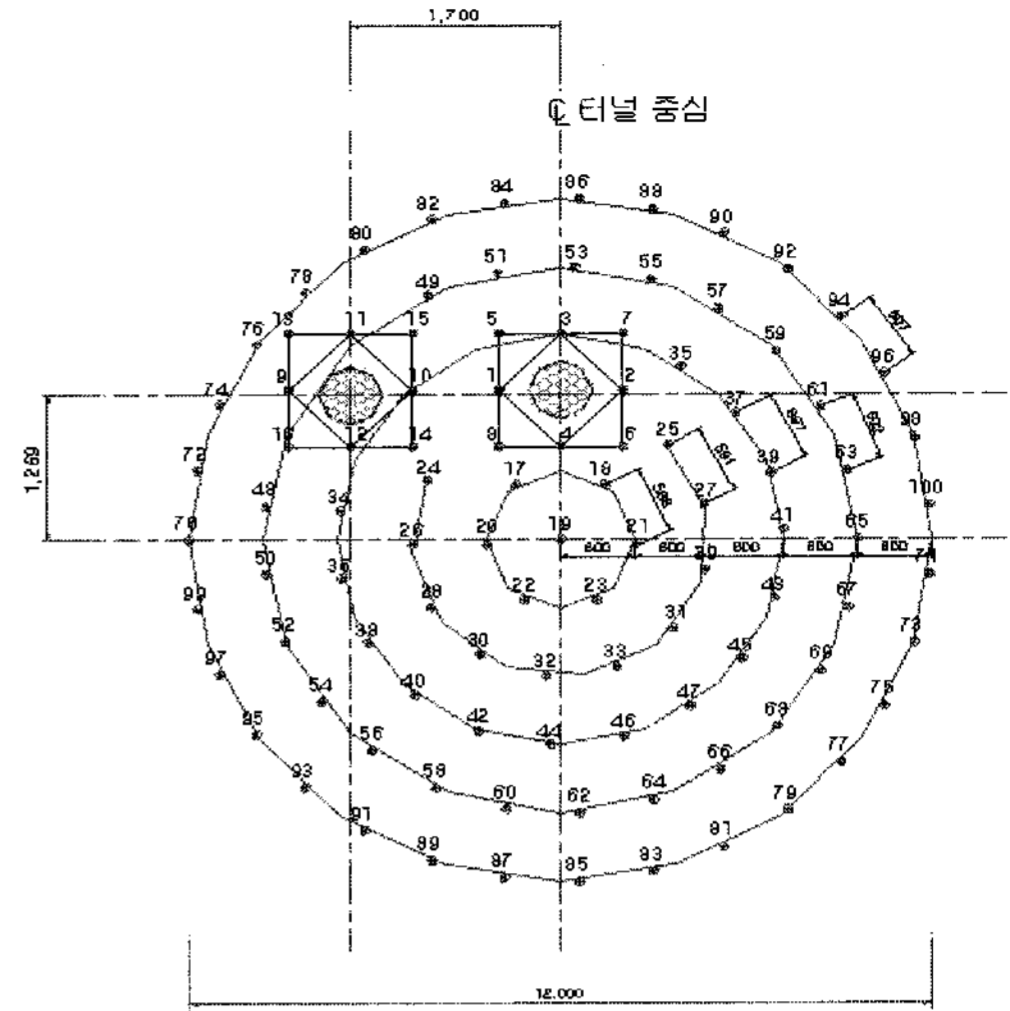


그림 3. 수직구#2 심발확대부 발파패턴도

3.6 기존뇌관 발파 패턴(비전기 뇌관)

비전기 뇌관 적용을 적용한 4영역 분할 발파이며, 1영역은 심발·확대부, 2영역~4영역은 확대부이며, 4번의 단계를 거쳐 발파와 버력처리를 반복한다. 목표 진동레벨은 0.3 cm/sec 이며 뇌관의 적용 지연초시는 20 ms이다. 발파제원은 표 5와 같다.

3.7 전단면 다단시차 분할 발파법(OBM공법 적용)

개발된 전단면 다단시차 분할 발파법(OBM)을 수직구 #2의 전단면에 적용하여 예측치와 비교하고 기존 비전기 뇌관과의 비교를 통해서 진동 및 소음 저감효과를 확인하고자 한다.

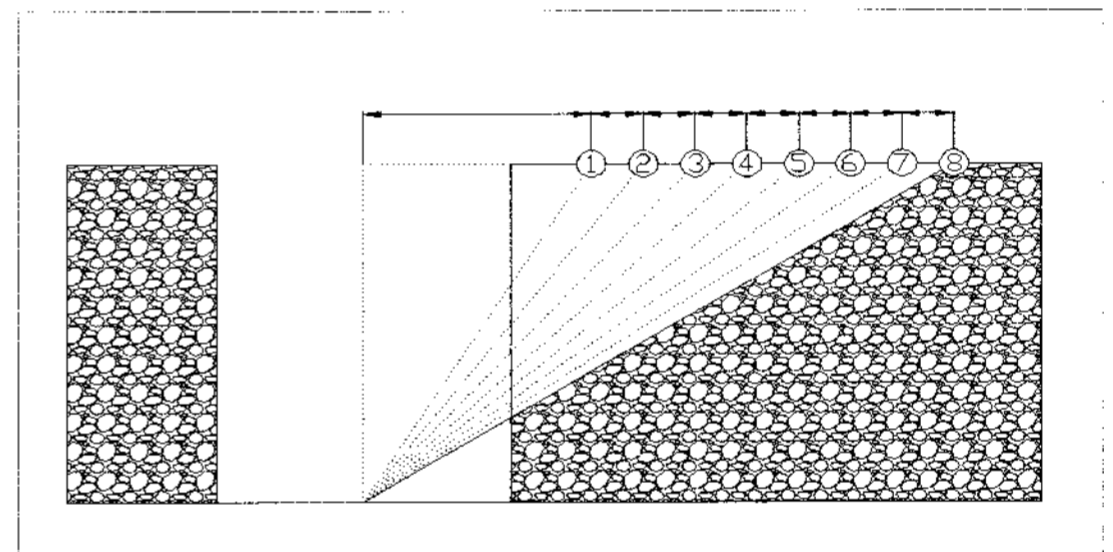


그림 4. 계측위치 모식도

표 3. 수직구#2에서의 심발·확대부 발파제원

| 구분 | 천공장 | 천공경 | 천공수 | 사용뇌관 | 공당 장약량 | 총 장약량 |
|-----------|-------|-----|-----|---------------|--|---------|
| 심발 확대부 | 1.5 m | Ø45 | 100 | 전자뇌관 비전기뇌관 | 제1심발 0.45 kg 제2심발 0.45 kg 확대공 0.5 kg | 36.2 kg |

표 4. 계측기 이격거리

| 계측기 번호 | 계측장비 | 비전기뇌관 심발확대(m) | 전자뇌관 심발확대(m) | 비전기뇌관 확대부(m) | 전자뇌관 전단면(m) |
|-----------|----------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1 | DS-477 | 40.0 | 36.9 | 40.0 | 40.9 |
| 2 | DS-477 | 42.2 | 39.4 | 42.2 | 43.1 |
| 3 | DS-477 | 45.0 | 42.3 | 45.0 | 45.8 |
| 4 | DS-477 | 48.1 | 45.6 | 48.1 | 48.9 |
| 5 | Minimate | 51.5 | 49.2 | 51.5 | 52.3 |
| 6 | Minimate | 55.2 | 53.0 | 55.2 | 55.9 |
| 7 | Minimate | 59.0 | 57.0 | 59.0 | 59.7 |
| 8 | DS-477 | 63.0 | 61.2 | 63.0 | 63.7 |

표 5. 비전기 뇌관 발파 제원

| 구분 | 천공장/굴진장 | 천공경 | 천공수 | 사용뇌관 | 지발당장약량 | 총 장약량 |
|---------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|-------|--------|----------|
| 수직구#2 확대영역 발파 | 1.1 m/1.0 m | Ø45 | 516 | 비전기뇌관 | 0.5 kg | 126.2 kg |
| | | | | | | 비장약량 |
| | 공간격 0.65~0.8 m | 단면적 153.688 m ² | 0.821 kg/m ³ | | | |

표 6. OBM 공법 발파 제원

| 구분 | 천공장/굴진장 | 천공경 | 천공수 | 사용뇌관 | 공당 장약량 | 총 장약량 |
|--------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------|----------|
| 수직구#2 전단면 발파 | 1.5 m/1.3 m | Ø45 | 300 | 전자뇌관 | 제1심발 0.45 kg | 145.5 kg |
| | | | | | 제2심발 0.45 kg | 비장약량 |
| | 공간격 0.65~0.8 m | 단면적 153.938 m ² | 제3심발 0.75 kg 확대공 0.5 kg | 0.727 kg/m ³ | | |

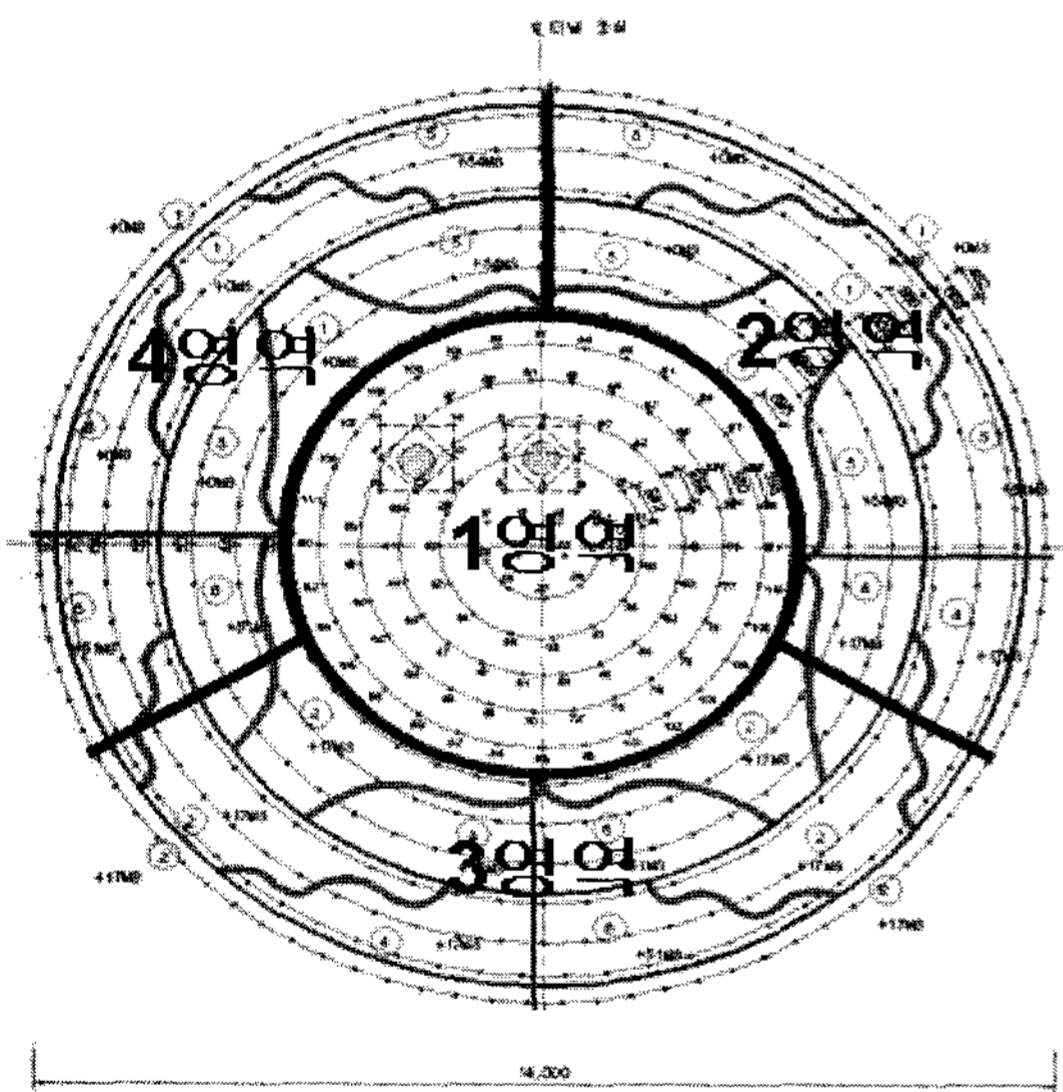


그림 5. 비전기 뇌관 발파패턴도

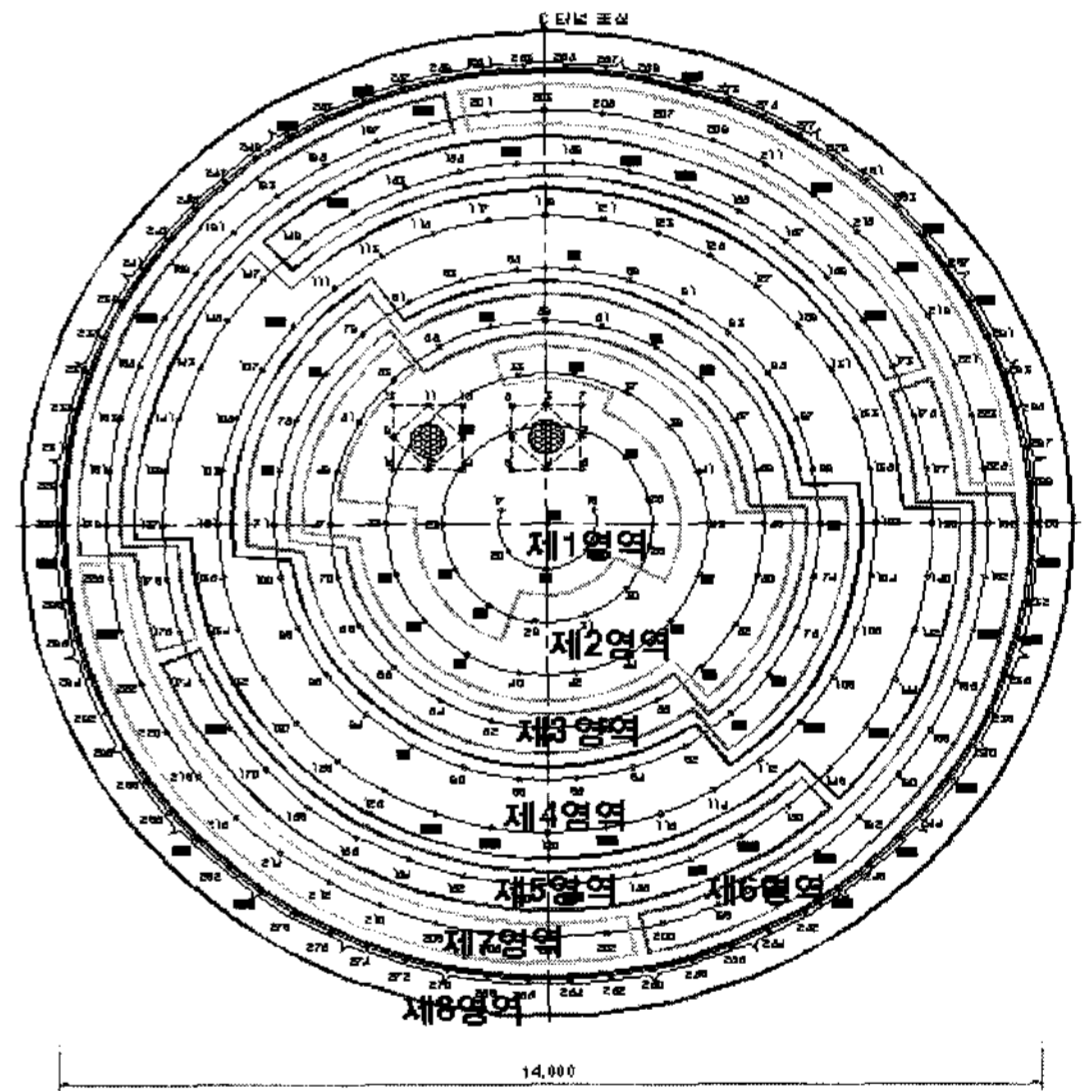


그림 6. OBM 발파패턴도

(1) 전단면 다단시차 분할 발파(OBM) 패턴

전단면 합성초시 분할 발파이며, 뇌관지연시차는 수직구 #2의 최적초시인 68 ms를 적용하였으며, OBM의 리듬을 주기 위해 총장약량을 8영역으로 나누어 장약량 비율을 1:1:1:3:1:1:1:3으로 하였고, 영역간 시차는 영역간 시차 계산에 의해 500 ms로 하였다. 최외곽 영역, 즉 8영역의 경우는 여굴과 미려도를 고려해 통상 스무스 블라스팅에 사용하는 10 ms를 적용하였다. 총 발파시간

은 17612 ms 이며 이는 약 17.6 sec에 해당한다. 목표 진동 레벨은 수직구 #2의 심발확대부에서의 발파 시물레이션에 의해 0.1~0.15 kine을 목표로 설계하였다. 발파제원은 표 6과 같다.

3.8 전자뇌관 적용 현장실험 결과

(1) 수직구 #2 심발·확대부 발파진동

수직구 #2의 심발·확대부에서의 합성초시 적용 발파

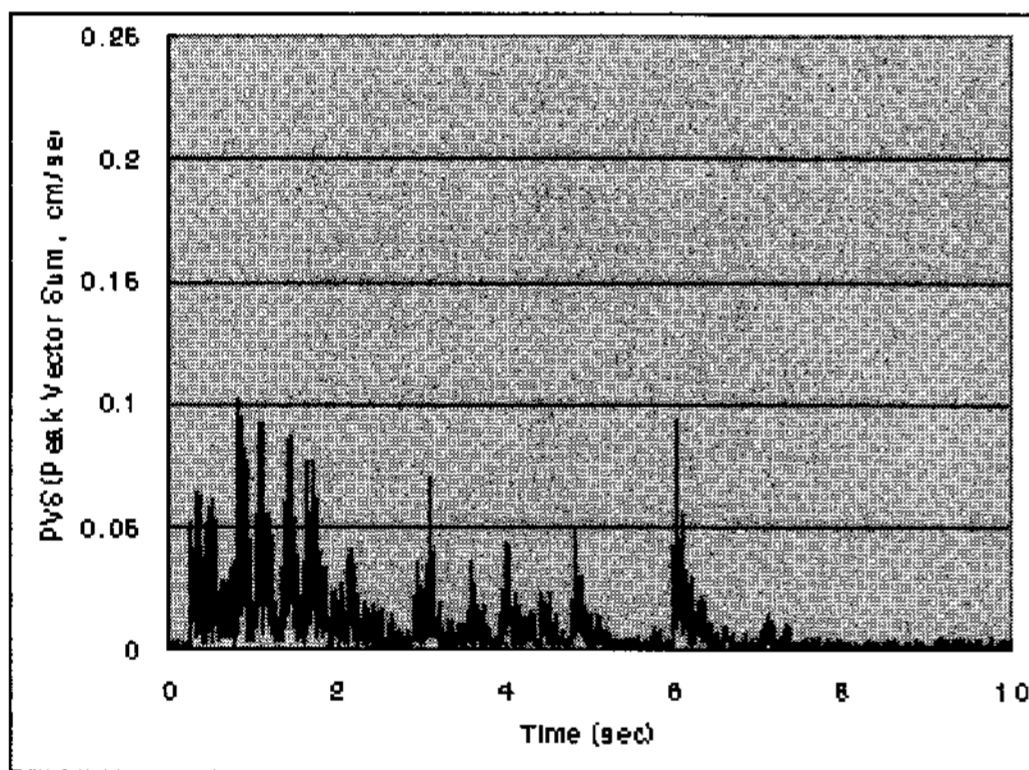
의 발파진동은 다음과 같으며 기존 뇌관인 비전기 뇌관 발파와 비교하였다.

예측 진동치와 대비하여 실제 발파 진동치의 $\pm 18\%$ 의

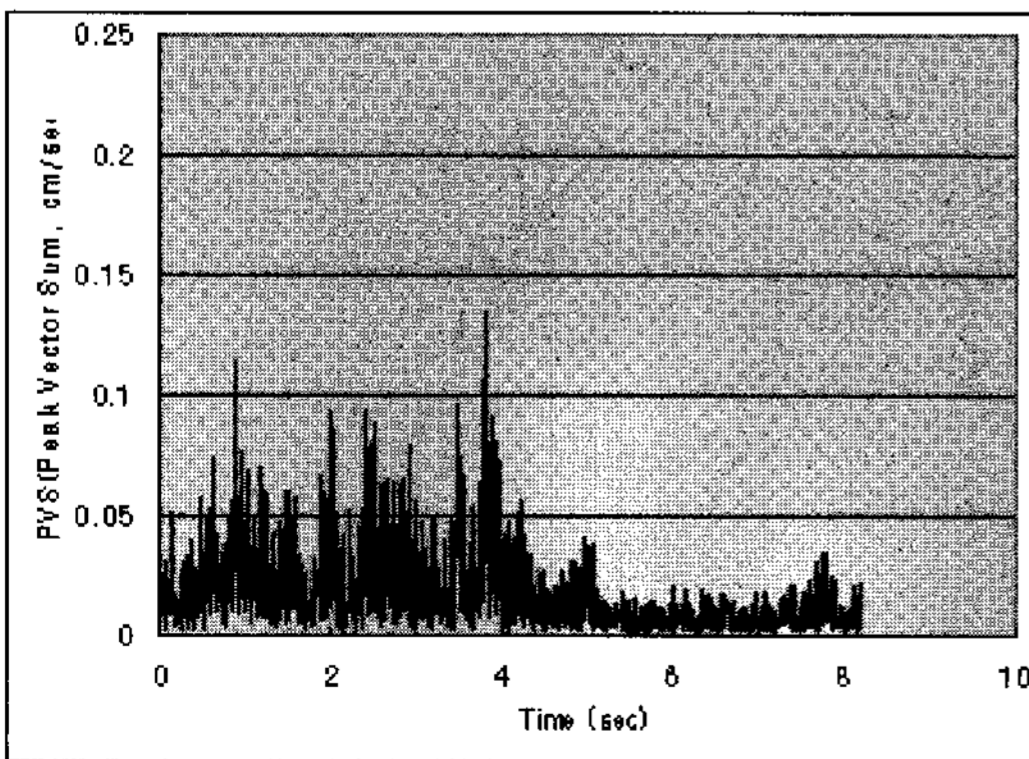
표 7. 수직구#2 심발 확대부 발파 진동 계측치와 예측치 결과

| 계측기 번호 | 비전기뇌관 | 전자뇌관(68 ms) | 발파 시뮬레이션 진동 예측치 |
|--------|-------|-------------|-----------------|
| 1 | - | 0.198 | 0.164 |
| 2 | 0.102 | 0.125 | |
| 3 | - | 0.162 | |
| 4 | 0.147 | - | |
| 5 | 0.182 | 0.135 | |
| 6 | 0.166 | - | |
| 7 | 0.087 | - | |
| 8 | 0.076 | 0.103 | |

단위 : cm/sec (kine)



(a) Nonel



(b) Electronic

그림 7. 수직구#2 심발·확대부 발파 진동 이력

오차 범위를 나타내었고 전자뇌관과 비전기 뇌관의 발파진동치의 차이는 전자뇌관이 비교적 크게나오는 경향이 나왔으나 후단으로 갈수록 감쇄특성이 보이지 않고 있다. 이는 콘크리트 도로 위에서의 계측으로 인해 절대값만을 비교할 수 있다.

3.9 수직구 심발·확대부 발파의 진동추정식 비교

폭원과 계측지점 사이의 거리가 짧아 단거리 계측에 쓰이는 삼승근 발파진동식을 통하여 비교하였다(2005. 안명석 외). 그러나 상관계수가 0.5 이하여서 그 회귀 분석이 신뢰할 만한 수준이 아니어서 감쇄특성의 비교는 생략하였다. 또한, 전체적으로 발파진동의 상관성이 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 진동계측 지점이 원지반이 아닌 콘크리트 슬래브 구조물에서의 측정이었기 때문에 발파진동이 거리에 따른 감쇄를 나타내지 않고 구조물의 진동으로 계측되었기 때문이라 생각된다.

따라서 각 기준거리에 따른 절대값만을 비교하였고, 진동이력을 통한 파형분석을 했다.

3.10 전단면 다단시차 분할 발파(OBM공법 적용) 현장실험 결과

(1) 수직구 #2 전단면 발파진동

수직구 #2에서의 OBM공법을 전단면에 걸쳐 적용한 결과와 일반 비전기뇌관의 결과를 표 8에서 비교하였다.

계측기 4번을 제외한 대부분의 발파진동치가 OBM에서 더 작게 나옴을 알 수 있다.

표 8. 수직구#2 전단면 발파 진동 결과

| 계측기 번호 | 비전기 뇌관 | 전자뇌관(68 ms) |
|--------|--------|-------------|
| 1 | 0.318 | 0.270 |
| 2 | 0.213 | 0.195 |
| 3 | 0.178 | 0.169 |
| 4 | 0.295 | 0.373 |
| 5 | 0.286 | 0.195 |
| 6 | 0.158 | 0.138 |
| 7 | 0.225 | 0.154 |
| 8 | 0.152 | - |

단위 : cm/sec (kine)

(2) 전자뇌관 발파파형

그림 8에서 보듯이 발파 파형검토 결과 최외곽 영역인 8영역 즉, 합성초시가 아닌 10 ms의 지연시차를 준 영역에서 가장 큰 진동치가 나옴을 알 수 있다.

(3) 발파 진동파형 비교

비전기뇌관의 파형과 비교 시 전자뇌관 발파의 경우 8영역을 제외하면 일정한 진동치를 나타냄을 알 수 있다. 그림 9에서 보듯이 8영역을 제외한 진동치는 0.1 cm/sec(0.1 kine)이하임을 알 수 있고, 약 43~62%의 진동 저감 효과가 있음을 알 수 있다.

(4) 전단면 다단시차 분할 발파(OBM공법 적용) 진동파형 분석

전자뇌관의 경우 최외곽(8영역)의 10 ms 적용구간을 제외하면 일정한 PVS가 계측되며 그림과 같이 0.05 cm/sec 이하의 진동치를 나타냄을 알 수 있다. 또한, 최외곽(8영역)을 제외한 PVS비교시 비전기 뇌관 대비 약 43~62%의 진동감소를 알 수 있다.

파형분석을 통해 진동의 구분은 명확하나 소음은 표 9에서와 같이 전파속도의 차이에 의해 명확히 구분되지 않았다.

표 9. 소음과 진동의 전파속도

| 구분 | 발파진동 | 발파음 |
|------|-----------------|---------------|
| 전파속도 | 4000~6000 m/sec | 300~400 m/sec |

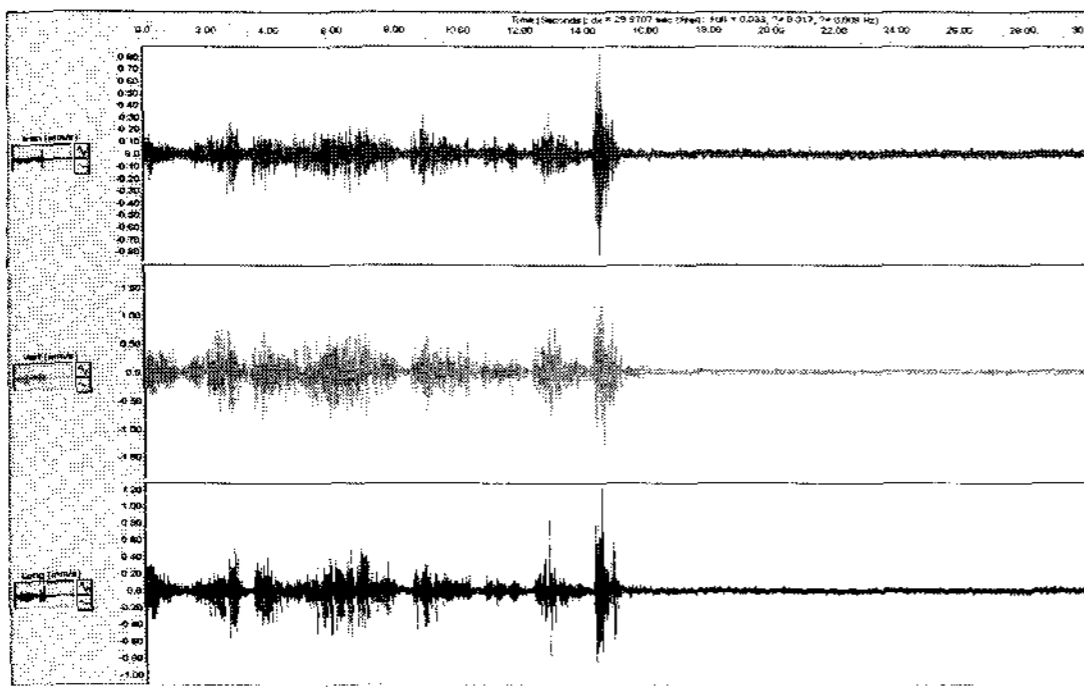


그림 8. OBM 발파 파형(T, V, L)

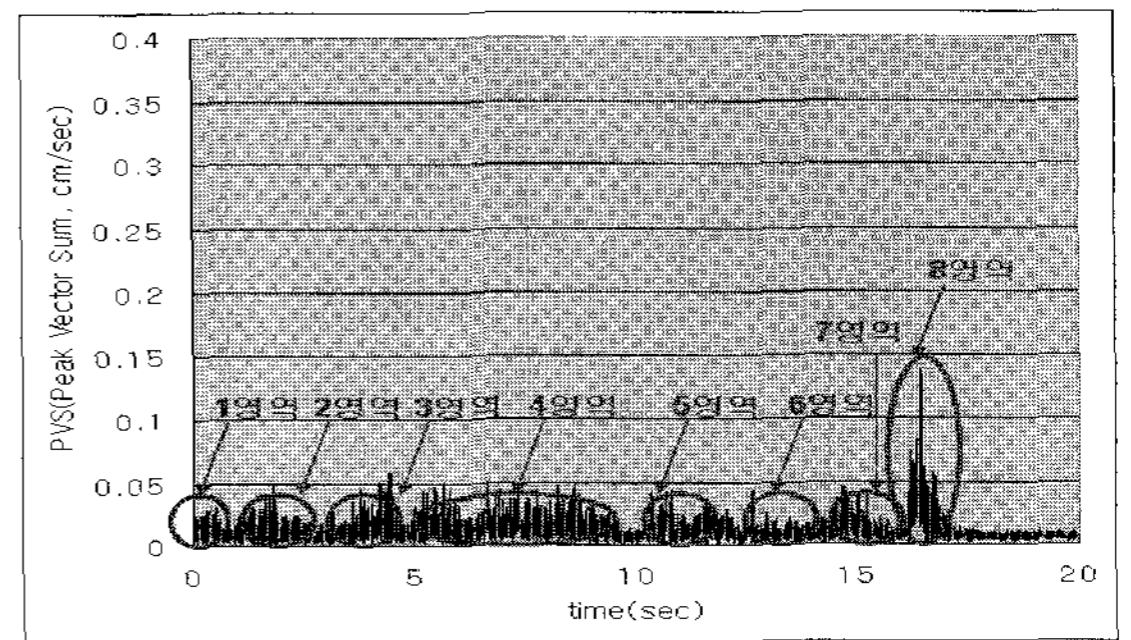
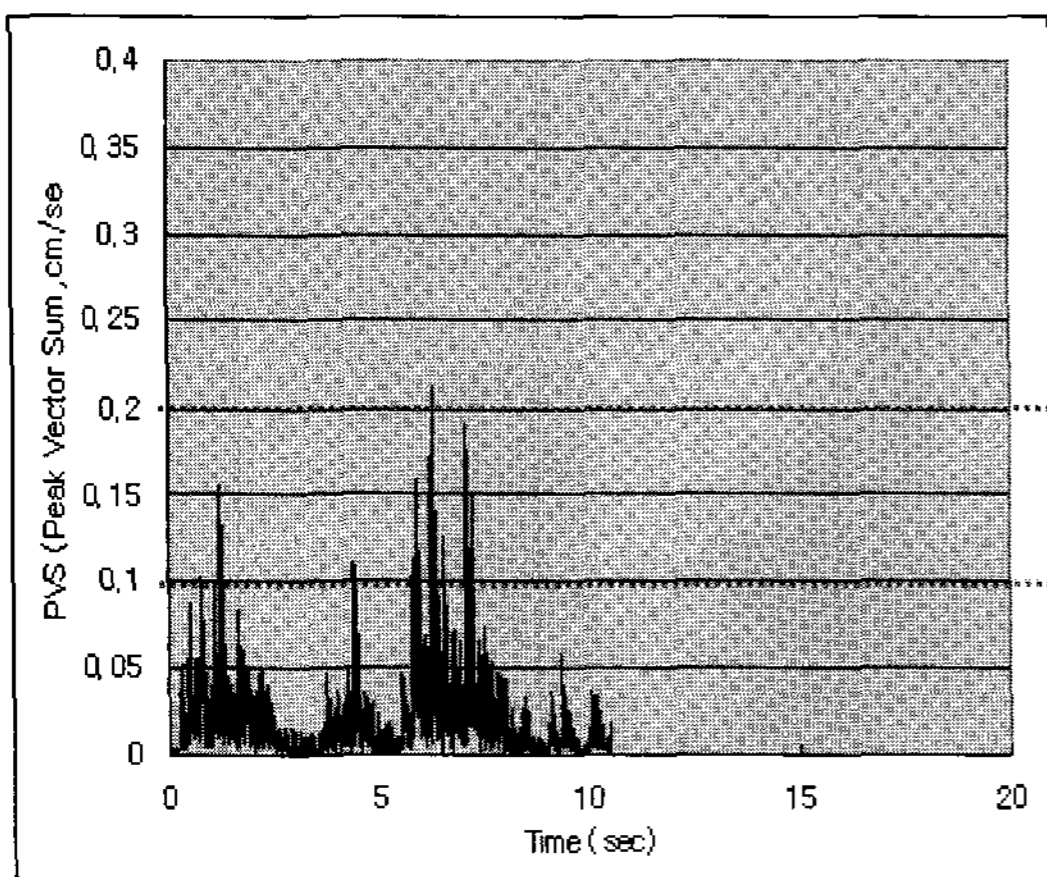
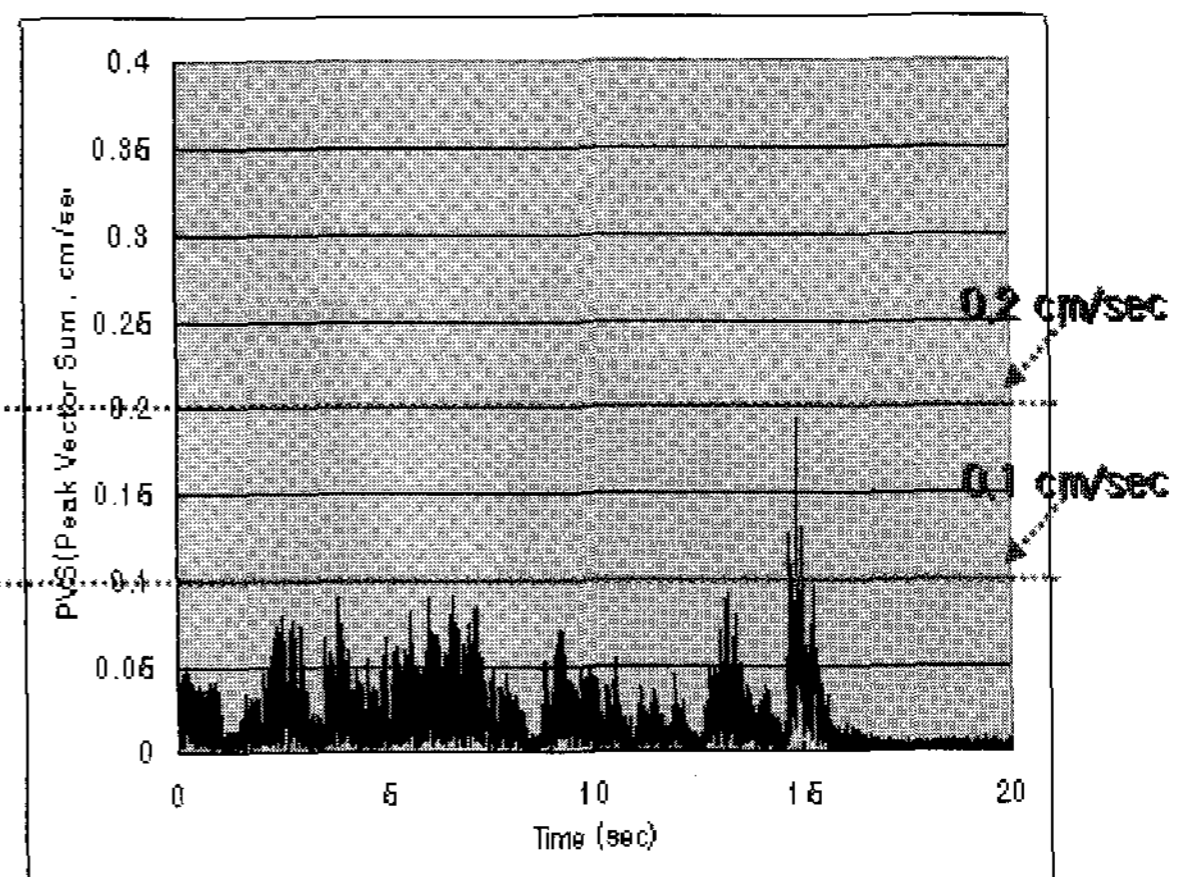


표 10. 수직구#2 전단면 다단시차 분할 발파(OBM공법 적용) 발파 진동 이력



(a) Nonel



(b) Electronic

그림 9. 수직구#2 전단면 발파 진동 이력

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 발파진동저감과 굴진효율개선을 얻기 위한 방안으로 전자뇌관을 적용하여 경암질이 주종을 이루는 암반을 대상으로 한 현장적용실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 파형합성 분석결과 파형의 중첩 시 10 ms 이하에서는 제발효과와 같이 진동치가 크게 나왔으며, 150 ms 이상의 중첩에서는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 발견하였다. 이를 통한 각 수직구의 최적초시는 68 ms로 나왔다.
2. 심발·확대부 발파에서는 발파 시뮬레이션을 통한 예측치와 실제 발파의 계측치가 수직구 #2는 $\pm 18\%$ 의 오차범위 내에서 예측 가능하였다.
3. 전단면 다단시차 분할 발파(OBM공법 적용)법을 통해 도심지에서의 천공수 300공, 천공장 1.5 m, 총장약량 145.5 kg, 총 발파시간 17.6 sec의 전단면 발파 가능여부를 확인 할 수 있었다.
4. 전단면 다단시차 분할 발파(OBM공법 적용)법에서는 합성초시 적용구역인 7영역까지의 진동치와 비전기뇌관 진동치를 비교하였을 때 약 43~62%의 진동저감 효과를 확인할 수 있었으며, 전자뇌관의 경우

7영역까지 0.05~0.1 cm/sec이하의 일정한 진동치를 나타내었다.

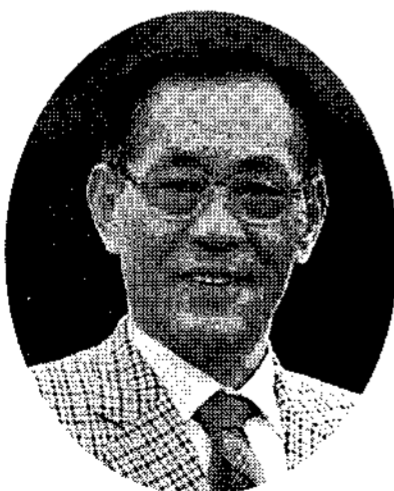
5. 전단면 다단시차 분할 발파(OBM공법 적용)법을 통해 도심지 근접 발파 시 야기되는 민원문제, 장약량 증가와 전단면 발파로 인한 공사기간과 공사비용 단축 등에 따른 경제성 비교에 대한 분석이 차후 연구에서는 필요하다.

감사의 글

본 논문은 건설 교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 첨단도시개발사업의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

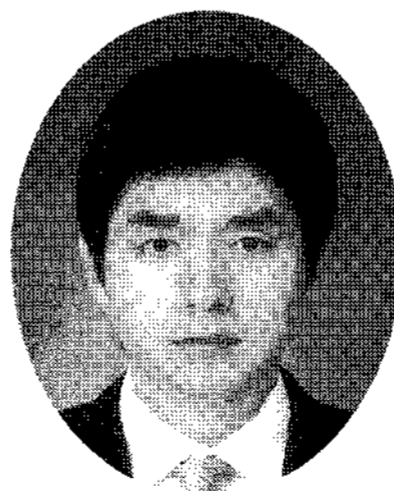
1. 윤지선, 김도현 (2006), “발파진동 파형합성을 이용한 전자뇌관의 최적지연초시에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 129-139.
2. 한동훈, 윤성현, 안명석 (2005), “암 발파 설계지침을 이용한 발파설계 요령”, “발파진동에 대한 국내·외 규제 기준 고찰”, 발파기술 워크샵, 대한 화약발파공학회, pp. 171-191.



윤 지 선

인하대학교
토목공학과
교수

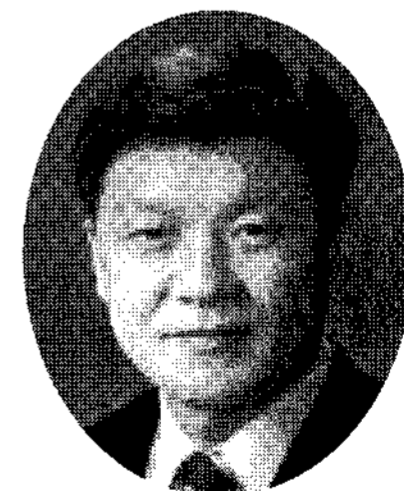
E-mail: jyoona@inha.ac.kr



김 수 현

인하대학교
토목공학과
대학원

E-mail: wolfgang121@naver.com



배 상 훈

인하대학교
토목공학과
박사과정

E-mail: taejin@taejinenc.com