

벤치발파에서 파쇄도 예측을 위한 암반조건 분석

최용근^{1)*}, 이정인²⁾, 이정상¹⁾, 김장순¹⁾

Analysis of In-situ Rock Conditions for Fragmentation Prediction in Bench Blasting

Yong-Kun Choi, Chung-In Lee, Jeong-Sang Lee and Jang-Soon Kim

Abstract Prediction of fragmentation in bench blasting is one of the most important factors to establish the production plan. It is widely accepted that fragmentation could be accurately predicted using the Kuz-Ram model in bench blasting. Nevertheless, the model has an ambiguous or subjective aspect in evaluating the model parameters such as joint condition, rock strength, density, burden, explosive strength and spacing. This study proposes a new method to evaluate the parameters of Kuz-Ram model, and the predicted mean fragment sizes using the proposed method are examined by comparing the measured sizes in the field. The results show that the predictions using Kuz-Ram model with the proposed method coincide with field measurements, but Kuz-Ram model does not reflect the in-situ rock condition and hence needs to be improved.

KeyWords Kuz-Ram Model, Fragmentation, Bench blasting

초 록 벤치발파에서 암석 파쇄도 예측은 생산계획을 수립하는 데 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. Kuz-Ram 모델은 지금까지 제안된 암석 파쇄도 예측 모델 중 가장 우수한 것으로 평가받고 있으나, 이 모델의 평가항목을 구성하고 있는 절리조건, 암석강도, 밀도, 사용폭약의 성능과 저항선, 공간격 등의 요소들은 그 값을 선정하는 과정에서 주관적인 요소가 개입되거나 정의가 모호한 요소를 포함하고 있다. 이 연구에서는 Kuz-Ram 모델을 구성하는 여러 평가항목의 값을 선정하는 과정에서 주관적이거나 모호한 요소를 제거하는 방법에 대해 검토하였으며, 예측값을 현장조사 결과와 비교하여 적용성을 검토하였다. Kuz-Ram 모델은 비교적 정확한 예측결과를 보였으나, 현지암반 조건을 충분히 반영하지 못하여 개선이 필요한 것으로 판단되었다.

핵심어 Kuz-Ram 모델, 암석 파쇄도, 벤치발파

1. 서 론

발파로 인한 암석 파쇄물은 일정한 크기를 가진 생산물로 만들어지기 위해 운반과정을 거쳐 크러싱 공정에 도달하며, 크러싱 공정에서는 최종 생산물의 크기를 일정하게 유지하기 위해 파쇄 장치(Crusher)를 사용한다. 이러한 장치는 장치의 규격에 적합한 일정 크기 이하의 암석만을 파쇄할 수 있으므로 발파 과정에서 이 크기를 초과하는 대형 암괴가 발생할 경우에는 소할 작업에 따른 천공과 추가 발파 비용이 발생한다.

소할로 인한 발파 비용 증가는 전체 생산원가의 20%

정도를 차지하는 천공·발파비용을 35% 이상으로 증가시킬 수도 있으며, 암석 파쇄물의 크기가 일정하게 유지되지 못함으로써 크러셔 용량을 증대시켜야 하는 등, 설비 투자 비용을 상승시키는 결과를 초래하기도 한다(Gama and Jimeno, 1993).

따라서 최적의 생산성을 확보하기 위해 파쇄물의 입도분포를 관리하는 것이 필수적이며, 가장 경제적인 입도분포 관리는 발파공정으로부터 시작될 때만이 가능하다(Nielsen, 1983). 즉, 주어진 암반조건과 발파조건으로부터 파쇄물의 입도분포를 정확히 예측할 수 있으면, 그에 적합한 최적의 발파설계가 가능해진다.

암석 파쇄도를 예측하기 위한 연구는 여러 차례 있었지만, 현장 적용이 가능한 실용적인 모델에는 Larsson (1974), Gama(1983), Cunningham(1983) 등이 있다. 특히 이중에서도 Cunningham(1987)을 통해 한 차례 수정된 Cunningham(1983)의 Kuz-Ram 모델은 지금

¹⁾ (주)지오제니컨설팅트

²⁾ 서울대학교

*교신저자(Corresponding Author): ykchoi@geogeny.biz

접수일: 2004년 10월 1일

심사 완료일: 2004년 10월 26일

까지 제안된 파쇄도 예측 모델 중 가장 우수한 것으로 평가받고 있을 뿐 아니라 암석 파쇄도를 분석하고 예측하는 최근의 컴퓨터 프로그램들이 이 모델을 적용하고 있고, 새로운 모델의 기초로 활용되는 등 가장 널리 이용되고 있다(Lopez et al., 1995; Kou et al., 1993). 그러나 이 모델은 암석의 공학적 특성과 저항선·공간격·공경·장약장·벤치높이·장약량·폭약강도 등의 발파조건을 충실히 반영하고 있는 반면, 암반의 불연속면 조건에 관해서는 기준이 모호하거나 판단 과정에 주관적 요소가 개입될 소지가 있는 등 완벽한 모델로 평가 받고 있지는 못하다.

이 연구에서는 Kuz-Ram 모델을 구성하는 여러 평가 항목의 값을 선정하는 과정에서 주관적이거나 모호한 요소를 제거하는 방법에 대해 검토하였으며, 예측값을 현장조사 결과와 비교하여 Kuz-Ram 모델의 적용성을 검토하였다.

2. Kuz-Ram 모델

2.1 Kuz-Ram 모델의 개요

Kuz-Ram 모델은 파쇄물의 평균 크기(X₅₀)를 평가하기 위한 Kuznetsov의 경험식과 파쇄물의 입도분포 형태를 평가하기 위한 Rosin-Rammler 입도분포 곡선 모델에 기초하고 있다. Kuznetsov의 경험식은 암반조건과 폭약의 강도(위력), 비장약량(kg/m³)을 주요 변수로 고려하고 있으며, Rosin-Rammler 입도분포 곡선은 천공 정밀도·저항선·공간격·벤치 높이 등의 발파형상을 주요 변수로 고려하고 있다.

먼저 Kuz-Ram 모델을 구성하는 Kuznetsov 경험식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$X_{50} = F_r \times q^{-0.8} \times Q_b^{1/6} \times \left(\frac{115}{S_{ANFO}} \right)^{19/30} \quad (1)$$

X₅₀ : 파쇄물의 평균 크기(cm), F_r : Rock Factor,
 q : 비장약량(kg/m³),
 Q_b : 사용된 폭약의 공당 장약량(kg),
 S_{ANFO} : 폭약의 상대강도(기준 ANFO=100, TNT=115, 국내 생산 ANFO=110)

다음으로 Rosin-Rammler 입도분포 곡선은 식 (2)와 같다.

$$F(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X}{X_c} \right)^n \right] \quad (2)$$

F(X) : X 크기의 체를 통과하는 비율,
 X : 체(screen) 크기, X_c : Characteristic Size,
 n : Uniformity Index (균등계수)

이때 Kuznetsov 경험식으로 구해진 파쇄물의 평균크기(X₅₀)를 식 (2)에 대입하면, 파쇄물의 평균크기에 대해 F(X) = 0.5이므로, X_c는 식 (3)과 같이 얻을 수 있다.

$$X_c = \frac{X_{50}}{0.693^{1/n}} \quad (3)$$

$$n = \left[2.2 - 14 \frac{B}{D} \right] \times \left[\frac{(1+S/B)}{2} \right]^{0.5} \times \left[1 - \frac{E_p}{B} \right] \times \left[\frac{|L_f - L_c|}{L} + 0.1 \right]^{0.1} \times \frac{L}{H} \quad (4)$$

D: 발파공의 지름(mm), B : 저항선(m),
 S: 공간격(m), L : 전체 장약장(m),
 L_f: 하부장약장(m), L_c: 주장약장(m)
 H: 벤치 높이, E_p: 천공오차로 인해 발생하는 편차(m)

2.2 Rock Factor

Cunningham(1987)은 현지암반 조건을 고려함에 있어서 보다 객관적인 사실에 근거하기 위해 Lilly(1986)의 Blastability Index(BI)를 이용하여 Rock Factor를 계산하는 방법을 제안하였다. Blastability Index(BI)는 벤치 발파에서 적정 비장약량을 산정하기 위해 암반의 절리 조건과 암석의 공학적 특성을 고려하는 일종의 현지암반 평가 기법이다. Cunningham(1987)은 Blastability Index(BI)에 0.12를 곱하여 식 (5)와 같은 Rock Factor 산출식을 구성했다.

$$Fr = 0.06 (RMD + JF + RDI + HF);$$

$$Fr = 0.12 \times BI \quad (5)$$

여기서 RMD = Rock Mass Description; JF = Joint Factor; RDI = Rock Density Index; HF = Hardness Factor로 정의되며, BI는 Blastability Index이다. 식 (5)의 우측 항을 구성하는 평가 인자는 Table 1과 같다.

2.3 파쇄도 분포 곡선에서 X_c와 n의 의미

식 (2)는 2개의 파라미터만을 이용하여 발파에 의한 암석 파쇄물의 크기 분포를 표현하고 평가할 수 있음을 보여준다. 이 두 개의 파라미터는 암석 파쇄물의 63.2%가 통과하는 체의 크기를 가리키는 Characteristic

Table 1. Parameters in order to estimate the Rock Factor

| Parameter | Description |
|--|---|
| • RMD = 10+10Xi | • Xi : Block Size of In-situ Rock Mass |
| • JF = JFs ¹⁾ + JFo ²⁾ JFs = 10 20 50 JFo = 10 20 30 40 | • Joint Spacing < 0.1 m • 0.1 m < Joint Spacing < Oversize(m) • Oversize(m) < Joint Spacing • Joint Dip < 10 degree • Joint Dip Direction - Dip Direction of Bench < 30 degree • 60 degree < Joint Dip Direction - Dip Direction of Bench • 30 < Joint Dip Direction - Dip Direction of Bench < 60 degree |
| • RDI = 25(SG- 2) | • SG : Specific Gravity of Rock |
| • HF = UCS/5 • HF = E/3 | • E > 50GPa, (UCS : Uniaxial Compressive Strength of Rock, MPa) • E < 50GPa, (E : Elastic Modulus of Rock, GPa) |

¹⁾ JFs : Rating for joint spacing

²⁾ JFo : Rating for joint orientation

Size(X_c)와 분포 곡선의 형태(파쇄물의 입도 분포 특성)를 결정짓는 Uniformity Index(n)이다.

가. X_c : Characteristic Size

Fig. 1은 n 이 1.5로 일정할 때 X_c 의 변화에 따른 입도분포 곡선의 변화를 보여준다. X_c 의 증가는 입도 분포 곡선을 우측으로 이동시킴으로써 파쇄물의 크기가 전체적으로 큰 쪽에 치우쳐 있다는 것을 표현하며, 반대의 경우는 파쇄물의 입도가 작은 쪽에 치우쳐 있는 것을 가리킨다.

나. n : Uniformity Index

Fig. 2는 Characteristic Size가 일정할 경우 Uniformity Index(n)의 변화에 따른 입도분포 곡선의 변화를 나타내고 있다.

입도분포 곡선의 형태를 결정짓는 Uniformity Index 값은 주로 0.8~2.2의 값을 갖지만 저항선에 따라서는 0.65의 값을 갖기도 한다(Cunningham, 1983; Rustan, 1998). Uniformity Index(n)가 작은 경우는 파쇄물의 입도가 작은 것부터 큰 것까지 고르게 분포하고 있음을 가리키며, 반대의 경우는 파쇄물의 입도가 일정한 크기에 집중되어 있는 것을 가리킨다.

3. 현장 조사

현장조사는 쌍용자원개발의 동해광산, 신기광산과 아시아자원개발의 영월광산 등 3개 석회석 광산에서 이루어졌다(Fig. 3 참조). 먼저 각 광산에 대해 지질현황과

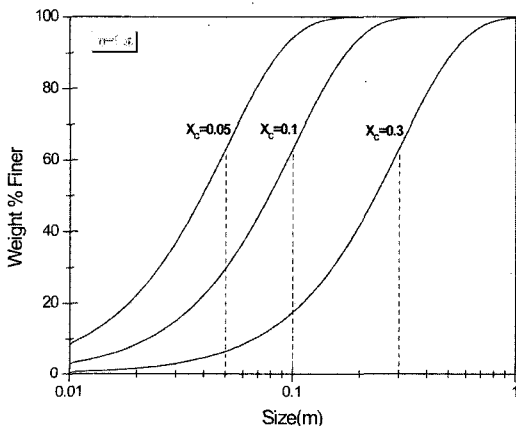


Fig. 1. Fragment size distribution in function with the Characteristic Size(X_c), when Uniformity Index(n) is 1.5

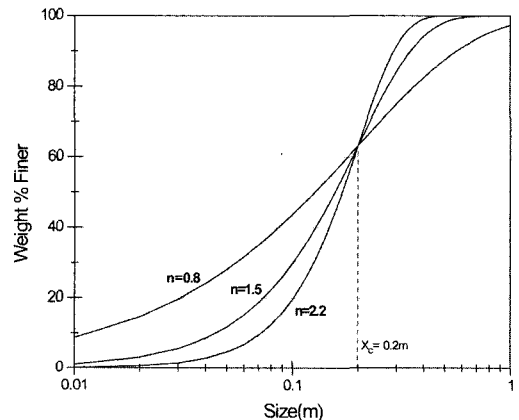


Fig. 2. Fragment size distribution in function with the Uniformity Index(n), when Characteristic Size(X_c) is 0.2m

절리분포 특성을 조사하였으며, 실내시험으로 암석의 일축압축강도와 밀도 등의 공학적 특성을 조사하여 Kuz-Ram 모델의 Rock Factor를 평가하기 위한 인자들을 구성하였다. 파쇄도 분석을 위한 현장조사는 발파전에 벤치높이와 저항선, 공간격 등의 발파패턴을 분석하고, 발파 후 쌓여있는 파쇄물을 관찰하여 파쇄입도를 분석하는 순서로 이루어졌다.

3.1 조사현장 개요

쌍용자원개발의 동해광산은 3개 채광구역(D1, D2, D3)으로 이루어져 있고, 쌍용자원개발 신기광산은 2개 채광구역(S1, S2)으로, 아시아자원개발의 영월광산은 1개 채광구역(Y1)으로 이루어져 있다. 동해광산과 신기광산은 고생대 두위봉형 조산누층군의 풍춘층을 대상으로 하는 석회석 광산이며, 영월광산은 고생대 영월형 조산누층군의 마차리층을 대상으로 하는 석회석 광산이다.

3.2 Rock Factor 평가

가. 현지암반의 블록크기

Rock Factor를 산정하기 위한 평가항목 중 현지암반의 블록크기로 정의되어 있는 첫 번째 항목에 대해서는 Cunningham(1983, 1987)에 의해 객관적인 평가방법이 제시되어 있지 못하다. Kuz-Ram 모델을 처음 소개한 Cunningham(1983)은 Rock Factor를 'Very soft rock=3~Hard rock=13'까지의 범위로 정의하고 있을 뿐 현지암반의 블록크기는 고려하고 있지 않다. 이를 수정한 Cunningham(1987)의 경우에는 Rock Factor를 계산하기 위해서 현지암반의 블록크기를 고려하지만 'In-situ blok size'로 정의하고 있을 뿐 이를 계산하기 위한 방법에 대해서는 명확히 제시되어 있지 않다.

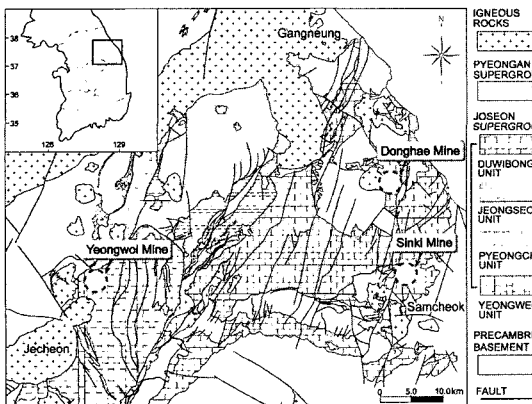


Fig. 3. The location map of the Limestone Mines

현지암반의 블록크기를 정의하기 위해 Palmström (1996; a, b)은 RQD나 단위면적(체적)당 절리수를 이용해서 현지암반의 블록크기(또는 블록체적)를 추정하는 방법을 소개하고 있으며, Aler et. al.(1996)은 통계적으로 생성된 3차원 절리망으로부터 블록크기를 추정하는 방법을 소개하고 있다. 그러나 이런 방법은 별도의 조사를 수행해야 하거나, 복잡한 자료처리 과정을 거쳐야 하는 등 적용이 불편한 단점이 있다.

반면 Cai et. al.(2004)는 현지암반의 블록크기를 평가할 수 있는 효과적인 방법을 제시했다. Cai et. al.(2004)는 현지암반의 블록크기와 절리조건과의 관계를 이용하여 GSI(Geological Strength Index)를 평가할 수 있는 관계 도표를 작성하였는데, 이 도표를 이용해서 현지암반의 블록크기를 평가할 수 있다. 이 도표는 현지암반을 육안관찰하여 GSI를 평가함과 동시에 현지암반의 블록크기를 평가할 수 있는 장점이 있다. Fig. 4에는 이 방법으로 동해광산(D1, D2)의 모든 벤치에서 조사된 GSI와 현지암반의 블록크기가 도시되어 있다.

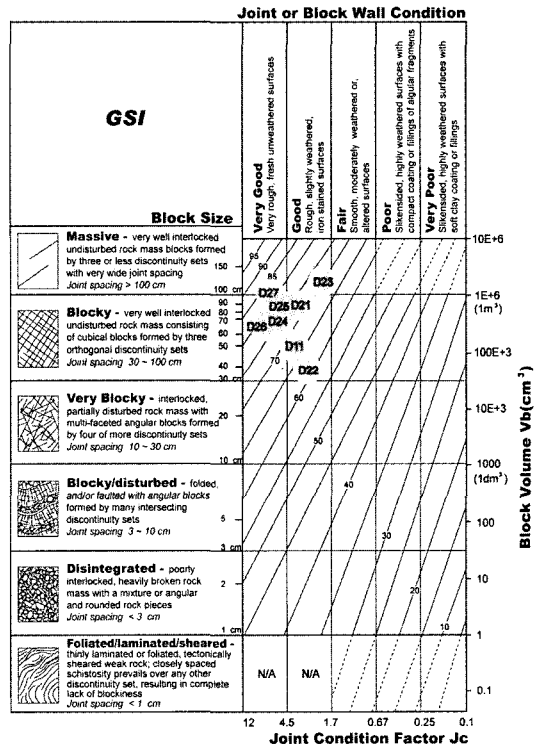


Fig. 4. GSI diagram including in-situ rock block size(after Cai et al., 2004)

나. 절리간격

절리간격은 모든 광산에서 각 절리군별로 조사되었으나, Kuz-Ram 모델이 고려할 수 있는 절리간격은 가장 우세한 주절리군에 제한되어 있다. 따라서 이 연구에서는 Set-1 절리군에 속하는 절리간격만을 평가하였다 (Fig. 5). 절리간격 분포는 전체적으로 Lognormal 분포가 잘 맞는다. 신기광산 S2의 절리간격이 평균 20~30 cm로 가장 좁으며, 최대간격도 90 cm 내외로 전체 조사 지역에서 가장 작은 값을 보인다. 반면 영월광산(Y1)의 경우는 평균간격이 60~70 cm 내외로서 타 지역에 비해 비교적 넓게 나타났으며, 일정한 간격으로 나타나는 것을 알 수 있다. 동해광산의 D1, D2 및 신기광산의 S1은 절리간격이 50~60 cm 내외로서 유사한 특징을 보인다. 동해광산의 D3는 절리간격이 평균 120 cm로써 전체 조사 지역 중 가장 넓은 절리간격 분포를 보이지만, 20 cm 이내의 절리 또한 다수 분포하는 특징을 보인다.

지만, 이 경우 분석자의 주관이 개입될 소지가 있으므로 객관적인 대표값을 확보하기 위해 조사된 절리의 Orientation Tensor로부터 계산된 첫 번째 Eigenvector의 방향을 적용하였다. 특정 지역에서 조사된 N개 절리 중 i번째 절리의 법선벡터가 $[l_i, m_i, n_i]$ 의 단위 벡터를 갖는다면, 이로부터 다음과 같은 3×3 행렬을 얻을 수 있다.

$$B = \begin{bmatrix} \sum l_i^2 & \sum l_i m_i & \sum l_i n_i \\ \sum m_i l_i & \sum m_i^2 & \sum m_i n_i \\ \sum n_i l_i & \sum n_i m_i & \sum n_i^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

이때 B 행렬의 정규화된 형태의 행렬을 다음의 (7)과 같이 구할 수 있는데 이를 Orientation Tensor로 정의하며, 이 행렬의 Eigenvector를 구할 수 있다.

다. 절리방향과 벤치면이 이루는 각도

일반적으로 절리방향은 절리군 분석을 통해서 평가되

$$A = \frac{B}{N} \quad (7)$$

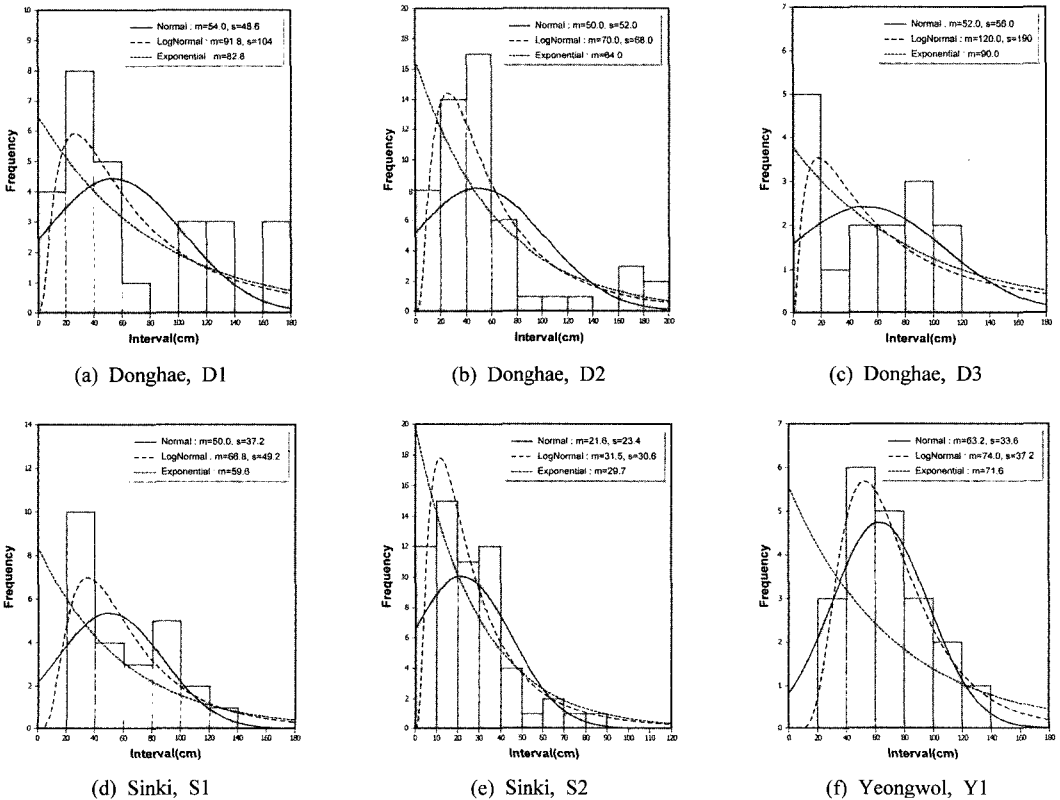


Fig. 5. Distribution of the major joint set interval for each mine(m : mean; s : standard deviation)

Table 2는 절리군 분석을 통해서 평가된 각 광산별 절리 방향성 분석 결과이며, Table 3은 Orientation Tensor로부터 계산된 Eigenvector의 방향과 경사이다.

Fig. 6에는 각 조사지역별로 평가된 Eigenvector와 조사된 모든 벤치의 방향을 표시하였다. 그림에서 점과 1~3의 숫자로 표시된 것은 첫 번째~세번째 Eigenvector에

Table 2. Summary of joint set analysis(Dip./Dip Dir.)

| Site(Mine) | Set-1 | Set-2 | Set-3 |
|--------------|--------|--------|--------|
| Donghae, D1 | 85/298 | 32/060 | 80/226 |
| Donghae, D2 | 79/313 | 29/098 | 87/226 |
| Donghae, D3 | 75/114 | 61/254 | 30/085 |
| Sinki, S1 | 86/090 | 64/002 | 36/180 |
| Sinki, S2 | 84/154 | 76/233 | 23/097 |
| Yeongwol, Y1 | 69/314 | 74/227 | 08/269 |

Table 3. Result of the trend and plunge of eigenvector for each mine

| Site(Mine) | Eigenvector 1 | | Eigenvector 2 | | Eigenvector 3 | |
|--------------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| | Trend | Plunge | Trend | Plunge | Trend | Plunge |
| Donghae, D1 | 283.6 | 0.44 | 193.2 | 44.08 | 14.0 | 45.91 |
| Donghae, D2 | 124.8 | 4.58 | 218.4 | 38.05 | 29.0 | 51.58 |
| Donghae, D3 | 286.8 | 16.6 | 20.6 | 12.38 | 145.6 | 69.07 |
| Sinki, S1 | 79.3 | 14.92 | 341.1 | 28.18 | 194.0 | 57.46 |
| Sinki, S2 | 353.92 | 16.51 | 262.1 | 6.20 | 152.2 | 72.30 |
| Yeongwol, Y1 | 119.03 | 23.63 | 27.04 | 4.52 | 286.87 | 65.89 |

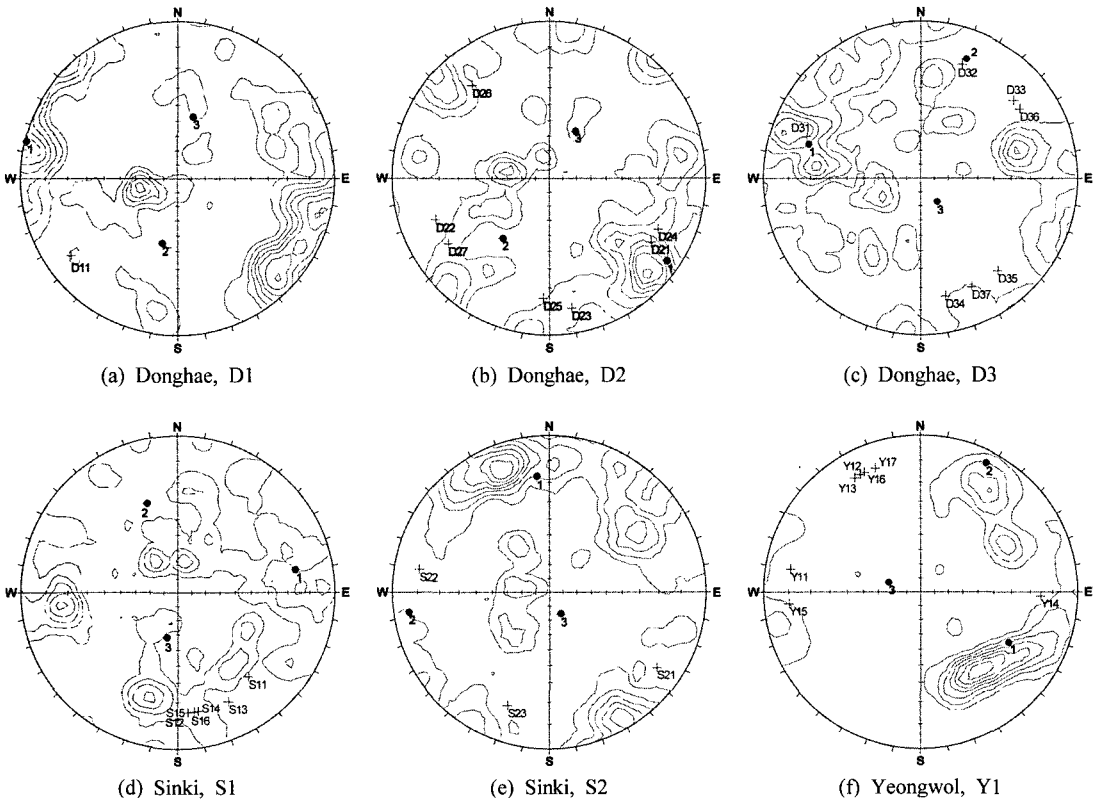


Fig. 6. The eigenvector and bench direction(1~3 : eigenvector; D11~Y17 : bench)

해당하며, '+'와 D11 등으로 표기된 것은 조사된 벤치면을 가리킨다. 이 그림으로부터 절리방향과 벤치면이 이루는 각도가 계산된다.

절리면의 경사방향과 벤치면의 경사방향이 이루는 각도 관계를 그림으로 표현하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)에는 두 면의 주향 차이가 0°를 이루는 경우이다. (a)에서와 같이 절리면의 주향이 벤치면의 주향과 동일하면 사이각은 0°로 표현되며, 이 때 절리의 경사방향이 벤치면의 경사방향과 동일하면 '+' 각도, 서로 반대 방향이면 '-' 각도를 이루게 된다. Fig. 7(b)는 절리면과 벤치면의 주향이 90°를 이루고 있는 경우이다.

라. 암석의 공학적 특성

조사 지역 암석의 공학적 특성을 파악하기 위해 실험실에서 일축압축강도와 인장강도, 기초적인 물성시험을 실시하였고, 암편들을 이용한 점하중 시험을 실시하였다. 일축압축강도와 물성시험을 위한 시료는 각 발파지역에서 채취한 암석 블록에서 얻어진 코어(NX-Size)를 이용하였다. 점하중 시험은 각 발파가 이루어진 벤치 주변에서 암편을 채취하여 불규칙 형태의 시료를 이용한 시험을 30회씩 실시하였으며, 30개 측정자료의 평균값을 수록하였다(Table 4).

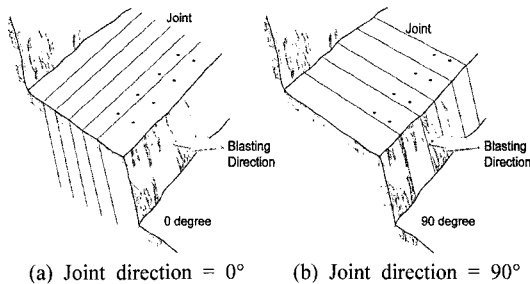


Fig. 7. The definition of the angle between the Joint direction and the bench surface

Table 4. Summary of rock properties

| Site(Mine) | UCS (kgf/cm ²) | Point Load Index (kgf/cm ²) | Tensile Strength (kgf/cm ²) | Elastic Modulus (10 ⁵ kgf/cm ²) | Vp (m/s) |
|--------------|----------------------------|---|---|--|----------|
| Donghae, D1 | 690 | 43 | 74 | 9.54 | 5,000 |
| Donghae, D2 | 810 | 34 | 69 | 4.25 | 3,210 |
| Donghae, D3 | 730 | 32 | 65 | 5.66 | 3,180 |
| Sinki, S1 | 1,170 | 45 | 240 | 12.79 | 5,650 |
| Sinki, S2 | 1,180 | 47 | 116 | 10.29 | 6,440 |
| Yeongwol, Y1 | 1,820 | 44 | 130 | 5.14 | 6,090 |

4. Kuz-Ram 모델을 이용한 예측

4.1 발파조건

6개 지역에서 총 31회의 발파결과가 조사되었다. 조사는 석회석 광석을 얻기 위한 정규 수직발파(Production Blasting)에서만 이루어졌으며, 기타 수평발파나 폐석에 대한 발파 및 단층이 자유면에 노출되어 있는 경우는 조사대상에서 제외되었다. 조사된 모든 광산에서 벤치 높이는 12~15 m로 유사하다. 저항선과 공간격도 대략 3 m~3.5 m 내외에서 유사하며, 1 m의 Sub-Drilling에 전색 높이 3~4 m를 적용하는 등 광산에 따라서 큰 차이를 보이지 않는다. 다만 영월광산(Y1)에서는 현지 여건상 발파공경을 89 mm로 적용하고 있으며, 동해광산에서는 주변 환경을 고려하여 102 mm와 89 mm 공경을 선택하여 적용하고 있다. 신기광산은 모든 벤치에서 102 mm 공경을 적용하고 있다. 폭약은 비중 0.8의 ANFO(Bulk Truck 운반)를 동일하게 사용하고 있다.

공당장약량(Q_b)은 ANFO 비중과 공경, 천공장과 전색장을 이용해서 산출되었다. 발파공 최하부에 장약되는 에멀전 폭약은 암석을 파쇄하기 위한 고밀도 하부장약이 아니라 ANFO를 기폭시키기 위한 전폭약으로 이용되는 것이므로 공당장약량과 비장약량 산출에서 제외되었다. 암반조건과 착점오차 등으로 공간격(S)과 저항선(B)이 일정하게 유지되지 못하는 경우는 비장약량 산출시 공간격과 저항선의 평균값이 이용되었다. 뇌관은 20 ms 간격의 지연시차를 가진 같은 회사 제품의 전기식 뇌관이 모든 광산에서 동일하게 적용되고 있었으며, 진동으로 인한 주변 환경피해를 고려하여 각 지연시차당 1개 공만을 발파하였다. 이러한 전기뇌관 결선 방법은 모든 광산에서 동일하다.

4.2 예측결과와 측정결과 비교

Table 5에는 Kuz-Ram 모델을 이용해서 예측된 파쇄물의 입도분포를 요약하였으며, Fig. 8에는 예측된 결과와 측정된 결과를 비교하기 위해 대표적인 벤치에 대한 예측과 측정결과를 동일 그래프에 도시하였다.

Kuz-Ram 모델을 이용한 예측결과는 현장조사 결과와 잘 일치하는 경우도 있으며, 평균크기(X_{50})가 100% 이상의 차이를 보이는 경우도 있다. 두 값의 차이는 파쇄암의 크기가 작거나 클수록 더 크게 나타나는 경향을 보인다. Fig. 8에서 D11과 D21, S23은 비교적 정확한

예측이 이루어진 경우이며, D35는 큰 차이를 보인 경우이다. 특히 D35는 벤치 내부에 있는 공동으로 인해 발파압력이 암석을 파쇄하는 데 충분히 활용되지 못하여 매우 큰 블록이 만들어진 경우이다.

Fig. 9는 측정된 파쇄물의 평균크기가 작은 것부터 큰

Table 5. Kuz-Ram model result

| Blast | Intact Rock | | | Jointing | | | | | Explosive | | Kuz-Ram Results | | | |
|-------|-------------|---------|-----------|----------|------------|-----------------|----------------|---------------|-----------|---------------------|-----------------|----------------------|---------------------|------|
| | SG | E (GPa) | UCS (MPa) | Js (m) | Joint Dip. | Joint Dip. Dir. | Block Size (m) | Face Dip Dir. | q | Q _b (kg) | Fr | X ₅₀ (cm) | X _c (cm) | n |
| D11 | 2.77 | 93.5 | 67.6 | 0.92 | 89 | 105 | 0.5 | 54 | 0.61 | 71.91 | 8.27 | 25.6 | 33.4 | 1.37 |
| D21 | 2.75 | 50.3 | 85.3 | 0.7 | 85.4 | 305 | 0.9 | 302 | 0.43 | 49.77 | 7.49 | 29.3 | 39.7 | 1.21 |
| D22 | 2.78 | 36.8 | 82.8 | 0.7 | 85.4 | 305 | 0.38 | 70 | 0.55 | 79.63 | 7.46 | 25.6 | 31.5 | 1.76 |
| D23 | 2.77 | 37.8 | 71.0 | 0.7 | 85.4 | 305 | 1.2 | 350 | 0.34 | 69.68 | 8.63 | 42.5 | 55.3 | 1.40 |
| D24 | 2.77 | 37.8 | 71.0 | 0.7 | 85.4 | 305 | 0.7 | 295 | 0.37 | 61.45 | 7.13 | 32.6 | 43.3 | 1.29 |
| D25 | 2.77 | 37.8 | 71.0 | 0.7 | 85.4 | 305 | 0.85 | 3 | 0.33 | 70.17 | 7.82 | 39.7 | 52.2 | 1.35 |
| D26 | 2.75 | 50.3 | 85.3 | 0.7 | 85.4 | 305 | 0.65 | 140 | 0.43 | 48.37 | 7.94 | 30.5 | 42.0 | 1.15 |
| D27 | 2.75 | 50.3 | 85.3 | 0.7 | 85.4 | 305 | 1.0 | 57 | 0.57 | 54.91 | 8.15 | 25.6 | 33.4 | 1.38 |
| D31 | 2.75 | 49.6 | 93.1 | 1.2 | 73.4 | 106 | 0.9 | 110 | 0.51 | 84.98 | 7.46 | 27.7 | 34.7 | 1.63 |
| D32 | 2.74 | 61.3 | 51.0 | 1.2 | 73.4 | 106 | 0.6 | 200 | 0.52 | 81.71 | 8.08 | 29.3 | 38.0 | 1.41 |
| D33 | 2.74 | 61.3 | 51.0 | 1.2 | 73.4 | 106 | 0.5 | 230 | 0.52 | 81.71 | 8.02 | 29.1 | 37.7 | 1.41 |
| D34 | 2.74 | 61.3 | 51.0 | 1.2 | 73.4 | 106 | 1.5 | 348 | 0.59 | 48.37 | 8.29 | 25.0 | 33.0 | 1.31 |
| D35 | 2.74 | 49.6 | 51.0 | 1.2 | 73.4 | 106 | 0.25 | 320 | 0.44 | 78.44 | 8.25 | 34.1 | 44.3 | 1.40 |
| D36 | 2.74 | 49.6 | 51.0 | 1.2 | 73.4 | 106 | 1.0 | 235 | 0.60 | 91.52 | 8.70 | 28.7 | 37.7 | 1.34 |
| D37 | 2.74 | 49.6 | 51.0 | 1.2 | 73.4 | 106 | 0.2 | 335 | 0.67 | 81.71 | 8.22 | 24.2 | 31.4 | 1.41 |
| S11 | 2.75 | 125 | 114.7 | 0.67 | 75 | 259 | 0.2 | 320 | 0.50 | 68.64 | 8.56 | 30.9 | 39.4 | 1.50 |
| S12 | 2.74 | 125 | 114.7 | 0.67 | 75 | 259 | 0.2 | 355 | 0.39 | 54.91 | 8.55 | 36.7 | 49.5 | 1.23 |
| S13 | 2.74 | 125 | 114.7 | 0.67 | 75 | 259 | 0.2 | 335 | 0.50 | 78.44 | 8.61 | 32.0 | 42.6 | 1.28 |
| S14 | 2.74 | 125 | 114.7 | 0.67 | 75 | 259 | 0.09 | 350 | 0.46 | 68.64 | 8.54 | 33.0 | 44.4 | 1.26 |
| S15 | 2.74 | 125 | 114.7 | 0.67 | 75 | 259 | 0.25 | 355 | 0.49 | 61.45 | 8.64 | 31.0 | 41.3 | 1.32 |
| S16 | 2.74 | 125 | 114.7 | 0.67 | 75 | 259 | 1.0 | 352 | 0.52 | 81.71 | 9.09 | 33.0 | 43.9 | 1.27 |
| S21 | 2.74 | 100 | 115.6 | 0.32 | 73.5 | 174 | 1.4 | 305 | 0.61 | 81.71 | 9.34 | 29.9 | 39.2 | 1.35 |
| S22 | 2.74 | 100 | 115.6 | 0.32 | 73.5 | 174 | 0.1 | 100 | 0.63 | 79.75 | 7.91 | 24.6 | 31.6 | 1.46 |
| S23 | 2.74 | 100 | 115.6 | 0.32 | 73.5 | 174 | 1.5 | 20 | 0.55 | 62.10 | 8.80 | 29.0 | 37.5 | 1.42 |
| Y11 | 2.76 | 50.4 | 178.4 | 0.74 | 70 | 310 | 1.1 | 100 | 0.34 | 69.68 | 9.34 | 46.4 | 60.3 | 1.40 |
| Y12 | 2.76 | 50.4 | 178.4 | 0.74 | 70 | 310 | 0.8 | 150 | 0.34 | 74.65 | 9.16 | 45.8 | 59.4 | 1.41 |
| Y13 | 2.76 | 50.4 | 178.4 | 0.74 | 70 | 310 | 0.4 | 153 | 0.43 | 72.17 | 8.92 | 36.9 | 47.6 | 1.44 |
| Y14 | 2.76 | 50.4 | 178.4 | 0.74 | 70 | 310 | 1.25 | 272 | 0.38 | 72.17 | 10.03 | 45.5 | 58.2 | 1.48 |
| Y15 | 2.76 | 50.4 | 178.4 | 0.74 | 70 | 310 | 0.3 | 85 | 0.46 | 64.70 | 8.86 | 33.9 | 42.8 | 1.57 |
| Y16 | 2.76 | 50.4 | 178.4 | 0.74 | 70 | 310 | 0.6 | 155 | 0.38 | 72.17 | 9.04 | 41.1 | 53.2 | 1.42 |
| Y17 | 2.76 | 50.4 | 178.4 | 0.74 | 70 | 310 | 0.6 | 160 | 0.38 | 69.68 | 9.04 | 41.0 | 53.0 | 1.42 |

SG : Rock specific gravity; E : Elastic modulus; Js : Joint spacing; q : Powder factor(kg/m³); Q_b : Charge per hole; Fr : Rock factor; X₅₀ : Fragment mean size; X_c : Characteristic size; n : Uniformity Index; Joint and face dip direction : degree

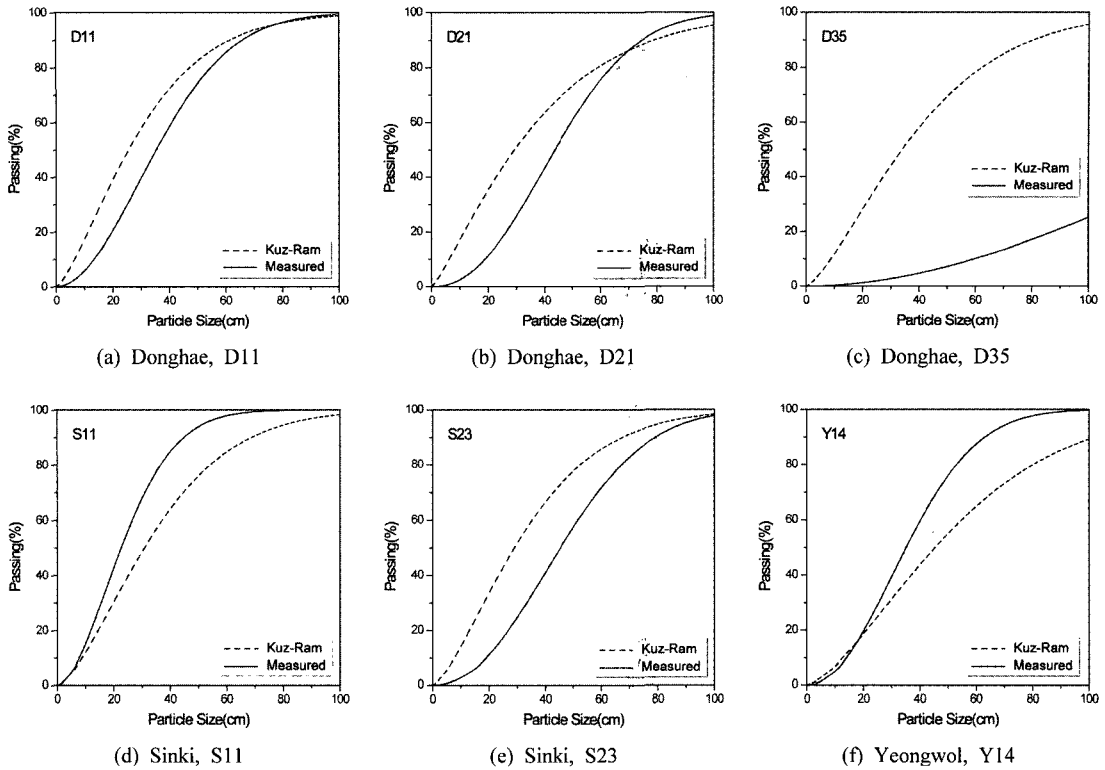


Fig. 8. Size distribution of the blasted rock and Kuz-Ram result

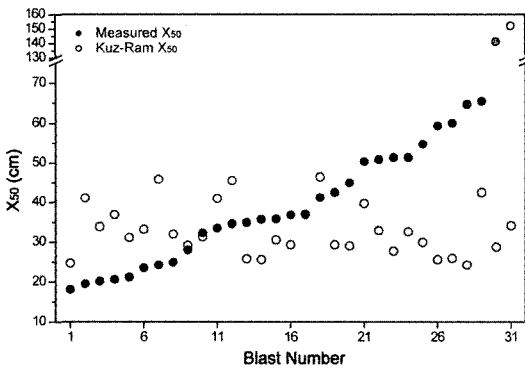


Fig. 9. Size distribution of the blasted rock and Kuz-Ram result

것의 순서대로 측정결과와 예측결과를 동시에 표기해 놓은 그림이다. 이 그림에서 Kuz-Ram 모델을 이용한 예측 결과는 파쇄물의 평균크기가 20~50 cm의 범위에 제한되어 나타난다. 발파조건이 모든 벤치에서 유사하다는 점을 고려하면, 예측값이 일정한 범위로 나타나는

이유는 현지암반 조건을 평가하는 Rock Factor 값의 범위가 제한되어 있음에 가리킨다. 또는 Rock Factor를 계산하기 위해 적용되고 있는 Blastability Index(BI)는 파쇄물의 평균크기 예측과 관련하여 현지암반 조건을 충분히 반영하지 못한다고 볼 수 있다.

5. 결 론

파쇄도를 정확히 예측할 수 있으면 원하는 파쇄도를 얻기 위한 발파설계가 가능해지며, 투입 장비와 수량을 사전에 예측할 수 있으므로 계획적인 생산이 가능해진다. 발파조건 뿐 아니라 현지암반 조건을 어느 정도 고려하고 있는 Kuz-Ram 모델은 파쇄도를 예측하기 위한 모델 중 가장 우수한 모델로 알려져 있다. 그러나 Kuz-Ram 모델을 이용해서 예측된 파쇄물의 크기가 일정한 범위에서 제한되어 나타나는 등 현장에서 측정된 결과와는 차이를 보였다. 이러한 차이는 Kuz-Ram 모델이 현지암반 조건을 고려하기 위해 적용하고 있는 방법이 현지암반 조건을 충분히 반영하지 못하기 때문에 나타난다. 따라서 보다 정확한 파쇄도 예측을 위해서는 현

지암반 조건을 평가하기 위한 새로운 기준이 마련되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Aler J., Mousa J. and Arnould M., 1996, Measurement of the fragmentation efficiency of rock mass blasting and its mining applications, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. abstr., 33(2), 125-139.
2. Cai M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y., Minami M., 2004, Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41(1), 3-19.
3. Cunningham C.V., 1983, The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. First Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden, 2, 439-453.
4. Cunningham C.V., 1987, Fragmentation estimation and the Kuz-Ram model: four years on, Proc. 2nd Int. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, Colorado, USA, 475-487.
5. Gama C., 1983, Use of comminution theory to predict fragmentation of jointed rock masses subjected to blasting, First Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden, 2, 565-579.
6. Gama C. and Jimeno C.L., 1993, Rock fragmentation control for blasting cost minimization and environmental impact abatement, 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Vienna, 273-280.
7. Kou S. and Rustan A., 1993, Computerized design and result prediction of bench blasting, 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Vienna, 263-271.
8. Larsson, B., 1974, Blasting of low and high benches, fragmentation from production blasting, Swedish Rock Blasting Committee, Stockholm, Sweden, 247-271.
9. Lilly, 1986, An empirical method of assessing rock mass blastibility, Proceedings Aus. IMM/IE Aust. Newman Combined Group Large Open Pit Mining Conference, 89-92.
10. Lopez J. and Carcedo A., 1995, Drilling and Blasting of Rocks, Balkema, Rotterdam, 391p.
11. Nielsen K., 1983, Optimization of open pit bench blasting, First Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden, 2, 653-663.
12. Palmström A. 1996(a), Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering, Part 2; the development of the rock mass index(RMi), Tunnelling and Underground Space Technology, 11(2), 175-188
13. Palmström A. 1996(b), Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering, Part 2; some practical applications of the rock mass index (RMI), Tunnelling and Underground Space Technology, 11(3), 287-303
14. Rustan A., 1998, Automatic image processing and analysis of rock fragmentation - comparison of systems and new guidelines for testing the systems, FRAGBLAST - International Journal of Blasting and Fragmentation, 2, 15-23.

최용근



1994년 서울대학교 공과대학
자원공학과 공학사
1996년 서울대학교 대학원
자원공학과 공학석사

Tel: 02-3472-2261
E-mail: ykchoi@geogeny.biz
현재 (주)지오제니컨설팅 이사

이정인



1963년 서울대학교 공과대학
광산학과 공학사
1965년 서울대학교 대학원
광산학과 공학석사
1974년 일본 도호쿠대학(東北大學)
대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 02-880-7221
E-mail: cilec@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

이정상



1993년 서울대학교 자연과학대학
지질학과 이학사
1996년 서울대학교 대학원
지질학과 이학석사

Tel: 02-3472-2261
E-mail: jstop@geogeny.biz
현재 (주)지오제니컨설팅 차장

김장순



2000년 세명대학교 공과대학
자원공학과 공학사
2003년 세명대학교 대학원
환경안전시스템공학과 공학석사

Tel: 02-3472-2261
E-mail: kim_js@geogeny.biz
현재 (주)지오제니컨설팅 대리