

불량 폐기물 매립지의 사후 활용방안

이 재 영
(李在榮)

서울시립대학교
환경공학부 교수



I. 서 론

II. 매립지의 안정화 처리방안

III. 결 론

I. 서 론

불량폐기물 매립지의 문제는 매립가스와 침출수의 방출 및 이동에 의한 인간위생 및 환경에 악영향을 미치는 경우라 할 수 있다. 특히 매립가스의 대기방출은 인간에게 위해성과 지구 온난화 등에 영향을 미치고 있다 한다. 그러므로 폐기물 매립지 및 불량매립지의 안전한 처리는 인간이 살고

있는 지구의 환경에 좋은 영향을 줄 것이다. 또한 우리 나라와 같이 인구밀도가 높고 좁은 국토면적을 가진 나라는 불량폐기물 매립지를 다른 목적으로 사용하고자 할 경우 매립지는 인간활동 및 사용계획에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 적절한 처리방안을 모색하여야 할 것이다.

우리나라의 사용종료 불량폐기물 매립지는 전국적으로 다양하게 분포되어 있으며, 총 1,700여개소(환경부, 898)가 있는 것으로 조사되었다. 그중 5000㎡ 미만의 소규모 매립지가 조사된 전체 불량매립지의 64%인 1,100여개소로서 대부분을 차지하고 있으며, 그 중 규모가 1,000㎡ 미만도 300여개소로서 전체의 17%에 달하여, 대부분 소규모 매립지로 나타났다. 이러한 매립지의 이용실태 및 계획을 보면 농지, 대지, 초지, 공원, 주차, 공공용지, 적환장 순으로 비교적 소극적인 면을 볼 수 있다. 현재 미국과 같이 국토 면적이 넓은 나라는 매립지 폐쇄 후 약 30년의 관리 및 안정화 기간을 두고 있지만 우리나라와 비슷한 일본과 같이 국토면적이 좁은 나라인 경우는 매립부지의 조기 안정화를 통한 토지의 재사용을 모색하고 있다. 우리

나라에는 현재까지 불법적으로 조성된 불량매립지가 다수 분포하고 있다. 여기서 불량매립지란 바닥층의 차수시설, 최종복토층 및 환경오염 방지시설이 적정하게 갖추어져 있지 않은 곳을 말한다. 이러한 불량매립지는 두 가지 측면에서 바라볼 수 있다. 우선 하나는 환경문제로서 침출수로 인한 매립지 주변의 지하수 오염문제와 매립가스로 인한 악취문제 등을 예상할 수 있고, 다른 하나는 지반공학적 측면으로서 매립지역은 연약지반의 형태로 구분할 수 있으며 개발계획시 토지 이용적 측면에 장애가 되고 있다. 또한 불법으로 매립된 폐기물은 굴착 후 기존에 운영되고 있는 위생매립지나 새로 계획되는 매립지로의 운송이 어려운 상황이다. 따라서 현존하는 불량폐기물 매립지를 적절히 처리하기 위한 방안의 모색이 필요하다.

본 고에서는 이러한 불량폐기물 매립지(사후종료매립지) 문제를 해결하기 위하여 적용 가능한 방법과 처리후 사용사례에 대하여 국내·외적으로 알아보기로 한다.

II. 매립지의 안정화 처리방안

불량폐기물 매립지를 완벽한 절차를 거쳐 토지 안정화를 실시한 국내의 예는 거의 없는 실정이며 외국에서 추진하고 있는 매립지 안정화 처리방안으로 동다짐공법, 약품혼합 다짐 처리법, 매립존치 및 오염방지에 따른 활용방법, 퇴비화 처리, 폐기물 재운반 후 불량매립지의 조기이용 방법, 조기안정화에 의한 굴착 및 선별 처리법(Waste Mining Method) 등이 사용되고 있다.

1. 동다짐

가. 개 요

수작업에 의한 다짐장비로 지반의 지지력(bearing capacity)을 개선시키는 Tamping 방법은 수세기 동안 이용되어 왔다. 토양다짐에서 타격에너지를 이용하는 원리는 1930년대 도로건설시 2~3m의 높이에서 2~3ton의 추(pounder)를 사용하여 도로건설에 응용하였다. 1970년대에 Menard와 Broice가 연약지반 개선을 위해 동다짐 공법을 개발한 이래 많은 경험들이 축적되어 왔다.

초기에는 10m의 높이에서 8ton의 추를 낙하시켜 80tm의 에너지를 얻는데 불과했으나 현재는 4,000tm의 에너지를 얻을 수 있는 기술까지도 개발되었으며 이는 20m의 높이에서 200t의 추를 낙하시키는 것에 해당된다. 오늘날 400~700tm의 에너지를 얻는 기술은 상당히 일반적이며, 연약지반의 심도 30m까지 개량할 수 있다. 현재까지 동다짐 공법의 응용은 약 1,500여회, 처리면적도 약 1,300만㎡에 이르며 전 세계적으로 이용되고 있다.

동다짐 공법이 적용 가능한 지반조건은 잡석, 자갈에서부터 점토질과 퇴적토질의 거의 모든 형태의 토양에 이르기까지 다양하다. 특히 점토질과 퇴적토질의 경우는 vertical drain과 sand 또는 rock columns와 같은 다른 기술과 접목하여 사용된다. 일반폐기물과 산업폐기물의 매립지는 선행압밀(preloading)과 변형의 획일성(The Uniformity of deformation)의 조건하에서 동다짐 처리될 수 있다. 현장공사 및 실험실 연구결과와 조사에 기초를 둔 Foreign monitoring(Quality Assurance

System : 특성 보장체계)과 여러 해에 걸쳐 수행된 동다짐 공법의 적용경험은 폐기물 매립지의 장기기간에 걸친 안전성의 개선을 위해서는 동다짐 공법을 최적화 하는 model의 개발이 필요하다고 본다. 동다짐 공법의 기술적인 배경과 토질역학의 경험들은 일부 현실화된 현장공사에 의해 설명 또는 제시되고 있다.

여기서, 선행압밀공법은 연약지반의 공학적 성질을 개량하기 위한 한가지 방법으로서 연약지반 표면에 등분포하중을 가하여 목적된 구조물의 설치 이전에 필요한 만큼의 압축이 발생하도록 유도하는 공법이다. 선행압밀공법의 하중을 부과하는 가장 흔한 방법으로는 토사(혹은 암석) 성토와 물탱크 등의 설치이다. 다만 이 공법은 수개월부터 1년 이상의 긴 시공시간이 필요하므로 토목사업의 계획 초기단계에서부터 시공여부가 결정되어야 한다.

배수(drainage)공법은 선행압밀공법에 의한 지반개량시 투수성이 나쁜 연약 점토층의 두께가 크면 지반개량에 소요되는 기간이 1년이상, 경우에 따라서는 수년씩 길어지기 때문에 이 기간을 단축시키는 공법이다. 배수공법에는 배수통로의 재료나 형성과정에 따라서 모래 말뚝식(sand pile), 압밀 배수(paper drain)식, 그리고 모래다짐 말뚝(sand compaction pile) 등이 있다.

동다짐 공법은 적용시 대상 지반을 격자형으로 분할하여 계획에 따라 하나건너씩 집중적으로 Tamping을 실시하고, 또한 시공과정에 지반조사를 병행하여 수시로 개량효과를 측정함으로써 효과적인 시공이 가능하다. 또한 초기에는 큰 에너

지로 Tamping하여 지반의 깊은 곳을 개량한 뒤 마지막으로 가벼운 Tamping을 가함으로써 지표 부근을 개량하여 전 깊이에 걸쳐 고르게 개량할 수 있다.

일반적으로 불량매립지를 개량할 때는 매립층 폐기물과 이미 존재하는 토사만으로는 동다짐 공법을 적용하여 다짐밀도를 일정 값 이상으로 균일하게 개량하는데 기술적 어려움이 많기 때문에 잡석, 모래, 자갈 따위를 혼합하여 다짐처리하는 동적치환공법을 동다짐공법과 함께 적용하는 것이 좋다.

나. 동다짐 공법의 특징

1) 장 점

① 잡석, 자갈, 모래, 세립토 및 폐기물 지반, 지하수 아래 토질의 다짐에 이르기까지 광범위하게 적용이 가능하다.

② 지반의 균질성에 대하여 시공과정에서 유연하게 대처할 수 있으므로 넓은 면적의 부지일지라도 확실하게 개량할 수 있다.

③ 절대공사기간에 제한을 받지 않고 급속시공이 가능한 공법으로서 특별한 약품이나 재료가 필요치 않은 점 등이다.

④ 대부분의 연약 폐기물층이 완전 포화된 것이 아니므로 충격을 가하면 간극내의 소량의 기체가 물로 용해되어 결과적으로 간극 부피를 감소시킨다.

⑤ 액상화, 배열과 전단 그리고 다짐 발생하는 과잉간극 수압의 확산 등으로 인하여 다짐동안에 투수성이 증가한다.

⑥ 다짐에 의하여 전단강도가 감소함에 따라 틱스트로피¹⁾ 강도가 얻어진다.

2) 단 점

① 유기물 분해에 의한 잔류 침하를 예측할 수 없다.

② 썩음에 의한 소음 진동이 발생한다.

③ 기존 구조물과 이격거리를 확보해야 한다.

④ 가스, 침출수, 악취 및 비산먼지 발생의 우려가 있다.

2. 약품혼합다짐처리법

가. 개 요

약품혼합다짐처리 공법은 「연약지층을 터파기하여 지상에서 약품 혼합시켜 다짐처리 하는 방법으로서 지반의 투수성을 감소시키고 지반의 강도를 증가시키는 공법」이다. 그리고 소형기계에 의한 시공성이 우수해서 유효한 지반개량 공법으로

많이 사용된다.

특히, 최근에는 바다나 하천 가까이에서 복잡한 퇴적층을 나타내는 지반에서의 시공도 증가할 뿐만 아니라 날로 심각한 폐기물 매립장, 산업폐기물 매립장, 오폐수 고화처리 등 지반조성에 점토공법, 비닐시트 공법이 아닌 현장의 흙을 이용하여 시멘트를 혼합한 약품을 보강하여 지반강화를 증대시키는 공법으로 선진국인 일본, 미국 등에서 폐기물 처리장 및 고화매립 설치 공법에 적용함으로써 환경오염 방지대책의 일환으로 평가받고 있다.

매립된 폐기물의 현상대에 시멘트와 약품을 혼합하여 폐기물과 토사입자 주변에 부착된 흡착수 중의 유기물을 전반적으로 분해하여 시멘트층의 칼슘이온이 토사입자 표면에 직접 작용하여 인공 암석을 형성하도록 한다.

일반적인 약품의 화학성분은 <표 1>와 같이 칼슘, 마그네슘, 칼슘 등 10여종으로 구성되어 있으며 주로 금속원소인 무기염의 복합물로 되어 있다.

<표 1> 약품의 화학성분

성 분	함 유 량 (%)
SiO ₂	22.0
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	7.5
CaO + MgO	62.8
SO ₃	2.2
기 타	5.5
합 계	100

1) 틱스트로피(Thixotropy)란 교란된 흙이 시간이 지남에 따라 손실된 강도의 일부를 회복하는 현상

나. 약품혼합 다짐 처리법 특징

1) 장 점

① 폐기물중 유해, 유독물질이 함유되어 있는 상태로 본 공법을 적용하여 침출수, 유독가스 발생문제를 감소시킬 수 있다.

② 폐기물 매립지의 현장토사(폐기물포함)를 이용, 시멘트에 화학약품을 혼합 처리하는 방법으로 폐기물 및 현장토사를 재사용 할 수 있다.

③ 일반 토양 뿐만 아니라 부식토의 실트, 점토 질 등의 초연약 지반을 개량할 수 있으며 적당한 강도 및 불투수력(투수계수 = $1 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$)을 나타낸다.

④ 작업이 용이하며 특수 기술이 필요없다. 시공은 현장토 + 시멘트 + 약품을 잘 교반 혼합하면 좋은 시공을 할 수 있다.

⑤ 타공법에 비해 공기가 단축되며 사후관리가 간단하여 경제적이다.

2) 단 점

① 지하수와 토양의 오염가능성이 있다.

② 약품혼합시 매립지반의 일축압축강도, 다짐 밀도는 증가되나 토사의 특징과는 다르므로 하중이 큰 구조물을 설치할 경우 충분한 토질조사를 요구한다.

③ 약품 혼합시 주변의 소음 및 비산먼지 발생이 우려된다.

④ 국내 폐기물 매립장에 적용사례가 거의 없다.

약품혼합다짐처리 공법과 유사하게 약품을 연약지반 중에 그라우팅 기구로 주입하여 지반을 안정화, 고형화 시킬 수 있는 방법으로는 약액주입

공법이 있다. 주입이란 천연의 지층, 시설물 또는 폐기물 매립시설에 펌프로 보내지는 고화지수재를 압입하는 것을 말한다. 주입이 성공하기 위해서는 압력하에서 주입된 주입체가 분리하지 않고 모든 공동, 틈바구니, 공극에 주입되어 연속적으로 채워져야만 하며 보링구멍이나 주입관을 통해서 주입된다.

그러나, 약액주입 공법의 적용 가능성에 대한 제한요인으로는 폐기물 매립장치럼 불규칙한 매질로 채워져 대단위 공극이 많은 틈바구니에 약액을 주입할 때는 좋은 결과를 얻지 못할 염려가 있다. 그리고 이 경우에는 주입압력을 높여도 소용없다. 즉 약액주입 공법은 폐기물 매립장의 안정화, 고형화 처리시에는 약품처리 효과가 낮으며 타공법에 비하여 고도의 기술이 필요하다.

일반적으로 국내 폐기물 매립장의 평균 깊이는 수도권 대단위 매립지를 제외하면 평균 5m미만이므로 터파기를 이용한 약품혼합 다짐처리가 경제성과 시공성 면에서 상대적으로 월등할 것으로 사료된다.

3) 설계 고려 사항

본 공법의 설계에 있어서 혼합처리약품 주입량을 결정하기 위해서 고려되어야 할 사항으로서는 개량 심도, 지하수위, 매립폐기물의 특성, 지반의 조건, 환경오염(침출수, 가스, 악취, 소음 진동) 등의 항목들이 있다.

가) 개량심도

약품혼합다짐처리 공법은 주로 불도저와 백호우를 사용하여 폐기물층에 약품을 혼합처리하기

때문에 매립고가 5~10m가 적당하다. 10m 이상의 깊이는약품혼합 시공상 어려움이 따라 비균질한 혼합상태가 되어 효과적인 고화처리를 기대하기 힘들다. 김포 매립지를 제외한 전국 사용후 매립지의 평균 총매립고가 10.2m에 불과 할 것으로 보 이므로 본 공법의 적용가능성은 충분하다고 판단 된다.

나) 지하수위

지하수위가 높을 경우 약품의 분해가 초기에 이루어져 고화제 효율이 저하될 것으로 기대된다.

다) 매립 폐기물의 특성

매립된 폐기물의 특성은 일반적인 토사와는 많이 다르다. 폐기물의 매립경과 년수가 오래될수록 일반 토사의 성질에 가까울 수 있으나 난분해성의 비닐 플라스틱류들의 매장량을 사전에 검토하는 것이 필수적이다. 매립 연령이 낮을수록 유기물량이 많고 가스발생도 심하다. 따라서 폐기물의 특성은 토사와는 전혀 다르므로 약품혼합 다짐처리 공법의 적용이 쉽지는 않다.

일반적으로 5년 이상된 매립폐기물의 경우 유기물류는 거의 분해되어 어느 정도 안정화 단계에 도달했음을 알 수 있다. 그러나 5년이하의 폐기물 경우도 약품혼합처리 공법의 적용은 가능하나 비닐 플라스틱과 같은 난분해성 물질의 함유량의 정도에 따라 그 처리효과에 차이가 있으므로 실내와 현장실험을 통하여 그 적용여부를 결정하여야 한다.

라) 지반조건

고화제 약품을 혼합다짐하는 공법은 폐기물 매

립지, 일반지반용, 연약지반, 고함수 개펄용, 유기물 고함유토질, 산업폐기물의 슬러지 등의 처리에 이르기까지 광범위하게 적용된다.

마) 침출수, 가스, 악취

본 공법을 동다짐공법과 비교할 때 침출수, 가스, 악취문제는 많이 감소한다. 각종 폐기물에 함유된 유해물질의 무해화 작용은 조직의 치밀화, 유해물질의 고정화, 유해 중금속류 원소의 이온치환 반응에 의해 이루어진다. 유해물질의 종류, 함유량에 따라 화학약품의 혼합량과 각종 첨가물량을 조절해야 한다. 따라서 본 공법의 적용가능성을 높이기 위해서는 실내와 현장 실험을 통한 매립폐기물의 침출수와 가스발생 문제를 고려하여야 한다.

바) 온도

고화제 약품은 각종 시멘트와 마찬가지로 기온이 높을 때 물과 결합 반응등의 화학반응이 활발하고 낮을 때는 완만해지며 특히 0℃이하에서는 강도의 증가가 기대되지 않는다. 또한 화학약품 첨가량이 적당하지 않고 재령기간이 짧을 때는 기온의 영향을 받기 쉬우므로 겨울철 공사시 세심한 주의가 필요하다.

3. 매립존치 및 오염방지에 따른 활용방법

현재 한국토지공사에서 가장 많이 계획 수행되고 있는 처리방법중 하나인 이 방법은 토지이용의 급박성이 없다면(공원 등), 적용하기에 보다 적합하고 현실적으로 가장 타당한 방법중의 하나가 될 것으로 판단된다. 본 방법은 앞에서 말한 동다짐

및 약품혼합다짐 처리방법과 병행하여 사용할 수 있는 방법이다.

본 방법의 기본 개념은 1차적으로 비위생적으로 처리된 매립으로 인하여 커다란 오염원(pollutant source)으로 존재하고 있는 매립지 주위의 환경오염 영향을 저감시키는데 있으며, 2차적으로 환경오염의 차단과 병행 혹은 별도로 매립지의 안정화를 기하며, 상기의 개념에 입각한 혹은 결과에 따라 적용 가능한 토지의 이용방안을 수립하는 것이라고 할 수 있다.

가. 기술적 타당성

비위생적으로 매립된 불량 매립지에서의 각 오염 항목에 대한 대책을 수립하는 것으로서 기술적으로 가능하고 가장 현실적인 방법이다. 따라서 본 방법은 적용기술의 특수성보다는 설계기술이 큰 비중을 차지하게 될 것이다. 하수오니 및 특정 폐기물에 대해서는 일반폐기물과 구분하여 대책을 수립해야 한다. 예로서 고형화를 실시하여 안정화시키거나 굴착하여 처리한 곳에 일반적인 오염방지 시설을 설치한다.

각 오염대책 적용시 항목별로 나누어 적용시기를 결정하며 각 항목의 연관성 및 경제성을 고찰하여 실시 순위를 정하여 연차적으로 실시가 가능하다.

나. 오염 영향

공사기간중 악취, 침출수에 의한 지표수 및 지하수의 오염 등이 발생되며 다른 방법에 비해 오염영향을 최소화 할 수 있는 방안을 우선적으로 실시하여야 한다. 철저하고 장기적이고 지속적인 감시(monitoring)시설의 설치 및 운영이 필요하다.

다. 토지 이용성

폐기물을 매립한 채로 오염방지 시설을 설치하고 안정화를 피하기 때문에 매립층의 장기적인 침하 및 가스 발생 등이 일어나며 이의 영향으로 인하여 단기 내에 고도의 토지이용은 불가능하다. 따라서 토지이용계획을 단계별로 나누어 초기는 공원으로 이용하고 매립지반이 충분히 안정된 후에 고도적인 이용을 하는 등 효과적인 토지이용계획을 수립해야 한다.

라. 최종복토(final covering)

위생매립시의 운영 중 설치되어야 할 일일복토 및 중간복토의 설치도 중요하나, 폐쇄후의 최종복토층의 설계를 더욱 효율적으로 계획 건설하는 것이 중요하다. 최종복토의 필요성 및 역할은 침출수의 발생을 방지하기 위하여 매립지 내부로의 우수 침투 차단, 매립지가스(LFG)의 표면으로 누출 방지, 해충, rodent의 서식 방지, 침강 및 침하에 대한 저감효과 등이다.

최종복토층의 구성은 우수와 가스의 차단을 위한 차단층(점토층 혹은 Geomembrane(HDPE/PVC) 등의 인공차수막), 이를 중심으로 상부에 배수층 및 하부에 지지층을 설치하고 맨 위 표면에는 뿌리가 짧은 식물을 위한 식생층을 설치한다. 이들 최종 복토층의 구성은 주변환경에 따라 다르게 설계·시공되어야 한다.

마. 침출수 차단벽

매립지 전체둘레에 차단벽을 설치하여 매립폐기물의 분해시 발생되는 침출수(leachate) 및 가스

(LFG)의 거동을 방지함으로써 지하수의 오염 및 인근지역의 환경오염을 막을 수 있다. 차단벽은 매립지 둘레의 표면상단에서 수직으로 지하 불투수층까지 설치되어 매립지 전체를 완전히 에워싸는 것을 원칙으로 한다. 차단벽으로는 일반적으로 완전히 차수를 기할 수 있는 Slurry Wall System을 가장 널리 사용하고 있으나 그 외의 여러 가지 공법을 사용할 수도 있다.

바. 침출수 처리시설

매립폐기물의 분해시 발생하는 침출수의 오염 농도는 상당히 높으며, 일반적으로 중금속을 포함한 다양한 오염물질들이 포함되어 있어 심각한 지하수의 오염을 초래한다. 따라서 이의 차단을 위해 침출수 차단벽을 설치할 경우 일반적으로 매립지내 갇히게 될 침출수의 추출 및 처리가 요구되게 된다.

사. 매립지가스(LFG) 유출설비

매립된 폐기물이 생화학적 분해과정을 통하여 분해되면서 가스를 생성하게 됨을 앞에서 언급한 바와 같다. 이렇게 발생된 가스(LFG)는 지하에서의 거동을 거쳐 표면으로 방출되면서 어느 한곳에 모여 있을 때 폭발, 화재의 위험성을 갖게 되며 대기중에 누출될 때는 악취를 발생시키게 된다. 이러한 LFG의 추출처리 필요성은 환경오염의 방지 측면에서 뿐만 아니라 매립지내의 공극 내에 갇혀 있는 기 발생가스를 추출함으로써 폐기물의 분해 작용을 촉진시켜 매립지 전체의 안정화에도 도움을 준다.

아. 발전 설비

매립지가스(LFG) 유출설비를 통하여 포집된 LFG는 그 양이 적거나 성분에 따라 이용가치가 없을 경우는 연소를 시켜 무해화 한 다음 대기로 방출한다. 매립지가 커서 매립지가스의 발생량이 많을 경우 이를 이용한 가스발전소의 건설도 가능하다.

자. 안정화 및 기타

상기에 검토한 안정화의 대책 외에 실질적으로 포함되어야할 사항으로는 사면의 안정화를 통한 토목공학적 측면에서의 매립지 안정과 특정폐기물 및 하수오니의 처리 등을 꼽을 수 있다.

4. 퇴비화 처리

퇴비화는 현재 가장 문제가 되고있는 음식물 폐기물을 처리하는 방법중 하나라고 말할 수 있다. 토양미생물의 작용에 의하여 벼짚류, 분뇨, 폐기물, 탈수오니, 톱밥 등 유기성 폐기물을 호기적 조건으로 분해시켜 그중 분해성 성분을 가스화하여 안정화하는 방식을 퇴비화(composting)라 부른다. 이때 유기물의 산화시 발생하는 에너지에 의해 유기물에 혼재하고 있는 병원균, 기생충류, 파리 등이 사멸되어 위생적인 안정화가 이루어지며 매립시 발생하는 침출수에 의한 지하수의 오염문제가 없어지고 퇴비화 공정에 따른 유기탄소의 미생물 호흡에 의한 분해로 전체적인 폐기물의 분량이 감소되는 장점이 있다.

폐기물이 부패하는 과정에서 생성되는 악취는

낙산, 아민류, Mercaptan류 등에 의한 것으로 이 물질도 퇴비화 도중 호기성 미생물에 의하여 무취의 가스로 분해되므로 퇴비화 후의 악취는 문제가 되지 않는다. 이외에 폐기물이 규제치 이상의 중금속을 함유하고 있을 경우 시장성 확보문제, 장시간의 숙성 등의 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 중금속에 대한 규제치를 설정하고 퇴비의 질을 향상시키거나 고유지에 사용하도록 국가적인 정책이 수립되어야 하며 퇴비화의 신공정개발에 투자가 이루어져야 한다.

퇴비화 공정시 영향을 주는 생물학적 환경조건으로는 입도, 수분, C/N비, 미생물의 존재, pH의 유지, 공기 등이다. 퇴비화에 대한 경제성을 평가할 경우 일반적으로 폐기물에 의한 퇴비생산의 단위 경제성은 거의 없는 것으로 판단되고 있으나 폐기물 처리라는 환경적인 측면과 국가, 국민 경제적 관점에서 보면 경쟁력이 있는 처리방법이라고 할 수 있다.

퇴비화공법은 위생매립이 불가능한 경우 대행할 수 있는 폐기물의 처리방법으로 사용이 가능하며 자원의 재 회수 및 재활용이라는 견지에서 채택될 수 있는 처리공법이다. 따라서 외국에서는 오래 전부터 이와 같은 유기성 폐기물 퇴비의 농업적 이용을 위하여 많은 연구를 수행하여 도시하수처리 오니와 목재 재재후 남은 경질 나무껍질의 이용 가능성에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.

현재 실행되고 있는 퇴비화 시스템으로는 Windrow Composting, Aerated Static Pile, Mechanical Reactor(In-vessel) 시스템으로 대별

된다. 이들 방법들은 공기의 주입방법에 있어 약간의 상이함이 있다. 각각의 방법을 설명하면 다음과 같다.

가. Windrow 시스템

이 방법은 Front-End Loader 또는 특별 제작된 장비를 이용하여 pile 위의 오니와 bulking agent의 혼합물에 공기를 주입하여 주는 방법이다. 총 유기물 부하가 높은 초기에는 약 하루에 한번 pile을 정기적으로 뒤집어주며 그 다음부터는 1 주일에 3번 정도의 빈도로 뒤집어 준다. 퇴비화를 마친 오니는 일반적으로 판매되기 전에 숙성을 위해 stockpile 된다.

나. Aerated Static Pile 시스템

이 방법은 각각의 pile 밑바닥에 다량의 perforated pile을 격자구조로 설치하여 적재시 전체에 적당량의 공기를 공급할 수 있도록 pump 또는 blower와 연결하여 퇴비화시키는 방법으로 pile은 wood chip 또는 기타 bulking agent층으로 덮여왔다.

이 방법은 균일한 산소 전달을 위하여 설계 및 시공시 주의하여야 한다. compost/bulking agent의 혼합물은 pile 형태를 유지하기 위하여 bulking agent 층위에 적당량을 적재하고 마지막으로 퇴비화 공정을 마친 부산물을 그대로 이용하거나 분쇄시켜 cover soil로서 이용한다. 이는 퇴비화 공정시 퇴적물 내부의 온도를 일정하게 유지시키고 좀 더 효과적인 산소공급을 하기 위함이다.

이 방법의 적용시 분쇄된 퇴비를 사용하면 분쇄

되지 않은 퇴비를 사용할 경우보다 퇴비의 공극이 작기 때문에 단열이 훨씬 효과적이다. 분쇄된 퇴비는 퇴비화 공정시 pile의 마지막 덮개용으로 주로 이용되며 분쇄되지 않은 퇴비는 시스템 전체의 균일한 산소공급 및 단열효과를 위해 pile의 중간 부분에 사용되어 진다.

다. Static Pile 시스템

이 방법은 침출수나 응축수에 의한 지하수의 오염방지와 기계장치들의 원활한 작동을 위하여 불투수층 지표면 위에 건설된다. 이 시스템은 운영관리가 용이한 장점이 있고 현재 pilot scale의 건설을 통한 실험이 행하여지고 있다.

라. In-Vessel 시스템

이 방법은 일명 Mechanical Reactor 시스템이라고도 하며 다른 퇴비화 시스템에 비하여 단위면적당 오니부하율을 증가시켜 다량의 오니를 이용하여 높은 pile을 형성할 수 있으므로 공간적 효율을 높일 수 있다. 이 방법은 현재까지 별로 많이 이용되고 있는 시스템은 아니지만 앞으로 많이 사용될 전망이다.

1) 기술적 타당성

① 현재 매립되어 있는 폐기물을 퇴비화할 경우는 무기 및 난분해성 물질이 혼용되어 처분되어 있는 상태에서 퇴비화 가능한 유기성분을 선별하는 공정의 선행이 필요하다. 따라서 이 경우는 선별에 따른 기술적 문제점을 내포한다.

② 매립기간의 장기화로 퇴비화를 위한 유기성분의 잔존량이 적다.

③ 하수오니만을 따로 구분하여 퇴비화가 가능하나 이는 다른 방법에 비해 바람직하지 못하다.

④ 퇴비화의 기술 및 일반대중에게 널리 받아들여지지 않은 상황하에서의 생산품의 처분 문제가 상존한다.

⑤ 처리운영에 막대한 양의 부지가 소요되며 이의 확보가 곤란하다.

⑥ 막대한 처리기간이 소요된다.

2) 환경영향

① 선별시 소음, 분진 등 오염영향이 있다.

② 막대한 처리기간동안 오염상태 방치 및 오염발생이 악화된다.

③ 그 동안 일반산업폐기물 및 도시폐기물의 무기분해물질과 혼재되어 있는 유기폐기물을 퇴비화한 산물에는 중금속, 유기화합물 등이 잔존함에 따른 향후 오염영향이 있고 퇴비로서 사용에 어려움이 있다.

3) 경제성

본 방법은 아직 널리 사용되고 있는 방법도 아니며 실험적으로 시도되는 시설이 대부분이므로 이에 대한 소요비용의 산정이 어렵다.

4) 토지이용성

① 선별후 남아있는 비 유기성물질의 부피는 상당한 양으로서의 이의 재매립이 필수적이므로 매립지 부피가 크게 줄어들지 않는다.

② 유기성물질을 퇴비화한다 할지라도 그 함량이 적어 향후 토지이용에 제약이 있다.

③ 퇴비화를 위한 소요부지가 많이 소요되어 토지활용의 극대화가 불가능하다.

5. 폐기물 재운반후 불량 매립지의 조기이용 방법

불량폐기물을 원천적으로 이송함으로써 오염의 근원을 제거하는 단순하지만 가장 확실히 오염을 제거하는 방법이라 할 수 있다. 이 방법의 사용시 고려할 사항은 기존 폐기물을 운영중인 매립지로 운반할 경우의 타당성을 전체적인 관점에서 조사하여야 하고 다음 단계로서 세부적인 운반 수단별 타당성을 검토하여야 한다.

가. 폐기물 운반시의 일반적 타당성

1) 기술적 타당성

① 기존 폐기물 매립지의 처분 대책으로서 가장 간단한 발상이며 기술적으로도 가능하다.

② 이 방안의 적용을 위해서는 폐기물 운송을 위한 현존하는 사회 간접자본 시설 외에 별도 운송수단 시설의 설치가 수반되어야 한다.

③ 매립지 굴착 공사시의 매립층 불안정으로 인한 붕괴 방지 등의 대책이 요구된다.

④ 만약 일부 하수오니나 사업장폐기물이 매립되어 있을 경우 이들을 운반, 재 처분을 위해서 액상폐기물의 운반 투기 및 사업장폐기물 운송 및 처분시설의 도입이나 고형화 처리 수 운반 등의 부수 대책이 필요하다.

⑤ 무분별한 매립으로 인해 일부 특정폐기물이 매립되면 이전 폐기물은 전부 특정 폐기물로 취급 처리되어야 할 것이다.

2) 환경영향

① 폐기물을 운반하기 위한 굴착시 악취, 유독가스의 방출 및 화재 발생의 영향 등이 있다.

② 본 대안을 수행하는 동안 환경 오염상태는 방지되고 따라서 침출수에 의한 인근지역 하천과 지하수의 오염, 가스배출에 의한 민원 발생이 우려된다. 단, 별도의 배기시설을 설치시 가스 처리시설을 두어야 한다.

③ 무분별하게 비위생적으로 도시폐기물이 매립되거나 사업장폐기물 또한 여러 곳에 산재하여 폐기물층 내부에 처분되어 있을 시에는 이를 재운반하여 진행중인 수도권 매립지에 처분시 또 다른 오염원을 만들 우려가 있고, 또한 현재 민원이 제기되고 있는 사업장폐기물의 투입으로 인해 일반 폐기물과의 혼합처분이 되는 결과를 초래한다.

3) 운송방법별 특성

운송방법으로는 도로 운송, 선박 운송, 철도 운송, 컨베이어 운송 등 4가지 방법으로 구분될 수 있다.

4) 토지 이용성

① 구조물의 건설시 침하 등으로 인하여 문제를 야기할 폐기물을 모두 재 운반함으로써 토지의 영구적 활용이 조기화 된다.

② 주변지역의 토지가치가 아주 높고 인근지역의 부수적 개발을 촉진한다.

6. 조기 안정화에 의한 굴착·선별 처리법(Waste Mining Method)

선진국의 경우 매립지를 활용하기 위하여 매립지 폐쇄후 30년 이상의 안정화 기간을 두고 있으나, 최근 일본, 유럽과 같이 국토가 협소한 국가의 경우 매립부지의 조기 활용이 추진되고 있다. 이

와 같이 국내의 경우도 폐기물 매립지가 도로 또는 택지로 활용되는 경우가 빈번하게 발생되어 이러한 사업에 대한 적절한 대책이 필요하다. 일반적으로 매립지내 혐기성 분해과정은 많은 시간이 소요되고 악취 및 유독가스의 발생과 오염농도가 높은 침출수가 발생하는 반면, 조기안정화는 호기성 분해 과정을 인위적으로 빠르게 진행시켜 오염물질의 분해를 촉진시키므로 환경오염 문제를 최소화시키는 방법이다. 이 조기안정화는 산소 및 미생물을 불량매립지(사용종료 매립지)안에 직접 고르게 공급하여 호기성 상태 및 미생물에 의한 오염물질의 분해를 촉진시키는 방법이다. 그렇지만 현재까지의 적용예에 의하면 대부분의 처리공법은 다짐, 배수, 고결화 및 보강 등으로 대별하고 있어 대부분 환경적인 측면은 고려하지 않고 지반 공학적인 접근으로 해결하고 있는 실정이다.

본고에서는 현재 연구 적용되고 있는 2가지 기술을 소개하고자 한다.

가. 자연압 및 저압에 의한 산소 및 미생물 주입방법

1) 기술의 원리

① 매립장의 굴착공사하는 부분을 생물/생화학적 변화를 통하여 안정화시킨다.

② 공기를 주입시켜 악취발생의 원인이되는 혐기성 박테리아의 활동을 억제하고, 이때에 생성된 공기-가스의 혼합물을 빨아내어 이의 악취원을 분해시킨다.

③ 공급되는 공기는 Biofilter를 거쳐, 따뜻한 호기성 박테리아들을 많이 함유하고 있으므로 호기

성으로의 전환을 더욱 용이하게 할 뿐 아니라, 혐기성으로의 재전환을 막아준다.

④ 추출정을 통하여 생성되는 혼합가스를 추출하여 Biofilter를 통과므로 냄새가 제거된다.

⑤ Biofilter는 여러 층으로 이루어져 있으며, 악취 제거에 효과적이라 할 수 있다. 굴착 공사중인 부분의 빨아올리는 공기-가스 혼합물이 포함하는 습기가 Biofilter의 수분을 공급하는데 중요한 역할을 한다.

⑥ Lance는 5~6m 깊이로 설치하며, 시간마다 바꾸어주는 공기 유입과 유출의 방향으로 공기 통로를 이루는 것을 막아주어, 확산을 용이하게 한다.

2) 기술의 장점

① 본 공법에서는 일정한 저압으로 공기를 유입-유출한다. 이로서 공기가 빠져나가는 channel을 만들지 않도록 유입과 유출의 방향을 바꾸어준다. 또한 동시에 수분조절의 역할도 하여준다.

② 겨울철에도 공사가 가능하다.

③ 기계의 설치와 변경 이동이 쉽다.

④ lance를 진동을 이용하여 바로 설치함으로써, 시간과 비용의 절감을 가져오고, 매립가스 누출에 대하여 안전하다.

⑤ 산소를 고압 유입하는 공법에 비하면 자연적으로 주위 공기를 유입시키므로 비용이 저렴하고, 폭발의 위험이 없어 안전하다.

나. 압축에 의한 산소 및 미생물 주입 방법

1) 기술의 원리

① 산소 성분비가 20% 이상인 압축공기를 만들

어 Blower로 보내며

② Blower로 보내진 공기는 매립지내 토양의 특성을 고려하여 고정된 센서에 의해 일정 압력에 따라 밸브가 열려 압축공기를 공급하며, 미생물에 의한 분해를 촉진하기 위해 필요에 따라 수분과 영양분을 공급한다.

③ Suction System은 용출정으로부터 흡입한 배가스로부터 수분을 분리한 후 폐가스를 Biofilter로 처리하거나, 고농도의 난분해성 물질을 함유한 경우에는 흡착탑을 이용하여 처리한다.

④ 안전 문제를 고려하여 메탄가스 폭발에 견딜 수 있도록 설계하며 부식방지를 위해 특수재질을 사용 할 수 있다.

2) 기술의 장점

① 압축공기를 주기적으로 불어넣어 넓은 범위를 통해 균등하게 공급한다.

② 산소공급량의 조절이 용이하다.

③ 수분과 미생물 성장에 필요한 영양분 공급이 용이하다.

④ 오염물질과 유독가스의 자연분해를 촉진시킨다.

⑤ 혐기성 상태에서 발생하는 악취의 억제 및 제거가 용이하다.

⑥ 침출수내 오염물질 부하가 상당히 감소한다.

⑦ 매립지내 유기성 물질의 부패로 매립용량이 증대된다.

⑧ 호기성 상태로 전환되기 때문에 부패 소요시간이 감소된다.

3) 기술적 타당성

조기안정화에 대한 굴착과 선별 등의 작업은 매립폐기물의 성상에 크게 좌우되므로, 매립연혁 자료조사 및 현장조사를 통한 폐기물성상 분석결과에 따라 각각의 과정에 대한 기술적인 대안을 선정하여야한다.

4) 환경오염 제거기술

매립장내 작업은 굴착, 선별, 적재 및 재매립 과정으로 이루어지며, 이 과정에서 발생하는 악취와 분진을 제거 또는 효과적으로 방지하는 방안을 검토하여야 한다.

5) 기술적용의 분야 및 용도

① 매립지 조기 안정화 촉진 분야

② 매립지 가스처리 및 매립가능 용량의 증대

③ 매립지내 폐기물 이송시 부피감소 및 악취발생 억제에 적용

④ 고효율 퇴비화 설비에 적용하여 퇴비화 촉진에 적용

⑤ 오염토양 및 지하수 정화를 위한 지중처리에 적용

6) 경제성

폐기물의 굴착, 운반 및 적정 위생매립은 매립된 폐기물을 굴착하여 에너지를 회수하고 유가물을 재자원화하며, 활용성이 적은 매립부지를 공원, 택지 등으로 개발하여, 환경오염의 최소화에 따른 토지활용의 극대화로 경제성을 확보토록 한다. 이와 같이 폐기물 굴착 및 이송은 토지활용후의 직접적인 손익에 대한 평가와 더불어 환경오염지대

로부터 공해 없는 쾌적한 부지공간의 창출이라는 부차적인 기대효과를 고려하여 경제적 평가를 검토한다.

일반적으로 구조물에 대하여 가장 많이 사용되고 있는 공법은 고결(그라우팅)방법과 동다짐방법이라 할 수 있으나, 반드시 가스 배출시설을 설치하여야 하고, 지하실은 설치하지 않아야 하는 등 세심한 주의를 요구하고 있다. 특히 지반의 침하가 진행됨에 따라 수시로 복토를 실시하여야 하며, 배출가스를 지속적으로 감시, 처리하여야 하는 등 많은 문제점을 안고 있음에 따라 이에 대한 기술적인 해결안이 절실히 필요한 상황이다.

이상과 같은 방법에 의하여 폐기물의 체적을 줄이거나, 안정화시킬 수가 있다. 그러나 굴착·이송 공법과 소각이외에는 환경적인 면의 고려는 배제되어 있음으로, 2차적인 환경문제가 항상 존재하여, 장기적으로 문제가 계속 발생하게 된다. 즉 유기물질의 분해에 의한 공극 생성으로 침하가 발생되고 가스가 형성되어, 악취 또는 폭발의 위험성이 존재하게 된다. 그러나 위에서 언급된 산소주입에 의한 폐기물의 조기안정화 공법은 폐기물 내에 존재하는 유기물질을 조기에 완전히 제지시킴으로 체적감소, 악취 및 폭발의 방지 뿐만 아니라 매립지반의 근본적인 안정화가 가능하게 된다.

III. 결 론

사후종료 폐기물 매립지의 토지이용은 매립지를 조성할 초기부터 장래의 활용방안을 고려한 매립지의 조성 및 매립방법이 반영되어야 한다. 특

히, 장래의 도시발전 계획과 연관되어야 할 것이다. 그러나 이전의 매립지의 경우 대부분 불량 매립지로서 장래의 토지이용 계획 없이 무분별하게 매립되었기 때문에, 이러한 상태 하에서의 토지 개발시에는 지반침하, 지반의 지지력, 가스발생, 침출수 발생 및 금속, 콘크리트의 부식 등의 문제점을 고려하여야 한다.

〈표 2〉와 같이 사후종료 매립지는 매립지 안정화 방안의 장단점을 비교 할 수 있다. 이들 가운데 효율적인 폐기물 안정화 방안은 매립지의 위치, 크기, 오염정도, 매립후 연한 등에 따라 선택될 수 있다. 이때 가장 중요한 parameter는 용도와 경제성에 있다고 본다.

매립지의 용도는 매립지로 활용하는 경우 택지로 활용하는 경우 공장부지로 활용하는 경우 농경지로 활용하는 경우 체육장으로 활용하는 경우 등이 있다. 여기서 특히 택지, 공공건물 및 공장부지로 활용할 경우에는 열린 공간으로 활용하여야 하며 지반 기초에 세심한 계획과 설계가 요구된다.

또한, 〈표 3〉은 토목·환경적 측면에서 불량폐기물 매립지의 재이용시 요구사항 및 요구도를 나타내 주고 있다. 요구 사항은 지반침하, 지지력, 가스 발생, 침출수 발생, 부식, 식생가능성, 폐기물 물성, 매립 폐기물처리 등이며, 재이용 목적에 따라서 요구되는 사항이 다르다.

〈표 4〉는 국내 불량 및 사후종료 매립지의 토지 활용 사례를 나타내었다. 〈표 4〉에서 보듯이 처리 방법은 단독 혹은 복합적으로 다양하게 이용하였지만 활용안은 공원, 도로, 택지, 매립지 재사용 등으로 제한되어 있다 볼 수 있다. 열린중남

〈표 2〉 불량폐기물 매립지의 처리방안 비교

구 분	장 점	단 점
동다짐 공법	<ul style="list-style-type: none"> · 시공과정에 있어 유연하게 대처할 수 있다 · 급속시공이 가능, 특별한 약품 재료가 필요하지 않음 · 충격에 의한 간극 파괴 감소 	<ul style="list-style-type: none"> · 유기물 분해에 따른 잔류침하 · 시공시 소음 및 진동발생 · 기존 구조물과 이격거리 확보 · 가스 침출수 악취발생 우려
약품혼합다짐 처리공법	<ul style="list-style-type: none"> · 침출수 및 유독가스 발생 감소 · 쓰레기 자체의 높은 강도 및 불투수력을 보임 · 지반개량공법 및 전체적 현장고형화 방법 실시시 반영구적 토지사용시기 단축 · 공기단축 및 사후관리 용이 	<ul style="list-style-type: none"> · 처리과정동안 폐기물의 굴착 및 혼합중 악취발생 · 중금속, 유기화합물 용출 가능성 · 상당한 부지 추가소용 · 국내폐기물 매립지 적용 사례부족
매립존치 및 오염방지에 따른 활용방법	<ul style="list-style-type: none"> · 기술적으로 가능하고 가장 현실적인 방법 · 환경생태공원의 조성 등으로 환경교육장 활용 · 매립지 처리비용 최소화·불량처분지의 개선에 대한 기술축적 및 파급 효과 	<ul style="list-style-type: none"> · 영구적인 오염원 제거측면에서는 불리 · 완전한 안정화가 되기 전까지는 토지이용제한·장기적 지속적 오염 감시시설 운영 필요·생태계 보전 필요성으로 자연상태로의 전환
퇴 비 화	<ul style="list-style-type: none"> · 폐기물이 재자원화 측면에서 유리 	<ul style="list-style-type: none"> · 퇴비시 유기성분 선별공정 선행 · 매립기간의 장기화로 퇴비화를 위한 유기성분의 잔존량 미비 · 퇴비화 생산품의 처분문제 상존 · 처분운영에 막대한 양의 부지소요 및 확보 곤란 · 막대한 처리기간 소요 · 긴 처리기간동안 오염상태 방치 및 오염발생 악화

구 분	장 점	단 점
폐기물 재운반 후 매립토지의 조기이용 방법	<ul style="list-style-type: none"> · 토지의 영구적 활용이 조기화 · 도시계획측면에서 토지이용가치 높아짐 · 인근지역의 부수적 개발효과 	<ul style="list-style-type: none"> · 별도 운송수단시설의 설치수반 · 매립지 굴착공사시 붕괴 위험성 및 재 반환경 오염 발생 가능성 · 매립지의 오염된 지반굴착 · 이송필요
조기안정화에 의한 안정화 및 굴착 · 선별 처리방법 (Waste Mining Method)	<ul style="list-style-type: none"> · 폐기물선별로 인해 매립지 부피 감소 · 유해성폐기물의 조기 안정화로 인한 토 지이용 가능시기 단축 · 큰 부지가 확보 될 경우 매립지로 재사용도 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 소규모에 적합 · 매립된 폐기물의수분 함량이 높은 경우 에는 굴착후 분리가 잘 안됨 · 굴착, 선별 및 회수한 폐기물에 유해성 물질 잔류 · 시공비용이 과다 · 국내폐기물 매립지 적용 사례부족

〈표 3〉 불량폐기물 매립지의 재이용시 요구사항 및 요구도

이용예 사항	공원녹지	도로 및 수로	단층주택	경기장 (공식트랙)	고층주택, 고층빌딩	공업단지, 상업단지
침 하	×	△	○	○	○	○
지 지 력	×	△	△	○	○	○
가 스 발 생	△	△	○	○	○	○
침 출 수 발 생	○	○	○	○	○	○
부 식	×	×	△	×	○	○
식 생 가 능 성	○	×		△	○	△
폐기물 크기	×	×	×	×	○	○
폐 기 물 물 성 (투 수 력)	△	△	○	○	△	△
매 립 폐 기 물 처 리	△	○	○	○	○	○

주: ○: 엄격한 요구 △: 중간정도 요구 ×: 고려대상 제외

〈표 4〉 국내 불량 및 사후종료 매립지의 토지 활용 사례

지 역	매립 년도	매립면적(㎡)	처 리 방 법	활 용 안
부 산 화 명	1985~1987	596,326(5m)	· 안정화	택지
광 주	1983~1990	2,730(5m)	· 복토	공원
구 리 인 창	1985전후	10,050(4~5m)	· 고화처리 · 매립	공원
상 계	1978~1984	20,704(3~8m)	· 15m 양질토 치환(조경 식재) · 동다짐 · 고화처리 다짐	택지
평 촌	1980전후	9,000(10m)	· 동다짐 · 폐기물 치환	택지 · 공원
전주 서신 · 서곡	1988~1990	17,497(6~8m)	· 굴착, 동다짐	도로 · 공원
삼 척	1986~1988	11,216(10~13m)	· 동다짐 · 그라우팅	택지
분 당	1985전후	1,000(3m)	· 폐기물 이송	상업지
광 주 일 곡	1986~1990	97,200(4~5m)	· 굴착, 매립	공원
청 주	1985~1992	폭 20m, 2~3km (15~20m)	· 동다짐	도로
대 전 갑 천 변	1983~1989	폭 7m, 600m구간 (4~5m)	· 동다짐	도로
난 지 도	1978~1992	5,465,877(90m)	· 안정화 · 복토보강	공원
의정부 송산(계획)	1985~1992	12,000(7m)	· 동다짐	공원
인 천 경 서 동	1990~1992	25,000(27m)	· 안정화 · 굴착 이송	도로

주 : ()안은 깊이를 나타냄

참 고 문 헌

- 이재영, “불량쓰레기 매립지 조사 및 활용에 관한 연구”, 한국토지공사 토지연구원, 1996.
- 환경부, 사용종료매립지 실태조사결과 및 지하수 오염방지대책, 1997.
- Edited by Fell, R., Phillips, T. and C. Gerrard, Geotechnical Management of Waste and Contamination, Sydney, Australia, 22~23 March, 1993.
- Koerner, R.M., Designing of Geosynthetics, 3rd Edition, Prentice Hall, 1994.
- Lee, Jai-Young, “Performance of Landfill Cover Systems in Cold Climates”, Dissertation, The Department of Civil and Environmental Engineering, Wayne State University, 1994.
- Mitchell, J.K., Chang, M., and Seed, R.B., “The Dettlemen Hills Landfill Failure : A Retrospective View of the Failure Investigations and Lessons Learned”, In Proceedings of the 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Mo., S. Prakash, Ed., 1993, pp.1379~1392.
- Sharma H.D. & S.P. Lewis, Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills : Design and Evaluation, John Wiley & Sons Inc., 1994.
- U.S. Environmental Protection Agency(USEPA), Design and Construction of RCRA/CERCLA Final Cover Seminar, CERL 90~50, USEPA, 1990.