JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(4) : 333-344 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.333

굴착 손상 영역 및 근계 영역에서의 모암 및 벤토나이트의 열-수리적 거동 특성에 대한 수치해석적 연구

조성길[1,*], 권용민[1], 김현재[1], 서진원[1], 김교순[1], 구준모[2]

[1](주)태성에스엔이, [2]경희대학교 기계공학과

Long-term Changes in Excavation Damaged Zone (EDZ) and Near-Field due to Thermal-Hydraulic Processes in Host Rock and Bentonite

SungGil Jo[1,*], YongMin Gwon[1], HyunJae Kim[1], JinWon Seo[1], GyoSoon Kim[1] and JuneMo Koo[2]

[1]TAE SUNG S&E, Inc., 10F, 27, Seongsu-ro 7-gil, Seongdong-gu, Seoul 04780, Republic of Korea
[2]Kyung Hee University, Department of Mechanical Engineering, 1732, Deogyeong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

Abstract To validate the numerical model used in the study of deep disposal of spent nuclear fuel, we selected benchmark cases and performed numerical model validation. We selected the DECOVALEX-THMC Task D_THM1 FEBEX Type benchmark case, which was conducted from 2003 to 2007. We analyzed the thermal-hydraulic (TH) behavior using the finite element program CODE_BRIGHT and verified the results against previous studies. The temperature results were similar to the results of DECOVALEX-THMC Task D. The saturation results showed a similar trend to the results of DECOVALEX-THMC Task D, but the time to reach full saturation was different.

Key words: Spent nuclear fuel, Deep geological disposal, TH coupling, DECOVALEX, Code validation

1. 서 론

1956년 영국에서 콜더홀 원자력 발전소가 상용화된 이후, 원자력 발전 후 생성되는 폐기물인 사용후핵연료의 처분에 관한 논의가 지속적으로 제기되고 있다. 1978년 고리 1호기 준공 이후 국내에는 2023년 기준 24개의 원전이 가동 중이며, 2개의 원전(고리 1호기, 월성 1호기)이 정지된 상태로 원자력 발전 이후 발생하는 사용후핵연료는 모두 발전소 내 저장 시설에서 보관하고 있다. 즉 원전을 운영함에 따라 사용후핵연료 포화율은 증가할 수밖에 없으며, 운영 중인 원전 중 사용후핵연료 포화율이 90% 이상인 원전은 10기에 도달한 상황이다[1]. 이처럼 사용후핵연료 관리의 문제는 국내외 시급한 현안으로 주목받고 있다. 소내 저장 시설에 사용후핵연료를 지속해서 보관하기에는 한계가 있어 관련 대안으로 사용후핵연료 처분이 제안되고 있으며, 국내에서는 다양한 논의 끝에 심층처분 방식으로 사용후핵연료를 처분하는 방법을 연구하고 있다. 심층처분은 지상으로부터 300~1,000 m 암반층 사이에 사용후핵연료를 처분하는 방식으로 Fig. 1과 같이 스웨덴의 SKB (Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag)에서 공학적 방벽과 천연

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry
***Corresponding author.** Sunggil Jo
Tel. +82-70-8789-1505 Fax. +82-42-671-8702 E-mail. sunggil@tsne.co.kr
Received 6 October 2023 **Revised** 17 November 2023 **Accepted** 29 November 2023

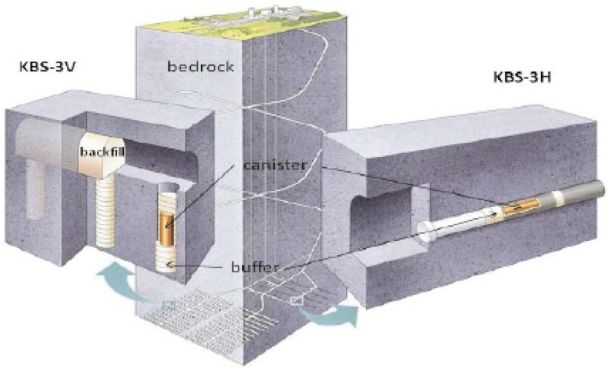

Fig. 1. KBS-3 Engineered Barrier System (EBS) design concept [2].

방벽으로 구성된 KBS-3 (Kärnbränslesäkerhet) 개념을 제안하였다[2].

사용후핵연료 처분은 최소 10만 년 이상 그 건전성이 보장되어야 한다. 각 나라별 서로 다른 현장 조건과 다양한 물리적 현상을 고려한 수치모델의 복잡성을 고려하면, 복합거동 현상 수치모델을 일일이 검증하기에 한계가 있다. 이에 제안된 모델 및 사용하는 코드에 대한 검증, URL (Site-specific Underground Research Laboratory) 실증 실험 및 Lab Scale Test 결과에 대한 공유를 위하여 SKI (Swedish Nuclear Power Inspectorate) 주도하에 국제 공동연구인 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments) 프로젝트가 시작되었다[3,4]. 1992년부터 시작된 DECOVALEX는 DECOVALEX-I, DECOVALEX-II, DECOVALEX-III, DECOVALEX-THMC, DECOVALEX-2011, DECOVALEX-2015, DECOVALEX-2019, DECOVALEX-2023 순으로 진행되었으며, 국내에서는 한국원자력연구원이 DECOVALEX-2011부터 참여하고 있다.

2004년부터 시작된 DECOVALEX-THMC TASK D 프로젝트[5]는 굴착 손상 영역(Excavation Damaged Zone; EDZ)과 처분장 근계 암반에서의 장기 투과도 및 다공성 거동에 대한 모델링을 목표로 스위스 Grimsel의 FEBEX 실험 및 미국 Yucca Mountain의 Drift Scale Test (DST)에 대한 THM, THC 수치해석 분석을 진행하였다. Task D_THM 분석의 경우, 총 3단계의 모델링 단계를 가지는데 1단계[6]에서는 모델링을 시작하는 단계로 각 연구팀에서는 해석 도메인에서의 초기 온도, 응력, 유동장, 포화도를 제공받아 THM 복합거동 해석을 진행했다. 2단계에서는 제공받은 데이터를 기반으로 민감도 분석을 수행 후 코드

Table 1. Research team and codes applied within DECOVALEX-THMC

Team	Computer Code
DOE (LBNL)	TOUGH2 (TH) and ROCMAS (THM)
JAEA	THAMES (THM)
BGR	GeoSys/Rockflow (THM)
CAS	FRT-THM (THM, FEMLAB application, combined with Mathlab)

별 결과 비교를 통해 사용된 수치모델을 검증했으며, 3단계에서는 매개변수와 모델에 관련된 불확실도 분석을 수행하였다. 연구에 참여한 국가 기관으로 중국과학원(Chinese Academy of Sciences, CAS, 중국), 로렌스 버클리 국립 연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL, 미국), 일본 원자력연구소(Japan Atomic Energy Agency, JAEA, 일본) 연방지질자원연구소(Bundesanstalt fur Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR, 독일)이며, 연구소별 사용 코드는 Table 1에서 확인할 수 있다.

DECOVALEX-THMC TASK D_THM1은 다양한 코드들을 이용하여 검증한 만큼 각 코드별 제한사항 역시 존재하였다. 일례로 TOUGH2 코드를 제외한 다른 코드들은 역학적 분석을 진행하였지만, TOUGH2 경우에는 불포화토에서의 수분 포화 시 공극 변화에 따른 팽윤압 증가와 같은 역학적 분석이 당시 불가능하여 ROCMAS와 TH 복합 거동 비교 분석만이 가능했다. 또한 Richards flow와 Two-Phase flow와 같이 코드별 수치모델이 상이했다. 하지만 다양한 코드를 검증한 보고서로써 코드 검증을 위한 좋은 연구라 판단된다. 한국의 경우 DECOVALEX-THMC의 연구 결과에 관한 검증 사례가 국내에는 존재하지 않아, 본 연구에서는 DECOVALEX-THMC TASK D THM1 [5] 결과를 스페인 카탈루냐 공과대학에서 개발한 유한요소법(FEM) 코드인 CODE_BRIGHT을 활용하여 열-수리-역학(THM) 복합거동 분석을 진행 중이며, 본 논문에서는 열-수리(TH) 복합거동만을 기술하였다.

2. 공학적 방벽에서의 물리적 현상

공학적 방벽 시스템(EBS, Engineered Barrier System)의 개념은 1995년 NEA (Nuclear Energy Agency) 문서[7]에

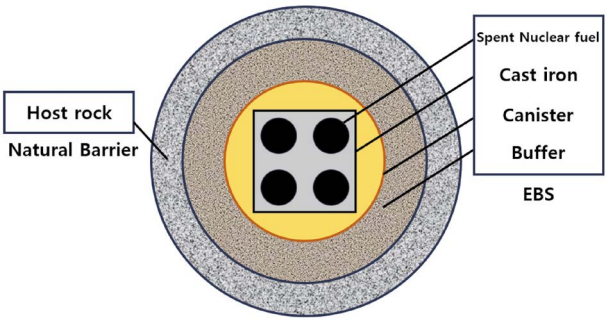

Fig. 2. Engineered Barrier System (EBS) design elements.

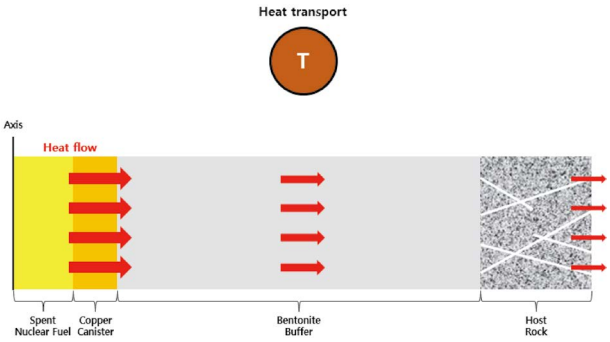

Fig. 3. Thermal behavior phenomena in Engineered Barrier System (EBS) [9].

처음 소개되었으며, 약 10만 년의 긴 시간 동안 생물권에 미치는 잔류 방사능이 미미한 농도가 되도록 하는 것을 목적으로 한다. Fig. 2와 같이 공학적 방벽 시스템의 주요 요소는 사용후핵연료, 주철용기, 캐니스터 (구리용기), 완충재, 뒤채움재로 고준위 처분장 저장소 내에 배치된 모든 인공 및 공학적 구성 요소를 뜻한다. 공학적 방벽 인근에는 모암이 포함된 근계 영역, 생물권에 영향을 받는 지반은 원계 영역으로 구분된다. 일반적으로 공학적 방벽 성능평가 시 원계 영역까지의 영향성을 고려하며, 특히 모암의 투수계수는 공학적 방벽 시스템 건전성에 큰 영향을 미치게 된다. 공학적 방벽에서의 주요 물리적 거동은 크게 4가지로 열적 (T) 거동, 수리적 (H) 거동, 역학적 (M) 거동, 화학적 (C) 거동으로 구성되나, 본 연구에서는 공학적 방벽에서의 열-수리적 (TH) 거동에 관한 복합거동을 기술하고자 한다 [8].

2.1. 공학적 방벽에서의 열적 거동 현상

Fig. 3과 같이 공학적 방벽에 영향을 미치게 되는 열적 거동의 경우 크게 2가지로 사용후핵연료에서 발행하는 잔열과 암반 깊이에 따라 증가하는 지온 경사로 구분된다. 원계 영역에서 지열의 상승, 마그마 침입, 화산활동이 일어나지 않는 이상 암반에서의 지온은 같은 높이에서 변하지 않음으로 성능평가 해석 시 지온 경사는 심도에 따라 설정하고 사용후핵연료 붕괴열 변화를 주로 고려하게 된다. 이때 열량은 처분된 사용후핵연료의 특성 및 폐기된 기간에 따라 달라진다.

사용후핵연료는 노형에 따라 캐니스터의 설계가 다르며, 방출 연소도에 따라 처분 이후 발생되는 열량 또한 달라진다. 실제로는 발전 이후 지속적으로 사용후핵연료가 배출된 만큼 사용후핵연료봉 집합체별로 처분 전 보관되는 기간이 다르나, 처분해석 시 보수적인 계산을 위해 균일한 열량으로 계산한다. 사용후핵연료가 발생시키는 잔열로 인한 열적 거동의 경우, 대류와 전도 그리고 복사에 의한 열전달 과정으로 구분할 수 있다.

전도의 경우, 열이 고온에서 저온으로 물체 내 내부에너지가 접촉된 다른 물체로 이동하는 현상을 의미한다. 공학적 방벽에서는 사용후핵연료로 인해 발생되는 열이 방출되면서 캐니스터에서 모암으로까지 이동하는 열적 거동 현상이 발생한다. 이때 가장 지배적인 열적 거동 현상은 전도이며, 이는 푸리에 법칙 (Fourier's law)을 이용하여 모사할 수 있다.

대류 열전달의 경우, 기체 및 유체를 통해 열이 전달되는 현상으로 자연대류와 강제대류로 구분할 수 있다. 모암 및 벤토나이트에서의 공극률이 매우 낮아 열전도에 비해 대류 열전달은 무시할 수 있을 정도로 작아 일반적으로 대류 열전달에 대한 효과를 고려하지 않는다.

복사 열전달의 경우, 심층처분시설의 구조적 특성으로 인해 전도에 의한 열전달이 지배적이지만 실제 처분공과 캐니스터 및 완충재 사이에 간극이 발생할 수 있다. 이러한 경우 복사 열전달의 영향이 커지게 되므로 복사 열전달에 대한 효과를 고려해야 한다.

2.2. 공학적 방벽에서의 수리적 거동 현상

Fig. 4와 같이 수리적 거동은 균열과 공극을 통해 이류와 확산 작용으로 지하수를 따라 이동한다. 압력 구배에 의해 구동되는 물의 수송방정식은 다르시 법칙 (Darcy's law)을 이용하여 모사할 수 있다. 액체 상태의 물 수송은 중력에 의해 발생할 수 있지만, 수리전도도에 의해 무시될 수 있다. 물의 밀도 차이는 온도나 염도 차이로 인해 발생할 수 있으나, 주변의 암반에서 전달되는 응력이 커 밀도 차이에

의해 발생하는 물 수송은 완충재에서 무시될 수 있다.

또한 증기압 구배에 의해 증기 상태의 수송이 발생할 수 있으며, 온도 구배에 따라 증기압이 달라진다. 이때 지하수로의 공기 용해와 지하수의 증발이 수반될 수 있다.

용해의 경우 일반적으로 심층처분장을 폐쇄 후 주변에 암반으로 둘러싸인 밀폐환경으로 보게 되며 지하 암반의 높은 압력으로 인하여 처분장 내부의 공기는 압축되어 물에 용해된다. 물에 용해된 공기는 물 수송에 의해 운반되며 일반적으로 대기 온도에서의 용해도는 약 2%이며, 온도가 증가하면 급격히 감소하게 된다.

일반적으로 지표에서 물의 상변화는 비등점 이상에서 발생하게 되며 엔탈피를 이용해 상변화를 모델링할 수 있지만, 심층의 처분장은 비등점 이하에서 지하수 증발을 모델링해야 한다. 이를 표현하기 위한 방식으로 온도에 따른 포화수증기압의 관계인 공기 습윤(Psychrometric law) 관계식으로 모델링될 수 있다. 삼투압 구배에 의해 발생하는 증기 상태의 수송과 중력 또는 밀도 구배에 의한 증기 수송은 완충재에서 중요하지 않을 수 있다.

암반과 완충재 사이의 상호 작용은 암반의 수리전도도에 의해 높은 영향을 받게 된다. 암반에서 굴착 손상 영역(EDZ, Excavation Damaged Zone)과 가까운 부분에 더 큰 수리전도도를 가지며, 물이 포함된 절리 사이의 거리에 따라 수분 흡수 속도가 달라진다. 암반에 큰 균열이 없는 경우 모든 물은 암반 기질을 통해 운반되나, 수송이 너무 느려 완충재에서 기존 흡수된 물이 재분배되는 특징이 있다.

암반의 균열 면은 보통 음이온을 띠고 있으며, 지하수 중 일부 양이온을 띠고 있는 핵종들은 이류와 확산 및 가스상으로 수송되는 과정에서 전기적 인력에 의해 암반 표면에 달라붙기도 하며, 표면과 화학 작용에 의해 달라붙기도 한다. 이러한 현상을 수착이라고 한다. 또한 미생물의 대사작용에 포함되기도 하며 복잡한 과정을 거치면서 지하수보다 이동 속도가 느려지며 지연될 수 있다.

사용후핵연료 처분 시 하나의 물리적 현상이 발현되는 것이 아니라 여러 물리적 현상이 복합적으로 상호작용이 일어나게 된다. 벤토나이트의 건조밀도가 열전도도에 영향을 미치듯[10] 각각의 물리적 현상은 다른 물리적 현상에 영향을 받게 되며 이에 따라 현상이 가속화될 수도 혹은 억제될 수도 있다. 따라서 사용후핵연료 처분은 다양한 물리적 현상이 상호작용하여 복합적으로 반응하기 때문에 매개변수와 수치모델을 자세히 조사할 필요성이 있다.

3. 이론적 근거

3.1. 구성 및 가정[11-13]

다공성 불포화 매질에는 액체, 기체 그리고 고체로 구성되어 있으며, 이들 사이의 열-수리적 복합거동을 모사할 수 있도록 수학적 공식화 과정이 필요하다. 이를 위해 다공성 불포화 매질 내 구성 요소에 대한 개념을 다음과 같이 가정한다.

다공성 불포화 매질은 기체상(Gas Phase), 액체상(Liquid Phase) 그리고 고체상(Solid Phase)의 3상으로 구성되어 있다. 이때 기체상은 건공기(Dry Air)와 수증기(Water Vapour)로 구성되어 있으며, 액체상에는 물(Water)과 용해된 공기(Dissolved Air)의 3종으로 구성되어 있다고 가정한다.

- 3상 구분(3 phases)

고체상(s): 벤토나이트, 뒤채움재, 모암 등
액체상(l): 물 + 용해된 공기

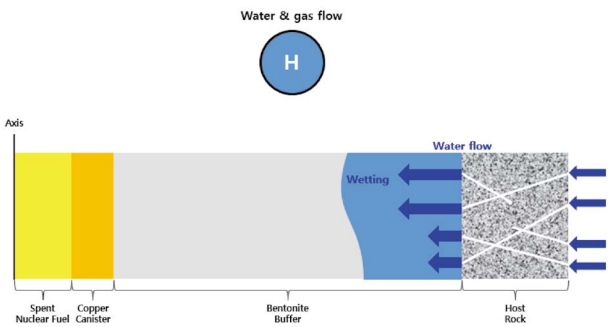

Fig. 4. Hydraulic behavior phenomena in Engineered Barrier System (EBS) [9].

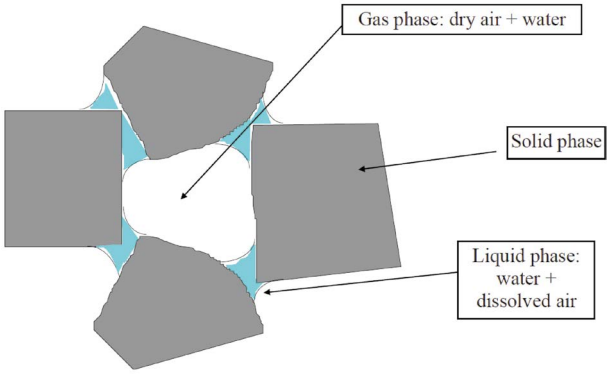

Fig. 5. Schematic representation of an unsaturated porous material [13].

기체상(g): 건공기+수증기

- 3종 구분(3 species)

흙입자(−): 고체 상태로만 존재(벤토나이트, 뒤채움재, 모암 등)

물(w): 액체상 또는 증발된 기체상으로 존재

공기(a): 건공기로 기체상에 존재, 액체상에 용해된 상태로 존재

다공질 불포화 매질에 대한 지배방정식의 수학적 공식화를 위해 다음과 같은 사항을 가정했다.

- 건공기는 단일 종으로 간주하며 기체 상태의 주요 구성 요소이다. 헨리의 법칙(Henry's law)은 용해된 공기의 평형을 표현하기 위해 사용된다.
- 기체, 액체 및 고체상에 대한 열적 평형이 가정되므로 같은 지점에서의 각 상의 온도는 동일한 것으로 가정한다.
- 증기 농도는 액체상과 평형을 이루며, 공기 습윤(Psychrometric law) 관계식을 통해 표현된다.
- 상태 변수(미지수)는 다음과 같다.
  → 액체 압력: P_l, 기체 압력: P_g, 온도: T
- 용해된 종과 유체 상에 대한 운동량 평형은 픽의 확산법칙과 다르시 법칙(Fick's law & Darcy's law)의 구성방정식을 통해 계산된다.
- 구성 방정식에서의 물리적 매개변수는 압력과 온도의 함수로 구성되어 있다. 예를 들어 계면에서의 증기 농도(in psychrometric law), 표면장력(in retention curve), 동점성 계수(in Darcy's law)는 온도에 강한 의존성을 가지고 있다.

4. 지배방정식

다공성 불포화 매질에 대한 열-수리적 거동 특성을 지배하는 방정식은 보존 방정식, 구성 방정식 그리고 평형 제한 조건에 해당하는 3가지 주요 그룹으로 분류할 수 있다.

4.1. 보존 방정식[11-14]

질량 보존 방정식은 다공성 불포화 매질에서 한 가지 종류 ψ(흙 입자, 물, 공기)에 대해 나타내며, ρ^{ψ}는 해당 종류의 단위 체적당 질량을 의미한다. 예를 들어 기체상의 물의 밀도 ρ_g^{ω}는 해당 종류의 질량 분율(ω_g^{ω})과 해당 상의 밀도(ρ_g)의 곱인 $\rho_g^{\omega}=\omega_g^{\omega}\rho_g$으로 표현된다. 본 연구에서는 고체 밀도의 변화로 인한 다공성 변화는 반영하지 않으므로 고체에 대한 질량 보존 방정식은 무시할 수 있다.

- 물의 질량보존

물은 액체상과 기체상에 존재하며, 다공성 불포화 매질에서 단위 부피당 물의 총질량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\text{액체상의 물 질량} + \text{기체상의 물 질량(증기)}}{\text{전체 부피}}$$

$$= \omega_l^{w}\rho_l S_l\phi + \omega_g^{w}\rho_g S_g\phi$$

여기서 S_l과 S_g는 액체상 및 기체상에 대한 포화도이며, ϕ는 공극률을 의미한다.

단위 부피당 물의 총질량에 대한 위의 식을 사용하여, 물의 총질량 보존 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\omega_l^{w}\rho_l S_l\phi + \omega_g^{w}\rho_g S_g\phi\right) + \nabla\cdot\left(\mathrm{j}_l^{\mathrm{w}} + \mathrm{j}_g^{\mathrm{w}}\right) = \mathrm{f}^{\mathrm{w}}$$

여기서 $\mathrm{j}_l^{\mathrm{w}}$와 $\mathrm{j}_g^{\mathrm{w}}$은 각각 액체와 기체 상태의 물의 총질량 플럭스이며, f^w는 외부에서 공급되는 물을 의미한다. 내부 공급이나 물의 추출은 고려되지 않기 때문에 내부 생성 항은 0으로 질량 보존식에 포함되지 않는다.

- 공기의 질량 보존

공기는 액체상과 기체상에 존재하며, 다공성 매질에서 단위 부피당 공기의 총질량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\text{액체상의 공기 질량} + \text{기체상의 공기 질량}}{\text{전체 부피}}$$

$$= \omega_l^{a}\rho_l S_l\phi + \omega_g^{a}\rho_g S_g\phi$$

단위 부피당 공기의 총질량에 대한 위의 식을 사용하여, 공기의 총질량 보존 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\omega_l^{a}\rho_l S_l\phi + \omega_g^{a}\rho_g S_g\phi\right) + \nabla\cdot\left(\mathrm{j}_l^{a} + \mathrm{j}_g^{\mathrm{a}}\right) = \mathrm{f}^{\mathrm{a}}$$

여기서 $\mathrm{j}_l^{\mathrm{a}}$와 $\mathrm{j}_g^{\mathrm{a}}$은 각각 액체와 기체 상태의 공기 총질량 플럭스이며, f^a는 외부에서 공급되는 공기를 의미한다.

- 내부에너지 보존 방정식

다공성 불포화 매질에서의 에너지 보존은 내부에너지로 표현할 수 있다. 이때 기체, 액체 및 고체상에 대한 열적 평형 상태가 가정되므로 각 상의 온도는 동일하다. 따라서 각 상의 내부에너지를 합하여 다공성 불포화 매질의 단위 부

피당 총에너지(total energy)를 다음과 같이 하나의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\text{전체 내부 에너지}}{\text{전체 부피}}$$

$$= E_s\rho_s(1-\phi) + E_l\rho_l S_l\phi + E_g\rho_g S_g\phi$$

여기서 E_s, E_l, E_g는 각 상의 단위 질량당 내부에너지(specific internal energy)를 의미한다.

다공성 매질에서의 내부에너지 평형 방정식은 각 상에서의 내부에너지, 이류, 전도를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(E_s\rho_s(1-\phi) + E_l\rho_l S_l\phi + E_g\rho_g S_g\phi) + \nabla\cdot(\mathrm{i}_c + \mathrm{j}_{Es} + \mathrm{j}_{El} + \mathrm{j}_{Eg}) = f^Q$$

여기서, i_c는 다공성 매질 내 열전도에 의한 에너지 플럭스, j_{Es}, j_{El}, j_{Eg}는 이류에 의한 에너지 플럭스, f^Q는 내/외부에서 공급되는 에너지를 의미한다. 이때 토양이 변형되지 않는 것으로 가정하면, 고체 입자의 거동으로 인한 이류 플럭스(j_{Es})는 0이 된다.

4.2. 구성 방정식[11-14]

다공성 불포화 매질에 대한 열-수리적 구성 방정식은 독립 변수와 종속 변수 사이의 관계를 설정하고, 종속 변수를 독립 상태 변수 T 및 P_l의 함수로 표현한다.

- 열적 거동 구성 방정식

다공성 불포화 매질에서의 열전달 과정은 푸리에 법칙을 통해 표현되며, 이는 열전도도의 함수 및 상(Phase)의 내부에너지를 통해 표현된다.

- 열전달 과정의 수학적 표현(Fourier's law)

열전달 과정은 전도에 지배적이므로 다음과 같이 푸리에 법칙을 지배방정식으로 사용한다.

$$\mathrm{i}_c = -\lambda\nabla T$$

여기서 λ는 열전도도, ∇T는 온도 구배를 의미한다.

이때 FEBEX 벤토나이트의 열전도도는 포화도에 따라 변화하는 특성을 반영하기 위해 다음과 같이 시그모이달 함수(Sigmoidal function)의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{[(Sr - Sr^*)/b]}} + A_2$$

여기서 A_1과 A_2는 각각 완전 포화 및 완전 불포화 상태에서의 열전도도, Sr^*는 두 극단 값(extreme values)의 평균 열전도도 값에 해당하는 포화도를 의미하며, b는 시그모이달 함수의 매개변수이다.

- 수리적 거동 구성 방정식

유체 상에서의 이류 플럭스(advective flux)에 대해서는 다르시 법칙으로 나타낼 수 있으며, 다공성 불포화 매질의 포화 정도와 수분 흡입력 사이의 관계는 수분보유곡선(water retention curve)으로 나타낼 수 있다. 확산 및 분산에 해당하는 비이류 플럭스(non-advective flux)는 픽의 법칙으로 나타낼 수 있다.

- 다공성 매질 내 유체의 흐름(Darcy's law)

유체의 흐름, 즉 기체와 액체 상태의 물과 공기에 대한 이류는 다르시 법칙에 따라 결정되며 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{q}_\alpha = -\frac{\mathbf{k}\,k_{r\alpha}}{\mu_\alpha}(\nabla \mathrm{P}_\alpha - \rho_\alpha \mathbf{g})$$

여기서 q_a는 다공성 매질에서의 유체 플럭스, k는 고유 투수계수(intrinsic permeability), k_{ra}는 상에 대한 상대 투수계수(relative permeability), μ_a는 유체의 점성, P_a는 유체의 압력, ρ_a는 유체의 밀도이다.

- 고유투수계수(Kozeny's model)

다공성 매질 내 공극을 통해 유체의 흐름이 일어나는 경우, 유체가 얼마나 쉽게 흐를 수 있는지의 여부는 유체 고유의 성격과 다공성 매질의 특성에 의해서 결정된다. 이때 고유투수계수는 유체 흐름의 용이성을 결정하는 다공성 매질의 특성을 나타내며, 공극률에 따른 고유투수계수의 변화는 다음과 같이 코제니 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_o \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}\frac{(1-\phi_o)^2}{\phi_o^3}$$

여기서 k는 공극률 ϕ에서의 고유투수계수이며, k_o는 공극률 ϕ_o에서의 참조 값(Reference Value)이다.

- 상대투수계수(Power law, van Genuchten-Mualem)

다상유체 유동 시 다공성 매질에 대한 각 유체의 상대적인 유동 용이도를 나타내며, 벤토나이트는 다음과 같이 지수 λ로 구성된 멱함수 법칙(power law)으로 나타낼 수 있다[15].

$$k_{rl} = AS_e^{\lambda_c}$$

$$k_{rg} = 1 - k_{rl}$$

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}}$$

이때 지수 λ_c는 상대투수계수와 관계된 Corey 지수를 의미하며, S_{ls}와 S_{rl}은 각각 최대포화도 및 잔류포화도를 의미한다. S_e은 유효포화도(effective saturation)를 의미하며 0과 1 사이의 값으로 도출된다.

모암에서는 Mualem (1976)의 모델을 기초로 한 van Genuchten (1980)의 투수계수함수 모델인 VGM (van Genuchten-Mualem) 모델을 사용했으며 다음과 같이 나타낼 수 있다[18].

$$k_{rl} = \sqrt{S_e}\left(1 - \left(1 - S_e^{1/\lambda_{rl}}\right)^{\lambda_{rl}}\right)^2$$

여기서 S_e는 유효포화도를 의미하며, λ_{rl}는 $1-1/n$ ($0<\lambda_{rl}<1$)로 나타낼 수 있으며 상대투수계수와 관계된 상수이다.

- 수분보유곡선(van Genuchten model)

다공성 불포화 매질에 지하수가 흐를 때 삼투압 현상에 의해 수분함량(water content)에 따라 수분 흡입력이 형성되며, 이를 수분보유곡선 또는 포화특성곡선이라 부른다. 이때 포화특성곡선에서 수분함량과 흡입력의 관계는 VG (van Genuchten)의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left(1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P}\right)^{\frac{1}{1-\lambda_v}}\right)^{-\lambda_v}$$

$$P = P_o \frac{\sigma}{\sigma_o}$$

여기서, $P_g - P_l$은 모세관압(capillary pressure)이며, P_o와 λ_v는 VG 모델의 물질상수이고, σ_o는 P_o가 결정된 온도에서의 표면 장력이며, σ는 온도 T에서의 표면 장력이다.

추가로 FEBEX 벤토나이트의 경우 낮은 수분함량에서 높은 흡입력을 가지게 되는데 이를 위해 기존 VG 모델을 개선한 FEBEX 모델을 사용했다.

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left(1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P}\right)^{\frac{1}{1-\lambda_v}}\right)^{-\lambda_v} f_d$$

$$f_d = \left(1 - \frac{P_g - P_l}{P_d}\right)^{\lambda_d}$$

여기서 P_d는 완전 불포화 상태에서의 모세관압을 의미하며, λ_d는 FEBEX 모델의 매개변수이다.

- 확산 법칙(Fick's law)

각 상에서의 종(species)의 비이류 플럭스는 분자 확산(molecular diffusion)과 역학적 분산(mechanical dispersion)으로 구성된다. 이때 본 연구에서는 온도에 따른 분자 확산의 영향이 지배적인 상태로 가정하므로 역학적 분산에 대한 영향은 무시할 수 있다[9]. 따라서 본 연구에서는 농도 구배에 따른 분자 확산만 고려하며 이는 픽의 확산법칙을 이용한 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\mathrm{i}_\alpha^{\mathrm{i}} = -\left(\tau\phi\rho_\alpha \mathrm{S}_\alpha \mathrm{D}_\alpha^{\mathrm{i}} \mathrm{I}\right)\nabla\omega_\alpha^i$$

여기서 τ는 굴곡률, ϕ는 공극률, ρ_α는 밀도, S_α는 포화도, D_α^i는 α상에서의 i종에 대한 확산 계수, I는 단위행렬, ω는 질량분율을 의미한다.

이때 기체상의 수증기 또는 공기의 분자 확산 계수는 다음의 관계식으로 표현된다.

$$D_\alpha^i = D\left(\frac{(273.15 + T)^n}{P_g}\right)$$

여기서 P_g는 기체 압력, D는 확산 계수, n은 매개변수이다.

4.3. 평형 제약조건[11-14]

다공성 불포화 매질에서 물질의 상변화(phase change, 물의 응축 및 증발 등)는 주어진 문제의 특성 시간보다 빠르게 일어나므로 항상 국부적인 평형조건에 있다고 가정한다. 이러한 가정은 평형 제약조건으로 표현되며 주어진 문제의 방정식 수를 줄일 수 있다[20].

- 기체상에서의 증기 농도(Psychrometric law)

계면에서의 곡률 및 온도 변화로 인해 기체 내 증기 밀도 변화가 발생하며, 다음과 같이 공기 습윤 관계식으로 표현된다.

$$\theta_g^w = \left(\theta_g^w\right)^o \exp\left[-\frac{M_w}{\rho_l R(T + 273.15)}(P_g - P_l)\right]$$

여기서 θ_g^w($w_g^w \rho_g$)는 기체상의 단위 부피당 증기의 질량, M_w는 물의 분자량(18.016 g mol^{-1}), R은 기체 상수(8.3142 J mol K^{-1})이다.

- 액체상에 용해된 공기(Henry's law)

다공성 매질에서 발생하는 습윤 과정 중 고립된 공기가 액체상에 용해되는 현상이 발생할 수 있으며, 이를 모사하기 위해 다음과 같이 헨리의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_l^{dgs} = \frac{P_{dgs} M_{dgs}}{H M_w}$$

여기서 $\theta_l^{dgs}(w_l^{dgs} \rho_l)$는 액체상에 용해된 건공기의 농도, P_{dgs}는 건공기의 압력, M_{dgs}와 M_w는 각각 건공기 및 물의 분자량, H는 헨리 상수이다.

5. 수치모델 검증을 위한 벤치마크

Table 2는 본 연구에서 사용한 벤치마크 해석 시스템의 형상 및 초기 붕괴열이다. 모델은 지면으로부터 지하 1,000 m, 처분공은 지하 500 m에 35 m 간격마다 위치한다. 처분터널 직경은 2.28 m이며, 캐니스터 직경은 0.9 m이다.

Fig. 6은 100만 년까지의 사용후핵연료 집합체의 감쇠열을 나타낸 그림이다. 폐기 후 30년이 지난 시점에서 사용후핵연료 집합체의 붕괴열은 약 400 W로 캐니스터 하나당 총 4개의 사용후핵연료 집합체가 삽입되므로 해석 시작 시 초기 캐니스터의 붕괴열을 1,600 W로 가정하였다[6]. DECOVALEX-THMC THM_1의 경우, FEBEX 실험을 기준으로 해석을 진행하였다. Plug를 제외한 수평 처분공의 길이는 13.08 m로 길이가 4.54 m인 2개의 Heater가 들어가며 Plug와 Heater 1 사이 간격이 2 m, Heater 1과 Heater 2 사이 간격이 1 m, Heater 2와 Drift End 사이 간격이 1 m로 구성되어 있으며 각 간격 사이는 벤토나이트로 채워져 있다. 허나, 2D 해석 시 단순화를 위해 처분공 중앙 부분 내에 Heater만 존재한다고 가정하였으며, 총 길이 13.08 m에서 히터 2개를 나눈 값인 6.54 m (캐니스터 길이 4.54 m, 보정값 2 m)로 열유속을 구하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 주요 관심 영역의 원계 및 근계를 나타낸 그림이며, 각 영역에서 주요 측정 위치를 나타냈다. 해

Table 2. Benchmark modeling size and initial decay heat

Repository design	D_THM1 (FEBEX_Type)
Model height, Ly [m]	1,000
Drift spacing, Lx [m]	35
Drift diameter, d [m]	2.28
Diameter of waste canister [m]	0.9
Near field study area	3 d × 3 d
Far field study area	2Lx/3 × 2Lx/3
Maximum thermal line load, Pw [W m^{-1}]	245 (at emplacement)

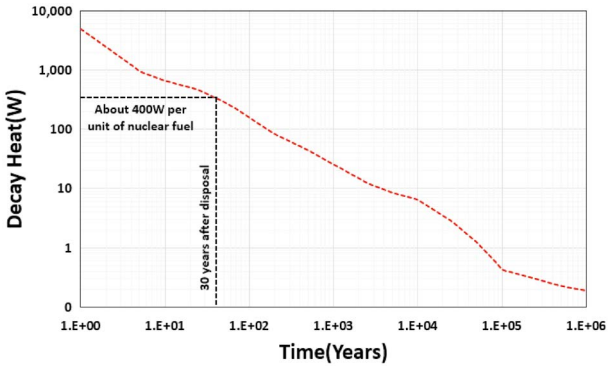

Fig. 6. Nuclear fuel decay heat profile per unit.

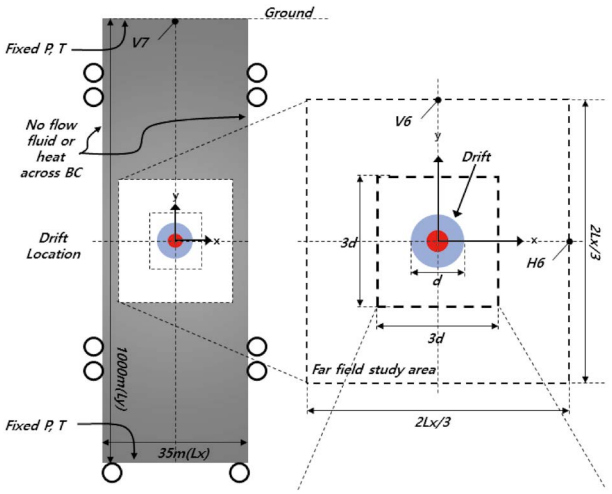

Fig. 7. Far field study area and measuring position.

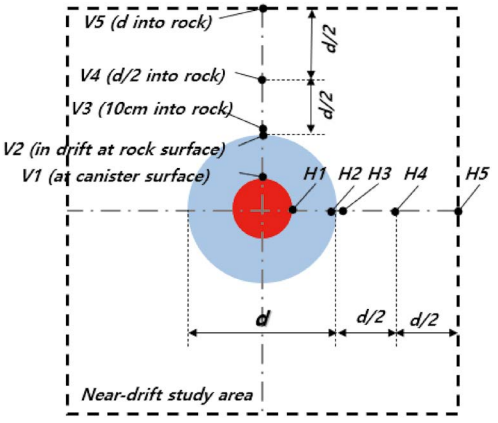

Fig. 8. Near-drift study area and measuring position.

석 형상은 2차원으로 모델링하였으며, 왼쪽과 오른쪽의 수직면은 흐름이 없는(No flow) 대칭 조건으로 가정하였다. 지표면(Ground)과 지하 1,000 m의 수평면의 경계조건은 고정값으로 가정하되 지표면은 0.1 MPa, 10°C, 지하 1,000 m에서는 9 MPa, 40°C 값을 설정하여 깊이에 따른 선형 값이 형성되도록 가정되며 지하 수압에 의한 모암(지층)은 포화 상태를 유지한다.

본 연구에서는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 V1 위치에서의 포화도와 V1, V3에서의 온도를 벤치마크 결과와 비교 검증했다.

Fig. 9는 굴착 과정과 벤토나이트 설치 및 사용후핵연료 최종 처분으로 인한 붕괴열 조건을 도식화한 그림이다.

첫 번째 과정은 굴착 후 터널 벽이 대기 중에 노출되는 과정으로 30년간 유지되며, 0.1 MPa과 25°C로 경계조건을 유지한다.

두 번째는 터널 벽의 경계조건을 제거한 후 벤토나이트를 설치하는 과정으로, 벤토나이트 초기 포화도는 65%이다. 이때 VG 모델을 개선한 FEBEX 모델을 이용하여 계산된 초기 흡입력은 73.5 MPa이다. 벤토나이트의 다공성은 0.41, 초기 온도는 25°C로 가정한다. 벤토나이트와 모암의

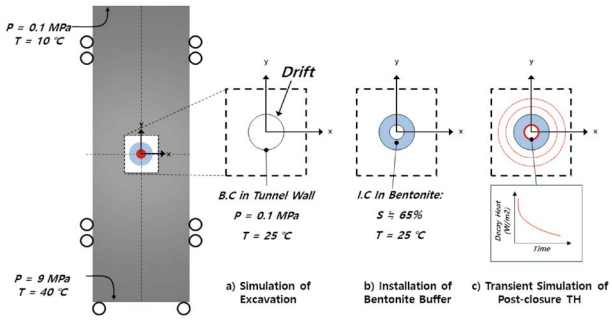

Fig. 9. Excavation and bentonite and canister installation process.

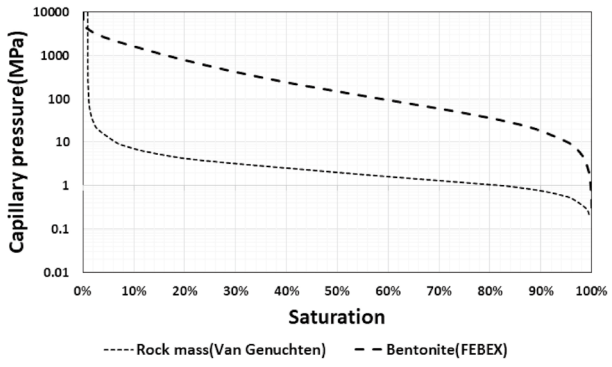

Fig. 10. Water retention curve of rock mass and bentonite.

수분보유곡선은 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다.

- 벤토나이트 수분보유곡선

$$0.65 = 0.01 + (1 - 0.01)[1 + \frac{s}{35^{1.45}}]^{-0.3}[1 - \frac{s}{40000}]^{1.5}$$

- 모암의 수분보유곡선

$$S_e = [1 + s/1.47^{2.5}]^{-0.6}$$

수분보유곡선을 통해 포화도가 결정되면 Table 4의 상대투수계수 관계식에 의해 Fig. 11과 같이 포화도에 따른 상

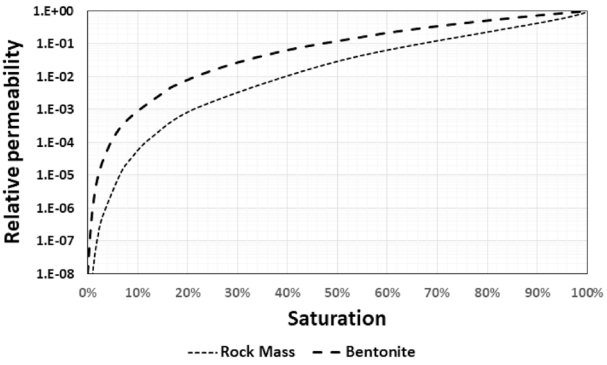

Fig. 11. Relative permeability of rock mass and bentonite.

Table 3. Boundary condition change to apply spent nuclear fuel decay heat

Time interval	During years	Heat flux ($W m^{-2}$)	Heat flux decrease ($W m^{-2}$)	Top BC (°C)	Bottom BC (MPa)
1	0~1	83.1	−1.7		
2	1~2	81.4	−1.7		
3	2~5	79.7	−5.2		
4	5~10	74.5	−6.1		
5	10~20	68.4	−9.7		
6	20~50	58.7	−19.2		
7	50~100	39.4	−14.4		
8	100~200	25.0	−9.5		
9	200~500	15.5	−5.5	10, 0.1	40, 9
10	500~ 1000	10.0	−4.9		
11	1000~ 2000	5.1	−2.1		
12	2000~5000	3.0	−1.3		
13	5000~ 10000	1.73	−0.43		
14	10000~20000	1.30	−0.60		
15	20000~50000	0.71	−0.45		
16	50000~100000	0.25	−0.14		
17	100000~1000000	0.1	−0.1		

Table 4. Host rock and bentonite thermal-hydraulic properties

Parameter	Rock mass	Bentonite
Density [kg m^{-3}]	2700	1610
Porosity	0.01	0.41
Specific heat [J kg^{-1} °C^{-1}]	900	966
Thermal conductivity [W m^{-1} K^{-1}]	3.0	$1.28-\frac{0.71}{1+e^{(s-0.65)/0.1}}$
Thermal expansion coefficient [°C^{-1}]	1e-5	1e-5
Permeability [m^2]	1e-17	2e-21
Relative permeability	$\sqrt{S_l}(1-(1-S_l^{1/0.6})^{0.6})^2$	S^3
Tortuosity factor for vapor diffusion	1	0.8

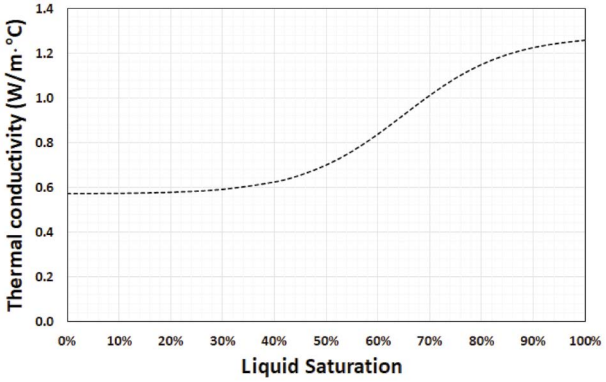

Fig. 12. Thermal conductivity of bentonite depending on saturation.

대투수계수가 결정된다. 따라서 다공성 매질 내 이류 현상을 표현하기 위한 다르시 법칙에 고유투수계수와 상대투수계수가 곱해진 형태로 적용된다.

세 번째 단계로 사용후핵연료 붕괴열 적용을 위해 캐니스터 표면의 발열 조건을 시간 구간을 나누어 Table 3과 같이 적용한다. 캐니스터의 표면적은 주어진 지름(0.9 m)과 보정 값이 적용된 길이(6.54 m)를 이용해 면적을 산출 후 Fig. 6의 붕괴열을 열유속(Heat flux)값으로 변환하여 적용한다. 열유속은 약 100만 년이 되면 완전히 사라진다.

Table 4는 모암과 벤토나이트의 열-수리 물성을 나타낸다. 벤토나이트의 열전도도는 시그모이달 관계식을 사용하며, Fig. 12와 같이 포화도에 따른 함수로 나타낸다. 반면 모암의 열전도도는 포화도와 관계없이 일정하다.

Fig. 13은 수치모델을 위한 격자 생성 그림을 나타낸다. 삼각 요소(Triangle elements) 5,164개를 생성했으며, 벤토나이트 주변에 상대적으로 조밀한 격자를 생성하였다.

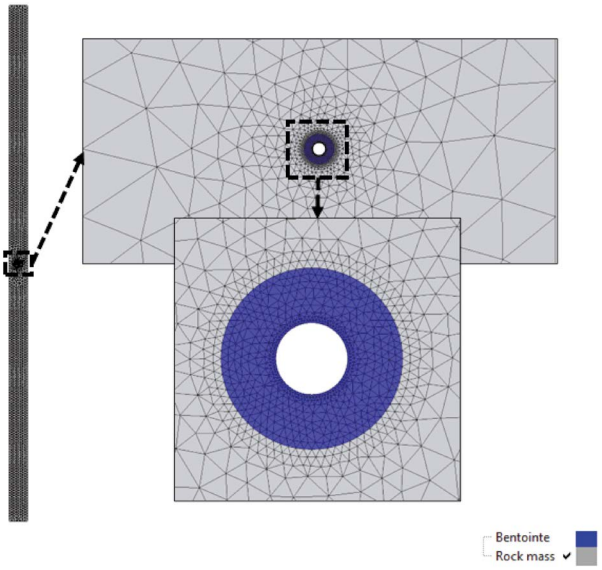

Fig. 13. Grid generation for numerical models.

6. 해석 결과

Fig. 14는 원계 관심 영역에서의 시간에 따른 온도 분포를 나타낸다. 초기 모암에서의 온도는 약 25°C로 100년 가까이 사용후핵연료에 의하여 가열된다. 온도 분포는 처분 이후, 원계 영역으로 넓게 확산되며 상승한다. 최고온도 도달 후 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15와 Fig. 16은 근계 영역에서의 시간에 따른 포화도(Saturation of degree)와 유체압(Water pressure)을 나타낸다. 포화도 분포는 원계 영역에서 크게 영향이 없으며, 근계 영역에서도 터널 주변에만 국한됨을 알 수 있다. 반면

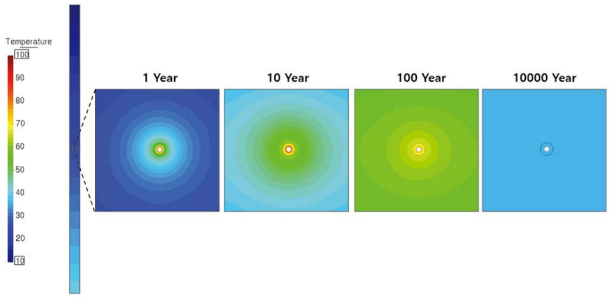

Fig. 14. Temperature distribution in the far field study area.

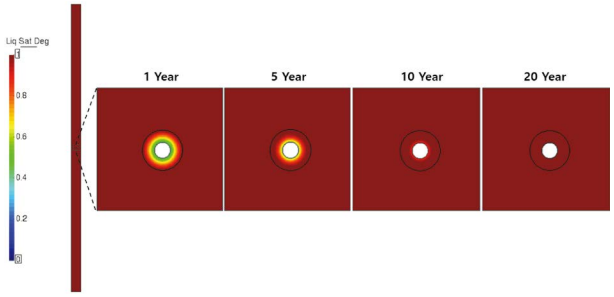

Fig. 15. Saturation distribution in the near field study area.

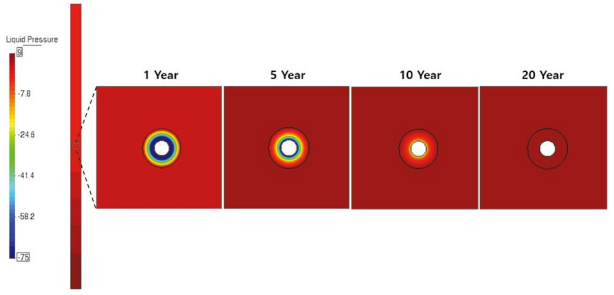

Fig. 16. Water pressure distribution in the near field study area.

근계 영역에서 시간에 따른 유체압의 분포 변화는 초기 1년 내에 급격하게 낮아졌다가 벤토나이트가 포화됨에 따라 높아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 17은 벤치마크 케이스의 온도 결과를 비교한 그림이다. 근계 관심영역 V1과 V3의 측정 위치에서의 시간에 따른 온도 변화에 관한 결과로 벤치마크 케이스의 결과와 상당히 유사함을 알 수 있다.

Fig. 18은 벤치마크 케이스의 포화도를 비교한 그림이다. 근계 관심영역 V1의 측정 위치에서의 시간에 따른 포화도 변화로 벤치마크 케이스의 결과와 상당히 유사함을 알 수 있다. 처분 약 1년 후 온도 상승의 영향으로 캐니스터 표면과 가까운 벤토나이트 포화도는 약 43%까지 감소했다가

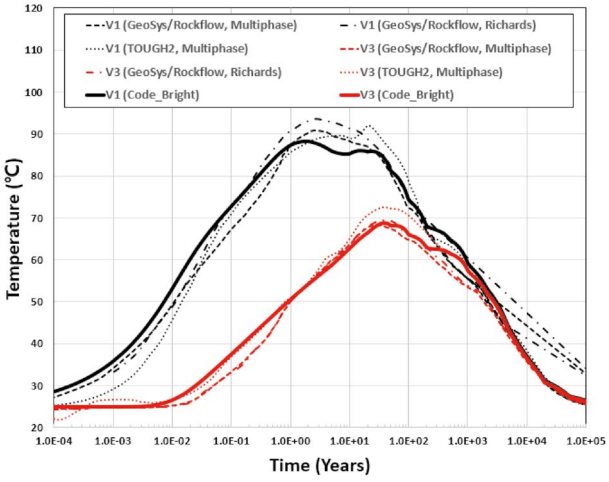

Fig. 17. Temperature comparison with benchmark case (V1, V3).

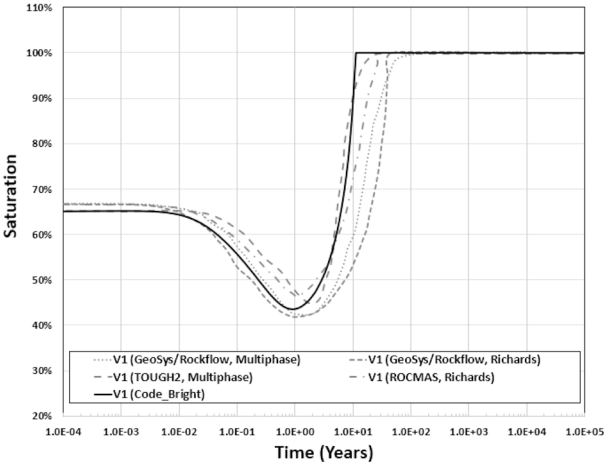

Fig. 18. Saturation comparison with benchmark case (V1).

약 11년 후 완전 포화된다. 완전 포화 시점이 본 벤치마크 열-수리 수치해석에서 약 11년인 반면, 비교 대상의 경우 25~30년으로 결과의 차이가 있음을 확인하였다. 이는 역학적(M) 거동에 의한 공극 변화가 무시됨에 따른 결과로 해석된다.

7. 결 론

본 연구에서는 사용후핵연료 심층처분을 위한 수치모델 검증을 위해 현재 개발 중인 모델에 대한 유효성 검증을 수행했다. 이에 따른 벤치마크 케이스를 선정하고 수치모델 비교 및 검증을 수행했다.

열-수리(TH) 모델 검증 결과 선행 연구와 상당 부분 유사함을 확인했다. 근계 관심영역 V1과 V3의 측정 위치에서의 시간에 따른 온도 변화에 관한 결과로 벤치마크 케이스의 결과와 상당히 유사함을 알 수 있다. 다만, 선행 연구의 감쇠열 값이 그래프로 작성되어 있어 데이터 추출 후 본 연구에 적용하는 과정에서 오차가 있을 것으로 사료된다.

시간에 따른 포화도 비교 결과 캐니스터 표면에 위치한 V1의 측정 위치에서의 시간에 따른 포화도의 완전 포화 시점이 본 연구에서 약 11년으로 선행 연구에 비해 다소 빠른 것을 확인하였다. 이는 역학(M) 모델이 반영되지 않은 결과로 해석되며, 향후 역학 모델을 추가한 열-수리-역학(THM) 복합거동 모델 개발을 통해 비교 검증을 수행할 계획이다.

사 사

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구사업임(No.2021040101003C).

참고문헌

1. Kang HS. 2023. Spent nuclear fuel storage status for the 2nd quarter of 2023, KHNP. Accessed August 2023. Available form: https://npp.khnp.co.kr/board/view.khnp?boardId=BBS_0000015&menuCd=DOM_000000103004007000&orderBy=REGISTER_DATE%20DESC&startPage=1&dataSid=10272#u.
2. SKB. 2012. AB, Svensk Karnbranslehantering. KBS-3H Complementary studies. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), Stockholm, Sweden. TR-12-01.
3. Lee C, Kim T, Lee J, Park J-W, Kwon S and Kim J-S. 2020. Introduction of International Cooperation Project, DECOVALEX from 2008 to 2019. *Tunn. Undergr. Space* **30**(4):271-305. https://doi.org/10.7474/TUS.2020.30.4.271.
4. Kwon S, Cho W-J and Choi J-w. 2007. Status of the International Cooperation Project, DECOVALEX for THM Coupling Analysis. *JNFCWT* **5**(4):323-338.
5. SKI. 2008. DECOVALEX-THMC Project Task D Long-Term Permeability/Porosity Changes in the EDZ and Near Field due to THM and THC Processes in Volcanic and Crystalline-Bentonite Systems Final Report, ISSN 1104-1374, ISRN SKI-R-08/45-SE.
6. Birkholzer J, Rutqvist J and Sonnenthal E. 2007. DECOVALEX-THMC Project. Task D. Long-Term Permeability/Porosity Changes in the EDZ and Near Field due to THM and THC Processes in Volcanic and Crystalline-Bentonite Systems. Phase 1 Report. No. SKI-R--07-10. Swedish Nuclear Power Inspectorate.
7. NEA-OECD. 1995. The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-lived Radioactive Wastes: A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the Nuclear Energy Agency.
8. Hedin A. 1999. SR 97: Processes in the Repository Evolution. Vol. 99. No. 7. Svensk karnbranslehantering AB/Swedish Nuclear Fuel and Waste Management.
9. Clara S, Salas J and Arcos D. 2010. Aspects of Geochemical Evolution of the Skbnear Field in the Frame of Sr-Site, TR-10-59, ISSN 1404-0344.
10. Lee GJ, Yoon S, Kim TH and Kim JS. 2022. Design Considerations for Buffer Materials and Research. *Tunn. Undergr. Space* **32**(1):59-77. https://doi.org/10.7474/TUS.2022.32.1.059.
11. Olivella S, Gens A, Carrera J and Alonso EE. 1996. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Eng. Comput.* **13**(7):87-112. https://doi.org/10.1108/02644409610151575.
12. Olivella S, Carrera J, Gens A and Alonso EE. 1994. Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Transp. Porous Media* **15**(3):271-293. https://doi.org/10.1007/BF00613282.
13. Olivella S, Vaunat J and Rodriguez-Dono A. 2022. CODE_BRIGHT 2022 User's Guide. Universitat Politècnica de Catalunya.
14. Pintado X, Kristensson O, Malmberg D, Åkesson M, Olivella S and Puig I. 2017. TH and THM modelling of a KBS-3H deposition drift. Posiva working report 2016-25. Posiva Oy. pp. 69-79.
15. Toprak E. 2013. THM modelling of deposition tunnel in ONKALO project. Universitat Politecnica de Catalunya. pp. 98-99. http://hdl.handle.net/2099.1/17270.
16. Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* **12**(3):513-522. https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513.
17. Van Genuchten MTh. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**:892-898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
18. Song YS. 2018. Estimation on Unsaturated Characteristic Curves of Acid Sulfate Soils (ASS). *KSEG* **28**(1):25-34. https://doi.org/10.9720/kseg.2018.1.025.
19. Pintado X and Rautioaho E. 2013. Thermo-hydraulic modelling of buffer and backfill. POSIVA 2012-48. Posiva Oy. pp. 11-22.
20. Shin H. 2011. Formulation of Fully Coupled THM Behavior in Unsaturated Soil. *KGS* **27**(3):75-83.