

입체해석학적 접근법에 의한 암반 절리 크기 및 밀집도의 통계적 분석에 관한 연구

류동우¹⁾ · 김영민²⁾ · 이희근³⁾

A Study of Statistical Analysis of Rock Joint Size and Intensity by Stereological Approach

Dong-Woo Ryu, Young-Min Kim and Hi-Keun Lee

Abstract. Rock joint system makes a heavy effect on the behavior of rock structures. The definition of a 3D rock joint system is very important in 2D or 3D numerical analysis for the prediction of the behavior of a discontinuous rock mass. To enhance the reality of a 3D definition of rock joint system, it is essential to estimate the unbiased statistics of basic geometric attributes of rock joints. In this study, we have proposed the statistical analysis and derived the related equations for an estimation of statistics of joint size and intensity. Geometry of rock joints in 3 dimensional space can be defined by the aggregate of location, size, orientation and intensity. The dimensional limit of survey method and its data makes 3D geometric attributes probabilistic. In the estimation of statistics of joint size, we have discussed the technique to correct the bias from a dimensional limit and derived the equation of 3D joint intensity by stereological approaches.

Keywords : 3D rock joint system, dimensional limit, joint size, joint intensity, stereology

초 록. 암반 구조물의 거동에 있어 지배적인 영향을 미치는 3차원 암반 절리계의 정의는 2차원 혹은 3차원 불연속 암반 거동의 예측을 위한 수치해석시 매우 중요하다. 3차원 절리계의 정의에 있어 현실성을 높이기 위해서는 기본적인 절리 기하학적 속성에 대한 객관적이고 정확한 통계량 추정이 필수적이다. 이에 본 연구는 절리 기하학적 속성 중 절리 크기 및 밀집도를 중심으로 통계적 분석기법에 대해 제안하고, 절리 크기 및 밀집도의 추정에 필요한 관계식을 유도하였다. 3차원 공간상에 위치하는 절리 기하학의 위치, 크기, 밀집도, 방향의 결합된 형태로서 정의할 수 있다. 그러나, 조사방법 및 자료의 차원 한계(dimensional limit)로 인해 3차원 기하학적 속성은 확률론적이다. 따라서, 절리 크기의 추정시 차원 한계로부터 발생할 수 있는 여러 편향들을 보정하기 위한 기법을 논의하였고, 입체해석학적 기법을 도입하여 절리 크기의 통계량으로부터 3차원 밀집도를 유도하였다.

핵심어 : 3차원 절리계, 차원 한계, 절리 크기, 절리 밀집도, 입체해석학

1. 서 론

암반 절리는 오랫동안 암반이 받아온 지체력(tectonic force) 및 여러 지질 환경의 변화를 반영하며, 암반 자체 불균질성의 원인이 된다. 이로 인해, 암반구조물에 있어 복잡한 역학적 거동과 수리적 거동의 변화를 초래하여 지하구조물의 안정성 및 기능성에 영향을 미친다. 이와 같은 암반 절리의 중요성으로 인해 지표 지질 조사에

있어 절리 조사의 비중은 상당히 높다. 일반적으로 암반 절리 조사는 절리의 역학적 수리적 특성을 파악하기 위한 실험실 실험 및 현장 실험과 달리 절리의 기하학적 특성을 파악하기 위한 작업으로 정의할 수 있다.

암반 절리계(rock joint system)는 형태(shape), 크기(size), 밀집도(intensity), 방향(orientation), 위치(location) 등의 기하학적 속성들의 특정 조합으로서 정의할 수 있다. 따라서, 암반 절리 조사 자료의 통계적 해석 목적은 전체 대상 암반 절리계 정의를 위한 각 기하학적 속성들의 통계량 추정에 있으며, 이에 근거한 암반 절리계의 모사는 수치해석을 위한 절리망(joint network)을 제공할 수 있다.

일반적으로 절리 조사법의 경우 조사창 조사법

¹⁾지하정보기술(주), 부설기술연구소 선임연구원

²⁾쌍용자원개발(주), 이사

³⁾서울대학교, 공과대학 명예교수

접수일 : 2001년 11월 27일

심사 완료일 : 2002년 3월 4일

(window sampling)에 의한 절리 조사의 대상은 조사 차원(dimension)의 제한성으로 인하여 2차원 공간에 위치하는 절리의 1차원 정보인 트레이스로 한정된다. 따라서, 암반 절리 자료의 해석은 이와 같은 2차원 평면상에 나타나는 1차원 정보로부터 3차원 공간에 위치하는 절리의 기하학적 특성인 크기를 추정해야 하는 한계성을 지닌다.

절리 크기의 통계량 추정시 가장 큰 문제점은 암반 절리 트레이스 조사 자체가 다양한 편향을 내재한 하나의 통계적 과정(stochastic process)이라는 것이다.

절리 트레이스 조사와 관련한 주요 편향은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 하한절삭 편향(truncation bias)
- 상한절삭 편향(censoring bias)
- 크기 편향(size bias)
- 방향 편향(orientation bias)

조사창 조사법에 의해 취득한 절리 트레이스 자료 분석을 수행할 때 하한절삭 편향, 상한절삭 편향 그리고 크기 편향에 대한 보정은 함께 이루어져야 한다. 여기서, 상한절삭은 표본의 성질인 반면, 하한절삭은 분포의 성질이다(Kendall 외, 1973).

본 연구에서는 벤치 발파에 의한 미굴과 여굴로 인해 대다수 절리의 트레이스가 방향 편향을 무시할 수 있었기 때문에 방향 편향에 대한 보정은 수행하지 않았다.

편향과 다른 범주로서, 트레이스 길이 분포로부터 크기의 분포를 추론하는 문제는 ill-posed 역산 문제이다(O'Sullivan, 1986). 이는 절리 크기 분포의 통계적 특성 변화가 트레이스 분포의 특성에 많은 영향을 미치지만, 역으로의 영향은 미미하기 때문이다.

이와 같은 문제를 해결하기 위한 방법으로 트레이스 길이 분포의 특징을 최적으로 반영하는 절리 크기의 통계량 추정 기법을 적용한다.

또한, 절리 크기와 더불어 3차원 절리계 모사에 필수적인 정보로서, 3차원 절리 밀집도(joint intensity)가 있다. 차원별 절리 밀집도의 정의가 다양하지만, 단위 체적당 절리개수로 정의할 수 있는 3차원 절리 밀집도는 3차원 절리계 정의에 유용한 자료로 활용할 수 있다. 조사 차원의 제약성을 극복하기 위해 본 연구에서는 입체 해석학(stereology)에 기초하여 절리 밀집도의 관련식을 유도하였다.

절리의 형상과 관련하여 여러 가지 모델이 제시되어 왔으나, 본 연구에서는 단일 매개변수로 크기를 정의할 수 있다는 장점을 지닌 원판형 절리 형상을 가정하였다.

2. 절리 크기

암반 절리 크기의 추정은 절리 트레이스 길이에 의존하며, 조사 차원 및 조사창의 제약성으로 인해 절리 트레이스의 기하학적 특성에 대한 완전한 2차원 기술은 어려운 문제이다.

암반 절리 조사는 다양한 편향이 내재되어 있는 하나의 통계 과정으로 정의할 수 있으며, 이 편향들을 고려한 절리 트레이스 길이의 통계량 추정과 관련된 다수의 연구들이 수행되어 왔다. 이 연구들은 크게 분포-의존적 접근법(distribution-dependent approach)과 분포-독립적 접근법(distribution-free approach)으로 구분할 수 있다.

분포-의존적 접근법에는 트레이스 길이분포를 음지수 혹은 로그-정규 분포의 가정 하에 직사각형 조사창으로부터 평균 트레이스 길이를 추정하는 방법이 제시되었다(Crudon, 1977; Baecher, 1980; Priest와 Hudson, 1981; Villaescusa와 Brown, 1992). 그러나, 분포-의존적 접근법은 트레이스 길이의 통계량을 얻기 위해 분포를 가정한다는 단점을 가진다. 이를 극복하기 위한 대안적 방법으로, 분포-독립적 접근법에 대한 연구들이 수행되었다(Pahl, 1981; Kulatilake 외, 1984; Mauldon, 1998).

반면, 3차원 절리계 모사를 위해서는 절리의 크기 분포에 대한 정보를 필요로 하기 때문에, 절리 트레이스의 분포와 절리 크기의 통계량 사이의 관계에 대한 많은 연구들이 수행되었다(Baecher 외, 1978; Warburton, 1980; Villaescusa와 Brown, 1992). 특히, Warburton(1980)은 입체해석학(stereology)과 기하 확률론(geometric probability)에 기초하여 하한절삭 편향을 고려한 트레이스의 길이 분포와 절리 크기 분포의 관계식을 제시하였다.

하한절삭 편향을 고려한 절리 트레이스 길이의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 Warburton(1980a)이 제안한 방법을 이용하여 구할 수 있다.

$$G(L) = \begin{cases} 0 & L < L_c \\ \frac{f(L)}{\int_{L_c}^{\infty} f(L) dL} & L \geq L_c \end{cases} \quad (1)$$

여기서, L_c 는 트레이스 길이 매핑에 대한 임계값이며, $f(L) dL$ 은 이론적으로 가정된 트레이스 길이 분포 함수이다.

상한절삭 편향은 Laslett(1982)이 제안한 방법에 의해 보정할 수 있다. 절리 트레이스 길이분포의 우도함수

(likelihood function)는 다음과 같다.

$$LF = \frac{\left\{ \prod_{i=1}^n f(X_i) \prod_{j=1}^m \int_{Y_j}^{\infty} f(h) dh \prod_{k=1}^p \int_{Z_k}^{\infty} (f(h) dh) dv \right\}}{(\mu_L)^{n+m+p}} \quad (2)$$

여기서,

(X_1, \dots, X_n) : 절리의 양끝단점이 관찰되는 절리 트레이스들의 길이

(Y_1, \dots, Y_m) : 하나의 끝단점이 관찰되는 트레이스들의 길이

(Z_1, \dots, Z_p) : 양끝단점이 모두 관찰되지 않는 트레이스들의 길이

$\mu_L = \int_0^{\infty} Lf(L) dL$: 평균 트레이스 길이.

최대우도추정자(maximum likelihood estimator)는 완벽해(closed form) 혹은 수치해로서 구할 수 있다. 최대우도추정자의 완벽해는 누적분포함수의 완벽해를 가지는 확률밀도함수로 국한되며, 그렇지 않은 경우 수치해석에 의해 근사해를 구해야만 한다.

절리 트레이스 길이와 절리 직경분포와의 입체해석학적 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다(Warburton, 1980a, b).

$$\begin{aligned} f(L) &= \frac{4L^2 \int_L^{\infty} g(D) dD}{\pi \mu_L^2 \int_L^{\infty} \sqrt{D^2 - L^2}} \\ &= \frac{4L^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} g(L \sec t) \sec t dt}{\pi \mu_L^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, D 는 절리의 직경, L 은 트레이스 길이, $g(D)dD$ 는 절리 직경의 3차원 분포, $f(L)dL$ 은 2차원 트레이스 길이의 분포, 그리고 μ_L 는 절리 직경 분포의 2차 모멘트이다.

식 (3)은 절리 직경 분포를 정의하는 모수들의 추정 문제이며, 이를 풀기 위한 일반적인 접근법은 $g(D)dD$ 의 초기값을 선택하여 계산한 후 절리 트레이스 길이 분포 $f(L)$ 의 계산치와 현장 자료와 비교하는 반복 연산법(iteration scheme)이 있다.

그러나, 식 (3)은 항상 정해만을 제공하지 않는다. 왜냐하면, 앞서 언급한 바와 같이 유한한 조사창으로부터 많은 트레이스들이 경계에서 절삭되기 때문에 트레이스 길이 분포와 직경 분포의 상한 부분(upper tails)에 대한 정보를 이용할 수 없다. 두 번째 이유로는 직경분포를 찾는 과정은 자료의 편향 혹은 오차에 민감하기 때문이다. 이런 문제를 해결하기 위해 식 (2)-식 (3)을 하나의

우도 함수(likelihood function)로 표현함으로써, 절리 크기의 통계량 추정시 트레이스 자료에 내재되어 있는 상한절삭 편향과 하한절삭 편향을 함께 고려할 수 있다.

3차원 절리 크기 분포의 통계량 추정을 위해 최대우도추정법(maximum likelihood estimation)을 적용하였다. Laslett(1982)가 제안한 트레이스 길이 분포의 최대우도추정자와 Warburton(1980 a, b)이 제안한 절리 트레이스 길이와 직경 분포와의 관계식으로부터 절리 직경 분포의 우도함수는 다음과 같이 정의할 수 있다(Villaescusa와 Brown, 1992).

$$\begin{aligned} \ln(LF) &= (n+m+p) \ln\left(\frac{4}{\pi}\right) \\ &\quad - (n+m+p) [\ln(\mu_D^2 + \sigma_D^2) - \ln(\mu_L)] \\ &\quad + 2 \sum_{i=1}^n \ln(X_i) + \sum_{i=1}^n \ln\left(\int_0^{X_i} g(X_i \sec t) \sec t dt\right) \\ &\quad + \sum_{j=1}^m \ln\left[\int_{Y_j}^{\infty} h^2 \left(\int_0^{X_i} g(h \sec t) \sec t dt\right) dh\right] \\ &\quad + \sum_{k=1}^p \ln\left[\int_{Z_k}^{\infty} \left(\int_0^{\infty} h^2 \left(\int_0^{X_i} g(h \sec t) \sec t dt\right) dh\right) dv\right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

n : 절리의 양끝단점이 관찰되는 절리 트레이스들의 개수

m : 하나의 끝단점이 관찰되는 트레이스들의 개수

p : 양끝단점이 모두 관찰되지 않는 트레이스들의 개수

μ_L : 평균 트레이스 길이

μ_D : 직경의 평균

σ_D : 직경의 표준편차.

상기 식은 절리 조사시에 발생하는 상한절삭 편향(censoring bias), 하한절삭 편향(truncation bias), 그리고 크기 편향(size bias)을 모두 고려할 수 있다는 장점이 있다.

일반적으로 암반 및 지반공학문제에 있어 공학적 변수는 양의 정부호를 가지는 값인 경우가 대부분이다. 이와 같은 사실에 근거하여 공학적 변수의 분포를 로그정규분포 혹은 음지수분포 등으로 가정하고 접근하는 경우가 많다. 본 연구에서는 절리 트레이스에 대한 로그정규성을 검증하여 가정하였으며, 그 결과에 기초하여 절리 직경분포의 로그정규성을 다음과 같이 가정하였다 :

$$g(D) = \frac{1}{\sigma_D \sqrt{(2\pi)D}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln D - \mu_D}{\sigma_D}\right)^2\right) \quad (5)$$

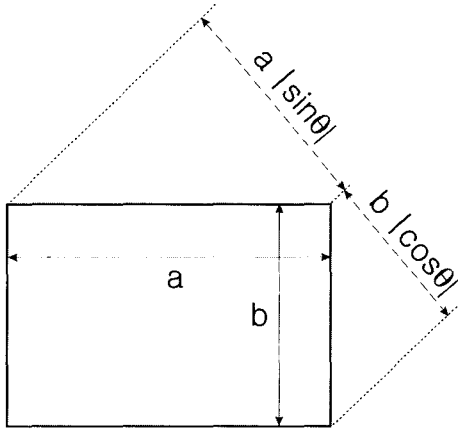


Fig. 1. Rectangular window with sides a and b . The window width in direction θ is $a|\sin\theta| + b|\cos\theta|$.

상기 로그정규 분포의 경우 우도함수(likelihood function)의 완전해가 존재하지 않기 때문에 최적화 문제로서 수치해석에 의해 구해야 한다.

식 (4)의 우도함수를 최대로 하는 유일해를 찾는 문제는 비제약 최적화 문제(unconstrained optimization problem)로서, 본 연구에서는 conjugate gradient algorithm과 finite-difference gradient 알고리즘을 이용하여 수치해를 구하였다(IMSL Math Library).

식 (4)는 입력값으로 절리 트레이스의 평균 길이가 필요하며, 이를 위해 직사각형 조사창에서의 분포-독립적 접근법에 의한 트레이스 평균 길이의 추정자를 이용하였다(Mauldon, 1998).

$$\bar{\mu} = \frac{ab}{aE[|\sin\theta|] + bE[|\cos\theta|]} \left(\frac{N + N_T - N_C}{N - N_T + N_C} \right) \quad (6)$$

여기서, N 은 전체 트레이스의 개수이며, N_T 는 양끝 단점이 모두 관찰되는 않는 트레이스(transecting trace), N_C 는 양끝단점이 모두 관찰되는 트레이스(contained trace), θ 는 트레이스의 방향이다. 또한, a 와 b 는 조사창의 폭과 높이에 해당한다(Fig. 1).

3. 3차원 절리 밀집도

절리 밀집도(joint intensity)는 조사 차원과 측정치의 차원에 따라 분류할 수 있다(Table 1). 조사 차원이 1차원인 경우, 즉 조사선 조사로부터 절리의 발생 빈도(frequency)의 결정과 관련된 연구들이 수행되었으며, 2차원 조사 차원의 경우, 즉 조사창 조사법에 의한 절리 밀도(joint density)의 추정과 관련한 연구들이 이루어졌

Table 1. Matrix of rock mass fracture intensity parameters (after Dershowitz and Herda, 1992).

Measured Parameter	Sampling	L	L^2	L^3
	(Scanlines)	(Rock exposure)	(Rock masses)	(Rock masses)
$N^0 [D=0]$	P_{10} [m ⁻¹]	P_{20} [m ²]	P_{30} [m ³]	
Length [D=1]	P_{11}	P_{21} [m ¹]	P_{31} [m ²]	
Area [D=2]	P_{12} [m]	P_{22}	P_{32} [m ¹]	
Volume [D=3]	P_{13} [m ²]	P_{23} [m]	P_{33}	

다(Priest와 Hudson, 1981; Pahl, 1981; Kulatilake 외, 1984). 이외에도, 기하확률론에 기초하여 다양한 차원의 절리 밀집도간의 관계에 대해 연구가 있었다(Dershowitz와 Herda, 1992).

3차원 절리게 모사를 위해서는 단위 체적 당 절리 개수인 P_{30} 이 가장 유용할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 절리 밀집도를 입체해석학적 접근법에 의해 유도하였다.

본 연구에서는 3차원 절리 밀집도를 단위 체적당 원관형 절리 중심의 개수로 정의하고, 이는 일반적인 convex particle에 대한 입체 해석학적 접근법으로부터 원관과 같은 특수한 경우로 변환하여 구할 수 있다.

먼저 convex 입자들이 공간상에 랜덤하게 산재되어 있는 시스템으로부터 모서리의 길이가 1인 정육면체를 잘라 내었을 경우를 고려하면, 전체 면적 $A_T = n_T l^2$ 인 평행한 n_T 개의 실험 평면이 정육면체를 균등하게 통과한다(Fig. 2). 투영면은 실험 평면에 수직이며, 정육면체의 한 면과 평행하다.

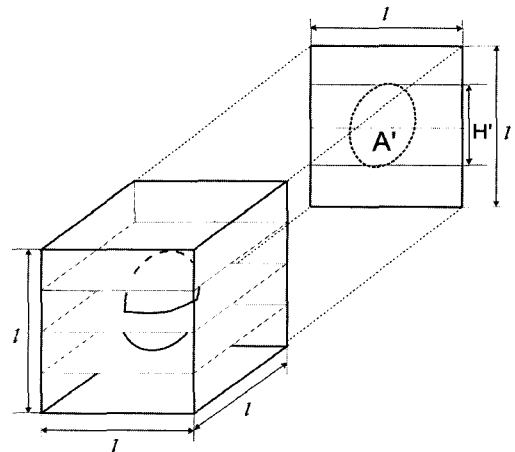


Fig. 2. Intersection of a convex particle by test planes and their projections.

입자의 한 입자에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n_x = f_2 n_T \tag{7}$$

여기서, n_x 는 입자와 교차하는 실험 평면의 개수이며, 입자와 실험평면이 교차할 확률은 f_2 이다.

확률 f_2 는 다음과 같이 비로 표현할 수 있다.

$$f_2 = \frac{H'}{l} \tag{8}$$

여기서, H' 는 입자 투영체의 높이이다(Fig. 2).

식 (7)에 식 (8)의 f_2 를 대입하고 양변을 A_T 로 나누면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{n_x}{A_T} = \frac{n_T H'}{A_T l} = \frac{H'}{l^3} \tag{9}$$

convex particles로 이루어진 시스템을 여러 개의 급간으로 분류하면, i 번째 급간의 N_i 개의 입자에 대해서 식 (9)는 다음과 같다.

$$(N_A)_i = \frac{1}{V_T} (N_i H_i') \tag{10}$$

여기서, $(N_A)_i$ 는 i 번째 급간에 속하는 입자가 단위 면적을 가진 실험 평면과 교차하는 개수이다.

모든 입자들에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\sum (N_A)_i = \frac{1}{V_T} \sum N_i H_i' \tag{11}$$

양변을 전체 입자의 개수 N 으로 나누면 다음과 같다.

$$\frac{N_A}{N} = \frac{1}{V_T} \left[\frac{N_1 H_1' + N_2 H_2' + N_3 H_3' + \dots}{N} \right] \tag{12}$$

$$= \frac{\bar{H}'}{V_T}$$

$$\therefore N_A = \frac{N}{V_T} \bar{H}' = N_V \bar{H}' \tag{13}$$

여기서, \bar{H}' 는 입자들의 투영체의 평균 높이이며, N_V 는 단위 체적당 입자의 개수이다.

N_A , 즉 단위 면적당 교차하는 입자의 개수를 측정할 수 있기 때문에, \bar{H}' 의 값이 주어졌을 경우 단위 체적당 입자의 개수를 식 (13)을 이용하여 계산할 수 있다.

간단한 형상을 가진 대상체에 대한 \bar{H}' 의 분석적 해는 다음과 같다.

$$\bar{H}' = \int_{H_{min}}^{H_{max}} H' P(H') dH' \tag{14}$$

여기서, $P(H')dH'$ 는 H' 와 $H' + dH'$ 의 투영체 높이를 가질 확률이다.

원판으로 가정된 절리의 밀집도에 대한 분석적 해를 얻기 위해 직경 D 과 두께 $t(t \ll r)$ 인 얇은 원판을 고려하자.

투영된 원판의 높이는 다음과 같다.

$$H' = D \sin \phi \tag{15}$$

여기서, ϕ 는 실험 평면의 법선 벡터와 원판이 이루는 각이다.

원판의 법선 벡터가 ϕ 와 $\phi + d\phi$ 에 있을 확률 $P(\phi)d\phi$ 는 $\sin\phi d\phi$ 이다.

따라서, 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$P(H') = P(\phi) \left| \frac{d\phi}{dH'} \right| = \sin\phi \left| \frac{1}{D \cos\phi} \right| = \frac{\tan\phi}{D} \tag{16}$$

식 (14)에 식 (16)을 대입하면 투영체의 평균 높이는 다음과 같다.

$$\bar{H}' = \frac{1}{D} \int_0^{\pi/2} H' \tan\phi dH' = \frac{\pi D}{4} \tag{17}$$

식 (13)에 평균 높이를 대입하여 단위 체적당 직경 D 인 원판의 개수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N_V = \frac{4}{\pi D} N_A \tag{18}$$

따라서, 절리의 평균 직경으로부터 단위 체적당 절리의 중심의 개수를 추정할 수 있다. 방향 편향을 고려할 경우 식 (18)을 다음과 같이 변형하여 사용할 수 있다.

$$N_V = \frac{4}{\pi D \sin|\nu|} N_A \tag{19}$$

여기서, ν 는 절리면과 조사면의 교각이다.

4. 현장 적용

조사 대상 지역은 동해석회석 광산으로 노천 채굴 방식으로 운영 중에 있는 동해석회석광산으로 층리가 발달된 석회암지대이다.

전체 36개의 조사지점에서 조사창 조사법에 의해 절리 자료를 취득하였다(Fig. 3). 절리 트레이스 분석은 디지털 영상을 이용하여 길이 및 절리 개수 등을 구하였다(류동우 외, 2000).

디지털 화상 내에서 두 개의 수직 절리군의 구분이

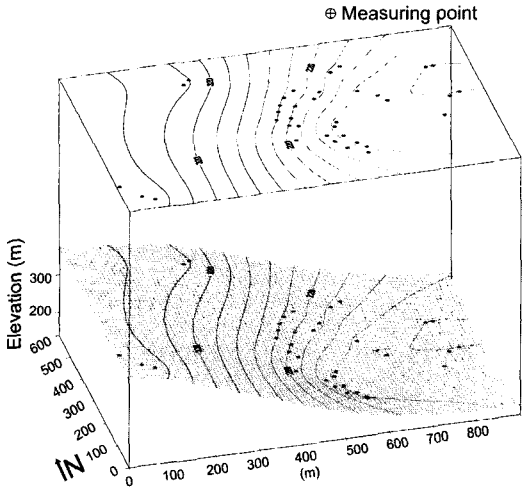


Fig. 3. Locations of sampling windows for joint survey in Donghae limestone mine.

어렵기 때문에 하나의 수직 절리군으로 간주하여 분석하였다. 두 수직 절리군의 크기에 대한 통계량은 같다는 가정 하에서, 수직 절리군에 속하는 절리의 개수는 방향 자료의 비율에 따라 다음과 같이 결정하였다.

$$n_{v1} = 0.303 \times n_v$$

$$n_{v2} = 0.697 \times n_v$$

여기서, n 은 두 수직 절리군에 속하는 절리의 개수, n_{v1} 은 평균 방향 (83.9, 41.0)을 가지는 수직 절리군 1에 속하는 절리의 개수, 그리고 n_{v2} 는 평균 방향 (85.5, 305.2)을 가지는 수직 절리군 2에 속하는 절리의 개수이다.

Fig. 4는 각 조사창으로부터 계산된 평균 트레이스 길이의 로그변환된 값에 대한 히스토그램 및 도해적 정규성 분석 결과를 보여준다. 조사창별 트레이스 평균 길이의 로그정규성 검증을 위하여 Kolmogorov-Smirnov 적합성 검증을 수행하였으며, 검증 결과 절리의 평균 트레이스 길이 분포에 대한 로그정규성의 귀무가설은 타당하였음을 확인할 수 있었다.

현장 자료의 분석은 36개의 조사창의 사진분석 (photoanalysis)에 의해 N , N_T , 그리고 N_C 를 구했으며, 이로부터 트레이스 평균 길이의 분포-독립적 추정치를 계산하였다. 이를 입력치로 하여 수평 절리군과 수직 절리군에 대한 평균 μ_D 와 표준편차 σ_D 를 각각 구하였다 (Table 2). 그 결과 수평 절리군에 대한 절리 직경의 통계량이 수직 절리군에 비해 상당히 큰 값을 가지는 것으로 나타났는데, 이는 조사지역의 지질학적 특성상 발달된 층리면의 영향인 것으로 파악된다.

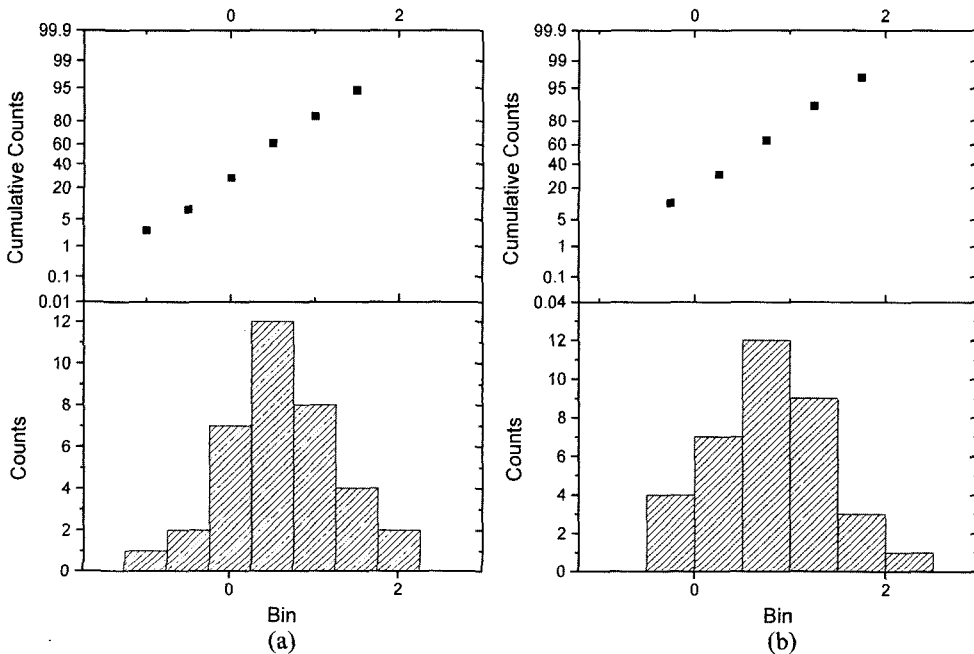


Fig. 4. Histogram with probabilities for log-transformed joint trace length data; (a) vertical joint sets and (b) horizontal joint set.

Table 2. Statistics of estimates of joint trace length and diameter.

Geometric property		Joint trace length (m)			
Method		Distribution-free estimates ¹⁾ ($\hat{\mu}_L$)			
Joint set		Statistics		E	SD
		[LN($\hat{\mu}_L$)]	[LN($\hat{\sigma}_L$)]	[$\hat{\mu}_L$]	[$\hat{\sigma}_L$]
Horizontal joint set		0.804	0.630	2.727	1.904
Vertical joint sets		0.574	0.661	2.201	1.633
Geometric property		Joint diameter (m)			
Method		Maximum likelihood estimate ²⁾			
Joint set		Statistics		E	SD
		$\hat{\mu}_D$	$\hat{\sigma}_D$	[$\hat{\mu}_D$]	[$\hat{\sigma}_D$]
Horizontal joint set		0.829	1.442	4.711	17.143
Vertical joint sets		0.670	1.271	3.690	8.799

1)The estimates of joints traces are assumed to follow a log normal distribution.

2)The diameters of joints are assumed to follow a log normal distribution:

$$E[\hat{\mu}_D] = \exp(\hat{\mu}_D + 0.5 \times \hat{\sigma}_D^2)$$

$$VAR[\hat{\mu}_D] = (\exp(\hat{\sigma}_D^2) - 1) \exp(2\hat{\mu}_D + \hat{\sigma}_D^2)$$

절리 크기 및 2차원 절리 밀집도, 즉 단위 면적당 절리 트레이스 개수를 입력치로 하여 3차원 절리 밀집도

Table 3. Statistics of estimates of 3D joint intensity

Statistics	Joint set	Horizontal joint set	Vertical joint sets
$E[LN(\lambda_V)]$		-0.854	-0.897
$SD[LN(\lambda_V)]$		0.768	0.787
$E[\lambda_V]$		0.572	0.556
$SD[\lambda_V]$		0.513	0.515
D_n^*		0.081	0.085
P-value		0.970	0.953

* : Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test statistics

를 추정한 결과는 Table 3과 같다.

절리 밀집도에 대한 분포를 로그-정규분포로 가정하고 이에 대한 Kolmogorov-Smirnov 적합도 검증을 수행하였으며, 검증 결과 귀무가설로 설정한 로그-정규분포의 타당성을 확인할 수 있었다(Fig. 5와 Table 3). 절리 밀집도를 로그정규성 가지는 확률집합체로서 고려할 때, 수평 절리군의 평균 절리 밀집도는 0.572, 그리고 두 개의 수직 절리군은 0.556으로 나타났다. 따라서, 평균 방향 (83.9, 41.0)을 가지는 수직 절리군 1의 평균 절리 밀집도는 0.168이며, 평균 방향 (85.5, 305.2)을 가지는 수직 절리군 2의 평균 절리 밀집도는 0.387이다. 3개의 절리군을 비교하였을 때, 수평 절리군이 지배적으

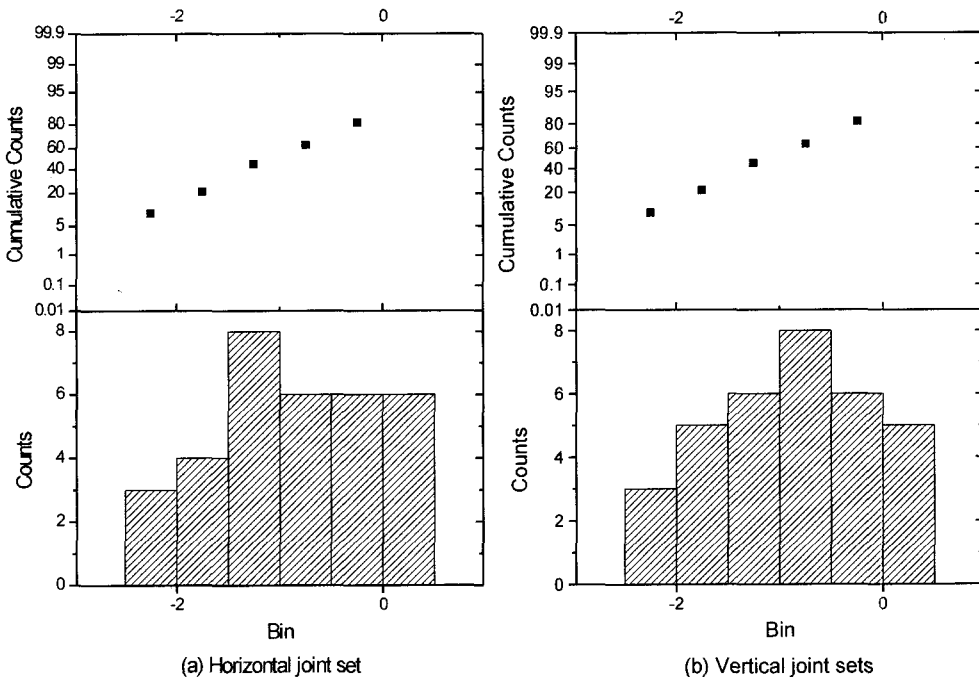


Fig. 5. Histogram with probabilities for log-transformed joint intensity; (a) vertical joint sets and (b) horizontal joint set.

로 나타남을 확인할 수 있으며, 이는 조사 지역에 발달된 층리에 기인하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 조사 방법 및 자료의 차원 한계로 인한 다양한 편향을 고려할 수 있는 절리 직경의 통계량 추정자를 입체해석학적 접근법과 최대우도추정자로부터 얻을 수 있음을 살펴보았다. 이와 같이 얻은 절리 직경에 대한 통계량 추정자는 차원 한계성으로 인한 다양한 편향을 보정할 수 있다는 장점을 지니는 반면, 3차원 절리 직경의 분포에 대한 가정이 필요하다는 단점을 지닌다. 이는 2차원 절리 트레이스 분포와 3차원 절리 직경의 분포간에 연관성 분석과 같은 추가적인 연구가 필요함을 의미한다.

3차원 절리계 모사를 위해서는 단위 체적당 원판형 절리의 개수에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해 다양한 차원 절리 밀집도에 대한 차원별 정의를 내리고, 3차원 절리계 모사에 유용하게 이용할 수 있는 3차원 절리 밀집도의 통계량 추정자를 입체해석학적 접근법에 의해 유도하였다. 절리 직경의 통계량과 2차원 절리 밀집도의 통계량을 이용한 3차원 밀집도는 조사창 조사법으로부터 얻을 수 있는 자료를 이용함으로써 보다 손쉽게 얻을 수 있는 장점을 가진다.

참고문헌

1. 류동우, 이유리, 장운섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 터널과 지하공간, 10(3), 329-343
2. Baecher, G. B. and Einstein, H. H., 1980, Progressively censored sampling of rock joints traces, Math. Geol., 12(1), 33-40
3. Cruden, D. M., 1977, Describing the size of discontinuities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14, 133-137
4. Dershowitz, W. S. and Einstein, H. H., 1988, Characterizing rock joint geometry with joint system models, Rock Mech. and Rock Engng., 21, 21-51
5. Dershowitz, W. S., Herda, H., 1992, Interpretation of fracture spacing and intensity, 33rd U.S. Symp. on Rock Mechanics, Santa Fe, N. Mexico, A. A. Balkema, Rotterdam, 757-766
6. Kendall, M. G. and Stuart, A., 1963, The Advanced Theory of Statistics, Hafner, New York, 433p.
7. Kulatilake, P. H. S. W., Wu, T. H., 1984, The density of discontinuity traces in sampling windows, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 21, 345-347
8. Laslett, G. M., 1982, Censoring and edge effects in areal and line transect sampling of rock joint traces, Math. Geol., 14(2), 125-140
9. Mauldon, M., 1998, Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows, Rock Mech. and Rock Engng., 31(4), 201-216
10. O'Sullivan, 1986, A statistical perspective on ill-posed inverse problems, Statistical Science, 1(4), 502-527
11. Pahl, P. J., 1981, Estimating the mean length of discontinuity traces, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, 221-228
12. Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline Surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, 183-197
13. Underwood, E. E., 1970, Quantitative Stereology, Addison-Wesley Publishing Company, 274p
14. Villaescusa, E. and Brown, E. T., 1992, Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurement, Rock Mech. and Rock Engng., 25, 67-87
15. Warburton, P. M., 1980a, Stereological interpretation of joint trace data, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 17, 181-190
16. Warburton, P. M., 1980b, Stereological interpretation of joint trace data : influence of joint shape and implication for geological surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 17, 305-316

류 동 우



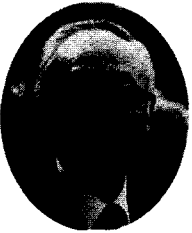
1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부, 공학박사
Tel. 02-871-4752
E-mail : ryurock@geophysical.co.kr
현재 지하정보기술(주)부설기술연구소, 선임연구원

김 영 민



1977년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
Tel. 033-520-1803
현재 쌍용자원개발(주) 이사

이 희 근



1970년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1973년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1977년 일본 교오또대학(京都大學) 대학원 자원공학과, 공학박사
E-mail: irram@plaza.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 명예교수
