

환경이중파일 기법에 의한 저투수성 오염토양의 정화

Remediation of a Low Permeable Soil by Environmental Double Pile

박 상 규*¹ Park, Sang-Kyu

이 기 호*² Lee, Ki-Ho

박 준 범*³ Park, Jun-Boum

임 만 빈*⁴ Im, Man-Bin

Abstract

Environmental Double Pile method was presented as a device to improve low permeable contaminated soil. EDP is one of the latest technology in a concept of one step process that is applied to low permeable contaminated ground to reutilize the site by enhancing drainage, contaminated remediation, bearing capacity of piles. In order to evaluate on-site applicability of this technology, qualities of EDP's drainage, strength and remediation were assessed through a series of experiments; EDP was verified to achieve remediation and improvement of soft ground.

요 지

저투수성 오염토양을 정화하기 위한 방안으로 환경이중파일 공법을 제안하였다. 환경이중파일은 저투수성 오염지반에 적용되어 배수촉진, 오염정화, 말뚝에 의한 지반지력 증가의 복합적인 기능을 수행하여 부지를 재활용할 수 있도록 하는 One Step Process 개념의 신기술이다. 기술의 현장적용성을 평가하기 위해 환경이중파일의 배수, 강도, 정화특성을 일련의 실험 등을 통해 평가하였으며, 정화 및 연약지반개량 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

Keywords : Environmental double pile, In-situ modeling test, Low permeable contaminated soil, Oyster shell, Sorption, Waste material

1. 서 론

우리나라는 국토의 삼면이 바다인 지리적 특성으로 인해 임해공업지대가 광범위하게 조성되어 있다. 이들 지역의 대부분은 투수성이 낮은 연약지반을 형성하고 있으며, 공장지대에 근접하고 있어 지반오염의 가능성이 클 것으로 예상된다. 따라서 이러한 지역을 개발하고자 할 경우에는 부지의 오염여부를 확인할 필요가 있는데, 만일 지반이 오염된 상태라면 우선적으로 정화가 이루어져야 할 것이다. 그러나, 대상지반이 저투수성인 경우엔 증기추출법이나 양수처리방법 등의 대표적인 정화방법에 의해서는 처리가 어려운데, 이것은 기존의

정화방법들이 투수성이 양호한 지반에서만 적용 가능하기 때문이다. 따라서 저투수성 오염지반을 굴착하여 정화하는 방법이 사용될 수 있으나, 이 방법은 오염토양을 굴착 후 이동함에 따라, 이동 지역에 이차오염유발을 유발할 수 있을 뿐만 아니라 대상지역이 넓은 경우엔 경제적 부담이 커질 수 있는 문제점을 안고 있다.

본 연구는 저투수성 오염지반을 활용하기 위한 방안으로, 오염정화와 연약지반처리를 동시에 해결할 수 있는 환경이중파일(Environmental Double Pile) 공법을 제안하였다. 환경이중파일은 개념적인 면에서 SD(Sand Drain)와 유사하지만, 모래가 아닌 굴폐각을 충전시키고 드레인 파일의 중앙에는 또 하나의 내부파일을 삽

*1 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., mohican1@freechal.com)

*2 서울대학교 지구환경시스템공학부 연구교수 (Member, Research Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

*3 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

*4 현대엔지니어링 주식회사 이사 (Member, Director, Hyundai Engrg. Co., Ltd.)

입하였다. 즉, 굴폐각층과 내부파일이 결합된 이중파일의 형태를 지니게 된다. 환경이중파일에서, 굴폐각은 배수재의 역할을 하는 동시에 오염물을 정화시키는 역할을 하는데, 이는 굴폐각의 흡착특성에 기인한다. 또한, 내부파일은 길이 및 둘레방향으로 천공되어 있는 금속 재질의 관으로서 배수로의 기능을 하는 동시에 그라우팅 주입구의 역할을 한다.

다시 정리하면, 환경이중파일의 작업은 배수와 그라우팅의 두 단계로 구분되는데, 상세한 진행 과정은 그림 1과 2에서 정리하였다. 그림에서, 상부재하에 의해 지중의 오염된 간극수가 수평방향으로 이동하면서 굴폐각층을 통과하는데, 이때 오염물질은 굴폐각에 흡착되고 정화된 지하수만이 내부파일을 통해 배출된다(그림 1). 배수가 종료되면 그라우팅을 실시하는데, 배수단계에서 배수로의 역할을 하던 내부파일은 시멘트 주입통로의 역할을 하게 된다(그림 2). 시멘트 주입액은 내부파일이 측면 유공을 통해 굴폐각층(Outer pile area)으로 확산되어 고형화된다. 결국 지반내에는 시멘트와 굴폐각으로 구성된 말뚝이 형성되는 것이다.

이와같이, 환경이중파일은 저투수성 오염지반에 적용되어 배수촉진, 오염정화, 말뚝에 의한 지반지력 증가

의 복합적인 기능을 수행하여 부지를 재활용할 수 있도록 하는 One Step Process 개념의 신기술이라고 할 수 있다.

한편, 환경이중파일은 전술한 기능외에 굴폐각과 같은 폐기물을 활용하는 목적을 갖고있다. 굴폐각은 한국의 남해 청정 해역을 중심으로, 굴양식산업에 의해 연간 28만 톤씩 발생한다. 그러나, 대부분 재활용되지 못하고 야적되고 있어 많은 환경적 문제점을 야기하고 있는 것이 사실이다. 현재 굴폐각은 비료 등의 원료등으로 활용되기도 하지만, 그 양은 극히 제한적이다. 따라서, 환경이중파일이 상용화 될 경우 굴폐각을 대량으로 활용할 수 있어 환경친화적인 장점과 동시에 경제적 효과도 클 것으로 기대된다.

본 논문은, 제안된 환경이중파일의 현장적용성을 검토하여 저투수성 오염지반의 대책공법으로서의 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다. 특히, 환경이중파일의 주요 기능인 배수촉진, 지지력 확보, 정화효과를 중심으로 검토하고자 한다. 이를 위해, 환경이중파일이 적용되는 현장의 조건을 실험실 스케일로 모사한 현장모델링 실험기를 제작하였으며, 현장모델링 실험을 통해 신공법으로서의 활용가능성을 평가하였다.

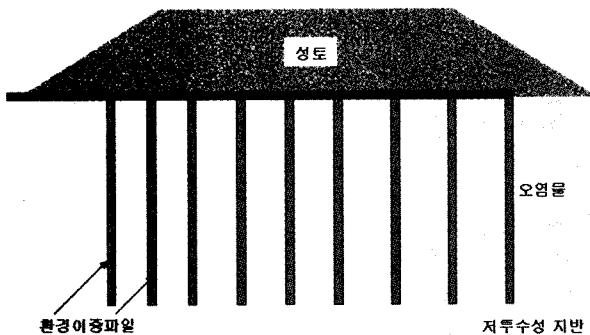


그림 1. 환경이중파일의 개요

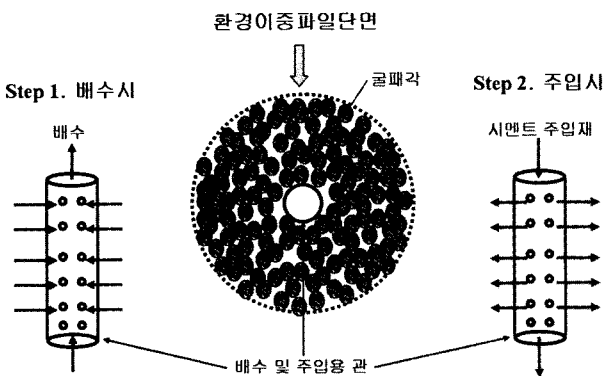


그림 2. 환경이중파일 단면

2. 실험

환경이중파일의 현장적용성을 평가하기 위한 실험은 현장모델링 실험을 중심으로 수행되었다. 또한 일축압축강도실험, 흡착실험을 병행하였다. 그림 3은 실험의 전체적인 순서도를 나타내고 있다. 한편, 대상지반으로는 화강풍화토와 점토지반을 고려하였고, 충전배수재는 파쇄한 굴폐각을 사용하였다.

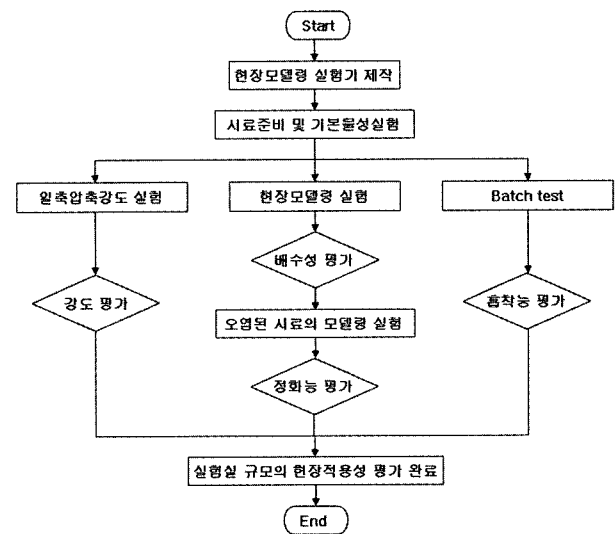


그림 3. 실험의 순서도

표 1. 실험재료의 XRF 분석 결과

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	LOI*	Total
굴패각	0.62	-	0.01	0.32	0.78	52.94	0.93	0.03	-	0.17	44.02	99.81
점토	55.15	20.87	0.92	7.28	1.18	0.99	1.65	2.14	0.09	0.17	9.26	100.34
화강풍화토	73.56	13.77	0.18	1.76	0.39	0.37	2.72	4.28	0.07	0.03	2.09	99.21

LOI* : loss of ignition

2.1 실험 재료

실험에 사용된 굴패각은 경남 ○○지역에 야적된 것을 수거하여 사용하였다. 굴패각의 주성분은 CaCO₃(약 90%)이고 그 외 단백질 성분인 Conchiolin이 소량 함유되어 있다. 굴패각의 성분을 분석하기 위해 X선 형광분광분석(XRF: X-Ray Fluorescence Spectrometry)시험을 실시하였다(표 1).

원형굴패각은 길이 80~130mm, 폭 30~80mm, 두께 20~50mm이고, 파쇄 후에는 박편이 되는 특징이 있다. 실험에 사용된 굴패각은 현장모델링 실험기 크기의 제약 때문에 원형굴패각을 파쇄하여 입자크기별로 분류하여 직경 2mm~4.75mm 범위의 것을 사용하였고, 이는 크기상으로 굵은모래에 해당된다. 파쇄된 굴패각의 입자 형태는 타원형이고 비중은 2.38이다. 이는 일반적

표 2. 시료의 기본물성

	화강풍화토	점 토
비 중	2.63	2.62
액성한계 (%)	-	64
소성지수	NP	35
USCS	SP	MH
Particle size distribution (%)	Gravel 2.1 Sand 93.2 Silt/Clay 4.7	Sand 27 Silt 57 Clay 16

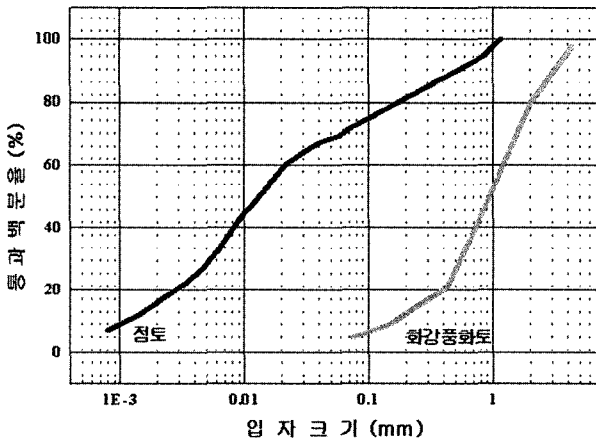


그림 4. 화강풍화토와 점토의 입도분포 곡선

인 토사에 비해 작기 때문에 일반적인 파쇄 상태에서 굴패각은 경량 재료로 판정할 수 있다.

화강풍화토는 한국에 가장 흔하게 분포하는 흙의 종류로서, 물을 많이 함유하면 고소성, 고풍수비의 세립토 특성을 나타낸다. 본 실험에 사용된 화강풍화토는 자연 채취후 4.75 mm보다 큰 입자들은 시료에서 배제하였으며, 함수비를 20%로 조절하여 사용되었다.

점토는 남해 ○○인근에서 채취한 준설 점토로, 자연 함수비는 94%이다. 실험에는 자연함수비 상태로 사용하였다. 실험에 사용한 화강풍화토와 점토의 입도분포 곡선과 기본물성치를 각각 표 2와 그림 4에 나타내었다.

2.2 실험 방법

2.2.1 현장 모델링 실험

현장모델링 실험기는 크기가 클수록 현장 재현성이 좋다는 인점이 있으나, 시험관리의 어려움과 시험기간의 장기화등의 문제가 있다. 따라서, 굴패각 배수층과 대상지반의 조성이 용이한 점들을 고려하여 실험기 본체의 크기를 D=260mm, H=350mm로 제작하였다. 실험기는 본체외에 상부의 주입장치와 하부의 배수장치로 구성되었고 공기압으로 상재압을 가하는 방식으로 압밀과 그라우팅을 수행하였다.

실험과정은 다음과 같다. 그림 5와 같이 대상시료와 굴패각 그리고 내부파일로 구성된 실험조건이 구성되면 상재압을 가하면서 압밀을 진행시키고, 압밀이 종료되면 그라우팅을 실시하였다. 실험조건은, 대상시료인 화강풍화토와 점토를 오염시키지 않은 상태로 모델링 실험을 실시하였으며 상재압은 1kg/cm²로 하고 충전되는 굴패각의 간극비(e)는 2.56(=굴패각 중량 300g 투입), 2.05(350g), 1.67(400g)로 하였으며 각각 5회씩 반복하여 신뢰성을 확보하였다.

한편, 오염된 시료를 대상으로 현장모델링 실험을 하기위해 기존의 실험기(그림 5)의 1/2 크기의 실험기를 별도로 제작하였다. 그 이유는, 기존의 실험기로는 정화 과정을 정밀하게 측정하기위한 실험조작에 많은 난제

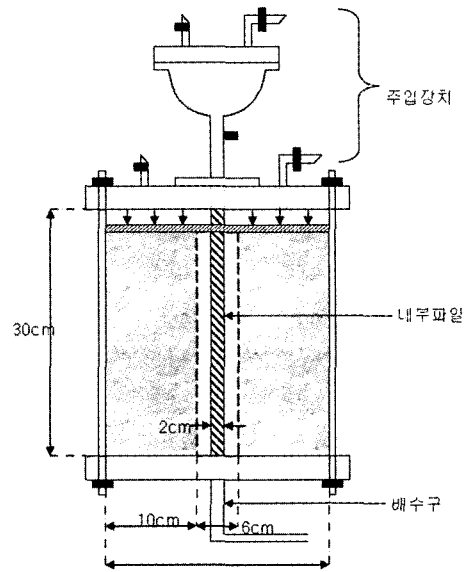
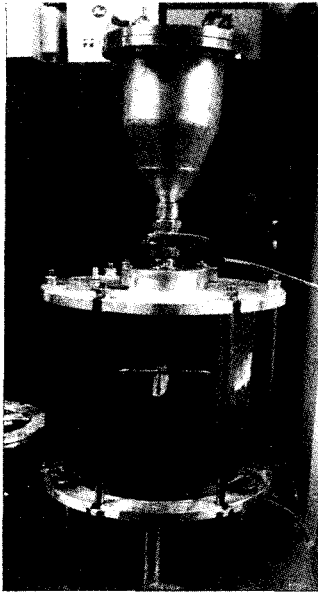


그림 5. 굴패각-시멘트 배수보강말뚝 시험기 및 개요도

가 발생하였기 때문이다.

오염원은 중금속인 Pb를 선택하였고 토양환경보전법에 제시된 토양오염기준을 근거로하여, Pb의 투입량을 100mg/kg, 400mg/kg, 1000mg/kg으로 결정하였다. $Pb(NO_3)_2$ 분말을 필요양에 따라 각각 수용액을 만들어 전술한 함수비 조건인 20%(화강풍화토)와 94%(점토)로 조절하여 실험하였으며, 그 외의 실험조건은 현장모델링 실험과 동일하게 적용하였다. 실험을 통해 배출되는 용액을 30ml씩 일정량으로 샘플링하여 pH를 측정하였으며, PerkinElmer사의 Atomic Absorption Spectrometer (AAS)를 이용하여 잔류오염농도를 측정하였다.

2.2.2 일축압축강도 실험

현장모델링 실험을 통해 형성된 말뚝은 겉보기와 만저보기등에 의해 간접적인 강도 평가는 가능하지만, 말뚝 중앙에 위치한 내부파일로 인해 일축강도실험에 의한 정량적인 강도측정이 어렵다. 그림 6과 같이, 현장모델링 말뚝은 중앙의 내부파일에 시멘트와 굴패각 혼합체가 결합된 형태인데, 내부파일을 제외하면 하나의 시멘트-굴패각 혼합체라 할 수 있다. 따라서, 시멘트와 굴패각으로 이루어진 공시체를 별도로 제작하여 일축압축강도 실험을 하였으며, 이를 통해 현장모델링 말뚝의 강도에 대한 평가를 하고자 하였다.

한편, 굴패각과 시멘트의 혼합비에 따른 강도특성을 평가외에 플라이애쉬의 첨가에 따른 장기강도의 증가

특성을 평가하고자 하였다. 플라이애쉬는 석탄을 연소시킨 후 발생하는 회중 집진기에서 포집되는 미세한 입자들을 의미하는데, 주요 구성 성분은 규소, 알루미늄, 철의 산화물로서 이들 세 가지 성분이 전체의 80~90% 이상을 차지하며 고온 연소 생성물의 특성상 석회와 물이 플라이애쉬의 주성분인 SiO_2 와 반응하여 시멘트성 물질을 생성하는 포졸란 성질을 지닌다. 플라이애쉬를 콘크리트에 첨가하는 경우 수화에 요구되는 단위 수량을 감소시키게 되고 플라이애쉬 단독으로는 경화성을 갖지 않지만, 포졸란이나 백토처럼 가용성 SiO_2 를 다량 함유하기 때문에 C_3S , C_2S 에서 유리된 $Ca(OH)_2$ 와 포

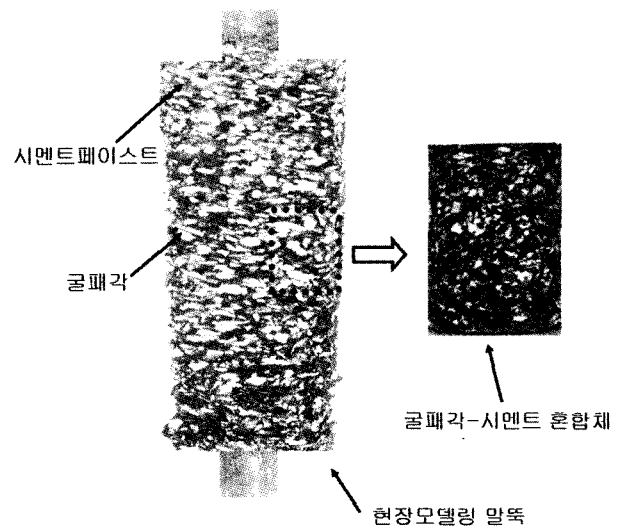


그림 6. 일축압축강도시험의 배경

졸란 반응을 일으켜 불용성 C-S-H gel을 생성한다. 플라이애쉬의 장기강도는 보통 포틀랜드시멘트보다 우수하다고 알려져 있으며, 플라이애쉬를 첨가한 콘크리트의 강도는 초기재령에서는 일반콘크리트보다 낮지만 재령이 길어짐에 따라 포졸란 반응에 의해 장기강도는 증가한다(정재동, 1998).

실험에는 현장모델링 실험때와 동일한 입径의 굴패각입자를 사용하고, 시멘트는 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 공시체의 배합은 다음과 같다. 물/시멘트비가 1:1인 시멘트 페이스트에 굴패각을 시멘트의 중량을 기준으로 각각 1배, 1.5배, 2배 만큼 혼합하였다. 시멘트 페이스트의 물/시멘트비를 1:1로 한것은 다양한 혼합비의 공시체를 제작하기 위해, 통상적으로 콘크리트 배합시 사용되는 0.5~0.6의 비율보다 높은 값으로 정한것이다. 또한, 굴패각의 첨가에 따른 공시체의 강도특성의 변화를 평가하기 위해 시멘트 페이스트만으로 구성된 공시체를 제작하여 실험결과를 비교하였다.

공시체는 재령별로 각각 7일(초기강도), 28일(설계기준강도), 60일(장기강도)로 구분하였고, 각 재령에 따라 3개의 동일한 혼합조건의 공시체를 제작하였다. 제작한 공시체는 공기 중에서 1일 양생한 후 몰드를 제거한 후 남은 기간 수중에서 양생하였다. 일축압축강도 실험은 KS F2314 규정에 준하여 실시하였고, 공시체의 규격은 Φ 50mm × H 100mm로 하였다.

2.2.3 회분식흡착실험(Batch test)

굴패각의 오염물질에 대한 흡착능을 평가하기 위해 회분식흡착실험을 실시하였고 또한, 현장 적용성을 검토하기 위하여 점성토와 화강풍화토에 대한 흡착실험도 함께 수행하여 각각의 흡착특성을 비교·평가 하였다.

흡착제는 10번체(2mm)를 통과시킨 굴패각분말을 사

용하였다. 또한 점토는 105℃ 건조로에서 24시간 건조한 후 입자를 분쇄하여 실험에 사용하였고, 화강풍화토는 건조로에서 24시간 건조시킨 후 10번체(2mm)를 통과한 시료에 대해서 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 대상 오염물질은 중금속인 Cd, Pb, Cu의 세 종류를 선택하였는데, 중금속용액은 표준용액을 필요농도로 희석하여 사용하였으며, 대상 중금속을 정량 분석하기 위하여 AAS를 이용하여 여액의 잔류 중금속 이온의 농도를 측정하였다.

실험은, 공시험을 통하여 중금속의 휘발성(volatil) 및 시료용기에 대한 흡착량을 조사하여 실험 전체에 대한 mass balance를 살펴보았다. 또한, 흡착실험에 적용할 흡착제와 용액과의 교반시간을 결정하기 위하여 흡착평형 실험을 실시하였다. Cd, Pb, Cu의 초기농도(C_0)가 40mg/L인 용액 30mL에 굴패각 입자 0.3g을 투입하고 교반하면서, 10분, 20분, 40분, 60분, 120분, 240분, 480분의 시간 간격으로 분취한 현탁액을 여과지를 사용하여 흡착제 입자를 여과시킨 후 중금속의 잔류농도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 환경이중파일의 배수성 평가

전술한 바와 같이, 현장모델링 실험은 배수와 그라우팅의 두단계로 구분되어 진행되었다. 그림 7, 8은 배수 단계에서 화강풍화토와 점토의 압밀곡선을 나타낸다. 각 시료에 대해, 충전되는 굴패각의 간극비(e)를 2.56(= 굴패각 중량 300g 투입), 2.05(350g), 1.67(250g) 로 조절하였는데, 이는 지반을 모델링할 수 있는 한계에서 가장 느슨한 상태와 조밀한 상태를 고려하여 결정한 값이다. 그림에서, 굴패각의 간극비가 클수록 침하속도가 빠르게 나타난다. 이것은 간극비가 클수록 통수능이 유리하기

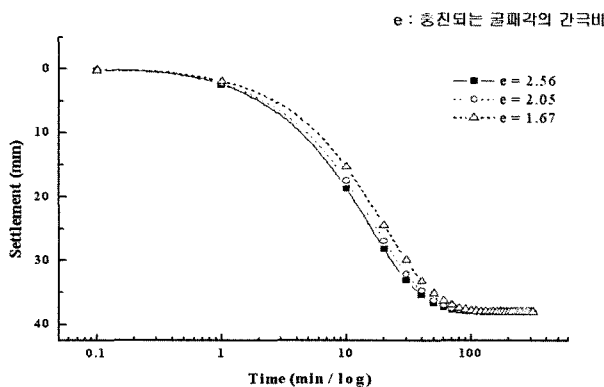


그림 7. 굴패각의 간극비에 따른 압밀곡선 (화강풍화토)

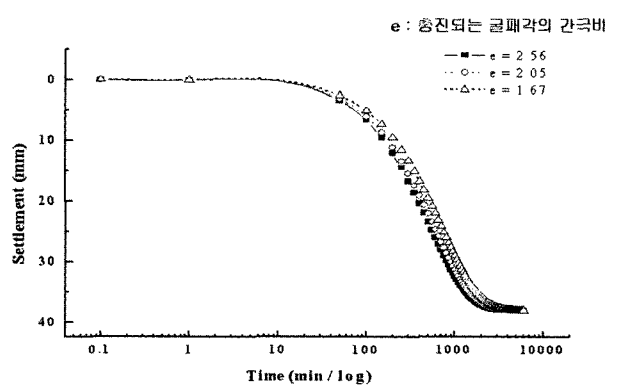


그림 8. 굴패각의 간극비에 따른 압밀곡선 (점토)

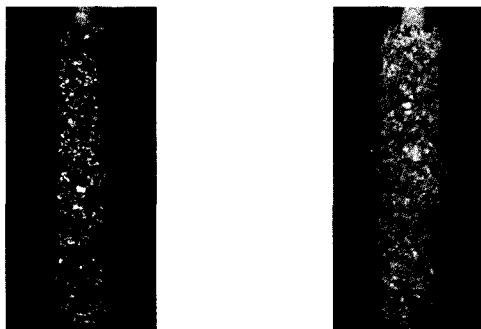
때문이다. 한편, 간극비 1.67과 2.05인 경우의 침하속도의 차이에 비해 2.05와 2.56인 경우에는 그 차이가 줄어들었다. 이것은, 간극비가 2.56인 경우는 굴패각층이 가장 느슨한 단계로서 횡방향 토압이 약한곳으로 집중되어 굴패각 배수층의 경계면이 일부분 손상을 입었기 때문이라 판단된다. 현장모델링 실험을 통해, 배수특성에서는 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 환경이중파일에 서 굴패각을 배수재료의 활용가능성을 확인하였다.

배수가 완료되고 그라우팅 단계의 시점(始点)을 압밀 곡선에서 압밀종료점으로 구할 수 있다. 당연한 결과이지만, 침하속도는 화강풍화토가 점토에 비해 빠르게 나타났으며, 본 실험조건에서, 그라우팅 시점을 화강풍화토는 300분 점토는 6000분으로 정할 수 있었다.

3.2 환경이중파일 말뚝의 강도 평가

현장모델링 실험의 그라우팅에 의해 굴패각과 시멘트로 혼합된 말뚝이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 말뚝이 형성된 상태를 비교할 때, 화강풍화토와 점토의 대상시료에 따른 차이점은 발견할 수 없었다. 굴패각의 간극비에 따라, 간극비(e) 2.05인 경우에 생성된 말뚝의 상태가 가장 양호하였다. 간극비 2.56인 경우엔, 전술한 바와 같이 굴패각층의 경계면으로 시료의 일부가 투입되어 부분적으로 시멘트와 균일하게 혼합되지 못한 말뚝의 일부가 손상을 입었다. 한편, 간극비 1.67인 경우엔 말뚝에 시멘트의 주입효과가 적게 나타나 경계면까지 시멘트 주입액이 충분히 주입되지 않았다. 이는 굴패각의 간극이 조밀하기 때문에 시멘트가 원활하게 확산 주입되지 못하고 시멘트가 주입될 수 있는 절대적인 공간이 부족한 때문이라 사료된다.

배수단계와는 달리, 말뚝의 형성은 굴패각의 간극비



(a) 대상시료 : 화강풍화토

(b) 대상시료 : 점토

그림 9. 굴패각-시멘트 배수보강말뚝

에 따라 변화를 나타내었다. 그러나, 굴패각층이 느슨하고 조밀함에 따라 나타나는 말뚝 형성특성이 간극비 2.05에서는 나타나지 않았다. 현장모델링실험을 통해 형성된 말뚝은 그림 9와 같다.

상기한 바와같이, 말뚝의 강도를 측정하기 위해 굴패각과 시멘트로 구성된 공시체를 제작하여 일축압축실험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

3.2.1 일축압축강도 실험 결과

먼저, 굴패각과 시멘트로 구성된 공시체의 강도특성을 평가하기 위한 해석방법에 대해 말하면 다음과 같다. 즉, 공시체를 두가지 재료인 굴패각과 시멘트의 혼합체라고 가정하고, 1) 굴패각(혼합재)의 첨가에 의한 강도특성의 변화, 2) 시멘트(matrix) 부분의 자경성(自硬性), 3) 혼합재와 매트릭스 부분의 접촉면(interface) 효과로 해석하고자 하였다.

1)의 굴패각의 첨가는 매트릭스 부분에 굴패각이 첨가됨에 따라 변화하는 강도특성, 즉 혼합되어지는 물질의 강도, 혼합비율등에 따라 발현되는 강도가 변화한다고 판단할 수 있다. 그리고 2)의 매트릭스 부분의 자경성은 혼합되는 물질의 특성보다, 오히려 매트릭스 부분의 자경성의 정도에 의해 발현강도가 영향을 받는다고 판단할 수 있다. 이와 같은 접근은 오히려 혼합재의 구성비율이 높아짐에 따라 매트릭스 부분의 자경성이 방해를 받아 강도가 저하되는 것을 예측할 수 있다. 마지막으로 3)의 interface 효과는 두 부분(혼합재 부분과 매

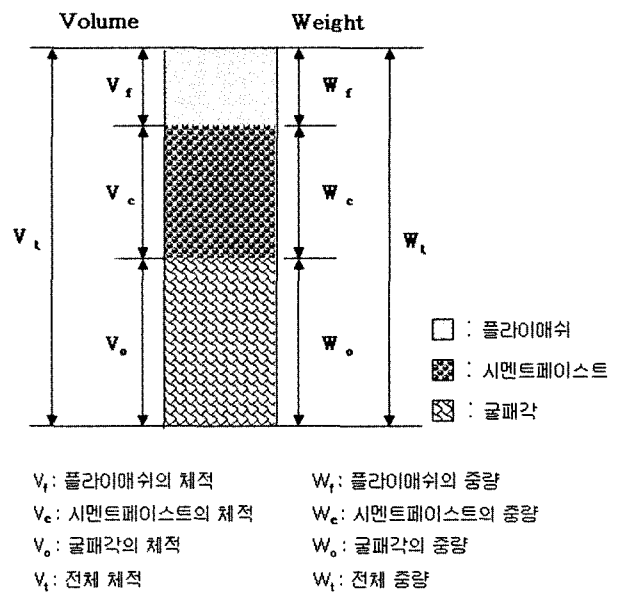


그림 10. 굴패각-시멘트 혼합체 구성요소의 정의

트릭스 부분)의 반응성, 혼합골패각의 골격구조, 간극구조(매트릭스 부분을 기준으로 할때)등의 다양한 원인에 의해 강도특성에 접근할 수 있다고 판단된다. 그러나, 본 실험을 통해서 1)과 2)의 원인으로 혼합체의 강도 특성을 설명하고자 하였다. 이러한 효과들을 정량적으로 평가하기 위해, 다음과 같은 체적의 개념으로 결과를 정리하였다. 즉, 공시체의 전체체적 V_t 는 다음식과 같이 표현할 수 있다. 그림 10은 혼합체의 구성요소를 체적과 중량의 개념으로 나타낸 것이다(이기호, 2001).

$$V_t = V_c + V_o + V_f \quad (1)$$

그림 11은 입경 4.75~2.00mm의 골패각을 각각 시멘트의 중량을 기준으로 100, 150, 200%의 3종류로 혼합한 후 재령 7일, 28일, 60일에 대하여 각각 3회의 시험을 수행한 결과의 평균값으로서, 시멘트의 중량을 기준으로 한 골패각의 혼합비 100, 150, 200%를 체적비에 따라 각각 $V_o/V_t = 0.24 / 0.32 / 0.4$ 로 변환하여, 골패각의 체적비에 따른 혼합공시체의 재령별 압축강도를 나타내었다.

그림에 의하면, 골패각의 체적비가 증가할수록 순수 시멘트 페이스트에 비해서 압축강도가 급격히 감소하는 경향을 보이고 있으나 체적비 0.32 이후부터는 강도가 증가하기 시작해 뚜렷한 강도증진을 보이고 있다. 이러한 특성은, 시멘트량에 따른 고결화 작용과 골패각의 혼합에 의한 골격구조의 형성에 기인한 것으로 사료된다. 즉, 그림에서 골패각의 체적비가 증가하면서 압축강도가 감소하는 것은 상대적으로 시멘트 페이스트의 체적이 줄어들면서 시멘트의 자경성(self-hardening)에 의한 강도발현 효과가 작아졌기 때문으로 볼 수 있다.

한편, 시멘트 페이스트의 체적이 점점 감소하다가 어느 지점에 도달하면 혼합체의 강도발현에서 시멘트의

자경성에 의한 영향이 거의 나타나지 않을 것이라고 사료되는데, $V_o/V_t=0.32$ 인 지점이라고 판단된다. 따라서, 이 지점부터는 혼합체의 강도발현은 골패각의 골격구조에 의한 영향으로 보인다. 즉, 혼합체내의 골패각의 상대밀도가 증가하면서 골격구조의 접촉강도가 증가하여 혼합체의 압축강도가 증가하는 것이다. 그림에서 체적비 0.32부터 압축강도가 증가하는 것은 위와 같은 이유로 설명할 수 있다. 실험 조건에서, 혼합체의 강도는 체적비 0.4인 경우 최대값을 나타내며 이는 골패각과 시멘트의 혼합비가 2:1인 경우에 해당된다.

그림에서, 재령 7일부터 28일까지는 비교적 큰 폭의 강도증진을 보이다가 재령 60일에서는 강도의 증가가 둔화되는 경향을 보인다. 따라서, 혼합공시체의 장기강도 개선을 위해 각각의 공시체에 플라이애쉬를 골패각 중량의 15%씩 첨가한 결과를 그림 12에 나타내었다.

그림과 같이, 플라이애쉬를 첨가함에 따라 압축강도가 증가하며, 특히 28일 이후의 장기강도의 증가가 두드러진다. 또한 체적비 0.32 이후부터는 플라이애쉬를 첨가함에 따라 60일 강도가 순수 시멘트페이스트의 강도와 비교해 유사한 범위의 강도를 나타냄을 볼 수 있다. 따라서, 골패각과 시멘트 혼합체의 장기강도가 플라이애쉬를 첨가함에 따라 증가함을 알 수 있다.

이상의 결과로서, 일축압축강도 실험을 통해 현장모델링 실험에서 형성된 말뚝의 강도를 간접적으로 평가할 수 있으며, 골패각과 시멘트의 혼합비가 2:1인 경우에 최대 강도를 나타냈다. 따라서, 환경이중파일을 현장 적용할 경우, 본 실험의 조건을 참고할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 말뚝의 장기강도를 증가시키기 위한 목적으로, 시멘트에 플라이애쉬를 첨가하여 주입재로 사용할 수 있는 방안을 모색할 수 있을 것으로 사료된다.

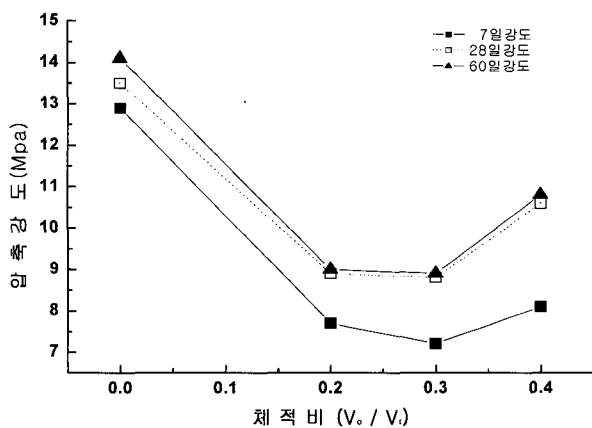


그림 11. 체적비에 따른 재령별 압축강도 변화

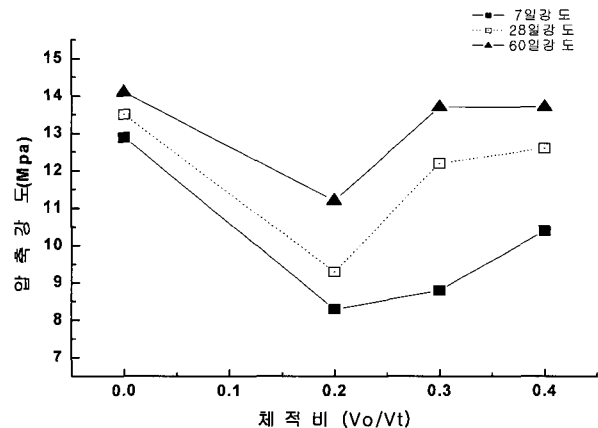


그림 12. 플라이애쉬의 첨가에 따른 압축강도 변화

3.3 환경이중파일의 정확능 평가

3.3.1 Batch test 결과

공시험 결과에 의하면 휘발 및 시료용기에 의한 오차는 초기 농도에 비해서 0.3~0.6% 정도로 이는 분석오차를 고려할 때 상당히 미미한 것으로 판단되었다. 일반적으로 중금속 이온은 비휘발성 오염물질로 생분해에 의한 오차가 거의 발생하지 않으므로 mass balance의 차이는 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 13은 Batch test 에서, 시간에 따른 카드뮴(Cd), 납(Pb), 구리(Cu)의 이온농도의 변화를 나타내었으며, 흡착의 진행과 흡착평형에 도달하는 시간과의 관계를 정리한 것이다. 초기 중금속의 이온농도는 40mg/L로, 흡착은 초기에 급격하게 일어나고 시간이 지남에 따라 평형에 도달하였다. 굴폐각의 최종적인 평형흡착량은 카드뮴이 납보다 크게 나타나고 있으나, 납의 경우 평형 흡착량은 작아도 흡착속도가 크므로 반응시간이 제한되어 있는 경우엔 더 큰 제거효율을 나타낼 것이다. 이는 중금속의 이동도(mobility)와 관련이 있는 것으로, 흡착속도가 빠르다는 것은 납의 이동도가 카드뮴이나 구리에 비해 그만큼 작다는 것을 의미한다. 토양이 중금속에 의해 오염이 되면 이동도에 관계없이 문제점을 유발하게 되는데 이동도가 높은 경우에는 지하수가 중금속에 의해 오염될 우려가 있으며, 이동도가 낮은 경우에는 중금속이 상부 토양에 축적되어 생태계에 잠재적인 오염원으로 작용할 수 있다.

그림 14는 화강풍화토에 대한 실험결과이다. 흡착평형시간은 흡착제의 표면적, 성분의 차이, 금속 이온의 전기음성도(electronegativity) 차이 등에 의해 영향을 받을 수 있는데, 각 중금속 이온에 대한 평형시간은 굴폐각의

경우 초기 40여분 후 평형에 도달하였으며, 화강풍화토의 경우 4시간 후 평형에 도달하는 것을 알 수 있었다.

굴폐각에 대한 각 중금속의 흡착 정도는 $Cd > Pb > Cu$ 와 같은 순서로 나타났다. Pb의 경우 초기 10분부터 90%이상의 높은 제거율을 나타내었으며, Cd, Cu는 20분부터 90%이상 제거되기 시작하여 시간이 증가할수록 제거율이 증가되었다. Cd과 Pb의 경우 최종적으로 99%이상의 높은 제거율을 나타내었으며, Cd, Pb, Cu 모두 40분 이내에 90%이상 제거되는 등 짧은 시간 안에 높은 제거율을 나타내었다.

이처럼, 굴폐각의 중금속 제거율이 높은 이유로는 pH의 영향을 들 수 있는데, pH에 따라 제거효율이 달라지는 이유는 낮은 pH에서 중금속 제거율은 교환점(exchange site)에서 주입된 H^+ 와 중금속과의 경쟁에 의하여 제거율이 감소되는 것으로 판단되며, 높은 pH에서는 중금속 이온과 H^+ 간의 경쟁 감소 및 중금속의 수산화물의 형성으로 인한 침전 때문에 높은 중금속 제거효율을 나타내는 것으로 보인다. 그러나 높은 pH에서는 흡착과 침전과정이 동시에 일어나기 때문에 중금속의 흡착과 침전을 구별하기는 사실상 어려운 것으로 사료된다. 굴폐각의 실험결과 초기 pH가 2.5에서 교반 후 pH가 최종적으로 7~8.5까지 상승하는 것을 확인할 수 있는데 이와 같이 굴폐각이 용액중에서 높은 pH값을 가지는 것은, 식 (2)와 같이 굴폐각의 주성분인 $CaCO_3$ 의 용해에 의하여 Ca^{2+} 이온의 석출과 CO_3^{2-} 이온 농도의 증가와 함께 pH가 상승하게 되는 것으로 판단된다.

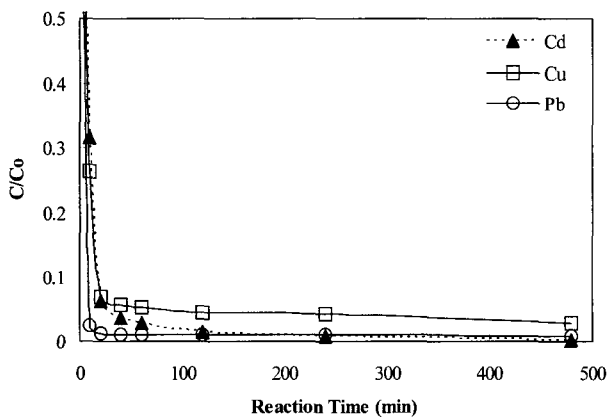
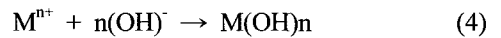
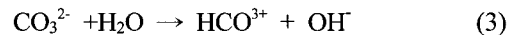
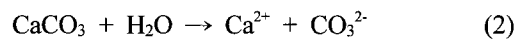


그림 13. 굴폐각의 흡착특성 ($C_0=40mg/L$)

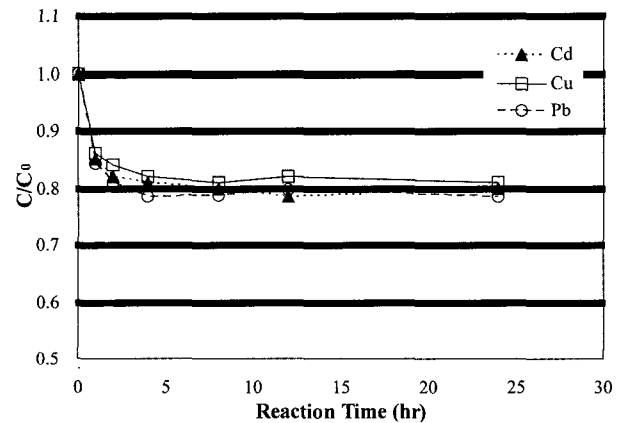


그림 14. 화강풍화토의 흡착특성 ($C_0=40mg/L$)

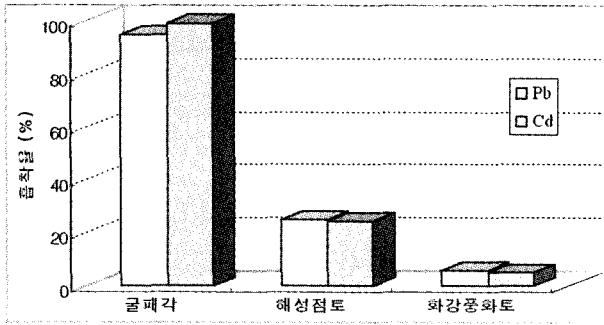


그림 15. 대상시료의 중금속 흡착율 비교 (C₀=40mg/L)

그림 15는 굴폐각, 점토, 화강풍화토의 Pb와 Cd에 대한 흡착율을 도시하여 비교한 것이다. 그림을 통해, 굴폐각의 흡착율은 점토와 화강풍화토에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다.

따라서, 환경이중파일에서 굴폐각을 중금속이온 제거제로 사용할 경우 CaCO₃의 흡착, 이온교환반응 등의 표면 화학적인 작용 및 pH상승효과로 인하여 높은 pH에서는 식 (4)의 형태로 산화물에 의한 수화착물의 형성으로 침전을 생성하게 되고 낮은 pH에서는 이온교환이나 표면 침착등에 흡착현상이 일어나게 될 것이므로, 환경이중파일에서 우수한 중금속이온의 제거제로서 활용될 수 있다고 판단된다.

3.3.2 납으로 오염시킨 시료의 현장모델링 실험

대상시료인 화강풍화토와 점토에 대해 각각 100mg/kg, 400mg/kg, 1000mg/kg의 기준으로 Pb를 혼합하였으며 그 초기농도는 두 시료의 함수비에 따라, 화강풍화토는 500, 2000, 5000 ppm이고 점토는 100, 400, 1000 ppm

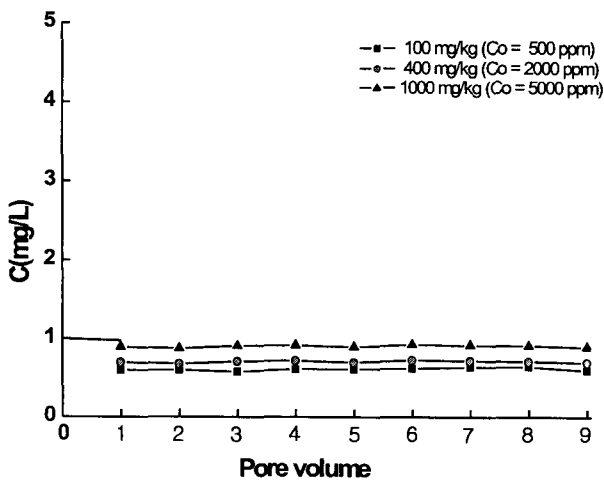


그림 16. 굴폐각-시멘트 배수보강말뚝 배출수의 Pb 이온농도 (화강풍화토)

이었다.

현장모델링 실험을 통해 상재압 1kg/cm²에서 배출된 수용액의 잔류오염농도를 측정된 결과는 그림 16, 17과 같다.

그림에서, 초기 Pb의 고농도에 비해 현장모델링 실험을 통해 배출되는 수용액의 농도는 1 ppm이하로 매우 낮게 측정됨을 알 수 있으며, 이는 Pb의 대부분이 굴폐각 충전층을 통과하면서 흡착기작동에 의해 제거된 것으로 판단된다.

Pb의 초기농도가 높을수록 배출수의 농도가 약간씩 높게 측정되고 있으나, 화강풍화토의 경우는 0.2 ppm 그리고 점토는 0.05 ppm 안팎의 매우 미세한 차이만을 보이고 있다. 따라서 굴폐각 충전층은 고농도의 Pb에 대해서도 양호한 제거능을 보인다고 판단할 수 있다. 한편, 이러한 중금속의 제거는 굴폐각의 흡착에 의한 영향 외에, 침전에 의한 부분도 일부 존재할 것으로 사료되지만 환경이중파일의 범위안에 존재가능한 침전물들은 그라우팅에 의해 고형화 시킬수 있을것으로 사료된다.

현장모델링 실험을 통해 Pb의 대부분은 정화되어 배출되는 것을 알 수 있었다. 현재, 모델링실험 종료후 대상시료와 굴폐각충전층에 잔존하는 Pb에 대한 용출실험을 실시하고 있으며 화강풍화토와 점토의 대상 모형지반의 조건에 따른 정화특성도 아울러 평가하고 있다. 추가로 획득될 연구결과도 조속한 시일내에 발표하고자 한다.

4. 결론

저투수성 오염연약지반을 처리하기 위하여 환경이중

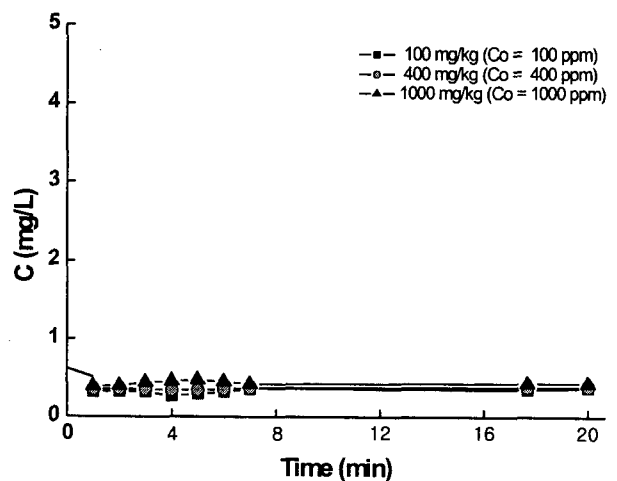


그림 17. 굴폐각-시멘트 배수보강말뚝 배출수의 Pb 이온농도 (점토)

파일 기술을 개발, 제안하였으며, 기술의 현장적용성을 평가하기 위해 환경이중파일의 배수, 강도, 정화특성을 일련의 실험을 통해 평가하였다. 본 논문에서 저투수성 오염지반을 환경이중파일기술의 적용을 통해 정화 및 연약지반개량 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 환경이중파일에서 검토한 배수, 강도, 정화에 관한 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장모델링 실험을 통해 환경이중파일의 배수효과를 확인할 수 있었다. 따라서, 제안된 환경이중파일은 배수를 촉진시키므로 연약지반의 처리에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 충전배수재로 활용한 굴폐각의 배수특성이 양호한 것에 의해, 건설대용재료의 활용가능성을 확인할 수 있었다.
- (2) 그라우팅에 의해 굴폐각과 시멘트로 혼합된 말뚝이 지반내 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 환경이중파일의 적용에 의해 지지력 증대효과를 기대할 수 있을것으로 판단된다.
- (3) 흡착실험을 통해 굴폐각은 높은 중금속 제거율과 지속시간을 나타냈다. 따라서, 환경이중파일을 사용함에 따라 중금속으로 오염된 지반의 정화가 가능한 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 오염된 시료를 대상으로 현장모델링 실험을 실시한 결과, 초기 오염농도 100mg/kg, 400mg/kg, 1000mg/kg에 대해 배출수의 농도는 거의 정확된 것으로 확인할 수 있었다. 따라서, 환경이중파일은 오염된 지반을 정화시키는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다

참 고 문 헌

1. 박상규, 권용삼, 이기호, 박준범 (2003), “굴폐각을 혼합한 시멘트 혼합체의 압축강도특성 연구”, 대한토목학회지, pp.129-138.
2. 박상규, 이기호, 박준범 (2002), “폐기물을 활용한 저투수성 오염 토양의 정화 및 안정화 기술 개발”, 한국지반공학회 2002 가을 학술발표회 논문집, pp.681-688.
3. 박홍재, 이봉현 (2001), “폐채첩과 굴폐각의 재활용에 관한 기초 연구”, 한국폐기물학회지, 제18권, 제4호, pp.319-325.
4. 윤정섭 (1999), “토양의 중금속 흡착특성과 EDTA, NTA를 이용한 중금속 제거효율에 관한 연구”, 서울대 석사학위논문.
5. 윤현석, 박준범, 이기호, 홍승철 (2002), “산업부산물에 대한 BTE의 흡착특성”, 한국폐기물학회지, 제19권, 제3호, pp.356-364.
6. 윤현석, 이기호, 박준범 (2002), “에틸렌렌에 의한 굴폐각 혼합공시체의 압축강도 변화특성”, 한국지반공학회지, 제18권, 제6호, pp.103-116.
7. 이기호 (2001), “폐기물을 포함한 이종혼합토의 강도·변형특성”, 한국지반환경공학회논문집, 제2권, 제2호, pp.33-39.
8. 이기호, 박준범 (2001), “굴폐각을 포함한 혼합토의 전단·변형 특성 평가를 위한 균질화법의 적용”, 한국지반공학회논문집, 제17권, 제4호, pp.183-190.
9. 정재동 (1998), “콘크리트 재료공학”, 진성각.
10. Barron, R.A. (1948), “Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells”, *Transaction, ASCE*, Vol.113, pp.718-754.
11. Benefield, L. D. and Morgan, J. M. (1990), “Chemical Precipitation”, *Water Quality and Treatment, Pontius, F. W. (Ed.) McGraw-Hill Inc., New York*, pp.641-708.
12. Blanchard, G., Maunaye, M. and Martin, G. (1984), “Removal of Heavy Metals from Waters by Means of Natural Zeolites”, *Wat. Res.*, 18, No.1501.
13. F.M. Lea. (1970), “The Chemistry of Cement and Concrete”, 3rd edn. *Edward Arnold(Publishers) Limited, London*.
14. Hashidate, Y.T. (1993b), “Application to Sand compaction pile and Characteristics of Sand Mixed with Crushed Oyster-shell”, *In: 29th Proceeding of Japan Geotechnical Society*, pp.717-720.
15. Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, Motoki Kazama, Kiho Lee and Lizhu Oyang. (2002), “Image-based Modeling and Analysis of Microstructures for Two-scale Problems in Geomechanics”, *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, pp.63-66.
16. Ruthven, D.M. (1984), “Principles of Adsorption and Adsorption Processes”, *John Wiley & Sons, New York*.
17. Upmeier, M.W. et al. (1997), “Use of Natural Clinoptilolite for the Optimization of Mineral Clay Liners for Waste Deposits”, *Prog. in zeolite & microporous materials studies in surface sci. & catalysis*, Vol.105, pp.1633-1639.

(접수일자 2003. 6. 21, 심사완료일 2003. 9. 29)