

## 반응물질이 도포된 연직배수재를 활용한 인천지역의 중금속 오염토양 정화에 관한 연구

### Remediation Efficiency Evaluation of Heavy Metal Contaminated Soils by Reactive Material Covered Vertical Drains in Incheon

신은철<sup>1</sup>, 어재원<sup>2</sup>, 김기성<sup>3\*</sup>

Eun-Chul Shin<sup>1</sup>, Jae-Won Eo<sup>2</sup>, Ki-Sung Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, College of Urban Sciences, Incheon National Univ., 119, Academy-Ro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

<sup>2</sup>Graduated Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, College of Urban Sciences, Incheon National Univ., 119, Academy-Ro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

<sup>3</sup>Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, College of Urban Sciences, Incheon National Univ., 119, Academy-Ro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

#### ABSTRACT

In Incheon area, 1960s of economic development planning and heavy industry center of efforts industrial park and port facilities, It is industrial land reclamation by coastal landfill, these industrial park has the characteristics of Low permeability lipid is embedded in the silty sand that was dredged. In this study, To evaluate the heavy metal adsorption ability to filter of drains that have been developed as environmentally friendly materials by applying the effective zeolite to heavy metal adsorption for soil pollution purification suitable for geological characteristics of Incheon. soil pollution Survey data and Literature search, which is the current through the industry, the most problematic was set to Cadmium (Cd) and Copper(Cu), Lead (Pb). and Using the Numerical Analysis using the Visual Modflow, was presented the most efficient drains set interval and format.

#### 요 지

1960년대 인천지역의 경제개발계획과 중공업단지 조성 노력의 일환으로 연안 매립지 개발이 진행되면서, 저투과성 지반이 매립된 연직배수재를 활용한 토양정화 효율을 평가하기 위하여, 인천지역의 토양오염 현황을 조사하고, 토양오염정화에 적합한 중금속 흡착제인 제올라이트를 배수재에 도포하여 제작하였다. 토양오염정화 실험을 통해, 중금속(Cu, Pb, Cd)의 흡착능을 평가하고, Visual Modflow를 이용하여 배수재의 설치 간격과 배수재의 배수 방향을 최적화하였다.

**Keywords** : Soil remediation technology, Reactive material, Vertical drain, Zeolite

#### 1. 서 론

환경부에서는 토양환경보전법 제5조(토양오염도 측정

등)에 의해 지자체별로 매년 토양오염우려지역을 선정하여 실태조사를 실시하고 오염지역에 대해 오염원자에 정화토록 함으로서 토양환경을 보전할 목적으로 전국 2,586개 지점에 대해 토양오염실태조사를 실시하고 있다 (Ministry of Environment, 2013). 조사결과 2012년 기준 전체 조사 지점의 2.13%인 55개 지점에서 토양오염우려

Received 3 May. 2015, Revised 23 Jun. 2015, Accepted 24 Jun. 2015

\*Corresponding author

Tel: +82-32-765-6551; Fax: +82-32-835-0728

E-mail address: [engfine@daum.net](mailto:engfine@daum.net) (K. S. Kim)

기준을 초과하였고, 55개 지점중 15개 지점에서는 토양오염대책기준을 초과하는 것으로 나타났다.

인천지역의 경우, 이전에 사용되었던 부평구의 미군기지 주변의 토양과 지하수가 유류와 중금속 등으로 오염되어, 토양오염 조사대상 5개 구역 중 3개의 구역에서 석유계총탄화수소(TPH)와 벤젠 등 유류와 구리·납·니켈·아연 등 중금속이 기준치를 초과한 것으로 조사되었다. 또한, 최근 이루어지고 있는 수인선 공사를 위해 지하 터파기를 한 결과 유류가 유출되어 토양과 지하수 오염이 심각한 수준임이 확인되었다. 또한, 김성환(2013)의 연구에서 제련공장, 도료공장, 분진 등에 의해 확산되는 카드뮴(Cd)의 경우 유리 산업 및 제조 산업의 위치한 부평구와 계양구 일대에서, 자동차 부품, 석탄의 연소, 산업활동, 폐기물 소각 등에 의해서 그 오염원이 발생하는 구리(Cu)의 경우 인천지역 최대 공업지역이 위치한 남동구에서, 목재 산업 및 유리산업이 산재하고 있는 서구 일대에서는 비소(As)의 오염도가 높은 것으로 나타났다(Kim, 2013).

본 연구에서는 반응물질이 중금속으로 오염된 인천지역의 토양 정화에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 가축분뇨, 비료 및 하수슬러지의 사용, 동 암모니아 레이온 제조공장 등에 의해 발생하는 구리(Cu), 광산, 급수관, 고무 제조공장, 인쇄공장, 자동차 배터리, 페인트 등에 의해 발생하는 납(Pb), 도금, 특수합금, 화학공업, 금속처리, 인산염 비료 등에 의해 발생하는 카드뮴(Cd)을 인공오염물질로 선정하였다. 선정된 오염물질의 정화를 위한 배수재에 반응물질을 도포하여 오염물질의 흡착능력을 평가하였고, 지하수 유동해석 프로그램인 Visual ModFlow를 이용하여 보다 경제적이고 효율적인 배수재 타설 간격 및 형태를 제안하였다.

## 2. 인천지역의 토양 오염현황 및 반응물질을 이용한 중금속으로 오염된 토양 정화

### 2.1 오염물질의 흡착이론

용액 속에 녹아있는 이온은 흡착매체와 반응하게 되면 흡착재에 흡착되거나 용액 내에 잔류하게 된다. 이때 용액 내에서의 평형농도와 흡착된 농도와의 관계를 그래프로 나타낸 것을 흡착 등온선이라고 하며, 흡착재에서 오염물질을 흡착 할 수 있는 최상한선을 흡착능이라 한다. 대표적인 흡착 등온모델로는 Freundlich와 Langmuir식이 있다

(Kim, 2013). Freundlich흡착은 오염물질의 농도  $C$ 와 평형상태의 흡착량  $q_e$ 가 선형이 아니고 비선형적관계를 가지는 경우를 말하며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$q_e = K_f C^N \quad (1)$$

여기서  $K_f$ 는 흡착재의 상대적인 흡착용량(g),  $N$ 은 흡착강도를 나타낸다. 만일  $C$ 와  $q_e$ 를 산술지(arithmetic paper)에 작도하였을 때, 선형 등고선처럼 직선형이 아니고 곡선형으로 나타나면 이는 Freundlich나 Langmuir등온선이 된다. 식 (1)의 양변에 대수를 취하고  $\log q_e$ 와  $\log C$ 을 양대수방안지에 작도하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\log q_e = \log K_f + N \log C \quad (2)$$

식 (2)는 양대수 방안지상에서는 직선으로 표기된다. 곡선의 기울기는  $N$ 이 되고,  $C=1$ 일 때  $\log q_e = \log K_f$ 가 되므로  $C=1$ 인 축에서의 절편은 바로  $\log K_f$ 가 된다. 식 (1)을 식 (2)에 대입하면 식 (3)과 같이 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_l \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{r_d}{n} \frac{\partial}{\partial t} (K_f C^N) \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} \left( 1 + \frac{r_d \cdot N K_f}{n} C^{N-1} \right) = D_l \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x}$$

따라서, Freundlich 흡착등온상태하에서 지연계수( $R_f$ )는 다음과 같다.

$$R_f = 1 + \frac{r_d \cdot N K_f}{n} C^{N-1} \quad (4)$$

### 2.2 연직 배수재와 반응물질을 이용한 중금속으로 오염된 토양 정화방법

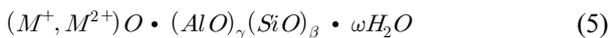
반응물질이란, 일반적으로 오염된 지하수가 이동할 때 반응물질을 통과하는 과정에서 오염물질을 불용화 시키거나 화학적으로 독성이 낮은 형태 또는 생물학적으로 분해가 쉬운 형태로 전환시키는 물질을 뜻한다. 반응물질로 활용하기 위해서는 대상 오염물질에 대한 반응성이 좋고 지속기간이 충분해야 하며, 비용이 저렴하고 확보가 쉬워야 한다. Table 1은 오염원과 해당하는 반응물질의 종류와 각

Table 1. Classification of contaminants and reactants applicable to each component (Kim, 2013)

Classification	Pollution source	Elements	Reactant	Reaction mechanism
Chlorinated organics	Industrial area, gas station, oil refinery, military facilities	PCE TCE	$Fe^0$ , GP Dust HRM Sludge	Desalination
		PCBs	Pd/Fe Bimetal Nanoscale Fe	Desalination
Nutritive salts	Leachate from landfill site, livestock wasteater	Total Nitrogen Ammonia-N	Zeolite	Ion exchange, adsorption reaction
	Livestock wasteater	T-P	Waste Lime SM Slag	Adsorption reaction, precipitation reaction
Heavy metal	Exhausted mine, acid waste liquor	$Cr^{6+}$	HRM Sludge, SM Slag	Reduction
		Cd, Zn, Cu, Pb, CN, As, Hg	Zeolite SM Slag	Ion exchange, adsorption reaction
Sulfate	Exhausted mine, acid waste liquor	Sulfate	$Al(OH)_3$ , SM Slag, Waste Lime	Precipitation reaction

조류별 반응 기작 등을 나타낸 것이다.

이 연구에서 사용한 반응물질은 제올라이트로서, 이온 교환 및 흡착반응으로 카드뮴(Cd), 아연(Zn), 구리(Cu), 납(Pb), 시안(CN), 비소(As), 수은(Hg) 등의 중금속과 반응하며 천연 제올라이트 광산이 여러 곳에서 발견됨에 따라 많은 양을 싼 가격에 공급할 수 있는 특징이 있다. 천연제올라이트는 일반적으로 이차 광물들이며, 산소원자를 공유함으로써 서로 연결되어 있는  $(Si, Al)_4$  사면체의 무한 또는 유한한 3차원 구조의 결정질이다. 식 (5)는 제올라이트의 일반적인 화학적 구성 원소 식을 나타낸 것이며 식 (6)은 제올라이트의 이온화 과정을 나타낸 것이다.



여기서  $M^+, M^{2+}$ 는 보통 다음과 같은 이온으로 대체된다.

$M^+$  :  $Na^+, K^+$  등의 1가 알칼리 금속

$M^{2+}$  :  $Mg^{2+}, Ca^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+}$  등의 2가 양이온

보통  $M^+, M^{2+}$  이온이 교환되는 금속들이는데 결정 내에서 이들의 위치에 따라 교환의 난이도가 결정되며, 또한  $\gamma, \beta, \omega$ 는 각각 상수이다.  $(\gamma + \beta)$ 는 단위 결정구조를 구성하고 있는 정사면체의 총 수를 나타낸다. 제올라이트는 이러한 분자 구조와 물과 함께 다른 이온과 교환이 가능한 양이온으로 구성되어 환경에 유해한 오염물질들과 반응하며, 제올라이트의 양이온 교환능력은 100g 당 200~400meq

정도로 알려져 있다. 물과 접하고 있는 산화물( $MgO, Al_2O_3, Fe_2O_3, SiO_2$  등)은 수산화된 표면을 가지고 있어, 깨어진 표면과 물과 반응하면 광물 표면은 식 (2)와 같은 반응을 통하여 음의 전하 또는 양의 전하를 갖게 된다. 전하는 표면의 수산화기의 수소화 반응 또는 탈수소화 반응에 의하여 결정되어 pH에 민감하다. 광물의 표면의 총 전하 값이 0이 되는 pH를 영전하점(PZC: Point of Zero Charge)이라 하고 이보다 pH가 낮은 경우 양의 전하를 띠어 음이온을 흡착시킬 수 있으며, 이보다 pH가 높은 경우는 음의 전하를 띠어 양이온을 흡착시킨다.

### 3. 배수재를 이용하여 중금속으로 오염된 토양 정화를 위한 실내 모형실험

#### 3.1 실험에서 사용된 연직배수재의 물리적 특성

이 연구에서는 실린더형 배수재를 사용하였고, 배수재의 표준시방 기준과 연직배수재의 오염토양 정화활용 시 가장 중요한 통수능은 직선( $106m^3/sec$ )과 굴곡( $86m^3/sec$ )인 경우 모두 기준을 만족하는 것으로 나타났다(KATRI, 2011). 또한, 배수재 필터와 코어의 재질분석결과(KS K 0210-1 : 2008) 필터와 코어 모두 PLA 성분으로 구성되어 있는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 사용된 연직 배수재는 생분해가 가능하며, 토양 정화효율이 우수하면서도 배수재 등에 의해 부차적인 오염이 발생하지 않아 친환경적인 오염토양 정화시스템 및 정화방법에 적용 가능하다. 즉 분해가능한 배수재와 연결된 진공펌프의 작동으

Table 2. Physical properties of the vertical drain boards (Kim, 2013)

	Item	Unit	Condition	Standrad	Experimental conditions	Result
Core	extent	mm	100±5	KS K 0505		103,0
	thickness	mm	3 ~ 5	KS K ISO 9863-2	2 kPa (pressure)	5,64
	weight	g/m	more than 70	KS K ISO 9864		111,9
	tensile strength	kN/width	more than 0,98	KS K ISO 10319		2,24
	discharge capacity	cm <sup>3</sup> /sec	more than 25 (straight) more than 15 (flexion)	Delft method	300 kPa (confine stress) 0,5 (hdraulic gradient)	106 (straight) 86 (flexion)
Filter	penetrability	cm/sec	1×10 <sup>-3</sup> over		Head loss 20 mm	2,3 × 10 <sup>-2</sup>
	tensile strength	N	more than 200	KS K 0743		235,8
	effective aperture size	μm	below than 90	KS K ISO 12956	O <sub>90</sub>	48

로 인하여 발생하는 흡입력으로 지중에 마설된 분해성 배수재에 있어 필터의 반응물질에 의해 1차적으로 오염물질을 제거 할 수 있을 뿐 아니라 배수재 코어를 통해 오염물질을 지상으로 배출처리함으로써 2차적으로 오염물질을 처리 할 수 있게 하는 것이다.

### 3.2 연직배수재에 도포된 반응물질의 오염물질 흡착 능력 시험

중금속으로 오염된 토양의 오염물질 제거를 위하여 실시한 회분식, 흡착실험을 실시하여 오염물질 농도에 따른 반응물질인 제올라이트의 최대 흡착량을 구하였다. 먼저 토양시료를 균일한 두께로 포설하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘 되도록 펼쳐놓아 풍건시킨 후, 나무망치 등으로 분쇄하여 눈금간격 0.15mm의 표준체(No. 100)로 체가름 하고, 시료를 각각 200g씩 취하여 사분법으로 균일하게 준비한다. 흡 속의 금속 성분을 분석하기 위해서 시료를 전처리 후 기기분석을 실시하였다. ES 07401~07407의 방법으로 구리, 납, 니켈, 비소, 아연 카드뮴에 대한 오염물질 검출시험을 수행하였으며, 오염물질의 잔류 농도는 고체, 액체, 기체상의 시료중에 미량(ppm 또는 ppb)으로 함유된 성분원소의 정성·정량 분석에 이용되는 유도결합플라즈마-원자발광분광법(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, ICP-AES)으로 측정 하였다.

실내 모형실험은 일반 실린더형 배수재와 실린더형 배수재 필터 표면에 반응물질을 도포한 경우로 나누어 수행하였다. 오염물질은 반응물질의 오염물질 흡착 시험에 적용했던 물질과 동일한 구리, 납, 카드뮴을 대상으로 하였

고, 실험을 진행하면서 시간경과에 따른 오염물질 농도를 측정하여 제거효율을 산정하였다. 실험순서 및 방법은 Fig. 1과 같다.

Table 3은 구리, 납, 카드뮴에 대한 2015년 중금속 환경기준을 나타낸 것으로, 공업단지 및 유류저장시설 등지에는 중금속의 오염이 심각한 것으로 조사되어, 토양오염우려기준의 1지역을 정화기준으로 설정하였다. 구리(Cu)는 1지역의 토양오염우려기준 150ppm, 토양오염대책기준 450ppm, 납(Pb)은 1지역의 토양오염우려기준 200ppm, 토양오염대책기준 600ppm이다. 카드뮴의 경우 1지역의 토양오염우려기준 4ppm, 토양오염대책기준 12ppm이다 (Ministry of Environment, 2015). 따라서 이번 실험에서는 토양오염우려기준에 의거하여 구리 200ppm, 납 250ppm과 토양오염대책에 의거하여 800ppm으로 실험하였으며, 카드뮴의 경우 10ppm과 20ppm으로 오염농도를 설정하였다.

오염물질 분말과 증류수로 설정된 농도의 용액을 제조한 후 흡 시료와 혼합하여 초기농도를 측정하고 오염된 시료를 최대건조단위중량의 70%의 다짐도로 채웠다. 오염된 시료를 토조에 모두 채운 후 반응물질을 도포한 배수재를 설치한 후, 토조의 상부캡을 결합하고 진공펌프와 배출된 물을 수집할 수 있는 수조를 고무호스를 이용하여 연결하였다.

진공펌프의 압력은 최대 0.1Mpa 이고, 실험이 진행되는 동안 0.09Mpa 이상을 유지하도록 하였다. 경과시간(2시간, 4시간, 6시간, 12시간, 24시간, 36시간, 48시간, 72시간, 96시간, 120시간, 144시간, 168시간)에 따른 오염농도는 모형토조 중간에 설치한 밸브를 통하여 시료를 채취하여

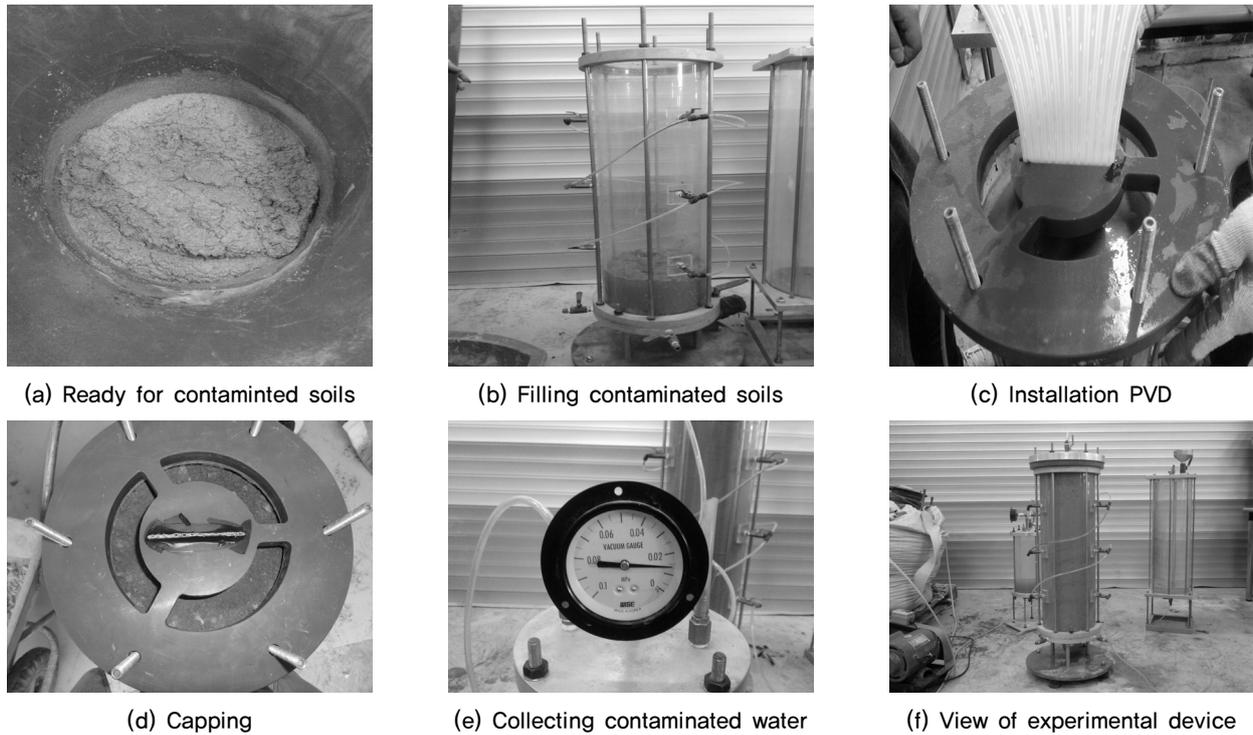


Fig. 1. Remediation process if contaminated soil by using reactive drains

Table 3. Heavy environmental standards applied to the experiment (unit : ppm)

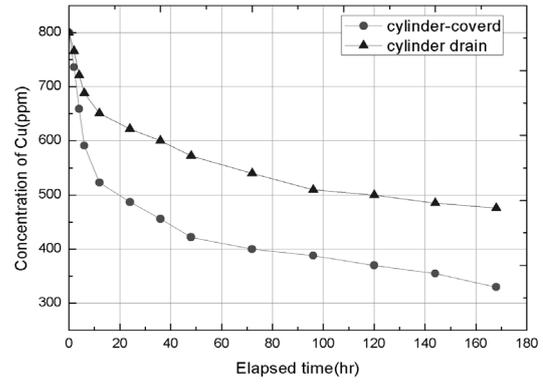
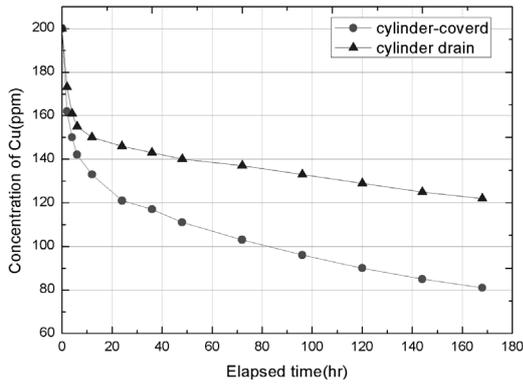
▪ Cu			
Item	1 region	2 region	3 region
Risk of soil contamination standards	150	500	2,000
Measures of soil contamination standards	450	1,500	6,000
▪ Pb			
Item	1 region	2 region	3 region
Risk of soil contamination standards	200	400	700
Measures of soil contamination standards	600	1,200	2,100
▪ Cd			
Item	1 region	2 region	3 region
Risk of soil contamination standards	4	10	60
Measures of soil contamination standards	12	30	180

오염농도를 측정하였다.

Fig. 2는 구리로 오염된 토양의 정화실험 결과를 나타낸 것으로, 200ppm의 농도의 구리로 오염된 토양은 실험시간 종료 후, 반응물질을 도포하지 않은 배수재로 정화실험을 한 경우 122ppm의 오염물질이 잔류하여 39%의 정화효율을 보였고, 반응물질을 도포한 배수재는 81ppm로 59.5%의 정화효율을 보였다. 800ppm의 농도의 구리로 오염된 토양은 실험시간 종료 후, 반응물질을 도포하지 않은 배수재로 정화실험을 한 경우 476ppm의 오염물질이 잔류하여 40.5%의 정화효율을 보였고, 반응물질을 도포한 실

린더형 배수재는 330ppm로 58.8%의 정화효율을 보였다.

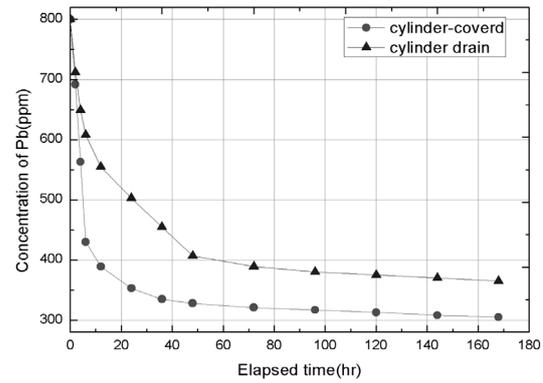
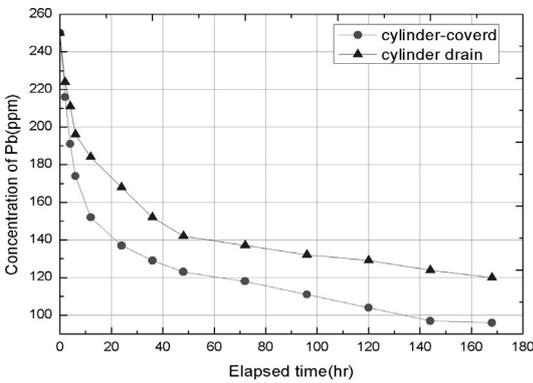
Fig. 3은 납으로 오염된 토양의 정화실험 결과를 나타낸 것으로 250ppm으로 오염된 납의 경우 실험 종료 후, 반응물질을 도포하지 않은 배수재로 정화실험을 한 경우 120ppm의 오염물질이 잔류하여 61.6%의 정화효율을 보였고, 반응물질을 도포한 배수재는 96ppm로 59.5%의 정화효율을 보였다. 800ppm으로 오염된 납의 경우 실험 종료 후, 반응물질을 도포하지 않은 배수재로 정화실험을 한 경우 365ppm의 오염물질이 잔류하여 54.4%의 정화효율을 보였고, 반응물질을 도포한 배수재는 305ppm로 61.9%의 정



(a) Filtration efficiency (contamination density 200 ppm)

(b) Filtration efficiency (contamination density 800 ppm)

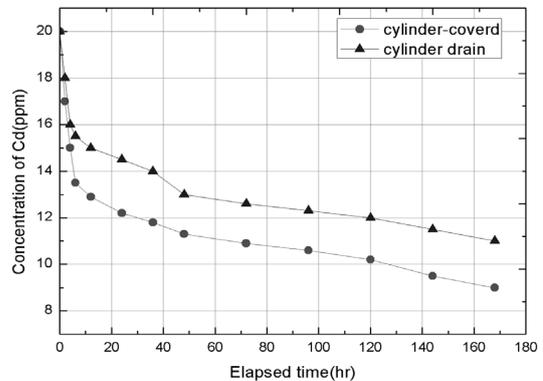
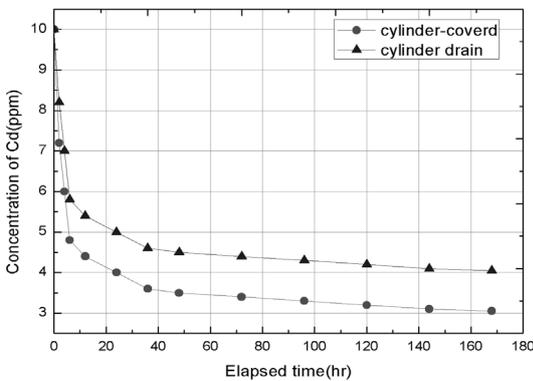
Fig. 2. Results of purification test in contaminated soil with Cu



(a) Filtration efficiency (contamination density 250 ppm)

(b) Filtration efficiency (contamination density 800 ppm)

Fig. 3. Results of purification test in contaminated soil with Pb



(a) Filtration efficiency (contamination density 10 ppm)

(b) Filtration efficiency (contamination density 20 ppm)

Fig. 4. Results of purification test in contaminated soil with Cd

화효율을 보였다.

Fig. 4는 카드뮴으로 오염된 토양의 정화실험 결과이다. 10ppm 농도의 카드뮴으로 오염된 경우 실험 종료 후, 반응물질을 도포하지 않은 배수재로 정화실험을 한 경우 4.05 ppm의 오염물질이 잔류하여 59.5%의 정화효율을 보였고, 반응물질을 도포한 배수재는 3.05ppm로 69.5%의 정화효율을 보였다. 20ppm 농도의 카드뮴으로 오염된 경우 실험

종료 후, 반응물질을 도포하지 않은 배수재로 정화실험을 수행한 결과 11ppm의 오염물질이 잔류하여 45%의 정화효율을 보였고, 반응물질을 도포한 실린더형 배수재는 9 ppm로 55.0%의 정화효율을 보였다.

실험 결과 모든 오염물질의 농도가 실험 초기 20시간까지 빠르게 감소하였으나, 그 이후 시간이 경과함에 따라 농도감소가 둔화되는 것을 확인하였다. 반응물질을 도포

Table 4. Contaminated soil remediation experimental results according to shape of PVD and pollutant

Pollutant	Initial concentration (ppm)	Shape	Removal ratio of pollution
Cu	200	cylinder	40.0%
		applied reaction material cylinder	59.5%
	800	cylinder	40.5%
		applied reaction material cylinder	58.8%
Pb	250	cylinder	52.0%
		applied reaction material cylinder	61.6%
	800	cylinder	54.4%
		applied reaction material cylinder	61.9%
Cd	10	cylinder	59.5%
		applied reaction material cylinder	69.5%
	20	cylinder	45.0%
		applied reaction material cylinder	55.0%

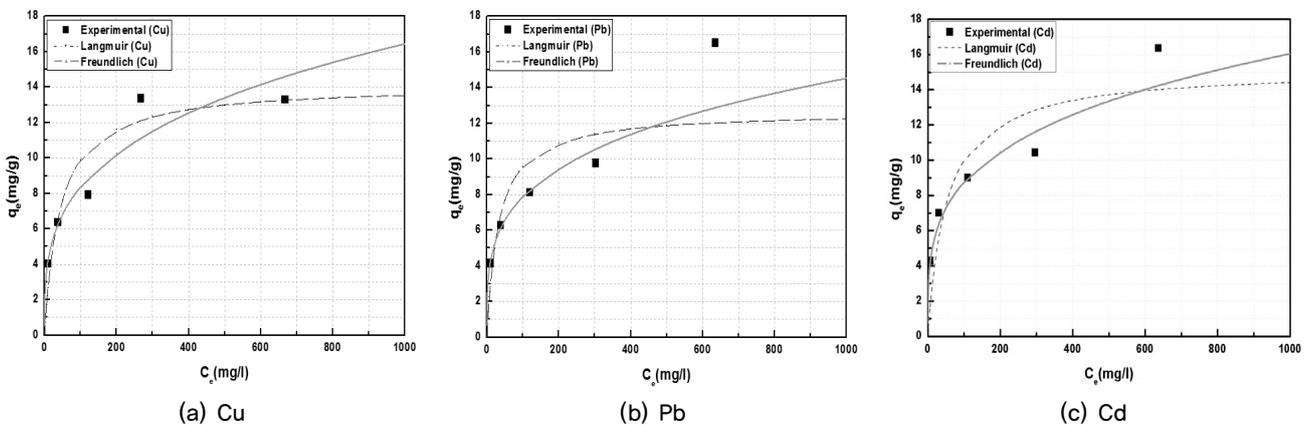


Fig. 5. Adsorption isotherm model according to pollutant

한 실린더형 배수재의 경우 구리와 카드뮴은 약 60%, 납은 약 62%의 제거율을 나타냈다. 각각의 오염원에 따른 오염토양의 정화실험 결과는 Table 4와 같다.

Fig. 5 (a)는 구리(Cu), (b) 납(Pb), (c) 카드뮴(Cd)을 나타낸 것으로, 오염물질 별로 초기 농도 변화에 따른 흡착량을 Freundlich와 Langmuir 흡착 등온모델과 비교한 것이다. 흡착실험 결과 등온 흡착모델은 농도가 증가함에 따라 곡선의 기울기가 감소하는 특성을 보이고 있으며, 이는 흡착제의 표면의 점차 피흡착 물질로 채워져 흡착가능영역이 감소하기 때문이며, 이러한 경향은 낮은 농도에서 흡착제에 보다 강하게 결합하며, 농도가 증가함에 따라 결합력이 약해지는 것을 알 수 있다. 최대 흡착량은  $Pb^{+2} > Cd^{+2} > Cu^{+2}$  순으로 나타났다.

#### 4. 수치해석을 통한 배수재의 설치간격 및 형식 선정

시뮬레이션을 이용하여 오염된 토양을 정화하기 위해 반응물질을 도포한 연직 배수재를 사용할 경우 효율적인 정화를 위한, 연직배수재의 설치간격을 결정하고자 하였다. 단일 배수재를 타설한 경우의 영향범위를 확인하고자 가로 5m, 세로 5m, 깊이 1m의 모의 영역을 설정하였다. 1개의 셀은 기존 연구에 의해 밝혀진 연직배수재의 등가 직경을 고려하여 5cm×5cm로 설정하였으며(Park, 2006), Table 5의 관계식에 의해 서로 유사한 결과가 도출된다.

1cm당 1개의 입자를 입력하였으며, 1개의 배수재를 타설했다고 가정한 시뮬레이션 결과 Fig. 6과 같이 포획범위가 1.1m로 선정되었다. 입력변수는 인천지역의 수리상수를 입력하였고, 단일 대수층으로 설정하였으며 함양량은

Table 5. Equivalent Diameter Equations for Reactive Drain

Reference	Equivalent diameter equations
Hansbo (1981)	$d_e = \frac{2(w+t)}{\pi}$
Atkinson and Eldred (1981)	$d_e = \frac{(w+t)}{2}$
Fellinius and Catonguay (1985)	$d_e = \left[ \frac{4(w \times t)}{\pi} \right]^{0.5}$
Long and Covo (1994)	$d_e = (0.5w + 0.7t)$

Table 6. Contaminated soil remediation numerical input parameters (Kim, 2015)

Parameter	Input
Mock area	5 m × 5 m × 1 m
Permeability, $k(m/sec)$	$1.0 \times 10^{-5}$
Effective porosity $S_y$	$1.0 \times 10^{-4}$
Storage coefficient, $S_s$	0.27
Cultivation volume ( $mm/year$ )	0
Boundary condition	constant head permeability
Longitudinal dispersivity	0.08

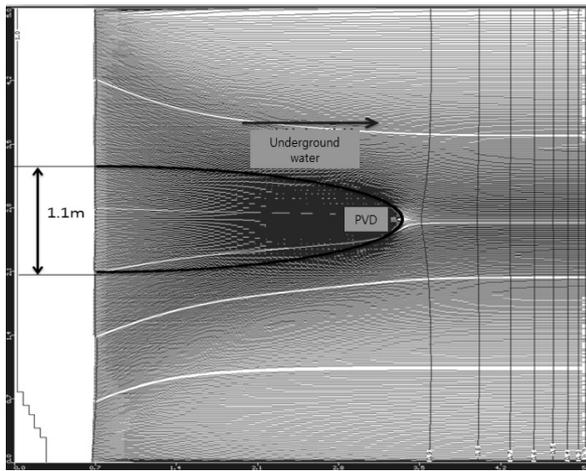


Fig. 6. Range of heavy metal absorption when placing PVD

입력하지 않았다. 일정수두경계(CHD)를 설정하여 지하수 흐름을 한 방향으로 균질하게 흐르는 모델을 설정하였다. 토질 종류에 따른 대수층에서의 저류계수, 비산출률, 간극률은 기존 연구사례 및 문헌연구 결과를 바탕으로 결정하였으며, 모델 형성에 입력한 수리특성 인자는 Table 6과 같다(Kim, 2015).

이 결과는 일반적인 현장의 배수재 타설간격과 비슷한 결과이며, 단일 배수재의 포획범위 결과를 바탕으로 배수재의 배열을 1열과, 지그재그로 하여 효과적인 타설 간격을 산정해 보고자 하였다. 배수재의 배열 수치해석 모델링 단면은 Fig. 7과 같다.

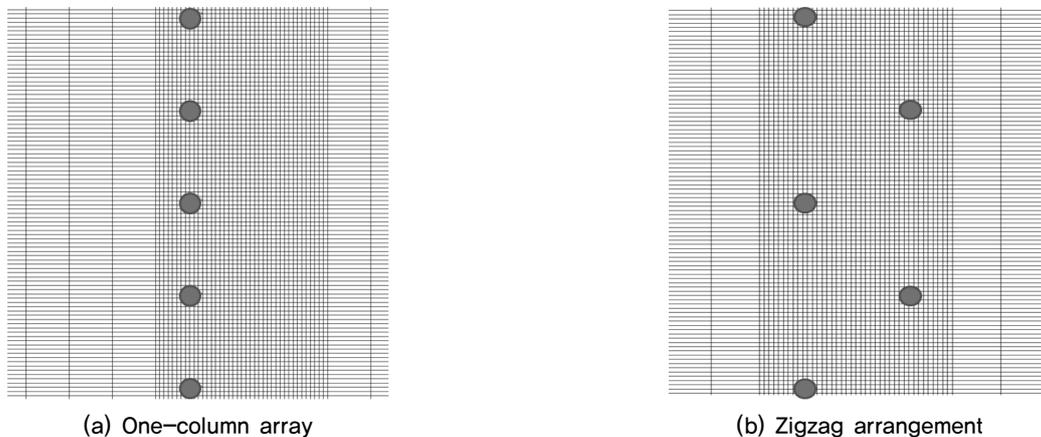
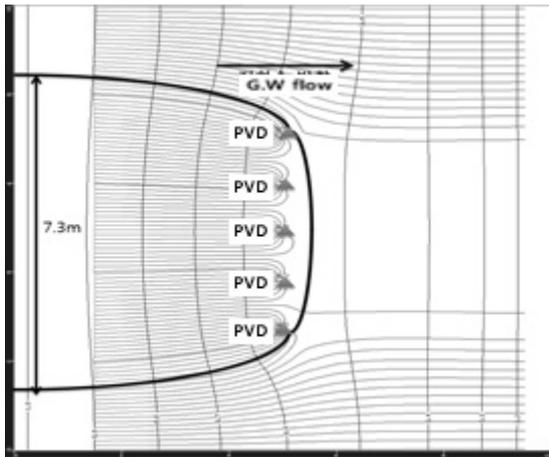
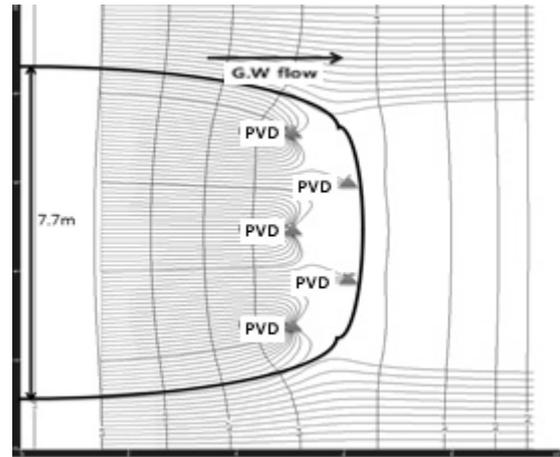


Fig. 7. Arrangement of the PVD for spacing

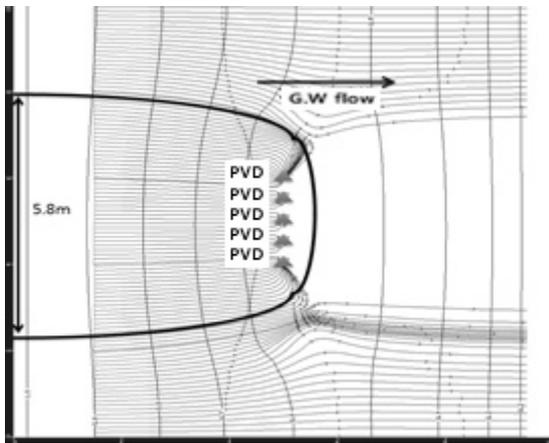


(a) One-column array

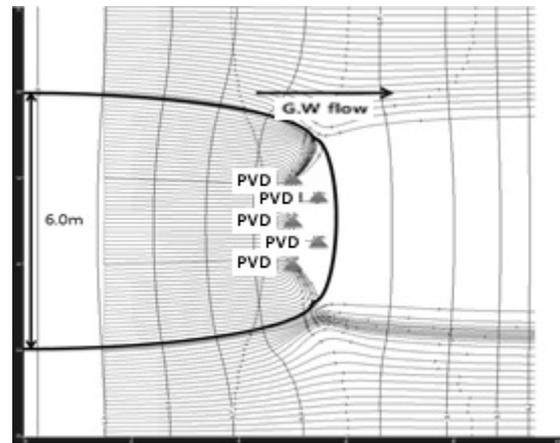


(b) Zigzag arrangement

Fig. 8. Range of heavy metal absorption (distance of PVD ; 1.1 m)



(a) One-column array



(b) Zigzag arrangement

Fig. 9. Range of heavy metal absorption (distance of PVD ; 0.5 m)

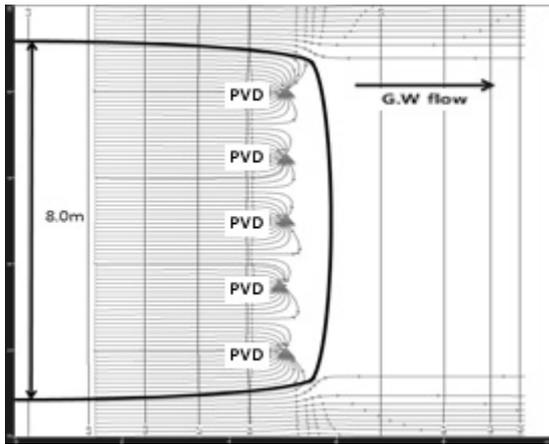
Table 6과 같은 조건에서 모델을 형성하였고, 단일배수재 모델링에서 얻어진 포획범위 1.1m를 배수재 타설 범위로 하여 1열 배열인 경우와 지그재그형 배열인 경우의 효율을 평가하였다. 해석결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같으며, 배수재를 1열로 타설한 경우의 포획범위 약 7.3m, 지그재그로 타설한 경우 포획범위가 약 7.8m로 산정되어 지그재그로 타설하는 것이 더 효율적임을 입증하였다.

이 결과를 바탕으로 가장 효율적인 배수재의 타설 간격을 결정하기 위하여 배수재 타설 간격이 0.5m인 경우, 1.5m인 경우, 2.0m인 경우에 1열 배열과 지그재그형 배열로 나누어 수치해석모델링을 진행하였다. Fig. 9에 나타난 결과와 같이 배수재 타설간격이 0.5m일때, 1열로 배열한 경우 포획범위가 약 5.8m, 배수재의 배열을 지그재그로 타설한 경우 포획범위가 약 6.0m로 산정되었다. 이는 배수재 타설간격이 1.1m인 경우와 마찬가지로, 지그재그로 타설한

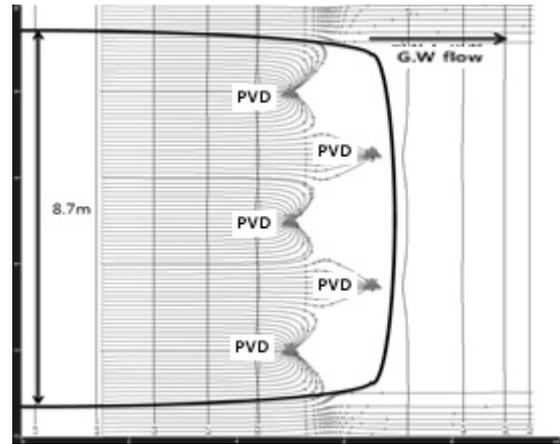
경우가 효율이 더 높은 것을 알 수 있다.

배수재 타설 간격이 1.5m인 경우, Fig. 10에 나타난 결과와 같이 배수재의 배열을 1열로 배열한 경우 포획범위가 약 8.0m, 배수재의 배열을 지그재그로 타설한 경우 포획범위가 약 8.7m로 산정되었다. Fig. 8의 결과와 마찬가지로 배수재를 지그재그형으로 배열한 경우가 효율이 더 좋았을 뿐 아니라 가장 포획범위의 상승폭도 큰 것으로 보아 가장 효율이 좋은 타설간격으로 판단된다.

배수재 타설 간격이 2.0m인 경우, Fig. 11과 같이 배수재 배열을 1열로 배열한 경우 포획범위가 약 10.0m로 산정되었으나, 오염물질의 유실이 발생했고 배수재의 배열을 지그재그로 타설한 경우에도 오염물질의 유실이 발생되었다. 뿐만 아니라 배수재를 1열로 배열한 경우보다 오염물질의 유실이 많아 정화효율이 떨어지는 것으로 판단된다.

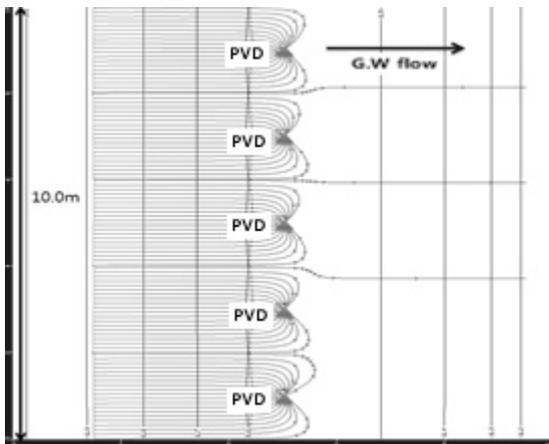


(a) One-column array

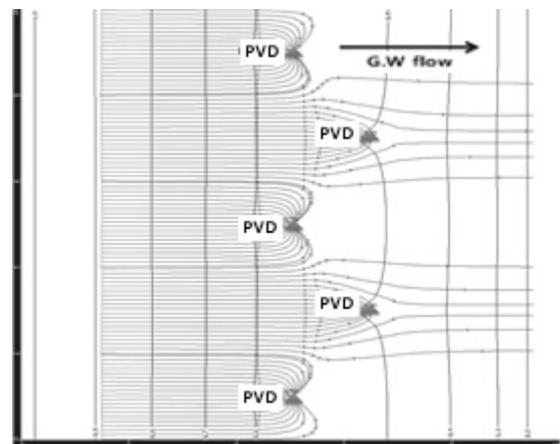


(b) Zigzag arrangement

Fig. 9. Range of heavy metal absorption (distance of PVD ; 1.5 m)



(a) One-column array



(b) Zigzag arrangement

Fig. 11. Range of heavy metal absorption (distance of PVD ; 2.0 m)

단일배수재의 포획범위인 1.1m간격으로 배수재를 설치하고, 배수재의 배열을 1열 배열과 지그재그 배열로 달리 했을 때 지그재그로 배열한 경우가 포획범위가 더 넓은 것으로 확인되었다. 이 결과를 바탕으로 배수재 타설 간격을 0.5m, 1.5m, 2.0m 으로 가정하여 수치해석 모델링을 진행하였다. 배수재를 0.5m 간격으로 1열 배열했을 때 포획범위 5.8m, 지그재그로 배열 했을 때 포획범위 6.0m로, 1.1m 간격으로 배수재를 배열했을 때와 마찬가지로 지그재그 배열이 포획범위가 더 넓었다. 1.5m간격으로 배수재를 1열로 배열했을 때 포획범위 8.0m, 지그재그로 배열 했을 때 포획범위 8.7m로, 0.5m, 1.1m 간격으로 배수재를 타설한 경우와 같이 지그재그 배열이 포획범위가 더 넓었고, 1.1m로 타설한 경우보다 효율이 더 높았다. 그러나, 배수재의 타설간격을 2.0m로 가정하였을 때, 1열로 배열한 경우 포획범위는 약 10.0m 였으나, 오염물질의 유실이 있어

정화효율이 떨어지고, 지그재그로 배열 했을 때는 오염물질의 유실이 1열로 배열한 경우보다 많아 정화효율이 급격히 저하되는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 중금속으로 오염된 저투수성 지반의 토양오염 정화비용 절감 및 공기 단축에 의한 경제 효과도 및 오염된 토양에 대하여 효율적으로 적용할 수 있는 정화 처리방안을 제시하였다. 오염물질 흡착을 위한 반응물질을 도포한 연직배수재의 물성시험을 실시하였으며, 오염토양의 정화효율을 평가하기 위하여 실내 모형실험과 수치해석 모델링을 수행하였다. 기본물성시험, 오염토양 정화에 대한 실내모형 실험과 수치해석을 수행한 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 반응물질 도포의 유무에 따라 오염원 제거율이 다르게 나타났으며, 반응물질을 도포한 실린더형 배수재의 제거율이 약 18~19%가량 높고, 납이나 카드뮴보다는 구리를 흡착하는데에 효율적인 것으로 분석되었다.
- (2) Freundlich와 Langmuir흡착등온모델을 비교한 결과 최대 흡착량은 납, 카드뮴, 구리순으로 나타났고, 초기 농도가 낮을수록 제거율이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 흡착제의 표면이 피흡착 물질로 환원됨에 따라 흡착가능 영역이 감소하기 때문이라 분석된다.
- (3) 수치해석을 통한 오염토양의 정화효율을 평가하기 위해 단일 연직배수재의 타설 시 배수재의 포획범위를 1.1m로 산정하였다. 수치해석 결과 연직 배수재를 일렬로 타설한 경우보다 지그재그로 타설한 경우 포획범위가 더 넓은 것으로 평가되었다.
- (4) 연직배수재의 타설간격을 0.5m, 1.5m, 2.0m로 가정하여 수치해석을 진행한 결과, 배수재를 0.5m 간격으로 1열 배열했을 때 5.8m, 지그재그 배열 했을 때 6.0m, 1.5m간격으로 1열 배열했을 때 8.0m, 지그재그 배열 했을 때 8.7m의 포획범위를 산정하였다. 연직배수재의 간격이 0.5m, 1.1m, 1.5m일 경우 지그재그 배열이 효율적이거나, 2.0m 간격에서는 오염물질의 유실이 많아 효율이 떨어지는 것을 확인하였다.

### Acknowledgement

This research was supported by a Grant (No. 005) from

2013 Research Development Program funded by Incheon Green Environment Center, Republic of Korea.

### References

1. Atkinson, M. S. and Eldred, P. J. L. (1981), "Consolidation of Soil using Vertical Drains", *Geotechnique*, Vol.31, No.1, pp.33-43.
2. Fellenius, B. H. and Castonguay, N. G. (1985), "The efficiency of band shaped drains-A Full scale Laboratory".
3. Hansbo, S., Jamiolkowski, M. and Kok, L. (1981), "Consolidation by Vertical Drains", *Geotechnique*, Vol.31, No.1, pp.45-66.
4. Kim, J. S. (2015), *Applicability Evaluation of Well-Type System for Remediation of Heavy Metal Contaminated Groundwater*, Ph D Thesis, Incheon National University, pp.79-81.
5. Kim, S. H. (2013), *Applicability of Reactive Drain for Remediation of Heavy Metal Contaminated Ground*, Ph.D Thesis, Incheon National University, pp.22, pp.75.
6. Long, R. and Covo, A. (1994), "Equivalent Diameter of Vertical Drains with an Oblong Cross Section", *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.9, pp.1625-1630.
7. Ministry of Environment, (2013), 2012 Soil Monitoring Network and Soil Contamination Survey.
8. Ministry of Environment, (2015), Soil Environment Conservation Act Enforcement regulations.
9. Park, J. J. (2006), *Applicability of Prefabricated Vertical Drain System for Remediation of Contaminated Soils*, Ph.D Thesis, Incheon National University, pp.47-57.