대규모 노천광에서의 지반진동제어 발파설계를 위한 현장계측 및 결과분석

최병희[1] · 류동우[1] · 선우춘[1]

1. 서 론

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 지반진동은 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. 이 연구의 일환으로 대상광산에서 적용되고 있는 현행 발파공법들에 대한 현장조사(최병희 외, 2006a)와 지반진동의 전파특성 분석에 대한 연구를 일부 수행한 바 있다(최병희 외, 2006b). 본 논문은 그 이후 수행된 연구의 결과를 정리한 것으로 추가적인 현장계측을 통해 기존의 자료처리 결과에 대한 신뢰도를 더욱 향상시킴으로써 앞으로 수행될 대상지역에서의 연약사면에 대한 지반진동 영향평가 과정에서 본 연구결과를 직접 적용할 수 있도록 하였다.

2. 지반진동의 계측 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

1) 한국지질자원연구원

석들은 강도가 매우 약하여 토양(soil)에 가깝다고 할 수 있으며, 건조하면 푸석푸석해지고 비가 내려 습윤 상태가 되면 진흙과 유사해지는 특성을 보인다.

표 1. 파시르 탄광에서 나타나는 주요 암석들의 물성

암종	밀도 (kg/㎥)	탄성파 속도 (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

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 왼편의 모암구획은 발파로 이완시킨 후 리핑으로 제거하며, 모암의 제거에 따라 드러나는 탄층은 주로 리핑 작업을 통해 채취하게 된다.

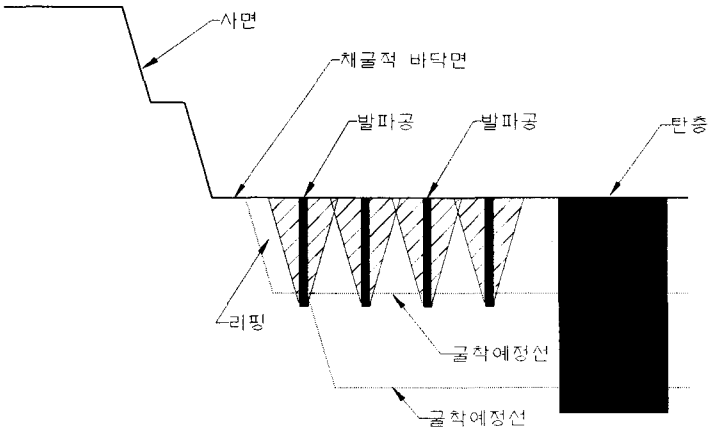


그림 1. 일자유면 발파와 채굴적의 형성

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). 기폭방법은 비전기식 뇌관을 이용한 지발발파를 적용하고 있으며, 그림 2에서 보듯이 광체의 주향방향을 따라 점진적으로 기폭시킨다. 파시르 탄광에서 적용되고 있는 전형적인 발파에서는 그림 3(b)에서와 같이 발파공의 직경 200 mm, 공깊이 9 m, 저항선 8 m, 공간격 9 m 정도에 공당장약량은 100 kg이 주로 사용되나 경우에 따라서는 그림 3(a)에서와 같이 공깊이 6 m에 공당장약량 50 kg이 혼용되기도 한다. 폭약은 주장약으로 ANFO(초유폭약)를 사용하며, ANFO는 뇌관 비기폭성으로 둔감하므로 별도의 전폭약(에멀젼 폭약, ϕ32mm)을 사용하여 기폭시킨다.

대상지역에서 모암을 제거하기 위한 대규모 노천발파로 발생하는 지반진동의 전파특성을 파악하기 위하여 현행 발파조건 하에서 계측을 수행하였다. 그림 4는 파시르 탄광의 전형적인 노천 채굴적의 모습이며, 그림 5는 주장약인 ANFO를 장전하고 있는 모습이다.

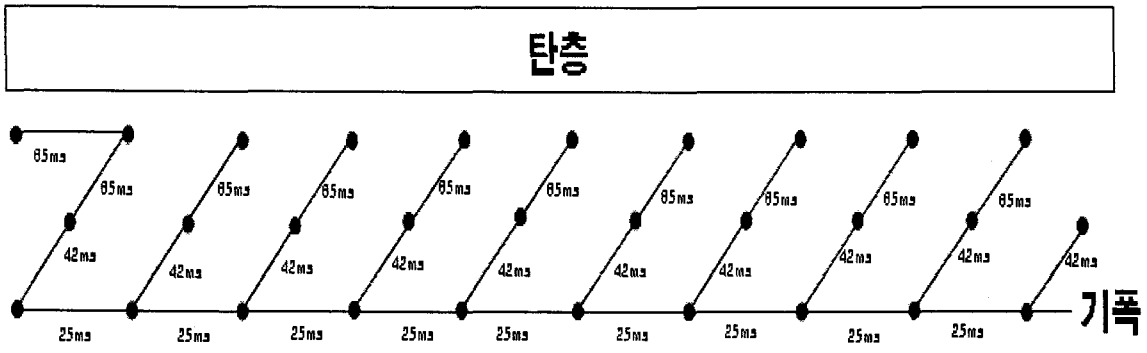
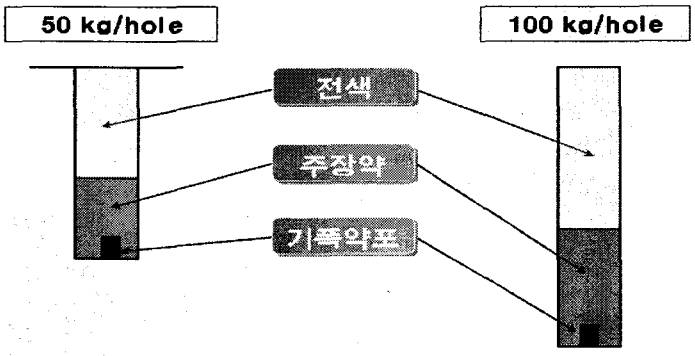


그림 2. 전형적인 발파패턴



(a) 공깊이 6 m (b) 공깊이 9 m

그림 3. 전형적인 장약패턴

그림 4. 노천 채굴적

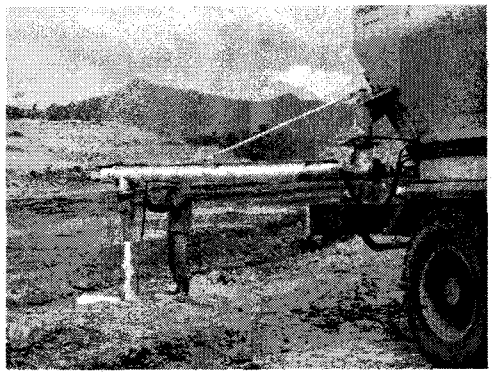


그림 5. 장약작업

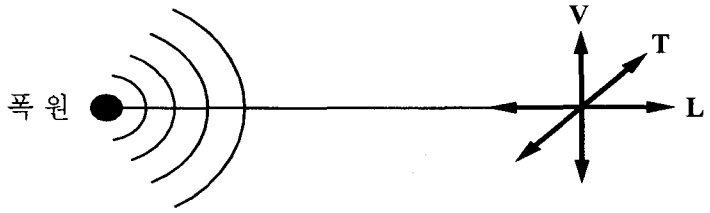
2.3 계측장비 및 계측방법

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

기본적인 장비의 구성은 그림 6에서와 같이 폭원에서부터 진행되어 오는 진동성분의 폭원 방향에 대한 수직방향(vertical), 진행방향(longitudinal) 및 접선방향(transverse) 등 세 방향의 지반진동을 감지하는 삼축 변환기(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 psi 단위)에 대한 정보도 출력할 수 있다.

계측장비는 관심의 대상이 되는 측선을 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, 3차 계측은 2007년 3월 중에 실시하였으며 총 19 차례의 발파를 대상으로 현장계측을 실시하였다. 그림 7은 계측기를 설치하고 있는 작업광경이며, 그림 8은 계측기 센서에 대한 GPS 위치측량 모습이다.



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

그림 6. 진동의 측정성분

그림 7. 계측기 설치작업

그림 8. GPS 위치측량

2.4 계측결과

계측결과를 정리하면 표 2와 같다. 표에서 폭원거리는 폭원에서 측점까지의 직선거리(m)이고, 최대 지발당 장약량은 계측이 이루어진 당해 발파에서 최대진폭을 기록한 최대 지발당 장약량(kg/delay)을 의미한다. Long, Trans 및 Vert는 각각 당해 발파에서 계측된 지반진동의 폭원방향성분, 폭원방향과 직교하는 수평방향성분, 폭원방향과 직교하는 연직방향성분의 최대치를 속도단위인 mm/s로 표시한 것이며, PPV(peak particle velocity)는 이들 세 성분들 가운데 최대치를 말하며, Vsum은 이들 세 성분들을 실시간(real-time)으로 합성한 최대 벡터합 성분을 나타낸다.

표 2. 파시르 탄광에서의 지반진동 속도 측정결과

측점	폭원거리 (m)	최대 지발당 장약량 (kg/delay)	Long (mm/s)	Trans (mm/s)	Vert (mm/s)	PPV (mm/s)	Vsum (mm/s)
5150	398	100	5.46	6.86	6.0	6.86	8.13
5150	400	100	5.08	6.60	6.10	6.60	8.42
10490	1234	100	0.51	0.38	1.02	1.02	1.09
10490	1040	186	1.79	0.98	1.02	1.79	1.94
10490	307	100	3.03	4.52	5.81	5.81	5.94
5150	395	98	5.59	3.68	3.17	5.59	5.77
10490	750	98	3.70	3.97	3.17	3.97	4.61
10490	210	113	11.40	17.00	9.64	17.00	19.80
5150	313	113	7.03	9.89	6.14	9.89	10.40
10490	200	176	8.46	12.10	8.68	12.10	12.90
5150	310	176	7.65	6.86	6.57	7.65	8.92
10490	540	210	7.37	3.84	2.30	7.37	7.92
5150	612	210	2.51	2.37	1.54	2.51	2.95
5150	220	83	18.50	13.70	21.40	21.40	22.90
10490	300	135	18.00	13.00	7.54	18.00	23.00
10490	200	196	5.97	4.51	6.46	6.46	8.10
10490	140	196	6.13	8.73	9.75	9.75	10.80
5151	305	100	4.67	4.41	3.60	4.67	5.74
5150(1)	550	100	3.35	2.52	2.86	3.35	3.36
5150(2)	550	100	3.30	2.56	2.65	3.30	3.41
5207	126	100	32.40	25.00	27.40	32.40	36.50
5151	305	100	12.70	10.90	5.95	12.70	14.40
5150(1)	550	100	4.43	4.32	4.98	4.98	5.90
5150(2)	550	100	4.24	4.57	5.08	5.08	6.08
5207	126	100	56.50	25.10	53.30	56.50	60.60
5151	237	125	4.35	4.48	6.02	6.02	6.16
5207	117	125	12.40	5.71	9.52	12.40	13.20
5151	237	125	10.70	9.05	13.00	13.00	15.70
5207	117	125	26.00	14.00	22.10	26.00	31.00
5151	484	100	2.52	4.49	2.24	4.49	4.88
5150(1)	905	100	0.97	1.59	1.75	1.75	1.78
5150(2)	905	100	0.95	1.70	1.56	1.70	1.83
5151	484	100	2.46	4.64	3.33	4.64	4.88
5150(1)	905	100	1.16	1.73	2.10	2.10	2.37
5150(2)	905	100	1.51	1.56	1.95	1.95	2.12
5207	148	100	13.10	7.24	14.10	14.10	16.50
5150(1)	345	100	12.50	8.68	3.87	12.50	13.10
5150(2)	345	100	11.60	8.51	3.64	11.60	12.40
5207	255	100	9.52	7.11	8.51	8.51	12.80
5151	388	100	5.91	7.52	6.08	7.52	8.68

3. 자료처리

3.1 처리방법

일반적으로 발파로 발생되는 지반진동은 지역적인 특성과 발파조건에 따라 그 크기가 달라지므로 대상지역별로 발파조건에 따라 지반진동을 실측하여 그 전파특성을 도출하여야 한다. 하지만 수없이 많은 영향변수들을 단순한 하나의 식에 반영하여 지반진동의 수준을 예측하는 것은 지극히 어려운 문제이므로 지반진동의 수준을 실무적으로 예측하는 데에는 주로 여러 연구자들이 제시한 경험식들(최병희 외, 2006b)이 사용되고 있다. 본 연구에서는 폭원거리(D)를 장약량(W)으로 환산한 형태로서 다음 식 (1)과 (2)에서와 같이 자승근 환산거리(SRSD; square root scaled distance)와 삼승근 환산거리(CRSD; cube root scaled distance) 개념을 이용한 회귀분석을 통하여 지반진동의 수준을 각각 예측하였다.

$$V = K(\frac{D}{W^{1/2}})^n \tag{1}$$

$$V = K(\frac{D}{W^{1/3}})^n \tag{2}$$

위 식 (1)과 (2)에서 V: 입자속도(particle velocity), n: 감쇠지수, K: 화약특성, 발파방법, 암반특성 등에 따라 결정되는 상수이다.

진동수준 예측식의 결정

지반진동의 진폭이 거리에 따른 감쇠하는 양상을 표현하는 진동수준 예측식은 계측된 현장자료로부터 회귀분석을 수행한 다음 적합도가 높은 식을 선택하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 계측자료를 SRSD 및 CRSD 기법으로 처리하여 각각의 전파식을 구한 후 그 가운데 적합도가 높은 식을 대상지역에서의 진동수준 예측식으로 채택하는 방법을 사용하였다. 자료처리 과정에서는 『당해 발파에서 측정된 지반진동의 Long, Trans, Vert 성분 중 최대치』로 정의되는 PPV 성분에 대해 진동의 중위수준(50%)을 나타내는 식과 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식(90% 신뢰구간의 상한(upper limit)에 해당하는 식; 이하 동일)을 도출하였다. 아울러 이들 세 방향 진동성분들(Long, Trans, Vert)의 실시간 벡터합(vector sum) 성분에 대해서도 중위수준(50%)을 나타내는 식과 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식을 각각 도출하였다.

3.2 처리결과

앞의 표 2에 제시한 지반진동 측정치를 대상으로 자료를 처리하였다. 먼저, 그림 9는 PPV 성분을 대상으로 SRSD로 처리한 그래프이며, 도출된 지반진동 전파식들은 식 (3a) 및 3b)와 같다. 식 (3a)는 측정된 자료의 95%를 아래로 포함하는 식이며, 식 (3b)는 지반진동의 PPV 성

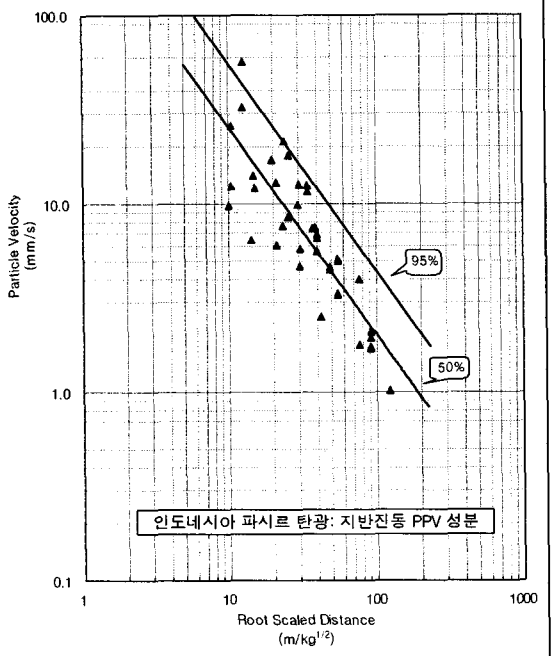


그림 9. SRSD: PPV 성분

$$PPV_{95\%} = 705.09\left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.10} \quad (3a)$$

$$PPV_{50\%} = 324.06\left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.10} \quad (3b)$$

$$(r = 0.85)$$

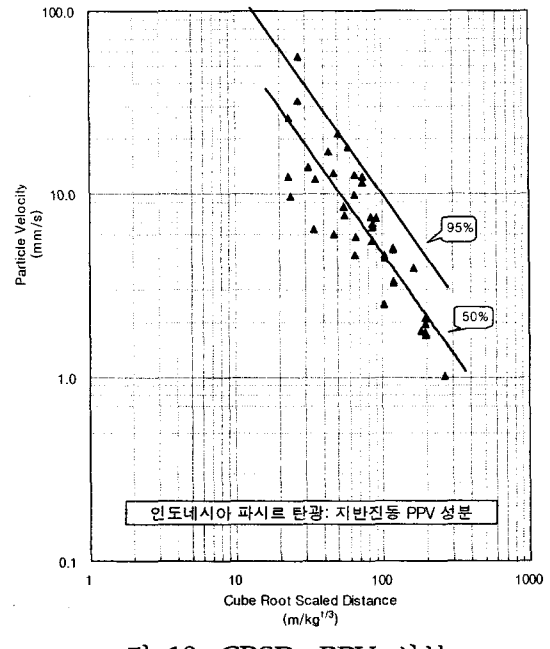


그림 10. CRSD: PPV 성분

$$PPV_{95\%} = 1939.25\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.14} \quad (4a)$$

$$PPV_{50\%} = 926.33\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.14} \quad (4b)$$

$$(r = 0.86)$$

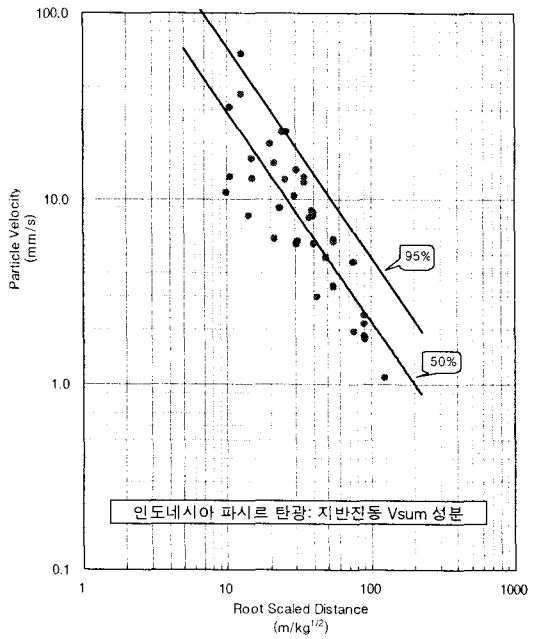


그림 11. SRSD: 벡터합 성분

$$Vsum_{95\%} = 877.66\left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.13} \quad (5a)$$

$$Vsum_{50\%} = 396.98\left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^{-1.13} \quad (5b)$$

$$(r = 0.85)$$

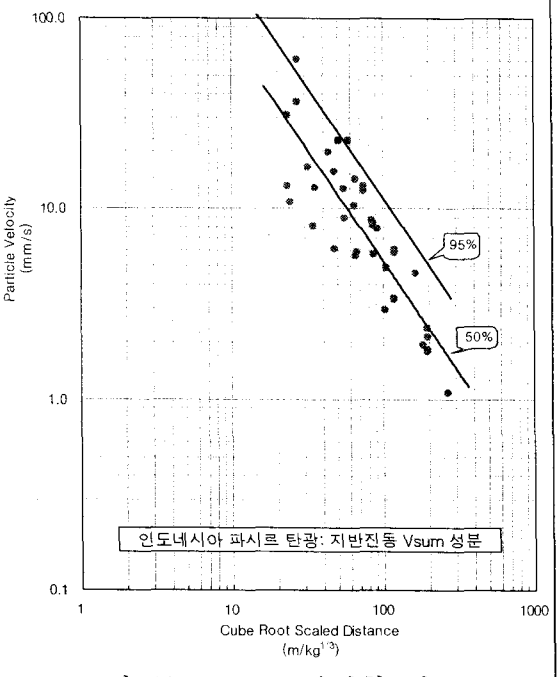


그림 12. CRSD: 벡터합 성분

$$Vsum_{95\%} = 2464.14\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.17} \quad (6a)$$

$$Vsum_{50\%} = 1157.90\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.17} \quad (6b)$$

$$(r = 0.86)$$

분들의 중위수준(50%)을 나타내는 식이다[2]. 마찬가지로 CRSD로 처리한 결과를 그림 10과 식 (4a) 및 (4b)에 보였다.

한편, 세 방향의 진동성분들을 실시간 합성한 성분인 벡터합 성분은 주어진 지역에서 나타나는 지반진동 값들을 최대수준으로 예측할 수 있으므로 이들 벡터합 성분만을 대상으로 SRSD로 처리한 그래프를 그림 11에 보였으며, 도출된 진동 전파식들은 식 (5a) 및 (5b)에 보였다. 마찬가지로 CRSD로 처리한 결과를 그림 12와 식 (6a) 및 (6b)에 보였다.

4. 결과고찰

4.1 지반진동 예측식

파시르 탄광에서 대규모 노천발파로 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 경우가 SRSD에 비해 적합도가 높은 것으로 나타났으므로 대상지역에서의 일반적인 지반진동의 속도수준을 예측할 때에는 다음 식 (7a)와 (7b)를 사용할 수 있다.

$$PPV_{95\%} = 1939.25\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.14} \tag{7a}$$

$$PPV_{50\%} = 926.33\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.14} \tag{7b}$$

지반진동의 벡터합 성분의 경우에도 CRSD를 사용하여 처리한 결과가 보다 높은 적합도를 보였기 때문에 대상지역에서 진동속도의 벡터합 성분을 예측할 때에는 다음 식 (8a)와 (8b)를 사용할 수 있다.

$$Vsum_{95\%} = 2464.14\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.17} \tag{8a}$$

$$Vsum_{50\%} = 1157.90\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-1.17} \tag{8b}$$

---

2) 예측식들에서 r은 상관계수(correlation coefficient)를 표시하며, 입자속도(PPV 또는 $Vsum$)의 단위는 mm/s, 폭원거리(D)는 m, 지발당 최대장약량(W)는 kg의 단위로 측정된다. 이하 동일.

4.2 지반진동 영향평가식

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 아래로 포함하는 식 (8a)를 영향평가식으로 사용할 수 있을 것이다.

한편, 과거 미광무국(USBM)을 중심으로 한 연구(Siskind et al, 1980) 등에서는 구조물 손상을 판정하는 기준이 되는 건물 벽체에서의 표면균열(cosmetic crack)의 발생을 주로 지반진동의 최대입자속도(PPV)와 관련지어 연구하였으며, 그 결과 미국, 독일 등의 법규에서는 구조물의 종류에 따라 PPV 값으로 지반진동의 수준을 규제하게 되었다. 이는 아마도 계측장비와 운용 S/W 등이 지금처럼 발달하지 않았던 시절에 이루어진 연구들의 당연한 귀결일지도 모르지만 현재까지 규제법규를 갖추고 있는 대부분의 나라에서는 PPV 값으로 허용수준을 규정하고 있다. 따라서 어떤 지역에서 발생되는 지반진동 수준이 규제법규에 합당한가를 판단할 때에는 관심의 대상이 되는 곳에서 측정한 지반진동의 PPV 값 자체가 판정의 기준이 된다.

이에 비하여, 우리가 지반진동을 제어하기 위한 발파패턴을 설계할 때에는 어떤 지역에서 발생되는 지반진동의 전파특성을 사전에 예측할 수 있다면 매우 유용할 것이다. 따라서 이런 경우에는 대상지역에서 측정한 지반진동 성분들(Long, Trans, Vert)로부터 우리가 원하는 다양한 지반진동 수준들(Long, Trans, Vert, PPV, Vsum)에 대한 감쇠경향을 통계적 추정을 통해 간단한 수식의 형태로 도출하는 방법이 널리 이용된다. 이와 같이, 실측된 PPV 값을 가지고 법규의 준수여부를 판정하는 것이 아니라 예측값을 가지고 적정발파를 설계할 때에는 엄격한 값으로서 Vsum을 채택한다면 지반진동에 대한 구조물의 안정성 확보의 측면에서는 매우 확실한 설계가 될 수 있다. 이런 맥락에서 본 연구에서는 파시르 탄광에서의 연약사면 안정성 평가과정에 지반진동의 벡터합 성분에 대한 예측식을 사용할 것을 제안하였다.

5. 결 론

본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 파시르 탄광의 대규모 노천발파로 발생하는 지반진동의 발생 및 전파 특성을 평가하기 위하여 총 19 차례의 발파를 대상으로 현장에서 지반진동을 계측하였다. 측정된 자료들은 통계적인 기법을 사용하여 처리함으로써 대상지역에서 발생되는 지반진동의 수준을 예측할 수 있는 예측식들을 유도하였다.

2) 파시르 탄광의 채굴적 사면들의 발파안정성을 평가하기 위한 지반진동 영향평가식으로는

엄격한 적용기준으로서 벡터합 성분의 95%를 아래로 포함하는 식을 사용할 것을 제안하였다.

▷ 대상지역에서의 사면안정성 평가를 위한 지반진동 영향평가식의 제안:

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

$$(Vsum : \mathrm{mm/s}, D : \mathrm{m}, W : \mathrm{kg})$$

감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연사업인 '대규모 석탄 노천광의 연약사면 안정성 및 생산성 향상 연구' 과제에서 지원을 받았으며, 계측과정에서 지원을 아끼지 않으신 인도네시아 현장의 KIDECO 임직원 여러분에게 깊이 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. 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. ISEE, 1998, Blasters' Handbook, 17th ed., Int. Soc. of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, USA, pp. 319-340.
5. 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. 73-74.