

Modeling the Groundwater Flow in the Near-field of the Near-surface Disposal System

표층처분시스템 근계영역의 지하수 유동에 대한 모델링 연구

Jung-Woo Kim^{1,*}, Je Heon Bang², and Dong-Keun Cho¹

¹Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

²Korea Institute of Nuclear Safety, 62, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

김정우^{1,*}, 방재현², 조동건¹

¹한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

²한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 과학로 62

(Received November 26, 2019 / Revised March 11, 2020 / Approved April 10, 2020)

A numerical model was developed using COMSOL Multiphysics to evaluate groundwater flow that causes radionuclide migration in the unsaturated zone of a near-surface disposal facility, which is considered as a domestic low and an intermediate-level radioactive waste disposal facility. Each scenario was modeled by constructing a two-dimensional domain that included the disposal vault, backfill, disposal cover, and unsaturated aquifer. A comparison of the continuous and intermittent rainfall conditions exhibited no significant difference in any of the factors considered except the wave pattern of water saturation. The input data, such as porosity and residual water content of the unsaturated aquifer, were observed to not have a significant effect on the groundwater flow. However, the hydraulic conductivity of the unsaturated aquifer was found to have a significant effect on the groundwater flow. Therefore, it is necessary to assess the hydraulic conductivity of an unsaturated aquifer to determine the extent of groundwater infiltration into the disposal vault.

Keywords: Near-surface disposal system, Unsaturated aquifer, Groundwater flow, Numerical model

*Corresponding Author.

Jung-Woo Kim, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: jw_kim@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2547

ORCID

Jung-Woo Kim

<http://orcid.org/0000-0001-6896-471X>

Dong-Keun Cho

<http://orcid.org/0000-0003-4152-8605>

Je Heon Bang

<http://orcid.org/0000-0002-6093-6252>

국내 중·저준위 방사성폐기물 처분시설로 고려되고 있는 표충처분시설의 불포화대에서 핵종 이동을 야기하는 지하수 유동을 평가하기 위하여 유한요소법 기반의 COMSOL Multiphysics을 이용한 수치모델을 개발하였다. 그리고, 처분장 가장자리를 대상으로 처분고, 뒤채움재, 처분덮개로 구성되는 표충처분시설과 그 아래에 위치한 불포화대를 포함한 수직 2차원의 모델 영역을 구성하여, 시나리오 별 모델링을 수행하였다. 지속적 강수 유입 조건과 간헐적 강수 유입 조건 비교에서 포화도의 파동 현상을 제외하고는 뚜렷한 차이점을 보이지 않는 것으로 판단되었다. 불포화대의 공극률이나 잔류함수비와 같은 입력 자료는 전반적으로 불포화대 지하수 유동에 큰 영향도가 없는 것으로 판단되었다. 하지만, 불포화대의 수리전도도는 지하수 유동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 즉, 처분고로의 지하수 유입 속도를 판단하기 위해서는 불포화대의 수리전도도 특성이 신중하게 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

중심단어: 표충처분시스템, 불포화대, 지하수 유동, 수치모델

1. 서론

국내 2단계 중·저준위 방사성폐기물 처분시설은 1단계 동굴처분시설에서 약 500~1,000 m 떨어진 거리에 125,000 드럼을 처분할 수 있는 처분고(vault)를 지표에 설치하고 처분덮개(cover)로 격리하는 표충처분시설로 계획되고 있다 [1]. 표충처분시설의 안전성평가에서 고려되는 전체 처분시스템은 일반적으로 Fig. 1과 같이 공학적방벽을 구성하는 처분고, 뒤채움재, 불투수층 덮개 등과 함께 천연방벽을 구성하는 불포화 및 포화 대수층을 포함한다.

지표부근에 위치하는 처분시설의 특성상, 표충처분시스템의 안전성평가 측면에서 폐기물로부터 발생한 핵종이 지표 생태계까지 도달하는 이동경로는 크게 1) 지하수를 통한 핵종 이동, 2) 처분장 내 폐기물 등으로부터 발생한 기체를 통한 핵종 이동, 3) 처분장으로의 부적절한 인간침입 등을 고려 할 수 있다. 비정상 시나리오로써 고려되어야 하는 인간침입을 제외하면, 핵종 이동의 주요 경로는 지표상으로 직접 이동하게 되는 기체상 핵종 이동과 불포화대에서 포화대로의 지하수 흐름을 통한 액체상 핵종 이동이 될 것이다. 그리고, 두 가지 이동경로 모두 표충처분시설 근계영역의 지하수 유동 특성에 영향을 받는다.

강수에 의한 지하수 흐름으로 시작하는 불포화대에서의 지하수 유동 및 핵종 이동은 포화대에서의 그것들과 매우 상이하다. 지하수 유동에서는 토양-지하수 간의 수분 보유(water retention) 특성을, 핵종 이동에서는 물-공극간의 농도 분배(distribution)가 추가적으로 고려되어야 한다. 불포화대에

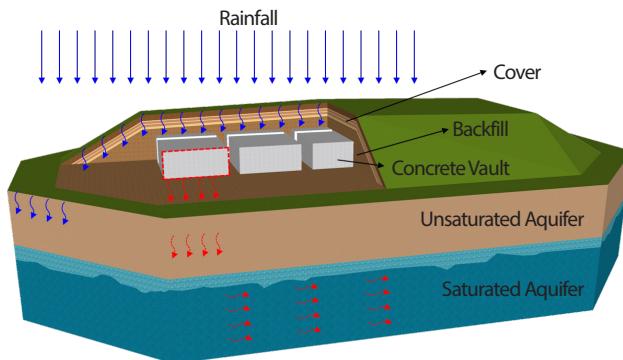


Fig. 1. Concept of near-surface disposal system.

서의 이러한 추가적인 고려사항들을 포화대와 같이 해석하거나 단순한 전이함수로 해석한다면 액체상 핵종 이동 측면에서 보수성은 증가하겠지만 불확실성은 여전히 남게 될 것이다. 따라서, 현재 운영중인 1단계 동굴처분시설의 핵종 누출 및 거동 특성이나 지하 심부에 위치하는 고준위폐기물 처분시스템을 대상으로 개발된 안전성평가 모델 등을 표충처분시설의 불포화대 핵종 거동 특성 평가에 활용하기 위해서는 많은 보수적인 가정들이 필요하다.

표충처분시설의 고유특성 중에 하나인 불포화대에서의 핵종 거동 특성과 관련하여 기존의 보수적인 가정들은 많은 불확실성을 포함하고 있다. 따라서, 처분시스템의 보수성은 유지하면서 이러한 보수적인 가정들을 대체하고 내재된 불확실성을 저감하기 위한 노력으로 표충처분시설의 불포화대에서 지하수 유동과 이를 고려한 방사성핵종의 누출 또는

부지오염에 대한 평가가 필요하다. 이를 위하여, 본 연구에서는 표충처분시설 근계영역에서의 지하수 유동 특성을 평가하기 위한 수치모델을 개발하고, 정상 및 비정상 조건에 의한 지하수 유동 특성의 변화를 비교·검토하였다.

2. 본론

2.1 표충처분시설 근계영역의 지하수 유동 개념모델

표충처분시설 근계영역의 지하수 유동에 대한 수치 모델 개발을 위하여 고려된 개념 모델들을 각 현상별로 서술하였다.

2.1.1 처분덮개에서 강수 유입

표충처분시설에서는 일반적으로 처분고로의 강수 유입을 최소화하기 위해서 다양한 매질의 덮개층(cover layer)을 반복적으로 사용하는 다층덮개(multi-layer cover) 개념을 도입하고 있다[1]. 본 연구에서는 그 중 대표적으로 물성값이 규명된 점토(clay)와 모래(sand)만을 반복해서 사용함으로써 표토(soil)와 함께 덮개층을 구성하였다. 여기서, 점토층은 강수의 유입을 저지하고, 모래층은 유입된 강수의 배수를 유도하는 역할을 하는 것으로 정의할 수 있다.

표충처분시설의 덮개에서 강수 유입의 주요 과정은 다음과 같다.

- 표충처분시설 덮개의 최상부인 표토층에 균등하게 그리고 지속적으로(또는 간헐적으로) 강수가 유입된다.
- 표토층에 유입된 강수는 각 덮개층 매질의 지하수 유동 특성(예, 공극율, 수리전도도, 수분보유 특성값 등)을 고려하여 중력 방향으로 이동한다.
- 투수능이 매우 낮은 점토층에 의해서 모래층에서는 덮개층의 경사를 따라 강수가 이동하여 처분고 아래에 위치하는 불포화대로 우회하여 이동할 수 있다.
- 덮개층을 모두 통과한 강수는 처분고와 그 주변 쇄석을 통하여 불포화대에 도달한다.

표충처분시설의 덮개에서 강수 유입에 대한 수치모델 개발을 위해서 본 연구에서 정의된 가정은 다음과 같다.

- 강수 유입량은 대상 지역의 강수 특성을 고려하여 단위면적당 유량(flux; 단위= $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)으로 정의한다.
- 강수는 강우뿐만 아니라 겨울철의 강설도 포함하지만, 눈(雪)과 비(雨)의 특성 차이를 고려하지 않고 모두 강우로 해석한다.
- 덮개층에 유입된 강수의 증발산과 지표유출은 고려하지 않는다. (미래 국내 기후의 불확실성 등을 고려하여 지하수 유동을 보수적으로 평가하기 위함)
- 표충처분시설의 상부 및 하부에 강수 이외의 지표수 및 지하수의 유입은 고려하지 않는다.
- 덮개층의 최상부인 표토층에 존재할 수 있는 식물 또는 초목들의 영향을 고려하지 않는다.
- 각 덮개층은 각각의 고유 물성을 가지는 균질한 공극매질로 정의한다.

2.1.2 불포화대 지하수 유동

지상에 위치하는 표충처분시설의 처분고로부터 유출된 핵종의 이동 매체가 되는 불포화대에서의 지하수 유동은 일반적으로 강수의 유입에 의해서 발생한다. 표충처분시설의 불포화대에서 지하수 유동의 주요 과정은 다음과 같다.

- 표충처분시설의 덮개와 주변 지표를 통하여 강수가 불포화대로 유입된다. (여기서, 지표를 통한 불포화대로의 직접적인 강수 유입은 처분덮개를 통한 강수 유입과 동일한 조건으로 가정한다.)
- 불포화대에 유입된 지하수는 불포화대 지하수 유동 특성(예, 공극율, 수리전도도, 수분보유 특성값 등)을 고려하여 중력 방향으로 이동하여 불포화대 아래에 위치한 포화대에 도달한다.

표충처분시설의 불포화대에서 지하수 유동에 대한 수치모델 개발을 위해서 본 연구에서 정의된 가정은 다음과 같다.

- 불포화대는 하나의 물성을 가지는 균질한 공극매질로 정의한다.
- 불포화대의 하부 경계는 포화대로써 불포화대로부터의 지하수 유입에 의해서 지하수위의 변화가 없다고 가정한다(고정수두 경계조건; constant head boundary condition).

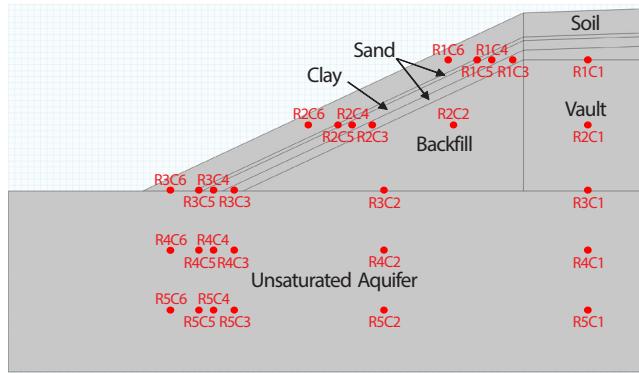


Fig. 2. Two-dimensional model domain for the near-surface disposal system and the measurement points (red dot).

Table 1. Dimensions of the model domain

Components	Values
Vault Width / 2	10 m
Vault Height	10.9 m
Cover Slope (Above Vault)	3.5% (2.0°)
Cover Slope (Above Backfill)	50% (26.6°)
Clay Layer Thickness	0.8 m
Sand Layer (Lower) Thickness	0.8 m
Sand Layer (Upper) Thickness	0.3 m
Soil Layer Thickness	2 m
Unsaturated Aquifer Height	15 m
Unsaturated Aquifer Width	50 m

- 불포화대의 물성값과 하부 고정수두 경계조건 하에서 불포화대의 초기 수리조건을 결정한다.
- 불포화대에서 기체의 이동은 고려하지 않는다.

2.2 표층처분시설 근계영역의 지하수 유동 수치모델

공학적방벽(처분고, 뒤채움재, 불투수층 덮개 등)과 천연방벽(불포화 및 포화 대수층)으로 구성되는 표층처분시설 근계영역의 지하수 유동 모사를 위하여, 앞서 정의된 개념모델을 바탕으로 유한요소법(FEM: Finite Element Method) 기반의 COMSOL Multiphysics[2]를 이용한 수치모델을 개발하였다.

COMSOL Multiphysics는 전세계적으로 다양한 다중물리현상 해석에 이용되고 있는 상용 수치해석 프로그램으로, 본 연구에서는 COMSOL 내에서 이미 검증되어 내재된 모델들을 이용하여 표층처분시설 근계영역의 지하수 유동 수치모델을 개발하였기 때문에 개발된 모델에 대한 검증(verification)을 별도로 수행하지 않았다.

2.2.1 모델 영역

표층처분시설 근계영역의 지하수 유동 해석을 위한 모델 영역은 처분장 가장자리를 대상으로 처분고, 뒤채움재, 처분덮개로 구성되는 표층처분시설과 그 아래에 위치한 불포화대를 포함한 수직 2차원으로 설정하였다(Fig. 2). 여기서, 처분덮개는 하나의 점토층을 중심으로 상부와 하부에 모래층으로 구성하였고, 처분덮개 최상부에는 일반 표토층으로 구성하였다. 그리고, 뒤채움재는 처분고의 측면(경사부)에만 존재하는 것으로 가정하였다. Fig. 2에서 각 구성요소들의 치수는 Table 1과 같다. 본 모델 영역에서는 표층처분시설 처분고 배치에서 가장자리에 해당되는 구역으로, 단일 처분고의 중심을 기준으로 처분덮개 경사면 및 지표로부터의 강수 유입에 의한 영향을 고려할 수 있다.

유한요소 해석을 위한 모델 영역 격자(mesh)화에서 두께가 얇은 상부 모래층에 대해서는 maximum element size를 0.2 m로 설정하였고, 나머지 영역에 대해서는 'Fluid dynamics'에 적합하게 검증된 COMSOL 내 격자 생성방법에 따라 자동적으로 생성되도록 설정하였다. 특히, 지속적인 강수 유입에 의하여 많은 지하수 유동이 예상되는 상부 모래층과 불포화대가 만나는 영역과 직접적인 지하수 유입이 발생하는 불포화대 좌측 영역의 격자를 좀 더 세분화하였다.

2.2.2 지배방정식

포화도(saturation)가 다양하게 분포하는 공극매질을 의미하는 불포화대에서의 지하수 유동은 COMSOL의 Richards' equation model[3]로 해석되었다. COMSOL의 Richards' equation model에서는 불포화대에서의 지하수 유동을 공극매질 내 지하수 압력의 변화로 나타내는데, 하나의 유동유체(지하수)에 대해서만 해석을 수행하고 지하수를 포함하지 않는 공극 내의 공기는 비유동(immobile)유체로 해석하였다. 즉, 공극매질은 공극(공기), 유체(지하수), 고체(토양 또는 암반)로 구성되며, 오직 유체만이 이동하는 것으로

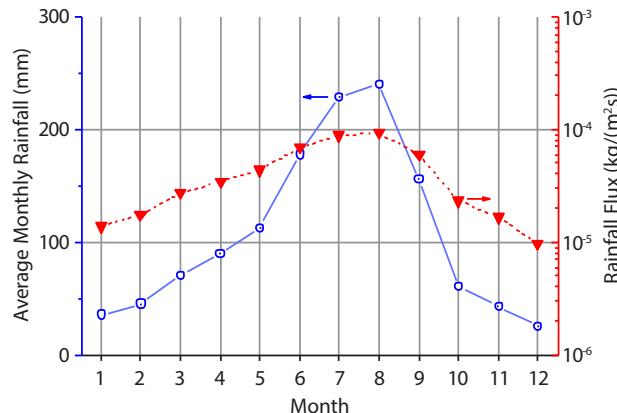


Fig. 3. Average monthly rainfall in certain regions of Korea for 30 years.

해석하였다. COMSOL의 Richards' equation model에서 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho \left(\frac{C_m}{\rho g} + SeS \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \left(- \frac{k_s}{\mu} k_r (\nabla p + \rho g \nabla D) \right) = Q_m \quad (1)$$

여기서, 종속변수 p 는 압력, C_m 은 비수분함량(specific moisture capacity), Se 는 유효포화도, S 는 저류계수(storage coefficient), k_s 는 투수계수, μ 는 유체의 동점성계수(dynamic viscosity), k_r 는 상대투수계수, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, D 는 깊이, 그리고 Q_m 은 유체의 유입 또는 유출량을 나타낸다.

불포화대 지하수 흐름 해석을 위한 Richards' equation은 포화대 해석과 달리 함수비, 유효포화도, 비수분함량, 상대투수계수 등과 같은 불포화대 물성에 의해서 비선형성(non-linearity)을 가진다. 공극매질 내 함수비는 잔류함수비(residual water content)와 포화함수비(saturated water content)의 범위 내에서 변화한다. 유효포화도는 공극률을 고려하여 함수비를 정규화한 값이다. 압력변화에 따른 함수비의 변화를 나타내는 비수분함량은 압력-함수비 그래프에서 기울기를 의미한다. 상대투수계수는 함수비 증가에 따라 함께 증가하며, 포화상태에서 최대값을 가진다. 이러한 물성값들을 계산하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같이 van Genuchten의 토양수분곡선(soil water retention curve)식을 이용하였다[3].

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + Se(\theta_s - \theta_r) & H_p < 0 \\ \theta_s & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$Se = \begin{cases} \frac{1}{[1 + |\alpha H_p|^n]^m} & H_p < 0 \\ 1 & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$C_m = \begin{cases} \frac{\alpha m}{1-m} (\theta_s - \theta_r) Se^{\frac{1}{m}} \left(1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^m & H_p < 0 \\ 0 & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$k_r = \begin{cases} Se^l \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 & H_p < 0 \\ 1 & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서, H_p 는 압력수두($=p/\rho g$), θ_s 와 θ_r 은 각각 포화 및 잔류 함수비, 그리고, α , n , m ($=1-1/n$), l 은 매질에 따라 결정되는 van Genuchten 모델 상수로써, α 는 공기 유입 압력수두(air entry pressure head)의 역수이고, n 은 매질의 공극 크기 분포와 관련있다. 그리고, Mualem[4]은 대부분의 토양에서 공극 연결성 지수인 l 이 0.5의 값을 가진다고 보고하였다.

2.3 입력자료

불포화대 지하수 유동을 해석하기 위해서는 우선적으로 지하수 유동을 유발하는 강수 자료와 함께 지하수 유동이 발생하는 매질의 불포화 물성자료가 필요하다.

2.3.1 강수 특성

강수 유입량은 국내 특정 지역의 30년간 월평균 강수량 자료를 바탕으로 유량(flux) 단위($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)로 계산되었다 (Fig. 3)[5]. 그 결과, 월평균 강수량 자료로부터 계산된 연간 강수량은 1,286.8 mm이었고 유량은 $4.08 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 로 계산되었다. 여기서, 앞서 가정한 바와 같이, 관련된 정확한 자료가 없는 이유로 증발산과 지표유출 등을 통한 감소된 지하수 함량을 고려하지 못했다. 이는 미래 국내 기후의 불확실성을 고려하여 지하수 유동을 보수적으로 평가하기 위함이지만, 향후 연구에서는 현실적인 개념모델 수립을 위하여 증발산과 지표유출 등을 통한 지하수 함량의 감소가 추가적으로 고려되어야 할 것이다. 기본적인 시뮬레이션 조건에서는 연간 강수량을 바탕으로 계산된 유량을 적용하여 매년 같은 유량의 강수가 지속적으로 유입된다는 설정을 적용하였다. 추가적으로, 강수의 간헐적 유입에 의한 영향을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건에서는 월평균 강수량

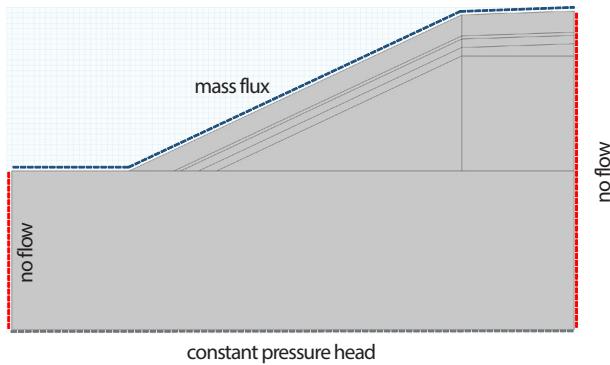


Fig. 4. Boundary conditions for the groundwater flow.

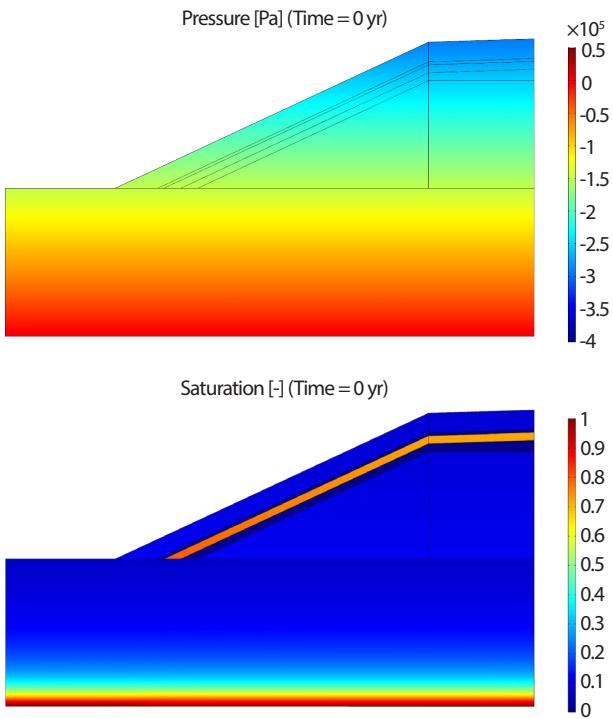


Fig. 5. Initial conditions for the groundwater flow: Pressure (Upper) and Saturation (Lower).

자료를 이용하여 월별로 wet-dry 조건이 반복적으로 발생한다고 설정하였다.

2.3.2 매질 특성

불포화대 지하수 유동 해석을 위하여 사용된 각 매질별 물성 자료는 Table 2와 같다. 매질은 Fig. 2의 모델 영역을

고려하여 처분고, 뒤채움재, 처분덮개(점토층, 모래층, 표토층), 그리고 불포화대로 구분하여 고려되었다. 매질별 물성값은 덮개의 개념이 유사한 국외사례를 참조하였다[6]. 자료가 빈약한 처분고 및 뒤채움재의 물성값으로는 표토층의 해당값을 사용하였다.

2.3.3 경계조건 및 초기조건

지하수 유동 해석을 위하여 사용된 경계조건으로는, 모델 영역 상부에서 강수 유입을 적용하기 위한 mass flux 조건을, 포화 대수층의 지하수면을 의미하는 모델 영역 하부에서는 constant pressure head 조건을, 그리고 모델 영역의 양측면에서는 지하수의 유입이나 유출이 존재하지 않는다는 가정하에 no flow 조건을 설정하였다(Fig. 4).

지하수 유동 해석을 위한 초기조건은 위의 경계조건에서 모델 영역 상부의 mass flux 조건(즉, 강수 조건)을 고려하지 않은 상태에서 Stationary 해석을 통한 결과로 설정하였다(Fig. 5). 모델 영역 모두 초기에 불포화 영역으로 가정하였기 때문에, 포화대 지하수면(즉, 모델 영역 하부경계)으로부터 불포화대와 뒤채움재, 처분고, 그리고 처분덮개까지 모두 깊이에 따른 음의 압력을 확인할 수 있었다. 그리고, van Genuchten 토양수분곡선 모델에 따른 매질별 포화도가 모델 영역 각 위치별로 설정되었음을 확인할 수 있었다.

2.4 강수 유입 조건에 따른 지하수 유동 특성

2.4.1 지속적 강수 유입 조건

지속적 강수 유입 조건에서 시간별 포화도 분포는 Fig. 6과 같다. 강수 유입에 의하여 표토층의 곁면이 먼저 포화되었고, 처분덮개의 경사를 따라 지하수 유동이 발생하여 처분덮개의 가장자리를 통한 불포화대로의 지하수 유입이 관측되었다. 지속적인 강수 유입에 의하여 지하수가 표토층을 통과하고 수리전도도가 높은 모래층으로 유입되면서 경사면을 통한 지하수 흐름이 가속화되었고, 표토층의 포화도는 감소하여 약 0.8 정도에서 평형상태에 도달하였다. 한 가지 특이 점은, 처분덮개의 경사도가 변하는 지점에서 포화도의 불연속적인 분포가 관찰되었다. 처분고 상부의 처분덮개에서는 낮은 경사도에 의하여 측면 방향으로 낮은 유속이 발생하고, 가장자리 뒤채움재 상부의 처분덮개에서는 높은 경사도에 의하여 측면 방향으로 상대적으로 높은 유속이 발생하는데,

Table 2. Material properties of near-surface disposal system[6]

Material Properties	Vault and Backfill	Cover (Clay)	Cover (Sand)	Cover (Soil)	Unsaturated Aquifer
Hydraulic Conductivity [m/s]	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-9}	3.00×10^{-4}	1.00×10^{-6}	8.20×10^{-7}
Saturated Water Content [-]	0.45	0.36	0.37	0.47	0.34
Residual Water Content [-]	0.1	0.0001	0.045	0.1	0.2
van Genuchten α [1/m]	4.4	0.16	6.83	4.4	1
van Genuchten n [-]	1.523	1.203	2.08	1.523	2
van Genuchten l [-]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

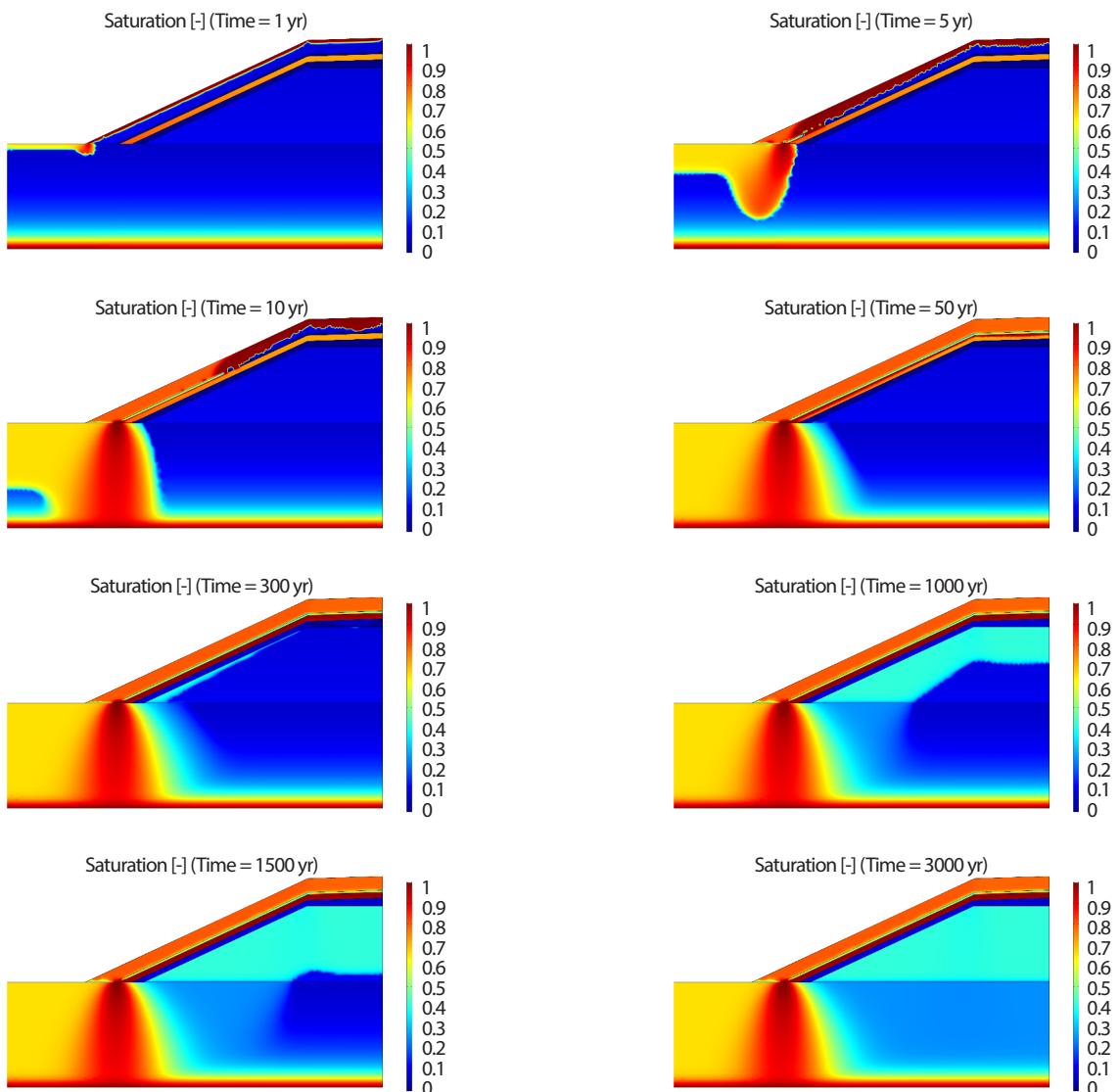


Fig. 6. Water saturation in the near-surface disposal system for each time-step.

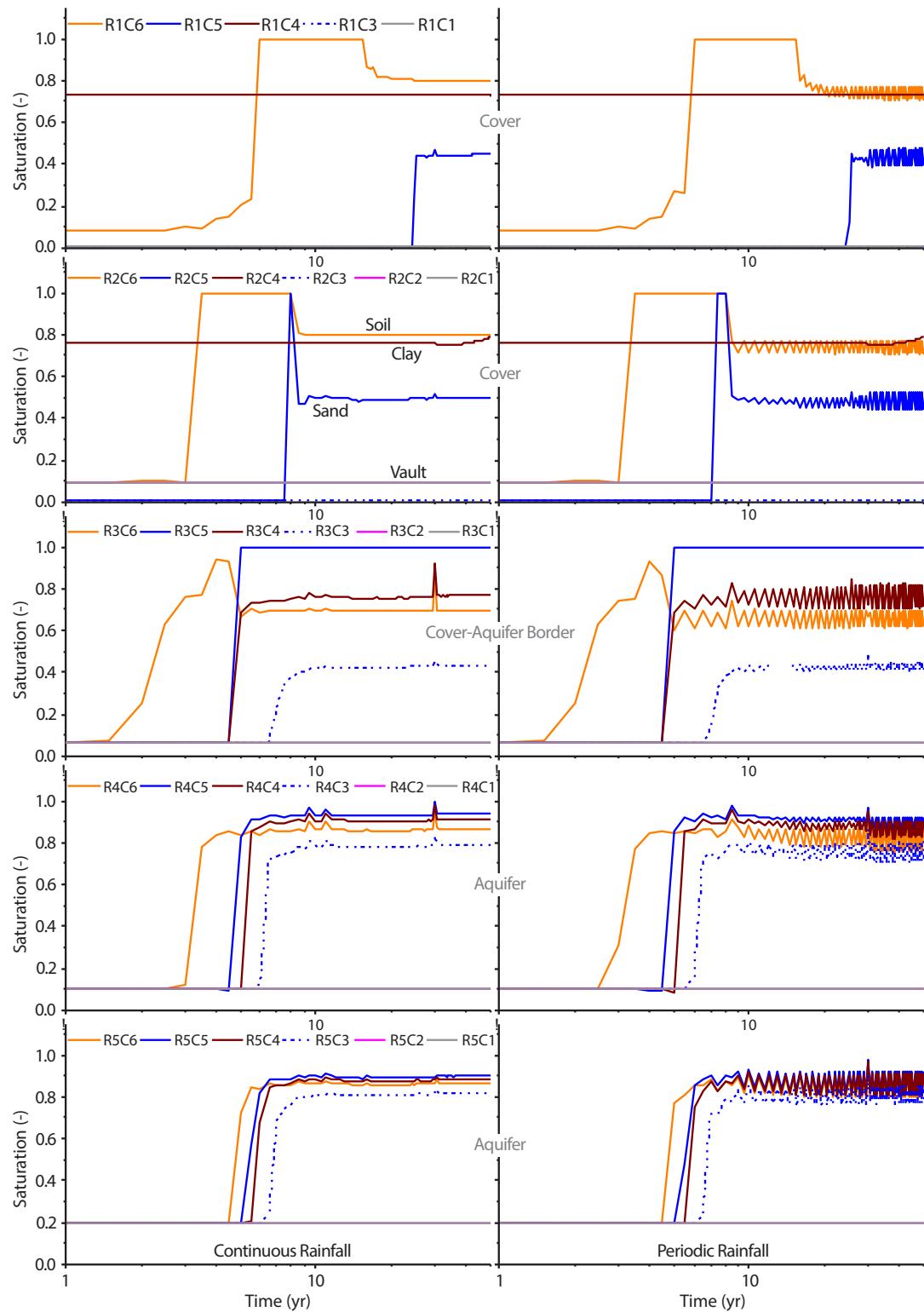


Fig. 7. Temporal distributions of water saturation for continuous and periodic rainfall conditions.

경사도가 변하는 지점에서 일부 낮은 경사도 구역이 인접한 구역의 높은 유속의 영향을 받기 때문으로 판단되었다.

모래층은 빠른 배수(drainage)에 의하여 포화도가 빠르게 0.4~0.5 정도에서 평형상태에 도달하였다. 모래층의 높은 수리전도도에 의한 빠른 배수와 점토층의 낮은 수리전도도의 영향으로 점토층으로의 지하수 유입은 매우 느리게 진행되었다. 본 계산에서는 강수 유입이 약 200년 지속된 이후에 점토층이 완전 포화되었고, 점토층 아래에 위치한 모래층을 통한 지하수 흐름이 관측되었다. 하지만, 점토층으로부터의 낮은 지하수 유입과 모래층의 높은 수리전도도 때문에 하부 모래층의 포화도는 약 0.1 정도로 매우 낮게 나타났고, 이는 하부 모래층 아래에 위치한 뒤채움재와 처분고로의 매우 낮은 지하수 유입을 초래하였다.

지속적인 강수 유입 조건에서 처분고로의 지하수 유입은 약 300년 이후에 처분고 상부에서 시작되었고, 약 1,700년 이후에는 처분고 전체에 지하수 유입이 완료되었다. 그리고, 약 2,000년 이후에는 불포화대를 포함한 전체 처분시스템이 수리지질 관점에서 평형상태에 도달하는 것을 확인하였다. 평형상태에서도 여전히 상부 모래층과 처분장 가장자리 아래의 불포화대에서는 많은 양의 지하수 흐름이 발생하였고, 뒤채움재, 처분고, 그리고 처분고 아래의 불포화대에서는 약 0.4 이하의 낮은 포화도를 가지며 불포화 상태를 계속해서 유지하는 것으로 확인되었다. 결론적으로, 표층처분 시설의 공학적방벽인 처분덮개의 구조적 건진성(stability)과 안전기능(safety function)이 장기간에 걸쳐 유지된다면 지표에서의 강수 유입이 지속적으로 발생하는 보수적인 조건에서도 처분고 내 폐기물로의 지하수 유입은 매우 제한적일 것으로 판단되었다.

2.4.2 간헐적 강수 유입 조건

지속적 강수 유입 조건은 현실의 기후 현상을 고려하면 보수적인 조건으로 간주될 수 있다. 지속적 강수 유입에 의해서 불포화대 지하수 유동이 많아지고, 이 때문에 핵종 이동이 빨라질 수 있기 때문이다. 지속적 강수 유입 조건의 보수성을 확인하기 위하여 간헐적 강수 유입 조건과의 지하수 유동 특성 비교를 수행하였다. 특히, 지하수 유동이 급격히 변하는 50년 이내의 지하수 유동 특성을 비교하였다. 간헐적 강수 유입 조건에서 강수 유입량은 Fig. 3의 월별 강수량을 바탕으로 두 달 동안의 강수량이 한 달 동안 모두 유입되는

것으로 가정하여 격월로 wet-dry 조건을 설정하였다. 이는 지속적 강수 유입 조건과의 비교에서 전체 강수 유입량을 동일시하기 위함이었다.

그 결과(Fig. 7), 간헐적 강수 유입 조건에서 시스템 내 압력 분포는 지속적 강수 유입 조건과 거의 유사하게 관측되었고, 시스템 내 수리특성이 평형상태에 도달한 후에 간헐적 강수 유입에 의한 포화도 분포의 파동 현상이 관측되었다는 점이 지속적 강수 유입 조건과의 차이점이라 할 수 있었다. 불포화대에서의 포화도 분포는 전체적으로 간헐적 강수 유입에 의해 감소된 것으로 관측되었고, 단지 강수 유입시의 포화도는 지속적 강수 유입 조건의 그것과 유사하거나 다소 낮은 것으로 관측되었다.

결과적으로, 강수 유입 조건을 간헐적으로 변경함으로써 불포화대 표층처분시스템의 수리특성이 다소 감소하였지만, 그 영향은 크지 않은 것으로 판단되었다. 즉, 불포화대 표층처분시스템의 안전성평가에서 강수 특성을 지속적 유입 조건으로 고려함으로써 안전성평가의 보수성이 증가되기는 하지만 그 정도는 크지 않을 것으로 판단되었다.

2.5 주요 입력자료의 영향

불포화대 지하수 유동 해석을 위해 필요한 입력자료들을 연구실 실험이나 현장조사를 통해서 획득하기에는 많은 제약이 따른다. 따라서, 일반적인 모델링 연구에서는 입력자료들을 각종 문헌 등에서 자주 인용하게 되는데, 이 때문에 모델링 결과의 불확도가 커지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 임의로 가정된 입력자료들 중에서 몇몇 주요 입력자료들이 불포화대 지하수 유동 및 핵종 이동에 미치는 영향을 추가적으로 조사하였다.

2.5.1 불포화대 공극률 영향

불포화대의 공극률 변화가 표층처분시스템 내 지하수 유동 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과, 불포화대 공극률을 0.24에서 0.44까지 변화시킴에 따라 표층처분시스템 내 지하수 유동 특성에 미치는 영향은 매우 적은 것으로 관측되었다. 단지, 불포화대 내 지하수 유입지점(측정지점 R4C5 와 R5C5)에서 초기 지하수 유입 시(약 5년 경과 후) 공극률 증가에 따라 지하수 유입이 다소 빨라짐을 확인할 수 있었다 (Fig. 8). 하지만, 전체 처분 안전성평가 기간(수천 년 이상)을

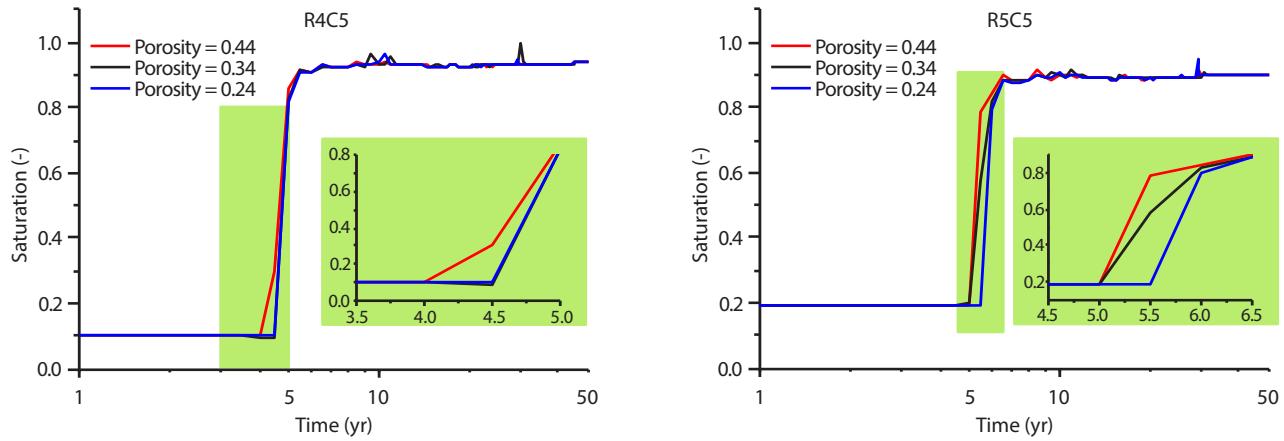


Fig. 8. Water saturation depending on the porosity of the unsaturated aquifer at the monitoring points R4C5 (Left) and R5C5 (Right).

고려할 때, 약 1~2년 동안의 이러한 수리특성 변화는 무시할 수 있을 정도의 영향으로 판단된다.

2.5.2 불포화대 잔류함수비 영향

불포화대의 잔류함수비 변화가 표충처분시스템 내 지하수 유동 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 불포화대 잔류함수비를 Table 2의 기준값에서 0.1에서 0.3까지 증감함으로써 나타나는 포화도 분포의 변화를 비교한 결과(Fig. 9), 큰 변화는 보이지 않는 것으로 확인되었다.

2.5.3 불포화대 수리전도도 영향

불포화대 수리전도도를 Table 2의 기준값에서 증감함으로써 나타나는 포화도 분포의 변화를 비교한 결과(Fig. 10), 공극률이나 잔류함수비와 달리 큰 변화를 확인할 수 있었다.

불포화대의 수리전도도가 감소하면서 처분덮개가 포화되는 속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있었으며, 불포화대 수리전도도가 8.2×10^{-8} m/s일 때는 불포화대의 모든 측정지점에서 빠르게 완전 포화상태에 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 반면에, 불포화대 수리전도도를 Table 2의 기준값에서 10배 증가하였을 때는 불포화대에서의 포화도 증가가 일찍 발생하였지만, 평형상태에서의 포화도 값은 감소된 것을 확인할 수 있었다. 즉, 불포화대의 수리전도도의 크기에 의해서 유입된 지하수가 잘 배수되거나 더 오래 잔류하거나 하면서 불포화대의 지하수 유동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

이러한 결과로부터, 불포화대의 지하수 유동이 오직

강수 유입에 의해서만 발생하고 처분덮개가 모든 영역에서 안전기능을 제대로 한다고 가정하면 수리전도도가 큰 불포화대가 유입된 강수의 배수를 원활하게 하여 실제 처분고로의 지하수 유입을 자연시키는 역할을 할 것으로 판단되었다. 하지만, 이러한 판단은 수리전도도가 낮은 처분장 부지를 선호하는 기존의 부지선정 기준에 반하는 것으로, 최종 판단을 하기 위해서는 그 외의 영향인자들에 대한 평가와 함께 신중히 이루어져야 할 것이다. 예를 들어, 수리전도도가 높은 불포화대가 처분고로의 지하수 유입을 자연시킬 수는 있지만, 일단 지하수 유입이 발생되고 핵종 누출이 발생하면 지하수를 통한 핵종 이동 시간은 더욱 빨라질 것이다.

3. 결론

국내 2단계 중·저준위 방사성폐기물 처분시설은 125,000 드럼을 처분할 수 있는 처분고를 지표에 설치하고 처분덮개로 격리하는 표충처분시설로 계획되고 있다. 지표에 인접한 표충처분시설의 특성 상 처분장에서 발생한 기체는 대부분 지표로 직접 이동하게 되고, 지하수 흐름을 통한 핵종 이동이 표충처분시설의 주요 이동경로로 고려된다. 현재 운영중인 1단계 동굴처분시설의 핵종 누출 및 거동 특성이나 지하 심부에 위치하는 고준위폐기물 처분시스템을 대상으로 개발된 안전성평가 모델 등을 표충처분시설에서의 핵종 거동 특성 검증에 활용하기 위해서는 많은 보수적인

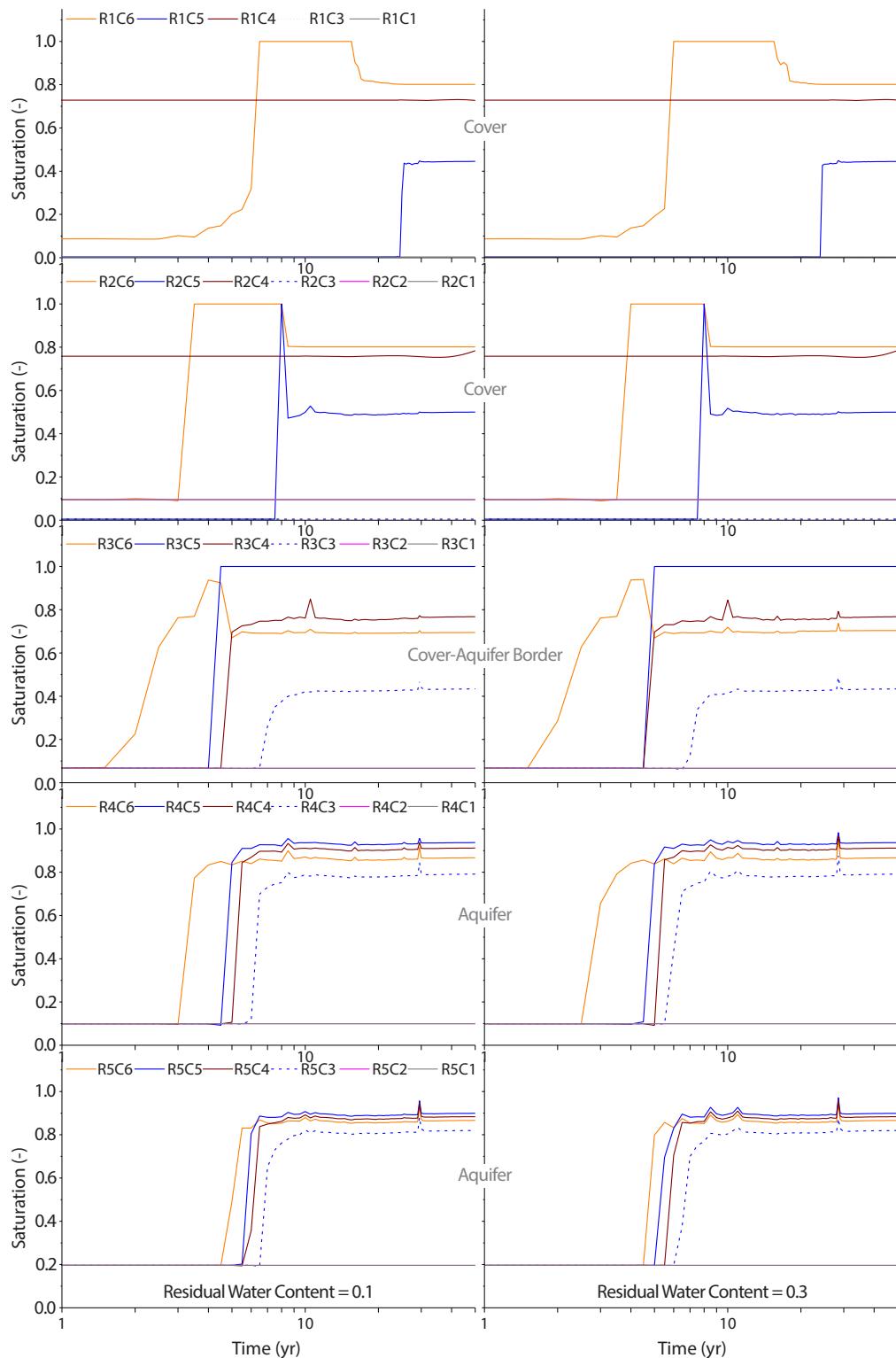


Fig. 9. Water saturation depending on the residual water content of the unsaturated aquifer.

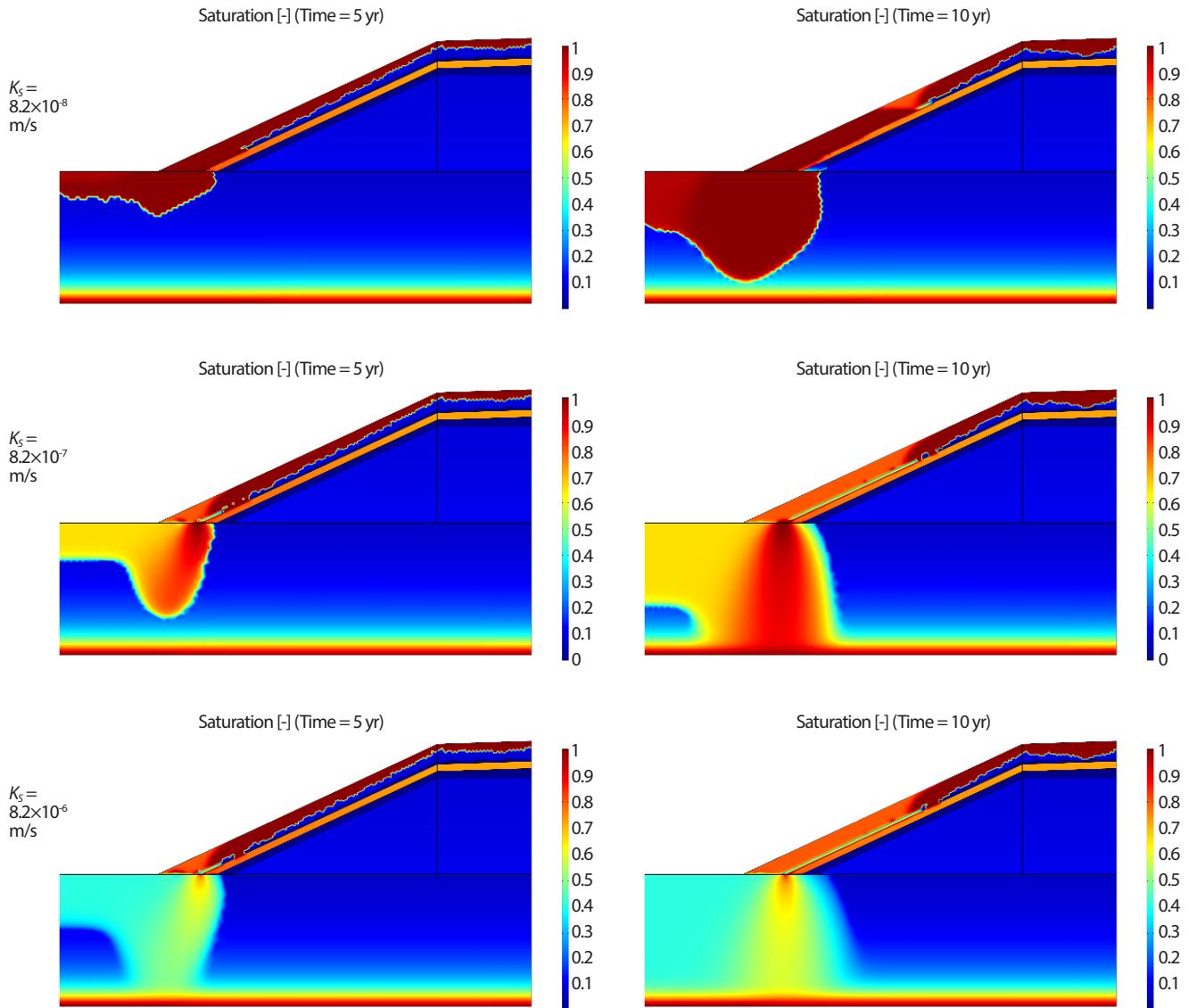


Fig. 10. Water saturation depending on the hydraulic conductivity of the unsaturated aquifer.

가정들이 필요하다. 표충처분시설의 고유특성 중에 하나인 불포화대에서의 핵종 거동 특성과 관련하여 기존의 보수적인 가정들은 많은 불확실성을 내재하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 처분시스템의 보수성은 유지하면서 기존의 보수적인 가정들을 대체하고 내재된 불확실성을 저감하기 위하여 중·저준위 방사성폐기물 표충처분시설의 불포화대에서 핵종 이동을 야기하는 지하수 유동을 평가하고자 하였다.

이를 위하여, 유한요소법 기반의 COMSOL Multiphysics을 이용한 수치모델을 개발하였고, 처분장 가장자리를 대상으로 처분고, 뒤채움재, 처분덮개로 구성되는 표충처분시설과 그 아래에 위치한 불포화대를 포함한 수직 2차원의 모델영역을 구성하여, 시나리오 별 모델링을 수행하였다.

지속적 강수 유입 조건의 보수성을 확인하기 위한 간헐적 강수 유입 조건과의 지하수 유동 특성 비교에서는, 불포화대 지하수 유동 관점에서 포화도의 파동 현상을 제외하고는

간헐적 강수 유입 조건이 뚜렷한 영향을 보이지 않는 것으로 판단되었다. 임의로 가정된 입력자료들 중에서 몇몇 주요 입력자료들이 불포화대 지하수 유동 및 핵종 이동에 미치는 영향을 조사한 결과, 불포화대의 공극률이나 잔류함수비와 같은 입력자료는 전반적으로 불포화대 지하수 유동에 큰 영향도가 없는 것으로 판단되었다. 하지만, 불포화대의 수리전도도는 지하수 유동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 즉, 처분고로의 지하수 유입 속도를 판단하기 위해서는 불포화대의 수리전도도 특성이 신중하게 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 표층처분시설을 구성하는 매질별로 van Genuchten의 토양수분곡선식에 필요한 상수들을 기준의 문헌에서 인용하였지만, 이들에 대한 영향 검토가 향후 추가적으로 수행되어져야 할 것이다.

본 연구에서 개발된 수치모델은 표층처분 시설의 다양한 입력자료들(예, 강수특성, 토양매질의 불포화 수리특성, 핵종 수착특성, 처분덮개의 규격 및 구성 등)을 이용하여 불포화대 지하수 유동을 해석할 수 있는 도구이다. 따라서, 앞으로 본 연구를 통해 개발된 불포화대 지하수 유동 수치모델은 전체 표층처분 시스템에 대한 핵종 이동 경로 및 시니리오 설정의 유효성 확인을 비롯해 불포화대 조건의 수리학적 입력자료 생산 등 안전성평가 분야에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업 중·저준위방사성폐기물 처분시설 규제검증기술 심화 연구(No.1703005) 및 과학기술정보통신부 지원에 의한 원자력기술개발사업 처분시스템 성능평가체계 개발(NRF-2017M2A8A5014856)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J. H. Bang, J.-W. Park, and K. I. Jung, ‘Development of Two-dimensional Near-field Integrated Performance Assessment Model for Near-surface LILW Disposal”, J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 12(4), 315-334 (2014).
- [2] COMSOL, COMSOL Multiphysics Reference Manual, www.comsol.com.
- [3] COMSOL, COMSOL Subsurface Flow Module – User’s Guide, www.comsol.com.
- [4] Mualem, Y., “A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media”, Water Resour. Res., 12(3), 513-522 (1976).
- [5] Korea Meteorological Administration, Annual Climatological Report, Publication Number: 11-1360000-000016-10, 2015.
- [6] Meyer, P.D. and Nicholson, T.J., “Auxiliary Analyses in Support of Performance Assessment of a Hypothetical Low-Level Waste Disposal Facility: Application of an Infiltration Evaluation Methodology”, NUREG/CR-6114 (PNL-8842) Vol. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1993.