

## 매립지 온실가스 배출량의 민감도 및 불확도 평가

김현선 · 김동식 · 김 호 · 이승묵

서울대학교 보건대학원

### Sensitivity and Uncertainty Analysis of Greenhouse Gas Emission from Landfills in Korea

Hyun-Sun Kim · Dong-Sik Kim · Ho Kim · Seung-Muk Yi

School of Public Health, Seoul National University

#### 1. 서론

전 세계적으로 기후변화 문제가 심화되면서 기후변화협약 및 교토의정서를 채택하는 등 국제적으로 다각적인 노력을 기울이고 있다.<sup>1~3)</sup> 최근 기후변화협약 당사국 총회(COP13)에서는 2013년 이후의 지구온난화 대책(Post Kyoto)을 세우기 위해, 2년간 협상을 지속해 2009년에 마무리를 하는 발리 로드맵을 채택하여 선진국은 상당한 정도의 온실가스를 감축하고, 개발도상국은 자발적으로 감축하는 방향으로 협상해 나가기로 했다.<sup>1)</sup>

우리나라의 경우 기후변화협약 당사국으로 온실가스의 배출현황 및 전망, 온실가스 억제정책을 포함하는 국가보고서를 제출하여야 하며 온실가스 감축을 위해 노력해야 한다(기후변화협약 제4조, 5조). 또한 선발개도국으로서 다른 나라 보다 정확하고 신뢰성 있는 온실가스 배출량 통계를 구축해야 하는 위치에 있다. 특히 폐기물부문은 다른 부문에 비해 온실가스 저감 잠재력이 높은 것으로 평가되며 그 중 매립부문의 온실가스 배출량은 전체 폐기물 부문의 약 60% 이상을 차지하여 보다 정확하고 신뢰성 있는 온실가스 배출통계체제가 요구된다.<sup>4~6)</sup>

현재까지 우리나라에서는 매립지의 온실가스 배출량 통계구축을 위해 많은 연구들이 진행되었다.<sup>7~11)</sup> 그러나 대부분의 연구는 기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 온실가스 배출량 산정지침서의 Mass Balance 방법(Tier 1)<sup>12,13)</sup>을 사용하거나, 적용변수도 IPCC에서 제시하는 기본값을 적용하는 등 우리나라 매립지의 특성을 정확하게 고려하지 못하였다. 특히 매립 폐기물의 성상 및 매립지의 유형에 따라 배출되는 매립가스 양의 차이가 크므로 외국의 폐기물 성상에 적합한 방법론을 그대로 우리나라에 적용하였을 경우 불확도를 높이는 결과를 초래할 수 있다.<sup>6)</sup> 이를 위해 일부 연구에서 우리나라 고유의 메탄발생속도 상수를 도출하여

Tier 1보다 현실성 있는 배출량을 제시하는 Tier 2 방법을 적용하여 온실가스 배출량을 산정하려는 노력을 하였으나 도출된 k값의 QAQC의 문제 등으로 산정된 온실가스 배출량의 신뢰도 및 정확도에 대한 고찰은 미흡하였다.<sup>10)</sup> 즉, 불확도 평가와 같은 QAQC가 온실가스의 인벤토리를 구축함에 있어 중요하나 아직 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 매립지의 특성에 맞는 온실가스 배출량을 산정하기 위해 적용 변수를 고찰하고, 산정된 온실가스 배출량의 불확도 및 민감도를 분석하여 매립부문 온실가스 배출량 산정방법의 신뢰도를 향상시키고자 한다.

#### 2. 연구 방법

IPCC에서는 기후변화협약 당사국의 온실가스 배출통계 작성을 위한 지침을 제공하고 있다. 이에 본 연구에서는 IPCC 2006 guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(이후 “2006GL”)<sup>14)</sup>에서 제시하는 방법을 활용하였다. 2006GL에서는 기존 IPCC revised 1996 guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(이후 “1996GL”)<sup>12)</sup>과 Good Practice Guidelines(GPG)<sup>13)</sup>에서 제시하고 있는 Mass Balance Model은 전혀 언급하지 않고 First Order Decay(FOD) 방법만을 제시하고 있다. 2006GL에서 제시하는 FOD방법은 크게 Tier 1, Tier 2, 그리고 Tier 3 방법으로 분류된다.

Tier 1방법은 IPCC FOD 방법을 활동자료 및 적용변수를 기초로 IPCC에서 제시하는 기본값을 적용하는 방법이다. Tier 2 방법은 기본적으로는 Tier 1 방법과 비슷하나 과거부터 최근까지의 매립지에 대한 양질의 매립이력과 국가 고유 활동자료를 조사 적용한다. 특히 매립이력에 대해서는 10년 혹은 그 이상의 기간에 대한 자료가 국가 고유의 통계나 조사에 의해 구축되어 있어야 하며 매립 폐기물의 성상 및 매립량 등에 대한 자료가 필요하다. Tier 3 방법은

E-mail: yiseung@snu.ac.kr

Tel: 02-740-8879

Fax: 02-745-9104

2.1. 산정 방법

본 연구에서는 2006GL의 Tier 2방법에 의해 온실가스 배출량을 산정하였으며, 산정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 DDOCm &= W \times DOC \times DOC_f \times MCF \\
 DDOCma_T &= DDOCma_{T-1} + (DDOCma_{T-1} \times e^{-k}) \\
 DDOCmdecomp_T &= DDOCma_{T-1} \times (1 - e^{-k}) \\
 CH_4 generated_T &= DDOCmdecomp_T \times F \times 16/12 \\
 CH_4 emitted_T &= (\sum_x CH_4 generated_{x,T} - R_T) \times (1 - OX_T) \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, DDOCm은 매립 폐기물 중 분해 가능한 DOC의 양(Gg)으로 W×MCF×DOC×DOC<sub>f</sub>에 의해 계산된다. W는 매립된 폐기물의 양(Gg), MCF는 메탄보정계수, DOC는 분해가 가능한 유기탄소 비율, DOC<sub>f</sub>는 DOC중에서 미생물에 의해 동화될 수 있는 비율이다. DDOCma<sub>T</sub>는 T년도까지 매립지에 누적된 DDOCm의 양(Gg), DDOCma<sub>T-1</sub>는 T-1년도까지 매립지에 누적된 DDOCm의 양(Gg), DDOCmd<sub>T</sub>는 T년도에 매립된 DDOCm의 양(Gg), DDOCm decomp<sub>T</sub>는 T년도에 분해된 DDOCm의 양(Gg), k는 메탄 발생속도상수를 각각 의미한다. CH<sub>4</sub> generated<sub>T</sub>는 T년에 발생한 메탄의 양, F는 매립가스 중 메탄의 부피비, R은 회수율, 그리고 OX는 산화율을 각각 의미한다.

2.2. 민감도 및 불확도

본 연구에서는 크리스탈볼을 이용하여 각각의 가정변수(온실가스 배출량 산정 변수)들이 예측변수(온실가스 배출량)에 미치는 영향력, 즉 민감도 분석을 하였다. 크리스탈볼에서는 기본적으로 제공하는 기능 중의 하나인 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하면서 모든 가정변수와 예측변수 간의 스피어만 순위상관계수(rank correlation)를 계산하여 민감도를 분석하게 된다. 이때 계산된 민감도는 개별 가정변수가 예측변수에 미치는 영향만을 통계적으로 살펴본 것이 아니라 가정변수들 간의 상관관계를 반영한 예측변수에 대한 영향력을 보여준다. 민감도 분석으로 가정변수가 예측변수에 어느 정도의 영향력을 갖는지 알 수 있으며, 또한 가정변수들이 모델에 어떠한 영향을 미치는지 알게 됨으로써 결과의 정확도를 증가시킬 수 있다.

불확도란 결과의 신뢰도를 나타내는 정량적인 지표로서 합리적으로 추정된 값의 분산 상태를 나타내는 단위가 된다. 몬테카를로 시뮬레이션을 할 경우 IPCC에서 제시하는 Tier 2방법으로 불확도 평가가 가능해진다. Tier 2방법에 의한 불확도 평가는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 도출된 온실가스 배출량 분포에 의해 결정된다. 따라서 본 연구에서는 온실가스 배출량 산정에 적용되는 변수의 분포를 가정하고 이를 통해 도출되는 온실가스 배출량 분포의 형태를 통해 이 배출량 분포의 백분위수 2.5와 97.5(신뢰구간 95%)에서 불확도를 평가하였다.

3. 배출량 산정에 적용되는 변수검토

3.1. W

본 연구에서는 1970년부터 2005년까지 환경부의 “전국 폐기물 처리실적 및 계획(1990, 1991)<sup>15)</sup>”과 “전국 폐기물 발생 및 처리현황(1993-2004)<sup>16)</sup>”에서 제시하는 폐기물 매립량을 적용하였다.

3.2. MCF

MCF는 매립된 폐기물 중의 생분해성 유기물이 혐기성 미생물에 의해 메탄가스로 전환되는 비율을 의미한다. IPCC 지침서에서는 매립지의 관리 상태별로 각기 다른 MCF값을 제시하고 있다.<sup>12-14)</sup> 우리나라는 현재 모든 매립지가 위생매립지로 관리되고 있으나 실제 매립이 종료된 매립지들의 경우 일부 비위생으로 관리되었다. 따라서 보다 정확하게 온실가스 배출량을 산정하기 위해서는 매립지별 관리현황을 파악하여 이에 따라 각기 다른 MCF값을 적용해야한다. 그러나 김현선 등<sup>6)</sup>의 연구에 따르면 매립지별 이력정보를 파악하여 각기 다른 MCF값을 적용하였을 때와 전체 매립지에 일률적으로 1을 적용하였을 때 큰 차이가 없었으므로 본 연구에서는 기존 대부분의 연구와 마찬가지로 모든 매립지가 위생매립지로 존재한다고 가정하고 일률적으로 1을 적용하였다.<sup>3-6)</sup>

3.3. DOC

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

Table 1. DOC values for the waste types

	1996GL <sup>a)</sup> , GPG2000 <sup>b)</sup>	2006GL <sup>c)</sup>	MOE (1997) <sup>d)</sup>	MOE (2001) <sup>e)</sup>	SLC <sup>f)</sup>	MOE (2006) <sup>g)</sup>
Paper	40	40	32	30.2	42.5	40.6
Food	15	15	11.4	9	42.6	26.6
wood	30	43	36.6	31.2	51.6	36
Sewage sludge		5	6.1	6.1	28	15.8
Rubber/ Leather		64	57.1	50	62.8	58.4
Others			28.5	28	30.8	23

a) IPCC, Revised 1996 guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, (1996)

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

c) IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, (2006)

d) Ministry of Environment (MOE), Waste statistics, (1997)

e) Ministry of Environment (MOE), Waste statistics, (2001)

f) Sudokwon landfill site management Cooperation (SLC), Study on the monitoring and projection system of LFG and leachate from Sudokwon landfill site, (2004)

g) Ministry of Environment (MOE), Construction of DB for greenhouse gas emission inventory in waste sector, (2006)

**Table 2.** Application of DOC for different waste types in this study

	Paper	Food	Wood	Sewage sludge	Rubber/Leather	Others
Distribution	Beta	Beta	Beta	Beta	Beta	Beta
Range	27.2-46.8	8.1-46.9	27.0-56.8	4.5-30.8	45.0-70.4	20.7-33.9
Mode	37.6	19.9	38.1	12.2	58.5	27.6

현재까지 우리나라에서 이루어진 연구에서 DOC를 계산하기 위해 사용된 폐기물 정상별 DOC 값을 Table 1에 나타내었다.<sup>11~14,17~19</sup> 본 연구에서는 민감도 및 불확도 평가를 위해 Table 1에서 제시한 모든 값의 평균을 최빈값으로 하고, 표에서 제시한 정상별 DOC값의 최소값 및 최대값의 10%만큼을 더 고려한 값을 범위로 하는 베타 분포를 가정하였다. 본 연구에서 적용된 정상별 분포 가정 특성은 Table 2와 같다.

3.4. DOC<sub>F</sub>

DOC<sub>F</sub>는 분해 가능한 유기탄소함량의 실제 분해비율로서 1996GL에서는 기본값으로 0.77을 제시하였으나, GPG에서는 리그닌 탄소를 포함하는 경우 DOC<sub>F</sub>의 기본값으로 0.5~0.6을 사용할 것을 권장하고 있다. 그러나 이러한 방법은 폐기물의 성상에 관계없이 폐기물을 하나의 정상으로 취급하고 있기 때문에 매립지의 매립정상 특성이 전혀 반영되지 못하는 문제점이 있다. 특히 매립지는 도시의 폐기물처리시스템의 구성에 의해 매립폐기물의 성상이 결정되기 때문에 매립지마다 매립폐기물의 정상변화의 범위가 넓다.<sup>6,11</sup> 따라서 DOC<sub>F</sub>도 매립폐기물의 정상별로 기본값이 제시될 필요가 있으나 우리나라에서는 이와 관련된 연구가 부족하여 민감도 및 불확도 평가를 위해 적용할 만한 자료의 수가 부족함으로 기존 우리나라 대부분의 연구에서 적용하는 0.5를 평균으로 하고, 2006GL에서 제시한 불확도를 고려하여 표준편차가 0.1인 정규분포를 가정하였다.

3.5. F

매립가스의 대부분은 메탄과 이산화탄소로 이루어져 있다. 메탄가스 비율인 F는 매립 폐기물의 정상 등 여러 요소에 의해 결정되는데, GPG에서는 F값이 성상에 따라 주로 0.4~0.6사이에 존재하며 기본값으로 0.5를 제시하고 있다. 2006GL에서는 0.5(범위 0.5-0.55)의 기본값과 ±5%의 불확도를 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 2006GL에서 제시한 기본값을 평균으로 하고 ±5%의 불확도를 고려하여 표준편차가 0.025인 정규분포를 가정하였다.

3.6. k

메탄발생속도상수(k)는 반감기(t<sub>1/2</sub>)를 매립 폐기물의 초기 질량이 반으로 분해되는데 소요되는 시간으로 정의된다. 메탄발생속도는 매립폐기물 특성, 기후조건, 매립방식, 매

**Table 3.** k values for waste types

Waste type	MOE (2000) <sup>a)</sup>	SLC (2004) <sup>b)</sup>	MOE (2006) <sup>c)</sup>	2006GL <sup>d)</sup>
Paper	0.139	0.084(0.01-0.18)*	0.06	0.07(0.06-0.085)
Food	0.693	0.075(0.04-0.11)	0.185	0.4(0.17-0.7)
Wood		0.115(0.02-0.04)	0.03	0.035(0.03-0.05)
Sewage sludge			0.185	
Rubber/Leather	0.0347	0.093(0.06-0.14)	0.025	
Others		0.145(0.04-0.25)	0.18	0.17(0.15-0.2)

\* Default value (range)

<sup>a)</sup> Ministry of Environment (MOE), Investigation of greenhouse gas emission from Environmental facilities, (2000)

<sup>b)</sup> Sudokwon landfill site management Cooperation (SLC), Study on the monitoring and projection system of LFG and leachate from Sudokwon landfill site, (2004)

<sup>c)</sup> Ministry of Environment (MOE), Construction of DB for greenhouse gas emission inventory in waste sector, (2006)

<sup>d)</sup> IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, (2006)

**Table 4.** Application of k for different waste types in this study

	Paper	Food	Wood	Sewage sludge	Rubber/Leather	Others
Distribution	Beta	Beta	Beta	Beta	Beta	Beta
Range	0.05-0.231	0.04-1.386	0.02-0.231	0.1-0.2	0.022-0.14	0.04-0.25
Mode	0.08575	0.2845	0.0785	0.185	0.0509	0.165

립지 운영 등 다양한 인자로 인해, 그리고 k값은 폐기물의 종류, 기후조건, 함수량에 따라 다양하게 나타난다. 이러한 영향으로 k값의 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.<sup>14)</sup> 그러나 기존 우리나라 연구의 대부분은 폐기물 정상별로 k값을 적용하지 않아 폐기물의 특성을 제대로 반영하지 못하였으나 일부 연구에서는 실험을 통해 정상별 k값을 도출하였고 이를 Table 3에 나타내었다.<sup>7,11,14,18)</sup> 본 연구에서는 민감도 및 불확도 평가를 위해 Table 3에서 제시한 모든 값의 평균을 최빈값으로 하고, 제시한 정상별 k값의 범위들의 최소값과 최대값을 포괄하는 베타 분포를 가정하였다. 본 연구에서 적용된 정상별 분포 가정 특성은 Table 4와 같다.

3.7. R

메탄가스 회수량은 매립지에서 발생하는 메탄가스를 회수하여 에너지로 활용하거나 Flaring 설비에서 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 있어 본 연구에서도 0을 적용하였다.<sup>13)</sup>

3.8. OX

산화율은 매립지로부터 발생하는 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 잘되고 있어 OX값으로 0.1을 제시하고 있다. 그러나 외국 선행연구에 의하면 기상상태나 복토 상태의 영향 등으로 인해 측정시기에 따라 4~50%의 산화율이 관찰되어 우리나라 매립지에서의 실제 산화율을 적용할 필요가 있으나 이에 대한 연구가 부족한 실정이다.<sup>6,19)</sup> 이에 본 연구에서는 우리나라의 선행연구에서 매립지 관리가 비교적 잘 되고 있다고 보고 산화율을 0.1을 적용하고 있어 본 연구에서도 동일한 값을 적용하였다.<sup>10,11)</sup>

#### 4. 결과 및 고찰

확률분포를 가정한 각각의 변수에 대해 식 (1)에 나타낸 것과 같이 2006GL의 메탄 배출량 산정식을 적용하여 총 10,000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 최종적인 메탄 배출량을 산정하였다. 메탄 배출량 산정에 적용된 변수가 분포를 가지므로 도출되는 메탄 배출량의 결과도 분포의 형태로 나타나게 되며 산정된 배출량의 통계결과는 Table 5에, 연도별 메탄 배출량의 경향은 Fig. 1에 제시하였다.

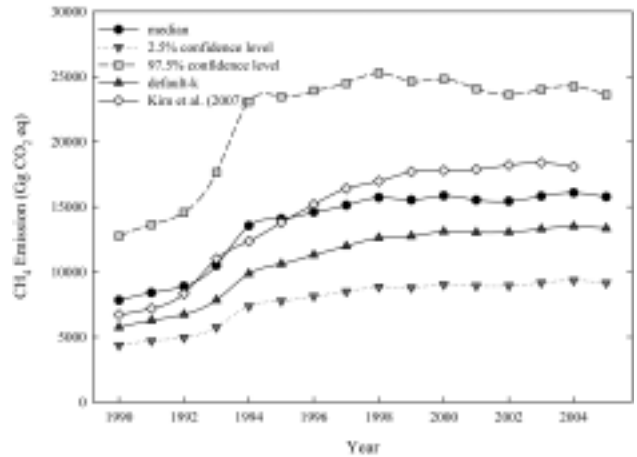
Table 5에 제시한 온실가스 배출량 분포에서 연도별 배출량의 평균 및 중앙값을 살펴보면, 2005년의 메탄 배출

**Table 5.** Statistical summary for greenhouse gas emission distribution(Unit : Gg CO<sub>2</sub>eq)

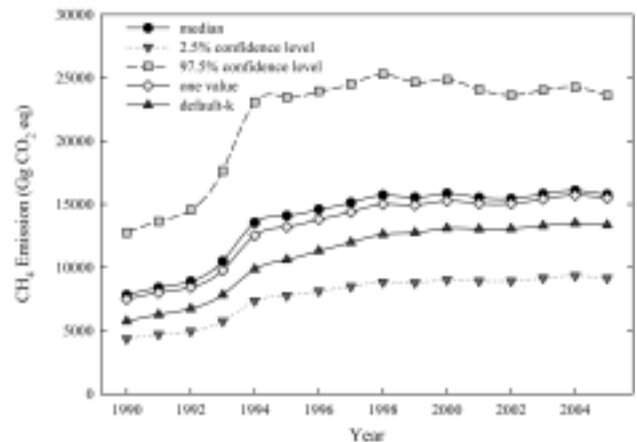
Year	Mean	Median	Std*	Min	Max	95% CI**		Uncertainty (%)
						lower	upper	
1990	8,024	7,820	2,145	1,324	17,858	4,355	12,760	27
1991	8,613	8,397	2,290	1,423	19,579	4,701	13,636	27
1992	9,128	8,898	2,464	1,498	21,404	4,952	14,561	27
1993	10,807	10,494	3,044	1,742	26,433	5,743	17,633	28
1994	13,983	13,543	4,016	2,229	34,501	7,356	23,090	29
1995	14,491	14,084	4,013	2,321	34,953	7,767	23,457	28
1996	14,967	14,592	4,046	2,389	35,284	8,129	23,941	27
1997	15,482	15,118	4,095	2,472	35,628	8,490	24,503	26
1998	16,064	15,718	4,172	2,573	36,153	8,848	25,287	26
1999	15,827	15,530	4,005	2,566	34,466	8,799	24,647	25
2000	16,116	15,848	4,002	2,636	34,178	9,023	24,828	25
2001	15,747	15,518	3,825	2,621	33,102	8,928	24,070	24
2002	15,648	15,435	3,732	2,647	32,451	8,930	23,624	24
2003	15,992	15,812	3,754	2,739	32,620	9,163	24,015	23
2004	16,261	16,079	3,769	2,821	32,707	9,344	24,256	23
2005	15,923	15,759	3,659	2,813	31,898	9,146	23,611	23

\* Standard Deviation

\*\* Confidence Interval (CI)



**Fig. 1.** Trend of annual methane emissions by Monte Carlo simulation.



**Fig. 1.** Comparison of methane emissions by Monte Carlo simulation.

량이 1990년에 비해 약 2배 정도 증가한 것으로 나타났다. 또한 연도별 온실가스 배출량 경향을 살펴보면, 1994년까지 메탄 배출량이 점차 증가하다가 이후 비슷한 수준의 메탄이 배출되고 있는 것으로 나타났다. 특히 1994년에 온실가스 배출량이 다른 해에 비해 상대적으로 많이 증가하였는데 이는 1993년의 폐기물 매립량이 다른 해에 비해 많았기 때문으로 폐기물 매립량이 온실가스 배출량 산정에 있어 중요한 변수임을 알 수 있다.

몬테카를로 시뮬레이션을 통해 도출된 온실가스 배출량 분포의 경향을 살펴보면, 1994년 이전까지의 메탄 배출량의 분포 범위는 비교적 좁았으나 이후 점점 넓어져 1998년에는 범위가 가장 넓은 것으로 나타났으며 최근에는 다소 범위가 줄어드는 경향을 보이고 있다.

연도별 메탄 배출량 결과의 불확도를 살펴보면 온실가스 배출량 경향과 비슷하게 1994년에 최고의 불확도를 보이다 이후 다소 감소하는 경향을 보이고 최근 3년 동안은 23% 불확도로 가장 낮은 값을 보였다. 그러나 전체적으로 평균 25%의 불확도를 보이고 있어 활동자료 및 적용 변수에 대한 보다 많은 고찰을 통해 불확도를 줄이기 위한 노력이 필요하다.

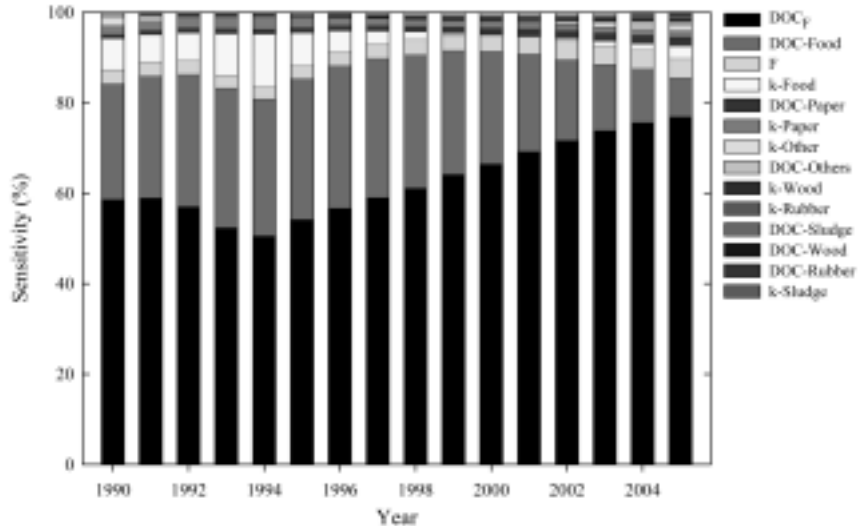


Fig. 2. Sensitivity of variables applying for methane emission estimation.

Fig. 1은 본 연구의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한 결과를 2006GL에서 제시한 메탄 발생 속도상수의 기본값을 적용한 결과 및 김현선 등<sup>6)</sup>에서 도출된 결과와 비교하였다. 먼저 메탄 발생 속도상수의 기본값을 적용하였을 때의 메탄 배출량이 본 연구의 메탄 배출량 분포 범위에는 포함되었으나 중앙값에 비해 상대적으로 배출량이 적게 평가되었다. 이는 우리나라의 폐기물 성상 특성을 고려하지 않고 IPCC의 기본값을 적용할 경우 온실가스 배출량이 과소평가될 수 있음을 의미하는 것으로 온실가스 배출량의 불확도를 줄이기 위해 우리나라 폐기물 성상별 메탄 발생 속도 상수에 대한 더 많은 연구를 통해 국가 고유값을 개발할 필요성이 있다.

적용변수에 대한 온실가스 배출량의 민감도를 비교한 김현선 등<sup>6)</sup>의 연구 결과와 비교한 결과, 메탄 배출량이 본 연구의 메탄 배출량 분포 범위에 포함되었으나 본 연구의 중앙값에 비해 상대적으로 배출량이 높게 평가되었다. 이는 김현선 등<sup>6)</sup>의 배출량 산정에 적용된 성상별 DOC의 대부분이 본 연구에서 적용된 값에 비해 상대적으로 높기 때문이다. 즉, 보다 신뢰성이 높은 온실가스 배출량을 산정하기 위해서는 적용변수에 대한 정확도를 높일 수 있는 더 많은 연구가 필요하며 또한 온실가스 산정 변수에 따른 온실가스 배출량의 기여도 및 민감도 파악이 무엇보다도 중요하다.

온실가스 배출량 결과에 영향을 미치는 배출량 산정 적용변수에 대한 민감도 분석을 시행한 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 민감도 분석결과, 연도별로 배출량 결과에 영향을 미치는 변수의 기여도가 상이하지만 전체적으로 살펴볼 때 DOC<sub>F</sub>가 다른 변수에 비해 전체 민감도의 약 60~75%를 차지하는 것으로 나타나 메탄 배출량에 있어 가장 지배적인 영향을 미치는 변수로 나타났다. DOC가 DOC<sub>F</sub> 다음으로 영향을 많이 미치는 것으로 나타났으나 최근에는 이에 대한 영향이 상당히 줄었다. 또한 2005년부터 음식물 쓰레기의 직매립이 금지가 되어 향후 이에 대한 영

향은 더욱더 감소할 것으로 사료된다. DOC<sub>F</sub>와 음식물류의 DOC와 같이 민감도에 큰 영향을 미치는 변수의 경우 이들 변수에 대해 가정한 확률분포의 범위가 다른 변수들에 비해서 상대적으로 넓어 전체적인 메탄 배출량에 큰 기여를 하는 것을 사료가 된다. 따라서 DOC<sub>F</sub>의 경우 IPCC 지침서에서 제시하는 기본값을 사용하기보다 실제 우리나라 폐기물 성상별 DOC<sub>F</sub>값을 도출하여 적용한다면 이 변수에 의한 민감도 및 불확도를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

### 5. 결론

2006GL에서 제시한 Tier 2 방법을 적용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 1990년부터 2005년까지의 온실가스 배출량을 산정하였다. 1990년에 비해 2005년의 온실가스 배출량이 약 2배 정도 증가하였으며, 배출량의 불확도는 평균 25%로 적용 변수에 대한 많은 고찰을 통해 불확도를 줄이는 노력을 기울여야 할 것이다. 연도별 온실가스 배출량의 민감도 분석 결과, 가정한 분포의 범위가 다른 변수에 비해 넓었던 DOC<sub>F</sub>가 메탄 배출량에 가장 큰 영향을 많이 미치는 것으로 나타났다. DOC<sub>F</sub>의 경우 IPCC 지침서에서 제시한 기본값을 사용하기보다 실제 우리나라 폐기물 성상별 DOC<sub>F</sub>값을 도출하여 적용한다면 이 변수에 의한 민감도 및 불확도를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

마지막으로 본 연구에서 적용한 모든 변수의 값들은 실제 폐기물이 매립된 해마다 도출한 결과를 적용한 것이 아니라 현재의 값을 전체적으로 적용한 것이므로 이에 의한 불확도가 있음을 염두에 두어야 한다. 그리고 연도별로 매립되는 폐기물의 매립비율이 다르며 가장 최근에는 음식물쓰레기 및 슬러지 반입 금지에 따라 전체적인 매립량의 감소로 인한 영향 등도 향후 고려되어야 할 것이다. 즉, 최종 메탄 배출량에 대한 적용변수의 민감도를 보다

정확하게 분석하기 위해서는 적용변수에 대한 더 많은 기초자료가 필요할 것이며 해마다 매립되는 폐기물의 특성을 면밀히 검토하여야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. United Nations Framework Convention on Climate Change Home Page, <http://unfccc.int>, Jan(2008).
2. Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguier, M., Van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., and Johnson, C. A., "Climate Change 2001 : The scientific basis," Cambridge University press(2001).
3. Bryden, H. L., Longworth, H. R., and Cunningham, S. A., "Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25o N," *Nature*, **438**, 655~657(2005).
4. Kumar, S., Gaikwad, S. A., Shekdar, A. V., Kshirsagar, P. S., and Singh, R. N., "Estimation method for national methane emission from solid waste landfills," *Atmos Environ*, **38**, 3481~3487(2004).
5. 기후변화협약대책위원회, "기후변화협약에 의거한 제 2차 대한민국 국가보고서,"(2003).
6. 김현선, 최은화, 이남훈, 이승훈, 정장표, 이채영, 이승묵, "매립지의 온실가스 배출량 산정 시나리오에 따른 온실가스 배출량 비교," *한국대기환경학회지*, **23**, 344~352 (2007).
7. 환경부, "환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사,"(2000).
8. 환경부, "환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축," (2002).
9. 환경부, "환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축 (II),"(2003).
10. 환경부, "매립지 온실가스 배출량 조사 및 통계구축," (2006).
11. 환경부, "환경부문 온실가스 배출통계 D/B 구축,"(2006).
12. IPCC, "IPCC revised 1996 guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,"(1996).
13. IPCC, "IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories," (2000).
14. IPCC, "2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories,"(2006).
15. 환경부, "전국 쓰레기 처리실적 및 계획,"(1990, 1991).
16. 환경부, "전국 폐기물 발생 및 처리 현황,"(1993-2005).
17. 환경부, "전국폐기물통계조사,"(2001).
18. 수도권매립지관리공사, "수도권매립지 매립가스와 침출수 발생량 모니터링 및 예측시스템 구축방안 연구,"(2004).
19. Abichou, T., Chanton, J., Powelson, D., Fleiger, J., Escoriaza, S., Lei, Y., and Stern, J., "Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers," *Waste Management*, **26**, 1305~1312(2006).