소각장 배출 다이옥신의 유해성과 대책방안

김성중 · 송한조 *
인천대학교 산업안전공학과 인하대학원 환경공학과*

1. 서론

최근 도시쓰레기 소각시설에서 배출되는 다이옥신과 관련하여 사회적으로 관심이 고조되고 있다. 특히 국내에는 설정되어 있지 않으나, 외국의 사례를 통해 볼 때 외국의 기준치보다도 월등히 높은 기준치 이상의 배출로 인하여 그 문제의 심각성을 피부적으로 느끼고 있다.
다이옥신이 주목받게 되기 시작한 것은 이탈리아의 세베소 사건을 비롯하여 월남전에서 미군이 고엽제로 사용한 에이젠트 오렌지에 불순물의 형태로 함유된 다이옥신에 노출된 사람들이 기형아를 출산하였다는 연구결과가 발표되면서 부터이다. 또한 1991년에는 일본의 교또회의에서 27명의 다이옥신 관련학자들이 연구결과를 발표하였는데, 여기에서 자원회수시설 즉 소각로 부근의 공기중 다이옥신 농도는 공중위생에 위해가 초래되지 않는다는 발표가 있었으나, 다이옥신의 유해성에 대한 의견이 분분한 상태이다. 우리나라의 경우 90년대 초 소각로 입지선정과 운영단계에서 다이옥신의 과다 발생으로 인하여 지역주민들의 강한 반대에 부딪혀 이의 대책마련이 시급할 실정이다.

2. 본 론

1) 다이옥신의 특성

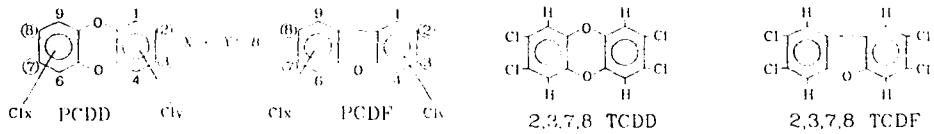
다이옥신은 고리가 세 개인 방향족화합물에 여러개의 염소가 붙어 있는 화합물을 말하며 이 가운데 고리에 산소원자가 두 개인 다이옥신계와 산소원자가 하나인 퓨란계 화합물을 통칭하는 용어이다. 이들 다이옥신류는 도시쓰레기 소각시설, 제강 및 금속정련산업, 자동차의 배기가스, 종이 및 펄프산업에서의 염소표백공정 그리고 폴리염화비닐과 농약 그리고 클로로페놀의 화학공업제조 공정중에서 널리 발생한다.

표 1 다이옥신의 발생원

구 분	항 목	세 부 내 용
인위적인 발생원	화합물제조	클로로페놀 관련물질의 제조공정(제초, 곰팡이방지, 살충제용도) 예) 2,4,5-T, PCP, 헥사클로로펜, NIP, X-52등
	폐기물소각	도시폐기물, 산업폐기물, 의료폐기물, 오니의 소각시의 연돌배출물, 비산재 및 잔재
	펄프,종이제조	염소화합물에 의한 표백처리공정
	자동차	휘발유 첨가제(사에틸납), 포착제(이클로로 이브로모에탄)사용
	기타	담배연기등
자연적인 발생원		화산, 화재, 번개 및 산불등

다이옥신은 염소수의 치환위치에 따라 75종의 동족체가 존재하는데 이 가운데 2,3,7,8위치가 염소치환된 이성체의 독성이 가장 강하다.

그림 1 다이옥신과 퓨란의 구조



동일한 성질을 갖는 화합물로서 퓨란이 있는데 염소수 및 치환위치에 따라 135종이 있다

표 2 다이옥신의 독성 비교 [1]

약 칭	명 칭	등가계수
2,3,7,8-TCDD	Tetrachlorodibenzodixion	1
1,2,3,7,8-PeCDD	Petachlorodibenzodixion	0.5
1,2,3,4,7,8-HxCDD 1,2,3,7,8,9-HxCDD 1,2,3,6,7,8-HxCDD	Hexachlorodibenzodixion Hexachlorodibenzodixion Hexachlorodibenzodixion	0.1 0.1 0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	Heptachlorodibenzodixion	0.01
1,2,3,4,5,6,7,8-OCDD	Octachlorodibenzodixion	0.001
2,3,7,8-TCDF	Tetrachlorodibenzofuran	0.1
2,3,4,7,8-PeCDF 1,2,3,7,8-PeCDF	Petachlorodibenzofuran Petachlorodibenzofuran	0.5 0.05
1,2,3,4,7,8-HxCDF 1,2,3,7,8,9-HxCDF 1,2,3,6,7,8-HxCDF 2,3,4,6,7,8-HxCDF	Hexachlorodibenzofuran Hexachlorodibenzofuran Hexachlorodibenzofuran Hexachlorodibenzofuran	0.1 0.1 0.1 0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF 1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	Heptachlorodibenzofuran Heptachlorodibenzofuran	0.01 0.01
1,2,3,4,5,6,7,8-OCDF	Octachlorodibenzofuran	0.001
others		0

다이옥신과 퓨란의 여러 동족체들이 독성이 모두 일정하지 않으므로 이들 화합물의 독성을 통일하기 위한 방법으로 가장 독성이 강한 2,3,7,8-TCDD를 기준으로 다른 이성체의 독성을 상대적으로 평가하는 방법이 있다. 이를 독성 등가 환산당량(TEQ)이라하고 각 물질의 양을 동일한 작용을 갖는 TCDD의 양으로 환산하는 것으로 이 환산계수를 등가독성계수라 칭한다.

2) 소각로에서의 생성 메카니즘

- 투입 쓰레기에 존재하던 PCDD/PCDF가 연소시 파괴되지 않고 배기가스중으로 배출
- 염화벤젠과 염화페놀 그리고 염화비닐등 비슷한 화학구조를 갖는 전구물질들이 이미 쓰레기속에 포함되어 존재하거나 소각시 형성되어 이들의 반응에 의해 형성
- 화학적 구조가 같지 않은 염소공여체와 반응하여 형성
- 저온에서 촉매화 반응에 의해 분진과 결합하여 형성

3) 다이옥신의 인체노출경로와 유해성

가) 노출경로

각종 오염원에서 발생된 다이옥신은 토양, 잔디, 초목, 지표수에 축적되어 있다가 동물에 의해 섭취되어 먹이사슬에 의해 인간에 노출되게 된다. 사람은 매일 약 0.1ng~0.2ng의 다이옥신을 섭취하고 있는데, 이중 97~99%는 음식물을 통해 섭취하고, 1~3%는 공기흡입에 의하여 섭취한다.

나) 인체 유해성

다이옥신은 맹독성 물질로 축적성, 난분해성이 높고, 발암성이 있는 화학물질로 알려져 있으나, 큰 동물일수록 독성이 크게 완화되어 나타난다.

다이옥신의 동물에 대한 독성은 LD_{50}(반수치사농도)으로 경구섭취의 경우 작은 쥐에서는 0.6㎍/kg, 큰 쥐에서는 5mg/kg 정도로 나타나고 있어 맹독성인 파라티온(10mg/kg)이상의 급성독성이 있는 것으로 알려져 있다. 특히 쥐에 대한 독성정도는 가장 독성이 강한 2,3,7,8-TCDD의 경우 청산가리의 500배, 파라치온의 100배로 알려져 있다.

표 3 동물에 대한 다이옥신의 급성치사량(미국 EPA)

구 분	반수치사농도(μg/kg)
물 모 토	0.6 - 2.5
쥐	22 - 320
토 끼	115 - 275
개	100 - 3,000
햄 스 터	1.150 - 5000
밍 크	4
원 숭 이	< 70

그러나 이와 같은 동물실험결과가 인간에게도 유사한 결과가 나올것이라는데에는 의문의 여지가 있다. 국제 화학물질안정성계획과 세계보건기구가 1988년에 발표한 "환경기인성 다이옥신 및 퓨란의 건강판정보고서"에 의하면 인간에 대한 다이옥신의 건강영향은 경미한 기능장애 외에는 계속적인 전신장애증상은 나타나지 않은 것으로 되어 있다.

다이옥신등에 폭로된 인간의 역학조사중에는 여러 가지 암의 발생율이 증가하였다고 보고된 경우가 몇몇 있었으나, 환경중의 발암요인은 매우 다양하므로 그 신뢰성은 매우 낮을 수 있다.

4) 소각장 배출 다이옥신의 규제방안

다이옥신의 인체독성에 대하여는 논란의 여지가 있으나 지금까지 밝혀진 바에 의하면 암을 유발할 가능성은 인정된다. 특히 2,3,7,8-TCDD의 경우에는 어느수준에서 얼마만큼 발암확률이 있는지는 명확치 않으나 그 발암성은 거의 확실한 것으로 보인다.

따라서 이에 상응하는 적절한 대책마련이 강구되어야 한다. 그러기 위해서는 우선 선진국들이 어떻게 다이옥신을 규제하고 있는지 알아 볼 필요가 있다.

가) 외국의 규제실태

선진국에서는 다음과 같이 다이옥신 1일 허용섭취량과 배출농도를 제시하고 있으며 각국마다 그 나라 실정에 맞는 규제방안을 제시하여 시행하고 있다.

표 4 각국의 다이옥신 배출농도 및 허용섭취량

국 명	배출농도기준	환산농도	허용섭취량
스웨덴	기설로 0.5~2.0ng/Nm^3 시설로 0.1ng/Nm^3	CO_2 = 10%	5pg/kg/d
덴마크	0.1ng/Nm^3	O_2 = 10%	1pg/kg/d
노르웨이	0.1ng/Nm^3	-	
네덜란드	0.1ng/Nm^3	O_2 = 11%	4pg/kg/d
독일	0.1ng/Nm^3	O_2 = 11%	1pg/kg/d
오스트리아	0.1ng/Nm^3	O_2 = 11%	
카나다	0.5ng/Nm^3	O_2 = 11%	10pg/kg/d
영국	0.1ng/Nm^3	-	
일본	기설로 0.5ng/Nm^3 신설로 0.1ng/Nm^3	O_2 = 12%	10pg/kg/d

① 독일

독일은 운전상 지침과 배출허용치 규제을 제시하고 있는데, 다이옥신에 대하여는 0.1ng/Nm^3 이내로 유지시키도록 규정해놓고 있으며, 측정방법은 연중 적어도 3일 측정하되, 각각 별도측정으로 정상가동시 매회 5~10시간동안에 약 15~30m^{3}정도의 가스를 채취분석하도록 하고 있다. 또한 2차 연소실에서의 연소가스 체류시간을 2초 이상으로 하고 가스 온도는 850℃를 유지하도록 명시해 두고 있다.

② 미국

미국은 1989년도에 EPA에서 설계에서부터, 운전, 감시에 관한 우소연소방안을 제시하였다

	요 소	방 법
설 계	완전혼합온도	982℃
	1차 공기	건조부,주연소부,후연소부 각각 공기량 제어
	2차 공기	총공기량의 40%
	2차 공기 분사방법	노 단면에 걸친 침투
	보조연료	설계만족을 위한 보조연료 사용
운 전	과잉공기	연도가스내의 3-9% 산소 농도
	시동	
	보조연료사용	낮은 노 온도, 높은 CO
감 시	연도가스내의 산소	3-9%
	연도가스내의 CO	4시간 평균 500ppm
	노온도	완전혼합거리에서 982℃

③ 일본

소각장에 관한 다이옥신류 발생방지 가이드라인 제시하고 있다.

대상 / 항목	전연속식		준연속식		고정뱃치로	
	신설로	기설로	신설로	기설로	신설로	기설로
다이옥신(TEQ ng/Nm^3)	0.5이하기대	재상태와 비교하여 대폭적인 배출농도 저하를 기대				
연돌출구 CO(ppm)	50이하	100이하	100이하	200이하	극력저감	완전연소
연소온도(℃)	800이상	800이상	800이상	800이상	800이상	완전연소
가스체류시간(초)	2이상	-	1이상	-	1이상	-
노출구 O_2농도(%)	6이상	6이상	6이상	6이상	6이상	완전연소
집진기출구먼지(ng/Nm^3)	20이하	-	50이하	-	50이하	-
집진기입구가스온도(℃)	200이하	250-280	200이하	250-280	200이하	250-280

④ 캐나다

"National Incinerator Testing and Evaluation Program" 제시와 폐기물 소각시 가능한 플라스틱 같은 염기성물질이 함유되어 있는 재료는 재활용하도록 하고, 연소로 형상설계변경, 연소조건의 변경들을 선정하여 실시하도록 하고 있다.

나) 소각장 배출 다이옥신의 규제방안

① 소각기술의 개선

- 소각전 처리기술 : 수거 및 전처리과정에서 다이옥신 발생 유해물질을 분리, 배출하여야 하고 계절별 폐기물성상이 다르므로 벙커내에서 크레인에 의한 충분한 혼합과 2-3일정도의 숙성과정을 거친후 투입량크기, 발열량, 수분함량, 휘발분들 폐기물조성을 균질화하여 소각로에 투입하여야 한다.

- 소각기술 : 소각기술 3T(Time,Temperature Turbulence)유지가 필수적이다. 그림2에서 보는 바와 같이 다이옥신발생량이 온도변화에 따라 변화함을 알 수 있는데 850℃ 부근에서 급격히 감소하므로 연소온도는 850℃이상으로 유지하도록 하여야 한다.

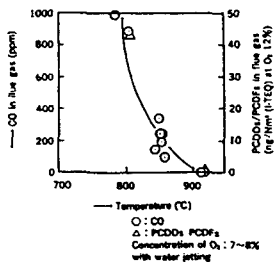


그림 2 연소실 평균온도에 따른 CO, PCDD/PCDF방출량 변화 [2]

또한 그림 3을 보면 연소로내 체재시간과 다이옥신의 발생량은 깊은 관계가 알 수 있는데, 적어도 2초이상으로 체재시간이 유지되면 다이옥신의 발생량을 줄일 수 있다. 연소가스가 최종적으로 주입되는 지점으로부터 850℃ 이상으로 2초이상을 유지하여야 한다. 이는 독성유기물질이 충분히 파괴되기 위한 최소 체류시간이다.

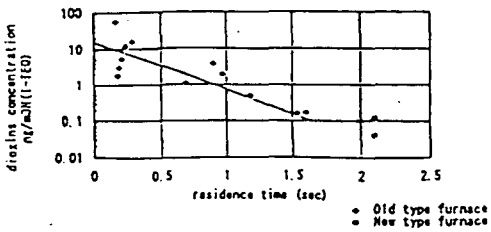


그림 3 연소로내 체재시간과 다이옥신 발생량과의 관계[3]

또한 로내에 국부연소나 불완전연소부가 생기지 않도록 공기의 적절한 혼합이 필요하다. 산소농도는 연소분위기 형성을 위해 충분한 양이 공급되어야 연소가스와 혼합이 잘 된다. 그러나 최근 국내 소각장 운전상황을 조사한 결과 대부분의 소각장에서 2차 공기를 연소로 출구에서의 온도조절에만 쓰거나 아예 사용하지 않고 있는데 혼합을 위해 효과적으로 2차 공기를 주입하여 연소실내 공해물질을 파괴하는 것이 다이옥신 저감을 위해 필수적이다. 그림4는 산소농도 변화에 따른 다이옥신 발생량을 나타내고 있는데, 과도하게 증가하게 되면 오히려 다이옥신류 배출이 증가하는 결과를 보여주고 있으므로 적당한 산소농도 유지가 필요하다.

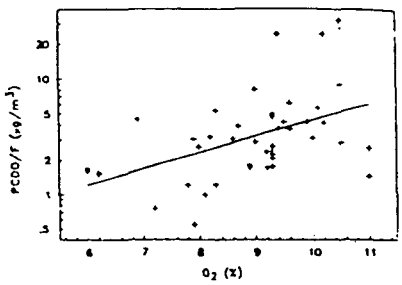


그림4 산소농도와 다이옥신 발생량의 관계[4]

- 소각후 처리기술 : 소각시 발생되는 산성가스, 분진, 금속류등에 관한 제어기술은 이미 많은 연구와 실용화가 되어 왔으나, 다이옥신류 및 퓨란류의 저감방안에 대해서는 매우 미비한 상태이다. 그러나 선진기술을 참고로 해서 소각후 배가스처리기술을 검토하여 배가스처리시스템을 조합하여 보면 분진과 다이옥신을 집진하는 백필터 → H_2O와 $CaCO_3$ 및 NaOH를 주입하여 HCL, HF, SO_X를 제거시키는 습식혹은 건식반응탑 → NaOH와 열, 활성코크스를 주입시켜 NO_X,다이옥신, 퓨란, HCL, CO를 제거하는 촉매기 → 남은 Hg와 다이옥신, 퓨란을 제거하는 2차 필터를 설치하면 다이옥신은 선진국 규제치의 10분의 1정

도인 0.01ng/m^3미만의 다이옥신이 발생되어 이상적인 배가스처리설비가 될 수 있다.

② 행정적 규제

- 다이옥신의 기준설정 : 일본의 구가이드라인인 0.5ng을 금년 7월 1일부터 권고치로 적용하고 있으나 선진국 기준치로 설정하고 허용기준개념으로 전환하여야 한다

- 다이옥신의 정기적 측정 의무화 : 다이옥신의 측정을 의무화하여 자료를 data화하여 체계적인 관리가 필요하다

- 소각시설 및 관리기준 강화 : 연소온도, 체류시간, O_2농도, CO농도, 방지시설입구의 배가스온도등 소각로 운전조건에 대한 기준을 마련하여 적용하여야 한다.

③ 작업환경의 개선

- 배가스 누출과 유입의 방지 : 시설에서 배가스가 누출되지 않도록 유인송풍을 하는 것과 동시에 작업실을 기밀화

- 환기와 공조설비의 설치운영 : 시설내의 작업실, 관리실등에 환기와 공조설비 설치

- 소각재와 비회의 비산방지 : 소각재 및 비회의 핏트 보관시나 수집, 운반,배립시 비산방지를 위해 가습을 실시

- 방진마스크 착용 : 부유분진의 흡입을 억제하기 위해 로내의 청소작업시 방진마스크 착용

3. 결 론

이상과 같이 다이옥신에 관한 유해성과 시급히 강구되어야 할 대체방안에 대하

여 간략히 살펴보았다. 각국마다 폐기물의 성상과 종류가 다르므로 그에 따른 대책마련이 다소 차이가 날 수 있다. 하지만 다이옥신이 인체에 미치는 영향은 지역 구분없이 동일하게 나타날 것이다. 선진국에서는 다이옥신에 대한 대책마련을 위해 해마다 수천억원의 자금을 투자해 배가스처리설비와 이의 제어 대책마련에 부심하고 있다. 해마다 늘어만 가는 폐기물의 적정처리를 위해서는 소각로의 사용이 증가될 수밖에 없는 실정이나 소각로의 설치와 운영으로 인한 주민들간의 마찰은 정부의 정책을 무기력하게 만들고 있다. 따라서 이미 선진국에서 정리된 다이옥신에 관한 평가를 정확히 이해하고 우리의 분석자료와 함께 면밀히 검토하여 우리실정에 맞는 대책을 검토하여 적용한다면 폐기물처리에 의해 발생되는 사회적 문제 해소의 실마리를 잡을 수 있을 것이다.

4. 참고문헌

[1][2] 김성중 · 최상민외 다수, 폐기물소각로 공해물질 생성과 제어, 한국과학기술원,1993

[3][4] 최상민, 다이옥신 저감을 위한 폐기물소각기술,포항공대환경공학부 산학강좌,1997

1) 다이옥신 저감을 위한 폐기물소각기술, 포항공대환경공학부 산기단기강좌 workshop, 1997.8
2) 한미폐기물소각 및 다이옥신제어 기술세미나, 한국폐기물학회지, 1997.4
3) 김성중외 다수, 폐기물 소각로의 공해물질 생성과 제어, 한국과학기술원, 1993
4) 김성중외 3명, 소각로 개발관련 연구, 대한기계학회지 8월호 소특집, 1994.8
5) 김성중외 3명, 폐기물 소각로의 연소실 설계고찰, 한국폐기물학회지, 1994.10