

일반 폐기물 매립지에서 폐기물의 생분해도 변화

이 형집[†], J.F.K. Earle^{**}, 안 규홍^{*}

* KIST, 환경 연구 센터

** Dept. of Agricultural & Biological Eng., University of Florida

1. 서론

지구상의 연간 일반 폐기물 발생량은 10억 3천만톤으로 추정되고 총 발생량의 92-93%가 매립에 의해 처분되며, 이중 적어도 62-63%가 불량 매립에 의존하고 있다고 고려된다(3). 미국 환경청의 보고에 따르면 1993년에 미국에서 2억 7백만톤의 일반 폐기물이 발생되었으며 총 발생량의 62%가 매립에 의해 처분되었다(5). 이 보고서에 따르면 재활용 등의 폐기물 발생량 감소 대책에도 불구하고 다가오는 2000년에 총 발생량은 2억 1천 8백만톤으로 증가할 것이고, 주된 폐기물 처분 방안은 매립일 것이라고 예상하고 있다. 환경부의 자료에 의하면 1994년에 우리나라에서 발생한 일반 폐기물 총량은 5천 2백만톤이며, 생활 폐기물의 84%, 사업장 일반 폐기물의 50%가 매립에 의해 처리 되었다(8). 2001년을 목표년도로 한 국가 폐기물처리 종합계획에서는 생활쓰레기의 45%, 사업장폐기물의 20%를 매립에 의해 처리하도록 개선하는 것을 목표로 설정하여 개선대책을 추진하고 있다(9). 앞으로도 비교적 값이 싸고 가장 보편적인 일반 폐기물 처리 공정으로 알려져 있는 매립이 세계에서 또는 우리나라에서 주된 폐기물 처리 방안으로 예상된다.

매립지 운영의 효율성을 최적화 하거나 매립지 재이용을 위해서는 매립지의 안정화 정도를 측정, 예측하는 것이 요구되어 진다. 매립지가 안정화 상태에 도달하면 침출수와 가스의 성상에 있어서 중성의 pH, 저농도의 휘발성 유기산, 고농도의 메탄 함유율, 총 발생 가스량의 감소를 보인다(4). 그러나 매립지 안정화 정도를 측정함에 있어서 침출수와 가스의 성상만을 살펴볼 뿐만 아니라 매립된 폐기물의 생분해도 변화를 살펴 봄으로써 더욱 안정화 정도의 측정 및 예측이 가능해질 수 있다. 메탄 가스 발생 잠재력과 휘발성 고형 성분 농도는 폐기물이 매립된 연도가 증가할수록 감소하고 휘발성 고형 성분이 증가할수록 메탄 가스 발생 잠재력은 증가한다고 보고되었다(2). 따라서 매립된 폐기물의 생분해도 지표로서 함유된 유기물의 지표인 휘발성 고형 성분(Volatile Solids)과 매립된 폐기물의 생화학적 메탄 가스 발생 잠재력(Biochemical Methane Potential)을 사용할 수 있다.

본 연구에서는 미국 Florida주 Alachua County의 남동부에 위치한 일반 폐기물 매립지에서 채취한 시료들을 분석하여 생분해도의 지표로서의 휘발성 고형 성분(VS)과 생화학적 메탄 가스 발생 잠재력(BMP)의 변화를 살펴봄으로써 안정화의 정도를 측정, 예측하고자 하였다.

2. 연구 수행 방법

Florida주의 북중부에 위치한 Alachua County Southwest Landfill(ACSWL)은 이미 매립이 끝난 두 개의 단위 구역(면적이 0.12 km²인 구역과 0.05 km²인 구역)과 현재 매립이 진행중인 면적이 0.11 km²인 단위 구역으로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용된 시료들은 매립이 진행중인 단위

구역에서 약 4년동안 7차례에 걸쳐 채취되었다. 직경이 10.2 cm인 시추봉을 회전시켜 지정된 깊이 까지 뚫은 다음, 회전없이 시추봉을 뽑아내어 채취하고자 하는 깊이 구간에 해당하는 시추봉의 회전 날에 묻어 나온 폐기물을 회수, 합성하여 시료로 채취하였다. 시료들은 일반적으로 약 3m 깊이의 간격으로 채취되었으며 시추공들의 최대 깊이는 약 9m에서 14m에 달하였다. 채취되어진 시료들은 폴리에틸렌 봉지에 담아 실험실로 옮겨져 분석하기 전까지 냉동실에 보관되었다.

본 연구를 위해서 채취된 폐기물 시료의 성상 분석, 수분 함량 측정, 고형물 성분 분석(Solids Analysis), 생화학적 메탄 발생 잠재력 측정(Biochemical Methane Potential Assay)을 행하였다. 시료의 성상 분석, 고형물 성분 분석, 생화학적 메탄 발생 잠재력(BMP)측정은 건조된 시료를 사용하였다. 시료의 성상 분석은 체 간격 6mm 스크린과 체 간격 0.42mm ASTM No.40 스크린을 사용하여 행해졌다. 6mm 스크린에 남은 비교적 입자가 큰 물질들은 종이류, 골판지류, 플라스틱류, 나무류, 유리류, 금속류, 섬유류, 그리고 분류가 힘들지만 생분해가 가능한 소립자 유기물류로 구분되었다. 6mm 스크린을 통과하고 ASTM No.40 스크린에 남은 입자가 작은 물질들은 세분해서 분류하기가 용이하지 않아 생분해가 가능한 미세입자 유기물류와 생분해가 가능하지 않은 미세입자 무기물류로 구분되었다. ASTM No.40 스크린을 통과한 물질들은 분말상의 물질들과 복토가 혼합되어 분류가 불가능하였다. 위와 같이 분류되어진 시료 중 세 부분이 시료의 생분해도를 살펴보기 위해 VS와 BMP 측정에 사용되었다. 첫 번째 부분은 6mm 스크린에 남은 종이류, 골판지류, 소립자 유기물류를 연마기로 갈아 제조된 것으로서 6mm 스크린에 남은 유기물 부분이라고 구분하였다. 두 번째 부분은 ASTM No.40 스크린에 남은 미세입자 유기물류를 연마기로 갈아 제조된 것으로서 ASTM No.40 스크린에 남은 유기물 부분이라고 구분하였다. 마지막 부분은 ASTM No.40 스크린을 통과한 분말상의 물질들과 복토의 혼합물로서 ASTM No.40 스크린을 통과한 부분이라고 구분하였다.

고형물 성분 분석은 Standard method(APHA, 1992)에 따라 행해졌고 생화학적 메탄 발생 잠재력(BMP)측정은 Owen 등에 의해 제안된 방법(7)에 따라 일정량의 시료를 일정한 배양액과 미생물 식종액을 포함한 250ml 용기에 담아 혐기성 상태에서 배양하여 배양기간 중에 발생한 기체량과 기체 성분 분석을 하여 행하였다.

매립지가 안정화 상태에 도달하였는가의 여부에 대한 수치상의 판단 기준이 없으므로, 본 연구에서는 일반 폐기물중의 유기물 성분이 거의 생분해되어 안정화 되었다고 고려되는 시료들을 분석하여 안정화의 지표로써 사용하였다. 이를 위해 사용된 시료들은 1) Florida주 Sumter County에 위치한 호기성 퇴비화 공장에서 수집된 최종 퇴비화 산물, 2) Florida주 Collier County에 위치한 매립이 완료된지 약 10 여년이 지난 매립지에서 채취된 시료, 3) 본 연구가 행해진 매립지에서 매립이 완료된지 약 10여년이 지난 단위 구역에서 채취된 시료들이다.

안정화 상태 여부를 측정함에 있어서 직접적으로 VS의 농도와 BMP를 사용함은 바람직 하지 못하다. 이는 안정화가 진행되는 어느 시점에서 채취된 시료의 VS의 농도와 BMP는 그 시점에서 잔류해 있는 유기물량을 토대로 계산된 절대적인 수치이기 때문이다. 그러므로 안정화 정도를 측정하기 위해서는 매립 시점에서 존재해 있던 유기물량을 토대로 하는 상대적 휘발성 고형 성분 농도(Relative Volatile Solids)와 상대적 생화학적 메탄 가스 발생 잠재력 (Relative BMP)를 사용하는 것이 타당하다. 매립된지 약 3개월 지난 시료를 채취하여 전기한 바와 같은 처리 및 분석 방법을 통해 VS와 BMP를 측정하고 그 값들을 기준으로 하여 RVS 농도와 RBMP를 계산하였다. 초기의 VS 성분은 생분해가 가능한 부분과 생분해가 가능하지 않은 부분으로 구성되어 있다. 생분해가 가능한 부분의 감소는 Pfeffer(7)가 제안한 대로 first-order kinetics를 따르며, 생분해가 가능한 부분이 분해되어 잔류 고형 성분(Fixed Solids)으로 되는 양이 무시할 정도로 작다는 가정하에서 건조 중량을 기준으로 한 RVS의 농도와 RBMP의 계산 방법과 RVS의 농도와 RBMP의 변화를 나타내는 식들은 다음과 같다.

$$RVS_t = (VS_t \times RFS_0) / (100 - VS_t) \text{ ----- (a)}$$

VS_t = 안정화가 진행된 어느 시점 t에서의 휘발성 고형 성분 농도
 (% , 시점 t에서의 총 건조 중량 기준)
 RVS_t = 안정화가 진행된 시점 t에서의 상대적 휘발성 고형 성분
 농도 (% , 초기 총 건조 중량 기준)
 RFS_0 = 초기 시점에서의 상대적 잔류성 고형 성분 농도
 (% , 초기 총 건조 중량 기준)

$$RBMP_t = (RVS_t / RVS_0) \times BMP_t \text{ ----- (b)}$$

BMP_t = 안정화가 진행된 어느 시점 t에서의 생화학적 메탄 발생
 잠재력 ($m^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$)
 $RBMP_t$ = 안정화가 진행된 어느 시점 t에서의 상대적 생화학적
 메탄 발생 잠재력 ($m^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$)
 RVS_0 = 초기 시점에서의 상대적 휘발성 고형 성분 농도
 (% , 초기 총 건조 중량 기준)

$$RVS_t = RBVS_t \times e^{kt} + RNBVS_0 \text{ ----- (c)}$$

$RBVS_t$ = 안정화가 진행된 시점 t에서의 상대적 생분해 가능
 휘발성 고형 성분 농도 (% , 초기 총 건조 중량 기준)
 $RNBVS_0$ = 초기 시점에서의 상대적 생분해 불가능 휘발성 고형
 성분 농도 (% , 초기 총 건조 중량 기준)
 k = 생분해율 상수

$$RBMP_t = RBMP_0 \times e^{kt} \text{ ----- (d)}$$

$RBMP_0$ = 초기 시점에서의 상대적 생화학적 메탄 발생
 잠재력 ($m^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$)

3. 실험 결과

실험에서 얻은 자료들을 분석함에 있어서 매립지 표면에서 약 6m 아래인 해발고도 32.6m 를 기준으로 매립지 상층과 하층으로 구분하여, 채취된 폐기물 시료의 성상 분석, 수분 함량 측정, 고형물 성분 분석, 생화학적 메탄 발생 잠재력 측정에서 얻은 결과들을 사용하였다. 생분해도의 변화를 살펴봄에 있어서 시료를 처음 채취한 시점을 기준으로 하여 RVS 농도와 RBMP의 변화를 살펴보았다. 또한 생분해가 가능한 유기물을 포함한 세 부분(6mm 스크린에 남은 유기물 부분, ASTM No.40 스크린에 남은 유기물 부분, ASTM No.40 스크린을 통과한 부분)의 결과들을 이용하여 총체적 시료의 상대적 VS의 농도와 상대적 BMP를 계산하였다.

표 1에 보인 채취된 시료의 성상을 살펴보면 매립된 시기가 약 1-1.5년이 빠른 매립지 하층의 시료들이 유기물 성분 함유율이 작았고 비교적 작은 입자의 유기물 성분이 많았다. 반면에 분해가 잘 되지 않는 성분들의 함유율은 상층과 하층에서 유사한 값을 보였다.

표 1. 채취된 시료의 성상별 조성

(단위: 건조 중량 %)

	상층 시료 (해발고도 32.6 m 이상) 평균 ± 표준편차	하층 시료 (해발고도 32.6 m 이하) 평균 ± 표준편차
종이류	10.1 ± 4.4	2.3 ± 1.9
골판지류	7.2 ± 3.0	4.5 ± 3.2
소립자 유기물류	3.9 ± 41.5	7.6 ± 6.8
미세입자 유기물류	12.3 ± 6.6	14.7 ± 2.8
플라스틱류	5.3 ± 2.0	3.3 ± 1.8
나무류	2.4 ± 1.5	1.5 ± 0.5
유리류	4.3 ± 1.8	6.5 ± 2.9
금속류	4.9 ± 3.6	4.8 ± 3.2
섬유류	5.4 ± 4.4	6.7 ± 4.1
미세입자 무기물류	4.1 ± 1.8	6.6 ± 2.6
ASTM No.40 스크린 통과 부분	40.1 ± 11.3	41.5 ± 12.8

수분 함유도 측정에서 총 28개 시료들에 대한 수분 함유도의 평균값은 27%이었고, 상대적 표준 편차는 17.4%이었다. 매립지 상층에서 채취된 시료들에 대한 수분 함유도와 상대적 표준 편차는 각각 28.1%, 18.9%였다. 반면에 매립지 하층의 시료들은 수분 함유도가 평균 25.3%, 상대적 표준 편차 11.1%임을 보였다.

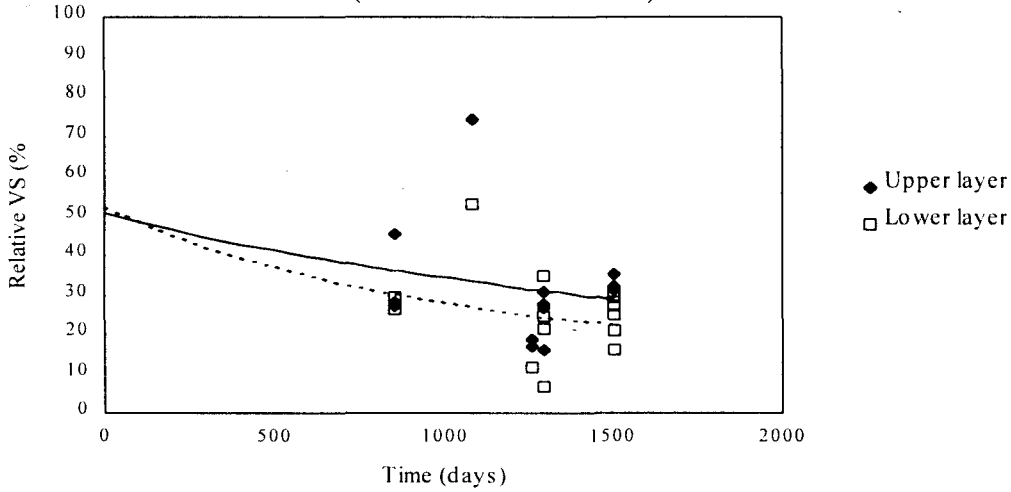
RVS 농도와 RBMP를 계산하기 위해 초기값으로 필요한 자료인 매립된 지 얼마 지나지 않은 시료에 있어서, 6mm 스크린에 남은 유기물 부분은 RVS 농도가 40.7%였고 상대적 잔류 고형 성분(RFS)의 농도는 5.4%였다. ASTM No.40 스크린에 남은 유기물 부분의 RVS 농도와 RFS 농도가 각각 9.8%와 5.4%였으며, ASTM No.40 스크린을 통과한 부분의 경우 RVS 농도와 RFS의 농도는 각각 2.5%와 29.8%였다. 따라서, 총체적 시료의 RVS 농도와 RBMP는 세 부분의 합으로써 각각 53%와 47%였다.

위의 초기값과 채취된 시료들의 RVS 농도와 RBMP 값을 이용하여, 비선형 회귀분석을 통해 매립 초기 시점의 상대적 생분해 가능 휘발성 고형 성분(Relative Biodegradable Volatile Solids) 농도, 상대적 생분해 불가능 휘발성 고형 성분(Relative Nonbiodegradable Volatile Solids) 농도, 생분해율 상수를 산정하였다. 상층 시료에 대해 매립 초기 시점의 상대적 생분해 가능 휘발성 고형 성분(RBVS) 농도는 35.7%, 상대적 생분해 불가능 휘발성 고형 성분(RNBVS) 농도는 15%, 생분해율 상수는 0.0006 d⁻¹이었다. 하층 시료의 경우는 각각 38.3%, 14%, 0.0010 d⁻¹이었다. 비선형 회귀 분석을 통해 산정된 RBMP의 경우 상층 시료는 0.272 m³ CH₄/kg VS, 하층 시료는 0.274 m³ CH₄/kg VS이었다. RVS 농도와 RBMP의 시간에 따른 변화는 그림 1과 그림 2에 보여진다.

매립지가 안정화 상태에 도달하였는가의 여부에 대한 수치상의 평가 기준을 위해 조사된 일반 폐기물중의 유기물 성분이 생분해되어 거의 없다고 고려되는 세 가지 시료들의 분석에서, BMP 값은 0.02-0.06 m³ CH₄/kg VS, 생분해율 상수는 0.12-1.26 d⁻¹의 범위에 있는 것으로 나타났다. BMP 0.02-0.06 m³ CH₄/kg VS를 RBMP로 나타내면 0.006-0.02 m³ CH₄/kg VS이었고 이는 산정

된 ACSWL의 초기 RBMP의 약 93-98%의 감소에 해당된다. 따라서, 매립된 일반 폐기물의 RBMP가 이 범위에 들게되면 안정화 상태에 이르렀다고 간주된다.

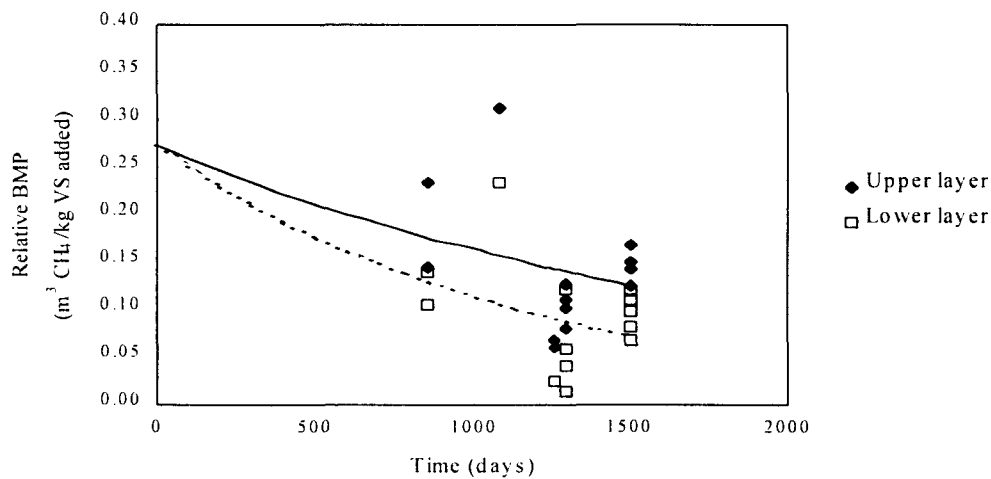
그림 1. Variations in RVS of Total Sample (Sum of 3 Fractions)



4. 결론

폐기물 시료의 성상 분석의 결과에서 매립 후 입자가 큰 유기물은 분해되어 소립자나 미세입자의 유기물로 변해가며, 유기물량은 감소함을 보였다. 수분 함량 측정 결과에서 상층의 수분 함유도가 하층보다 조금 높은 것은 상층은 강우의 영향을 받기 쉽지만 강우의 침투가 하층까지는 쉽지 않기 때문이라고 간주된다. 안정화된 매립지에서 폐기물의 RBMP가 0.006-0.02 m³ CH₄/kg VS의 범위에 든다고 산정하고 채취된 시료들의 RBMP의 시간에 따른 변화를 살펴보면, 상층의 경우 16.9-25.5 년, 하층의 경우 10.7-15.8년의 기간이 안정화 상태에 도달하리라고 예상된다.

그림 2. Variations in Relative BMP of Total Sample



References

- 1) APHA, 1992, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 18th Ed., American Public Health and Association
- 2) Attal, A., J. Akunna, P. Camacho, P. Salmon and I. Paris, 1992, "Anaerobic Degradation of Municipal Waste in Landfill", Wat. Sci. Tech., v.25, no.7, p.243
- 3) Christensen, T.H., R. Cossu, and R. Stegmann, 1989, Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, p.5, Academic Press, San Diego, CA
- 4) Findikakis, A.N. and J.O. Lecky, 1979, "Numerical Simulation of Gas Flow in Sanitary Landfills", ASCE, v.105, no. EE5, p.927
- 5) Franklin Associates, 1994, "Characterization of Municipal Solid Waste in the United States:1994 Update", EPA/530-s-94-042, Washington, D.C.
- 6) Owen, W.F., D.C. Stuckey, J.B. Healy, L.Y. Young and P.L. McCarty, 1979, "Bioassay for Monitoring Biochemical Methane Potential and Anaerobic Toxicity", Water Research, v.13, p.485
- 7) Pfeffer, J.T., 1974, "Temperature Effects on Anaerobic Fermentation of Domestic Refuse", Biotech. & Bioeng., v.16, p.771
- 8) 환경부, 1995, 전국 폐기물 발생 및 처리 현황
- 9) 환경부, 1996, 환경 백서