

복합차수층공법이 적용된 매립장 바닥차수층 시공사례

[김천시 생활폐기물매립시설 바닥차수층 적용사례를 중심으로]

이규 정*, 채수 권**, 백 세 환**, 이 도 우**

1. 서론

폐기물 매립시설은 기초자치단체별로 1개소 이상 씩 위생적인 매립시설을 확보해야만 하는 필수 사회 기반시설이지만, 그간 자치단체에서는 폐기물관리 법에 의한 설치승인을 받지 않은 읍·면단위의 비환경적인 소규모 비위생매립시설을 설치, 운영하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 시설물들이 주변토양 및 지하수오염문제를 포함하여 악취문제 발생 등 대표적인 혐오시설로 인식되는 바람에 매립시설 자체에 대한 거부감이 팽배해 있으며, 나아가서는 신규 매립시설의 설치사업에도 상당히 악영향을 끼치고 있는게 현실이다.

이에 정부에서는 소규모 비위생 매립시설의 난립을 근절하는 한편, 대규모 위생매립시설을 설치하여 폐기물을 안전하고 위생적으로 처리하기 위하여 국

고보조사업으로 매립시설 및 생활폐기물종합처리 시설을 기초자치단체별로 설치 추진하고 있으며, 앞으로 계속해서 나머지 지역에 대하여 설치 및 운영을 추진할 계획이다.

2005년도 환경백서에 나타난 생활폐기물매립시설 설치사업 현황을 보면 1998년말 기준 위생매립률 84%를 2004년까지 100%로 제고하기 위하여 매립시설 85개소의 건설을 추진한 결과, 2004년까지 67개소(9,891천 m^2)(수도권매립지 3공구 3,812천 m^2 포함)를 완공하여 운영 중에 있고, 18개소(2,393천 m^2)를 건설 중에 있으며, 매립시설을 설치하는 지역에 대하여는 1996년까지 시설비의 50%를 국고 보조하였으며, 1997년 이후부터는 시설비의 30%를 지원하고 있다.¹⁾

경상북도 김천시 개령면 서부리에 위치한 본 매립시설은 김천시에서 발생하는 폐기물에 대한 위생적이고 적절한 처리, 처분계획을 수립하여 주변환경오염을 저감시키고 안정적인 최종처리를 함으로써 2차 환경오염을 극소화하고 시민의 보건위생 및 생활환경의 질적 향상을 도모하고자 본 사업이 계

*1 (주)엔지이에스 기술부 부장 (leeqj@hanmail.net)

**2 을지대학교 보건환경과학부 교수, 공학박사

**3 정회원, (주)도화지질 대표이사, 공학박사

**4 김천시청 환경관리과

획되었으며, 2004년 9월부터 2005년 7월까지 기본 및 실시설계 용역이 수행되었고, 주민설명회 과정을 거쳐 2005년 8월 공사발주, 2007년도 5월에 준공 및 사용개시 신청을 하는 과정으로 사업이 추진되고 있다.

본 고에서는 김천시 생활폐기물매립시설 조성사업 중 바닥차수층 공중 부분에 대한 내용을 중심으로 매립시설 조성사업에 대한 적용사례를 개략적으로 서술하고자 하며, 특히 본 사업에 적용된 환경부 신기술 지정 제22호인 “폐기물매립장 복합차수층 조성공법”에 대한 시공 및 품질관리 등 기술적인 내용을 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 김천시 생활폐기물 매립시설 조성사업 현황²⁾

표 1. 김천시 생활폐기물매립시설 조성사업 개요

구분	내역
부지 면적	사업부지: 44,989㎡ 진입도로: 2,260㎡
매립 면적	25,378㎡ (1, 2, 3차분 합계)
매립 용량	173,823㎥ (1, 2, 3차분 합계)
매립가능기간	약 16년 (1차: 6년, 2차: 4년, 3차: 6년)
주요 공사 내용	<ul style="list-style-type: none"> ■부지조성: 저류구조물(홍제방) 축조, 침출수 차단 및 집배수시설 지하수 및 우수 배제시설 및 도로시설 침출수누출탐지시스템 ■매립가스 포집시설 ■관리시설: 관리동, 작업동 ■부대시설: 계량시설, 세운 및 세차 시설, 펜스 시설 등 ■조경시설: 차폐수목 및 환경정화수 식재

경상북도 김천시 개령면 서부리 616번지 일원에 위치한 본 매립시설은 1, 2, 3차분 합계 규모로 총 매립면적 25,378㎡, 총 매립용량은 173,823㎥로서 약 16년간 매립이 가능하도록 설계되었다. 2005년 9월에 착공되어, 2006년도 5월~6월까지 차단층 공정이 수행되어졌으며, 전체적인 조성사업 개요를 표 1에 나타내었다.

2.2 바닥차수층 조성기술 현황

바닥층은 폐기물 매립지에서의 모든 요소 중 가장 중요한 부분이며 환경적 안정성을 요구하고 있다. 폐기물의 침출수는 복합적인 오염물질을 함유하고 있어 처리에 있어서도 상당한 어려움을 겪고 있다. 이러한 침출수를 차수하기 위해서는 바닥층의 안전한 설계와 시공이 우선적으로 이루어져야 한다.

차수층의 설계는 보통 점토의 투수계수 안에서 오염물질의 이동, 확산, 화학적특성 및 동수경사 등에 대하여 층의 두께를 어떻게 결정하는가에 기준을 두고 있다. 그러나 실제적으로 차수층의 설계에 있어서 중요한 것은 다짐 시 설계기준에 맞는 투수계수(국내·외 기준 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하)를 가질 수 있는 적당한 차수물질을 잘 선택하는 것이며, 그 다음 일정한 두께를 근거로 하여 다짐방법에 따라 포설을 하는 것이다. 차수층의 요구조건으로는 1)이류와 확산으로 인한 오염물질 이동의 최소화, 2)오염물에 대한 높은 흡착능력과 지연효과, 3)화학적물질과 침식에 대한 저항성 등을 종합적으로 고려하여 설계하는 게 중요하다.

현재 국내에서 폐기물매립장의 바닥차수층 용도로 사용되고 있는 공법으로는 1) 벤토나이트 혼합토 공법, 2) 침출수 방지용 차수벽 설치공법, 3) 자가형

성 자가치유 공법 및 4) 폐기물매립장 복합차수층 공법 등이 주로 적용되고 있다. 이들 공법들은 각각 장, 단점을 가지고 있으며 다양한 토질 조건 및 기상 조건을 가진 우리나라에 일률적으로 적용하기에는 어려운 면이 있다. 설사 차수나 지반 보강을 위하여 고 비용을 투입하고서도 그 성능 및 효과를 신뢰하기 어려운 경우도 종종 발생하기도 한다.

벤토나이트 혼합토 공법의 경우 벤토나이트의 팽윤작용으로 인해 차수효과면에서는 신뢰성이 우수하나 자제 발현 강도가 거의 없다는 단점과 함께 건조시 크랙 발생이 우려되는 성질이 있으며, 침출수 방지용 차수벽 공법의 경우 시멘트와 고화제의 고화작용으로 인해 상대적으로 다른 공법에 비해서는 높은 강도를 확보할 수 있으나 양생과정 중 소성 및 건조수축으로 인한 균열발생 등 차단층 표면이 손상을 입게 되는 경우가 발생할 소지가 있다. 이 밖에 자가형성/자가치유공법은 두 층에 존재하는 반응성 물질의 반응으로 인해 경계면에서의 침전물을 형성하여 차수성능을 증진시킨다는 개념을 도입한 공법으로 알려져 있다.

설계단계시 상기에서 소개된 4가지 공법에 대한 차수메커니즘 및 각각의 공법들에 대한 장단점을 비

교한 검토 내용을 분석하고, 현장여건을 충분히 고려하여 본 조성사업의 바닥차수층 공종에서는 특허 등록 제 418560호 및 환경부 환경신기술 제22호로 지정된 “폐기물매립장 복합차수층 조성공법”을 선정하였으며, 이 공법에 대한 내용은 다음 절에서 설명하였다.

2.3 폐기물매립장 복합차수층 조성공법

본 공법은 기존의 차수층 공법들이 가지고 있었던 문제점들을 최소화하기 위하여 가장 최근에 개발된 것으로서, 매립장 차수층의 기능손상을 방지하며, 매립장 내부로의 우수 및 지표수의 유입을 방지하여 침출수의 발생량 자체를 절대적으로 감소시킴으로써 지하수 및 지반환경 오염을 최소화하고, 보다 안전한 매립환경을 조성하기 위해 개발되었다. 즉, 매립장 현장 부근에서 사용가능한 흙에 각각 상부층첨가재(BLT), 중간층첨가재(BLM), 하부층첨가재(BLL)를 일정량 혼합하여 다짐, 조성함으로써 폐기물관리법에 의한 최종차단층을 조성할 수 있는 기술이다.

사용 흙에 따라 각각 첨가제의 혼합량을 조절하여

표 2. 각 층별 첨가재료 및 특징

구분	첨가 재료	특 징	첨가재 배합량
상부층 (BL-T)	BLT (시멘트계 고화제)	<ul style="list-style-type: none"> • BLT 고결에 의한 차수 • 표면열화, 균열최소화 • 동결융해저항성 	<ul style="list-style-type: none"> • 흙 (90~95%) • 각 층별 첨가재 (5~10%)
중간층 (BL-M)	BLM (벤토나이트 및 미생물, 활성재제)	<ul style="list-style-type: none"> • 벤토나이트 팽윤 작용 • bio-film 형성 • 오염물질의 부분적 제거 	
하부층 (BL-L)	BLL (석회계 고화제)	<ul style="list-style-type: none"> • BLL 고결에 의한 차수 • 지반 개량 • 연약지반 처리 효과 	

투수계수 기준을 만족시킬 수 있으며 또한 현장 조건에 따른 유연한 설계 및 시공이 가능한 기술로서, 동결융해 및 건조습윤 작용에 대한 저항성이 있으며 또한 차수층 내에 미생물의 생장에 의하여 bio-barrier(미생물 차수대)를 형성함으로써 투수계수 저감 및 부분적인 오염물질의 제거가 가능한 기술로서, 각 층의 구성 및 성능을 요약하여 표 2에 나타내었다.⁴⁾

현장여건상, 매립지의 위치가 해안가나 연약지반 상에 위치하지 않은 관계로 인해 지반개량효과가 있는 하부층(BLL층)은 제외하였으며, 매립지 안정화에 따른 부등침하 발생에 대한 신속적인 대응, 매립지 내부로의 오염물질 이동시에도 미생물차수대 형성에 의한 차수기능 유지 및 오염물질 제거 효과를 극대화하기 위하여 BLT층(20cm)과 BLM층(30cm) 즉, 바닥차수층 조성두께를 50cm로 하는 2개층으로 구성하여 시공성 증대효과를 도출하였다.

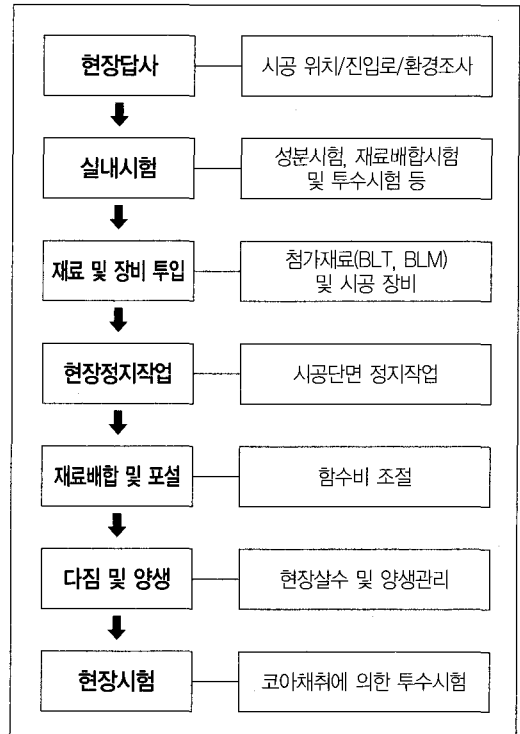


그림 1. 시공단계 공정도

2.4 차단층 시공 과정

2.4.1 시공 개요

차수층의 성능은 사용하고자 하는 흙의 상태에 따라 각 첨가물질의 배합비를 달리하여 최적의 배합비를 산정하여야 하므로, 먼저 각 흙의 특성을 파악하고 이에 대한 실내시험을 거친 후, 최종 배합비를 결정하여야 한다.

본 공사에 적용된 최종차단층 시공은 현장에서 흙과 각각의 첨가재(BLT 및 BLM)를 혼합하여 포설한 후 소정의 다짐도에 이르도록 다짐하는 과정으로 이루어지며, 전체적인 기본 공정도를 그림 1에 나타내었다.

품질관리를 위한 시험은 실내시험과 현장시험으

로 구분되며 실내시험으로는 주로 흙과 첨가재(BLT 및 BLM)에 관한 시험으로 함수비시험, 입도분석시험, 다짐시험, 변수위투수시험, 성분분석시험, 용출시험 등을 실시하였으며, 시공 중에는 흙의 현장함수비와 현장다짐도를 측정하였고, 현장시험은 시공 종료 후 코아시료를 채취하고 공인시험기관에 시험을 의뢰하여 투수시험을 실시함으로써 시공완료된 최종품질을 확인하였다.

2.4.2 사전 실내시험

본 시공에 앞서 차단층시공에 대한 최적의 품질관리 기준을 정하기 위하여 시공에 사용할 흙재료와 첨가재(BLT 및 BLM)에 대하여 실내시험을 수행하

복합차수층공법이 적용된 매립장 바닥차수층 시공사례 [김천시 생활폐기물매립시설 바닥차수층 적용사례를 중심으로]

었다.

흙재료에 대한 기본 토성시험을 통하여 기본적인 물성을 분석한 결과, 흙의 자연함수비는 12.5%, 밀도는 2.678g/cm³, 액·소성한계는 NP로 나타났으며, 투수계수는 6.5×10⁻⁶cm/sec, 통일분류법에 의한 흙의 종류는 SM계열의 흙으로 평가되었으며, 이들 내용을 정리하여 표 3에 나타내다.

KSF 2312에 의한 다짐시험결과 흙재료는 최대건조밀도가 1.736 g/cm³, 최적함수비는 14.4%로 나타났으며, 각각의 첨가재에 대한 적정혼합비를 결정하고자 첨가재 배합안에 따른 배합별 다짐시험 및 투수시험을 실시한 결과, BLT첨가재의 경우 모두 1m³당 120kg의 배합안(제2안)을 적용했을 때 바닥차수층 법적투수계수기준치(1.0×10⁻⁷cm/sec) 이하인

9.0×10⁻⁶cm/sec가 측정되었고, BLT첨가재의 경우에는 112kg의 배합안(제2안)을 투입하였을 때 7.8×10⁻⁶cm/sec의 투수계수가 계속되었다. 이들 첨가재 배합비에 따른 다짐 및 투수시험결과를 표 4에 나타내었다.

사용되는 첨가재에 대한 화학성분분석(KS L 4007) 및 유해물질 용출시험을 실시한 결과, 표 5와 같이 BLM첨가재는 SiO₂ 63.30%, Al₂O₃ 6.90%, CaO 1.69% 등의 순으로 실리카 성분이 상당히 많은 부분을 차지하고 있는 반면, BLT첨가재는 CaO 31.10%, SiO₃ 11.30%, SO₃ 7.10% 순으로 분석되었으며, 폐기물공정시험법에 의한 용출시험 결과 Pb, Cd, Cr+6, Cu, As, Hg, CN 등의 중금속성분은 전혀 검출되지 않았음을 확인하였다.

표 3. 흙 종류의 판정 및 기본적인 물성

시험 항목	목적	시험 방법	시험 결과
함수량 시험	흙의 자연함수비	KSF 2306	12.5 (%)
밀도시험	밀도	KSF 2308	2.678
액성한계시험	액성한계	KSF 2303	* NP
소성한계시험	소성한계	KSF 2304	* NP
흙의 분류	흙 종류 정의	AASHTO 분류법	** SM
투수 계수	사용 흙의 투수계수	KSF 2322	6.5×10 ⁻⁶ cm/sec

*) NP : 비소성(Non Plastic)

**) SM : 조립토 모래 (Sand), 세립분 12% 이상 함유 (Mo)

표 4. 배합별 실내다짐시험 및 투수시험결과

구 분	첨가재 배합량 (모토 1m ³ 당 투입량)	시험 결과		
		최대건조밀도 (g/cm ³)	최적함수비 (w, %)	투수계수 (cm/sec)
BLT 첨가재	제1안(104kg/m ³)	1.709	16.9	3.1×10 ⁻⁷
	제2안(120kg/m ³)	1.717	16.2	9.0×10 ⁻⁶
	제3안(136kg/m ³)	1.732	15.2	7.9×10 ⁻⁶
BLM 첨가재	제1안(96kg/m ³)	1.701	16.1	1.3×10 ⁻⁷
	제2안(112kg/m ³)	1.709	17.3	7.8×10 ⁻⁶
	제3안(120kg/m ³)	1.716	18.3	6.5×10 ⁻⁶

표 5. 첨가재료에 대한 화학성분 분석결과

(단위 : %)

구분	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SiO ₃	강열감량
BLT첨가재	11.30	1.17	4.20	31.10	1.83	0.52	7.1	2.31
BLM첨가재	63.30	1.66	6.90	1.69	1.60	0.52	-	14.56

2.4.3 재료 혼합

본 공사에 적용된 혼합방법은 선별과 연속혼합이 가능한 플랜트장비를 이용하였으며 이 장비는 크게 첨가재를 저장할 수 있는 호퍼와 흙을 사용가능 크기 이하로 선별할 수 있는 장치 그리고 혼화재와 흙을 혼합할 수 있는 교반장치로 구성되었으며, 실내배합다짐시험결과로부터 도출된 배합비는 설계시방에 준하여 현장에서 사용되는 흙 1m³(γ_{dmax} 1.736g/cm³) 당 BLT첨가재 120kg, BLT첨가재 112kg을 각각 혼합하였다.

차단층 재료의 생산 과정은 그림 2와 같이 원지반 상태의 흙재료를 20mm의 체가 설치된 2중 스크린에 통과시켜 잡석 및 나무뿌리 등의 이물질 제거하고, 이러한 선별토에 고압분사기로 살수하여 15% 내외의 함수비가 되도록 조절하였다. 이와 같이 선별된 흙과 사이로에 저장된 첨가재를 스크린에 설

치된 교반장치에 스크류식 이송장치로 이송하여 최대한 균일한 혼합이 되도록 조절하였다.

2.4.4 포설 및 다짐

선별과 배합과정을 거친 혼합토는 백호를 이용하여 15ton 덤프트럭에 상차하여 시공장소로 운반하였다. 현장에 포설된 혼합토는 그림 3과 같이 도저를 이용하여 다짐작업이 용이하도록 포설을 완료한 후, 모터 그레이더를 이용하여 표면마무리 작업을 실시하여 궤도장비의 비궤자국으로 인한 요철부분과 잡석을 제거함으로써 후속 다짐공정에 의해 최대한 평탄한 면이 되도록 하였다. 다짐은 평지부의 경우 진동이 가능한 1ton급 콤팩터를 사용하였으며, 시험 다짐을 통해 95% 이상의 상대다짐도에 이를 수 있는 최소 왕복횟수를 결정하고 그 이상의 다짐 횟수가 이루어지도록 하였다.



그림 2. 재료혼합 공정



그림 3. 포설 및 다짐 공정



그림 4. 현장다짐도 측정

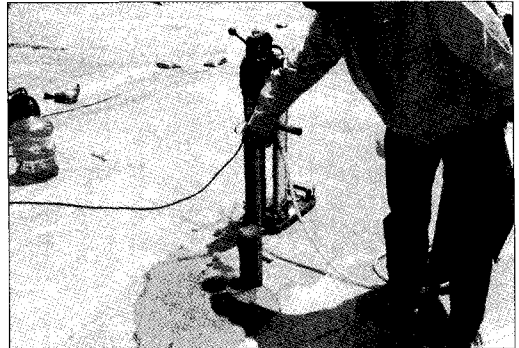


그림 5. 현장코어 채취

표 6. 현장다짐도 측정결과

구 분	건조밀도 (γ_d)	상대다짐도 (%)	시험방법
No.1	1,698	99.3	KSF 2311-96
No.2	1,715	100.4	
No.3	1,682	98.0	
No.4	1,729	100.7	

표 7. 현장코어 투수시험 결과

구 분	투수계수 (cm/sec)	층 구분	시험방법
No.1	6.9×10^{-8}	BLM층	KSF 2306-00
No.2	8.4×10^{-8}	BLT층	
No.3	9.1×10^{-8}		
No.4	9.3×10^{-8}		

2.4.5 시공 후 품질확인시험

차단층의 품질 확인을 위하여 다짐을 완료한 후 그림 4와 같이 시공된 장소에서 총 4회에 걸쳐 현장 다짐도를 측정하였고, 그 결과 표 6처럼 상대다짐도(%)의 값은 98.0~100.7 %의 범위로 계측되어, 시방서 상대다짐도 기준 95% 이상을 모두 만족하였다.

또한, 차단층 시공이 완료 시점에서 14일 이후에 그림 5와 같이 현장코어를 4개 채취하여 변수위 투수시험을 수행하였다. 투수시험을 위한 시료는 회전식 코어채취기를 사용하였으며, 표 7에서 보듯이 현장에서 채취된 총 4개의 시료에 대하여 실시한 투수시험 결과는 BLM층은 6.9×10^{-8} cm/sec로 계측되었고, BLT층은 각각 8.4×10^{-8} , 9.1×10^{-8} , 9.3×10^{-8} cm/sec의 범위로 나타나 폐기물 관리법에 의한 설

계기준인 1×10^{-7} cm/sec 이하의 기준치를 만족함을 확인하였다.

3. 결론

김천시에서 발생하는 폐기물에 대한 위생적이고 안정적인 최종처리 위하여 사업이 추진되었던 생활 폐기물매립시설 조성사업 내용 중, 바닥차수층 공정과 관련하여 설계과정의 주요사항 및 시공과정의 단계별 시험분석내용을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 흙재료에 대한 기본 토성시험을 통하여 기본적인 물성을 분석한 결과, 흙의 자연함수비는 12.5%, 밀도는 2.678 g/cm^3 , 액성·소성한계는 NP로

나타났으며, 투수계수는 $6.5 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$, 통
일분류법에 의한 흙의 종류는 SM계열의 화강
풍화토로 현장 인근에서 채취하여 시공성이 용
이하였다.

2. 사용되는 첨가재에 대한 화학성분분석을 실시
한 결과, BLM첨가재는 SiO_2 63.30%, Al_2O_3
6.90%, CaO 1.69% 등의 순으로 실리카 성분이
상당히 많은 부분을 차지하고 있는 반면, BLT
첨가재는 CaO 31.00%, SiO_2 11.30%, SO_3
7.10% 순으로 분석되었으며, 폐기물공정시험
법에 의한 용출시험 결과 Pb , Cd , Cr^{6+} , Cu , As ,
 Hg , CN 등의 중금속성분은 전혀 검출되지 않
았고, 따라서 사용 재료의 환경적 무해성을 검
증하였다.
3. 바다치수층의 투수계수가 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이
하의 법적기준치를 만족하기 위해서 각각의 첨
가재 배합안에 따른 배합별 다짐시험 및 투수시
험을 실시한 결과, BLT첨가재의 경우 모토 1m^3
당 120kg의 배합안(제2안)을 적용했을 때 9.0
 $\times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 가 측정되었고, BLM첨가재의 경
우에는 112kg의 배합안(제2안)을 투입하였을
때 $7.8 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 투수계수가 계측되었다.
4. 준공 시, 시공된 최종차단층의 시료를 채취하여

공인시험기관에 변수위 투수시험을 의뢰한 결
과, 설계기준치인 $1 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ 이하의 투수계
수를 만족하였고, 현장 다짐도시험에서는 설계
기준인 최대건조밀도의 95% 이상을 모두 만족
하는 것으로 나타났다.

5. 현장 시공 완료 후, 시공되어진 바다치수층 부
분에 대해서 차수성능을 포함한 여러 가지 공학
적인 거동특성을 장기간 분석함으로써 향후 기
술적인 보완 자료를 데이터화할 필요가 있을 것
으로 사료된다.

참고 문헌

1. 환경부(2005), 환경백서, p. 586.
2. 김천시(2005), 김천시 생활폐기물매립시설조성사업 기본
및 실시설계보고서, pp.3-15, 205-227.
3. 환경부(2002), 폐기물관리법 시행규칙, 폐기물처리시설
의 설치기준.
4. (주)엔지에스(2005), "바이오-배리어에 의한 복합차수층
조성기술", 제6회 환경신기술발표회 발표논문집, 환경관
리공단, 제주도, pp. 256-259.

