

국내 폐기물 매립장 차수재 현황조사 연구

Recent Trends in Domestic Landfill Liners

정하익 HA-IK JEONG^{*1}

홍성완 SUNG-WAN HONG^{*2}

장연수 YEON-SOO JANG^{*3}

김수삼 SOO-SAM KIM^{*4}

*1. 한국건설기술연구원, 지반연구실, 선임연구원

*2. 한국건설기술연구원, 지반연구실, 연구위원

*3. 동국대학교, 공과대학, 토목공학과, 조교수

*4. 중앙대학교, 공과대학, 토목공학과, 교수

SYNOPSIS: In this paper, various aspects of landfill liners such as guide of liner installation, types of bottom liners and vertical barriers, domestic companies producing and dealing liners, quality assurance and control of liners, are investigated. Although sanitary landfilling of domestic municipal wastes has begun at the last decade, we still need to strengthen the regulation for designing and constructing the liner systems and to diversify the types of liners used in the landfills. Technologies of quality control for selecting and installing landfill liners should be improved as soon as possible. In order to develop the technologies and to solve the problems related to landfill liners, more efforts should be taken among the engineers and the agencies who are interested in maintaining safe subsurface environments.

1. 서론

인구증가 및 산업발달로 인해 부수적으로 발생하는 가정폐기물, 산업폐기물 등의 도시폐기물이나 공장폐기물, 광산폐기물, 핵폐기물 등의 산업폐기물이 매년 증가추세에 있으며 이들의 처리는 새로운 사회문제로 대두되게 되었으며 이들의 효과적인 처리를 위하여 매년 막대한 예산이 소요되고 있다. 이러한 폐기물의 대부분은 최종 처분이 매립에 의존하게 되므로 2차적인 환경문제가 유발되지 않도록 위생매립이 이루어져야 한다. 그러나 기존의 폐기물의 매립은 특별한 위생 처리를 하지 않은 채 단순매립(open dumping) 형식으로 막대한 양의 폐기물이 매립됨으로 말미암아 심각한 환경문제가 야기되고 있으며 인근 주민들의 민원대상이 되고 있다. 따라서 매립지를 위생적으로 처리하기 위하여는 매립지내 오염수의 확산과 주변지하수의 오염을 방지하기 위한 위생 매립시스템의 구축이 이루어져야 하며 이를 위해서는 가장 먼저 차수재 시스템의 구축이 선행되어야 한다.

국내의 경우 매립장에 위생적인 차수재를 설치하기 시작한 것은 1980년대 후반기로서 불과 몇년전의 일이며, 차수재 설치초기에는 천막이나 비닐 등 저급의 차수재가 사용된 예가 있기도 하지만 현재는 양질의 차수재를 설치하여 위생매립율이 많이 향상되고 있다.

본 고에서는 국내 폐기물 매립장 차수재 설치기준, 차수재 종류, 차수재 생산 현황 및 관련 업체조사, 차수재 적용현황 그리고 차수재 품질관리 및 연구현황 등에 대한 조사분석을 통하여 현재 국내 폐기물 매립장 차수재의 적용 현황을 고찰하고 이의 발전 및 개선방안을 모색하고자 한다.

2. 국내 폐기물매립장 차수재 설치기준

2.1 일반폐기물 매립장

침출수가 매립시설에서 유출되는 것을 방지하기 위하여 매립시설의 측면 및 바닥은 일반폐기물의 성장·매립높이 등을 감안하여 점토·고밀도폴리에틸렌 등의 차수재료를 사용하여 다음의 방법에 따라 차수처리하여야 한다. 다만, 매립시설의 측면과 바닥의 토양의 투수계수가 1초당 1천만분의 1센티미터이하인 경우 또는 이와 동등 이상의 차수효과를 가지고 있는 경우에는 그러하지 아니한다.

- 1) 고밀도폴리에틸렌 또는 이에 준하는 재질의 합성수지를 사용하는 경우
두께 1밀리미터 이상의 것을 1겹이상 포설하여야 하며, 차수재의 상·하부는 30센티미터 이상의 점토 등을 포설해야 한다.
- 2) 점토·벤토나이트 등 점토류를 사용하는 경우
75센티미터 이상의 두께로 포설하여 투수계수가 1초당 1천만분의 1센티미터 이하가 되도록 하여야 한다.
- 3) 기타의 차수재료를 사용하는 경우
1) 또는 2)와 동등한 차수효과를 가지도록 차수처리하여야 한다.

그리고 매립시설의 지반은 침하의 우려가 없도록 하여야 한다라고 규정하고 있다.

2.2 특정폐기물 매립장

침출수가 매립시설에서 유출되는 것을 방지하기 위하여 매립시설의 측면 및 바닥은 특정폐기물의 성장·매립높이 등을 감안하여 점토·

고밀도폴리에틸렌 등의 차수재료를 사용하여 다음의 방법에 따라 차수처리하여야 한다. 다만, 매립시설의 측면과 바닥의 토양의 투수계수가 1초당 1천만 분의 1센티미터 이하인 경우 또는 동등 이상의 차수효과를 가지고 있는 경우에는 그러하지 아니한다.

- 1) 고밀도폴리에틸렌 또는 이에 준하는 재질의 합성수지를 사용하는 경우
두께 1밀리미터 이상의 것을 2겹이상(동물성 잔재물·폐수처리오니·공정오니·폐석고 또는 폐석회만을 매립하는 매립시설의 경우에는 1겹 이상)포설하여야 하며, 라이너 사이에는 부직포를 이용하여 보호층을 두고 차수재의 상·하부는 30센티미터 이상의 점토 등을 포설해야 한다.
- 2) 점토·벤토나이트 등 점토류를 사용하는 경우
1.5미터 이상(동물성잔재물·폐수처리오니·공정오니·폐석고 또는 폐석회만을 매립하는 매립시설의 경우에는 75센티미터이상)의 두께로 포설하여 투수계수가 1초당 1천만분의 1센티미터 이하가 되도록 하여야 한다.
- 3) 기타의 차수재료를 사용하는 경우
1) 또는 2)와 동등한 차수효과를 가지도록 차수처리하여야 한다.

3. 차수재 종류

국내 및 외국에서 사용되고 있는 차수재의 종류를 살펴보면 아래와 같으며 분류된 각 항목별로 많은 종류의 차수재가 또 세분되어 전체 종류로는 수십종에 이르고 있다.

폐기물 매립지의 차수재 적용초기에는 자연 점토류계통이나 저급의 지오멤브레인이 사용되었으나 최근에는 관련 산업기술의 발달로 인하여 고급의 지오멤브레인이나 혼합점토류 계통의 차수재가 많이 사용되고 있다.

3.1 표면 차수재

- 점토차수재
- 지오멤브레인차수재
 - Thermoplastics: PVC, EIA
 - Crystalline Thermoplastics: HDPE, LDPE
 - Thermoplastics Elastomers: CPE, CSPE
 - Elastomers: EPDM, IIR
- GCL(Geosynthetic Clay Liner)
 - 지오텍스타일과 벤토나이트결합
 - Bento-Mat
 - Claymax
 - 지오멤브레인과 벤토나이트결합
 - Paraseal
 - Gundseal
- 혼합토 차수재
 - 흙벤토나이트
 - 플라이애쉬 혼합재

- 흙시멘트
- 아스팔트 콘크리트
- 흙/모래 아스팔트
- 콘크리트
- 스프레이차수재
 - 아스팔트
 - 토질안정제
 - Bee Star
 - EMC(earth materials catalyst)
 - Condor SS
 - Ion-X System
- 화학적 흡착 차수재
 - 활성탄
 - 페타이어

3.2 연직 차수재

- 지수 코아
- 슬러리월
 - soil bentonite
 - cement bentonite
 - plastic concrete
 - diaphragm wall
 - vibrated beam
- 그라우트 커튼
 - suspension
 - chemical
- 소일 믹스월
- 시이트 파일
- 연직 지오멤브레인

4. 차수재 생산 및 관련업체 현황

4.1 차수재 생산현황

○ 점토차수재

점토차수재는 소정의 입도분포, 액성한계, 소성한계, 소성지수, 투수계수를 만족하고 유기물이나 불순물이 소정량 이하인 점토이면 되며 국내의 경우 해안지역이나 점토가 다량으로 나오는 지역에서 채취가 가능하다.

○ 혼합토 차수재

혼합토 차수재에는 주재료와 첨가제가 있는데 주재료는 화강토, 모래 등의 일반토사와 플라이애쉬, 광산폐기물 등의 산업부산물이 있는데 전자는 국내 어느 현장에서나 쉽게 구할 수 있으며 후자는 화력발전소, 광산지역 등지에서 구할 수 있다. 그리고 첨가제에는 벤토나이트, 시멘트, 석회 등이 있는데 이 중에서 벤토나이트가 투수저감효과가 크기 때문에 많이 사용되고 있으며 국내에서는 주로 경주지역에서 생산이 되고 있다.

○ 지오멤브레인 차수재

지오멤브레인 차수재는 초창기에는 주로 외국수입에 의존하여 왔

으나 현재에는 국내의 석유화학분야 산업의 발달에 힘입어 자체 생산 되는 품질이 여러종류 있으며 생산된 제품은 국립공업시험원이나 한국 화학시험검사소 등에서 품질시험을 의뢰, 실시하고 있다.

4.2 국내 차수재 관련업체 현황

국내에서 폐기물 매립지 차수재관련 업체는 크게 표면차수재로는 지오멤브레인, 벤토나이트, GCL(Geosynthetic clay liner), 스프레이 차수재, 연직차수재로는 시이트파일, 슬러리월, 그라우트 등의 취급 업체로 대별하여 볼 수 있다.

표면차수재인 지오멤브레인 취급업체는 거신, 고려화학, 골든포우, 동해루드, 성진화학, 시지엔지니어링, 아그루코리아, 연일합성, 일광, 일품엔프라스, 정진엔프라스, 콘테크, 한국석유공업, 합심 등 전체적으로는 10여개 이상 업체가 되는데 제품은 국산, 미국산, 오스트리아산 등이 있다.

벤토나이트 취급업체는 동양벤토나이트, 성원통상, 시지엔지니어링, 신일상역, 한국아이엠 등으로 제품은 국산, 미국산, 중국산 등이 있다.

GCL차수재 중에서 지오텍스타일과 벤토나이트의 혼합체인 점토브레이크 차수재를 취급하는 업체는 거신, 성원통상, 신일상역 등이 있으며 HDPE에 벤토나이트가 부착된 복합차수재(composite liner) 취급업체는 거신, 콘테크, 시지엔지니어링 등이 있다.

스프레이 차수재에는 슛크리트와 토질안정제인 Bee Star 취급업체가 있는데 관련기관을 살펴보면 슛크리트는 다수의 슛크리트시공업체 그리고 Bee Star는 흥성환경 등이 있다.

마지막으로 연직차수벽 취급업체를 살펴보면 시이트파일의 강원산업, 슬러리월의 삼보산업, 범양슬레땅쉬, 그라우트커튼의 그라우팅 전문회사, 수직지오멤브레인의 거신 등이 있다.

이상과 같이 제시된 차수재 취급업체는 카다로그 및 통신연락을 통하여 파악된 것이기 때문에 누락된 업체나 차수재가 있을 수 있다는 것을 첨언해 둔다.

5. 차수재 적용현황

5.1 매립지별 적용현황

5.1.1 일반폐기물 매립장

1) 해안매립장

국내 매립지의 경우는 해안지역에 자연적으로 형성된 해성점토를 차수재로 활용하게 되는데 대표적으로 김포 해안매립지의 경우를 살펴보고자 한다. 본 매립장의 차수재인 해성점토의 주요 지층 구성상태는 그림 1에서와 같이 지표면으로부터 퇴적토층, 풍화산류토층, 풍화암층, 연암층순으로 구성되어 있으며 평균 해성퇴적토층의 두께는 평균 15m가 된다. 차수시스템은 투수시험결과 지반의 투수계수가 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하로서 불투수성을 이루며 장래 쓰레기 매립하중에 의한 압밀효과에 따라 투수성이 저하된다는 가정하에 원지반을 그대로 사용하였다.

매립장 내부의 법면부는 제방 성토시 재료문제와 함수비 관리의

곤란으로 다짐이 불량하게 되어 쓰레기층에서 발생한 침출수의 차수가 불확실하게 될 우려가 있으므로 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 시이트를 사용하여 차수막을 그림 2와 같이 설치하였다.

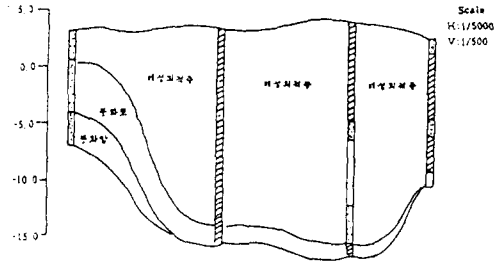


그림 1. 해안매립장 바닥부 해성점토 차수재의 지층구성 형태

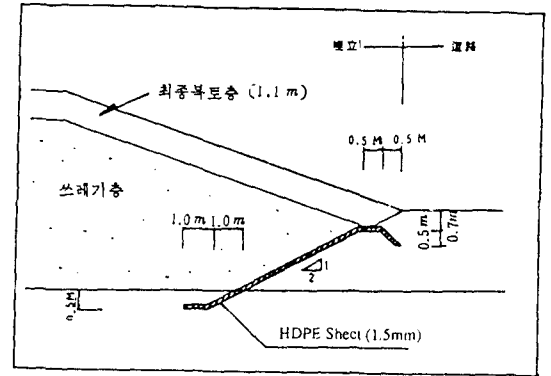


그림 2. 해안매립장 법면부 HDPE 차수재 설치 단면도

2) 육상매립장

육상매립장은 평지에 설치되는 평지매립장과 계곡에 설치되는 계곡매립장으로 분류할 수 있는데 육상매립장은 과거로부터 불법투기 행하여진 매립장이기 때문에 매립 주변 지반 지하수에 오염현상이 나타나고 있다. 육상 매립장은 일반 육상토층에 설치되어 있어 매립장 하부지반이 견고하기 때문에 해안매립장과 같은 지반불량 문제는 거의 없는 것으로 나타났다.

육상매립장 중에서 평지매립장은 바닥의 지반은 내륙지역인 경우 일반 화강토층 등으로 이루어져 있고 강가나 하천가인 경우 세립질 모래, 자갈, 점토 등의 혼합재로 이루어져 라이너로서 적합한 소정의 투수계수를 나타내고 있지 않은 상태이며 수년전까지도 매립장 바닥에 라이너를 설치하지 않았다. 그리고 침출수 집수 및 처리시스템도 설치되어 있지 않아 매립장 인근지역 및 하류지역의 오염이 예상된다. 그러나 최근에 건설하였거나 현재건설중인 매립장은 주로 고밀도 폴리에틸렌 시이트를 사용하여 라이너를 설치하고 있으며 침출수 집수 및 처리시스템도 병행, 설치하여 위생매립장으로서의 면모를 갖추어 가고 있다. 현재 평지매립장의 차수시스템은 지오멤브레인 1겹(그림 3 참조) 또는 점토류 차수재층 등 주로 단일 차수시스템을 적용하고 있다.

육상매립장 중에서 계곡 매립장은 내륙지방에서 평지지역에 매립장으로 활용할 만한 부지가 없고 주민생활환경과의 이격을 위한 경우 선정될 수 있다. 국내에서 현재 계획중인 계곡 매립장을 살펴보면 그

림 4에서와 같이 매립장 저류구조물밑에는 침출수 방지를 위한 시이트파일을 설치하였으며 바닥면에는 고무도 폴리에틸렌 시이트를 포설하였다. 매립장 양쪽 경사지에는 소단을 1m 폭으로 조성하고 소단위에는 라이너 시이트가 밀려 내려오지 않도록 중량의 흙주머니를 올려놓았다.

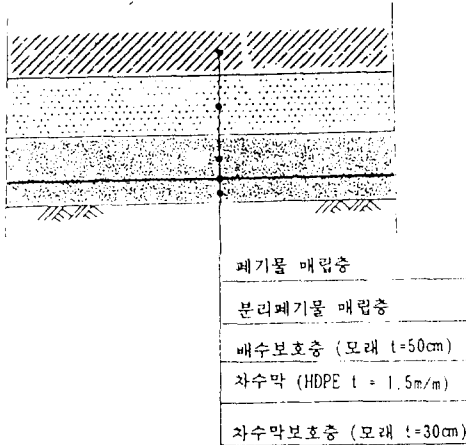
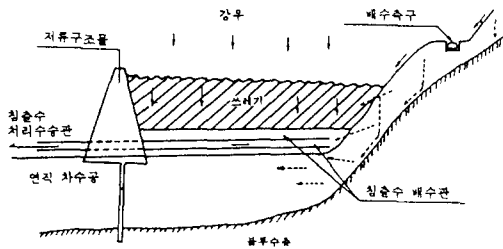
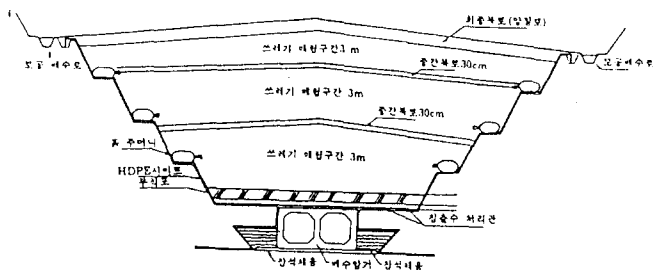


그림 3. 평지매립장 차수재 설치 단면도



(a) 제방하부 연직 시이트파일 설치 단면도



(b) 바닥 및 측면 지오멤브레인 설치 단면도
그림 4. 계곡매립장 차수재 설치 단면도

5.1.2 산업폐기물 매립장

산업폐기물은 일반 쓰레기와는 달리 독성이 강하기 때문에 차수재의 설계 및 시공관리가 엄격해야 할 것이다. 국내 산업폐기물 매립장 건설초창기에는 단순투기 형식이었으나 시간이 경과함에 따라 단일차수 형식을 거쳐 현재에는 이중 복합차수 형식을 채택하고 있다. 현재 적용되고 있는 산업폐기물 매립장의 차수시스템에는 두께 1.5mm인 지오멤브레인 2겹과 그 중간에 30cm 점토를 사용한 형식과 두께

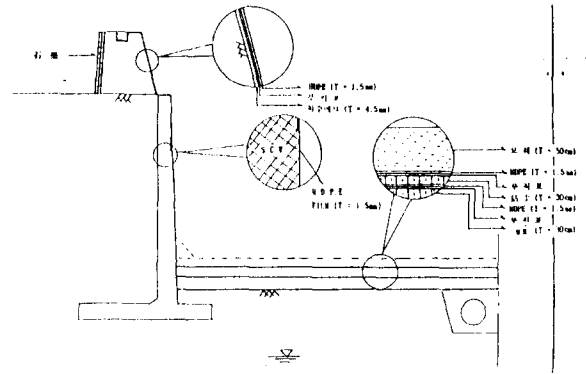


그림 5. 산업폐기물 매립장 차수재 설치 단면도

1.5mm인 지오멤브레인 1겹과 그 하부에 50cm 벤토나이트 다짐토를 사용하는 형식 등이 있는데 후자를 도시하면 그림 5에 나타난 바와 같다.

5.2 차수재별 적용현황

국내의 차수재 적용 현황을 살펴보면 위생매립장의 시스템으로서 차수재가 설치된 것은 1980년대 후반이후로서 차수재 설치 역사가 불과 몇년되지 않고 있으며 최근에 신설되는 매립장에는 차수재 및 침출수처리시스템이 제대로 갖추어 위생매립장으로서의 면모를 갖추고 있다. 국내에서 유통되고 있는 차수재중에서 적용건수는 지오멤브레인이 가장 많은 것으로 나타났고 그 다음이 점토나 혼합토 등의 점토류 차수재로 나타났다. 그리고 GCL 차수재, 스프레이 차수재 및 연직 차수재가 현장 및 지형적 여건에 따라 제한적으로 적용된 것으로 나타났다.

5.2.1 바닥차수재

1) 점토차수재

점토차수재는 현장에 존재하는 소정의 부수계수를 지닌 자연산 점토를 매립지 차수재로 사용하는 것으로 점토차수재를 사용한 국내 매립지로는 매립지 부지에 자연적으로 형성된 해성점토를 이용한 김포 해안매립지, 화성 특정폐기물매립지 구매립장과 인근의 점토를 이용한 대전 제3공단 폐기물매립장 등이 있다.

2) 혼합토 차수재

자연산 점토나 일반토사가 소정의 부수계수를 나타내지 않을 경우 이들 재료에 벤토나이트를 섞어 혼합토 차수재를 형성하게 되는데 벤토나이트 혼합토 차수재 설치 매립지에는 이리제2공단매립장, 경산매립장, 온산매립장 등의 바닥차수재와 화성매립장 최종 복토 등이 있다. 여기에서 보통벤토나이트의 첨가함량은 3~5% 정도이며 벤토나이트의 첨가량은 실제 사용되는 주재료인 현장토에 대해 실험으로부터 산정된 값이 아니라 대체적으로 외국의 기준이나 사용사례를 참고로 한 것이다.

3) 지오멤브레인 차수재

국내 위생매립지에 채택된 차수재중에서 지오멤브레인 차수재가 적용건수에 있어서 가장 많은 것으로 나타나고 있다. 위생매립 초창기에는 지오멤브레인 중에서 비닐이나 PVC 등도 적용된 사례가 있으

나 현재에는 거의 HDPE를 적용하고 있다. 지오멤브레인 차수재 적용 매립장은 성남쓰레기매립지, 화성특정매립지의 신규매립장, 온산특정 폐기물매립지, 대구특정매립지 등 수십개소에 이르고 있다.

4) GCL(Geosynthetic Clay Liner)

GCL은 고가이기 때문에 국내에서는 현장 일반폐기물 매립장에는 사용되지 않고 매우 유해한 폐기물을 저장하는 특정폐기물 매립장에만 적용되고 있으나 적용건수는 몇개소 되지 않고 있다. 적용매립장으로 대전제 3공단 폐기물매립장 수직부, 경산 특정폐기물매립장, 온산 특정폐기물매립장 등이 있다.

5) 스프레이 차수재

국내에서 차수재 설계나 시공에 적용된 스프레이 차수재에는 터널이나 사면안정에 사용되는 숏크리트와 연약지반 토질 안정제로 사용되고 있는 Bee Star가 있다. 현재 숏크리트 차수재는 설계만 되어 있는 상태이고 Bee Star는 시공이 되고 있다. 숏크리트는 광주시 동구 매립장에 설계된 차수재인데 본 매립장은 계곡매립장으로서 법면 부분이 급경사를 이루고 있기때문에 지형적으로 점토류나 지오멤브레인계통 차수재의 시공이 거의 불가능하여 이의 대안으로 그림 6과 같이 숏크리트가 차수재로 설계가 되었다. Bee Star는 부산 을숙도매립장에 적용되고 있는데 본 매립장은 해안매립지로서 지반이 매우 연약하여 점토류, 지오멤브레인 등의 차수재가 설치되기 어렵기 때문에 Bee Star가 연약지반 보강 및 차수효과가 가능하여 선정되었다.

5.2.2 연직차수재

폐기물 매립장에 사용될 수 있는 연직차수재로서는 슬러리월, 그라우트커튼, 시이트파일, 소일믹스월, 연직지오멤브레인 차수재 등이 있으나 국내에서 사용된 연직차수재로서는 시이트 파일과 슬러리월이 있다.

1) 시이트파일

국내 폐기물 매립지에 적용된 시이트파일은 매립장에서 발생하는 침출수를 차수하기 위한 차수재뿐만 아니라 해안지역이나 지하수위가 높은 지역에 매립지를 축조할 경우 지하수위의 상승에 의하여 양압력이나 지하수의 유입을 방지하기 위한 차수재로도 적용되었다. 적용매립지로서는 온산특정폐기물 매립장, 충주시 쓰레기매립장, 이리제2공단 폐기물매립장, 전북권 특정폐기물매립장, 군산 일반폐기물 매립장 등이며 전형적인 단면도는 그림 7에 제시된 바와 같다.

2) 슬러리월

슬러리월은 차단형 매립시설이나 매립장의 용량을 증가시킬 목적으로 사용되는 매립장에 적용될 수 있는 차수재이다.

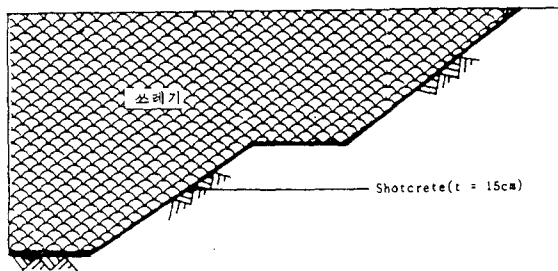


그림 6. 숏크리트 차수재 설치 단면도

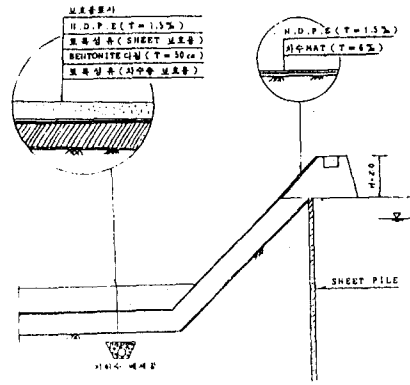


그림 7. 연직 시이트파일 설치 사례 단면도

본 공법의 개발 초기에는 단순 차수벽(cut-off-wall)으로 지하수의 차단과 가설 토류벽으로 사용되었으며, 기술의 진보 및 시공방법과 장비의 발달 등으로 토목건설 분야에서는 지하구조물의 벽체로 사용되고 있으며, 70년대 부터 적극적으로 환경분야에 적용하기 시작하여 현재 전세계에서 수백 건의 시공사례 및 연구결과가 보고되고 있다. 특히 미국에서는 불량 처분지의 오염확산 차단방법인 passive barrier의 한 분야로 많은 연구와 시공사례를 발표하고 있으며, 많은 나라에서 유해 폐기물 저장방법으로 연구, 활용되고 있다.

우리나라는 국토가 협소한 점을 극복하고 주민들의 매립장 설치에 대한 거부감을 해소시키는 방안을 모색하여야 하며 이를 만족시키기 위하여 사용가능 매립지의 단위 면적당 매립량을 극대화시키고 주위 환경의 오염을 방지할 수 있는 방법을 모색하고자 하는바, 이와같은 요구조건을 충족시킬 수 있는 효과적인 방법으로 지하차단벽 방법이 검토되고 있다.

국내에서는 1991년도에 D공장 산업폐기물 매립장의 차단형 매립지에 적용된 사례가 있다.

6. 차수재 품질관리 및 연구 현황

차수재 관련 품질관리로는 차수재료 선정시험 및 시공시 수행되는 시공품질관리인 CQC(construction quality control)과 CQA(construction quality assurance) 등이 있다. 다음에 제시되는 차수재와 화학성분과의 반응성, 차수재를 통한 오염물질 이동특성, 벤토나이트혼합토 등에 관한 연구는 한국건설기술연구원의 자체 및 외부기관의 의뢰에 의하여 수행된 내용중 일부이다.

6.1 점토차수재

6.1.1 해안매립장

해안매립장의 경우에는 매립장 선정시에 차수재로 쓰이게 되는 바닥해성점토에 대한 실험이 수행된다. 이의 일례로 김포해안 매립장의 경우를 살펴보면 다음과 같다. 현장의 라이너를 구성하고 있는 흙의 특성은 표 1과 같다. 대체로 소성이 적은 실트 및 점토로 구성되어 있고, #200체 통과량이 95% 이상이나 점토물은 20% 정도로 나타나 있다. 차수재지반의 점착력은 높은 편이지만 마찰력이 적고 SPT의 N치가 4보다 적게 나타나 매우 연약한 지반임을 알 수 있다. 차수재재

료의 투수계수는 입도분포와 실험실의 변수위 투수시험으로부터 구하였는데 입도분포로부터 구한 투수계수는 10^6cm/sec , 투수시험으로부터 구한 값은 $9.42 \times 10^6 \sim 1.25 \times 10^7 \text{cm/sec}$ 이었다.

폐기물 매립장 차수재는 침출수와 접촉하기 때문에 반드시 침출 화학성분과의 반응성 시험이 수행하는데 상기와 같은 특성을 지닌 자연해성점토 차수재와 침출수화학성분과의 반응성 시험에 대한 연구가 수행되었는데 이를 살펴보면 다음과 같다. 실험에 사용된 침출수화학성분은 폐기물 매립장에서 발생하는 침출수를 구성하고 있는 산성, 중성(극성, 비극성), 염기성 성분중에서 대표적으로 acetic acid, methanol, heptane, aniline으로 하였다.

표 1. 해성점토 차수재의 물리, 역학적 특성

토질정수	값
비중	2.64~2.68
단위중량(KN/m^3)	17.4~17.8
간극비	1.02~1.13
토질분류	ML~CL
200체 통과량	> 95
점토입자의 퍼센트	20
액성한계(W_L)	33.4~41.5
소성지수(I_p)	11.2~19.0
점착력(KN/m^2)	19.6~35.28
마찰각($^\circ$)	2~6
SPT(N)	< 4
압축지수	평균 0.235

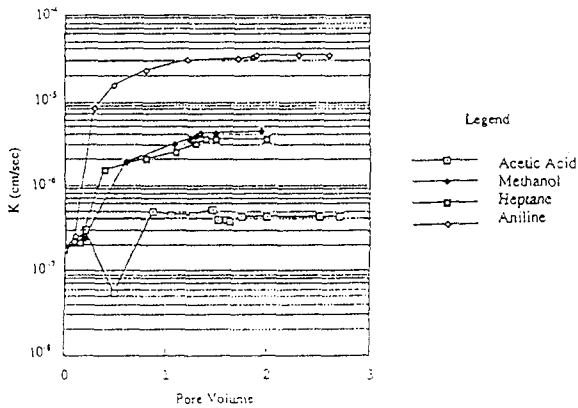


그림 8. 원액 화학용액(100%)에 대한 해성점토 차수재의 투수특성변화

실험결과 그림 8에서 보는 바와 같이 투수계수에 미치는 영향 정도는 aniline이 월등하게 크고, methanol, heptane은 거의 동일하며 acetic acid가 비교적 작은 것으로 나타났으며 순수한 물에 의한 투수계수와 비교해 보면 각각 194배, 25배, 20배 그리고 2배로 투수계수가 증가함을 알 수 있었다.

또한 이와 같은 자연해성점토 차수재를 통한 오염물질의 이동 특성을 검토하기 위한 수치해석을 실시하였는데 이를 살펴보면 다음과 같다. 해성점토 차수재층의 지반이 균질하다고 할 경우에 대한 투수계수의 변화에 대한 오염물질의 30년동안 이동한 모습을 그림 9에 도시하였다. 본 문제에서 오염물질 이동시간을 30년으로 지정한 것은 미국 EPA의 점토라이너를 통한 오염수의 새어나감을 방지하고자 하는

방지기간에 맞추어 해석하고자 하였기 때문이다. 투수계수가 $10^6 \sim 10^7 \text{cm/sec}$ 에서는 라이너의 깊이 부분을 향하여 2~3m의 오염이동이 있었을 뿐 가계방의 기초지반을 통한 이동은 거의 없었는데 이는 투수계수가 $10^6 \sim 10^7 \text{cm/sec}$ 영역에서는 라이너재료의 지하수의 흐름의 영향보다는 유효확산계수(effective molecular diffusion)에 의한 영향이 많이 작용하였기 때문이다. 그러나 $K=10^5 \text{cm/sec}$ 에서의 오염물질은 30년동안 오염원으로부터 20m 가량을 이동하였다.

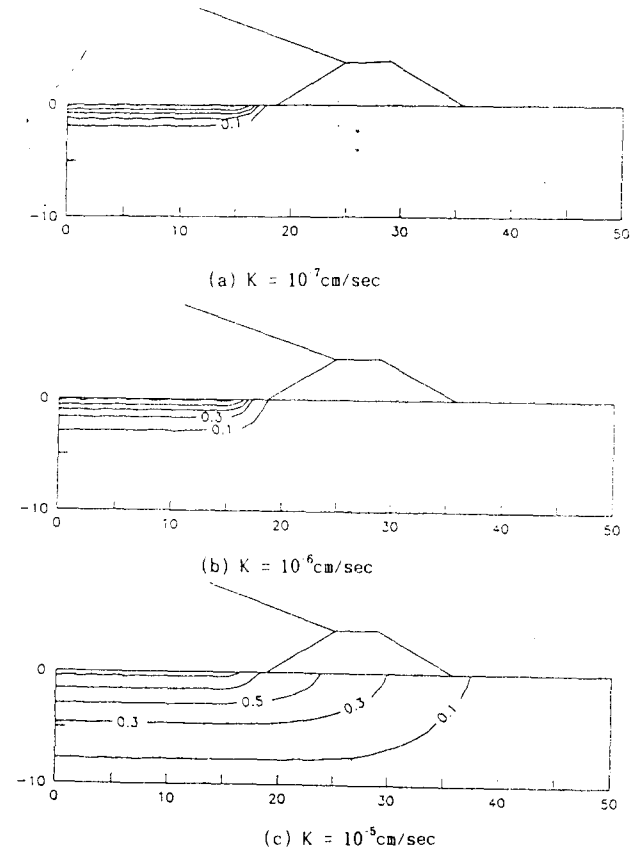


그림 9. 해성점토 차수재의 투수계수변화에 따른 오염물질 이동특성(30년 경과후)

6.1.2 옥상매립장

옥상매립장의 경우 매립장 바다이나 인근에 차수재로서 사용가능한 자연점토가 존재하는 경우에 주로 사용된다. 옥상매립장에 적용된 점토차수재에 대한 선정시험 및 시공시 품질관리시험을 수행한 D공단 매립장의 사례를 살펴보면 다음과 같다.

1) 실내실험

○ 입도분석

시험대상시료에 대한 입도분석 시험결과 입도분포 특성을 살펴보면 표 2 및 그림 10에 제시한 바와 같다. 통일분류법상으로 시료를 분류한 결과 두 시료 모두 CL에 해당한다.

국내의 경우에는 점토차수재 재료의 규격조건에 대한 자세한 규정이 없기 때문에 외국의 규정(EPA 등)을 살펴보면 차수재로서 사용되는 점토의 입도규격은 다음과 같이 정하고 있다.

- 200번체 통과량 : 30% 이상
- 4번체 잔류량 : 10~20% 이하
- 최대입경 : 25~50mm 이하

이와 같은 외국 규정과 비교 검토하여 보면 본 시험에 사용된 점토시료 모두 허용치이내에 들고 있음을 알 수 있다.

표 2. 점토차수재의 입도특성

항 목	점 토 A	점 토 B
200번체 통과량(%)	35	46
4번체 잔류량(%)	19	9
최대입경(mm)	20	7
60% 입경(D60, mm)	1.2	0.52
30% 입경(D30, mm)	0.02	0.0085
10% 입경(D10, mm)	0.002	0.0007
균등계수	600	743
곡률계수	0.2	0.2
통일분류	CL	CL

○ 비중 및 함수비

점토차수재 시료의 비중과 시료 채취시 현장함수비를 살펴보면 점토 A는 2.65, 19.8%, 점토 B는 2.49, 16.2%로 나타났다.

○ 연경도

점토차수재 시료의 액성 및 소성한계를 살펴보면 점토 A가 33.95%, 21.15%, 점토 B가 39.15%, 21.65%로 나타났으며 외국의 규정에 의하면 점토가 차수재로서의 기능을 갖기 위해서는 소성지수(plastic index)가 10% 이상이 되어야 한다는 기준을 살펴볼 때 본 시료의 경우 12.8%와 17.5%로 나타나 모두 기준치에 속함을 알 수 있다.

○ 다짐특성

KSF 2312에 의한 점토시료 A, B의 다짐시험결과 사용시료의 다짐특성은 그림 11에서와 같이 평균 최대건조밀도(maximum dry density)와 최적함수비(optimum moisture content)가 각각 1.79 g/cm³, 1.87 g/cm³, 그리고 18.0%, 15.1%로 나타났다.

○ 투수특성

강성벽 투수 시험기(rigid wall permeameter)를 사용한 변수위 투수시험(variable permeability test)으로 하였는데 투수시험시 시료의 다짐상태는 점토차수재의 다짐도가 95% 이상 유지되어야 하므로 95%의 다짐도 조건으로 하였다. 투수시험결과 점토 A의 경우 투수계수가 8.57x10⁻⁶cm/sec로 나타났으며, 점토 B의 경우는 0.978x10⁻⁷ cm/sec로 나타났다.

국내외의 규정에 의하면 폐기물 매립장 적용 점토차수재의 투수계수를 1x10⁻⁷ cm/sec 이하로 제시된 바 점토 A의 경우는 제시된 기준 이상이 되기 때문에 차수재로서 적용하기에는 부적당하며 점토 B의 경우는 기준이하가 되기 때문에 적용가능하다.

2) 현장시험

현장밀도는 다짐된 점토차수재 중에서 대표적으로 각 5개 지점을 선정하여 측정하였는데 다짐도는 측정지점 1, 2, 3, 4, 5별로 각각 98.4, 96.3, 95.7, 89.8, 89.8%로 나타났다. 여기에서 측정지점 1, 2는 매립장 중앙부분, 3은 중앙과 가장자리의 중간지점 그리고 4, 5는 가장자리부분이다. 따라서 중앙지점의 다짐도가 가장 크고 다음에 중간지점,

가장자리 지점순으로 나타났다. 점토차수재에 요구되는 다짐도를 95% 이상이라할 때 중간부분은 소정의 다짐도가 확보되었으나 가장자리 부분은 소정의 다짐도에 미치지 못하였기 때문에 다짐이 더 수행되어야 한다.

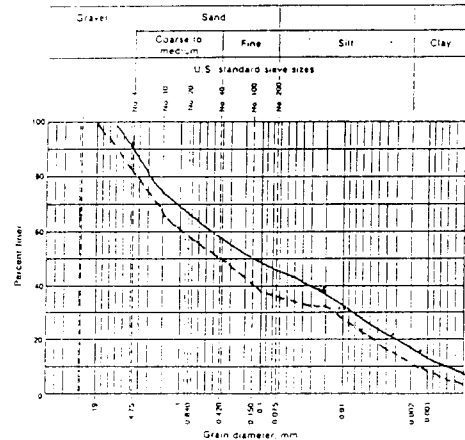
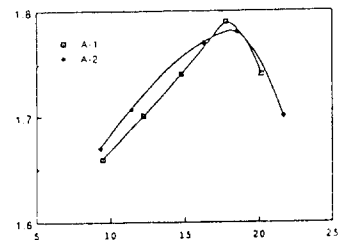
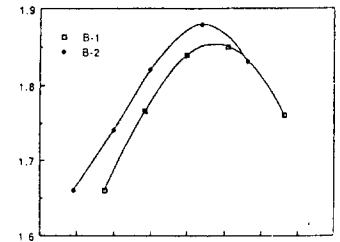


그림 10. 점토차수재의 입도분포곡선



(a) 점토 A



(b) 점토 B

그림 11. 점토차수재의 다짐곡선

6.2 지오멤브레인 차수재

지오멤브레인 자체의 재질시험은 주로 생산업자가 수행하여 카다로그상에 기록하여 제공되고 있다. 지오멤브레인의 설치에 있어서 가장 중요한 것은 시이트의 용접이다. 시이트의 용접이 불완전하면 차수재의 투수계수가 아무리 작다 하더라도 소용이 없기 때문이다. 시이트 용접시에는 주위의 대기온도가 용접수행이 가능한 온도범위에 있어야 하고 과다한 수분이 존재하지 않아야 하며 용접부위는 깨끗하게 청소하고 수분, 먼지 등 이물질이 제거되어야 한다. 그러나 국내의 경우 시공일정, 지하수위 상승, 우기 등의 이유로 인하여 용접부위에 수분이나 이물질이 존재한 상태에서 그리고 이것을 청결하게 하지 않은 상태에서 시공된 사례가 있으므로 주의하여 시공되어야 한다.

용접이 완료된 부분에 대하여는 일정한 시험을 실시하여 용접상태

를 점검해야 한다. 시험방법에는 비파괴시험과 파괴시험이 있는데 비파괴시험에는 진공시험, 공기압시험이 있으며 파괴시험에는 전단시험, peel 시험 등이 있다. 비파괴시험은 용접이 수행된 전체구간에 대하여 실시하고 파괴시험은 대표적인 구간을 선정하여 실시하고 있으나 파괴시험 실시는 미흡한 상태에 있다. 따라서 국내 현장에서는 주로 비파괴시험이 많이 사용되고 있으며 비파괴 실험중에서 공기압 시험은 긴 구간을 검출할 때 사용하며 진공시험은 국부적인 구간을 검출할 때 사용되고 있다.

6.3 혼합토 차수재

6.3.1 흙 벤토나이트

혼합토 차수재의 선정시험은 벤토나이트의 함량을 결정하기 위한 단계인데 국내의 경우 그동안 대부분의 혼합토 차수재 적용현장에서는 실제 선정시험을 실시하지 않고 외국사례만을 기준으로 하여 벤토나이트의 함량을 결정하여 왔으나 최근에는 실내실험을 실시하여 벤토나이트의 함량을 결정하는 사례가 한두건 정도 있었다. 국내의 경우 전국적으로 산재해 있는 화강토를 폐기물 매립장의 차수재로서 적용하기 위한 실험연구가 수행된 바 있다. 그림 12에서 보는 바와 같이 벤토나이트의 첨가량이 증가함에 따라 투수계수가 점차적으로 감소함을 알 수 있으며 소정의 투수계수인 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 를 얻기 위한 벤토나이트의 함량은 10%로 나타남을 알 수 있다. 그리고 이와 같은 화강토 벤토나이트 차수재와 침출화학성분과의 반응성실험을 실시한 바 그림 13에서 보는 바와 같이 100% 화학용액 부가에 의한 투수계수 증가량을 보면 acetic acid는 8배, methanol은 12배, heptane은 10배, 그리고 aniline은 4배 정도로 나타났다.

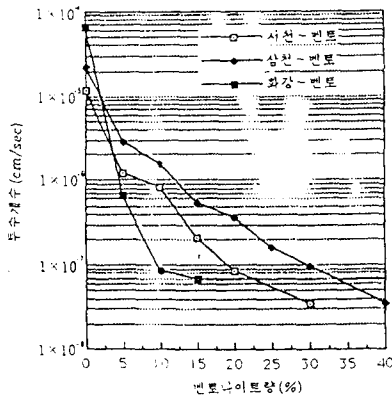


그림 12. 벤토나이트 첨가량에 따른 혼합 차수재의 투수계수 변화

6.3.2 플라이애쉬 벤토나이트

플라이애쉬를 차수재로 사용할 경우에는 플라이애쉬마다 차이가 있겠지만 일반적으로 그 자체만으로는 적용성이 미흡하기 때문에 석회, 시멘트, 벤토나이트 등을 첨가하여 혼합재를 만들어 사용하고 있다. 따라서 플라이애쉬의 주재료에 벤토나이트 및 시멘트의 첨가제를 혼합한 재료에 대한 물리적, 역학적 특성과 침출수 화학성분에 대한 반응성을 파악하여 플라이애쉬의 폐기물 매립지 차수재로서의 활용방

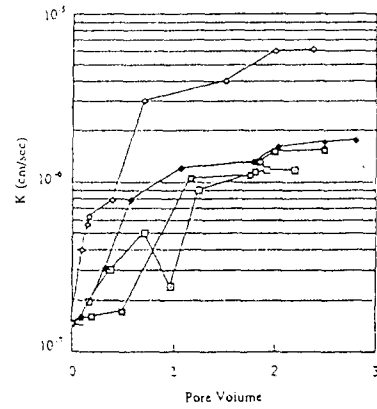


그림 13. 원액 화학용액(100%)에 대한 흙벤토나이트 차수재의 투수 특성 변화

안을 모색하고자 연구한 바 있다. 서천화력발전소 생성 플라이애쉬에 벤토나이트가 첨가된 혼합차수재와 침출화학성분과의 반응성 실험결과를 살펴보면 화학용액의 농도가 100%인 경우 그림 14에서 보는 바와 같이 화학용액이 부가에 따라 투수계수 증가량이 acetic acid는 2배, methanol은 19배, heptane은 15배, 그리고 aniline은 32배 정도로 나타났다.

75%농도 methanol의 통과에 따른 차수재의 투수특성을 살펴보면 그림 15(a)에서 보는 바와 같이 methanol이 통과됨에 따라 서천플라이애쉬 혼합차수재와 김포 해상점토는 투수계수가 점차로 감소하다가 증가하여 일정한 값으로 수렴한다. 최종 단계에서 투수계수 증가량은 서천 플라이애쉬는 약 2.2배 그리고 김포 해상점토와 화강토 혼합차수재는 거의 없는 것으로 나타났다. heptane이 75% 섞인 용액에 대한 투수특성을 살펴보면 그림 15(b)에서 보는 바와 같이 투수계수가 일정하거나 다소 감소하는 경향을 보이다가 1.5 공극체적 부근에서 갑자기 급격하게 증가되었다. 여기에서 1.5 공극체적 용액 부가후 투수계수가 갑자기 증가하는 것은 heptane이 53g/l의 비율로 용해된 수용액이 차수재를 통과한 후에 물보다 비중이 낮은 순수한 heptane이 통과하면서 이루어진 현상으로 사료된다.

기 서술된 결과가 100% 및 75% 농도의 용액이 2~3 공극체적 침투액에 대한 반응성을 고려할 때 본 결과를 뒷받침하기 위해 좀 더 많은 양의 침투용액에 의한 장기간의 투수시험이 요망된다.

7. 결론

이상과 같이 국내 폐기물 매립장에 적용되고 있는 차수재 현황이 대하여 살펴보았다. 80년대 후반기부터 폐기물매립장에 차수재가 설치되기 시작하여 최근에 건설되는 매립장은 대부분 위생매립시스템을 갖추고 있다. 그러나 국내 매립장에 차수재가 설치된 역사가 불과 몇 년전으로 매우 짧기 때문에 아직도 관련 규정, 적용차수재의 다양성, 차수재 재질선정 및 품질관리 시험, 차수재관련 연구 등이 미흡한 상태에 있다.

차수재 설치기준을 살펴보면 미국 EPA기준 등 선진외국의 기준에 비하여 차수재의 설치 두께 등 차수시스템의 설치기준이 미약한 편이다. 또한 외국에서는 실제 적용하고 있는 차수재가 수십종에 이르고 있으며 자국의 특성에 맞게 수정보완하여 사용하고 있으나 국내의 경

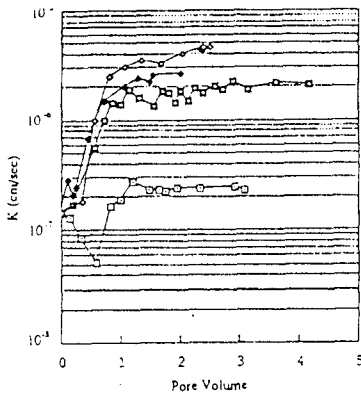


그림 14. 원액 화학용액(100%)에 대한 플라이애쉬 벤토나이트 차수재의 투수특성변화

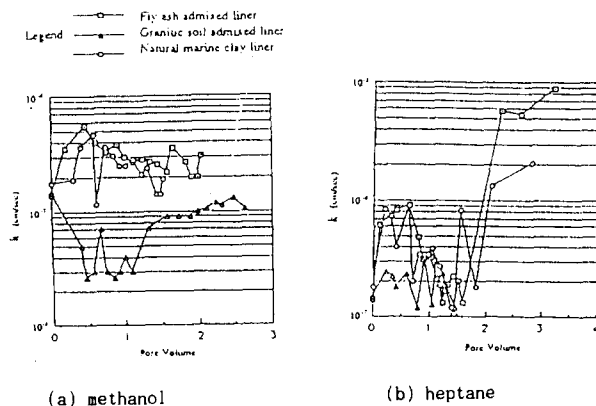


그림 15. 희석 화학용액(75%)에 대한 차수재의 투수특성변화

우에는 지역 및 현장조건에 적합한 차수재를 사용하는 것이 아니라 점토, 지오멤브레인, 혼합차수재 등 몇종에 국한하여 사용되고 있는 실정이다. 우리나라는 산지가 많고 삼면이 바다로 되어 있어 급경사지와 연약지반에 적용될 수 있는 차수재의 개발이 요구된다고 할 수 있다. 국내에서 사용되고 있는 차수재의 대부분이 외국에서 수입되고 있어 많은 외화가 유출되고 있으므로 이의 국산화가 시급하며 또한 외국제품과 경쟁하기 위해서는 국내에서 생산되는 차수재의 질적 수준을 향상시켜야 한다.

국내 차수재 적용현황을 살펴보면 해안 매립지의 경우 자연해성 점토를 차수재로 사용하고 있어 지반의 불균질성 및 폐기물 하중에 의한 부동침하에 의하여 침출수의 누출 및 침출수 집수관로의 변형이 예상되므로 이에 대한 대책이 강구되어야 한다. 차수재 적용시 아직까지도 단일차수재 시스템이 사용되고 있는 경우가 있고 차수재 설치기준대로 이행하지 않는 경우가 있어 이중 및 복합 차수재 시스템의 적용이 요망되고 관련 기준대로 적용되고 있는지 엄정한 지휘감독이 요망된다.

차수재 설치에 있어서 가장 중요한 사항이 차수재료 선정 및 시공시 수행되는 품질관리라고 할 수 있다. 국내의 경우 차수재료 선정시 수행되어야 할 선정시험은 거의 수행되지 않고 있으며 시공시에만 차수재의 품질관리가 제한적으로 수행되고 있다. 외국에서는 차수재의 물리, 역학, 투수특성, 화학반응성, 장기적 특성변화, 차수재를

통한 오염물질 이동특성, 새로운 차수재 개발 등 많은 연구가 수행되고 있으나 국내에서는 2~3년전부터 한두 기관에서 연구가 수행되어 아직 초보단계라 할 수 있다.

따라서 이상과 같은 문제점을 개선하고 차수재 관련 기술을 발전시키기 위해서는 관련기관 및 기술자들의 보다 많은 관심과 노력이 경주되어야 할 것이다. 지반공학분야가 지반환경공학분야로 확산되어 가고 있고, 국제토질및 기초공학회에서 지반환경분야에서 다루어야 할 항목으로 매립장시스템, 점토차수재, 덮개시스템, 지반내 물질이동특성, 폐기물매립 및 준설편기물 및 오염지반의 토목공학활용, 차수시스템, 배수시스템 등을 제시한 바 차수재 관련 연구뿐만 아니라 관련 지반환경분야에 대한 연구가 활성화 되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 광주직할시(1990), "광주직할시 쓰레기 매립장 조성사업 기본 및 실시설계 보고서," 475pp.
2. 광주직할시 동구(1993), "광주직할시 동구 쓰레기 매립장 조성사업 기본 및 실시설계 보고서," 361pp.
3. 인천직할시(1989), "김포지구 쓰레기 매립장 조성사업 실시설계 보고서," 284pp.
4. 정하익(1991), "폐기물 매립지의 라이너시스템," 한국건설기술연구원, 건설기술정보, 통권 95호 pp. 13~20.
5. 청주시(1993), "문암 일반폐기물 매립장 조성사업 기본 및 실시설계 보고서," 336pp.
6. 한국건설기술연구원(1992), "도시폐기물 매립장의 건설부지 활용과 위생매립시스템에 관한 연구," 건기연 92-GE-112, 274 pp.
7. 환경관리공단(1988), "화성사업소 자체폐기물 매립장의 조성공사 기본설계 보고서," 486 pp.
8. 환경관리공단(1992), "이리 제2공단 폐기물 매립장 조성사업 기본설계 보고서," 462 pp.
9. 환경관리공단(1992), "대전 제3공단 폐기물 매립장 조성사업 실시설계 보고서," 274pp.
10. 환경청(1988), "김포지구 수도권 해안매립지 조성사업 실시설계 보고서," 558 pp.
11. Amalendu Bagchi(1990), "Design construction and monitoring of sanitary landfill," 279 pp.
12. Week, O.L.(1990), "Liner systems used for the containment of solvents and solvent-contaminated hazardous wastes," Environmental Institute for Waste Management Studies, pp. 1~137.