

A Prediction of Thermal Expansion Coefficient for Compacted Bentonite Buffer Materials

압축 벤토나이트 완충재의 열팽창계수 추정

Seok Yoon*, Geon-Young Kim, and Min-Hoon Baik

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

윤석*, 김건영, 백민훈

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

(Received March 21, 2018 / Revised June 27, 2018 / Approved July 18, 2018)

A geological repository system consists of a disposal canister with packed spent fuel, buffer material, backfill material, and intact rock. The buffer is indispensable to assure the disposal safety of high-level radioactive waste. Since the heat generated from spent nuclear fuel in a disposal canister is released to the surrounding buffer materials, the thermal properties of the buffer material are very important in determining the entire disposal safety. Especially, since thermal expansion can cause thermal stress to the intact rock mass in the near-field, it is very important to evaluate thermal expansion characteristics of bentonite buffer materials. Therefore, this paper presents a thermal expansion coefficient prediction model of the Gyeongju bentonite buffer materials which is a Ca-bentonite produced in South Korea. The linear thermal expansion coefficient was measured considering heating rate, dry density and temperature variation using dilatometer equipment. Thermal expansion coefficient values of the Gyeongju bentonite buffer materials were $4.0\sim 6.0\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Based on the experimental results, a non-linear regression model to predict the thermal expansion coefficient was suggested and fitted according to the dry density.

Keywords: Compacted bentonite buffer materials, Linear thermal expansion coefficient, Regression analysis

*Corresponding Author.

Seok Yoon, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: syoon@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2946

ORCID

Seok Yoon <http://orcid.org/0000-0001-7388-7501>

Geon-Young Kim <http://orcid.org/0000-0001-5502-178X>

Min-Hoon Baik <http://orcid.org/0000-0003-0104-9183>

고준위폐기물을 처분하기 위한 심층처분시스템의 구성 요소로는 처분용기, 완충재, 뒷채움 및 근계 암반이 있다. 이 중 완충재는 심층 처분시스템에 있어 필수적인 요소이다. 처분용기에서 발생하는 고온의 열량은 완충재로 전과되기에 완충재의 열적 특성은 처분시스템의 안정성 평가에 상당히 중요하다고 할 수 있다. 특히, 고온의 열량은 완충재의 열적 팽창을 야기하여 근계 암반에 열응력을 야기할 수 있기에 완충재의 열팽창 특성 규명은 반드시 필요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 경주산 압축 벤토나이트 완충재(KJ-II)에 대한 열팽창 거동 특성을 실내 실험을 통해 분석하고 선형 열팽창계수에 대한 추정 모델을 제시하고자 하였다. 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수는 dilatometer 장비를 이용하여 승온 속도, 건조밀도, 온도 범위에 따라 측정되었으며 선형 열팽창계수 값은 대략 $4.0\sim 6.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다. 또한 실험 데이터를 토대로 비선형 회귀분석 방법을 이용하여 건조밀도에 따른 경주 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수를 추정할 수 있는 모델을 제시하였다.

중심단어: 압축 벤토나이트 완충재, 선형 열팽창계수, 회귀분석

1. 서론

원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료는 지하 500~1,000 m 깊이의 심층 처분시스템의 다중방벽(공학적방벽과 천연방벽) 개념에 의해 안전하게 처분되어야 한다. 인간이 개발한 기술로 처분시스템의 성능과 안정성을 확보할 수 있는 공학적방벽은 처분용기(canister), 뒷채움재(backfill), 완충재(buffer), 근계영역 암반(near-field rock) 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 이 중 완충재는 처분용기와 처분공 사이에 채워지는 물질로써 사용후핵연료가 담겨있는 처분용기를 처분공에 고정시키며 주변의 물리적 충격으로부터 처분용기를 보호하고 지하수 유입을 최소화하여 지하수에 의해 용해된 핵종이 주변 암반으로 유출되는 것을 방지한다[1, 2]. 또한 완충재는 처분용기로부터 발생하는 붕괴열을 주위 암반으로 신속히 발산시키는 역할을 하기에 완충재의 열적 특성은 완충재의 온도가 설정된 최고 온도를 넘지 않도록 하며, 아울러 온도증가에 의한 열팽창으로 인해 주위 암반과 처분용기가 과도한 열응력을 받지 않도록 하는데도 중요한 역할을 한다[3, 4].

따라서 완충재에 적합한 후보물질을 선정하기 위해 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 그 결과 주로 몬모릴로나이트로 구성된 벤토나이트 점토 광물이 가장 적합한 물질인 것으로 알려져 있다[5, 6]. 벤토나이트는 몬모릴로나이트를 다량 함유하는 스멕타이트 군에 속하며, 이 군에 속하는 광물들은 인접(adjacent) 층상구조와 높은 팽윤 특성을 가진다[5]. 몬모릴로나이트는 알루미늄 8면체의 내부치환에 의해 층간전하가

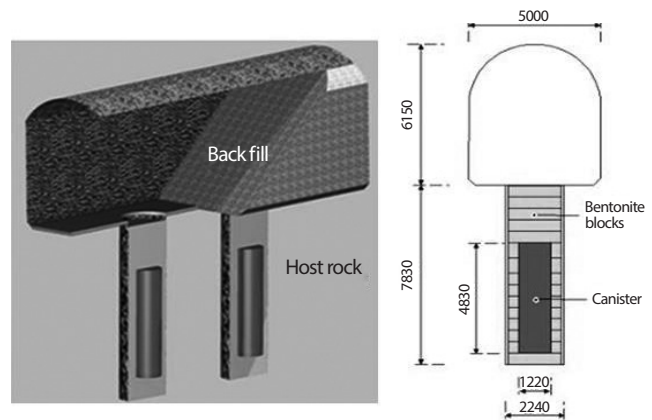


Fig. 1. Concept of engineered barrier system [1].

발생되는 광물이며, 벤토나이트는 층간사이에 존재하는 교환성 양이온의 종에 따라 Na형 벤토나이트와 Ca형 벤토나이트로 구분된다[7]. 우리나라의 경우 경주에서 Ca형 벤토나이트가 생산되고 있기에 Ca형에 대한 연구가 주로 수행되고 있다.

완충재의 열적 특성인 열전도도와 비열에 관한 연구는 많이 수행되고 있으나[3, 8-12], 역학적 물성으로 분류될 수 있는 열팽창에 관한 연구는 거의 전무한 상황이다. 특히, 주변 암반으로부터 지하수가 유입되어 이로 인해 발생할 수 있는 팽창압과 처분용기에서 발생하는 고온의 열량으로 인해 완충재에 열팽창응력이 작용될 수 있기에[13, 14], 완충재의 열팽창 특성에 관한 연구도 다른 물성과 더불어 반드시 필요하다고 할 수 있다.

Table 1. Chemical composition of KJ-II powder [5]

Chemical constituent	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO
Percentage (%)	58.81	15.17	5.28	5.72	2.70	1.27	1.06	0.67	0.13

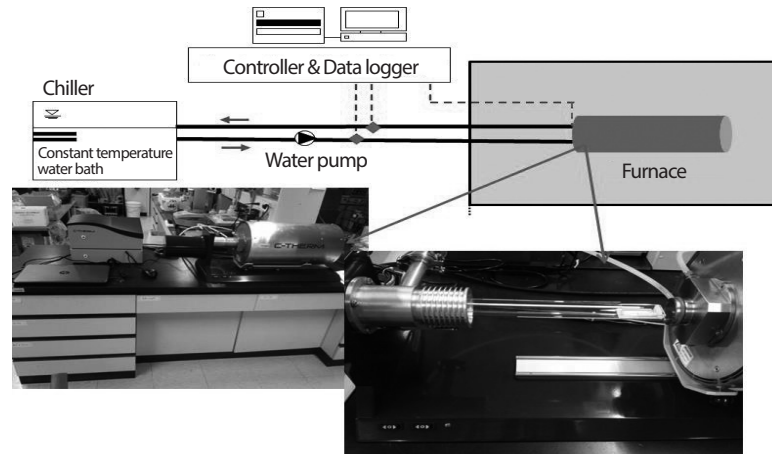


Fig. 2. Dilatometer for the measurement of linear thermal expansion coefficient.

따라서 본 연구에서는 국내외적으로 거의 연구된 적이 없는 벤토나이트 완충재에 대한 열팽창 특성을 규명하고자 하였다. 우선, 국내의 경주 Ca형 압축 벤토나이트를 이용하여 승온속도, 건조밀도, 온도 구간에 따라 선형 열팽창계수를 측정 후 영향 인자별 열팽창 거동을 분석하였으며, 측정된 값을 근거로 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수 추정 모델을 제시하고자 하였다.

2. 실내 열팽창계수 실험

2.1 실험 재료

본 실험에 사용된 Ca형 국내 벤토나이트는 신생대 제3기충군 지역인 한반도 동남쪽의 경주, 울산, 포항 일대에 분포하고 있다[15]. 한국원자력연구원에서는 경주 벤토나이트 시료를 2015년을 기준으로 이전까지는 KJ-I, 이후 시점에는 KJ-II로 명명하여 연구를 수행중에 있으며[5], 본 연구에서는 (주)클라리언트코리아에서 생산한 Ca형 경주 벤토나이트인 KJ-II를 이용하여 실험을 수행하였다. KJ-II 벤토나이트 분말의

통일분류 결과 고소성 점토인 CH로 분류되었으며 비중은 2.71, 액성한계와 소성한계는 각각 146.7%, 28.4%였으며 소성지수는 118.3%이었다[15]. 또한 KJ-II 벤토나이트는 Table 1과 같이 대부분 SiO₂와 Al₂O₃가 차지하였고, CaO는 NaO보다 약 5~6배 높은 구성비율을 나타냈다. 열팽창계수 실험을 위하여 KJ-II 벤토나이트 분말을 압축하여 블록으로 성형하였으며 시료는 직경 약 10 mm, 높이 약 20 mm의 원기둥 형태로 제작되었다.

2.2 실험 기기

압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수를 측정하기 위하여 Dilatometer (C-Therm Technologies Ltd) 장비를 사용하였다(Fig. 2). 본 장비는 푸시로드 타입으로 푸시로드를 시료에 접촉시키면 푸시로드 반대편의 LVDT (linear variable displacement transducer)가 연결되어 있어 샘플의 부피가 팽창하면 푸시로드의 이동거리가 LVDT에 계측이 되는 원리이다[16]. Dilatometer는 시료에 열을 가해주는 Furnace와, 실험 종료 후 냉각을 위한 Chiller, 그리고 실시간 데이터를 계측할 수 있는 Data-logger 시스템으로 구성되어 있다.

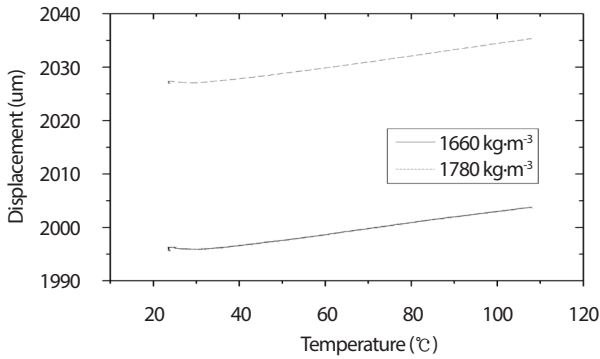


Fig. 3. Displacement with respect to temperature range.

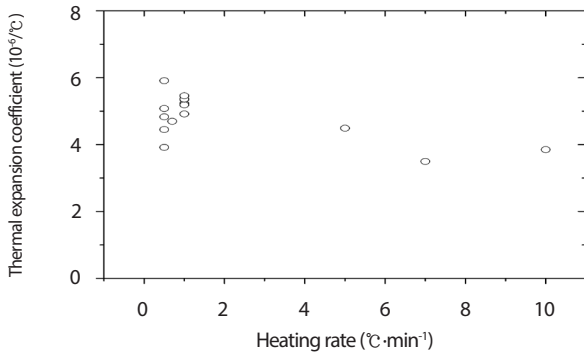


Fig. 4. Linear thermal expansion coefficient with respect to heating rate.

Dilatometer를 이용하여 열에 의한 시료의 길이 변화를 측정할 수 있으며 식 (1)에 의해 선형 열팽창계수를 도출할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \frac{\Delta L}{\Delta T} = \frac{1}{L_0} \frac{(L_i - L_0)}{(T_i - T_0)} \quad (1)$$

여기서 α 는 선형 열팽창계수 (1/°C), L (mm)은 샘플의 길이, T (°C)는 온도를 뜻한다. 즉, 열팽창계수는 특정 구간에서의 온도 변화에 따른 길이 변화를 초기 길이로 나누어준 값을 뜻한다[14].

3. 실험 결과

Lee et al. (2014)[17]의 연구에 따르면 심층처분시스템에서의 벤토나이트 완충재의 온도 상승 속도는 상당히 작은 것

으로 알려져 있다. 처분용기와 완충재가 접한 곳의 초기 온도 상승도 최대 0.1~0.3°C·min⁻¹ 인 것으로 파악되며 이를 고려하여 온도 상승에 따른 벤토나이트 완충재의 열팽창 거동을 조사하였다. 실험의 용이성을 위해 압축 벤토나이트를 110°C에서 48시간 동안 건조한 후 건조 상태에서의 선형 열팽창계수를 측정하였다.

우선 건조밀도에 따라 25°C에서 110°C까지 열팽창 거동을 살펴보았으며 실험에 사용된 압축 벤토나이트 완충재의 건조밀도는 1,516 kg·m⁻³에서 1,806 kg·m⁻³ 값을 보였다. 본 Dilatometer 장비의 최소 승온 속도는 0.5°C·min⁻¹ 이기에 승온 속도가 0.5°C·min⁻¹ 일 때 두 가지 건조 밀도에서의 압축 벤토나이트 완충재의 열에 의한 길이 변형값을 측정하였다. Fig. 3과 같이 상온 이후 대략 30°C에서 110°C 구간까지 일정한 기울기로 길이가 증가됨을 알 수 있으며 선형 열팽창계수는 30°C에서 110°C까지 일정한 기울기를 갖는 두 지점에서 식 (1)을 통해 계산되었다.

또한 승온속도에 따라 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수를 측정하였다. 실제 심층처분환경을 고려한다면 완충재에 전달되는 온도 상승은 0.1~0.3°C·min⁻¹로 설정하여야 하나, 본 장비의 특성상 승온 속도를 0.5~10°C·min⁻¹로 설정하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 승온속도가 증가할수록 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수는 감소하는 경향을 보였으나 승온속도가 1°C·min⁻¹ 미만에서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 따라서 실제 처분환경을 고려하여 승온속도는 0.5~1°C·min⁻¹로 설정하여도 무방할 것으로 판단된다.

승온속도 0.5~1°C·min⁻¹ 구간에서 건조밀도에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수를 측정하였다. Fig. 5와 같이 압축 벤토나이트 완충재의 건조밀도가 증가할수록 선형 열팽창계수 값은 감소하는 것으로 나타났으며 건조밀도가 1,650 kg·m⁻³ 미만에서는 큰 변화가 없었다. 이는 건조밀도가 작을수록 시료 내 공기가 차지하는 비율이 크다는 것이며 공기의 열팽창계수는 1×10⁻³ 단위로 흙 입자의 열팽창계수보다 매우 크기에[18] 전체 시료의 열팽창계수가 크게 나타난 것으로 판단된다. 대표적인 열적 물성인 열전도도와 비열은 건조밀도에 비례하는 것으로 알려져 있다[9,15].

전체적으로 본 실험에 사용된 KJ-II 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수는 4.0~6.0×10⁻⁶/°C 값을 나타냈으며 이는 Na 계열의 MX-80의 압축 벤토나이트의 열팽창계수보다 약 35~80배 정도 작은 값을 나타냈다. MX-80의 열팽창계수는

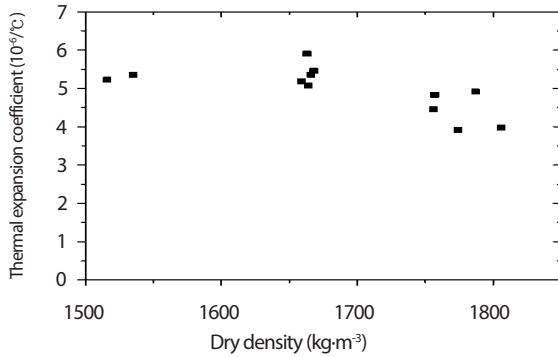


Fig. 5. Linear thermal expansion coefficient with respect to dry density.

Table 2. Comparison of swelling index between domestic and overseas bentonites [5]

Samples	Swelling Index (mL/2g)
KJ-II (S.Korea)	6.5
KJ-I (S.Korea)	8
Mg-type (Czech Republic)	6
Na-activated (Czech Republic)	28
MX-80 (USA)	48

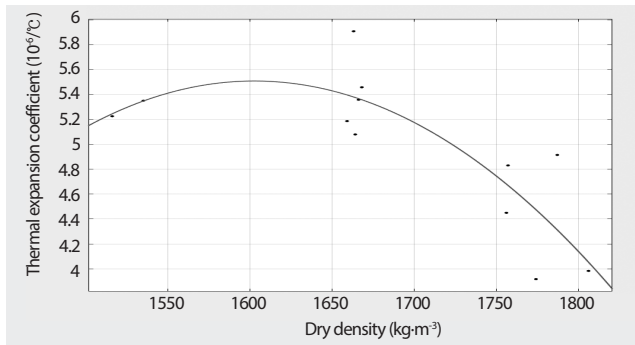


Fig. 6. Non-linear regression analysis model.

Table 3. Summary of descriptive statistics quantity

	N	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation	Skewness	Kurtosis
Dry density (kg·m ⁻³)	12	1516	1806	1688	27.027	-0.629	-0.330
Thermal expansion coefficient (1.0×10 ⁻⁶ /°C)	12	3.917	5.909	4.972	0.172	-0.622	-0.123

2.2~3.1×10⁻⁴/°C 정도로 알려져있다[19]. 이는 Table 2에서 알 수 있듯이 Na 계열의 벤토나이트 보다 Ca 계열의 경주 벤토나이트는 팽윤지수 값이 약 4~8배 정도 낮았으며, 팽창성이 우수한 Na 성분은 약 2배 정도 낮았기 때문인 것으로 판단된다[5].

4. 선형 열팽창계수 추정 모델 개발

4.1 개요

흙과 같이 입자와 간극으로 구성된 물질들은 필연적으로 불확실성이 개입되어 공학적 특성 및 지질조건, 설계 정수 등을 정확하게 판단하기 힘들기 때문에 확률론적 해석 방법을 통해 설계 인자를 도출할 수 있다[15,20]. 확률론적 해석방법은 지반공학에서 적용되는 변수들을 확률변수로 가정하여 이에 대한 확률 특성을 분석한 후, 확률론을 이용하여 해석하는 방법이다[20, 21]. Fig. 5와 같이 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수는 건조밀도에 따라 비선형 관계를 보였다. 따라서 본 연구에서는 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수를 종속변수로 정하고 건조밀도를 독립변수로 정하여 비선형 회귀분석을 통하여 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수를 추정할 수 있는 모델을 제안하고자 하였다.

4.2 비선형 회귀분석

독립변수와 종속변수가 모두 연속형의 데이터기에 회귀분석을 채택하여 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수를 추정하고자 하였다. 총 12가지 데이터를 토대로 Fig. 6과 같이 MATLAB의 surface tool 모듈을 이용하여 식 (2)와 같이 비선형 회귀식을 도출하였으며 Table 3은 회귀분석에 사용된 데이터들의 기초 통계량을 나타낸다.

Table 4. Results of non-linear regression analysis

	<i>B</i>	Standard error	<i>t</i>	P-value
Constant	-8.489×10 ⁻⁵	4.000×10 ⁻⁵	-2.122	
a (γ_d^2)	-3.520×10 ⁻¹¹	1.449×10 ⁻¹¹	-2.429	< 0.05
b (γ_d)	1.128×10 ⁻⁷	4.822×10 ⁻⁸	2.340	< 0.05
R ²	0.699			
adj-R ²	0.632			

B: Non-standardized coefficient, *t*: *B*/standard error

Table 5. Results of ANOVA analysis

	DF	SS	MS	F	P-value
Regression	2	2.769×10 ⁻¹²	1.384×10 ⁻¹²	10.438	< 0.01
Residual	9	1.194×10 ⁻¹²	1.326×10 ⁻¹³		
Total	11	3.963×10 ⁻¹²			

DF: Degree of freedom, SS: Sum of square, MS: Mean square (SS/DF)

$$\alpha = -3.520 \times 10^{-11} \gamma_d^2 + 1.128 \times 10^{-7} \gamma_d - 8.489 \times 10^{-5} \quad (2)$$

여기서, γ_d 는 압축 벤토나이트 완충재의 건조밀도(kg·m⁻³)를 뜻하며 α 는 열팽창계수 (1/°C)를 뜻한다. 식 (2)와 같은 비선형 회귀분석은 일반 선형 회귀분석과 달리 독립변수 간 다중공선성이 발생할 수 밖에 없다. 따라서 비선형 회귀분석에 있어서 이에 대한 유의성 검증은 의미가 없으며 잔차의 등분산성 및 정규성 검증 같은 잔차 분석도 필요하지 않다[22]. 따라서 계수에 대한 유의성과 ANOVA 분석을 실시하여 회귀식에 대한 유의성을 검증하였다[23]. Table 4는 비선형 회귀분석 결과에 대한 모형 요약표를 나타낸다. 상수 및 계수에 대한 유의확률은 0.05보다 작았으며 이는 독립변수를 종속변수의 예측에 사용할 수 있다는 것을 의미한다[15]. 결정계수 (R²) 및 조절 결정계수 (adj-R²)값은 0.6~0.7 정도였다. Table 5는 ANOVA 결과표를 보여주고 있는데 ANOVA 분석은 분산 비 검증이라고 하며 종속변수를 예측하는데 있어 독립변수의 기여도를 나타낸다[22]. 본 회귀식에 대한 유의확률 역시 0.01보다 작게 나타났기에 독립변수와 종속변수간의 유의성이 상당히 높다고 할 수 있다[23]. 따라서 식 (2)를 통해 국내 경주

압축 벤토나이트 완충재의 경우 건조밀도 값만 안다면 선형 열팽창계수를 합리적이고 쉽게 추정할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서는 12개의 작은 실험 데이터를 토대로 회귀모형을 제시하였기에 추후 실험을 추가하여 회귀모형의 수정 및 보완이 필요할 것으로 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료를 처분하기 위한 심층처분시스템의 공학적방벽인 압축 벤토나이트 완충재의 열팽창특성을 실험적 방법을 통해 평가하였으며, 측정된 데이터를 이용하여 선형 열팽창계수를 추정할 수 있는 모형을 제시하였다.

우선 국내 경주산 벤토나이트인 KJ-II를 가지고 110°C 의 건조로에서 건조 후 상온에서 110°C 까지 선형 열팽창계수를 측정하였다. 승온속도가 증가할수록 선형 열팽창계수 값은 감소하였으나 1°C·min⁻¹ 미만에서는 큰 차이를 보이지는 않았다. 실제 심층처분시스템에서 완충재에 가해질 수 있는

최고 순간 승온 속도가 $0.1\sim 0.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 인 점을 고려할 때 승온 속도는 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 로 설정하여도 무방할 것으로 판단된다. 또한 다양한 건조밀도에 따라 압축 벤토나이트의 선형 열팽창계수를 측정하였으며 건조밀도가 증가할수록 선형 열팽창계수는 감소하였다. 전반적으로 본 실험에 사용된 KJ-II 압축 벤토나이트 완충재의 선형 열팽창계수는 $4.0\sim 6.0\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 값을 나타냈으며 이는 Na 계열의 MX-80의 압축 벤토나이트의 열팽창계수보다 약 35~80배 가량 작은 값을 나타냈다. 이는 Na 계열의 벤토나이트 보다 Ca 계열의 경주 벤토나이트의 경우 팽윤지수 값과 팽창성이 우수한 Na 성분이 상대적으로 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 아울러 건조밀도에 따른 선형 열팽창계수 실험값을 토대로 비선형 회귀분석을 실시하여 선형 열팽창계수 추정식을 개발하였다.

벤토나이트 완충재는 처분 용기에서 발생하는 고온의 열량을 주변 암반으로 전달하는데 있어 중요한 역할을 하기에 완충재의 열적 특성은 매우 중요하다고 할 수 있다. 완충재의 열적 물성인 열전도도와 비열에 관련된 연구는 많이 수행되어 왔으나, 역학적 물성 중 하나인 열팽창계수에 관한 연구는 거의 수행된 적이 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 외적으로 연구된 적이 거의 없는 벤토나이트 완충재에 대한 열팽창 특성을 온도범위, 승온속도 및 건조밀도에 따라 규명하였다. 공학적방벽 시스템의 완충재에는 지하수 유입에 의한 팽창압 뿐만 아니라 처분용기에서 발생하는 고온의 열량으로 인한 열팽창응력이 작용된다. 이에 따라 본 연구에서 제시한 완충재의 열팽창 특성 및 회귀 모델은 전체 처분시스템의 열-수리-역학 복합해석 및 전체 안전성 평가에 있어서 중요한 입력자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 건조 상태에서의 압축 벤토나이트 완충재의 열팽창 특성을 고려하였지만, 실제 처분시스템에서는 초기 함수비가 존재하는 벤토나이트 완충재가 사용될 것이다. 따라서 처분용기에서 발생하는 고온의 열량과 주변 암반에서의 지하수 유입으로 인해 벤토나이트 완충재는 팽창 및 수축 등의 복합 현상을 보일 것으로 예상되기에 추후에는 이를 고려할 수 있는 벤토나이트 완충재의 열팽창 규명에 관한 연구도 반드시 필요할 것으로 판단된다. 또한 벤토나이트 완충재의 열팽창으로 인한 주변 암반 및 처분용기에 가해지는 열응력에 관한 정량적인 한계값 및 기준 등에 관한 연구도 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국연구재단의 원자력기술 개발사업으로 수행되었으며 (NRF-2017M2A8A5014857) 이에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCE

- [1] J.Y. Lee, D.K. Cho, H.J. Choi, and J.W. Choi, "Concept of a Korean reference disposal system for spent fuels", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 44(12), 1563-1573 (2007).
- [2] Swedish Nuclear Fuel Supply Co/Division KBS, "Final storage of spent nuclear fuel-KBS3", *Svensk Kärnbränslehantering AB Report*, Stockholm (1983).
- [3] J.W. Lee, H.J. Choi, and J.Y. Lee, "Thermal conductivity of compacted bentonite as a buffer material for a high-level radioactive waste repository", *Ann. Nucl. Energy*, 94, 848-855 (2016).
- [4] M.J. Kim, S.R. Lee, S. Yoon, J.S. Jeon, and M.S. Kim, "Effect of thermal properties of bentonite buffer on temperature variation", *J. Korean Geotech. Soc.*, 34(1), 17-24 (2018).
- [5] M. Yoo, H.J. Choi, M.S. Lee, and S.Y. Lee, "Measurement of properties of domestic bentonite for a buffer of an HLW repository", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 14(2), 135-147 (2016).
- [6] Karnland, "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 (2010).
- [7] F.T. Madsen, "Clay mineralogical investigation related to nuclear waste disposal", *Clay Minerals*, 33(1), 109-129 (1988).
- [8] C. Ould-Lahoucine, H. Sakashita, and T. Kumada, "Measurement of thermal conductivity of buffer materials and evaluation of existing correlation predicting it", *Nucl. Eng. Des.*, 216(1-3), 1-11 (2002).
- [9] A.M. Tang, Y.J. Cui, and T.T. Lee, "A study on the

- thermal conductivity of compacted bentonite”, *Appl. Clay Sci.*, 41(3-4), 181-189 (2008).
- [10] W.J. Cho, J.W. Lee, and S. Kwon, “An empirical model for the thermal conductivity of compacted bentonite and a bentonite-sand mixture”, *Heat Mass Transf.*, 47(11), 1385-1393 (2011).
- [11] M. Wang, Y.F. Chen, S. Zhou, R. Hu, and C.B. Zhou, “A homogenization-based model for the effective thermal conductivity of bentonite-sand-based buffer material”, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 68, 43-49 (2015).
- [12] S. Yoon, G.Y. Kim, T.J. Park, and J.K. Lee, “Thermal properties of buffer material for a high-level waste repository considering temperature variation”, *J. Korean Geotech. Soc.*, 33(10), 25-31 (2017).
- [13] M.V. Villar, P.L. Martin, and J.M. Barcala, “Modification of physical, mechanical and hydraulic properties of bentonite by thermo-hydraulic gradients”, *Eng. Geol.*, 81(3), 284-297 (2006).
- [14] J.O. Lee, Y.C. Choi, M.S. Lee, and H.J. Choi, “Thermal expansion characteristics of the compacted bentonite buffer”, *Proc. of Spring Conf. of J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 159-160 (2015).
- [15] S. Yoon, G.Y. Kim, and M.H. Baik, “A prediction of specific heat capacity for compacted bentonite buffer”, *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 15(3), 199-206 (2017).
- [16] ASTM E 228: Standard test method for linear thermal expansion of solid materials with a push-rod dilatometer (2017).
- [17] J.O. Lee, K. Birch, and H.J. Choi, “Coupled thermal-hydro analysis of unsaturated buffer and backfill in a high-level waste repository”, *Ann. Nucl. Energy*, 72, 63-75 (2014).
- [18] “Properties of air”, Accessed Feb. 20 2018. Available from: <http://www.solarview.net/archives/339> (2018).
- [19] L. Borgesson, H. Hokmark, and O. Karland, “Rheological properties of sodium smectite clay”, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. Report, SKB-TR-88-30 (1988).
- [20] K.H. Jeon, “Probabilistic analysis of unsaturated soil properties for Korean weathered granite soil”, Master Thesis, KAIST (2012).
- [21] N.V. Nikhil and S.R. Lee, “A hybrid feature selection algorithm integrating an extreme learning machine for landslide susceptibility modeling of Mt. Woomyeon, South Korea”, *Geomorph.*, 263, 50-70 (2016).
- [22] I.H. Lee, “Easy flow regression analysis”, Hannarae Publishing Corporation (2014).
- [23] J.Y. Park, “Statistical entrainment growth rate estimation model for debris-flow runout prediction”, Master Thesis, KAIST (2015).