creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

석사학위논문

폐기물매립지의 메탄 발생 특성 및 매개변수 개발 연구

A study on the development of parameter based on the investigation of methane emission characteristics in a landfill site

2015년 8월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
김 지 혜

폐기물매립지의 메탄 발생 특성 및 매개변수 개발 연구

A study on the development of parameter based on the investigation of methane emission characteristics in a landfill site

지도교수 전 의 찬

이 논문을 이학 석사학위논문으로 제출함

2015년 8월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
김 지 혜

김지혜의 석사학위논문을 인준함

2015년 8월

심사위원장 _____ (인)

심 사 위 원 _____ (인)

심 사 위 원 _____ (인)

국문초록

폐기물매립지에서 발생하는 메탄은 2012년 기준으로 국가 총 메탄 배출량의 22.4%을 차지하고 있어 메탄 배출량에 대한 신뢰성 확보와 배출량 관리가 중요하다. 국내에서는 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 일차분해모델(First Oder Decay model, FOD model)을 이용하여 폐기물매립지 온실가스 배출량을 산정한다. 또한 온실가스 배출량 산정에 필요한 매개변수도 2006 IPCC 가이드라인 기본값을 활용하고 있다. 하지만 IPCC 기본값의 경우 국내 폐기물매립지의 특성을 반영하기 어려운 한계점이 존재하여 국내특성을 반영할 수 있는 매개변수에 대한 연구의 중요성이 커지고 있다.

본 연구에서는 현장측정을 통한 국내 소규모폐기물매립지의 기상 등에 따른 메탄 발생 특성을 파악하고 일차분해모델의 매개변수 중 하나인 메탄산화계수를 산정하는데 목적이 있다.

메탄의 발생 특성 및 메탄산화계수 산정을 위해 폐기물매립지 중 40지점을 선정하여 7월 ~ 10월간 총 5회에 걸쳐 측정하였으며, 닫힌챔버법과 비분산적외선 분석기(NDIR)을 이용하여 매립지표면에서 발생하는 메탄과 이산화탄소의 플럭스와 배출량을 산정하였다.

폐기물매립지 메탄 표면 배출량 산정결과, 평균 3.2 ton/day로 나타났으며, 9월의 메탄 표면 배출량은 각각 6.2 ton/day로 측정회차 중 가장 높게 측정되었다.

매립지의 최종매립완료시기별로 구역을 나누어 매립완료시기별 메탄 플럭스의 차이가 있는지 Kruskal-Wallis 분석결과, 유의한 차이를 보이지 않았다. 온실가스 플럭스와 기상조건과의 Kendall’s tau 분석결과, 강수량과의 강한 양의 상관관계를 보여 강수량과 관련이 있을 것으로 판단된다. 위 분석결과에 따라 현장측정을 통하여 온실가스 배출량 산정 시, 측정일의 기상에

따라 배출량 결과에 차이가 생길 수 있다. 따라서 계절에 대한 고려뿐 아니라 기상조건을 고려하여 온실가스 배출량을 산정해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 메탄산화계수를 산정하기 위해 물질수지법을 이용하였다. 메탄산화계수는 평균 0.64로 산정되었으며, 0.48 ~ 0.76의 범위로 나타났다.

IPCC 기본값과 비교결과, 본 연구에서 산정된 메탄산화계수는 IPCC 기본값 0.1보다 비교적 높게 나타났다. 따라서 FOD모델을 통해 매립지에서 발생되는 메탄 배출량 산정 시, IPCC 기본값을 사용하게 되면 온실가스 배출량이 과다하게 산정될 가능성이 있으므로 보다 정확한 매립지 온실가스 배출량을 산정하기 위해서 우리나라 고유 메탄산화계수 개발이 필요할 것으로 사료된다.

일반적으로 매립지에서의 온실가스 배출은 토양의 온도와 수분, 대기압 등 가스상 물질의 배출에 영향을 주는 인자와 토양미생물의 활동에 의한 복합적인 요인에 의해 발생된다. 추후 이러한 요소들을 고려한 연구가 추가로 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 더 많은 매립지를 대상으로 메탄산화계수를 산정한다면 보다 정확하고 신뢰성 높은 폐기물매립지에서의 온실가스 배출량 관리가 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 매립지, 메탄 발생 특성, 물질수지법, 메탄산화계수

목 차

제1장 서 론 ····· 1

제1절 연구의 배경 및 목적 ····· 1

제2절 연구의 범위 및 방법 ····· 3

제2장 이론적 배경 ····· 5

제1절 매립지에서의 온실가스 발생 메커니즘 ····· 5

제2절 매립지에서의 온실가스 측정방법 ····· 8

1. 챔버 측정방법 ····· 8
2. 미기상학적 측정방법 ····· 9
3. 플룸 측정방법 ····· 10

제3절 메탄산화 ····· 11

1. 메탄산화 ····· 11
2. 메탄산화계수 ····· 12
3. 메탄산화계수 산정방법 ····· 14

제3장 연구 방법 ····· 17

제1절 조사 대상 매립지 및 측정지점 선정 ····· 17

1. 조사 대상 매립지 ····· 17
2. 매립지표면 측정지점 ····· 20

제2절 실험 방법 ····· 22

1. 매립지표면 온실가스 발생량 측정 ····· 22
2. 매립가스 회수 ····· 24

제3절 측정자료의 통계분석 ····· 25

1. 비모수 일원배치 분산분석 ····· 25
2. 비모수 상관분석 ····· 27
제4절 메탄산화계수 산정 ····· 29

제4장 연구 결과 ····· 31
제1절 매립지의 메탄 발생 특성 ····· 31
1. 매립지표면의 메탄 플럭스 ····· 31
2. 메탄 배출량과 영향인자의 관계 ····· 38
제2절 매립지의 메탄산화계수 산정 ····· 42
1. 메탄산화계수 산정 ····· 42
2. 메탄산화계수와 메탄 플럭스의 상관분석 ····· 44

제5장 결 론 ····· 45

참 고 문 헌 ····· 47

ABSTRACT ····· 54

List of Table

Table 1. Methane oxidation factor(OX) for solid waste landfill(IPCC, 2006) ···· 13
Table 2. Status of Sooncheon landfill site ····· 17
Table 3. Physical composition of waste in Sooncheon landfill site ····· 19
Table 4. Measurement dates and the number of measurement points ····· 20
Table 5. The number of measurement points and measurements for each area according to the final year of landfill cover ····· 21
Table 6. Summary of CH_4 and CO_2 flux field investigation in this study ·· 32
Table 7. CH_4 recovery rate and CH_4 concentration in Sooncheon landfill site ·· 36
Table 8. The result of surface emission of CH_4, CO_2 and CH_4 recovery rate in Sooncheon landfill site ····· 37
Table 9. The Result of methane flux from Sooncheon landfill site and the number of measurement points ····· 39
Table 10. The Result of Kruscal-Wallis test ····· 39
Table 11. Daily average weather condition for Sooncheon during the measurement ·· 41
Table 12. Correlation coefficient between methane surface emission, methane recovery rate and meteorological element ····· 41
Table 13. The result of methane oxidation rate and methane oxidation factor in this study ····· 43
Table 14. The result of correlation analysis of methane oxidation factor and methane, carbon dioxide flux for each measurement point ····· 44

List of Figure

Figure 1. Research procedure of this study ····· 4
Figure 2. Generalized phases in the generation of landfill gases ····· 7
Figure 3. Landfill methane mass balance ····· 15
Figure 4. Sooncheon landfill ground plan ····· 18
Figure 5. Location of the surface flux measurement points ····· 21
Figure 6. Schematic diagram of closed chamber system configured to measure GHG flux ····· 23
Figure 7. Methane recovery facility at Sooncheon landfill site ····· 24
Figure 8. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 1st measurement ····· 33
Figure 9. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 2nd measurement ····· 34
Figure 10. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 3rd measurement ····· 34
Figure 11. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 4th measurement ····· 35
Figure 12. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 5th measurement ····· 35
Figure 13. Comparison of methane oxidation factor of this study and previous studies ····· 43

제1장 서 론

제1절 연구의 배경 및 목적

우리나라의 폐기물부문의 온실가스 배출량은 2012년 기준 14.8 백만ton CO_2eq.로 국가 전체 배출량의 약 2.2%를 차지하고 있으며, 1990년 대비 49.4% 증가하였다(온실가스종합정보센터, 2014). 폐기물부문은 크게 매립, 소각, 하폐수분야로 나뉘며 폐기물 매립부문의 메탄 배출량은 2012년 기준 6.2 백만ton CO2eq.로 폐기물분야 메탄 배출량의 42%를 차지하고 있다. 이렇듯 폐기물매립지는 메탄의 주요한 발생원이자 기후 변화를 일으키는 중요한 인자로 인식되어 왔다(IPCC, 1996).

우리나라에서는 저탄소 녹색성장 기본법에 따라 마련된「온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침(2012)」에 따라 개별 매립시설의 메탄 배출량 산정방법을 규정하고 있으며, 이는 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하는 일차분해모델인 FOD(First Order Decay)방법을 따르고 있다. FOD 방법을 이용하는데 분해 가능한 유기 탄소(DOC), 혐기적으로 분해 가능한 유기 탄소의 비율(DOCf), 메탄보정계수(MCF), 발생된 매립가스의 메탄비율(F), 산화계수(OX), 반감기(t1/2), 반응상수(k), 메탄회수(R), 지연시간 등과 같은 매개변수가 중요한 영향을 미치고 있다(이원재, 2015). 폐기물매립지의 유형 및 폐기물의 성상에 따라 배출되는 메탄 배출량의 차이가 크므로 매립지별 특성을 고려한 매개변수가 개발되어야 한다. 하지만 국내에서는 국내 연구 자료의 부족으로 2006 IPCC 가이드라인의 기본 매개변수를 적용하고 있는 실정이다.

이 중 메탄산화계수 OX에 대한 연구는 국외에서는 다양하게 연구가 진행

되고 있지만, 국내에서는 매립지 전체를 대상으로 메탄산화계수를 산정한 연구는 미비하다. 관련 연구로 이원재(2015)는 매립지 메탄산화계수를 매립지역 중 9개 지점을 대상으로 산정하였으며, 연구 결과 IPCC 기본값보다 높은 산화계수가 산정되었다. 이 연구에서는 IPCC 기본값을 사용하게 되면 실제 메탄 배출량보다 과다하게 산정될 가능성이 있다는 것을 나타내고 있다.

폐기물매립지에서 발생되는 온실가스 관리 등을 위해서 온실가스 배출통계 기반 마련이 필요하며, 국가 온실가스 감축정책에 필요한 보다 정확하고 신뢰성 있는 배출량 산정 및 평가가 필요하다.

본 연구에서는 국내 중소규모 매립지에 해당하는 순천시 생활폐기물매립지를 대상으로 직접적 측정법인 챔버방법을 이용하여 매립지표면으로부터 발생되는 온실가스 플럭스를 조사하자 한다. 이와 더불어 온실가스 배출량에 영향을 줄 수 있는 기상조건과 메탄의 배출 특성을 파악하기 위하여, 매립지에서 발생되는 메탄 배출량과 기상조건과의 상관관계를 분석하고자 한다. 또한 현장측정을 통해 조사된 온실가스 플럭스를 기반으로 물질수지 방법을 이용하여 실제 매립지의 환경조건에 맞는 고유 산화계수(Methane Oxidation Factor)를 도출하고자 한다. 이를 통해 IPCC FOD모델의 메탄 배출량 예측값에 대한 정확성을 향상시키는데 일조할 수 있을 것이라 판단된다.

제2절 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 소규모 생활폐기물매립지를 대상으로 현장측정을 통해 매립지표면에서 배출되는 메탄 배출량을 산정하였다. 매립지와 같이 지점별로 온실가스 배출량의 차이가 있는 면오염원에는 여러 지점을 측정함으로서 대표성을 확보할 필요가 있다. 따라서 전체매립지 중 40지점을 대상으로 7월부터 10월까지 총 5회에 걸쳐 조사하였다.

매립지에서의 메탄 발생 특성을 파악하기 위하여 매립 완료시기별로 구역을 나누어 평균 메탄 플럭스가 구역에 따라 차이가 있는지 통계적 기법을 통해 파악하였다. 또한 기상과 메탄 배출량간의 상관관계를 분석하였다.

현장측정을 통해 산정된 매립지표면의 메탄과 이산화탄소 플럭스와 회수된 메탄의 농도를 기반으로 물질수지법을 이용하여 매립지 고유 메탄산화계수를 산정하고 IPCC 기본값과 선행연구와 상호 비교분석하였다. 또한 메탄산화계수와 메탄 플럭스간의 상관관계를 분석하였다. 본 연구는 Figure 1의 절차에 따라 진행하였다.

Introduction
Set up object and scope of this study

⇩

Theoretical Background
Mechanism of methane formation in a landfill site
Method for measurement of GHG in a landfill site
Method for estimation of Oxidation Factor

⇩

Method of Study
Set up method for measuring Methane flux and emission
Statistics analysis of the data
Set up method for Methane Oxidation Factor

⇩

Result and Discussion
Estimation of Methane flux and emissions from a landfill site
One-way ANOVA for 3 area according to the final year of landfill cover
Correlation analysis with methane emissions and weather conditions
Estimation of Methane Oxidation Factor using Mass-balance approach
Correlation analysis with Methane Oxidation Factor and influence factor

⇩

Conclusion
Summary of this study and conclusion

Figure 1. Research procedure of this study

제2장 이론적 배경

제1절 매립지에서의 온실가스 발생 메커니즘

폐기물매립지의 매립가스는 매립된 폐기물의 물리적·화학적·생물학적인 분해반응 등을 통해 발생된다. 폐기물에 포함된 유기물은 크게 미생물의 분해가 쉬운 분해성유기물(3개월 ~ 5년 내에 분해되는 물질)과 난분해성유기물(5 ~ 50년 이상 소요되는 물질)으로 나눌 수 있다. 주로 탄수화물, 지방, 단백질은 고분해성 유기물로 분류되고, 플라스틱, 고무, 가죽류는 난분해성 유기물로 분류된다.

매립층 내에는 호기성 및 혐기성 영역이 존재하는데 폐기물 층 내의 산소가 호기성 분해에 의해 고갈되면 혐기성 상태로 바뀌어 혐기성 분해가 시작된다.

호기성 조건에서는 미생물이 폐기물 내에 존재하는 산소를 이용하여 분해성유기물을 분해한다. 최종산물로 이산화탄소, 물이 생성되고 미량이지만 암모니아, 황화수소도 발생된다. 반응식은 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

호기성분해 : $C_aH_bO_cN_dS_e + (4a + b - 2c - 3d + 6e)/4O_2$

$$\rightarrow aCO_2 + (b - 5d + 2e)/2H_2O + dNH_3 + eSO4_2- + (d - 2e)OH- \quad (1)$$

혐기성 조건에서는 가수분해 및 메탄발효에 의해 이산화탄소, 메탄, 물, 미량의 암모니아와 황화수소로 변환된다. 유기물의 혐기성분해의 반응식은

다음의 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

혐기성분해 : $C_aH_bO_cN_dS_e$ → 중간생성물＋악취가스

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

매립지내의 유기성분의 분포, 폐기물의 함수율, 다짐의 정도에 따라 매립지에서 발생하는 현상 및 반응의 기간에 차이가 생긴다. Figure 2는 매립지에서의 혐기성 분해과정에서 발생하는 가스조성의 시간적 추이과정을 모식화한 것이다. 폐기물 분해과정은 크게 초기조정단계(Initial adjustment), 전이단계(Transition phase), 산생성단계(Acid phase), 메탄발효단계(Methane fermentation), 숙성단계(Maturation phase)로 5단계로 나뉜다.

제1단계인 초기분해단계에서는 매립지 내부의 생물분해성 성분이 미생물에 의해 분해된다. 이 단계에서는 폐기물매립 시 일정한 공기량이 매립층 내부에 존재하기 때문에 호기성상태에서 분해가 이루어져 산소가 감소하고 이산화탄소가 증가하는 경향을 보인다.

제2단계는 전이단계로서 폐기물과 함께 포함된 산소가 소비되어 혐기상태로 변환되는 과정이다. 질산염과 황산염이 전자수용체로서 생물변환반응에 의해 질소가스와 황산수소가스로 조금씩 환원된다. 이때의 환원전위의 최적의 조건은 -50 ~ 100 mV이며, 메탄생성은 산화환원전위가 -150 ~ -300 mV 범위에서 일어난다. 산화환원전위가 감소해가면 미생물이 폐기물에 포함된 유기물을 메탄과 이산화탄소로 변환하기 시작한다.

제3단계는 산생성기로 2단계에서 미생물활성이 가속화됨에 따라 다량의 유기산과 함께 다량의 이산화탄소와 소량의 수소가스가 생성된다.

제4단계는 메탄발효기라고 불린다. 산생성균에 의해 생성된 아세트산과 수소가스가 메탄가스나 이산화탄소로 변환된다. 아세트산의 생성과 메탄생

성이 동시에 이루어지기 때문에 메탄과 이산화탄소의 농도가 일정하게 유지된다. 이 때문에 매립지내의 pH는 6.8 ~ 8까지 거의 중성에 가까워진다.

제5단계는 숙성기로 제 4기에 분해되지 않았던 생분해성물질이 부분적으로 변환되는 과정이다. 매립가스의 발생속도는 제 4기에 비해 현저하게 감소한다. 이것은 매립지내에 남아있는 물질이 대부분 분해가 어려운 난분해성물질이고, 매립가스를 발생시키는 균들의 영양분이 대부분 침출수에 녹아들어 배출되기 때문이다(Techobanoglous *et al.*, 1993; 전성호, 2006; 真次寬, 2014).

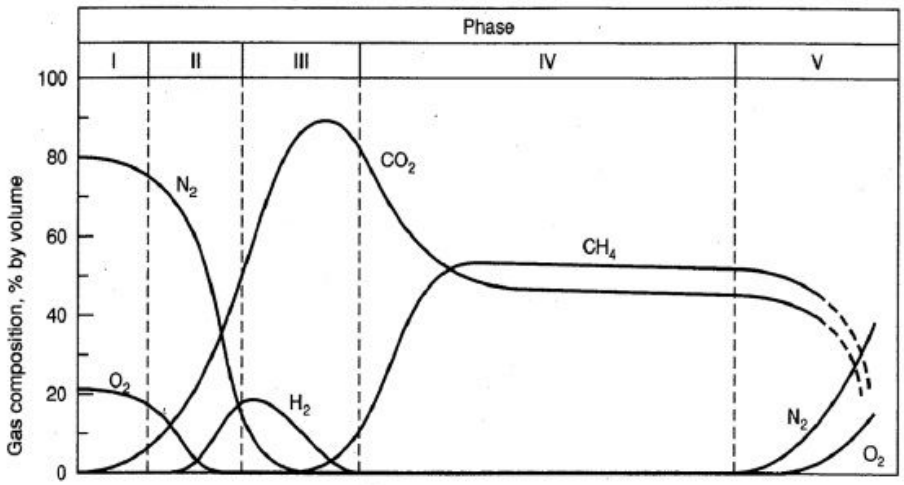

Figure 2. Generalized phases in the generation of landfill gases(Ⅰ=initial adjustment, Ⅱ=transition phases, Ⅲ=acid phases, Ⅳ=methane fermentation, and Ⅴ=maturation phase) (Kim, 2003; 真次寬, 2014)

제2절 매립지에서의 온실가스 측정방법

매립지에서 발생되는 온실가스 배출량은 현장측정으로 산정된 실제 메탄 배출량과 온실가스 발생 예측 모델과의 비교를 통해 평가된다. 매립지표면으로부터 발생되는 메탄의 직접적인 측정법에는 미기상학적 방법과 챔버를 이용한 방법, 플룸 측정 방법 등이 있다(IPCC, 2006).

1. 챔버 측정방법 (Chamber Method)

이 방법은 챔버(Chamber) 등을 이용하여 가스 표면발생량을 측정하는 방법으로 형태에 따라 크게 닫힌챔버와 열린챔버로 나뉜다.

닫힌챔버 방법은 일반적으로 매립지나 늪지에서 발생되는 가스 플럭스를 조사하는데 사용되며(Ishimori, 2009), 주로 토양으로부터 배출되는 비반응성 가스인 이산화탄소, 아산화질소, 메탄 등의 지표면 배출량을 측정하는데 이용된다(김득수, 2000). 닫힌챔버의 측정 방법은 챔버를 측정지점(토양표면, 수체표면 등)에 설치한 후, 가스 농도가 시간에 따라 선형적으로 증가하는 동안 챔버로부터 시료가스를 일정시간 간격으로 채취 및 분석하고 시간 간격에 따른 농도 변화량(dt/dc)을 이용하여 플럭스를 산정한다(사재환, 2006). 이 방법은 다른 방법에 비해 단순하고 경제적이며 비교적 좁은 지역에서 지·화학적 특성을 지표 변화와 효과적으로 관련지을 수 있는 장점을 가지고 있다(국립환경과학원, 2012). 닫힌챔버 방법은 챔버 설치 시 지표 상태를 변화시켜야하지만, 미량으로 가스가 배출되는 경우에도 그로 인한 배출량에 미치는 영향은 매우 작아 많은 연구에서 활용하고 있다(김득수, 2000).

열린챔버 방법은 일정유량의 대기공기 또는 청정한 공기를 흐르게 한 후 챔버 유출구로부터 배출되는 시료가스를 채취하여 농도를 측정한다. 그리고

측정된 시료가스 농도에 유입유량과 챔버가 덮고 있는 면적을 적용하여 플럭스를 산정한다. 이 방법은 주로 NOx와 같이 반응성이 강한 기체의 플럭스를 측정할 때 이용되는 경우가 많다.

2. 미기상학적 측정방법 (Micrometeorological Method)

미기상학적 방법으로 경도(gradient)법과 에디상관(eddy correlation)법이 주로 사용되고 있다(농림부, 1999). 경도법은 저속반응기기를 사용하며, 에디상관법은 고속반응기기를 사용한다. 에디상관법은 에디 확산, 안정도 보정 또는 바람의 연직구조 등의 프로파일의 모양에 대하여 가정 없이 직접 측정할 수 있어 가장 좋은 미기상학적 방법으로 간주되고 있다. 미기상학적 방법은 기상관측용 타워를 세워 바람이 운반하는 기체를 측정하며 측정기기의 종류 및 특징, 측정대상에 따라 기기 제어 방법이 바뀌게 되므로 전문적인 운영자가 필요로 한다. 또한 이 방법은 넓은 지역을 연속적으로 장기간 모니터링이 가능하다는 점과 순기체교환율(net gas exchange rate)을 정량적으로 측정하는데 큰 장점을 갖는다. 반면, 바람장(wind field)에 일관성이 없는 경우, 추정된 기체교환율이 공기밀도 변화의 불확실성에 의해 영향을 받게 되므로 측정지점과 관련한 많은 조건과 고려사항이 만족되지 않으면 미기상학정 방법을 적용할 수 없다(국립환경과학원, 2012). 또한 측정범위가 제한되어 있기 때문에 매립지 전체 배출량을 대표하기 어려운 단점이 있다(IPCC, 2006).

3. 플룸 측정방법 (Plume Method)

매립지에서의 온실가스 배출량을 측청하기 위하여 매립지 횡단면의 풍하지역(downwind)과 풍상지역(upwind)의 메탄 플럭스 차이를 측정한다. 매립지에서 발생되는 메탄의 농도증가와 함께 추적자가스의 농도 비교를 통해 평가되며, 분산모델을 이용하여 산정된다.

매립지 아래의 바람이 부는 지역인 풍하지역에서 횡단면을 따라 메탄 플룸을 샘플링하여 농도를 측정하는데, 측정된 메탄은 다른 바탕 농도보다 높게 측정된다. 측정된 값과 함께 매립지의 지형의 특성 및 매립지 내의 배출유형 등이 분산모델에 반영되며, 이를 통해 매립지 전체의 메탄 배출량이 산정된다.

이 방법의 장점으로 공간적 변이성을 설명할 수 있다는 점과, 전체 매립지의 배출량을 측정하는 것이 가능하고, 비교적 정확하다는 점을 들 수 있다. 그러나 이 방법은 풍하 쪽에서 측정이 가능하다는 조건을 만족해야하며, 장비가 고가이고 연속측정 시 인력이 많이 소요된다(유한녕, 2013; IPCC, 2006).

제3절 메탄산화

1. 메탄산화

매립지에서 대기 중 이산화탄소 플럭스보다 더 높은 이산화탄소 플럭스가 조사되는데 이는 메탄 산화로 인한 것으로 해석할 수 있다(Christophersen *et al.*, 2001). 매립지 내부에서 발생된 메탄이 매립지표면까지 통과하면 산소가 포함된 층을 지나게 된다. 이 때 토양 내에 존재하는 메탄영양세균(methanotroph)이 에너지원으로 메탄을 사용하면서 이산화탄소로 변환한다. 여기서 대기 중에 포함된 메탄의 일부가 매립지표면에서 산화될 수 있으나 무시할 만큼 적다(Bogner *et al.*, 1995; 1997; Borjesson, 1997; Borjesson and Svensson, 1997).

메탄이 산화되는 과정은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(Hanson and Hanson 1996; Bowman, 2006; Oonk, 2010).

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \qquad (3)$$

이 반응에서 촉매역할을 하는 주요 효소는 Methane monoxygenase(MMO)으로 알려져 있으며 이 유전자는 메탄영양세균(methanotroph)에 포함된 효소를 조절하는 역할을 한다. 이 효소는 Particle MMO와 Soluble MMO로 나뉘며 메탄의 C-H결합을 깨고 최종 생성물인 CO_2로 전환시킨다(이원재, 2015).

이 과정에서 토양 두께, 재질, 온도, 함수율, 영양물질 구성 등에 따라 메탄 산화율이 변화될 수 있다(Charlotte *et al.*, 2009; 이원재, 2015). Chanton and Liptay (2000)에서는 플로리다 매립지를 대상으로 메탄산화율을 산정하였으며 그 결과 겨울보다 여름의 메탄 산화율이 높아 계절마다 차이를 보

였다. 또한 토양 재질의 종류에 따라 메탄 산화에 차이를 보였다. 선행연구에 의하면 매립지표면에서 15 ~ 20cm 떨어진 지점에서 메탄산화가 최대로 일어나는 것으로 조사되었다(Jones and Nedwell, 1993; Czepiel *et al.*, 1996b; Scheuts *et al.*, 2004).

2. 메탄산화계수

폐기물매립지에서 발생되는 온실가스를 메탄 배출량을 예측하기 위해서 화학양론식에 의한 방법, 물질수지에 의한 방법, 동역학적 모델에 의한 방법, 연속식 생물 분해 반응에 의한 방법, 회귀분석에 의한 방법 등이 사용된다(이원재, 2015). 2006 IPCC 가이드라인에서는 메탄 배출량 산정을 위하여 1차 반응모델인 FOD(First Order Decay)방법을 제안하고 있으며 Tier 1 모델은 식 (4)와 같다.

$$CH_4\text{배출량} = \left[\sum_x CH_4\text{발생량}_{X,T} - R_T\right] \times \left(1 - OX_T\right) \qquad (4)$$

T	= 인벤토리 연도
x	= 폐기물 카테고리나 성상/물질
R_T	= T년도에 회수된 CH_4 (Gg)
OX_T	= T년도의 산화율

이 방법은 폐기물매립지의 폐기물 조성에 생물학적으로 분해 가능한 유기물질이 분해됨과 동시에 메탄과 이산화탄소가 생성됨을 가정한다. 발생된 메탄의 일부는 에너지 및 열로 회수될 수 있으며, 매립지표면에서 산화될 수 있음을 반영하고 있다. 당해년도에 매립된 폐기물의 분해로 인해 발생되는 메탄 배출량을 산정하고, 회수된 메탄을 빼준다. 그 이유는 회수되지 않고 복토재 등을 거쳐 배출되는 메탄만이 산화되기 때문이다.

2006 IPCC 가이드라인에서 복토 다짐이 잘 되어있는 등 관리가 잘된 매립지에는 산화계수 0.1을 사용하도록 하고 있으며 우리나라 목표관리제에서는 토양, 퇴비 등으로 복토되는 매립지는 0.1 기타 0을 적용하도록 하고 있다.

일본의 경우, 폐기물매립지는 일반폐기물 및 산업폐기물관리형 최종처리장은 폐기물의 처리 및 청소에 관한 법률시행령과 지방자치제 조례에 기초하여 중간복토 및 최종복토가 실시되고 있다. 따라서 2006 IPCC 가이드라인을 기반으로 다른 Annex 1 국가와 동일하게 관리된 매립지 산화계수 기본값인 0.1을 채용하고 있으나, 추후 연구를 통해 국내 실태를 반영한 산화계수 설정을 검토하고 있다(環境省, 2006).

국내에서는 우리나라 매립지 고유 산화계수를 설정하기 위한 연구가 충분치 않아 IPCC의 산화계수 기본값을 사용하고 있다. 따라서 기본값을 사용하여 배출량을 산정하게 되면 실제보다 과다하게 계산될 가능성이 있다.

Table 1. Methane oxidation factor(OX) for solid waste landfill(IPCC, 2006)

	Methane Oxidation Factor(OX)
Managed covered with CH_4 Oxidising material (e.q. soil, compost)	0.1
Managed but not covered with aerated material, unmanaged and uncategorised SWDS	0

3. 메탄산화계수 산정방법

메탄산화계수를 산정하는 방법에 있어 크게 물질수지법(Mass balance Approach)과 안정동위원소법(Stable Isotope Approach)이 있다. 국외에서는 두 가지 방법을 통하여 연구가 진행되고 있다. 최근 연구를 통하여 안정동위원소법이 물질수지법에 비해 메탄산화율이 과소평가되는 경향이 있음을 밝혀졌다(Jeremy, 2014). 최근 실험실 내부에서 실험과 현장연구를 통해 확산량을 고려하기 위한 보안 연구도 이루어지고 있다(De Visscher *et al*, 2004, Chanton *et al.,* 2008b).

가. 물질수지법 (Mass balance Approach)

물질수지를 이용한 메탄산화계수 산정 방법은 매립지내부에서 발생된 메탄 플럭스가 복토재를 통과하면서 산화의 정도를 산정하기 위하여 사용된다. 이 방법은 이산화탄소가 토양 내에서 분해되지 않는다는 점과 토양 내에서 생성되는 가스는 무시할 수 있다는 점을 가정한다(Jeremy, 2014). 또한, 폐기물매립지에서의 CH_4이 산화됨에 따라 CO_2와 H_2O로 전환되며 이때 생성된 모든 CO_2는 CH_4산화에 의해 생성된다는 가정에 기초한다(이원재 2015). 물질수지에 의한 메탄의 생성과정을 요약한 것은 Figure 3과 같다.

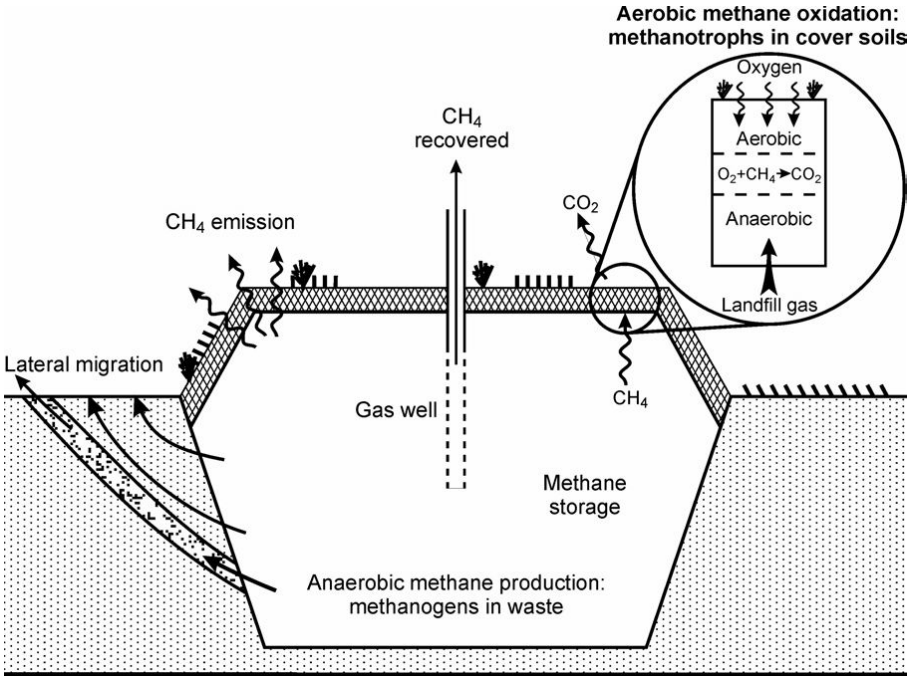

Figure 3. Landfill methane mass balance (Charlotte Scheutz, Peter Kjeldsen *et al*,, 2009)

나. 안정동위원소법 (Stable Isotope Approach)

일반적으로 자연계에의 탄소의 동위원소의 비율은 ^{12}C 99%, ^{13}C가 1%로 존재한다. 안정동위원소법은 토양을 통과하기 전후의 LFG를 샘플링하여 각각의 탄소동위원소비를 비교하여 산화율을 파악한다.

메탄이 매립지 토양을 지나면서 토양 속에 존재하는 Methanotrophs라고 불리는 박테리아에 의해 산화된다. 이 박테리아들은 호기성으로 토양 안에 포함된 메탄을 물과 이산화탄소로 변환시킨다.

안정동위원소법은 Methanotrophs 박테리아가 메탄 산화 시 ^{12}C를 선호하는 경향을 토대로 만들어진 방법이다. 따라서 ^{13}C의 원자를 포함한 메탄보다는 ^{12}C가 포함된 메탄을 우선적으로 산화시킨다. 그 때문에 ^{13}C와 ^{12}C의

비율을 비교함으로서 산화의 정도를 가늠할 수 있다. 일반적으로 토양을 지나기 전의 메탄은 가스 배제공에서 측정된 메탄가스로 보며 토양을 지난 메탄은 토양 위에 챔버를 설치하여 메탄가스를 샘플링한다(Jeremy, 2014; Jeffrey *et al*., 2010).

안정동위원소법을 이용하여 메탄산화율을 파악하기 위해서 식 (5), 식 (6)을 이용하여 산정한다(Chanton and Kiptay, 2000; De visscher *et al.,* 2004). 식 (5)의 $\delta^{13}C$(동위원소비)는 표준물질의 동위원소비(Rstandard)에 대한 상대적인 변이 정도를 천분율(‰)로 나타내는 델타 값(δ)을 말한다. fox는 매립지 토양을 지나 산화되는 메탄 분획(메탄산화효율)이며 식 (6)과 같이 산정한다.

$$\delta^{13}C(‰) = \left[\left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}}\right) - 1\right] \times 1000 \qquad (5)$$

Where

$\delta^{13}C$ = 각 토양 샘플의 ^{13}C 분율(‰)

Rsample = 샘플(Sample)의 ^{13}C : 12C 비율

Rstandard = 표준물질(Standard)의 ^{13}C : ^{12}C 비율

$$f_{OX} = \frac{(\delta^{13}C_{in,\,methane\,emitted} - \delta^{13}C_{in,\,methane\,below\,cover\,soil})}{1000 \times (\alpha_{OX} - \alpha_{trans})} \qquad (6)$$

Where

fox = 메탄산화계수

$\delta^{13}C_{in\ methane\ emitted}$ = 복토재에 포함된 메탄의 $d^{13}C$

$\delta^{13}C_{in,\ methane\ cover\ soil}$ = 복토재를 통과하여 배출된 메탄의 $d^{13}C$

α_{ox} = 메탄산화 동위원소분별정수(Isotope fractionation factor)

α_{trans} = 동위원소 전환 분별정수(Isotope transportation fractionation)

제3장 연구 방법

제1절 조사 대상 매립지 및 측정지점 선정

1. 조사 대상 매립지

본 연구에서의 연구 대상 시설은 전라남도 순천시에 위치한 중소형 매립지(34°58.065'N, 127°32.627'E)로 1991년도에 매립을 시작하여 현재까지 매립이 진행되고 있다. 본 매립지의 총 부지면적은 149,000 m^2이고 본 연구에서 매립부지에서 발생하는 메탄 배출량 계산 시 사용한 매립면적은 실매립면적인 95,000 m^2이다. 매립용량은 2,259,000 m^3으로 호기성 위생매립방법인 Cell공법으로 매립하고 있다. 복토는 매일복토 중간복토, 최종복토를 실시하고 있으며 매립지 한 층의 구조는 쓰레기 약 4.5 m, 복토 약 0.5 m의 두께이고 한 층을 매립하는데 약 4 ~ 5년 소요된다. 매립지의 개요는 Table 2에 매립지의 평면도는 Figure 4에 나타내었다.

Table 2. Status of Sooncheon landfill site

Area (m^2)		Landfill Capacity (m^3)	Waste Disposed Volume (m^3)	Disposed rate(%)	Start of landfilling
Total Area	Disposed Area				
148,000	95,000	2,259,000	2,086,000	92.3	1991

순천시 주요현황 재인용

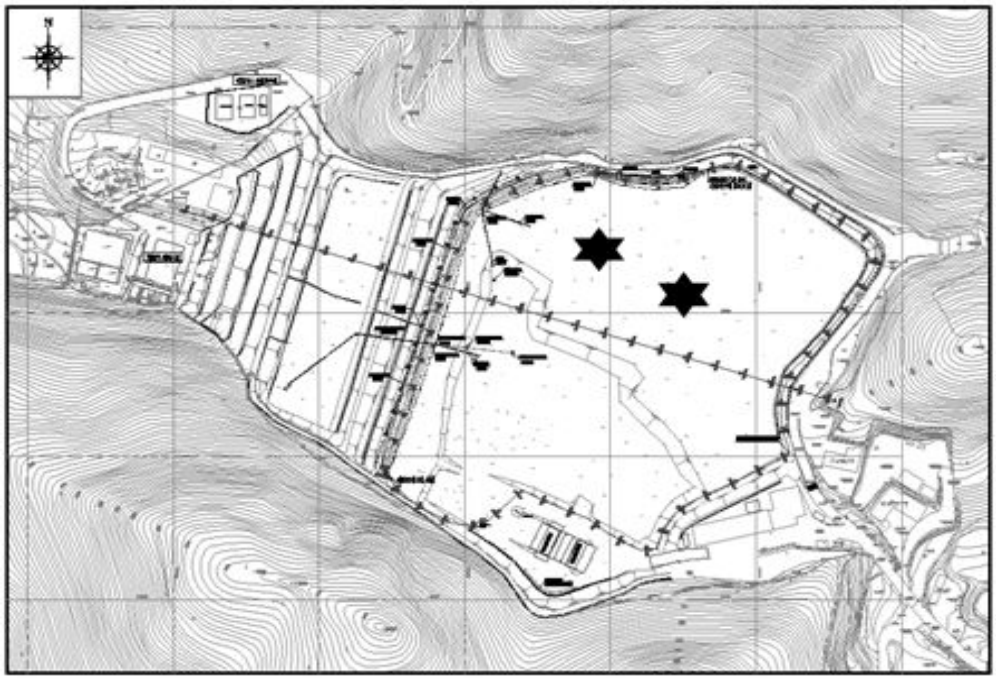

Figure 4. Sooncheon landfill ground plan (★ : location of Methane Recovery facility)

순천시의 폐기물 성상은 종이류, 종이류, 고무피혁류, 플라스틱류, 섬유류, 가연성기타류, 불연성으로 구성되어 있다. 다음 Table 3에 순천시의 폐기물 성상별 매립량 추이를 나타내었다. 순천시의 폐기물 총 매립량은 2002년부터 2012년까지 매립량은 전반적으로 감소하는 추세를 나타내고 있으며, 2012년 기준으로 2002년 대비 폐기물 총 매립량이 약 40% 가량 감소되었다. 2004년도 음식물류 폐기물 직매립 금지제도가 시행되면서 2004년 이후 음식물 채소류 폐기물을 매립하지 않고 있으며, 폐기물 매립량에도 영향을 주는 것으로 나타났다.

Table 3. Physical composition of waste in Sooncheon landfill site

Year	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Amount of wastes landfilled (ton)	85660	80957	75460	59106	76785	66036	50591	56019	58134	58134	46172
Food waste(%)	15511.6	8850.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Paper(%)	17506.6	13841.1	4591.95	10132.5	0	18401	16912.9	510923	530.2	530.2	803.0
Wood(%)	5699.8	5039.8	1754.9	3414.2	0	1434.3	1772.5	3102.0	3219.2	3219.2	3,796.0
Rubber(%)	2646.3	2630.6	9365.0	881.1	0	6190.3	3692.8	5291.7	5491.5	5491.5	5,292.5
Plastic/Vinyl (%)	5699.8	7522.9	1491.7	624.1	0	3963.3	4616	948.9	984.7	984.7	2,007.5
Texture(%)	2614.3	2470.8	2303.0	258.8	2343.5	2015.4	0	1709.7	1774.2	1774.2	401.5
Leather(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Industrial Sludge(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Domestic Sludge(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Rasidue derived animals and plants(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Used cooking oil(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Combustible others(%)	6383.2	173444	6588.4	916.0	32688.3	12931.9	0	27960.3	29016	29016	35,880
Non-combustible (%)	29598.3	23257.0	57794.2	42879.9	41753.3	21099.8	23596.8	16495.5	171183	171183	1,971.

전국 폐기물 발생 및 처리현황 재인용

2. 매립지표면 측정지점

매립지표면에서 발산되는 가스 플럭스 측정을 위하여 측정지점을 선정하였다. 미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 매뉴얼 및 영국 EA(Environment Agency)의 매뉴얼을 기초로 다음의 식 (7)에 따라 측정지점 수를 정하였다. 전체 면적을 등간격으로 격자를 만들었으며 기상조건과의 차이를 알기 위하여 매회 비슷한 지점에서 이산화탄소 및 메탄을 측정하였다.

$$\text{측정 지점 수 } n_k = 6 + 0.15\sqrt{area\ of\ zone\ K(m^2)} \qquad (7)$$

전체매립지를 등간격의 격자로 나눈 후, 매립이 진행 중인 지역과 목초가 자라 챔버 설치가 어려운 지역을 제외하고 평지이며 주변의 특이지점이 없는 총 40지점을 선정하였다. 구역의 구분은 대상 매립지 관계자와의 인터뷰를 통해 A지역은 2011년, B지역은 2012년, C지역은 2013년에 매립이 완료된 지역임을 확인하여 그것을 바탕으로 매립완료 시점이 다른 A, B, C의 세 개의 구역으로 나누었다.

각 측정지점에 대한 GPS 위치좌표를 파악하여 7 ~ 10월간 총 5회 거의 동일한 지점에서 메탄과 이산화탄소를 측정하였다. 측정일시 및 지점은 Figure 4와 같으며 A, B, C 지점의 측정일시 및 지점 수는 Table 4와 같다.

Table 4. Measurement dates and the number of measurement points

Times	Measurement Dates	No. of measurement points
1	2014.7.21. ~ 2014.7.24.	40
2	2014.8.4. ~ 2014.8.8.	40
3	2014.8.25. ~ 2014.8.29.	40
4	2014.9.22. ~ 2014.9.29.	40
5	2014.10.21. ~ 2014.10.24.	40

Table 5. The number of measurement points and measurements for each area according to the final year of landfill cover

Area	Final year of landfill cover	No. of measurement points	No. of measurements
A	2011	16	5
B	2012	12	5
C	2013	12	5

Figure 5. Location of the surface flux measurement points
(★ : location of Methane Recovery well)

제2절 실험 방법

1. 매립지표면 온실가스 발생량 측정

매립지표면 메탄 배출량을 조사하기 위하여 닫힌챔버법(Closed Chamber)을 이용하였다. 이 방법은 미기상학적인 측정방법에 비해 장치의 운용이 편리하고 매우 실용적이고 경제적이다. 또한 측정 지점의 배출 특성을 측정할 수 있다는 장점으로 인해 매립지표면의 온실가스 측정에 자주 사용된다(김득수, 2000; Charlotte *et al.*, 2001; 전성호, 2006). 따라서 본 연구에서는 닫힌챔버법을 이용하여 측정지점에서의 메탄과 이산화탄소 플럭스를 측정하였다.

본 연구의 측정 시스템의 구성도는 Figure 6과 같다. 본 실험에 사용된 실험장치는 크게 닫힌챔버(Closed Chamber), 수분제거장치(Pretreatment), 비분산적외선분석기(Non-dispersive infrared absorption, NDIR), 자료 수집장치(Data logger)로 분류할 수 있다.

챔버 설치 및 분석은 다음의 순서로 이루어진다. 우선, 챔버가 지면에 닿는 부분의 표면을 약 3～5 cm 정도 판 후 챔버를 설치하고 하부는 공기가 들어오지 않도록 흙으로 잘 덮는다. 챔버 상부가 투명 아크릴로 되어 있으므로 직사광선을 차단할 수 있는 그늘막을 설치하고 질소가스(영점교정)와 표준시료(4497 ppm)를 이용하여 교정을 실시한다. 챔버 내부의 가스는 5 L/min으로 흡입한 뒤, 측정된 가스는 다시 챔버 내부로 들어간다.

챔버를 통하여 채취한 가스는 4 ℃로 설정된 전처리장치 내부를 지나면서 수분이 제거된다. 이후 채취된 온실가스는 비분산적외선분석기(SIENENS, ULTRAMAT)를 이용하여 현장에서 실시간으로 분석하였다. 그리고 챔버 내부의 상부에 Thermocouple과 압력관을 설치하여 가스 채취 환경에 대한 온도와 압력을 측정하였다. 이 때 온도와 압력은 NIDR 분석기를 통해 측정된 온실가

스 농도와 함께 자료 수집장치(Dooil Tech, EMS-365)에 저장된다.

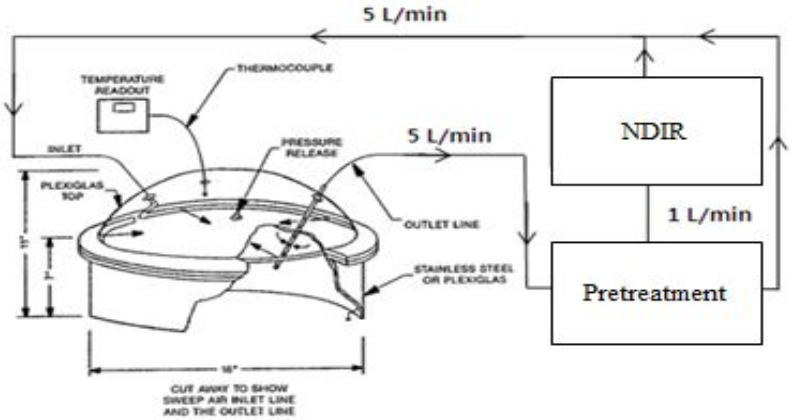

Figure 6. Schematic diagram of closed chamber system configured to measure GHG flux

측정기기는 비분산적외선방식의 연속측정기(UTRAMAT 6)를 사용하여 시간의 흐름에 따른 농도의 변화를 관찰하였다. 메탄가스의 플럭스는 농도 변화의 기울기가 가장 큰 값 중 농도 변화 곡선의 결정계수(R^2)가 0.8 이상인 값을 채택하여 산정하였다(UK Environment Agency, 2010). 온실가스 표면 플럭스는 측정된 기체농도의 시간변화율을 이용하여 배출된 메탄 배출량이 챔버 내의 질량평형관계로부터 유도된 다음의 식 (8)에 의해 계산되었으며 0℃, 1기압의 온실가스 플럭스를 구하였다.

$$Q = \frac{dc}{dt} \times \frac{V_{Chamber}}{A_{Chamber}} \qquad (8)$$

Q = 온실가스 표면 플럭스(mg/m^{2}min, mole/m^{2}min)
dc/dt = 농도상승률(mg/m^{3}min, mole/m^{3}min)
$V_{chamber}$ = 챔버 부피(0.03 m^3)
$A_{chamber}$ = 챔버 하부면적 (0.13 m^2)

2. 매립가스 회수

가스배제공의 좁은 관을 통하여 가스가 포집되므로, 관의 단면적과 가스의 유속을 측정하여 유량을 산정한다. 대상 매립지의 가스배제공은 LFG(Landfill Gas)회수관 2기가 설치되어 있으며, 2기 중 1기만이 가동 중에 있는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 회수한 LFG로 발전시설을 운영하는 민간업체로부터 회수된 매립가스에 대한 데이터를 제공받아 사용하였다.

Figure 7. Methane recovery facility at Sooncheon landfill site

제3절 측정자료의 통계분석

1. 비모수 일원배치 분산분석 (Nonparametric One-way ANOVA)

매립완료시기가 다른 구역 간 평균 메탄 플럭스의 차이가 있는지 조사하기 위하여 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 실시하였다.

일원배치 분산분석은 두 집단 또는 그 이상간 하나의 검정(종속)변수에 대해 평균의 차이가 통계적으로 유의한지를 검정하는데 이용한다. 표본의 추정치는 다른 표본의 측정치와 서로 독립적이고, 정규분포이며, 집단 간 분산은 동일하다는 가정 사항을 만족해야한다. 만일 이 가정을 만족하지 못하였을 때는 가장 널리 사용되는 비모수 검정 방법인 크루스칼 왈리스(Kruskal-Wallis)의 순위에 의한 일원배치분산분석을 적용한다.

일반적으로 모수적 방법이란 모집단이 특정한 분포를 따른다는 가정 하에서 모르는 모수에 대한 추정이나 검정 등을 생각하는데 이를 모수적 방법이라고 한다. 그러나 현실의 데이터들은 이러한 가정을 충족시키는 일이 드물다. 모집단에 대한 분포형태를 가정할 수 없는 경우에는 모집단의 분포형태를 완화하여 이론을 전개하는데, 이와 같은 통계적 방법을 비모수적 방법이라고 말한다. 비모수적인 방법은 모집단의 분포가 정확하게 알려져 있지 않은 경우 뛰어난 검정력과 효율성을 보인다(차영준 등, 2004).

본 연구에서는 일원배치 분산분석을 위하여 귀무가설 「H_0 : $\tau_1 = \tau_2 = \ldots = \tau_k$」과 이에 대한 일반대립가설 「$H_1$: τ_i들은 모두 같지는 않다.」을 세웠다. 이후, 다음과 같이 유의수준 α에서의 크루스칼 왈리스 검정절차를 따랐다.

1) k개의 실험조건에서 $N=\sum_{i=1}^{k} n_i$개의 관측값으로 이루어진 혼합표본에 대해 작은 것부터 차례로 순위를 부여한다.

2) R_{ij}=N개의 혼합표본에서 X_{ij}의 순위로 정의한다.
각 처리에서 순위합(R_j)과 평균순위($\overline{R_{.j}}$) 및 총평균순위($\overline{R_{..}}$)는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{.j}=\sum_{i=1}^{n_j} R_{ij} \tag{9}$$

$$\overline{R_{.j}}=\frac{R_{.j}}{n_j} \tag{10}$$

$$\overline{R}_{..}=\sum\sum R_{ij}/N=(1+2+...+N)/N=\frac{N+1}{2} \tag{11}$$

여기서, j=1, ..., k

3) 크루스칼 왈리스의 검정통계량을 계산한다.

$$H=\frac{12}{N(N+1)}\sum_{j=1}^{k} n_j\left(\overline{R_{.j}}-\frac{N+1}{2}\right)^2 \tag{12}$$

$$=\frac{12}{N(N+1)}\sum_{j=1}^{k}\frac{R_{.j}^2}{n_j}-3(N+1)$$

4) 다음과 같은 방법을 통하여 검정한다. 유의수준 α 에서 $H \geq h(a, k,(n_1, n_2,...,n_k))$ 이면 H_0를 기각한다. 여기서, $h(a, k, (n_1, ..., n_k))$는 $P_0\{H \geq h(a, k,(n_1, ..., n_k))\}=a$ 를 만족하는 상수로 크루스칼 왈리스 통계량 분포표를 이용하여 구하였다.

2. 비모수 상관분석 (Nonparametric Correlation Analysis)

상관분석이란 두 변수사이의 연관성, 대응관계 등을 나타내는 개념을 말한다. 두 변수들이 등간 또는 비율척도이면서 정규분포를 따르는 경우 피어슨(Pearson) 상관계수를 통해 두 변수의 관련성을 분석한다. 반면, 변수들에 대한 확률분포를 모를 경우나 순서척도로 되어있는 경우 스피어만(Spearman)의 순위 상관계수인 로(ρ, rho)나 켄달(Kendall)의 타우(τ, tau)를 구한다.

본 연구에서는 다음과 같이 두 변수간의 관련성을 알아보기 위하여 상관분석을 하였다.

첫번째로, 기상청의 과거자료인 평균기온, 평균운량, 일강수량, 상대습도, 일조시간, 강수지속시간과 메탄 표면 배출량 및 메탄 회수량을 변수로 두고 상관계수를 도출하여 상관관계를 보고자 하였다. 일강수량은 전날의 강수량에 영향을 받을 수 있으므로 측정전날의 강수량의 평균값을 사용하였으며 그 외의 값에 대해서는 측정 당일 값들의 평균값을 사용하였다.

두번째로, 메탄산화계수와 메탄과 이산화탄소 플럭스와의 상관관계를 보고자 하였다. 5차례에 걸쳐 지점마다 측정하여 산정한 메탄산화계수와 메탄과 이산화탄소 플럭스 값을 사용하였다.

정규성 검정 결과, 각 변수들의 분포가 정규분포에 따른다는 가설을 기각하였다. 일반적으로 켄탈의 타우(τ)를 사용하는 것은 통계 분포가 좀 더 나은 통계적 특성을 가지고 있다(Jan and Tomasz, 2011). 따라서 본 연구에서는 대표적인 비모수 상관관계분석법인 켄달의 타우(τ)를 구하여 상관관계를 분석하였다. 상관계수는 −1 ~ +1 사이에 존재한다(김영주 등, 2007).

켄달의 타우(τ)는 두 대응되는 변수의 순위를 이용하여 기준이 되는 변수의 순위와 비교하는 변수의 순위를 비교하여 발견되는 역배열(inversion)의 개수를 기초로 순위의 상관관계를 나타내는 방법이다. 산정 식은 식

(13)과 같다.

$$\tau = \frac{S}{\sqrt{\frac{1}{2}\left[n(n-1)-T_x\right]\frac{1}{2}\left[n(n-1)-T_y\right]}} \tag{13}$$

S = P - Q로 P는 x_i를 크기의 순서대로 배열하였을 때 (x_i, y_i)의 짝 중에서 y_i가 크기순으로 배열되어 있는 짝의 수이고, Q는 크기의 역순으로 배열되어 있는 짝의 수이다. T_x와 T_y는 각각 $\frac{\sum t(t-1)}{2}$로 t는 x, y 각각의 동순위(tie)를 이루는 개수이다. 만약에 동순위가 하나도 없다면, 위의 식에서 $\frac{\sum t(t-1)}{2}$=0이므로, 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다(김영주 등, 2007).

$$\tau = \frac{S}{\sqrt{\frac{1}{2}\left[n(n-1)-T_x\right]\frac{1}{2}\left[n(n-1)-T_y\right]}} = \frac{S}{\frac{1}{2}n(n-1)} \tag{14}$$

제4절 메탄산화계수 산정

본 연구에서는 매립지 내부에서 발생하는 메탄과 이산화탄소 플럭스는 지표에서 발산되는 플럭스와 같다는 물질수지에 근거한 산정법을 이용하여 메탄산화계수를 산정하였다. 이 방법은 토양에서 발생되는 가스는 무시할 수 있을 정도로 미량이며 생성된 이산화탄소는 물에 녹지 않음을 가정한다 (Wangyao *et al*., 2011).

본 연구 매립지의 7월 ~ 10월까지 총 5회에 걸쳐 한 회당 40지점의 메탄산화계수를 평가하였다. 기본적으로 매립지에서 메탄산화 시 이산화탄소와 물로 전환되며 생성된 이산화탄소는 메탄산화에 의한 것을 가정한다. 식 (15)와 같이 매립지 내부에서 발생하는 메탄 플럭스($F_{CH4\ under\ the\ cover}$)와 이산화탄소 플럭스($F_{CO2\ under\ the\ cover}$)의 합은 매립지 지표에서 발생되는 메탄 플럭스($F_{CH4\ ground\ level}$)와 이산화탄소 플럭스($F_{CO2\ ground\ level}$)의 합과 같다. 여기서, 매립지표면에서 발생되는 메탄과 이산화탄소의 플럭스(mole/m^2·day)를 사용하였다.

$$LFG = F_{CH_4\,ground\,level} + F_{CO_2\,ground\,level} \qquad (15)$$
$$= F_{CH_4\,under\,the\,cover} + F_{CO_2\,under\,the\,cover}$$

현장측정을 통하여 메탄과 이산화탄소의 플럭스의 비를 산정하였고, A사에서 제공받은 데이터를 통하여 LFG의 메탄의 비율을 알고 있다. 매립지 내부에서 생성된 메탄 플럭스($F_{CH4\ under\ the\ cover}$)는 식 (16)과 같이 매립지표면에서 측정한 메탄과 이산화탄소 플럭스의 합과 회수하는 시설에서 측정한 메탄의 농도의 비와 곱하여 계산하였다.

$$F_{CH_4 under\ the\ cover} = \left(F_{CH_4 ground\ level} + F_{CO_2 ground\ level}\right) \times \frac{CH_{4\,under\ the\ cover}}{CO_{2\,under\ the\ cover} + CH_{4\,under\ the\ cover}} \quad (16)$$

메탄산화량(Methane Oxidation Rate : MO)은 식 (17)과 같이 매립지내부에서 생성된 메탄 플럭스($F_{CH4\ under\ the\ cover}$)와 매립지표면에서 측정된 메탄 플럭스($F_{CH4\ ground\ level}$)와의 차이를 계산하여 산정하였다 .

$$MO(Methane\ Oxidation\ rate) = F_{CH_4\ under\ the\ cover} - F_{CO_2\ ground\ level} \quad (17)$$

메탄산화계수(Oxidation Factor : OX)는 식 (18)과 같이 $F_{CH4\ under\ the\ cover}$에 대한 MO의 비율로 나타냈다.

$$OX(Oxidation\ Factor) = \frac{MO}{F_{CH_4\ under\ the\ cover}} \quad (18)$$

LFG	= 폐기물매립지 온실가스 플럭스의 총합(mole/m^2·min)
$F_{CH4\ ground\ level}$	= 매립지표면 메탄 플럭스(mole/m^2·min)
$F_{CH4\ under\ the\ cover}$	= 매립지 하부 메탄 플럭스(mole/m^2·min)
$F_{CO2\ ground\ level}$	= 매립지표면 이산화탄소 플럭스(mole/m^2·min)
$F_{CO2\ under\ the\ cover}$	= 매립지 하부 이산화탄소 플럭스(mole/m^2·min)
$CH_{4\ under\ the\ cover}$	= 매립지 하부 메탄농도(vol%)
$CO_{2\ under\ the\ cover}$	= 매립지 하부 이산화탄소농도(vol%)
MO	= 메탄산화량 (mole/m^2·min)
OX	= 메탄산화계수

제4장 연구 결과

제1절 매립지의 메탄 발생 특성

1. 매립지표면의 메탄 플럭스

1 ~ 5차까지 닫힌챔버를 이용하여 시료를 샘플링하고, NDIR을 이용하여 각 40지점에서 발생되는 메탄 농도를 1분 간격으로 연속 측정하였다. 측정된 농도 데이터를 기반으로 플럭스를 산정하였으며 이를 Table 6에 나타냈다.

측정 결과 메탄의 평균 플럭스는 23.1 $mg/m^2 \cdot min$으로 나타났다. 메탄의 경우 4차인 9월의 플럭스는 45.3 $mg/m^2 \cdot min$으로 가장 높게 나타났으며 났으며, 1차인 7월의 플럭스는 6.1 $mg/m^2 \cdot min$으로 가장 낮게 나타났다.

2차와 3차는 같은 8월에 측정되었는데, 3차인 8월말에 측정된 메탄 플럭스는 2차인 8월초에 측정된 것보다 약 1.7배의 차이를 보였다. 이는 측정기간에 따른 측정일의 기상요소와 관련이 있을 것으로 사료되며, 이는 제4장 제1절 2에서 다루기로 한다.

본 연구에서 산정된 메탄 플럭스와 선행연구에서 산정된 메탄 플럭스를 비교하여 보았다. 유한녕(2013)의 연구대상 H매립지는 1997년부터 매립을 시작하여 매립종료는 2024년으로 계획되어있는 준호기성 매립지이다. 연구결과 7월의 메탄 플럭스는 7.7 $mg/m^2 \cdot min$로 조사되었는데, 본 연구결과 중 1차인 7월 평균 메탄 플럭스 6.1 $mg/m^2 \cdot min$와 비슷한 값을 나타났다.

Table 6. Summary of CH_4 and CO_2 flux field investigation in this study

		Times				
		1	2	3	4	5
CH_4 Flux ($mg/m^2 \cdot min$)	Min	0	0	0	0	0
	Average	6.1	15.0	26.7	45.3	22.5
	Max	86.9	249.6	239.8	388.1	205.4
	S.D	16.4	43.7	60.5	90.5	48.5
	N	40	40	40	40	40
CO_2 Flux ($mg/m^2 \cdot min$)	Min	3.1	0	0	0	0
	Average	60.0	70.5	142.1	151.5	81.3
	Max	220.3	692.7	690.8	987.6	521.4
	S.D	50.5	125.4	184.3	224.2	121.3
	N	40	40	40	40	40

S.D. : Standard Deviation

가. 매립지표면의 메탄 배출 분포

매회 측정한 GPS좌표를 자오선을 X축으로 위도선을 Y축으로 한 좌표표시법인 TM(Transverse Mercator)좌표로 변환 후, 입력 자료로 사용하여 각 지점별 메탄 플럭스($mg/m^2 \cdot min$) 분포를 나타내었다. Figure 8 ~ 12와 같이 공간해석 프로그램인 Surfer 11(Golden software, Inc.)을 이용하여 Universal 크리깅을 통해 매립지내 메탄 플럭스의 공간분포를 표시하였다.

매립지 표면에서의 메탄 플럭스 분포는 지점마다 불균일한 특징을 보였다. 또한 총 측정 지점의 약 10%는 메탄이 거의 발생되지 않았다. Schroth

et al.(2012)와 마찬가지로 측정 달과 상관없이 a지점과 같이 LFG 회수관 가까이의 메탄 플럭스가 많이 발생되는 경향을 보였다. b지점도 마찬가지로 측정 달과 관계없이 메탄 플럭스가 높았는데, 복토재의 종류에 따라 차이를 보일 수 있다(Schroth, 2012; 이원재, 2014).

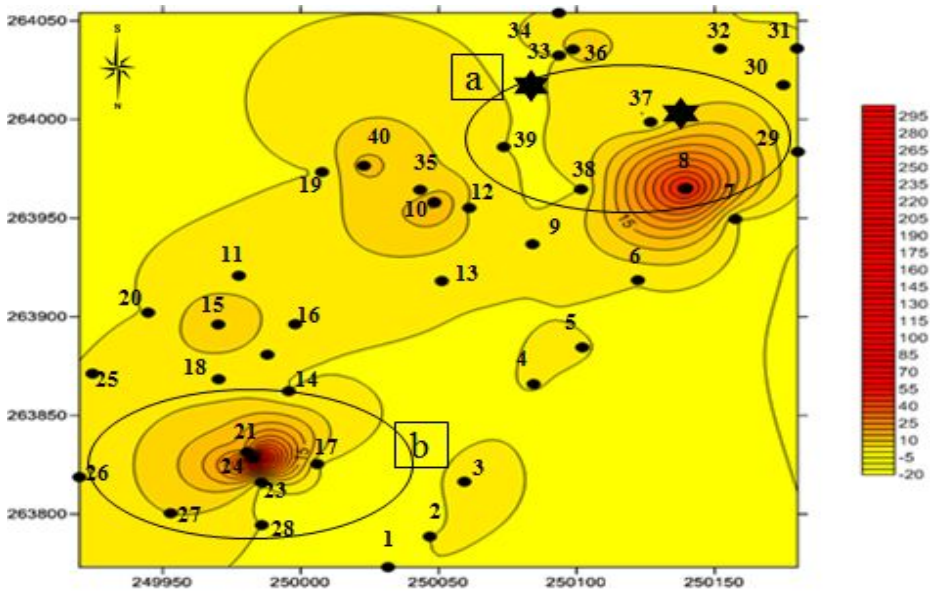

Figure 8. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 1st measurement

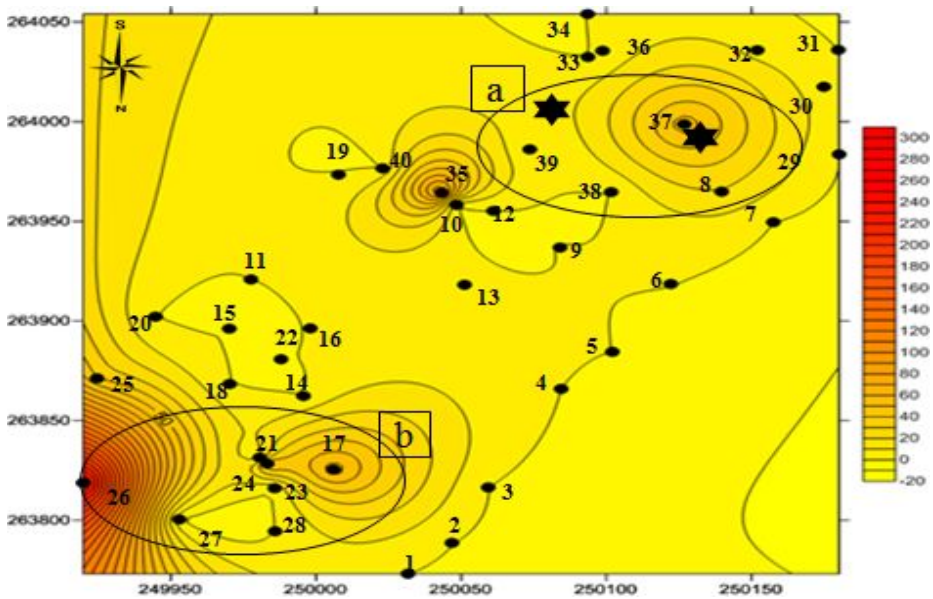

Figure 9. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 2nd measurement

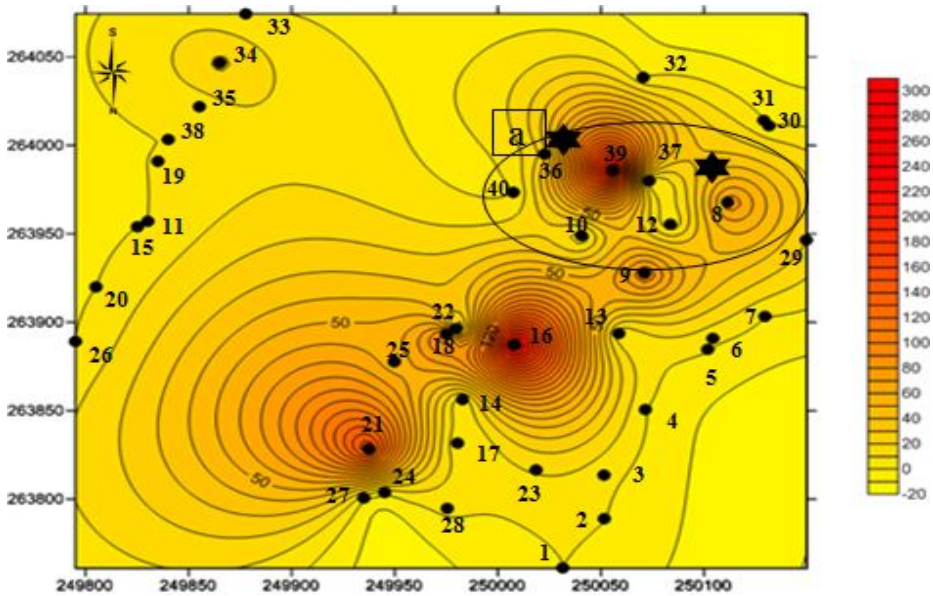

Figure 10. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 3rd measurement

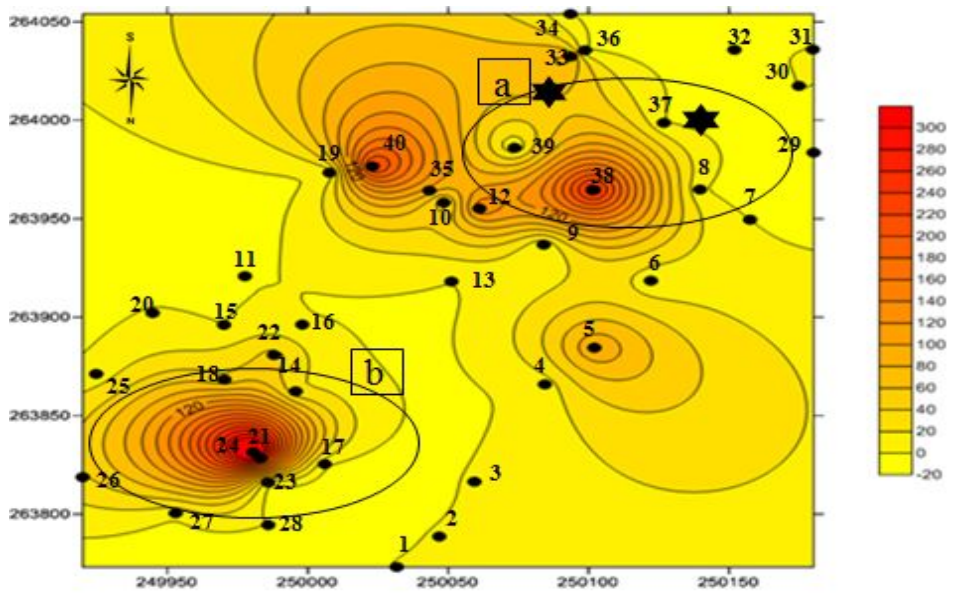

Figure 11. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 4th measurement

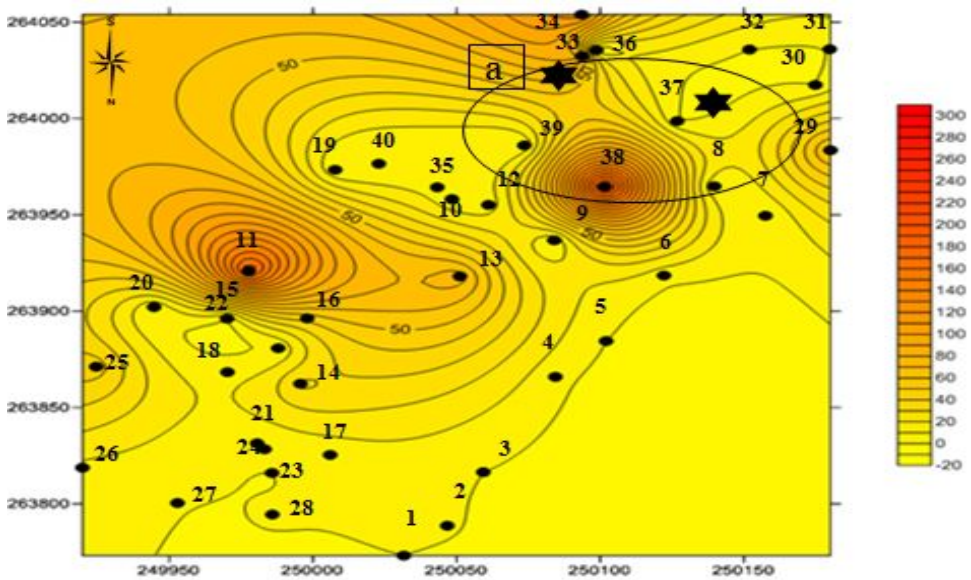

Figure 12. Methane flux at the surface of the landfill-cover soil for the 5th measurement

나. 메탄 회수량

본 연구의 온실가스 배출량 산정을 위하여 측정기간 동안의 메탄농도데이터와 회수량을 A사로부터 제공 받았다. 측정기간 동안의 메탄 회수량과 농도를 하루평균값으로 계산하여 Table 7에 나타내었다.

메탄 회수량은 2차인 8월초에서 가장 높게 나타났으며 이때 LFG 회수량 18,104.7 m^3, 메탄농도는 40.1%로 나타났다. 그러나 5차인 10월의 메탄 회수량은 12,72.4 $m^{3,}$ 이때 메탄농도는 38.5%로 가장 낮게 나타났다. 회수된 월별 메탄농도를 살펴보면 1차인 7월의 메탄농도가 41.2%로 가장 높은 값으로 나타났고, 5차인 10월의 메탄농도는 38.5%로 가장 낮게 나타났다.

1 ~ 5차까지 평균 메탄 농도는 약 40%로 폐기물매립지의 혐기성 분해과정의 제 4단계에 해당하는 메탄발효기인 것으로 사료된다. 이 시기에는 산생성균에 의해 생성된 아세트산과 수소가스가 메탄과 이산화탄소로 변환되는 시기이다.

Table 7. CH_4 recovery rate and CH_4 concentration in Sooncheon landfill site

Times	CH_4 Recovery Rate (m^3/day)	CH_4 Concentration (vol %)
1	13941.0	41.2
2	18104.7	40.1
3	16035.8	40.0
4	16485.1	40.0
5	12972.4	38.5

다. 매립지표면 메탄 배출량과 메탄 회수량의 비교

매립지에서의 현장 측정일을 기준으로 산정된 메탄 플럭스에 매립지 면적을 적용하여 메탄의 표면 배출량을 구하였다. 또한 현장 측정기간 동안의 LFG 회수량을 평균하여 하루 회수량으로 산정하였으며 그 결과를 Table 8에 회차별로 비교하였다.

4차 메탄 표면 배출량은 6.2 ton/day으로 가장 높은 값을 나타내었으며 1차의 월 메탄 표면 배출량은 0.8 ton/day으로 가장 낮은 값을 보였다. 월별 메탄 표면발생 경향은 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

각 회차별 메탄 회수량은 2.1 ~ 2.4 ton/day의 범위로 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 온실가스 총배출량의 차이는 표면 배출량의 차이로 인한 것으로 사료된다.

Table 8. The result of surface emission of CH_4, CO_2 and CH_4 recovery rate in Sooncheon landfill site

Times	Surface CH_4 Emission (ton/day)	Surface CO_2 Emission (ton/day)	CH_4 Recovery Rate (ton/day)
1	0.8	8.2	2.4
2	2.1	9.6	2.1
3	3.6	19.4	2.2
4	6.2	20.7	2.2
5	3.1	11.1	2.2

2. 메탄 배출량과 영향인자의 관계

메탄 표면 배출량과 영향인자와의 관계를 나타내기 위하여 최종매립완료시기가 다른 A(2011년 매립완료), B(2012년 매립완료), C(2013년 매립완료) 구역 간 평균 메탄 플럭스의 차이가 있는지 조사하였다. 또한 현장측정 기간 동안의 기상청자료를 기반으로 기상인자와 매립지 표면 메탄 배출량의 상관관계를 조사하였다.

가. 매립 완료시기에 따른 메탄 발생 특성 분석

One-way ANOVA는 세 개 이상의 그룹간의 평균비교를 위한 통계기법이다. 지점 간 메탄 플럭스의 결과는 Table 9에 나타내었다. 최종매립완료시기별로 A, B, C지점으로 나누어 각각의 지점별 평균 메탄 플럭스차이의 유무를 밝히기 위해 분석을 실시하였다. 우선 분석을 위한 기본가정은 3개의 그룹 모두 정규분포를 따르고 분산이 동일하여야 한다는 것이다. A, B, C지점 간 메탄 플럭스가 모두 정규분포를 따르지 않아 Kruscal-Wallis Test라는 비모수방법을 사용하였다.

귀무가설은 “세 지점의 평균 메탄 플럭스는 동일하다(즉, 적어도 어느 두 집단 간의 평균값 간에는 차이가 없다)으로 Table 10과 같이 유의확률이 $p>0.05$으로 귀무가설을 채택하는 결과를 얻었다. 따라서 본 매립지의 경우 A, B, C 지점마다 평균 메탄 플럭스는 독립적이지 않다, 즉 유의한 차이가 없는 것으로 판단할 수 있다. 지점마다 최종매립시기는 다르나 매립 폐기물은 불균질할 뿐 아니라 폐기물 성상별 분해속도가 다르다(박진규, 2012) 또한 가장 최근에 매립된 폐기물의 분해의 영향보다 과거에 매립된 폐기물의 분해의 영향이 크기 때문에 지점별 메탄 플럭스에 유의한 차이가 없는 것으로 사료된다.

Table 9. The Result of methane flux from Sooncheon landfill site and the number of measurement points

Measurement Area	Methane flux ($mg\,CH_4/m^2 \cdot min$)					No. of measured points
	Minimum	Average	Median	Maximum	S.D.	
A	0	26.3	0.85	388.1	66.2	80
B	0	22.1	0.38	237.5	51.6	60
C	0	16.8	0.19	264.6	46.1	60

S.D. : Standard Deviation

Table 10. The Result of Kruscal-Wallis test

Methane flux	
Chi-square	4.316
Degree of Freedom	2
Asymptotic Significance	0.116

나. 메탄 배출량과 기상의 상관관계

기상청의 과거자료인 평균기온, 평균운량, 일강수량, 상대습도, 일조시간, 강수지속시간과 메탄 전체배출량과 메탄 표면 배출량, 메탄 회수량의 상관관계를 통계 프로그램 SPSS(Ver.21)을 이용하여 분석하였다.

분석에 앞서 정규성 검정을 한 결과, 분포가 정규분포에 따른다는 가설을 기각하여 비모수 상관관계분석법인 Kandall's tau로 분석하였다. Kandall's tau 테스트 결과를 보면 Figure 13, Table 12에 나타낸 것과 같이 메탄 표면

배출량과 강수량이 강한 양의 상관관계(τ =1, p<0.001, n=5)를 보였다. 하지만 메탄 회수량과 기상요소와 상관관계를 보이지 않아, 메탄 회수량은 외부 환경에 의해 크게 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

측정 기간 동안의 기상은 평균한 값을 Table 11에 나타내었다. 2차와 3차의 기상자료는 각각 8월 초, 8월 말의 측정기간 동안의 평균값으로 각각의 평균 기온은 24.9℃, 22.4℃로 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 3차 조사 시 측정일 전날을 포함한 일평균 강수량은 2차 측정일 전날을 포함한 일평균 강수량보다 많았다. 선행연구에 따르면 매립지 토양의 수분은 매립지 메탄 배출량에 영향을 주는 중요한 요소로 알려져 있다(Bogner *et al.*, 1995, Boeckx and van Cleemput, 1996). 본 연구에서 다음과 같이 3가지 이유로 인하여 강수량이 메탄 표면 배출량에 영향을 준 것으로 판단된다.

첫째, 김혜진 등(2005)에서 모의매립조의 수분함량을 달리하여 운전하였을 때, 수분함량이 높아질수록 매립가스가 많이 발생되었다. 본 연구에서도 강수량이 높았을 때 메탄 배출량도 높아, 선행연구와 비슷한 경향을 나타났다.

둘째, 메탄영양세균은 메탄을 산화하여 이산화탄소로 변환시키는 중요한 인자이다. 토양 내 수분함량이 높아지면 토양의 공극을 막아 메탄 산화를 방지하게 된다. 최적의 메탄산화조건을 위해서는 적절한 수분 함량이 필요하며, 토양내의 최적의 수분함량은 메탄영양세균이 최적으로 활동할 수 있는 환경을 제공한다. Yuan(2006)에서 Biofilter에 채운 토양의 용적 수분 함량을 0.1에서 0.4와 0.5로 증가시켰을 때 메탄영양세균의 활동으로 인한 메탄제거 속도가 감소하였다. 본 연구에서 강수량이 많을수록 메탄 배출량은 많았으나, 메탄 발생량 대비 이산화탄소의 발생량 비율은 줄어드는 경향을 보였다. 이는 높은 수분량으로 인해 토양공극이 막혀 대기 중의 산소의 수송이 막힌 것이 원인이라고 사료된다.

셋째, 일반적으로 강수현상은 주로 저기압상태 발생되며(신도식 등, 2002),

저기압상태가 매립지표면에서 메탄을 더 쉽게 발생시킬 수 있는 요인이 될 수 있다(UK Environment Agency, 2010).

Table 11. Daily average weather condition for Sooncheon during the measurement

	Times				
	1	2	3	4	5
Daily Average Temperature (℃)	27.2	24.9	22.4	19.7	14.1
Cloudiness (%)	6.1	8.0	9.1	5.9	6.9
Daily Precipitation (mm)	1	13.6	29.0	38	18.5
Relative Humidity (%)	70.7	82.7	84.9	82.9	86.0
Duration of Sunshine (hr)	3.4	5.6	1.6	3.8	3.8
Time of Rain Duration (hr)	0.5	2.4	3.6	5.7	5.1

Table 12. Correlation coefficient between methane surface emission, methane recovery rate and meteorological element

			Daily Average Temperature	Cloudiness	Daily Precipitation	Relative humidity	Duration of Sunshine	Time of Rain duration
Kendall's tau_b	Methane surface emission	Correlation Coefficient	-0.60	0.00	1.00*	0.40	-0.20	0.60
		Sig. (2-tailed)	0.14	1.00	0.00	0.33	0.62	0.14
	Methane recovery rate	Correlation Coefficient	0.40	-0.20	-0.40	-0.60	0.40	-0.40
		Sig. (2-tailed)	0.33	0.62	0.33	0.14	0.33	0.33

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

제2절 매립지의 메탄산화계수 산정

1. 메탄산화계수 산정

매립지표면 메탄 플럭스와 이산화탄소 플럭스 조사 결과를 기반으로 메탄산화계수를 산정하였으며, 결과는 Table 13에 나타내었다. 평균메탄산화계수는 0.64로 산정되었다. 9월의 메탄산화계수가 평균 0.48로 가장 작았고, 7월의 산화계수는 0.76으로 가장 높았다.

Figure 14과 같이 물질수지방법으로 산정된 메탄산화계수의 선행연구 결과와 비교해 보면 프랑스 Sonzay 폐기물매립지(Widory *et al*., 2012)는 평균 0.34, 국내 경기도 소재 J 폐기물매립지(이원재, 2015)는 평균 0.51, 본 연구는 평균 0.64로 나타나, IPCC 기본값인 0.1과 상당한 차이를 보이고 있다. J 폐기물매립지는 준호기성 위생매립을 실시하고 있고 폐기물 종류는 생활폐기물과 소각재이다. 본 폐기물매립지를 대상으로 산정된 산화계수는 10월과 11월에 측정되었으며 평균 0.5와 0.41 ~ 0.61의 범위로 나타났다. 본 연구에서 측정된 10월 메탄산화계수는 0.56으로 선행연구와 적은 차이를 보였다.

태국 Pattaya와 Saraburi 폐기물매립지(Wangayao *et al.,*2011)를 대상으로 산정된 메탄산화계수도 계절마다 차이를 보였으며, 우기보다 건기 시 메탄산화계수가 더 높았다. 토양에 수분 함량이 높으면 대기 중 산소가 토양 속으로 통과하기 어려워져 우기의 메탄산화계수가 낮게 조사된 것으로 사료된다.

Table 13. The result of methane oxidation rate and methane oxidation factor in this study

		Times				
		1	2	3	4	5
CH_4 Oxidation Rate (mole/m^2·day)	Minimum	0	0	0	0	0
	Maximum	1.83	1.23	9.04	1.13	0.96
	Average	0.52	0.28	1.32	0.32	0.23
	S.D.	0.39	0.28	2.15	0.38	0.27
CH_4 Oxidation Factor		0.76	0.69	0.70	0.48	0.56

S.D. : Standard Deviation

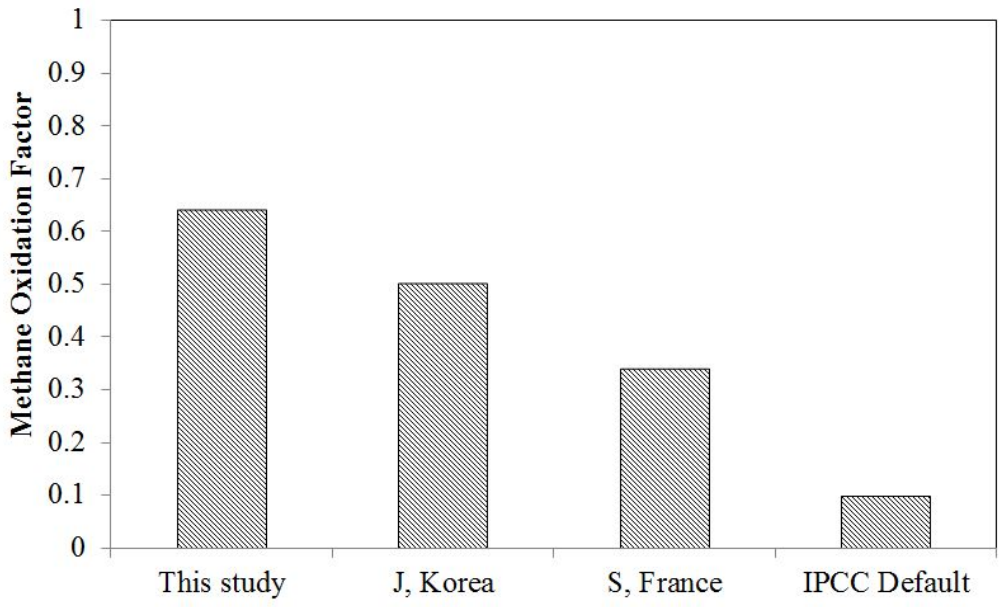

Figure 13. Comparison of methane oxidation factor of this study and previous studies

2. 메탄산화계수와 메탄 플럭스의 상관분석

본 연구에서 산정한 1 ~ 5차까지 각 지점 당 메탄의 플럭스와 메탄산화계수와의 상관관계를 통계 프로그램 SPSS(Ver.21)을 이용하여 분석하였다. 정규성 검정 결과, 분포가 정규분포에 따른다는 가설을 기각하여 비모수 상관관계분석법인 Kandall's tau로 분석하였다.

Kandall's tau 테스트결과는 Table 14와 같이 나타내었다. 메탄산화계수와 메탄 플럭스와는 강한 음의 상관관계(τ =-0.83, p<0.001)를 보였다. 이는 메탄 플럭스가 많이 발생될수록 산화가 적게 일어난다는 것을 의미한다.

Chanton and Liptay(2000)와 Chanton *et al.*(2010)에서 메탄산화율이 높았던 지점은 메탄 배출량이 낮은 것으로 조사되어 본 연구와 비슷한 경향을 보였다. Hot spot과 같이 표면에서 고농도로 메탄이 발생되는 곳은 메탄산화가 일어나는 토양층을 거치지 않고 배출되기 때문인 것으로 사료된다 (Oonk, 2010).

Table 14. The result of correlation analysis of methane oxidation factor and methane, carbon dioxide flux for each measurement point

		CH_4 Flux (mole/m^2·day)
CH_4 Oxidation Factor		
Kendall's tau_b	Correlation Coefficient	-0.83**
	Significance (2-tailed)	0.00

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).
*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

5장 결 론

본 연구에서는 메탄 발생 특성 및 메탄산화계수 산정을 위해 폐기물매립지 중 40지점을 선정하여 7월 ~ 10월간 총 5회에 걸쳐 측정하였으며, 닫힌 챔버법과 비분산적외선분석기(NDIR)을 이용하여 매립지표면에서 발생하는 메탄의 플럭스와 배출량을 산정하였다. 또한 최종매립완료시기가 다른 지점별 차이의 유무와 측정당시의 기상의 상관관계를 분석하였다. 조사된 온실가스 플럭스를 기반으로 물질수지법을 이용하여 연구대상 매립지 고유 산화계수(OX)를 산정하였다.

매립지표면 메탄 배출량은 평균 3.2 ton/day로 나타났다. 특히 9월의 메탄 배출량은 각각 6.2 ton/day로 측정회차 중 가장 높았다. 측정 달에 따라 다소 차이를 보였는데, 메탄 플럭스와 기상조건의 Kendall's tau 분석결과 강수량과 강한 양의 상관관계를 보였다. 또한 매립지의 최종매립완료시기별로 구역을 나누어 매립완료시기별 메탄 플럭스의 차이가 있는지 Kruskal-Wallis 분석한 결과, 유의한 차이를 보이지 않았다. 지점마다 최종매립시기는 다르나 매립 폐기물의 불균질성과 과거에 매립된 폐기물의 분해의 영향으로 인하여 지점별 메탄 플럭스에 유의한 차이는 없는 것으로 사료된다.

측정된 메탄과 이산화탄소 플럭스를 기초로 물질수지법을 통해 산정된 메탄산화계수는 평균 0.64로 0.48 ~ 0.76의 분포를 보였다. 메탄산화계수와 메탄 플럭스는 강한 음의 상관관계를 보였으며, 이는 Hot spot과 같이 고농도의 메탄이 발생되는 지점은 메탄토양층을 거치지 않는 지점으로 판단된다.

본 연구와 같이 폐기물부문의 온실가스 배출량산정은 신뢰성 있는 자료를 얻기 위해서 메탄 발생 특성을 반영한 자료 확보가 필요할 것이다. 특히

측정일의 기상에 따라 배출량 결과에 차이가 생길 수 있으므로 계절에 대한 고려 뿐 아니라 기상조건을 고려하여 온실가스 배출량을 산정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

또한, 본 연구에서 산정된 본 매립지 고유 산화계수는 IPCC 기본값 0.1보다 높게 산정되었다. FOD모델을 통해 매립지에서 발생되는 메탄 배출량 산정 시 IPCC 기본값을 사용하게 되면 과다하게 산정될 가능성이 있다. 따라서 보다 정확한 매립지 온실가스 배출량을 산정하기 위해서 우리나라 고유 메탄산화계수 개발이 필요할 것으로 사료된다.

일반적으로 매립지에서의 온실가스 배출은 토양의 온도와 수분, 대기압 등 기체배출에 영향을 주는 인자와 토양미생물의 활동에 의한 복합적인 요인에 의해 발생된다. 추후 이러한 요소들을 고려한 연구가 추가로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

국외 선행연구에 따르면 메탄산화계수 산정 시 물질수지법과 안정동위원소법을 이용하여 산정된 사례가 있으므로, 두 방법의 비교를 통해 더욱 신뢰 높은 메탄산화계수 산정이 필요할 것이다. 보다 정확하고 신뢰성 높은 폐기물매립지의 온실가스 배출량 관리를 위하여 더 많은 매립지를 대상으로 메탄산화계수를 산정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

국가 온실가스 인벤토리 보고서, 2014, 온실가스종합정보센터

국립환경과학원, 2012, Closed chamber를 이용한 산림지역 토양의 질소산화물 및 메탄의 지표 배출량 조사 연구 보고서

김득수, 장영기, 전의찬, 2000, 플럭스챔버에 의한 매립지표면 메탄의 배출량 측정과 분석, 한국대기환경학회지, Vol.16, No.5, pp.499-509

김영주, 김희갑, 2007, 환경통계학, 동화기술

김정태, 정진도, 김장우, 매립지 메탄가스 발생량 실측을 통한 메탄발생 속도상수(k)값의 산출 및 발생량 예측, 대한환경공학회지 추계학술연구발표회, pp.331~337 (2005)

김희정, 2012, 국내 준호기성 매립 기술의 도입 실태 조사 및 개선에 관한 기초 연구, 서울시립대학교 공학석사 학위논문

김혜진, 김종호, 오동익, 김석찬, 이남훈, 김낙주, 2005, 혐기성 폐기물매립지에 있어서 수분이 매립폐기물의 안정화에 미치는 영향, 유기물자원화학회지, 제13권, 제1호, pp.124-130

농림부, 1999, 전국 농업기상 감시 및 실시간 작황진단체계 구축 과제의 최종보고서, 농림부, 97-100.

박진규, 2012, 폐기물매립지에서의 온실가스 예측 모델 및 변수 산정방법 개발, 안양대학교 대학원 공학박사학위논문.

박진규, 강정희, 김은철, 김경, 윤석표, 이남훈, 2013, 생활폐기물 성상별 메탄발생률 평가, J. of Korea Society of Waste Management, Vol. 30, No. 1, pp. 52-59

사재환, 2006, 하수처리장의 악취물질 플럭스 특성 및 물질전달모형 개발-암모니아와 트림틸아민을 중심으로-, 동신대학교 대학원 공학박사학위논문.

서동천, 이동훈, 이정준, 한현수, 권정안, 김승도, 이남훈, 김남주, 유만식, 서창일, 정용환, 2001, 폐기물의 유기탄소함량을 이용한 매립가스 발생량 예측, 한국폐기물자원순환학회지, Vol. 18, No. 8, pp.702~714

신도식, 박윤호, 김병남, 허철운, 2002, 저기압에 동반된 강수유형과 선행조건, 대기 제 12권 3호, 10, 253-253

심교문, 민성현, 김용석, 정명표, 황해, 김석철, 소규호, 2014, 김제 벼-보리 이모작 논에서 벼 재배기간 동안의 순생태계 CO_2 교환량에 대한 환경요인 분석, 한국기후변화학회지, Vol.5 no.1 pp.71-81

유한녕, 2013, 소규모매립지의 온실가스배출계수 특성, 충북대학교 대학원 공학석사학위논문.

이원재, 2015, 소규모매립지 CH4 배출비를 이용한 MCF 추정 및 k 특성에 관한 연구, 한국교통대학원 대학원 공학박사학위논문.

이원재, 2015, 폐기물매립지에서 물질수지를 이용한 메탄산화계수(OX) 산정에 관한 연구, 안양대학교 대학원 공학석사학위논문.

이준기, 2012, 매립 폐기물의 성상별 메탄발생속도상수 산정에 관한 연구, 부경대학교 공학박사 학위논문.

전성호, 2006, 실규모 매립지의 메탄총배출량 측정결과를 이용한 메탄발생속도상수 추정에 관한 연구, 서울시립대학교 공학석사 학위논문.

전은정, 2007, 폐기물매립지에서의 메탄 발생특성조사 및 발생량 예측모델에 관한 연구, 서울시립대학교 대학원 공학박사학위논문.

차영준, 2004, 비모수검정, 자유아카데미

환경부, 2002 ~ 2014, 전국폐기물 발생 및 처리현황

真次寛, 2014, 準好気性埋立構造の廃棄物埋立地における生ごみ由来の浸出水量の予測手法に関する研究,福岡大学博士学位論文

環境省, 2006, 温室効果ガス排出量算定に関する検討結果, 廃棄物分科会

Bogner, J.E., Spokas, K., Burton, E., Sweeney, R., Corona, V., 1995, Landfills as atmospheric methane sources and sinks, Chemosphere 31, pp.4119-4130.

Bogner, J., Meadows, M., Czepiel, P., 1997. Fluxes of CH_4 between landfills and the atmosphere: natural engineered control. Soil Use and Management 3, pp.268-277.

Boeckx, P., Van Cleemput, O., 1996. Methane oxidation in a neutral landfill cover soil: influence of moisture content, temperature, and nitrogen-turnover. Journa of Environmental Quality 25, pp.178-183.

Borjesson, G., Svensson, B.H., 1997. Seasonal and diurnal methane emissions from a landfill and their regulation by methane oxidation. Waste Management Research 15, 33-54.

Bruno Capaccioni, cristina Caramiello, Fabio Tatano, Alessandro Viscione, 2010, Effects of a temporary HDPE cover on landfill gas emissions: Multiyear evaluation with the static chamber approach at an Italian landfill, Waste Management, Vol.31, 5, pp.956-965

Charlotte Scheutz, Peter Kjeldsen, 2004, Environmental Factors Influencing Attenuation of Methane and Hydrochlorofluorocarbons in Landfill Cover Soils, Journal of Environmental Quality, No.33, pp.72-79

Charlotte Scheutz, Peter Kjeldsen et al., 2009, Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions, Waste Management & Research, Vol. 27, pp.409-455

Chanton, J.P., Liptay, K., 2000. Seasonal variation in methane oxidation in landfill cover soils as determined by an in situ stable isotope technique. Global Biogeochemical Cycles 14, pp.51-60.

Chanton, J.P., Powelson, D.K., Abichou, T., Hater, G., 2008. Improved field methods to quantify methane oxidation in landfill cover materials using stable isotope carbon isotopes. Environmental Science and Technology 42, pp.665-670.

Czepiel, P.M., Mosher, B., Crill, P.M., Harriss, R.C., 1996, Quantifying the effects of oxidation on landfill methane emissions. J. Geophys. Res. 101, pp.16721-16729.

De Visscher, A., De Pourcq, I., Chanton, J., 2004, Isotope fractionation effects by diffusion and methane oxidation in landfill cover soils. J. Geophys. Res. p.109, D18111. doi:10.129/2004JD004857.

D. Widory E. Proust, G. Bellenfant, O. Bour, 2011, Assessing methane oxidation under landfill covers and its contribution to the above atmospheric CO_2 levels : The added value of the isotope (d13C and d18O CO_2; d13C and dD CH_4) approach, 2012, Waste Management 32, pp.1685-1692

Hanson, R.S., Hanson, T.E., 1996. Methanotrophic bacteria. Microbiol. Rev. 60, pp.439-471.

H. Ishimori, K. Endo, M. Yamada, 2009, Reliability Evaluation for Static Chamber Method at Landfill Sites, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Boston

IPCC, 2006, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Jan Hauke, Tomasz Kossowski, 2011, Comparison of values of pearson's and spearman's correlation coefficients on the same sets of data, Quaestiones geographicae 30(2)

Jeong, S. and Kim, J. Y, Methodologies to Develop Parameters of Methane Generation Potential (L0) to Increase Reliability of Greenhouse Gas Inventory in Solid Waste Landfills, 2013, Journal of Korea Society of Waste Management Vol.30 No.6 pp.617-624

Jeffrey Chanton, Tarek Abichou, Claire Langford, Kurt Spokas, Gary Hater, Roger Green, Doug Goldsmith, Morton A. Barlaz, 2011, Observations on the methane oxidation capacity of landfill soils, Waste Management Vol.31, pp.914-925

Jeremy K. O'Brien, Practical Methods for Measuring Landfill Methane Cover Soil Oxidation, FORESTERDAILYNEWS, 2014.12.22., http://foresternetwork.com/daily/waste/swana-news-practical-methods-for-measuring-landfill-methane-cover-soil-oxidation/

Jeffrey Chanton, Karen Liptay, 2000, Seasonal variation in methane oxidation in a landfill cover soil as determined by an in situ stable isotope technique, Global Biogeochemical Cycles Vol 14, No.1 pp.51-60

Jones, H.A., D.B. Nedwell, 1993. Methane emission and methane oxidation in landi ll cover soil. FEMS Microbiol. Ecol. 102:185–195.

Komsilp Wangyao, Sirintornthep Towprayoon, Masato Yamada, Kazuto Endo and Tomonori Ishigaki, 2011, Methane Oxidation in Landfill Cover Soil: Case Study in Thailand, IPCBEE vol.6

Liptay, K., Chanton, J., Czepiel, P., Mosher, B., 1998. Use of stable isotopes to determine methane oxidation in landfill cover soils. Journal of Geophysical Research 103, pp.8243–8250.

Mette Christophersen, Peter Kjeldsen, Helle Holst, Jeffrey Chanton, 2001, Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation, Waste Management & Research,19 pp.595-612.

Mijin Kim, 2003, The study of Landfill Microbial Communities Using Landfill Gas and Landfill Gas Condensate, Dissertation, Drexel University

M. Maione, J. Arduini, M. Rinaldi, F. Mangani, B. Capaccioni, 2005, Emission of non CO_2 greenhouse gases from landfills of different age located in central Italy, Journal of Integrative Environmental Sciences, 2, pp. 167–176

M. Maione, J. Arduini, A. Berloni, B. Capaccioni, F. Mangani, G. Mangani, L. Pirillo, F. Tatàno, 2005, Landfills as sources of trace gases involved in global change phenomena and in air quality issues, Geophysical Research Abstracts, 7, p. 07761.

M.H. Schroth, W. Eugster, K.E. Gómez, G. Gonzalez-Gil, P.A. Niklaus, P. Oester, 2012, Above- and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil, Waste Management, Volume 32, Issue 5, May 2012, pp.879-889.

Oonk H., 2010, Literature review: methane from landfills: methods to quantify generation, oxidation and emission. Innovations in Environmental Technology, The Netherlands, Oonkay.

Surfer, 2012. Surfer 11 User's Guide. Golden Software, Inc., Golden, CO.

Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J.P., Morcet, M., Aran, C., Graff, C., Moreau-le Golvan, Y., Hebe, I., 2006. Methane mass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems? Waste Management 26, pp.516–525.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. A., 1993, Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, Mc-Graw Hill, Singapore.

US EPA, 1996. Standards of performance for new stationary sources and guidelines for control of existing sources: municipal solid waste landfills; Code of Federal Regulations. Title 40. Sections 9, 51, 52 and 60.

US EPA, 2004. Direct emissions from landfilling municipal solid waste. Climate Leaders Greenhouse Gas Inventory Protocol. Washington, DC.

US EPA, 2012. Quantifying Methane Abatement Efficiency at Three Municipal Solid Waste Landfills, EPA/600/R-12/003.

UK Environmental Agency and Scottish Environment Protection Agency, 2002. Guidance on Landfill Gas Flaring, p.8.

Ward, R.S., Williams, G.M., and Hills, C.C., 1996, Changes in Major and trace Components of Landfill Gas During Subsurface Migration, Waste Management & Research. 14: pp.243-261.

Yuan, Lei, 2006 Methane emission and oxidation through landfill covers, Dissertation, Florida State University.

Abstract

A study on the development of parameter based on the investigation of methane emission characteristics in a landfill site

Jihye Kim

Cooperation Course for Climate Change

The Graduate School

Sejong University

The methane emission from landfill site was 22.4% of the total methane emission by domestic in 2012, so it is important to secure reliability and to manage methane emission. In Korea the greenhouse gas emission of landfill site has been computed by using FOD model(First Order Decay model) proposed by 2006 IPCC guideline. Also the default value of 2006 IPCC guideline has been used as parameters to calculate greenhouse gas emission. However the IPCC default value has a limit to reflect the attribute of domestic landfill site, so the importance of the study on the parameter reflecting domestic landfill site is getting higher.

In this study the attribute of methane generated, as per weather and other conditions, at small scale domestic landfill site has been comprehended by field

measurement, and to compute methane oxidation factor, a parameter of FOD model, is the purpose of this study.

To compute the attribute of methane emission and methane oxidation factor total 40 spots of landfill site have been selected and total 5 times measured during July to October, and the flux and emission of methane and carbon dioxide, generated on the surface of landfill site, were computed by using close chamber method and NDIR analyzer.

According to the computing result of surface methane emission of landfill site, the average quantity was 3.2 ton/day, and in September it was 6.2 ton/day that was the highest among measurements.

According to the Kruskal-Wallis analyzing result, to define the difference of methane flux by landfill completion period, zoned landfill area by the year of final landfill cover, there was no significant difference. From the Kendall's tau analyzing result of the greenhouse gas and the weather condition, there were strong and positive correlation with precipitation, thus it was understood that it has correlated with precipitation. As per these analyzing result, from on site measurement of greenhouse gas emission, there might be difference of emission result depending on the weather of measuring day. Therefore it was understood that not only the season but also weather condition should be considered when computing greenhouse gas emission. In this study the material index method was used to compute methane oxidation factor. The average value of methane oxidation factor was 0.64 with the range of 0.48 ~ 0.76.

Comparing with IPCC default value, the methane oxidation factor computed by this study was relatively higher than IPCC default value 0.1. Therefore, when computing methane emission of landfill site by FOD model, there would

be some possibility of excessive greenhouse gas emission computed by applying IPCC default value, so it would be necessary to develop the unique methane oxidation factor of Korea.

In general, greenhouse gas emission of landfill site is influenced by complex factors, factors influencing gaseous emission, such as soil temperature and moisture, air pressure, as well as soil microbe activities. It is judged that further studies, considering these factors, should be followed. Also it is understood that more accurate and reliable greenhouse gas emission management would be possible by computing the methane oxidation factor from the more landfill sites.

Keywords : Landfill, Characteristics of methane emission, Mass balance method, Methane Oxidation Factor