

지연시차에 따른 발파진동의 주파수 특성 예측

정두성¹⁾, 강추원^{2)*}, 고진석²⁾, 장호민¹⁾, 류복현¹⁾

Prediction of Principal Frequency of Ground Vibration from Delayed Blasting

Doo-Sung Chung, Choo-Won Kang, Jin-Seok Ko, Ho-Min Chang, Pog-Hyun Ryu

Abstract Before blasts that can have direct impacts on human bodies or structures, it is necessary to assess impacts of ground vibration. Therefore, frequency has been recognized as an important factor in order to assess impact on ground vibration and damages. There have been many studies on impacts of frequency. But, there have been no studies on relations between vibration and frequency according to delay time difference. In this study, we examined the relations between delay time difference and frequency according to each frequency with which reinforcement and destructive intervention repeat through delay time difference obtained using superposition modeling of single hole blasting waveform based on the theory of time difference developed by Langefors.

Key words Ground vibration, Delay time, Frequency, Superposition modeling

초 록 도심지 발파와 같이 인체나 구조물에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 발파 작업 시에는 지반진동의 영향성 평가 작업이 필수적으로 선행되어야 한다. 이로 인해 주파수가 지반진동의 특성에 관하여 미치는 영향과 피해여부를 판단하는 중요한 요소로 인식되고 있다. 주파수의 영향에 대해서 많은 연구가 이뤄지고 있지만, 이러한 연구들은 지반진동의 발생과 전파에 있어서 지연시차에 따른 주파수 특성을 연구한 것은 아니었다. 따라서 본 연구에서는 Langefors의 시차이론에 근거한 단일공 파형에 의한 중첩모델링으로 얻어진 지연시차를 통하여 지반진동의 간섭에 있어 보강과 상쇄간섭이 반복되는 각각의 지연시차에 따른 주파수의 관계를 고찰하였다.

핵심어 지반진동, 지연시차, 주파수, 중첩모델링

1. 서 론

지반진동의 특성에 관하여 미치는 영향과 피해여부를 판단하는 중요한 요소로 인식되고 있는 주파수는 구조물의 진동 허용기준 설정에서 대두되었다. OSM(1983)에서 최대 진동속도 뿐만 아니라 주파수 변수를 고려한 즉, 주파수 대역에 따라 허용진동 기준을 달리하는 방식으로 발파진동 규제의 범위를 확대하였다.

구조물의 경우, 구조물의 높이가 높아질수록 구조물의 고유주파수가 저주파 대역으로 이동하므로 이 경우 지진파 같은 매우 낮은 주파수의 진동에 취약성을 나타낸다고 보고하였다(Mederaris, 1979, Newmark et al.

1982, Nicholls et al. 1971). 이와 같이 주파수는 발파진동으로 인해 구조물에 미치는 영향과 피해여부를 판단하는 중요한 요소로 인식되고 있다.

김대상 외(1991)는 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구를 수행하여 거리가 멀고 지하심부 발파에서는 저주파가 우세하고, 표면발파의 경우에는 고주파가 우세하다 하였고, 임한욱과 김재동(1992)은 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구를 시행하였으며, 류창하(1995)는 발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측에 관한 연구를 시행하였다.

그리고 강추원과 김종인(2005)은 주 주파수를 고려한 협동장약 특성에 관한 연구에 의하면 발파진동은 거리와 주파수 정도에 따라 파의 간섭정도가 상이하며 간섭의 정도는 발파진동의 크기에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다.

이러한 연구들은 발파진동의 주파수 특성에 대한 연

¹⁾ 조선대학교 에너지 자원공학과

²⁾ 조선대학교 에너지 자원공학과 교수

* 교신저자 : cwkang@chosun.ac.kr

접수일 : 2010년 4월 7일

심사 완료일 : 2010년 4월 21일

게재 확정일 : 2010년 4월 22일

구 분야이지만 발파의 지연시차와 주파수의 관계에 대한 연구를 한 것은 아니었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 주파수의 특성을 예측함으로써 구조물 등에 어떠한 영향을 미칠지를 사전에 평가하여 시공 전 피해를 규제하고 안전성을 고려한 설계가 될 수 있도록 Langefors의 시차이론에 근거한 단일공 파형에 의하여 결정된 지연시차를 통하여 발파진동의 간섭에 있어 보강과 상쇄 간섭이 반복되는 각각의 주파수에 따른 지연시차와 주파수의 관계를 고찰하였다.

2. 연구지역의 지질 및 암석의 물리적 특성

본 연구의 실험지역은 지리적 행정 구역상 부산광역시 해운대구 송정동으로 한반도의 동남측에 위치한다. 실험지역은 Fig. 1과 같고 실험지역 일대의 지질은 Fig. 2과 같이 계곡부를 따른 구조선의 영향으로 풍화대와 수계의 발달이 좋고 대부분 지지층은 풍화암층, 연암층으로 구성, 산록완사면 및 선상지 지형이다. 전체적인 지질은 대부분이 중생대 백악기 경상계 신라통의 래피리웅회암 및 각력암(Klt) 등으로 나타나며 주변으로 중생대 백악기 경상계 신라통의 유문반암(Krp), 맥암류 산성암맥의 산성암(Kad), 안산암질암류의 안산암 및 조면안산암(Kan), 불국사 화강암류화강섬록암(Kgdi), 신라통 이천리층의 퇴적암(Kic) 등을 신생대 제 4기의 제 4계 충적층(Qa)이 피복하는 것으로 형성하고 있다.

또한 본 실험지역의 암석에 대하여 실내실험을 한 결과, 비중은 2.6~2.7로 측정되었고, 흡수율의 경우 0.2~0.3%이고, 단축압축강도는 92.2~169.7 MPa로 측정되었으며, 탄성과 속도는 P파가 4,222~4,755 m/sec이고

S파가 2,819~3,131 m/sec로 나타났으며, 포와송비는 0.21~0.25로 나타났으며, 탄성계수는 46.1~56.9 GPa로 나타났다.

3. 실험방법 및 계측 결과

3.1 실험방법

본 연구의 현장 실험지역은 부산광역시 해운대구 송정동 일원의 『동해남부선(○○~○○) 복선 건설공사』의 현장으로서 실험조건은 Table 1과 같고, 천공패턴은 Fig. 3과 같으며, 총 19회의 발파에 대한 실험을 동일한 발파 패턴을 적용하여 Fig. 4와 같이 측정을 실시하였다.

실험은 기준 파형을 측정하기 위한 단일공 발파를 1회 실시하고, Langefors의 시차이론(식 (1))에 근거하여 주

Table 1. Applied design parameter for some of the shots.

No.	1	2~19
Diameter (mm)	45	
Drilling length (m)	2.7	
Burden (m)	1.0	
Spacing (m)	1.2	
Charge per hole (kg)	0.96	
Charge per delay (kg)	0.96	
Explosive	Emulsion	
Explosive diameter (mm)	φ32	
Detonator	Instantaneous electric detonator	Delay electric detonator (475 ms)
Number of holes per blast	1	5



Fig. 1. Experiment site.

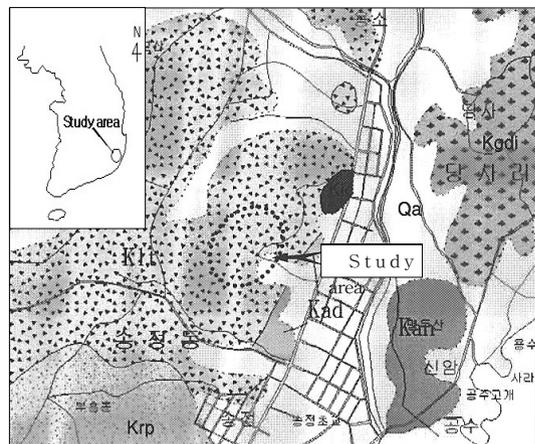


Fig. 2. Geological map of study area.

파수 분석을 실시하여 시차결정을 하였다(Langefors & Kihlström, 1978)

$$\tau = H \cdot T \quad (1)$$

여기서, τ 는 지발뇌관의 시차, H 는 상수, T 는 발파진동의 주기이다.

본 연구에서 실시한 중첩모델링에서는 1회에 발파되는 모든 발파공은 동일한 진동파형을 발생하고 모든 탄성파 속도는 동일하다고 가정하였으며, 샘플링 비율(sampling rate)이 1,024 sps인 점을 감안하였으며, 지연시차와 발파공수 등의 발파조건과 함께 중첩을 하였다.

또한, 지연시차에 따른 주파수의 특성을 파악하기 위하여 결정된 각각의 지연시차를 적용하여 3회씩 총 18회의 실험을 실시하였고, 지연시차를 입력하기 위하여

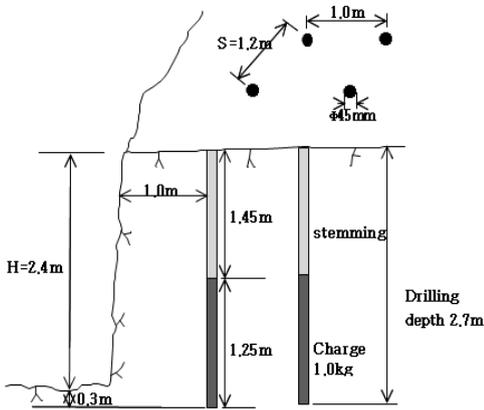


Fig. 3. Schematic diagram of blasting pattern.

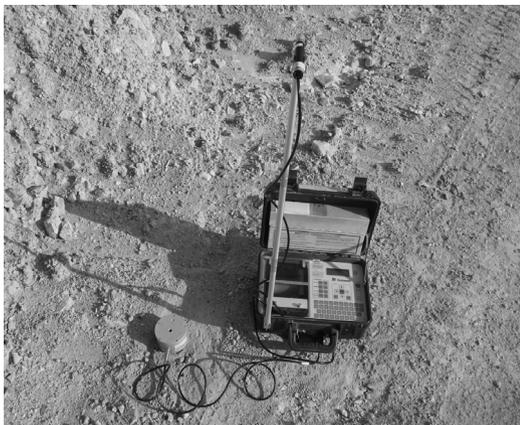


Fig. 4. Arrangement of monitoring instrument.

Table 2의 조건으로 미국 REO사의 다단식 발파기를 이용하였고, 컷 오프(cut-off)를 고려하여 뇌관은 475 ms를 지연시차로 갖는 ms 전기지발뇌관을 사용하였다.

3.2 계측결과

단일공발파의 계측 및 FFT분석 결과

Table 1의 발파조건으로 단일공 1회 발파의 실험을 한 결과 1개의 데이터를 획득 하였으며, 최대 입자 속도의 경우 점선방향성분(T)은 0.9 mm/sec, 수직방향성분(V)은 2.1 mm/sec 그리고 진행방향성분(L)은 4.9 mm/sec로 계측되었다. 세 성분중 진동치가 가장 큰 성분인 진행방향성분(L)을 기준파형으로 선정하여 FFT분석을 통하여 주 주파수를 결정하였으며, 주 주파수는 47 Hz로 분석되었으며, 그 결과는 Fig. 5와 Fig. 6과 같다.

Table 2. Enter the time of sequential blasting machine.

No.	2~4	5~7	8~10	11~13	14~16	17~19
Input delay time sequential blasting (ms)	5	10	15	21	32	42
Last delay time (ms)	495	515	535	559	603	643

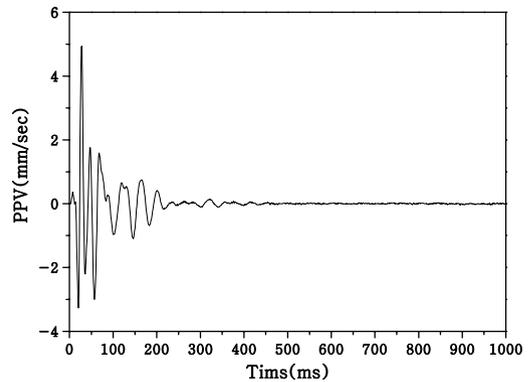


Fig. 5. Waveform of single hole blast.

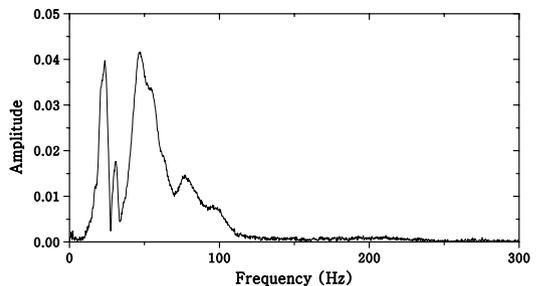
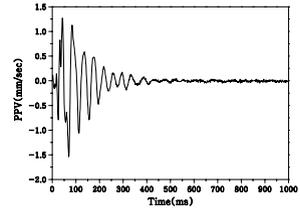
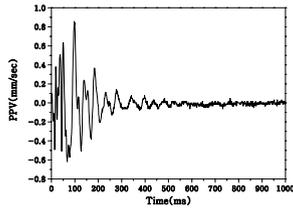
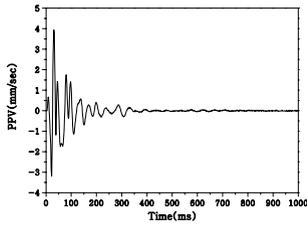
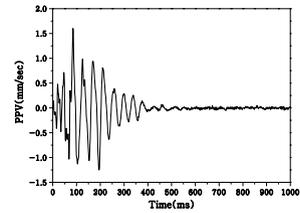
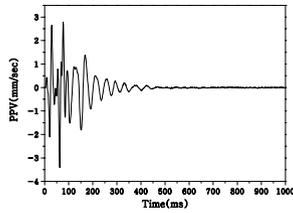
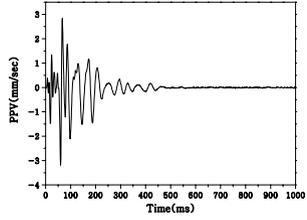


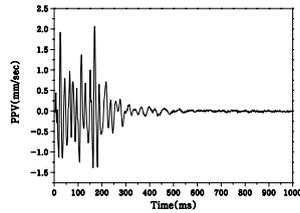
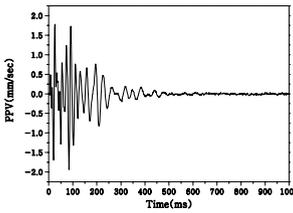
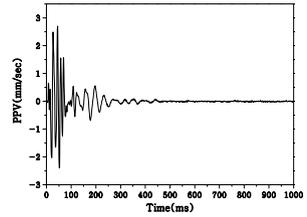
Fig. 6. FFT analysis of single hole blast.



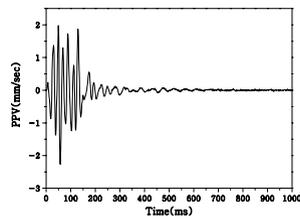
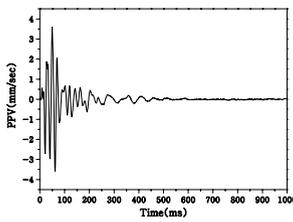
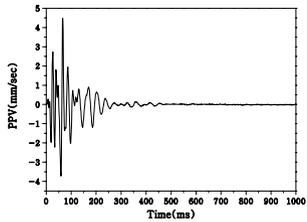
(a) Delay time 5 ms (0.25 T).



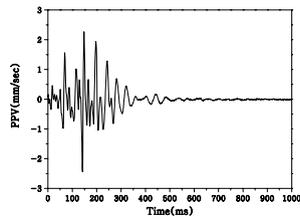
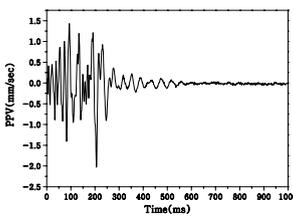
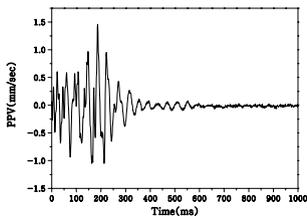
(b) Delay time 10 ms (0.5 T).



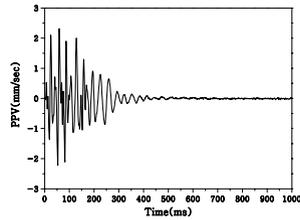
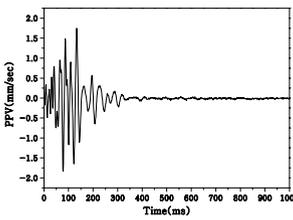
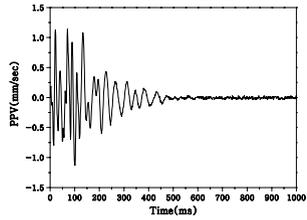
(c) Delay time 15 ms (0.75 T).



(d) Delay time 21 ms (1.0 T).



(e) Delay time 32 ms (1.5 T).



(f) Delay time 42 ms (2.0 T).

Fig. 7. Measured waveform of applied delay time.

지연시차 결정

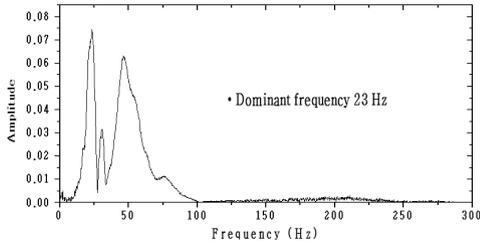
단일공 발파를 통한 주파수 분석을 하여 본 연구의 실험에 적용할 지연시차를 결정하였다. 0.25 T에 해당하는 지연시차는 5 ms, 0.5 T는 10 ms, 0.75 T는 15 ms, 1.0 T는 21 ms, 1.5 T는 32 ms, 2.0 T는 42 ms로 결정되었다.

시차부여에 따른 발파의 계측 및 FFT 분석 결과

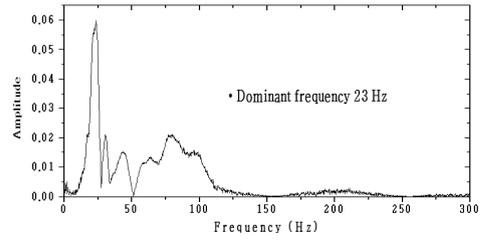
최대 입자 속도의 경우 접선방향성분(T)은 0.7~3.2 mm/sec, 수직방향성분(V)은 0.5~1.9 mm/sec 그리고 진행방향성분(L)은 0.8~4.5 mm/sec로 계측되었으며 Fig. 7과 같다. 또한 세 성분 중 진동치가 가장 큰 성분을 기준파형으로 선정하여 주파수분석을 실시하였으며, 이에 대하여 FFT분석을 통하여 주 주파수를 결정하였다. 그 결과, Table 3과 같이 지연시차 5 ms의 경우 20, 21, 23 Hz, 10 ms의 경우 23, 23, 23 Hz, 15 ms의 경우 64, 31, 56 Hz, 21 ms의 경우 47, 45, 49 Hz, 32 ms의 경우 24, 24, 24 Hz, 그리고 42 ms의 경우 45, 46, 31 Hz로 나타났다.

Table 3. Result of measurement.

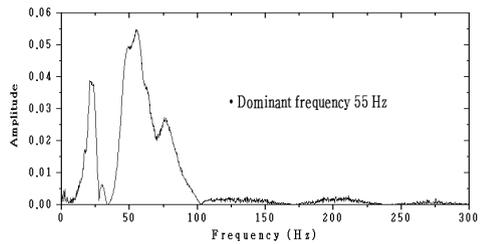
Blast no.	Delay time	PPV (mm/sec)	Dominant frequency (Hz)	Distance (m)
1	-	4.9	47	55
2		3.9	20	57
3	5ms	0.9	21	80
4		1.5	23	75
5		3.2	23	58
6	10ms	3.4	23	57
7		1.6	23	59
8		2.7	64	56
9	15ms	1.9	31	60
10		2.1	56	58
11		4.5	47	55
12	21ms	3.6	45	56
13		2.3	49	67
14		1.5	24	62
15	32ms	2.0	24	61
16		2.4	24	60
17		1.1	45	61
18	42ms	1.9	46	60
19		2.3	31	57



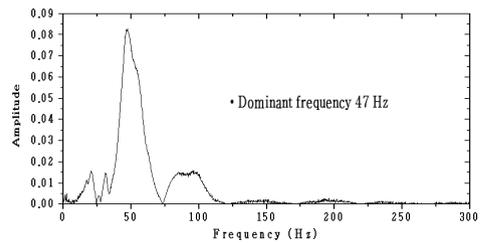
(a) Delay time 5 ms (0.25 T).



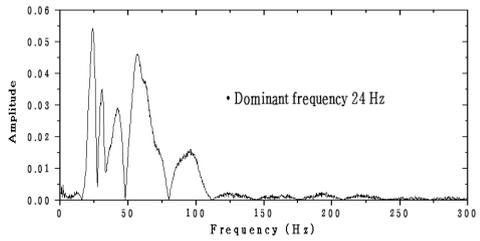
(b) Delay time 10 ms (0.5 T).



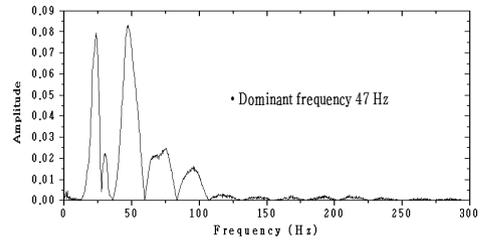
(c) Delay time 15 ms (0.75 T).



(d) Delay time 21 ms (1.0 T).



(e) Delay time 32 ms (1.5 T).



(f) Delay time 42 ms (2.0 T).

Fig. 8. Prediction modeling by FFT analysis.

4. 주 주파수의 예측 모델링

단일공 발파를 통하여 획득한 데이터의 중첩을 통하여 각각의 지연시차부여에 따른 주 주파수의 변화에 대해 FFT분석을 통한 예측 모델링을 실시하였다. 본 연구의 실험에 적용한 지연시차 5, 10, 15, 21, 32, 42 ms에 대하여 주 주파수의 예측모델링을 실시하였으며, 각각 23, 23, 55, 47, 24, 47 Hz로 예측되었으며 그 결과는 Fig. 8(a)~(f)와 같다.

5. FFT분석에 의한 예측 모델링과 실제 주 주파수의 비교

현장에서 획득한 단일공 발파 파형을 토대로 지연시차별 중첩모델링을 통하여 FFT분석을 실시하여 주주파수의 예측모델링을 실시한 결과와 현장에서 계측된 실제 데이터의 FFT분석을 통한 주 주파수를 비교하였다.

5 ms의 경우 각각 3, 2, 0 Hz의 근소한 차이를 보였고, 10 ms의 경우 동일한 값을 보였으며, 15 ms의 경우 각각 9, 24, 1 Hz의 차이를 보였다. 그리고 21 ms의 경우 0, 2, 2 Hz로 같거나 근소한 차이를 보였고, 32 ms의 경우 동일한 값을 보였으며, 42 ms의 경우 각각 2, 1, 16 Hz의 차이를 보였다.

대체로 예측모델링과 근소한 차이를 보이거나 같은 값을 보였으나, 15 ms의 지연시차인 8회와 9회의 경우와 42 ms의 지연시차에서 19회의 경우 다소 많은 차이를 보였다. 이는 동일뇌관이라 하더라도 발생하는 뇌관의 기폭오차, 암반 내 불연속면과 지질적 구조의 복잡성으로 인한 진동전파의 차이로 인한 차이로 판단된다.

6. 결론

지연시차에 따른 주파수 특성을 예측하기 위하여 단일공 파형 중첩모델링을 하여 FFT분석을 통한 예측모델링과 현장에서 계측된 실제 데이터의 FFT분석의 결과에 따른 주 주파수를 비교·검토하였다. 또한 주파수의 특성의 변수를 최소화하기 위하여 진행된 실험 모두 동일한 패턴으로 설계·실시하여 계측을 실시하였다.

그 결과, 지연시차 부여에 따른 발파에서는 예측모델링과 대부분 근소한 차이를 보이거나 같은 값을 보였다. 그러나 이들 데이터 중 지연시차 15 ms와 지연시차 42 ms

의 1개의 데이터가 다소 많은 차이를 보였는데 이는 동일뇌관이라 하더라도 발생하는 뇌관의 기폭오차, 암반 내 불연속면과 지질적 구조의 복잡성으로 인한 진동전파의 차이, 상쇄·보강 간섭 등의 교란으로 인한 차이로 판단된다. 또한 본 연구에서는 특정지역에서 실험을 실시하였으나 암반상태가 다르거나 실험조건을 달리하여, 뇌관의 기폭오차 등의 요인을 최소화 시켜 실규모의 발파에서도 재현할 수 있도록 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 2009년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드린다. 또한 이 논문을 위해 세심한 조언을 해주신 심사위원께도 진심으로 감사드린다.

참고문헌

1. 강추원, 김종인, 2005, 주 주파수를 고려한 협동장약 특성에 관한 연구, 터널과 지하 공간, Vol. 15, No. 4, pp.316-323.
2. 김대상, 이정인, 이희근, 1991, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 28, No. 6, pp.444-454.
3. 류창하, 1995, 발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측, 한국 자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집, pp.132-141.
4. 임한옥, 김재동, 1992, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 29, No. 3, pp.146-157.
5. Langefors U. and Kihlström B., 1978, The modern technique of Rock Blasting, New York, John Wiley & Sons, pp.258-293.
6. Medearis, K., 1979, Structural response to explosion induced ground motions, American Society of Civil Engineers, Special Publication, ASCE, New York, 138.
7. Newmark, N.M. and W.J. Hall, 1982, Earthquake spectra and design, Earthquake Engineering Research Inst., Berkeley Cali., 103.
8. Nicholls, H.R., and C.F. Johnson and W.I. Duvall., 1971, Blasting vibrations and their effects on structures, Bureau of Mines Bull. 656.
9. OSM (Office of Surface Mining), 1983, Surface Coal Mining and Reclamation Operation: Permanent Regulatory Program; Use of Explosives; General Performance Standards; Permit Application.



정두성

2008년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2010년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사

Tel: 062-230-7876

E-mail: ssamppag@nate.com

현재 조선대학교 에너지 자원공학과 박사과정



강추원

1973년 조선대학교 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 에너지 자원공학과 교수



고진석

1979년 조선대학교 자원공학과 공학사
1981년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1995년 한양대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 062-230-7118

E-mail: jsgo@mail.chosun.ac.kr

현재 조선대학교 에너지 자원공학과 교수



장호민

2003년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2005년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사

Tel: 062-230-7876

E-mail: swessil@hanmail.net

현재 조선대학교 대학원 자원공학과 박사과정



류복현

2004년 조선대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2006년 조선대학교 대학원 자원공학과
공학석사

Tel: 062-230-7876

E-mail: pogryu@hanmail.net

현재 조선대학교 대학원 자원공학과 박사과정