

## 퇴적 연약점토의 오염에 따른 강도 및 변형 거동특성

### The Behaviour Characteristics of Strength and Deformation of the Deposited Soft Clay Owing to Contamination

천 병 식<sup>1</sup> Chun, Byung-Sik

하 광 현<sup>2</sup> Ha, Kwang-Hyun

#### Abstract

The chemical property analysis on the deposited clay using scanning electron microscope and energy dispersive x-ray spectrometer were performed. Also, the triaxial compression tests and consolidation tests using NaCl aqueous solution and leachate as substitute pore (or saturated) water in samples were carried out to find out the behaviour characteristics of strength and deformation of contaminated deposited clay. From the chemical composition analysis results of clay samples, the magnitudes of composition ratio were revealed in the order of O, C, Si, Al, and Fe. Of these, why the ratio of carbon appeared to be large is estimated as due to the increase of the phyto-planktons after the construction of tide embankment. In the triaxial compression test and consolidation test results, the shear strength and compression properties have increased with the increase in concentration of contaminant (NaCl). This phenomenon is considered as to be caused by the changes of soil structure to flocculent structure owing to the decrease in the thickness of diffuse double layer in proportion to increase in the concentration of electrolyte.

#### 요 지

채취된 퇴적 점토시료의 화학적 특성을 규명하기 위하여 주사전자현미경(SEM) 관찰과 에너지분산분광(EDX) 분석을 수행하였다. 또한 생활하수 및 산업폐수의 유입으로 오염된 퇴적점토의 강도 및 변형특성 변화를 파악하기 위하여 NaCl 수용액과 매립장 침출수를 시료의 간극수 또는 포화수로 교체하여 삼축압축시험과 압밀시험을 실시하였다. 점토 시료에 대한 화학성분 분석결과 구성비 크기는 O, C, Si, Al, Fe 순서를 보이고 있으며, 이 중에서 C의 비율이 높게 나타난 것은 방조제 축조로 인한 식물 플랑크톤의 증식에 기인된 것으로 추정된다. 삼축압축시험 및 압밀시험결과, NaCl의 농도가 증가할수록 전단강도는 증가하고 압축성이 커지는 것으로 나타났다. 이는 전해질의 농도가 증가할수록 확산이중층(DDL)의 두께가 감소되어 흙의 구조가 면모화되기 때문인 것으로 판단된다.

**Keywords :** Chemical analysis, Diffuse double layer, Flocculent structure, Leachate, NaCl solution

#### 1. 서 론

최근 국내 연안 지역은 간척사업, 방조제 건설 등의 인위적인 요인이 퇴적환경의 변화를 야기시켜 여러 가

지 문제가 발생하고 있다. 따라서, 해안에 인접한 지역의 퇴적점토는 점토광물의 종류 및 특성뿐만 아니라 입도분포, 토립자의 형상, 유기물 함유량, 퇴적환경 및 응력 이력 등의 영향으로 그 토질 특성이 다양화될

1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

2 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

잠재성이 내재되어 있으므로 퇴적토에 대한 특성은 종합적인 연구를 통하여 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 특히 본 연구에서 시료를 채취한 지역의 경우, 인공방조제의 축조로 퇴적환경의 급격한 변화가 초래되어 표층 퇴적물의 구성 및 퇴적물 내의 화학조성상의 변화가 진행 중인 것으로 예상된다.

지반환경공학적인 측면에서 볼 때, 최근에는 연약지반에 도로, 기초, 건축 구조물 등을 축조해야 하는 토목기술자들에게는 퇴적 점토층에 대한 공학적 특성뿐만이 아니라 광물학적인 특성에 대한 지식이 필요하게 되었다. 점토는 입자 크기가 작고 일반광물과 거동형태가 상이하며, 이러한 점토광물에 대한 연구는 X선 회절분석기법(XRD)이 개발되면서 활발히 수행되고 있다(민덕기 등, 2000). 주요 점토광물 구조에 대한 연구는 J. W. Gruner(1932)가 카올리나이트의 구조를 밝혀냈고, Hofmann 등(1933)은 팽창구조를 나타내는 몬트모릴로나이트의 모델을 제안하였으며, Grim 등(1939)은 운모형 점토광물의 일반형태인 일라이트를 소개하고 있다.

퇴적 점토광물에 대한 국내 연구로는 최진용 등(1998)의 한반도 주변해역 점토광물의 함량과 분포에 관한 연구, 이연규 등(1996)의 퇴적물 특성과 점토광물 분포를 중심으로 한 광양만 및 여수해만 퇴적환경 변화에 관한 연구, 박정기 등(1991)의 한강하구 및 경기만에서의 점토광물에 대한 연구 등이 수행되었다. 해양 퇴적토의 퇴적환경 변화에 관한 연구는 한국해양연구원을 중심으로 지속적으로 수행되고 있으며, 신동혁 등(2004)은 이원방조제 건설 후 계절별 퇴적학적 특성과 퇴적환경 변화에 대해서, 최만식 등(1999)과 심무준 등(1998)은 시화호 방조제 건설에 따른 표층퇴적물의 퇴적상의 변화와 퇴적물의 성분 분포에 관한 연구를 수행한 바 있다. 이처럼 지금까지 퇴적토의 퇴적환경 변화에 관한 국내 연구는 대부분 수괴(water mass)의 지화학적 특성, 저서생물(benthos)의 분포, 방조제 건설에 따른 퇴적상(堆積相)의 변화, 퇴적물 중 오염물질 함량 등과 같이 주로 해양공학, 환경공학적인 측면에서 다루어져 왔다.

한편 간척사업이나 방조제 건설에 따라 발생하는 심각한 문제는 인접 거주지역의 생활하수와 산업공단에서 하천을 따라 유입되는 산업폐수로 인한 수질오염 문제이다. 이와 수반하여 환경문제에 대한 인식 변화와 관심 증대로 인해 중금속 오염 및 부영양화와 같은 환경공학적인 측면에서 많은 연구가 국내에서 수행되고 있다. 그러나, 안태봉(1997)에 의해 염분이 모래-벤토나이트

혼합토의 응력 변형에 미치는 영향에 관한 연구가 수행된 바 있지만, 생활 및 산업폐수 등과 같은 실제 오염물이 토질특성에 미치는 영향에 대한 지반공학적인 측면에서의 접근은 거의 이뤄지지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 퇴적점토의 화학적 특성을 파악하기 위해 현장에서 채취된 시료에 대해 물리적 특성, 화학적 성분에 대한 분석을 실시하였다. 이 과정에서 시화호 유역의 9개소에서 퇴적점토 시료를 채취하여 기본물성시험을 수행하고 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 에너지분산분광법(energy dispersive x-ray spectrometer, EDX)을 이용하여 점토시료의 입자구조와 화학적 성분 특성을 분석하였다. 그리고 해수와 오염물질이 토질의 강도 및 변형특성 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 증류수, 염수(NaCl 수용액)와 4개소의 쓰레기 매립장에서 채취된 침출수를 간극수 또는 포화수로 이용하여 삼축압축시험 및 압밀시험을 수행하였다.

## 2. 연구 방법

퇴적점토의 화학적 특성을 규명하기 위하여 시화호 유역에서 Thin Wall Tube 샘플러를 이용하여 불교란 점토시료를 채취하였다. 대표 시료에 대하여 기본적인 물성시험을 실시하고 주사전자현미경(SEM) 관찰 및 에너지분산분광법(EDX)을 이용하여 입자구조와 화학적 성분 조성 분석을 수행하였다. 또한, 간극수의 화학적 특성이 퇴적점토의 강도 및 변형특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 일련의 시험들을 수행하였다.

### 2.1 시료채취 및 기본 물성시험

퇴적점토 시료는 시흥시에 인접한 시화호 유역(시화 1공구)의 9개소에서 채취하였으며, 채취심도는 지표하 2~3m 정도이다. 현장에서 채취한 점토시료에 대해서는 화학적 특성분석에 앞서 비중, 체분석, 함수비, 에터버그한계 시험 등의 기본적인 물성시험을 실시하였다.

### 2.2 주사전자현미경(SEM) 관찰

점토시료의 입자구조를 관찰하기 위해 사용된 주사전자현미경(SEM)은 시료 표면에 가속전압의 전자선을 조사하고, 시료와의 상호작용에 의해 시료 표면에서 방출

되는 2차 전자를 검출기로 검출증폭하여 상을 형성함으로써 고체시료의 미세조직, 형상 및 단면을 관찰할 수 있는 장치로 점토시료 표면에 주사된 상이 얻어지므로 3차원적인 입체 영상을 관찰할 수 있다. 또한 SEM은 각각의 카메라 시스템을 통하여 관찰 즉시 촬영할 수 있고, 이러한 주사전자현미경에 X-선 검출기를 부착하여 전자빔이 시료 표면에 부딪힐 때 발생하는 X-선을 검출기에 기록함으로써 화학조성을 정량적으로 분석할 수 있다. 따라서, 채취된 점토시료에 대해 주사전자현미경 관찰을 수행하여 시료입자의 모양과 구조를 관찰하고, 에너지분산분석법(EDX)을 통해 화학성분의 정량분석을 병행하였다. 본 연구에서는 기초과학연구원 춘천분소에서 보유하고 있는 장비인 Hitachi Science Systems사의 저진공 주사전자현미경(low vacuum scanning electron microscope) S-3500N을 사용하였으며, 검출된 2차 전자의 증폭은 15~300,000배까지 가능하다.

### 2.3 강도·변형특성 시험

해수 및 오염물질로 인한 토질특성의 변화를 파악하기 위해 현장에서 채취된 불교란 퇴적점토 시료를 대상으로 1개의 증류수와 농도를 달리한 4개의 NaCl 수용액 및 4개소에서 채취한 쓰레기 매립장 침출수를 간극수

(포화수)로 이용하였으며, 각각의 시험에 사용되는 시료에 대해서는 기본 물성시험을 실시하였다.

또한, 각각의 시료에 대해 간극수를 달리하여 일축압축시험, 삼축압축시험(그림 1 참조) 및 압밀시험을 규정(KSF-2314, KSF-2346, KSF-2316)에 따라 수행하여 오염물질이 흙의 강도 및 압밀특성 변화에 미치는 영향을 규명하였다.

### 2.4 간극수(포화수) 조성

#### 2.4.1 염수(NaCl 수용액)

대표적인 화학물질인 염수를 인위적으로 조제하였으며 순수한 염화나트륨(NaCl)과 증류수의 혼합으로 조성된 5%, 10%, 15%, 20%의 NaCl 수용액을 시료의 간극수(포화수)로 사용하였다.

#### 2.4.2 쓰레기 매립장 침출수

오염 물질인 쓰레기 매립장 침출수는 총 4개소의 매립장에서 채취하여 시료의 간극수(포화수)로 사용하였다.

### 2.5 시료 간극수의 치환방법

시료 내의 간극수를 계획된 간극수로 치환하기 위한 일련의 과정이 수행되었다. 즉, 증류수 및 5%, 10%, 15%, 20% 농도의 NaCl 수용액과 4개소의 매립장 침출수가 담겨진 수조에 불교란 시료가 채워져 있는 9개의 Thin Wall Tube 샘플러( $\phi 50, 450\text{mm}$ )를 13개월 동안 침수시켜 간극수를 치환하였다. 또한 삼축 및 압밀시험에서도 상기 과정에서 적용된 용액이 간극수 또는 포화수로 사용되었다. 본 연구에서 9개의 시료별로 적용된 치환 간극수 또는 포화수의 조성현황은 표 1과 같다.

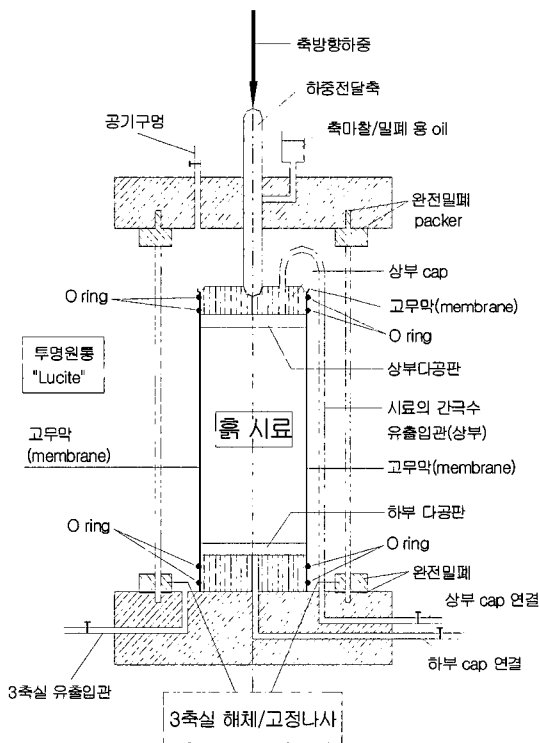


그림 1. 삼축압축시험 모식도

표 1. 시료별 적용 간극수

시료 No.	적용 간극수	비 고
SH-01	증류수	
SH-02	5% NaCl 수용액	
SH-03	10% NaCl 수용액	
SH-04	15% NaCl 수용액	
SH-05	20% NaCl 수용액	
SH-06	충남 당진 매립장 침출수	
SH-07	충남 금산 매립장 침출수	
SH-08	대전 금고 매립장 침출수	
SH-09	대전 신대 매립장 침출수	

### 3. 물리적 및 화학적 특성

#### 3.1 물리적 특성

본 연구에서 사용된 점토시료에 대한 기본물성은 표 2와 같다. #200체 통과량은 평균 93.7%이고, 자연함수

비는 평균 59.8%, 비중은 2.73, 액성 및 소성한계의 평균은 각각 82.4%, 30.8%로서, 9개의 시료는 거의 유사한 물리적 특성을 보였다.

#### 3.2 입자구조

그림 2는 채취된 점토시료에 대해 주사전자현미경(SEM)으로 입자구조를 관찰한 결과로, 건조된 시료의 표면 모습이다. 각 시료는 동일 배율(100,000배)을 적용하여 촬영되었다. 그림에서 관찰되는 바와 같이 점토는 판상 및 침상의 모양으로 이루어져 있는 것을 알 수 있으며, 석영과 장석의 결정들도 보이고 있다.

주사전자현미경 관찰결과, 9개의 점토시료 입자는 유사한 입자구조를 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서, 채취된 모든 점토시료는 물리적 특성이 거의 유사한 것으로 판단되며, 삼축압축시험 및 압밀시험에 사용된 시료는 치환 간극수를 제외하고는 동일한 조건을 가지는 것으로 볼 수 있다.

표 2. 시료의 기본 물성

시료 No.	#200체 통과량 (%)	비중 Gs	애터버그 한계			함수비 wn (%)
			LL (%)	PL (%)	PI (%)	
SH-01	94.5	2.73	85.0	32.0	53.7	59.0
SH-02	95.9	2.73	83.5	31.3	52.2	61.7
SH-03	95.6	2.73	82.1	31.2	50.9	60.7
SH-04	94.9	2.73	86.1	32.3	53.8	59.3
SH-05	93.5	2.73	79.5	30.0	49.5	61.2
SH-06	92.6	2.73	81.2	30.7	50.5	59.4
SH-07	93.9	2.73	85.1	31.2	53.9	58.9
SH-08	92.0	2.73	80.0	28.9	51.5	59.6
SH-09	90.5	2.73	78.9	29.3	49.6	58.5
평균	93.7	2.73	82.4	30.8	51.7	59.8

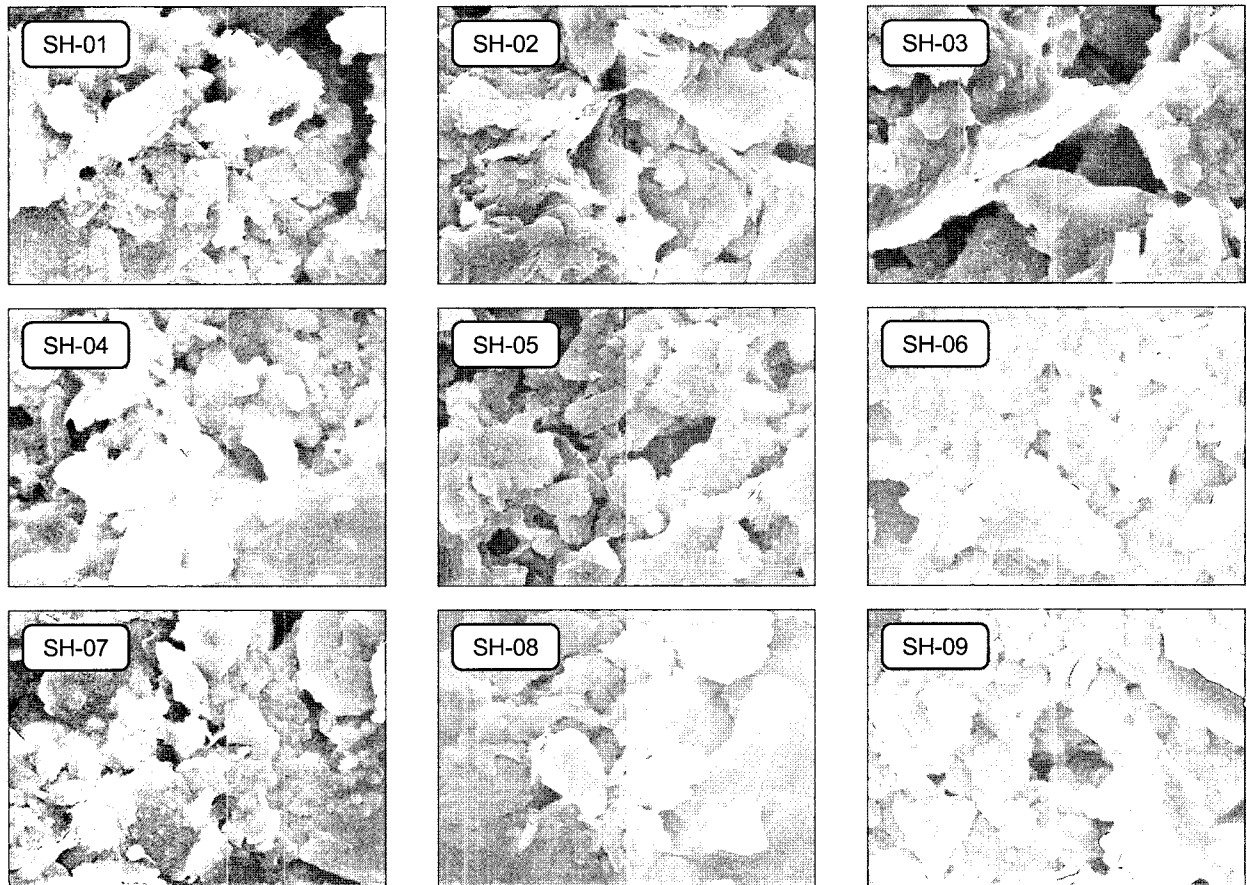


그림 2. 시료의 입자구조

### 3.3 화학적 특성

표 3은 채취된 점토시료에 대해 실시된 에너지분산형 광분석(EDX) 결과를 근거로 9개 시료별 구성원소 비율을 나타낸 것이며, 그림 3은 시료별로 검출된 X-ray 스펙트럼을 보여주고 있다.

분석 결과, 그림 4와 같이 원소별 구성비율은 9개 시료별로 약간의 차이는 있지만 O, C, Si, Al, Fe 순서의 공통적인 구성원소 분포를 보였다.

그림 5와 같이 전체 시료에 대한 각 원소별 평균 구성 비율은 O가 44.8%, C가 28.9%, Si가 13.8%, Al이 6.0%, Fe가 2.4%로 전체의 95.9%를 구성하고 있으며 기타 미량의 원소(Na, Mg, K, Ca)가 4.1%를 구성하고 있다. 그림 6과 같이 중량을 기준으로 하면, O가 38.0%, C가 19.3%, Si가 20.4%, Al이 8.5%, Fe가 6.9%로 전체의 93.2%를 구성하고 기타 미량의 원소가 6.8%를 차지하였다.

원소별 비율 중에서 C가 높게 나타난 이유는 유기탄

표 3. EDX 분석에 의한 시료의 원소 구성

구분		C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe	Total
SH-01	Weight(%)	29.44	34.91	0.89	1.25	6.87	16.58	1.63	2.17	0.62	5.63	100
	Atomic(%)	42.36	37.71	0.67	0.89	4.40	10.20	0.79	0.96	0.27	1.74	100
SH-02	Weight(%)	10.09	40.16	1.02	1.61	11.30	24.50	1.13	4.49	—	5.69	100
	Atomic(%)	16.79	50.20	0.89	1.32	8.37	17.45	0.64	2.30	—	2.04	100
SH-03	Weight(%)	18.52	36.68	0.86	1.76	9.86	21.02	1.43	2.99	—	6.88	100
	Atomic(%)	29.11	43.27	0.70	1.37	6.90	14.13	0.76	1.44	—	2.33	100
SH-04	Weight(%)	18.72	40.72	0.35	0.88	7.61	20.84	0.73	5.54	—	4.61	100
	Atomic(%)	28.74	46.92	0.28	0.67	5.20	13.68	0.38	2.61	—	1.52	100
SH-05	Weight(%)	16.23	39.67	0.97	1.55	7.83	24.79	0.77	2.14	—	6.04	100
	Atomic(%)	25.52	46.83	0.80	1.21	5.48	16.67	0.41	1.03	—	2.04	100
SH-06	Weight(%)	—	44.23	0.86	2.31	10.56	25.10	1.43	3.51	1.10	10.90	100
	Atomic(%)	—	60.96	0.82	2.09	8.63	19.71	0.89	1.98	0.61	4.31	100
SH-07	Weight(%)	23.13	37.56	0.82	2.35	7.39	16.51	0.82	1.81	—	9.66	100
	Atomic(%)	34.97	42.57	0.65	1.76	4.98	10.68	0.42	0.84	—	3.14	100
SH-08	Weight(%)	34.25	35.83	0.60	1.43	6.19	12.69	—	1.87	—	7.15	100
	Atomic(%)	42.27	37.12	0.43	0.98	3.80	7.49	—	0.79	—	2.12	100
SH-09	Weight(%)	23.07	32.43	0.72	1.36	8.81	21.85	1.51	4.29	—	5.95	100
	Atomic(%)	35.57	37.55	0.58	1.04	6.05	14.41	0.79	2.03	—	1.97	100

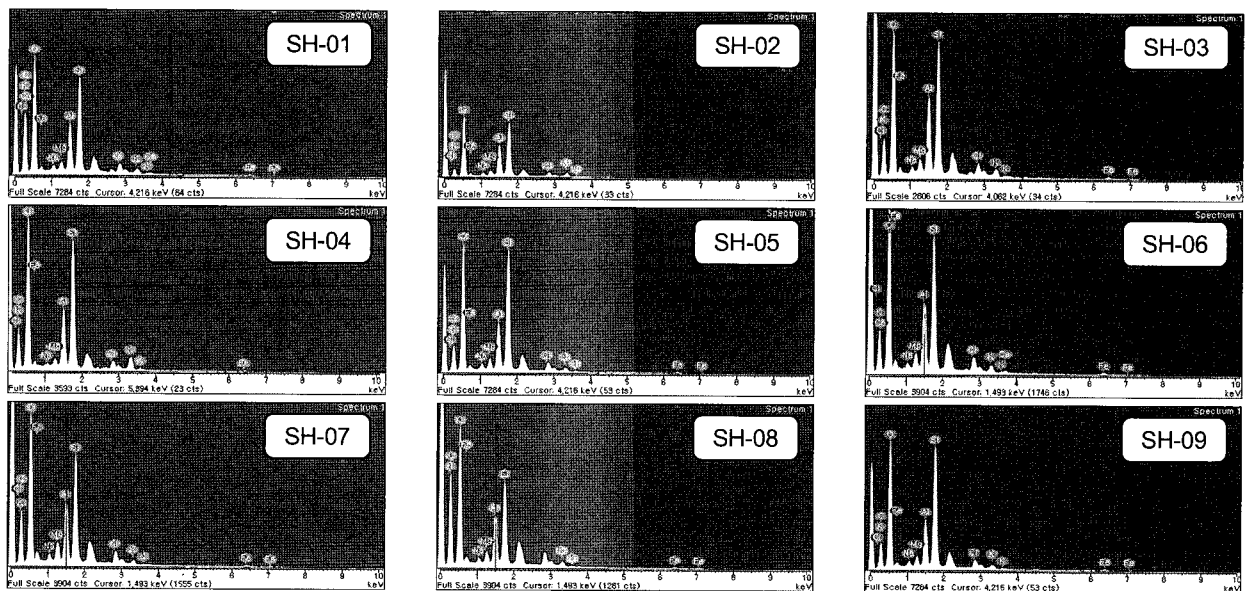


그림 3. 시료의 X-ray 스펙트럼

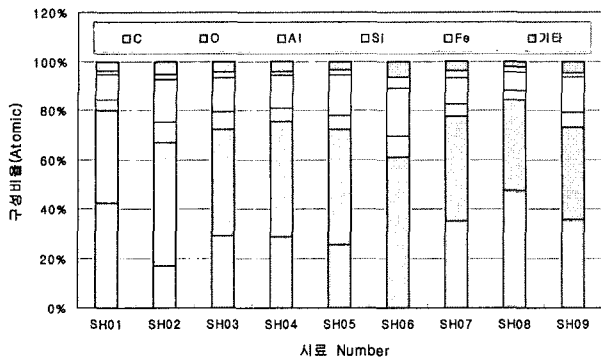


그림 4. 시료별 구성원소 비율(Atomic)

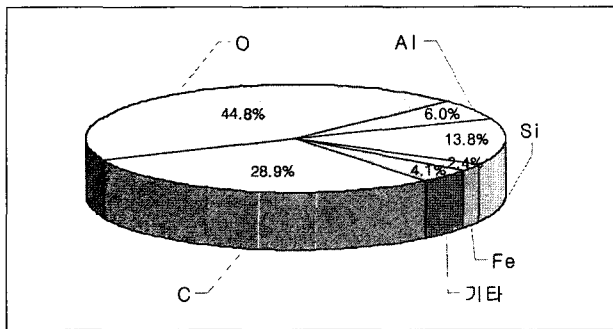


그림 5. 구성원소 평균비율(Atomic)

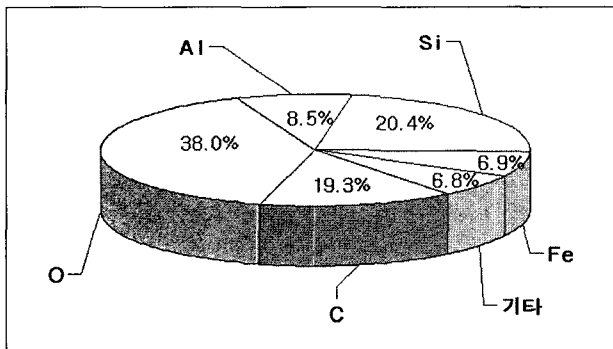


그림 6. 구성원소 평균비율(Weight)

소를 구성하는 것은 식물플랑크톤, 박테리아, 동식물 배설물 등이지만 대개 유기탄소 비율이 식물플랑크톤과 비슷하다는 것을 감안하면 방조제 축조로 인하여 식물플랑크톤 증식이 활발하여 유기물이 다량 생성·퇴적되었기 때문인 것으로 유추할 수 있다. 한편, 점토광물의 화학적 특성을 볼 때, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>의 화학성분이 전체의 대부분을 구성하는 것으로 판단된다.

#### 4. 오염된 흙의 특성변화

##### 4.1 쓰레기 매립장 침출수 성상분석

삼축압축시험 및 압밀시험 시료의 간극수 또는 포화

표 4. 쓰레기 매립장 침출수 성상 분석결과

조성	매립장	충남 당진	충남 금산	대전 금고	대전 신대
NH <sub>4</sub> -N(mg/L)		892	783	639	356
NO <sub>3</sub> -N(mg/L)		0	0	0	0
Alkalinity(mg/L as CaCO <sub>3</sub> )		11,217	6,683	6,317	2,350
pH		8.15	8.12	7.79	7.99
Hardness(mg/L as CaCO <sub>3</sub> )		979	1,064	905	860
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)		136.8	81.9	110.6	47.3
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)		151.6	198.9	133.8	166.1
K <sup>+</sup> (mg/L)		1,251	918	892	256
Na <sup>+</sup> (mg/L)		1,518	1,320	1,186	332
Cl <sup>-</sup> (mg/L)		4,403	3,348	2,945	1,704
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)		202	63	52	73
Fe(mg/L)		2.8	17.1	39.8	28.3
SAR(mg/L)		126.4	111.4	107.3	32.1

수로 사용하기 위하여 4개소의 쓰레기 매립장(충남 당진, 충남 금산, 대전 금고, 대전 신대)에서 채취된 침출수에 대해서 성상분석 시험을 수행하였으며, 그 결과는 표 4와 같다.

표 4에서 SAR(sodium adsorption ratio)은 흙의 투수성(permeability)과 폭기(aeration)의 정도를 나타내는 지수로 식 (1)과 같이 Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 이온의 농도에 따라 결정된다. 흙의 Na<sup>+</sup> 이온 함유도가 증가하면 즉, SAR 값이 커지면 흙은 알카리성이 되어 투수성이 감소되므로, 배수가 잘 안되고 공기소통도 현저히 저감된다(Stawinski, J. 등, 1990).

$$SAR(mg/L) = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Mg^{2+} + Ca^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

#### 4.2 강도특성 변화

계획된 간극수(포화수)로 치환된 시료에 대한 일축압축시험과 삼축압축시험 결과는 표 5와 같다. 그림 7은 축방향 응력에 대한 변형 특성을, 그림 8은 (σ<sub>1</sub>+σ<sub>3</sub>)/2에 대한 (σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)/2의 관계특성을 나타낸 것이다.

그림 7에서 보는 바와 같이, NaCl 수용액 농도가 증가할수록 축방향 응력-변형 곡선의 기울기는 급해지고 극한응력(강도)도 커지는 경향을 보였다. 또한, 쓰레기 매립장 침출수로 포화된 시료의 응력-변형 곡선의 기울기와 극한응력은 침출수의 화학적성상에 따른 차이는 있지만 NaCl 수용액으로 포화된 시료보다 모두 큰 것으

로 나타냈다.

한편, 그림 8은 파괴시의 응력상태를 응력경로(stress path)로 나타낸 것으로 NaCl 수용액 농도 증가에 따른

표 5. 일축 및 삼축압축시험 결과

시료 No	일축압축시험 Q <sub>u</sub> (kPa)	삼축압축시험					적용 간극수 (포화수)
		UU C <sub>uu</sub> (kPa)	CU				
			전응력 C <sub>cu</sub> (kPa)	φ <sub>cu</sub> (°)	유효응력 C' (kPa)    φ' (°)		
SH-01	81.95	42.02	7.85	18.2	5.88	20.3	증류수
SH-02	85.81	44.17	8.83	18.6	7.85	20.8	5% 소금물
SH-03	88.56	46.38	9.81	18.7	7.85	21.1	10% 소금물
SH-04	92.35	48.58	10.79	19.3	8.83	21.6	15% 소금물
SH-05	98.33	51.33	11.77	19.7	9.81	21.9	20% 소금물
SH-06	109.7	56.98	11.77	20.2	9.81	22.3	침출수(충남당진)
SH-07	129.0	66.81	13.73	21.3	11.77	23.6	침출수(충남금산)
SH-08	133.1	68.32	13.73	22.1	11.77	24.9	침출수(대전금고)
SH-09	125.3	65.07	12.75	20.9	10.79	23.7	침출수(대전신대)

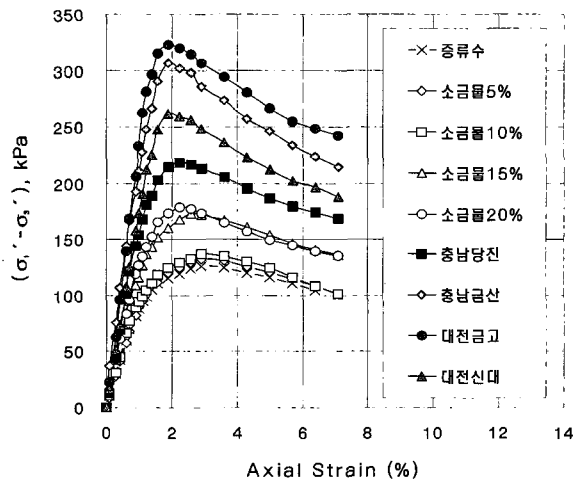


그림 7. 축방향 응력에 대한 변형 곡선

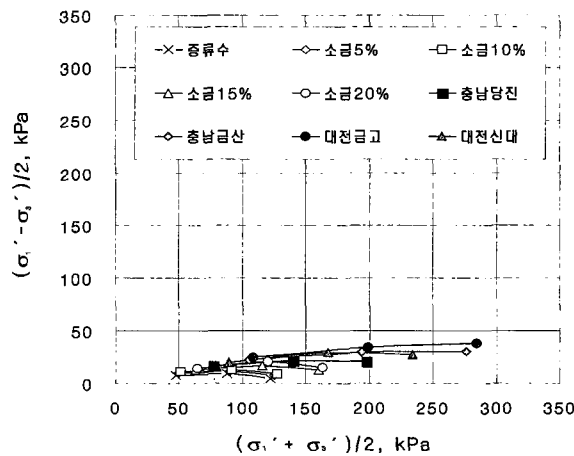


그림 8. (σ₁'+σ₃')/2에 대한 (σ₁'-σ₃')/2 관계곡선

kr선의 기울기 변화는 크지 않지만 침출수로 포화된 시료의 기울기는 증류수로 포화된 시료에 비해 상대적으로 크게 증가된 것을 알 수 있다.

NaCl 수용액 농도를 달리한 시료에 대한 일축압축시험과 삼축압축시험 결과, 표 5에 제시된 바와 같이 농도가 증가할수록 점토시료의 강도도 증가하였다. 이와 같은 현상은 Gouy-Chapman의 확산이중층 모델을 이용하여 설명될 수 있다. 즉, 양의 전기를 띠는 Na<sup>+</sup> 이온과의 치환은 양이온과 음으로 대전되는 점토판 사이의 끄는 힘을 증가시켜 확산이중층 두께가 감소되고 이에 따라 흙의 구조는 외부하중에 대한 저항이 큰 면모구조로 바뀌기 때문에 이에 상응하는 비배수 전단강도는 증가하게 된다.

따라서, 표 5와 그림 9에서 보는 바와 같이 NaCl 수용액 농도가 0%에서 20%로 증가함에 따라 유효응력 조건에서는 5.88kPa에서 9.81kPa로, 전응력 조건에서는 7.85kPa에서 11.77kPa로 점착력이 각각 1.7배, 1.5배 정도 증가된 현상은 전해질 농도가 증가함에 따라 흙 구조가 면모화 되는 현상에 기인한 것으로 볼 수 있다(Moum, J. 등, 1961). 반면, 표 5 및 그림 10에 나타난 바와 같이 전단저항각은 전응력 조건(φ<sub>cu</sub>)에서는 18.2°에서 19.7°로 1.5° 증가하였으며, 유효응력 조건(φ')에서는 20.3°에서 21.6°로 1.3° 증가하였다. 이와 같이 NaCl 수용액 농도가 증가하더라도 전단저항각은 큰 변화를 보이지 않는 데 이것은 전단저항각이 화학적인 영향보다는 점토시료의 입도조성, 흙 구조 등과 같은 밀도 성질에 지배되는 물리적인 현상임을 유추할 수 있다(안태봉, 1997). 한편,

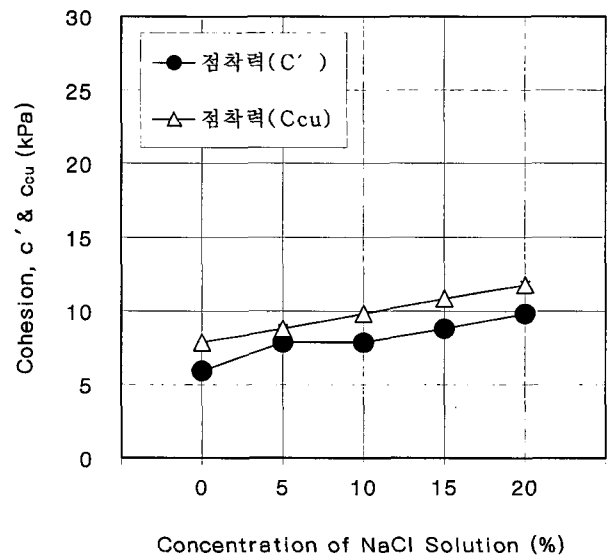


그림 9. NaCl 농도에 따른 점착력 변화

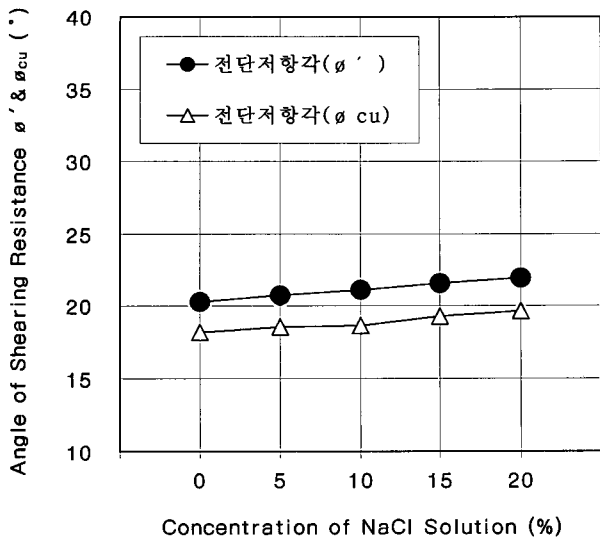


그림 10. NaCl 농도에 따른 전단저항각 변화

침출수로 포화시킨 시료들에 대한 시험결과, 침출수의 성상에 따라 정도의 차이는 있지만, 증류수로 포화된 시료에 비해 강도가 증가하였으며 NaCl 수용액으로 포화시킨 시료보다도 강도증가 현상이 큰 것으로 나타났다. 이는 표 4에서 보듯이 NaCl 수용액에 비해 침출수의 양이온가(cation balance)가 크기 때문인 것으로 판단된다.

### 4.3 압밀특성 변화

표 6은 상이한 간극수로 포화된 9개의 시료에 대한 압밀시험 결과로, 각 시료별 e-log(P) 곡선으로부터 산정된 선형압밀하중( $P_c$ )과 압축지수( $C_c$ )를 나타낸 것이며, 그림 11과 그림 12는 각각 압밀시험을 통해 얻어진 9개 점토 시료별 압밀계수( $C_v$ )와 체적변화계수( $m_v$ ) 곡선을 나타내고 있다.

압밀시험결과, NaCl 수용액의 농도가 0%에서 20%로 증가함에 따라 압축지수( $C_c$ )는 0.452에서 최대 0.608로

표 6. 압밀시험 결과

시료 No.	$C_c$	$P_c$ (kPa)	적용 포화수
SH-01	0.452	80.0	증류수
SH-02	0.495	90.0	5% 소금물
SH-03	0.608	96.0	10% 소금물
SH-04	0.455	100.0	15% 소금물
SH-05	0.608	115.0	20% 소금물
SH-06	0.548	125.0	침출수(충남당진)
SH-07	0.585	160.0	침출수(충남금산)
SH-08	0.616	170.0	침출수(대전금고)
SH-09	0.565	150.0	침출수(대전신대)

커지는 것으로 나타났으며, 이것은 전해질 용액의 농도가 증가함에 따라 흙의 구조가 간극비와 압축성이 큰 면모구조로 변하기 때문인 것으로 판단된다. 쓰레기 매립장 침출수로 포화된 시료의 압축지수는 0.548~0.616으로 증류수로 포화된 시료에 비해 모두 증가하였는데, 이것 역시 전해질 용액의 농도 증가에 따른 흙 구조의 변화에 기인한 것으로 판단된다.

표 7과 그림 13은 압밀시험을 통해 측정된 투수계수 변화를 나타낸 것으로 NaCl 농도가 15%인 시료를 제외하고는 NaCl 수용액 농도가 증가할수록 투수계수도 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 강도 및 압밀 특성 변화와 동일하게 확산이중층 모델로써 설명이 가능하다(Madsen, F. T. 등, 1987). 소금물 15% 포화시료의 경우는 전해질 농도 이외에 확산이중층 두께와 토립자의 구조에 영향을 주는 포화수(NaCl 수용액)와 시료 사이에 예기치 않은 화학적 작용이 형성된 것으로 추정된다.

한편, 침출수로 포화된 시료의 경우, 증류수로 포화된 시료에 비해 투수계수가 모두 증가하였는데, 이것 역시 전해질 농도 증가에 따른 확산이중층의 두께 변화로 야

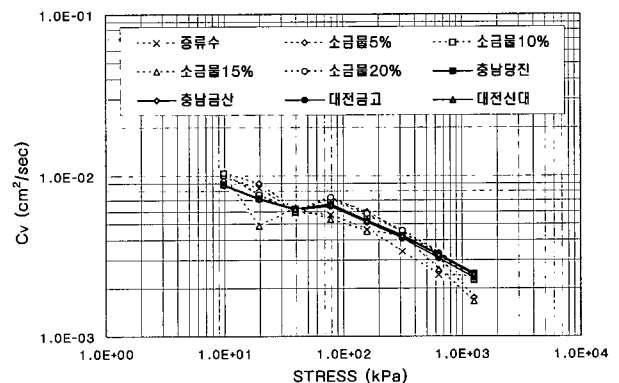


그림 11. 압밀계수( $C_v$ ) 곡선

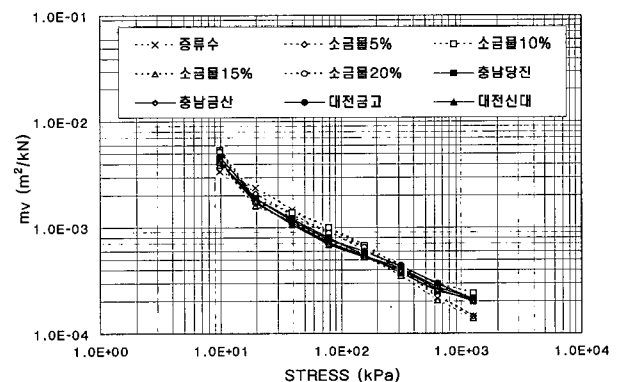


그림 12. 체적변화계수( $m_v$ ) 곡선



표 7. 투수계수(cm/sec) 변화

시료 No	재 하 하 중			적용 포화수
	9.81kPa	156.91kPa	1,255kPa	
SH-01	$3.25 \times 10^{-6}$	$2.87 \times 10^{-7}$	$3.34 \times 10^{-8}$	증류수
SH-02	$4.32 \times 10^{-6}$	$3.61 \times 10^{-7}$	$2.46 \times 10^{-8}$	5% 소금물
SH-03	$5.48 \times 10^{-6}$	$3.77 \times 10^{-7}$	$5.34 \times 10^{-8}$	10% 소금물
SH-04	$3.86 \times 10^{-6}$	$2.39 \times 10^{-7}$	$2.24 \times 10^{-8}$	15% 소금물
SH-05	$5.26 \times 10^{-6}$	$3.69 \times 10^{-7}$	$4.89 \times 10^{-8}$	20% 소금물
SH-06	$3.61 \times 10^{-6}$	$2.84 \times 10^{-7}$	$5.02 \times 10^{-8}$	침출수(충남당진)
SH-07	$3.75 \times 10^{-6}$	$2.81 \times 10^{-7}$	$5.05 \times 10^{-8}$	침출수(충남금산)
SH-08	$4.02 \times 10^{-6}$	$3.03 \times 10^{-7}$	$4.73 \times 10^{-8}$	침출수(대전금고)
SH-09	$3.61 \times 10^{-6}$	$2.74 \times 10^{-7}$	$4.91 \times 10^{-8}$	침출수(대전신대)

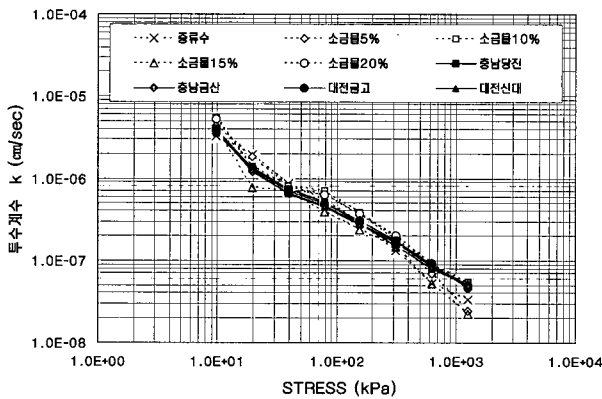


그림 13. 투수계수 곡선

기되는 흙 구조상의 변화 때문인 것으로 보인다. 그러나, 쓰레기 매립장 침출수별 투수계수를 보다 면밀하게 분석하기 위해서는 확산이중층 모델 이외에 침출수에 대한 성분분석결과에 주목할 필요가 있다. 흙의 투수성이 반영된 SAR 값의 크기는 표 4에서 살펴본 바와 같이 충남 당진, 충남 금산, 대전 금고, 대전 신대의 순으로 나타났다. 실제 현장의 응력상태와 유사한 재하하중(156.91kPa)에서의 투수계수를 비교해 보면, 대전 신대 쓰레기 매립장에서 채취된 침출수로 포화된 시료를 제외하고는 SAR 값과 투수계수간의 관계를 잘 따르는 것으로 나타났다. 대전 신대 쓰레기 매립장 침출수의 SAR 값이 타지역의 침출수보다 적음에도 불구하고 투수계수가 작게 나타난 것은 pH가 클수록 투수계수가 감소하는 흙과 화학물질의 상호작용에서 그 요인을 찾을 수 있다. 이와 같이, 확산이중층 두께와 토립자 구조에 미치는 포화수의 영향은 복합적이므로 추가적 실험을 통해서 면밀한 분석이 필요하겠지만 본 실험에서 나타난 결과만을 고려해 볼 경우, 포화수의 pH 요소가 SAR 요소에 비해 토질특성 변화에 보다 직접적인 영향을 미치

는 것으로 판단할 수 있다.

이상의 시험결과로부터, 흙의 강도 및 변형특성은 토립자의 구조와 포화수로 사용된 오염물의 농도에 의해 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었으며, 침출수로 오염된 흙의 특성변화에 대해서는 보다 많은 시험과 심층 연구를 통해 관련 메커니즘을 명확하게 규명할 필요가 있다.

## 5. 결론

퇴적점토가 폭넓게 분포하고 있는 시화호 유역에서 채취한 시료에 대해 기본 물성시험과 화학성분분석을 실시하였다. 또한 NaCl 수용액과 쓰레기 매립장 침출수로 포화시킨 시료에 대한 삼축압축시험과 압밀시험을 수행하여 강도 및 변형특성 변화를 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 채취된 점토시료에 대한 주사전자현미경(SEM) 관찰결과, 점토입자는 판상 및 침상의 모양으로 이루어져 있고, 석영과 장석의 결정들을 확인할 수 있었으며, 9개의 점토시료는 거의 유사한 입자구조를 보였다.
- (2) 에너지분산분광분석(EDX)을 통한 화학성분 분석결과, O와 C, Si, Al 및 Fe가 전체의 96% 정도를 차지하였다. 특히, C의 비율이 높게 나타나고 있는데 이것은 시료가 채취된 지역이 방조제 축조로 인하여 식물플랑크톤의 증식이 활발하게 이뤄지고 있음을 유추할 수 있다.
- (3) NaCl 수용액의 농도를 달리하여 포화시킨 점토시료에 대한 삼축압축시험결과, NaCl의 농도가 증가할수록 강도도 증가하였다. 이것은 전해질의 농도가 증가할수록 확산이중층의 두께가 감소되어 이에 상응하는 전단강도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) NaCl 수용액으로 포화시킨 시료에 대한 압밀시험결과, NaCl 수용액의 농도가 0%에서 20%로 증가함에 따라 압축지수( $C_c$ )는 0.452에서 최대 0.608로 커지는 경향을 보였다. 이것은 전해질 용액의 농도가 증가함에 따라 흙의 구조가 간극비와 압축성이 큰 변모구조로 변하기 때문인 것으로 보인다.
- (5) 쓰레기 매립장의 침출수로 포화시킨 시료들의 경우, 침출수의 성상에 따라 정도의 차이는 있지만, NaCl 수용액으로 포화시킨 시료보다도 강도증가 현상이

## 참고 문헌

큰 것으로 나타났다. 이것은 전해질 농도가 큰 포화수(침출수)의 화학적 상호작용에 기인하는 것으로 판단되며, 압축지수( $C_c$ )는 0.548~0.616으로 증류수로 포화된 시료의 압축지수 0.452에 비해 모두 증가하는 현상을 보이고 있다.

- (6) 압밀시험을 통해 산출된 투수계수는 NaCl 수용액의 농도가 증가할수록 커지는데, 이와 같은 현상은 강도 및 압밀특성 변화와 동일하게 DDL 모델로써 설명할 수 있다. 또한 침출수로 포화된 시료별 투수계수와 침출수 성상분석 결과로부터 전해질의 농도가 증가함에 따라 확산이중층의 두께가 감소하는 특성 외에도 침출수의 성상(SAR)과 투수계수간의 상관관계가 높은 것을 확인할 수 있었다.

이상의 시험결과로부터, 흙의 강도와 변형특성은 토립자의 구조와 포화수로 사용된 오염물의 특성에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 또한 해수 등으로 오염된 흙이 제체재 등으로 직접 활용되며, 장기적으로 담수의 지배 하에 있게 되는 조건에서는 간극수가 담수로 치환되면서, 흙의 강도와 변형 특성 등이 가역적으로 복원될 수 있다는 가능성이 예측된다. 따라서, 이런 조건에서는 설계강도 및 변형특성 선정시 토목 구조물의 환경조건을 충분히 감안하여 결정하여야 할 것으로 판단되며, 이와 같은 맥락에서 향후 오염된 포화수의 화학적 요인과 흙의 강도 및 변형특성 상호간의 명확한 규명을 위한 보다 심층적인 연구 수행이 필요하다.

또한 본 연구의 일환으로 확보된 시화호 지역에서 채취된 퇴적점토에 대한 화학적 특성 정보를 바탕으로 오염된 토질의 특성변화에 대한 연구자료가 축적된다면, 향후 해성 퇴적점토의 공학적 특성 연구에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

1. 민덕기, 황광모, 강문기 (2000), “울산 퇴적 점토의 화학적, 광물학적 특성”, *한국지반공학회논문집*, 제16권, 제6호, pp.51-58.
2. 박정기, 오재경 (1991), “한강하구 및 경기만에서의 점토광물에 대한 연구”, *한국해양학회지*, 제26권, pp.313-323.
3. 신동혁, 금병철, 박은영, 이희일, 오재경 (2004), “방조제 건설후 이원 대조차 기간대의 계절별 퇴적학적 특성 및 퇴적환경”, *한국지구과학회지*, 제25권, 제7호, pp.615-628.
4. 심무준, 김은수, 김경태, 이기복, 강화성, 이광우 (1998), “시화호 퇴적물의 유기탄소, 황 및 중금속 분포”, *한국물환경학회지*, 제14권, 제4호, pp.469-482.
5. 안태봉 (1997), “염분이 모래와 벤토나이트 혼합토의 응력변형에 미치는 영향”, *한국지반공학회지*, 제13권, 제2호, pp.17-27.
6. 이연규, 황진연, 정규귀, 최정민 (1996), “광양만 및 여수해만 퇴적환경 변화-퇴적물 특성과 점토 광물 분포를 중심으로”, *한국지구과학회지*, 제16권, pp.407-416.
7. 최만석, 천중화, 우한준, 이희일 (1999), “시화호 표층퇴적물의 중금속 및 퇴적상 변화”, *한국환경과학회지*, 제18권, 제5호, pp.593-600.
8. 최진용, 김석윤 (1998), “한반도 주변해역 점토광물의 함량과 분포”, *한국지구과학회지*, 제19권, 제5호, pp.524-532.
9. Grim, R. E. (1939), “Relation of the composition to the properties of clay”, *J. Amer. Ceram. Soc.*, Vol.22, pp.141-151.
10. Gruner, J. W. (1932), “The crystal structure of kaolinite”, *Z. Kristallogr*, Vol.83, pp.75-88.
11. Hofmann, U., Endell, K., and Wilm, D. (1933), “Kristallstruktur und Quellung von Montmorillonit”, *Das Tonmineral der Bentonittonne*, *Z. Kristallogr*, Vol.86, pp.340-348.
12. Madsen, F. T. and Mitchell, J. K. (1987), “Chemical Effects on Clay Hydraulic Conductivity and Their Determination”, *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, ASCE, ASTM, Geotechnical Special Publication.
13. Moun, J. and Rosenquist, I. (1961), “The Mechanical Properties of Montmorillonite and Illitic Clays Related to the Electrolytes of the Pore Water”, *Proceeding, 5th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, 263page.
14. Stawinski, J., Wierchos, J., and Garcia-Gonzalez, M. T. (1990), “Influence of Calcium and Sodium Concentration on the Microstructure Bentonite and Kaolin”, *Clay Miner.*, Vol.38, No.6, pp.617-622.

(접수일자 2005. 5. 4, 심사완료일 2005. 6. 23)