

대형소각시설 잔류성유기오염물질 조사결과 보고

○ 대형 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 잔류성유기오염물질 배출 특성을 파악하여 저감 대책 수립을 위한 기초자료 제공

1. 조사개요

- 조사근거 : 자체조사사업 [산업환경팀-56(2018. 1. 22.)호]
- 조사주기 : 연2회
- 조사대상 : 3개 소각장, 4개 소각시설
 - 해운대 자원에너지센터 : 170톤/일 × 1기
 - 명지 자원에너지센터 : 170톤/일 × 2기
 - (주)부산이앤이 : 500톤/일 × 1기
- 조사대상 : 소각시설별 배출가스, 소각재(바닥재, 비산재)
- 분석방법 : 잔류성유기오염물질 공정시험기준
- 조사항목 : 2,3,7,8-TCDD 등 다이옥신류 및 퓨란류 17종
2,2',4,4'-TBDE 등 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 27종

표 1. 다이옥신 및 퓨란 (PCDDs/PCDFs1)) 17종

동질체(Congener)		I-TEF ²⁾	동질체(Congener)		I-TEF
1	2,3,7,8-TCDF	0.100	11	2,3,7,8-TCDD	1.000
2	1,2,3,7,8-PeCDF	0.050	12	1,2,3,7,8-PeCDD	0.500
3	2,3,4,7,8-PeCDF	0.500	13	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.100
4	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.100	14	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.100
5	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.100	15	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.100
6	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.100	16	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.010
7	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.100	17	OCDD	0.001
8	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.010			
9	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.010			
10	OCDF	0.001			

1) PCDDs/PCDFs : polychlorinated dibenzo-p-dioxins/polychlorinated dibenzofurans
 2) I-TEF : 국제 독성등가계수(International Toxic Equivalent Factor)

표 2. 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs3) 27종

동족체(Homologue)		동질체(Congener)		동족체(Homologue)		동질체(Congener)	
Mono-BDE	1	4-BDE(BDE-3)		Hexa-BDE	16	2,2',3,4,4',5-hexa-BDE(BDE-138)	
Di-BDE	2	2,4-di-BDE(BDE-7)			17	2,2',4,4',5,5'-hexa-BDE(BDE-153)	
	3	4,4'-di-BDE(BDE-15)			18	2,2',4,4',5,6'-hexa-BDE(BDE-154)	
Tri-BDE	4	2,2',4-tri-BDE(BDE-17)			19	2,3,3',4,4',5-hexa-BDE(BDE-156)	
	5	2,4,4'-tri-BDE(BDE-28)			Hepta-BDE	20	2,2',3,4,4',5',6-hepta-BDE(BDE-183)
Tetra-BDE	6	2,2',4,4'-tetra-BDE(BDE-47)				21	2,2',3,4,4',6,6'-hepta-BDE(BDE-184)
	7	2,2',4,5'-tetra-BDE(BDE-49)		22		2,3,3',4,4',5',6-hepta-BDE(BDE-191)	
	8	2,3',4,4'-tetra-BDE(BDE-66)		Octa-BDE	23	2,2',3,3',4,4',5,6'-octa-BDE(BDE-196)	
	9	2,3',4',6-tetra-BDE(BDE-71)			24	2,2',3,3',4,4',6,6'-octa-BDE(BDE-197)	
Penta-BDE	10	3,3',4,4'-tetra-BDE(BDE-77)		Nona-BDE	25	2,2',3,3',4,4',5,5',6-nona-BDE(BDE-206)	
	11	2,2',3,4,4'-penta-BDE(BDE-85)			26	2,2',3,3',4,4',5,6,6'-nona-BDE(BDE-207)	
	12	2,2',4,4',5-penta-BDE(BDE-99)		Deca-BDE	27	2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'-deca-BDE(BDE-209)	
	13	2,2',4,4',6-penta-BDE(BDE-100)					
	14	2,3',4,4',6-penta-BDE(BDE-119)					
15	3,3',4,4',5-penta-BDE(BDE-126)						

표 3. 시설별 방지시설 및 비산재 채취지점

시설명	방지시설 구성 (*비산재 채취 지점)
해운대 자원에너지센터	소각로 - 보일러 - 전기집진기* - 여과집진기 - 세정집진기 - SCR - 연돌
명지 자원에너지센터	소각로 - 보일러 - 전기집진기* - 세정집진기 - SCR - 연돌
(주)부산이앤이	소각로 - 원심집진기 - SNCR - 보일러 - 원심집진기 - 여과집진기* - 연돌

2. 조사결과

2-1. 다이옥신 조사결과

○ 배출가스 중의 다이옥신

- 배출가스 중의 다이옥신 농도는 0.001~0.138 ng-TEQ/Sm³의 범위를 나타냄. 하반기 부산이앤이에서 「잔류성유기오염물질 관리법」 배출허용기준 0.1 ng-TEQ/Sm³ 초과하였으며, 그 외에는 기준 이하로 분석되었음. 하반기 부산이앤이 시료채취 당시 쓰레기 투입시설 오작동 발생으로 기준을 초과한 것으로 조사되었으며, 시설개선 후 시료채취 및 분석결과 기준 이내 수준으로 나타났음
- 부산이앤이의 배출농도가 배출허용기준의 평균 78.3%에 달해 방지시설 추가설치 등 다이옥신 농도 저감에 대한 검토가 필요할 것으로 판단됨
- 부산이앤이의 보일러 출구온도가 평균 409.9°C이며, 원심집진기를 거쳐 여과집진기 백필터 출구온도가 평균 177.7°C로 원심집진기와 여과집진기를 거치면서 염소와 잔류탄소에 의한 DE NOVO합성(250~350°C) 가능성이 높음. 따라서 300°C전후에서의 체류시간 최소화, 백필터 보조제 첨가, SCR 등 방지시설 추가설치 등이 고려되어야 할 것으로 보임

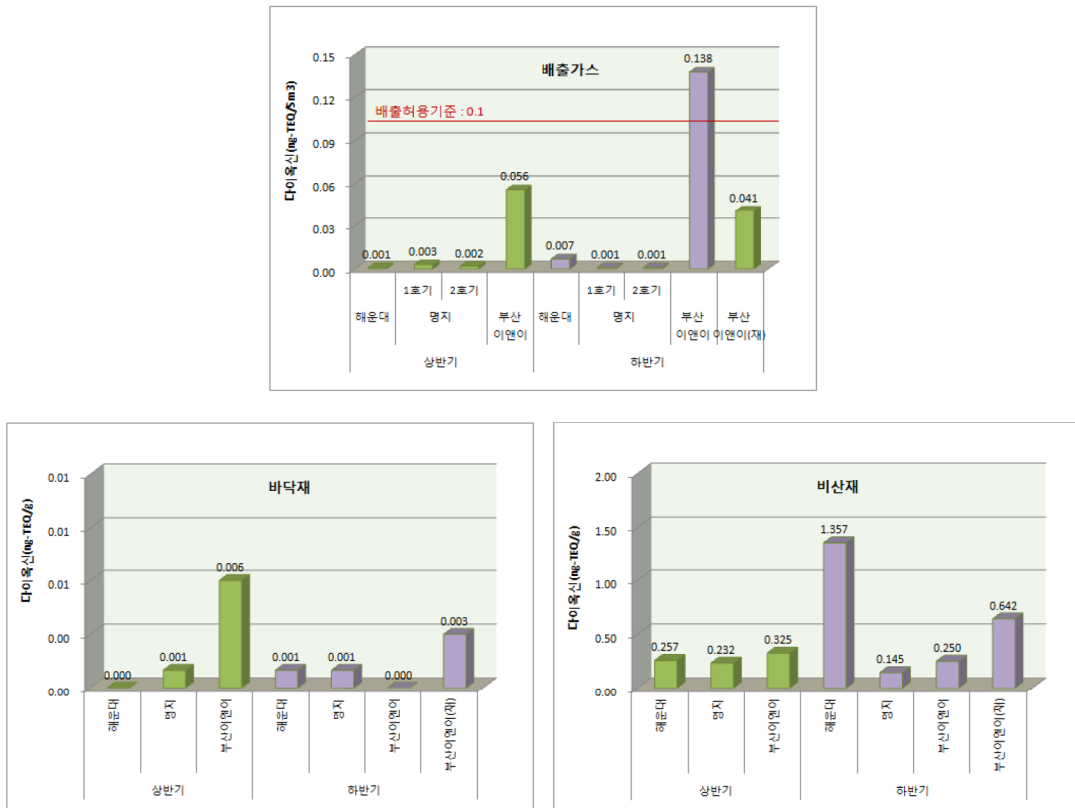


그림 1. 배출가스 및 소각재의 다이옥신 환산농도

○ 바닥재 및 비산재 중의 다이옥신

- 바닥재 중 다이옥신 농도는 하반기 부산이앤이에서 0.006 ng-TEQ/g으로 가장 높게 검출되었으며, 나머지 시설에서는 0.000~0.003 ng-TEQ/g의 범위를 나타내었음. 「잔류성유기오염물질 관리법」 고체상태 폐기물의 다이옥신 함유 기준은 3 ng-TEQ/g으로 최대 0.2% 수준을 나타내었음
- 비산재 중 다이옥신 농도는 하반기 해운대에서 1.357 ng-TEQ/g으로 가장 높게 나타났으며, 나머지 시설에서는 0.145~0.642 ng-TEQ/g 수준을 나타내었음. 「잔류성유기오염물질 관리법」 고체상태 폐기물의 다이옥신 함유 기준인 3 ng-TEQ/g을 초과한 비산재는 없었음. 상기 기준을 초과한 폐기물은 일정한 기준에 따라 처리하여야 하며, 현재 대상시설 모두 고형화 방법 등 지정폐기물로 처리하고 있어, 기준에 초과하더라도 걱정하게 비산재가 처리되고 있다고 할 수 있음
- 소각시설에서 다이옥신은 염소와 잔류탄소에 의한 재합성, 불완전 연소에 의한 클로로벤젠, 클로로페놀과 같은 전구물질 합성에 의해 주로 생성됨. 이 과정에서 비산재가 촉매로 작용하여 소각시설에서 비산재는 다이옥신 재합성 정도와 배출제어 효율을 나타냄
- 하반기 해운대 지점의 비산재는 전기집진기에서 수거되었으며, 타 사례에 비해 다이옥신 재합성이 다소 높게 나타나면서 비산재 중 다이옥신 농도도 증가하였으나, 이후 방지시설을 거치면서 농도가 낮아진 것으로 판단됨

○ 다이옥신 동질체 분포 특성

- 배출가스 중 다이옥신 실측농도는 퓨란류/다이옥신류 비율이 38.6~50.6%, 환산농도는 35.6~72.7%로 나타남. 따라서 배출가스에서는 퓨란류보다 다이옥신류가 대체로 높게 나타났으나, 환산농도로는 해운대를 제외하고 퓨란이 높게 나타났음. 실측농도에서는 OCDD의 기여율이 높게 나타났으며, 환산농도에서는 대체로 독성계수가 높은 2,3,4,7,8-PCDF가 높게 나타남
- 바닥재를 살펴보면 해운대와 명지는 퓨란류가 높게 발생되었고, 부산이앤이는 다이옥신류가 높게 발생되었으나, 환산농도로는 모두 퓨란류가 높게 나타났음
- 비산재는 해운대와 명지에서 다이옥신류가 높게 나타났고, 부산이앤이에서는 퓨란류가 높게 나타났음
- 부산이앤이의 비산재는 전체 방지시설 중 뒷부분에 위치한 여과집진기에서 수거하여, 여과집진기를 거치면서 퓨란이 상당히 제거되어, 부산이앤이 배출가스에서는 상대적으로 다이옥신류가 높게 나타난 것으로 판단됨

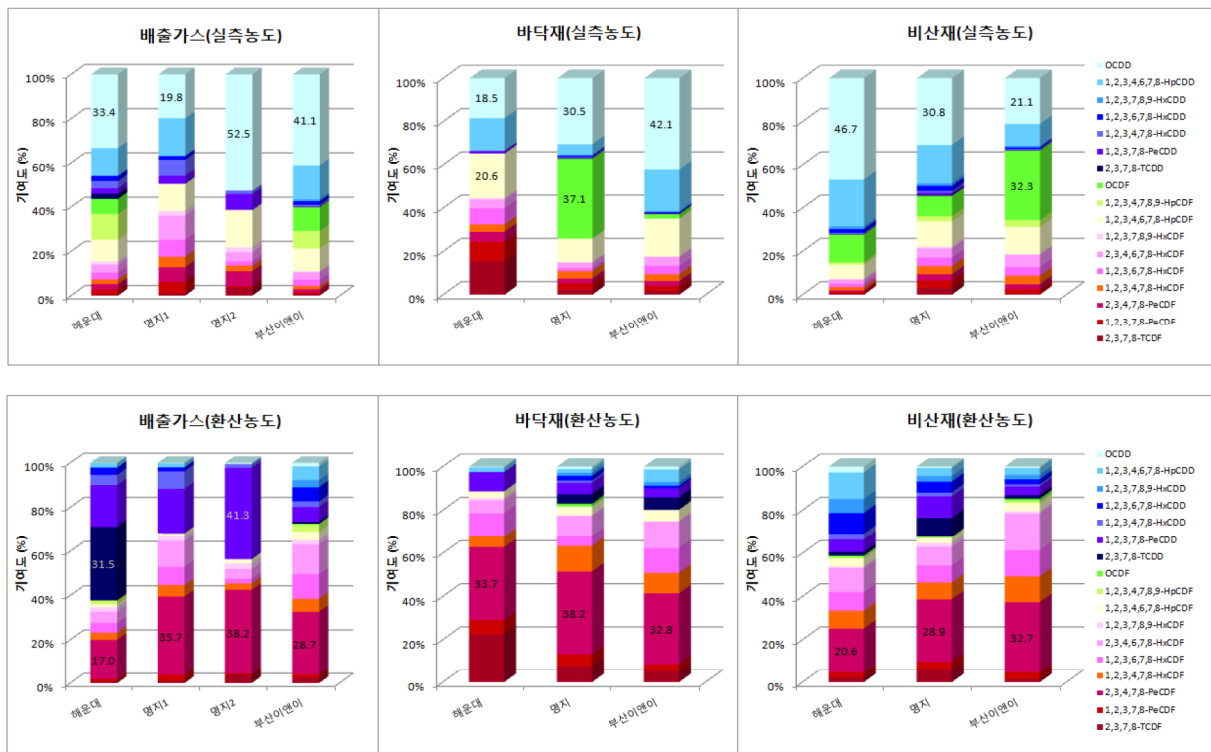


그림 2. 다이옥신 동질체별 기여도 평가

표 5. 다이옥신 동질체별 기여율

실측기여율(%)	배출가스			바닥재			비산재			
	해운대	명지1	명지2	부산이앤이	해운대	명지	부산이앤이	해운대	명지	부산이앤이
2,3,7,8-TCDF	0.7	0.9	3.6	0.6	15.5	2.2	1.8	0.4	3.1	0.5
1,2,3,7,8-PeCDF	2.0	5.2	0.7	0.8	8.9	3.2	2.3	0.8	3.5	2.2
2,3,4,7,8-PeCDF	2.5	6.6	6.8	1.5	4.6	2.2	2.2	0.7	2.8	2.2
1,2,3,4,7,8-HxCDF	2.1	4.8	2.5	1.5	3.4	3.4	3.2	1.5	3.8	3.9
1,2,3,6,7,8-HxCDF	3.1	7.6	1.9	2.8	7.4	1.3	3.8	1.5	3.9	4.0
2,3,4,6,7,8-HxCDF	3.6	10.9	4.0	3.4	4.0	2.6	4.2	2.0	4.2	5.7
1,2,3,7,8,9-HxCDF	1.5	2.1	2.3	0.5	0.8	0.2	0.0	0.1	0.8	0.4
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	9.9	12.5	16.8	10.2	20.6	10.9	17.6	6.7	11.7	12.5
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	11.6	0.0	0.0	7.9	0.0	0.0	0.0	1.1	2.4	3.2
OCDF	6.8	0.0	0.0	10.8	0.0	37.1	2.1	12.9	9.4	32.3
2,3,7,8-TCDD	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.4	0.1
1,2,3,7,8-PeCDD	2.6	3.6	7.3	0.3	1.2	0.3	0.3	0.2	1.0	0.3
1,2,3,4,7,8-HxCDD	3.3	7.2	1.5	0.6	0.0	0.3	0.0	0.5	0.9	0.3
1,2,3,6,7,8-HxCDD	2.2	1.7	0.0	1.6	0.0	0.6	0.4	1.7	2.4	0.8
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.4	0.6	1.2	1.3	0.7
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	12.5	17.1	0.0	15.5	15.1	4.9	19.3	21.9	17.6	10.2
OCDD	33.4	19.8	52.5	41.1	18.5	30.5	42.1	46.7	30.8	21.1
sum	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
퓨란	43.7	50.6	38.6	40.0	65.2	62.9	37.2	27.8	45.6	66.7
다이옥신	56.4	49.4	61.4	60.0	34.8	37.1	62.8	72.2	54.4	33.3

환산기여율(%)	배출가스			바닥재			비산재			
	해운대	명지1	명지2	부산이앤이	해운대	명지	부산이앤이	해운대	명지	부산이앤이
2,3,7,8-TCDF	0.9	1.0	4.0	2.4	22.6	7.7	5.3	2.3	6.2	1.4
1,2,3,7,8-PeCDF	0.9	2.9	0.4	1.6	6.5	5.6	3.4	2.3	3.6	3.3
2,3,4,7,8-PeCDF	17.0	35.7	38.2	28.7	33.7	38.2	32.8	20.6	28.9	32.7
1,2,3,4,7,8-HxCDF	3.1	5.2	2.9	5.8	5.0	11.9	9.4	8.2	7.7	11.9
1,2,3,6,7,8-HxCDF	4.2	8.2	2.1	11.2	10.9	4.7	11.4	8.6	7.9	12.0
2,3,4,6,7,8-HxCDF	4.7	11.8	4.4	13.4	5.9	9.2	12.5	11.0	8.7	17.2
1,2,3,7,8,9-HxCDF	2.0	2.2	2.5	2.0	1.2	0.5	0.1	0.7	1.7	1.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1.2	1.4	1.9	4.0	3.0	3.9	5.2	3.8	2.4	3.8
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	1.6	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	1.0
OCDF	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	1.3	0.1	0.7	0.2	1.0
2,3,7,8-TCDD	31.5	0.0	0.0	0.9	0.0	4.3	5.7	1.6	8.8	1.6
1,2,3,7,8-PeCDD	17.6	20.0	41.3	6.7	8.8	5.1	4.3	5.8	9.9	4.0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	4.3	7.8	1.7	2.5	0.0	1.1	0.0	2.7	1.8	1.0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	3.0	1.8	0.0	6.3	0.0	2.1	1.1	9.6	5.0	2.3
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	1.4	1.7	6.4	2.6	2.0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	1.9	1.9	0.0	6.1	2.2	1.7	5.8	12.2	3.6	3.1
OCDD	0.2	0.2	0.6	1.6	0.3	1.1	1.3	2.6	0.6	0.6
sum	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
퓨란	35.6	68.3	56.4	72.7	88.7	83.1	80.3	58.9	67.8	85.4
다이옥신	58.5	31.7	43.6	27.3	11.3	16.9	19.7	41.1	32.2	14.6

2-2. 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 조사결과

○ 배출가스, 바닥재, 비산재 중의 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)

- 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)는 독성이 강한 유해물질인 POPs(1) 물질에 포함되며, 브롬화난연제로 시트, 매트리스, 전기·전자 기기 등에 사용됨. 국내에서 2006년 2월부터 제조와 사용이 금지되었으나, Deca-BDE는 현재에도 사용중임
- 배출가스 중 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 농도는 20.209~92.888 ng/Sm³ 으로 하반기 명지1 소각장에서 가장 높은 것으로 나타났음. 외국사례와 비교하였을 때 유사 또는 다소 높게 나타났음
- 바닥재 중 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 농도는 1.092~3.953 ng/g으로 상반기 명지 소각장에

1) POPs(Persistent Organic Pollutants) : 잔류성유기오염물질, 독성·잔류성·생물농축성 및 장거리이동성의 특성을 가지고 있어 사람과 생태계를 위협하게 하는 물질, 잔류성유기오염물질에 관한 스톡홀름협약에서 정함.

서 가장 높게 나타났음. 비산재에서는 2.312 ~ 3.394 ng/g 으로 상반기 해운대 소각장에서 가장 높게 검출되었음. 외국사례와 비교시 바닥재와 비산재 모두 낮은 농도로 조사됨
 - 바닥재는 비산재에 비해 유해성이 낮아 매립처리하고 있으나, 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 항목은 바닥재에서도 다소 높게 나타나 매립처리에 대한 검토가 필요할 것으로 판단됨

표 6. 지점별 배출가스 및 소각재 중 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 실측농도

구 분		실측농도*		외국사례**	
		상반기	하반기		
배출가스	해운대	37.697	53.693	26.1~109.0	
	명지-1	29.843	92.888		
	명지-2	35.228	33.813		
	부산이앤이	20.209	40.214(36.900)		
소각재	바닥재	해운대	3.528	1.375	20.4~186.0
		명지	3.953	2.898	
		부산이앤이	1.092	1.811(1.370)	
	비산재	해운대	3.394	3.169	0.332~25.5
		명지	3.074	2.339	
		부산이앤이	3.098	2.312(3.393)	

* 배출가스는 ng/Sm³, 바닥재 및 비산재는 ng/g임
 ** Distribution of PBDEs and PBDD/Fs in municipal solid waste incinerators 참조
 (Environmental Pollution 158 (2010) 1595-1602, Taiwan)

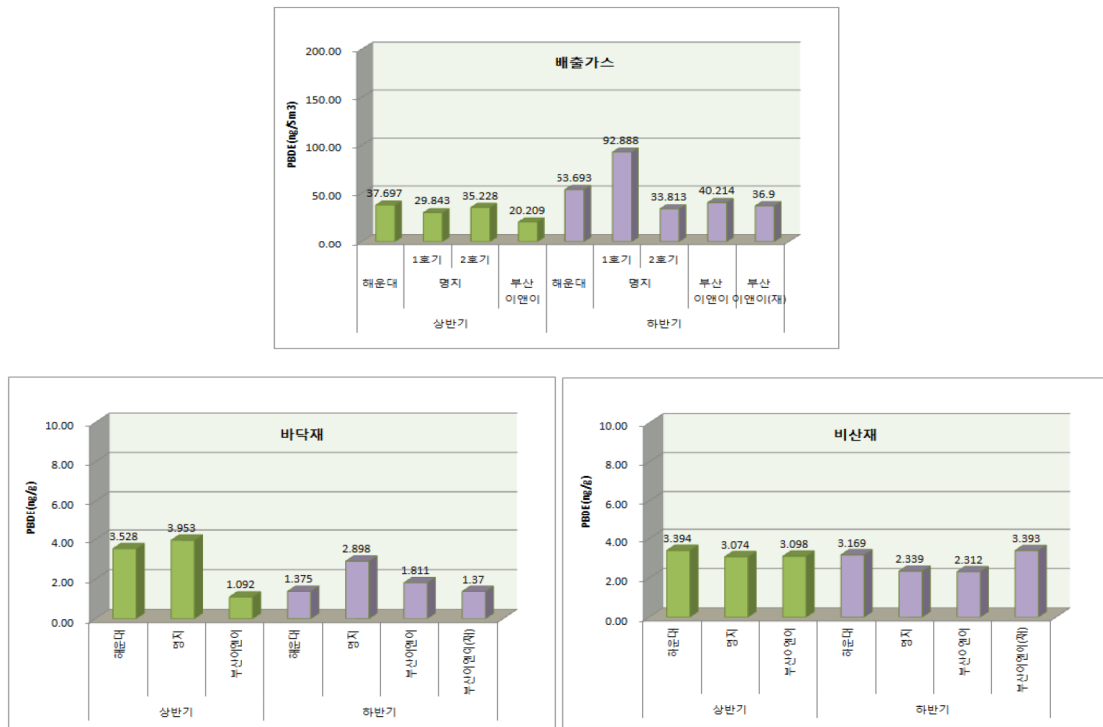


그림 3. 배출가스 및 소각재의 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 측정농도

○ 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 동질체 분포 특성

- 4개 소각장 배출가스 중 고브롬계 동질체(Σ Higher-BDEs: BDE-196, 197, 206, 207, 209)가 차지하는 비율이 평균 96.7%로 조사되었으며, 이중 BDE-209가 차지하는 비율이 평균 66.9%로 가장 높은 비율을 차지하고 있었음. 이는 2006년부터 상업용 Penta-BDE와 Octa-BDE가 사용 금지되었고, 현재 배출원이 되는 물질은 상업용 Deca-BDE로 BDE-209가 이성질체의 대부분을 차지하며, 난분해성으로 환경에 오래 잔류하는 특성이 원인인 것으로 판단됨
- 바닥재 및 비산재는 고브롬계 동질체가 평균 94.8%, 95.4%로 조사되어 저브롬계 대비 높게 나타남. 현재 소각시설에 대한 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)의 배출허용기준과 공정시험기준이 없어 이에 대한 검토가 필요할 것으로 판단됨

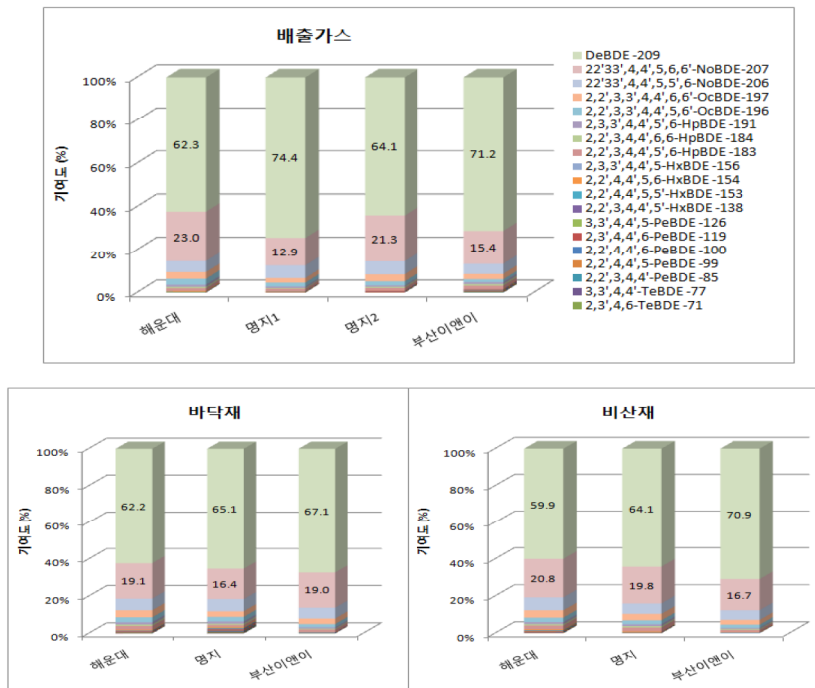


그림 4. 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 동질체별 기여도 평가

2-3. 배출가스 및 소각재 중의 잔류성유기오염물질(POPs) 농도

- 그림 5에서는 소각시설별 다이옥신과 폴리브롬화디페닐에테르(PBDE)을 함께 살펴보았음. 하반기 해운대에서 비산재 다이옥신이 특히 높게 나타났으며, 이를 제외하고 부산이앤이 비산재 다이옥신이 다소 높게 나타났음. 해운대에서는 방지시설을 거치면서 배출가스의 농도가 현저히 감소하였으나, 부산이앤이에서는 배출허용기준의 41~138 %를 유지하였음
- 하반기 명지 1 소각장에서 배출가스 중 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)가 가장 높게 나타났으며, 바닥재 중에서는 상반기 명지 1 소각장에서 높게 나타났음. 비산재 중의 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 농도는 배출가스 또는 바닥재에 비해 소각시설에 따른 차이가 적게 나타나, 방지시설별 운영에 의한 제거율 차이가 크지 않을 것으로 판단됨

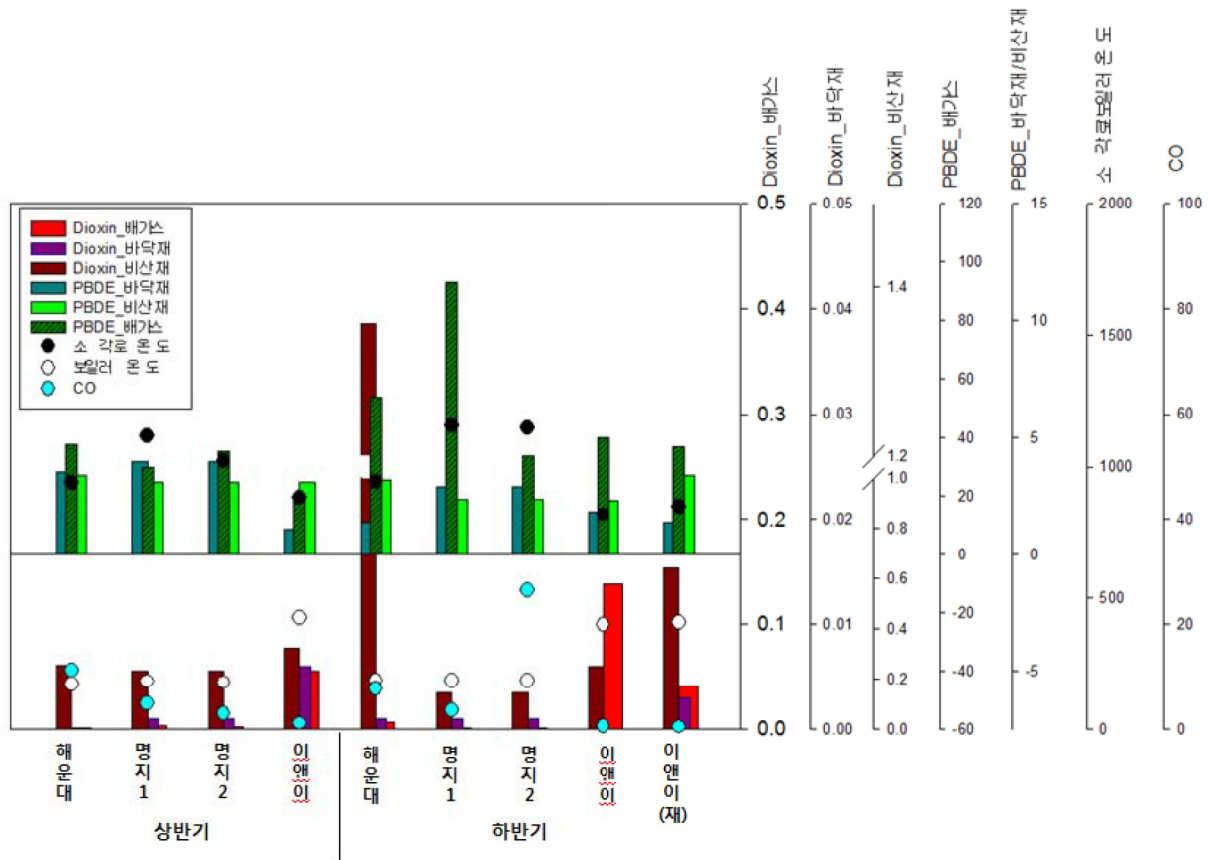


그림 5. 소각시설별 다이옥신 및 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 측정농도
 (Dioxin_배가스:ng-TEQ/Sm³, Dioxin_바닥재와 비산재:ng-TEQ/g,
 PBDE_배가스:ng/Sm³, PBDE_바닥재와 비산재:ng/g)

3. 결론 및 고찰

- 3개 소각장 4개 소각시설 배출가스 중의 다이옥신 농도는 0.001~0.138 ng-TEQ/Sm³의 범위로 「잔류성유기오염물질 관리법」배출허용기준(0.1)을 하반기 부산이앤이에서 초과하였으며, 그 외에는 기준 이하로 조사되었음
- 부산이앤이 하반기 시료채취 당시 쓰레기 투입시설 오작동 발생으로 기준을 초과한 것으로 조사되었으며, 시설개선 후 시료채취 및 분석결과 기준 이내 수준으로 나타났음
- 부산이앤이의 배출가스 농도는 배출허용기준의 평균 78.3 %에 달해 방지시설 추가설치 등 다이옥신 농도 저감에 대한 검토가 필요할 것으로 판단됨
- 바닥재의 경우 「잔류성유기오염물질 관리법」에서 정하는 다이옥신 함유기준(3 ng-TEQ/g)의 최대 0.2% 수준으로 낮은 수준임. 비산재는 하반기 해운대에서 1.357 ng-TEQ/g으로 가장 높게 나타났으며, 나머지 시설에서는 0.145~0.642 ng-TEQ/g 수준을 나타냄
- 3개 소각장의 배출가스 중 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 농도는 20.209 ~ 92.888 ng/Sm³ 으로 하반기 명지1 소각장에서 가장 높은 것으로 나타났음
- 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)는 독성이 강한 유해물질인 잔류성유기오염물질(POPs)에 포함되며,

브롬화난연제로 Deca-BDE는 현재에도 사용중임. 따라서 소각시설 배출가스 및 소각재에 대한 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 배출허용기준과 공정시험기준에 대한 검토가 필요할 것으로 판단됨

4. 활용방안

- 소각장 잔류성유기오염물질 관련 정책수립을 위한 기초자료로 활용

5. 기대효과

- 효과적인 소각로 운영 유도 및 소각장 잔류성유기오염물질 오염실태에 대한 대시민 자료 제공