

소각장 환경영향평가지 수는 배출 계수에 관한 연구

전미경 · 박석순*

경기개발연구원 생활환경연구부, *이화여자 대학교 환경공학과

A Study on Mercury Emission Factor for Environmental Impact Assessment of Municipal Waste Incinerator

Mee-Kyung Chun · Seok-Soon Park*

Dept. of Living Environment, Kyonggi Development Institute

*Dept. of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

Abstract

The amount of mercury emitted from an incinerator depends on the properties of waste, combustion condition, and control devices. Mercury concentration in air proportionates to the increase of incinerator installation. The purpose of this study is to provide a method for determination of mercury emission factor which can predict the amount of mercury emitted from each incinerator specifically. Case study was performed for N municipal waste incinerator. Based on the method presented in this paper, we obtained mercury emission factor as 1.85~1.95 g Hg/t at N Municipal Waste Incinerator and this result was regarded as reasonable when compared with existing mercury emission factor in reference cases. Fluorescent lamps turned out to be the most important source(44.4%) of mercury in municipal waste and its amount will tend to increase, while batteries become less significant. In addition, medical waste is one of the major source of mercury.

Key Words: Mercury, Emission Factor, Incinerator

I. 서론

지난 1950년대 일본 미나마타 현에서 발생한 수은 중독은 세계적인 경각심을 불러 일으켰다. 그러나 그후 발암물질의 피해가 관심을 끌게 되면서 수은은 우리에게서 이미 해결된 문제와도 같이 서서히 잊혀져 갔다. 그런데 비교적 깨끗한 환경을 유지하고 있던 서유럽 국가들이 80년대부터 호수에서 수은을 검출하면서 이들은 대기속에 이미 다량의 수은이 존재하고 있다는 사실을 알게 되었다. 이제 수은은 공장 폐수를 통한 국소적인 오염 서유럽 국가들이 80년대부터 호수에서 수은을 검출하면서 이들은 대기속에 이미 다량의 수은이 존재하고 있다는 사실을 알게 되었다. 배출량도 비교적 많은 것으로 나타났는데, 예를 들어 미국 뉴저지 주의 소각장 수은 규제치는 한 연돌에서 약 22 g/hr이므로, 법적으로 허용된 것만 계산해도 연돌 2개가 있는 소각장에서 대기중으로 배출하는 수은의 양은 연간 397 kg이나 되며, 1993년 한 해에만 미국이 대기중으로 방출한 수은은 약 57,590 kg에 이른다.¹⁾

지구 전체에서 배출된 수은을 정량한 결과, 아시아의 경우, 1992년 총 1,012 톤의 수은을 배출하여 전체의 46% 가량을 차지하며, 그중 약 300톤이 소각장에서 배출된 것으로 조사되었다.²⁾ 수은 배출량 자체로 보면 발전소가 가장 큰 배출원이긴 하지만, 발전소에서 사용하는 화석 연료보다 폐기물 속의 수은 함유 비율이 크기 때문에 배출 농도가 높고¹⁾ 소각장은 주거 지역 인근에 위치하기 때문에 인체에 더 큰 영향을 미치게 되는 것이다. 또한 금속 생산 공정이나 염소 생산 공정에서 배출되는 수은 농도가 소각장보다 높긴 하지만, 총 배출량은 소각장보다 훨씬 적다.³⁾

건전지, 형광등, 페인트, 온도계 등에 포함되어

있는 수은은 인체에 노출되지 않아 유해하지 않지만, 소각로에서 고온으로 연소되면 기체 수은으로 변환된다. 수은의 주된 배출 형태는 Hg^0 와 $HgCl_2$ 인데, 수용성인 $HgCl_2$ 는 비가 올 경우에는 소각로 주변에 고 농도로 침적되고 비수용성인 Hg^0 는 장거리까지 확산된다. 그러나 비수용성인 Hg^0 도 오존과 같은 산화제를 만나면, 수용성인 Hg^{+2} 로 변하게 된다. 특히 주변 대기가 산성일 경우에는 이러한 변화가 더 촉진되어 빗물이나 안개, 눈 등에 의해 침적되는 양이 증가하게 된다. 이렇게 침적된 수은은 토양이나 수중 미생물에 의해 무기수은보다 5-20배나 더 유독한 유기 수은, 즉, 메틸 수은으로 변하게 된다. 또한 유기 수은은 수생 식물이나 무척추 동물 그리고 물고기 등에 생물 농축 (Bioaccumulation)과 먹이 연쇄에 따른 생물증폭 (Biomagnification) 현상을 반복하면서 사람이 먹는 물고기에는 매우 높은 농도로 존재하게 된다. 미국에서는 이미 1986년부터 20개 주에서 하천이나 호수에서 잡은 물고기 섭취를 금지하는 경고를 내렸는데, 그 중에서 반 이상이 수은 때문이었으며, 뉴저지 주에서만 15개의 호수와 수백 개의 우물에서 수은이 초과 검출되었다. 조사한 결과, 미국에서 소각로가 많은 주일수록 물고기의 수은 농도가 높은 것으로 밝혀졌다.⁴⁾

이렇게 소각로가 미치는 영향이 크지만, 수은은 매우 미량으로 존재하기 때문에 일반적인 방법으로 분석하기가 어려워 현재 우리 나라에서는 소각장에서 배출되는 수은의 농도도 측정하지 않고 있을 뿐만 아니라 대기오염 규제 대상에도 포함되어 있지 않는 실정이다. 우리 나라 환경영향 평가서 작성에 관한 규정⁵⁾을 보면 소각처리시설 평가시 대기환경기준 항목 (TSP, SO_2 , NO_2 , CO, O_3 , PM10, Pb)을 중심으로 평가하되, 지역의 특성과 발생원의 종류에 따라 항목을 추가 선정하도록 되어 있다. 그러나

실제로 소각로나 발전소 건설시 수은을 대기질 평가 항목에 추가 선정할 예는 거의 찾아보기 어렵다. 예를 들면, 최근 수행한 경기도 K시 폐기물 소각장 환경영향 평가서⁶⁾에 서도 대기환경기준 항목 오염물질 및 다이옥신의 발생량 예측과 저감시설에 대한 평가는 수록되어 있지만, 소각장에서 발생하는 수은의 배출량과 영향에 대해서는 아무런 언급도 되어 있지 않다.

또한 환경영향평가서 작성에 관한 규정⁵⁾에는 발전소 및 소각시설이 달리 구분되어 있지만, 평가 항목에는 동일한 대기질 평가항목으로 들어가 있는데, 발전소와 폐기물 소각장에서 배출되는 대기 오염물질 들은 농도에 상당한 차이가 있으므로 각각의 중요성이 다르기 때문에 이 배출원들을 동일한 오염물질 항목에 대해 조사하는 것은 적절하지 않다.⁷⁾ 그 뿐만 아니라 수은이 많이 배출되는 배출원들도 Table 1에 나타나 있듯이⁸⁾ 수은의 화학적 조성과 물리 화학적 특성이 다르기 때문에 배출원에서 생성되는 수은 화합물의 종류에 따라 저감 방안이 달라져야 하고 배출된 후 확산되면서 주변에 미치는 영향에 대한 평가가 각각 달라져야 한다. 즉, Chun⁹⁾이 지적했듯이, 수용성인 Hg⁺² 화합물이 발전소보다 상대적으로 많이 생성되는 도시 폐기물 소각로는 건식 침착보다 습윤 침착이 더 많이 될 것이므로 발전소에 대한 평가와는 달리 산성 비가 미치는 영향에 대한 연구가 병행되어야 한다.

수은은 우리 나라가 OECD에 가입하면서 오염을 규제하기로 수락한 사안인 동시에, 이미 상당량의 수은이 대기중에 방출되어 앞으로 생태계에 큰 영향을 미칠 것으로 간주되므로 그 위해성을 평가하고 대책을 수립하기 위해서는 실제로 소각로에서 얼마만한 양의 수은이 방출되어 생태계에 어떻게 분포되고 축적되는가에 대한 연구가 선행되어야 한다. 최근 우리나라의 주요

소각장에서 배출되는 수은의 총량을 일반 도시 고형 폐기물(Municipal Solid Waste, MSW)과 의료용 폐기물(MeDical Waste, MDW)로 나누어 개략적으로 산정한 연구¹⁰⁾에서 대기중의 연간 배출량이 수 톤 대에 이를 것으로 추정하였다. 그러나 실제로 배출되는 양은 각 지역 특성에 따른 쓰레기의 성상, 연소 조건, 방지 시설의 종류등에 따라 달라진다.

따라서 각 소각장마다 수은의 배출계수를 보다 정확하게 산정할 수 있는 배출계수 결정 방법을 제시하고 배출량을 추정하는 것은 앞으로 대기 오염의 관리 및 제어에 도움이 될 뿐만 아니라, 소각장 건설시 환경영향평가에서 수행되어야 하는 과제이다. 본 연구는 도시폐기물 소각장에서 예상되는 수은배출 계수 산정 방법을 제시하고 현재 가동중인 소각장을 대상으로 수은 배출량을 추정하여 비교 검토하였다.

II. 연구 방법

1. 주요 수은 배출원

점차 소비 패턴이 선진국화함에 따라 무엇보다도 심각해져 가는 문제는 폐기물 처리 분야이다. 특히 80년대 이후 가정과 사업장에서 배출되는 일반 폐기물은 전년 대비 증가율이 7-9% 정도로 급증하는 추세였다.¹¹⁾ 이후 1992년 쓰레기 종량제의 실시로 일반 폐기물 발생량은 감소하는 경향을 보이고 있으나, 재활용품 분리 수거 등으로 인해 오히려 폐기물 톤당 수은의 함유 농도는 증가하고 있다.¹²⁾ 소각장에서 연소되는 MSW는 발전소의 연료와는 달리 매우 다양하고 지역적인 특성을 갖을 뿐만 아니라 계절적인 특성도 갖기 때문에 배출량 산정을 위해서는 각 배출원의 변화 양상을 파악해야 한다. 즉, Table 2는 1982년 유럽에서 측정된 이래 자주 사용되어

은 수은의 배출계수이며,³⁾ Table 3은 방지시설의 종류에 따라 미국 연방환경보호청에서 산정한 수은의 배출계수가 나타나 있으나,¹³⁾ 이것은 미국에서 일반적인 소각장을 대상으로 산출한 것으로서 우리나라의 폐기물 성상 및 연소 특성을 고려하지 않았으므로, 이러한 수은 배출계수를 그대로 사용하는 것은 부적합하다.

그러므로 적절한 수은 배출계수를 계산하기 위해서는 각 지역에서의 폐기물의 특성과 변화 양상을 먼저 고려해야 한다.

Table 1. Speciation of Mercury in Raw Flue Gases from Various Point Sources.⁸⁾

Process	Hg ⁰ _(g)	Hg ⁺² _(g)	Hg ⁺² _(s)
Chlor-alkali plant	50-90 %	10-50 %	-
Coal Combustion	1-50 %	1-30 %	1-20 %
Waste Incineration	1-20 %	1-60 %	1-20 %

Table 2. Emission Factors, Commonly Used for Preliminary Estimates in Europe, 1982.³⁾

Emission Source	Emission Factors (g/t)
Coal Power Plant	7.6 - 25.8 × 10 ⁰
Waste Incinerator	0.4 - 3.5
Industrial, Commercial and Residential Coal Combustion	0.1 - 1.2
Wood Combustion	0.2
Non ferrous Metall Production	3.0 - 8.0
Cl ₂ Production	5.2

Table 3. Mercury Emission Factors of Mass Burn and Modular/Excess Air Combustor, Used in U. S. EPA.¹³⁾

	Uncont rolled	ESP	DSI/ESP	SD/ESP	DSI/FF	SD/FF
Emission Factors(g/Mg)	2.8	2.8	1.98	1.63	1.10	1.10

(ESP : ElectroStatic Precipitator, DSI : Duct Sorptor Injection, SD : Spray Dryer, FF : Fabric Filter)

수은이 사용한다. 건전지에서 1.3% (중량비) 정도이던 수은의 함량을 1992년 국제적으로 0.025% (중량비) 이하로 규제하도록 결정된 후, 건전지의 수은 함량은 급격히 감소하고 있으나,¹²⁾ 아직도 수은전지 등의 수은 함량은 매우 높으며 무수은 건전지도 1 ppm 이하의 수은을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다. 특히 MDW는 전체량의 1% 미만에 불과하지만, 산화수은을 많이 사용하고 있기 때문에 MDW에서 발생하는 수은은 전체 수은량의 1/3 정도인 것으로 간주된다.¹⁾

또한 수은은 매우 우수한 전기전도도를 갖고 있어서 전기 제품에 많이 사용되기 때문에, 그 다음으로 중요한 수은 배출원은 형광등과 같은 전구 제품들이다. 수은을 함유하는 전구는 크게 두 가지로서, 일반 형광등 (40 w당 25 mg의 수은 함유)과 거리의 수은등 (400-800 w, 400 w당 60-75 mg의 수은 함유)으로 분류할 수 있는데, 이 밖에 나트륨 등도 20 내지 30 mg의 수은을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾ 규제로 인하여 대부분 배출량이 감소하는 다른 배출원들과는 달리, 형광등의 생산은 미국에서 앞으로 계속 높은 증가 추세를 보일 것으로 Table 4에 제시되어 있으며 이에 따라 수은 배출원으로서 그 중요도가 더 높아질 것으로 쉽게 추측할 수 있다.¹⁵⁾

형광등을 실내에서 별로 사용하지 않는 간접 조명 방식을 사용하는 미국의 경우에도 이와 같이 형광등이 주요 배출원으로 대두되고 있는데, 우리나라는 대부분의 실내에서 형광등을 사용하고 있을 뿐만 아니라, 수은 함량이 규제되고 있는 건전지와는 달리 수은 함량에 대해 아무런 규제를 받고 있지 않으며, 대부분의 지역에서 형광등이 분리 수거되지 않고 있다. 따라서 우리나라에서는 형광등의 중요성이 Table 4에 나타난 정도보다 훨씬 더 높을 것으로 추정되며, 앞으로도 경제 개발과 소비생활의 증가에 따라

폐형광등의 양이 더욱 증가할 것으로 보인다.

그밖에 현재 가정용 체온계의 생산이 증가하고는 있으나, 앞으로는 디지털 체온계가 보급될 것으로 보이므로 가까운 장래에 체온계에 함유된 수은도 감소 추세로 돌아설 것이다. 또한 페닐수은 아세테이트가 실내용 페인트의 수명을 연장하기 위해 방부제나 살균제로 사용되어 왔으나, 미국에서 1990년부터 사용이 금지되었으며 앞으로 이러한 규제는 국제적으로 확산될 것으로 판단된다.

2. 소각로중 수은의 질량 수지

소각되는 폐기물의 조성 이외에도, 소각기 형태나 연소 조건, 방지 시설의 유무 및 종류에 따라 배출계수는 크게 달라진다. 우리나라에서 현재 많이 사용하는 소각로 형태는 매스 연소/수벽기 (Mass Burn/Water Wall)로서, 매스 연소기는 주입 시스템을 통과하기에 너무 큰 물질을 제거하는 것 이외에 아무 전처리 없이 연소시킨다. 800℃ 이상의 연소 온도에서 수은은 대부분 기체 상태의 Hg⁰로 변환된다.¹⁾ 수은은 증기압이 매우 높기 때문에 가장 쉽게 휘발될 수 있는 중금속이다.¹⁶⁾ 따라서 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 다른 중금속들은 거의 입자 상태로 변환되기 때문에 전기 집진기 (Electro Static Precipitator, ESP)나 직물 여과 (Fabric Filter, FF) 시설과 같은 일반적인 입자 제어 시설에서 98% 이상이 제거되지만, 증기압이 매우 높은 수은은 다단계 습식세정기(Wet Scrubber, WS), 활성 탄소 흡착제를 사용하는 ESP/WS가 결합된 제어시설과 같은 특정한 방지시설이 없는 한, Hg⁰와 HgCl₂로 나뉘어 거의 대부분이 그대로 방출된다.¹⁷⁾ 즉, 방지 시설을 통과할 때, FF (250℃ 이하)나 ESP (350℃ 이하)만으로는 모두 온도가 높아서 기체 상태의 수은 제거에 아

무 효과가 없다.¹⁾ HCl이나 SO₂와 같은 유해가스 제거에 사용되는 WS가 기체 수은을 80% 정도까지 효과적으로 제거할 수 있다고 하지만, Hg⁰는 비수용 성이므로 될 수 있으면 수은을 Hg⁺²로 산화 시켜야 하며, 산화된 Hg⁺²는 WS에서 용해되지만, WS에서 사용하는 Na₂SO₄ 중의 SO₂로 쉽게 환원되어 증기압이 높은 Hg⁰로 다시 방출될 수 있다. 또한 냉각시설에서 미세입자에 흡착된 수은은 WS에서 제거할 수 없으므로 ESP나 FF를 WS에 더 부착시키고 다단계식 WS를 사용해야 한다.^{18,19)}

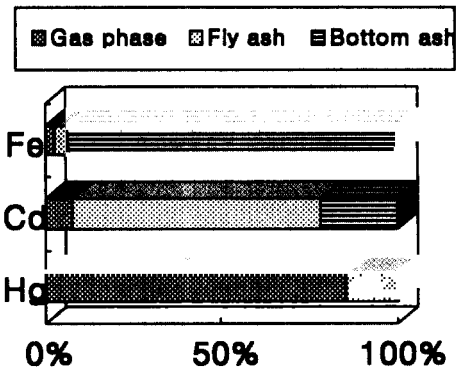


Fig. 1. Typical partitioning for heavy metals in coal combustion¹⁷⁾

미국에서 일반적인 소각장에 유입된 수은의 질량 수지는 다음 Fig. 2와 같다.¹⁸⁾ 대부분의 소각로에서 용재(slag)가 형성되는 비율은 거의 비슷하다. 방지 시설의 종류에 따라 달라지는 비율이 정화된 배출 가스에 대한 여과 재의 비율인데, 수은이 포집되기 위해서는 집진기내에서 저온 (170℃ 가량)의 상태가 요구된다.²⁰⁾ 본 연구의 대상인 N소각장은 독일 바브록사와 기술 제휴로 건설되어 일일 처리 최대물량 400 t의 스토카식 소각로 2기를 보유하고 있으며 이중 1기를 1996년 9월부터 가동중이다.²¹⁾

Table 4. Discards of Mercury in Products in the Municipal Solid Waste¹³⁾

	1970		1980		1989		2000	
	t	%	t	%	t	%	t	%
Household Batteries	281.9	73.7	389.6	78.4	563.5	87.6	89.3	57.0
Fluorescent Lamps	17.3	4.5	22.0	4.4	24.2	3.8	37.1	23.7
Paint Residues	27.4	7.2	24.2	4.9	16.5	2.6	0.5	0.3
Fever thermometers	11.1	2.9	23.3	4.7	14.8	2.3	15.2	9.7
Thermostats	4.81	1.3	6.3	1.3	10.1	1.6	9.3	6.0
Pigments	29.3	7.7	20.9	4.2	9.1	1.4	1.4	0.9
Dental Uses	8.4	2.2	6.4	1.3	3.6	0.6	2.1	1.3
Paper Coating	0.1	0.0	1.1	0.2	0.9	0.1	0.9	0.0
Light Switches	0.4	0.1	0.4	0.1	0.4	0.1	0.4	1.1
Film Pack Batteries	1.9	0.5	2.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
total Discards	382.6	100.0	496.6	100.0	643.1	100.0	156.2	100.0

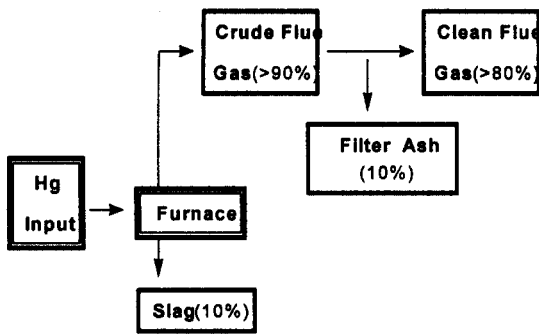


Fig. 2. Mercury mass balance in waste incinerators.¹⁸⁾

N소각장은 ESP, WS, 선택적 촉매환원장 (Selective Catalyst Reducer, SCR)를 사용하고 있는데, ESP는 300 °C 정도로 유지되고 있으므로, 수은을 포집할 수 없으며 단순한 WS로는 수은 제거가 비효과적이고 SCR도 수은을 포집할 수 없으므로 현재의 제어 설비는 수은을 거의 제거할 수 없는 실

정이다. 따라서 Fig. 2에서 여과 재에 포집되는 비율을 미국에서는 10%였지만 우리 나라에서는 1% 정도로 산정한다면, 대기중으로 배출되는 최종 정화된 가스 속의 수은은 총 유입량의 89% 정도에 달할 것으로 보인다.

3. 폐기물중 수은 함량의 산정

N소각장 처리대상 구역의 폐기물 발생량은 97년 여름 일일 평균 496 t/day이며, 7일 기준 최대 발생량은 약 700 t/day 정도로 나타났다. 재활용이 가능한 폐기물을 제외한 일반 폐기물의 양은 353 t/day으로 그 중에서 280-320t/day 정도가 매일 N소각장에서 처리되고 있다. N소각장에 유입되는 폐기물의 물리적 조성은 Table 5와 같다.^{23,24)}

Table 5. Physical Properties of Waste in N Municipal Waste Incinerator²²⁾

Moisture	Food	Wood	Vinyl Plastics	Paper	Clothes	Non-com bustible	Others
Wet (%)	43.99	1.84	14.68	25.93	8.28	4.47	0.62
Dry (%)	35.71	1.58	17.74	27.07	8.32	8.43	1.14

1993년을 기준으로 대상 구역의 폐기물 성상별 처리량에 의거하면, 전체 폐기물 처리량중 금속은 3.6%를 차지하고 있고 이 중 건전지가 17.7% 함유되어 있다.²³⁾ 금속류는 재활용이 가능한 폐기물로 분류해야 하고 재활용의 참여도는 증가하겠지만, 산업이 발달할수록 복합적인 폐기물(즉, 플라스틱이 들어간 금속등)이 증가하고 있어서 재활용이 갈수록 어려워질 것이다. 따라서 금속의 양은 미소한 증가만을 보일 것으로 예상할 수 있기 때문에 본 연구에서는 일정한 것으로 가정하였다. 건전지의 경우, 대부분 분리수거를 실시하고 있지 않으며 분리수거를 시행하고 있는 미국에서도 그 실적은 5% 미만으로 매우 낮고, 전처리 역시 매우 미비하다. 현재 N 소각장에서는 소각 처리 이전에 수작업으로 재활용 가능한 폐기물을 선별하고 있으나, 부피가 작은 건전지는 전량 소각장으로 유입된다고 보는 것이 타당하다. 따라서 대상 구역에서 매일 버려지는 건전지의 양은 7일 기준 최대량을 감안하여 3.16 내지 4.46t으로 추산된다.

건전지에 함유되는 수은의 규제치는 1 ppm이므로 규제 이후에 만들어진 건전지는 이 값을 적용하면 되지만, 규제 이전에 만들어진 건전지가 아직 시중에 있음을 감안해야 한다. 이러한 지연시간(time lag) 효과를 고려하여 규제

이전에 만들어진 건전지가 전체 폐건전지의 약 10%를 차지할 것으로 가정하고 그 건전지의 수은 함량을 250 ppm으로 볼 때,²⁴⁾ 매일 건전지속에 포함되어 버려지는 수은의 양은 81.8~115.47 g Hg이다.

1996년 국내에서 출하된 형광등은 Table 6에 나타나 있듯이 직관, 환관, 전구형을 망라하여 총 338,829,000개였다.²⁵⁾ 형광등의 경우, 운반이 용이하지 않아서 수출입이 미량에 지나지 않으므로 국내에서 모두 소모되는 것으로 간주해도 무방하다. N구에서 폐기되는 형광등의 양에 대한 자료가 없기 때문에 Table 6의 국내 출하량만을 기준으로 삼아 출하량이 폐기량과 같고 대상 구역에서 폐기되는 형광등이 인구 비례와 같다고 가정한다면, 매일 N 소각장 처리 구역에서 폐기되는 형광등의 갯수는 12,068개이다. 일반적으로 형광등 1개에 함유된 수은이 25 mg이므로 매일 폐기되는 형광등에 포함되는 수은의 양은 301.7 g/day이다. 또한 대상 구역의 가로등은 모두 수은 등(3,399개)이며, 이외에 골목의 보안등은 나트륨등(5,254개)이므로 가장 일반적으로 사용되는 600 w 수은등의 수은 함유량이 80 mg Hg이고 평균 수명은 6000 시간이지만 1년에 1회 교환한다고 가정할 때, 이들에 함유되어 소각장으로 유입되는 수은의 양은 약 1.18 g Hg이고, 이상과 같이 재활용품으로 분리되지 않고 폐기물 중 전구에 함유되어 들어오는 수은의 총량은 하루에 302.88 g/day이다.

MDW는 지정 폐기물로 특별히 처리되어야 하지만, 우리나라에서는 제대로 분류되지 않고 소각장으로 유입되고 있는 실정이다. MSW와 MDW의 생성비로 소각장의 폐기물 조성비를 분리하여 고찰한 바에 따르면, 미국의 폐기물 생성비(1.4 : 0.02)에 의거하여 MDW에 의한 수은 함유량을 계산하였다.^{2,10)}

Table 6. Shipment Quantities of Fluorescent Lamps²⁶⁾

Lamp Types	Number(unit : 1000)
Straight	209252
Round	57663
Bulb	71914

이에 따라 N 소각장 하루 유입량인 320 t 중 315.5 t은 MSW이고 4.5 t은 MDW인 것으로 가정한다. 일반적으로 MDW에는 고 농도의 수은, 카드뮴, 6가 크롬, 납 및 PCDD등이 함유되어 있는데, 미국 뉴저지주 환경부에서 정한 수은 배출 기준과 Glasser가 연구한 MDW 소각장에서 수은 배출계수를 비교하면, 수배에서 수백 배까지 수은 배출 정도가 차이나기도 한다.^{2,26)} 1994년 미국 연방환경보호청에서 선진국의 MDW 수은 배출계수를 30 g Hg/t 으로 설정하였는데,²⁾ 우리 나라를 25 g Hg/t 정도로 가정한다면, 이 값은 60% 정도를 방지 시설에서 제어했다고 보는 값이므로 실제 MDW 속의 수은 함량은 62.5 g Hg/t 이다. 따라서 N 소각장에 유입되는 MDW의 수은량은 하루에 281.25g Hg로 추정할 수 있다.

Reimann²⁷⁾의 연구에 따르면 음식물 쓰레기를 소각할 때 배출되는 수은의 양은 0.377 mg Hg/t이다. N 소각장의 음식물 쓰레기의 비율은 43.99%이므로,²⁸⁾ 매일 소각장으로 유입되는 폐기물 315.5t 중 음식물 쓰레기에서 배출되는 수은의 양은 하루에 53.07 mg Hg 이다. 따라서 MSW 에 함유된 수은의 양은 건전지, 형광등, 음식물 쓰레기를 합하여 384.73 ~418.40 g Hg이다. 이 값에 MDW에서 배출되는 수은량을 합하면, 총 665.98~699.65 g 의 수은이 폐기물속에 함유되어 있다고 할 수 있으므로, 소각되는 폐기물 중 수은

함유량은 2.08~2.19 g Hg/t 이다. 이렇게 계산한 수은 함유량과 물질 수지에 의거하여 89%가 대기중으로 방출된다고 가정하면, N 소각장의 수은 배출계수는 1.85~1.95 g Hg/t이다.

III. 결과 및 토론

Pirrone et al.²⁹⁾은 폐기물중 수은 함유량은 높지만 효과적인 방지 시설이 설치되어 있는 선진국 소각장의 경우, 60%의 수은을 제거한다고 가정하여 수은 배출계수를 1.2g Hg/t으로 산정하고, 소비 수준이나 산업화의 정도가 아직 낮지만, 방지 시설도 설치되어 있지 않은 개발도상국일 경우, 1.0g Hg/t 정도로 수은 배출계수를 산정하였다. 그러나 우리 나라는 소비 수준은 매우 높지만, 아직 효과적인 수은 방지시설이 설치되어 있지 않은 경우이므로, 선진국의 수은 배출계수보다 큰 값이 산출되리라는 예상에 본 연구의 수은 배출계수는 어느 정도 부족하였다. 이 값은 Table 2에서 나타난 수은 배출계수 범위이며 Table 3에서 미국 연방환경보호청이 방지 시설이 없는 소각장에서의 수은 배출계수로 결정한 2.8 g Hg/Mg 보다 조금 낮은 값이므로, 어느 정도 합리적인 값으로 간주할 수 있다. 실제로 이 값은 앞서 언급한 바와 같이 여러 가지 여건에 따라 변화하므로, 정확한 배출계수를 결정하기 위해서는 각 소각장마다 폐기물의 조성과 양의 변화 및 소각 시설 변화에 따라 배출계수를 재산정해야 한다. 320 t의 폐기물을 24시간 같은 양으로 소각하는 경우, 대상구역의 수은 배출률은 $6.9 \times 10^3 \sim 7.2 \times 10^3$ g/sec 인데, 우리 나라는 연속 연소 식이 아니라 회분식 소각 방식을 채택하고 있으므로 실제 배출률은 이 값보다 훨씬 클 것이다. 이 점을 감안할 때, 서론에서 밝혔듯이 미국

뉴저지주 소각장에서 수은 규제치가 한 연대에서 6.1×10^3 g/sec 인 것을 고려한다면,¹⁾ 연구 대상 소각장의 수은 배출률은 매우 큰 값이다. 더구나 뉴저지주에서 1995년까지의 수은 배출기준인 6.5×10^5 g Hg/dscm (dry standard cubic meter) (7% 산소 보정시)을 2000년도까지 2.8×10^5 g Hg/dscm 으로 강화하고 있는 것으로 보아 알 수 있듯이 수은 규제치는 앞으로 갈수록 강화될 전망이다¹⁹⁾. 최근 온실가스에 대한 국제적인 규제 조치가 논의되고 있는 것을 감안한다면, OECD에 가입한 우리나라로서 대기중 수은 배출의 규제는 남의 일만은 아니다. 따라서 우리 나라도 머지않아 대기중 수은 배출기준을 지정하고 소각장에서의 수은 배출기준을 산정해야 할 것으로 보이므로, 수은 배출계수의 산정 방법을 제시하는 것은 우리 나라 수은 오염 및 소각장 건설시 환경영향평가에 도움이 될 것이다.

Fig. 3에 나타난 결과에서 소각장에 유입되는 폐기물중의 수은 배출원으로서 가장 심각한 요인으로 꼽혔던 건전지는 의외로 전체 유입량 중에서는 14.4%에 불과하고, MDW를 제외한 MSW중에서 24.5%의 영향을 미치는데 그쳤다. 이는 건전지 속의 수은 함유량에 대해 1992년부터 국제적인 규제가 엄격하게 실시되고 있기 때문인 것으로 보인다. 위의 Table 4에 나타나 있듯이 앞으로 건전지의 수은 기여도는 감소할 것으로 보이지만, 소형 휴대용 통신 기기나 워크맨, 멜로디 카드 등의 사용이 증가하고 있으므로 소형 건전지의 사용량은 오히려 증가할 것이다. 특히 전자계산기, 사진기, 휴대용 게임기, 시계 등에 많이 쓰이고 있는 수은전지는 전량이 대만에서 수입된 제품인데, 수은이 2.5 내지 3.5%에 달해 국제 규제치인 0.025%의 100배가 넘는다. 따라서 이러한 소형 건전지의 분리 수거와 재충전 건전지의 사용 등을 적극 권장하여 건전지를 통해 소각장으로 유입되는 수은의 양을 감소시키도록

노력해야 한다.

폐기물 중에 건전지 속의 수은이 차지하는 비율이 뜻밖으로 적었던 것과는 반대로, 형광등속의 수은은 소각장에서의 수은 배출에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 즉, Fig. 3에 나타나 있듯이 소각로에 유입되는 폐기물 중 형광등속의 수은은 44.4%로 가장 큰 배출원일 뿐만 아니라 MDW를 차지한 MSW속에 함유된 형광등 속의 수은은 전체 수은의 75.6%로서 가장 중요한 배출원인 것으로 나타났다. 이러한 예상 밖의 결과는 건전지 속의 수은 함량에 대해서는 엄격한 규제가 실시되고 있는데 반해, 형광등에 대해서는 아직 아무런 규제가 시행되고 있지 않으며 토기를 즉석에서 치사시킬 수 있는 양을 함유하고 있으면서도 지정폐기물로 설정되지 않아서 분리 수거가 이루어지고 있지 않기 때문이다.

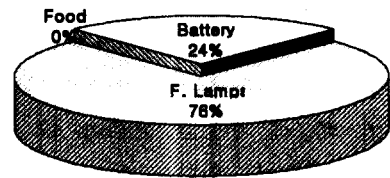


Fig 3. Mercury content ratio in MSW (Municipal Solid Waste) from a N Municipal Waste Incinerator (F. Lamps : Fluorescent Lamps).

최근 우리 나라의 각종 환경 규제들은 국제적인 규제를 마치못해 따르고 있는 실정이므로, 형광등을 별로 사용하지 않는 외국의 조명 방식을 감안할 때 우리 나라 스스로 형광등의 수은 함유량을 규제하지 않고 소각로 방지 시설의 설치로만 제어하려고 한다면 소각로에서 배출되는

수은의 규제는 요원한 일이 될 것이며 막대한 시설 비용이 들 것임은 물론이고, 수은을 포함한 소각재나 폐수를 다시 처리해야 하므로 이중 삼중으로 비용을 들여야 한다.

또한 사회가 발달할수록 의료 행위가 증가하기 마련이므로, MDW의 증가는 앞으로도 지속될 것이다. 실험실, 병원, 특히 치과 병원에서 수은은 체온계나 아말감 봉합제로 쓰일 뿐만 아니라 시약, 멸균액, 소독약 및 기압계, 혈압계, 공극계 (porosimeter), 전량 계, 에어 펌프, 확산 펌프, 펌프 밀폐제, 수은 제트 전극, 강하(dropping) 전극, 맥리오드(Mcleod) 게이지, 연료 전지, 제동계(vibration damper), 냉각제, 방사선 차폐물 등으로 다양하게 사용되고 있다.¹⁾ 앞의 계산에서 알 수 있듯이, 전체량의 1.4%에 불과한 MDW가 전체 수은 유입량의 41.2%를 차지하고 있는 것을 볼 때, MDW의 철저한 분리 수거 및 처리는 수은 오염의 방지 및 규제에 결정적인 도움을 줄 것이다.

이상과 같이 각 배출원별 수은 배출량과 N 소각장의 수은 배출계수를 계산하였으나, 소각장에 유입되는 폐기물에 대한 보다 정확한 자료가 부족하기 때문에 앞으로 보완이 더 필요한 몇 가지 문제점들이 있다. 즉, 건전지의 수은 함유량을 법적 규제치인 1 ppm으로 가정하였으나, 건전지의 종류 및 제조업체에 따라 함유량이 다를 수도 있다. 또한 규제를 받지 않는 의료용이나 산업용의 건전지도 상당수에 이를 것으로 추산되는데, 이에 대한 정확한 생산량과 수은 함유량, 유통 구조 및 폐기과정에 대한 파악이 필요하다. 형광등 사용량을 폐기량에 대한 자료가 없어서 출하량에 대해 단순히 인구비례로 계산 하였으므로 건전지 및 다른 배출원 계산 방법과 동일하지 않다. 그 외에도, MSW와 MDW의 비율이 미국 기준이며, 음식물중의 수은 함유량 역시 미국 기준치를 사용하였다. 가장

수은이 많이 함유되어 있는 것은 터널에서 사용되는 저압 나트륨 등이지만, 자료가 미비하여 본 연구에서는 제외하였으며, 사용이 증가하고 있는 가정용 체온계에 의한 요인을 고려하지 못했고, 단일 제품으로 포함되지 않는 페인트, 염료 등의 변수를 고려하지 않았다. 실제로 페인트나 연료는 수은 함유량은 높으나, 소각로에 유입되는 폐기물의 양을 산정할 수 있는 자료는 부족했다. 또한 특수 코팅된 종이와 살충제 용기는 고려에서 제외 시켰다. 왜냐하면 특수 코팅된 종이와 살충제 용기는 재활용으로 수거 되고 있기 때문이다. 따라서 폐기물 배출량 등은 최대값을 사용하였으나, 배출계수 산정시 포함시키지 못한 값들이 있기 때문에 어느 정도 실제값과 유사할 것으로 추정된다.

IV. 결론

지금까지 우리 나라에서 중금속에 의한 인체의 피해는 작업장에서 나타나는 산업재해로 한정되는 것으로 인식되어 왔다. 그러나 소각장 건설의 증가로 인해 중금속 중에서도 중기압이 유달리 큰 수은은 대기로 확산되어 경우에 따라서는 많은 국민들에게 피해를 미칠 위험을 내포하게 되었다. 우리 나라가 2001년까지 소각을 25%로 증가시킬 계획인 것을 감안한다면, 대기 중 수은의 농도 증가는 피할 수 없는 현실이다. 최근 수행된 한 연구²⁹⁾에 따르면, 서울 시내에서도 소각장에 의한 수은 농도의 영향이 적지 않음을 알 수 있다. 소각장에 인접한 지점과 북서쪽으로 3.4 km 떨어진 지점인 지점의 측정값을 비교한 결과, 소각장 부근의 수은 농도는 평균 $53.96 \pm 22.41 \text{ ng/m}^3$ 이었고, 3.4km 떨어진 지점에서는 $21.05 \pm 3.66 \text{ ng/m}^3$ 의 값을 나타냈다. 소각장이 가동되는 밤 시간에는 소각장 부근의 수은 농도가 무려 71.26 ng/m^3 을 기록하여 시내 중심가에서

측정한 36.62 ng/m³의 1.9배에 이르렀으며, 미국의 배경 농도인 2 ng/m³의 35 배가 넘는 것으로 나타났다. 이제까지 아무런 규제 없이 우리 나라 대기 중에 배출된 수은은 이미 상당량에 이르고 있을 것으로 추정되므로, 앞으로 수은에 대해 강력한 규제를 실시한다 할 지라도 이미 방출된 수은은 대기 중에서 상당 기간 잔존하면서 우리 나라 생태계에 큰 영향을 미칠 것이다. 그 뿐만 아니라, 이미 서구에서는 전세계적인 수은의 대기 방출량 및 국가간 장거리 확산 경로에도 많은 연구가 진행되고 있으므로, 국제적인 규제가 머지 않아 논의될 가능성도 충분하다고 보인다. 이러한 상황에서 현재 우리나라의 소각장이 미치는 환경영향평가에서 수은을 제외시켜 정확한 배출량의 산정이나 측정도 없이 다이옥신류만을 위한 방지시설을 설치하는 것은 앞으로 수은의 환경 오염이 증가할 것이 명확하다는 것을 인식할 때 경제적인 면에서도 불합리하다.

따라서 서론에서도 언급했듯이, 환경영향평가지 대기질 항목이 세분되어 각 배출원의 특성에 따라 각기 중요한 대기오염물질에 대해 영향평가가 이루어 져야 한다. 특히 우리 나라는 형광등으로 인해 폐기물 중 수은 함량이 매우 높으므로 소각로의 환경 영향평가지 대기환경기준 항목에 수은을 반드시 포함시켜 수은 배출이 주변에 미치는 영향을 예측할 수 있어야 한다.

수은은 극히 미량으로도 큰 영향을 미치므로, 서구의 일반적인 배출계수를 여러 가지 특성이 다른 우리 나라 소각장에 그대로 대입하여 배출량을 계산하는 것은 바람직하지 않을 뿐만 아니라, 오염물 확산 방지 대책에 큰 오차를 초래할 우려를 안고 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 최신식 설비를 갖춘 N 소각장을 대상으로 선택하여 쓰레기의 성상, 연소 시설(스토카식 소각로) 및 방지 시설(ESP, WS, 선택적 촉매

환원장치)의 종류에 따라 수은 배출계수를 계산하였다. 특히 쓰레기의 성상은 계절적 및 지역 여건에 따라 변화하므로 수은 배출계수를 정확히 계산하기 위해서는 여러 자료들이 정확해야 할 것이지만, 본 연구에서는 충분한 자료들을 구하기가 어려웠다. 그러나 본 연구에서 계산한 1.85~1.95 g Hg/t의 수은 배출계수는 기존의 배출계수들과 비교할 때, 어느 정도 합리적인 값으로 평가되며, 이러한 계산 방법을 이용하여 다른 소각장들도 수은 배출계수를 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

또한 수은의 배출량을 줄이기 위해서는 방지 시설이나 연소 기술도 중요하지만, 이에 못지 않게 신중히 고려되어야 할 것은 폐기물의 질과 양이다. 즉, 본 연구에서 수은의 가장 큰 배출원으로서 전체 유입량 중에서는 44.4%, 의료용 폐기물을 제외한 MSW중에서는 75.6%를 차지하고 있는 것으로 파악된 형광등에 함유된 수은 함유량에 대한 정부의 엄격한 규제가 필요하고 수입되고 있는 수은 전지에 대해서도 규제가 이루어 져야 한다. 형광등도 지정 폐기물로 설정되어 소각로 속에 유입되지 않아야 하며, 의료용 폐기물의 불법 유입을 줄이기 위해서는 보다 철저한 분리 수거가 이루어 져야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국 학술진흥재단의 박사후 연구원 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Greenberg, A., 1994, Mercury: a Survey of Its Properties, Environmental and Health

- Impacts, Its control and Regulation, Report to NJDEP, Dept. of Science and Research, 5-8
2. Pirrone, N., Keeler, G. J., and Nriagu, J. O., 1996, Regional Differences in Worldwide Emissions of Mercury to the Atmosphere, *Atmos. Environ.*, 30(17) : 2981-2987
 3. Pacyna, J. M. and Munch, J., 1991, Anthropogenic Mercury Emission in Europe, *Wat. Air Soil Pollut.*, 56 : 41-51
 4. Collins, R. and Cole, H. S., 1990, Mercury Rising: Government Ignores the Threat of Mercury from Municipal Waste Incinerators, Clean Water Action Clean Water Fund Research and Technical Center, Washington, D. C., 1-35
 5. 강 현, 박 석순, 이 무춘, 이 장훈, 이 주삼, 이 태관, 이 한섭, 이 현동, 임 재명, 전 의찬, 조 용진 편저, 1996, 환경영향평가, 동화기술, 633-670
 6. 군포시, 대한주택공사, 1997, 군포 쓰레기 소각시설 건설사업 환경영향평가서
 7. Hall, B., Schager, P., and Lindqvist, O., 1991, Chemical Reactions of Mercury in Combustion Flue Gases, *Wat. Air Soil Pollut.*, 56 : 3-14
 8. Lindqvist, O., 1991, Emission of Mercury to the Atmosphere, *Wat. Air Soil Pollut.*, 55 : 23-41
 9. Chun, Mee-Kyung, 1996, Modeling of Mercury Wet Deposition from an Incinerator, Ph. D. Dissertation, Rutgers, the State University of N. J.
 10. 김 기현, 송 동용, 1996, 국내 주요 쓰레기 소각시설로부터 발생하는 수은의 대기 배출량에 관한 연구, *J. KAPRA*, 12(5) : 593-596
 11. 신 현국, 1995, 폐기물 소각 현황과 정책, *J. KAPRA*, 11(2) : 101-106
 12. Rothstein, R. A. and Clamence, B., 1991, Issues Associated with Environmental Impact and Permit Evaluations of Mercury Emissions from Municipal Waste Combustors, in Presentation of Air, Water, & Waste Technologies Conference, The Engineering Society of Detroit and Michigan, Detroit, 1-34
 13. 환경관리공단, 1996, 대기오염배출계수 (III), 169-210
 14. deFreitas, A. S. W., 1979, Effect of Mercury on the Canadian Environments, National Research Council, Canada
 15. Franklin, M. A., 1993, Characterization of Mercury in Products in Municipal Solid Waste, Franklin Associates, Ltd., Prairie Village, 1-13
 16. Dempsey, C. R., and Oppelt, E. T., 1993, Incineration of Hazardous Waste: A Critical Review Update, *A&WMA*, 43 : 25-73
 17. Hall, B., 1992, An Experimental Study of Mercury Reactions in Combustion Flue Gases, Ph. D. Dissertation, Chalmers University of Technology, ISBN 91-7032-682-7, Goteborg, 1-47
 18. Vogg, H., Braun, H., Metzger, M., Schneider, J., 1986, The Specific Role of Cadmium and Mercury in Municipal Solid Waste Incineration, *Waste Management & Research* 4 : 65-70
 19. Frillici, P. W., Li, R., Bacon, G. H., and Hayes, D. J., 1993, Evaluation of Mercury Emission Reduction Alternatives for the Fort

- Dix Resource Recovery Facility, A&WMA 3rd International Conf. on Municipal Waste combustion, Williamsberg, 1-15
20. Lindqvist, O., 1986, Fluxes of mercury in the Swedish Environment: Contributions from Waste Incineration, Waste Management & Research 4 : 35-44
 21. 고 윤화, 1997, 소각장 배출 다이옥신 규제 방안, in Proceedings of the International Seminar on waste Incineration and Dioxin Control Technology, 한국 폐기물학회, 미국·아시아 환경기술협력기구, Seoul, 57-78
 22. 통계청, 1996, 노원구 통계 연감, 38-39
 23. 서울시정개발연구원, 1994, 서울시 쓰레기 처리 기본방향 설정-쓰레기 배출 특성 분석 및 관리 방향 설정, 시정연 94-R-15①
 24. Drum, D. A., Crawford, K., Selzer, T., Wargo, S., 1993, Behavior of Mercury Metal and Mercury Compounds during Collection on Various Media at 400 ° F, A&WMA 86th Annual meeting & Exhibition 93-MP-21.01, Denver, 1-8
 25. 통계청, 1996, 산업생산연감, 636-637
 26. Glasser, H., Chang, D. P., and Hickman, D. C., 1991, An Analysis of Biomedical Waste Incineration, A&WMA, 41(9) : 1180-1188
 27. Reimann, D. O., 1986, Mercury Output from Garbage Incineration, Waste Management & Research 4 : 45-56
 28. 쓰레기 성분 분석표, 노원 자원회수시설, 1997 6월 5일, 7월 9일, 8월 6일 자료의 평균값
 29. Sohn, D. H., Shin, J. E., Jung, S. Y., and Jung, W. T., 1995, Mercury Concentration in Urban and Rural Atmospheres of Korea, J. KAPRA, 11(E), 55-62