

트롬멜 스크린 시스템을 이용한 Landfill Mining기술

최갑석*. 최동순**. 나경덕***. 이병선****

A Landfill Mining Technology by Trommel Screen System

Kab-Seok Choi*, Dong-Soon Choi**, Kyeung-Dcuk Na***, Byung-Sun Lee****

ABSTRACT

Landfill Mining is becoming more widely used in many closed landfill sites in the world. Many of existing landfills will be excavated inevitably owing to building the clean environment with the new structures and developing the cities in cramped country. This paper aimed at the introducing the design technology of the trommel screen and its in-site applied performance of the trommel screen system through experiments, which system is under developing by one of the national project and the analysis results of influencing factors to the environment.

The result of the theoretical estimation agrees well with the experimental data, so that the sorting system could be able to be applied with the requirements of the purpose of end-items. As a result of the analysis, any hazardous materials including heavy metals met the limitations of the criteria in this experiment. In geotechnical engineering, it will be desirable to use the sorted soils mixing with another soils in accordance with the requirements of the usages.

Key Words : Landfill Mining, Trommel Screen System, Non-Combustible Materials, Combustible Materials, Closed landfill site, Raked type separator for combustibles Geotechnical engineering

* 환경기계기술연구부 책임연구원

** 환경기계기술연구부 위촉연구원

*** (주) 포스벨 대표이사

**** (주) 포스벨 대리

1. 서론

Landfill Mining은 미국환경보호청, 지방공공기관 그리고 환경공학자들이 제시하고 있는 폐기물 문제 해결방안중의 하나이며, 자원회수와 환경영향완화를 위한 매립물질의 굴착 및 기계 처리로 정의하고 있는데, Landfill Mining은 실제로 오래된 폐기물 매립층을 포크레인등을 이용하여 굴착하고, 굴착후 회수된 폐기물은 일정 공정을 통하여 분리되고 처리된다.

이러한 Landfill Mining은 전세계적으로 무분별하게 매립하여 매립지로부터 발생되는 토양오염, 수질오염, 대기오염등의 환경오염문제를 해결하지 않을 수 없는 필연적인 문제로 대두되었기 되었기 때문이다. 나아가 도시확장이나 토지의 유효이용등에 대한 필요성에 따라 매립지를 정비하는 정책이다. 미국의 경우 플로리다주 콜리어카운티와 뉴욕주 에딘버그에서 선별된 토양을 일일복토재로 재이용한 사례¹⁾를 위시하여 수질보호를 위한 매립지정비에도 정책이 진행되어 왔으며, 일본의 경우 신규 매립지 인가가 나지 않아 기존 매립지의 재활용에 대한 기술 개발이 활발히 진행되고 있으며, 남태평양등의 관광 휴양지등에도 관광객 유치를 위하여 아름다운 휴양지 해변가의 매립지 정비에 대한 정비도 고려되고 있는 실정이다. 선진국의 경우 매립폐기물이 토양과 지하수등에 미치는 위해성 평가, 정비방법 선택, 정비우선 순위 결정등을 거쳐 규정에 따라 매립지 정비 목적 및 용도에 맞는 매립지 정비를 시행하고 있는 실정이나 국내의 경우 2002년 기준 약 1,170개소의 비위생 매립지 중 침출수를 자체 처리하거나 이송 혹은 위탁처리를 하고 있는 사용종료 매립지는 232개소 정도이며, 정비대상 매립지중 66%는 이미 다른 용도로 활용하고 있는 것으로 보고되고 있다.

뿐만 아니라 매립지용량이 포화상태에 가까워지고 있으며, 매립지확보가 예산문제, NIMBY현상등으로 실제 거의 불가능한 상태이기 때문에

기존 매립지를 정비하여 환경오염문제를 해결하고 또 재사용할 수 있는 방안이 매우 시급한 실정이다.

정부에서는 사용종료 매립지 가운데 정비가 시급한 대상을 97개소, 6,660,000m²으로 보고 2010년까지 7,881억원의 사업비를 투입할 계획이며, 그 이후에도 지속적으로 투입할 계획을 가지고 있는 것으로 전해지고 있다. 그러나 사용종료 매립지 정비를 위한 개량 기술 수준 및 대상 매립지 선정기준 및 관리체계가 아직 정립되지 않은 상태이며, 매립지 특성 및 안정화도 조사, 주변 토양 및 지하수 시료채취/분석, 조사결과에 의한 오염확산 모델링 평가 등의 정밀 조사가 우선적으로 이루어져야 하며 이를 토대로 한 사용 매립지 유형별 정비지침 수립 및 정비 사업 추진에 대한 개선 방안이 진행되어져야 할 단계이다.

본고에서는 정부의 매립지 정비 지침이 수립되지 않은 상황에서, 환경부 차세대환경신기술개발사업의 일환으로 개발되어 실용화 단계에 이르고 있는 고효율 선별·재활용 기술 장치를 사용하여 국내 Landfill Mining의 대표적인 기술로 매립지 폐기물을 굴착하여 분리하고 정비하는 과정에서 발생하는 선별토사의 분리효율 예측과 실험자료 비교, 분리토사의 성상분석, 유해성 분석, 지반공학적 특성 분석 및 가연성 물질과 불연성 물질의 재활용을 위한 고찰 등을 검토하여, 매립지 재사용 공간확보와 함께 매립폐기물 자원화를 위한 재활용의 가능성을 동시에 달성하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. Landfill Mining기법

2-1 Landfill Mining

Landfill Mining은 자원회수와 환경영향 완화를 위한 매립물질을 굴착하여 기계적으로 분리하고 재활용할 수 있는 물질을 최대한으로 하는 기술로서, 매립된 폐기물을 포크레인들이 중장비를

이용하여 매립물질을 굴착하고, 굴착된 물질을 기계적으로 분리여, 즉 토사, 불연성 물질, 가연성 물질, 철재 및 비철류등으로 분리하여 용도에 맞게 재활용 하는 기술이 국내외적으로 유망한 기술로 부상되고 있다.

매립지에서 중장비를 이용하여 굴착한 매립지 폐기물은, 일차적으로 금속류와 비철재류를 분리하고 다음에 일정 크기 이하의 토사를 분리시키기 위하여 스크린 공정을 거치고, 일정 크기 이상의 혼합폐기물(폐세멘트, 벽돌, 돌등의 불연성 물질과 비니르 플라스틱, 목재류, 어망등 가연성 물질류)중에서 가연성 물질을 분리하는 공정을 지나면 매립지 폐기물의 분리 작업은 일차적으로 끝나며, 다음 단계에서 분리된 폐기물의 사용 용도에서 요구하는 조건에 맞게 양호한 원료를 만들어 내는 공정이 필요하다.

즉, 폐기물 관리법상의 토사내 이물질 함유량 1%(부피기준)이내를 맞추기 위해서는 분리된 토사중 혼합된 미세 가연성 물질을 분리 시켜야 하며, 분리된 가연성 물질을 RDF등으로 재활용 할 경우 가연성 물질내 미세 토사성분등을 더욱 줄여 RDF제조 공정의 원료조건을 맞추어 주는 공정등이 필요하며, 한편으로 가연성 폐기물의 소각처리를 위해서 처리 단가가 톤당 20여만원 정도이기 때문에 가연성 폐기물의 중량을 합리적으로 줄이기 위하여 건조장치를 설치하여 미세 토사성분을 줄일 뿐만 아니라 건조 과정을 통하여 수분량을 줄이는 기법도 적용하여 가연성 폐기물의 처리비를 줄이는 방법도 채택되고 있다.

국내에서는 이와 같은 매립지 정비를 위하여, 트롬멜 장치와 가연성 분리장치를 이용하여 매립지 폐기물을 분리해왔었는데, 매립지 폐기물의 수분량이 30~50%정도이기 때문에 트롬멜 원통의 분리구(Aperature)의 막힘 현상이 빈번하여 작업성이 떨어지고, 가연성 분리를 위하여 토사가 분리된 후 혼합폐기물을 낙하시키면서 블로워를 이용하여 강한 바람으로 가연성 폐기물을

날려, 분리하는 방법에서는 토사나 자갈이 가연성 폐기물과 함께 날려가 다시 분리시켜야 하는 단점이 있었다. 이러한 단점을 보완한 트롬멜 시스템은 망막힘 방지 칼날설치에 의한 트롬멜 장치의 분리구 막힘을 막아 작업성능을 95%이상으로 향상시키고, 기계적인 원리를 이용한 갈퀴식 가연성 물질 분리장치를 사용함으로써 분리성능을 95%이상으로 올림과 동시에 작업장내 토사, 분진등의 비산으로 인한 작업장의 악조건을 청결하게 하여 작업조건을 향상시켰다. 이 기술은 일본의 STAR-MEET(Steam/Air Multi-staged Enthaloy Extraction Technology) 기술과 연계시키기 위하여 일본 진출을 도모하고 있으며 생활 가연성 폐기물과 매립지 가연성 폐기물을 혼합하여 처리하기 위한 구상이 진행되고 있다.

2-2 매립지 정비공법

매립지의 특성은 매립된 폐기물의 종류, 매립 경과년수 등에 따라 차이를 많이 나타내고 있으며, 관리형 매립지 일수록, 매립년수가 짧을 수록 가연성 물질이 많이 나오고 부패하기 쉬운 유기물질이 부패하기 시작하여 Landfill gas가 나오는 특징을 가지고 있다.

비위생 매립지일경우도 매립년수가 많을수록 가연성 물질량이 줄고 불연성 물질(토사를 포함)의 양이 많은 것이 일반적인 현상이다. 국내에서는 다음의 세가지 방법으로 정비를 하고 있으며 그 중에서도 선별이적처리공업이 국내·외에서 새로운 공법으로 각광을 받고 있다.

가. 전량이송처리공법

비위생 매립지를 굴착하여 덤프트럭으로 운반 처리하는 방법이다. 이 방법은 가장 확실하게 오염원을 제거할 수 있는 방법이라고 할 수 있다. 그러나 이송된 폐기물은 다시 재매립하여야 하기 때문에 다른 매립지의 수명을 단축

시키는 단점이 있다.

나. 선별이적처리공법

기존의 매립지를 굴착하여 굴착된 물질 및 매립지를 재사용하는 선별이적처리(Landfill mining) 공법은 새로운 유망한 방법중의 하나로 각광을 받고 있다. 이방법은 미국이나 유럽에서 실용화 단계에 있다. 이 방법은 최근들어 환경공학자들과 공공기관에서 제시하고 있는 폐기물 처리 문제의 해결방안의 하나로서 매립 폐기물을 굴착한 후 토사성분은 매립지 복토재나 성토재등으로 재 활용하고 나머지 폐기물은 가연성인 경우 소각처리하거나 불연성인 경우 재매립하는 방법이다. 이 공법에서 가장 중요한 사항은 매립폐기물의 선별기술이라고 할 수 있다. 이방법의 특징은 첫째는 중장비를 이용하여 오래된 매립지내 매립물질을 굴착하는 것이다. 굴착후 부지는 새로운 매립지로 사용하거나 공원등 위락지구로 조성을 할 수 있어 기존 매립부지의 가치를 높일 수 있다. 둘째는 굴착된 물질을 처리하는 것이다. 굴착된 물질들은 선별하여 재활용 할 수 없는 물질을 처분하고 재활용가치가 높은 물질들을 회수하기 위하여 선별기술과 선별된 물질들을 재이용하는 기술도 함께 개발되어져야 한다.

다. 자체안정화 공법

매립지를 굴착하지 않는 대신 차수시설이나 가스포집시설등 사후 관리시설을 설치하여 침출수나 발생가스등을 지속적으로 모니터링하고 처리하는 방법으로서 대규모매립지에서 적용할 수 있는 소극적인 방법이라 할 수 있다. 이기술의 핵심인 침출수 차단방법은 그라우팅공법 등 약액주입공법, 슬러리 월(Slurry Wall) 그리고 강널말뚝공법(Sheet Pile)등으로 대별 할 수 있다. 그라우팅 공법은 매립지 하부에 지하수가 유입되는 것을 방지하기 위하여 약액을 지반 내부에 주입, 교반하여 그라우트 커튼을 형성하도록 하는 방법이다. Slurry Wall 공법은 굴착면의 붕괴

와 지하수의 침투를 방지하기 위하여 트렌치(Trench)에 벤토나이트 슬러리(Bentonite Slurry)를 공급하면서 원하는 깊이까지 수직으로 굴착한 후 뒷채움재를 충전하여 벽체를 시공하는 방법이다.매립지 배출가스는 적절한 관리없이 대기중으로 배출되면 악취를 유발시키고 상부식생에 악영향을 끼치며, 폭발의 위험성을 가지고 있다.

그럼으로 자체안정화 공법을 이용할 경우 특히 매립지 배가스의 포집, 처리, 재활용 방법이 고려되어야 한다. 매립지 배가스의 포집방법은 수직추출정, 수평트렌치 그리고 이들을 혼합시킨 복합형이 있다. 매립지 배출가스의 처리방법에는 대기 중으로 확산시키는 방법, 소각, 전력생산 및 잉여가스 소각방법 등으로 나누어 볼 수 있다.

3. 트롬멜 시스템구성

3-1. 트롬멜 시스템 구성과 기능

매립지 폐기물을 굴착하여 철재류, 35mm이하의 토사, 가연성 물질 및 불연성 물질의 4원분리를 위한 트롬멜 시스템은 매립폐기물의 투입 Hopper, Trommel Device, Rake Type Separator (for combustible materials), control pannel, Magnetic separator, 미세 가연성 물질 분리장치 등으로 구성(그림 1 참조)되어 있으며, 토사는 트롬멜 장치에서 걸러지며, 트롬멜 장치에는 일정 크기의 원통 주위에 분리공을 다수 설치되어 경사지게 설치된 상태에서 회전된다. 대상 폐기물은 전진 방향으로 이동/회전하면서 토사는 분리공으로 분리된다.

매립지에서 굴착된 폐기물은 Hopper를 통해 트롬멜 시스템으로 투입되고, 자동 콘베어 장치로 트롬멜 스크린으로 이송된다. 이트롬멜 장치에서 35mm이하의 토사와 극히 일부 가연성 폐기물이 분리되어 이송 콘베어상에서 재차 진동

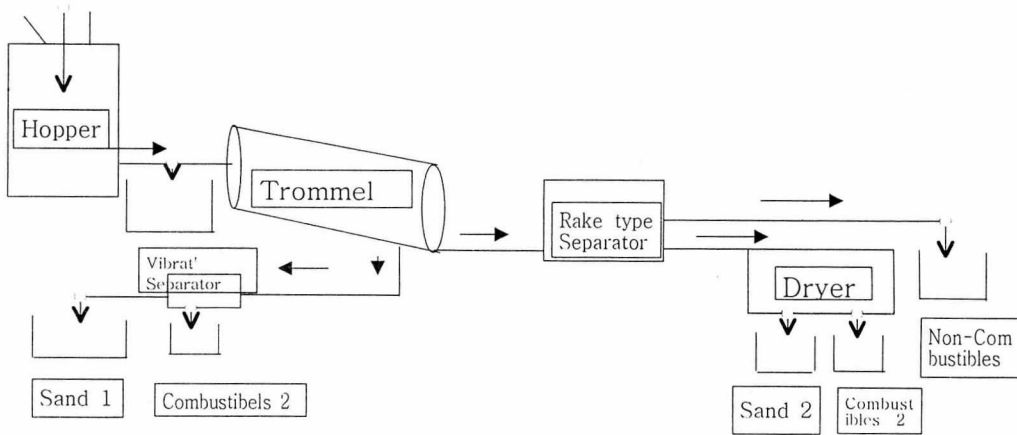


Fig. 1 A model of Trommel System

스크린으로 투입되어 미세 가연성 물질이 분리되어 적치장으로 각각 운반된다. 트롬멜 스크린에서 걸리지 않은 벽돌, 폐세멘트, 목재류, 자갈등이 다음 공정으로 이송되게 되는데, 가연성 물질 분리 공정으로, 이곳에서는 갈퀴식 가연성 물질을 긁어 올리고 인근 이송 콘베이어로 옮기는 공정으로 3~4단으로 구성된다. 이곳에서도 가연성 물질에 불연성 물질이 다소 포함되기 마련이며, 불연성 물질에도 가연성 물질이 다소 포함될 수 있는데, 폐기물 조성이나 함수율등의 영향을 받게된다.

그럼으로 분리된 폐기물의 사용 용도에 따라 적당한 후처리 설비를 투입하여 처리 경비와 관련시켜 대응해야 한다. 가연성 물질의 경우 건조와 토사 탈리를 위하여 트롬멜 형식의 건조장치를 설치하여 그 효과를 올리는 경우가 본 기술에서 적용되었다.

3-2 트롬멜 스크린의 이론 해석

트롬멜 장치에서 토사가 분리되는 기본 이론은 입자 분리 공정과 입자의 운동해석에 의해 전개할 수 있다.

트롬멜 스크린에서 대상 물질의 최소 크기와 Screen Hole을 결정하고, 충돌 횟수는 확률 문제로 본다. 직경이 d 인 구형의 물질이 일변이 $a(a>d)$ 인 사각형의 hole을 빠져나갈수 있는 확률 p 는

$$p = [1 - d/a]^2 * ra \quad (1)$$

크기 $x_0 \leq x \leq x_m$ 의 모든 입자에 대한 확률은 식(2)으로 나타난다.

ra 는 트롬멜 원통 표면적에 대한 분리공의 면적비를 나타낸다.

식(1)의 입자크기에서 전면적에 대한 분리 확률 $P(x_0, x_m)$ 은 식(2)로 나타나며

$$P(x_0, x_m) = \int f(x) x [1 - (1 - p)^n] dx \quad (2)$$

트롬멜에 투입된 대상물질에서 일정 크기 범위 안에 있는 입자들의 전체량은

$$F(x_0, x_m) = \int f(x) dx \quad (3)$$

이때 $x_0 \leq x \leq x_m$ 사이에서의 분포를 나타낸다. 트롬멜 효율은 $E(x_0, x_m) = P(x_0, x_m) / F(x_0, x_m)$ (4)이 된다.

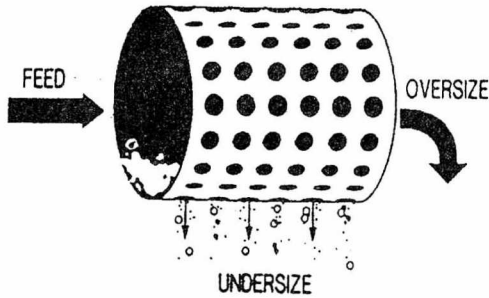


Figure 2. Typical Trommel

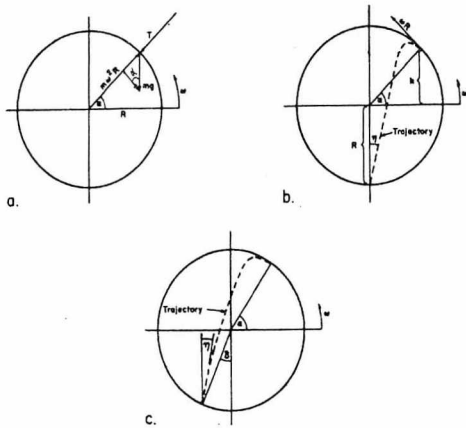


Figure 3 Particle Flight Trajectory in a Trommel

또 질량 m 인 입자가 수평 방향 직경 상에서 이동하여 움직이는 각도 (α) 는 각속도 ω , 트롬멜 반경 R ,의 함수가 된다. Fig. 2에서 입자가 표면에 붙어 있는 한 원심력 $mR\omega^2$ 은 중력의 법선 방향의 합력 T 와 같다. $T=0$ 일 때 입자는 비로소 바닥으로 떨어지게 된다.

그 조건은 $R \omega^2 / g = \sin \alpha$ (5)이며, $\alpha = \pi/2$ (수직)에 이르기 위한 각속도는 임계각속도 (Critical angular velocity)이고 입자가 떨어지지 않고 정점까지 트롬멜 내부 표면을 타고 갈 수 있는 각도가 된다. 실제, 수평 방향에 대해 Barrel 경사각 β 값은 $\pi/36 (= 5^\circ)$ 정도로, 즉 $\cos \beta$

≈ 1 이기 때문에 무시한다.

한편, 바렐 바닥에 떨어지는 점과 각도 α , 그리고 체류중에 걸린 시간 간격 t 사이에 관계식은 입자가 바렐표면을 떠나 부딪칠 때까지의 수직거리는 Fig. 2b에 나타낸바와 같이

$$(R+h) = R(1 + \sin \alpha) = gt^2/2 - \omega R t \cos \alpha \quad (6)$$

가 되고 여기에서 바렐의 경사각 β 를 무시하면

$$\omega t = \sin \alpha x \cos \alpha + [\sin^2 \alpha x \cos^2 \alpha + 2 \sin \alpha (1 + \sin \alpha)]^{1/2} \quad (7)$$

우변의 첫항은 궤적이 정점에 도달할 때까지 걸리는 시간이고 두 번 제항은 정점에서 바렐의 바닥에 떨어지는 데 걸리는 시간을 나타낸다.

트롬멜을 설계할 때 네 개의 파라메타 ω , R , L , β 의 관계식이 필요하다. 바렐 입구 부근의 단면에서 두께 b 를 가지고 angular section $(\delta + \pi/2 + \alpha)$ 에 따라서 바렐을 타고 있는 물질은 단면적 $bR(\delta + \pi/2 + \alpha)$ 를 차지한다. 비행중에 있는 물질은 시간 t 또는 $bR\omega t$ 시간동안에 바렐을 타고 있는 물질의 양에 해당한다. 물질은 속도 $(\omega/2\pi) \ell/f$ 로 바렐의 길이 방향(Longitudinally)으로 이동한다. ℓ 은 매 층들에 따른 물질의 축방향 움직인 거리를 나타낸다. 물질이 차지하고 있는 단면적과 입구부근의 바렐을 따라가는 속도를 곱하면 Volumetric feedrate가 된다. 여기에 그 층의 밀도 ρb 를 곱하면 질량유량 M (Mass feedrate)가 된다.

$$M = \Psi g^{1/2} b \rho b \beta R^{2/3} \quad (8)$$

$$\text{여기서 } \Psi = (\sin \alpha)^{1/2} (\omega t \cos \alpha + \sin \alpha + \cos \delta) \quad (9)$$

식 (8)에서 β 가 작기 때문에 $\sin \beta = \beta$ 로 대체한 것이다.

식(8)에서 처리되는 단위 시간당 물질의 양 M 은 $f(\Psi, b, g^{1/2}, \rho b, \beta, R^{2/3})$ 의 함수이며, 이 변수들 중에서 $b, g^{1/2}, \rho b, \beta$ 항은 거의 변화가 없고 식 (9)에서 보는바와같이 α 의 함수인 Ψ 이나 트롬멜 반경 R 의 영향을 많이 받는 것을 예상할 수 있다.

Table 1. Trommel Design parameter

a(deg)	sin a	Ψ	R	M
	75	0.9959	1.0	0.88
70	0.9397	1.214	0.878	1.214
60	0.8660	1.974	0.635	1.974
50	0.7660	2.604	0.528	2.604
40	0.6427	2.848	0.497	2.848
35	0.573	2.476	0.546	2.476
30	0.500	2.251	0.582	2.251
20	0.342	1.598	0.732	1.598
10	0.173	0.873	1.094	0.873

표 1에는 Lift 장치가 처리 물질을 올려주는 각도(a)에 따라 Ψ 값을 산출하고, 이 Ψ 값에 따라 처리 대상 물질의 양 M이 일정할 경우 트롬멜 직경을 변화시킬 수 있는 배율과, 트롬멜 반경 R이 일정할 경우 처리되는 물질량의 변화량의 배율을 나타낸 것이다.

표1과 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 a의 값이 40도 부근에서 물질의 처리량은 최고치의 값을 나타내는 것을 알 수 있으며, 트롬멜의 반경을 현실적으로 어느 일정 크기 이하로 줄이거나 늘이는 것은 어렵기 때문에 R값이 일정할 때 처리할 수 있는 물질의 상·하한치를 비교하는 것이 바람직하다.

4. 매립지 정비와 시스템 성능 평가

4.1. 분리장치의 성능 확인

트롬멜 스크린의 선별율은 스크린을 통과한 분리 토사량을 선별대상 쓰레기 량으로 계산하였다. 그림 1에서 예측한 값과 거의 대등한 값을 나타내고 있다.

가연물질 분리 효율은 투입된 폐기물에서 토사를 분리한 후 불연성 물질중 가연성 물질에서 분리된 가연물질과 분리된 토사중에서 가연물을 분리한 것으로 총 투입된 양중의 가연물질과 비교한 양이며 표 3과 같이 평균 96.9%의 분리 성능을 확인 하였다.

Table 2. The efficiency of trommel screen

	1	2	3	4	5	6	Ave
Sorted Quantity(kg)	65,154	93,278	76,955	84,631	73,397	88,812	80,371
Input(kg)	80,901	118,833	99,155	105,004	96,146	107,101	101,175
Sorted ratio(%)	80.5	78.5	77.6	80.6	76.3	83.0	79.4

Table 3. The Sorting efficiency of combustibles

	1	2	3	4	5	6	Ave
Comb. in Wastes (kg)	4,921	5,504	3,863	3,537	5,634	4,475	4,656
Sorted Comb.(kg)	4,862	5,73	3,765	3,415	5,426	4,270	4,513
Efficiency(%)	98.2	97.6	97.5	96.5	96.3	95.4	96.9

4.2. 분리 토사에 대한 유해성 검토

토양에 영향을 미치는 pH, 폐기물의 삼성분/유기물/회분분석 및 유해성 조사와 지반공학적인 특성 분석을 수행한 내용을 요약하면 다음과 같다.

pH는 토양이 산성인지 알칼리성인지 판단할 수 있는 지표이며, Sample Site 5개처를 선정하여 시료를 채취하여 분석한 결과는 7.61~7.97로 평균 7.72의 중성을 나타냈다.

함수율에 대한 5개 Site의 Sample 분석 결과는 표 4와 같으며 수분은 25.34~28.19(평균 26.71)%를 나타내고 유기물은 6.65% 및 회분은 66.74%를 보였으며 지역적, 폐기물 종류 및 경과년수에 따른 차이는 매립지마다 약간씩의 차이를 나타내고 있다.

Table 4. Moisture,volatile solid and ash content of sorted soils
(unit: w/w %, wet basis)

Measured	Organics	Moisture	Ash	T/T
1	7.32	28.19	64.49	100
2	7.47	27.15	65.38	100
3	5.61	26.81	67.58	100
4	5.62	25.34	69.04	100
5	6.71	26.05	67.24	100
Ave.	6.55	26.71	66.74	100

표 5.에서 보는 바와같이 6가크롬,유기인화합물, PCBs, 동식물을 제외한 유류(BTEX,TPH),페놀, TCE,PCE는 검출되지 않았으며, Cd, As, F, Hg, Ni, Cu, Zn등은 “토양환경보전시행령의 토양오염우려기준”가 “지역 기준치를 만족하고 있다. 따라서 선별토사를 매립지의 복토재나 공원 식생층의 성토 및 건설현장의 건설재료로 사용시 유해성이 없는 것으로 판단된다.

매립지의 5개 Site에서 채취한 시료를 분석한 결과, 평균분리토사중 이물질 함유량은 0.80% (체적기준), 함수비는 36.47%, 비중은 2.53~2.55 범위로 평균 2.54, 입도시험 결과 균등계수(Cu)는 18.3, 곡율계수(Cg)는 3.0으로 좋은 입도 조건을 만족 시키고 있다. 한편 액성한계(LL)은 48.8%, 소성한계(PL)은 41.1%이며 소성지수는 7.7을 얻었다. 선별토사는 일반토사와 비교하여 거의 유사한 특성을 가지고 있으며 점토질이 조금 높은 것으로 나타났다. 다짐, 강도, 투수시험은 다음과 같은 토사의 혼합비를 만들어 분석하였다.

Table 5. The results of hazardous analysis of sorted soils

	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁻⁶	organo-phosporus	PCB	CN	Phenol	Oil	Ni	Zn	F	PCE/PCB
#1	0.37	10.4	0.24	0.04	5.0	ND	ND	ND	0.03	ND	ND	1.3	288	89	ND
#2	0.39	7.36	0.36	0.06	5.3	ND	ND	ND	0.02	ND	ND	2.3	233	95	ND
#3	0.36	8.09	0.20	0.02	6.1	ND	ND	ND	0.05	ND	ND	2.8	189	83	ND
#4	0.40	15.2	0.50	0.02	5.8	ND	ND	ND	0.04	ND	ND	2.3	255	78	ND
#5	0.37	5.82	0.30	0.03	6.8	ND	ND	ND	0.03	ND	ND	3.1	169	75	ND
Ave.	0.37	9.38	0.32	0.03	5.8	ND	ND	ND	0.03	ND	ND	2.4	226	84	ND
유리기준치	1.5	50	6	4	100	4	10	-	2	4	-	40	300	400	8/4
대책기준치	4	125	15	10	300	10	-	-	5	10	-	100	700	800	20/10

* ND: Not Detected

Table 6. Mixing Ratios of solids

(Unit: %)

Specimen	Sorted soil	Natural soil	Remark
#1	100	0	
#2	75	25	
#3	50	50	
#4	25	75	
#5	0	100	

다짐효과면에서는 혼합비가 높을수록 건조밀도가 커지고 최적 함수비는 25.9%에서 11.0%로 감소하며, 일축압축강도에서는 선별토사가 일반 토사보다 배이상외 값을 나타내는데 이는 분리 토사내에 점착력이 많은 점토질 흙이 많이 포함된 결과로 예측되고, 투수계수는 분리 토사일 경우 낮은 값으로 나타내고 혼합비율이 커질수록 일반 토사의 투수계수에 근접해가는 것을 알 수 있다. 지반공학적인 측면에서 볼때 일반토사와는 차이가 나기 때문에 용도에 따라 일반토사를 혼합하여 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

5. 분리된 물질의 재활용 방안

매립지 폐기물을 굴착하여, 트롬멜 시스템의 Hopper에 투입하여 금속물질을 Magnetic Separator와 Manual로 분리시키고 트롬멜에서 토사를 분리한 후 다시 미세 가연성 물질을 분리시키며, 트롬멜을 통과한 물질중에서 가연성 물질을 분리시키는 공정에서 재활용 할 수 있는 물질은 금속 물질, 토사, 가연성 물질, 불연성 물질로 나눌 수 있다. 이중 토사는 앞에서 살펴본 바와 같이 유해성 물질이 기준치 범위내에서 기준을 만족시키고 있으며, 가연성 물질은 표8에서 보는 바와 같이 합성 수지류가 대부분을 차지하고 있어 소각방법에 의한 처리를 할 경우 건류 방식에 의한 처리가 바람직 할 것이 발열량이 높기 때문에 많은 폐열 회수 이용이 가능하다. 또 불연성 물질의 경우 재생골재로의 활용이 바람직하며, 천연 골재 채취 규제가 심해지고 있기 때문에 재생골재 원료로서 매우 바람직한 시기이다.

Table 7. Measured results of Proctor/unconfined compression strength/permeability coefficient

Specimen	Proctor		comp.strength(kg/cm ²)	permeability (cm/s)
	opt.moisture(%)	density(t/m ³)		
#1	25.9	1.34	0.89	1.71x10 ⁻⁵
#2	21.0	1.53	0.89	2.03x10 ⁻⁵
#3	20.4	1.58	0.87	2.60x10 ⁻⁵
#4	16.1	1.70	0.81	8.29x10 ⁻⁵
#5	11.0	1.84	0.40	1.05x10 ⁻⁴

표 8. Physical components of combustibles(Unit:%)

Wastes	#1	#2	#3	#4	#5	#6	Ave.
Synthetic resins	75.7	74.6	88.8	60.5	82.6	81.3	77.2
Textiles	11.3	0	3.6	23.7	8.1	13.2	10.0
Papers	2.6	13.5	7.6	5.3	7.0	4.4	6.8
Othwrs	10.4	11.9	0	10.5	2.3	1.1	6.0

국내 매립지 전체를 통해 매립지 폐기물 가운데 토사, 콘크리트, 아스팔트등 특히 매립지 폐기물중 불연성 물질량을 10% 및 밀도를 1.5ton/m³으로 하였을때 2002년도 232개소의 140,034천m³의 매립량에서 21,005천톤(14,003천 m³)가 활용될 수 있고 그중 재생골재 수율을 60%로 하였을때 12,603천톤(8,401천m³)의 재생골재(2002년 골재 수요량의 7%수준)을 생산할 수 있으며, 보고 되지 않은 매립지까지를 포함하여 재생골재가 차지하는 양은 더 커질 것으로 예상된다.

6. 결 론

전 세계적으로 폐기물 처리문제는 환경 보전 차원에서 매우 중요시되며, 특히 매립에 의존해 오던 무관심이 환경오염을 유발해왔으며 인류에게 직접적으로 악영향을 미치고 있기 때문에 매립지 정비는 매우 시급한 상황이 되었다. 정부의 매립지 정비가 추진되고 있으나 아직 정비지침이 수립되지 않은 실정에서, 환경부 차세대환경 신기술개발사업의 일환으로 개발되어 실용화 단계에 이르고 있는 고효율 선별·재활용 기술 장치를 사용하여 매립지 폐기물을 정비하는 과정에서 발생하는 선별토사의 분리효율 예측과 실험자료 비교, 분리토사의 성상분석, 유해성 분석, 지반공학특성 분석 및 가연성 물질과 불연성 물질의 재활용을 위한 고찰 등을 검토하여, 매립지 재사용 공간확보와 함께 매립폐기물 자원화를 위한 재활용의 가능성을 제시한 내용으로 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 매립지 토사 분리용 트롬멜 장치의 이론 해석과 실험 결과에 의한 트롬멜 장치의 설계기술을 정립하여 국내 매립지 정비에 활용할 수 있도록 상용화 단계로 이끌고,
- 2) 분리 토사내 유해물질은 기준치를 만족하고, 지반 공학적인 면에서는 일반 토사와

혼합하여 용도에 맞도록 사용하는 것이 바람직함을 확인하였으며

- 3) 매립지 폐기물 분리에 의한 철재류, 가연성 물질, 불연성 물질의 재활용 가치를 재활용할 수 있는 수준까지 분리가 가능한 트롬멜 시스템을 구성 할 수 있으며
- 4) 본 연구에서 개발한 트롬멜 시스템은 국내·외 매립지 정비를 위한 선진 기술로 매우 유용하게 활용 할 수 있을 것으로 판단 된다.

참 고 문 헌

1. 남궁 완외, “폐기물 매립지 선별토양의 물리 화학적 특성”, 한국폐기물학회 논문집 제13 권 제6호, pp783-792,1996년 11월
2. M.Piekarczyk, H.Ciurej, Trommel Screens for Waste Utilization, Computer Aided Design
3. P.Frank Winkler, David Gordon Wilson, Size Characteristics of Municipal Solid Waste,
4. Harvey Alter, Jerome Gavis, Marc L. Renard, Design Models of Trommels for Resource Recovery Processing,
5. P.A.Wheeler, J.R.Barton and R.New, An Empirical Approach to the Design of Trommel Screens for Fine Screening of Domestic Refuse
6. 최갑석, 폐기물 자원회수용 트롬멜 스크린 설계기술,한국기계연구원 기계와 재료, 2002. 추
7. 최갑석외, 토사의 확률분포 해석에 의한 Trommel Screen 설계, 한국폐기물학회 2002년 추계학술연구발표회 논문집, 2002.11
8. 이재영, 사용종료 매립지 선별토사의 재활용을 위한 기초연구 최종보고서, 2004.5