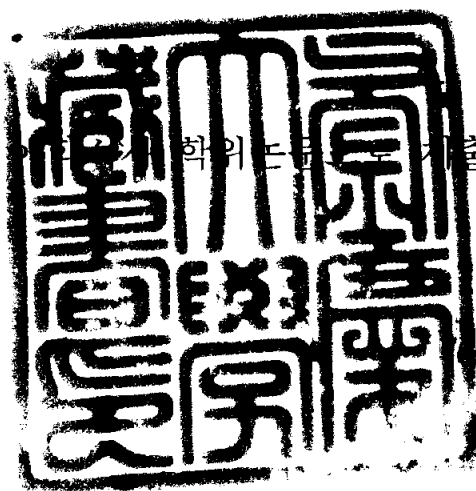


이학석사 학위논문

매립지에서 배출되는 온실가스의 배출통계 구축에 관한 연구

지도교수 옥 곤

이 논문을 학위논문으로 제출함.



2004년 8월

부경대학교 산업대학원

지구환경과학과

정 동 희

정동희의 이학석사 학위논문을 인준함.

2004년 8월 31일

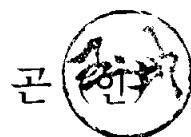
주 심 이학박사 김 영 섭



위 원 공학박사 정 용 현



위 원 공학박사 옥



목 차

목 차	i
List of Tables	iv
List of Figures	v
Abbreviation	v
 Abstract	 1
 1. 서 론	 4
1.1 연구배경	4
1.2 연구목적	6
 2. 이론적 고찰	 7
2.1 매립지에서의 반응단계	7
2.1.1 초기 조정단계	7
2.1.2 전이단계	8
2.1.3 산 형성단계	9
2.1.4 메탄발효단계	9
2.1.5 숙성단계	10
2.2 매립가스의 종류	10
2.3 매립가스 포집 및 회수기술	14
2.3.1 매립가스 추출정	16

2.3.2 LFG 이송설비	18
2.3.3 응축수 포집 및 처리	18
2.4. 온실가스 산출방법	19
2.4.1 Tier 1 : 기본방법	20
2.4.2 Tier 2 : FOD 방법	26
2.4.3 산정방법의 선정	33
2.5 온실가스 배출량 산정의 불확실성	34
2.5.1 Tier 1 : 기본방법	34
2.5.2 Tier 2 : FOD 방법	34
 3. 실험방법	 35
3.1 연구대상 시설 및 측정지점	35
3.1.1 연구대상시설	35
3.1.2 시료선정 및 시료채취 지점	36
3.2. 현장조사	38
3.2.1 배제공에서의 메탄가스 발생량 조사	38
3.2.2 표면에서의 메탄가스 발산량 조사	40
3.2.3 매립대상 폐기물 성상조사	43
 4. 결과 및 고찰	 45
4.1 연구대상 매립장의 폐기물 이력	45
4.1.1 일반 이력사항	45
4.1.2 폐기물 매립량	45
4.1.3 매립 폐기물 성상 조사결과	46
4.2 메탄가스 발생량 현장조사결과	47

4.2.1 배제공에서의 메탄가스 배출량	47
4.2.2 매립지 표면에서 발산되는 메탄 발산량	52
4.2.3 연구대상 매립지 발생 메탄가스 발생량	53
4.3 매립지 온실가스 배출량 산정방법별 배출통계 비교	53
4.3.1 Tier 1에 의한 메탄가스 배출량 산정	55
4.3.2 Tier 2에 의한 메탄가스 배출량 산정	59
4.3.3 온실가스 배출량 산정방법별 배출통계 비교	61
 5. 결 론	 63
 참고문헌	 65
 감사의 글	 69

List of Tables

Table 2-1. The substance of LFG generated in MSW landfill site	11
Table 2-2. The substance & conc. of oxygen-compounds in LFG	12
Table 2-3. The substance & conc. of Sulphur-compounds in LFG	12
Table 2-4. The substance & conc. of Aromatic hydrocarbon-compounds in LFG	13
Table 2-5. The substance & conc. of Chlorinated hydrocarbon-compounds in LFG	14
Table 3-1. Status of landfill for research	35
Table 3-2. Measurement outline of landfill for research	36
Table 3-3. Specification of Chamber	40
Table 3-4. Operative condition of GC for methane analysis	42
Table 4-1. Yearly waste disposed volume in Ulsan landfill site	46
Table 4-2. Physical composition of waste disposed	46
Table 4-3. 3 components and elementary analysis of waste disposed	47
Table 4-4. Concentration and flowrate of CH ₄ from extraction well(1st)	48
Table 4-5. Concentration and flowrate of CH ₄ from extraction well(2nd)	49
Table 4-6. Concentration and flowrate of CH ₄ from extraction well(3rd)	50
Table 4-7. Concentration and flowrate of CH ₄ from extraction well(4th)	51
Table 4-8. CH ₄ surface emissions rate at landfill for research	52
Table 4-9. GHG emissions at landfill for research	53
Table 4-10. Yearly CH ₄ emissions and factors using Tier 1	58
Table 4-11. Yearly CH ₄ emissions and expectations using Tier 2	60

List of Figures

Fig. 2-1. LFG collection system using vertical well	17
Fig. 2-2. Decision tree for CH ₄ emissions from Solid Waste Disposal Site	33
Fig. 3-1. Sketch and spot measured of landfill for research	37
Fig. 3-2. Infrared Gas Analyzer	38
Fig. 3-3. Control of air inflow to the extraction well	38
Fig. 3-4. Hot wire anemometer	39
Fig. 3-5. Airtight Chamber for measurement	40
Fig. 3-6. Gas Chromatography	41
Fig. 3-7. Variation of CH ₄ conc. overtime in chamber	42
Fig. 4-1. Yearly CH ₄ emissions using Tier 1	58
Fig. 4-2. Yearly CH ₄ emissions and expectations using Tier 2	61

Abbreviation

LFG	: Landfill Gas	매립가스
GHG	: Greenhouse Gas	온실가스
ET	: Emission Trading	배출권거래제
TCE	: Ton of Carbon Equivalent	탄소환산톤
CDM	: Clean Development Mechanism	청정개발체제
COP	: Conference of the Parties	당사국총회
GWP	: Global Warming Potential	지구온난화지수
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change	기후변화에 관한 정부간협의회

The study on Developing GHG inventory for Landfill

Dong-hee Jung

*Department of Earth Environmental Sciences, Graduate School of
Industry, Pukyong National University
Busan 608-737, Korea*

Abstract

According to the Article 12 of UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change), all parties of the convention should present its National Communication containing the national Greenhouse Gas(GHG) inventory, its policy & measure status for reducing the GHG emission and so on, to the secretariat. In related to the submission of the national communication, an estimation of the GHG emission in each category is the most crucial section and its accuracy is very important, because it is not only directly related to the national economic as a trade barriers but also reviewed for evaluating a

national commitment as defined on Kyoto Protocol.

It is known that a landfill is a major GHG emitter in waste category, and also has a great potential for reducing GHG emission. To estimate the GHG emission generating in landfill, it is firstly required to implement the basic surveys as like the waste composition, GHG concentration and amount of the LFG(landfill gas), and its variation trends. During the surveys, the basic data such as the component, amount and composition of the deposited wastes should be also collected. After collecting all data about the landfill, we can estimate the GHG emission by applying the collected data into IPCC methods which is internationally allowed.

The IPCC suggests two methods such as Tier 1 and Tier 2 which are classified by the national circumstances acquiring the data possibility. The goal of this research is to suggest the best practice to estimate GHG emission of landfill site by reviewing the process of the basic data collection and comparing the results of two methods of the IPCC guideline.

According to the site measurement, the CH₄ proportion of LFG is 46.68% and the amount of CH₄, as known a greenhouse gas, is 4,196.87 ton/yr, in which both are for yearly average base.

The maximum CH₄ amount of landfill based on the Tier 1 of IPCC guideline was 20,859 ton-CH₄/yr in FY1996, the minimum CH₄ amount was 5,584 ton-CH₄/yr in 2001, the yearly average CH₄ amount from FY1994 to FY2002 was 11,737±5,027 ton-CH₄/yr, and the total amount for same period was 105,635 ton-CH₄. However the

total CH₄ amount from FY1994 to FY2065 applied by the Tier 2 as known FOD(First Order Decay) is estimated to 64,174 ton-CH₄.

This basic research shows that the result of the Tier 1 is 1.65 times higher value than Tier 2. The main difference between two methods is that the Tier 2 produces a time-dependent emission profile that better reflects the true pattern of the degradation process over time, whereas Tier 1, as known the default method, is based on the assumption that all potential CH₄ is released in the year the waste is deposited. The default method is giving a reasonable annual estimate of actual emissions if the amount and composition of waste deposited have been constant or slowly varying over a period of several decades.

Therefore, the IPCC propose that it is good practice to use the FOD method, if possible, because it more accurately reflects the emissions trend over time. The use of the FOD method requires data on current, as well as historic waste quantities, composition and disposal practices for several decades.

Keywords : Green House Gas, Landfill, Inventory, Tier

1. 서 론

1.1 연구배경

홍수, 폭우, 폭설, 가뭄 등의 기상이변 현상이 자주 찾아오는 최근의 동향은 기후변화와 관계가 깊다. 이는 전지구 평균기온이 올라감에 따라 더 많은 수증기가 대기 중으로 유입되어 더욱 강력하고 집중적인 악기상을 초래하는 원인중의 하나로 지적되고 있다(UNFCCC/SBSTA/1999). 실제로도 이러한 수증기 유입이 빠르게 진행되고 있는데 미국과 유럽의 자료에 의하면 현재 대기 중 수증기 농도는 약 10~20% 정도 증가된 것으로 보고되고 있다(USEPA, 1999). 앞으로 지구온난화가 진행되면서 지구상 곳곳에 극심한 가뭄과 폭설, 폭우가 찾아오는 기상이변의 발생빈도는 증가할 것으로 예상되며, 이로 인한 기후변화는 더욱 뚜렷이 나타날 것으로 예상되고 있다. 특히 건조한 지역은 더욱 건조해져 사막 지역이 빠르게 확장하고 상습적인 수해지역은 물난리가 더욱 심해지는 양극화 현상이 심화될 것으로 지적되고 있다(Dlugokencky et al., 1994, Environment Agency of UK, 1999).

이러한 지구온난화를 유발하는 온실가스의 대표적인 성분으로는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 프레온류 등이 있으며, 각 성분의 대기중 농도는 산업화의 진행에 따라 지속적이고 현저한 증가 추세를 보이고 있다(SBSTA, 1999).

이에 따라 지구온난화에 따른 이상 기후현상을 예방하기 위한 목적으로 '92년 6월 브라질의 리우에서 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)을 채택하였다.

기후변화협약 제4조 1항 및 제12조의 규정에서는 협약상의 모든 국가는 온실가스의 감축노력을 객관적으로 평가받기 위해 온실가스 배출통계

량, 저감정책 및 향후 계획 등을 담은 국가보고서(National Communication)를 제출하도록 규정하고 있으며(UNFCCC, 1992), 기후변화협약상의 우리나라 현 지위가 개도국 신분인 non-Annex I 국가에서 선진국 신분으로 변화되어 온실가스 감축의무를 부담할 경우, 배출통계의 부정확한 산정은 무역장벽으로 작용하여 경제적 손실로 이어질 뿐만 아니라 국제적인 국가 지위에도 영향을 미치게 되므로 온실가스 배출량에 대한 통계 구축은 반드시 필요하다.

국내에서는 아직까지 온실가스 배출량 통계 구축과 관련된 전반적인 조사연구의 진행이 초보단계에 머물고 있으며, 특히 폐기물 분야의 경우 상대적으로 배출총량측면에서 큰 비중을 차지하지 않기 때문에 그 중요성이 간과되어 왔으나 다른 분야와는 달리 적은 비용으로 온실가스 저감 효과가 높기 때문에 효율성 측면에서 관심이 높다(환경부, 2000).

특히, 환경기초시설에서 배출되는 온실가스 관리 및 저감대책 수립 등과 관련된 업무가 환경부로 이관되면서 환경기초시설에서의 온실가스 배출량에 대한 통계자료의 신뢰성이 제고되기 시작했으며, 온실가스 배출량 측정 등을 통한 기초조사 연구 및 통계구축사업 등이 최근 활기를 띠기 시작하였다.

그중 매립부분은 환경부문 온실가스 배출량의 대부분을 차지하며 매립가스 자원화 사업 및 직접 소각법 등을 통하여 온실가스에 관련된 전반적인 연구가 최근에 이루어지기 시작하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

환경부 주관으로 2001~2002년도에 수행한 『환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축』 연구결과에 의하면 2000년도 환경기초시설에서 온실가스 배출총량은 4,242,869 TCE이고, 매립에 의해서는 2,793,489 TCE로서 전체의 65.8%, 하·폐수 처리과정에서는 323,473 TCE으로 7.6%에 해당되며, 소각부분은 1,125,907 TCE로 26.6%를 차지하는 것으로 보고되었다.

한편 메탄발생량 산정방법에 있어 IPCC에서는 일관성을 유지하기 위해 전 매립지에 대해 동일한 방법의 적용을 권고하고 있으며, IPCC에서

권장하는 Tier 2 방법을 적용하기 위해서는 매립지별 매립이력이 충실해야 하고 최소한의 추정이 가능해야 하나, 일부 매립지는 매립이력에 대한 정보가 Tier 2를 적용할 수 있을 정도로 충실한 검토와 자료확보가 이루어지지 못하고 있다. 따라서, 폐기물 매립량 및 조성, 매립지 현황 자료, 현장조사에 의한 추정인자 보완과 더불어 조사방법의 검증·표준화를 통해 적합한 조사방법을 선택하여 사용함으로써 매립지 온실가스 배출량 산정의 신뢰성 향상을 더욱 확보할 수 있도록 하는 것이 필요한 것으로 지적되고 있다.(Revised 1996 IPCC Guidelines, 1997)

1.2 연구목적

환경부문에서의 온실가스 주요 발생원이며, 저감 잠재력이 가장 높은 매립부문의 온실가스 배출량 통계구축의 필요성이 요구되고 있다. 이를 달성하기 위해 매립 폐기물의 성상조사, 매립지의 온실가스 배출농도 및 배출량, 변동 등을 파악하고, 기초 자료인 폐기물의 년도별 매립종류, 양 및 조성 등을 동시에 조사할 필요가 있다. 또한, 국제적으로 통용되고 있는 배출통계 방법인 Tier 1 및 Tier 2로 산정 비교함으로써 적정하고 신뢰성 있는 배출통계구축 방법을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

이러한 기초연구를 통해 매립부문 배출량 통계의 신뢰성 향상 및 산정값의 불확실성을 개선하여 국내 현실에 부합되는 배출량을 산정하기 위한 온실가스 배출통계 구축에 필요한 기초자료를 확보할 수 있는 기반을 구축할 수 있도록 하며, 검증 가능한 온실가스 배출통계를 포함한 국가 보고서 작성과 온실가스 저감 방안으로 제시된 교토메커니즘인 청정개발체제와 배출권거래제에서 활용할 수 있는 배출통계 구축 방안을 마련하고, 온실가스 배출량 산정 및 검증에 활용할 수 있게 하기 위함이다.

2. 이론적 고찰

매립이란 매립지에 폐기물을 처분하는 것을 이르며, 매립지란 토양에 폐기물을 처분하기 위하여 사용되는 물리적 시설을 의미한다. 매립된 폐기물은 물리·화학·생물학적인 반응을 통해 분해되면서 최종적으로 매립가스(Landfill Gas : 이하 LFG)와 침출수로 전환된다.

2.1 매립지에서의 반응단계

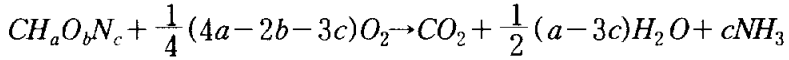
매립된 폐기물은 물리·화학·생물학적인 반응을 통해 분해되면서 최종적으로 매립가스와 침출수로 전환된다. LFG의 주요성분은 메탄(CH_4)과 이산화탄소(CO_2)로서 98%에 이르며, 이외에 수소, 황화수소, 일산화탄소, 암모니아, 질소, 산소 등으로 구성되어 있다. 또한 휘발성유기화합물인 벤젠, 톨루엔, 디클로로메탄 등이 배출되는 것으로 알려지고 있다(G. Tchobanoglous et al., 1993). LFG의 발생은 매립시기에 따라 5단계로 구분할 수 있는데, 첫째, 초기조정단계, 둘째, 전이단계, 셋째, 산형성단계, 넷째, 메탄발효단계, 다섯째, 숙성단계로 구성되어 있다. 메탄은 네번째 단계인 메탄발효시기에 집중적으로 많이 나오며, 실제로 그 단계가 시간적으로도 가장 긴 것으로 알려지고 있다.

2.1.1 초기 조정단계

폐기물 중 생분해가 가능한 유기성분은 호기성 미생물에 의해 분해되기 시작한다. 호기성 조건은 폐기물 투입과 함께 유입되는 공기에 의해 매립 초기에 형성되며, 복토재의 호기성 세균(Aerobic Bacteria)에 의해 분해가 이루어진다.

초기 조정단계에서의 호기성 반응식은 아래에서 보는 것과 같이 표현

할 수 있다.



위 반응식에서도 알 수 있듯이 유기성분이 분해되면서 산소 농도는 감소하는 반면에 이산화탄소 농도는 증가하게 된다. 따라서 외부에서 지속적으로 산소가 공급되지 않는다면 호기성 분해는 점차 감소하게 된다.

매립지는 복토재로 덮여 있고 특히 차수막이 설치되어 있어 매립지 내부로의 공기 유입이 원활하게 이루어지지 않으며, 반응으로 인한 가스 발생으로 매립지 내압이 높기 때문에 외부로부터의 공기 유입을 기대하기는 힘들다.

그러므로 점차 매립지 내에서는 산소가 감소되기 때문에 호기성 반응은 수일간밖에 지속되지 않으며, 10~20℃ 정도의 온도가 상승된다..

2.1.2 전이단계

호기성 반응으로 인해 매립지 내의 산소가 고갈되면서 혐기성 조건이 형성되기 시작한다. 통성혐기성(Fermentative) 세균에 의한 혐기성 분해가 일어나며, 산소 대신에 질산염(Nitrate)과 황산염(Sulfate)을 전자 수용체로 활용하여 질소와 황화수소가스로 환원시킨다.

폐기물의 산화/환원 전위차(Oxidation/reduction potential)를 측정하여 혐기성 분해가 일어나기 시작하는 것을 감지할 수 있으며, 일반적으로 전위차 값이 -50 ~ -100mV인 경우에 질산염과 황산염의 환원이 일어나는 시점으로 혐기성 분해의 시작을 알 수 있다.

한편 전위차 값이 -150 ~ -300 mV인 경우에 메탄 생성이 일어나는 것으로 알려지고 있다. 침출수 형성이 거의 일어나지 않으나, 만약 침출수가 형성된다면 유기산과 CO₂의 농도 증가로 인해 pH가 다소 떨어지는 양상을 띠기 시작한다.

2.1.3 산 형성단계

2단계에서 시작된 미생물의 활동이 많은 유기산과 약간의 수소를 발생시킨다. 첫 단계 반응은 고분자 화합물 지질, 탄수화물, 단백질, 핵산 등을 효소 반응에 의해 저분자 화합물로 전환하는 전환단계이다. 두 번째 단계는 아세트산(CH₃COOH)와 펄빅산(Fulvic acid) 그리고 다른 좀 더 복잡한 유기산으로 대표되는 첫 단계 산물을 저급 분자 화합물로 전환하는 단계이다.

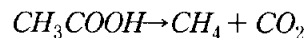
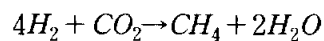
3단계에서 주로 발생하는 것은 이산화탄소이며, 소량의 수소도 발생한다.

비메탄형성균에 의해 반응이 주로 진행되며 이러한 미생물은 산형성균이라고 한다.

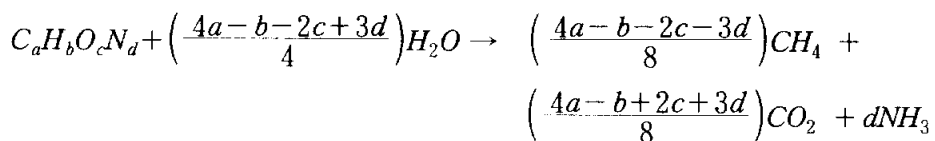
침출수의 pH는 유기산과 매립지내 이산화탄소 농도의 증가로 5 또는 그 이하로 떨어진다. 유기산이 용해되므로 전기전도도가 증가하고 pH가 낮기 때문에 많은 무기물, 특히 중금속이 3단계에서 많이 증가된다.

2.1.4 메탄발효단계

메탄 형성균이 3단계 생성물인 아세트산과 수소를 이용하여 메탄, 물, 이산화탄소 등으로 다음과 같이 전환시킨다.



메탄 생성 반응식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

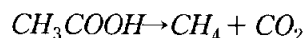
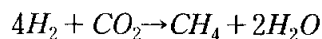


유기산의 소모는 pH를 점차적으로 증가시켜 7~8 정도까지 높아지고 (중성 pH), BOD와 COD가 감소하며 높은 pH로 인해 침출수의 중금속 농도도 감소한다. 매립 후 약 6개월 또는 수년 후에야 3단계 반응시기에 도달된다.

2.1.5 숙성단계

LFG 발생률이 급격히 감소하며, 이는 대부분의 영양물질이 앞 단계에서 침출수로 제거되어 매립지에 남아 있는 것은 생분해가 느리기 때문이다. 5단계에서 생성되는 주요 가스는 메탄과 이산화탄소이며, 매립지 종료 방법에 따라서 소량의 질소와 산소도 LFG에 나타난다.

위의 5 반응 단계 중에서 가장 주요한 것은 메탄발효단계로서 전단계에서 생성된 수소와 아세트산을 메탄 형성균이 아래에서 보는 것처럼 메탄(CH₄), 이산화탄소(CO₂), 물(H₂O)로 전환시킨다.



2.2 매립가스의 종류

LFG의 주요성분은 메탄이 약55(±5)%, 이산화탄소가 약45(±5)%로서 대부분을 차지하고, 나머지는 미량 성분들로 매립폐기물과 생물학적 반응에 따라 그 양과 종류가 달라진다. 메탄과 이산화탄소 다음으로 질소, 산소, 암모니아 등의 순서이며, 나머지는 미량성분으로 출현한다<표 2-1>. LFG의 상대습도는 100%이며, 이를 LFG의 전체 질량 대비하여

물이 차지하는 비율은 3~7% 정도이다. LFG의 겉보기밀도는 공기보다 약간 높은 1.34kg/m^3 이다. 매립지를 온실가스 측면에서 살펴본다면 다량의 메탄 발생으로 인하여 주요 메탄 배출원으로 인식되고 있다. 미국의 경우 매립지가 가장 주요한 메탄가스의 발생원으로 총 메탄가스 배출량의 30% 이상을 차지하는 것으로 알려지고 있다.

Table 2-1. The substance of LFG generated in MSW landfill site

Substance	Proportion (% , dry-based)
메탄(Methane)	45~60
이산화탄소(Carbon dioxide)	40~60
질소(Nitrogen)	2~5
산소(Oxygen)	0.1~1.0
황화합물(Sulphur Compounds)	0~1.0
암모니아(Ammonia)	0.1~1.0
수소(hydrogen)	0~0.2
일산화탄소(Carbon Monoxide)	0~0.2
기타(Others)	0.01~0.6

Source : G. Tchobanoglous et al.(1993). Integrated Solid Waste Management

특정 미량 성분들은 가스 추출 및 활용 과정에서 장치에 문제를 일으킬 수도 있을 뿐만 아니라 일부는 위대한 대기물질로 인체에 해를 끼칠 수 있다. 이러한 미량성분은 유기성폐기물의 생물학적 분해 과정에서 생성된 것과 초기 폐기물에 함유되어 있는 것들로 구분할 수 있다. 생물학적 분해 과정에서 생성된 미량 성분은 산소화합물, 황화합물, 탄화수소화합물로 구분할 수 있으며, 산소화합물은 산소를 함유하고 있는 유기성분이 생물학적으로 분해되면서 생성되는 것으로 가스생성 초기 단계에 주로 많이 발생된다. <표 2-2>는 대표적인 산소화합물 LFG를 나타내는 것으로 알코올, 에스테르, 케톤, 카르복실산류 등이 여기에 속한다.

황화합물은 악취의 원인으로 알려지고 있으며, 황화수소와 Mercaptans 등은 위대한 대기오염물질이다. 황화합물은 분해가 용이한

물질로부터 대부분 생성되기 때문에 폐기물의 매립 과정 중에 주로 발생된다. 반면에 황화수소는 LFG 발생의 모두 단계에서 발생되며, 농도는 $0\sim70\text{mg/m}^3$ 이다. <표 2-3>은 LFG에서 관찰된 황화합물의 종류와 농도 범위를 나타내고 있다.

Table 2-2. The substance & conc. of oxygen-compounds in LFG

Substance	Conc.(mg/m ³)	Substance	Conc.(mg/m ³)
Ethanol	16~1450	Acetic ester	2.4~263
Methanol	2.2~210	Butyric ester	<0.9~350
1-Propanol	4.1~630	Acetic butyl ester	60
2-Propanol	1.2~73	Butyric propyl ester	<0.1~100
1-Butanol	2.3~73	Acetic propyl ester	<0.5~50
2-Butanol	18~626	Acetic acid	<0.06~3.4
Acetone	0.24~4.1	Butyric acid	<0.02~6.8
Butanone	0.078~38	Furan	0.1~2.4
Pentanal	0.8	Methylfurans	0.06~170
Hexanal	4.04	Tetrahydrofuran	<0.5~8.8

Source : G. Tchobanoglous et al.(1993), Integrated Solid Waste Management

Table 2-3. The substance & conc. of Sulphur-compounds in LFG

Substance	Concentration(mg/m ³)
Methyl mercaptan	0.1~430
Ethyl mercaptan	0~120
Dimethyl sulphide	1.6~24
Dimethyl disulphide	0.02~40
Carbon disulphide	<0.5~22
Carbon oxysulphide	<0.1~1.9

Source : G. Tchobanoglous et al.(1993), Integrated Solid Waste Management

LFG중의 탄화수소화합물은 유기성폐기물이 생물학적으로 분해되는

과정에서 자연적으로 발생하는 것과 산업활동 등에 의해 생성된 인위적인 탄화수소화합물이 폐기물에 함유되어 있다가 LFG로서 발생하는 것으로 설명할 수 있다. 인위적인 탄화수소화합물은 방향족 탄화수소화합물과 염소계 탄화수소화합물로 나눌 수 있으며, LFG중에 함유되어 있는 방향족 탄화수소화합물의 종류와 농도는 <표 2-4>에 나타난 것과 같다.

Table 2-4. The substance & conc. of Aromatic hydrocarbon-compounds in LFG

Substance	Concentration(mg/m ³)
Benzene	0.03~15
Toluene	0.2~615
Ethylbenzene	0.5~236
Xylene	0.2~283
Styrol	0.1~10
Prorylbenzene	1.5~173

Source : G. Tchobanoglous et al.(1993), Integrated Solid Waste Management

염소계 탄화수소화합물은 주로 금속산업 및 세탁업종에서 세척류로 많이 활용되고 있다. <표 2-5>는 LFG중의 염소계 탄화수소화합물을 나타내고 있는 것으로 농도의 범위가 상당히 크며, 이는 매립지에 따라 특정한 성분의 매립량이 다른 것에 기인한다. 염소 및 불소가 치환된 프레온은 냉장고 및 각종 스프레이에 사용되어 왔으며, 그 자체의 독성은 강하지 않으나, 물리·화학적으로 안정되어 있어 LFG중의 함량이 상대적으로 높다. 염소계 탄화수소화합물은 지구온난화지수가 상당히 높기 때문에 지구온난화 측면에서는 주요 관찰대상이 되고 있다. 또한 염소계 탄화수소화합물로부터 HCl이 생성될 가능성이 높으며, 이로 인해 장치부식 등의 문제를 초래할 가능성이 높다.

최근에는 LFG중에 유기실리카화합물(Organic silica compounds)이 관찰되었고, 이는 LFG 엔진에 문제를 일으키는 것으로 보고되고 있다. 유리실리카화합물은 엔진 내부에 사포와 같은 미세한 층을 형성하고, 제

거가 불가능한 것으로 알려지고 있으며, 엔진에 심한 손상을 입히는 것으로 알려져 주의를 요하는 성분으로 지적되고 있다(수도권매립지운영관리조합, 1997).

Table 2-5. The substance & conc. of Chlorinated hydrocarbon-compounds in LFG

Substance	Conc.(mg/m ³)	Substance	Conc.(mg/m ³)
Dichlorodifluoromethane	4~700	Vinyl chloride	0~264
Trichlorofluoromethane	0~500	Dichloroethylene	0~294
Trichlorotrifluoromethane	0~30	1,2-dichloroethylene	2~100
Chlorotrifluoromethane	0~10	1,1-dichloroethylene	0.4~138
Chlorodifluoromethane	2~276	1,1,1-trichloroethane	0~29
Dichlorofluoromethane	0.4~14	Dichloroethane	0.4~20
Chlorofluoromethane	0.1~110	1,1-dichloroethane	0.5~21
Dichloromethane	0~684	Trichloromethane	0~50
Trichloroethylene	0~312	Dichlorobenzene	0.1~5.3
Tetrachloroethylene	0~250		

Source : G. Tchobanoglous et al.(1993), Integrated Solid Waste Management

2.3 매립가스 포집 및 회수기술

LFG의 포집 및 회수의 목적은 첫째, LFG의 대기 배출을 줄이고, 둘째, 악취성분의 대기 방출을 최소화하고, 셋째, 매립지를 벗어난 LFG 이동을 최소화하고, 넷째, LFG의 메탄성분으로부터 에너지 회수 등을 달성하기 위함이다.

LFG중에서 주성분인 메탄은 온실가스로 알려져 있어 LFG를 대기중으로의 직접방출 하는 것을 막기 위하여 LFG를 처리하기 위한 목적과 자원화하여 에너지로서 활용하고자 하는 목적으로 구분할 수 있다. 또한

최근에는 이러한 두 가지 주요목적을 동시에 충족시키기 위한 접근이 시도되고 있다. 그러나 두 목적을 구체화하는 과정에서 서로 상충되는 측면이 있다. 특히 자원화가 목적인 경우는 LFG중의 메탄가스 성분을 높게 유지하는 것이 불가피하나, 대기오염 제어 측면에서는 위해한 성분과 메탄의 농도를 가능한 낮출 필요성이 있다. 따라서 LFG 포집 설비의 설계는 LFG의 활용 목적, LFG의 발생량, LFG의 회수율 등에 따라 결정된다.

LFG의 포집 회수설비는 수동적 회수시스템과 능동적 회수시스템으로 구분하고 있다. 수동적 회수시스템은 LFG의 대기방출을 줄이기 위한 것이 주목적으로 LFG의 가스압만을 이용하여 회수하는 방식으로 매립지 표면에 통기구(Vent)를 설치하고 폐기물 매립층까지 LFG의 배출을 유도할 수 있는 배기설비를 연결 설치하여 LFG를 회수하고 이를 버너로 연소처리하고 있다. 반면에 능동적 회수시스템은 감압 또는 진공펌프를 이용하여 LFG의 이동을 제어하고 LFG의 회수 효율을 높이기 위한 형태이다.

LFG의 효율적 포집 회수를 위해서는 LFG의 이동을 이해하는 것이 우선되어야 한다. 현재 미국은 폭발의 위험성으로 매립지 영향권에서 토양중의 메탄 농도가 5% 이하를 유지하도록 규제하고 있다. 그리하여 LFG의 이동에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 이는 LFG의 활용 측면에서도 상당히 중요하다. 그러나 토양의 복잡한 구조 및 다양한 특성으로 인하여 LFG의 이동 현상을 정확히 예측하기는 힘들다. 따라서 LFG 추출정 설계와 운전은 대부분 경험에 의존하고 있는 경우가 많다.

LFG중의 메탄 농도는 사용 목적에 따라 여러 기준이 적용된다. 자원화 목적은 메탄 농도를 가능한 높게 유지하는 것이 필요하나, LFG 회수 과정에서 주위의 공기 유입이 불가피하고 그로 인해 LFG의 메탄 농도가 떨어진다. 일반적으로 전기생산의 경우에 있어 가스엔진은 메탄 농도 45~50%, 가스터빈은 35~40%, 증기터빈은 20% 정도의 메탄 농도도 적용 가능한 것으로 알려지고 있다(수도권매립지운영관리조합, 1997).

2.3.1 매립가스 추출정

LFG 추출정은 능동적 LFG 회수 시스템에 적용하고 있는 것으로 LFG를 흡입 포집하기 위해 추출정에 음압을 걸어야 하며, 그 음압의 정도는 LFG 양과 질에 따라 달라질 뿐만 아니라 추출정의 깊이, 복토재의 특성, 폐기물의 질(매립기간, 수분, 밀도, 폐기물 종류), 최종복토와도 밀접히 관련되어 있다. 음압을 너무 심하게 걸면 LFG에 공기 유입이 불가피해지며, 공기 유입에 따른 문제점은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 공기에 의한 회석으로 LFG의 발열량 저하, 둘째, LFG에 포함된 공기중의 산소량으로 송급 파이프라인이나 처리설비에서 폭발 가능성, 셋째, 공기 주입으로 혐기성 조건 형성이 제약되어 LFG 발생 자체가 감소 등을 과다한 음압 적용에 따른 외부 공기 유입으로 인한 문제점을 지적할 수 있다.

가스 추출정에는 수직정(Vertical Well)과 수평정(Horizontal Well)이 있으며 수직정을 일반적으로 많이 사용되고 있다. 반면에 수평정은 깊이가 깊은 매립지 또는 현재 매립이 진행중인 매립지에 더 적합한 것으로 알려지고 있다. 가스 추출정은 서로 연결되어 주 포집기로 가스를 이송 저장하게 만들어져 있고, 모니터링과 가스량 조절이 가능하도록 설계하는 것이 바람직하다.

2.3.1.1 수직정

수직정은 일반적으로 매립이 완료된 후에 설치하며 매립지 표면 상부에서 각 추출정을 연결하는 관을 설치하며 추출정간의 간격은 영향반경이 서로 겹치도록 설계한다<그림 2-1>. 매립층이 깊고 인공차수막을 최종 복토에 활용하는 경우는 추출정 간격이 50~66m를 적용하고, 반면에 점토 및 흙 등이 최종 복토재인 경우는 추출정 간격으로 33m를 사용하는 것이 일반적이다.

추출정 주변의 상부는 가스가 외부로 누출되거나 공기가 외부에서 침

투되지 않도록 벤토나이트 또는 점토 등을 채워 기밀성을 유지하고 하부는 자갈로 채워서 LFG 포집이 용이하도록 설계한다. 또한 추출정 상단 부분에 각 정의 흡입을 조정할 수 있는 밸브를 설치하고, LFG 발생량 변화에 따라 회수량을 조절할 수 있도록 설계하고 있다. 추출정 상단에는 침출수 확인, 시료채취, 마노미터(Manometer) 설치 목적으로 밸브를 설치한다. 폐기물 매립층에 따라 침하되는 정도를 고려하여 수직추출정의 깊이를 다르게 설정한다.

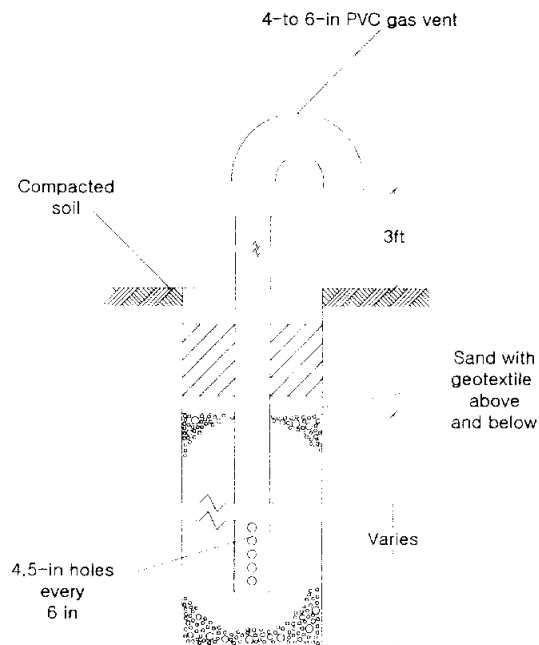


Fig. 2-1. LFG collection system using vertical well

2.3.1.2 수평정

수평정은 미국 LA 카운티에 의해 개발 적용된 것으로 매립중인 매립지에 적용되고 있는 경우가 많으며, 0.5~1m 깊이로 폐기물을 파내고,

굵은 골재를 먼저 포설한 후 유공관을 그 위에 포설하고, 폐기물과 복토로 다시 메꾸며 벤토나이트 또는 점토 등으로 공기가 침투하지 못하도록 적절히 포설해야 한다. 수평정간의 높이 간격은 약26m, 폭 간격은 약 66m 정도가 일반적이다.

2.3.2 LFG 이송설비

추출정에서 회수된 LFG를 최종 포집설비로 모으기 위해 블로어(Blower)를 사용하며, 목적에 따라 정제 등의 전처리 과정을 거치며 콤퓨레서를 이용하여 LFG를 압축하여 에너지 회수설비 등으로 이송한다. LFG 이송 과정에서의 폭발 위험을 방지하기 위해 안전 장치가 필요하다.

2.3.3 응축수 포집 및 처리

LFG의 포집 및 회수에서 반드시 고려해야 될 것은 응축수의 포집 및 처리이다. LFG는 수분이 포화되어 있으며, 따뜻한 LFG가 가스 포집시설을 통과하는 과정에서 냉각되면서 응축수가 발생된다. 포집 가스에서 응축수를 제거하지 않으면서 포집관이 막혀 LFG 포집이 불가능해진다. 응축수의 제거는 LFG 이송관을 경사지게 설치하여 응축수 이송이 용이하도록 한다. 이송관의 경사 정도는 이송관의 길이와 LFG 발생량 등에 따라 결정되며, 일반적으로 응축수 분리기나 추출정 방향으로 5% 이상의 경사도를 이송관에 적용한다. 또한 포집된 응축수는 응축수의 특성에 따라 적절한 처리 방법을 선정하여 처리한다.

2.4. 온실가스 산출방법

온실가스 산출방법은 기본방법인 Tier 1과 FOD(First Order Decay)방법인 Tier 2가 있다. Tier 1은 당해연도에 매립된 폐기물은 당해연도에 모두 분해되어 매립가스화 된다고 가정하여, 메탄가스 배출이 매립기간 동안에만 이루어진다고 가정하였고, Tier 2는 매립이 종료된 후 20~50년 동안에도 꾸준히 폐기물이 분해되면서 매립가스를 발생한다고 가정하여 제시되고 있다.

두 산정 방식의 메탄배출계수인 L_0 값이 동일하므로 두 방식에 의한 메탄 총 발생량은 동일하고, 단지 Tier 1의 경우는 매립기간이라는 짧은 기간 동안에 메탄가스가 발생하는 것으로 계산하는 반면에 Tier 2는 이보다 훨씬 긴 기간 동안에 꾸준히 발생하는 실제 매립가스 배출 형태를 모사한다. 그러므로 Tier 1에 의한 평가의 경우 매립기간 동안의 메탄가스 배출이 과대 평가될 소지가 있어, Tier 2에 의한 산정 결과가 Tier 1보다 현실적인 평가 방법이다. 그러나 장기적인 측면에서는 두 방식의 메탄가스 배출량은 같다고 할 수 있다.

매립지별로 매립 폐기물의 성상과 매립량이 일정하지 않으며, 매립공법, 복토 방법, 매립가스 배출방법 등도 다르다. 이러한 여러 변수에 의해 매립가스 배출량이 변할 수 있으며, 각 변수가 매립가스 발생에 어떠한 영향을 미치는지 정량화하기가 사실상 불가능하다. 그러므로 매립가스 배출량 산정은 근본적으로 불확실성을 내재하고 있다.

Tier 1은 이러한 매립기술과 관련된 인자에 따른 배출량 차이를 고려하지 않고 있지만, Tier 2는 직접 측정을 통해 메탄가스 배출량을 결정하므로 Tier 1에서 다루지 못한 매립기술에 따른 배출량 차이를 반영하고 있다. 단지 측정결과가 얼마만큼 대표성을 유지할 수 있느냐가 관건이다. 모든 매립가스 배제공에서 메탄 발생량을 측정해야 하나, 현실적으로 불가능하고, 일부 측정한 배제공 결과로부터 전체 발생량을 유추 결정해야 한다. 그러므로 일부 측정치로부터 전체 발생량을 결정하는 방식

이 신뢰성을 갖기 위해서는 여러 매립지를 대상으로 하여 지속적인 자료 축적이 이루어져야 한다. 또한 배제공에서 배출되는 온실가스의 양이 시간에 따라 변하므로 이의 보정방법에 대한 충분한 검토가 필요하다.

하지만, Tier 2가 보다 현실적으로 매립가스 배출 형태를 모사하지만, 과거와 현재의 매립이력 정보가 없다면 적용할 수 없고, Tier 1의 기본 방법에 따라 배출량을 산출해야 한다.

2.4.1 Tier 1 : 기본방법

Tier 1 방법은 IPCC 지침서(1997)에서 제시한 것으로 산정식은 다음과 같다.

$$\text{CH}_4 \text{ 배출량(톤/yr)} = (\text{MSW}_T \times \text{MSW}_F \times \text{MCF} \times \text{DOC} \times \text{DOC}_F \times F \times 16/12 - R) \cdot (1 - \text{OX}) \quad (1)$$

여기서,

MSW_T = 폐기물 연간 총 발생량 (Gg/yr)

MSW_F = 발생되는 폐기물의 총량 중에서 매립되는 비율

MCF = 메탄보정계수(Methane Correction Factor)

DOC = 분해가 가능한 유기탄소 비율(Gg/Gg-waste)

DOC_F = DOC 중에서 미생물에 의해 동화될 수 있는 비율

F = 매립가스 중에서 메탄이 차지하는 부피 비율

R = 발생되는 매립가스 중에서 포집·회수된 메탄가스의 양 (Gg/yr)

OX = 포집·회수되지 않은 메탄가스가 매립층을 통과하면서 산화되는 비율

한편, 최근에 발표된 IPCC Good Practice 지침서(2000)에서는 L_0 라는 변수를 새로이 도입하였고, 이는 배출계수의 개념으로 폐기물 단위

톤당 메탄가스 배출량으로 다음과 같은 식으로 표현된다: $L_0 = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times 16/12$. 그러므로, 실질적으로 산정식은 달라진 것이 없으며, 단지 여러 변수를 묶어 L_0 로 표현하였다. 위 모델식에서 설명한 각 변수에 대한 설명은 아래에서 보는 것과 같다.

2.4.1.1 폐기물의 연간 총 발생량(MSW_T)과 매립 비율(MSW_F)

일반적으로 MSW는 생활폐기물의 약자로서 사용되고 있으나, 여기서는 매립 처리되는 각종 폐기물을 총칭하는 것으로 생활폐기물, 사업장폐기물, 슬러지, 건설폐기물 등이 포함된다. 국내에서는 환경부에서 「전국 폐기물 발생 및 처리현황」이란 폐기물 관련 통계자료를 매년 발간하고 있어 폐기물 연간 총 발생량(MSW_T)과 매립비율(MSW_F)에 대한 자료를 확보하는데는 문제가 없다.

2.4.1.2 메탄보정계수(Methane Correction Factor : MCF)

매립 폐기물이 모두 혐기적으로 분해되지 않고, 호기적으로 분해될 수 있기 때문에 매립지의 관리 상태를 반영하기 위해 메탄보정계수를 도입해야 한다. MCF가 0인 경우는 호기성 분해 조건이고, 1인 경우는 혐기성 분해 조건을 의미한다. 관리가 잘 이루어진 매립지는 복토재를 사용하고, 매립지 표면을 다듬고, 폐기물을 압축 다짐하기 때문에 공기가 투입될 가능성이 그만큼 적어지기 때문에 혐기성 반응이 진행될 가능성이 높아진다. 이러한 매립지의 경우는 MCF값이 크다. 반면에 관리가 잘 안 되고 있는 매립지는 폐기물의 압축 다짐 등의 작업 없이 매립하는 경우가 많기 때문에 매립 폐기물 층에 공극이 많아 공기가 침투할 가능성이 높다. 그러므로, 호기성 조건이 형성될 가능성이 높아 이러한 매립지의

경우는 MCF 값이 작다.

2.4.1.3 유기탄소(Degradable Organic Carbon : DOC)

일반적으로 분해 가능한 유기탄소란 생화학적 분해가 가능한 유기탄소를 의미하고, 단위는 Gg/Gg-waste이다. DOC는 폐기물의 성상과 밀접한 관련이 있으며, 폐기물의 성상별 DOC의 가중 평균치로 산정할 수 있다.

1996년의 IPCC 지침서에서 제안한 DOC 계산 방식은 아래에서 보는 것과 같다.

$$\text{DOC} = (0.4 \times A) + (0.17 \times B) + (0.15 \times C) + (0.3 \times D) \quad (2)$$

여기서,

A = 폐기물 중 종이와 섬유 질량 비율

B = 폐기물 중 정원 및 공원폐기물 등의 부패가 용이한 유기성
폐기물의 질량 비율

C = 폐기물 중 음식물쓰레기 질량 비율

D = 폐기물 중 나무 및 짚의 질량 비율

그러나, 위의 IPCC 계산 방식은 정원폐기물 등이 많은 미국, 유럽국가에 적합한 형태이므로 이를 바로 적용하기에는 문제가 있다. 그러므로, 우리나라에 적합한 고유식을 개발하는 것이 필요하다. 이를 위해서 우선 국내에서 발생하는 유기성 폐기물을 분해도에 따라 구분하였다. 이 중에서 생분해가 안 되는 폐기물은 폐합성수지 계열로 설정하였고, 나머지 유기성 폐기물(음식물·채소류, 종이류, 고무·피혁, 슬러지, 동식물성 잔

채물, 폐섬유, 폐합성고무, 폐피혁, 기타 유기물)은 모두 분해가 가능한 것으로 가정하였다. 따라서 국내 매립 폐기물 단위 중량당 유기탄소 함량은 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$\text{DOC}(\%) = \text{CCF} \times \text{FW}_f + \text{CCP} \times \text{PA}_f + \text{CCW} \times \text{WO}_f + \text{CCR} \times \text{RU}_f + \text{CCA} \times \text{FA}_f + \text{CCU} \times \text{SR}_f + \text{CCL} \times \text{LE}_f + \text{CCS} \times \text{SL}_f + \text{CCA} \times \text{AN}_f + \text{CCO} \times \text{OT}_f \quad (3)$$

여기서,

CCF = 음식물·채소류 중의 탄소 함량(습량기준)

FW_f = 음식물·채소류의 전체 폐기물 중 중량 비율(습량기준: %)

CCP = 종이류 중의 탄소 함량(습량기준)

PA_f = 종이류의 전체 폐기물 중 중량 비율(습량기준: %)

CCW = 나무류 중의 탄소 함량(습량기준)

WO_f = 나무류의 전체 폐기물 중 중량 비율(습량기준: %)

CCR = 고무·피혁 중의 탄소 함량(습량기준)

RU_f = 고무·피혁류의 전체 폐기물 중 중량 비율(습량기준: %)

CCA = 폐섬유 중의 탄소함량(습량기준)

FA_f = 폐섬유의 전체 폐기물 중 중량 비율(습량기준: %)

CCU = 폐합성고무 중의 탄소함량(습량기준)

SR_f = 폐합성고무(사업장폐기물)의 전체 폐기물 중 습량기준 비율(%)

CCL = 폐피혁 중의 탄소함량(습량기준)

LE_f = 폐피혁(사업장폐기물)의 전체 폐기물 중 중량 비율(습량기준: %)

CCS = 슬러지 중의 탄소 함량(습량기준)

SL_f = 슬러지의 전체 폐기물 중 중량 비율(습량기준: %)

CCA = 동식물성 잔재물 중의 탄소 함량(습량기준)

AN_f = 동식물성 유기물의 전체 폐기물 중 중량 비율(습량기준: %)

CCO = 기타 유기물류 중의 탄소 함량(습량기준)

OT_f = 기타 유기물류의 전체 폐기물 중 중량 비율(습량기준: %)

2.4.1.4 동화 가능한 DOC(Degradable Organic Carbon Dissimilated)

위에서 제시된 분해 가능한 폐기물 중에서도 일부 성분은 생분해가 되지 않거나 분해속도가 상당히 느린 것이 있다. 이러한 대표적인 성분이 리그닌이며, 나무, 종이 등에서 이러한 성분이 많이 발견된다. 따라서 메탄가스 발생량에서 이러한 특성을 반영하기 위해 DOC_F 를 도입하였다. DOC_F 는 매립지의 DOC 중에서 생분해가 가능한 비율을 의미한다. IPCC 지침서에서는 DOC_F 의 기본값으로 0.77을 제시하고 있다. 최근의 문헌 조사에 의하면 이 값이 다소 과대 평가된 것으로 알려지고 있다. 최근의 IPCC(2000)의 Good Practice Guidance에서는 DOC_F 의 기본값으로 0.5~0.6을 사용하는 것을 권장하고 있다.

2.4.1.5 매립가스 중의 메탄가스 비율(F)

매립가스의 대부분은 메탄과 이산화탄소로 이루어져 있다. 메탄가스 비율 F 값은 매립 폐기물의 성상에 따라 0.4~0.6 정도의 범위 값을 갖는 것으로 알려지고 있다. 측정을 통해 F값을 결정하는 경우에는 회수 과정에서 공기가 유입될 공산이 크므로 측정 F 값이 실제 보다는 작을 수 있다. 따라서 측정에 의해 산정된 F 값을 대표값으로 간주할 필요는 없다. 그러므로, 메탄가스 비율 F 값으로 일반적으로 0.5를 사용하고 있는 것이 무난한 것으로 알려지고 있다.

2.4.1.6 메탄가스 회수량(R)

메탄 회수량은 매립지에서 발생되는 메탄가스를 회수하여 에너지로 활용하거나 Flaring 설비에서 연소 처리되는 양을 의미한다. 이는 매립지의

매립가스 관리 상황과 밀접한 관련이 있다. 매탄가스를 연소하면 CO_2 와 H_2O 로 배출되고, 여기서 CO_2 는 생물계 폐기물의 분해로 인해 생성된 CH_4 의 연소에 의해 발생된다. 소각에서 생물계 폐기물에 의해 배출되는 CO_2 는 온실가스 배출량에서 제외시키는 것과 마찬가지로 회수되어 연소 처리되는 메탄량은 비록 CO_2 를 발생시키나, 자연계에서 순환 재이용된다고 가정하여 온실가스 배출량에서 제외시킨다.

2.4.1.7 산화율(OX)

산화율은 매립지로부터 발생하는 매탄가스가 매립 복토층을 통과하면서 산화되는 비율을 의미한다. OX 값이 0이며 전혀 산화가 일어나지 않는 경우인 반면에 1인 경우는 발생하는 매탄가스가 100% 산화된다는 것이다. IPCC에서 권장하고 있는 산화율의 기본값은 제로이며, 현장 및 실험실에서의 조사 결과에 따르면 산화율의 변화폭이 큰 것으로 드러났다. 그러나, 산화율은 일반적으로 0.1 이하로 그 이상의 값은 너무 높은 것으로 알려지고 있다. 한편 미국의 경우는 0.1을 산화율로 사용하고 있고, 최근 환경부(2000) 보고서에서는 산화율값으로 0을 선정했다. 일반적으로 위생매립지에서는 비위생매립지 보다 OX 값이 높은 것으로 나타났다. 현재 국내의 경우 위생매립지의 매립량이 훨씬 많은 것을 감안한다면 산화율로 0값을 선정하기보다는 0.1을 선정하는 것이 보다 바람직한 것으로 판단된다.

2.4.2 Tier 2 : FOD 방법

IPCC 지침서(1997)에서 제시한 산정식은 다음과 같다.

$$Q_{CH_4} = L_0 \times M_t \times \{ \exp(-kc) - \exp(-kt) \} \quad (4)$$

위 모델식에서 설명한 각 변수에 대한 설명은 아래에서 보는 것과 같다.

2.4.2.1 폐기물의 평균 연간 매립량(M_t)

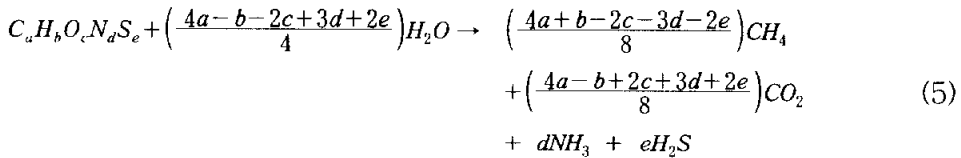
폐기물의 평균 연간 매립량은 매립기간 동안에 총 매립된 폐기물의 양을 매립기간으로 나누어 결정한다. 그러므로, 매립되는 폐기물의 양과 성상의 변화가 심하면 메탄 발생량의 산정 결과 신뢰도가 떨어진다.

2.4.2.2 메탄 배출계수(L_0)

메탄 배출계수를 산정하는 방법은 크게 두 가지를 고려할 수 있다. 첫 번째는 폐기물의 실험식(Empirical Formula)을 완성하고, 이 폐기물이 혐기성 분해에 의해 생성 가능한 메탄의 최대 발생량을 양론적으로 결정하는 것이고, 두 번째는 유기성폐기물의 탄소함량으로부터 직접 구하는 방법이다.

(1) 혐기성 분해 반응식을 이용한 산정방법

다음은 폐기물의 실험적 화학식이 $C_aH_bO_cN_dS_e$ 인 경우 폐기물의 혐기적 분해 반응식을 나타내는 것으로 폐기물이 분해되면서 메탄, 이산화탄소, 암모니아, 황화수소가 생성된다.



위 식으로부터 메탄 발생량을 산정하는 순서는 다음과 같다.

- ① 유기성폐기물 중의 원소성분(C, H, O, N, S)의 함량을 결정한다.
- ② 각 원소성분의 함량을 원소의 원자량으로 나누어 각 원소의 mole 수를 결정한다.

여기서 결정한 각 원소의 mole 수는 폐기물의 실험식 $C_aH_bO_cN_dS_e$ 의 반응 계수 a, b, c, d, e가 된다.

- ③ 위에서 결정한 a, b, c, d, e로부터 메탄의 생성 mole수인 $(4a + b - 2c - 3d - 2e)/8$ 을 계산한다. 이는 폐기물 1 mole 당 생성되는 메탄의 mole 수를 결정하게 된다.

- ④ 폐기물 1mole의 분자량을 다음에 근거하여 결정한다

$$: 12a + b + 16c + 14d + 35.5e$$

이는 폐기물 1mole을 질량으로 환산하여 폐기물 질량당 생성되는 메탄량을 결정하기 위한 것이다.

- ⑤ 폐기물 1톤당 생성되는 메탄량을 결정한다.

폐기물 1mole의 질량을 1톤으로 전환하는 경우 생성되는 메탄의 mole 수를 비례적으로 결정하고, 이를 질량 또는 부피로 환산한다. 질량의 경우는 mole수에 메탄의 분자량인 16을 곱하고, 부피의 경우는 22.4ℓ (0°C , 1기압)를 곱해 결정한다.

위에서 결정한 것은 메탄 이론 발생량(G_0)이며, 실제 메탄은 메탄보정

계수(MCF)와 동화 가능한 비율(DOC_F)에 의해 결정되면 이를 반영한 L_0 는 다음과 같이 표현된다.

$$L_0 = \text{MCF} \times \text{DOC}_F \times G_0 \quad (6)$$

(2) 유기탄소 함량을 이용한 산정방법

유기탄소 함량을 이용한 폐기물 단위 톤당 발생하는 메탄 발생량은 다음 식에 의해 산정할 수 있다.

$$L_0 = \text{MCF} \times \text{DOC} \times \text{DOC}_F \times F \times 16/12 \quad (6-1)$$

2.4.2.3 메탄 발생속도상수(k)

(1) 메탄 발생속도 이론식

어느 특정 기간(일반적으로 1년 단위) 동안에 매립된 유기성 폐기물의 분해가 1차 반응에 의한 것이라면 이는 다음과 같은 동역학식에 의해 표현된다.

$$\frac{dM_w}{dt} = -k M_w \quad (7)$$

여기서 M_w 는 매립 폐기물의 매립시점으로부터 t 시간 경과 후의 매립 폐기물의 잔류량이고, k 는 유기성 폐기물의 분해속도상수이다. 식(7)을 적분하면 M_w 는 다음과 같이 표현된다.

$$M_w = M_0 \exp(-kt) \quad (8)$$

여기서 M_0 는 매립 폐기물의 연간 매립량으로 표현된다. 한편 메탄의 생성 동역학식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dM_{CH_4}}{dt} = -L_0 \frac{dM_w}{dt} = k L_0 M_w \quad (9)$$

여기서 L_0 는 메탄 배출계수이다. 식(8)을 식(9)에 대입한 다음 적분하여 어느 시간 t 까지 발생한 메탄 총 발생량은 다음과 같이 표현된다.

$$M_{CH_4}(t) = M_0 L_0 (1 - e^{-kt}) \quad (10)$$

한편 특정 시점 t 에서의 1년 동안 발생한 메탄량은 그 시점까지의 메탄 총 발생량에서 그 시점보다 1년 전의 메탄 총 발생량을 빼주어 결정하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{CH_4}(t) = M_0 L_0 \{e^{-k(t-1)} - e^{-kt}\} \quad (11)$$

식(11)은 1년 동안의 매립 폐기물에 의한 메탄 발생을 나타내고 있다. 그러나 실제로는 폐기물이 연속적으로 매립되므로 특정시기 t 에서의 메탄 발생량은 연차적으로 매립된 폐기물에 의한 누적된 메탄 발생량을 대변하게 된다. 연도별로 매립된 폐기물에 의한 매립 개시 후 t 년이 경과한 시점에서의 메탄 발생량은 다음과 같다.

매립 경과년수	매립 개시 후 t 시간 경과 시점에서의 메탄 발생량(톤/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	$M_0(N) L_0(N) \{1 - e^{-k(t-N+1)}\} - M_0(N) L_0(N) \{1 - e^{-k(t-N)}\}$

각 연도별로 매립된 폐기물에 의한 메탄 발생량의 합이 t 에서의 메탄 총 발생량이 되며 이는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{CH_4}(t) = \sum_{i=1}^N M_0(i) L_0(i) [\exp\{-k(t-i)\} - \exp\{-k(t-i+1)\}] \quad (12)$$

여기서 N 은 매립이 종료된 시점을 의미한다. 만약 매립이 진행 중인 경우는 N 대신에 t 를 대입하면 된다.

(2) 메탄 발생속도상수 결정: 연평균 매립량과 메탄배출계수를 사용하는 경우

연평균 매립량과 메탄배출계수를 적용하는 경우에 연도별로 매립된 폐기물에 의한 매립 개시 후 t 년이 경과한 시점에서의 메탄 발생량은 다음과 같다.

매립 경과년수	매립 개시 후 t 시간 경과 시점에서의 메탄 발생량(톤/yr)
1	$M_{avg} L_{avg} \{1 - e^{-kt}\} - M_{avg} L_{avg} \{1 - e^{-k(t-1)}\}$
2	$M_{avg} L_{avg} \{1 - e^{-k(t-1)}\} - M_{avg} L_{avg} \{1 - e^{-k(t-2)}\}$
...	
N	$M_{avg} L_{avg} \{1 - e^{-k(t-N+1)}\} - M_{avg} L_{avg} \{1 - e^{-k(t-N)}\}$

M_{avg} : 평균 연간 매립량, L_{avg} : 평균 메탄배출계수

각 연도별로 매립된 폐기물에 의한 메탄 발생량의 합이 t 에서의 메탄 총 발생량이 되며, 이는 다음과 같이 Tier 2의 산출식인 (4)와 동일함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Q_{CH_4}(t) &= M_{avg} L_{avg} \{ \exp(-k(t-N)) - \exp(-kt) \} \\
 &= M_{avg} L_{avg} \{ \exp(-kc) - \exp(-kt) \}
 \end{aligned} \tag{13}$$

여기서 c 는 매립 종료 후 메탄가스 발생 측정지점인 t 까지의 경과시간을 의미하며 이는 $t-N$ 과 같게 된다. 식(13)에서 $\exp(-kc)$ 와 $\exp(-kt)$ 는 수열함수 형태로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\exp(-kc) \approx 1 - kc + \frac{k^2 c^2}{2}, \quad \exp(-kt) \approx 1 - kt + \frac{k^2 t^2}{2}$$

이를 식(13)에 대입하여 k 에 대한 2차 함수 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{c^2 - t^2}{2} \right) k^2 + (t - c)k - \frac{Q_{CH_4}}{L_{avg} M_{avg}} = 0 \tag{14}$$

k (메탄 발생속도상수: yr^{-1})는 근의 공식을 이용하여 식(14)로부터 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$k = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad (15)$$

여기서 $\alpha = \frac{c^2 - t^2}{2}$, $\beta = t - c$, $\gamma = -\frac{Q_{CH_4}}{L_{avg}M_{avg}}$ 이다.

그러므로, 매립 개시 후 t 년이 경과한 시점에서의 메탄 발생량 Q_{CH_4} (톤 CH_4/yr), L_{avg} , M_{avg} 를 결정하면 식(15)로부터 k 값을 산정할 수 있다.

또는 매립 개시 후 t 년이 경과한 시점에서의 메탄 발생량을 가장 잘 모사하는 식(13)에서 k 값을 결정한다. 이는 k 값을 계속 변화시키면서 측정된 메탄 발생량과 가장 접근한 메탄 발생량을 허락하는 k 값을 선정하는 방법이다.

(3) 메탄 발생속도상수 결정: 연도별 매립량과 메탄배출계수를 사용하는 경우

연도별로 매립량과 매립 폐기물 성상이 거의 일정한 경우에는 위 방법을 적용하여 메탄가스 배출량을 산정하는데 큰 문제가 없으나, 연도별로 매립량과 성상이 크게 변하는 경우는 메탄가스 배출량 결과의 오차 가능성이 높아진다.

연도별로 매립량을 결정하고 메탄배출계수를 결정하면 식(12)를 이용하여 메탄 발생속도상수를 결정할 수 있게 된다. 식(12)에서 메탄 배출량($Q_{CH_4}(t)$)은 측정에 의해 결정하며, 이 값에 가장 접근하는 k 값을 시행착오방식(trial-and-error method)으로 결정한다.

2.4.3 산정방법의 선정

최근에 소개된 IPCC Good Practice에서는 매탄 발생량 산정 방법 중에서 Tier 1과 Tier 2 중에서 적합한 방법을 국가별 특성에 따라 선정할 수 있는 방안을 제시하고 있다<그림 2-2>. Tier 2가 보다 정확한 매탄 배출량을 제시하므로 가능한 이를 이용하는 것이 바람직하다. <그림 2-2>에 따르면 매립이력에 대한 정보가 산정방식인 Tier 1 또는 2를 결정짓는 주요 인자이다.

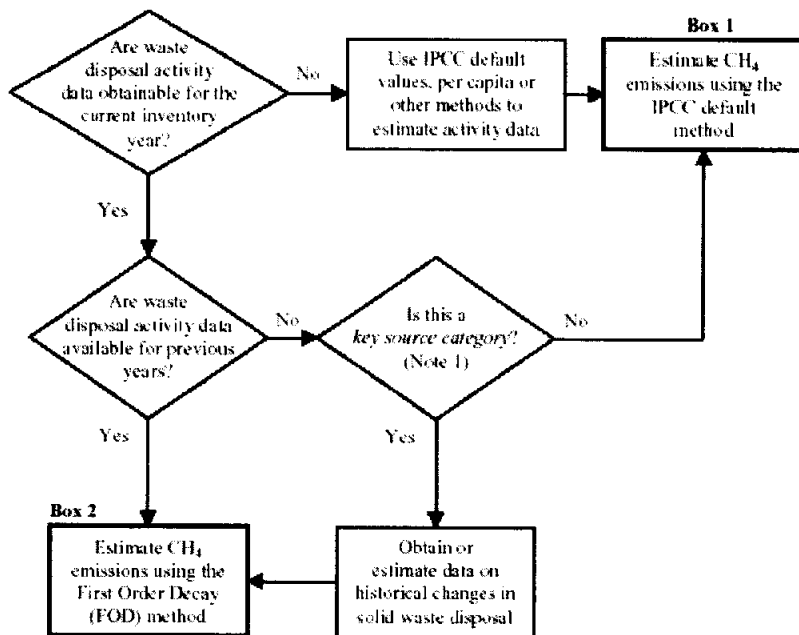


Fig. 2-2. Decision tree for CH₄ emissions from Solid Waste Disposal Site

2.5 온실가스 배출량 산정의 불확실성

2.5.1 Tier 1 : 기본방법

기본방법은 1년 동안에 매립된 폐기물 전량이 메탄가스로 전환 배출된다는 것이다. 연간 매립되는 폐기물의 양과 성상이 매립기간 동안 거의 일정하다면 기본방법에 의해 산정한 메탄가스 발생량 결과는 신뢰할 수 있다. 매립 폐기물의 양과 성상이 매립기간 동안 크게 변한다면 기본방법에 의한 메탄가스 발생량의 산출 결과는 신뢰하기 힘들다. 기본방법을 적용하는 경우 메탄 발생량의 오차는 $\pm 15\%$ 정도인 것으로 알려지고 있다.

2.5.2 Tier 2 : FOD 방법

FOD 방법도 연간 매립되는 폐기물의 양이 일정하다는 가정과 메탄의 생성반응 속도상수(k)가 메탄 발생기간 동안 일정하다는 가정으로 인하여 메탄 발생량의 불확실성을 내포하고 있다. 단지 FOD 방법은 메탄의 발생을 시간의 함수 형태로 표현했다는 장점을 지니고 있다. 최근 미국에서 보고된 연구결과에 의하면 몇 개의 매립지 측정 조사를 통하여 산정한 기본값 L_0 와 k 를 다른 매립지에 적용하여 메탄 발생량을 예측하였고, 이를 실측한 것과 비교해 보았다. 조사 대상 80여개 매립지 중에서 21개 매립지에 대해서는 실측한 것과 잘 맞았으나, 그렇지 않은 매립지도 상당수가 있었다. 기본값을 적용한 경우 실제 배출량과 38~492%의 차이가 있는 것으로 드러났다. 그러므로, 몇 개의 매립지에서 측정하여 결정한 변수로 다른 매립지의 메탄 발생량과 전국 발생량을 결정하는 것은 많은 불확실성을 내포할 수 있다. 몇개의 대형 매립지를 중심으로 실측 등의 장기적인 조사를 통하여 FOD 변수값의 신뢰도를 제고시키는 노력이 필요하다고 판단된다.

3. 실험방법

3.1 연구대상 시설 및 측정지점

3.1.1 연구대상시설

본 연구는 국내 매립시설을 대상으로 매립지 온실가스 배출량 산정방법인 Tier 1 및 Tier 2의 방법으로 온실가스 배출량을 산정 비교하여 봄으로서 향후 국가보고서 작성에 적용 가능한 배출통계 기초자료를 구축하고자 하였다.

이의 연구를 위해 2001년 지방자치 단체에서 관리·운영중인 폐기물 매립시설 286개소 중 총 매립면적, 매립용량, 기매립량, 잔여매립 가능량, 사용기간, 차수시설 종류 및 두께, 가스포집시설 및 처리방법과 매립지 관리상태를 종합 비교한 후 적정 시설을 선정하였다.

연구대상시설은 생활폐기물을 혐기성 위생매립방법으로 처리하는 침출수 차수시설과 가스배제시설이 설치된 대형 매립지이며, 배출량 산정방법별 산정 기초자료를 어느 정도 취득할 수 있는 사용중인 위생매립지이다.

<표 3-1>에 연구대상 매립지의 현황을 나타내었다.

Table 3-1. Status of landfill for research

Site	Startup	Expiry	Disposed area (m ²)	Total cap. (m ³)	disposed volume (m ³)
Ulsan	1994	2010	142,663	4,255,142	2,875,982

3.1.2 시료선정 및 시료채취 지점

연구대상 매립지에 대하여 4차에 걸쳐 1차(가을철), 2차(겨울철), 3차(봄철), 4차(여름철)로 나누어 온실가스 배출량 산정 기초자료 조사 및 온실가스 배출농도 현장조사를 실시하여 평균 배출량을 산정하였다.

<표 3-2>에 연구대상 매립지의 현장 조사일정, 기상 및 조사 지점수 등의 개요를 나타내었다.

Table 3-2. Measurement outline of landfill for research

Classification	Date for measurement	Meteorology	No. of inspected spot	
			Extraction well (measured/total)	Surface
1st(fall)	2002. 10. 28	Shine	49/49	13
2nd(winter)	2003. 2. 10	cloudiness	49/49	13
3rd(spring)	2003. 4. 30	Shine	49/49	13
4th(summer)	2003. 7. 5	cloudiness	49/49	13

연구대상 매립지는 현재 사용중 매립지이며 대형 매립지에 속한다. 현재 매립 중 매립가스 이용시설이 설치되어 매립지 옆의 생활 쓰레기 소각장과 금호산업에 연료로 공급되고 있었으며 나머지 가스는 간이 소각기(Flare Stack)를 설치하여 소각 중이었다.

당 매립지의 배제공은 현재 총 49개가 설치되어 있었으며 실시간 자동유량측정기와 가스분석기를 통하여 배제공에서 배출되는 가스를 측정·분석하고 있다.

매립가스 발생량 측정을 위해 49개소의 배제공과 표면 발산량을 측정하기 위하여 13개 지점을 선정하여 계절별로 4차에 걸쳐 시료 채취 및 분석을 실시하였다.

현장에서 수집 필요한 기초자료는 측정기간중에 조사하였고, 배출통계를 위한 기초자료는 국가 통계자료를 조사 활용하였다.

그 외 국내에서 아직 연구되지 않은 배출량 산정 통계자료는 국제적으로 통용하고 있는 계수를 준용하여 배출통계를 산정하여 비교하였다

다음의 <그림 3-1>에 연구대상 매립지 현장에서의 조사 지점을 나타내었다.

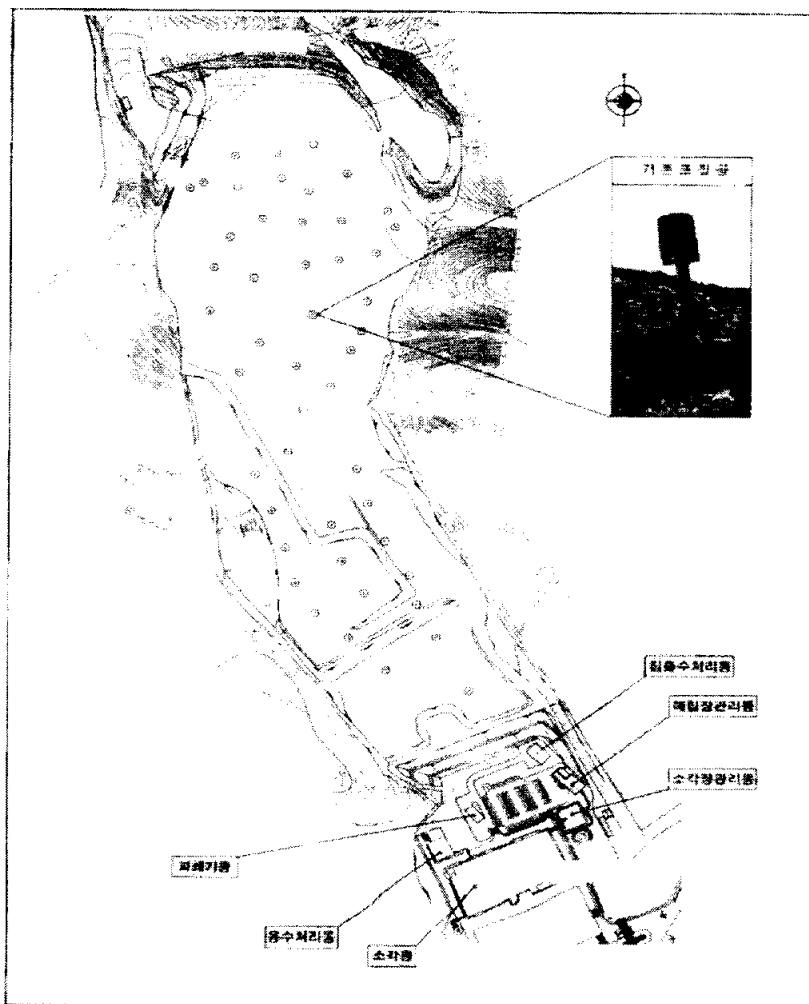


Fig. 3-1. Sketch and spot measured of landfill for research

3.2. 현장조사

3.2.1 배제공에서의 메탄가스 발생량 조사

3.2.1.1 배제공에서의 가스농도 조사

연구대상 매립지에 설치되어 있는 매립가스 배제공을 통하여 배출되는 매립가스의 주요성분인 메탄(CH_4), 이산화탄소(CO_2) 및 산소(O_2)의 농도를 측정하였다. 매립가스의 성분 중 CH_4 , CO_2 , O_2 는 매립지 현장에서 <그림 3-2>의 휴대용 측정기(Infrared Gas Analyzer, GA 94)를 이용하여 직접 측정하였다. 측정하기에 앞서 미리 가스배제공의 상단이나 시료 채취구를 비닐 등의 재질로 제작한 마개로 막아 공기의 유입을 최대한 억제한 상태에서 측정기를 연결하여 매립가스의 성분을 측정하였다. 가스배제공이 유공관인 경우에는 <그림 3-3>와 같이 최대한 공기의 유입을 막고, 산소 농도가 최저가 되는 가능한 한 깊은 위치까지 튜브를 넣은 후 측정을 실시하였다. 특히 유량이 안정된 상태에서 측정 및 관찰하기 위하여 유량이 충분히 안정되었다고 판단되는 시점까지 가스를 계속 배출시킨 다음 안정된 각 성분의 측정값을 취하였다.

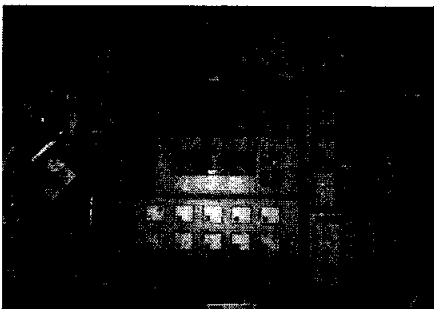


Fig. 3-2. Infrared Gas Analyzer

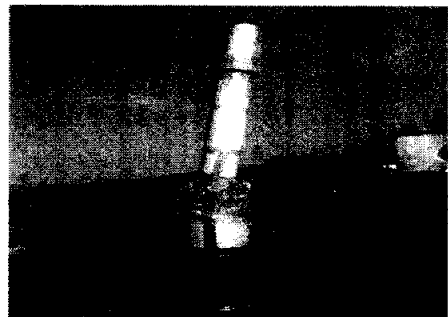


Fig. 3-3. Control of air inflow
to the extraction well

3.2.1.2 배제공에서의 가스유량 조사

연구대상 매립지에 설치되어 있는 가스 배제공을 통하여 배출되는 가스의 유량을 조사하기 위해서 가스 배제공에 <그림 3-4>의 휴대용 열선 유속계(Portable Hot-Line Current Meter, Testo 435)를 흐름방향에 직각이 되도록 설치하여 현장에서 가스의 배출유속을 직접 측정하였다. 그 평균유속과 배제공의 관경을 이용하면 각 가스 배제공으로부터 배출되는 가스의 유량을 계산할 수 있다.

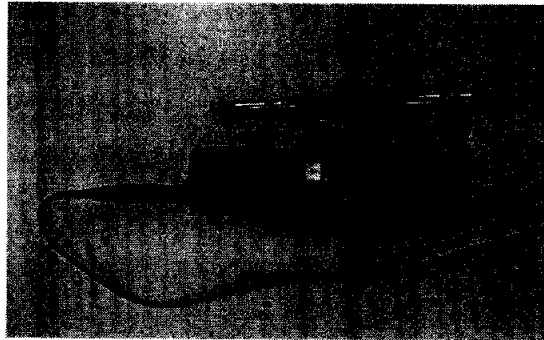


Fig. 3-4. Hot wire anemometer

3.2.1.3 배제공에서의 메탄가스 방출량 계산

가스 배제공으로부터 유량 $Q(\ell/\text{min})$ 로 가스가 방출되고 있다고 가정하여, 가스 성분인 메탄의 농도가 $C_1(\%)$ 이면, 메탄의 가스 포집관 방출 속도 $K(\ell/\text{min})$ 는,

$$K = Q \cdot C_1 / 100$$

이다.

3.2.2 표면에서의 메탄가스 발산량 조사

3.2.2.1 표면발산 메탄가스 포집

시료의 채취를 위하여 <표 3-3>과 <그림 3-5>와 같은 Chamber를 매립지 표면에 위치시키되 10mm정도가 지면으로 들어가도록 Chamber를 설치하고 주변의 흙을 이용하여 지면과의 간격을 최소화함으로써 가스가 누출되지 않도록 주의하였다.

Table 3-3. Specification of Chamber

Diameter	Height	Area	Volume
260mm	150mm	530.66cm ²	7959.9cm ³

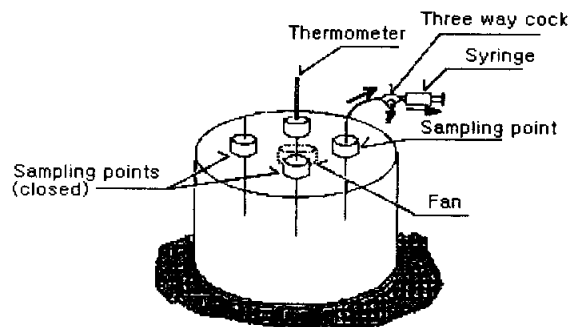


Fig. 3-5. Airtight Chamber for measurement

Chamber 내의 기체는 Fan으로 교반하고, 시료는 삼방콕크를 조작하여, Syringe로 배관내의 기체를 빨아들여 배출시킨 후에, 시료를 Syringe로

흡인하여 채취하였다. 시료의 채취는 Chamber의 설치 후 첫 시료를 0분으로 하여 2분 간격으로 6분 경과시까지 4회에 걸쳐 시린지에 채취하였으며, 시료가 담긴 Syringe를 밀봉하여 실험실로 운송한 후 가스 시료의 CH₄ 농도를 분석하였다.

3.2.2.2 표면발산 메립가스에서의 메탄농도 분석

메탄의 분석을 위하여 가스크로마토그래프를 사용하였다<그림 3-6>.

Column은 석유화합물이나 탄화수소와 같은 비극성 화합물을 분리할 수 있는 Agilent社의 HP-1을 이용하였으며, 250ppm과 500ppm의 메탄(CH₄) 표준가스를 이용하여 시료의 농도 측정을 위한 검량선을 구하였다. 또한 최소 검출한계는 1ppm이다. 따라서 1ppm 이하의 검출량은 N.D로 나타내었다.

<표 3-4>에 가스크로마토그래프의 운전조건을 나타내었다.

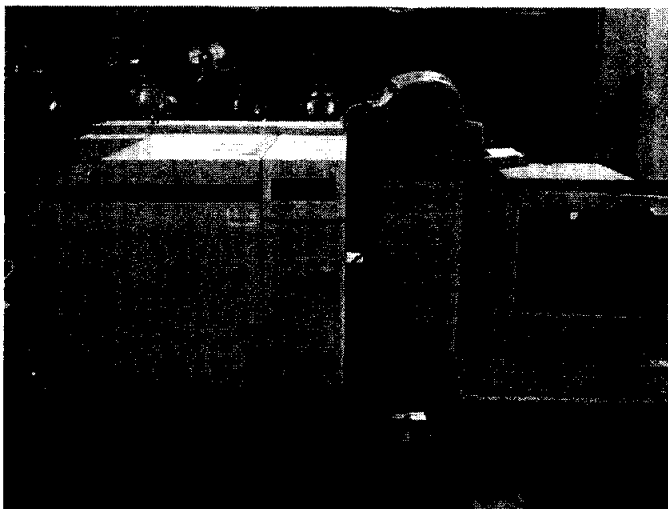


Fig. 3-6. Gas Chromatography

Table 3-4. Operative condition of GC for methane analysis

Item	Condition
GC	Agilent 6890
Column	HP-1 Methyl Siloxane Capillary 30.0m×250 μ m×0.25 μ m
Detector	FID
Carrier Gas	N ₂ Gas, 0.8m/min
INJ/DET Temp.	150℃
COIL Temp.	35℃

3.2.2.3 표면에서의 메탄가스 발산량 계산

분석결과에 따라 <그림 3-7>과 같이 채취시간에 따른 챔버내의 메탄농도를 도표에 plot하고 초기기울기(직선부분)를 이용하여 메탄 표면발산량으로 계산하였다.

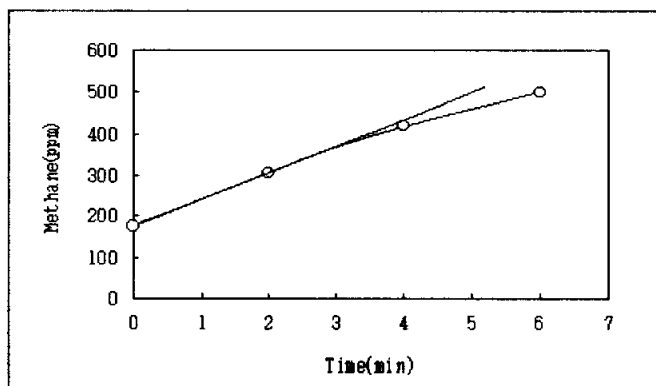


Fig. 3-7. Variation of CH₄ conc. overtime in chamber

챔버 내의 flux는 시간 t(min)에 따른 메탄농도 C(ppmv)의 변화를 다음

식으로 직선 회귀하여, 두 변수간의 선형성이 높은 경우($r^2 = 0.90$ 이상)를 채택한 후, 이로부터 기울기 $b(\text{ppmv}/\text{min})$ 를 구하였다.

$$C = a + bt$$

Chamber의 높이를 $h(\text{m})$, 바닥면적 $A(\text{m}^2)$ 이라 하면, Chamber의 용적은 $Ah(\text{m}^3)$ 가 되고, 단위시간에 따른 메탄의 표면발산량 또는 흡수량인 $\Delta v (\text{m}^3/\text{min})$ 는,

$$\Delta v = Ahb \times 10^6$$

이 된다. 따라서, Chamber를 이용하여 둘러싼 장소에서 발산하는 메탄의 flux $J(\text{m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 는,

$$J = \Delta v / A = hb \times 10^6$$

이 되고, 단위가 $\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2$ 일 때는,

$$J = \Delta v \times 10^3 / A = hb \times 10^3$$

로 계산할 수 있다.

3.2.3 매립대상 폐기물 성상조사

3.2.3.1 물리적 조성

매립대상 폐기물의 물리적 조성에 대한 분석은 음식물류, 종이류, 합성수지류, 섬유류, 고무·가죽류, 나무류 등의 가연성분과 유리·초자류, 금

속류 등의 비가연분의 비가연성분으로 분류 측정하였다. 판단이 모호한 부분은 기타성분으로 분류하였다.

3.2.3.2 삼성분(수분, 가연분, 회분)

삼성분 분석은, 물리적 조성별 시료의 무게를 측정한 후, 가연 성분만을 대상으로 건조시킨 후 무게를 칭량한다. 건조기의 온도는 수분이외의 가연성분의 손실을 가능한 줄이고, 폐기물공정시험법에 정해진 $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ 에 조정하여 건조 시켰다.

3.2.3.3 화학적 조성(원소분석)

건조 및 파쇄가 끝난 시료를, 각각의 물리적 조성 성분이 차지하는 비율에 따라 가연분 혼합시료를 조제한 다음, 쓰레기의 화학적 조성을 분석한다. 분석항목은 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N), 황(S), 회분으로 6개 항목으로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 연구대상 매립장의 폐기물 이력

4.1.1 일반 이력사항

울산에 위치한 생활폐기물 매립지인 연구대상 매립지의 영향권역 주거 인구는 1,065,037명이고, 1인당 쓰레기 발생량은 약 1.37kg/인·일로 조사되었고, 쓰레기는 혐기성 위생매립방법으로서 사용기간이 1994년부터 2010년까지 총 17년 동안 매립을 계획하고 있었다.

4.1.2 폐기물 매립량

연구대상 매립지의 총 매립면적이 142,663m²이고, 총 매립용량은 4,255,142m³이며, 기매립량은 매립 총 용량의 절반 보다 다소 높은 2,875,982m³이다. <표 4-1>에 연구대상 매립지에서의 년도별 폐기물 매립량을 나타내었다.

현재까지의 연간 평균 매립량은 259,216±74,307 ton이고, 총 매립량은 2,332,948ton이다. 최대 매립량은 1996년의 384,468톤이고, 최소 매립량은 2001년의 159,693톤으로 나타났다. 연간 매립량의 상대표준편차는 28.7%로 상당히 높았으며, 최근 소각장의 운영으로 매립량이 줄어들어 매립량 감소가 나타나기 시작하였다. 그러므로 매립량이 매립장 운영 초기 단계와 많은 차이가 나타났으며, 이로 인해 매립량의 편차가 심하게 나타났다.

매립량에 대한 자료의 출처는 1994년도부터 1999년도까지는 환경관리공단에서 제공한 자료를 이용(1999년까지는 울산시의 통계자료가 없어 환경관리공단의 자료 활용(매립장 가스 재활용 시설 공사 관련 보고서)하고, 2000년부터 2002년까지는 울산시의 자료를 활용하였다.

Table 4-1. Yearly waste disposed volume in Ulsan landfill site

Year	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Disposed Volume (ton/yr)	233,759	327,329	384,468	309,726	259,891	275,137	217,051	159,693	165,894

4.1.3 매립 폐기물 성상 조사결과

매립지에서 발생하는 온실가스의 양을 계산하는데 사용하기 위해 매립된 폐기물을 대상으로 성상조사를 실시하였다.

폐기물 성상조사도 매립지 현지조사 시기와 동일하게 4차에 걸쳐 폐기물 물리적 조성, 함성분 및 원소조성을 분석하여 평균하였다.

직 매립되는 생 폐기물보다 숙성, 발효단계를 거쳐 수분조성이 많이 낮아졌음을 알 수 있다.

분석결과는 <표 4-2> <표 4-3>에 각각 나타내었다.

Table 4-2. Physical composition of waste disposed

(unit : %)

Composition		1st	2nd	3rd	4th	Average
Combustible	food	21.8	12.4	37.9	10.3	20.6
	paper	28.9	25.8	18.1	17.0	22.5
	synthetic resins	15.2	7.0	16.4	9.5	12.0
	textile	8.1	10.4	2.5	5.0	6.5
	rubber · leather	0	0.7	1.8	6.7	2.3
	wood	0.6	0.2	0.1	0.1	0.3
	others	6.6	4.5	16.2	15.2	10.6
Non-combustible	glass	6.2	5.0	1.5	2.9	3.9
	metal	1.1	5.5	3.9	19.6	7.5
	others	11.5	28.5	1.6	13.7	13.8
Sum		100	100	100	100	100

Table 4-3. 3 components and elementary analysis of waste disposed

(unit : %)

Composition	3 components			elementary analysis					
	moisture	combustible	ash	C	H	O	N	S	ash
food	81.7	13.6	4.7	40.4	6.0	19.6	3.3	0.2	30.5
paper	14.5	61.2	24.3	35.9	5.1	32.6	0.3	0.0	26.1
synthetic resin	8.7	85.8	5.5	73.6	11.0	7.9	0.8	0.1	6.6
textile	14.5	72.3	13.2	48.1	6.0	29.5	2.2	0.1	14.1
rubber · leather	0.5	77.0	22.5	50.1	6.5	20.6	0.0	0.1	22.7
wood	25.9	56.1	18.0	42.2	5.4	27.2	0.9	0.1	24.2
others	37.2	52.9	9.9	44.2	5.7	25.7	1.6	0.3	22.5
Average	26.1	59.8	14.1	47.8	6.5	23.3	1.3	0.1	21.0

4.2 메탄가스 발생량 현장조사결과

4.2.1 배제공에서의 메탄가스 배출량

<표 4-4> ~ <표 4-7>에 1차(가을철)에서 4차(여름철)까지의 배제공에서 배출되는 메탄 농도와 배출유량을 나타내었다.

1차 측정(가을철)의 24, 40, 47번 배제공의 측정시 기기의 일시적 오류로 인하여 3개의 배제공을 제외한 메탄의 발생량이며, 2·3·4차(겨울철·봄철·여름철) 측정시에는 모든 배제공에 대한 조사가 이루어졌다.

Table 4-4. Concentration and flowrate of CH₄ from extraction well(1st)

Point	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Flowrate (L/min)		Remark
				LFG	CH ₄	
1	40.6	29.8	0.1	163.33	66.31	gas recycle
2	56.8	42.3	0.1	2000	1136.00	
3	55.9	41.1	0.5	800	447.20	
4	46.6	36.5	0.4	266.67	124.27	
5	56.8	41	0.3	583.33	331.33	
6	57.3	42.3	0	433.33	248.30	
7	44.2	32.6	1.2	416.67	184.17	
8	56.9	41.9	0.1	716.67	407.79	
9	49	36.2	1.2	866.67	424.67	
10	41.4	34.1	0.1	158.33	65.55	
11	45.9	32.5	0.1	166.67	76.50	
12	27.7	19.8	11.4	65	18.01	
13	47.2	28.9	0.1	55	25.96	
14	57.8	42	0.1	616.67	356.44	
15	55.8	40.1	0.5	266.67	148.80	
16	51	37.6	0.4	1266.67	646.00	
17	53	39.8	0.8	550	291.50	
18	52.9	38.3	1.2	183.33	96.98	
19	60.6	36.4	0.3	850	515.10	
20	47.8	36.7	1.4	383.33	183.23	
21	45.6	33.1	2.1	416.67	190.00	
22	56.2	37.7	0.2	383.33	215.43	
23	42.3	35.7	0.2	500	211.50	
24	0	0	0	0	0.00	temporary unmeasurable
25	52	37.8	1.4	500	260.00	gas recycle
26	51.7	38.4	0.1	683.33	353.28	
27	47.8	35.7	0.5	233.33	111.53	
28	52	39.5	0.9	866.67	450.67	
29	46.3	36.6	0.1	183.33	84.88	
30	53.6	37.6	0.3	1233.33	661.06	
31	47	38.4	0.1	816.67	383.83	
32	37.3	31.7	0.3	125	46.63	
33	52.8	37.6	1.5	1050	554.40	
34	53.4	35.4	0.4	128.33	68.53	
35	57.2	40.2	0	633.33	362.26	
36	56.8	42.5	0.1	433.33	246.13	
37	53.1	38	0.5	783.33	415.95	
38	30.4	29.4	0.1	150	45.60	
39	58.7	41.3	0	1716.67	1007.69	
40	0	0	0	0	0.00	temporary unmeasurable
41	45.4	33.8	0.1	166.67	75.67	gas recycle
42	0	0	0	0	0.00	
43	56.1	40.8	0.2	500	280.50	
44	50.4	35.7	0.1	500	252.00	
45	49.4	35.8	0.3	533.33	263.47	
46	56.3	42.1	0.1	483.33	272.11	
47	0	0	0	0	0.00	temporary unmeasurable
48	55.4	41.2	0.2	250	138.50	gas recycle
49	53	40.1	0.5	466.67	247.34	
Average	49.25	36.22	0.67	533.59	282.46	

Table 4-5. Concentration and flowrate of CH₄ from extraction well(2nd)

Point	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Flowrate (L/min)		Remark
				LFG	CH ₄	
1	0	0	0	0	0.00	gas recycle
2	54.2	38	0.9	115	62.33	
3	59	39.6	0.4	583.33	344.16	
4	61.4	38.4	0	216.67	133.04	
5	38.6	30.4	4.4	400	154.40	
6	56.4	39.7	0.1	366.67	206.80	
7	59.5	39.4	0	165	98.18	
8	55.4	38.4	0.6	140	77.56	
9	56.1	39	0.5	583.33	327.25	
10	54.5	35.1	0	111.67	60.86	
11	0	0	0	0	0.00	
12	47.7	35.5	1.3	266.67	127.20	
13	60.7	32	0	156.67	95.10	
14	59.4	30.6	0	650	386.10	
15	57.3	38.6	1	130	74.49	
16	51.9	34.9	0.3	250	129.75	
17	57.2	37.8	0.5	61.67	35.28	
18	49.9	36.8	1.5	450	224.55	
19	62.6	37.3	0.2	666.67	417.34	
20	57.8	40.8	0	283.33	163.76	
21	57.9	40.1	0	283.33	164.05	
22	63	37	0	160	100.80	
23	54.2	39.8	0.1	366.67	198.74	
24	0	0	0	0	0.00	
25	58.7	39.8	0.2	433.33	254.36	
26	58.5	40.8	0.1	350	204.75	
27	62.2	38.4	0	156.67	97.45	
28	56.8	38.8	0.8	400	227.20	
29	55.3	38.5	0	146.67	81.11	
30	55.9	37.4	0.2	516.67	288.82	
31	62.1	37.9	0	700	434.70	
32	51.6	36	0.8	466.67	240.80	
33	52.2	38.1	0.9	533.33	278.40	
34	58.9	40	0	155	91.30	
35	60.5	39.5	0	566.67	342.84	
36	53	38.6	0.4	140	74.20	
37	55.8	40.3	0.1	550	306.90	
38	0	0	0	0	0.00	
39	60	40	0	123.33	74.00	
40	61.7	37.7	0.1	155	95.64	
41	63.9	36.1	0	366.67	234.30	
42	59.9	37.5	0.1	123.33	73.87	
43	55.9	39	0.3	83.33	46.58	
44	0	0	0	0	0.00	
45	60.9	39	0	700	426.30	
46	58.8	39.2	0.2	183.33	107.80	
47	0	0	0	0	0.00	
48	55.6	41.3	0.1	433.33	240.93	
49	0	0	0	0	0.00	
Average	48.83	32.51	0.33	279.39	159.26	

Table 4-6. Concentration and flowrate of CH₄ from extraction well(3rd)

Point	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Flowrate (L/min)		Remark
				LFG	CH ₄	
1	44.1	30.1	0.1	183.26	80.82	gas recycle
2	56.7	43.1	0.1	2582.3	1464.16	
3	62.4	38.5	0.7	516.46	322.27	
4	55.2	37.6	0.1	566.44	312.67	
5	61.9	38.2	0.8	283.22	175.31	
6	55.1	36.9	0.8	533.12	293.75	
7	53.9	34.1	0.8	199.92	107.76	
8	62	37.8	0.4	349.86	216.91	
9	59.2	37	0.9	666.4	394.51	
10	53.6	33.2	0.1	333.2	178.60	
11	53.5	35.6	0.1	199.92	106.96	
12	0	0	0	0	0.00	
13	32.5	27.6	0.1	833	270.73	
14	57.6	41.3	0.1	2182.46	1257.10	
15	0	0	0	0	0.00	
16	59.3	38.9	0	333.2	197.59	
17	41.2	34	2.8	399.84	164.73	
18	60	38.3	0.4	266.56	159.94	
19	57.1	35.5	0.5	816.34	466.13	
20	61.6	39.8	0.1	449.82	277.09	
21	50.7	37.7	0.1	266.56	135.15	
22	65.6	36.7	0.3	103.29	67.76	
23	56.7	37.2	0.9	516.46	292.83	
24	43.8	32.7	0.1	183.26	80.27	
25	56.7	40.5	0.8	2582.3	1464.16	
26	58.2	38	0.1	183.26	106.66	
27	53.5	37.5	0.2	499.8	267.39	
28	61.8	38.7	0.6	266.56	164.73	
29	0	0	0	0	0.00	
30	59.7	38.4	0.1	283.22	169.08	
31	59.2	38.4	0.2	483.14	286.02	
32	20.3	34.7	2.5	121.62	24.69	
33	48.6	36.3	2.3	1066.24	518.19	
34	49.4	43.5	0.3	183.26	90.53	
35	55.6	41.3	0.1	932.96	518.73	
36	52.3	39.9	1.2	449.82	235.26	
37	61.1	40.3	0	466.48	285.02	
38	43	43.9	0.1	199.92	85.97	
39	59.4	42.8	0	2632.28	1563.57	
40	42.4	35	0.4	199.92	84.77	
41	44.4	37.6	0.1	649.74	288.48	
42	0	0	0	0	0.00	
43	62.6	39.6	0.1	132.8	83.13	
44	43.6	39.4	0.6	163.27	71.19	
45	52.6	36.9	0.3	1299.48	683.53	
46	58.4	41.7	0.3	216.58	126.48	
47	0	0	0	0	0.00	
48	56.1	39.1	0.2	333.2	186.93	
49	60.4	41.2	0	449.82	271.69	
Average	48.22	34.01	0.42	542.05	297.94	

Table 4-7. Concentration and flowrate of CH₄ from extraction well(4th)

Point	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Flowrate (L/min)		Remark
				LFG	CH ₄	
1	0	0	0	0	0.00	gas recycle
2	57.3	41.3	0.1	133.33	76.40	
3	55.8	40.3	0.8	350	195.30	
4	55.8	41.9	0	266.67	148.80	
5	57.8	41.4	0.1	123.33	71.28	
6	57.6	41.2	0.1	416.67	240.00	
7	0	0	0	0	0.00	
8	58.2	40.2	0.1	500	291.00	
9	48.6	37.1	0.4	716.67	348.30	
10	52.2	36.4	0.1	483.33	252.30	
11	49.1	37.1	0.3	166.67	81.83	
12	57.5	40.3	0.4	650	373.75	
13	0	0	0	0	0.00	
14	58.2	41.2	0	366.67	213.40	
15	0	0	0	0	0.00	
16	58.7	39.7	0.1	250	146.75	
17	55.6	39.9	0.6	166.67	92.67	
18	56.4	42.5	0	216.67	122.20	
19	47.7	34.8	0.9	416.67	198.75	
20	52.3	39.6	0.2	233.33	122.03	
21	60.7	38.1	0.1	216.67	131.52	
22	0	0	0	0	0.00	
23	54.8	42.7	0	166.67	91.34	
24	0	0	0	0	0.00	
25	54.8	40.3	0.9	466.67	255.74	
26	52.5	38	0.1	166.67	87.50	
27	48.8	37.7	0.5	616.67	300.93	
28	57.8	38.3	0.6	700	404.60	
29	0	0	0	0	0.00	
30	56.9	39.4	0.7	333.33	189.66	
31	0	0	0	0	0.00	
32	0	0	0	0	0.00	
33	57	39.1	0.3	600	342.00	
34	55.6	35.9	0.1	216.67	120.47	
35	58.6	40.2	0.1	566.67	332.07	
36	58	40.5	0.2	233.33	135.33	
37	49.2	36.3	0.1	750	369.00	
38	56.5	36.6	0.8	550	310.75	
39	58.5	41.3	0.1	1866.67	1092.00	
40	49.7	38.6	0.6	466.67	231.93	
41	55	41	0.1	466.67	256.67	
42	0	0	0	0	0.00	
43	0	0	0	0	0.00	
44	0	0	0	0	0.00	
45	54.3	39.1	0.4	533.33	289.60	
46	51.7	37.3	1.5	110	56.87	
47	0	0	0	0	0.00	
48	54.6	40.2	0.4	533.33	291.20	
49	57	41.6	0.1	233.33	133.00	
Average	40.42	28.92	0.24	311.23	171.37	

4.2.2 매립지 표면에서 발산되는 메탄 발산량

<표 4-8>에 1차(가을철)에서 4차(여름철)까지의 연구대상 매립지 표면에서 발산되는 메탄가스 발산량을 나타내었다.

1차 측정인 가을철에만 일부 표면에서 메탄가스가 발산되었고, 나머지 계절에서는 표면에서의 메탄가스 발산량은 없는 것으로 조사되었다.

Table 4-8. CH₄ surface emissions rate at landfill for research

measured point	1st			2nd		
	temp. of chamber(℃)	atmospheric pressure(mbar)	CH ₄ emission rate(L/m ² /hr)	temp. of chamber(℃)	atmospheric pressure(mbar)	CH ₄ emission rate(L/m ² /hr)
A	18	1010	N.D	5	980	N.D
B	17	1010	0.2226	6	980	N.D
C	17	1010	N.D	5	980	N.D
D	17	1010	N.D	7	980	N.D
E	18	1010	0.0214	5	980	N.D
F	17	1010	0.0261	6	980	N.D
G	18	1010	0.0060	4	980	N.D
H	18	1010	N.D	6	980	N.D
I	18	1010	0.0403	5	980	N.D
J	19	1010	N.D	5	980	N.D
K	19	1010	N.D	8	980	N.D
L	17	1010	0.0933	6	980	N.D
M	18	1010	N.D	3	980	N.D
Average	17.8	1010	0.0315	5.5	980	N.D
measured point	3rd			4th		
	temp. of chamber(℃)	atmospheric pressure(mbar)	CH ₄ emission rate(L/m ² /hr)	temp. of chamber(℃)	atmospheric pressure(mbar)	CH ₄ emission rate(L/m ² /hr)
A	15	978	N.D	20	985	N.D
B	17	978	N.D	21	985	N.D
C	16	978	N.D	20	985	N.D
D	16	978	N.D	19	985	N.D
E	17	978	N.D	22	985	N.D
F	16	978	N.D	22	985	N.D
G	15	978	N.D	21	985	N.D
H	18	978	N.D	21	985	N.D
I	15	978	N.D	19	985	N.D
J	16	978	N.D	20	985	N.D
K	17	978	N.D	20	985	N.D
L	16	978	N.D	19	985	N.D
M	13	978	N.D	22	985	N.D
Average	15.9	978	N.D	20.5	985	N.D

4.2.3 연구대상 매립지 발생 메탄가스 발생량

현장조사를 이용하여 각 매립지의 온실가스 배출량을 산정한 결과를 다음의 <표 4-9>에 나타내었다. 산정방법은 각 매립지의 가스배제공을 통하여 배출되는 온실가스의 양에 대해서는 모두 합산하였고, 복토표면을 통한 배출량은 평균 메탄표면발산량과 매립지의 면적을 곱하여 구한 것이다. 가스배제공과 복토표면의 배출량을 합하여 매립지의 온실가스 배출량으로 하였으며, 각 계절별 온실가스 배출량을 평균하여 나타내었다.

Table 4-9. GHG emissions at landfill for research

Classification	1st(fall)	2nd(winter)	3rd(spring)	4th(summer)	Average
CH ₄ emissions	5,224.22 ton/yr	2,929.83 ton/yr	5,480.97 ton/yr	3,152.46 ton/yr	4,196.87 ton/yr
CH ₄ flowrate in extraction well	282.46 ℓ/min	159.26 ℓ/min	297.94 ℓ/min	171.37 ℓ/min	227.76 ℓ/min
CH ₄ conc. in extraction well	49.25%	48.83%	48.22%	40.42%	46.68%
CH ₄ emissions in extraction well	5,196.09 ton/yr	2,929.83 ton/yr	5,480.97 ton/yr	3,152.46 ton/yr	4,189.84 ton/yr
CH ₄ surface emissions	28.13 ton/yr	0 ton/yr	0 ton/yr	0 ton/yr	7.03 ton/yr

4.3 매립지 온실가스 배출량 산정방법별 배출통계 비교

매립지별로 매립 폐기물의 성상과 매립량이 일정하지 않으며, 매립공법, 복토 방법, 매립가스 배출방법 등도 다르다. 이러한 여러 변수에 의해 매립가스 배출량이 변할 수 있으며, 각 변수가 매립가스 발생에 어떠한 영향을 미치는지 정량화하기가 사실상 불가능하다. 그러므로 매립가스 배출량을 산정하여 통계구축 하는 것은 근본적으로 불확실성을 내재하고 있다.

매립지에서 발생하는 온실가스의 배출량을 산정하는 주요 국제적인 통용방법은 당해연도 매립된 폐기물은 당해연도에 모두 매립가스화 된다는 가정의 기본방법인 Tier 1이 있고, 매립된 폐기물은 일차 분해방정식에 의해 매립 완료 후에도 지속적으로 매립가스를 발생한다는 가정의 FOD 방법인 Tier 2가 있다.

Tier 1은 매립기술 및 외부여건과 관련된 인자에 따른 배출량 차이를 고려하지 않고 있고, Tier 2는 직접 측정을 통해 메탄가스 배출량을 결정하므로 Tier 1에서 다루지 못한 매립기술에 따른 배출량 차이를 반영하고 있다. 단지 측정결과가 얼마만큼의 대표성을 확보하는가에 따라서 배출량 산정의 정확도가 결정될 것으로 판단된다.

모든 매립가스 배제공에서 메탄 발생량을 측정해야 하나, 현실적으로 불가능하고, 일부 측정한 배제공 결과로부터 전체 발생량을 유추 결정해야 한다. 그러므로 일부 측정치로부터 전체 발생량을 결정하는 방식이 신뢰성을 갖기 위해서는 여러 매립지를 대상으로 하여 지속적인 자료 축적이 이루어져야 한다. 또한 배제공에서 배출되는 온실가스의 양이 시간적에 따라 변하는데 그것을 어떻게 보정해야 하는가도 향후 검토사항 중의 하나로 판단되며, 보정계수의 검토도 필요하리라 사료된다.

본 연구에서는 Tier 1과 Tier 2 방법을 적용하여 배출량을 산정하여 비교하였다. Tier 1 적용을 위한 산정식은 식(16)에서 보는 것과 같다. 여기서 주목해야 할 사항은 메탄 회수율(R)이 없다고 가정한 것이다. 실제 현장에서는 여러 형태로 매립가스를 포집 처리하고 있다. 그러나 매립지별로 메탄 회수율을 결정하기가 용이하지 않아 방법론 개발 등에 대한 심도 있는 연구가 뒤따라야 하리라 판단된다. 그러므로 여기서 산정한 메탄가스 배출량은 배출될 수 있는 최대치이다.

$$Q_{CH_4} \text{ 배출량(톤/yr)} = (MSW_T \times MSW_F \times MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times 16/12 - R) \cdot (1 - OX) \quad (16)$$

Tier 2 적용을 위해서는 다음과 같은 식(17)을 활용하였다. 온실가스 배출량인 Q_{CH_4} 는 매립지의 배제공과 표면에서 발산하는 메탄가스량을 매립지에서 직접 측정하여 결정하고, 이를 식(17)에 대입한 다음 k 값을 계속 변화시키면서 측정 Q_{CH_4} 와 가장 접근하는 계산방식인 시행착오방식(trial-and-error method)을 사용하여 Q_{CH_4} 를 허락하는 k 값을 선정하였고, 선정된 k 값을 이용하여 프로그램으로 연도별 메탄가스 배출량을 산정하였다.

$$Q_{CH_4}(t) = \sum_{i=1}^N M_o(i) L_o(i) [\exp\{-k(t-i)\} - \exp\{-k(t-i+1)\}] \quad (17)$$

4.3.1 Tier 1에 의한 메탄가스 배출량 산정

Tier 1에 의한 메탄가스 배출량 산정시 사용되는 변수와 변수를 결정하기 위한 자료 출처 및 가정은 다음과 같다.

년도별 매립량($MSW_T \times MSW_F$)은 앞에 나타낸 매립장의 년도별 매립량을 사용한다. 음식물류, 재활용품 등의 분리수거로 매립 초기보다는 매립량이 점차 줄고 있다. 연간매립량의 상대 표준편차도 28.7%로 상당히 높다.

메탄보정계수(MCF)는 호기성 조건일 경우 0이고, 혐기성 조건의 경우는 1이지만, 관리가 잘 이루어진 매립지는 복토재를 사용하고, 매립지 표면을 다듬고, 폐기물을 압축 다짐하기 때문에 공기가 투입할 가능성이 그만큼 적어지기 때문에 혐기성 반응이 진행될 가능성이 높아진다. 이러한 매립지의 경우는 MCF값이 크므로 연구대상 매립지의 MCF값은 1.0으로 정한다. IPCC GHG Protocol에서도 위생매립지의 경우 MCF값을

1.0으로 권장하고 있다.

유기탄소(DOC) 비율은 매립 폐기물 성상 조사 결과의 물리적 조성별 습윤기준 원소조성과 환경부에서 조사 발표한 “전국 폐기물 발생 및 처리현황”에서 년도별 울산시 폐기물 발생 및 처리 통계자료로 계산하였다.

DOC는 2000년부터 크게 떨어졌으며, 1996~1999년까지는 16% 수준이었으나, 그 이후에는 11% 수준으로 많은 감소가 나타났다. 실제 매립폐기물도 음식물쓰레기 등의 가연성분이 감소하고, 불연성분이 증가하였다. 주요 원인은 음식물쓰레기의 분리 배출이 시행되기 시작하여 매립폐기물에 음식물쓰레기의 함유량이 크게 떨어졌기 때문으로 풀이된다.

동화 가능한 DOC(DOC_F)는 매립지의 DOC 중에서 생분해가 가능한 비율을 의미한다. 폐기물 중에서는 일부 성분이 생분해가 되지 않거나 분해속도가 상당히 느린 것이 있다. 이러한 대표적인 성분이 리그닌이며, 나무, 종이 등에서 이러한 성분이 많이 발견된다. 따라서 메탄가스 발생량에서 이러한 특성을 반영하기 위해 DOC_F를 도입하였다. IPCC 지침서에서는 DOC_F의 기본값으로 0.77을 제시하고 있지만, 최근의 문헌 조사에 의하면 이 값이 다소 과대 평가된 것으로 알려지고 있기 때문에 최근의 IPCC(2000)의 Good Practice Guidance에서는 DOC_F의 기본값으로 0.5~0.6을 사용하는 것을 권장하고 있다. 본 연구에서는 0.55를 적용한다.

매립가스 중의 메탄가스 비율(F)값은 1차 측정시(가을철) 0.4925, 2차 측정시(겨울철) 0.4883, 3차 측정시(봄철) 0.4822, 4차 측정시(여름철)에 0.4042로 여름철을 제외하고는 계절별로 F값의 차이가 크지 않았다. 일반적으로 혐기성 분해 반응이 활발히 진행되면 매립가스 중에 메탄의 함량비가 높아지고, 따라서 F값도 증가할 것으로 기대하였다. 이러한 현상은 여름철에 보다 뚜렷하리라 기대하였으나, 여름철의 F값이 가장 낮게 나왔으며, 이에 대한 해석은 아직까지 내리지 못하고 있는 상황이다.

본 연구조사에서 측정한 F값의 평균은 0.4668, 표준편차 0.0419로서 일

반적인 기본 값인 0.5와 유사하였다. 이는 정상적인 매립가스 배출 형태를 보이고 있다.

매탄가스 회수량(R)은 온실가스 배출통계 구축에서 명확한 모니터링을 요구하고 있다. 이러한 이유는 교토메커니즘의 청정개발체제(CDM) 및 배출권거래제(ET)에서의 배출량 검증시 확인 가능하도록 요구하고 있다. 모니터링이 되지 않는 Flare Stack에서의 매립가스 연소부분을 회수율로 인정하지 않는 것도 이러한 이유이다. 따라서 매립가스 포집에 대한 모니터링이 되지 않는 매립지는 매탄가스의 회수율이 없다고 간주된다. 그러나, 대부분의 매립지에서 최소한 매립가스를 연소처리하고 있어 회수율이 상당히 높을 것으로 추정되나, 정량화하기가 힘들어 본 연구에서는 회수율이 없다고 가정하였고, 이로 인해 매탄가스 배출량의 과대평가가 예상된다.

매립가스 산화율(OX)은 앞에서 언급한대로 미국의 위생매립지의 산화율을 10%로 간주하고 있어, 본 연구대상의 위생매립지도 10%를 적용하였다.

매탄가스의 연도별 배출 결과는 <표 4-10>과 <그림 4-1>에 정리되어 있다. 1996년에 최대치인 20,859ton-CH₄/yr을 나타냈으며, 최소치는 2001년의 5,584ton-CH₄/yr로 조사되었다. 1994~2002년의 매탄가스 연간 평균 발생량은 11,737ton-CH₄/yr, 총 발생량은 105,635ton-CH₄로 나타났다. 2000년 이후부터 매탄가스 발생량이 절반 수준으로 감소되었으며, 이는 매립량 감소와 동일한 양상을 보인다. 이는 Tier 1 방식의 매립가스 발생량 산출 방식이 매립량과 비례하기 때문이다.

Table 4-10. Yearly CH₄ emissions and factors using Tier 1

Factors	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
waste disposed quantity (ton/yr)	233,759	327,329	384,468	309,726	259,891	275,137	217,051	159,693	165,894
MCF	1.0								
DOC(%)	14.18 ¹	14.18 ¹	17.61	16.08	15.65	16.21	10.37	11.35	11.99
DOC _F	0.55								
F	0.4668								
R	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OX	0.1								
CH ₄ emissions (ton/yr)	10,213	14,301	20,859	15,344	12,531	13,741	6,935	5,584	6,128

¹ : DOC avg. value(1996~2002) was used due to absence of waste composition data

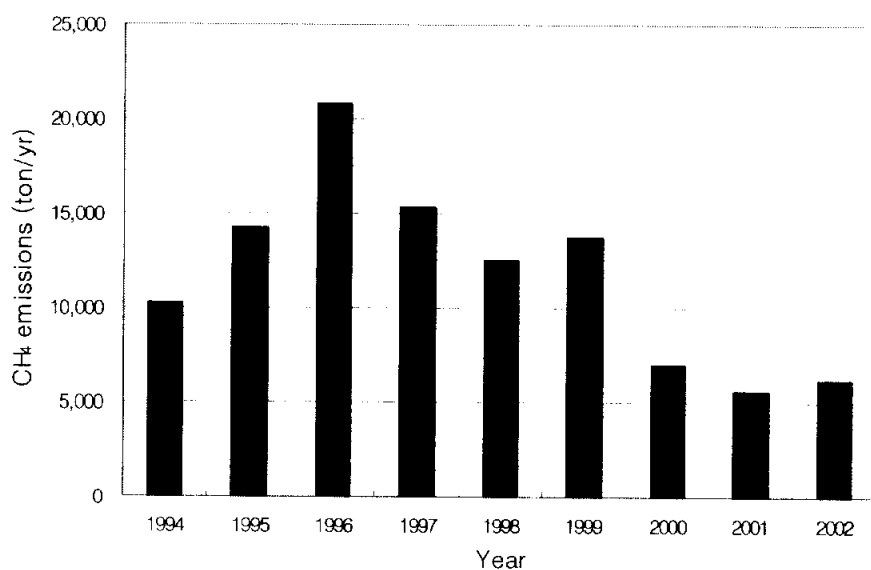


Fig. 4-1. Yearly CH₄ emissions using Tier 1

4.3.2 Tier 2에 의한 메탄가스 배출량 산정

1차(가을철), 2차(겨울철), 3차(봄철), 4차(여름철)회 측정된 메탄 발생속도(Q_{CH_4})는 각각 5,224.22, 2,929.83, 5,480.97, 3,152.46ton/yr이다. 평균 메탄배출계수(L_0)값은 Tier 1에서 가정한 변수값과 매립 폐기물 분석결과로 산출하면 가을, 겨울, 봄, 여름에 각각 0.04512, 0.02712, 0.06573, 0.02991 ton-CH₄/ton-waste로 산출되었다.

가을과 봄에 높은 반면에 겨울과 여름에 낮은 값을 보여주고 있다. 이처럼 평균 메탄배출 계수값의 차이가 생기는 주된 이유는 메탄 발생속도의 측정치가 두 배 이상 차이가 나기 때문이다. 이처럼 메탄 발생속도가 커다란 차이를 보이는 이유 중의 하나는 계절에 따라 메탄 분해 및 발생 양상이 달라지기 때문으로 추정할 수 있겠다. 겨울철에 메탄 발생속도가 낮을 것으로 예상되었지만, 여름철에 낮은 메탄 발생속도는 예상하지 못했었다. 일반적으로 여름철에는 유기물질의 분해가 왕성하므로 메탄 발생속도가 높으리라 기대했으나, 가장 낮은 메탄 발생속도를 기록했다. 여름철의 빗물에 의한 영향가스 배제상의 문제로 추정할 수 있으나, 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 측정횟수를 늘이고, 지속적인 조사 검토가 더욱 필요하다고 판단된다.

메탄 발생속도상수(k)는 폐기물이 분해되어 절반이 되는 반감기를 나타내는 지표인데, 통상 국제적으로 매립되는 폐기물 분해 반감기를 14년 정도로 추정하여 k 값을 0.05로 기본값을 제시하고 있으나, 본 연구에서는 메탄 발생속도(Q_{CH_4})와 메탄배출계수(L_0)값으로부터 프로그램에 의해 획득된 k 값은 0.10851로서 폐기물의 분해 반감기는 6.4년으로 산출되었다. 이것은 외국의 경우보다 폐기물중 음식물류의 비율이 높아 나타나는 현상으로 판단되며, 우리나라도 2000년 이후에는 음식물류의 직매립이 금지되고 있어 향후에는 분해 반감기가 늘어나 k 값이 낮아질 것으로 판단된다.

폐기물 매립량, 평균 메탄배출계수(L_0), 메탄 발생속도상수(k)로 년도

별 발생되는 메탄가스량과 향후 발생 예측량을 <표 4-11>과 <그림 4-2>에 나타내었다. 매립기간에는 매립시기가 증가할수록 메탄가스 배출량이 점차 증가하는 양상을 보이고, 매립기간 동안의 Tier 1에 의한 메탄가스 배출량이 Tier 2 보다 1.5~22배정도 높게 나타났다. Tier 1에 의하면 2002년의 메탄가스 배출량은 6,128ton/yr인 반면에 Tier 2에 의해서는 4,155ton/yr로 Tier 1에 의한 결과가 1.5배 이상 높은 것으로 나타났다.

Table 4-11. Yearly CH₄ emissions and expectations using Tier 2

year	CH ₄ emissions (ton/yr)	year	CH ₄ emissions (ton/yr)	year	CH ₄ emissions (ton/yr)
1994	0	2018	824	2042	61
1995	662	2019	740	2043	55
1996	1,520	2020	663	2044	49
1997	2,452	2021	595	2045	44
1998	3,077	2022	534	2046	40
1999	3,496	2023	479	2047	35
2000	3,915	2024	430	2048	32
2001	4,127	2025	386	2049	29
2002	4,155	2026	346	2050	26
2003	4,197	2027	310	2051	23
2004	3,765	2028	279	2052	21
2005	3,378	2029	250	2053	18
2006	3,031	2030	224	2054	17
2007	2,719	2031	201	2055	15
2008	2,440	2032	180	2056	13
2009	2,189	2033	162	2057	12
2010	1,964	2034	145	2058	11
2011	1,762	2035	130	2059	10
2012	1,581	2036	117	2060	9
2013	1,418	2037	105	2061	8
2014	1,272	2038	94	2062	7
2015	1,141	2039	84	2063	6
2016	1,024	2040	76	2064	6
2017	919	2041	68	2065	5
Sum		64,174			

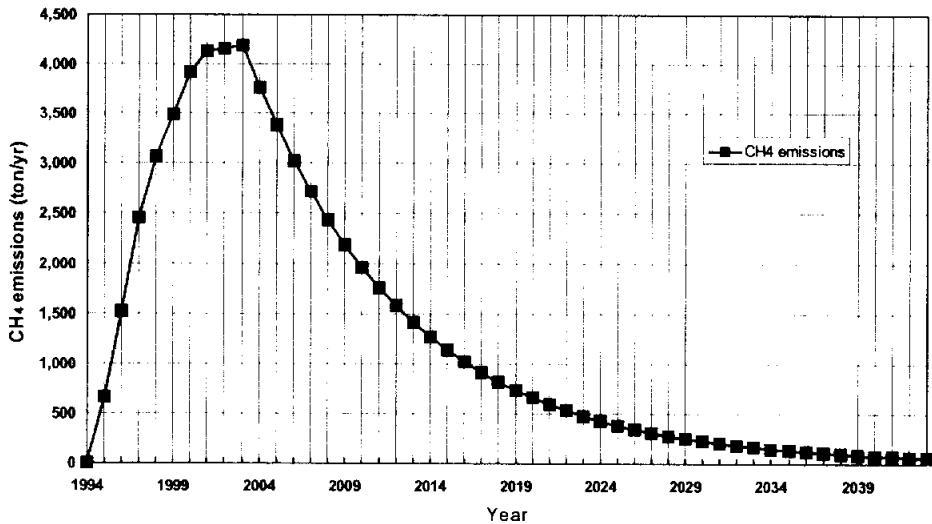


Fig. 4-2. Yearly CH₄ emissions and expectations using Tier 2

4.3.3 온실가스 배출량 산정방법별 배출통계 비교

Tier 1 방법은 당해연도 매립된 폐기물은 당해연도에 매립가스화 된다는 가정에 의해 9년간 총 메탄가스 발생량이 105,635ton-CH₄이었고, 매립된 폐기물은 일차분해방정식에 의해 매립가스화 된다는 Tier 2 방법으로 1994년부터 2065년까지 발생 및 예측한 총 메탄가스 발생량은 70년간 64,174 ton-CH₄이었다. 이론적으로 Tier 1방법으로 산출한 총 온실가스 배출량과 Tier 2방법으로 산출한 총 온실가스 배출량은 같아야 하지만, Tier 1방법으로 산출한 메탄가스량이 Tier 2방법보다 1.65배 많이 발생하여 배출되는 것으로 산정되었다.

이러한 이유는 앞서 언급한 바와 같이 Tier 1은 매립기술 및 외부여건과 관련된 인자에 따른 배출량 차이를 고려하지 않고 있고, Tier 2는 직접 측정을 통해 메탄가스 배출량을 결정하므로 Tier 1에서 다루지 못한 매립기술에 따른 배출량 차이를 반영하고 있기 때문이고, 메탄가스 측정 결과가 얼마만큼 신뢰할 수 있는가가 중요한 요소 중의 하나이며, 신뢰

성 확보 및 유지의 필요성이 요구되는 것으로 판단된다.

Tier 1과 같이 과다하게 온실가스가 발생하는 것으로 계산되는 방법으로 산출된 온실가스 발생량은 UNFCCC에 제출하는 온실가스 배출량 국가보고서에 반영될 경우 국가 이미지에 나쁜 영향을 미칠 수 있고, 온실가스 의무감축율을 높일 수 있어 국가 경쟁력을 낮출 수 있다.

하지만, Revised 1996 IPCC Guideline에서는 매립지에서의 온실가스 배출량 통계구축시 매립량, 매립 폐기물의 성상조사, 매립가스 관리현황 등의 과거 매립 이력을 확보할 수 없다면 기본방법인 Tier 1을 적용하도록 권장하고 있기 때문에 임의로 Tier 1 또는 Tier 2를 선택할 수 있는 것은 아니다.

따라서 현실적이고, 국가 이익을 줄 수 있는 배출통계 구축을 위해서는 표준화된 통계 기초자료 확보방안이 마련되어야 한다.

또한, Tier 2방법으로 온실가스 배출량 산정시 적용된 변수 값중 우리나라에서 연구하지 못하고, IPCC Guideline에서 제시하는 기본 값은 우리나라의 현실을 반영하지 못하는 경우가 있으므로 조속한 연구가 필요하다.

5. 결 론

환경부문중 매립분야 온실가스 배출통계 구축을 위해 매립된 폐기물의 성상조사, 매립가스 농도 및 발생량 조사 및 통계 기초자료를 조사하여 Tier 1 및 Tier 2의 배출통계 구축방법별로 변수값과 배출량을 산정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매립가스중의 메탄가스 비율은 계절별로 1차(가을철) 49.25%, 2차(겨울철) 48.83%, 3차(봄철) 48.22%, 4차(여름철) 40.42%로서 평균 46.68%로 조사되었고, 온실가스인 메탄가스 발생량은 1차 5,224.22, 2차 2,929.83, 3차 5,480.97, 4차 3,152.46ton/yr로 조사되어 년평균 메탄가스 발생량은 4,196.87ton/yr이었다.
2. 메탄 발생속도상수(k)는 폐기물이 분해되어 절반이 되는 반감기를 나타내는 지표인데, 통상 국제적으로는 기본적으로 0.05를 적용하여 반감기를 14년 정도로 제시하고 있으나, 본 연구에서는 메탄 발생속도(Q_{CH_4})와 메탄배출계수(L_0)값으로부터 프로그램에 의해 획득된 k 값은 0.10851로서 폐기물의 분해 반감기는 6.4년으로 산출되었다. 이것은 외국의 경우보다 폐기물중 음식물류의 비율이 높아 나타나는 현상으로 판단되며, 우리나라도 2000년 이후에는 음식물류의 직매립이 금지되고 있어 향후에는 분해 반감기가 늘어나 k 값이 낮아질 것으로 판단된다.
3. 매립지 온실가스 배출통계 기본방법인 Tier 1로 산출한 온실가스 발생량은 1996년에 최대치인 20,859ton-CH₄/yr을 나타냈으며, 최소치는 2001년의 5,584ton-CH₄/yr로 조사되었고, 1994~2002년의 메탄가스 연간 평균 발생량은 11,737±5,027ton-CH₄/yr, 총 발생량은

105,635ton- CH₄로 나타났다. 2000년 이후부터 메탄가스 발생량이 절반 수준으로 감소되었으며, 이는 매립량 감소와 동일한 양상인데, 이는 Tier 1 방식의 매립가스 발생량 산출 방식이 매립량과 비례하기 때문이다.

4. FOD 방법인 Tier 2로 1994년부터 2065년까지 예측한 온실가스 배출통계는 64,174ton-CH₄로서 Tier 1방법이 Tier 2보다 1.65배정도 높게 발생하는 것으로 산출되었다. 매립기간 도중에 산정한 메탄 배출량은 Tier 1의 결과가 Tier 2 보다 훨씬 높다. 그 이유는 Tier 1은 매립된 폐기물이 매립과 동시에 모두 배출된다는 가정 때문이다. 그러나 매립이 종료된 후에도 메탄가스가 지속적으로 배출되므로 Tier 1에 의한 결과는 매립가스 배출을 적절하게 모사한다고 할 수는 없다. 반면에 Tier 2는 이러한 현상을 반영하고 있어 매립 종료 후에도 메탄가스가 지속적으로 배출되는 것을 제시하고 메탄가스 배출량을 산출할 수 있다. 그러므로 IPCC에서 인지하고 있듯이 Tier 2로 산정 방식을 전환하기 위해서는 매립지별로 매립이력에 대한 조사가 필요하고, 최소한 연도별 매립량 자료가 있어야 Tier 2로 메탄가스 배출량을 산정할 수 있다.

이상과 같은 연구결과로부터 향후 측정결과의 신뢰성 확보를 위한 표준화된 측정방법과 기초자료 확보방안에 대한 연구 필요성이 있었으며, 한편, 온실가스 배출량 산정시 적용되는 보정계수 등의 변수값에 대한 연구의 필요성도 요구되며, 상세한 검토가 이루어질 필요성도 제기되었다.

참고문헌

- 보건복지부, 보건복지통계연보, 1998
- 수도권매립지운영관리조합, 매립가스 처리기술 설치효율 분석조사 연구용역 보고서, 1997. 12.
- 신항식 등, 모형 매립조를 이용한 폐기물의 분해 증진 연구, 폐기물학회지 제10권 제2호, 1993, p129-136
- 신항식 등, 생분해도 실험에 의한 주방폐기물의 혐기성 소화 타당성 연구, 폐기물학회지 제10권 제1호, 1993, p35-42
- 조재경 등, 주방폐기물의 Biochemical Methane Potential 측정, 폐기물학회지 제10권 제2호, 1993, p211-217
- 통계청, 1970-2020 시도별 추계인구, 1998
- 통상산업부, 기후변화협약관련 국가보고서 작성 및 대응방안 연구, 1995
- 환경보전장기종합계획, 1996-2005, 환경비전 21, 환경부, 1996
- 환경부, 환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사, 2000
- 환경부, 환경부문의 온실가스 저감잠재력 평가, 2000
- Bevington, P. R. and Robinson, D. K. (1992). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. WCB/McGraw-Hill Boston USA, p. 328.
- Bingemer, H.G. and P.J. Crutzen (1987). The production of methane from solid wastes. *Journal of Geophysical Research*, 92 (D2), pp. 2181-2187.
- Cochran, W.G. (1963). *Sampling Techniques*. 2nd edition, John Wiley & Sons Inc., New York, p. 411.
- Cullen, A.C. and H.C. Frey (1999). *Probabilistic Techniques in Exposure and Risk Assessment: A Handbook for Dealing with Variability and Uncertainty in Models and Inputs*. Plenum Press, New York.
- Derwent R.G., Simmonds P.G., O Doherty S., Ciais P. and Ryall D.B. (1998b). European source strengths and Northern Hemisphere baseline concentrations of radiatively active trace gases at Mace

- Head, Ireland . *Atmos Environ.*, 32, pp. 3703-3715.
- Dlugokencky E.J., Steele L.P., Lang P.M. and Mesarie K.A. (1994).
The growth rate and distribution of atmospheric CH₄. *J. Geophys. Res.*, 99, pp. 17021-17043.
- Eggleston, S. *et al.* (1998). *Treatment of Uncertainties for National Greenhouse Gas Emissions*. Report AEAT 2688-1 for DETR Global Atmosphere Division, AEA Technology, Culham, UK.
- Environment Agency of the United Kingdom (1999). Environment Agency's Technical Guidance Notes, *Environment Agency's Pollution Inventory* (1998 Data), UK.
- European Environmental Agency (EEA) (1997). *Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook*. European Environmental Agency, Copenhagen.
- Flugsrud, K., W. Irving and K. Rypdal (1999). *Methodological Choice in Inventory Preparation. Suggestions for Good Practice Guidance*. Document 1999/19, Statistics Norway.
- Frey, H.C. and D.E. Burmaster (1999). Methods for Characterization of Variability and Uncertainty: Comparison of Bootstrap Simulation and Likelihood-Based Approaches . *Risk Analysis*, 19(1): 109-129.
- Frey, H.C. and D.S. Rhodes (1996). Characterizing, Simulating, and Analyzing Variability and Uncertainty: An Illustration of Methods Using an Air Toxics Emissions Example . *Human and Ecological Risk Assessment*, 2(4), pp. 762-797.
- Frey, H.C., Bharvirkar, R. and Zheng, J. (1999). *Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Emissions Estimation, Final Report*. Prepared by North Carolina State University for U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, USA, July 1999.
- Frey, H.C., Bharvirkar, R., Thompson, R. and Bromberg, S. (1998). Quantification of Variability and Uncertainty in Emission Factors and Inventories . *Proceedings of Conference on the Emission*

- Inventory*, Air & Waste Management Association, Pittsburgh, PA, USA.
- Graedel T. E., Bates, T.S., Bouwman, A.F., Cunbold, D., Dignon, J., Fung, I., Jacob, D.J., Lamb, B.K., Logan, J.A., Marland, G., Middleton, P., Pacyna, J.M., Placet, M. and Veldt, C. (1993). A compilation of inventories of emissions to the atmosphere . *Global Biogeochemical Cycles*, 7, pp. 1-26.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1997). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volumes 1, 2 and 3*. J.T. Houghton et al., IPCC/OECD/IEA, Paris, France.
- International Organization for Standardization (ISO) (1994). *Air Quality, Determination of Performance Characteristics of Measurement Methods*. ISO 9196:1994. ISO, Geneva, Switzerland.
- ISO (1993). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. International Organization for Standardization, ISBN 92-67-10188-9, ISO, Geneva, Switzerland, p.101.
- Janssen L.H.J.M., J.G.J. Olivier, A.R. van Amstel (1999). Comparison of CH₄ emission inventory data and emission estimates from atmospheric transport models and concentration measurements . *Environmental Science & Policy*, 2, pp. 295-314.
- Levin I., H. Glatzel-Mattheier, T. Marik, M. Cuntz, M. Schmidt, D.E. Worthy (1999). Verification of German methane emission inventories and their recent changes based on atmospheric observations . *J. Geophys. Res.*, 104, pp. 3447-3456.
- Lim B., P. Boileau, Y. Bonduki, A.R. van Amstel, L.H.J.M. Janssen, J.G.J. Olivier, C. Kroeze (1999a). Improving the quality of national greenhouse gas inventories . *Environmental Science & Policy*, 2, pp. 335-346.
- Lim, B, P. Boileau (1999b). Methods for assessment of inventory data quality: issues for an IPCC expert meeting . *Environmental Science & Policy* 2, pp. 221-227.

- NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) (1996). *A Guide for Uncertainty Analysis in Dose and Risk Assessments Related to Environmental Contamination*. NCRP Commentary No. 14, Bethesda, MD, USA.
- Norwegian Pollution Control Authority (1999). *Evaluation of Uncertainty in the Norwegian Emissions Inventory*. Norwegian Pollution Control Authority (SFT) Report 99:01, Norway.
- Oonk, H. and T. Boom (1995). *Landfill gas formation, recovery and emissions*, TNO-report R95-203, TNO, Apeldoorn, The Netherlands.
- Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (SBSTA), United Nations Framework Convention on Climate Change (1999). *National Communications from Parties included in Annex 1 to the Convention, Guidelines for the Preparation of National Communications, Draft conclusions by the Chairman*. FCCC/SBSTA/1999/L.5, p. 17.
- United Nations Framework Convention on Climate Change, 1992
- USEPA (1999). *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-1997*. EPA 236-R-99-003, U.S. Environmental Protection Agency.
- Van Amstel A.R, J.G.J. Olivier and L.H.J.M. Janssen (1999). Analysis of differences between national inventories and an Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR). *Environmental Science & Policy*, 2, pp. 275-294.

감사의 글

학업에 열중할 수 있도록 많은 성원과 격려를 주셔서 소중한 결실을 맺게 되어, 모든 분께 깊은 감사를 드립니다.

우선, 석사과정과 논문이 완성되기까지 격려와 조언으로 인도하여 주신 지도교수 옥곤 교수님께 진심으로 감사 드리며, 바쁘신 시간 중에도 논문을 심사하여 주시고, 조언해 주신 김영섭 교수님과 정용현 교수님께도 심심한 감사를 드립니다.

그리고 세세한 가르침을 주신 한영호 교수님, 이동인 교수님께 감사드립니다.

또한 연구실에서 늦게까지 연구하며 서로를 감싸주는 모습이 아름다운, 논문이 있기까지 편집에 많은 도움을 준 김동환, 김영교, 박지현, 김성용, 지성희, 정봉길, 황인자 및 실험실 식구들에게도 감사 드립니다.

어려울 때 많은 격려와 성원을 보내주신 최경식 팀장님을 비롯한 가족 같은 지구환경팀원들과도 기쁨을 같이 하고 싶습니다.

그리고, 업무를 같이하며 오늘의 저를 있게 해주신 이준홍 부장님과 동료이자 동반자인 미소희 멤버, 항상 힘이 되어 주셨던 공단 직원 분들에게도 감사 드립니다.

저에게 온 정성을 쏟아주신 어머니와 장인, 장모님의 크신 사랑이 오늘의 저를 만들어 주셨기에 항상 감사 드립니다.

어려운 시기에도 저를 사랑으로 감싸주신 형님과 형수님, 누님과 매형께도 감사 드립니다.

마음 깊이 항상 고마움 마음을 간직하고 있는 우리 가족의 든든한 후원자이자, 나의 동반자 역할을 하면서 사랑으로 같이한 아내와 언제나 자랑스러운 우리 아들 정한록에게 이 작은 결실을 바칩니다.

2004년 8월

정 동 희