

## 복소유전율상수 반응에 의한 벤토나이트 수분분포 특성 연구

김만일<sup>1)</sup> · 정교철<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소, <sup>2)</sup>안동대학교 지구환경과학과

### Properties of Moisture Distribution on Bentonite by the Responses of Complex Dielectric Constant

Man-Il Kim<sup>1)</sup> · Gyo-Cheol Jeong<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

<sup>2)</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

---

본 연구에서는 복소유전율상수 반응으로부터 벤토나이트 공시체의 물성치인 체적함수비와 수분분포 특성을 파악하기 위하여 수행되었다. 벤토나이트 재료는 현재 폐기물처분장에서 차수재료로 널리 이용되고 있다. 차수재료의 경우, 일반적으로 투수계수가  $10^{-7}$  cm/sec 이하로 작아야 한다. 난투수성 재료에 대해 온도구배에 따른 수분분포 특성을 파악하기 위해 FDR-V 측정장비를 적용해 이들을 측정하였다. 그 결과, 복소유전율상수는 체적함수비와 온도 증가에 따라 함께 증가함을 알 수 있었다. 온도구배에 따른 복소유전율상수 변화는 수분이동이 온도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 증가함을 확인하였으며, 이는 수분분포 특성을 보여준 것이다.

**주요어 :** 벤토나이트, 복소유전율상수, 체적함수비, 온도구배

To evaluate a property of moisture distribution and volumetric water content on bentonite media the responses of complex dielectric constant were used which are measured by Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer (FDR-V) system. The bentonite is widely used a barrier liner system in the waste disposal site, recently. In case of barrier liner system, generally, the coefficient of permeability should have to less than  $10^{-7}$  cm/sec. According to the results, the complex dielectric constants are increasing with increase the volumetric water content and temperature together. Also the variation of complex dielectric constant due to temperature gradient is confirmed that the moisture movements are increasing with the variations of temperature from high range to low range, which is represented the property of moisture distribution in the bentonite.

**Key words :** Bentonite, Complex dielectric constant, Volumetric water content, Temperature gradient

---

\* Corresponding author : jeong@andong.ac.kr

## 서 론

벤토나이트 혼합토에 대한 침윤과정 및 배수과정의 관계를 갖는 수분특성곡선 분포 특성에서 히스테리시스(hysteresis)현상에 의해 벤토나이트 등 점성토 계열의 매질에서는 투수시험과 같은 일련의 침윤과정에 관한 시험이 매우 어려운 실정이다. 매질에 대한 배수 및 침윤과정에서는 그 물을 함유할 수 있는 보수성이 다르기 때문에 실제 현상에서 공학적인 문제가 되고 있는 침윤과정에 대한 연구가 절대적으로 고려되어야 한다. 또한 점성토는 수분 함양 상태에 따라 팽창과 수축이 발생하는 성질을 가지고 있어 포화 침투시 간극비 변화는 투수계수에 영향을 주는 요인으로 작용한다. 또한 불포화 침투에 대해서도 이와 같은 영향을 고려한 수분 특성을 공학적 관점에서 파악할 필요가 있다.

따라서 저투수 특성 확보를 위해 혼합재료로서 벤토나이트가 널리 사용되는 이유는 벤토나이트가 물과 접촉하였을 때 체적팽창율(volumetric extension rate)이 높을 뿐만 아니라, 벤토나이트 입자의 높은 비표면적과 양이온 치환능력(CEC, Cation Exchange Capacity)으로 인해 오염물질 차폐, 이동억제, 정화 등의 목적에도 적합하기 때문이다(이종민과 이재영, 2001). 벤토나이트는 스멕타이트(smectite) 계열의 광물인 몬모릴로나이트(montmorillonite)를 주성분으로 높은 양이온 교환능력, 큰 비표면적, 높은 팽창성, 낮은 투수성 등의 물리적 특성을 가지고 있다. 벤토나이트는 칼슘계(calcium)와 나트륨계(sodium)로 나뉘며 이는 광물질 형성이나 가공 또는 처리되는 동안에 점토 입자 표면에 흡착되는 외부 이온의 종류에 따른다(Santamarina et al., 2001; Gleason et al., 1997). 나트륨계 벤토나이트는 칼슘계 벤토나이트보다 전단강도는 작으나, 오염물질 차폐재로서 필요한 팽창성과 투수계수 측면에서 월등히 우수하고 화학물질에 대한 재료의 내구성에서 동등한 성능을 보인다(Dananaj et al., 2005; Mitchell et al., 1995).

방사성 폐기물 처분에 관련해서는 강철로 제작된 용기에 폐기물을 넣어 밀폐한 후, 그 용기를 고심도 지하암반 내 건설된 터널에 처분하는 방법을 사용하고 있다. 그 예로서는 암반 내 지하수 침투에 따른 강철 용기의 부식을 방지하기 위해 차수재료인 난투수성 광물의 하나인 벤토나이트가 이용되고 있다. 그러나 폐기물 처분 후 폐기물로부터 방열 등에 의해 온도구배가 발생되고, 벤토나이트 내에서 수분이동이 발생하는 것으로 사료된다. 차수재료로 널리 사용 중인 벤토나이트의 경우, 투수계수가  $10^{-7}$  cm/sec로 거의 물이 침투하지 못하는 점토광물 특성을 가지고 있다(Koch, 2002; 장연수와 이광열, 2000). 그러나 주변 온도조건에 따라 벤토나이트 내부에서 함수비 변화, 즉, 수분이동 특성을 파악하는 것은 폐기물 처분장에서는 매우 중요한 부분이다. 이는 폐기물 처분이 완료된 후 이들에게서 발생하는 열은 매우 높기 때문에 벤토나이트 차수재료를 사이에 두고 온도구배에 차이를 보인다. 온도 변화에 따른 벤토나이트 내부에 존재하는 수분 거동의 발생 유무를 파악할 수 있는 실험방법과 이를 측정할 수 있는 정밀 측정 장비가 절실히 요구된다. 따라서 본 연구에서는 측정프로브의 선단(끝)부분에서 물질거동 내지 수분함유 형태에 따른 매질의 복소유전율상수(complex dielectric constant)인 실수부(real part)와 허수부(imaginary part)를 측정할 수 있는 Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer (FDR-V) 측정 장비를 이용하였다. 실내시험을 수행하여 벤토나이트 공시체에 설치된 온도센서와 FDR-V 측정프로브에 의해 측정된 자료를 바탕으로 벤토나이트 공시체 내에서 발생하는 온도구배의 영향에 기인하는 수분이동 및 분포특성을 분석하는 것이 본 연구의 목적이다.

## FDR-V 구성

유전율 측정법은 지반을 구성하는 다공질 매질의 전자기파에 의해 반응하는 복소유전율(complex permittivity) 특성을 이용하는 측정법이다. 본 연구에 적용된 유전율 측정 장비는 Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer(FDR-V) 시스템을 적용하여 측정 주파수 1~18 GHz 범위 내에서 매질의 복소유전율을 신속하게 측정할 수 있는 장치를 사용하였다. FDR-V는 기본적으로 고주파수의 전자기파 인피던스를 측정할 수 있는 벡터 네트워크 어날라이저(VNA, Vector Network Analyzer), 20개의 측정프로브를 동시에 연결할 수 있는 멀티 스위치 유니트(MSU, Multi-Switch Unit), 측정프로브(CMP, Coaxial Measurement Probe), 그리고 각 채널에 연결된 측정프로브의 교정작업(calibration) 및 측정 자료 저장 등을 수행하는 컴퓨터(data logger)등 네 가지의 장치로 구성되어 있으며 50Ω 동축 전송선(CTL, Coaxial Transmission Line)으로 각 장치들이 연결되어 있다(Fig. 1).

본 FDR-V 측정장비로 매질의 복소유전율상수 측정은 다음과 같은 과정을 통해 이루어진다. VNA에서 발생된 전자기파는 본체의 A지점으로부터 MSU로 전달된다. 여기서 각 채널의 포트를 통하여 CTL을 따라 CMP의 측정부분에 전달되며, 측정대상 매질 내부까지 전달된 전자기파는 유전율 측정부분인 CMP 끝의 B지점에서 반사되어 MSU으로 되돌아간다. MSU에서는 증폭기(tracking generator)와 방향성 결합기(directional coupler)가 내장되어 있어 반사파와 직진파를 선별하여 반사파만이 증폭되어 VNA에서 측정 주파수 영역(1~18GHz)에 대해 실수부(real part,  $\epsilon'$ )와 허수부(imaginary part,  $\epsilon''$ )의 복소유전율상수가 측정되며 각 측정치는 엑셀파일 형태로 저장된다. 이 복소유전율상수는 매질의 전기학적 성질에 기인해 나타나는 유전 상수로써 하나의 측정 주파수 범위에 대해 반사되는 매질의 특성인 실수부 상수( $\epsilon'$ )와 매질의 측정 부에서 흡수되어져 감소되는 허수부 상수( $\epsilon''$ )로 쌍을 이루어 존재한다(Bekefi and Barrett, 1987). 따라서 측정 매질의 전기적 성질에 의해 복소유전율상수는 상대적으로 측정치 범위를 나타낸다. 또한 VNA는 전자기

파 측정 물질 내의 반사계수를 S 파라메타에 의해 직접 구해지기 때문에, 다양한 매질에 대해서도 복소유전율 측정이 가능하다는 특징을 가지고 있다. 측정 주파수 범위가 1GHz~18GHz까지 매우 넓기 때문에 지금까지 측정이 불가능했던 다양한 매질에 대한 복소유전율상수의 측정 및 흡입자 구조 내지 매질 내부에 존재하는 미량의 수분량 측정에도 적용할 수 있는 가능성도 가지고 있다. 다공질 매질의 복소유전율상수의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon' - j\left(\epsilon'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \cdot \epsilon_0}\right) \quad (1)$$

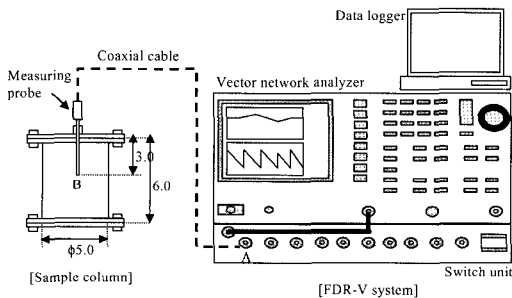
여기서  $\epsilon$  은 매질의 복소유전율상수(complex dielectric constant)를 나타내며,  $\epsilon'$ 와  $\epsilon''$ 는 각 전기장(electric capacity)에 의존하는 실수부 상수와 유전율 손실의 영향에 의존하는 허수부 상수를 의미한다. 또한 전기장은 매질에 포함된 물 체적의 영향에 의해 나타나며, 유전율 손실은 흡과 물에서 용질의 혼합에 의한 비율과 동일하게 고려되어진다.  $\sigma_{dc}$ 는 dc 전도도이며,  $\omega$ 는 전자기파의 주파수를 나타낸다. 그리고  $\epsilon_0$ 와  $j$ 는 진공에서의 복소유전율상수와  $-1/2$ 의 값의 미한다.

### 벤토나이트 물성시험

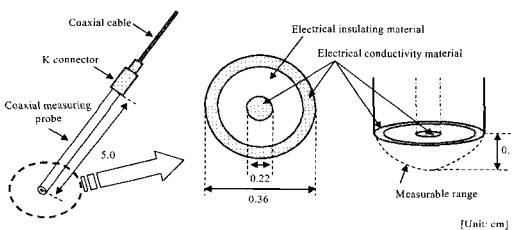
순수 벤토나이트에 대해 측정된 각 물성치는 Table 1에 나타내었다. 복소유전율상수 반응으로부터 매질의 물성치 파악은 실험 당시의 매질에 대한 복소유전율상수 및 온도 등의 관계를 명확하게 파악할 필요가 있다. 따라서 여기서는 각 체적함수비 조건으로 제작된 벤토나이트 공시체를 대상으로 온도를 증가시켜 각 설정 온도

Table 1. Physical properties of bentonite material.

Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	2.75
Maximum grain size (mm)	0.074
Grain size (%)	
Coarse	0.0
Silt	29.0
Clay	71.0



(a) Set-up



(b) Coaxial measurement probe

Fig. 1. Schematic diagram of the FDR-V system.

에 대해 복소유전율상수를 측정하였다. 이렇게 측정된 복소유전율상수(complex dielectric constant,  $\epsilon$ ), 온도(temperature,  $T$ ), 체적함수비(volumetric water content,  $\theta$ ) 변화로부터 관계식을 유도하였다.

시험방법은 체적함수비 0.01, 0.14, 0.19, 0.26으로 설정한 벤토나이트를 사용하여 내경 5cm, 높이 3cm의 아크릴 칼럼에 건조밀도가 1.60g/cm<sup>3</sup>되도록 시료를 압밀시켜 벤토나이트 공시체를 제작하였다. 각기 제작된 공시체는 항온조에 넣어 온도를 10°C에서 70°C까지 각 10°C씩 상승시켜가면서 각 온도에 대한 복소유전율상수를 측정하였다. 시험이 종료된 후 사용한 벤토나이트 공시체를 분해하여 건조기에서 105°C로 24시간 건조시킨 후 실제 체적함수비를 측정하였다. 측정된 공시체의 복소유전율상수인 실수부( $\epsilon'$ )와 허수부( $\epsilon''$ )의 스펙트럼의 결과로부터, 실수부 1GHz의 측정치를 이용하여 체적함수비와 복소유전율상수의 관계를 체적함수비 및 온도별로 구분하여 Fig. 2와 3에 나타내었다. 온도 의존성에 대해서는 복소유전율상수의 실수부 측정치에 대해서만 고려해 볼 때, 체적함수비와 온도가 증가할수록 실수부 상수 또한 함께 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 물의 복소유전율상수가 약 80 정도로 다른 매질의 복소유전율상수보다 월등히 높은 값을 가질 뿐만 아니라 온도가 높아질수록 물 분자의 활동성이 우수하기 때문에 복소유전율상수가 높은 값을 가지는 것으로 판단된다(Santamarina et al., 2001; Noborio, 2001).

Fig. 3에 따르면, 실수부의 복소유전율상수가 체적함수비와 온도에 대해 선형적인 관계로 증가함을 알 수 있다. 여기서 y축을 체적함수비( $\theta$ ), x축을 복소유전율상수( $\epsilon'$ ), 온도( $T$ ), 온도 × 복소유전율상수( $T\epsilon'$ ) 등으로 하여 선형다중회귀분석을 하여 아래와 같은 식을 유도하였다.

$$\theta = -0.0025T + 0.041\epsilon' + 0.00072T\epsilon' - 0.40 \quad (2)$$

따라서 본 연구에서는 식 (2)를 이용하여 측정된 복소유전율상수인 1GHz의 실수부 상수를 적용해 온도에 따른 체적함수비를 산정하였다. 결과적으로 측정 대상 매질의 체적함수비를 파악하기 위해서는 매질의 온도와 측정된 복소유전율상수 등의 물성치 만으로도 가능하다는 것을 의미한다.

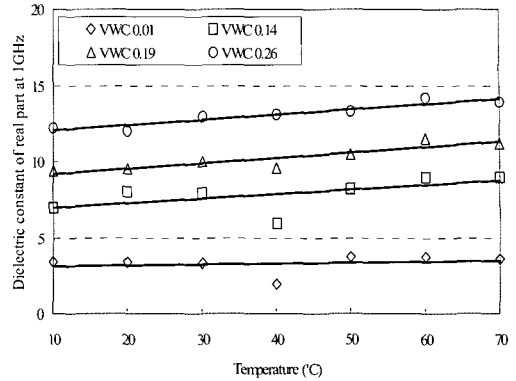


Fig. 2. Temperature dependency due to the range of volumetric water content on the bentonite mold.

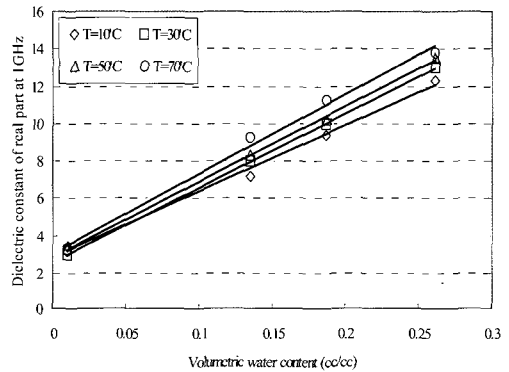


Fig. 3. Relationship between volumetric water content and complex dielectric constant with the range of temperature.

### 시험장치

Fig. 4는 벤토나이트 공시체 내에서의 온도구배에 따른 수분이동 및 분포특성 평가를 수행하기 위해 제작된 시험장치 모식도이다. 본 시험 장치는 두께 1cm의 원통형 아크릴 칼럼으로써 높이 20cm, 벤토나이트 공시체를 설치하는 칼럼의 경우 높이 10cm, 외경 5cm, 내경 3cm의 원통형 칼럼으로 제작되었다. 온도구배 효과를 극대화하기 위하여 칼럼 상단부와 하단부에 높이 3cm, 직경 3cm의 항온탱크를 벤토나이트 공시체 상단부 및 하단부에 밀착될 수 있도록 설치하였다. 공시체에서의 온도구배는 순환식 항온수조를 사용하여 시험장치의 상단부와 하단부를 서로 다른 설정 온도로 고정할 수 있도록 고안하였다.

벤토나이트 공시체 내에서 발생하는 함수비 변화를

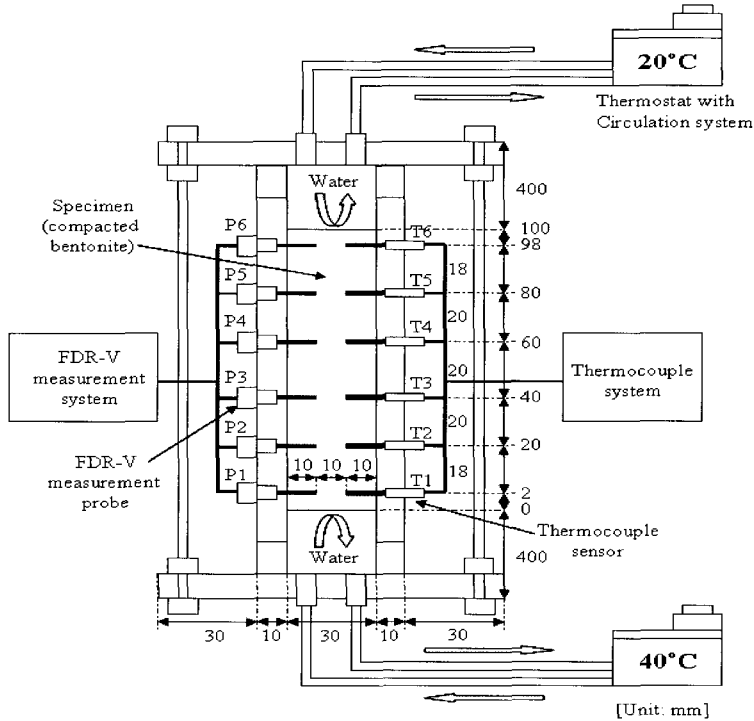


Fig. 4. Schematic diagram of bentonite mold column with FDR-V and Thermocouple systems.

측정하기 위하여 공시체 하부에서부터 0.2cm, 2.0cm, 4.0cm, 6.0cm, 8.0cm, 9.8cm의 위치에 대해 한 방향은 공시체 내의 온도를 측정할 수 있는 열센서를, 반대 방향에는 FDR-V 측정프로브를 설치하여 각 측정시간에 따른 온도와 복소유전율상수 변화를 동시에 측정하였다.

### 온도구배에 따른 수분분포 특성

본 시험은 앞서 설명한 시험장치를 이용하여 장치 하단부를 40°C, 상단부를 20°C로 설정하여 벤토나이트 공시체의 온도구배를 측정하였다. FDR-V 측정 장비에 연결된 측정프로브를 칼럼 하단부에서부터 P1~P6까지 총 6개의 측정프로브를 벤토나이트 공시체 내 1cm 깊이로 각기 설치하여 설치지점에 대해 복소유전율상수 변화를 1시간 간격으로 총 100시간동안 연속적으로 측정하였다. 또한 동일한 방법으로 측정 프로브가 설치된 반대 방향에 열센서를 설치하여 동일한 측정시간 간격으로 공시체 내에서의 열전도 변화를 함께 측정하였다. 본 시험에서는 총 6개의 측정 프로브를 설치하여 함께 운영하였으나, 측정프로브

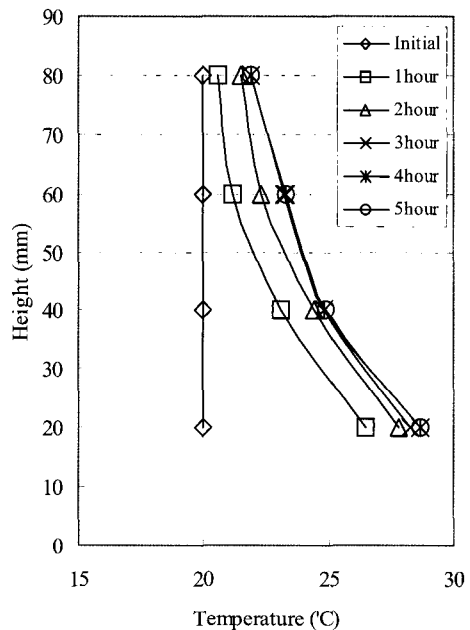


Fig. 5. Temperature variations of bentonite mold from initial condition.

설치상의 문제로 인해 P1과 P6의 측정자료 획득은 불가능하였다.

Fig. 5와 6은 공시체에 설치된 각 열센서의 측정 결과치를 도시한 것으로써 시험 개시 후부터 공시체 각 위치에서의 온도 변화 양상을 보여주고 있다. 그 결과, 약 10시간 후부터 모든 설치 지점에서의 온도는 거의 일정하게 나타났으며, 상단부부터 하단부까지 온도구배 영향이 서로 연결되어져 있는 것을 확인하였다. 그러므로 측정된 복소유전율상수와 온도의 관계를 식 (2)에 대입하여 각 시간에 따른 공시체 내에서의 체적함수비 변화를 산정하였다. Fig. 7에 따르면 측정프로

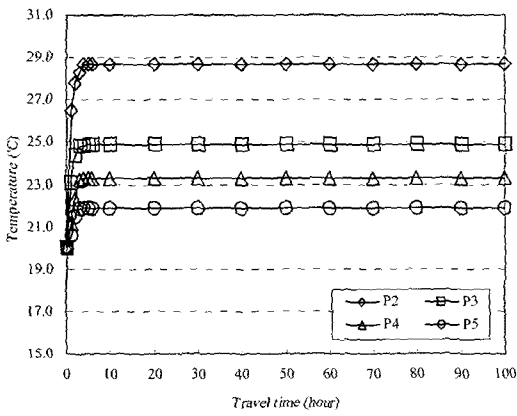


Fig. 6. Temperature properties to different the temperature gradient on the bentonite mold.

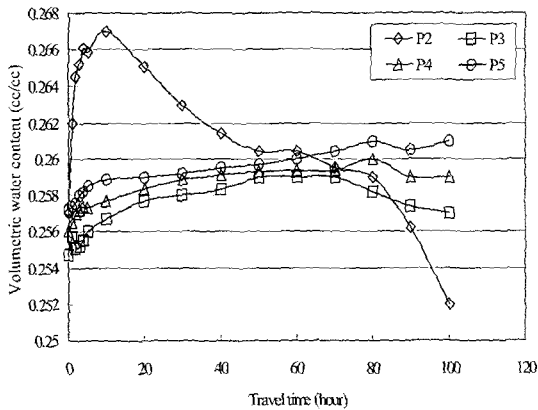
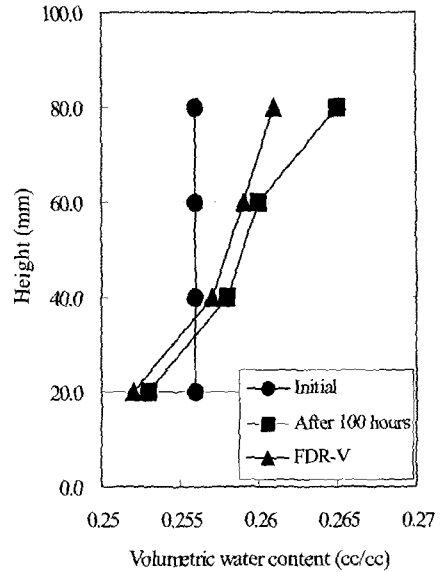
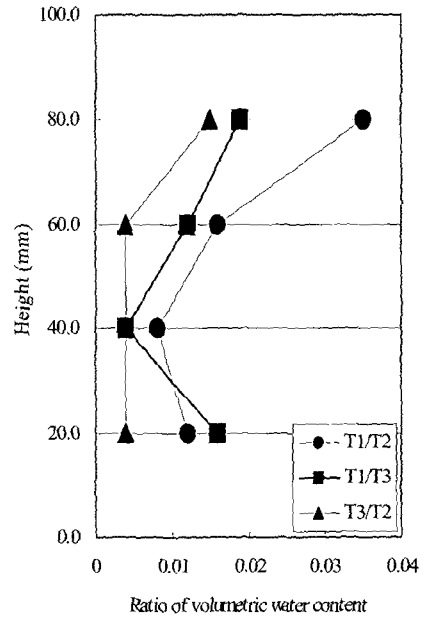


Fig. 7. Variation of volumetric water content calculated by eq. (2) using the responses of complex dielectric constant.



(a) Movement of volumetric water content



(b) Ratio of volumetric water content with height

Fig. 8. Properties of distribution of volumetric water content in bentonite mold: T1- initial condition; T2- after 100 days; T3- profiles of measured FDR-V.

브가 설치된 각 위치에 대해서 경시적인 함수비 변화를 파악할 수 있기 때문에, 측정된 각 지점의 복소유전율상수 반응만을 이용하여 공시체 내의 체적함수비를 계산하였다. 현재까지는 경시적인 함수비의 이동을 정밀하게 측정할 수 있는 측정방법이 없기 때문에 온도구배를 갖는 공시체를 시험 종료 후에 2cm 두께로 절단하여 건조시험을 통해 체적함수비를 측정하고, 시험 개시부터 100시간 후의 체적함수비 분포와 비교함으로써 그 정확성을 검토하였다. Fig. 8은 체적함수비의 측정 결과를 비교하여 나타내었다.

실제 체적함수비와 비교해 복소유전율상수와 온도의 관계로부터 구한 측정치는 벤토나이트 공시체 상하단부에서 측정오차가 약 1% 내에 분포하는 것을 알 수 있다. 한편, 공시체 내에서의 수분이동은 그 양이 미미하기 때문에 체적함수비를 정량적인 값으로 나타내기에는 다소 어려움이 있지만 벤토나이트의 투수계수가  $10^{-7}$  cm/sec 정도로 작다는 것을 감안할 때 공시체 내에서 온도구배에 따른 수분이동 및 분포 경향을 충분히 본 측정 장비를 적용해 파악할 수 있는 것을 확인하였다.

### 결 론

본 실험연구에서는 차수재료로 사용하는 벤토나이트에 대해 기본적인 복소유전율상수 반응 물성치와 온도구배에 따른 벤토나이트 내에서 발생하는 수분이동 특성을 FDR-V 유전율 측정장비를 적용하여 수행하였다. 이미 알려진 바와 같이 벤토나이트의 투수계수는 다공질 매질이 가지는 투수계수보다 훨씬 작기 때문에 폐기물처분장의 차수재료로 널리 사용되고 있지만 폐기물의 종류에 따라 발생하는 열에 의해 오염물질 등이 차수재 내부로 침투 확산될 가능성을 내포하고 있다. 따라서 벤토나이트 공시체 내부에서 온도구배에 따른 수분이동 특성을 복소유전율상수 반응으로부터 파악하였다.

체적함수비와 온도 변화에 따른 벤토나이트 내 복소유전율상수의 변화는 1GHz의 실수부 상수만을 이용해 검토해본 결과 체적함수비와 온도 상승에 따라 실수부 상수도 함께 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 물의 복소유전율상수가 다른 매질에 비해 매우 크기 때문이다. 온도구배에 대한 실험에서는 벤토나이트 공시체를 포함하고 있는 아크릴칼럼 상단부와 하단부의 온도차가 20°C의 온도구배 조건에서 체적함수비를 측정하여 실제의 체적함수비 변화와 비교

한 결과, 측정오차가 약 1% 이내에서 존재하는 것으로 나타났다. 이는 실험 종료 후 2cm 두께로 잘라 건조시험을 통해 계산된 체적함수비가 일정 크기로 절단된 시료 전체에 대한 평균값을 의미하는데 반해 FDR-V 측정 장비에 의해 측정된 값은 측정프로브가 설치되어 있는 지점에서만의 체적함수비이기 때문에 다소 작은 측정 결과치를 보이는 것으로 판단된다. 그렇지만 일반적인 차수재료로 사용되는 벤토나이트의 투수계수의 범위가  $10^{-7}$  cm/sec임을 감안할 때 복소유전율상수 측정만으로 온도구배 영향에 의한 벤토나이트 공시체 내 수분이동 및 분포특성을 충분히 파악할 수 있는 것으로 확인되었다. 또한 체적함수비의 측정 오차 범위를 고려해 볼 때, FDR-V 측정 장비를 적용해 경시적인 체적함수비 변화로부터 수분이동 뿐만 아니라 액체상의 물질이동 경향을 전체적으로 파악하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

장연수, 이광열, 2000, 지반환경공학, 구미서관, 587p.  
 이종민, 이재영, 2001, 폐기물매립장에서 다짐에너지와 팽윤도에 의한 토양-벤토나이트 혼합토의 투수계수 특성에 관한 연구, 한국지하수토양환경학회지, 6(4), 61-72.  
 Bekefi, G. and Barrett, A.H., 1977, Electromagnetic vibrations, waves, and radiation, Cambridge, The MIT Press, 664p.  
 Dananaj, I., Frankovská, J. and Janotka, I., 2005, The influence of smectite content on microstructure and geotechnical properties of calcium and sodium bentonites, Applied Clay Science, 28, 223-232.  
 Gleason, M. H., Daniel, D. E. and Eykholt, G. R., 1997, Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(5), 438-445.  
 Koch, D., 2002, Bentonite as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls, Applied Clay Science, 21, 1-11.  
 Mitchell, J. K., Bary, J. D. and Mitchell, R. A., 1995, Material interactions in solid waste landfills, Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication, No. 46, ASEC, 568-590.  
 Noborio, K., 2001, Measurement of soil water content

and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 31, p. 213-237.

Santamarina, J.C., Klein, K.A. and Fam, M.A., 2001, *Soils and waves*, John Wiley & Sons, England, 488p.

투 고 일 2005년 8월 4일

심 사 일 2005년 8월 5일

심사완료일 2005년 9월 13일

김만일

한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소  
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1

Tel: 042-860-0427

Fax: 042-860-0592

E-mail: mikim916@paran.com

정교철

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388번지

Tel: 054-820-5753

Fax: 054-823-1627

E-mail: jeong@andong.ac.kr