

# 흙-벤토나이트월에 대한 전기전도도 모니터링 기법의 적용성 평가

## Applicability of Electrical Conductivity Monitoring Technique for Soil-bentonite Barrier

오 명 학<sup>1</sup> Oh, Myoung-Hak

유 동 주<sup>2</sup> Yoo, Dong-Ju

김 용 성<sup>3</sup> Kim, Yong-Sung

박 준 범<sup>4</sup> Park, Jun-Boum

### Abstract

In this study, applicability of electrical conductivity monitoring technique for containment barrier such as soil-bentonite wall was evaluated. Laboratory tests including permeability tests and column tests were performed to understand variations in electrical conductivity at different bentonite contents, hydraulic conductivities, and heavy metal concentrations. The electrical conductivity of compacted soil-bentonite mixtures was found to increase proportionally with bentonite content. Accordingly, the hydraulic conductivity of compacted soil-bentonite mixtures which decreases linearly with increasing bentonite content was found to have an inversely proportional relationship with the electrical conductivity. In column tests, electrical conductivity breakthrough curves and concentration breakthrough curves were simultaneously obtained. These results indicated that electrical conductivity measurement can be an effective means of detecting heavy metal transport at the desired locations within barriers and verifying possible contaminant leakage. Experimental results obtained from this study showed that the electrical conductivity measurement can be a promising tool for monitoring of containment barrier.

### 요 지

본 연구에서는 흙-벤토나이트월과 같은 차단벽체에 대한 전기전도도 모니터링 기법의 적용성을 평가하였다. 벤토나이트 함량, 투수계수 및 중금속 농도에 따른 전기전도도 변화를 파악하기 위하여 투수실험과 주상실험을 실시하였다. 흙-벤토나이트 혼합 다짐시편의 전기전도도는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 흙-벤토나이트 차단벽체의 투수계수는 벤토나이트 함량과 반비례하는 경향을 나타내었으며, 전기전도도와도 반비례하는 경향을 나타내었다. 주상실험을 통하여 전기전도도 파과곡선과 농도 파과곡선을 동시에 구할 수 있었다. 이 결과는 전기전도도 측정기법이 벽체 내부의 임의 지점에서 중금속의 이동을 감지하고 오염물질의 누출 가능성을 확인하는 유용한 방법으로 활용될 수 있음을 나타낸다. 본 연구결과에 의하면 전기전도도 측정기법이 차단벽체 모니터링에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords** : Bentonite content, Electrical conductivity, Heavy metal transport, Hydraulic conductivity, Soil-bentonite

1 정회원, 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Coastal Eng. Research Dept., Korea Ocean Research & Development Institute, omyhak@kordi.re.kr, 교신저자)

2 정회원, 유신코퍼레이션 지반본부 기초설계팀 사원 (Member, Foundation Eng. Dept., Geotech & Geology Division, Yooshin Eng. Corp.)

3 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Seoul National Univ.)

4 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Seoul National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

오염물질 차단공법은 오염지역에서 오염된 지하수가 외부로 유출되지 못하도록 불투수벽을 형성하는 방법이다. 차단시설은 침출수 및 오염된 지하수의 외부 유출을 방지할 수 있으며, 오염원이 직접 처리되지는 않지만 다른 복원 공법에 비해 경제적이다. 차단공법으로는 슬러리월, 시트파일, 그라우트커튼, 흙교반벽, 동결벽 등의 시설이 있다(정하익, 1998). 특히 흙-벤토나이트월(soil-bentonite wall)은 설치비용이 저렴하고, 화학적 저항성의 범위가 크고, 낮은 투수특성을 갖는다는 장점을 가지고 있다. 벤토나이트는 물과 반응시 체적팽창율이 높기 때문에 저투수성 확보가 가능하며, 비표면적과 양이온교환능(CEC, cation exchange capacity)이 매우 크기 때문에 오염물질에 대한 흡착능이 우수하다. 따라서 저투수성의 확보와 오염물질의 이동 억제를 목적으로 하는 오염물질 차단시스템에 효과적으로 적용되고 있다(Alther, 1982; Daniel, 1993; Appolonia, 1979; Mitchell et al., 1995; 유동주 등, 2006).

오염물질의 이동억제를 위해 차단벽체가 시공되면, 차단시설의 설치 후에 투수계수시험을 통하여 설계투수계수가 확보되었는지를 검토하며, 그 후 벽체의 내부와 외부의 지하수위가 설계수두를 유지하는지 여부를 검토하기 위하여 지하수위 모니터링을 실시하고, 오염물질 차단효과를 검증하기 위하여 지하수질에 대한 모니터링을 수행하게 된다. 그러나, 차단시설은 시공시 품질관리 정도에 따른 차수성의 불균질이 나타날 수 있으며, 이로 인해 오염물질의 누출 가능성이 있을 수 있다. 따라서, 차수성의 균질성 여부를 효과적으로 평가하고 차단시설 설치 후 차단벽체를 통한 오염물질의 이동을 장기적으로 모니터링할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

흙-벤토나이트월과 같이 벤토나이트가 혼합된 차단벽체의 투수계수는 벤토나이트 함량에 가장 크게 영향을 받는다. 따라서, 차단시스템 시공시 설계에서 계획된 투수계수의 확보여부에 대한 모니터링 기법으로 벤토나이트 함량을 평가하는 기법에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다(유동주 등, 2006). 벤토나이트 함량을 산출하는데 많이 사용되는 방법은 벤토나이트에 흡착되는 메틸렌블루의 양을 적정하여 벤토나이트를 정량화하는 메틸렌블루테스트이다(Kenney et al., 1992). 그러나 측정시간이 오래 걸리고, 많은 양의 시료에 대해 실험이 어려우며, 실험자의 주관적 판단이 결과에 크게 영향을

줄 수 있다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 Abu-Hassanein 등(1996)은 전기전도도 측정법을 통하여 슬러리의 벤토나이트 함량을 평가하는 기법을 제안한 바 있다. 전기전도도 측정기법은 측정이 간단하고 빠르며 넓은 대상영역에 대해서도 경제적으로 적용될 수 있다. Abu-Hassanein 등(1996)은 벤토나이트 및 흙-벤토나이트 혼합토를 탈이온수와 혼합하여 슬러리를 만들어 전기전도도를 측정하여, 슬러리의 전기전도도와 벤토나이트 함량의 선형적인 비례관계를 도출하였다. 유동주 등(2006)은 전기전도도 측정에 의한 슬러리의 벤토나이트 함량평가가 메틸렌블루테스트와 비교하여 큰 차이가 없음을 보였으며, 슬러리 용액의 전기전도도 및 이온농도 분석을 통해 벤토나이트 함량 증가에 따라 나타나는 슬러리 전기전도도의 선형적 증가는 주로 벤토나이트로부터 용해된 이온 성분에서 나타나는 것임을 규명하였다. 또한, 슬러리 내에 존재하는 벤토나이트 이외의 점토입자 등 세립분 함량과 슬러리 용액의 초기 전기전도도가 슬러리의 전기전도도 측정 결과에 미치는 영향을 제시한 바 있다.

그러나, 기존의 연구는 슬러리 상태에 대해 전기전도도를 측정하는 것이기 때문에 이미 시공된 차단벽체에 대한 모니터링에는 직접 적용되기 어렵다. 시공이 완료된 흙-벤토나이트월의 품질관리 및 모니터링에 전기전도도 측정기법을 적용하기 위해서는 벽체에서 직접 전기전도도를 측정하는 방법의 적용성이 검증되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 흙-벤토나이트월의 벤토나이트 함량 및 투수성 평가에 대한 전기전도도 모니터링 기법의 적용성을 평가하기 위하여 흙과 벤토나이트를 혼합한 다짐시편에 대한 실내실험을 수행하여 벤토나이트 함량 및 투수계수와 전기전도도의 상관관계를 분석하였다. 또한, 전기전도도 측정기법을 적용하여 차단벽체를 통한 오염물질 이동의 지속적인 모니터링에 대한 적용성을 평가하기 위하여 중금속 이동을 모사한 주상실험을 통하여 중금속 이동에 따른 전기전도도의 변화 경향을 도출하여 벽체 단면을 통한 중금속 이동 모니터링에 대한 적용성을 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료

벤토나이트는 층간에 존재하는 양이온의 종류에 따

라 칼슘 벤토나이트(Ca-bentonite)와 나트륨 벤토나이트(Na-bentonite)로 구분된다. 나트륨 벤토나이트는 칼슘 벤토나이트에 비해 전단강도는 다소 작으나, 저투수성의 확보가 용이하고, 오염물질에 대한 흡착력이 크기 때문에 오염물질 차단시스템에 널리 활용되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 차단시스템에 많이 활용되는 나트륨 벤토나이트에 대해 실험을 수행하였다. 또한 벤토나이트 이외의 다른 점토의 영향 정도를 평가하기 위하여 카올리나이트에 대한 실험을 병행하여 벤토나이트에서 나타나는 결과와 비교하였다. 흙-벤토나이트 혼합토에 대한 실험을 위하여 서울대 구내에서 채취한 화강풍화토(이후 'Soil A'로 표기)와 대구 매립지 조성공사현장에서 채취한 원지반토(이후 'Soil B'로 표기)를 사용하였다.

본 연구에 사용된 흙의 특성을 표 1에 제시하였으며, XRF(X-Ray Fluorescence Spectrometer) 분석을 통해 얻은 흙의 구성성분을 표 2에 정리하였다. 모든 시료는 노건조하여 사용하였으며, 현장에서 직접 채취한 흙(Soil A와 B)의 경우에는 10번체를 통과한 시료를 실험에 사용하였다. 현장에서 채취한 시료에 대해 다짐시험을 수행한 결과 Soil A의 경우 최적함수비는 12%이고, 최대건조단위중량은  $2 \text{ t/m}^3$ 이었으며, Soil B의 경우에는 최적함수비 16.3%이고, 최대건조단위중량은  $1.7 \text{ t/m}^3$ 으로 나타났다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 투수시험

벤토나이트 함량에 따른 다짐시편의 투수계수 및 전기적 특성변화를 평가하기 위하여 노건조된 Soil A와 Soil B에 벤토나이트 함량을 변화시켜가면서 각 시료의 최적함수비 조건으로 골고루 혼합하였다. 혼합된 시료는 하버드 다짐몰드와 동일한 규격인 직경 33.3mm, 높이 71.5mm로 제작된 아크릴 몰드에서 하버드 다짐기로 ASTM SPT 479에 따라 3층 25회 다짐을 실시하여 시편을 제작하였다. 준비된 다짐시편에 대하여 그림 1(a)와 같이 투수시험을 실시하였고 이때 적용된 주입압은 시료의 조건에 따라 10~21kPa을 적용하였다. 일정한 시간간격으로 투수계수를 지속적으로 측정하여 일정한 값이 나올 때까지 투수실험을 수행하였다. 투수시험 완료 후 몰드의 상하부 캡만 제거한 후 그림 1(b)와 같이 다짐시편의 상하부를 원형의 황동전극판으로 대체하여 투수시험시의 물 흐름방향과 동일한 수직방향으로 전기전도도를 측정하였다. 투수시험과 전기전도도 측정은 동일한 조건의 시료에 대하여 각각 2회씩 반복 실시하였으며, 각 실험의 평균값을 구하여 결과분석에 활용하였다.

시료의 전기전도도는 Agilent 4263 LCR meter를 사용하여 측정하였다. 흙의 전기전도도를 측정할 때 직류 및 매우 낮은 주파수 영역의 교류에서는 전극분극(Elec-

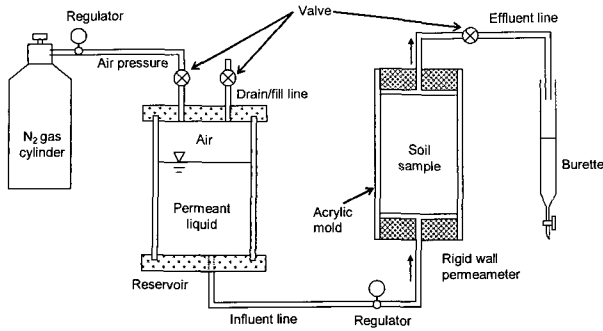
표 1. 실험에 사용된 흙의 특성

	Bentonite	Kaolinite	Soil A	Soil B
Specific gravity	2.6	2.59	2.60	2.69
Liquid limit (%)	393	62.1	-	31.1
Plasticity Index (%)	351	36.0	Non-plastic	20.0
USCS	CH	CH	SW	ML
Percentage passing sieve No.200 (<0.075mm)	100%	100%	7.6%	58.8%
Specific surface area(m <sup>2</sup> /g)	40.78	7.39	3.95	27
Cation exchange capacity(meq/100g)	90~120	3~15	-	-

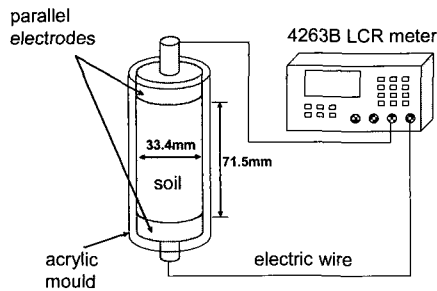
표 2. XRF 분석에 의한 흙의 구성성분

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI <sup>1)</sup>	Total
Bentonite	63.47	16.64	0.48	3.76	2.01	2.75	2.72	0.26	0.27	0.11	8.52	100.99
Kaolinite	48.16	35.66	0.18	1.01	0.25	2.93	0.78	0.61	0.01	0.02	11.36	100.97
Soil A	69.37	17.23	0.21	1.99	0.34	0.31	2.71	4.17	0.24	0.04	3.27	99.88
Soil B	66.82	16.55	1.00	6.79	0.46	0.23	0.24	1.76	0.06	0.29	6.68	100.86

<sup>1)</sup> LOI : Loss of Ignition



(a) 강성벽체 투수시험 개요도



(b) 전기전도도 측정 개요

그림 1. 투수실험 및 전기전도도 측정 개요

trode polarization)이 발현되는 것으로 알려져 있다(Rinaldi and Cuestas 2002). 이 효과는 전극이 금, 니켈, 구리와 같은 전극을 이용하여 측정하였을 때 전극의 이온들이 교환되지 않고 축적되어 콜로이드 입자의 표면에 발생하는 것과 유사한 이중층을 발생시키기 때문에 나타난다. 이러한 전극 표면의 이중층은 시료의 전기비저항치를 증가시키는 높은 저항치를 가지는 얇은 필름형태로 볼 수 있다. 반면 높은 주파수 영역에서는 double layer relaxation 효과에 의해서 전기전도도가 실제 값보다 증가되는 경향이 나타난다(Rinaldi and Cuestas, 2002). 이러한 현상을 배제하기 위하여 ASTM(1982)에서는 25~3000Hz의 주파수 범위에서 물의 전기전도도를 측정하는 것을 제안하고 있으며(Campanella and Weemees, 1990), Campanella and Weemees(1990)는 UBC 비저항콘에서 1kHz의 주파수에서 전기비저항을 측정하였다. 따라서 본 연구에서도 전극분극과 double layer relaxation 효과를 배제하기 위하여 1kHz의 주파수에서 전기전도도를 측정하였다.

### 2.2.2 주상실험

차단벽체 내에서의 오염물질 이동 모니터링을 위한 전기전도도 측정기법의 적용성을 평가하기 위하여 중

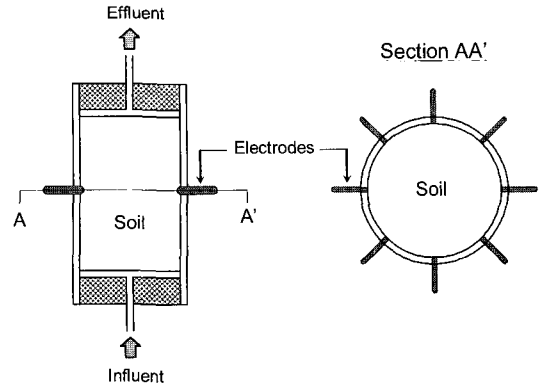


그림 2. 주상실험의 전기전도도 측정 몰드

금속 이동을 모사한 주상실험을 실시하였다. 본 실험에서는 차단벽체에서 요구되는 설계투수계수( $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  이하)를 만족하는 조건에 대해 실험을 수행하기 위하여 Soil A에 벤토나이트 함량이 5%가 되도록 혼합한 다짐시편을 대상으로 하였다. 또한, 벤토나이트가 포함된 시료에서 나타나는 중금속 이동 특성과 전기전도도 차이를 비교할 목적으로 Soil A에 대한 실험도 병행하여 실시하였다. 주상실험은 그림 1(a)와 같은 방식으로 수행되었으며, 다짐시편은 투수시험과 동일한 규격의 몰드와 방법으로 제작되었다. 다만, 중금속 이동에 따른 전기전도도의 변화를 시료 중간부의 단면에 대해 측정하기 위하여 그림 2와 같이 몰드의 중간부에 방사형으로 8개의 전극봉이 설치된 몰드를 제작하여 사용하였다.

전기전도도 측정시 다짐시편의 불균질에 의한 영향을 배제하고자 중금속 용액을 주입하기 전에 8개의 전극봉에 대하여 조합을 변화시켜가며 전기전도도를 측정하고 비교적 일정한 값을 나타내는 조합들을 선정한 후, 이들 조합들에 대하여 오염물질을 주입한 이후 일정한 시간간격으로 측정하고 평균값을 구하여 전기전도도의 변화를 분석하였다.

주상실험은 일정한 투수계수가 측정될 때까지 수돗물을 주입하였으며 포화상태로 판단된 후 주입용액을 중금속 희석용액으로 바꾸어 주입하였다. 오염용액으로는 카드뮴(Cd)을 50mg/L와 100mg/L의 농도로 조제하여 실험에 사용하였다. 오염물질 주입 후 일정한 시간간격으로 시료 단면에서의 전기전도도 변화를 측정하였으며 유출수를 샘플링하여 유출수에 존재하는 카드뮴의 농도를 원자흡광광도계(Atomic Absorption Spectroscopy)를 이용하여 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도 변화

흙-벤토나이트 혼합 다짐시편의 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도의 변화를 그림 3에 도시하였다. 그림 3에 의하면 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 전기전도도가 선형적으로 증가하는 경향을 뚜렷하게 나타내었다. 흙-벤토나이트 혼합 다짐시편에서 벤토나이트 함량과 전기전도도의 상관관계는 식 (1)과 같은 선형관계식으로 표현될 수 있으며, 표 3에 제시된 바와 같이 높은 상관성을 갖는 것을 알 수 있다.

$$\sigma_s = a C_B + b \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_s$ 는 흙-벤토나이트 혼합다짐시편의 전기전도도(mS/m),  $C_B$ 는 벤토나이트 함량(%),  $a$ 와  $b$ 는 상수를 각각 나타낸다.

벤토나이트 함량에 따른 전기전도도의 증가는 두가지 요인으로 설명될 수 있다. 첫째는 벤토나이트에서 용해된 이온성분들에 의한 용액의 전기전도도 증가이다. 유동주 등(2006)은 벤토나이트를 탈이온수에 넣고 충분히 교반시킨 후 용액 중에 존재하는 양이온 성분들의 농도를 분석한 바 있다. 벤토나이트 교반 후 용액에 용해된 이온 성분과 농도를 살펴보면,  $\text{Na}^+$ 이온의 농도는 24~37meq/100g로 카올리나이트에서 용해되어 나온 농도인 0.9~1.3meq/100g보다 약 30배 정도 큰값을 나타낸 것을 비롯하여 다른 양이온 성분들도 다른 종류의 흙에 비해 훨씬 많은 이온들이 용해되어 나온다는 것을 제시하였다(유동주 등 2006). 흙 입자에서 간극수 상으로 용해된 이온성분은 간극수의 전기전도도를 증가시키기 때문에 결국 흙 시편의 전기전도도는 증가하게 된다. 둘째는 벤토나이트의 흡착수 층에서 발생하는 표면전도 효과에 의해 나타나는 현상으로 해석될 수 있다. 점토 입자의 경우에는 흙 입자 표면의 흡착수 층을 따라 전기전도가 발생하는 표면전도(surface conduction) 효과에 의해 전도성을 가지는 것으로 알려져 있다(오명학 등, 2004; Yoon et al. 2002). 벤토나이트는 비표면적이 넓어 표면전도에 기여할 수 있는 흡착수의 양이 다른 점토에 비해 상대적으로 많기 때문에 전기전도도를 크게 증가시키게 된다.

그림 3에서 벤토나이트와 카올리나이트의 함량 변화에 따른 전기전도도 변화 경향을 비교해 볼 수 있다. 이

때 시료는 다른 점토성분의 영향을 배제하기 위하여 성형시 혼합토 Soil A에서 200번체에 잔류된 시료만을 혼합하였다. 그림 3에 의하면 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도 변화에 비하여 카올리나이트 함량에 따른 전기전도도는 약간 증가하는 경향은 나타나지만, 그 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 두 점토성분에 대한 이러한 용해되어 나온 이온의 양과 비표면적의 상대적인 차이로 인해 전기전도도 변화 정도에 차이가 나타나는 것으로 볼 수 있다.

그림 3과 표 3에서 벤토나이트와 혼합되는 흙의 종류에 따른 전기전도도의 변화를 살펴보면, Soil A보다 Soil B의 경우 y절편이 더 크기 때문에 모든 벤토나이트 함량에 대하여 더 높은 전기전도도를 나타내며, 기울기에는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 Soil B의 경우 실트 및 점토 성분이 58.8%로 Soil A에 비해 상대적으로 많이 포함되어 있기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 즉 혼합토 상에 존재하는 점토 입자의 표면전도 효과에 의한 전기전도성 증대에 의해 나타나는 결과로 해석될 수 있다.

실험결과에 의하면 벤토나이트와 혼합되는 흙의 종류가 다르더라도 혼합토에 존재하는 점토성분의 양에 따라 y절편의 차이는 있으나, 벤토나이트 함량에 따른

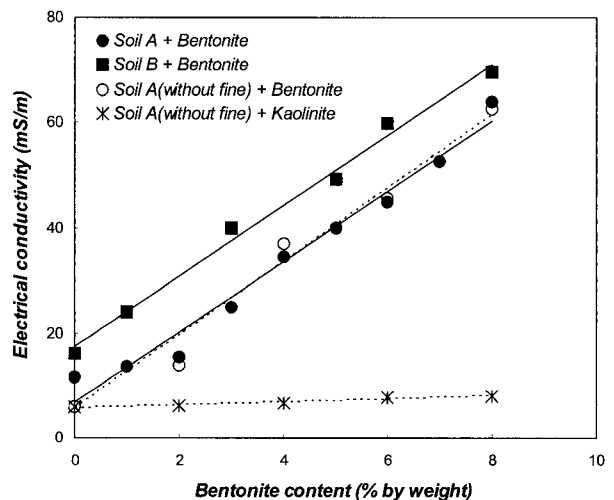


그림 3. 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도 변화

표 3. 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도 변화에 대한 회귀분석 결과

Specimen	Regression equation	R <sup>2</sup>
Soil A + Bentonite	$\sigma_s = 6.69C_B + 6.7$	0.9748
Soil B + Bentonite	$\sigma_s = 6.71C_B + 4.3$	0.9923
Soil A(without fine) + Bentonite	$\sigma_s = 6.95C_B + 5.7$	0.9764
Soil A(without fine) + Kaolinite	$\sigma_s = 0.28C_B + 5.7$	0.9031

전기전도도 증가의 기울기는 거의 변화가 없었으며, 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도 변화는 다른 점토성분에 비하여 상대적으로 매우 크기 때문에 전기전도도 측정을 통한 흙-벤토나이트 혼합 다짐 시료에서의 벤토나이트 함량 평가가 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.2 투수계수와 전기전도도 관계

오염물질 차단시스템에서 중요한 설계인자 중 하나는 투수계수로서 일반적으로  $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$  이하의 투수계수를 확보하여야 한다. 투수계수는 벤토나이트와 함께 혼합되는 흙의 종류, 점토함량, 입도분포 등과 같은 특성에 의해서도 영향을 받지만, 벤토나이트 함량에 의해 가장 크게 영향을 받기 때문에 벤토나이트 함량이 주요 설계인자가 된다(유동주 등 2006).

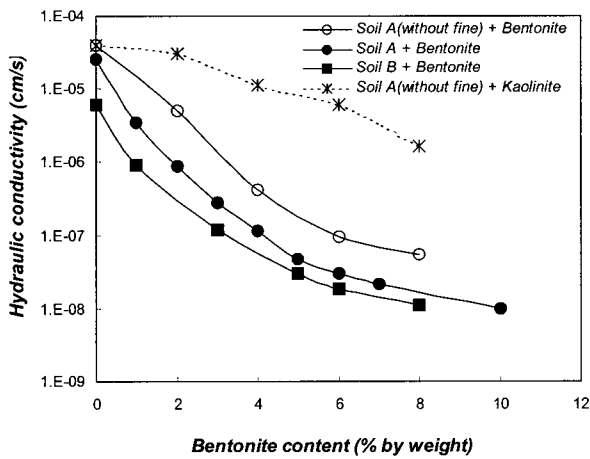


그림 4. 벤토나이트 함량에 따른 투수계수 변화

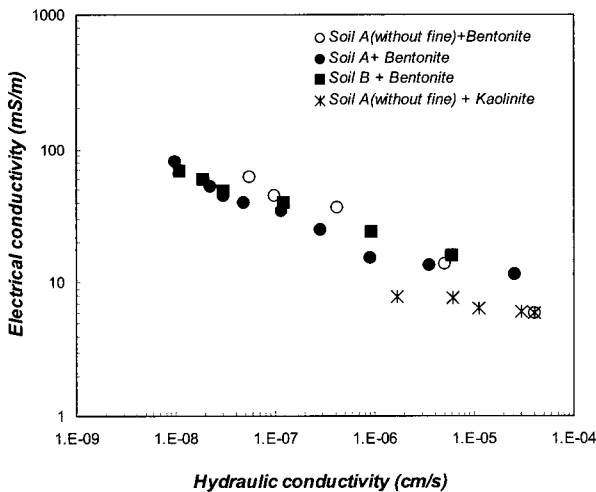


그림 5. 투수계수와 전기전도도와의 관계

그림 4는 벤토나이트 함량에 따른 다짐시편의 투수계수 변화를 나타낸 것이다. 또한, 투수실험을 수행한 시편에 대해 전기전도도를 측정하여 투수계수와 전기전도도와의 상관성을 그림 5에 도시하였다. 실험결과에 의하면 카올리나이트를 혼합한 시료에서 카올리나이트 함량이 0%에서 8%로 증가하면서 투수계수가  $4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 에서  $1.6 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 로 감소하였지만, 전기전도도는 큰 변화를 나타내지 않았다. 반면, 벤토나이트가 혼합된 경우에는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 투수계수가 뚜렷하게 감소하고, 전기전도도는 증가하는 경향을 나타내기 때문에 투수계수와 전기전도도는 반비례관계를 나타내었다.

그림 5에 나타난 투수계수와 전기전도도의 이러한 상관관계는 벤토나이트 함량 변화에 따른 투수계수 변화와 전기전도도 변화에 대한 각각의 상관성으로부터 종속적으로 도출되는 결과로 보는 것이 타당하며, 벤토나이트 함량이 변화되어 시료의 조성이 바뀐 것이므로 투수계수와 전기전도도의 독립적인 관계로 일반화하여 규정하기에는 어려움이 있다. 즉, 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 투수계수가 감소하며, 전기전도도는 증가되므로 이러한 관계에 의해 투수계수와 전기전도도 사이의 관계가 도출되는 것으로 사료된다. 투수계수와 전기전도도 사이의 독립적인 관계를 도출하기 위해서는 동일한 시료에서 투수계수가 변화되는 경우에 대한 실험이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구의 결과에 의하면 벤토나이트를 혼합하여 투수성을 조절하는 경우에는 벤토나이트 함량에 따른 관계로부터 투수성에 대한 간접적인 모니터링을 수행하는 것은 가능할 것으로 판단된다.

### 3.3 중금속 이동에 의한 전기전도도 변화

전기전도도 측정을 통하여 차단벽체를 통한 오염물질의 이동에 대한 모니터링 가능성을 평가하기 위하여 수행한 주상실험의 결과를 그림 6과 그림 7에 제시하였다. 시편의 단면에서 측정된 전기전도도의 변화를 파과 곡선으로 도시하기 위하여 식 (2)에 제시된 바와 같이 상대전기전도도(relative electrical conductivity) 개념을 적용하였다.

$$\text{Relative electrical conductivity} = \frac{EC_{(t)} - EC_0}{EC_{(f)} - EC_0} \quad (2)$$

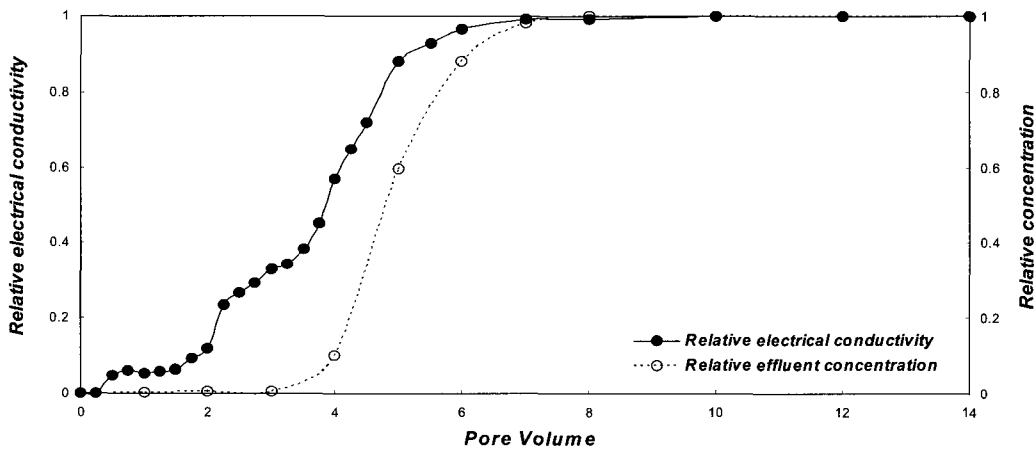
여기서,  $EC_{\theta}$ 는 임의 시간에 측정된 다짐시편의 전기전도도,  $EC_0$ 는 오염물질 주입전 몰드내 시료의 초기 전기전도도,  $EC_{\theta}$ 는 파과된 이후의 전기전도도를 나타낸다.

그림 6은 벤토나이트가 포함되지 않은 화강풍화토 시료에 대한 실험결과이며, 그림 7은 벤토나이트를 5% 혼합하여 초기 투수계수가 약  $5 \times 10^{-8}$  cm/s를 나타내어 차단벽체의 투수계수 조건을 만족하는 조건의 시료에 대해 실험을 수행한 것이다. 그림 7에 제시된 실험결과는 10개월에 걸쳐 지속적으로 실험을 수행하여 측정함으로써 낮은 투수계수와 벤토나이트의 중금속에 대한 흡착능으로 인하여 약 190 pore volume에서 파과가 나타났다.

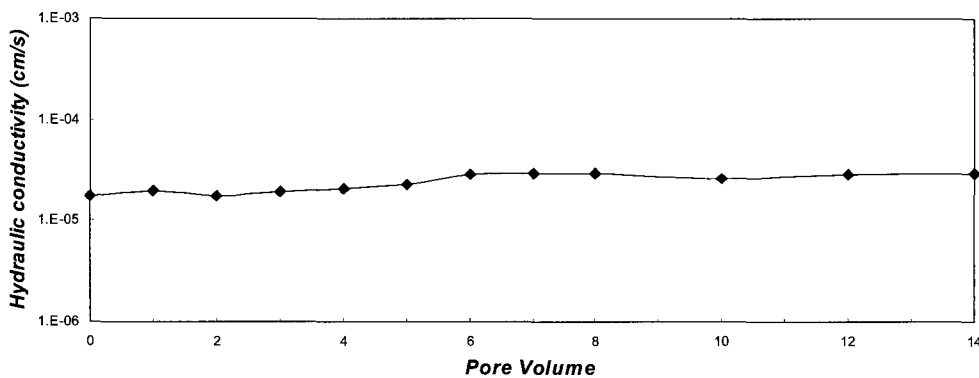
그림 6(b)에서 벤토나이트가 포함되지 않은 다짐시편의 경우 중금속 용액이 주입되는 동안 투수계수의 변화가 거의 발생하지 않았다. 즉, 반응성이 거의 없는 사질토지반의 경우 투수계수의 변화가 거의 발생하지 않았다. 그러나 그림 7에서 볼 수 있듯이 5%의 벤토나이트가 포함된 다짐시편의 경우에는 약 10 pore-volume 이후

에 급격한 증가양상이 확인되었으며 이는 전기전도도의 증가시점과 매우 유사하게 나타났다. 일반적으로 나트륨벤토나이트가 화학물질을 포함하고 있는 물과 접촉했을 때 투수계수의 증가가 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다(Michell et al., 1993; Gleason et al. 1997). 이는 양이온의 농도가 증가할 때 간극수의 농도가 증가함에 따라 발생한 자유에너지의 차이에 의해서 판상층 사이의 물분자들이 층 바깥으로 이동함에 따라 층간격이 감소되기 때문이다(McBride, 1994). 나트륨 벤토나이트를 포함한 주상실험에서 확인된 전기전도도와 투수계수의 증가 시점에서의 유사한 변화양상을 통해 두 인자의 간접적인 상관성을 유추할 수 있다. 그러나 투수계수의 증가가 전기전도도의 직접적인 변화요인으로 판단하기는 무리가 있으며 투수계수의 변화를 평가하는 데 있어 전기전도도를 기준인자로 활용하기 위해서는 동일한 시료에 대해 투수계수를 조절한 다양한 실험이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

그림 6(a)와 7(a)에 제시된 파과곡선은 카드뮴 성분이

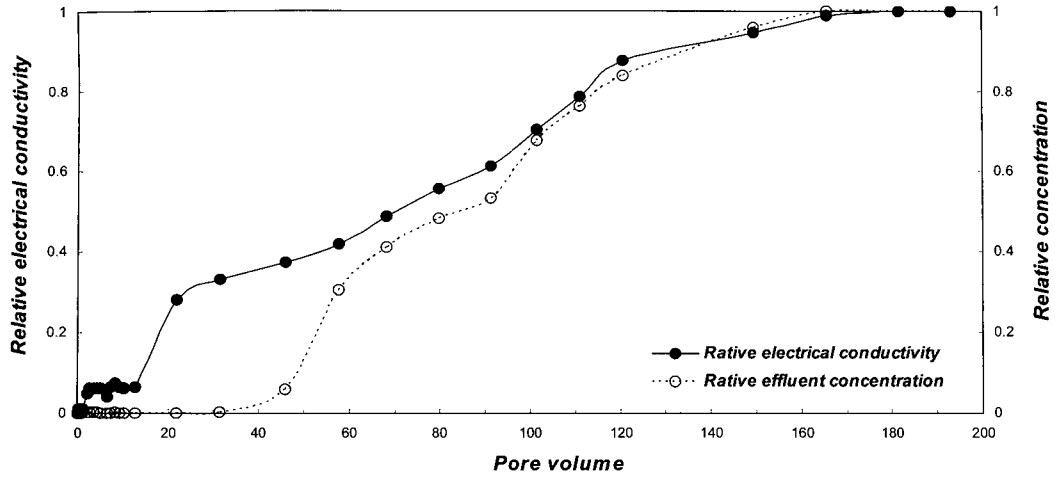


(a) 파과곡선

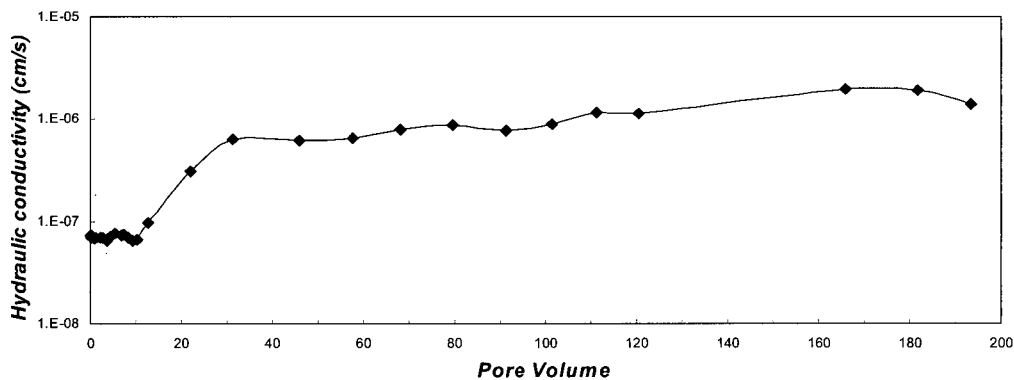


(b) 투수계수 변화

그림 6. Soil A의 카드뮴 파과곡선 및 투수계수 변화



(a) 파과곡선



(b) 투수계수 변화

그림 7. 흙-벤토나이트 혼합 다짐 시편에 대한 카드뮴 파과곡선 및 투수계수 변화

다짐시편을 완전히 통과하여 유출수에서 검출되기 이전에 전기전도도를 측정하는 단면에서 그 단면을 통과하는 카드뮴의 이동을 감지할 수 있음을 나타낸다. 기존의 모니터링에서는 차단벽체 외부의 지하수질에 대한 모니터링을 통하여 차단벽체를 통한 오염물질의 누출 여부를 조사하게 된다. 그러나, 차단벽체의 특정 단면에서 전기전도도를 모니터링하는 기법을 적용하면 오염물질이 벽체를 완전히 통과하기 전에 차단벽체를 통한 오염물질의 이동정도를 파악할 수 있게 되므로 오염물질의 누출을 사전에 방지하기 위한 보수 및 대책수립에 유용할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 벤토나이트가 혼합되는 흙-벤토나이트와 같은 차단벽체에 대한 전기전도도 모니터링의 적용성을 평가하기 위하여 투수실험과 주상실험을 수

행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 흙-벤토나이트 혼합 다짐시편의 전기전도도는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 벤토나이트에서 간극수로 용해된 이온성분과 벤토나이트의 흡착수 층을 통한 표면전도효과에 의하여 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 차단벽체의 주요 설계인자인 벤토나이트 함량을 전기전도도 측정에 의하여 효과적으로 조사할 수 있음을 나타낸다.
- (2) 흙-벤토나이트 차단벽체의 투수계수와 전기전도도는 반비례하는 경향을 나타내었다. 그러나, 이러한 결과는 벤토나이트 함량과 전기전도도의 상관관계로 인해 나타나는 부수적인 결과로 해석될 수 있으므로 투수계수와 전기전도도가 독립적인 상관관계를 갖는다고 보기에는 어려움이 있다. 다만, 차단벽체에서 벤토나이트 함량이 투수계수에 미치는 영향이 크기 때문에 벤토나이트 함량과 전기전도도와의



상관관계에 기초해서 간접적으로 투수성을 모니터링하는 방식으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

- (3) 차단벽체 단면에 대한 전기전도도를 측정된 결과 시편을 완전히 통과한 유출수의 성분분석결과 얻게 되는 파과곡선에 비해 전기전도도 측정단면에서 오염물질의 이동정도를 평가할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 전기전도도 측정기법을 적용하여 차단벽체 단면을 지속적으로 모니터링함으로써 오염물질이 차단벽체 통과여부를 효과적으로 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 공학연구소의 지원 및 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참고 문헌

1. 오명학, 이기호, 박준범 (2004), "함수비와 간극수 오염이 불포화 사질토의 전기비저항에 미치는 영향", *대한토목학회 논문집*, 제 24권, 제1C호, pp.27-34.
2. 유동주, 오명학, 김용성, 박준범 (2006), "벤토나이트 슬러리의 전기적 특성에 대한 영향인자 분석", *한국지반공학학회 논문집*, 제 22권, 제10호, pp.21-32.
3. 정하익 (1998), *지반환경공학*, 도서출판 유림.
4. Abu-Hsaasnein, Z. S., Benson, C. H., Wang, X., and Blotz, L. R. (1996), "Determining bentonite content in soil-bentonite mixtures using electrical conductivity", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.

- 19, No.1, pp.51-57.
5. Alther, G. R. (1982), "The role of bentonite in soil dealing application", *Bull. Assn. of Engrg., Geologists*, 19, pp.201-409.
6. Appolonia, D., Christoper, R. R. (1979), "Soil-bentonite slurry trench cut-off walls, *Geotechnical Exhibition and Technical Conference*, Chicago, Illinois.
7. ASTM (1982), "Standard test methods for electrical conductivity and resistivity of water", ASTM D1125-82, Pennsylvania, pp.149-156.
8. Campanella, R. G. and Weemees, I. (1990), "Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies", *Canadian Geotechnical Journal*, 27, pp.557-567.
9. Daniel, D. E. (1993), *Clay liners, Geotechnical practice for waste disposal*, Daniel, D. E., Ed., Chapman & Hall, London, England, pp.137-163.
10. 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*, Vol. 123, No. 5, pp.438-445.
11. Kenney, T., Van Veen, W., Swaloo, M., and Sungaila, M. (1992), "Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, pp.364-374.
12. McBride, M. (1994), *Environmental Chemistry of Soils*, Oxford University Press, New York.
13. Mitchell, J. K. (1993), *Fundamentals of soil behavior*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, N.Y.
14. Mitchell, J. K., Bary, J. D., and Mitchell, R. A. (1995), "Material interactions in solid waste landfills, *Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication No. 46*, ASCE, pp.568-590.
15. Rinaldi, V. A. and Cuestas, G. A. (2002), "Ohmic conductivity of a compacted silty clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128, pp.824-835.
16. Yoon, G. L., Oh, M. H., and Park, J. B. (2002), "Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone penetrometer", *Environmental Geology*, Vol.43, No.1-2, pp.18-28.

(접수일자 2007. 5. 10, 심사완료일 2007. 7. 19)