

매립지의 온실가스 배출량 산정 시나리오에 따른 온실가스 배출량 비교

Comparison of Greenhouse Gas Emission from Landfills by Different Scenarios

김현선 · 최은화 · 이남훈¹⁾ · 이승훈²⁾

정장표³⁾ · 이채영⁴⁾ · 이승묵*

서울대학교 보건대학원, ¹⁾안양대학교 환경공학과, ²⁾경성대학교 환경문제연구소,

³⁾경성대학교 건설환경공학부, ⁴⁾수원대학교 토목공학과

(2007년 3월 7일 접수, 2007년 6월 21일 채택)

Hyun-Sun Kim, Eun-Hwa Choi, Nam-Hoon Lee¹⁾, Seung-Hoon Lee²⁾,
Jang-Pyo Cheong³⁾, Chaeyoung Lee⁴⁾ and Seung-Muk Yi*

School of Public Health, Seoul National University

¹⁾Department of Environmental Engineering, Anyang University

²⁾Division of Civil and Environmental Engineering, Kyungsung University

³⁾Environmental Science and Technology Research Center, Kyungsung University

⁴⁾Department of Civil Engineering, University of Suwon

(Received 7 March 2007, accepted 21 June 2007)

Abstract

Quantifying the methane emission from landfills is important to evaluate measures for reduction of greenhouse gas emissions. To estimate methane emission for the entire landfills from 1990 through 2004 in Korea, Tier 1 and 2 methodologies were used. In addition, five different scenarios were adopted to identify the effect of important variables on methane emission. The trends of methane emission using Tier 1 were similar to the disposed waste amount. Methane emission using Tier 2 increased as the degradation of waste was gradually proceeded. This result indicates that disposed waste amount and methane generation rate are the important variables for the estimation of methane emission by Tier 1 and 2, respectively. As for the different scenarios, methane emission was highest with scenario I that the entire landfills in Korea were regarded as one landfill. Methane emissions by scenario III and IV considering different DOC_F values with the waste type and different MCF values with the height of waste layer, respectively, were underestimated compared to scenario II. This result indicates that the method of scenario I employed to most previous studies may lead to the overestimation of methane emission. Therefore, more careful consideration of the variables should be needed to develop the methodologies of greenhouse gas emission in landfills along with the characteristics of disposed waste in Korea.

Key words : Methane emission, Landfill, DOC_F , MCF

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-740-8879, E-mail : yiseung@snu.ac.kr

1. 서 론

지구온난화에 영향을 미치는 대기 중 온실가스의 농도가 점차 증가함에 따라 지구의 평균기온과 해수면 온도가 상승하는 등 전 세계적으로 다양한 문제에 직면하고 있다(Bryden *et al.*, 2005; Houghton *et al.*, 2001; Karl *et al.*, 1993). 이러한 지구온난화현상을 유발하는 온실가스의 대기 중 농도를 안정화시키기 위해 국제적으로 기후변화협약 및 교토의정서를 채택하는 등 다각적인 대응을 하고 있다. 우리나라 역시 기후변화협약 당사국으로써, 온실가스의 배출현황 및 전망, 온실가스 억제정책을 포함하는 국가보고서를 제출하여야 하며 온실가스 감축을 위해 노력해야 한다(기후변화협약 제4조, 5조). 또한 2005년 교토의정서가 발효되고 Post Kyoto 체제에 대한 의무부담방식이 논의되는 가운데 우리나라에는 선발개도국으로서 다른 나라 보다 정확하고 신뢰성 있는 온실가스 배출량 통계를 구축해야하는 위치에 있다.

우리나라는 이산화탄소 배출량이 세계 10위(2003년 기준)이며 OECD 국가 중 1990년 대비 배출량 증가속도가 가장 빠른 국가로서 부문별 온실가스 배출량을 정확히 파악하고 이에 대한 저감대책을 강구하여야 한다. 특히 폐기물부문의 경우, 다른 부문에 비해 온실가스 저감 잠재력이 높은 것으로 평가되므로 이에 대한 보다 정확하고 신뢰성 있는 온실가스 배출통계체계가 요구된다.

고형폐기물은 인간의 활동에 의해 발생되는 주요한 인위적 배출원이며 매립되는 폐기물은 메탄을 발생시키는 가장 주요한 요인으로 작용한다(Kumar *et al.*, 2004a). 메탄은 지구온난화를 일으키는데 가장 중요한 인자로 이산화탄소에 비해 온난화지수가 약 21배 정도 크고, 1996년 IPCC에 따르면 연간 1~2% 정도 대기 중의 메탄양이 증가하고 있다(Kumar *et al.*, 2004b; IPCC, 1996). 또한 매립지에서 배출되는 메탄 배출량이 폐기물부문에서 발생하는 온실가스의 약 60%를 차지하고 있으므로 매립지에서의 온실가스 배출량 추정은 상대적으로 그 중요성이 크다고 할 수 있다(기후변화협약위원회, 2003).

매립지에서의 메탄 배출량을 정확하게 산정하기 위해 기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서는 Tier 1뿐

만 아니라 Tier 2 산정방법을 제시하고 있다(IPCC, 2006, 2000, 1996). 외국의 선행연구에서도 IPCC에서 제시하는 방법론을 수정·보완하여 다양한 메탄 배출량 산정방법론을 제안하고 있으나 이들 대부분은 인구 1인당 발생하는 폐기물 중 매립되는 양을 통해 전체 매립지에 매립되는 양을 추정한 것으로 각 매립지에 매립되는 폐기물의 정보를 정확하게 파악·적용하지 못하고 있는 실정이다(Scharff and Jacobs, 2006; Bogner *et al.*, 2003). 또한 매립되는 폐기물의 성상 및 매립지의 유형에 따라 배출되는 온실가스 양의 차이가 크므로 외국의 폐기물 성상에 적합한 방법론을 그대로 우리나라에 적용하였을 경우 불확도를 높이는 결과를 초래할 수 있다.

우리나라에서도 매립지에서의 메탄 배출량을 산정하기 위한 다양한 연구들이 수행되고 있으나 초창기 연구의 대부분은 일부 매립지를 대상으로 Tier 1 방법에 의해 메탄 배출량을 산정하거나 실측을 통해 온실가스 배출량을 파악하는 연구들이 주를 이루었다(환경부, 2001, 2000; 에너지경제연구원, 1998). 일부 연구의 경우 우리나라 전체 매립지의 메탄 배출량을 산정하기도 하였으나 Tier 1에 의한 메탄 배출량만을 산정하였고, 이 결과는 우리나라 매립지 전체를 하나의 매립지로 간주하여 도출된 결과로써 각 매립지별 특성을 반영하지 못하는 문제점을 가지고 있었다(환경부, 2002). 이후 Tier 2 방법에 의해 온실가스 배출량을 산정하고자 하였으나 이들 결과 역시 일부 매립지만을 대상으로 하거나 우리나라 전체 매립지를 하나의 매립지로 간주하여 메탄 배출량을 산정하여 여전히 각 매립지별 특성을 고려한 매립지별 온실가스 배출량은 파악하지 못하였다(환경부, 2006, 2003, 2002; 한림대학교, 2004).

따라서 본 연구에서는 우리나라의 각 매립지의 특성을 고려한 온실가스 배출량을 산정하기 위해 Tier 1과 Tier 2 산정방법에 적용되는 각 변수들을 고찰하고, 적용변수별 온실가스 배출량 결과를 비교·검토하고자 한다. 이를 통해 우리나라 폐기물 매립지 특성을 고려한 매립부문 온실가스 배출량 산정방법의 신뢰도를 향상시키고자 한다.

2. 연구 방법

IPCC에서는 기후변화협약 당사국의 온실가스 배

출통계 작성을 위한 지침을 제공하고 있다. 이에 본 연구에서는 IPCC revised 1996 guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (이후 “1996GL”)와 IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (이후 “GPG 2000”)에서 매립지에서의 메탄 배출량을 산정하기 위해 제시하고 있는 default method (Tier 1)와 First Order Decay (Tier 2) 방법을 이용하였다.

2. 1 Tier 1

Tier 1 방법은 물질수지법을 기초로 하여 실험모형에 의해 개발된 비교적 간단한 산정방법으로 계산식은 식(1)에 나타내었다(Kumar *et al.*, 2004b). Tier 1은 매립된 폐기물에서 생성된 메탄은 폐기물이 매립된 그 해 모두 배출된다고 가정하므로 현실성 있는 배출량을 제시하지는 못한다.

$$\text{CH}_4 \text{ Emission} = \sum [\text{MSW}_T \times \text{MSW}_F \times L_0] \times (1 - OX) \quad (1)$$

여기서, MSW_T 는 발생한 도시고형폐기물의 총량 (Gg/year), MSW_F 는 도시고형폐기물 총 발생량 중 매립되는 비율이며, L_0 는 메탄 배출계수로 계산식 $MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times 12/16$ 에 의해 계산된다. MCF는 메탄보정계수, DOC는 분해가 가능한 유기탄소 비율, DOC_F 는 DOC 중에서 미생물에 의해 동화될 수 있는 비율, F 는 매립가스 중에서 메탄이 차지하는 부피 비율, R 은 회수율, 그리고 OX 는 산화율을 각각 의미한다.

2. 2 Tier 2

Tier 2 방법은 시간에 따라 폐기물이 동화되는 실제 패턴을 반영한 메탄의 배출량 프로파일을 생성하여 현실에 맞는 배출량을 제시하며, 이 산정식은 식(2)와 같다(Kumar *et al.*, 2004b).

$$\text{CH}_4 \text{ Emission} = \sum [A \times k \times \text{MSW}_T(x) \times \text{MSW}_F(x) \times L_0 \times e^{-k(t-x)}] \times (1 - OX) \quad (2)$$

기본적으로 적용되는 변수는 Tier 1과 같으며, t 는 산정 연도, x 는 메탄 발생과 관련된 폐기물 매립기간 (년), A 는 $\frac{1-e^{-k}}{k}$ 로 합계를 보정해주는 정규화 계수, 그리고 k 는 메탄 발생속도상수이다.

3. 배출량 산정에 적용되는 변수검토

3. 1 MSW

식(1)과 (2)에 나타낸 MSW_T 와 MSW_F 의 곱은 폐기물의 총 매립량을 의미한다. 일반적으로 MSW는 생활폐기물을 의미하나 본 연구에서는 온실가스 배출량 산정을 위해 생활폐기물뿐만 아니라 사업장 폐기물 등 모든 매립 폐기물을 총칭한다. 우리나라는 환경부의 “전국 폐기물 처리실적 및 계획(환경부, 1991, 1990)”과 “전국 폐기물 발생 및 처리현황(환경부, 1993~2005)”에서 매립지별 매립량 자료를 연도별로 확보하고 있어 인구수에 따라 추정된 폐기물의 매립량이 아닌 실제 매립지별 매립량을 적용할 수 있다.

3. 2 MCF

MCF는 매립된 폐기물에서 생분해성 유기물이 혼기성미생물에 의해 메탄가스로 전환되는 비율을 의미한다. IPCC 지침서에서는 매립지의 관리 상태별로 MCF값을 표 1과 같이 제시하고 있다. 그러나 대부분의 선행연구에서는 우리나라 매립지가 모두 위생매립지로 존재한다고 가정하고 일률적으로 1을 적용하였다(환경부, 2006, 2003, 2002, 2000). 폐기물은 매립지 종류 및 규모, 매립량, 그리고 매립방법에 따라 대략 10~15년 동안 매립작업이 진행되며 그 기간 동안 매립폐기물은 노출되는 환경에 따라 그 특성이 변하게 된다. 즉 시계열적으로 메탄배출계수를 달리 부여할 필요가 있다. 이러한 매립작업의 특성을 반영하여 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (이후 “2006GL”)에서는 다양한 MCF값을 제시하였으며, 이를 기초로 우리나라 매립지 특성에 맞는 MCF값을 표 1에 나타내었다.

먼저 우리나라의 매립지는 거의 대부분이 혼기성 매립방식을 채택하고 있지만 향후 온실가스 저감대책이 강조되어 준호기성 매립방식이 채택될 가능성도 고려하여 매립방식을 혼기성과 준호기성으로 분류하였다. 준호기성 매립방식은 주로 일본에서 채택하고 있는 공법으로 저부의 침출수 배제관을 통해 대기의 산소가 매립지 내부에 유입되어 미미한 호기성 환경을 유지하는 특징을 지니고 있어 공간적인 분해환경의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 또한

우리나라의 경우 약 5m의 높이(폐기물과 복토층을 포함)로 단계적으로 폐기물을 쌓는 셀공법으로 매립이 진행되므로 매립작업 진척에 따라 매립작업 중인 상부층과 매립된 하부층간의 공기유입정도는 상이하다. 따라서 셀공법에 의해 매립이 되는 우리나라의 협기성 매립방식에서 상부층의 경우 비교적 공기유입이 용이하여 준호기성 상태와 유사하게 되며 하부층은 협기성 상태가 되므로 표 1과 같이 매립층에 따라 서로 다른 값을 제시하였다.

본 연구에서는 2004년까지 매립종료 되었거나 매립 중인 우리나라의 모든 매립지의 위생매립 여부를 구분하여 표 1에 제시한 값을 각각 적용하였다.

Table 1. Application of MCF for different site type.

Type of site		1996GL ¹⁾ , GPG2000 ²⁾	2006GL ³⁾	This study
Managed (anaerobic)	Top layer (5 m waste)	1.0	1.0	0.5
	Lower layer			1.0
Managed (semi-aerobic)			0.5	0.5
Unmanaged-deep (>5 m waste) and/or high water table		0.8	0.8	0.8
Unmanaged-shallow (<5 m waste)		0.4	0.4	0.4
Uncategorized		0.6	0.6	0.6

¹⁾IPCC, Revised 1996 guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1996

²⁾IPCC, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 2000

³⁾IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006

3.3 DOC

DOC는 생화학적 분해가 가능한 유기탄소로 폐기물의 성상과 밀접한 관계가 있으며, 폐기물 성상별 DOC의 가중 평균치로 산정할 수 있다.

본 연구에서는 표 2와 같이 우리나라 폐기물 성상을 7가지로 분류하여 각 성상별 중량비율과 탄소 함량을 곱하여 DOC를 산정하였다. 이때 폐기물 성상별 탄소 함량의 경우 환경부 “폐기물 통계”자료의 성상별 삼성분 자료를 활용할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 기존연구와 달리 폐기물 성상별 DOC와 DOC_F 를 모두 고려하고자 적용 대상 폐기물의 일관성을 위해 DOC_F 값 자료로 활용된 수도권 매립지 반입폐기물 삼성분 분석자료(수도권매립지관리공사, 2004a)를 활용하여 DOC를 계산하였다(표 2).

3.4 DOC_F

DOC_F 는 분해 가능한 유기탄소함량의 실제 분해비율로서 1996GL에서는 기본값으로 0.77을 제시하였으나, GPG2000에서는 리그닌 탄소를 포함하는 경우 DOC_F 의 기본값으로 0.5~0.6을 사용할 것을 권장하고 있다. 그러나 이러한 방법은 폐기물의 성상에 관계없이 폐기물을 하나의 성상으로 취급하고 있기 때문에 매립폐기물 성상의 특성이 전혀 반영되지 못하는 문제점이 있다. 특히 매립지는 도시의 폐기물처리시스템의 구성에 의해 매립폐기물의 성상이 결정되기 때문에 매립지마다 매립폐기물의 성상변화의 범위가 넓다. 따라서 DOC_F 도 매립폐기물의 성상별

Table 2. Application of DOC, DOC_F , and k for the waste type in this study.

Type of waste	DOC (wet, %)	DOC_F (wet, %)	k (yr^{-1}) -Tropical ($MAT^a \leq 20$), Moist and Wet ($MAP^b/PET^c > 1$)
Slowly degrading waste	Paper	40.55	55.7
	wood	35.96	32.4
	Rubber/Leather	58.42	11.5
Moderately degrading waste	Textile	45.61	38.2
Rapidly degrading waste	Food	26.64	51.9
	Sewage sludge	15.77	12.2
Others	22.97	43.2	0.180 ^{d)}

^aMAT: Mean annual temperature, ^bMAP: Mean annual precipitation, ^cPET: Potential evapotranspiration

^{d)}The values of Rubber, Textile, and others are calculated by the correlation of the values of IPCC and SLC (IPCC=(SLC+0.0666)/4.063, r=0.938)

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

2. Sudokwon landfill site management, Study on the monitoring and projection system of LFG and leachate from Sudokwon landfill site, 2004a

3. Sudokwon landfill site management, Investigation of landfill gas generation, 2004b

로 기본값이 제시될 필요가 있으며, 본 연구에서는 표 2에 제시한 것과 같이 수도권매립지관리공사(2004a)에서 조사한 폐기물 성상별 유기탄소 함량 중 생분해율 자료를 활용하였다. 이 자료는 DOC에 서도 사용된 수도권매립지 반입폐기물을 대상으로 한 결과로, 이 값을 우리나라 폐기물 전체를 대표하는 값으로 사용할 경우 산정되는 온실가스 배출량의 불확도를 높이는 결과를 초래할 수 있다. 그러나 현재까지 DOC_F 값을 제시하고 있는 다른 결과가 없으므로 본 연구에서는 수도권매립지공사의 자료를 활용하였다. 따라서 향후 우리나라 폐기물 통계 자료 구축 시 DOC_F 값에 대한 연구가 필요할 것이다.

3.5 F

매립가스의 대부분은 메탄과 이산화탄소로 이루어져 있다. 메탄가스 비율인 F는 매립 폐기물의 성상 등 여러 요소에 의해 결정되는데, GPG2000에서는 F 값이 성상에 따라 주로 0.4~0.6사이에 존재하며 기본값으로 0.5를 제시하고 있다. 우리나라에서는 환경부(2006) 연구결과 실제 매립지에서 실측한 F값으로 0.5를 제시한 바 있어 본 연구에서도 동일한 값을 적용하였다.

3.6 k

메탄발생속도상수(k)는 반감기($t_{1/2}$)를 매립 폐기물의 초기 질량이 반으로 분해되는데 소요되는 시간으로 정의된다. 메탄발생속도는 매립폐기물 특성, 기후 조건, 매립방식, 매립지 운영 등 다양한 인자로 인해 k 값은 폐기물의 종류, 기후조건, 함수량에 따라 다양하게 나타난다. 이러한 영향으로 k 값의 범위는 최대 0.2(반감기 3년, 수분함량이 높고 생분해도가 우수한 음식폐기물)에서 최소 0.02(반감기 35년, 건조하고 생분해성이 낮은 나무 또는 종이)로 다양하게 나타나고 있다(2006GL). 본 연구에서는 2006GL에서 아한대 습윤 기온 지역의 k 값으로 제시한 값을 적용하였으며, 2006GL에서는 분류하지 않았으나 우리나라 폐기물에서 존재하는 고무피혁류, 섬유류, 기타 가연물의 경우 수도권매립지관리공사(2004b)에서 제시한 결과와 2006GL의 결과의 회귀분석을 통해 도출된 값을 적용하였다(표 2).

앞서 언급하였듯이 k 값을 적용하기 위해서는 무엇보다도 매립기간이 중요하다. 따라서 본 연구에서는

1970년부터 2004년까지 우리나라 모든 매립지의 매립기간을 조사하여 이를 각 매립지별로 적용하였다.

3.7 R

메탄가스 회수량은 매립지에서 발생되는 메탄가스를 회수하여 에너지로 활용하거나 Flaring 서비스에서 연소 처리되는 양을 의미한다. 이는 매립지의 매립가스 관리 상황과 밀접한 관련이 있다. 따라서 특정 매립지에 대한 실제 메탄 회수량을 실측하여 메탄 회수율을 결정해야 하나, 이러한 조사 결과가 없는 경우에는 기본값인 0을 적용하도록 하고 있다. 우리나라의 경우 각 매립지별 온실가스 회수량 조사 결과가 없으므로 본 연구에서는 기본값인 0을 적용하였다(GPG2000).

3.8 OX

산화율은 매립지로부터 발생되는 메탄가스가 매립 복토층을 통과하면서 산화되는 비율을 의미한다. 산화율은 측정하기가 힘들고 동일한 매립지에서도 측정지점에 따라 달라지기 때문에 정확한 값을 산정하기 어려우나, 매립지에서 배출되는 메탄의 양을 좌우하는 중요한 인자이다. IPCC에서는 선진국의 경우 대부분의 매립지가 위생매립지로 관리가 잘 되고 있다고 판단하여 OX값으로 0.1을 제시하고 있다. 그러나 외국 선행연구에 의하면 측정시기에 따라 산화율이 4~50% 정도로 그 결과가 상당히 차이가 있는데 이는 기상상태나 복토의 상태에 영향을 받기 때문이다(Abichou et al., 2006; Spokas et al., 2006; Bogner and Matthew, 2003). 따라서 우리나라 매립지를 대상으로 한 실험연구를 바탕으로 정확한 산화율을 적용할 필요가 있으나 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 우리나라의 선행연구에서는 매립지 관리가 비교적 잘 되고 있다고 보고 산화율을 0.1을 적용하고 있어 본 연구에서도 동일한 값을 적용하였다(환경부, 2006, 2003, 2002, 2000).

4. 메탄 배출량 산정

매립부문의 온실가스 배출량을 산정하기 위해 시나리오를 작성하고 이를 표 3에 나타내었다. 시나리오는 적용되는 각 변수별 영향을 파악하기 위해 작

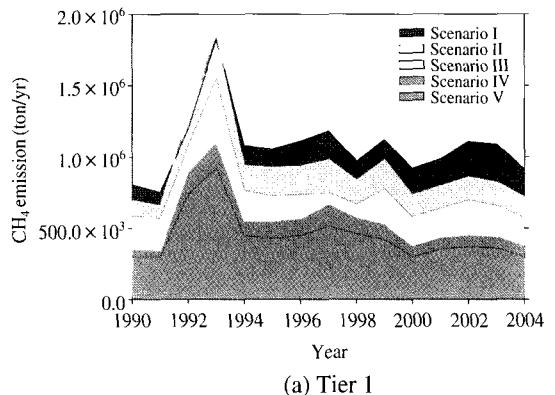
Table 3. Scenarios for the estimate of methane emission.

	Scenario I	Scenario II	Scenario III	Scenario IV	Scenario V
MSW	Disposed amount of T.L. ¹⁾	Disposed amount of I.L. ²⁾	Disposed amount of I.L	Disposed amount of I.L	Disposed amount of I.L
DOC	Table 2 (T.L.)	Table 2 (I.L.)	Table 2 (I.L.)	Table 2 (I.L.)	Table 2 (I.L.)
DOC _F	0.55	0.55	Table 2 (I.L.)	0.55	Table 2 (I.L.)
MCF	1	1	1	Table 1 (I.L.)	Table 1 (I.L.)
F	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
k	Table 2	Table 2	Table 2	Table 2	Table 2
R	0	0	0	0	0
OX	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

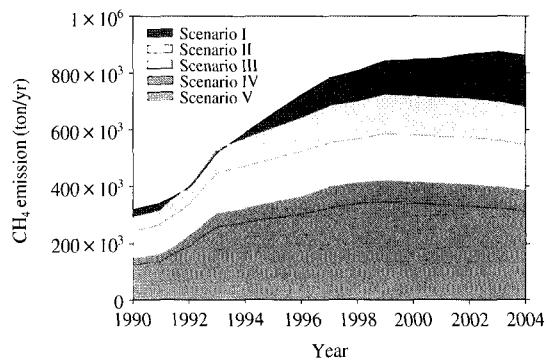
¹⁾T.L: Total landfills²⁾I.L: Individual landfills

성된 것으로 시나리오 I은 우리나라 전체 매립량에 대한 전체 폐기물의 성상인자를 고려하여 메탄 배출량을 산정하는 것이다. 시나리오 II~V까지는 우리나라 전체 매립지를 하나의 매립지로 보고 메탄 배출량을 산정하는 시나리오 I과는 달리 각 매립지별 온실가스 배출량을 산정하고 산정된 결과를 합산하여 매립지 전체의 총 메탄 배출량을 계산하는 방법이다. 구체적으로 살펴보면, 시나리오 II는 각 매립지에 매립된 폐기물의 매립량과 해당 매립지에 매립된 폐기물 성상별 DOC를 계산하고 DOC_F는 0.55를, MCF는 1을, F와 OX는 IPCC 지침서의 기본값을 적용하는 방법이다. 시나리오 III은 시나리오 II와 동일한 값을 적용하고 DOC_F만 매립된 폐기물의 성상에 따라 표 2에 제시된 값을 각각 적용하는 방법이다. 시나리오 IV는 시나리오 II에 산정연도의 매립진행 상태에 따라 서로 다른 매립층에 대해 표 1에 제시된 MCF값을 적용하는 방법이며, 시나리오 V는 시나리오 II에 폐기물 성상에 따른 DOC_F과 매립층에 따라서 서로 다른 MCF값을 모두 적용하는 방법이다. 각 시나리오는 Tier 1과 Tier 2에 의한 온실가스 배출량 산정에 모두 동일하게 적용되었다.

Tier 1과 Tier 2방법에 의해 시나리오별로 산정한 온실가스 배출량을 그림 1에 나타내었다. 먼저 Tier 1의 산정결과를 살펴보면, 시나리오 I~V의 메탄 배출량이 전체적으로 증감을 반복하는 형태를 보인다. 시나리오 III을 제외한 시나리오 I, II, IV, V의 경우 1990년의 메탄 배출량보다 2004년의 메탄 배출량이 각각 13%, 3%, 7% 그리고 0.5% 정도 증가한 것으로 나타났으며 시나리오 III의 경우 2004년의 메탄 배출량이 1990년에 비해 약 2% 정도 감소한 것으로



(a) Tier 1



(a) Tier 2

Fig. 1. Trends of methane emission by scenarios.

나타났다. 이는 1990년에 매립된 폐기물이 2004년에 매립된 폐기물에 비해 비교적 DOC값이 높은 성상이 주로 매립되었기 때문으로 사료된다.

1990~2004년까지 Tier 1방법에 의해 산정된 시나리오 I~V의 메탄 배출량 산정결과, 모든 시나리오

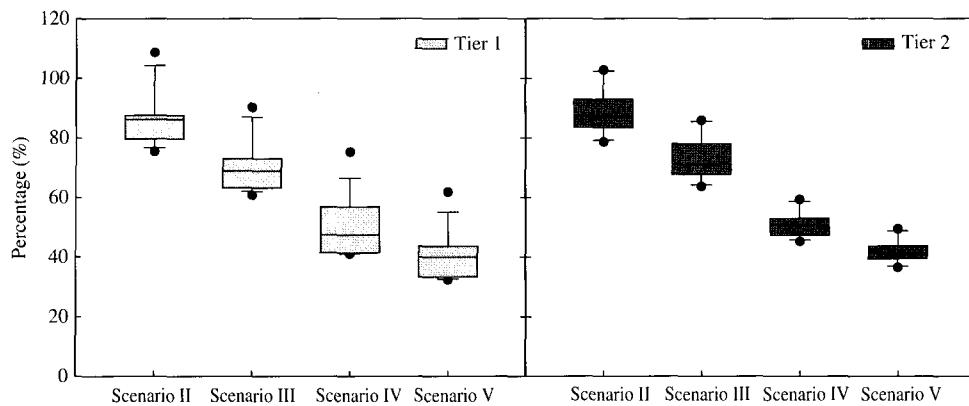


Fig. 2. Comparison of methane emission by scenarios.

에서 1993년의 메탄 배출량이 다른 해에 비해 가장 많은 것으로 나타났다. 이는 1993년에 수도권 매립지가 개시되면서 다른 해에 비해 매립량이 많아 배출되는 메탄 배출량도 높게 산정되었다. 또한 매립량이 다른 해에 비해 상대적으로 많았던 1997년, 1999년, 2003년의 메탄 배출량도 다른 해에 비해 높게 산정되었다. 즉, Tier 1에 의해 산정된 메탄 배출량은 폐기물 전체 매립량의 경향과 같은 것으로 Tier 1 산정방법에서 매립량이 메탄 배출량 산정에 가장 주요한 요소임을 알 수 있었다.

Tier 2방법에 의한 산정결과를 살펴보면, Tier 1의 결과에서 폐기물 매립량과 같은 경향으로 메탄이 배출되는 것과 달리, 실제 시간에 따라 폐기물이 동화되어 메탄이 배출되는 패턴이 고려되어 메탄 배출량이 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 시나리오 I~V의 메탄 배출량 산정결과 모두 1990년에 비해 2004년도의 메탄 배출량이 약 2.5배 정도 증가한 것으로 나타났다. Tier 1의 산정결과에서는 폐기물이 가장 많이 매립되었던 1993년에 메탄 배출량이 가장 많은 것으로 나타났으나, Tier 2의 산정결과에서는 시나리오 I을 제외한 나머지 시나리오 II~V에서 1999년도의 메탄 배출량이 가장 높게 평가되었다. 이는 실제 각 매립지의 매립기간에 따른 폐기물의 반감기를 고려하여 우리나라 전체 매립지에서의 온실가스 배출량을 산정하였으므로 Tier 2의 산정결과는 매립량과 비례관계가 성립하지 않는다. 또한 우리나라 매립지의 폐기물 매립량이 증감을 반복하고 있

기는 하나 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며 Tier 2의 산정결과 역시 1999년 이후 다소 감소하는 경향을 보이고 있어 향후 매립에 의한 메탄 배출량은 점점 줄어들거나 일정한 값으로 수렴하는 형태를 보일 것으로 사료된다.

Tier 1과 Tier 2방법에 의해 산정된 시나리오별 메탄 배출량을 비교하여 그림 2에 나타내었다. Tier 1과 Tier 2의 산정결과 메탄 배출량이 시나리오 I > 시나리오 II > 시나리오 III > 시나리오 IV > 시나리오 V의 순으로 높게 산정되었다. 시나리오 I은 우리나라 전체 매립지를 하나의 매립지로 간주하여 메탄 배출량을 산정한 것으로 각 매립지에서 배출되는 메탄 배출량을 산정하여 이를 합산한 시나리오 II, III, IV, V에 비해 메탄 배출량이 높게 평가되었다. Tier 1의 산정결과에서는 시나리오 I의 산정결과에 비해 시나리오 II, III, IV, V의 산정 결과가 각각 14%, 30%, 50% 그리고 59% 적게 메탄이 배출되는 것으로 나타났다. Tier 2의 산정결과, 시나리오 II, III, IV, V의 메탄 배출량이 시나리오 I의 메탄 배출량에 비해 각각 11%, 27%, 49% 그리고 59% 적게 평가되었다. 즉, 현재까지 우리나라 대부분의 연구에서 적용되고 있는 시나리오 I의 경우 다른 시나리오에 비해 매립지에서의 메탄 배출량을 과대평가하여 매립지에서의 메탄 배출량을 제대로 반영하지 못한다고 할 수 있다.

각 매립지별 온실가스 배출량을 산정한 후 합산한 시나리오 II~V에서 적용 변수별 영향을 살펴본 시나리오 II, III, IV의 결과를 비교하였다(그림 2). 먼저

Tier 1의 산정결과에서, 성상에 따른 DOC_F 를 반영한 시나리오 III의 메탄 배출량이 이를 반영하지 않은 시나리오 II의 메탄 배출량에 비해 약 20% 적었다. 또한 매립층에 따른 MCF를 반영한 시나리오 IV의 메탄 배출량은 시나리오 II의 배출량보다도 약 42% 적게 평가되었을 뿐만 아니라 시나리오 III의 결과보다도 약 28% 적게 평가되었다. 특히 성상에 따른 DOC_F 와 매립층에 따른 MCF값을 모두 반영한 시나리오 V의 배출량은 시나리오 II에 비해 약 53% 적게 산정되었으며 시나리오 III과 IV에 비해 각각 42%와 19% 정도 적게 메탄 배출되는 것으로 나타났다.

Tier 2의 메탄 배출량 산정 결과에서는 시나리오 III의 메탄 배출량이 시나리오 II의 메탄 배출량보다 약 18% 적게 산정되었다. 시나리오 IV의 메탄 배출량은 시나리오 II의 메탄 배출량에 비해 약 43% 정도, 시나리오 III의 메탄 배출량에 비해 약 30% 적게 평가되었다. 시나리오 V의 메탄 배출량은 시나리오 II, III, IV에 비해 각각 53%, 43%, 그리고 18% 정도 메탄이 적게 배출되는 것으로 평가되었다.

Tier 1과 Tier 2의 산정결과에서 모두 폐기물 성상에 따른 DOC_F 를 반영한 시나리오 III의 결과가 이를 고려하지 않은 시나리오 II의 결과보다 약 19% 정도 메탄이 적게 배출되는 것으로 나타났다. 또한 매립층에 따른 MCF값을 반영한 시나리오 IV의 결과가 시나리오 II보다 약 43% 정도 메탄이 적게 배출되는 것으로 나타났다. 특히 폐기물 성상에 따른 DOC_F 와 매립층에 따른 MCF값을 모두 반영한 시나리오 V의 결과가 시나리오 II에 비해 약 53% 정도 메탄이 적게 배출되는 것으로 나타나 시나리오 V에 의한 메탄 배출량이 전체 시나리오의 메탄 배출량 중 가장 적었다. 이는 폐기물 성상에 따른 DOC_F 와 매립층에 따른 MCF값이 매립부문 온실가스 배출량 산정의 주요 인자이며 특히 매립층에 따른 MCF값은 온실가스 배출량에 가장 큰 변화를 주는 주요 인자임을 알 수 있었다. 따라서 보다 정확하게 매립지로부터 배출되는 온실가스 배출량을 산정하기 위해서는 각 매립지별 매립량에 대한 정보가 정확하게 파악되어야 하고, 매립되는 폐기물 성상의 특성을 제대로 파악하여야 할 것이다. 특히 매립지별 매립공법이 상이하므로 매립지별 매립특성을 파악하여 매립층에 따른 MCF값을 보다 정확하게 적용하여야 할

것이다.

5. 결론 및 고찰

매립부문 온실가스 배출량을 산정하기 위해 1990~2004년까지 우리나라 매립지 전체를 대상으로 Tier 1과 Tier 2 방법으로 각 매립지별 온실가스 배출량을 산정하였다. 또한 적용되는 변수의 영향을 파악하기 위해 시나리오를 작성하고 이에 따른 메탄 배출량을 서로 비교 검토했다.

매립부문 메탄 배출량 산정결과 Tier 1에 의한 메탄 배출량은 폐기물 매립량의 증감경향과 동일하였으며 Tier 2의 산정결과 실제 시간에 따라 폐기물이 서서히 동화되어 메탄 배출량이 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 즉, Tier 1의 산정방법에서는 폐기물의 매립량이 주요인자로 작용하였으며, Tier 2의 산정결과에서는 폐기물 성상별 매립기간에 따른 메탄 발생속도가 주요인자로 작용하는 것으로 나타났다.

시나리오에 따른 메탄 배출량 결과를 살펴본 결과 시나리오 I > 시나리오 II > 시나리오 III > 시나리오 IV > 시나리오 V의 순으로 메탄이 배출되는 것으로 나타났다. 즉, 시나리오 I에 비해 시나리오 II~V의 메탄 배출량이 적게 산정되어 우리나라 매립지 전체를 하나의 매립지로 보고 메탄 배출량을 산정해오던 기존 연구(시나리오 I)의 결과는 우리나라 매립지에서 배출되는 메탄 배출량을 과대평가하고 있음을 알 수 있었다. 폐기물 성상별 DOC_F 를 고려한 시나리오 III과 매립층에 따른 MCF값을 적용한 시나리오 IV는 IPCC 지침서에서 제시하는 기본값만을 적용한 시나리오 II의 메탄 배출량 결과보다 더 적게 산정되었다. 특히 시나리오 IV의 결과는 시나리오 III의 메탄 배출량보다 더 적게 평가되었다. 즉, 폐기물 성상별 DOC_F 와 매립층에 따른 MCF값이 온실가스 배출량 산정에 있어 주요한 인자로 작용하고 있으며 이 중 매립층에 따른 MCF값이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

현재까지 우리나라 대부분의 연구에서 IPCC 지침서에 제시된 기본값을 적용하여 매립부문의 온실가스 배출량을 산정해왔다. 그러나 본 연구의 결과 폐기물 성상별 DOC_F 와 매립층에 따른 MCF값에 따라

메탄 배출량 결과가 상이하게 나타남을 알 수 있었다. 비록 본 연구에서는 DOC_F 와 MCF값만을 고려하였으나 향후 침출수에 의해 DOC 소실율, 산화율 및 회수율 등에 대한 연구를 통해 적용 변수에 대한 매립지별 정확한 정보를 기초로 한 온실가스 배출량 산정연구가 계속되어야 할 것이다. 또한 이를 바탕으로 우리나라 매립지의 특성을 고려한 보다 신뢰도 높은 온실가스 배출량 산정 방법론을 확립하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국 환경기술진흥원의 ‘차세대 핵심 환경기술개발사업(과제번호: 2005-12001-0045-3)’과 환경부 지정 기후변화특성화대학원 사업에서 지원된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 기후변화협약대책위원회(2003) 기후변화협약에 의거한 제2차 대한민국 국가보고서.
- 수도권매립지관리공사(2004a) 수도권매립지 매립가스와 침출수 발생량 모니터링 및 예측시스템 구축방안 연구.
- 수도권매립지관리공사(2004b) 폐기물 잡재가스발생량 조사.
- 에너지경제연구원(1998) 기후변화협약 대응 실천계획 수립을 위한 연구.
- 한림대학교(2004) 환경부문의 효율적 국가 온실가스 배출통계구축방안-중·장기 전략수립.
- 환경부(1990, 1991) 전국 쓰레기 처리실적 및 계획.
- 환경부(1993~2005) 전국 폐기물 발생 및 처리 현황.
- 환경부(2000) 환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사.
- 환경부(2001) 매립가스 자원화 사업의 CDM 사업으로서의 활용방안 연구
- 환경부(2002) 환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축.
- 환경부(2003) 환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축(II).
- 환경부(2006) 매립지 온실가스 배출량 조사 및 통계구축.
- Abichou, T., J. Chanton, D. Powelson, J. Fleiger, S. Escoriza, Y. Lei, and J. Stern (2006) Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers, *Waste Management*, 26, 1305-1312.
- Bogner, J. and E. Matthews (2003) Global methane emission from landfills: New methodology and annual estimates 1980~1996, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2), 1065.
- Bryden, H.L., H.R. Longworth, and S.A. Cunningham (2005) Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N, *Nature*, 438, 655-657.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (2001) *Climate Change 2001: The scientific basis*, Cambridge University press.
- IPCC (1996) IPCC revised 1996 guidelines for National greenhouse gas inventories.
- IPCC (2000) IPCC Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.
- IPCC (2006) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories
- Karl, T.R., P.D. Jones, R.W. Knight, G. Kukla, N. Plummer, V. Razuvayev, K.P. Gallo, J. Lindsey, R.J. Charlson, and T.C. Peterson (1993) A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74, 1007-1023.
- Kumar, S., S.A. Gaikwad, A.V. Shekdar, P.S. Kshirsagar, and R.N. Singh (2004a) Estimation method for national methane emission from solid waste landfills, *Atmospheric Environment*, 38, 3481-3487.
- Kumar, S., A.N. Mondal, S.A. Gaikwad, S. Devota, and R.N. Singh (2004b) Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal site: a case study, *Atmospheric Environment*, 38, 4921-4929.
- Scharff, H. and J. Jacobs (2006) Applying guidance for methane emission estimation for landfills, *Waste Management*, 26, 417-429.
- Spokas, K., J. Bogner, J.P. Chanton, M. Morcret, C. Aran, C. Graff, Y. Moreau-Le Golvan, and I. Hebe (2006) Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?, *Waste Management*, 26, 516-525.