

TOUGH2 전산코드의 MINC 기법을 이용한 불포화 암반 내 단열 해석 방법론 개발

하재철* · 정재열 · 김수진 · 윤정현

한국원자력환경공단

Development of Methodology for Fracture Network Analysis in the Unsaturated Zone using MINC Approach in TOUGH2 Code

Jaechul Ha*, Jae-yeol Cheong, Soogin Kim, Jeonghyoun Yoon

Korea Radioactive Waste Agency (KORAD)

Received 18 July 2016; received in revised form 30 August 2016; accepted 2 September 2016

현재 경주 중저준위방사성폐기물 처분장(이하 '경주방폐장')에서는 2단계 표층처분시설이 계획중에 있으며, 포화대에 위치한 1단계 처분시설과는 달리 불포화대 상부에 위치하게 된다. 단열을 포함하는 불포화대의 특성상 지하수 및 용질의 대부분이 단열을 통해 이동할 것으로 예상된다. 따라서 불포화 암반 매질에 대한 정밀한 해석을 위하여 단열망 연속체와 암반 매질 연속체를 구분하여 해석하는 TOUGH2 전산코드의 meshmaker 모듈의 MINC 기법을 활용하였다. TOUGH2 MINC 기법의 기존 국내 연구 사례가 미미하여 본 연구에서는 MINC를 이용한 mesh 구성 방법에 대한 절차를 개발하였으며, 단열 연속체와 암반매질 연속체의 k-field를 생성하였다. 이와 같이 생성된 도메인은 향후 이중 연속체를 기반으로 경주방폐장의 지하수 유동 및 오염물질 이동 등에 활용될 뿐만 아니라 단열이 발달한 암반에서 단열-암반매질 연결성을 고려한 단열망 유동 특성을 분석하는데 참고가 될 것으로 기대한다.

주제어: 이중공극, 단열망, 개구성 단열, 경주방폐장, TOUGH2 모델링

The second phase of low- and intermediate-level waste (LILW) disposal facility is under planned on the sedimentary rock in unsaturated zone. In this study, we created two meshes which were a matrix continuum mesh and a fracture continuum mesh to carry out 2 dimensional numerical modeling for groundwater flow in the unsaturated zone containing fractures focused on the second phase of LILW disposal facility. Two continuum meshes were developed using MINC in meshmaker module of TOUGH2 code. A fracture continuum mesh was included the k-field distribution of the permeability derived from the Discrete Fractured Network (DFN) modeling. To apply the unsaturated zone for the modeling, the gridding steps to generate mesh were developed. Each step to generate a mesh consisted of definition of materials, setting the initial conditions and creating grids using MINC. The methodology development of meshes in this study will be applied for more precise modeling of groundwater flow and mass transport.

Key words: double-porosity, fracture network, open fracture, TOUGH2 modeling, MINC

*Corresponding author:

© 2016, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

토양을 포함한 지표 불포화대 및 지하수대가 위치한 포화대에서의 지하수 이동에 대한 연구는 활발히 진행 되어왔다. 특히, 지열과 관련된 지열 저류암에서의 열-수리-역학(Thermal -Hydrological-Mechanic, THM) 해석(Shihao Wang et al, 2014) 및 지층 내 CO₂와 세일가스를 포함한 지질환경에서의 열, 유체의 흐름은 지속적으로 연구가 이루어 졌다(Dario Hernandezl et al, 2015; George J. Moridis, Craig M. Freeman, 2014). 하지만 토양과 지하수대 사이에 존재하는 불포화암반에 대한 해석 및 타당한 접근은 불포화암반의 매질 특성 및 단열의 존재로 인한 불확실성으로 상대적으로 어려운 연구대상으로 고려되었다. 본 연구에서 고려한 대상은 경주 중저준위 방사성폐기물 처분장(경주방폐장)이 위치한 전체 부지내에서 특히, 불확실성을 내포하고 있는 불포화 암반 위에 건설예정인 표층처분시설 부지를 대상으로 한다(KRMC, 2008). 지하수 유동 특성 해석을 위하여 불포화 조건의 유체 이동 해석이 가능한 TOUGH2 (Transport of Unsaturated zone Groundwater flow and Heat) 전산코드를 이용한 불포화 암반 해석 모델 방법론에 대하여 제시하였다(Pruess, Oldenburg, and Moridis, 1999). 특히, 이중공극(double -porosity) 개념을 이용하여 단열을 통한 거시적인 이동뿐만 아니라 방사성폐기물의 저장능과 관계된 단열-암반매질 사이의 상호 물질 교환의 개념을 적용한 미시적 유체의 유동 또한 고려하고자 하였다(Pruess, 1983).

전산코드

단열이 발달한 불포화 암반내에서 지하수 유동을 모사하기 위한 다양한 방법들이 존재하고 있다(Hinds, 2001). 본 연구에서는 다공성 연속체 모델로써 매질을 고려하였다. 특히 경주방폐장과 같이 기반암반에 단열이 발달한 환경에서는 연속체 모델로 암반매질을 고려할 때 mesh 구성을 단일 연속체(single-continuum)로 고려할 것인지, 다중 연속체(multi-continuum)로 고려할 것인지에 따라 결과의 차이가 발생할 수 있다. 암반 내부에서 발달한 단열들로 이루어진 불포화 암반의 전체 시스템을 단일연속체로 고려하는 것보다는 단열 연속체와 암반매질 연속체라는 이중 연속체 구조로 고려하여 유동 해석을 하는 것이 타당해 보인다.

낮은 투과성의 암반매질은 단열 사이에 존재하며, 단열과 상호연결이 되어 있다. 거시적인 유체의 흐름은 유효공극 연속체로 구성된 단열망을 통해서만 이루어지고 암반매질과 단열사이의 유동 흐름은 양 매질사이의 압력 차이에 의한 흐름으로 지엽적인 상호 교환이 이루어진다. 이러한 상호 유동흐름은 암반매질과 단열사이의 평균압력 차이에 비례하게 발생한다. 이러한 개념은 압력 확산율과 낮은 압축률을 가

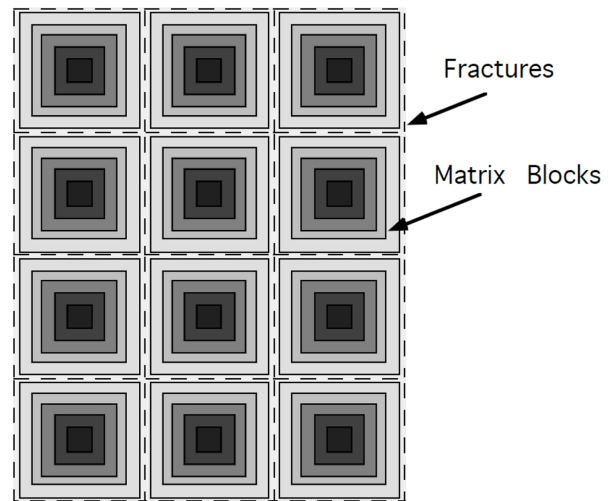


Fig. 1. Subgridding in the method of (MINC) (Pruess, Oldenburg, and Moridis, 1999).

지는 등은·단상(isothermal single-phase)의 유체 흐름에 적용할 수 있으며, 단열내 압력이 암반 매질내로의 빠른 침투를 가능하게 해준다. 그러나 다상 유체나 열과 유체가 결합된 조건의 유동 해석에는 상대적으로 오랜시간이 걸린다. 이와 같은 대상의 유동흐름 해석을 위해서는 압력, 온도, 질량 분율 변화 등을 풀어내는 작업이 필요하다. 이를 위하여 MINC (Multiple Interacting Continua) 기법이 고안되었으며, Fig. 1과 같이 암반 매질을 다시 분할하여 문제를 해결하였다(Pruess, 1983).

MINC 개념은 생성, 주입된 소스가 상대적으로 침투가 느린 암반매질이 아닌 단열망을 통하여 빠른 전파가 이루어져 유체의 압력, 온도, 상 등이 변화하는 것에 기반을 두고 있기 때문에 암반매질에서의 변화는 단열로부터의 거리에 의해 영향을 받는다. 단열에서 암반으로, 암반에서 단열로의 유체 유동은 Fig. 1에서와 같이 일련의 격자들로 이루어진 1D로 구조화할 수 있다. 하지만 일반적으로 모든 암반 매질을 세부 격자로 나눌 필요는 없다.

본 연구에서는 암반매질과 암반매질 사이에 단열이 존재하여 단열과 암반매질 사이에는 물질이동을 고려하는 반면에, 암반매질과 암반매질 사이에는 상호 연결이 없는 이중공극(double -porosity) 모델을 고려하여 적용하였다(Fig. 2) (Pruess, Oldenburg, and Moridis, 1999).

이러한 이중공극 개념은 MINC 방법을 도입하였지만 단열은 단일 구성체로 존재하는 반면에 암반매질 내부를 다시 격자로 구분하지 않고 단일 암반매질 격자로 고려한 방법이다. 단열이 발달된 불포화 암반내에서 지배적인 유동 흐름은 단열망을 통하여 이루어지는 반면에 암반매질 연속체는 유동 흐름이 거의 일어나지 않을 것으로 예상하여 적용한 모델이다. 다만, 단열과 암반매질 사이의 미시적인 연결성과 유동 흐름은 고려를 하였다. 이러한 개념은 중·저준위 방

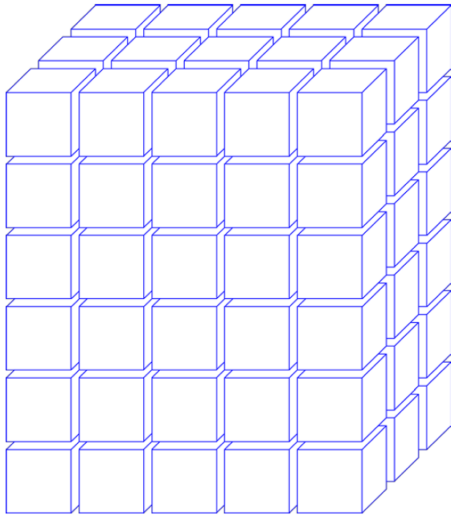


Fig. 2. Idealized double-porosity model (Pruess, Oldenburg, and Moridis, 1999).

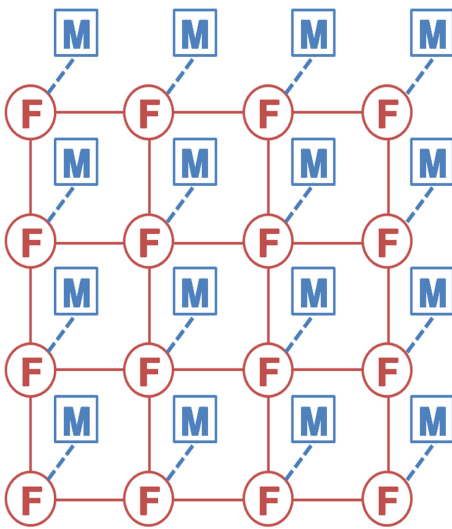


Fig. 3. Flow connections in the double-porosity model.

사성폐기물의 최종처분 후 일정시간 경과 후, 인공방벽을 통과하여 유출된 방사성 핵종의 이동과 관계된다. 지하수 유동과 용질의 이동이 단열을 통해서만 이동하게 되면 MINC 방법의 도입 필요성이 충분하지 않다. 하지만, MINC 기법을 통해서 분석하고자 하는 대상은 단열과 암반매질사이의 물질 상호작용을 통한 용질의 흡착(Sorption), 침전(Precipitation), 공침(Coprecipitation), 희석(Dilution), 여과(Filtration) 등 물리화학적 지연과정이다. 이러한 물질 상호작용 영향을 받게 되고, 지하 환경의 물리화학적 조건들(pH, Eh, 및 이온강도 등)이 변화함에 따라 방사성 핵종의 지하매질 내에서 거동이 달라짐을 고려하고자 하였다(MD Williams et al, 2010). Fig. 3은 단열과 암반매질 사이의 연속체 구성의 개념을 잘 나타내 주고 있다. 단열(F)끼리 연결된 단열망사

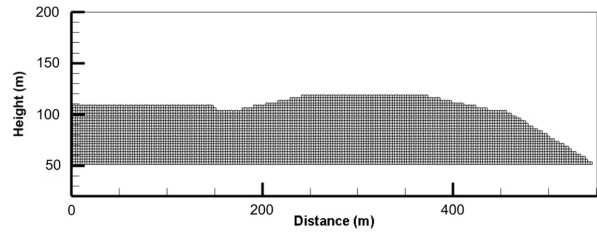


Fig. 4. Grids in modeling domain.

이로 유동이 이루어지고 암반매질(M)은 상호 연결성이 존재하지 않는다. 미시적으로 각 격자에서 F-M의 연결성은 존재하고 있다(Pruess, Oldenburg, and Moridis, 1999).

이와 같이 이중공극 모델을 사용한 의미는 공극망의 연결체인 단열망을 통하여 거시적인 유체의 흐름이 이루어지는 부분을 해석하는 동시에 단일 격자 수준에서 단열과 암반매질사이의 미시적인 물질 상호교환이 이루어지는 상호공극연결성의 부분 또한 해석하고자 하는 것이다.

해석방법

도메인 구성

이중공극 모델을 구성하기 위해서는 최초의 원시 mesh를 생성해야 한다. 이후 동일 위치를 공유하는 단열 mesh와 암반 mesh를 구분 한다. TOUGH2 에서 meshmaker라는 mesh 생성 모듈을 이용하여 Fig. 4와 같은 최초의 mesh를 생성하였다. 본 연구의 도메인 영역은 경주방폐장 2단계 표층처분시설이 위치할 부지의 X-Z 방향으로 절단한 2-dimension 단면을 대상으로 하였고, X축 방향 170 m~430 m 에 존재하는 방사성폐기물이 처분될 처분고와 처분장 운영 후 폐쇄 덮개의 위치를 고려하여 도메인을 구성하였다. 또한 Z-방향으로는 본 연구의 해석 대상인 불포화대-포화대의 접점인 해발고도 50 m 높이까지만 고려를 하였다.

이렇게 구성된 원시 mesh를 이용하여 이중공극 모델 적용을 위해서는 MINC 기법이 추가적으로 필요하다. 원시 mesh에서 생성된 각 격자를 단열매질과 암반매질로 분할하는 절차가 필요한 것이다.

불포화대에 존재하는 단열들의 방향성을 고려하여 단열이 암반 사이에 위치하는 구조적인 “TYPE” 정의를 해야한다. TYPE 정의는 전체 모델링 mesh가 1D, 2D 또는 3D 구조를 가지는 것과는 독립적으로 단열의 방향성만을 고려하여 발달 방향을 정의하는 것이다. 본 연구에서는 경주방폐장의 표층처분시설에 위치한 시추공 4공(2KB1~4)의 BHTV (borehole televiwer) 자료를 분석한 결과, 서로 다른 2세트의 방향성이 우세하게 나타나는 것으로 판단하여, “TWO-D” 타입의 단열 형태를 입력하였다(Fig. 5).

또한, 단일 격자를 공유하는 암반매질과 단열의 전체 수

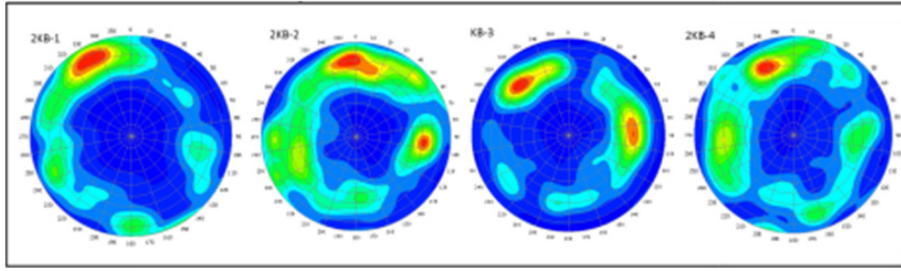


Fig. 5. Stereonet Contour plots of Fractures from BHTV Data.

Table 1. Difference of permeability between matrix and fractures.

	Mean value of matrix	Range of Fractures
Permeability [m ²]	6.26×10^{-16}	$1.33 \times 10^{-13} \sim 1.33 \times 10^{-15}$

를 정의(J) 해야 하는데, 본 모델 방법에서는 암반과 단열 2개의 연속체로 J=2 값을 적용하였다. 전체 단열 부피를 단열의 공극으로 나눈 값이 단열 연속체, 즉 실제 지하수 유동이 이루어지는 부피가 된다. 본 모델에서는 전체 단열의 부피가 최대 1% 미만으로 가정하였으며, 단열 공극은 0.2의 값을 사용하였기에 단열 연속체가 각 격자에서 차지하는 상대 부피는 5%로 설정하였다. 암반 매질 연속체가 차지하는 상대 부피는 자연스럽게 총 95%가 된다. 단열 연속체 상대 부피 5%는 개구성 단열뿐만 아니라 폐쇄성 단열까지 포함한 부피로써 각 격자 내에서 5%의 부피가 단열망 역할로써 유동 흐름이 발생하는 장소는 아니다. 실제 지하수 및 용질이 이동하는 부피는 단열 공극률을 곱한 수치가 적용이 된다. 또한 시추공 자료의 P10(단위길이의 scanline과 교차하는 단열들의 개수)를 통하여 P32(단위부피의 암반에 위치한 단열들의 면적)을 계산하여 단열들의 평균 이격거리 2.8m를 도출, 설정하였다. 이러한 격자모델 구조를 적용한 이유의 대전제는 지하수가 주로 이동하는 경로가 암반매질이 아닌 개구성 단열의 연속체로 이루어진 단열망(open fracture)을 통하여 지하수 및 용질이 이동한다는 것이다(Fig. 3). 이를 뒷받침하는 자료로는 Table 1과 같이 본 연구대상 지역에서 획득한 단열과 암반의 permeability 차이의 결과로 예상된다. 암반 매질과 단열이 가지는 permeability의 절대적 수치가 수십~수백배 차이가 나는 것으로 확인이 된다. 그만큼 단열망을 통한 유체 흐름이 상대적으로 우세하게 이루어진다는 것으로 해석이 된다.

Table 2. Definition of Materials in MINC mesh.

Origin mesh	MINC mesh	Origin mesh	MINC mesh	Origin mesh	MINC mesh	Origin mesh	MINC mesh
FRAMX	FRACT	WASTE	WASTf	CONCT	CONCf	COVER	COVEf
	MATRX		WASTm		CONCm		COVEm

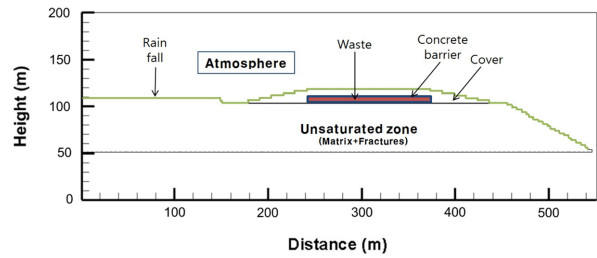


Fig. 6. Position of components.

구성매질

격자 및 mesh 구성 후 각 격자별 매질 정의가 필요하다. 본 연구지역의 대상매질로는 처분덮개, 콘크리트 방벽, 폐기물, 기반암반 및 경계조건과 소스생성을 위한 대기, 강우생성 격자, 저수장 매질로 구성하였다(Fig. 6). 본 연구에서는 이중공극 모델을 통한 지하수 유동 방법론 개발에 초점을 두었으므로 각 매질의 정확한 실측 데이터 및 불포화 조건에서 상변화를 고려한 적용함수의 변수들은 논외로 하겠다(van Genuchten, 1980).

이중공극을 적용하는 본 모델에서는 최초 생성된 mesh를 기반으로 각 격자마다 단열과 암반 매질로 격자 구분의 절차가 필요하며 MINC 기법을 활용한 분리 절차는 상기 도메인 구성 부분에 기술하였다. 최초 정의된 매질 중 대기, 강우, 저수장 등은 지하수 및 용질 이동이 일어나지 않는 영역이기 때문에 단열의 개념 적용이 필요하지 않은 매질로써 격자 분리를 제외하였다. 이를 제외한 기반암반, 폐기물, 콘크리트 방벽, 처분덮개 매질에 대하여 단열 연속체와 암반매질 연속체로의 이중공극 분리 절차를 수행하였다(Table 2). 최초 생성된 격자에서 단열 연속체와 암반매질 연속체의 구분을 위하여 각각 f, m을 마지막에 붙여 혼란을 방지하였다.

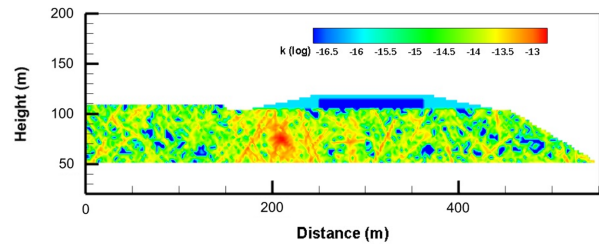
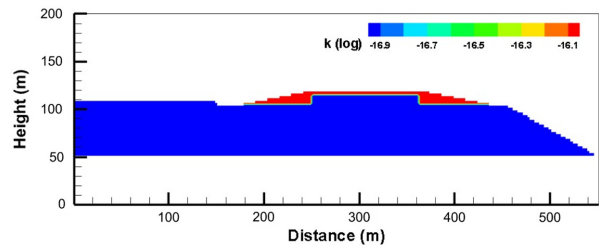
Table 3. Primary variables of materials.

	pressure (Pa)	brine mass fraction (-)	air mass fraction /gas saturation	temperature (°C)	remarks
FRACT MATRX COVEf COVEm CONCf CONCm WASTf WASTm	1.0E+5	1.0E-3	30%	15.0	Two phase
INFIL	1.0E+5	1.0E-3	30%	15.0	Single phase
ATMOS			95%		
RIVER			0%		

초기조건

TOUGH2 전산코드는 분석하고자 하는 대상에 따라 상태 방정식(Equation Of State, EOS)이 존재하며 풀이를 위해 요구되는 입력인자의 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 water, brine, air 세 물질과 관계된 격자 간 상호 연결성을 분석하고자 EOS7 모듈을 사용하였다. EOS7 모듈에서는 초기 변수로 입력과 brine 질량 분율, 온도가 공통적으로 필요하며 단상, 2상 차이에 따라 각 격자 공기 질량 분율, 기체 포화도 입력 값을 필요로 한다(Pruess, 1991).

입력데이터 구성 형식에는 총 세 가지의 다른 방법이 존재한다. 도메인을 구성하는 모든 격자에 동일한 초기 조건으로 입력하는 것이 첫 번째, 3.2절의 구성 매질 설정에서 정의된 각 구성요소별로 공통 초기 조건 값을 부여하는 것이 두 번째 방법이며, 마지막으로 각 격자별 초기 조건을 다르게 부여하여 모델링을 수행하는 방법이 있다. 본 연구에서는 각 구성요소별로 공통적인 초기조건을 가질 것으로 예상하여 Table 3과 같이 매질별로 초기조건을 설정하였다. 구성요소별로 크게 단상, 2상의 매질 구분부터 설정하였다. 불포화 암반의 단열(FRACT), 암반매질(MATRX), 표층처분시설 상부 덮개(COVER), 콘크리트 방벽(CONCT), 폐기물(WASTE)은 기체와 액체가 공존할 것으로 예상하여 2상의 매질로 설정하였으며 기체 포화도를 30%로 공통 초기 값을 부여하였다. 이 조건은 실측 데이터를 기반으로 설정한 것은 아니다. 다음의 세 구성요소는 단상으로 초기 조건을 설정하였다. 최상부 강우 생성격자는 실제 공기중의 상대습도를 고려하여 공기질량 분율을 30%, 대기는 공기질량 분율을 95%, 강은 공기질량분율 0%로 각각 설정하였다. 열의 흐름을 고려하지 않기 위하여 일정 온도조건을 부여하였고, 또한 지하수 침투 후 정상상태에 도달하게 되면 자연스럽게 수두가 형성되기 때문에 초기압력 조건은 따로 부여하지 않고 1기압으로 설정하였다.

**Fig. 7.** Distribution of k-field in fracture continuum.**Fig. 8.** Distribution of k-field in matrix continuum.

결 과

상기 이중공극 모델 절차에 따른 입력데이터 구성 후 단열과 암반매질 각각에 대한 permeability 분포도는 Fig. 7, Fig. 8과 같다. 단열과 암반 매질 연속체의 k-field 결과는 격자사이의 질량이동 방정식에 대한 해석 결과를 나타내는 것은 아니며 mesh 구성부터 시작되어 MINC 기법 적용까지 일련의 절차를 수행한 결과에 대하여 시각화한 것이다. 시추공 데이터의 단열 정보를 기반으로 추계론적 방법에 의해서 생성된 위치별 단열의 permeability 값들이 본 연구에서 생성된 각 격자와 대응하면서 단열 연속체 k-field에서는 격자별 다양한 분포를 나타내었다. 반면에 암반 매질 연속체 k-field는 덮개를 제외한 전체 영역에서 일정한 permeability를 적용하였기 때문에 그림과 같은 분포를 나타내고 있다. 표층처분시설이 위치하는 영역에서 단열 연속체의 permeability는 $1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, $5.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 등으로 일

정한 값을 가지는 반면, 불포화대에 존재하는 격자들은 $1.0 \times 10^{-16} \sim 1.0 \times 10^{-13} \text{m}^2$ 으로 다양한 범위를 보이고 있다. 암반매질 연속체 k-field에서는 덮개를 제외한 전 영역에서 $1.0 \times 10^{-17} \text{m}^2$ 값을 가지고 있다.

결 론

본 연구에서는 경주방폐장 표층처분시설이 위치하게 될 불포화 암반에 대하여 MINC 기법을 활용한 해석 방법론을 개발 하였다. 단열이 발달한 불포화대에서의 지하수 및 용질 이동을 분석하기 위하여 이중공극 모델을 적용하였다. 본 연구에서 대상은 특정지었지만 MINC 활용 방법론 개발에 초점을 맞추었기 때문에 매질에 적용한 특성 값들은 실측 데이터를 사용하지는 않았다. 연구대상에 대하여 범위를 확정 짓고, 최초의 원시 mesh를 구성하였으며 단열 연속체와 암반매질 연속체로 구분을 위한 MINC 기법을 활용하였고 격자에 대한 초기조건, 매질 설정을 하였다. MINC 적용을 통해 생성된 mesh는 단열에 의한 유체 유동 영향이 상당할 것으로 예상되는 조건에서 유용하게 이용될 수 있다. 다만, MINC 기법을 정밀하게 적용하고자 할 때에는 단일 구성된 단열 연속체와 상관없이, 암반매질 연속체를 다시 부피를 기반하는 매질 특성에 따른 여러 구획으로 나눌 필요가 있을 때 구분 기준이 명확히 적용되어야 MINC를 적용하는데 의미가 있을 것으로 판단된다. 본 방법론 개발을 통하여 향후 경주처분장의 지하수 및 오염물질 이동뿐만 아니라 단열을 포함하는 암반매질에서의 도메인 구성 방법에 있어서 유의미한 접근 방법이 될 수 있다고 고려된다. 이번 방법론의 결과물인 MINC mesh를 기반으로 향후에는 강우조건 및 소스생성, 암반매질의 permeability, 매질별 특성 값 획득 등을 통하여 한 단계 발전된 모델 해석 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Dario Hernandez¹, Jonathon Clearwater¹, John Burnell², Peter Franz¹, Lutfhie Azwar¹, Andrew Marsh, 2015, Update on the Modeling of the Rotokawa Geothermal System: 2010–2014, Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April.
- George J. Moridis, Craig M. Freeman, 2014, The RealGas and RealGasH2O options of the TOUGH+ code for the simulation of coupled fluid and heat flow in tight/shale gas systems, Computers & Geosciences 65, 56-71.
- Hinds, J., 2001, Development of Numerical Grids for UZ Flow and Transport Modeling, US DOE, 70p.
- KRMC, 2008, Safety Assessment Report. (SAR)
- Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G., 1999, TOUGH2 user's guide, Version 2.0, LBNL-43134, Berkeley, CA.
- Williams, M. D., Newell, D., Vermeul, V. R., Watson, T., and Reimus, P. W., 2010, Development of Models to Simulate Tracer Behavior in Enhanced Geothermal Systems, PNNL-19523, Richland, Washington.
- Pruess, K., 1983, GMINC - A Mesh Generator for Flow Simulations in Fractured Reservoirs, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-15227, Berkeley, CA.
- Pruess, K., 1991, EOS7, An Equation-of-State Module for the TOUGH2 Simulator for Two-Phase Flow of Saline Water and Air, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-31114, Berkeley, CA.
- Shihao Wang, Yi Xiong, Philip Winterfeld, Keni Zhang and Yu-Shu Wu, 2014, Parallel Simulation of Thermal-Hydrological-Mechanic (THM) Processes in Geothermal Reservoirs, PROCEEDINGS, Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, 24-26 February.
- Van Genuchten, 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 44.

하재철

한국원자력환경공단 기술연구소
34129 대전광역시 유성구 가정로 168
Tel: 042-601-5354
Fax: 042-601-5387
E-mail: jcha@korad.or.kr

정재열

한국원자력환경공단 기술연구소
34129 대전광역시 유성구 가정로 168
Tel: 042-601-5351
Fax: 042-601-5387
E-mail: jjy@korad.or.kr

김수진

한국원자력환경공단 기술연구소
34129 대전광역시 유성구 가정로 168
Tel: 042-601-5356
Fax: 042-601-5387
E-mail: point0410@korad.or.kr

윤정현

한국원자력환경공단 기술연구소
34129 대전광역시 유성구 가정로 168
Tel: 042-601-5350
Fax: 042-601-5387
E-mail: jhyoon@korad.or.kr