

< 7장. 폐기물과 온실가스 >

1. 서론

폐기물 분야에서 발생하는 온실가스로는 메탄, 이산화탄소 및 아산화질소가 있으며 그밖에도 기타 비메탄계 유기성휘발물질 등이 생성된다. 이러한 온실가스들은 도시고형폐기물의 매립 및 소각과 액상폐기물인 생활하수 및 산업폐수의 처리과정에서 발생된다.

폐기물 분야에서 발생하는 가장 대표적인 온실가스로는 폐기물의 혐기성 분해 과정에서 발생하는 메탄을 들 수 있으며 주로 도시고형폐기물의 매립과 폐수 처리과정에서 방출된다. 폐기물에 의해 방출되는 메탄의 발생량은 1992년 기준으로 인간활동에 의해 연간 발생하는 전체 메탄의 5~20% 가량을 차지하고 있다(IPCC, 1992). 메탄은 온실효과를 일으키는 잠재 능력이 이산화탄소보다 21배 크며 따라서 최근 들어 지구의 온난화에 미치는 메탄의 영향에 관해 많은 사람들이 관심을 가지고 있기도 하다. 도시고형폐기물의 매립에 따라 발생하는 메탄의 양은 20~70 Tg/yr (Bingemer and Crutzen, 1987, US EPA, 1994) 정도로 추산되고 있으며 인간에 의해 방출되는 전체 메탄 발생량인 375 Tg/yr(IPCC, 1996)의 5~19%를 차지하고 있다. 폐기물에 의해 발생하는 메탄의 또 하나 주요 발생원은 생활하수 및 산업폐수 처리과정이며, 이때 발생하는 메탄의 대부분은 산업폐수 처리과정에서 발생된다. 생활하수 및 산업폐수 처리과정에 의한 메탄 발생량은 연간 30~40 Tg/yr로 전체 메탄 발생량의 8~11%를 차지하고 있다. 생활하수의 처리과정에서 발생하는 메탄의 양은 2 Tg/yr로 산업폐수 처리과정에서 발생하는 메탄의 5~8%에 불과하다.

여러 다른 형태의 연소와 마찬가지로 도시고형폐기물의 소각은 온실가스 생성의 발생원이 되나, 아직은 이에 대한 많은 자료가 축적되지 않은 상태이며 여러 기초 연구 결과에 의하면 폐기물의 소각은 폐기물로부터 발생하는 전체 온실가스의 작은 부분을 차지할 것으로 예측되어지고 있다. 이 밖에도 생활하수의 처리와 폐기물의 소각에 의해 아산화질소가 발생하는 것으로 보고되고 있다.

1997년, 미국에서 1813.6 MMTCE(millions of metric tones of carbon equivalents)의 온실가스가 배출되었으며 이 중, 약 3.9%인 70 MMTCE가 폐기물로부터 발생된 것으로 알려져 있다. 그 내용을 자세히 살펴보면 도시고형폐기물의 매립 및 폐수 처리과정에서 발생하는 메탄의 양이 각각 66.7 및 0.9 MMTCE였으며 생활하수처리 및 도시고형폐기물의 소각으로부터 발생하는 아산화질소의 양은 각각 2.3 및 0.1 MMTCE로 보고되었다(US EPA, 1999). 아산화질소의 경우, 1995년의 IPCC 가이드라인에서는 생활하수 처리시 발생하는 주요 온실가스로 고려되지는 않았으나, 1996년 IPCC 가이드라인에서부터 생활하수에 의한 온실가스 통계에 포함되었다. 생활하수에 의한 온실가스로는 아산화질소와 메탄이 있으며, 메탄보다는 아산화질소에 의한 온실가스 영향이 크게 나타난 것은 주목할 만한 점이라 할 수 있다.

2. 온실가스 발생량 예측방법

가. 매립

도시고형폐기물의 매립에 따라 발생하는 매립가스 중 메탄은 매립장 주변의 환경에 악영향을 미칠 수 있으며 이러한 매립가스의 성분은 매립방식 등 여러 요인들에 의해 영향을 받는다. 메탄은 음식물쓰레기, 종이, 나무 등과 같은 가연성물질에 있는 유기성분의 분해에 의해 발생된다. 매립 직후 유기성분은 산소가 존재하는 호기성 상태에서 분해되며 그 후 산소가 거의 없는 혐기성조건에서 셀룰로오스, 아미노산, 설탕 등과 같은 성분들로 분해된다. 이러한 간단한 성분들은 발효되어 가스성분 및 혐기성 박테리아의 영양소가 되는 물질들로 변환되며 그 후 안정화된 유기물질과 기체상 물질들로 다시 분해된다. 이러한 기체상 물질 즉, 매립가스의 부피 구성비를 살펴보면 대략적으로 약 50%의 메탄과 50%의 이산화탄소로 이루어짐을 알 수 있다. 실질적으로 매립지에서 발생되어 공기 중으로 방출되는 이산화탄소는 침출수로의 용해로 인해 이보다 낮다. 메탄은 일반적으로 매립 2~3년 후 발생되기 시작하며 10~60년간 지속적으로 방출된다.

1996년 개정판 IPCC 가이드라인에서는 폐기물 매립에 의한 메탄 발생량을 산정하는 방법으로 Default methodology, 1차동역학적 방법, 경험적 방법 등을 추천하고 있으며, 이들 방법들은 각각의 장단점을 가지고 있다. 본 장에서는 Default methodology와 2개의 1차동역학적 방법을 이용하여 폐기물 매립에 의한 메탄 발생량을 산정하였으며, 이러한 방법들에 의한 결과를 비교해 보았다. Default methodology는 연간 매립된 폐기물이 매립 즉시 메탄가스를 발생한다는 가정하에 쓰이는 방법이다. 이와는 달리, 1차동역학적 방법은 모든 메탄가스가 매립 즉시 발생하는 것이 아니라 일정 시간이 경과한 후에도 형성, 배출된다는 점을 고려한다. 즉 이 방법은 시간적 개념을 도입한 방법이며, 발생량 계산을 위해서는 많은 인자들에 관한 자료를 필요로 한다. 그러나 국내의 특성이 고려된 인자값은 전무한 상태이며, 이들 인자들에 대한 연구도 많이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

1) Default methodology

Default Methodology는 생화학적 분해가 가능한 유기성분의 조성비를 이용, 물질수지식을 통해 메탄의 발생량을 예측하는 방법이다. 이 방법은 최소한의 자료로도 계산이 가능하여 적용하기 쉽다는 장점이 있으나, 단기적 측면에서의 메탄 발생량을 실제 발생량보다 과대하게 예측한다는 단점이 있다. 이 방법을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{연간 메탄발생량} = (\text{MSWT} \cdot \text{MSWF} \cdot \text{MCF} \cdot \text{DOC} \cdot \text{DOCF} \cdot F \cdot 16/12 - R) \cdot (1 - \text{OX})$$

MSWT = 도시고형폐기물의 총 발생량

MSWF = 도시고형폐기물의 매립 비율

MCF = 메탄보정계수

DOC = 분해성 유기탄소

DOCF = 분해성 유기탄소 중 메탄으로의 전환율

F = 매립가스중 메탄 비율 (default=0.5)

R = 메탄 회수율

OX = 산화계수

도시고형폐기물의 연간 매립량(MSWT:MSWF) 및 주요성상은 ‘전국폐기물발생 및 처리현황(환경부)’의 자료를 이용하여 구할 수 있다. 메탄보정계수(MCF)는 매립방식에 따라 다른 값을 가지며 이러한 충분한 자료가 확보되지 못한 국가는 default 값으로 0.6을 사용하도록 되어있다. 복토재를 사용하거나, 폐기물의 다짐 등이 존재하는 위생매립장(IPCC 가이드라인 기준)의 경우, 완전한 혐기성 상태를 가정하여 메탄보정계수 1을 갖는다. 비위생매립장의 경우, 부분적으로 호기성 상태를 유지하고 있으며 매립고가 낮음에 따라 낮은 메탄보정계수 값을 갖게 된다. 각 매립장의 매립형태에 대한 정보가 없는 나라의 경우는, default 값인 0.6을 사용한다. 우리나라 역시 위의 자료가 그리 많이 조사되지 않은 편이며, 따라서 default 값을 사용하는 것이 일반적이라 할 수 있다. DOC(분해성유기탄소)의 값을 구하기 위해서는 매립처리폐기물의 성상 및 처리량과 각 성상별 탄소성분비가 필요하며, 이들 자료를 정리하면, <표 I-8> 및 <표 I-9>와 같다. <표 I-8> 및 <표 I-9>로부터 매립 처리되는 폐기물의 성상별 탄소함유량(<표 I-10>)을 구할 수 있으며, 1997년에 매립 처리된 폐기물의 DOC는 8.44%로 계산되었다. 이렇게 각 연도별 매립처리 폐기물의 DOC를 구하기 위해서는 앞에서와 같은 통계자료를 필요로 한다. 1994년부터 1997년까지의 DOC 계산결과가 <표 I-11>에 나와 있다. 이렇게 계산된 DOC는 IPCC가 제안한 방법으로 산출된 값 9.2%(대기환경학회, 1999)와 유사한 수치를 보이고 있다. 표에서 보는 바와 같이 각 연도별 DOC는 서로간에 차이를 보이고 있으며, 연차적으로 감소하는 추세에 있음을 알 수 있다. 이는 소각확대 정책에 기인한 것으로 분해성유기탄소와 밀접한 관계가 있는 가연성폐기물의 소각이 증대되고 있음을 말한다.

<표 I-8> 매립처리 폐기물 성상, 1997년

(단위 : 톤/일)

	구분	생활폐기물	사업장일반 폐기물	건설폐기물	합계	%
가연성	음식물 채소류	10973.5			10973.5	14.8
	종이류	4946.9	75.4	159.5	5181.8	7.0
	나무류	1391.3	75.4	571.6	2038.3	2.8
	고무피혁류	947.8			947.8	1.3
	플라스틱류	1861.2	381.9	270.8	2513.9	3.4
	폐합성섬유		34.9		34.9	0.0
	폐합성고무		28.2		28.2	0.0
	폐합성피혁		8.4		8.4	0.0
	기타폐합성고분자화합물		224.4		224.4	0.3
	슬러지		8427.7		8427.7	11.4
	동,식물성 잔재물		196.5		196.5	0.3
	동,식물성 폐식용유		26.2		26.2	0.0
	기타	3796.6	532.5	288.8	4617.9	6.2
	소계	23917.3	10011.5	1290.7	35219.5	47.6
불연성		6518.5	23721.5	8456.4	38696.4	52.4
합계		30435.8	33733	9741.1	73915.9	100.0

친환경적 자원순환형 정책

자료 : 전국폐기물 발생 및 처리현황, 1998, 환경부

<표 I-9> 폐기물의 종류별 원소성분비

(단위 : %)

구분	수분함량 (%)	C	H	O	N	S	Ash
음식물 채소류	72	40.6	5.5	28.1	3.6	0.8	21
종이류	23	41.6	5.2	35.8	0.8	0.5	16.1
나무류	21	46.3	5.8	32.7	1.1	0.5	13.2
고무피혁류	12	64.9	8.4	11.6	10	1	15
플라스틱류	14	74.4	11.1	5.7	0.9	0.7	5
폐합성섬유	20	48	6.4	40	2.2	0.2	3.2
폐합성고무	10	69.7	8.7	-	-	1.6	20
폐합성피혁	15	60	8	11.6	10	0.4	10
기타폐합성고분자화합물	14	74.4	11.1	5.7	0.9	0.7	5
슬러지	74	23.5	2.9	15	3.2	2.5	45
동,식물성 잔재물	72	40.6	5.5	28.1	3.6	0.8	21
동,식물성 폐식용유		66.9	9.6	5.2	2	-	16.3
기타유기물	38	45.9	6.4	27.3	2.9	0.6	15.9

자료 : 환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사“ (환경부 용역 1차중간보고서, 대기환경학회, 1999)

<표 I-10> 매립처리 폐기물의 원소성분현황, 1997년

(단위 : 톤/일)

	구분	처리량	수분함량 (%)	건조중량	C	H	O	N	S
분 해 성	음식물 채소류	10973.5	72	3072.6	1247.5	169.0	863.4	110.6	24.6
	종이류	5181.8	23	3990.0	1659.8	207.5	1428.4	31.9	20.0
	나무류	2038.3	21	1610.3	745.6	93.4	526.6	17.7	8.1
	고무폐혁류	947.8	12	834.1	541.3	70.1	96.8	83.4	8.3
	폐합성섬유	34.9	20	27.9	13.4	1.8	11.2	0.6	0.1
	폐합성고무	28.2	10	25.4	17.7	2.2	0.0	0.0	0.4
	폐합성피혁	8.4	15	7.1	4.3	0.6	0.8	0.7	0.0
	기타폐합성고분자화합물	224.4	14	193.0	143.6	21.4	11.0	1.7	0.4
	슬러지	8427.7	74	2191.2	514.9	63.5	328.7	70.1	54.8
	동,식물성 잔재물	196.5	72	55.2	22.3	3.0	15.5	2.0	0.4
	동,식물성 폐식용유	26.2		26.2	17.5	2.5	1.4	0.5	0.0
	기타	4617.9	38	2863.1	1314.2	183.2	781.6	83.0	17.2
	소계	35219.5		14895.8	6242.1	818.2	4065.2	402.4	135.2
비분해성	폐합성수지	2513.9	14	2162.0	1608.5	240.0	123.2	19.5	15.1
	불연성	38696.4							
합계		73915.9			7850.6	1058.2	4188.5	421.8	150.3

<표 I-11> 매립폐기물의 분해성유기탄소함량(DOC)

년도	1994	1995	1996	1997
DOC(%)	10.39	9.26	9.33	8.44

<표 I-12>는 매립처리 폐기물의 성상변동 추이를 나타낸다. 1994~1997년 4년간 매립폐기물의 분해성물질 함량은 감소하는 추세이며, 이는 앞의 DOC 감소 추세와도 일치한다. 이러한 변화는 매립량에 큰 변동이 없을 경우, 매립에 의한 온실가스 생성이 점점 줄어들 수 있음을 시사한다. 매립되는 음식물 쓰레기의 비율은 빠른 속도로 줄어들고 있으며, 다른 성상은 비교적 작은 폭의 변동을 보이고 있다. 매립처리 폐기물의 성상에 대한 조사가 이루어지지 않은 1994년 이전은 쓰레기종량제 실시 이전으로 분리수거 및 재활용의 형태가 1994년과 비슷할 것이며 또한 <표 I-5>에서 보는 바와 같이 1994년 이전의 소각율에 큰 변동이 없다는 점을 고려했을 때, 이 기간의 폐기물 성상은 1994년과 비슷할 것으로 판단된다. 따라서 본 장에서는 1994년 이전의 DOC를 1994년의 DOC와 동일하다고 가정하고 메탄배출량을 산정하였다.

<표 I-12> 매립처리 폐기물의 성상변동 추이

(단위 : %)

	구분	1994년	1995년	1996년	1997년
분해성	음식물 채소류	23.0	21.9	19.3	14.8
	종이류	8.5	6.6	8.4	7.0
	나무류	2.9	2.7	3.0	2.8
	고무폐혁류	2.1	1.8	1.4	1.3
	폐합성섬유	5.2	0.1	0.1	0.0
	폐합성고무	0.1	0.1	0.1	0.0
	폐합성피혁	0.0	0.1	0.0	0.0
	기타 폐합성고분자화합물	0.3	0.2	0.2	0.3
	슬러지	6.8	9.8	9.0	11.4
	동,식물성 잔재물	0.8	1.1	0.4	0.3
	동,식물성 폐식용유	0.1	0.2	0.0	0.0
	기타	0.0	5.4	6.0	6.2
	소계	49.8	49.9	47.9	44.2
비분해성	불연성	47.0	47.3	48.1	52.4
	폐합성수지	3.3	2.8	4.0	3.4
합계		100.0	100.0	100.0	100.0

자료 : 전국폐기물 발생 및 처리현황, 1998, 환경부

DOCF는 유기탄소함량 중 매립가스로 전환되는 비율을 나타내며 현재까지 온도만을 변수로 하는 단순 이론모델($DOCF=0.014T+0.28$; T =온도)이 주로 이용되고 있다. 본 연구에서는 혐기성 반응이 일어나고 있는 매립지역의 온도가 외부의 온도에 관계없이 35°C로 일정하다고 가정하였으며 따라서 DOCF의 값으로 0.77을 사용하였다. R은 메탄이 소각 등을 통해 회수되는 값으로 국내에서 아직은 조사된 바 없으며 메탄의 회수율, R을 0으로 가정하였다. 산화계수(OX)는 메탄이 폐기물의 상층부 및 매립지의 복토부에서 산화되는 비율로 아직까지 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 본 연구에서는 미국의 온실가스발생 보고서(US EPA, 1999)에서 사용된 0.1을 사용하였다. 앞에서 언급된 부분들을 고려하여 메탄 발생량 예측식을 정리하면 다음과 같다.

$$CH_4 \text{ Emission} = 0.2772 \times MSWT \times MSWF \times DOC$$

2) 1차동역학적 방법 (1)

1차동역학적 방법은 폐기물 매립 즉시 모든 메탄이 발생되는 것이 아니라 여러 기간에 걸쳐 발생된다는 사실을 기초로 도입된 방법이다. 메탄배출량 산정을 위해 1차 분해반응식을 이용하며, 다음과 같다.

$$Q = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt})$$

$$Q = \text{메탄발생량 (ton/yr)}$$

$$L_0 = \text{메탄발생잠재량 (ton/ton of refuse)}$$

R = 연평균매립량 (ton/yr)
 k = 메탄발생속도상수 (1/yr)
 c = 매립이 끝난 이후의 시간(yr)
 t = 매립이 시작된 이후의 시간 (yr)

매립되는 폐기물의 구성에 따라 메탄이 발생하는 정도가 달라지며, 따라서 메탄발생잠재량, L_0 는 폐기물 조성의 함수라 할 수 있다. 가용한 최근의 각 연도별(1994~1997년) 매립폐기물 조성비를 이용하여 메탄발생잠재량을 계산하면 <표 I-13>과 같다. 이들 값들은 국내의 기존 연구(과학기술처, 1992)에서 조사된 151.4 m³/ton 보다 작고, 미국 환경청의 배출계수(100 m³/ton)보다는 큰 값이다. 한편 시간에 따라 L_0 가 작아지는 현상을 보이고 있는데 이는 앞에서 언급되었다시피 가연성폐기물의 소각확대 정책에 따라 DOC가 줄어드는 것과 동일한 이치이다. 메탄 발생속도 상수, k 는 기존에 이루어진 연구 결과(0.031yr⁻¹, 에너지경제연구원, 1994)를 이용하였다.

<표 I-13> 연도별 메탄발생잠재량 (L_0)

년도	L_0 (m ³ /ton)	L_0 (kg/ton)
1994	138.2	92.0
1995	131.3	87.4
1996	130.7	87.0
1997	121.4	80.8

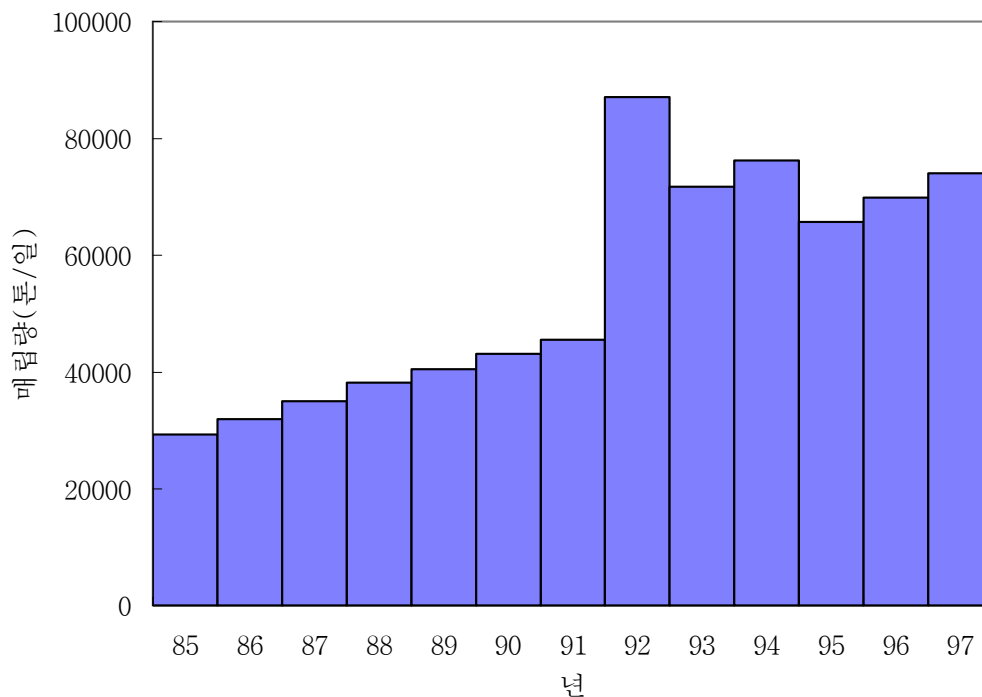
연평균매립량(R)을 구하기 위해 각 연도별 매립량을 살펴보면 <표 I-14> 및 <그림 I-1>과 같으며, 연도별 매립량이 일정하지 않음을 알 수 있다. 1992년 이전의 폐기물 발생량은 부피톤을 기준으로 산정된 것이며, 따라서 보정계수를 이용하여 중량톤으로 전환하였다. 이때 보정계수는 0.552('92 전국폐기물발생 및 처리현황, 환경처)를 이용하였다.

<표 I-14> 연간 매립량

친환경적 자원순환형 정책

년도	매립량 (톤/일)	매립량 (중량톤, 톤/일)	평균매립량 (1985년부터 당해년도까지, 톤/일)
1985	53,176	29,353	29,353
1986	57,865	31,941	30,647
1987	63,411	35,003	32,099
1988	69,248	38,225	33,631
1989	73,294	40,458	34,996
1990	78,106	43,115	36,349
1991	82,411	45,491	37,655
1992	87,069	87,069	43,832
1993	71,800	71,800	46,939
1994	76,275	76,275	49,873
1995	65,749	65,749	51,316
1996	69,847	69,847	52,861
1997	74,059	74,059	54,491

자료 : ‘전국 폐기물 발생 및 처리현황’, 환경부



<그림 I-1> 연간매립량 추이

위의 모델은 매해의 매립량 및 매립폐기물의 조성에 큰 변화가 없을 때, 보다 정확한 값을 가지며, 각 연도별 자료가 충분할 경우에는 위의 식을 시간에 대하여 미분한 후, 각 연도의 메탄발생량을 합하는 방법을 적용하는 것이 오차를 줄일 수 있다. <그림 I-1> 및 <표 I-12>에서 보는 바와 같이 우리나라의 연간 매립량 및 조성비는 일정하다고 보기 힘들며, 각 연도별로 메탄발생량을 고려하는 것이 나으리라 생각된다. 이와 같은 방법으로는 1차동

역학적 방법 (2)가 있다.

3) 1차 동역학적 방법 (2)

매립량에 관한 연도별 통계자료가 정리되어 있는 국가는 아래와 같은 식을 적용하는 것이 권장된다.

$$Q_{T,x} = k R_x L_0 e^{-k(T-x)}$$

$Q_{T,x}$ = x년에 매립된 폐기물에 의해 현재 배출되는 메탄 발생량

x = 폐기물의 매립연도

R_x = x년의 매립량

T = 현재의 연도

총 매립폐기물에 의한 현재까지의 총 메탄발생량을 산정하기 위해서는 매립시작년도부터 현재까지의 각 메탄발생량을 합해야 하며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Q_T = \sum Q_{T,x}, \quad x = \text{최초연도} \sim T$$

나. 소각

폐기물을 소각할 때, 이산화탄소가 배출되는 것은 틀림없는 일이지만 순수하게 온실가스로만 작용하는 배출량을 산정하기란 쉽지 않다. 소각되는 폐기물 중 많은 부분이 음식물류, 종이 등과 같은 생물성 폐기물로 순환과정을 통하여 생태계에 동화 재이용되기 때문에 온실가스 발생량 산정시 제외되는 것이 합리적이다. 한편 플라스틱 등 화석연료를 기초로 제조된 물질들의 소각시 발생하는 이산화탄소는 순 온실가스로 취급되어야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 온실가스 배출량 산정시 음식물, 채소류, 종이류, 나무류 및 동식물성 폐기물과 같은 생물성폐기물을 제외하였으며 완전 연소를 가정하였다. 소각에 의한 이산화탄소 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$CO_2 = MSW_t \cdot MSW_f \cdot EF_1 \cdot \text{eff.}$$

CO_2 = 이산화탄소 배출량 (ton/yr)

MSW_t = 총 폐기물발생량 (ton/yr)

MSW_f = 소각처리 비율

EF_1 = 소각처리에 의한 비생물성 CO_2 배출계수

eff. = 연소효율

소각에 의한 이산화탄소 배출량을 산정하기 위해서는 <표 I-9>와 <표 I-15>과 같은 소각처리 폐기물의 양과 조성 그리고 성상별 원소성분비가 필요하며, 이를 토대로 성상별 탄소함유량을 계산하면 <표 I-16>와 같다. 소각에 의한 온실가스로 분류되는 비생물성 폐기물의 탄소함량은 1997년의 경우, 2006.8 톤/일이며, 소각처리된 폐기물 총량은 하루 10254

친환경적 자원순환형 정책

톤이다. 이로부터 완전연소를 가정하여 비생물성 CO₂ 배출계수를 계산하면 0.717 (kg CO₂ / kg waste)의 값을 갖게 된다.

<표 I-15> 소각처리 폐기물의 성상별 처리현황, 1997년

(단위 : 톤/일)

	구분	생활폐기물	사업장	건설폐기물	합계	%
가 연 성	음식물 채소류	814.6			814.6	7.9
	종이류	1036.4	298.7	129.6	1464.7	14.3
	나무류	445.3	521.2	690.9	1657.4	16.2
	고무피혁류	149			149	1.5
	플라스틱류	352.9	1192.9	409.9	1955.7	19.1
	폐합성섬유		166		166	1.6
	폐합성고무		132.8		132.8	1.3
	폐합성피혁		60.3		60.3	0.6
	기타폐합성고분자화합물		127.5		127.5	1.2
	슬러지		2541.5		2541.5	24.8
	동,식물성 잔재물		192.4		192.4	1.9
	동,식물성 폐식용유		0.7		0.7	0.0
	기타	543.1	166.8	186.1	896	8.7
	소계	3341.3	5400.8	1416.4	10158.5	99.1
불연성		29.2	26.3	40	95.5	0.9
합계		3370.5	5427.1	1456.4	10254	100.0

자료 : '전국 폐기물 발생 및 처리현황', 환경부

친환경적 자원순환형 정책

<표 I-16> 소각처리 폐기물의 원소성분현황, 1997년

(단위 : 톤/일)

	구분	처리량	수분함량 (%)	건조중량	C	H	O	N	S
가연성	음식물 채소류	814.6	72	228.09	92.60	12.54	64.09	8.21	1.82
	종이류	1464.7	23	1127.82	469.17	58.65	403.76	9.02	5.64
	나무류	1657.4	21	1309.35	606.23	75.94	428.16	14.40	6.55
	고무피혁류	149	12	131.12	85.10	11.01	15.21	13.11	1.31
	플라스틱류	1955.7	14	1681.90	1251.34	186.69	95.87	15.14	11.77
	폐합성섬유	166	20	132.80	63.74	8.50	53.12	2.92	0.27
	폐합성고무	132.8	10	119.52	83.31	10.40	0.00	0.00	1.91
	폐합성피혁	60.3	15	51.26	30.75	4.10	5.95	5.13	0.21
	기타폐합성고분자화합물	127.5	14	109.65	81.58	12.17	6.25	0.99	0.77
	슬러지	2541.5	74	660.79	155.29	19.16	99.12	21.55	16.52
	동,식물성 잔재물	192.4	72	53.87	21.87	2.96	15.14	1.94	0.43
	동,식물성 폐식용유	0.7		0.7	0.47	0.07	0.04	0.01	0.00
	기타	896	38	555.52	254.98	35.55	151.66	16.11	3.33
	소계	10158.5	39.34	6162.38	3196.43	437.75	1338.35	108.13	50.53
불연성		95.5							
합계		10254		6162.38	3196.43	437.75	1338.35	108.13	50.53
비 생물성탄소합량					2006.08				

앞의 방식과 같이 1994년에서 1997년까지의 이산화탄소 배출계수를 계산하면, <표 I-17>과 같다

<표 I-17> 이산화탄소 배출계수

(단위 : kg CO₂ / kg waste)

년도	1994	1995	1996	1997
CO ₂ 배출계수	0.548	0.752	0.745	0.717

1994년의 이산화탄소 배출계수가 타 연도에 비하여 작은 값을 갖고 있으며 1995년부터 배출계수가 줄어들고 있는 추세는 주목할 만한 점이라 할 수 있다. 이를 분석하기 위해 소각처리 폐기물의 연도별 성상변동 추이를 조사하였으며 <표 I-18>과 같다. <표 I-18>에서 1994년이 다른 해에 비해 특이한 사항은 온실가스 발생에 포함되지 않는 종이류 등과 같은 생물성폐기물의 구성비가 높은 반면, 비생물성폐기물의 구성비가 낮다는 점이다. 특히, 배출계수의 증가에 많은 영향을 미치는 탄소함유량 50% 이상의 비생물성폐기물(플라스틱, 합성고분자물질 등) 구성비가 다른 해에 비하여 월등히 작은 값을 갖는다. 한편, 1995년부터 탄

친환경적 자원순환형 정책

소함유량 50% 이상의 비생물성폐기물의 구성비가 감소하고 있다는 점은 1995년까지는 재활용이 가능한 폐합성고분자물질들이 소각 처리되었지만, 효과적인 분리 배출 등으로 소각보다는 재활용의 비율이 증가되고 있음을 말하며, 효과적인 자원의 관리라는 측면에서 바람직하다 할 수 있겠다. 이렇게 1994년을 전후해서 소각폐기물의 성상에 많은 변화가 있음을 주시할 때, 1994년 이전의 소각폐기물성상은 쓰레기 수거체계, 재활용 실태, 산업구조 등의 측면에서 1994년 이후와는 차이가 있을 것으로 보이며, 따라서 이 기간동안의 이산화탄소 배출계수를 1994년의 값과 동일하다고 가정하여 온실가스 발생량을 산출하였다.

<표 I-18> 소각처리 폐기물의 성상변동 추이

(단위 : %)

	구분	1994년	1995년	1996년	1997년
가연성	음식물 채소류	5.3	4.9	6.2	7.9
	종이류	24.2	15.2	17.7	14.3
	나무류	13.4	11.4	16.6	16.2
	고무피혁류	1.0	0.7	1.2	1.5
	플라스틱류	12.7	16.8	18.9	19.1
	폐합성섬유	1.2	5.2	2.6	1.6
	폐합성고무	1.2	3.2	2.8	1.3
	폐합성피혁	0.6	1.6	1.2	0.6
	기타 폐합성고분자화합물	1.5	1.7	1.8	1.2
	슬러지	28.8	32.3	23.8	24.8
	동,식물성 잔재물	0.5	0.6	1.1	1.9
	동,식물성 폐식용유	0.0	0.2	0.2	0.0
	기타	7.1	5.2	5.6	8.7
	소계	97.5	99.0	99.6	99.1
불연성		2.5	1.0	0.4	0.9
합계		100.0	100.0	100.0	100.0
	생물성폐기물	43.4	32.3	41.8	40.3
	탄소함량이 50% 이상 되는 비생물성폐기물 ¹⁾	18.2	29.2	28.7	25.3

1) 비생물성폐기물 중 슬러지 및 기타가연성폐기물 제외

최근의 연구결과들에 의하면, 폐기물 소각시 발생하는 또 다른 주요 온실가스로 아산화질소가 주목받고 있으며 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$N_2O = MSW_t \cdot MSWF \cdot EF_2$$

$$N_2O = \text{아산화질소 배출량 (g/yr)}$$

$$EF_2 = N_2O \text{ 배출계수}$$

여기서 N_2O 배출계수는 쓰레기의 단위 무게당 배출되는 아산화질소의 양으로 국내 쓰레기

에 대한 배출계수는 조사 발표된 적이 없으며, 미국 환경청에서 발표된 N₂O 배출계수는 0.1 kg/ton이다. IPCC 가이드라인에서도 도시고형폐기물 소각에 의한 아산화질소 배출에 관한 자료를 찾을 수 있으며 <표 I-19>와 같다. 소각대상이 도시고형폐기물이며 국내 소각로의 형식과 용량이 유사한 스토거방식의 폐기물 톤당 아산화질소 발생량의 원단위는 26 ~ 270 g N₂O/ton of waste이다. 본 연구에서는 국내의 연구자료 부족으로 미국 EPA의 N₂O 배출계수를 사용하였다.

<표 I-19> 도시고형폐기물 소각시 발생하는 아산화질소의 배출 자료

Nature of Waste (reference)	Facility	T(°C)	N ₂ O Emission				
			ppmv ^a min.	ppmv ^a average	ppmv ^a max.	O ₂ (%)	g N ₂ O/ ton waste
Municipal refuse	10 furnace(65-300 tonnes/day)		1.2	8	18		
Municipal refuse	Stepgrate	780-880	0.8		4.9	10	11-43
	Stepgrate	790-980	4		24	8-14	40-220
	Fluid. bed	830-850	6.7		10.5	13-15	14-123
Municipal solid waste	5strokers(20-400 tonnes/day)		3	7	12		26-270
	3fluid. bed		5.6	9.8	17.1		97-293
	rot. koln (120 tonnes/day)		10.2	11.1	12.1		35-165

^appmv = parts per million by volume

자료: 1996 개정판 IPCC 가이드라인

다. 생활하수 및 산업폐수

1) 생활하수

1996년 개정판 IPCC 가이드라인에서는 생활하수 및 산업폐수의 처리시, 액체와 슬러지 부분을 구분하여 온실가스 발생량을 산정할 것을 추천하고 있으나, 여기에서 사용되어야 할 인자값은 현재 국내에서 전무한 실정이며 따라서 본 장에서는 액체 부분만이 고려된 비교적 단순화된 식을 이용하였다. 슬러지 처리에 따른 온실가스 발생은 이미, 앞에서 도시고형폐기물로 구분되어 고려되었으며, 생활하수에 의해 발생하는 메탄 발생량 산정식은 다음과 같다.

메탄발생량 = 인구수·BOD₅(1인당 하루에 배출하는 BOD 부하량)·혐기성 상태에서 처리되는 비율·MCF(메탄전환율) - 메탄 회수량

친환경적 자원순환형 정책

BOD5 및 혐기적으로 처리되는 생활하수의 비율에 대한 국내 자료가 부족하여, IPCC 가이드라인(1994)의 자료를 이용하였으며 메탄전환율은 default 값인 0.22 kg CH₄/kg을 사용하였다. 아시아 지역의 대표적인 BOD5 값과 혐기적으로 처리되는 하수의 비율은 각각 0.04 kg/인·일 및 15%이다. 한편, 메탄회수는 없다고 가정하였다

생활하수 처리시 발생하는 또 하나의 온실가스는 아산화질소로서 발생량 산정식은 다음과 같다.

$$N_2O = \text{Protein} \cdot \text{FracNPR} \cdot \text{NRPEOPLE} \cdot \text{EF6} \cdot 44/28$$

Protein = 국민 1인당 연간 단백질 섭취량

FracNPR = 단백질내 질소 성분비 (default = 0.16 kg N / kg protein)

NRPEOPLE = 인구수

EF6 = 배출계수 (default = 0.01 kg N₂O-N / kg sewage-N produced)

연간 단백질 섭취량은 보건복지부의 ‘국민영양조사 결과보고서, 1997’의 일 섭취량(73.3 g/인·일)으로부터 구할 수 있으며, 총 인구수는 ‘전국통계조사(통계청)’의 자료를 이용하였다.

2) 산업폐수

산업폐수에 의한 메탄 발생량 산정식은 아래와 같으며, 각각의 산업공정에서 발생하는 메탄의 양을 합하여 총 발생량을 산정하게 된다.

$$\text{메탄발생량} = \sum [\text{각 산업별 폐수발생량} \cdot \text{BOD5} \cdot \text{혐기성 상태에서 처리되는 비율} \cdot \text{MCF} - \text{메탄 회수량}]$$

위의 식에서 각 산업별 오염물질 배출량(폐수발생량 X BOD5)은 ‘공장폐수의 발생과 처리(환경부)’에 나와 있으며, 혐기적 처리비율 및 메탄 회수량은 생활하수와 같은 가정이 적용되었다. IPCC 가이드라인(1994)에서는 산업별 오염물질 배출량 자료가 없는 나라를 위해 산업별 BOD5 값을 default 값으로 제시하고 있으며, 국내 자료와의 비교를 위해 오염물질 배출량을 폐수발생량으로 나누어 국내의 산업별 BOD5를 계산하였다. 통계자료의 이용이 가능한 1986년부터 1998년까지의 BOD5 및 IPCC 가이드라인의 값을 <표 I-20>에 정리하였다. 국내의 경우, 연도별로 BOD5가 많은 편차를 보이고 있으나, 전체적으로 IPCC 가이드라인의 값보다 매우 낮은 농도를 보이며, 따라서 폐수의 경우, IPCC 가이드라인의 수치를 이용할 경우, 온실가스 발생을 과대하게 예측할 수 있다는 위험성이 있다할 수 있겠다.

<표 I-20> 국내의 업종별 BOD 농도 및 IPCC default 값

(단위 : mg/ℓ)

친환경적 자원순환형 정책

업종	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1993	1994	1995	1996	1997	1998	평균	IPCC
산업용 화학	502.6	521.5	540.5	675.0	724.0	1305. 1	705.2	712.5	693.2	689.3	559.6	939.1	714.0	1000
기타 화학	413.8	1209. 1	1037. 7	1397. 1	830.2	904.0	960.1	986.8	1028. 6	483.7	465.8	415.9	844.4	2000
고무 플라스틱	505.1	97.6	216.6	225.6	250.9	169.7	279.9	322.6	255.6	221.6	255.3	307.6	259.0	1000
제1차 금속	50.7	11.6	1.1	55.6	2.3	17.2	100.8	100.0	105.1	120.9	167.4	157.7	74.2	1000
조립 금속	117.8	179.1	139.5	108.3	209.1	31.9	123.1	118.5	123.3	135.2	394.6	259.6	161.7	2000
석유 정제	112.1	108.9	213.1	192.1	225.5	224.5	37.1	115.5	129.7	142.3	138.7	199.8	153.3	4000
가죽 모피	1604. 1	1674. 5	1676. 2	1851. 5	1804. 4	1807. 6	1839. 6	1921. 3	1880. 4	1933. 9	2009. 5	1976. 9	1831. 7	2000
식료품	906.7	1690. 4	1655. 6	1120. 7	950.9	961.6	1043. 6	894.8	921.5	1117. 9	1709. 4	1687. 3	1221. 7	35000
해산물 판매	1138. 0	1017. 6	1001. 8	1177. 8	1255. 2	792.4	770.7	758.2	820.0	639.2	778.2	690.4	903.3	2000
음료품	5685. 0	3556. 5	3400. 0	7338. 7	5330. 3	8210. 1	4036. 3	3674. 5	3259. 9	3336. 5	3102. 1	2898. 7	4485. 7	35000
섬유	365.1	396.5	432.8	512.4	1644. 8	486.4	635.9	618.0	604.9	717.4	691.2	688.6	649.5	1000
종이 담배	424.3	620.7	618.5	732.3	1010. 9	701.2	780.6	834.4	879.1	900.8	908.1	899.2	775.9	4000
비금속 광물	85.4	95.8	93.4	28.7	62.4	39.2	60.6	64.3	68.9	137.4	108.9	138.3	81.9	2000
운수 수선	63.7	142.7	128.2	62.1	416.1	9.2	239.0	191.1	192.9	171.3	159.8	105.2	156.8	2000
세탁업	173.4	165.6	189.9	227.5	266.1	177.2	182.7	192.5	248.3	316.1	330.5	299.9	230.8	2000
석탄 광업	16.6	9.3	7.4	18.3	80.6	36.6	45.7	30.2	92.2	92.1	106.9 1	112.0 1	48.7 ²	2000
금속 광업	464.9	511.7	507.2	685.1	638.9	1.0	100.5	145.7	181.1	184.7	-	-	342.1	2000
기타 광업	71.9	141.3	155.9	231.3	37.1	0.0	141.9	104.0	87.6	90.1	-	-	106.1	2000
인쇄 출판	1728. 3	1781. 2	1737. 4	1947. 0	749.7	108.0	2318. 2	3286. 9	1365. 7	1180. 8	209.5	-	1367. 7	2000
사진 처리	151.8	269.0	255.6	1280. 0	713.9	70.6	5569. 7	4382. 8	-	-	17.5	6.9	1271. 8	2000
사회 서비스	209.5	211.5	167.2	161.2	808.7	165.9	248.6	369.9	310.0	312.6	-	-	296.5	2000
축산	3856. 3	4449. 4	4300. 3	3500. 7	5966. 6	5522. 6	-	-	-	-	-	-	4599. 3	2000
전기	43.2	30.9	30.8	20.9	18.2	2.2	40.1	18.7	17.8	92.2	-	-	31.5	2000
폐수 처리업	-	-	12.4	291.3	126.5	78.3	375.9	918.3	1300. 0	1066. 4	2889. 6	1589. 0	864.8	2000
공통 시설	-	-	-	-	580.6	1152. 1	-	-	-	-	-	-	866.4	2000
전기 전자	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75.8	147.4	111.6	2000
병원	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	315.3	336.4	325.8	2000
발전수도사업	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	224.7	405.5	315.1	2000
기타	272.4	362.5	319.1	404.7	32.9	37.3	147.5	105.1	791.9	531.9	285.9	213.0	292.0	2000
총계	239.0	259.9	206.0	306.0	312.7	284.5	353.9	358.5	335.7	354.6	545.9	646.3	350.3	2000

주) 1. 1997년 이후는 석탄광업, 금속광업, 기타광업을 통합하여 광업·토사석 채취 업종으로 분류

2. 1997년 이후의 석탄광업 항목은 BOD 평균값 계산에서 제외

참고문헌

장현준 등, 기후변화협약 대응 실천계획 수립을 위한 연구, 산업자원부, 1998