

1D 측선에 의한 절리 자료에 대한 편향 보정 기법에 관한 연구

엄 정 기^{1)*}

A study of the Sampling Bias Correction on Joint Data from 1D Survey Line

Um, Jeong-Gi

Abstract The procedures to correct sampling biases for discontinuity data obtained from 1D survey line(borehole or scanline) is addressed. The probability of intersection between the survey line and a circular discontinuity is considered, and a correction for orientation bias is developed assuming discontinuities as equivalent circular disks. The correction incorporates the effect of the angle between the direction of survey line and each discontinuity plane belonging to the discontinuity cluster, size of each discontinuity and length of the survey line. A procedure is provided to estimate unbiased discontinuity spacing parameters using the discontinuity spacing data based on the measurements carried out on a finite length of the survey line.

KeyWords: Borehole, Scanline, Sampling bias correction, Stochastic uppercase letters

초 록 시추공 또는 선형조사선과 같은 1D 측선에서 측정된 절리 자료의 샘플링 편향을 보정하는 절차를 기술하였다. 1D 측선에서 절리가 관측될 수 있는 확률은 측선 방향에 대한 절리의 상대적인 방향 이외에도 절리 크기, 절리 모양 및 측선 길이 등의 복합적 요인에 의하여 결정될 수 있다. 본 연구에서는 절리의 모양을 원판형이라 가정하고 절리의 방향 및 크기에 의하여 나타날 수 있는 절리 자료의 방향 편향 효과를 동시에 보정할 수 있는 방법론을 제시하고, 현장적용을 통하여 방향 편향 보정이 절리군의 방향분포에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 또한, 유한 길이의 측선으로부터 산정된 절리군의 간격분포는 샘플링 영역인 측선 길이에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 이와 같은 간격 편향에 대한 보정절차를 기술하였다.

핵심어: 시추공, 선형조사선, 자료 편향 보정, 통계적

1. 서 론

불연속암반은 대·소 불연속면과 이들 사이에 위치하는 무결암으로 구성되어 있으며, 이와 같은 불연속암반에 존재하는 불연속면은 불연속암반의 수리·역학적 특성에 지대한 영향을 미친다. 불연속암반 내에 분포하는 불연속면은 암반공학적 프로젝트의 규모에 따라 대규모 불연속면(major discontinuity)과 소규모 불연속면(minor discontinuity)으로 분류할 수 있다. 단층, 전단대, 암맥 및 일정크기 이상의 대절리 등은 대규모 불연속면에 해당하며, 이들은 공학적 대상인 불연속암반에서 확정적 단수 또는 통계적 다수의 선 구조로 취급될 수 있다. 한편, 크기가 상대적으로 작은 소절리, 층리 및 엽리 등과 같이 기하학적으로 변화성(variability)이 큰

소규모 불연속면의 특성은 통계적으로 해석할 수 있다. 본 논문에서 다루는 불연속면은 변화성이라는 통계적 특성을 갖는 소규모 불연속면에 한정되며, 편의상 이와 같은 소규모 불연속면을 통틀어 “절리”라 명하기로 한다.

절리암반의 강도 및 변형 등의 역학적 특성과 대표요소체적(representative elementary volume, REV) 및 삼차원 수리전도도 등의 암반지하수 특성을 규명함에 있어서 대상 절리암반에 존재하는 절리에 대한 현실적인 삼차원 구조 해석은 매우 중요하다. 이를 위하여 지표지질조사 및 터널내부 트레이스 맵핑을 통한 선형조사선(1D)이나 조사창(2D)에서 얻은 절리자료를 토대로 삼차원 절리암반의 구조 특성을 통계적으로 구현하는 방법론이 제시되었다. 하지만, 절리암반에 대한 삼차원 절리 연결망의 구현은 현장 특성상 대부분의 경우에 있어서 시추공 및 선형조사선 등의 1D 측선으로부터 확보된 절리 자료에 의존하게 된다. 이때 1D 측선에서 제공하는 절리의 방향 및 간격에

¹⁾ 부경대학교 환경탐사공학과 교수

*교신저자(Corresponding Author): jum@pknu.ac.kr

접수일: 2003년 4월 4일

심사 완료일: 2003년 9월 15일

대한 자료는 실제 절리암반에 대한 매우 제한된 정보로서 샘플링 편향(sampling biases)으로 인한 오류를 내포하고 있다.

시추공, 터널내부 및 지표노두의 1D 또는 2D 샘플링 영역에서 절리가 관측될 수 있는 확률은 샘플링 영역에 대한 절리의 상대적인 방향, 절리의 크기, 절리의 모양 및 샘플링 영역의 규모와 같은 요인에 의하여 결정될 수 있다. 따라서 동일한 대상 암반에서 샘플링 영역의 크기와 위치에 따라 절리의 개수는 다르게 나타날 수 있으며, 관측된 절리 빈도수는 실제 절리 빈도수와 차이를 보일 것이다. 그러므로 임의의 샘플링 영역으로부터 관측된 절리자료를 사용하여 대상 절리암반의 기하학적 모수에 대한 해석을 위한 전단계로 샘플링 영역에 의한 샘플링 편향을 보정하여야 한다. Terzaghi¹⁾는 절리 방향자료의 방향 편향을 보정하기 위하여 각각의 절리군에 속하는 절리의 방향과 시추공과 같은 샘플링 영역의 방향 사이의 각도에 의해 파생되는 방향 편향 효과를 보정하는 방향 편향 보정법을 제시하였으나, 이를 위하여 무한 크기의 절리 및 샘플링 영역을 가정함으로써 절리 크기에 의한 방향 편향 효과를 고려하지 못하였다. Kulatilake와 Wu²⁾, Wathugala 등³⁾은 유한 크기의 절리와 샘플링 영역이 교차하여 나타날 수 있는 샘플링 편향 효과를 보정하는 알고리즘을 도출하여 2D 조사창 조사에 의한 방향 편향 보정법을 제시하였다. 하지만 이와 같은 보정법은 시추공과 선형조사선 등의 1D 축선에서 얻은 절리자료에는 적용할 수 없다.

현재 대부분의 국내현장에서 2D 조사창에 의한 절리 자료의 획득이 가능한 비탈면 노두를 확보하기는 어려운 실정이다. 또한, 대다수 절취사면의 경우에도 보강재로 인하여 절리조사를 위한 2D 샘플링 영역의 확보가 용이하지 않으므로 시추공에 의존한 절리조사가 보편화되고 있다. 본 연구에서는 시추공 및 선형조사선 등의 1D 축선에서 조사된 절리자료에서 나타날 수 있는 방향 편향을 보정하는 기법을 제시하고, 현장적용을 통하여 방향 편향 보정이 방향분포에 미치는 영향에 대하여 고찰한다. 또한, 유한 길이의 축선으로부터 산정된 절리군의 간격분포가 축선 길이에 따라 다르게 나타날 수 있는 간격 편향에 대한 보정 절차에 대하여 서술한다.

2. 1D 축선에 의한 샘플링 편향 보정

2.1 절리 방향 편향 보정

시추공 또는 선형조사선 등의 1D 축선 상에 나타난 절리 방향 자료에 대한 방향 편향을 보정하기 위해서 절리를 원판형이라 가정하고 절리군 내의 각각의 원판

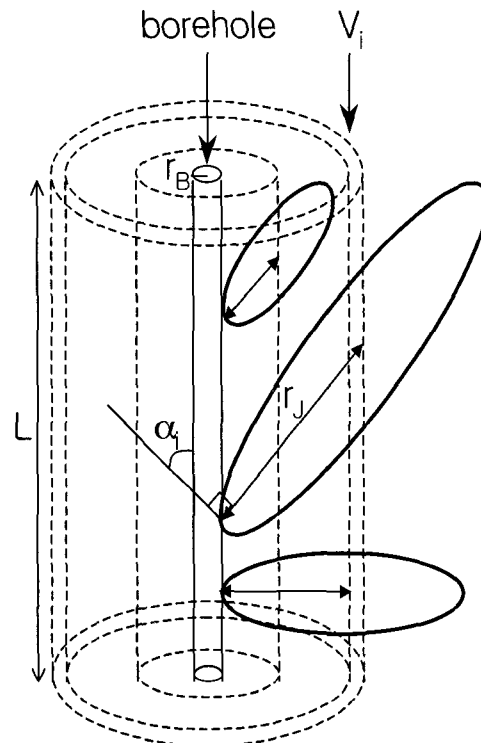


Fig. 1. Generation of the volume for the intersection between the circular disk and the borehole.

절리가 시추공과 교차할 수 있는 통계적 확률을 고려할 수 있다. 이는 절리군에 속하는 각각의 절리면(법선벡터)과 1D 축선이 이루는 각도, 축선의 길이 및 원판 절리의 크기 등으로 인하여 파생될 수 있는 방향 편향 효과를 동시에 고려하는 것이다.

Fig. 1은 원판 절리와 시추공이 교차하여 형성하는 체적(V_i)을 나타내는 모식도이다. 원판 절리가 시추공과 교차하도록 원판 절리의 중심점이 위치할 수 있는 시추공 주위의 통계적 체적 V_i 의 크기는 i 번째 절리면의 법선 방향과 시추공 방향 사이의 예각(α_i), 원판 절리의 반경(r_j) 및 샘플링 영역인 시추공 길이(L)에 의하여 결정된다. 그림과 같이 1D 축선이 시추공인 경우에는 선형 조사선과 달리 시추공 반경(r_B)에 의해서도 V_i 가 영향을 받을 수도 있으나 일반적으로 $r_B \ll r_j$ 인 점을 상기할 때 시추공 크기(반경)에 의한 효과는 무시할 수 있다. Fig. 1에서 α_i 가 감소할수록 또는 r_j 가 증가할수록 V_i 가 증가함을 알 수 있다. 시추공과 원판 절리가 교차하는 확률은 V_i 의 크기에 비례하며, 절리 방향의 편향 보정을 위하여 관측상대빈도(observed relative frequency, ORF)에 할당할 수 있는 가중치(w_i)에 반비례한다. 따라서 i

번째 절리에 대하여 산정할 수 있는 통계적 체적 V_i 와 w_i 사이에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$w_i = k / V_i \quad (1)$$

여기서, k 는 비례상수이다. V_i 는 i 번째 절리면의 법선 방향과 1D 측선 방향 사이의 예각, 원판 절리의 반경 및 시추공 길이의 함수이며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_i = \pi(r_i)^2(\cos\alpha_i)(L) \quad (2)$$

식 (2)에서 V_i 를 산정하기 위해서는 절리 크기의 추정 이 이루어져야 하나 시추공 절리 자료는 절리 길이에 대한 정보를 제공하지 않는다. 따라서 절리 크기분포에 대한 자료를 확보하기 위해서는 대상 지역에 대한 터널 맵핑 또는 최소한 지표지질조사를 실시하여 대상 암반에 대한 절리 길이에 대한 분석이 병행되어야 한다.

시추공에서 총 N 개의 절리가 관측되었다면 시추공과 교차하는 i 번째 절리의 (ORF) $_i$ 는 $1/N$ 이다. 이때 i 번째 절리의 보정 상대 빈도(corrected relative frequency, CRF)는 (ORF) $_i$ 와 절리가중합수 w_i 의 곱으로 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$(CRF)_i = w_i(ORF)_i = w_i / N \quad (3)$$

한편, 절리군에 속하는 각각의 절리로부터 산정된 CRF의 합이 1 임을 이용하여 비례상수 k 를 구할 수 있다. 즉 식 (3)으로부터,

$$\sum_{i=1}^N w_i/N = 1 \quad (4)$$

이며, 식 (1)과 식 (4)로부터

$$k = N / \sum_{i=1}^N (1/V_i) \quad (5)$$

이다. 이때, (CRF) $_i$ 를 구하는 식 (3)은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$(CRF)_i = 1 / \{V_i \sum_{i=1}^N (1/V_i)\} \quad (6)$$

이와 같은 수식을 사용하여 산정되는 w_i 및 (CRF) $_i$ 를 이용하여 기전의 1D 측선에 대한 절리방향으로 인하여 파생되는 샘플링 편향과^{3),4)} 더불어 절리 크기에 의한 방향편향 효과를 동시에 보정할 수 있다. 즉, 절리군의 방향분포 모델링을 수행함에 있어서, w_i 를 적용하여 절리군의 평균 방향여현을 산정함으로써 보정된 평균 방향을 구할 수 있으며, 또한, 절리군에 대한 방향분포 모

델로 기전에 채택되어온 Fisher^{5),7)}, Bingham⁶⁾ 및 이변량 정규분포^{5),7)} 등을 사용할 때 스테레오 투영망의 위도 및 경도 구간에 대한 CRF를 적용하여 보정후의 방향분포에 대한 적합성 검증을 수행할 수 있다.

2.2 절리 간격 편향 보정

일반적으로 절리의 간격 분석에 있어서 유한 길이의 1D 측선으로부터 절리군의 평균간격과 1D 빈도수(linear frequency, 1/평균간격)를 산정한다. 이는 샘플링 영역인 측선 길이에 따라 절리군의 간격분포가 다르게 산정될 수 있는 오류를 내포하고 있으며, 이에 대한 보정이 이루어져야한다. 이와 같은 절리 간격의 샘플링 편향을 보정하기 위하여 다음과 같은 관계식⁸⁾을 사용할 수 있다.

$$E(x) = \frac{\mu}{(1 - e^{-L/\mu})} \left[1 - \left(1 + \frac{L}{\mu}\right) e^{-L/\mu} \right] \quad (7)$$

여기서 $E(x)$ 는 유한 측선 길이 L 에서의 평균 절리 간격이며, μ 는 무한 길이의 측선을 가정한 평균 절리 간격이다. 식 (7)은 절리 간격분포를 음지수분포로 가정하고 관측 평균 간격과 측선의 길이를 고려하여 각 절리군에 대하여 절리 간격의 샘플링 편향을 보정한 평균 절리 간격을 산정하는 것이다. 또한, 관측치와 보정치 사이의 백분율 오차 e 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$e = 100 \times \frac{\mu - E(x)}{\mu} \quad (8)$$

측선의 길이가 평균 절리 간격에 9배($L/\mu=9$)일 때, 식 (7)로부터 $E(x)=0.1110L$ 이며, 이와 같은 결과를 식 (8)에 대입하여 얻어진 관측 절리 간격과 보정 절리 간격 사이의 백분율 오차는 0.11%로서, 측선의 길이가 평균 절리 간격의 9배 수준에서 이미 관측치와 보정치 사이의 차이가 미소함을 의미한다.

3. 현장적용

현장자료로서 스웨덴의 고준위 핵연료 폐기물 처분장을 위한 부지 연구의 일환으로 아스포섬에 설치된 시추공(trend = 318°, downward plunge = 85°)에서 결정질 암석인 섬록암(diiorite)이 연속적으로 분포하는 457.4-536.0 m 심도 범위로부터 얻어진 절리의 방향자료 및 간격자료를 사용하였다. 시추공에서 관측된 절리 방향 자료를 사용하여 절리군을 구분함에 있어서, 클러스터링 알고리즘⁹⁻¹⁰⁾을 적용하여 절리면 법선벡터의 밀집점(dense points)을 확인하고 이에 의한 최적의 절리군수를 구분하는 목적함수(objective function)에 의해서 절

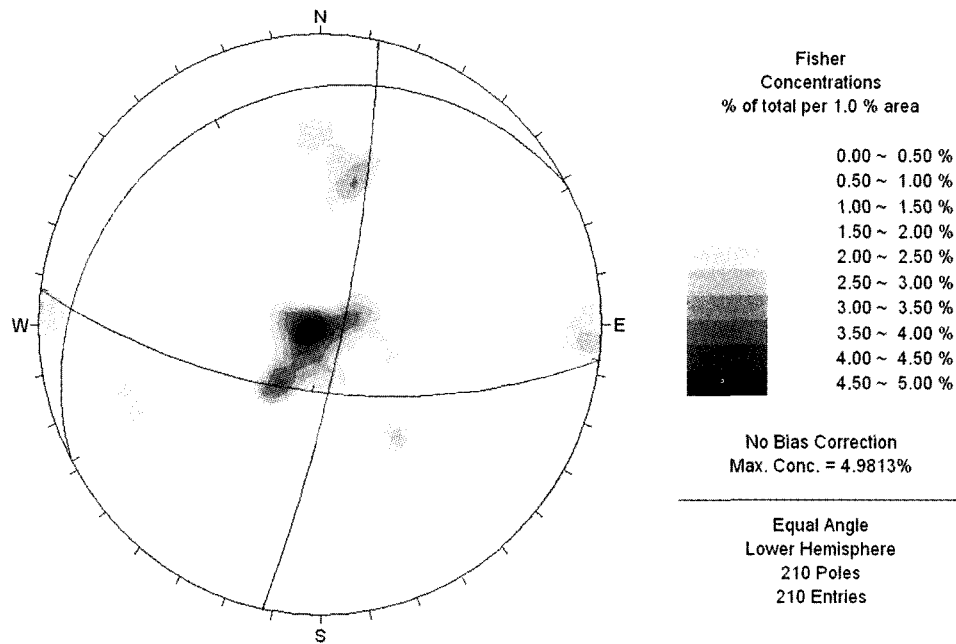


Fig. 2. Orientation distribution of joint sets on a lower hemispherical equal angle projection.

리군을 구분할 수 있다. 하지만, 방향 변화성이 높은 실제 현장 자료를 위와 같은 알고리즘에 적용하였을 때 수학적 목적함수로 절리군 개수를 구분하기에는 어려움이 많으며, 최적의 절리군 개수를 도출하기 위해서는 목적함수 이외에도 연구자의 적절한 암반공학적 판단이 필요하다. 본 연구지역에서 시추공 방향자료로부터 클러스터링 알고리즘을 사용하여 구분된 3개의 절리군이 Fig. 2에 도시되어 있으며, 각각의 절리군에 속하는 절리개수와 각각의 절리군에서 산정된 절리면의 평균 방향이 Table 1에 나타나 있다. Fig. 2에서와 같이 3개의 절리군 공히 높은 변화성을 보이며 이는 부분적으로 방향분석을 위한 절리 자료수의 부재에 기인한다

Table 1. Delineated joint sets and goodness-of-fit results of Bingham distribution for orientation data.

Joint Set No.	No. of Data	Mean Orientation		χ^2 test P
		Dip Dir. (°)	Dip (°)	
1	50	102	81	0.007
2	52	187	64	0.038
3	108	332	13	0.228

Note: P=Maximum significance level at which Bingham distribution can be used to represent the statistical distribution of orientation of joint set (a minimum of 0.05 is required to represent orientation data by a Bingham distribution).

고 판단된다. 이와 같이 변화성이 큰 절리군일수록 방향 편향 보정의 중요성은 커지게 된다.

전장에서 서술한 바와 같이 ID 축선에서 얻은 절리 방향성의 보정을 위한 CRF를 산정하기 위해서는 절리 크기의 추정이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 대상 절리암반 인근에 위치한 터널에서 보고¹¹⁾된 절리 트레이스와 길이에 대한 제한적 정보를 사용하였으며, 2D 샘플링 영역에서 산정된 절리 길이분포로부터 3D 원판형으로 가정된 절리 크기분포를 도출하는 절차¹²⁾를 적용하여 산정된 직경 5.26 m의 원판절리를 사용하여 CRF를 산정하였다. 본 연구지역에서 분류된 3개의 절리군 중 절리군1에 속하는 대표적인 절리로부터 계산된 CRF값이 Table 2에 나타나있다. 절리군1에 해당하는 총 절리 개수는 50개이며, 따라서 각각의 절리에 대한 관측상대빈도(ORF)는 1/50, 즉, 0.02이다. 각각의 절리에 대해서 식 (2)를 이용하여 V_i 를 산정한 후 식 (6)을 사용하여 보정상대빈도(CRF)를 산정하였으며, 식 (3)으로부터 각 절리에 대한 가중치도 산정하였다.

Fig. 3은 절리군1에 대한 방향 편향 보정 전·후의 방향분포를 나타내는 3차원적 히스토그램이다. 그림에서 경사방향과 경사를 수평면 상의 두 축으로 설정하였으며, 수직축은 상대빈도를 나타내고 있다. Fig. 3에서 경사가 큰 절리에 대하여 방향 편향 보정 전과 후의 상대빈도는 상당한 차이를 보이며, 이는 수직에 가까운 경

Table 2. Estimated corrected relative frequencies for some representative joints from joint set 1.

Dip Direction (°)	Dip (°)	Angle between borehole and MNV	ORF	W_i	CRF
090	90	86.66	0.02	0.4822	0.0097
100	85	81.07	0.02	0.1819	0.0036
120	85	80.25	0.02	0.1667	0.0033
270	85	88.35	0.02	0.9830	0.0197
280	85	88.95	0.02	1.5335	0.0307
090	80	76.68	0.02	0.1225	0.0025
110	80	75.65	0.02	0.1135	0.0023
280	80	83.95	0.02	0.2680	0.0054
110	75	70.60	0.02	0.0850	0.0017
120	70	65.25	0.02	0.0674	0.0013

Note: Trend of borehole=318°, Downward plunge of borehole=85°, Length of borehole=78.6 m, MNV=Mean Normal Vector of joint set, ORF=Observed Relative Frequency, CRF=Corrected Relative Frequency, W_i =Weight of the i th joint.

사를 갖는 절리군1에 속하는 원판 절리들의 중심점들이 수직에 가까운 시추공과 교차하도록 위치할 수 있는 통계적 체적이 상대적으로 작아서 높은 값의 가중치가 할당되는 이유에 기인한다. 각 절리군의 방향 편향 보정 전·후의 방향 자료에 대하여 Fisher 분포의 χ^2 적합성 검증⁵⁾을 실시하였다. 3개의 모든 절리군에 대하여 평균 방향과 방향분포가 방향 편향 보정으로 인하여 변화하였음을 알 수 있다(Table 3, Fig. 4). 이는 시추공과 같은 1D 측선의 자료를 사용하여 절리군의 방향분포를 모델링 함에 있어서 방향 편향 보정의 중요성을 시사하는 것이다. Table 3에 나타나 있는 Fisher 분포의 적합성 검증 결과에서 본 연구지역의 3개의 절리군 공히 Fisher분포 모델이 통계적으로 적합하지 않음을 확인할 수

있다. 또한, 각 절리군의 방향 자료에 대하여 Bingham분포의 χ^2 적합성 검증⁶⁾을 수행하였다. Table 1에 나타난 결과에서 방향 자료의 분포모델로서 Bingham분포가 절리군3에만 적합함을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 이론적 확률분포(Fisher 및 Bingham분포)들이 연구지역의 3개의 절리군중, 2개의 절리군에서 통계분포로 채택할 수 없음을 시사하며, 여러 연구자들에 의하여 기 수행된 방향분포에 대한 연구에서도 기전의 이론적 확률분포(Fisher 또는 Bingham분포)가 실제 현장에서 방향 자료의 통계분포로 충분하지 않음을 지적한 바 있다^{7),13-14)}. 이와 같이 기전의 이론적 확률분포에 의해 해석될 수 없는 절리군에 대한 방향분포 모델링을 위해서는 방향 편향 보정 후 산정된 CRF에 의한 경험적 방향분포

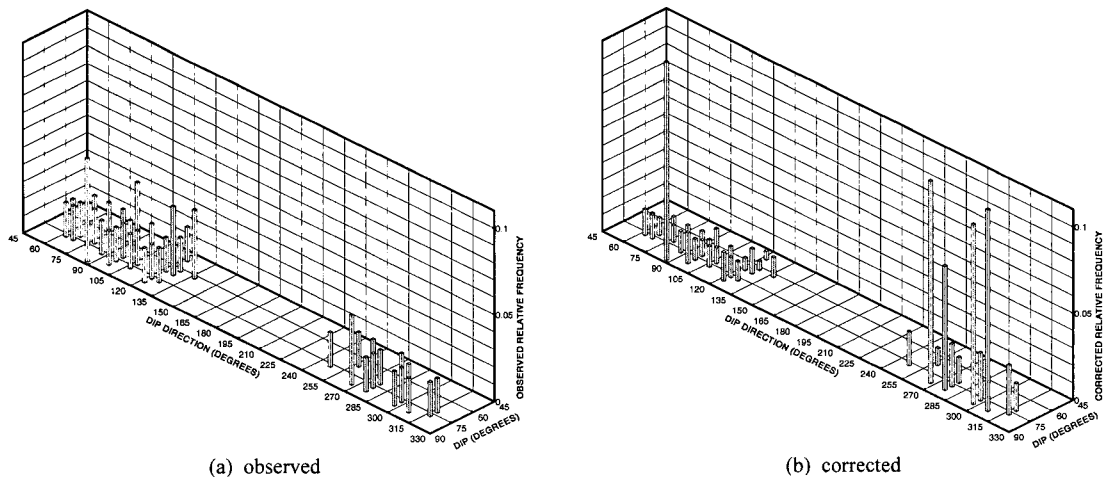
**Fig. 3.** Relative frequency of orientation for joint set 1.

Table 3. Goodness-of-fit results of Fisher distribution for orientation data.

Raw orientation data						
Joint set No.	No. of Data	Upward mean normal vector		K	Sp. Var.	χ^2 test P
		Trend (°)	Plunge (°)			
1	50	102	9	9.04	0.1084	0.009
2	52	187	25	7.92	0.1238	0.047
3	108	8	61	2.48	0.3990	<0.005
Data corrected for sampling bias						
Joint set No.	No. of Data	Upward mean normal vector		K	Sp. Var.	χ^2 test P
		Trend (°)	Plunge (°)			
1	50	285	0	11.86	0.0827	<0.005
2	52	183	11	7.47	0.1312	<0.005
3	108	6	54	2.47	0.4010	<0.005

Note: K=Fisher constant, Sp. Var.=Spherical variance, P=Maximum significance level at which the Fisher distribution is suitable to represent the statistical distribution of joint orientation data(a minimum of 0.05 is required to represent orientation data by a Fisher distribution).

(empirical orientation distribution)¹³를 사용할 수 있다.

본 연구지역에서 구분된 각각의 절리군에 속하는 절리 간격에 대한 통계적 모델로 음지수분포의 적합성을 검증하기 위하여 Kolmogorov-Smirnov 적합성 검증¹⁵을 수행하였다. Table 4에 나타난 결과에서 낮은 값의 Kolmogorov-Smirnov 통계량과 0.2보다 큰 P값으로부터 3개의 절리군 모두에서 절리 간격에 대한 확률분포로서 음지수분포가 매우 타당함을 알 수 있다. Fig. 5는 각 절리군에서 간격 자료에 대한 히스토그램과 더불어 이론적 음지수분포를 나타내고 있다.

Table 4. Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test results of exponential distribution on spacing data of the three joint sets.

Joint Set No.	No. of Data	Mean (m)	Var. (m ²)	K-S _{stat}	K-S Test P
1	49	1.5904	5.7369	0.0936	>0.2
2	46	1.6174	3.0515	0.1046	>0.2
3	112	0.6946	0.9258	0.0231	>0.2

Note: K-S_{stat}=Kolmogorov-Smirnov statistics, A minimum P value of 0.05 is required to accept the tried probability distribution to represent the spacing distribution of the joint set.

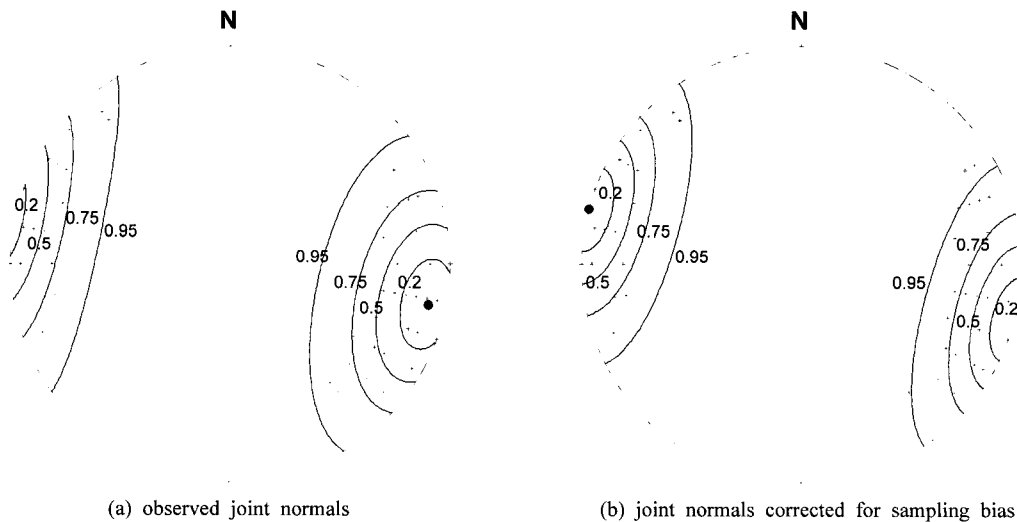


Fig. 4. Results of Fisher distribution fit for orientation data of joint set 1.

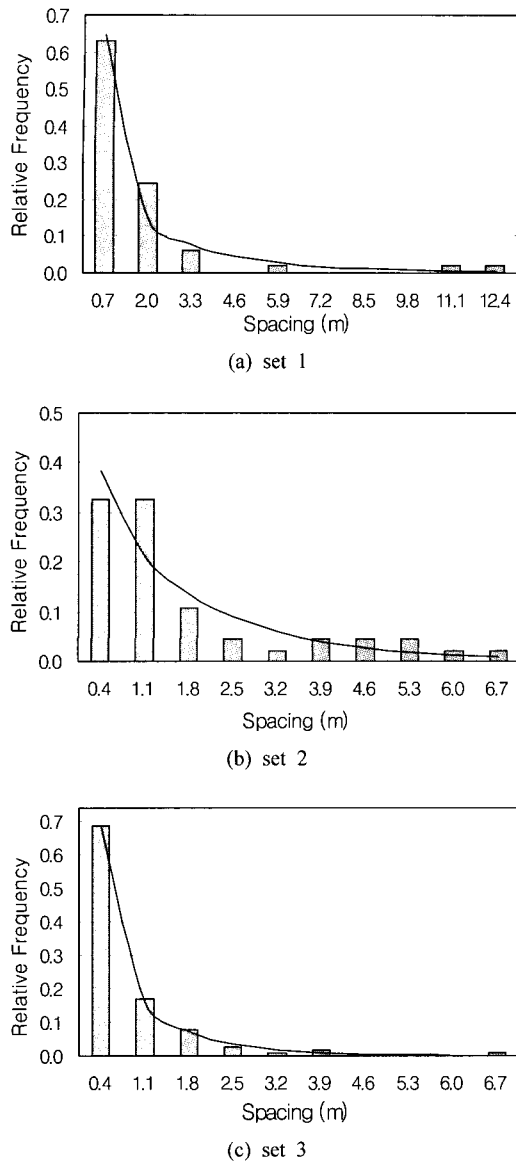


Fig. 5. Fitting of exponential distribution to spacings.

Table 5는 식 (7)을 이용하여 간격 편향 보정을 수행한 결과이며, 모든 절리군에 있어서 평균 절리 간격에 대한 관측치와 보정치 사이에 차이가 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 사용된 절리 간격 자료의 평균 간격에 비하여 샘플링 영역인 시추공 길이가 충분히 길어 샘플링 편향 효과를 보정할 필요가 없음을 시사하는 것이다.

위와 같이 각 절리군에 대하여 시추공 방향으로 산정된 보정 평균 절리 간격과 각 절리군에 대하여 보정된 평균법선 방향을 사용하여, 각 불연속면군의 평균법선 방향으로의 보정된 평균 절리 간격 μ_i 를 다음과 같은 관계식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\mu_i = \mu_b |\cos \theta_i| \tag{9}$$

여기서, μ_b 는 시추공 방향으로의 보정 평균 절리 간격이며, θ_i 는 시추공 방향과 절리군의 평균 법선 방향 사이의 각이다. 각각의 절리군에 대하여 식 (9)를 사용한 절리 간격 분석 결과가 Table 5에 나타나 있다.

4. 결 언

절리군에 속하는 각각의 절리면(법선벡터)과 1D 측선이 이루는 각도, 측선의 길이 및 원판 절리의 크기 등으로 인하여 파생될 수 있는 방향 편향효과를 보정하기 위해서 측선 상에서 관측된 절리에 대해서 할당되는 가중치는 절리 모양을 원판형으로 가정하였을 때 원판 절리가 측선과 교차하도록 원판 절리의 중심점이 위치할 수 있는 시추공 주위의 통계적 체적에 반비례한다. 통계적 체적을 산정하기 위한 절리 크기분포에 대한 자료를 확보하기 위해서는 대상 지역에 대한 터널 맵핑 또는 최소한 지표지질조사를 실시하여 대상 암반에 대한 절리 길이에 대한 분석이 병행되어야 한다. 이와 같은 가중치에 의한 방향편향 보정은 기존의 1D 측선에 대한 절리 방향으로 인하여 파생되는 방향 편향 효과를

Table 5. Mean spacings and linear frequencies along the borehole and mean normal vector directions for joint sets.

Joint Set No.	Observed mean spacing along borehole (m)	Corrected mean spacing along borehole (m)	Angle between borehole and MNV (°)	Corrected mean spacing along MNV (m)
1	1.59	1.59	70.00	0.54
2	1.62	1.62	60.06	0.81
3	0.69	0.69	18.08	0.66

Note: Trend of borehole=318°, Downward plunge of borehole=85°, Length of borehole=78.6 m, MNV=Mean Normal Vector of joint set.

보정하는 방법에 비하여 절리의 방향과 크기에 의한 편향 효과를 동시에 고려할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 방향 변화성이 높은 실제 현장자료의 절리군을 구분하기 위하여 기전의 알고리즘을 적용하였을 때 최적의 절리군 개수를 도출하기에는 어려움이 많으며, 연구자의 적절한 암반공학적 판단이 필요하다. 이와 같이 변화성이 큰 절리군일수록 방향 편향 보정의 중요성은 커지게 되며, 본 연구에서 제시된 절리의 방향과 크기가 함께 고려된 보정절차를 현장 자료에 적용하여 시추공 상에 나타난 절리의 방향 자료에 대한 방향 편향 보정을 실시한 결과 방향 편향 보정 전과 후의 상대빈도는 상당한 차이를 보였다. 또한, 모든 절리군에 대하여 평균방향과 방향분포가 방향 편향 보정으로 인하여 변화하였으며, 각 절리군의 방향 편향 보정 전·후의 방향 자료에 대하여 Fisher 분포의 χ^2 적합성 검증을 실시하였을 때 연구지역의 3개의 절리군 공히 Fisher 분포 모델이 통계적으로 적합하지 않다고 판정되었다. 이와 같이 이론적 확률분포가 절리자료에 대한 통계분포로 채택될 수 없는 절리군에 대한 방향분포 모델링을 위해서는 방향 편향 보정 후 산정된 CRF에 의한 경험적 방향분포(empirical orientation distribution)를 사용할 수 있다.

유한 길이의 시추공으로부터 산정된 절리의 간격분포는 샘플링 영역인 시추공 길이의 영향에 의한 산정치의 오류를 내포하고 있으며, 절리 간격분포가 음지수분포를 따른다면 관측 평균 간격과 측선의 길이를 고려하여 각 절리군에 대하여 절리 간격의 샘플링 편향을 보정한 평균 절리 간격을 산정할 수 있다. 연구지역에서 구분된 각각의 절리군에 속하는 절리 간격에 대한 통계적 모델로 음지수분포의 적합성을 검증하기 위하여 K-S 적합성 검증을 수행한 결과 확률분포로 매우 타당하였으며, 본 연구에서 사용된 절리 간격 자료의 평균 간격에 비하여 샘플링 영역인 시추공 길이가 충분히 샘플링 편향 효과를 보정할 필요가 없음을 확인하였다. 하지만 현장특성상 측선 방향으로의 평균 절리 간격에 비하여 측선 길이가 충분히 길지 못하여 발생하는 편향 오류를 보정하기 위해서는 각 절리군에 대하여 측선 방향으로 보정 평균 절리 간격을 산정하여, 각 절리군의 평균법선 방향으로의 보정 평균 절리 간격을 산정한 후 1-D 절리 빈도수를 결정할 수 있다.

감사의 글

본 논문작성은 부경대학교 지질환경연구소의 일부 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Terzaghi, R. 1965, Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*, 15, 287-304.
2. Kulatilake, P.H.S.W. and Wu, T.H., 1984, Sampling bias on orientation of discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17, 243-254.
3. Wathugala, D.N., Kulatilake, P.H.S.W., Wathugala, G.W. and Stephansson, O.A., 1990, A general procedure to correct sampling bias on joint orientation using a vector approach. *Computer and Geotechnics*, 10, 1-31.
4. Priest, S.D., 1993, *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall, 473p.
5. Kulatilake, P.H.S.W., Wu, T.H. and Wathugala, D.N., 1990, Probabilistic modeling of joint orientation. *Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 14, 325-350.
6. Bingham, C., 1964, *Distributions on the sphere and on the projective plane: unpubl. Doctoral dissertation*. Yale Univ. 93p.
7. 류동우, 김영민, 이희근, 2002, 암반 절리 방향성 자료의 통계적 분석 기법에 관한 연구, *터널과 지하공간(한국암반공학회지)*, 12(1), 19-29.
8. Sen, Z. and A. Kazi, 1984, Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 21, 203-212.
9. Shanley, R. J. and Mahtab, M.A., 1976, Delineation and analysis of clusters in orientation data. *Mathematical Geology*, 8, 9-23.
10. Mahtab, M.A. and Yegulalp, T.M., 1984, A similarity test for grouping orientation data in rock mechanics. *Proc. of the 25th U.S. Symp. on Rock Mech.*, 495-502.
11. Hermanson, J., Stigsson, M. and Wei, L., 1998, A discrete fracture network model of the Äspö Zedex Tunnel section. A Technical Report submitted to Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
12. Kulatilake, P. H.S.W. and Wu, T.H., 1986, Relation between discontinuity size and trace length. *Proc. of the 27th U.S. Symp. on Rock Mech.*, 130-133.
13. Kulatilake, P.H.S.W., Wathugala, D.N. and Stephansson, O., 1993, Joint network modeling including a validation to an area in Stripa Mine, Sweden. *Int. Jour. of Rock Mech. & Mining Science*, 30, 503-526.
14. Kulatilake, P.H.S.W., Chen, J., Teng, J., Shufang, X., and Pan G., 1996, Discontinuity geometry characterization for the rock mass around a tunnel close to the permanent shiplock area of the Three Gorges dam site in China. *Int J Rock Mech and Min Sci.*, 33, 255-277.
15. Ang, A.H-S. and Tang, W.H., 1975, *Probability concepts in engineering planning and design*, Vol. 1, John Wiley & Sons, 409p.

**엄정기**

1988년 연세대학교 이과대학 지질학과
이학사
1990년 연세대학교 대학원 지질학과
이학석사
1997년 University Arizona 공학박사

Tel: 051-620-6244

E-mail: jum@pknu.ac.kr

현재 부경대학교 환경탐사공학과 교수
