

오염지하수의 확산방지를 위한 대체 혼합차수재의 적용에 관한 연구

김 윤 희* · 임 동 희 · 이 재 영

*수도권매립지관리공사, 서울시립대학교 환경공학부

A Feasibility Study on the Deep Soil Mixing Barrier to Control Contaminated Groundwater

*Yun Hee Kim · Dong-Hee Lim · Jai-Young Lee

**Sudokwon Landfill Site Management Corp.
Dept. of Environmental Eng., University of Seoul*

ABSTRACT

There is a lot of method to manage the insanitary landfill but vertical cutoff walls have been widespreadly used and were installed into the subsurface to act as a barrier to horizontal groundwater flow. The stabilized material such as specialized cement or mixed soil with additives has been generally applied for the materials of the deep soil mixing barrier in korea. The amount of the stabilized material is dependent on the field conditions, because the mixing ratio of the material and the field soil should achieve a requirement in the coefficient of permeability, lower than $1.0 \times 10^7 \text{ cm/sec}$.

This study determined the quantity and optimized function ratio of the stabilized material in the formation process of the mixed barrier that was added with stabilized material on the field soil classified into SW-SC under USCS(Unified Soil Classification System). After that the fly ash and lime were selected as an additives an that could improve the function of the stabilized material and then the method to improve the functional progress in the usage of putting into the stabilized material as an appropriate ratio was studied and reviewed. The author used the flexible-wall permeameter for measuring the permeability and unconfined compressive strength tester for compressive strength, and in the view of environmental engineering the absorption test of heavy metals and leaching test regulated by Korean Waste Management Act were

performed.

As the results, the suitable mixing ratio of the stabilized material in the deep soil mixing barrier was determined as 13percent. To make workability easy, the ratio of stabilized material and water was proven to be 1 : 1.5 . With the results, the range of the portion of the additives(fly ash : lime= 70 : 30) was proven to be 20~40% for improving the function of the stabilized material, lowering of permeability.

In heavy metal absorption assessment of the mixing barrier system with the additives, the result of heavy metal absorption was proved to be almost same with the case of the original stabilized material; high removal efficiency of heavy metals. In addition, the leaching concentration of heavy metals from the leaching test for the environmental hazard assessment showed lower than the regulated criteria.

요 약 문

비위생 매립지를 정비하는 방법은 여러가지공법이 있으나, 지중에 투수성이 매우 낮은 물질을 설치하여 폐기물과 오염된 지하수를 가두고 외부지역의 지하수가 유입되는 것을 차단하는 목적으로 심층혼합차수공법 형태의 연직 차수벽이 많이 설치된다. 국내에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 심층혼합 차수공법의 차수재료는 특수시멘트 계열의 고화재를 많이 사용하고 있으며, 이때 고화재 투입량은 차수재의 법적 설치기준인 투수계수가 $1.0 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ 이하이어야 하므로 현장토의 여건에 따라 달라지게 된다.

본 연구에서는 흙의 통일분류법상 SW-SC로 분류된 현장토를 대상으로 고화재를 활용한 혼합 차수벽 형성에서의 적정 고화재 투입량 및 최적 함수비를 결정하고 고화재를 개량할 수 있는 물질로서 비산재와 석회를 선정하여 적절한 혼합비로 고화재에 첨가함으로써 혼합 차수재의 기능 향상에 대한 방안을 검토하였다.

연구결과, 심층 혼합 차수공법에서 차수재의 고화재 적정 배합비율은 투수계수 실험을 통하여 13%가 적절한 것으로 나타났으며, 이 때 시공성을 용이하게 하기 위한 배합수비는 고화재 : 물의 비가 1 : 1.5가 적절한 것으로 나타났다. 이와 같이 도출된 기본적인 배합비를 기준으로 비산재와 석회를 첨가한 혼합 차수재의 강도와 투수능을 평가한 결과, 고화재(시멘트) 대신 첨가재(비산재 : 석회 = 70 : 30)를 20~40% 정도 첨가하여 사용한다면 고화재만을 사용하는 경우보다 더 낮은 투수능을 보임을 알 수 있었다.

혼합 차수재의 중금속 고정능 평가에서는 고화재(시멘트)만을 혼합할 때와 상응하는 중금속 고정능력이 있었으며, 환경적 위험성 평가를 위한 중금속 용출 실험에서도 용출농도는 규제치 이하임을 알 수 있었다.

1. 서 론

매립시설의 법적 기준이 미비하였던 1990년대 이전에 건설된 매립지는 차수막, 침출수 집배수 처리시설 등이 설치되지 않은 비위생매립지가 대부분이며, 이러한 비위생매립지에서는 침출수 등이 주변으로 유출되어 토양, 지하수, 하천의 오염 및 생태계 파괴의 주범으로 간주되어 인근 주민의 끊임없는 민원의 소지가

되고 있다.

비위생매립지의 오염방지대책으로 현재 가장 많이 사용하고 있는 방법은 최종복토를 하고 연직차수벽을 설치한 후 내부 발생 침출수를 집수정으로부터 이송하여 처리하는 방법과 매립 폐기물을 타 매립지로 굴착 이전하는 방법을 사용하고 있다.

본 연구에서는 연직차수벽의 심층혼합차수공법에서 원자반토에 시멘트-비산재-석회를 혼합하여 차수재로

활용할 수 있는 최적 배합비율을 도출함을 목적으로 하며, 이에 대한 평가방법으로서 토목공학적인 실험평가와 환경공학적인 실험평가를 수행하였다.

토목공학적인 실험평가 방법으로서, 심층혼합차수공법을 적용하는 건설현장에서 일반적으로 사용하고 있는 고화재(시멘트) 배합비를 토대로 압축강도 및 투수계수를 측정하여 배합비율과 함수비를 산정하였다. 여기서 결정된 최적의 고화재량과 함수비를 기준으로 개량 첨가재(비산재, 석회)를 다양한 비율로 배합된 시료에 대한 압축강도와 투수계수를 측정하여 기준에 적합한 지를 검토한 후 혼합차수재의 적정배합 비율을 도출하였다.

환경공학적인 실험평가 방법으로서는, 적절한 배합비로 형성된 혼합차수재에 대한 중금속 고정능을 평가함과 동시에 혼합차수재료로서 사용된 현장토, 시멘트, 비산재 및 석회에 대한 위해성 평가를 위해 폐기물관리법상에 준한 용출실험을 실시하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

1) 현장토

시험에 사용된 현장토는 우리나라에 일반적으로 분포되어 있으며, 매립장이 주로 설치되는 산간지역에 널리 분포하고 있는 토양으로서, 일반적으로 투수계수가 커서 오염물질의 이동이 용이한 원지반토 중에서 선정하였는데, 경기도 Y지역에서 채취한 사질토를 대상 시료로 사용하였다.

2) 고화재와 첨가재

매립지 또는 오염물질의 확산을 방지하는 시스템등에서의 현장토 고화처리는 현장토 자체만으로 차수기능을 확보하기 어려울 때 사용하는 방법으로, 현장토에 고화재나 다른 첨가재를 주입하여 원지반토의 차수기능을 보강한다.

본 연구에 사용된 고화재는 상품화되어 심층혼합 차수공법 건설현장에서 일반적으로 사용하고 있는 국내

〈표 1〉 고화재와 보통시멘트의 주요 화학적 조성비

| 종 류 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ | CaO+MgO | Na ₂ O+K ₂ O |
|--------|------------------|--|---------|------------------------------------|
| 고화재 | 40% 이상 | 5% 이상 | 25% 이상 | 1% 이하 |
| 보통 시멘트 | 15% 이상 | 8% 이상 | 60% 이상 | 0.85% 이하 |

S사의 지반개량용 특수시멘트로서, 보통 포틀랜트 시멘트보다 강도가 높으며 해수 및 중금속에 대한 화학적 안정성이 크다. 보통 포틀랜트 시멘트와 본 연구에 사용된 특수시멘트의 주요화학적 조성비의 차이를 〈표 1〉에 나타내었다.

폐기물로서 분류되는 비산재는 대표적인 포줄란 반응물질로서 물과 함께 석회와 반응하여 포줄란 반응을 일으키며 시멘트와 같은 역할을 하는 물질을 생성하게 된다. 이러한 반응을 통해 높아진 pH는 중금속을 고정시키는 역할을 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 비산재와 석회를 첨가재로서 선정하고 포줄란 반응을 하는 두 물질을 고화재에 첨가하여 고화재를 개량하고자 하였다.

2.2 실험방법

1) 토목공학적 실험

현장토의 기초 테스트(현장토 물성분석)로 비중시험(KS F2308), 액성/소성한계시험(KS F2303 / KS F2304), 최대건조밀도 및 최적함수량(O. M. C.)를 구하였다.

일축압축강도 실험은 시료에 따른 실험오차를 줄이기 위해 표준망체 No. 10을 통과한 시료만을 사용하였다. 최적배합수비 결정실험, 첨가재의 최적 배합률 결정실험에 사용된 모든 공시체는 물성분석을 수행한 현장토 시료와 고화재 및 첨가재를 혼합 용기속에 넣고 혼합기를 시동하여 골고루 혼합한 다음 슬러리 형태의 혼합물을 한 번의 길이가 50mm인 큐빅몰드에 3층으로 채워 넣어서 준비하였는데, 몰드주위를 나무망치로 가볍게 타격하여 발생된 기포를 충분히 제거하였다. 이렇게 성형된 공시체는 항온항습기에서 2일간 보관된 뒤, 몰드를 탈영시키고 일정 일수만큼 양생(7일, 14일, 28일)

하여 일축압축강도 실험용 시료로 사용하였다.

삼축투수실험에 사용된 현장토 역시 표준망체 No. 10을 통과한 현장토로서 적정배합비에 따른 각각의 첨가재를 혼합하여 지름 50mm, 길이 100mm인 원통형 몰드에 3층으로 기포가 발생되지 않게 채워 넣어서 시료를 성형하였다. 일축압축강도 시료와 같은 방법으로 양생(7일, 28일) 하여 삼축 투수실험을 수행하였다.

2) 환경공학적 실험

회분식 흡착실험은 대표적인 중금속 Pb, Zn, Cd, Cu을 대상으로 개량 고화재에 대한 흡착능을 평가하였다. 고화재를 비롯한 첨가재(비산재, 석회)의 pH가 모두 높기 때문에(약 pH11) 중금속의 고정이 빠른 시간에 이루어지므로 충분한 반응이 일어나는 시간에서의 고정능(24시간)을 평가하였다. 중금속 분석은 ICP(Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy, Shimadzu, ICPs 1000Ⅳ모델, Japan)를 이용하여 분석하였다.

현장토, 고화재, 첨가재(비산재, 석회)가 혼합된 차수재가 환경에 미칠 수 있는 위해성을 평가하기 위하여 폐기물 용출실험법에 따라 중금속 용출실험을 수행하였다. 중류수의 pH를 5.8~6.3으로 조정하여 고형물과 용매의 비가 1:10인 혼합액을 만들어서, 상온 상압하에서 6시간 동안 진탕한 후에 상징액중 중금속의 농도를 ICP를 이용하여 분석하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 혼합차수재의 기준 배합비 결정

1) 현장토의 기본물성 및 기초실험

현장에서 4분법으로 채취한 현장토의 함수비를 측정하고 자연 풍건시킨 후 기본적인 물성을 조사하였다. 비중시험은 No. 10체를 통과한 시료를 사용하고, 액성한계 및 소성한계는 No. 40체를 통과한 시료를 이용하여 시험을 실시하였다. 시료의 기본적 물성을 <표 2>에 나타내었다.

현장토에 대한 다짐특성을 파악하기 위해 표준다짐시험법(A다짐법)에 준하여 다짐시험을 실시한 결과, 현장토의 최대건조단위중량은 1.94t/m³이며, 이때의 최적함수비는 약 12% 인 것으로 나타났다.

2) 최적 고화재 배합비 및 배합수비 결정

현장토에 대한 고화재의 최적 배합비를 결정하기 위해 고화재 첨가량이 각각 중량 배합비로 16%, 13% 그리고 10%로 하여 공시체를 제작하여 28일 양생후 투수계수시험을 하였다.

배합안을 기준으로 투수계수 측정 실험을 한 결과, <표 3>에서 알 수 있듯이 고화재가 16%와 13% 배합된 시료에서 기준을 만족하는 결과를 얻을 수 있었는데, 현장토에 대한 고화재의 최적 배합비율은 투수계수의 기준만족여부와 경제성을 고려하여 13%로 정하여 모든 실험을 수행하였다.

심층혼합차수공법 공사현장에서 고화재와 물의 배합비를 1:1로 하여 슬러리 주입시 시공상의 어려움이 발생하게 되는데, 이를 개선하기 위하여 고화재와 물의 배합비를 달리하여 시료를 성형한 후, 일축압축강도와 투수계수 측정 실험을 통하여 고화재와 물의 최적 배합비를 산정한 결과 고화재와 물의 배합비를 1:1.5로 조제한 시료에서 일축압축강도와 투수계수기준을 만족하였다. 더욱이, 실제 시공현장에서도 함수량이 많이 포함된 슬러리가 시공상의 용이함을 도모할

<표 2> 현장토의 기본물성

| 물리적 성질 시료 | 토성 | 비중 | 액성한계 (%) | 소성한계 (%) | 입도분석 | | | | | | |
|--------------|-------|------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|------------|------------|---------|
| | | | | | D ₁₀ (mm) | D ₃₀ (mm) | D ₆₀ (mm) | 200체 통과량 (%) | Cu (균등 계수) | Cc (곡률 계수) | 함수비 (%) |
| 현장토 | SW-SC | 2.66 | 30.55 | 17.75 | 0.19 | 0.73 | 1.8 | 6.17 | 9.47 | 1.56 | 11 |

〈표 3〉 고화재 첨가량에 따른 시료의 조제

| 구 분 | | 시료의 조제 | | | | 투수계수 실험결과 (cm/sec) |
|-----|--------|--------|--------------|-----|-------------|--------------------------|
| | | 합 계 | 고화재 (시멘트) | 수 분 | 현장토 (건조) | |
| 1안 | 중량(g) | 1000 | 160 | 160 | 680 | 5.9×10^8 |
| | 배합율(%) | 100 | 16 | 16 | 68 | |
| 2안 | 중량(g) | 1000 | 130 | 130 | 740 | 8.1×10^8 |
| | 배합율(%) | 100 | 13 | 13 | 74 | |
| 3안 | 중량(g) | 1000 | 100 | 100 | 800 | 1.9×10^7 |
| | 배합율(%) | 100 | 10 | 10 | 80 | |

수 있으므로, 본 연구에서는 고화재와 물의 배합비를 1 : 1.5(즉, 혼합차수재의 합수비 24.2%)로 기준하여 실험을 수행하였다.

3.2 혼합차수재의 최적 첨가재 배합비율

1) 첨가재를 혼합한 시료의 조제

현장토를 고화처리하여 오염물질의 이동을 차단하기 위한 혼합차수재의 사용재료는 고화재와 더불어 첨가재로 비산재와 석회를 선정하였다. 문헌 연구를 통하여 투수계수를 최대로 감소시킬 수 있는 비산재와 석회의 최적 배합비는 70 : 30으로 고찰되었다. 따라서

본 연구에서는 현장토에 첨가되는 고화재의 전체량 (13%)에서 첨가재의 비율을 20%~80%로 달리하여 〈표 4〉와 같이 시료를 조제하였다.

2) 토목공학적 특성평가

첨가재의 배합비율을 달리한 시료 각각을 7일, 14일, 28일의 양생일수에 따른 일축압축강도 특성 및 투수능의 변화 특성을 평가하기 위한 실험을 수행하였다.

〈그림 1〉은 각 배합비에 따라 제작된 공시체의 28일 강도를 나타내고 있으며, 여기서 대조군은 첨가재를 넣지 않은 고화재(시멘트) 13%를 혼합한 시료이다. 그

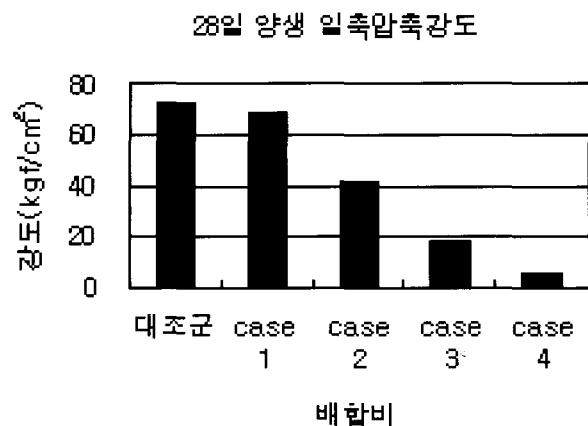
〈표 4〉 첨가재 배합비에 따른 시료조제

(단위 : g)

| 구 분 | 합 계 (혼합차수재) | 현장토 | 함수량 | 고화재 (시멘트) | 첨 가 재 | | |
|----------------|----------------|-----|-----|--------------|-------|-----|-----|
| | | | | | 소 계 | 비산재 | 석 회 |
| Case1 (20%) | 1000 | 675 | 195 | 104 | 26 | 18 | 8 |
| Case2 (40%) | 1000 | 675 | 195 | 78 | 52 | 36 | 16 |
| Case3 (60%) | 1000 | 675 | 195 | 52 | 78 | 55 | 23 |
| Case4 (80%) | 1000 | 675 | 195 | 26 | 104 | 73 | 31 |

* 위 배합 시험 조건은 중량 배합으로 공시체를 제작 시험한 것임.

* 전체(현장토 + 고화재 + 첨가재 + 물)의 무게를 1kg이라고 할 때, 첨가되는 고화재의 량



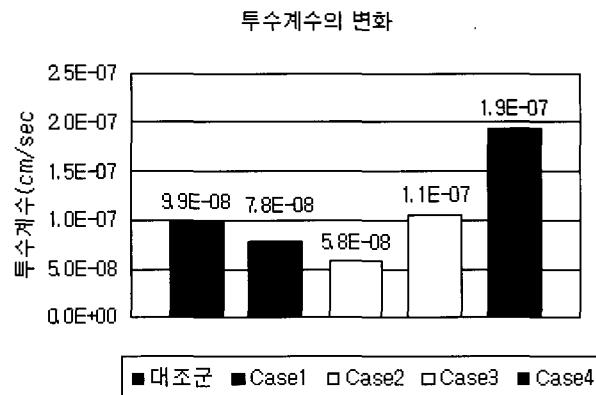
〈그림 1〉 28일 양생 시료의 일축암축강도

래프에서 보는 바와 같이 고화재의 량이 줄어들수록 강도가 감소함을 알 수 있으나, 모든 경우의 배합비에서 기준치의 강도보다는 높은 강도를 보임을 알 수 있었다. case 1의 경우는 강도 저하가 크게 나타나지 않았으며, case 2의 경우는 약 40% 정도의 강도 저하가 관찰되었다.

투수계수의 변화는 〈그림 2〉에서 보듯이, 고화재와 첨가재가 적절히 혼합된 Case 1과 Case 2의 투수계수는 법적기준인 1×10^{-7} cm/sec를 만족하고 있으며 다른 시료에 비하여 전체적으로 더 낮음을 알 수 있다.

3) 환경공학적 위험성 평가

각각의 공시체를 28일 양생후 분쇄하여 대표적인 중



〈그림 2〉 28일 양생시료의 투수계수의 변화

금속 Pb, Cr, Cd, Cu, Zn에 대한 고정능을 평가하는 실험을 수행하였다. 대상 중금속의 농도는 100 mg/l으로 정하였으며, 각각의 배합비에 따라 시료가 높은 pH를 보이는 특성으로 중금속의 고정이 빠른 시간에 이루어지므로 시료들의 고정능을 변별하기 위하여 100 mg/l의 중금속 용액의 pH를 3으로 고정하였다. 분쇄된 혼합차수재는 100ml의 용매에 1g의 비율로 혼합하였다.

원토에 대한 중금속의 흡착능을 알아보기 위해서는 24시간 동안의 충분한 혼합이 필요하므로 원토와 각각의 배합비에 따른 시료에 대하여 중금속 용액을 24시간 반응시켜 중금속의 고정능을 비교하였다. 〈표 5〉에서 알 수 있듯이, 대조군과 case 1~4의 중금속 고정 능력은 거의 유사한 수준이며, 모든 경우에서 원토의

〈표 5〉 24시간 교반후 중금속 제거율

| 구 분 | Pb | | Zn | | Cu | | Cd | |
|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | 제거율 (%) | 실험후 pH |
| 대조군 | 95.24 | 11.60 | 99.85 | 11.25 | 99.96 | 11.50 | 99.92 | 11.70 |
| case 1 | 95.17 | 11.70 | 99.85 | 11.24 | 99.96 | 11.50 | 99.90 | 11.70 |
| case 2 | 93.65 | 11.66 | 99.85 | 11.16 | 99.93 | 11.44 | 99.91 | 11.44 |
| case 3 | 93.94 | 11.58 | 99.87 | 10.91 | 99.87 | 11.45 | 99.92 | 11.60 |
| case 4 | 92.80 | 11.60 | 99.62 | 10.87 | 99.97 | 11.28 | 99.90 | 11.55 |
| 원토 | 40.03 | 3.80 | 20.24 | 3.65 | 18.84 | 3.85 | 11.17 | 4.30 |

* N.D : Not Detected

고정능력보다는 더 높은 고정능을 보였다.

대조군은 고화재 자체의 높은 pH 특성으로 인하여 중금속을 수화물 형태로서 고정하므로 중금속 제거율이 높은 경향을 나타내고 있으며, 비산재와 석회가 첨가된 시료 또한 첨가재와 고화재의 높은 pH로 인하여 중금속을 잘 고정할 수 있음을 중금속 고정 능력 평가 실험에서 알 수 있었다. 혼합차수재가 환경에 미치는 위해성을 중금속에 준하여 평가하기 위하여 폐기물 공정시험법에 준하는 용출실험 결과, 중금속 용출특성은 현장토 및 첨가재의 중금속 용출농도는 규제치 이하였으며, 이들을 혼합하여 만든 혼합차수재 역시 위해할 정도의 중금속이 용출되지 않았다.

4. 결 론

오염된 지하수의 이동 억제를 위한 심층혼합 차수공법에서 심층혼합 기둥체 형성을 위하여 사용되는 고화재(시멘트)를 개량하기 위한 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 차수재의 최적 고화재 배합비 및 배합수비 결정 혼합차수재에 투입되는 고화재는 13%가 적절하며, 고화재와 함수량의 배합 비율을 1 : 1.5(혼합차수재의 함수비 24.2%)로 사용한다면 공사 시공을 원활하게 할 뿐만 아니라 일축압축강도의 기준을 만족하는 범위에서 더 낮은 투수능을 기대할 수 있다.

2) 혼합차수재의 최적 첨가재 배합비율

고화재(시멘트)를 개량하기 위한 재료로서 비산재와 석회를 선정하여 강도와 투수능 및 중금속 고정능을 평가한 결과, 고화재(시멘트) 대신에 비산재와 석회(비산재 : 석회=70 : 30)를 20~40% 정도 첨가하여 사용한다면 강도의 기준을 만족하는 범위에서 더 낮은 투수계수 저감 효과를 기대할 수 있다.

3) 환경적 위해성 평가

고화재(시멘트)는 자체의 높은 pH 특성으로 인하여 중금속을 수화물 형태로서 고정하므로 중금속 제거율이 높은 경향을 나타내고 있으며, 비산재와 석회가 첨

가된 시료 또한 첨가재의 높은 pH로 인하여 중금속을 잘 고정할 수 있음을 중금속 고정 능력 평가 실험에서 알 수 있었다.

환경적 위해성 평가를 위한 중금속 용출실험에서도 현장토 및 첨가재의 중금속 용출농도는 규제치 이하임을 알 수 있었으며, 이들을 혼합하여 만든 혼합차수재 역시 위해할 정도의 중금속이 용출되지 않았다.

이에 더하여, 폐기물인 비산재를 활용하므로 자원을 절약함과 동시에 재활용의 한 방안으로 고려 될 수 있을 것이며, 첨가재의 활용에 따라 고화재의 사용을 줄일 수 있기 때문에 공사비도 절감될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 서울시립대학교 산학연관소사업 사업에 의하여 지원되었음을 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 유 찬, 오염토양에 대한 고결공법의 처리효과에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문, 1999.
- 이광열, 반응셀 기법을 이용한 비위생매립지 오염 확산 방지대책, 2000 지반환경 심포지엄, 한국건설기술연구원, 2000.
- 이재영, 정문경, 고재만, 연직 차수벽을 이용한 폐기물 매립지 침출수 오염 제어 사례 연구, 한국토양환경학회지, Vol.4, No.2 163-174, 1999.
- 정문경, 오염부지 차폐를 위한 연직차수벽 기술, 2000 지반 환경심포지엄, 한국건설기술연구원, 2000.
- D. E. Daniel, Geotechnical Practice for Waste Disposal, The University of Texas at Austin, USA, 1993.
- M. Pilia, R. Cossu, L. Cariboni and F. Malpei, Use of lime-fly ash mixtures for construction of landfill bottom, Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, 1995.