

플럭스챔버에 의한 매립지표면 메탄의 배출량 측정과 분석

Surface Flux Measurements of Methane from Landfills by Closed Chamber Technique and Its Validation

김득수·장영기¹⁾·전의찬²⁾

군산대학교 토목환경공학부 환경공학전공, ¹⁾수원대학교 환경공학과,

²⁾동신대학교 환경공학과

(2000년 5월 26일 접수, 2000년 7월 19일 채택)

Deug-Soo Kim, Young-Kee Jang¹⁾ and Eui-Chan Jeon²⁾

Environmental Engineering, School of C & E Engineering, Kunsan National University,

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Suwon University,*

²⁾*Department of Environmental Engineering, Dongsin University*

(Received 26 May 2000; accepted 19 July 2000)

Abstract

Next to carbon dioxide, methane is the second largest contributor to global warming among anthropogenic greenhouse gases. Methane is emitted into the atmosphere from both natural and anthropogenic sources. Natural sources include wetlands, termites, wildfires, ocean and freshwater. Anthropogenic sources include landfill, natural gas and oil production, and agriculture. These manmade sources account for about 70% of total global methane emissions; and among these, landfill accounts for approximately 10% of total manmade emissions. Solid waste landfills produce methane as bacteria decompose organic wastes under anaerobic conditions. Methane accounts for approximately 45 to 50 percent of landfill gas, while carbon dioxide and small quantities of other gases comprise the remaining 50 to 55 percent. Using the closed enclosure technique, surface emission fluxes of methane from the selected landfill sites were measured. These data were used to estimate national methane emission rate from domestic landfills. During the three different periods, flux experiments were conducted at the sites from June 30 through December 26, 1999. The chamber technique employed for these experiments was validated in situ. Samples were collected directly by on-site flux chamber and analyzed for the variation of methane concentration by gas chromatography equipped with FID. Surface emission rates of methane were found out to vary with space and time. Significant seasonal variation was observed during the experimental period. Methane emission rates were estimated to be $64.5 \pm 54.5 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$ from KimPo landfill site, $357.4 \pm 68.9 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$ and $8.1 \pm 12.4 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$ at KwangJu (managed and unmanaged), $472.7 \pm 1056 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$ at JonJu, and $482.4 \pm 1140 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$ at KunSan. These measurement data were used for the extrapolation of national methane emission rate based on 1997 national solid waste data. The results were compared to those derived by theoretical first decay model suggested by IPCC guidelines.

Key words : methane emission, landfill gas emission, flux chamber, greenhouse gas

1. 서 론

온실기체의 국가 배출자료는 기후변화협약과 관련된 국제협상 및 국내 저감대책 수립에 없어서는 안될 중요한 기초자료이다. 그러나 국내 현실은 비교적 배출비중이 큰 에너지산업과 농업 분야를 제외하고는 온실기체의 배출(inventory) 조사가 미흡한 실정이다. 주요 온실기체들이 CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 , CFC 등은 여러 경로를 통해서 대기로 배출되고 있으며, 이들 중에서 CH_4 의 온실효과 기여수준은 17%로 55%인 CO_2 다음으로 높게 나타나고 있다 (IPCC, 1994). 또한 대기 중 CH_4 의 농도는 산업화 이전의 700 ppb수준에서 '99년 1.7 ppm수준으로 증가되어 인위적 배출의 기여가 계속 증가 추세에 있는 것으로 보고되고 있다. 주요 온실기체들에 대한 대기 중 농도가 과거보다 현저하게 증가되었음이 확인되고 있고(Bouwman, 1990), CH_4 은 대기중의 농도는 낮으나 상대적으로 지구온난화에 기여하는 정도가 CO_2 에 비해 질량기준으로 21배가 높고, 생체발생량(biotic source emission)이 크기 때문에 지구규모수지에 있어서 신중하게 고려되어야 한다. 한편, 전지구 규모의 CH_4 배출량은 400~640 Tg CH_4/yr 정도이며, 인위적으로 배출되는 CH_4 의 양은 전체 배출의 약 70%를 차지하고 있다(IPCC, 1996, 1997). 인위적인 배출의 약 11%가 폐기물 매립지를 통해 배출되는 것으로 나타나고 있으며, 추후 인구증가에 따라 예상될 수 있는 매립지 메탄발생량의 증가에 대처하기 위한 적절한 폐기물 처리대책과 매립지에서 발생되는 기체의 배출평가기법 등의 개발이 국가적으로 필요할 것이다.

각국의 온실기체 국가 배출량은 자료의 신뢰성과 각국 자료의 비교·평가를 위해서 산정방법과 자료제출 형태가 통일 될 필요가 있다. 이와 같은 자료의 표준화를 위해서 각국의 배출원별 온실기체 배출량 작성을 위한 "1996 IPCC Guidelines 수정안"이 최근에 제시되었고, 주어진 guidelines에 따라 온실기체의 배출량을 산출하여 일정한 형태로 작성·보고를 원장하고 있다. 그러나 guideline에서 각 배출원별 배출량 산출을 위해 제안한 방법에는 국가별 산업 특성, 생활, 문화특성 등의 차이에 따라 변화할 수 있는 여러 물리, 환경인자들이 사용되고 있기 때-

문에 각국별 배출량작성을 위해서는 이러한 변화요소 또는 인자들에 대한 각국 특성에 알맞은 값들이 적용되어질 필요가 있다.

이번 연구에서는 기후변화와 관련된 온실효과에 커다란 기여를 하고 있는 CH_4 의 매립지 표면으로부터의 국내 배출량을 현재 사용중인 5곳의 광역매립장을 대상으로 닫힌 플럭스챔버(closed flux chamber)를 사용하여 매립표면으로부터 계절 별로 3차례에 걸쳐 측정하였고, 국내의 실제 매립환경과 비교하기 위하여 그 결과들을 "기후변화에 관한 다 정부간 협의회(IPCC)"에서 권장한 방법인 물질평형에 따른 식과 1차 분해함수식에 따라 1997년 국가 폐기물자료와 국내 폐기물 성상조사 자료들을 기본으로 하여 추정된 배출량(환경부, 2000)과 비교분석하고 논의하였다.

2. 연구방법

매립지 표면으로부터의 CH_4 배출량은 미기상학적인 측정방법에 비해 장치의 운용이 편리하여 매우 실용적이고 경제적이며, 측정지점의 배출특성을 대표할 수 있는 닫힌 챔버(closed flux chamber)를 사용하여 측정하였다. 이러한 방법은 주로 미량기체의 지구순환과 흡수/배출원(sink/source)연구를 위해서 적용되는 측정방법으로 토양으로부터 배출되는 바 반응성 가스, 예를 들면 CO_2 , N_2O , CH_4 등의 지표배출량을 측정하는데 이용하는 방법이다. 닫힌 챔버에 의한 배출량 측정은 챔버를 측정지점에 설치 시에 지표상태를 변화시키는 단점이 있지만, 그로 인한 배출량에 미치는 영향은 토양으로부터의 자연적 배출과 같이 그 크기가 매우 작은 경우에도 무시할 수 있을 정도로 작았으며, 주로 자연토양(목초지, 습지, 사바나, 우림 지역 등)과 경작지 토양으로부터의 질소산화물, 아질산가스와 메탄의 배출량 측정에 사용되어진 바 있다(Tsuruta et al., 1997; Watanabe et al., 1997; Yoh et al., 1997; 이경보 등, 1997). 이번 연구에서 매립지로부터의 메탄배출량 산정을 위한 기초자료 조사를 위해 플럭스챔버 측정방법을 매립지 표면으로부터의 메탄배출량 측정을 위해 선정된 매립장의 지표면에 적용하였으며 시료의 채취와 측정 분석에 응용될 닫힌 챔버 방법을 다음에 설명하였다.

2.1 조사지점

매립기체는 내부에 묻혀진 폐기물의 생물학적 분해, 증발, 반응 등에 의해 생성되고, 확산, 대류, 치환 등에 의하여 이동하여 매립지 표면을 통해 대기 중으로 배출된다(McBean *et al.*, 1995). 챔버를 이용한 메탄의 지표배출 측정은 매립지 내부의 압력 차이에 따른 기체의 이동현상 중 매립지 표면을 통해 배출되는 기체를 채취하여 그 성분 중 포함된 메탄을 정량 분석하여 배출량을 산출하는 것이다. 이를 위하여 전국에 산재하여 있는 매립지 중에서 그 이력이 비교적 상세하고 운영관리가 양호한 수도권, 광주, 전주, 군산의 위생 광역매립지와 그들과 측정된 결과를 비교하기 위해서 한 곳의 비위생매립지(광주)를 대상으로(표 1 참조) 챔버를 이용하여 매립지 표면으로부터의 메탄배출농도를 1999년 6월부터 12월까지 3차례에 걸쳐 측정하고, 그 배출량을 산출하였다. 1차 조사기간은 1999년 6월 30일부터 1999년 7월 14일 까지, 2차조사기간은 1999년 8월 12일부터 8월 26일까지, 그리고 3차조사기간은 1999년 12월 7일부터 12월 26일까지 행하여졌다. 조사기간 동안 대상 매립지를 포함하여 국가 온실 가스배출량 산정을 위한 기초자료 생산을 위해서 인근의 기타 환경기초시설(소각장, 하·폐수처리장 등)에서도 온실기체 배출량 측정 실험이 동시에 수행되었다. 챔버를 이용한 메탄배출량 측정은 단계별 표면복토가 완료된 구역을 대상으로 가능하면 측정지점의 환경특성을 대표할 수 있도록 하기 위하여 측정구역을 분할하여 대상지역별로 4 또는 6지점에서 측정을 하였다.

2.2 시료채취와 분석

플릭스챔버는 외경 30 cm, 높이 30 cm(내부용적 약 21 L)인 원통형으로 지표배출량측정을 위한 설치와 이동에 적당한 크기를 갖도록 제작되었다. 몸

통은 투명한 아크릴로 이루어졌으며, 시료채취를 위한 tedlar bag과의 연결 부위를 포함한 모든 연결부분은 swagelok fitting과 teflon관으로 구성하여 기체 시료의 손실을 줄이도록 고안되었다. 챔버 몸통은 측정 시에 설치로 인한 배출량 변화에 미치는 영향을 줄이고 설치를 쉽게 하기 위하여 받침과 분리될 수 있도록 제작되었다. 받침은 지면으로의 삽입을 용이하게 하기 위해 강판으로 제작되었고, 받침의 윗면은 몸통 밑 부분의 o-ring에 의하여 밀착하여 설치 후 챔버 밖으로 기체가 새는 것을 방지하도록 하였고, 너트를 이용하여 연결되도록 고안되었다. 그림 1에 플릭스챔버의 일개를 제시하였다.

기체의 배출량 측정을 위해서는 챔버 몸통을 받침에 덮은 상태에서 챔버 안에서 시간에 따라 변화하는 메탄의 농도변화를 감지해야 한다. 챔버 내의 기체의 혼합은 대략 30분내에 균질하게 되지만 시료의 대표성을 보다 확실하게 유지하기 위한 기체의 균질 혼합을 위해 챔버 내에 테프론 stirrer(60~80 rpm)를 설치하였다. 측정 시에는 인위적인 환경 변화로 인한 측정지점의 영향을 최소화하기 위하여, 우선 챔버를 분해하여 밀받침을 먼저 측정지점에 설치하였다. 설치시 밀면을 매립지면으로부터 최소한 5 cm 이상 삽입시켜서 지면으로부터의 기체누출을 방지한다. 지표면이 예전 상태의 안정을 되찾을 수 있도록 이상의 조건으로 30분 정도 둔 후에 상부의 챔버 몸통을 조심하여 밀받침 위에 놓고 너트로 두 부분을 연결하였다. 연결 직후에 몸통에 연결된 teflon 채취관을 통해서 일정 시간 간격으로 여러 번 반복하여 챔버 내의 기체시료를 채취하는데, 이때 2-way 또는 3-way tap이 달린 플라스틱 주사기(50 ml)를 사용하거나, 저유량 소형펌프(Sibata Mini pump MP-2 N, Sibata Scientific Technology, Japan)와 연결된 tedlar bag을 사용하여 채취하고, 챔버 내에 K-type thermocouple을 장착하여 온

Table 1. Selected landfill sites and sampling period for the surface flux measurements.

Landfills	Sampling site	Landfill amounts (ton)	Landfill area (m ²)	Landfill period	Sampling period		
					1	2	3
KimPo	J block	4,366,327	133,592	1993. 7 ~ 1998. 12	1999. 7. 8	1999. 8. 17	1999. 12. 26
KwangJu-1	-	2,311,577	213,275	1993 ~ 1999. 7	1999. 7. 12	1999. 8. 12	1999. 12. 9
KwangJu-2	-	-	54,589	1989. 7 ~ 1994. 12	1999. 7. 12	1999. 8. 12	1999. 12. 10
JonJu	1 block	374,500	143,000	1997. 9 ~ 1999. 7	1999. 7. 1	1999. 8. 12	1999. 12. 7
KunSan	1 block	270,000	62,300	1996. 4 ~ 1999. 11	1999. 6. 30	1999. 8. 13	1999. 12. 8

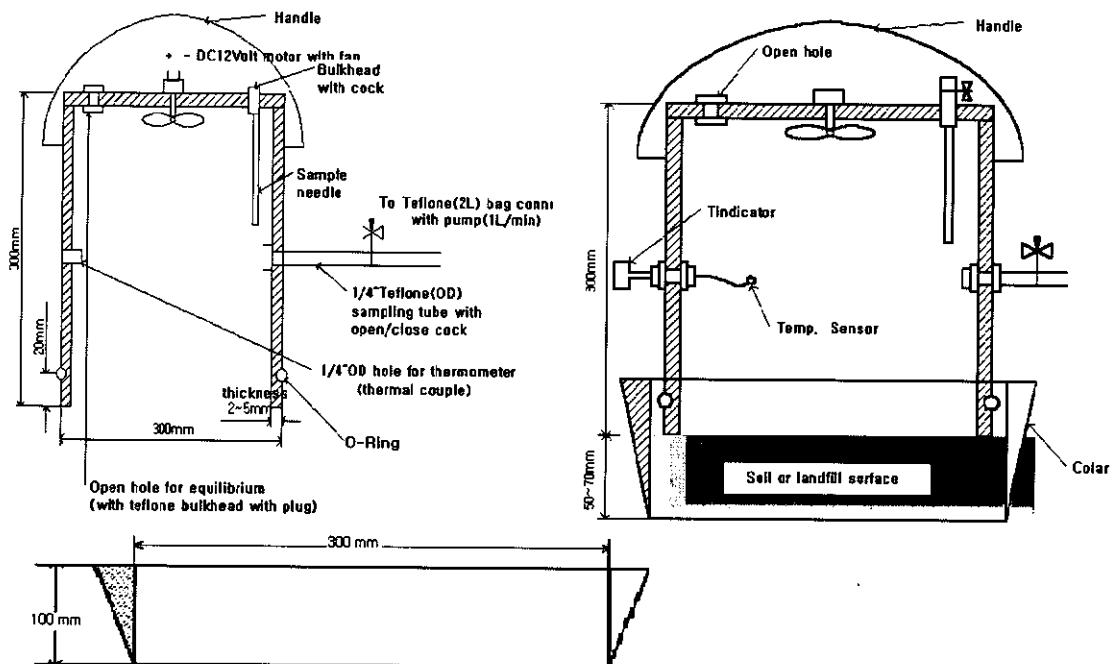


Fig. 1. Schematic of closed flux chamber.

도를 측정하였다. 시료는 챔버 몸통이 측정지점에 설치된 직후 채취되었으며 (t_0), 처음 시료채취 후 30분 후에 2번째 시료를 취하고(t_30), 다음 측정지점으로 이동하여 같은 방법으로 챔버를 설치하여 측정을 반복하였다. 챔버 몸통은 마지막 시료 채취 후에는 챔버 벽에 의해서 변경된 내부 환경에 의한 변화를 최소화시키기 위해서 반드시 개방시켰다. 주사기 또는 테프론백에 채취된 시료는 분석을 위해 당일 실험실로 옮겨지고, 가능한 하루 내에 GC에 의해 정량 분석되었다.

측정된 기체농도의 시간 변화율을 이용하여 배출된 메탄의 배출량이 챔버 내의 질량평형관계로부터 유도된 다음 식(1)에 의해 산출되었다.

$$F = \rho \cdot V/A \cdot \Delta C/\Delta t \cdot 273/(T+273) \quad (1)$$

F : flux ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \text{hr}^{-1}$)

ρ : density of CH_4 gas ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

V : volume of the chamber (m^3)

A : the bottom area of the chamber (m^2)

$\Delta C/\Delta t$: the average changing rate of concentration with time (ppmV hr^{-1})

T : average temperature in the chamber during
 Δt ($^\circ\text{C}$)

이번 연구에서는 총 8개의 flux 챔버를 자체 고안하여 제작하였으며, 1회 측정에 2개 또는 3개의 챔버를 동시에 설치하여 거의 동일한 시간대에 측정하였고, 매립지 전체표면으로부터의 메탄배출량은 플렉스챔버에 의해 결정된 단위 표면배출량 ($\text{kg/m}^2/\text{yr}$)과 매립지 총 면적 (m^2)을 이용하여 산출하였다.

2. 2. 1 메탄 (CH_4) 분석

CH_4 은 대기 중 비반응성 기체로서 시료채취에 거의 어려움 없이 매립지 표면에 설치된 플렉스챔버로부터 테프론 백이나 폴리프로필렌 주사기에 채취되었다. 이와 같이 채취된 공기시료는 주사기에 의해 GC내 column으로 직접 주입되어 분석되었다. 기체시료 loop의 부피는 2cc로 sample valve와 연결되어 있다. CH_4 분석을 위해 운영될 GC와 사용되는 column은 시료를 최적으로 분리하고 탐지하기 위한 최적조건을 경험적으로 선택하였다. 분석컬럼은 Porapak N컬럼 (1.8 m 길이의 SS, 3.175 mm 외경)을

사용하였고, 45~50°C로 유지하여 운반기체 유량 20~30 cm³/min의 조건하에서 다른 기체성분과 분리 될 수 있도록 하였다. 메탄을 검출하기 위해서는 250°C(검출기제작사에 따라 범위가 달라질 수 있다)에서 유지되는 불꽃이온검출기(FID)가 사용되었으며, 크로마토그램은 GC와 연결된 컴퓨터를 이용하여 분석하였다.

3. 메탄의 배출농도측정 결과 및 배출량 산출

3.1 사용된 flux chamber 방법의 적절성 검토

외부흐름이 차단된 닫힌챔버의 경우 이론적으로는 챔버 내의 시간에 따른 기체농도 변화경향은, 챔버의 크기와 주위환경인자, 그리고 배출크기 등에 따라 차이가 있지만, 폐쇄형 챔버의 물리적 특성에 따라 챔버 설치 후 일정 시간 동안 선형적으로 증가하고(대략 설치 후 약 15분에서 40분까지), 일정 시간 이 후에는 지속적인 지표배출로 인한 챔버 내의 농도 증가로 인하여 지표배출이 억제됨에 따라 증가율이 감소하면서 일정한 농도 값에 수렴하여 챔버 내부의 기체농도가 평형상태(equilibrium state)에 도달하게 된다. 이러한 경향은 농경지토양이나 실제 자연토양에서의 측정실험을 통해서도 확인된 바 있다(Roelle *et al.*, 1999; Kim, 1997a, b; Kim *et al.*, 1994, 1995; Kaplan *et al.*, 1988). 이번 연구에서는 대상 매립지에서 flux 챔버를 이용한 지표배출량 측정 조사 전에 측정방법의 적절성을 확인하기 위하여 챔버를 측정지점에 설치한 후에 챔버 내 메탄농도의 시간에 따른 변화를 실제 측정과 동일한 방법으로 조사하였다. 과거에 여러 연구자들에 의해 수행된 것과 같은 방법으로 측정지점에 챔버를 장치한 직후부터 15분마다 1시간 동안에 챔버 내의 메탄의 농도가 일정시간에 따라 선형증가하며, 최종적으로는 평형상태에 도달하는가 하는 검증실험이 측정기간 동안 행하여졌다. 그림 2는 챔버의 적절성 실험의 결과를 보인 것으로 챔버내에서 메탄농도가 시간에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있다.

실험 결과에 의하면, 처음 시료 채취 후에 다음 시료까지의 약 15분 동안 매우 이상적인 선형증가를 보이고 있다. 이후 증가율이 서서히 감소하면서 45분대 이후에는 현저하게 평형농도로 접근함을 보

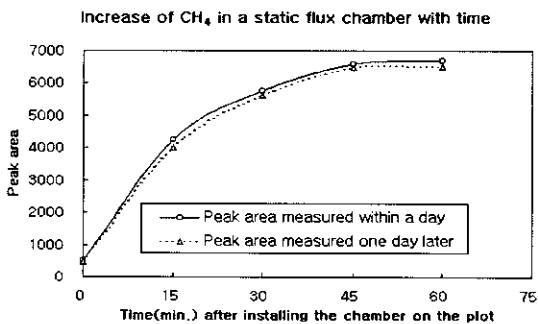
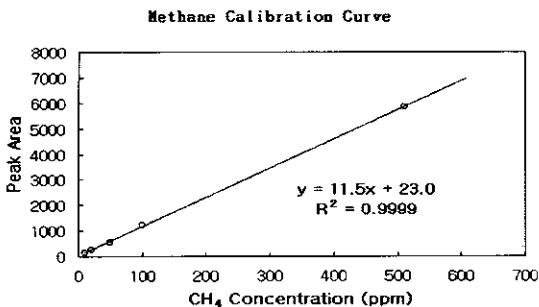


Fig. 2. Time rate of change of CH₄ concentration in flux chamber.

이고 있다. 챔버 설치 직후는 챔버 내의 적은 기체 압력으로 자유롭게 지표로부터 챔버 내부로 배출이 급격히 이루어지고, 어느 정도 배출이 이루어지면 그로 인해 챔버 내부의 기체압력이 상승한다. 챔버 내부의 기체 압력의 상승으로 지표로부터의 메탄배출이 저항을 받게되어 점차적으로 배출이 적어지고 챔버 내부와 지표와의 평형상태에 도달하게 된다. 이상의 실험 결과는 처음 15분 동안 가장 선형적인 메탄의 농도 증가가 있었기 때문에 챔버 설치 후에 약 15분 동안의 농도 증가율을 배출량 산출에 적용하는 것이 가장 보수적이고 이상적인 것임을 제시하고 있다. 측정실험결과를 실제 측정방법에 적용할 경우 15분 후의 측정치를 30분까지 외삽하여 실측된 30분까지의 변화율과 비교하여 보면 처음 30분의 측정결과로 배출량을 산정 할 경우 산술적으로는 처음 15분간의 배출량에 비해 약 27% 정도로 과소 평가될 우려가 있다. 그러나 이러한 실험결과는 측정시의 배출조건과 환경인자의 변화 등에 따라서 배출특성과 농도의 증가율도 함께 변화할 수 있으며, 그로 인해 나타날 수 있는 불확실성이 최근 까지 조사연구를 통해 발표되었던 미량기체의 지표 배출량의 경우에 50% 이상이었던 것을 고려한다면, 플렉스챔버 사용 시에 15분에서 30분 동안에 채취된 시료를 배출량 산출에 적용하는 것으로 인한 오차는 심각한 수준이 아닌 것으로 보이며 이와 같은 실험을 이 후 여러 번 반복 수행하여 그에 따른 변화량을 조사하여 신뢰성을 검증하는 방안이 제안된다. 한편, 그림 2에서 점선으로 나타낸 부분은 같은 시료를 하루 후에 분석한 결과를 나타낸 것으로 주

Fig. 3. Multi-points calibration curve for CH₄ by GC-FID.

사기에 채취된 시료내의 메탄농도는 주사기 내부와의 화학반응 또는 물리적 현상에 의해서 채취된 시료 중의 메탄농도가 시간이 경과함에 따라 감소될 수 있으며, 그로 인한 영향을 조사하기 위한 결과를 도시한 것이다. 결과적으로 하루동안의 시간경과에 따른 메탄농도 감소는 처음농도의 5% 미만으로 근소하게 나타났으며, 이로 인해 배출량 계산에 미치는 영향은 실험과 경험, 그리고 이론을 통한 배출량 산출에 나타날 수 있는 불확실성을 고려한다면 지극히 적은 수준이었다.

그림 3은 GC-FID분석을 위한 메탄의 검량곡선을 나타낸 것으로, 검량을 위한 메탄의 표준기체는 미국NIST에서 인증된 100 ppmV의 표준기체를 사용하였다. 100 ppmV 미만의 경우 다중 검량선 작성을 위하여 10 ppmV, 20 ppmV, 50 ppmV의 농도가 표준시료로부터 희석되어 사용되었고, 100 ppmV 이상 500 ppmV 사이의 검량선은 1%메탄표준가스를 500 ppmV로 희석하여 분석된 결과를 사용하여 작성하였다. 준비된 각각의 시료들이 GC-FID에 의해 분석되었고, 일정한 시간에서 메탄의 피크가 감지되었으며, 그 때의 피크면적과 분석된 시료의 농도가 그림과 같이 일차선형관계 (Peak area = 11.5 · 시료농도 + 23, R² = 0.99)를 보였다.

3. 2 메탄의 지표배출측정 결과

1차 측정기간에는 각 대상 매립지의 측정구역(block)에서 무작위(random)로 선정된 4지점에서 모두 40개의 시료들이 채취되었고, 2차 3차 측정기간 동안에는 결과의 통계적 신뢰도를 높이기 위하여 측정지점을 같은 구역 내에서 6지점, 또는 8지점으로 늘려 시료 수를 증가시켰다. 또한 측정기간 중

에 매립지 표면으로부터 메탄배출측정에 사용되고 있는 플렉스챔버의 성능평가를 위해 일정시간 간격에 따른 지표배출농도의 변화량을 조사하는 실험을 반복 수행하였다.

이상으로 여름철 2회와 겨울철 1회에 걸쳐 3차례 측정기간 동안의 모든 측정결과를 표 2에 제시하였다. 챔버 측정에 의한 메탄의 단위배출량(mgCH₄/m²/hr)은 수도권매립지에서 평균과 표준편차가 64.5 ± 54.5 mgCH₄/m²/hr이었으며, 광주위생매립지의 경우는 357.4 ± 68.9 mgCH₄/m²/hr, 비위생매립지의 경우 8.1 ± 12.4 mgCH₄/m²/hr, 전주매립지에서 472.7 ± 1056 mgCH₄/m²/hr, 그리고 군산매립지의 경우는 482.4 ± 1140 mgCH₄/m²/hr으로 나타났다. 측정결과에서 나타났듯이 각 매립지에 따라, 그리고 동일매립지 내에서도 측정지점에 따른 측정값들의 편차가 심하였다. 이는 매립가스의 배출에 영향을 미치는 매립인자들의 물리·화학 인자들이 매립지 별로 균질하지 않기 때문인 것으로 생각될 수 있었다. 이를 극복하기 위해서는 일정기간 같은 지점에서 지속적으로 반복하여 지표배출량을 측정하고, 그 기간 중의 통계적 대표 값을 대상 매립지에 적용할 수 있겠으나, 이번 연구에서는 주어진 연구여건 상의 제약으로 연속적이고 지속적인 배출량 측정이 이루어 질 수 없었다. 그러나, 국내에서는 거의 처음으로 시도된 현지측정이고, 측정된 결과를 이용하여 국내 매립특성이 적용된 메탄 배출량의 개략적인 범위를 비교적 보수적으로 평가하고, 그 결과를 IPCC에 의해 제안된 방법으로 산출된 배출범위와의 비교검증을 위해서 이번 연구를 통해 측정된 실제 측정자료를 다음과 같이 정리하였다. 측정된 값들 중에서 메디안 값 또는 최대 값을 배출에 필요한 대표 값으로 정하여 대상 매립지로부터의 배출량을 추정하고, 매립지의 기초자료를 활용하여 단위질량 당 메탄배출량을 산정한 후 폐기물 발생량 자료로부터 국내배출량을 추정하는 것이 실측된 결과를 이용하여 메탄배출량을 보수적으로 평가(conservative estimation)하고 검증할 수 있는 가장 적절한 방법으로 생각되었다. 따라서, 연구기간 동안 3차례에 걸쳐 측정, 분석된 대상 매립지 표면으로부터 배출된 메탄의 배출량 산출 결과를 메디안과 최대 값으로 표 2에 모두 요약 정리하였다. 그림 4는 각 대상 매립지에서 측정된 메탄의 단위배출량의 변화량을 도시한

Table 2. Surface emission rates of CH₄ from the selected landfills during the experimental period.

Landfills	Period	(1) gCH ₄ /m ² /hr	(2) tonCH ₄ /yr	(3) kgCH ₄ /ton/yr	Median	Maximum	Remarks
Kim Po	99/6/30	0.0611	71.3962	0.0164			
	~	0.0763	89.1576	0.0204			
	99/7/14	0.0099	11.5683	0.0026	For (3): 0.0184		
		0.0058	6.7774	0.0016	For (1): 0.0687		
	99/8/12 ~	0.1543	180.3017	0.0413	mean of(3):	For (3): 0.0413	landfill area (m ²) 133,392
	99/8/26				mean = 0.0173	For (1): 0.1543	andfill amount (ton) 4,366,327
Kwang Ju-1 (managed)	99/12/7 ~	0.0797	93.1306	0.0213	s.d. = 0.0146		landfill years 5.5
	99/12/26						
	99/6/30	0.0005	0.9341	0.0004			
	~	0.0022	4.1102	0.0018			
	99/7/14	0.1549	289.3980	0.1252			
		0.0865	161.6070	0.0699			
Kwang Ju-2 (unmanaged)	99/8/12	0.0161	30.0795	0.0130	For (3): 0.0737		
	~	2.3590	4407.2938	1.9066	For (1): 0.0912		
	99/8/26	0.1062	198.4123	0.0858	mean of (3)	For (3): 1.9066	landfill area (m ²) 213,275
		0.0178	33.2555	0.0144	mean = 0.2889	For (1): 2.3590	landfill amount (ton) 2,311,577
	99/12/7	0.0403	75.2920	0.0326	s.d. = 0.5566		landfill years 4
	99/12/26	0.0959	179.1689	0.0775			
Jon Ju	99/6/30	0.9660	1804.7672	0.7808			
	~	0.4434	828.3993	0.3584			
	99/7/14						
	99/8/12	0.0005	0.2157				
	~	0.0005	0.2344				
	99/8/26	0.0001	0.0428				
Kun San	99/8/12	0.0005	0.2350				
	~	0.0014	0.6504				
	99/8/26	0.0014	0.6504		For (1): 0.0014	For (1): 0.0335	landfill area (m ²) 54,589
		0.0032	1.5159				landfill years 7
	99/12/7	0.0019	0.8942				
	99/12/26	0.0187	8.9184				
Jon Ju	99/6/30	0.0335	16.0197				
	~	0.0276	13.2174				
	99/7/14						
	99/8/12	0.1279	160.1865	0.4277			
	~	0.0009	1.1320	0.0030			
	99/8/26	0.0045	5.6602	0.0151			
Kun San	99/8/12	0.0041	5.0943	0.0136			
	~	3.6714	4599.0518	12.2805			
	99/8/26	0.0009	1.0773	0.0029	For (3): 0.1716		
		0.2107	263.9146	0.7047	For (1): 0.0513		
	99/12/7	2.5528	3197.8290	8.5389	mean of (3)	For (3): 12.2805	landfill area (m ²) 143,000
	~	0.0561	70.2879	0.1877	mean = 1.5812	For (1): 3.6714	landfill amount (ton) 374,500
Kun San	99/12/26	0.0192	23.9888	0.0641	s.d. = 3.5348		landfill years 2
	99/12/7	0.4213	527.7791	1.4093			
	~	0.0138	17.2745	0.0461			
	99/12/26	0.0268	33.5217	0.0895			
		0.0465	58.2621	0.1556			
		0.2460	308.1593	0.8229			
Mean		0.1609	201.6063	0.5383			
	99/6/30 ~	0.0949	51.7858	0.2566			
	99/7/14	0.1021	55.7313	0.2762			
	99/8/12	0.0027	1.4517	0.0072			
	~	0.0040	2.1830	0.0108			
	99/8/26	0.0018	0.9823	0.0049	For (3): 0.0108		
Kun San		2.5032	1366.1328	6.7695	For (1): 0.0040		
		3.5120	1916.6506	9.4974	mean of (3)	For (3): 9.4974	landfill area (m ²) 62,300
		0.0018	0.9714	0.0048	mean = 1.3021	For (1): 3.5120	landfill amount (ton) 270,000
	99/12/7	0.0019	1.0478	0.0039	s.d. = 3.0840		landfill years 3
	~	0.0347	18.9429	0.0702			
	99/12/26	0.0092	5.0209	0.0186			
Mean		0.0005	0.2620	0.0010			
		0.0029	1.5772	0.0058			

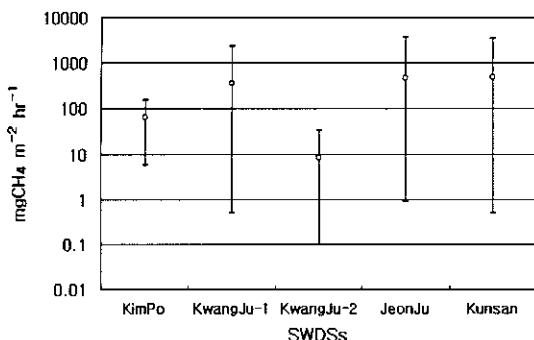


Fig. 4. Comparisons of the CH_4 emission from the selected landfill surface during the experiments. Circles are the means for each landfill site, and the bar ends denote maximum and minimum of the emission, respectively. The numbers in parenthesis represent the number of samples collected.

것으로, 비위생매립지에서 보다 위생매립지에서 높은 메탄배출을 나타내었고 광주, 전주, 군산 위생매립지의 경우 평균배출량이 유사한 수준($357.4 \sim 482.4 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$)이었다. 단위배출율의 크기는 매립지와 측정 시기에 따라 변화가 크게 나타났으며, 광주매립지의 경우 비위생매립지(평균: $8.1 \pm 12.4 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$, 범위: $0.1 \sim 33.5 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$)가 위생매립지(평균: $357.4 \pm 688.6 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$, 범위: $0.5 \sim 2359 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$)에 비해서 배출율이 매우 적게 나타났고, 다른 지역 위생매립지의 배출에 비해서도 상대적으로 낮은 배출율을 나타내었다. 3차례 측정에서 겨울철 배출결과가 여름철에 비해 낮게 나타났으며, 이는 겨울철 저온현상에 의한 배출환경 인자가 억제됨으로 인한 현상으로 사료되었으며, 이는 과거 국내 수도권매립지에서 한 차례 있었던 유사한 챔버 실험 결과에서도 그 사례가 보고된 바가 있다(수도권매립지운영관리조합, 1997).

3. 3 메탄의 지표배출량 산출과 평가

측정결과에 따라 표 2에 제시된 결과에 의하면 flux챔버를 사용한 매립지 표면으로부터의 메탄 배출량 산출결과 도출된 대상 매립지에서의 매립쓰레기의 단위질량(ton)당 최대배출계수의 범위는 $0.04 \sim 12.3 \text{ kgCH}_4/\text{ton}/\text{yr}$ 으로 나타났으며, 이 값은 일상 대기환경(20°C , 1기압)에서 메탄을 부피로 환산할 경우 약 $0.06 \sim 18.5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton}/\text{yr}$ 에 해당된다. flux

챔버에 의한 지표배출실험 결과의 현실성 판단을 위하여 산출된 대상 매립지의 매립쓰레기 단위질량 ton당 최대배출계수의 범위를 IPCC가 메탄배출량 산출을 위해 제안하는 일차 분해함수식의 메탄발생 주요인자인 L_0 값과 비교하였다. L_0 값은 매립된 폐기물 단위질량 당 배출될 수 있는 메탄의 총량을 부피로 표시한 것이며, 매립지에서 가스의 배출기간은 메탄발생율인 k 값(yr^{-1})에 따라 다르긴 하지만 대략 매립 후 20년에서 40년 동안 지속되는 것으로 알려져 있다(McBean et al., 1995). 대체로 k 값의 크기에 따라 분해함수식에 따른 모델에서 가스배출이 집중되는 기간은 매립 후 약 5년($k \sim 0.3$)에서 10년($k \sim 0.075$)까지 변화될 수 있다. 본 연구와 관련되어 수행된 보고서(환경부, 2000)에서 국내 폐기물 특성을 고려하여 이론적으로 산출된 매립폐기물 당 메탄발생 잠재량(L_0)인 $117.5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$ (예상된 $k = 0.035 \text{ yr}^{-1}$)이 매립 후 10년~20년간 균등 배출됨을 가정할 경우 연간 배출량이 $5.9 \sim 11.8 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$ 범위로 나타날 수 있으며, 이는 flux챔버에 의한 측정 결과에 의해 산출된 대상 매립지 매립폐기물 단위질량 ton당 최대배출계수의 범위 내에 포함됨을 알 수 있었다. 표 3은 flux챔버를 사용한 지표배출량 측정 결과와 IPCC에서 제안된 이론적 메탄 발생과의 비교를 위해 작성되었다. 본 연구에서 산출한 표면 배출량 측정에 의한 결과를 보다 현실적으로 비교하기 위하여 1997년 국내의 매립폐기물 총량을 이용하였다. 1997년 매립된 폐기물 총량으로부터 발생될 수 있는 메탄 배출량을 '97년 폐기물 원소분석 자료에 의해 이론적으로 산출된 L_0 ($117.5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$)와 표면배출 대상 매립지의 모든 측정결과로부터 산출된 연간 최대배출률($0.06 \sim 18.5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{hr}$), 평균배출률을 적용하여 산출하여 그 결과를 비교하였다.

비교결과에 의하면 지표 flux측정의 최대배출계수를 1997년 매립폐기물에 적용할 경우, 1997년 매립 이후 한해 동안 국내에서 예상되는 메탄배출량의 범위가 $1,080 \sim 332,973 \text{ tonCH}_4/\text{yr}$ 이었다. 그리고 이를 배출계수의 평균을 적용하여 산출된 결과는 $160,187 \text{ tonCH}_4/\text{yr}$ 이었다. 이 값들은 1997년 폐기물 성분자료를 이용하여 추정된 L_0 와 속도상수 $k = 0.035/\text{yr}$ 로 1997년 매립폐기물량 이용하여 IPCC의 1차분해모델 결과 산출된 매립 후 첫해 배출량인

Table 3. The summaries of CH₄ emission rates from flux chamber experiment and IPCC Guideline for the first decay model.

Experimental CH ₄ emission rates (m ³ CH ₄ /ton/yr)		IPCC theoretical CH ₄ generation potential (L ₀)	
Maximum emission rate	Mean emission rate for total samples	L ₀ (m ³ CH ₄ /ton)	Theoretical emission rate (m ³ CH ₄ /ton/yr)
0.06~18.5 (mean: 8.91±8.84)	1.46±3.89	117.5	5.9~11.810 (assume that CH ₄ release evenly during the nextto 20 years.)
CH ₄ emission for 1997 (tonCH ₄ /yr)	1,080~332,973 (mean: 160,187)	26,278	total emission during the next 20 years 106,191 tonCH ₄ /yr (for the case of 20 years, i.e. 5.9 m ³ CH ₄ /ton/yr) 1,060,000 (tonCH ₄ /20 yr): by IPCC first decay model with k = 0.035 72,500 tonCH ₄ /yr: (emission for the very first year after landfilling)

72,500 tonCH₄/yr과 매립 후 20년 간 배출되는 총량인 1,060,000 tonCH₄/20 yrs(환경부, 2000)이 매년 균등하게 배출됨이 가정되었을 경우의 연 배출량인 106,191 tonCH₄/yr과 크게 다르지 않았다. 그러나, 지표배출측정을 통해 도출된 배출계수가 단지 매립지 표면으로부터 배출되는 메탄으로 인한 것임과 실제 측정 당시 배출강도의 편차가 심했던 것을 고려한다면, 보수적인 평가를 위한 최대배출계수 보다는 3차례에 걸친 전체 측정결과로부터 평균된 지표배출계수(1.46±3.89 m³CH₄/ton/yr)의 적용이 보다 현실적일 것으로 사료된다.

한편, 이론적 잠재량에 의해 매립 후 첫해 동안 발생할 것으로 추정된 양은 매립 폐기물로부터 발생 가능한 메탄이 매립지 표면 뿐 아니라 가스배제공, 그 외의 매립장 내 모든 배출 가능한 곳을 통하여 배출되는 모든 메탄을 포함한 것이기 때문에, 평균 지표배출계수에 의해 산출된 매립 후 첫해의 메탄 배출량이 폐기물에 포함된 메탄이 모두 배출될 것으로 가정한 이론적 추정 값과 비교될 때는 이러한 차이가 고려되어야 할 것이다. 따라서 비교 시에 지표배출 만이 고려된 챔버측정에 의한 결과가 상대적으로 작을 것이다. 표 3에서 평균배출계수를 1997년 매립량에 적용한 결과 메탄배출량이 26,278 tonCH₄/yr으로 산출되었고, 이에 비해 매립 후 첫해의 이론적인 추정값은 1차분해함수 식을 적용했을 경우 72,500 tonCH₄/yr, 그리고 20년간 균등배출을 가정한 계수 5.9 m³CH₄/ton/yr을 적용했을 경우는 106,191 tonCH₄/yr이었다. 결과적으로 이번 연구에 의해 조사된 평균지표배출계수를 적용하여 산출된

메탄의 매립지 표면으로부터의 발생량은 이론적인 배출량의 약 1/4 수준인 것으로 나타나서 평균 지표배출계수에 의한 표면 메탄 발생량이 이론적으로 추정된 매립지(표면은 물론 배출이 가능한 모든 시설)로부터의 메탄 발생량의 약 24~35% 정도 기여하고 있는 것으로 나타났다. 이는 측정기간 동안에 함께 조사되었던 가스배제공으로부터 배출되는 메탄의 양이 표면 배출량에 비해 수십배 정도 많았던 점을 고려할 때 flux챔버에 의해 측정된 결과가 실제 배출량을 산출하고, 국가배출규모를 예측하는 데 있어 현실적으로 타당할 수 있음을 보여주는 것이다.

4. 결론 및 제의

국내 주요 매립지 표면으로부터 배출되는 메탄의 양을 국내환경 특성에 적절한 배출량 추정 방법과 배출인자를 도출하기 위한 기초 조사연구의 일환으로 달힌 챔버법을 이용하여 측정하였다. 또한 달힌 플렉스 챔버법의 타당성이 매립지 표면에서 측정기간 동안 조사되었다. 메탄의 지표 플렉스를 여름철과 겨울철 동안 대상 매립지 별로 일정 기간 동안 3회 측정하였고, 그 결과를 IPCC guideline에서 추천하고 있는 방법에 의해 산출된 결과와 비교하였다. 챔버 실험 결과 매립지 표면에서 배출되는 메탄은 챔버 내에서 45분 이 후에는 거의 평형상태에 도달됨이 보여졌고, 플렉스챔버를 이용한 배출량은 최초 15분 동안의 배출율을 적용하는 것이 가장 보수적인 결과를 산출할 수 있음을 나타내었다. 따라

서, 이번 연구에서 배출량 산정에 사용된 30분 동안의 능도 증가율은 가장 보수적인 산출결과에 비하여 약 27% 정도 과소 평가될 수 있음을 나타내는 것이다. 측정기간 동안의 메탄의 단위배출량은 동일 매립지의 경우 일 지라도 측정장소에 따라 그 변동이 심하였으며, 이는 매립지에 매립된 폐기물의 성상이 균질하지 않고, 매립 후 관리 등이 일정하게 이루어지지 않기 때문으로 생각 될 수 있었다. 위생 매립지의 경우 평균단위배출율은 수도권을 제외하고는 $350\sim480 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$ 으로 서로 유사한 수준이었으나, 비위생매립지의 경우 이들 보다는 현저하게 낮은 $8 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{hr}$ 로 나타났다. 또한 겨울철의 배출량이 여름철의 배출크기에 비해 낮게 나타나서 매립지 메탄의 배출이 기온에 의해서도 영향을 받을 수 있음을 보였다. 한편 매립지표면으로부터의 메탄의 최대배출 계수는 $0.04\sim12.3 \text{ kgCH}_4/\text{ton}/\text{yr}$ ($0.06\sim18.5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton}/\text{yr}$; 20°C , 1기압)로서 IPCC에 의해 권고된 방법에 의해 국내 폐기물자료를 적용하여 산출된 메탄발생 잠재량(L_0)인 $117.5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$ 이 매립 후 10년~20년간 균등 배출됨을 가정할 경우의 연간 배출량인 $5.9\sim11.8 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$ 과 비교될 수 있었다.

이상의 기초연구는 국내 환경기초시설에서 발생하는 국가온실가스 배출량산출과 전망을 위해서 국내시설과 환경특성이 적용될 수 있는 측정기법이나 산출방법을 개발하기 위해 시도되었다. IPCC에서는 온실가스 배출량산출을 위한 기초자료가 빈약한 국가의 경우 해당국가들 간의 산출자료의 신뢰성과 산출결과를 효과적으로 비교·평가하기 위해 IPCC가 제시하는 방법을 사용하도록 권고하고 있다. 그러나 IPCC 지침에 의해 제시된 배출량산정 모형과 경험식에는 기 조사된 선진국들의 국가적, 지역적, 문화적 특성에 의해 결정된 인자와 요소들이 있으며, 이러한 인자들이 IPCC의 지침에 따라 국내에 적용되었을 경우에 산출된 메탄의 배출량에 커다란 불확실성(uncertainty)과 오차(error)를 초래할 수 있음을 명확한 사실일 것이다. 따라서 IPCC 지침에 의해 산출된 배출 값들이 어느 정도 신뢰성을 갖을 수 있는가 하는 의문은 계속 남을 수 있을 것이다. 결과의 신뢰성을 평가하고 불확실성 또는 오차를 줄이기 위한 방법으로는 대상 매립장에서 배출되는 매립가스를 실제 측정하고 매립된 폐기물성상의 물

리·화학적 변화와 배출특성 연구를 통해 국내매립장의 기초측정 자료를 축적하고 분석하는 것이다. 이를 위해서는 매립장으로부터 국내 여전과 매립환경에 적절한 인자들을 도출하고 신뢰성 있는 연구 결과의 확보를 위해 국가차원에서의 장기적으로 일관성 있고 집중된 연구지원이 요구되며, 국가지원연구에 의해 개발된 관련기술을 축적하고 산출된 자료들의 database화와 함께 축적된 기술력과 자료를 효율적으로 관리하고 개발시킬 수 있는 지원시스템의 구성이 필요하다고 생각된다.

감사의 글

이 연구는 환경부 연구사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구사업을 지원하여 주신 환경부와 관계자 여러분들께 감사드립니다. 또한 현장시료측정과 분석을 위해 도움을 준 군산대학교 대기환경연구실의 오진만, 두강진, 고현석과 수원대학교, 동신대학교의 대기환경실험실 연구원들에게도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 수도권매립지운영관리조합(1997) 매립가스 처리기술 설치 효율 분석조사 연구용역 보고서, 491pp.
- 이경보, 이덕배, 김종구, 김용웅(1997) 벼 재배방식이 메탄 가스 배출에 미치는 영향, 한토비지, 30, 35~40.
- 환경부(2000) "환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사", 최종보고서, 2000. 3. 한국대기환경학회, 182pp.
- Bouwman, A.F.(1990), *Soils and the greenhouse effects*, John Wiley and Sons, Chichester.
- IPCC (1994) Radiative Forcing of Climate Change, WMO-UNEP.
- IPCC (1996) Technologies, Policies and Measures for Mitigating Climate Change.
- IPCC (1997) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2 Volumes : Volume 2, Workbook, Volume 3, Reference Manual, Intergovernmental Panel of Climate Change.
- Kaplan, W.A., S.C. Wofsy, M. Keller, and J.M.D. Costa (1988) Emission of NO and deposition of O₃ in a tropical forest system, J. Geophys. Res. 93, 1389-1395.
- Kim, D.-S. (1997a) Characterization of NO_x emissions from soils in southwest Korea and their atmospheric

- chemistry, J. of Korea Air Pollution Res. Assoc., Vol. 13-6, 451-461.
- Kim, D.-S. (1997b) Emissions of Nitric Oxide (NO) from Intensively Managed Agricultural Soils in the Lower Coastal Plain Region, North Carolina, J. of Korea Air Pollution Res. Assoc., 13-E, 11-24.
- Kim, D.-S. and V.P. Aneja, and W.P. Robarge (1994) Characterization of Nitrogen Oxide Fluxes from Soil of a Fallow Field in the Central Piedmont of North Carolina. *Atmospheric Environment*, 28(6), 1129-1137.
- Kim, D.-S., P. Roelle, and V.P. Aneja (1995) Natural Emission of Nitric Oxide from Agricultural Soil of Corn-field in eastern North Carolina, J. of Korea Air Pollution Res. Assoc., 11-E, 31-43.
- McBean, Edward A., F.A. Rovers, and G.J. Farquhar (1995) *Solid Waste Landfill Engineering and Design*, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, NJ, 1995. pp.96.
- Roelle, P., V.P. Aneja, J. O'Connor, W. Robarge, Deug-Soo Kim, and J.S. Levine (1999) Measurement of nitrogen oxide emissions from an agricultural soil with a dynamic chamber system. *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, No. D1, 1609-1619.
- Tsuruta, H., K. Kanda, and T. Hirose (1997) Nitrous oxide emission from a rice paddy field in Japan, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49, 51-58.
- Watanabe, T., T. Osada, M. Yoh, and H. Tsuruta (1997) N₂O and NO emissions from grassland soils after the application of cattle and swine excreta, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49, 35-39.
- Yoh, M. et al. (1997) Diffusion analysis of N₂O cycling in a fertilized soil, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49, 29-33.