

파시르 탄광의 발파패턴 개선설계와 적용

최병희¹⁾ · 류동우¹⁾ · 선우춘¹⁾

1. 서론

인도네시아 파시르(Pasir) 탄광에서는 연장 16km에 이르는 노천 채굴적을 유지하고 있으며, 탄층 채취를 위한 모암의 제거에 지표면을 자유면으로 하는 일자유면 발파공법을 적용하고 있다. 발파대상이 되는 모암은 주로 이암과 사암이며, 이들은 일축 압축강도가 17-25(MPa) 정도인 매우 연약한 미고결 암층이다. 따라서 발파는 저항선의 이동보다는 이완을 목적으로 수행되며, 광체는 리핑으로 채취된다. 기존 발파공법에서 공당장약량은 80-125(kg/hole), 명목상의 지발간격은 17-67(ms) 정도이다. 지금까지 몇 차례의 현장계측을 통해 지반진동을 측정한 결과 우세주파수는 10Hz 이하로 나타났으며, 150m 이상의 거리에서는 표면파가 뚜렷이 분리되는 현상이 관찰되었다. 이들 표면파는 저주파 진동으로서 원거리까지도 잘 전달되며, 진폭도 커서 채굴적의 경계를 이루는 연약사면들의 안정성을 위협하는 요인이 되고 있다.

파시르 탄광은 개발 이후 15년 이상 채굴이 진행됨에 따라 채굴적의 평균심도가 현재 150m에 달하며, 암반이 연약하여 채굴적을 형성하는 사면들의 안정성을 확보하고 발파의 효율성을 제고할 수 있는 새로운 노천 발파공법에 대한 연구가 착수되었다. 이 연구의 일환으로 대상광산에서 적용되고 있는 기존의 발파공법들에 대한 현장조사(최병희 외, 2006a)와 지반진동의 전파특성에 대한 연구가 수행된 바 있다(최병희 외, 2006b). 본 연구에서는 파시르 탄광의 미고결 암층에서 관찰되는 지반진동의 전파특성을 파악하고, 이를 토대로 진폭을 저감시킬 수 있는 기폭패턴을 설계하여 실규모로 발파함으로써 그 적용성을 시험하였다.

2. 기존의 발파공법과 문제점

2.1 지질개요

파시르 탄광은 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 파시르 탄광에서 나타나는 주요 암석들인 이암과 사암에 대한 물성시험 결과이다(Chung et al., 2003). 표 1에서 보듯이 이 암석들은 강도가 매우 약

1) 한국지질자원연구원

하여 토양(soil)에 가깝다고 할 수 있으며, 건조하면 부서부서 해지고 비가 내려 습윤상태가 되면 진흙과 유사해지는 미고결 암층의 특성을 보인다.

표 1. 파시르 탄광에서 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
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

2.2 기존 발파 패턴

일반적으로 대부분의 노천광산에서는 자유면이 2개인 계단식 발파가 적용되고 있으나 파시르 탄광에서는 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 리핑만으로도 굴착이나 채광이 가능하기 때문에 이 방법이 계속 적용되고 있는 것으로 판단된다. 그림 1은 파시르 탄광의 전형적인 노천 채굴적의 모습이며, 그림 2는 석탄층을 채취하기 위해 주변의 모암을 수직천공 및 발파함으로써 단계적으로 채굴적을 형성해가는 일자유면 발파과정을 도시한 개념도이다.

그림 3은 파시르 탄광에서 적용되고 있는 전형적인 발파패턴의 하나를 보여주고 있는데, 기존의 발파패턴에서는 점화순서의 설계가 체계적인 저항선의 이동보다는 모암을 파괴하여 파쇄도를 좋게 하는데 초점이 맞추어져 있다. 즉, 약장약이 되어 암반이 완전히 파괴되지 않으면 이후의 버럭처리 작업에 지장을 받을 수 있기 때문에 가급적 과장약 설계를 하여 암반을 잘게 부수는데 주안점을 두고 있는 것이다. 하지만 일반적으로 과장약 발파는 파쇄도를 향상시키는 만큼 지반진동을 증가시키는 요인이 된다. 광산개발의 초기단계에서는 파쇄도가 보다 중요한 요소였음에 틀림이 없으나 이제는 채굴적이 150m 이상으로 심부화 되어 채굴적 양안을 이루는 연약사면의 안정성 확보가 더욱 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 따라서 이제는 파시르 탄광에서도 발파의 양면성, 즉 파괴 효율성과 진동 안정성의 확보라고 하는 양립하기 어려운 두 측면 사이의 적절한 조화가 요구되고 있는 시점이라 하겠다.

한편, 파시르 탄광의 연약한 암층을 대상으로 지금까지 적용되어 오고 있는 전형적인 발파패턴에서는 그림 4(b)에서와 같이 공경 200mm, 공깊이 9m, 저항선 8m, 공간격 9m에 공당 장약량은 100kg/hole이 주로 사용되나 지형의 기복에 따라 그림 4(a)와 같이 공깊이 6m에 공당장약량 50kg/hole 등이 혼용되기도 한다. 폭약은 주장약으로는 ANFO(초유폭약)를 사용하는데, ANFO는 뇌관 비기폭성으로 둔감하므로 전폭약(에멀전 폭약, ϕ 32mm)으로 기폭시킨

다. 그리고 적도 부근 열대림의 특성상 연중으로 비가 많아 안전을 위하여 비전기식 뇌관을 사용하고 있다.

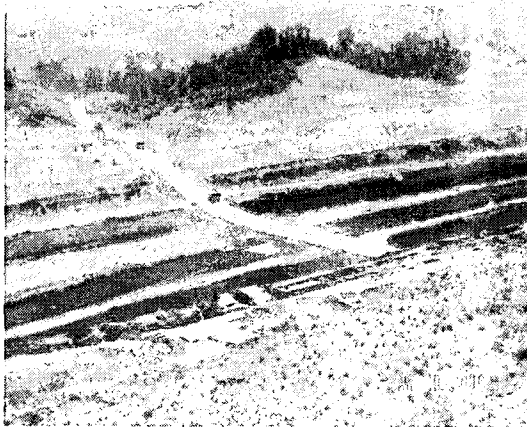


그림 1. 노천 채굴적

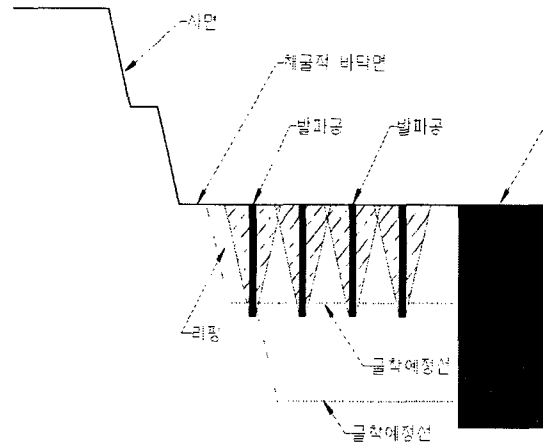


그림 2. 채굴적의 형성과정

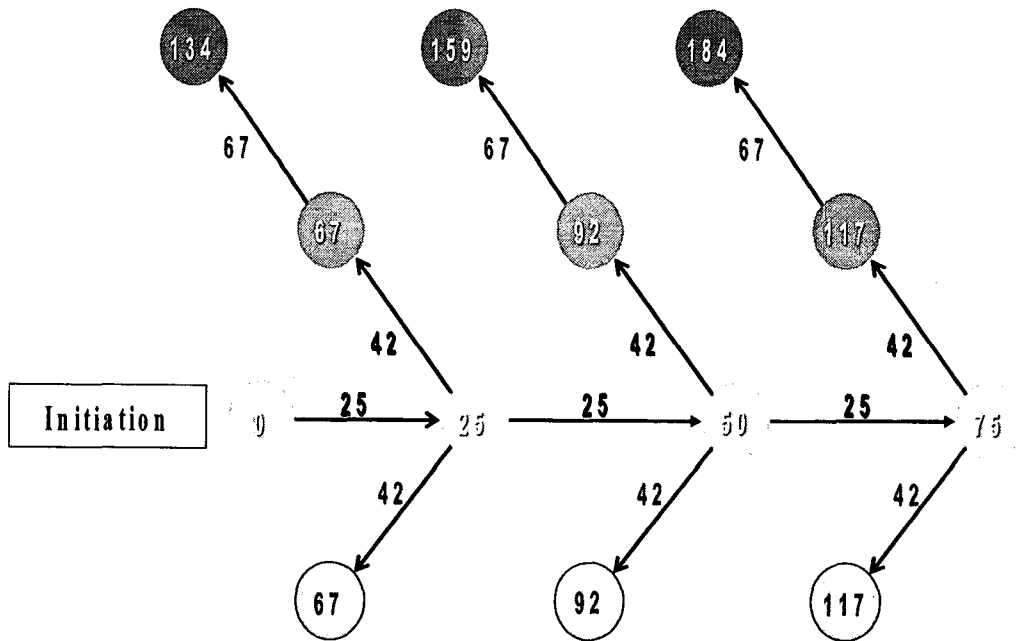


그림 3. 전형적인 발파패턴

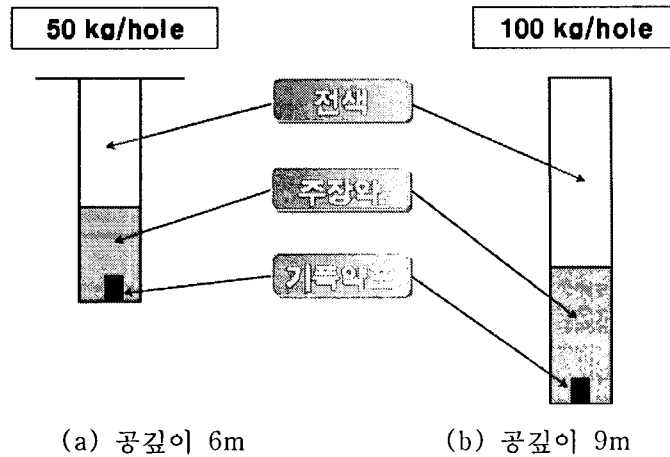


그림 4. 전형적인 장약패턴

2.3 채굴적의 발파안정성 확보문제

그림 5에 보인 바와 같이 현행 발파패턴에서는 지표면을 제외하면 자유면이 없으므로 발파 이완에 이어 리핑 작업이 진행되고 나면 남겨진 부분이 그대로 최종사면의 법면이 되고 있다. 이와 같이 형성된 사면들은 선행발파로 인한 손상영역을 포함하고 있을 확률이 매우 높으며, 지속적인 발파진동을 받거나 강우에 의한 침수가 발생하게 되면 여러 형태의 사면파괴가 발생할 가능성이 더욱 커지게 된다. 현재 파시르 탄광의 규모를 고려하였을 때 수년 이상 유지하여야 할 대규모의 연약사면들이 많으므로 이들 사면에 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 진동제어공법이 아니라 광산의 개발계획과 발파의 효율성까지 모두 고려한 공법이어야 하며, 설계된 공법은 충분한 현장시험 및 진동영향 평가과정을 거쳐서 적용하여야 할 것이다.

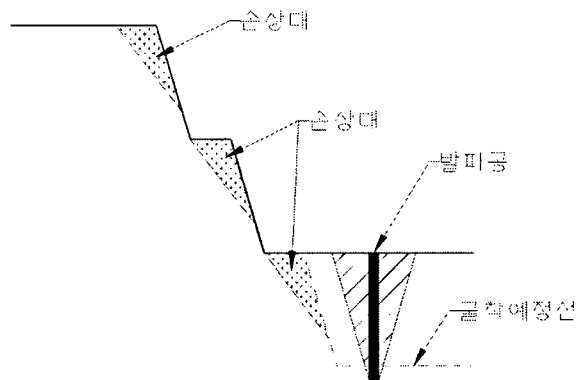


그림 5. 인접사면에서의 손상대 발생

3. 기존 발파공법 하에서의 지반진동의 측정 및 결과분석

3.1 계측방법

지반진동을 측정을 위한 현장계측에서는 지반의 입자속도를 측정하는 상용의 진동계(seismograph)를 관심의 대상이 되는 축선을 따라 적절한 이격거리를 두고 설치함으로써 진동의 전파양상을 파악할 수 있는 측정 자료를 얻을 수 있도록 하였다. 현장에서의 발파조건이나 지반조건은 항상 동일한 것이 아니므로 가능한 한 다양한 조건을 반영할 수 있도록 여러 차례의 계측을 통하여 많은 자료를 획득하는 것이 중요한 요건이 된다. 하지만 해외현장이란 특수성 때문에 지금까지 많은 계측을 할 수 없었지만 총 19 차례의 발파를 대상으로 40점의 유효한 측정 자료를 확보하였다. 그림 6은 현장에서 진동계를 설치하고 있는 작업장경이며, 그림 7은 진동계 센서의 좌표를 얻기 위한 GPS 위치측량 모습이다.



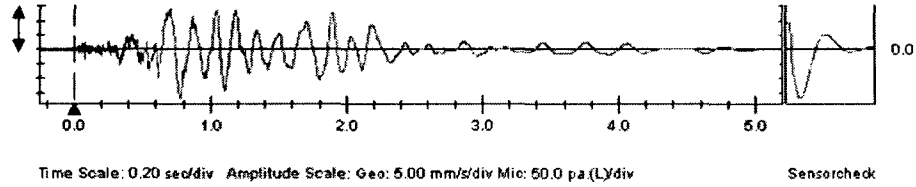
그림 6. 계측기 설치작업



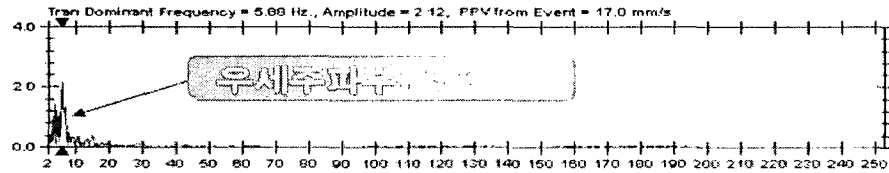
그림 7. GPS 위치측량

3.2 계측

현장에서 측정된 대표적인 지반진동 속도파동을 그림 8(a)에 보였다. 이 파동에 대해 FFT(fast Fourier transform) 기법으로 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform)을 수행하면 그림 8(b)와 같으며, 이 파동의 우세주파수(dominant frequency)는 약 5.9Hz로 나타났다. 주파수의 측면에서 그림 8의 파동은 파시르 탄광에서 측정되는 전형적인 지반진동 속도파동이라 할 수 있으며, 실제로 지금까지 현장에서 계측된 거의 모든 지반진동 속도파동들이 10Hz 이하의 우세주파수를 보이고 있다. 지반진동의 주파수는 구조물의 고유주파수와 관련하여 응답변위를 증폭시킴으로써 구조물의 안정성에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 더욱이 10Hz 이하의 저주파 지반진동은 채굴적을 이루는 연약사면들의 고유주파수와 관련하여 사면의 안정성에 중대한 영향을 미치는 인자로 작용할 수 있다.



(a) 전형적인 지반진동 속도파동



(b) 지반진동 속도파동에 대한 FFT 결과

그림 8. 전형적인 지반진동 속도파동과 우세주파수

3.3 지반진동 속도수준 예측식

파시르 탄광에서 적용되고 있는 전통적인 발파공법에 의해 발생하는 지반진동의 수준을 평가하기 위하여 현행 발파패턴 하에서 지반진동을 계측하여 측정된 PPV 성분에 대한 중위수준 및 자료의 95%를 아래로 포함하는 전파식들을 도출하였다. 그 결과 CRSD를 사용하여 처리한 경우 ($r=0.86$)가 SRSD($r=0.85$)에 비해 상관도가 약간 높은 것으로 나타났으므로 대상지역에서의 일반적인 지반진동의 속도수준을 예측할 때에는 다음 식 (1)와 (2)를 사용할 수 있다.

$$PPV_{95\%} = 1939.25 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.14} \quad (1)$$

$$PPV_{50\%} = 926.33 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.14} \quad (2)$$

지반진동의 PVS 성분의 경우에도 CRSD를 사용하여 처리한 결과($r=0.86$)가 SRSD($r=0.85$)에 비해 약간 더 높은 상관도를 보였기 때문에 대상지역에서 진동속도의 벡터합 성분을 예측할 때에는 다음 식 (3)과 (4)를 사용할 수 있다.

$$PVS_{95\%} = 2464.14 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.17} \quad (3)$$

$$PVS_{50\%} = 1157.90 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.17} \quad (4)$$

4. 지반진동 저감을 위한 기폭패턴의 설계 및 적용시험

4.1 기폭패턴 설계

파시르 탄광은 지반진동의 우세주파수가 10Hz 이하로 관찰되는 전형적인 저주파 현장 (low-frequency site)이라 할 수 있다. 이와 같은 저주파 현장에서는 전통적인 8ms 지발기준으로는 장약을 효과적으로 분리시키기 어렵다. 이 이론에 근거하여 파시르 탄광에서의 우세주파수 대역을 3-8(Hz)로 간주한다면 이상적인 정현파를 가정하였을 때 지반진동의 증폭을 배제할 수 있는 지발시간은 31-83(ms)로 계산된다(최병희 외, 2007). 따라서 기폭패턴의 설계과정에서는 가급적 지발시간을 길게 설정하는 것이 유익할 것이나 현실적으로는 상용뇌관의 규격과 컷오프(cut-off) 현상, 작업상의 편의성 등의 문제가 복합적으로 관련되어 있어 모든 발파공 상호간에 대하여 수십 ms 이상의 지발시간을 부여하는 데는 제약이 따르게 마련이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 불규칙한 점화순서를 조정함으로써 저항선의 이동이 체계적으로 이루어질 수 있도록 기폭패턴을 개선하는 데에 주안점을 두었다. 개선된 패턴은 일자유면 발파뿐만 아니라 계단식 발파에도 그대로 적용될 수 있는 것으로 전형적인 설계패턴(TB 01)을 그림 9에 보였다. 이 패턴은 기폭점(0ms)을 향하여 위, 아래의 저항선이 순차적으로 이동되는 구조로 되어 있다. 그림 9에 보인 기폭패턴에서는 지반진동의 증폭 내지 상쇄 현상을 관찰할 목적으로 의도적으로 상하의 지발시간을 같게 부여하여 대칭구조로 설계하였으나 다른 패턴들에서는 비대칭으로 설계함으로써 향후 대비가 될 수 있도록 하였다. 계단이 개설되어 있는 곳에서는 그림 10과 같이 시험패턴(TB 01)의 상부나 하부의 절반만 적용하며, 일자유면 발파의 경우에도 탄층의 위치에 따라 탄층에서 먼 쪽으로의 정향발파를 위해 이와 같은 절반의 패턴만을 사용할 수 있다. 한편, 그림 11은 이 기본패턴을 토대로 현장에서 실제 시험발파에 적용한 패턴이다.

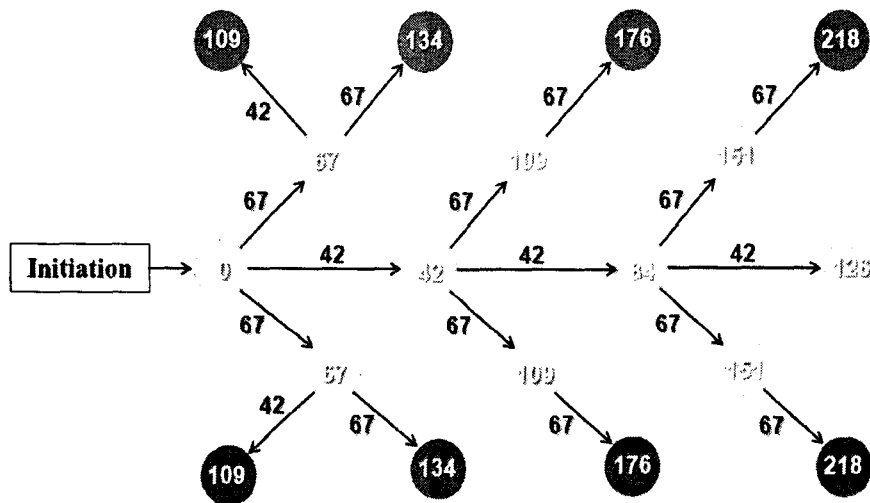


그림 9. 기폭패턴 설계일례 (TB 01)

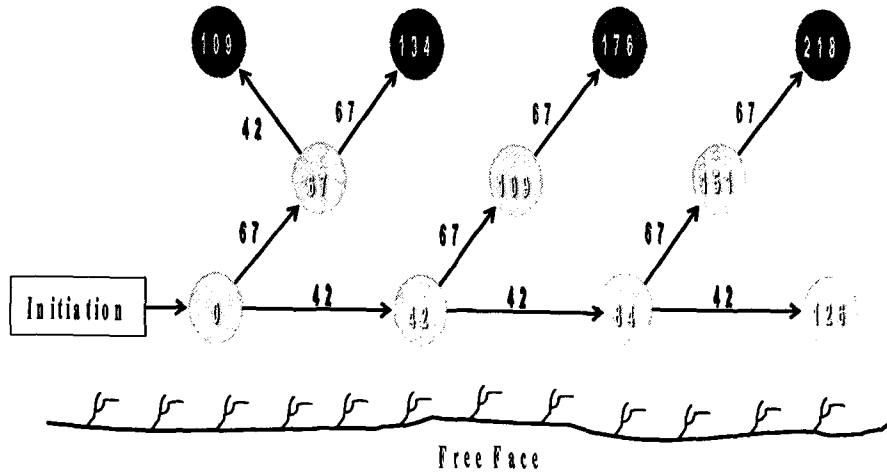


그림 10. 설계된 기폭패턴(TB 01)의 계단발파에의 적용

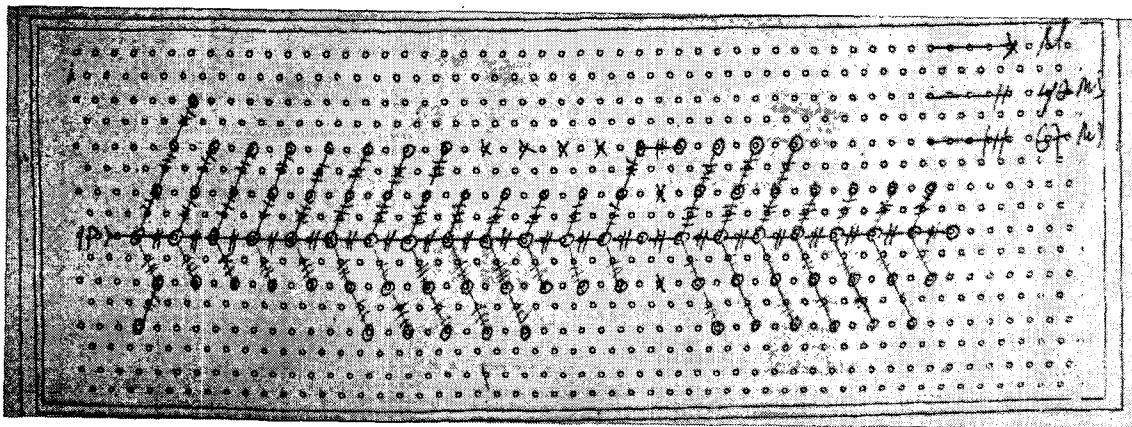


그림 11. 기폭패턴(TB 01)의 현장적용 실례

4.2 시험발파 결과분석

시험패턴(TB 01)과 몇 가지 변형패턴들을 현장에서 실규모로 시험발파한 결과 측정된 지반진동의 수준을 기존발파의 결과들과 비교하여 보았다. 그림 12는 지반진동의 PPV 성분을 도시한 결과이며, 그림 13은 PVS 성분에 대한 결과그래프이다. 두 그래프에서 실선은 기존발파에 의한 지반진동의 중위수준(50%)이며, 점선은 시험발파에 의한 중위수준이다. 시험발파의 경우에는 경험적으로 정규근사가 가능한 30점 이상의 측정자료를 확보하지 못한 상태이지만 기존발파에 비해 지반진동의 저감효과는 뚜렷하게 나타나고 있다. 현재 파시르 탄광에서는 5개 이상의 시험패턴을 설정해 놓고 지속적인 시험 및 계측을 수행하고 있으므로 향후 이들에 대한 결과를 보다 상세하게 파악할 수 있을 것이다.

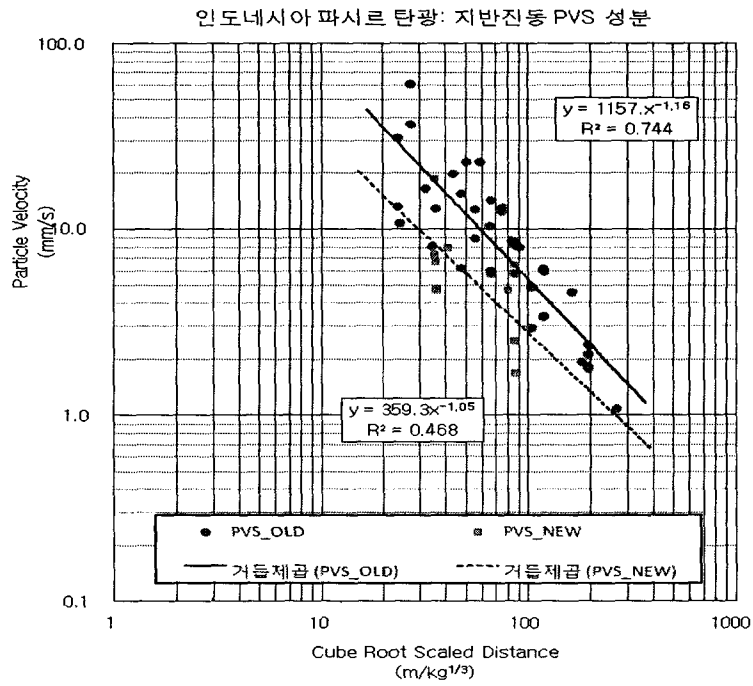


그림 13. 기존발파와 시험발파의 결과대비: PVS 분석

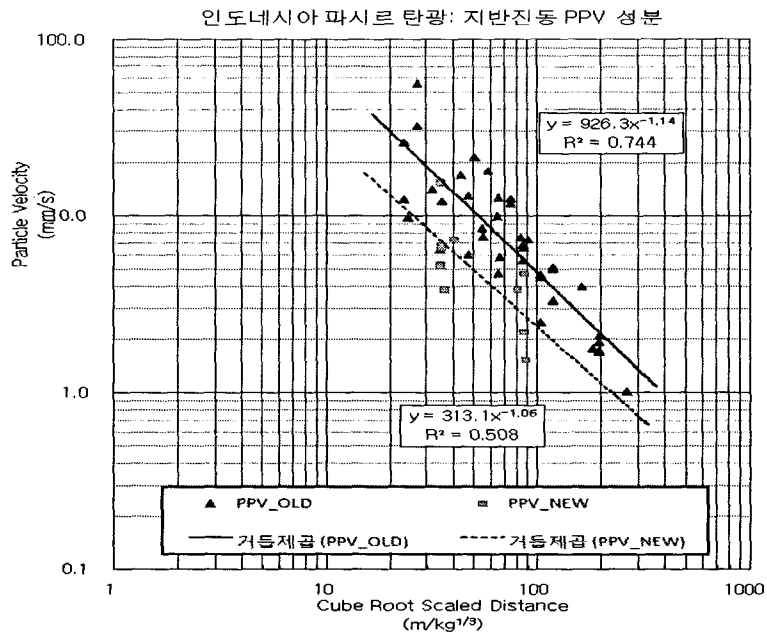


그림 12. 기존발파와 시험발파의 결과대비: PPV 분석

5. 결 론

인도네시아 파시르 탄광은 남북방향으로 약 16km에 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 붕괴할 수 있는 위험성이 있으며, 발파의 효율성이 낮아 경제성을 저하시키는 요인으로도 작용할 수 있다. 이와 같은 기존의 발파패턴과 광산의 규모 및 개발방법 등을 고려하였을 때 수년 이상 유지해야 할 대규모 사면들에 대한 진동안정성을 확보하기 위해서는 진동영향을 고려한 새로운 발파공법을 개발할 필요성이 있다. 본 연구에서는 진동제어를 위한 새로운 발파공법 개발의 일환으로 대상광산에서 기존에 적용하고 있는 기폭패턴을 변경하여 현장에서 실규모로 시험발파를 실시하고, 발생한 지반진동을 측정하여 그 결과를 기존발파와 대비하여 분석하였다. 분석결과에 의하면 새로운 기폭패턴을 적용하였을 때 발생하는 지반진동 수준이 기존 패턴을 적용한 경우에 비하여 더 낮은 것으로 나타났다. 하지만 해외현장이란 특수성 때문에 아직까지는 충분한 자료가 확보되지 않아 결과를 명확히 제시하기 어려우나 대상광산에서는 현재 5개 이상의 시험발파 기본패턴을 설정해 두고 지속적으로 지반진동을 측정하고 있으므로 앞으로 이들에 대한 자료가 추가적으로 확보되면 새로운 기폭패턴에 대한 진동저감 효과를 보다 상세하게 보고할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연사업인 '대규모 석탄노천광의 연약사면 안정성 및 생산성 향상 연구' 과제에서 지원을 받았으며, 조사과정에서 지원을 아끼지 않으신 인도네시아 현장의 KIDECO 임직원 여러분에게 감사드린다.

참고문헌

1. 최병희, 류동우, 선우춘, 2006a, 파시르 탄광에서의 채탄발파공법에 대한 문제점 분석 및 개선방안 연구, 대한화약발파공학회지, Vol. 24, No. 1, pp. 57-62.
2. 최병희, 류동우, 선우춘, 2006b, 파시르 탄광에서의 발파진동의 전파특성 분석, 대한화약발파공학회지, Vol. 24, No. 2, pp.51-63.
3. 최병희, 류동우, 선우춘, 2007, 대규모 노천광 발파에서 적정 지발간격의 설정을 위한 지반진동의 전파특성 분석, 제4회 한화발파기술심포지움 논문집, pp. 50-66.
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.