

불연속면의 확률절리망 알고리즘의 개발¹

고 왕 경²

요 약

불연속면의 분석은 방향성 데이터로서 적은 표본을 가지고 암반의 전체를 추론해야 하는 문제를 갖고 있다. 실험실에서 분석된 표본은 시추공에 의하여 분석된 데이터이므로 그 크기가 제한되어 있어, 거대한 암석을 분석하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 이런 표본을 이용하여 거대한 암석의 대표 방향성, 집락 정도, 불연속면의 간격, 암석의 크기를 결정하는 연장성에 관하여 가정된 분포 하에서 계산하고, 이를 이용하여 암석의 분포 형태를 관찰할 수 있는 확률 절리망을 그리는 알고리즘을 연구한다. 그리고 실제 불연속면 데이터를 적용하여 이들을 구하고 확률절리망을 작성한다.

주제어: 간격성, 대표 방향성, 연장성, 집락성, 확률 절리망

1. 서론

시추공에 의하여 밝혀진 암반의 구조형태를 이용하여 지하에 광범위하게 매설되어 있는 암반을 파악하는 것은 토목공학, 지반공학과 암석공학 등에 매우 중요하다. 그러나 암반의 크기에 관한 추정치 실제로 불가능하기 때문에 똑같은 크기의 암반으로 구성하는 확률 절리망을 사용하여 분석되었다. 그러나 이 논문에서는 확률론의 입장에서 이를 추정하고 이를 이용하여 확률론의 입장에서 확률절리망을 작성하고 실제 데이터와의 차이를 검증한다.

암반의 불연속면과 수평면이 이루는 기울기를 경사각 β 라하고, 북쪽을 0° 로 하여 시계방향으로 수평면의 각도를 경사방향 α 라 하면, 두개의 표본 쌍 $(\alpha_1, \beta_1), (\alpha_2, \beta_2), \dots, (\alpha_N, \beta_N)$ 에서 α_i 와 β_i 는 종속이나 (α_j, β_j) 와 (α_k, β_k) 는 서로 독립인 확률변수이다. 또한 불연속면 사이의 간격은 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 로 구성되어 있다. 이 자료를 이용하여 암반의 모양을 확률론적으로 해석하여 지하에 매설되어 있는 암반의 구조를 추정하고자 한다.

표본에 의하여 추정한 자료를 근거로 실제 지하 매설물에 존재할 것으로 예상되는 암반의 절리 형태를 확률론에 근거하여 해석하고, 확률 모의실험(Monte-Carlo simulation) 방

¹ 이 논문은 안양대학교 교내 연구비로 연구되었음

² 경기도 안양시 안양 5동 708-113 안양대학교 정보통계학과 부교수

법에 의하여 절리분포도를 작성한다. 동시에 조사 구간에서 수행된 지표지질조사와 BIPS 자료를 종합하여 이를 대표 방향성, 암반의 크기를 결정하는 연장성, 암반과 암반 사이의 간격성으로 구분하고 각각의 항목을 확률분포를 이용하여 대표방향, 연장성, 간격을 구하고, 동일한 절리특성을 가질 것으로 판단되는 균열영역(Fracture Domain)을 결정하여 각각의 균열영역에 대하여 확률론에 근거한 확률 절리망을 그리는 알고리즘을 제안한다. 이 때 사용되는 분포들은 암반 구조에 대한 방향성은 Fisher 분포, 연장성은 지수 분포, 절리의 중심은 포아송 분포를 가정한다. 특히 이 논문에서는 집락성의 계산 방법을 제안하고 Fisher 상수와와의 관계를 실 데이터를 이용하여 계산하겠다. 또한 연장성의 계산방식을 제안하여 이를 절리망에 포함시킨다.

암석공학은 그 효시가 Fookes and Parrish(1969)에서 시작하여, Attewell and Woodman(1971), Goodman(1976)에서 진전이 있었고, Hoek and Bray(1981), Priest and Brown(1983), Brady and Brown(1985)에 의하여 현재 사용되어지는 여러 가지 이론이 창출되기에 이른다. 1985년을 기점으로 하여 Long et al(1985)에 의하여 그 발전이 가속되어 토목공학에서 필요 불가결한 요소로 대두되고 있다.

제2장에서는 불연속면의 분석에 관한 제반 이론을 연구하고, 제3장에서는 확률절리망을 자동으로 그릴 수 있는 알고리즘(algorithm)의 개발을 목표로 각 요소별 난수를 발생시키는 수식을 구하며 동시에 확률절리망 작성 알고리즘을 제안한다. 제4장에서는 확률론의 입장에서 본 분석 방향에 관하여 결론을 내리고 앞으로의 발전 방향을 살펴 보기로 한다.

2. 불연속면에 관한 분석이론

불연속면 분석은 $(\alpha_1, \beta_1), (\alpha_2, \beta_2), \dots, (\alpha_N, \beta_N)$ 에서 α_i 와 β_i 는 종속이나 (α_j, β_j) 와 (α_k, β_k) 는 서로 독립인 확률변수이고, 또한 불연속면 사이의 간격은 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 는 서로 독립이라 가정한다.

2.1 조사선에 따른 측정오차 보정

조사선의 방향벡터와 불연속면의 법선벡터가 이루는 예각을 δ 로 하고, α_d 와 β_d 는 조사선의 경사방향 및 경사각이라 할 때, 대수적 조작을 위하여 다음과 같이 변환시킨다. 이 때 α_n 과 β_n 은 불연속면 법선의 선주향 (trend) 및 선경사(plunge)이다.

$$\begin{aligned}\alpha_n &= \alpha_d \pm 180^\circ (0^\circ \leq \alpha_n \leq 360^\circ) \\ \beta_n &= 90 - \beta_d\end{aligned}\quad (1)$$

절리군 법선 방향과 예각을 이루는 조사선과 교차되는 불연속면의 수효는 예각이 증가할수록 감소되며, 예각이 90° 에서는 교차면이 존재하지 않으므로, 조사선을 이용한 방향성 자료는 심각한 편차를 갖게된다. 따라서, 편차를 제거시킬 필요가 있다. 이때, 개별 절리면들이 각 절리군을 형성한다고 가정할 때, 예각 δ 를 이용하여 절리군에 속한 모든 불연속면

이 평행한 이상적인 경우에는 측정자료에 대한 가중치를 고려하여 오차를 제거할 수 있다. 이때 각 절리군의 수정된 값은 다음과 같은 가중치를 갖는다.

$$w = \frac{1}{\cos(\delta)} \quad \delta < 90^\circ \quad (2)$$

여기서 $\cos(\delta) = |\cos(\alpha_n - \alpha_d) \cos(\beta_n) \cos(\beta_d) + \sin(\beta_n) \sin(\beta_d)|$ 이다. 이때 w 값은 $\delta = 90^\circ$ 에 가까운 값을 갖게 되면 그 값이 커지므로 다음과 같은 정규최대 가중치 오차 (normalised maximum weighting factor error)를 이용하여 그 값이 커지는 것을 방지하게 된다.

$$W_{\epsilon, \max} = \left(\frac{\cos(\delta)}{\sin(90^\circ - \delta - \epsilon)} - 1 \right) \times 100(\%)$$

이와같이 계산된 보정항을 이용하여 변형된 데이터를 α_{ni} , β_{ni} 라 하자. 원 데이터를 정규화시켜줌으로서 같은 정도의 가중치를 갖는 표본의 총 가중치 표본수를 이용한 가중치 계산은 다음 식에 의한다.

$$w_{ni} = \frac{w_i N}{N_w} \quad (3)$$

이때, $N_w = \sum_{i=1}^N w_i$ 이며 w_i 는 (2)식에 의하여 계산된 각 성분이 갖게 되는 가중치 값이다. (3)식을 이용하여 절리군을 3차원상에 표현하면, i 번째 성분의 벡터 \mathbf{n}_i 의 x, y, z 직교좌표 성분 (n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}) 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} n_{xi} &= w_{ni} \cos(\alpha_{ni}) \sin(\beta_{ni}) \\ n_{yi} &= w_{ni} \cos(\alpha_{ni}) \cos(\beta_{ni}) \\ n_{zi} &= w_{ni} \sin(\beta_{ni}) \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 절리군의 대표 방향성

절리군의 대표적 방향성은 (4)식을 이용하여 각 불연속면의 3차원 표현 벡터 \mathbf{n}_i 로 구할 수 있는데 이 방법은 가중치가 높은 불연속면의 방향성이 중요하게 작용되는 방법이다. 따라서 대표방향은 절리군의 합성 벡터 $\mathbf{r}_n = (r_{xn}, r_{yn}, r_{zn})$ 은 (4)식을 이용하여 구한다. 이때 직교좌표성분은 다음과 같다.

$$r_{xn} = \sum_{i=1}^N w_{ni} n_{yi}, \quad r_{yn} = \sum_{i=1}^N w_{ni} n_{xi}, \quad r_{zn} = \sum_{i=1}^N w_{ni} n_{zi}$$

따라서, 합성벡터 \mathbf{r}_n 의 크기는 $l(\mathbf{r}_n) = \sqrt{r_{xn}^2 + r_{yn}^2 + r_{zn}^2}$ 이 되며, \mathbf{r}_n 의 대표 선주향 α_{rn} 과 대표 선경사 β_{rn} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha_{rn} &= \arctan\left(\frac{r_{xn}}{r_{yn}}\right) + q \\ \beta_{rn} &= \arctan\left(\frac{r_{zn}}{\sqrt{r_{xn}^2 + r_{yn}^2}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 q 는 0° 와 360° 사이에서 정확한 사분면에 위치하도록 조정하는 변수이다.

2.3 집락성 측정

Fisher, R. A(1953)은 방향성 데이터의 함수로서 확률변수 Θ 의 분포를 불연속면의 방향성을 분석하는데 사용되고 있다. Fisher 분포의 확률밀도 함수는 다음과 같다.

$$f(\theta) = \frac{K \sin(\theta) e^{K \cos(\theta)}}{e^K - e^{-K}}, \quad 0 \leq \theta \leq \pi$$

윗 식에서 K 는 Fisher 상수이며 방향의 집락 정도를 나타내는 집락지수로 사용된다. 이에 대한 추정량은 충분추정량을 비롯하여 여러가지가 있으나, 여기서는 Mardia(1972)가 제안한 (6)식과 같은 불편 추정량을 사용한다.

$$\hat{K}_1 = \frac{N-2}{N-|r_n|} \quad (6)$$

여기서 N 은 불연속면의 개수이며 $|r_n| = l(\mathbf{r}_n)$ 이다. 이때 \hat{K}_1 는 불연속면의 집락 정도를 나타내며, 그 값이 3보다 클 때는 집락 정도가 높음이 밝혀졌다. 불연속면의 방향이 절리군 대표 방향과 θ 이내의 각도 내에 존재할 확률은 약간의 대수적 조작을 통하여 다음과 같이 구한다.

$$P(\Theta < \theta) \approx 1 - e^{K|r_n|(\cos(\theta)-1)}$$

이 식에서 θ 를 구하면

$$\theta = \arccos \left(1 + \frac{\ln(1 - P(\Theta < \theta))}{K|r_n|} \right) \quad (7)$$

이 된다.

다른 집락 정도의 측정치로서 Fisher 분포의 최우추정량으로서 다음 식을 집락성 정도를 측정하는 지수로 제안한다.

$$\hat{K}_2 = \frac{|r_n|}{N} \quad (8)$$

\hat{K}_2 은 $[0,1]$ 의 범위에서 존재한다. 이 때 $\hat{K}_2 = 1$ 이면 한 점에 모여져 있다는 것을 의미하나, $\hat{K}_2 = 0$ 이라고 하여 확률적으로 퍼져있다는 의미는 아니다. 다시말하면 암반의 균열 상태가 임의의 방향을 갖고있다는 의미는 아니다. 또한 (6)식에 의한 집락 지수는 $\hat{K}_1 \geq 3$ 인 점에서는 곡선이 완만하나, 제안된 (8)식의 집락지수는 $\hat{K}_2 \geq 2/3$ 에서는 곡선의 경사가 급하기 때문에 판별 정도가 뛰어나 변별력이 좋다는 것을 그래프 상에서 확인할 수 있었고, 아울러 두 식의 관계는 다음과 같다.

$$K_2 = 1 - \frac{1}{K_1}$$

통계적 분석을 위하여 평균과 표본편차 및 신뢰구간을 구하기 위하여, 약간의 대수적 조작을 통하여 구하면 \hat{K}_2 의 표본 분산은 $S^2 = 1 - \hat{K}_2$ 이며 . 표본 표준편차는 $Sd = \sqrt{-2\ln(1 - S^2)}$ 이다. 이를 이용하여 $100 \times (1 - \alpha)\%$ 신뢰구간을 구하면 다음과 같다. 여기서 $u_{\alpha/2}$ 는 사다리꼴 분포에서 구한다.

$$Pr(\hat{K}_2 - u_{\alpha/2}Sd \leq K_2 \leq \hat{K}_2 + u_{(1-\alpha/2)}Sd) = 1 - \alpha$$

2.4. 연장성 측정

암반 구조의 중요한 요소 중에 하나가 연장성이다. 즉 균열이 어떤 방향으로 어느 만큼 형성되어있나 하는 문제에서 그 길이를 연장성 이라 하자. 지하에 매설되어 있는 암반은 그 구조가 실제적으로 파악하기가 불가능하다. 따라서 확률론의 입장에서 지하 구조물의 구조형태를 파악하기 위해서는 암반이 크기를 추정해야 한다. 물론 추정하고자 하는 암반은 원형을 가정한다.

연장성에 관한 이론적인 분포는 몇가지가 있는데, 이 논문에서는 암반의 지름 y 을 추정하는 함수로서 다음과 같은 확률밀도함수를 가정하겠다.

$$f(y) = \frac{e^{-\frac{y}{\mu_L}}}{\mu_L}, \quad 0 < y < \infty$$

여기서, μ_L 은 균열상태의 평균 길이를 의미한다.

이때 l 의 길이를 갖게 될 확률은

$$P(Y \leq y) = \int_0^l f(t)dt = 1 - e^{-\frac{l}{\mu_L}} \tag{9}$$

이다. 그런데 μ_L 즉 평균 길이를 구하는 것은 매우 어렵고 난해한 것이다. 이 논문에서는 시추공에 의하여 분석된 암석의 평면투영의 면적들의 평균 $\mu_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{시추공의 반 지름})^2 \pi \cos(\alpha_{ni})$ 을 사용하여 추정한다. 또한 (9)식에서 l 의 값을 구하기 위하여 $P(X \leq x) = 1 - \alpha$ 인 경우, 즉 $100 \times (1 - \alpha)\%$ 의 신뢰성을 가지고 암반이 존재하리라 추정되는 연장 길 이 $l = -\mu_L \ln(\alpha)$ 을 이용하여 구한다. (단, 이 논문에서 사용하는 추정되는 절리군 길이를 $\alpha = 0.01$ 으로 가정하자.) 또한 분석대상이 되는 절리군과 동일한 형태의 절리군을 의미한다.

2.5. 간격성

불연속면의 절리 간격을 분석하는 방법은 지수 분포에 의해 불연속면 간격을 결정한다. 그 분포는

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad 0 < x < \infty$$

이다. 전체 불연속면의 평균 간격은 빈도수의 역수 $\frac{1}{\lambda}$ 로 나타낸다. 또한 그 분포함수는

$$P(X \leq x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (10)$$

이 된다.

3. 확률절리망

시추공에 의해 실험실에서 분석된 표본을 이용하여 대표방향, 집락지수, 간격 및 이 논문에서 제안된 연장성을 계산한다. 이를 이용하여 확률 절리망(random fracture network)을 작성하고, 이를 토대로하여 절리형태를 확률론적으로 분석할 수 있을 것이다. 확률 모의 실험 기법에 의하여 프로그램 언어 Maple V로부터 확률난수를 추출하고 앞에서 계산된 방법에 의해 계산하여 그래프를 작성한다. Monte-Carlo Simulation 기법을 이용한 확률 절리망을 작성하기 위해서는 절리의 개수, 절리간격, 절리 방향, 절리의 연속성을 각각 추정하여야 한다. 각 방법은 다음에 의하여 구한다.

3.1 난수 발생

이 논문에서 사용한 난수는 Maple V에 내장되어 있는 rand() 패키지를 이용하였으며, 가정된 분포들의 난수는 역 분포함수 (inverse cdf technique) 방법을 적용하였으며, 이때 각 난수는 동일한 것이 아니다.

3.1.1 간격성

절리망의 간격을 조사선 상에 형성하기 위한 통계적 난수발생방법은 지수 분포를 이용한 난수는 (11)식을 적용하여 계산한다.

$$R_{E,\lambda}^i = \frac{-\ln(1 - R_{U,\lambda}^i)}{\hat{\lambda}} \quad (11)$$

여기서, $R_{U,\lambda}^i$ 는 $0 \leq x \leq 1$ 상에서의 사다리꼴 분포에서 구한 i 번째 난수라는 의미이고 $\hat{\lambda}$ 는 실제 데이터에서 구한 절리간격의 평균의 역수이다.

3.1.2. 방향성

절리망의 방향은 조사선 상에서 절리방향을 θ 라 하면 θ 는 Fisher 분포에 의하여 계산되며, (7)식을 이용하여 계산하면

$$R_{F,k}^i = \arccos\left(\frac{\ln(1 - R_{U,\lambda}^i)}{k} + 1\right) \quad (12)$$

이다. 여기서 k 는 Fisher 상수 K 의 추정값이다. 즉 절리가 수평면으로 어떤 방향으로 이루어지고 있는지를 파악한다.

3.1.3. 연장성

모집단이 지수 확률밀도함수로 가정하였으므로 (9)식에 의하여 난수를 발생하면

$$R_{D,C}^i = -\mu_L \ln(1 - R_{U,i}^i) \quad (13)$$

이다. 또한 $\hat{\mu}_L$ 은 앞에서 제안한 실제 데이터에서 추정한 값이다.

3.1.4 중심좌표와 절리면 갯수

중심좌표는 포아송 확률좌표(random poisson coordinate) 계산방식에 의하여 다음과 같이 절리선의 중심 (x_r, y_r) 을 구한다.

$$\begin{aligned} x_r &= x_{g1} + R_{U,i}^i(x_{g2} - x_{g1}) \\ y_r &= y_{g1} + R_{U,i}^i(y_{g2} - y_{g1}) \end{aligned} \quad (14)$$

이때 (x_{g1}, y_{g1}) 과 (x_{g2}, y_{g2}) 는 2차원 상에 표현코자 하는 사각형의 양끝 점을 의미한다.

또한 절리 개수의 추정은

$$n_{int} = \lambda_t L = \frac{L}{\bar{X}_t} \quad (15)$$

이다. 이때, L 은 시추공의 전체 길이를, n_{int} 는 불연속 절리군의 계수를 나타내고 \bar{X}_t 는 평균절리간격을 나타낸다.

3.2 확률 절리망 작성

3.2.1 연장성 추정

표면에 나타난 불연속면에 관한 연장 길이와 추정된 연장 길이를 비교하기 위하여, A 회사에서 실시한 7개의 공구에서 표본을 추출하였다. 추출방법은 조사선 상에 나타나는 불연속면을 지면에서의 높이와 선경사, 선주향을 Silva 콤파스를 이용하여 측정하였다.

이렇게 구한 표본을 분석한 결과가 [표 1]과 같이 공구별로 불연속면의 개수, 대표 선주향과 선경사, Fisher 상수, 전체길이, 평균간격, 실제 연장길이가 분석되었다(이때 단위는 m이다). 또한 앞에서 제안한 연장 길이 추정방법에 의하여 연장 길이를 구하였다. 이를 이용하여 추정된 연장길이를 이론치로 하고, 연장길이를 실제치로 하는 적합도 검정을 실시한 결과 $\chi^2 = 1.1115$ 로서 5% 유의수준에서 유의적인 차이를 볼 수 없었다. [표 1]에서 추정된 연장길이는 선경사가 비교적 작은 암반은 그 차이가 크지만 선경사가 비교적 큰 암반은 그 오차가 비교적 작음을 나타내고 있어 제안된 방법이 효과적이었음을 알 수 있다.

[표 1] 연장 길이 추정

공구별	실제 데이터의 결과						추정된 연장길이
	개수(N)	선주향/선경사(°)	K_1	전체길이	평균간격	연장길이	
A1	21	316/10	21.743	2.10	0.105	2.37	3.52
A2	20	7/10	12.032	2.22	0.122	2.01	3.32
A3	22	31/9	10.612	2.90	0.138	1.65	2.18
A4	20	250/16	6.684	4.11	0.217	1.29	1.32
A5	22	267/48	8.662	3.10	0.148	2.28	2.70
A6	22	206/37	3.219	6.92	0.364	2.31	2.57
A7	23	196/57	2.616	2.07	0.109	1.63	1.58

3.2.2 확률 절리망 작성 알고리즘

불연속면에 관한 확률 절리망의 작성은 다음과 같은 알고리즘으로 작성하되 절리망의 개수는 (15)식에 의해 추정된 절리 개수만큼 그리면 된다. 이때, 각 단계에서의 난수를 발생하는데 이는 동일한 난수가 아니다.

단계 1 : (11)식을 이용하여 불연속면 간격계산

단계 2 : (14)식을 이용하여 작성하고자 하는 사각형의 중심점과 조사선을 계산

단계 3 : (13)식을 이용한 연장성 l 을 계산

단계 4 : (12)식을 이용한 방향성 계산

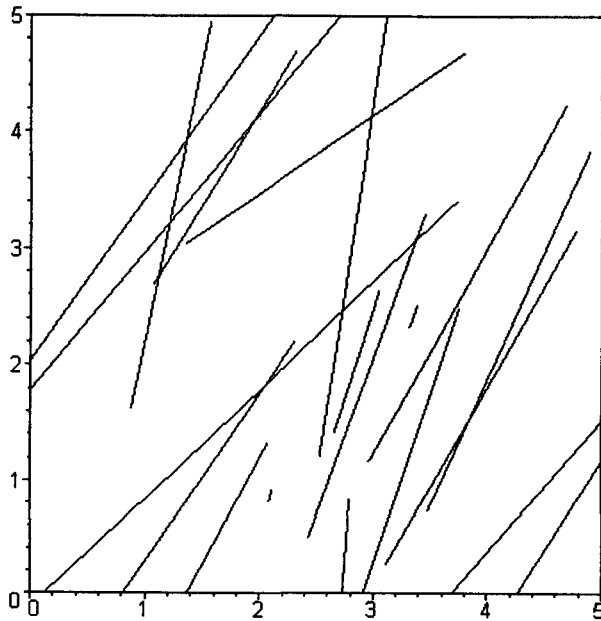
단계 5 : 확률 절리망 작성

본 논문에서 쓰인 프로그램 언어는 Maple V 이며 실제 데이터에서 계산된 여러 가지 값을 반영하여 확률 절리망을 작성한다. 이 때 사용한 확률난수는 Maple 팩키지에 내장되어 있는 난수 발생 팩키지를 사용하며, 입력되어지는 변수는 실제로 계산된 값이다. 모의 시험 결과는 [그림 1]에서 확인할 수 있고 이때 사용된 변수 값은 앞의 [표 1]에서 구한 A5 공구의 결과이다. Fisher 상수의 추정값 $K_1 = 8.662$, 연장 길이 $l = 2.28m$, 시추공의 전체 길이 $m_1 = 3.10m$, 불연속면의 평균 간격 $\lambda = 0.148m$ 을 이용하여 그려진 절리망이다. 이 결과는 앞에서 분석한 실제 데이터와 유사한 모양을 갖고있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론 및 제언

지하 매설물의 구조를 파악한다는 것은 매우 힘든 일이나, 암석공학에서 다루는 여러 가지 기법들을 이용하여 비록 지름 7mm의 시추공에서 얻어진 자료라 할지라도 확률론에 근거한 추정은 시추공 근방의 암반 구조를 파악하는데 매우 효과적이다. 이 논문에서 사용한 실제 데이터와 추정된 값에 유의적인 차이가 보이지 않은 점이 이를 입증하고 있다.

random realisation illustrating generated network



[그림 1] 확률 절리망

암반 구조학에서 다루는 확률과 통계 기법은 기초적인 것으로 통계적인 입장에서 관심을 기울인다면 많은 발전이 있을 것으로 본다. 또한 여러 학자들에 의하여 밝혀진 바에 의하면, Fisher 분포는 대칭형 분포에서는 매우 효과적이지만 비대칭 분포에서는 효과가 감소된다고 알려져 있다. 따라서 암반구조 분석에 관한 방향성 데이터에 필요한 분포를 개발하여 적용시키는 것도 바람직하다. 이 논문에서 제안된 방법은 이론적인 것이고 실제적인 데이터의 적용은 일곱 개의 공구를 이용하였을 뿐이므로 많은 데이터를 가미시켜 나간다면 연장 길이를 추정함에 있어 보다 효과적인 방법을 연구하여야 한다.

참고 문헌

1. Attewell, P. B. and Woodman, J. P. (1971). Stability of discontinuous rock masses under polyaxial stress systems, *In 13th Symposium on Rock Mechanics, Stability of Rock Slopes, ASCE, N.Y.*, pp 665-683.
2. Batschelet, E. (1981). *Circular Statistics in Biology*, Academic press. London and N.Y.

3. Brady, B. H. G. and Brown, E. T. (1985). *Rock mechanics for Underground Mining*, George Allen & Unwin, London.
4. Fisher, R. A.(1953). Dispersion on a sphere, *proceedings of Royal Society of Lodon*, A217, 295-305.
5. Fisher, N. I.(1993). *Statistical Analysis of Circular Data*, Cambridge univ. press, N.Y.
6. Fooks, P.G. and Denness, B.(1969). Observational studies on fissure patterns in Cretaceous sediments of South-East England, *Geotechnique*, 19, No.4 ,pp453-477.
7. Fookes, P. G. and Parrish, D. G. (1969). Observational studies on small-scale structural discontinuities in the London Clay and their relationship to regional geology, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1, pp217-240.
8. Goodman, R. E. (1976). *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*, West, St Paul.
9. Hock, E.(1998). *Rock Engineering - Course notes by Evert Hoek*, Evert Hoek consulting Engineer Inc. , Canada.
10. Hoek, E. and Brown, E. T.(1988). *The Hoek- Brown failure criterion - a 1988 update , Proceeding of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Rock Engineering for underground Excavations*, Toronto, pp31-38.
11. Hoek, E. and Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering*, 2nd and 3rd editions, Institution of Mining and Metallurgy, London.
12. Long, J. C. S., Gilmour, P. and Witherspoon, P. A.(1985). A model for steady fluid flow in random three dimensional networks of disc-shaped fracture, *Water Resources Research*, 21, No.8, pp1105-1115
13. Mardia, K. V.(1973). *Statistics of Directional data*, Academic press, Lodon and N.Y.
14. Priest, S. D. and Brown, E. T.(1983). Probabilistic stability analysis of variable rock slopes, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 92,A1-12
15. Priest, S. D.(1993). *Discontinuity analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, London.
16. 조태진 역(원저 S. D. Priest)(1999). 반구투영법을 이용한 암석역학, 구미서관, 서울.

Development of Random fracture network for discontinuity plane

Ko, Wang Kyung³

Abstract

A major deficiency of laboratory testing of rock structure is that the structures are limited in size and therefore present a very small and highly selective sample of the rock mass from which were removed.

In a typical engineering project, the samples tested in the laboratory represent only a very small fraction of one percent of the volume of the rock mass.

In this paper, we calculate the representative orientation of the resultant vector, the measure of the degree of clustering, the volume of rock mass, the trace length of discontinuity spacing under underlying distributions. And we generate the random fracture networks using real data. We propose the calculating the trace length.

Key Words and Phrases: Representative orientation, degree of clustering, volume, trace length, random fracture network.

³708-113, Anyang 5-dong, Manan-gu, Anyang shi 430-714, Korea