

벤토나이트 슬러리의 전기적 특성에 대한 영향인자 분석

Factors Affecting the Electrical Properties of Bentonite Slurry

유 동 주¹ Yoo, Dong-Ju

오 명 학² Oh, Myoung-Hak

김 용 성³ Kim, Yong-Sung

박 준 범⁴ Park, Jun-Boum

Abstract

Factors affecting the electrical properties of bentonite slurry were identified and electric conduction mechanism in slurry was examined. Electrical conductivity of bentonite and soil-bentonite slurry linearly increases with the bentonite content. Test result indicated that the change in electrical conductivity of slurry was mainly caused by dissolved cations from bentonite particles. The relationship between electrical conductivity and bentonite content was affected by the initial electrical conductivity of slurry solution and fine content in soil-bentonite mixture. Such influences were evaluated and the calibrated relationships were suggested. Based on the suggested relationship between electrical conductivity and bentonite content, bentonite content in various bentonite and soil-bentonite slurry can be quantitatively evaluated by using electrical conductivity measurement method.

요 지

본 연구에서는 벤토나이트 슬러리의 전기적 특성에 대한 영향인자와 전기전도 메커니즘을 규명하고자 하였다. 벤토나이트 및 흙-벤토나이트 슬러리의 전기전도도는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 뚜렷한 선형적 증가 경향을 나타내어 전기전도도 측정방법이 슬러리에서의 벤토나이트 함량 평가에 적용될 수 있음을 확인하였다. 이때 슬러리의 전기전도도 변화는 주로 벤토나이트에 존재하는 양이온이 용해되어 용액의 전기전도도를 변화시키기 때문에 나타나는 결과로 확인되었다. 슬러리에서 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도의 선형적 관계는 용액의 초기 전기전도도와 세립토 함량에 영향을 받는 것으로 나타났으며 이들의 영향을 고려하여 슬러리에서 벤토나이트 함량과 전기전도도의 관계식을 도출하였다. 본 연구에서 제시된 관계식을 토대로 다양한 조건의 벤토나이트 및 흙-벤토나이트 슬러리에서 전기전도도 측정을 통하여 벤토나이트 함량에 대한 정량적인 평가가 가능할 것으로 기대된다.

Keywords : Bentonite, Cation, Electrical conductivity, Slurry

1. 서 론

벤토나이트는 스멕타이트(smectite) 계열의 몬트모릴로나이트(montmorillonite)가 주성분으로, 물과 반응시 체적팽창율(volumetric extension rate)이 높기 때문에

저투수성 확보를 목적으로 하는 차수벽 시공시 혼합재료로 널리 사용되고 있다. 또한 벤토나이트는 비표면적과 양이온교환능(CEC, cation exchange capacity)이 매우 커서 오염물질에 대한 흡착능이 우수하다. 따라서 저투수성의 확보와 오염물질의 이동 억제를 목적으

1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 연구원 (Member, Research Assistant, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ., jinbo75@snu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국해양연구원 연안개발연구본부 연수연구원 (Member, Post-doc., Coastal Eng. Research Dept., Korea Ocean Research & Development Institute, omyhak@kordi.re.kr)

3 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ., escape2@snu.ac.kr)

4 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ., junbpark@snu.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

로 하는 폐기물 매립장의 라이너나 복토시스템의 다짐 차수재와 흙-벤토나이트 혹은 시멘트-벤토나이트 슬러리월과 같은 연직 차단벽체 등 오염물질 차단시스템에도 많이 적용되고 있다(Alther, 1982; Daniel, 1993; D'appolonia, 1979; Mitchell et al., 1995).

이와 같은 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, 차수재료 내에 분포하는 벤토나이트 함량에 의해 가장 크게 영향을 받는다. 따라서 계획된 투수계수를 확보하기 위해서는 차단 시스템의 시공 시 설계에서 산정된 벤토나이트 함량의 확보 여부를 확인하고 시공과정 중에 벤토나이트 함량 변화를 모니터링 하는 것이 필요하다.

벤토나이트 함량을 산출하기 위해서 현재까지 많이 사용되는 방법은 메틸렌 블루테스트이다(Kenney et al., 1992). 이 방법은 벤토나이트에 흡착되는 메틸렌블루의 양을 측정하여 벤토나이트를 정량하는 것이다. 그러나 측정시간이 오래 걸리고, 많은 양의 시료에 대해서 실험이 어려우며 또한 실험자의 주관적인 판단이 결과에 크게 영향을 줄 수 있다는 단점이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위한 하나의 대안으로 전기전도도를 측정하는 방법이 제안된 바 있다(Abu-Hassanein et al., 1996). 전기적 방법은 측정이 간단하고 빠르며 경제적이고, 메틸렌 블루테스트에 비해 큰 시료에 대해서도 적용이 가능하다.

Abu-Hassanein 등(1996)은 벤토나이트 및 흙 벤토나이트 혼합토를 탈 이온수와 혼합하여 슬러리를 만든 후 전도도를 측정하여 슬러리의 전기전도도가 벤토나이트 함량에 크게 영향을 받는 것을 보였으며, 이를 토대로 전기전도도 측정기법의 적용 가능성을 제시하였다. 그러나 슬러리에서 발생하는 전기전도 메커니즘에 대해 명확히 규명하지 못하였으며, 온도 이외의 다른 조건의 변화에 대해서는 고려하지 못하였다. 벤토나이트 함량을 정량적으로 평가하는데 전기전도도 측정기법을 효과적으로 적용하기 위해서는 슬러리의 전기전도도에 영향을 주는 인자들을 명확히 규명하고, 이를 정량적으로 평가해야 한다. 따라서 본 연구의 목적은 (1) 벤토나이트 및 흙-벤토나이트 슬러리에서 벤토나이트 함량과 전기전도도와의 상관관계를 확인하고 (2) 용액의 전기전도도 및 이온농도 분석을 통해 슬러리에서의 전기전

도 메커니즘을 규명하며, 또한 (3) 슬러리 내에 존재하는 벤토나이트 이외의 점토입자 등 세립분 함량과 용액의 초기 전기전도도가 슬러리의 전기전도도 측정결과에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

2. 전기전도 기작

흙에서의 전기전도는 크게 지반을 구성하고 있는 흙이나 암석의 전기적 특성과 간극수의 전기적 특성에 따라서 달라질 수 있다. 일반적으로 건조한 흙 광물에서 전기전도는 결정체 격자에 존재하는 전자나 이온의 이동에 의해 발생한다. 그러나 흙에서 흔히 발견되는 광물에서는 이동성 전자의 수와 이온들의 이동도가 모두 매우 작다. 그러므로 건조된 흙의 전도도는 이온의 농도가 낮은 상태의 간극 유체의 전기전도도보다도 훨씬 작게 나타난다. 그리고 습윤 상태 흙에서 전기전도는 연결된 간극유체 안에서 발생하며 매우 큰 전도성을 갖는다. 낮은 전도성의 간극유체를 포함하고 있는 비표면적이 큰 흙의 경우를 제외 하면, 간극유체는 흙에서 발생하는 전기전도의 지배적인 경로로 알려져 있다(Curtis and Narayanan, 1998; Saarenketo, 1998; Yoon et al., 2002). 간극유체에서의 전기전도는 미시적으로 볼 때, 이온의 이동도에 의해 발생하며, 수용성 전해질에서의 전도와 일치한다. 그러나 흙에서 간극유체를 통한 전체 전기적 흐름은 입자의 간극률과 입자 골격, 그리고 포화도와 굴곡도(tortuosity)에 영향을 받는다.

포화된 흙을 통한 전류의 흐름은 그림 1과 같은 세 가지 경로를 통하여 흐르게 된다. (1) 순수한 간극수 만에 의해 형성되는 경로, (2) 간극수와 흙 입자를 연속적으로 연결하는 경로, (3) 흙 입자가 서로 연결되어 이루는 경로이다(Smith and Arulanandan, 1981; 오명학 등, 2004).

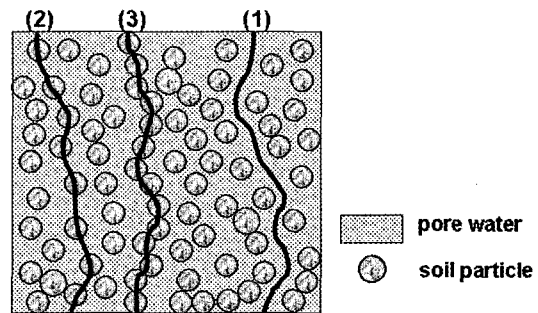


그림 1. 포화된 흙에서 전류흐름경로(Smith and Arulanandan, 1981)

간극수에서의 전기전도는 전해질용액에서의 전류흐름으로 해석될 수 있다. 용액의 전기전도도는 용액 속에 존재하는 이온수와 종류에 따라 달라진다(Sawyer and McCarty, 1978). 용액에서의 전기전도도 값은 용액 속에 존재하는 이온의 이동도에 의해 결정되는데 이온의 이동도와 내부 미소규모 인자를 이용하여 전해질의 전기전도도는 식 (1)과 같이 도출될 수 있다. 만일 전해질이 여러 종류의 이온성분으로 완전히 이온화되었다면, 그 전해질의 몰 전도도(σ_{el})는 각각의 이온에 대한 몰 전도도의 합이 되며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Reiger, 1987; Klein 1999; Santamarina et al., 2001).

$$\sigma_{el} = dz|uF = cA \quad (1)$$

$$\sigma_{el} = F \sum_i c_i z_i u_i = \sum_i c_i A_i \quad (2)$$

여기서, c 는 몰 농도[mol/L], z 는 이온의 이온가수(valence), F 는 패러데이(Faraday) 상수(=96485.3C/mol), A 는 몰당 전도도[S·m²/mol]를 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)는 이온과 이온사이의 상호작용을 무시할 수 있는 낮은 농도에서 잘 적용된다(Klein, 1999).

흙 입자의 경우 일반적으로 사질토입자는 비전도성인 것으로 알려져 있으므로 사질토 지반의 경우 흙 입자를 통한 전류의 이동은 간극수에 의해 전달되는 전류에 비해 매우 작으므로 무시될 수 있다. 따라서 지반 내에서의 전기전도도 값에는 세 가지 경로 중에서 간극수에 의해 형성되는 전류전도 경로에 의한 효과가 지배적으로 나타난다. 점토입자는 표면전도 효과에 의해 전도성을 가지는 것으로 알려져 있다. 여기서 표면전도(surface conduction)는 흙 입자 표면의 흡착수 층을 따라 발생하는 전기전도를 나타낸다. 따라서 점토질 흙에서는 그림 1에 제시된 바와 같은 세 가지 경로를 통해 전류가 흐르게 된다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1. 실험재료

벤토나이트는 층간에 존재하는 양이온의 종류에 따라 칼슘(Ca)계 벤토나이트와 나트륨(Na)계 벤토나이트로 구분된다. 나트륨계 벤토나이트는 팽윤성이 양호하며 물 흡수시 겔(gel) 생성력이 우수한 분산형 점토이고,

칼슘계 벤토나이트는 팽윤성과 겔 생성력이 상대적으로 저조한 응집형 점토이다(Van Olphen, 1977). 나트륨계 벤토나이트는 칼슘계 벤토나이트에 비해 전단강도는 다소 작으나, 저투수성의 확보가 용이하고, 오염물질에 대한 흡착력이 높기 때문에 폐기물매립지의 다짐 차수재나 슬러리월 등의 차단시스템에서는 나트륨계 벤토나이트가 주로 활용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 지반환경공학적인 사용빈도가 높은 나트륨계 벤토나이트에 대해 실험을 수행하였다. 점토입자의 종류에 따른 슬러리의 전기적 특성을 비교분석하기 위하여 카올리나이트에 대한 실험을 병행하였다. 또한 흙-벤토나이트 혼합토에 대한 실험을 위하여 본 연구에서는 세 가지 종류의 흙을 사용하였다. 사질토로서 주문진 표준사를 사용하였으며, 서울대 구내에서 채취한 흙(이후 'Soil A'로 표기)과 매립지 조성공사현장에서 채취한 원지반 흙(이후 'Soil B'로 표기)을 사용하였다.

본 실험에 사용된 모든 흙의 입도분포곡선은 그림 2와 같으며 이들의 기본 물성치를 표 1에 정리하였다. 그리고 실험에 사용된 모든 흙의 화학구성성분을 조사하기 위하여 X-Ray 형광분석(X-Ray fluorescence spectrometer)을 수행하였고 그 결과를 표 2에 나타내었다. 모든 흙 시료는 105℃에서 24시간 이상 노건조하여 사용하였고, Soil A와 Soil B의 경우에는 10번체를 통과한 시료를 사용하였다.

흙-벤토나이트 슬러리에서 흙에 포함된 세립분 함량이 슬러리의 전기전도도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Soil A를 대상으로 200번체에 잔류한 시료와 통과한 시료를 분리한 후 다양한 세립분 함량이 될 수 있도록 세립분 함량을 조절하여 시료를 준비하였다. 또한 200번체에 잔류한 Soil A 시료와 카올리나이트를 동일한 방법으로 혼합하여 시료를 준비하였다. 본 연구에서

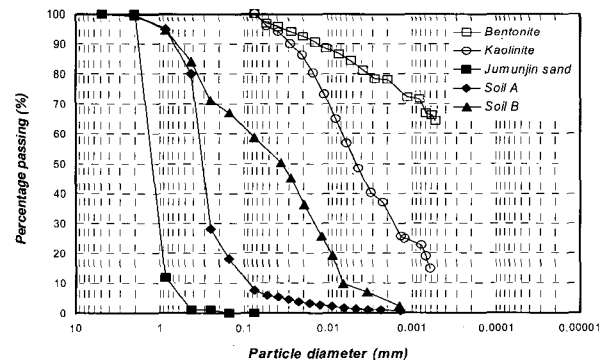


그림 2. 실험에 사용된 흙의 입도분포곡선

표 1. 실험에 사용된 흙의 특성

	Bentonite	Kaolinite	Jumunjin Sand	Soil A	Soil B
Specific gravity	2.6	2.59	2.64	2.60	2.69
Liquid limit(%)	393	62.1	-	-	31.1
Plasticity Index(%)	351	36.0	NP ¹⁾	NP ¹⁾	20
USCS	CH	CH	SP	SW	ML
Percentage passing sieve No.200(<0.075mm)	100%	100%	0%	7.6%	58.8%
Specific surface area(m ² /g)	40.78	7.39	3	3.95	27
Cation exchange capacity(meq/100g)	90~120	3~15	-	-	-

¹⁾ NP : Non-plastic

표 2. 실험에 사용된 흙에 대한 X-선 회절분석 결과

	Bentonite	Kaolinite	Jumunjin sand	Soil A	Soil B
SiO ₂	63.47	48.16	85.78	69.37	66.82
Al ₂ O ₃	16.64	35.66	6.31	17.23	16.55
TiO ₂	0.48	0.18	0.08	0.21	1.00
Fe ₂ O ₃	3.76	1.01	0.31	1.99	6.79
MgO	2.01	0.25	0.03	0.34	0.46
CaO	2.75	2.93	0.28	0.31	0.23
Na ₂ O	2.72	0.78	0.79	2.71	0.24
K ₂ O	0.26	0.61	3.56	4.17	1.76
MnO	0.27	0.01	0.01	0.24	0.06
P ₂ O ₅	0.11	0.02	0.01	0.04	0.29
LOI ¹⁾	8.52	11.36	2.57	3.27	6.68
Total	100.99	100.97	99.74	99.88	100.86

* unit : weight %

¹⁾ LOI : Loss of Ignition

표 3. 실험에 사용된 흙의 구성[unit : % by weight]

Symbol	Soil A		Kaolinite
	> # 200	< # 200(fine)	
Soil A_F 0	100	0	-
Soil A_F 5	95	5	-
Soil A_F 10	90	10	-
Soil A_F 20	80	20	-
Soil A_F 30	70	30	-
Soil A_K 5	95	-	5
Soil A_K 10	90	-	10
Soil A_K 20	80	-	20
Soil A_K 30	70	-	30

여기서, F는 세립토(fine), K는 카올리나이트를 나타낸다.

세립토 함량의 영향평가에 사용된 시료의 혼합조건은 표 3과 같다.

슬러리를 만들기 위해 기본적으로 탈이온수(Deionized water)를 사용하였다. 그리고 슬러리에 사용되는 용액의 전기전도도가 슬러리에 있는 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도의 변화에 미치는 영향을 평가하기 위

하여, 0.5, 1, 2, 5, 10mM농도의 KCl용액을 이용하여 실험을 수행하였다. KCl용액은 K⁺와 Cl⁻의 높은 이온화 경향으로 인해 용액상에서 해리가 잘 되므로 전기전도도 변화를 효율적으로 유발할 수 있다. 또한 양이온과 음이온 사이의 이동도의 차이가 크게 되면 전하불균형이 초래되어 액간접촉전위(liquid junction potential)가 발생하게 되는데 K⁺와 Cl⁻의 이온 이동도는 서로 유사하기 때문에 이동도차에 의해 발생하는 전위오차를 최소화할 수 있다.

3.2 실험방법

벤토나이트 함량에 따른 벤토나이트 및 흙 벤토나이트 슬러리의 전기전도도를 평가하기 위하여 흙 시료를 비이커에 넣고 탈이온수(Deionized water)를 첨가하여 슬러리를 조제하였다. 이때 슬러리에 멩쳐진 벤토나이트 덩어리가 없어질 때까지 충분히 교반하였다. 벤토나이트와 물이 접촉하여 수화되는 시간을 고려하여 교반

시간을 결정하기 위하여 본 실험에서는 슬러리의 교반 시간에 따른 전기전도도의 변화를 평가하였다. 교반시간을 달리하여 전기전도도를 측정된 결과 그림 3에 제시된 바와 같이 10분 이상 경과한 후에는 시간에 따른 전기전도도의 변화가 거의 없는 것을 확인하였다. 따라서 본 실험에서는 모든 슬러리 제조시 교반시간이 최소 10분이상이 되도록 하였다.

슬러리를 교반 시킨 후, 전기전도도 측정기(Orion 550A, USA)를 사용하여 슬러리의 전기전도도를 측정하였다. 슬러리의 전기전도도를 측정 후, 슬러리를 필터링(membrane filters-pore size: 0.45 μ m)하여 흙 입자를 거른 용액의 전기전도도를 측정하여 용액 자체의 전기전도도를 평가하였고, ICP-MS(Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometer)와 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometer) 분석을 통하여 용액 상에 용해된 주요 양이온 성분의 농도를 분석하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 점토슬러리의 전기전도도

슬러리상태에서 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도의 변화를 그림 4에 도시하였다. 이 결과를 통해 벤토나이트 함량이 높아짐에 따라 벤토나이트 슬러리의 전기전도도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 벤토나이트 함량과 벤토나이트 슬러리의 전기전도도와는 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 벤토나이트 슬러리의 전기전도도와 벤토나이트 함량 사이의 관계에 대해 회귀분석을 수행하였고 얻어진 상관관계 식 (3)과 결정계수 R²값은 다음과 같다.

$$\sigma_s = 1.7 + 2.3C_B \quad C_B \geq 1g/L \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9982$$

여기서, σ_s 는 슬러리의 전기전도도(mS/m), C_B 는 슬러리에 포함된 벤토나이트 함량(g/L)을 나타낸다.

Abu-Hassanein 등(1996)도 벤토나이트 슬러리에서 벤토나이트 함량에 따라 전기전도도가 본 연구결과와 유사하게 선형적으로 증가하는 경향을 보고한 바 있다. 기존 연구에서는 벤토나이트 함량의 증가에 따른 슬러리의 전기전도도 증가 경향을 흙에 존재하는 점토광물의 이온화와 벤토나이트 입자 자체의 표면전도 효과가 함께 발생되어 나타나는 결과로 예상하고 있다(Abu-Hassanein et al., 1996). 본 연구에서는 슬러리에서 나타나는 전기전도도 증가에 대하여 이온화로 인한 용액의 전기전도도 변화에 의한 영향과 흙 입자의 표면전도에 의한 영향 정도를 평가하기 위하여 슬러리를 필터링하여 용액의 전기전도도를 측정하였다. 필터링을 하더라도 흙입자가 완전한 배제되었다고 보기는 어렵지만, 상대적인 비교를 통한 분석에는 무리가 없을 것으로 판단하였다. 그 결과 그림 4에 나타난 바와 같이 슬러리를 필터링하여 얻어진 용액의 전기전도도는 벤토나이트 함량에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었으며, 벤토나이트가 포함된 슬러리의 전기전도도보다 더 크게 측정되었다. 이는 벤토나이트 슬러리에서 나타나는 전기전도도의 변화는 주로 용액의 전기전도 특성의 변화에 의해 나타나는 것으로 해석될 수 있음을 나타내며, 표면전도 효과보다 슬러리 상에서 용액의 전기전도도에 의해 슬러리 전기전도도가 지배적으로 결정된다는 것을 나타내는 결과이다. 뿐만 아니라, 슬러리 상에 존재하는 흙 입자는 표면전도 효과가 존재지만 그 기여도는 크지

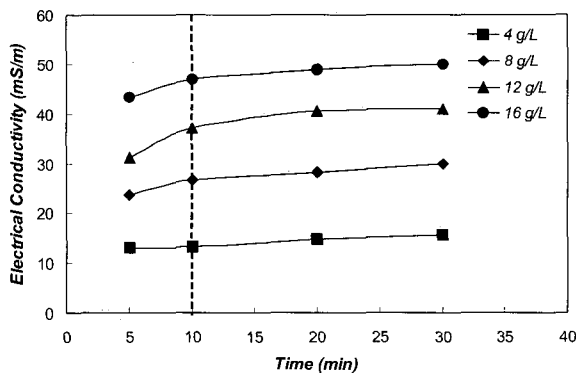


그림 3. 슬러리의 교반시간에 따른 벤토나이트 슬러리의 전기전도도 변화

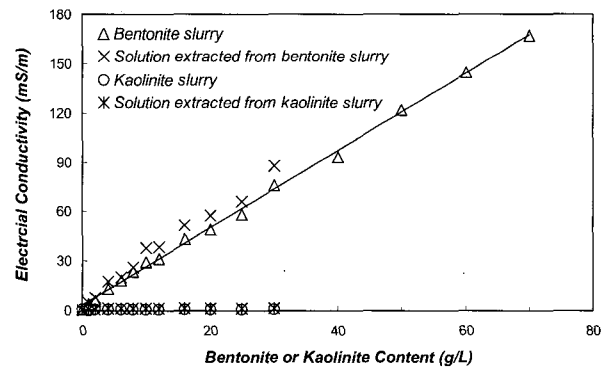


그림 4. 점토함량에 따른 슬러리의 전기전도도 변화

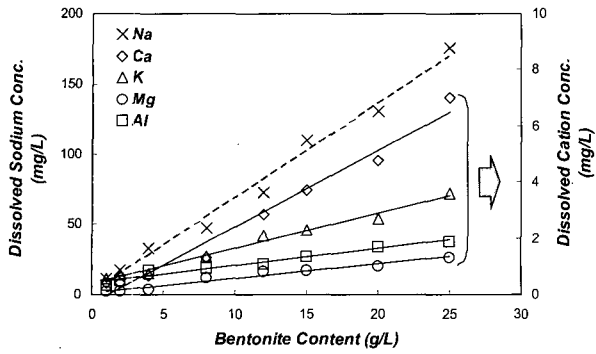


그림 5. 벤토나이트 함량과 용해된 양이온 농도 사이의 관계

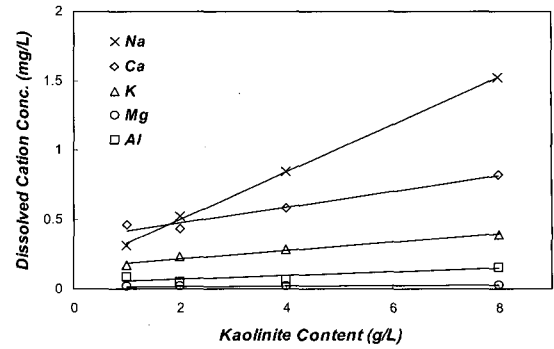


그림 6. 카올리나이트 함량과 용해된 양이온 농도 사이의 관계

않으며, 흙 입자가 용액 상에서 차지하는 부피만큼 용액 상에 존재하는 이온의 이동을 방해하는 역할을 할 수 있으므로 용액의 전기전도도를 오히려 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다.

슬러리 용액에서의 전기전도도 변화를 설명하기 위하여 필터링한 벤토나이트 슬러리의 용액에 대한 성분 분석을 수행하였고 그 결과를 그림 5에서 도시하였다. 그림 5를 통해 알 수 있듯이 벤토나이트 함량이 높아짐에 따라 입자로부터 용해되어 나온 양이온의 농도가 선형적인 증가경향을 나타내었고, 특히 다른 양이온에 비해 Na^+ 이온의 농도가 높은 것으로 나타났다. 즉 이온의 농도가 높을수록 전류전도에 기여하는 전하운반체가 많아지기 때문에 더 많은 전하의 이동이 발생하여 슬러리의 전기전도도가 증가한 것이다. 따라서 이온의 양을 반영하는 슬러리 용액의 전기전도도는 벤토나이트 함량이 높을수록 더 커지게 된다.

카올리나이트 슬러리의 경우(그림 4)에는 카올리나이트 함량변화에 따른 카올리나이트 슬러리 전기전도도의 변화경향이 거의 없는 것으로 나타났으며, 필터링한 슬러리 용액의 전기전도도 변화도 카올리나이트 함량증가에 따라 거의 나타나지 않았다. 이러한 결과는 그림 6을 통해 알 수 있듯이 벤토나이트(그림 5)에 비해 카올리나이트에서는 매우 낮은 이온농도를 나타내고 있으며, 카올리나이트 함량이 증가함에 따라 용해된 양이온의 농도 증가량도 크지 않기 때문인 것으로 나타났다.

벤토나이트 슬러리에서는 카올리나이트 슬러리에 비해 함량변화에 따른 전기전도도 증가경향이 훨씬 민감하게 나타남을 알 수 있는데, 이는 카올리나이트에 비해 벤토나이트가 매우 많은 교환가능한 양이온을 포함하고 있으므로 입자로부터 많은 양이온들이 용해되어 용액의 전기전도도를 증가시키기 때문이다. 그림 7에 제

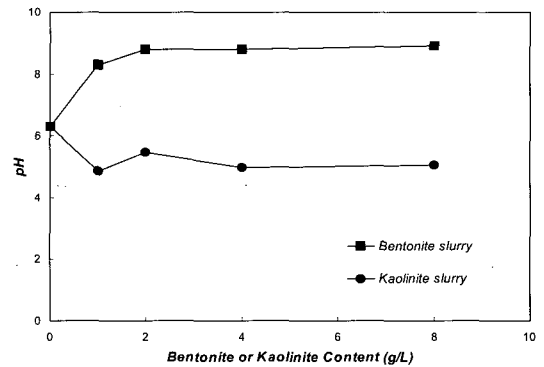


그림 7. 점토 함량에 따른 슬러리의 pH

시된 pH 측정결과에서 알 수 있듯이 카올리나이트 슬러리와는 달리 벤토나이트 슬러리에서는 pH의 증가를 나타내었는데, 이는 벤토나이트에 존재하는 교환가능한 양이온들이 용액상의 H^+ 와 교환하기 때문에 나타나는 결과이다. 즉, 점토입자로 구성된 점토광물은 동형치환과 점토입자 모서리에서의 불연속적 구조의 파괴에 의해 점토광물의 표면은 음전하(negative layer charge)를 띄게 되는데 점토광물은 이러한 결손된 음전하만큼의 전하를 중화시키기 위해 양이온들을 층간에 흡착함으로써 중화를 하게 된다. 이러한 고유한 양이온을 흡착할 수 있는 능력을 양이온교환능(Cation Exchange Capacity)이라 한다. 벤토나이트는 카올리나이트에 비해 매우 높은 양이온교환능을 가지고 있으며, 물속의 H^+ 보다 CEC의 선택성이 낮은 양이온(c.g., Na^+)들을 많이 포함하고 있기 때문에 H^+ 가 Na^+ 와의 양이온교환이 활발히 이루어진다. 따라서 화학적 평형을 유지시키기 위하여 pH는 상승하게 된다. 그러나 카올리나이트는 CEC가 낮아서 표면의 전기적 성질을 거의 띄지 않기 때문에 pH의 증가를 나타내지 않는 것이다.

4.2 용액 전기전도도의 영향

그림 8은 용액의 초기전도도에 따른 벤토나이트 슬러리의 전기전도도와 벤토나이트 함량과의 관계를 나타내고 있으며 표 4에서 회귀분석 결과를 정리하였다. 그림 8과 표 4에 의하면 모든 경우에서 식 (4)와 같은 선형 관계식으로 표현됨을 알 수 있다.

$$\sigma_s = AC_B + B \quad (4)$$

여기서 σ_s 는 슬러리의 전기전도도(mS/m), C_B 는 슬러리에 포함된 벤토나이트 함량(g/L), A와 B는 상수를 각각 나타낸다.

모든 용액에 대하여 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 슬러리의 전기전도도는 선형적인 증가경향을 보이고 있지만 용액의 전기전도도가 높을수록 기울기는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과에 대한 원인을 규명하기 위하여 최대, 최소 전기전도도 값을 갖는 용액을 사용한 경우에 대하여 성분분석을 수행하였고 그 결과를 그림 9에 도시하였다. 벤토나이트 입자에 존재하

는 5가지 종류의 양이온을 분석대상으로 하였으나 실험 결과 K^+ 와 Na^+ 를 제외하고는 매우 낮은 농도로 나타났기 때문에 슬러리의 전기전도도에 결정적인 영향을 주는 두 양이온에 대한 결과만 제시하였다. 결과를 통해 알 수 있듯이 용액의 초기전기전도도가 낮은 저농도의 경우에는 두 양이온이 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 용액의 초기전기전도도가 높은 고농도의 경우에는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 많은 Na^+ 가 용해되어 용액상에 존재하는 이온농도가 증가되지만 K^+ 의 경우 K^+ 이온이 흡입자로 흡착되어 용액상에 존재하는 K^+ 이온의 농도는 감소하게 된다. 벤토나이트 함량 증가에 따라 용액상의 주요 양이온의 이러한 상반된 변화로 인하여 이온에 의한 용액의 전기전도도 증가효과는 어느 정도 상쇄되는 것으로 예측된다. 이러한 결과를 통해 벤토나이트 함량이 증가하여도 상대적으로 전기전도도가 높은 고농도의 용액에서는 슬러리의 전기전도도에 대한 벤토나이트 함량변화에 따른 전기전도도 변화의 민감도가 감소하는 것을 알 수 있다.

슬러리의 전기전도도변화는 용액의 초기 전기전도도

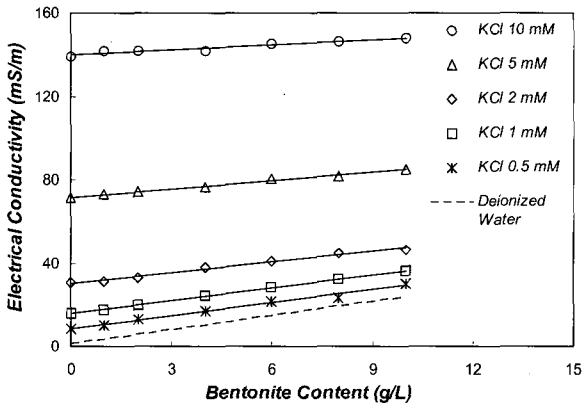


그림 8. 용액의 농도에 따른 벤토나이트 슬러리의 전기전도도와 벤토나이트 함량과의 관계

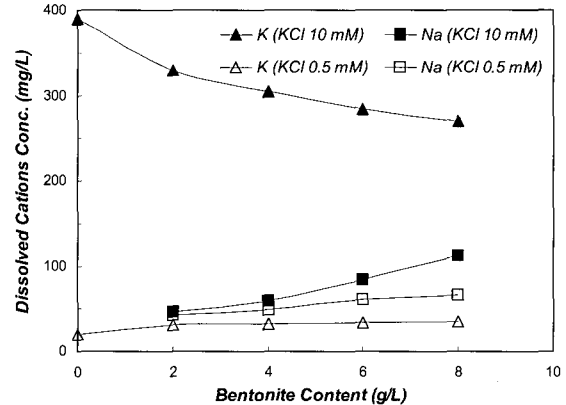


그림 9. 용액의 농도변화에 따른 벤토나이트 함량과 용해된 양이온의 관계

표 4. 용액의 농도 따른 슬러리 전기전도도와 벤토나이트 함량과의 상관성에 대한 회귀분석 결과

Solution	Initial electrical conductivity of solution [mS/m]	Slope	y-axis intercept [mS/m]	R ²
KCl 10mM	139.2	0.81	140.0	0.9325
KCl 5mM	71.4	1.34	71.6	0.9920
KCl 2mM	30.4	1.76	30.0	0.9887
KCl 1mM	16.1	2.06	15.8	0.9993
KCl 0.5mM	8.3	2.08	8.5	0.9876
Deionized Water	0.4	2.34	1.7	0.9982

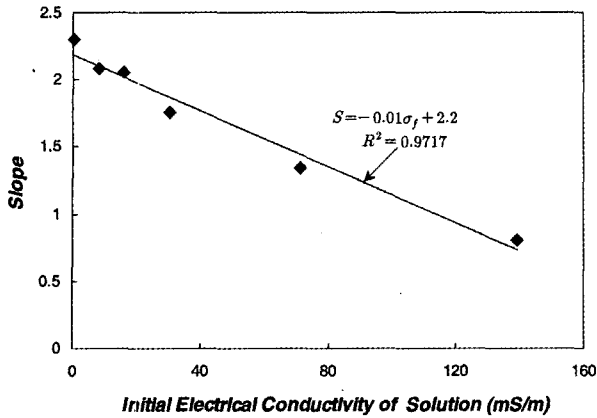


그림 10. 용액의 초기전기전도도에 따른 기울기의 변화

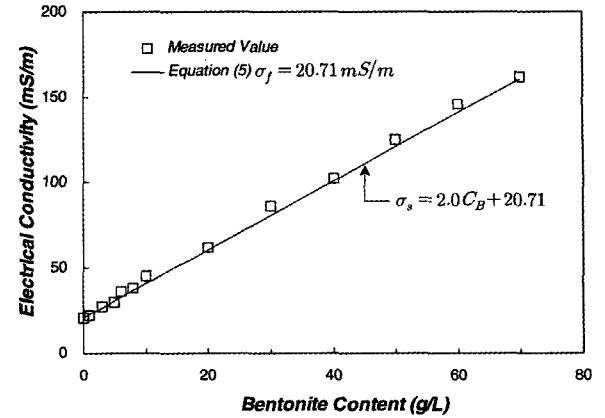


그림 11. 수돗물을 용매로 사용한 벤토나이트 슬러리의 전기전도도

의 영향을 받으므로 정확한 벤토나이트 함량을 추정하기 위해서는 이러한 영향을 고려해야 한다. 표 4에 의하면, 식 (4)에서 기울기 A와 y절편 B는 용액의 초기 전기전도도에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 용액의 초기 전기전도도와 y절편 B는 약간의 차이를 보이지만 그 정도가 매우 작기 때문에 근사적으로 볼 수 있다. 또한, 기울기 A의 경우에는 그림 10에 도시한 바와 같이 용액의 초기 전기전도도 값이 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 식 (4)는 용액의 초기 전기전도도를 고려하여 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_s = (-0.01\sigma_f + 2.2)C_B + \sigma_f \quad (5)$$

여기서, σ_s 는 슬러리의 전기전도도(mS/m), C_B 는 슬러리에 포함된 벤토나이트 함량(g/L), σ_f 는 슬러리 용액의 초기 전기전도도를 나타내고 있다.

식 (5)의 대한 적용성을 검증하기 위하여 수돗물을 슬러리 용액으로 사용하여 벤토나이트 함량에 따른 슬러리의 전기전도도 변화를 평가하였다. 그림 11은 수돗물을 슬러리 용액으로 사용한 벤토나이트 슬러리에서 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도 측정결과와 수돗물의 초기 전기전도도(20.17mS/m)를 식 (5)에 적용한 관계식에 의해 계산된 결과를 함께 도시한 것이다. 그림 11에 의하면 식 (5)에 의해 계산된 값과 실제 측정값이 잘 일치되는 결과를 나타내고 있다. 따라서 식 (5)를 적용하면 용액의 초기 전기전도도의 영향이 고려되므로 전기전도도 측정값에 의해 벤토나이트 함량에 대한 정량적인 평가가 가능할 것으로 기대된다.

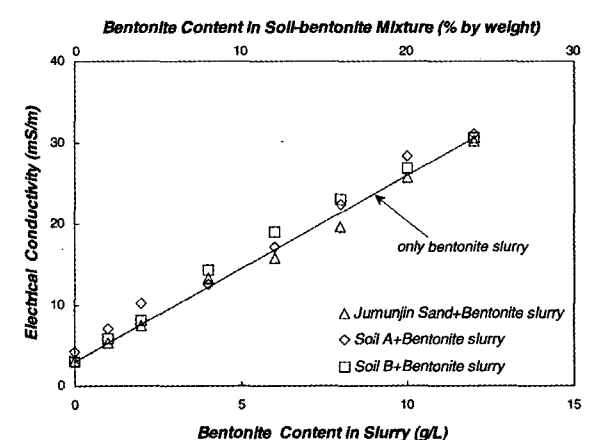


그림 12. 흙-벤토나이트 슬러리의 전기전도도와 벤토나이트 함량의 관계

4.3 흙-벤토나이트 혼합토의 벤토나이트 함량평가

흙-벤토나이트 슬러리에 대한 결과 그래프를 그림 12에 도시하였다. 흙-벤토나이트 슬러리에서도 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 슬러리의 전기전도도는 증가하였고, 그래프에서 선형으로 제시한 벤토나이트 슬러리에 대한 값과 비교하여 유사한 증가경향을 나타내고 있다. 그러나 벤토나이트 슬러리의 전기전도도 보다 흙-벤토나이트 슬러리의 전기전도도가 대체적으로 약간 높은 값을 나타내는 것은 흙에 존재하는 세립성분과 흙에 포함된 염분이 슬러리의 전기전도도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 실험에 사용된 모든 흙에 대해 용액상으로 용해되어 나온 양이온의 성분과 농도를 분석하여 그 결과를 표 5에 나타내었다. 표 5를 통해 알 수 있듯이 벤토나이트에는 다른 흙에 비해 많은 양이온을 포함하고 있으며, 이에 반해 주문진 표준사, Soil A 그리고 Soil B에서는 매우 소량의 양이온만을 포함하고 있다.

이는 다른 흙이 포함되더라도 벤토나이트 함량의 영향이 지배적으로 슬러리의 전기전도도 변화에 반영되기 때문에 슬러리의 전기전도도 변화에 미치는 흙의 영향이 상대적으로 매우 낮다는 것을 나타낸다. 결과적으로 흙-벤토나이트 혼합토에서도 전기전도도 측정을 활용하여 벤토나이트 함량에 대한 추정이 가능한 것으로 확인되었다. 흙-벤토나이트 슬러리에서 전체 흙에 대한 벤토나이트 함량과 전체 슬러리에 대한 벤토나이트 함량과의 관계는 아래 식과 같다.

$$BC(\%) = \frac{C_B}{M_S} \times 100 \quad (6)$$

여기서, M_S 는 1L의 슬러리를 만들기 위해 사용된 흙-벤토나이트 혼합토의 무게(g)를 나타내며 BC는 혼합토 중에 포함된 벤토나이트의 중량비(%)를 각각 나타낸다. 따라서 전기전도도를 측정하여 식 (5)를 통해 구해진 C_B 와 혼합토의 중량 M_S 를 각각 식 (6)에 적용하여 혼합토 중의 벤토나이트 함량 BC(%)를 구할 수 있다.

4.4 흙-벤토나이트 슬러리에 포함된 세립토의 영향

흙이 포함하고 있는 세립토의 함량이 흙-벤토나이트

슬러리의 전기전도도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 먼저 세립토만으로 구성된 슬러리의 전기적 특성을 검토하였다. 이를 위해 Soil A를 대상으로 No.200체를 통과한 시료를 준비하고 이 시료를 탈이온수와 교반하여 슬러리를 만들었다. 세립토 함량에 따른 전기전도도를 앞서 설명한 바와 같은 방법으로 측정하여 그 변화를 그림 13에 도시하였다. 결과에서 보듯이 세립토의 함량에 따라 슬러리의 전기전도도는 선형적 증가경향을 나타내고 있다. 그러나 세립토만으로 구성된 슬러리는 벤토나이트 슬러리의 전기전도도 변화에 비해 매우 낮은 기울기를 나타내고 있으며, 카올리나이트 슬러리 보다는 약간 높은 증가경향을 보이고 있다. 앞서 설명한 바처럼 이러한 전기전도도의 증가 경향은 세립토에 포함되어 있는 점토광물의 이온화로 인해 전하운반량이 증가하였기 때문이며 결과에서 나타난 기울기 차이는 표 5에 제시된 바와 같이 용해성 양이온의 양과 종류에 기인한 것으로 판단된다.

위의 결과를 바탕으로 실제 흙에 다양한 함량의 세립토가 포함되어 있는 경우를 모사하여 흙에 포함된 세립토가 흙-벤토나이트 슬러리의 전기전도도 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 일정한 벤토나이트 함량에서 흙에 포함된 세립토의 함량을 변화시켜가며 전

표 5. 용해된 양이온의 농도[meq/100g]

Sample ID	Ca	Na	K	Mg	Al
Bentonite	0.26~0.37	24~37	0.4~1.3	0.12~0.22	0.26~0.42
Kaolinite	0.13~0.27	0.9~1.3	0.2~0.4	0.01~0.04	0.11~0.2
Jumunjin sand	0.03	0.05	0.01	0.37	0.01
Soil A	0.11	0.38	0.08	0.25	0.01
Soil B	0.02	0.19	0.03	0.2	0.2

Note: meq = milliequivalent unit

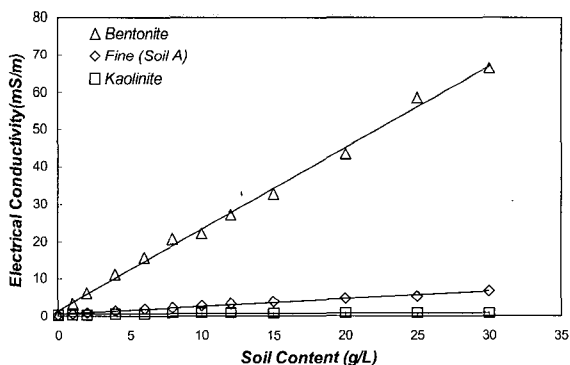


그림 13. 세립토의 함량에 따른 슬러리의 전기전도도

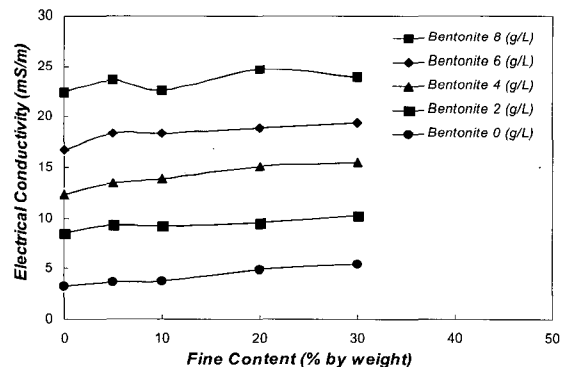


그림 14. 동일한 벤토나이트 함량에서 세립토의 함량에 따른 전기전도도의 변화

표 6. 흙의 종류 및 세립토의 함량과 슬러리의 전기전도도와의 상관성에 대한 회귀분석 결과

Soil composition	Regression equation	R ²
Bentonite Slurry + Soil A_F 0	$\sigma_s=2.2C_B+3.6$	0.9955
Bentonite Slurry + Soil A_F 5	$\sigma_s=2.2C_B+4.5$	0.9876
Bentonite Slurry + Soil A_F 10	$\sigma_s=2.2C_B+4.5$	0.9946
Bentonite Slurry + Soil A_F 20	$\sigma_s=2.3C_B+5.1$	0.9961
Bentonite Slurry + Soil A_F 30	$\sigma_s=2.2C_B+6$	0.9967
Bentonite Slurry + Soil A_K 5	$\sigma_s=2.3C_B+3.6$	0.9839
Bentonite Slurry + Soil A_K 10	$\sigma_s=2.2C_B+4.6$	0.9850
Bentonite Slurry + Soil A_K 20	$\sigma_s=2.3C_B+3.8$	0.9911
Bentonite Slurry + Soil A_K 30	$\sigma_s=2.2C_B+2.9$	0.9967
Bentonite Slurry + Soil A	$\sigma_s=2.2C_B+4.5$	0.9925
Bentonite Slurry + Soil B	$\sigma_s=2.3C_B+3.9$	0.9922
Bentonite Slurry + Jumunjin Sand	$\sigma_s=2.2C_B+3.2$	0.9906

여기서, σ_s 는 슬러리의 전기전도도(mS/m), C_B 는 슬러리에 포함된 벤토나이트 함량(g/L)을 나타낸다.

기전도도의 변화를 측정하였고 그 결과를 그림 14에서 도시하였다. 그림 14에 의하면 실험에 적용된 모든 벤토나이트 함량에서 흙에 대한 세립토의 함량이 증가함에 따라 대체로 근소한 전기전도도 증가 경향이 나타났다. 그러나 벤토나이트 함량 증가로 인한 슬러리의 전기전도도 변화가 세립토의 함량증가로 인한 슬러리의 전기전도도 변화 보다 훨씬 크다는 것을 결과를 통해 확인할 수 있었다.

앞서 확인된 결과들을 토대로 전기적 방법을 활용하여 흙-벤토나이트 슬러리에 벤토나이트 함량을 추정함에 있어 흙의 종류 및 세립토 함량 등이 슬러리의 전기전도도에 미치는 영향의 범위를 정량적으로 파악하기 위하여 본 실험에 사용된 모든 경우의 흙-벤토나이트 슬러리의 전기전도도 변화에 대한 회귀분석을 수행하고 얻어진 상관관계식과 결정계수 R²값을 표 6에 정리하였다. 표 6에서 나타난 바와 같이 다양한 조건의 흙-벤토나이트 슬러리에 대해서 벤토나이트 함량과 전기전도도는 선형적 관계를 나타내며 높은 상관성을 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 흙의 종류 및 흙에 포함된 세립토가 흙-벤토나이트 슬러리의 전기전도도에 영향을 주지만 단지 y절편만을 다소 변화시킬 뿐 기울기의 경우에는 벤토나이트 슬러리의 전기전도도와 유사함을 확인하였다. 이는 슬러리의 전기전도도의 변화에 영향을 미치는 지배적인 인자가 벤토나이트 함량이라는 것을 의미한다. 결과적으로 흙의 종류 및 세립토의 함량에 따른 전기전도도 차이를 고려하기 위해 흙의 종류와 세립토의 함량이 유사한 흙에 대하여 제시된 상관관계식을 활용한다면 보다 정확하게 벤토나이트 함량을 평가할

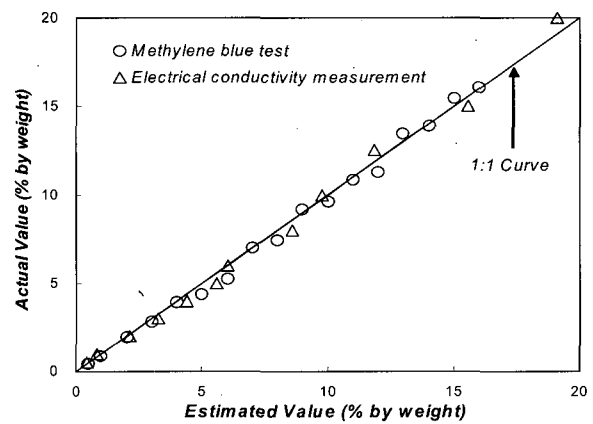


그림 15. 메틸렌 블루 시험과 전기전도도 측정기법의 비교

수 있을 것으로 판단된다.

4.5 메틸렌 블루 시험과 전기전도도 측정기법의 비교

벤토나이트를 함유하고 있는 흙에서 벤토나이트 함량을 산출하기 위한 방법으로 기존에는 메틸렌 블루 테스트를 주로 사용하여 왔다. 하지만 본 연구에서는 메틸렌 블루의 여러 단점을 극복하기 위하여 전기적 방법을 적용하였다. 산출량에 대한 두 방법의 정확성을 비교하기 위하여 측정값과 참값을 각각 그림 15에 도시하였고 결과에 대한 오차를 표 7에서 제시하였다.

그림 15와 표 7에서 보듯이 두 방법을 통해 산출된 벤토나이트 함량은 실제 값과 매우 유사하였고 오차의 범위는 메틸렌 블루시험에서 13% 이내였으며 전기전도도 측정법에서 14% 이내로 나타나 정확도 측면에서는 차이가 없음을 확인하였다.

표 7. 메틸렌 블루 시험과 전기전도도 측정법의 정확도 비교

Actual value(%)	Methylene blue test		Electrical conductivity measurement	
	Measurement value(%)	Error(%)	Measurement value(%)	Error(%)
0.5	0.44	-12.0	0.45	-10
1	0.87	-13.0	0.86	-14
2	1.96	-2.0	2.11	+5.5
3	2.83	-5.6	3.26	+8.7
4	3.91	-2.3	4.41	+10.2
5	4.35	-13.0	5.57	+11.5
6	5.22	-13.0	6.01	+0.2
7	6.96	-0.6	-	-
8	7.39	-7.6	8.61	+7.6
9	9.13	+1.4	-	-
10	9.57	-4.3	9.79	-2.1
11	10.87	-1.2	-	-
12	11.30	-5.8	11.36	-5.3
13	13.48	+3.7	-	-
14	13.91	-0.6	-	-
15	15.43	+2.9	15.57	+3.8
16	16.09	+0.6	-	-
20	20.22	+1.1	19.11	-4.5

5. 결론

본 연구에서는 전기전도도 측정을 통하여 슬러리에 포함되어 있는 벤토나이트의 함량을 평가함에 있어 슬러리에 있는 전기전도도 측정에 대한 영향인자를 도출하고 그 메커니즘을 규명하고자 하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 벤토나이트 및 흙-벤토나이트 슬러리의 전기전도도는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 뚜렷한 선형적 증가 경향을 나타내어 전기전도도 측정방법이 슬러리에 있는 벤토나이트 함량 평가에 적용될 수 있음을 확인하였다. 벤토나이트는 다른 흙에 비해 매우 많은 치환가능한 양이온을 포함하고 있기 때문에 함량 증가에 따른 슬러리의 전기전도도 증가 경향이 민감하게 나타났다. 이때 벤토나이트에 의한 슬러리의 전기전도도 증가에 기여하는 벤토나이트 입자의 표면전도효과는 크지 않았으며, 주로 벤토나이트로부터 용해된 이온농도의 증가로 인해 나타나는 것으로 나타났다.
- (2) 슬러리에 있는 벤토나이트 함량에 따른 전기전도도의 선형적 관계는 용액의 초기전기전도도에 크게 영향을 받는 것으로 확인되었다. 용액의 초기 전기전도

도가 증가함에 따라 기울기가 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, y절편은 용액의 초기 전기전도도와 거의 같은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이를 토대로 본 연구에서는 용액의 초기 전기전도도 효과를 고려한 관계식을 도출하였으며, 이 식을 통하여 슬러리 조제시 사용된 용액의 초기 전기전도도에 따른 벤토나이트 함량의 정량적 평가가 가능할 것으로 기대된다.

- (3) 흙-벤토나이트 슬러리에서 혼합토 상에 존재하는 세립토의 함량이 증가함에 따라 전기전도도가 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 세립토의 함량이 벤토나이트 함량과 전기전도도 측정값과의 관계식에 미치는 영향을 분석한 결과, y절편만을 다소 증가시켰음을 확인하였다. 보다 다양한 종류의 세립토를 사용한 추가연구를 통하여 y절편의 변화양상을 정량적으로 도출한다면 보다 정확한 벤토나이트 함량 평가가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호:R01-2002-000-00136-0)지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 오명학, 이기호, 박준범 (2004), “함수비와 간극수 오염이 불포화 사질토의 전기비저항에 미치는 영향”, *대한토목학회 논문집*, 24, pp.27-34.
2. Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., Wang, X. and Blotz, L. R. (1996b), “Determining Bentonite Content in Soil-bentonite Mixtures using Electrical Conductivity”, *Geotechnical Testing Journal*, 19(1), pp.51-57.
3. Alther, G. R. (1982), “The role of bentonite in soil dealing application”, *Bull. Assn. of Engrg. Geologists*, 19, 401-409.
4. Appolonia, D., Christopher R. Ryan. (1979), Soil-bentonite Slurry Trench Cutt-off Walls, Geotechnical Exhibition and Technical Conference Chicago Illinois, March 26 1979.
5. Curtis, J. and Narayanan, R. (1998), “Effects of laboratory procedures on soil electrical property measurements”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47(6), pp.1474-1480.
6. Daniel, D. E. (1993), Clay liners, Geotechnical practice for waste disposal, D. E. Daniel, ed., Chapman & Hall, London, England, 137-163.
7. Kenney, T., Van Veen, W., Swallow, M., and Sungaila, M. (1992), “Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand Mixtures”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, pp.364-374.
8. Klein, K. (1999), Electromagnetic properties of high specific surface minerals, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, USA.
9. 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, P. 568-590.
10. Reiger, P. H. (1987), *Electrochemistry*, Prentice-Hall, Inc.
11. Saarenketo, T. (1998), “Electrical properties of water in clay and silty soils”, *Journal of Applied Geophysics*, 40, pp.73-88.
12. Santamarina, J. C. (2001), *Soils and Waves*, John Wiley & Sons.
13. Sawyer, C. N., McCarty, P. (1978), *Chemistry for Environmental Engineering*, 3th Ed., McGraw-Hill, New York.
14. Smith, S. S. and Arulanandan, K. (1981), “Relationship of electrical dispersion to soil properties”, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, 107 (GT5), pp.591-604.
15. Van Olphen, H. (1977), *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, 2nd edition. John Wiley & Sons, New York.
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*, 43(1-2), pp.18-28.

(접수일자 2006. 2. 21, 심사완료일 2006. 9. 14)