

# 대형소각시설 잔류성유기오염물질 조사결과 보고

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

## 1. 조사개요

- 조사근거 : 자체조사사업 [산업환경팀-175(2019. 2. 28.)호]
- 조사주기 : 연2회
- 조사대상 : 2개 소각장, 3개 소각시설
  - 해운대 자원에너지센터 : 170톤/일 × 1기
  - 명지 자원에너지센터 : 170톤/일 × 2기
- 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)			동질체(Congener)		
		I-TEF <sup>2)</sup>			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)	
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)		
Penta-BDE	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 소각재 채취지점

시설명	방지시설 구성 (*소각재 채취 지점)
해운대 자원에너지센터	소각로* -보일러* - 전기집진기* - 여과집진기* - 세정집진기 - SCR - 연돌
명지 자원에너지센터	소각로* -보일러* - 전기집진기* - 세정집진기 - SCR - 연돌

※ 바닥재 ⇒ 소각로에서 채취, 보일러재 ⇒ 보일러 수관에서 채취, 비산재 ⇒ 전기집진기에서 발생한 재  
 여과재 ⇒ 여과집진기(활성탄 투입)에서 발생한 재

## 2. 조사결과

### 2-1. 다이옥신 조사결과

○ 지점별 배출가스 및 소각재 중의 다이옥신 농도

- 배출가스 중의 다이옥신 농도는 0.000~0.013 ng-TEQ/Sm<sup>3</sup>의 범위로 모든 지점 「잔류성유기오염물질 관리법」배출허용기준 0.1 ng-TEQ/Sm<sup>3</sup> 이내, 기준대비 최고 13% (하반기 해운대소각장) 수준으로 분석되었음.
- 바닥재와 보일러재 중 다이옥신 농도는 0.000~0.015 ng-TEQ/g의 범위로 하반기 명지 1호기에서 가장 높은 수준을 나타내었음. 비산재 중 다이옥신 농도는 0.505~4.306 ng-TEQ/g의 범위로 상반기 명지 1호기에서 가장 높게 나타났으며, 여과재는 0.608~2.600 ng-TEQ/g의 범위로 해운대 소각장에서만 측정하였음.
- 상반기 명지 1호기의 배출가스는 2호기와 함께 0.000 ng-TEQ/g으로 가장 낮은 수준을 나타내었으나 비산재에서는 4.306 ng-TEQ/g으로 가장 높은 수준을 보였음. 소각시설 배출가스 중 다이옥신은

가스상 대비 입자상 비율이 높은 것으로 알려져 있으며, 입자상 다이옥신은 주로 전기집진기와 여과 집진기에서 주로 제거됨. 상반기 명지 1호기 전기집진기에서 다이옥신 제거율이 높아짐에 따라 비산재 다이옥신 농도가 증가하고 배출가스는 낮아진 것으로 판단되나, SCR을 포함한 집진시설별 배출가스 중 다이옥신 농도를 분석하면 보다 정확한 판단이 가능할 것으로 생각됨.

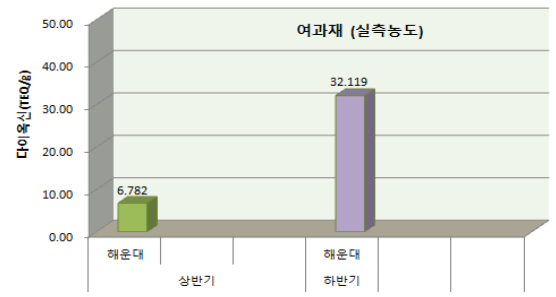
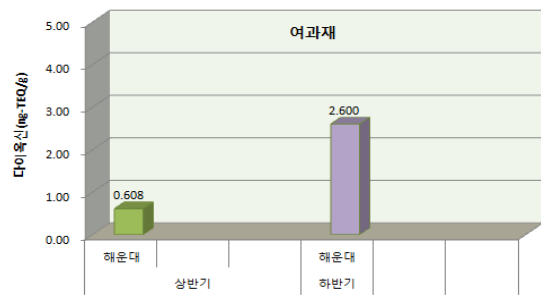
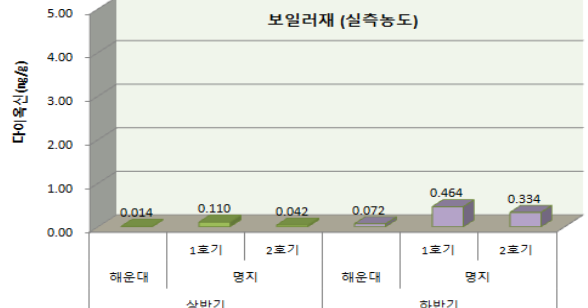
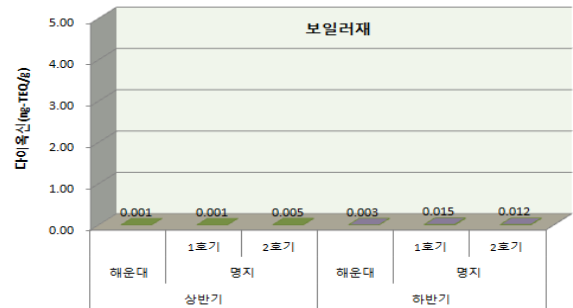
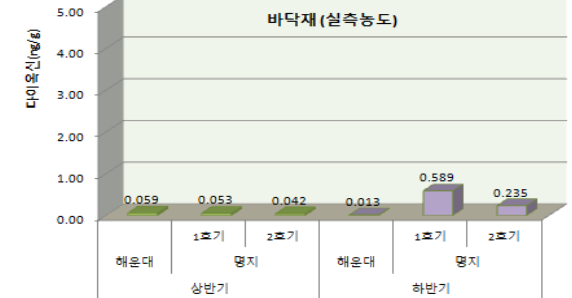
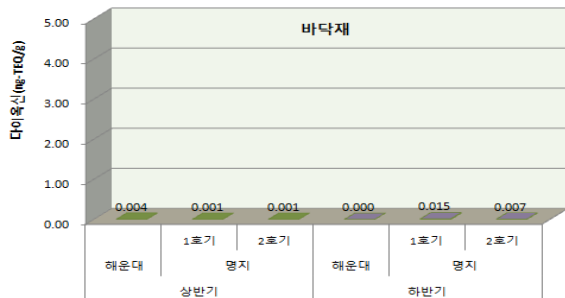
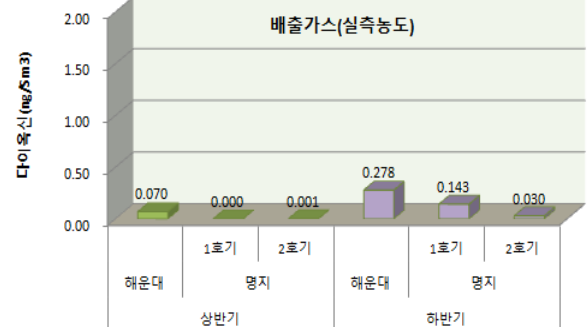
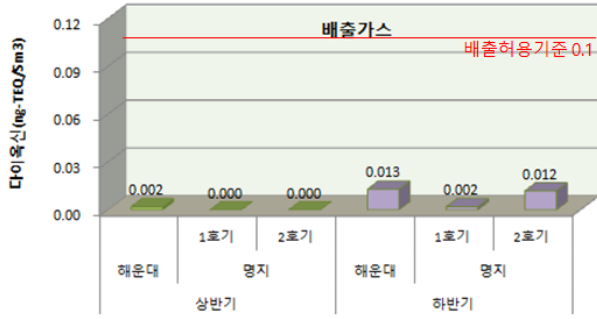
- 상반기 명지 1호기 비산재 중 다이옥신 농도는 「잔류성유기오염물질 관리법」 고체상태 폐기물의 다이옥신 함유 기준인 3 ng-TEQ/g을 초과하였음. 기준을 초과한 폐기물은 일정한 기준에 따라 처리하여야 하며, 현재 대상시설 모두 여과재와 비산재에 대하여 고품화 처리를 거쳐 폐기물 처리하고 있어, 기준에 초과하더라도 적정하게 비산재가 처리되고 있다고 할 수 있음.
- 소각시설에서 다이옥신은 염소와 잔류탄소에 의한 재합성, 불완전 연소에 의한 클로로벤젠, 클로로페놀과 같은 전구물질 합성에 의해 주로 생성됨. 이 과정에서 비산재는 촉매로서 작용할 수 있으며, 소각시설에서 비산재는 다이옥신 재합성 정도와 배출제어 효율을 나타냄.
- 소각재별 다이옥신 평균농도를 살펴보면, 바닥재(0.005 ng-TEQ/g) < 보일러재(0.006 ng-TEQ/g) < 비산재(1.512 ng-TEQ/g) < 여과재(1.604 ng-TEQ/g) 순으로 나타났음. 즉 소각로에서 보일러를 거치면서 다이옥신이 재합성되고 이후 전기집진기와 여과집진기의 활성탄를 거치면서 입자상 다이옥신이 주로 제거되며, 후단의 SCR를 거치면서 가스상 다이옥신이 제거되는 것으로 판단됨.

표 4. 지점별 배출가스 및 소각재 중의 다이옥신 실측 및 환산농도

구 분		실측농도*		환산농도**		
		상반기	하반기	상반기	하반기	
배출가스	해운대	0.070	<b>0.278</b>	0.002	<b>0.013</b>	
	명지-1	0.000	0.143	0.000	0.002	
	명지-2	0.001	0.030	0.000	0.012	
소각재	바닥재	해운대	0.059	0.013	0.004	0.000
		명지-1	0.053	<b>0.589</b>	0.001	<b>0.015</b>
		명지-2	0.042	0.235	0.001	0.007
	보일러재	해운대	0.014	0.072	0.001	0.003
		명지-1	0.110	<b>0.464</b>	0.001	<b>0.015</b>
		명지-2	0.042	0.334	0.005	0.012
	비산재	해운대	27.258	40.971	0.505	0.596
		명지-1	118.896	28.438	<b>4.306</b>	0.838
		명지-2	<b>137.825</b>	30.713	1.897	0.927
	여과재	해운대	6.782	<b>32.119</b>	0.608	<b>2.600</b>

\* 실측농도 : 배출가스는 ng/Sm<sup>3</sup>, 소각재는 ng/g임.

\*\* 환산농도 : I-TEQ값 적용, 배출가스는 ng-TEQ/Sm<sup>3</sup>, 소각재는 ng-TEQ/g임.



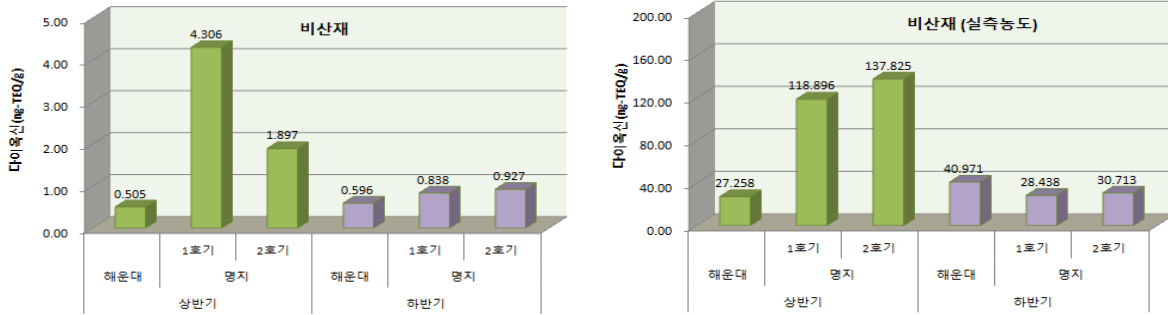
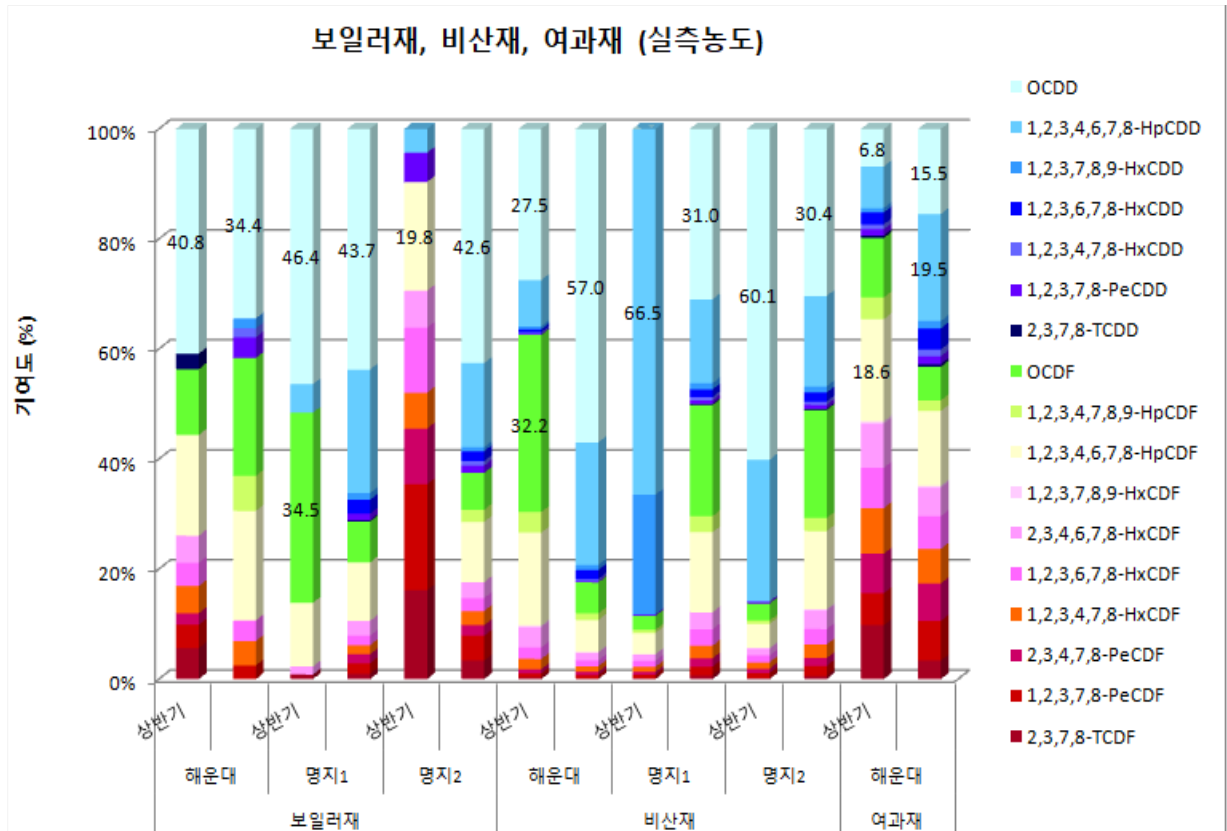
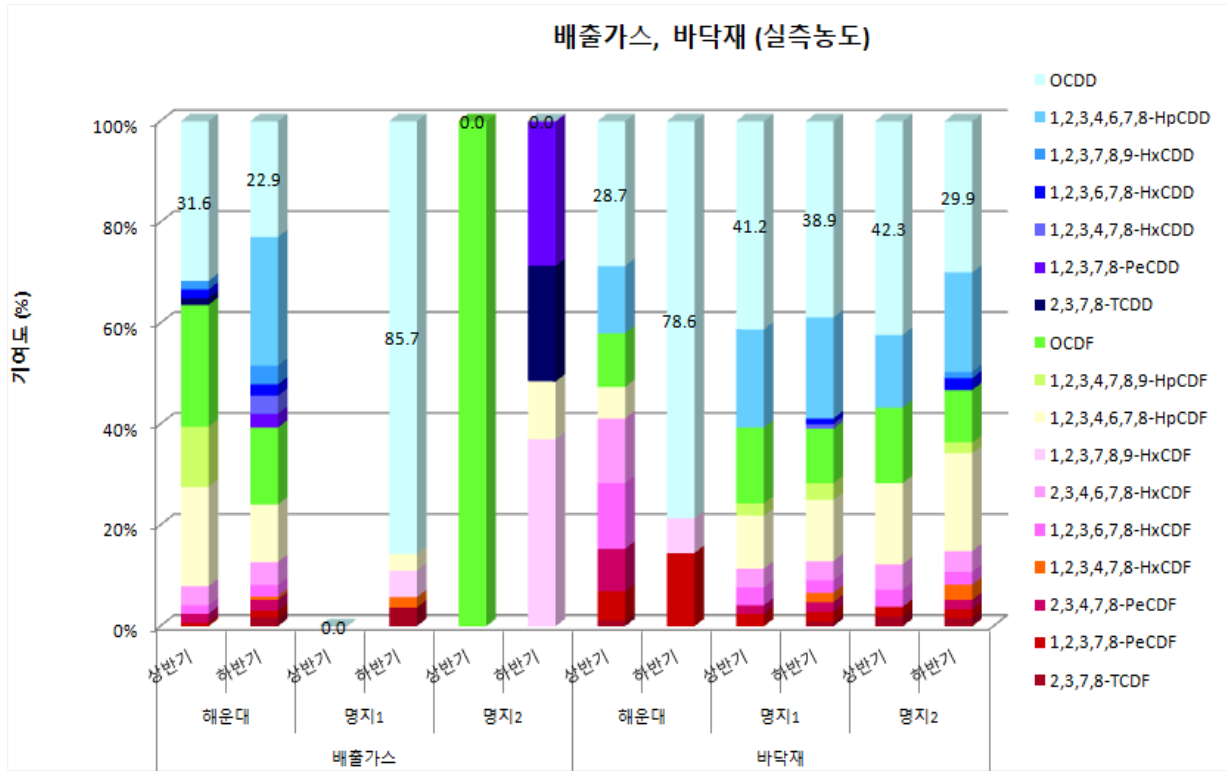


그림 1. 배출가스 및 소각재의 다이옥신 환산농도

○ 다이옥신 동질체 분포 특성

- 배출가스 중 다이옥신 실측농도는 퓨란류/다이옥신류 비율이 14.3~100%, 환산농도는 8.8~91.7%로 나타남.
- 기존 문헌조사에 따르면 국내 소각로 배출가스 및 소각재의 이성질체 분포는 실측농도 기준 OCDD > 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF > OCDF로 퓨란류/다이옥신류 비율은 퓨란이 높게 나타나고, TEQ 농도 역시 퓨란류가 다이옥신류보다 많고 2,3,4,7,8-PeCDF, 2,3,4,6,7,8-HxCDF 농도가 높은 것으로 보고 되고 있음.
- 배기가스 중 염소화 반응이 활발할수록 고염화 다이옥신 농도 분포는 증가하며, 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 는 OCDF 9번째 자리에 있는 염소가 탈리되면서 생성되어 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF 보다 높은 농도를 나타내는 것으로 알려짐.
- 배출가스 중 다이옥신은 해운대 소각장에서 다소 유사하게 나타났으나, 명지 소각장은 다른 낮은 농도로 인해 이러한 패턴을 나타내지 않았던 것으로 판단됨.
- 상반기 명지 1호기 비산재, 명지 2호기 보일러재를 제외하고 바닥재, 보일러재, 비산재 중 다이옥신 동질체별 분포는 위와 유사한 패턴을 나타내었으며, 실측농도 기준 OCDD, 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF, OCDF 외 1,2,3,4,6,7,8 -HpCDD 농도도 다소 높게 나타났음.
- 해운대 소각장의 여과재의 동질체별 분포를 살펴보면, 비산재와 비교하여 OCDD, OCDF의 농도가 상대적으로 낮은 것으로 나타났음. 이는 앞단의 입자상 제거 효율이 높은 전기집진기에서 OCDD와 OCDF의 제거가 높게 나타난 결과로 판단됨. 또한 활성탄을 투입하는 여과집진기는 가스상 다이옥신 제거에도 효과가 있는 것으로 알려져 있어, 입자상 다이옥신에서 비율이 높은 OCDD, OCDF 농도는 여과재에서 비율이 낮은 것으로 생각됨.



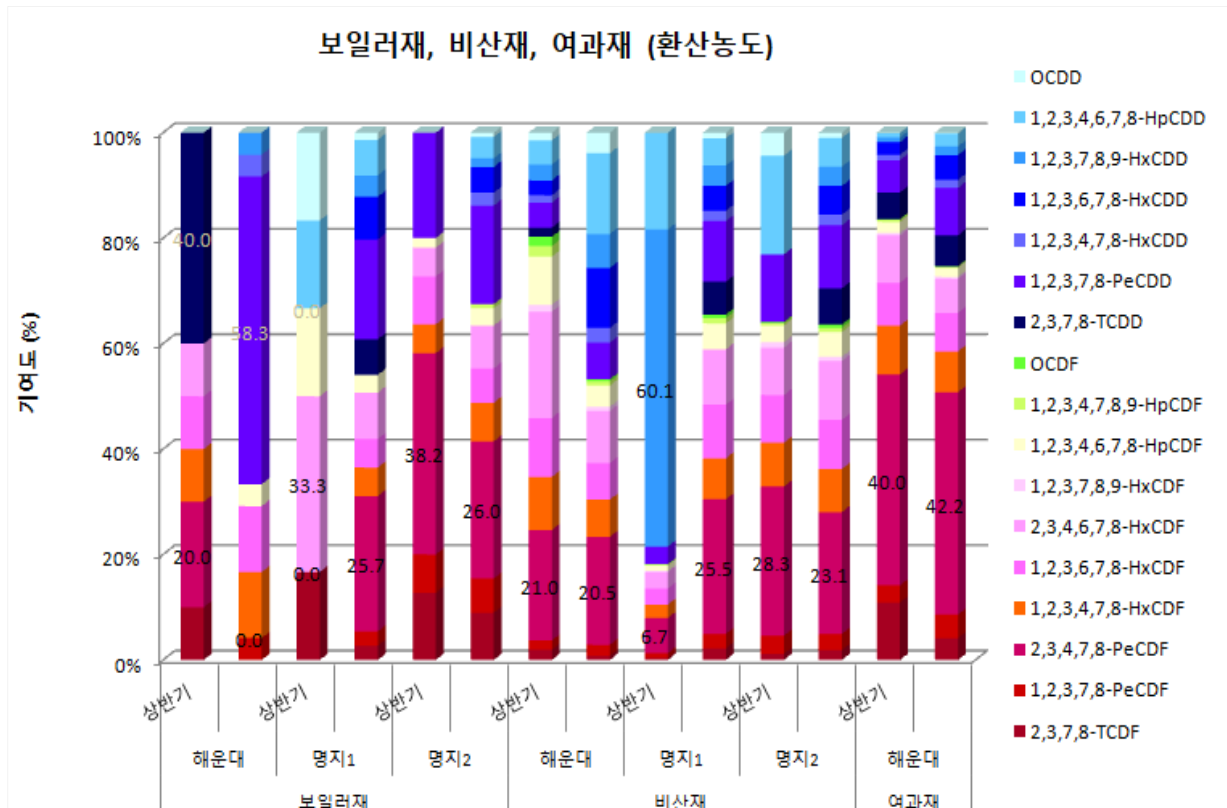
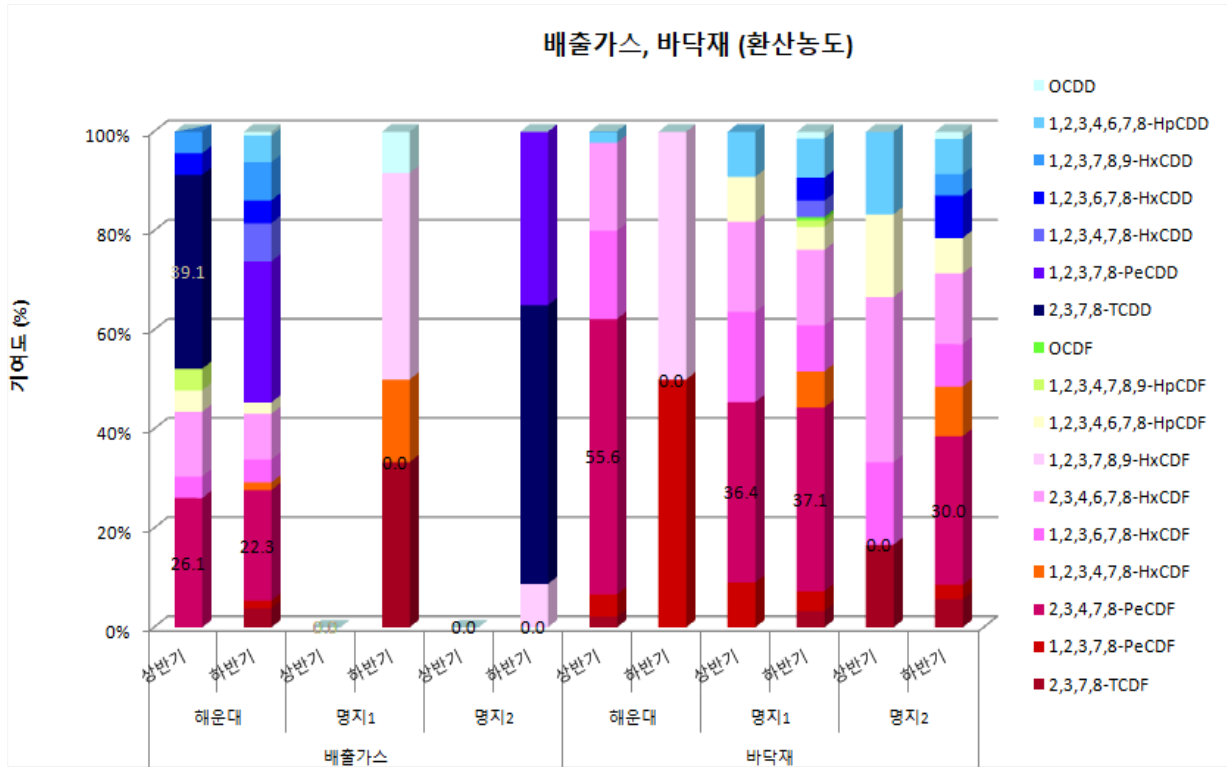


그림 2. 다이옥신 동질체별 기여도 평가

표 5. 지점별 배출가스 및 소각재 중의 다이옥신 실측 및 환산농도  
 <실측농도에 따른 기여율>

실측기여율(%)	배출가스						바닥재					
	해운대		명지1		명지2		해운대		명지1		명지2	
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
2,3,7,8-TCDF	0.0	1.8	#DIV/0!	3.7	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.9	1.9	1.6
1,2,3,7,8-PeCDF	0.7	1.3	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	5.7	14.5	2.4	2.0	1.9	1.8
2,3,4,7,8-PeCDF	1.7	2.2	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	8.4	0.0	1.7	1.9	0.0	1.8
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.0	0.6	#DIV/0!	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	3.0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	1.7	2.3	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	13.0	0.0	3.6	2.4	3.4	2.6
2,3,4,6,7,8-HxCDF	3.7	4.6	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	12.8	0.0	3.7	3.8	5.0	4.1
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.0	0.0	#DIV/0!	5.2	0.0	37.0	0.0	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	19.7	11.4	#DIV/0!	3.4	0.0	11.4	6.2	0.0	10.5	12.1	16.1	19.4
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	11.9	0.0	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	3.3	0.0	2.1
OCDF	24.1	15.2	#DIV/0!	0.0	100.0	0.0	10.6	0.0	15.0	10.8	14.9	10.4
2,3,7,8-TCDD	1.3	0.0	#DIV/0!	0.0	0.0	22.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1,2,3,7,8-PeCDD	0.0	2.7	#DIV/0!	0.0	0.0	28.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.0	3.6	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1.7	2.3	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	2.3
1,2,3,7,8,9-HxCDD	1.7	3.7	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.0	25.5	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	13.3	0.0	19.5	20.0	14.4	19.7
OCDD	31.6	22.9	#DIV/0!	85.7	0.0	0.0	28.7	78.6	41.2	38.9	42.3	29.9
sum	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
류란	63.6	39.3	#DIV/0!	14.3	100.0	48.5	58.0	21.4	39.3	39.1	43.3	46.8
다이옥신	36.4	60.7	#DIV/0!	85.7	0.0	51.5	42.0	78.6	60.7	60.9	56.7	53.2

실측기여율(%)	보일러재						비산재						여과재	
	해운대		명지1		명지2		해운대		명지1		명지2		해운대	
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
2,3,7,8-TCDF	5.6	0.0	0.8	1.0	16.1	3.4	0.4	0.1	0.1	0.7	0.2	0.6	9.8	3.4
1,2,3,7,8-PeCDF	4.2	2.5	0.0	1.9	19.3	4.5	0.7	0.6	0.7	1.6	0.9	1.8	5.8	7.2
2,3,4,7,8-PeCDF	2.1	0.0	0.0	1.6	10.1	1.9	0.8	0.6	0.5	1.5	0.8	1.4	7.2	6.8
1,2,3,4,7,8-HxCDF	4.9	4.4	0.0	1.7	6.5	2.6	1.9	1.0	0.9	2.3	1.1	2.5	8.3	6.3
1,2,3,6,7,8-HxCDF	4.2	3.7	0.0	1.7	11.8	2.4	2.1	1.0	1.1	3.0	1.2	2.8	7.3	5.9
2,3,4,6,7,8-HxCDF	4.9	0.0	1.5	2.7	6.7	2.9	3.7	1.4	1.1	3.1	1.2	3.4	8.0	5.2
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.3
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	18.3	19.9	11.6	10.6	19.8	11.0	16.9	5.8	3.8	14.6	4.4	14.2	18.6	13.6
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	2.2	3.7	1.2	0.6	2.9	0.6	2.4	4.0	1.9
OCDF	12.0	21.4	34.5	7.4	0.0	6.7	32.2	5.6	2.5	20.2	3.1	19.6	10.8	6.1
2,3,7,8-TCDD	2.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.5	0.5
1,2,3,7,8-PeCDD	0.0	3.7	0.0	1.2	5.3	1.3	0.2	0.2	0.2	0.7	0.4	0.7	1.1	1.5
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	0.4	0.0	0.6	0.0	0.6	0.9	1.2
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	1.8	0.5	1.7	0.0	1.4	0.0	1.6	2.2	3.8
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.0	1.8	0.0	1.2	0.0	0.7	0.6	0.9	21.8	1.1	0.0	1.1	0.8	1.3
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.0	0.0	5.2	22.5	4.3	15.3	8.4	22.3	66.5	15.3	25.8	16.4	7.6	19.5
OCDD	40.8	34.4	46.4	43.7	0.0	42.6	27.5	57.0	0.0	31.0	60.1	30.4	6.8	15.3
sum	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
류란	56.3	58.4	48.4	28.6	90.4	37.5	62.6	17.6	11.5	49.8	13.7	48.9	80.2	56.8
다이옥신	43.7	41.6	51.6	71.4	9.6	62.5	37.4	82.4	88.5	50.2	86.3	51.1	19.8	43.2

<환산농도에 따른 기여율>

환산기여율(%)	배출가스						바닥재					
	해운대		명지1		명지2		해운대		명지1		명지2	
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
2,3,7,8-TCDF	0.0	3.8	#DIV/0!	33.3	#DIV/0!	0.0	2.2	0.0	0.0	3.3	16.7	5.7
1,2,3,7,8-PeCDF	0.0	1.5	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	4.4	50.0	9.1	4.0	0.0	2.9
2,3,4,7,8-PeCDF	26.1	22.3	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	55.6	0.0	36.4	37.1	0.0	30.0
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.0	1.5	#DIV/0!	16.7	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	0.0	10.0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	4.3	4.6	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	17.8	0.0	18.2	9.3	16.7	8.6
2,3,4,6,7,8-HxCDF	13.0	9.2	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	17.8	0.0	18.2	15.2	33.3	14.3
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.0	0.0	#DIV/0!	41.7	#DIV/0!	8.8	0.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	4.3	2.3	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	9.1	4.6	16.7	7.1
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	4.3	0.0	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0
OCDF	0.0	0.0	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0
2,3,7,8-TCDD	39.1	0.0	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	56.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1,2,3,7,8-PeCDD	0.0	28.5	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.0	7.7	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0
1,2,3,6,7,8-HxCDD	4.3	4.6	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	0.0	8.6
1,2,3,7,8,9-HxCDD	4.3	7.7	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.0	5.4	#DIV/0!	0.0	#DIV/0!	0.0	2.2	0.0	9.1	7.9	16.7	7.1
OCDD	0.0	0.8	#DIV/0!	8.3	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	1.4
sum	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
류란	52.2	45.4	#DIV/0!	91.7	#DIV/0!	8.8	97.8	100.0	90.9	82.8	83.3	78.6
다이옥신	47.8	54.6	#DIV/0!	8.3	#DIV/0!	91.3	2.2	0.0	9.1	17.2	16.7	21.4



환산기여율(%)	보일러재						비산재						여과재	
	해운대		명지1		명지2		해운대		명지1		명지2		해운대	
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
2,3,7,8-TCDF	10.0	0.0	16.7	2.7	12.7	8.9	1.9	0.8	0.4	2.2	1.2	1.9	10.9	4.1
1,2,3,7,8-PeCDF	0.0	4.2	0.0	2.7	7.3	6.5	1.8	2.1	0.9	2.7	3.4	3.1	3.3	4.5
2,3,4,7,8-PeCDF	20.0	0.0	0.0	25.7	38.2	26.0	21.0	20.5	6.7	25.5	28.3	23.1	40.0	42.2
1,2,3,4,7,8-HxCDF	10.0	12.5	0.0	5.4	5.5	7.3	10.1	7.0	2.5	7.8	8.3	8.2	9.2	7.7
1,2,3,6,7,8-HxCDF	10.0	12.5	0.0	5.4	9.1	6.5	11.2	6.9	3.0	10.2	9.1	9.3	8.2	7.3
2,3,4,6,7,8-HxCDF	10.0	0.0	33.3	8.8	5.5	8.1	20.1	9.9	3.1	10.5	9.0	11.2	9.0	6.5
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.8	0.2	0.0	1.0	0.8	0.5	0.4
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.0	4.2	16.7	3.4	1.8	3.3	9.1	4.0	1.1	4.9	3.2	4.7	2.1	1.7
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	2.0	0.8	0.2	1.0	0.5	0.8	0.4	0.2
OCDF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.4	0.1	0.7	0.2	0.6	0.1	0.1
2,3,7,8-TCDD	40.0	0.0	0.0	6.8	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	6.2	0.0	6.9	5.0	5.8
1,2,3,7,8-PeCDD	0.0	58.3	0.0	18.9	20.0	18.7	4.8	7.0	3.3	11.5	12.8	11.9	6.1	9.0
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	2.4	1.4	2.8	0.0	2.0	0.0	2.0	1.0	1.5
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.0	0.0	0.0	8.1	0.0	4.9	2.8	11.4	0.0	4.7	0.0	5.5	2.4	4.7
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.0	4.2	0.0	4.1	0.0	1.6	3.0	6.5	60.1	3.8	0.0	3.7	0.9	1.7
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.0	0.0	16.7	6.8	0.0	4.1	4.6	15.3	18.4	5.2	18.7	5.4	0.8	2.4
OCDD	0.0	0.0	16.7	1.4	0.0	0.8	1.5	3.9	0.0	1.1	4.4	1.0	0.1	0.2
sum	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
퓨란	60.0	33.3	66.7	54.1	80.0	67.5	80.2	53.2	18.2	65.5	64.1	63.6	83.6	74.7
다이옥신	40.0	66.7	33.3	45.9	20.0	32.5	19.8	46.8	81.8	34.5	35.9	36.4	16.4	25.3

## 2-2. 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 조사결과

### ○ 지점별 배출가스 및 소각재 중의 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)

- 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)는 독성이 강한 유해물질인 POPs<sup>1)</sup>물질에 포함되며, 브롬화난연제로 시트, 매트리스, 전기·전자 기기 등에 사용됨. 국내에서 Tetra-, Penta-, Hexa-, Hepta-BDE는 2006년 2월부터 제조와 사용이 금지되었으나, Deca-BDE는 2020년 2월 20일부터 「잔류성유기오염물질관리법」상의 잔류성유기오염물질에 포함되어, 스톡홀름 협약에 따라 자동차 및 항공기 일부 부품 등 특정면제항목을 제외하고 사용이 금지되었으나, 기존 제품들이 광범위하게 사용되고 있는 실정임.
- 배출가스 중 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 농도는 9.218~68.967 ng/Sm<sup>3</sup> 으로 하반기 명지 2호기에서 가장 높은 것으로 나타났음. 외국사례와 비교하였을 때 유사 또는 다소 높게 나타났음.
- 바닥재 중 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 농도는 1.378~46.516 ng/g으로 상반기 해운대 소각장에서 가장 높게 나타났음. 보일러재는 0.349~3.390 ng/g으로 하반기 명지 1호기에서 가장 높게 나타났고, 비산재에서는 0.207 ~ 4.255 ng/g 으로 하반기 명지 2호기에서 가장 높게 검출되었음. 여과재에서는 해운대 소각장에서만 조사하였고 6.934~34.101 ng/g으로 나타났음. 외국사례와 비교시 바닥재와 비산재 모두 낮은 농도로 조사됨.
- 소각재별 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 평균농도를 살펴보면, 여과재(20.518 ng/g) > 바닥재(9.788 ng/g) > 비산재(1.863 ng/g) > 보일러재(1.787 ng/g) 순으로 일부 여과재와 바닥재에서 상대적으로 높게 나타났음.
- 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 중 안정도가 상대적으로 높은 Deca-BDE (BDE-209)는 500°C에서 탈브롬화가 일어나며, 600~900°C에서 브롬화다이옥신류(PBDF/PBDDs)로 비의도적 물질이 생성되는 것으로 알려져 있음. 따라서 소각장 쓰레기 중 PBDEs 상당량이 브롬화다이옥신류(PBDF/PBDDs)로 변환되는 것으로 판단되며, 바닥재 중의 PBDEs는 변환되지 못하고 남은 부분에 해당하는 것으로

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

보임. 이 후 비산재 대비 여과재에서 PBDEs 농도가 다소 높게 나타나, 금번 조사에서는 활성탄을 투입한 여과집진기가 전기집진기 보다 제거효율이 더 높을 것으로 판단됨.

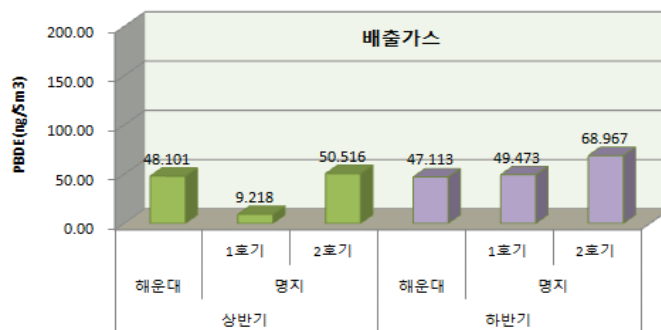
- 바닥재는 비산재에 비해 유해성이 낮아 매립처리하고 있으며, 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 항목은 일부 바닥재에서도 다소 높게 나타나 매립처리에 대한 검토가 필요할 것으로 판단됨.

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

구 분		실측농도*		외국사례**	
		상반기	하반기		
배출가스	해운대	48.101	47.113	26.1~109.0	
	명지-1	9.218	49.473		
	명지-2	50.516	68.967		
소각재	바닥재	해운대	1.971	46.516	20.4~186.0
		명지-1	2.310	3.436	
		명지-2	1.378	3.119	
	보일러재	해운대	0.349	2.125	-
		명지-1	0.863	3.390	
		명지-2	1.844	2.150	
	비산재	해운대	0.207	1.372	0.332~25.5
		명지-1	1.294	2.896	
		명지-2	1.152	4.255	
	여과재	해운대	34.101	6.934	-

\* 배출가스는 ng/Sm<sup>3</sup>, 바닥재 및 비산재는 ng/g임

\*\* Distribution of PBDEs and PBDD/Fs in municipal solid waste incinerators 참조  
(*Environmental Pollution* 158 (2010) 1595-1602, Taiwan)



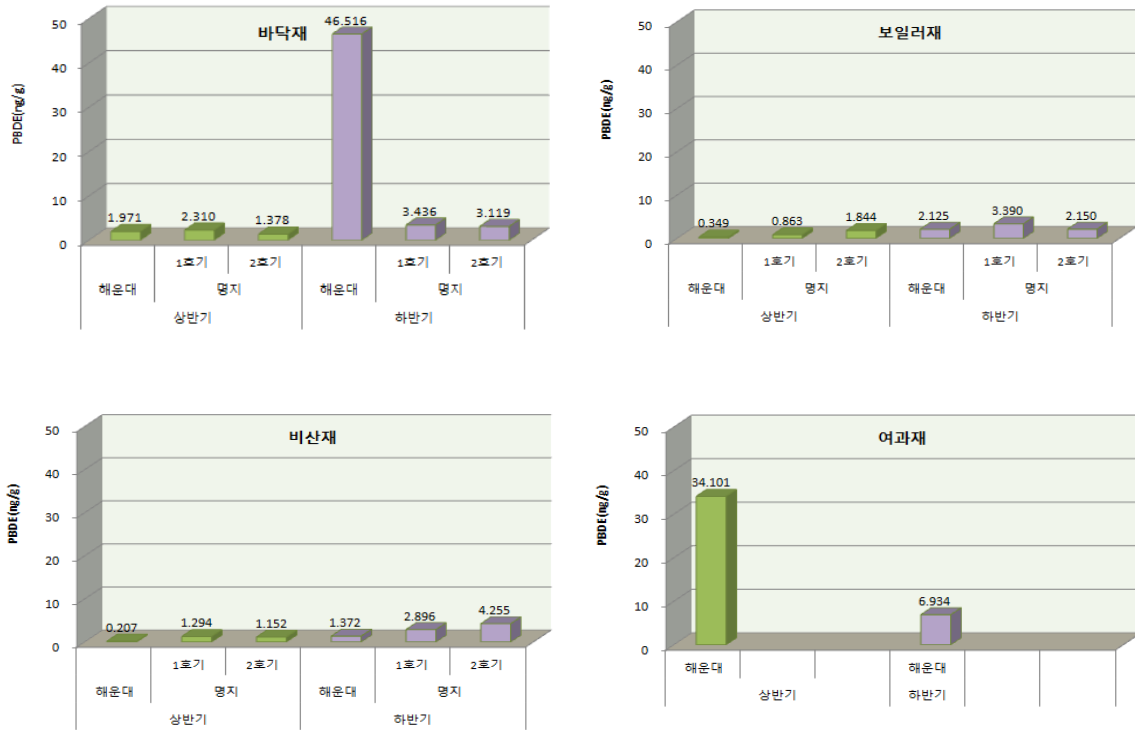


그림 3. 배출가스 및 소각재의 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 측정농도

○ 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 동질체 분포 특성

- 4개 소각장 배출가스 중 고브롬계 동질체(ΣHigher-BDEs: BDE-196, 197, 206, 207, 209)가 차지하는 비율이 평균 97.3%로 조사되었으며, 이중 BDE-209가 차지하는 비율이 평균 58.6%로 가장 높은 비율을 차지하고 있었음. 이는 2006년부터 상업용 Penta-BDE와 Octa-BDE가 사용 금지되었고, 최근 배출원이 되는 물질은 상업용 Deca-BDE로 BDE-209가 이성질체의 대부분을 차지하며, 난분해성으로 환경에 오래 잔류하는 특성이 원인인 것으로 판단됨. 또는 저브롬계 PBDE가 소각시 열분해가 더 잘되어 고브롬화 PBDE가 더 많이 잔류하는 것으로 판단됨.
- 소각재에서 고브롬계 PBDE는 평균 87.1%로 조사되어 저브롬계 대비 높게 나타남. 현재 소각시설에 대한 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)의 배출허용기준과 공정시험기준이 없어 이에 대한 검토가 필요할 것으로 판단됨.

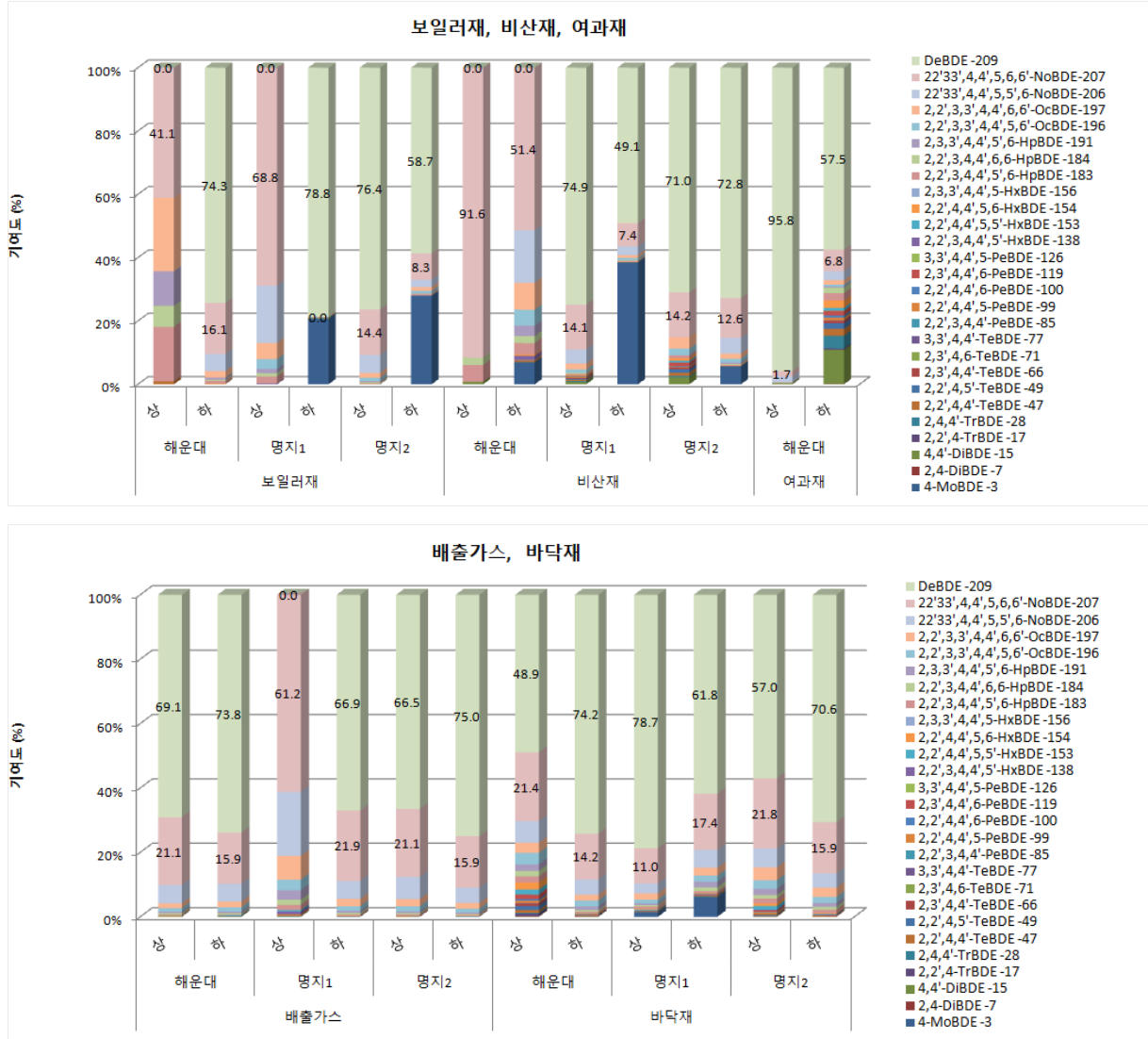


그림 4. 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 동질체별 기여도 평가

### 3. 결론 및 고찰

- 2개 소각장 3개 소각시설 배출가스 중의 다이옥신 농도는 0.000~0.013 ng-TEQ/Sm<sup>3</sup>의 범위로 「잔류성유기오염물질 관리법」배출허용기준(0.1) 이내, 기준대비 최고 13%(상반기 해운대소각장) 수준으로 조사되었음.
- 소각재별 다이옥신 평균농도를 살펴보면, 바닥재(0.005 ng-TEQ/g) < 보일러재(0.006 ng-TEQ/g) < 비산재(1.512 ng-TEQ/g) < 여과재(1.604 ng-TEQ/g) 순으로 나타났음. 즉 소각로에서 보일러를 거치면서 다이옥신이 재합성되고 이후 전기집진기와 여과집진기의 활성탄을 거치면서 입자상 다이옥신이 주로 제거되며, 후단의 SCR를 거치면서 가스상 다이옥신이 제거되는 것으로 판단됨.
- 상반기 명지 1호기 비산재 중 다이옥신 농도는 「잔류성유기오염물질 관리법」 고체상태 폐기물의 다이옥신 함유 기준인 3 ng-TEQ/g을 초과하였음. 기준을 초과한 폐기물은 일정한 기준에 따라 처리

하여야 하며, 현재 대상시설 모두 여과재와 비산재에 대하여 고행화 처리를 거쳐 폐기물 처리하고 있어, 기준에 초과하더라도 걱정하게 비산재가 처리되고 있다고 할 수 있음.

- 2개 소각장의 배출가스 중 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 농도는 9.218 ~ 68.967 ng/Sm<sup>3</sup> 으로 하반기 명지 2호기에서 가장 높은 것으로 나타났음.
- 소각재별 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 평균농도를 살펴보면, 여과재(20.518 ng/g) > 바닥재(9.788 ng/g) > 비산재(1.863 ng/g) > 보일러재(1.787 ng/g) 순으로 일부 여과재와 바닥재에서 상대적으로 높게 나타났음.
- 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)는 독성이 강한 유해물질인 잔류성유기오염물질(POPs)에 포함되며, 브롬화난연제로 최근에 특정면제항목을 제외하고 제조와 사용이 금지되었으나, 기존 제품들이 광범위하게 사용되고 있음.
- 따라서 소각시설 배출가스 및 소각재에 대한 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs) 배출허용기준과 공정시험기준, 바닥재 매립처리에 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