

원통형조사창에서의 절리선 길이분포를 이용한 암반 내 절리직경분포 추정에 관한 연구

전기환¹⁾, 송재준^{2)*}, 조영도³⁾

A Study for the Estimation of Joint Diameter Distribution Using the Trace Length Distribution from Cylindrical Window Survey

Kihwan Jeon, Jae-Joon Song, Young-Do Jo

Abstract This study suggests an algorithm for estimating joint diameter distribution in rock mass from the joint trace length distribution around a circular tunnel. For estimating the joint diameter distribution, the concept of Joint Center Volume (JCV) suggested by Song. (2005) was applied and the calculation method of JCV for the cylindrical window survey was developed by using the complete survey method. The estimated joint diameter distribution was verified against the original joint diameter distribution by Monte-Carlo simulation. It was observed that the estimated joint diameter distribution was converged to the original joint diameter distribution with less than 20% of error.

Key words Joint diameter distribution, Trace length distribution, Cylindrical window survey

초 록 본 연구에서는 암반 내 원통형 공동면에 나타나는 절리선 길이분포를 이용하여 암반 내에 존재하는 절리의 직경분포를 추정하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 암반 내 절리의 직경분포를 추정하기 위해서 송재준(2005)에 의해 제시된 Joint Center Volume(JCV)의 개념이 적용되었다. 평면 조사창에 나타나는 절리선에 대한 JCV 값을 산정하는 송재준(2005)의 알고리즘을 확장하여, 원통형 공동면을 조사창으로 하는 경우의 암반 내 절리 직경분포 추정을 위해 전수조사 기법을 적용한 JCV 계산 알고리즘을 개발하였다. 추정된 절리 직경분포는 Monte-Carlo 시뮬레이션 기법을 이용하여 절리직경 모분포와 비교 검증하였으며 추정된 절리 직경분포가 모분포와 20% 내외의 오차 범위에서 수렴하는 것을 확인하였다.

핵심어 절리직경분포, 절리선 길이분포, 원통형 조사창

1. 서 론

암반 내에 존재하는 불연속면은 암반 내 구조물의 역학적 안정성에 영향을 미치며 구조물내로의 지하수 유입 문제 등을 발생시키는 주요 요인이다. 따라서 암반 내 구조물의 안정성 해석이나 지하수 차수 설계 등에는 암반 내 존재하는 절리의 거칠기와 간극, 절리의 크기 등이 주요 파라미터가 된다. 암반 내 존재하는 절리의

크기는 일반적으로 절리가 암반 내부에 존재하고 있고 암반이 빛과 전자기파에 대해 불투과성을 보이기 때문에 공동 노출면에서의 조사창 조사 등 현장 조사에서 그 값을 실측하기 어렵다(Priest, 1993). 따라서 절리의 크기는 현장에서 실측한 조사창 데이터를 기반으로 절리의 직경분포에 대한 확률분포를 추정하는 방식을 통하여 그 값을 추정하는 것이 일반적이다(Villaescusa and Brown, 1992).

절리 직경분포의 추정은 먼저 절리가 포아송 디스크 모델(Baccher, Einstein and Lanney, 1997) - 절리가 원판형이고 중심점의 위치가 3차원 공간상에서 무작위로 결정 - 을 따른다고 가정할 후 귀납적 방법과 연역적 방법에 의해 구해질 수 있다. 절리 직경분포를 연역적 방법으로 구하는 경우, 먼저 현장의 조사창에서 측정한

¹⁾ 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사과정

²⁾ 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 부교수

³⁾ 한국지질자원연구원 광물자원연구본부

* 교신저자 : songjj@snu.ac.kr

접수일 : 2011년 10월 7일

심사 완료일 : 2011년 10월 25일

게재 확정일 : 2011년 10월 25일

절리선 길이분포를 이용하여 암반과 공동, 그리고 암반 내에 존재하는 원판형 절리의 기하학적인 위치관계를 고려하여 암반 내 절리의 직경분포를 수학적으로 추정하는 방식을 취한다(Kulatilake and Wu, 1986).

암반 내 절리의 직경분포를 연역적으로 추정하는 방식의 경우, 국내에서는 대표적으로 송재준(2005)의 논문에서 암반 내 평면 조사창 조사 데이터를 이용한 원판형 절리의 직경분포와 체적빈도 추정 알고리즘이 제시되었으며 국외의 경우 Tonon and Chen(2007) 등에 의해 절리 직경분포를 추정하는 확률 분포식이 제안되었다. 또한 Song(2009)은 조사창에 나타나는 절리선과 조사창의 교차 형태를 고려하여 절리선 길이분포로부터 원형 및 사각형 절리의 크기분포를 추정하는 알고리즘을 제시하였다.

위의 선행 연구들은 공동 주변 절리의 직경분포를 추정정에 적용하는 경우 공동 벽면에 직사각형 형상의 평면 조사창을 설치하여 그로부터 얻어지는 절리선 길이분포를 이용하는 방식을 취한다. 본 연구에서는 송재준(2005)이 제시한 평면 조사창에서의 절리선 길이분포를 이용한 암반 내 절리 직경분포 추정 알고리즘을 암반 내 비평면 조사창 - 원통형 공동면 전체 - 에서 측정된 절리선 길이분포를 이용한 절리 직경분포 추정 알고리즘으로 확장하였다. 본 연구에서 적용된 원통형 조사창의 경우 비평면 조사창의 일례로, 송재준(2005)이 제안한 절리 직경분포 추정 알고리즘을 비평면 조사창으로 확장하는 경우의 적용성을 검증하였다. 비평면 조사창의 일례인 원통형 조사창에서 송재준(2005)의 절리 직경분포 추정 알고리즘을 검증함으로써, 추후 임의의 형상의 공동면에서 측정된 절리선 길이분포를 이용한 절리 직경분포 추정 알고리즘의 개발로 확장될 수 있다.

2. 직경분포 추정식의 유도

2.1 배경이론

송재준(2005)은 암반사면 또는 공동 벽면에 설치한 평면 조사창에서의 절리선 길이 분포를 이용한 암반 내 절리의 크기(직경)분포를 추정하기 위한 추정식과 알고리즘을 제안하였다. 절리는 원판형 또는 직사각형 형태를 가지는 것으로 가정하며, 절리의 중심점은 3차원 공간 내에서 무작위로 결정되는 포아송 모델을 가정한다. 특정 절리군에 속한 절리들은 모두 동일한 방향성을 가져 평행함을 가정한다. 직경분포의 추정은 절리군별로 수행하며, 암반 내 공동면에 등장하는 절리선과 절리면을 대상으로 한다.

공동면에 등장하는 절리선 길이분포를 이용하여 연역

적 방식으로 암반 내 절리의 직경분포를 추정하기 위해서는 Joint Center Volume(JCV)의 개념을 도입하여야 한다. JCV는 조사창 내에 특정 길이를 가지는 절리선이 존재하기 위해 암반 내에서 원판형 절리의 중심이 위치해야 하는 지점의 공간적 크기를 의미하며, 이는 절리의 직경이 변함에 따라서 다른 값을 가지게 된다(송재준, 2005). 즉, 만일 원판형 절리의 직경이 2 m인 경우를 가정했을 때, 원판형 절리의 중심이 공동 주변 암반 내 어느 위치에 존재하여야 조사창 내에 길이가 1 m인 절리선이 존재할 수 있는가를 수학적으로 계산하여 그 영역의 부피를 구한 값이 바로 절리 직경 2 m, 절리선 길이 1 m인 경우의 Joint Center Volume이 되는 것이다. 동일한 절리선 길이 1 m인 경우라도 절리의 직경이 달라지면 조사창 내에 1 m의 trace를 나타나게 하는 절리 중심의 영역이 바뀌므로 따라서 JCV 값은 절리의 직경과 조사창 내에서 얻어지는 절리선 길이 값이 변함에 따라서 그 값이 변하는 값이라고 할 수 있다.

송재준의 논문(2005)의 경우 암반 공동면 내의 한 측면에 평면인 조사창을 설치하기 때문에 절리 직경과 조사창 내 절리선 길이 변화에 따른 암반 내의 절리 중심의 영역이 평행육면체의 형태로(Fig. 1) 계산되며, 이를 통해 얻어지는 JCV 값을 이용하여 절리선 분포로부터 절리의 직경분포를 추정하였다.

본 연구의 경우 평면 조사창을 이용하는 것이 아니기 때문에 평행육면체 등의 기하학적인 방식으로 JCV 값을 산정하는 것에 어려움이 있어 전수조사 기법을 적용하여 JCV 값을 산정하였다. 전수조사 기법은 계산을 원하는 전체 domain을 일정 크기의 격자로 세분화하여 반복 계산하는 형태를 가진다. 본 연구에서 적용한 전수조사 기법을 적용한 JCV의 계산은 2.4절에서 자세히 언급하도록 한다.

조사창 내 다양한 구간의 절리선 길이를 발생시키는 직경 별 절리 중심들의 JCV 값을 산정한 후 이 값을 이용하여 대상 암반 내 공동면에서의 절리선 길이분포를 이론적으로 계산할 수 있다. 송재준(2005)은 평면 조

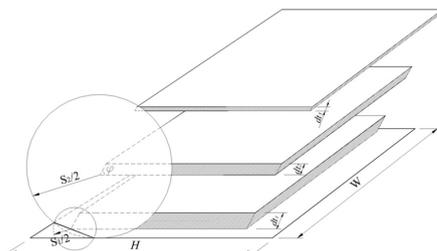


Fig. 1. 평행육면체 형태의 JCV(송재준, 2005)

사창을 이용하여 이론적으로 구해지는 조사창 내 절리선 길이를 다음과 같이 정의하였다.

$$N_i = A_i \sin \phi \lambda_v d l^2 \sum_{j=i}^n \left[\left(\sqrt{j^2 - (i-1)^2} - \sqrt{j^2 - i^2} \right) c_j \right] \quad (1)$$

여기서 N_i 값은 길이가 $(i-1)dl \sim idl$ 구간에 속하는 조사창 내 절리선의 이론적 개수를 의미한다. 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$N_i = \sum_{j=i}^n a_{ij} c_j$$

여기서

$$a_{ij} = A_i \sin \phi \lambda_v d l^2 \left(\sqrt{j^2 - (i-1)^2} - \sqrt{j^2 - i^2} \right) \quad (2)$$

위의 식 (2)에서 c_j 는 절리 직경분포 추정 알고리즘을 이용하여 추정해야 하는 미지수이며, a_{ij} 는 절리의 직경이 j 이고 조사창 내의 절리선의 길이가 i 일 때의 JCV 값을 의미한다.

N_i' 을 i 번째 구간에 속하는 현장조사에서 실측된 절리선의 개수라 하면 이론적인 절리선의 개수 (N_i)와 현장조사에서 실측된 길이 구간별 절리선의 개수 (N_i')의 길이 구간별 오차제곱합은 다음의 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$E^2 = \sum_{i=1}^n \left[N_i' - \sum_{j=i}^n a_{ij} c_j \right]^2 \quad (3)$$

상기 오차제곱합이 최소가 되는 경우의 직경분포를 구하기 위해 다음과 같이 c_k 에 대해 편미분한다.

$$\frac{\partial E^2}{\partial c_k} = -2 \sum_{i=1}^k \left[\left(N_i' - \sum_{j=i}^n a_{ij} c_j \right) a_{ik} \right] = 0, \quad (1 \leq k \leq n) \quad (4)$$

위의 식 (4)를 다시 정리하면 아래와 같다.

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=i}^n a_{ik} a_{ij} c_j = \sum_{i=1}^k N_i' a_{ik}, \quad (1 \leq k \leq n) \quad (5)$$

식 (5)를 행렬식의 표현으로 바꾸면 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$[A_{kj}] [c_j] = [b_k]$$

여기서

$$\begin{aligned} A_{kj} &= \sum_{i=1}^m a_{ik} a_{ij} \\ m &= j \text{ (at } k \geq j) \text{ or } m = k \text{ (at } k < j) \\ b_k &= \sum_{i=1}^k N_i' a_{ik} \end{aligned} \quad (6)$$

절리선 길이의 히스토그램이 1 m 간격으로 10개 구간으로 이루어져 있다면, 직경분포 c_j 는 matrix solver를 통해 10×10 행렬식을 풀어 구하게 된다. 상기 식들에서 나타나는 a_{ki} 또는 a_{ij} 는 식 (2)에서와 같이 체적빈도 λ_v 를 포함한다. 체적빈도는 절리 직경분포와 함께 직접적으로 측정하는 것이 거의 불가능하므로 현장에서 증명하기 어려운 파라미터이며 위의 알고리즘을 이용하여 식 (6)으로 직경분포를 구하면 λ_v 가 1인 상태에서의 직경분포를 구하게 된다. 절리 직경분포의 확률분포를 추정하고 직경 분포함수의 면적이 1이 되도록 정규화하면 암반 내 절리의 체적빈도를 추정할 수 있다.

2.2 원통형조사창에서의 절리선 길이 계산 알고리즘

원통형조사창에서의 절리선 분포를 이용한 암반 내 절리 직경분포 추정을 위해서 원통형 공동면과 원판형 절리의 교선으로 주어지는 절리선 길이의 계산을 위한 알고리즘은 개발하였다.

계산을 위한 domain은 y방향으로 10 m 길이를 가지는 반지름 $r_i = 2.5 \text{ m}$ 의 공동과, 체적의 중심이 (0,0,0)에 위치하는 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 규모의 암반으로 설정하였다(Fig. 2).

원통형 공동면으로 주어지는 곡면과 원판형 절리와의 교선으로 얻어지는 절리선은 기본적으로 세 개의 공간도형 (평면, 구, 원통)의 교점으로서 표현될 수 있다. 공동 주변 암반 내의 한 점 (c_x, c_y, c_z) 을 지나며 법선벡터가 (n_x, n_y, n_z) 인 평면과, 이 평면이 지나는 점 (c_x, c_y, c_z)

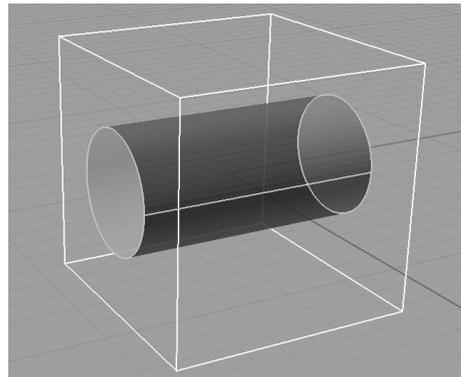


Fig. 2. 계산을 위한 암반과 원통형 공동

을 중심으로 하며 특정 반지름 r 을 가지는 구의 교점들의 집합을 구한다. 이러한 방식으로 구해진 점들의 집합은 공간상의 점 (c_x, c_y, c_z) 을 중심으로 가지며 법선벡터 (n_x, n_y, n_z) 에 의해 방향성을 가지는 반지름이 r 인 3차원 공간에서의 원의 내부 영역이 된다. 이 원의 내부 영역과 위에서 기본 domain으로 설정한 원통형 공동면의 교점을 구하면 이 교점들의 집합이 바로 원판형 절리와 원통형 공동면의 교선인 절리선이 되는 것이다(Fig. 3).

세 개의 공간도형 평면, 구, 그리고 원기둥의 교점들의 집합으로 표현되는 절리선의 길이 계산을 위해서 원통형 곡면을 이산화된 각도 $\theta(i)$ 에 대해서 매개변수화 하였다. $\theta(i) = 0^\circ \sim 360^\circ$ 로 변화시켜가며 아래 식 (7)을 만족시키는 $\theta(i)$ 값을 계산하면,

$$\begin{aligned} x(i) &= r_t \cos\theta(i) \\ z(i) &= r_t \sin\theta(i) \\ y(i) &= c_y(jn) - \frac{n_x}{n_y} [r_t \cos\theta(i) - c_x(jn)] \\ &\quad - \left[\frac{n_z}{n_y} r_t \sin\theta(i) - c_z(jn) \right] \\ (-5 \leq y(i) \leq 5) \end{aligned} \tag{7}$$

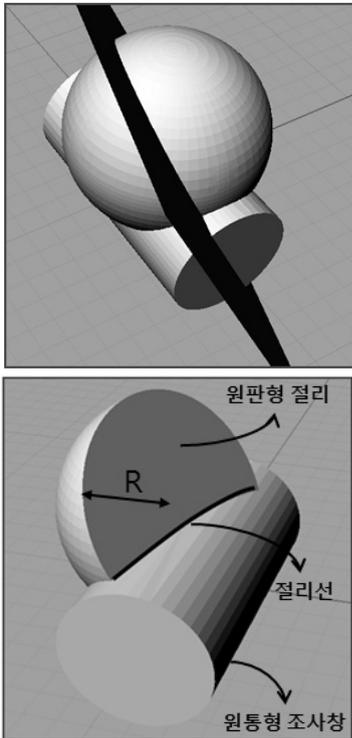


Fig. 3. 평면, 구, 원기둥의 교선으로 얻어지는 절리선

임의의 점 (c_x, c_y, c_z) 을 지나며 법선벡터가 (n_x, n_y, n_z) 인 평면상의 점들 중에서 암반 내 존재하는 원통형 곡면과 교차하는 점들을 찾을 수 있다. 이 교점들과 절리 중심점 (c_x, c_y, c_z) 과의 거리가 주어진 구의 반지름 값보다 작거나 같은 경우의 점들의 집합이 절리면과 공동면의 교차선인 절리선을 이룬다. 절리선이 매개변수화된 점들의 집합으로 주어지기 때문에, 매개변수화된 점들을 선적분하면 원판형 절리와 원통형 공동면의 교선이 절리선의 길이를 계산할 수 있다.

2.3 전수조사 기법을 적용한 Joint Center Volume (JCV)의 계산

원통형 조사창에서의 절리선 분포를 이용한 절리 직경분포의 추정을 위해서는 원통형 공동면 상에 존재하는 길이 구간별 절리선과 절리의 직경변화에 따른 암반 내 JCV 값을 계산하여야 한다. 평면 조사창에서와 같이 기하학적인 방식을 이용하여 JCV 값을 구하는 것이 쉽지 않으므로 전 암반 영역을 여러 개의 작은 육면체 mesh로 등분하여 JCV 계산을 위한 전수조사를 실시하였다.

JCV 계산을 위한 전수조사는 원하는 영역을 여러 개의 작은 크기의 cube로 나누는 mesh를 이용하여 수행되었다. Fig. 4는 원통형 조사창에서의 JCV 계산을 위해 해당 domain-암반-을 여러 개의 작은 cube로 분할해 놓은 mesh를 보여준다.

전수조사를 위한 cube mesh를 생성하기 위해 10 m × 10 m × 10 m 크기의 암반을 x, y, z 축을 따라 0.1 m 간격으로 세분화하여 $10^{-3} m^3$ 의 부피를 가지는 총 일백만 개의 cube를 생성하였다. 세분화된 미세 volume 중심에 원판형 절리의 중심이 위치한다고 가정하였다.

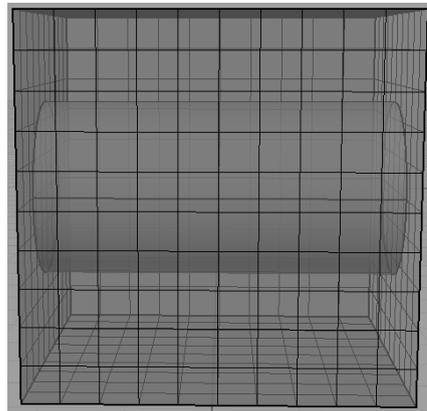


Fig. 4. JCV 계산을 위한 cube mesh

원판형 절리의 중심을 한 cube에 고정시킨 후 절리의 직경을 1 m에서 10 m까지 1 m 간격으로 증가시키며 원통형 공동면상에 나타나는 절리선의 길이를 계산하였다.

계산에 적용된 모든 절리는 동일한 방향성을 가지는 것으로 가정하였다. 절리군은 30°의 dip, 60°의 dip direction의 방향 특성을 가지는 것으로 설정하였다.

절리의 직경이 변함에 따라 원통형 곡면에 나타나는 절리선의 길이는 달라졌으며, 절리선의 길이를 1 m부터 10 m까지 1 m 간격으로 구분하였다. 하나의 고정된 cube가 원판형 절리의 중심점의 역할을 하는 동안 절리의 직경을 변화시켜가며 그에 따라 변하는 절리선 길이의 변화를 계산하여 하나의 cube가 가질 수 있는 모든 JCJV의 값을 산정하였다. 이러한 계산 과정을 총 일백만 개의 cube를 대상으로 반복함으로써, 공동 주변 암반의 JCJV 값을 계산하였다(Table 1).

2.4 Monte-Carlo 기법을 적용한 절리선 길이 계산

암반 내 절리 직경분포 추정을 위해 식 (6)의 행렬식을 이용하려면 $b_k = \sum_{i=1}^k N_i' a_{ik}$ 로 표현되는 b_k 행렬을 계산해야 한다. b_k 행렬을 계산하기 위해서는 a_{ij} 행렬과 N_i' 값이 필요하다. 여기서 N_i' 는 길이가 i 번째 구간에 속하는 절리선의 개수를 의미하며 이 값은 현장에서의 조사창 조사를 통해 얻어질 수 있다.

그러나 본 연구에서는 Monte-Carlo 기법을 적용하여 N_i' 값을 계산하였으며 계산 과정은 다음과 같다. 일백만 개로 세분화 된 암반 내 절리 중심 중에서 무작위로 일십만 개의 절리 중심을 선택하고 normal, log-normal, 그 외 임의로 선택된 두 가지 분포를 따르는 절리의 직경 일십만 개를 난수 발생시킨다. 무작위로 선택된 일십만 개의 절리 중심에 난수 발생시킨 일십만 개의 직

경을 분배하고 원통형 공동면에 등장하는 절리선의 길이를 계산하였다(Fig. 5). 이 절리선 길이분포의 구간별 빈도로 실제 현장조사를 통해 얻을 수 있는 N_i' 값을 대체하였다.

3. 추정분포의 비교 및 검증

2절에서 제시한 계산과정에 의해 추정된 절리 직경분포를 검증하기 위해 2.3절에서 언급한 Monte-Carlo 시뮬레이션을 적용하였다. 2.2절에서 제시한대로 10 m × 10 m × 10 m의 암반을 0.1 m 간격으로 세분화하고 이 중에서 임의로 일십만 개를 선택하여 원판형 절리의 중심이 되게 하였다. 2절에서 제시한 알고리즘으로 얻어지는 추정 절리직경분포와 비교 검증하기 위한 절리 직경 모분포는 절리의 직경이 normal 분포, log-normal 분포, 그 외의 임의로 주어진 2가지 경우의 분포를 따르는 경우를 가정하고 각 분포별로 일십만 개의 난수를 발생하여 대입하였다.

Fig. 6에 절리 직경분포 추정 알고리즘에 의해 계산

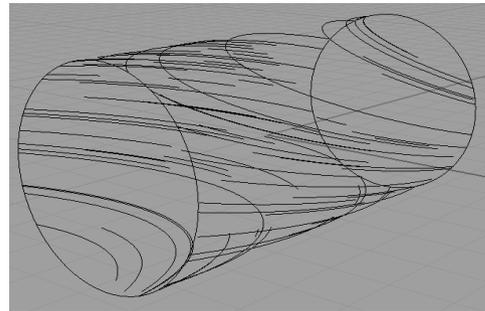
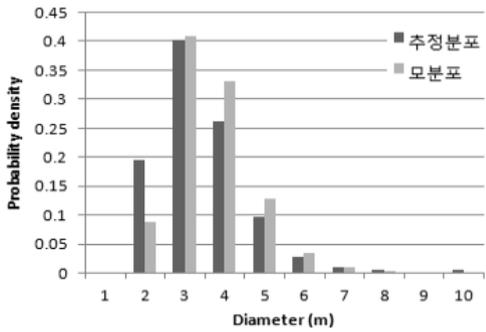


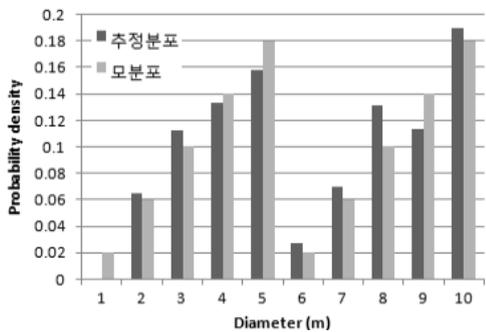
Fig. 5. Monte-Carlo 기법에 의해 발생된 절리선

Table 1. 절리 직경, 절리선 길이 변화에 따른 구간별 JCJV 값

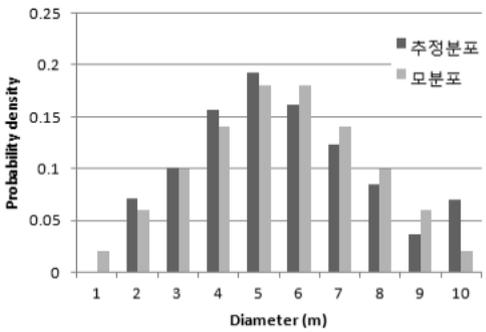
i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	105.50	40.12	29.23	24.67	22.61	23.66	23.48	27.32	31.82	36.95
2	2.52	167.96	91.62	70.25	59.24	50.97	42.04	38.00	35.27	33.63
3	0.00	8.75	188.11	126.52	115.50	96.37	72.14	58.03	51.29	47.74
4	0.00	0.00	13.26	186.47	134.48	142.08	129.91	98.64	76.08	62.57
5	0.00	0.00	3.23	17.49	174.52	133.87	146.51	147.95	132.03	99.86
6	0.00	0.00	0.00	5.91	20.73	155.85	130.54	141.42	144.94	151.07
7	0.00	0.00	0.00	3.05	8.03	25.00	132.90	123.57	133.54	137.75
8	0.00	0.00	0.00	0.43	5.36	9.08	26.44	111.04	113.80	124.78
9	0.00	0.00	0.00	0.00	3.09	7.27	11.15	26.45	89.27	103.43
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	5.15	8.61	12.59	23.97	69.29



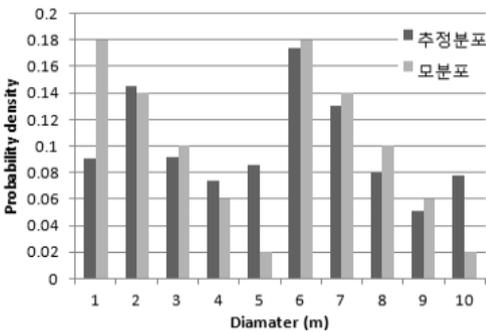
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. 추정 직경분포와 모분포의 비교

된 직경분포와 Monte-Carlo 시뮬레이션에 적용되었던 절리 직경의 모분포를 비교한 그래프가 제시되어 있다. 직경의 모분포와 추정분포의 확률밀도값을 구간별로 비교하여 각 구간에서의 값 차이의 절대값을 모두 합한 수치를 추정분포의 오차로 정의하였다(송재준, 2005).

Table 2에서 볼 수 있듯이 네 개의 모분포 case에서 추정분포와 모분포 사이의 구간별 확률밀도 값의 오차 합이 20% 내외의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 4개의 모분포 case에서 직경이 1 m인 구간에서의 추정 확률밀도가 모분포에서의 확률밀도 값보다 작게 구해지고, 직경이 10 m인 구간에서의 추정 확률밀도가 모분포에서의 확률밀도 값보다 크게 구해지는 경향이 있으며, 이러한 경향이 추정분포와 모분포 사이의 오차를 발생시키는 원인이 된다는 것을 알 수 있다.

해석 대상 영역인 암반의 scale이 10 m × 10 m × 10 m 이고, 절리의 최대 직경이 10 m이기 때문에 추정 과정에서 end effect로 인한 오차가 발생하였는지 확인하기 위해 해석 대상 영역인 암반의 크기를 20 m × 20 m × 20 m로 확장하였다.

Fig. 7은 암반 영역이 20 m × 20 m × 20 m로 확장된 경우의 추정결과를 나타낸 것이다. 이 경우 역시 추정분포와 모분포 사이의 오차가 24% 정도 발생하였으며, 따라서 앞서 언급했던 암반 규모가 10 m × 10 m × 10 m인 경우에 발생했던 오차가 end effect에 기인한 것이 아님을 알 수 있었다.

Song(2009)에 의하면, 현장 조사 시 조사창 내에 존재하는 절리선에 대해서 절리선과 조사창의 포함 관계

Table 2. 추정분포와 모분포 사이의 오차

Case	a	b	c	d
오차	0.23	0.15	0.18	0.28

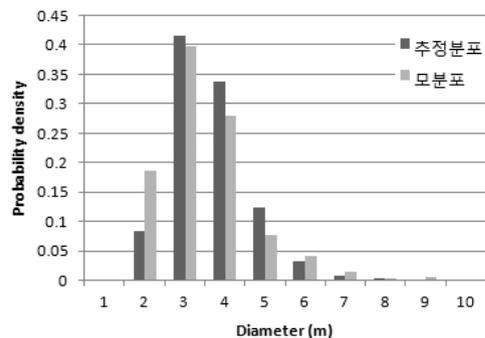


Fig. 7. 확장된 암반영역에서의 추정결과

에 따라 절리선을 세 개로 분류하여 암반 내 절리의 직경분포를 추정했음을 알 수 있다. 양끝내포 절리선만을 고려하여 절리 직경분포를 추정하는 기존 연구 결과(송재준, 2005)와 비교했을 때, 조사창과 절리선의 포함 관계를 구분하여 절리 직경분포를 추정하는 알고리즘의 경우 오차가 거의 발생하지 않는 우수한 추정 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 본 연구의 경우, 공동면에 등장하는 모든 절리선을 공동면과의 포함관계를 고려하여 구분하지 않고 절리 직경분포를 추정하여 특정 길이구간에서의 오차가 크게 발생하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존에 제시된 평면 조사창에서의 절리선 길이 분포를 이용한 암반 내 공동 주변의 절리 직경분포 추정 알고리즘을 원통형 조사창에서의 절리선 길이 분포를 이용한 암반 공동 주변의 절리 직경분포 추정 알고리즘으로 확장하였다. 기존 알고리즘에서 제시한 연역적 방식을 통한 절리 직경추정 알고리즘은 그대로 적용했으나 조사창의 형태가 평면에서 3차원의 곡면으로 바뀐 것을 고려하기 위해 계산 방식을 변형하였다. 또한 확장된 알고리즘을 통해 추정된 절리의 직경분포와 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 얻어진 절리 직경의 모분포를 비교 검증하였다.

알고리즘을 통해 계산된 추정분포와 모분포 사이의 비교를 통해서 확률밀도분포 상의 20% 정도에 해당하는 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 해석 시간과 컴퓨터 메모리의 한계 문제로 인해서 절리 최대직경에 대한 암반의 스케일이 작아 크기 효과로 인한 오차가 발생하는 것을 가정하여 해석 영역의 크기를 확장시켜 해석을 수행하였으나 역시 20% 내외의 오차가 발생하였다.

평면 조사창과는 달리 원통형 조사창에서는 절리의

최대 직경을 초과하는 길이를 가지는 절리선의 수가 많기 때문에 절리 직경분포의 정확한 추정을 위해서는 절리선과 공동면의 포함관계를 고려하여 절리선을 구분한 뒤 절리의 직경분포를 추정하는 알고리즘을 도입해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지지원기술개발사업(2008-R-RD11-P-03-3-010)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 송재준, 2005, 최소자승법을 이용한 원판형 절리의 직경분포와 체적빈도 추정에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제 15권 제2호, 137-144.
2. Baecher, G. B., H. H. Einstein and N. A. Lanney, 1997, Statistical description of rock properties and sampling. 18th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 1-8.
3. Tonon, F. and S. Chen, 2007, Closed-form and numerical solutions for the probability distribution function of fracture diameter, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Vol. 44, 332-350.
4. Song, J. J., 2009, Distribution-free method for estimating size distribution and volumetric frequency of rock joints, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 46, 748-760.
5. Kulatilake, P. H. S. W. and T. H. Wu, 1986, Relation between discontinuity size and trace length., Proc. 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Tuscaloosa, Alabama, 130-133.
6. Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall., London.
7. Villaescusa, E. and E. T. Brown, 1992, Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurements. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 25, 67-87.



전 기 환

2007년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2010년 서울대학교 공과대학 에너지시
스템공학부 공학석사

Tel: 02-880- 8713
E-mail: york49@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 박사과정



조 영 도

1977년 인하대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1982년 인하대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2007년 광운대학교 화학공학과 공학박사

Tel: 042-868-3223
E-mail: jyd@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 광물자원연구
본부 자원탐사개발연구실 책임연구원



송 재 준

1993년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 02-880-9043
E-mail: songjj@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지시스템공학부
교수