천공방식과 암질등급이 파쇄도와 진동수준에 미치는 영향

The Effect of Drilling Patterns and Rock Mass Conditions on Fragmentation and Ground Vibration in Quarry Blasting

정영준[1], 양형식[2], 이상은[3]
Young-Jun Jeong, Hyung-Sik Yang, Sang-Eun Lee
[1]금용산업개발, [2]전남대학교, [3]한암엔지니어링

초 록

파쇄 암석의 파쇄도는 발파효율을 나타내는 중요 척도로서 적재와 분쇄 작업에 큰 영향을 미친다. 그러나 현장에 쌓여 있는 발파암 더미로부터 파쇄도를 조사한다는 것은 용이한 작업이 아니다. 본 연구에서는 석산 발파에서 가장 중요한 요소인 천공방식과 암질의 변화가 파쇄도와 발파진동에 미치는 영향을 조사하였다. 파쇄 입도에 영향을 미치는 중요한 변수인 천공방식, 암질등급(RMR), 현지 암반의 블록 크기, 발파진동 등의 영향을 파쇄암의 평균입도(MFS)와 상위 5개의 대괴 평균치(L_5)로 나타내었다. 연구결과, 파쇄암의 평균입도는 상위 5개의 대괴 평균치와 선형적인 관계를 보였다. 발파방법과 파쇄도 평가 결과 재래식 발파에서는 파쇄도를 예측할 수 없었고 커다란 옥석이 생성되었으나, 벤치발파에서는 평균파쇄암의 크기가 비교적 양호한 파쇄상태를 유지하였다. 현지 암반 블록 크기는 평균 파쇄암의 크기와 선형적 관계를 나타내었다. RMR값이 커짐에 따라 발파진동 추정식의 진동상수 K와 감쇠지수 n의 절대값과 평균 파쇄암의 크기, 그리고 상위 대괴의 크기는 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었고, 진동상수 K와 감쇠지수 n도 증가하는 경향을 보였다.

핵심어 : 파쇄도, 발파진동, 석산, 천공방법, RMR

1. 서 론

영세한 석산에서는 초기 개발에 소요되는 비용을 줄이고자 합리적인 현장 개발 대신 종래에 사용하던 수평천공 발파를 주로 사용하고 있다. 수평천공 발파의 가장 큰 문제점은 법면의 높이가 과도하여 채석을 위한 천공작업이 어렵고 큰 옥석이 생성되어 추가적인 소할 발파가 필요하다는 점이다. 또 발파시 자유면의 확보가 적절하지 못하여 진동, 비산이 커지고, 절리면은 과도하게 활성화되어, 작업 공정상 효율이 떨어지고 막장은 역경사(over hang)가 형성되어 안전사고의 위험이 상존하는 실정이다. 골재 석산의 발파에서 중요한 사항 중 하나는 대괴 발생을 줄이고, 적절한 파쇄입도를 유지하는 것이다. 파쇄입도는 암석의 지질, 체적당 천공장, 체적당 장약량, 천공패턴, 점화순서, 공의 경사, 공의 편향, 1회 발파의 규모 등과 같은

요인에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이상적으로 파쇄된 암석은 발파후에 더 이상 처리하지 않아도 되는 암석이다. 따라서 파쇄입도를 줄이는데 모든 노력을 기울여야 한다.

발파에 의한 지반진동은 민원발생의 주요 원인이 되고 있다. 일반 노천발파와 구별되는 석산발파의 재래식 발파법은 자유면의 수가 대부분 1 자유면으로 한정되어 이루어지는 극히 제한적인 발파공법이다. 이 때문에 시공자는 필연적으로 암반을 파쇄하기에 충분한 화약량보다 훨씬 많은 화약을 이용하여 발파를 하게 된다. 과장약된 화약은 진동을 유발하여 인근 지반이나 구조물에 영향을 미쳐 지반을 약화시키거나 구조물에 손상을 입히게 되며, 특히 가장 민감하게 반응하는 주민들의 감정을 자극하여 민원발생을 유발하게 된다.

본 연구는 이런 점들을 감안하여 전북 남원 금용석산에서 파쇄입도에 영향을 미치는 중요한 변수인 천공방법, 암반조건(RMR), 현지 암반의 블록 크기(RQD/J_n), 발파진동 등이 파쇄암의 평균입자의 크기(MFS)와 상위 5개의 대괴 평균치(L_5)의 크기에 미치는 영향을 연구하고 진동에 대한 영향도 고찰하였다.

2. 연구대상 지역

발파가 실시된 현장은 골재채취를 위한 중소규모의 석산이며 시험대상 암반의 역학적 성질을 살펴보면 Table 1과 같다.

발파지역의 지질구조는 절리와 단층이 주로 발달되어 있다. 절리발달상은 판상(Sheetings) 절리가 특징적이며, 채굴면상부 전구간에서 이를 확인할 수 있고, N80E~N80W, 35~40NW, 20~30NE의 방향을 보인다. 판상절리외 채석장 서측에서는 단층파쇄대(Shear zone)가 발달되며, 파쇄대 내부에서 중풍화암과 변질대가 형성되어 있다.

Table 1. Physical and mechanical properties of rock mass

Classification	Soft rock	Hard rock
Rock type	Tuff	Two mica granite
Compressive strength (kg/㎠)	730.0-790.0	1120.0-1660.0
Specific gravity	2.71	2.60-2.72
Water content	1.92	0.28-1.58
Friction angle (°)	48	51.0-52.0
Cohesion (kg/㎠)	150.0	230.0-280.0
Young's modulus (10^5kg/㎠)	3.66	5.4-6.41
Poisson's ratio	0.24	0.20-0.27

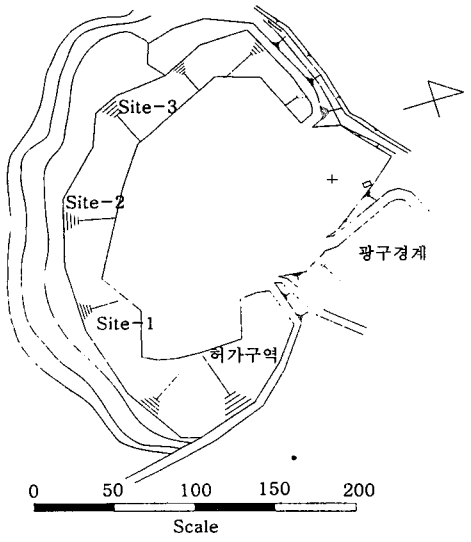

Fig. 1 Blasting site map : Kumyong quarry

파쇄대에서 절리의 방향성은 N50~60E, 60~70NW로 나타난다. 파쇄대에서 더욱 서측으로 채굴면 상부에서 판상절리와 이에 수직으로 인장절리가 발달되어 있으며, N40E, 80SE의 방향성을 보인다. 조사구역내의 동측과 서측 채석

면에서 2개의 단층이 확인되며, 동측의 단층은 판상절리와 같은 방향으로 N80W, 50NE로 발달되며, 서측의 단층은 N50~60E, 60~70NW의 방향성으로 단층파쇄대를 형성한다. 중앙부에서 수직경사로 단층면으로 추정되는 면이 관찰되나, 본 구조선을 경계로 동측에서 변질된 화강암이 발달되는 것으로 보아 관입관계의 지질경계면으로 사료된다.[1)]

3. 시험방법

3.1 시험기구 및 재료

본 연구에서는 유압드릴로 수직천공과 수평천공을 하였으며, 75 mm의 Button bit와 노천발파용 3 m Rod를 사용하였다.

뇌관은 20 ms 단차의 MS series와 NONEL 비전기식뇌관을 병행하여 사용하였다. 폭약은 상부장약에 ANFO를, 공저장약은 50 mm Emulite를 사용하였다.

파쇄암을 분석하기 위해 삼성사의 SDC-85 디지털 카메라와 일반 4배율 촬영이 가능한 카메라로 촬영하였으며, 2 m의 scale bar를 0.2 m 간격으로 표식을 하여 파쇄도를 분석하였다

3.2 사용폭약 및 뇌관

폭약은 고려화약(주) 제품인 EMULITE100 ϕ50 mm와 ANFO를 사용하였다.

뇌관은 고려화약(주) 제품인 KODETO를 사용하였으며, ANFO 장전시에는 NONEL 비전기식을 병행하여 사용하였다.

Table 2. Weight strength of explosives

Description	Dimension	EMULITE100	ANFO
Detonator velocity	m/s	5900	3300
Heat of explosion	kcal/kg	950	1100
Gas pressure	ℓ/kg	888	975
Apparent specific gravity	g/cc	1.15-1.25	0.9
Drop impact sensitivity	㎝	100	50
Water resistance	-	Excellent	Fair
Cold resistance	℃	-20	-20

3.3 발파형태

발파형태는 재래식발파와 벤치발파의 2가지 패턴으로 하였다. 장약방법은 2가지 패턴 모두 역기폭 순발발파하였다.

Table 3. Conventional blasting patterns

Description	I	II	III	IV	V
Bit diameter(mm)	75	75	75	75	75
Drilling length (m)	15	15	18	15	12
Hole spacing (m)	2.0	1.8	1.8	2	2
Burden (m)	15	15	18	15	12
Total charge (kg)	3900	4500	2725	4500	1975
Column charge	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO
Bottom charge	EMULITE100	EMULITE100	EMULITE100	EMULITE100	EMULITE100
Blasting site	Site1	Site1	Site2	Site2	Site3

3.3.1 재래식 발파

재래식 발파는 발파지역 하부에 수평 천공하여 집중장약의 형태로 발파하는 패턴이다. 자유면의 형성이 불량하여 법면의 높이가 과도하고 이로 인한 천공작업의 어려움과 큰 옥석의 생성으로 추가적인 소할발파가 필요하며, 발파시 진동, 비산 등 작업 공정상의 비효율과 안전사고의 위험이 상존하는 실정이다.

Fig 2는 재래식발파의 천공형태 일례를 나타낸 것이다. Table 3은 본 연구에 적용한 재래식 발파패턴을 나타낸 것이다.

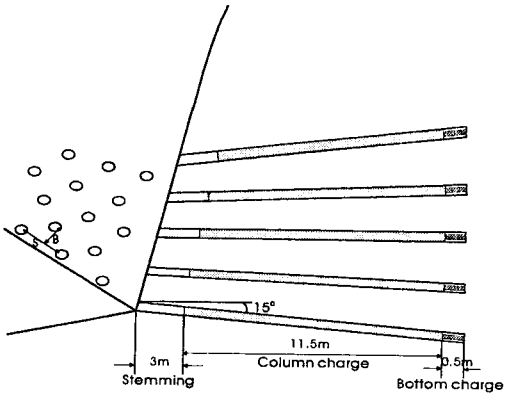

Fig. 2 Typical drilling pattern of conventional blasting

3.3.2 벤치발파

벤치발파란 상부로부터 여러 단의 작업장을 조성한 다음, 계단에서 하향 수직공을 천공하여 발파를 실시하는 2자유면 발파방법이다. 지형조건에 따라 계단의 높이가 달라지고 그에 따라 천공경, 공당 장약량 등이 서로 다르기 때문에 상대적인 비교는 어렵다.

Fig. 3에 벤치발파의 천공형태를 Table 4에 벤치발파의 패턴을 나타내었다.

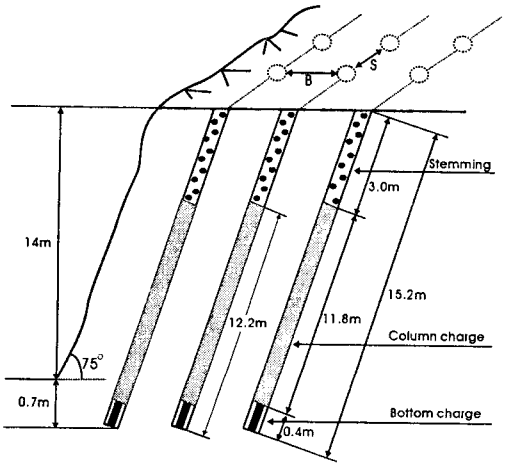

Fig. 3 Typical drilling pattern of bench blasting

Table 4. Bench blasting patterns

Description	I	II	III	IV	V
Bit diameter (mm)	75	75	75	75	75
Drilling length (m)	15.0	15.0	12.0	15.0	18.0
Hole spacing (m)	2.0	2.0	2.3	2.0	1.8
Burden (m)	2.5	2.5	2.2	2.0	2.5
Total charge (kg)	3,150	2,700	2,800	3,450	4,150
Column charge	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO
Bottom charge	EMULITE 100	EMULITE 100	EMULITE 100	EMULITE 100	EMULITE 100
Blasting site	Site1	Site2	Site3	Site1	Site2

3.4 파쇄도 평가

Fig. 4와 Fig. 5는 파쇄암의 크기별, 중량별 누적곡선을 나타내고 있다.

파쇄도 평가는 파쇄암의 스케일에 의해 기준치 이상의 파쇄암만을 조사하는 방법을 사용하여 전석의 수를 기록하여 누적곡선을 그리고 50%값을 평균파쇄도(MFS)로 95%값을 상위대괴(L_5)로 결정하였다.

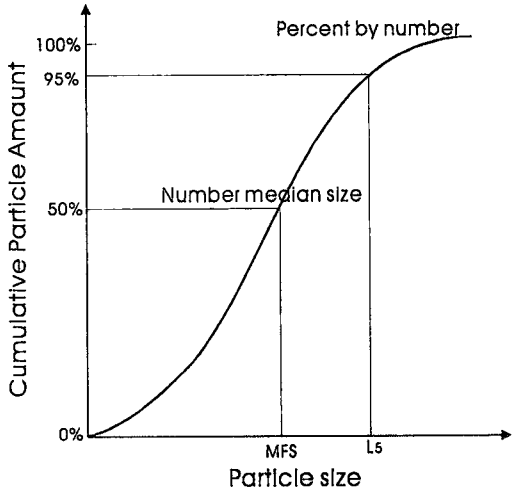

Fig. 4 Fragment size distribution by number of fragment

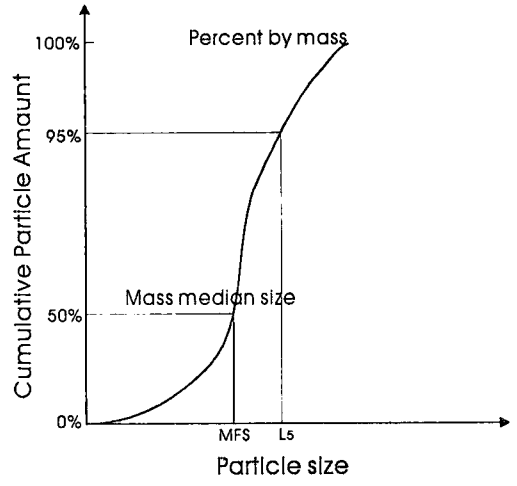

Fig. 5 Fragment size distribution by mass of fragment

3.4.1 육안분석

현장에서 수집한 사진자료에 대해 기준치 이상의 파쇄암만을 조사하고 전석의 수를 기록하여 평가하였다. 평가의 최소 기준치는 20 cm로 하였으며 그 이하의 크기는 평가에서 제외하였다. Fig. 6은 육안분석의 결과를 나타낸 것이다.

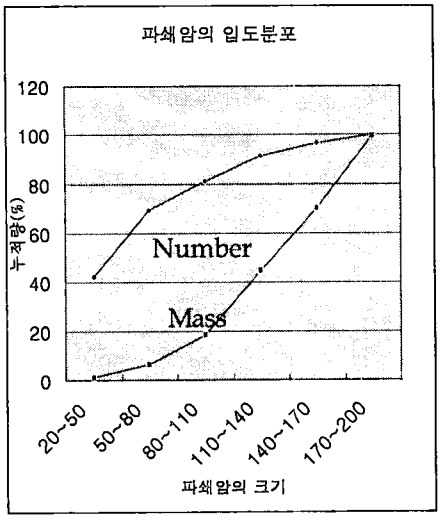

Fig. 6 Cumulative distribution of fragmentation data

3.4.2 영상처리

본 연구에서는 상용프로그램 중에 Split Desk-top 2.0으로 영상 처리하였다. Split의 data 처리과정은 다음과 같다.

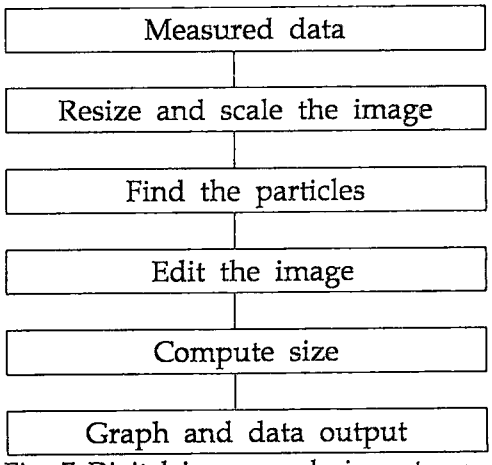

Fig. 7 Digital image analysis systems

Table 5. Summary of fragmentation data

Boulder size(cm)	Number	Cumulative number(%)	Density (t/m^3)	Equivalent weight(t)	Mass(t)	Cumulative mass(%)
20~50	25	42.37	2.71	0.75	1.62	1.51
50~80	16	27.12	2.71	3.36	5.20	4.85
80~110	7	11.86	2.71	6.16	13.65	12.73
110~140	6	10.17	2.71	10.38	27.90	26.02
140~170	3	5.08	2.71	10.08	27.32	25.48
170~200	2	3.39	2.71	12.24	31.52	29.40
Total	59	100			107.21	100

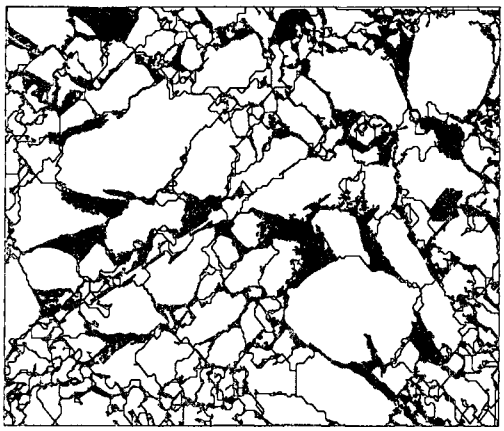

Fig. 8 Find the particles (Delineated particles of muckpile)

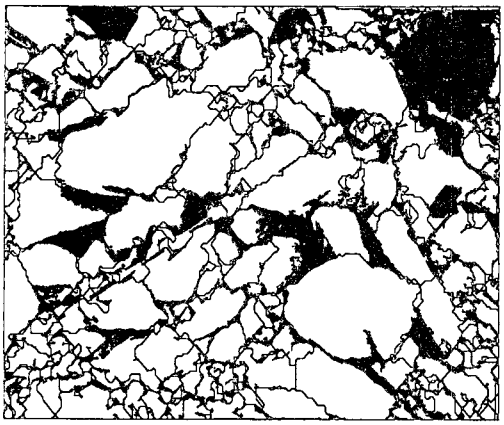

Fig. 9 Edit the image

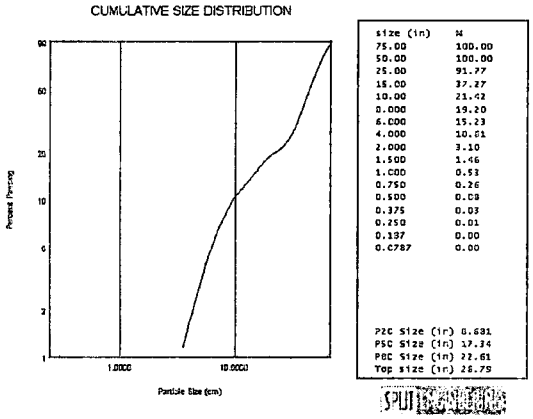

Fig. 10 Cumulative distribution of blasting fragmentation data

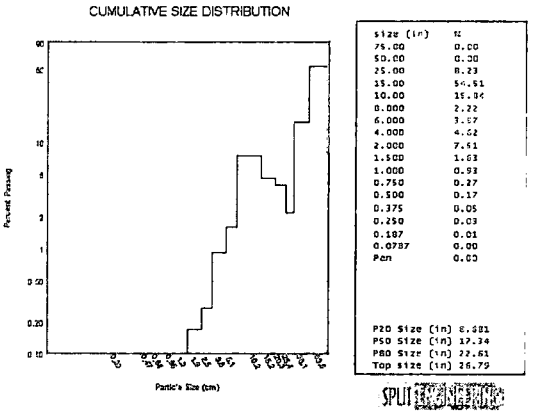

Fig. 11 Cumulative histogram of selected sieve series of blasting fragmentation data

3.5 진동평가

진동은 캐나다 Instantel 사의 Blastmate Series Ⅱ인 DS 677 1대와 Blastmate Series Ⅲ인 DS 077 5대를 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

석산 발파의 천공패턴과 암반특성의 변화가 파쇄도와 지반진동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 실시한 본 연구에서는 RMR, RQD/J_n, MFS, L_5 등의 상관성을 조사하였으며, 지발당 최대 장약량(maximum charge per delay)으로 신뢰수준 50%에서 회귀분석을 실시하여 상관성 및 거리별 감쇠특성을 비교하였다.

4.1 평균파쇄도와 상위대괴

파쇄암의 평균크기(MFS)와 상위 5개의 대괴평균치(L_5)와의 상관관계를 분석한 결과 Fig. 12, 13과 같이 선형의 추세를 보였다. 식 (1)은 재래식발파, 식 (2)는 벤치발파의 결과이다. 전체적으로 재래식발파의 경우 평균 파쇄암의 크기로 상위대괴를 평가하는 방법은 상관도가 낮아서 예측에 무리가 있을 것으로 판단된다.

$$L_5 = 2.20 + 1.61\,MFS \quad (r = 0.60) \quad (1)$$

$$L_5 = 0.49 + 1.97\,MFS \quad (r = 0.82) \quad (2)$$

Larsson(1974)은 $L \fallingdotseq 2.6\ k_{50}$로 규명하였다. 파쇄암의 입도분포를 통해 평균파쇄도가 구해지면, 이 값으로 대괴의 발생정도를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

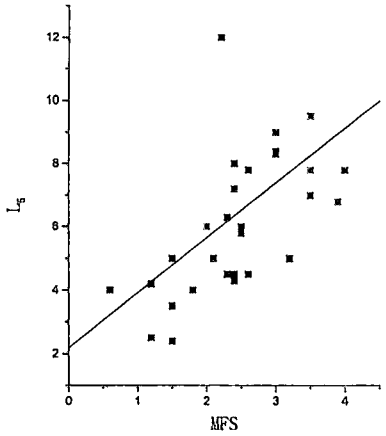

Fig. 12 Trend of boulder size for mean fragmentation size (conventional blasting)

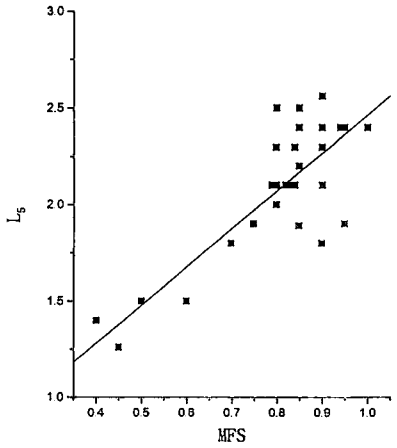

Fig. 13 Trend of boulder size for mean fragmentation size (bench blasting)

4.2 RMR과 평균파쇄도 및 대괴율

Fig. 14와 15는 RMR과 평균파쇄도 및 대괴율의 상관관계를 보인 것이다. 재래식발파와 벤치발파 공히 상관성이 낮게 평가되었지만 RMR의 증가에 따라 파쇄입도가 대체적으로 증가하는 경향을 보였으며 파쇄암의 분포가 벤치발파는 1 m 이하의 크기를 나타내었다.

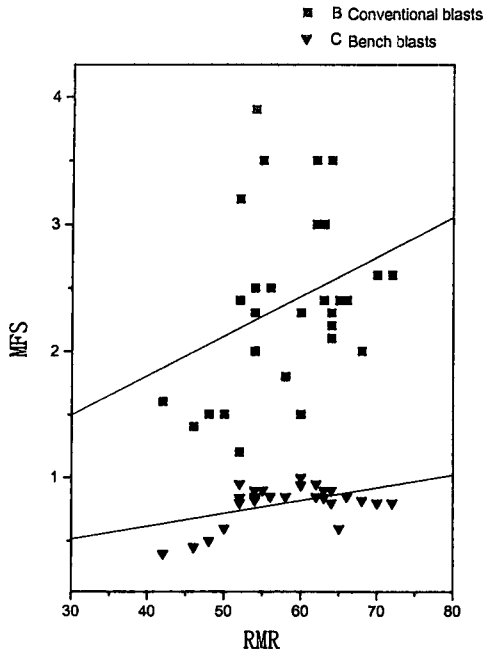

Fig. 14 Trend of RMR value for mean fragmentation size

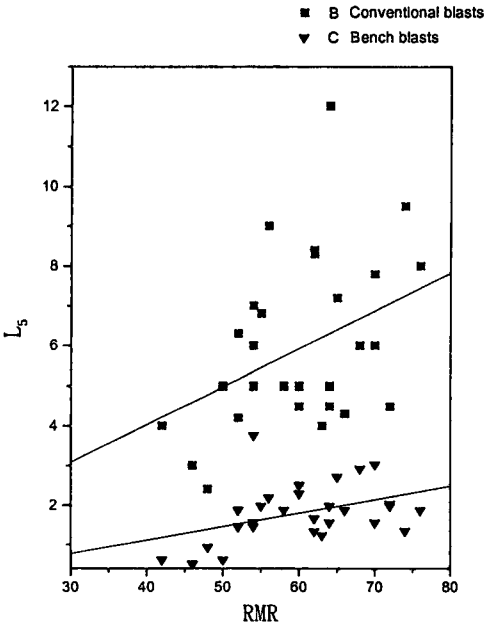

Fig. 15 Trend of boulder size for RMR value

이는 벤치발파가 재래식발파와 비교하여 자유면의 확보가 원활하기 때문으로 생각된다. RMR과 상위대괴(L_5)와의 상관관계도 평균파쇄도와 마찬가지 경향이나 상관성이 낮아 수식으로 예측하기에는 곤란할 것으로 판단된다.

4.3 블록의 크기와 평균파쇄도

Fig. 16은 벤치발파에서 블록의 크기와 파쇄도의 관계를 보인 것이다. 평균파쇄도(MFS)는 블록의 크기가 커지면 대체적으로 커진다. 이는 블록의 크기가 커지면 암반의 상태가 상대적으로 Massive한 상태이므로 파쇄암의 크기가 커진 것으로 사료된다. 블록의 크기에 대한 평균파쇄도는 상관계수 r=0.94를 갖는 선형의 추세를 나타내었다.

$$MFS = 0.46 + 0.07(RQD/J_n) \quad (3)$$

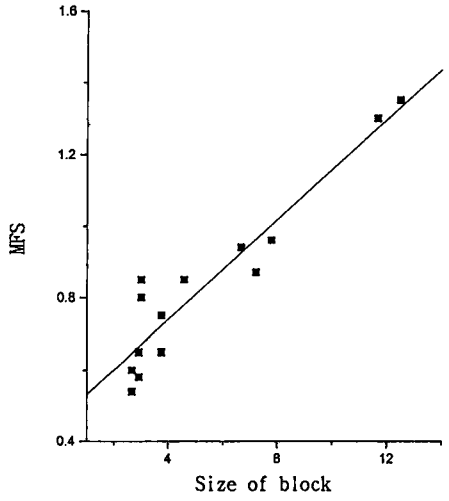

Fig. 16 Trend of mean fragment size for block size

4.4 RMR과 진동

RMR에 따른 진동 수준의 변화를 평균예상식으로 구하고 그 관계를 계수 K와 n의 추이로 표시하였다. (Fig. 17, 18)

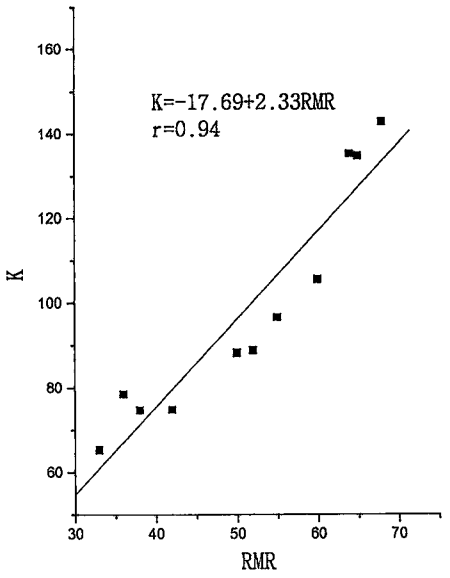

Fig. 17 Relationship between RMR and coefficients of blasting conditions

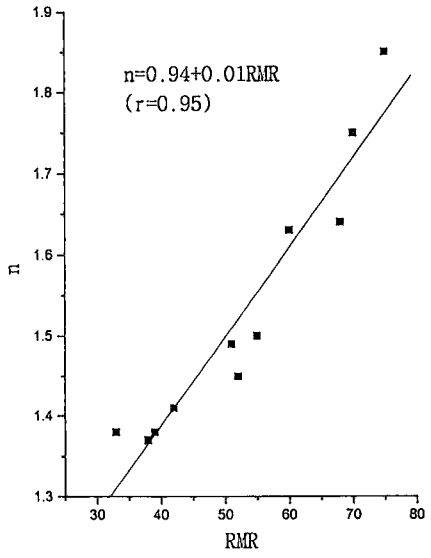

Fig. 18 Relationship between RMR and index of level of attenuation rate of displacement over distance

분산이 큼에도 불구하고 RMR의 증가에 따라 K와 n이 공히 증가하는 경향을 보였다. 이는 경암일수록 진동수준이 증가하지만 환산거리에 따른 감쇠도 크다는 것을 의미한다.

5. 결 론

발파에 의한 파쇄암석의 파쇄도는 발파효율을 나타내는 중요 척도로서 적재작업과 재활용을 위한 분쇄작업에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 현장 사례를 중심으로 석산발파에서 가장 중요한 요소인 천공방법과 암반조건의 변화가 파쇄도와 발파진동에 미치는 영향을 조사하였다. 파쇄입도에 영향을 미치는 중요한 변수인 천공방법, 암반조건, 현지 암반의 블록 크기, 발파진동 등의 영향을 파쇄암의 평균입도와 상위 5개의 대괴 평균치로 나타내었다. 이상의 연구결과는 다음과 같다.

1) 파쇄암의 평균입도는 상위 5개의 대괴 평균치와 선형적인 관계를 보였다.

2) 재래식 발파에서는 파쇄도 예측이 어려웠고 큰 옥석이 생성되었으나, 벤치발파에서는 평균 파쇄암의 크기가 1 m 내외로 비교적 양호한 파쇄상태를 유지하였다.

3) 평균 파쇄암의 크기는 현지 암반 블록의 크기에 비례하는 선형적 추이를 나타내었다.

4) RMR값이 커짐에 따라 발파진동 추정식의 진동상수 K와 감쇠지수 n의 절대값과 평균 파쇄암의 크기, 그리고 상위 대괴의 크기는 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었고, 진동상수 K와 감쇠지수 n도 증가하는 경향을 보였다.

참 고 문 헌

1) 선우 춘, 류창하, 최병희, 2001, 영상처리기법에 의한 발파 파쇄암의 파쇄도 측정, 화약·발파 제 19권 제2호, pp. 6~8

2) Aler, J. & J. du Mouza, 1996, Measurement of Blast Fragmentation, 257-262

3) Kuznetsov, V. M., 1973, The mean diameter of the fragments formed by blasting rock, Soviet Mining Sci. 9, 144-148