2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

단열암반 수리특성 평가

Evaluation of Hydraulic Properties in Fractured Rockmass

이은용, 장근무

한국전력공사 원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149호

요 약

결정질 단열암반의 투수성을 평가하기 위하여 전남 여수시 낙포동 일대에 분포하는 응회암을 대상으로 4개 시추공에서 초음파 주사검층 기법을 이용한 단열조사와 수압시험을 시행하고 자료를 분석 하였다. 단열조사에서는 총 303개 단열의 분포위치, 방향성, 경사각 틈의 크기가 측정되었으며 5m 구간별 80회 수압시험으로부터 수리전도도를 산출하였다. 측정된 단열중 12%에 해당하는 단열만이 개구성 단열로 분석되었으며 기타 단열들은 방해석과 같은 침전광물로 충전되어 투수성에 큰 영향을 미치고 있다. 암반의 대표요소체적 개념에 의한 조화평균 수리전도도와 추계적 연속체 이론에 의한 기하평균 수리전도도는 $5x10^{-8}$m/s 로 일치하고있다. 50m block 규모의 단열망 모델 해석에 의한 투수계수 tensor 계산결과로 이방성을 분석할 수 있었으며 수직성분 수리전도도가 수평성분 수리전도도보다 다소 큰 값을 가지나 비교적 등방성 매질의 특성을 보인다.

Abstract

Boreole packer test and fracture survey using borehole acustic scanning method was performed in order to evaluate hydraulic characteristics of Tuff distributed in northern Yeosu area. Total of 303 fractures were detected and then orientation, apeture size of each fracture are analyzed. Only 12 % of detected fractures were identified as open fractures and others were filled with minerals such as calcite. This indicates that the hydraulic property of rockmass is influenced by fillings as well as apeture size. Mean of hydraulic conductivity of rockmass based on stochastic continuum theory was $5x10^{-9}$m/s and it was was coincident with harmonic mean. Anisotropy of hydraulic conductivity was analyzed by fracture network modeling interpretation. The result showed that horzontal and vertical components conductivity values were nearly same, therefore it might be concluded that the rockmass was hydraulically isotropic.

1. 서 론

방사성폐기물 처분장의 대상이 되는 암반에서 지하수는 핵종이동의 주요 매체가 된다. 따라서 암반내 지하수유동을 평가하기 위해서는 지하수유동로의 역할을 하게되는 단열의 수리

지질학적 특성을 파악하는 것이 중요하다. 이러한 단열의 특성은 여러 가지 파라메터들에 의해 정의되는 바, 그 대표적인 파라메터들은 단열의 방향성(orientation), 길이, 틈의 크기(apture size). 간격(spacing) 그리고 투수성이다. 그러나 단열을 포함하는 지질학적 암석분포와 구조의 불규칙성과 복잡성 그리고 지하암반 조사방법의 제한성으로 인하여 파라메터들을 정량적으로 평가함에 항상 신뢰성의 문제가 따르게 된다. 최근 이같은 평가의 신뢰성을 제고하기 위한 기술과 이론이 개발되고 있으며 특히 방사성 폐기물처분장 평가분야의 연구에서 괄목할 만한 성과를 보이고 있다. 본연구에서는 초음파 주사기법을 이용한 텔레뷰어(Televiewer) 단열조사 방법과 수리파라메터 해석방법을 적용하여 우리나라에 광범위하게 분포하는 응회암을 대상으로 암반의 수리지질학적 특성을 평가하였다.

2. 연구지역 지형, 지질분포와 시추공 개요

연구지역은 여수반도 북측 해안에 위치하며 전남 여수시 낙포동 일부에 해당된다. 제석산(EL. 338m)을 중심으로 동측은 비교적 완만한 경사를 이루고 있으나, 서측은 급경사의 험준한 산악지형으로 접근이 불가능한 정도이다. 연구지역 일대의 분포암석은 중생대 백악기의 유천층군 화산암류와 이를 관입한 알칼리장석화강암으로 구성되며 시추조사 지점의 암석은 화산암류에 해당하는 암회색 또는 녹회색의 안산암질 응회암으로 래피리 크기의 다양한 암편을 포함하고있다. 시추위치는 제석산 동측 사면의 해발고도 50 61m에 위치하고 4개공의 전체 시추심도는 총 404.59m이다. 연구지역 지질분포와 시추위치는 그림1 과 같다.

3. 단열조사

3.1 텔레뷰어 조사

텔레뷰어 조사는 초음파를 시추공벽에 주사하고 이때 되돌아오는 반사파의 진폭을 영상화하여 단열형상을 분석하는 시추공 초음파주사 검층기법(borehole acustic scanning technique)을 이용한 조사이다. 이 방법으로 암반내 분포하는 단열의 방향성, 경사각을 측정할 수있으며 특히 반사파의 주시치로부터는 지하수유동에 중요한 정보가 되는 단열틈의 크기와 개구성 여부를 파악할 수있다.

지층 경계면에 수직으로 입사된 탄성파가 반사되어오는 파의 에너지는 그 경계면에서의 입사각, 탄성파의 주파수, 매질의 물성(밀도)에 따라 결정된다. 그림2에서와 같이 압전소자로부터 발생된 초음파 빔(주파수 1.4MHz)을 rotate mirror에 보내면 mirror는 window를 통해 공벽에 수직으로 빔을 조사하게된다. 이때의 반사파는 암석또는 단열의 물성에 따라 진폭의 변화를 가져오게되며 이 진폭치를 영상화하여 해석하므로서 단열의 형상(방향과 경사각)을 분석할 수있다. 또한 진폭이미지에서 분석된 단열의 진폭치는 상대적으로 낮은 값을 갖게된다. 여기에서 정현곡선을 나타내는 단열주변을 일정한 크기(상하 3cm)로 잘라내어 단열틈으로 해석될 수 있는 진폭의 경계치를 선정한 후 그 이하에 해당되는 진폭치 영역과 이상에 해당되는 진폭치 영역의 면적을 계산하면 단열틈 영역의 높이 즉, 단열틈의 크기를 파악 할 수 있게된다. 그림3은 텔레뷰어 검층 분석결과의 예로서 시추공내 분포하는 단열의 상태를 보여 주고있다. 조사에 사용된 텔레뷰어 장비는 독일 DTM-Geotec에서 최근 개발한 FACIMILE-40 측정 시스템으로 초음파 조사 logger 및 controller, 영상해석 처리용 본체로 구성되어 있다.

3.2 조사결과

4개 시추공에서 텔레뷰어 조사에 의해 측정된 단열은 총 303개 이다. 이 단열들을 stereonet 상에 도시한 결과는 그림4 와 같으며 3 방향의 우세 단열조를 이루고 있다. 이 3개조의 대표 단열조 경사방향/경사각은 각각 050°/19°, 083°/85°, 339°/85° 로서 N40W 방향성의 저경사 단열조와 N7°W 및 N21°E 방향성의 고경사 단열조가 암반 block을 형성한다는 것을 의미한다. 한편 연구지역 일대의 선상구조(linearment)는 연장성(persistence)이 큰 NE 계열과 상대적 빈도는 많으나 연장성이 작은 NW 계열로 분류(김경수외, 1999b) 되는 바, 시추조사 지역은 광역 선상구조에 따르는 불연속면구(discontinuity domain)의 단열 분포특성을 보이는 것으로 판단된다.

조사된 지점의 단열틈 크기는 10mm에서 0.1mm 범위로 측정되었으며 단층 또는 단열대로 분류 할 수 있는 구간은 분포하지 않고 있다. 그러나 단열이 교차하거나 공내 변형등의 영향으로 빔 조사위치로부터 상대적으로 근거리에 단열이 위치하는 경우 틈의 크기는 실제보다 크게 계산 될 수 있는 요인을 감안하면 다소 과도하게 평가 될 수 있다. 측정된 단열 303개 중 12%에 해당하는 36개의 단열만이 개구성 단열로 분석되었으며 이 개구성 단열들의 평균 크기는 6mm이다. 나머지 88%는 단열틈이 방해석등의 침전광물로 채워진 닫힌 상태 단열이다. 이로서 조사지점 암반의 낮은 투수성과의 관계를 파악 할 수 있다.

4. 시추공 수리시험

4.1 시험 방법과 계수산출

시추공내에 일정압, 일정량의 물을 주입하므로서 정상류 상태를 유지하는 조건의 시험을 통상 수압시험 또는 packer test라고 한다. 수압시험은 시험구간에 double pakcer를 설치하고 지상으로부터 압력수를 주입하므로서 유량(flow rate)과 주입압력을 측정하는 방법으로 시행된다. 수압시험에서 측정된 유량과 주입압력으로부터 Moyer 이론에 따라 투수량계수를 산출한다. 암반은 균질, 등방성매체이고 물 주입시 시추공 근접된 암반에서는 방사상유동 체계가 형성되고 그 외부에는 구상유동 체계가 형성된다. 방사상유동과 구상유동 체계의 경계는 시험구간의 1/2에 형성된다고 가정하면(Moye 1967) (1)식과 같은 유량과 주입압력의 관계함수가 유도되며 이로부터 수리전도도를 산출 할 수있다.

$$K = \frac{q}{h_w L}\left[\frac{1 + \ln(L/2r_w)}{2\pi}\right] \qquad (1)\text{식}$$

q=flow rate(m^3/sec)

L=test section length(meter)

h_w=effective pressure head(meter)

= injection pressure head-G.W pressure head-head loss

r_w=bore hole radius(meter)

4.2 투수계수 분포특성

수압시험으로부터 산출되는 값은 다수의 단열을 포함하는 시험구간 암반의 투수량계수(transmissivity)이고, 투수계수(hydraulic conductivity)는 투수량계수를 시험구간 길이로 나눈 값으로 정의된다. 구간별 수리전도도는 $K = 2\times10^{-6}$m/s로부터 $K = 10^{-9}$m/s 범위에 속하며 개구성 단열이 분포하는 구간의 수리전도도는 $K = 5\times10^{-7}$m/s ~ 5×10^{-9}m/s 범위로 나타나고 있고 이외의 구간에서는 수리전도도는 $2\sim3\times10^{-9}$m/s 값의 분포를 보이고 있다.

그림5는 시추공에서의 심도별 구간 수리전도도와 개구성단열(type1,2) 및 닫힌단열(type3) 유형별 크기에 대한 분포이며 개구성 단열의 분포 여부에 따라 수리전도도 차이가 있음을 확인 할 수있다.

5. 대표 수리전도도

5.1 대표요소체적과 수리전도도

수리지질학적 단위층 암반의 대표 수리전도도는 시험에서 측정된 소규모 구간별 수리전도도의 평균값(average value)으로서 설정되게된다. 이 경우 대표 수리전도도는 규모 종속적으로 결정되므로 대표요소체적(representative elemetry volume ; REV) 규모를 전제로 하게된다. REV는 평균 투수성이 대표하는 암반의 규모가 균질성을 보이기 시작하는 최소규모로 정의되며 이 규모에서의 수리전도도가 균질(homogeneous)매질 개념의 대표수리전도도로 설정된다. REV 개념에 의한 대표수리전도도를 산출하기 위해 시험공 K-1에서 규모 증가에 따르는 수리전도도의 변화를 분석하였다. 연구지역 K-1공에서의 분석은 그림6에서와 같으며 산술평균값을 적용한 경우 수리전도도값이 규모 증가에 따라 수렴하지 않고 있으며 조화평균 값을 적용한 대표요소체적 규모는 약50m 로서 이 규모에서의 대표수리전도도는 $4\ 5\times10^{-9}$m/s 값을 갖는 것으로 분석된다.

5.2 추계적 연속체이론에 의한 유효수리전도도

REV규모 보다 큰 규모의 불균질성(heterogeneous)매질의 투수성을 대표 할 수 있는 수리전도도를 유효수리전도도로 정의한다. 매질의 투수계수 log conductivity(ln K)의 확률밀도분포가 Gaussian에 따르면 추계적 연속체(stochastic continnum)이론에 따르는 유효수리전도도는 (2)식과 같은 정규확률밀도분포의 평균값(mean value)과 variance의 관계함수로 표현되고(Gutjahr. 1978) 이 때의 평균값을 기하평균(geometric mean)수리전도도라 한다.

$$K_{eff} = K_G[1 + (\frac{1}{2} - \frac{1}{n})\sigma^2] \qquad (2)\text{식}$$

K_{eff} ; effective hydraulic conductivity
K_G ; mean hydraulic conductivity (geometric mean)
σ^2 ; variance
n ; flow dimension

연구지역 유효수리전도도를 산출하기 위해 도시된 시험공 구간별 ln K 값에 대한 정규확률밀도분포는 그림7과 같다. 이 분포함수에 의해 계산된 평균값 수리전도도는 5×10^{-9}m/s 이며 이 값은 상기 REV 개념에 의한 조화평균값 수리전도도와 과 일치하고 있다.

5.3 이방성 수리전도도

이방성 수리전도도는 지하수유동 특성 평가에 중요한 요소이나 현실적으로 현장 시험을 통해 이를 측정하는 것이 불가능한 실정이다. 본 연구에서는 단열망모델 해석 프로그램 NAPSAC을 이용하여 유한평면의 추계적 3차원 단열망에서의 수리전도도 텐서를 계산하고 이로부터 이방성을 분석평가 하였다.

NAPSAC에서 요구되는 입력파라메터는 단열의 방향성, 길이 간격, 틈 크기와 수리전도도이고 이들 파라메터는 확률분포함수, 평균값, 표준편차 값으로 입력되어 단열망을 모사하고

이 단열망을 통한 지하수 이동이 계산된다. 입력파라메터는 공내 단열조사와 수압시험 자료 그리고 연구지역 노출암석에서 조사선방법으로 측정된 단열자료를 이용하였다.

REV규모로 설정된 50m 규모 block에서 형성된 단열수는 약 7000개이고 3차원으로 모사된 단열망은 그림8 에서 보여주고있다. 이 규모의 영역에서 계산된 수평, 수직성분 방향의 수리전도도는 각각 $6x10^{-9}$m/s, $9x10^{-9}$m/s, $1.2x10^{-8}$ m/s이다. 수직성분의 수리전도도가 수평방향 수리전도도에 비하여 다소 큰 값을 가지나 각 성분방향의 수리전도도의 뚜렸한 차이를 보이지 않는 비교적 등방성 매질로 평가된다. 이 같은 이유는 대상 암반에서 N40° W 방향성의 저경사 단열조와 N7° W 및 N21° E 방향성의 고경사 단열조가 발달하는 단열 분포 특성과 REV규모로 설정된 해석 대상영역의 균질화에 따른 효과 때문인 것으로 분석된다.

6. 결론

결정질 단열암반인 응회암을 대상으로 초음파 주사검층 기법을 이용한 BHTV 단열조사와 수압시험을 시행하고 투수성을 평가하였다.

BHTV조사로서 현 위치(in situ)에서의 단열조사가 가능했으며 총 303개 단열의 분포위치, 방향성, 경사각 틈의 크기가 측정되었다. 측정된 단열중 12% 만이 개구성 단열로 파악되었으며 기타 단열들은 방해석과 같은 침전광물로 충전되어있다. 이로서 암반내 분포하는 단열 중에서도 일부의 단열만이 지하수 유동통로로서의 역할을 하는 것으로 확인되고 있다 . BHTV조사에 의한 단열 틈 크기는 해석상 실제보다 크게 계산될 수있다. 틈의 크기는 삼승법칙이 적용되는 단열 지하수유동 평가에 가장 중요한 인자이므로 이의 정확한 자료취득을 위한 조사방법의 지속적 기술개발 요구된다.

수리지질학적 단위층의 대표수리전도도로서 다층구조 개념에 의한 평균값은 퇴적암과 같이 단위층 구별이 비교적 용이한 암반에는 적용에 문제가 없으나, 응회암 또는 화강암과 같이 단일암석으로 구성된 단위층에서는 확률통계해석 이론에 의한 평균값으로서 대표수리전도도 값을 결정하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

단열망 모델 해석에 의한 투수계수 텐서분석은 이방성을 평가 할 수 있는 방법으로 제시될 수있다. 단열의 형상이 비교적 단순하며 3개의 단열조에 의해 6면체를 이루는 응회암에서는 방향별 수리전도도의 차이가 적은 등방성 매질로 평가된다.

참고 문헌

김경수, 김천수, 배대석, 고용권, 박병윤(1999a) : Televiewer를 이용한 암반 단열분포특성 해석 기술, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1368/99. pp.49.

김경수, 이은용, 김천수(1999b) : 여수반도 북동부지역의 선상구조와 단열계 분포특성, 지질공학회지, Vol.9, No.1, p.31-43.

원자력환경기술원(1998) : 低準位放射物處分長 水理모델 構成技法 硏究, TM.98NJ21.M1998.1, pp.280.

한국원자력연구소, 한국자원연구소(1998) : Aperture Size Analysis(AperSa) program.

Almén, K. E., Andersson, J. E., Carlsson, L., Hansson, K., & Lasson, N. A.(1986) : Hydraulic testing in crysalline rock. A comparative study of single-hole test methods, SKB Technical Report, 86-27, Stockholm.

Andersson, J. E. and Persson, O.(1985) : Evaluation of single-hole hydraulic tests in fractured crystalline rock by steady-state and transient methods, SKB Technical Report, 85-95, Stockholm.

Dershowitz, W. S., and Einstein, H. H.(1988) : Characterizing of rock joint geometry with joint system models, Rock Mech. and Rock Eng., Vol.21, p.21-51.

Hubbert, M. K.(1940) : The theory of groundwater motion, J. Geol., Vol.48, pp.785-944.

Moye, D. G.(1967) : Drilling for Foundation Exploration, Civil Engineering Transactions, pp.95-100.

Priest, S. D.(1993) : Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall. p.473

Terzaghi, R.(1965) : Sources of error in joint surveys, Geotechnique, Vol. 15, p.287-304.

Ziegler, T.(1976) : Determination of rock mass permeability, US Army Engineers Waterways Experiments Station, Technical Report S-76-2, Vicksburg, Mississippi, pp.88.

Lynn W. Gelhar (1983) : Three-Dimensional Stachastic Analysis of Marcrodispersion in Aquifers, Water Resources Research, Vol. 19, p161-180

Allan L. Gutjahr (1978) ; Sochastic Analysis of Spacial Variability in Subsurface Flows Water Resources Research, Vol. 14, No.2 p263-271 , No.5, p953-959

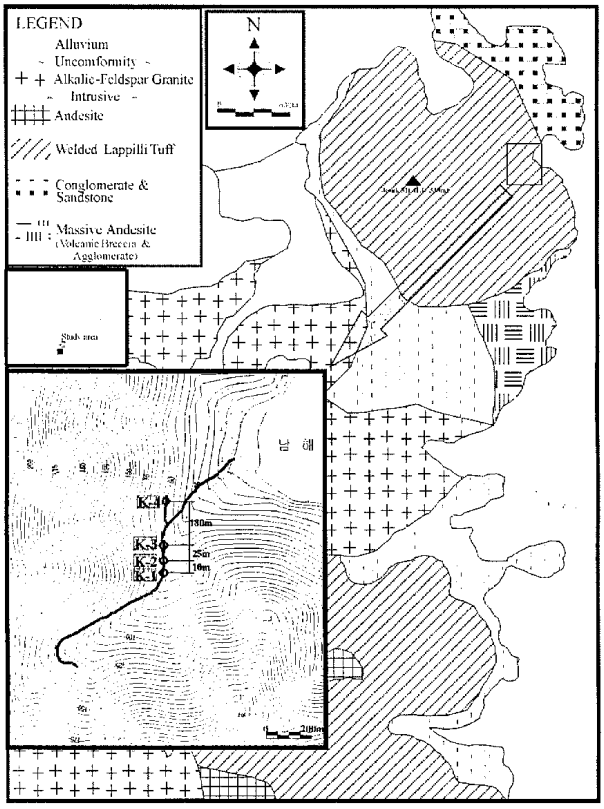
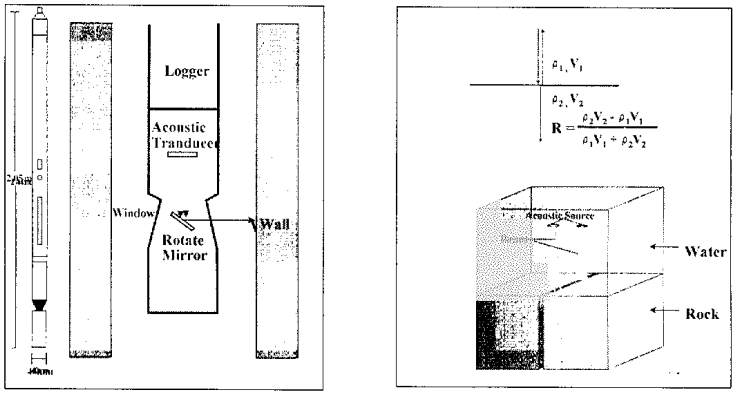


그림1. 연구지역 지질분포와 시추위치



(a) Projection of the acoustic beams encircling the borehole wall.

(b) Change in acoustic energy after reflection from interface.

그림2. 텔레뷰어조사 원리

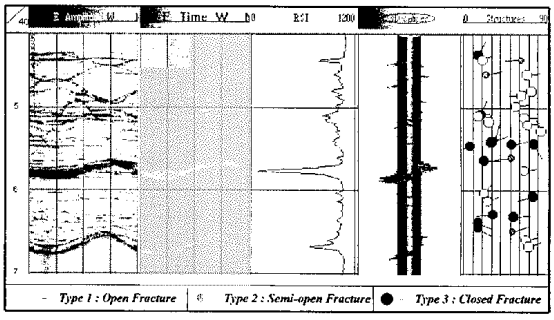
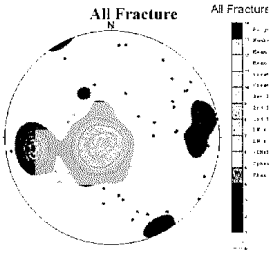
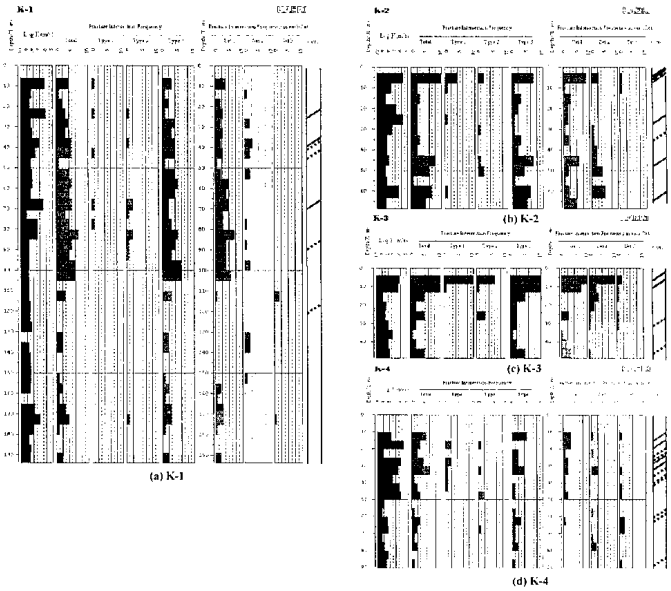


그림3. 텔레뷰어조사에 의한 단열형상 예



(a)

그림4. 단열의 방향성 분포



(a) K-1 (b) K-2 (c) K-3 (d) K-4

그림5. 시추공 구간별 수리전도도와 단열틈크기 및 교차빈도

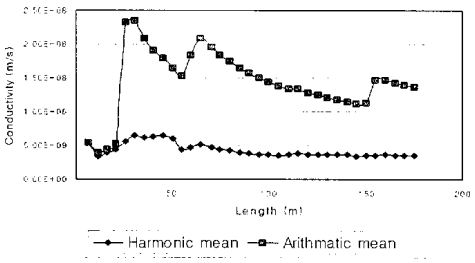


그림6. K-1시추공 규모(구간) 증가에 따른 평균수리전도도 변화

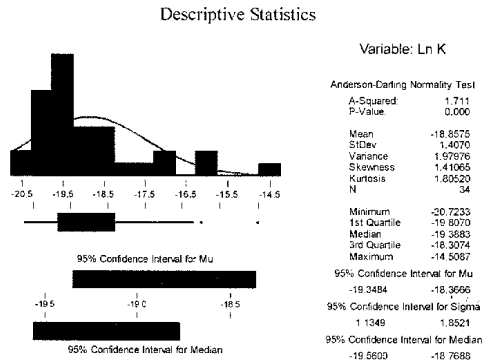


그림7. 수리전도도 확률밀도분포

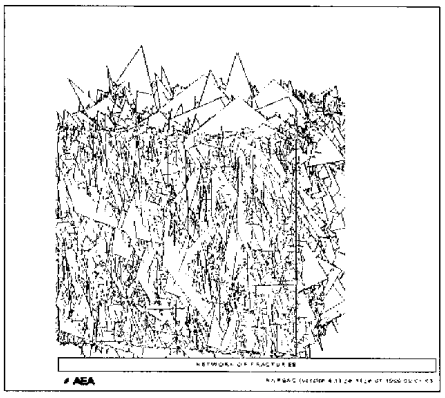


그림8. NAPSAC을 이용한 50m 암반규모의 단열망 모사결과