

수도권 매립지의 매립가스 발생량 예측과 최적 운영

신철호, 오송열*, 김래현

서울산업대학교 산업대학원 화학공학과, *서울산업대학교 에너지환경대학원 신에너지공학과

Optimal utilization and estimation of gas generation rate in SUDOKWON landfill site

Cheol-Ho Shin, Song-Yul, Oh*, Lae-Hyun, Kim*

Department of Chemical Engineering, Graduate School of Industry, Seoul National Univ. of Technology

*Department of Newenergy, Graduate School of Energy and Environment, Seoul National Univ. of Technology

1. 서론

각종 폐기물 매립지에서는 유기성 폐기물이 혐기성 분해에 의해 다량의 매립가스(LFG : landfill gas)를 발생시킨다. 이러한 LFG의 조성은 메탄(CH4)이 50~60%와 이산화탄소(CO2)가 30~40%로 대부분을 차지하며 그 밖에 미량의 H2S, NH3, CFCs, VOC등으로 이루어져 있다[2]. 이 중 메탄가스를 활용함으로써 대체에너지자원 확보 및 지구온난화에 미치는 영향을 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 기존에 국내에서 적용된 매립가스 발생량 예측 모델을 이용하여 우리 실정에 맞는 수도권 매립지의 TC값을 통한 LFG 발생량을 예측하고 안정적인 매립가스의 공급을 위한 효율적인 매립지의 운영방안을 모색하고자 한다.

2. LFG의 발생 및 조성

2.1 일반적인 LFG의 발생 및 조성

LFG는 산소가 없는 상태에서 유기성 폐기물이 박테리아에 의한 혐기 발효를 통해서 생성된다. 폐기물 매립 후 6개월이 지나야 메탄이 생성되기 시작하고 1~2년이 경과하면 가스의 생성과 유기성 폐기물의 분해가 정상 상태에 도달하여 50~60%의 메탄과 30~40%의 이산화탄소가 약 20~30년 동안 발생한다. Fig.1에 시간의 경과에 따른 LFG의 조성을 5단계로 구분하여 나타내었다[2-3].

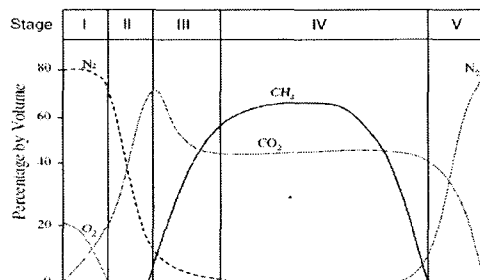


Fig. 1 Landfill gas composition during the five phases.

2.2 수도권 매립지 현황

Table 1은 도시 폐기물과 산업폐기물을 구분하여 매년 매립된 폐기물의 양을 나타내고 있으며 1992~2004년 동안 수도권 매립지에 매립된 폐기물의 총량을 보여준다. 1992~1994년까지는 매립량이 증가하다가 1995년 쓰레기 종량제 실시이후로 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있다. 1992년부터 2004년도 까지 수도권매립지에 반입된 폐기물은 총 92,229천 톤으로 연평균 7,095천 톤이 반입되고 있다. 매년 증가 추세를 보이던 폐기물 반입량은 1995년 쓰레기 종량제 실시를 계기로 1999년까지 감소추세에 있었으나 경기회복에 따른 건설폐기물의

증가로 인하여 2000년부터 증가추세로 돌아섰으며 2003년에는 전년도에 비하여 5%가 감소하였다. Table 2는 수도권 매립지에서 포집되어 사용되는 매립가스의 양과 매립가스의 성분 분포를 나타낸다. 매립가스의 활용을 위한 조건인 메탄 함량 40%를 줄곧 유지해 온 것으로 조사되었다.

Table 1 Total quantity of disposed waste

Year	Trucks**	Quantity of Waste					
		Total*	Municipal waste*	Industrial Waste			
				Subtotal*	Domestic*	Facilities*	Construction*
1992	137,425	1,462,254	1,076,378	385,876	9,718	376,158	-
1993	791,981	8,088,911	5,759,524	2,329,387	727,295	1,127,518	474,574
1994	1,005,300	11,664,891	5,776,620	5,888,271	929,578	1,078,161	3,880,532
1995	780,141	9,177,982	4,441,752	4,736,230	1,188,530	1,128,494	2,419,206
1996	717,943	8,613,533	4,315,433	4,298,100	1,194,995	1,245,822	1,857,283
1997	629,876	7,702,975	4,007,236	3,695,739	891,328	1,121,001	1,683,410
1998	526,920	6,603,425	3,467,987	3,135,438	847,986	1,053,925	1,233,527
1999	493,421	6,027,635	3,078,992	2,948,643	632,095	784,810	1,531,738
2000	510,334	6,206,600	2,933,119	3,273,481	524,299	549,110	2,200,072
2001	523,860	6,339,140	2,687,428	3,651,712	472,296	270,711	2,908,705
2002	582,513	7,342,719	2,523,383	4,819,336	663,719	256,272	3,899,345
2003	536,126	6,989,013	2,353,615	4,635,398	638,184	283,890	3,713,324
2004	474,911	6,010,159	2,021,944	3,988,215	693,116	268,689	3,026,410
Total	7,710,751	92,229,237	44,443,411	47,785,826	9,413,139	9,544,561	28,828,126

unit) * : ton, ** : truck

source) SUDOKWON Landfill Site Management Corporation, Incoming Waste Management Team[1]

Table 2 Collected ,utilized quantity and composition of LFG

Year	collected and utilized quantity				gas composition			
	collection*	flaring*	power generation*	air conditioning*	CH ₄ **	O ₂ **	CO ₂ **	N ₂ **
1998	146,371,170	144,081,764	-	2,289,406	57.8	-	30.8	10.4
1999	163,579,698	158,506,920	-	5,072,778	57.4	-	27.9	14.6
2000	213,506,030	212,481,560	-	1,024,470	45.4	6.1	25.8	22.6
2001	159,156,509	153,337,305	2,332,994	3,486,210	43.0	4.8	30.8	21.4
2002	140,238,654	104,051,126	27,913,663	8,273,865	45.0	1.9	35.6	17.6
2003	88,219,901	56,105,886	26,044,146	6,069,869	51.0	1.3	35.8	14.2
2004	201,247,529	168,945,857	29,528,928	2,772,744	54.5	0.7	38.3	6.5

unit) * : m³/year , ** : %

source) SUDOKWON Landfill Site Management Corporation, Incoming Waste Management Team[1]

3. LFG 발생량 예측

3.1 LFG 발생량 예측시 사용되는 Kinetic 모델

Table 3은 LFG발생량을 예측하기 위한 반응속도 개념을 이용한 수학적 모델들을 나타낸다. 각 모델들의 특성을 살펴보면 EPA 모델은 초기의 Lag Time이 고려되지 않고 L₀ 와 t 값의 가정에 따라 다양한 예측결과 도출이 가능하다. Palos Verdes 모델은 초기의 Lag Time이 고려되고 반감기 및 99%의 분해기간의 가정 및 실측데이터로부터 k₁, k₂ 값이 가정된다. Sheldon Arleta 모델은 하수처리 혐기반응조 이론의 Fair, Moore곡선에 기초하며 Palos Verdes 모델과 유사하다. PG & E 모델은 몬테카를로 방법 등 통계적 방법을 이용하고 기존의 실측자료 등 이용 가능한 자료가 있어야 적용이 가능하다. Scohill Canyon 모델은 EPA 모델과 유사하나 디폴트로 제시된 보수 값이 다르다. SCS 모델은 EPA 모델에서 지체 시간 1년을 가정한다. 0차 반응 모델은 과거에는 널리 적용되기도 하였으나 실제 발생량 자료와 차이를 보여 현재에는 거의 적용되지 않는다[4]. Table 3의 모델중 EPA 모델은 메탄 발생이 일시적이지 않고 장기간에 걸쳐 이루어진다는 사실에 기초하고 있으므로 실제 상황에 보다 근접한 접근방법이며 수도권매립지의 경우에는 EPA 모델에 지체시간 1년을 가정한 SCS모델을 적용하는 것이 바람직하다. SCS모델은 1차 반응에 의해 분해된다는 개념에서 폐기물량을 직접 사용하지만 현실적으로는 폐기물 중에 포함되어 있는 탄소함량을 이용

하는 것이 보다 타당하기 때문에 수도권매립지 LFG 발생량 예측에는 같은 일차분해 개념의 유기성 탄소함량(TC)을 이용하는 모델을 사용하였다.

Table 3 Kinetic Model for LFG generation rate prediction

모델명	모델식
EPA	· 1차 반응 모델 · $dL/dt = -kL$
Palos Verdes	· 2단계 1차 반응 모델 · $dG/dt = -k_1G$ $dL/dt = -k_2L$
Sheldon Arleta	· 2단계 1차 반응 모델 · $dG/dt = -k_1G$ $dL/dt = -k_2L$
PG & E	· 그래프 피팅 모델 · 쌍곡선식이나 지수함수식을 가정
Scholl Canyon	· 1차 반응 모델 · $dL/dt = -kL$
SCS	· 1차 반응 모델 · $dL/dt = -kL$
0차 반응 모델	· 0차 반응 모델 · $dL/dt = -k$

3.2 시간에 따른 LFG 평가방법

폐기물 중의 탄소성분이 1차 반응에 의해 분해된다는 개념을 이용한 일차분해모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = 1.868 \times M \times TC \times f_{ao} \times f_a \times f_o \times k \times e^{-kt} \quad (1)$$

(1)식에서 Q는 해당년도의 매립가스 발생량($m^3/년$), 1.868은 건조탄소(TC) 1kg당 발생하는 이론적 가스량($m^3LFG/kg TC$), M은 매립된 폐기물의 양(ton), TC는 매립폐기물 1톤이 함유하고 있는 유기탄소량(kg TC/ton), k는 매립가스 발생속도 상수($/yr^{-1}$), f_{ao} 는 매립시작 후 반년동안의 매립가스 생산량을 고려한 계수, f_a 는 이론적인 조건에서 TC가 가스화 되는 비율, f_o 는 실제 매립조건에서 TC가 가스화 되는 비율, t는 매립기간(yr)을 각각 나타낸다. 이 모델은 폐기물의 탄소함량과 그 탄소가 모두 분해되었을 때 발생할 수 있는 최대 LFG량을 기초로 하며 실제로 매립될 경우의 매립가스 발생비율 등을 고려하여 시간 경과에 따른 LFG 발생량을 예측하게 된다[4-5].

3.3 변수의 설정

모델에서 사용하는 변수 중 폐기물 매립량(M)은 수도권 매립지 통계연감 제3호(2005)[1]를 참고했고 f_{ao} , f_a , f_o 등은 모델에서 일반적으로 사용되고 있는 기본 값인 0.9, 0.7, 0.7로 각각 가정하였다. 폐기물 1톤의 유기탄소량(TC)은 IPCC 계산방식에 의해서 구하려 했으나 정원폐기물 등이 많은 미국, 유럽국가에 적합한 형태이므로 우리나라 수도권매립지 현실에 맞지 않아 본 연구대상인 수도권 매립지에 매립된 폐기물의 물리적 조성별로 분석한 수분함량 및 화학적 조성 자료를 이용하여 TC값을 구하였다[4-5]. Table 4는 가연성분들에 포함된 탄소함량을 습기준으로 나타낸 것으로 불연성분에는 유기성 탄소가 포함되지 않은 것으로 판단하였다. 또한 Table 5와 Table 6에 수도권매립지의 폐기물 성분별 물리적 조성에 대한 자료를 나타내었다. 본 연구에서 사용된 TC는 각 폐기물 종류별 탄소함량을 이용하여 전체 폐기물에 대한 값으로 산정하였다. LFG의 발생속도상수 k는 매립가스의 발생이 얼마나 빠르게 진행되어 종료되는가를 나타내는 LFG 발생량 예측의 중요한 인자로서 그 값이 클수록 LFG 발생곡선의 폭이 좁아지고 LFG 발생기간이 짧아지는 형태를 나타내며 그 값이 작을수록 LFG 발생곡선의 폭이 넓어지면서 비교적 완만한 형태를 보이고 LFG 발생기간은 길어지는 경향을 나타내게 된다. 수도권매립지의 LFG 발생속도 상수 k는 기존에 적용된 수도권매립지와 국내 원주 매립지, 국가 온실가스 배출량 조사에 사용되었던 4개의 모델을 사용하였으며, 각 모델에 대한 개략적인 설명은 Table 7에 나타내었다.

Table 4 TC content of component materials

materials	food	paper	wood	rubber leather	plastic	other	incombustibles
content	12.42	21.61	30.25	51.67	40.28	18.79	0.00

unit) * : %, wet weight[4]

Table 5 Main stream of municipal waste

Year	combustibles								incombustibles			
	subtotal	food	paper	plastic	wood	rubber leather	textiles	others	subtotal	glass	metals	others
1999	90.6	32.1	28.7	16.5	1.6	3.6	4.9	3.2	9.4	5.9	1.9	1.6
2000	92.0	36.1	25.3	20.8	1.1	3.4	4.4	0.9	8.0	4.8	1.5	1.7
2001	92.5	39.7	23.9	18.8	0.9	2.5	5.6	1.1	7.5	5.0	1.3	1.2
2002	93.0	32.3	31.4	24.9	1.0	0.3	3.1	-	7.0	4.9	1.9	0.4
2003	93.1	23.6	32.9	30.5	0.7	-	5.0	0.4	6.9	4.6	1.9	0.4
2004	92.3	12.7	39.0	34.4	1.9	-	4.3	-	7.7	5.1	2.0	0.6

unit) * : %

source) SUDOKWON Landfill Site Management Corporation, Incoming Waste Management Team[1]

Table 6 Main stream of construction waste

Year	combustibles					incombustibles				
	subtotal	wood	plastic	paper	textiles	subtotal	soil	brick	metals	glass
2002	22.9	12.5	5.7	3.4	1.3	77.1	50.1	24.2	1.8	1.0
2003	31.7	15.2	12.7	2.8	1.0	68.3	41.9	24.4	1.5	0.5
2004	42.9	24.3	12.6	4.2	1.8	57.1	37.5	16.8	2.1	0.7

unit) * : %

source) SUDOKWON Landfill Site Management Corporation, Incoming Waste Management Team[1]

Table 7 Quantity estimation model of landfill gas[4]

model No.	k(yr ⁻¹)	model	application case
1	0.35	BMP	수도권 매립지 LFG 처리시설 설치효율 분석시 적용
2	0.32	Scholl Canyon	원주 매립지 적용
3	0.14	SCS	수도권 매립지 매립가스 타당성 조사 및 기본계획 수행시 적용
4	0.1376	-	국가 온실가스 배출량 조사 모델

본 연구에서 2006년 이후 수도권 매립지에서 발생하는 매립가스 추정에 있어 다음과 같은 가정을 적용하였다. 먼저 유입되는 폐기물의 양, 폐기물의 물리적 조성이 현재와 비교적 유사할 것이라는 것과 제3매립장과 제4매립장은 제2매립장의 운영이 종료되는 시점에서 동시에 가동될 것이라는 전제조건하에 매립가스의 발생량을 예측하였다.

3.4 예측결과의 불확실성의 요인

수도권 매립지의 매립가스 발생량 평가상의 불확실성 요인에는 방법상의 불확실성과 자료상의 불확실성 등이 있을 것으로 생각된다. IPCC의 기본 방법에서는 매립지에 매립된 폐기물이 비교적 일정하고 폐기물에서 발생한 가스가 매립된 당해연도에 배출된다는 가정을 가지고 있다. 그러나 매립폐기물은 시간에 따라 증가하며, 이로 인해 매립가스의 배출에 대해 과대평가를 유발하게 되는 요인이 바로 방법상의 요인이다. 또한 사용되는 인자들 각각에 대한 평가에서 자료의 불확실성을 포함하고 있다. 이들 인자에 의해 상대적으로 크게 예측되거나 혹은 작게 예측되는 사례가 발생하게 된다. 이들 인자들을 살펴보면 매립폐기물의 양과 조성, 매립된 폐기물로부터 실제로 발생하는 매립가스의 양, 대기 중으로 실제 배출되는 매립가스의 양 등이 있을 수 있다. 이외에 불확실성의 요인으로서는 아직까지 매립된 폐기물로부터 매립가스가 발생하는 시기가 정확하게 규명된 자료가 없고 매립가스의 총 발생량에 대한 매탄 포집율의 정확한 데이터가 있을 수 없으며 최대 규모의 수도권매립지를 타매립지에서 사용한 모델로 평가한다는 것과 계절, 온도와 같은 변수 또한 신뢰도를 저감시키는 영향을 줄 수 있을 것이라 생각된다.

4. 결과 및 고찰

앞에서 제시한 수식과 변수들을 이용하여 수도권 매립지의 발생량을 평가한 결과를 다음

Fig. 2에 나타내었다. 기존의 수도권 매립지의 경우 제1매립장이 포화가 되는 시점(2000년 10월)에 제2매립장을 운영하였기에, 제3매립장과 제4매립장의 가동시기를 제2매립장의 매립 용량(6,700 만 톤)을 초과하는 시점(2011년) 이후부터로 선택하였다. 연간 유입되는 폐기물의 용량과 폐기물의 성상을 지금과 비슷한 수준으로 생각하였다. 결과로서 살펴보면 매립가스 생성속도 상수인 k값이 큰 1번(BMP)과 2번(Scholl Canyon)모델에서는 매립 직후부터 매립가스의 발생량이 급증하였다가 다시 급격히 감소하는 양상을 나타냈으며, 3번(SCS)과 4번(국가 온실가스 배출량 조사) 모델에서는 매립 후 2~3년간 완만하게 매립가스의 발생량이 증가하였다가 천천히 감소하는 형태를 나타내고 있다. 여기서, 제1매립장과 제2매립장의 운영이 종결되는 시기인 2000년과 2012년에서는 매립가스의 발생량이 상당히 감소하였다가 다시 후속 매립장의 가동 후 다시 증가하는 불안정한 양상을 나타내고 있어, 수도권 매립지에서 발생하는 매립가스를 이용하는 유틸리티들로 하여금 수급에 불안정한 요인으로 작용하리라 생각된다.

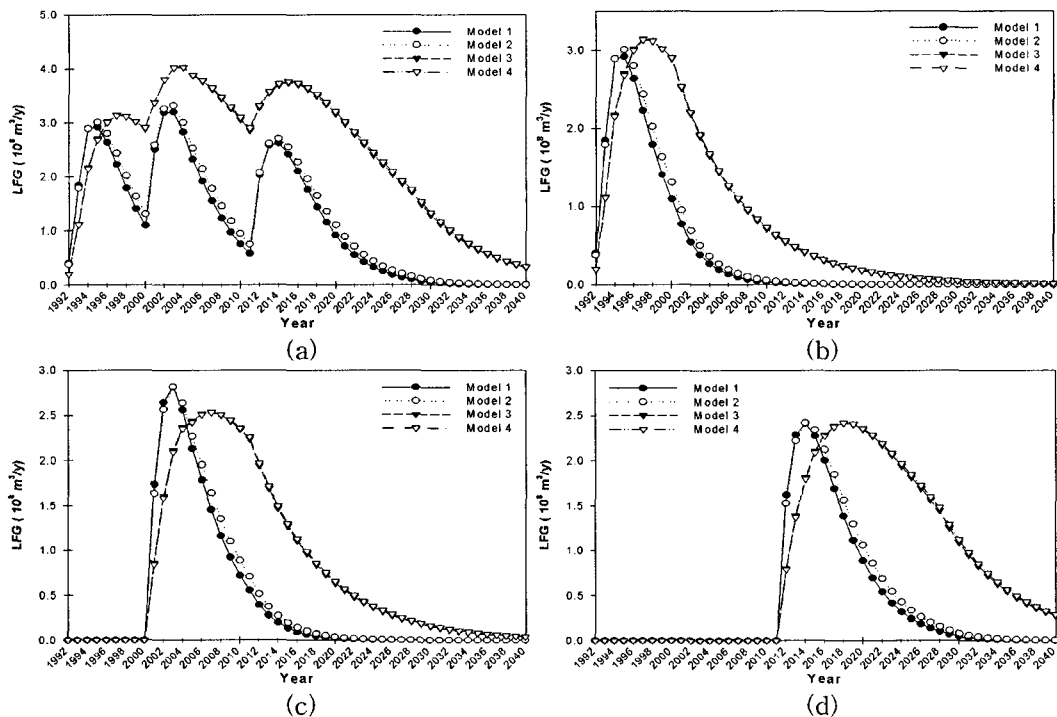


Fig. 2 Estimation of LFG generation by predictive model in Sudokwon landfill site. (a) Total, (b) 1st site, (c) 2nd site, (d) 3rd and 4th site

따라서 기존의 매립장이 포화 후 후속 매립장을 가동시키는 활용방안에서 기존의 매립장이 포화되기 2~3년간의 시간적인 여유를 두고 단계별로 후속 매립장을 가동시키는 분할 활용 방안을 통해 매립가스를 사용하는 유틸리티들로 하여금 수급의 불안정 요인을 없애는 방안을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제시하는 효율적인 방안은 2009년에 제3매립장을 가동하고, 제2매립장으로 유입되던 폐기물의 절반을 유입한다는 가정을 두었다. 또한 2012년에는 제4매립장을 가동하여 제2매립장과 제3매립장으로 유입되는 폐기물을 분할 매립하고, 제2매립장이 포화되는 2015년 이후에는 다시 제3매립장과 제4매립장으로 폐기물을 절반씩 매립하는 방안을 제시하고자 한다. 이렇게 보완된 방안을 통해 수도권 매립지의 매립가스 발생량을 평가한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이 방법에 의해 매립가스의 발생 최대치는 조금 감소하지만, 보다 안정적으로 매립가스가 발생할 수 있다는 결과를 얻을 수 있다. 이 방법은 기존의 방식에 의하면 2011년에 포화되는 제2매립장의 수명도 약 4년간 연장시킬 수 있는 결과가 나왔으며, 제3매립장과 제4매립장을 단계적으로 가동시킴으로써 각각 매립장의 수명도 2년씩 연장시키는 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

수도권 매립지를 대상으로 예측 모델을 통한 매립가스 발생량 평가 및 매립지 활용방안을 모색한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 수도권 매립지의 매립가스 발생량 예측시 미국, 유럽과 같은 매립지에서의 매립가스 발생량 예측에 사용되는 TC값의 적용이 현실적으로 맞지 않아 실제 수도권 매립지에 매립된 폐기물의 성분별로 TC값을 산정하여 예측모델에 적용함으로써 매립가스의 발생량을 예측할 수 있었다.

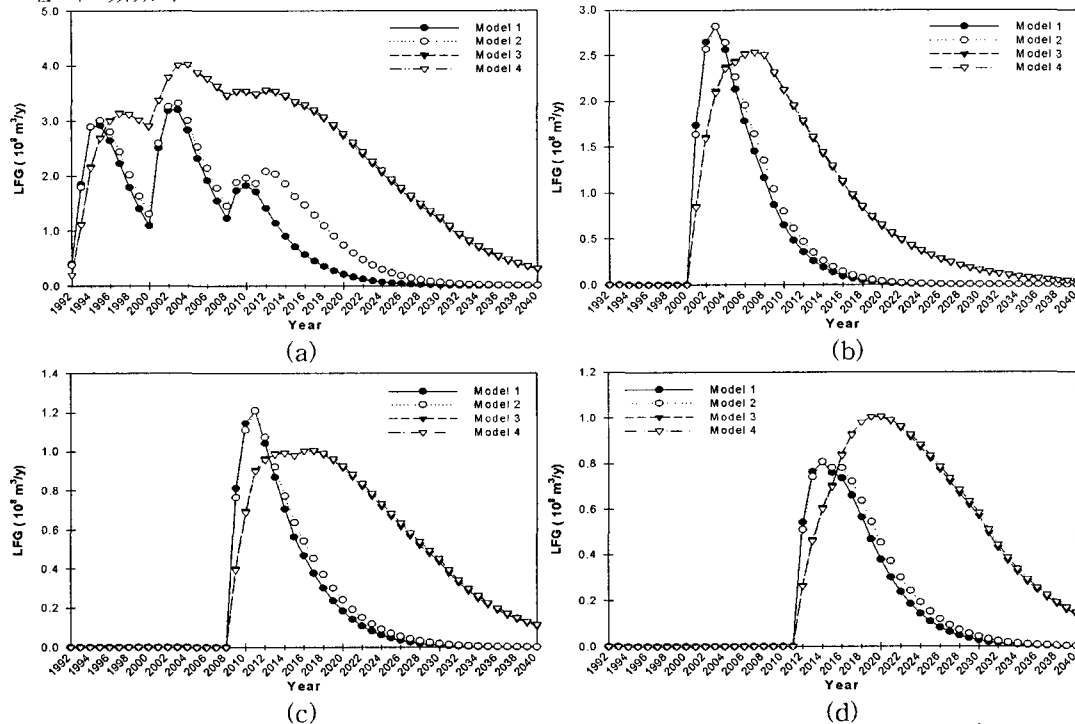


Fig. 3 Estimation of LFG generation by revised management. (a) Total, (b) 2nd site, (c) 3rd site, (d) 4th site

2. 수도권 매립지의 매립가스 발생량 예측모델에 있어서, 실제 수도권 매립지에서 포집하여 이용한 매립가스의 양과 비교하여 살펴본 결과, 3번(SCS)과 4번(국가 온실가스 배출량 조사) 모델이 잘 맞는 것으로 나타났다. 수도권 매립지의 경우 플라스틱, 합성고무와 같은 유기성 폐기물이 다량으로 함유되어 있어 매립가스의 생성속도가 생각했던 것 보다 천천히 발생기에 나타난 결과로 생각된다.
3. 보완된 방안을 통해 수도권 매립지의 매립가스 발생량을 평가한 결과, 제2매립장이 포화된 후 제3·4매립장을 가동시키는 활용방안에 비해, 제2매립장이 포화되기 전 제3매립장과 제4매립장을 단계적으로 가동시키는 방안이 매립가스의 안정적인 수급에 있어 보다 효율적인 것으로 나타났다.
4. 또한 새로운 활용방안에 의해 제2매립장의 수명을 예상보다 3년, 제3매립장과 제4매립장의 경우는 각각 2년씩 연장시킬 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. 수도권 매립지 통계연감 제1~3호. 수도권 매립지 관리공사. 2003~2005.
2. 김종남. 매립가스(LFG) 활용기술. ETIS 분석지 22권. 2003. 6.
3. Roberto Bove, Piero Lunghi. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. Energy Conversion and Management. 2005
4. 매립가스 자원화 사업의 CDM사업으로서의 활용 방안 연구. 환경부. 2001. 3.
5. 최경식 외. 기후변화협약 제3차 국가보고서작성을 위한 기반구축연구. 에너지경제연구원. 2004.
6. 서동천 외. 폐기물의 유기탄소함량을 이용한 매립가스 발생량 예측, 한국폐기물학회지, 2001. 9
7. 이철효 외. 사용종료매립지의 가스 활용 방안 평가. 삼성건설기술연구소. 2000. 5
8. Rosa-Laura Meraz. A fractal-like kinetics equation to calculate landfill methane production. Fuel.2004
9. Sunil Kumar, Estimation method for national methane emission from solid waste landfills, Atmospheric Environment, 2004. 6

10. Lars Mikkel Johannessen. Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills. Urban Waste Management Thematic Group. 1999. 8