

# 고준위폐기물 처분시설의 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도 추정

## A Prediction of Thermal Conductivity for Compacted Bentonite Buffer in the High-level Radioactive Waste Repository

윤 석 <sup>1</sup>	Yoon, Seok	이 민 수 <sup>2</sup>	Lee, Min-Soo
김 건 영 <sup>2</sup>	Kim, Geon-Young	이 승 래 <sup>3</sup>	Lee, Seung-Rae
김 민 준 <sup>4</sup>	Kim, Min-Jun		

### Abstract

A geological repository has been considered one of the most adequate options for the disposal of high-level radioactive waste. A geological repository will be constructed in a host rock at a depth of 500~1,000 meters below the ground surface. The geological repository system consists of a disposal canister with packed spent fuel, buffer material, backfill material, and intact rock. The buffer is very important to assure the disposal safety of high-level radioactive waste. It can restrain the release of radionuclide and protect the canister from the inflow of groundwater. High temperature in a disposal canister is released into the surrounding buffer material, and thus the thermal transfer behavior of the buffer material is very important to analyze the entire disposal safety. Therefore, this paper presents a thermal conductivity prediction model for the Kyungju compacted bentonite buffer material which is the only bentonite produced in Korea. Thermal conductivity of Kyungju bentonite was measured using a hot wire method according to various water contents and dry densities. With 39 data obtained by the hot wire method, a regression model to predict the thermal conductivity of Kyungju bentonite was suggested.

### 요 지

심층 처분방식은 고준위폐기물을 처분하기 위한 가장 적합한 대안으로 고려되어지고 있다. 심층 처분시설은 지하 500~1,000m 깊이의 암반층에 설치되며 심층 처분시스템의 구성 요소로는 처분용기, 완충재, 뒷채움 및 근계 암반이 있다. 이 중 완충재는 심층 처분시스템에 있어 매우 중요한 역할을 한다. 완충재는 지하수 유입으로부터 처분용기를 보호하고, 방사성 핵종 유출을 저지한다. 처분용기에서 발생하는 고온의 열량이 완충재로 전파되기에 완충재의 열적 성능은 처분시스템의 안정성 평가에 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 경주산 압축 벤토나이트 완충재에 대한 열전도도 추정 모델을 개발하고자 하였다. 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도는 비정상 열선법을 이용하여 다양한 함수비와 건조밀도에 따라 측정하였으며, 총 39개의 실험 데이터를 토대로 회귀분석을 이용하여 경주 압축 벤토나이트의 열전도도 추정 모델을 제시하였다.

1 정희원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI, Tel: +82-42-868-2946, Fax: +82-42-868-8055, syoon@kaeri.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비희원, 한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부 책임연구원 (Principal Researcher, Radioactive Waste Disposal Research Division, KAERI)

3 정희원, KAIST 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)

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

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

국내 전력 총 생산량의 30%를 차지하고 있는 원자력 에너지는 그 사용량이 점점 증가하고 있는 추세이다. 국내에서는 원자력 에너지의 중요성을 인지하여 현재 총 25기의 원자로가 가동 중이며, 추가적으로 2024년까지 34기의 원자로 운영계획을 가지고 있다. 한편, 원자력 발전소의 연료로 쓰고 난 사용후핵연료는 방사선준위가 높은 폐기물으로써 강한 방사선과 높은 열을 방출하여 인체에 매우 위험하기 때문에 고준위 폐기물의 처분 문제가 꾸준히 제기되어 왔다. 이에 따라 한국원자력연구원에서는 사용후핵연료에의 심층 처분에 대한 연구를 1997년도 부터 지속하고 있으며, 스웨덴 KBS-3 처분개념을 근거로

국내 심부 지하 환경을 반영한 처분시스템을 제시하였다 (Swedish Nuclear Fuel Supply Co., 1983; Lee et al., 2007).

심층 처분시스템에서 사용후핵연료는 지하 500~1000m 깊이의 암반층에 격리되어 공학적 다중방벽의 개념에 의해 안전하게 처분되어야 한다. 심층 처분시스템의 공학적 방벽의 구성요소로는 처분용기(Canister), 뒷채움재(Backfill), 완충재(Buffer), 근계영역 암반(Near-Field rock)이 있다. 사용후핵연료봉은 부식과 충격에 견디는 강한 금속재로 만들어진 처분용기에 보관되고, 견고한 암반에 건설된 동굴 형태의 심층 처분장에 넣은 후 완충재로 밀봉된다. 또한 동굴 형태의 처분장은 뒷채움재로 완전히 메워 겹겹이 둘러싸인 채로 생태계로부터 철저히 격리되어야 한다(Fig. 1). 이 때 처분용기와 처분공 사이에 채워지는 완충재는 처분용기를 처분공에 고정시키는 역할뿐만 아니라, 암반의 전단거동과 같은 물리적 충격으로부터 처분용기를 보호하며, 지하수 유입을 최소화하여 지하수에 의해 용해된 핵종이 주변 암반으로 유출되는 것을 저지한다(Yoo et al., 2016; Choi et al., 2014). 또한 완충재의 열적 특성은 처분용기로부터 발생하는 붕괴열을 주위 암반으로 신속히 발산시켜, 완충재의 온도가 설정된 최고 온도를 넘지 않도록 하는데 중요한 역할을 한다(Lee et al., 2014). 이를 위해 완충재는 처분용기로부터 열을 발산하기 위한 높은 열전도도를 가져야 한다(Villar et al., 2006).

이러한 완충재에 적합한 후보물질을 선정하기 위해 여러 물질에 대한 특성 조사가 이루어졌으며, 그 결과 벤토

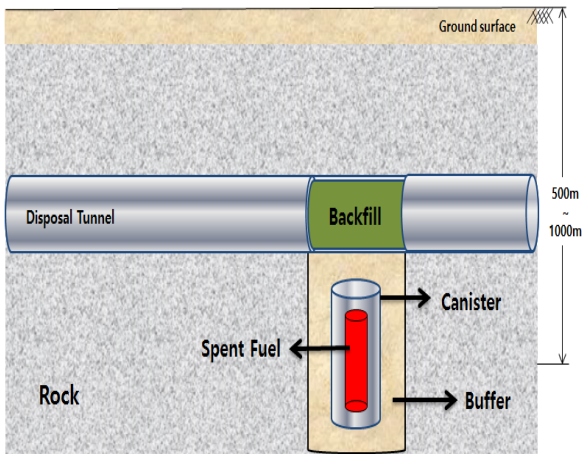


Fig. 1. Concept of engineered barrier system

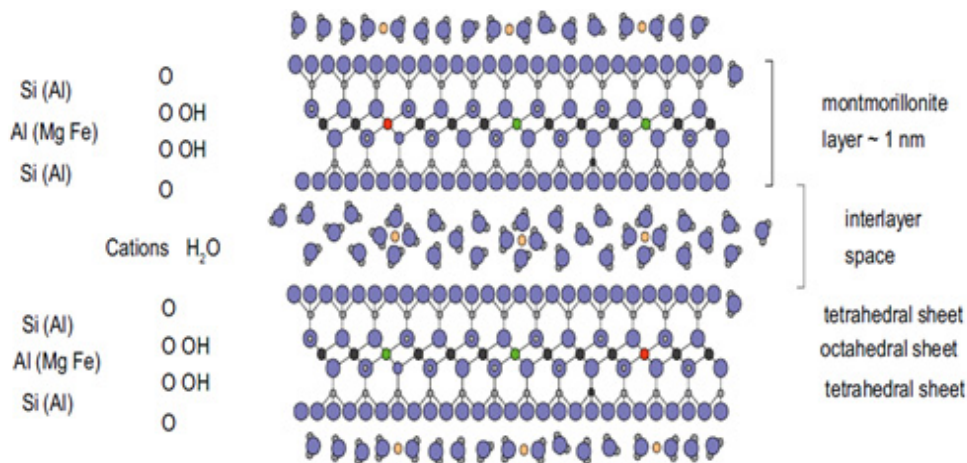


Fig. 2. Chemical structure of the montmorillonite layer (Karlund, 2010)

나이트로 이루어진 점토 광물이 가장 적합한 후보 물질로 연구되고 있다(Yoo et al., 2016; Kranland, 2010). 벤토나이트는 몬모릴로나이트를 다량 함유하는 스�멕타이트 군에 속하며, 이 군에 속하는 모든 광물은 연접한 층상구조와 팽윤 특성을 가진다(Fig. 2). 2:1층 판상구조를 이루는 벤토나이트는 실리카 4면체 2개 층과 그 사이에 8면체 알루미늄수산화물 1개 층이 있으며, 실리카 4면체 혹은 알루미늄 8면체 내에서 동형치환에 의해 발생된 음이온은 전기적으로 중성을 만들기 위해 층간 사이에 양이온( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  등)을 흡수함으로써 전기적 균형을 이루게 된다(Kranland, 2010). 몬모릴로나이트는 주로 알루미늄 8면체의 내부치환에 의해 충전하가 발생하는 광물이며, 벤토나이트는 층간사이에 존재하는 교환성 양이온의 종에 따라 Na형 벤토나이트와 Ca형 벤토나이트 등으로 구분된다(Yoo et al., 2016). 현재 스웨덴, 핀란드, 스위스 등의 국가에서는 MX-80이라는 Na형 벤토나이트를 후보물질로 고려하고 있고, 일본 역시 자국에서 생산되는 Na형 벤토나이트를 연구하고 있다(Cho et al., 2011). 우리나라의 경우 한국원자력연구원에서는 경주 지역에서 생산되는 Ca형 벤토나이트(KJ-I)를 후보물질로 연구한 바 있으며, 최근에는 동일 지역에서 생산된 벤토나이트(KJ-II)를 이용하여 완충재의 열-수리-역학적 복합거동 실증 실험에 대한 연구가 진행중에 있다(Yoo et al., 2016).

본 연구에서는 새롭게 생산된 KJ-II 완충재의 열-수리-역학 거동 중 열전도도에 대한 추정 모델을 새롭게 제시하고자 하였다. 기존의 KJ-I에 대한 열전도도 측정 실험 및 거동 모델에 연구가 진행되었으나(Lee et al., 2013; Lee et al., 2016), 이는 실내 실험 데이터를 근거로 간단한 추정식만 제시되었고 다양한 변수를 고려한 추정 모델에 대한 통계적 유의성 검증에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 KJ-II 완충재 블록을 제작하여 다양한 건조밀도 및 함수비에 따라 열전도도를 측정하였으며, 측정된 값을 근거로 건조밀도 및 함수비, 포화도, 공기 백분율에 따른 다양한 변수 조합에 따른 열전도도 추정 모델을 제시하고자 하였다.

## 2. 실내 열전도도 실험

### 2.1 실험 기기

압축 벤토나이트 완충재의 열전도도를 측정하기 위하여 QTM-500(Kyoto Electronics, Japan)과 KD2-pro(Decagon

Device, USA)를 사용하였다(Fig. 3). QTM-500은 비정상 열선법의 원리를 이용함으로써, 조작이 용이하며 신속하고 정확하게 열전도도를 도출하는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2013). 비정상 열선법은 온도와 저항간의 관계가 잘 알려진 백금선에 일정한 열량을 가하면서 가열 시간과 열선의 온도 상승과의 관계를 이용하여 열전도도를 구하는 방식이다(ASTM C1113/C1113M-09). 벤토나이트 블록의 샘플은  $100\text{mm} \times 50\text{mm} \times 20\text{mm}$  크기의 직육면체 형태였다. 또한 QTM-500 장비와의 결과 검증을 위해 비정상 탐침 장비인 KD2-pro의 Single probe를 이용하여 벤토나이트 블록의 열전도도를 측정하였다. Single probe 방법은 무한 선형 열원 이론에 기반하여 매우 가는 금속선에 전류를 가하면서 시간에 따른 금속선의 온도 상승 경향으로부터 열전도도를 측정하는 방법이다(Park, 2011; Yoon et al., 2016; ASTM D5334-14). 샘플은 직경 30mm, 높이 100mm의 원기둥 형태였으며 탐침 삽입 전 프리 드릴링 후 써멀 그리스를 탐침 주변에 도포하여 실험이 진행되었다(Fig. 4).

### 2.2 실험 기기별 비교

우선 QTM 장비와 KD2-pro의 single probe 방법과의 비교 검증을 위해 거의 동일한 상태의 건조밀도와 함수

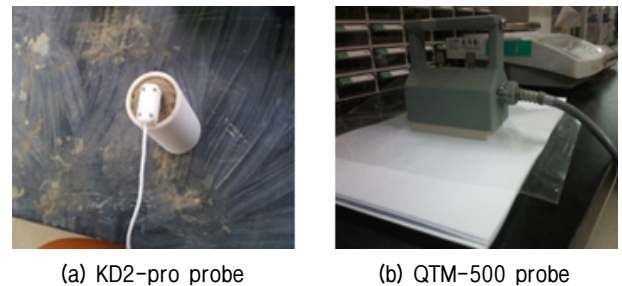


Fig. 3. Thermal properties analyzer

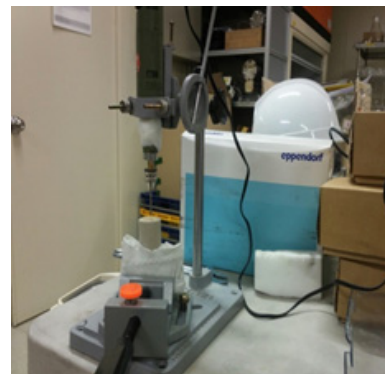


Fig. 4. Pre-drilling process

비를 가지는 벤토나이트 블록의 열전도도를 측정하였다. 비교 검증에 사용된 벤토나이트 블록 시료의 건조밀도는 1.733~1.735t/m<sup>3</sup> 였으며 함수비는 자연 상태인 11~12% 일 때와 48시간 건조시킨 후 0% 일 때 각각 실험이 수행되었다(Table 1). 실험 결과 QTM 500과 KD2-pro의 single probe 방법과의 결과 차이는 1~6% 정도로 발생하였다. Single probe의 경우 실험 전 pre-drilling 작업을 수행하여야 하며 건조밀도가 큰 경우 일직선으로 10cm 정도 drilling 작업 과정에서 시료가 절단되는 어려움이 있었기에 실험의 편리성을 위해 QTM-500 장비를 이용하여 벤토나이트 블록의 열전도도를 측정하였다.

### 2.3 실험 Database 구축

압축 벤토나이트 완충재의 열전도도는 크게 함수비

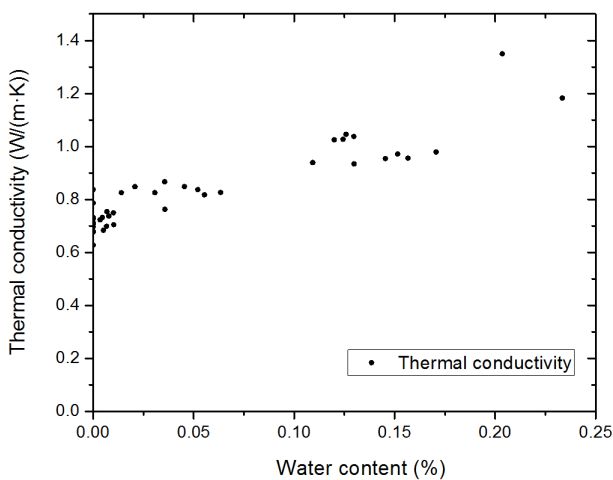
와 건조밀도에 비례하는 것으로 알려져 있다(Cho et al., 2011; Lee et al., 2011; Lee et al., 2013, Tang et al., 2008). 또한 Tang et al.(2008)은 공기부피 백분율에 따른 열전도도 추정 모델을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 다양한 함수비와 건조밀도에 따라 총 39개의 KJ-II 벤토나이트 블록을 제작하였으며 QTM-500 장비를 이용하여 열전도도를 측정하였다. 또한 함수비와 건조밀도 값을 알면 포화도와 공기부피 백분율로 환산이 가능하기에 다양한 독립변수에 따른 열전도도 추정모델을 제시하고자 하였다. Table 2는 사용된 변수들에 대한 기본 통계량을 나타내며 Fig. 5는 건조밀도와 함수비에 따른 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도 변화를 보여주고 있다.

Table 1. Comparison of experimental results

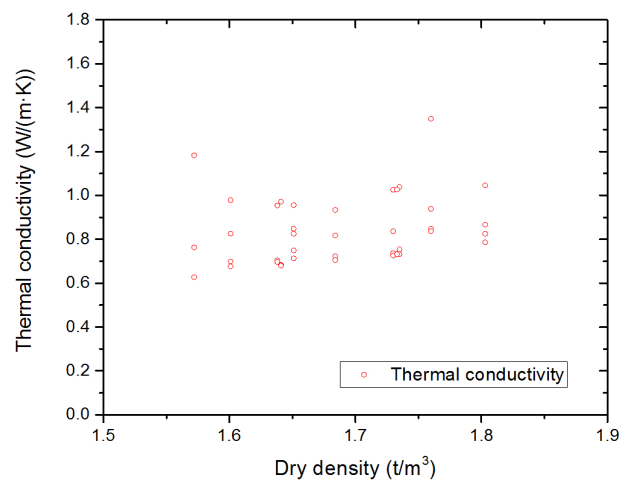
Measurement type	Dry density (t/m <sup>3</sup> )	Water content (%)	Thermal conductivity (W/(m·K))
Single probe (KD2-pro)	1.735	11/0	1.036/0.683
QTM-500	1.733	12/0	1.025/0.726

Table 2. Summary of descriptive statistics quantity

	N	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation	Skewness	Kurtosis
Dry density (t/m <sup>3</sup> )	39	1.572	1.803	1.6869	0.0694	0.057	-1.047
Water content (%)	39	0.000	0.234	0.0566	0.0681	1.018	-0.190
Saturation (%)	39	0.000	1.000	0.2634	0.3195	1.007	-0.308
Thermal conductivity (W/(m·K))	39	0.627	1.350	0.8415	0.1549	1.227	1.778
Air-pore volume fraction (%)	39	0	0.420	0.2786	0.1227	-0.901	-0.414



(a) Thermal conductivity vs water content



(b) Thermal conductivity vs dry density

Fig. 5. Thermal conductivity with respect to dry density and water content

### 3. 열전도도 추정 모델 개발

#### 3.1 개요

흙이나 암석은 불확실성이 필연적으로 개입하므로 공학적 특성 및 설계 변수 등을 정확하게 판단하기 힘들다 (Yoon et al., 2015). 따라서 이러한 자료로부터 안정성을 평가하거나 설계에 사용할 대표적인 값을 획득하기는 어렵기에 확률론적 해석방법이 적용될 수 있다. 확률론적 해석방법은 사용되는 입력 변수를 확률변수로 가정하여 변수들이 나타내는 확률특성을 분석하고 확률론을 이용하여 해석하는 방법이다(Anthony, 2007; Jeon et al., 2010; Phoon et al., 2010). 본 연구에서는 벤토나이트 블록의 열전도도를 종속변수로 칭하였으며 열전도도에 미치는 인자들을 독립변수로 칭하였다. 독립변수와 종속변수가 모두 연속형의 데이터인 경우 다중회귀분석을 채택하여 벤토나이트 블록의 열전도도를 추정할 수 있는 모델을 제안하고자 하였다.

#### 3.2 건조밀도와 함수비를 이용한 회귀분석

우선, 건조밀도와 함수비를 독립변수로 사용하여 벤토나이트 블록의 열전도도를 추정하고자 하였다. Yoon et al.(2017)은 압축 벤토나이트 완충재의 함수비 측정 기준을 24시간 아닌 48시간을 제시하였으며 24시간과 48시간의 건조시간에 따른 함수비의 오차는 대략 5~7% 인 것으로 나타났기에 압축 벤토나이트 완충재의 정확한 함수비의 측정이 요구된다. 회귀 분석의 가정 조건인 변수들의 정규성을 확인하기 위하여 모든 변수들에 대해 왜도와 첨도를 계산하였으며 Table 2와 같이 왜도 첨도의 절대값이 2보다 작기에 정규성을 만족함을 알 수 있다(Lee, 2014; Yoon et al., 2015). 또한 SPSS Statistics 24의 P-P Plot 모듈을 이용하여 종속변수인 열전도도(TC: thermal conductivity)의 정규성을 검증하였

으며 Fig. 6과 같이 데이터들이 직선 주위에 모여 있기에 정규성을 만족함을 알 수 있다(Data solution consulting team, 2013).

SPSS Statistics 24의 Regression 모듈을 이용하여 선형 회귀분석을 실시하였다. 분석 결과 표준화 잔차 3이 넘어가면 회귀식이 유의하지 않기에(Lee, 2014; Yoon et al., 2015) 표준화 잔차가 3이 넘어가는 1개 데이터를 제외 후 회귀분석을 수행하여 식 (1)과 같은 회귀식이 제시되었다.

$$\lambda = 0.571\gamma_d + 1.970w - 0.237 \quad (1)$$

여기서  $\lambda$ 는 벤토나이트 블록의 열전도도(W/(m·K)),  $\gamma_d$ 는 건조단위중량( $t/m^3$ ), 그리고  $w$ 는 함수비(%)를 뜻한다. Table 3은 회귀분석 결과에 대한 모형 요약표를 나타내고 있으며 건조단위중량과 함수비 계수에 대한 유의확률이 0에 가깝기에 식 (1)에 사용된 독립변수를

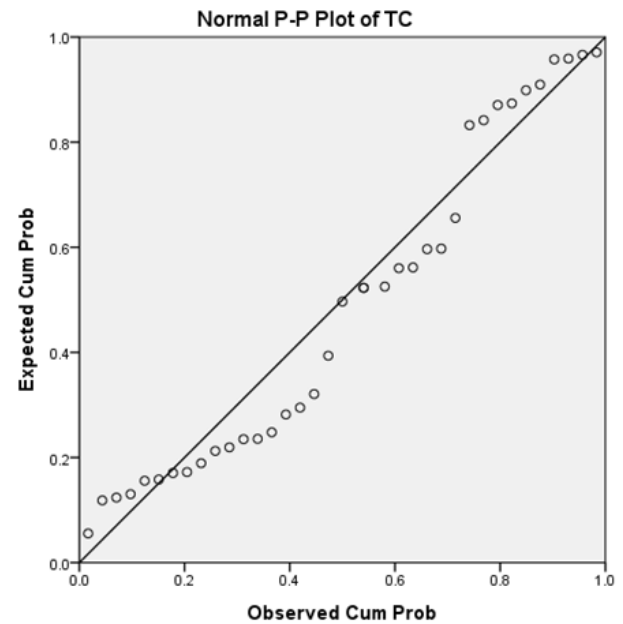


Fig. 6. P-P plot of the thermal conductivity

Table 3. Results of multiple regression analysis using dry density and water content

	B	Standard error	t	P-value	VIF
Constant	-0.237	0.135	-1.758	0.087	
X1 (dry density)	0.571	0.080	7.163	<0.01	1.018
X2 (water content)	1.970	0.085	23.051	<0.01	1.018
R <sup>2</sup>	0.970				
adjR <sup>2</sup>	0.940				

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



종속변수의 예측에 사용할 수 있다(Yoon et al., 2015). 또한 VIF(variance inflation factor) 값도 10보다 작기에 독립변수 간 다중공선성이 발생하지 않으며 결정계수(R<sup>2</sup>) 및 조절 결정계수(adjR<sup>2</sup>)값도 0.9 이상으로 높은 정확도를 보였다. Table 4는 ANOVA 분석 결과를 나타내고 있으며 ANOVA 분석은 분산비 검증이라고 하며 종속변수를 예측하는데 있어 독립변수의 기여도를 나타낸다(Anthony, 2007; Lee, 2014). 본 회귀식에 대한 F 값에 대한 유의확률은 거의 0에 가깝기에 독립변수와 종속변수간 유의성이 상당히 높다는 것을 알 수 있다(Yoon et al., 2015).

또한 회귀분석 결과의 유의성을 검증하는데 있어 잔차 분석이 중요하며 잔차의 정규성, 등분산성을 만족해야 회귀식이 통계적으로 유의하다고 할 수 있다(Lee, 2014; Go et al., 2014). 잔차의 정규성은 Fig. 6과 같이 P-P 도표를 이용하거나 정량적 방법으로는 Shapiro-Wilk 방법

과 Kolmogorov-Smirnov 방법이 많이 이용된다. Table 5와 같이 본 회귀식에 대한 잔차 정규성에 대한 유의확률은 0.05보다 크게 나타났으며 이는 잔차의 정규성을 만족한다고 할 수 있다(Go et al., 2014; Yoon et al., 2015). 또한 잔차의 등분산성은 Fig. 7과 같으며 ±3 이내에서 일정한 형태의 추세나 경향 등이 없이 무작위로 분포되고 있기에 잔차의 등분산성을 만족하는 것으로 판단된다(Hair et al., 2009).

### 3.3 건조밀도와 포화도를 이용한 회귀분석

식 (1)의 함수비를 측정된 후 건조밀도와 비중 값을 알면 포화도를 계산할 수 있다. 하지만, 실제 심층 처분시스템의 공학적 방벽의 안전성 평가를 위해서는 지하수 유입에 따른 완충재의 포화도 규명이 중요하다고 할 수 있다(Lee et al., 2014; Lee et al., 2015). 즉 압축 벤토나이트 완충재의 포화도에 따른 열전도도 변화가 안정성 평가에 중요한 요소로 작용하기에 압축 벤토나이트 완충재의 포화도 및 건조밀도에 따라 열전도도 추정 모델을 제시하고자 하였다. 3.2절의 독립변수의 함수비를 포화도로만 변화시켰으며 동일한 방법으로 SPSS Statistics 24의 Regression 모듈을 이용하여 선형 회귀분석을 실시하였으며 분석 결과 표준화 잔차 3이 넘어가는 2개 데이터를 제외 후 식 (2)와 같은 회귀식을 제시하였다.

$$\lambda = 0.452\gamma_d + 0.379S - 0.03 \quad (2)$$

여기서 S는 벤토나이트 블록의 포화도(%)를 나타낸다. Table 6은 회귀분석 결과에 대한 모형 요약표를 나타내고 있으며 Table 7은 ANOVA 분석 결과를 나타낸

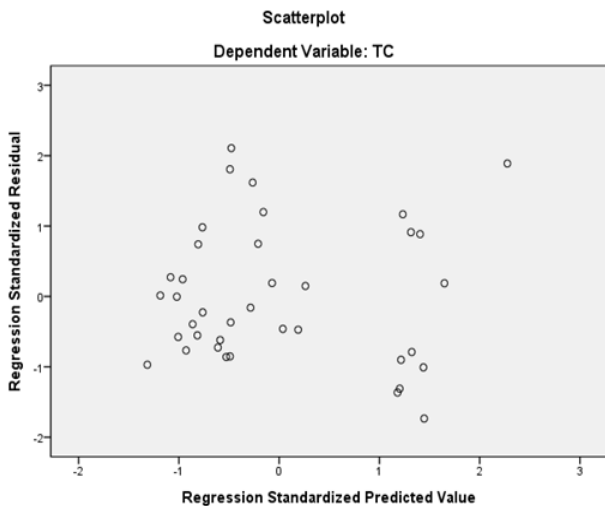


Fig. 7. Homoscedasticity plot of residuals using dry density and water content

Table 4. Results of ANOVA analysis using dry density and water content

	DF	SS	MS	F	P-value
Regression	2	0.608	0.304	274.351	<0.01
Residual	35	0.039	0.001		
Total	37	0.646			

Table 5. Results of normal distribution in residual analysis using dry density and water content

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	DF	P-value	Statistic	DF	P-value
Standardized residual	0.121	38	0.173	0.957	38	0.147

Kurtosis: 0.516, Skewness: -0.509

Table 6. Results of multiple regression analysis using dry density and degree of saturation

	B	Standard error	t	P-value	VIF
Constant	-0.03	0.155	-0.197	0.845	
X1 (dry density)	0.452	0.092	4.912	<0.01	1.009
X2 (degree of saturation)	0.379	0.022	17.240	<0.01	1.009
R <sup>2</sup>	0.909				
adjR <sup>2</sup>	0.904				

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

Table 7. Results of ANOVA analysis using dry density and degree of saturation

	DF	SS	MS	F	P-value
Regression	2	0.470	0.235	170.436	<0.01
Residual	34	0.047	0.001		
Total	36	0.517			

Table 8. Results of normal distribution in residual analysis using dry density and degree of saturation

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	DF	P-value	Statistic	DF	P-value
Standardized residual	0.106	37	0.200	0.959	37	0.182

Kurtosis: 0.843, Skewness: -0.160

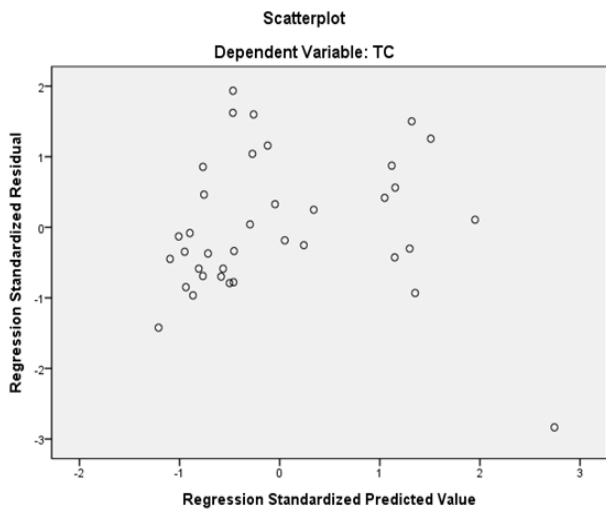


Fig. 8. Homoscedasticity plot of residuals using dry density and degree of saturation

다. 또한 Table 8은 잔차의 정규성 분석 결과를 보여주고 있으며 Fig. 8은 잔차의 등분산성을 나타낸다. 3.2절과 동일한 방법으로 회귀 분석에 대한 유의성을 검증하였다. 또한 식 (1)에 사용된 함수비 값을 알면 포화도로 변환될 수 있으며 식 (1)과 식 (2)를 이용한 열전도도 값의 상대오차는 1~2% 내외로 큰 차이가 나타나지는 않았다.

### 3.4 공기부피 백분율을 이용한 회귀분석

Tang et al.(2008)은 공기부피 백분율을 이용하여 열전도도를 추정할 수 있는 모델을 제시하였다. 따라서 본 연구에서도 공기부피 백분율을 독립변수로 사용하여 KJ-II 벤토나이트 블록의 열전도도를 추정하고자 하였다. 역시 3.2절과 3.3절과 동일한 방법으로 선형 회귀분석을 수행하여 식 (3)과 같은 회귀식을 제시하였다.

$$\lambda = -1.099(V_a/V) + 1.142 \quad (3)$$

여기서  $V_a$ 는 공기 부피를 뜻하며  $V$ 는 벤토나이트 블록의 전체 부피를 나타낸다. Table 9~11과 Fig. 9는 회귀분석에 대한 유의성 분석 결과를 보여주고 있다. 여기서 잔차의 정규성 검증 결과 Kolmogorov-Smirnov 검증 방법에서 유의확률이 0.05보다 작게 나왔으나 실험 데이터 개수가 50 미만인 경우 Shapiro-Wilk 검증만 유의해도 충분한 것으로 알려져 있다(Lee, 2014). 따라서 공기부피 백분율을 이용한 열전도도 추정 모델도 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 원자력발전소에서 발생하는 고준위폐

Table 9. Results of multiple regression analysis using air-pore volume fraction

	B	Standard error	t	P-value	VIF
Constant	1.142	0.018	64.737	<0.01	
X1 (air-pore volume fraction)	-1.099	0.057	-19.155	<0.01	1.000
R <sup>2</sup>	0.954				
adjR <sup>2</sup>	0.911				

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

Table 10. Results of ANOVA analysis using air-pore volume fraction

	DF	SS	MS	F	P-value
Regression	1	0.589	0.589	366.924	<0.01
Residual	36	0.058	0.002		
Total	37	0.646			

Table 11. Results of normal distribution in residual analysis using air-pore volume fraction

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	DF	P-value	Statistic	DF	P-value
Standardized residual	0.167	38	0.009	0.943	3A8	0.052

Kurtosis: 1.504, Skewness: 0.103

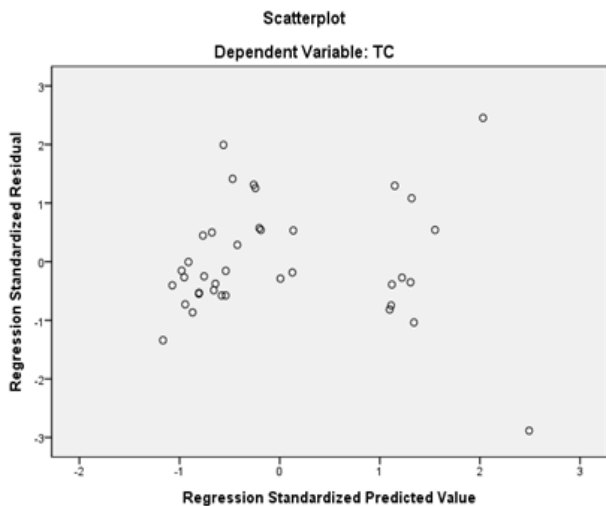


Fig. 9. Homoscedasticity plot of residuals using air-pore volume fraction

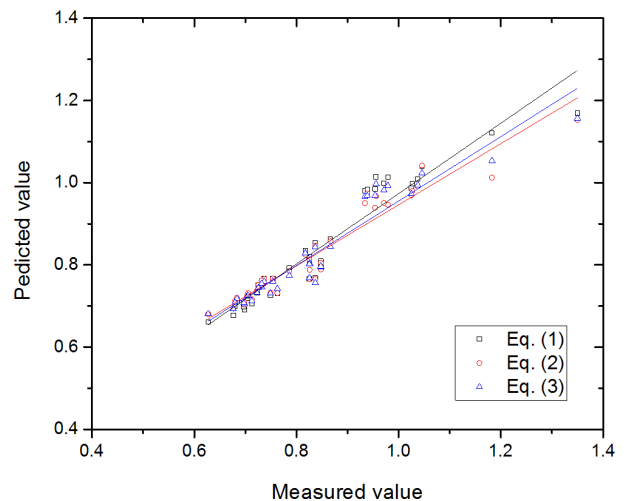


Fig. 10. Measured value vs predicted values

기물을 처분하기 위한 심층 처분시스템에서의 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도 추정 모델을 제시하였다. 압축 벤토나이트 완충재는 처분 용기에서 발생하는 고온의 열량을 주변 암반으로 전파하는데 있어 중요한 역할을 하기 때문에 완충재의 열적 성능은 처분시스템의 안정성 평가에 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 완충재의 열적 성능 중 하나인 열전도도를 측정하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 국내 경주산 벤토나이트인 KJ-II를 가지고 다양한 함수비와 건조밀도에 따라 39개의 시료를 제작하였으며 비정상 열선법의 원리를 적용한 QTM-500 장비를 이용하여 벤토나이트 블록의 열전도도를 측정하였다. 장비의 적합성 검증을 위해 무한선형열원 이론을 적용한 KD2-pro의 single probe 방법과 거의 동일한 상태의 건조밀도와 함수비를 가지는 벤토나이트 블록의 열전도도를 측정하였다. 측정 결과 두 장비를 사용한 오차는 1~6% 정도였으며 single probe의 경우 실험 전 pre-drilling 작업을 수행해야 하는



어려움이 있었기에 실험의 편리성 측면에서 QTM-500 장비를 이용하여 열전도도를 측정하였다.

(2) 건조밀도와 함수비, 건조밀도와 포화도 그리고 공기 백분율을 독립변수로 채택하여 각각 3가지 경우에 대해 선형 회귀분석을 수행하여 열전도도 추정 모델을 제시하였다. 3가지 모두  $R^2$ 가 0.9 이상이었으며 Fig. 10과 같이 실제 측정된 값과 추정된 값이 거의 유사하게 도출되었다. 열전도도 값이 1.2 W/(m·K) 이 넘어가는 데이터의 경우 오차가 조금 발생하였는데 이는 회귀분석시 이상치로 제외하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 회귀분석에 따른 통계적 유의성도 충족하였기에 본 연구에서 제시한 회귀모델은 벤토나이트 완충재 블록의 열전도도를 추정하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 즉, 본 연구에서 제시된 열전도도 회귀 모델은 실제 열전도도를 측정하지 않더라도 함수비, 포화도, 공기 부피 백분율과 같은 기본 물성만 측정하면 압축 벤토나이트 완충재의 열전도도를 손쉽게 추정할 수 있을 것으로 기대되며 그 중  $R^2$  값이 가장 높은 건조밀도와 함수비를 이용한 회귀식을 이용하는 것이 정확할 것으로 사료된다. 아울러, 고준위방사성폐기물 처분시스템에서는 고준위방사성폐기물의 특성 중의 하나인 붕괴열로 인해 폐기물 주변 완충재에서 야기되는 건조 현상과 암반으로부터의 지하수 유입으로 인한 포화현상에 의한 완충재의 포화도 변화가 필연적으로 나타나게 된다. 이러한 현상을 반영한 처분시스템의 설계와 설계된 처분시스템의 성능을 평가하고 그 안전성을 평가하는데 있어서는 포화도와 건조밀도를 이용한 회귀 모델이 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌 (References)

1. Anthony, J. H. (2007), "Probability and Statistics for Engineers and Scientists", Third Edition, THOMSON BROOKS/COLE.

2. ASTM C1113/C1113M-09, "Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique)", ASTM International.

3. ASTM D5334-14, "Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure", ASTM International.

4. Choi, H. J., Kim, K. S., Cho, W. J., Lee, J. O., and Choi, J. W. (2014), "HLW Long-term Management System Development: Development of Engineered Barrier System Performance", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-3859.

5. Cho, W. J., Lee, J. W., and Kwon, S. (2011), "An Empirical Model for the Thermal Conductivity of Compacted Bentonite and a Bentonite-sand Mixture", *Heat and Mass Transfer*, Vol.47, pp. 1385-1393.

6. Data solution Consulting Team (2013), "SPSS Statistics Descriptive Statistics and Correlation Analysis", SPSS Data Solution.

7. Go, G. H., Lee, S. R., Yoon, S., and Kang, H. B. (2014), "Design of Spiral Coil PHC Energy pile Considering Effective Borehole Thermal Resistance and Groundwater Advection Effects", *Applied Energy*, Vol.125, pp.165-178.

8. Hair Jr, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., and Anderson, R. E. (2009), *Multivariate Data Analysis*, 7th Edition, Prentice-Hall.

9. Jeon, K. H., Lee, S. R., and Oh, G. D. (2010), "Probabilistic Analysis of Unsaturated Soil Properties for Korean Weathered Granite Soil", *24th KKCNN Symposium on Civil Engineering*, Hyogo, Japan.

10. 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.

11. Lee, C. S., Lee, J. W., Choi, H. J., Kim, G. Y., and Kim, K. (2015), "Thermo-hydro-mechanical Modelling of CIEMAT Column Test : Part 1- before Hydration", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-6216.

12. Lee, I. H. (2014), "Easy Flow Regression Analysis", Hannarae Publishing Corporation.

13. 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.

14. Lee, J. O., Lee, M. S., Choi, H. J., Lee, J. Y., and Kim, I. Y. (2014), "Establishment of the Concept of Buffer for an HLW Repository: An Approach", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-5824.

15. Lee, J. O., Choi, H. J., and Lee, J. Y. (2016), "Thermal Conductivity of Compacted Bentonite as a Buffer Material for a High-level Radioactive Waste Repository", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 94, pp.848-855.

16. Lee, J. Y., Cho, D. K., Choi, H. J., and Choi, J. W. (2007), "Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.44, No.12, pp.1565-1573.

17. Lee, M. S., Choi, H. J., Lee, J. O., and Lee, J. P. (2013), "Improvement of the Thermal Conductivity of a Compact Bentonite Buffer", *Korea Atomic Energy Research Institute Report*, KAERI/TR-5311.

18. Park, H. (2011), "Thermal Conductivities of Unsaturated Korean Weathered Granite Soils", Master thesis, KAIST.

19. Phoon, K. K., Santoso, A., and Quek, S. T. (2010), "Probabilistic

- Analysis of Soil-water Characteristic Curves”, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No.3, pp.445-455.
20. Swedish Nuclear Fuel Supply Co/Division KBS (1983), “Final Storage of Spent Nuclear Fuel-KBS3”, *Svensk Kärn-bränslehantering AB Report*, Stockholm.
  21. Tang, A. M., Cui, Y. J., and Le, T. T. (2008), “A Study on the Thermal Conductivity of Compacted Bentonite”, *Applied Clay Science*, Vol.41, pp.181-189.
  22. Villar, M. V., Martin, P. L., and Barcala, J. M. (2006), “Modification of Physical, Mechanical and Hydraulic Properties of Bentonite by Thermo-hydraulic Gradients”, *Engineering Geology*, Vol.81, pp. 284-297.
  23. Yoo, M., Choi, H. J., Lee, M. S., and Lee, S. Y. (2016), “Measurement of Properties of Domestic Bentonite for a Buffer of an HLW Repository”, *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, Vol.14, No.2, pp.135-147.
  24. Yoon, S., Lee, S. R., Kim, Y. T., and Go, G. H. (2015), “Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity of Korean Weathered Granite Soils Using a Regression Analysis”, *Geomechanics and Engineering*, Vol.9, No.1, pp.101-113.
  25. Yoon, S., Lee, S. R., Kim, Y. S., Kim, G. Y., and Kim, K. (2016), “Prediction of Ground Thermal Properties from Thermal Response Test”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.7, pp.5-14.
  26. Yoon, S., Kim, G. Y., Kim, M. J., and Lee, S. R. (2017), “Evaluation of Water Content Measurement for Bentonite Buffer Material”, *Proceeding of KGS Spring National Conference*, Seoul, Korea.

Received : May 8<sup>th</sup>, 2017

Revised : June 21<sup>st</sup>, 2017

Accepted : July 4<sup>th</sup>, 2017