

## 매립장 사후관리종료를 위한 유기물 함량비 산정방법

천 승 규\*

서울과학기술대학교 에너지환경대학원

### An Estimation Method of Organic Matter Content Ratio for the Termination of Post-closure Maintenance of a Landfill

Seung-Kyu Chun\*

Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Science & Technology

#### ABSTRACT

This paper examines an assessment method for terminating the post-closure maintenance of a landfill using a simplified landfill gas model. The case study site is the Sudokwon Landfill in Incheon city, which was closed in 2000. The deviations of the results obtained by the regular model and the simplified model were both slightly over 10% from the measured data. Also, the deviation of the simplified model from the regular model has been less than 5% since 2005. Thus, the simplified model could be applied to other landfills that have been closed for at least 5 years. Additionally, the results of the mass balance analysis using the simplified landfill gas model indicated that 39% of the organic carbon was discharged, leading to organic carbon and organic matter content of 7.2 and 17.6%, respectively, in the landfill by the end of 2018.

**Key words :** Landfill, Post-closure, Organic matter, Organic carbon, Landfill gas model

#### 1. 서 론

사용종료 또는 폐쇄된 매립지는 폐기물관리법에 따라 30년간 환경에 위해가 없도록 사후관리(Laner et al., 2012)를 하여야 한다. 사후관리를 위한 침출수(Park et al., 2007) 및 매립가스 관리에는 많은 비용이 소요되고 토지이용 또한 공원, 체육시설 등으로 한정되기 때문에 매립장의 조기안정화를 통한 사후관리 종료는 경제적인 매립장 관리와 국토의 효율적 활용을 위해 필요하다. 사후관리를 종료하기 위해서는 검사기관으로부터 받은 환경영향조사서를 첨부하여 승인기관에 신청을 해야 하는데, 이를 위해서는 충분한 수의 현장 굴착 시료분석을 통해 가스 발생, 유기물 함량비 등을 조사해야한다. 그러나 안정화 진척도와 향후 전망 그리고 사후관리종료 여부가 불확실한 상태에서 이러한 본 연구나 조사를 진행하는 것은 재정 및 행정적으로 부담스럽기 때문에 사전평가를 한 후 매립장 운영관리방식의 변경을 통한 안정화의 촉진 또

는 사후관리종료를 위한 연구나 조사여부를 판단하는 것이 합리적이다.

매립폐기물의 분해와 안정화와 관련한 선행연구들은 침출원수 분석방법(Sizirici et al., 2010)을 이용한 경우도 있으나, 대부분 현장 굴착시료 분석을 통한 유기탄소함량이나 매립가스 발생속도나 잠재력 등에 대한 연구(Wu et al., 2011, Kim et al., 2010, Ritzkowski et al., 2006)를 중심으로 이루어져 왔다. 매립장 굴착시료분석을 대신 할 수 있는 사전평가방법으로는 매립가스과 침출수, 매립장의 침하 상태와 같은 매립장 관리지표에 대한 분석 또는 매립장 내부의 분해환경과 관련한 유기탄소나 유기물의 분해율과 함량비를 평가하는 방법이 있다. 이때 매립가스와 침출수 등은 모니터링 데이터의 추이와 현 상태를 통해 손쉽게 파악이 가능하나, 매립장 내부의 유기물 함량비 등을 굴착시료에 대한 분석 없이 수행하기 위해서는 매립가스 모델 등을 활용해야한다. 그러나 이 경우 현장 관리자가 매립가스 모델을 사용하는 것은 현실적으로 어

\*Corresponding author : skchun@seoultech.ac.kr

Received : 2019. 7. 3 Reviewed : 2019. 7. 31 Accepted : 2019. 8. 16

Discussion until : 2019. 10. 31

럽기 때문에 별도로 전문기관에 의뢰해야 하고, 연도별 및 성장별 매립폐기물의 양, 매립가스 발생량 측정자료, 삼성분과 원소분석 등 이화학적 분석자료, Biochemical Methane Potential(BMP) (Mou et al., 2014) 실험에 의한 바이오 가스 최대 발생량 자료 등이 요구된다. 국내 매립장 가운데 이와 같은 자료들을 모두 생산 및 관리해온 경우는 없으며, 사후관리 중에 있는 매립장 중에는 연도별 및 성장별 매립폐기물량에 대한 기초 자료조차 부족한 경우도 많다.

따라서 사후관리종료 가능성 판단을 위한 항목들 중 유기탄소나 유기물 함량비와 같은 항목의 경우 매립장에 대한 본격적인 조사 실시 전에 매립폐기물의 개략적 성장과 매립경과기간, 매립가스 발생량 등을 종합적으로 고려하여 사전에 보다 간단한 방법으로 안정화 정도를 간이 평가할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구는 이러한 배경에서 매립가스모델을 이용하여 유기탄소 및 유기물 함량비를 매립장 현장관리자나 운영자가 보다 손쉽게 산정할 수 있는 방법론을 개발하고자 하였다. 연구 대상지는 수도권 매립지 제1매립장으로서 수도권에서 발생하는 생활 및 건설폐기물 등을 처리하기 위하여 설치된 폐기물관리법 제5조1항의 광역폐기물처리시설이다. 1992년 2월부터 개장하여 2000년 10월 매립이 종료되었고 2018년말 현재 약 18년 동안 사후관리를 하고 있다. 동 매립장에 본 연구에서 제시하는 방법론을 적용하여 안정화 정도를 분석하고 동시에 연구결과의 활용 가능성을 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 유기물 함량비 산정을 위한 물질수지식

매립장내부의 유기물 함량비란 식(1)과 같이 매립장과 외부를 구분하는 구조물에 해당하는 최종복토층과 사면의 제방을 제외하고, 그 내부의 현존 매립물 내에 존재하는 유기물의 건 중량기준 비율이다. 현존 매립물량은 일일 및 중간 복토와 폐기물을 포함한 총 매립물량에서 매립가스와 침출수를 통해 매립장 외부로 배출되고 남은 매립물량을 의미하며, 유기물량은 매립 폐기물이 생물화학적 반응에 의하여 액상 및 기상으로 전환된 후 매립가스와 침출수를 통해 매립장 외부로 배출되고 남은 양이다.

$$OM_r(\%) = \frac{OM_l - OM_d}{M_l - M_d} \times 100 \quad (1)$$

$OM_l$ 은 현 매립장 내부 유기물 함량비,  $OM_r$ 은 총 매립 유기물량,  $OM_d$ 은 총 배출 유기물량,  $M_l$ 은 총 매립물량,

$M_d$ 은 총 배출 매립물량

매립장내 유기물 함량비에 미치는 영향요소들은 다양하나 영향의 크기에 관계없이 관련 요소들을 모두 포함하면 식(1)은 식(2)와 같이 보다 구체적으로 표현할 수 있다.

$$OM_r(\%) = f_{om} \times \frac{OC_l - OC_{LFG} - OC_{Lch}}{LC_l + W_l - OC_{LFG} - f_{OH} \cdot OH_{LFG} - M_{Lch}} \times 100 \quad (2)$$

$OC_l$ 은 매립된 유기탄소량,  $OC_{LFG}$ 는 매립가스로 배출된 유기탄소량,  $OC_{Lch}$ 는 침출수로 배출된 유기탄소량,  $LC$ 는 매립장 복토량,  $W$ 는 매립된 폐기물량,  $f_{OH}$ 는 매립가스내의 산소, 수소 중 폐기물로부터 제공된 비율,  $OH_{LFG}$ 는 매립가스내 산소와 수소의 양,  $M_{Lch}$ 는 침출수로 배출된 폐기물과 복토성분 등의 총 매립물량,  $f_{om}$ 은 유기물/유기탄소 비율이다.

식(2)의 매립 유기탄소량  $OC_l$ 은 폐기물내 유기탄소량으로서 바이오매스 계열 폐기물인 음식물, 종이, 목재, 섬유, 슬러지 등의 원소분석에 의한 탄소량이다.  $OC_{LFG}$ 는 매립가스의 메탄과 이산화탄소를 구성하는 기체상의 탄소량이고,  $OC_{Lch}$ 은 침출수로 배출된 유기탄소 총량이다. 식(2)의 분모에 해당하는 현존 매립물량은 총 매립물량인 일일 및 중간복토량  $LC$ 과 총 매립폐기물량  $W$ 의 합산량에서 매립가스와 침출수에 의하여 배출된 매립물량을 제외하여야 한다. 매립가스 배출물에는 메탄과 이산화탄소내의 탄소 외에 이들을 구성하는 수소와 산소 중에서 폐기물로부터 제공된  $f_{OH} \cdot OH_{LFG}$ 도 포함된다.  $M_{Lch}$ 는 침출수로 배출된 용존성 및 입자성 물질의 총량이다. 식(2)는 유기탄소 함량비를 기준으로 한 것으로서 이를 유기물 함량비로 전환하려면 매립장 현장에 적용가능한 적절한 방법론에 의하여 유기탄소와 유기물의 비율인  $f_{om}$ 를 구해야 한다.

### 2.2. 매립가스로의 유기탄소 배출량

식(2)에서 매립가스를 통해 배출된 유기탄소량  $OC_{LFG}$ 는 측정자료가 있다면 가장 바람직하다. 이때의 측정자료는 가스 포집정(Zheng et al., 2018)에 의한 포집량과 표면 발산량(Trapani et al., 2013) 등을 모두 포함해야한다. 표면발산량은 매립장의 복토방법, 매립 후 경과시기, 매립가스 포집정에 가해지는 부압(negative pressure)의 크기 등 여러 요인에 의해 영향을 받기 때문에 같은 매립장이라도 시기별로 변동 폭이 클 뿐만 아니라 측정방법(EPA, 1986)과 측정지점 수에 따른 정확성 문제 등 현실적인 어려움이 크다. 이로 인해 거의 모든 국내 매립장에서 표면발산량은 측정되지 못하고 있는 실정이다.

이와 같이 매립가스 총 발생량의 실측이 어려운 경우 일반적으로 식(3)의 일차분해 함수를 사용하는 매립가스 모델(Meraz et al., 2004)을 이용하여 배출량을 추정해야 하고, 이를 위해서는 연도별 및 폐기물 성상별 매립량( $W$ ), 단위 폐기물 성상별 매립가스 최대 발생 가능량( $L$ ), 폐기물 성상별 반응속도 상수( $k$ )가 필요하다(Amini et al., 2012; Faour et al., 2007).

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_{ij} W_{ij} (1 - e^{-k_j t}) \quad (3)$$

$Q_{LFG}$ 는 매립가스(메탄과 이산화탄소) 발생량( $\text{Nm}^3$ ),  $L$ 은 폐기물 성상별 메탄과 이산화탄소 발생 잠재력( $\text{Nm}^3/\text{Mg}$ ),  $W$ 는 연간 성상별 매립폐기물량( $\text{Mg}/\text{y}$ ),  $k$ 는 폐기물 성상별 분해속도 상수( $\text{y}^{-1}$ ),  $t$ 는 매립 경과년( $\text{y}$ ),  $j$ 는 폐기물 성상의 가짓수,  $n$ 는 매립된 연도

국내 매립장에서 식(3)을 그대로 적용할 수 있는 정도의 자료 활용이 가능한 경우는 없다. 따라서 자료부족 문제와 현장 관리자의 편의성을 고려한 보다 간소화된 모델링 방법이 필요하다. 우선, 매립가스 발생양태에 영향을 미치는 것은  $k$ 로서 각각의 폐기물 성상별로 적정  $k$ 를 찾아내 적용하거나(IPCC, 2007) 보다 간단히 이분해성과 중분해성 물질로 나누어 적용하는 방식이 있다. 이 가운데 수도권매립지의 경우 기존 연구에 따르면 후자의 방식에 의한 모델이 보다 현장에 적합하다(SLC, 2018). 따라서 음식물이나 슬러지와 같은 이분해성 폐기물과 중분해성 폐기물에 각각 동일한  $k$ 를 적용하고 연도별  $L$ (Li et al., 2018)과  $W$ 를 곱한 값을  $d$ 라고 하면 식(3)은 식(4)와 같이 바꿀 수 있다.

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \left\{ d_{ei} (1 - e^{-k_e t}) + d_{mi} (1 - e^{-k_m t}) \right\} \quad (4)$$

$d_e$ 와  $d_m$  및  $k_e$ 와  $k_m$ 는 각각 매립된 이분해성 및 중분해성 폐기물의 연간 매립가스 발생 잠재력 총량 ( $L \times W$ ) ( $\text{Nm}^3/\text{y}$ ) 및 분해속도 상수 ( $\text{y}^{-1}$ )

모델 사용의 목적이 과거의 연도별 매립가스 발생양태를 파악하기 위한 것이 아니고 매립종료 후 충분히 시간이 경과한 상태에서 과거의 배출총량을 알기 위한 것이라면 연도별로 이분해성과 중분해성 폐기물이 각각 특정연도에 한꺼번에 매립된 것으로 전제하더라도 현재 이후의 매립가스 발생양태와 큰 차이가 없을 것이다. 그리고 이는 이분해성 물질의 비율이 클 수록 그리고 매립종료 이후의 경과기간이 긴 매립장일수록 그러하다. 이러한 조건

의 매립장에 있어서 매립기간 중 연도별로 매립된  $d$ 의 총량이 특정연도에 한꺼번에 매립되었다고 가정할 경우 식(4)는 식(5)와 같이 된다.

$$Q_{LFG} = D_e (1 - e^{-k_e Y_e}) + D_m (1 - e^{-k_m Y_m}) \quad (5)$$

$D_e$ 와  $D_m$ 는 각각 매립기간 동안 매립된 전체 이분해성 및 중분해성 폐기물의 매립가스 발생 잠재력 총량 ( $\text{Nm}^3$ ),  $Y_e$ 와  $Y_m$ 은 이분해성 및 중분해성 폐기물이 일괄 매립된 것으로 가정된 특정 연도로부터 경과된 연수

$Y$ 를 어떻게 정하는 기는 복수 년에 걸친 매립량의 무게 중심을 찾는 것과 유사한 개념이다. 본 연구에서는 식(6)처럼 각 폐기물 성상별 최초 매립개시 년부터 순차적으로  $d$ 를 더해 갈 때  $D$ 의 1/2을 넘는 특정 해( $x$ )에 도달한 경우, 특정 해 전년까지의  $d$  합산량과 특정 해  $d$ 의 절반을 더한 값( $1/2d_x$ )이  $D$ 의 1/2 이내라면 해당년도를 중심년도로 하고, 초과 시에는 특정 해 전년( $x-1$ )을 중심년도로 하였다. 이는 IPCC의 매립폐기물 분해에 관한 지체시간 디폴트 값이 6개월인 점을 감안한 것이다.

$$\frac{1}{2}D \geq \sum_{i=1}^{x-1} d_i + \frac{1}{2}d_x \quad (6)$$

$x$ 는  $D$ 의 1/2을 넘기는 해

사후관리종료를 위한 사전평가는 보통 매립종료 후 20년 이상 경과된 매립장을 대상으로 할 것이다. 따라서 음식물과 같은 반감기가 1년인 이분해성 폐기물내 탄소는 거의 대부분 매립가스로 배출되었다고 볼 수 있다. 이 경우 식(5)는 보다 간편한 식(7)로 바꿀 수 있고, 최종적으로 이렇게 구한 매립가스 발생량을 매립가스 내 탄소의 양으로 바꾸면 식(8)과 같다.

$$Q_{LFG} = D_e + D_m (1 - e^{-k_m Y_m}) \quad (7)$$

$$OC_{LFG} = \left\{ D_e + D_m (1 - e^{-k_m Y_m}) \right\} \times \frac{12 \times 10^{-3}}{22.4} \times \frac{273}{273 + T_{LFG}} \quad (8)$$

$T_{LFG}$ 는 매립가스의 평균 온도( $^{\circ}\text{C}$ )

### 2.3. 현장적용 및 평가

#### 2.3.1. 유기탄소 포함 총 매립물량 산정

분석에 필요한 폐기물의 성상별 습량기준 매립량과 함수율은 수도권매립지의 통계자료(SLC, 2018; SLC, 2017)를 사용하였고, 폐기물 성상별 원소분석자료는 과거 매립 당시 폐기물에 대한 분석자료가 없어 수도권매립지 내부

분석자료(SLC, 2000-2017)의 평균값을 적용하였다. 폐기물 외에 최종복토부분을 제외한 각 층 및 블럭별 일일 및 중간복토 사용량은 총  $10.5 \times 10^6 \text{ m}^3 (18.9 \times 10^6 \text{ Mg})$ 이다.

2.3.2. 배출 유기탄소량 등 산정

매립가스로의 유기탄소 배출량인 식(2)의  $OC_{LFG}$ 을 분석하기 위해 식(3)(C1), 식(5)(C2), 식(7)(C3)의 세 가지 방법으로 매립가스 모델을 사용하였다. 그리고 각각의 모델 적용 결과를 비교하여 최종적으로 간소화된 C3의 적용가능성을 확인한 후 이후의 분석은 C3에 의하였다. C1~C3에서 메탄과 이산화탄소 반응속도 상수인  $k$ 는 Table 1과 같이 이 분해성과 중분해성 반감기인 1년과 5년을 식(9)에 의하여 반응속도 상수인  $k$ 로 전환하였다. C1~C3의 모델적용을 위한  $L$ 은 기존 연구보고서(SLA, 1997)의 메탄

값을 적용하되, 메탄과 이산화탄소 합산 값으로 전환하기 위해 1998-2017년의 제1매립장 포집가스의  $(\text{CH}_4 + \text{CO}_2) / \text{CH}_4$  평균값인 1.51을 적용하여 산출된 Table 1의 값을 사용하였다. C1에서  $W$ 는 1992.4~2000.10의 폐기물 성장별 습량기준 매립량을 적용하였다.

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k} = \frac{0.69315}{k} \tag{9}$$

C2와 C3의 경우는 식(5)에 따라 연도별로  $W$ 와 Table 1의  $L$ 을 곱한  $d$ 를 사용하였고, 식(6)에 의하여 계산한 결과에 의하면 생활폐기물, 건설폐기물, 슬러지의 폐기물 성장 모두 1995년이 식(5)와 식(7)의  $Y$ 에 해당하였다. C3의 경우는 이분해성으로 적용한 음식물류와 슬러지의 경우  $d$  값은 2001년까지 모두 배출된 것으로 가정하고, 중분해성 폐기물에 대하여는 C2와 동일하게 모델을 적용하였다. C1~C3 결과의 정합도 비교를 위한 실측자료는 수도권매립지에서 표면 발산량 측정이 이루어진 2005~2018년을 대상으로 하였다. 실측자료와 모델값 간의 정합도는 동 기간 중 연도별 실측값과 모델값 간의 평균편차를 사용하였다. 이상 설명된 C1~C3의  $W, d, Y$  조건을 정리하면 Table 2와 같다.

침출수를 통한 유기탄소 배출은 제1매립장의 1993년부터 2018년까지의 연도별 침출수 배출량에 연도별 평균 TOC 농도를 곱하여 산출하였고, 침출수로의 총 매립물질 배출량은 상기 유량에 침출원수의 연도별 TS 농도를 곱하여 산출하였다. 기타 배출물질로서 메탄과 이산화탄소 내 수소와 산소 중 폐기물로부터의 제공량인 식(2)의  $f_{OH}$ .

**Table 1.** The input parameters for landfill gas modeling of 1st Landfill ( $L : \text{Nm}^3 \text{ CH}_4 + \text{CO}_2 / \text{wet waste Mg}$ )

Waste type	Model input parameter			
	L	Half life	k	
Household	Food	123.1	1	0.6932
	Paper	193.2	5	0.1386
	Wood	135.5	5	0.1386
	Textile	279.8	5	0.1386
	Other	163.5	5	0.1386
Demolition	Paper	131.5	5	0.1386
	Wood	24.0	5	0.1386
	Textile	96.9	5	0.1386
Sludge	26.0	1	0.6932	

**Table 2.** The modeling conditions of  $W, d,$  and  $Y$  for C1~C3

	Year	Easily degradable					Moderately degradable			
		Total	Sub-total	Food	Sludge	Sub-total	Paper	Wood	Textile	Other
C1 ( $10^3 \text{ Mg wet waste}$ )	Total	33,255	15,870	12,649	3,221	17,384	11,635	2,462	2,095	1,192
	1992	884	467	349	118	417	312	17	53	35
	1993	4,957	2,406	2,064	341	2,551	1,862	162	321	206
	1994	5,684	2,492	2,110	383	3,191	2,018	590	373	210
	1995	4,593	2,127	1,714	413	2,466	1,614	388	293	171
	1996	4,468	2,158	1,664	494	2,310	1,551	315	278	166
	1997	4,053	1,986	1,486	499	2,068	1,386	285	249	148
	1998	3,417	1,716	1,245	471	1,701	1,155	216	206	124
	1999	3,015	1,436	1,099	337	1,579	1,035	246	188	110
	2000	2,183	1,082	918	164	1,101	702	242	134	23
C2 ( $10^6 \text{ Nm}^3$ )	1995 ( $Y_e, Y_m$ )	5,003	1,641 ( $D_e$ )	1,557 ( $d_{ei}$ )	84 ( $d_{ei}$ )	3,363 ( $D_m$ )	2,248 ( $d_{mi}$ )	334 ( $d_{mi}$ )	586 ( $d_{mi}$ )	195 ( $d_{mi}$ )
C3 ( $10^6 \text{ Nm}^3$ )	1995 ( $Y_m$ )	5,003	1,641 ( $D_e$ )			3,363 ( $D_m$ )				

$OH_{LFG}$ 는 관련연구(Chun, 2018)에서 제시된  $f_{OH}$  값인 0.71을 적용하였다.

### 2.3.3. 민감도 분석 및 산정식 간소화

식(2)의 구성 요소들이 유기물 함량비에 미치는 영향은 각각 다르다. 구성요소가 유기탄소 함량비에 기여하는 정도를 파악하기 위해 전제 물질수지에서 각각의 요소들이 차지하는 비율을 분석하고 아울러 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 각 요소의 값을 단독으로 30%씩 증가시켰을 때의 유기탄소 함량비 변동율을 분석하는 방법으로 하였다. 그리고 물질수지에서의 영향도와 민감도가 작은 항목들을 확인함으로써 보다 간소화된 방식으로 매립장의 안정화도를 평가할 수 있는 식을 제시하였다.

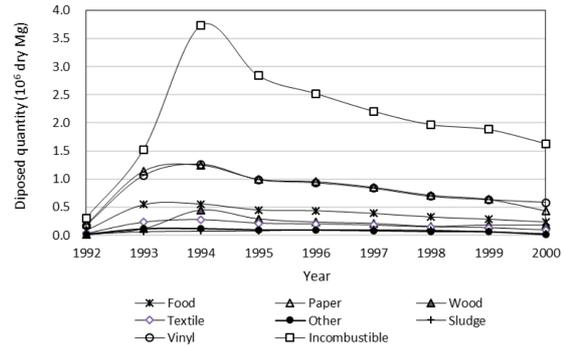
### 2.3.4. 유기물 함량비 산정

현재 우리나라에서는 매립장의 유기물 분해배출과 관련한 안정화 기준은 유기물 함량 5% 미만이다. 유기물에 대한 이화학적 정의로는 폐기물공정시험기준 상의 강열감량에서 언급되어 있으나 이 역시 회분에 대한 포함가능성에 대한 주의를 당부하고 있다. 따라서 강열감량에 회분을 포함한 값 또는 삼성분 분석시의 수분을 제외한 부분의 함량비를 해당 바이오매스 유래 유기성 폐기물의 유기물이라 할 수 있을 것이다. 유기탄소 함량비를 유기물 함량비로 전환하기 위한 식(2)의  $f_{om}$ 를 위해 본 연구에서는 매립폐기물의 탄소대 가연분량의 비율을 적용하였다. 즉, 삼성분 분석시 원소분석 결과에서 탄소비의 역수를  $f_{om}$ 으로 하였다. 이때 식(8)에서 이분해성 물질은 사실상 모두 분해배출이 끝난 것으로 간소화 하였으므로  $f_{om}$  적용은 중분해성 물질만을 대상으로 하였다.

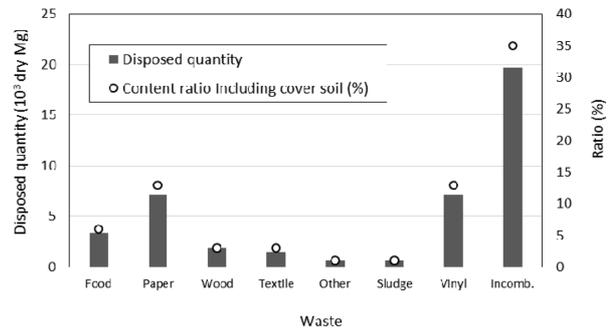
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 유기탄소 매립량

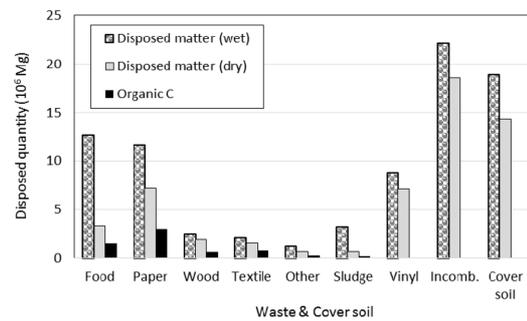
수도권매립지 제1매립장에 복토를 포함하여 매립된 건량 기준 성상별 및 연도별 폐기물의 양은 Fig. 1(a)와 같으며, 성상별 총량과 비율은 Fig. 1(b)와 같다. 총 건량기준 폐기물 매립량은  $42.1 \times 10^6$  Mg이고, 복토를 포함할 경우  $56.5 \times 10^6$  Mg이다. 분해성 폐기물은 폐기물만을 대상으로 하면 36.2%이나 복토량을 포함할 경우 분해성 폐기물은 27.0%이고 나머지는 비닐류 12.7%, 불연성 34.9%, 복토 25.4%이다. 제1매립장에 매립된 유기탄소의 매립량은  $6,369 \times 10^3$  Mg이며, 종이류 47.2%, 음식물류 22.9%, 섬유류 11.8% 순이었다. 아울러 Fig. 1(c)에서 보는 바와



(a) Annual disposed waste quantity



(b) Total disposed waste quantity and their ratios



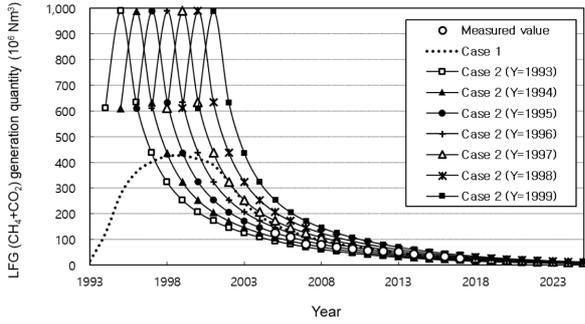
(c) Total disposed matter and organic C

Fig. 1. Estimated disposed waste quantity, organic C, and ratios of each waste type in the 1st Landfill Site of the Sudokwon Landfill.

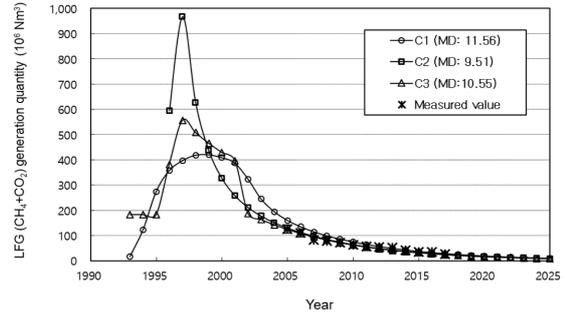
같이 습량기준 총 매립물량에 대하여 건량은 67.9%, 유기탄소는 7.7%, 생물화학적으로 분해 가능한 유기탄소(L)는 3.1% 수준이었다.

### 3.2. 배출 유기탄소량

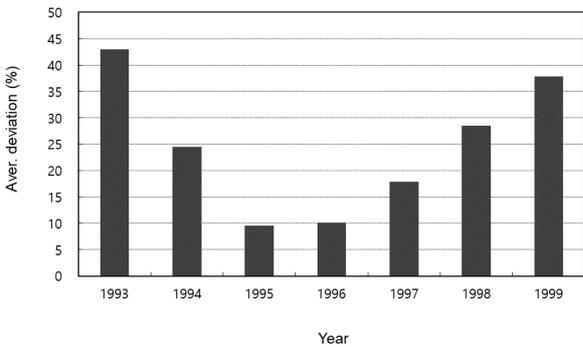
식(6)에서 일괄매립년도별 매립가스 발생량 곡선은 Fig. 2(a)와 같고 각각의 경우에 실측 매립가스 발생량과의 평균편차는 Fig. 2(b)와 같다. 제1매립장의 경우 1995년도에 일괄 매립된 것으로 할 때 평균 편차는 약 9.5%로서 가장 작았고 1996년도를 일괄 매립년도로 한 경우와 거의



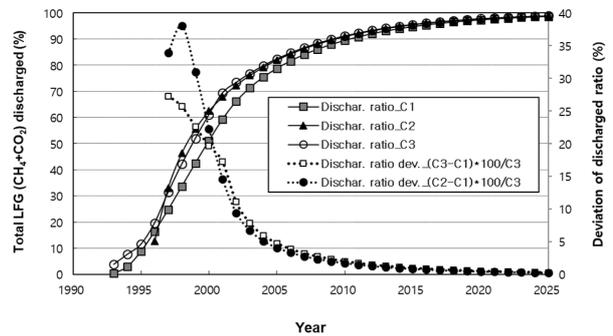
(a) Landfill gas(LFG) generation curves by changing Y



(a) Mean deviation to monitored value by C1, C2, and C3



(b) Mean deviations to monitored value by changing Y



(b) LFG discharged ratio by C1, C2, and C3

**Fig. 2.** Modeling results by eq. 5 based on the changing total disposed year (Y) by eq. 6.

**Fig. 3.** Modeled results by the modeling method of C1, C2, and C3.

같았다. 그러나 일괄매립년도가 1995년과 1996년 두 해에서 멀어질 경우, 1994년도 24.4%, 1997년도 17.9% 등 평균편차 값은 급격하게 커지고 있다.

C1~C3 방법별 매립가스 모델적용 결과는 Fig. 3과 같다. C2와 C3는 Fig. 2의 결과에 따라 일괄매립년도를 1995년도로 한 경우이다. Fig. 3(a)에서 보면 세 가지 방법에 따라 2005~2018년 사이의 실측값과의 편차는 큰 차이가 없으며, C2와 C3는 거의 같다. Fig. 3(b)과 같이 L에 기초한 이론적으로 배출 가능한 총 매립가스량은  $4,731 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ 로서 2001년까지 C1 60.0%, C2 68.6%, C3 69.5%가 배출되었고, 2018년말까지는 각각 96.6%, 97.1%, 97.1%가 배출되었다. 즉, 시간이 경과될수록 누적 총 배출 매립가스량에 있어서 세 가지 경우의 차이는 줄어들었고, C1을 기준으로 C1과 C2 및 C3 간의 누적배출율의 차이는 2002년에 각각 9.8%, 9.2%, 2005년 4.0%, 3.9% 그리고 2009년에 이르면 1.6%로 감소될 뿐만 아니라 C2와 C3 간의 C1에 대한 차이도 거의 없어진다.

매립종료 후 어느 정도 경과한 경우에 기존 모델링 방

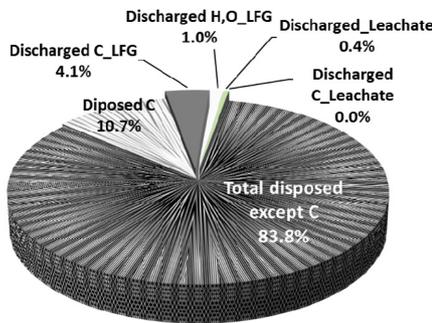
법 대신 간소화 방법에 의한 모델링을 하여도 문제가 없을지는 매립장별 폐기물 분해속도에 따라 다를 수 있다. 그러나 수도권매립지 제1매립장이 현 폐기물관리법에 의거한 전형적인 생활폐기물 위생매립장인 점을 감안하면 동 연구결과와 타 생활폐기물 매립장이 크게 다르지 않을 것이다. Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 C3와 C1 값 사이의 편차는 2000년 10월 매립종료 후 5년이 경과한 2005년도에 5%미만, 10년 경과된 2010년에 2%미만으로 감소하므로 5%를 기준으로 할 경우 매립종료 후 5년 이상이라면 매립장 사후관리나 매립가스 에너지화를 위한 매립가스 잔여 발생잠재력 평가 시에 간소화 모델을 적용하여도 무리가 없을 것으로 판단되었다.

### 3.3. 유기탄소 함량비

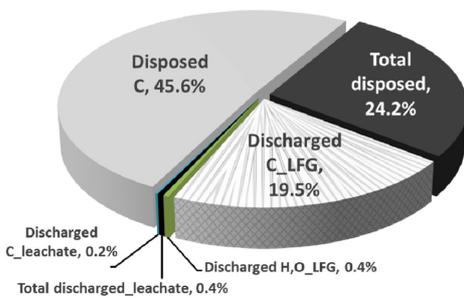
C1과 C3를 대상으로 유기탄소 함량비를 계산하면 Fig. 4와 같다. 복토와 폐기물을 포함한 총 매립물량은 건량기준  $56.5 \times 10^3 \text{ Mg}$ 이고, 이 가운데 C1은 5.8%, C3는 5.9%가 매립가스와 침출수를 통해 배출되었다. 구체적인 매립물의 배출경로는 매립가스로의 배출이 대부분인 92.6%이

	C1 (10 <sup>3</sup> Mg)	%	C3 (10 <sup>3</sup> Mg)	%
Total disposed material	56,459	100	56,459	100
Total discharged material	3,302	5.8	3,318	5.9
LFG	3,058	5.4	3,074	5.4
C	2,448	4.3	2,461	4.4
H, O	610	1.1	613	1.1
Leachate	244	0.4	244	0.4
① Total remained material	53,157	94.2	53,140	94.1
Total disposed organic O.C.	6,369	100	6,369	100
Total discharged O.C.	2,468	38.8	2,481	39.0
LFG	2,448	38.4	2,461	38.6
Leachate	20	0.3	20	0.3
② Total remained O.C.	3,900	61.2	3,887	61.0
③ O.C. ratio (%) (②×100/①)	7.32		7.31	

Fig. 4. Mass balance analysis result of each landfill material.



(a) Influential ratios of each landfill material



(b) Sensitivity analysis results of each landfill material

Fig. 5. Contribution to the organic carbon content ratio of the 1st Landfill Site by each influential factor.

었다. 매립된 유기탄소의 총량  $6,369 \times 10^3$  Mg 중에서 C1은 38.8%, C3는 39.0%가 배출되었고, 이 역시 매립가스로의 배출이 99.2%를 차지하였다. 배출량을 반영한 결과, 2018년을 기준으로 C1과 C3에 의한 유기탄소 함량비를 계산하면 약 7.3%이다.

### 3.4. 산정요소별 유기탄소비 영향도

식(2)의 구성 요소들이 유기탄소 함량비에 미치는 기여

도를 분석한 결과는 Fig. 5(a)와 같다. Fig. 5(a)에서 보는 것처럼 제1매립장내 매립물 간의 물질수지에 있어서 현 유기탄소 함량비와 관련한 각 요소들의 양적 비율은 유기탄소를 포함한 매립물 전체량과 매립가스로의 유기탄소 배출량이 대부분을 차지한다. 또한 식(2)의 구성요소를 각각 30%씩 증가 시켰을 때의 유기탄소 함량비의 증감도를 나타낸 민감도 분석결과는 Fig. 5(b)와 같다. Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 식(2)의 구성요소 중 침출수의 매립물 및 유기탄소 유출량, 매립가스를 구성하는 H와 O의 폐기물로부터의 제공량 등은 전체 유기탄소 함량비에 대한 기여율이 모두 합하여 약 1%로서 미미하기 때문에 생략하여도 무방하다. 따라서 이들을 생략할 경우 식(2)는 간소화된 식(11)로 바꿀 수 있다.

$$OM_r(\%) = f_{om} \times \frac{OC_I - OC_{LFG}}{LC_I + W_I - OC_{LFG}} \times 100 \quad (11)$$

간소화된 식(11)에 의한 물질수지 분석은 Fig. 6과 같으며, 간소화되기 이전 Fig. 4의 유기탄소 함량비와 비교하면 동 연구방법이 가지는 여러 오차요인을 감안할 때 사실상 거의 같은 값이다.

### 3.5. 유기물 함량비 추정

유기탄소 함량비를 유기물 함량비로 전환하기 위하여 Table 3의 중분해성 유기성 폐기물별 원소분석 결과에 의한 탄소함량을 적용하였다. 이는 이분해성 폐기물은 C3에서 이미 모두 분해 배출된 것을 가정하였기 때문이다. Table 3의 탄소함량은 삼성분 분석에 의한 수분을 제외한 물질량의 함량이므로 이의 100%에 대한 역수가 곧 식(2)의  $f_{om}$  즉, 매립폐기물의 탄소대 가연분량의 비율에 해당한다. 각 물질별로 탄소함량이 다르므로 건량기준 매립량

	C1 (10 <sup>3</sup> Mg)	%	C3 (10 <sup>3</sup> Mg)	%
Total disposed material	56,459	100	56,459	100
Total discharged C to LFG	2,448	4.3	2,461	4.4
① Total remained material	54,011	95.7	53,998	95.6
Total disposed organic O.C.	6,369	100	6,369	100
Total discharged C to LFG	2,448	38.4	2,461	38.6
② Total remained O.C.	3,921	61.6	3,908	61.4
③ O.C. ratio (%) (②×100/①)	7.26		7.24	

Fig. 6. Results of the simplified mass balance analysis of each landfill material.

Table 3. Organic carbon content and weighted  $f_{om}$  of each moderately degradable organic waste

		Disposed quantity (10 <sup>3</sup> Dry Mg)	C (%)	$f_{om}$	Weighted $f_{om}$
Total (Aver.)		11,244	(42.49)	(2.37)	(2.43)
Household	Paper	6,837	40.00	2.50	1.52
	Wood	437	44.90	2.23	0.09
	Textile	1,372	49.80	2.01	0.25
	Other	662	39.00	2.56	0.15
Demolition	Paper	353	38.82	2.58	0.08
	Wood	1,421	40.72	2.46	0.31
	Textile	161	44.20	2.26	0.03

에 따른 가중평균을 적용하여 구한 식(2)의  $f_{om}$ 는 2.43이었고, 동 값을 Fig. 6에서의 유기탄소 함량비 7.2%에 곱한 결과는 17.6%이다. 물론 중분해성 물질의 경우도 성상별로 분해율에 차이가 있는 등 여러 고려요인이 있을 수 있으나 안정화 사전평가를 위한 간이적인 방법으로서 모델을 사용한 것이므로 이러한 부분까지 판단하는 것은 무리이다. 향후 보다 객관적인 평가를 위해서는 현재의 유기물 기준이 아닌 해외 많은 국가(EU, 1999)에서 적용하고 있는 유기탄소 또는 감열감량, 가연분과 같은 보다 객관적으로 계량화가 가능한 기준으로서의 개선이 필요하다.

유기물 함량비 5% 미만인 현 관련고시 기준을 감안할 때 제1매립장은 이에 크게 못 미치는 수준으로 나타났다. 또한 매립가스를 통해 이미 97% 정도의 분해 가능한 유기탄소(L)가 배출되었으므로 추가적인 유기탄소와 유기물 함량비 감소폭은 매우 적을 것으로 판단되었다.

#### 4. 결 론

매립장의 안정화 정도와 사후관리종료 가능성에 대한 사전평가방법으로서 굴착시료 분석이 아닌 간소화된 매립가스 모델 사용방법에 대한 연구를 수도권매립지 제1매립

장을 대상으로 수행하였다. 동 간소화 방법은 기존 방법에 비하여 폐기물 매립량과 반응속도 상수를 다수의 성상별이 아닌 이분해성과 중분해성 두 종류로만 적용하고 매립시점도 중심년도에 통합 매립된 것으로 함에 따라 요구되는 자료를 줄이고 매립가스 모델링도 간단히 할 수 있었다. 1995년을 일괄매립년도로 하는 간소화된 모델 적용 결과 매립종료 후 5년 이상 경과시 기존 모델링 방식에 의한 결과와의 편차는 5%미만으로 나타났다. 또한 2018년 기준 매립가스 발생량 실측값과의 평균편차는 10.6%로서 일반 모델적용 결과와의 차이는 거의 없었다. 2018년까지 간소화 모델 적용결과 39.0%의 유기탄소가 매립가스 등을 통해 기 배출되었으며, 유기탄소 함량비와 유기물 함량비는 각각 7.2%와 17.6%로서 고시 기준을 크게 상회하였다. 또한 유기탄소 총량 중 분해 가능한 유기탄소의 97.1%가 이미 매립가스로 배출된 상황이므로 장시간이 경과하여도 사후관리종료를 위한 유기물 함량비 만족은 어려운 것으로 예상되었다. 연구결과 향후 현장 실무자에 의한 매립장의 현 안정화도와 사후관리종료 시기를 추정함에 있어 본 연구 방법론이 사전평가방법으로 적용가능할 것으로 판단되었다.

## 사 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Amini, H.R., Reinhart, D.R., and Mackie, K.R., 2012, Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties, *Waste Manag.*, **32**, 311.
- Chun, S.K., 2018, Landfill Site Water Budget Assessment by Analyzing Consumed Water Quantity for Landfill Gas Generation, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **35**, 327-335.
- EPA (US Environmental Protection Agency), 1986, Measurement of Gaseous Emission Rates from Land Surfaces Using an Emission Isolation Flux Chamber User's Guide, 3-11.
- EU (European Commission), 1999, COUNCIL DIRECTIVE 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.
- Faour, A.A., Reinhart, D.R., and You H., 2007, First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills, *Waste Manag.*, **27**, 948-953.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 3.17.
- Kim, K., Yang, J.K., and Chang, Y.Y., 2010, Analysis of Methane from Screened Soil of Closed Landfill and Application of Landfarming for the Reduction of the Methane, *J. Soil Groundwater Environ.*, **15**, 40-45.
- Laner, D., Crest, M., Scharff, H., Morris, J.W.F., and Barlaz, M.A., 2012, A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills, *Waste Manag.*, **32**, 498-512.
- Li, W., Khalid, H., Zhu, Z., Zhang, R., Liu, G., Chen, C., and Thorin, E., 2018, Methane production through anaerobic digestion: Participation and digestion characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin, *Applied Energy*, **226**, 1219-1228.
- Meraz, R.L., Vidales, A.M., and Domínguez, A., 2004, A fractal-like kinetics equation to calculate landfill methane production, *Fuel*, **83**, 76-78.
- Mou, Z., Scheutz, C., and Kjeldsen, P., 2014, Evaluating the biochemical methane potential (BMP) of low-organic waste at Danish landfills, *Waste Manag.*, **34**, 2254-2255.
- Park, J.K., Kim, T.D., Choi, D.H., and Lee, J.Y., 2007, Evaluation of Groundwater Quality Characteristics around Uncontrolled Closed Valley Landfill, *J. Soil Groundwater Environ.*, **12**, 75-80.
- Ritzkowski, M., Heyer, K.-U., and Stegmann, R., 2006, Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills, *Waste Manag.*, **26**, 356-372.
- Sizirici, B., Tansel, B., and Kumar, V., 2011, Knowledge based ranking algorithm for comparative assessment of post-closure care needs of closed landfills, *Waste Manag.*, **31**, 1232-1238.
- SLA (Sudokwon Landfill Site Operation and Management Association), 1997, Analysis and Investigation on the installation efficiency of LFG treatment facility, 102.
- SLC (Sudokwon Landfill Site Management Corp.), 2018, Sudokwon Landfill Statistics Yearbook, 93-95, 100-101.
- SLC, 2017, 2016 Site Monitoring and Generation Characteristic Analysis of LFG from Sudokwon Landfill, 13-16.
- SLC, 2000-2017, Analytical report of wastes carried into Sudokwon Landfill.
- Trapani, D.D., Bella, G.D., and Viviani, G., 2013, Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes, *Waste Manag.*, **33**, 2109-2114.
- Wu, H., Zhao, Y., Long, Y., Zhu, Y., Wang, H., and Lu, W., 2011, Evaluation of the biological stability of waste during landfill stabilization by thermogravimetric analysis and Fourier transform infrared spectroscopy, *Bioresour. Technol.*, **102**, 9403-9408.
- Zheng, Q.T., Kerry Rowe, R., and Feng, S.J., 2018, Design of vertical landfill gas collection wells considering non-homogeneity with depth, *Waste Manag.*, **82**, 26-36.