

벤토나이트 완충재의 열물성이 온도 변화에 미치는 영향

Effect of Thermal Properties of Bentonite Buffer on Temperature Variation

김민준 ¹	Kim, Min-Jun	이승래 ²	Lee, Seung-Rae
윤석 ³	Yoon, Seok	전준서 ⁴	Jeon, Jun-Seo
김민섭 ⁴	Kim, Min-Seop		

Abstract

A buffer in a geological disposal system minimizes groundwater inflow from the surrounding rock and protects the disposed high-level waste (HLW) against any mechanical impact. As decay heat of a spent fuel causes temperature variation in the buffer that affects the mechanical performance of the system, an accurate estimation of the temperature variation is substantial. The temperature variation is affected by thermal and material properties of the system such as thermal conductivity, density and specific heat capacity of the buffer, and thus these factors should be properly included in the design of the system. In particular, as the thermal properties are variable depending on the density and water content of the buffer, consideration of the effects should be included in the analysis. Hence, in this study, a numerical model based on finite element method (FEM) which is able to consider the change of density and water content of the buffer was established. In addition, using the numerical model, a parametric study was conducted to investigate the effect of each thermal property on the temperature variation of the buffer.

요 지

심층 처분시설에서 완충재는 지하수의 유입을 최소화하며, 역학적인 충격을 흡수하는 중요한 역할을 한다. 사용후 핵연료로부터 발생하는 붕괴열은 완충재의 온도를 변화시켜 역학적 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 완충재 온도 변화에 대한 정확한 예측이 필요하다. 이러한 온도 변화는 완충재의 열물성인 열전도도, 밀도, 비열에 영향을 받으며, 이에 대한 영향이 심층 처분시설의 열 해석에 고려되어야 한다. 특히 이들 열물성은 벤토나이트 완충재의 밀도와 함수비에 따라 변화하기 때문에 이에 대한 영향이 해석에 포함되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 완충재의 밀도와 함수비 변화 영향을 고려할 수 있는 유한요소법 기반의 열 해석 수치모델을 설정하였다. 또한 수치모델을 바탕으로 매개 변수 연구를 수행하여 각각의 열물성이 완충재의 온도 변화에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

Keywords : Deep geological disposal, Compacted bentonite buffer, Thermal conductivity, Density, Specific heat capacity

1 정희원, KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)

2 정희원, KAIST 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST, Tel: +82-41-350-3617, Fax: +82-42-350-7200, srlee@kaist.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정희원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI)

4 비희원, KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

국내 전력 생산의 큰 비중을 차지하고 있는 원자력 에너지를 얻는 과정에서는 고온의 방사선 준위가 높은 핵연료 폐기물이 발생한다. 사용후핵연료는 장시간동안 붕괴열과 유해한 방사선을 방출하기 때문에 고준위 폐기물 처분에 관한 문제가 매우 중요하다. 고준위 폐기물 처분의 방식 중 하나인 심층 처분 방식은 지하 500m 이상 깊이의 안정적인 지층구조에 고준위 폐기물을 처분하여 인간 생활권으로부터 영구히 격리시키는 것으로, 현재 대부분의 국가들이 심층 처분 방식을 선호하고 있다(Lee et al., 2007). 심층 처분 시스템의 구성 요소로는 처분용기, 완충재, 뒷채움재, 주변 암반이 있으며, 이들은 사용후핵연료를 다중으로 차폐하는 공학적 다중 방벽의 역할을 한다. 이 중에서 완충재는 처분공을 둘러싼 암반과 처분 용기간의 공간을 메워서 주위 암반으로부터의 지하수 유입을 최소화하는 차폐 기능과 동시에 주변 암반의 전단거동과 같은 외부의 역학적 충격으로부터 폐기물과 처분용기를 보호하는 역할을 한다(Lee et al., 2011). 또한 완충재는 사용후핵연료로부터 발생한 붕괴열을 주변 암반으로 신속하게 발산시킬 수 있어야 한다. 이에 따라 완충재로는 높은 열전도도와 팽윤성, 양호한 양이온 흡착능 및 처분 환경에서의 내구성 등이 우수한 것으로 알려져 있는 벤토나이트가 일본 및 유럽 각국에서 사용되고 있으며, 마찬가지로 국내에서도 벤토나이트를 완충재로 사용하고 있다(Lee et al., 2010). 완충재의 요구 조건을 만족시키기 위하여 벤토나이트는 압축 블록의 형태로 사용된다. 완충재로 사용되는 벤토나이트는 몬모릴로나이트를 다량 함유하는 스펙타이트 군에 속하는 점토광물로서 구성광물의 금속 양이온 종류에 따라서 Na-벤토나이트, Ca-벤토나이트 등으로 구분된다. 스웨덴, 핀란드, 스위스, 일본 등의 국가에서는 Na-벤토나이트를 완충재 후보물질로 고려하고 있다(Lee et al., 2013). 반면에 국내에서는 경주 지역에서 생산되는 Ca-벤토나이트가 기준 완충재 물질로 제안되었다. 완충재는 처분용기와 가장 밀접하게 위치해있기 때문에 심층 처분 시스템의 장기적인 설계와 안정성 해석을 위해서 매우 중요한 요소이다.

특히, 사용후핵연료의 붕괴열에 의한 공학적 방벽에서의 온도 변화는 심층 처분 시스템의 안정성에 큰 영향을 미친다. 이러한 공학적 방벽 내에서의 온도 변화는 사용후핵연료와 바로 맞닿아 있는 벤토나이트 완충재

의 열적 특성에 의해 많은 영향을 받기 때문에 이에 대한 정확한 분석이 요구된다. 특히 완충재는 온도의 변화에 따라 열-수리-역학적 물성이 변화될 수 있기 때문에 심층 처분 시스템을 도입할 예정인 세계 각국에서는 완충재의 기본 요구 성능을 충족시킬 수 있는 완충재의 제한 온도를 설정해두었다. 국내의 경우에는 완충재의 온도가 100°C를 기준으로 이를 넘지 않도록 설계해야 되기 때문에(Cho et al., 2016), 완충재의 온도 변화에 관한 정확한 예측 및 해석 기술이 필요하다. 한편, 붕괴열에 의한 완충재의 온도 변화를 결정짓는 벤토나이트의 열적 물성으로는 열전도도, 비열, 밀도가 있다. 해석 기술의 정확성을 위하여 심층 처분시설의 운영에 따른 완충재의 열적 물성의 변화가 해석에 고려되어야 한다. 벤토나이트의 열적 물성들은 주로 함수비와 밀도의 영향을 받으며, 세계 각국의 기준 완충재 물질에 따라 이에 대한 영향은 다소 상이하다. 국내에서는 기준 완충재 물질로 제안된 경주산 압축 벤토나이트 완충재에 대하여 Yoon et al.(2017)이 함수비와 밀도의 영향을 고려한 열물성 모델을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 기준 완충재 물질에 대한 열물성 모델을 바탕으로 밀도와 함수비의 변화에 따른 열물성 변화를 고려하여 완충재의 온도 변화 예측이 가능한 유한요소법 기반의 열해석 수치모델을 설정하였다. 그리고 수치모델을 이용하여 심층 처분시설 운영에서의 벤토나이트 완충재의 열적 거동을 살펴보았다. 또한 이를 바탕으로 매개변수 연구를 수행하여 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도, 비열, 건조밀도가 완충재의 온도 변화에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

2. 수치해석

2.1 개요

본 연구에서는 벤토나이트의 열물성 변화가 붕괴열로 인한 완충재의 온도 변화에 미치는 영향을 구체적으로 살펴보기 위해 수치해석을 수행하였다. 수치해석에는 벤토나이트 완충재, 즉 다공성 매질 내부에서의 열전달 해석을 위하여 유한요소법 해석 기반의 수치해석 상용프로그램인 COMSOL Multiphysics 5.2a를 사용하였다. 열전달 수치해석에서 고려되는 전도에 의한 매질의 온도 변화는 다음의 지배방정식으로 나타낼 수 있다(COMSOL Inc, 2016).

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

여기서, T 는 매질의 온도(K), t 는 시간(s), ρ 는 매질의 밀도(kg/m^3), C_p 는 매질의 비열($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), λ 는 열전도도 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), Q 는 일반적인 열원(W/m^3)을 나타낸다.

2.2 벤토나이트 완충재의 열물성

식 (1)과 같이, 일반적인 열원에 의한 매질의 온도 변화는 매질의 열물성인 열전도도, 비열, 밀도의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 대상 매질로 고려하는 벤토나이트 완충재, 즉 불포화토의 열전도도는 함수비와 간극비에 의한 영향을 받으며, 대표적인 불포화토의 열전도도 추정 모델로는 Kersten, Johansen, Cote and Konrad 등이 제안한 경험식들이 있다(Go et al., 2016; Kersten, 1949; Johansen, 1975; Cote and Konrad, 2005). 그러나 벤토나이트 완충재는 압축 블록의 형태로 사용되고 있기 때문에 일반적인 불포화토의 열물성 모델로는 완충재의 열전도도 추정이 부정확하다. 이에 Yoon et al.(2017)은 국내에서 기준 완충재 물질로 제안된 경주 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도를 추정할 수 있는 모델을 제시하였으며, 다음과 같다.

$$\lambda = 0.571\gamma_d + 1.970w - 0.237 \quad (2)$$

여기서, γ_d 는 건조단위중량(t/m^3), w 는 함수비(%)를 나타낸다.

일반적으로 압축 벤토나이트 완충재의 비열은 주어진 건조밀도와 수분함량 범위에서 대략 $0.6 \sim 1.3\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 의 값을 보이며, 그 값은 수분함량이 많을수록 증가한다(JNC, 1999; Knutsson, 1983). 이는 물의 비열이 상대적으로 높기 때문이다. 또한 비열은 건조밀도에도 영향을 받게 되는데 밀도와 수분함량에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 비열은 다음과 같이 계산될 수 있다(Yoon et al., 2017).

$$c = 0.5825\gamma_d + 0.2579\exp(S) - 0.2962 \quad (3)$$

여기서 c 는 압축 벤토나이트 완충재의 비열($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), S 는 포화도(%)를 뜻한다.

밀도는 초기 건조밀도와 심층 처분 시스템의 운영에

따라 변화하는 습윤밀도로 나눠서 살펴볼 수 있다. 건조 밀도는 물을 제외한 흙의 단위체적당 질량으로써, 압축 벤토나이트 완충재의 초기 제작 시에 결정되는 값이다. 식 (2)와 (3)에서 사용되는 건조밀도는 블록형태로 형성된 초기 시료의 건조밀도이다. 실제 시스템의 운영 중에서는 주변 암반부로부터 물이 유입되기 때문에 이로 인한 부피 변화를 무시하더라도 함수비 변화로 습윤밀도의 값은 계속 변하게 된다. 완충재의 열해석에 사용하는 식 (1)의 지배방정식에서 밀도 값은 습윤밀도를 뜻하는 것으로 해석 결과에 영향을 미치게 된다.

2.3 수치해석 모델

본 연구에서는 벤토나이트 완충재 매질 내부에서의 열해석을 위하여 공학적 다중방벽의 개념을 바탕으로 2D-축대칭 유한요소모델을 설정하였다. 실제 고준위방사성 폐기물은 우선 처분 용기에 밀봉한 후 처분 터널 바닥에 굴착하여 만든 처분공에 정치시킨다. 처분용기와 처분공의 암반 벽 사이에는 완충재를 설치하도록 되어 있다. 모든 처분공이 완충재로 채워진 후, 처분터널은 압축 벤토나이트와 모래의 혼합물로 구성된 뒷채움재로 메워진다. 이를 반영한 유한요소모델의 형상과 해석 영역의 크기는 Fig. 1과 같으며, 처분 용기는 실제 심층 처분 시스템과 같이 지중 500m에 위치하여 공학적 다중방벽으로 둘러싸여 있는 것으로 가정하였다(Lee et al., 2014). 또한 심층 처분 시스템의 구성요소인 처분 터널, 완충재, 처분 용기, 주변 암반부를 모두 유한요소

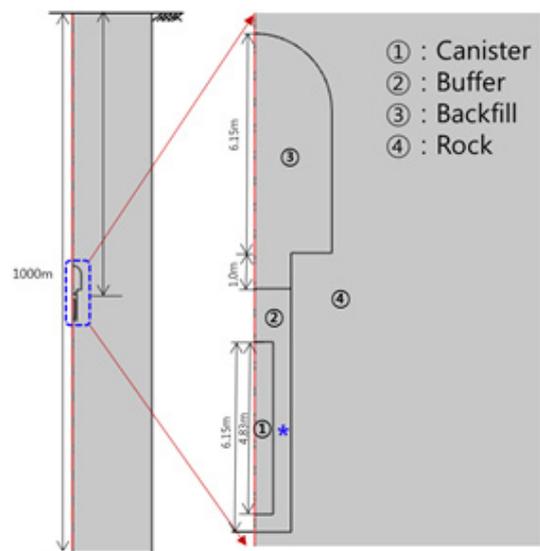


Fig. 1. Numerical modelling for engineering barrier

해석 모델에 포함하였다.

고준위 방사성의 사용후핵연료는 임시 저장 수조 내부에서 임시보관기간을 거쳐 처분용기에 보관된다. 이때 처분용기에서는 사용후핵연료에 의해 붕괴열이 발생하게 된다. 처분용기의 붕괴열은 Fig. 2와 같이 시간이 지남에 따라 점점 줄어드는 경향을 보이며, 이는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다(Lee et al., 2011).

$$P(t) = 6.535 \times 10^3 (t + 30)^{-0.758} \quad (4)$$

여기서, P(t)는 처분용기로부터 방출되는 붕괴열의 열량(W/m³)을, t는 해석 기간(year)을 뜻한다. 이 식 (4)를

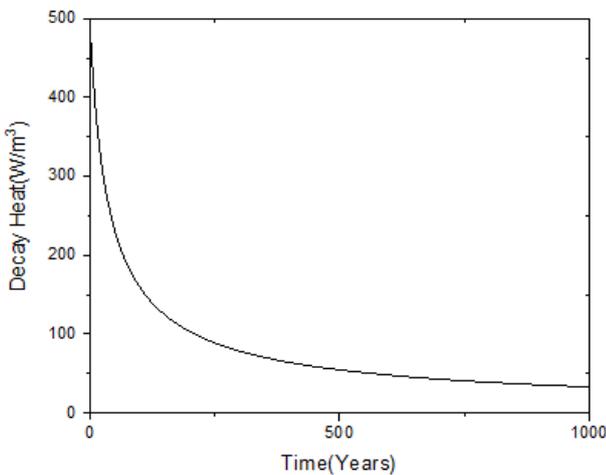


Fig. 2. Heat output from a canister

이용하여 수치해석시 처분 용기의 열원(heat source)을 설정하였다.

해석에 사용되는 처분용기, 뒷채움재, 주변 암반의 열물성은 Table 1에 나타난 바와 같다(Lee et al., 2014). 또한 2.2절에서 설명한 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도 및 비열의 열물성 모델을 수치해석 모델에 포함시켰다. 고려된 완충재의 열물성 변화는 Table 2에 요약한 바와 같다. 우선, 심층 처분시설 운영에서의 벤토나이트 완충재의 열적 거동을 살펴보기 위한 완충재의 기본 설계 조건(Case 1)으로 함수비는 압축 벤토나이트 완충재의 초기 자연 함수비인 11%를, 밀도는 기본 값인 1.6 t/m³을 설정하였다(Yoon et al., 2017). 또한 본 연구에서는 벤토나이트 완충재의 열전도도, 밀도, 비열이 완충재의 온도 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 2와 같이 각각 다른 해석 Case들을 설정하여 매개변수 연구를 수행하였다. 매개변수 연구의 해석 Case들은 지하수가 유입되는 실제 시스템 운영 조건과 유사하게 하고자 각각의 값들을 함수비 변화에 따라 설정하였다. 공학적 방벽의 설치 심도는 지중 500m 정도로 주변 포화된 암반부로부터 완충재로 물이 유입하게 된다. 따라서 처분공이 설치된 이후에는 완충재의 함수비가 초기 자연 함수비인 11%에서부터 포화 함수비인 26.4%까지 변하게 된다(Lee et al., 2011; Lee et al., 2014). 따라서 이러한 벤토나이트 완충재의 함수비 변화를 고려하기 위하여 식 (2)와 (3)에 각각 초기 함수비, 포화 함수비, 그

Table 1. Thermal properties used in the simulation

	Thermal conductivity (W/(m·k))	Density (t/m ³)	Specific heat capacity (kJ/kg·K)
Canister	49.02	6580	132.82
Backfill	0.8	1600	981
Rock	2.427	2700	820

Table 2. Cases considered in a parametric study

Case	Thermal conductivity (W/(m·k))	Density (t/m ³)		Specific heat capacity (kJ/kg·K)	Parametric study
		Dry	Wet		
1	0.893 (w=11%)	1.6	1.6	1.027	Reference case
2	1.071 (w=20%)	1.6	1.6	1.027	Thermal conductivity
3	1.197 (w=26.4%)	1.6	1.6	1.027	
4	0.893	1.6	1.6	1.186 (w=11%)	
5	0.893	1.6	1.6	1.337 (w=26.4%)	
6	0.893	1.6	1.8	1.027	Wet density
7	0.893	1.6	2.1	1.027	
8	0.779	1.4	1.6	0.91	Dry density (initial)
9	1.01	1.8	1.6	1.143	

리고 이 범위 내에 있는 임의의 함수비인 20%를 이용하여 열물성 값들을 설정하였다(Table 2). 또한 건조밀도는 국내 경주 벤토나이트 블록의 기본 값($1.6t/m^3$)을 기준으로 완충재의 기본 성능을 유지할 수 있는 최소 값($1.4t/m^3$) 및 블록 제작 조건을 고려한 최대 값($1.8t/m^3$)으로 설정하였다(Lee et al., 2011). 습윤밀도는 기본 값을 기준으로 물의 유입으로 인해 증가하는 것을 고려하여 각각 $1.8, 2.1kg/m^3$ 으로 설정하였다(Cho et al., 1999).

열물성 각각의 영향을 살펴보기 위하여 Case 2와 3은 기본 설계 조건과는 다른 함수비 및 그로 인한 완충재의 열전도도의 변화를 반영하여 설정하였다. 또한 Case 4와 5는 완충재의 비열을, Case 6과 7은 완충재의 습윤밀도를 변경하여 설정하였다. 특히 Case 8과 9에서는 완충재의 건조밀도의 값에 따라 변하는 열전도도와 비열을 같이 고려하였다.

해석기간은 심층 처분 시스템의 장기적인 운영을 살펴보기 위하여 1000년으로 설정하여 해석을 수행하였다. 정확하면서도 효율적인 해석의 수행을 위하여 요소망은 완충재 부근에 더 조밀하게 형성하였으며, 완충재로부터 멀리 떨어진 암반 부분은 다소 성글게 형성하였다.

수치해석을 위한 경계 조건으로 왼쪽 측면은 2D 축대칭 조건으로 설정하였고, 나머지 측면과 아랫면은 단열 조건으로 설정하였다. 해석의 초기 조건으로 지표면의 온도를 $15^{\circ}C$ 로 설정하였으며, 또한 전체 해석 영역에서의 온도조건은 심도가 깊어질수록 온도가 증가하는 지열 경사($3^{\circ}C/100m$)를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

벤토나이트 완충재의 기본 설계 조건인 Case 1에 대한 수치해석을 통하여 처분 용기로부터 발생한 열원에 의한 벤토나이트 완충재의 온도변화에 대하여 살펴보았다. 수치 해석의 결과는 Fig. 3과 같으며, Fig. 3의 (a)는 Fig. 1에 표시된 부분에서의 벤토나이트 완충재의 온도 변화이며, (b)는 처분 용기 주변의 온도 분포에 대한 결과이다.

벤토나이트 완충재의 온도 변화는 다음의 두 가지 현상에 의해서 복합적으로 발생한다. (1) 열원에서 발생한 열량에 의해 온도가 증가함, (2) 주변으로의 열전도로 인하여 온도가 감소함. 위의 두 가지 영향을 같이 고려해보면 완충재의 온도 변화는 Fig. 3의 (a)에서 보이는 것과 같이 초기에는 온도가 급격하게 증가하지만, 점차 시간이 지나면서 온도가 감소하여 거의 일정해지는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3의 (b)를 통하여 처분용기에서 발생한 열이 완충재를 지나 주변 암반까지 시간에 따라 방출되는 것을 확인할 수 있다. 이와 더불어 Table 2의 벤토나이트 완충재의 열물성 값에 따른 수치해석을 통해 열물성 변화가 온도 해석에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

3.1 열전도도가 완충재의 온도 변화에 미치는 영향

Case 1, 2 및 3에 대한 수치 해석 결과를 비교함으로써 함수비 및 열전도도가 벤토나이트 완충재의 온도 변

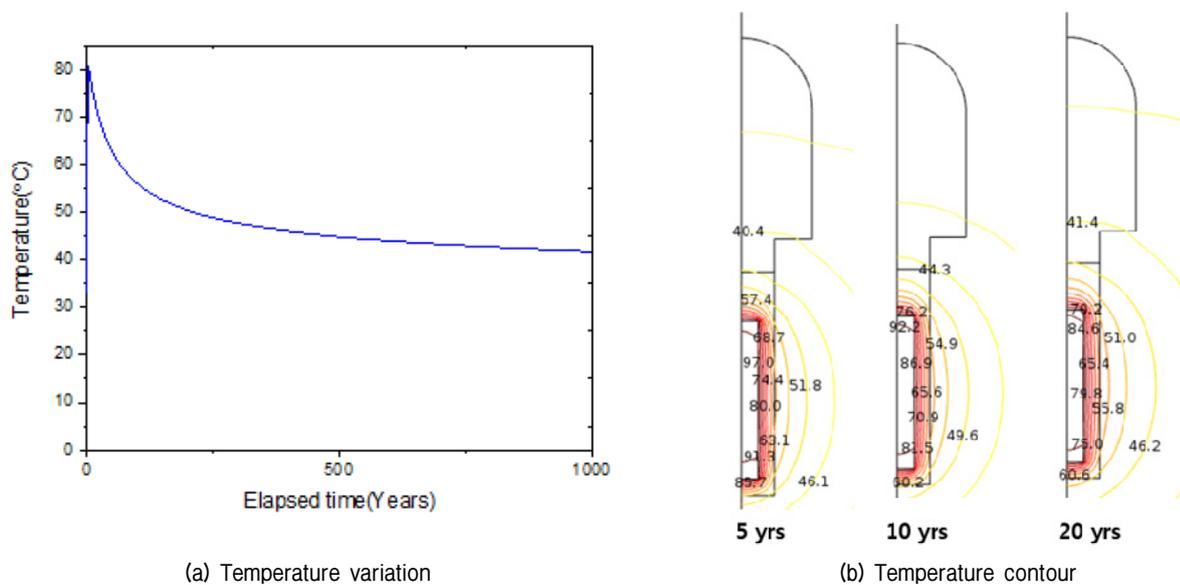


Fig. 3. Simulation results of a reference case

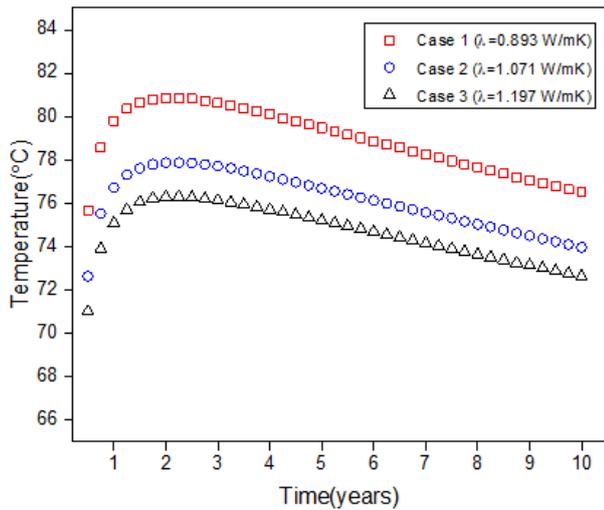


Fig. 4. Effect of thermal conductivity on temperature variation of buffer

화에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. Fig. 4는 시간에 따른 벤토나이트 완충재의 온도 변화를 나타낸다.

Fig. 4와 같이 함수비가 증가하고, 그에 따른 열전도도가 증가하면 완충재의 온도 변화가 작게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 완충재의 열전도도가 높을수록 처분용기로부터 전달된 고온의 열을 완충재 외부로 많이 방출하기 때문이다. 또한 이를 통해 함수비 변화로 수반되는 열전도도의 변화에 따라서 벤토나이트 완충재의 최대 온도가 변하는 것을 확인할 수 있었다. 벤토나이트 완충재의 최대 온도는 설계 기준 값을 넘지 못하도록 설계 되어야하기 때문에 여러 요소에 의해 변화하는 열전도도는 벤토나이트 완충재의 정확한 열해석 및 시스템의 설계에 중요한 인자라고 볼 수 있다.

3.2 비열이 완충재의 온도 변화에 미치는 영향

비열의 변화가 벤토나이트 완충재의 온도 변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Case 1, 4 및 5에 대한 해석 결과를 비교해 보았다. 시간에 따른 벤토나이트 완충재의 온도 변화는 Fig. 5와 같다.

일반적으로 비열이 크면 온도 변화가 작게 발생한다. 이는 비열이 클수록 온도를 높이는 데 많은 열량이 필요하므로 온도가 잘 변하지 않기 때문이다. 하지만 심층 처분 시설에서 벤토나이트 완충재가 가질 수 있는 비열의 범위에서는 Fig. 5와 같이 비열 값의 변화에 따른 완충재의 온도 변화는 거의 나타나지 않았다.

이를 통해 비열은 벤토나이트의 중요한 열물성임에

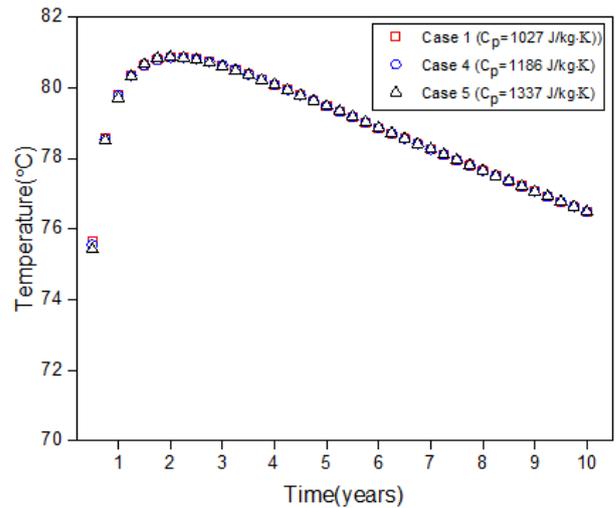


Fig. 5. Effect of specific heat capacity on temperature variation of buffer

도 불구하고, 실제 상황이 고려된 변화값 범위에서는 완충재의 열해석 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

3.3 밀도가 완충재의 온도 변화에 미치는 영향

밀도의 변화가 완충재의 온도 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. 2.2절에서 언급한 바와 같이 밀도는 시스템의 운영기간 동안 변하는 함수비 조건에 따라 습윤밀도와 초기 조건에서의 건조밀도로 나눠서 해석을 수행함으로써 각각에 대한 영향을 조사해보았다. 우선 Case 1, 6 및 7의 해석 결과를 통하여 습윤밀도의 변화에 의한 영향에 대하여 살펴보았다.

심층 처분 시설의 운영시에 완충재는 주변에서 물이 유입됨에 따라 습윤밀도가 증가하게 된다. 이 때 완충재는 사방으로 구속되어있어 부피가 일정하기 때문에 습윤밀도의 증가는 질량의 증가라고 볼 수 있다. 동일한 물질에 같은 열량을 가할 때는 질량이 클수록 온도 변화가 작게 발생한다. 그러나 수치해석 결과 Fig. 6과 같이 각각의 해석 경우에 대하여 완충재의 온도 분포 차이가 아주 미세한 것으로 나타났다. 이를 통해 심층 처분 시설의 운영기간 중 변하는 습윤밀도 값의 변화는 완충재의 온도 변화에 미치는 영향이 미미하다는 것을 알 수 있었다.

다음은 Case 1, 8 및 9의 해석 결과 비교를 통하여 건조밀도가 완충재의 온도 변화에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

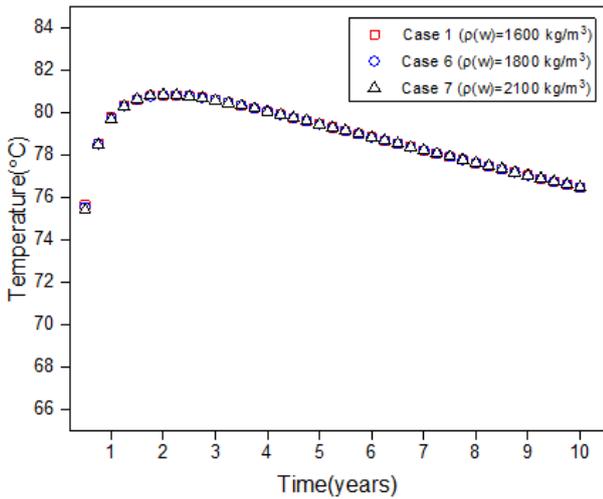


Fig. 6. Effect of wet density on temperature variation of buffer

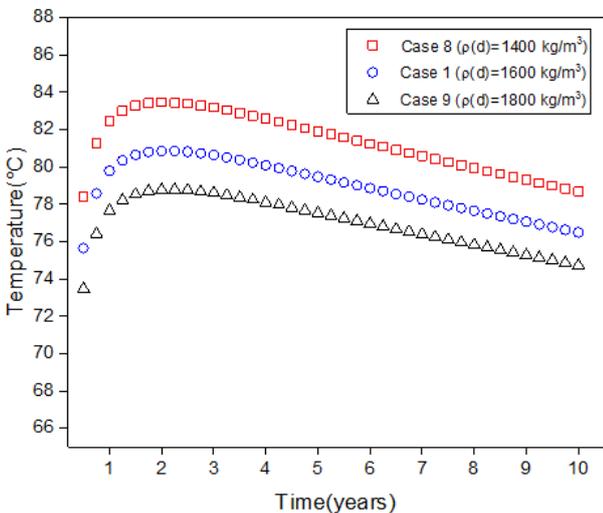


Fig. 7. Effect of dry density on temperature variation of buffer

Fig. 7은 식 (2)와 (3)에서와 같이 건조밀도가 증가하면 열전도도와 비열이 증가하는데 이를 같이 고려해준 벤토나이트 완충재의 온도 변화라고 할 수 있다. 해석 결과 건조밀도가 증가할수록 완충재의 온도 변화가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 비열과 습윤밀도에 따른 온도 변화의 해석 결과를 고려하였을 때, 비열이나 밀도의 변화로 인한 영향이라기보다는 식 (2)에서 처럼 건조밀도가 증가할수록 열전도도가 증가한 영향 때문이라고 볼 수 있다.

따라서 시스템 운영 중 변하는 습윤밀도가 해석에 미치는 영향은 미미하다고 볼 수 있지만 초기조건에 따라 변하는 건조밀도가 열전도도의 변화에 미치는 영향은 온도 변화에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 고준위폐기물의 심층 처분 시스템에서 벤토나이트 완충재의 열물성 변화가 주변 온도 변화에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 심층 처분 시스템은 벤토나이트 완충재의 열적 성능을 만족시키기 위한 기준 온도를 넘지 않도록 설계되어야 하며, 이에 따라 완충재의 온도 변화 해석은 매우 중요하다. 완충재의 온도 변화를 결정짓는 벤토나이트의 주요 열적 물성으로는 열전도도, 비열, 밀도가 있는데 심층 처분시설의 운영에서 이들은 변화하기 때문에 이에 대한 영향을 고려할 수 있는 모델의 설정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 압축 벤토나이트 완충재의 열물성 모델을 이용하여 밀도와 함수비에 따른 열물성의 변화를 고려할 수 있는 수치해석 모델을 설정하였다. 또한 수치모델을 이용하여 심층 처분 시스템에서의 벤토나이트 완충재의 온도 변화에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 수치해석 모델의 설정을 위해 상용 프로그램인 유한요소해석법 기반의 COMSOL Multiphysics 5.2a를 사용하였다. 수치해석 모델은 처분용기가 지중 500m에 설치되어 있는 것으로 가정한 공학적 다중방벽의 개념을 모사하였다. 또한 모델에는 국내 기준 완충재 물질인 경주 압축 벤토나이트 완충재의 열물성을 반영하였다. 수치 모델을 장기간 해석 하였을 때, 사용후핵연료의 붕괴열에 의해 완충재의 온도가 초기에는 증가하였으나 시간이 지날수록 열이 방출되어 일정하게 수렴하는 것을 볼 수 있었다. 또한 수치해석 모델은 매개변수 연구에 사용되었다.
- (2) 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도는 건조밀도와 함수비의 영향을 받으며, 매개변수 연구를 위하여 함수비에 따라 다른 열전도도의 값을 설정하여 수치해석을 수행하였다. 해석 결과 함수비가 크고 그에 따른 열전도도가 높을수록 온도변화가 작게 나타났다으며, 이로 인해 최대 온도는 낮았다. 이는 벤토나이트 블록의 열전도도가 높을수록 처분용기로부터 전달된 고온의 열을 많이 방출하기 때문이다. 이를 통하여 심층 처분 시스템의 설계에 있어 완충재의 열전도도는 중요한 인자라는 것을 알 수 있다.
- (3) 매개변수 연구를 통하여 벤토나이트의 비열은 완충재의 온도변화에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할

수 있었다. 또한 비열은 다른 열물성 변화에 의해 그 변화가 크지 않으므로, 열해석에는 중요하지 않은 인자라는 것을 알 수 있었다.

- (4) 밀도는 시스템의 운영기간 동안 변하는 함수비에 따라 변하는 값인 습윤밀도와 초기 조건의 건조밀도를 가지고 열전도도와 비열에 영향을 미치는 밀도로 나눠서 해석을 수행함으로써 각각에 대한 영향을 살펴보았다. 습윤밀도의 경우 각각의 해석 경우에 대하여 완충재의 온도 분포 차이가 아주 미세한 것으로 나타났다. 이를 통해 습윤밀도 값의 변화는 완충재의 온도 변화에 미치는 영향이 미미하다는 것을 알 수 있었다. 반면에 건조밀도는 그 값이 증가할수록 완충재의 온도 변화가 작게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 비열이나 함수비 변화로 인한 습윤밀도의 변화로 인한 영향이라기보다는 초기 조건에서의 건조밀도가 증가할수록 열전도도가 증가한 영향 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 시스템 운영 중 변하는 습윤밀도가 해석에 미치는 영향은 미미하다고 볼 수 있지만 초기조건에 따라 변하는 건조밀도가 열전도도의 변화에 미치는 영향은 온도 변화에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.
- (5) 설정된 모델을 바탕으로 수리-역학적 특성들간의 복합적인 관계가 고려되고 이를 열-수리-역학적 연계 해석과 결합하면 보다 정확한 심층 처분시설의 온도변화를 살펴볼 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 초기 조건의 건조밀도는 완충재의 열전도도 및 주변 온도 변화에 큰 영향을 주는 요소이므로 주어진 현장 조건을 고려하여 완충재의 최적의 초기 조건을 찾아내는 것이 처분장의 장기 안정성을 확보하는데 중요한 문제가 된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 한국연구재단의 핵심개인연구지원사업(NRF-2017R1A2B4010397)과 원자력기술개발사업(NRF-2017M2A8A5014857)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Comsol Inc. (2016), "Comsol Multiphysics user's manual Ver. COMSOL 5.2a", USA.

2. Côté, J. and Konrad, J. M. (2005), "A Generalized Thermal Conductivity Model for Soils and Construction Materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.2, pp.443-458.

3. Cho, W. J. and Kim, G. Y. (2016), "Reconsideration of Thermal Criteria for Korean Spent Fuel Repository", *Annals of Nuclear Energy*, Vol.88, pp.73-82.

4. Cho, W. J., Lee, J. W., and Chun, K. S. (1999), "Basic Physico-chemical and Mechanical Properties of Domestic Bentonite for Use as a Buffer Material in a High-level Radioactive Waste Repository", *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol.31, No.6, pp.39-50.

5. Go, G. H., Lee, S. R., and Kim, Y. S. (2016), "A Reliable Model to Predict Thermal Conductivity of Unsaturated Weathered Granite Soils", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.74, pp.82-90.

6. JNC (1999), "HI2 Project to establish technical basis for HLW disposal in Japan", Supporting Report 2, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Japan.

7. Johansen, O. (1975), "Thermal Conductivity of Soils", University of Trondheim, Ph.D. Thesis.

8. Kersten, M.S. (1949), "Laboratory Research for the Determination of the Thermal Properties of Soils", Arctic construction and frost effects laboratory, Technical Report 23.

9. Knutsson, S. (1983), "On the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Highly Compacted Bentonite", SKR Technical Report 83-72.

10. Lee, J. H., Lee, M. S., Choi, H. J., and Choi, J. W. (2010), "Temperature Effect on the Swelling Pressure of a Domestic Compacted Bentonite Buffer", *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, Vol.8, No.3, pp.207-213.

11. Lee, J. O., Cho, W. J., and Kwon, S. (2011a), "Thermal-hydro-mechanical Properties of Reference Bentonite Buffer for a Korean HLW Repository", *Tunnel and Underground Space*, Vol.21, No.4, pp.264-273.

12. Lee, J. W., 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.

13. Lee, J. Y., Cho, D. K., Choi, H. J., Choi, J. W., and Wang, L. M. (2011b), "Analysis of Disposal Efficiency based on Nuclear Spent Fuel Cooling Time and Disposal Tunnel/pit Spacing for the Design of a Geological Repository", *Progress in Nuclear Energy*, Vol.53, pp.361-367.

14. Villar, M. V. (2004), "Thermo-hydro-mechanical Characteristics and Processes in the Clay Barrier of a High Level Radioactive Waste Repository", State of the art report.

15. Yoon, S., Lee, M. S., Kim, G. Y., Lee, S. R., and Kim, M. J. (2017), "A Prediction of Thermal Conductivity for Compacted Bentonite Buffer in the High-level Radioactive Waste Repository", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.4, pp.55-64.

16. Yoon, S., Kim, G. Y., and Baik, M. H. (2017), "A Prediction of Specific Heat Capacity for Compacted Bentonite Buffer", *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol.15, No.3, pp. 199-206.

Received : November 1st, 2017

Revised : December 6th, 2017

Accepted : December 7th, 2017