

오염물질에 의한 점토 차수재의 역학적 특성변화 및 지하수 오염거동

하광현¹ · 이상은^{2*} · 정성래^{3,4} · 천병식⁴

¹(주)삼보기술단, ²강원대학교 에너지 · 자원공학과, ³(주)성지지반기술, ⁴한양대학교 토목공학과

The Change in Geotechnical Properties of Clay Liner and the Contamination Behavior of Groundwater Due to Contaminant

Kwang-Hyun Ha¹ · Sang-Eun Lee^{2*} · Sung-Rae Chung^{3,4} · Byung-Sik Chun⁴

¹Sambo Engineering Co. LTD

²Department of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University

³SungJi Geotechnical Engineering Co., LTD.

⁴Department of Civil Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

The triaxial compression tests and consolidation tests using NaCl solution and leachates as substitute pore (or saturated) water in samples were carried out to find out the behavior characteristics of strength, deformation and permeability coefficient of contaminated clay. Also, the chemical property analysis on the clay samples using scanning electron microscope and energy dispersive x-ray spectrometer were involved. The magnitudes of composition ratio were shown in the order of O, C, Si, Al, and Fe as a result of chemical composition analysis for clay samples. Besides, as the results of triaxial compression tests and consolidation tests, the shear strength, compression and permeability properties were increased with increasing in the concentration of contaminant (NaCl). It may be considered that these circumstances be caused by the changes of soil structure to flocculent structure due to the decrease in the thickness of diffuse double layer with increasing in the concentration of electrolyte. MT3D model was also using to grasp the procedures that the groundwater may be contaminated by the leachates permeated through the clay liner. The results of contaminant transport analysis showed a tendency that the predicted concentration of groundwater was higher with increasing in the initial concentration of Cl^- ion and increased as a nonlinear curves with time. The transportation distance calculated by the use of regression equation between the distance from contaminant source and the concentration of Cl^- ion was increased with increasing the initial concentration.

Key words : Leachate, Diffuse double layer, Flocculent structure, Contaminated ground- water, Contaminant transport analysis

요 약 문

오염물질로 오염된 퇴적점토의 강도, 변형 및 투수특성 변화를 파악하기 위하여 NaCl 수용액과 매립장 침출수를 시료의 간극수(포화수)로 교체하여 삼축압축시험과 압밀시험을 수행하였다. 또한, 채취된 점토시료의 화학적 특성을 규명하기 위하여 주사전자현미경(SEM) 관찰과 에너지분산분광(EDX) 분석이 수반된다. 화학성분 분석결과 O, C, Si, Al, Fe 크기 순의 구성비가 얻어졌으며, 삼축압축시험 및 압밀시험결과는 NaCl의 농도가 증가할수록 극한응력(강도)은 증가하고 압축성과 투수성이 커지는 경향을 보이는데, 이는 전해질의 농도가 증가할수록 확산이중층(DDL)의 두께가 감소되어 면모화되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 점토 차수재를 투과한 침출수가 지하수 오염에 미치는 영향을 분석하기 위하여 MT3D 해석모델이 이용되었으며, 지하수 오염거동 해석결과 초기 염소이온 농도가 클수록 측정농

*Corresponding author : lee9367@kangwon.ac.kr

원고접수일 : 2007. 8. 13 게재승인일 : 2007. 10. 1

질의 및 토의 : 2008. 4. 30 까지

도도 커지며, 시간경과에 따라 지하수 오염농도는 비선형적으로 증가되었다. 지하수 오염농도 감소 관계식을 유도하여 지하수 오염 이동거리를 예측한 결과, 초기농도가 클수록 지하수 오염 이동거리도 크게 나타났다.

주제어 : 침출수, 확산이중층, 면모구조, 지하수 오염, 오염물질 이동해석

1. 서 론

차수재로 이용되는 점토는 점토광물의 종류 및 특성뿐만 아니라 입도분포, 토립자의 형상, 유기물 함량, 퇴적환경 및 응력이력 등의 영향으로 그 특성이 다양화될 잠재성이 내재되어 있으므로 점토에 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, 점토층의 공학적 특성뿐만 아니라 광물학적인 특성에 대한 지식이 필요하게 되었다. 점토는 입자 크기가 작고 일반 광물과 거동형태가 상이하며, 이러한 점토광물에 대한 연구는 X선 회절분석법(XRD)이 개발되면서 활발히 수행되고 있다(민덕기 등, 2000).

한편, 인접 거주지역의 생활하수와 산업공단에서 하천을 따라 유입되는 산업폐수로 인한 수질문제와 수반하여 환경문제에 대한 인식 변화와 관심 증대로 인해 중금속 오염 및 부영양화와 같은 환경공학적인 측면에서 많은 연구가 국내에서 수행되고 있다. 안태봉(1997)에 의해 염분이 모래-벤토나이트 혼합토의 응력변형에 미치는 영향에 관한 연구가 수행된 바 있지만, 생활 및 산업폐수 등과 같은 실제 오염물이 토질 특성에 미치는 영향에 대한 지반공학적인 측면에서의 접근은 거의 이루어지지 않고 있다.

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

아울러, 침출수가 지하수 오염에 미치는 영향을 파악하

기 위한 일련의 분석이 이루어졌다. 이 연구에서는 쓰레기 침출수가 점토 차수층을 투과하여 지하수층으로 확산되는 특성을 분석하기 위하여 MT3D 모델을 이용한 오염물질 거동해석이 수행되었다.

2. 오염된 점토의 특성변화

2.1. 시료준비 및 시험

2.1.1. 시료채취 및 기본물성시험

시료는 시화호 유역(시화 1공구)의 8개소에서 Thin Wall Tube Sampler을 이용하여 GL(-) 2~3 m의 동일 심도에서 불교란 상태로 채취되었으며, 현장에서 채취된 점토시료에 대해서는 비중, 입도분석, 함수비, 에터버그한계 시험 등이 수행되었다.

2.1.2. 입자구조 및 화학성분

입자구조 관찰 및 화학성분 분석은 기초과학지원연구소 춘천분소의 도움을 받아 이루어졌다. 입자구조 관찰을 위한 점토시료 표면사진 촬영은 동 분소가 보유한 Hitachi Science Systems사의 주사전자현미경(SEM)을 사용하였고, 주사전자현미경에 부착된 X선 스펙트럼 검출기를 이용하여 화학성분을 정량적으로 분석하였다.

2.1.3. 오염수(포화수), 시료조성 및 역학시험

오염물질이 역학적 특성변화에 미치는 영향분석의 일환으로 점토시료의 간극수가 계획된 간극수로 치환되도록 정수위 투수시험과 유사한 일련의 과정이 수행되었다. 즉, 점토시료가 채워져 있는 샘플러를 투수원통으로 사용하여 증류수, NaCl 수용액(5%, 10%, 20%)과 4개소의 매립장에서 채취한 침출수를 상부에서 지속적으로 공급하는 방법으로 간극수를 치환하였다.

치환 소요시간에 대한 예비시험이나 치환 완료 후 치환 상태를 확인하기 위한 시험은 수행되지 않았으나 Darcy의 법칙을 이용하여 치환 소요시간에 대한 개략적인 검토가 이루어졌으며 이를 근거로 13개월의 치환기간이 적용되었다. 본 시험에서 시료별로 적용한 치환 간극수의 조성현황은 Table 1과 같으며, 이런 일련의 과정을 거쳐 얻어진 시료를 대상으로 역학시험이 수행되었다.

2.2. 시험결과 및 분석

2.2.1 점토시료의 물리적 성질

점토시료에 대한 물성 시험결과는 Table 2에 정리되고,

Table 1. Porewaters applied to the samples

Sample No.	Porewater applied
SH-01	Distilled water
SH-02	5% NaCl solution
SH-03	10% NaCl solution
SH-04	20% NaCl solution
SH-05	Leachate (DangJin disposal site)
SH-06	Leachate (KeumSan disposal site)
SH-07	Leachate (KeumGo disposal site)
SH-08	Leachate (ShinDae disposal site)

Table 2. Physical and index properties of the clay samples

Sample No.	% passing No.200 sieve	Specific gravity	Atterberg limits			Water content W_n (%)
			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	93.5	2.73	79.5	30.0	49.5	61.2
SH-05	92.6	2.73	81.2	30.7	50.5	59.4
SH-06	93.9	2.73	85.1	31.2	53.9	58.9
SH-07	92.0	2.73	80.0	28.9	51.5	59.6
SH-08	90.5	2.73	78.9	29.3	49.6	58.5
Aver.	93.6	2.73	81.9	30.6	51.5	59.9

#200체 통과량은 평균 93.6%, 비중은 2.73, 액성한계 및 소성한계는 평균 81.9%와 30.6%이고 함수비는 평균 59.9%가 얻어졌으며 8개소에서 채취된 점토시료가 거의 유사한 물리적 성질을 갖는 것으로 나타났다.

2.2.2. 점토시료의 입자구조 및 화학적 특성

1) 입자구조

점토시료 표면에 대한 대표적인 주사전자현미경 촬영성상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1로부터 입자구조는 판상 및 침상으로 이루어져 있으며 석영과 장석의 조암광물 결정이 분포되고 있는 것으로 확인되는 한편, 8개의 시료는 모두 유사한 입자구조를 갖는 것으로 판단된다.

2) 화학적 특성

Table 3은 에너지분산분광분석 결과로서 시료별 원소 구성비율을 보여주고 있는데, 평균 구성비율은 O, C, Si, Al, Fe 원소 순으로 44.5%, 28.9%, 13.8%, 6.1% 및 2.5%이며 전체의 96%를 점유하고 있으며, 기타 미량의 원소가 4.1%로 분포되고 있다. 이 구성비율은 시료별로 약간의 차이는 있지만 O, C, Si, Al 및 Fe 순서의 동일한 경향을 보였다.

2.2.3. 쓰레기 침출수 성상분석

삼축압축시험 및 압밀시험 시료의 간극수(포화수)로 사용하기 위하여 채취된 쓰레기 침출수에 대한 성상분석이

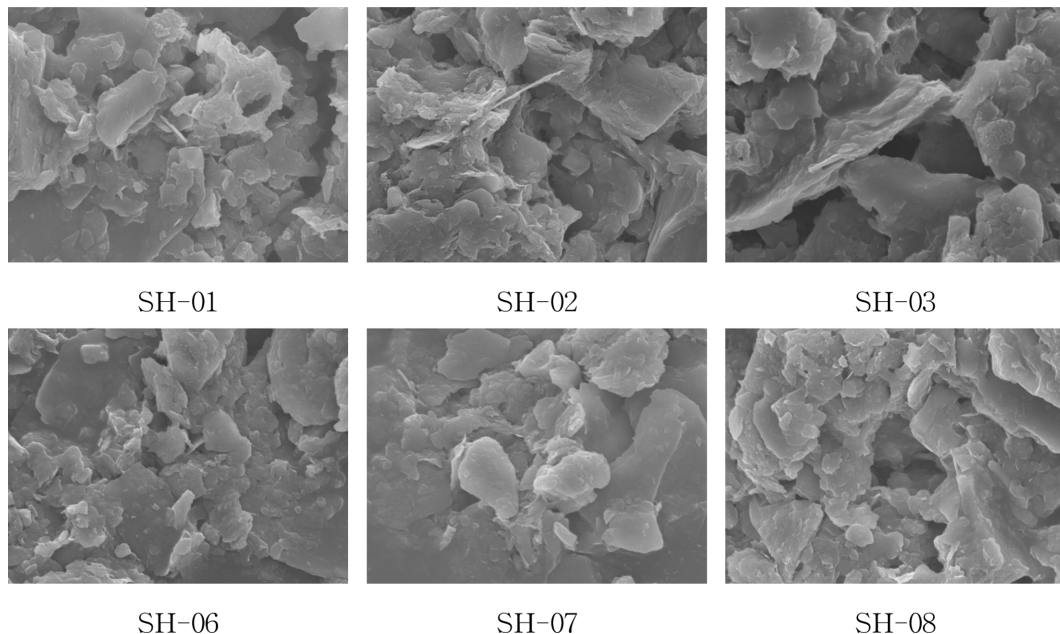


Fig. 1. Typical particle structures of the specimens (magnified by 100,000 times).

Table 3. Results of the EDX analysis for the specimens

Sample No.		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 (%)	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-05	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-06	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-07	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-08	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

Table 4. Results of SAR analysis for leachates

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

수행되었으며 Table 4에 그 성과가 정리된다. 이 표에서 SAR(sodium adsorption ratio)은 흙의 투수성과 폭기(aeration)의 정도를 나타내는 지수로 식(1)과 같이 Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 이온의 농도에 따라 결정된다. 흙의 Na⁺ 이온 함유도가 증가하면 즉, SAR 값이 커지면 흙은 알칼리성이 되어 투수성이 감소되므로 배수가 잘 안되고 공기소통도 현저히 저감된다(Stawinnski, et al., 1990).

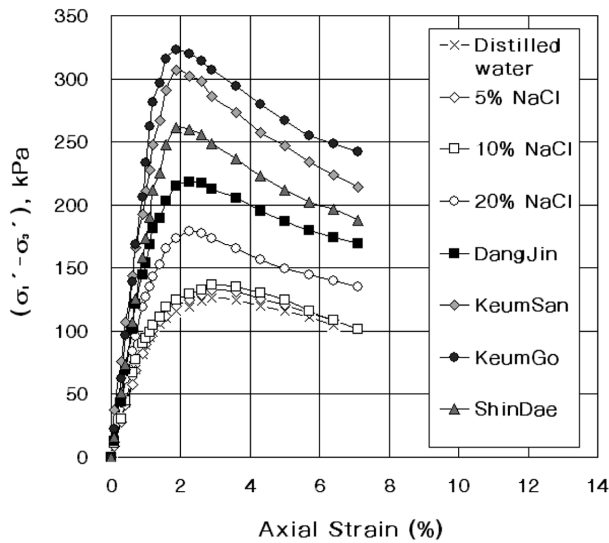
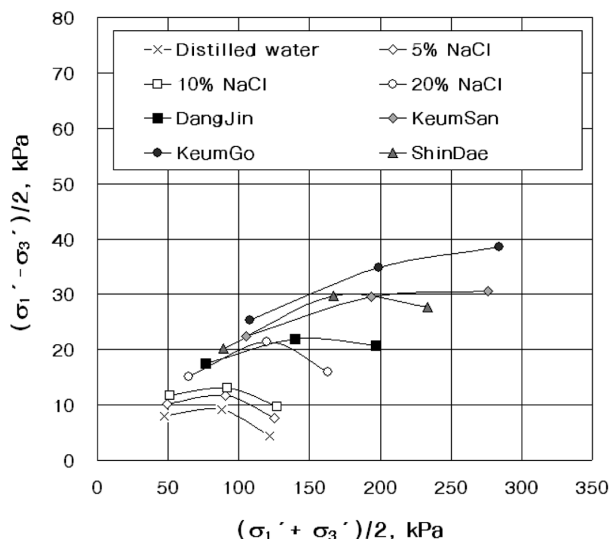
$$SAR(mg/L) = \frac{N_a^+}{\sqrt{\frac{Mg^{2+} + Ca^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

Table 5. Result of unconfined compression and triaxial compression tests

Sample No.	Unconfined compression test	Triaxial compression test				
		UU	CU			
			Total strength	Effective strength		
	q_u (kPa)	C_{uu} (kPa)	C_{cu} (kPa)	ϕ_{cu} (°)	C' (kPa)	ϕ' (°)
SH-01	81.95	42.02	7.85	18.2	5.88	20.3
SH-02	85.81	44.17	8.83	18.6	7.85	20.8
SH-03	88.56	46.38	9.81	18.7	7.85	21.1
SH-04	98.33	51.33	11.77	19.7	9.81	21.9
SH-05	109.7	56.98	11.77	20.2	9.81	22.3
SH-06	129.0	66.81	13.73	21.3	11.77	23.6
SH-07	133.1	68.32	13.73	22.1	11.77	24.9
SH-08	125.3	65.07	12.75	20.9	10.79	23.7

2.2.4. 역학특성 변화

계획된 간극수(포화수)로 치환된 시료에 대한 일축압축 시험과 삼축압축시험 결과는 Table 5와 같다. Fig. 2는 축방향 응력에 대한 변형 특성을, Fig. 3은 $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 에 대한 $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ 의 관계특성을 나타낸 것이다. Fig. 2는 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 화학적 성상에 따른 차이는 있지만 NaCl 수용액으로 포화된 시료

Fig. 2. $(\sigma_1' - \sigma_3')$ vs. axial strain curves.Fig. 3. $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ vs. $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ curves.

보다 모두 큰 것으로 나타났다. Fig. 3은 파괴시의 응력 상태를 응력경로로 나타낸 것으로 NaCl 수용액 농도 증가에 따른 k 선의 기울기 변화는 크지 않지만 침출수로 포화된 시료의 기울기는 증류수로 포화된 시료에 비해 상대적으로 큰 증가를 보인다.

NaCl 수용액 농도를 달리한 시료에 대한 일축압축시험과 삼축압축시험 결과, 농도가 증가할수록 점토시료의 강도도 증가하였다(Table 5). 이와 같은 현상은 Gouy-Chapman의 확산이중층(diffuse double layer, DDL) 모델을 이용하여 설명될 수 있다. Gouy-Chapman 모델에서 유도된 이온의 이론적 분포는 식 (2)와 같이 나타낼 수

있으며, 식 (2)의 n_0 를 몰농도(m_0)로 표현하면 식 (3)과 같이 된다. 식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 간극수의 이온농도와 이온의 원자기는 확산층의 양이온수와 관계된다. 즉, 1가의 이온은 2가의 이온보다 $n_{(+)}$ 가 크고 또한 이온농도가 적을수록 $n_{(+)}$ 가 증가하기 때문에 확산층 두께가 커지게 된다.

$$n_{(+)} = n_0 \coth^2 \frac{\chi}{2} \sqrt{\frac{8\pi n_0 z^2 e^2}{\epsilon \chi T}} \quad (2)$$

$$n_{(+)} = N m_0 \coth^2 (0.16z\sqrt{m_0\chi}) \quad (3)$$

여기서,

$n_{(+)}$: 토립자 표면부터 거리 χ (Å)에서 양이온수

n_0 : 간극수 단위용적 중의 양이온수(normality)

N : 노르말 농도(normality)

m_0 : 간극수 단위용적 중의 양이온수(molarity)

z : 양이온의 원자가

e_c : 전기소량(원자 1개의 전하, coulomb)

ϵ : 물의 유전체 상수

χ : Boltzmann 상수

T : 절대온도

따라서 양의 전기를 띠는 Na^+ 이온과의 치환은 양이온과 음으로 대전되는 점토판 사이의 π 는 힘을 증가시켜 확산이중층 두께가 감소되고 이에 상응하는 비배수 전단 강도는 증가하게 된다.

Table 5에서 보는 바와 같이 NaCl 수용액 농도가 0%에서 20%로 증가함에 따라 유효 점착력이 5.88 kPa에서 9.81 kPa로 약 1.7배 정도로 증가된 현상은 전해질 용액의 농도가 증가함에 따라 흙 구조가 면화되는 현상에 기인한 것으로 볼 수 있다(Moum, and Rosenquist, 1961). 반면, 전단저항각은 전응력 조건(ϕ_{cu})에서는 18.2°에서 19.7°로 약 1.5° 증가하였으며, 유효응력 조건(ϕ)에서는 20.3°에서 21.6°로 약 1.3° 증가하였다. 이와 같이 NaCl 수용액의 농도가 증가하더라도 전단저항각은 큰 변화를 보이지 않는데 이것은 전단저항각이 화학적인 영향보다는 시료의 밀도성질에 지배됨을 유추할 수 있다. 한편 쓰레기 매립장의 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.

Table 6은 상이한 간극수로 포화된 9개의 시료에 대한 압밀시험 결과를 나타내고 있다. 압밀시험결과, NaCl 수

Table 6. Results of the consolidation tests

Sample No.	C_c	P_c (kPa)
SH-01	0.452	80.0
SH-02	0.495	90.0
SH-03	0.608	96.0
SH-04	0.608	115.0
SH-05	0.548	125.0
SH-06	0.585	160.0
SH-07	0.616	170.0
SH-08	0.565	150.0

용액의 농도가 0%에서 20%로 증가하였다. 압축지수(C_c)는 0.452에서 최대 0.608로 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.

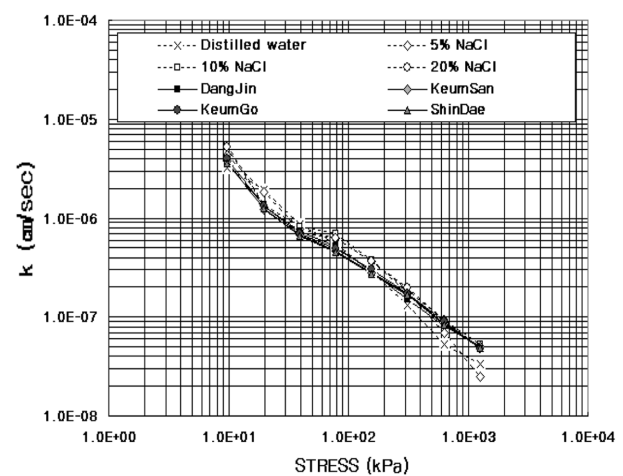
2.2.5. 투수특성 변화

Table 7과 Fig. 4는 압밀시험을 통해 측정된 투수계수 변화를 나타낸 것으로 NaCl 농도가 15%인 시료를 제외하고는 수용액 농도 증가에 따라 투수계수도 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 강도 및 압밀특성 변화와 동일하게 DDL모델로 설명이 가능하다(Madsen, F. T., 등, 1961). 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 추측된다.

침출수로 포화된 시료의 경우도 증류수로 포화된 시료에 비해 투수계수가 모두 증가하였는데, 여기서도 전해질 농도 증가에 따른 확산이중층의 두께 변화에 기인한 것으로 보인다. 그러나 쓰레기 매립장 침출수별 투수계수 변화를 보다 면밀하게 분석하기 위해서는 DDL모델 이외에 침출수에 대한 성분분석결과에 주목할 필요가 있다. 흙의 투수특성이 반영된 SAR 값은 Table 4에서 살펴본 바와 같이 충남 당진, 충남 금산, 대전 금고, 대전 신대의 순으로 나타났다. 실제 현장의 응력 상태와 유사한 재하하중(156.91 kPa)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 타 지역의 침출수보다 적음에도 불구하고 투수계수가

Table 7. Variation of the coefficient of permeability (cm/sec)

Sample No	Load applied		
	9.81kPa	156.91kPa	1,255kPa
SH-01	3.25×10^{-6}	2.87×10^{-7}	3.34×10^{-8}
SH-02	4.32×10^{-6}	3.61×10^{-7}	2.46×10^{-8}
SH-03	5.48×10^{-6}	3.77×10^{-7}	5.34×10^{-8}
SH-04	5.26×10^{-6}	3.69×10^{-7}	4.89×10^{-8}
SH-05	3.61×10^{-6}	2.84×10^{-7}	5.02×10^{-8}
SH-06	3.75×10^{-6}	2.81×10^{-7}	5.05×10^{-8}
SH-07	4.02×10^{-6}	3.03×10^{-7}	4.73×10^{-8}
SH-08	3.61×10^{-6}	2.74×10^{-7}	4.91×10^{-8}

**Fig. 4.** Variation of the coefficient of permeability, k .

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 추가적인 실험을 통해서 면밀한 분석이 필요하겠지만 본 실험에서 나타난 결과만을 고려해 볼 경우에는 포화수의 pH 요소가 SAR 요소에 비해 토질특성 변화에 보다 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

3. 매립지 오염원에 의한 지하수 오염 거동 예측

3.1. 해석 개요

본 연구에서는 오염물의 지중침투 및 수원유입에 따른 문제를 직면하는 매립장을 대상으로 점토 차수층을 통과한 오염물질에 의한 지하수 오염거동이 모사되며, 침출수 성상에 따른 오염물질의 농도변화를 분석하여 거동양상이 파악된다. 오염물질의 이동방향은 지하수 흐름과 일치하

는 것으로 가정하여 현재 상태의 수리지질학적 조건을 재현하는 정류 모사가 이루어지고 이를 바탕으로 오염물질 이동을 모의하는 부정류 모사가 수행된다.

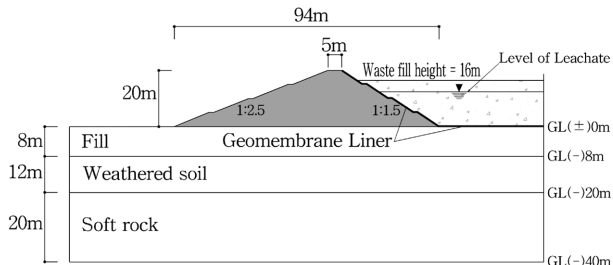


Fig. 5. Cross section of the waste disposal modeled.

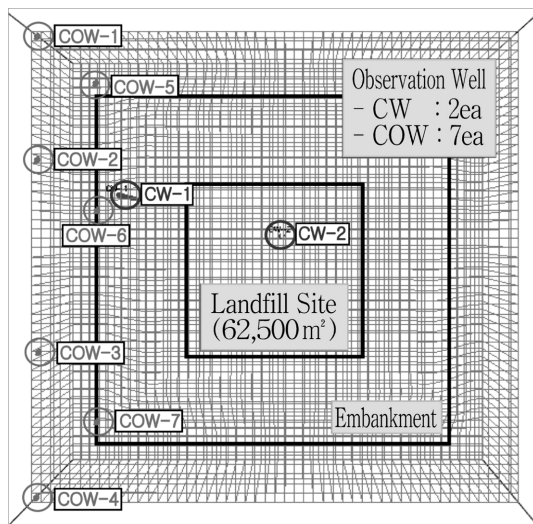


Fig. 6. Mesh used in the analysis modeling.

Table 8. Configuration of the analysis mesh

Description	Waste disposal area(m)	Area analyzed (m)	Number of cells (R × C)	Magnitude of cells (R × C)
Waste disposal	250 × 250	500 × 500	50 × 50	50 × 50

Table 10. Hydrogeologic parameters of the site

Layer No.	Classification	Specific yield (S_y)	Porosity (%)	Longitudinal dispersivity (m, α_L)	Transverse dispersivity (m, α_T)	Vertical dispersivity (m, α_V)
Layer-1	Embankment	0.2	0.3	0.1	0.01	0.01
	Wastes	0.2	0.3	0.1	0.01	0.01
	Fill	0.2	0.3	0.1	0.01	0.01
Layer-2	Weathered soil	0.001	0.2	—	—	—
Layer-3	Soft rock	0.0005	0.1	—	—	—

3.2. 해석 단면

매립지 면적은 62,500 m² (250 m × 250 m) 규모로 선정하였으며, 해석 단면 제원은 Fig. 5와 같다. 매립지역은 3개 층으로 나누고 각 층마다 50 × 50개의 셀을 사용하여 Table 8과 Fig. 6과 같이 격자망을 구성하였다. 또한, 해석결과가 모델경계의 영향을 받지 않도록 해석영역은 500 m × 500 m로 설정하였다. 해석영역의 하부 경계면은 불투수 조건으로, 좌·우측 경계면은 일정수두의 영향을 받는 조건으로 모델링하고, 표면 치수막 파손으로 오염물질이 10년간 지속적으로 유출되는 조건을 가정하여 치수재 물성은 고려하지 않았다.

또한 Fig. 6과 같이 7개의 관측정(COW-1 ~ COW-7)을 선정하여 경과기간 1, 5, 10, 20년을 주기로 오염물질의 이동 및 농도변화 특성을 분석하였다. 관측정은 오염물질의 이동방향을 고려하여 해석모델의 좌측에 분포시키고 관측정 모두 매립층 내부의 동일 심도에 위치시켰다.

3.3 매립지 치수층 및 하부지반의 수리 특성

오염물질 이동해석에 필요한 파라미터는 관련 시험결과에서 얻은 자료를 기준으로 결정하는 것이 바람직하지만, 본 연구의 해석대상은 가상의 매립지이므로 일반적으로 매립지 오염물 이동해석에 사용되는 수치를 참고하였다. 본 연구에서 적용한 지층별 수리전도도는 Table 9에, 수리 파라미터는 Table 10에 정리된다.

또한, 한국지하수총람(농업진흥청)의 수자원이용현황과 수자원장기종합계획(건설교통부) 통계자료를 기준하여 해

Table 9. Hydraulic conductivity of the site

Layer No.	Classifications	Hydraulic conductivity	
		$k_{xx} = k_{yy}$	k_{zz}
Layer-1	Embankment	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}
	Wastes	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}
	Fill	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}
Layer-2	Weathered soil	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}
Layer-3	Soft rock	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}

Table 11. Contaminant source condition

CASE No.	The sites leachate sampled	Contaminant measured	Concentration (mg/l)
CASE-1	DangJin waste disposal	Cl ⁻ ion	4,403
CASE-2	KeumSan waste disposal	Cl ⁻ ion	3,348
CASE-3	KeumGo waste disposal	Cl ⁻ ion	2,945
CASE-4	ShinDae waste disposal	Cl ⁻ ion	1,704

Table 12. The concentration at the measuring wells according to elapsed time

Well No.	Distance (m)	CASE-1(yr.)				CASE-2(yr.)				CASE-3(yr.)				CASE-4(yr.)			
		1	5	10	20	1	5	10	20	1	5	10	20	1	5	10	20
COW-1	164.6	0.00	12.8	24.6	14.1	0.00	9.7	18.7	10.7	0.00	8.6	0.0	0.0	0.00	5.0	9.5	5.5
COW-2	136.3	0.05	112.4	106.5	75.1	0.04	85.5	81.0	57.1	0.03	75.2	71.3	50.2	0.02	43.5	41.2	29.1
COW-3	136.5	0.02	90.1	111.2	79.2	0.01	68.5	84.6	60.2	0.01	60.3	74.4	53.0	0.01	34.9	43.0	30.7
COW-4	184.3	0.00	1.8	4.8	2.0	0.00	1.3	3.6	1.5	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.7	1.9	1.0
COW-5	96.3	0.00	0.7	31.2	156.6	0.00	0.6	23.8	119.1	0.00	0.5	20.9	104.8	0.00	0.3	12.1	60.6
COW-6	76.7	0.00	6.6	100.8	566.0	0.00	5.0	76.6	430.4	0.00	4.4	67.4	378.7	0.00	2.5	39.0	219.1
COW-7	94.8	0.00	1.5	39.5	178.2	0.00	1.1	35.1	135.5	0.00	1.0	26.4	119.2	0.00	0.6	15.3	69.0

석대상 지역의 연평균 강수량을 1,300 mm/yr로, 함양량은 강수량의 18%를 적용하여 234 mm/yr로, 증발산량은 27%를 적용하여 351 mm/yr로 추정하였다.

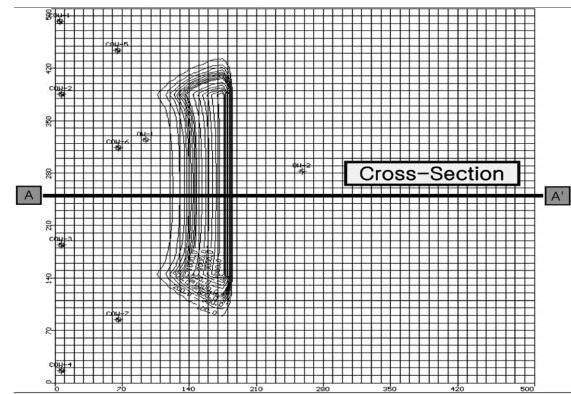
3.4. 오염원 조건

본 연구에서는 매립지 침출수의 Cl⁻이온을 MT3D 모델의 지하수 오염원으로 적용하여 오염물 거동을 모사하였으며, 해석 Case별 오염원 농도는 Table 11과 같다. 장연수 등(2001)의 연구에 따르면 Cl⁻의 유효확산계수는 Na⁺, K⁺, Ca²⁺보다 2~6배 정도 크게 나타났으며, 장연수 외(1994), 오석영 외(1996), 강동희 외(2001), 홍경택 외(2002)의 연구와 같이 매립지 주변환경 오염특성에 관한 대부분의 국내 연구에서도 염소이온을 기준물질로 사용하였다. 즉, 침출수 성상 중 가장 비중을 차지하며, 화학적 반응으로 인한 지연이 없는 비활성 염소이온을 관측 오염원으로 설정하여 오염물질 이동 및 확산범위가 가장 최대인 조건에 대하여 해석이 수행되었다.

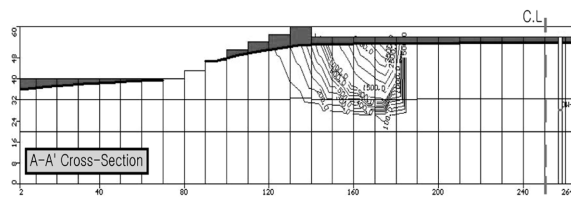
3.5. 해석결과 및 분석

관측정별로 측정된 염소이온 농도는 Table 12와 같으며, 해석결과에서 공통적으로 관측정 COW-3과 COW-6에서 측정된 염소이온 농도가 상대적으로 높게 나타나 매립지 중앙부에서 가장 많은 오염물질이 유출되어 이동성이 큰 것으로 확인되었다.

Fig. 7~Fig. 10은 염소이온 농도 분포도를 나타낸 것으로 오염물질 성상에 상관없이 거동 초기 1년 동안에는 오



(a) Plan view

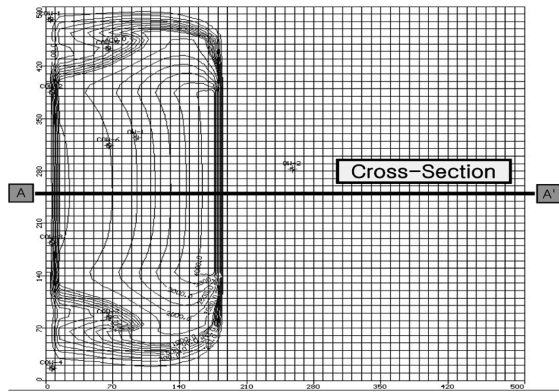


(b) Cross section(A-A)

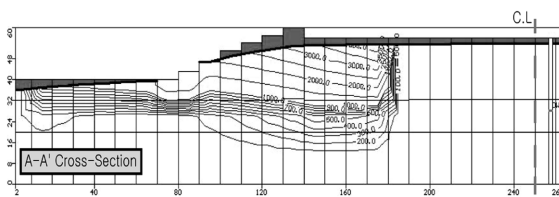
Fig. 7. Diffused concentration after 1 year (CASE-4).

염물질이 하향이동하고 시간이 경과함에 따라 수평방향으로 이동이 현저해지지만 5년 이후에는 수직방향으로의 이동이 우세해지면서 농도가 희석되는 동일한 경향을 보이고 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 침투농도가 관측되는 관측정 COW-3과 COW-6에서의 염소이온 농도변화를 보여준다.

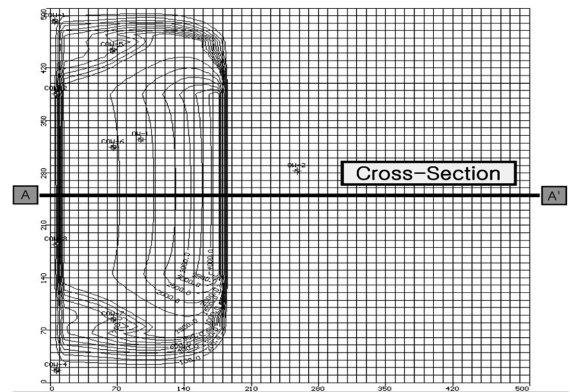


(a) Plan view

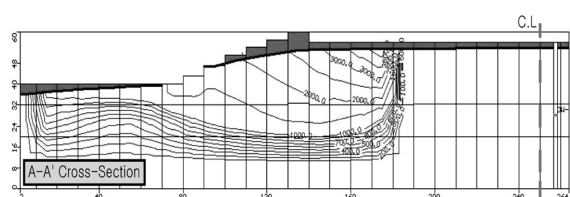


(b) Cross section(A-A)

Fig. 8. Diffused concentration after 5 years (CASE-4).

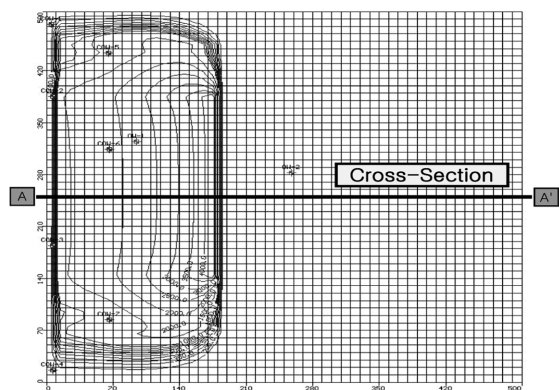


(a) Plan view

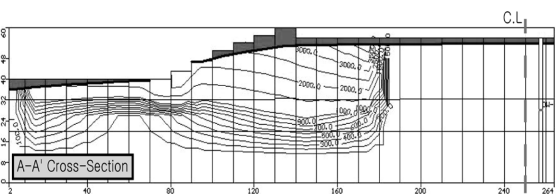


(b) Cross section(A-A)

Fig. 10. Diffused concentration after 20 years (CASE-4).



(a) Plan view



(b) Cross section(A-A)

Fig. 9. Diffused concentration after 10 years (CASE-4).

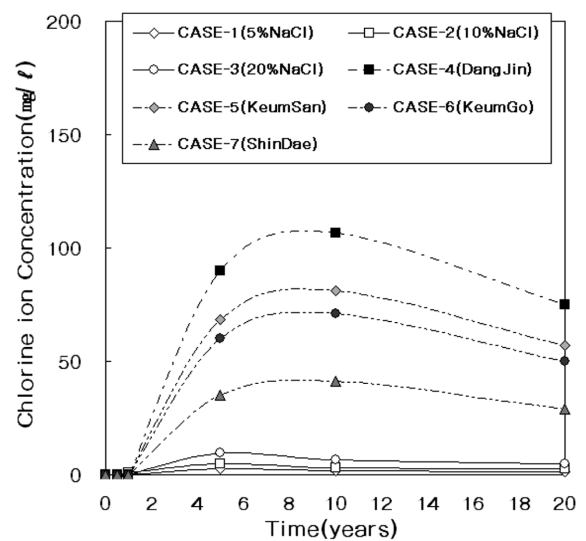


Fig. 11. Variation of the chlorine ion concentration with time at the COW-3.

Fig. 11에서 COW-3 관측점의 농도는 시간에 따라 증가하다가 일정시간(6년)이 경과하면 감소하는 결과를 보이

는데 이런 현상은 지하수 이동초기에는 확산에 의한 오염 물질의 이동으로 어느 정도까지는 농도가 증가하지만 시간경과에 따라 지하수 이동거리가 멀어지면서 희석으로 인한 지연작용이 활발해져 농도가 감소되기 때문인 것으로 판단된다. 반면, 오염원과 가장 가까운 COW-6 관측점에서는 Fig. 12와 같이 초기에는 시간경과에 따라 완만하

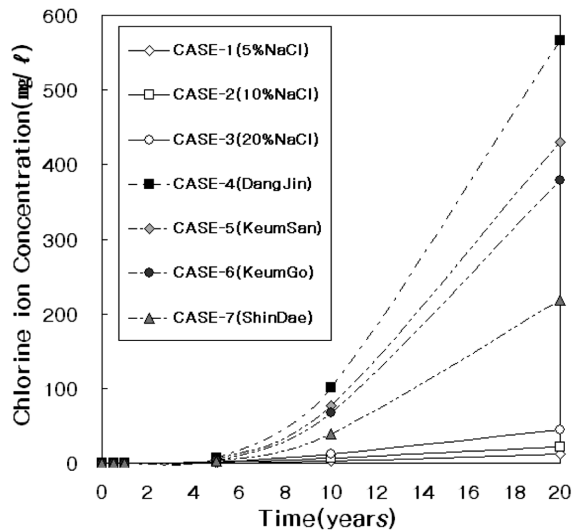


Fig. 12. Variation of the chlorine ion concentration with time at the COW-6.

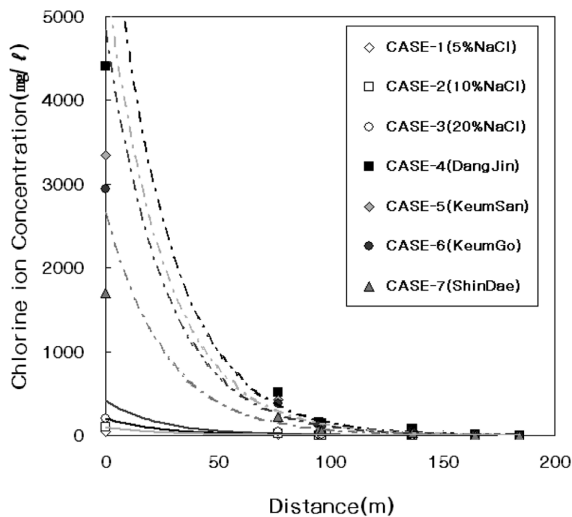


Fig. 13. Variation of chlorine ion concentration with the diffused distance.

게 농도가 증가하다가 지속적인 오염원 공급으로 인해 6년을 경계로 농도가 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

3.6. 오염물질 이동거리 예측

Fig. 13은 오염물질 이동영역을 분석하기 위해 염소이온의 농도분포를 이격거리에 따라 표현한 것으로 이격거리 증가에 따라 염소이온의 농도는 지수 감소하는 것으로 나타났다.

오염원으로부터 이격거리 90 m 구간에서는 농도가 급격하게 감소되고 이후부터 감소폭이 점차 줄어들다가 150 m 이상에서는 농도가 거의 대부분 희석된 상태로 되

Table 13. The correlation equations for concentration decay of chlorine ion with the diffused distance

Descriptions	Initial concentration of chlorine ion (mg/l)	Correlation equations	R ²	Diffused distance (m)
CASE-4	4,403	$4775.7 \times \text{EXP}(-0.0344d)$	0.97	417
CASE-5	3,348	$3641.3 \times \text{EXP}(-0.0333d)$	0.97	406
CASE-6	2,945	$3203 \times \text{EXP}(-0.0333d)$	0.97	402
CASE-7	1,704	$1853.2 \times \text{EXP}(-0.0333d)$	0.97	286

는 것을 모든 해석 Case에서 확인할 수 있었다.

한편, 이격거리별 농도변화 그래프를 이용하여 염소이온 농도감쇄 관계식을 유도하였으며, 그 결과는 Table 13과 같다. 이 관계식이 갖는 의미는 초기농도가 클수록 이격거리에 따른 농도변화가 크고 그 만큼 농도구배에 의한 확산현상이 활발해지기 때문인 것으로 해석된다. 일반적으로 분산에 의한 이동이 확산에 의한 이동에 비해 큰 비중을 차지하지만, 매립지 제방의 점토층과 같이 지하수 유속이 매우 작은 경우에는 역학적 분산보다는 농도구배에 따른 확산현상이 거동을 지배하는 주요 요인이 된다는 점도 유추될 수 있다.

4. 결 론

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 역학적 특성 및 투수특성 변화를 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 채취된 점토시료에 대한 주사전자현미경(SEM) 관찰 결과, 점토입자는 판상 및 침상의 모양으로 이루어져 있고, 석영과 장석의 결정들을 확인할 수 있었으며, 9개의 점토시료는 거의 유사한 입자구조를 보였다.

(2) 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.

(3) NaCl 수용액으로 포화시킨 시료에 대한 압밀시험결

과, 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 면모구조로 변하기 때문인 것으로 보인다. 쓰레기 매립장의 침출수로 포화시킨 시료들의 경우, 침출수의 성상에 따라 정도의 차이는 있지만, NaCl 수용액으로 포화시킨 시료보다도 강도증가 현상이 큰 것으로 나타났다. 이것은 전해질 농도가 큰 포화수(침출수)의 화학적 상호작용에 기인하는 것으로 판단되며, 압축지수는 0.548 ~ 0.616으로 증류수로 포화된 시료의 압축지수 0.452에 비해 모두 증가하는 현상을 보이고 있다.

(4) 압밀시험 성과에서 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 성분분석 결과로부터 전해질의 농도 증가와 함께 확산이중층의 두께가 감소하는 특성에 따라 침출수의 성상(SAR)과 투수계수간의 상관관계가 높은 것을 확인할 수 있었다.

(5) 지하수 오염물질 이동 해석결과, 초기농도가 클수록 이동거리도 지수적으로 증가하였으며, 이는 초기농도가 클수록 농도변화가 크고 그 만큼 농도구배에 의한 확산현상이 활발해졌기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 시험결과로부터, 흙의 강도와 변형특성은 토립자의 구조와 포화수로 사용된 오염물의 농도에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 또한 해수 등으로 오염된 흙이 제체재 등으로 직접 활용되며, 장기적으로 담수의 지배하에 있게 되는 조건에서는 간극수가 담수로 치환되면서, 흙의 강도와 배면 특성 등이 가역적으로 복원될 수 있다는 가능성이 예측된다. 따라서 이런 조건에서는 설계 강도 및 변형특성 선정 시 토목 구조물의 환경조건을

충분히 감안하며 결정하여야 할 것으로 판단되며, 이와 같은 맥락에서 향후 오염된 포화수의 화학적 요인과 흙의 강도 및 변형특성 상호간의 명확한 규명을 위한 보다 심층적인 연구 수행이 추천된다.

참 고 문 헌

- 강동희, 조원철, 이재영, 2001, 부정류 상태에서의 난지도 매립지 침출수 거동 예측, 한국지하수환경학회지, **6**(2), 57-67.
- 민덕기, 황광모, 강문기, 2000, 울산 퇴적 점토의 화학적, 광물학적 특성, 한국지반공학회논문집, **16**(6), 51-58.
- 안태봉, 1997, 염분이 모래와 벤토나이트 혼합토의 응력변형에 미치는 영향, 한국지반공학회지, **13**(2), 17-27.
- 오석영, 전효택, 1996, 폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 자연특성, 지하수환경학회지, **3**(1), 37-49.
- 장연수, 이광열, 1994, 난지도 매립장 지반을 통한 오염이동 특성파괴 제어, 지하수환경학회지, **1**(1), 1-5.
- 장연수, 홍경택, 2001, 해안 점성토의 무기화합물에 대한 확산특성, 대한토목학회 논문집, **21**(4-C), 339-348.
- 홍경택, 장연수, 2002, 점성토층에서의 오염물 이동 특성, 대한토목학회 학술발표회 논문집, **2**, 313-316.
- 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.
- Moum, 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*, **1**, p. 263.
- Stawinski, J., Wierchos, J., and Garcia-Gonzalez, M.T., 1990, Influence of Calcium and Sodium Concentration on the Microstructure Bentonite and Kaolin, *Clay Miner.*, **38**(6), 617-622.