

A Prediction of Specific Heat Capacity for Compacted Bentonite Buffer

압축 벤토나이트 완충재의 비열 추정

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

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

윤석*, 김진영, 백민훈

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received June 1, 2017 / Approved July 4, 2017)

A geological repository for the disposal of high-level radioactive waste is generally constructed in host rock at depths of 500~1,000 meters below the ground surface. 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, and it can restrain the release of radionuclides and protect the canister from the inflow of groundwater. Since high temperature in a disposal canister is released to the surrounding buffer material, the thermal properties of the buffer material are very important in determining the entire disposal safety. Even though there have been many studies on thermal conductivity, there have been only few studies that have investigated the specific heat capacity of the bentonite buffer. Therefore, this paper presents a specific heat capacity prediction model for compacted Gyeongju bentonite buffer material, which is a Ca-bentonite produced in Korea. Specific heat capacity of the compacted bentonite buffer was measured using a dual probe method according to various degrees of saturation and dry density. A regression model to predict the specific heat capacity of the compacted bentonite buffer was suggested and fitted using 33 sets of data obtained by the dual probe method.

Keywords: Compacted bentonite buffer, Specific heat capacity, Dual probe method, 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 심층 처분시설은 지하 500~1,000 m 깊이의 암반층에 설치된다. 심층 처분시스템의 구성 요소로는 처분용기, 완충재, 뒷채움 및 근계 암반이 있다. 이 중 완충재는 심층 처분시스템에 있어 필수적인 요소인데, 완충재는 지하수 유입으로부터 처분용기를 보호하고, 방사성 핵종 유출을 저지한다. 처분용기에서 발생하는 고온의 열량은 완충재로 전파되기에 완충재의 열물성은 처분시스템의 안정성 평가에 상당히 중요하다고 할 수 있다. 완충재의 열전도도 규명에 대한 연구는 많이 진행되고 있는 반면, 비열에 대한 연구는 미진한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 국내 경주산 압축 벤토나이트 완충재(KJ-II)에 대한 비열 추정 모델을 개발하고자 하였다. 압축 벤토나이트 완충재의 비열은 이중 탐침법을 이용하여 다양한 포화도와 건조밀도에 따라 측정하였으며, 총 33개의 실험 데이터를 토대로 회귀분석을 이용하여 경주 압축 벤토나이트의 비열을 추정할 수 있는 모델을 제시하였다.

중심단어: 압축 벤토나이트 완충재, 비열, 이중 탐침법, 회귀 분석

1. 서론

사용후핵연료는 지하 500~1,000 m 깊이의 암반층에 심층 처분시스템의 다중방벽의 개념에 의해 안전하게 처분되어야 한다. 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 처분용기를 처분공에 고정시키며 암반의 전단거동과 같은 물리적 충격으로부터 처분용기를 보호하고 지하수 유입을 최소화하여 지하수에 의해 용해된 핵종이 주변 암반으로 유출되는 것을 저지한다[1-3]. 또한 완충재는 처분용기로부터 발생하는 붕괴열을 주위 암반으로 신속히 발산시키는 역할을 하기에 완충재의 열적 특성은 완충재의 온도가 설정된 최고 온도를 넘지 않도록 하는데 중요한 역할을 한다[4, 5].

따라서 완충재에 적합한 후보물질을 선정하기 위해 다양한 특성 조사가 이루어졌으며, 그 결과 주로 몬모릴로나이트의 점토광물로 이루어진 벤토나이트가 가장 적합한 물질인 것으로 알려져 있다[1,6]. 벤토나이트는 몬모릴로나이트를 다량 함유하는 스멕타이트 군에 속한다. 몬모릴로나이트는 알루미늄 8면체의 내부치환에 의해 충전하가 발생하는 광물이며, 벤토나이트는 층간사이에 존재하는 교환성 양이온의 종에 따라 Na형 벤토나이트와 Ca형 벤토나이트로 구분된다[1,7]. 현재 유럽 및 일본에서는 Na형 벤토나이트를 주로 연구하고 있으며 우리나라의 경우 경주에서 생산되는 Ca형 벤토나이트를 기반으로 연구를 수행하고 있다[5, 7, 8].

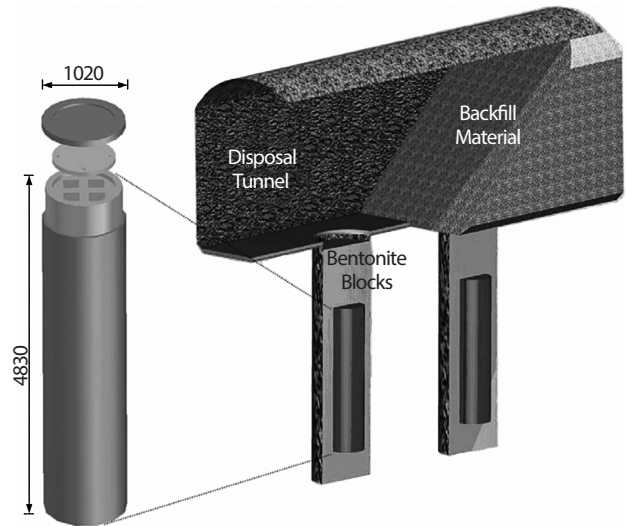


Fig. 1. Concept of engineered barrier system (Lee at al., 2007).

벤토나이트 완충재는 건조밀도 $1.6 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 이상의 값을 가져야 하며[1] 이를 위해 벤토나이트 완충재는 분말을 압축한 블록 형태로 설치되어야 한다. 압축 벤토나이트 완충재의 열적 특성은 공학적 방벽의 전체 성능평가에 있어 매우 중요하며 열적 특성은 크게 열전도도와 비열로 나눌 수 있다. 열전도도 특성에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있는 반면에 [3, 9-12], 비열에 대한 연구는 상대적으로 적게 수행되었다. 실제 포화도에 따라 완충재의 열적 특성이 변화될 수 있기에 심층 처분시스템 공학적방벽의 성능평가를 위해서는 지하수 유입에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 포화도 규명이



Fig. 2. Dual probe.

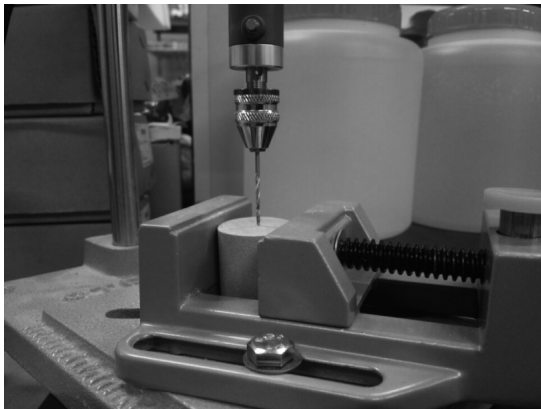


Fig. 3. Pre-drilling process.

중요하다고 할 수 있다[13]. 따라서 본 연구에서는 국내의 Ca형 압축 벤토나이트를 이용하여 건조밀도 및 포화도에 따라 비열을 측정하였으며, 측정된 값을 근거로 압축 벤토나이트 완충재의 비열 추정 모델을 제시하고자 하였다.

2. 실내 비열 실험

2.1 실험 기기 및 재료

압축 벤토나이트 완충재의 비열을 측정하기 위하여 주로 KD2-pro (Decagon Device, USA)의 이중 탐침법(dual probe)을 사용하였다(Fig. 2). 이중 탐침법은 무한 선형열원이론을

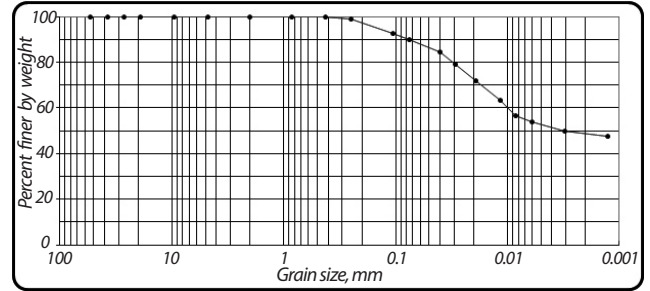


Fig. 4. Particle size distribution of KJ-II powder.

기반으로 하나의 탐침에 열을 가한 후 열이 다른 탐침에 도달할 때의 시간과 온도를 측정하여 체적 비열을 측정한다 [14, 15]. 탐침법은 시험 방법이 간편하고 측정 시간이 짧기에 실내에서 손쉽게 지층의 열물성을 측정할 수 있다[16, 17]. 실험에 사용된 압축 벤토나이트 블록 시료는 직경 30 mm, 높이 40 mm의 원기둥 형태였으며 탐침 삽입 전 프리 드릴링 후 썬열(thermal) 그리스를 도포하여 벤토나이트 블록의 비열을 측정하였다(Fig. 3).

본 실험에 사용된 Ca형 경주 벤토나이트는 우리나라의 경우 신생대 제3기충군 지역인 한반도 동남쪽의 경주, 울산, 포항 일대에 분포하고 있다[18]. 한국원자력연구원에서는 경주 벤토나이트 시료를 2015년을 기준으로 이전까지를 KJ-I, 이후 시점을 KJ-II로 명명하여 연구를 수행중에 있으며[1], 본 연구에서는 (주) 클라리언트 코리아에서 생산한 Ca형 경주 벤토나이트인 KJ-II를 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 4는 KJ-II 분말의 입도 분포곡선을 나타내며 통일분류 결과 고소성 점토인 CH로 분류되었다. 비중은 2.71, 액성한계와 소성한계는 각각 146.7%, 28.4%였으며 소성지수는 118.3%이었다.

2.2 실험 기기별 비교

우선 KD2-pro의 이중 탐침법의 비교 검증을 위해 DSC (differential scanning calorimeter) 장비를 이용하여 거의 동일한 상태의 건조밀도와 함수비를 가지는 벤토나이트 블록의 열전도도를 측정하였다. 비교 검증에 사용된 벤토나이트 블록 시료의 건조밀도는 1.58~1.62 t · m³ 였으며 함수비는 0~8% 사이에서 각각 실험이 수행되었다(Table 1). Table 1에서 예를 들면, 이중 탐침법에 사용된 시료의

건조밀도가 1,581 t · m³, 함수비는 7.714% 였을 때 비열은 1,000 kJ · kg⁻¹ · K⁻¹로 측정되었다. 이 때, DSC에 사용된 시료의 건조밀도 값은 1,575 t · m³, 함수비는 7.821% 였으며 비열 값은 1,024 kJ · kg⁻¹ · K⁻¹였다. 실험 결과 KD2-pro의 dual probe 방법과 DSC 와의 결과 차이는 1~5% 정도로 발생하였다. 하지만 DSC의 경우 시료 사이즈가 직경 5 mm, 두께 1 mm의 상당히 작은 사이즈가 필요하기에 시료를 제작하기에 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 시료 조성의 편리성을 위해 이중 탐침법을 이용하여 압축 벤토나이트 블록의 비열을 측정하였다.

2.3 실험 Database 구축

압축 벤토나이트 완충재의 비열은 건조밀도, 함수비 등에 영향을 받는 것으로 알려져있다[8, 19, 20]. 실제 심층 처분시설에서 지하수가 유입되면 완충재의 포화도가 변할 것이며 이는 열물성의 변화를 초래할 수 있기에 본 연구에서는 다양한 함수비와 포화도, 그리고 건조밀도에 따라 총 33개의 KJ-II 블록을 제작하였으며 dual probe 방법을 이용하여 비열을 측정하였다. 측정된 데이터를 이용하여 포화도와 건조밀도에 따른 비열 추정 모델을 제시하고자 하였다. Table 2는 사용된 변수들에 대한 기본 통계량을 나타낸다.

3. 비열 추정 모델 개발

3.1 개요

간극과 입자로 구성된 흙과 같은 물질은 불확실성이 필연적으로 개입하므로 공학적 특성 및 설계 변수 등을 정확하게 판단하기 힘들다[21]. 이러한 자료로부터 설계 시 안정성을 평가하기 위해 사용할 대표적인 값을 획득하기는 어렵기에 확률론적 해석방법이 적용될 수 있다. 확률론적 해석은 변수들이 나타내는 확률특성을 분석하고 확률론을 이용하여 해석하는 방법이다[21-23]. 본 연구에서는 벤토나이트 블록의 비열을 종속변수로 정하고 비열에 영향을 미치는 인자들을 독립변수로 정하였다. 독립변수와 종속변수가 모두 연속형의 데이터이기에 다중회귀분석을 채택하여 압축 벤토나이트 완충재의 비열을 추정할 수 있는 모델을 제안한다.

Table 1. Comparison of experimental results

| Measurement type | Dry density (t · m ³) | Water content (%) | Specific heat capacity (kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹) |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------|---|
| Dual probe (KD2-pro) | 1.581/1.622 | 7.714/0 | 1.000/1.035 |
| DSC | 1.575/1.620 | 7.821/0 | 1.024/0.973 |

3.2 건조밀도와 포화도를 이용한 회귀분석

건조밀도와 포화도를 독립변수로 사용하여 압축 벤토나이트 완충재의 비열을 추정하고자 한다. 회귀 분석의 가정 조건인 변수들의 정규성을 확인하기 위하여 모든 변수들에 대해 왜도(skewness)와 첨도(kurtosis)를 계산하였으며 Table 2와 같이 왜도와 첨도의 절대값이 2보다 작기에 정규성을 만족함을 알 수 있다[21, 24]. 또한 SPSS Statistics 24의 P-P Plot 모듈을 이용하여 종속변수인 비열(SH)의 정규성을 검증하였으며 Fig. 5와 같이 데이터들이 직선 주위에 모여 있기에 정규성을 만족함을 알 수 있다[25].

우선 회귀분석의 정확도를 높이기 위한 가중치 회귀분석 및 Robust 회귀분석 등의 기능을 보유하고 있는 MATLAB의 surface tool 모듈[21]을 이용하여 독립변수에 가중치를 부여한 후 다중회귀분석을 수행하였다(Fig. 6). 표준화 잔차 값이 3 이상이면 회귀식이 유의하지 않기 때문에[24, 26] 표준화 잔차가 3을 넘는 3개데이터를 제외한 후 시행착오법으로 다중 회귀분석을 수행하여 식 (1)과 같은 회귀식을 도출하였다.

$$c = 0.5825\gamma_d + 0.2579\exp(S) - 0.2962 \quad (1)$$

여기서 c는 압축 벤토나이트 완충재의 비열(kJ · kg⁻¹ · K⁻¹), γ_d 는 건조단위중량 (t · m³), S는 포화도(%)를 뜻한다. Table 3은 회귀분석 결과에 대한 모형 요약표를 나타내고 있으며 건조단위중량과 포화도 계수에 대한 유의확률이 0에 가깝기 때문에 식 (1)에 사용된 독립변수를 종속변수 예측에 사용할 수 있다[21, 24]. 또한 VIF (variance inflation factor) 값도 10보다 작은 1에 가깝기 때문에 변수 간 다중공선성이 발생하지 않으며 결정계수(R²) 및 조절 결정계수 (adjR²)값은 0.7 정도였다. Table 4는 ANOVA 분석 결과를 나타내고

Table 2. Summary of descriptive statistics quantity

| | N | Minimum | Maximum | Average | Standard deviation | Skewness | Kurtosis |
|--|----|---------|---------|---------|--------------------|----------|----------|
| Dry density ($t \cdot m^{-3}$) | 33 | 1.454 | 1.795 | 1.632 | 0.094 | -0.060 | -0.957 |
| Water content (%) | 33 | 0.000 | 0.233 | 0.082 | 0.066 | -0.143 | -0.824 |
| Saturation (%) | 33 | 0.000 | 1.000 | 0.387 | 0.289 | 0.078 | -0.582 |
| Specific heat capacity ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) | 33 | 0.696 | 1.563 | 1.070 | 0.214 | 0.476 | 0.151 |

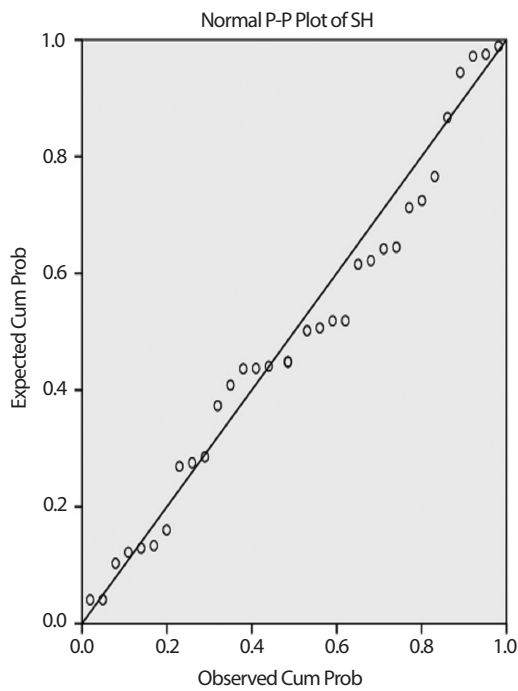
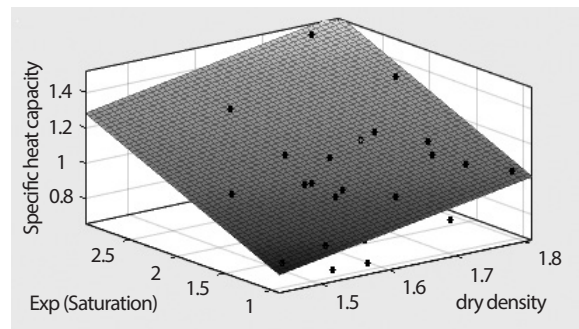
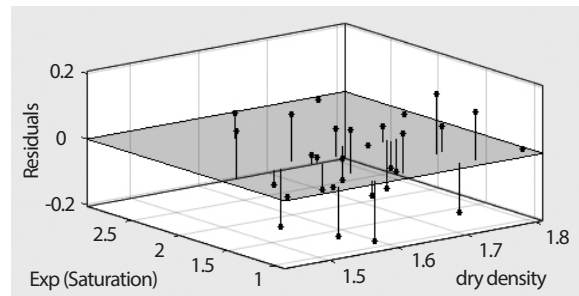


Fig. 5. P-P plot of the specific heat capacity.



(a) 3-D curve surface model



(b) Fitting residual

Fig. 6. Regression analysis model.

Table 3. Results of multiple regression analysis

| | B | Standard error | t | P-value | VIF |
|-------------------|---------|----------------|---------|---------|--------|
| Constant | -0.2962 | 0.3506 | -0.8448 | | |
| X1 (r_d) | 0.5825 | 0.2268 | 2.5689 | <0.05 | 1.0924 |
| X2 (exp(S)) | 0.2579 | 0.0431 | 5.9907 | <0.01 | 1.0924 |
| R ² | 0.7115 | | | | |
| adjR ² | 0.6902 | | | | |

B: non-standardized coefficient, t: B/standard error, VIF: variance inflation

Table 4. Results of ANOVA analysis

| | DF | SS | MS | F | P-value |
|------------|----|--------|-------------------------|--------|---------|
| Regression | 2 | 1.1263 | 5.6316×10^{-1} | 33.294 | <0.01 |
| Residual | 27 | 0.4567 | 1.6915×10^{-2} | | |
| Total | 29 | 1.5830 | | | |

Table 5. Results of normal distribution in residual analysis

| | Kolmogorov-Smirnov | | | Shapiro-Wilk | | |
|-----------------------|--------------------|----|---------|--------------|----|---------|
| | Statistic | DF | P-value | Statistic | DF | P-value |
| Standardized residual | 0.084 | 30 | 0.200 | 0.970 | 30 | 0.528 |

Kurtosis: -0.080 Skewness: -0.876

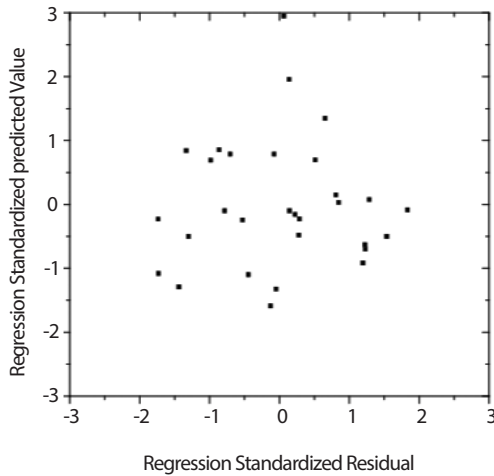


Fig. 7. Homoscedasticity plot of residuals.

있으며 ANOVA 분석은 분산비 검증이라고 하며 종속변수를 예측하는데 있어 독립변수의 기여도를 나타낸다[22, 24]. 본 회귀식에 대한 F 값에 대한 유의확률은 0에 가까울 정도로 매우 작은 값을 나타내므로 독립변수와 종속변수 간 유의성이 매우 높다는 것을 알 수 있다[24].

회귀분석 결과의 유의성을 검증하는데 있어 잔차분석이 중요하며 잔차가 정규성, 등분산성을 이루어야 회귀식이 통계적으로 유의하다고 할 수 있다[24, 27]. 잔차의 정규성은

검증하기 위한 정량적 방법으로는 Shapiro-Wilk 방법과 Kolmogorov-Smirnov 방법이 많이 이용된다[24, 26]. Table 5와 같이 본 회귀식에 대한 잔차 정규성에 대한 유의확률은 0.05 보다 크게 나타났기에 이는 잔차의 정규성을 만족한다고 할 수 있으며 잔차의 등분산성은 Fig. 7과 같으며 ±3 이내에서 일정한 형태의 추세나 경향 등이 없이 무작위로 분포되고 있기에 잔차의 등분산성을 만족하는 것으로 판단된다[24, 26].

4. 결론

본 논문에서는 원자력발전소에서 발생하는 고준위폐기물을 처분하기 위한 심층 처분시스템의 공학적방벽인 압축 벤토나이트 완충재의 비열 추정 모델을 제시하였다. 벤토나이트 완충재는 처분 용기에서 발생하는 고온의 열량을 주변 암반으로 전달하는데 있어 중요한 역할을 하기에 완충재의 열적 성능은 매우 중요하다고 할 수 있다. 열적 성능 중 열전도도의 물성 규명에 관한 연구는 많이 진행되고 있는 반면 비열에 대한 연구는 많이 부족한 상황이기 때문에 본 연구에서는 완충재의 열적 성능 중 하나인 비열을 측정하였다. 우선, 국내 경주산 벤토나이트인 KJ-II를 가지고 다양한 포화도와 건조밀도에 따라 33개의 시료를 제작하였으며 이중 탐침법을

적용하여 압축 벤토나이트 완충재의 비열을 측정하였다. 장비의 적합성 검증을 위해 DSC 장비를 이용하여 거의 동일한 상태의 건조밀도와 함수비를 가지는 압축 벤토나이트 완충재의 비열을 측정하였다. 측정 결과, 두 장비를 사용한 오차는 1~5% 정도였으며 DSC의 경우 실험을 위한 시료 제작의 어려움으로 인해 실험의 편리성 측면에서 이중 탐침법을 이용하여 비열을 측정하였다.

실제 심층 처분시스템에서 지하수 유입에 따라 완충재의 팽윤 및 포화도 변화가 발생할 수 있으며 이는 완충재의 열물성 변화를 초래한다. 따라서 완충재의 건조밀도와 포화도를 독립변수로 채택하여 다중 회귀분석을 수행하여 비열 추정 모델을 제시하였다. 추정 결과, 통계적 가정 사항을 모두 충족하였으며 R^2 값은 0.7 정도로 도출되었다. 본 연구에서 제시한 회귀모델은 압축 벤토나이트 완충재의 비열을 추정하는데 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 아울러 포화도와 건조밀도를 이용한 비열 추정 모델은 향후 실제 처분시설에서 전체 처분시스템의 안정성평가를 위한 중요한 입력변수로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

또한 본 연구에서 제시된 통계모델의 정확도 향상을 위해 보다 다양한 변수들을 고려할 수 있는 데이터가 추가되어야 할 것으로 생각되며 기계 학습법 등과 같은 다양한 방법들과의 비교 검증에 대한 연구도 추가적으로 필요할 것으로 생각된다. 아울러, 실제 심층 처분시스템에서 벤토나이트 완충재의 열-수리-역학 특성들이 고려된 복합물성 규명이 중요하기에 향후에는 이에 대한 체계적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 한국연구재단의 원자력기술 개발사업(NRF-2017M2A8A5014857)으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] 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", *JNFCWT*, 14(2), 135-147 (2016).
- [2] 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).
- [3] 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, 284-297 (2006).
- [4] Swedish Nuclear Fuel Supply Co/Division KBS, "Final storage of spent nuclear fuel-KBS3", *Svensk Kärnbränslehantering AB Report*, Stockholm (1983).
- [5] Lee, M.S. Lee, H.J. Choi, J.Y. Lee, and I.Y. Kim, "Establishment of the concept of buffer for an HLW repository: An approach", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-5824 (2014).
- [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] 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, 1385-1393 (2011).
- [8] W.J. Cho, J.W. Lee, and C.H. Kang, "A compilation and evaluation of thermal and mechanical properties of compacted bentonite for the performance assessment of engineered barriers in the high-level waste repository", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-1826 (2001).
- [9] 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).
- [10] A.M. Tang, Y.J. Cui, and T.T. Lee, "A study on the thermal conductivity of compacted bentonite", *Appl. Clay Sci.*, 41, 181-189 (2008).
- [11] M.S. Lee, H.J. Choi, J.O. Lee, and J.P. Lee, "Improvement of the thermal conductivity of a compact bentonite buffer", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-5311 (2013).

- [12] 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. J. Heat Mass Transf.*, 68, 43-49 (2015).
- [13] C.S. Lee, J.W. Lee, H.J. Choi, G.Y. Kim, and K. Kim, "Thermo-hydro-mechanical modeling of CIEMAT column test : Part 1- before hydration", Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-621 (2015).
- [14] K.L. Bristow, R.D. White, and G.J. Klutenberg, "Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating", *Aust. J. Soil Res.*, 32, 447-464 (1994).
- [15] Decagon Devices, Inc., KD2 pro thermal properties analyzer. Operator's manual (2016).
- [16] H. Park, "Thermal conductivities of unsaturated Korean weathered granite soils", Master thesis, KAIST (2011).
- [17] S. Yoon, S.R. Lee, Y.S. Kim, G.Y. Kim, and K. Kim, "Prediction of ground thermal properties from thermal response test", *J. Korean Geotech Soc.*, 32(7) 5-14 (2016).
- [18] J.W. Lee, W.J. Cho, and S. Kwon, "Thermo-hydro-mechanical properties of reference bentonite buffer for a Korean HLW repository", *Tunnel and Underground Space*, 21(4), 264-273 (2011).
- [19] Japan Nuclear Cycle Development Institute, "H12 project to establish technical basis for HLW disposal in Japan", Supporting Report 2, JNC, Japan (1999).
- [20] K. Wiczorek and R. Mieke, "Measurement of thermal parameters of the HE-E buffer material", PEBS, European Commission (2011).
- [21] S. Yoon, S.R. Lee, Y.T. Kim, and G.H. Go, "Estimation of saturated hydraulic conductivity of Korean weathered granite soils using a regression analysis", *Geomech. Eng.*, 9(1), 101-113 (2015).
- [22] J.H. Anthony, "Probability and Statistics for Engineers and Scientists", Third Edition, THOMSON BROOKS/COLE (2007).
- [23] K.K. Phoon, A. Santoso, and S.T. Quek, "Probabilistic analysis of soil-water characteristic curves", *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(3), 445-455 (2010).
- [24] I.H. Lee, "Easy flow regression analysis", Hannarae Publishing Corporation (2014).
- [25] Data solution Consulting Team, "SPSS Statistics Descriptive Statistics and Correlation Analysis", SPSS Data Solution (2013).
- [26] S. Yoon, S.R. Lee, J.Y. Park, J.H. Seong, and D.H. Lee, "A prediction of entrainment growth for debris-flow hazard analysis using multiple regression analysis", *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 15(6), 353-360 (2015).
- [27] G.H. Go, S.R. Lee, S. Yoon, and H.B. Kang, "Design of spiral coil PHC energy pile considering effective borehole thermal resistance and groundwater advection effects", *Appl. Energy*, 125, 165-178.