

## 수치해석 방법에 의한 연직배수시스템의 오염토양 복원효율 비교분석

### The Comparison of Remediation Efficiency for Contaminated Soils under Vertical Drain System by Numerical Analysis Method

신 은 철<sup>1</sup>      Shin, Eun-Chul  
이 성 철<sup>2</sup>      Lee, Sung-Chul  
박 정 준<sup>3\*</sup>     Park, Jeong-Jun

#### ABSTRACT

The remediation efficiency of the contaminant through laboratory experiment of the pilot scale was evaluated for the influence factors in the contaminated soils for the applicability of the prefabricated vertical drain system. It was performed numerical analysis by the method that the finite element and finite differences based on the drawn result about the remediation of contaminated soils. The parametric analysis for the applied parameter value was performed. In the pilot scale remediation experiment, as a result of evaluating with the minimum limit concentration ratio, in the case of dense and loose condition, the remediation time was much longer. And the remediation efficiency was rapidly progressed as the time was elapsed. It was analyzed that the contaminant concentration is reduced around the extraction well as the contamination remediation rate by numerical analysis result as the time was elapsed.

#### 요 지

오염지반 복원을 목적으로 사용한 연직배수시스템의 적용성 평가를 위하여 영향 인자에 대한 지반공학적 특성을 기초로한 파일럿 규모의 실내 오염복원 실험시 오염물질의 복원 효율을 분석하였다. 또한, 도출된 결과를 바탕으로 유한요소 및 유한차분방법에 의한 수치해석을 수행하였으며, 해석시 적용된 물성값에 대한 매개변수를 평가하였다. 오염복원 모형실험과 수치해석에서 최소한계농도비를 기준으로 하여 오염복원을 해석 결과, 지반이 조밀한 경우 최소한계 농도비 도달시간이 더 길어지며, 지속시간에 따른 농도분포를 살펴보면, 농도는 주입배수재를 중심으로 그 주변에서 더 빠르게 제거되고, 반면에 추출배수재 주변에서는 농도가 더 높게 나타남을 알 수 있었다.

**Keywords** : Prefabricated vertical drain system, Pilot scale test, Numerical analysis, Remediation efficiency

#### 1. 서 론

지속적인 경제발전과 소득수준이 향상되면서 산업활동과 더불어 자동차 보급으로 인한 유류사용량이 크게 증가하였다. 이에 따라 주유소의 유류저장탱크 및 화학물질을 저장하고 있는 산업시설에서의 지하저장탱크에서 비수용성액체(NAPLs)로 분류되는 유류 및 유해화학물질의 유출

로 인한 토양 및 지하수 오염 문제가 부각되고 있다(고석오, 2002).

연직배수시스템은 지반공학분야에서 지반개량공법으로 많이 사용되어온 연직배수공법을 오염토양 복원에 적용하여 배수촉진, 오염정화 등의 복합적인 기능을 수행하여 부지를 활용할 수 있도록 하였다. 즉, 조립지반에 많이 사용되고 있는 복원기술인 토양세정공법과 유사한 시스템

1 정희원, 인천대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., University of Incheon)  
2 정희원, 인천대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., University of Incheon)  
3\* 정희원, 인천대학교 건설환경공학과 연구교수 (Member, Research Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., University of Incheon, E-mail: frostjun @incheon.ac.kr)

으로서 매립지반 내에서 물의 주입 또는 추출 지점과 오염 토 또는 간극수 지점과의 이동 시간을 짧게 하여 물을 추출하는 데 걸리는 시간을 최소화 하였다(정하익, 2003; 박정준과 신은철, 2008; Welker et al., 1998). 또한, 연직배수시스템은 다수의 주입배수재와 추출배수재를 설치함으로써 포켓상으로 분포하고 있는 오염물질을 신속하게 제거할 수 있다.

본 연구에서는 연직배수시스템의 적용성 평가를 위하여 파일럿 규모의 실내 오염복원 실험을 통한 오염물질의 복원효율을 분석하였다. 또한, 도출된 결과를 바탕으로 Gabr et al.(1996)과 이행우와 장병욱(2006)이 제시한 유한요소해석 프로그램인 FLUSH와 유한차분해석으로 3차원 지하수 거동모델인 MODFLOW 프로그램, 침출수의 확산, 분산 등을 해석할 수 있는 MT3D를 이용하여 지하수 유동 및 오염물질 이동 연계해석을 실시하여 오염복원율을 평가, 매개변수에 대한 분석을 수행하였다. 유한요소와 유한차분에 의한 수치해석 조건은 실내모형실험과 동일하게 적용하였으며, 실내모형실험을 통한 오염복원율 분석결과와 수치해석 결과를 비교하였다.

## 2. 토양오염 복원과 수치해석 모델

### 2.1 토양오염 복원 기술

그림 1에 나타난 바와 같이 토양세정(soil flushing)공법은 일반적으로 물이나 비수용액과 같은 적절한 용매를 사용하여 지반내 오염물질을 추출해 내는 것이다. 오염지역에 세정용액을 주입하고 웰포인트나 지중배수관으로 배수시키는 오염토양 복원의 대표적 기술이다.

Rawe(1996)는 토양세정에 의한 오염지반의 처리효율

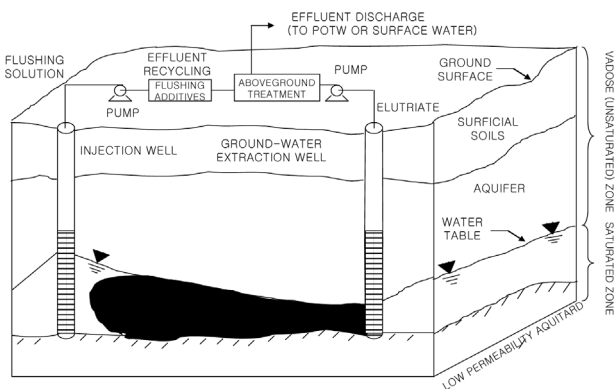


그림 1. 현장에서의 토양세정개념(Roote, 1997)

은 세정용액과 오염물질의 접촉, 오염물질의 특성 및 지반 조건에 따라 달라지며, 유기물 함량이 낮은 투수성이 높은 지반에 매우 효과적인 것으로 제시하였다. 토양세정공법을 현장에 적용시키기 위해서는 오염물질의 농도와 특성, 오염물질의 분포, 대상 지반의 물리, 화학, 생물학적 성질에 미치는 용매의 영향 등을 고려하여야 한다.

### 2.2 토양세정 시스템의 오염정화 예측모형 해석이론

연직배수재를 이용한 토양세정 복원시스템 적용시 오염지역에서 방사형 방향으로 거리에 따른 간극수압 및 농도분포를 평가하여 오염물질이동에 대한 메카니즘을 규명할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Gabr et al.(1996)과 이행우와 장병욱(2006)이 제시한 연직배수재가 설치된 오염지반에서 시공간적 변화에 따른 오염농도 변화량을 구하는 지배방정식을 정의하고, 해를 구하기 위해서 방정식을 유도하였다. 오염정화 예측모형은 오염된 토양의 복원과 정동안 체적변화가 없는 정수압상태의 흐름을 연직배수재로의 주입률과 추출률이 같은 질량균형 상태로 가정하였고, 가용성 오염물질에 용매의 이동을 시간과 깊이의 함수인 오염물질 농도를 평가하기 위하여 모형화 하였다. 타입된 연직배수재는 반경이  $r_{eq}$ 인 영향범위를 고려하고, 3차원 대칭조건으로 가정하여 모형화 할 수 있다.

### 2.3 해석에 적용된 수치해석 프로그램

유한요소 해석프로그램으로 적용한 FLUSH 전산프로그램은 Gabr et al.(1996)이 제시한 시간 변화에 따른 오염농도 변화량을 여러 가지 수학적 처리와 방사성 및 연직방향의 정확도에 대한 중첩의 원리를 이용하여 error function(erf) 및 complementary error function(erfc)값은 보통 series분식으로 값을 구하지만 series는 매개변수의 범위나 적용하는 차수에 따라 값의 변화가 커 안정적일 값을 구하는데 어려움이 있다. 따라서, 안정적인 erf(x) 및 erfc(x)값을 구하고 많은 양의 분석을 수행하기 위하여 개발되었다.

유한차분 해석프로그램으로 적용한 MODFLOW는 3차원 유한차분 지하수 유동 모형으로 다양한 수리지질학적 구조를 보다 손쉽게 구현하여 모의할 수 있고 결과를 쉽게 해석할 수 있다. 특히 용수의 공급, 오염물질의 정화, 광산의 배수 등에 대한 모의에 많이 이용되는 신뢰성이 높은

모형이다. MODFLOW는 사용하기에 쉽고 편리하며 규모가 비교적 큰 수리지질학적 문제를 해결하기 위해 필요한 대용량의 자료를 처리, 분석 및 유지하는 능력이 뛰어나다. 또한 물리적, 수학적인 지하수 유동 형태의 개념이 실제로 어떻게 나타날 것인가에 대해 대용량의 자료와 함께 다루어진다. MT3D는 복잡한 수리지질학적 구조에서의 용질 이동에 대해 널리 이용되는 3차원 유한 차분 수치 모형이다. 각각의 용질 이동은 서로 영향을 주는 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 모두 가능하다. 정류(steady-state flow)와 부정류(transient flow), 이방성 분산(anisotropic dispersion), 일차 감쇄(first-order decay), 용질간의 화학 반응, 선형과 비선형의 흡착 등을 모두 고려하면서 이송에 의한 용질 이동을 모의할 수 있다(Zheng, 1990).

### 3. 실내모형실험에 의한 토양오염 복원

#### 3.1 토양세정복원을 이용한 토양오염 복원 실내모형 실험

토양세정복원에 사용된 연직배수재에서 고려해야할 주요 영향인자로 영향범위(zone of influence), 등가직경(equivalent diameter), 스미어 효과(smear effect)에 대한 결과는 신은철 등(2006)이 수행한 결과를 적용하였다. 연직배수재의 영향범위 및 등가직경, 스미어 효과에 대한 평

표 1. 사용된 시료의 공학적 특성

항목	값
비중, $G_s$	2.67
균등계수, $C_u$	2.0
곡률계수, $C_c$	0.85
최적함수비, $w_{opt}$ (%)	16.4
최대건조단위중량, $\gamma_{d(max)}$ ( $tf/m^3$ )	1.52
투수계수, $k(cm/s)$	$3.61 \times 10^{-4}$
통일분류법(USCS)	SM

표 2. 실내모형실험 조건 및 결과

구분	# 1	# 2	# 3	# 4
초기오염농도(ppm)	30,000		15,000	
다짐조건	느슨 ( $n = 0.4$ )	조밀 ( $n = 0.2$ )	느슨 ( $n = 0.4$ )	조밀 ( $n = 0.2$ )
추적자	염소이온 ( $d^-$ )			
최소한계농도비 도달시간(hr) (복원효율 시간)	40	70	28	38

가를 위하여 사용된 시료는 실트질 흙(SM)으로서 공학적 특성은 표 1에 나타내었고, 입도분포곡선은 그림 2에 나타내었다. 시험방법은 한국공업규격(KS)에 명시된 표준시험방법에 의거하여 실시하였다. 실트질 흙의 표준다짐시험 결과는 최적함수비가 16.4%, 최대건조단위중량은  $1.52 tf/m^3$ 을 나타내었고, 투수계수는  $3.61 \times 10^{-4} cm/s$ 로 나타났다.

오염복원을 평가를 위한 파일럿 규모의 오염복원 모형 실험은 모형토조내의 토목섬유 연직배수재에 진공압력을 가하여 대상 지반내 존재하는 오염물질이 추출되어진다. 즉, 물을 주입할 수 있는 주입펌프장치, 진공된 상태에서 연직배수재를 통해 분배장치까지 압력을 가하여 추출시켜 주는 실린더 형태의 압력조절장치로 구분할 수 있다.

표 2에 나타낸 바와 같이 오염복원을 모형실험시 토조안의 시료는 포화상태를 유지시켰으며, 실험과정 동안 온도는  $24^\circ C \sim 25^\circ C$  범위에서 크게 두가지 조건으로 분류하여 실험을 수행하였다. 첫째 조건은 추적자로 사용한 염소이온의 초기농도가 각각 높은 경우(30,000ppm)와 낮은 경우(15,000ppm)로 구분하여 실시하였다. 둘째로 다짐조건은 간극률의 변수로서, 3층 다짐을 실시한 경우 간극률은

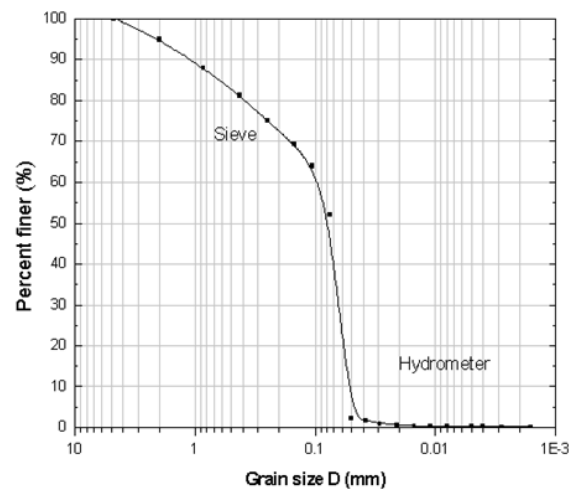


그림 2. 실험 시료의 입도분포곡선

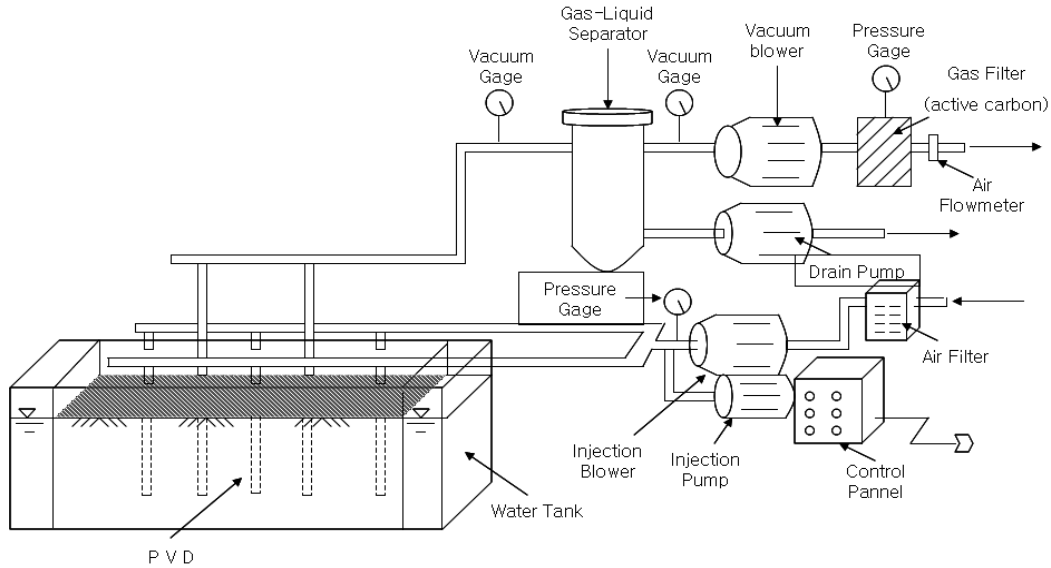
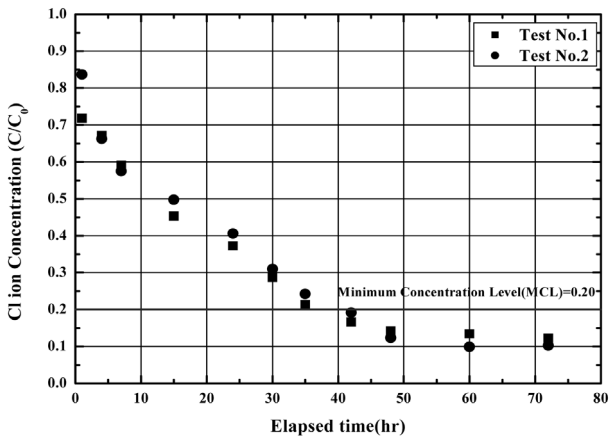
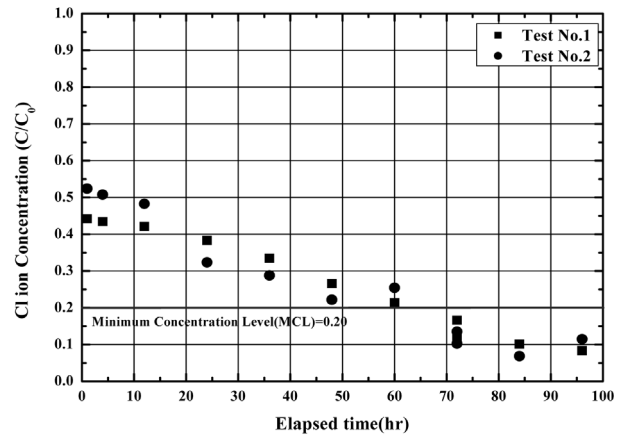


그림 3. 모형실험 시스템 개념도



(a) 느슨한 조건( $n = 0.4$ )



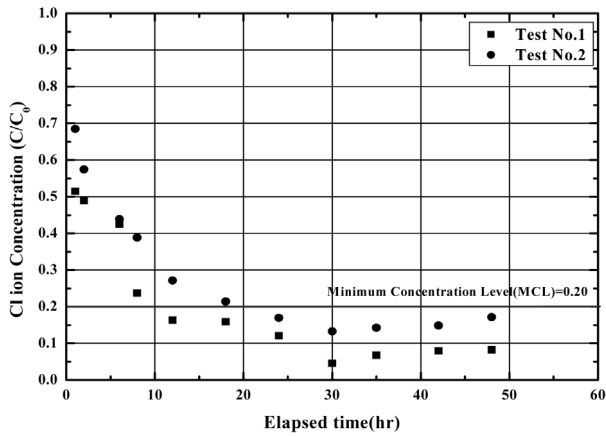
(b) 조밀한 조건( $n = 0.2$ )

그림 4. 초기오염농도가 높을 때 시간에 따른 이온농도비 관계

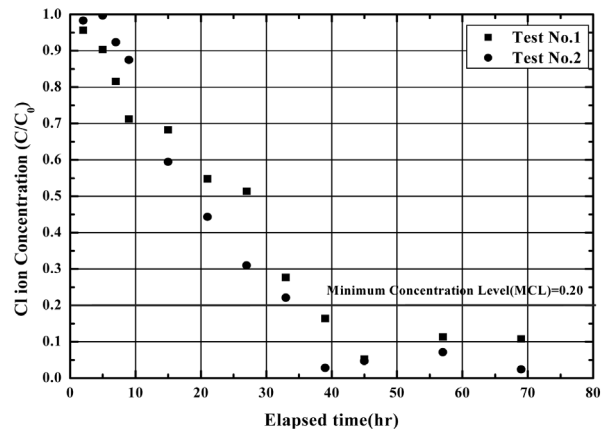
0.2, 5층 다짐을 실시한 경우 간극률은 0.4의 조건으로 실험을 수행하였다. 이후 염소이온 농도 측정장비의 표준염소이온 프루브(probe)를 사용하여 지속시간에 따른 염소이온농도를 측정하였다. 토양세정 복원시스템 적용시 오염지역에서 방사형 방향으로 거리에 따른 농도분포, 즉 4.1절에 나타난 유한요소해석시 시간과 깊이의 함수인 오염물질 농도 변화를 평가하기 위하여 초기농도조건을 구분하였다. 그림 3은 신은철 등(2006)이 제시한 영향범위결과를 바탕으로 하여 13cm의 간격인 삼각형 배열패턴으로 타입하여 진공조건하에서 염화나트륨(NaCl) 주입과 추출 개념도를 나타낸 것이다.

### 3.2 모형실험에 의한 토양오염복원 결과

오염복원 모형실험에서는 농도변화 측정시 염소이온의 추출된 시료에 대하여 최소한계농도비  $C/C_0 = 0.20$ 을 기준으로 하여 평가하였다. 이 기준은 이온 보정과 측정시스템에서 측정될 수 있는 최소 하한값으로 하여 오염복원 실험의 모든 단계에 가장 낮은 최소 한계값으로 선정한 것이다. 여기서  $C$ 는 각각의 지속시간에 따라 채취된 시료의 농도이고,  $C_0$ 는 염소이온의 초기 농도이다. 즉, 농도비 ( $C/C_0$ )와 주입 및 추출물 사이에서의 보정을 위하여 농도비의 기준을 정하였다. 그림 4는 초기이온농도가 높은 경우에 대하여 지반조건이 느슨하거나 조밀한 경우의 염소



(a) 느슨한 조건( $n = 0.4$ )



(b) 조밀한 조건( $n = 0.2$ )

그림 5. 초기오염농도가 낮을 때 시간에 따른 이온농도비 관계

표 3. 유한요소 해석시 적용한 입력변수

변수	단위	적용값			
		조밀한 조건		느슨한 조건	
		# 1	# 2	# 3	# 4
$H$	$m$	0.457	0.457	0.457	0.457
$r$	$m$	0.18	0.18	0.18	0.18
$r_0$	$m$	0.013	0.013	0.013	0.013
$K_d$	$m^3/kg$	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
$\alpha_r, \alpha_z$	$m$	0.1	0.5	0.1	0.5
$n$		0.2	0.2	0.4	0.4
$\gamma_s$	$kg/m^3$	1670	1670	1470	1470
$u_r, u_z$	$m/hr$	$2.5 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$
$Q_0$	$m^3/hr$	$1.29 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-3}$	$1.29 \times 10^{-3}$

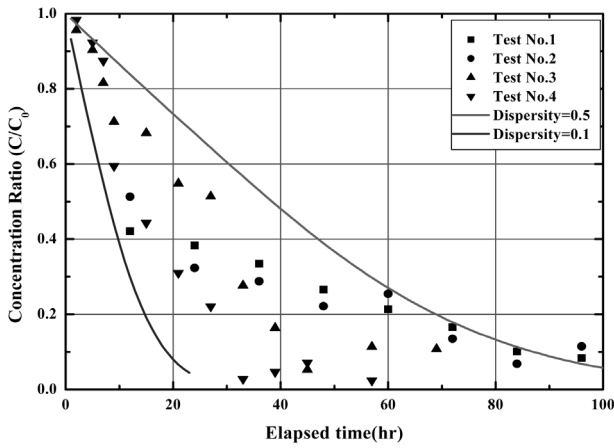
이온 농도비를 나타낸 것이다. 그림 4(a)의 느슨한 경우일 때 대략 40시간이 지나면 2개의 추출 배수재에서 최소한 계농도비 기준이하로 감소하였다. 또한, 그림 4(b)의 조밀한 조건일 경우에는 대략 70시간이 지속되었을 때 최소한 계농도비 이하로 감소하여, 지반조건이 조밀한 경우 최소한 계농도비 도달시간(복원효율시간)이 더 길어지는 것을 알 수 있다. 그림 5(a)의 느슨한 상태일 경우에는 약 28시간이 지나 모든 추출 배수재에서 최소한 계농도비 기준에 도달하였고, 그림 5(b)의 조밀한 상태일 경우에는 38시간이 지나  $C/C_0 = 0.20$ 에 도달하여 그림 4(a)와 비슷하게 나타났다.

#### 4. 수치해석에 의한 오염복원을 평가

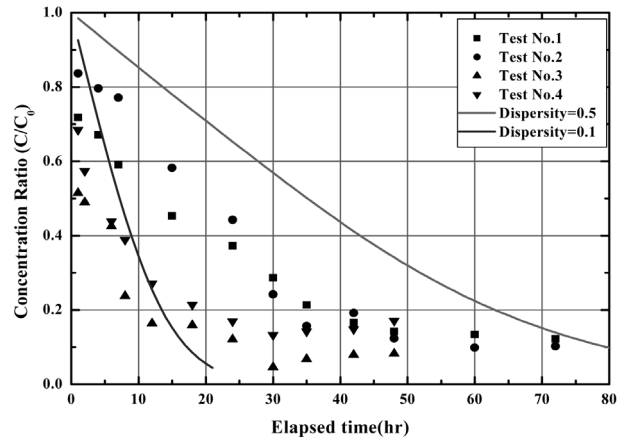
##### 4.1 유한요소해석에 의한 오염복원을

해석은 실내모형실험의 #1~#4조건으로 부터의 데이터

형식에 맞추어 수행하였다. 모형실험 #1~#2는 초기오염 농도가 높은 경우에 대하여 예측된 값이고, 모형실험 #3~#4는 초기농도가 낮은 경우에 대하여 다짐조건이 느슨한 상태와 조밀한 상태로 구분하여 농도변화를 나타낸 것이다. 표 3은 실내모형실험에 의하여 도출된 주요 입력 변수 값으로 수치해석시 적용한 값을 나타낸 것이다.  $H$ 와  $z$ 는 연직배수재의 길이에 따라 다르게 나타나는 값으로서  $H$ 는 대수층의 두께( $m$ ),  $z$ 는 지표면으로부터 임의지점까지의 연직 거리( $m$ )이다. 또한,  $n$ 는 흙의 간극률,  $r$ 는 주입배수재와 추출배수재 사이의 거리( $m$ ),  $r_0$ 는 연직배수재 등가반경( $m$ ),  $\gamma_s$ 는 흙의 단위중량( $kgf/m^3$ ),  $u_z$ 는 연직방향 흐름 유속( $m/h$ ),  $K_d$ 는 흡입자와 용액의 평형분포계수( $m^3/kgf$ ),  $C_0$ 는 초기농도( $mg/kgf$ )를 나타낸다. 염소이온의 평형분포계수( $K_d$ )는  $3 \times 10^{-4} m^3/kgf$ 으로서 보통 일반적인 실트질 흙의 평형분포계수값이며, 수치해석에서 지연계수의 함수로 나타낼 수 있다. 연직배수재 등가반경인  $r_0$ 의 값은  $0.013m$ , 주입배수재와 추출배수재 사이 거



(a) 느슨한 조건( $n = 0.4$ )



(b) 조밀한 조건( $n = 0.2$ )

그림 6. 유한요소 해석결과에 의한 오염농도비

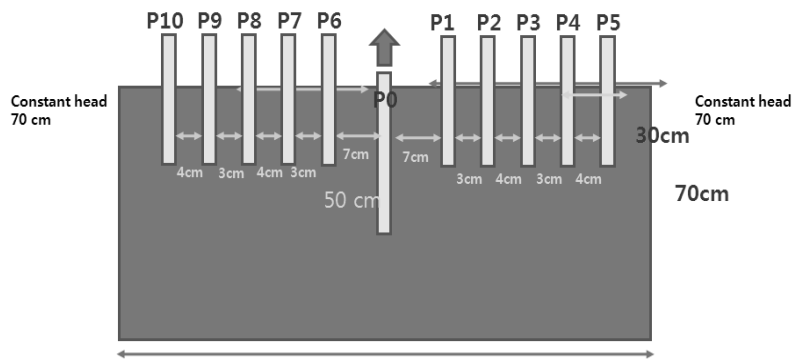


그림 7. 수치해석 모델링 단면도

라인  $r$  값은  $0.18m$ 를 적용하였다. 또한, 연직방향의 흐름 유속( $u_z$ )은 주입배수재 열과 추출배수재 열 사이에서의 평균 동수경사를 계산하여  $2.5 \times 10^{-3} m/hr$ 로 결정하였다. 연직배수재의 추출률( $Q_0$ )은 각각의 연직배수재에서 측정된 값과 추출연직배수재 열에서 가장 낮은 값으로 하여  $1.27 \times 10^{-3} m^3/hr$ 를 적용하였다.

그림 6은 지속시간에 따른 오염농도비( $C/C_0$ )의 관계 곡선을 나타낸 것으로서, 실내오염복원 모형실험으로부터 염소이온 농도를 통하여 나타내었다. 모형실험 #1~#4에 대하여 예측된 오염농도변화를 살펴보면, 조밀한 경우와 느슨한 경우, 염소이온 농도의 실제 복원율은 분산지수의 범위가  $0.1 \sim 0.5$  사이에서 거의 유사하게 예측되었다. 조밀한 조건일 경우에 오염농도비 예측을 비교해 보면, 느슨한 조건일 경우보다 분산지수의 범위가  $0.1 \sim 0.5$  사이 일 때, 좀 더 정확한 곡선을 나타내고 있다. 이는 모형실험시 토조내 흡에서의 투수계수의 크기가 서로 다른 조건을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

유한요소 프로그램에 의한 수치해석 분석결과는 6개의

추출 배수재에서 측정된 값들의 조밀한 상태일 경우에는 예측한 분산지수로 그려진 상하한선내에 분포하였으며, 느슨한 상태일 경우, 초기에는 오염복원율이 약간 과대평가되었으나, 전체적으로 분석치의 분포내에 있어 유한요소 수치해석에 의한 토양 오염복원 분석에 적용하는 것이 무리가 없을 것으로 판단된다.

#### 4.2 유한차분해석에 의한 오염복원율

유한차분에 의한 수치해석 모델링은 모형실험 조건을 동일하게 모델링하였다. 폭  $105cm$ , 높이  $70cm$ 의 격자망을 구성하였다. 격자망 중앙부에 추출정을  $50cm$  깊이로 모델링 하였으며, 추출정 좌우로  $30cm$  깊이로 관측정을  $3cm$ 와  $4cm$ 의 간격으로 모델링 하였다. 관측정은 모형실험이 간극수압계를 모델링 한 것이다. 총 관측정의 개수는 10개를 구성하였다. 추출정은 0번으로 넘버링을 하였고, 추출정 우측에 5개 관측정이 1~5번으로 좌측 관측정이 6~10번으로 넘버링을 하였다. 그림 7에 나타낸 바와 같

표 4. 유한차분 해석시 적용한 입력물성값 및 결과

조건	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8
간극률	0.2				0.4			
초기농도(ppm)	30,000		15,000		30,000		15,000	
분산지수	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5
수평투수계수( $\times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ )	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
수직투수계수( $\times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ )	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
영향반경 (m)	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
비용출율	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
비저류계수( $m^{-1}$ )	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
추출율( $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ )	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29
함수비 (%)	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4
분산계수( $\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{day}$ )	9	9	9	9	9	9	9	9
해석시간 (hr)	100							
최소한계농도비 도달시간(hr)	80				150			

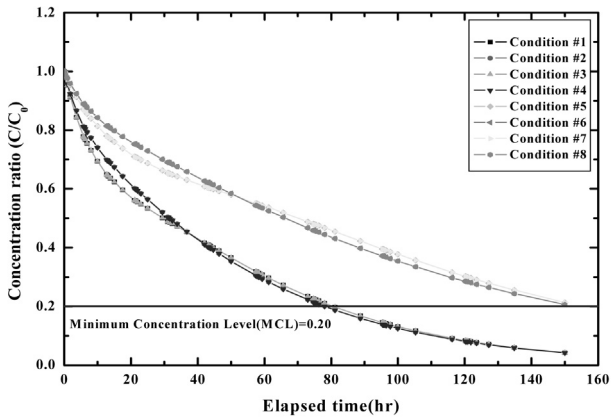
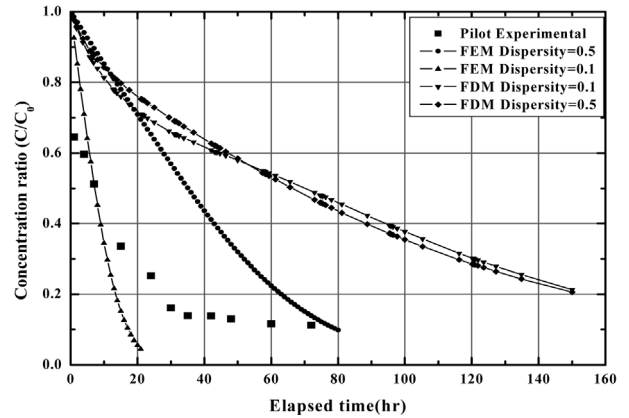


그림 8. 추출정에서의 시간에 따른 오염농도비의 변화

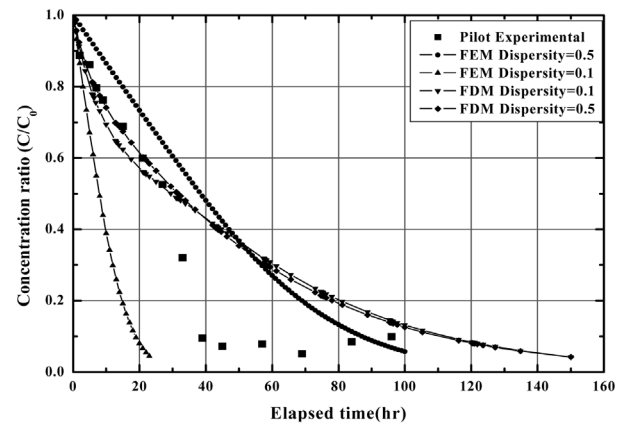
이 해석시 경계조건에서 좌우측 수두는 고정수두 경계조건으로 70cm의 수위를 유지하는 것으로 고려하였고, 초기오염농도, 간극률, 분산지수의 값을 가변변수로 하여 해석을 수행하였다. 표 4는 수치해석시 적용된 입력변수와 결과이며, 그림 8은 유한차분에 의한 오염복원을 해석 결과를 나타낸 것이다. 시간이 경과함에 따라 추출배수재를 중심으로 오염농도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 해석 결과 느슨한 지반의 경우 최소한계농도비에 도달하는 시간은 약 80시간이고, 조밀한 지반의 경우 약 150시간이 소요되었고, 초기오염 농도조건의 영향은 미미한 것으로 분석되었다. 따라서, 지반이 조밀한 경우 최소농도비 도달시간이 더 길어지며, 이는 모형실험결과와 동일한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

### 4.3 실내모형실험과 수치해석결과 비교

그림 9는 실내모형실험을 통한 오염복원을 결과와 수치



(a) 느슨한 조건( $n=0.4$ )



(b) 조밀한 조건( $n=0.2$ )

그림 9. 모형실험과 수치해석 결과 비교

해석을 통한 결과를 비교 분석한 결과이다. 조밀한 조건과 느슨한 조건에 따라 분석하였으며, 수치해석결과는 분산지수의 변화에 대한 해석결과를 이용하였다. 유한요소 해석결과 추출배수재에서 측정된 값들이 조밀한 경우에는

분산지수의 상하한선내에 분포하였으며, 느슨한 조건일 경우, 초기에는 측정된 추세선보다 오염복원율이 약간 과대평가되었으나, 복원율이 40%이상인 시점부터는 측정된 관계곡선이 유한요소 해석결과와 조밀한 경우 분산지수의 상하한선내에 분포하였으나, 느슨한 조건일 경우, 오염 복원 초기 20시간 미만일 때 분산지수의 상하한선내에 분포하는 것으로 분석되었고, 이후에는 복원율이 과소평가되어 최소한계농도비 도달시간이 많이 소요되었다.

## 5. 결론

오염된 토양의 복원을 목적으로 연직배수시스템의 적용성 평가를 위하여 실내모형실험을 통한 오염물질의 복원 효율 등을 분석하였고, 도출된 결과를 바탕으로 유한요소 수치해석과 유한차분 수치해석을 수행하여 오염복원율을 평가하였다. 모형실험 및 수치해석 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 오염복원 모형실험에서는 농도변화 측정시 염소이온의 추출된 시료에 대하여 최소한계농도비  $C/C_0 = 0.20$ 을 기준으로 하여 평가하였다. 오염복원 모형실험과 수치해석에서 최소한계농도비를 기준으로 하여 오염복원율 해석 결과, 지반이 조밀한 경우 최소한계농도비 도달시간이 더 길어지며, 지속시간에 따른 농도분포를 살펴보았을 때, 농도는 주입배수재를 중심으로 그 주변에서 더 빠르게 제거되고, 반면에 복원구역(추출배수재) 주변에서는 농도가 더 높게 나타남을 알 수 있었다.
- (2) 실내모형실험을 통한 오염복원율 결과와 수치해석을 통한 분석결과 유한요소해석은 조밀한 경우에는 분산지수의 상하한선내에 분포하였으며, 느슨한 조건일 경우, 오염복원율이 다소 과대평가되었다. 유한차분해석은 조밀한 경우 분산지수의 상하한선내에 분포하였으나, 느슨한 조건일 경우, 오염 복원 초기에는 분산지수의 상하한선내에 분포하는 것으로 분석되었으나, 이후에는 복원율이 과소평가되어 최소한계 농도비 도달시간이 많이 소요되었다.
- (3) 본 연구는 오염된 토양의 복원시 연직배수시스템의 적용성에 대한 연구를 수행하였다. 도출된 결과를 바탕으로 향후 흙의 종류, 오염물질에 따른 추출과 정 등 다양한 조건에서 현장규모의 실험적 연구를

비롯하여 수치해석에 필요한 분산지수, 흡착, 흐름 유속 등 모형변수들의 경계조건 및 최적화 과정을 더욱더 심도 있게 분석하여 실제현장과 부합되는 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

이 논문 또는 저서는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.[NRF-2009-353-D00053]

## 참고문헌

1. 고석오 (2002), “토양 및 지하수 복원기술 동향 및 현장적용”, 2002 *지반환경*, 한국건설기술연구원, pp.129-156.
2. 박정준, 신은철 (2008), “연직배수재를 이용한 오염지반 복원의 영향인자 분석”, *한국지반환경공학회논문집*, 제9권, 제1호, pp.39-46.
3. 신은철, 박정준, 김성환 (2006), “진공압력에 따른 연직배수재의 지반공학적 특성 분석”, 2006 *대한토목학회 정기 학술대회*, pp.723-726.
4. 이행우, 장병욱 (2006), “토양 및 오염물질의 물성치가 연직배수재에 의한 현장오염정화에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구”, *한국토목섬유학회논문집*, 제5권, 제2호, pp.1-8.
5. 정하익 (2003), “연직배수공법을 이용한 오염지하수의 복원”, 2003 *지반환경*, 한국건설기술연구원, pp.183-201.
6. Gabr M. A., Bowders J. J., Wang. J. and Quaranta J. D. (1996), “In situ soil flushing using prefabricated vertical drains”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.1, pp. 97-105.
7. Gabr M. A., Wang J. and Bowders J. J. (1996), “A model for efficiency of soil flushing using PVD-enhanced system”, *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No. 11, pp.914-920.
8. Rawe (1996), *EPA environmental engineering source book*, Ann Arbor Press, Inc., Chelsea, Michigan, pp.101-110.
9. Roote, D. S. (1997), *In situ flushing*, Technology Overview Report, TO-97-02, GWRTAC.
10. Welker, A. L., Logan, M. and Knight, S. B. (1998), “Design issues of a prefabricated drain remediation system”, *Geotechnical News*, 16(1), pp.31-35.
11. Zheng, C. (1990), *A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in ground water systems*, S.S. Papadopoulos & Associates, Inc.

(논문접수일 2011. 2. 21, 심사완료일 2011. 3. 23)