

인도네시아 파시르탄광의 사면 안전성 제고를 위한 제어발파공법의 적용

최병희, 류창하, 류동우, 정용복(한국지질자원연구원)

1. 서론

인도네시아 파시르탄광은 초기개발 이후 15년이 지나면서 노천 채광장의 심도가 평균 150 m까지 깊어지고 있는데다 모양이 연약한 이암으로 이루어져 있어 발파 시 발생하는 지반진동이 채광장 사면의 안전에 커다란 위협요인으로 작용하고 있다. 이에 따라 채광장 사면들의 안전을 확보하고 발파의 효율성을 제고할 수 있는 노천 발파공법 개선에 관한 연구가 착수되었다. 이 연구의 일환으로 대상광산에서 적용되고 있는 기존의 발파공법들에 대한 현장조사(최병희 외, 2006a)와 지반진동의 전파특성에 대한 연구(최병희 외, 2006b) 및 미고결된 암층에서의 지반진동의 저감을 위한 바닥발파의 기폭패턴 개선에 관한 연구(최병희 외, 2007) 등이 수행된 바 있다. 본 연구에서는 기존 연구결과들을 토대로 파시르탄광에서 발파로 발생하는 지반진동으로부터 채광장 사면의 안전성을 제고할 목적으로 사면들에 대한 지반진동 허용수준을 설정하고, 설정된 허용수준을 만족시킬 수 있는 발파공법들을 사면으로부터의 이격거리별로 제공함으로써 실질적인 대책방안을 제공하고자 하였다.

2. 지질개요

파시르탄광은 칼리만탄(Kalimantan) 섬의 동남부에 위치하고 있으며 하상퇴적으로 생성된 제3기의 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). 표 1에서 보듯이 이 암석들은 강도가 매우 약하여 토양(soil)에 가깝다고 할 수 있으며, 건조하면 부서부스러지고 비가 내려 습윤상태가 되면 진흙과 유사해지는 미고결 암층의 특성을 보인다.

표 1. 파시르탄광에서 나타나는 주요 암석들의 물성

암종	밀도 (kg/m ³)	탄성파속도 (m/s)		단축 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
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

3. 기존의 발파패턴

일반적으로 대부분의 노천광산에서는 자유면이 2개인 계단식 발파가 적용되고 있으나 파시르탄광에서는 지표면을 유일한 자유면으로 하는 일자유면 발파가 적용되고 있다. 이런 형태의 일자유면 발파에서는 자유면이 지표면 하나뿐이므로 발파의 효율이 나쁘지만 이 지역에서 나타나는 미고결 암층(대부분 이암, 일부는 사암)은 강도가 매우 약하므로 발파를 통해 암반을 이완시키기만 하면 이후에는 리핑(ripping)만으로도 굴착 및 채광이 가능하고, 또한 탄층이 주향방향에서 16 km를 넘고 탄층경사도 수직에 가깝기 때문에 광체를 효율적으로 채굴하기 위한 광산의 개발계획에 따라 부득이하게 적용되고 있는 것으로 보인다. 그림 1은 석탄층을 채취하기 위해 주변의 모암을 수직천공 및 발파함으로써 단계적으로 채광장을 형성해가는 일자유면 발파과정을 도시한 개념도이다.

파시르탄광의 연약한 모암층을 대상으로 적용되고 있는 기존의 전형적인 발파패턴에서는 그림 2(b)에서와 같이 공경 200 mm, 공깊이 9 m에 공당장약량은 100 kg/hole이 주로 사용되나 지형의 기복에 따라 그림 2(a)와 같이 공깊이 6 m에 공당장약량 50 kg/hole이 혼용되기도 한다. 폭약은 주장약으로는 ANFO(초유폭약)를 사용하는데, ANFO는 뇌관 비기폭성으로 둔감하므로 전폭약(에멀전 폭약, $\phi 32\text{mm}$)으로 기폭시킨다. 그리고 적도 부근 열대림의 특성상 연중으로 비가 많아 안전을 위하여 비전기식 뇌관을 사용하고 있다.

그림 3은 파시르탄광에서 적용되고 있는 전형적인 기폭패턴의 하나를 보여주고 있는데, 저항선(B)은 7 m, 공간격(S)은 8 m 정도로서 이 패턴을 2자유면 발파로 가정하면 발파공들이 순차적으로 발파되어 나가는 방식은 일반적인 벤치발파법과 마찬가지로 알 수 있다.

현재 파시르 탄광에서는 채광장 바닥과 사면에서 모두 기존의 전형적인 발파패턴이 적용된다. 따라서 발파장소에 바로 인접한 연약사면이 지속적인 발파진동을 받거나 강우로 포화되면 여러 형태의 사면파괴를 일으킬 가능성이 더욱 커지게 된다. 따라서 이와 같은 채광장 사면들에 대한 발파안정성을 확보하기 위해서는 이격거리별로 진동영향을 고려한 적정규모의 표준발파공법이 마련될 필요성이 있다.

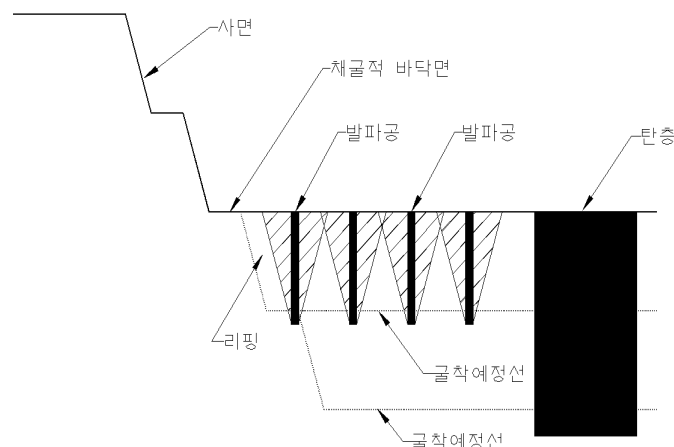


그림 1. 일자유면 발파와 채광장의 형성과정

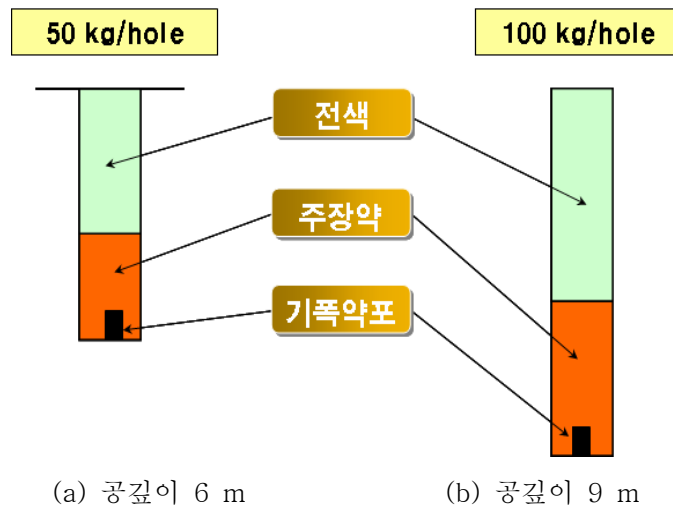


그림 2. 전형적인 장약패턴

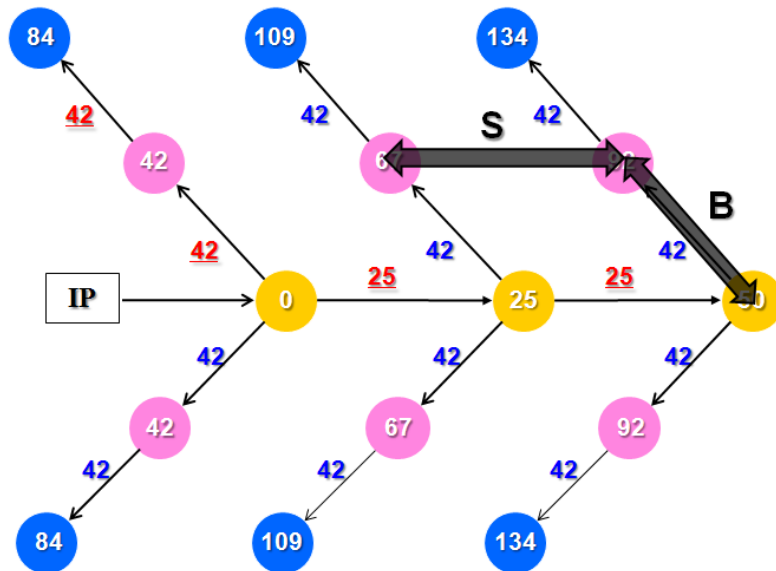


그림 3. 전형적인 기폭패턴

4. 채광장 사면 및 폐석장에 대한 지반진동 허용수준의 설정

발파로 인한 지반진동으로부터 과시르탄광의 연약한 사면들의 안전을 확보하기 위하여 채광장 사면과 폐석장의 폐석더미에 대하여 지반진동 허용수준을 설정하였다. 허용수준을 설정하기 위해서는 실험적인 방법을 적용하는 것이 가장 바람직할 것이지만 현실적으로 매우 어려운 문제이므로 표 2에 보인 바와 같이 유사한 조건의 사면에 대하여 러시아에서 사용하고 있는 허용수준을 준용하였다(Pal Roy, 2005). 이와 같은 러시아 기준을 토대로 과시르탄광의 채광장 사면에 대하여는 120 mm/s, 폐석장의 폐석더미에 대하여는 60 mm/s의 지반진동 허용수준을 각기 설정하였으며, 이를 표 3에 정리하였다.

표 2. 사면의 지반진동 허용수준에 관한 러시아 기준

Type of structure	Allowable PPV (mm/s)	
	Repeated	One fold
Saturated sandy slopes	60	120
Soil slopes which are part of primary structure	120	240

표 3. 파시르탄광의 주요 구조물에 대한 지반진동 허용수준의 설정

대상 구조물	허용수준 (PPV, mm/s)
폐석장(waste dump)*	60
채광장 사면(pit slope)	120

* 엄밀히는 폐석장의 폐석더미를 말함.

5. 파시르탄광에서의 안전발파지침의 수립

5.1 지반진동의 전파특성 분석

파시르탄광에서 수행되고 있는 기존의 발파패턴과 실규모 시험발파 패턴들로부터 지반진동을 측정하였다. 그림 4는 이들 발파로부터 측정된 지반진동의 PPV 자료를 자승근 환산거리를 이용하여 도시한 결과이며, 그림에서 실선은 전체 지반진동의 중위수준(50%)을 표시하고 점선은 모든 자료의 95%를 아래로 포함하는 예측구간(prediction interval)의 상한을 표시한다. 본 연구에서는 지반진동을 보수적으로 관리하기 위하여 자승근 환산거리를 채택하였다. 통계처리 시에는 공당 장약량을 지발당 장약량으로 사용하였는데, 그 이유는 현재 적용되고 있는 발파공법, 지질 및 지형조건의 다양성을 반영하기 어려운 점과 기존에 잘 알려져 있는 8 ms 지발을 파시르탄광과 같은 저주파 현장에서는 그대로 적용할 수 없는 문제 등이 있기 때문이다. 자료처리 결과 나타난 회귀선의 적합도 또한 매우 낮기 때문에 본 연구에서 파시르탄광에서 발생하는 지반진동 수준을 예측하는 데에는 모든 PPV 측정자료의 95%를 포함하는 수준을 사용하였으며, 유도된 예측식은 다음과 같다.

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

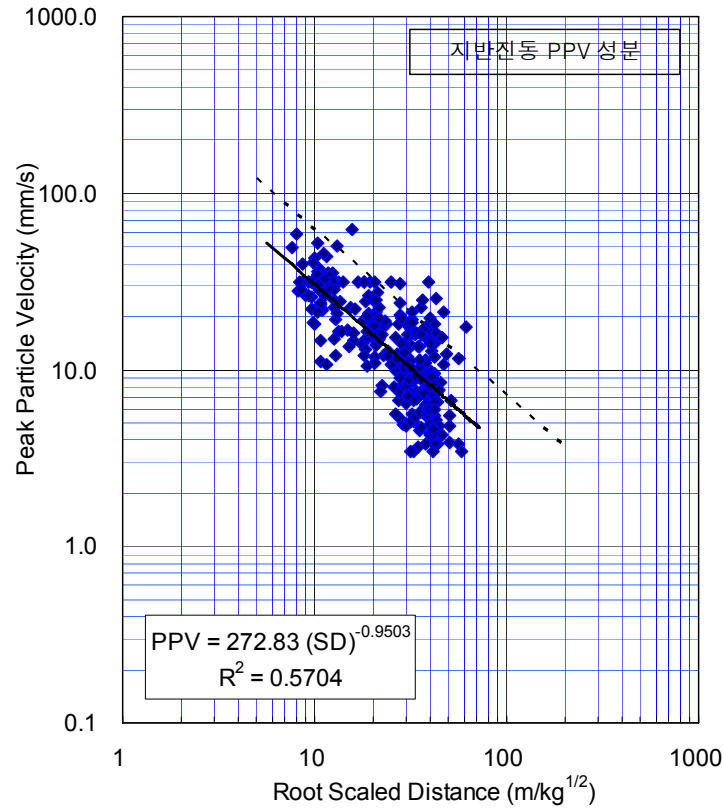


그림 4. 회귀분석 결과(PPV, 자승근 환산거리)

5.2 환산거리인수 산출

채광장 사면과 폐석장에 대한 허용수준과 파시르탄광에서 발생 가능한 지반진동의 수준에 대한 예측식을 알고 있으므로 환산거리(scaled distance)의 개념을 이용하면 안전발파를 설계하는 지침을 수립할 수 있다. 이를 위하여 환산거리인수(scaled distance factor)를 먼저 구한다.

폐석장의 경우 예측식과 허용수준으로부터 환산거리인수 $D_{s, waste}$ 를 구하면 다음과 같다.

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

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

채광장 사면의 경우에는 환산거리인수 $D_{s, slope}$ 가 다음과 같이 계산된다.

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

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

5.3 안전발파 설계지침 수립

파시르탄광에서 채광장 사면과 폐석장의 안전을 확보하기 위한 안전발파지침은 다음과 같이 크게 두 가지로 구분할 수 있다.

첫째, 발파시 발생하는 지반진동이 사면과 폐석장에 대해 설정된 허용수준을 초과하지 않아야 한다. 이를 위하여 현장의 발파담당 엔지니어는 매 발파 시 발파장소 부근의 사면과 폐석장에서 지반진동을 측정하고 측정된 진동수준이 각각에 대한 허용수준을 초과하는지 여부를 확인하여야 한다.

둘째, 사면과 폐석장에 대하여 설정된 지반진동 허용수준을 만족할 수 있도록 발파를 설계하기 위해서는 앞에서 산출한 환산거리인수를 사용한다. 예를 들어, 발파장소에서 폐석장까지의 최단거리(D)가 80 m일 때 현행의 발파패턴 하에서 사용가능한 공당 최대장약량(W)은 앞의 식 (3)으로부터 다음과 같이 산출된다.

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

또 발파장소에서 사면까지 최단거리(D)가 50 m일 때 현행의 발파패턴 하에서 사용가능한 공당 최대장약량(W)은 앞의 식 (5)으로부터 다음과 같이 산출된다.

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

물론, 폐석장과 사면이 동시에 문제가 될 때에는 각각에 대해 산출된 장약량 가운데 적은 쪽이 공당 최대장약량이 되도록 발파를 설계하여야 한다.

5.4 제어발파공법 개발

사면이나 폐석장에 가까운 장소에서 발파작업을 수행할 때에는 공당 장약량을 기존의 평균적인 장약량인 100 kg/hole 이하로 조절해야 한다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 사면까지의 이격거리가 50 m 이하가 되면 기존의 공당 장약량인 100 kg/hole을 사용할 수 없게 된다. 따라서 이런 경우에 대비하여 현재 규모를 축소된 발파패턴을 시험발파를 통해 개발하고 있으며, 사면에 적용할 표준적인 벤치발파법도 개발 중에 있다. 그림 5는 천공장을 기존의 9 m에서 4.5 m로 축소시킨 발파패턴으로서 저항선(B)과 공간격(S)은 직각방향에서 각각 4 m, 적정 공당 장약량은 16 kg/hole로 계산되었으며, 한차례의 시험발파를 수행하였다.

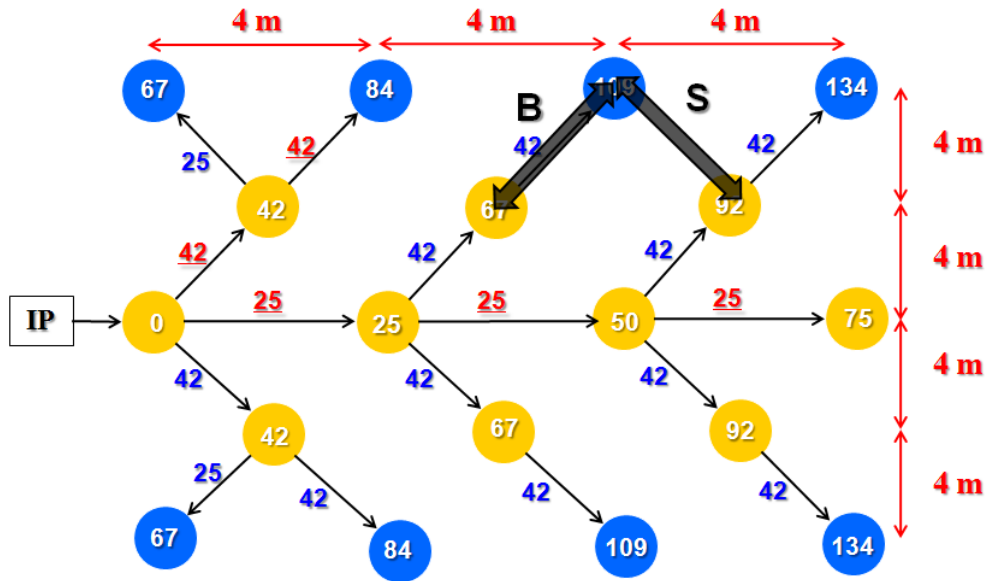


그림 5. 소규모 제어발파패턴 (천공장 4.5 m)

6. 결론

본 연구에서는 인도네시아 파시르탄광의 연약한 채광장 사면들과 폐석장을 발파로 인한 지반진동으로부터 보호하기 위하여 각각에 대해 지반진동 허용수준을 설정하고 설정된 허용수준을 만족시킬 수 있는 안전발파의 지침을 수립하였다. 연구의 주요결과는 다음과 같다.

1) 파시르탄광에서 현재 적용되고 있는 공법들(기존의 공법 및 새로이 설계된 제어발파 공법)을 대상으로 지반진동을 측정하고, 측정된 결과를 통계처리 하여 파시르탄광에서 발생할 수 있는 지반진동의 수준을 사전에 예측할 수 있는 예측식을 유도하였다.

2) 파시르탄광의 주요 구조물에 대하여 러시아 기준을 준용하여 지반진동 허용수준을 설정하였다. 폐석장에 대해서는 지반진동 허용수준을 60 mm/s, 채광장 사면들에 대해서는 120 mm/s로 설정하였다.

3) 파시르탄광에서 채광장 사면과 폐석장의 안전을 확보하기 위한 안전발파지침은 환산거리인수를 사용하여 발파장소에서 관심의 대상이 되는 구조물(사면, 폐석장)까지의 거리에 따라 공당 최대장약량을 제한하는 방식으로 수립하였다.

4) 관심의 대상이 되는 사면이나 폐석장까지의 이격거리에 따라 적용할 수 있는 적정규모의 발파패턴을 이론적인 설계 및 현장 시험발파 과정을 통해 개발 중에 있다.

감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 지식경제부 출연사업인 ‘대규모 석탄 노천광의 연약사면 안정성 및 생산성 향상 연구’ 과제에서 지원을 받았으며, 실험과정에서 지원을 아끼지 않은 인도네시아 현장의 KIDECO 임직원 여러분에게 감사를 드린다.

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, 2007, 미고결 암층에서의 진동저감을 위한 기폭패턴의 설계 및 적용, 2007년 한국암반공학회 특별 심포지엄 논문집, pp.470-485.
4. 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.
5. Pal Roy, P., 2005, Rock Blasting: Effects & Operations, A.A. BALKEMA PUBLISHERS, p.95.