

## 파시르탄광의 시면안전을 위한 발파지침 수립 연구

최병희<sup>1)\*</sup>, 류창하<sup>1)</sup>, 선우춘<sup>1)</sup>, 정용복<sup>1)</sup>

### Establishment of a Safe Blasting Guideline for Pit Slopes in Pasir Coal Mine

Byung-Hee Choi, Chang-Ha Ryu, Choon Sunwoo, and Yong-Bok Jung

**Abstract** A surface blasting method with a single free face is currently used in Pasir Coal Mine in Indonesia. The single free face 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 this regard, we decided to make a specific blasting guideline for the control of ground vibrations to ensure the safety of the pit slopes and waste dumps of the mine. Firstly, we derived a prediction equation for the ground vibration levels that could be occurred during blasting in the pits. Then, we set the allowable levels of ground vibrations for the pit slopes and waste dumps as peak particle velocities of 120 mm/s and 60 mm/s, respectively. From the prediction equation and allowable levels, safe scaled distances were established for field use. The blast design equations for the pit slopes and waste dumps were  $D_s \geq 5$  and  $D_s \geq 10$ , respectively. We also provide several standard blasting patterns for the hole depths of 3.3~8.8 m.

**Key words** Pasir Coal Mine, Surface blasting, Ground vibration, Blasting guideline, Allowable level

**초 록** 인도네시아 파시르탄광에서 적용되고 있는 전형적인 발파방법은 지표면을 유일한 자유면으로 하는 일자유면 노천발파 공법이다. 일반적으로 일자유면 발파방법은 자유면이 하나뿐이므로 구속이 커서 큰 지반진동을 일으키게 된다. 큰 지반진동은 다시 채광장의 경계를 이루는 사면의 안정성에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 이런 측면에서 발파로 인한 지반진동으로부터 파시르탄광의 채광장 사면과 폐석장의 안전을 확보할 수 있는 발파지침을 마련하기로 하였다. 먼저, 파시르탄광에서 발파로 발생될 수 있는 지반진동 수준을 예측할 수 있는 예측식을 유도하였다. 다음으로, 채광장 사면과 폐석장의 폐석터미를 관리하기 위한 지반진동 허용수준을 PPV 측정치로 각각 120 mm/s 및 60 mm/s로 설정하였다. 도출된 예측식과 설정된 허용수준으로부터 현장에서 사용할 수 있는 안전발파를 위한 환산거리 조건식을 설정하였다. 설정된 환산거리 조건식은 채광장 사면과 폐석터미에 대해 각각  $D_s \geq 5$  및  $D_s \geq 10$ 이다. 또한, 환산거리 조건식을 만족시킬 수 있도록 전광장 3.3~8.8 m에 대하여 몇 가지 표준발파패턴을 제안하였다.

**핵심어** 파시르탄광, 노천발파, 지반진동, 발파지침, 허용수준

## 1. 서 론

인도네시아 칼리탄탄섬(일명 보르네오섬)에 위치하고 있는 파시르탄광은 개발 이후 약 15년이 지나면서 노천 채광장의 심도가 평균 150 m 이상으로 깊어지고 있을 뿐만 아니라 모양이 연약한 이암과 사암으로 이루어져 있고, 연중으로 비가 많아 발파 시 발생하는 지반진동

이 채광장 사면의 안전에 커다란 위협요인으로 작용하고 있다. 이에 따라 채광장 사면들의 안전을 확보하고 발파의 효율성을 제고하기 위하여 노천 발파공법의 개선에 관한 연구가 착수되었다. 이 연구의 일환으로 대 상광산에서 적용되고 있는 기존의 발파공법들에 대한 현장조사(최병희 외, 2006a)와 지반진동의 전파특성에 대한 연구(최병희 외, 2006b), 미고결된 암층에서의 지반진동의 저감을 위한 바닥발파의 기폭패턴 개선에 관한 연구(최병희 외, 2007a) 및 적정 지발간격의 설정을 위한 지반진동의 전파특성 분석 연구(최병희 외, 2007b) 등이 수행된 바 있다. 본 연구에서는 지금까지 진행되어 온 기존의 연구결과들을 바탕으로 파시르탄광에서

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지반안전연구부

\* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 10월 20일

심사 완료일 : 2008년 11월 27일

게재 확정일 : 2008년 11월 27일

발파로 발생하는 지반진동으로부터 채광장 사면의 안전성을 제고할 수 있도록 사면에 대한 지반진동 허용수준을 설정하고, 발파장소로부터 사면까지 이격거리에 따라 지반진동 영향을 고려한 안전발파지침을 수립함으로써 현장에서 간편하게 적용할 수 있는 실질적인 대책방안을 마련하고자 하였다.

2. 파시르탄광의 지질개요

인도네시아는 자바해구(Java trench), 술라베시해구(Sulawesi trench), 필리핀해구(Philippine trench) 등으로 둘러싸여 있는데, 그림 1의 인도네시아 부근의 구조지질도(tectonic map)에 잘 나타나 있다. 자바해구는 수마트라섬(Sumatra island)과 자바섬(Java island)의 남동쪽에 위치하고 있으며, 호주판(Australian plate)과 유라시아판(Eurasian plate)을 구분하는 경계가 된다. 그림에도 불구하고 칼리만탄섬(Kalimantan island)은 섭입대(subduction zone)로부터 벗어나 있는 것이 특징이다(Chung et al, 2003).

칼리만탄섬에는 신생대 제3기의 퇴적암층이 넓게 분포하고 있다. 이 퇴적암층의 기반암으로는 고생대의 편마암류와 편암류가 있으며, 오피올라이트(ophiolite)를 포함하고 있는 중생대의 화성암류도 분포하고 있다. 파시르 탄전(Pasir coal field)은 와루킨층(Warukin formation)에 위치하고 있으며, 와루킨층은 그림 2에서 보듯이 대규모의 분지구조(basin structure)의 형태를 취하고 있다.

파시르탄광에서 나타나는 제3기층은 하상퇴적으로 생성된 이암층과 사암층 및 석탄층으로 구성되어 있다. 이들 퇴적층들은 동서와 남북방향에서 차례로 압축력을 받아 조밀한 습곡과 트러스트 구조를 보이며 지표부근에서는 수직에 가까운 경사를 보인다. 표 1은 파시르탄광에서 나타나는 주요 암석들인 이암과 사암에 대한 물성시험 결과이다(Chung et al., 2003). 이 암석들은

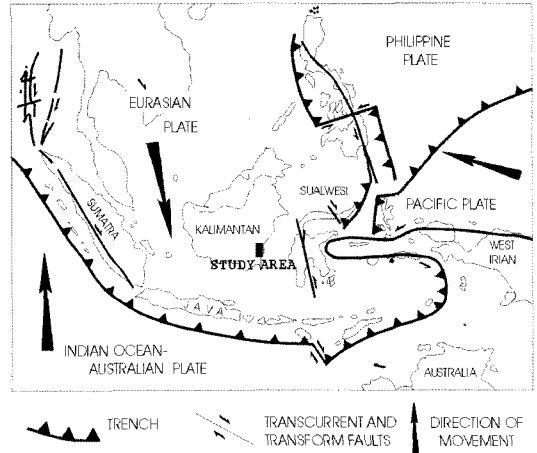


그림 1. 인도네시아 부근의 구조지질도

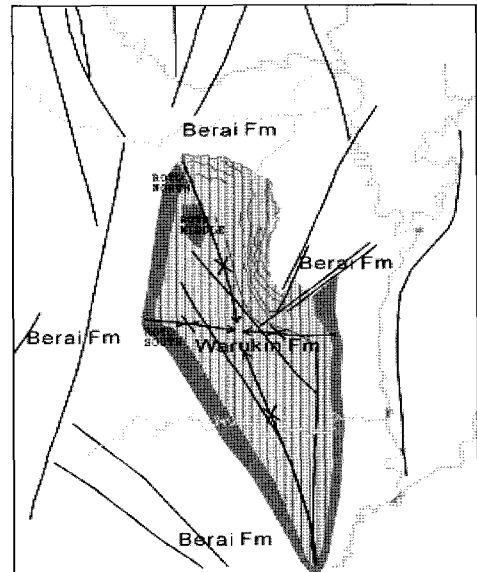


그림 2. 와루킨층 및 베라이층(Beraí formation)의 분포도

표 1. 파시르탄광에서 나타나는 주요 암석들의 물성

암종		이암	사암 I	사암 II
단위중량(kN/m <sup>3</sup> )		22.1	21.8	22.8
탄성과 속도 (m/s)	S 파	1640	1500	1740
	P 파	2580	2510	3010
일축압축강도(MPa)		17	15	25
간접인장강도(MPa)		1.4	0.6	1.5
영률(GPa)		3.6	2.4	4.6
포아송비		0.14	0.18	0.13
점착력(MPa)		2.9	1.8	3.8
내부마찰각(°)		42.3	46.4	43.9

강도가 매우 약하며, 건조하면 부서부서해지고 습윤상태가 되면 토사화되는 미고결 암층의 특성을 보인다.

### 3. 기존의 대규모 발파공법 및 사면 안정성 문제

파시르탄광에서는 탄층 채굴에 앞서 모암을 제거하기 위하여 지표면을 유일한 자유면으로 하는 일자유면 발파를 적용하고 있다. 일자유면 발파는 발파의 효율이 나쁘지만 파시르탄광의 경우에는 (i) 모암이 미고결 암층(대부분 이암, 일부는 사암)으로서 강도가 매우 약하므로 발파를 통해 이완시키기만 하면 이후에는 리핑(ripping)만으로도 굴착 및 채광이 가능하다는 점과 (ii) 탄층이 주향방향에서 16 km를 넘고 경사도 수직에 가깝기 때문에 광체를 효율적으로 채굴하기 위한 광산의 개발계획에 따라 채택되어 있다. 그림 3은 탄층을 채취하기 위해 주변의 모암을 수직천공 및 발파함으로써 단계적으로 채광장을 형성해가는 과정을 도시한 개념도이다.

파시르탄광의 연약한 모암층을 대상으로 한 기존의 전형적인 발파패턴에서는 공경 200 mm, 천공장 9 m에 공당장약량은 80~130 kg이 주로 사용되나 지형의 기복에 따라 천공장 6 m에 공당장약량 50 kg이 혼용되기도 한다. 폭약은 주장약으로는 ANFO(초유폭약)를 사용하는데, ANFO는 뇌관 비기폭성으로 둔감하므로 전폭약(에멀전 폭약,  $\phi 32$  mm)으로 기폭시킨다. 그리고 적도 부근 열대림의 특성상 연중으로 비가 많아 안전을 위하여 비전기식 뇌관을 사용하고 있다.

그림 4는 파시르탄광에서 적용하고 있는 전형적인 발파패턴의 일례를 보여주고 있는데, 저항선(B)은 7 m, 공간격(S)은 8 m 정도이다. 이 패턴은 일자유면 발파패턴이지만 각 발파공들이 순차적으로 기폭되므로 최초의 발파공이 기폭되면서 파괴된 암석이 지표면 쪽으로

움직여 나가면 그 하부에 공간이 생기게 된다. 그러면 뒤이어 발파되는 발파공의 저항선은 지표면 쪽으로도 움직여 나가지만 앞서 발파된 발파공 쪽으로도 움직이게 되므로 전체적으로는 2자유면 발파로 간주할 수 있다. 이런 관점에서 그림 4의 기폭패턴은 일반적인 벤치 발파에서 각 발파공들이 순차적으로 기폭되어 나가는 방법과 마찬가지로 알 수 있다. 이런 순차적인 파괴 양상은 점선으로 표시하였으며, 굵은 화살표는 파괴된 암체가 이동하는 방향을 나타낸다.

이 발파패턴의 경우에는 기폭점(initiation point; IP)이 있는 첫 번째 발파공열에서 큰 지반진동이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 즉, 첫 번째 열의 경우에는 각 공이 발파되는 방향이 모두 기폭점을 향하므로 저항선이 다른 열의 공간격(S)과 같이 길어져서 큰 지반진동이 발생할 소지가 있다.

현재 파시르탄광에서는 채광장의 바닥과 사면에서 모두 지발당(여기서의 지발은 동일한 명목 지연초시를 의미함) 2~3공(200~300 kg)씩 폭발시키는 전형적인 발파패턴들이 적용되고 있으며, 지속적인 발파에 따른 지반진동이 노출된 사면의 파괴를 일으키는 요인으로 작용하고 있다. 따라서 사면에 대한 발파안전성을 제고하기 위해서는 발파장소에서 사면까지의 이격거리에 따라 지반진동의 영향을 고려한 적정규모의 표준발파패턴을 마련하는 대책방안을 수립할 필요성이 있다.

### 4. 채광장 사면에 대한 지반진동 허용수준의 설정

발파로 인한 지반진동으로부터 파시르탄광의 연약한 사면들의 안전을 확보하기 위하여 채광장의 사면과 폐석장의 폐석터미에 대하여 지반진동 허용수준을 설정하였다. 허용수준을 설정하기 위해서는 실험적인 방법을 동원하는 것이 가장 바람직하지만 현실적으로 매우

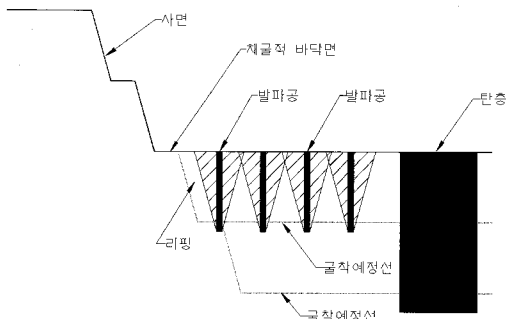


그림 3. 일자유면 발파패턴 및 채광장 사면의 형성과정

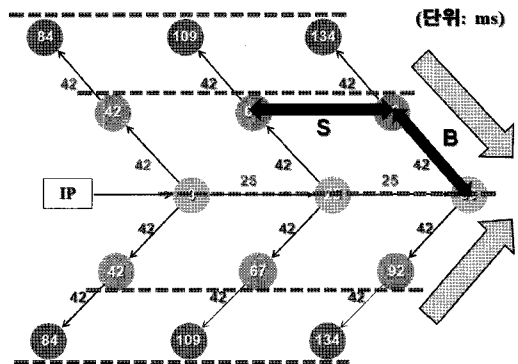


그림 4. 전형적인 기폭패턴과 파괴양상

어려운 문제이므로 표 2에 보인 바와 같이 유사한 조건  
의 사면에 대하여 러시아에서 사용하고 있는 허용수준  
을 준용하였다(Pal Roy, 2005). 러시아 기준에서는 사  
면을 (i) 포화된 사질 사면(saturated sandy slope)과 (ii)  
기초(primary structure)의 일부로서의 흙사면(soil slope)  
의 두 종류로 구분하고, 각각에 대하여 지반진동 허용  
수준을 최대입자속도(peak particle velocity; PPV)로  
설정하되, 이를 다시 일회성 진동과 반복적인 진동을  
받는 경우로 세분하고 있다. 즉, 같은 사질 사면이라 하  
더라도 반복적인 진동을 받는 경우에는 지반진동 허용  
수준을 60 mm/s로 규정하고 있으며, 일회성 진동을 받  
는 경우에는 120 mm/s로 완화시켜 적용하고 있다.

현재까지 암반사면에 대하여 지반진동 허용수준을 규  
정하고 있는 나라는 찾기 어렵지만 파시르탄광의 경우  
에는 암반사면이 연약하여 흙사면과 유사한 거동을 하  
므로 안전을 우선한 측면에서 러시아의 기준을 적용하  
는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 즉, 러시아 기준의  
흙사면은 도로나 철도, 건물 등의 기초가 되는 사면을  
지칭하는 것으로 판단되므로 파시르탄광의 연약한 암  
질을 고려하였을 때 이 기준을 적용하는 것이 안전상  
매우 타당할 것으로 보인다. 아울러 러시아 기준에서  
규정하고 있는 포화된 사질사면은 파시르탄광의 폐석  
더미(폐석산)의 특성과 매우 유사한 것으로 판단된다.  
따라서 파시르탄광의 채광장 사면에 대하여는 러시아  
기준의 흙사면과 같은 PPV=120 mm/s, 폐석장의 폐석  
더미에 대하여는 러시아 기준의 사질사면과 같은  
PPV=60 mm/s를 지반진동 허용수준으로 각기 설정하  
였다.

### 5. 안전발파지침의 수립

#### 5.1 지반진동 예측식의 유도

파시르탄광에서 적용되고 있는 기준의 발파패턴과 실  
규모의 시험발파 패턴 등을 대상으로 지반진동을 측정  
하였다. 그림 5는 이들 발파로부터 측정된 지반진동의

표 2. 사면의 지반진동 허용수준에 관한 러시아 기준

보안물건	허용수준 (PPV, mm/s)	
	반복성 진동	일회성 진동
사질 사면 (saturated sandy slopes)	60	120
흙사면 (soil slopes which are part of primary structure)	120	240

PPV 값(직교 3 성분 중 최대치)을 자승근 환산거리(root  
scaled distance)를 사용하여 도시한 결과이다. 이 그래  
프에서 실선은 전체 지반진동의 중위수준(50%)을 표시  
하고, 점선은 모든 자료의 95%를 아래로 포함하는 예  
측구간(prediction interval)의 상한선을 표시한다. 본 연  
구에서는 전통적으로 노천발파에서 지반진동의 수준을  
예측할 때 많이 사용하는 자승근 환산거리를 택하였다.

그림 5는 현장에서 측정된 312개의 측정치를 처리하  
여 얻은 결과이며, 회귀선의 적합도(결정계수)는 0.57로  
서 낮은 편이다. 따라서 안전을 고려하여 파시르탄광에  
서 발생하는 지반진동 수준을 예측하는 데에는 측정자  
료의 95%를 아래로 포함하는 수준을 사용하였으며, 이  
수준에 대한 예측식은 식 (1)과 같다.

$$PPV_{95\%} = 558.56 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-0.95} \quad (1)$$

회귀분석 과정에서는 공당장약량을 지발당 장약량으  
로 사용하였다. 즉, 통상적인 발파에서는 지발당 장약량  
이 8 ms 이내에 기폭되는 총장약량으로 정의되지만 본  
연구에서는 최대 공당장약량을 지발당 장약량으로 정  
의하였다. 이와 같이 공당장약량을 지발당 장약량으로  
정의한 것은 파시르탄광이 10 Hz 이하의 우세주파수를  
보이는 저주파 현장이기 때문이다. Siskind(2000)가 지  
적한 바와 같이 이런 저주파 현장에서는 ‘지발(delay)’  
의 기준으로 기존의 8 ms를 그대로 사용하기가 곤란하다.

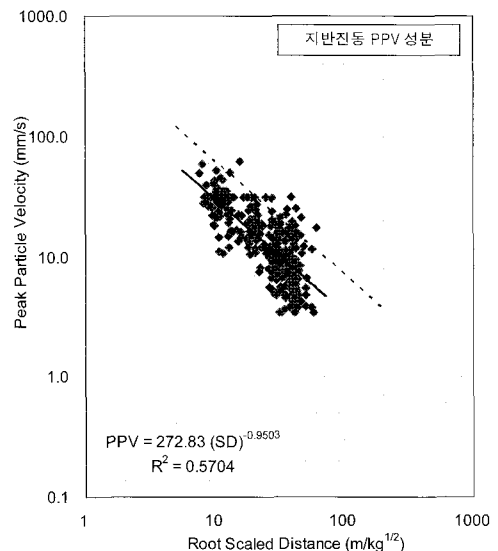


그림 5. 회귀분석 결과(PPV, 자승근 환산거리)

즉, 파시르탄광에서는 저주파, 곧 장주기(long-period)의 지반진동이 발생되므로 암석을 대상으로 하는 전통적인 8 ms 지발은 사실상 의미가 없어진다고 보아야 한다. 예를 들어, 주파수  $f=4$  Hz인 파동의 경우 주기  $T=\frac{1}{f}=250$  ms가 되므로 이와 같은 장주기의 파동을 일으키는 폭원들을 8 ms의 지발로써 분리시키는 것은 사실상 불가능하기 때문이다(최병희 외, 2007b).

이와 같은 적정 지발시차에 관한 이론을 고찰하기 위해 현장에서 시험발파를 실시하였다. 그림 6은 시험발파에 적용한 기폭패턴을 보여준다. 시험발파는 위에서부터 아래까지 총 5열의 발파공열에 대하여 실시되었다. 상단의 제1열은 지발시차가 0 ms로서 순발이며, 제2열부터 5열까지는 발파공 사이의 지발시차가 차례로 25, 42, 65, 109 ms이다. 또, 제1열은 순발로서 단일공이지만 제2열부터 5열까지는 열당 13공씩을 사용함으로써 지발의 효과를 관찰하고자 하였다(그림에서는 열당 5공씩이지만 실제로는 13공씩임). 모든 발파공은 직경 200 mm, 천공장 9 m, 공당장약량 100 kg이었으며, 공간 및 열간 간격은 7 m였다. 그리고 각 열 간의 지연시간을 1~2초로 길게 부여하여 지반진동 측정파형이 열별로 서로 구분되도록 함으로써 지발시차의 영향을 확인할 수 있도록 하였다.

그림 7은 시험발파로부터 발생된 지반진동을 55 m

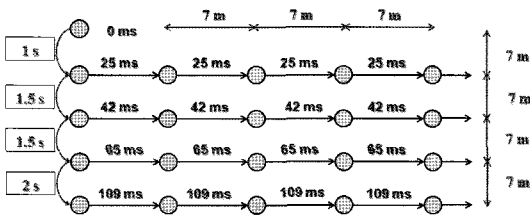


그림 6. 적정 지발시차 시험발파

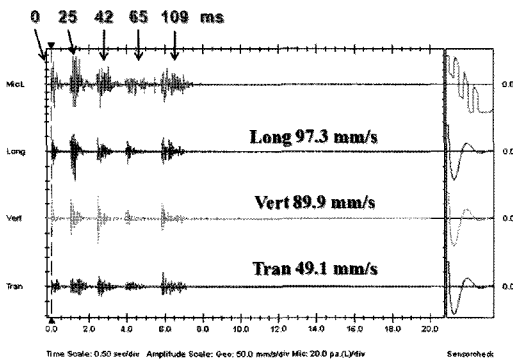


그림 7. 지반진동 측정결과

떨어진 곳에서 측정된 결과이다. 제일 위의 파동은 소음이며, 아래의 세 개는 지반진동 속도의 세 성분파동들이다. 성분속도의 피크치는 진행방향 수평성분은 97.3 mm/s, 연직방향 성분은 89.9 mm/s, 진행방향에 수직인 수평성분은 49.1 mm/s 정도로 나타났다. 이 시험에서 주목할 것은 각 파동별로 나타나는 5개의 로컬 피크치(local peak)이다. 각 열별로 지발시차를 0, 25, 42, 65, 109 ms로 부여했으므로 각 파동의 첫 번째 로컬 피크치는 0 ms, 두 번째는 25 ms, 다섯 번째는 109 ms 지발시차를 가진 열에서 발생한 것임을 알 수 있다.

시험발파 결과로부터 지발시차를 65 ms로 부여한 네 번째 열에서 지반진동이 가장 낮게 발생한 것을 볼 수 있다. 따라서 이 결과만을 놓고 볼 때에는 65 ms가 가장 적절한 지발시차라 할 수 있을 것이다. 하지만 소음의 경우에도 네 번째 열의 측정치가 가장 낮게 나타났으므로 네 번째 열의 암질이 다른 열과 달랐기 때문에 이러한 결과가 나타났을 수도 있다. 그러므로 이 결과에 대한 정확한 평가나 대현장에 적용할 수 있는 ‘지발시차’에 대한 정의는 보다 많은 시험발파를 통해 결정되어야 할 것이다.

결과적으로 파시르탄광에 알맞은 ‘지발시차’는 추가적인 연구를 통해 밝혀야 할 과제라 할 수 있으므로 현재로서는 확실하지 않은 지발시차를 사용하는 것보다는 발파패턴이 크게 변하지 않는다는 전제 하에 공당장약량을 지발당 장약량으로 설정하였다. 즉, 현재 파시르탄광에서 적용되고 있는 발파방법은 기존의 전형적인 발파패턴들과 본 연구과정에서 제안된 발파패턴들로 국한되고 있기 때문에 공당장약량을 기준으로 자료를 처리하여도 미래에 발생할 지반진동 수준을 역시 공당장약량을 기준으로 예측하는 데에는 아무런 문제가 없기 때문이다.

### 5.2 환산거리인수의 산출

보안물건에 대한 허용수준과 지반진동에 대한 예측식이 있으므로 환산거리(scaled distance)의 개념을 이용하면 안전발파를 설계하는 지침을 수립할 수 있다. 미국 노천채광청(Office of Surface Mining; OSM)의 경우에는 조건에 따라 절대거리와 환산거리를 선택하여 지반진동을 관리할 수 있도록 하고 있다(Atlas Power Company, 1987). 절대거리에 비해 환산거리를 사용하면 거리의 변화에 따른 장약량의 변화가 연속적으로 이루어질 수 있으므로 현장 기술자들이 시험발파 장약량을 보다 쉽게 결정할 수 있는 이점이 있다. 하지만 지나치게 보수적인 설계도 될 수 있으므로 최종적인 설계는 항상 시험발파 및 계측을 거쳐 결정하여야 한다.

환산거리를 이용한 지침을 수립하기 위해 보안물건별로 환산거리인수(scaled distance factor)를 구한다. 폐석더미의 경우 예측식과 허용수준으로부터 환산거리인수  $D_{s,waste}$  를 구하면 다음과 같이 된다.

$$PPV_{95\%} = 558.56 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-0.95} = 60 \quad (2)$$

$$\frac{D}{W^{1/2}} = D_{s,waste} = 10 \quad (3)$$

채광장 사면에 대한 환산거리인수  $D_{s,slope}$  는 다음과 같이 된다.

$$PPV_{95\%} = 558.56 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-0.95} = 120 \quad (4)$$

$$\frac{D}{W^{1/2}} = D_{s,slope} = 5 \quad (5)$$

### 5.3 안전발파 설계지침

파시르탄광에서 지반진동으로부터 보안물건에 대한 안전을 확보하기 위한 발파지침은 다음 두 개의 기준으로 이루어진다: (i) 측정치가 사면과 폐석더미에 대해 설정된 허용수준을 초과하는지 관리하는 기준과 (ii) 사면이나 폐석더미 부근에서 발파하고자 할 때 지반진동수준을 사전에 예측하여 발파를 설계하는 기준이다.

#### 보안물건에 대한 지반진동 관리기준

발파시 발생하는 지반진동의 수준은 사면과 폐석더미에 대해 설정된 허용수준(사면: 120 mm/s, 폐석더미: 60 mm/s)을 초과하지 않아야 한다. 이 기준을 준수하기 위해서는 매 발파마다 인근 사면과 폐석장에서 지반진동을 측정하여야 한다. 효율적인 관리를 위해서는 Dowding (1996)이 권고한 바와 같이 측정된 진동수준이 허용수준의 80%를 넘어서면 즉시 발파를 중단하고, 100%를 넘어서면 천공작업을 포함한 모든 발파관련 작업들을 중단한다. 또 이런 상황이 발생하면 다음 발파작업으로 들어가기 전에 적절한 조치를 취하고, 부득이한 경우에는 장약량을 조절하는 등 발파설계를 변경한다.

#### 제어발파 설계기준

파시르 탄광에서 발파규모를 조절할 때 적용할 수 있는 제어발파 설계기준은 앞에서 산출한 환산거리인수를 사용한 환산거리 조건식으로 규정하며, 이 식들을 표 3에 보였다. 따라서 사면과 폐석더미에 대한 지반진동 허용수준을 초과하지 않도록 발파를 설계하려면 각

각에 대한 환산거리 조건식을 사용하면 된다.

표 3. 파시르탄광에서 보안물건별로 적용되는 안전발파 설계기준

보안물건	환산거리 조건식 ( $D_s$ : m/kg <sup>1/2</sup> )
폐석더미(waste dump)	$D_s \geq 10$
채광장 사면(pit slope)	$D_s \geq 5$

예를 들어, 발파장소에서 폐석더미까지의 최단거리 ( $D$ )가 80 m일 때 현행의 발파패턴 하에서 사용가능한 공당장약량( $W$ )은 폐석더미에 대한 환산거리 조건식으로부터 다음과 같이 산출한다.

$$W \leq \left( \frac{D}{D_{s,waste}} \right)^2 = \left( \frac{80}{10} \right)^2 = 64 \text{ kg} \quad (6)$$

또 발파장소에서 사면까지 최단거리( $D$ )가 50 m일 때 현행의 발파패턴 하에서 사용가능한 공당장약량( $W$ )은 채광장 사면에 대한 환산거리 조건식으로부터 다음과 같이 산출한다.

$$W \leq \left( \frac{D}{D_{s,slope}} \right)^2 = \left( \frac{50}{5} \right)^2 = 100 \text{ kg} \quad (7)$$

물론, 폐석더미와 사면이 동시에 문제가 될 때에는 각각에 대해 산출된 장약량 가운데 적은 쪽이 최대 공당장약량이 되도록 설계하여야 한다.

### 5.4 표준발파패턴 설계

사면이나 폐석장 부근에서 발파작업을 할 때에는 안전을 위하여 공당장약량을 기존의 평균적인 장약량인 100 kg 이하로 조절해야 할 필요가 생긴다. 5.3절의 계산에 따르면 사면까지의 이격거리가 50 m일 때 사용할 수 있는 최대 공당장약량이 100 kg이므로 이격거리가 더 가까워지면 사용할 수 있는 공당장약량을 줄여야 한다.

사면에 인접한 채광장 바닥에서의 발파작업은 항상 있는 것이므로 이격거리가 50 m 이하인 경우에 대비하여 규모를 축소된 발파패턴을 보유하고 있어야 한다. 또, 지금까지는 사면발파에서도 기존의 천공장 9 m의 대규모 발파가 적용되고 있는데, 이는 사면안전에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 이런 경우를 위해서도 규모를 축소된 발파패턴이나 벤치발파 공법을 마련할 필요가 있다.

그림 8은 연구를 통하여 제안된 표준적인 기폭패턴이다. 제안된 기폭패턴의 경우 파괴는 점선으로 표시된 바와 같은 편대형으로 발생하며, 저항선의 이동방향은 큰 화살표로 표시된 방향이 된다. 제안된 패턴은 컷오프(cut-off)의 우려가 거의 없고, 저항선과 공간격은 기존의 패턴과 반대가 되는 것으로 이미 현장에서 많이 적용되고 있다.

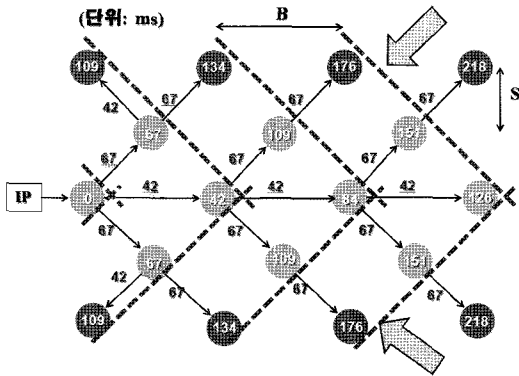
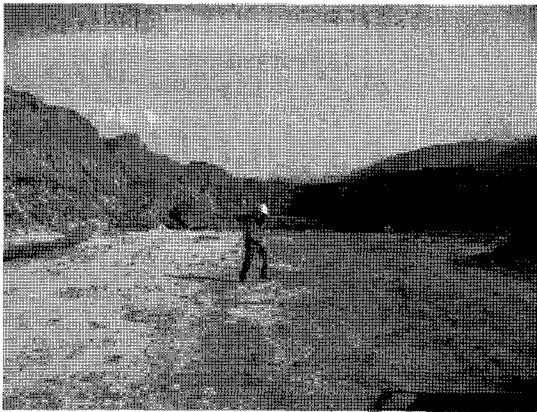
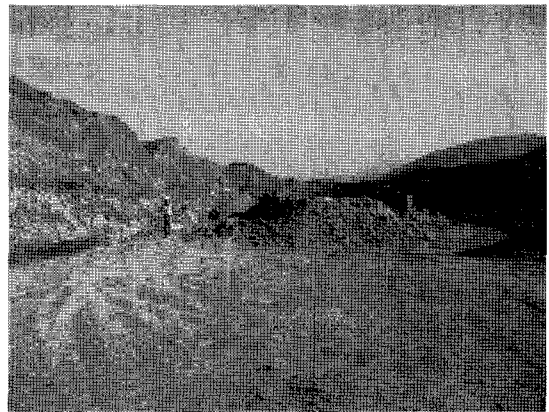


그림 8. 표준 기폭패턴(천공장 4.4 m)

발파규모를 축소하여 천공장을 기존의 9 m에서 4.4 m로 한 경우 저항선(B)과 공간격(S)은 직각방향으로 측정하였을 때 각각 4 m 씩이며, 적정 공당장약량은 16 kg으로 계산되었다. 이 패턴에 대한 시험발파에서는 공당장약량을 15 kg 및 20 kg으로 달리하면서 이론치를 검증하였다. 그림 9는 천공장 4.4 m, 공당장약량 20 kg, 총공수 40공(8공/열×5열)일 때 그림 8에 보인 기폭패턴을 적용하여 실시한 소규모 시험발파 전후의 모습이다. 그림 9(b)의 발파 후 파괴양상을 보면 파괴된 암체가 지표면 위로 2 m 정도까지 솟아올라 필요 이상으로 과도한 발파가 된 것을 알 수 있다. 이와 동일한 천공 및 기폭 패턴을 사용하되 공당장약량을 15 kg으로 축소하여 탄층과 탄층 사이에서 시험발파를 수행한 결과 파괴 암체가 지표면 위로 최대 1 m 정도까지 적절히 이동하고, 최후열의 뒤쪽에서 폭 10 cm 정도의 인장균열이 발생한 것이 관찰되었다. 이 결과로부터 천공장 4.4 m의 발파공에 대해서는 설계된 공당장약량인 16 kg이 적당한 것으로 평가되었다. 이 외에 천공장 3~6 m에 대하여도 표준적인 발파패턴을 설계하였으며, 그 결과를 표 4에 보였다.



(a) 발파전의 모습



(b) 발파후의 파괴양상

그림 9. 소규모 바닥발파의 파괴양상 (공당장약량 20 kg)

표 4. 채광장 바닥에서 적용되는 표준발파패턴 설계제원

천공장 (m)	3.3	4.4	5.5	6.6	8.8
저항선(B) (m)	3.0	4.0	4.5	5.5	7.5
공간격(S) (m)	3.0	4.0	5.5	6.5	8.5
공당장약량 (kg)	8	16	29	46	100

## 6. 결론

인도네시아 파시르탄광에서 발파시 발생하는 지반진동으로부터 채광장 사면과 폐석장의 안전을 제고하기 위하여 지반진동 허용수준을 설정하고, 설정된 허용수준을 만족시킬 수 있는 안전발파의 지침을 마련하였다.

- 1) 파시르탄광에서 현재 적용되고 있는 공법들(기존 공법 및 시험발파 공법)을 대상으로 지반진동을 측정하고, 측정된 결과를 통계적으로 처리하여 파시르탄광에서 발생할 수 있는 지반진동의 수준을 사전에 예측할 수 있는 예측식을 유도하였다.
- 2) 채광장 사면과 폐석장의 발파안전을 확보하기 위하여 이들에 대한 지반진동 허용수준을 설정하였다. 폐석터미에 대해서는 지반진동 허용수준을  $PPV=60$  mm/s, 채광장 사면들에 대해서는  $PPV=120$  mm/s로 각기 설정하였다.
- 3) 보안물건에 대한 안전발파 설계기준은 환산거리 조건식을 사용하여 발파장소에서 가장 가까운 구조물까지의 이격거리에 따라 최대 공당장약량을 제한하는 방식으로 수립하였다. 폐석터미에 대해서는 환산거리 조건식  $D_s \geq 10$ , 채광장 사면에 대해서는  $D_s \geq 5$ 를 적용한다.
- 4) 발파를 설계할 때에는 보안물건과의 이격거리와 환산거리 조건식을 이용하여 최대 공당장약량을 결정한다. 발파를 관리할 때에는 측정된 진동수준이 보안물건별 허용수준을 초과하는지 여부를 확인하고, 필요할 경우에는 발파설계를 조절한다.

## 사 사

본 연구는 지식경제부 출연사업인 ‘대규모 석탄 노천광의 연약사면 안정성 및 생산성 향상 연구’ 과제에서 지원을 받았으며, 실험과정에서 지원을 아끼지 않은 인도네시아 현장의 KIDECO 임직원 여러분에게 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 최병희, 류동우, 선우춘, 2006a, 파시르 탄광에서의 채탄발파공법에 대한 문제점 분석 및 개선방안 연구, 대한화약발파공학회지, 제24권 제1호, pp.57-62.
2. 최병희, 류동우, 선우춘, 2006b, 파시르 탄광에서의 발파진동의 전파특성 분석, 대한화약발파공학회지, 제24권 제2호, pp.51-63.
3. 최병희, 류동우, 선우춘, 박상봉, 권종찬, 2007a, 미고결 암층에서의 진동저감을 위한 기폭패턴의 설계 및 적용, 2007년 한국암반공학회 특별 심포지엄 논문집, pp.470-485.
4. 최병희, 류동우, 선우춘, 2007b, 대규모 노천광 발파에서 적정 지발간격의 설정을 위한 지반진동의 전파특성 분석, 제4회 한화발파기술심포지움 논문집, pp.50-66.
5. Atlas Power Company, 1987, Explosives and rock blasting, Atlas Power Company, pp.344-348.
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. Dowding, C.H., 1996, Construction vibrations, Prentice Hall, pp.437-441.
8. Pal Roy, P., 2005, Rock Blasting: Effects & Operations, A.A. BALKEMA PUBLISHERS, p.95.
9. Siskind, D.E., 2000, Vibrations from Blasting, ISEE, pp.20-22.





### 류창하

1976 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1979 서울대학교 대학원 자원공학과 공학  
석사  
1989 University of Utah(in USA) 공학박사

Tel: 042-868-3236

E-mail: cryu@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구  
본부 책임연구원



### 최병희

1988 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
2002 전남대학교 대학원 자원공학과 공학  
석사  
2005 전남대학교 대학원 지구시스템공학과  
공학박사

Tel: 042-868-3237

E-mail: bhchoi@kigam@re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구  
본부 선임연구원



### 정용복

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학  
석사  
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템  
공학부 공학박사

Tel: 042-868-3097

E-mail: ybjung@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구  
본부 선임연구원



### 선우준

1978년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1984년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1985년 Paris VI 대학(France) DEA  
1988년 Paris VI 대학 지구구조학과  
(France) 공학박사  
Tel: 042-868-3235

E-mail: sunwoo@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구  
본부 책임연구원