

고준위폐기물처분장 공학적방벽의 갭 공간이 미치는 영향 분석

An Influence Analysis on the Gap Space of an Engineered Barrier for an HLW Repository

윤 석¹ Yoon, Seok
이 창 수² Lee, Changsoo
김 민 준³ Kim, Min-Jun

Abstract

The high-level radioactive waste (HLW) produced from nuclear power plants is disposed in a rock-mass at a depth of hundreds meters below the ground level. Since HLW is very dangerous to human being, it must be disposed of safely by the engineered barrier system (EBS). The EBS consists of a disposal canister, backfill material, buffer material, and so on. When the components of EBS are installed, gaps inevitably exist not only between the rock-mass and buffer material but also between the canister and buffer material. The gap can reduce water-retarding capacity and heat release efficiency of the buffer material, so it is necessary to investigate properties of gap-filling materials and to analyze gap spacing effect. Furthermore, there has been few researches considering domestic disposal system compared to overseas researches. In this reason, this research derived the peak temperature of the bentonite buffer material considering domestic disposal system based on the numerical analysis. The gap between the canister and buffer material had a minor effect on the peak temperature of the bentonite buffer material, but there was 40% difference of the peak temperature of the bentonite buffer material because of the gap existence between the buffer material and rock mass.

요 지

원자력발전소에서 발생하는 고준위폐기물은 지하 수백 미터 깊이의 암반에 처분된다. 이러한 고준위폐기물은 인체에 유해하기에 공학적방벽시스템에 의해 안전하게 처분되어야 하며, 공학적방벽시스템은 처분용기, 뒤채움재, 완충재 등으로 구성된다. 고준위폐기물처분장에 이러한 공학적방벽시스템의 구성요소를 설치하게 되면, 처분용기 및 완충재 사이, 완충재와 자연 암반 사이 등에 갭이 존재하게 된다. 이러한 갭의 존재로 인해 공학적방벽재의 차수능과 열전달 효율이 떨어질 수 있기에, 갭 공간의 크기 및 갭채움재 특성 평가 등의 연구가 반드시 필요하다고 할 수 있다. 해외에 비해 국내 처분시스템을 고려한 갭 공간 및 갭채움재에 대한 연구는 아직 진행되고 있지 않는 상황이기에, 본 연구에서는 수치해석을 통해 국내 처분시스템을 고려한 갭 공간이 공기로 채워져 있는 조건하에서 갭의 크기에 따른 벤토나이트 완충재의 첨두 온도를 도출하였다. 처분용기와 완충재 사이의 갭 공간이 완충재의 첨두 온도에 미치는 영향은 미미하였으나, 완충재와 자연 암반 사이의 갭 공간에 따른 완충재의 첨두 온도는 최고 약 40%의 차이를 나타냈다.

1 정회원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI)

2 비회원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 선임연구원 (Senior Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI)

3 정회원, 한국지질자원연구원 심지층연구센터 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Deep Subsurface Research Center, KIGAM, Tel: +82-42-868-3244, Fax: +82-31-868-3244, kimmj@kigam.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

사용후핵연료는 원자력발전소에서 발생하는 고준위 폐기물로서, 강한 방사선을 배출하여 인체에 매우 위험하다. 따라서 이러한 고준위폐기물은 인간 생활권과 완전히 격리되어야 하기에 천연방벽과 공학적방벽의 다중방벽시스템에 의해 지하 수백 미터 깊이의 암반에 안전하게 처분되어야 한다(Chen et al., 2017; Cho, 2017; Zheng et al., 2015; Yoon et al., 2020). 천연방벽은 고준위폐기물처분장 주변에 자연 상태로 존재하는 암반과 지질 환경을 뜻하며, 공학적방벽(Engineered barrier)은 인간에 의해 인위적으로 개발된 방벽으로써 사용후핵연료를 담은 처분용기, 완충재, 뒤채움재 등으로 구성된다. 고준위폐기물처분장은 여러 개의 처분터널과 이를 연결하는 터널로 구성되는데, 처분동굴 바닥에는 수직의 처분공(Deposition borehole)을 굴착한다(Juvankoski, 2013; Lee et al., 2013). 그 후 사용후핵연료를 처분용기에 밀봉한 후 처분용기를 처분공에 설치하고, 처분용기와 암반 사이의 빈 공간은 완충재로 충전시킨 후, 처분터널을 뒤채움재로 채워서 완전히 폐쇄하게 된다(Fig. 1).

공학적방벽은 처분장 주위의 모암에 존재하는 지하수의 침투를 지연시키고 고준위폐기물에 함유되어 있는 방사성핵종이 처분장 외부로 유출되는 것을 막아주는 역할을 한다(Cho, 2017). 이 중 완충재는 벤토나이트 점토를

압축한 형태인 압축 벤토나이트가 완충재로 가장 적합한 것으로 알려져 있으며(Dixon et al., 1985; Karland, 2010; Lloret et al., 2003; Xiang et al., 2020), 국내의 경우 경주 지역에서 생산되는 벤토나이트에 대한 완충재로서의 성능 분석 연구를 수행 중에 있다(Cho et al., 1999; Lee et al., 2011; Yoon et al., 2020).

고준위폐기물처분장의 처분공에 처분용기를 설치시키고 완충재를 설치하는 과정에서 처분용기와 완충재 사이, 완충재와 암반 사이에는 불가피하게 갭(gap)이 형성된다. 이것은 완충재나 뒤채움재 설치 시 작업의 편의성을 위해서, 또한 굴착된 처분공의 암반 표면이 고르지 못하기에 일정한 공간을 두어야 하기 때문이다(Lee et al., 2013). 하지만 처분장 폐쇄 후 이러한 갭이 그대로 존재한다면 공학적방벽재의 차수능과 열전달 효율이 떨어지고, 특히 완충재와 암반 사이의 갭으로 인해 처분공벽에서의 스펙링과 완충재 블록의 움직임이 생길 수 있기에 이를 방지하기 위해서는 갭 공간을 물질로 채워야 한다(Juvankoski, 2013).

이렇듯, 처분공 내의 갭 사이즈와 갭채움재에 대한 연구가 필요하며 스웨덴과 핀란드를 중심으로 연구가 진행되고 있다. 스웨덴과 핀란드는 처분용기와 완충재 사이에는 10mm 갭을, 완충재와 처분공 내벽 암반 사이에는 50mm 갭을 허용하고 있으며, 처분용기와 완충재 사이는 갭채움을 하지 않고, 완충재와 처분공 내벽 사이는

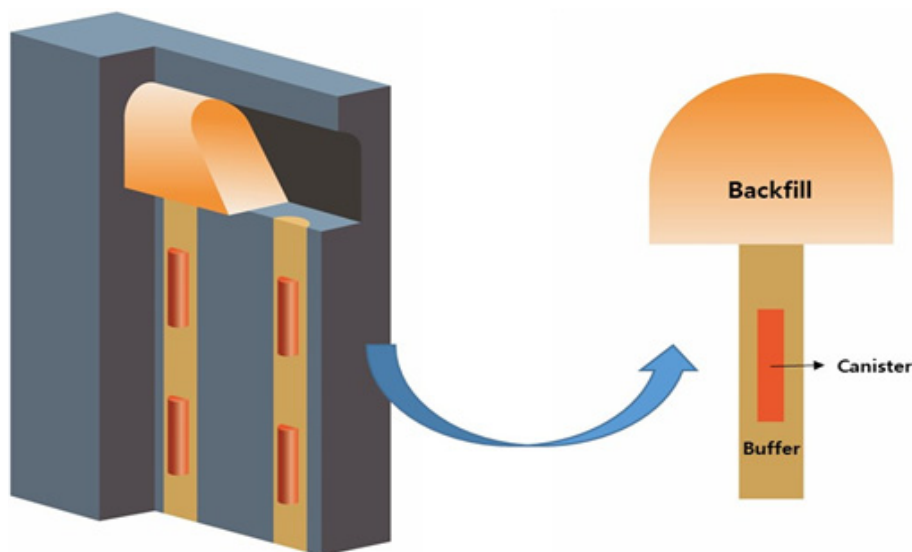


Fig. 1. Concept of deposition hole and engineered barrier system (Yoon et al., 2020)

벤토나이트 펠렛 및 과립 벤토나이트(*granular bentonite*)를 갭채움재로 적용하고 있다(Juvankoski, 2013; Marjavaara and Kivikoski, 2011). 캐나다에서도 완충재와 암반 사이의 갭을 벤토나이트 펠렛과 과립 벤토나이트로 충전시키는 실험을 실시하였다(Kjartanson et al., 2005). Lee et al.(2019)은 처분용기와 완충재 사이 갭을 물질로 채우는 것이 오히려 완충재의 침투 온도를 상승시킨다고 분석하였으며, 일반적으로 처분용기와 완충재 사이는 갭채움을 하지 않고 있다. 또한 벤토나이트 펠렛을 제조하기 위해 정압축, 롤러압축 및 압출컷팅 방법 등 제조 방법에 관한 연구도 진행되고 있다(Marjavaara and Holt, 2012). 국내의 경우, Lee et al.(2019)은 한국형 처분시스템을 반영한 갭채움 재료에 따른 완충재의 침투 온도를 수치해석을 통해 분석하였으나, 이를 제외하고는 처분공 내의 갭을 고려한 연구는 진행된 바가 거의 없는 상황이다. 게다가 처분용기와 완충재 사이의 갭은 공기에 의한 전도 및 대류가 복합적으로 발생할 수 있으며, 이는 공학적방벽시스템의 가장 중요한 설계인자 중 하나인 완충재의 침투온도를 결정하는데 있어서 매우 중요한 영향을 끼치기에 이를 고려한 갭에서의 정확한 열전달 해석이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 국내 처분시스템 환경을 고려하여 갭 크기에 따른 열전달 해석을 수행하고자 하였다. 이를 근거로 벤토나이트 완충재에 미치는 침투 온도를 산출하여 갭 크기의 영향을 분석하였으며, 아울러 국내 처분시스템에 적합한 갭 크기를 제시하고자 하였다.

2. 수치해석

본 연구에서는 공학적 방벽에서 갭 공간의 변화가 완충재의 침투 온도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에는 연속체 해석 및 유한요소법 기반의 상용프로그램인 COMSOL Multiphysics 5.5를 사용하였다. COMSOL Multiphysics는 다양한 해석 모듈에 따른 지배 방정식의 풀이와 가장 적합한 구성 모델의 이용 및 각 모듈 간 완전 결합 해석이 가능하며, 필요시에는 사용자가 직접 방정식을 구성할 수 있다(COMSOL Inc., 2019). 특히, Lee et al.(2014), Kim et al.(2018), Kim et al.(2019)의 사전 연구에서는 COMSOL multiphysics를 이용하여 심층 처분장에 결합 해석을 수행함으로써 프로그램 사용의 신뢰성이 입증되어왔다. 본 연구에서는 완충재의 침투 온도를 평가하기 위하여 프

로그래프의 Heat Transfer module과 Laminar Flow module을 사용하였다.

2.1 지배 방정식

사용후핵연료에서 발생한 열로 인한 완충재의 온도 변화 해석에는 전체 처분시스템 구성 요소에서의 열전도를 공통적으로 고려하였다. 특히, 처분용기와 완충재 사이의 갭 공간은 공기에 의한 전도 및 대류로 인한 열전달이 발생할 수 있기에, 본 연구에서는 갭 공간에서의 공기의 전도 및 대류에 의한 열전달을 동시에 고려하여 완충재의 온도 변화를 도출하였다. 처분시스템에서 고려되는 Heat Transfer module의 열전달 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q \quad (1)$$

여기서, T 는 매질의 온도(K), t 는 시간(s), ρ 는 매질의 밀도(kg/m^3), C_p 는 매질의 비열($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), u 는 매질의 속도(m/s), λ 는 열전도도($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), Q 는 일반적인 열원(W/m^3)을 나타낸다. 갭을 제외한 처분용기, 완충재, 뒤채움재, 암반에서는 식 (1)에서 매질의 속도가 없기 때문에 대류 항이 배제된 열전도만이 고려되었다.

공학적방벽의 갭에서는 공기에 대한 인위적인 경계 및 흐름 조건이 없기 때문에 강제 대류는 고려하지 않았으며, 온도 차이와 중력에 의해 발생하는 자연 대류만을 고려하였다. 자연 대류에는 층류와 난류가 발생할 수 있으며, 이를 결정하는 유동 형태는 유체에 작용하는 점성력에 대한 부력의 비를 나타내는 Grashof 수에 좌우된다. 본 연구에서는 갭에서 공기의 흐름에 대한 Grashof 수가 난류로 넘어가는 기준인 10^9 보다 작게 나타났기 때문에 층류만을 고려하였다(Incropera et al., 2006). 따라서, 갭 공간에서 공기의 흐름에 따른 열전달인 대류를 고려하기 위하여 층류에서의 흐름 모듈을 사용하였다. 단일 기체에서의 흐름은 Navier-Stokes 법칙에 의해 고려될 수 있으며, Laminar Flow module의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot (-pI + \tau) + \rho g \quad (2)$$

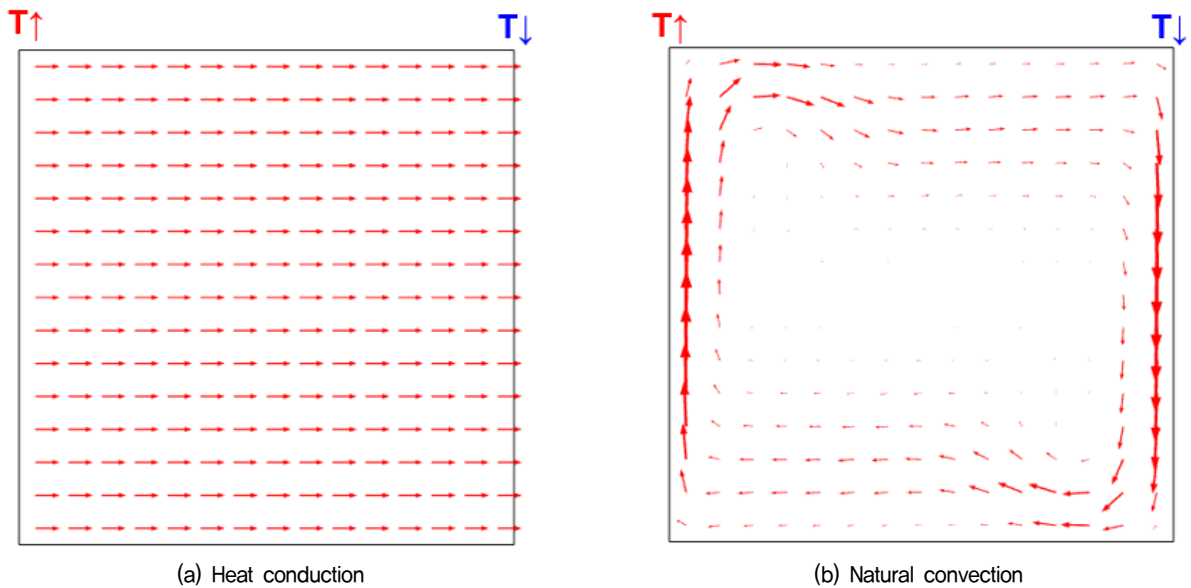


Fig. 2. Heat transfer mechanism in gap

여기서, p 는 압력(Pa), τ 는 점성 응력 텐서(Pa), g 는 중력가속도(m/s^2)를 뜻한다. 식 (1)과 (2)에 공통으로 반영되는 매질의 속도에 대하여 갭 공간에서의 공기 특성이 결합되어 공기 내 대류에서의 열전달이 해석에 반영되었다.

본 연구에서는 비압축성 유체의 거동을 고려하였으며, 이를 설명할 수 있는 부시네스크 근사(Boussinesq Approximation) 방법을 해석에 적용하였다(Lee, 2013). 또한, Fig. 2는 갭 내에서 발생하는 열전도 및 자연대류 흐름에 대한 그림을 나타내고 있다.

2.2 해석 방법 및 과정

본 연구에서는 우리나라에서 발생하는 가압경수로형(PWR) 사용후핵연료를 처분할 수 있도록 제안된 한국형 처분시스템(Korean reference disposal system, KRS)을 해석 모델로 고려하였으며(Lee et al., 2014), 공학적 다중방벽의 개념을 바탕으로 2D-축대칭 유한요소모델을 설정하였다. 설치 심도는 500m로 가정하였고, 해석 모델에는 심층 처분 시스템의 구성요소인 처분 터널, 처분 용기, 뒷채움재, 완충재, 갭, 근계 암반을 모두 고려하였다. 공학적 방벽에서의 갭은 처분 용기와 완충재의 경계면과 완충재와 근계 암반의 경계면에서 총 2개가 발생하며, 이를 모두 포함한 해석 모델은 Fig. 3과 같다.

고준위 방사성의 사용후핵연료는 임시 저장 수조 내부에서 약 30년의 임시보관기간을 거쳐 처분용기에 보

관된다(Lee et al., 2014). 임시보관기간 이후의 처분용기에서 발생하는 붕괴열은 시간이 지남에 따라 반감기를 거쳐 점점 줄어드는 경향을 보이며, 이는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(Lee et al., 2014).

$$P(t) = 6.353 \times 10^3 t^{-0.758} \quad (3)$$

여기서, $P(t)$ 는 처분용기로부터 방출되는 붕괴열의 열량(W/m^3)을, t 는 해석 기간(year)을 뜻한다. 수치해석 모델에는 처분 용기에서 발생하는 열원(heat source)에 식

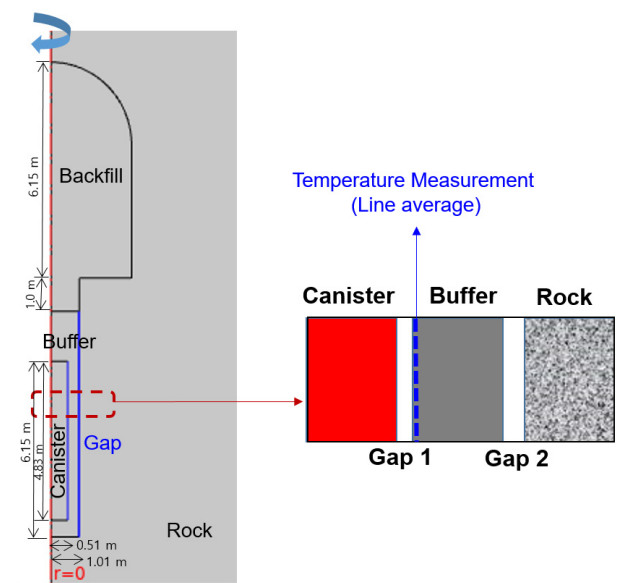


Fig. 3. Geometry of the numerical model

(3)을 대입함으로써, 시간에 따른 붕괴열을 설정하였다.

또한, 해석에서 처분시스템의 구성요소별 열물성은 한국형 처분 시스템의 표준 물성을 사용하였으며, 이는 Table 1과 같다(Lee et al., 2014). 해석 기간은 심층 처분 시스템의 운영에 따른 침투 온도를 살펴보기 위하여 20년으로 설정하여 해석을 수행하였다. 이는 식 (3)에서 사용후핵연료로부터 발생하는 열이 시간에 따라 지속적으로 감소하기 때문에 침투 온도를 살펴보기에는 충분한 해석 기간으로 볼 수 있다. 해석의 정확성과 효율성을 동시에 고려하기 위하여 열원과 가까운 겹, 완충재 부근은 요소망을 조밀하게 형성하였으며, 열원으로부터 멀리 떨어진 암반 부분은 성글게 형성하였다. 생성된 요소망은 삼각형 형태의 2D 요소로써 총 71,606개의 요소 개수가 설정되었다. 수치해석을 위한 경계 조건으로 왼쪽 측면은 2D 축대칭 조건으로 설정하였고, 나머지 측면은 단열 조건으로 설정하였다. 초기 조건은 지표면의 온도를 10°C로 설정하였으며, 전체 해석 모델에서는 심도가 깊어질수록 온도가 증가하는 지열 경사(3°C/100m)를 적용하였다. 겹 공간에서의 자연대류 해석을 위한 열전달 경계조건으로 겹의 상부와 하부 경계에서는 공통적으로 단열 조건을 설정하였다. 처분용기와 완충재 사이의 겹의 왼쪽 경계에는 처분용기의 평균 온도를, 오른쪽 경계에는 완충재의 평균 온도를 설정하였다. 완충재와 암반 겹의 왼쪽 경계에는 완충재의 평균 온도를, 오른쪽 경계에는 암반의 평균 온도를 설정하였다. 또한 층류 해석에서는 겹 내에서 중력과 밀도 차이에 의한 흐름을 고려하였으며, 겹의 모든 경계면에서는 흐름이 발생하지 않는 조건을 설정하였다.

본 연구에서는 겹 크기에 따라 완충재의 침투 온도를 산출하고자 하였으며 수치해석에 사용된 겹 공간의 사이즈는 처분용기와 완충재 사이는 5, 10, 15mm로, 완충재와 암반 사이의 겹 공간의 사이즈는 25, 50, 75mm로 총 9가지 경우에 따라 각각 수치해석을 수행하였다.

Table 1. Thermal properties used in the simulation (Lee et al., 2014)

	Thermal conductivity (W/(m·K))	Density (kg/m ³)	Specific heat capacity (J/kg·K)
Canister	49.02	6580	132.82
Backfill	0.8	1600	981
Buffer	0.893	1600	966
Gap (Air)	0.025	1,293	1.01
Rock	2.427	2700	820

한편, 겹 공간에서의 공기의 전도와 대류 현상을 같이 반영할 때와 열전도만 고려했을 때의 완충재의 침투 온도를 산출하여 비교하였다. 이를 통해 겹채움에 따른 완충재 온도 해석 관련 연구에서 현재까지 제대로 고려되고 있지 않은 공기의 대류에 의한 영향을 분석하고자 하였다.

3. 해석 결과 및 토의

처분용기와 완충재 사이의 겹 공간은 공기에 의한 전도 및 대류로 인한 열전달이 발생할 수 있기에, 본 연구에서는 겹 공간에서의 공기의 전도 및 대류에 의한 열전달을 동시에 고려하여 완충재의 침투 온도를 도출하였다.

우선 겹 공간의 중요성을 분석하기 위해 겹 공간이 존재할 때와 존재하지 않을 때 완충재의 침투 온도를 산출하였다(Fig. 4). 처분용기와 완충재 사이의 공간은 핀란드 처분시스템 기준을 적용하여 10mm로, 완충재와 암반 사이의 공간은 50mm로 설정하였다. Fig. 4에서와 같이 겹이 존재하지 않을 때는 벤토나이트 완충재의 침투 온도는 설계 온도인 100°C 이하로 예측되었으나, 겹이 공기뿐만 아니라 존재하였을 때는 겹이 없을 때보다 완충재의 침투 온도는 약 30% 이상 높게 도출되었기에 겹의 존재가 처분시스템의 안전성 평가에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다.

이를 바탕으로 겹에서의 공기의 전도와 대류 현상을 반영할 때와 전도만 고려했을 때의 완충재의 침투 온도를 산출하였다. Fig. 5는 겹 공간에서 공기의 전도만 고려했을 때와 전도 및 대류를 동시에 고려했을 때 완충재

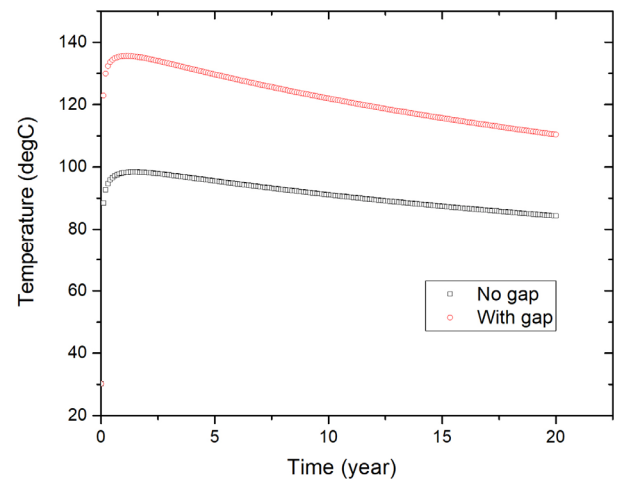


Fig. 4. Temperature variation with and without gap

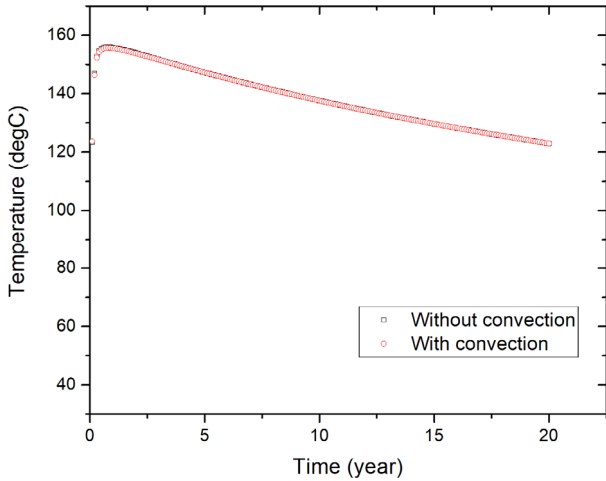


Fig. 5. Temperature variation with respect to consideration of air convection

와 처분용기 경계면에서의 침투 온도를 보여주고 있으며, 공기의 대류 현상을 전도와 같이 고려했을 때 완충재의 침투 온도가 약간 높게 나타났다. 이는 대류에 의한 공기의 열전달이 활발해져 완충재와 용기 경계면 사이의 온도가 약간 높게 나타난 것으로 판단되지만 공기의 전도 외에 대류까지 고려한 열전달이 완충재의 침투 온도에 미치는 영향은 매우 미미한 것으로 나타났다. 이는 아주 작은 닫힌 공간에서 공기의 자연 대류로 인한 열전달은 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. Lee et al.(2019)은 갭 공간에서의 공기의 전도와 복사에 따른 열전달과 전도만 고려했을 때 완충재의 온도에 미치는 영향은 차이가 거의 없다고 보고하였으며, 이 역시 갭 공간에서 공기의 전도, 대류, 복사를 동시에 고려하는 것과 전도만 고려하는 열전달은 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 암반과 완충재 사이 갭이 50mm 일 때, 처분용기와 완충재 사이의 갭 크기에 따른 완충재의 온도 변화를 보여주고 있다. 대략 처분공에 공학적방벽 구성 요소들이 설치된 이후 완충재의 침투온도는 서서히 증가하다가 초기 1~3년 쯤 최고온도에 도달한 후 서서히 감소함을 알 수 있다. 또한 처분용기와 완충재 사이 갭 공간의 크기가 증가할수록 완충재의 침투 온도는 약간 감소하였는데, 이는 처분용기와 완충재 사이의 갭이 클수록 공기의 전도와 대류에 의한 열전달이 감소하기에 완충재의 온도가 감소한 것으로 판단되며, 갭 크기의 영향성은 미미하였다.

Fig. 7은 처분용기와 완충재 사이 갭이 10mm 일 때, 완충재와 암반 사이의 갭 크기에 따른 완충재의 온도

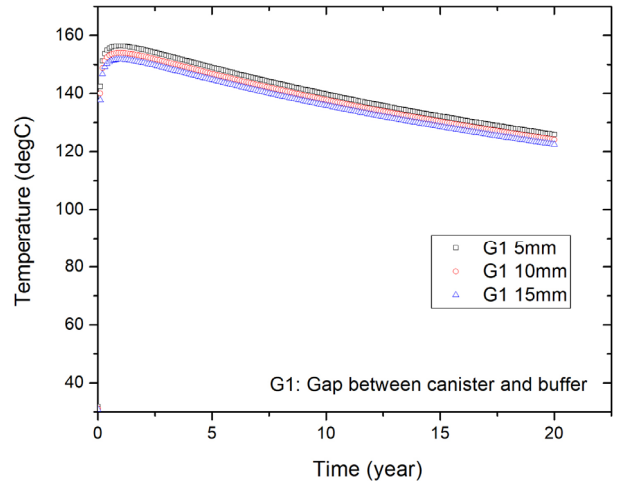


Fig. 6. Temperature variation according to G1 size

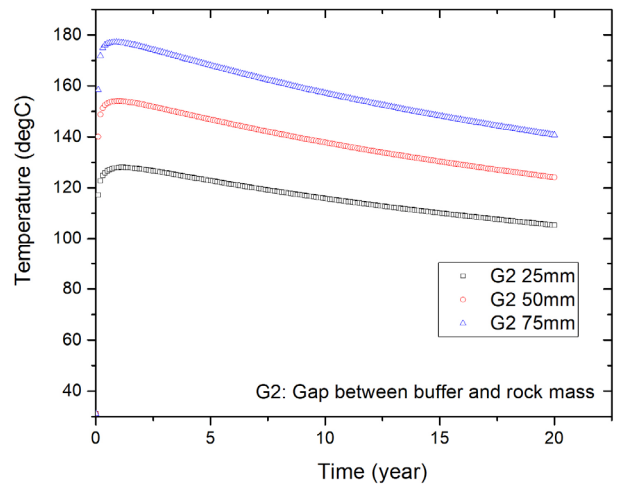


Fig. 7. Temperature variation according to G2 size

변화를 보여주고 있다. 완충재와 암반 사이 갭이 클수록 완충재의 침투 온도 값은 증가하였으며, 75mm 일 때 침투 온도는 25mm 일 때보다 약 40% 증가한 것을 알 수 있다. 이는 완충재와 암반 사이 갭이 클수록 완충재에 축적된 열이 주변 암반으로 제때 소산되지 못한 것으로 판단된다. 따라서 완충재와 암반 사이의 갭은 완충재의 열이 충분히 전파될 수 있도록 열전도도가 큰 적절한 물질로 채우는 것이 필요하며, 갭 사이즈도 가능한 작게 설정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. Table 2는 수치해석에 사용된 각 경우에 따른 완충재의 침투 온도 값을 보여주고 있다. 처분용기와 완충재의 갭 공간의 크기가 완충재의 침투 온도에 미치는 영향성은 매우 작았으나, 완충재와 암반 사이 갭 공간의 크기는 완충재의 침투 온도에 매우 큰 영향성을 나타냈다.

Table 2. Peak temperature of buffer considering gap size

G1 size (mm)	G2 size (mm)	Peak temperature (degC)
5	25	130.29
5	50	156.42
5	75	179.55
10	25	128.07
10	50	154.05
10	75	177.17
15	25	125.69
15	50	151.77
15	75	174.8

4. 결론

본 연구에서는 고준위폐기물을 심층 처분하기 위한 공학적방벽시스템의 구성 요소 사이에서 발생할 수 있는 갭 공간의 크기가 완충재의 침투 온도에 미치는 영향을 수치해석을 통해 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 연속체 해석 및 유한요소법 기반의 상용프로그램인 COMSOL Multiphysics 5.5를 사용하여 KRS 처분시스템을 구현하였다. 본 수치해석에서는 기존에는 적용되지 않고 있던 갭채움 공간의 공기에서의 전도 및 대류 열전달을 동시에 고려하였으며, 처분용기와 완충재와의 갭은 5, 10, 15mm로 설정하였으며, 완충재와 암반 사이의 갭은 25, 50, 75mm로 설정하였다.
- (2) 우선, 갭 공간이 존재하지 않을 때와 갭 공간이 존재할 때 완충재의 침투 온도를 도출하였다. 완충재와 처분용기 사이 갭은 10mm, 완충재와 암반 사이의 갭은 50mm로 설정하였으며, 갭이 존재하지 않을 때의 완충재 최고온도는 100°C 미만으로 예측되었으나, 갭 공간이 공기로 존재할 때의 완충재 최고온도는 약 30% 높게 측정되었기에 갭 공간이 완충재의 최고 온도에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 또한 갭에서의 공기의 대류 및 전도를 고려한 수치해석 결과, 전도를 고려하였을 때보다 완충재의 침투 온도는 약 0~0.5°C 높게 나타났으나 결과에 미치는 영향은 상당히 미미하였다. 또한 완충재와 처분 용기와 완충재와의 경계면 지점에서의 온도(처분 용기와 완충재와의 경계면 지점에서의 온도)는 약간 감소하였다. 갭 크기가 15mm 일 때의 완충

재 침투 온도는 5mm 일 때보다 약 3% 정도 낮게 나타났다으며, 이는 처분용기와 완충재 사이의 갭이 클수록 공기의 전도와 대류에 의한 열전달이 감소하기에 완충재의 온도가 감소한 것으로 판단되며, 전체적으로 완충재와 처분 용기 사이의 갭 크기가 완충재의 침투 온도에 미치는 영향은 미미하였다. 완충재와 암반 사이의 갭은 25, 50, 75mm 일 때 완충재의 침투 온도를 산출하였으며, 갭 크기가 클수록 완충재의 침투 온도는 크게 상승하였다. 갭 크기가 75mm 일 때의 완충재의 침투 온도는 25mm 일 때보다 약 40% 크게 도출되었으며, 이는 완충재와 암반 사이의 갭이 클수록 주변 암반으로 열이 잘 소산되지 않고 축적된 것으로 판단된다. 완충재와 처분 용기와의 갭보다 완충재와 암반 사이의 갭 크기가 완충재의 침투 온도에 미치는 영향이 훨씬 크게 나타났기에 완충재의 암반 사이는 열전도도가 높은 물질로 채우는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

- (3) 본 논문에서는 갭채움 공간이 완충재의 침투 온도에 미치는 민감도를 분석하기 위해 공학적방벽시스템의 구성 요소 간의 열해석만 고려하였다. 본 연구에서는 갭 공간의 크기에 따른 완충재의 상대적인 침투 온도를 도출하는데 의의를 두었으며 공학적방벽 구성 요소 간 갭 공간의 크기에 따라 완충재의 침투 온도는 설계 기준치인 100°C 보다 훨씬 큰 180°C 까지 예측이 되었다. 따라서 갭 공간의 사이즈 및 적절한 갭채움 물질에 대한 중요성이 상당히 크다고 할 수 있으며, 본 연구 결과를 토대로 완충재와 암반 사이는 약 25~50mm로 반드시 열전도도도가 우수한 물질로 갭채움을 하는 것이 필연적으로 요구된다. 또한 향후에는 공학적방벽 요소 간 열해석 뿐만 아니라 열-수리-역학 복합해석을 고려하여 보다 정확한 갭채움 공간의 민감도 및 그에 따른 적절한 갭채움재 개발이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국연구재단의 개인 기초연구사업(2020R1F1A072379)과 원자력연구개발사업(2021M2C9A1018633)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- Cengel, Y. A. and Ghajar, A. J. (2011), "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications", Fourth edition McGraw Hill Education.
- Chen, W. Z., Ma, Y. S., Yu, H. D., Li, F. F., Li, X. L., and Sillen, X. (2017), "Effects of Temperature and Thermally-induced Microstructure Change on Hydraulic Conductivity of Boom Clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.9, pp.383-395.
- Cho, W. J. (2017), "Radioactive Waste Disposal", KAERI/GP-495/2017.
- Cho, W. J., Lee, J. O., and Chun, K. S. (1999), "The Temperature Effects on Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite", *Applied Clay Science*, Vol.14, pp.47-58.
- Choi, H. J., Lee, J. Y., Kim, S. S., Kim, S. K., Cho, D. K., Kim, K. Y., Jeong, J. T., Jeon, K. S., Choi, J. W., Lee, J. O., Lee, M. S., and Kim, P. O. (2008), "Korean Reference HLW Disposal System", KAERI/TR-3563/2008.
- Comsol Inc. (2019), "Comsol Multiphysics user's manual Ver. COMSOL 5.5", USA.
- Dixon, D. A., Gray, M. N., and Thomas, A. W. (1985), "A Study of the Compaction Properties of Potential Clay-sand Buffer Mixtures for Use in Nuclear Fuel Waste Disposal", *Engineering Geology*, Vol.21, pp.247-255.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S. (2006), "Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th ed", John Wiley & Sons.
- Juvankoski, M. (2013), "Buffer design 2012", Posiva 2012-14, Posiva Oy.
- Karland, O. (2010), "Chemical and Mineralogical Characterization of the Bentonite Buffer for the Acceptance Control Procedure in a KBS-3 Repository", Svensk Kärnbränslehantering AB Report, SKB TR-10-60.
- Kim, M. J., Lee, S. R., Jeon, J. S., and Yoon, S. (2019), "Sensitivity Analysis of Bentonite Buffer Peak Temperature in a High-level Waste Repository", *Annals of Nuclear Energy*, Vol.123, pp.190-199.
- Kim, M. J., Lee, S. R., Yoon, S., Jeon, J. S., and Kim, M. S. (2018), "Effect of Thermal Properties of Bentonite Buffer on Temperature Variation", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.1, pp.17-24.
- Kjartanson, B., Dixon, D., and Kohle, C. (2005), "Placement of Bentonite Pellets to Fill Repository Sealing System Voids and Gaps", Technical Report No. 06819-REP-01200-10136-R00, Ontario Power Generation.
- Lee, C. (2013), "A Benchmark for 2-Dimensional Incompressible and Compressible Mantle Convection Using COMSOL Multiphysics", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol.49, No.2, pp. 245-265.
- Lee, J. O., Brich, K., and Choi, H. J. (2014), "Coupled Hydro Analysis of Unsaturated Buffer and Backfill in a High-level Waste Repository", *Annals of Nuclear Energy*, Vol.72, pp.63-75.
- Lee, J. O., Cho, W. J., and Kwon, S. (2011), "Thermal-hydro-mechanical Properties of Reference Bentonite Buffer for a Korean HLW Repository", *Tunnel and Underground Space*, Vol.21, No.4, pp.264-273.
- Lee, J. O., Choi, Y. C., and Choi, H. J. (2013), "R&D Status on Gap-filling Materials for the Buffer and Backfill of a HLW Repository", KAERI/AR-1005/2013.
- Lee, J. O., Choi, H. J., Kim, G. Y., and Cho, D. K. (2019), "Numerical Analysis of the Effect of Gap-filling Options on the Maximum Peak Temperature of a Buffer in a HLW Repository", *Progress in Nuclear Energy*, Vol.111, pp.138-149.
- Lee, J. Y., Kim, H. A., Kim, I. Y., Choi, H. J., and Cho, D. G. (2020), "Analyses on Thermal Stability and Structural Integrity of the Improved Disposal Systems for Spent Nuclear Fuels in Korea", *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol.5, pp. 21-36.
- LLoret, A., Villar, M. V., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X., and Alonso, E. E. (2003), "Mechanical behavior of heavily compacted bentonite under high suction changes. *Geotechnique*, Vol. 53, pp. 27-40.
- Marjavaara, P. and Holt, E. (2012), "Customized Bentonite Pellets: Manufacturing, Performance and Gap Filling Properties", Working report 2012-62, Posiva Oy, Eurajoki.
- Marjavaara, P. and Kivikoski, H. (2011), "Filling the Gap between Buffer and Rock in the Deposition Hole", Working report 2011-33, Posiva Oy, Eurajoki.
- Xiang, G., Ye, W., Xu, Y., and Jalal, F. E. (2020), "Swelling Deformation of Na-bentonite in Solutions Containing Different Cations", *Engineering Geology*, Vol.277, pp.105757.
- Yoon, S. and Kim, G. Y. (2021), "Measuring Thermal Conductivity and Water Suction for Variably Saturated Bentonite", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.53, pp.1041-1048.
- Zheng, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J. T., and Liu, H. H. (2015), "On the Impact of Temperature up to 200°C in Clay Repositories with Bentonite Engineered Barrier System: A Study with Coupled Thermal, Hydrological, Chemical, and Mechanical Modeling", *Engineering Geology*, Vol.197, pp.278-295.

Received : February 19th, 2021

Revised : March 25th, 2021

Accepted : March 30th, 2021