

## 인도네시아 파시르 탄광에서의 노천발파로 인한 지반진동의 발생 및 전파특성 분석

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

### 1. 서론

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 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. 이에 따라 향후 채굴적을 형성하는 사면들의 안정성을 확보하고 발파의 효율성을 제고할 수 있는 새로운 발파공법에 대한 연구가 착수되었다. 본 연구의 일환으로 현행 발파공법들에 대한 현장조사가 수행된 바 있으며(최병희 외, 2006), 그 후속연구로서 진동제어형 공법설계가 이루어질 수 있도록 현장에서 지반진동을 측정하였고, 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 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). 표 1로부터 알 수 있듯이 파시르 탄광에서 나타나는 암석들은 강도가 매우 약하여 토양(soil)에 가깝다고 할 수 있으며, 건조하면 부서부서해지고 비가 내려 습윤 상태가 되면 진흙과 유사해지는 특성을 보인다.

---

1) 한국지질자원연구원

2) P.T. KIDECO JAYA AGUNG

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

## 2.2 현행 발파공법 및 계측개요

일반적으로 대부분의 노천광산에서는 2 자유면 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 채택하게 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 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 모암 구획은 발파로 이완시킨 후 리핑으로 제거하며, 모암의 제거에 따라 드러나는 탄층은 주로 리핑 작업을 통해 채취하게 된다.

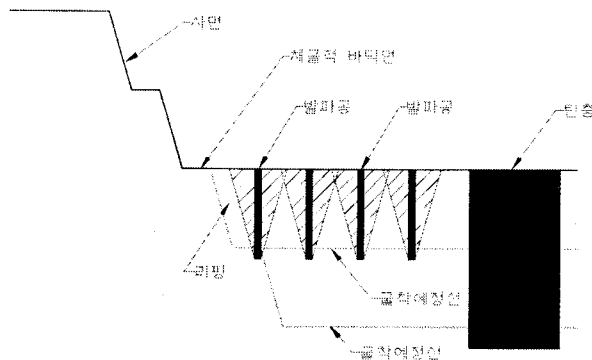


그림 1. 채굴적의 형성과정

이와 같이 파시르 탄광에서 채굴적을 형성하거나 광체주변의 모암을 제거하기 위해 적용되는 전형적인 발파패턴은 그림 2와 같다. 각 발파의 대상구획은 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 $\varnothing$ )으로 기폭시킨다. 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.

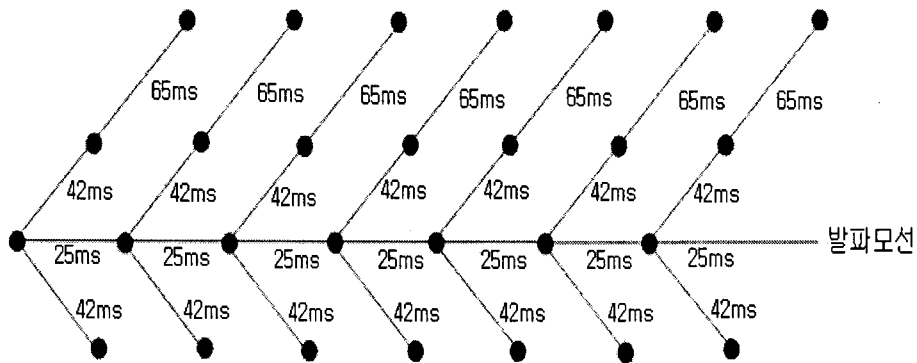


그림 2. 전형적인 발파패턴

대상지역에서 모암을 제거하기 위한 대규모 노천발파로 발생하는 지반진동의 전파특성을 파악하기 위하여 현행 발파조건 하에서 계측을 수행하였다. 그림 3은 파시르 탄광의 전형적인 노천 채굴적의 모습이며, 그림 4는 주장약인 ANFO를 장전하고 있는 모습이다.

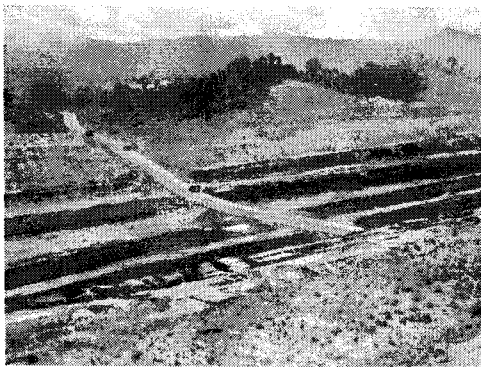


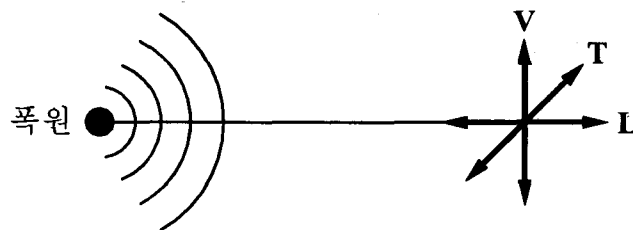
그림 3. 노천 채굴적



그림 4. 장약작업

## 2.2 계측장비 및 계측방법

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



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

그림 5. 진동의 측정성분

기본적인 장비의 구성은 그림 5에서와 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, 최대벡터합속도 및 최대발파풍압 (dB 또는 psi단위)에 대한 정보도 출력할 수 있다.

계측장비는 관심의 대상이 되는 축선을 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 7월중에, 2차 계측은 8월중에 실시하였으며 총 12 차례의 발파를 대상으로 현장계측을 실시하였다. 그림 6 및 7은 계측기를 설치하고 있는 작업광경과 설치된 계측기의 모습을 보여준다.

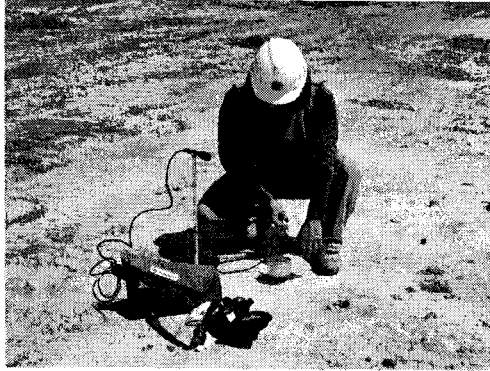


그림 6. 계측기 설치작업

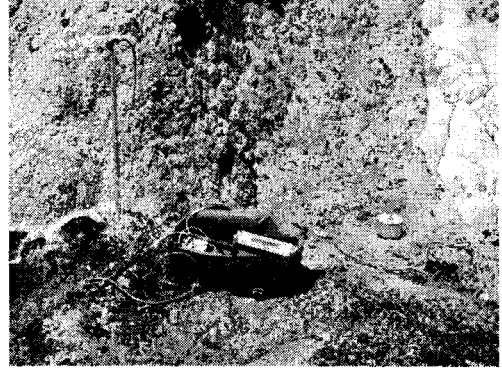


그림 7. 설치된 계측기

### 2.3 계측결과

계측결과를 정리하면 표 2와 같다. 표에서 폭원거리는 폭원에서 측정점까지의 직선거리(m)이고, 장약량은 계측이 이루어진 당해 발파에서 최대진폭을 기록한 지발당 최대장약량(kg)을 의미한다. L, T 및 V는 각각 계측된 진동치의 폭원방향성분, 폭원방향과 직교하는 수평방향성분, 폭원방향과 직교하는 연직방향성분의 최대치를 속도단위인 mm/s로 표시한 것이며, Vsum은 이들 직교 세 성분들의 실시간(real-time) 최대벡터합성분을 나타낸다.

## 3. 자료처리

### 3.1 처리방법

#### (1) 발파로 인한 지반진동수준의 예측법

발파진동의 크기에 영향을 주는 변수들을 대별하면 i) 화약의 종류와 장약량, ii) 폭원에서 측정점까지의 거리, iii) 암반의 역학적, 구조적 특성, iv) 천공패턴, 장약방법, 점화순서 등의 발파방법 등이며, 지역적인 특성과 발파조건에 따라서도 크기가 달라지므로 대상지역별로 발파조건에 따라 지반진동을 실측하여 그 전파특성을 도출하여야 한다.

표 2. 파시르 탄광에서의 지반진동 측정치

계측기	폭원거리 (m)	지발당 최대장약량 (kg/delay)	L	T	V	Vsum
			(mm/s)	(mm/s)	(mm/s)	(mm/s)
5150	398	100	5.46	6.86	5.97	8.13
5150	400	100	5.08	6.60	6.10	8.42
10490	1234	100	0.51	0.38	1.02	1.09
10490	1040	93	1.79	0.98	1.02	1.94
10490	307	100	3.03	4.52	5.81	5.94
5150	395	98	5.59	3.68	3.17	5.77
10490	750	98	3.70	3.97	3.17	4.61
10490	210	113	11.40	17.00	9.64	19.80
5150	313	113	7.03	9.89	6.14	10.40
10490	200	88	8.46	12.10	8.68	12.90
5150	310	88	7.65	6.86	6.57	8.92
10490	540	105	7.37	3.84	2.30	7.92
5150	612	105	2.51	2.37	1.54	2.95
5150	220	83	18.50	13.70	21.40	22.90
10490	300	135	18.00	13.00	7.54	23.00
10490	200	98	5.97	4.51	6.46	8.10
10490	140	98	6.13	8.73	9.75	10.80

가. 일반식

지반진동의 수준을 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 폭원거리를 주요 변수로 하여 다음 식과 같이 표현할 수 있다(Dowding, 1996).

$$PPV = k D^a W^c \tag{1}$$

식에서,

PPV = 최대진동속도(Peak Particle Velocity), cm/s 또는 mm/s,

D = 폭원거리, m

W = 지발당 최대장약량, kg/delay

k, a, c = 자유면 상태, 화약의 성질, 압질, 발파방법 등에 따르는 상수

나. 환산거리를 이용한 식

상기의 일반식은 거리를 장약량으로 환산한 형태로서 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

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

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

식에서,

$n$  = 감쇠지수

$k$  = 화약특성, 발파방법, 암반특성 등에 따라 결정되는 상수

거리를 장약량의 자승근으로 환산한 형태의 식 (2)를 자승근 환산거리식(Siskind et al., 1980)이라 하며, 삼승근으로 환산한 형태의 식 (3)을 삼승근 환산거리식(Ambraseys & Hendron, 1968; Dowding, 1996)이라고 한다. 환산거리를 이용한 식은 로그-로그 그래프 상에서는 직선으로 나타나므로 매우 실용적이다.

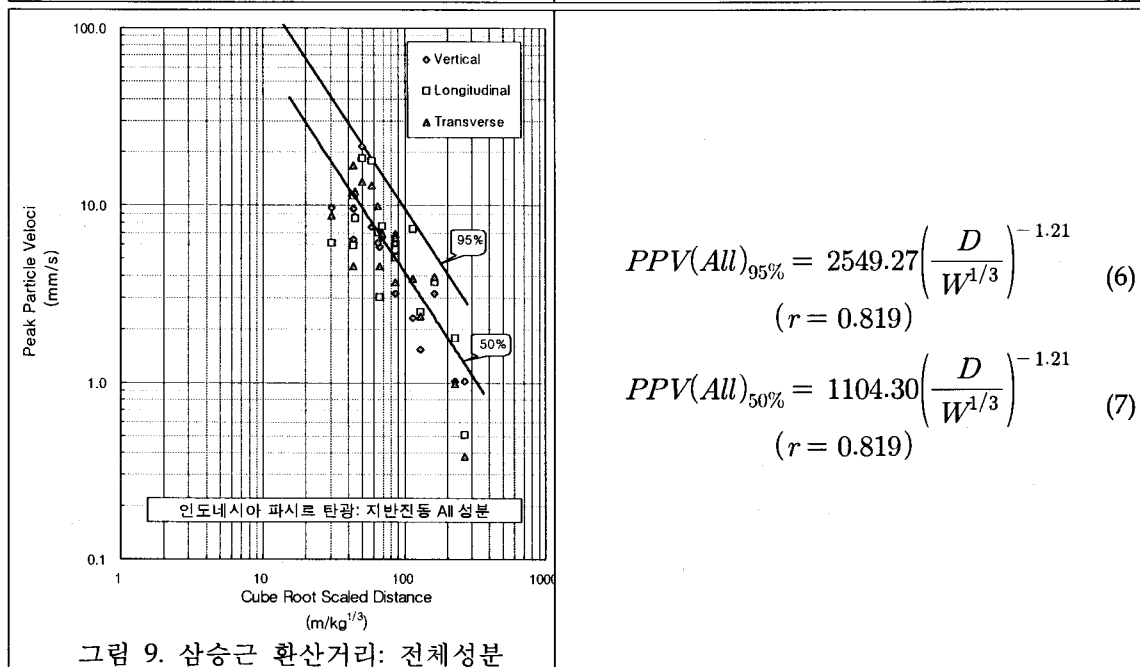
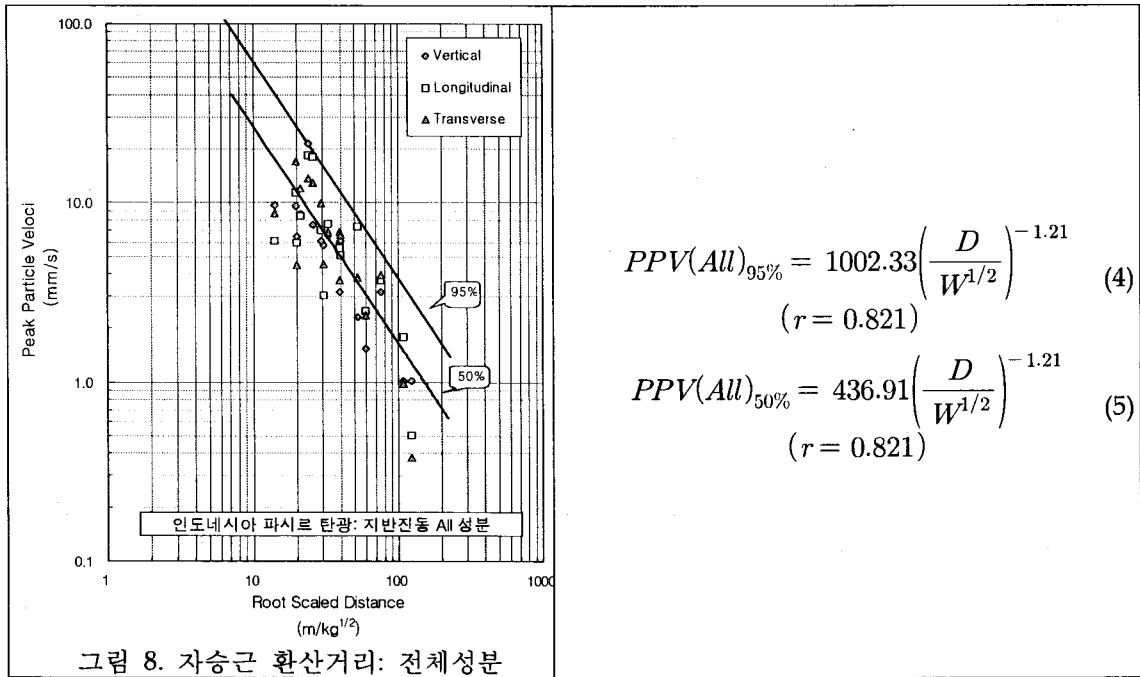
## (2) 진동수준 예측식

발파진동의 전파특성을 나타내는 예측식은 계측된 현장자료로부터 회귀분석을 통하여 각각의 상수를 구한 후 적합도가 높은 식을 선택하는 것이 일반적이다. 본 연구에서도 계측자료를 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리로 처리하여 구한 전파식들 가운데 적합도가 높은 자승근 환산거리식을 진동예측식으로 채택하였다. 지반진동의 전체성분에 대해 진동의 중위수준(50%)을 나타내는 식과 측정된 자료의 95%를 포함하는 식(90% 신뢰구간의 상한)을 각각 도출하였다.

## 3.2 처리결과

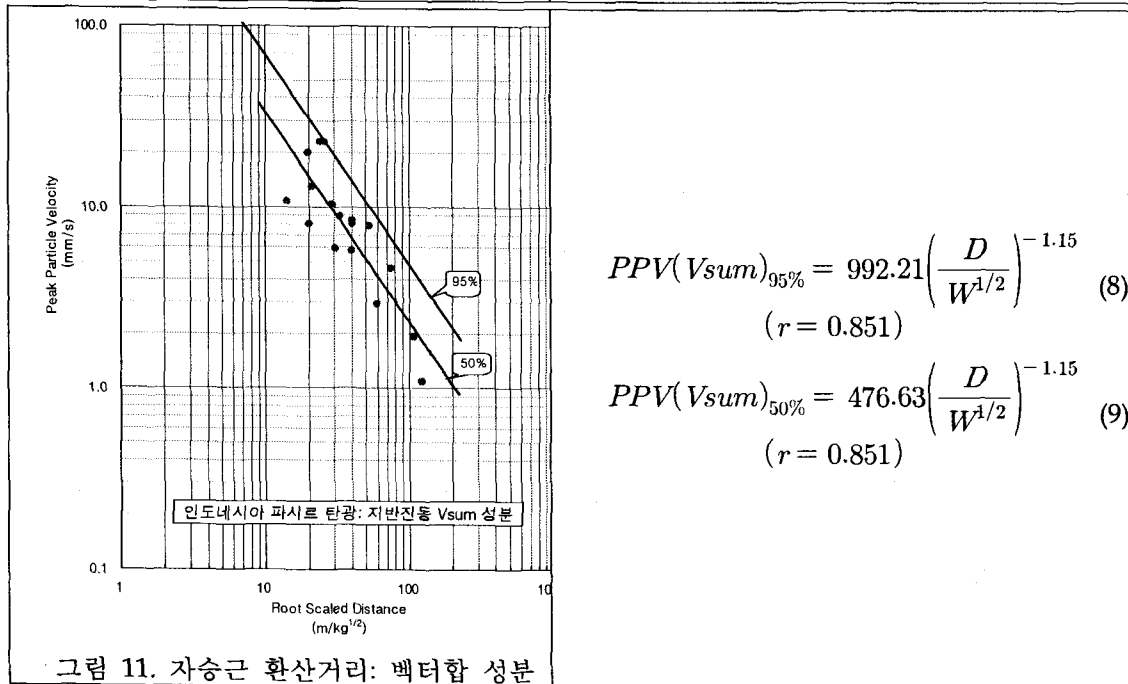
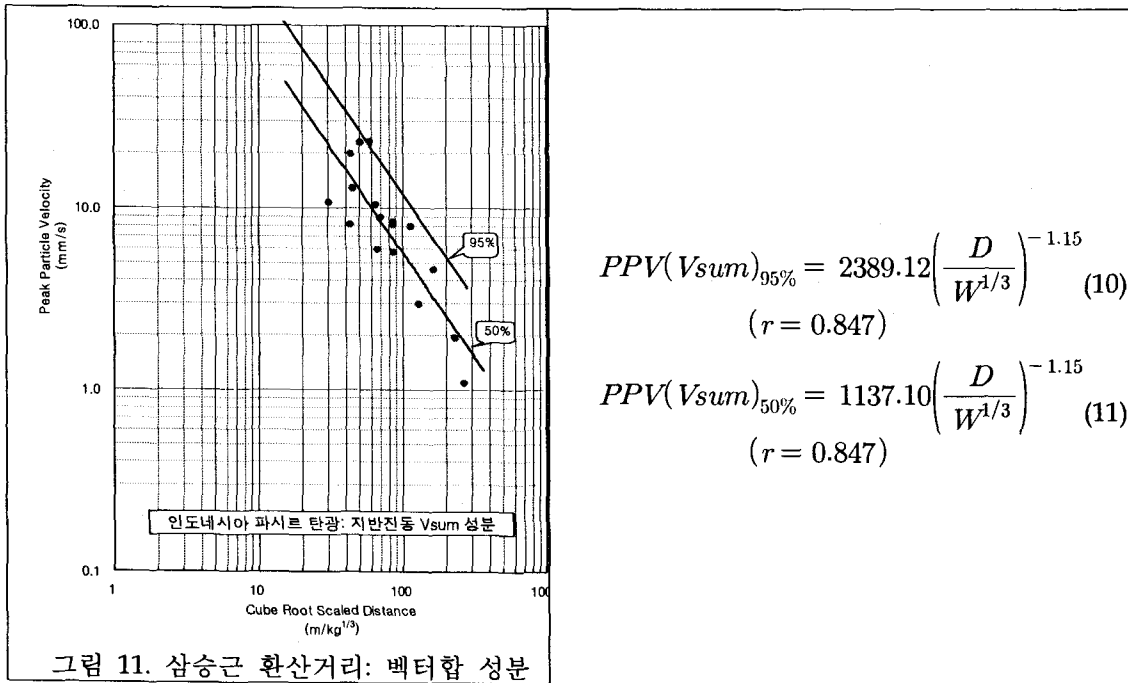
지금까지 획득된 진동자료의 수는 많지 않은 편이나 향후 지속적인 측정이 이루어 질 것이므로 본 논문에서는 표 2에 제시한 측정치를 대상으로 자료를 처리하였다. 먼저, 그림 8은 세 방향의 진동성분들(L, T, V 성분) 전체를 대상으로 자승근 환산거리로 처리한 그래프이며, 도출된 진동 전파식들은 식 (4) 및 (5)와 같다. 식 (4)는 측정된 자료의 95%를 포함하는 식(90% 신뢰구간의 상한)이며, 식 (5)는 지반진동의 전체성분에 대해 진동의 중위수준(50%)을 나타내는 식이다. 마찬가지로 삼승근 환산거리로 처리한 결과를 그림 9와 식 (6) 및 (7)에 보였다.

한편, 세 방향의 진동성분들의 최대치들을 실시간 합성한 성분인 벡터합(vector sum) 성분은 주어진 지역에서 나타나는 진동값들을 최대수준으로 예측할 수 있으므로 이들 벡터합



성분만을 대상으로 자승근 환산거리로 처리한 그래프를 그림 10에 보였으며, 도출된 진동 전파식들은 식 (8) 및 (9)와 같다. 마찬가지로 삼승근 환산거리로 처리한 결과를 그림 11과





식 (10) 및 (11)에 보였다.

#### 4. 결과고찰

##### 4.1 진동수준 예측식

파시르 탄광에서 대규모 노천발파로 발생하는 최대진동수준을 평가하기 위하여 현행 발파패턴 하에서 지반진동을 계측하여 측정된 전체 성분에 대한 중위수준 및 자료의 95%를 나타내는 전파식들을 도출하였다. 그 결과 그림 8 및 9에서 보듯이 자승근 환산거리를 사용하여 처리한 경우가 삼승근 환산거리에 비해 적합도가 높은 것으로 나타났으므로 파시르 탄광지역에서의 일반적인 지반진동의 속도수준을 예측할 때에는 다음 식 (12) 및 (13)을 사용할 수 있다.

$$PPV(All)_{95\%} = 1002.33 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.21} \quad (12)$$

$$PPV(All)_{50\%} = 436.91 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.21} \quad (13)$$

지반진동의 벡터합 성분의 경우에도 자승근 환산거리를 사용하여 처리한 결과가 보다 높은 적합도를 보였기 때문에 파시르 탄광지역에서 진동속도의 벡터합 성분을 예측할 때에는 다음 식 (14) 및 (15)를 사용할 수 있다.

$$PPV(Vsum)_{95\%} = 992.21 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.15} \quad (14)$$

$$PPV(Vsum)_{50\%} = 476.63 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.15} \quad (15)$$

##### 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 12와 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 침수가 발생하게 되면 여러 형태의

사면파괴가 발생할 가능성이 더욱 커지게 되는 것이다.

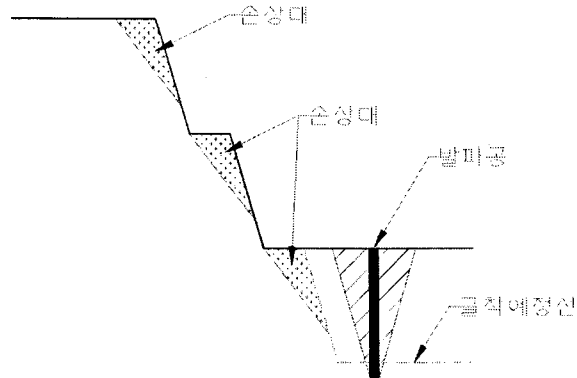


그림 12. 인접사면에서의 손상대 발생

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 있으며, 이를 위한 진동영향의 평가과정에서는 사면의 안정성을 최우선적으로 고려하여 대상광산에서 계측된 결과로부터 도출된 예측식들 가운데 가장 높은 수준의 진동치를 예측하는 벡터합 성분들의 95%를 포함하는 다음 식을 진동영향 평가식으로 사용할 수 있다.

$$PPV(V_{sum})_{95\%} = 992.21 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.15} \quad (16)$$

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

### 5. 결론

본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 인도네시아 파시르 탄광에서 적용되고 있는 대규모 노천발파에 있어서의 천공, 장약 및 점화 패턴에 대한 현장조사를 수행하였다.
- 2) 파시르 탄광지역에서 발파로 발생하는 지반진동의 발생 및 전파 특성을 평가하기 위하여 11

최병희, 류동우, 선우춘, 이종범

차례의 노천발파 및 1 차례의 시험발파를 대상으로 현장에서 진동계측을 수행하였다. 측정된 자료들은 통계기법을 사용하여 처리함으로써 대상지역에서 발생하는 지반진동의 최대수준을 예측할 수 있는 예측식들을 유도하였다.

3) 파시르 탄광의 채굴적 사면들의 발파안정성을 평가하기 위한 진동영향 평가식으로는 보수적인 적용기준으로서 벡터합 성분의 95%를 포함하는 식을 사용할 것을 제안하였다.

▷ 파시르 탄광지역에서의 사면안정성 평가를 위한 진동영향 평가식:

$$PPV(V_{sum})_{95\%} = 992.21 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.15}$$

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

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 최병희, 류동우, 선우춘, 2006, 파시르 탄광에서의 채탄발파공법에 대한 문제점 분석 및 개선방안 연구, 대한화약발파공학회지, 제24권 1호, pp.57-62.
2. Ambraseys, N. R., and & Hendron, A. J., 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. 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.
4. Dowding, C. H., 1996, Construction Vibrations, Prentice Hall, pp.45-51, pp.54-55.
5. ISEE, 1998, Blasters' Handbook, 17th ed., Int. Soc. of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, USA, pp. 319-340.
6. 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.