

## 파시르 탄광에서의 발파진동의 전파특성 분석

최병희<sup>1)</sup>, 류동우<sup>2)</sup>, 선우춘<sup>3)</sup>

# Analysis of the Propagation Characteristics of Blast Vibrations in Pasir Coal Mine

Byung-Hee Choi, Dong-Woo Ryu and Choon Sunwoo

**Abstract** : The typical blasting method adopted in Pasir Coal Mine is a surface blasting technique with a single free face. It means that there is only one free face, which is usually the ground surface. This kind of blasting method is easy to use but inevitably causes enormous ground vibrations, which, in turn, can affect the stability of the slopes comprising the various boundaries of the open pit mine. In addition, the method also has the problem of lowering the overall blast efficiency compared to other methods such as bench blasting methods or ones with more than two free faces. In this respect, a project was launched to develop a new blasting method that is suitable for both controlling the ground vibration and enhancing the blast efficiency. As a part of the project, we investigated the current blasting method of the mine, and have conducted field measurements of the ground vibrations from 12 blasts. This paper presents the details of the typical blasting pattern and the propagation characteristics of the ground vibration from the surface blasting in the mine. Especially, various predictive equations for peak particle velocities that can be used to estimate the ground vibration level in the mine area were derived from the regression analyses using the measured ground vibration data.

**Key words** : surface blasting, Pasir Coal Mine, ground vibration, propagation characteristics, peak particle velocity, predictive equation

**초 록** : 인도네시아 파시르 탄광에서는 전형적으로 일자유면 발파방법이 사용되고 있다. 일반적으로 이 방법은 노천에서 지표면을 유일한 자유면으로 한 발파법이므로 구축이 커서 화약의 에너지가 저항선의 파괴에 효율적으로 사용되지 못하고 발파의 부작용으로 간주되는 지반진동의 유발에 많이 소모된다. 현재 파시르 탄광에서는 모암의 제거를 위한 굴착발파에 이와 같은 일자유면 발파방법을 적용하고 있지만 이는 노천광산에서 일반적으로 적용되는 이자유면 발파인 계단식 발파에 비해 큰 지반진동을 유발할 가능성이 높다. 더욱이 파시르 탄광의 경우 노천 채굴적의 양안이 연약사면으로 이루어진 곳이 많아 높은 지반진동 수준은 이들 사면의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한, 진동문제와는 별도로 일자유면 발파는 저항선이 하나뿐이므로 암반파괴의 측면에서도 발파효율이 좋지 않다. 따라서 파시르 탄광에서 나타나고 있는 발파의 비효율성과 진동증가 문제를 개선할 목적으로 새로운 발파공법에 대한 연구가 착수되었으며, 이 연구의 일환으로 현행 발파공법에 대한 조사가 기 수행된 바 있다. 본 논문에서는 파시르 탄광에서 수행한 지반진동의 계측과정과 결과를 현행 발파공법과 함께 제시하고, 측정된 자료에 대한 통계처리를 통해 대상지역에서의 지반진동의 전파특성을 분석하였다.

**핵심어** : 노천발파, 파시르 탄광, 지반진동, 전파특성, 최대입자속도, 예측식

### 1. 서 론

인도네시아 파시르 탄광(Pasir coal mine)에서는

지표에 노출된 수직탄층을 따라 남북방향으로 약 16 km에 달하는 대규모 노천 채굴적(open pit)을 유지하고 있으며, 모암의 제거를 위한 굴착발파에 일자유면 발파공법을 적용하고 있다. 일자유면 발파공법에서는 화약의 에너지가 암반의 파괴에 효율적으로 사용되지 못하고 암반 중으로 응력파의 형태로 전파됨에 따라 지반진동(ground vibration)이 크게 유발되면서 장기간의 유지관리가 필요한 주요 채굴적 사면들의 안정성을 위협하는 요인이 되고

1) 한국지질자원연구원

\* Corresponding author : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2006년 11월 24일

게재승인일 : 2006년 12월 19일

있다. 또한, 일자유면 발파에서는 자유면이 하나뿐이므로 발파의 효율성이 떨어져 경제성이 저하되는 문제점도 있다. 이에 따라 현재 파시르 탄광에서 적용되고 있는 일자유면 발파패턴을 개선함으로써 채굴적을 형성하는 사면들의 안정성을 확보하고 발파의 효율성을 제고할 수 있는 새로운 발파공법에 대한 연구가 착수되었으며, 이 연구의 일환으로 현행 발파공법들에 대한 현장조사를 수행한 바 있다(최병희 외, 2006). 그 후속연구로서 진동제어형 공법 설계가 이루어질 수 있도록 지반진동에 대한 현장 계측을 실시하였으며, 이로부터 파시르 탄광지역에서 특징적으로 나타나는 대규모 노천발파에 의한 지반진동의 발생 및 전파 특성을 분석하였다.

## 2. 현장계측 및 결과

### 2.1 지질개요

파시르 탄광은 하상퇴적으로 생성된 제3기의 이암(mudstone)과 사암(sandstone) 및 석탄(coal) 층으로 구성되어 있는데, 이들 퇴적층들은 동서와 남북 방향에서 차례로 압축력을 받아 조밀한 습곡과 트러스트 구조를 보이면서 지표부근에서는 수직에 가까운 경사를 보이고 있다. 표 1은 파시르 탄광에서 나타나는 주요 암석들인 이암 및 사암에 대하여 실험실에서 실시한 물성시험 결과표이다(Chung et al, 2003). 표 1로부터 알 수 있듯이 파시르 탄광에서 나타나는 암석들은 강도가 매우 약하여 토양(soil)에 가깝다고 할 수 있으며, 건조하면 부서져 부서지고 비가 내려 습윤 상태가 되면 진흙과 유사해지는 특성을 보인다.

### 2.2 현행 발파공법 및 계측 개요

일반적으로 대부분의 노천광산에서는 일자유면 발파인 수직의 계단식 발파가 적용되고 있으나 파시르 탄광에서는 편평한 암반에서의 터파기 발파에서와 같은 일자유면 발파가 적용되고 있다. 이런 형태의 일자유면 발파에서는 자유면이 지표면 하나뿐이므로 발파의 효율이 가장 나쁘지만 파시르 탄광에서 이와 같은 일자유면 발파를 채택하게 된 데는 다음과 같은 두 가지의 이유가 있다. 첫째, 이 지역에서 나타나는 암층(이암, 사암)이나 탄층은 강도가 매우 약하므로 화약발파를 통해 암반을 이완시키기만 하면 이후에는 리핑(ripping)만으로도 굴착이나 채취가 가능하기 때문이다. 이 때문에 현재 파시르 탄광에서 실시되고 있는 대부분의 발파작업은 암반을 제자리에서 이완시키는 것만을 목적으로 하는 이완식 발파라 볼 수 있다. 둘째, 탄층의 경사가 거의 수직이고 기존의 채굴적 사면들이 탄층의 주향방향으로 개설되어 있어 계단식 발파를 도입할 경우 발파방향에 따라서는 비산되는 파쇄 암편들로 인해 광체가 오염될 수도 있기 때문이다. 그림 1은 광체인 석탄층을 채취하기 위한 일종의 준비 작업으로서 광체 주변의 모암을 수직천공 및 발파함으로써 단계적으로 채굴적을 형성해가는 과정을 도시한 개념도이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 탄층 원편의 모암구획은 발파로 이완시킨 후 리핑으로 제거하며, 모암의 제거에 따라 드러나는 탄층은 주로 리핑 작업을 통해 채취하게 된다.

파시르 탄광에서 채굴적을 형성하거나 광체 주변의 모암을 제거하는데 적용되는 전형적인 발파패턴은 그림 2와 같다. 각 발파의 대상구획은 탄층의 주

표 1. 파시르 탄광에서 나타나는 주요 암석들의 물성

암종	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	탄성파속도 (m/s)		일축 압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	영률 (GPa)	포아송비	점착력 (MPa)	내부 마찰각 (°)
		S 파	P 파						
이암	2260	1640	2580	17	1.4	3.6	0.14	2.9	42.3
사암 I	2220	1500	2510	15	0.6	2.4	0.18	1.8	46.4
사암 II	2330	1740	3010	25	1.5	4.6	0.13	3.8	43.9

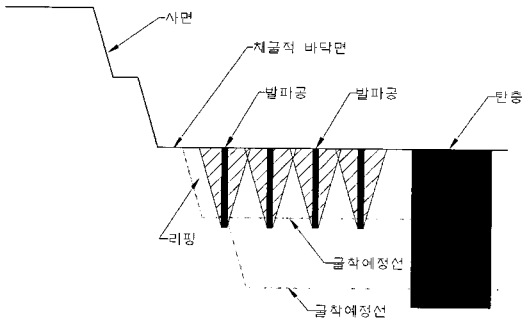


그림 1. 채굴적의 형성과정.

향방향을 길이방향으로 하는 직사각형의 형태가 되며, 천공패턴은 스웨덴 방식이라 불리는 지그재그 형식(staggered pattern)을 기본패턴으로 하고 있다(ISEE, 1998). 기폭방법은 비전기식 뇌관을 이용한 지발발파를 적용하고 있으며, 그림 2에서 보듯이 전형적으로 V 컷 (경우에 따라서는 박스 컷(box cut))의 형태로 광체의 주향방향을 따라 점진적으로 기폭시킨다. 그림 3(a)는 발파장소가 탄층에 인접하였을 때 사용하는 기폭패턴의 일례로서 탄층의 반대편을 향해 기폭되도록 한 일종의 정향발파이다. 그림 3(b)와 3(c)는 발파장소의 기하학적 형태에 따라 발파공의 배열을 조절한 천공패턴을 보여주고 있다. 파시르 탄광의 전형적인 발파에서는 그림 4(b)에서와 같이 발파공의 직경 200 mm, 공깊이 9 m, 저항선 8 m, 공간격 9 m 정도에 공당장약량은 100 kg이 주로 사용되나 경우에 따라서는 그림 4(a)에서와 같이 공깊이 6 m에 공당장약량 50 kg이 혼용되기도 한다. 폭약은 주장약으로 ANFO(초유폭약)를 사용하며, ANFO는 뇌관 비기폭성으로 둔감하므로 별도의 전폭약(에멀전 폭약류, 32mm $\varnothing$ )을 사용하여 기폭시킨다.

한편, 주변모암을 제거함으로써 드러난 광체에 대한 채굴작업이 일정부분 진행되면 다른 작업장에서는 심부의 광체를 채굴하기 위해 채굴적의 확장

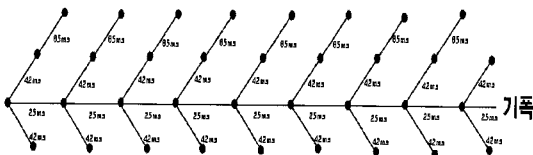
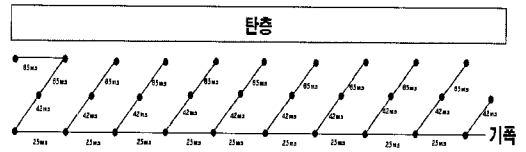
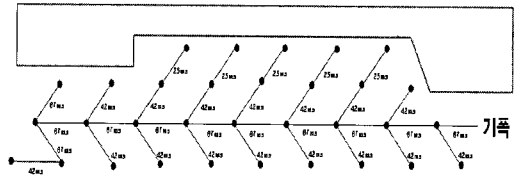


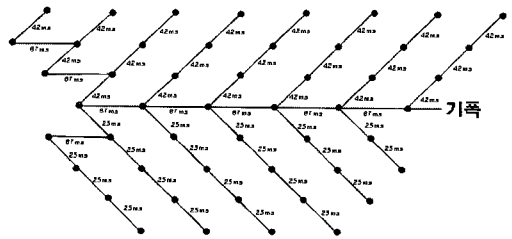
그림 2. 전형적인 발파패턴.



(a) 탄층 인근에서의 정향발파

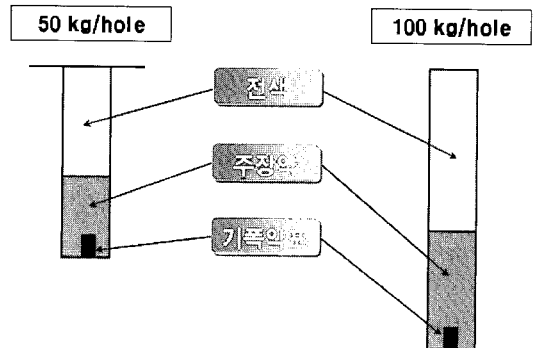


(b) 인접사면 부근에서의 천공패턴의 변화



(c) 발파장소의 기하학적 형태에 따른 천공패턴의 변화

그림 3. 변형된 발파패턴들.



(a) 공깊이 6 m

(b) 공깊이 9 m

그림 4. 전형적인 장약패턴.

한편, 주변모암을 제거함으로써 드러난 광체에 대한 채굴작업이 일정부분 진행되면 다른 작업장에서는 심부의 광체를 채굴하기 위해 채굴적의 확장 작업을 시작하여야 한다. 현재 파시르 탄광에서는 연간 15 m 정도로 채굴적의 심도가 증가하고 있는 추세이다. 심부의 광체를 채굴하기 위해서 채굴적의 심도를 증가시킬 때에는 가능한 한 채굴적의 폭을 넓혀 줌으로써 채굴적 양편의 사면의 안정을 기하여야 한다. 이를 위하여 심도를 15 m 정도 증가시킬 때마다 채굴적의 양편을 각각 60~70 m씩 수평으로 확장시킨다. 그림 5는 이 과정을 보여주는 것으로 사면 최상부의 발파구획에서 시작하여 하부를 향하여 차례로 발파를 진행함으로써 채굴적을 확장시켜 나간다. 이때 각 구획의 발파에 적용되는 발파패턴은 앞의 그림 2와 3에 보인 발파패턴들이 그대로 적용된다.

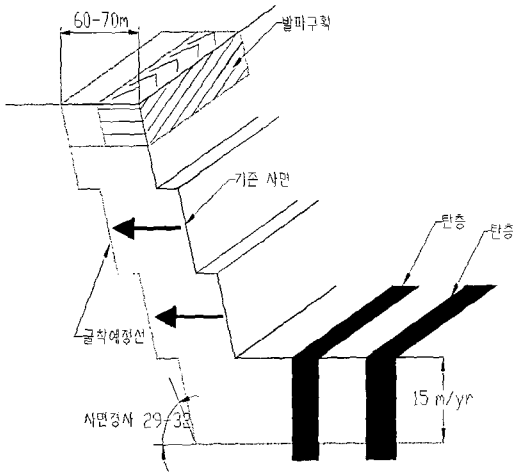


그림 5. 채굴적의 확장과정.

대상지역에서 모암을 제거하기 위한 대규모 노천 발파로 발생하는 지반진동의 전파특성을 파악하기 위하여 현행 발파조건 하에서 계측을 수행하였다. 그림 6은 파시르 탄광의 전형적인 노천 채굴적의 모습으로서 채굴적 양안을 형성하는 사면의 모습과 채굴적 바닥에 노출된 탄층의 모습을 볼 수 있다. 그림 7은 주장약인 ANFO를 장전하고 있는 모습이며, 그림 8은 발파로 이완된 암반을 적재하고 있는 광경이다.

채굴적 사면

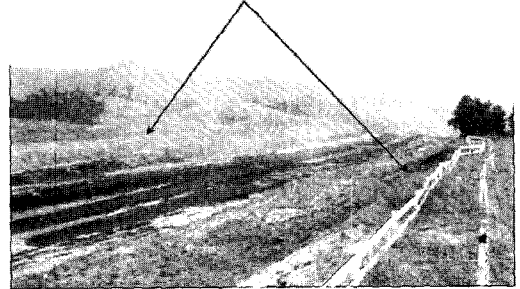


그림 6. 채굴적.



그림 7. ANFO 장전.

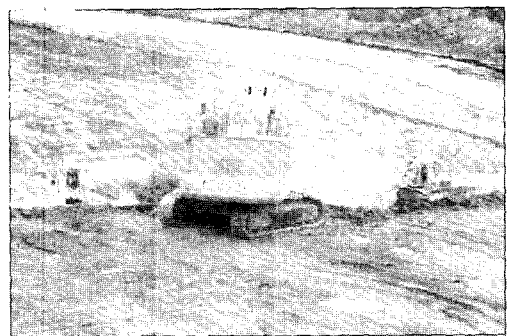
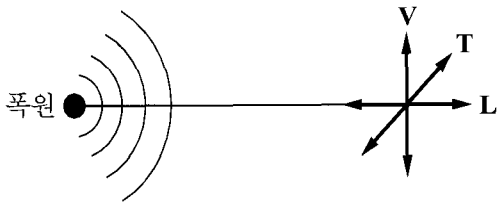


그림 8. 이완된 암반의 적재작업.

2.2 계측장비 및 계측방법

진동측정에 사용된 장비는 캐나다 Instantel사의 MiniMate Plus 및 미국 Geosonics사의 SSU2000DK 등이었다. 본 기기들은 발파진동 전용 측정장비로서 지반진동을 측정함과 동시에 발파에 의해 발생하는 발파풍압도 측정할 수 있는 계측 장비이다.



**L : Longitudinal** (진행방향 성분)  
**V : Vertical** (진행방향과 수직성분)  
**T : Transverse** (진행방향과 접선성분)

그림 9. 진동의 측정성분.

기본적인 장비의 구성은 그림 9에서와 같이 폭원에서부터 진행되어 오는 진동성분의 폭원방향에 대한 수직방향(vertical), 진행방향(longitudinal) 및 접선방향(transverse) 등 세 방향의 지반진동을 감지하는 삼축변환기(triaxial transducer)와 공기 중으로 전달되는 발파풍압을 감지하는 소음계 그리고 측정을 제어하고 기록하는 모니터로 구성되어 있다. 또한 발생된 각각의 진동에 대하여 세 방향성분에 대한 최대입자속도, 최대입자변위, 최대입자가속도, 최대속도에서의 주파수, 최대백터합속도 및 최대발파풍압 (dB 또는 psi 단위)에 대한 정보도 출력할 수 있다.

계측장비는 관심의 대상이 되는 측선을 따라 여러 개소를 선정하여 발파진동의 전파양상을 분석할 수 있는 자료를 얻을 수 있도록 적절한 이격거리를 두고 설치하였다. 현장의 발파조건 및 지반조건이 동일하지 않으므로 가능한 다양한 조건을 반영할 수 있도록 몇 차례의 계측을 실시하여 계측자료를 획득하고자 노력하였다. 1차 계측은 2006년 7월 중에, 2차 계측은 8월 중에 실시하였으며 총 12 차례의 발파를 대상으로 현장계측을 실시하였다. 그림 10과 11은 계측기를 설치하고 있는 작업광경과 설치된 계측기의 모습을 각각 보여준다.

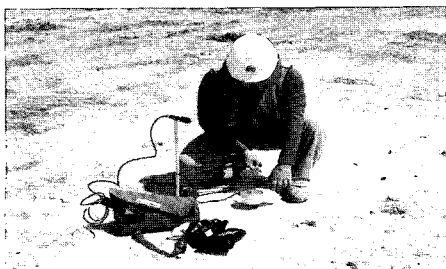


그림 10. 계측기 설치작업.

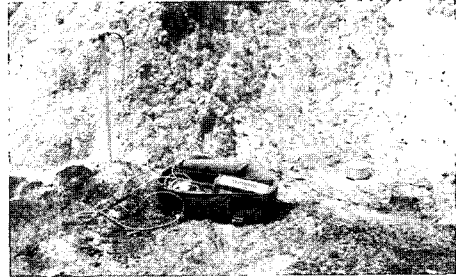
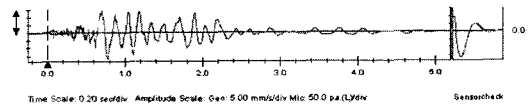


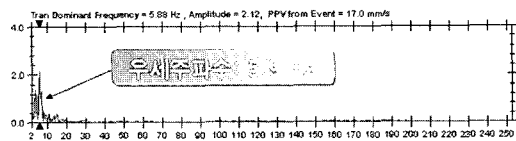
그림 11. 설치된 계측기.

### 2.3 계측결과

현장에서 측정된 대표적인 진동속도 파동을 그림 12(a)에 보였다. 이 파동에 대해 FFT(fast Fourier transform) 기법으로 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform)을 수행한 것이 그림 12(b)이며, 측정된 파동의 우세주파수(dominant frequency)는 약 5.9 Hz로 나타났다. 주파수의 측면에서 그림



(a) 전형적인 진동속도 파동



(b) 진동속도 파동에 대한 FFT 결과

그림 12. 전형적인 진동속도 파동과 우세주파수.

12의 파동은 파시로 탄광에서 측정되는 전형적인 진동속도 파동이라 할 수 있으며, 실제로 지금까지 현장에서 계측된 거의 모든 진동속도 파동들이 10 Hz 이하의 우세주파수를 보이고 있다. 지반진동의 주파수는 구조물의 고유주파수와 관련하여 응답변위를 증폭시킴으로써 구조물의 안정성에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 따라서 향후 채굴적을 형성하는 연약사면들의 안정성 평가과정에서는 지반진동의 진폭특성과 더불어 주파수특성에 대한 분석과

표 2. 파시르 탄광에서 측정된 지반진동 속도파동의 진폭 및 우세주파수

계측기	폭원거리 (m)	지발당 최대장약량 (kg/delay)	L		T		V		Vsum (mm/s)
			(mm/s)	(Hz)	(mm/s)	(Hz)	(mm/s)	(Hz)	
5150	398	100	5.46	3.8	6.86	6.0	6.0	3.9	8.13
5150	400	100	5.08	3.8	6.60	4.3	6.10	3.9	8.42
10490	1234	100	0.51	2.9	0.38	7.0	1.02	5.9	1.09
10490	1040	186	1.79	2.3	0.98	2.3	1.02	2.5	1.94
10490	307	100	3.03	4.5	4.52	4.5	5.81	3.6	5.94
5150	395	98	5.59	2.5	3.68	2.9	3.17	3.5	5.77
10490	750	98	3.70	3.8	3.97	2.9	3.17	2.4	4.61
10490	210	113	11.40	3.6	17.00	5.9	9.64	3.9	19.80
5150	313	113	7.03	3.6	9.89	5.5	6.14	3.6	10.40
10490	200	176	8.46	7.9	12.10	4.6	8.68	7.3	12.90
5150	310	176	7.65	6.4	6.86	9.1	6.57	5.8	8.92
10490	540	210	7.37	6.9	3.84	6.9	2.30	5.8	7.92
5150	612	210	2.51	3.9	2.37	3.9	1.54	3.8	2.95
5150	220	83	18.50	4.3	13.70	5.3	21.40	5.1	22.90
10490	300	135	18.00	7.6	13.00	6.8	7.54	7.8	23.00
10490	200	196	5.97	10.9	4.51	10.9	6.46	9.3	8.10
10490	140	196	6.13	4.9	8.73	9.1	9.75	8.1	10.80

정이 반드시 수반되어야 할 것이다.

현장에서 얻은 계측결과를 정리하면 표 2와 같다. 표 2에서 폭원거리는 폭원에서 측정점까지의 직선거리(m)이고, 지발당 최대장약량은 계측이 이루어진 당해 발파에서 8 ms 이내의 지발시차로 기폭되는 최대 장약량을 의미한다. 예를 들어, 앞의 그림 2에 보인 전형적인 발파패턴의 경우 공당 장약량이 105 kg인 두 개의 발파공이 같은 지발시간으로 폭발하면 지발당 최대장약량은 210 kg이 된다. 또한, 표 2의 L, T, V는 각각 측정된 진동속도치의 폭원방향성분, 폭원방향과 직교하는 수평방향성분, 폭원방향과 직교하는 연직방향성분의 최대치를 가리키는데, 각 성분에 대한 크기(진폭)와 우세주파수를 mm/s와 Hz 단위로 각각 표시하였다. Vsum은 이들 직교하는 세 속도성분들을 실시간(real-time) 합성한 성분인 벡터합(vector sum) 성분의 최대치(mm/s)를 나타낸다.

### 3. 자료처리

#### 3.1 처리방법

##### 발파로 발생되는 지반진동의 수준에 대한 예측방법

발파진동의 크기에 영향을 주는 변수들을 대별하면 i) 화약의 종류와 장약량, ii) 폭원에서 측정점까지의 거리, iii) 암반의 역학적, 구조적 특성, iv) 천공 패턴, 장약방법, 점화순서 등의 발파방법 등이 있다.

즉, 발파진동은 지역적인 특성과 발파조건에 따라 그 크기가 달라지므로 대상지역별로 발파조건에 따라 지반진동을 실측하여 그 전파특성을 도출하여야 한다. 하지만 수없이 많은 영향변수들을 단순한 하나의 식에 반영하여 지반진동의 수준을 사전에 예측한다는 것은 지극히 어려운 문제이므로 지반진동의 수준을 실무적으로 예측하는 데에는 여러 연구자들이 제시한 경험식들이 주로 사용되어 오고 있다. 이와 관련하여 Ghosh and Daemen(1983)과

표 3. 지반진동 수준의 예측을 위해 제안된 경험식들

제안자	진동수준 예측식	비고
Morris(1950)	$a = KW^{1/2}/D$	$a$ : 입자변위, $K$ : 입지상수, $W$ : 장약량, $D$ : 폭원거리
Habberjam and Whetton(1952)	$a \propto W^{0.085}$	$a$ : 입자변위, $W$ : 장약량
Gustafsson(1973)	$V = K\sqrt{W/D^{3/2}}$	$V$ : 입자속도, $W$ : 장약량, $D$ : 폭원거리, $K$ : 상수(스웨덴 경암에서 약 400) ※ $W/D^{3/2}$ : 장약수준(charging level)으로서 Langefors and Kihlstrom(1963)이 제안
Devine(1962); Devine and Duvall(1963)	$V = K(D/W^{1/2})^{-n}$	$V$ : 입자속도, $D$ : 폭원거리, $W$ : 장약량, $K$ : 상수( $D/W^{1/2}=1$ 일 때 $V$ -절편), $n$ : 상수 ※ 예측식의 적용: Nicholls et al(1971); Siskind et al(1980)
Ambraseys and Hendron(1968); Dowding(1971)	$V = K(D/W^{1/3})^{-n}$	$V$ : 입자속도, $D$ : 폭원거리, $W$ : 장약량, $K$ : 상수( $D/W^{1/3}=1$ 일 때 $V$ -절편), $n$ : 상수 ※ CRSD 개념의 도입: Blair and Duvall(1954); Duvall and Petkof(1959)
Davies et al(1964); Attewell et al(1965)	$V = KW^nD^b$	$V$ : 최대입자속도, $W$ : 지발당 최대장약량, $D$ : 폭원거리, $K, a, b$ : 입지상수(국부적인 지질조건, 폭약강도 관련 상수) ※ $V = f(W, D)$ 꼴의 이변수함수로 간주시 일반적인 식; 다중회귀분석(multiple regression analysis) 요함
Ghosh and Daemen(1983)	$V = K(D/W^{1/2})^{-n}e^{-\alpha D}$ $V = K(D/W^{1/3})^{-n}e^{-\alpha D}$	$V$ : 입자속도, $D$ : 폭원거리, $W$ : 장약량, $K, n$ : 상수, $\alpha$ : 비탄성 감쇠계수 ※ 환산거리 개념에 에너지 손실에 따른 비탄성 감쇠효과 반영: 다중회귀분석 요함
Pal Roy(1991)	$V = n + K(D/W^{1/2})^{-1}$	$V$ : 입자속도, $D$ : 폭원거리, $W$ : 지발당 최대장약량, $n(<0)$ : 입지상수, $K$ : 설계상수(장약량, 폭원거리, 약경, 지발시간, 지향선, 공간격, 하부천공, 전색장),

Bhandari(1997) 등은 당시까지 제안되었던 대표적 실험식들을 보고한 바 있는데, 이들을 정리하면 표 3과 같다.

표 3에서 보듯이 현재까지 국내외에서 지반진동의 수준을 예측하는 데에는 과거 USBM과 직·간접적으로 관련된 여러 연구자들(Devine and Duvall, 1963; Duvall and Petkof, 1959; Nicholls et al, 1971; Siskind et al, 1980)이 제안하거나 채택한 것으로 긴 봉상장약(cylindrical charge)을 고려한 자승근 환산거리(SRSD ; square root scaled distance) 개념을 이용한 예측식과 지반진동이 암반 중에서 구상으로(spherically) 전파되는 기하학적 형태를 고려한 삼승근 환산거리(CRSD ; cube root scaled distance) 개념을 이용한 예측식이 특히 많이 사용되고 있다. 이들 기존 경험식들의 적합성에 대하여는 전문가들 사이에 서로 다른 견해를 보이기도 하지만 예측식의 선택문제와 관련하여 Siskind(2000)는 지반진동의 수준을 실무적으로 예측하는 데에는 SRSD나 CRSD 어느 쪽을 사용해도 무방하다고 보았으며, Snodgrass and Siskind(1974)는 특정 현장에 적합한 것이라면 이들 두 가지 방법 외에 어떠한 예측식을 사용하여도 좋은 것으로 보았다. 즉, 지반진동의 수준을 예측할 때에는 진동발생에 영향을 미치는 현장의 복잡한 지질조건들이나 설계변수들을 모두 일일이 고려할 수는 없기 때문에 이들을 간단한 식으로 단순화한 다음 관찰된 진동수준을 하나의 통계량(statistic)으로 취급함으로써 문제를 단순화하는 것이다. 따라서 수식을 사용하여 진동수준을 예측하는 문제는 어떠한 예측식을 사용하느냐의 문제라기보다는 주어진 예측식을 사용했을 때 나타나는 결과의 적합도(곧, 상관계수)나 산포도(곧, 표준편차)가 얼마나 되느냐의 문제라 할 수 있다(Siskind, 2000).

이런 맥락에서 본 연구에서는 폭원거리( $D$ )를 장약량( $W$ )으로 환산한 형태로서 다음 식 (1)과 (2)에서와 같이 SRSD와 CRSD 개념을 이용한 회귀분석을 통하여 지반진동의 수준을 각각 예측하였다. 이와 같은 환산거리를 이용한 식은 로그-로그 좌표상에서는 직선의 식이 되므로 자료를 직선에 적합시킬 수 있어 매우 실용적이다.

$$PPV = K \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^n \quad (1)$$

$$PPV = K \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^n \quad (2)$$

위 식 (1)과 (2)에서  $PPV$  : 최대입자속도(peak particle velocity),  $n$  : 감쇠지수,  $K$  : 화약특성, 발파방법, 암반특성 등에 따라 결정되는 상수이다.

### 파시르 탄광지역에 적용할 진동수준 예측식의 결정

앞에서 언급한 바와 같이 지반진동의 전파특성을 나타내는 진동수준 예측식은 계측된 현장자료로부터 회귀분석을 수행한 다음 적합도가 높은 식을 선택하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 계측자료를 SRSD 및 CRSD 기법으로 처리하여 각각의 전파식을 구한 후 그 가운데 적합도가 높은 식을 대상지역에서의 진동수준 예측식으로 채택하는 방법을 사용하였다. 자료처리 과정에서는 지반진동의 L, T, V 성분 전체에 대해 진동의 중위수준(50%)을 나타내는 식과 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식을 도출하였다. 아울러 이들 세 방향의 진동성분들의 벡터합 성분에 대해서도 중위수준(50%)을 나타내는 식과 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식을 각각 도출하였다.

### 3.2 처리결과

현장여건상 지금까지 측정된 지반진동 자료의 수는 많지 않은 편이며, 특히 벡터합 성분자료의 경우에는 회귀분석에 필요한 30개 이상의 자료가 확보되지 않은 상태이다. 따라서 이 부분에 대해서는 처리결과의 신뢰도를 향상시키기 위하여 향후 추가적인 측정을 통해 결과를 수정, 보완할 계획이다. 이와 같은 전제 하에서 본 논문에서는 진동자료의 처리결과를 사면의 안정성 평가에 적용하는 과정을 보여주기 위하여 표 2에 제시한 계측결과만을 대상으로 하여 결과를 도출하였다.

먼저, 그림 13은 세 방향의 진동성분들(L, T, V 성분) 전체를 대상으로 SRSD로 처리한 그래프이며, 도출된 진동 전파식들은 식 (3a) 및 (3b)와 같다. 식 (3a)는 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식이며, 식 (3b)는 지반진동의 전체성분에 대해 진동의 중위수준(50%)을 나타내는 식이다.<sup>2)</sup> 마찬가지로 CRSD로 처리한 결과를 그림 14와 식 (4a) 및 (4b)에 보였다.

2) 90% 신뢰구간의 상한(upper limit)에 해당하는 식; 이하 동일.



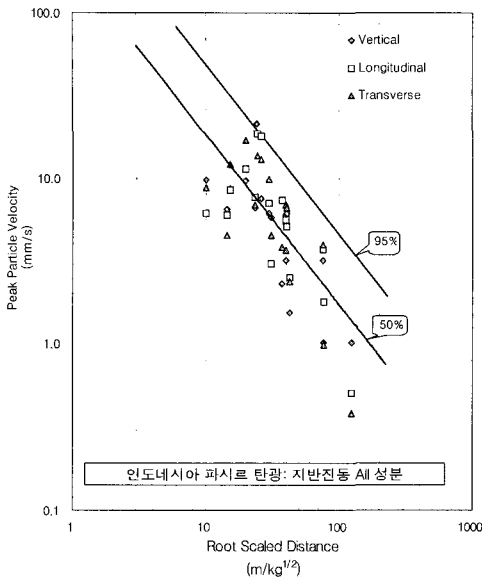


그림 13. SRSD : 전체성분.

$$PPV(All)_{95\%} = 521.06 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.03} \quad (3a)$$

$$PPV(All)_{50\%} = 195.74 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.03} \quad (3b)$$

$(r = 0.74)$

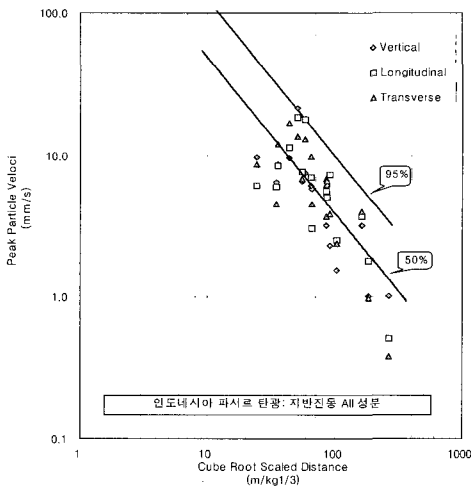


그림 14. CRSD : 전체성분.

$$PPV(All)_{95\%} = 1556.08 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.10} \quad (4a)$$

$$PPV(All)_{50\%} = 612.18 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.10} \quad (4b)$$

$(r = 0.77)$

한편, 세 방향의 진동성분들의 최대치들을 실시간 합성한 성분인 벡터합 성분은 주어진 지역에서 나타나는 진동값들을 최대수준으로 예측할 수 있으므로 이들 벡터합 성분만을 대상으로 SRSD로 처리한 그래프를 그림 15에 보였으며, 도출된 진동 전파식은 식 (5a) 및 (5b)와 같다. 마찬가지로 CRSD로 처리한 결과를 그림 16과 식 (6a) 및 (6b)에 보였다.

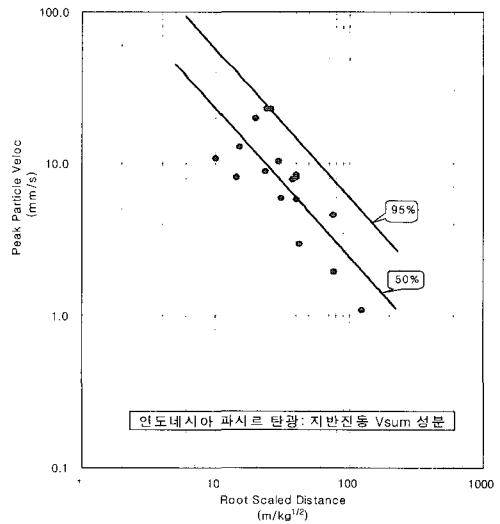


그림 15. SRSD : 벡터합 성분.

$$PPV(Vsum)_{95\%} = 539.68 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-0.98} \quad (5a)$$

$$PPV(Vsum)_{50\%} = 219.03 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-0.98} \quad (5b)$$

$(r = 0.76)$

3) 예측식들에서  $\gamma$ 은 상관계수(correlation coefficient)를 표시하며, 최대입자속도(PPV)의 단위는 mm/s, 폭원거리(D)는 m, 지발당 최대장약량(W)는 kg의 단위로 측정된다. 이하 동일.

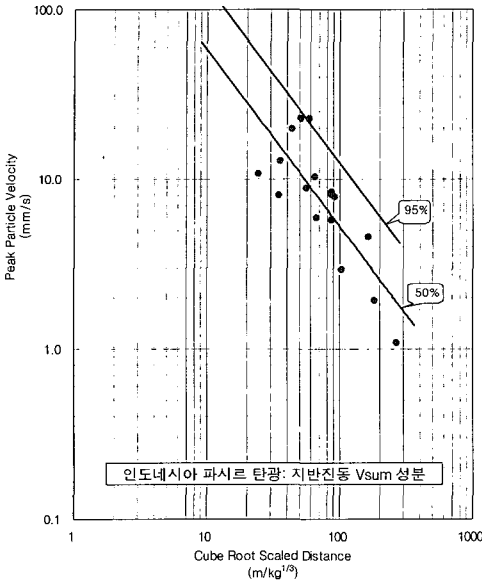


그림 16. CRSD: 벡터합 성분

$$PPV(V_{sum})_{95\%} = 1503.89 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.04} \quad (6a)$$

$$PPV(V_{sum})_{50\%} = 641.98 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.04} \quad (6b)$$

( $r = 0.79$ )

#### 4. 결과고찰

##### 4.1 진동수준 예측식

파시르 탄광에서 대규모 노천발파로 발생하는 최대진동수준을 평가하기 위하여 현행 발파패턴 하에서 지반진동을 계측하여 측정된 L, T, V 전체성분에 대한 중위수준 및 자료의 95%를 아래로 포함하는 전파식들을 도출하였다. 그 결과 앞의 그림 13과 14에서 보듯이 CRSD를 사용하여 처리한 경우가 SRSD에 비해 적합도가 높은 것으로 나타났으므로 파시르 탄광지역에서의 일반적인 지반진동의 속도수준을 예측할 때에는 다음 식 (7a)와 (7b)를 사용할 수 있다.

$$PPV(All)_{95\%} = 1556.08 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.10} \quad (7a)$$

$$PPV(All)_{50\%} = 612.18 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.10} \quad (7b)$$

지반진동의 벡터합 성분의 경우에도 CRSD를 사용하여 처리한 결과가 보다 높은 적합도를 보였기 때문에 파시르 탄광지역에서 진동속도의 벡터합 성분을 예측할 때에는 다음 식 (8a)와 (8b)를 사용할 수 있다.

$$PPV(V_{sum})_{95\%} = 1503.89 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.04} \quad (8a)$$

$$PPV(V_{sum})_{50\%} = 641.98 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.04} \quad (8b)$$

#### 4.2 진동영향 평가식

서두에서 언급한 바와 같이 파시르 탄광에서 현재 적용되고 있는 발파패턴은 일자유면 발파이다. 일자유면 발파에서는 화약이 지닌 에너지의 대부분이 암반의 파괴에 사용되기 보다는 지반진동의 형태로 암반 중으로 전달되는데 소모된다. 따라서 파시르 탄광의 취약한 암반조건을 고려했을 때 현행 발파방법을 그대로 적용할 경우 발파진동으로 인하여 채굴적을 이루고 있는 여러 사면들의 안정성이 문제가 될 수 있다. 즉, 그림 17과 같이 현행 발파패턴에서는 지표면을 제외하면 자유면이 없으므로 발파이완에 이어 리핑 작업이 진행되고 나면 남겨진 부분이 그대로 최종사면의 법면이 되고 있다. 이와 같이 형성된 사면들은 선행발파로 인한 손상영역을 포함하고 있을 가능성이 매우 높으며, 이런 상태에서 지속적인 발파진동을 받거나 강우에 의한

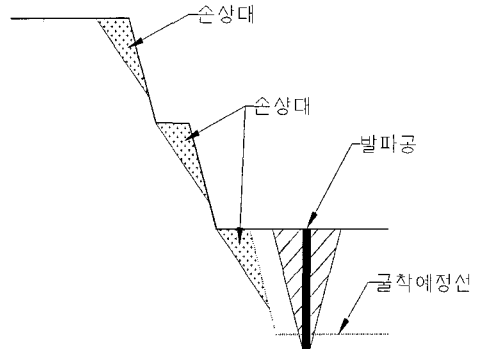


그림 17. 인접사면에서의 손상대 발생.

침수가 발생하게 되면 여러 형태의 사면파괴가 발생할 가능성이 더욱 커지게 되는 것이다.

현재 파시르 탄광의 규모를 고려하였을 때 수년 이상 유지하여야 할 대규모 사면들이 많으므로 이들 사면들에 대한 안정성 확보는 곧 작업안정성 확보로 이어진다. 따라서 채굴적 사면들에 대한 발파 안정성을 확보하기 위해서는 진동영향을 고려한 새로운 발파공법을 개발할 필요성이 있다. 이와 같은 제어발파공법의 개발을 위한 진동영향의 평가과정에서는 사면의 안정성을 우선적으로 고려하여 대상 광산에서 계측된 결과로부터 도출된 예측식들 가운데 가장 높은 수준의 진동치를 예측하는 벡터합 성분들의 95%를 아래로 포함하는 다음 식 (9)를 진동영향 평가식으로 사용할 수 있다.

$$PPV(V_{sum})_{95\%} = 1503.89 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{1.04} \quad (9)$$

(PPV: mm/s, D: m, W: kg)

### 5. 결 론

연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 인도네시아 파시르 탄광에서 적용되고 있는 대규모 노천발파에 있어서의 친공, 장약 및 점화패턴에 대한 조사결과 광산개발의 편의를 위한 일차 유면 발파공법의 적용으로 인하여 연약사면에 대한 안정성 문제가 있는 것으로 분석되었다.
- 2) 파시르 탄광에서 발파로 발생하는 지반진동의 진파특성을 평가하기 위하여 11 차례의 노천발파와 1 차례의 시험발파를 대상으로 현장에서 지반진동을 측정하였다. 측정된 자료들을 대상으로 SRSD 및 CRSD 개념을 적용하여 회귀분석을 실시함으로써 대상지역에서 발생가능한 지반진동의 최대수준을 예측할 수 있는 진동수준 예측식들을 유도하였다.
- 3) 향후 파시르 탄광의 연약사면들에 대한 발파안정성 평가과정에서 사용할 진동영향 평가식으로는 벡터합 성분의 95%를 아래로 포함하는 식을 제안하였다. 하지만 현재까지 회귀분석에서 필요로 하는 충분한 자료가 확보되지 않아 향후 추가적인

측정을 통해 처리결과와 신뢰도를 향상시킬 필요성이 있다.

### 감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연사업인 ‘석탄노천광의 사면안전유지 및 발파기술 연구’ 과제에서 지원을 받았으며, 현장계측 및 시험발파 과정에서 장비와 인력을 적극 지원하여 주신 인도네시아 파시르 탄전 현장의 KIDECO 임직원 여러분에게 깊이 감사드린다.

### 참고문헌

1. 최병희, 류동우, 선우춘, 2006, 파시르 탄광에서의 채탄발파공법에 대한 문제점 분석 및 개선방안 연구, 대한화약발파공학회지, Vol. 24, No. 1, pp. 57-62.
2. Ambraseys, N.R. and A.J. Hendron, 1968, Dynamic Behavior of Rock Masses, Rock Mechanics in Engineering Practice (K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz, eds.), John Wiley & Sons, Inc., London, pp. 203-227.
3. Attewell, P.B., I.W. Farmer and D. Haslam, 1965, Prediction of Ground Vibration Parameters from Major Quarry Blasts, Mining and Minerals Engineering, Dec., pp. 621-626.
4. Bhandari, S., 1997, Engineering Rock Blasting Operations, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp. 302-304.
5. Blair, B.E. and W.I. Duvall, 1954, Evaluation of Gages for Measuring Displacement, Velocity and Acceleration of Seismic Pulses, USBM RI 5073, 21p.
6. Chung, So-Keul et. al., 2003, Geotechnical Study on the Stabilization for the Slopes of the Pasir Coal Mine, KIGAM Report for KIDECO, p.vii.
7. Davies, B., I.W. Farmer and P.B. Attewell, 1964, Ground Vibration from Shallow Subsurface Blasts, The Engineer, Mar. 7, pp. 553-559.
8. Devine, J.F., 1962, Vibration Levels from

- Multiple Holes per Delay Quarry Blasts, Earthquake Notes, Vol. XXXIII, Sep. pp. 32-39.
9. Devine, J.F. and W.I. Duvall, 1963, Effect of Charge Weight on vibration Levels for Millisecond Delayed Quarry blasts, Earthquake Notes, Vol. XXXIV, Jun. pp. 17-24.
  10. Dowding, C.H., 1971, Response of Buildings to Ground Vibrations Resulting from Construction Blasting, Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Urbana Champaign.
  11. Duvall, W.I. and B. Petkof, 1959, Spherical Propagation of Explosion-Generated Strain Pulses in Rock, USBM RI 5483, pp. 1-20.
  12. Ghosh, A. and J.J.K. Daemen, 1983, A Simple New Vibration Predictor (Based on Wave Propagation Laws), 24th US Symp. on Rock Mech., Texas, pp. 151-157.
  13. Gustafsson, R., 1973, Swedish Blasting Technique, SPI, Gothenburg, Sweden, pp. 211-221.
  14. Habberjam, J.M. and J.T. Whetton, 1952, On the Relation between Seismic Amplitude and Charge of Explosive Fired in Routine Blasting Operation, Geophysics, Vol. 17, No. 1, pp. 116-128.
  15. ISEE, 1998, Blasters' Handbook, 17th ed., Int. Soc. of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, USA, pp. 319-340.
  16. Langefors, U. and B. Kihlstrom, 1963, The Modern Technique of Rock Blasting, 3rd. ed., John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 285-288.
  17. Morris, G., 1950, Vibrations due to Blasting and Their Effects on Building Structure, The Engineer, London, pp. 394-395.
  18. Nicholls, H.R., C.F. Johnson and W.I. Duvall, 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, USBM Bulletin 656, 105p.
  19. Pal Roy, P., 1991, Prediction and Control of Ground Vibrations due to Blasting, Colliery Gaurdian, Vol. 239, No. 7, pp. 215-210.
  20. Siskind, D.E., M.S. Stagg, J.W. Kipp and C.H. Dowding, 1980, Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting, USBM RI 8507, pp. 9-17.
  21. Siskind, D.E., 2000, Vibrations from Blasting, ISEE, Cleveland, OH USA, pp. 17-28.
  22. Snodgrass, J.J. and D.E. Siskind, 1974, Vibrations from Underground Blasting, USBM RI 7937, 31p.



선 우 준

한국지질자원연구원 지반안전연구부  
책임연구원

전화 : 042)868-3235

Email : sunwoo@kigam.re.kr

---



최 병 희

한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원

전화 : 042)868-3237

Email : bhchoi@kigam.re.kr

---



류 동 우

한국지질자원연구원 지반안전연구부  
선임연구원

전화 : 042)868-3099

Email : dwryu@kigam.re.kr

---