

반응벽체(Permeable Reactive Barriers) 워크샵 참가기

- 반응벽체를 이용한 지반환경 정화기술 -

박준범*, 김태식**

지난 4월 25일부터 27일까지 3일간 영국 북아일랜드 벨파스트(Belfast)의 Queen's University에서 제1회 반응벽체네트워크 워크샵(The 1st Workshop of the Permeable Reactive Barrier Network)이 개최되었다. 워크샵은 반응벽체의 연구와 개발에 주도적인 역할을 담당하고있는 미국환경청(US EnvironmentlaPA), 캐나다의 워터루대학(University of Waterloo)을 포함한 15개의 기관 및 단체의 연합체인 PRB Network에서 주최하였다(관련 자료 www.prb-net.org).

반응벽체란 지중(Subsurface)에 시공된 반응물질이 채워진 투과성 벽체를 말하는 것으로, 중금속, 유기화합물, 영양염류 등으로 오염된 지하수는 이를 통과하면서 흡착, 분해, 탈염되어 정화될 수 있다(박준범 등 1999) (그림 1).

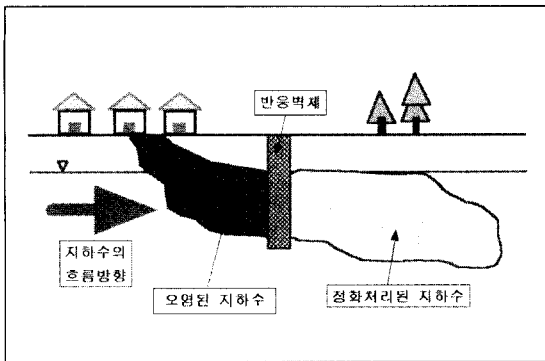


그림 1. 반응벽체의 개요도

반응벽체공법에 의한 지반정화는 (1)저가(Low Cost)의 비용으로 설치되어, (2)추후 운영 및 유지관리(Operation & Maintenance, O&M)비용이 적게 들면서도, (3)오염된 지반을 효과적으로 정화할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로, 앞으로 우리나라의 비위생매립지, 폐광산, 유기화합물, 특히 염화유기화합물(Chlorinated Organic Compounds), 그리고 중금속 등으로 오염된 지역에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

서울대학교 지반 및 지반환경연구실(geolab.snu.ac.kr 이 홈페이지 주소 앞에 www는 넣지 않는다)에서는 한라산업개발과의 산학협력으로 현재 반응벽체연구를 수행 중에 있는바, 그간의 연구결과를 발표하고, 최근의 연구동향을 파악하고자 본 워크샵에 참석하게 되었다. 서울대학에서는 본인과 박사과정의 이재원, 이승학, 한라에서는 한동선이사와 정일철대리가 참석하였다. 새로 개관한 멋진 인천공항을 출발하여, 일본 간사이공항을 거쳐 약 13시간의 비행 후 영국런던의 히드로공항에 도착하였다. 영국본토는 4월 말 현재 온통 구제역(Foot and Mouth Disease)파동으로 소, 돼지, 양들을 하루에도 수천, 수만 마리씩 도살 중에 있었다. 영국 농가의 주 수입이 축산업인 상황에서 광우병(Mad Cow Disease, vCJD or BSE)에 이은 구제역의 출현은 축산업을 거의 빈사상태에 빠뜨렸다. 영국정부는 농가가 보유하고있는 총기류를 압수하여, 도살에 반발하는 폭동과, 자포자기로 인한 자살을 막는 정책까지 실시 상태에 있었으니, 가히 그 심각성이 어느 정도인지 짐

* 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정

작이 간다. 또한, 가축을 얼마나 많이 태우는지, 태울 때 다이옥신이 발생할 것을 우려하여 이동식 다이옥신 측정장치까지 설치하고 소각 중에 있었다. 우리는 사실 영국에 오기 전에 무엇을 먹어야 할지 상당히 고민스러웠었다. 그런데 그 난리상태인 영국에서는 아무도 먹는 것에 신경 쓰지 않고 쇠고기도 잘들 먹고 있었다. 우리도 영국서는 영국인들처럼 아무 생각 없이 그냥 맛있게 고기를 잘 먹었다. 이럴 때 적절한 4자성어가 과연 무엇일까? 부화뇌동(附和雷同)? 글썄. 단지 토사곽란(吐瀉糞亂)이 되지 않은 것을 현재 감사하고 있다.

런던서 이들을 보내고, 아일랜드의 수도 더블린을 거쳐, 기차로 학회장소인 벨파스트(Belfast)로 이동하였다. 벨파스트가 어디인가? 바로 그 아일랜드의 신페인(Sinn Fein)당의 독립군(Irish Republican Army, IRA)의 활동이 가장 활발하였던 지역으로 악명(?) 높은 곳이다. 벨파스트의 택시운전기사에게 폭탄테러 등 때문에 이곳에서 살기가 겁나지 않느냐고 물으니, 웃으면서 하는 말이 '서울서 살기는 겁나지 않느냐'는 것이다. 여기서 서울소식이라고는 매일 화염병 등과 연관된 시위, 데모, 파업 등이니 얼마나 살벌하다고 생각하였겠는가. 대답이 공색하여 내년엔 2002월드컵이 우리나라에서 열린다는 말만 얼버무리고 말았다. 그나마 여기영어는 정말 황당하기 그지없다. 미국서 공부하였지만 별 도움이 되지 않는다. 나에게 직접 이야기할 때는 좀 팬찮지만, 자기들끼리 서로 주고받는 말은 정말 '여기 영어 정말 영어 맞아?'라고 생각이 들기 딱 알맞다.

학회는 Queen's University(www.qub.ac.uk)(그림 2)에서 25일부터 시작되었다. 13개국으로부터 약 200여명이 참가한 학회로, 유럽의 참가자가 가장 많았고, 미국과 캐나다에서 20명 가량이 왔고, 아시아에서는 유일하게 한국에서만 참가하였다. 참가자들의 면면중에는 현재 미국서 PRB연구가 가장 활발한 연구소인 EPA Kerr lab(www.epa.gov/ada)의 Robert Puls박사, Gillham 교수와 함께 PRB의 공동개발자라고 할 수 있는 캐나다의 Stephanie

O'Hannesin, 유럽최초의 PRB의 현장설치를 주도한 영국의 Robert Klain교수, 독일에서 PRB를 상용화하여, 군사시설오염지역 등에 성공적으로 적용시키고있는 Hermann Schadd 박사 등이 있었다. 이들은 워크샵을 통하여 자신들의 연구결과와 현장 경험을 상세하게 설명하여 주었다. 참가자들의 전공을 살펴보면 과연 PRB라는 것이, 아니 지반환경이라는 것이 얼마나 다양한 전공을 필요로 하는지를 보여준다. 참가자들은 환경공학자, 지질학자, 지하수문학전공자, 화학자, 토양화학자(Soil Chemist), 생물학자(미생물), 생화학자 등이 많았고, 이상하게 본인과 같은 지반공학(지반환경)자는 우리 외에는 한 명도 없는 것 같았다(이 사실은 후에 확인되었다). 대개의 지반 오염문제에는 이와 같이 network 구성이 매우 중요하다고 본다. 결코 독불장군 식으로 본인만이 해결할 수 있다는 착각은 빨리 버릴수록 해답은 가까워진다고 보면 맞는 것 같다. 이런 관점에서 볼 때, PRB연구를 각 전공의 network 형성을 통하여 접근한다는 것은 매우 바람직하다고 느껴졌고, 본 워크샵의 기본 취지도 이에 바탕을 두고 있었다.

첫날인 25일에는 두 건의 현장견학이 있었다. 현장에 대한 개요설명 및 질의 응답 후 버스로 약 40분 가량 이동하여 첫 번째 현장인 Portadown에 도착하였다. 한참 PRB 및 유도벽(funnel) 시공이 진행중인 상태로(PRB의 시공법을 본 글의 후반부에 정리

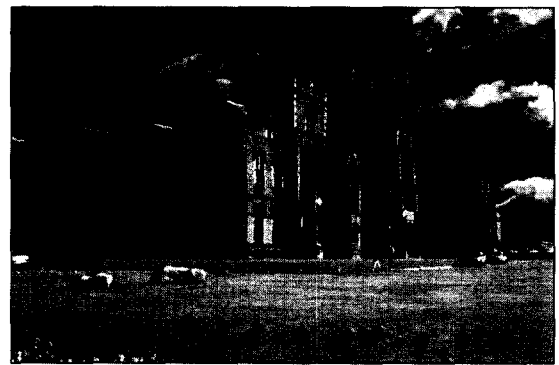


그림 2. 북아일랜드 벨파스트의 퀸스대학
(The Queen's University of Belfast)

PRB 시장의 확대 가능.

- (2) Robert Puls (USEPA, Kerr Lab, Ohio, puls.robert@epa.gov) - 미국의 경우 PRB로 처리하는 물질은 염화유기화합물 (Chlorinated Hydrocarbons)과 중금속이 주류를 이룸. 최근의 미국의 PRB연구는 반응물질(Reactive Materials)의 가격을 낮출 수 있는 물질의 개발과, PRB와 타 정화방법의 연계 적용법에 초점을 맞추고 있음(현재 서울대에서 수행중인 연구도 반응물질의 경제성과 확보의 용이성에서 이와 맥을 같이 하고 있다고 생각한다. 현재 서울대학교의 지반환경연구실에서 사용하는 반응물질 중에는 제철/제강 슬래그(Waste Iron Metals)와 제올라이트(Clinoptilolite)도 있다. 반응벽체의 사용 중에 microbial fouling, 혹은 precipitation등으로 발생할 수 있는 막힘 현상(clogging)은 현재까지 보고된 사례가 거의 없음. 미국 노스캐롤라이나의 Elizabeth City의 TCE와 Cr⁺⁶오염지역에 사용되었던 반응벽체도 총 공극의 60%이상이 CaCO₃와 FeS로 채워졌으나, 사용에 장애를 초래할 정도의 투수계수저하는 발생하지 않았음. Cr⁺⁶의 농도는 5 ppm으로부터 0.05 ppm으로 감소.
- (3) Stephan Jefferis (영국 University of Surrey, s.jefferis@surrey.ac.uk) - PRB의 Cell형 설치방법 소개. 북아일랜드에서 방문하였던 두 곳(Portadown, Monkstown)의 현장 소개. 비용적인 측면에서 Monkstown은 총 37만 파운드(1파운드는 대략, 미화 2달러)가 소요되었는데, 세부적인 사항은 현장조사와 설계에 35,000, 영가철 15,000, 건설비 240,000, 시공관리 45,000, 3년간의 모니터링 35,000 파운드가 소요되었음. PRB를 하나의 Subsurface Reactor의 개념으로 보고, 오염원의 제거와 제어(Control)의 용도로 사용설명.

- (4) Stephanie O'Hannesin (캐나다 Environmental Technology사(www.eti.ca), sohannesin@eti.ca) - 캐나다 워터루대학의 최초 PRB 개발 참여자. 1985년 한 학생이 우연히 철(Fe)이 TCE의 반감기를 10¹⁰ hr에서 수 시간으로 줄이는 현상을 발견한 이후 워터루 대학에서 B.Gilham교수와 J.Cherry교수의 주도로 PRB연구를 추진하게된 배경 설명. 1994년 미국 캘리포니아의 Sunnyvale은 최초의 PRB 상용설치 지역(사용 재료는 영가철). 현재까지 막힘 현상 없이 성공적으로 사용되고 있다고 보고. 현재까지 미국 및 캐나다 등에서 사용되고 있는 상용의 PRB중에서도 (Organic, Inorganic 포함) 막힘 현상은 보고되지 않고 있다. 미국과 캐나다의 경우 PRB 설치비용은 미화 평균 45만 불 정도 소요.
- (5) Hermann Schad (독일 IMES GmbH, hermann.schad.imes@t-online.de) - 독일의 세계최장 450m의 PRB 소개. 반응벽체 내부를 전기비저항(Electrical Resistivity)을 이용한 물리탐사기법으로 조사한 바, 반응물질의 밀도가 다를 경우, 즉, 바닥쪽으로 갈수록 밀도가 높고, 상부층은 밀도가 낮다고 보고. 채움(Packing)문제 제기. (이에 대하여 본인은, 어떤 물질을 벽체 상부로부터 투여하여 채우게 되면, 낙하높이의 차이에서 발생하는 에너지의 차로, 바닥은 다짐과 구속응력의 증가로 단위중량이 증가하고, 상부는 이와는 반대의 현상이 발생한다고 설명하였다. 즉, 매우 간단한 다짐(Compaction)문제와 직결된다고 설명하였으나, 안타깝게도, 참석자 중에는 지반공학자(Geotechnical Engineers)가 아무도 없었다.)

서울대와 한라산업개발에서는 공동으로 두 편의 논문을 발표하였다. 첫 번째 논문은 'Chlorinated Ethene Reduction by Waste Metallic Iron'으로,

40mesh의 Cast Iron Filing, 제강 부산물인 Hot Rolling Mill(HRM) Sludge 와 Iron Casting 과정에서 발생하는 Grind Pricipitates(GP) Dust를 사용하여 PCE와 TCE를 제거하는 과정을 설명하였다. 두 번째 논문은 'Estimating the Applicability of Clinoptilolite for Removing Cation Contamination in Groundwater'이다. 여기서는 제올라이트를 사용하여, 중금속((납/구리) 및 영양염류(암모늄)를 제거하는 실험을 소개하였고, 벽체의 지반공학적(Geotechnical) 문제를 다루었다. 이 밖에도, 매우 흥미로운 논문 중에는 노르웨이의 JORDFORSK 연구소의 Grete Rasmussen (grete.rasmussen@jordforsk.no)이 발표한 논문 (Vegetated Permeable Barriers Treat Creosote Contaminated Groundwater)으로 식물을 PRB에 심어서 유기화합물(Creosote과 phenol)을 정화하는 방법으로, 이는 PRB와 Phytoremediation (박준범 등 1999)의 복합적인 방법이라 할 수 있겠다. 정말 훌륭한 아이디어라 할 수 있겠다.

PRB를 사용하고자 하는 사람들이 가장 관심 있어 하는 사항은 바로 PRB의 사용연한(Longevity)이다. 이는 궁극적으로는 PRB의 경제성에 관한 문제로, 이를 결정하는 것은 반응물질의 반응효율 유지와 막힘 현상의 방지이다. 아직까지 상용으로 설치되었던 PRB가 막힘 현상 때문에 사용하지 못한 사례는 보고되지 않았으나, 일반적으로 시간이 지나면서, 반응효율의 감소와 간극의 막힘 현상은 어느 정도 감지가 되고 있다. 반응효율은 영가철을 이용한 염화유기 화합물의 제거의 경우 pH에도 크게 영향을 받으며 (pH가 증가하면서, 일반적으로 반응효율이 떨어짐), 막힘 현상은 독일의 Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM) (tamas.meggyes@bam.de)에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 보고에 의하면, 18일만에 영가철이 완전히 투수계수를 잃게되는 상황도 실험실에서 관찰되었다고 한다. 앞으로의 PRB의 연구방향도 반응물질의 개발과 더불어, 반응물질의 반응성유지와 막힘

현상에 관한 연구가 필요하다고 하겠다. 현재의 PRB설계는 이에 대하여 정확한 사용연한을 예측하지 못하고 설치 사용되는 실정이다. 일반적으로 시공시에 반응물질이 오염지역을 정화하는데 충분한 양이 주입되고, 시간 경과에 따른 막힘 현상도 크게 영향을 주지 않는 것으로 보고되어, 한마디로 이 부분은 가장 중요한 부분임에도 불구하고, 정확한 예측모델이 아직 제안되고 있지 않고 있다. 바로 이 부분은 현장의 물리화학적, 생물학적, 수리지질학적인 문제 등 모든 상황을 고려하여야 하므로 모델개발이 쉽지가 않은 상황이다. 앞으로의 PRB연구에 있어서 반드시 짚고 넘어가야 할 부분이라 생각한다.

이들간의 학회는 퀸스대학에서 주최한 저녁만찬으로 마무리되었다. 교내의 채플에서 만찬을 하였는데, 천장이 매우 높은 실내에서 식사를 하는 경험도 색다른 느낌이었다. 이번 제1회 PRB Network Workshop은 최근의 PRB의 연구와 개발동향에 관한 전문가들의 설명과 토론을 통하여, 나름대로 문제점과 발전방향을 짚어본 행사였다고 생각한다. 앞으로 매년 개최되어, PRB연구 Leading Group의 교류의 장으로 역할을 기대하여 본다.

다음에는 일반적인 반응벽체의 시공법에 관한 내용을 첨가하였다.

반응벽체의 시공 기법

반응벽체의 설치 방법은 크게, 연속벽체방식과, 오염대 유도벽을 이용한 방식(Funnel and Gate System)으로 나눌 수 있다. 연속벽체의 경우, 벽체 전체, 혹은 일부에 대해서 반응물질이 설치되고, 오염대 유도벽을 이용한 방식의 경우는 불투수성의 벽체(Funnel)를 설치하고, 오염지하수대가 반응물질이 설치된 곳(Gate)으로 흘러가도록 유도하는 방법이다.

일반적으로 지반의 조건이 불균질할 경우, 투수계수가 일정하게 되지 않아 반응매체에 무리를 일으킬 수 있는데 이를 방지하기 위해 피 그래블(Pea Gravel)을 설치한다. 피 그래블은 반응매체 주변의 투수성을 증가시키고, 지하수의 흐름을 균일하게 하며, 또한 반응물질에서 유입과 유출을 관찰하는데 균일한 조건을 제공하는 역할을 한다. 즉, 주상형 투수 실험(Column Permeability Test)에 시료의 양 끝단에 설치하는 Porous Stone의 역할과 같다고 할 수 있다. 일반적으로 반응벽체의 설치 깊이는 위로는 계절에 따른 지하수위의 변화와 반응물질의 감소를 고려하여 지하수위보다 2ft정도 위까지 설치해야 한다. 그리고, 반응벽체내의 반응물질과 반응하지 않고 반응벽체 아래로 흐르는 것(Underpass)을 막기 위해 대수층 1ft아래까지 설치가 되어야 한다. 만약 대수층의 연속성이 확실하지 않아 오염대가 다른 곳으로의 흐름이 우려될 경우 반응벽체 아래에 토목섬유나 콘크리트로 바닥을 별도로 시공해야 한다.

1. 반응벽의 설치

1.1 트렌치(Trench)의 굴착

백호(Backhoe)와 클램셸(Clamshells)과 같은 굴착 장비를 사용하여, 트렌치를 파고 반응벽체를 설치하는 방법이다. 굴착 후 반응물질의 설치 시간 동안의 트렌치의 안정성을 확보하기 위해 임시로 강철 시트 파일을 설치한다. 또한 이 강철 시트 파일은 반응벽체 안에서 반응물질과 피 그래블을 구분하는 역할을 하기도 한다. 강철 시트 파일을 대체해서 트렌치의 안정성을 확보하기 위해 바이오폴리머 슬러리(Biopolymer Slurry)를 사용하는 경우가 있다. 바이오폴리머 슬러리는 생분해가 되며, 트렌치의 투수성에 거의 영향을 미치지 않는 특징을 갖고 있다. 이 바이오폴리머에 관한 기술적인 사항은 Stephanie O'Hannesin의 Envirometal Technologies Inc.(www.eti.ca)에서 상용화를 통하여 확보하고 있다. 또한, 트렌치의 굴착깊이에 따라 다른 굴착 장

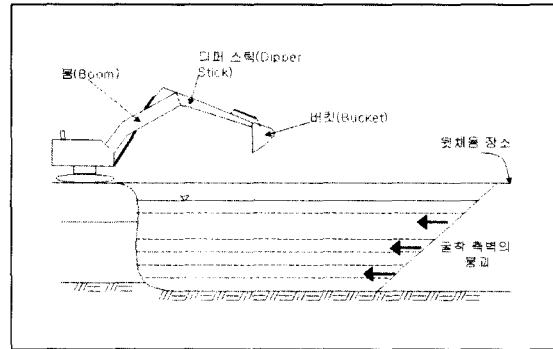


그림 4 백호를 이용한 슬러리 컷오프 월의 굴착

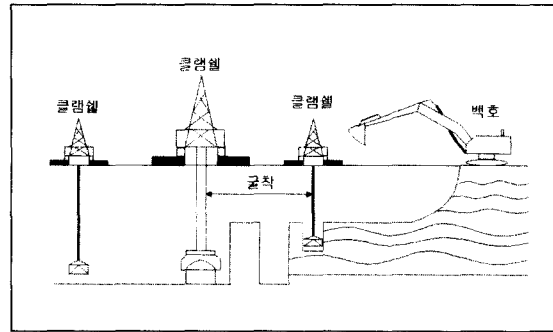


그림 5 클램셸을 이용한 슬러리 컷오프 월의 굴착

비를 사용한다. 굴착 깊이가 30ft정도까지의 깊이로 얇은 경우는 백호를 사용하지만, 그 이상의 깊이는 클램셸을 사용하여 굴착을 한다. 그림 4, 5는 백호와 클램셸을 이용하여 굴착하는 모습의 개략도 이다.

1.2 우물통을 이용한 설치

(Caisson-Based Emplacement)

우물통을 이용한 설치 기법은 우물통을 지중에 근입시킨 후, 우물통 내부의 흙을 모두 굴착해 내고 우물통 내부에 확보된 빈 공간 안에 반응매체를 집어넣는 시공법으로 이미 건설현장에서 기초공사의 한 방법으로 많이 사용되고 있다. 반응물질을 채워 넣는 작업이 끝나게 되면 우물통을 뽑아내게 된다. 우물통 기초 시공법에는 개방식, 조립식, 강철 우물통을 사용하며, PRB에서는 주로 우물통 직경의 크기가 8ft보다 작은 우물통을 사용한다. 우물통의 직경의 크기가 작으면 작을수록 지중 내로 쉽게 근입이 가능하

며, 유지보수하기가 쉬워진다. 우물통 직경의 크기가 8ft 보다 크게 되면, 반응 물질을 설치하는데 있어서 비경제적이 되며, 지하수가 통과하는데 있어서 제약을 받게 된다. 따라서 우물통의 직경이 8ft 이상이 되는 경우는 오염대가 넓게 퍼진 경우, 오염정도가 심한 경우, 지하수의 흐름 속도가 빠른 경우, 오염대 유도벽 체를 이용한 다중 우물통 방식(Funnel-and-Gate System with Multiple Caisson Gates)의 경우에만 사용하게 된다. 우물통 기초 설치 시공 공법은 지주작업이 필요 없으며, 굴착해나가는 데 인부가 필요 없고, 아주 작거나 큰 반응물질을 저렴하게 설치할 수 있다는 장점이 있는 반면, 우물통의 근입 공정이 주변 지반조건에 민감하다라는 단점이 있다. 만약 지반 내에 자갈 층이 있을 경우, 우물통이 근입되지 않을 수 있고, 압밀(Consolidation)이 잘 일어나는 연약한 토층이나 자갈 층의 경우 우물통을 다시 뽑아내는 공정에서 어려움을 겪을 수 있다. 우물통 근입시 우물통 주변의 흙에 다짐효과가 나타나 반응물질 주변의 투수성을 떨어뜨릴 수 있다. 또 우물통을 45ft보다 깊이 근입시키는 것은 어렵다.

1.3 맨드럴을 이용한 설치

(Mandrel-Based Emplacement)

이 방법은 중공 강철 샤프트(Hollow Steel Shaft)나 맨드럴을 사용하여, 지중에 수직의 빈 공간을 만들고, 그 공간에 반응물질을 채우는 방법이다. 공간이 만들어지면, 그 안에 반응물질을 채우는 방법은 두 가지를 들 수 있다. 한 가지는 트레미 튜브(Tremie Tube)를 사용하여 단순히 반응물질을 안으로 넣는 방법이다. 원하는 깊이에 도달하게 되면 맨드럴을 추출되고 Drive Shoe와 반응물질은 남게 된다. 또 다른 방법은 반응물질과 결합된 워드레인(Wick Drain), 지오멤브레인이나 지오파브릭(Geofabric)을 설치하는 것이다. 이 방법은 경제적이며(45ft 깊이 기준으로 노동과 장비에 대한 비용을 포함 \$7/ft²), 준설토를 발생시키지 않아 처리해야 할 위험한 오염물질을 줄이는 장점이 있다. 또한 직

경 1in의 입자까지 설치할 수 있다. 반면 맨드럴의 크기인 2in × 5in으로 인하여 반응물질의 크기에 제한이 있고, 맨드럴이 지중에 근입할 때 주변지반을 다지는 효과가 발생하여 투수계수가 떨어질 수 있는 단점이 있다. 또한 원하는 반응물질의 수직성이 확보되지 않을 수도 있다.

1.4 연속식 굴착(Continuous Trench)

연속식 굴착기(Continuous Trencher)를 사용하여 반응물질을 설치하는 기법이다. 이 방법은 굴착깊이의 제한 때문에 백호나 클램셸만큼 일반적이지는 않지만, 35~40ft 깊이까지 굴착이 가능하다. 1ft에서 2ft정도의 좁은 폭을 굴착할 수 있으며, 굴착즉시 반응물질이나 불투수성의 HDPE (High-Density Polyethylene) 라이너를 설치할 수 있다. 그림 6는 연속식 굴착기의 개략도이다. 굴착기는 물이 채워져 있는 경우 배수작업이나 시트 파일 없이도 작업이 가능하며, 굴착토를 거의 생성시키지 않고 작업속도가 빠르다는 장점이 있다. 미국 노스캐롤라이나의 엘리자베스시티 현장에서 150ft × 2ft × 26ft를 하루에 공사한 예가 있다. 이외에도 지반 교란이 적어 민감한 지역에서 작업하기에 이상적이라는 장점도 있다. 단점으로는 얇은 깊이에 부적합하며, 습윤 상태이고

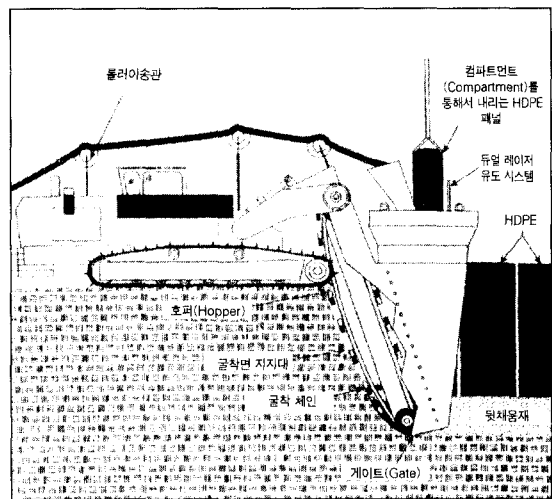


그림 6. 연속 굴착기

(높지에 가까운 지형) 압밀되어있지 않은 지반에 대해서는 굴착토를 지상으로 옮기는데 어려움이 있다. 또한 큰 자갈이 있는 경우 굴착에 문제가 발생할 수 있다. 비용은 이동에 대한 비용은 제외시킨 설치비용이 \$5~12/ft² 정도이다.

2. 오염대 유도벽의 설치 기법

반응물질이 채워지는 반응벽과는 구별하여 때로 부가적으로 불투수성의 벽체를 반응벽의 날개부위에 설치해야하는 경우가 있다.(예, Funnel and Gate System) 불투수성의 벽체를 설치하는 방법에는 일반적으로 두 가지 방법이 있다. 하나는 강철 시트 파일을 이용한 컷오프 월(Sheetpile Cutoff Wall)이고 다른 한가지는 슬러리 트렌치컷오프 월(Slurry Trench Cutoff Wall)이다. 이러한 것들은 오염된 지하수가 반응벽체 내의 반응물질을 통과하지 않고 반응벽체 밑으로 이동하는 것을 막는 역할을 하거나, 설치된 반응벽체를 지지하는 역할을 한다. 자세한 설명은 2.1와 2.2에서 설명하기로 한다.

2.1 강철 시트 파일 벽체

강철 시트 파일 벽체는 일반적으로 지반 굴착 공사에 사용하는 방법이다. 굴착이 진행되는 동안 트렌치가 무너져버리거나 지하수의 흐름을 막기 위해서 사용한다. 시트 파일의 수명은 대략 7~40년 정도이며, 강철 시트파일의 수명은 흙의 산소 함유 정도나, 오염물질의 부식시키는 정도에 따라 다르다. 시트파일의 깊이는 40ft정도이며, 용접을 할 경우 더 깊은 깊이까지 설치가 가능하다. 그러나 흙에 자갈이 많이 포함되어있는 경우 부적합하며, 파일 삽입이 불가능할 수도 있다. 시트파일의 강도와 보존성에도 불구하고 지반환경적인(Geoenvironmental) 면에서는 파일의 연결부에서의 결합 때문에 사용이 제한적이다. 워터루 대학에서는 연결부의 연속성을 확보하기 위해서 연결부 밀봉식 시트파일 (Sealable-Joint Sheetpile)을 개발하였다. 연결부 밀봉식 시트파일

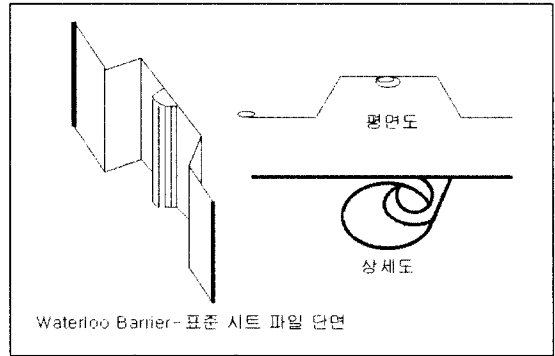


그림 7 Waterloo Barrier 시트 파일

의 개략도는 그림 7과 같다. 강철 시트 파일의 단점은 시트 파일을 설치하는 동안 발생하는 마찰로 인해 연결부가 약해지거나 손상을 입을 수 있으며, 특히 깊은 깊이에 적용시킬 경우 용접면에서 손상을 입을 가능성이 있다. 연결부 밀봉식 시트파일의 경우는 캐나다에서만 생산이 되어 일반적으로 사용하는 데는 문제가 있다.

2.2 슬러리 월

슬러리는 지중 설치 벽중에 오염된 지하수의 흐름을 유도하는 방법 중 가장 일반적인 방법으로, 굴착 벽면에 필터 케이크(filter cake)를 형성하여 트렌치의 모양을 유지시켜주는 역할을 한다. 먼저 백호나 클램셸을 사용하여 트렌치를 굴착한 후에 슬러리를 채워넣는데, 보통 시멘트-벤토나이트나 흙-벤토나이트를 사용한다. 슬러리 월의 설치 현장 조건이 중요하며, 현장에 따라 슬러리 월의 형태를 결정해야 한다. 또한 투수성, 변형성, 효율성이 슬러리 월의 형태의 적합성과 내구연한을 결정하는 중요한 조건이 된다. 슬러리 월은 다양한 형태로 사용이 가능하지만, 특별히 오염대 유도벽체를 이용한 방법중 우물통을 이용한 시공방법에 적합하다.

2.2.1 흙-벤토나이트 슬러리 월

흙-벤토나이트를 함유하고 있으며, 투수성이 낮고, 가격이 저렴하며, 여러 가지 화학 물질로 오염된

경우에 적합하다. 시공순서는 먼저 트렌치를 원하는 깊이에 원하는 길이로 굴착 후 물과 벤토나이트의 혼합물을 트렌치에 밀어 넣는다. 굴착토는 물, 벤토나이트와 섞어 사용이 가능하여 별도의 처리비용이 들지 않는다. 흙-벤토나이트 슬러리의 배합비율은 대략 물95%, 벤토나이트 5%정도로 하나 가변적이고, 교반 작업시 충분히 균일하게 교반이 되게끔 해야한다. 현장 시공 시 주의할 점은 슬러리내의 수분이다. 슬러리내 수분이 충분하여 트렌치의 경사를 따라 흐를 수 있어야 하나, 함수비가 너무 높아 슬러리가 지나치게 흘러 진행중인 굴착을 방해해서는 안 된다. 이와는 반대로 함수비가 적어 충분히 흐르지 않을 경우, 슬러리가 포개지기 시작하고, 빈 공동을 만들어 낮은 투수성 확보에 문제를 일으킬 수 있다.

위에 나타난 흙-벤토나이트 슬러리 월의 문제점들은 세심한 시공을 하면 극복할 수 있는 문제이다. 그러나 이 방법은 현장에 흙, 벤토나이트와 물을 교반 시킬 충분한 작업공간 내지는 혼합교반기가 확보가 안 된다면 적용시킬 수 없는 시공방법이다. 그림 8은 흙-벤토나이트 슬러리 월 시공의 개략도를 나타낸다.

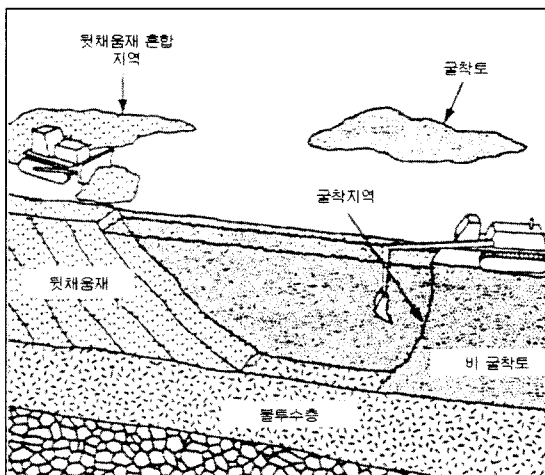


그림 8 흙-벤토나이트 슬러리 트렌치 단면도

2.2.2 시멘트-벤토나이트 슬러리 월

시멘트-벤토나이트 슬러리 월의 일반적인 시공 원

리와 방법은 흙-벤토나이트 슬러리 월과 같다. 흙-벤토나이트 슬러리 월에 비해 현장에 별도의 교반작업을 할 공간이 필요하지 않다는 장점이 있다. 따라서, 작업공간이 제한되어 뒷채움재를 교반할 공간이 없을 경우 사용하며, 슬러리의 벤토나이트, 시멘트의 배합비율은 대략 벤토나이트 4~7%, 시멘트 15~30%정도가 적당하다. 시멘트-벤토나이트 슬러리 월은 교반시 굴착토 대신 시멘트를 사용하여 가격이 비싸며, 굴착토를 별도의 비용을 들여 처리해야 하는 단점이 있다. 또한 흙 입자를 거의 포함하고 있지 않기 때문에 투수성이 크고, 오염물질을 통과시키는 경향이 있다.

이 장에서는 반응벽체의 현장 설치 기법 중 반응벽체의 설치 기법과 Funnel-and-Gate System의 불투수성 벽체를 설치하는 방법에 대해서 간단히 살펴본다. 현재 일본에서는 반응물질을 설치하는 기법중 위에서 설명한 우물통을 응용한 방법을 사용하여 시공한 사례(Taisei 大成 建設)가 있다. 일본에서는 앞서 설명한 우물통을 이용한 설치 방법과 달리, 지하수가 지나가는 곳에 여러개의 현장타설 Drilled Shaft를 엇갈리게 말뚝처럼 설치하고 반응물질을 채워 넣는 방법을 성공적으로 시공 현재 사용하는 사례를 보고하고 있다. 각 반응벽 말뚝이 서로 교차하지 않으므로, 이 방법의 경우 각각의 reactive cell이 미치는 영향범위를 알고 있어야 한다는 전제조건이 만족되어야 한다. 그러기 위해서는 수많은 실험과 모델링을 거쳐야 할 것이다. 이 방법에 대하여 유럽이나 북미측에서는 오염물질의 Bypass문제로 채택을 권장하지 않고 있다. 불투수성벽체의 시공도, 최근에는 슬러리벽에 HDPE등의 토목섬유재를 보강한 복합벽체(Composite Wall)의 사용이 늘고 있다.

국내에서 아직 반응벽체를 대규모로 시공한 사례가 없으나, 반응벽체의 최대 장점인 저렴한 시공/관리 비용과, 뛰어난 오염제거 효과로 볼 때, 앞으로 적용이 활발히 될 것이라 예상이 된다. 따라서, 외국의 공법들을 배우고 소규모의 여러 시험 시공을 통하

여 기술을 축적해야 한다고 판단된다. 또한 앞선 일
본의 경우에서처럼 우리 나라의 현장 조건에 맞게끔
적절히 개량을 하는 노력을 해야할 것이다.

참고문헌

1. 이재원, 김재영, 박준범 (1999) 매립장 침출수로 오염된
지반정화를 위한 반응벽체 기법 소개, 대한토목학회지 제
47권 제 3호, pp. 33-47
2. 박준범, 이승환, 최명인, 이승학 (1999) 식물정화기법
(phytoremediation)을 이용한 지반오염의 정화, 지반
공학회지 Vol.15.,No.7. pp.15-24
3. US army corps of Engineers, February (1997)
Design guidance for application of permeable
barriers to remediate dissolved chlorinated sol-
vents,
4. US Environmental Protection Agency (1998)
Permeable reactive barrier technologies for conta-
minant remediation,
5. US Environmental Protection Agency (2000)
Permeable reactive barriers for inorganics,

한국지반공학회 논문집 정기구독 신청 안내

회원 여러분의 안위를 기원합니다.

1999년 1월부터 우리학회의 간행물이 학회지와 논문집으로 분리 발간되었습니다. 학회지는 매월 무가
로 회원들께 배포되며, 논문집은 유가로 1년에 20,000원의 구독료를 납부하고 받아 보실 수 있습니다.
필요하신 회원은 다음 사항을 참고하셔서 논문집 구독 신청을 하시기 바랍니다.

다음

- 구 독 료 : 1년 6회, 20,000원
- 신청기한 : 수시(단, 신청시점이 구독료 납부 회계시점임)
- 입 금 처 : 한국주택은행 (예금주: 한국지반공학회) 534637-01-002333
- * 입금 후 반드시 학회 사무국(02-3474-4428, 7865)으로 연락하여 확인하시기 바랍니다.