

## 폐기물 매립장 차수재료의 수분량 측정에 관한 연구

김만일

한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소

김형수

한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소

정교철

안동대학교 지구환경과학과

### 1. 서 론

폐기물 매립장에서 발생되는 침출수 내지 지하수위 상승에 따른 지하수 오염, 그리고 다양한 경로로 발생될 수 있는 토양오염들의 문제들을 방지하기 위하여 매립장 하부에 저투수성(*low permeability*) 성질을 갖는 매질의 다양한 차수재를 설치한다. 일반적으로 폐기물 지층 매립장에 사용되는 차수재의 경우 침출수의 누출을 억제하기 위하여 저투수성 물질, 즉 투수계수가  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$  이하의 차수재료를 사용한다(한국지반공학회, 2004; 장연수와 이광열, 2001; Tay et al., 2001). 현재 차수재로 사용하고 있는 벤토나이트 혼합토는 투수계수가  $10^{-7} \sim 10^{-11} \text{ cm/sec}$  정도의 저투수성 물질에 해당된다. 이 재료는 물을 흡수하여 팽윤을 발생시키는 특성을 가진다. 따라서 이러한 차수재의 침투특성 및 팽윤특성에 관해서는 지금까지는 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어오고 있으나, 공학적인 메카니즘 내지 물리특성 등에 대해서는 아직 부족한 부분이 남아 있다.

특히 벤토나이트와 같은 점토 광물로 이루어진 차수재의 투수계수에 영향을 미치는 주요 영향인자는 흙의 종류, 점토의 함량, 입경분포 등의 재료 특성과 함수비와 건조밀도, 다짐두께와 같은 현장 시공상의 방법, 마지막으로 주변 환경의 영향을 받아 차수재의 건조균열 내지 동결융해로 인한 차수재층의 손상 정도로 고려해 볼 수 있다. 이러한 영향인자에 대한 연구는 Tay 등(2001)에 의해 체계적으로 진행되었는데, 그 결과 벤토나이트 함량 10%와 20%를 가진 재료에 대한 수리전도도의 분포는 평균적으로  $3 \times 10^{-12} \text{ m/s}$  범위로써 저투수성 물질에 해당된다. 또한 건조시험에서 10%의 벤토나이트 혼합토일 경우, 체적함수비를 증가시킬수록 건조 후 발생되는 크랙의 길이와 폭이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 이와 반대로 20% 함량 벤토나이트 혼합토에서는 체적함수비 증가에 비해 크랙의 길이와 폭이 미세하게 발생되는 것으로 보고되어 있다.

매립장 현장에서 불포화 상태로 시공되어져 있는 차수재의 시공 직후, 재관수(*再冠水*, reflooding)에 의해 수분상태는 장기적으로 변화하기 때문에 각각의 포화도에 대한 이들의 침투 내지 팽윤거동 파악의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 특히 수분량 측정지점에 대해서는 현재 미량의 수분이동에 대한 측정장비 및 원위치에서의 장기적 모니터링이 가능한 계측장비가 거의 소개되어져 있지 않고, 이러한 매립장 시공 후의 안전성에 대해서 체계적인 관리가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고주파수 전자기파의 인피던스 특성으로 발생되는 합성간섭파를 이용하여 다공질매질의 유전율상수를 측정할 수 있는 Frequency Domain Reflectometry(FDR) 측정장비를 적용하였다. 특히 고주파수인  $0.1 \sim 1.7 \text{ GHz}$  범위의 전자기파를 사용하기 때문에 측정프로브의 주변에서 보다 정밀한 측정이 가능하다는 점에서 비교적 넓은 범위를 갖는 매립장을 피복하게 될 차수재의 연결부위에서 발생될 수 있는 오염된 침출수의 유출 가능성을 계측할 수 있을 것이다.

이에 본 측정장비를 적용해 벤토나이트 혼합토로 이루어진 차수재에 대한 액상의 물질 침투 파악 및 이를 위한 적용성을 교정곡선을 도출하기 위해 실내시험을 통하여 측정결과를 검토하였다.

## 2. 시험 방법 및 결과

### 2.1. 유전율 측정장비 구성

본 연구에서는 Frequency Domain Reflectometry(FDR) 측정장비를 사용하여 매질이 갖는 흡수비와 이로부터 반응하는 유전율상수 변화로부터 벤토나이트 혼합토에 대한 다양한 물성치를 측정하였다. FDR 측정장비는 넓은 주파수 범위인 0.1~1.7GHz 상에서 주파수 인피던스 반응에 따라 유전율상수를 측정한다. 이 측정장비는 전자기파의 인피던스 반응에 따라 매질의 유전율을 측정하는 것으로써, 전자파 발생기(Tracking Generator), 스펙트럼 분석기(Spectrum Analyzer), 방향성 결합기(CM Directional Coupler), FDR 측정센서 및 자료 수집기(Data Logger)로 구성되어 있다 (김만일 등, 2004). 매질의 유전율 측정은 FDR 측정센서를 측정매질에 삽입한 후, 전자파 발생기에서 고주파의 전자기파를 측정매질로 방출한다. 전자파의 진행속도는 매질 주변의 유전특성에 의해 변하기 때문에 매질에 설치된 FDR 측정센서에서의 입사파와 측정센서 선단부에서 반사파를 발생시킨다. 이 두 파들은 합성간섭파를 발생시켜 방향성 결합기를 경유해 스펙트럼 분석기에서 관찰된다. 여기서 FDR 측정센서 선단부터의 반사파 신호는 FDR 측정센서를 왕복하기 때문에 위상이 늦어져 측정된 두 파의 합성간섭파는 일정한 주파수 간격에서  $\sin$ 곡선과 비슷한 굴곡형태의 주파수 파장을 보이게 된다. 이러한 주파수 영역에서의 파장을 이용해 매질의 유전율상수가 결정된다.

### 2.2. 벤토나이트 혼합토 특성

저투수 특성 확보를 위한 혼합재료로서 벤토나이트가 널리 사용되는 이유는 벤토나이트가 물과 반응하였을 때 체적팽창율(Volumetric Extension Rate)이 높을 뿐만 아니라, 입자의 높은 비표면 면적과 양이온 치환능력(CEC, Cation Exchange Capacity)으로 인한 오염물질 차폐, 이동억제, 정화 등의 목적에도 부합되기 때문이다. 벤토나이트는 스멕타이트(smectite)가 주성분이고 그 거동이 스멕타이트 광물의 특성에 지배받는 점토류를 말하며, 점토입자 주변의 치환 가능한 이온의 종류에 따라 나트륨계(Na, Sodium)와 칼슘계(Ca, Calcium) 벤토나이트로 구분한다. 나트륨계 벤토나이트(Na-bentonite)는 칼슘계 벤토나이트(Ca-bentonite)보다 전단강도는 작으나, 오염물질 차폐재로서 필요한 팽창성과 투수계수 측면에서 월등히 우수하고 화학물질에 대한 재료의 내구성에서 동등한 성능을 보인다(Mitchell et al., 1995). 벤토나이트 함량에 따른 벤토나이트 혼합 차수층의 투수계수는 약 4% 이상의 벤토나이트가 혼합되었을 때, 투수계수 기준을 만족하는 것으로 나타났다(Giani, 1992). 모래질 원토와 벤토나이트를 혼합할 경우 일반적으로 5~10%의 벤토나이트가 필요하다. 한국건설기술연구원 연구보고서(1998)에 따르면, 매립장 등에 사용할 목적으로 차수재를 제작할 경우, 필요한 벤토나이트의 양은 토취장의 토사와 사용된 벤토나이트의 종류에 따라 다르기 때문에 배합시험 및 투수시험을 수행하여 벤토나이트 함량을 결정하여야 한다.

본 연구에서는 벤토나이트 혼합토에 대한 벤토나이트 배합율의 측정한계를 측정하기 위하여 사용된 벤토나이트의 재료는 야마가타현(山形)산, 미국산, 군마현(群馬)산 등의 총 세 종류의 벤토

나이트를 각각 A, B 및 C로 편의상 구분해 사용하여 이들에 화강풍화토(5mm 채를 통과한 시료)를 혼합시켜 벤토나이트 혼합토 몰드를 각각 제작하여 실내시험을 수행하였다. 제작된 벤토나이트 혼합토의 배합율은 10%, 13%, 15%, 20%로 건조상태에서 교반시킨 후, 함수비 10%가 되도록 물을 첨가하여 혼합하였다. 이렇게 제작된 혼합토 몰드는 높이 20cm, 직경 6cm의 아크릴 몰드에 1층을 3cm로 일정하게 압밀시켜 총 7회에 걸쳐 단계적으로 하나의 몰드를 제작한 후 24시간 실온에서 방치한 후 실내시험을 수행하였다. 몰드제작 물성치 조건을 표 1에 나타내었다.

표 1. 벤토나이트 혼합토 몰드의 제작 물성치 조건.

건조밀도, $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	공극률, n	함수비, $\omega$ (%)
1.70	0.377	10.0

### 2.3. 벤토나이트 혼합토 유전율 교정 결과

차수재에 대한 장기간의 모니터링 작업을 고려해, 시공시의 전극을 매설할 필요가 있어, 이 경우는 전송 케이블이 길어도 측정 가능한 Time Domain Reflectometry(TDR) 및 Frequency Domain Reflectometry(FDR) 측정법(최대 50m까지), Amplitude Domain Reflectometry(ADR) 측정법(길이에 제한없음)이 유효할 것으로 사료된다. 여기서는 폐기물 매립장에서의 측정을 목적으로 벤토나이트 혼합토에 대한 유전율 교정작업을 수행하였다.

폐기물 매립장에서의 차수재료 관리를 목적으로 하기 위해 대상으로 하는 혼합토는 시공현장의 것을 이용하였다. 공시체는 길이 20cm, 직경 6cm의 몰드로 제작하였다. 벤토나이트 혼합토는 미국산 벤토나이트 B와 화강풍화토에 대해 배합율이 13%로 조절하여 불포화 몰드를 제작하였다. 건조밀도  $\rho_d=1.75g/cm^3$ , 공극률 0.37로 하여 압밀 제작하기 위한 단계별 압밀 높이는 3cm로 하여 제작하였다. 시료의 물리적 특성을 파악하기 위하여 입도분석, 토입자의 밀도 및 압밀시험을 수행한 결과를 그림 1과 표 2에 나타내었다.

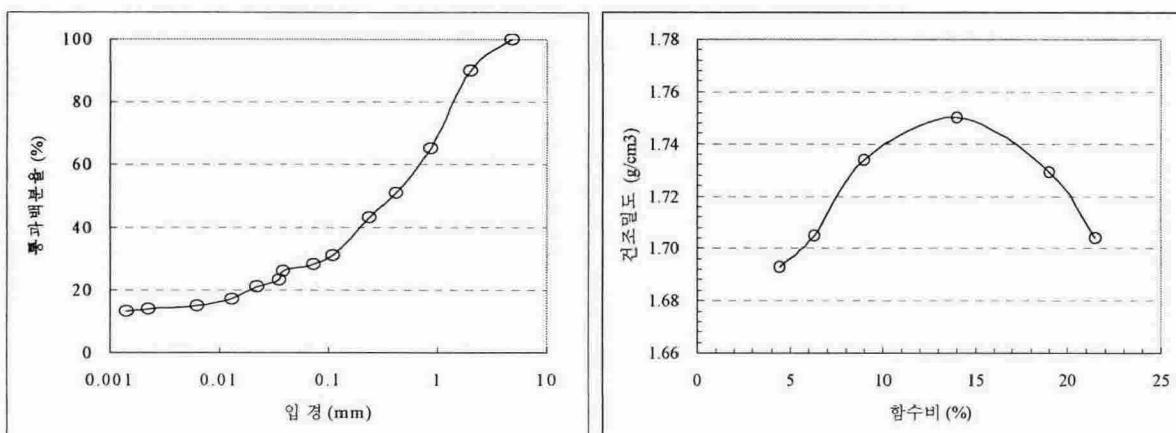


그림 1. 미국산 벤토나이트 B 혼합토의 기본 물성치 시험.

표 2. 벤토나이트 혼합토의 물리적 특성.

흡입도, $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	최적함수비, $\omega_{opt}$ (%)	최대건조밀도, $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	비중, Gs
2.73	14	1.75	2.73

### 3. 토 의

벤토나이트 혼합토 B에 대해 불포화 몰드 제작시 압밀하중을 동일하게 가하여 제작한 혼합토 몰드에 체적함수비를 각기 조절하여 제작한 후, 유전율 측정장치인 FDR과 ADR 측정센서를 삽입 설치하여 유전율 변화를 검토하였다. 또한, 순수 표준사에 대해 체적함수비 관계만을 FDR로 측정 하였다. 이러한 측정결과를 Topp 등(1980)가 제시한 경험식을 이용하여 함께 비교한 것을 그림 2에 도시하였다. 측정결과에서 ADR 측정치가 FDR 측정치 보다 높게 나타나고 있는데, 이는 ADR 측정센서가 3본식의 원통형으로 측정 대상 지점에 설치시, 센서가 설치되어 있는 혼합토 일부분에 압밀 현상이 발생함에 따라 측정 유전율상수 측정치 변화가 발생된 것으로 판단된다.

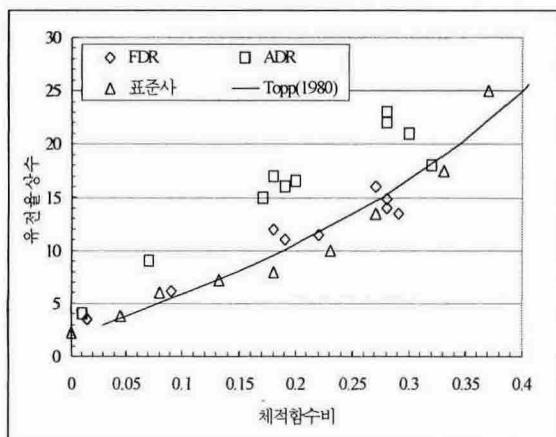


그림 2. 폐기물 매립장의 벤토나이트 혼합토에 대한 유전율 측정 결과.

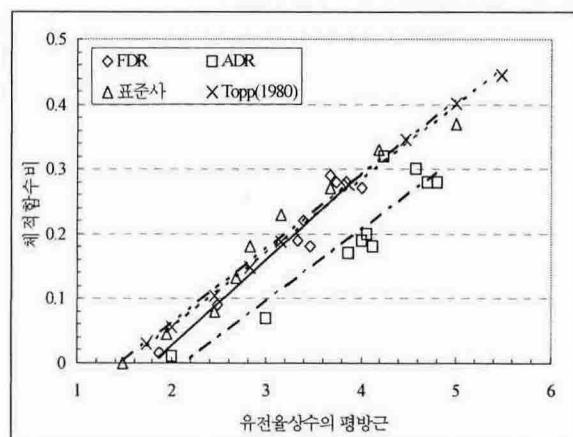


그림 3. 폐기물매립장의 벤토나이트 혼합토에 대한 교정 결과.

표 3. 각 측정장비에 대한 교정방정식.

측정장치	측정매질	1차원 방정식	상관계수 ( $R^2$ )
FDR	벤토나이트 혼합토 B	$\theta = 0.1331\sqrt{\vartheta} - 0.2389$	0.936
ADR	벤토나이트 혼합토 B	$\theta = 0.1103\sqrt{\vartheta} - 0.2342$	0.864
FDR	표준사	$\theta = 0.1145\sqrt{\vartheta} - 0.1667$	0.962
TDR	Topp 등 경험식(1980)	$\theta = 0.1137\sqrt{\vartheta} - 0.1705$	0.999

체적함수비( $\theta$ )와 유전율상수의 평방근( $\sqrt{\varrho}$ )의 관계를 그림 3과 같이 도시한 후, 각각의 측정장비에 대한 결과를 1차원 방정식으로 유도하였다(표 3). 유도된 1차원 방정식의 각 상관계수를 고려해 보면, FDR 측정센서로 측정된 벤토나이트 혼합토와 표준사에 대해서는 비교적 유사한 값을 보이고 있지만, ADR 측정센서로 측정된 벤토나이트 혼합토는 작은 값을 나타낸다. 이러한 원인은 앞서 설명한 바와 같이 측정센서의 형태 및 설치상의 문제로 인해 나타난 결과로 생각되며, ADR 보다는 1선식 FDR 측정센서의 적용 효율성이 높은 것으로 판단된다. 결과적으로 교정결과에서 FDR 측정치가 Topp 등의 경험식 결과와 유사하게 나타남에 따라 벤토나이트 혼합토에 대한 체적함수비의 측정이 유전율 반응을 이용해 가능할 것으로 사료된다. 따라서 현장에서의 FDR 및 ADR 측정법에서의 계측은 지반의 평균적인 수분량을 측정하기 위한 것으로서, 다수의 측정지점에 대한 측정이 필요하다는 것을 의미하며, 이에 부합되는 측정장비로는 다수의 측정센서를 동시에 운영할 수 있는 FDR 측정법이 유효할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 유전율 반응을 이용해 매립된 폐기물에서 발생되는 침출수 등의 오염물질의 침투를 방지하기 위해 매립장 하단부에 설치되는 차수재의 재료인 벤토나이트 혼합토에 대한 수분 함양을 측정하기 위하여 고주파수인 0.1~1.7GHz 범위에서 유전율상수를 측정할 수 있는 Frequency Domain Reflectometry(FDR) 측정장비를 사용하여 실내시험을 수행하였다. 매립장 차수재의 경우, 매립물질에서 발생되는 침출수의 침투 거동 및 주변 지역의 지하수 거동에 따른 지하수위 변화 등의 영향에 의해 차수재의 성능에 문제를 일으킬 가능성이 항상 내재되어 있음으로 이들에 대한 변화 및 효율적인 모니터링 기법 등이 요구된다.

여기서는 벤토나이트와 화강풍화토를 섞어 제작한 벤토나이트 혼합토에 대한 유전율상수 변화로부터 불포화 몰드 내 수분함량을 측정한 결과, 각 단계의 포화도 증가에 따라 측정치가 증가하는 것을 확인하였다. 즉 이러한 것은 결과적으로 도일한 조건을 갖는 불포화 몰드 내에서 미량의 수분함량 변화 만으로도 유전율상수 변화를 감지할 수 있기 때문에, 침출수와 같은 액체상태의 물질 등의 침투거동을 측정센서가 설치된 취약지점에서 장기적인 침투거동 형태를 충분히 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-4-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해준 사업단 측에 감사드린다.

#### 참고문헌

- 김만일, 정교철, 박창근, 2004, 지하댐 지반 물성치 측정을 위한 유전율 측정 시스템 개발, 지질공학, 14(4), 361-369.
- 장연수, 이광열, 2001, 지반환경공학, 구미서관, 587 p.
- 한국건설기술연구원, 1998, 폐기물 매립시설의 설계·시공 기술에 관한 연구, 건기연 98-075, 329 p.
- 한국지반공학회, 2004, 지반공학 시리즈 13 - 폐기물 매립 및 토양환경, 사단법인 한국지반공학회,

구미서관, 313 p.

- 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.
- Giani, G. P., 1992, Rock slope stability analysis, *A. A. Balkema*, 374 p.
- Tay, Y. Y., Stewart, D. I. and Cousens, T. W., 2001, Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners, *Engineering Geology*, 60, 263-274.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan, 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16(3), 574-582.