

석회석 광산에서 전자뇌관의 적용성에 관한 연구

송영석, 이윤재, 민형동¹⁾, Dave Kay²⁾

A Case Study of Applying Electronic Detonator in Limestone Quarry

Young-Suk Song, Yun-Jae Lee, Hyung-Dong Min and Dave Kay

초 록. 일반적으로 국내 석회석 광산에서의 발파는 20ms나 25ms 시차를 가지는 지발발파로 시행되어지고 있다. 국외에서는 전자뇌관을 사용하여 암반의 지질학적인 특성에 따라 지발 시차를 사용자의 현장에 따라 선정하여, 주변 보안 물건에 따른 진동 및 소음을 경감하면서, 1회 발파의 생산량을 증대할 수 있으며, 2차 파쇄 비용 및 적재비용을 절감하는 최적의 시차를 적용하여 발파 규모를 줄이지 않는 발파패턴을 적용하고 있다.

본 연구는 해외에서 사용되고 있는 전자뇌관을 국내 현장 석회석 광산(단양)에 적용함으로써 최적지연시차를 찾아내는 방법과 초시의 오차에 따른 문제점과 향후 국내 적용성을 판단하고자 하였다. 대규모 석회석 광산을 대상으로 최적 시차를 판단하고자 동일 패턴에서 시차를 6ms ~ 30ms로 시험발파를 시행하여 4가지 요소 발파진동속도, 주 주파수 특성, 파쇄입도, 암석 이동 및 버력의 상태를 분석하여 각 시차에 따른 배점을 두어, 당 현장에 요구되는 개별 가중치를 선정하여 분석하였다. 분석 결과 당 현장에서의 발파결과에 따른 요소별 가중치를 발파진동속도(20), 주 주파수 특성(20), 파쇄입도(40), 암석 이동(10) 및 버력의 상태(10)로 하여 분석한 결과 15ms가 최적시차로 나타났다. 향후 각 현장에 적합한 요소별 가중치를 선정하여 현장별 최적시차를 도출 한다면 최적의 발파효과를 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : 지발발파, 전자뇌관, 개별 요소, 개별 가중치, 최적 지연 시차

1. 서 론

국내 석회석 광산에서의 채광은 주로 화약을 이용한 발파를 시행하고 있으며, 각 현장마다 최적의 벤치 발파 형태를 선정하여 작업을 하고 있다. 이는 대상 암질 및 주변요건 등의 환경적인 측면과 발파규모 및 경제적인 요소와 시공방법 등 발파 기술적인 측면을 고려하여 선정한다. 여기서 환경적인 측면은 화약을 이용한 발파 작업 시 발생하는 진동 및 소음이 주변 보안 물건에 미치는 정도를 나타내는 것이며, 기술적인 측면은 천공, 장약과 기폭시차, 발파, 소할, 버력 처리, 수송운반, 분쇄의 일련의 과정을 통해서 검토하는 것이 바람직하다. 환경적인 측면과 기술적인 측면을 고려할 때 가장 기본이 되는 작업이 현장에 맞는 발파 패턴의 설정이다. 발파 패턴의 가장 중요한 요소는 지발당 장약량의 선정이고 이에 따라 공간적, 저항선 천공장을 선정하여야 한다. 국내 석회석 광산에서

적용되는 지발시차는 20 ms 나 25ms로 한정되어 있으며 기폭시차의 오차에 따른 진동 예측의 불확실성 및 파쇄입도의 불균일등 한계점에 당면하였다. 따라서 기폭 시스템보다는 발파 규모를 줄이고 있는 실정이다. 이는 환경적인 측면에 맞추기 위하여 기술적인 측면을 고려하지 못하는 방법으로 발파가 이루어지고 있기 때문에, 이를 개선하고 보다 더 효과적인 발파를 시행하기 위하여 정확한 초시의 전자뇌관(Electronic detonator)을 적용하여, 당 현장에 경제성을 향상시키고, 환경적인 측면에서도 만족할 수 있는 최적의 기폭시차를 제안하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 전자뇌관 개요

산업용 화약의 효시라 할 수 있는 다이ना마이트가 발명된 이래로, 발파기술(Blasting Technique)은 오랜 시간에 걸친 개발과 Know-How를 바탕으로 꾸준히 발전을 거듭하고 있다. 현재까지의 기술발전과 더불어 화약류에서도 여러 가지의 획기적인

1) (주)한화

2) Orica co.

접수일 : 2004년 5월 12일

발전요소가 있었는데 이를 나열해 보면, ANFO의 발견과 에멀전(Emulsion)폭약의 발명, 기폭초시를 내장한 지연뇌관(Delay Detonator), 비전기 기폭시스템(Shock tube 등)의 활용 등일 것이다. 특히, 근래에는 컴퓨터를 이용한 발파시스템(Computerized Blasting System)과 함께 뇌관의 기폭초시(Delay time)를 내장된 집적회로(Integrated Circuit)로 조정하는 전자뇌관(Electronic Detonator)이 개발되어, 그 활용의 폭을 넓혀 가고 있다. Fig. 1과 같이 전자뇌관(Electronic Detonator)은 기존의 연시제의 위치에 집적회로(Integrated Circuit)를 내장하여 기폭초시(Delay time)의 정밀도를 0.1 Millisecond의 수준으로 높이고 발파의 Process를 Computerized한 것으로서 뇌관의 안정도를 높여 안전사고의 위험을 줄이고 초시의 정밀도에 따른 다음의 효과를 위하여 사용되고 있다.

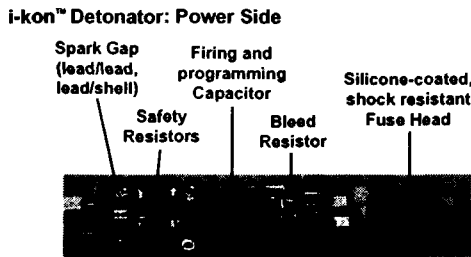


Fig. 1. System briefing(Power Side)

- 1) 대규모 발파현장(노천 광산 등)의 파쇄도 개선 효과
- 2) 발파로 인한 소음/진동의 저감 효과
- 3) 터널 벽면 제어 효과

3. 시험발파

전자뇌관을 사용하여 현장에 따른 적합한 발파 패턴과 개선할 수 있는 방안을 제시하기 위하여 석회석 광산인 성신 양회에서 실시하였다. 이번 시험은 현재 동일한 발파 패턴에서 시차를 달리하여 발파 결과에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 6, 15, 20, 25, 30ms로 시차를 달리하여 발파를 실시하였다. 발파 결과 분석은 5가지 요소로 파쇄입도, PVS의 진동 속도 분석, PPV의 FFT 분석, 발파암 이동 및 적재상태로 구분하여, 결과 분석에 따라 당 현장에 적합한 시차를 찾아내고자 하였다. 시험 발파 재원은 Table 1과 같이 총 5회를 실시하였다.

3.1 지질 및 암반개요

본 연구의 대상 현장은 충북 단양지역으로 Fig. 2와 같은 지질도로 주요 암종은 석회암으로 구성되어 있다. 암반의 주요내용은 Table 2와 같으며, 절리에 의한 발파 영향은 벤치 전색 부분에서 미

Table 1. Properties of Blasting

Div.		I-Kon 1	I-Kon 2	I-Kon 3	I-Kon 4	I-Kon 5
Bench	Height(m)	15	15.5	15~18	18	15.5
	Length(m)	16.5	16.5	16.5~19	3~19	17
	Spacing/Burden	5.1/4.1	4.5/4.1	4.1/3.7	4.1/3.7	4.5/4.1
	Dia(mm)	φ102	φ 89	φ102	φ102	φ102
Charge	explosive	HiMEX	HiMEX	ANFO	ANFO	HiMEX
	delay per(Kg)	125±5	95±5	116.5±5	116.5±6	105
	Total (Kg)	1,986	894	4,198	1,100	1,376
Drilling	Holes	16	11	36	11	14
	Drill row	1	1	1	1	1
	Inclination	70°	70°	70°	70°	70°

굴이 발생할 수 있으며, 절리의 간격과 전 발파의 파쇄영역권내에 기인하여 발생된 것으로 판단된다.



Fig. 2. Geological map of test area

Table 2. Properties of rock mass

Type	Limestone
Strength	S-R ~ H-R
Under water	None
Joint spacing	1m
Joint condition	W
Joint set number	3

3.2 벤치현황

세부 벤치 현황은 Table 3과 같으며, Fig. 3과 같이 벤치의 경사는 70°로 이루어져 있다. 또한 암반의 강도에 따라 천공경을 $\phi 89 \sim \phi 102$ 로 변경하여 저항선과 공간격을 선정하였다.

Table 3. Drilling Geometry

Bench height (m)	15 ~ 16 m
Drill length (m)	16.5 m
Spacing (m) / Burden (m)	4.2 ~ 5.1
Drill row	Single row
Dia (mm)	89 ~ 102
Inclination	70°

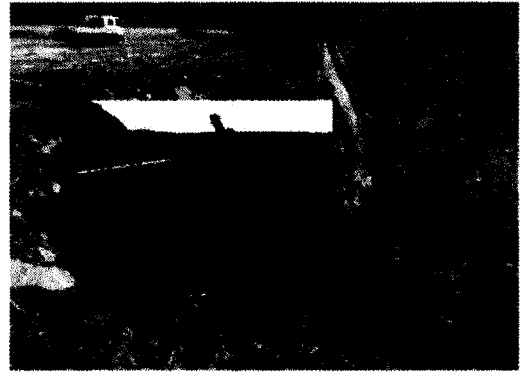
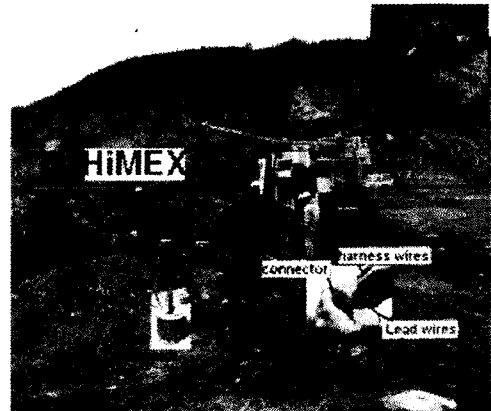


Fig. 3. Photograph of test area

3.3 발파 및 장약현황

발파 현황과 장약현황은 Fig. 4와 같으며, 절리 발달에 의한 크랙 구간에 보여 흠 탐색 장비에 의한 균열위치를 check하고, Aig-bag을 사용하여 장약손실 및 국부적인 과장약을 피하기 위하여 이중 장약(Deck charge)을 실시하였다. 적용 폭약은 ANFO와 HiMEX를 암반의 상태에 따라 적용하였으며, 장약현황은 Table 4와 같이 실시하였다.



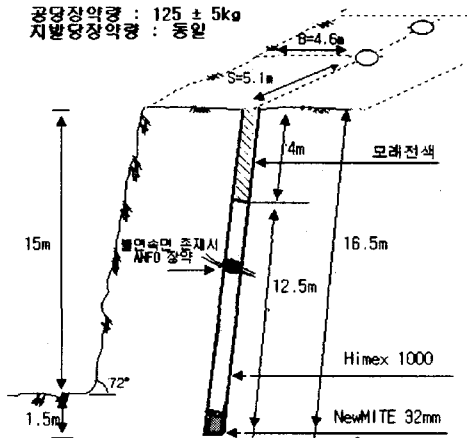


Fig. 4. Charging property of test area

Table 4. Charging Specification

Hole per Weight (kg)	125± 5
Delay per Weight (kg)	125± 5
Total weight (kg)	HiMEX : 1910, ANFO : 76
Explosive	HiMEX 1000
Detonator	I-Kon(electronic Det)

3.4 기폭현황

발파 횟수에 따른 기폭 시스템을 적절히 활용하기 위하여 1열 천공된 공에 동일한 발파 조건을 나타내기 위하여, 중간 지점에 2sec의 시차를 두어 좌, 우로부터 기폭을 할 수 있게 Table 5와 같이 기폭시스템을 선정하였으며, 세부 현황은 Fig. 5와 같이 기폭 하였다.

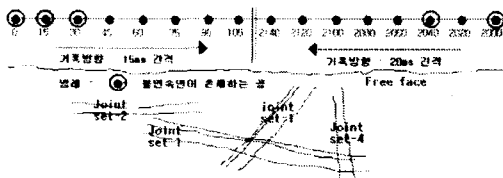


Fig. 5. Detonation arrangement property

Table 5. Ignition system of each blast

Div.	Delay Time
I-Kon 1	15ms / 20 ms
I-Kon 2	20 ms
I-Kon 3	20 ms / 25 ms
I-Kon 4	30 ms
I-Kon 5	6 ms

4. 결과 분석

시차의 변화에 따른 발파 결과를 PVS의 진동 속도 분석, PPV의 FFT 분석, 파쇄입도, 발파암 이동 및 적재 상태 5가지 요소로 구분하여 기폭 시차가 발파 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

4.1 진동 측정 위치

발파진동 측정은 지반의 바닥부에 직접적으로 나타나는 진동을 측정하기 위하여 앞쪽, 옆쪽과 뒤쪽에서의 최단거리 중 원지반 위에서 진동계측을 실시하였다. Fig. 6은 발파1의 계측 위치를 나타냈으며, 발파별 계측 거리 및 위치는 Table 6과 같다. 이때 적용된 계측기는 eXAD-8(PMT)는 1번 DS477(Instantel)은 2번, NS-5400 (Nomis)은 3번의 순으로 설치하여 계측을 실시하였다.

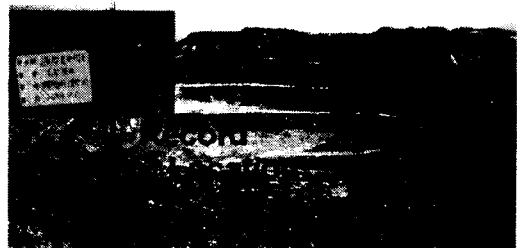


Fig. 6. Record location

Table 6. Vibration record location.

Div.	Distance(m)		
	eXAD-8	Ds-477	NS-5400
I-Kon 1	210	260	270
I-Kon 2	150	200	250
I-Kon 3	150	200	250
I-Kon 4	200	250	300
I-Kon 5	110	160	210

4.2 발파 진동 계측결과

Table 7~ 9에는 각 계측 위치에 따른 계측기별 결과를 정리하였고, FFT분석은 DS 477로 계측된 데이터를 ASCII 파일로 변환한 후 Matlab을 이용하여 분석하였다.

Table 7. Result of blast vibration(eXAD-8)

Div.	Ver (mm/sec)	Trans (mm/sec)	Long (mm/sec)	PVS (mm/sec)
I-Kon 1	4.246	3.196	2.660	5.371
	5.270	2.684	2.952	5.447
I-Kon 2	3.074	3.123	2.879	3.637
I-Kon 3	2.879	2.513	2.952	3.380
	5.612	5.222	4.026	5.938
I-Kon 4	2.904	3.050	4.270	5.021
I-Kon 5	15.665	11.639	15.958	19.039

Table 8. Result of blast vibration(DS-477)

Div.	Ver (mm/sec)	Trans (mm/sec)	Long (mm/sec)	PVS (mm/sec)
I-Kon 1	1.19	1.17	1.64	1.676
	1.79	2.40	2.24	2.710
I-Kon 2	3.06	1.95	2.08	3.130
I-Kon 3	1.87	1.84	1.06	2.685
	2.75	1.83	1.97	3.250
I-Kon 4	1.95	1.00	1.68	2.000
I-Kon 5	7.86	3.89	6.73	9.590

Table 9. Result of blast vibration(NS-5400)

Div.	Ver (mm/sec)	Trans (mm/sec)	Long (mm/sec)	PVS (mm/sec)
I-Kon 1	-	-	-	-
	1.2	1.0	1.6	2.0
I-Kon 2	1.6	1.6	1.2	2.0
I-Kon 3	-	-	-	-
	0.0	2.2	1.2	2.2
I-Kon 4	0.0	1.0	0.8	1.0
I-Kon 5	4.1	3.5	3.3	4.8

N/A (-) : Not Applicable

4.3 발파 진동 속도 및 주파수 분석

각 성분별 진동 계측된 데이터를 시간별 시차를 두고 발파를 하였으므로 전체 데이터를 각기 다른 시차를 가지는 데이터로 변환하여 성분별 최대값 (PPV)으로 FFT 분석을 하였다. Fig. 7은 발파 1의 수직성분의 진동 시간이력과 전체의 주파수분석이며, 발파 1의 15ms와 20ms의 2개의 시차를 두어 구분되므로 이에 따른 시간 이력과 주파수 분석이다.

(1) 발파진동속도 분석 결과

발파 진동 속도의 분석은 최대진동 합성치(PVS)를 이용하였다. Fig. 8에서와 같이 시차에 따른 진동속도의 크기는 20 ms에서 각 공별 발생하는 진동의 합성 및 중첩이 가장 적게 발생하며, 6 ms, 15 ms, 25 ms, 30 ms에서 진동의 합성 및 중첩이 많이 발생되어 높은 진동속도가 발생하는 것을 알 수 있었으며, 일정거리 이상에서는 진동의 감소가 수렴하는 양상으로 보이나 비교적 근거리에서 20ms에서 가장 낮은 수준으로 나타났다.

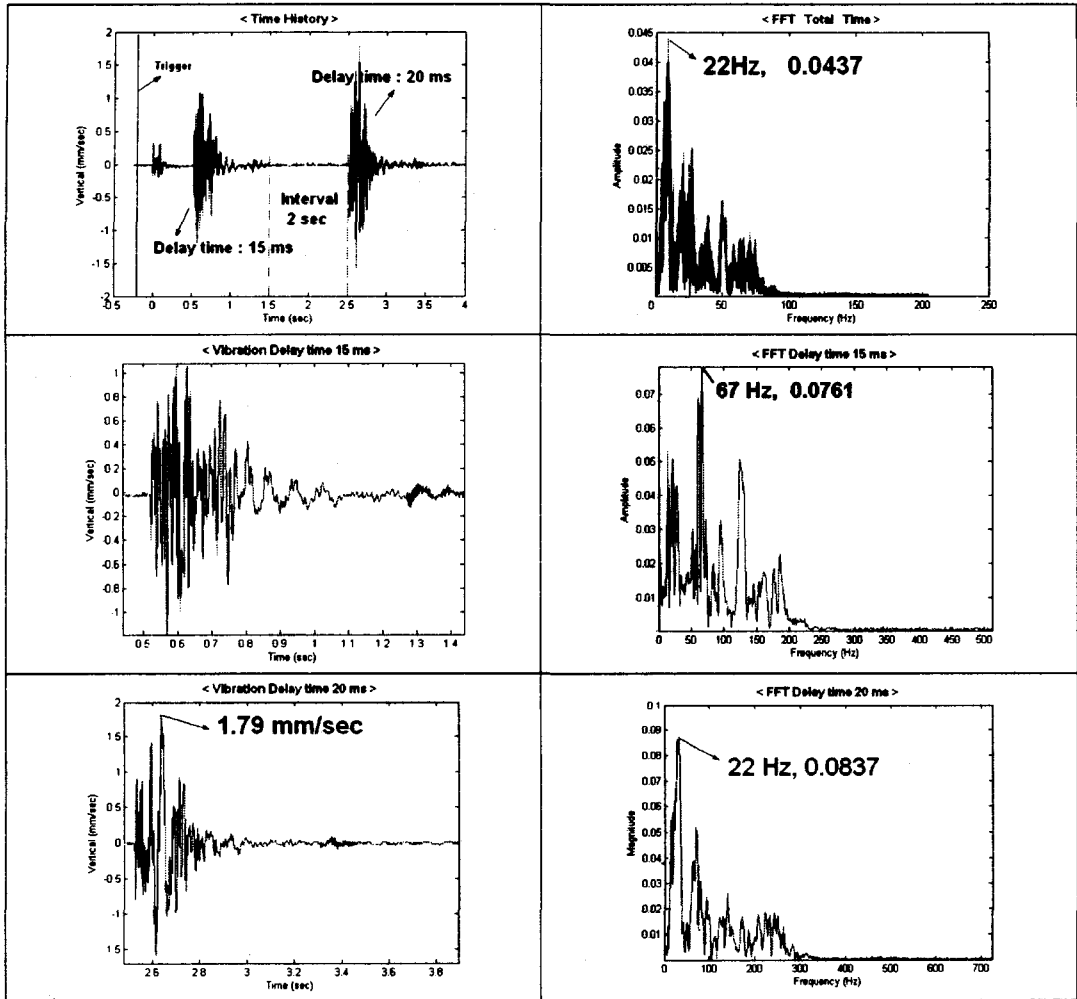


Fig. 7. Time history and FFT analysis(Vert.)

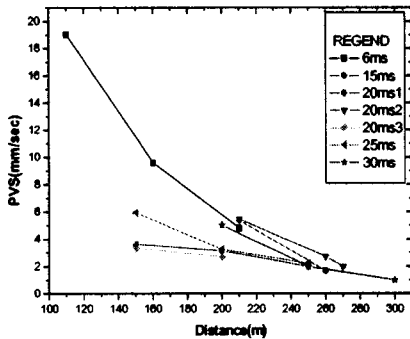


Fig. 8. Result of blast vibration(PVS) analysis

(2) FFT 분석 결과

FFT 분석은 각 성분별 최대치(PPV)를 이용하였으며, Fig. 9에 그 결과를 나타내었다. 각 성분별 Max FFT는 서로 상이하게 발생하였으며 이는 석회암이 나타내는 공동 특성과 계측 위치의 변화에 따라 성분별 전파되는 진동진폭의 변화가 발생된 것을 알 수 있다. 수평 성분이 구조물의 벽체에 10 Hz 이내로 진행될 때 공진에 의한 크랙이 발생되므로 6ms 일 때는 영향이 있을 것으로 판단되며, 수직 성분은 천정과 바닥에 10Hz 이내로 진행될

때 공진에 의한 크랙이 발생되므로 각 시차에 따른 영향은 없을 것으로 판단된다. 주파수 분석에 따른 결과 각 진동 성분의 최대치를 볼 때 15ms에서 상대적으로 높은 주파수가 발생하며, 환경적인 측면에서 당 현장 암반에서 가장 적합한 지연시차를 나타내는 것을 알 수 있다.

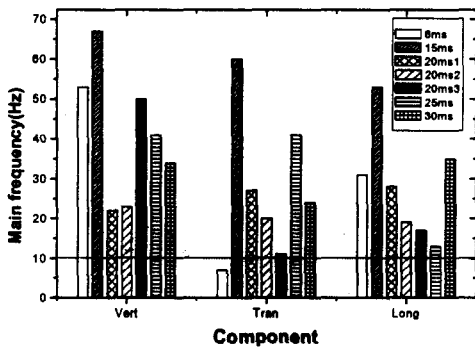


Fig. 9. Result of FFT analysis

(3) 전기뇌관(HiDETO)과 진동특성 비교 결과

정확한 시차를 가지는 전자 뇌관과 오차의 범위가 5%이내인 전기 뇌관의 진동 특성을 비교하기 위하여 동일 암반 및 발파 조건에서의 I-Kon 2 발파(20 ms)와 동일조건에서 발파를 실시한 결과를 Table 10에 나타내었다. 또한 편차에 의한 동시 기폭 가능성 여부를 알고자 I-kon 5 발파(6ms)와 동일하게 160m에서 진동을 측정하여 Table 11과 같이 비교하였다.

Table 10. 20ms(I-Kon2) VS 20ms(HiDETO)

Div.	Ver (mm/sec)		Trans (mm/sec)		Long (mm/sec)		PVS (mm/sec)
	PPV	FFT	PPV	FFT	PPV	FFT	
I-Kon 2 20ms	3.074	23	3.123	20	2.879	19	3.637
HiDETO 20ms	4.49	10	3.67	10	4.00	13	5.46

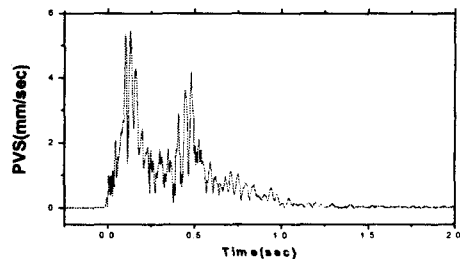
Table 11. 6ms(I-Kon5) VS 20ms(HiDETO)

Div.	Ver (mm/sec)		Trans (mm/sec)		Long (mm/sec)		PVS (mm/sec)
	PPV	FFT	PPV	FFT	PPV	FFT	
I-Kon 5 6ms	7.86	53	3.89	37	6.73	31	9.59
HiDETO 20 ms	7.60	14	3.94	14	5.97	19	9.11

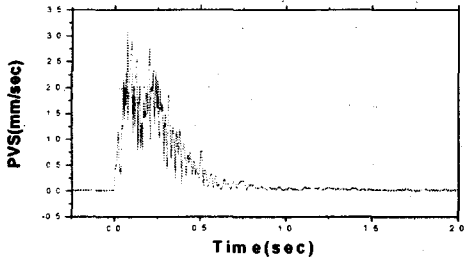
Fig. 10은 각성분의 합성 진동치인 PVS의 분석 결과를 나타내었다. 그 결과 전자뇌관은 진동 파형이 일률적으로 나타나고, 전기뇌관은 진동 파형이 불규칙적으로 나타났다. 이는 초시 편차에 의해 진동의 합성이 발생한 것이다. 이를 확인하기 위하여 지연시차가 6ms인 I-Kon 5와 비교하였을 때 합성된 진동파형이 비슷하게 분석되었다. PVS합성 파형 분석결과 초시의 오차가 5%이내인 전기뇌관은 초시의 오차가 1%이내인 전기 뇌관에 비하여 진동 합성 및 진동 감소, 상쇄도 나타날 수 있어 거리에 따른 진동을 예측하기가 불리한 것을 알 수 있다.

당 현장 암반에서 초시의 오차가 적은 전자뇌관이 전기뇌관에 비하여 33%의 합성 진동이 감소되었다. 주파수분석 결과는 초시 오차가 1%이내인 전자 뇌관 발파 시 주파수는 23Hz로 전기발파 10Hz보다 높게 발생되었다.

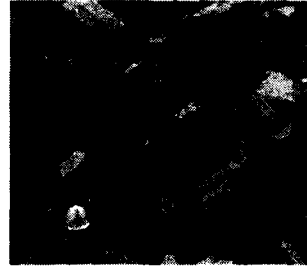
기폭 초시의 정밀도에 따른 비교를 위하여 동일 조건에서 전기뇌관으로 2회의 발파를 실시한 결과 초시의 정밀도가 1%이내인 전자뇌관 사용 시 주파수 및 진동의 조정이 가능 할 것으로 판단된다.



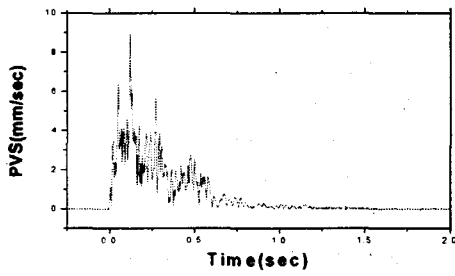
(a) Hideto (20ms, 200m)



(b) I-Kon 2 (20ms, 200m)



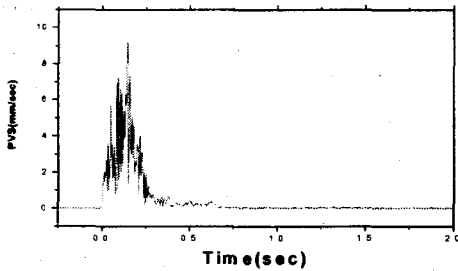
(a) 20 ms(I-Kon 1)



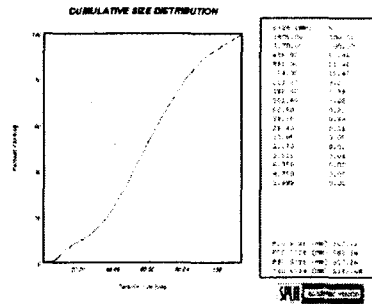
(c) Hideto (20ms, 160m)



(b) Fragmentation analysis



(d) I-Kon 5(6ms, 160m)



(c) Cumulative size distribution

Fig. 10. Results of PVS analysis

Fig. 11. Result of fragmentation analysis

4.4 파쇄입도 분석 결과

입도 분석은 영상 입도 분석 프로그램인 Split Desktop을 이용하여 Fig 11.과 같은 순서로 평균입도와 입도 분포를 분석을 실시하였으며, 분석 현황은 Table 12.와 같다.

Table 12. Result of fragmentation

Div.	P50(m)	P20(m)	P80(m)	Top Size
I-Kon 1	0.56	0.36	0.76	0.93
	0.58	0.37	0.82	1.13
I-Kon 2	0.55	0.36	0.80	1.01
I-Kon 3	0.59	0.38	0.83	1.15
	0.62	0.40	0.89	1.35
I-Kon 4	0.63	0.39	0.92	1.05
I-Kon 5	0.43	0.15	0.74	0.89

Fig 12는 시차별 입도분포를 나타낸 것으로 6ms에서 평균 입도가 가장 작게 나타났으며, 이는 제발의 효과에 기인한다. 입도 분포 현황은 15ms ~ 30ms의 시차에서 입도 분포가 골고루 배치된 것을 알 수 으며, 25ms에서 최대 파쇄입도는 암반의 불연속면에 따른 미장약 구간에 기인한 것이다. 분석결과 기폭시차가 파쇄입도에 영향을 받는 요인은 미세하나, 파쇄입도는 시차가 짧을수록 파쇄입도는 개선되는 것을 알 수 있다. 당 현장은 석회석 광산이므로 시차를 줄일수록 파쇄입도의 감소에 따른 크라샤 비용이 감소될 것으로 판단된다.

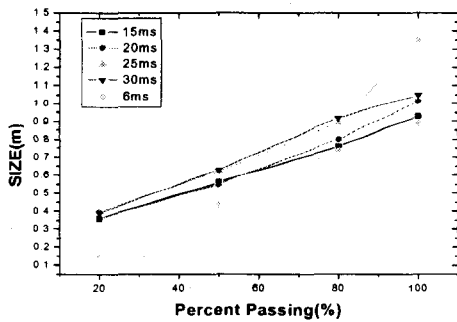


Fig. 12. Result of passing size

4.5 버력 이동 및 상태 분석 결과

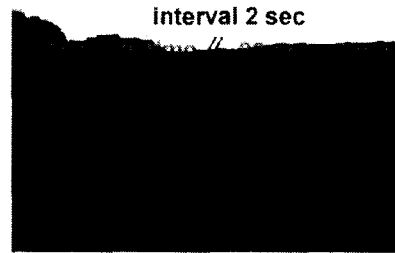
발파 후 암석의 이동 및 버력의 상태는 2 차 파쇄 비용의 절감에 관계되며, 당 현장에서 가장 중요한 요소이다. 이결과를 분석하기 위하여 장비의 효율에 따른 버력의 이동거리 및 상태를 Fig. 13 과 같이 나타냈으며, 발파별 결과는 Table 13과 같다.

버력의 이동거리는 발파 후 파쇄석이 자유면 방향으로 수직거리이며, 버력의 상태는 3차원 표기를 해야 하나, 계측장비의 부족으로 벤치상반으로 버력이 적재된 거리를 계측하였다. 당 현장의 장비의 원활성 및 가동성을 바탕으로 분석한 결과 6ms에서 벤치면에서의 버력의 이동 및 상태가 가장 적정하게 나타났다. 20 ms 이상에서는 버력의 이동은 원활하나 인접공의 영향을 받지 못하여 벤치면

에 그대로 적재되는 것을 알 수 있다. 시차가 20ms 이내일 때는 버력 위치에 따라 인접공의 영향을 받아 앞으로 움직임을 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 시차에 따른 버력의 현황은 시차가 짧을수록 이동거리는 짧아지고, 상태는 한곳에 집적되어 적재하기 용이하므로 버력처리 비용이 감소될 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 13. Moving and muck profile

Table 13. Result of moving and muck profile

Div.	Delay Time (ms)	Muck Profile (m)	Moving distance (m)
I-Kon 1	15	4.2	13
	20	3.1	18
I-Kon 2	20	3.4	21
I-Kon 3	20	3.0	20
	25	7.0	16
I-Kon 4	30	3.0	14.5
I-Kon 5	6	9.5	11

4.6 발파 결과에 따른 요소별 가중치

당 현장의 최적 기폭 시차를 선정하기 위하여 기폭 시차를 달리하여 발파를 실시하였다. 발파결과를 5가지 요소로 구분하여 당 현장에 요구되는 요소별 가중치를 Table 14와 같이 적용하였다. 가중치는 당 현장의 중요도를 고려하여 선정하였으며, 발파 환경문제가 매우 중요시 되는 현장에서는 발파진동 및 주파수 요소에 기본배점을 상향조정하여야 하며, 당 현장에서는 기본배점(10~40) × 가중치(1~5) = 총점(100~500)/5 = 점수(100점 만점)으로 선정하였다.

Table 14. Weight per elements

Elements	Weight
Blast vibration	20
Blast frequency	20
Fragmentation	40
Muck profile	10
Moving	10
Sum	100

각 요소별 가중치에 시차별 구분을 하여 5점을 최대 배점으로 선정하였으며, 당 현장의 요소별 가중치에 따른 배점을 Table 15와 같이 산출하였다.

Table 15. Weight sum per delay time

Weight per element	Grade per delay time				
	6ms	15 ms	20 ms	25 ms	30ms
Blast vibration	1	2	5	4	3
Blast frequency	1	5	4	2	3
Fragmentation	5	4	3	2	1
Moving	5	4	3	2	1
Muck	5	4	3	2	1
Sum	17	19	18	12	9
Weight sum	68	76	72	48	36

당 현장의 발파 결과를 요소별 가중치별로 분석 결과 15ms일 때 76점으로 가장 적합한 초시로 나

타났다. 기폭 초시를 사용자가 조절할 수 있는 전자뇌관을 현장에 적용할 때 현장별 최적 시차를 찾기 위하여 위와 같은 분석을 적용하여 최적의 시차를 도출 할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구는 단양지역 석회석 광산에서 기폭시차가 발파 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 당 현장에 적합한 기폭시차를 산출하기 위하여 발파 결과를 5가지 요소로 구분하였고, 요소별 가중치를 발파진동 속도(20), 발파진동 주파수(20), 파쇄입도(40), 버력의 이동(10) 및 적재 상태(10)로 구분하여 발파 결과의 가중치에 따른 최적 시차를 도출하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시차에 따른 진동의 크기는 20ms에서 각 공별 발생하는 진동의 합성 및 중첩이 가장 적게 발생하며 25ms, 30ms, 15ms, 6ms 순으로 진동의 합성 및 중첩이 많이 발생되어 높은 진동속도가 발생하는 것을 알 수 있다.
- (2) 주파수 분석에 따른 결과 각 진동 성분의 최대치를 볼 때 15ms에서 높은 주파수를 발생하였으며 20ms, 30ms, 25ms, 6ms 순으로 주파수가 낮게 발생되었다.
- (3) 전자뇌관과 전기뇌관의 진동 파형을 분석한 결과 전자뇌관은 진동의 파형이 거리에 따라 규칙적이고 일률적으로 나타나고, 전기뇌관은 진동 파형이 불규칙적으로 나타났으며, 당 현장에서 20 ms 시차의 동일한 발파조건에서 진동 계측결과 전기뇌관보다 전자뇌관의 PVS가 33%가 감소되었다. 이는 전기뇌관 사용 시 초시 편차에 의한 진동의 합성이 이루어져 증폭이 발생한 것으로 사료되며, 타 현장에서는 진동의 합성에 의한 감쇄도 발생될 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 정확한 시차를 가진 전자뇌관으로

지발 발파가 이루어지면 진동의 합성이 증폭/감쇄가 될 수 있는지 예측이 보다 용이하게 이루어 질것으로 판단된다.

- 4) 시차에 따른 파쇄입도는 시차가 짧을수록 파쇄입도는 개선되는 것을 알 수 있다.
- 5) 시차에 따른 버력의 현황은 시차가 짧을수록 버력의 위치가 장비가 적재하기 용이하게 되는 것을 알 수 있다.
- 6) 당 현장에서 기폭시차에 따른 발파 결과를 요소별 가중치로 산정한 결과 최적 시차는 15ms 이다.
- 7) 전자뇌관은 정확한 기폭 초시로 진동의 발생이 균일하게 발생되므로, 진동합성에 따른 증폭, 감쇄의 예측이 가능하므로 현장 현황(지반조건, 시공적인 측면 및 환경적인 측면)에 적합한 초시를 선택 사용 할 수 있을 것이다.

국내 노천(석회석) 광산에서는 대발파가 효과가 좋음에도 불구하고 발파진동에 의한 민원 발생 증가와 발파비용을 전체적인 비용의 증감보다 일부 분인 화약재료비용증가에 더욱 민감하게 받아 들여 비 전기뇌관을 이용한 대규모발파보다 소규모 발파(1회 20공 이내, MS지발발파)를 적용하고 있다. 전자뇌관에 대한 연구 및 현장 시험발파에 따른 결과를 분석해 볼 때 발파규모를 줄이지 않고 정확한 기폭시차와 지반의 조건에 따른 진동의 감쇠 특성을 반영할 수 있는 최적합 기폭시차를 선택할 수 있으므로 향후 전자뇌관의 적용범위 및 활용도는 더 넓어질 것이다.

참 고 문 헌

1. Leonard Meirovitch, "Elements of Vibration Analysis", McGraw-Hill, Inc., 1986
2. B. Singh · P.Pal Roy "Blasting in ground excavations and mines", 1993
3. Per-Anders Persson, Roger Holmberg, Jaimin Lee, " Rock blasting and explosives engineering", 1996 revised edition
4. "MATLAB-Control System Toolbox", MathWorks, Inc., 1997
5. Electronic Delay Detonator(ASAHI, 2002)
6. I-Kon User Manual(Orica, 2003)
7. 28th ISEE Annual Conference(ISEE, 2002)
8. 30th ISEE Annual Conference(ISEE, 2004)