

발파암 계수의 3차원 공간 분포에 기초한 암석 파쇄도 예측 및 발파 패턴 설계

류동우^{1)*}, 심현진²⁾, 서종석³⁾

Prediction of Rock Fragmentation and Design of Blasting Pattern based on 3-D Spatial Distribution of Rock Factor

Dong-Woo Ryu, Hyun-Jin Shim and Jong-Seok Seo

Abstract The optimum blasting pattern to excavate a quarry efficiently and economically can be determined based on the minimum production cost which is generally estimated according to rock fragmentation. Therefore it is a critical problem to predict fragment size distribution of blasted rocks over an entire quarry. By comparing various prediction models, it can be ascertained that the result obtained from Kuz-Ram model relatively coincides with that of field measurements. Kuz-Ram model uses the concept of rock factor to signify conditions of rock mass such as block size, rock jointing, strength and others. For the evaluation of total production cost, it is imperative to estimate 3-D spatial distribution of rock factor for the entire quarry. In this study, a sequential indicator simulation technique is adopted for estimation of spatial distribution of rock factor due to its higher reproducibility of spatial variability and distribution models than Kriging methods. Further, this can reduce the uncertainty of predictor using distribution information of sample data. The entire quarry is classified into three types of rock mass and optimum blasting pattern is proposed for each type based on 3-D spatial distribution of rock factor. In addition, plane maps of rock factor distribution for each ground levels is provided to estimate production costs for each process and to make a plan for an optimum blasting pattern.

KeyWords Rock fragmentation, Kuz-Ram model, Rock factor, Sequential indicator simulation, Production cost

초 록 대규모 채석을 위한 최적 발파 패턴은 파쇄 입도의 분포에 따라 추산된 최소 발파 비용에 기초하여 결정될 수 있다. 따라서 파쇄 입도의 분포를 예측하는 문제는 매우 중요하다. 파쇄 입도 분포의 예측에 사용된 모델은 현장 시험발파로부터 얻은 발파석에 대한 입도 분포와 비교 검토하여 선택하였다. 그 결과 Kuz-Ram 모델을 파쇄 입도 모델로 선정하였으며, 이 모델은 현지 암반의 상태를 고려할 수 있는 발파암 계수라는 지배적 인자를 사용한다. 전체 생산 비용 산정을 위해 발파암 계수의 3차원 공간 분포의 추정 은 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대규모 발파 예정 대상 구역 전체의 발파암 계수에 대한 3차원 공간 분포를 추정하기 위해 순차적 지시 시뮬레이션을 적용하였다. 순차적 지시 시뮬레이션은 조건부 시뮬레이션의 한 종류로서, 크리깅 기법에 비해 높은 변동도 모델 재현성과 취득된 조사 자료의 분포 모델에 관한 정보를 활용함으로써 추정치에 대한 불확실성을 보다 줄일 수 있는 장점을 가진다. 발파암 계수의 3차원 분포로부터 대상 구역 전체의 발파암 TYPE을 분류할 수 있었으며, 각 TYPE별 최적 발파 패턴을 설계할 수 있었다. 또한, 지반고별 발파암 계수의 분포에 대한 정량적 정보를 제공함으로써 각 공정단계별 비용을 추산하여 공정계획을 세우는데 도움이 될 수 있다.

핵심어 파쇄도, Kuz-Ram 모델, 발파암 계수, 순차적 지시 시뮬레이션, 생산비용

¹⁾ 한국지질자원연구원 연수연구원

²⁾ (주)서영엔지니어링 지반터널설계실 과장

³⁾ 도성엔지니어링(주) 부장

* 교신저자 : ryurock@empal.com

접수일 : 2005년 7월 12일

심사 완료일 : 2005년 8월 8일

1. 서 론

공단 및 항만 등의 국가 산업 인프라 구축을 위한 부지조성 및 인근 공사현장의 원활한 석재공급을 위해 수행되는 대규모 석산 개발시 암석 파쇄도는 벤치발파의 효율성과 생산 경제성을 평가하는 가장 중요한 요소로 작용한다. 공급 석재 규격 이상의 발파석 발생시 불필요한 소할 및 파쇄 공정이 발생되므로 전체 생산비용 증대 및 공기 지연의 결과를 초래하게 된다. 따라서 생산비용 절감 및 공기 단축을 위하여 암석 파쇄도를 고려한 발파설계는 필수적이라 할 수 있다(Nielsen, 1983).

발파석의 평균 파쇄입도크기를 예측하는 모델 중 비교적 활용도와 현장 적용성이 높은 모델로는 Larsson 모델(Larsson, 1974), SveDeFo 모델(Kou and Rustan, 1993), Kuz-Ram 모델(Cunningham, 1983, 1987) 등이 있다. 최용근(2005)은 이들 모델들을 비교·검토하였으며, 실제 현장 자료와 시험발파를 통해 수정 보완된 암석 파쇄도 예측 모델을 제안한 바 있다.

현지암반 조건 평가를 통한 정확한 파쇄입도 분석이 이루어지면 목표 파쇄도를 얻기 위한 발파설계가 가능하므로 전체 발파대상구역의 효율적인 발파패턴 선정 및 전체 석재 생산공정의 생산원가를 분석하기 위해서는 전체 발파 대상구역의 현지 암반 조건에 관한 평가가 이루어져야 한다. 그러나 대규모 석산의 경우 조사 범위의 한계로 인하여 전구간의 암반조건을 파악하기

어려우므로 제한된 조사 자료의 통계적 정보를 최대한 활용할 수 있는 현지암반 조건의 공간 분포 추정 과정이 필요하다.

본 연구에서는 발파패턴을 달리하는 4회의 현장 시험 발파에 의한 실제 파쇄입도 분포와 여러 예측모델에 의한 파쇄입도 분포를 비교·분석하여 최적 파쇄도 예측 모델을 선정하였고, 순차적 지시 시뮬레이션을 적용하여 얻은 발파암 계수(Rock Factor, Fr)의 3차원 공간분포 추정결과를 바탕으로 지반고별 구간에 따른 발파 TYPE을 구분하였으며, 발파 TYPE별 파쇄도 및 생산원가 분석으로부터 설계 벤치높이인 12 m의 경우에 대해 최적의 생산성을 확보할 수 있는 발파패턴을 선정하고자 하였다.

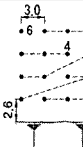
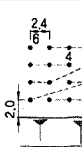

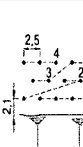

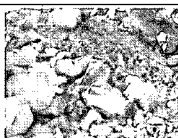
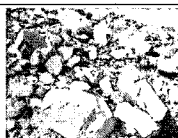

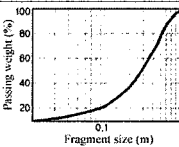
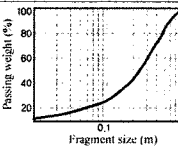
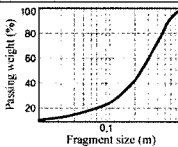
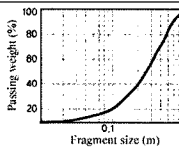
2. 파쇄도 예측 모델

2.1 파쇄도 예측 모델 선정

파쇄도 예측 모델을 선정하기 위해 현장 시험발파를 수행하였으며, 영상처리기법에 의한 발파석 입도 분석 결과를 실제 파쇄입도크기로 가정하고 여타 예측 모델들에 의한 추정 파쇄입도를 비교 분석하였다.

파쇄도 예측 모델 선정을 위해 수행된 현장 시험발파 발파패턴과 영상처리기법을 적용하여 분석한 파쇄입도 분포는 Table 1과 같다. 현장 암반특성에 적합한 화약

Table 1. Test blasting patterns and results of fragmentation analysis

Division	Pattern-I	Pattern-II	Pattern-III	Pattern-IV
Blasting pattern				
Bench height (m)	9	9	11	11.5
Explosive	ANFO	Emulsion	Dynamite	Emulsion
Specific charge(kg/m ³)	0.30	0.32	0.34	0.31
Fragmented rock image				
Fragment size distribution curve				
Average fragment size(m)	0.32	0.28	0.28	0.29

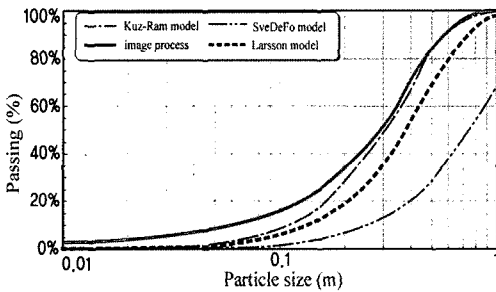


Fig. 1. Comparison among fragment size distributions from measurement and various fragmentation models

류 및 천공패턴 선정을 위해 4가지 발파패턴으로 구분하여 현장 시험발파를 수행하였으며, 영상처리기법에 의한 실제 파쇄입도 크기 분석 결과 평균 파쇄입도 크기는 0.28~0.32 m의 범위를 보였다.

4회의 현장 시험발파 결과에 대하여 영상처리기법에 의한 평균 파쇄입도 분포 곡선과 예측 모델들에 의해 추정한 평균 파쇄입도 분포 곡선들은 Fig. 1과 같다. 비교 분석 결과 Kuz-Ram 모델이 비교적 양호한 예측결과를 보여주는 것으로 나타났으며, 입도 크기 30 cm 이상에서는 거의 유사한 결과를 보였다. 이에 근거하여 발파 공정 최적화를 위한 파쇄도 예측 모델로서 Kuz-Ram 모델을 선정하였다.

2.2 발파암 계수

Kuz-Ram 모델에서는 현지 암반 조건을 고려하기 위

해 Kuznetsov의 경험식을 기초로 하고 있으며, 현지 암반 조건을 반영하기 위한 인자로 발파암 계수의 개념을 사용하고 있다. 따라서 전체 발파 대상 구역의 암반 조건을 고려한 생산 비용 산정과 발파 패턴 선정을 위해 발파암 계수의 3차원 공간 분포를 추정해야 하며, 이로부터 얻은 암석 파쇄도의 예측결과를 통해 최적의 발파 패턴을 결정할 수 있다.

Cunningham(1987)은 객관적인 사실에 근거하여 현지 암반 조건을 평가하기 위해 Lilly(1986)의 발파 지수(blastability index; BI)를 이용해서 발파암 계수(rock factor)를 평가하는 방법을 제안하였다. 발파 지수(BI)는 벤치발파에서 적정 비장약량을 산정하기 위해 암반의 절리조건과 공학적 특성을 고려하는 일종의 현지 암반 평가 기법이다(최용근 외, 2005). Cunningham(1987)은 발파 지수(BI)에 0.12를 곱하여 다음 식과 같은 발파암 계수와 관련한 추정식을 구성하였다.

$$F_r = 0.06 \times (RMD + JF + RDI + HF);$$

$$F_r = 0.12 \times BI \quad (1)$$

여기서, RMD(rock mass description)는 암반 블록 크기와 관련한 인자, JF(joint factor)는 암반 절리 간격 및 벤치와의 상대적 방향과 관련한 인자, RDI(rock density index)는 암반의 비중과 관련한 인자, HF(hardness factor)는 암반 강도와 관련된 인자이며, BI는 발파 지수(blastability index)이다. 식 (1)에서의 각 인자별 평가 기준에 대한 간단한 설명은 Table 2와 같다.

Table 2. Parameters in order to estimate the rock factor(after Cunningham, 1987)

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

¹⁾ JFs : Rating for joint spacing

²⁾ JFo : Rating for joint orientation

발파암 계수를 구성하는 인자들은 발파 대상 현저 암반 조건을 평가하기 위한 값으로서, 크게 암반의 블록 크기, 암반 절리의 간격과 방향, 그리고 비중 및 강도 등으로 구성된다.

강도와 비중 등은 점하중 강도 및 실내 시험을 통해서 그 값을 평가할 수 있으며, 비중의 경우 물리 검출을 통해서도 취득할 수 있는 값이다. 절리 간격 및 방향과 관련한 부분은 시추공 조사(BIPS 혹은 Televiewer) 및 지표지질조사를 통해 취득한 자료를 토대로 평가할 수 있다. 암반 블록의 크기는 직접적으로 조사할 수 있는 자료가 아니며, 이것과 관련하여 몇몇 추정법들을 활용할 수 있다. 대표적인 암반 블록 크기의 추정은 GSI (geological strength index)를 이용하여 구할 수 있다. 하지만, GSI는 단일값으로 표시되지 않고, 암반 상태와 절리 상태에 따라 일정 범위의 값으로 표시되는 특징이 있다. 이는 GSI의 산정시 간편하다는 점에서 장점이 될 수도 있지만, 공학적 판단으로 암반의 특징을 정성적으로 평가하기 때문에 조사자의 주관성이 개입될 여지가 많다. 또한, 발파암 계수의 인자인 암반 블록 크기를 산정할 때 요구되는 사항은 단순히 블록의 크기만을 고려해야 할 사항이며, 이 경우 GSI는 절리 상태(joint condition, Jc)와 같은 부가적인 인자가 블록 크기의 범위 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 암반 블록 크기

의 산정을 위해 절리의 기하학적 인자만을 고려하기 위한 접근법을 채택하였다.

2.3 암반 블록 크기 평가

발파암 계수의 구성 인자 중 암반 블록 크기는 중요한 인자이다. Palmström(2001)은 블록 크기를 추정하기 위해 다양한 절리 기하를 고려한 비교적 간편한 몇 가지 추정식들을 제안하였으며(Table 3), 이를 이용하여 현지 암반의 절리 자료로부터 암반 블록 크기를 추정하였다.

- 절리군 간격에 의한 블록 크기 추정

세 개의 절리군이 암반 블록을 형성하고 있는 경우, 암반 블록의 체적은 다음 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$V_b = S_1 \times S_2 \times S_3 \times (\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3) \quad (2)$$

여기서, S_1 , S_2 , S_3 는 절리군간의 간격이며, γ_1 , γ_2 , γ_3 는 절리군간의 사잇각이다.

랜덤 절리군이나 세 개 이하의 절리군이 있는 경우, 상기 추정식으로 계산하기 어렵지만, 랜덤 절리군의 간격이 주 절리군의 간격의 5-10배 정도인 경우는 상기 식을 이용해서 추정할 수 있다.

Table 3. Various estimation methods for block size and joint density (after Palmström, 2001)

Distance between joints		Measurement	Calculation of the volumetric joint count(Jv) and/or the block volume(Vb)
3-D	Joint set spacings ¹⁾ S_1, S_2, S_3, \dots	Block volume, V_b	$V_b = S_1 \times S_2 \times S_3 \times (\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3)$ $V_b = \beta \times J_v^{-3}$ *
		Volumetric joint count, J_v	$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{N_r}{5}$
2-D	Joint set spacings ¹⁾ S_1, S_2, S_3, \dots	Joint density in an area, N_a	$J_v \approx k_a \times N_a$
		Weighted jointing density in an area, wJ_d	$J_v \approx wJ_d$
1-D	Joint intercept ²⁾ J_i	Joint density along a drill ore or scanline, N_l Rock quality designation, RQD	$J_v \approx k_l \times N_l$ $J_v \approx 35 - RQD/3.3$
		Weighted jointing density along a line, wJ_d	$J_v \approx wJ_d$

¹⁾ Distance between joint in a joint set

²⁾ Joint intercept is the distance between joints of various joint sets along a drill core. In bore holes this term should be applied instead of the term joint spacing

* β = block shape factor, a simplified expression is $\beta = 20 + 7a_3 / a_1$ (a_3 and a_1 are the longest and shortest dimension of the block)

k_l and k_a are factors to convert 1-D and 2-D measurement into volumetric (3-D) measurements

- 조사창 조사자료를 활용한 경우

노두나 절개지를 대상으로 한 조사창 조사법을 적용하여 취득된 자료가 있을 경우, 2차원 절리 빈도(N_a)는 단위면적당 절리 개수이다. 그러나 조사창(노두)의 면적과 비교하여 절리들의 길이가 관찰되는 절리 빈도에 영향을 미치기 때문에 블록 크기를 보다 정확하게 추정하기 위해 추가적인 보정과정이 필요하다. 다음과 같이 조사면의 길이보다 절리 길이들이 짧은 경우 다음과 같이 보정할 수 있다.

$$N_a = (1/\sqrt{A}) \sum (n_{a_i} \times L_i) + N_{a_j} \quad (3)$$

여기서

n_{a_i} = 조사창의 길이보다 짧은 절리길이 L_i 을 가지는 절리 i

N_{a_j} = 조사창의 길이보다 길이가 긴 절리들의 개수

A = 조사창의 면적절리

절리의 빈도는 조사창의 방향 및 절리의 방향에 따라 변화하며, 다양한 방향의 여러 조사창에서 얻은 N_a 는 보다 정확한 절리 밀도를 제공할 수 있다. 단위 면적당 절리 개수인 2차원 절리밀도 N_a 와 단위 체적당 절리 개수인 3차원 절리 발생 빈도(J_v)의 관계는 다음과 같이 경험식으로 표현할 수 있다.

$$J_v = N_a \times k_a \quad (4)$$

여기서, k_a 는 상관 인자(correlation factor)로 1~2.5의 값을 가지며, 평균적으로 $k_a = 1.5$ 이다. 가장 큰 값은 주 절리군이 조사창과 평행한 경우이다.

- 조사선 조사자료를 활용한 경우

1차원 절리 빈도(N_l)와 3차원 절리 발생 빈도(J_v)의 경우는 다음과 같다.

$$J_v = N_l \times k_l \quad (5)$$

여기서, k_l 은 상관 인자로서 1.25~6의 값을 가지며, 평균적으로 $k_l = 2$ 이다. 2차원 절리밀도의 경우보다 정확성이 떨어진다.

- 단위 체적당 절리 개수로부터의 블록 크기 추정

$$V_b = \beta \times J_v^{-3} \times \frac{1}{\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3} \quad (6)$$

여기서, β 는 블록 형상 인자로서 다음과 같다.

$$\beta = \frac{(a_2 + \frac{a_2 \times a_3}{a_2 \times a_3} + a_3)^3}{(a_2 \times a_3)^2} \quad (7)$$

여기서, $a_2 = S_2/S_1$ 과 $a_3 = S_3/S_1$ 이다.

절리군 사잇각이 약 90°인 경우, 다음 식을 이용할 수 있다.

$$V_b = \beta \times J_v^{-3} \quad (8)$$

3. 발파암 계수의 3차원 공간 분포 추정

암석 파쇄도의 예측을 위해 Kuz-Ram 모델에 기초한 발파암 계수의 개념을 이용하였다. 발파암 계수는 암반 블록 크기, 암반 절리 빈도, 방향, 암반의 비중 및 암석 강도의 경험적 함수로 정의할 수 있다.

발파 대상 구역의 발파암 계수의 공간 분포 추정을 위해 조건부 시뮬레이션 중의 하나인 순차적 지시 시뮬레이션을 활용하였다. 이 방법은 조건부 시뮬레이션의 한 종류로서, 크리깅 기법에 비해 높은 변동도 모델 재현성과 취득된 조사 자료의 분포 모델에 관한 정보를 활용함으로써 추정치에 대한 불확실성을 보다 줄일 수 있는 장점을 갖는다(류동우 외, 2003).

3.1 순차적 지시 시뮬레이션(sequential indicator simulation)

먼저 n 개의 지역화 변수 z 의 자료 $\{z(s_\alpha), \alpha = 1, \dots, n\}$ 가 주어졌을 때, N 개의 격자점 s_j' 에서의 지역화 변수 z 의 시뮬레이션을 고려하면 순차적 지시 시뮬레이션은 다음 과정을 거쳐 수행될 수 있다.

1. K 의 임계값 z_k 를 이용하여 $(K+1)$ 개의 급간으로 지역화변수 z 의 변화 범위를 이산화한다. 그리고 각 자료 $z(s_\alpha)$ 를 지시 자료 벡터로 다음과 같이 변환한다.

$$i(s_\alpha; z_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } z(s_\alpha) \leq z_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k = 1, \dots, K \quad (9)$$

2. 각 절점에 도달할 무작위 경로를 정의한다.

3. 각 절점 s' 에서

- 다양한 지시 크리깅 알고리즘 중 하나를 이용하여 K 개의 조건부 누적분포함수(conditional cumulative distribution function; 이하 ccdf) $[F(s'; z_k | (n))]^*$ 값을 결정한다. 조건을 부여하는 정보는 시뮬레이션하고자 하는 절점 주변의 측정(조사) 자료와 앞서 수행한 시뮬레이션 값들의 지시 변환들(index transforms)이다.

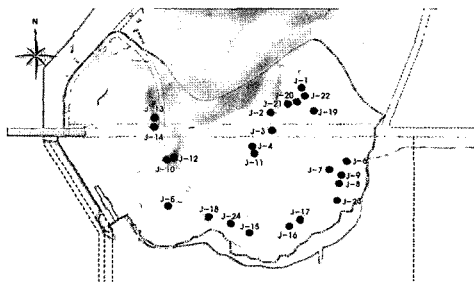
- 순서관계문제(order relation problem)는 음의 가중치 발생과 임계값들의 임의의 급간에서 자료가 결여 등의 문제를 발생시킬 수 있기 때문에 순서관계문제에 대해 보정한다. 또한, 조건부 누적분포 함수 모델 $F'(s'; z|z_1, \dots, z_n), \forall z$ 을 내삽 및 외삽 알고리즘에 의해 작성한다.
- 상기 조건부 누적분포함수로부터 시뮬레이션 값 $z^{(l)}(s')$ 를 발생시킨다.
- 이 시뮬레이션 값을 조건부 자료집합에 추가한다.
- 무작위 경로로 따라 다음 절점으로 이동하여, 상기 과정을 반복한다.

다른 무작위 경로를 통해 상기 전체 과정을 반복함으로써, 추가적인 실현들, $\{z^{(l)}(s'), j=1, \dots, N\}$, $l=1$ 을 발생시킨다.

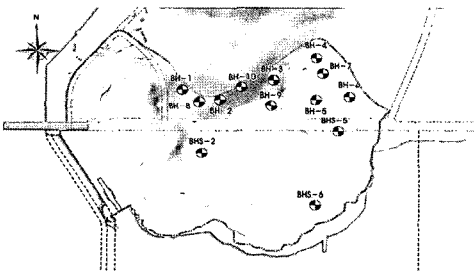
이상의 순차적 지시 시뮬레이션 알고리즘을 활용하여 발파암 계수의 3차원 공간 분포를 추정하는데 활용하였다.

3.2 지구통계학적 자료 분석

발파암 계수를 결정하는 인자값의 추정을 위해 지표 지질조사 및 시추공 조사로부터 얻은 자료를 통계 분석하여 변동도 모델 및 분포 모델을 결정하였다. 지표지



(a) geological survey sites



(b) locations of boreholes

Fig. 2. Locations of geological survey and boreholes

질조사는 24개소에서 조사선 조사법으로 수행하였으며, 13개 시추공에서 BIPS 및 코어자료 분석을 수행하였다(Fig. 2).

이들 조사로부터 취득된 기초 자료는 절리 빈도(간격), 방향, 연장성, 점하중 강도값 등이 있으며, 발파암 계수를 결정하는 인자들 중 암반블록 크기(RMD)의 결정은 매우 중요하므로 취득된 절리 자료를 중심으로 각 절리의 방향과 간격 그리고 블록의 형상 인자를 이용하여 각 조사 지점에서의 대표 암반 블록 크기를 추산하였다. 또한, 절리 간격 및 방향의 함수인 JF는 JFs 및 JFo를 각각 구하여 최종값을 산정하였으며, 암반 비중의 함수인 RDI와 암석 강도의 함수인 HF는 각 시험치에 기초하여 계산하였다. 각 인자별 결과를 토대로 발파암 계수를 산정하여 이에 대한 통계분석과 지시 변동도 모델링을 수행하였다(Fig. 3).

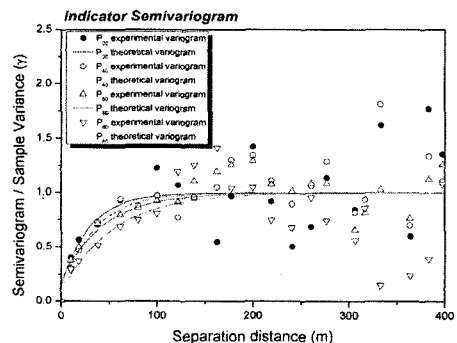
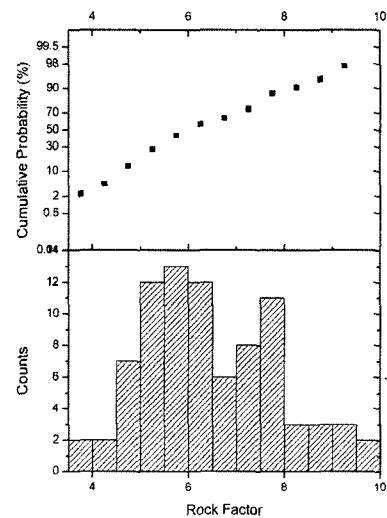


Fig. 3. Distribution and indicator variogram models of Fr sample data

3.3 발파암 계수의 공간 분포 추정 및 가시화

발파암 계수의 공간 분포를 추정하기 위해, 발파암 계수를 구성하는 인자들의 공간분포에 대한 분석·시화를 수행하였다. 이는 발파암 계수에 영향을 미치는 주요 인자들의 공간 분포 양상을 살펴봄으로써 최종 발파암 계수의 분포에 지배적인 인자를 파악하기 위한 목적이다. 발파암 계수의 분포 양상은 다른 인자들의 분

포들과 비교하였을 때 자연 상태의 암반 블록 크기 분포와 비교적 비슷한 경향을 보이니, 반드시 유사하다고 보기는 어렵다. 이는 다른 인자들의 분포 영향들이 발파암 계수를 결정하는데 함께 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 4). 전체 발파 대상 영역에서 20~80 분위수에 해당되는 발파암 계수의 범위는 6.05~7.11로 추정되었다(Fig. 5).

석산 개발은 단계적인 발파 과정을 통해 골재 공급과

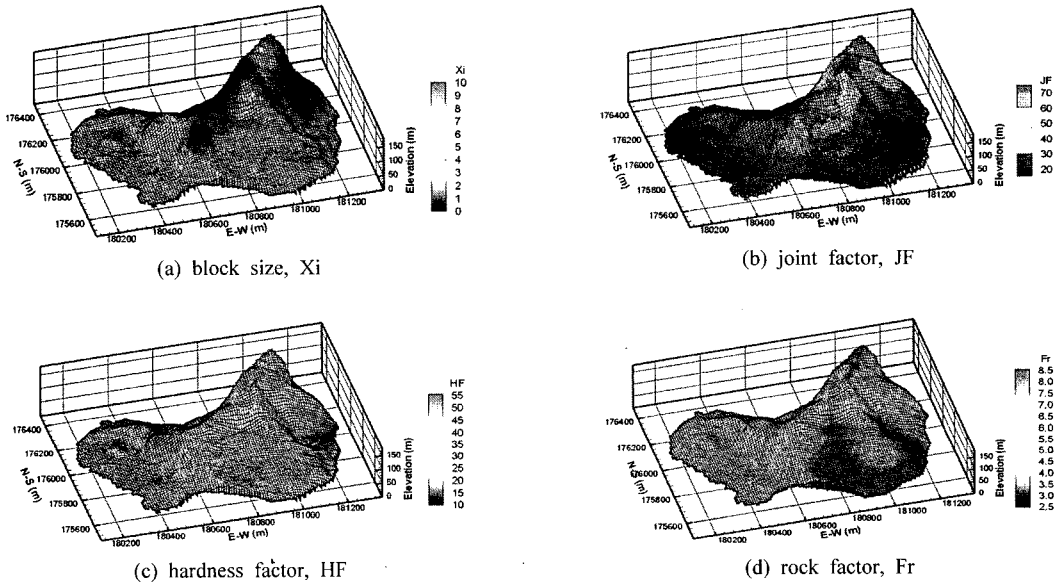
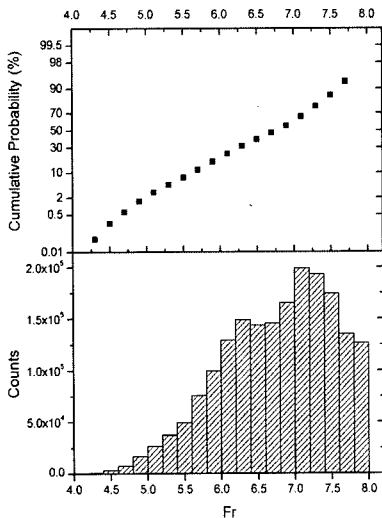


Fig. 4. 3-D spatial distributions of Xi, JF, HF and Fr, respectively



Percentiles

$$P_{20} = 6.05$$

$$P_{40} = 6.41$$

$$P_{50} = 6.62$$

$$P_{60} = 6.98$$

$$P_{80} = 7.11$$

Fig. 5. Overall distribution and percentiles of rock factors

함께 최종 목표로 설정한 지형을 만들기 위해 이루어졌다. 따라서 각 단계별 발파 공정에 따라 새로이 나타나는 현지 암반의 발파암 계수의 분포를 파악하기 위해 각 지반고별 평면 분포도를 작성하였다(Fig. 6).

각 지반고별 발파암 계수의 평면 분포 특성은 각 단계별 발파공정에 반영될 수 있으며, 비교적 낮은 파쇄도가 예상되는 구간에 적절한 규격의 파쇄기(crusher)를 배치함으로써 파쇄 암석의 적재와 운송의 효율성을 높일 수 있다.

4. 발파패턴 설계

4.1 발파암 계수 분포에 따른 발파 TYPE 분류

발파암 계수의 3차원 공간 분포에 대한 시뮬레이션 결과를 이용하여 벤치높이에 따른 구간별 발파암 계수를 3개의 TYPE으로 분류하였다. 각 TYPE 별 발파암 계수 범위 및 대표값은 Table 4와 같다. 발파암 계수가 6.0 이하인 구간을 TYPE-I, 6.0~7.0 구간을 TYPE-II, 7.0 이상인 구간을 TYPE-III으로 구분하였으며, 발파가

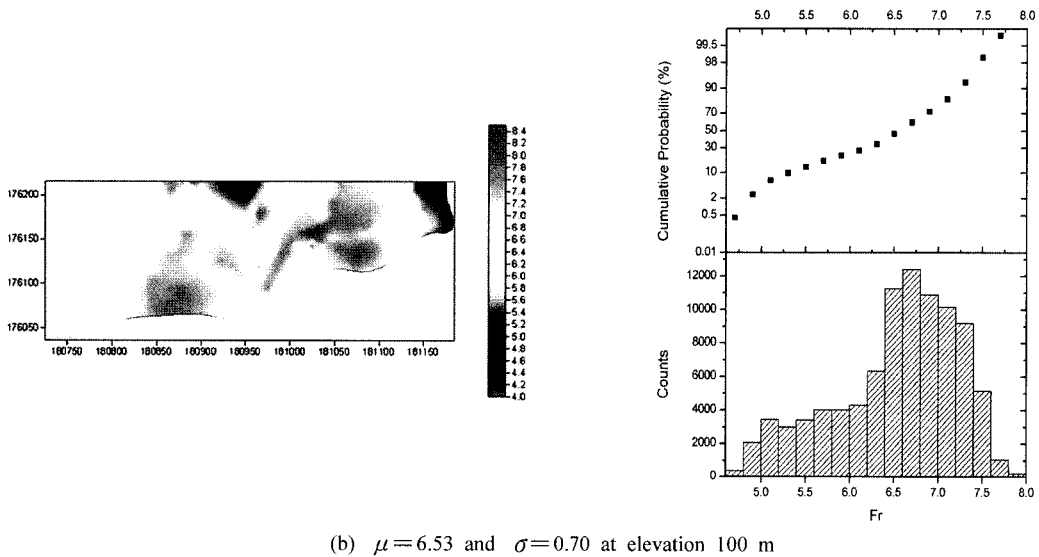
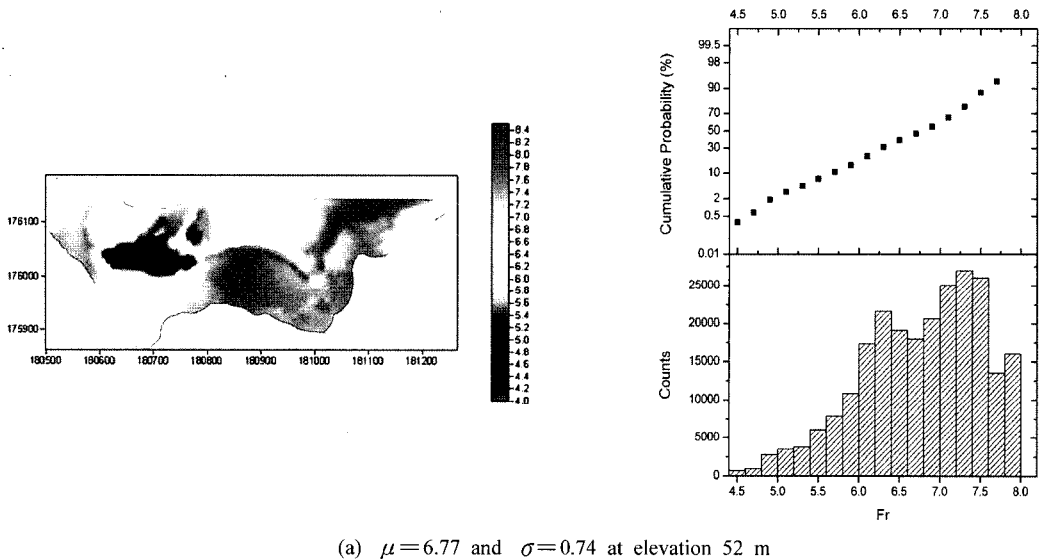


Fig. 6. Examples of spatial distribution and statistics of rock factors at elevation 52 m and 100 m

수행되는 전 체적에 대한 TYPE 별 비율은 TYPE-I 구간이 19%, TYPE-II 구간이 57%, TYPE-III 구간이 24%를 차지하였다. 파쇄입도 분석에 적용되는 대표 발파암 계수는 TYPE-I, II, III에 대하여 각각 5.5, 6.5, 7.5를 적용하였다.

4.2 발파 TYPE별 최적 발파 파쇄입도 설정

벤치발파에서 암석 파쇄입도 예측은 소할량 예측 및 개발공정 시스템 선정을 통한 정확한 생산원가 분석을 가능하게 하므로 최적의 생산성을 확보하기 위하여 암석 파쇄입도 관리는 필수적이다(Nielsen, 1983). 따라서 각 발파 TYPE 별로 Olofsson 식 등에 근거하여 공간격, 최소저항선 및 비장약량을 달리하는 총 16개의 예비 발파패턴을 선정하여 각 발파패턴별로 생산원가 및 파쇄입도 분포를 분석하였다.

본 발파 대상 구역의 석재 공급계획 중 생산 석재의 약 72%가 비규격석(0.03 m^3 이하)으로 공급되므로 발파석 중 0.03 m^3 이상의 대괴는 브레이커 및 파쇄기 소할을 수행하는 것으로 계획하였으며, 이에 따라 생산원가는 천공 및 발파비와 소할 및 쇄석비로 구분하여 산정하였다. 천공비는 유압식 크로라드릴 사용에 따른 감가상각비, 경유비, 노무비 등이 포함되고, 발파비는 화약, 뇌관 비용 및 노무비가 포함되며, 소할비는 브레이커 사용에 따른 감가상각비, 경유비, 노무비, 그리고 쇄석비는 크러셔 사용에 따른 감가상각비, 경유비, 전기소모품비, 노무비 등으로 구성된다.

파쇄입도 분석의 경우 현장 시험발파에 의한 실제 파

쇄입도분포와 가장 흡사한 파쇄입도 분포를 보이는 Kuz-Ram 모델에 TYPE 별 대표 발파암 계수 값을 적용하여 각 예비 발파패턴별 파쇄입도 분포를 분석하였다.

발파구간 중 가장 많은 분포를 차지하는 TYPE-II 구간의 예비 발파패턴별 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율(%)과 생산원가와의 관계는 Fig. 7과 같다. 일반적으로 파쇄도가 증가함에 따라 천공 및 발파 비용이 증대되고 소할 및 쇄석 비용이 감소하는 경향을 나타내는데(Gama and Jimeno, 1993), 본 연구에서도 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율이 증가함에 따라 천공 및 발파비는 증가하고 소할 및 쇄석비는 감소하는 경향을 나타내었다. 천공비는 발파비용의 41~45%를 차지하며 크러셔에 의한 쇄석비는 전체 생산원가의 10% 정도를 차지하였고, 브레이커에 의한 소할비는 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율이 증가함에 따라 급격하게 감소하였다.

발파 TYPE 별 생산원가 분석에 따른 최적 파쇄입도 분포 결과는 Table 5와 같다. 천공 및 발파비용과 소할

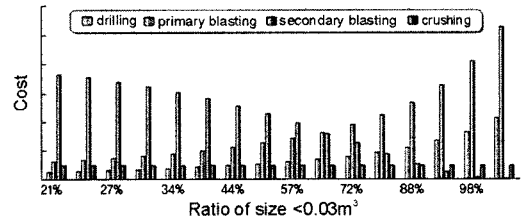


Fig. 7. Comparison of production costs according to particle size distributions for TYPE-II

Table 4. Blasting type classification according to the distribution of rock factors

Division	TYPE-I	TYPE-II	TYPE-III
Fr range	Fr < 6.0	6.0 < Fr < 7.0	Fr > 7.0
Representative Fr	5.5	6.5	7.5
Ratio	19%	57%	24%

Table 5. The optimum fragment ratio (< 0.03 m^3) based on minimum production cost for TYPE-I, II and III

Division	TYPE-I	TYPE-II	TYPE-III
Production cost - Fragment ratio (< 0.03 m^3)			
Optimum fragment ratio (< 0.03 m^3)	73 ~ 77%	66 ~ 70%	60 ~ 64%

및 쇄석비용의 합인 생산원가는 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율이 증가함에 따라 어느 정도 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내며 생산원가가 최저일 때의 파쇄입도를 최적 발파 파쇄입도로 설정하였다. TYPE-I에서 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율이 73~77%, TYPE-II에서 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율이 66~70%, TYPE-III에서 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율이 60~64%일 때 최적의 생산성을 얻는 것으로 나타났다.

4.3 파쇄입도를 고려한 발파패턴 선정

생산원가 및 파쇄입도 분석 결과를 바탕으로 하여 TYPE 별로 최적 발파패턴을 선정하였으며, 발파패턴 선정 결과는 Table 6과 같다. 선정된 발파패턴에 대하여 Kuz-Ram 모델에 의한 파쇄입도 분석 결과 TYPE-I~III의 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율이 각각 75%, 68%, 61%로서 최적 생산성 확보를 위한 파쇄입도 범위 내로 나타났다.

5. 결 론

대규모 채석을 위한 최적 발파 패턴은 파쇄 입도의 분포에 따라 추산된 최소 발파 비용에 기초하여 결정될 수 있다. 따라서 파쇄 입도의 분포를 예측하기 위해 발파암 계수의 3차원 공간 분포 추정은 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 3차원 공간 분포의 추정을 통해 대

규모 채석이 이루어질 대상 구역의 발파암 계수 분포를 추정하였다. 이를 근거로 대상 구역의 3개 TYPE의 발파암 계수 범위를 설정하였고, 각 구간 TYPE별로 생산비용을 산정하였다. 이상의 결론은 다음과 같다.

- 1) 발파암 계수의 인자별 조사 자료를 근거로 발파 대상 구역의 3차원 공간 분포 모델링을 위해 순차적 지시 시뮬레이션을 적용하였다. 이를 토대로 각 발파 공정에 따라 새로운 지형에 대한 발파암 계수의 공간 분포를 추정할 있었으며, 파쇄 입도 예측에 활용할 수 있었다.
- 2) 발파암 계수가 6.0 이하인 구간을 TYPE-I, 6.0~7.0 구간을 TYPE-II, 7.0 이상인 구간을 TYPE-III으로 구분하였으며, 발파가 수행되는 전 체적에 대한 TYPE별 비율은 TYPE-I 구간이 19%, TYPE-II 구간이 57%, TYPE-III 구간이 24%를 차지하였다. 파쇄입도 분석에 적용되는 대표 발파암 계수는 TYPE-I, II, III에 대하여 각각 5.5, 6.5, 7.5를 적용하였다.
- 3) 파쇄입도에 따른 생산원가 분석 결과 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율이 증가함에 따라 천공 및 발파비는 증가하고 소할 및 쇄석비는 감소하는 경향을 나타내었다. 브레이커에 의한 소할비는 파쇄입도 0.03 m^3 이하 비율이 증가함에 따라 급격하게 감소하였고 크려서에 의한 쇄석비는 전체 생산원가의 10% 정도를 차지하였다.

Table 6. The optimum blasting pattern for TYPE-I, II and III

Division	TYPE-I	TYPE-II	TYPE-III
Bench height(m)	12	12	12
Drilling diameter(mm)	76	76	76
Drilling length(m)	13.6	13.6	13.6
Drilling inclination(°)	70°	70°	70°
Burden(m)	2.6	2.6	2.6
Spacing(m)	3.2	3.2	3.2
Charge per hole(kg)	33	36	38
Specific charge(kg/m ³)	0.31	0.33	0.35
Explosive/detonator	emulsion / electric	emulsion / electric	emulsion / electric
Fragment size distribution curve			

- 4) 파쇄입도 및 생산원가 분석 결과를 바탕으로 하여 TYPE 별로 최적 발파패턴을 선정하였으며, 선정된 발파패턴에 대하여 Kuz-Ram 모델에 의한 파쇄입도 분석 결과, 최적 생산성 확보를 위한 TYPE-I~III의 파쇄입도 $0.03 m^3$ 이하 비율을 각각 75%, 68%, 61%로 설정할 수 있었다.

참고문헌

- 류동우, 김택곤, 허종석, 2003, RMR의 불확실성 모델링을 위한 지구통계학적 시뮬레이션 기법에 관한 연구, 터널과 지하공간, 13.2, 87-99.
- 최용근, 이정인, 이정상, 김장순, 2004, 벤치발파에서 파쇄도 예측을 위한 암반조건 분석, 터널과 지하공간, 14.5, 353-362.
- 최용근, 2005, 벤치발파에서 암석 파쇄도에 영향을 미치는 요인 분석과 파쇄도 예측 모델 개발, 박사학위논문, 서울대학교, 141 p.
- 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.
- Cunningham, C.V., 1987, Fragmentation estimation and the Kuz-Ram model-four years on, 2nd Int. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, Colorado, USA, 475-487.
- 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.
- Larsson, B., 1974, Blasting of low and high benches, Swedish Rock Blasting Committee, Stockholm, Sweden, 247-271.
- Lilly, P., 1986, An empirical method of assessing rock mass blastability, Large Open Pit Mining Conference, 89-92.
- Nielsen K., 1983, Optimization of open pit bench blasting, First Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden, 2, 653-663.
- Palmström, A., 2001, Measurement and characterization of rock mass jointing, In-situ characterization of rocks, Sharma V.M. and Saxena K.R. eds., A.A. Balkema, 49-97.
- 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.

류 동 우



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부 공학박사
Tel: 042-868-3265
E-mail: ryurock@empal.com
현재 한국지질자원연구원 연수연구원

심 현 진



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
Tel: 02-589-4396
E-mail: shimhj@seoyeong.co.kr
현재 (주)서영엔지니어링 지반터널설계실 과장

서 종 석



1996년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사
Tel: 031-726-6700
E-mail: sjs@dosungeng.co.kr
현재 도성엔지니어링(주) 부장