

“폐기물을 **자원**으로, 매립지를 **드림파크**로!”

매립지 온실가스 배출량 산정방법

2021. 3.



수도권매립지관리공사
자원순환기술처 연구개발부

목 차

1. 폐기물매립지 온실가스 배출량 산정방법

- 1-1. 매립가스 발생 메커니즘 1
- 1-2. 온실가스 발생량 산정지침 3
- 1-3. 매립부문 배출계수 정의 5
- 1-4. 수도권매립지 온실가스 발생량 6

2. 수도권매립지 온실가스 발생량 평가방법

- 2-1. 반입폐기물 성상조사 7
- 2-2. 잠재가스발생량 평가방법 10
- 2-3. 강제포집량, 간이소각량, 표면발산량 평가방법 14

3. 챔버법을 이용한 표면발산량 현장 모니터링

- 3-1. 챔버법 측정방법 17
- 3-2. 관측자료 처리 19
- 3-3. 표면발산량 측정결과 및 온실가스 발생량 분석 결과 ... 20

4. 에디공분산법을 이용한 표면발산량 현장 모니터링

- 4-1. 에디공분산법 측정방법 22
- 4-2. 관측장비 설치 및 유지관리 24
- 4-3. 관측자료 처리 26
- 4-4. 에디공분산법 수도권매립지 적용 27

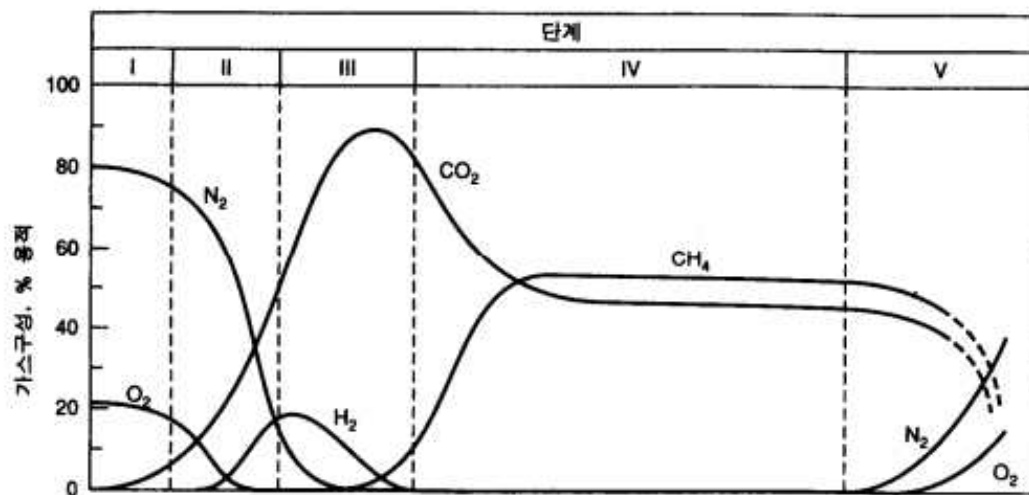
부록

- 부록1. 수도권매립지 반입폐기물 연도별 성상조사 결과 30
- 부록2. 수도권매립지 온실가스 배출경로별 모니터링 결과 .. 33
- 부록3. 매립시설 온실가스 배출량 직접측정시스템 고도화 계획(안) · 34

1. 폐기물매립지 온실가스 배출량 산정방법

1-1. 매립가스 발생 메커니즘

수도권매립지에 매립되는 폐기물은 크게 생활폐기물과 사업장폐기물로 나눌 수 있다. 생활폐기물은 성상별로 종이, 섬유, 음식물, 나무류, 정원 및 공원 폐기물류, 기저귀, 고무 피혁류, 플라스틱, 금속류, 유리류, 기타로 나누며, 사업장 폐기물은 음식물류, 폐섬유류, 폐목재류, 폐기류, 석유제품류, 용매, 플라스틱류, 폐합성고무, 건설 및 파쇄 잔재물, 기타, 폐수슬러지, 하수슬러지로 나뉜 기물의 종류가 다양하며 구성물질에 따라 물리·화학적으로 다른 특성을 나타낼 수 있다. 특히 생물학적으로 분해가능한 물질(유기탄소 등)들은 미생물에 의하여 분해되면서 가스가 만들어지는 특성이 있다. 미생물에 의한 분해는 크게 호기와 혐기조건에 따른 분해로 구분되며, 수도권매립지의 경우 혐기조건을 갖고 있다. 혐기조건에서는 매립가스(LFG)가 그림 1-1과 같이 5단계에 걸쳐 생성된다.



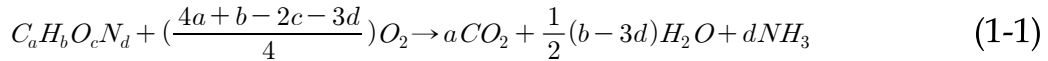
I:초기조정단계, II:전이단계, III:산형성단계, IV:메탄발효단계, V:숙성단계

[그림 1-1] 일반적인 LFG 발생의 변화단계

1) 1단계 - 초기 조정단계

초기 조정단계에서는 폐기물 매립 시 유입되는 공기(산소)에 의하여 호기조건이 마련되고, 복토재에 포함되어 있는 호기성 박테리아에 의해 유기성분이 분해되면서 산소가 소모되는 호기반응이 일어난다. 호기반응은 식 1-1의 반응식에서 볼 수 있듯이 분해에 의해 이산화탄소가 생성되는데 농도는 높은

경우 90%까지 나타나며 온도는 70도 이상까지 올라가는 경우도 있다. 복토재 등으로 관리되는 매립장의 경우 초기 매립지 내부의 압력이 높아짐으로써 대기압에 의한 공기유입을 저지하는 효과가 있다. 초기 조정단계의 기간은 추가적인 산소가 유입되지 않으면서 수일간밖에 지속되지 않는다.



2) 2단계 - 전이단계

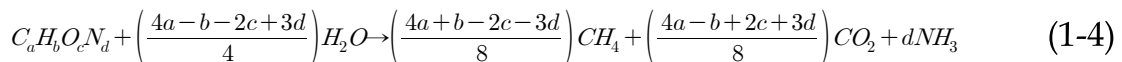
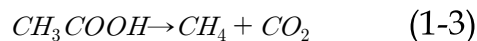
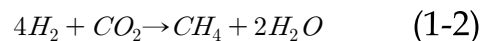
초기 조정단계가 끝나면 산소가 고갈되면서 혐기조건이 형성된다. 이때 산소 대신에 질산염(Nitrate)과 황산염(Sulfate)을 전자 수용체(Electron Acceptor)로 활용하는 통성혐기성(Fermentative) 세균이 활동하기 때문에 폐기물의 산화/환원 전위차(Oxidation/Reduction Potential)를 측정함으로써 혐기 분해가 시작함을 알 수 있다. 한편 전위차 값이 -150 ~ -300 mV인 경우에 CH₄ 생성이 일어나는 것으로 알려지고 있다.

3) 3단계 - 산형성단계

산형성단계는 고분자 화합물 등이 발효반응과 가수분해에 의해 저분자 화합물로 분해되고, 아세트산 등 유기산이 생성되는 단계이다. 주로 이산화탄소가 발생하며 소량의 수소가 생성된다.

4) 4단계 - 메탄생성단계

메탄생성균이 아세트산과 수소 등을 이용하여 메탄(CH₄)과 이산화탄소(CO₂)로 분해하는데 간단히 식 1-2, 식 1-3과 같은 반응이 일어나며, 메탄 생성 반응식은 식 1-4와 같다.



5) 5단계 - 숙성단계

매립가스 발생과 침출수 유출 등으로 매립장 내 분해가능한 폐기물의 양이 줄어들면서 가스 발생량이 줄어드는 단계로 질소와 산소가 매립가스 성분에 나타난다.

1-2. 온실가스 발생량 산정지침

폐기물의 분해는 다양한 영향인자에 의하여 발생하기 때문에 가정사항에 따라 다양한 식이 제시되고 있다. 총 메탄발생량을 구하는 일반적인 모델은 초기 최대 메탄발생이 이루어지며 분해속도에 따라 Exponential하게 줄어드는 것으로 가정(1차 반응, FOD)하는 모델로 식 1-5와 같이 구할 수 있다. 여기서, 특정 시점(T년도)에서 1년 동안 메탄 발생량은 식 1-6과 같이 T년도까지의 총 발생량에서 그 직전년도(T-1)년도 총 발생량을 빼주면 된다.

$$M_{CH_4}(t) = M_0 L_0 (1 - e^{-kt}) \quad (1-5)$$

$$Q_{1,CH_4(t)} = M_0 L_0 \{e^{-k(t-1)} - e^{-kt}\} \quad (1-6)$$

폐기물이 연속으로 매립되는 매립지의 경우 식 1-6을 연차적으로 산정하여 누적하면 된다. 따라서 연도별로 매립된 폐기물에 의해 특정시점에서 발생하는 메탄양은 표 1-1과 같이 표현되며, 식 1-7과 같이 정리할 수 있다.

[표 1-1] t년 경과 후 CH₄ 발생량

매립년도	매립 개시 후 t시간 경과 시점에서의 CH ₄ 발생량(ton/yr)
1	$M_0(1)L_0(1)1 - e^{-kt} - M_0(1)L_0(1)\{1 - e^{-k(t-1)}\}$
2	$M_0(2)L_0(2)1 - e^{-k(t-1)} - M_0(2)L_0(2)\{1 - e^{-k(t-2)}\}$
...	...
N	$M_0(N)L_0(N)1 - e^{-k(t-N+1)} - M_0(N)L_0(N)\{1 - e^{-k(t-N)}\}$

$$Q_{CH_4}(t) = \sum_{i=1}^N M_0(i)L_0(i) [\exp\{-k(t-i)\} - \exp\{-k(t-i+1)\}] \quad (1-7)$$

국내 온실가스 산정 지침은 「온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침」에 근거하여 산정하고 있다. 이 지침은 IPCC 가이드라인을 참고로 1차 반응(First-order decay, FOD)에 의하여 폐기물이 분해되는 것으로 가정하여 매립가스 발생량을 산정하는 방법을 적용하였다(산정지침 상 메탄발생은 지연시간 1년을 갖는다).

지침에서는 표 1-1의 과정 및 식 1-7 계산을 보다 쉽게 하기 위하여 다음과 같이 메탄 배출량을 산정할 수 있도록 가이드하고 있다. 최종 배출량은 발생

량에서 회수량을 제외하고 복토층에서 메탄이 이산화탄소로 산화되는 산화율을 곱하여 계산한 양이 대기중으로 배출된다고 본다. 다만, 회수율에 따라 배출량을 산정하는 방식은 달라진다.

$$CH_4 Emissions_T = \left[\sum_x CH_4 \geq rated_{x,T} - R_T \right] \times (1 - OX)$$

$$CH_4 \geq rated_{x,T} = DDOCM,decomp_T \times F \times 1.336$$

$$DDOCm,decomp_T = DDOCMa_{T-1} \times (a - e^{-k})$$

$$DDOCma_{T-1} = DDOCmd_{T-1} + (DDOCma_{T-2} \times e^{-k})$$

$$DDOCmd_{T-1} = W_{T-1} \times DOC \times DOC_f \times MCF$$

여기서, $CH_4 generated_{x,T}$ 는 T년도 메탄 배출량(tCH₄)

$CH_4 generated_T$: T년도 발생 가능한 최대 메탄배출량(tCH₄)

R_T : T년도에 회수된 메탄량(tCH₄)

OX : 매립지 표면에서의 산화율

$DDOCm, decomp_T$: T년도에 혐기적으로 분해된 유기탄소(tC)

F : 발생 매립가스에 대한 메탄 부피비

1.336 : CH₄의 분자량(16.043)/C의 원자량(12.011)

$DDOC_{maT-1}$: T-1년도 말까지 누적된 유기탄소(tC)

k : 메탄 발생 속도상수

$DDOC_{mdT-1}$: T-1년도에 매립된 혐기적 분해가능한 유기탄소(tC)

W : 폐기물 매립량(t-Waste)

DOC : 분해 가능한 유기탄소 비율(tC/t-Waste)

DOC_f : 메탄으로 전환 가능한 DOC 비율

MCF : 호기성 분해에 대한 메탄 보정계수

T : 산정년도

x : 폐기물 성상

1-3. 매립부문 배출계수 정의

폐기물 매립부문 온실가스 배출량 산정에서 사용되는 배출계수는 표 1-2로 간략히 이해할 수 있으며, 배출량 산정 시 기본적으로 기본계수값(표1-3)이 주어지고 일부 실측값을 사용한다. 기본계수값은 배출량 규모에 따라 Tier1 ~ 3로 구분되며, '20년 현재 폐기물 매립부문은 Tier 1의 계수를 사용한다.

여기서, 생화학적 분해 가능한 유기탄소에서 가스화 되는 양은 $DOC \times DOC_f \times MCF \times F \times 1.336$ 으로 나타낼 수 있는데 이는 폐기물 성상별 단위 중량당 메탄 최대 생성 가능량인 잠재가스발생량(L_0)과 같은 의미를 나타낸다. L_0 는 BMP-test(생물학적 메탄잠재력 시험)를 통하여 실험적으로 구할 수 있는데 자세한 실험방법은 '2-2. 잠재가스발생량 평가방법'에 기술하였다.

[표 1-2] 매립시설 CH₄ 발생량 산정 주요 변수

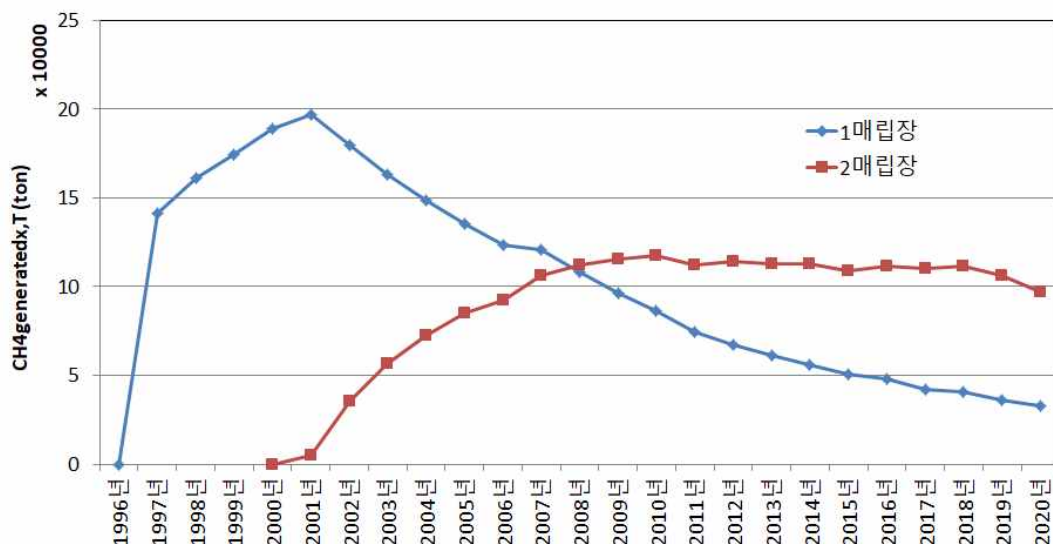
변수	내용	적용값
DOC (Degradable Organic Carbon)	생화학적 분해가 가능한 유기탄소	표 1-3 적용
DOC _f (Fraction of DOC)	생화학적 분해 가능한 유기탄소 중 분해되지 않는 비율(기본값 : 0.5)	0.5
MCF (Methane Correction Factor)	매립지에 따른 혐기·호기 정도를 반영한 값	혐기조건:1.0
F (Fraction of CH ₄ in LFG)	매립가스 중에서 메탄가스가 차지하는 비율(기본값 : 0.5)	실측값 적용
k (Reation Constant)	폐기물의 분해 속도 상수	표 1-3 적용
OX (Oxidation Factor)	메탄이 매립지 복토층을 통과하면서 산화되는 비율	0.1
R (Recovery Rate)	생성된 매립가스의 회수 되는 비율	실측값

[표 1-3] 폐기물 종류 및 성상별 기본 배출계수

생활폐기물			사업장 폐기물		
폐기물 성상	DOC	K	폐기물 성상	DOC	K
혼합폐기물(bulk)	0.14	0.09	혼합폐기물(bulk)	0.15	0.09
종이류	0.40	0.06	음식물류(음식, 음료 및 담배)	0.15	0.185
섬유류	0.24	0.06	폐섬유류	0.24	0.06
음식물류	0.15	0.185	폐목재류	0.43	0.03
나무류	0.43	0.03	폐지류	0.40	0.06
정원 및 공원폐기물류	0.20	0.1	석유제품류, 용매, 플라스틱류	0.00	0
기저귀	0.24	0.06	폐합성고무	0.39	0.03
고무 피혁류	0.39	0.03	건설 및 파쇄 잔재물	0.04	0.1
플라스틱류	0.00	0	기타 사업장 폐기물	0.01	0.1
금속류	0.00	0	폐수 슬러지(오니)	0.09	0.185
유리류	0.00	0	하수 슬러지(오니)	0.06	0.185
기타 생활폐기물	0.00	0	-	-	-

1-4. 수도권매립지 온실가스 발생량

앞서 설명한 온실가스 발생량 산정지침에 따라 수도권매립지에 매립되는 폐기물을 반영하여 계산하게 되면 발생량은 그림 1-2와 같이 그려지게 된다. 폐기물 매립양이 일정하게 지속적으로 이루어지게 되면 매립가스 발생량은 초기 점진적으로 증가하다가 일정하게 유지되고, 매립 종료 후 급격하게 감소한다.



[그림 1-2] 제 1, 2매립장 온실가스 발생량(지침 기준)

2. 수도권매립지 온실가스 발생량 평가방법

2-1. 반입폐기물 성상조사

매립가스 발생량 산정시 기본값을 사용하도록 되어 있다. 하지만 매립지에 반입되는 폐기물의 구성 물질에 따라 매립가스 발생량은 크게 달라지기 때문에 정확한 발생량 예측을 위해서는 기본적으로 반입폐기물의 성상을 조사하는 것이 수행되어야 한다. 수도권매립지관리공사는 1999년부터 매년 반입폐기물에 대한 성상조사를 실시 하고 있으며, 최근 폐기물의 원소분석을 추가하여 ① 물리적 조성, ② 삼성분, ③ 화학적 조성 ④ 총 유기탄소를 분석하여 자료를 구축하고 있다.

1) 물리적 조성

일반적으로 생활폐기물과 건설폐기물, 중간처리잔재물에 대한 물리적 조성을 조사하며, 원추사분법 및 육안으로 폐기물을 분리하여 무게를 쟀다. 건설 및 중간처리 잔재물의 경우 나무 등에 토사 등 불연성 미립자 등이 붙어 있는 경우가 있어 무게가 과다하게 산정되는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하고자 입도선별기를 도입하였으며, 인력으로 분리하기 어려운 불연성 물질을 쉽게 분리함으로써 보다 정확한 성상조사가 이루어 질 수 있도록 하였다.

2) 삼성분 분석

삼성분은 시료 중 수분, 가연분, 회분의 함량을 의미하며 폐기물의 중요한 화학적 특성 중 하나이다. 수분은 물리적 조성별 분리가 끝난 습시료를 대형 열풍건조기에서 건조시켜 건조 전·후 무게 차이로부터 구한다. 건조 온도는 가연성 물질의 손실을 가능한 줄이고 화재의 위험을 막기 위하여, 폐기물공정시험법에서 규정된 $100\pm5^{\circ}\text{C}$ 보다 낮은 80°C 정도로 조정하고, 건조기간은 약 3일 이상으로 충분히 길게 적용하여 건조한다. 건조가 끝난 시료는 수분의 재흡수가 일어나지 않도록 실리카겔을 채운 항량기 안에서 냉각시킨 후 무게를 측정하여 수분함량을 구한다. 무게측정이 끝난 시료는 파쇄기를 이용하여 3 mm 이하의 입경으로 파쇄한 후, 전기로를 이용하여 폐기물공정시험법에 따라 $600^{\circ}\text{C}\pm25^{\circ}\text{C}$ 에서 30분간 강열하고 남은 무게를 측정함으로써 가연분과 회분의 함량을 구한다. 여기서 수분 함량을 제외한 시료의 가연분 즉, 건기준 가연분은 VS(Volatile Solid)라 표기되며 후에 BMP test에서 시료 주입량을 결정하는 자료로 활용한다.

삼성분(수분, 가연분, 회분)의 산출방법은 다음의 식과 같다.

$$\text{수분}(W) = \frac{[(M)_{before} - (M)_{after}]}{(M)_{before}} \times 100 \quad (2-1)$$

$$\text{가연분}(C) = \frac{100 - W}{100} \times \frac{[(M_d)_{before} - (M_d)_{after}]}{(M_d)_{before}} \times 100 \quad (2-2)$$

$$\text{회분}(A) = (100 - W - C) \quad (2-3)$$

여기서, (M)_{before}, (M)_{after} : 건조 전·후의 무게(g)

(M_d)_{before}, (M_d)_{after} : 강열 전·후의 무게(g)

4) 화학적 조성 분석방법

폐기물의 화학적 조성은 건조·파쇄 전처리한 폐기물을 고온(1020℃ 이상)에서 연소시켜서 나온 가스를 열전도도검출기(TCD)로 측정하는 원소분석기를 이용한다. 일반적으로 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N) 및 황(S)에 대하여 분석하여 나타내는 경우가 많으며 이외에도 염소(Cl)에 대한 분석을 추가하는 경우도 있다. 화학적 조성은 대부분 가연성물질의 건조된 시료를 이용하므로 폐기물의 경우 가연성 폐기물을 대상으로 분석이 이루어지며 그 결과는 건 기준의 값으로 제시된다.

5) 총 유기탄소 분석방법

화학적 조성 중의 탄소 함유율은 폐기물의 가연성 물질 중에 포함되어 있는 전체 탄소(유기탄소+무기탄소)를 대상으로 한다. DOC(Degradable Organic Carbon)는 생화학적 분해가능한 유기탄소를 대상으로 하기 때문에 여기서 무기탄소 부분을 제외시켜야 미생물 분해에 의한 가스발생을 평가함에 있어 정확한 자료를 제시할 수 있다. 유기탄소량을 측정하는 방법으로는 무기탄소를 직접 제거하는 방법과 고형물 TOC 분석기를 이용하는 방법 등이 있으며, 일반적으로 TOC 분석이 더 신뢰성이 높다고 여겨진다.

TOC 분석은 폐기물 시료 중에 포함되어 있는 모든 유기물을 고온 산화시켜 가스상으로 변환시킨 후 적외선 검출기를 이용하여 발생된 가스 중의 이산화탄소 농도를 분석함으로써 총탄소량(TC, Total Carbon)을 구하고, 인산염 용액을 이용한 전처리 후 동일한 방법으로 무기탄소량(IC, Inorganic Carbon)을 구한다음 총탄소량과 무기탄소량의 차이로 총 유기탄소를 얻게 된다.

IPCC 2006 GL에서는 각 폐기물 성상 별 탄소 함량(Carbon content)과 화석 탄소비율을 함께 제공하여, 이를 성상 별 매립량 비율에 따라 가중평균하여

최종 DOC를 결정할 수 있도록 하고 있다. 즉, IPCC 에서는 총 탄소함량 중 화석탄소함량을 제외한 모든 탄소는 분해 가능한 것으로 간주하고 있음을 알 수 있다.

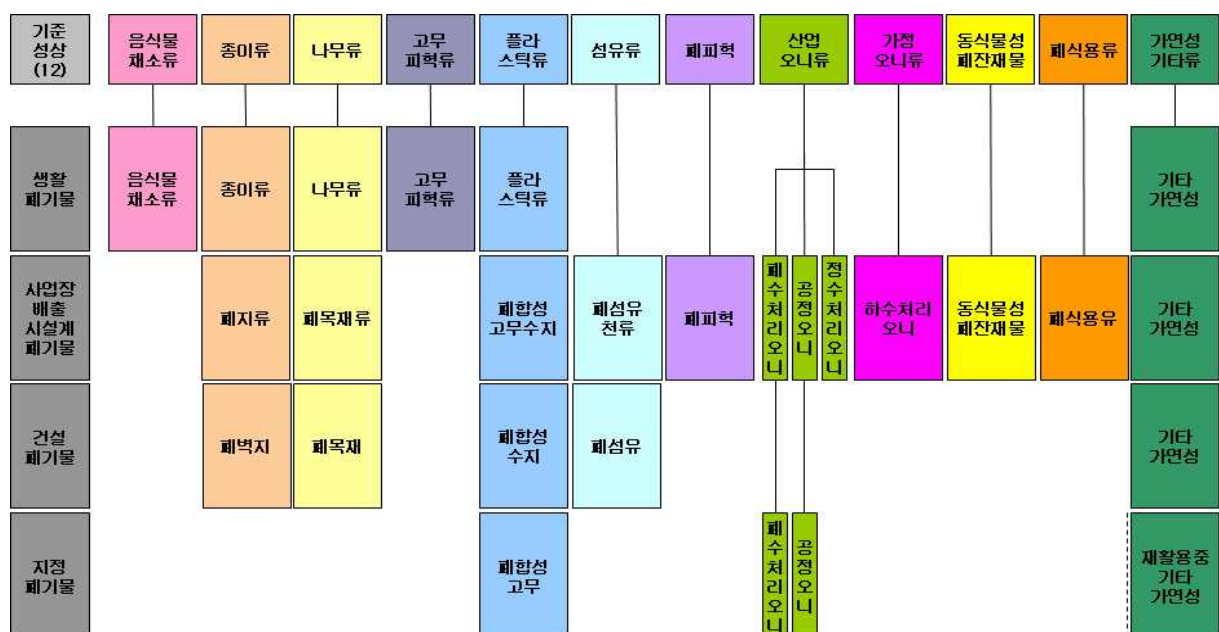
6) 물리적인 성상분석 및 DOC 도출을 위한 분석대상폐기물 종류

일반적인 매립가스 발생량 산정공식에 물리적인 성상이 반영된다. 공사에서는 표2-1과 같이 폐기물을 성상분류 하고 있으며, IPCC의 경우 표2-2와 같이 분류하고 있다.

[표2-1] 공사 물리적 성상분석 대상폐기물 및 '19년 분석결과

구분		생활폐기물	건설폐기물	중간처리잔재폐기물
가연성	비닐	26.4	14.4	19
	종이	35.3	6.7	3.5
	섬유	3.7	1.1	2.1
	목재	0.8	12.4	21.1
	음식물	9.7	-	-
	고무	1.4	-	-
	기타	13.8	0.2	0.3
불연성	유리	1.6	3.4	0.9
	금속	1.2	2.7	1.3
	벽돌	-	24.9	18.9
	토사	-	34.2	32.9
	기타	6.1	-	-

[표2-2] 온실가스 배출량 산정을 위한 폐기물 분류기준성상표



2-2. 잠재가스발생량 평가방법

폐기물의 잠재가스발생량은 실제로 발생할 수 있는 가스의 잠재적인 양으로 주로 메탄에 대한 평가를 한다. 잠재가스발생량 평가 방법으로는 이론적인 방법과 실험적인 방법이 있다. 이론적인 방법은 물질수지에 기초한 양론적 접근방법과 생분해도에 의한 접근방법이 있으며, 실험적 방법은 혐기성 소화조, lysimeter, 실험실 실험 등이 있다.

양론적 접근은 폐기물의 화학적 조성을 이용하여 산정한다. 하지만 폐기물의 시간적·환경적 조건에 따른 분해를 고려하지 않기 때문에 Methane potential의 결정에 어려움이 있다. 그럼에도 화학식을 통해 간단히 계산할 수 있기 때문에 개략적인 가스발생량 산정과 비교에 이용할 수 있어 다른 예측 모델의 추정 인자 산출에 기초적으로 사용된다. 대표적으로 Modified Buswell equation(식 2-4)이 있다.

$$C_aH_bO_cS_e + (a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2})H_2O \rightarrow (\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4})CH_4 + (\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4})CO_2 + dNH_3 + eH_2S \quad (2-4)$$

실험적 방법으로는 대표적으로 BMP(Biochemical Methane Potential)-Test가 있다. BMP test는 생분해에 의한 메탄발생량을 평가하는 대표적인 실험으로, serum bottle 내부에 기질(폐기물)과 혐기성 미생물 및 영양물질을 조성하고 온도, pH 등 혐기반응을 위한 최적의 조건을 유지하면서 가스 발생량과 그 조성의 변화를 측정하는 실험이다.

1) BMP-Test를 위한 시료처리

생활 폐기물과 건설폐기물은 건조, 파쇄(3mm이하)한 후 사용하고, 그 외의 폐기물(슬러지류, 소각재, 탈수케이크 등)은 그대로 기질로써 사용한다. 즉시 실험이 어려운 경우 밀봉하여 냉장고에 4℃로 보관한 후 사용한다.

2) BMP-Test를 위한 영양배지 조성

혐기성 미생물이 이용할 영양물질은 Shelton과 Tiedje(1984)의 방법을 따라 표 2-3와 동일하게 조성한다. 제조된 영양배지는 혐기조건을 유지하기 위해 가압멸균기를 이용하여 10분 정도 멸균하고 배지에 포함된 산소를 배출시킨 후 상온으로 냉각한다. 냉각과정 시 산소의 유입을 막기 위하여 질소 가스를 지속적으로 주입한다.

혐기성 미생물은 침출수처리장에서 채취한 식종액을 실험 시작 전에 채취하여 200번(0.075 mm) 체로 여과한 후 여액을 이용한다. 식종액 양은 영양배지의 10%를 기준으로 주입한다.

[표 2-3] BMP test를 위한 영양 배지 조성

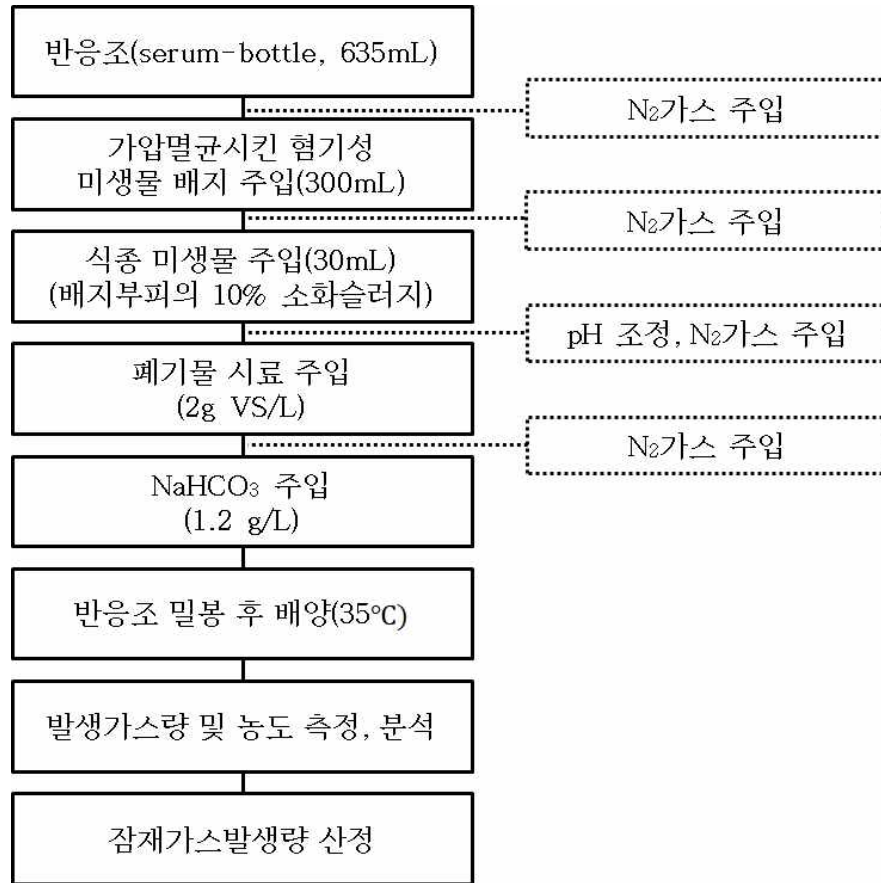
구분	시약명	주입량
Phosphate buffer	KH_2PR_4	0.27 g/L
	$\text{K}_2\text{HPO}_4(\text{pH}7.0)$	0.35 g/L
Mineral salts	NH_4Cl	530 mg/L
	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	75 mg/L
	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	100 mg/L
	$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	20 mg/L
Trace metals	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.5 mg/L
	H_3BO_3	0.05 mg/L
	ZnCl_2	0.05 mg/L
	CuCl_2	0.03 mg/L
	$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.01 mg/L
	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.05 mg/L
	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.05 mg/L
	Na_2SeO_3	0.05 mg/L

3) BMP-Test 수행

BMP-Test의 과정은 serum bottle 1L 기준으로 그림 2-1에 도시하였다.

준비된 영양배지와 식종액의 조성이 완료되면, 가수분해 및 산형성 미생물에 의해 발생한 유기산의 영향(메탄 생성 저해)을 최소화 하기 위하여 1N NaOH와 1N HCl를 이용하여 pH를 최적조건인 7.0로 조정한다. 또한 산형성에 따른 pH 감소를 막기 위하여 알칼리도 물질로서 중탄산염(NaHCO_3) 1.2 g/L을 주입한다. 여기에 혐기 상태인지를 확인하기 위한 resazurin 수용액을 serum bottle 내 주입하여 색깔 변화를 확인 할 수도 있다.

최종적으로 조성이 완료되면 밀봉한 후 35℃(최적온도)를 유지시킬 수 있는 항온조에서 실험을 진행하고 시간에 따라 시료를 채취하여 가스 농도 및 조성, 양을 평가한다. 여기서 별도의 동일한 반응조(serum bottle)를 구성한 후 액상시료를 소량 채취하여 pH 변화를 확인 할 수도 있다.



[그림 2-1] BMP test의 수행 과정(흐름도)

4) 잠재가스발생량 평가

시료채취는 유리체시린지를 이용하고, G/C 분석을 통하여 농도를 측정한 후 메탄 발생량을 평가한다. 측정기간 동안 메탄발생량을 산정할 때 가스시료 채취 전 반응조의 상단부 빈공간(headspace)과 메탄양을 식 2-5와 같이 보정하여야 한다.

$$V_{CH_4}(35^{\circ}\text{C}) = C_1(V_1 + V_0) - C_0V_0 \quad (2-5)$$

여기서, C_1 : 시료 채취 시점의 CH_4 농도(%)

C_0 : 시료 채취 이전의 CH_4 농도(%)

V_1 : 시린지에 의해 측정된 총 가스부피(mL)

V_0 : serum bottle의 headspace의 부피(mL)

식 2-5에 의해서 계산된 메탄발생량은 식 2-6을 이용하여 0°C , 1기압의 표준상태로 전환시킨 뒤 누적메탄발생량을 구한다.

$$V_{CH_4}(STP) = V_{CH_4}(35^{\circ}C) \frac{273}{273+35} \times \frac{760-42.2}{760} \quad (2-6)$$

여기서, 건조 상태의 가스발생량을 구하기 위하여 35℃에서의 포화수증기량을 빼주며, 폐기물 시료만의 순수 누적가스발생량을 측정하기 위해 식중액만을 포함한 경우 바탕시험용 시료의 누적가스 발생량 값을 측정, 식중액으로 인한 누적가스 발생량 부분을 보정한다.

5) 최종메탄수율(M_0) 및 메탄발생속도상수(k) 평가

위 실험에서 유기물의 분해를 1차 반응으로 가정하고, 분해된 기질은 모두 가스로 전환된다고 가정한다면 최종메탄수율은 식 2-7로 나타낼 수 있으며, 폐기물의 종류와 발생량 평가를 통하여 최종메탄수율과 메탄발생속도상수를 도출할 수 있다.

$$M = S_0 Y(1 - e^{-kt}) = M_0(1 - e^{-kt}) \quad (2-7)$$

여기서, M_0 : 최종메탄수율(mL CH_4 /g VS)

2-3. 강제포집량, 간이소각량, 표면발산량 평가방법

1) 강제포집량 조사방법

수도권매립지의 매립가스는 각 매립장 현장에 설치·분포되어 있는 수직가스 포집정에서 포집되어 개별배관, 매니폴드스테이션, 가스이송관 등을 통해서 매립가스관리센터로 이송된다. 매립가스관리센터에서는 포집·이송된 매립가스를 발전소, 보일러 등 활용시설로 보내주고 활용되지 않는 가스는 소각기를 이용하여 소각처리하고 있다. 이 과정에서 매립장별 매립가스 포집량, 소각량, 활용량 등과 주요성분의 농도, 압력 등이 각종 계측기기에 의해 실시간으로 확인되며, 각 값에 대해서는 일지에 기록하여 데이터를 관리하고 있다.

2) 간기소각기(가스배제공) 배출량 조사방법

매립지에 설치되어 있는 가스배제공은 주요 매립가스 배출경로 중 하나이다. 매립가스를 강제로 포집하지 않는 매립지의 경우에는 매립지 내부의 가스 압력에 의해 자연적으로 배출되는 상당부분이 가스배제공을 통해 대기로 배출될 수 있다. 수도권매립지와 같이 매립가스를 강제포집하는 경우라도 폐기물 매립고에 따라 포집이 어려운 시기에는 가스배제공에 의해 자연배출되는 매립가스를 간이소각기를 이용하여 연소시키는 것이 주요 매립가스 처리방법이 될 수 있으며, 강제포집 중에도 매립가스가 원활히 포집되지 않는 지점에 대해서는 가스배제공에 간이소각기를 설치하여 운영하여야 한다.

간이소각기가 설치되지 않은 가스배제공은 밀폐되어 있으므로 매립가스 배출량 조사는 간이소각기가 설치되어 있는 가스배제공을 대상으로 한다. 간이소각기는 주로 원형관 형태로 구성되어 있으며, 열선유속계, 프로펠러형 유속계, 비누막 유량계, 로터미터(rotameter), 피토크관(pitot tube), 물치환법 등 여러 가지 방법을 이용하여 가스유량을 측정할 수 있다. 로터미터나 물치환법의 경우에는 배출되는 가스의 양이 적을 경우 측정기기 자체에 의한 압력손실에 의해 측정이 불가능하거나 과소평가될 수 있으며, 비누막 유량계의 경우에는 매우 미량의 가스에도 측정 가능하지만 가스의 양이 많은 경우에는 사용할 수 없다. 피토크관과 프로펠러형 유속계는 간이소각기의 시료채취구를 재설치하여야 하기 때문에 사용하기에 곤란할 수 있다. 열선유속계는 관로를 흐르는 가스의 흐름으로 인해 생기는 열전도도의 차이를 이용하여 유속을 측정한 후 관경을 고려하여 유량으로 환산할 수 있으며, 매립가스를 포함하여 다양한 현장에서 범용으로 사용되고 있고 현장에서 직접 측정하는 데 매우 편리하다.

이에 수도권매립지관리공사에서는 가스배출량의 변동에 유연하게 사용할 수 있고 간이소각기의 시료채취구의 개조나 추가설치가 필요하지 않은 열선유속계를 조사에 이용한다.

간이소각기가 설치된 가스배제공의 매립가스 배출량 측정에 사용된 열선유속계(Hot Wire Anemometer, BM-BSV 101, LSI spa, Italy)는 측정범위 0~50 m/sec, resolution 0.01 m/sec이었으며, 이를 이용하여 각 매립장 현장에서 직접 측정한다. 가스배제공의 간이소각기는 관 중간에 시료채취구 및 밸브가 설치되어 있어 이를 통해 가스유속 및 농도를 측정할 수 있으며, 각 가스배제공에서 측정된 가스유속과 관경에 따른 단면적, 유속측정시의 매립가스 중 메탄과 이산화탄소의 농도 분석결과를 이용함으로써 성분별 가스유량을 산정할 수 있다.

한편, 매립가스의 주요 성분인 메탄, 이산화탄소, 산소 등의 농도는 휴대용 가스분석기(Infrared Gas Analyser, GA94A, Geotechnical Instruments, UK)를 이용하여 가스유속과 함께 현장에서 직접 측정한다.

3) 표면발산량 조사방법

복토 등 매립지 표면을 통해 배출되는 매립가스의 양을 조사하기 위해서도 여러 가지 방법이 사용되고 있다. 그 중 대표적인 조사방법에는 미기상학적 방법과 챔버에 의한 방법을 들 수 있다.

미기상학적 방법에도 다양한 방법이 알려져 있으며, 측정 시에 주위 환경에 변화를 주지 않는다는 것과 비교적 넓은 지역(100~1,000 m²)을 대표할 수 있는 배출량 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 반면, 측정장비를 설치하고 의미 있는 자료를 얻기 위한 장비를 운영하기 위해서는 고도로 숙련된 전문인력과 배출량 산출에 요구되는 실시간 분석이 가능한 장비가 필요하므로 높은 비용이 요구되고, 측정 대상으로 하는 표면발산 외에 외부로부터의 다른 배출원이 있을 경우 해당 배출원에서의 배출량 측정이 불가능한 단점이 있어 매립지에 적용된 사례는 극히 적다.

이에 비해 챔버를 이용한 조사방법은 미기상학적 방법보다 간단하고 경제적이기 때문에 매립가스의 표면발산량 측정에 주로 사용되고 있는 방법이다. 측정 가능한 면적이 미기상학적 방법에 비해 매우 작기 때문에 배출량이 국소적으로 큰 차이를 나타내거나 다른 배출원이 공존할 때 표면발산량의 측정이 가능한 장점이 있다. 반면, 배출량 측정결과가 측정지점에 국한될 수 있고 넓은 지역을 대상으로 할 때 지역의 대표성이 제한받을 수 있는 단점이

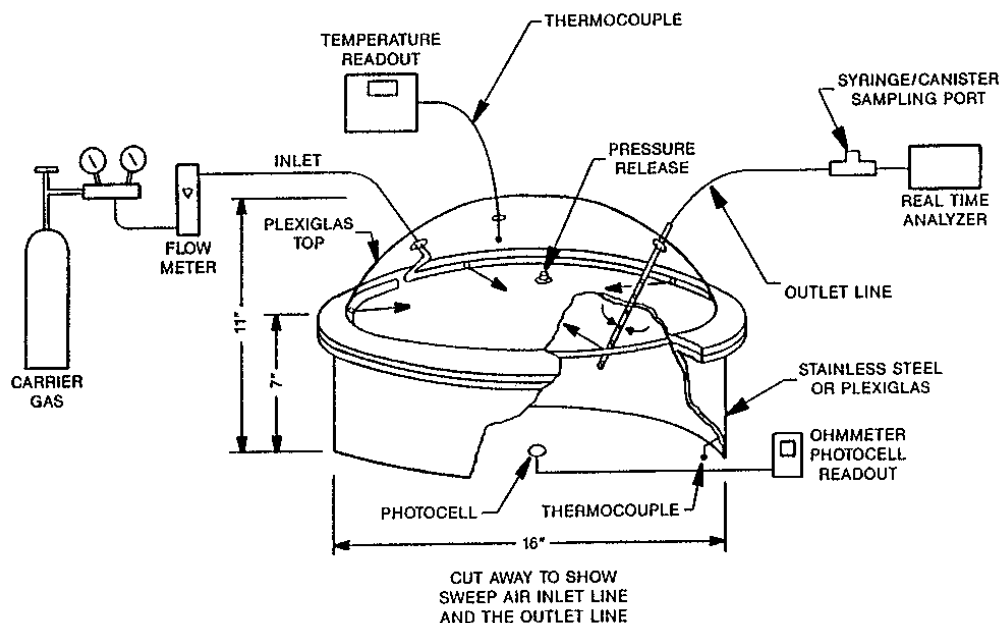
있다. 따라서 이를 보완하기 위해서는 조사지점수를 최대화하여 대표성 있는 데이터를 얻도록 해야 한다. 사용되는 챔버는 운영방법에 따라 닫힌 챔버(static flux chamber)와 열린 챔버(dynamic flux chamber)로 나눌 수 있으며, 조사대상으로 하는 성분에 따라 선택하여 사용할 수 있다. 미국 환경보호청(US EPA, 1986)에서는 가스의 표면발산량 측정을 위한 방법으로서 dynamic flux chamber를 이용하여 측정할 수 있도록 지침을 제공하고 있다.

3. 챔버법을 이용한 표면발산량 현장 모니터링

3-1. 챔버법 측정방법

조사지점에 따라 큰 차이를 보이는 매립지의 특성과 모니터링의 경제성과 편의성 등을 고려하여 챔버를 이용한 조사방법으로 매립가스 표면발산량을 측정하고 있다. 조사에는 static flux chamber와 dynamic flux chamber가 모두 사용가능하나 static flux chamber의 경우 조사지점당 분석시료가 dynamic flux chamber에 비해 많아 분석에 따른 시간소요가 크고 정해진 규격 등이 없어 연구자에 따라 다르게 제작·사용하고 있으므로 장치가 복잡하고 설치가 비교적 어렵지만 미국 EPA의 dynamic flux chamber를 이용하고 있다. 챔버는 미국 EPA의 지침을 따라 제작된 것이나 전체 재질은 스테인리스 스틸로 구성하고 여기에 비활성의 테플론으로 코팅하여 반응성이 강한 성분에 대해서도 적용할 수 있도록 하였다.

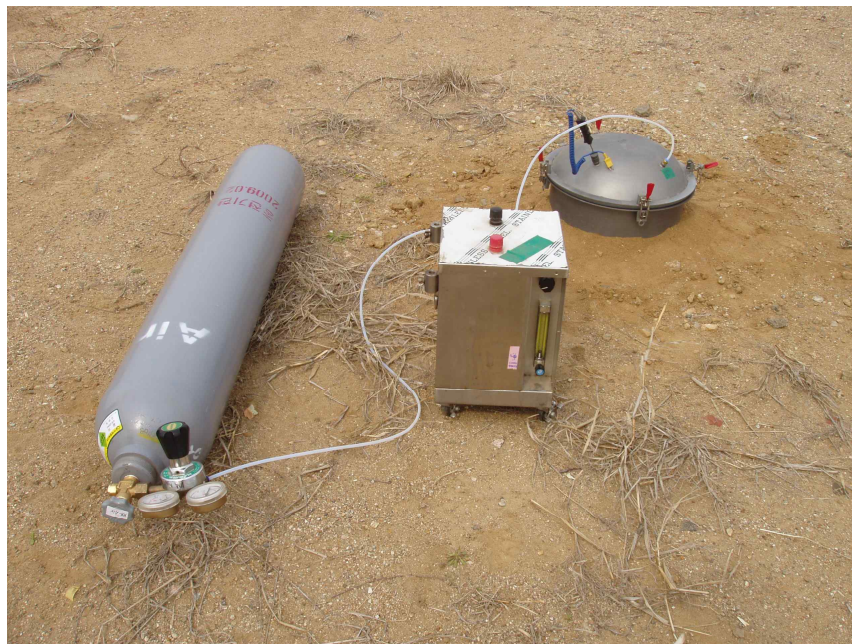
다음 그림 3-1은 dynamic flux chamber의 구성도이다. 챔버는 챔버 본체와 함께 운반가스(carrier gas) 유입부, 시료채취부 등으로 구분된다. 챔버의 용량은 30 L이며, 하부원통으로 둘러싸인 바닥면적은 0.130 m^2 이다. 운반가스 유입부는 가스가 골고루 유입될 수 있도록 하부원통 상단부 안쪽 둘레에 일정간격으로 구멍을 뚫은 스테인리스 스틸 관으로 이루어졌으며, 시료채취부는 챔버 내부까지 삽입된 유공성 관으로 되어 있다.



[그림 3-1] 매립가스 표면발산량 조사를 위한 dynamic flux chamber 구성도

그림 3-2에는 매립지 현장에서 매립가스 표면발산량을 실제로 측정하기 위하여 dynamic flux chamber를 설치한 모습을 보여주고 있다. 지표면의 풀이나 큰 자갈 등은 제거하고 하부원통이 지표면으로 2~3 cm 깊이만큼 들어가도록 설치한 후, 하부원통 바깥쪽에 주변흙을 쌓고 다져서 지표면과 하부원통 간의 경계면을 통한 가스의 출입이 최소화되도록 한다.

2005년도 매립가스 현장 모니터링시에는 대기와 유사한 질량으로 비활성 기체인 아르곤(Ar)을 운반가스로 사용하였으나 챔버 내부를 대기와 유사한 조건으로 조성하기 위하여 공기(air)를 운반가스로 하였고 그 유입속도는 5 L/min으로 하였다. 미국 EPA의 지침에서는 운반가스와 발산가스가 혼합되어 충분히 안정화되는 시점인 챔버용적을 4회 채우는 데 걸리는 시간(6분×4회=24분)이 지난 후에 시료를 채취하도록 제안하고 있으나, 선행 연구(수도권매립지관리공사, 2005a)에서는 30분 이후에 챔버 내부의 가스농도가 안정화되는 것으로 확인되어 챔버에서 배출되는 가스시료는 챔버설치 후 30분이 경과한 이후에 채취하도록 하였다.



[그림 3-2] 챔버(dynamic flux chamber)를 이용한 매립가스 표면발산량 측정

가스시료 중의 성분별 농도는 메탄화장치-가스크로마토그래프/불꽃이온화 검출기(Methanizer-GC/FID)를 이용하여 분석한다(분석조건은 표 3-1 참조). 그 분석결과는 그림 3-3으로 지도에 표시한다.

[표 3-1] 메탄 및 이산화탄소 농도 분석 조건

분석장치	항 목	분 석 조 건
Methanizer (Donam Ins., Korea)	칼 럼	10cm×1/8inch S.S., Nickel powder + Glass wool
	가스유량	H ₂ : 30mL/min
	온 도	360℃
GC/FID (GC-9A, SHIMADZU, Japan)	칼 럼	2m×3mm S.S., Porapak Q(80/100 mesh)
	검 출 기	불꽃이온화검출기(Flame Ionization Detector)
	운반가스	N ₂ : 30mL/min
	주입부/검출기 온도	130℃
	칼럼온도	60℃(등온조건)



[그림3-3] 표면발산량 측정지점과 분석결과

3-2. 관측자료 처리

가스 중 메탄과 이산화탄소의 분석결과를 이용하여 각 성분의 표면발산량 (L/m²/hr)은 다음과 같이 구할 수 있으며, 여기서 매립가스의 표면발산량은 0℃, 1기압 혹은 25℃, 1기압으로 보정하여 비교한다.

$$E_i = C_i \times 10^{-6} \times \frac{Q}{A} \times 60 \times \frac{298}{T+273} \times \frac{P}{1013} \quad (3-1)$$

여기서, E_i : i 성분의 표면발산량(L/m²/hr)

C_i : 가스시료 중 i 성분의 농도(ppmv)

Q : 운반가스 유입량(5L/min)

A : 챔버로 덮인 표면적(0.130m²)

T : 챔버 내 가스온도(℃)

P : 대기압(mbar)

i : CH₄ 또는 CO₂

3-3. 표면발산량 측정결과 및 온실가스 발생량 분석 결과

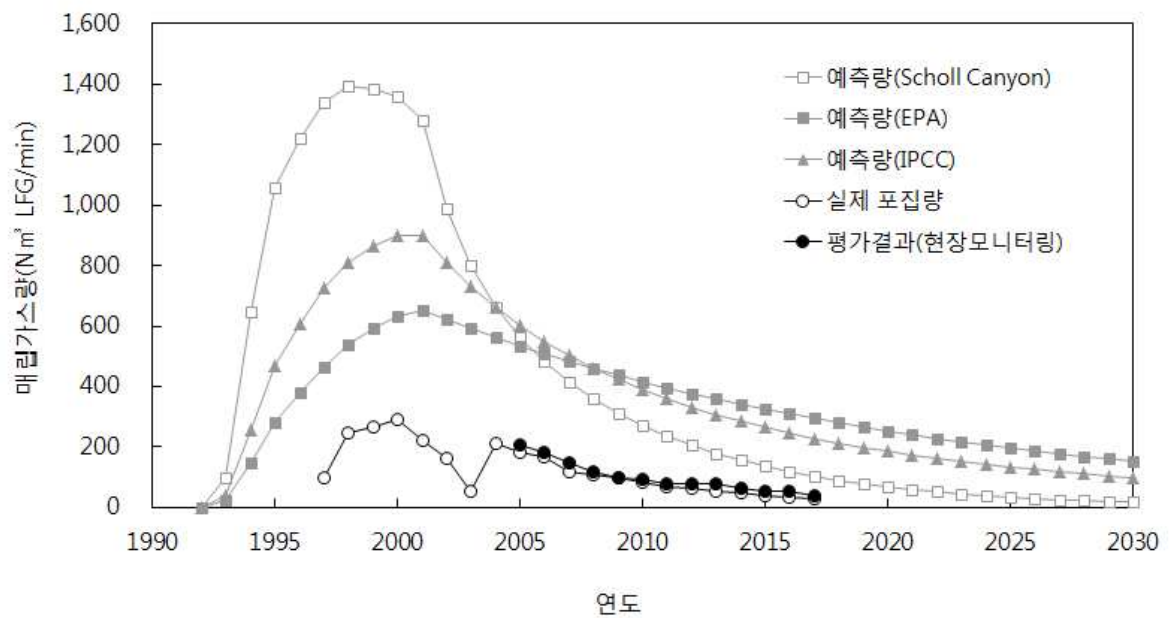
온실가스 발생량을 산정하는 모델은 국내 산정지침 뿐만 아니라 Scholl Canyon 모델, EPA 모델 등 가정사항과 고려사항에 따라 다양함 모델이 제시되고 있다. 모델별 매립가스 발생량과 실측결과를 비교하기 위하여 L_0 와 k 값은 표 3-2를 사용하였다. 여기서, L_0 는 공사 자체 실험결과 값이며, k 값은 기존 모델에서 제시된 값을 적용하였다. 즉, 분해정도에 따라 폐기물 조성별 반감기를 가정한 Scholl Canyon model(수도권매립지관리공사, 2004b)의 값과 미국 EPA의 LandGEM(US EPA, 2005)에서 제시한 CAA Conventional 메탄 발생속도상수인 0.05yr^{-1} , IPCC 가이드라인(IPCC, 2006)에서 제시한 분해정도에 따른 폐기물 조성별 반감기값을 사용하였다.

[표 3-2] 매립가스 발생량 예측을 위한 폐기물 L_0 및 반감기

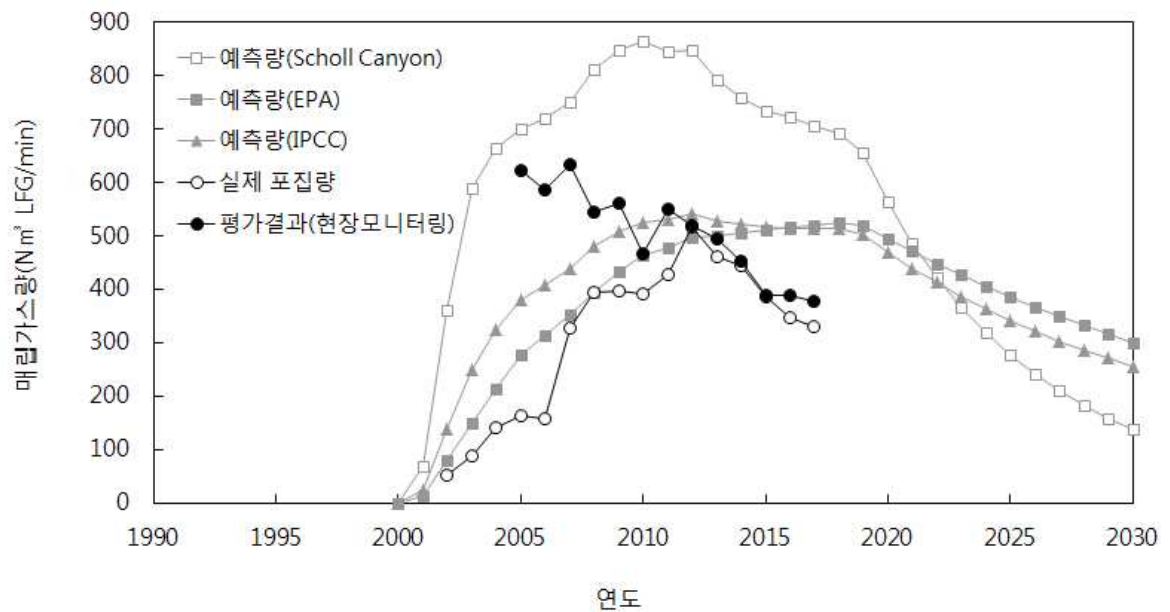
구 분		음식물	종이	목재	슬러지	기타가연	비 고
L_0	Scholl Canyon model	419.9	284.9	213.1	153.8	295.4	자체 실험값
반감기	Scholl Canyon model	1	5	5	5	5	슬러지와 기타 가연의 경우, 중분해성폐기물의 반감기값 적용
	IPCC 2006 Guideline	4	12	23	4	7	

* 섬유류는 기타가연에 포함하고, 난분해성인 플라스틱류와 물리적조성비율이 낮은 고무가죽류는 가스 발생도가 낮은 것으로 판단하여 제외함

각 모델에 따른 온실가스 발생량을 산정하고, 제2장과 제3장에서 소개한 방법으로 매립가스 발생량을 10여년 이상 직접측정한 결과를 비교하면 실제 발생량과 모델로 예측한 값의 차이가 상당함을 알 수 있다. 이러한 차이는 L_0 의 값에 대한 불확도(한차례 실험결과 값 사용, 폐기물 세부항목 미분류 등) 및 k 에 대한 불확도(매립장 내부 환경조건 및 실험과 현장의 괴리 등) 등으로 다양한 영향 요인이 있기 때문이다. 여기서 k 에 대한 불확도가 가장 크기 때문에 L_0 에 대한 일부 불확도를 가감하고 k 를 변경하는 방법으로 보정을 하는 것이 현실적인 방법으로 판단된다.



[그림 3-4] 제1매립장 매립가스 발생량 산정 및 실제 측정결과 비교



[그림 3-5] 제2매립장 매립가스 발생량 산정 및 실제 측정결과 비교

4. 에디공분산법을 이용한 표면발산량 현장 모니터링

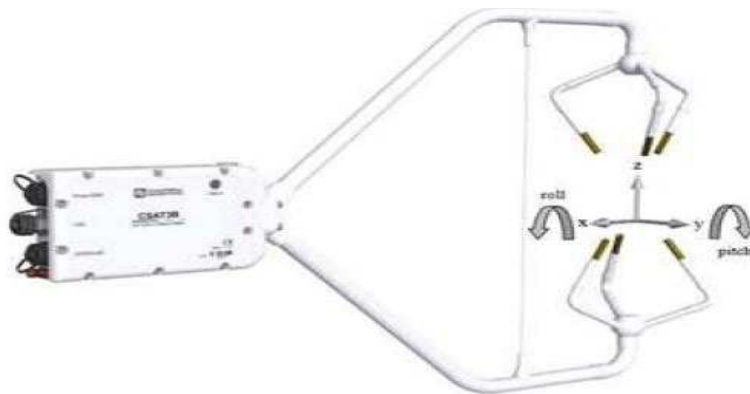
4-1. 에디공분산법 측정방법

에디 공분산(eddy covariance) 기술은 초음파 풍향-풍속-온도계와 함께 고속(예, 10 Hz)으로 연직 난류 수송을 직접 관측함으로써 지면과 대기간의 에너지와 물질의 수송을 정량적으로 감시하는 방법이며, 대상 생태계를 손상시키지 않고 에너지, 물, 탄소 순환에 관한 중요한 정보들을 얻을 수 있다.

에디 공분산 기술로 메탄/이산화탄소 플럭스를 관측하기 위해서는 고속으로 연직풍속과 메탄/이산화탄소 농도를 관측해야 한다. 이를 위해 사용되는 장비는 초음파 풍향-풍속-온도계와 적외선 기체분석기이다.

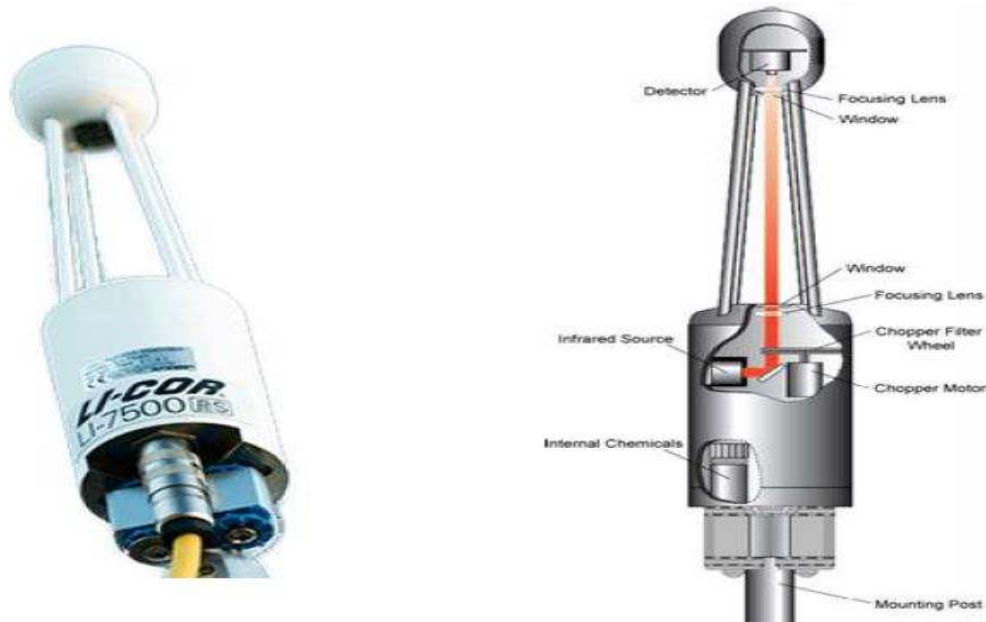
수도권매립지는 먼지가 많은 특성상 개회로 분석기를 적용하였다. 자세한 장치설명은 다음과 같다.

초음파 풍향-풍속-온도계는 변환기(transducer)로부터 방출되는 일련의 초음파 신호를 사용하여 공기 중의 음속을 측정하는 기기이다. 수도권매립지에 설치된 3차원 초음파 풍향풍속계는 트랜스듀서 3쌍이 위아래로 마주보는 형태이며 각각의 트랜스듀서에서 음파를 발생하고 서로간의 도달시간을 계산하여 3차원 풍속을 측정한다.



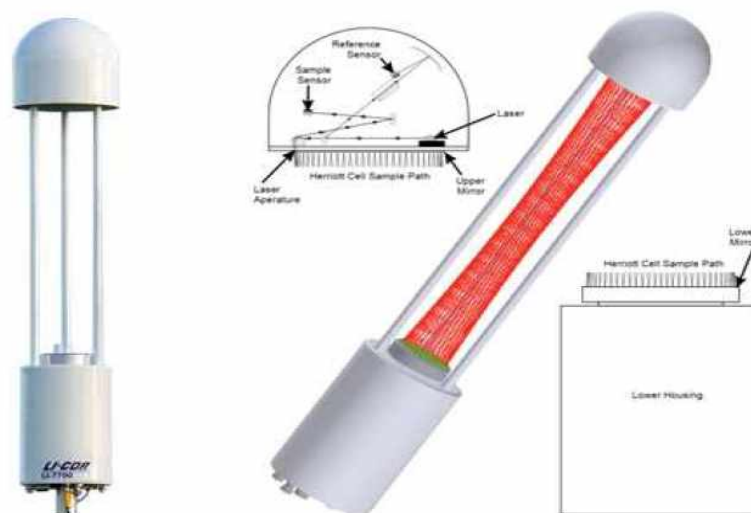
[그림 4-1] 3차원 초음파 풍향풍속계

이산화탄소 농도를 측정하는 적외선 기체분석기는 전자기장 스펙트럼의 적외선 영역의 복사 흡수 성질을 이용하여 농도를 측정한다. 수도권매립지에 설치된 CO₂/H₂O 기체분석기는 두 개의 렌즈가 마주보는 형태이며 한쪽에서 적외선을 발생하고 경로상의 CO₂/H₂O 입자가 해당하는 파장의 적외선을 흡수하여 감쇄된 양을 반대쪽에서 검출하는 방식이다.



[그림 4-2] CO₂/H₂O 기체분석기

메탄 농도는 대기 중에 존재하는 양이 이산화탄소보다 훨씬 적기 때문에 보다 정교한 방법으로서의 측정이 요구되는데, 대상 기체의 흡수선을 통과하면서 변하는 파장의 변화에 기반한 파장변조분광법을 이용한 메탄 농도 기체분석기가 널리 이용된다. 수도권매립지에 설치된 CH₄ 기체분석기는 두 개의 거울이 마주보는 형태이고 레이저를 발생하여 CH₄ 입자에 의한 파장변화를 감지하는 원리이다. CH₄는 앞선 CO₂/H₂O에 비해 굉장히 미미한 양이 대기 중에 존재하기 때문에 관측을 위해 센서의 크기가 훨씬 크고, 물리적 거리는 50 cm이지만 위아래 거울을 통해 광학거리를 30 m로 늘려 측정한다.



[그림 4-3] CH₄ 기체분석기

4-2. 관측장비 설치 및 유지관리

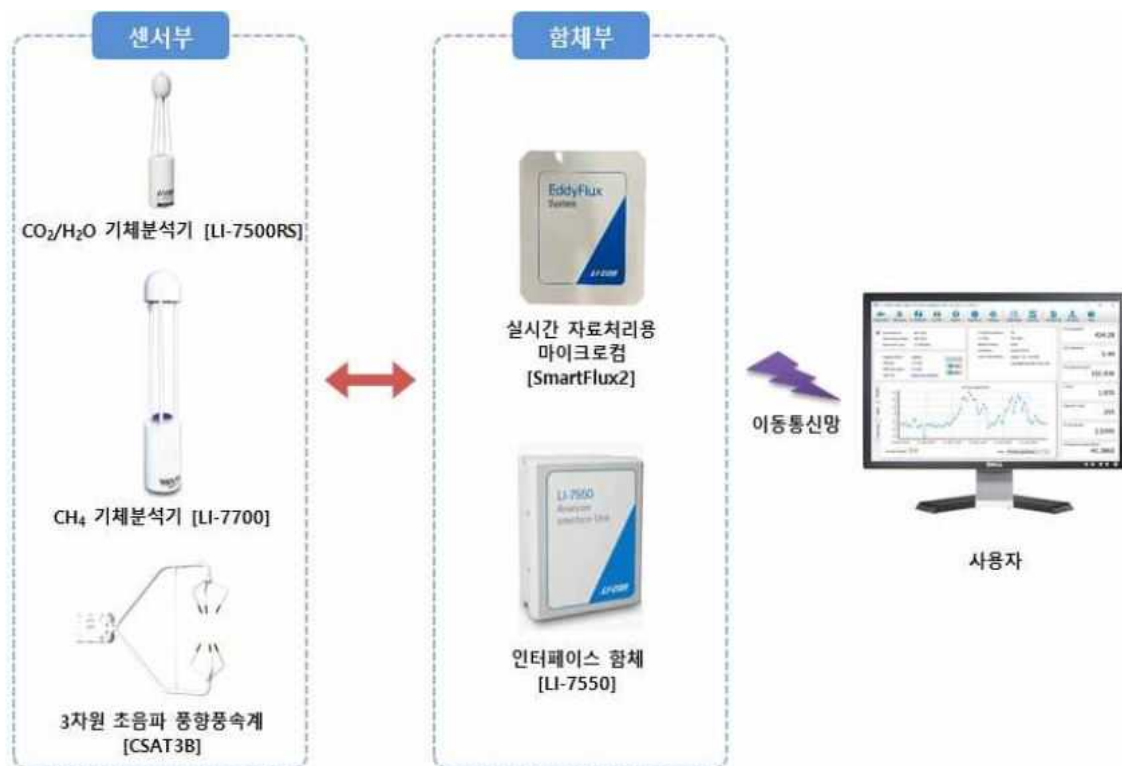
1) 관측장비 설치

수도권매립지 특성상 특수지역(공유수면)으로 분류되어 있어 타워설치 최대치인 6 m 높이로 타워를 설치했고, 플럭스 관측장비는 낙뢰를 고려해 약 5.5 m 높이에 설치하였다.



[그림 4-4] 유량 관측장비

총 3개의 관측장비가 함체로 연결되고 함체에 내장된 미니컴퓨터가 실시간으로 자료처리를 수행하고 저장할 수 있도록 구성하였다.



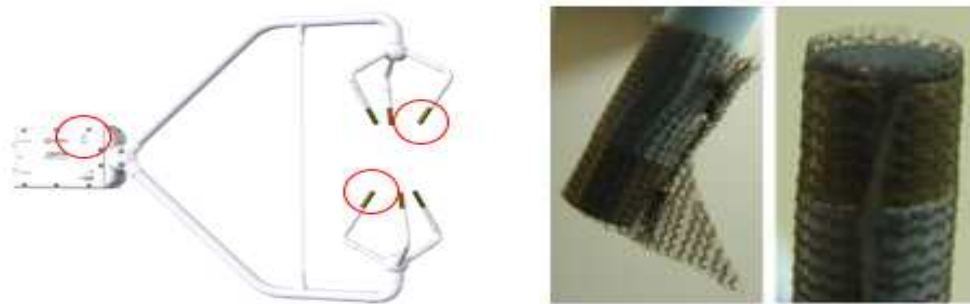
[그림 4-5] 관측장비 센서부, 함체부 및 모니터링

2) 관측장비 유지관리

LI-7500RS 개회로 CO₂/H₂O 기체분석기 관리 개회로 기체분석기(LI-7500 RS)는 렌즈의 청결도가 관측값에 많은 영향을 미치기 때문에 신호 강도 값인 CO₂ Signal Strength의 값이 90 이상을 유지할 것을 권장한다.

아래 그림은 강우로 인해서 관측부인 센서 렌즈에 물방울이 맺혀 신호 강도가 매우 떨어져 있는 상태(0에 가까워짐)일 때 관측자료의 품질이 낮아진다. 이 경우에는 마른 천이나 실험용 티슈를 이용해 렌즈(위·아래)를 닦아줘야 한다. 비가 내린 후, 물방울이 자연스레 마르면 신호 강도는 올라가게 된다. 렌즈에 이물질이 있어도 신호 강도에 영향을 미치는데 새똥이 묻어있다면 렌즈를 닦아 Signal Strength를 회복시켜 준다.

Wick이 손상되면 교체하고, 비행기 날개 모양(위)과 사각형(아래)으로 구분되어 각 위치에 맞는 wick을 사용한다.



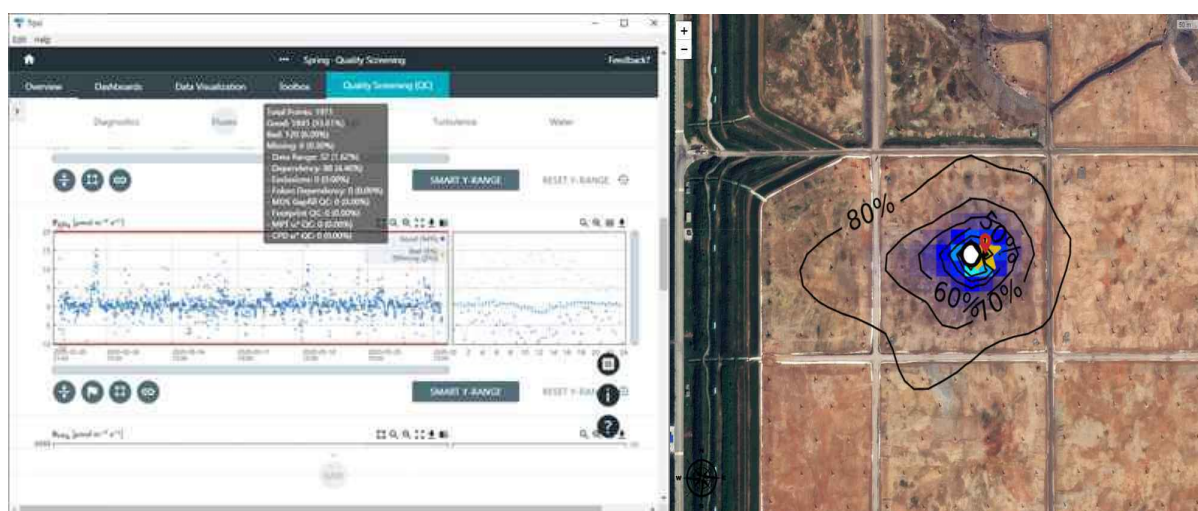
[그림 4-6] 3차원 초음파풍향풍속계와 위 wick(좌), 아래 wick(우)

4-3. 관측자료 처리

에디공분산 시스템에서 수집된 자료는 자동으로 '.ghg' 파일로 저장된다. 저장된 파일은 EddyPro® 소프트웨어를 통하여 보정을 거치게 되는데 기본적으로 사용하는 방법은 ① 추세제거, ② 시간지연보상, ③ 좌표변환, ④ 소닉 온도의 수증기 보정, ⑤ 주파수 반응보정, ⑥ 공기 밀도보정, ⑦ 분광보정이 있으며 이를 통한 통계적 분석으로 플럭스를 계산한다. EddyPro®은 상용 프로그램으로 초보자도 쉽게 사용할 수 있다.

EddyPro®로 처리된 플럭스는 Tovi™ 소프트웨어로 분석하게 된다. Tovi™ 소프트웨어는 품질이 좋지 않은 데이터를 필터링하고 특정 변수의 측정기간을 생략할 수 있으며, 결측 및 데이터 시각화, 시계열 그래프 등을 확인 할 수 있다. 품질이 낮은 값을 필터링 하는 방법은 ① 최대·최소값을 기준으로 제거하거나, ② EddyPro®가 제공하는 품질 플래그를 기반으로 제거하는 방법, ③ 마찰 속도가 너무 낮은 경우에 제거하고, ④ 관측 대상영역에서 발자국(Footprint)의 비율을 기반으로 제거하는 방법 등이 있다.

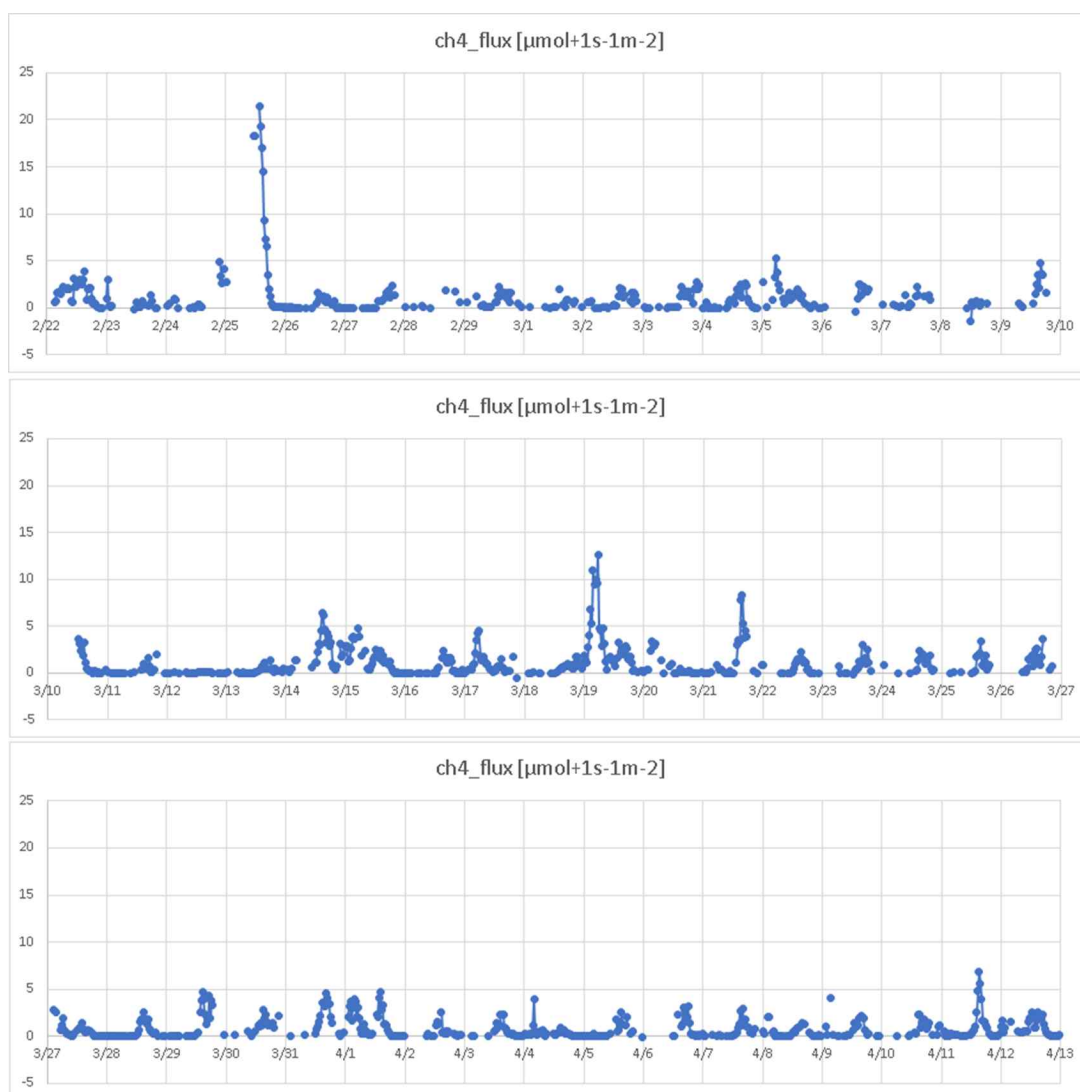
위 처리 과정을 거친 후 결과를 이용하여 발자국 영역을 분석할 수 있다. 발자국 영역 분석은 에디공분산으로 관측된 소스의 영역 위치 및 크기, 상대적 기여도 등을 시각화 할 수 있는 방법이다.



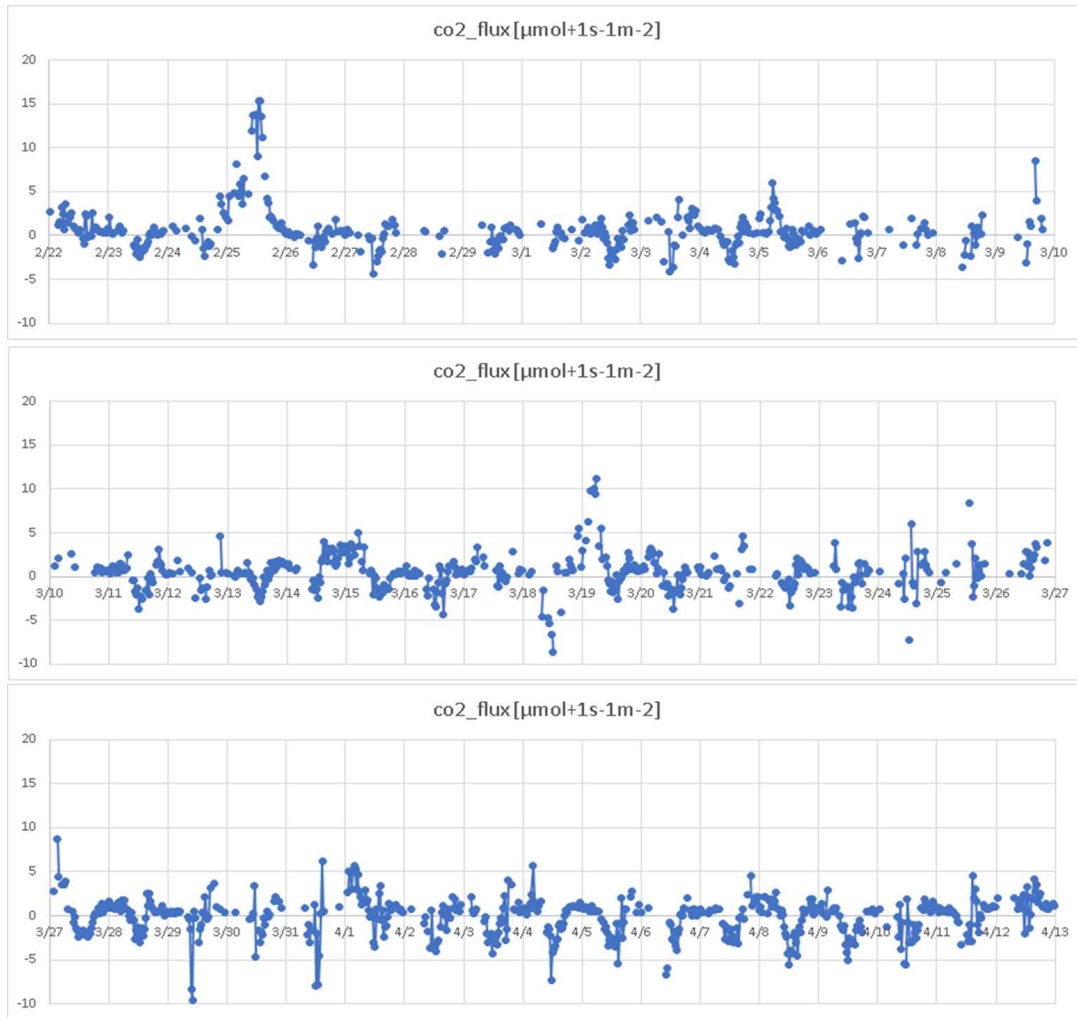
[그림 4-7] Tovi™ 소프트웨어를 이용한 자료처리(메탄플럭스, 발자국 영역)

4-4. 에디공분산법 수도권매립지 적용

에디공분산 기술을 이용하여 2월22일부터 4월12일까지 2매립장 일부지역의 표면발산량을 연속측정한 결과는 다음과 같다. 관측된 메탄 플럭스는 $0 \sim 21.4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었으며, 평균은 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었다(그림 4-8). 오전 보다는 오후에 주로 방출되고 있음을 확인할 수 있다. 같은 기간 이산화탄소 플럭스는 $-9.6 \sim 15.3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었으며, 평균은 $0.3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었다(그림 4-9). 여기서 이산화탄소는 식물의 광합성 및 호흡이 포함된 값으로 보정이 이루어져야한다.

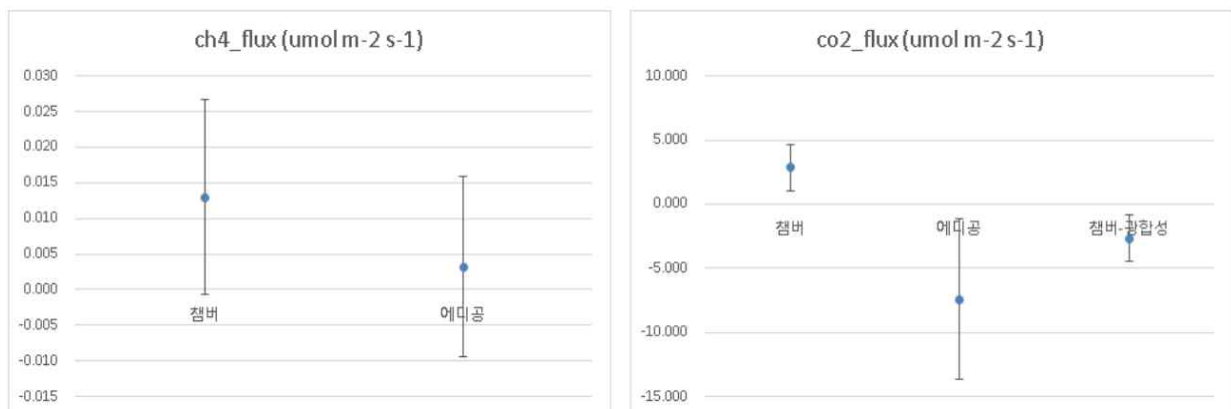


[그림 4-8] 전반기 동안 제2매립장에서 관측된 메탄 플럭스 시계열



[그림 4-9] 전반기 동안 제2매립장에서 관측된 이산화탄소 플럭스 시계열

챔버와 에디공분산 기술을 이용하여 같은 시간 배출량을 측정한 결과, 메탄은 오차범위 내에 유사하게 측정되었다. 이산화탄소는 차이가 있었으나 광합성량을 추정하여 보정한 결과 오차범위 내에 유사하게 측정되었다.



[그림 4-10] 2020년 5월 28일 챔버법과 에디공분산법으로 동시에 측정한 결과

본 기술을 적용 후 결과를 인정받기 위한 방법은 현재 마련되어 있지 않다. 현재 연속측정방법의 배출량 산정방법 및 측정기기의 설치·관리 기준에는 굴뚝연속자동측정기에 의한 CO₂ 배출량 산정방법만 다루어지고 있다. 따라서 매립지에 적용시 이 기준에 따라 관련 측정기기를 설치하고 운영함으로써 측정한 데이터를 확보하고 직접측정을 인정받는 지침과 방법론을 마련하여야 한다.

부록 1. 수도권매립지 반입폐기물 연도별 성상조사 결과

□ 연도별 생활폐기물 물리적 조성

(단위 : %)

연 도	가 연 성								불 연 성			
	계	음식 물	종 이	플라스 틱	목 재	고무가죽	섬 유	기 타	계	유리·자기	금 속	기 타
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	92.8	32.3	31.4	24.9	1.0	-	3.1	0.1	7.2	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
2005	96.7	12.0	38.1	39.4	2.0	-	5.2	-	3.3	2.2	1.1	-
2006	94.7	10.2	39.0	31.6	2.9	-	6.9	4.1	5.3	2.7	1.7	0.9
2007	93.8	11.3	41.0	27.7	2.2	-	6.6	5.0	6.2	2.8	2.2	1.2
2008	94.7	10.0	48.6	24.1	1.6	-	4.6	5.8	5.3	2.1	1.3	1.9
2009	90.0	11.4	45.8	22.3	1.4	-	3.9	5.2	10.0	2.1	1.8	6.1
2010	92.8	12.6	40.1	23.7	1.0	-	4.9	10.5	7.2	3.4	1.1	2.7
2011	92.9	8.8	44.9	24.1	0.7	-	4.6	9.8	7.1	2.9	1.1	3.1
2012	92.9	10.3	44.0	23.9	0.7	-	4.7	9.3	7.1	2.5	1.5	3.1
2013	93.2	7.7	44.6	23.2	0.6	-	4.5	12.6	6.8	3.1	0.9	2.8
2014	94.2	8.1	43.8	26.7	0.6	-	5.2	9.7	5.8	2.4	1.6	1.8
2015	94.3	8.0	50.1	21.9	0.5	-	5.6	8.2	5.7	1.0	1.8	2.9
2016	93.3	7.9	43.5	25.1	0.8	-	4.0	12.0	6.7	2.2	1.5	3.0
2017	93.4	6.9	43.6	26.0	1.1	-	4.8	11.0	6.6	1.4	1.5	3.7
2018	94.0	6.8	44.8	25.9	0.9	1.3	6.9	7.4	6.0	1.4	1.5	3.1
2019	91.1	9.7	35.3	26.4	0.8	1.4	3.7	13.8	8.9	1.6	1.2	6.1

* 주 : 1999년 이후 반입된 생활계폐기물에 대한 조사결과임, 2002년부터 2017년까지 기타가연분에 고무·가죽류 포함

□ 연도별 건설폐기물 물리적 조성

(단위 : %)

연 도	가 연 성						불 연 성				
	계	목 재	플라스틱	종 이	섬 유	기 타	계	토 사	벽 돌	금 속	유리 ·자기
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
2005	42.4	27.3	11.9	1.9	1.2	0.1	57.6	39.3	15.4	1.8	1.1
2006	45.1	27.6	13.8	1.9	1.7	0.1	54.9	30.1	21.9	1.6	1.3
2007	41.0	26.8	10.0	2.8	1.3	0.1	59.0	32.7	23.2	1.7	1.3
2008	49.1	33.3	11.7	2.9	0.9	0.3	50.9	27.0	20.3	1.7	2.0
2009	47.3	34.7	7.4	4.1	0.7	0.4	52.7	24.6	24.3	1.3	2.5
2010	36.9	21.6	10.6	3.6	1.1	-	63.1	26.2	33.5	1.7	1.7
2011	44.5	32.0	9.6	2.0	0.7	0.2	55.5	25.1	26.6	1.3	2.5
2012	48.8	29.4	13.9	4.9	0.6	-	51.2	21.8	26.4	1.3	1.7
2013	46.8	29.3	13.0	3.7	0.7	0.1	53.2	20.2	29.2	1.4	2.4
2014	50.5	28.8	16.8	3.9	0.9	0.1	49.5	20.0	26.6	1.2	1.7
2015	40.6	24.2	11.5	4.2	0.6	0.1	59.4	35.1	20.5	1.4	2.4
2016	40.6	19.1	16.4	4.1	1.0	-	59.4	30.0	25.6	2.0	1.9
2017	41.6	23.7	13.5	3.6	0.8	-	58.4	23.2	30.2	2.8	2.2
2018	43.3	24.0	11.8	6.5	0.9	0.1	56.7	23.0	29.2	2.7	1.8
2019	34.8	12.4	14.4	6.7	1.1	0.2	65.2	34.2	24.9	2.7	3.4

* 주 : 2002년 이후 반입된 건설폐기물에 대한 조사결과임

□ 연도별 생활폐기물 성상

연도	겉보기밀도 (kg/m ³)	삼성분(%)			발열량(kcal/kg)		원소조성(%)				
		수분	가연분	회분	고위	저위	탄소	수소	산소	질소	황
2002	208	36.1	58.1	5.8	4,192	3,569	55.8	7.7	26.7	1.7	0.1
2003	239	24.2	65.3	10.5	4,378	3,815	50.9	7.4	32.9	1.0	0.1
2004	107	14.5	75.4	10.1	7,160	6,606	56.7	8.7	25.4	0.7	0.0
2005	127	21.3	64.1	14.6	4,467	3,940	52.5	7.4	32.0	1.2	0.1
2006	131	24.2	62.2	13.6	5,049	4,604	52.1	6.3	29.9	1.3	0.0
2007	135	20.0	73.4	6.7	4,574	4,041	53.4	7.6	28.7	0.9	0.0
2008	153	20.7	69.3	10.0	4,258	3,761	49.9	7.3	30.1	1.3	0.0
2009	171	21.6	68.0	10.4	4,003	3,528	49.2	6.7	30.0	0.8	0.0
2010	172	22.8	64.1	13.1	3,923	3,855	47.1	6.4	27.5	0.8	0.0
2011	190	22.2	64.3	13.5	4,290	3,823	49.2	6.3	32.6	0.9	0.0
2012	186	20.7	65.2	14.1	4,259	3,756	50.4	7.3	31.2	0.9	0.0
2013	178	23.1	66.7	10.2	4,118	3,564	51.2	7.4	28.2	0.7	0.0
2014	166	20.2	69.6	10.2	4,533	3,964	50.7	8.3	31.2	1.3	0.0
2015	150	17.3	72.9	9.8	4,322	3,863	48.1	6.6	33.2	1.0	0.0
2016	156	20.3	70.1	9.6	4,429	3,899	52.4	7.6	32.7	1.1	0.0
2017	130	19.2	71.8	9.0	4,152	3,622	54.6	7.9	30.4	0.8	0.0
2018	156	16.3	68.9	14.8	4,331	3,884	47.7	6.4	25.0	0.6	0.1
2019	167	23.3	69.9	7.8	4,489	3,935	53.2	7.8	28.4	0.9	0.1

* 주 : 2002년부터 반입된 생활폐기물에 대한 조사결과임

* 주 : 삼성분, 발열량, 원소조성은 가연성 생활폐기물에 대한 조사결과임

□ 연도별 건설폐기물 성상

연도	겉보기밀도 (kg/m ³)	삼성분(%)			발열량(kcal/kg)		원소조성(%)				
		수분	가연분	회분	고위	저위	탄소	수소	산소	질소	황
2013	472	19.4	46.3	34.3	3,824	3,357	36.4	5.1	26.3	0.9	2.7
2014	457	19.7	48.7	31.6	3,819	3,298	38.9	5.6	25.3	0.6	1.0
2015	456	19.5	31.6	32.6	4,258	3,766	50.3	6.9	36.5	0.8	0.1
2016	471	16.8	66.1	17.1	4,650	4,136	51.6	7.7	31.7	1.0	0.8
2017	499	19.2	63.6	17.2	4,362	3,847	49.4	6.9	34.9	1.1	0.8
2018	346	13.4	68.2	18.4	4,501	4,230	49.3	7.2	24.1	0.5	0.9
2019	591	15.1	67.6	17.4	4,535	4,066	50.3	7.0	29.1	0.8	1.4

* 주 : 2013년부터 반입된 건설폐기물에 대한 조사결과임

* 주 : 삼성분, 발열량, 원소조성은 가연성 건설폐기물에 대한 조사결과임

부록 2. 수도권매립지 온실가스 배출경로별 모니터링 결과

구 분		강제포집(A)		가스배제공(B)		표면발산(C)		발생량(A+B+C)	
		Nm³/분	%	Nm³/분	%	Nm³/분	%	Nm³/분	%
제1매립장	2006년	161.1	89.2	5.3	2.9	14.3	7.9	180.7	100.0
	2007년	130.0	86.8	4.0	2.6	15.8	10.6	149.8	100.0
	2008년	103.1	85.7	0.0	0.0	17.3	14.3	120.4	100.0
	2009년	89.2	91.7	0.0	0.0	8.1	8.3	97.3	100.0
	2010년	81.4	85.6	0.0	0.0	13.7	14.4	95.0	100.0
	2011년	66.0	85.7	0.0	0.0	11.0	14.3	76.9	100.0
	2012년	61.8	80.5	0.0	0.0	15.0	19.5	76.8	100.0
	2013년	53.4	69.5	0.0	0.0	23.5	30.5	76.9	100.0
	2014년	50.1	79.3	0.0	0.0	13.1	20.7	63.3	100.0
	2015년	38.2	72.8	0.0	0.0	14.3	27.2	52.5	100.0
	2016년	31.9	60.6	0.0	0.0	20.8	39.4	52.7	100.0
	2017년	24.7	64.1	0.0	0.0	13.8	35.9	38.5	100.0
	2018년	23.3	60.2	0.0	0.0	15.4	39.8	38.7	100.0
	2019년	22.6	59.3	0.0	0.0	15.5	40.7	38.1	100.0
	1차	25.3	66.2	0.0	0.0	13.0	33.8	38.3	100.0
	2차	21.0	49.0	0.0	0.0	21.9	51.0	43.0	100.0
	3차	22.1	62.3	0.0	0.0	13.4	37.7	35.4	100.0
	4차	22.0	61.4	0.0	0.0	13.8	38.6	35.8	100.0
제2매립장	2006년	185.7	31.7	154.3	26.3	245.6	41.9	585.5	100.0
	2007년	399.2	63.1	75.2	11.9	158.6	25.1	633.0	100.0
	2008년	402.2	73.9	0.0	0.0	142.1	26.1	544.3	100.0
	2009년	398.2	70.8	0.0	0.0	164.5	29.2	562.7	100.0
	2010년	389.1	83.5	0.0	0.0	76.6	16.5	465.7	100.0
	2011년	456.7	82.8	4.0	0.7	90.7	16.4	551.4	100.0
	2012년	495.7	95.3	8.1	1.6	16.5	3.2	520.3	100.0
	2013년	463.6	93.6	0.8	0.2	31.1	6.3	495.5	100.0
	2014년	432.4	95.5	3.7	0.8	16.5	3.6	452.6	100.0
	2015년	369.9	94.9	0.7	0.2	19.4	5.0	390.0	100.0
	2016년	348.7	89.4	7.8	2.0	33.6	8.6	390.1	100.0
	2017년	329.2	87.3	4.9	1.3	43.0	11.4	377.1	100.0
	2018년	323.5	90.0	6.7	1.8	29.3	8.2	359.5	100.0
	2019년	303.9	93.4	3.2	1.0	18.3	5.6	325.4	100.0
	1차	318.3	91.8	3.0	0.9	25.6	7.4	346.8	100.0
	2차	311.0	92.7	3.3	1.0	21.2	6.3	335.4	100.0
	3차	298.0	95.6	2.8	0.9	11.0	3.5	311.8	100.0
	4차	288.5	93.9	3.6	1.2	15.3	5.0	307.4	100.0
제3매립장	2019년	0.0	0.0	5.4	20.8	20.5	79.2	25.9	100.0
	1차	-	-	-	-	-	-	-	-
	2차	0.0	0.0	4.9	21.5	17.8	78.5	22.7	100.0
	3차	0.0	0.0	5.3	19.6	21.8	80.4	27.1	100.0
	4차	0.0	0.0	6.0	21.3	22.1	78.7	28.0	100.0

※ 배출기여도(%)는 배출경로별 매립가스 배출량의 연도별 4계절 평균값(Nm³/분)으로부터 산정

※ 강제포집량은 조사기간 중 포집량(메탄 및 이산화탄소 포집량)의 산술평균값임

부록 3. 매립시설 온실가스 배출량 직접측정시스템 고도화 계획(안)

- (배경) 온실가스 배출량 산정지침 상 매립시설은 복토층 두께, 재질, 성능 등과 무관하게 기본값을 사용함으로써 배출량이 과다 산정
- (목적) 매립시설 온실가스 배출량 직접측정 결과 신뢰도 확보 및 배출계수(Tier2~Tier4) 개발·대응을 통한 배출량 현실화 추진
- (추진내용)
 - 에디공분산기술 정확도 및 신뢰도 향상을 위한 분석장비 설치
 - 직접측정(에디공분산법) 데이터 신뢰성 확보 연구(기존 챔버법 비교분석)
 - 국가배출계수(Tier2) 개발 지원·대응을 위한 자료조사 및 데이터 분석
- (추진기간) 2021. 1. ~ 2024. 12.

