

## 파시르 탄광에서의 채탄발파공법에 대한 문제점 분석 및 개선방안 연구

최병희<sup>1)\*</sup>, 류동우<sup>1)</sup>, 선우춘<sup>1)</sup>

### A Study on the Improvement of Surface Blasting Method 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 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 controlling the ground vibration and enhancing the blast efficiency. As a part of the project, authors investigated the current blasting method as well as the overall pit developing process in the mine, and established some important guidelines that should be observed during the whole development process. This paper presents the details of the typical blasting pattern and the pit developing method in the mine, and suggests the guidelines determined from the results of the observations.

**Key words** : surface blasting, Pasir Coal Mine, ground vibration, bench blasting

**초 록** : 인도네시아 파시르 탄광에서는 전형적으로 일자유면 발파방법이 사용되고 있다. 일자유면 발파방법은 지표면을 유일한 자유면으로 한 발파법이므로 구축이 커서 화약의 에너지가 저항선의 파괴보다는 지반진동의 유발에 더 많이 소모된다. 따라서 파시르 탄광에서 현재 적용되는 일자유면 발파방법은 노천광산에서 일반적으로 적용되는 이자유면 발파인 계단발파에 비해 더 큰 지반진동을 유발시킬 수 있다. 더욱이 파시르 탄광의 경우 노천채굴적의 양안이 연약사면으로 이루어져 있어 발파진동은 이들 사면들의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 발파진동과는 별도로 일자유면 발파는 본래 저항선이 하나뿐이므로 암반파괴의 측면에서도 발파효율이 좋지 않다. 따라서 파시르 탄광이 안고 있는 현안문제를 해결할 목적으로 진동제어와 발파효율을 동시에 향상시킬 수 있는 새로운 발파공법에 대한 연구가 착수되었다. 이 연구의 일환으로 파시르 탄광에서의 현행 발파공법과 광산개발에 대한 현장조사가 수행되었으며, 본 논문에서는 현장조사 과정에서 얻어진 결과들 가운데 향후 새로운 발파공법으로의 전환과정에서 반드시 준수되어야 할 공법설계의 지침을 제시하였다.

**핵심어** : 노천발파, 파시르 탄광, 지반진동, 계단발파

## 1. 서 론

인도네시아 파시르 탄광(Pasir coal mine)에서는 지표에 노출된 수직탄층을 따라 남북방향으로 약 16 km에 달하는 대규모 노천 채굴적을 유지하고 있으며, 모암의 제거를 위한 굴착발파에 일자유면

발파공법이 적용되고 있다. 일자유면 발파공법에서는 화약이 지닌 에너지의 대부분이 암반의 파괴보다는 지반진동(ground vibration)의 발생 및 전파에 사용되는데, 이로부터 발생된 큰 발파진동은 장기간의 유지관리가 필요한 주요 사면들의 안정성을 위협하는 요인이 되고 있으며, 발파의 효율성을 떨어뜨리는 문제점도 지니고 있다. 본 논문에서는 파시르 탄광에서 적용되고 있는 현행 발파공법을 살펴보고 그 문제점을 분석함으로써 향후 채굴적을 구성하는 사면들의 안정성을 확보하고 발파의 효율성을 제고할 수 있는 새로운 발파공법으로

1) 한국지질자원연구원 지반안전연구부

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

접수일 : 2006년 5월 29일

게재승인일 : 2006년 6월 23일



그림 1. 파시르 탄광의 지정학적 위치.

표 1. 파시르 탄광에서 나타나는 주요 암석들의 물성

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

의 전환과정에서 필수적으로 요구되는 근본적인 지침들을 마련해 보고자 하였다.

## 2. 현행 발파공법에 대한 고찰

### 2.1 지질개요

파시르 탄광은 동남아시아 말레이군도의 대순다 열도에 속하는 칼리만탄(Kalimantan) 섬에 위치하고 있다. 칼리만탄 섬은 보르네오 섬으로도 불리며, 면적이 약 75만 km<sup>2</sup>로서 말레이군도에서 제일 큰 섬이고 세계에서 세 번째로 큰 섬이다. 섬의 북쪽 약 1/3은 말레이시아가 차지하고 있으며, 남쪽 2/3는 인도네시아에 속한다. 그림 1은 파시르 탄광의 지정학적 위치를 보인 그림으로 탄광은 아당만(Adang bay)으로부터 육로로 약 40 km 지점에 위치하고 있다.

칼리만탄 섬에는 제3기 퇴적암들이 널리 분포하고 있으며, 고생대의 편마암(gneiss) 및 편암(schist)과 중생대의 화성암류가 기층을 이루고 있

다. 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 보이며 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). 표로부터 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.

그림 2에서와 같이 파시르 탄광의 채굴적(pit)은 주 채굴대상이 되는 3개의 탄층들을 따라 남북방향으로 약 16 km에 걸쳐 있으며, 이 대규모 채굴적의 중간부근을 기준하여 북쪽에 위치하고 있는 광체를 로또(Roto) 북광체, 남쪽은 로또 남광체라 부른다. 채굴적의 바닥은 지표수준을 170 ML로

보았을 때 현재까지 대략 0 ML까지 개발되어 있으며, 앞으로 지하심부에서의 광체발달 상황에 따라 최대 -150 ML까지 개발이 진행될 것으로 예상된다. 탄폭은 부광대와 빈광대에 따라 일정하지 않으나 평균 수 내지 수십 m 정도이며, 최대탄폭은 80 m 정도이다. 그림 3은 파시르 탄광의 전형적인 노천 채굴적의 모습을 보인 사진이며, 그림 4는 이와 같은 채굴적의 형태를 개념적으로 도식화한 모식도이다.

**2.2 현행 발파공법**

일반적으로 골체를 채취하기 위한 대규모 채석장이나 북미지역의 수평탄층을 대상으로 하는 노천광산에서는 일자유면 발파인 수직 계단발파가 적용되고 있으나 파시르 탄광에서는 편평한 암반에서의 터파기 발파에서와 같은 일자유면 발파가 적용되고 있다. 일자유면 발파에서는 자유면이 지표면 하나뿐이므로 발파의 효율이 가장 나쁘지만 파시르 탄광에서 이와 같은 일자유면 발파를 채택

하게 된 데는 다음과 같은 두 가지의 이유가 있다. 첫째로, 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 암반의 이완을 목적으로 한 발파라고도 볼 수 있다. 두 번째로, 파시르 탄광에서는 탄층의 경사가 거의 수직이므로 계단발파를 도입할 경우 발파방향에 따라서는 비산되는 파쇄 암편들로 인해 광체가 오염될 수도 있기 때문이다. 그림 5은 광체인 석탄층을 채취하기 위한 일종의 준비 작업으로서 광체 주변의 모암을 수직천공 및 발파함으로써 단계적으로 채굴적을 형성해가는 과정을 그린 개념도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 탄층 원편의 모암구획은 발파로 이완시킨 후 리핑으로 제거하며, 모암의 제거에 따라 드러나는 탄층은 주로 리핑 작업을 통해 채취하게 된다.

파시르 탄광에서 적용되고 있는 전형적인 발파

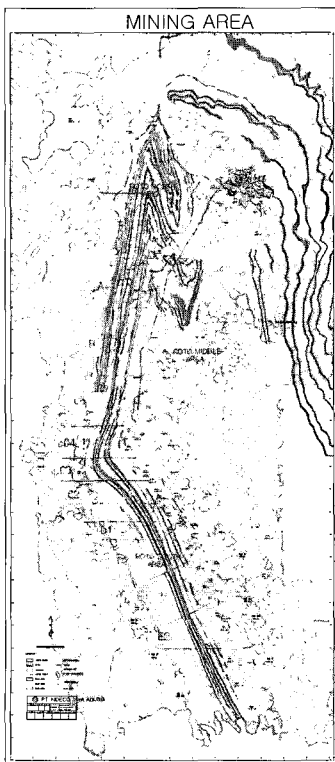


그림 2. 광체의 발달 상황.

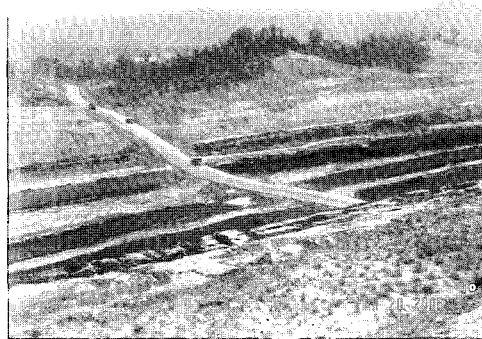


그림 3. 노천 채굴적.

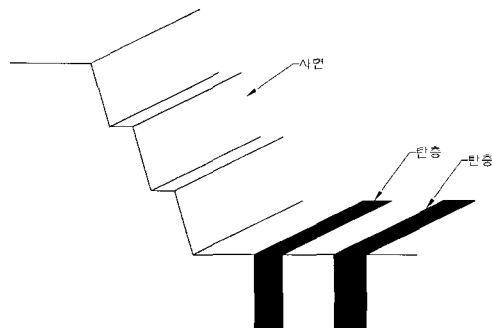


그림 4. 노천 채굴적의 모식도.

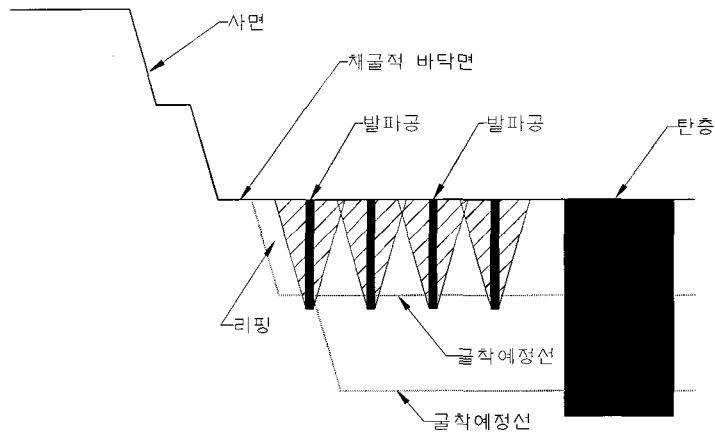


그림 5. 채굴적의 형성과정.

패턴을 그림 6에 보였다. 각각의 발파에서 대상으로 하는 구획은 탄층의 주향방향을 길이방향으로 하는 직사각형의 형태가 되며, 천공패턴은 스웨덴 방식이라 불리는 지그재그 형식(staggered pattern)을 기본패턴으로 하고 있다(ISEE, 1998). 전형적인 발파에서 발파공의 직경은 200 mm, 공심은 9 m이며, 저항선은 8 m, 공간격은 9 m 정도이다. 폭약은 주장약으로 ANFO(초유폭약)를 사용하며 공당 장약량은 100 kg 정도이다. 주장약은 전폭약(NewMite I, 32mm $\phi$ )을 사용하여 기폭시킨다. 기폭방법은 비전기식 뇌관을 이용한 지발발파를 적용하고 있으며, 그림 6에서 보듯이 전형적으로 V 컷(경우에 따라서는 박스 컷(box cut))의 형태로 광체의 주향방향을 따라 점진적으로 기폭시킨다.

한편, 주변모암을 제거함으로써 드러난 광체에

대한 채굴작업이 일정부분 진행되면 다른 작업장(막장)에서는 심부의 광체를 채굴하기 위해 채굴적의 확장작업을 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 7은 이 과정을 보여주는 것으로 사면의 최상부의 발파구획에서 시작하여 하부를 향하여 차례로 발파를 진행함으로써 채굴적을 확장시켜 나간다. 이때 각 계단 발파에 적용되는 발파패턴은 앞의 그림 6에 보인 전형적인 발파패턴이 거의 그대로 적용된다.

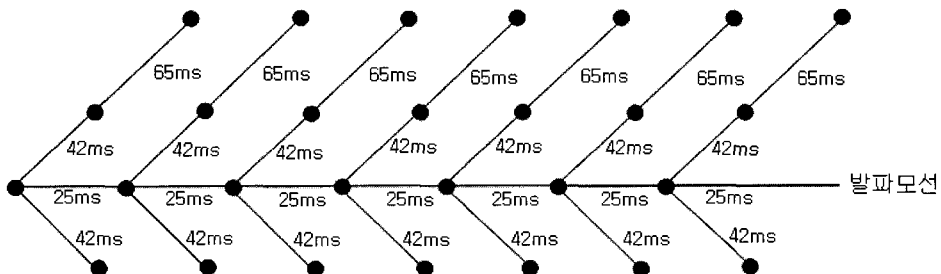


그림 6. 전형적인 발파패턴.

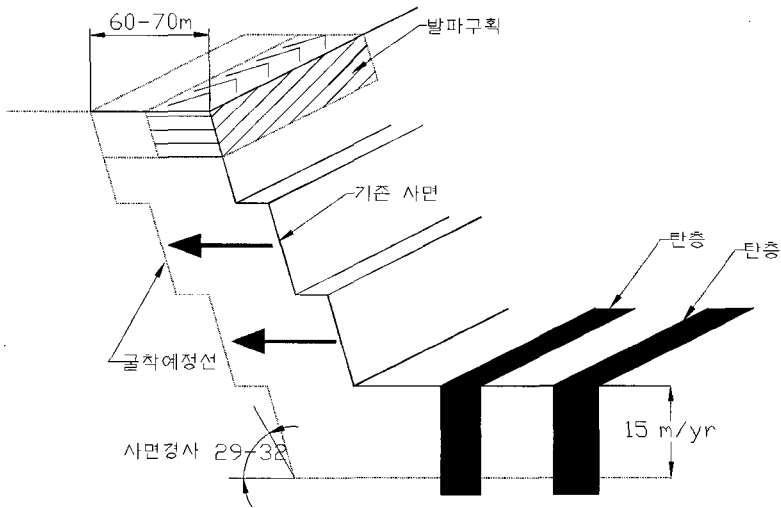


그림 7. 채굴적의 확장과정.

**2.3 채굴적의 발파안정성 확보문제**

앞에서 언급한 바와 같이 파시르 탄광에서 현재 적용되고 있는 발파패턴은 일자유면 발파이다. 일자유면 발파에서는 화약이 지닌 에너지의 대부분이 암반의 파괴에 사용되기 보다는 지반진동(ground vibration)의 형태로 암반 층으로 전달되는데 소모된다. 따라서 파시르 탄광의 취약한 암반 조건을 고려했을 때 현행 발파방법을 그대로 적용할 경우 발파진동으로 인하여 채굴적을 이루는 여러 사면들이 붕괴할 가능성이 높은 것으로 볼 수 있다. 즉, 그림 8에 보인 바와 같이 현행 발파패턴에서는 지표면을 제외하면 자유면이 없으므로 발파이완에 이어 리핑 작업이 진행되고 나면 남겨진

부분이 그대로 최종사면의 법면이 되고 있다. 이와 같이 형성된 사면들은 선형발파로 인한 손상영역을 포함하고 있을 확률이 매우 높으며, 이런 상태에서 지속적인 발파진동을 받거나 강우에 의한 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 발파안정성을 확보하기 위해서는 진동영향을 고려한 새로운 발파공법을 개발할 필요성이 있다고 본다. 하지만 새로운 공법의 개발 시에는 단순한 진동 제어공법이 아니라 광산의 개발계획과 발파의 효율성을 포함한 세 가지 측면을 모두 고려한 공법이여야 하며, 설계된 공법은 충분한 현장시험 및 진동영향 평가과정을 거쳐서 적용하여야 할 것이다.

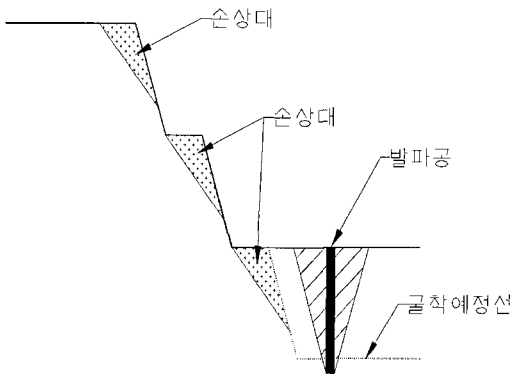


그림 8. 인접사면에서의 손상대 발생.

**3. 결 론**

인도네시아 파시르 탄광은 남북방향으로 약 16 km에 달하는 대규모의 노천 채굴적을 유지하고 있으며, 모암의 제거를 위한 굴착발파에 지표면을 유일한 자유면으로 한 일자유면 발파공법을 적용하고 있다. 일자유면 발파공법은 큰 지반진동을 유발할 수 있어 파시르 탄광의 취약한 암반사면들이

진동영향으로 봉쇄할 수 있는 위험성이 있으며, 발파의 효율성이 낮아 경제성을 저하시키는 요인이 되고 있다. 이와 같은 현행 발파패턴과 광산의 규모 및 개발방법 등을 고려하였을 때 수년 이상 유지하여야 할 대규모 사면들에 대한 안정성을 확보하기 위해서는 진동영향을 고려한 새로운 발파공법을 개발할 필요성이 있을 것이다. 하지만 새로운 공법의 개발 시에는 단순한 진동제어공법이 아니라 반드시 광산의 개발계획과 발파의 효율성을 함께 고려한 공법설계가 이루어져야 할 것이다.

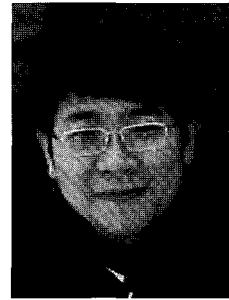
### 감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연사업인 '석탄노천광의 사면안전유지 및 발파기술 연구' 과제에서 지원을 받았으며, 조사과정에서 지원을 아끼지 않으신 인도네시아 현장의 KIDECO 임직원 여러분에게 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Chung, So-Keul, et al., 2003, Geotechnical Study on the Stabilization for the Slopes of the Pasir Coal Mine, KIGAM Report for KIDECO.

2. ISEE, 1998, Blasters' Handbook, 17th ed., Int. Soc. of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, USA, pp. 319-340.

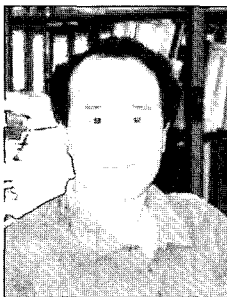


류 동 우

1994 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1996 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2000 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부  
공학박사

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

(E-mail : dwryu@kigam.re.kr)



최 병 희

1988 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
2002 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2005 전남대학교 대학원 지구시스템공학과  
공학박사

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

(E-mail : bhchoi@kigam.re.kr )



선 우 준

1978 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1984 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1988 프랑스 Paris VI 대학 지구구조학과 이학박사

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

(E-mail : sunwoo@kigam.re.kr)