

연직배수재를 이용한 토양세정시스템의 오염토양정화 특성

박 정 준

인천대학교 공학기술연구소 선임연구원

The Characteristics of Soil Remediation by Soil Flushing System Using PVDs

Park, Jeong-Jun

Senior Researcher, Research Institute for Engineering and Technology, Univ. of Incheon.

ABSTRACT

For the purpose of ground improvement by means of soil flushing systems. Incorporated technique with prefabricated vertical drains have been used for dewatering from fine-grained soils. The laboratory model tests were performed by using the flushing tracer solutions for silty soils and recorded the tracer concentration changes with the elapsed time and flow rates. A mathematical model for prediction of contaminant transport using the PVD technology has been developed. The clean-up times for the predictions on both soil condition indicate more of a sensitivity to the dispersivity parameter than to the extracted flow rate and vertical velocity parameters. Based on the results of the analyses, numerical analysis indicate that the most important factor to the in-situ soil remediation in prefabricated vertical drain system is the effective diameter of contaminated soil.

Key Words : *Soil Remediation, Soil Flushing System, PVDs(Prefabricated Vertical Drains), Low Permeability, Prediction Model.*

I. 서 론

토양은 인간이 살아가는 터전이고 개발사업이 수행되는 원천적 환경매체로서 매우 중요한 자원

이다. 최근, 전세계적으로 인구증가 및 산업 발달로 발생하는 폐기물과 유해화학물질로 인하여 토양 및 지하수 오염의 심각성이 고조되어 개발사업으로 영향 받게 되는 토양환경에 대한 중요성

Corresponding author : Park, Jeong-Jun, Research Institute for Engineering and Technology, University of Incheon,
Tel : +82-32-770-4383, E-mail : frostjun@incheon.ac.kr

Received : 28 September, 2007. **Accepted** : 23 October, 2007.

이 대두되고 있다. 특히 지속적인 경제발전과 소득수준이 향상되면서 산업활동과 더불어 자동차 보급으로 인한 유류사용량이 크게 증가하였다. 이에 따라 주유소의 유류저장탱크 및 화학물질을 저장하고 있는 산업시설에서의 지하저장탱크에서 비수용상액체(NAPLs)로 분류되는 유류 및 유해화학물질의 유출로 인한 토양 및 지하수 오염 문제가 부각되고 있다(고석오, 2002).

오염토양 복원기술의 종류는 매우 다양하게 개발되어 실용화되고 있다. 토양세정기술, 토양증기추출기술, 양수처리기술, 바이오벤팅기술 등이 오염지역의 현장복원기술로 많이 사용되고 있다. 이들 기술은 주로 조립지반에 사용되거나 불포화 지반에 사용되는 것으로서 시가지, 산업지역, 공장지대가 밀집된 고농도의 중금속 및 유해물질이 함유되어 있는 투수성이 낮은 매립지반에서는 오염물질 추출에 어려움이 있다. 특히 토양세정기술 적용시 매립지반의 투수계수는 매우 낮기 때문에 세척제가 오염지반내로 주입되거나 추출되는 데 한계가 있고, 생물학적 처리기술의 경우에도 영양소를 주입하는 데 어려움이 있다. 따라서 오염된 매립지반 현장에서 이들 공법을 적용할 때에는 상기 기술된 문제점을 개선할 수 있는 방안이 강구되어야 한다(정하익, 2003).

이러한 문제해결 방안의 하나로 Quaranta et al (1997)은 기존의 연약지반 개량공법에서 널리 사용되고 있는 토목섬유 연직배수재(prefabricated vertical drains)를 활용한 연직배수복원시스템에 대한 연구를 수행하였다. 즉, 조립지반에 많이 사용되고 있는 복원기술인 토양세정공법과 토양증기추출공법과 유사한 시스템으로서 매립지반 내에서 물과 공기의 주입 또는 추출 지점과 오염토 또는 간극수 지점과의 이동 시간을 짧게 하여 물 또는 공기를 추출하는 데 걸리는 시간을 최소화하였다(Shin et al., 2006; 정하익, 2003; Welker et al., 1998). 또한, 연직배수시스템은 다수의 주입배수재와 추출배수재를 설치함으로써 포켓상으로 분포하고 있는 오염물질을 신속하게 제거할

수 있다.

본 연구에서는 연직배수시스템의 적용성을 위하여 오염토양 복원시 오염지반에 영향을 주는 인자에 대한 공학적 특성을 바탕으로 파일럿 규모의 실내 오염복원 실험을 통한 오염물질의 복원효율 등을 분석하였다. 염화나트륨을 복원실험의 추적자로 사용하였고, 도출된 결과를 바탕으로 Gabr et al(1996)이 유도한 지배방정식을 이용하여 예측모형 시뮬레이션 등을 통한 유효성을 평가하였다.

II. 연직배수재를 이용한 토양세정복원시스템 개념

연직배수재는 물 혹은 공기를 현장지반과 지하수로 이동시켜 진공조건 상태에서 오염된 공기와 물을 추출하여 오염토양을 복원시키는 매체이다. 오염수나 오염가스의 추출은 연직배수재 상부에 관을 연결시킨 관망을 통해 진공압력을 가하여 추출할 수 있다. 연직배수재의 주입과 추출 흐름은 복원과정 동안 매체의 질량평형이 유지되어야 하지만 흙의 압밀로 인하여 간극률이 감소하게 되고, 흙의 투수계수 및 투기계수가 저하되어 복원시 소요되는 시간이 더 길어질 수도 있다. 즉, 연직배수재를 이용하여 한층 더 발전된 연직배수시스템의 매카니즘은 지반개량을 목적으로 사용된 연직배수공법의 설계와 유지관리를 기초로 하고 있다.

본 연구에서 사용되어진 연직배수재의 단면 형태는 Figure 1에 나타난 바와 같고, 각각의 제품 특성은 Table 1에 나타내었다. Hansbo(1981)는 기존에 연약지반의 개량시 압밀촉진에 사용되어지는 연직배수재에 대하여 델프트 시험, 켈리

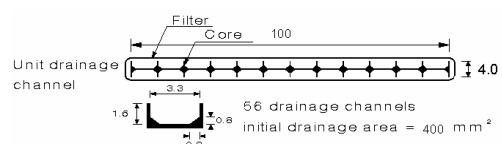
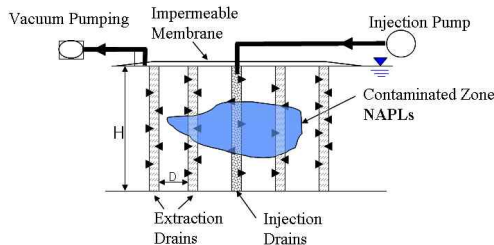


Figure 1. Schematic of core with PVDs(unit : mm).

Table 1. Specifications of PVDs.

Properties		Units	Dimension	
Material	Filter	-	Polypropylene	
	Core	-	Polypropylene	
Weight		<i>gf/m</i>	90	
Width		<i>mm</i>	100±5	
Thickness		<i>mm</i>	4±0.5	
Drain	Tensile strength	<i>kgf/width</i>	350	
	Discharge capacity	10kPa	<i>cm³/sec</i>	180
		300kPa	<i>cm³/sec</i>	140
Filter	Tensile strength	<i>kgf</i>	50	
	Effective opening size	<i>μm</i>	50~90	

**Figure 2.** Concept of soil flushing with PVDs.

포니아 시험 방법을 제시하였고, ASTM에서는 연직배수재의 투수성과 전수성을 결정하기 위하여 각각 ASTM D 4491, D 4716의 방법을 제시하였다.

토목섬유 연직배수재를 이용한 토양세정시스템의 적용은 1995년 미국 버지니아대학에서 연직배수재에 주입과 진공추출을 병행하여 복원효과와 적용성에 대하여 소개된바 있다. Bowers and Gabr(1995)는 연직배수재를 이용하여 토양세정공법을 적용시켜 오염토양복원의 현장적용성을 평가하였다. 즉, 기존 적용된 토양세정공법 적용시 세립질 지반에서의 작은 간극을 세정제가 전달되는 데에는 한계가 있기 때문에 복원효율이 떨어져 연직배수재를 이용하여 오염된 토양을 복원함으로써 세립질 지반에서의 토양세정기술의 효과를 실험적으로 규명하였다.

Gabr et al(1996)은 모형실험과 파일럿 규모의

실내실험을 통하여 배수재의 투수특성을 제시하였고, 오염회수토조를 제작하여 실험 및 수치해석을 실시하였다. Quaranta et al(1997)은 오염된 세립지반에 연직배수재를 적용시켜 배수재 영역 내에서의 영향과 파일럿 규모의 오염복원 실험을 수행하였다. Welker et al(1998)은 배수재 설치간격, 배수저항 및 배수재와 화학물질의 반응에 대한 연구를 수행하였으며, Gabr et al(1999)은 오염지반 및 지하수 복원시 오염물질과의 접촉에 의하여 배수재의 막힘현상에 대하여 시간에 따른 지오텍스타일 필터의 통수성 및 인장강도, 배수재의 압축거동 특성을 파악하였다. Fig. 2는 포화지역에서의 오염지반 복원을 위하여 토목섬유 연직배수재를 이용한 토양세정복원 시스템의 현장개요도를 나타낸 것이다.

III. 연직배수시스템을 이용한 오염복원을 평가

1. 실험방법

오염복원을 평가를 위해서 토양세정 복원시스템에서의 주요 영향인자인 배수저항, 영향범위, 등가직경 등의 산정결과(Shin, et al., 2006)를 분석하여 폭은 2.5cm, 길이는 50cm인 축적효과에 의해 단면을 축소시킨 연직배수재를 모형토조에 타입시켜 실험을 수행하였다. 오염복원토조에서의 배수재 타입깊이는 40cm로 타설하였고, 연직배수재 상부 10cm까지는 플라스틱 튜브로 감싸서 지표면으로부터의 공기유입으로 인한 진공손실을 최소화 하였으며, 강제 스틸로 제작한 맨드릴을 이용하여 유압식 형태로 연직배수재를 타입하였다.

Figure 3은 모형토조내의 연직배수재에 진공압력을 가하여 대상 지반내 존재하는 오염물질을 추출 할 수 있도록 제작된 오염복원 실험장치이다. 토양세정시스템 적용시 물을 주입할 수 있는 주입펌프장치와 물과 공기의 주입과 추출을 연결시켜주는 분배장치로 구성되었다. 또한, 추출된 물과 공기를 분리시켜주는 유수분리 장치,



Figure 3. PVD system installation setup.

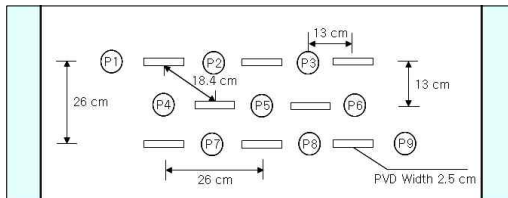


Figure 4. Plan view of PVDs layout in model test box.

진공된 상태에서 연직배수재를 통해 분배장치까지 압력을 가하여 추출시켜주는 실린더 형태의 압력조절장치와 추출된 공기를 여과시켜주는 가스추출장치로 구분하여 파일럿 규모의 오염복원 실험을 수행하였다.

제작된 오염복원 모형실험장치에 염화나트륨을 추적자로 이용하여 토양세정시스템 복원 실험을 수행하였다. 복원 실험에 사용된 시료는 실트질 모래로서 오염복원토조에 시료를 각 실험 단계별로 포설하여 진공조건하에서 연직배수재를 통하여 추출함으로써 지속시간에 따른 농도를 측정하였다. Figure 4는 모형토조내에 연직배수재와 피에조미터를 위치시킨 배치도로서 제안된 영향범위결과를 바탕으로 하여 13cm의 간격인 삼각형 배열패턴으로 타입하였다. 오염복원토조 중앙열 2개의 배수재는 염화나트륨을 주입시켜 용매의 흐름을 유도하였고, 중앙열 주변 6개의 배수재에서는 진공조건하에서 추출하도록 하였다.

2. 농도변화

염소이온 농도를 보정하여 곡선을 최적화하였고, 1 단계에서는 초기농도가 높은 경우, 2 단계에서는 초기농도가 낮은 경우에 대하여 이온농도를 초기 염소이온 농도의 비(QC_0)로 하여 시간에 따른 농도 변화를 측정하였다. 오염복원 모형 실험에서는 농도변화 측정시 염소이온의 추출된 시료에 대하여 최소한계농도비 $QC_0=0.20$ 을 기준으로 하여 평가하였다.

Figure 5는 초기이온농도가 높은 경우에 대하여 지반조건이 느슨하거나 조밀한 경우의 염소이온 농도비를 나타낸 것이다. Figure 5(a)의 느슨한 경우일 때 대략 40시간이 지나면 2개의 추출 배수재에서 최소한계농도비($QC_0=0.20$) 기준이 하로 감소하였다. 또한 Figure 5(b)의 조밀한 조건일 경우에는 대략 70시간이 지속되었을 때 최소한계농도비 이하로 감소하여, 지반조건이 조밀한 경우 복원효율시간이 더 길어지는 것을 알 수 있다.

Figure 6에 나타난 바와 같이 초기농도를 감소시켜 실험을 실시하였다. 결과, Fig. 6(a)의 느슨한 상태일 경우에는 약 28시간이 지나 모든 추출 배수재에서 최소한계농도비 기준에 도달하였고, Figure 6(b)의 조밀한 상태일 경우에는 38시간이 지나 $QC_0=0.20$ 에 도달하여 Figure 5(a)와 비슷하게 나타났다. 즉, 모든 실험에 대한 각각의 이온 검출농도 그래프의 양상은 유사한 경향을 보이고 있고, 시간이 지남에 따라 복원효율시간도 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 또한, 지속시간에 따른 농도분포를 살펴보았을 때, 농도는 주입배수재를 중심으로 그 주변에서 더 빠르게 제거되고, 반면에 복원지역 주변에서는 농도가 더 높게 나타남을 예측할 수 있었다.

한편, 주입물과 추출물이 균형을 이루는 정상 흐름 상태에도 불구하고, 주입배수재 주변에서는 마운딩 형태의 분포가 발생하였고, 추출배수재 주변에서는 콘모양 형태의 수위강하 분포의 지하수 흐름형태를 나타내었다. 또한, 실험과정중 주

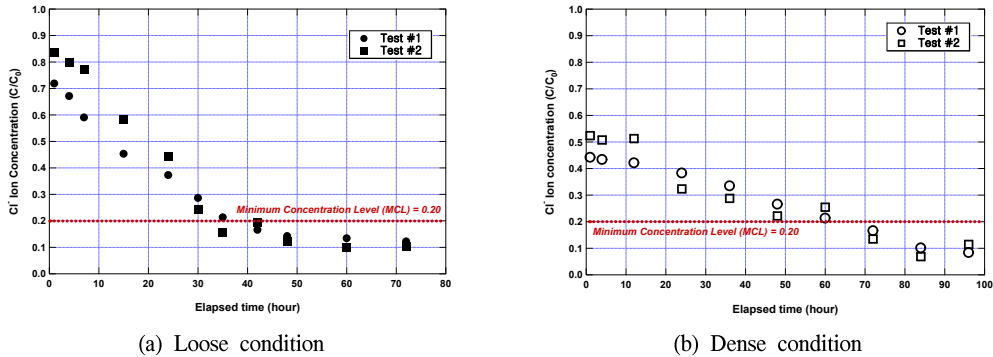


Figure 5. Variation of ion concentration ratio with time for high initial concentration.

입력과 추출물의 정상상태의 흐름을 유지하다가 추출만을 유도하여 주입에 대한 영향을 검토한 결과, 전체적으로 간극수압은 다소 증가하는 경향을 나타내었으나, 주입과 추출을 동시에 작동시켰을 경우와 비슷한 경향을 나타내어 주입에 대한 간극수압의 영향은 크게 나타나지 않았다. 따라서, 배수재 위치에 따른 영향범위 실험결과와 부합됨으로 실제 현장적용시 오염복원에 기초 자료로 활용할 수 있다.

IV. 토양세정복원시스템의 예측모형을 이용한 시뮬레이션

중양에 위치한 주입배수재를 통하여 물을 주입시키고, 오염물질의 복원을 위하여 주변 추출배수재에 진공압력을 가함으로써 임의의 방사방향 거리에 따른 오염농도 복원률을 평가하였고,

이 결과를 바탕으로 Gabr et al(1996)등이 제안한 지배방정식으로 예측모형을 이용한 시뮬레이션을 통하여 오염물질 이동시 최적화 변수를 도출하였다. 예측모형은 완전포화조건이며 지반내에서 화학적, 생물학적 반응이나 분해에 의한 질량감소는 무시하였고, 확산-분산 및 흡착과정과 이류 이동과 같은 시간적, 공간적 이동을 가정하였다. 오염물질의 시간적, 공간적 농도변화는 오염용매의 수리경사에 의한 이류현상과 농도경사에 의한 분산작용, 오염물질과 흡입자의 표면에 흡착하는 정도에 좌우된다.

이행우 등(2006)이 제시한 바와 같이 예측모형 적용시 오차함수(erf)와 보정오차함수(erfc)의 값은 각각 변수에 따라 값을 결정하지만, 이는 매개변수의 범위나 적용하는 차수에 따라 값의 변화가 크기 때문에 안정적인 값을 구하는데 어려움

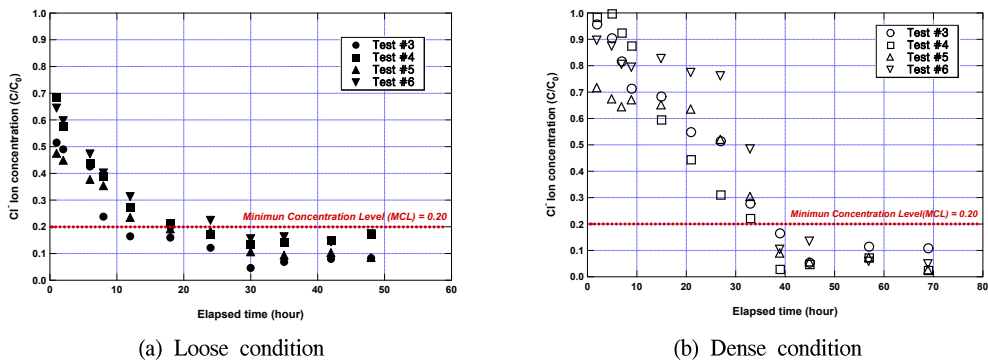


Figure 6. Variation of ion concentration ratio with time for low initial concentration.

Table 2. Model input parameters with compaction condition.

Parameter	Unit	Values				Remarks
		Dense condition		Loose condition		
		# 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	
a_r & a_z	m	0.1	0.5	0.1	0.5	
n		0.2	0.2	0.2	0.2	
r_s	kg/m^3	1670	1670	1470	1470	
u_r, u_z	m/hr	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}	
Q_0	m^3/hr	1.29×10^{-3}	1.29×10^{-3}	1.29×10^{-3}	1.29×10^{-3}	

이 있다. 따라서 본 연구에서는 안정적인 erf(x)와 erfc(x)값을 나타내고, 다양한 조건을 분석하기 위하여 개발된 전산모형으로 앞서 도출된 오염복원 모형실험을 통한 결과와 비교하였다. 토양세정 복원시스템의 현장 적용성 평가를 위하여 앞서 3.2절의 오염복원 모형실험 결과를 바탕으로 시뮬레이션을 통하여 각각의 변수에 대한 효과를 제시하였다.

예측모형의 최종 형태는 Gabr et al(1996)이 제안한 오염농도 해석식을 이용하여 연직배수재가 설치된 오염지반에서의 시간 및 공간변화에 따른 오염농도변화율을 모형화 하였다. 모든 해석은 실내오염복원 모형실험의 #1~#6으로 부터의 데이터 형식에 맞추어 수행하였다. 모형실험 #1~#2는 초기오염농도가 높은 경우에 대하여 예측된 값이고, 모형실험 #3~#4는 초기농도가 낮은 경우에 대하여 다짐조건이 느슨한 상태와 조밀한 상태로 구분하여 농도변화를 나타낸 것이다. Table 2는 실내오염복원 모형실험에 의한 주요 입력 변수 값을 나타낸 것이다.

예측모형의 입력자료는 아래에 나타낸 바와 같이 오염지반의 지반조건, 오염물질의 이류, 분산 및 흡착에 관련된 추출 배수재의 추출률, 연직배수재의 등가반경 등이고, 오염물질의 분포자료

와 매개변수 분석을 위하여 분할수 및 수렴조건 등을 입력하였다. 예측 모형으로 분석된 결과는 임의의 위치에서의 시간에 따른 초기오염농도에 대한 오염농도비(C/C_0)로 나타내었다. 예측모형에 사용된 입력변수 중 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), r_s 는 흙의 단위중량(kg/m^3), u_z 는 연직방향 흐름 유속(m/h), K_d 는 흙입자와 용액의 평형분포계수(m^3/kgf), C_0 는 초기농도(mg/kgf)를 나타낸다. 염소이온의 평형분포계수(K_d)는 $3 \times 10^{-4} m^3/kgf$ 로서 보통 일반적인 실트질 흙의 평형분포계수값이며, 예측모형에서 지연계수의 함수로 나타낼 수 있다.

지속시간에 따른 오염농도비의 예측은 연직방향과 방사방향의 분산지수를 기준으로 하여 모든 가능변수를 적용시켜 수행하였다. 즉, 본 연구에서는 예측모형에 변수 적용시 Freeze and Cherry (1979)가 제시하였던 간극률이 서로 다른 흙과 암석의 종류에 따라 오염물질 이동시 방사방향 및 연직방향의 분산지수 값은 0.1, 0.5m를 적용하였고, 연직방향과 방사방향의 분산지수는 낮은

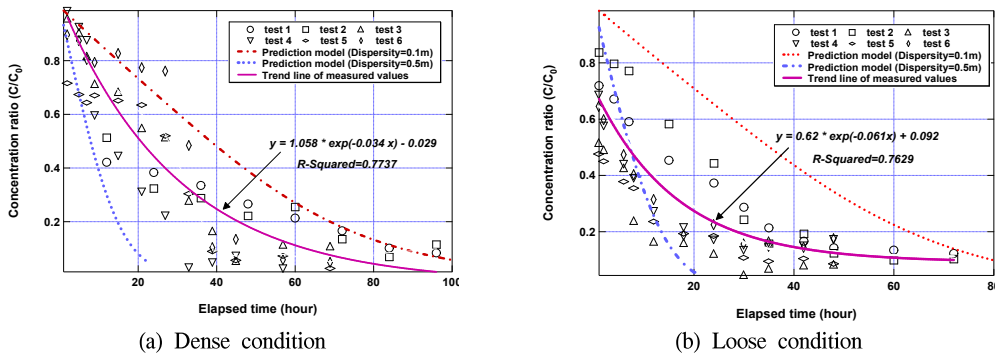


Figure 7. Prediction model verification.

흐름속도 때문에 두 값이 같게 나타내었다. 연직 배수재 등가반경인 r_0 의 값은 $0.013m$, 주입배수재와 추출배수재 사이 거리인 r 값은 $0.18m$ 를 적용하였다. 또한, 연직방향의 흐름유속(u_z)은 주입배수재 열과 추출배수재 열 사이에서의 평균 동수경사를 계산하여 $2.5 \times 10^{-3} m/hr$ 로 결정하였다. 연직배수재의 추출률(Q)은 각각의 연직배수재에서 측정된 값과 추출연직배수재 열에서 가장 낮은 값으로 하여 $1.27 \times 10^3 m^3/hr$ 을 적용하였다.

Figure 7은 지속시간에 따른 오염농도비(C/C_0)의 관계 곡선을 나타낸 것으로서, 실내오염복원 모형실험으로부터 염소이온 농도를 통하여 나타내었다. 오염복원률 예측모형은 각각 가정된 연직방향과 방사방향 분산지수가 서로 다른 2개의 곡선을 기준으로 하여 비교분석하였다. 본 예측을 통하여 입력변수에 해당되는 분산지수를 기초로한 모형의 정확도를 알 수 있다.

예측된 오염농도변화를 살펴보면, 조밀한 경우와 느슨한 경우, 염소이온 농도의 실제 복원률은 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, 좀더 정확한 곡선을 나타내고 있다. 이는 모형토조내 실트질 흙에서의 투수계수의 크기가 서로 다른 조건을 나타내기 때문으로 사료된다.

예측 모형으로 분석한 결과, 조밀한 경우에는

6개의 추출 배수재에서 측정된 값이 거의 예측한 분산지수의 상하한선 범위내에 분포하였으며, 느슨한 상태일 경우, 초기에는 측정된 추세선보다 오염복원률이 약간 과대평가되었으나, 복원률이 28%이상인 시점부터는 측정된 값이 예측모형으로 나타낸 분산지수의 범위내에 있어 개발된 예측모형이 토양 오염복원 분석에 적용되는 데는 무리가 없을 것으로 사료된다.

또한, 각각 다른 분산지수와 가변변수들을 변화시키면서 복원시간을 예측하였을 경우, 예측된 복원시간은 추출률과 연직방향 흐름속도와 같은 변수 보다는 분산지수 입력값이 더 민감하게 작용한다는 것을 알 수 있었다.

오염층의 두께가 두껍고 주입배수재와 추출배수재의 간격이 넓을수록 복원효율이 낮고, 복원시간이 길어졌다. 오염물질이 흡입자의 흡착과 관련된 지연계수가 작을수록 오염복원 효율은 크고, 분산지수가 클수록 효율은 크게 나타났다.

따라서, 예측모형을 통하여 가정된 방사방향과 연직방향의 분산지수를 기초로 하여 실험데이터에 따른 예측된 오염농도비와 복원시간을 나타내었고, 최적화된 예측모형을 제안하였다.

V. 토양세정시스템 예측모형의 매개변수 분석

본 연구에서는 오염지반 및 오염물질의 물성치가 연직배수재에 의한 오염물질 추출에 미치는

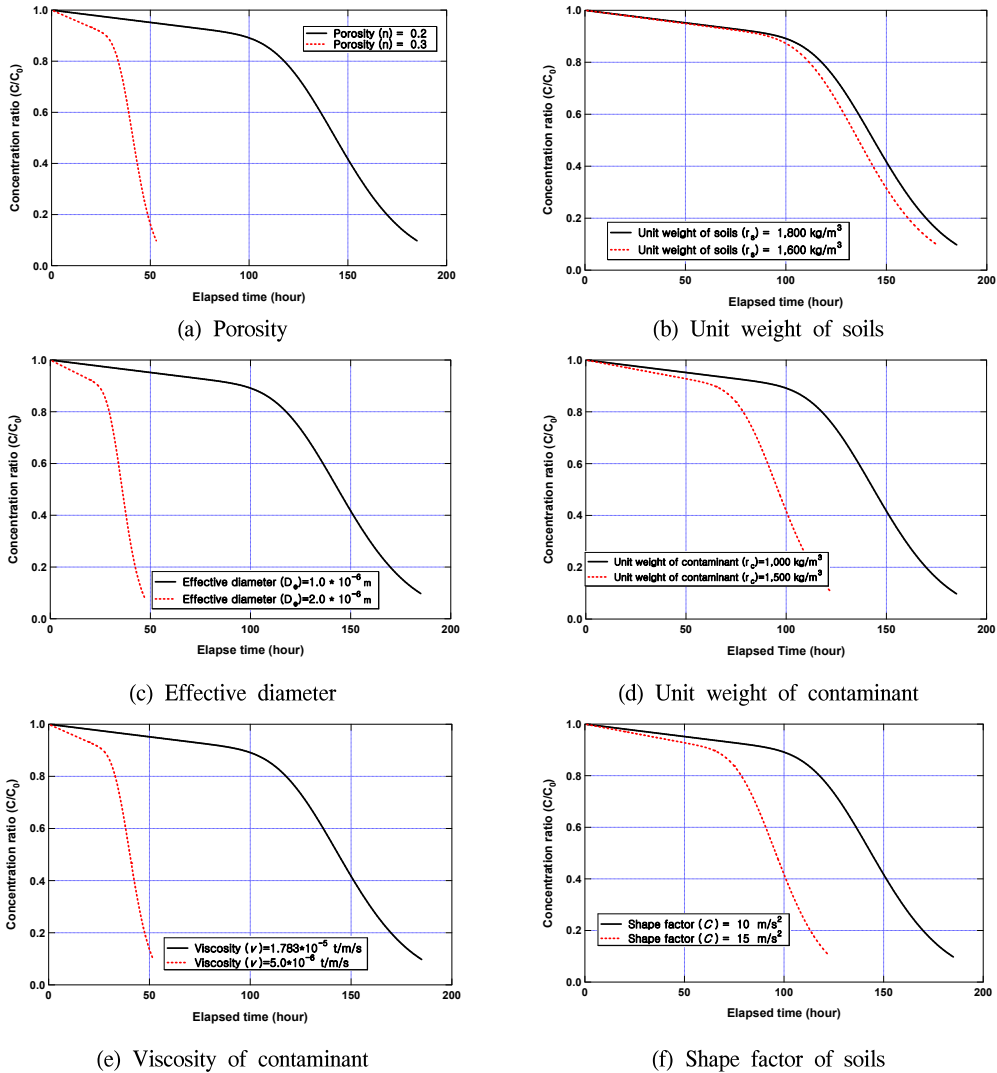


Figure 8. Variation of contaminant concentration ratio as influence of parameter.

영향을 규명하기 위하여 앞절에서 검증된 예측모형으로 매개변수 분석을 수행하였다.

최적화 과정을 신속히 처리하고, 가장 중요한 변수들에 초점을 맞추기 위해서 최적화된 변수들의 개수를 감소시켰다. 최적화 과정을 통한 변수를 제거하기 위해서 해석결과에 크게 영향을 미치지 않거나, 값에 대한 변수가 어느 정도 추측할 수 있다면 그 변수를 제거될 변수로 선정하였다.

가정된 예측모형의 입력자료를 이용하여 오염지반 복원에 미치는 영향을 파악하였다. Taylor

(1948)는 지반내에 흐르는 투수계수에 영향을 주는 인자로서 흙의 간극률, 흙의 단위중량, 유효입경, 오염물질의 단위중량, 점도, 흙의 형상계수로 나타내었다. 즉, 오염지반의 투수계수는 흐름속도와 연직배수재를 통한 추출률과 관계되며, 흐름속도와 추출률은 분산지수에 영향을 미치게 되어 결국 오염복원 과정시 중요한 역할을 하게 된다(이행우, 2006).

Figure 8은 오염토양에 영향을 주는 변수들을 투수계수와 연계하여 지속시간에 따른 오염복원

Table 3. Analysis of parameter for remediation efficiency of contaminants.

Item	Soil and solute						Contaminants	
	Parameter	a_r, a_z	n	r_s	D_e	C	r_c	v_s
Properties	Unit	m		kgf/m^3	m	m/s^2	kgf/m^3	$tf/m/s$
	Range(R)	0.01 ~ 15	0.2 ~ 0.9	1,400 ~ 1,900	$1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-7}$	10 ~ 100	1,000 ~ 1,800	$1.78 \times 10^{-5} \sim 8.00 \times 10^{-7}$
	Application value(A)	1.9	0.1	200	1×10^{-6}	5	500	1.28×10^{-5}
	Impact($\Delta A/\Delta R$) (I)	0.127	0.143	0.286	0.001	0.056	0.625	0.753
	Efficiency	t_1	185	185	185	185	185	185
	t_2	65	53	175	47	123	123	52
	$(t_1-t_2)t_1$ (II)	0.649	0.714	0.054	0.746	0.335	0.335	0.719
Effects(II/I)		5.11	4.99	0.02	745.9	5.99	0.54	0.95

를 나타내었다. Table 3은 도출된 결과를 바탕으로 변수분석을 수행하여 오염복원에 영향을 미치는 정도를 비교분석하였다. 즉, 각각 다른 값의 분산지수를 변화시키면서 오염복원 효율을 나타낸 것으로서, 예측된 복원시간은 추출률과 연직방향 흐름속도의 변수 보다는 분산지수 입력값이 더 민감하게 작용하고 있고, 분산지수가 커질수록 오염복원 효과가 크게 나타났다. Figure 8(a)에서는 흙의 간극률이 클수록 오염복원 효율이 크게 나타났고, Figure 8(b)는 흙의 단위중량에 따른 농도 변화를 나타낸 것으로서 흙의 단위중량이 낮을수록 효율은 다소 증가하나 그 영향은 아주 작은 것으로 나타나고 있다. Figure 8(c)는 유효입경에 따른 복원효율을 나타낸 것으로서, 입경이 클수록 그 효율은 매우 좋으며 다른 변수들보다 오염복원 효과에 미치는 영향이 매우 크게 나타났다. Figure 8(d)에서와 같이 오염물질의 단위중량이 커질수록 오염복원 효율이 큰 것으로 나타났고, Figure 8(e)는 오염물질의 점성에 대하여 시간에 따른 오염농도 변화를 나타낸 것으로, 점성이 클수록 유체의 이동에 저항이 발생하여 복원효율은 낮아지는 것으로 나타났다. 마지막으로 Figure 8(f)는 형상계수와 시간에 따른 지반의

오염농도의 변화를 나타낸 것으로 형상계수가 커질수록 오염복원 효과가 크게 나타났다.

Table 3은 오염지반 및 오염물질의 물성치를 자연계에서 가질 수 있는 개략적 범위를 바탕으로 본 연구에서의 물성치 변화를 적용하여 오염정화에 미치는 영향에 대하여 매개변수 분석을 수행하였다. 즉, 지속시간에 따른 오염복원률과 오염 복원이 90% 완료되는데 소요시간을 바탕으로 분석을 수행하였다. 결과, 오염복원에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 흙의 유효입경으로서, 이는 오염지반 흐름속도와 연직배수재를 통한 추출률과 관계된 분산지수에 가장 큰 영향을 미쳐 복원 과정시 분석된 가장 큰 영향인자로 판단할 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 연직배수시스템의 적용성을 위하여 오염토양 복원시 오염지반에 영향을 주는 인자에 대한 공학적 특성을 바탕으로 파일럿 규모의 실내 오염복원 실험을 통한 오염물질의 복원효율 등을 분석하였다. 또한, 도출된 결과를 바탕으로 Gabr et al(1996)이 유도한 지배방정식을

이용하여 예측모형 시뮬레이션, 매개분석 등을 통한 적용성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 초기이온농도가 높고, 지반조건이 느슨한 경우일 때 대략 40시간이 지나면 2개의 추출 배수재에서 최소한계농도비 기준이하로 감소하였고, 조밀한 조건일 경우에는 대략 70시간이 지속되었을 때 최소한계농도비 이하로 감소하여, 지반조건이 조밀한 경우 복원효율시간이 더 길어지는 것을 알 수 있다. 즉, 모든 실험에 대한 검출 농도 그래프의 양상은 유사한 경향을 보이고 있고, 시간이 지남에 따라 복원효율시간도 빠르게 진행됨을 알 수 있었다.

2. 오염복원 실험시 주입률과 추출률이 균형을 이루는 정상흐름 상태에도 불구하고, 주입배수재 주변에서는 마운딩 형태의 분포가 발생하였고, 추출배수재 주변에서는 콘모양 형태의 수위강하 분포의 지하수 흐름형태를 나타내었고, 배수재 위치에 따른 영향범위 실험결과와 부합됨으로서 실제 현장적용시 오염복원에 기초자료로 활용할 수 있다.

3. 예측 모형으로 분석한 결과는 6개의 추출 배수재에서 측정된 값들의 조밀한 경우에는 거의 예측한 분산지수로 그려진 상하한선내에 분포하였으며, 느슨한 상태일 경우, 초기에는 측정된 추세선보다 오염복원률이 약간 과대평가되었으나, 복원률이 28%이상인 시점부터는 측정된 관계곡선이 예측모형으로 나타낸 분석치의 분포내에 있어 개발된 예측모형이 토양 오염복원 분석에 적용되는 데는 무리가 없을 것으로 사료된다.

4. 오염토양에 영향을 주는 변수들을 투수계수와 연계하여 개발된 전산모형으로 매개변수 분석을 수행한 결과, 오염복원에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 흙의 유효입경으로서, 이는 오염지반 흐름속도와 연직배수재를 통한 추출률과 관계된 분산지수에 가장 큰 영향을 미쳐 복원 과정시 분석된 가장 큰 영향인자로 판단된다.

인용 문헌

- 고석오. 2002. 토양 및 지하수 복원기술 동향 및 현장적용, 지반환경, 한국건설기술연구원, pp.129-156.
- 이행우 · 장병욱. 2006. 토양 및 오염물질의 물성치가 연직배수재에 의한 현장오염정화에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구, 한국토목섬유학회논문집 5(2) : 1-8.
- 정하익. 2003. 연직배수공법을 이용한 오염지하수의 복원, 지반환경, 한국건설기술연구원, pp.183-201.
- Bowders, J. J., and Gabr, M. A. 1995. Strip-drains for in silty clean up of contaminated fine-grained soils, *Geotechnical News*, 13(3) : 21-25.
- Freeze, R. A., and Cherry, J. A. 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Gabr M. A., Bowders J. J., Wang, J., and Quaranta J. D. 1996. In situ soil flushing using prefabricated vertical drains, *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1) : 97-105.
- Gabr, M. A., Williamson, A., Sabodish, M., and Bowders, J. J. 1999. BTEX extraction from clay soil using prefabricated vertical drains, *Journal of Geotech. and Geoenviron. Engrg*, 125(3) : 615-618.
- Hansbo, S., Jamiolkowski, M., and Kok, L. 1981. Consolidation by vertical drains, *Geotechnique*, 31(1) : 45-66.
- Quaranta, J. D., Gabr, M. A., Cook and Szabo, D. 1997. Developments in prefabricated vertical drain enhanced soil flushing, *Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.703-706.
- Shin, E. C., Park, J. J., and Das, B. M. 2006. Remediation of heavy metal contaminated soils using PVDs, *5th ICEG Environmental*

- Geotechnics, pp.287-293.
- Taylor, D. W. 1948. Fundamentals of soil mechanics,
John Wiley & sons Inc., New York.
- Welker, A. L., Logan, M., and Knight, S. B. 1998.
Design issues of a prefabricated drain reme-
diation system, Geotechnical News, 16(1) :
31-35.