

매립지 차수재의 무기화합물에 대한 이류-확산 특성

Advective-diffusive Characteristics of Waste Landfill Liner to Inorganic Chemicals

장 연 수¹ Jang, Yeon-Soo

류 정 훈² Ryu, Jung-Hoon

김 용 인³ Kim, Yong-In

Abstract

Characteristics of advective-diffusive transport of inorganic chemicals in clayey soils as well as in two hardened barrier materials of silica and lime are analyzed from the laboratory column test and compared with those of pure diffusive column test. The results show that the average dispersion coefficients of three materials are $4.39 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$, $1.98 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$, $1.99 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$, respectively, and the value of clay is higher than that of hardened barrier materials. There was no significant difference between the dispersion coefficients of advective-diffusive column tests and the effective diffusion coefficients from the pure diffusive column tests, if advective velocity was lower than 10^{-7}cm/s . The range of dispersion coefficients of advective-diffusive column tests was narrower than that of diffusion coefficients of pure diffusion tests.

요 지

본 논문에서는 이류를 고려한 확산 실험을 통해 매립지 차수층을 이루는 점토와 실리카계와 석회계 두 종류의 고화재(PA, PB)에서의 무기물 이동특성을 알아보고 이를 순수확산 실험결과와 비교하였다. 점토와 고화층(PA, PB)에 대한 이류를 고려한 확산실험 결과 평균분산계수는 각각 $4.39 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$, $1.98 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$, $1.99 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 로 나타나 고화층이 점토보다 높은 것으로 나타났다. 이류-확산 실험 결과와 순수확산 실험결과를 비교 분석결과 이류를 고려한 경우 각각의 무기물에 대한 음이온인 염소이온의 분산계수의 값은 두 시험 결과 사이에 큰 차이를 나타내지 않았으나 범위는 이류를 고려한 경우가 순수확산의 경우 보다 적은 것으로 나타났다.

Keywords : Advective-diffusive, Diffusion coefficients, Hardened barrier, Landfill liner, Leachate, Retardation coefficient

1. 서 론

쓰레기 매립지에서 침출수에 의한 주변지반의 오염을 방지하기 위해서는 차수층을 통한 오염물의 이동특

성이 정확히 파악되어야 한다. 쓰레기 매립지에 설치된 차수층에서의 오염물 이동 메커니즘은 차수층의 투수계수가 낮은 관계로 이류보다는 주로 확산에 의하여 이루어진다고 알려져 있으며 이에 따라 점토라이

¹ 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Dong-Guk Univ., ysjang@dgu.ac.kr)

² 한구해외기술공사 지반부 (Korea Consultants International Geotechnical Dept.)

³ 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 (Dept. of Civil & Environmental Eng., Dong-Guk Univ.)

너의 확산계수 산출은 순수확산 시험에 의하는 경우가 많았다. 그러나 실제 매립지 점토라이너는 확산과 함께 이류의 영향을 받는 것이 분명하므로 이를 고려한 이동 특성을 찾는 것이 필요하다.

국내에서는 차수층을 통한 오염물 이동에 대한 연구로 송(1999)은 원지반점토에 대하여, 홍(2000)은 국내 수도권 매립지 제 2공구의 바닥 차수재로 사용된 고화 차수재에 대하여 낮은 투수성재료에서의 농도차에 의해 일어나는 순수확산 특성을 규명하였다. 외국에서는 Rowe 등(1988)이 쓰레기 매립지에 설치된 차수층의 이동특성을 규명하기 위해서 이류와 확산모두를 고려한 실험을 통하여 오염물 이동 인자를 구하였다. Barone 등(1989)은 오염물의 이동특성을 규명하기 위해 여러 성분으로 이루어진 현장의 침출수와 동일한 용액을 이용하여 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 의 확산계수를 구하고 이 값들을 단일 성분으로 된 용액의 실험결과로 구한 확산계수와 비교하였다. Rowe와 Badv(1996)는 NaCl을 이용 모래층과 자갈층의 이류-확산에 의한 용질의 이동을 실험하였다. Shackelford와 Daniel(1991)은 다짐 점토에서 무기물에 대한 확산시험을 수행하여 유효확산계수를 측정하였다. Garga와 O'Shaughnessy(1994)는 Champlain 해성점토 샘플에 대하여 현장조건을 고려한 확산시험을 수행하고 이를 일차원 오염물 이동 해석모델로 분석하여 Ottawa 지역에 분포된 Champlain 해성점토의 오염물 이동성을 평가하였다. van der Sloot 등(1997)은 자가형성(SSSH) 고화 차수재와 간극물이 다른 재료들에 대한 투수계수와 비반응성 용질의 유효확산계수 간의 관계를 연구하였다.

본 연구에서는 국내 수도권 제 2매립지 하부차수층에 대해 순수확산 실험을 통한 유효확산계수만이 제시되어 있는 바, 기존 순수확산 실험에 사용된 원지반점토와 수도권 제 2매립지의 하부지반에 시공된 실카계(PA)와 석회계(PB)의 고화층 재료를 이용하여 무기물의 이류-확산 컬럼 실험을 수행하였다. 또한 컬럼실험 결과에서 얻어진 데이터를 확산 및 지연계수의 영향을 고려할 수 있도록 수정한 유한요소 흐름 해석 프로그램 SATRAN(Jang, 1990)으로 해석한 것을 실험결과와 근사하여 분산계수를 구하였다. 구해진 분산계수는 기존의 송(1999), 홍(2000)에 의한 순수확산실험 결과와 비교하여 이류가 분산계수에 어느 정도 영향을 미치는 지를 확인하고 외국 문헌에서 얻은 실험결과와도 비교하였다. 실험 및 해석에 사용된 대상무기물은 NaCl, KCl, CaCl_2 이었다.

2. 배경이론

일반적으로 지반내의 오염물 이동은 이류(advection), 분산(dispersion), 반응(reaction) 및 감쇄(decay) 등과 같은 인자에 의해 지배되며(Freeze and Cherry, 1979), 이들 중 분산은 역학적 분산(mechanical dispersion)과 확산(diffusion)으로 나누어 생각할 수 있다.

공극매체에서 이류에 의한 오염물의 1차원적 이동은 Darcy의 이론인 식 (1)과 같은 침투속도를 지닌 지하수 흐름과 같이 움직이게 된다(장연수, 이광열, 2000).

$$\overline{v}_x = \frac{K}{n} \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

여기서 \overline{v}_x 는 침투유속[L/T], K는 다공질매체의 투수계수[L/T], n은 물이 다공질 매체를 통하여 실제적으로 흐르는 유효공극률을 말하고, $\frac{dh}{dx}$ 는 수두경사이다.

흡과 같은 다공질매체 내에 오염물질이 유입되었을 때는 동수구배가 존재하지 않더라도 농도구배에 의해 지하수계내의 용질의 이온이나 분자는 그들의 운동량에 따라 농도구배가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하게 된다. 이런 현상을 확산이라고 한다. 확산으로 인한 일차원 용질 거동은 Fick의 제1법칙에 의해 식 (2)와 같이 표현된다.

$$f_x = -D_e \frac{dC}{dx} \quad (2)$$

여기서 f_x = mass flux [$M/L^2/T$]

D_e 는 확산계수 [L^2/T]

$\frac{dC}{dx}$ 는 농도구배 [$M/L^3/L$] 이다.

폐기물 매립지로부터의 오염물 누출을 막기 위한 차수층은 투수계수가 작은 경우 이류(advection)나 수리동력학적 분산(hydrodynamic dispersion)보다는 확산(diffusion)에 의한 이동이 주된 오염물 이동 특성이 된다(Barone 등, 1989).

포화된 다공매체에서의 반응성용질의 이류-분산 이동 지배방정식을 다음과 같다(Freeze와 Cherry, 1979).

$$\frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\overline{v}}{R} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3)$$

여기서, C는 용액의 농도[M/L^3], D는 분산계수[L^2/T], t는 시간[T], \overline{v} 는 평균침투속도[L/T], R은 지연계수이다. 식 (3)에서의 분산계수(D)는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$D = \alpha \bar{v} + D^* \quad (4)$$

여기서, α 는 분산지수[L], D^* 는 분자확산계수[L²/T]이다. 유효확산계수와 지연계수는 다음과 같은 과정을 통해 구하였다.

- ① 포화 시 사용한 간극수의 비반응성 및 반응성용질의 배경농도와 순수확산시험을 통해 얻은 비반응성 및 반응성 용질의 깊이별 농도를 그래프에 근사한다.
- ② 프로그램의 입력계수인 분자확산계수를 가정하고 실행시켜 나온 농도 데이터를 ①의 그래프에 중첩시킨다.
- ③ 분자확산계수의 값을 변화시키며 시험데이터에 대하여 최적 근사하여 가장 적합한 분자확산계수 값을 산출한다.

비반응성 및 반응성 용질의 깊이별 농도그래프는 SATRAN프로그램을 이용하여 작성하는 데, 유한요소 프로그램인 SATRAN의 입력계수는 투수계수, 분산계수, 시간, 간극율으로서 먼저 투수계수를 이용하여 각 요소망의 수두차를 구하여 침투속도 및 분산계수를 고려한 강성행렬을 구성하고 이 강성행렬에 대하여 유한요소해석을 수행하여 깊이별 농도데이터를 산출해낼 수 있는 프로그램이다.

반응성 용질의 지연계수는 다음과 같이 구하였다.

본문의 식 (3)~식 (4)를 참조하면, 순수확산만의 이동시 속도항은 $\bar{v}=0$ 이므로 식(4)는 $D = D^*$ 로 표현할 수 있다. 따라서 식 (3)은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\frac{D^*}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5)$$

실험대상이 된 비반응성 용질(CI)의 확산계수를 D_{CI} 이라하고 반응성 양이온의 유효확산계수를 각각 D_{Na} , D_K , D_{Ca} 라고 한다면 각 순수확산 시험결과로부터 구해지는 지연계수 R과 양이온의 유효확산 계수의 관계 (Shackelford와 Daniel, 1991)는 다음과 같이 표현된다.

$$D_{Na} = \frac{D_{CI}}{R_{Na}}, D_K = \frac{D_{CI}}{R_K}, D_{Ca} = \frac{D_{CI}}{R_{Ca}} \quad (6)$$

3. 원지반 점토 및 단일고화층의 이류-확산시험

3.1 실험 장치 및 조건

본 실험은 이류를 고려한 이류-확산 컬럼실험으로 실험기간은 점토의 낮은 투수계수를 고려하여 30일로 하

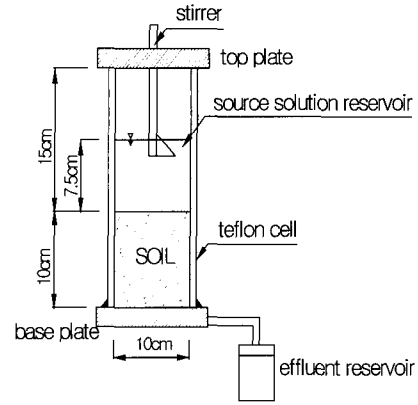


그림 1. 이류-확산 시험장비 개요도

고 유출되는 침출수를 모으기 위하여 effluent reservoir를 설치하고 effluent reservoir는 장기간 실험으로 인한 증발을 막기 위한 덮개 설치와 유출량이 적은 것을 고려하여 effluent reservoir로 사용한 메스실린더는 용량이 작은것을 사용하여 유출되는 침출수량의 미묘한 변화를 볼 수 있게 하였다(그림 1). 컬럼은 외경 11.4cm, 내경 10cm이며, 높이 15cm인 테플론 셀로 제작되었다. 시료의 높이는 10cm로 하고 침출수의 높이는 7.5cm로 하고, 시료는 각각의 물리적 특성에 맞게 건조단위중량을 기준으로 다짐하여 성형하였다.

시료 성형이 끝난 후 시료는 현장에서 채취한 원지반 간극수로 포화시켰으며, 시료의 포화는 시료하부에서 유출량이 일정해지면 포화된 것으로 보았다.

실험 중에는 reservoir안의 용액의 농도가 일정하게 유지되도록 일정 시간 간격으로 농도를 측정하여 농도가 감소했을 경우에는 용질을 보충해주고 일정한 동수 경사를 유지할 수 있도록 용액을 보충해준다. 실험 기간 동안 약 10일 간격으로 투수계수의 변화를 측정하여 평균투수계수를 구하였으며, 실험 중 시료 안으로 특정한 유로가 형성되었는지를 파악하였다.

실험이 끝난 후에는 시료를 추출하여 1cm 간격으로 잘라내어 간극수를 추출한 후 각각의 농도를 측정하고 이 결과로부터 이류-확산 특성을 추정하기 위하여 식 (3)을 모델링한 용질이동 수치해석 프로그램 SATRAN을 이용하여 실험결과를 근사하여 이류를 고려한 분산계수를 구하였다.

3.2 사용점토 및 간극수, 침출수 성분 분석

실험에 사용된 점토는 수도권 매립지 제 3공구에서

채취한 원지반 점토로 이에 대한 비중, 함수비, 액소성 한계, 체분석과 비중계분석을 통한 실내 토질 특성시험 결과를 나타내었다(표 1).

원지반 점토의 간극수에 있는 간극수의 무기물 농도와 현장에서 채취한 침출수의 성분을 분석하여 나타내었다(표 2). 간극수의 성분분석결과 염분의 농도가 높은 것으로 나타났는데, 이것은 현장의 점토가 해수의 영향을 많이 받은 지역이었기 때문으로 사료된다(송, 1999).

표 1. 원지반 점토의 물리적 특성(송, 1999)

특 성		실험에 사용된 시료
비 중		2.68
함수비(%)		35.00
액성한계(%)		42.00
소성한계(%)		25.46
소성지수(%)		16.54
습윤단위중량(g/cm ³)		2.02
최대건조단위중량(g/cm ³)		1.79
최적 함수비(%)		13.50
Grain Size (%)	Silt(#200-0.005 mm)	63.68
	Clay (<0.005 mm)	14.53

표 2. 실내시험에 의한 원지반 간극수 및 침출수의 무기물에 대한 화학적 구성

무기물종류	원지량	간극수(mg/L)	침출수(mg/L)
Cl ⁻	35.5	6,000	11,800
Na ⁺	22.9	1,452	2,400
K ⁺	39.1	79	1,430
Ca ²⁺	40.1	1,200	107.4

표 3. 실험에 사용된 각 이온별 초기농도

사용용액	실험기간 (hour)	초기농도(mg/L)	
		양이온	음이온(Cl ⁻)
NaCl	96	7,795	12,000
KCl	96	13,220	
CaCl ₂	96	6,783	

침출수 성분분석 결과는 염소의 농도가 12,000mg/L 정도로 간극수의 염소 이온 농도의 약 두 배로 나타났다. 간극수 농도분석결과(표 2)를 이용하여 실험에 사용될 점토의 배경이온농도를 알 수 있었으며, 침출수의 농도 분석결과를 통하여 실험에 사용될 인공침출수의 농도를 결정하였다(표 3). 인공침출수는 염소이온을 비반응성 용질로 사용하고 이에 대한 양이온을 점토와 흡착하는 반응성용질로 사용하였으며, 비반응성 용질의 농도는 음이온인 염소이온을 기준으로 하고, 반응성용질의 농도는 염소이온의 농도에 대한 단일 무기물의 양이온 농도를 적용하였다.

3.3 점토내에서의 이류-확산 실험

분산계수를 구하기 위하여 상대농도 $C/C_0=1(t>0)$ 조건으로 농도를 일정하게 유지시켜 주며 하부에서의 흐름을 허용하는 조건에 대하여 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 배경농도 및 초기농도 조건은 각각 표 2, 표 3과 같다.

실험 중 약 10일 간격으로 투수계수의 변화 여부를 측정하였는데, 그 결과 투수계수는 약 1.80×10^{-7} cm/sec에서 2.09×10^{-7} cm/sec로 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타나 실험 중 유로형성 등의 시료파괴는 일어나지 않은 것으로 나타났다. 각 수용액 NaCl, KCl, CaCl₂에 대해서 실험한 경우 각각의 비반응성 이온(Cl⁻)에 대한 분산계수와 각 양이온(Na⁺, K⁺, Ca²⁺)의 지연계수를 얻을 수 있었다.

음이온 Cl⁻의 깊이에 따른 농도변화를 수치해석 결과에 근사하여 분산계수를 구하였으며 양이온은 NaCl, KCl, CaCl₂ 용액에 대한 깊이에 따른 농도변화를 수치해석 결과에 근사하여 지연계수를 구하였다(그림 2).

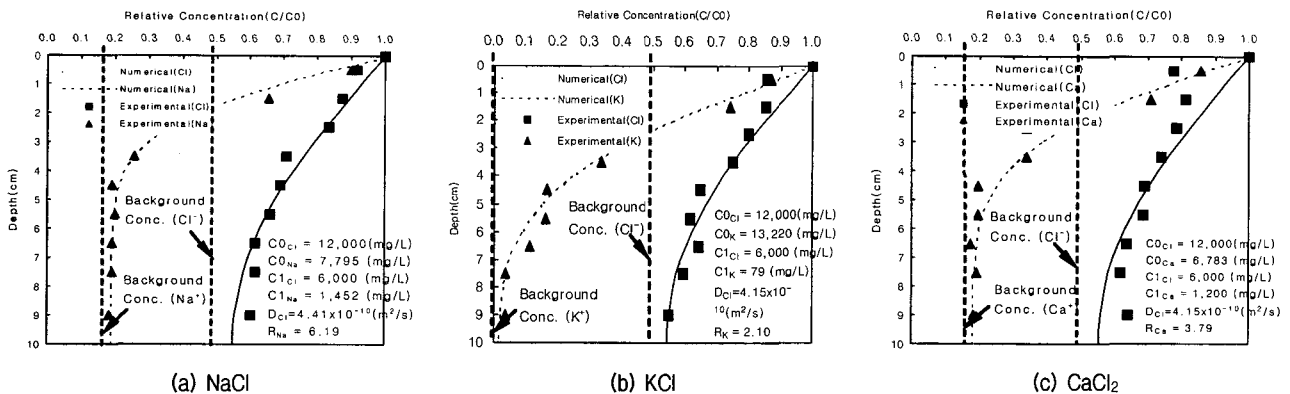


그림 2. 이류-확산의 경우 점토에 대한 용액의 깊이에 따른 이온별 농도 변화

3.4 고화층에서의 이류-확산 실험

고화층 시료의 성형은 표 4의 시료별 배합비를 토대로 하여 원지반 점토와 PA, PB 단일고화재를 배합하여 높이 10cm, 직경 10cm로 성형하였다. 여기서 PA는 실리카계 무기물(SiO₂)이 주성분이고, PB는 석회계 무기물(CaO)이 주성분인 고화차수재이다. 성형시료의 밀도는 시공다짐 조건 $\gamma_{d,max}=1.753 \text{ t/m}^3$ 의 95%를 넘도록 하여 시료를 성형하였고, 약 15일간의 포화 및 양생 기간을 거쳤다. PA혼합토는 실리카계(PA) 고화재와 원지반토를 1 : 5의 비율로 혼합하였고, PB혼합토는 석회계(PB) 고화재와 원지반토를 1 : 6.67의 비율로 혼합하였다. 초기농도는 표 3과 같이 염소이온 농도 12,000mg/L

표 4. 실리카계(PA), 및 석회계(PB) 혼합토의 배합비(류진현, 2000)

시 료	혼 합 증 량 (g)			혼합비율
	고화재	모 토	증류수	
PA혼합토	229.08	1145.38	185.54	PA : 모토 = 1 : 5
PB혼합토	179.2	1195.2	185.54	PB : 모토 = 1 : 6.67

와 이에 대한 각 단일무기물의 양이온이 적용되며 실험 기간은 30일이다.

이류-확산실험에서 얻어진 실리카계(PA) 혼합토와 석회계(PB) 혼합토의 평균투수계수는 각각 $0.92 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 와 $0.95 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 로 차수층의 투수계수 설계 기준인 10^{-7} cm/sec 이하에 적합한 것으로 나타났으며 분산계수와 지연계수는 점토와 마찬가지로 음이온과 양이온의 깊이에 따른 농도변화를 수치해석 결과에 피팅하여 구하였다.

그리고, 실리카계(PA) 혼합토에 대한 NaCl, KCl, CaCl₂ 각각의 용액의 깊이에 따른 이온별 농도변화 데이터와 수치해석 결과를 피팅하여 그래프를 그렸다(그림 3).

다음은 석회계(PB) 혼합토의 3가지 수용액에 대한 깊이에 따른 이온별 농도변화 데이터를 수치해석 결과에 근사한 결과이다(그림 4).

3.5 점토와 고화층에 대한 이류-확산 실험 결과 및 고찰

원지반 점토와 고화층(PA, PB혼합토)에 대한 이류-확산 실험결과와 송(1999)와 홍(2000)의 순수확산 실험

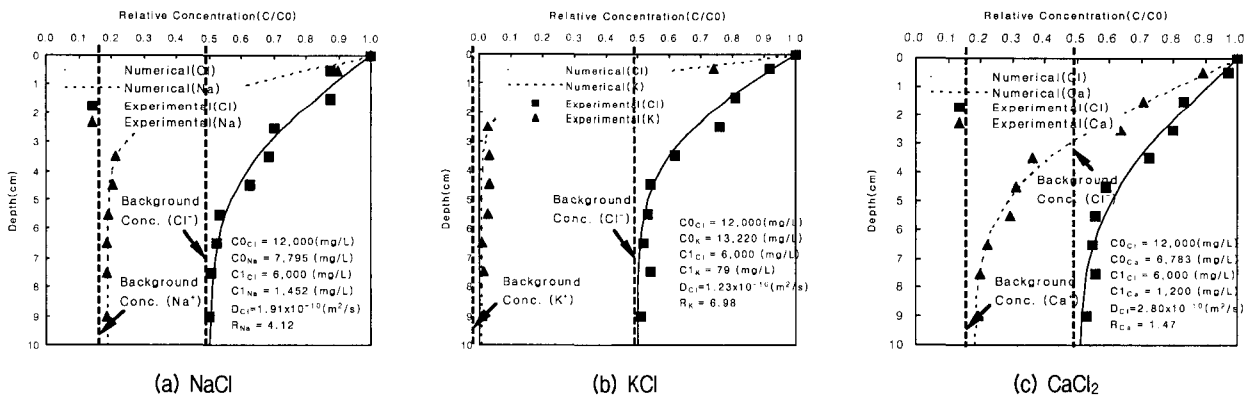


그림 3. 이류-확산의 경우 실리카계(PA)혼합토에 대한 용액의 깊이에 따른 이온별 농도 변화

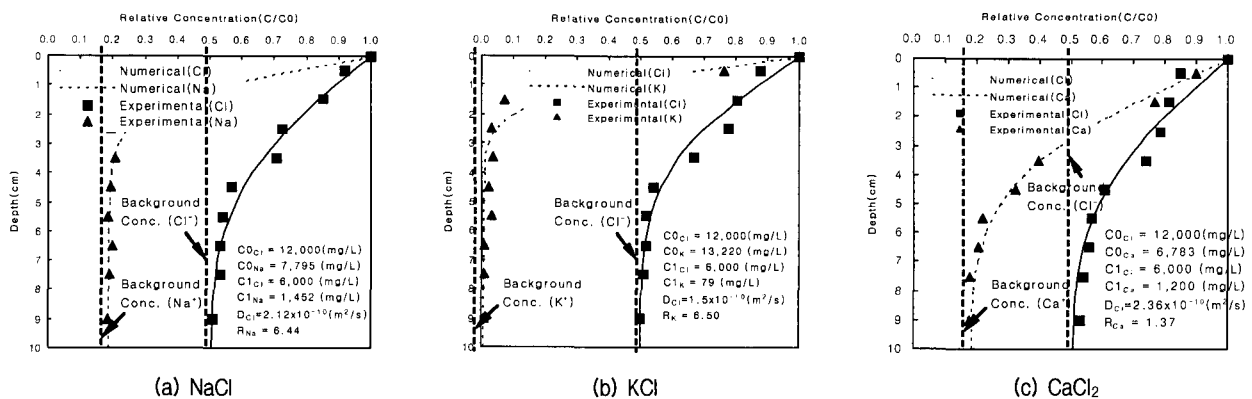


그림 4. 이류-확산의 경우 석회계(PB)혼합토에 대한 용액의 깊이에 따른 이온별 농도 변화

표 5. 실험결과에 따른 염소이온의 분산계수 및 양이온의 지연계수

시 료	사용용질	이류-확산			순수확산 (홍, 2000)	
		이류속도 (10^{-7} cm/s)	분산계수 (10^{-10} m ² /s)	지연계수	유효확산계수 (10^{-10} m ² /s)	지연계수
원지반 점토	NaCl	3.62	4.41	6.19	4.16	5.94
	KCl	3.19	4.15	2.10	2.50	2.00
	CaCl ₂	3.37	4.60	3.79	5.50	3.67
	mean	3.39	4.39	4.02	4.05	3.88
실리카계(PA) 혼합토	NaCl	1.60	1.91	4.12	1.67	4.00
	KCl	1.48	1.23	6.98	0.83	6.70
	CaCl ₂	1.74	2.80	1.47	2.80	1.33
	mean	1.61	1.98	4.19	1.90	4.01
석회계(PB) 혼합토	NaCl	1.80	2.12	6.44	1.94	5.83
	KCl	1.40	1.50	6.50	0.50	6.25
	CaCl ₂	1.78	2.36	1.37	2.20	1.29
	mean	1.66	1.99	4.77	1.65	4.46

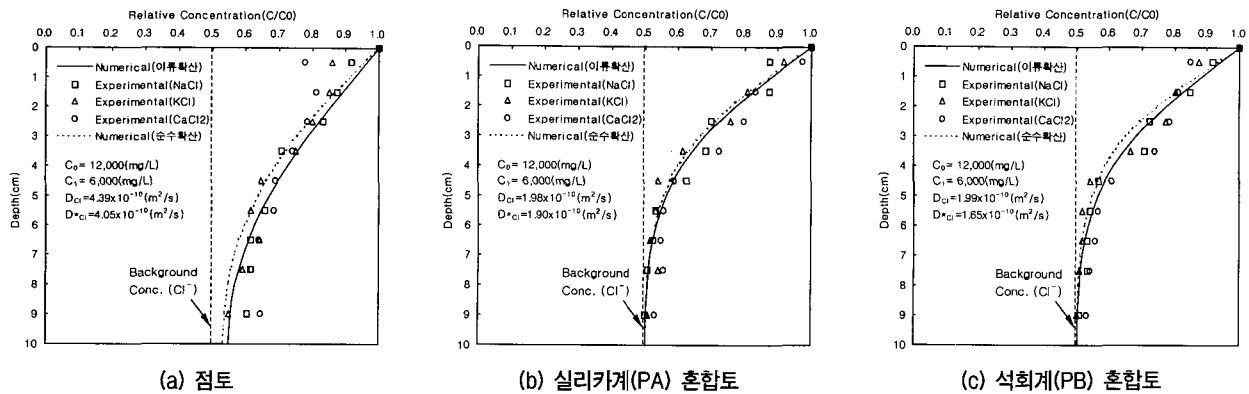


그림 5. 이류-확산과 순수확산의 경우 점토와 고화층에 대한 비반응성 용질들의 깊이에 따른 농도변화 비교

결과를 비교하여 표 5에 이류-확산 실험에서 얻어진 이류속도, 분산계수 및 지연계수, 순수확산 실험에서 얻어진 유효확산계수 및 지연계수를 정리하여 나타내었다.

실험결과에서 얻어진 표 5의 원지반 점토의 분산계수는 $4.15 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s} \sim 4.60 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 이고 기존 순수확산 실험에서 얻어진 유효확산계수의 범위 $2.5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s} \sim 5.50 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 에 비교하여 분산계수는 유효확산계수의 범위에 포함되는 것으로 나타났다.

고화층(PA, PB혼합토) 역시 분산계수가 유효확산계수 보다 적은 범위를 가지는 것으로 나타났는데, 이것은 기존의 순수확산 실험이 4~7일간의 단기 실험인데 반해 본 이류-확산 실험이 30일간의 장기실험으로 좀 더 안정된 값을 취할 수 있었기 때문으로 사료된다. 지연계수는 원지반 점토와 고화층(PA, PB혼합토) 모두 이류-확산 실험에서 얻어진 값이 순수확산 실험에서 얻어진 값과의 차이가 크지 않은 것을 알 수 있었다.

그림 5에는 원지반 점토, 실리카계(PA) 혼합토, 석회계(PB) 혼합토 각각에 대한 음이온인 염소이온의 깊이

별 농도변화 데이터와 평균 분산계수와 평균 유효확산계수를 적용한 이류-확산과 순수확산에 의한 용질의 이동을 비교하였다.

그림 5에 의하면 점토와 실리카계(PA), 석회계(PB) 혼합토 모두 이류-확산에 의한 용질 이동과 순수확산에 의한 용질 이동이 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이류-확산 실험이 순수확산 실험보다 장기실험임에도 불구하고 지연계수의 차이가 크지 않은 것은 이류-확산 시험의 경우도 이류속도가 매우 낮아 순수확산 실험의 no-flow상태와 마찬가지로 화학반응이나 생물학적 저감이 충분히 발생할 수 있었기 때문으로 사료된다.

그림 6은 국외의 순수확산 실험에 의한 유효확산 계수 및 분산계수를 비교한 것으로 기존 순수확산시험의 재료와 같이 염도가 높은 재료에 대한 순수확산 실험을 수행한 Duursma(1966)와 Shishkina(1966) 등의 실험결과를 보면 각각 $3.5 \sim 5.5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$, $2.4 \sim 4.3 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 로 기존 유효확산 실험결과와 비교적 잘 일치하는 경향을 보여준다. 또한 본 실험에서 구해진 점토와 고화층의

연구자	시료	이동형태	평균선행속도 $\times 10^{-7} \text{cm/s}$	분산계수 ($\times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$)								
				1	2	3	4	5	6	7		
Duursma (1966)	점토	순수확산	0									
Shishkina (1966)		순수확산	0									
Shackelford et al. (1991, 1995)		순수확산	0									
		이류확산	3.29 - 32.94									
본 실험결과		순수확산	0									
		이류확산	3.19 - 3.62									
		고화층 (PA)	순수확산	0								
			이류확산	1.48 - 1.74								
		고화층 (PB)	순수확산	0								
			이류확산	1.40 - 1.80								

그림 6. 여러재료에 대한 음이온 Cl⁻의 분산계수비교

분산계수가 순수확산 계수보다 적은 범위를 가지는 것으로 나타났는데, 이것은 기존의 순수확산 실험이 4~7 일간의 단기 실험인데 반해 본 이류-확산 실험이 30일간의 장기실험으로 좀 더 안정된 값을 취할 수 있었기 때문이라 여겨진다. 외국의 점토의 경우도 본 실험결과와 마찬가지로 순수확산 실험에 의한 유효확산계수와 이류-확산 실험에 의한 분산계수가 비슷한 범위의 값을 갖는 것과는 일치하는 것으로 나타났다.

4. 결론

원지반 점토 및 고화층에 대한 무기물 이류-확산실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이류를 고려했을 때 원지반 점토의 분산계수 D는 $4.39 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$ 이고 실리카계(PA) 혼합토는 점토보다 약 2.2배가 작은 $1.98 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 나타났으며 석회계(PB) 혼합토는 실리카계(PA) 혼합토와 비슷한 값인 $1.65 \sim 1.99 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$ 로 나타났다.
- (2) 본 이류-확산실험에서 구해진 원지반 점토에서 염소이온의 분산계수 D의 범위가 분자확산계수 D*의 범위에 포함되는 것으로 나타났으며 실리카계(PA), 석회계(PB) 혼합토의 경우도 분산계수의 범위가 분자확산계수의 범위보다 적은 것으로 나타났는데, 이것은 이류-확산실험이 순수확산 실험에 비하여 장기실험으로 실험결과 값의 편차가 줄어들었기 때문으로 판단된다.
- (3) 이류-확산 실험에 의한 지연계수는 원지반 점토 >

PA혼합토 > PB혼합토 순으로 나타났으며, 순수확산 실험에 의해서 구해진 지연계수 값과 비교한 결과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 류정훈 (2001), "매립지 차수재의 이류를 고려한 흡착 및 확산특성", 동국대학교 토목공학과, 석사학위 논문.
2. 류진현 (2000), "연약지반 위에 시공된 자가치유(SSSH) 차수재의 투수 및 강도특성", 동국대학교 토목공학과, 석사학위 논문.
3. 송현용 (1999), "점토와 고화재의 확산에 관한 실험적 연구", 동국대학교 토목공학과, 석사학위 논문, pp.33-55.
4. 장연수, 이광열 (2000), 지반환경공학, 구미서관.
5. 홍경택 (2000), "고화차수재와 점성토의 확산특성에 관한 연구", 동국대학교 토목공학과, 석사학위 논문, pp.25-54.
6. Barone, F. S., Yanful, E. K., Quigley, R. M., and Rowe, R. K. (1989), Effect of Multiple Contaminant Migration on Diffusion and Adsorption of Some Domestic Waste Contaminants in a Natural Clayey Soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.26, No.2, pp.189-198.
7. Duursma, E.K. (1966), In Disposal of Radioactive Wastes into Seas, Oceans and Surface Waters, International Atomic Energy Agency, Vienna, pp.355-371.
8. Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979), *Groundwater*, rentice-Hall.
9. Garga, V.K. and O'Shaughnessy, V. (1994), The Hydrogeological and Contaminant Transport of Fractured Champlain Sea Clay in Eastern Ontario. Part 2. contaminant transport, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.6, pp.902-915.
10. Jang, Y. S. (1990), *Reliability Approach to Probabilistic Modelling of Contaminant Transport*, Ph.D. thesis of University of California, Berkclly.
11. Rowe, R. K. and Badv, K. (1996), Advective-Diffusive Contaminant Migration in Unsaturated Sand and Grave, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.12, pp.965-975.
12. Rowe, R. K., Caers, J. C. and Barone, F. (1988), "Laboratory Determination of Diffusion and Distribution Coefficients of Contaminants using Undisturbed Clayey Soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, No.1, pp.108-118.
13. Shackelford, C.D. and Daniel, D.E. (1991), Diffusion in saturated soil. II: Results for Compacted Clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.3, pp.485-505.
14. Shackelford, C. D. and Redmond, P. L. (1995), "Solute Breakthrough Curves for Processed Kaolin at Low Flow Rates." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 1, pp. 17-32.
15. Shishkina, O.V. (1966), *Khimichiskie Protsessy Moryakhi Okeanakh*, 26; Abstracts in Chemical Abstracts, 67, 47060.
16. van der Sloot, H. A., Cnubben, P. A. J. P., Geusebroek, M. G. and Naus, R. W. M. (1997), The Self-Forming and Self-Repairing Sealing Method, Editors: Christensen T.H., Cossu, R. and Stegman, R., Sixth International Landfill Symposium (SARDINIA '97), Cagliari, Sardinia, Italy.

(접수일자 2003. 4. 4, 심사완료일 2004. 4. 9)