

절리암반내 지구조구 설정을 위한 정량적 기준에 대한 연구

엄정기^{1)*}, 조태진²⁾, 권순진³⁾

A Study on the Quantified Criteria in Determining the Geostructural Domain of Fractured Rock Mass

Jeong-Gi Um, Taechin Cho and Soon Jin Kwon

Abstract This study addresses the applicability of box fractal dimension, D_B , as an index of statistical homogeneity of fractured rock mass. The box-count method's capability in quantifying the combined effect of fracture density and size distribution is examined systematically. Total of 129 two-dimensional fracture configurations were generated based on different combinations of fracture size distribution and fracture density. D_B was calculated for the generated fracture network systems using the box-counting method. It was found that standard deviation of trace length and fracture orientation have no effect on calculated D_B . The estimated D_B was found to increase with increasing total density and/or mean trace length. To explore the field applicability of this study, the statistical homogeneity of fractured rock mass was investigated at the rock slope and the underground facility using the box-counting method as well as conventional contingency table analysis. The results obtained in this study clearly show that the methodologies given in this paper have the capability of determining the statistical homogeneity of fractured rock mass.

KeyWords Statistical homogeneity, Box fractal, Contingency table, Fractured rock mass, Geostructural domain

초 록 본 연구는 절리암반의 통계적 동질성에 대한 정량적 기준으로 절리의 평면밀도 및 길이를 동시에 고려할 수 있는 통계적 모수인 박스프랙털(D_B)의 적용성에 대해 논하였다. 길이분포와 평면밀도를 달리하는 총 129개의 절리연결망에서 박스 집계법을 이용하여 절리의 길이분포와 평면밀도의 변화에 따른 D_B 의 변화특성을 고찰한 결과 D_B 는 절리의 방향 또는 절리길이의 표준편차 변화에 영향을 받지 않고 전체절리에 대한 평균 절리길이와 평면밀도에만 영향을 받는다는 사실을 검증하였다. 또한 D_B 는 절리의 길이와 평면밀도의 함수로써 공학적 지구조구 구분의 정량적 척도로 활용될 수 있음을 입증하였다. 본 연구의 현장 적용성을 검토하기 위하여 도로사면 및 지하구조물에서 박스 집계법을 적용한 사례연구를 수행하였다. 통계적 동질구역 구분에 있어서 일반적인 지질조건과 더불어 기존의 분할표 해석과 본 연구의 방법론을 병행하면 절리의 방향성, 평균길이 및 평면밀도가 종합적으로 고려된 공학적 지구조구의 구분이 가능할 것으로 사료된다.

핵심어 통계적 동질성, 박스프랙털, 분할표, 절리암반, 지구조구

1. 서 론

절리암반의 구조적 특성에 대한 확고한 이해는 암반 구조물의 효과적인 설계 및 유지·관리에 있어서 매우 중요한 요소이다. 지표 및 지하의 노출된 절리암반에서 선형조사선 또는 조사창기법¹⁻²⁾에 의하여 획득한 절리

자료를 기초로 절리구조의 기하학적 모수를 추정하고, 절리암반의 삼차원적 구조특성을 통계적 과정으로 묘사하는 방법론³⁻⁵⁾이 제안되었다. 또한 시추장비의 발전과 더불어 절리분포 및 암반구조 특성에 대한 심도 있는 해석도 시도되었다⁶⁾. 이와 같이 절리암반의 공학적 활용성을 평가하는 암반구조해석 기술에 있어서는 상당한 진전이 있었지만, 암반구조해석 시 선행되어야 하는 암반공학적 지구조구(geostructural domain) 구분에 관한 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 절리의 연결망 구조는 지질 또는 응력 조건의 공간적 변화에 따라 다르게 형성된다. 현재 대부분의 경우 연구자의 정성적인 판단에 의하여 임의의 주위 구간에 대한 절리자

¹⁾ 부경대학교 환경탐사공학과 교수

²⁾ 부경대학교 환경탐사공학과 교수

³⁾ 대한광업진흥공사

* 교신저자 : jum@pknu.ac.kr

접수일 : 2005년 10월 18일

심사 완료일 : 2005년 1월 16일

료를 바탕으로 한 암반구조해석이 주를 이루고 있으며, 이에 따른 해석 결과가 대상 절리암반의 구조적 특성을 심도 있게 표현하지 못하는 경우가 많다. 따라서 암반 내에서 절리계의 변화 양상을 반영하는 암반공학적 지구조구의 설정이 선행 되어야 하며, 구분된 지구조구에 대한 암반구조해석이 개별적으로 이루어져야 한다. 그러나, 지구조구를 설정하기 위한 구분기준을 확정적으로 도출하기에는 어려움이 많으며, 변동성을 수반하는 절리계의 특성을 감안할 때 통계적 동질성(statistical homogeneity)^{7,8)}의 개념이 정량적 구분기준으로 적용 되어야 한다.

통계적 동질성은 설정된 지구조구 내에서 암반의 구조적 특성이 통계적으로 유사함을 의미한다. 예를 들어 시추공의 심도에 따라 서로 인접한 구간에서 각각 측정된 절리군 개수와 산정된 방향분포가 서로 상이하게 나타난다면, 통계적 동질성이 결여되었다고 볼 수 있으며, 인접한 구간은 서로 다른 통계적 동질구역으로 구분되어야 한다. 이는 대절토 사면과 같은 지표에 노출된 절리암반에도 적용될 수 있으며 절리분포에 따른 절리계의 변동성을 고찰하여 통계적 동질성을 규명하고, 이에 의한 동질구역을 설정한 후 암상변화와 단층 등의 대규모 구조선을 종합적으로 고려하여 지구조구를 설정해야 한다.

현재까지 대상지역에 대한 암반공학적 지구조구를 구분하는 방법으로 절리군의 개수 및 방향분포와 연구자의 경험적 판단에 기초한 지구조구 구분법^{4), 7,8)}이 주로 사용되고 있다. 완전한 의미의 통계적 동질지구조구는 설정된 지구조구 내에서 절리의 방향성 이외에도 절리 밀집도, 길이, 모양, 거칠기 및 역학적 특성 등이 통계적으로 유사함을 의미한다. 본 연구는 절리암반의 구조적 특성 규명에 기초가 되는 지구조구 설정을 위한 새로운 정량적 구분기준의 도출에 중점을 두었으며, 현장적용을 통하여 개발된 요소이론과 기존의 방법론⁷⁾ 간의 비교 및 상호 보완을 검토하여 정량적 지구조구 구분절차를 제시하였다.

2. 분할표 해석

통계적 동질지구조구 구분기준으로 제시된 분할표(contingency table) 해석⁷⁾은 경사방향과 경사정도에 따라 일정 영역(Fig. 1, Table 1)의 반응범주로 구분된 하반구 슈미트망에 김정하고자 하는 두 지역 혹은 여러 지역의 절리 방향성을 각각 제도한 후, 각 셀(cell)에 포함되는 법선벡터의 관측도수에 대한 통계적 동질성 검정을 수행하는 것이다. 하반구 슈미트망을 등면적의 패

치(patch)로 구획하여 등면적분할영역도를 구성하기 위해서는 경사밴드의 수와 각각의 경사밴드에서 패치의 개수를 결정해야한다. 등면적분할영역도의 예로 Fig. 1에서는 경사밴드의 개수를 3개로 구획하였으며, 각각의 밴드는 6, 12 및 16개 등 총 34개의 패치로 이루어져 있다. 이와 같은 패치는 분할표에서 셀로 규정되어지며, Table 1은 각 지역에서의 슈미트플롯으로 정의되는 r개의 행변수에 대하여 각각의 분할영역으로 정의되는 c개의 열변수로 이루어진 r×c 분할표이다. 여기서 행의 합과 열의 합은 각각 R₁, R₂, ..., R_r와 C₁, C₂, ..., C_c로 주어지며, 이들을 주변도수(marginal frequency)라고 한다. 이와 같은 분할표에 대하여 동질성 검정을 수행함으로써 각 슈미트플롯간의 통계적 동질성을 파악할 수 있다.

Miller⁷⁾는 절리의 방향성에 대한 통계적 동질성 검정의 방법론으로 분할표에 대한 피어슨카이제곱(χ^2) 검정을 제안하였으며, χ^2 검정통계량은 다음과 같이

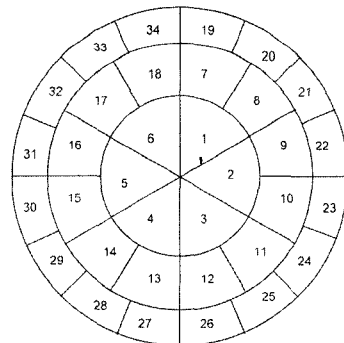


Fig. 1. An example patch network for contingency table analysis(after Miller, 1983)

Table 1. Contingency table for Schmidt plot(after Miller, 1983).

Rows	Columns			Row totals
	Patch 1	Patch 2	· Patch c	
Schmidt plot 1	f_{11}	f_{12}	· f_{1c}	R_1
Schmidt plot 2	f_{21}	f_{22}	· f_{2c}	R_2
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
Schmidt plot r	f_{r1}	f_{r2}	· f_{rc}	R_r
Column totals	C_1	C_2	· C_c	N

f_{ij} = number of fracture poles observed in cell ij
 N = total number of poles from all Schmidt plots

정의된다.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(f_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} \quad (1)$$

여기서 f_{ij} 는 ij 셀에 제도된 절리 법선벡터의 관측도수이며, e_{ij} 는 ij 셀에서의 기대도수(expected frequency: $(R_i C_j)/N$)로 정의된다. 비교되는 지역들의 방향성이 통계적으로 동질하다는 귀무가설(H_0)이 채택되기 위해서는 식(1)에 의하여 산정된 χ^2 검정통계량이 자유도 (df)=(r-1)(c-1)에서 주어진 유의수준 α 에 해당하는 임계치 χ^2_{α} 값보다 작아야 한다. 예를 들어 두 지역(R=2)의 방향성을 비교할 때 각 슈미트망의 셀이 Fig. 1의 예에서와 같이 34개로 구성되었다면 $C=34$ 이므로, 자유도 (2-1)(34-1)=33에서 주어진 유의수준에 해당하는 임계치 χ^2_{α} 보다 산정된 χ^2 검정통계량이 작아야 귀무가설이 채택되게 된다. 역으로 임계치 χ^2_{α} 보다 산정된 χ^2 검정통계량이 크면 귀무가설은 기각되므로 두 지역이 방향성에 대한 통계적 동질영역으로 취급될 수 없는 증거가 더 뚜렷하게 된다.

이와 같은 검정이론을 통하여 절리암반의 통계적 동질성의 가부를 판단할 때 적용되는 특정한 유의수준은 정해진 바 없으며 일반적으로 통계학 분야에서 선호되는 $\alpha=0.05$ 를 사용하는 것이 보편적이다. 하지만 유의수준이 바뀌게 되는 경우에는 이에 따른 임계한계를 다시 추정해야하므로 유의확률 p 값을 계산하면 유의수준이 달라져도 임계한계를 알아볼 필요 없이 귀무가설의 기각 및 채택 여부에 대하여 바로 결론 내릴 수 있다. 분할표의 모든 셀에서 $f_{ij}=e_{ij}$ 일 때 χ^2 검정통계량은 최소값 0을 갖으며, χ^2 검정통계량이 클수록 귀무가설을 강하게 기각하기 때문에 검정의 p 값은 귀무가설 하에서 χ^2 검정통계량이 관찰값보다 크거나 같게 되는 확률이다. 따라서 p 값은 자료에서 계산된 χ^2 검정통계량보다 크게 되는 카이제곱분포의 오른쪽 꼬리확률이며, 허용될 수 있는 최대 유의수준보다 p 값이 크면 귀무가설은 채택된다.

χ^2 검정의 정확도는 슈미트망 상에서 구분된 각 셀에서의 기대빈도에 따라 좌우되며, 일반적으로 기대빈도가 5 이상의 조건이면 표본크기가 충분히 커서 χ^2 검정 결과가 타당한 것으로 알려져 있다. 하지만 실제 현장 자료의 개수는 이러한 기준을 충족시키지 못하여 검정 결과를 신뢰하기 어려운 경우가 대부분이다. 이와 같은 경우에는 χ^2 검정통계량이 자유도 30이상의 조건에서 식(2)와 (3)으로 각각 정의된 평균($E(\chi^2)$)과 분산($\text{Var}(\chi^2)$)을 갖는 정규분포를 따른다는 가정에 근거하여 오른

쪽 꼬리확률인 p 값을 산정할 수 있다⁷⁾.

$$E(\chi^2) = [(r-1)(c-1)N]/(N-1) \quad (2)$$

$$\text{Var}(\chi^2) = \frac{N}{(N-1)(N-2)(N-3)} \left(\frac{AN^3 + BN^2 - (D+G)N - H}{N-1} - (KC+LR)N^2 + (MC+QR)N + RCN^2(N+1) \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } A &= 2(r-1)(c-1) & K &= r^2+2r-2 \\ B &= r^2c^2+2r+2c-4 & L &= c^2+2c-2 \\ D &= 2rc(r-1)(c-1) & M &= r(r-2) \\ G &= 2(r+c)(r+c-2) & Q &= c(c-2) \\ H &= rc(r-2)(c-2) \end{aligned}$$

$$R = \sum_{i=1}^r \frac{1}{R_i} \quad C = \sum_{j=1}^c \frac{1}{C_j}$$

3. 박스프랙탈의 적용성

유클리드 기하학에 있어서 직선, 평면, 육면체 및 구 등의 규칙적인 기하학적 형상을 설명하기 위하여 정수의 차원을 사용한다. 직선은 1차원이며, 삼각형 혹은 사각형은 2차원이고 육면체나 구는 3차원인 정수의 차원을 갖는다. 하지만 산맥, 해안선, 나무, 또는 암석 표면의 거칠기와 같은 부정형의 자연 대상에 대하여 직선, 평면 또는 육면체와 같은 유클리드 기하학 또는 정수의 차원으로 설명하기는 매우 어렵다⁹⁾. 예로서 자연 상태에서의 암석표면 거칠기의 단면은 거칠기의 정도에 따라 1(직선의 유클리드 차원) 과 2(평면의 유클리드 차원) 사이의 비정수의 차원을 가질 것이다. 이와 같은 비정수의 차원으로 정의되는 프랙탈 차원은 공간적 변동성의 정량화에 효과적으로 사용될 수 있다.

이차원의 암반 노출면에서 맵핑된 절리 트레이스는 평면밀도와 길이분포에 따라 1에서 2 사이, 즉 1.xx의 프랙탈 차원을 갖게 되며, 이와 같은 프랙탈 차원의 산정하기 위하여 박스 집계법(box-counting)¹⁰⁾이 유용하게 사용될 수 있다. Fig. 2에서와 같이 절리 트레이스를 포함하는 사각창을 분할하는 사각요소의 한 변의 크기가 r 일 때 절리 트레이스를 포함하는 사각요소의 개수가 $N(r)$ 이라면 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$N(r) \propto r^{-D_D} = B r^{-D_D} \quad (4)$$

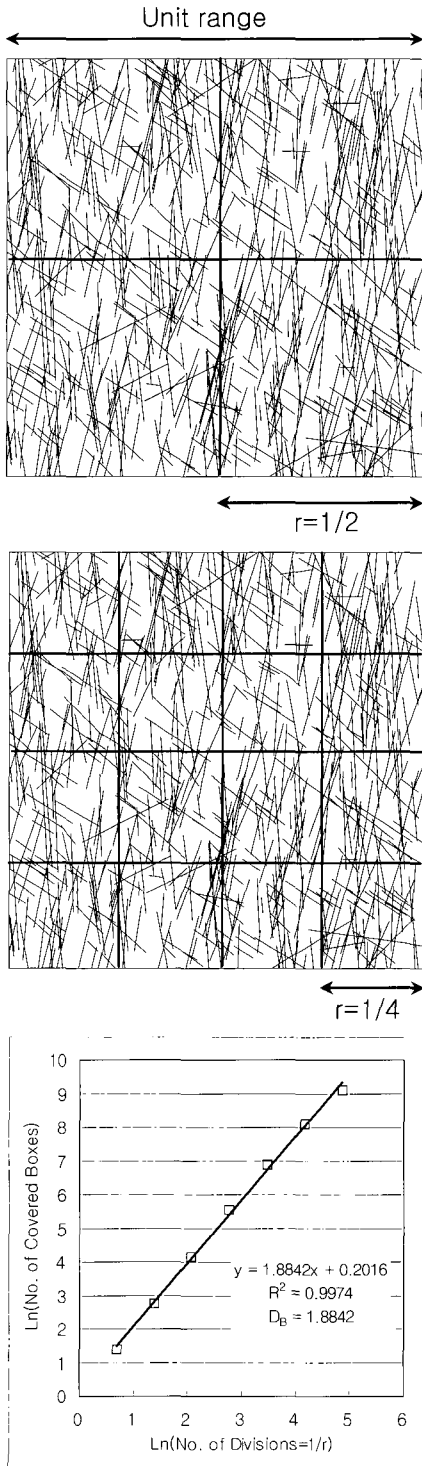


Fig. 2. Illustration of the procedure of the box-counting method

여기서 B는 비례상수이며, D_B 는 박스 집계법에 의한 박스프랙털 차원이다. 초기단계에서는 프랙털 차원을 측정하고자 하는 전 영역을 4등분($r=1/2$)하여 이를 분할단계(division) 1로 정의하는데, 이때 사각요소는 4개가 된다. 분할된 각각의 사각요소를 다시 4등분($r=1/4$)하게 되면 분할단계 2가 되고, 사각요소의 총 개수는 16개가 된다. 이와 같은 방법으로 분할단계를 지속적으로 증가시키며 이에 따른 사각요소의 크기를 반복적으로 4등분함으로써 사각요소의 크기를 감소시키면 전체 사각요소의 개수는 각 분할단계마다 4배씩 증가하게 된다. 박스 집계법은 각 분할단계에서 총 생성된 사각요소의 수 중 불연속면을 포함하는 사각요소의 수를 기재하여 식(4)로부터 $\ln(N(r))$ vs. $\ln(1/r)$ 관계를 X-Y 그래프에 도시한 후 선형회귀분석을 통하여 선형성을 확인하고 D_B 를 산정하는 방식이다. 절리의 평면밀도와 길이가 클수록 불연속면 트레이스를 포함하는 사각요소의 개수가 증가하므로 이를 반영하는 D_B 는 증가하게 된다. Kulatilake 등¹¹⁾은 triadic Koch curve⁹⁾를 대상으로 박스프랙털 차원을 산정하기 위한 입력변수 r의 크기가 산정된 박스프랙털 차원의 정확성에 미치는 영향에 대하여 분석하고, 정확한 박스프랙털 차원을 산정하기 위해서는 적절한 범위의 r을 사용해야함을 개진하였으나, 자연현상에 대한 박스프랙털 차원을 산정하기 위한 r의 적당한 범위를 제시하기는 어렵다고 보고하였다. 또한 방향성과 평균길이의 조합을 달리하여 생성한 3개의 2D 절리연결망에 대한 분석을 수행하여 박스프랙털 차원이 불연속면의 평면밀도와 길이를 동시에 고려할 수 있는 파라미터임을 제시하였다. 이에 본 연구에서는 절리의 길이분포 및 개개 절리군의 평면밀도 변화가 프랙털 차원에 미치는 영향에 대하여 체계적으로 해석하고 평가하였다.

절리의 길이분포와 평면밀도의 변화에 따른 D_B 의 변화특성을 고찰하기 위하여 서로 다른 길이분포와 평면밀도를 갖는 총 129개의 30 m × 30 m 절리연결망을 몬테칼로 모사기법을 적용하여 통계적으로 생성하였다. 생성된 절리연결망에서 절리길이와 위치는 각각 감마분포와 포아송분포를 따르며, 주향방향이 각각 30°와 120°인 2개의 절리군을 사용하였다. 절리의 통계적인 길이분포와 확정적인 방향 및 평면밀도에 따른 129개의 절리연결망에 대한 입력변수가 Table 2에 나타나 있다. Fig. 3은 생성된 129개의 절리연결망 중 평면밀도와 길이분포의 변화를 육안으로 인지할 수 있는 대표적인 절리연결망을 도시한 것이다.

Fig. 4는 Table 2의 Group 1에 해당하는 확정적 모수

Table 2. Summary of fracture parameter values for the generated fracture networks.

(a) Fracture networks having the different fracture-size distribution

Trace Group	Deterministic Parameters		Mean Trace Length(m)	Standard Deviation of Trace Length(m)						
				0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88
Group 1 (No. of fracture network: 32)	Orientation:	set1=30°	0.50	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88
		set2=120°	1.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75
	Density:	d1=1.5/m ²	2.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50
		d2=1.5/m ²	3.00	1.50	2.25	3.00	3.75	4.50		
		4.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00		
Group 2 (No. of fracture network: 31)	Orientation:	set1=30°	0.50	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88
		set2=120°	1.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75
	Density:	d1=1.0/m ²	2.00	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	
		d2=2.0/m ²	3.00	1.50	2.25	3.00	3.75	4.50		
		4.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00		
Group 3 (No. of fracture network: 31)	Orientation:	set1=30°	0.50	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88
		set2=120°	1.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75
	Density:	d1=2.0/m ²	2.00	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	
		d2=1.0/m ²	3.00	1.50	2.25	3.00	3.75	4.50		
		4.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00		

(b) Fracture networks having the different total fracture density

Trace Group	Deterministic Parameters		Mean Trace Length(m)	Total Fracture Density(m ⁻²)						
				3.00	2.67	2.44	2.22	2.00	1.78	1.56
Group 4 (No. of fracture network: 35)	Orientation:	set1=30°	0.50	3.00	2.67	2.44	2.22	2.00	1.78	1.56
		set2=120°	1.00	3.00	2.67	2.44	2.22	2.00	1.78	1.56
	cov of trace length=1.0		2.00	3.00	2.67	2.44	2.22	2.00	1.78	1.56
			3.00	3.00	2.67	2.44	2.22	2.00	1.78	1.56
		4.00	3.00	2.67	2.44	2.22	2.00	1.78	1.56	

cov=coefficient of variation(std/mean)

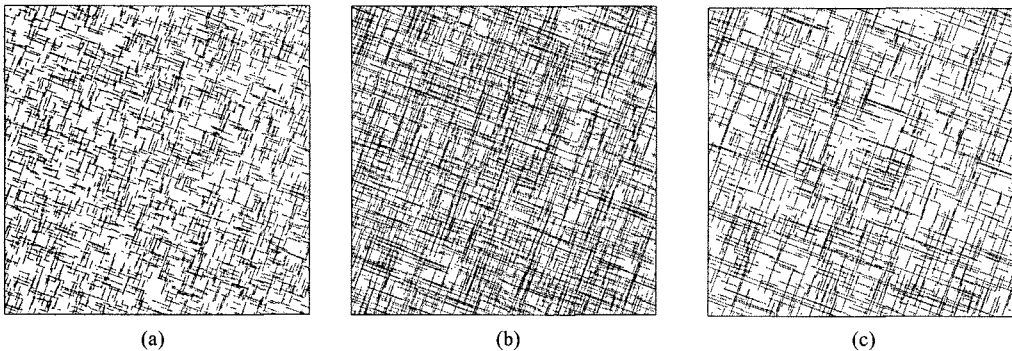


Fig. 3. Selected examples of generated fracture network: (a) $d_1=1.50/m^2$, $d_2=1.50/m^2$, $L=1m$, $cov=0.5$, (b) $d_1=1.50/m^2$, $d_2=1.50/m^2$, $L=2m$, $cov=0.5$ and (c) $d_1=0.78/m^2$, $d_2=0.78/m^2$, $L=2m$, $cov=1$

와 절리의 평균길이 및 표준편차가 각각 1 m와 0.5 m ($cov=0.5$)인 절리연결망(Fig. 3(a))에서 박스 집계법을 적용하여 산정된 D_B 를 나타내고 있다. D_B 를 산정하기 위한 초기 박스 크기는 30 m × 30 m를 1/4 ($r=1/2$)로 분할한 4개의 15 m × 15 m 이다. 다음 단계에서는 각각의 박스를 다시 1/4($r=1/4$)로 분할하여 16개의 7.5 m

× 7.5 m 박스 크기를 고려하였다. 이와 같은 방법으로 최종 7단계에서 총 16384개의 박스를 고려하였으며, 각 단계별로 절리 트레이스를 포함하는 박스 개수를 산정한 후 $\ln(N(r))$ vs. $\ln(1/r)$ 의 선형성을 확인하고 기울기인 D_B 를 산정하였다. Fig. 5은 상기 절차에 의하여 Table 2에 나타난 길이분포와 평면밀도를 달리하는 총

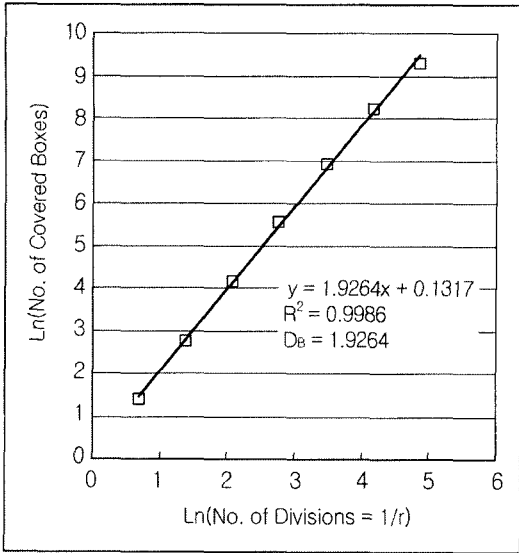
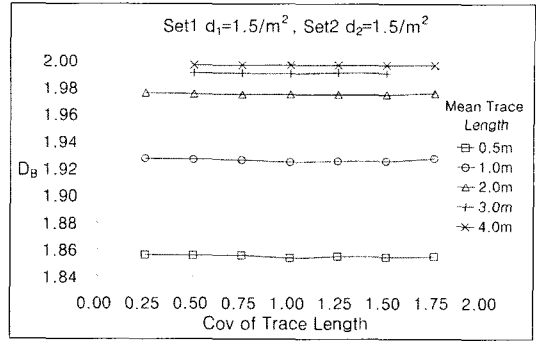


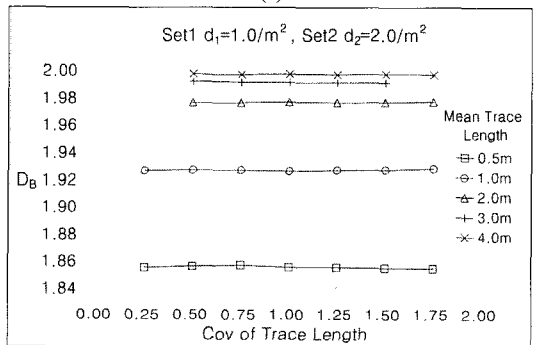
Fig. 4. $\ln(N(r))$ versus $\ln(1/r)$ plots obtained for the fracture network having mean trace length=1m, standard deviation =0.5m and deterministic parameters of Group1 in Table 2

94개의 절리연결망(Group1, 2, 3)에 대하여 산정된 D_B 를 나타내고 있다.

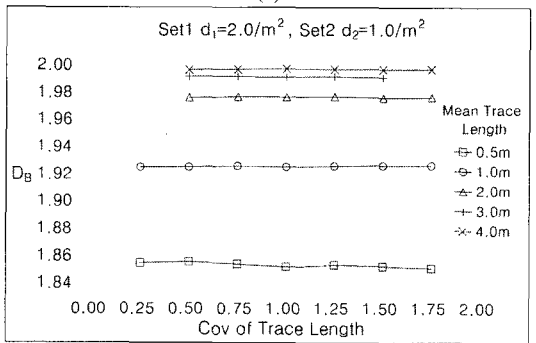
Fig. 5(a)는 두 절리군의 평균길이 $L=0.5-4.0$ m, 평면 밀도 $d_1=1.5/m^2$ 과 $d_2=1.5/m^2$, $cov=0.25-1.75$ 범위의 Group 1 절리연결망에서 산정된 D_B 를 나타내고 있다. $L=0.5$ m인 경우 산정된 D_B 의 범위는 1.8549-1.8563으로 절리길이의 표준편차에 따른 효과를 거의 반영하지 않는다. 또한 절리의 평균길이가 1 m, 2 m, 3 m 및 4 m 일 때에도 각각의 절리길이에서 산정된 D_B 는 표준편차의 변화를 반영하지 않고 거의 일정하다. 이와 같은 결과는 절리연결망이 자체유사(self-similar)의 프랙털 특성을 갖는다는 것을 의미한다. 한편, 절리의 평균길이가 0.5 m에서 4 m로 길어짐에 따라 D_B 는 1.8549에서 1.9965까지 증가하는데, 이는 D_B 가 평균 절리길이의 변화를 반영하는 것으로 해석할 수 있다. Fig. 5(b)와 (c)는 전체평면밀도($d=d_1+d_2$)를 일정하게 유지하고 두 절리군의 상대적 평면밀도를 달리하여 산정된 D_B 를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)와 비교할 때 D_B 는 각각의 절리군에 대한 평면밀도의 변화에 민감한 반응을 보이지 않는다. 이는 두 절리군의 평면밀도 d_1 과 d_2 의 차이에 관계없이 전체평면밀도와 평균 절리길이가 일정하면 D_B 의 변화가 거의 없음을 의미하는 것이다. 또한, 여기서 사용된 두 절리군의 주향이 각각 30° 와 120° (Table 2)임을 상기할 때 d_1 과 d_2 의 차이는 특정한 절리 방향성의 가중을 내포하고 있으나, D_B 는 절리의 방향성에 따르는 절리연결망의 차이를 구분할 수 없다는 것을 확인할 수



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Plots between estimated D_B and coefficient of variation(cov) of trace length for different mean trace length and fracture density: (a) Group 1, (b) Group 2 and (c) Group 3

있다. 이와 같은 결과는 통계적 동질구역 구분에 있어서 위에서 언급한 분할표 해석을 적용한 방법론의 병행이 필요하다는 점을 시사한다.

Fig. 6은 절리의 평균길이가와 전체평면밀도 d 를 달리하며 생성된 절리연결망(Group 4)에 대하여 산정된 D_B 의 변화를 나타내고 있다. 각 절리길이에 대하여 전체평면밀도가 증가함에 따라 D_B 가 대수함수적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 절리연결망에서 산정

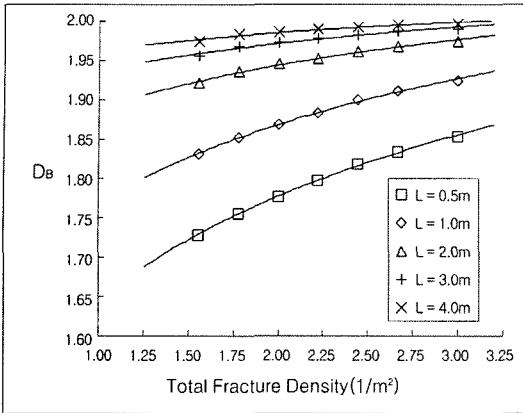


Fig. 6. Plots between estimated D_B and total fracture density for different fracture trace length

된 D_B 가 절리의 길이와 평면밀도의 함수로써 길이와 밀도의 변화를 동시에 반영함을 입증한다. 이는 현장적용 시 2D 노출면에서 평면밀도와 D_B 를 측정하면 전체 절리에 대한 평균길이를 추정할 수도 있다는 가능성을 시사하나, 표준편차에 따른 길이분포를 추정할 수 없다는 것과 조사창 자료의 왜곡성을 감안할 때 절리 길이 추정에 관한 박스프랙털 차원의 활용 가능성은 기존의 이론¹²⁻¹³⁾에 비하여 아직 초보적이라 사료된다. 하지만 본 연구에서 추구하는 절리암반의 동질지구구조 구분을 위한 파라미터로써 박스프랙털 차원은 절리의 길이와 평면밀도가 고려된 지구구조 설정을 위한 절리암반의 상대적 구분기준으로 활용될 수 있다고 판단된다.

4. 현장적용

4.1 도로사면 적용사례

본 연구를 통하여 도출된 방법론의 현장 적용성을 파악하기 위하여, 부산-울산 고속국도의 울산부근에 위치한 연장 180 m 와 최대사면고 35 m의 절취사면에 대하여 선형조사선을 이용한 절리조사를 실시하였다. 조사 지역에는 중생대 백악기 퇴적암이 분포하며, 적색 및 회색의 셰일 또는 사암이 주종을 이루고 있다. 주된 지질구조는 퇴적 층리면이며, 층리면의 경사는 약 10-20° 정도의 저각으로 사면의 경사방향과 60° 정도의 차이를 보이며 경사져 있다. 절리는 거의 수직에 가까운 고각의 절리가 사면 전체적으로 발달해 있으며 이와 유사한 방향으로 소단층이 발달하고 있다.

절리자료의 획득을 위한 조사선 SL1, SL2 및 SL3의 상대적 위치는 Fig. 7에 도시되어 있으며, 대상사면에서

각각 우측 상부, 우측 하부 및 좌측 하부에 위치하고 있다. 우측 하부 와 좌측 하부에서 조사된 절리자료를 비교 분석하여 절리분포의 수평적 변화를 고찰하였으며, 우측 상부 와 우측 하부의 절리자료를 비교 분석하여 절리패턴의 수직적 변화를 고찰하였다. 각 선형조사선에 대한 세부사항은 Table 3에 나타나 있다. 절취사면 내에서의 동질지구구조 구분을 위하여 조사된 절리의 방향, 길이 및 간격 등의 절리 기하학적 자료를 바탕으로, 방향성에 의한 통계적 동질구역 구분기준으로 제시된 분할표 해석법과 박스 집계법을 적용하여 두 방법론의 상호 비교 및 보완성을 검토하였다.

절리의 방향성에 의한 통계적 동질구역의 구분기준으로 제시된 Miller⁷⁾의 분할표 해석을 수행함에 있어 Fig. 1과 같은 고정된 분할영역(patch network)에 단순히 두 지역의 방향 자료를 각각 입력한 후 동질성 검정을 수행한다면, 셀 빈도는 방향자료의 위치에 영향을 받을 수 있으므로 정확한 p 값을 산정하기 어려운 경우가 존재한다. 예를 들어 절리군이 Fig. 1의 22번째 셀과 23번째 셀의 경계부에 분포한다고 가정하면 전체적으로 15°정도 시계방향으로 회전된 분할영역을 적용하는 것이 두 지역의 셀빈도를 비교함에 있어서 더욱 효과적일 것이다. 이러한 사항을 고려하기 위하여 본 연구에서는 분할영역을 북(N)을 기준으로 시계방향으로 15°씩 회전시키면서 총 11회(12회 짝는 분할영역이 180° 회전되므로 초기 위치와 동일)에 걸쳐 산정한 p 값의 최대값, 최소값 및 평균값을 검토하여 통계적 동질성의 적합성을 검정하였다. SL1과 SL2에서의 방향자료를 하반구투영망에 작도한 후 Fig. 8에서와 같은 15° 회전된 분할영역에 대하여 식(1)을 적용하여 산정된 p 값은 0.1373이다.

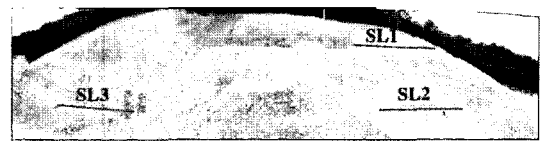


Fig. 7. Locations of the survey lines in the cut slope

Table 3. The specifications of scanlines.

Scanline ID	Scanline Length (m)	Scanline Direction		No. of Fracture
		Trend (deg.)	Plunge (deg.)	
SL1	25.0	330	14	83
SL2	27.4	330	0	104
SL3	20.0	328	4	83

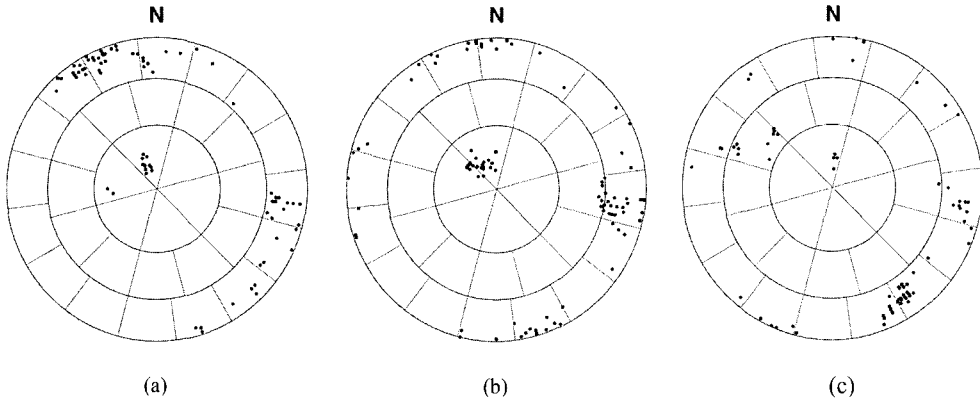


Fig. 8. Lower-hemisphere equal area polar projections of fracture poles of (a) SL1, (b) SL2 and (c) SL3 on the 15° rotated patch network

하지만 전체 셀의 78%가 5보다 작은 기대빈도를 가지므로 χ^2 검정 결과가 타당하지 못할 수도 있다⁷⁾. 따라서 본 연구에서는 식(2)와 식(3)으로 산정된 평균과 분산을 갖는 정규분포의 오른쪽 꼬리확률인 p 값을 산정하여 통계적 동질성 검정을 수행하였다.

각각의 선형조사선에서 조사된 방향자료(Table 4)를 사용하여 SL1 과 SL2, SL2 와 SL3, 및 SL1 과 SL3 에 대하여 분할표 해석을 수행한 결과가 Table 5에 수록되어 있다. SL1 과 SL2에서 산정된 p 값의 범위는 0.0000-0.2595 이며 평균값은 0.0654 이다. 일반적으로 통계학에서 p 값이 0.05 이상일 때 귀무가설을 강하게 채택한다는 것을 상기할 때, 평균 p 값이 0.0654인 SL1 과 SL2 지역은 절리의 방향성에 대하여 통계적 동질영역이라 판단할 수 있다. 따라서 SL1 지역과 SL2 지역은 방향성만을 고려하였을 때 통계적인 동질지구구조라고 해석할 수 있다. 그러나 SL2 와 SL3 및 SL1 과 SL3 에 대하여 산정된 p 값은 각각 0 으로 나타났으며, SL2 와 SL3 또는 SL1 과 SL3 구역은 서로 다른 지구구조로 해석할 수 있다. 즉, 사면 우측의 상단과 하단은 동질지구구조이며 사면 하단에서 좌우 횡적으로는 서로 다른 공학적 지구구조로 구분되어야 한다.

절리의 길이와 평면밀도의 상대적 변화를 반영하는 공학적 동질구조 구분을 위해서는 절취사면 내의 SL1, SL2 및 SL3 에서 조사된 절리 트래이스(Fig. 9)에 대하여 박스 집계법을 적용하였다. 일반적으로 2D 노출면에서 취득된 절리의 방향 및 간격에 대한 자료는 실제 절리암반에 대한 제한된 정보로서 샘플링 편향(sampling biases)으로 인한 오류를 내포하고 있다. 터널내부 및 지표의 2D 노출면에서 확인되는 절리는 절

Table 4. Orientations of the fracture sets in the study area.

Scanline ID	Fracture Set No.	No. of Data	Mean Orientation	
			Dip	Dir
SL1	1	47	154	85
	2	16	280	74
	3	15	138	13
SL2	1	34	170	89
	2	44	274	75
	3	25	145	16
SL3	1	12	200	88
	2	14	276	78
	3	37	327	76
	4	19	119	50

Table 5. Homogeneity statistics based on contingency table analysis using the fracture orientation data of SL1, SL2 and SL3.

Sections Tested for Statistical Homogeneity	Obtained p-Value		
	Maximum	Minimum	Mean
SL1 and SL2	0.2595	0.0000	0.0654
SL2 and SL3	0.0000	0.0000	0.0000
SL1 and SL3	0.0000	0.0000	0.0000

리의 방향 및 길이 등에 기인된 편향효과에 의하여 동일한 절리암반에서도 조사영역의 방향과 크기에 따라 절리의 자세는 다르게 나타나므로, 관측된 절리 빈도수는 실제 절리 빈도수와 차이를 보인다. 따라서 임의의

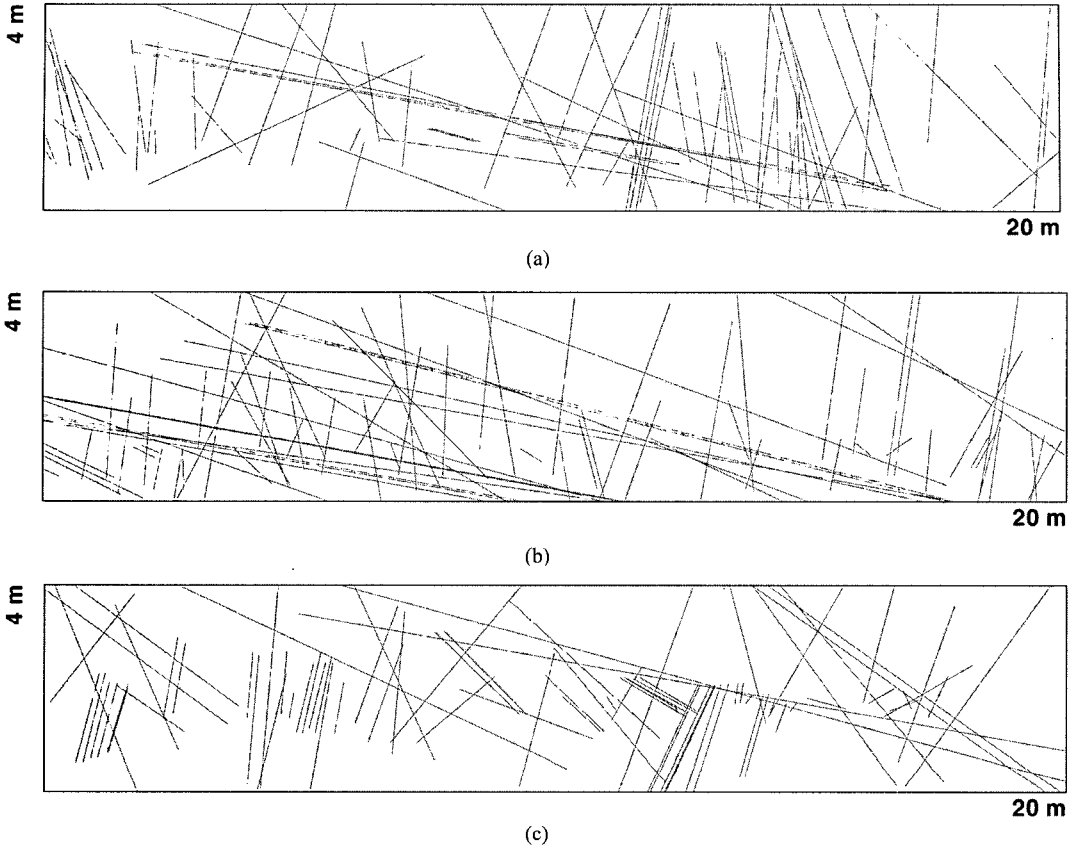


Fig. 9. Fracture maps to estimate the box fractal dimension: (a) SL1, (b) SL2 and (c) SL3

2D 노출면의 절리자료에 적용하여 산정된 D_B 는 대상암반을 특성화하는 절대적 척도로 볼 수 없다. 하지만 2D 조사영역의 방향과 크기가 동일하다면 샘플링 편향효과도 동일하므로, D_B 의 공간적 변동성은 절리의 길이와 평면밀도를 고려하는 통계적 동질구조구 구분의 상대적인 척도로 사용할 수 있다. 또한 조사선자료의 경우 조사선에 교차하는 절리선만을 대상으로 하기 때문에 산정되는 D_B 는 실제 2D 노출면에서의 D_B 와 차이가 있으리라 판단되지만 상대적 비교라는 관점에서 볼 때 같은 규모의 초기 사각요소를 적용하여 산정된 D_B 값의 변화는 절리구조의 변화를 고려할 수 있다고 사료된다.

각각의 조사선에서 D_B 를 산정하기 위한 초기 박스 크기는 $20\text{ m} \times 4\text{ m}$ 를 1/4로 분할한 4개의 $10\text{ m} \times 2\text{ m}$ 박스이며, 다음 단계에서는 각각의 박스를 다시 1/4로 분할하여 16개의 $5\text{ m} \times 1\text{ m}$ 박스 크기를 고려하였다. 이와 같은 방법으로 최종 7단계까지 단계별로 절리 트

레이스를 포함하는 박스 개수를 산정한 후 $\ln(N(r))$ vs. $\ln(1/r)$ 의 선형성을 확인하고 D_B 를 산정한 결과 SL1, SL2 및 SL3에서 산정된 D_B 는 각각 1.7283, 1.7427 및 1.7014 이다. 산정된 D_B 를 고찰하여 볼 때 SL1 과 SL2 의 D_B 의 차이는 0.0144 이며, SL1 과 SL3의 D_B 의 차이는 0.0269 이다. 또한, SL2 와 SL3의 D_B 의 차이는 0.0413 로서 제일 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 D_B 의 차이만을 고려하였을 때 SL1 구역과 SL2 구역이 상대적으로 동질성이 가장 우수하며, SL2 구역과 과 SL3 구역은 상대적으로 동질성이 가장 불량함을 유추할 수 있다. 이는 분할표 해석 결과에서 도출된 사면 우측의 상단과 하단은 동질 지구조구이며 사면 하단에서 좌우 횡적으로는 서로 다른 공학적 지구조구로 구분되어야 한다는 결과와도 일치한다. 특히 사면의 우측 상하부는 절리의 방향성뿐만 아니라 절리의 평면밀도와 길이분포도 유사한 통계적 동질성을 갖는다고 판단된다.

4.2 지하터널 적용사례

지하터널 적용사례를 위한 대상암반은 OO지역의 지하 유류비축시설로서 평행한 2조 터널로 구성된 지하시설물이다(Fig. 10). 본 역의 지질은 주로 저반형의 중생대 주라기 대보화강암류로 구성되어 있으며, 지역적으로 소규모의 반상 암맥류가 관입 발달하고, 연구지역 동측부에서는 국부적으로 규암층이 협제된 편마암류가 고도의 풍화변질작용을 수반하며 분포하고 있다. 암반 상태와 구조물 안정성에 직접적 영향을 미칠 수 있는 대규모 지구조적, 지질공학적 요소로는 N40-50E 방향의 단층대가 구조물의 축방향(N70E)과 사교하여 발달하고 있다. 또한 단층대를 따라 다수의 암맥류가 관입 발달하고 있다. 소규모 불연속면 시스템으로는 N5-10W, N60-70W, N40-50E 방향의 절리군이 우세하게 발달하고 있으며, 평균 절리간격은 0.5-2.0 m 내

외 이다.

박스프랙털 차원을 산정하기 위해 사용된 자료는 Fig. 10 에 도시된 지하 유류비축터널의 터널 트레이스 맵핑 자료로부터 운반 통로 부분을 제외한 비축용 터널부에서 단층, 절리, 파쇄대 및 암맥 등 총 2,511개의 불연속면 자료이다. 박스프랙털 차원을 산정하기 위해서는 폭 18 m의 남·북부 터널과 9 m의 중앙 연결터널로 이루어진 전체 터널 구간을 총 120 개의 9 m × 10 m 영역으로 분할하고 개개 영역을 초기 박스로 하여 전철의 사례에서와 동일한 방법으로 7단계까지의 사각요소에 대한 $\ln N(r)$ vs. $\ln (1/r)$ 관계를 분석하였다. 이와 같은 방법으로 지하 유류비축터널의 전 구간에서 D_B 를 산정한 결과가 Fig. 11에 도시되어 있다.

Fig. 11는 산정된 D_B 를 산정영역(9 m × 10 m)의 중심점에 부여하여 지하 유류비축터널 내에서의 D_B 분포

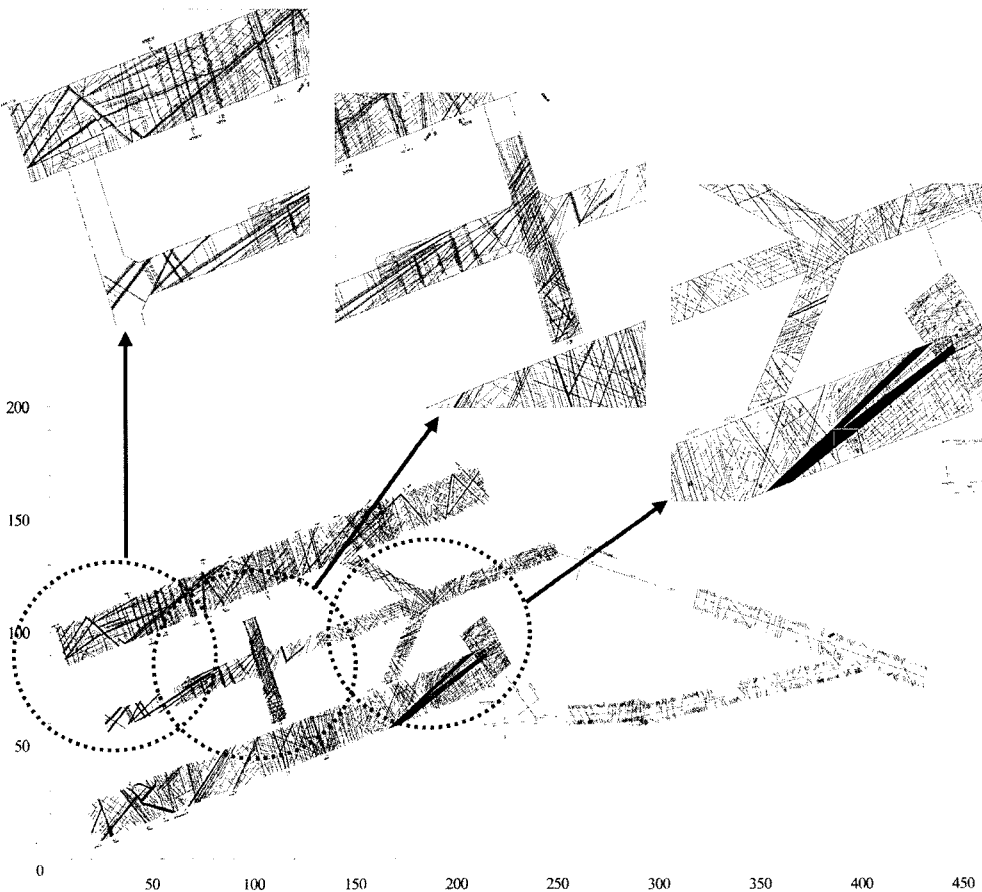


Fig. 10. The schematic diagram of underground tunnels for oil storage

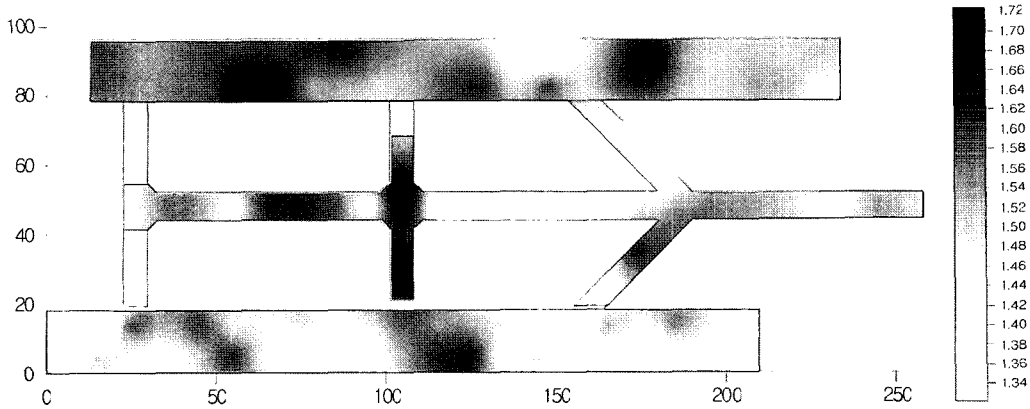


Fig. 11. Estimated box fractal dimension, D_B , for underground oil storage

양상을 이미지화한 것으로서, D_B 는 불연속면의 길이와 평면밀도에 관계된 불연속면 분포양상의 변화를 효과적으로 반영하고 있다. 특히 북부 터널 좌측부와 우측부에서 N34-53E 방향으로 발달하는 단층대를 따라 다수의 평행한 불연속면이 발달하고 있으며, 우측부의 단층대는 중앙연결터널과 남부 터널까지 연속적인 발달 양상을 보이고 있다(Fig. 10). 산정된 D_B 의 분포를 볼 때, 지하 유류비축터널은 북부 터널이 남부 터널에 비해 높은 D_B 를 갖으며, 전체 구조물을 대상으로 서북 지역이 동남 지역에 비해 높은 D_B 가 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 불연속면의 길이 및 평면밀도에 관계된 통계적 동질영역은 D_B 에 근거하여 중앙연결터널 중심부를 통과하는 NE-SW 방향의 단층대를 중심으로 크게 대분될 수 있다고 판단되며, 필요한 경우에는 대분된 영역 내에서도 비교적 작은 규모의 동질영역이 세분되어 질수도 있을 것이다.

5. 결 언

절리 방향성에 대한 기존의 분할표 해석법은 절리암반의 통계적 동질구조구 구분을 위한 유용한 수단이지만 절리 길이나 평면밀도의 변화를 고려하지 못한다. 본 연구에서는 절리의 평면밀도와 길이를 동시에 고려한 통계적 동질구역의 구분기준으로 비유클리드 프랙털 차원인 박스프랙털 차원의 적용성을 고찰하였다. 절리의 길이분포와 평면밀도를 달리하는 총 129개의 절리연결망에 대한 박스프랙털 차원의 변이특성을 체계적으로 분석한 결과 박스프랙털 차원이 절리의 방향성, 절리길이의 표준편차 및 개개 절리군의 평면밀도 변화에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 절리연결

망이 자체유사의 프랙털 특성을 갖는다는 것을 의미한다. 또한 박스프랙털 차원이 전체평면밀도와 평균 절리길이의 변화에만 영향을 받는다는 것을 검증하였으며 이들의 함수로써 공학적 지구조구 구분의 정량적 척도로 활용할 수 있음을 확인 하였다. 그러나 박스프랙털 차원은 절리의 방향 분포에 따르는 절리 연결구조의 변화를 구분하지 못하므로 기존의 분할표 해석을 적용한 방법론의 병행이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시된 방법론의 현장 적용성을 검토하기 위하여 도로사면과 지하구조물에 대한 사례연구를 수행한 결과 박스프랙털 차원 및 기존의 분할표 해석이 현지 절리암반에 대한 절리구조의 변동성을 효과적으로 반영함으로써 절리암반내 공학적 지구조구 구분을 위한 유용한 기준으로 활용될 수 있음을 확인 하였다. 통계적 동질구역 구분에 있어서 일반적인 지질조건과 더불어 이들 방법론을 병행하면 절리의 방향성, 평균길이 및 평면밀도가 종합적으로 고려된 통계적 동질구역의 설정이 가능하리라 사료된다.

사 사

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-003-C00153).

참고문헌

1. Priest, S.D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, 473 p.
2. Priest, S.D. and J. Hudson, 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline

surveys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 18, 183-197.

3. Kulatilake, P.H.S.W., D.N. Wathugala, and O. Stephansson, 1993, Joint network modeling with a validation exercise in Stripa Mine, Sweden, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr.*, 30, 503-526.
4. Kulatilake, P.H.S.W., J. Chen, J. Teng, X. Shufang and G. Pan, 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.*, Vol. 33, 255-277.
5. Kulatilake, P.H.S.W., J. Um, M. Wang and R.F. Escandon, 2003, Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East tunnel site, California, USA, *Engineering Geology*, Vol. 70, 131-155.
6. 조태진, 유병옥, 원경식, 2003, Discontinuity Orientation Measurement (DOM) 시추장비 및 코어질리 해석모델 개발, *터널과 지하공간(한국암반공학회지)*, Vol. 13, 33-43.
7. Miller, S.M., 1983, A statistical method to evaluate homogeneity of geostructural populations, *Mathematical Geology*, Vol. 15, 317-328.
8. Mahtab, M.A., T.M. Yegulalp, 1984, A similarity test for grouping orientation data in rock mechanics, *Proc. of the 25th U.S. Symp. on Rock Mech.*, 495-502.
9. Mandelbrot, B.B., 1983, *The fractal geometry of nature*, W. H. Freeman and Company, New York, p. 468
10. Feder, J., 1988, *Fractals*. Plenum Press, New York, 283 p.
11. Kulatilake, P.H.S.W., R. Fiedler and B.B. Panda, 1997, Box fractal dimension as a measure of statistical homogeneity of jointed rock masses, *Engineering Geology*, Vol. 48, 217-229.
12. Mauldon, M., 1998, Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex window, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 31, 201-216.
13. Song, J.J. and C.I. Lee, 2001, Estimation of joint length distribution using window sampling, *Int J Rock Mech and Min Sci.*, Vol. 38, 519-528.

엄정기



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

Tel: 051-620-6244
 E-mail: jum@pknu.ac.kr
 현재 부경대학교 환경탐사공학과 교수

조태진



1980년 서울대학교 해양학과 이학사
 1986년 University of wisconsin-Madison MS
 1988년 University of Wisconsin-Madison Ph.D

Tel: 051-620-6238
 E-mail: chotc@pknu.ac.kr
 현재 부경대학교 환경탐사공학과 교수

권순진



1990년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사
 1992년 연세대학교 대학원 지질학과 이학석사

Tel: 02-840-5738
 E-mail: zerocool@kores.or.kr
 현재 대한광업진흥공사 해외총괄팀/해외 기획부 과장