

## 폐기물 소각부문 온실가스 배출량 현황 및 전망

간순영 · 홍지형\* · 이수빈\* · 한영지

강원대학교 환경과학과 · \*국립환경과학원 대기총량과

### Estimation and Projection of Greenhouse Gas Emissions from Waste Incinerators in Korea

Sun Yeong Kan · Ji Hyung Hong\* · Su Bin Lee\* · Young Ji Han

Department of Environmental Science, Kangwon National University

\*Air Pollution Cap System Division, National Institute of Environmental Research

#### 1. 서론

우리나라의 온실가스 배출량은 현재 배출량 기준으로 세계 10위이며, 1990년 대비 배출량 증가 백분율 기준으로 OECD 국가 중 1위에 위치하고 있다.<sup>1)</sup> 따라서 2012년까지는 온실가스 감축의무가 없는 상태이나, 제 2차 공약기간이 시작되는 2013년 이후부터는 온실가스 감축 의무대상 국가로 참여하는 것이 불가피 할 것으로 판단되며 미국과 일본 등으로부터 2008년부터 자발적 참여를 강력히 요구받고 있는 실정이다. 이러한 전망을 토대로 기후변화협약 내용의 이행에 따른 국가적 부담을 최소화하고 실리를 추구할 수 있는 적극적이고 능동적인 대처방안을 강구할 필요성이 절실한 시점이다. 폐기물 부문에서는 현재 매립으로 인한 온실가스 배출량이 가장 큰 비중을 차지하고 있지만(매립: 67%, 소각: 28%, 하폐수: 5%),<sup>2)</sup> 국가 폐기물 관리정책<sup>3)</sup>에 의해 소각 비율이 점차 증가하는 추세이다. 따라서 소각부문으로부터의 온실가스 배출량의 정확한 산정이 필수적이며, 정밀한 온실가스 배출통계체제가 요구되고 있다. 폐기물 소각에 의해 발생하는 온실가스는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 메탄(CH<sub>4</sub>)으로 알려져 있다.<sup>4)</sup> 그러나 메탄의 경우 고온에서 일정한 소각시간을 유지하는 현재 소각 조건에서는 발생량이 미미하여 소각에서의 메탄 발생량은 고려하지 않고 있으며, 일반적으로 CO<sub>2</sub>배출이 N<sub>2</sub>O보다 더 중요하게 다뤄지고 있다. 또한 비생물계 폐기물의 소각에 의한 CO<sub>2</sub>만 온실가스로 간주하고, 생물계 폐기물에 의한 CO<sub>2</sub>는 자연계에서 순환 과정을 통해 동화 재이용되는 것으로 간주하여 온실가스 산정에서 제외하고 있다.<sup>5)</sup>

우리나라에서 시행된 기존의 소각부문 온실가스 배출량 연구는 사업장폐기물이 가장 많은 CO<sub>2</sub>를 배출함에도 불구하고 사업장 폐기물을 제외하고 산정하여 과소평가되거나,<sup>6)</sup>

생물계 폐기물까지 포함시켜 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하여 과대평가를 가져왔다.<sup>7)</sup> 혹은 단시간 동안 일부 소각장의 CO<sub>2</sub> 실측 농도를 바탕으로 산정하였는데, 소각장으로 유입되는 폐기물은 성상과 소각조건이 수시로 변하기 때문에 단시간 동안 측정된 CO<sub>2</sub> 배출량은 잘못된 정보를 전달할 가능성이 크다.<sup>8)</sup> 따라서 온실가스 배출량을 정확히 산정하기 위해서는 소각되는 폐기물의 양뿐만 아니라 성상을 정확히 파악하고 성상별 활동도 자료의 신뢰성이 확보되어야 한다.

본 연구에서는 소각에 의해 발생하는 온실가스 배출량을 산정하기 위해 산정방법에 적용되는 변수들을 고찰하고, IPCC 지침서<sup>9)</sup>에서 제시한 산정 방법을 이용하여 온실가스 배출량을 산정하였으며, 이를 소각장에서의 직접 측정량과 비교하였다. 또한 향후 폐기물 소각에 의해 발생하는 온실가스 배출량을 전망해보고, 소각 부문 온실가스 배출량을 저감시키기 위해 여러 정책을 기반으로 하는 시나리오를 작성하여 각 시나리오에 따른 온실가스 저감 잠재력을 평가해보았다. 이를 통해 다양한 국내외 정책 및 온실가스 저감 기술의 상대적 중요성을 파악하고자 하였다.

#### 2. 연구 방법

##### 2.1. 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 산정방법

IPCC는 소각에 의한 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 산정식을 식 (1)과 같이 제시하였다.<sup>5)</sup> 이전의 Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories<sup>4)</sup>에서 제시한 산정식과의 가장 큰 차이점은 2006년 보고서에서는 소각되는 폐기물 중 건조물질만을 대상으로 이산화탄소 배출량을 산정한다는 점이다. 폐기물은 그 성상에 따라서 수분 함유율이 크게 달라지며, 사실상 폐기물에 함유된 수분의 양은 CO<sub>2</sub> 배출량 산정할 때 감해주어야 정확한 CO<sub>2</sub> 배출량을 계산할 수 있다. 또한 각 변수에 대한 보다 더 상세한 기본값이 제시되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 2006년 IPCC 산정식을 이용하여 온

E-mail: youngji@kangwon.ac.kr

Tel: 033-250-8579

Fax: 033-251-3991

실가스 배출량을 산정하였다.

$$CO_2 = \sum(IW_i \times dm_i \times CF_i \times FCF_i \times Eff_i \times OX \times 44/12) \quad (1)$$

여기서,  $i$ 는 폐기물의 형태, 즉 생활폐기물, 일반사업장 폐기물, 건설폐기물 또는 지정폐기물을 뜻하여,  $IW_i$ (Amount of incinerated waste of type  $i$ )는  $i$  형태의 폐기물 소각량,  $CF_i$ (fraction of carbon in the dry matter)는  $i$  형태의 폐기물 중 건조물질 내 탄소함량 비,  $FCF_i$ (Fraction of fossil carbon in waste of type  $I$ )는  $i$  형태의 폐기물 중 화석연료에서 기인한 탄소 함량 비,  $dm_i$ (dry matter content in the waste (wet weight) incinerated)는 폐기물의 구성성분  $i$  중 건조물질의 함량 비(%),  $Eff_i$ (Burn out efficiency of combustion of incinerators for waste of type  $I$ )는 연소 효율,  $OX$  (Oxidation factor)는 산화율이다.

### 2.2. 아산화질소( $N_2O$ ) 배출량 산정방법

소각 시설에서의 아산화질소의 배출량은 폐기물 양과 배출 계수를 곱하여 산정하며(식 (2)), 폐기물 종류별 배출 계수는 기존의 연구 자료인 환경부<sup>9)</sup>에서 참조한 값을 사용하였으며, Table 1에 나타내었다.

$$N_2O = \sum(IW_i \times EF_i) \times 10^{-6} \quad (2)$$

여기서,  $IW_i$ 는 폐기물 종류  $i$ 의 소각된 양(Gg/yr),  $EF_i$ (Aggregate  $N_2O$  emission factor for waste of type  $i$ )는  $N_2O$ 의 배출 계수(kg  $N_2O$ /Gg)이다.

### 2.3. 실측 방법

이산화탄소 실측 방법은 조사대상 사업장 선정부터 이루어진다. 조사대상 사업장은 국립환경과학원의 대기배출원 및 배출량조사 프로그램(Source Data Management Program, SODAM)을 활용하여 선정하였다. 조사대상사업장은 국내에서 대표성을 갖는 사업장을 선정하기 위해 총 4단계의 과정을 거쳤다. SODAM에 등록된 해당업종 1~3종 사업장 조사, 연료사용량 문헌조사를 통한 대표 배출원 확인, 사업장 방문을 통해 단위공정 및 방지시설 등을 검토하여 최종적으로 선정된 대상사업장은 지정의 폐기물 처리업 3개 사업장, 지정폐기물 처리업 3개 사업장, 총 6개 사업장(9개 stack)이다. 대상사업장의 현장측정은 폐기물 소각으로부터 발생한  $CO_2$  측정이 가능한 굴뚝에 대해서 전수조사를 실시하였다.  $CO_2$ 의 분석은 최종배출구인 굴뚝에 연결하여 비분산적외선분석방법(Non-dispersive Infrared, NDIR)의 이동식 가스분석장치(Portable Gas Analyzer, PG-250)로 실시간 측정하였다. 또한,  $CO_2$  측정당시의 유량은 대기오염공정시험방법과 EPA(Air Test method 2)에서 유량측정 방법으로 규정되어 있는 피토크(계수 0.84)으로 동압을 측정하고 굴뚝의 단면적을 곱하여 산정하였다. 유량은 우리나라 대기오염 공정시험방법에 따라 굴뚝 단면적별 측정

횟수를 적용하여 다회간의 측정값이 적용되었으며, 동압의 값이 흔들리지 않는 범위에서 10분 이상 측정값을 평균한 후에 CleanSYS 자료와 자가측정자료를 비교·검증하여 적용하였다.

아산화질소 실측 방법은 시료 채취관을 굴뚝에 장착한 후 냉각장치를 연결하고, 휴대용 유량펌프를 연결한 다음 정속으로 시료를 채취하였다. 또한 배출계수를 산정하기 위해서는 배기가스의 유량, 온도, 수분량 등의 측정이 필요하므로 본 연구에서는 우리나라의 대기오염공정시험방법 또는 이와 동등한 방법을 적용하였다. 시료채취관을 통과한 배기가스는 고온 상태이므로 시료 채취시에는 시료 채취관의 손상을 방지하기 위하여, 시료채취관과 시료채취장치 사이에 수냉식 냉각장치를 장착하였다. 소각로에서 배출되는 가스포집은 배출가스의 냉각을 위한 임핀저와 휴대용펌프(SIBATA, 1100)를 이용하여 0.5 L/min 유량으로 40 min 동안 teddler bag (SKC.Ltd., USA)에 가스를 포집하였다.  $N_2O$ 의 분석은  $N_2O$ 의 표준곡선 산출을 위해 주문 제작한 499.4 ppmv의  $N_2O$  가스와 국제적으로 인정된 표준원가스(99.99%, 한국화학기술연구소)를 사용하여 검량선을 작성하였고,  $\mu$ -Electron capture detector(ECD, 전자포획형 검출기)와 Flame ionization detector(FID, 불꽃 이온화 검출기)가 장착된 Gas-chromatography (HP 6890, USA)를 이용하여 분석하였다.

### 2.4. 적용변수의 검토

#### 2.4.1. $IW_i$ (폐기물 소각량)

환경부의 전국 쓰레기 처리실적 및 계획<sup>10)</sup>과 전국 폐기물 발생 및 처리현황<sup>11)</sup> 자료에 의하면 우리나라의 폐기물은 생활폐기물, 일반사업장 폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물로 나누어지고, 각 폐기물은 더 세분화되어 성상별로 자료가 축적되어있다. 이산화탄소의 경우, IPCC 방법론에 의거하여 생물계 폐기물을 제외하고 비생물계 폐기물 소각량만을 대상으로 산정하였다.

#### 2.4.2. $CF_i$ (탄소 함유율)

기존의 IPCC 지침서<sup>4)</sup>에서는 폐기물 형태 중 도시고형 폐기물에 해당하는 값인 0.4를 기본값으로 제시하였고 지정폐기물 중 병원폐기물은 0.6, 유해폐기물은 0.5를 각각 적용하였다. 그러나 IPCC 2006 지침서에서는 폐기물 성상에 따라 건조물질 중 탄소함유비율 값에 대한 보다 더 상세한 기본값을 제시하고 있다. 그러나 본 연구에서는 기존 연구<sup>11)</sup>에서 사용한 우리나라 고유의 값을 사용하여 폐기물 성상별로 적용하였다. 생활폐기물의 경우, 고무피혁류는 62.9%, 플라스틱류는 74.5%, 기타는 30.9%를 적용하였고, 사업장배출시설계 폐기물과 건설폐기물의 경우, 폐섬유천류는 45.6%, 폐합성수지는 69.7%, 폐합성고무는 71.1%, 폐피혁은 54.6%, 기타는 30.9%를 적용하였고, 지정폐기물의 경우는 국가 고유의 값이 존재하지 않기 때문에 2000년 IPCC 지침서에서 제시한 값을 동일하게 적용하였다.

**Table 1.** Emission factors of N<sub>2</sub>O from waste incinerator for various waste type (unit : g/ton)

Composition	Emission factor
municipal solid waste	39.8
industrial waste (except for sludge)	109.57
sludge in industrial waste	408.41
construction waste	109.57
specified waste (except for sludge)	109.57
sludge in specified waste	408.41

2.4.3. FCF<sub>i</sub>(화석연료에서 기인한 탄소 함량비)

IPCC에서는 폐기물의 성상별 FCF 값을 제시하고 있으므로 본 연구에서는 배출량 산정의 불확실도를 줄이기 위해 IPCC 2006 GL에서 제시한 성상별 값을 사용하였다.<sup>5)</sup> 즉, 고무피혁류는 0.2, 플라스틱은 1, 폐섬유천류는 1, 폐합성수지는 1, 기타 폐기물 성상은 1로 가정하여 계산하였다. 2000 GPG 산정식에도 불확실도를 줄이기 위해 이 값을 동일하게 성상별로 적용하였다.

2.4.4. dm<sub>i</sub>(건조물질 함량) 및 Eff<sub>i</sub>(연소효율)

건조물질의 함량은 환경부의 “환경부문 온실가스 배출통계 DB구축”<sup>12)</sup> 자료에서 폐기물 성상별 건조물질 함량을 Table 2과 같이 제시하고 있어 본 연구에서도 폐기물 성상별로 동일한 값을 사용하였다. 건조물질의 함량은 소각시 오직 탄소를 포함한 부분만이 이산화탄소로 전환되기 때문에 수분을 감해주어야 한다. 따라서 이 값을 고려해주어야 불확실도를 줄일 수 있고, 정확한 이산화탄소 배출량을 산정할 수 있다. 폐기물 성상에 따른 소각 시스템의 연소효율은 환경부<sup>9)</sup>에서 참조하여 0.97을 일괄적으로 적용하였다.

**Table 2.** Dry matter content in various waste type

Waste composition	Dry matter fraction in % of wet weight	
Municipal solid waste	rubber/leather	91.71
	plastics	96.97
	others	64.35
	textiles	89.80
Industrial waste	plastic	96.97
	synthetic rubber	91.71
	leather	91.70
Construction waste	other	64.35
	plastics	96.97
	others	64.35
	oil	-
Specified waste	organic solvent	-
	highly polymerized compound	-
	clinical waste (organism)	-
waste	plastics	96.97
	others	64.35

- : No data

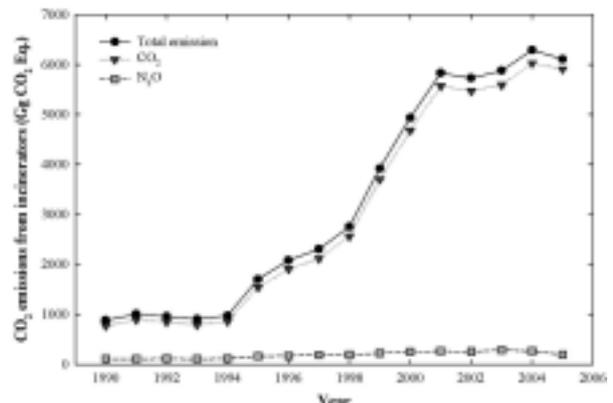
2.4.5. EF<sub>i</sub>(배출계수, 아산화질소)

환경부<sup>9)</sup> “환경정책에 의한 온실가스 저감효과·비용 분석 및 중장기 감축시나리오 개발”에서 아산화질소의 배출계수를 폐기물 종류별로 제시하고 있으며 본 연구에서도 동일한 값을 적용하였으며, Table 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소각 부문 온실가스 배출량 현황

1990년부터 2005년까지 위에서 제시한 변수들을 바탕으로 이산화탄소와 아산화질소의 배출량을 산정하였다(Fig. 1). 1990~1995년까지는 폐기물 발생량에 대한 자료가 부족하여 어느 정도 불확실성을 내포하고 있다. 아산화질소 배출량은 소각시설별로 변동이 클 수 있으나, 본 연구에서는 소각시설별 배출계수를 고려하지 않고 폐기물의 성상에 따른 배출계수만을 고려하여 IPCC 산정식을 이용하여 계산하였다. 온실가스 배출량은 1994년까지는 크게 증가하지 않다가 1995년부터 급속하게 증가하는 경향을 보였다(Fig. 1). 이는 생활폐기물, 건설폐기물 및 지정폐기물의 증가보다, 일반사업장 폐기물이 크게 증가하였기 때문으로 보인다. 그러나 2005년에는 지정폐기물의 발생량에 대한 자료가 존재하지 않고, 건설폐기물의 발생량도 2004년에 비하여 크게 감소하여 온실가스 배출량이 약간 감소하는 추세를 나타내었다. 폐기물 유형별로는 일반사업장 폐기물이 가장 큰 기여도를 나타내었다(생활폐기물 : 24%, 일반사업장 폐기물 : 48%, 건설폐기물 : 16%, 지정폐기물 : 12% ; 2004년 기준). 전반적인 추세를 보면 소각 부문 온실가스 배출량은 1990년 이후 점차 증가하여 2004년에는 1990년의 온실가스 배출량에 비해 약 7배 이상 높게 평가되었다. 따라서 폐기물 부문에서 소각이 차지하는 비율이 점차 증가하고 있어 향후 폐기물 부문 온실가스 저감을 위해서 소각 부문에 대한 온실가스 저감대책 마련이 중요한 것으로 사료된다. 또한 N<sub>2</sub>O의 경우 폐기물 성상별로 배출계수가 세분화되어 있지 않아, 정확한 배출계수가 도출될 경우 보다 신뢰도 높은 배출량을 산정할 수 있을 것으로 사료된다.



**Fig. 1.** Estimated greenhouse gas emissions from waste incinerators in Korea.

IPCC에서 제시한 방법으로 산정된 소각 부문 온실가스 배출량이 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O의 실제 측정치를 대표할 수 있는지 파악하기 위하여, 각각 9개의 소각장(CO<sub>2</sub>) 및 5개의 소각장(N<sub>2</sub>O)을 대상으로 실제 측정한 자료와 비교하였다. 소각장별 소각량을 바탕으로 실측한 이산화탄소 배출량과 IPCC 산정식에 의해 계산된 배출량은 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Fig. 2: t-test, *p-value* = 0.45, *n* = 9). 또한 산정값과 실측값의 상관성을 파악한 결과 R<sup>2</sup>값이 0.78이었고 기울기가 1.0049이었고, 통계적 차이를 살펴보기 위해 F검정을 실시한 결과 유의한 분산 차이가 없었다( $\alpha$  = 0.05, *p* = 0.36). 이러한 결과를 근거로 IPCC에서 제시한 산정식은 실측한 이산화탄소 배출량을 오차 범위 내에서 대표할 수 있다고 사료된다.

또한 본 연구에서 사용한 폐기물 성상별 N<sub>2</sub>O의 배출계수가 실측값을 대표할 수 있는지 파악하기 위하여 실측한 아산화질소 배출계수와 비교하였다(Fig. 3). 두 배출량의 결과를 살펴보면, 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(t-test, *p-value* = 0.64, *n* = 6). 그러나 Company C(stack 1)의 경우, 본 연구에서 사용한 아산화질소 배출계수로 산정된 배출량이 실측한 아산화질소 배출계수로 산정된 배출량보다 매우 큰 값을 나타내었다. Company C(stack 1)의 경우 다른 시설에 비해 오니류 폐기물의 양이 뚜렷이 높은 것으로 보아, 환경부<sup>9)</sup>에서 제시한 오니류 폐기물의 N<sub>2</sub>O 배출계수(408.42 kg/Gg-waste)가 너무 높게 책정되어진 것을 알 수 있다. 반면, Company F의 경우에는 소각된 폐기물 양에 비해 측정된 N<sub>2</sub>O 배출량이 매우 높아, 유도된 배출계수(852.4 kg/Gg)가 환경부에서 제시한 N<sub>2</sub>O 배출계수(Table 1)에 비해 매우 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 소각 폐기물의 양이 잘못 기록되었을 가능성에 기인한다.

본 연구에서 실측된 소각장의 개수와 시료의 개수가 정확한 통계적 결론을 유추할 수 있을 정도로 크지 않기 때문에, 신뢰성 있는 통계적 분포도를 얻기 위해서는 앞으로 광범위한 측정이 필요하다. 배출량 측정 자료로부터 배

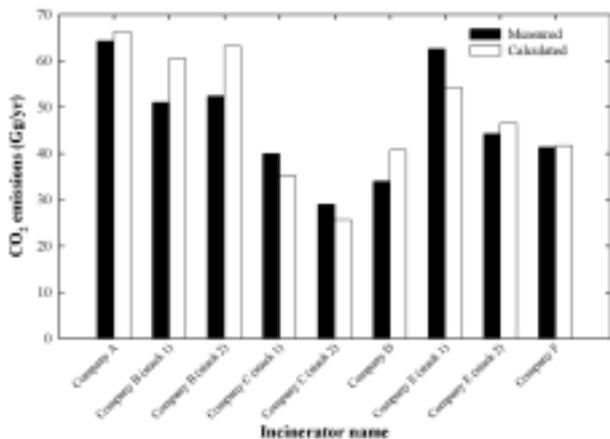


Fig. 2. Comparison between calculated and measured emission rates for carbon dioxide(CO<sub>2</sub>).

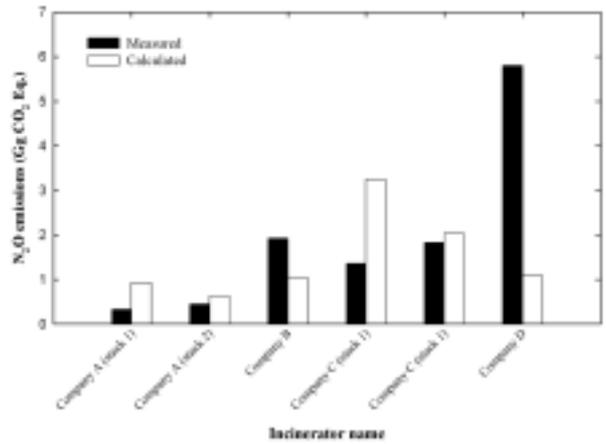


Fig. 3. Comparison between calculated and measured emission rates for nitrous oxide(N<sub>2</sub>O).

출량 산정에 필요한 폐기물 성상별뿐만 아니라 소각 방식별로 배출계수가 더 세분화되어 제시되는 것이 절실하게 필요하다.

### 3.2. 시나리오별 온실가스 배출량 전망

우리나라는 폐기물의 종합적인 관리를 위하여 국가폐기물종합계획에 근거하여 폐기물을 관리한다. 정책으로는 크게 폐기물 최소화정책, 폐기물 자원화 정책, 폐기물의 안전관리를 위하여 소각시설기반을 구축하고 소각시설의 다이옥신 등 오염물질 배출기준 정비 등을 추진, 폐기물관리 인프라 확충 등이 있다. 세부적으로 폐기물 최소화 정책으로는 쓰레기 종량제 실시, 1회용품 규제, 포장폐기물 및 음식쓰레기 감량화 등의 시책을 개발하여 추진하고, 폐기물 자원화 정책으로는 재활용 산업기반 조성 및 지원 정책, 예치금 및 부담금제 실시 등이 있으며, 폐기물 관리기반을 전반적으로 정비하는 시책을 추진하고 있다. 이외에 소각 부문에서 온실가스를 저감하기 위해 국내외에서 추진하고 있는 정책, 사업 그리고 기술 중 우리나라에서 추진 중이거나 적용 가능한 정책이나 기술에 따른 온실가스 잠재력을 평가하였다.

#### 3.2.1. 기준 시나리오(Business As Usual ; BAU)

향후 온실가스 배출량을 예측하기 위한 기준 시나리오는 제 2차 국가 폐기물 관리 종합계획<sup>2)</sup>에 의거하여 설정하였다(Table 3). 생활폐기물의 경우 2005년의 1인당 폐기물 발생량은 1.03 kg/인·일으로, 2008년 이후에는 1.04 kg/인·일으로 가정하고, 일반 사업장 폐기물 및 사업장 배출시설계 폐기물의 경우 폐기물이 연간 3%씩(2005년은 5%) 증가하는 것으로 가정하고, 건설폐기물의 경우는 연간 5.5%씩 폐기물이 증가하는 것으로 가정하였다. 이렇게 전망된 폐기물 종류별 발생량을 기초로 2004년의 소각비율이 계속 유지된다고 가정하여 생활폐기물, 일반사업장 폐기물, 사업장 배출시설계 폐기물, 그리고 건설 폐기물의 발생량에 각 폐기물의 2004년도 소각율인 15.7%, 8.3%,

**Table 3.** Assumptions applied in BAU scenario(unit:ton/day)

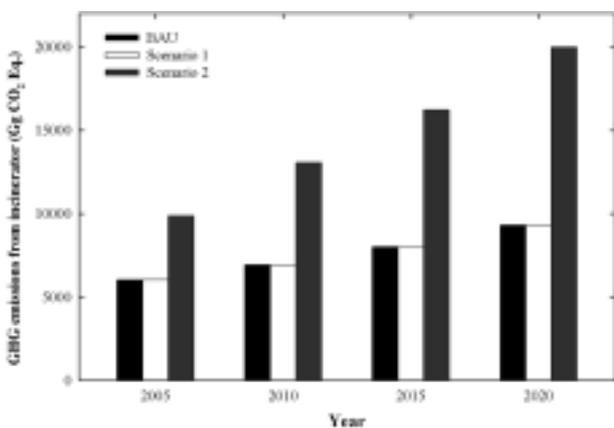
	2005	2008	2011
Total amount of waste	291,440	329,541	370,909
Municipal solid waste	50,750	51,829	52,743
- per capita generation (kg/day · per capita)	1.03	1.04	1.04
General industrial waste	240,690	277,712	318,166
- industrial waste	142,575	162,006	183,239
- construction waste	87,863	103,570	120,733
- specified waste	10,252	12,136	14,194

6.7%, 2.0%를 적용하여 폐기물 종류별 소각량을 전망하였다. 이를 토대로 연구방법에서 제시한 적용변수를 입력하여 IPCC가 제시한 산정 방법으로 2005년부터 2020년까지 온실가스 배출량을 전망하였다. 아산화질소 배출량을 전망하기 위해 기본적으로 사용되는 폐기물 소각량은 이산화탄소 배출량 전망에서 가정한 소각량을 동일하게 사용하였으며, 또한 오니류와 오니류를 제외한 폐기물을 각각 나누어 2004년의 소각비율을 적용하여 소각량을 예측하였고, 각각의 배출계수를 입력하여 아산화질소 배출량을 산정하였다.

기준 시나리오를 사용한 온실가스 배출량 전망 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이산화탄소와 아산화질소 모두 사업장 배출 시설계 폐기물의 소각량이 많이 발생하여 이산화탄소 배출량이 빠르게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 소각 부문의 온실가스 배출량 저감을 위해서는 일반사업장 폐기물과 건설폐기물의 발생량을 효율적으로 관리하는 것이 중요할 것으로 사료된다. 또한 아산화질소의 온난화지수가 이산화탄소에 비해 310배 높음에도 불구하고 예측된 배출량이 아주 적어 소각 부문에서는 이산화탄소 배출량의 기여가 높을 것으로 예측되었다.

3.2.2. 시나리오 1: 폐기물 감량화 정책

환경부는 폐기물 발생량을 원천적으로 감량시키고 불가



**Fig. 4.** Estimation of future greenhouse gas emissions from waste incinerators using by BAU scenario, scenario 1, scenario 2.

피하게 발생된 폐기물은 재활용하기 위하여 1회용품 사용규제 강화 및 쓰레기 종량제의 개선에 힘쓰고 있다. 1994년 3월 일회용품 사용규제제도를 도입한 이후 단계적으로 규제내용을 강화하였다. 또한 1995년 1월부터 쓰레기를 버린 양 만큼의 비용을 부담하게 하는 쓰레기종량제를 도입하여 재활용품을 최대한 분리배출 하도록 유도하고 있다. 시나리오 1은 이러한 폐기물 감량화 정책이 반영된 것으로, 환경부는 폐기물을 감량화 또는 최소화하는 정책을 적극적으로 추진하여 폐기물 발생량을 원천적으로 감량시키는 것을 목표로 하고 있다.<sup>3)</sup> 따라서 시나리오 1은 국가 폐기물 관리 종합 계획<sup>3)</sup>에 근거하여 폐기물 발생량 감소로 인한 온실가스 배출량을 전망하였고, 감량화 정책의 저감잠재력을 평가하였다. Table 4에 의거한 시나리오 1의 폐기물 발생량은 생활폐기물의 경우 2005년 97%를 시작으로 매년 1%씩 폐기물의 발생량이 감소하는 것으로 가정하였으며 2012년에 90%를 기점으로 2020년까지 90%가 계속 유지된다고 가정하였다. 일반 사업장 폐기물의 경우 2005년 3%를 시작으로 매년 1%씩 증가하여 2011년에는 8%로 2020년까지 8%를 유지하는 것으로 가정하였고, 폐기물 종류별 소각비율은 2004년의 소각비율을 그대로 유지하였다. 이러한 가정을 적용하여 폐기물 종류별 소각량을 추정하였으며, 이를 바탕으로 IPCC 산정식을 이용하여 2005년에서 2020년까지의 온실가스 배출량을 전망하였다 (Fig. 4).

시나리오 1에 따른 온실가스 배출량 전망은 2005년에는 약 6,025 Gg-CO<sub>2</sub>로 2020년에는 9,305 Gg-CO<sub>2</sub>로 나타났다. 전망된 온실가스 배출량 전망 결과를 바탕으로 온실가스 배출량 잠재력을 평가하였다. 시나리오 1을 통해 기대되는 온실가스 배출량 저감 잠재력은 BAU 대비 2005년에는 약 93 Gg-CO<sub>2</sub>에서 점점 증가하는 추세를 보이며, 2020년에는 약 210 Gg-CO<sub>2</sub>의 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

3.2.3. 시나리오 2: 폐기물 처리구조 변화 정책

시나리오 2는 폐기물 처리구조의 변화가 반영된 것으로, 발생된 폐기물을 처리하는 과정에서 온실가스 배출량이 가장 많은 매립의 비율을 줄이고 재활용이나 소각의 비율을 늘리는 것이다. 국가폐기물관리종합계획<sup>3)</sup>에서 제시하는 소각 목표율을 적용하여 온실가스 배출량을 전망하였다 (Table 4). 생활폐기물과 일반 사업장 폐기물의 발생량은 현재의 수준을 그대로 유지한다고 가정하였고, 생활폐기물의 소각율은 2005년 23%를 시작으로 2011년 30%까지 증가하다가 이후 31% 수준을 유지하는 것으로 가정하였다. 일반 사업장 폐기물의 소각율은 2005년 6.9%에서 2011년

**Table 4.** Assumptions applied in scenario 1 and scenario 2

Municipal solid waste	2005 2008 2011			General industrial waste	2005 2008 2011		
Generation (kg/day · per capita)	0.97	0.94	0.91	Composition(%)	3	6	8
Target (%)	23	28	30	Target(%)	6.9	7.5	7.8

7.8%까지 증가하다 이후 8%를 유지하는 것으로 가정하였다. 이와 같은 가정을 기초로 예측된 폐기물 소각량의 결과를 바탕으로 2005년에서 2020년까지의 온실가스 배출량을 전망하였다(Fig. 4). 시나리오 2에 따른 온실가스 배출량은 2005년에는 9,506 Gg-CO<sub>2</sub>로 나타났고, 2020년에는 19,215 Gg-CO<sub>2</sub>로 크게 증가하였다. 시나리오 2에 따른 온실가스 전망 결과를 통해 저감 잠재력을 평가한 결과 온실가스가 감소되기 보다는 오히려 증가하여 BAU 대비 2020년에는 9,904 Gg-CO<sub>2</sub>가 더 증가하는 것으로 나타났다. 이는 폐기물 처리구조 변경에 따라 소각비율이 상대적으로 증가하여 소각을 통해 배출되는 온실가스 양이 증가하였기 때문이다. 그러나 폐기물 처리 구조 변화 정책에 의해 매립 부문으로부터 배출되는 메탄의 양이 감소될 것이므로, 전체 폐기물 부문 온실가스 배출량은 매립 및 하·폐수 부문을 모두 포함하여 평가되어야 할 것이다.

3.2.4. 시나리오 3: 에너지 회수

시나리오 3인 에너지 회수는 열량은 높으나 재활용 소재가치가 적은 폐기물류에 대해서는 폐기물이 갖고 있는 열 에너지를 회수·이용함으로써 폐기물 부하를 줄이고 자원 이용을 극대화하는 정책이다. 따라서 폐기물이 소각될 때 생산되는 폐열은 열병합 발전소에 의해 지역 난방용으로 사용되고, 소각로에서 생성된 증기는 터빈을 돌려 전력이 생산된다. 이렇게 에너지로 활용하는 폐열의 회수율을 높임으로써 폐기물 부문 온실가스 배출량을 상당부분 감축할 수 있을 것으로 기대된다.

우리나라 생활폐기물 자원회수 시설 현황은 총 33개가 있는 것으로 조사되었고 점차 증가하고 있다. 이 소각시설에서 2003년부터 2006년까지 소각되는 양과 회수되고 있는 열 생산량을 바탕으로 감축 가능한 이산화탄소의 양을 산정하였다. 이를 위해 “기후변화 협약 대응을 위한 중장기 정책 및 전략수립에 관한 연구”<sup>13)</sup>에서 제시한 발전량에 대한 CO<sub>2</sub> 집약도 0.123 kg-C/kWh(2000년 기준)를 이용하여 소각량 1 ton당 감축할 수 있는 이산화탄소의 양을 산출하였다. 2003년부터 2006년까지의 감축할 수 있는 이산화탄소의 양은 평균 1.09 ton-CO<sub>2</sub>/ton-waste으로 산정되었으며, 여기에 폐기물 종류별 소각량을 곱하여 우리나라에서 감축할 수 있는 온실가스량을 산출하였다(Fig. 5). 소각량이 증가하는 것에 비해 열 생산량의 증가가 더 큰 것으로 나타나, 향후 소각 부문에서 배출되는 온실가스보다 감축할 수 있는 온실가스 양이 더 클 것으로 보여진다. 2010년에 감축할 수 있는 온실가스 양은 7,597 Gg-CO<sub>2</sub>으로 나타났고, 2020년에는 11,075 Gg-CO<sub>2</sub>으로 그 양이 점차 증가하였다.

우리나라의 경우 에너지 부문의 온실가스 배출량이 기타 부문에 비해 월등히 크기 때문에, 소각열로 인해 생산되는 에너지를 활용한다면 그만큼 에너지 부문의 온실가스 배출량이 저감되는 이종의 효과를 볼 수 있다. 특히 사업장 배출시설계 폐기물과 건설폐기물에서 많은 양을 감축

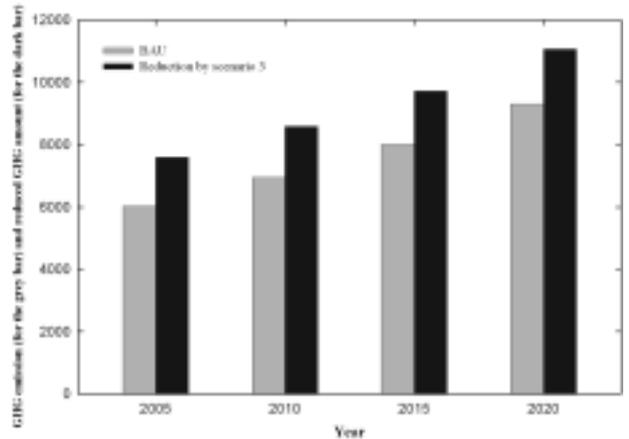


Fig. 5. Reduced amount of greenhouse gas emissions by energy recovery from waste incinerators.

할 수 있는 것으로 보인다. 그러나 2003~2006년까지의 회수된 에너지 평균 효율이 향후에도 그대로 지속된다는 가정 하에 계산을 해주었기 때문에 에너지 회수에 의해 감축할 수 있는 이산화탄소 양은 어느 정도의 불확실도를 내포하고 있다. 또한 생활폐기물의 성상은 일반사업장이나 건설폐기물의 성상과는 다르지만 자료의 부족으로 생활폐기물에서 에너지의 회수에 의해 감축되는 이산화탄소의 양을 일반 사업장폐기물과 건설폐기물에도 동일하게 감축된다고 적용하였고 또한, 지역 간 폐기물 성상 불균형에 따라 일부 지역의 소각시설에서는 소각시설을 가동할 충분한 폐기물이 공급되지 않아 소각시설의 운영 측면에서도 많은 문제가 발생하고 있어 이로 인한 대책이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결과

본 연구에서는 소각부문의 온실가스 배출량을 산정하고 향후 2020년까지의 온실가스 배출량을 전망하였으며, 또한 현재 추진 중인 정책이나 기술을 시나리오 별로 작성하여 그에 따른 저감할 수 있는 온실가스 저감 잠재력을 알아보았다.

1) 1990년부터 2004년까지 소각부문의 이산화탄소 발생량은 꾸준히 증가하고 있으며 지속적으로 증가할 것으로 전망된다. 이러한 점은 향후 소각에 의한 온실가스 배출이 환경기초시설분야에서 점차 중요한 배출원으로 자리매김할 것을 시사하고 있다. 특히 일반 사업장 폐기물의 발생량이 증가하고 있기 때문에 일반 사업장 폐기물의 소각이 주요 배출원으로 소각분야에 있어 온실가스의 저감을 위해서는 일반 사업장 폐기물의 관리가 중요할 것으로 예상된다.

2) 본 연구에서 산정값과 측정값과 비교하여 보았을 때, 통계적으로 유의한 차이가 나지 않는다는 것으로 나타나 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O 모두 실측값을 대표할 수 있다고 판단된다. 그

리나 시료의 개수와 선별 소각장의 한계로 인해 통계적 결과를 신뢰하기 어렵고, 특히  $N_2O$ 의 경우 폐기물 성장별로 배출계수가 세분화되어야 할 필요성이 있어 향후 소각장의 온실가스 배출량에 대한 광범위한 측정을 필요로 한다.

3) 또한, 시나리오 별로 온실가스 배출량과 그에 따른 저감량을 알아보았다. 시나리오 1인 폐기물 감량화 정책을 적용하였을 때는 온실가스가 저감되는 양이 점차 증가하는 것으로 나타난 반면, 시나리오 2인 폐기물 처리구조 변화 정책을 적용하였을 때는 소각율의 증가로 인해 오히려 온실가스 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 시나리오 3인 에너지 회수 기술을 적용하였을 때는 배출된 온실가스를 모두 상쇄시킬 만큼 다량의 온실가스를 감축할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 향후 소각 부문의 에너지 회수 기술은 국가 집중사업으로 투자할 만한 가치가 있는 것으로 사료된다. 예를 들어, 중·저온의 열을 전기 또는 기계적 에너지로 전환하여 난방에너지로 이용하거나, 이를 지역 냉·난방 또는 구역형 에너지사업의 열 공급망 등에 연결시켜 소비자에게 공급하는 통합 열에너지 관리 방법 구축을 고려해 볼 수 있다. 또한 열병합 발전소의 조성과 도시 설계 등의 각종 입지, 시설 설치 및 입주계획 등에서 에너지 이용을 최적화할 수 있도록 사전 환경성 검토나 환경영향평가제도 등의 협의조건에 반영하는 정책도 향후 고려되어야 한다. 소각 부문에서의 에너지 회수 기술의 적용은, 결과적으로 에너지 생산량의 감소 및 에너지 생산 효율을 높이게 되어 에너지 부문에서의 온실 가스 배출량도 상당히 감축할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. European Environment Agency, Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2005 and inventory report 2007(2007).
2. 환경부, “전국생활폐기물 소각시설 운영협의회,” (2004~2007).
3. 환경부, “제2차 국가폐기물관리종합계획,” (2002).
4. IPCC, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories(2000).
5. IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(2006).
6. 에너지경제연구원, “기후변화협약 대응 실천계획 수립을 위한 연구,” (1998).
7. 에너지경제연구원, “기후변화협약 관련 국가보고서 작성 및 대응방안연구,” (1994).
8. 환경부, “환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축,” (2002).
9. 환경부, “환경정책에 의한 온실가스 저감효과 비용 분석 및 중장기 감축 시나리오 개발,” (2006).
10. 환경부, “전국 쓰레기 처리실적 및 계획,” (1990~1991).
11. 환경부, “전국 폐기물 발생 및 처리 현황,” (1993~2005).
12. 환경관리공단, “환경부문 온실가스 배출통계 D/B구축,” (2006).
13. 에너지경제연구원, “기후변화 협약 대응을 위한 중장기 정책 및 전략수립에 관한 연구,” (2004).
14. 환경부, “생활폐기물 소각시설 운영현황,” (2004~2007).
15. 환경부, “주요선진국가의 온실가스 감축 현황 및 우리나라 온실가스 감축 가이드라인 개발,” (2007).
16. IPCC, IPCC revised 1996 guidelines for National greenhouse gas inventories(1996).