

국내 비의도적 주요 배출원의 지역별 수은 대기 배출량 산정 및 미래 활동도 변화와 최적가용기술 적용 시 배출량 추이

Estimation of Mercury Emission from Major Sources in Annex D of Minamata Convention and Future Trend

성진호 · 오주성 · 백승기 · 정법목 · 장하나 · 서용철 · 김성현*

연세대학교 환경공학과

(2016년 1월 15일 접수, 2016년 3월 31일 수정, 2016년 4월 5일 채택)

Jin-Ho Sung, Joo-Sung Oh, Seung-Ki Back, Bup-Mook Jeong,
Ha-Na Jang, Yong-Chil Seo and Seong-Heon Kim*

Department of Environmental Engineering, WtERT Center, Yonsei University

(Received 15 January 2016, revised 31 March 2016, accepted 5 April 2016)

Abstract

This study discusses the present status of mercury emission and distribution from major anthropogenic sources in Korea and the future trend of mercury emission by activity changes and application of BATs. Atmospheric mercury emission from major anthropogenic sources based on Annex D of Minamata convention was estimated to around 4.89 tonne in 2012. Emission ratios of cement clinker production, coal-fired power plant, waste incineration and non-ferrous metal smelting were 68.68%, 24.75%, 6.29% and 0.28%, respectively. High mercury emission regions were characterized by the presence of cement clinker production facilities and coal-fired power plants. Prediction of future activities was carried out by linear regression of the previous year data. The (total) mercury emission was estimated to decrease up to 48% Under the scenario of BATs to be applied and the change of future activities. Emissions from coal-fired powerplants and cement clinkers were expected to decrease significantly.

Key words : Mercury, Anthropogenic source, Emission, BAT, Scenario

1. 서 론

수은은 위해성과 아울러 장거리 이동 특성을 가지고 있어 국제적 공동대응 필요성이 지속적으로 제기되었

고, 최근 국제수은협약에 대한 논의가 본격화되었다. 2013년 1월 최종협약문이 도출되었고, 2013년 10월 ‘수은에 관한 미나마타협약’이 채택되었다. 우리나라를 포함하여, EU·일본·중국 등 주요국 대부분은 협약에 서명하였고, 현재 협약에 대한 비준을 추진하고 있다(UNEP, 2013). 국내에서는 2016년에 발효될 것으로 예상되는 이 협약에 대비하여, 협약문 이행을 위한 모니터링, 배출원 관리, 원자재·제품관리, 폐기물 처

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-760-2380, E-mail : seongheo@yonsei.ac.kr

리, 노출저감 및 기술개발 등 6개 주요 분야별 수은관리 종합대책을 마련하고 있다. 이 중 수은의 대기 배출은 UNEP의 전문가회의를 통해 각국의 인위적 배출원에서의 배출량을 종합하고 있다(MOE, 2013).

현재 AMAP/UNEP에서는 2010년을 기준으로 전 세계의 수은 배출량을 공식 발표한 바 있다(AMAP/UNEP, 2013). 미나마타협약 중 부속서 D에는 비의도적 대기 중 수은 배출원이 목록화 되어 있다(UNEP, 2013). 비의도적 대기 중 수은 배출시설이란 제품이나 공정 과정 중 원재료로 수은이 들어가지 않지만, 연소 등의 공정 때문에 배가스를 통해 수은을 배출하는 시설이다. 국내에서 부속서 D에 해당하는 시설 중 주요 배출시설은 석탄 화력발전시설, 비철금속 1차 제련시설, 시멘트 클링커 생산시설 및 폐기물 소각시설이다. 이들 배출시설들은 국내의 부속서 D 해당 시설 배출량의 90% 이상을 배출하는 것으로 파악된다(NIER, 2011).

배가스 중 수은의 제어 효율은 대기오염 방지시설 구성의 영향이 가장 크다고 알려져 있다(Park *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008). 기존 대기오염 방지시설은 배가스 중 오염물질(NO_x, SO_x, PM 등)을 제어하는 과정에서 가스상 수은을 동시에 제거하는 이중 효과(co-benefit)를 가지고 있다(Jung and Shim, 2009; Scala and Clack, 2008). 현재 UNEP에서는 대기 중 수은 배출량을 감축하기 위해 비의도적 배출시설에 대한 최적 가용기술(BAT: Best Available Technology) 가이드라인이 작성되고 있다. 국내에서도 최적가용기술에 대한 적용성 및 효율에 대한 검토가 완료된 상태이다.

AMAP/UNEP 등에서 발간한 보고서에 국내 총 대기 중 수은 배출량이 공개되어 있다(UNEP, 2013). 또한 국내 수은 배출량을 종합하여 대기 중 총 수은 배출량을 산정한 결과가 있다(KECO, 2012). 하지만 기존에 국내 대기 중 수은 배출량을 지역별로 파악한 결과는 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서 국내 주요 수은 배출시설들의 위치를 기반으로, 지역별 분포를 파악하고자 국내 부속서 D에 해당하는 시설만을 대상으로 시설별 위치와 선행연구의 배출계수를 적용하여 지역별 수은 배출량을 도출하였다.

대기오염물질의 배출량은 경제성장과 기술의 발전에 따라 변화하게 된다. 일반적으로 경제성장은 오염물질 배출의 증가를 유발한다. 한편 미나마타협약 발효 이후에는 다양한 시설에 BAT가 적용될 것이며, 특히 새로

운 대기오염 방지시설에 BAT를 적용하면 수은의 배출량이 감소할 것이다. 따라서 본 연구에서는 미래의 활동량 변화를 예측하고 BAT의 적용에 따른 시나리오를 설정하여 수은의 미래 배출량 추이를 예측하였다.

2. 연구 방법

2.1 주요 인위적 대기배출원 조사

미나마타협약에는 수은의 주요 대기배출시설을 목록화(부속서 D)하고 있으며, 국내에서 현황이 파악된 시설은 석탄 화력발전시설, 시멘트 클링커 생산시설, 비철금속 1차 제련시설 및 폐기물 소각시설이다(UNEP, 2013). 각 시설의 위치는 국립환경과학원의 대기배출원 관리시스템 자료를 이용하여 파악하였다.

국내에서 사용되는 석탄의 종류는 가정산업과 발전 부분에서 주요하게 사용되는 무연탄과 발전, 비철금속 1차 제련 및 기타 제조시설에서 주요하게 사용하고 있는 유연탄이 있다(MOTIE, 2014). 국내 석탄 화력발전 시설은 한국전력공사에서 관리 중이며, 5개의 전력 그룹사에서 지역별 화력본부를 기저부하 발전소로 운전하고 있다(KEPCO, 2015). 표 1은 국내 지역별 및 사용 연료에 따른 석탄 화력발전시설 분포이다.

수은에 대한 미나마타협약에서 부속서 D로 구분된

Table 1. Coal-fired power plants in Korea.

Location	Fuel		Subtotal
	Anthracite	Bituminous	
Gangwon-do	2	—	2
Gyeongsangnam-do	—	2	2
Incheon	—	1	1
Jeollanam-do	—	2	2
Chungcheongnam-do	1	3	4
Total	3	8	11

Table 2. Primary non-ferrous metal smelting facilities in Korea.

Location	Smelting materials			Subtotal
	Copper	Zinc	Zinc/Lead	
Ulsan	1	—	1	2
Gyeongsangbuk-do	—	1	—	1
Total	1	1	1	—

비철금속 1차 제련시설은 구리, 아연, 납 및 금 제련시설이다. 국내의 비철금속 제련시설은 금 제련시설을 제외한 구리, 아연 및 납 제련시설이 운영되고 있다. 국내에서는 표 2와 같이 구리 제련시설 1개소, 아연 제련시설 2개소 및 납 제련시설 1개소가 존재한다. 이 중 1개소는 아연과 납을 동시에 제련하는 시설로 파악되어 비철금속 1차 제련시설은 총 3개소이다.

한국은 세계 10대 시멘트 소비국가로 연간 45,493천톤을 사용하고 있으며, 이는 세계 전체 소비량 중 1.4%를 차지한다. 또한 한국은 세계 11대 시멘트 생산국가로 2014년 기준 시멘트 및 클링커 생산량은 각각 47,048천톤, 44,816천톤이다. 국내 생산업체는 총 10개가 존재하며(KCA, 2015), 표 3은 국내 지역별 시멘트 클링커 생산시설 수를 나타낸 것이다.

국내에서 폐기물은 발생원별 관리 형태로 크게 생활폐기물과 사업장 폐기물로 구분하고 있다. 사업장 폐기물은 발생특성 및 성상에 따라 다시 사업장 일반폐기물(사업장 생활폐기물, 사업장 배출시설계 폐기물), 건설폐기물 및 지정폐기물로 세분화 된다. 표 4는 국내 지역별 및 종류별 폐기물 소각시설의 위치를 나타낸 것이다.

2.2 수는 대기 배출량 산정

각 시설별 대기 중 수는 배출량은 선행연구에서 도출한 배출계수에 주요 대기배출원의 2012년도 활동도를 적용하여 산출하였다. 일반적으로 배출계수는 대표적인 시설을 실측한 뒤 산출된 평균값을 동종시설의 계수로 활용한다(KECO, 2012). 본 연구에서는 지역별 배출량의 오차를 최소화하기 위해 실측된 시설은 해당

시설의 배출계수를 사용하고 그 외의 시설은 실측치의 평균값을 사용하였다(표 7). 석탄 화력발전시설 중 무연탄은 3개 시설 전체가 실측되었고, 유연탄시설은 8개 시설 중 4개 시설이 실측되었다. 시멘트 클링커 생산시

Table 3. Cement clinker production facilities in Korea.

Location	Subtotal
Gangwon-do	5
Cungcheongbuk-do	4
Jeollanam-do	1
Total	10

Table 4. Waste incineration facilities in Korea.

Location	Waste type		Subtotal
	Municipal waste	Industrial waste	
Gangwon-do	7	—	7
Gyeonggi-do	27	6	33
Gyeongsangnam-do	14	1	15
Gyeongsangbuk-do	23	4	27
Gwangju	1	1	2
Daegu	1	—	1
Daejeon	1	1	2
Busan	4	2	6
Seoul	4	—	4
Ulsan	2	2	4
Incheon	6	1	7
Jeollanam-do	10	2	12
Jeollabuk-do	7	1	8
Jeju	2	—	2
Cungcheongnam-do	12	1	13
Cungcheongbuk-do	6	1	7
Total	127	23	150

Table 5. Emission factors used for calculating emissions.

Categories	Type	Emission factor (mg/tonne) (Minimum~Maximum) ¹⁾
Coal-fired power plants	Anthracite	1.98 (1.82~3.12) ¹⁾
	Bituminous	15.27 (7.96~25.89) ¹⁾
Non-ferrous metal smelting facilities	Copper	4.70 ¹⁾
	Zinc	6.37 ¹⁾
	Lead	5.45 ¹⁾
Cement clinker production facilities		59.25 (1.02~141.42) ¹⁾
Waste incineration facilities	Municipal	31.14 (5.90~49.70) ¹⁾
	Industrial	224.44 (95.33~354.53) ¹⁾

¹⁾NIER (2010, 2008)

Table 6. BAT applied to each facilities and mercury removal efficiency.

Facilities	Wide used configurations	Best Available Technologies	
		Configurations	Hg removal efficiency
Coal-fired power plants	SCR-ESP-FGD	SCR-ACI-ESP-FGD	≥ 90% ¹⁾
Non-ferrous metal	ESP-VS-ESP-Boliden Norzink-1st Adsorption Tower-2nd Adsorption Tower-WS		≥ 99% ²⁾
Cement clinker production facilities	SNCR-BF	SNCR-EP-BF	≥ 77% ³⁾
Waste incinerator facilities	-	SDR-BF-SCR or SNCR	≥ 85% ⁴⁾

¹⁾ Pavlish *et al.*, 2009, ²⁾ Park *et al.*, 2010, ³⁾ (AMAP/UNEP, 2013), ⁴⁾ Bureau, E., 2006

SCR: Selective Catalytic Reduction, ESP: Electro Static Precipitator, FGD: Flue Gas Desulfurization, ACI: Activated Carbon Injection, VS: Venturi Scrubber, SNCR: Selective Non-Catalytic Reduction, BF: Back Filter, SDR: Semi Dry Reactor, WS: Wet Scrubber.

설은 총 10개 시설 중 3개 시설이 실측되었다. 비철금속 1차 제련시설은 구리와 납은 각각 1개 시설만 운영되고 있으며 실측되었다. 아연제련시설은 총 2개 중 1개 시설이 실측되었다. 폐기물 소각시설은 생활폐기물 소각이 177개소 중 6개 시설, 지정폐기물 소각이 45개소 중 3개 시설이 실측되었다(표 7). 폐기물 소각시설은 전체 시설에 비해 실측된 수가 적고, 각 소각시설의 소각량이 파악되어 있지 않다. 때문에 전체 폐기물 소각량을 각 시설별 전용용량으로 나눠 활동도를 산출하였다. 각 시설의 측정된 배출계수의 최소, 최대 및 평균 값은 다음 표 5와 같다.

2.3 BAT 적용 시나리오에 입각한 미래 대기 배출량 산정

수은의 대기 배출량은 활동도와 대기오염 방지시설 구성에 따라 변한다. 활동도의 변동은 각 시설의 증축 계획을 활용하거나 통계적 분석 방법을 통해 미래의 생산 및 수요량을 예측할 수 있다. 석탄 화력발전시설의 미래 활동도는 제7차 전력수급 기본계획에 따른 신규 발전시설의 가동 규모로부터 예측하였다(MOTIE, 2015). 석탄 화력발전시설을 제외한 시설들의 미래 활동도 예측은 3가지 방법을 검토하였다. 첫 번째로 기존 활동도들의 선형 회귀식을 적용하여 미래의 활동도를 예측하였다. 두 번째는 기존 활동도의 4단위 이동평균을 적용하고 선형 회귀식을 통해 예측하였다. 세 번째는 가장 최근 연도부터 가중치를 두어(P1: 0.4, P2: 0.3, P3: 0.2, P4: 0.1) 이동가중평균을 구한 뒤 선형 회귀식을 통해 예측하는 방법이다. 세 가지 방법을 예비 검토한 결과 일반 선형 회귀식의 적용은 활동도가 과다하

게 변화하는 것을 알 수 있었다. 이동평균과 가중이동평균을 구한 뒤 선형 회귀식을 예비 적용한 결과, 두 방법 사이에는 큰 차이가 없었다. 하지만 두 가지 방법 중 최근 변화를 반영한 이동가중평균법을 활용하는 것이 더 적합하다고 판단하였다. 각 시설별 활동도 예측에 사용된 과거 자료는 연도별 폐기물 소각량, 시멘트 생산량, 비철금속 생산을 사용하였다(MOE, 2014a, b; PPS, 2014; KCA, 2013). 또한 각 회귀분석 결과는 상관계수(R)값과 유의 확률에 따른 신뢰구간(%)을 통해 예측 값의 불확실성을 판단하였다.

경제성장과 동시에 방지시설에 대한 기술개발과 적용을 통해 수은의 대기 배출량이 감소 또한 미래 예측에 중요한 요소이다. 국제적으로는 수은에 대한 BAT (Best Available Technology)/BEP (Best Environmental Practice) 가이드라인이 작성되고 있으며, 국내에서도 수은협약 대책마련을 위한 BAT/BEP 국내 적용방안 연구가 진행된 바 있다(MOE, 2015). 미래 예측에서는 2016년 말부터 수은의 주요 대기배출원에 BAT를 적용 시 배출되는 수은량 변화를 산정하였다. 미래의 수은 배출량의 산정은 3가지 시나리오를 적용하여 판단하였다. 첫 번째는 모든 시설에서 BAT를 적용하지 않아 현재의 배출계수를 유지하고 활동도 변화를 예측한 결과이다. 두 번째는 신규 시설을 건설하거나, 활동도가 증가할 때 그 증가분에 대해서만 BAT를 적용하는 방법이다. 세 번째는 모든 시설에 BAT를 적용하는 방안이다. 이런 세 가지의 경우를 모두 고려하여 미래의 배출량을 산정하였다. 각 시설들에 적용할 수 있는 BAT는 범위로 제공되나, 본 연구에서는 최소값을 사용하였고, 이를 표 6에 나타냈다.

Table 7. Local emissions of each facilities.

Categories	Sub categories	Region (Number of facilities)	Emission factor (mg/tonne)	Activities (tonne/yr)	Emissions (tonne/yr)	
Coal-fired power plants	Anthracite	GAW-1 (1)	1.82 ¹⁾	202,164	0.00037	
		GAW-2 (1)	3.12 ¹⁾	520,523	0.0016	
		CUCN (1)	1.00 ¹⁾	535,523	0.00053	
	Bituminous	INC (1)	9.18 ¹⁾	10,767,774	0.099	
		CUCN-1 (1)	25.89 ¹⁾	12,334,318	0.32	
		CUCN-2 (1)	18.04 ¹⁾	13,325,349	0.24	
		CUCN-3 (1)	7.96 ¹⁾	12,824,504	0.10	
		JELN (1)	15.27 ²⁾	1,229,535	0.025	
		GYSN-1 (1)	15.27 ²⁾	12,977,879	0.019	
		GYSN-2 (1)	15.27 ²⁾	13,311,442	0.20	
	GYSN-3 (1)	15.27 ²⁾	29,186,648	0.20		
	Sub total					1.21
	Cement clinker production facilities	GAW-1 (1)	59.25 ²⁾	8,425,171	0.50	
GAW-2 (1)		141.42 ¹⁾	10,853,066	1.53		
GAW-3 (1)		1.02 ¹⁾	2,484,681	0.0025		
GAW-4 (1)		59.25 ²⁾	3,604,083	0.21		
GAW-5 (1)		59.25 ²⁾	5,059,944	0.30		
CUCB-1 (1)		59.25 ²⁾	5,267,209	0.31		
CUCB-2 (1)		59.25 ²⁾	627,386	0.037		
CUCB-3 (1)		35.32 ¹⁾	2,802,217	0.099		
CUCB-4 (1)		59.25 ²⁾	5,380,737	0.32		
JELN (1)		59.25 ²⁾	650,493	0.039		
Sub total					3.36	
Waste incineration facilities	Municipal	SEU (5)		862,980	0.027	
		BUS (3)		224,176	0.0070	
		DAG (1)		138,308	0.0043	
		INC (3)		209,100	0.0065	
		GWJ (1)		93,702	0.0029	
		DAJ (1)		111,105	0.0035	
		ULS (1)		107,532	0.0034	
		KYK (23)	31.14 ²⁾	1,342,108	0.042	
		GAW (14)		115,693	0.0036	
		CUCB (9)		123,887	0.0039	
		CUCN (13)		229,256	0.0071	
		JELB (2)		157,317	0.0049	
		JELN (41)		128,967	0.0040	
	GYSB (23)		157,775	0.0049		
	GYSN (19)		387,753	0.012		
	JEJ (4)		85,607	0.0027		
	Industrial	ULS (3)		36,897	0.0083	
		BUS (2)		15,610	0.0035	
		INC (2)		46,476	0.010	
		DAJ (2)		35,478	0.0080	
KYK (18)			277,793	0.062		
CUCN (1)		224.44 ²⁾	24,835	0.0056		
JELB (1)			16,249	0.036		
JELN (5)			62,441	0.014		
KYSB (8)		126,302	0.028			
GWJ (1)		21,287	0.0048			
CUCB (2)		28,382	0.0064			
KYSN (1)		56,765	0.13			

Table 7. Continued.

Categories	Sub categories	Region (Number of facilities)	Emission factor (mg/tonne)	Activities (tonne/yr)	Emissions (tonne/yr)
Sub total					0.31
Non-ferrous metal smelting facilities	Zinc	ULS (1)	6.37 ²⁾	481,794	0.0031
		KYSB1 (1)		481,794	0.0031
	Copper	ULS (1)	1.70 ²⁾	895,969	0.0042
	Lead	ULS (1)	5.45 ²⁾	643,745	0.0035
Sub total					0.0014
Total					4.89

¹⁾The actual facilities.

²⁾The average of the same kind facilities.

GAW: Gangwon-do, GYG: Gyeonggi-do, GYSN: Gyeongsangnam-do, GYSB: Gyeongsangbuk-do, GWJ: Gwangju, DAG: Daegu, DAJ: Daejeon, BUS: Busan, SEU: Seoul, ULS: Ulsan, INC: Incheon, JELN: Jeollanam-do, JELB: Jeollabuk-do, JEJ: Jeju, CUCN: Chungcheongnam-do, CUCB: Chungcheongbuk-do.

3. 결과 및 고찰

3.1 배출원별 대기오염 방지시설 및 수은

배출량

2012년 국내 부속서 D에 해당하는 시설들의 총 수은 배출량은 연간 4.89톤으로 산출되었다. 각 지역의 시설별 활동도, 배출계수 및 배출량을 표 7에, 주요 배출원의 수은 배출 비율은 그림 1에 나타났다. 시설별 수은 배출비율은 시멘트 클링커 생산시설, 석탄 화력발전시설, 폐기물 소각시설 및 비철금속 1차 제련시설 순으로 각각 68.68%, 24.74%, 6.29% 및 0.28%를 차지했다.

국내 시멘트 클링커 생산시설로부터 대기로 배출되는 수은은 연간 3.36톤으로 산출되었다. 시멘트 클링커 생산시설 내 대기오염 방지시설은 대부분 무촉매환원기(SNCR:Selective Non-Catalytic Reduction)와 여과집진기(FF:Fabric Filter)로 구성되어 있다(Kim *et al.*, 2010). 이들 방지시설의 수은제어 효율은 평균 60.50%에 머물고 있어 상대적으로 높은 수은 배출량을 보이는 것으로 판단된다.

석탄 화력발전시설로부터 대기로 배출되는 수은은 연간 1.21톤으로 산출되었다. 무연탄 화력발전시설의 대표적인 방지시설은 전기집진기(ESP: Electro Static Precipitator)와 습식탈황기(FGD:Flue Gas Desulfurization)로 구성되어 있다. 유연탄 화력발전시설의 대표적인 방지시설은 촉매환원기(SCR: Selective Catalytic Reduction), ESP 및 FGD로 구성되어 있다(Kim *et al.*,

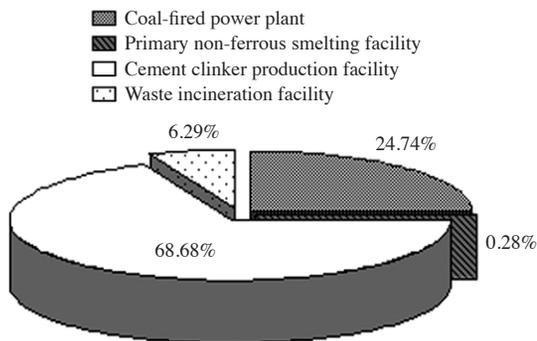


Fig. 1. Mercury emission ratio in Annex D in Korea.

2012; NIER, 2008). 이들 방지시설의 수은제어 효율은 무연탄 평균 77.50%, 유연탄 평균 76.92%에 머물고 있어 상대적으로 높은 수은 배출량을 보이는 것으로 판단된다.

비철금속 1차 제련시설로부터 대기로 배출되는 수은은 연간 0.014톤으로 산출되었다. 비철금속 1차 제련시설은 매우 복잡한 대기오염 방지시설 구성을 보이며 다양한 co-benefit효과로 제어된다(Park *et al.*, 2010). 이들 방지시설은 수은제어 효율은 평균 99.90%에 달하고 있어 상대적으로 매우 낮은 수은 배출량을 보이는 것으로 판단된다.

폐기물 소각시설로부터 대기로 배출되는 수은은 연간 0.31톤으로 산출되었다. 폐기물 소각시설은 매우 많은 종류의 대기오염 방지시설이 운영되고 있어, 대표

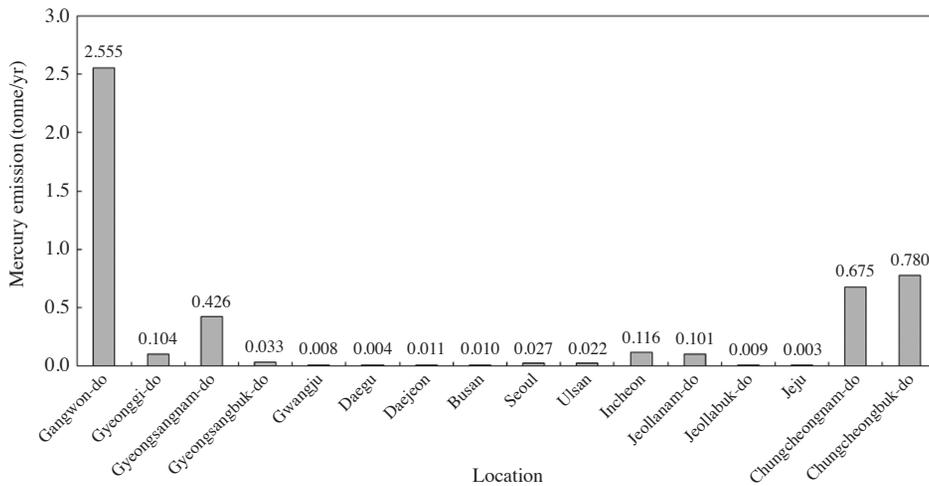


Fig. 2. Distribution of mercury emissions in Korea.

방지시설 선정이 어려운 상태이다. 대기오염 방지시설의 평균 제어 효율은 생활폐기물 소각시설은 93.52% (NIER, 2008; Lee, 2004; Seok *et al.*, 2004)로 높은 효율을 보이나, 지정폐기물 소각시설은 38.24%의 낮은 효율을 보이고 있다.

3.2 지역별 수은 배출량과 총 수은 배출량

지역별 수은 배출량은 산업시설별 수은 배출량과 큰 연관성이 있다. 가장 큰 배출량을 보이는 시멘트 클링커 생산시설은 원료의 수급이 용이한, 강원도와 충청북도 지역에 집중되어 있다. 석탄 화력발전시설은 해수의 이용을 위해 바닷가 주변에 위치하고 있으며, 활동도가 큰 유연탄 화력발전시설이 무연탄 화력발전시설보다 지역별 수은 배출량에 더 큰 영향을 미친다.

강원도의 대기 중 수은 배출량은 연간 2.56톤으로 가장 많은 수은을 배출했으며, 부속서 D에 해당하는 총 배출량의 52.31%를 차지했다. 그 원인은 시멘트 클링커 생산시설이 강원도에 집중되어 있는 것이 가장 큰 영향을 미쳤으며, 시멘트 클링커 생산시설로부터의 배출은 강원지역 전체 수은 배출량의 99.78%를 차지하였다. 충청북도의 수은 배출량은 연간 0.78톤으로 산정되었으며, 국내 총 배출량의 15.97%를 차지했다. 이는 충청북도에 시멘트 클링커 생산시설이 집중되어 있기 때문이며, 충청북도 전체 수은 배출량의 98.12%를 차지하였다. 충청남도의 수은 배출량은 연간 0.68톤으로

국내 총 배출량의 13.82%를 차지하였으며, 석탄 화력발전시설이 가장 큰 영향을 미쳤다. 석탄 화력발전시설의 수은 배출량은 충청남도 전체 수은 배출량의 98.30%를 차지하였다. 경상남도의 수은 배출량은 연간 0.43톤이고, 총 배출량의 8.72%를 차지하였다. 주요 배출원은 석탄 화력발전시설이며, 경상남도 전체 배출량의 94.18%를 차지했다. 국내 부속서 D에 해당하는 시설의 총 수은 배출량 중 강원도, 충청남도, 충청북도 및 경상남도의 비율이 90% 이상 편중된 것으로 나타났다. 이외 지역은 총 수은 배출량이 연간 0.13톤 이하로 나타났다(그림 2).

3.3 시나리오에 따른 수은 배출량

미래의 수은 배출량은 활동도의 변화량을 추정하고, BAT는 2017년부터 적용하여 미래 배출량을 예측하였다. 또한 BAT의 적용을 3가지 시나리오로 구분하여 배출량을 산정하였다.

석탄 화력발전시설의 연도별 발전용량은 그림 3에 나타난 바와 같이 신규 시설이 완공되는 시점에 큰 폭으로 증가하며, 2022년까지 단계적으로 증축될 예정이다(MOTIE, 2015). 석탄 화력발전시설의 미래 활동도는 2012년의 석탄 사용량을 기준으로 연도별 발전용량의 증가분을 적용하여 2022년까지 산출하였다. 2022년의 연간 수은 배출량은 2.08톤으로 2012년 대비 71.95%가 증가할 것으로 예측되었다(그림 4).

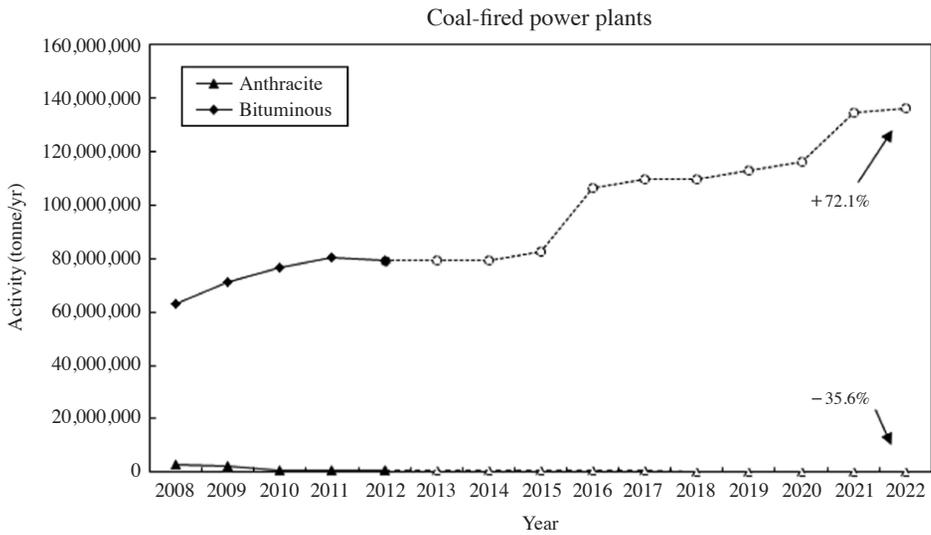


Fig. 3. Future changes in the activity of coal-fired power plants.

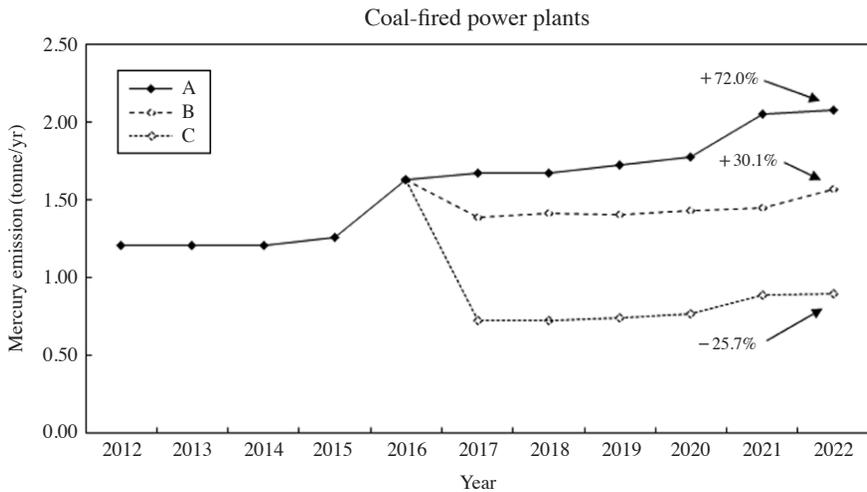


Fig. 4. Mercury emission scenarios in coal-fired power plants, A: increased activities (scenario A), B: increased activities & applied BAT for new facilities (scenario B), C: increased activities & applied BAT for whole facilities (scenario C).

석탄 화력발전시설의 BAT는 입자상 물질 제어설비 전단에서 활성탄을 분사하는 것(ACI: Activated Carbon Injection)으로 중금속과 같은 미량물질을 흡착하여 제어함과 동시에 수은에 대한 매우 높은 제어 효율을 나타낸다. 이를 통해 수은의 제어 효율은 90% 이상으로 증가할 수 있다(Pavlish *et al.*, 2009). 신규 시설에 BAT를 적용하면 연간 1.56톤을 배출하여, 미적용 시 대비

24.96% 감소할 것으로 예측되었다. 모든 시설에 BAT 적용 시 연간 0.87톤을 배출하여, 미적용 시 대비 58.29% 감소할 것으로 예측되었다(그림 4).

석탄 화력발전시설 이외의 시설은 가중이동평균법을 사용하여 미래의 활동도를 예측하였다. 해당 방법의 불확실성을 판단하기 위해 1998년부터 2007년까지의 각 시설별 활동도의 이동가중평균 값을 1차 회귀분석

Table 8. Prediction error of the activity applying the moving weighted average and linear regression.

Year	Cement clinker production facility	Waste incinerator		Non-ferrous metal smelting facility		
		Municipal	Industrial	Copper	Zinc	Lead
2008	-2.48%	-10.28%	-2.27%	2.24%	-9.31%	0.98%
2009	1.24%	-4.50%	13.43%	-5.83%	-8.62%	-22.94%
2010	-0.56%	-1.92%	6.54%	-0.91%	-7.80%	-26.21%
2011	-1.09%	-5.50%	2.94%	2.55%	-18.47%	-39.71%
2012	-1.62%	-5.99%	-5.94%	5.04%	-13.28%	-41.97%
Average	-0.90 ± 1.25%	-5.64 ± 2.71%	2.94 ± 6.77%	0.62 ± 3.74%	-13.28 ± 5.90%	-25.97 ± 15.37%

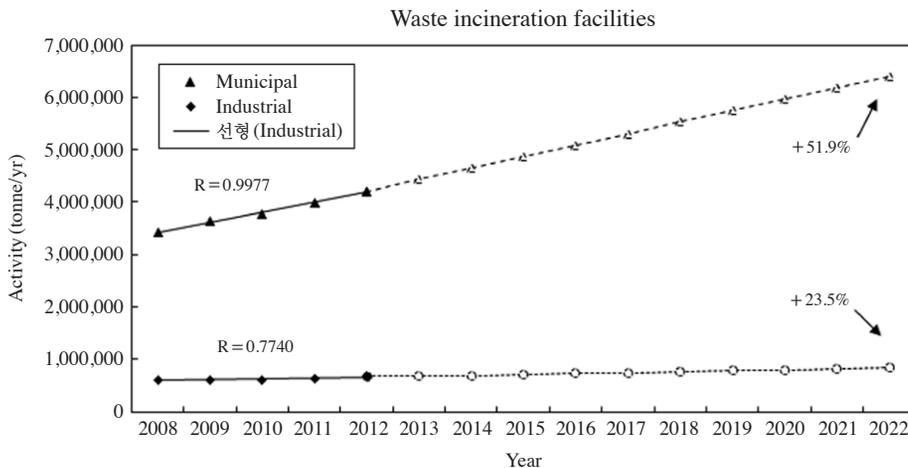


Fig. 5. Future changes in the activities of waste incineration facilities.

하고 2008~2012년도에 외삽하여 활동도를 예측하였다. 산출된 값을 2008년부터 2012년까지의 실제 활동도와 비교하여 다음 표 8에 나타냈다. 각 시설별 예측된 활동도를 실제 활동도비교해 보면, 시멘트 클링커 생산시설은 $-0.9 \pm 1.25\%$, 생활 및 지정폐기물 소각시설은 각각 $-5.64 \pm 2.71\%$, $2.94 \pm 6.77\%$ 의 차이를 보였다. 비철금속 제련시설의 경우 실제 값과 비교하여 구리는 $0.62 \pm 3.74\%$ 로 근접한 값을 보였으나, 아연과 납은 각각 $-13.28 \pm 5.90\%$, $25.97 \pm 15.37\%$ 로 나타났다. 활동도를 예측한 뒤 검증해본 결과 비철금속 생산시설의 아연과 납 제련시설을 제외한 나머지 시설의 활동도 예측 수준은 적합하다고 판단된다. 또한 나머지 두 시설의 경우 전체 대기 중 수는 배출량에 기여하는 정도가 매우 낮아 큰 영향을 없을 것으로 판단된다.

폐기물 소각시설은 폐기물 소각량을 활동도로 적용한다. 생활폐기물과 지정폐기물의 과거 5년간 가중이

동평균의 선형 변화 추세 및 미래 예측 변화량을 그림 5에 나타냈다. 생활폐기물 및 지정폐기물 소각시설의 최근 5년간 변화를 선형 모사한 상관계수, R은 각각 0.9977, 0.7740로서 유의 확률에 따른 신뢰수준은 각각 100.0%, 88.6%이다. 전체 폐기물 소각량은 지속적으로 증가하면서 2022년 수는 배출량은 0.37톤을 배출하여, 2012년의 실제 배출량 대비 21.55%가 증가할 것으로 예측되었다.

생활폐기물 소각시설의 대기오염 방지시설은 현재 충분한 효율을 보이고 있기 때문에 신규 시설에 대한 BAT 적용은 고려하지 않았다. 지정폐기물 소각시설에 적용 가능한 BAT는 SDR과 습식세정기(WS: Wet Scrubber)이다. SDR은 배가스 중 산화수은의 비율을 증가시키고, 습식방지시설은 산화된 수은을 제거하는 효율이 높다(Redinger *et al.*, 1997). 이 두 가지 공정을 적용하면 수은의 제어 효율을 85% 이상으로 향상시킬

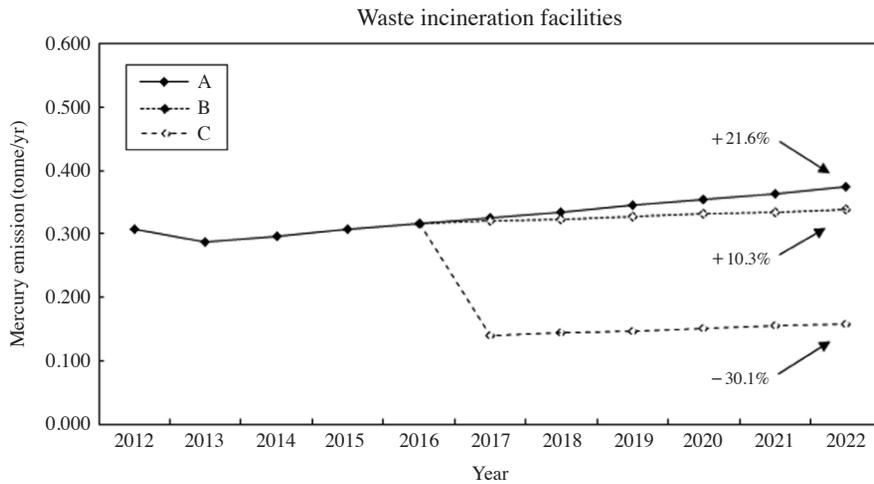


Fig. 6. Mercury emission scenarios in waste incineration facilities. A: Increased activities (scenario A), B: Increased activities & applied BAT for new facilities (scenario B), C: Increased activities & applied BAT for whole facilities (scenario C).

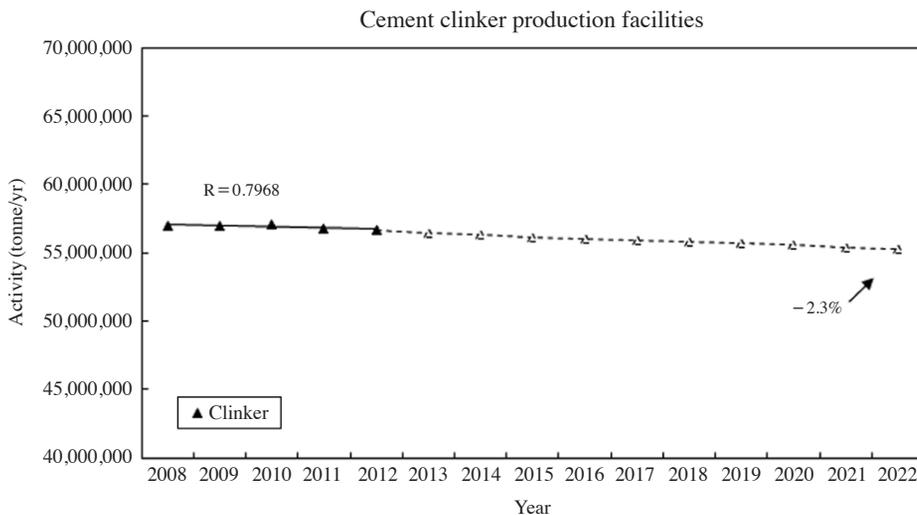


Fig. 7. Future changes in the activities of cement clinker production facilities.

수 있다(Bureau, 2006). 폐기물 소각시설의 시나리오는 폐기물이 지속적으로 증가함에 따라 신규 시설이 건설된다고 가정하였고, 증가량을 신규 시설의 활동도로 가정하여 산출하였다. 지정폐기물 소각 신규 시설에 BAT를 적용하면 2022년 배출량은 연간 0.36톤으로, 기존 배출량 대비 3.11% 감소할 것으로 예측되었다. 모든 시설에 BAT 적용 시 연간 0.23톤을 배출하게 되어, 미

적용 시 대비 38.32%가 감소할 것으로 예측되었다(그림 6).

시멘트 클링커 생산시설은 생산량을 활동도로 적용한다. 시멘트 클링커 생산시설의 과거 5년간 가중이동 평균의 선형 변화 추세 및 미래 예측 변화량을 모사한 상관계수, R은 0.7968로서 89.3%의 유의미한 신뢰수준을 보였다(그림 7). 시멘트 클링커 생산량은 지속적

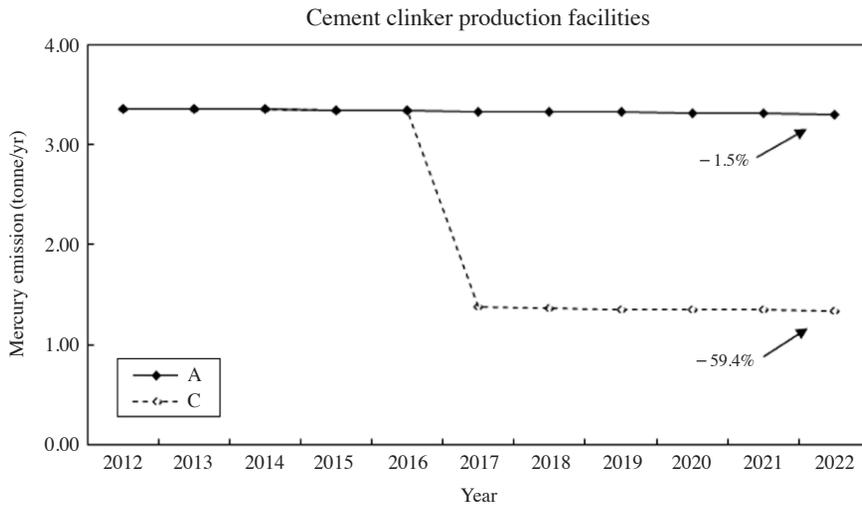


Fig. 8. Mercury emission scenarios in cement clinker production facilities. A: Increased activities (scenario A), C: Increased activities & applied BAT for whole facilities (scenario C).

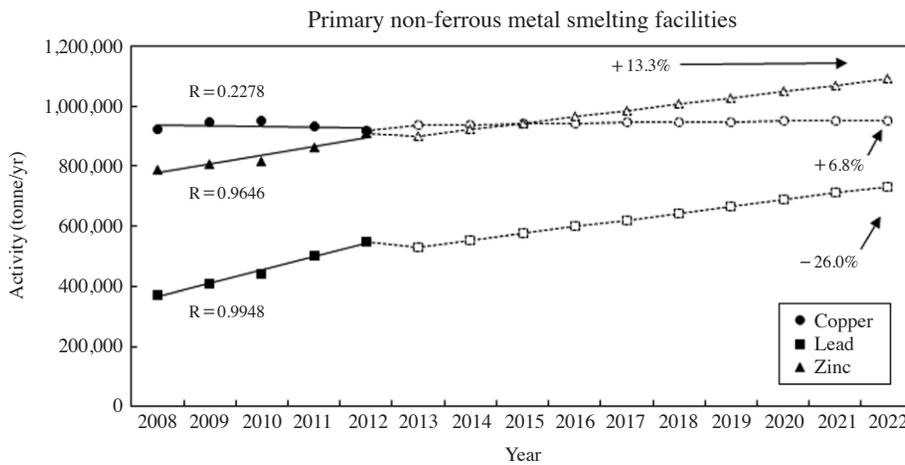


Fig. 9. Future changes in the activities of primary non-ferrous metal smelting facilities.

으로 감소하면서 2022년 수은 배출량은 연간 3.30톤으로 2012년 실제 배출량 대비 1.53%가 감소될 것으로 예측되었다. 시멘트 클링커 생산시설에 적용할 BAT는 전기집진기이며, co-benefit 효과로 수은의 제어 효율은 77% 이상으로 증가할 수 있다(AMAP/UNEP, 2013). 시멘트 클링커 생산시설은 신규 시설의 추가나 활동도가 없다고 판단되어 모든 시설에 BAT를 적용하는 시나리오만 적용하였다. 시멘트 클링커 생산시설의 모든 시설에 BAT 적용 시 연간 1.34톤을 배출하여, 미적용

시 대비 59.37%가 감소할 것으로 예측되었다(그림 8).

비철금속 1차 제련시설은 비철금속 생산량을 활동도로 적용하며, 과거 5년간 가중이동평균의 선형 변화 추세 및 미래 예측량을 그림 9에 나타냈다. 구리, 아연, 납 제련시설의 최근 5년간 활동도 변화를 선형 모사한 상관계수, R은 각각 0.2278, 0.9646, 0.9948이고, 유의 확률에 따른 신뢰구간은 각각 28.8%, 99.2%, 100.0%였다. 구리는 아연과 납에 비해 활동도 선형 모사 신뢰도가 낮으나 전체 수은 배출량에 미치는 기여도가 적어

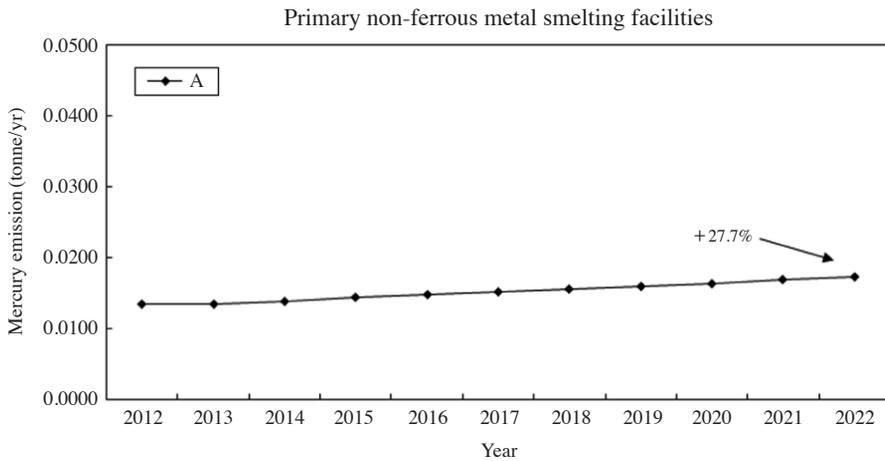


Fig. 10. Mercury emission scenarios in primary non-ferrous metal smelting facilities. A: Increased activities (scenario A).

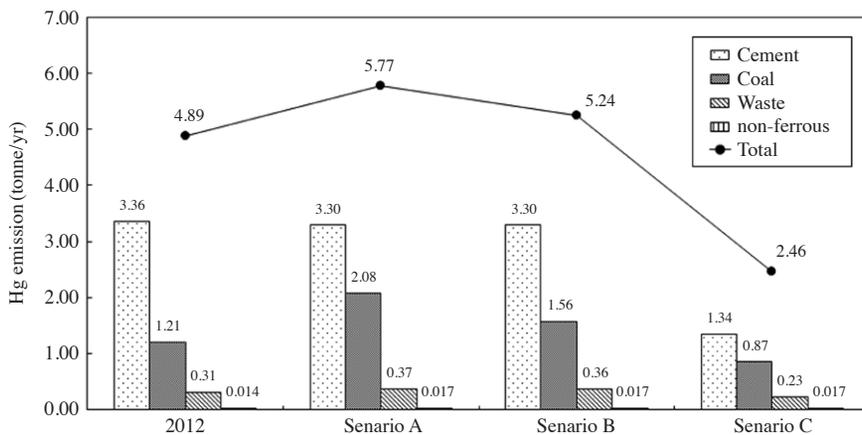


Fig. 11. BAT scenario applied to each facilities and overall emission in Korea.

큰 영향은 없을 것으로 판단된다. 2022년까지 비철금속 1차 제련시설의 수은 배출량을 산정하여, 그림 10에 나타냈다. 비철금속 생산량이 지속적으로 증가하면서 2022년 수은 배출량은 0.017톤으로, 2012년 실제 배출량 대비 27.70%가 증가할 것으로 예측되었다. 비철금속 1차 제련시설은 이미 충분한 방지시설을 적용하고 있으며, 수은에 대해 99.9%의 제어 효율을 보유하고 있다. 따라서 본 시설에 추가적인 방지시설의 적용은 불필요할 것으로 판단된다. 때문에 비철금속 시설에 대한 BAT 시나리오는 적용하지 않았다.

3.4 지역별 수은 배출량과 총 수은 배출량의 시나리오에 따른 변화

그림 11은 부속서 D에 해당하는 각 시설들에 대해 2012년의 배출량과 2022년 기준 BAT 시나리오가 적용된 변화 예측 결과이다. BAT가 미적용된 2022년 수은 배출량은 총 5.77톤으로 2012년 대비 약 18.19% 증가할 것으로 예측되었다. 2012년 대비 석탄 화력발전시설은 71.95%, 폐기물 소각시설은 21.55%, 비철금속 1차 제련시설은 27.70%가 증가할 것으로 예측되었다. 반면 시멘트 클링커 생산시설은 1.53% 감소할 것으로 예측되었다. 2022년의 각 시설별 배출비율 변화는 2012

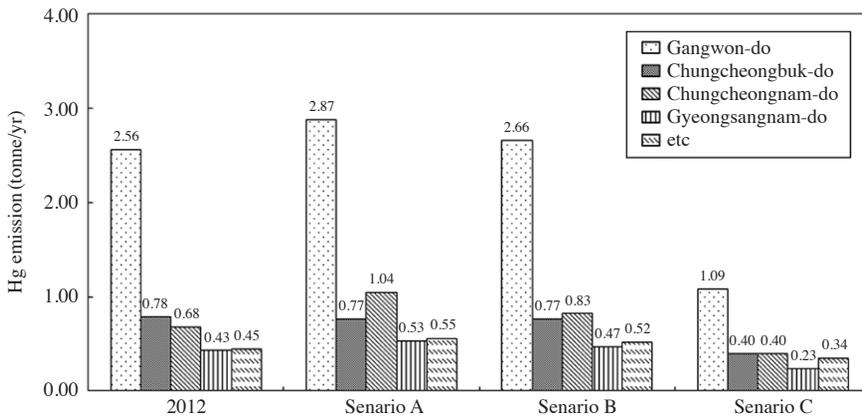


Fig. 12. BAT scenario applied to regional distribution of mercury emissions in Korea.

년 대비 시멘트 클링커 생산시설이 68.69%에서 57.23%로 감소하였고, 석탄화력 발전시설은 24.74%에서 36.00%로 크게 증가하였다. 폐기물 소각시설은 6.29%에서 6.47%로 증가하고, 비철금속 제련시설은 0.28%에서 0.30%로 증가할 것으로 예측되었다.

신규 시설에 BAT를 적용하는 두 번째 시나리오로 예측한 총 수는 배출량은 5.24톤으로 BAT 미적용 시 대비 9.19%가 감소될 것으로 예측되었다. 각 시설별 배출비율은 시멘트 클링커 생산시설, 석탄 화력발전시설, 폐기물 소각시설 및 비철금속 생산시설에서 각각 63.02%, 29.75%, 6.90%, 0.33%의 비율을 보일 것으로 예측되었다.

세 번째 시나리오에 따라 모든 시설에 BAT 적용 시 총 수는 배출량은 2.46톤으로 BAT 미적용 시 대비 57.44%가 감소될 것으로 예측되었다. 각 시설별 배출비율은 시멘트 클링커 생산시설, 석탄 화력발전시설, 폐기물 소각시설 및 비철금속 생산시설에서 각각 54.63%, 35.28%, 9.38%, 0.70%의 비율을 보일 것으로 예측되었다.

그림 12는 부속서 D시설에 대해 BAT 시나리오가 적용된 지역별 수는 배출기여도를 나타냈다. BAT 시나리오를 미적용 시 2022년 국내의 지역별 수는 배출량은 강원도, 충청북도, 충청남도, 경상남도, 기타 지역들에서 각각 연간 2.87톤(49.79%), 0.77톤(13.30%), 1.04톤(18.10%), 0.53톤(9.21%), 0.55톤(9.60%)을 배출할 것으로 예측되었다. 각 지역이 전체 부속서 D시설의 배출량 중 차지하는 비율은 각각 시멘트 클링커 시설로

인해 높은 배출량을 보였던 강원도와 충청북도의 경우 상반된 예측결과를 보였다. 충청북도는 감소할 것으로 예상되었으나 강원도는 오히려 증가 추세를 보였다. 이 원인은 신규 석탄 화력발전시설의 가동으로 인해 수는 배출량이 늘어났기 때문이다. 마찬가지로 신규 석탄 화력발전시설이 가동되는 충청남도과 경상남도 역시 수는 배출량이 증가할 것으로 예상되었다. 특히 충청남도에는 신규 가동되는 시설이 많아 그 증가폭이 크고, 국내 총 수는 배출량에서 두 번째로 많은 양을 배출할 것으로 예상되었다. 신규 시설에 BAT를 적용하는 시나리오에서는 석탄 화력발전시설이 추가된 지역의 수는 배출량이 소폭 감소할 것으로 예상되었고, 타 지역에서는 큰 변화가 없었다. 모든 시설에 BAT가 적용된 시나리오에서는 강원도, 충청북도, 충청남도, 경상남도, 기타 지역들의 수는 배출량은 각각 1.09톤(44.22%), 0.40톤(16.14%), 0.40톤(16.12%), 0.23톤(9.52%), 0.34톤(14.66%)으로 예측되었다. 미적용 시 대비 가장 많은 감소율을 보인 지역은 강원도로 BAT 미적용 시 대비 57.53%가 감소할 것으로 예측되었다. 그 외에 충청북도, 경상남도, 충청남도, 기타지역 순으로 각각 49.24%, 45.16%, 41.37%, 23.39%가 감소할 것으로 예측되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 미나마타 협약 부속서 D에 해당하는 국내 주요 시설의 대기 중 수는 배출량을 산정하고, 미

래의 배출량을 시나리오별로 예측하였다. 자연배출원, 이동오염원 및 부속서 D 이외의 시설 등은 제외되었으며, 그 결과는 다음과 같다.

국제수은협약 부속서 D에 해당되는 국내 주요시설의 대기 중 수은 배출량은 연간 4.89톤으로 산정되었다. 시멘트 클링커 생산시설, 석탄 화력발전시설, 폐기물 소각시설, 비철금속 1차 제련시설에서 각각 연간 3.36톤, 1.21톤, 0.31톤, 0.014톤을 배출하는 것으로 나타났다. 총 배출량 중 각 시설별 배출 비율은 각각 68.69%, 24.74%, 6.29%, 0.28%를 차지했다.

연간 지역별 수은의 대기 배출량은 강원도 2.56톤, 충청북도 0.78톤, 충청남도 0.68톤 및 경상남도 0.43톤, 기타 지역에서 0.45톤으로 산정되었다. 총 배출량 중 각 지역의 배출량 비율은 각각 52.31%, 15.97%, 13.82%, 8.72%, 9.18%를 차지했다. 부속서 D에 해당하는 국내의 대기 중 수은 배출은 시멘트 클링커 생산시설과 석탄 화력발전시설이 집중되어 있는 지역에서 대부분을 배출하는 것으로 나타났다.

각 시설별 2022년까지 활동도 변화 통해 미래의 연간 수은 배출량을 예측하였다. 또한 BAT를 적용하는 시나리오를 검토하여 미래의 수은 배출량의 변화를 예측하였다. 2022년 국내 총 배출량은 연간 5.77톤으로 2012년 대비 약 18.13% 증가할 것으로 예측되었다. 총 배출량 중 각 시설의 비율은 시멘트 클링커 생산시설, 석탄 화력발전시설, 폐기물 소각시설, 비철금속 1차 제련시설 순으로 각각 57.23%, 36.00%, 6.47%, 0.30%를 차지할 것으로 예측되었다. 석탄 화력발전시설은 신규 시설 가동의 영향으로 차지하는 비율이 증가하고, 시멘트 클링커 생산시설은 배출량은 소폭 감소했으나 전체 배출량에서 차지하는 비율이 줄어들 것으로 예측되었다. 신규 시설에 BAT를 설치하는 시나리오를 적용하면 2022년 수은 배출량은 5.24톤으로 BAT 미적용 시 대비 9.19% 감소할 것으로 예측되었으며, 배출 비율에는 큰 차이가 없었다. 전체 시설에 BAT를 설치하는 시나리오를 적용하면 2022년 수은 배출량은 2.46톤으로 BAT 미적용 시 대비 57.44%가 감소할 것으로 예측되었다. 총 배출량 중 각 시설의 비율은 시멘트 클링커 생산시설, 석탄 화력발전시설, 폐기물 소각시설, 비철금속 1차 제련시설 순으로 각각 54.63%, 35.28%, 9.38%, 0.70%를 차지할 것으로 예측되었다. 석탄 화력발전시설이 차지하는 비율이 2012년 대비 크게 증가하는 반

면 시멘트 클링커 생산시설은 큰 폭으로 감소할 것으로 예측되었다. 폐기물 소각시설과 비철금속 1차 제련 시설은 총 배출량에서 차지하는 비율이 소폭 증가할 것으로 예측되었다.

부속서 D에 해당하는 시설의 BAT 시나리오를 적용한 지역별 수은 배출량 변화는 다음과 같다. BAT 시나리오를 미적용 시 2022년 국내의 지역별 수은 배출량은 강원도, 충청북도, 충청남도, 경상남도, 기타 지역들에서 각각 2.87톤, 0.71톤, 1.04톤, 0.53톤, 0.55톤을 배출할 것으로 예측되었다. 총 배출량 중 각 지역의 배출량 비율은 각각 49.79%, 13.30%, 18.10%, 9.21%, 9.60%로 예측되었다. 특히 신규 석탄 화력발전시설이 가동되는 충청남도의 증가폭이 클 것으로 예측되었다. 신규 시설에 BAT를 적용하는 시나리오에서는 신규 석탄 화력발전시설의 수은 배출량 감소로 인해 강원도, 충청남도, 경상남도의 총 배출량에 대한 기여도가 줄어들 것으로 예측되었으며, 차지하는 비율은 큰 차이가 없을 것으로 예측되었다. 모든 시설에 BAT를 적용할 경우 국내의 지역별 수은 배출량은 강원도, 충청북도, 충청남도, 경상남도, 기타 지역들에서 각각 연간 1.09톤, 0.40톤, 0.40톤, 0.23톤, 0.34톤을 배출할 것으로 예측되었다. 총 배출량 중 각 지역의 배출량 비율은 각각 44.22%, 46.14%, 16.12%, 9.52%, 14.00%로 예측되었다. 시멘트 클링커 생산시설과 석탄 화력발전시설이 많은 지역인 강원도의 배출량 및 차지하는 비율의 감소가 가장 클 것으로 예측되었다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “생활공감 환경보건기술개발사업”과 “지식기반 환경서비스(폐자원에너지화) 전문인력양성 사업” 지원을 받았습니다.

References

- Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)/ United Nation Environment Programme (UNEP) (2013) Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013.
- Bureau, E. (2006). Reference document on the best available

- techniques for waste incineration (BREF), integrated pollution prevention and control. European IPPC, Seville, Spain, 602 pp.
- Jung, J.S. and S.G. Shim (2009) Mercury research and management in Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(2), 99-107. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.C., J.M. Park, K.W. Jang, S.B. Lee, N.E. Jung, D.J. Song, and S.K. Kim (2012) A Study on the Development of the Mercury Emission Factor from Coal-fired Power Plant, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(2), 172-181. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., J.M. Park, S.B. Lee, D. Pudasainee, and Y.C. Seo (2010) Anthropogenic mercury emission inventory with emission factors and total emission in Korea, *Atmos. Environ.*, 44(23), 2714-2721.
- Korea Cement Association (KCA) (2013) 2012 Korean cement industry.
- Korea Cement Association (KCA) (2015) www.cement.or.kr
- Korea Electric Power Corporation (KEPCO) (2015) <http://home.kepco.co.kr/kepco/main.do>
- Korea Environment Corporation (KECO) (2012) Hazard reduction of global regulatory response and green chemical technology DB construction.
- Lee, H.K. (2004). The Characteristics of Mercury Emission from Municipal Solid Waste (MSW) Incinerator Stack, *Korean J. Environ. Heal. Sci.*, 30(5), 378-387.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2014) Yearbook of energy statistics.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2015) 7th electricity supply plan.
- Ministry of Environment (MOE) (2013) Negotiation strategies for response to the international convention on mercury.
- Ministry of Environment (MOE) (2014a) 2013 National waste generation and treatment.
- Ministry of Environment (MOE) (2014b) 2013 National industrial waste generation and treatment.
- Ministry of Environment (MOE) (2015) Research on establish comprehensive mercury management measure for implementation of mercury international convention.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2008) Study on Hg emissions from domestic industrial facilities (I).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2010) Study on Hg emissions from domestic industrial facilities (II).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2011) Research on estimation of recoverable mercury from domestic major industrial facilities and management.
- Park, J.M., S.B. Lee, H.C. Kim, D.J. Song, M.S. Kim, M.J. Kim, and S.J. Lee (2010) Emission characteristics of mercury in Zn smelting process, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(5), 507-516. (in Korean with English abstract)
- Park, K.S., Y.C. Seo, S.J. Lee, and J.H. Lee (2008) Emission and speciation of mercury from various combustion sources, *Powd. Technol.*, 180(1), 151-156.
- Pavlish, J.H., J.S. Thompson, C.L. Martin, L.L. Hamre, R. Wiemuth, and S. Pletcher (2009) Fabric filter bag investigation following field testing of sorbent injection for mercury control at TXU's Big Brown Station, *Fuel Processing Technol.*, 90(11), 1424-1429.
- Public Procurement Service (PPS) (2014) non-ferrous metal supply status.
- Redinger, K.E., A. Evans, R. Bailey, and P. Nolan (1997, August) Mercury emissions control in FGD systems. In Proceedings of EPRI-DOE-EPA Combined Air Pollutant Control Symposium, Particulates and Air Toxics (Vol. 3).
- Scala, F. and H.L. Clack (2008) Mercury emissions from coal combustion: Modeling and comparison of Hg capture in a fabric filter versus an electrostatic precipitator, *J. Hazard. Mat.*, 152(2), 616-623.
- Seok, K.S., J.Y. Hong, S.J. Lee, D.G. Lee, D.G. Kim, and J.H. Park (2004) A Study on the Emission Characteristics of Mercury in Municipal and Industrial Waste Incinerators, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(2), 205-213. (in Korean with English abstract)
- United Nation Environment Programme (UNEP) (2013) Minamata Convention on Mercury.
- Wang, Y.J., Y.F. DUAN, L.G. YANG, Y.M. JIANG, C.J. WU, W. Qian, and X.H. YANG (2008) Comparison of mercury removal characteristic between fabric filter and electrostatic precipitators of coal-fired power plants, *J. Fuel Chem. Tech.*, 36(1), 23-29.