

생활폐기물 소각시설에서 배출되는 PCDDs/DFs의 배출농도 평가 및 배출계수 산출

황태웅[†] · 김삼권* · 이동훈**

환경관리공단 환경분석연구센터, *농업과학기술원 농업환경부, **서울시립대학교 환경공학부

The Estimation of TEQ Concentrations and Emission Factors for PCDDs/DFs Emitted from Stack of Municipal Solid Waste Incineration Plants

Tae-Woong Hwang[†], Sam-Cwan Kim*, and Dong-Hoon Lee**

Environmental Research & Analysis Center, Environmental Management Corporation

**National Institute of Agricultural Science and Technology*

***The Faculty of Environmental Engineering, University of Seoul, Environmental Research Complex, Gyongseo-Dong, Seo-Gu, Incheon, 404-708, Korea*

This study was performed to evaluate the emission concentrations of PCDDs/DFs (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins/dibenzo-furans) emitted from the stacks of various municipal solid waste (MSW) incineration plants and estimate emission factors considering several operation parameters. MSW incineration plants were classified into 3 groups (i.e., large, medium, and small), according to their incineration capacity per day. The average emission concentrations of PCDDs/DFs were 0.014 ng-TEQ/Nm³ in large-scale incineration plants, 1.203 ng-TEQ/Nm³ in medium-scale incineration plants, and 15.317 ng-TEQ/Nm³ in small-scale incineration plants. Emission factors for each scale of incineration plants were estimated to 0.09, 9.05, and 176.43 per tonne of waste burned, respectively. In particular, large-scale incineration plants showed the positive relationship between TEQ concentrations of PCDDs/DFs and emission factors ($R^2=0.8775$). These results can be used for the estimation of emission amounts from MSW incineration plants into ambient air.

Key words: dioxins, furans, emission factor, municipal solid waste incineration

1. 서 론

인체 및 환경에 미치는 유해성 및 잔류성, 장거리 이동성을 나타내는 대표적인 물질인 PCDDs/DFs에 대한 다양한 연구 및 저감노력은 2001년 “스톡홀름 협약 (Stockholm convention on POPs)”을 통해 국제적으로 확대되었다. 이미 알려진 바와 같이 PCDDs/DFs의 주요 배출원으로는 폐기물 소각시설, 철강산업의 소결 시설, 비금속 산업시설 등이 있으며, 우리나라에서는 1997년 폐기물관리법에서 대형생활폐기물 소각시설에서 배출되는 PCDDs/DFs의 규제를 시작하여 2007년부터 시간당 25 kg 이상의 생활폐기물 및 감염성 폐기물

소각시설에 대해서도 배출기준을 확대·설정하여 적용하고 있다.

또한, 2008년 1월부터는 ‘잔류성유기오염물질 관리법’을 제정하여 폐기물 소각시설 이외에도 제철 및 제강시설, 알루미늄 제조시설, 시멘트 제조시설 등 다양한 배출원에 대한 처리방법 및 배출기준을 제시하고 있다.

국내 폐기물 소각시설의 분류는 크게 생활, 사업장일반, 사업장지정, 감염성 폐기물로 구분할 수 있으며, 각 그룹별로 소각용량에 따라 별도의 다이옥신 배출허용 기준을 적용하고 있다. 2004년 환경부에서 발표한 다이옥신 배출원별 배출량 산정결과를 살펴보면¹⁾, 환경대기

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: tohwang@emc.or.kr

로 배출되는 PCDDs/DFs 중 폐기물 소각시설이 차지하는 배출기여도는 낮은 추정값과 높은 추정값 사이의 범위가 약 84~94%로 다량의 PCDDs/DFs가 폐기물 소각에서 기인함을 알 수 있다.

한편, 배출량 평가는 실측된 농도를 바탕으로 작성되기 때문에 지속적인 신규작성이 이루어져야 한다. 배출량 산정은 크게 Top-down Approach과 Bottom-up Approach으로 나눌 수 있으며, 실측결과가 없거나 매우 소수이고 배출계수 및 활동도 산출과 관련하여 신뢰성 있는 자료 확보가 곤란한 경우에는 대표 배출계수를 선정하여 배출량을 산정하는 Top-down Approach를 사용하게 된다¹⁾. 두 가지 접근방법 모두 배출계수의 산출이 우선적으로 수행되어야 하는데, UNEP Toolkit(2003)²⁾에서는 폐기물 소각시설 방지시설의 효율에 따라 0.5~3,500 µg TEQ/ton-waste의 범위로 배출계수를 제시하였으며, Choi 등(2008)³⁾은 50 개소의 소형 생활폐기물 소각시설(소각용량 0.2 ton/hr 미만)에서 배출되는 PCDDs/DFs의 배출계수로 평균 1,302.4(17.0~12,252.0) µg WHO-TEQ/ton-waste를 산출하였고, Chen 등(2004)⁴⁾은 중소형 소각시설이 대형 소각시설에 비해 50배 이상 높은 배출계수를 나타내는 것으로 보고한 바 있다.

따라서, 본 연구에서는 2007년 한 해 동안 법적 의무 측정된 생활폐기물 소각시설에 대하여 굴뚝을 통해 배출되는 PCDDs/DFs의 배출농도를 평가하고, 대상시설의 운전자료를 토대로 대표적으로 사용가능한 배출계수를 산출함으로써 현 수준에서의 배출량 평가 및 향후 저감 가능한 수준을 예측하기 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구대상 소각시설의 분류

국내에서 가동 중인 생활폐기물 소각시설은 2006년부터 소각용량 2.0 ton/hr 이상인 모든 시설에 대해 0.1 ng I-TEQ/Nm³의 대기 배출기준이 설정되어 이에

따라 운영 중에 있으며, 이 미만의 소각용량에 대해서는 설치 및 가동 개시일을 기준으로 각기 다른 배출기준을 적용하고 있다. 본 연구에서는 2007년 한 해 동안 측정된 의무 및 준공검사를 목적으로 측정된 분석결과를 대상으로 하였으며, 생활폐기물 소각시설을 국내 배출기준에 따라 분류하되, 2006년부터 새로이 규제 대상이 되었던 0.2 ton/hr 미만의 시설을 별도로 설정하여, 소각능력 2.0 ton/hr 이상을 대형, 0.2 이상 2.0 ton/hr 미만인 시설을 중형, 0.025 이상 0.2 ton/hr 미만인 시설을 소형 소각시설로 분류하였다. Table 1에는 현재 적용되는 배출기준을 각 분류에 따라 정리하였고, Table 2에는 폐기물 소각시설 분류별로 연구대상 시설 수 및 평균 설계 소각용량 및 실제 가동량을 나타내었다.

2.2. 시료채취 및 분석방법

시료채취 및 분석은 대기오염공정시험방법 ES 01504.1(2007.10.01 개정)에 따라 실시하였다. 시료채취는 4 hr, 3.0 Nm³ 이상을 등속 흡인하였고, 이때 시료채취의 정도관리를 위해 ³⁷Cl₄-2,3,7,8 TeCDD 2 ng (EPA-1613CSS, Wellington Inc., Canada)을 XAD-2 수지에 주입하였다. 시료채취 시 배출가스의 유량 및 유속, 측정점 온도 등을 5분 간격으로 측정하였으며, 연소가스 분석기를 통해 O₂, CO₂, CO, SO_x, NO_x를 1분 간격으로 연속적으로 측정하였다.

시료채취가 종료된 후, 채취된 흡수액은 갈색 유리병에 옮겨 담고, 시료채취에 사용된 임핀저, 흡인관, 노즐 등은 톨루엔과 메탄올을 이용하여 세척, 회수하

Table 1. Emission Limits of PCDDs/DFs for MSW Incineration Plants in Korea

Incineration Capacity (ton/hr)	[Unit : ng I-TEQ/Nm ³]	
	New Facility Standards	Existing Facility Standards
≥ 2.0	0.1	0.1
0.2 ≤ x < 2.0	5	10
0.025 ≤ x < 0.2	5	10

Table 2. Classification of MSW Incineration Plants and the incineration capacity to be studied

Classification	Incineration Capacity (ton/hr)	No. of facilities	Designed capacity* (ton/hr)	Actual Throughput (ton/hr)
Large Scale	x ≥ 2.0	53	6.9 (8.3)	5.4 (4.7)
Medium Scale	0.2 ≤ x < 2.0	43	0.9 (0.8)	0.8 (0.8)
Small Scale	0.025 ≤ x < 0.2	13	0.1 (0.1)	0.1 (0.1)

* average (median)

여 흡수액과 혼합한 다음 냉장보관 하였으며, 원통여지와 XAD-2 수지는 전처리 시까지 별도로 냉장보관 하였다.

흡수액 및 세정액은 유리섬유 여지로 여과하여, 입자상 물질은 원통여지 및 XAD-2 수지와 함께 16시간 이상 Soxhlet/Dean-stark 추출장치를 이용하여 톨루엔 300 ml로 추출하였고, 여과액은 톨루엔을 이용하여 2회 반복하여 추출하였다. 고상 및 액상 추출액을 혼합하여 회전증발 농축기로 농축한 다음, 일부를 분취하여 PCDDs/DFs 분석용 시료로 하고, 여기에 정제용 표준물질로 15종의 ¹³C-labelled PCDDs/DFs 1ng(EPA-1613LCS, Wellington Inc., Canada)을 주입하였다. 시료의 정제는 황산처리와 실리카겔컬럼 정제를 단순화시킨 다층실리카겔컬럼과 알루미늄나켈럼의 순으로 실시하여 시료 중에 존재하는 유기탄소, 색도유발물질 및 PCBs(polychlorinated biphenyls)와 같은 방해물질을 제거하였으며, 정제가 충분치 않은 경우 추가적으로 활성탄컬럼으로 정제하였다⁵⁾.

정제가 끝난 시료는 실린지용 표준물질로 2종의 ¹³C-labelled PCDDs/DFs 1ng(EPA-1613ISS, Wellington Inc., Canada)을 주입한 다음, 최종적으로 약 50 µl 정도로 농축하여 고분해능 가스크로마토그래피/고분해능 질량분석기(Autospec Ultima, Micromass, UK)로 분석하였다. 기기의 분석조건은 Table 3에 나타내었다. 분석대상 물질은 독성등가 환산계수가 정해진 17개의 2,3,7,8 치환이성체로 얻어진 농도를 산소농도 12%로 보정한 후에 국내에서 적용하고 있는 I-TEFs(International Toxicity Equivalency Factors)를 이용하여 TEQ(Toxic Equivalents as a 2,3,7,8-TeCDD) 농도로 산출하였다.

Table 3. Analysis Condition of HRGC/HRMS for PCDDs/DFs

HRGC	
Column	SP-2331 (60 m × 0.32 mm × 0.2 µm)
Oven Temp.	120°C (1 min, 10°C)→200°C (2 min, 3°C/min)→260°C(20 min)
Injector Temp.	275°C (1.0 µl injection)
Injection mode	Split/Splitless
HRMS	
Resolution	above 10,000 (10 % valley)
Ionization	EI+, 34 eV
Trap Current	300 µA
Ion chamber Temp	270°C

2.3. 배출계수 산출방법

배출계수는 소각대상 폐기물의 종류 및 성상, 폐기물 소각로의 형식 및 운전방식, 방지시설의 구성, 운영능력 등에 따라 큰 차이를 나타내며, 배출계수가 크다고 반드시 배출량이 많은 것은 아니기 때문에, 배출량 평가를 위해서는 활동도와의 상호관계 속에서 검토되어야 한다. 그러나, 배출계수가 큰 경우 국지적인 영향이 크게 나타날 수 있으므로 그에 대한 평가도 신중하게 이루어져야 한다.

배출계수는 단위 소각대상 폐기물에 대한 배출량(µg 또는 ng/ton-waste)으로 표현하는 것이 일반적인 방법이며, 실측된 다이옥신 농도와 측정시의 배출가스 유량 및 소각 폐기물량, 산소농도를 바탕으로 다음의 식에 따라 작성된다.

$$EF = C_{sample} \times V_{emission\ gas} \div M_{waste\ burned}$$

여기서,

EF : Emission Factor (ng/ton-waste)

C_{sample} : PCDDs/DFs TEQ concentration for emission gas (ng I-TEQ/Nm³)

V_{emission gas} : Flow rate of emission gas (Nm³/hr)

M_{waste burned} : Incineration weight for waste (ton/hr)

배출계수 작성 시 위 식의 인자별로 어떠한 값을 사용하는가에 따라 다양하게 나타나는데, 현행 잔류성유기오염물질관리법 시행규칙 [별표 6]에 따르면, 실측 다이옥신 농도는 측정값 중 최대치, 배출가스 유량은 일 최대치 또는 시설용량, 폐기물 소각량은 최대 일일활동도를 적용하여 다이옥신 발생량을 평가하도록 되어 있다. 이는 높은 수준의 배출량 평가를 실시함으로써 환경 중으로 배출되는 다이옥신의 배출저감 의지가 반영된 것으로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 2007년 한 해 동안 측정된 결과를 기준으로 배출계수를 작성하고자 하였기 때문에, 다이옥신 실측과 동시에 측정된 평균 배출가스 유량과 측정당일의 평균 소각량을 기초로 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소각시설 규모별 다이옥신 농도 평가

생활폐기물 소각시설에서 배출되는 PCDDs/DFs의 배출농도와 소각시설의 규모와의 상관성을 평가하기 위

해 대형, 중형, 소형 소각시설로 구분하여 각각의 농도를 비교하였다. 그 결과, 2.0 ton/hr 이상의 대형 소각 시설에서는 평균 0.014 ng I-TEQ/Nm³으로 조사되어 현 수준에서 이미 최적저감기술(Best Available Technology/Best Environmental Practice, BAT/BEP)이 적용되고 있는 것으로 평가되었다. 또한, 0.2 이상 2.0 ton/hr 미만의 중형 소각시설에서는 평균 1.203 ng I-TEQ/Nm³, 0.025 이상 0.2 ton/hr 미만인 소형 소각 시설에서는 평균 15.317 ng I-TEQ/Nm³인 것으로 조사되어 소각용량에 따라 큰 차이를 나타내었다.

그러나, 각 분류별 중간값으로 평가된 TEQ 농도를 비교해 보면, 대형, 중형, 소형 소각시설에서 각각 0.010, 0.179 및 1.900 ng I-TEQ/Nm³으로 나타나, 대형을 제외한 중형 및 소형 소각시설에서는 평균값에 비해 크게 낮은 농도를 나타내었다. 이러한 결과는 상대적으로 높은 농도를 나타내는 일부 소각시설에 의한 영향이 평균값을 높게 만든 것으로 판단된다.

국내에서는 1990년대 후반부터 소각시설에서 배출되는 PCDDs/DFs의 배출농도 평가가 진행되어져 왔는데, 김 등(2005)⁶⁾, 김 등(2006)⁷⁾, 윤(2003)⁸⁾은 대형 생활폐기물 소각시설의 배출가스 중 PCDDs/DFs 농도는 2000년 이후 꾸준히 저감되어 0.1 ng I-TEQ/Nm³을 훨씬 하회하는 낮은 농도 수준으로 검출되고 있음을 보고하고 있다.

E. Abad 등(2000)⁹⁾은 500 ton/day인 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 PCDDs/DFs의 물질수지에 대한 연구에서, 평균 0.004 ng I-TEQ/Nm³의 측정결과를 제시하였다. 또한, M. Giugliano 등(2002)¹⁰⁾은 16.67 ton/hr의 소각용량을 가진 생활폐기물 소각시설의 대기 오염방지시설별 PCDDs/DFs의 배출거동을 평가하였는데, 여과집진시설의 집진효율이 99.9% 이상임에도 불구하고 PCDDs/DFs의 농도저감은 약 94% 내외로써, 연돌을 통한 최종배출가스 중 PCDDs/DFs 농도 측정 결과 0.034 ng TEQ/Nm³정도가 배출되는 것으로 보고하고 있다.

한편, D. Shi 등(2008)¹¹⁾은 6.25 ton/hr의 소각용량을 가진 생활폐기물 소각시설 배출가스 중 PCDDs/DFs 농도를 0.12 및 0.10 ng TEQ/Nm³으로 제시하였는데, 최실투입비 임에도 불구하고 0.1 ng TEQ/Nm³을 만족시키지 못한 가장 큰 이유로 투입폐기물 성상 및 그에 따른 운영의 어려움을 들고 있다.

또한, 국내 폐기물 소각시설에 대한 배출기준이 '06년부터 기존시설에 대해 더욱 엄격하게 적용되고 있는

점을 고려하면, 2.0 ton/hr 미만의 시설도 대부분 배출 기준을 충족시키고 있음을 알 수 있다. Fig. 1은 각 규모별 PCDDs/DFs TEQ 농도를 Box 그림으로 나타낸 것으로, 위로부터 상위 10% 값, 3/4분위값, 중간값, 1/4분위값 및 하위 10% 값으로 표현되며, 점표시는 상위 및 하위 10%를 넘는 값, 점선은 평균값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 소형소각시설의 경우에는 실측자료가 13시설에 불과해 농도편차가 비교적 클 것이라는 것을 충분히 예측하였지만, 시료수가 43개로 비교적 많은 중형 소각시설도 농도편차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 시설의 설치일 또는 변경일을 기준으로 별도의 배출기준이 적용되기 때문인 것으로 판단되며, 향후 시설개선을 통해 보다 엄격한 배출기준이 적용될 경우에 PCDDs/DFs의 환경대기 중으로의 배출농도는 상당히 낮아질 것으로 판단된다. 또한, P. S. Kulkarni 등(2008)¹²⁾은 PCDDs/DFs 배출원 및 현재의 저감기술에 대한 고찰에서 PCDDs/DFs의 소각시설에서의 재합성은 약 1~500 ng I-TEQ/Nm³ 정도로 광범위하게 이루어지기 때문에 다양한 저감노력이 이루어져야 함을 강조하고 있어, 중소형 소각시설에 대한 소각대상 폐기물의 균질화를 포함한 적정 전처리, 준연속식 및 회분식(回分式) 소각로의 가동조건 개선, 배출가스 냉각설비 및 대기오염저감설비의 개선과 같은 다양한 저감노력이 필요한 것으로 판단된다.

3.2. 소각시설 규모별 배출계수 비교

배출계수 평가를 위해서는 다이옥신 농도의 실측과 더불어 배출가스 유량 및 폐기물 소각량에 대한 신뢰

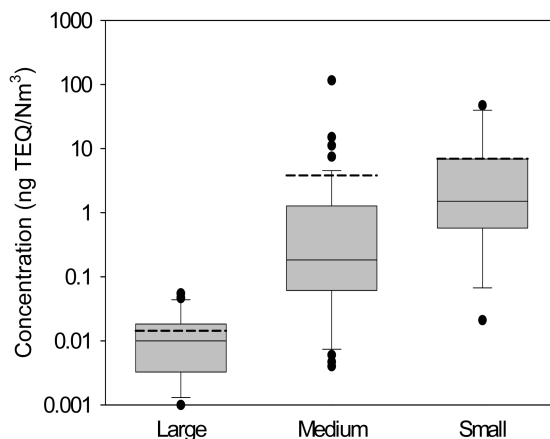


Fig. 1. The comparison of PCDDs/DFs TEQ concentrations between large, medium and small MSW incineration plants.

Table 4. Summary of O₂ concentration, incineration weight, and flow-rate of flue gas in MSW Incineration Plants to be studied

Incineration Plants	Statistics value	O ₂ concentration (%)	Incineration weight (A) (ton/hr)	Flow-rate of Flue gas (B) (Nm ³ /hr)	Flow-rate per waste (B/A) (Nm ³ /ton)
Large Scales	average	10.44	5.4	36350.7	6396
	median	10.80	4.7	31298.0	6202
	1/4-quardtyle	9.20	2.7	19661.0	5596
	3/4-quardtyle	11.70	7.4	47523.0	7166
	Maximum	13.50	11.8	99581.0	10443
	Minimum	7.00	1.6	7463.0	3731
Medium Scales	average	12.86	0.9	6383.8	8046
	median	12.80	0.8	4933.2	7875
	1/4-quardtyle	11.60	0.6	4042.2	5336
	3/4-quardtyle	14.28	1.1	8518.8	9756
	Maximum	16.70	1.7	18885.9	25808
	Minimum	8.21	0.3	1129.5	2416
Small Scales	average	12.58	0.1	2111.3	19606
	median	12.55	0.1	1549.7	14500
	1/4-quardtyle	9.90	0.1	893.8	7315
	3/4-quardtyle	14.40	0.2	2957.4	31330
	Maximum	17.30	0.2	5015.4	48637
	Minimum	8.40	0.1	493.7	5196

성이 높은 자료가 확보되어야 한다. 본 연구에서 배출 가스 유량은 PCDDs/DFs 측정 시에 동시에 이루어졌으며 폐기물 소각량은 폐기물이 크레인으로 소각로에 투입될 때 계량된 값을 이용하였다. 대형 소각시설의 대부분은 소각로에 투입하기 전에 계량이 이루어지고 있어 상대적으로 정확한 폐기물 소각량을 평가할 수 있으나, 준연속식 또는 회분식 소각시설이 대부분인 중소형 소각시설은 폐기물 계량시설이 없는 경우가 많아 불확실성이 큰 것으로 조사되었다.

따라서, 중소형 소각시설과 같이 다이옥신 측정 시 폐기물 투입량을 정확히 알 수 없는 경우에는 소각로 용량을 그대로 적용하였다. 연구대상 시설에 대한 측정 자료 중 배출계수 산출과 관련된 소각량, 배출가스 유량 등의 통계적 수치를 Table 4에 나타내었다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이, 배출계수($\mu\text{g}/\text{ton-waste}$)는 대형<중형<소형 소각시설의 순으로 나타났으며, 평균치로 보았을 때 각각 0.09, 9.05, 176.43 $\mu\text{g}/\text{ton-waste}$ 로 계산되었다. 특히, 소각시설 용량이 작아질수록 배출계수의 편차는 커지고, 대형과 소형 생활폐기물 소각시설의 차이는 약 2,000배 정도인 것으로 평가되었다. 중소형 생활폐기물 소각시설의 배출계수는 UNEP Toolkit(2003)의 생활폐기물 소각시설에서 배출되는

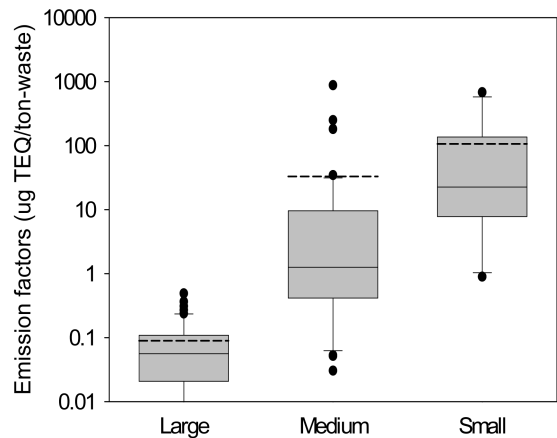


Fig. 2. The comparison of PCDDs/DFs emission factors between large, medium and small MSW incineration plants.

PCDDs/DFs의 Class 2 및 3 수준으로 대기오염방지 시설의 추가설치 및 개선이 요구되는 수준이라 할 수 있다.

또한, 0.2 ton/hr 미만의 소형 생활폐기물 소각시설의 경우에는 배출농도 및 배출계수 모두 측정시설별로 큰 차이를 나타내었는데, 이는 문 등(2006)¹³⁾, M. Lemieux 등(2004)¹⁴⁾ 및 B. Gullett 등(2003)¹⁵⁾이 수행한 노천

소각 시 배출되는 PCDDs/DFs의 배출계수가 대략 7.3~76.8 µg TEQ/ton-waste 수준임을 감안하였을 때, 본 연구에서 평가한 배출계수는 이보다도 높은 수준으로 평가된 것을 알 수 있다.

따라서, 중형 및 소형 생활폐기물 소각시설의 일부시설이 평균값에 미치는 영향과 그에 따라 대표적인 배출계수 산출에 필요한 보다 많은 실측 자료가 필요한 것으로 판단된다.

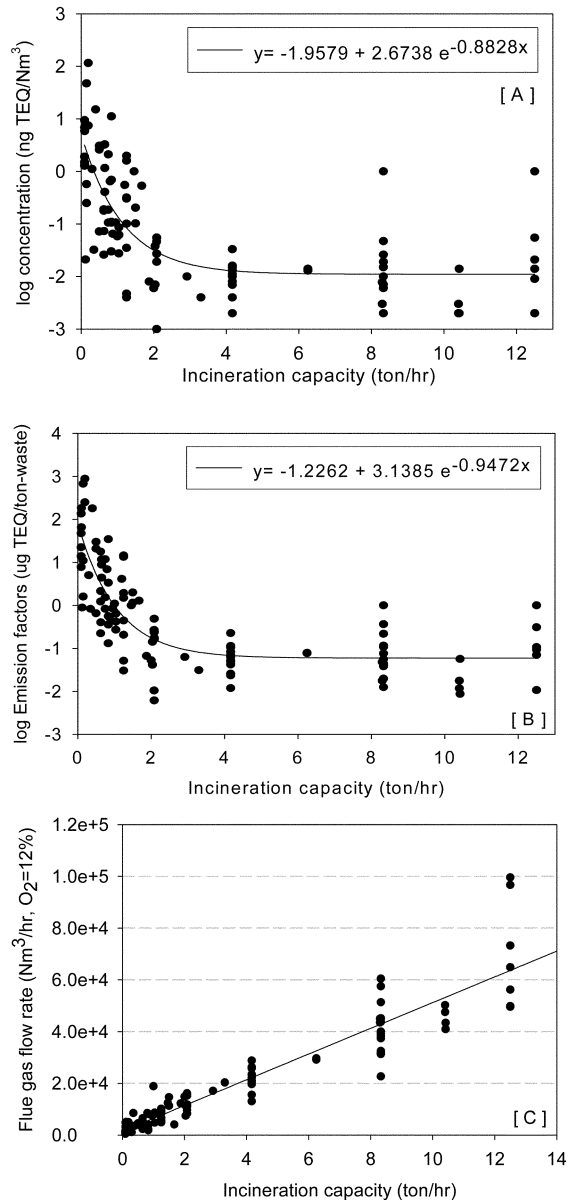


Fig. 3. The relationship between incineration capacity and (A) TEQ concentration, (B) emission factor and (C) flue-gas flow rate.

3.3. 배출계수와 다이옥신 농도의 상관성 평가

Fig. 3의 (A)와 (B)를 비교하면, 배출가스 다이옥신의 TEQ 농도와 배출계수 사이에는 양의 상관성을 보여주는 것을 알 수 있다. 배출계수 평가 시에는 폐기물 소각량과 배출가스 유량이 중요한 인자인데, Fig. 3의 (C)에 알 수 있는 바와 같이 폐기물 소각로의 규모와 배출가스 유량은 일정하게 비례하는 것을 알 수 있다.

대형 소각시설의 평균 배출가스 유량은 6396.5 Nm³/ton-waste, 중형 및 소형 소각시설의 경우에는 각각 8,046.3 및 10,606.3 Nm³/ton-waste로 측정되어, 소각시설의 규모가 작아질수록 상대적으로 많은 배출가스가 배출되고 있는 것으로 나타났다. 이는 적절한 연소용 공기의 제어가 이루어지지 않고 있음을 의미하며, 중소형 소각시설의 산소농도가 대형 생활폐기물 소각시설에 비해 상대적으로 높은 것도 동일한 이유라고 판단된다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 배출가스 농도가 0.05 ng I-TEQ/Nm³ 이하인 대형 생활폐기물 소각시설에 대한 평가 결과, PCDDs/DFs TEQ 농도와 배출계수 사이에는 비교적 양호한 상관성(R² = 0.8773)을 나타내었는데, 이 때 배출가스 농도를 x(ng I-TEQ/Nm³), 배출계수를 y(µg I-TEQ/ton-waste burned)라고 하면 $y = (-0.0002) + 6.2596x$ 에 의해 실측 농도로부터 배출계수의 예측이 가능하다.

Table 5에는 이상치에 의한 영향을 파악하기 위해, 이상치를 제외하지 않은 경우와 제외한 경우의 농도 및 배출계수의 차이를 비교하였다. 이상치는 높은 농도를 나타내는 상위 10%로 설정하였다. 표에서 알 수 있듯

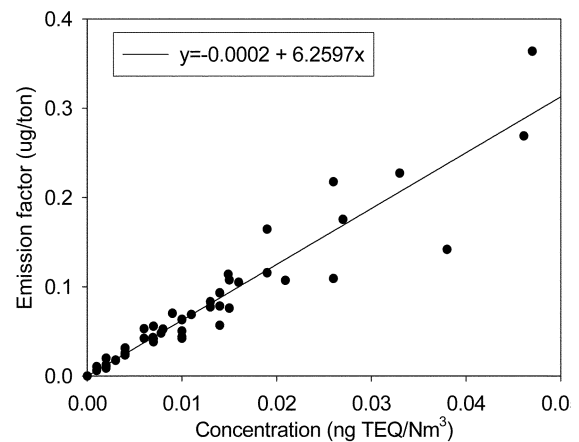


Fig. 4. The relationship between TEQ concentrations and emission factors (Large scale, 0.00=x=0.05).

Table 5. Emission Concentrations of PCDDs/DFs and Emission factors estimated in this study

Incineration Plants	Statistics value	including outliers		excluding outliers	
		TEQ concentration (ng TEQ/Nm ³)	Emission Factor (µg/ton-waste)	TEQ concentration (ng TEQ/Nm ³)	Emission Factor (µg/ton-waste)
Large Scales	average	0.014	0.09	0.010	0.06
	median	0.010	0.06	0.009	0.05
	1/4-quardtile	0.004	0.02	0.003	0.02
	3/4-quardtile	0.016	0.11	0.014	0.09
	Maximum	0.055	0.49	0.038	0.23
	Minimum	0.000	0.00	0.000	0.00
Medium Scales	average	1.203	9.05	0.489	3.70
	median	0.179	1.23	0.107	1.10
	1/4-quardtile	0.064	0.43	0.060	0.41
	3/4-quardtile	0.901	5.97	0.543	3.74
	Maximum	15.083	180.60	3.067	29.89
	Minimum	0.000	0.00	0.000	0.00
Small Scales	average	15.317	176.43	6.984	118.01
	median	1.900	47.45	1.701	34.97
	1/4-quardtile	1.283	11.07	1.106	10.26
	3/4-quardtile	7.449	183.99	7.010	148.23
	Maximum	115.311	877.52	47.351	676.17
	Minimum	0.021	0.89	0.021	0.89

이, 대형 생활폐기물 소각시설에는 그 차이가 거의 없는 것으로 나타났으나, 상위 10%를 제외하였을 때 중형 및 소형 생활폐기물 소각시설에서는 각각 40% 및 67% 낮은 수준으로 조사됨으로써 높은 농도를 나타내는 시설에 대한 집중적인 개선 등을 통한 저감노력이 전체 배출량 저감에 우선적으로 고려되어야 할 것으로 평가되었다.

4. 결 론

생활폐기물 소각시설을 잔류성유기오염물질 관리법상의 배출기준에 따라 대형(2.0 ton/hr 이상), 중형(0.2 이상 2.0 ton/hr 미만), 소형(0.025 이상 0.2 ton/hr 미만)으로 구분하여, 이들 소각시설의 최종배출구를 통해 대기로 배출되는 PCDDs/DFs의 농도를 실측·평가하고, 또한 각 소각시설 운전자료를 토대로 다이옥신 배출계수를 산출한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 대부분의 생활폐기물은 소각시설은 현행 다이옥신 배출허용기준을 만족하고 있었으며, 특히 대형 소각시설은 배출허용기준보다 매우 낮은 수준으로 다이옥신이 배출되고 있어 현 상황에서 BAT/BEP이 달성된 것

으로 판단된다.

2. 중·소형 소각시설은 다이옥신 배출농도 편차가 시설별로 차이가 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이를 평가하기 위해 중간값과 평균값을 비교해 본 결과, 평균값은 3/4 분위값을 상회하거나 근접한 수준을 나타냄으로써 일부 높은 수준으로 배출되는 시설에 대한 중점적 관리를 통한 저감노력이 필요한 것으로 평가되었다.

3. PCDDs/DFs의 실측농도와 폐기물 소각량 및 배출가스 유량을 고려한 배출계수 간의 상관관계를 평가한 결과 전체적으로 양의 상관성을 나타내는 것을 보여주었다. 특히, 배출농도가 0.05 ng I-TEQ/Nm³ 이하인 대형 생활폐기물 소각시설에서는 R²값이 0.8773으로 높은 상관성을 얻을 수 있었는데, 이는 폐기물 소각 시 배출되는 연소가스의 유량이 폐기물 소각시설의 소각로 용량과 비례하기 때문으로 판단되며, 해당 범위의 소각용량을 가진 생활폐기물 소각시설에 대한 실측농도 또는 배출가스 유량 자료가 확보된다면 적절한 배출계수의 예측 및 배출량 산출이 가능한 것으로 평가되었다.

4. PCDDs/DFs 농도가 상위 10%에 해당하는 고농도의 소각시설을 제외하고 배출농도 및 배출계수를 평

가한 결과, 대형 생활폐기물 소각시설은 각 값의 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나, 중형 및 소형 소각시설의 배출계수는 평균값과 비교하였을 때 각각 40% 및 67% 정도 낮아지는 경향을 나타냈다. 이는 상위 10%의 배출농도가 평균 배출농도에 기여하는 바가 크다는 것을 의미하는 것으로, 향후 우리나라 생활폐기물 소각시설의 다이옥신 배출량을 저감시키는 위해서는 이들 시설에 대한 집중적인 관리가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 환경부, *비점오염원 다이옥신 배출량 산정기법 개발*, 2004.
2. UNEP, *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*, 1st ed., 2003.
3. K.I. Choi, S.H. Lee, D.H. Lee, *Atmospheric Environment*, 2008, 42, 940-948.
4. Chen et al., *Chemosphere*, 2004, 54, 1413-1420.
5. 日本規格協會, K0311, 1999.
6. 김삼권 등, *Proceeding of dioxin conference*, 2005, 2008-2010.
7. 김기현, 정봉진, 이준일, 정일록, *한국폐기물학회지*, 2006, 제23권 제5호, 427-435.
8. 윤근덕, *대한환경공학학회지*, 2003, 25권 6호 723-731.
9. E. Abad, M.A. Adrados et al., *Chemosphere*, 2000, 40, 1143-1147.
10. M. Giugliano, S. Cernuschi et al., *Chemosphere*, 2002, 46, 1321-1328.
11. D.Z. Shi, W.X. Wu, S.Y. Lu et al., *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153, 685-694.
12. P. S. Kulkarni, J.G. Crespo, C.A.M. Afonso, *Environment International*, 2008, 34, 139-153.
13. 문동호, 황태웅, 박금정, 이상원, 주창한, 옥근, *한국폐기물학회지*, 2007, 24권 1호, 29-35.
14. P. M. Lemieux et al., *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30, 1-32.
15. B. Gullett et al., *Atmospheric Environment*, 2003, 37, 4893-4899.