

## 반응성 배수재를 이용한 중금속 오염토양의 정화효율 분석

### Analysis of Heavy Metal Contaminated Soils Remediation Using Reactive Drains

박정준<sup>1\*</sup>, 최창호<sup>2</sup>, 신은철<sup>3</sup>

Jeongjun Park<sup>1\*</sup>, Changho Choi<sup>2</sup>, Eunchul Shin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Member, Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Incheon, 119 Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdaero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-712, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Incheon, 119 Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This paper presents the analysis condition of remediation technique of contaminated fine-grained soil and physical properties of bio-degradable drain for analysis site applicability using bio-degradable drain method. As the result, two kinds of developed degradable drains (cylindrical shaped and harmonica shaped) are satisfied the Korean Industrial Standard. And the cylindrical shaped drain has an excellent discharge capacity than that of another one. By the results of laboratory test, the citric acid is chosen as the washing agent because it has low toxicity, so it is able to minimize harmful influence to environment. Furthermore the subject contaminants were selected as Cd, Cu and Pb. Based on the field pilot test results, the most remedial efficiency is the use of reactive material applied in bio-degradable drain method with the process of injecting the washing agent and extraction of contaminated fluid.

#### 요 지

본 논문에서는 생분해 배수재를 이용한 오염토양 정화기술의 현장적용성을 평가하기 위하여 생분해 배수재의 물리적 특성시험을 수행하였으며, 이를 이용한 현장실험을 통하여 중금속 오염토양의 정화효율을 분석하였다. 두 종류(실린더 코어형, 하모니카형)의 생분해 배수재에 대한 시험결과, 실린더 코어형 배수재의 경우, 한국산업규격 표준시방에서 제시하는 기준치를 모두 만족하였으며, 하모니카형 생분해성 배수재는 실린더 코어형 배수재에 비해 배수능력이 상당히 낮은 결과를 나타내었다. 또한 오염토양 복원시 사용한 세정제로는 자체독성이 적어 생태계에 미치는 영향을 최소화하며, 생물학적 재순환시스템과의 최적인 조건을 지니고 있는 시트르산(citric acid)을 선정하여 중금속 중 Cd, Cu, Pb을 현장실험 대상 오염물질로 선정 후 실험을 수행하였다. 현장실험은 3가지 설치조건을 고려하여 정화효율을 분석하였으며, 반응물질이 도포된 생분해 배수재를 이용하여 세척제를 주입·추출을 동시에 수행한 경우가 복원효율이 가장 높은 것으로 평가되었다.

**Keywords** : Bio-degradable drains, Remedial efficiency, Heavy metal contaminated soil, Reactive material

## 1. 서 론

최근 인구증가 및 산업의 발달로 인하여 부수적으로 발생하는 폐기물과 사용량이 증가하고 있는 화학물질로 인

하여 토양 및 지하수의 오염이 심각한 상태에 있다. 또한 쾌적하고 편리한 생활환경 조성을 위해 공장이나 기존의 낡은 시설물을 철거함으로써 새로운 도시환경을 조성하는 도시재생사업이 활발히 진행 되고 있으며 이에 따라 토양의 환경적 오염에 대한 평가가 중요시 되고 있다. 그리고 기존의 재활용처리부지, 공장부지 또는 군부대 주둔지 등이 이전하면서 기존 부지에 누적되었던 토양의 오염과 이

Received 15 Feb. 2013, Revised 15 Mar. 2013, Accepted 15 Mar. 2013

\*Corresponding author

Tel: +82-32-835-4243; Fax: +82-32-835-0775

E-mail address: frostjun@incheon.ac.kr (J. J. Park)

에 대한 처리에 관한 사항들이 중요하게 부각되고 있다 (Park, 2007).

오염지역에 사용되는 복원공법에는 여러 종류가 개발되어 실용화되어 있다. 미생물정화, 진공/공기추출, 토양 세척 공법 등이 오염지역의 현장복원공법으로 많이 사용되고 있다. 이들 공법은 주로 조립지반에 사용되거나 불포화 지반에 사용되는 것으로서 산업지역, 공장지대가 밀집된 고농도의 중금속 및 유해물질이 함유되어 있는 해안매립 지반에서는 유체의 전송 및 오염물질의 추출에 어려움이 있고, 특히 실트질 모래의 간극은 매우 작기 때문에 세척제 및 탈착제가 토양 속으로 주입되거나 추출되는 데 한계가 있다. 미생물정화의 경우에도 오염지역 내로 영양소를 주입하는 데 어려움이 있다. 오염된 매립지반 현장에서 이들 공법을 적용할 때에는 이러한 문제점을 개선할 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 즉, 오염물질 유출이 예상되는 해안지역과 공단지역의 투수성이 낮은 세립지반이라는 특성은 오염원에 노출시 기존의 정화기술 한계 극복을 위하여 경제성 있는 복원기술을 도입하는 것이 불가피하다 (Shin et al., 2008; Gabr et al., 1999).

생분해성 배수재를 활용한 오염토양 정화공법은 오염원에 대한 반응성 물질을 내포하여 선택적으로 오염원만 흡착제거하는 진일보한 기능을 가진 공법으로, 해안 및 매립된 오염지반에 적용되어 생분해성 기능, 배수촉진, 오염정화, 전단강도 증가의 복합적인 기능을 수행하여 부지를 활용할 수 있도록 하는 복합형 개념의 복원기술이다. 따라서 해안 매립지와 같은 투수성이 낮은 오염 토양의 경우 기존의 정화 방법으로는 적용하기 어렵기 때문에 이러한 문제점을 극복할 수 있는 새로운 기술 개발과 더불어 단순한 오염지반에서 오염물의 제거를 목적으로 하고 있을 뿐 아니라 정확한 지반을 건설부지로서 적극 활용하기 위한 친환경 지반 개량의 기능도 수행할 수 있다.

본 연구에서는 생분해 배수재를 이용한 오염토양 정화 기술의 현장적용성을 평가하기 위하여 생분해배수재의 물리적 특성시험을 수행하였으며, 이를 이용한 3가지 설치 조건에서의 현장실험을 통하여 중금속 오염토양의 정화효율을 분석하였다.

## 2. 생분해성 배수재와 반응물질

### 2.1 생분해성 배수재

일반적으로 연약지반 상의 구조물 건설시에는 안전성

과 경제성, 시공성 등을 고려하여 적절한 연약지반 개량공법을 선정하는데, 현재 가장 널리 사용되는 공법으로 연약지반의 압밀배수를 촉진시키는 연직배수공법이 국내에서 많이 사용되고 있다. 연직배수공법으로는 샌드드레인공법, 모래다짐말뚝공법, 플라스틱보드드레인 등을 들 수 있다. 천연골재인 모래를 사용하는 샌드드레인공법과 모래다짐말뚝공법 등은 최근 모래 수급의 어려움과 모래 채취에 따른 자연생태계 파괴문제 등의 문제점이 있어, 품질관리와 시공성 및 경제성이 우수한 플라스틱보드드레인 공법으로 점차 대체되어 가고 있는 실정이다(Shin et al., 2011). 그러나 플라스틱보드드레인 공법은 배수재의 재질이 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리에스테르 등의 석유화학제품으로 자연속에서 분해되는데 짧게는 수백년 이상 분해되지 않고 반영구적으로 지반속에 묻혀 있게 되어 장기적으로 환경적인 피해의 우려가 있으며, 추후 개량지역에 지하공동구나 배수구 등의 지하구조물 건설시 배수재의 절단 곤란에 따른 굴착시공의 어려움 및 배수재의 폐기처리 문제 등이 발생할 수 있다(Kim et al., 2010).

생분해성 플라스틱은 사용하는 원료에 따라 천연계 고분자, 화학 합성 고분자, 미생물 생산 고분자 그리고 천연계 고분자와 화학 합성 고분자의 혼용 등 크게 4가지 형태가 있다. 이 중 화학 합성 고분자와 미생물 생산 고분자의 형태를 지방족 폴리에스테르라 부르며, 보통 옥수수나 감자에서 추출한 전분을 이용하여 만든다. 지방족 폴리에스테르는 생분해성이 없어 주로 의류에 사용하는 방향족 폴리에스테르의 분자구조 중 벤젠고리 부분을 탄화수소로 대체, 자연환경에서 완전 생분해가 가능하도록 만들고 있다. 지방족 폴리에스테르는 가격이 상대적으로 고가이지만, 강도가 높고 가공성이 뛰어나 최근 각광을 받고 있다. 최근에는 바이오산업이 급격하게 성장하면서 지방족 폴리에스테르의 가격도 점차 낮아지고 있는 상태이다.

최근 일본에서 개발된 생분해성 플라스틱 배수재는 폴리유산(poly-lactic acid), 즉 PLA라고 불리는 화학 합성 고분자 형태의 재료를 사용하였다. PLA는 락타이드(lactide)의 축합중합(condensation polymerization)에 의해 합성되는 폴리에스테르로서, 중합원료인 락타이드는 주로 감자와 옥수수로부터 얻어진다. PLA 섬유는 옥수수의 전분을 발효시켜, 글루코스를 거쳐 젖산을 만들고, 이것을 축합반응 시키면 PLA를 생산할 수 있다. 이렇게 생성된 PLA를 나일론이나 폴리에스테르와 같이 용융방사, 용융성형 등의 방법으로 원하는 PLA 섬유를 만들 수 있다. 이렇게 만들

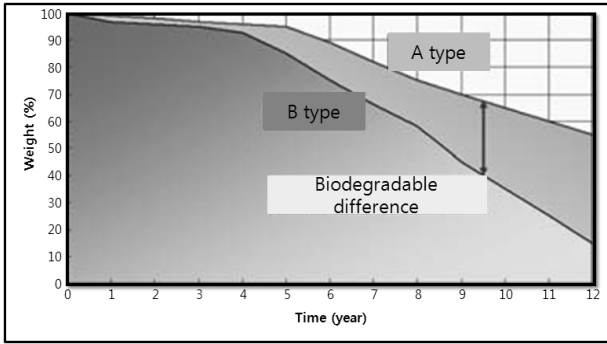


Fig. 1. Change of biodegradability with elapsed time (梅木康之 et al., 2005)

어진 PLA 섬유는 폐기시 물과 이산화탄소로 완전히 분해되어 자연 순환고리를 이루게 되어 진정한 친환경 재료라고 할 수 있다(Kim et al., 2010).

생분해성 플라스틱 배수재의 기능은 압밀이 진행되는 도중에는 기능을 발휘하다가 압밀이 종료된 후에는 지반 내의 미생물에 의해 완전히 분해되는 성질의 배수재를 의미하는데, Fig. 1은 플라스틱 생분해도 측정방법인 ISO 14855-1(2005)을 이용하여 PLA 섬유로 제작한 두 종류의 생분해성 플라스틱에 대한 생분해성 시뮬레이션 시험 결과를 나타낸 것이다(梅木康之 et al., 2005). 5년경과 까지는 두 종류의 생분해성 플라스틱 중량이 서서히 감소하지만 5년이 지나면서부터 중량은 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 재료에 따라 분해속도에 차이를 보여 인위적으로 생분해 정도를 조절할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 2.2 반응물질

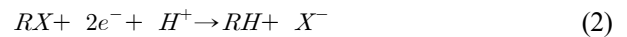
영가철(zero-valent iron, ZVI)은 유기오염물질에 오염된 토양 및 지하수의 정화를 위한 반응벽체의 매질로서 주로 사용되고 있고, 이것에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다(O'Hannesin et al., 1998; Gillham et al., 1994). 영가철은 오염물질과의 반응 및 제거 효율이 높고 가격도 다른 매질에 비해 상대적으로 저렴하여 널리 사용된다(Matheson et al., 1994; Muftikian et al., 1995; Korte et al., 1995). 영가철에 의한 TCE의 처리는 철 표면에 직접 접촉해서 일어나는 탈염소화작용으로서 이 때 철의 산화가 일어나 산화철이 반응매질 표면에 침적되어 오염물 분해속도가 감소된다. 이러한 영가철을 이용한 반응벽체의 수명을 연장하고 오염물질의 제거효능을 유지하기 위하여 여러 가지 방법이 연구되어졌고, 이 중에는 목표대상인 영가철의 재생을 목표로 하여 철환원균을 이용하여 산화

된 철을 재환원시켜 수명연장을 시도하는 방법(Chapelle, 1993)과 벤토나이트와 같은 다른 매질을 이용해 영가철 벽체와 병용하여 유기오염물질을 비롯해 중금속, 기타 오염물질 등의 고정화 및 제거에 사용함으로써 영가철의 부담을 줄이고 오염물질 제거효율의 상승을 기대하는 복합 반응벽체를 이용하는 방법 등이 연구되었다(Cho et al., 2004; Lee et al., 2004).

식 (1)에서와 같이 염화유기화합물의 제거를 위한 영가 금속에 의한 탈염소화 반응은 반응벽체 기법의 주요 반응 기작으로, 영가철은 산화를 일으키며 산화-환원쌍을 형성한다. 이러한 양상은 영가 금속이 전자를 잃으며 양이온 형태로 존재하려는 경향을 나타내며 자발적 산화에 의해 발생하는 부식반응으로 고려될 수 있다.



또한, PCE, TCE와 같은 할로겐화 알킬(RX)의 경우, H<sup>+</sup>공여체의 존재하에 식 (2)와 같은 반응에 의하여 환원적 탈염소화가 진행된다.



상기 반응 외에도, 적절한 전자전달 매개체(electron-transfer mediator)를 첨가하면 PCBs와 같은 이성질체의 혼합물에 대한 환원작용기의 환원능을 촉진시킬 수 있다. 특히, 주물공정 및 제강공정의 폐철분은 고부가 자원화를 통한 오염정화라는 측면에서 매우 유용하게 적용 가능하다.

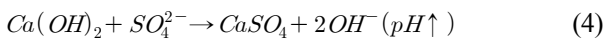
양이온교환이란 액상에 존재하는 양이온이, 고체 표면에 정전기적 인력으로 결합되어 있는 같은 전하의 양이온과 교환되는 현상으로 이온교환이 일어나는 본체를 Z로 표현하고 본체 내의 이온을 A, 수용액상의 이온을 B라고 하면 교환반응을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.



이온교환수지로는 천연에서 산출되는 제올라이트가 사용되는데, 기본적인 구조 요소는 사면체로 그 중앙에 실리콘이나 알루미늄 원자를 가지고 있고 사면체의 꼭지점에 4개의 산소원자를 가지고 있는 형태로, 전기적 결합으로 인한 치환이온이 위치하고 있다. 클라이놀타일로라이트(Clinoptilolite)가 가지는 높은 양이온교환능력과 물리적,

화학적 강도 및 경제적 효율성을 고려할 때 암모니아, 중금속 제거를 목적으로 하는 반응벽체 내의 반응물질로 사용함에 있어 그 적용성이 매우 높다.

제철과정에서 발생되고 있는 고체상태의 폐기물인 슬래그를 통하여 황산염의 제거가 이루어진다. 제강슬래그를 이용한 가능한 황산염의 제거 반응은  $T-Fe$ 를 이용한  $SO_4^{2-}$ 의 침전,  $MgO$ 의 높은 PZC값을 이용한 음이온의 흡착 제거,  $Ca$ 와의 반응으로 인한 침전 등으로 고려될 수 있다. 황산염의 제거 기작과 더불어 제강슬래그의  $CaO$ 성분의 용해로 인해 AMD의 pH를 높이는 현상이 일어난다. 식 (4)은  $Ca$ 으로 인해 pH가 높아지는 반응을 나타낸 것이다.

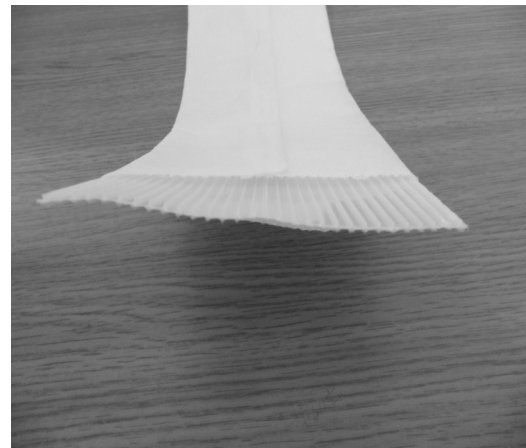


### 3. 생분해배수재의 제작 및 공학적 특성

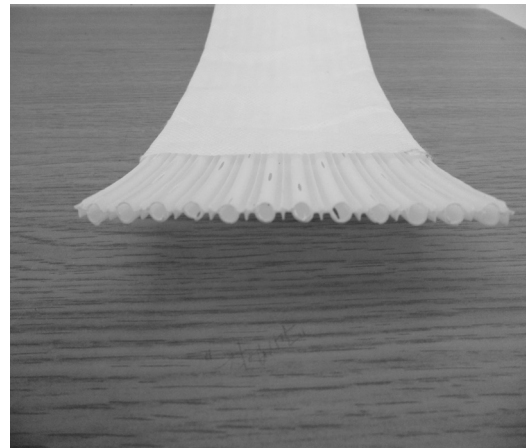
#### 3.1 생분해배수재의 제작

분해성 플라스틱 배수재의 폭은 약 95mm이며 두께는 약 3mm 정도로 기존 플라스틱 배수재와 모양과 형상이 거의 동일한 제품이다. 생분해성 플라스틱 배수재를 구성하고 있는 코어(core)는 플라스틱 일반적인 가공 방법 중 하나인 압출성형법을 이용해 제작한다. 압출성형법은 파우더 또는 펠렛상의 수지를 압력하에서 열과 전단력에 의해 용융시키고 일정형태를 갖는 다이(die)를 통해 밀어내어 필요한 제품을 성형하는 방법이다. 이러한 압출공정은 기존 플라스틱 배수재의 코어를 제작하는 데에도 동일하게 사용된다.

생분해성 플라스틱 배수재를 구성하는 필터(filter)는 스펀본드법을 사용하여 부직포 형태로 제작하고 있다. 스펀본드법으로 제조한 부직포는 종래의 단섬유 부직포와는 달리 필라멘트 섬유로 구성되어 강도가 동일중량의 단섬유보다 높은 장점이 있어 종래에 적용되지 못했던 공업용, 건설용도와 같은 새로운 내구성 응용분야 시장의 창출을 가져왔으며 대량생산이 가능하다. 이러한 일련의 과정을 거쳐 생산된 생분해성 배수재의 필터 주성분은 생분해 젯산인 PLA, 코어의 주성분은 PLA와 폴리에틸렌(PE)으로 이루어져 있다. 옥수수에서 추출한 PLA 원사로 만들어진 원료는 압출 및 냉각 과정을 거쳐 배수재로서의 형상을 갖게 된다. Fig. 2는 제작된 생분해 배수재의 사진전경을 나타낸 것이다.



(a) Harmonica shaped



(b) Cylindricity shaped

Fig. 2. Photo of manufactured bio-degradable drains

#### 3.2 생분해배수재의 공학적 특성

Table 1과 Table 2는 두 종류(실린더 코어형, 하모니카형)의 생분해 배수재의 물성 및 분해성에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 실린더 코어형 배수재의 경우, 한국산업규격 표준시방에서 제시하는 기준치를 모두 만족하였으며, 하모니카형 생분해성 배수재는 실린더 코어형 배수재에 비해 배수성능이 상당히 낮은 결과를 나타내었다. 즉, Fig. 3(a)는 실린더 코어형 배수재의 필터 분해성에 대한 열중량 분석 결과로서, 총 분해율은 온도 806.85°C에서 중량비 99.03%이며, 최대 분해효율을 보인 온도는 338.14°C이다. Fig. 3(b)는 실린더 코어형 배수재 코어의 분해성을 나타낸 것으로 열중량 실험 결과, 약 88%의 PLA와 약 12%의 PE로 이루어져 있으며, 승온시 PE가 먼저 분해되는 양상을 나타내었다. PE성분 및 PLA성분의 총 분해율은 99.92%이며, 최종 승온은 806.83°C로 나타났다. 두 유기화합물 각각의 최대 분해효율 온도는 PE가 333.60°C,

Table 1. Physical properties of bio-degradable drain (Cylindricity shaped)

	Item	Unit	Criteria	Method	Test condition	Test result
Core	Width	mm	100±5	KS K 0505		103,0
	Thickness	mm	3 ~ 5	KS K ISO 9863-2	Applied pressure (2kPa)	5,64
	Weight	g/m	70 over	KS K ISO 9864		111,9
	Tensile strength	kN/width	0,98 over	KS K ISO 10319		2,24
	Discharge capacity	cm <sup>3</sup> /sec	25 over (straight) 15 over (bend)	Delft method	Confining pressure (300kPa) Hydraulic gradient :0,5	106 (straight) 86 (bend)
Filter (non-woven)	Permeability	cm/sec	1×10 <sup>-3</sup> over		Head loss 20mm	2,3×10 <sup>-2</sup>
	Tensile strength	N	200 over	KS K 0743		235,8
	Effective opening size	μm	90 below	KS K ISO 12956	O <sub>90</sub>	48

Table 2. Physical properties of bio-degradable drain (Harmonica shaped)

	Item	Unit	Criteria	Method	Test condition	Test result
Core	Width	mm	100±5	KS K 0505		101,0
	Thickness	mm	3 ~ 5	KS K ISO 9863-2	Applied pressure (2kPa)	3,52
	Weight	g/m	70 over	KS K ISO 9864		88,5
	Tensile strength	kN/width	0,98 over	KS K ISO 10319		2,75
	Discharge capacity	cm <sup>3</sup> /sec	25 over (straight) 15 over (bend)	Delft method	Confining pressure (300kPa) Hydraulic gradient :0,5	17 (straight) 15 (bend)
Filter (non-woven)	Permeability	cm/sec	1×10 <sup>-3</sup> over		Head loss 20mm	2,7×10 <sup>-2</sup>
	Tensile strength	N	200 over	KS K 0743		218,1
	Effective opening size	μm	90 below	KS K ISO 12956	O <sub>90</sub>	43

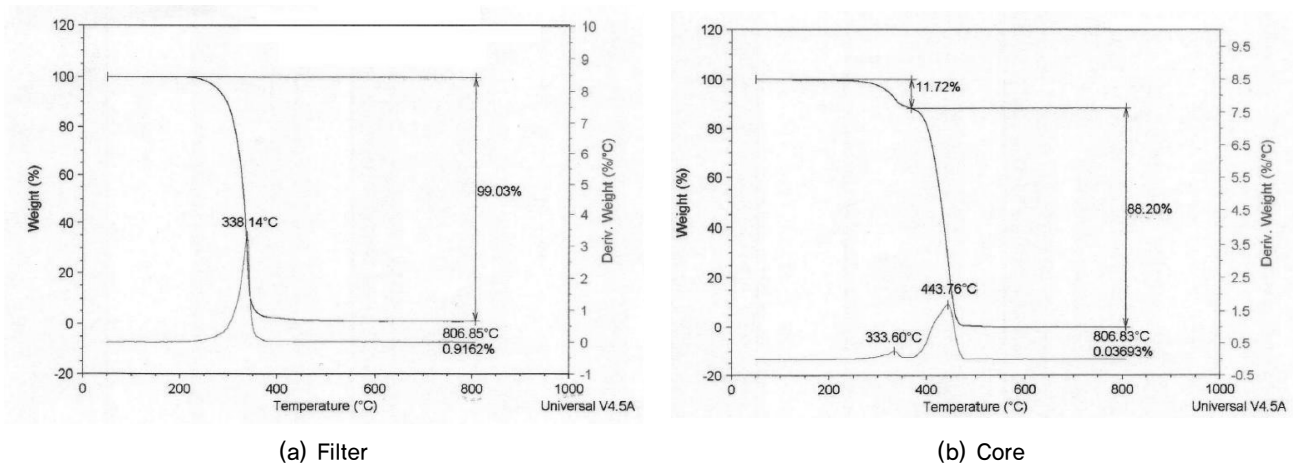


Fig. 3. Degradability of Drains (Cylindricity shaped)

PLA가 443.76°C의 값을 갖는다.

Fig. 4(a)는 하모니카형 생분해 배수재 필터재의 열중량 시험결과를 나타낸 것으로서, 총 중량분해율은 95.50%, 최종 승온은 807.04°C이며, 최대 분해효율온도는 360.32°C이다. 이로 인해 필터재 성분의 유기화합물 함유율이 약 96%에 달함을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 하모니카형 분해성 배수재 코어의 열중량시험 결과로 실린더 코어형 배수재와 달리 PLA성분으로만 이뤄진 하모니카형 분해성 배수

재 코어는 99.21%의 총 중량분해율을 가지며, 최대 승온은 807.05°C임을 나타내었다. 코어 역시 유기화합물 외에 약 1%의 기타 성분이 함유되어있으며, 최대 분해효율온도는 363.85°C로 나타나지만 601.79°C의 온도에서도 그 값이 약간 상승하였으며, 601.79°C 구간에서부터 약 0.54%의 분해가 더 발생하였다. Fig. 5는 실린더코어형과 하모니카형 배수재 필터의 침투능을 나타낸 것이며, 유효구멍 크기는 각각 48, 43μm로 도출되었다.

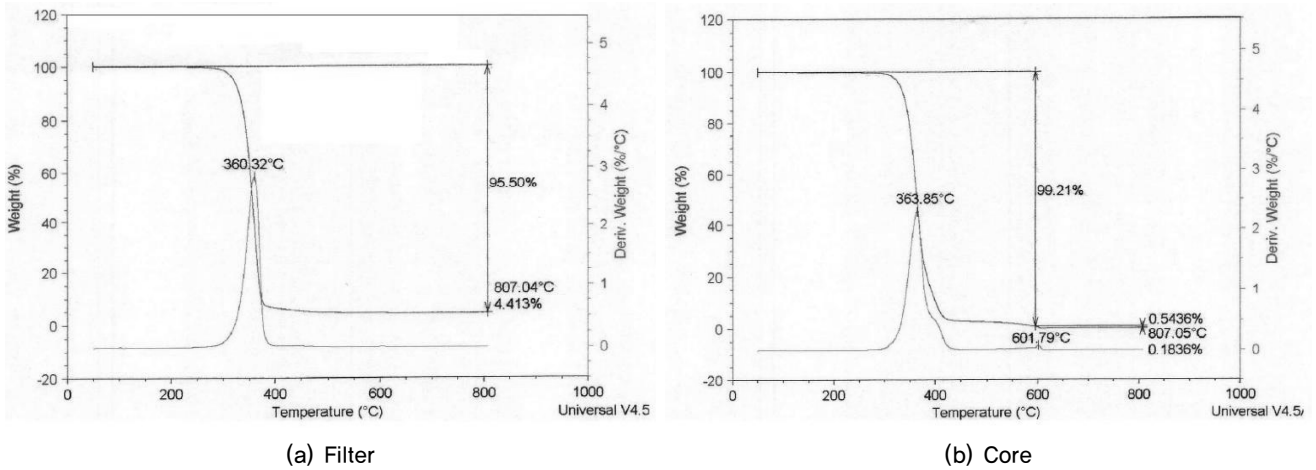


Fig. 4. Degradability of Drains (Harmonica shaped)

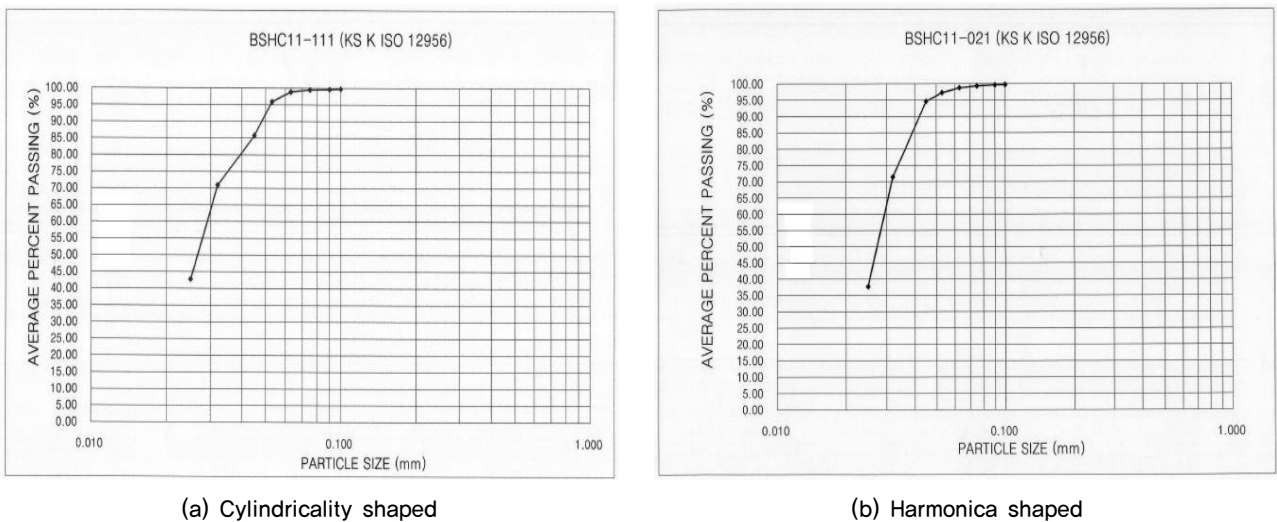


Fig. 5. Infiltration capacity of drain filter

평가 결과, 생분해성 배수재는 투수성이 낮은 지반에서도 사용될 수 있으며, 토양 정화효율이 우수하면서도 매립된 배수재 등에 의해 부차적인 오염이 발생하지 않아 친환경적인 오염토양 정화처리 기술에 적용할 수 있다. 이에 정화효율을 극대화시키기 위하여 반응물질을 도포한 생분해 배수재는 오염된 지반 내에 타입되며, 자연 분해성 수지로 형성되는 코어 및 필터를 포함하는 생분해 배수재와 이에 더하여 필터의 외주면에 영가철, 제올라이트 및 스크리아를 포함하는 반응물질이 도포되도록 하였다. 즉 생분해 배수재와 연결되어진 진공 펌프의 작동으로 인하여 발생하는 흡입력으로 지중에 매설된 생분해 배수재에 있어 필터의 반응물질에 의해 1차적으로 오염물질을 제거할 수 있을 뿐 아니라 코어를 통해 오염물질을 지상으로 배출 처리함으로써 2차적으로 오염물질을 처리할 수 있게 하는

것이다.

코어 및 필터를 구성하는 자연 분해성 수지는 올리고당인 시클로덱스트린 100중량부에 대하여 디카르복실산 60에서 70중량부, 폴리오가노실록산 5에서 15중량부가 포함되고, 이에 더하여 강도를 증가하기 위해 시클로덱스트린 100중량부에 대하여 무기충전제 10에서 20중량부를 더 포함하여 구성하였다. 여기서 무기충전제로는, 하이드록시아파타이트(hydroxyapatite), 탄산칼슘( $CaCO_3$ ), 탈크(Talc)중 어느 하나 또는 둘 이상의 혼합물로 이루어짐이 타당하며, 코어 및 필터를 자연 분해성 수지로 조성함으로써 생분해 배수재가 토양 매립 6개월 후 인장강도의 보유율이 80%를 유지하고 그 역할이 끝난 후 완전히 분해되도록 하였다.

## 4. 중금속 오염토양 정화 현장시험

### 4.1 오염토양의 물리·화학적 특성 및 중금속 농도 분석

#### 4.1.1 물리·화학적 특성

본 연구에서 실험대상으로 선택한 시료는 인천에 위치한 우수지의 퇴적토로서 인근의 생활하수 및 공단지역의 산업폐기물 등으로 유류 및 중금속에 의한 오염도가 높게 측정되었다. 오염토의 일반적인 물리·화학적 특성을 알아보기 위하여, 퇴적토 시료의 유기물함량, pH 및 양이온 교환용량 실험을 수행 하였다. 퇴적토의 pH는 토양오염공정시험법에 따라 pH meter(Thermo Orion 920A+)를 사용하여 측정하였으며, 퇴적토의 유기물함량은 폐기물공정시험법에 의해 결정하였고, 양이온교환용량은 1N 초산암모늄법에 의해 결정하였다. 또한, 오염 퇴적토의 입도분석을 위해 입도 분석용 표준체를 사용하여 체 진동기에서 분별한 후 각 입자별 중량을 측정하였다.

Table 3은 본 실험에 사용된 오염토의 200번체 통과량과 물리·화학적 특성을 나타낸 것이다. 오염토의 pH는 7.0~8.3으로 중성에서 약 알칼리성을 보였으며, 유기물 함량은 1.76%~13.15%로 일반적인 토양의 유기물 함량보다 약 2배 정도 높은 값을 나타내었다. 광물성 토양의 양이온 교환 능력은 토양성분들에 따라 0.5~200meq/100g으로 상당히 다양하게 나타나는데, 본 연구에서 채취한 오

Table 3. Physical properties of contaminated soils

Sample (No.)	#200 passing (%)	pH	Organic content (%)	CEC (meq/100g)
Sample 1	10,096	8,1	3,91	4,1
Sample 2	6,430	8,3	3,13	3,1
Sample 3	0,460	7,2	1,76	6,5
Sample 4	58,491	7,8	13,15	20,9

Table 4. Concentration of heavy metal in contaminated soils

Sample	Measured concentration (mg/kg)						
	Zn	Pb	Cd	As	Ni	Cu	Cr
1	82,49	5,06	ND	ND	ND	23,98	6,46
2	4,101,12	5,52	17,23	0,029	527,59	210,338	0,662
3	2,984,68	4,54	15,55	0,003	398,21	236,486	0,685
4	3,526,67	543,67	9,23	10,4	270,57	1,194,67	ND
Category for cause	600	400	10	50	200	500	15
Category for cleanup	1800	1200	30	150	600	1500	45

염토양의 CEC는 3.1meq/100g~20.9meq/100g으로 국내 일반토양(10~30meq/100g)에 비해 낮게 나타났다. 양이온 교환 능력은 토양 내에 약하게 결합되어 있는 양이온과 용액상의 양이온 교환에 대한 경향을 측정하는 방법으로 일반적으로 비교적 낮은 양이온 교환능력 값(50~100meq/100g이하)을 갖는 토양이 높은 양이온 교환 능력 값을 가진 토양에 비해 토양세정공법을 적용하는데 효과적이다.

#### 4.1.2 중금속 농도 분석

본 연구에 사용된 퇴적토들의 중금속 농도를 살펴보기 위해 국내 토양 오염규제 물질인 중금속 7종(Zn, Pb, Cd, As, Ni, Cu 및 Cr)을 대상으로 토양오염공정시험법에 준하여 전처리를 실시한 후 분석하였다. 또한, 대상 퇴적토 입도별 중금속 농도를 분석하여 유효입경을 알아보고 세척실험 및 영향인자 실험을 통하여 향후 퇴적토 세정에 영향을 미치는 인자들에 대한 평가에 사용하고자 하였다. 토양오염공정시험법은 전함량 측정법으로 오염 퇴적토 3g을 정확하게 취하여 250ml 등근 플라스크에 넣은 다음 증류수 1ml를 넣어 시료를 적신후 염산(HCl) 21ml와 질산(HNO<sub>3</sub>) 7ml를 첨가하여 상온에서 2시간 동안 정치시켜 유기물을 분해한 후 환류냉각 조건에 도달시켜 적정온도로 가열하는 방법으로 전처리 후, 고액분리를 위하여 Whatman 사의 공극 크기 0.45 $\mu$ m GF/C membrane 여과지를 이용하여 감압 여과하였으며, 0.5M 질산(HNO<sub>3</sub>)을 이용하여 잔류물을 최대한 세척한 후 전량이 100ml 되도록 표선을 맞추어 이 액을 ICP(Perkin-elmeroptima DV2100)로 분석하였다.

Table 4는 퇴적토 내 오염의 정도를 평가하기 위하여 각 시료별 중금속 농도를 분석한 결과이다. Zn의 경우 82.49mg/kg~4,101.12mg/kg으로 토양오염대책기준을 초과하였으며, Pb는 4.54mg/kg~543.67mg/kg으로 토양오염우려기준을 초과하고 있다. Cd는 불검출~17.23mg/kg

으로 토양오염우려기준을 초과하고 있으며, As는 토양오염관리기준에 미치지 못하는 것으로 분석되었다. Cu는 23.98mg/kg~1,194.67mg/kg으로 토양오염우려기준을 초과하고 있다. 따라서, 현장 실험을 통한 정확효율 평가를 위하여 대상 중금속 오염물질은 Pb, Cd, Cu로 선정하였다.

토양 입도 분포는 표준화된 물리적인 특성 중의 하나이다. 최근 연구에 따르면, 오염물질이 토양 입자의 크기와 함수관계를 갖고 있는 경우가 많으며, 처리효율 또한 입자의 크기와 유관함을 보여주고 있다. 토양세정공정은 0.24~2.00mm인 사질토에 적합한 방법으로 알려져 있으며, 일반적으로 세정기술의 적용한계는 토양 중 실트나 점토의 함유율이 약 30% 이상일 경우에는 기술적인 한계가 있다.

## 4.2 현장시험

### 4.2.1 개요

생분해 배수재를 이용한 토양오염 복원 시스템의 효과를 검증하기 위하여 상기에서 시료를 채취한 유수지에 현장 시험 부지를 조성하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 현장부지 1개 구역의 면적은 가로×세로(5m×5m), 높이는

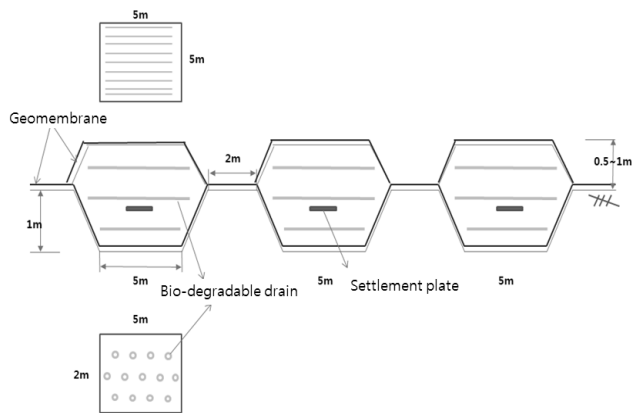


Fig. 6. Schematic diagram of field test

1.5~2m로 부지를 조성하였으며, 총 3개의 구역으로 설치 조건을 달리하여 시간에 따른 농도변화를 측정하여 정확 효율을 분석하였다. 설치조건은 세정제 주입과 추출을 동시에 하는 경우, 추출만 하는 경우(생분해 배수재에 반응 물질이 도포된 경우), 추출만 하는 경우(순수 생분해 배수재만 설치된 경우)로 수행하였다.

### 4.2.2 실험 결과

현장부지의 중금속 초기오염농도는 Cd이 17.23mg/kg, Cu가 860.64mg/kg, Pb이 543.67mg/kg으로 측정되었으며, Fig. 7에서와 같이 해당 부지의 중금속 추출을 위해 생분해성 배수재의 타설 후 성토하중에 의한 지반 내 중금속의 추출 경과를 초기농도비(C/C<sub>0</sub>)로 하여 나타내었다.

반응물질과 세정제를 사용하지 않은 순수하게 생분해 배수재만을 이용한 조건에서 중금속의 추출은 약 24.3일 이후부터 오염지역 우려기준 이하의 농도까지 하강시킬 수 있었으며, Cu의 경우 약 21일, Pb는 약 24.6일이 소요되었다. 25일 이후 부터는 해당 부지의 중금속 오염농도가 모두 우려기준에 못 미침을 알 수 있었다.

또한, 반응물질의 중금속 흡착효과에 대한 성능 분석을 위해 생분해성 배수재 필터에 제올라이트를 도포하여 실험을 수행하였다. 제올라이트가 도포된 생분해성 배수재의 중금속 추출은 이전의 결과에 비해 약 1.6배 정도 빠르게 정확효율을 나타내었다. 이는 도포된 제올라이트의 중금속 흡착능에 의한 결과이며, 기준에 보고된 Pb>Cu>Cd의 순서로 효율을 나타내는 유사한 결과를 보였다(Kam et al., 2011).

효과적인 중금속 오염정화를 위하여 30mM/L 농도의 시트르산을 1일 간격으로 100L씩 주입하여 중금속 농도의 저감율(C/C<sub>0</sub>)을 나타내었으며, 토양오염 우려지역기준 농도는 Cd이 12mg/kg, Cu가 500mg/kg, Pb이 400mg/kg

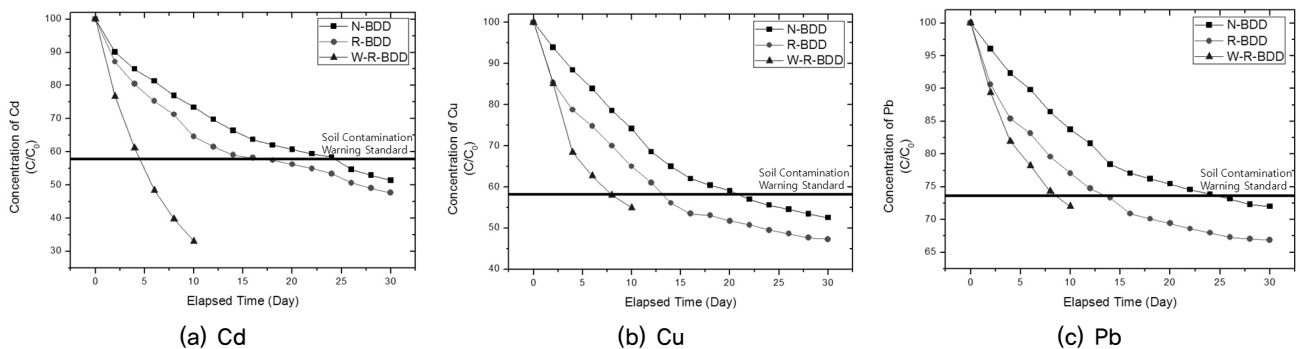


Fig. 7. Remedial efficiency for heavy metal



으로, 기준농도 이하 복원에 소요된 기간을 표기하였다. 시트르산 주입 및 중금속 추출 시, 약 3일 후부터 Cd의 농도가 토양오염우려기준 이하로 검출되었으며, Cu에 대한 농도 저감율은 약 8일 후부터, Pb의 경우는 약 8.5일 후부터 우려기준 이하의 농도를 나타내었다. 즉, 시트르산 주입 이전의 결과에 비해 약 2배가량 빠른 복원이 가능함을 알 수 있으며, 특히 실내실험에 대한 결과와 같이 다른 중금속 보다 Cd에 대한 제거효율이 뛰어난 것을 나타내었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 생분해 배수재를 이용한 오염토양 복원 기술의 현장적용 기술개발을 위하여 토양오염 복원기술의 현황과 생분해 배수재의 일반특성과 물리적 특성시험을 수행하였다. 또한 실내실험 및 현장실험을 통한 생분해 배수재공법의 성능에 관한 분석을 수행하였으며, 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

두 종류(실린더 코어형, 하모니카형)의 생분해 배수재의 물성 및 분해성에 대한 시험결과 실린더 코어형 배수재의 경우 한국산업기준에 의거 모두 기준치를 만족시키는 결과를 나타내었으며, 하모니카형 생분해성 배수재는 실린더 코어형 배수재에 비해 배수성능이 상당히 낮은 결과를 보였다.

세척제로 사용한 유기산으로 생물학적 재순환시스템과의 최적의 조건을 지니고 있는 시트르산을 선정하여 중금속 중 Cd, Cu, Pb을 현장시험의 오염대상 물질로 선정하였다. 이 후 현장 시험을 통하여 3가지 설치조건에 대한 농도 저감효율을 분석한 결과, 시트르산 주입과 추출을 동시에 수행할 경우, 약 3일 후부터 Cd의 농도가 토양오염우려기준 이하로 검출되었으며, Cu에 대한 농도 저감율은 약 8일 후부터, Pb의 경우는 약 8.5일 후부터 우려기준 이하의 농도를 나타내 시트르산 주입 이전의 결과에 비해 약 2배가량 빠른 정화가 이루어져 반응물질이 도포된 생분해 배수재를 이용하여 세정제를 주입·추출을 동시에 수행한 현장조건의 정화효율이 가장 높은 것으로 평가되었다.

생분해성 배수재는 투수성이 낮은 지반에서도 사용될 수 있으며, 토양 정화효율이 우수하면서도 매입된 배수재 등에 의해 부차적인 오염이 발생하지 않아 친환경적인 오염토양 정화처리 기술에 적용할 수 있다.

## Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea Grant funded by the Korean Government [NRF -2009-353-D00053].

## References

1. Chapelle, F. H.(1993), *Ground-water Microbiology and Geochemistry*, John Wiley and Sons, pp.99-100.
2. Cho, H. H. and Park, J. W.(2004), "Hybrid barriers of iron and modified-bentonite for the remediation of multi-contaminated water", *J. Korean Society on water Environment*, Vol.20, No.5, pp.512-519.
3. Gabr, M. A., Williamson, A., Sabodish, M., and Bowders, J. J.(1999). "BTEX extraction from clay soil using prefabricated vertical drains". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.3, pp.615-618.
4. Gillham, R. W. and O'Hannesin, S. F.(1994), "Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron", *Ground Water*, 32, pp.958-967.
5. ISO 14855-1(2005), "Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions-Method by analysis of evolved carbon dioxide-Part 1 : General method"
6. Kam, S. K., Hyun, S. S., and Lee, M. G.(2011), "Removal of divalent heavy metal ions by Na-PI synthesized from Jeju Scoria", *J. of Korean Environmental Sciences Society*, Vol.20, No.10, pp.1337-1345.
7. Kim, J. H., Cho, S. D., Chai, J. G., and Sato, H. (2010), "Characteristics of biodegradable plastic drain board", *J. Korean Geosynthetics Society*, Vol.9, No.3, pp.67-75.
8. Korte, N. E., Grittini, C., Muftikian, R., and Fernando, Q. (1995), "The Use of Palladized Iron as a Means of Treating Chlorinated Ethenes and Ethanes", *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management*, Vol.7, pp.51-53.
9. Lee, H. J. and Park, J. W.(2004), "removal of trichloroethylene, Cr(VI) and Nitrate in leachate by bentonite and zero valent iron", *J. Korean Geo-Environmental Society*, Vol.5, No.2, pp.5-75.
10. Matheson, L. J. and Tratnyek, P. G.(1994), "Reductive Dehalogenation of Chlorinated Methanes by Iron Metal", *Environmental Science and Technology*, 28, pp.2045-2053.
11. Muftikian, R., Fernando, O., and Korte, N.(1995), "A Method for the Rapid Dechlorination of Low Molecular Weight Chlorinated Hydrocarbons in Water", *Water Research*, Vol.29, No.10, pp.24-34.
12. O'Hannesin, S. F. and Gillham, R. W.(1998), "Long-term performance of an in situ "iron wall" for remediation of

- VOCs”, *Ground Water*, 36, pp.164-170.
13. Park, J. J. (2007), “Implementation of Infinite Boundary Condition Considering Superposed Theory on SVE Remediation System”, *J. Korean Geosynthetics Society*, Vol.6, No.3, pp.9-16.
  14. Shin, E. C., Park, J. J., and Lee, K. W. (2008), “Numerical Analysis of Soil Vapour Extraction Remediation System using Prefabricated Vertical Drain”, *J. Korean Geosynthetics Society*, Vol.7, No.4, pp.1-8.
  15. Shin, E. C., Park, J. J., and Zhanara, N.(2011), “Evaluation discharge capacity with various prefabricated vertical drain core types”, *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.3, No.4, pp.5-14.
  16. 梅木康之, 須山泰行, 八木正 (2005), “生分解性 Plastic drain board 「LACT-BOARD」 の開発と適用”, *土木建設技術 Symposium 2005 論文集*, 土木學會 建設技術研究委員會, pp.29-34.