

Low Frequency Long Duration Blast Vibrations and Their Effect on Residential Structures

M. P. Roy, A. K. Sirveiya and P. K. Singh

지속시간이 긴 저주파 발파진동과 주거 구조물에 미치는 영향

이상헌¹⁾, 송승곤¹⁾ 譯

Abstract : A major concern with blasting at surface mines is generation of ground vibration, air blast, flyrock, dust & fume and their impact on nearby structures and environment. A study was conducted at a coal mine in India which produces 10 million tonne of coal and 27 million cubic meter of overburden per annum. Draglines and shovels with dumpers carry out the removal of overburden. Detonation of 100 tonnes of explosives in a blasting round is a common practice of the mine. These large sized blasts often led to complaints from the nearby inhabitants regarding ground vibrations and their affects on their houses. Eighteen dragline blasts were conducted and their impacts on nearby structures were investigated. Extended seismic arrays were used to identify the vibration characteristics within a few tens meters of the blasts and also as modified by the media at distances over 5 km. 10 to 12 seismographs were deployed in an array to gather the time histories of vibrations. A signature blast was conducted to know the fundamental frequency of the particular transmitting media between the blast face and the structures. The faster decay of high frequency components was observed. It was also observed that at distances of 5 km, the persistence of vibrations in the structures was substantially increased by more 10 seconds. The proximity of the frequency of the ground vibration to the structure's fundamental frequencies produced the resonance in the structures. On the basis of the fundamental frequency of the structures, the delay interval was optimized, which resulted into lower amplitude and reduced persistence of vibration in the structures.

Key Words : ground vibration, seismograph, time history of vibration, fundamental frequency, resonance, delay interval, lower amplitude, persistence of vibration

1. 개 요

발파 작업은 작업해야할 암량과 폭약의 기폭에 의한 생산성의 상호작용에 의해 결정된다. 그러므로 발파 기술자는 각각의 상황에서 발파 작업에 가장 큰 영향을 미치는 암량을 결정하는 것과 그로 인해 서로 다른 지질 상황에 적합하게 발파 설계를 변화시켜야 하는 난제에 직면해 있다. 발파의 부수적 영향으로 원하지 않게 알려진 것들에는 진동, 소음/폭풍압, 비산, 먼지 그리고 유해가스이다(Singh et al., 1996). 직업상의 건강과 안전 문제에 반하는 이러한 다섯 가지의 환경 영향들 중 무엇

이 광산과, 석산, 건설 현장의 쇠퇴를 가져오게 만들었는가? 발파 작업상 얻어지는 것 중 원치 않는 것으로 지반 진동이 피할 수 없는 그 원인이라고 할 수 있다. 진동에너지는 파쇄 암반의 영역을 넘어서 전파되다 소멸되고 이는 지표 위의 구조물에 피해를 일으키는 원인이 될 수 있으며, 광산 주변의 거주자들에게 불쾌감 또한 줄 수 있다(Siskind et al., 1980). 이 비생산적인 에너지는 폭약의 화학적 에너지 중 아주 작은 부분에 해당되지만 이 에너지는 상태가 매우 양호한 지질조건에서는 암소음 레벨 아래로 떨어지기 전까지 수 km에 걸쳐 전달된다. 하지만 적합한 발파 패턴을 적용함으로써 그 영향을 매우 안전한 수준까지 낮추는 최적화 작업도 가능하다.

1) (주)고려Nobel화약 서울지사 설계기술부
접수일 : 2005년 3월 17일

본 논문은 2005년 국제화약발파공학회의인 ISEE에서 개최한 학회논문집에 실린 것으로 광산 근처와 먼 곳에 위치한 주거 구조물에 대한 지반진동의 영향을 조사하기 위하여 인도에 있는 벤치형 광산에서 실시했던 현장 연구를 다루고 있다. 발파가 진행되는 동안 진동은 10~12 곳의 위치에서 연속적으로 계측이 되었으며, 광산 주변에서 구조물의 고유주파수는 결정된 상태이다. 특정발파에서만 아니라 일반 생산 발파로부터도 수집된 데이터는 구조물에서의 진동 지속시간을 줄이고 아울러 더 낮은 진동 수준을 이끌어내기 위한 최적의 발파설계를 위하여 사용하는 등의 내용으로 우리 나라에서 흔히 일어나는 발파진동에 의한 구조적, 인체적 민원을 줄이기 위한 좋은 참고 자료가 될 것으로 사료되어 번안하여 논문지에 게재하고자 한다.

2. 광산 주변 지질적 특성

인도 석탄지역에 속한 남부 탄전의 Jayant Opencast Project는 연간 총 굴착량에 대하여 인도 석탄광산 중 가장 큰 것 중 하나이다. 여기서는 연간 1,000만톤의 석탄과 2,700만 m^3 의 버력이

나오고 있다. 채광장의 평균 경사도는 1:2.6이다. 세 개의 석탄 광주 즉, Purewa 상부, Purewa 하부 그리고 Turra에서 광채가 되고 있다. 이들 각각의 광주 두께는 Purewa 상부가 5~9m, Purewa 하부가 9~12m 그리고 Turra가 13~19m 정도이다. Purewa 하부와 Purewa 상부 사이의 광주는 분기점의 광주 두께가 17~32m 인데 비해 Turra와 Purewa 하부 사이의 광주 두께는 52~59m 정도이다. Purewa 상부 지역의 광주 상부의 저항선은 12~95m 이다. 앞으로 채광 가능한 석탄 보존량은 약 348.93백만 톤이고 버력량의 체적은 907백만 m^3 이다. 6천만톤의 석탄이 매년 이 탄전에서 생산되고 있다. Fig. 1은 남부 탄전의 광산들을 보여주고 있다.

3. 현장 제원 조건

이 연구를 위한 광산의 벤치에서 18회의 발파가 실행됐으며, 공수는 25~97공까지 다양했다. 1회 발파당 기폭된 폭약의 양은 약 50,250~197,407 kg까지 사용되었으며, 지발당 최대 폭약량은 1,980~5,784 kg 정도였다. 발파공들의 직경은

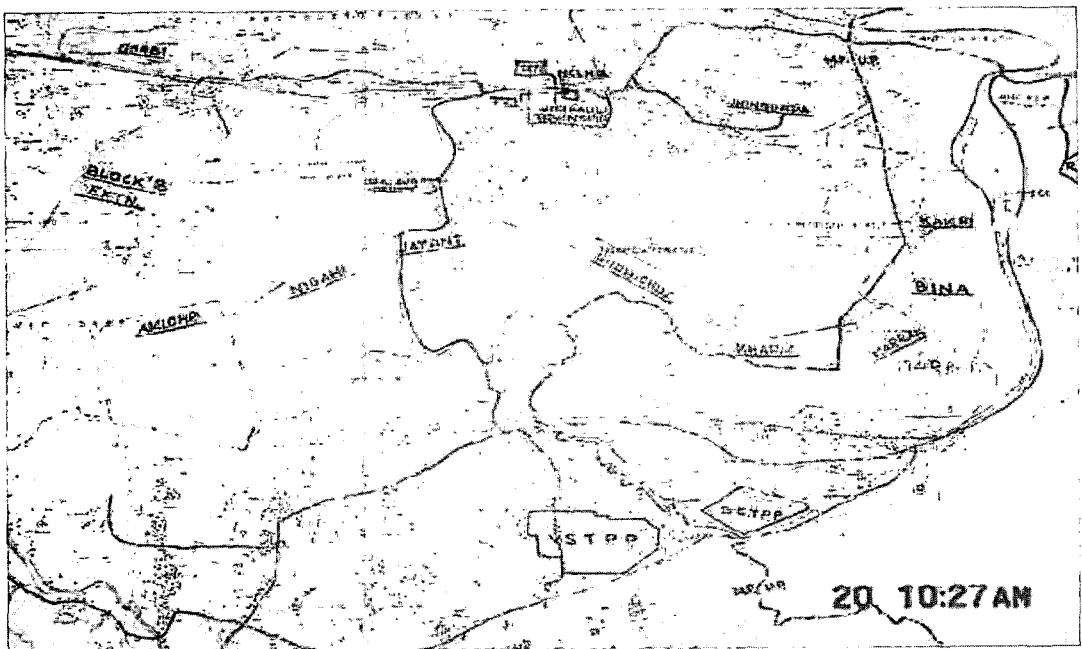


Fig. 1. Location of Jayant opencast mine and other mines of Northern Coalfields Limited.

259mm와 311mm로 천공되었고 그 깊이는 28~40m 이다. 저항선과 공간격은 9 & 11m 그리고 10 & 12m, 진동 계측 거리는 150~1,650m의 범위에서 실시되었다. 발파는 도폭선과 함께 노넬기폭시스템을 이용하여 실행되었다.

4. 시험 방법

발파로 인한 발생된 진동은 BlastMate III와 MiniMate plus (made in Canada M/s Instantel Inc.), SSU 3000 LC (made in USA by M/s Geosonics Inc.) 그리고 Mini-Seis (made in USA by M/s White Industrial Seismology)를 사용하여 계측하였다. 전파된 지진 성분이 만들어지고 진동의 시간이력을 얻기 위하여 10~12개의 지진계가 배열되었다. 발파면과 구조물 사이의 전파되는 특유의 기본 주파수를 알아내기 위하여 시험발파가 실행되었다. 계측 위치는 근처 마을과 그 마을의 구조물에서 구조물의 기초 가까이 뿐만 아니라 발파면 근처로 설정하였다.

진동은 1.21mm/s~101mm/s의 범위에서 기록되었으며, 진동의 주 주파수(ZC frequency)는 계측 위치에 따라 3.3Hz~16Hz사이에서 기록되었다. 또한 Nonel 튜브와 도폭선을 사용한 공의 기폭으로 발생된 진동을 비교해보는 시도도 실시하였다. 두 발파 세트는 거의 모든 발파 설계 변수를 일정하

게 유지하면서 실행되었다. 유일한 변수는 기폭방법에 있었다. Nonel 뇌관의 기폭 방식을 실행한 발파가 도폭선에 의한 기폭 방식으로 행했던 것과 비교하여 더 낮은 진동을 기록하였다. 진동 데이터의 Fourier 분석 결과 Fig.2와 Fig.3에서 보는 바와 같이 주파수에서 중요한 차이를 보이는 것으로 나타났다.(비전기뇌관의 경우 4~35Hz, 도폭선의 경우 4~8Hz). 진동은 두 발파 모두 발파면에서 200m 지점에서 기록된 것이다. 두 발파로부터 여러 지점에서 기록된 진동과 우세주파수는 Table 1에 나타나있다. 다음은 두 발파에서 사용된 시험 발파 설계 변수들을 보여주고 있다.

Parameters	Value
저항선 (m)	10
공간격 (m)	12
천공장 (m)	33
전색장 (m)	7
공당 평균장약량 (kg)	2,340
지발당 장약량 (kg)	4,680
1발파당 기폭된 폭약량 (kg)	114,386
공간 지연 시차 (ms)	25
열간 지연 시차 (ms)	42~165
공 수 (공)	50
기폭 시스템	도폭선, None 튜브(비전기)

Table 1. Vibrations records due to detonation of blasts with detonating cords and Non-electric tubes at similar locations

진 동 계측거리	도폭선 발파에서 기록된 진동		비전기 튜브발파에서 기록된 진동	
	PPV (mm/s)	우세 주파수(Hz)	PPV (mm/s)	우세 주파수(Hz)
200	101	6	53.0	11
250	82.9	9.3	52.4	4.6
300	75.2	9.8	48.8	17
350	58.1	5.8	38.8	10
400	50.4	7.8	34.9	9.3
450	38.74	7.7	32.7	15
500	37.6	7.9	23.8	24
550	30.1	7.8	19.62	10.9
600	28.4	11	17.3	27
1525	14.6	8	11.1	7.3
5000	1.81	7.2	1.58	9.5

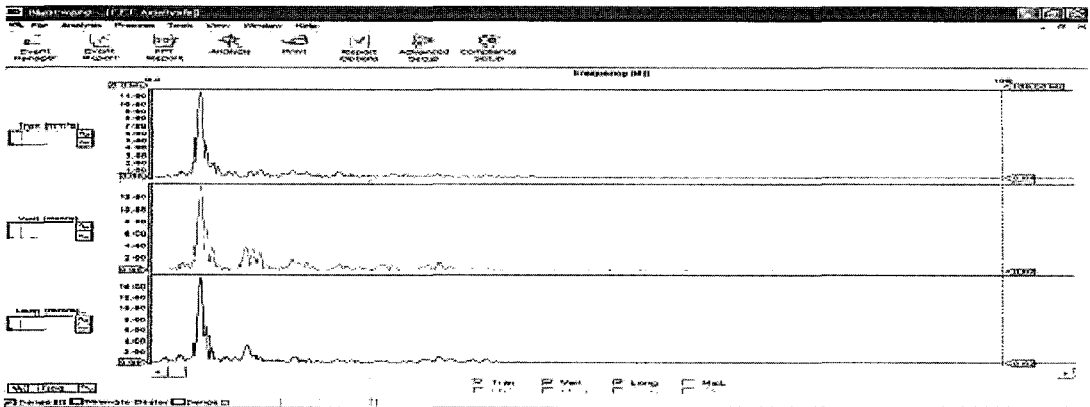


Fig. 2. Blast wave frequencies due to detonation of holes with Detonating cord.

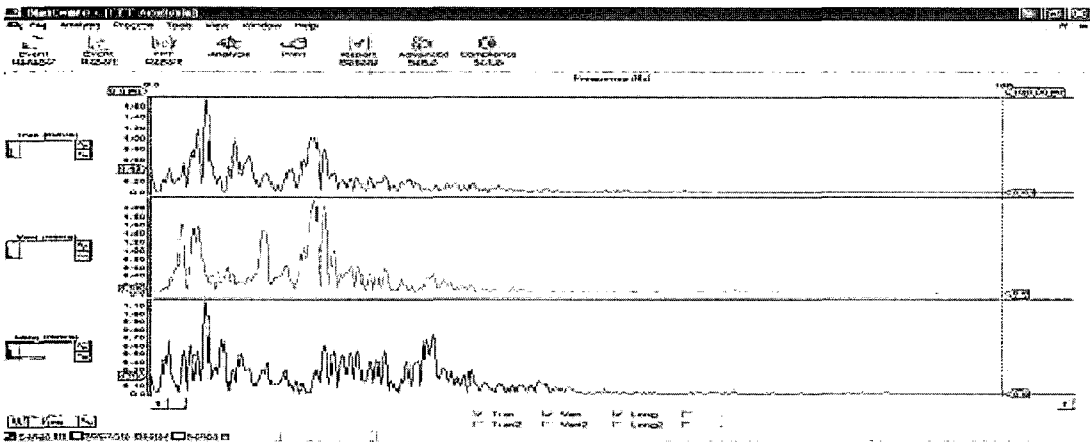


Fig. 3. Blast wave frequencies due to detonation of holes with non-electric tubes.

5. 발파진동에 대한 구조물의 응답과 기본 주파수

구조물의 동적 특성은 구조물의 고유주파수와 감쇠비를 포함하고 있다. 구조물의 동적 응답에 대한 주파수의 영향은 두 가지 측면을 포함하고 있다. 한 가지는 발파파의 주파수(외적 영향)이고 다른 하나는 구조물의 고유 주파수(내적 영향)가 그것이다. 지반진동의 세 요소가 구조물을 얼마나 많이 진동시키는지 결정한다. 지반진동 진폭(PPV), 지속시간 그리고 주파수가 그것이다. 발파 파의 주파수가 구조물의 고유진동보다 훨씬 클 때는 그 발파 진동에 대하여 즉각적으로 구조물이 반응하

지 않는다. 고주파수를 가지는 발파파의 감쇠는 매우 빠르며, 지속 시간 역시 매우 짧고 변형도 작게 일어난다. 반면에, 저주파를 동반하는 발파파가 전파되는 경우에는 구조물의 특정 규모보다 반파의 길이가 더 길기 때문에 구조물 전체가 진동을 일으키게 된다. 특히 발파파의 주요 주파수의 크기가 그 구조물의 고유주파수에 매우 근접할 경우, 구조물은 발파 진동에 응답을 보이게 되고 구조물 전체가 매우 심하게 흔들리는 원인이 된다. 왜냐하면 발파파의 감쇠가 느리고, 지속시간이 길며, 피해의 영향이 누적되어 드러나기 때문이다. 구조물의 공명 주파수는 주로 구조물 크기와, 높이 강성률에 좌우된다. 연구자들은 진동의 수평 성분이 구조물

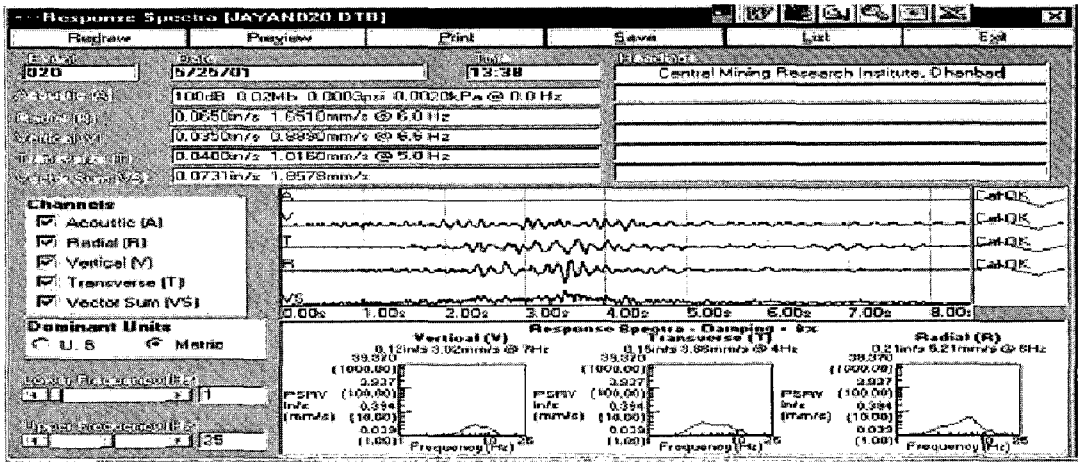


Fig. 4. Response spectra of blast wave recorded at 6,080m from blast face.

코너에서의 전단파괴나 벽체 중간부에서의 파괴와 같은 것에 가장 큰 영향을 미친다는 결론을 내렸다. 수직 성분은 천정과 바닥의 전단파괴 응답에 더 영향을 미친다.(Dowding, 1985)

발파에 대하여 사람들이 불평을 하는 진짜 원인은 구조적인 응답이다. 모든 발파 진동의 불만은 얼마나 많이 지반이 흔들리는가가 아니라, 얼마나 많이 집이 흔들리는가에 기인한다. 그 문제의 중요한 관점을 그대로 유지하여, 서로 다른 빌딩과, 주거지, 전기변전소의 응답을 측정해 보았다. 구조물의 서로 다른 높이에서 진동의 증폭이 관찰되었고, 구조물의 고유 주파수가 결정되었다. FFT 주파수 분석으로 우세 주파수 대역이 7Hz보다 낮은 것으로 나타났다. 이것은 구조적인 응답상태를 고려해 볼때 좋지 않은 상황인 것으로 확인됐다. 구조적인 응답은 Fig.4에서 보는 바와 같이 발파 위치로부터 6,080m 지점에서 기록된 파동의 스펙트럼 분석을 수행해 봄으로써 설명된다.

구조물의 응답스펙트럼의 자세한 기록이 Table 2에 표기되어 있다.

6. 발파진동 주파수

발파에 의해 발생한 파의 주파수는 일반적으로 지반조건이나 지연시차 배열에 의해 좌우된다. 지

반이나 구조물들은 저주파수를 갖는 파의 형태에 잘 반응한다. 토양과 퇴적암이 혼재하는 경우가 압축력이 좋고 긴 범위의 전파경로를 갖는 암에 비하여 상대적으로 발파파의 저주파 때문에 잠재적으로 더 심각한 발파 진동을 만들 수 있다. 광산 주변에 주거 구조물이 있을 때, 저주파의 진동은 항상 중요한 관건이다. 투과되는 진동이 구조물의 고유주파수 범위의 주파수를 가질 때, 공명을 일으키게 되고 그 결과로서 구조물에서 진동의 진폭이 증폭되게 된다. 이것이 구조물에서 바닥부에서보다 높은 천정부에서 더 높은 진폭의 진동을 일으키는 이유이다(Table 2). 진동기록을 분석해 본 결과 노천 탄전 발파가 저주파의 진동을 발생시키는 것으로 나타났다.

데이터의 56% 해당하는 경우에서 기록된 발파 진동의 주파수를 확인해 본 결과 7Hz이하의 주파수를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 저주파수는 상부 토양층과 같은 저속도의 지표층에 의해 생성된다. 계측된 데이터를 FFT 분석을 실시하여 본 결과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 3.3~7Hz 주파수 범위에서 발파진동의 에너지가 최대로 집중되는 것으로 나타났다. 그리고 이와 유사한 형태가 모든 대부분의 발파에서 관찰되었다.

Table 2. Structural response to blast vibrations and their fundamental frequencies

No.	구조물명과 구조 양식	수신기 위치높이 (m)	PPV (ground surface) (mm/s)	PPV (roof, corner, mid-wall) (mm/s)	진동 증폭	구조물 고유주파수 (Hz)
1	Morwa house : Load bearing structure	3.5	2.34	5.07	2.17	6.94
		4.2	2.37	5.45	2.30	6.69
		7.2	2.83	7.51	2.65	6.81
2	CETI hostel : Load bearing structure	5.2	1.23	4.05	3.29	8.31
		9.8	2.60	14.6	5.62	6.50
3	Mart building : Load bearing structure	8.1	2.97	9.73	3.28	6.25
4	Panjare bhawan : frame structure	6.1	1.49	4.85	3.26	4.25
		12.0	2.81	9.93	3.53	3.19
5	Marhauli sub-station : Load bearing structure	4.5	10.1	23.7	2.35	10.6
6	Residential house : Load bearing structure	7.0	4.07	10.4	2.56	7.25
7	Site office : Load bearing structure	3.3	7.52	16.5	2.19	8.75
8	Bucy office : frame structure	6.6	8.46	25.1	2.97	7.38

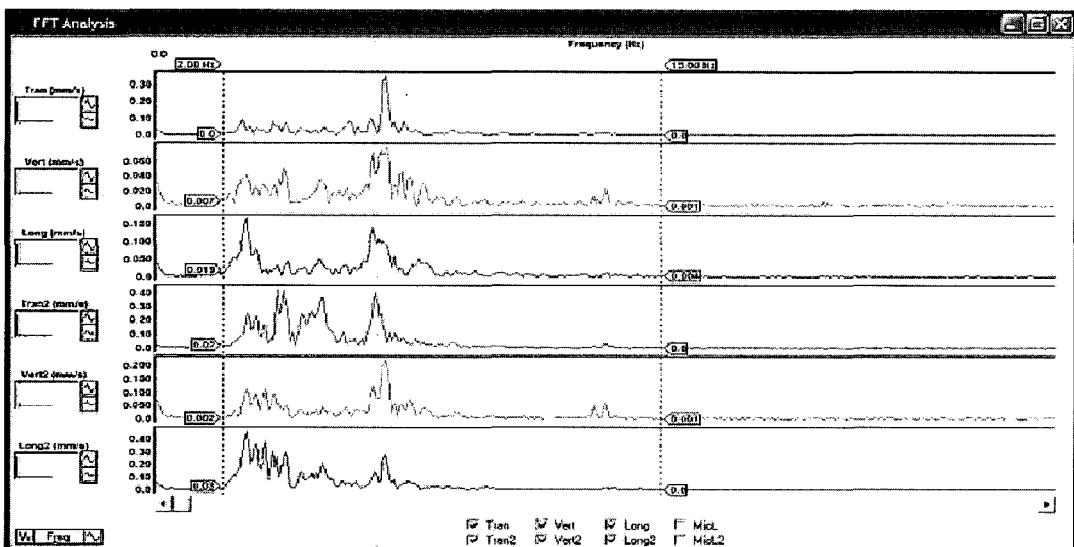


Fig. 5. FFT analysis of vibration record monitored on the ground as well as at the structure (Panjare bhawan) at 5,800m from blast face.

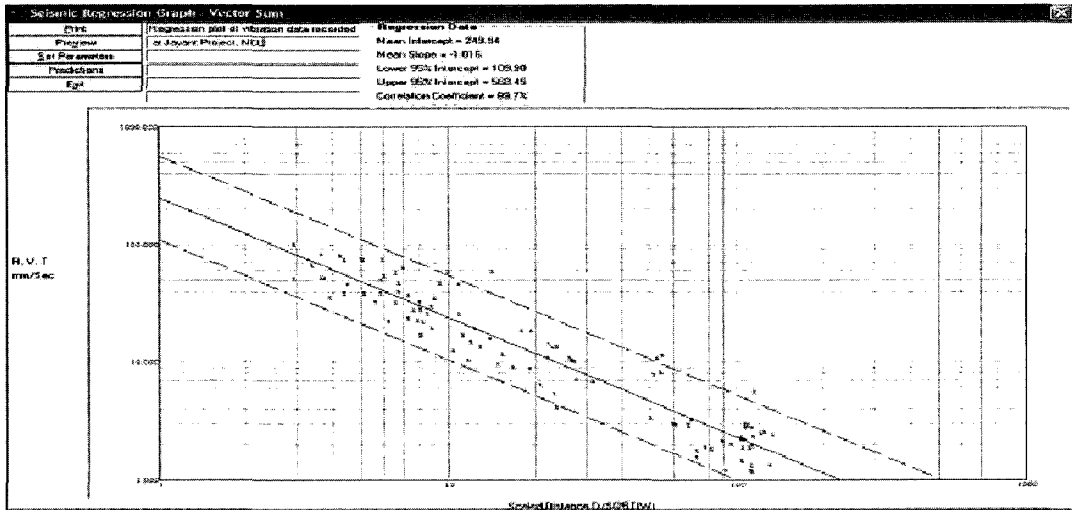


Fig. 6. Regression plot of vibration data recorded at near and far field.

7. 환산거리와 회귀분석

여러 위치에서 계측된 지반진동 데이터를 통계화 하기 위해 그룹을 지었다. 다음의 식(1)은 특정 현장의 발파진동을 회귀분석하여 예측식을 도출한 것이다.

$$v = 249.94 \left(\frac{R}{\sqrt{Q_{\max}}} \right)^{-1.016} \quad (1)$$

여기서, v : 최대 입자 속도 (mm/s)

Q_{\max} : 지발당 최대 장약량 (kg)

R : 발파면으로부터 진동 계측 수신기까지의 거리 (m)

식의 상관계수 : 89.7%

Fig. 6에서 보여주는 그래프는 계측된 진동 데이터를 회귀분석 한 것이다. 진동 데이터를 분석해본 결과 근거리에서는 발파진동이 빠르게 감소하는 반면 원거리에서는 매우 느리게 감소하는 것으로 드러났다. 회귀분석 그래프에서 보여주는 분산형태는 현장으로부터 근거리와 원거리에서 계측된 진동 데이터를 모두 포함하고 있다. 근거리와 원거리 현장 데이터를 분리하여 처리하는 이러한 특징적인 작업의 필요성이 대두되었다. 이점은 Yuill 등의 연구에서도 같은 점을 찾을 수 있다(2001).

8. 시험발파에 의한 지연시차의 최적화

최적의 지연시차는 적당한 암 파쇄도, 팽창, 이동, 비산과 여굴 제어 그리고 최소의 지반진동과 후폭풍압을 얻는데 중요한 역할을 한다. 대발파에 있어서 효과적인 지연시차를 사용하는 소규모 발파에 비하여 진동 지속시간이 항상 매우 크기 때문에 진동의 증폭을 완전히 피하기란 어려운 일이다(Valdivia et. al., 2003). Singh 등(2003)은 이러한 광산과 같은 외부 현장 작업에 대해 효과적인 저항선에 대해 6ms/m~16ms/m의 지연시차로 할 것을 제안하였다.

발파 작업에 있어서 악영향의 최소화와 발파로 인해 발생하는 지반진동의 지질학적 전파 특성 효과를 밝혀내기 위해서 가장 효과적인 방법은 지반 특성을 파악하기 위한 시험발파를 행하는 것이다(Wheeler, 2001; Aldas & Bilgin, 2004). 그러므로 발파진동의 파형 특성을 알아내기 위해 4개의 벤치광산에서 시험발파가 수행되었다. 그 시험발파의 시간 이력은 Fig.7에 나타나 있다.

시험발파의 주파수 스펙트럼이 분석되었고, 파형의 특성을 시뮬레이션화하기 위하여 파의 선형 겹치기가 수행되어졌다. 최적의 지연시차를 결정하기 위하여 시험발파 파장의 1/2 또는 1/4배를

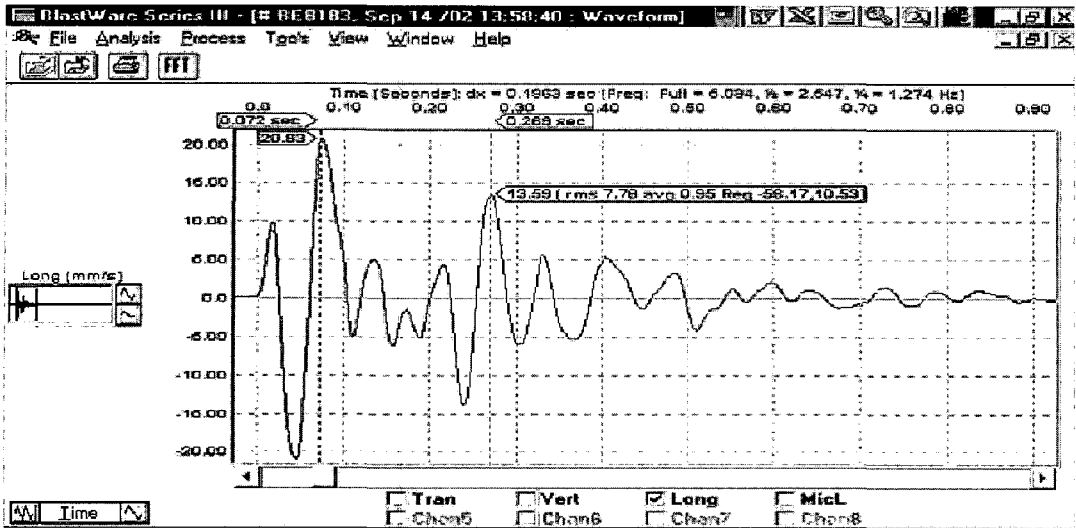


Fig. 7. Time history of the signature blast in longitudinal direction.

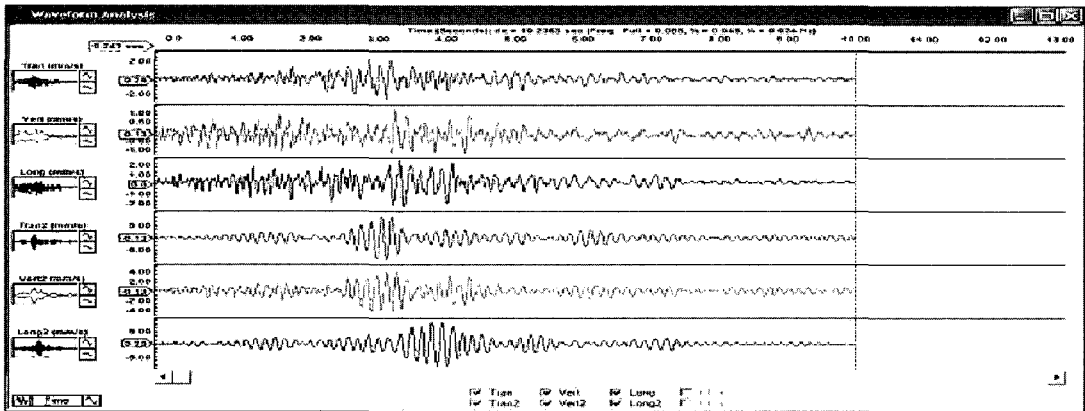


Fig. 8. Blast time history due to bench blasting of Jayant Project with prevailing blast design of the mine.

취하였다(Rudenko, 2002). 분석 결과 공들 사이의 매우 짧은 지연시차와 열들간의 매우 긴 지연시차는 피해야 하는 것으로 나타났다. 더 분석해 본 결과 최적의 저항선을 갖는 발파에서 발파암면이 이동을 시작하기 위해 필요한 평균 시간은 3.5~4ms 인 것으로 나타났다. 따라서 11~16ms/m의 지연시차일 경우 더 나은 결과를 가져올 것으로 보였다. 당 광산의 실제 발파 작업에서는 15~27ms/m의 효과적인 지연시차를 유지하고 있었고 발파 지속시간은 1,801ms~2,184ms였다. 발파 지속시간은 12 초 이상이었고 진동 증폭은 3.85배였다(Fig.8). 사

전발파를 해석한 자료를 바탕으로 하여 발파 설계가 최적화되었고 시험발파가 이루어졌다. Fig.9에서 보는 바와 같이 발파 지속시간은 1,527ms까지 감소하였다.

수정된 발파 패턴을 적용하여 본 결과, 일반적으로 행해지고 있던 발파작업으로 발생한 발파진동에 비하여 모든 계측 지점에서 그 크기가 감소하였다. 그리고 같은 구조물에서 진동 지속시간도 8 초까지 감소한 것으로 나타났으며(Fig.10), 진동의 증폭도 단지 2.18배 정도로 감소하였다.

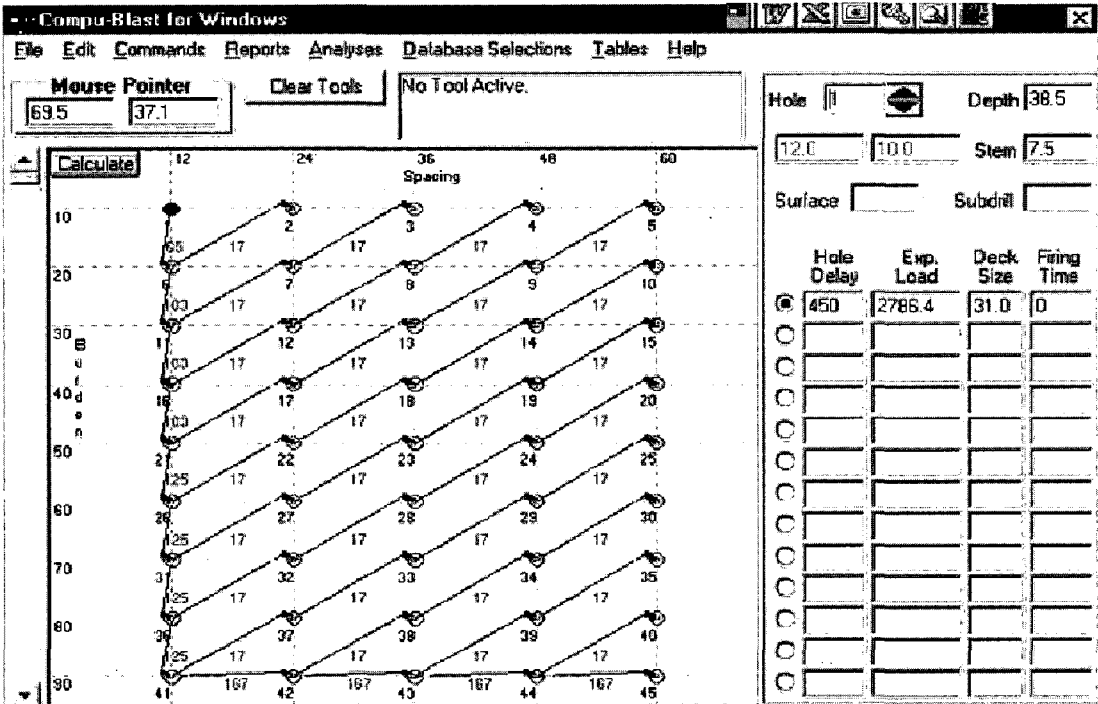


Fig. 9. Modified blast design experimented at Jayant Project.

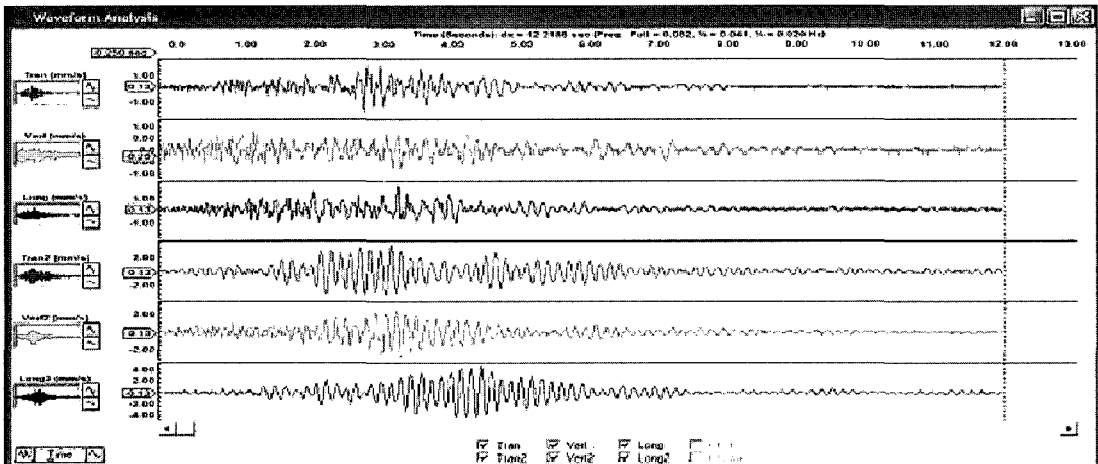


Fig. 10. Blast time history recorded due to bench blasting of Jayant Project with modified blast design.

9. 결 론

비전기 기폭시스템을 사용하여 발파를 하는 경우가 도폭선을 사용하여 발파를 실시하는 경우에

비하여 더 낮은 진동을 일으킨다. 그리고 발파 파의 주파수 역시 비전기 뇌판의 경우에서 더 높은 범위로 나타났다(up to 35Hz). 구조물에서 진동의 증폭은 구조물의 높이와 구조물의 고유 주파수와 유입되는 진동의 주파수에 의하여 5배 이상인 것

으로 나타났다. 총 발파 지속시간이 2,184ms였을 때, 원거리에 위치한 구조물에서의 진동 지속시간은 12초 이상이었다. 사전 시험발파를 참고로 하여 공과 열의 지연시차를 최적화하였으며, 이때 1,527ms의 발파 지속시간은 진동의 감소와 구조물에서의 진동 지속시간을 줄이는 결과를 가져왔다. 사전 시험발파는 진동 주파수를 향상시키는 것을 가능하도록 하였고, 또한 구조물에서 진동의 증폭을 더욱 더 줄일 수 있게 되었다. 또한 정밀 시차는 발파효율을 증대시키고 진폭을 줄이는데 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 발파 현장으로부터 근거리나 원거리 지점에서 계측된 진동 데이터로 진동을 예측할 시에는 데이터를 분리되어 분석하여야 한다.

참고문헌

1. Aldas, G. G. U. and H. A. Bilgin, 2004, Effect of some rock mass properties on blasting-induced ground vibration wave characteristics, CIM Bulletin, Vol. 97, No. 1079, pp. 52-59.
2. Dowding, C. H., 1985, Blast Vibration monitoring and control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p. 297.
3. Rudenko, D., 2002, An analytical approach for diagnosing and solving blasting complaints, The Journal of Explosives Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 36-41.
4. Singh, P. K., W. Vogt, R. B. Singh and D. P. Singh, 1996, Blasting side effect - investigations in on opencast coal mine in India, Int. Journal of Surface Mining Reclamation and Environment, The Netherlands, Vol. 10, pp. 155-159.
5. Singh, P. K., M. P. Roy, R. K. Singh and A. K. Sirveiya, 2003, Impact of blast design and initiation sequence on blast vibration, Proceedings of National Seminar on Explosives and Blasting, DGMS, Dhanbad, India, pp. 118-126.
6. Siskind, D. E., M. S. Stagg, J. W. Kopp and C. H. Dowding, 1980, Structure Response and Damage Produced by airblast from Surface Mine Blasting, U. S. Bureau of Mines, RI8485, p. 111.
7. Valdivia, C., M. Vega, C. R. Scherpenisse and W. R. Admson, 2003, Vibration simulation method to control stability in the Northeast corner of Escondida Mine, International Journal of Rock fragmentation by blasting, FRAGBLAST, Vol. 7, No. 2, pp. 63-78.
8. Wheeler, R. M., 2001, The analysis of signature vibration to help control vibration frequency, Proceedings of Tenth High-Tech Seminar on State of the art, Blasting Technology, Instrumentation and Explosives Application, Nashville, Tennessee, July 22-26, pp. IX 3-21.
9. Yuill et al., 2001, Variations in vibrations signals from single hole quarry blast to help control vibration frequency, Proceedings of ISEE Conferences, Orlando, USA.