

사용종료매립지 선별토사의 특성분석을 통한 안정성 평가

Characterization of the Screened Soil from a Closed Landfill to Evaluate the Stabilization

박동운* · 문세흠** · 이남훈*** · 남경필**** · 김재영*****

Park, Dong Un · Moon, Seheum · Lee, Namhoon · Nam, Kyoungphile · Kim, Jae Young

Abstract

This study was conducted as a preliminary research to evaluate the reusability of the screened soil from a closed landfill. For this purpose, we determined the physico-chemical properties of five soil samples collected from a closed landfill site with dumped ages of 1, 5, 10, 15, and 20 years. Gas evolution and leachate analysis were also performed using lab-scale lysimeters. According to sieve analyses, all screened soil samples were within the range of well-graded standard. However, hand-separation showed that rates of non-soil content by volume in all screened soils were higher than the regulation, i.e. 1% by volume except 20 year-old soil. There was no trend in volatile solid (VS) of screened soil along the dumped age. However, microbial activity test showed the identical results to soil respiration test and can be a good indicator for the stabilization of closed landfills. Humic substances extraction test also showed that the portion of non-humic substances in soil organic matter (SOM) decreased with the increase of dumped age. Results obtained from tests demonstrated that decomposition of wastes was still ongoing and the soil samples were not stabilized even after 20 years of dumped age. Therefore, screened soil from waste dumping site should be appropriately remediated to stabilize wastes-origin, biodegradable organic fractions before reuse.

Keywords : waste dumping site, prescreened soil, lysimeter, stabilization

요 지

사용종료매립지 정비사업 시행시 다량으로 발생하는 선별토사의 재활용 타당성을 평가하기 위하여 선별토사에 대한 기본 물성치 실험, 회분식 실험, 모형매립조 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 선별토사는 공주에 위치한 사용종료매립지에서 매립연한 별로 1, 5, 10, 15, 20년이 경과한 토사를 25 mm 체로 선별하여 채취하였다. 체분식 실험 결과 선별토사는 매립연한에 관계없이 입도분포가 양호하여 지반공학적인 면에서는 성토재 등으로의 재이용이 가능할 것으로 사료된다. 그러나, 이물질부피비의 경우 20년 선별토사를 제외하고 모두 재활용을 위한 법적 기준인 1%를 넘어 재이용을 위해서는 보다 정밀한 선별이 필요할 것으로 판단되었다. 선별토사의 VS는 매립연한에 따라 특별한 경향을 보이지 않아서 안정화 판단 기준으로 적절치 않음을 보였다. 혐기조건, 호기조건에서의 미생물 활성도 실험은 혐기분해를 모사한 모형매립조 실험과 호기조건을 모사한 soil respiration test와 동일한 양상을 보여, 생물학적 분해기능성에 대한 좋은 판단 근거가 될 수 있음을 알

*한국과학기술정보연구원 산업정보분석실 연구원(E-mail: zzompang@freechal.com)

**서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정(E-mail: moon13@snu.ac.kr)

***안양대학교 도시환경공학부 환경공학과 부교수(E-mail: nhlee@aycc.anyang.ac.kr)

****BK21 사회기반 및 건설기술 인력양성 사업단 전문강사(E-mail: kpnam@gong.snu.ac.kr)

*****정회원 / 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 조교수(E-mail: jaeykim@snu.ac.kr)

수 있었다. 생물학적으로 분해가 쉬운 non-humic substances의 경우 매립연한이 증가함에 따라 토사 내 전체 유기물에 대한 비율이 감소하였다. Soil respiration test, biochemical methane potential test 등을 실시해 본 결과, 매립연한이 짧은 선별토사의 경우 토사 내 유기물이 아직 안정화되지 못한 것을 알 수 있었고, 모형매립조 실험을 통해 10년 이상의 선별토사 또한 장기적으로는 지반침하, 가스, 악취, 침출수 등의 문제점이 발생할 수 있는 것으로 판단되었다. 따라서, 사용종료매립지 선별토사의 재활용을 위해서는 쓰레기에서 유래한 토사 내 유기물의 안정화를 위한 복원공법 적용이 선행되어야 할 것이다.

핵심용어 : 비위생매립지, 선별토사, 모형매립조, 안정화

1. 서 론

국내에 존재하는 폐기물 매립지 1,300여 개소 중 98% 이상이 위생매립지가 기본적으로 갖추어야 할 제반시설을 제대로 갖추지 못한 비위생 매립지이며, 대부분의 사용종료 매립지는 비위생매립지에 해당한다(한국과학기술연구원, 1999). 사용종료매립지의 처리 및 정비 방안으로는 이송처리공법, 선별이적 처리공법, 자체 안정화공법, 자체 고품화공법, 오염확산 방지공법 등 여러 방법이 제시되어 왔으며, 국내에서는 대부분 선별이적 처리공법과 자체 안정화공법이 적용되고 있다(정하익, 2000). 이중 선별이적 처리공법은 매립폐기물을 굴착한 후 선별하여, 폐기물은 소각하거나 위생매립지로 이송, 재매립하고 토사 성분은 매립지 복토재나 성토재 등으로 재활용하는 방법으로(남궁완 등, 1995; 윤석표, 윤범환, 1997; 정하익, 2000), 실제 적용과정에 있어서 매립폐기물의 선별기술에 의해 처리 효율이 크게 좌우된다. 일반적으로 국내 사용종료매립지 정비사업 시행시 다량으로 발생하는 선별토사는 대부분 생활폐기물을 매립하여 중금속류 등의 농도가 관련법 기준이내로 폐기물 관리법상 사업장 폐기물로 분류, 재활용 관련사항을 적용할 수 있다(이남훈 등, 1995). 그러나, 기존의 선별기술로는 단순한 토사 성분만을 얻을 수 없고, 장기적으로는 지반침하, 가스, 악취, 침출수 발생 등을 유발하는 유기물을 함유하고 있어 자연상태의 토사에 비해 재활용 용도가 제한적이다(남궁완 등, 1995). 따라서, 사용종료매립지 선별토사의 재활용에 따른 문제점의 파악과 저감을 위한 처리방안 및 기준설정이 필요하다.

본 연구에서는 공주시 금홍동 사용종료매립지에서 채취한 선별토사를 대상으로 하여 (1) 매립연한에 따른 선별토사들의 기본 물성치를 조사하고; (2) 선별토사 내 유기물의 호기상태와 혐기상태에서의 생물학적

분해 정도를 살펴보고; (3) 선별토사 내 유기물의 물용출 정도를 평가하고; (4) 모형매립조를 운전하여 이를 통해 매립 연한이 다른 선별토사의 생물학적 장기 분해 거동을 분석하여, 사용종료매립지 선별토사의 안정성을 판단하여 보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

실험에 사용한 선별토사는 충남 공주시 금홍동 530번지에 위치한 총 매립용량이 2,442,883 m³(456,991톤)인 사용종료매립지에서 채취하였다. 굴착기를 사용하여 지하 약 5 m 정도 굴착한 후 쓰레기가 포함된 토사를 25 mm체로 현장에서 선별하였다. 체는 현장에서 사용되고 있는 토사선별기를 기준으로 정하였다. 선별토사는 매립연한 별로 5가지 즉, 1, 5, 10, 15, 20년 이 경과한 토사를 따로 채취하였으며, 매립연수는 매립작업일지, 매립된 신문 등의 간행물 등을 이용하여 추정하였다. 채취한 토사는 실험실로 운반하여 봉합한 상태로 상온에서 보관하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 기본 물성치 실험

함수비는 현장에서 시료 채취 직후 무게를 측정하고 실험실로 옮긴 후 105±5°C oven에서 24시간 건조하여 측정하였다. Water Holding Capacity(WHC)는 1/3 bar 방법을 사용하였고, pH는 공정시험방법(토양편)을 이용하였다. 또한, 비중 및 액소성 한계는 한국산업규격에서 제시한 방법을 사용하였고(이상덕, 1997), 이물질부피비는 선별토사 내 이물질을 수작업을 통하여 선별한 후 메스실린더를 이용하여 측정하였다. 강열감량(VS)은 105±5°C에서 24시간 동안 건조시킨 시료(TS)를 400°C에서 16시간 동안 태운 후 무게차를 측

정하여 구하였다(NSSC, 1996).

2.2.2 회분식 실험

혐기조건과 호기조건에서 선별토사의 생물학적 분해가능성을 파악하기 위해 Biochemical Methane Potential (BMP) test와 soil respiration test를 실시하였으며, 각 조건에서 미생물의 활성도를 측정하였다. 또한 선별토사의 처리기법으로서 토양세척법(soil washing)의 적용 가능성을 살펴보기 위해 물을 이용한 토양세척 실험을 수행하였다.

실험에 사용한 토사는 20년 선별토사를 제외하고는 이물질의 부피비가 법적인 기준인 1% 이상이므로 재활용을 위해서는 우선 재선별이 필요하였다. 따라서 회분식 실험은 토사의 재선별이 이루어졌다는 가정하에 이물질을 수작업으로 제거한 후에 수행하였으며, 토양세척실험은 보다 많은 양의 유기물을 용출시키기 위해 0.25 mm 체를 이용하여 재 선별한 토사를 이용하였다.

BMP test는 Owens와 Chynoweth(1993) 등에 의해 제시된 방법을 이용하였고, Soil respiration test는 25 g의 대상 토양 시료를 WHC의 55%로 수분을 조절한 후 용기에 넣고, 0.05 M NaOH 용액을 이용하여 CO₂를 흡수시켜 매일 0.05 M HCl 용액으로 적정하여 측정하였다(Alef and Nannipieri, 1998).

매립연한에 따른 선별토사의 미생물의 활성도 변화를 파악하기 위해 질소 가스로 충전한 후 약 3주 동안 4°C 냉장보관시켜 혐기상태로 만든 시료와, 호기상태로 만든 시료를 밀폐된 용기에 각각 준비하였다. 준비된 토양 1g에 phosphate buffer 용액을 10 ml 주입한 후 2500 rpm vortex shaking을 1분간 2회 실시하여 미생물을 추출한 후 10분간 중력 침강을 시킨 후 상정액을 채취하여 2 ml culture tube에 담아 약 30초 정도 원심분리 시켰다. 상정액에서 50 µl를 채취하여 micro luminometer(New Horizons Diagnostics, Model: 3650a)를 이용해 측정된 RLU(Relative Light Unit)의 값을 분석기기 업체에서 제공한 검량선을 이용하여 호기상태와 혐기상태의 미생물의 활성도를 number of CFU(Cell Forming Unit)의 형태로 계산하였다.

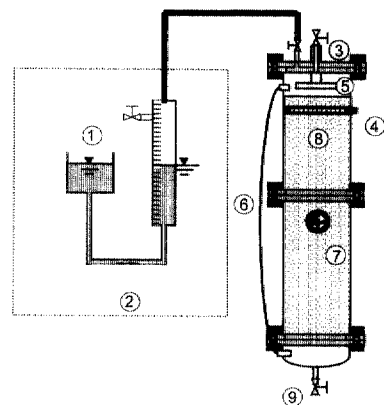
토양 세척 실험은 폐기물 용출 실험방법(공정시험법, 폐기물편)을 준용하여 3 g의 토양시료에 30 ml 증류수를 넣은 후 진탕기를 이용하여 200 rpm으로 6시간

연속 진탕하고 원심분리한 후 상정액의 BOD와 COD를 측정하였다. 토양 세척 실험을 통한 유기물 용출결과와 비교를 하기위해 선별토사의 BOD와 COD를 측정하였다. 선별토사의 BOD는 3 g의 시료에 300 ml의 증류수를 주입하여 혼합한 혼탁액의 BOD를 측정 한 후 측정된 값에 10을 곱하여 고액비 1:10으로 환산하였다. 선별토사의 COD는, 1:10의 고액비로 선별토사와 황산-중크롬산칼륨 용액을 혼합하고 2시간 동안 산화시킨 후에 측정하였다.

난분해성 유기물과 이분해성 유기물을 구분하기 위하여 실시한 humic substances extraction은 Stevensen(1994)이 제시한 방법을 사용하여 고액비 1:10으로 non-humic substances, humic acid, fulvic acid를 용출해 내어 용출액의 COD를 측정하고, 흙에 남아있는 humin의 COD를 측정하여 고액비 1:10으로 환산하여 나타내었다.

2.2.3 모형매립조 실험

본 연구에서는 그림 1과 같은 모형매립조를 매립연한 1년 선별토사(이하 1년-1 선별토사), 그리고 40일 경과 후 다시 채취한 시료에 대해 매립연한에 따라 1년(이하 1년-2 선별토사), 5년, 10년, 15년, 20년 선별토사, 모두 6기를 운전하였다. 각 모형매립조는 두께 1 cm인 PVC 원통으로 제작하여 30°C 항온실에



- ① 가스 샘플링 포트 ② 가스 모집조
- ③ 우수 주입 장치 ④ 침하량 관측을 위한 자석
- ⑤ 우수배분장치 ⑥ 침출수 배출 용이를 위한 공기 튜브
- ⑦ 온도계 ⑧ 자석식 침하판
- ⑨ 침출수 샘플링 포트

그림 1 모형매립조

설치하였으며, 모형매립조 중앙에 온도센서를 설치하였다. 우수공급장치는 십자형의 PVC파이프를 이용하여, 공주지역의 강우량을 고려하여 하루 30 ml씩 증류수를 공급하였다. 시료는 현장에서 25 mm체로 선별한 토사를 특별한 전처리 없이 그대로 이용하였으며, 건조단위중량의 90%가 되게 습윤단위중량을 맞추어 150 cm 높이까지 다짐봉을 이용해 5단으로 다진 후 충전하였다. 매립가스 발생량은 그림 1의 ②와 같은 가스 포집조를 이용하여 측정하였으며 포집된 가스는 TCD(Thermal Conductivity Detector)가 장착된 GC(Gas Chromatography)를 이용하여 분석했다. 가스 포집조의 경우 발생가스의 용해를 막기 위해 포화식염수를 사용하였다. 가스 발생량과 조성은 1일 1회 실시하여 분해 거동을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기본 물성치 실험

선별토사의 기본 물성치와 입도분포를 표 1과 그림 2에 나타내었다. 함수비의 경우 대체적으로 매립 연한이 오래될수록 그 값이 커짐을 알 수 있고, 비중의 경우 시료간 큰 차이가 없었으나 20년이 경과한 시료에는 매립 당시 연탄재도 함께 매립되었기 때문에 비중이 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 또한, 모든 시료에 대해 균등계수와 곡률계수가 양입도 기준(균등계수>10, 곡률계수 1~3)을 만족하여 선별토사의 생물학적 안정화 이후 성토재로 재이용시 지반공학적으로는 유용하게 쓰일 수 있다고 판단된다. pH는 6.8~7.2의 중성을 나타내어 landfarming과 같은 호기성 분해를 이용한 복원공법을 적용할 경우, 추가로 토양의

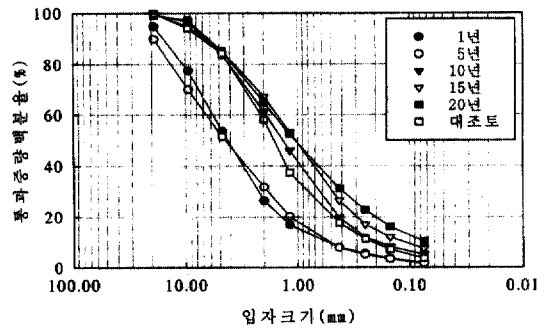


그림 2 매립연한에 따른 선별토사의 입도분포

pH를 조정할 필요가 없다고 사료된다.

선별토사의 이물질부피비를 측정된 결과 매립연한이 짧을수록 이물질이 많이 포함되어 있음을 알 수 있었다. 20년이 경과한 시료의 경우 연탄재와 일반 생활폐기물이 함께 매립이 되어 작은 입자의 경우 토사로부터 연탄재를 분리하는 것이 불가능하여, 연탄재 전량을 토사로 분류하였다. 시료채취 시에 25 mm체로 일차 선별했음에도 불구하고, 1년 경과 시료의 경우 이물질이 부피비로 12%까지 포함된 것으로 측정되어 선별토사 재이용을 위한 법적 기준인 이물질부피비 1% 미만을 맞추기 위해서는 이물질 선별작업이 필요할 것으로 생각된다. 한편, 선별토사 내 유기물 함량은 표 1에서 보는 바와 같이 매립연한에 따라 특별한 경향을 보이지 않았으며, 이로 미루어 보아 유기물 함량 자체로는 안정화 판단의 기준이 되지 못함을 알 수 있다.

3.2 회분식 실험

대상 토양시료가 최적의 혐기성 조건으로 분해될 경우 발생하는 가스의 양을 측정하는 BMP test 결과,

표 1 기본 물성치

토양	1년	5년	10년	15년	20년
현장 함수비(% by wt.)	17.0	14.0	30.1	31.8	43.5
WHC(% by wt.)	32.9	35.7	41.0	44.9	45.0
비중	2.68	2.62	2.56	2.63	2.53
균등계수	11.4	10.8	10.0	13.6	21.3
곡률계수	1.55	1.16	1.19	1.51	1.33
소성지수	Non-plastic				
이물질부피비(%)	12.3	6.0	2.4	1.7	0.5
pH	6.7	6.8	7.2	7.1	7.1
S (% by wt.)*	1.92±0.08	1.69±0.02	2.50±0.48	2.88±0.12	2.40±0.34

* : 평균 ± 표준편차

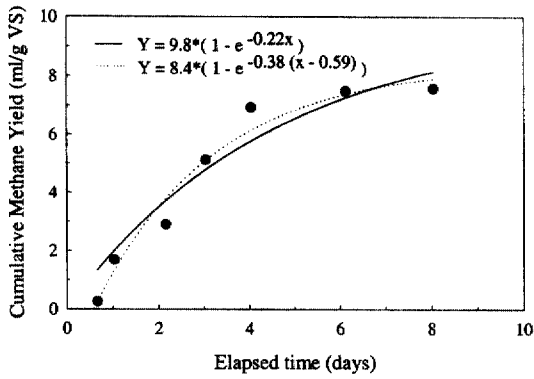


그림 3 매립연한 1년 선별토사의 누적 CH₄ 발생량

매립연한 1년 선별토사에서 약 8일 동안 가스가 발생하였고, 나머지 선별토사에서는 동일기간 동안 가스 발생이 관측되지 않았다. 매립연한 1년 선별토사의 누적 메탄가스 발생량을 그림 3에 나타내었다. 표 2는 다른 문헌에서 제시한 반응상수와 가스 발생량을 나타낸 것이다. 일차반응상수 k는 유기물의 분해 속도를 의미하며 본 실험에서는 지체시간을 고려하는 경우 0.38 day⁻¹, 지체시간을 고려하지 않는 경우 0.22 day⁻¹의 값을 나타내었다.

Soil respiration test에서 시간에 따른 누적 CO₂ 발생량을 측정된 결과, 그림 4에서 보는 바와 같이 1년, 5년 선별토사의 CO₂ 발생량은 10년 이상 된 선별토사들에 비해 1.5배 이상 크게 측정되었다. 한편, 10년 이상 된 선별토사들의 CO₂ 발생량은 비슷한 값을 나타내었으며, 이는 매립연한이 10년 이상 된 토사에서는 호기성분해에 의한 유기물의 분해가 거의 안정화 상태에 도달했기 때문이라고 여겨진다.

시료 내의 미생물 활성도의 측정결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보는 바와 같이 혐기상태에서

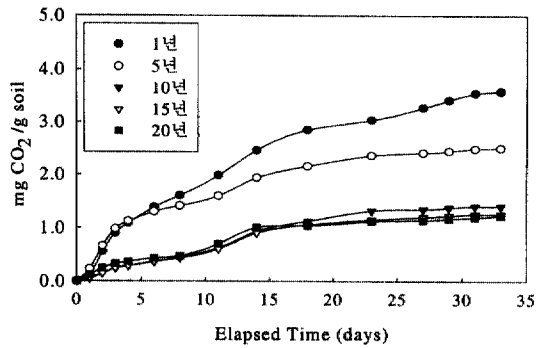


그림 4 Soil respiration test에서의 시간에 따른 누적 CO₂ 발생량

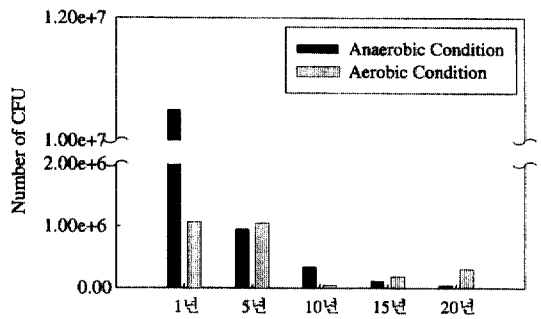


그림 5 대상 토양 시료의 미생물 활성도

미생물의 활성도는 매립연한에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며 1년 선별토사에서의 활성도가 다른 토사들에 비해 10배 이상 크게 측정되었다. 호기조건에서 미생물의 활성도는 혐기조건과는 달리 매립연한에 따라 뚜렷한 경향을 나타내진 않았으나 1년, 5년 경과된 시료의 미생물 활성도가 10년 이상 경과된 시료보다 크게 측정되었다. 혐기상태와 호기상태에서의 미생물의 활성도 측정 결과는 각각 BMP test와 soil

표 2 메탄 생성 일차반응상수 (k)값과 기존 연구결과와의 비교

대상 시료	G _{max} (ml/g VS)	k (day ⁻¹)	지체시간 (day)	참고문헌
매립연한 1년 선별토사	9.8	0.22	Without	본 연구
	8.4	0.38	0.59	
밥	352.2	0.34	3.5	강석태, 1996
종이	223.2	0.50	3.2	
밥+종이	303.2	0.60	1.8	
일반폐기물	186.5~204.1	0.05~0.08	Without	이동우, 1998
		0.06~0.10	3.2~4.1	

G_{max} : 총 메탄 발생량.

VS : 유기물 함량

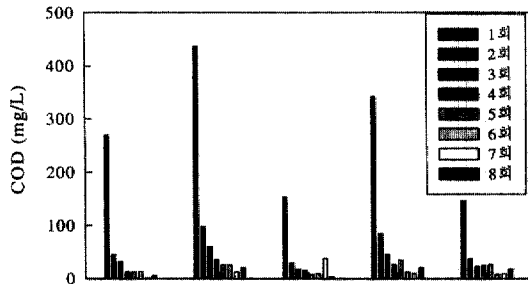


그림 6 물 용출 실험에서 용출액의 COD

respiration test의 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 이로 미루어 보아 미생물의 활성도는 생물학적 분해가능성에 대한 좋은 판단근거가 될 수 있을 것으로 여겨진다.

물로 용출되어 나올 수 있는 유기물의 양을 알아보기 위해 물 용출 실험을 8회 반복 실시하여 그림 6에 나타내었다. 그림 6을 살펴보면, 1회 용출시켰을 때 물에 의해 용출가능한 COD의 60~70%가 용출되어, 선별토사를 물로 한번 세척하는 것만으로도 지반 침하, 가스, 악취, 침출수 발생 등의 원인이 되는 유기물을 상당량 저감시킬 수 있을 것으로 보인다. 한편 1회의 물 세척으로 용출되어 나온 BOD, COD와 선별토사의 BOD, COD값을 각각 측정하여 표 3에 나타내었다. 표 3에서 보는 바와 같이 1회의 물 용출에 의해 씻겨 나오는 유기물은 토사 내 전체 유기물의 양에 비해 아주 적은 양임을 알 수 있다. 그러나 토사 내의 전체 유기물 중 얼마가 세척되는냐는 것보다는 용출 가능한 유기물 중 얼마가 세척되는냐가 더욱 중요한 요소로 생각된다.

Humic substances는 생물학적으로 분해가 어려운 물질로 알려져 있다(Stevensen, 1994). 선별토사 내 유기물 중 humic substances와 non-humic substances를 표 3 물 세척시 용출 가능한 BOD, COD와 선별토사의 BOD, COD 비교(단위: mg/L)

	1년	5년	10년	15년	20년
1회 물 세척 용출 BOD	11	34	6	29	8
1회 물 세척 용출 COD	270	436	154	342	146
선별토사 BOD	217	445	139	378	133
선별토사 COD	2,913	10,615	2,513	21,683	19,054

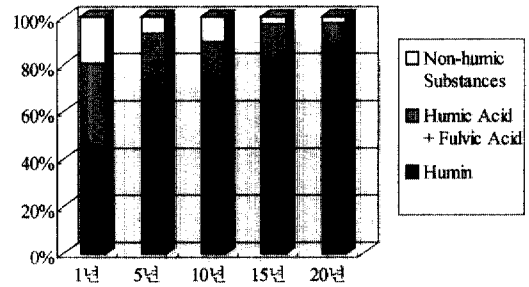


그림 7 선별토사 내 humic substances 용출액의 COD 비율

용출하여 그 용출액의 COD를 측정, 백분율로 환산하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7을 보면 매립연한 10년 선별토사를 제외하고 매립연한이 경과함에 따라 생물학적으로 쉽게 분해가능한 non-humic 물질의 비율이 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 매립연한 1년 선별토사의 경우 non-humic 물질이 전체 유기물의 20% 정도이지만, 다른 선별토사의 경우 모두 10% 이하임을 알 수 있다. 즉 유기물의 절대량은 매립 당시 쓰레기의 성상과 복토제로 사용된 토사의 종류 등에 따라 다르기 때문에 매립연한 별로 경향을 정확히 찾을 수 없었지만, 각각의 선별토사 내 전체 유기물 중에서 생물학적으로 분해 가능한 부분은 매립연한이 경과함에 따라 줄어들게 됨을 알 수 있었다.

3.3 모형매립조 실험

매립연한에 따른 선별토사 모형매립조의 누적 가스 발생량을 그림 8에 나타내었다. 1년-1 선별토사의 모형매립조에서는 운전기간이 90일이 지날 때까지 평균

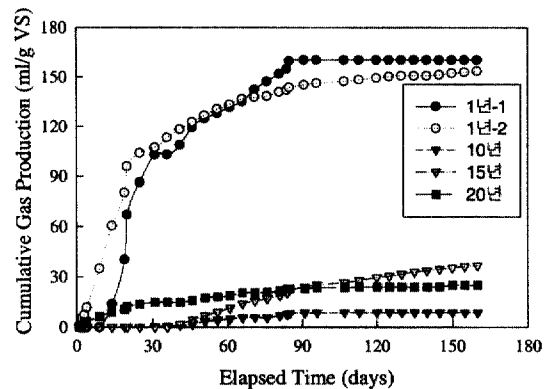


그림 8 매립연한에 따른 선별토사 모형매립조의 누적 가스 발생량

적으로 1일당 3 ml/g VS 이상의 가스가 발생하였고, 운전기간이 100일 이상 지난 후에는 가스 발생이 관찰되지 않았다. 1년-2 선별토사 모형매립조의 경우 초기 한달 동안은 1년-1 선별토사 모형매립조의 경우와 마찬가지로 하루 3 ml/g VS 이상 많은 가스가 발생하였으나, 그 후 점차 감소하여 운전기간 160일이 경과한 후에는 0.3 ml/g VS 정도 계속 발생하고 있다.

그러나, 분해가 활발히 일어난 1년 선별토사와는 달리 5년 선별토사 모형매립조에서는 가스 발생이 관찰되지 않았다. 즉, 생물학적 반응이 전혀 일어나지 않았으며 160일 경과 후, 생물학적 분해가 발생한 1년 선별토사 침출수의 COD값에 비해 5년 선별토사 침출수의 COD값이 훨씬 크게 측정된 것으로 미루어 보아, 5년 선별토사의 경우에는 생물학적 분해 반응을 저해하는 요인이 있었던 것으로 판단된다.

한편, 10년 선별토사 모형매립조의 경우 운전 한달 경과 후, 그리고 15년 선별토사 모형매립조의 경우 운전 45일 경과 후 처음으로 가스가 발생하기 시작하여 160일이 경과한 현재 각각 하루 0.2 ml/g VS, 0.5 ml/g VS 정도 가스가 발생하고 있다. 반면 20년 선별토사 모형매립조의 경우 운전 초기부터 불규칙하게 가스가 발생하고 있다. 10년 이상 경과한 선별토사들의 경우에는 실제로 분해 반응이 활발하게 일어나지 않았기 때문에, 매립시 사용된 복토재와 매립 폐기물의 성상 등에 의해 가스가 특별한 경향 없이 비슷하게 발생한 것으로 사료된다.

매립연한 1년-2 선별토사 모형매립조의 가스 성상 변화를 그림 9에 나타내었다. 일반적으로 매립지에서의 가스 성상 변화 추이(Kruempelbeck and Ehrig, 1999)와 비슷한 양상으로 처음 CH₄, CO₂가 발생하면서 N₂가 점차 감소하고 약 10일 이후 CH₄가 CO₂를 역전하여 CH₄가 평균 65%(vol), CO₂가 평균 30%(vol) 정도로 검출되었다. 1년-1 선별토사 모형매립조에서 발생한 가스의 성상은 1년-2 선별토사와 유사한 결과를 나타내었으며, 10년 선별토사 모형매립조의 가스 조성은 CH₄가 약 35%, CO₂가 20% 정도 측정되었다. 15년 선별토사에서 나온 가스의 경우 CH₄, CO₂가 각각 55%, 20% 정도로 일정하게 유지되었다. 20년 선별토사 모형매립조에서는 운전기간 동안 간헐적으로 가스가 발생했지만, CH₄는 전혀 검출되지 않았고 CO₂만 5~10% 정도 검출되었다. 5년 선별토사 모형매립조에서는 가스가 발생하지 않아 가스 성상을

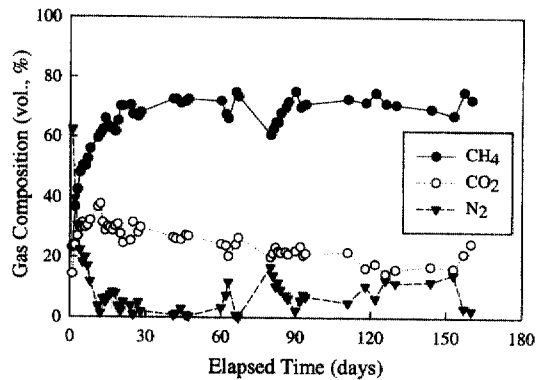


그림 9 운전기간에 따른 매립연한 1년-2 선별토사 모형매립조의 가스 성상

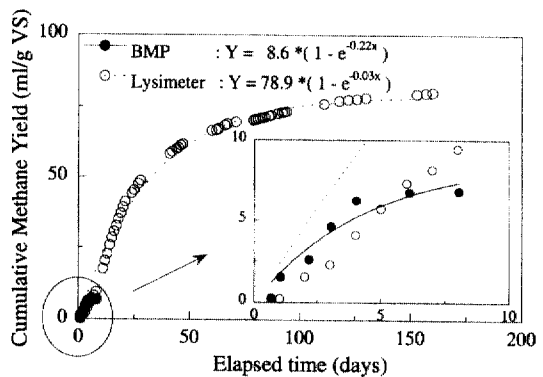


그림 10 모형매립조와 BMP test에서의 가스발생량 비교

분석할 수 없었다.

가스발생량과 가스조성 측정자료를 이용하여 모형매립조에서의 CH₄ 누적가스발생량을 계산할 수 있었으며 1-2 선별토사의 모형매립에서 발생한 CH₄와 BMP test의 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 보는 바와 같이 모형매립조에서의 가스발생량은 78.9 ml/g VS로 BMP test 보다 10배 정도 크게 측정되었으며 유기물의 분해속도인 k 값은 0.03 day⁻¹으로 10배 정도 낮게 측정되었다.

BMP test는 혐기성 조건에서 유기물의 분해에 의해 발생할 수 있는 총 CH₄ 발생량을 실험적으로 추정하는 방법으로 모형매립조보다 더 많은 양의 CH₄이 발생하는 것이 일반적이다(이동우, 1998). 본 논문에서는 BMP test를 수행 시에 25 g(약 0.5 g VS)의 토사를 이용하였으며, 약 8일 후에는 가스발생이 관찰되지 않아 실험을 멈추었다(그림 3 참조). BMP test의 수행 시에 적은 양의 토사(또는, VS)를 이용한 것이 가스

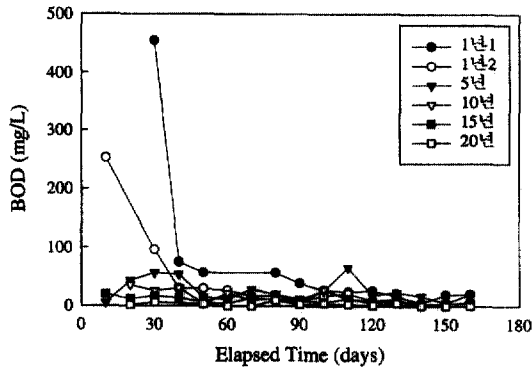


그림 11 운전기간에 따른 침출수의 BOD 변화

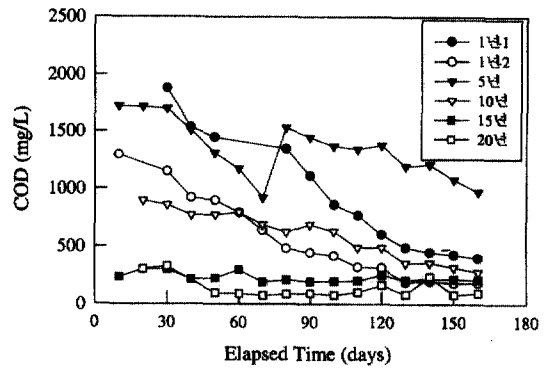


그림 12 운전기간에 따른 침출수의 COD 변화

발생량 측정에 오차를 유발시킨 것이라고 여겨지며, 8 일의 실험기간이 선별토사에 있을 수 있는 난분해성 유기물을 분해하기에 충분한 시간이 아니었다고 생각 된다. 따라서, BMP test의 가스발생량이 모형매립조에서 보다 작게 측정된 것은 BMP test에서의 가스발생량 측정오차로 인한 것이라고 사료되며, 본 논문에서는 BMP test 보다 모형매립조를 이용한 혐기성분해 실험이 선별토사의 생물학적 분해를 잘 모사했다고 판단된다. 선별토사의 BMP test를 수행하는 경우에는 가능한 많은 양의 시료를 이용하는 것이 바람직하며, 가스발생이 단기간에 걸쳐 발생한다고 하더라도 토사의 유기물 중에 난분해성 물질이 많을 수 있으므로 장기간 실험을 수행할 필요가 있다고 생각된다.

모형매립조에서 발생하는 침출수의 BOD를 측정하여 그림 11에 나타내었다. 매립연한이 1년, 5년 된 선별토사의 모형매립조에서 나온 침출수를 제외하고는 대부분 50 mg/L 이하의 값을 보였고, 특히 40일이 경과한 후부터는 매립연한이 1년, 5년 된 선별토사 침출수의 BOD 또한 급격히 감소하여 안정화됨을 알 수 있다. 그림 12는 침출수의 COD를 측정된 결과를

나타낸 것이다. 매립연한 1년, 5년, 10년 선별토사의 모형매립조에서 나온 침출수에서 500 mg/L 이상의 높은 COD값을 보였다. 운전 기간이 증가함에 따라 점차로 COD가 감소하는 경향을 보이고 있지만, 160일이 경과했음에도 불구하고 5년 선별토사 침출수의 경우 COD가 1,000 mg/L 정도의 큰 값을 보였다.

COD 측정값과 앞에서 구한 BOD값을 이용해 BOD/COD값을 표 4에 제시하였다. 운전 초기 한달까지는 매립연한 1년 선별토사의 침출수 BOD/COD 값이 상당히 컸으나, 40일이 경과한 후 대부분의 BOD/COD 값이 환경부(2001)와 Rooker(2000)가 제시한 매립지 안정화의 필요조건인 10% 미만이었다. 이는 침출수 내에 많은 양의 유기물이 존재하나 실제 생물학적 분해 가능한 양은 그에 비해 작기 때문이다.

환경부의 사용종료매립지 정비지침(2001)에 의하면, 사용종료매립지 안정화의 조건은 침출수의 수질이 2년 연속 배출허용기준에 적합하고, BOD/COD_{cr}이 0.1이하이어야 한다. 또한, 매립가스의 경우 발생량이 2년 연속 증가하지 않고, CH₄의 농도가 5% 이하 등의 조건을 만족하여야 한다. 본 실험에서는 모형매립조의

표 4 침출수의 BOD/COD비

(단위: %)

운전 일수	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
1년-1	-	-	24.2	4.9	3.9	-	-	4.2	3.5	3.1	3.1	4.3	3.5	2.1	4.5	5.3
1년-2	19.5	-	8.3	3.3	3.3	3.4	2.7	3.7	1.8	4.2	6.6	2.7	5.7	1.1	1.6	3.9
5년	0.3	2.6	3.4	3.6	1.1	1.0	3.2	1.3	1.6	4.2	4.9	1.3	2.0	1.4	0.5	2.1
10년	-	4.0	3.0	4.0	0.5	2.8	1.5	2.1	0.3	2.1	2.3	1.6	2.8	0.9	1.2	2.0
15년	8.7	4.2	5.7	6.5	2.7	1.3	7.4	4.9	5.1	3.2	6.0	2.1	4.2	1.6	1.6	2.0
20년	-	0.6	1.8	-	3.2	0.0	0.0	11.1	2.6	5.6	2.5	0.5	5.5	0.1	0.2	0.5

운전기간이 160일 밖에 되지 않았기 때문에, 환경부에서 제시한 매립지 안정화 조건을 본 실험 결과와 직접 비교할 수는 없다. 그러나, 모형매립조에서 가스가 계속 발생하고 있고, 침출수의 COD 또한 매우 높기 때문에 쓰레기에서 유래한 선별토사 내 유기물은 아직 안정화되지 않은 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 공주 금홍동 사용종료매립지 선별토사를 대상으로 생물학적 안정화 정도 및 지반공학적인 성질을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대상 선별토사의 입도분포를 조사한 결과, 양입도 기준을 모두 만족하여 지반공학적인 면에서는 선별토사를 성토재 또는 복토재로 재이용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이물질부피비가 높은 경우에는 재활용에 법적 제한이 있다.

2. Soil respiration test에서의 CO₂ 발생량과 호기 조건에서의 미생물 활성도 모두 1년과 5년 선별토사가 다른 선별토사들에 비해 높은 값을 보였다. 또한 혐기성분해를 모사한 모형매립조 실험에서는 1년 선별토사에서의 가스발생량이 다른 토사들에 비해 매우 크게 관찰되었으며, 이는 혐기 조건에서의 미생물활성도 결과와 유사하다. 이를 통해 미생물 활성도 실험은 생물학적 분해가능성에 대한 좋은 판단근거를 제공해 주는 것으로 판단된다.

3. 물 용출 실험 결과(고액비 1:10), 1회 세척 후 물에 의해 용출 가능한 COD의 60~70%가 용출되어, 선별토사를 물로 한번 세척하는 것만으로도 물에 용출되는 유기물의 상당량이 제거됨을 알 수 있었다. 선별토사의 유기물 함량은 매립연한에 따른 경향을 찾을 수 없었지만, humic substances extraction 실험을 한 결과, 전체 유기물 중 생물학적으로 쉽게 분해되는 유기물의 비율은 매립연한이 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있었다.

4. 모형매립조 침출수의 BOD/COD는 운전 40일 경과 후, 매립연한에 상관없이 모두 매립지의 안정화 조건인 0.1 이하의 값을 나타내었다. 그러나, 운전 160일 경과 이후에도 가스는 계속 발생하였고, 침출수의 COD 또한 높은 값을 나타내어 쓰레기에서 유래한 선별토사 내 유기물은 아직 안정화되지 않은 것으로 판단된다.

5. 선별토사의 미생물 활성도, soil respiration test, BMP test 및 모형매립조 실험을 한 결과, 쓰레기에서 유래한 선별토사의 유기물은 아직 안정화 상태에 도달하지 않은 것으로 보이며, 선별토사의 재활용을 위해서는 적절한 복원공법이 선행되어야 할 것으로 생각된다. 만일 미생물을 이용한 복원 공법을 적용한다면, 대상 선별토사의 pH는 6.8~7.2로 중성을 나타내어, 추가로 토양의 pH를 조정할 필요가 없다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 (주)선진엔지니어링과 2001년도 두뇌한국 21 사업에 의해 지원되었습니다. 이 연구의 수행을 지원해 준 서울대학교 공학연구소에도 감사드립니다.

참고문헌

- 강석태(1996) **매립지 안정화에 대한 침출수 재순환율의 영향**, 석사학위논문, 한국과학기술원.
- 남궁완, 최정영, 황의영(1995) 폐기물 매립지 굴착토양의 재활용을 위한 타당성조사 연구, **한국폐기물학회지**, Vol. 12, No. 5, 638-644.
- 윤석표, 윤범한(1997) 비위생매립지의 굴착, 선별, 재활용에 관한 사례 연구, **한국폐기물학회지**, Vol. 14, No. 6, 541-547.
- 이남훈, 윤석표, 김철중(1995) 폐기물 매립지 재사용을 위한 매립폐기물의 물리화학적 특성에 관한 기초연구, **한국폐기물학회지**, Vol. 12, No. 5, 525-533.
- 이동우(1998) **폐쇄매립지에서 오염물질의 분해 및 침출**, 박사학위논문, 서울대학교.
- 이상덕(1997) **기본 토질 시험**, 새론.
- 정하익(2000) 비위생매립지 및 불법매립지의 정비방안, **매립기술연구회 제2회 전문가 초청 세미나**, 21세기 지속 가능한 매립기술, 55-69.
- 한국과학기술연구원(1999) **불량매립지 복원기술**, 과학기술부.
- 환경부(2001) **사용종료매립지 정비지침**, 환경부.
- Alef, K. and Nannipieri, P. (1998) *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*, Academic Press, San Diego, C.A..
- Kruempelbeck, I. and Ehrig, H.J. (1999) Long term behavior of municipal solid waste landfills in Germany, *Proceedings Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium*, Volume I, 27-36.
- National Soil Survey Center (NSSC) (1996) *Soil Survey Laboratory Manual*, Department of Agriculture, U. S..
- Owens, J.M. and Chynoweth, B.P. (1993) *Biochemical*

methane potential of solid waste components, *Water Science and Technology*, 27(2), 1-14.
Rooker, A. (2000) *A critical evaluation of factors required to terminate the post-closure monitoring period at solid waste landfills*, M.S. Thesis, North Carolina

State University.
Stevenson, F.J. (1994) *Humus Chemistry*, John Wiley & Sons, New York, NY.

(접수일:2002.2.25/심사일:2002.3.30/심사완료일:2002.3.30)