

연직 차수벽을 이용한 폐기물매립지 침출수 오염 제어 사례 연구

이 재 영 · 정 문 경* · 고 재 만**

서울시립대학교 환경공학부

한국건설기술연구원 토목연구부*

(주) 일광 지오라인, 기술 연구소 **

A Case History of Confinement of the Contaminated Landfill Using a Vertical Barrier

Jai-Young Lee, Moonkyung Chung*, Jae-Man Koh**

Dept. of Environmental Engineering, Univ. of Seoul

**Constructed Facilities Division, Korea Institute of Construction Technology,*

***DWM Research center, Il Kwang Geoline Inc.,*

ABSTRACT

This paper presents a case history of remedial action adopted for contaminated groundwater in a landfill. The objectives of the projects are: (1) to effectively confine contaminated groundwater with an economically reasonable means, (2) to prevent further contamination of soil by collecting and treat the contaminant, and (3) to assure the environmental safety of the landfill during its operating period. Reported are the process from site investigation, through design and construction of an appropriate remedial action, to the monitoring of the selected confinement system. In view of the results of site investigation, deep soil mixing cutoff wall using the DMW(deep soil mixing cutoff wall) method and specially produced HEC soil stabilizer were used for the construction of deep soil mixing cutoff wall. For rock foundation with sever fractures, chemical grout curtain with urethane was installed. The monitoring results to date indicate that the selected vertical barrier performed satisfactorily.

Key words : contaminated, groundwater, landfill, DMW, HEC, cutoff wall, vertical barrier

요약문

본 논문은 매립지의 침출수 유출로 오염된 지반 및 지하수의 효과적인 처리 방법 중의 하나인 연직 차수벽의 시공사례를 다루고 있다. 연직 차수벽의 설치 목적은 오염된 지하수의 이동을 경제적이고 효과적으로 차단하고, 차단후 차수벽 내부의 오염된 지하수를 회수하여 침출수 처리장에서 처리함으로써 추가적인 지반오염을 방지하며, 매립장의 잔여 이용 기간동안 매립장의 안전 운영의 기초를 확보하는 것이다. 현장조사의 단계에서 부터, 공법의 선정과 설계, 시공, 시공품질의 확인에 까지 일련의 과정을 보고하였다. 오염원과 오염의 원인 및 범위를 파악한 후, DMW 공법과 HEC 고화제를 이용하여 심층 혼합 차수층을 설치하였다. 균열이 심한 암반층의 차수를 위해서는 우레탄을 주입하여 차수층을 형성하였다. 조사기간 동안의 현장 모니터링 결과에 의하면, 토사와 암반층에 걸친 심층 혼합 차수층의 설치로 본 현장의 오염 처리는 현재를 기준으로 만족스러운 것으로 판단되었다.

주제어 : 매립지 복구 공법, 침출수 유출, 지하수, 매립지, 연직차수벽, 심층교반차수벽, 우레탄 그라우팅

1. 서론

국내에서 1990년대 이전에 조성된 대부분의 매립장은 현재의 관련법에서 정한 차수시설이 설치되지 않은 불량 매립지로서, 침출수에 의한 주변 지반과 지하수의 오염이 발생하게 된다. 또한 차수시설이 설치된 위생매립지에서도 차수시설의 부실 혹은 파괴로 인한 주변환경의 오염이 발생한다. 오염된 주변 환경의 복원과 오염물질 이동의 완전한 차단은 불가능하고 비경제적이며 환경에 가해지는 위험의 수준의 측면에서 필요하지 않을 수도 있다⁽¹⁾. 미국의 예를 들면 오염토양의 복원, 정화사업에서 어느 정도 효과를 거둔 것이 사실이나, 지나치게 소모적인 법적 공방, 비현실적인 목표 설정, 정부 주도정책의 효율한계 등의 이유로 고비용과 비효율을 감소한 결과 1990년대 초부터 비판을 수용, 현실적인 방향으로 선회하게 되었다⁽²⁾. 수용 가능한

현실적인 대안으로서 오염지역에 물리적인 차수벽을 설치하여 오염물질의 추가적인 이동을 억제하고, 상황이 허락하면 차수벽 내부의 오염물질을 점진적으로 처리하는 방안을 들 수 있다.

연직 차수벽(혹은 차단벽)은 지중에 투수성이 매우 낮은 물질을 설치하여 폐기물과 오염된 지하수를 가두고 외부 지역의 지하수가 유입되는 것을 차단하는 목적으로 설치된다. 차수벽의 재료와 시공법에 따라 흙-벤토나이트 슬러리월(slurry wall), 흙-석회 혹은 흙-시멘트계 슬러리월, 연직 지오멤브레인 차수벽, 강널말뚝 차수벽, 화학적 그라우트재, 심층 고화 차수벽 등이 사용된다. 다양한 종류의 연직 차수벽에 대하여 세계적으로 축적된 최근까지의 기술은 문헌에서 찾을 수 있다^{(3), (4)}. 연직차수벽의 선택은 차수벽의 기능, 배열, 설치심도 및 연장, 요구되는 투수계수의 상한치, 지반의 조건, 지하수의 위치, 경제성과 시공성을 포함한 현장조

건 등을 함께 고려하여 이루어진다.

이 중 심층 혼합 공법(deep soil mixing)은 당초 지반의 강도 증진과 변형 억제를 목적으로 사용되었으며, 오염지반에서 연직 차수벽으로도 그 적용이 확대되었다. 지반에 교반용 날개가 달린 축을 유압으로 진입시키면서 동시에 지반 내에 시멘트, 석회, 특수 고화제 등의 고결제를 분체 혹은 슬러리 형태로 주입한 후, 흙과 강제 교반하여 연속적인 벽체를 형성하는 공법이다. 심층 혼합 공법은 현장 흙의 치환작업 없이 원상태에서 차수벽이 형성되므로 현장의 오염된 흙을 굴착, 제거한 후 차수벽이 설치되는 슬러리월 형태의 차수벽 공법에서와 같은 오염된 흙의 처리 및 이송 과정이 필요 없고 이로 인한 이차적인 환경 위험이 없다. 또한 설치된 차수벽의 두께가 진동 빔 차단벽(vibratory beam cutoff wall)과 같은 형태의 공법보다 두꺼워 설치후 안정성에 대한 추가적인 신뢰도를 높일 수 있다. 시멘트를 이용한 심층 혼합 공법으로서 심층 고화 차수벽(deep soil mixing cutoff wall)의 최근 발전된 개선 사항은 Taki 등⁴⁵⁾에 있다. 이 공법은 지반환경 부분에서 오염지반의 현장 고화 처리 공법(in-situ solidification and stabilization)으로도 사용될 수 있는데, 보통 포틀랜드 시멘트가 아닌 특수한 시멘트계 고화제를 사용할 경우 중금속이나 휘발성 유기 화합물(VOCs)로 오염된 지반 및 매립장 침출수로 오염된 지반의 고화처리에도 효과적으로 사용될 수 있다⁴⁶⁾.

불량 매립지를 포함한 오염지반의 처리는 그 연구와 실행에서 지난 10년간 북미와 유럽, 일본에서 활발히 이루어졌다. 우리나라에서는 1996년 토양환경보전법의 시행으로 법적 기틀이 마련됨에 따라 관심과 실천이 증대할 것으로 예상되나 오염지반 처리에 대한 목표, 기준, 관리 등에 구체적 사항이 미비하고 동시에 보고된 현장 적용 사례가 과부족한 상태이다. 연직 차수벽과 같은 오염물질의 현장

차단법(in situ containment)의 적용 및 시행결과의 승인을 위한 제도 마련의 전제로서, 또한 기존 기술의 보완과 개선을 위해 선발대 격의 시공사례의 보고는 매우 중요하다. 연직 차수벽의 성공적인 현장 적용을 위해서는 다음과 같은 요소가 만족되어야 한다. (1) 목적과 제반 조건에 대한 구체적인 인식, (2) 적용 가능한 공법의 평가 및 선정, (3) 최적공법의 설계, 시공, 시공품질관리의 기준 마련, (4) 시공후 모니터링 기법 마련. 이를 위해서는 대상 지역의 수리지질학적 특성, 지반조건, 오염원의 특성과 오염지역의 범위 등에 대한 사전조사가 선행되어야 한다.

본 논문에서는 국내 Y 지역에서 발생한 매립장의 오염 이동을 제어하기 위한 연직 차수벽의 시공 사례를 보고하고 있다. 매립지에서 유출된 침출수로 인해 오염된 지하수의 문제를 해결하기 위해 시도된 현장 처리 공법의 시공사례를 통하여 현장조사, 공법의 선정과 설계와 시공, 공사품질의 관리 및 공사후 현장 모니터링에 이르는 일련의 과정을 설명하고자 한다.

2. 현장 조사

본 현장은 평지에서 가까운 산자락의 하부에 위치하였고, 매립지를 조성할 당시 부분적으로 성토가 이루어졌다. 매립지가 조성되기 전에는 논으로 사용되었던 것으로 조사되었다. 당초 위생매립지로 조성되었으나 매립지 주변 지역에서 침출수의 유출 징후가 발견되어 침출수의 이동을 차단하기 위한 연직차수벽을 매립지의 입구 쪽, 즉 매립지의 하단 제방에서 일정 위치 떨어진 평지에 설치하게 되었다.

2.1 지표하 조사

현장 여건상 연직 차수벽을 설치할 수 있는 공간은 매립지 제방과 평행한 방향으로 약 50m 정도이

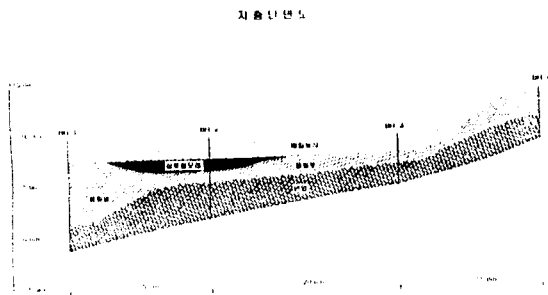


Fig. 1. Cross Section View of the Site

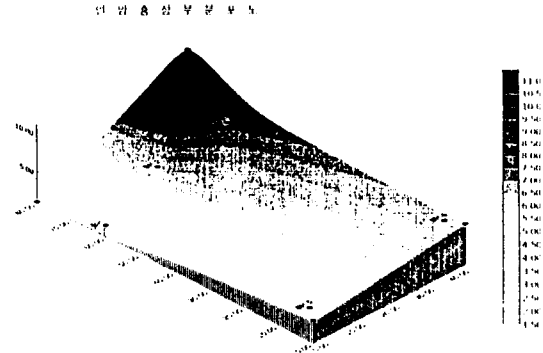


Fig. 2. Schematic Drawing of the Ground above Rock

고, 차수벽 예상 설치 위치를 중심으로 모두 6개소에서 시추 조사를 실시하였다. 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 지표면으로부터 성토층과 원지반 표토, 실트질 흙, 풍화토, 풍화암, 연암의 순으로 지반이 구성되어 있다. 조사 위치에 따라 흙의 깊이는 1.7m~4.4m이며 그 하부는 풍화의 정도가 심한 암반으로 연결되어 있다. 매립장의 계곡부에 해당하는 BH-1과 BH-5에서 성토 및 원지반 표토층이 가장 두꺼웠다. 암반층은 제방을 바라보고 우측의 BH-4 시추공에서 진입 도로가 있는 좌측의 BH-1 시추공 방향으로 존재하는 것이 확인되었

다. 시추공마다 시료를 채취한 결과 연암층은 암편 형태로 코아(core)가 회수되었으나 회수율은 극히 저조하고 층 상부는 절리 및 균열이 매우 발달한 것으로 판정되었으며 하부로 갈수록 그 정도가 점차 강해지는 경향을 보였다. 지하수의 흐름방향을 파악하기 위해 시추조사가 완료된 후 시추공별로 공대수위를 측정된 결과 제방을 기준으로 제방에서 가까운 BH-1번~BH4번 시추공보다 BH-5~6번 시추공에서 더 높게 나타나 지하수의 흐름 방향을 예측할 수 있었다. Fig.1과 Fig.2에 지반의 단면 구성과 연암층 상부의 구조를 나타내었다.

Table 1. The Identification of Subsurface from Boring Tests

공 번	성토 및 표토	실트질흙	풍화토	풍화암	연 암	천공최대깊이	지 하 수 위
BH-1	2.2 m	-	1.5 m	4.8 m	2.5 m	11.0 m	GL -2.0 m, 성토층
BH-2	2.1 m	1.3 m	1.0 m	-	3.6 m	8.0 m	GL -2.2 m, 원지반 토사
BH-3	1.8 m	-	1.1 m	-	2.1 m	5.0 m	GL -1.8 m, 성토층
BH-4	0.5 m	-	-	2.2 m	2.3 m	5.0 m	발견되지 않았음
BH-5	4.8 m	-	-	1.2 m	2.0 m	8.0 m	GL -3.5 m, 성토층
BH-6	0.5 m	1.2 m	-	0.6 m	2.2 m	6.0 m	GL -3.4 m, 풍화암

2.2 오염도 조사

수질오염조사

침출수 및 주변 계곡수의 수질과 토양의 오염도를 조사하였다. 수질에 대해서는 수질환경보전법에서 규정한 수질오염공정시험법을 따랐으며, 토양에 대해서는 토양환경보전법에서 규정한 토양오염공정시험방법에 따라 시험하였다. 수질시험을 위해서 처리장 침출수를 1개소에서 2회 채취, 시험하였고, 현장에 설치되어 있는 4개의 지하수 검사정과 지하수 관로 중 1개소에서 시료를 채취해 2회 시험하였다. 지하수 검사정의 위치를 보면 한 개의 검사정이 매립지 제방 바로 아래 침출수 처리장 부근에 위치하여 지하수 오염 발생시 가장 기준점이 되며 나머지 세 개의 검사정은 매립지 하부 제방으로부터 서로 다른 거리에 위치한다. 토양의 오염도 조사를 위해 매립지의 하부에 위치한 제방의 하단 주변에서 2개소, 매립지 상부 복토층 1개소 그리고 상단 진입도로 부분 1개소에서 각 2회씩 시료를 채취, 분석하였다. 오염도 조사를 위한 시료채취 위치

를 Fig. 3에 나타내었다.

침출수에 대한 수질분석결과의 일부를 Table 2에 나타내었다. 표의 결과는 1998년 1월과 2월에 침사지로 유입되는 지점에서 채취한 침출수에 대한

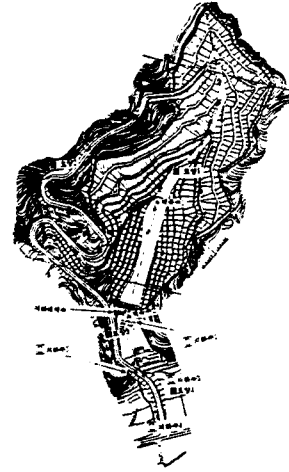


Fig. 3. Locations of the Sample Collection for Investigating Contamination

Table 2. Some Results from Leachate Analysis

회 차 항 목	1 차	2 차	평균	회 차 항 목	1 차	2 차	평균
pH	7.83	7.92	7.87	TCE	ND	ND	ND
COD	3.937	2.517	3.227	PCE	ND	ND	ND
NO ₂ -N	ND	8.09	4.04	Cr+6	ND	ND	ND
NO ₃ -N	ND	ND	ND	T-Cr	0.118	0.201	0.159
NH ₃ -N	2.106	1.848	1.977	CN	ND	ND	ND
T-N	2.496	2.256	2.376	Hg	0.003	0.002	0.0025
T-P	168	24.0	96	As	0.039	0.022	0.03
Cl ⁻	2.743	3.892	3.317	Cd	0.049	0.095	0.072
색 도	1.676	1.637	1.656	Cu	0.056	0.085	0.07
대장균(개/ml)	> 300,000	> 38,000	169,000	Phenol	2.79	2.04	2.41
n-Hexane	69.6	36.6	53.1	Pb	ND	ND	ND
PCB	ND	ND	ND	Fe	26.0	34.7	30.3
유기인	ND	ND	ND				

수질분석결과이다.

한편 지하수검사정의 오염물질 농도 변화를 파악하기 위하여 1997년도에 당 매립지 관리사무소가 해당지역 도 보건환경연구원에 4회에 걸쳐 의뢰 분석한 바 있어 그 결과를 참고하였으며, 본 현장 조사 기간 중인 1999년 1월과 익년 1월에 두 차례에 걸쳐 별도의 시험을 하였다. 현장의 지형과 수리지리학적 정보를 고려할 때 침출수 유출의 개연성이 높을 곳으로 판단되는 2개 지점에서 지하수 배제관으로 유출되는 물에 대해서 분석하였다. 지하수 검사정과 지하수 배제관에서 채취한 시료에 대하여 pH, COD_{Min}, NO₃-N, Cl 등 21개 항목을 분석한 결과, 지하수 검사정의 경우 수중의 유기물질량을 나타내는 COD는 3번 검사정에서의 값이 최소 10.9mg/l ('98년 2월), 최대 23.2mg/l ('97년 12월)로서 계절에 관계없이 높게 검출되었으며, 모든 검사정도 마찬가지로 높게 검출되었다. Cl-은 매립지의 위치가 산간 지역임에도 불구하고 대체로 높게 검출되었다. 질소화합물도 대체적으로 높게 검출되었으나, 반대로 Cr⁶⁺ 등 중금속류는 검출되지 않았거나 극소량 검출되었다. 매립지 침출수의 특성 성분이라 할 수 있는 COD, Cl-, 질소화합물 등이 높게 검출된 점으로 미루어 매립지 주변 지하수의 오염원인은 직접적으로 매립지의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다.

지하수 배제관으로부터 유출되는 물의 경우 각 항목별 평균 농도는 COD 123.6mg/l, NH₃-N 37.4mg/l, T-N 59.7mg/l, Cl- 292mg/l, 색도는 1,109도로서 지하수 검사정 수질 보다 더 높게 검출되었다. 이것은 매립지의 차수시설이 그 기능을 충분히 유지하지 못해 침출수가 유출되었고 그 결과 지하수가 오염되었던 것으로 판단된다.

토양오염조사

매립지에서 채취한 시료에 대한 분석 결과 토양 오염도는 미미하거나 무시할 정도의 낮은 수치를

나타내었다. 조사된 네 개의 지점에서의 오염정도는 상대적으로 서로 달랐으나 모든 경우 토양환경법에서 규정한 토양오염대책기준은 물론 토양오염 우려기준보다도 훨씬 낮은 수치를 나타내었다. 즉, 주변 토양이 크게 오염된 징후는 발견할 수 없었다.

3. 오염된 지하수의 제어

3.1 평면 및 단면 계획

본 현장에서 오염처리공법의 적용 목적은 (1) 오염 지하수의 수평 이동을 차단하는 것과 (2) 차단된 지하수를 전량 회수하여 침출수 처리장으로 이송시켜 토양의 점진적인 오염을 막고, (3) 매립지를 잔여 매립기간 동안 안전하게 사용하는데 목적이 있다. 따라서 각 오염원 별로 대책을 수립하여야 하는데 매립장 하부 지하수 배제로의 현 상태로 볼 때 지반으로 침출수의 유출이 추정되는 바, 연직 차수벽을 설치하여 오염된 지하수의 이동을 직접적으로 차단하고⁽⁷⁾, 차단벽이 있는 경우에 오염된 매립지의 정비방안⁽⁸⁾에 나타난 방법을 근거로 지하수 관로로 유입되는 지하수는 별도의 집수정을 설치하여 전량 침출수 처리장으로 유입시키기로 하였다. 한편 균열이 심한 암반층을 통한 오염된 지

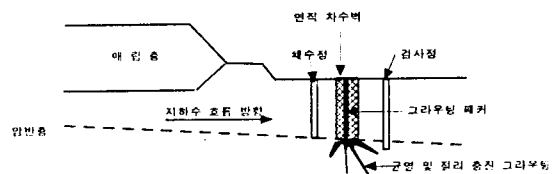


Fig. 4. Typical Cross Section View of Deep Soil Mixing Cutoff Wall Adopted at the Field

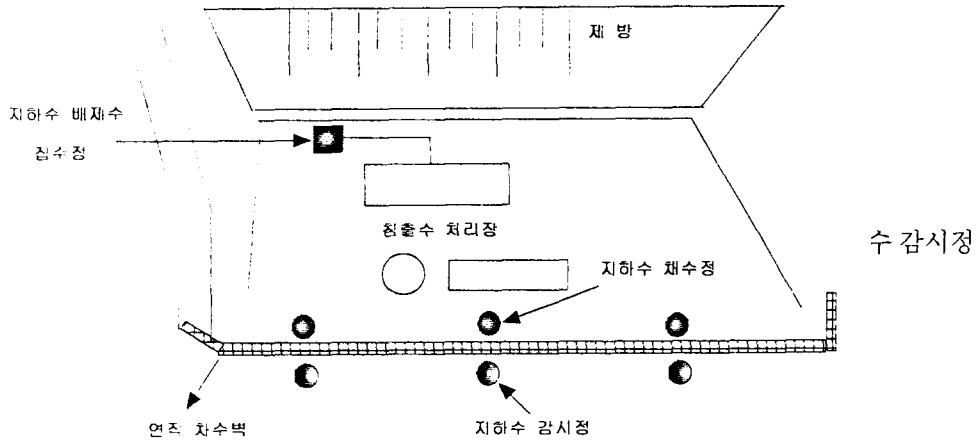


Fig. 5. Layout of Deep Soil Mixing Cutoff Wall to Prevent the Transport of Contaminated Groundwater

하수의 이동을 막기 위해 암반층에 적용 가능한 수직 차수벽의 설치가 필요하게 되었다.

3.2 지하수 제어용 연직 차수벽의 설계와 시공

연직 차수 공법의 결정

여러 가지 다른 종류의 수직 차수벽 공법 중 우선 토사층에 대해서는 현장의 토사 심도가 깊지 않고 그 경우 시공성, 경제성, 공법의 안정성이 뛰어난 심층 혼합 차수벽을, 암반층에 대해서는 균열을 막아 지하수의 흐름을 경제적이고 효과적으로 막을 수 있는 약액 주입 공법을 사용키로 결정하였다. 심층 혼합 차수벽의 설계 목표로서 투수계수 1×10^{-7} cm/sec 이하, 일축압축강도 5 kg/cm^2 이상으로 결정하였다. 차수벽의 설치시 가장 중요한 기준은 투수성으로서 위의 값은 매립장의 차수층에 적용되는 상한값이다. 심층 혼합 차수벽 공법 중 본 현장에 적용한 공법은 DWM으로 명칭되는 공법이다. DWM 공법에서 사용하는 고결재는 시멘트계로 분류될 수 있는 HEC 고화제이다. HEC 고화제는 국내 자체 개발품으로서 저발열 시멘트계를

주원료로 하며 원지반 흡과의 화학적 반응을 통해 강도의 증진과 투수성의 저하가 이루어진다. 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 장기 강도의 증가 효과가 우수하며 오염된 토양 혹은 염분이 많은 바닷물이 있는 조건에서도 흡의 개량에 효과적으로 기능을 발휘한다⁽⁹⁾. DWM 공법에 사용되는 심층 혼합장비는 같은 용도의 장비와 유사하나 몇가지 차이점이 있다. 지반에 주입하는 혼합재의 보다 낮은 균질 분산과 일정한 주입율의 유지를 위해 교반용 날개를 일반적 심층혼합장비의 경우와 달리 수평날개 대신에 약 15도의 경사를 주었다. 그 결과 의도한 혼합효율 개선 뿐 아니라 교반시 슬라임(slime)의 과다 발생을 줄일 수 있었다. 또한 혼합재 주입시 주입압을 $7-15 \text{ kg/cm}^2$ 의 비교적 낮은 범위로 유지하여 균질한 혼합이 되도록 하였다.

암반층에 대한 약액 주입 공법에서 주입재료로서 우레탄을 사용하였다. 우레탄 주입 공법은 암반의 파쇄대, 공동, 터널의 균열, 압입 볼트의 코킹 그리고 균열부 누수 방지 등의 목적으로 광범위하게 사용된다.⁽¹⁰⁾ 사용한 우레탄은 3차원 망상 구조의 수소 결합성 수지 발포체로서, 안정된 발포특

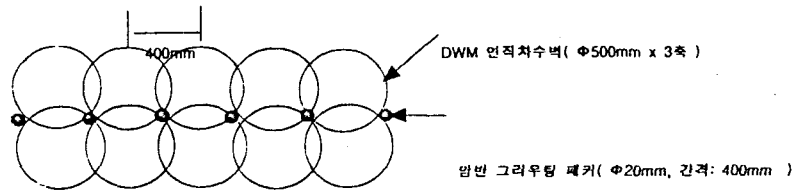


Fig. 6. Detailed Layout of Deep Soil Mixing Columns

성, 비수축성, 고점착성이 특징이다. 물과 반응하여도 물성의 변화가 없다. 또한 점도 저하용인 휘발성의 첨가제를 사용하지 않아도 유동성이 매우 뛰어나 토립자나 암반의 미세한 틈에도 주입이 가능하여 충실한 충전 작업이 가능하다. 우레탄의 주입시 우레탄은 중합반응, 물첨가 반응, 발포 반응, 가교 반응 순으로 연차적인 반응이 일어난다.

심층 고화 차수벽의 고화제 함량 결정

실내 배합 시험을 위하여 연직 차수벽 설치 대상 지점에서 현장 흙 시료를 채취하였다. 지표면으로부터 약 2m를 굴착한 후 무게 약 40kg의 블록 시료를 채취하여 물성실험을 하였다. 현장흙의 자연함수비는 11.4%이고 단위중량은 1.86ton/m³이다. 200번체(=0.074mm)를 통과한 시료의 함량은 36%이며, 통일분류법에 의해 SM으로 분류되었다.

HEC 고화제의 혼합비 결정에는 HEC 고화제에 대한 축적된 실험결과와 경험이 이용되었다. 개략적인 설계 잣대로서 200번체 통과량이 20%이상이고 SM으로 구분되는 흙과 섞어 1×10⁻⁷cm/s이하의 투수계수 기준을 만족하기 위해서는 9% 이상의 혼합이 필요하다. 여기서 혼합비는 건조한 흙시료

의 무게에 대한 무게 백분율이다. 만약 대상 흙이 침출수로 오염된 경우에는 필요한 혼합비가 13%로 증가하여야 한다. 본 현장에서는 차수벽이 시공 후 지속적으로 침출수와 접촉할 것이므로 배합비를 13%로 결정하였다. 결정된 배합비로 현장에서 채취한 흙과 섞고 최적함수비 조건에서 표준 A다짐으로 다짐한 시료에 대하여 일축압축시험과 투수시험을 실시하였으며, 실험결과는 Fig. 7과 Table 3에 나타내었다. 투수실험은 28일간 양생을 거친 시료에 대해 시행하였다.

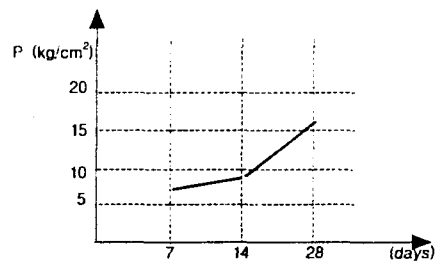


Fig. 7. Unconfined Compressive Strength of Soil mixed with HEC as a function of Curing Time

Table 3. Summary of Strength and Hydraulic Conductivity Tests

(단위 : P kg/cm²)

7일				14일				28일				투수 계수 시험
1	2	3	평균	1	2	3	평균	1	2	3	평균	
6.43	6.58	6.56	6.52	9.34	9.65	9.78	9.59	15.34	15.28	14.86	15.16	7.28E-11cm/sec

DWM 연직 차수벽의 시공

DWM 공법에서 사용한 장비는 KOBELCO사의 중량 125 톤 규격의 심층 파일 드라이버와 직경 500mm의 3축 교차 오거로 구성되어 있으며, 본체의 높이는 22.7m이다. 운영 보조 장비로서 20 톤 규격의 자동계량기와 자동 공급 장치가 장착된 Batch Plant가 있다. 공사 전 최대 높이 22.7m의 파일드라이버의 이동과 운전시 방해가 될 수 있는 고압선로와 같은 지상 시설물의 확인과 그에 대한 적절한 조치가 선행되었다. 또한 매립장의 세륜 시설용 용수 관로, 상수관, 침출수 배출구 등을 포함한 지하 시설물에 대한 사전 위치 파악 및 적절한 조치도 함께 이루어졌다. 본격적인 심층 고화 차단벽의 시공에 앞서 측량을 실시하여 기준선을 결정하고 깊이 0.5m, 폭 0.5m의 터파기를 실시한 다음 중심선을 표시한 후 오거의 관입 예정 위치에 표시말뚝을 설치했다. 이는 시공중 슬라임이 발생하여도 오거 관입 위치를 정확히 찾아 시공함으로써 연속벽체의 핵심인 중첩과 횡방향 연속성을 유지하기 위함이다. 본 시공에서 오거의 회전속도는 0.5m/분의 저속이었으며 고화재 분사는 10kg/cm² 이하의 압력으로 시행하였다. 교반은 오거의 관입과 인발시 각 1회씩 2회 실시하였다.

시공품질 관리기준의 설정과 시행빈도는 구조물의 종류와 시공 규모에 따라 다르나 일반적으로 심층혼합공법의 기준인 심층혼합기동 50개당 1회 또는 개량토량 500 m³ 에 1회를 기준으로 삼았다.

현장 혼합 교반 처리 즉시 개량체가 굳기 전에 2 개소에 지름 150mm의 PVC 파이프를 지하 3 m

깊이로 매입하여 시료를 채취하여 이를 이용하여 공시체를 제작하였고 일정기간 동안 수증양생 후 압축강도시험과 투수시험을 실시하였다. 심층 혼합 기동이 형성되고 완전히 성형된 후 그 상태에서 현장투수시험을 실시하는 것이 차수벽의 성능을 가장 정확히 구할 수 있으나, 본 현장에서는 시공의 규모와 용이하게 적용할 수 있는 현장투수시험의 부재를 이유로 현장에서 혼합 시공된 대로의 시료를 이용한 몰드 시료로 투수계수를 측정하였다. 실험 결과를 Table 4에 나타내었다.

암반층에서 약액 주입공의 설계와 시공

그라우팅은 액상 물질을 지층이나 암반에 주입, 고화시켜 강도 조절과 지하수의 흐름을 차단하는 목적으로 사용된다. 전술한 바와 같이 본 현장의 암반층은 균열과 절리가 발달하여 있으며 지하수위가 G.L.-2.0 m 내외로 존재하고 있어 암반의 그라우팅이 필요할 것으로 판단되었다. 시공에 앞서 설계시 주입량을 결정하여야 하는데 단위 깊이당 주입량, Q(m³)의 계산은 아래와 같다⁽¹⁰⁾.

심도 1m 당 주입량은 일반적인 그라우트량 산정 공식인 $Q = \pi/4 \times D^2 \times n \times p$ 을 사용하였으며, 여기서 D(m)는 그라우트의 유효 반경, n(%)은 간극율, p(%)는 충전율이다. 간극율과 충전율은 토질의 특성에 따라 문헌에 나타난 값을 현장에 적용하였다. 예를 들어 표준관입시험의 타격횟수인 N값이 30 이상인 풍화암에서 간극율은 30~40%의 범위에 있으며, 이때 충전율과 주입율은 각각 82.5%, 24.7~33%의 값을 가진다.

Table 4. Results of Strength and Hydraulic Conductivity Tests on The Field Prepared Samples

시료 번호	시 험 항 목	측 정 치	시 험 방 법
1 번	일축 압축강도(28일)	2.4N/mm ² (24.1kgf/cm ²)	KSF 2405-95
	투수 계수 (k)	5.9 × 10 ⁻⁶ cm/sec	KSF 2322-95
2 번	일축 압축강도(28일)	2.1N/mm ² (21.1kgf/cm ²)	KSF 2405-95
	투수 계수 (k)	4.8 × 10 ⁻⁶ cm/sec	KSF 2322-95

본 현장에서 단위 길이당 주입량은 $0.166 \text{ m}^3/\text{m}$ 로 산정되었으며, 암반층에 우레탄 삽입을 위한 패커(packer)는 길이 1m로 결정하였다. 우레탄의 총 소요량에는 계산된 필요량에 5%의 소모율을계상하였다.

우레탄 주입시 주입압력은 차수용임을 저압으로 자연스럽게 침투시키는 것이 바람직하기 때문에 이때의 권장치인 $1\text{--}10 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 중 $4 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 으로 결정, 사용하였다⁽¹⁰⁾.

또한 DWM 연직 차수벽이 7일정도 양생이 된 후에 상부에 피아노선과 페인트를 이용하여 천공 위치를 표시하고 램머 드릴을 이용하여 지름 80mm의 패커를 삽입할 수 있도록 천공을 하였다. 천공된 구멍으로 패커 삽입이 끝나면 압축기를 가동하여 주입을 하는데 공기 밸브를 서서히 열어 주입압이 $4 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 이하로 일정하게 주입한다. 주입이 더 이상 되지않으면서 공내 압력이 $25 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 정도가 될 때 밸브를 닫는다. 시공 순서는 충분한 공극 충진을 위해 일련의 시공순서에서 격변호로 시공하였다. 예, 1 - 3 - 5 - 7 - 2 - 4 - 6 - 8 공 ...의 순. 충전 작업이 끝나면 약 7일간 발포가 충분히 될 때까지 기다린 후 상부로 돌출된 패커의 두부 정리를 한다. 시공후 개량체의 지수 효과를 점검하기 위하여 동일한 규격의 패커를 이용하여 양단이 막힌 상태에서 얇은 바늘로 우레탄을 주입하여 그 효과를 검증한다. 또한 시공 후 연직 차수벽 전 후면에 Fig. 8에 나타난 바와 같이 검사정을 설치하여 약 1개월 가량 지하수의 거동을 점검함으로써 오염물질의 이동 여부를 확인하였다.

5) 오염 지하수의 채수와 지하수 검사정의 설치 및 모니터링

본 현장은 전술한 바와 같이 매립장의 침출수가 지하수로 유입되었던 것이 핵심적인 문제였던 만큼 지하수의 수평방향 이동의 차단이 가장 중요한 공

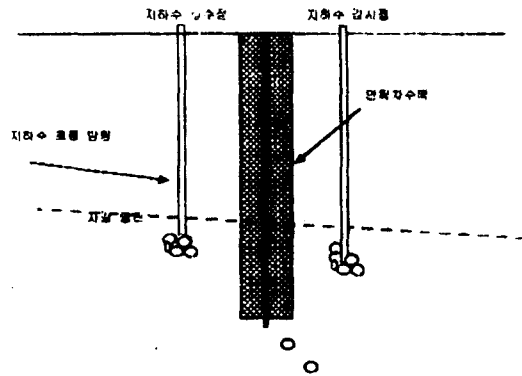


Fig. 8. The Collection of groundwater and monitoring wells.

정이었으며, 이렇게 차단된 오염 지하수는 전량 채수 후 침출수 처리장으로 이송하는 것으로 계획하였다. 채수정은 지름 350mm PE 유공관을 깊이 8 m로 자갈을 충전한 다음 내부에는 3 마력의 자동 수위 조절 장치와 내부식성을 지닌 수중 펌프를 매설하였다. 설치 장소는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 연직 차수벽에서 약 30cm 정도 떨어진 곳에 총 3개소 설치하여 여기에서 집수되는 지하수를 24 시간 동안 채수할 계획을 수립하였다.

또한 연직 차수벽의 하류 쪽에도 지름 350mm의 PE 유공관을 바닥에 깊이 8m로 자갈을 충전한 지하수 검사정을 설치하여 지하수의 거동을 감시하였다. 지하수위와 침출수 오염 지하수위는 측량용 표척을 넣어 30일간 점검하였으며 그 결과를 보면 지하수 집수정에 설치된 펌프를 가동하기 전 지하수위가 지표면으로부터 깊이 1.0~2.0m에서 펌프가 가동된지 3일 후부터 집수정에서의 지하수위는 지표면으로부터의 깊이 5.0m 이하를 상시 유지하였고 검사정은 3일째 지하수를 완전 제거한 이후 27일 간 지하수위 측정이 거의 불가능하였음을 미루어 볼 때 차수벽을 통한 지하수의 이동은 거의 없는 것으로 판단되었다.

4. 결론 및 고찰

본 논문은 매립지에서 유출된 침출수로 인해 오염된 지하수의 문제를 해결하기 위해 시도된 현장 처리 공법의 시공사례를 보고하였으며 현장조사, 공법의 선정과 설계와 시공, 공사품질의 관리 및 공사후 현장 모니터링에 이르는 일련의 과정을 설명하였다. 연직 차수벽의 일종인 심층 혼합 차수벽을 DMW 공법으로 시공하였고 이때 사용된 혼합재는 저발열성 시멘트와 기타 물질로 구성된 고화제이다. 본 시공사례 연구로부터 다음과 같은 몇가지 결론을 제언하고자 한다.

1. DMW 공법으로 설치한 심층 혼합 차수층으로 매립지의 침출수로 오염된 지하수의 이동을 효과적으로 막을 수 있었다. 설치된 심층 혼합 차수층의 투수계수는 매립지 차수층의 투수계수 기준을 만족하였으며 균열이 심한 암반층의 차수를 위해서는 우레탄을 그라우팅하여 차수벽을 형성하였다.
2. 공사후 차수벽의 품질관리 및 오염방지효과의 확인은 장기간 동안의 모니터링에 의존할 수 밖에 없다. 그러나 본 시공사례에서 적용한 바와 같이 차수벽 상,하부의 집수정의 수질 검사를 통해서 단기적으로 공사후 차수벽의 부실시공으로 인해 생길 수 있는 오염물질의 지속적인 이동 여부는 확인 할 수 있다고 본다.
3. 매립지 주변 토양과 지하수 오염 문제를 해결하기 위한 방법으로서 연직 차수벽 공법 등의 차단공법(confinement)은 오염된 환경의 완전한 복원 혹은 차단에 비추어 경제적이고 현실적으로 실현 가능한 방법중 하나라 할 수 있다.
4. 오염지반의 처리 문제는 현장의 조건, 적용 대상 공법의 시공성과 경제성, 처리 목표 및 한계 등의 복잡한 변수가 동시에 작용하는 만큼 일률적인 표준공정의 제시가 쉽지 않으며 성공적인

처리를 위해서는 철저하고 세밀한 현장조사가 선행되어야 하며 이를 통한 합리적인 방안의 선택이 필수적이다.

5. 우리나라에서는 현재까지 오염지반의 처리와 관련한 시공사례가 많지 않고 더욱 보고된 사례는 매우 희박한 상황이다. 관련기술의 보완 및 개선, 제도의 구체화 및 합리적인 기준의 설정과 운영을 위해 향후 이와 유사한 사례의 연구 및 발표가 매우 중요하다.
6. 침출수와 접촉하게 되는 심층 혼합 차수층의 내구성은 향후 지속적으로 연구되어야 할 것이다. 일반적으로 허용될 수 있는 혼합재의 종류와 배합비 등이 보편화되기까지는 시멘트 계열의 혼합재를 사용하는 경우라면 본 시공사례에서 시도한 것과 같은 보통 포틀랜드 시멘트가 아닌 화학적 내구성이 뛰어난 특수 시멘트나 고화제를 사용하는 것이 안전할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Mitchell, J.K. and Rumer, R.R. " Waste Containment Barriers : Evaluation of the Technology" , In Situ remediation of the Geoenvironment. J.C. Evans eds., Geotechnical Special Publication No. 71, ASCE. (1997).
2. 황대규, 정문경. "미국의 시행착오로 본 국내 토양오염 대책의 제언". 토목, 대한토목학회. Vol. 46, No. 8, pp. 6-15, (1998).
3. Rumer, R.R. and Ryan, M.E., eds. Barrier Containment Technologies for Environmental Remediation Applications. John Wiley & Sons, New York. 170 pp (1995).
4. Rumer, R.R. and Mitchell, J.K., eds. Assessment of Barrier Containment Technologies - A Comprehensive Treatment for Environmental Remediation Applications. Proc. of the Intl.

- Containment Technology Workshop, NTIS Publication No. PB96-180583, 437 pp.
5. Taki, O., Takeshima, S., and Yang, D.S., "Pollution containment Using Soil-Cement Mixed Walls", Chemical Contamination at Shoreline Sites, HAZMACON 90, Anaheim, CA, April 17-19, (1990).
 6. 윤춘경, 유찬, 이창노, 노광화, HEC 고화재를 이용한 오염지반의 고결 처리에 관한 연구, 연구보고서, 건국대학교 부설 농업자원개발연구소, (1990).
 7. 한 정상, 지하수 환경과 오염, 박영사 출판사, pp 872-885 (1998).
 8. 장 익근, 이남훈 등, 농어촌 지역 소규모 쓰레기 매립지 계획 설계 기법 개발 연구(부록), 농어촌진흥공사 pp79-84, (1998).
 9. 일본 시멘트 협회, 지반 개량 매뉴얼, 기보당 출판사, pp 117-47, (1994).
 10. 토목공법 연구회, 그라우팅 편람, 창우 출판, pp 45- 48, (1999).