

여수반도 북동부지역의 선상구조와 단열계 분포특성

Characteristics of Lineament and Fracture System in the North-eastern Area of Yosu Peninsula

김 경 수 (Kyung Soo Kim)

한국원자력연구소

이 은 용 (Eun Yong Lee)

원자력환경기술원

김 천 수 (Chun Soo Kim)

한국원자력연구소

요약 / ABSTRACT

본 연구는 여수반도 북동부지역에서의 단열망 개념의 지하수유동 수치해석에 필요한 단열계의 분포특성에 대하여 여러 가지 방법을 통하여 이를 조사·분석하는데 목적이 있다. 연구지역의 지질은 크게 화산암류와 화강암으로 구분된다. Order 1~Order 3등급에 해당되는 광역 및 부지규모의 선상구조는 기존 지질도, 항공사진 및 전산음영기복도를 이용하여 분석되었다. Order 4등급의 단열계에 대한 자료는 지표에서 축선 조사를 통하여 이루어졌다. Order 4등급의 단열계에서 저경사각의 Set 4의 방향이 선상구조에서는 두드러지지 않은 점을 제외하고는 전체적으로 유사한 분포양상을 갖는다. Order 4등급의 단열계는 3개의 고경사각 단열조와 1개의 저경사각 단열조로 분류되며, 암종별 뚜렷한 차이는 보이지 않는다. Set 1부터 Set 4의 순서대로 발달 정도가 체계적이며, 충전물질은 상대적으로 저경사각 단열조에 우세한 경향을 보인다. 단열 간격은 대수정규분포를 따르고, 수정 Terzaghi 보정을 적용하였을 때 단열조별 단열의 빈도는 0.38/m~1.01/m의 범위를 갖는다. 단열 길이 역시 대수정규분포를 따르고, 단열조별 평균치는 2.9m~3.7m의 범위를 갖는다.

주요어 : 여수반도, 선상구조, 단열계 분포특성

This study aims to quantify the distribution characteristics of the fracture system for the numerical modeling of groundwater flow in the north-eastern area of Yosu peninsula. The study area is composed mainly of volcanic rocks and granite. The regional and site scale lineament in the range of magnitude Order 1 to Order 3 were analyzed from the geologic map, air-photograph and shaded relief map. The geometric parameter of Order 4 fracture system was acquired from the scanline survey on the ground surface. There is a similar trend in the preferred orientation between the regional lineament and the Order 4 fracture system except the Set 4 of Order 4 fracture system which is not prominent in the

type. That is classified to three fracture set of high dip angle and one of low dip angle. From the lineament trend. The orientation of Order 4 fracture system has similar characteristics in each rock termination mode analysis, it is considered that the fracture system was developed systematically and sequentially from Set 1 to Set 4. Filling materials are distinct relatively in low dip angle set. The fracture spacing follows to lognormal distribution and the fracture frequency corrected by the modified Terzaghi correction ranges from 0.33 to 1.01 per meter in each fracture set. The fracture trace length also follows to lognormal distribution and ranges from 2.9m to 3.7m in each fracture set.

Key Words : Yosu Peninsula, Lineament, Fracture distribution characteristics

서 언

지하에 설치되는 각종 시설물의 안전성에 영향을 미치는 요인으로 수리지질학적인 특성이 우선적으로 고려되는 대표적인 시설에는 방사성폐기물처분시설과 지하유류비축시설을 들 수 있다. 전자는 주요 지하수유동로로부터 충분한 격리되어야 하는 조건, 후자는 안정적인 수동력학적 수밀성이 확보되어야 하는 조건이 시설의 성능에 대한 기본요건(김천수와, 1997)이기 때문에 투수성 지질구조는 이들 시설의 안전성에 직접적인 영향을 미치게 된다.

괴상의 결정질암반에서 지하수의 흐름 특성을 부지 규모 (site scale, 수 백 m~1,000m) 또는 암반블록 규모 (rock block scale, <수 백 m)의 관점에서 볼 때, 그 흐름은 단열망(discrete fracture network)의 분포특성에 지배된다(이하 암반에 분포하는 모든 불연속면에 대하여 단열이라 한다). 이때 수리학적으로 연결되지 않는 암반매질은 불투수성 영역으로 간주되므로 투수성 단열(conductive fracture) 및 단열대(fracture zone)를 포함하는 암반 전체를 등가 다공성 매질(equivalent porous medium)로 정의할 수는 없다. 이러한 자연현상을 수치적으로 해석하기 위하여 근자에 이르러는 단열망 유동 개념(FracMan, Golder Asso., 1994; NAPSAC, Cliffe et al., 1994) 또는 이와 등가 다공성 매질 개념을 혼합된 형태로 모사할 수 있는 모델(CONNECTFLOW, Hartley, 1996)이 적용되고 있다. 이러한 수치모델이 적용되려면 대상부지에 분포하는 단열계에 있어서 위치와 규모를 정의할 수 있을 정도의 대규모 단열대에 대하여는 결정적 정보가, 중·소규모의 단열들에 대하여는 확률적인 대표값이 결정되어야 한다.

이러한 배경으로부터 한국전력공사 원자력환경기술원과 한국원자력연구소는 1998년~2000년까지 공동으로 연구지역을 대상으로 방사성폐기물처분시설 주변 암반에서의 수리모델구성기법 연구를 수행 중이다. 본 논문은 1차년도 연구결과(한국원자력연구소, 1998)와 원자력증장기연구사업의 일부로서 여수반도 북동부지역에서의 단열망 개념의 지하수유동 수치해석에 필요한 단열계의 분포특성에 대하여 여러 가지 방법을 통하여 이를 조사·분석하는데 목적이 있다.

조사과정 중에 노두면에서 쉽게 확인되는 절리 규모의 단열과 소규모 단층 등에 대하여는 현장 조사가 수행되었고, 직접적인 관찰이 어려운 대규모 단열대 등의 구조에 대하여는 위성영상이나 음영기복도와 같은 간접적인 수단을 통하여 선상구조로 인지될 수 있다고 가정하였다. 이들 선상구조가 의미하는 지질 및 지질구조적 특성에 관한 확인작업은 향후 수행될 예정이다.

연구지역은 여수반도의 북동단 해안에 접하며 전남 여수시 삼암동을 중심으로 낙포동, 신덕동 일대의 3×5km 면적에 해당된다(Fig. 1). 연구지역의 서측은 북북동 방향의 계곡을 따라 이어지는 859번 국도를 경계로 하고 북측과 동측은 광양만과 접한다. 859번 국도로부터 삼암동 해변가 마을로 이어지는 동서방향의 계곡부 도로를 사이로 연구지역 북측은 제석산(EL. 338m), 남측은 해발 340m 고지를 정점으로 동서방향의 산계가 발달한다. 북측과 남측의 정상부 고지는 화산암류가 분포하며 급격한 경사를 갖는 악지 지형으로, 특히 제석산 서측 사면은 도로변에서부터 정상에 이르기까지 암반이 노출되어 있다.

지 질

연구지역의 지질은 유천층군 화산암류와 이를 관입한 화강암이 분포한다(Fig. 1). 유천층군은 하부로부터 응방산층, 신성리층, 봉화산용결응회암, 월래리안산암 순으로 구성되며 각 층은 정합적으로 놓인다. 이들 화산암류의 형성 이후에 알칼리장석 화강암이 관입하였다(장기홍외, 1989). 이 지역의 화산암류는 북측 일부에 분포하는 화산쇄설성퇴적암인 신성리층을 제외하고 구성광물과 이에 포함되어 있는 암편의 크기와 종류가 다양하고 점이적으로 변화하고 있어 그 경계가 명확하지 않다.

응방산층은 연구지역에서 저지에 분포하는 최고기의 화산암류로 암회색의 치밀 견고한 괴상암산암을 주로 하며 렌즈상의 화산각력암과 집괴암을 포함하고 있다. 신성리층은 본 역의 최북단에 분포하며, 응회암질 역암과 녹색 사암이 주류를 이룬다. 봉화산용결응회암은 하부에 암회색 화산각력암 및 집괴암, 상부에 유문암질 용결래필리응회암으로 구성되는데, 최근의 시추조사 결과 이들은 점이적으로 변하는 것으로 확인되었다. 특히 야외에서 응방

산층의 화산각력암과 봉화산용결응회암의 화산각력암 및 집괴암과는 그 경계를 명확히 하기란 쉽지 않다. 알칼리장석화강암은 이들 화산암류를 관입한 세립질의 치밀 견고한 암석으로서 현미경 하에서 전형적인 미문상조직이 관찰된다.

본 연구에서는 지질에 관한 한 층서단위로 분류하지 않고 유사한 암상끼리, 즉, 크게 괴상암산암, 화산각력암 및 집괴암, 용결래필리응회암, 그리고 화강암으로 구분하여 검토하였다.

조 사 방 법

단열계는 근본적으로 기하학적 규모와 수리적 특성으로 분류 가능하며, 특별히 사업의 목적상 이들의 특성이 시설의 안전성에 미치는 영향 정도에 따라 분류기준이 달라 질 수 있다. 단열빈도 측면에서는 수리적 역할이 클수록 그 빈도가 적어지고, 수리적 역할이 작은 소규모의 단열은 빈도가 높은 것이 일반적인 분포특성이다. 본 연구에서는 지하에 설치되는 시설의 규모를 중심으로하여 주변 암반에 분포하는 단열의 규모에 따라 다음과 같이 일반적으로 적용될 수 있는 정성적 기준을 적용하였다(Black et al., 1994; 김천수의, 1997).

- Order 1등급 : 시설이 입지하는 암반블록의 경계역할을 하는 주요 광역 구조선 (major regional structures)
- Order 2등급 : 단위 지하시설 사이를 통과할 수 있는 주요 단열대 (major fracture zones)
- Order 3등급 : 지하시설을 통과하는 주요 단열 (major fractures) 및 국지 단열대 (local fracture zones)
- Order 4등급 : 통상 암반에 분포되어 있는 절리 등의 단열계 (fracture system)

이 분류기준은 고도의 안전성을 요구하는 방사성폐기물처분장, 이와 유사한 규모를 갖는 지하원유비축시설에서도 적용 가능하다. 물론 이것은 정성적인 기준이기 때문에 범용으로, 또한 초기 지표조사 단계에서는 효과적으로 적용할 수 있지만 단계별 조사가 진행되면서 고유의 지질학적 특성을 근거로 정량적으로 분류할 수 있을 것이다.

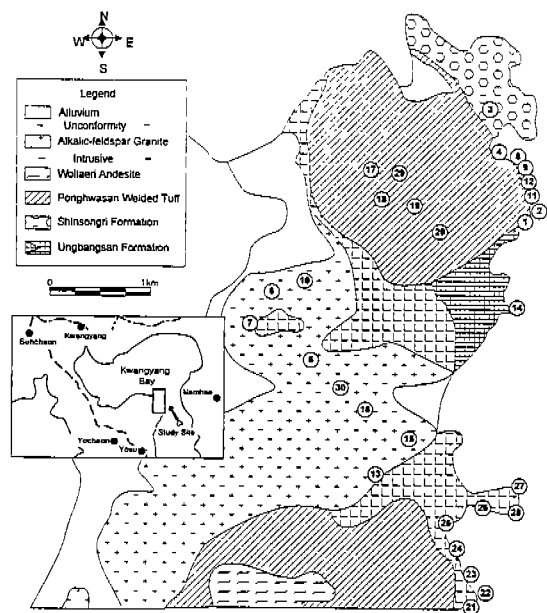


Fig. 1. Location and geologic map of the study area(Numbers imply the scanline mapping location).

연구지역을 포함하는 광역지역에서 Order 1부터 Order 3등급에 해당하는 광역규모 선상구조 분석에는 국립지리원 발행 1:5,000 축척의 수치지도(Digital Elevation Model) 19개 도면(총 면적 120.5km²)을 이용하여 제작된 전산음영기복도(shaded relief map)를 이용하였다. 연구지역내의 부지규모 선상구조 분석에는 1:20,000 축척의 항공사진과 연구지역 중심으로 확대된 전산음영기복도를 이용하였다. 전산음영기복도를 이용한 선상구조 분석은 태양 고도각을 45°로 고정시키고, 방위각을 0°에서부터 시계방향으로 45°씩 증가시키면서 음영대비에 의한 지형의 선형 특성으로서 그 위치와 방향을 결정하였다.

Order 4등급에 해당하는 절리규모 단열계의 확률적 분포특성 해석을 위하여는 연구지역 내에서 조사지점이 편중되지 않도록 유의하면서 충분한 단열조사가 가능한 노두에서 축선법(scanline method)에 의한 단열조사를 통하여 자료를 얻었다. 조사대상 단열길이(truncation limit)는 1.0m로 설정하였다.

Order 1-Order 3등급의 선상구조 분포특성

광역규모 분포특성

연구지역을 포함하는 주변의 광역지역에 대하여

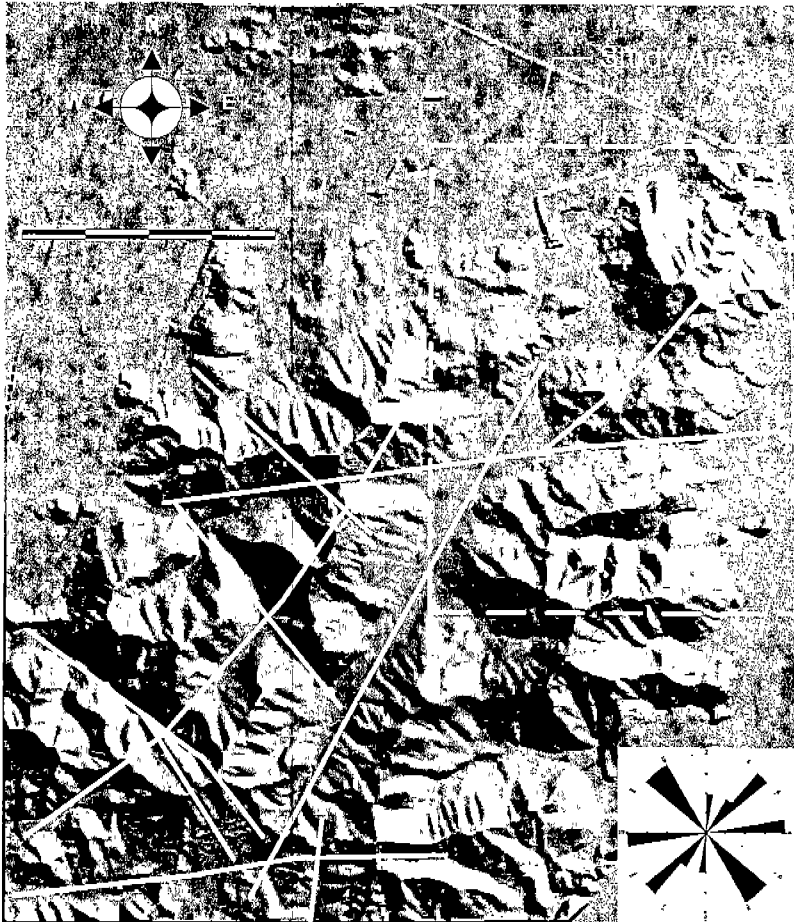


Fig. 2. Regional scale lineament distribution map from the shaded relief map.

여수반도 북동부지역의 선상구조와 단열계 분포특성

분석된 선구조선 분포도는 Fig. 2와 같다. 축척이 작은 도면에서 인지 가능한 선상구조는 대부분 암반블록을 구분할 수 있을 정도에 해당하는 Order 1 등급의 선상구조이다. 이 지역의 Order 1등급의 선상구조 중 규모가 가장 큰 것은 N30°E와 N80°E로서 각각 대계곡을 형성하면서 여수반도 북쪽 지역을 동서와 남북으로 이분하며, 분석영역의 중앙부에서 서로 교차한다. 분석영역의 우하단 영역에는 뚜렷한 선상구조의 발달이 보이지 않는 점이 특징

적이다. 이들 선상구조의 우세방향은 발달 정도의 순으로 볼 때 EW군, NE군 및 NW군으로 대표된다.

부지규모 분포특성

항공사진에서의 선상구조는 EW와 NE계열로 분류 가능하다(Fig. 3). 전산음영기록도로부터는 항공사진에서 인지되지 않는 선상구조가 좀 더 자세하게 분석되었다. 전산음영기록도에서 분석된 부지규

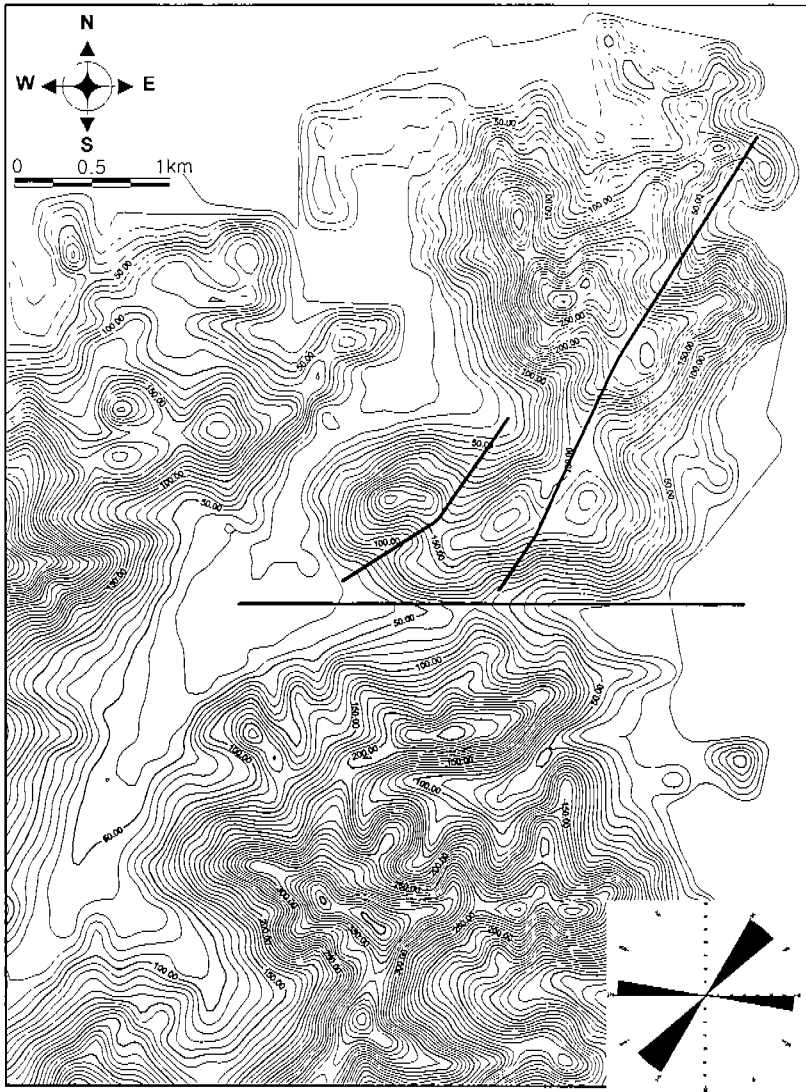


Fig. 3. Site scale lineament identified from the air-photograph.

모 선상구조와 앞서의 광역규모 전산음영기복도 및 부지규모 항공사진에서 분석된 결과를 종합하여 정리한 분포도는 Fig. 4와 같다. 이 지역 내에서 인지되는 선상구조의 전체적인 방향성은 광역 선상구조의 우세방향과 대체적으로 유사한 경향을 보이나, 빈도를 고려해 보면 NE계열의 선상구조가 약간 우세한 것으로 판단된다. 기타 발달 빈도와 연장성이 상대적으로 불량한 선상구조들이 확인된다.

Order 1 등급의 선상구조는 N30°E 방향의 계곡을 가로지르는 것과 N80°E 방향으로서 연구지역

중앙부에 위치하는 것이다. Order 2 이하의 선상구조는 NE군과 NW군으로 구성되는데, Order 1의 선상구조에 비하여 발달 빈도가 상대적으로 많지만 그 연장성은 작은 특징을 갖는다. Order 3에 해당되는 것들은 항공사진이나 전산음영기복도 상에서 확인하기에는 한계가 있지만, 연장성이 작은 3~4 조의 선상구조가 인지 가능하다. 화강암 분포지역에서는 상대적으로 미약한 분포를 보인다.

선상구조의 방향과 길이분포를 비교해 보면(Fig. 5), 전체적으로 N80°E 방향으로의 연장성이 가장

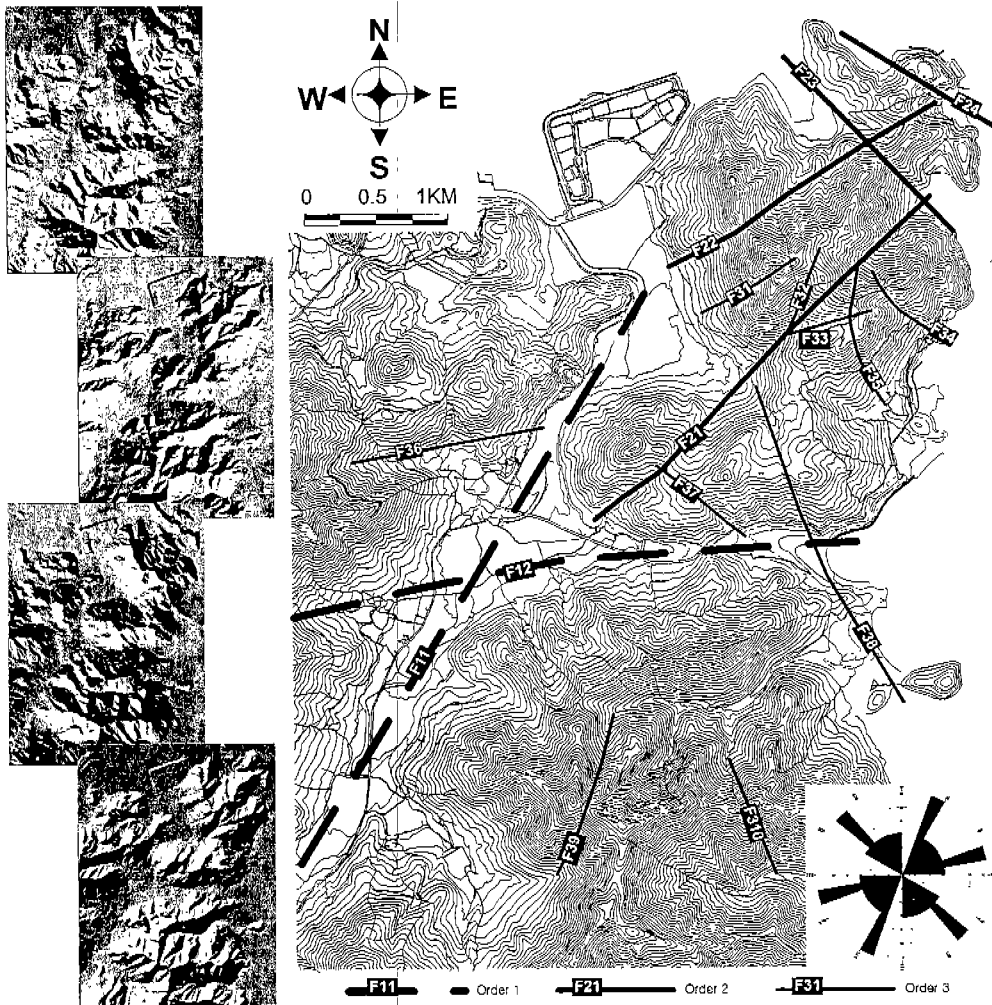


Fig. 4. Summarized lineament map in the study area.

우세하다. 부지규모의 선상구조의 누적길이는 우세 방향성을 따라 큰 차이 없이 4~8km의 범위를 가지며, NW 우세 방향의 분포범위가 넓게 분포하는 특징을 보인다.

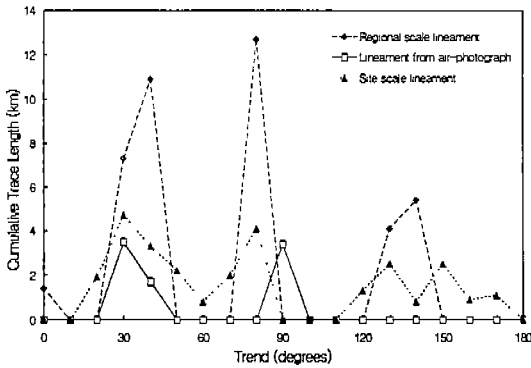


Fig. 5. Histogram of the lineament trend versus cumulative length.

Order 4등급의 단열계 분포특성

총 30개 지점(Fig. 1)에서 수행된 측선조사 결과, 피상안산암은 노두의 발달이 불량하여 1개 지점에서, 저지대에 분포하는 화산각력암 및 집괴암은 15개 지점, 고지대에 분포하는 용결래필리온회암은 4개 지점, 알칼리장석화강암은 8개 지점에서 단열자료가 수집되었으며, 이는 전체 누적조사길이 446.95m에서 935개의 단열에 해당된다.

자료의 보정

임의 방향에 거의 평행하게 발달하는 단열조에서 단열빈도(fracture frequency)는 단열조의 수선 방향을 따라서 단위미터 당 교차되는 단열의 수를 말한다. 그러나 야외의 노두면에서 측선법으로 얻어지는 단열자료는 1개 단열조에 대하여 수선인 방향으로 조사된 것이 아니기 때문에 측선의 설치방향에 따라 조사되는 자료의 수는 실제보다 적어지게 된다. 이러한 조사방향에 의한 sampling bias를 제거하기 위하여 적절한 보정을 하였다.

단열조와 측선이 이루는 예각을 δ_i 라 하면 i 번째 단열조에 대한 가중측정수는 $1/\cos \delta_i$ 이 되므

로, 이를 단일 단열에 적용하면 가중치(w) = $1/\cos \delta$ 로 간주될 것이다. 이때 X, Y 방향이 각각 동쪽(trend 90°)과 북쪽(trend 0°)에 수평이고 Z 가 이들에 수직방향(plunge 90°)인 3차원 직교좌표계에서 단열조 수선의 trend/plunge를 α_n/β_n , 측선의 trend/plunge를 α_s/β_s 라 하면, 단열조 수선과 측선과의 $\cos \delta$ 는 식 (1)로서 계산될 수 있다 (Priest, 1993).

$$\begin{aligned} \cos \delta = & (\sin \alpha_n \cos \beta_n \sin \alpha_s \cos \beta_s) \\ & + (\cos \alpha_n \cos \beta_n \cos \alpha_s \cos \beta_s) \\ & + (\sin \beta_n \sin \beta_s) \end{aligned}$$

$$w = \frac{1}{|\cos(\alpha_n - \alpha_s) \cos \beta_n \cos \beta_s + \sin \beta_n \sin \beta_s|} \quad (1)$$

가중치 계산을 위하여 상기의 방법을 이용할 경우 단열조 수선과 측선이 이루는 예각이 거의 수직인 상황에서 공교롭게도 하나의 단열이 측선과 교차할 경우 가중치는 매우 높아지게 될 가능성이 있다. 이론적으로 가중치는 1부터 50이상까지($\delta=89^\circ$ 일 때)의 범위를 갖게 되어 과대 해석되는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 가중치를 이용한 보정방법에서 발생하는 오류를 최소화하기 위해서 수정 Terzaghi 보정(modified Terzaghi correction, Golder Assoc., 1994)을 적용하였다.

$$N = \min\left\{\left[\frac{R}{\cos \beta}\right], U\right\} \quad (2)$$

R =a uniform, random deviate between 0 and 1
 β =the angle between the normal to the fracture plane and the borehole or scanline direction

U =user specified maximum correction

본 연구에서는 식 (2)에서 U 의 보정값을 최대 7 이하로 한정하였으며, 이로써 보정된 단열수는 원 자료 935개로부터 1,153개로 약 23.3% 증가되었다.

방향성

암종 구분없이, 보정되지 않은 조사자료 전체에 대하여 수정 Terzaghi 보정을 한 다음, FracMan 코드의 ISIS 모듈의 set identification 기능을 이용

하여 4개의 단열조를 정의하였다(Fig. 6). 각각의 단열조의 확률분포함수는 Fisher 분포를 따르는 것으로 판단된다. 각 단열조별 평균 및 우세 방향성에 대하여는 Table 1에 정리하였다. Set 1부터 Set 3까지는 경사각 70°이상인 고경사 단열조이며, Set 4는 경사각 50° 내외의 저경사 단열조이다. Set 1부터 Set 4가 차지하는 비율은 순서대로 39.1%, 29.8%, 16.4%, 그리고 14.7%이다.

대표 암종별 단열 방향성(Fig. 7)을 살펴보면, 괴상안산암은 보정된 자료의 수가 45개로서 신뢰성에 문제가 있지만 Set 2가 우세하게 분포하는 특성을 보인다. 연구지역의 저지에 분포하는 화산각력암과 집피암은 Set 1과 Set 2가 고르게 분포하는 반면에, 고지를 점하고 있는 용결래필리응회암에서는 Set 2의 발달이 미약한 대신 Set 3가 상대적으로 우세하게 분포하는 특성을 보인다. 화산암류 분출 이후

관입된 알칼리장석화강암의 경우에는 뚜렷한 우세 단열조 없이 고르게 분포하는 특성을 보이고, 여타 암종과는 달리 단열조의 clustering 정도가 불량한 것이 특징이다. 그러나, 알칼리장석화강암 분포지역의 EL.-30m에서 EL.-60m에 위치하는 지하공동 조사결과를 참고하면, 공동 단면(18m×30m)을 가로지르는 단열만을 고려하였을 때 Set 1과 Set 2가 우세하게 분포하는 것으로 나타났다(한국석유개발공사, 1996). 지하에서의 Set 1은 경사방향이 북쪽으로, Set 2의 경우에는 동쪽으로 편중되어 분포하는 것으로 조사되었다. 지하의 단열자료가 상대적으로 크기가 큰 단열만을 대상으로 한 것이기 때문에 지표자료와는 다소의 차이가 있지만, 전체적인 경향은 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

Table 1. Summarized statistics of the fracture sets.

Set		1	2	3	4
Fracture Type(%)	Coated	6.2	7.5	5.1	11.4
	Sealed	-	0.3	-	1.1
	Fresh	93.8	92.2	94.9	87.5
Termination Mode(%)	Both ends free	37.5	21.6	18.4	31.8
	One end free	39.0	47.4	52.2	35.2
	Both ends against fractures	12.1	19.6	23.5	31.8
	Splay	-	-	-	-
	Unknown	11.4	11.4	5.9	1.1
Censoring Type(%)	Both ends exposed	67.7	60.1	67.6	75.0
	One end covered	21.0	28.1	26.5	22.7
	Both ends covered	11.4	11.8	5.9	2.3
	Unknown	-	-	-	-
Infilling Materials	Calcite	4.4	3.9	5.1	4.5
	Iron Oxide	1.7	2.6	-	-
	Clays	-	1.0	-	-
	Feldspars	-	-	-	3.4
Mean Attitude	Dip direction	137.1	302.4	54.2	71.0
	Dip angle	89.3	87.7	74.5	50.7
Preferred Attitude	Dip direction	340	275	45	240
	Dip angle	75	70	75	50
Proportion(%)		39.1	29.8	16.4	14.7
Trace Length(m)	Mean ±SD	3.12±2.61	3.65±3.52	3.52±3.26	2.89±2.16

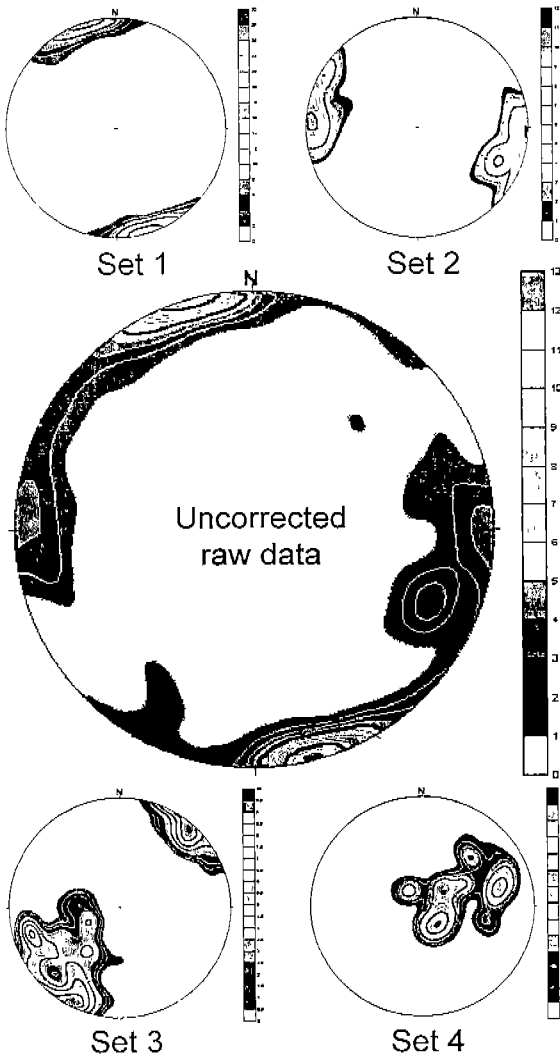


Fig. 6. Fracture set identification using FracMan ISIS module. Fracture number of each set has been corrected by equation (2).

충전물질

단열 충전물질은 야외 노두의 풍화, 침식 정도에 따라 불확실성이 크지만 연구지역 내의 모든 단열조는 대부분 충전(sealed)된 상태로 있지 않고 신선한(fresh) 상태인 것으로 조사되었다. Set 1부터 Set 3까지는 5~6% 정도가 피복된(coated) 상태에 있으며, Set 4는 11.4%에 이른다. 충전물질의 대부

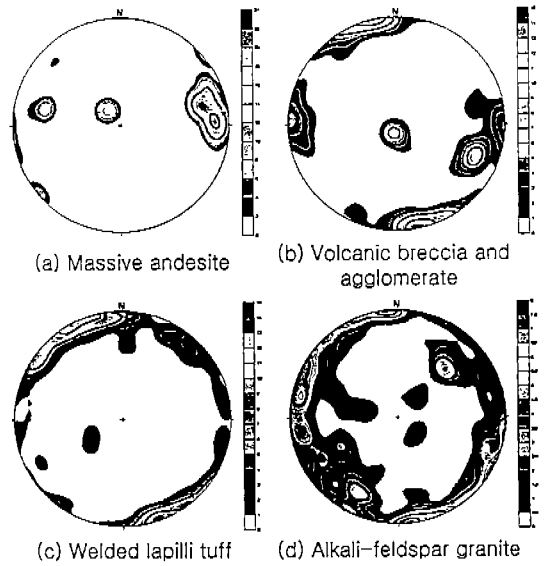


Fig. 7. Orientation characteristics in major rock type.

분은 방해석이며, 지하수 유동의 흔적을 지시하는 철산화물과 기타 점토질광물이 소량 충전되어 있다 (Table 1).

간격 및 빈도

지표 노두면에서 조사된 외견단열간격(S_2)으로부터 실간격(S_m)은 식 (1)의 방향여현으로부터 $S_i = S_a \cos \delta$ 와 같이 계산되었다. 단열조별 실간격치는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 대수정규분포를 따른다.

단열빈도는 식 (1)에 내포된 $\cos \delta$ 의 과대 보정 가능성을 감안하여 식 (2)를 이용하여 재계산되었다. j 번째 단열조의 빈도(λ_j)는 식 (3)으로 계산된다.

$$\lambda_j = N / \sum_{j=1}^n S_{aj} \cos \delta \quad (3)$$

만약 단열조 수선과 각 δ 를 이루는 축선에서의 단열빈도($\lambda_{s, \delta}$)는 $\delta=0^\circ$ 일 때 $\lambda_{s, \delta} = \lambda$ 에서부터 $\delta=90^\circ$ 일 때 $\lambda_{s, \delta}=0$ 으로 감소될 것이다. 따라서 축선을 따르는 단열빈도는 식 (4)와 같이 된다.

$$\lambda_j = \lambda_{sj} / \cos \delta \quad (4)$$

Table 2. Summarized statistics of the fracture frequency for fracture set.

Set	Uncorrected fracture number	Terzaghi correction number	Corrected fracture number	Surveyed scanline length(m)	Fracture frequency(/m)
1	405	1.114	451	446.95	1.01
2	306	1.120	343		0.77
3	136	1.390	189		0.42
4	88	1.932	170		0.38
Total	935		1,153		2.58

Table 3. Summarized statistics of the fracture frequency for rock types.

Set		1	2	3	4	Total
Uncorrected fracture number	Massive Andesite	1	21	1	10	33
	Volcanic Breccia & Agglomerate	221	157	52	36	466
	Welded Lapilli Tuff	66	41	30	1	138
	Alkali-feldspar Granite	85	80	42	32	239
Terzaghi correction number	Massive Andesite	1.114	1.120	1.390	1.932	-
	Volcanic Breccia & Agglomerate					
	Welded Lapilli Tuff					
	Alkali-feldspar Granite					
Corrected fracture number	Massive Andesite	1	23	2	19	45
	Volcanic Breccia & Agglomerate	246	176	72	70	564
	Welded Lapilli Tuff	73	46	41	2	162
	Alkali-feldspar Granite	95	89	59	61	304
Surveyed scanline length(m)	Massive Andesite	10.0				425.0
	Volcanic Breccia & Agglomerate	235.1				
	Welded Lapilli Tuff	42.0				
	Alkali-feldspar Granite	137.9				
Fracture frequency(/m)	Massive Andesite	0.10	2.30	0.20	1.90	4.50
	Volcanic Breccia & Agglomerate	1.05	0.75	0.31	0.30	2.41
	Welded Lapilli Tuff	1.74	1.10	0.98	0.05	3.87
	Alkali-feldspar Granite	0.69	0.65	0.43	0.44	2.21

식 (2)~(4)를 이용하여 단열빈도를 계산한 결과 (Table 2)를 정리하면, 연구지역에 분포하는 단열조별 길이(trace length)가 1.0m 이상인 단열의 빈도는 $\lambda_1=1.01/m$, $\lambda_2=0.77/m$, $\lambda_3=0.42/m$, 그리고 $\lambda_4=0.38/m$ 로 해석된다. 즉, 이것은 각 단열조의 수선 방향으로의 단열빈도를 의미하는 것이므로, 실제

연구지역 내 임의 지역에서 임의의 방향으로 시추를 하거나 축선을 설치했을 경우 단열대 부근을 제외하고, 추적길이가 1.0m 이상인 단열이 교차될 수 있는 확률은 2.58/m 이하일 것으로 예측할 수 있다.

동일한 방법으로 암종별 단열빈도를 계산하였다

여수반도 북동부지역의 선상구조와 단열계 분포특성

(Table 3). 괴상안산암은 4.50/m로 가장 크게, 알칼리장석화강암이 2.21/m로 가장 적은 것으로 분석되

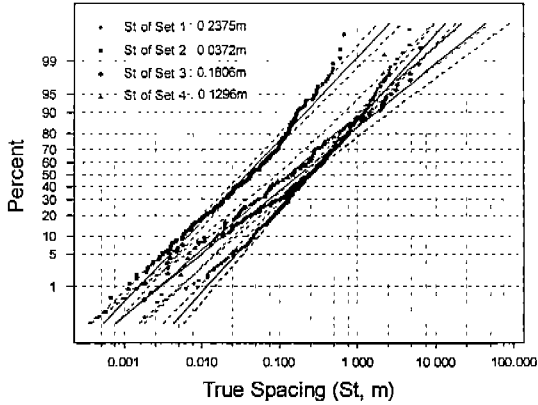


Fig. 8. Lognormal probability plot for fracture spacing.

었다. 앞서 언급하였듯이 괴상안산암은 자료 수가 충분치 않으므로 신뢰성을 보장할 수 없다. 이를 제외한 화산암류와 알칼리장석화강암의 경우를 비교해 보면, 화산암류의 단열빈도가 0.2~1.66/m 정도 더 우세하게 발달하는 것으로 밝혀졌다.

길이

연구지역에 분포하는 4개 단열조의 길이에 대한 분포형태는 대수정규분포를 따른다(Fig. 9). 단열조 순서대로 산술적인 평균치는 3.117m, 3.651m, 3.524m, 2.889m이고, 대수평균은 2.353m~2.721m의 범위를 갖는다(Table 4). 분포빈도가 가장 우세한 Set 1보다는 빈도가 적은 Set 2와 Set 3의 길이가 더 큰 것이 특징적이다.

암종별 단열 길이의 평균값을 살펴보면, 괴상안산암과 용결래필리응회암의 경우는 3m 이하로서

Table 4. Summarized statistics of the fracture trace length.

Set		1	2	3	4	
Fracture Trace Length (m)	Arithmetic Mean ±SD(m)	3.117±2.607	3.651±3.518	3.524±3.257	2.889±2.164	
	Minimum(m)	1.000	1.000	1.000	1.000	
	Median(m)	2.160	2.500	2.500	2.300	
	Maximum(m)	20.000	30.000	30.000	10.500	
Rock Types	Massive Andesite	Arithmetic Mean ±SD(m)	2.000	2.265±1.600	1.100±0.141	1.532±0.581
		Minimum(m)	-	1.000	1.000	1.000
		Median(m)	-	1.500	1.100	1.500
		Maximum(m)	-	6.000	1.200	3.000
	Volcanic Breccia & Agglomerate	Arithmetic Mean ±SD(m)	3.271±2.887	4.114±3.883	4.174±4.427	2.976±1.429
		Minimum(m)	1.000	1.000	1.000	1.000
		Median(m)	2.200	2.745	2.265	3.000
		Maximum(m)	20.000	30.000	30.000	8.500
	Welded Lapilli Tuff	Arithmetic Mean ±SD(m)	2.382±1.754	2.013±1.099	3.034±2.176	1.500
		Minimum(m)	1.000	1.000	1.000	-
		Median(m)	1.500	1.800	3.000	-
		Maximum(m)	8.000	6.000	8.000	-
Alkali-feldspar Granite	Arithmetic Mean ±SD(m)	3.611±2.468	3.979±3.693	3.437±2.329	3.548±3.089	
	Minimum(m)	1.000	1.000	1.000	1.000	
	Median(m)	2.500	2.740	2.500	1.800	
	Maximum(m)	10.000	20.000	10.000	10.500	
Lognormal Distribution	Mean (m)	2.402	2.721	2.649	2.353	

다른 두 암종에 비하여 상대적으로 작다. 화산각력암과 알칼리장석화강암의 경우는 3m 이상의 길이를 가지며, 공히 Set 1 보다는 Set 2와 Set 3의 길이가 더 큰 것으로 나타났다.

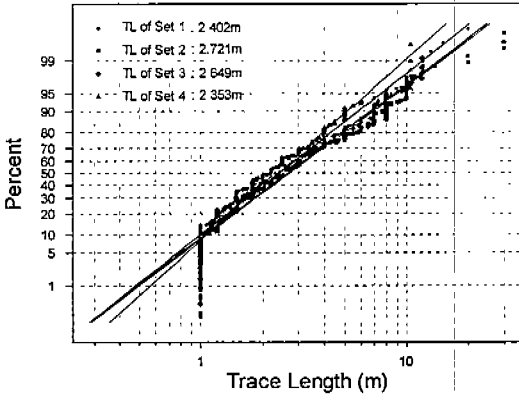


Fig. 9. Lognormal probability plot for fracture trace length.

종식유형

단열 조사과정 중에 독립된 하나의 단열이 다른 단열과 어떠한 형태로 교차되는 지를 5가지 유형으로 분류하여 기재하였다. 단열의 양 끝이 다른 단열에 의해 종식되지 않는 유형이 많은 단열조는 상대적으로 체계적이고(systematic), 시기적으로도 먼저 생성된 것으로 고려할 수 있다. 대신에 양단 혹은 한 쪽 끝이 다른 단열에 의해 잘려지는 단열이 많은 단열조는 전자보다 후기에 생성된 것임을 알 수 있는 것이다.

4개 단열조 중에서 단열의 양단이 잘리지 않는 비율이 가장 큰 순서대로 Set 1>Set 4>Set 2>Set 3이다. 한 쪽 혹은 양단이 다른 단열에 의해 잘리는 비율은 Set 3>Set 2 & Set 4>Set 1이다. 따라서, Set 4의 불확실성을 고려한다면 연구지역 내에 분포하는 단열체계는 Set1>Set 2>Set 3의 순으로 체계적인 것으로 분류된다(Table 1 참조).

토의 및 결론

연구지역을 포함하는 주변 광역지역에 대한 선상구조 분석기법에 있어서는 수치지도로서 제작된

전산응용기복도가 기존의 항공사진에서 인지할 수 없었던 선상구조를 확인하는데 유용한 것으로 여겨진다. 넓은 지역을 분석하는 데 있어서 값싼 저해상도의 위성영상보다는 수치지도를 이용하는 방법이 불확실성을 경감시킬 수 있을 것이며, 이에 고해상도의 위성영상 이미지를 병용하여 해석하는 것이 바람직할 것이다.

선상구조의 분포특성의 경우, F11과 F12는 연구지역 내에서 가장 뚜렷한 Order 1 등급에 해당된다. 이들은 공히 지형적으로 계곡을 이루고 그 폭이 100~500m에 이른다. Order 2 등급의 선상구조는 독립적인 암반블록의 경계를 이루는데, 주 분포 방향은 NE계열과 NW계열로 대표된다. 암반블록 내에 분포하는 Order 3 등급의 선상구조는 지하에 시설이 입지할 경우 이를 가로지를 수 있는 것으로 판단된다. 그러나, 상대적으로 이들의 발달규모와 연장길이가 작으므로, 시설의 안정성에 위요소로 작용할 정도의 규모는 아닌 것으로 사료된다.

선상구조와 Order 4 등급의 단열계 분포 양상을 비교해 보면, 단열계 Set 1은 선상구조의 EW계열의 주 방향과 일치함을 보이고, Set 2는 NE계열의 선상구조와, 그리고 Set 3은 NW계열의 선상구조와 대비된다. 그러나, 저경사각의 Set 4의 방향은 선상구조에서 두드러지지 않는다.

연구지역 내에 분포하는 Order 4 등급의 단열계 분포특성을 정리하면 다음과 같다.

- 3개의 고경사각 단열조와 1개의 저경사각 단열조로 분류되며, 암종별 뚜렷한 차이는 보이지 않는다. Set 1부터 Set 4의 순서대로 발달 정도가 체계적이며, 상대적으로 저경사각 단열조(Set 4)를 따라서 충전물질이 우세하다.
- 단열 간격은 대수정규분포를 따르고, 수정 Terzaghi 보정을 적용하였을 때 단열조별 단열빈도는 0.38m~1.01m의 범위를 갖는다. 연구지역 내 임의 방향을 따라서 크기 1.0m 이상인 단열이 교차될 수 있는 빈도는 2.58개/m 이하이다. 암종별 단열빈도는 용결래필리움회암이 가장 우세하다.
- 단열 길이는 대수정규분포를 따르고, 단열조별 평균치는 2.889m~3.651m의 범위를 갖는다. 분포빈도와 체계적 정도에서 가장 우세한 Set

1보다는 Set 2와 Set 3의 길이가 더 큰 것이 특징적이다. 암종별 산술평균값은 괴상안산암과 용결래필리용회암의 경우는 3m 이하로서 다른 두 암종에 비하여 상대적으로 작다. 화산각력암과 알칼리장석화강암의 경우는 3m 이상의 추적길이를 가지며, 공히 Set 1 보다는 Set 2와 Set 3의 추적길이가 더 큰 것으로 분석되었다.

이러한 연구결과로부터 Order 1~Order 3 등급 규모의 선상구조는 이들이 의미하는 지질구조적 및 수리적 특성에 대하여 정밀한 확인과정을 거쳐 향후 광역규모의 지하수유동 수치해석시 고려될 것이며, Order 4 등급의 단열계 분포특성은 수리적으로 중요 지점에 대한 단열망개념의 수치해석시 입력자료로 이용될 것이다.

사 사

본 연구는 한국전력공사 원자력환경기술원에서 시행하는 연구개발사업(과제번호: 98NJ21)과 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기연구개발사업에 의하여 수행되었다. 현장 조사에 협조를 아끼지 않으신 한국석유공사 관계자와 (주)엘지엔지니어링 김경희님, 그리고 조사에 참여한 조성일님, 류신애님께 심심한 감사를 드린다. 특별히 선상구조 분석에 조언을 아끼지 않으신 경북대학교 장태우 교수님께도 감사드린다.

참 고 문 헌

김천수, 배대석, 김경수, 고용권, 송승호, 1997, 지하 유류비축시설 수리안정성 평가방안, 대한지질공학회지, 7-3, 229-245.

한국석유개발공사, 1996, U-1 비축기지 1차 공사 감리용역-최종 수리시험 해석 보고서, (주) 삼립컨설턴트.

한국원자력연구소, 1998, 저준위방사물처분장 수리 모델 구성기법 연구-1차년도 연구보고서, 한국전력공사 원자력환경기술원.

장기홍, 이영길, 김규환, 1989, 남해·서상 지질도폭 설명서, 한국동력자원연구소.

Black, J. W. et al., 1994, Review of SKB framework for the geoscientific characterization of sites for deep repositories with emphasis on the testing and numerical representation of fractured crystalline rock, PR44-94-001.

Cliffe, K. A., Morris, S. T. and Wilcock, P. M., 1994, NAPSAC(Release 3.0) User guide, AEA Technology.

Golder Assoc. Inc., 1994, FracMan-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling and exploration simulation(Version 2.306).

Hartley, L. J., 1996, CONNECTFLOW(Release 1.0) User guide, AEA Technology.

Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman and Hall, 473p.

김경수, 김천수
 한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야
 대전광역시 유성구 덕진동 150 (우 : 305-353)
 TEL : (042) 868-2365, -2063
 FAX : (042) 868-2063
 Homepage : <http://www.kaeri.re.kr/~geoenv>
 e-mail : nkskim1@nanum.kaeri.re.kr,
 ncskim1@nanum.kaeri.re.kr

이은용
 한국전력공사 원자력환경기술원 수문환경연구팀
 대전광역시 유성구 덕진동 150 (우 : 305-353)
 TEL : (042) 8700-280