

## A Study on the Constructing Discrete Fracture Network in Fractured-Porous Medium with Rectangular Grid

사각 격자를 이용한 단열-다공암반내 분리 단열망 구축기법에 대한 연구

Ji-Woong Han, Yong-Soo Hwang and Chul-Hyung Kang

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

[jwihan@kaeri.re.kr](mailto:jwihan@kaeri.re.kr)

한지웅, 황용수, 강철형

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received August 18, 2005 / Approved November 22, 2005)

### Abstract

For the accurate safety assessment of potential radioactive waste disposal site which is located in the crystalline rock it is important to simulate the mass transportation through engineered and natural barrier system precisely, characterized by porous and fractured media respectively. In this work the methods to construct discrete fracture network for the analysis of flow and mass transport through fractured-porous medium are described. The probability density function is adopted in generating fracture properties for the realistic representation of real fractured rock. In order to investigate the intersection between a porous and a fractured medium described by a 2 dimensional rectangular and a cuboid grid respectively, an additional imaginary fracture is adopted at the face of a porous medium intersected by a fracture. In order to construct large scale flow paths an effective method to find interconnected fractures and algorithms of swift detecting connectivities between fractures or porous medium and fractures are proposed. These methods are expected to contribute to the development of numerical program for the simulation of radioactive nuclide transport through fractured-porous medium from radioactive waste disposal site.

**Key Words** : Discrete Fracture Network, Fractured-Porous Medium, Fracture Intersection, Connectivity

### 요 약

결정질 암반에 위치한 가상의 방사성폐기물처분장에 대한 정확한 안전성 평가를 수행하기

위해서는 다공암반으로 대표되는 공학방벽 및 결정질 암반으로 대표되는 자연방벽을 모두 고려한 매질에서의 물질 거동 특성을 정확하게 모사하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 단일-다공암반내 유동 및 물질전달의 정확한 해석을 위한 연결망 구축방법에 대하여 서술하였다. 실제 단일암반을 사실적으로 모사하기 위하여 단일 물성자료는 확률밀도함수를 이용하여 생성하였다. 2차원의 사각격자로 모사된 단일암반과 육면체로 모사된 다공암반간 교차선의 원활한 검색을 위하여 단일암반과 연결된 다공암반의 교차면에 가상의 단일암반을 추가적으로 도입하였다. 전체 유동경로를 구성하기 위하여 생성된 단일들 간의 교차선을 효율적으로 검색할 수 있는 방법 및 단일암반 및 단일-다공암반간의 연결도를 신속히 확인하는 알고리즘을 제안하였다. 이러한 방법들은 추후 방사성폐기물처분장에서 단일-다공 암반을 통한 핵종 이동 특성을 모사할 수 있는 수치코드 개발에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

**중심단어:** 분리단열망, 단일-다공암반, 단일교차, 연결도

## 1. 서론

전 세계적으로 방사성 폐기물 처분시설에 대한 안전성 평가의 필요성이 증대되면서, 처분시설로부터 유출된 핵종의 거동 및 영향을 모사하기 위한 다양한 안전성 평가 기법[1-7]이 이용되고 있다. 이러한 평가 기법은 국가별로 상이한 부지특성, 지질환경조건 등을 상세히 모사할 수 있도록 개발되어야 한다. 국내 암반의 경우 표토층은 다공질 암반, 심부지하는 결정질 암반으로 구성되어 있다[8]. 따라서 만일 부득이한 상황에 의해 처분장으로부터 방사성핵종이 유출될 경우 방사성핵종은 처분용기 주변의 벤토나이트 및 숏크리트로 구성된 공학적 방벽을 거쳐 지하 심부 결정질 암반을 통하여 이동한 후 지표면의 표토층을 통과하여 최종적으로 생태계에 이르게 된다. 공학적 방벽을 구성하고 있는 벤토나이트 및 숏크리트, 그리고 지표면을 구성하고 있는 표토층은 다공암반이며, 지하심부는 화강암반으로 대표되는 단일 암반이다. 따라서 방사성 폐기물 처분장의 안전성에 대한 정확한 평가를 위해서는 불가피하게 유출된 방사성 핵종을 대상으로 단일암반과 다공암반에서의 이동경로 및 유출시간에 대한 정확한 모델링 및 예측이 필요하다.

그러나, 기존의 안전성 평가 방법은 주로 1차원 확률론적 안전성 평가(Probability Safety Assessment, PSA)가 주류를 이루었다[3]. 또한 다차원 평가의 경

우 대부분 단일암반을 조밀한 상호연결이 충분히 많다는 가정하에 그에 상응하는 수력학적 인자를 갖는 다공암반으로 가정하여 모사함으로써 단일망을 통한 상세 유동 및 물질 전달 현상을 정확히 모사하는 데에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 최근에는 암반을 구성하고 있는 각 단일들의 특성을 자세히 반영할 수 있는 분리단열 모델을 이용하여 개별 단일들을 통한 유동 및 물질 전달 특성을 대해 명확하게 분석할 수 있는 다차원 수치해석 코드들이 개발되고 있다. 특히 CONNECTFLOW[9]와 같은 일부 상용수치해석코드들은 분리단열망과 다공암반이 공존하는 암반에서의 방사성 핵종 이동의 모사가 가능하여 다공암반으로 구성된 공학방벽 및 단일 암반으로 구성된 자연방벽으로 이루어진 국내 처분장의 지리적 특성을 모사하는데 적합하다. 그렇지만, 이러한 상용 코드는 단일암반과 다공암반에서의 반복계산을 통하여 해를 수렴시키는 방법을 이용함으로써 다량의 계산용량이 필요하며, 이러한 계산용량은 평가대상지역의 범위에 비례하여 급격히 증가한다. 또한 상용코드의 특성상 코드의 일부를 수정, 보완하여 국내 처분장 환경 및 폐기물 특성에 최적화하는 것에도 한계가 있다.

본 연구진은 전술한 기존 방법들의 한계를 극복하기 위하여 다차원 확률론적 안전성평가(Multi-Dimensional Probability Safety Assessment,

MDPSA) 코드를 개발중에 있다. MDPSA 코드는 평가대상지역의 광역화에 따른 계산용량의 급격한 증가부담을 피할 수 있도록 유동저항(flow resistance) 개념을 기반으로 하였으며, 분리 단열 개념을 이용한 단열 모사 및 단열-다공압반이 혼재하는 국내 처분장의 지질학적 특성을 동시에 모사할 수 있도록 개발되고 있다. 이를 위해서는 우선적으로 동종(다공 혹은 단열)압반 및 이종(단열-다공)압반간 연결면에서의 유동저항을 산출해야하며, 이러한 유동저항의 정확한 산출을 위해서는 3차원적으로 분포되어 있는 다양한 압반들 사이의 연결체계 파악이 선행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 MDPSA 코드의 전체 계산 과정을 소개하고, 단열-다공압반내 단열망을 사실적으로 구축하기 위해 필요한 단열 생성 방법 및 향후 유동저항을 산출하기 위해 선결되어야 할 다공압반과 단열압반, 혹은 복수의 단열압반간의 교차선 검색 방법 및 광역 단열망 구축기법에 대하여 설명하고자 한다.

## II. 본론

### 가. MDPSA 코드의 전체 계산 과정

유한체적법에 기반을 둔 MDPSA 코드의 전체적인 계산과정은 Fig. 1과 같다. 설정된 계산영역을 대상으로 다수의 부영역으로 분할한 후 각 부영역마다 압반특성을 정의한다. 여기서 압반은 각각 비활성압반, 다공압반, 그리고 단열압반중 하나로 정의되며, 비활성 압반은 지표지형을 모사하는데 이용된다. 또한 단열 압반영역의 경우 실제 단열의 특성을 잘 모사할 수 있도록 Fig. 1의 점선부분으로 표시된 별도의 과정을 통해 단열망이 구성된다. 이러한 방법으로 각 부영역별 특성 및 물성값이 결정되면 부영역별 유동저항을 산출하고, 적합한 경계조건을 도입하여 개별 부영역을 재결합하여 통합한다. 재결합된 전체 계산영역을 대상으로 지하수 및 핵종이동 계산을 수행하고 이 결과를 바탕으로 안전성 평가를 수행한다. 따라서 실제 지형의 특성을 보다 사실적으로 모사하는 과정은 정확한 안전성 평가를 위한 기초 과정인 동시에 중요한 과정이다. 특히 핵종이동은 다공압반에서

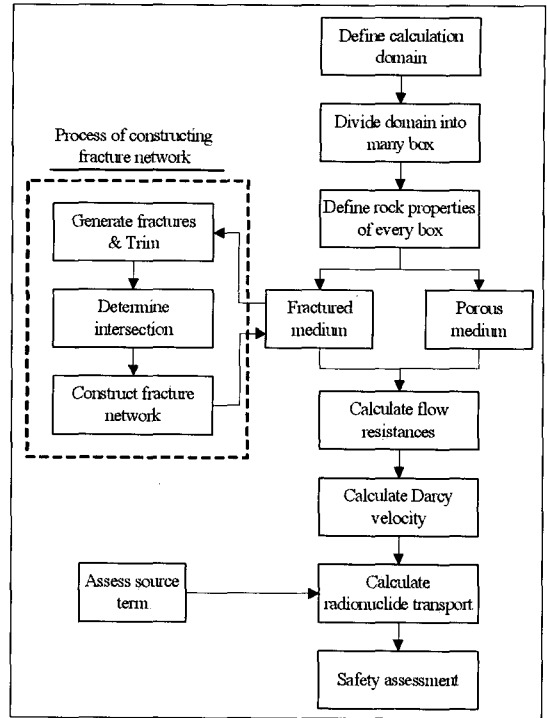


Fig. 1. Overall process of MDPSA

는 매우 서서히, 단열압반에서는 단열망을 통하여 매우 빠르게 진행되므로, 단열-다공 압반이 공존하는 압반특성을 함께 고려할 수 있으면서도 복잡하게 얽혀있는 압반간 상호연결 관계를 효과적으로 정확히 모사할 수 있는 수치기법의 개발이 필수적이다. 이러한 연결관계를 구성하기 위한 과정은 Fig. 1의 점선 부분으로 표시된 것과 같이 각각 단열 생성, 교차선 결정 및 교차선간 연결도 확인 과정으로 세분할 수 있다.

### 나. Discrete fracture network 구축

#### ① 단열 생성 및 계산영역 정리

본 계산에서 2차원의 사각격자로 모사된 개개의 단열은 크기, 주향, 경사, 간극 등의 여러 가지 물성값에 의해 정의된다. 또한 각각의 물성값들은 생성기원, 압반 특성 등에 따라 매우 다양한 분포 특성을 갖는다. 이러한 다양한 분포 특성들을 모사하기 위하여 통계적인 확률분포함수를 이용하였으며, 이들 물성값들이 종합되어 하나의 단열이 결정된다. 표 1에 단열 생성에 필요한 물성값 및 이들 물성값에 대한 확

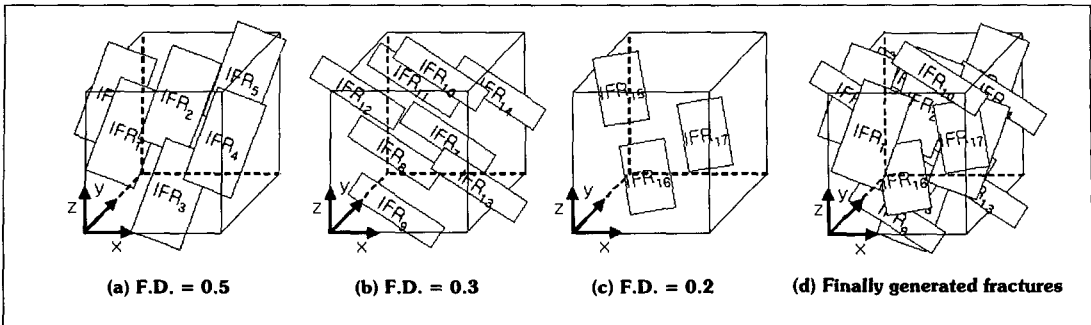


Fig. 2 Independently generated stochastic fracture sets and finally combined fractures

클론적 분포를 산출할 수 있는 확률밀도함수들을 정리하였다. 이러한 경우 전체 단열망은 일정한 분포 특성을 갖는 단열들로 정의되는 단열군의 집합체로서 확장하여 모사될 수 있다. 즉, 각 단열군을 대상으로 단위 체적내에 존재하는 단열면적으로 정의되는 단열 밀도(Fracture Density, F.D.)를 결정하면 Fig. 2와 같이 각각 다른 특성의 물성값을 갖는 단열군의 조합으로 최종적으로 구현하고자 하는 단열망을 구성할 수 있다. 최종적으로 생성된 단열망중 일부는 Fig. 2(d)에 도시된 바와 같이 계산영역을 벗어나게 된다. 이들에 대해서는 Fig. 3과 같은 부단열 개념을 도입하여 각 부단열의 중심좌표가 전체 계산영역을 벗어나는 경우엔 관련 부단열을 계산대상에서 제외하였다.

② 복수개의 단열암반 혹은 단열-다공암반간 교차선 검색

지하수가 단열암반 혹은 단열-다공암반을 통해 흐르기 위해서는 생성된 여러 단열들 및 다공암반이 상호간에 충분히 연결되어 거시적인 유동경로가 구성

되어야 한다. 그러한 유동경로의 존재여부는 단열망을 구성하고 있는 복수개의 단열암반 혹은 단열-다공암반간의 교차 특성에 의해 결정된다. 즉 단열들에 대한 통계 입력자료에 따라 단열-다공암반내 광역 유동경로가 구성될 수도 있고, 단지 국부적으로 고립된 유동 경로만이 구성될 수도 있다. 물론 계산 영역내의 단열 개수가 증가할수록 광역의 경로가 형성될 가능성도 증가한다. 따라서 전체 유동경로를 구성하기 위해서 우선 단열들간 혹은 다공암반과 단열들간의 교차선을 검색해야 하며, 이들 교차선의 연결도에 대한 확인 및 기록 과정도 필요하다.

기존에도 이러한 2차원 단열암반간의 연결망 구성 기법에 대한 연구는 타원형 단열 혹은 사각형 단열을 이용하여 수행된 바 있다(10, 11, 12). 그렇지만, 본 연구에서는 단열암반간의 연결뿐만 아니라 단열암반과 다공암반의 연결을 동시에 고려할 수 있는 방법이 제안되었다. 즉 유한체적법에 기초한 수치해석코드에서 단열암반을 사각격자로 모사하는 경우 다공암반은 육면체로, 단열암반은 2차원의 사각 격자로 표현된다. 이때 단열암반과 교차하는 다공암반의 교차

Table. 1 Various PDF(Probability density Function)s for fracture properties

Properties	Probability Density Function
size, aspect ratio, strike, dip, rotation, transmissivity, permeability, rock density, flow porosity, fracture aperture	constant distribution
	uniform distribution
	log distribution
	triangular distribution
	log triangular distribution
	normal distribution
	log normal distribution

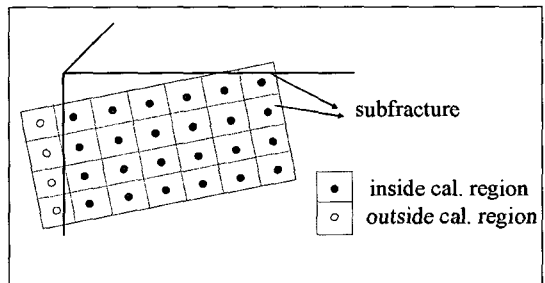


Fig. 3 Process of trimming

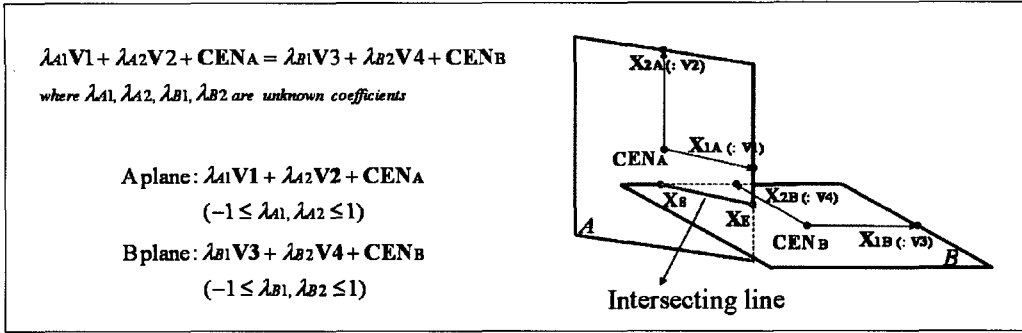


Fig. 4 Details of fracture intersection

면에는 추가적으로 교차면과 일치하는 동일한 크기의 가상의 사각 단열압반을 정의할 수 있다. 이러한 방법을 적용하면 단열압반간의 교차면 검색 뿐만 아니라 단열압반과 다공압반의 교차면 검색에서도 기존의 단열망 검색방법을 이용할 수 있다.

이렇게 교차하는 한 쌍의 단열들마다 그 교차여부를 판단하는 것은 어려운 일이 아니다. 그러나, 전체 단열들을 대상으로 일일이 그 교차 여부를 확인하는 것은 매우 비효율적인 방법이다. 따라서 불필요한 검색 회수를 감소시키기 위한 알고리즘이 고안되었다. 우선, 직각 격자로 구획된 계산영역을 기준으로 각 격자 블록을 통과하는 단열군들의 목록을 작성한다. 이러한 단열군 목록이 전 격자 블록에 대하여 작성되면, 각 격자 블록마다 소속 단열군을 상호 비교하여 교차선을 검색한다. 교차선 검색 방법을 설명하기 위하여 Fig. 4 에 교차하고 있는 두 개의 단열(A, B) 및 교차선( $X_G, X_F$ )을 도시하였다. 2차원의 평면으로 묘사된 단열 위의 좌표는 단열의 종축 및 횡축 방향에 평행하고 길이가 각 방향 축의 1/2인 2개의 방향벡터 ( $V1, V2, V3, V4$ ) 및 중심좌표( $CENA, CENB$ )를 이용하여 표현될 수 있다. 교차선은 두 평면의 공통부분을 의미하며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 단열중심좌표 및 각 방향벡터는 단열이 생성됨과 동시에 결정되며,  $\lambda_{A1}, \lambda_{A2}, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}$ 는 절대값이 1보다 작은 미지수이다. 교차선을 표시하는 벡터 형태의 방정식을 방향 성분별로 분리한 후 각 미지수에 대해 정리하면, 각 미지수는 기지의 벡터들로 표현될 수 있다. 이때 R 행렬을 구성하는 세 개의 방향벡터는 서로 독립이어야 한다. 만일 독립이 아닐 경우엔 R

행렬의 구성 벡터를 변환하여 서로 독립이 되도록 재구성해야 한다. 이 경우 세 개의 미지수는 다시 하나의 미지수  $\lambda_{B2}$ 로 표현될 수 있다. 여기서 모든 미지수의 절대값이 1보다 작다는 초기 조건을 적용하면, Fig. 5와 같이 네 조건을 모두 만족시키는  $\lambda_{B2}$ 의 최소값과 최대값을 결정할 수 있다. 만일 모든 조건을 만

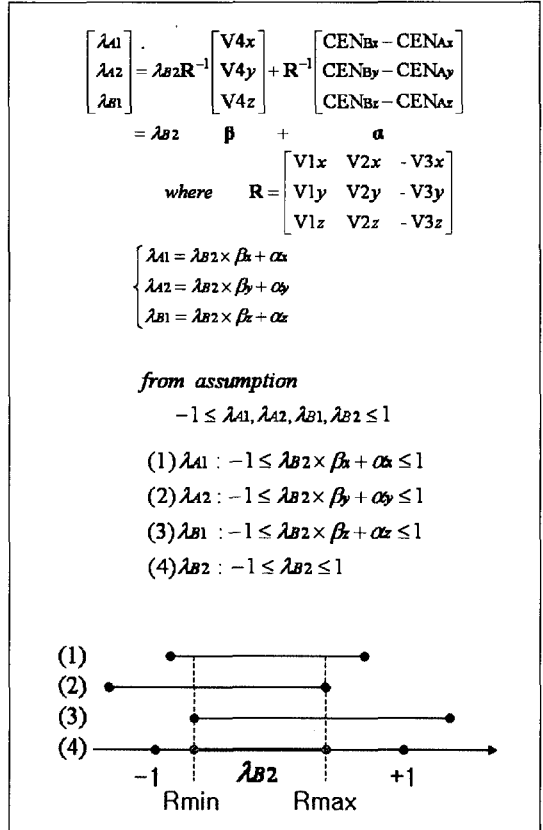


Fig. 5 Available range of  $\lambda_{B2}$

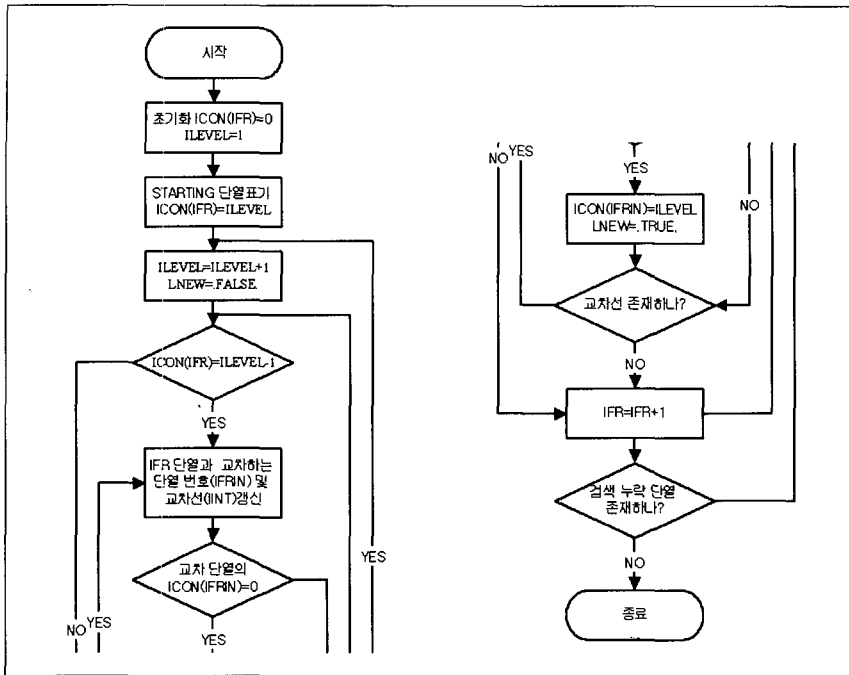


Fig. 6 Flowchart of constructing fracture network

족시키는  $\lambda_{b2}$ 가 존재하지 않는다면, 두 단열은 교차하지 않는 것이다. 이것으로부터 최종적으로 두 단열간의 교차선에 대한 시점과 종점을 결정한다. 이때 각 교차선을 형성하는 단열쌍의 정보를 교차선에 대한 상세 정보와 함께 기록하면 단열간의 교차선 목록에 대한 상세정보가 구축된다. 이들 단열 목록을 기초로 교차선이 존재하는 부단열을 검색한 후 동일한 방법을 적용하면 최종적으로 교차선이 존재하는 부단열의 목록 및 관련 상세정보도 구축할 수 있다.

③ 단열-다공암반내 단열망 구축

단열-다공암반내 단열망에 의한 전체 유동경로를 구성하기 위해서 전술한 과정을 통하여 생성된 교차선 목록 및 관련 단열쌍 정보를 기초로 하여 교차선간의 연결도를 검색하여야 하며 그 방법은 Fig. 6의 흐름도와 같다. 우선 전 단열목록의 연결도 레벨(ICON)를 초기화시킨다. 경계 단열과 교차하는 단열을 시작단열로 기록하고 해당 단열의 연결도 레벨을 기록한 후 레벨을 증가시킨다. 단열목록 중 이전 단계 레벨과 동일한 단열의 교차선 정보 및 단열쌍 정보로부터 이와 연결된 또 다른 새로운 단열의 연결도 레벨을 갱신한다. 이와 같은 방법으로 연결도 레

벨이 갱신되지 않은 단열을 연쇄적으로 검색하면서 교차선이 없는 단열이 검색될 때까지 연결도 레벨 갱신 과정을 반복한다. 이러한 단열 검색 및 연결도 레벨 갱신과정을 전 단열목록을 대상으로 누락된 단열이 없을 때까지 반복수행하면 최종적으로 모든 단열간의 상호 연결 목록이 완성된다. 이들 목록 중 단열망과 교차하는 다공암반면에 위치한 가상의 단열암반에 대한 정보를 다시 해당 다공암반의 정보로 갱신시키면 최종적으로 단열-다공암반에서 단열암반간의 연결도 및 단열암반과 다공암반의 연결도가 완성된다.

III. 결론

단열암반과 다공암반이 공존하는 방사성 폐기물 처분장의 지질학적 특성에 적합한 암반에서의 지하수 및 핵종 이동을 모사할 수 있는 다차원 확률론적 안전성 평가 코드의 개발 배경 및 전체 계산 과정을 소개하였다. 또한 복수개의 단열암반 및 단열-다공암반간 연결망을 효율적으로 구축하기 위해 필요한 단열 생성 방법, 교차선 검색 방법 및 단열-다공 암반내

유동 및 물질전달의 정확한 해석을 위한 연결도 구축 방법에 대하여 설명하였다. 불규칙적으로 다양하게 분포되어 있는 단열암반을 모사하기 위하여 다양한 확률밀도함수를 도입하였다. 단열암반과 교차하는 다공암반에 가상의 단열암반을 추가적으로 정의한 후 격자블록마다 통과하는 단열목록을 작성하는 방법으로 단열-다공암반의 교차선 검색을 가능하게 하였으며, 단열들간의 교차선 검색 시간을 단축하였다. 교차선 상세정보 및 단열쌍 정보를 기초로 상호 연결된 단열들을 순차적으로 검색하면서 각 단열의 연결도 레벨을 갱신시키는 방법을 이용하여 모든 단열간의 상호 연결 목록을 작성하였으며 다공암반의 교차면에 설정된 가상의 단열암반의 정보를 다공암반의 정보로 재갱신시키는 과정을 통하여 최종적으로 단열-다공암반에서의 광역 단열망을 완성시켰다. 본 방법은 추후 방사성폐기물 처분장에서 단열-다공암반을 통한 핵종 이동 특성을 모사할 수 있는 수치코드 개발에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1]C. H. Kang, "Mass Transfer and Transport of Radionuclides through Backfill in Geologic Nuclear Waste Repository," Ph.D. Thesis, U.C. Berkeley, 1989.
- [2]J. E. Sinclair, and P. J. Agg, MASCOT and MOP Programs for Probabilistic Safety Assessment Part A, AEA Technology plc, NNSS/R336, 1995.
- [3]황용수, 이연명, 강철형, "MASCOT-K를 이용한 가상 방사성폐기물 처분장에서의 종합성능 평가," 한국암반공학회, Vol.10, pp.553-558, 2000.
- [4]황용수, 서은진, 강철형, "모의 저준위 방사성폐기물 동굴 지하수 유동 평가," 한국방사성폐기물 학회 춘계 학술 발표회, Vol.2, No.1, pp.212-218, 2004.
- [5]Serco Assurance, CONNECTFLOW Release 8.1 Technical Summary Document, SERCO/ERRA-C/TSD02V1, 2004.
- [6]Y. M. Lee, Y. S. Hwang, S. G. Kim and C. H. Kang, "A Control Volume Scheme for Three-Dimensional Transport : Buffer and Matrix Effects on a Decay Chain Transport in the Repository," Journal of the Korean Nuclear Society, Vol.34, No.3, pp.218-231, 2002.
- [7]Y. C. Park and K. K. Lee, "Simulation of Groundwater Flow in Fractured Porous Media using a Discrete Fracture Model," Econ. Environ. Geol., Vol. 28, No. 5, pp.503-512, 1995.
- [8]C. H. Kang, J. E. Ku, S. G. Kim, S. S. Kim, J. W. Kim, J. W. Park, Y. M. Lee, J. W. Lee, G. S. Jeon, W. J. Cho, J. W. Choi, Y. S. Hwang, and S. K. Kwon, "Geological Disposal System Development," KAERI/RR-2013/1999, Korea Atomic Energy Research Institute, 1999.
- [9]L. J. Hartley and D. Holton, "CONNECTFLOW (Release 2.0) Technical Summary Document," SERCO/ERRA-C/TSD02v1, 2003.
- [10]P. C. Robinson, "Connectivity, Flow and Transport in Network Models of Fractured Media," Ph.D. thesis, Oxford University, 1984.
- [11]W. S. Dershowitz and H. H. Einstein, "Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models," Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 21, pp.21-51., 1988.
- [12]M. Sahimi, Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock ; from Classical Methods to Modern Approaches, Weinheim, Germany : VCH, p.141., 1995.