

연직배수재를 이용한 오염지반 복원의 영향인자 분석

Analysis of Influence Factors for Remediation of Contaminated Soils Using Prefabricated Vertical Drains

박 정 준¹⁾ · 신 은 철[†]

Park, Jeongjun · Shin, Eunchul

ABSTRACT : Due to the growth in industrialization, potential hazards in subsurface environments are becoming increasingly significant. The extraction of the contaminant from the soil and movement of the water are restricted due to the low permeability and adsorption characteristics of the reclaimed soils. There are a number of approaches to *in-situ* remediation that are used in contaminated sites for removing contaminants. These include soil flushing, dual phase extraction, and soil vapor extraction. Among these techniques, soil flushing was the focus of the investigation in this paper. Incorporated technique with PVDs has been used for dewatering from fine-grained soils for the purpose of ground improvement by means of prefabricated vertical drain systems. 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. The modeling was intended to predict the effectiveness and time dependence of the remediation process. Modeling has been performed on the extraction, considering tracer concentration and laboratory model test characteristics. The computer model used herein are SEEP/W and CTRAN/W, this 2-D finite element program allows for modeling to determine hydraulic head and pore water pressure distribution, efficiency of remediation for the subsurface environment. It is concluded that the coefficient of permeability of contaminated soil is related with vertical velocity and extracted flow rate. The vertical velocity and extracted flow rate have an effect on dispersivity and finally are played an important role *in-situ* soil remediation.

Keywords : Influence Factor, Remediation, Contaminated Soils, PVDs, Laboratory Model Test, Numerical Analysis

요 지 : 개발사업과 산업발달로 인하여 발생하는 유해화학물질과 유류사용량이 늘면서 화학물질과 유류를 저장하는 지하저장탱크에서의 오염물질 유출로 토양 및 지하수 오염이 심각해지고 있다. 또한, 산업지역, 공장지대가 밀집된 매립 지반에서는 투수계수가 낮아 오염물질 추출에 한계가 있다. 이러한 문제해결 방안의 하나로 연약지반 개량공법에서 사용되고 있는 연직배수재를 이용하여 기존의 복원기술인 토양세정공법의 효율을 증진시킨 연직배수시스템에 대한 연구를 수행하였다. 오염된 지반의 복원을 목적으로 사용한 연직배수시스템의 적용성 평가를 위하여 오염토양 복원시 오염지반에 영향을 주는 인자에 대한 유효성 등을 분석하였다. 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, 염화나트륨을 복원실험의 추적자로 사용하였고, 도출된 결과를 바탕으로 SEEP/W와 CTRAN/W 유한요소해석 프로그램을 이용하여 압력수두와 지속시간에 따른 농도변화, 각각의 지반조건에 대한 복원률의 오염물질 흐름 해석을 통한 유효성을 평가하였다. 결과, 오염지반의 투수계수는 흐름속도와 연직배수재를 통한 추출률과 관계되며, 흐름속도와 추출률은 분산지수에 영향을 미치게 되어 결국 원위치 오염복원 과정시 중요한 역할을 하게 된다.

주요어 : 영향인자, 복원, 오염지반, 토목섬유 연직배수재, 실내 오염복원실험, 수치해석

1. 서 론

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

1) 정회원, 인천대학교 공학기술연구소 선임연구원

† 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수(E-mail : ecshin@incheon.ac.kr)

용되거나 불포화 지반에 사용되는 것으로서 시가지, 산업 지역, 공장지대가 밀집된 고농도의 중금속 및 유해물질이 함유되어 있는 투수성이 낮은 매립 지반에서는 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 등(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 최소화 하였다(신은철 등, 2007; 정하익, 2003; Shin 등, 2006; Welker 등, 1998). 또한, 연직배수시스템은 다수의 주입배수재와 추출배수재를 설치함으로써 포켓상으로 분포하고 있는 오염물질을 신속하게 제거할 수 있다.

따라서, 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, 염화나트륨을 복원실험의 추적자로 사용하였고, 도출된 결과를 바탕으로 SEEP/W와 CTRAN/W 해석 프로그램을 이용하여 압력수두와 지속시간에 따른 농도변화, 각각의 지반조건에 대한 복원률의 오염물질 흐름 해석을 통한 유효성을 평가하였다.

2. 토목섬유 연직배수재를 활용한 연직배수시스템의 개념

토목섬유 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 이용하

여 한층 더 발전된 연직배수시스템의 매카니즘은 지반개량을 목적으로 사용된 연직배수공법의 설계와 유지관리를 기초로 하고 있다.

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

Gabr 등(1996)은 모형실험과 파일럿 규모의 실내실험을 통하여 배수재의 투수특성을 제시하였고, 오염회수토조를 제작하여 실험 및 수치해석을 실시하였다. Quaranta 등(1997)은 오염된 세립지반에 연직배수재를 적용시켜 배수재 영역내에서의 영향과 파일럿 규모의 오염복원 실험을 수행하였다. Welker 등(1998)은 배수재 설치 간격, 배수저항 및 배수재와 화학물질의 반응에 대한 연구를 수행하였으며, Gabr 등(1999)은 오염지반 및 지하수 복원시 오염물질과의 접촉에 의하여 배수재의 막힘현상에 대하여 시간에 따른 지오택스타일 필터의 통수성 및 인장강도, 배수재의 압축거동 특성을 파악하였다. 본 연구에서 사용되어진 연직배수재의 단면 형태는 Fig. 1에 나타낸 바와 같고, Fig. 2는 포화지역에서의 오염지반 복원을 위하여 토목섬유 연직배수재를 이용한 연직배수시스템의 현장 개요도를 나타낸 것이다.

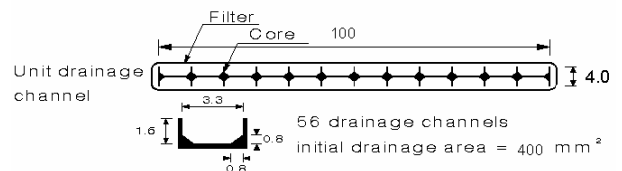


Fig. 1. Schematic of core with PVDs (unit: mm)

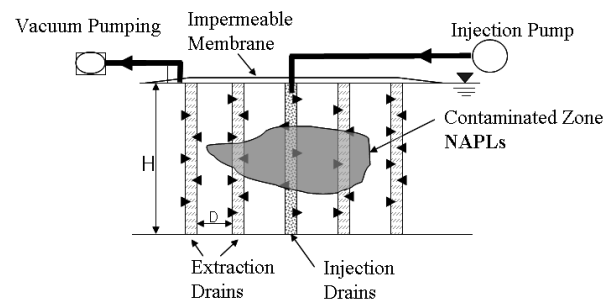


Fig. 2. Concept of soil flushing with PVDs

3. 연직배수시스템을 이용한 오염지반의 복원효율

3.1 실험방법

본 연구에서는 오염지반의 복원 효율 평가를 위해서 연직배수시스템에서의 주요 영향인자인 배수저항, 영향범위, 등가직경 등의 산정결과(신은철 등, 2007)를 분석하여 폭은 2.5cm, 길이는 50cm인 축척효과에 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 맨드렐을 이용하여 유압식 형태로 연직배수재를 타입하였다.

Fig. 3은 모형토조내의 연직배수재에 진공압력을 가하여 대상 지반내 존재하는 오염물질을 효과적으로 추출할 수 있도록 제작된 오염복원 실험장치를 나타낸 것이다. 즉, 연직배수시스템 적용시 물을 주입할 수 있는 주입펌프장치와 물과 공기의 주입과 추출을 연결시켜주는 분배장치로 구성되었다. 또한, 추출된 물과 공기를 분리시켜주는 유수분리 장치, 진공된 상태에서 연직배수재를 통해 분배장치까지 압력을 가하여 추출시켜주는 실린더 형태의 압력조절장치와 추출된 공기를 여과시켜주는 가스추출장치로 구분하여 오염지반에 대한 복원효율을 평가하였다.

또한, 제작된 오염복원 모형실험장치에서는 염화나트륨을 추적자로 이용하였고, 실험에 사용된 시료는 실트질 모래로서 오염복원토조에 시료를 각 실험 단계별로 포설하여 진공조건하에서 연직배수재를 통하여 추출함으로써 지속시간에 따른 농도를 측정하였다. Fig. 4는 모형토조내에 연직배수재와 피에조미터를 위치시킨 배치도로서 신은철 등(2007)이 제시한 영향범위결과를 바탕으로 하여 13cm의 간격인 삼각형 배열패턴으로 타입하였다. 오염복원토조 중앙열 2개의 배수재는 염화나트륨을 주입시켜 용매의 흐름



Fig. 3. PVD system installation setup

을 유도하였고, 중앙열 주변 6개의 배수재에서는 진공조건하에서 추출하도록 하였다.

본 논문에서 사용된 시료는 실트질 흙으로서 공학적 특성은 Table 1에 나타내었고, 입도분포곡선은 Fig. 5에 나타내었다. 입도분포곡선에 나타난 바와 같이 실트질 흙의 구성은 70%이상의 가는 모래질 입자와 30% 정도의 실트 및 점토분을 함유하고 있고, 세립토분의 대부분은 실트질로 구성되어 있으므로 통일분류법의 분류기호로 SM인 실트질 모래로 나타났다. 실트질 흙의 표준다짐시험 결과는 최적함수비가 16.4%, 최대건조밀도는 14.9kN/m³을 나타내었고, 투수계수는 3.61×10⁻⁴cm/s로 도출되었다.

3.2 농도변화

본 연구에서는 염소이온 농도를 보정하여 곡선을 최적화하였고, 1 단계에서는 초기농도가 높은 경우, 2 단계에서는 초기농도가 낮은 경우에 대하여 이온농도를 초기 염

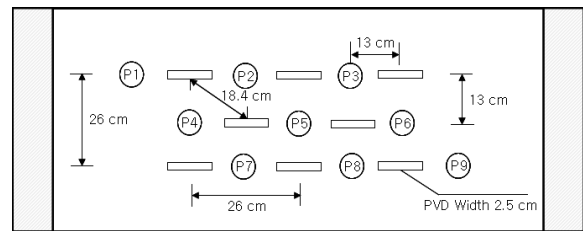


Fig. 4. Plan view of PVDs layout in model test box

Table 1. Engineering properties of silty soils

Item	Quantity
Specific gravity	2.67
Uniform coefficient	2.0
Coefficient of gradation	0.85
Optimum moisture content(%)	16.4
Max. dry unit weight(kN/m ³)	14.9
Coefficient of permeability(cm/s)	3.61 × 10 ⁻⁴
USCS Classification	SM

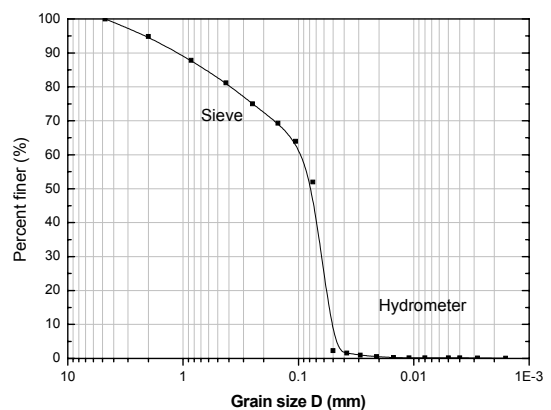


Fig. 5. Grain size distribution for silty soils

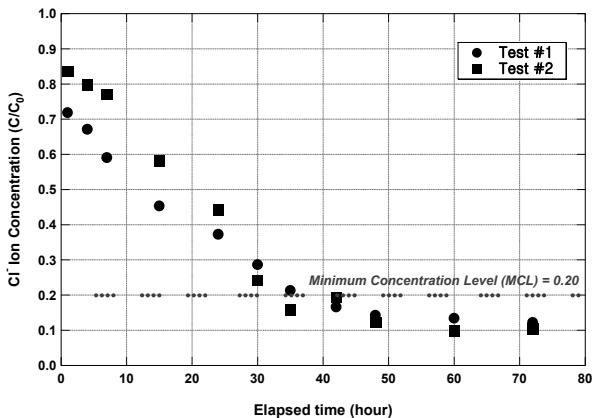
소이온 농도의 비(C/C_0)로 하여 시간에 따른 농도 변화를 측정하였다. 오염복원 모형실험에서는 농도변화 측정시 염소이온의 추출된 시료에 대하여 최소한계농도비 $C/C_0=0.20$ 을 기준으로 하여 평가하였다.

Fig. 6은 초기이온농도가 높은 경우에 대하여 지반조건이 느슨하거나 조밀한 경우의 염소이온 농도비를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 느슨한 경우일 때 대략 40시간이 지나면 2개의 추출 배수재에서 최소한계농도비($C/C_0=0.20$) 기준이하로 감소하였다. 또한 Fig. 6(b)의 조밀한 조건일 경우에는 대략 70시간이 지속되었을 때 최소한계농도비 이하로 감소하여, 지반조건이 조밀한 경우 복원효율시간이 더 길어지는 것을 알 수 있다.

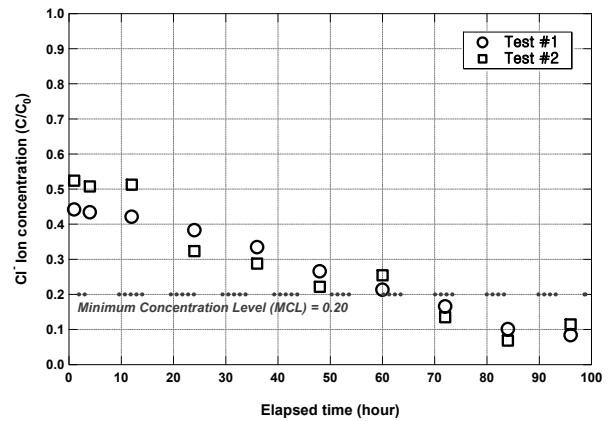
Fig. 7에 나타난 바와 같이 초기농도를 감소시켜 실험을 실시하였다. 결과, Fig. 7(a)의 느슨한 상태일 경우에는 약 28시간이 지나 모든 추출배수재에서 최소한계농도비 기준에 도달하였고, Fig. 7(b)의 조밀한 상태일 경우에는 38시간이 지나 $C/C_0=0.20$ 에 도달하여 Fig. 6(a)와 비슷하게 나타났다. 즉, 모든 실험에 대한 각각의 이온 검출농도 그래

프의 양상은 유사한 경향을 보이고 있고, 시간이 지남에 따라 복원효율시간도 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 또한, 지속시간에 따른 농도분포를 살펴보았을 때, 농도는 주입 배수재를 중심으로 그 주변에서 더 빠르게 제거되고, 반면에 복원지역 주변에서는 농도가 더 높게 나타남을 예측할 수 있었다.

한편, Quaranta 등(2005)이 제시한 바와 같이 주입물과 추출물이 균형을 이루는 정상흐름 상태에도 불구하고, 주입배수재 주변에서는 마운딩 형태의 분포가 발생하였고, 추출배수재 주변에서는 콘모양 형태의 수위강하 분포의 지하수 흐름형태를 나타내었다. 또한, 실험과정중 주입물과 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 기초자료로 활용할 수 있다.

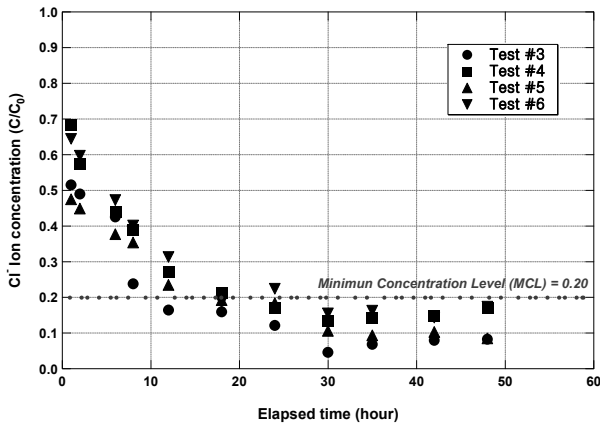


(a) Loose condition

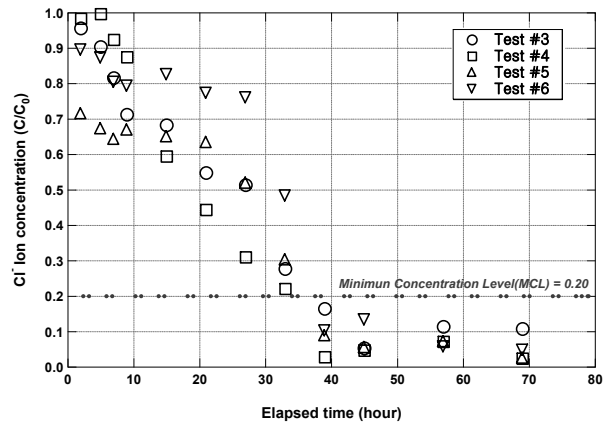


(b) Dense condition

Fig. 6. Variation of ion concentration ratio with time for high initial concentration



(a) Loose condition



(b) Dense condition

Fig. 7. Variation of ion concentration ratio with time for low initial concentration

4. 수치해석을 통한 연직배수시스템의 유효성

수치해석시 적용지반은 3장의 오염지반의 복원효율 실험방법과 동일한 실트질모래로 실내모형복원실험의 스케일로 모델링하였다. 본 연구에 사용된 해석 프로그램은 우선 각각 연직배수재로부터의 거리에 따른 압력수두를 산정하기 위하여 SEEP/W 침투해석 프로그램을 사용하였고, 지속시간에 따른 농도변화와 지반조건에 따른 흐름을 평가하기 위하여 오염물질 확산해석프로그램인 CTRAN/W를 이용하였다.

4.1 압력수두 해석

연직배수재의 영향범위에 대한 지반내 압력분포를 결정한 후 Surfer 프로그램을 이용하여 벡터 프레임으로 나타내었다. 모형토조내 설치된 피에조미터와 연직배수재를 통한 진공압 적용시에 압력수두를 측정하면서 폭 2.5cm인 축소된 연직배수재를 20cm 깊이 아래로 각각 30cm와 50cm 관입된 깊이로 하여 깊이에 따른 영향범위를 나타내었다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 연직배수재의 타입깊이가 깊어짐에 따라 압력수두가 작용되는 깊이 또한 증가하고 있으나, 수평방향으로의 영향반경은 연직배수재에서 약 20cm 정도를 약간 넘어가는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 지반내 공기의 흐름률은 간극비와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 깊이가 깊어질수록 단위중량이 증가하게 되므로 간극비가 감소하여 공기흐름률이 감소하게 된다. 따라서 깊이가 증가할수록 측정되어지는 압력수두는 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 연직배수재의 직경을 원형의 등가환산직경으로 하고, 수직축을 중심으로 선대칭해석을 기초로 모델링 하였다. 또한, 해석시 연직배수재는 실내모형복원 실험에서와 같이 폭은 2.5cm, 길이는 50cm인 축척 효과에 의해 단면을 축소시킨 배수재를 모형토조내에 타입된 형태로 진공압력은 20kPa을 적용하였다. 사용된 해석프로그램 SEEP/W는 오염물질의 흐름 해석을 위한 CTRAN/W로 해석하기 위한 요소망 및 포화 및 불포화지반내 오염물질의 이동에 영향을 주는 간극수압의 분포나 흐름특성 등의 침투해석데이터를 제공하는 것으로서, Fig. 10은 모델링된 지반의 압력수두의 분포를 나타낸 것이다.

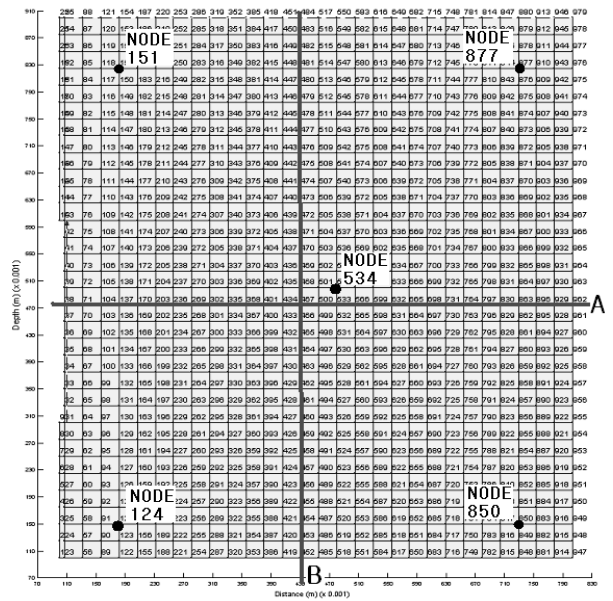
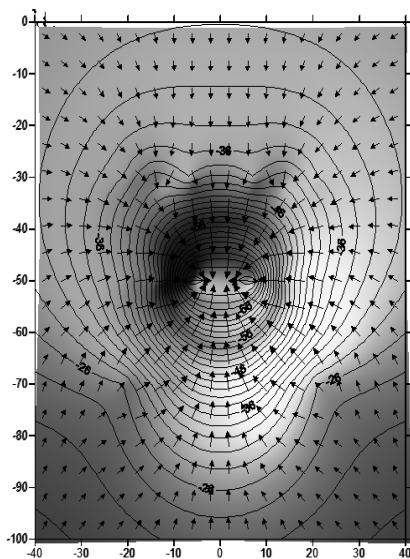
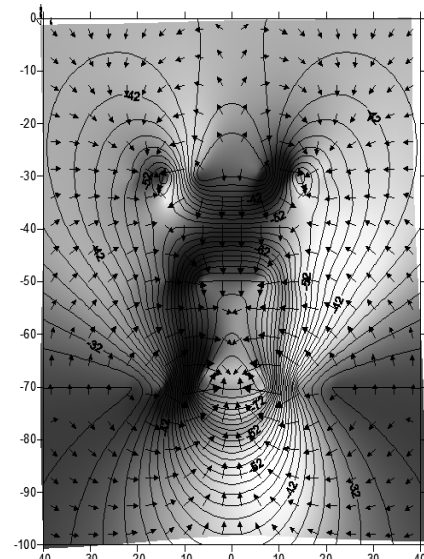


Fig. 9. Boundary condition of finite element mesh



(a) Penetration depth 30cm



(b) Penetration depth 50cm

Fig. 8. Zone of influence with penetration depth of PVDs

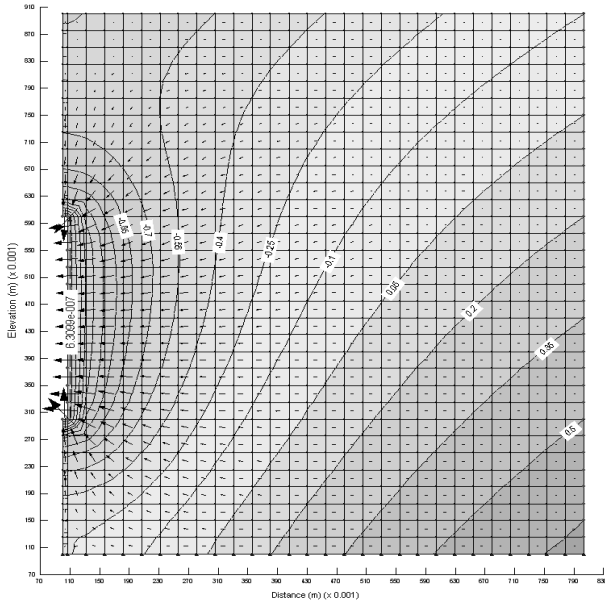


Fig. 10. Distribution of pressure head in ground

Fig. 11은 거리에 따른 압력수두의 변화이고, Fig. 12는 깊이에 따른 압력수두의 변화로서, 여기서 A라인과 B라인은 Fig. 7에 나타난 바와 같다. 해석을 통한 모형복원실험의 A라인, 즉 배수재 중앙에서의 거리에 따른 압력수두는 신은철 등(2005, 2007)에서 제시한 오염지반 복원을 위한 지반공학적 실험결과의 압력수두와 마찬가지로 연직배수재로부터 13~15cm 떨어진 지점부터 진공압력이 약 70% 이상 손실됨을 나타내고 있으며, 깊이에 따른 B라인의 경우는 연직배수재 관입깊이 이하로 진공압력이 거의 작용되지 않고, 깊이가 깊어질수록 단위중량이 증가하게 되므로 간극비가 감소하여 압력수두는 증가하는 경향을 나타내었다.

4.2 오염물질확산 해석

오염물질의 흐름경로 및 복원효율을 파악하기 위하여 오염물질확산 해석프로그램인 CTRAN/W를 이용하였을 때 대상 지반은 실제 수행하였던 모형복원실험과 마찬가지로 초기 농도를 20,000ppm으로 설정하였으며 총 100시간 동안 흐름해석을 수행하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 대상지반의 상하좌우 5개의 대표 절점인 Node 124, 151, 534, 850, 877을 결정하고, 각 절점에 대하여 지속시간에 따른 농도 변화를 나타내었다. Fig. 13에 나타난 바와 같이 각 절점별 복원효율은 지속시간에 따른 농도변화는 차이를 보이지 않았지만, 지속시간 30~50시간까지 약 70% 정도의 복원 효율을 나타내고 있다. 또한, Fig. 14에 나타난 바와 같이 3장의 Fig. 6의 실내모형 복원실험 결과와 수치해석 비교 결과를 살펴보면, 염소이온의 추출된 시료

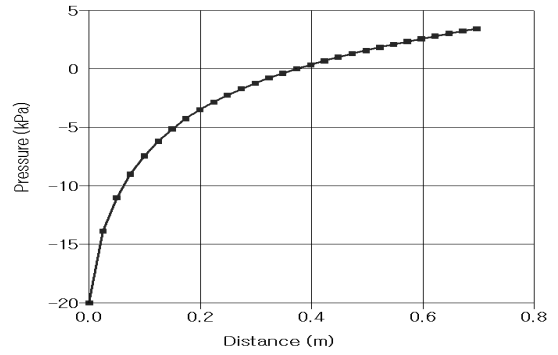


Fig. 11. Pressure head as distance on A-line

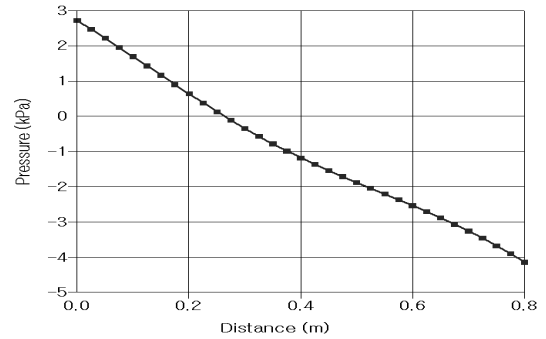


Fig. 12. Pressure head as depth on B-line

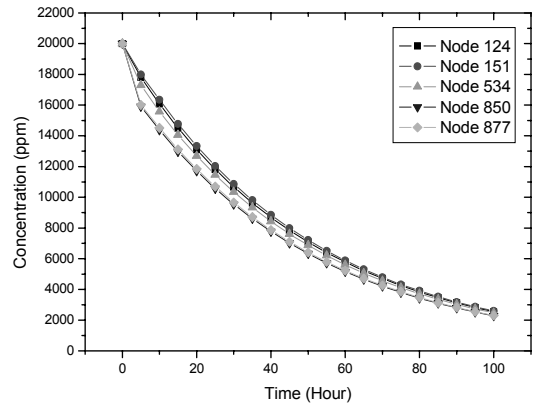


Fig. 13. Variation of concentration as elapsed time on node

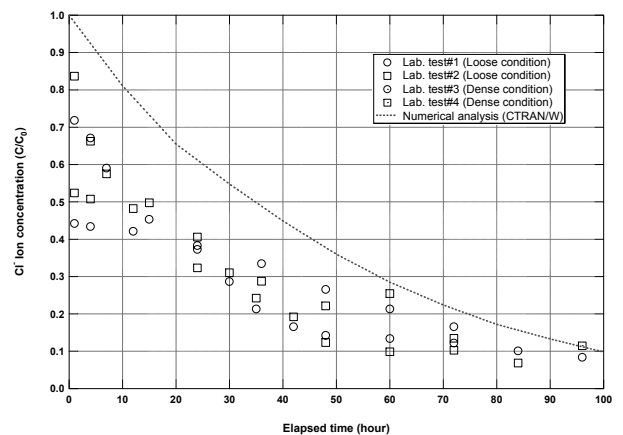


Fig. 14. Comparison of laboratory model test and numerical analysis

에 대하여 최소한계농도비 $C/C_0=0.20$ 을 기준으로 하였을 경우, 해석시 대략 75시간이 지속되었을 때 최소한계농도비 이하로 감소하여, 실제 복원실험 결과와 이온 검출농도 그래프의 양상은 매우 유사한 경향을 보이고 있고, 시간이 지남에 따라 복원효율시간도 빠르게 진행됨을 알 수 있었다.

수치해석을 통하여 가정된 흐름속도와 추출물의 함수인 투수계수를 기초로 하여 실험데이터에 따른 예측된 오염농도비와 복원시간을 나타내었다. 오염지반 및 오염물질의 물성치가 연직배수재에 의한 오염물질 추출에 미치는 영향을 규명하기 위하여 앞서 수행된 실내모형실험 결과를 바탕으로 동일한 조건하에 투수계수에 따른 복원효율을 평가하였다. 대상모델의 투수계수 조건을 각각 1.81×10^{-4} , 3.61×10^{-4} , $7.22 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 로 적용한 결과 Fig. 15와 같이 100시간 경과 후 각각 70%, 90%, 98%의 복원효율을 나타내어 투수계수에 따른 복원효율을 예측할 수 있다. 또한, Fig. 16은 CTRAN/W를 이용하여 해석한 시간에 따른 오

염물질의 이동 및 농도 감소율을 Visual Contour을 이용해 나타내었다. 즉, 오염지반의 투수계수는 흐름속도와 연직 배수재를 통한 추출률과 관계되며, 흐름속도와 추출률은 분산지수에 영향을 미치게 되어 결국 오염복원 과정시 중요한 역할을 하게 된다.

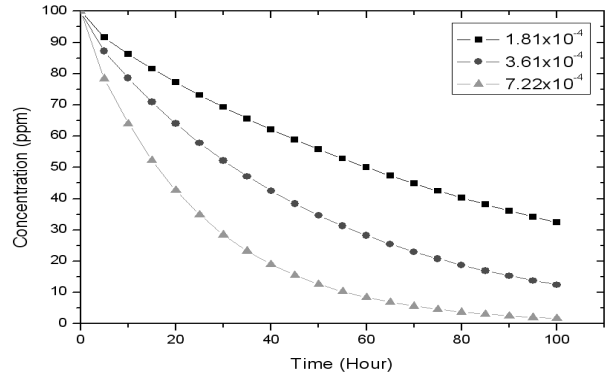


Fig. 15. Efficiency of remediation with coefficient of permeability

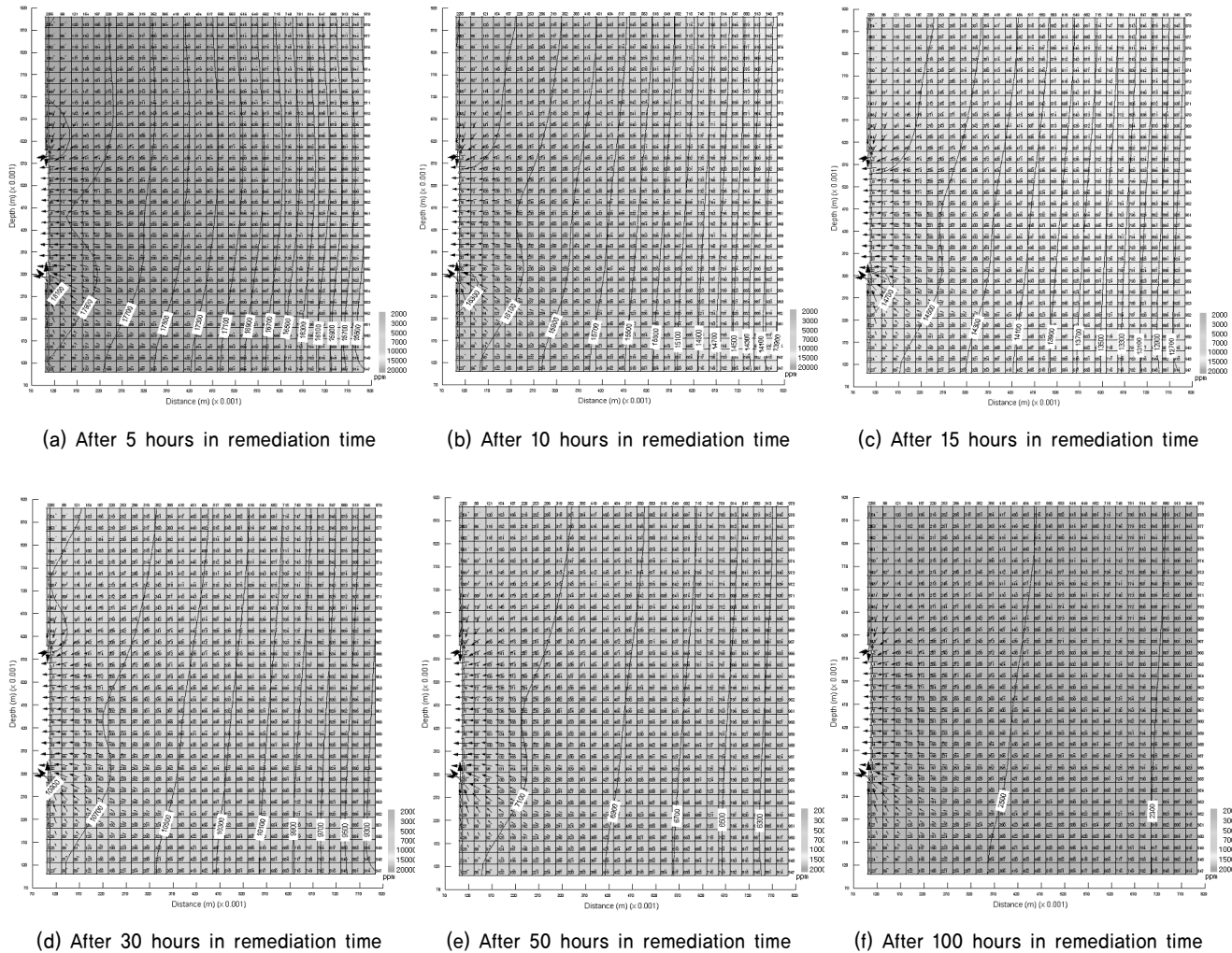


Fig. 16. Variation of concentration as remediation time

5. 결 론

본 연구에서는 연직배수시스템의 적용성을 위하여 오염 토양 복원시 오염지반에 영향을 주는 인자에 대한 공학적 특성을 바탕으로 파일럿 규모의 실내 오염복원 실험을 통한 오염물질의 복원효율 등을 분석하였다. 또한, 염화나트륨을 복원실험의 추적자로 사용하였고, 도출된 결과를 바탕으로 SEEP/W와 CTRAN/W 해석 프로그램을 이용하여 압력수두와 지속시간에 따른 농도변화, 각각의 지반조건에 대한 복원률의 오염물질 흐름 해석을 통한 유효성을 평가하였다.

- (1) 실내모형 복원실험에 대하여 각각 지반조건과 초기농도조건에 따른 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.
- (2) 연직배수재의 타입깊이가 깊어짐에 따라 압력수두가 작용되는 깊이 또한 증가하고 있으나, 수평방향으로의 영향반경은 연직배수재에서 약 20cm 정도를 약간 넘어가는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 지반내 공기의 흐름률은 간극비와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 깊이가 깊어질수록 단위중량이 증가하게 되므로 간극비가 감소하여 공기흐름률이 감소하게 된다. 따라서 깊이가 증가할수록 측정되어지는 압력수두는 증가하는 경향을 나타내었다.
- (3) 실내모형 복원실험 결과와 수치해석 비교 결과를 살펴보면, 염소이온의 추출된 시료에 대하여 최소한계농도비 $C/C_0=0.20$ 을 기준으로 하였을 경우, 해석시 대략 75시간이 지속되었을 때 최소한계농도비 이하로 감소하여, 실제 복원실험 결과와 이온 검출농도 그래프의 양상은 매우 유사한 경향을 보이고 있고, 시간이 지남에 따라 복원효율시간도 빠르게 진행됨을 알 수 있었다.
- (4) 투수계수에 따른 복원효율을 평가 결과, 대상모델의 투수

계수 조건을 각각 1.81×10^{-4} , 3.61×10^{-4} , 7.22×10^{-4} cm/sec로 적용하였을 때 100시간 경과 후 각각의 조건에 따라 70%, 90%, 98%의 복원효율을 나타내어 투수계수에 따른 복원효율을 예측할 수 있었다. 즉, 오염지반의 투수계수는 흐름속도와 연직배수재를 통한 추출률과 관계되며, 흐름속도와 추출률은 분산지수에 영향을 미치게 되어 결국 오염복원 과정시 중요한 역할을 하게 된다.

참 고 문 헌

1. 고석오(2002), 토양 및 지하수 복원기술 동향 및 현장적용, 2002 *지반환경*, 한국건설기술연구원, pp. 129~156.
2. 신은철, 박정준, 김종인(2005), 연직배수재를 이용한 폐석회 슬러지의 지반개량 효과, *한국지반환경공학회 논문집*, 제 6권, 제 2호, pp. 51~60.
3. 신은철, 박정준(2007), 오염토양 복원을 위한 연직배수시스템의 지반공학적 특성, *한국지반환경공학회 논문집*, 제 8권, 제 5호, pp. 5~14.
4. 정하익(2003), 연직배수공법을 이용한 오염지하수의 복원, 2003 *지반환경*, 한국건설기술연구원, pp. 183~201.
5. Bowders, J. J., and Gabr, M. A.(1995), Strip-drains for in Silty Clean up of Contaminated Fine-grained Soils, *Geotechnical News*, Vol. 13, No. 3, pp. 21~25.
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., Williamson, A., Sabodish, M., and Bowders, J. J.(1999), BTEX Extraction from Clay Soil Using Prefabricated Vertical Drains, *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 615~618.
8. Quaranta, J. D., Gabr, M. A., Cook, and Szabo, D.(1997), Developments in Prefabricated Vertical Drain Enhanced Soil Flushing, *Proceedings, Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 703~706.
9. Quaranta, J. D., Kunberger, T., and Gabr, M. A.(0000), WIDE Application for subsurface Hydraulic Head Control, GSP 142, *Waste Containment and Remediation*, pp. 1~12.
10. 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.
11. Welker, A. L., Logan, M., and Knight, S. B.(1998), Design Issues of a Prefabricated Drain Remediation System, *Geotechnical News*, Vol. 16, No. 1, pp. 31~35.

(접수일: 2007. 9. 27 심사일: 2007. 9. 28 심사완료일: 2007. 11. 5)