

Self-Sealing & Self-Healing Landfill Liner

Caijun Shi (SS/SH Manager, WTI, Canada.)

문 상 화((주) 그린-필 대표이사)

요약 : 쓰레기 매립장의 오수 침출 방지를 목적으로 그간 차수층이 시공되었으나 기존의 차수재는 그 성능상 많은 문제점을 내포하고 있었다.

이제 본 고에서는 '자가 형성' 및 '자가 치유'기능을 가진 SS/SH 차수층에 관하여 실내 시험 및 수도권 매립지(3공구)를 대상으로 현장 시험시공을 실시한 결과에 관해서 기술하였다.

두 시험을 통하여 SS/SH 차수층은 쓰레기 매립장 차수재로써 필요한 기준강도를 충족시키는가 하면 투수계수도 기준치를 만족시키는 낮은 수치를 나타내는 등 우수한 기능을 충분히 입증하였다.

무엇보다, 쓰레기 매립장에서 일반적으로 발생하는 차수층 손상에 대한 '탁월한 치유기능'을 가지고 있음으로 차수층 보수비가 전혀 필요없다는 점에서 대단히 경제적이란 판단되었기에, 기능성과 경제성을 확보한 이 SS/SH 공법을 본공사에 적용할 수 있게 된 것이다.

주요어 : 쓰레기 매립장, SS/SH, 투수계수, 수도권 매립지, 자가치유.

1. 서론

우리나라는 제1차 경제개발 5개년 계획을 시작으로 선진국대열에 진입할 만큼 산업경제가 고도로 성장하였고 또한 인구가 지속적으로 증가해 왔기에 사회적인 큰 문제점인 쓰레기 처리문제에 봉착하게 되었다.

현재, 가정 및 공장 등에서 지속적으로 발생하는 쓰레기를 원활하게 처리하기 위하여 각 자치단체에서 많은 비용과 노력을 투자하고 있는 실정이지만, 쓰레기 매립장의 적지부지 부족, 쓰레기 매립장의 차수시설 불비에 기인된 주변 지하수 오염 등의 심각한 문제 때문에 매립장 선정을 둘러싸고 선정된 지역주민의 집단 민원 발생하는 등 매립장 설립이 지극히 어려운 실정이다.

따라서 매립장 설치시 상기와 같은 문제점을 원활히 해결하고 합리적인 쓰레기의 처리를 하여 민원 발생을 없앨 수 있는 방법으로 매립장내의 침출수가 주위 지

하수를 오염시키지 않으며 쓰레기 적치과정중에 있어서도 분진발생 및 악취 등으로 지역주민에게 피해를 끼치지 않도록 하는 조치가 강구 되어야 할 것이다.

본 고에서는 상기의 문제점 해결의 한 일환으로 쓰레기 매립장의 오수가 주위 지반중으로 침출되지 않도록 기존의 공법과는 달리 완벽하게 오수를 차단할 수 있는 재료를 적용하여, 수도권 매립지(3공구) 기반시설조성공사의 차수층을 시험 시공하여 탁월한 효과를 발휘한 자가형성 및 자가치유(Self sealing and self healing)기능을 가진 SS/SH 차수재에 관한 기본적 특성 언급과 현장시험 시공결과에 관해서 기술하기로 한다.

2. SS/SH 차수재 공법의 개요

2.1 기본 원리

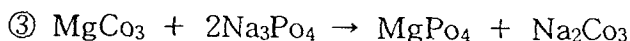
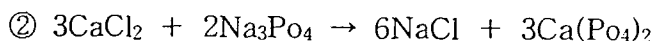
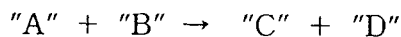
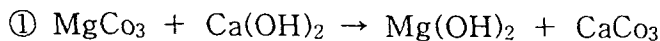
“자가형성 및 자가치유(SS/SH) 차수재”에 기반을 둔 쓰레기 격리(Isolation)에 대한 원리는 Van der sloot 등(1991, 1993, 1995)에 의하여 최초로 제시되었다. 차수층의 “자가형성(Self sealing)” 원리는 그림 1.에서 보여지는 바와 같이 미세확산(microscopic diffusion)과 침전(precipitation)의 과정을 거쳐 발생한다. 즉, 각기 다른 용해성 화합물로 조성된 A층과 B층(이하 PA, PB로 칭한다)의 경계부근에서 반응이 시작되어 불투수성의 침전물을 형성한다.

양층의 접합부위에서 발생하는 침전은 화학반응물질의 수분농도를 저하시켜 농도 경사(Concentration gradients)를 유발 시킴으로써 2차 미세확산을 유도하여 재차, 삼차 침전된다. 이와 같이 반복된 확산-침전 주기는 접합부위의 공극이 극히 미세한 상태까지 지속된다. 양층에 충분한 여분의 상호 반응 물질이 존재할 정도로 PA, PB가 두껍게 시공되면 초기에 형성된 불투수성 차수막(seal층)에 손상이 발생하여도 상술한 바와 같은 자가형성 과정을 반복함으로써 손상부위를 “자가치유(self-healing)” 하게 된다.

2.2 반응원리

SS/SH 차수막 형성을 유도하는 PA와 PB는 각각 탄산계 무기물과 칼슘계 무기물이 주요 물질이 되며, 기본 반응식과 조성 물질 구성은 다음과 같다

1) 반응식



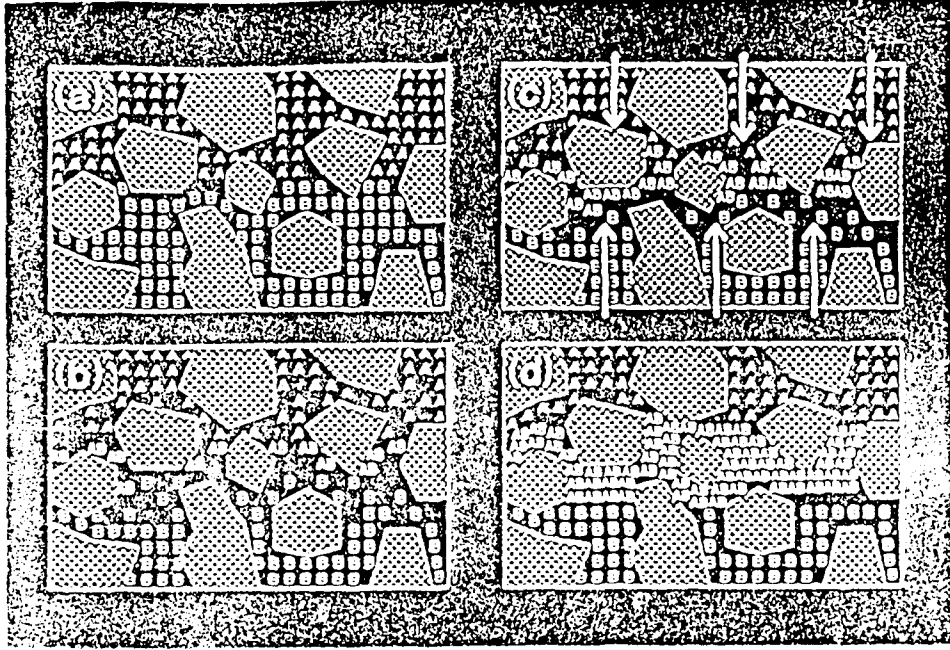


그림 1. SS/SH 차수제의 자가 형성과정의 미시적 관찰

- (a) Matrix 공극속에 존재하는 PA, PB의 화학물질 A, B
- (b) 반응물질 AB의 침전에 의한 수분농도의 저하
- (c) 확산작용에 기인한 침전부위 화학물질의 농도 증가
- (d) 침전물에 의해 공극이 극히 미세한 상태가 되게 하는 자가형성 종료과정

2) 조성물질

조성물질은 현장 지반토의 특성에 따라 변화하나 일반적으로 표 1.과 같이 구성 되어 있다.

표 1.에서 나타낸 바와 같이 각층의 조성물질의 화학반응(확산-침전)은 모든 물질이 각각의 음이온(CO_3^{2-} 와 OH^-) 과 양이온 (Mg^{+2} 와 Ca^{+2})로 용해됨에 따라 진행된다. 이러한 이온은 접합부위에서 상대적으로 비용해성 광물인 브르사이트 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)와 칼사이트(CaCO_3)를 형성하게 된다는 것이 본 공법의 기본 반응 원리이다

또한, 본 차수막은 자체가 중금속 등 오염물질에 대한 흡착력과 수리학적 저항력이 매우 높을 뿐만 아니라 가스상 혹은 용존물질의 확산에 대해서도 높은 저항력을 가지고 있다. 그림 3.에는 SS/SH층에 주석연료를 이용한 확산 실험결과를 나타낸 것이다(McGvegor & Stegemann, 1997).

그림에서 나타난 바와 같이 PA와 PB의 접합에 형성된 Seal(Barrier)층에 중금속 농도가 급격히 저하하는 불연속면이 나타나고 PB층을 통과한 경우 거의 제로(0)인 것으로 부터 중금속이나 기타 용존물질을 포함하는 침출수에 대해 오염물질이 차수벽 자체에 흡착(absorption)되거나 침전(Precipitation)되는 것으로 나타났다.

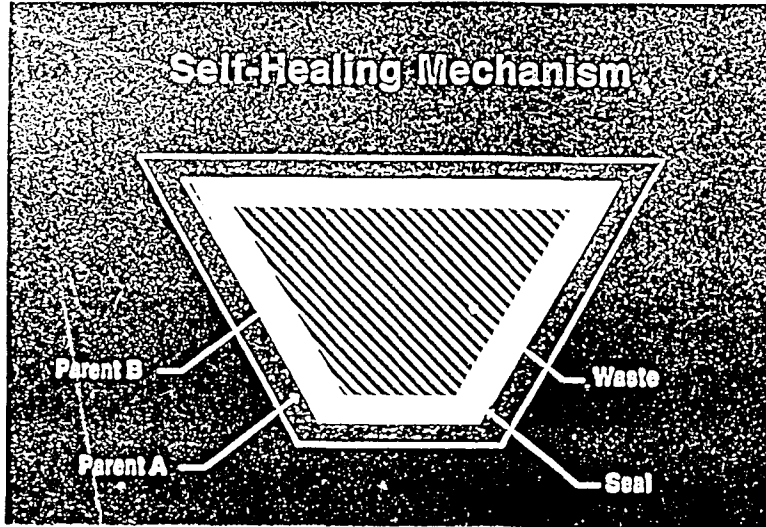


그림 2. 쓰레기 매립장 주위에 설치된 SS/SH공법의 개념도

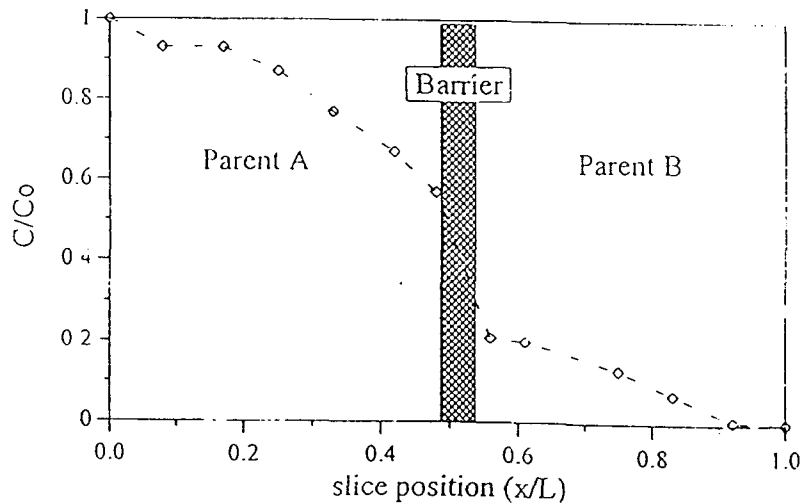


그림 3. SS/SH층에 주석연료를 이용한 확산실험 결과

또한, 차수층은 동결/융해, 습윤/건조에 따른 기상변화에 영향을 받지않고 그 성능을 유지한다. 이에관한 실험은 각각 다음과 같이 실시하였다.

먼저, 동결/융해(Freeze/Thaw)시험은 3-D 동결방법을 사용하였으며, 18 °C(±4)에서 22 °C(±5)까지의 온도변화를 매일 반복 실험하였고, 투수계수는 ASTM D5084에 따라 분석하였다. 분석을 하는 동안은 유효 구속 응력은 일정하게 유지하였다. Permeant로는 증류수를 사용하였다.

습윤/건조(Wet/Dry)시험은 일주일에 한번씩 습윤/건조를 반복하고 증류수를 이용하여 4일간 시료를 포화시키고 건조로에서 60 °C조건으로 3일간 방치하였다.

동결/융해 영향 및 습윤/건조에 관한 영향을 조사한 시험결과를 나타내면 각각 그림 4, 5와 같다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 동결/융해를 17회 반복한 상태에서 투수계수가 동결/융해의 영향을 받지않은 상태보다 다소 증가하나 50회 반복한 상태까지 $8 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 의 값을 나타내어 차수재로 충분히 역할을 수행할 것으로 판단된다.

그림 5.에서는 건조/습윤 반복작용을 한 결과를 나타내며 8회에 걸친 건습반복작용을 가한 경우에도 본 차수막은 미국에서 규정하고 있는 다짐점토 차수층의 한계치인 $k = 1 \times 10^{-9} \text{m/sec}$ 의 기준을 초과하지 않는 양호한 차단효과를 유지하는 것으로 나타나 있다.

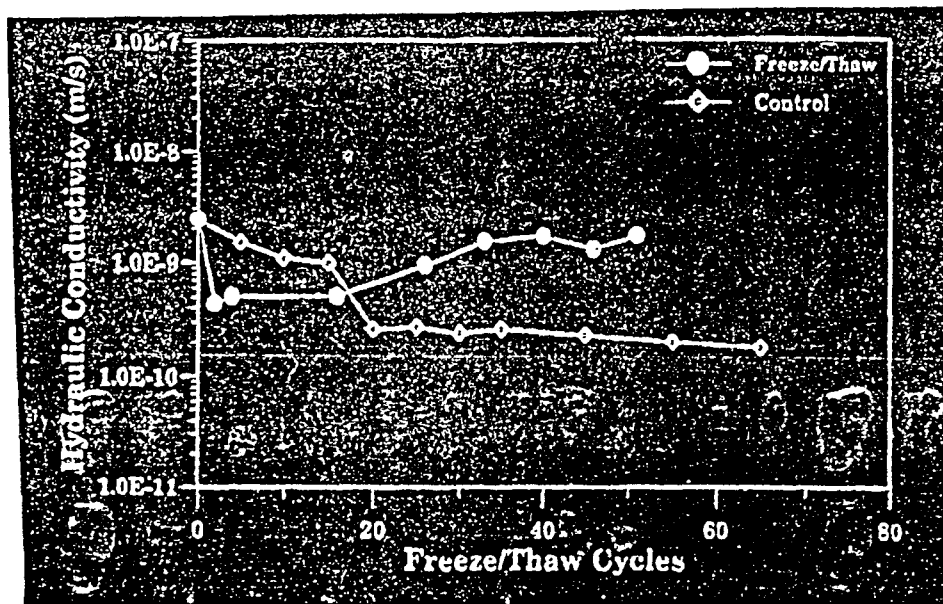


그림 4. SS/SH재의 동결/융해영향을 측정한 결과

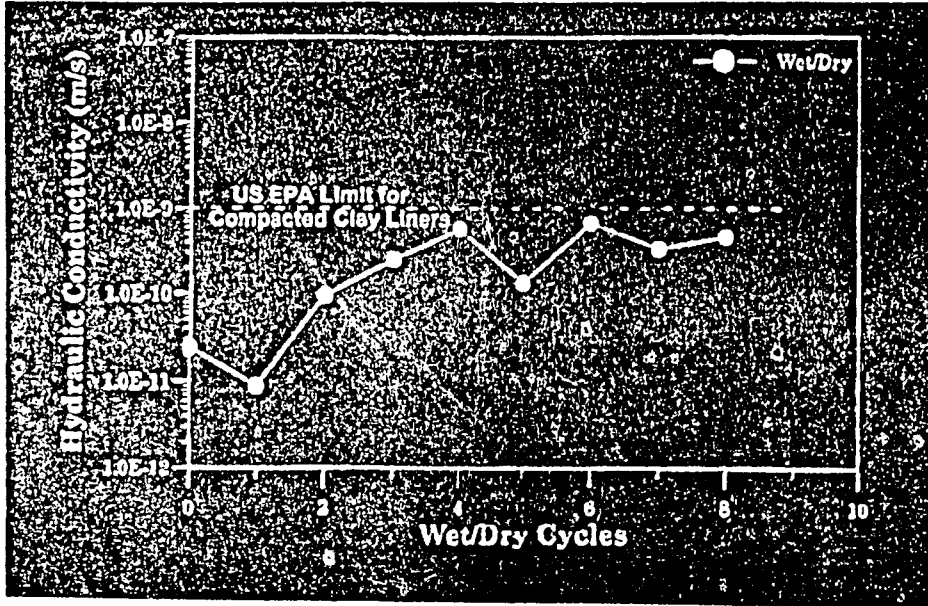


그림 5. SS/SH계의 건습반복작용에 의한 변화측정결과

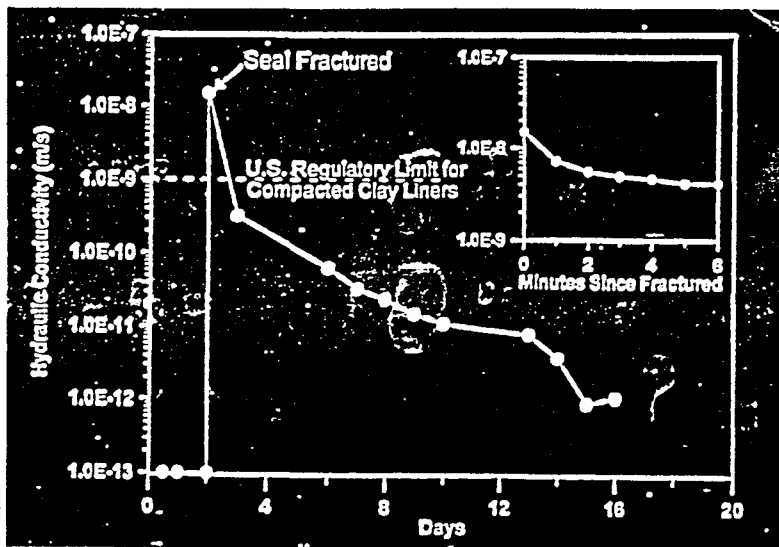


그림 6. 광산 쓰레기 차수재료로서 자가치유 능력

차수막에 손상 발생시 자가치유 기능에 대해서는 지금까지 HDPE liner가 가장 우수한 차수재로 인정되어 온 것처럼 투수계수는 평균 10^{-12} cm/sec로서 본 차수막보다 뛰어나다. 그러나, HDPE는 접합부 문제가 지금까지 미해결 과제로 남아있으며 해안 매립지 연약지반에서는 부등침하에 기인된 광범위한 찢어짐 등의 손상을 입을 수 있으며, 자가치유는 불가능하다. 또한 개량된 HDPE+clay의 경우라 하더라도 부분천공일 경우에 국한되어 물리적 방법에 의한 자가치유가 가능할 뿐이다.

이에 대하여 본 공법은 캐나다의 광산 쓰레기 매립지를 대상으로 캐나다 WTI사에서 ASTM D5084 시험법에 의거하여 실시한 시험 결과에 의하면 그림 6.에서 나타내는 바와 같이 seal층에 인공적인 손상을 발생시킨 경우 당초 1×10^{-13} m/sec의 투수계수가 0.9×10^{-8} m/sec로 증가하였으나 자가치유 기능의 발현으로 1일이내에 미국 다짐검토 차수층 기준치보다 낮은 투수계수를 나타내고 14일이 지난후에는 0.4×10^{-13} m/sec 이하의 낮은 투수성을 가진 상태로 회복됨을 알 수 있다. 이와같이 자가치유기능을 가지고 있으므로 본 공법의 차수재는 종래의 차수재로는 불가능했던 손상부분을 쉽게 복구시킬 수 있다는 뛰어난 장점을 가지고 있다.

3. 수도권 매립지 (3공구) 현장 시험 시공결과

3.1 개요

동아건설 산업주식회사에서 수도권 일대(서울, 경기, 인천)의 쓰레기를 매립하기 위하여 경기도 김포군 백석동에 위치(그림 7. 참조)한 사업면적 3,811,753m². 매립면적 53,400,000m² 규모의 수도권 매립지 제3공구 기반조성공사를 실시할 계획이다.

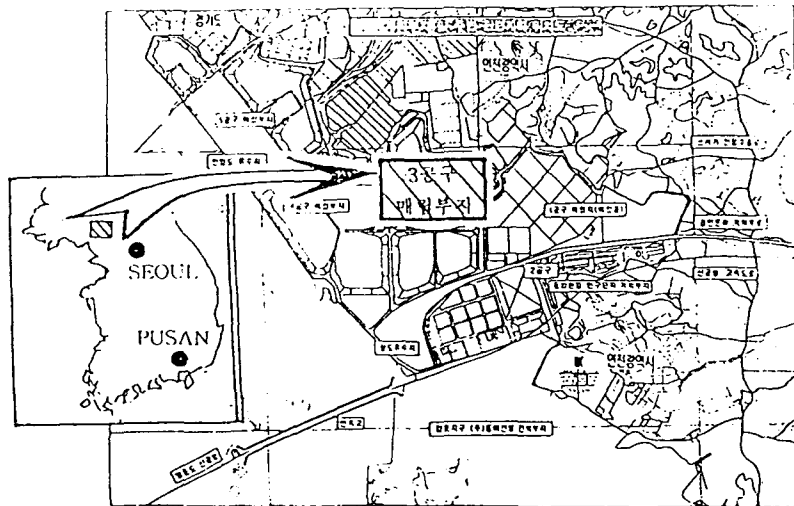


그림 7. 수도권 매립지(3공구)현장 위치도

본 매립장 설치시 종래 큰 문제점으로 대두되어온 주변토양 및 지하수 오염방지를 목적으로 차수층을 설치하기 위하여 시공업체인 (주)그린-필 외 4개사가 각 150m×30m의 규모로 1997. 6.~1997. 8.의 2개월간 시험시공을 실시하도록하고 그 결과에 의해 최적의 차수재 및 차수층 시공사를 선정하도록 하였다. 본 절에서는 당사에서 실시한 SS/SH공법의 시험시공 결과에 관해서 간단히 기술하기로 한다.

3.2 SS/SH공법의 시공현황

(주) 그린-필에서 타 4개사와 동일 하게 150mm × 30mm 규모의 시험시공 구간을 할당받아 표층 고화 처리를 실시하였다.

그림 8., 9.에는 시공구간의 평면도와 종단도를 각각 나타낸다.

시험시공은 그림 10.에 나타내는 것과 같은 순서로 실시하였으며, 고화처리의 층 두께는 75cm이며 하부로부터 Soil Cement(S/C)층을 45cm 부설하고 PA와 PB를 각 15cm씩 부설 하였으며, 각층의 원지반토와 화학물질의 혼합상태는 S/C층에 있어서는 원지반토 1m³를 기준으로 시멘트를 120kg 혼합함과 동시에 원지반토 건조단위 중량(γ_d)의 3%내외에 해당하는 PB층의 화학물질을 섞었다. PB층은 원지반토 1m³에 대하여 PB화학물질을 약 0.15 γ_d 가되게, PA층은 원지반토 1m³에 PA화학물질의 약 0.2 γ_d 가 되도록 혼합하였다. 부설시 함수비(w)는 실내다짐시험결과 최적함수비(OMC)가 21%였으므로 이 기준에 맞추어 w=20~25%의 범위를 유지하게 하였다. 대규모 시공이 될 경우는 플랜트를 설치하여 혼합이 이루어지게 되도록 하여야 하나, 본 시험시공에 있어서는 시공량이 소량이므로 편법으로 장비를 동원하여 혼합을 실시하였다.

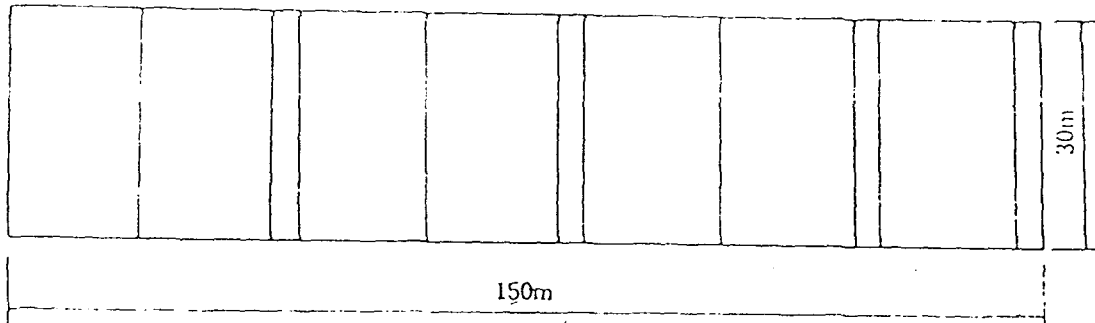


그림 8. 시험시공 평면도

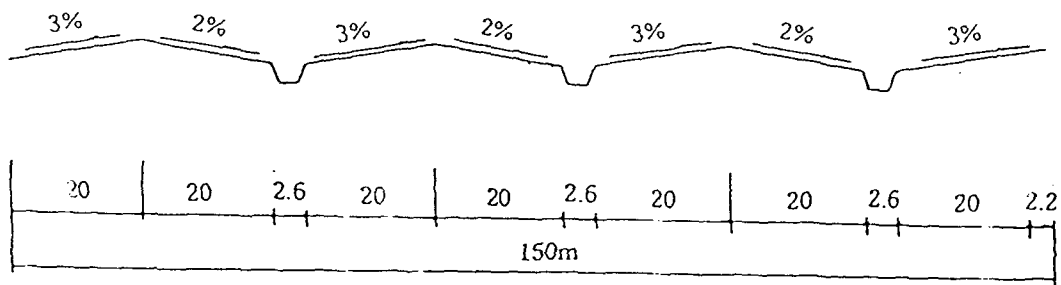


그림 9. 시험시공 종단면도

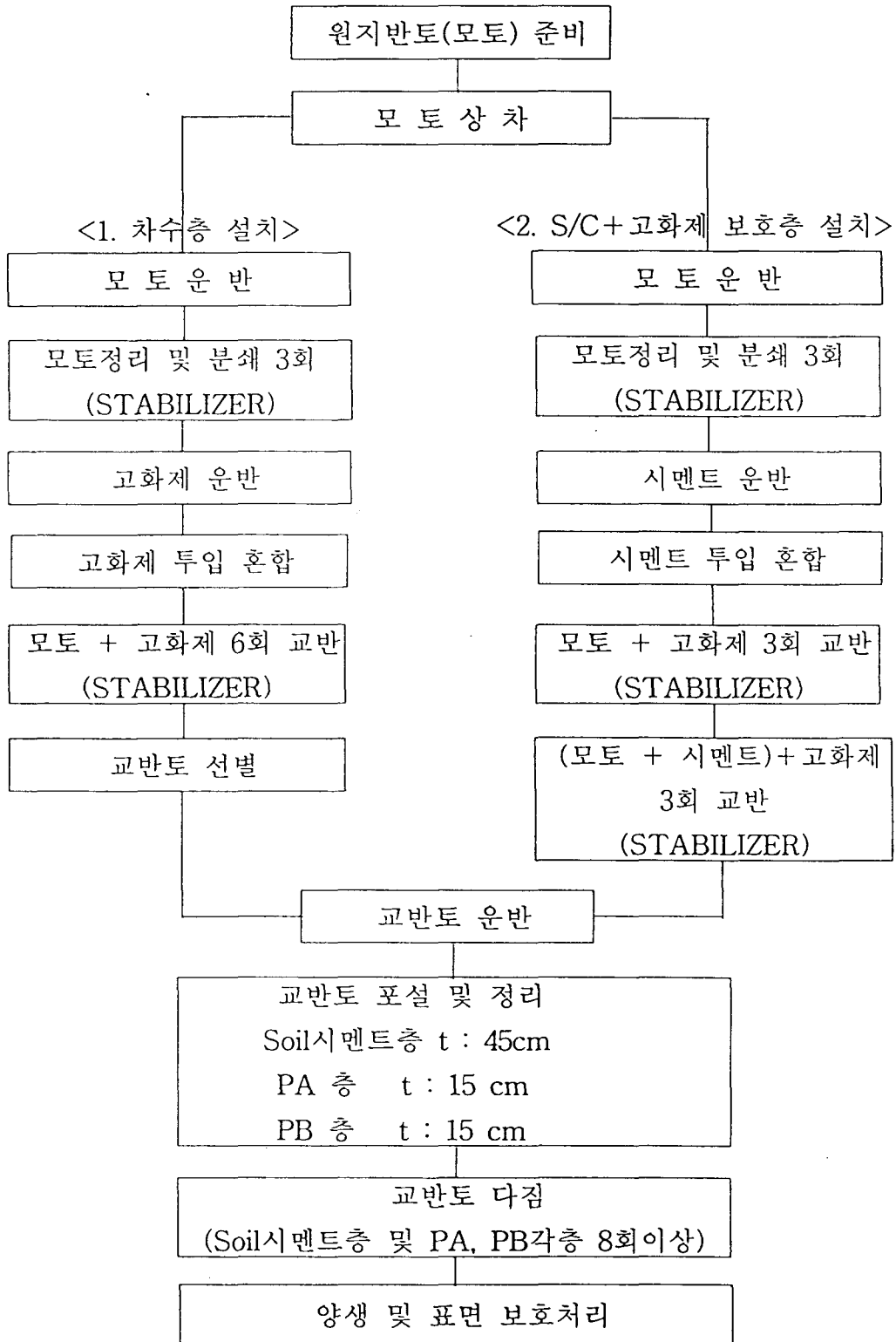


그림 10. 고화처리 시험시공 순서도

SS/SH 차수층 시공시 사용된 장비는 표 2.에 나타낸다. 3종류의 전압장비가 제시된 것은 기초지반의 조건에 합당한 접지압을 가진 장비를 적절하게 선정하여 이용되게 하였기 때문이다.

표 2. 장 비 투 입 현 황

번호	장비명	규격	대수	용도	비고
1	백호우	0.8m ³	1대	토공, 모토작업 및 상차	
2	백호우	0.2m ³	1대	연약지반 및 접합부분 작업	
3	백호우+스테빌라이저	0.8m ³	2대	모토분쇄 및 교반	
4	페이로다		1대	시멘트 운반, Soil 시멘트, 고화토 상차 및 보조	
5	덤프트럭		1대	모토, Soil 시멘트, 고화토 운반	
6	불도져		1대	Soil 시멘트, 고화토 포설	
7	롤러	1, 2.5, 10 ton	(3대) 각 1대	전압다짐(연약지반)	
8	양수기		1대	배수용	
9	분무기		1대	고화토 교반시 및 양생시 살수용	
10	선별기		1대	모토내 불순물 및 덩어리 1cm 이상 제거	

3.3 강도 특성

한국 건설 품질 연구소에서 시험 시공후 42일이 경과한 상태의 SS/SH 시공구간의 대표적인 3개 지점에서 강도 시험 측정용 시료를 채취하여 일축 압축 강도 시험을 하였다. 표 3.에는 강도 시험 결과를 나타낸다.

표 3. 한국건설품질연구소 강도시험결과

시료명	시료 채취일	공시체 번호	시험일	하중	일축압축강도 (kgf/cm ²)
PA+PB+CS+ C+PB	97-07-22	GS-2-5	97-07-25	232	6.5
	97-07-22	GS-2-5	97-07-28	78	2.2
	97-07-22	GS-3-4	97-07-25	356	9.9

표 3.에서 알 수 있는 바와 같이 차수재의 일축 압축 강도는 2.2~9.9kgf/cm²의 범위를 나타내며, 평균 6.2kgf/cm²로 허용기준(5kgf/cm²)을 충분히 만족시킬 만한 결과를 얻었다고 판단된다.

3.4 투수성

한국 건설 품질 연구소와 서울 시립 대학교에서 seal층과 soil + cement + PB의 시료를 채취하여 투수계수를 측정한 결과를 표 4., 5.에 각각 나타낸다.

표 4. 한국 건설 품질 연구소 실험 결과표

시료명	시료채취일	공시체 번호	시험일	투수계수
그린-필 seal 층	97-09-02	1	97-09-02	6.677×10^{-8}
	97-09-02	2	97-09-02	9.783×10^{-8}
soil+cement+ PB의 하층	97-07-24	14	97-08-12	2.596×10^{-8}
	97-07-24	21	97-09-06	4.380×10^{-8}

표 5. 서울 시립 대학교 실험 결과표

sample No.	공시체 무게(g)	공시체 수침 무게(g)	공시체의 시험후 무게(g)	투수계수(cm/sec)
1	1181.9	1211.9	1223.4	9.7954×10^{-8}
2	1184.8	1219.8	1227.4	9.9525×10^{-8}
3	1153.0	1184.5	1196.8	1.0260×10^{-8}
4	1176.0	1198.4	1209.7	9.7752×10^{-8}

양측에서 제시한 시험결과에서 알 수 있는 바와 같이 본 차수층의 투수계수는 $1.02 \times 10^{-7} \text{cm/sec} \sim 2.60 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 거의 균질의 값을 나타냈으며, 국내 매립장 차수재의 기준치인 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 보다 낮은 투수계수를 나타내며 양호한 상태를 유지하고 있는 것으로 사료된다.

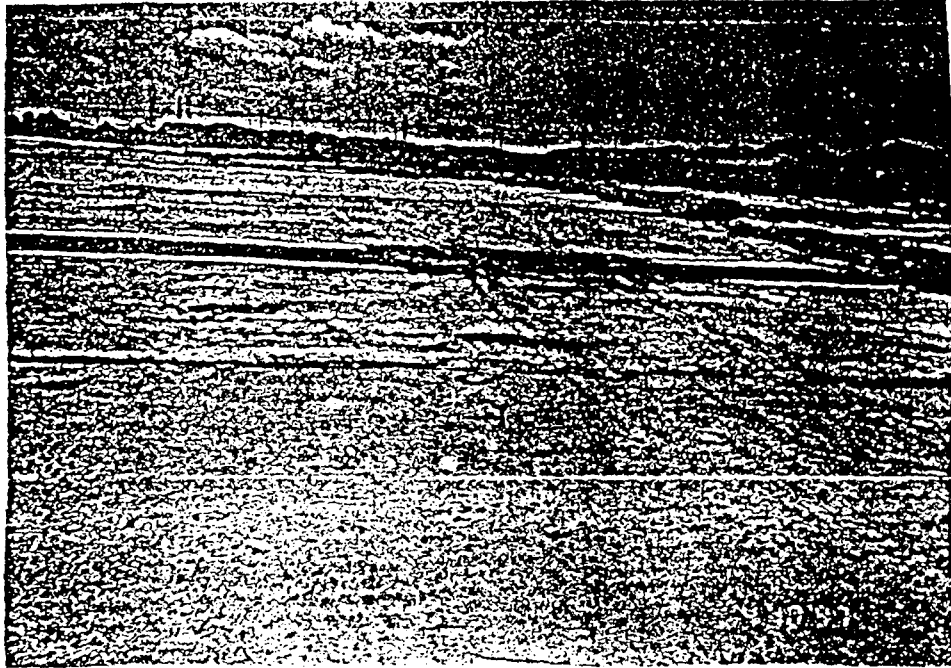


사진 1. 주행전의 차수층 표면 상태



사진 2. 120회 주행시험후 차수층 표면 상태

3.5 주행성

1997. 10. 6.~1997. 10. 8. (3일간)에 걸쳐 25톤 규모의 덤프트럭을 120회 주행시킨 후 차수층의 상태를 점검한 결과 주행전에 표면 균열이 0.8~2.0mm 폭으로 발생해 있었으나 주행에 따른 추가적인 크랙의 진행은 발견할 수 없었으며, 역으로 주행 종료후에 표면 크랙이 감소하는 경향을 나타냈다. 사진 1., 2.에는 주행전, 후의 차수층 표면 상태를 나타낸다.

3.6 자가 치유 능력

1) 실내시험

본 차수층이 설치된 구간의 대표적인 위치에서 시료를 채취하여 캐나다의 WTI사와, 서울시립 대학교에서 자가치유기능을 시험을 각각 실시하였다. 각 시험 결과를 그림 11., 12.에 각각 나타낸다.

그림 11.에 나타내는 바와 같이 당초 2×10^{-8} cm/sec의 투수계수를 가진 본 차수층에 구멍을 뚫는 경우 6.0×10^{-7} cm/sec까지 투수계수가 증가하였다가 10일이 경과한 뒤에 당초의 투수계수와 유사한 값을 나타내고, 그 이후 지속적으로 투수계수가 저하하여 23일 경과한 시점에서는 오히려 투수계수가 9×10^{-10} cm/sec로 당초보다 낮은 불투수층으로 변하는 것을 알 수 있다.

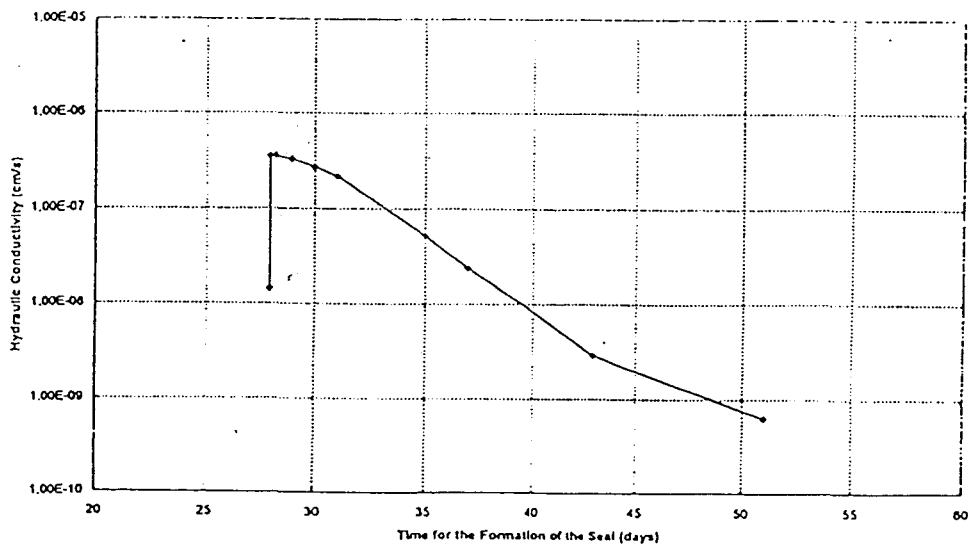


그림 11. 캐나다 WTI社 SS/SH 실험분석표

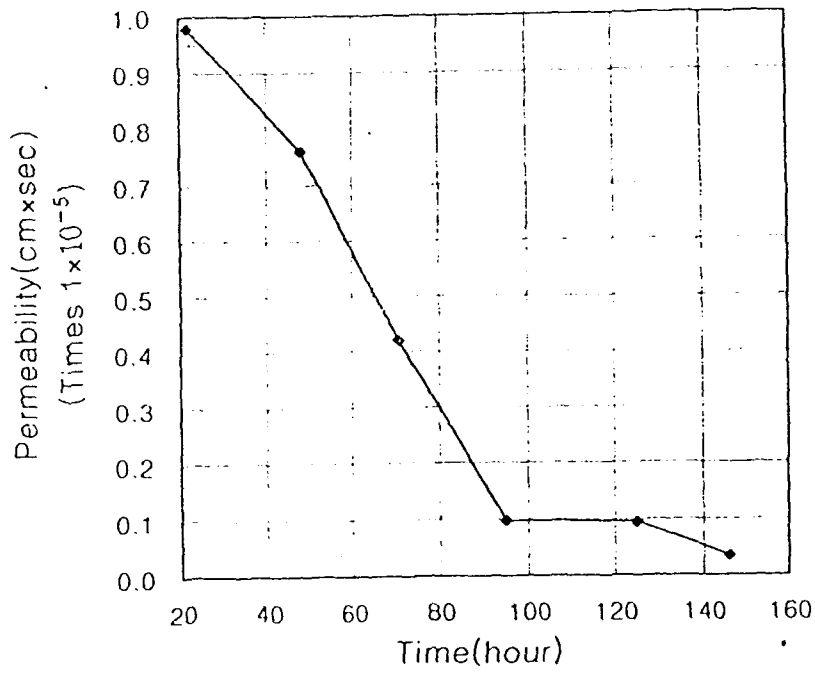


그림 12. 서울 시립대 SS/SH 실험분석표

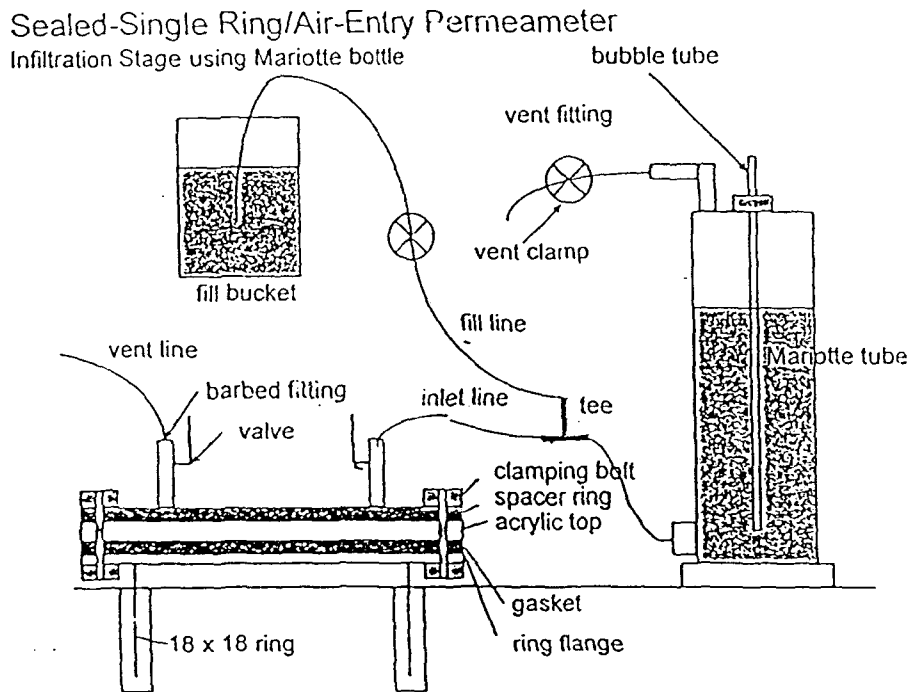


그림 13. Sealed Sngle Ring/Air-Entry Permeameter

그림 12.의 서울시립 대학교 실내시험 결과에서도 구멍을 뚫은(Punching) 후 1×10^{-5} cm/sec의 투수계수를 나타낸 것이 96시간(4일) 경과 후 투수계수가 1/10로 저하되어 가는 경향을 나타내어 SS/SH 차수층의 자가 치유 기능이 뛰어난을 알 수 있다.

2) 현장 시험

당사의 시공구간 총 4500 m^2 중 표층 고화 처리 구간 $20 \times 30 \text{ m}$ 규모의 대표적인 위치에 1997년 8월 8일~8월 23일 (16일간)에 걸쳐서 그림 13.에 나타내는 것과 같은 특수 현장 투수 시험장치(sealed single ring infiltrometer, SSRI)를 이용하여 자가 치유 능력시험을 실시하였다.

본 시험장치는 현장에서 직접 간편하고 짧은 기간내에 자가 치유 능력을 정확하게 측정할 수 있는 특성을 가지고 있다. 가로×세로= $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ 의 면적에 PB로부터 PA층까지 직경 0.7mm 크기의 구멍을 강제로 10공 만들고 그 위에 SSRI를 설치하였으며, SSRI의 top부분 표면을 진공상태로한 후 14일간 지속적으로 물을 공급하였다. 시험 기간중의 시간당 공급수량 및 물의 침투율 값은 표 6.에 나타낸다. 물의 침투율(Infiltration rate, I)은 표 6. 속에 나타낸 것과 같이 산정된다.

표 6.에서 알 수 있는 바와 같이 차수층에 구멍을 만들기 전에 I값이 1.16을 나타냈으나, 구멍을 뚫은 후 $I=1.77$ 을 나타내어 침투율이 증가된 후 시간의 경과와 더불어 지속적으로 감소되는 경향을 나타내며, 2.5일 경과된 후 당초의 I값과 거의 유사한 상태를 보이고 그 후에는 당초값보다 낮은 침투율(I)을 나타내는 것을 알 수 있으며 이는 본 차수층에 손상을 입을 경우 오히려 침출수 통과작용에 기인되어 Seal층의 두께가 증가되는 현상과도 관련이 있는 것으로 사료된다.

상기의 실내시험과 현장시험 결과를 종합할 때 본 차수층은 양호한 자가치유기능을 나타내어 수도권 배립지 3공구에 차수층으로 충분히 사용될 수 있는 재료로 판단된다.

표 6. SSRI 실험시 시간당 공급수량 및 I값

일시	시간당 공급수량 (cm/h)	물 침투율	비교
8월 12일	10.5 cm/h	$I = 1.16$	↑ 구멍뚫기(Punching) 전 Punching ↓ 구멍뚫은 후
8월 12일	16 cm/h	$I = 1.77$	※Infiltration Rate 환산공식 $I = \text{Infiltration (} 10 \text{ E-6 m/s)}$ $I = \frac{Q}{t \cdot A} \times 10^{-6} \text{ m/s}$ $Q = h \times 80.64$ $t = 3600$ $A = 0.45 \times 0.45 \text{ m}^2$
8월 13일	12 cm/h	$I = 1.33$	
8월 14일	9.63 cm/h	$I = 1.06$	
8월 15일	8.4 cm/h	$I = 0.93$	
8월 16일	7.55 cm/h	$I = 0.84$	
8월 17일	6.43 cm/h	$I = 0.71$	
8월 18일	5.45 cm/h	$I = 0.60$	
8월 19일	4.15 cm/h	$I = 0.45$	

4. 결론

쓰레기 매립장의 침출수 때문에 주변 토양과 지하수가 오염되는 등 환경파괴가 심각한 상황이다. 그러나 이러한 피해를 극소화 시킬 수 있다고 사료되는 최근에 개발된 '자가 형성' 및 '자가 치유' 기능을 가진 SS/SH 차수재에 대한 특성을 언급하였던 바, (주)그린-필은 SS/SH 공법으로 수도권 매립지 3공구의 차수재 시험시공을 실시한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) SS/SH공법은 쓰레기 매립시 차수재로 필요한 기준강도를 충족시켰고, 중금속의 흡착력이 대단히 뛰어났다. 그리고 본 차수재는 동결/융해 및 건습작용에 큰 영향을 받지 않으며, 기초지반의 변위에 대단히 탄력적이었다. 또 투수계수도 차수재 기준을 충분히 만족시키는 낮은 값을 나타내므로 양질의 차수층 형성이 가능하다는 것을 입증하였다.

2) 수도권 매립지 3공구에서 시험 시공한 결과에 의하면 SS/SH 차수재는 강도면에서는 수도권 매립지 3공구에서 요구하는 기준치에 부합하고 차수기능면에서는 그 기준치를 훨씬 상회한다. 나아가 중장비 주행에 아무런 문제를 야기시키지 않는 재료임이 확인되었다.

3) 현장 시험시공 결과 SS/SH 공법은 종래 쓰레기 매립장의 가장 큰 문제점으로 지적되어온 차수층 손상에 따른 보수 문제를 해결할 수 있으며 탁월한 자가형성 및 자기치유기능을 발휘하여 손상발생전 보다 손상발생후에 오히려 더욱 높은 차수기능을 가지는 뛰어난 차수재임이 입증되었다. 따라서 기초지반의 대변형 및 쓰레기 매립과정에서 필연적으로 발생할 수 있는 차수층의 손상에 대해서 복구비가 전혀 불필요하므로 대단히 경제적이고 뛰어난 기능성을 갖추고 있음도 입증되었다.

4) 수도권 매립지 3공구에 있어서 상기와 같은 탁월한 효과를 발휘한 SS/SH공법이 다른 4개사의 제품에 비해서 우수함을 인정받아 (주)그린-필이 SS/SH 차수공법을 이용하여 본 기반시설 공사를 실시하도록 선정되었다.

참 고 문 헌

- 1) 동아건설 주식회사 (1997) : 고화처리시험 시공회의자료, p.1.
- 2) McGregor R. and Stegemann J.A (1997) : Performance Characteristics of a self-sealing/self-healing barrier, 1997 Int. Containment Technology Conf. and Exhibition, St. Peterburg Florida U.S.A.
- 3) Van der Sloot H.A. Hockley D.E. & Wijkstra J. (1991) : Zelf-vormende en zelf-herstellende afdichtingen : concept, modellering en labresultaten. Energie en Milieutechnologie, Januari 1991, 1/2, 27~31.
- 4) Van der Sloot H.A. Hockley D.E. Wijkstra J. & Stegemann J.A (1993) : Self-sealing and self-repairing seals for waste isolation. Proceedings Geoconfine '93 Vol.1, Geology and Confinement of Toxic Wastes. Montpellier, June 1993. M. Arnould, M. Barres and B. Come (eds), Balkema Rotterdam. pp. 73~79.
- 5) Van der Sloot H.A., D. Pereboom, R.G. McGregor and J.A. Stegemann (1995) : Properties of self-forming and self-repairing seals. In Proceedings 5th International Landfill Symposium, in press, Sardinia.