잔류성 유기오염물질(POPs)의 관리현황과 대응방향(2)

- 부산물을 중심으로 -

한국환경정책 · 평가연구원 박정규 · 이희선

목 차

Ⅰ. 서론
1. 연구의 목적
2. 연구의 내용 및 방법

Ⅱ. POPs 부산물 관리의 필요성
1. POPs 부산물의 정의
2. 국제적인 규제강화
3. 발생원 대체방법의 부재
4. 기존 관리정책의 미흡
5. 심각한 물질독성 및 환경위해
5.1 다이옥신/퓨란
5.2 HCB

Ⅲ. 선진국의 POPs 부산물 관리동향
1. 다이옥신과 퓨란
1.1. 국가별 배출원
1.2 국가별 오염현황
1.3 국가별 규제현황
2. HCB
2.1 국가별 배출원
2.2 국가별 오염현황
2.3 국가별 규제현황

Ⅳ. POPs 부산물의 국내 배출현황과 문제점
1. 다이옥신과 퓨란
1.1. 배출원 및 배출현황
1.2 오염현황
1.3 국내 관리상의 문제점
2. HCB
2.1 배출원 및 배출현황
2.2 오염현황
2.3 국내 관리상의 문제점

Ⅴ. POPs 부산물의 효율적 관리방안
1. 배출원 및 배출량 조사
2. 오염현황 및 위해성 확인사업 실시
3. 규제기준 선정
3.1 환경매체별 허용기준
3.2 주요 배출원별 배출기준
4. 최적가용기술 개발 및 적용
4.1 다이옥신/퓨란의 저감방안
4.2 HCB의 저감방안
5. POPs 부산물의 통합관리를 위한 특별법 제정

Ⅵ. 결론

Ⅶ. 참 고 문 헌

부록Ⅰ. 약어정리

부록Ⅱ. 각국의 HCB 규제기준

부록Ⅲ. 소각시설에서의 다이옥신/퓨란 저감기술

5.2 HCB

HCB는 백색의 결정체로 1940년대 보리, 밀, 귀리, 호밀 등 곡물의 살균제로 처음 생산되었으며 화약이나 탄약, 합성고무를 제조하는데 사용되기도 하였다. <표 Ⅱ-9>. 그 후 살충제와 목재방부제로도 사용되었으나 최근 발생하는 HCB의 대부분은 여러 산업공정에서 부산물 또는 불순물로 발생되고 있다. 염소계 용매 및 염화비닐 등의 염소화합물 제조공정, chlor-alkali 공정, 도시폐기물 소각장으로부터 배출되는 비산재(fly ash)와 연료가스로부터 발생되는 폐기물 등의 부산물로 생성되며, 유기염소계 살충제의 제조공정으로부터 불순물로서 생성되기도 한다.

그러나 HCB는 강한 잔류성과 독성, 고농도의 생물농축으로 인해 인간과 환경에 미치는 심각한 피해가 점차 보고되기 시작하였다. 인체에 나타나 HCB의 유해한 영향은 1955년부터 1959년까지 터어키에서 최초로 발생하였다. 살균제인 HCB로 처리된 곡물로 만든 빵을 섭취한 후 약 500여명이 HCB에 중독되었으며 4,000명 이상이 질병에 감염되었다. 특히 HCB에 노출된 여성들의 모유를 섭취한 유아들은 높은 사망률을 나타내었다. 그 외 HCB의 인체건강 및 환경에 미치는 위해성은 다음과 같다.

<표 Ⅱ-9> HCB의 물리화학적 특성

CAS No.	118-74-1
분자식	C_6Cl_6
분자량	284.79a
상태	상온에서 백색결정의 고체
용해도	물에 거의 용해되지 않음(25℃에서 0.005mg/ℓ) 에테르, 벤젠, 클로로포름, 고온의 에탄올에는 잘 용해됨
분배계수	옥탄올-물 분배계수 (log Kow) = 5.5
증기압	0.0023 Pa (25℃)
헨리상수	131 Pa/m³/mol
기타 특성	낮은 인화성

5.2.1 실험동물에 대한 독성

HCB는 포유류에 광범위한 독성을 나타내며 실험동물에 대한 HCB의 독성치는 표 <Ⅱ-10>와 같다. 이때 독성치는 LOELs(lowest-observed-effect levels)와 NOELs(no-observed-effect levels)로 표현하였다.

(1) 급성 및 아만성 독성

실험동물에 대한 HCB의 급성독성은 낮게 나타났는데 구강 LD50값은 기니피그 1,000㎎/kgb.w., 랫드 3,500 - 10,000㎎/kgb.w.이며, 호흡에 의한 LC50 값은 고양이 1,600㎎/㎥, 마우스 4,000㎎/㎥이다. HCB는 휘발성이 높지 않고 지용성이 낮으므로 고농도의 노출에 의한 급성 및 아만성독성에 대한 연구는 많이 수행되지 않았다.

HCB에 짧은 시간동안 노출되었을 경우 일차적으로 간과 신경에 대한 독성효과가 발생하고, 체중변화, 피부손상, 몸의 떨림 증상 등이 나타난다. 노출기간과 양이 증가하면 피부손상, 행동이나 신경의 변화, 체중감소, 조직무게의 증가, 갑상선 기능 및 갑상선호르몬 변화 등의 증상이 나타나고 심하면 사망에 이른다. 특히 저농도의 HCB에 장기간 노출되었을 경우 칼슘의 체내 항상성 교란과 뼈의 기형이 유발된다.

<표 Ⅱ-10> HCB에 노출된 포유류의 최저 NOEL과 LOEL

영 향	NOEL (㎎/kgb.w./일)	LOEL (㎎/kgb.w./일)
먹이를 통해 HCB에 아만성으로 노출되었을 때 urinary copropor-phrin과 마이크로좀 간효소 증가	0.05	0.5
위를 통해 HCB를 만성적으로 주입하였을 때 칼슘대사변화, 간의 중량증가	0.07	0.7
젤라틴 캡슐에 의해 HCB에 아만성적으로 노출된 원숭이의 난소 상피조직, 여포세포, 난소여포 등 미세구조변화 및 난자의 발달 변화	-	0.1
5주된 쥐(rat)를 먹이를 통해 HCB에 노출시켰을 때 체액성 면역작용, intraalveolarmacrophage의 축적, 마이크로좀 EROD 활성 등 증가	-	0.2a
쥐(mice)를 임신기간과 45일때까지 HCB를 포함한 땅콩버터를 먹였을 때 oxazolone에 대한 delayed-type hypersensitivity가 저하됨	-	0.5a
쥐(mice)가 먹이를 통해 HCB에 아만성적으로 노출되었을때 Leish-mania 감염에 민감해지고 악성종양에 대한 저항력과 수면시 세포파괴 감소.	-	0.6

<표 Ⅱ-10> HCB에 노출된 포유류의 최저 NOEL과 LOEL(계속)

영 향	NOEL (㎎/kgb.w./일)	LOEL (㎎/kgb.w./일)
개(beagle)가 젤라틴캡슐을 통해 HCB에 만성적으로 노출되었을 때 위 임파세포의 마디성장(Nodular hyperplasia of gastric lymphoid tissue)	-	0.12
수컷 F0의 조직의 무게(심장, 뇌, 간) 증가, F1암컷 수컷 모두의 화합물과 관계된 조직의 변화 (compound-related histological change)	0.05-0.07[a]	0.27-0.35[a]
먹이를 통해 HCB에 만성적으로 노출된 쥐의 간(SERDML 분열증식, 미토콘드리아의 변형, 액포수의 증가)의 미세구조 변화	0.05-0.06	0.25-0.30
먹이를 통해 HCB에 만성적으로 노출되었을 때 혼합된 산화작용 유도	-	0.5-0.6
HCB에 만성적으로 노출된 어미 밍크의 hypothalamus의 세로토닌 농도의 증가, 수유기간동안 HCB에 노출된 밍크새끼의 hypothalamus의 도파민농도 감소, 출생시 몸무게 감소, 유아의 사망률 감소, 간이나 신장의 손상은 눈에 띄지 않음.	-	0.16a
a 어미에 의해 전달되어진 노출, inutero나 육아에 의해 전달된 것을 알려지지 않음 b Ethoxyresorufin-O-deethylase		

(2) 만성독성

저농도의 HCB에 장기간 노출된 대부분의 실험동물 간에서 비종양적인 영향(non-neoplastic effects)이 관측되었다. 랫드(Sprague-Dawley, SD)를 대상으로 2세대에 걸쳐 실시한 실험에서는 F1의 동물[20]에서 심장과 간의 무게증가, 간과 신장의 조직변화 등이 관측되었다. 또한 랫드(SD)에 9-10개월간 먹이에 HCB 10ppm(대략 0.5-0.6㎎/kgb.w./일)을 주입하였을 때 산화제 활성이 관찰되었으며, 먹이에 5ppm 농도로 3-12 개월 간 주입하였을 경우 원형질 망상조직의 급증과 함께 미토콘드리아의 변형, 저장액포 증가 등이 유발되었다.

(3) 발암성

지금까지 수행된 많은 연구에서 HCB의 발암성이 확인되었다. Cabral et al.(1977)이 먹이 중에 50ppm, 100ppm, 200ppm의 HCB를 주입한 결과, 수컷과 암컷 Syrian golden 햄스터에서 간암세포가 현저하게 증가하였다. 또한 스위스 쥐(Swiss mice) 암컷과 수컷에게 HCB의 농도가 0ppm, 50ppm, 100ppm, 200ppm으로 조절된 먹이를 120주 동안 주입한 결과, 200ppm에 노출된 암컷에서 간세포의 종양이 현격히 증가하였다.(Cabral et al., 1979; Carbral and Shubik, 1986).

그 외 여러 연구에서도 HCB가 발암성 물질 또는 암의 전구물질임이 밝혀졌으며, 특히 간암을 유발하는 확률이 매우 높은 것으로 보고되고 있다.

(4) 번식독성

최근 Health and Welfare Canada에서 실시한 연구에 의하면 저농도의 HCB라 할지라도 암컷 원숭이의 생식세포에 영향을 주는 것으로 나타났다. Cynomolgus 원숭이에게 HCB를 구강으로 0.1㎎/kgb.w./일 씩 90일간 주입하였을 때 난소표면의 상피세포(Babineau et al., 1990)와 여포세포의 구조가 퇴화하고 난자의 성장이 감소하는 것을 관측할 수 있었다(Singh et al., 1991.).

한편 여러 실험종에 대한 연구결과는 HCB에 반복적으로 노출될 경우 남성의 생식에도 영향을 미치지만 주로 고농도(30 - 221㎎/kgb.w./일)의 HCB에 노출되었을 때에만 영향을 주는 것으로 밝혀졌다(den Tonkelaar et al., 1978 ; Elissalde and Clark, 1979 ; Simon et al., 1979 ; Borzelleca and Carchman, 1982). 임신과 수유기간 동안 HCB에 노출된 실험동물 역시 간독성과 함께 출생시 체중감소, 사산수 증가 등의 독성이 보고되어 있다(Grant et al., 1977 ; Mendoza et al., 1977 ; Hansen et al., 1979 ; Kitchin et al., 1982 ; Arnold et al., 1985).

20) HCB의 노출농도는 부모와 F1세대모두 0.27-0.35mg/kgb.w./일임

(5) 면역독성

지금까지 수행된 연구결과에 의하면 HCB는 면역체계에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 쥐나 원숭이를 약간의 HCB에 노출시켰을 때 흉선과 비장, 림프관, 폐의 림프조직에 영향을 주는 것으로 나타났다(Kimbrough and Linder, 1974 ; Latropoulos et al., 1976 ; Goldstein et al., 1978 ; Vos et al .,1979 ; Kitchin et al.,1982). Gralla et al.(1977)은 하루 1mg(0.12㎎/kg bw/일) 이하의 농도에 만성적으로 노출시켰을 때 개의 위 임파선 세포의 초과생장(hyperplasia)이 유발되었다고 보고한 바 있다. 또한 쥐를 대상으로 HCB를 처리한 결과 면역체계가 변형되었으며 폐세포에 macrophage가 축적되는 현상이 관찰되었다(Vos et al., 1983).

5.2.2 인체건강에 대한 독성

(1) 모유내에서의 농도

HCB는 전세계적으로 분포된 모유내의 오염물질로서 스페인, 브라질, 이집트의 3개국을 제외한 모든 나라에서 채취한 시료의 90% 이상으로부터 HCB가 검출되었다. HCB는 인도와 같이 살균제를 전혀 사용하지 않는 나라에서도 발견되었으며, 대부분의 국가에서 산업지역내에 거주하는 산모의 모유에서 가장 높은 농도로 검출되었다.

세계적으로 모유내 HCB의 평균 배경농도(background level)는 약 0.1 ppm으로 알려져 있다. 대부분의 국가[21]들이 0.04 - 0.2ppm 범위의 HCB 농도를 보이고 있으며, 브라질, 캐나다, 스페인, 영국 등은 0.02ppm 또는 그 이하의 낮은 농도를 유지하고 있다. 전세계적으로 HCB 농도가 가장 높게 나타난 지역은 요르단(평균 0.29ppm), 체코(평균 0.639ppm), 슬로바키아(평균 0.829ppm) 등으로, 특히 슬로바키아의 경우 HCB가 아직도 농업에서 사용된다는 점과 염소계 용매 제조과정에서 HCB가 다량 발생되기 때문에 고농도의 HCB가 모유에서 검출된 것으로 추정된다.

최근 들어 선진국에서는 혈액과 모유내의 HCB 농도가 감소되고 있는 것으로 밝혀졌다. 덴마크에서 수행된 한 연구에 의해서 1993년 모유속의 농도가 1986년 측정치의 절반 이하로 떨어졌으며, 노르웨이에서도 1986년과 1991년 사이에 HCB 농도가 약 50% 감소되었다. 또한 스웨덴의 경우 모유에 포함된 HCB 농도가 현저히 감소되었음이 통계적 수치로 발표된 바 있다. 스페인 바로셀로나에서 실시된 한 연구에 의하면 1993년의 혈액내 HCB 농도(평균 4.13ng/ml)가 1986년 동일한 실험대상에게서 검출된 농도(평균 11.09ng/ml보다 현저하게 감소되었음을 알 수 있다.

(2) 인체노출의 영향

HCB는 모체로부터 태아에게 태반을 통해 전달되고, 수유를 통해 유아에게 전해진다. 스웨덴에서 실시된 연구에 의하면 평균 98일의 수유기간동안 모유속의 HCB 농도가 현저히 감소되었으며, 첫 임신에 의한 모유에서의 HCB 농도(0.1ppm)가 두 번째 임신기간(0.06ppm), 세 번째 임신기간(0.04ppm)보다 높게 나타났다. 이는 수유기간동안 모체로부터 아기에게 HCB가 전달되고, 임신기간 동안에는 태아에게 전달되었기 때문이다.

HCB의 직업상의 노출에 관한 연구는 최근 스웨덴에서 실시되었는데, 그 결과 알루미늄 주물공정[22]에 노출된 작업자의 혈액내 평균 HCB 농도는 공정에 노출되지 않은 작업자들보다 4배 이상 높은 농도(0.313 ~ 0.66ppm)로까지 증가되었음이 밝혀졌다. 또한 유해폐기물 소각장에 종사하는 작업자들에 대한 연구결과

21) 호주, 카자흐스탄, 터키, 멕시코, 프랑스, 독일, 네덜란드, 이탈이아, 노르웨이, 스웨덴 등
22) 알루미늄의 용융과정에서 수소를 제거하기 위해 hexachloroethanefmf tkdydgkau, 이때 HCB가 부산물로 방출됨

이들의 혈액내 HCB농도가 현저하게 증가하여 일반인에 비해 2배에 달하였으며, 이는 소각시 발생되는 유기염소가 함유된 여러 화학물질들에 노출되어 발생한 것으로 추정된다(Selden et al., 1997).

그 외 인간이 HCB에 노출됨으로서 발생되는 독성 영향은 동물실험 결과와 마찬가지로 porphyria와 간에 대한 영향, 피부손상, 신경계의 영향, 효소농도의 변화, 여러 형태의 암[23] 및 기형발생[24] 등이 보고되어 있다(Sonawane 1995, ATSDR 1997). 이 외에 HCB는 여성의 난소와 월경주기에 대한 영향, 임신중 생존율과 출생률의 감소 등을 유발하기도 한다.

5.2.3 생태독성

지금까지 발표된 HCB의 생태독성 연구결과를 <표 Ⅱ-11>에 정리하였다. 다음 표에서 나타난 바와 같이 HCB는 다양한 수서생물과 육상생물종에서 독성을 나타내고 있다.

<표 Ⅱ-11> HCB의 생태독성 시험결과

실험	생물군	독성치	참고문헌
급성	수서	· 민물조류(Chlorella pyrenoidosa)는 정상폐쇄시스템에서 1㎍/ℓ의 HCB에 46시간 동안 노출시에 엽록소, drymatter, carbon-hydrate, 질소생성 등이 감소됨	Geike and Parasher, 1976
		· 물벼룩, Daphnia magna는 5㎍/ℓ 농도의 흐르는 물속(flow-through test)에서 치명적 영향 없음	Nebecker et al., 1989
		· 7㎍/ℓ의 HCB를 포함한 흐르는 물에서HCB는 13%의 분홍새우(pink shrimp, Penaeusduorarum)와 10%의 새우(grasshrimp, Palaemonetes pugio)를 치사시킴	Parrish et al., 1974
		· 정상폐쇄시스템에서 섬모충류 원생동물(Euplotes vannus)은 10㎍/ℓ의 HCB에 48시간 노출된 후 생식이 10% 감소	Persoone and Uyttersprot, 1975
		· 담수어류는 수중 HCB의 용해도 부근의 농도에서 급성 노출시 유해한 영향을 받지 않음	Call et al., 1983; Ahmad et al., 1984
		· 해양어류 연준모치 (sheepshead minnow, Cyprinodon variegatus) 는 13㎍/ℓ 농도에 96시간 노출될 때 유해한 영향을 받지 않음	Parrish et al., 1974

<표 Ⅱ-11> HCB의 생태독성 실험결과(계속)

실험	생물군	독성치	참고문헌
급성	육상	· 갈매기(Larus argentatus)의 배(embryo)에 대한 LD50은 4.3㎍/kg b.w./일이며, 1.5㎍/kg b.w./일에 노출되었을 때 배의 무게 감소	Boersma et al., 1986
		· 생후 10일된 꿩(ring-necked pheasants, Phasianus colchicus)의 5일 LC50은 617㎍/kg b.w./일 · 생후 5일된 물오리(Anas platyrhynchos)의 5일 LC50은 5000㎍/kg b.w./일 이상	Hill et al., 1975
만성	수서	· 조류(Chlorella pyrenoidosa)를 3개간 1㎍/ℓ에서 배양했을 때 성장 증가 · 원생동물(Tetrahymena pyriformis)이 10일간 1㎍/ℓ에 노출되었을 때 성장 감소	Geike and Parasher, 1976
		· 가재(Procambarus clarki)는 정상상태의 renewal 시스템에서 5㎍/ℓ에 10일간 노출됐을 때 hepatopancreas의 손상 증가	Laseter et al., 1976
		· Daphnia magna는 정상상태의 폐쇄시스템에서 14일간 16㎍/ℓ에 노출되었을 때 수정이 50% 감소	Calamari et al., 1983
		· 단각목(amphipod, Gammaruslacustris)이 3.3㎍/ℓ의 HCB가 포함된 흐르는 물에 28일간 노출되었을 때 치사율 증가	Nebecker et al., 1989

<표 Ⅱ-11> HCB의 생태독성 실험결과(계속)

실험	생물군	독성치	참고문헌
만성	수서	· 단각목(Hyallela azteca)과 연충(worm,Lumbriculus variegatus)을 4.7㎍/ℓ의HCB에 노출시킬때 생존, 성장, 생식에 영향없음	Laseter et al., 1976
		· 연준모치(fathead minnow, Pimephales promelas)와 무지개송어(rainbow trout, Oncorhynchus mykiss)는 수중 용해도 정도의 농도에서 유해한 영향 받지 않음	U.S. EPA, 1988
		· 바스(large-mouth bass, Micropterus salmoides)는 10일간 3.5㎍/ℓ의 흐르는 물에 노출됐을 때 간탈저(liver necrosis) 현상을 나타냄	-
	육상	· 일본메추라기(Japanese quail, Coturnix japonica)는 100㎍/g의 HCB를 포함한 먹이를 90일간 섭취할 때 치사율이 증가 · 알의 부화율은 20㎍/g에서 감소 · 5㎍/g에서는 간의 무게가 증가, 간의 경미한 손상과 배설물 중 coproporphyrin가 증가	Vos et al., 1972
		· Eurasian kestrels(Falco innunculus)에게 50에서 200㎍/g의 HCB를 포함하는 쥐(mice)를 65일간 먹였을 때 체중 감소, 간의 무게가 증가, 심장무게 감소	Vos et al., 1972

23) 유기염소물질 제조공장 주변에 살고 있는 주민을 대상으로 실시한 역학조사결과, 혈청내 HCB가 증가한 주민들의 soft tissue sarcoma와 갑상선암의 발병률이 평균 발병률보다 높은 것으로 보고되고 있다.(Grimalt et al., 1994)

24) 지금까지 HCB의 사람에 대한 in utero 성장에 미치는 영향에 대한 연구는 수행된 바는 없지만, 1950년대 터키사건으로 인하여 HCB에 노출된 여성에게서 태어난 어린이중 많은 기형이 보고된 적이 있다.(ATSDR, 1997)

Ⅲ. 선진국의 POPs 부산물 관리동향

UNEP의 POPs 규제협약안에는 부산물에 포함되는 화합물질로 PCDD/ PCDF, HCB, PCBs을 규정하고 있다. 이중 PCBs는 coplaner 형태의 PCBs가 일부 산업공정에서 발생될 수 있어 부산물로 간주되고 있다. UNEP에서 규정한 이들 부산물의 배출원 중 BAT를 적용하여야 하는 배출원은 다음과 같다.

① 도시폐기물, 유해폐기물, 의약폐기물, 하수 슬러지 등의 혼합소각
② 유해폐기물을 소각하는 시멘트 킬른
③ 표백과정에서의 염소물질 또는 염소물질을 생산해 내는 화학물질을 사용하는 펄프공정
④ 다음과 같은 금속처리공정 ; 2차 구리생산공정, 제철산업의 탕화공정, 2차 알루미늄 생산공정, 2차 아연 생산공정

또한 다음과 같은 공정에서도 PCDD/ PCDF, HCB, PCBs이 발생할 수 있다.

⑤ 폐기물의 노천소각
⑥ ④에 포함되지 않은 금속처리시설에서의 열처리과정
⑦ 가정쓰레기 소각
⑧ 석탄연료를 사용하는 시설과 산업용 보일러
⑨ 비의도적으로 POPs 물질(특히 chlorphenol과 chloranil)을 배출하는 화학공정
⑩ 화장(火葬)
⑪ 자동차(특히 납이 포함된 휘발유 사용)
⑫ 동물사체의 소각
⑬ 직물과 가죽의 염색(chloranil을 사용) 및 마무리공정(알칼리용액으로 추출)
⑭ 폐자동차의 파쇄공정
⑮ 구리선의 용해공정
⑯ 폐유정제소

이들 물질의 다양한 배출원, 오염현황 및 규제기준 등은 국가별로 차이가 있어, 이를 다음과 같이 살펴봄으로써 POPs중 부산물의 국제적인 규제동향을 파악하였다.

1. 다이옥신과 퓨란

1.1. 국가별 배출원

1.1.1 미국

미국 EPA는 미국내 다이옥신과 퓨란의 배출에 대해 지속적인 연구를 진행하여 왔으며, 최근(2000년 9월)에는 1998년 배출원 목록에 대한 보고서를 발표한 바 있다. 그러나 본 보고서에는 1998년 TRI 자료를 수집하지 못하여, 1995년 TRI 자료를 중심으로 미국내 각 배출원별 배출량을 다음 <표 Ⅲ-1>과 같이 정리하였다.

<표 Ⅲ-1>에서 보는 바와 같이 1995년 미국내 다이옥신 배출원에서 대기로 방출된 다이옥신 총량은 1,026gI-TEQ/년 ~ 7,541gI-TEQ/년 정도이며, 평균치는 2,745gI-TEQ/년이었다. 다이옥신 배출원 중 다이옥신을 가장 많이 배출한 것은 목재방부재인 PCP가 처리된 목재로서, 매년 25,000gI-TEQ/년의 PCDDs와 PCDFs가 배출되었다. 그 외에 대량 배출원으로는 폐기물 소각(도시폐기물 및 병원폐기물 소각)과 금속처리공정(이차 구리제련공정)등이 있다.

도시폐기물 소각으로 인해 발생되는 다이옥신의 양은 1987년의 평균배출량 7,915gTEQ/년(3,540 - 17,698gTEQ/년)에서 1995년 배출량 1,100gTEQ/년(492 - 2,496gTEQ/년)으로 현저히 감소하여 약 1/7 이하로 감소되었다<표 Ⅲ-2>. 이는 소각공정의 개선 및 소각로의 오염방지기술 향상에 의한 것으로, 미국

내 모든 소각로에 MWC 기준(Municipal Waste Combustion, 도시폐기물소각)을 엄격한 적용한 결과이다(US EPA, 1998). 의료폐기물 소각으로 인한 다이옥신 배출 역시 1987년(평균배출량 2,470gTEQ/년)에 비해 1995년의 평균배출량이 477gTEQ/년(151 - 1,510gTEQ/년)이 현저히 감소되었다. 이와 같은 소각에 의한 다이옥신 배출은 미국내 대기 배출의 주요 배출원이다.

한편 다이옥신의 주요 수질 배출원은 펄프나 제지공장이며, 이는 1987년의 356gTEQ/년(252 - 504gTEQ/년)에서 19.5gTEQ/년(13.8 - 27.6gTEQ/년)으로 감소되었다. 이와 같이 현격한 저감효과가 발생된 것은 펄프 제지공정에서 다이옥신의 발생을 저감하기 위해 화학적인 표백과정을 변경하였으며, 특히 Cluster rule(63FR 18504)을 적용함으로써 가능하였다.

<표 Ⅲ-1> 미국의 대기 및 제품을 통한 다이옥신/퓨란 배출량('95)

배출원	배출량(gI-TEQ/년)
○ 폐기물 소각(도시, 병원 및 유해폐기물 포함)	1,589
○ 발전 및 에너지(자동차 연료, 목재, 석탄, 석유 연소 포함)	214
○ 기타 고온 배출원(시멘트화로, kraft 회수 보일러 포함)	174
○ 무단 소각 (산림화재)	208
○ 금속제련공정(구리, 알루미늄, 납 등의 이차 탕화공정)	560
○ 화학물질제조/공정 배출원	NEG
대기로의 총배출량	2,745(1,026 - 7,541)
○ 기타 배출원 (대기를 제외한 제품) - Pentachlorophenol	25,000
○ 대기배출원의 평가등급 - 매립지 화재 - 가정내 무단 소각 - 철탕화공정	1,000 1,000 100

자료 : Ministry of Environment, New Zealand inventory of dioxin emissions to air, land and reservory sources, 2000

<표 Ⅲ-2> 미국내 다이옥신, 퓨란 및 PCBs의 매체별 배출량('87년과'95)

배 출 원	'87년 매체별 배출량 (gTEQ/년)				'95년 매체별 배출량 (gTEQ/년)			
	대기	수계	토양	제품	대기	수계	토양	제품
폐기물 소각								
○도시폐기물 소각	7,915	*	NA	NA	1,100	*	NA	NA
○유해폐기물 소각	5.0	*	NA	NA	5.7	*	NA	NA
○보일러/산업용로	0.77	*	NA	NA	0.38	*	NA	NA
○병원폐기물 소각	2,470	*	NA	NA	477	*	NA	NA
○화장로	0.16	*	NA	NA	0.24	*	NA	NA
○하수 슬러지 소각	6.0	*	NA	NA	6	*	NA	NA
○타이어 연소	NEG	*	NA	NA	NEG	*	NA	NA
○펄프/종이 슬러지 소각	(b)	*	NA	NA	(b)	*	NA	NA
발전/에너지 생산								
○자동차연료연소(유연)	32.4	NA	NA	NA	NEG	NA	NA	NA
○자동차연료연소(무연)	3.8	NA	NA	NA	6.3	NA	NA	NA
○자동차연료연소(디젤)	26.3	NA	NA	NA	33.5	NA	NA	NA
○목재연소 (주거용)	89.6	NA	*	NA	62.8	NA	*	NA
○목재연소 (산업용)	27.5	*	*	NA	29.1	*	*	NA
○석탄연소 (주거용)	**	NA	*	NA	**[10]	NA	*	NA
○석탄연소 (산업용/utility)	62.8	*	*	NA	72.8	*	*	NA
○석유연소 (주거용)	**	NA	NA	NA	**[10]	NA	NA	NA
○석유연소 (산업용/utility)	15.5	*	NA	NA	9.3	*	NA	NA

<표 Ⅲ-2> 미국내 다이옥신, 퓨란 및 PCBs의 매체별 배출량('87년과'95) (계속)

배 출 원	'87년 매체별 배출량 (gTEQ/년)				'95년 매체별 배출량 (gTEQ/년)			
	대기	수계	토양	제품	대기	수계	토양	제품
기타 고온 배출원								
○ 시멘트화로 (폐기물소각)	117	*	*	*	153	*	*	*
○ 시멘트화로 (폐기물소각 이외)	13.7	*	*	*	17.8	*	*	*
○ 아스팔트 혼합 공정	**	*	*	*	**[10]	*	*	*
○ 석유정제 촉매 재생	*	NEG	*	NA	*	NEG	*	NA
○ 담배연소	1.0	NA	*	NA	0.81	NA	*	NA
○ 탄소 재활성화로	NEG	NA	NA	NA	NEG	NA	NA	NA
○ kraft 회수 보일러	2.0	*	*	NA	2.3	*	*	NA
무단소각								
○ 매립 발생가스 연소	**	NA	NA	NA	**[10]	NA	NA	NA
○ 매립지 화재	**	NA	*	NA	**[100]	NA	*	NA
○ 화재(구조물)	**	*	*	NA	**[10]	*	*	NA
○ 화재(자동차)	**	*	*	NA	**[10]	*	*	NA
○ 산림화재	170	NA	*	NA	208	NA	*	NA

○ 쓰레기 무단소각	**	NA	*	NA	**[1000]	NA	*	NA
○ PCBs의 무단소각	*	*	*	NA	*	*	*	NA

자료 : US EPA, '99 Great lakes binational Toxics Strategy : PCDD(dioxin) and PCDF(furans) sources and Regulations, 2000

<표 Ⅲ-2> 미국내 다이옥신, 퓨란 및 PCBs의 매체별 배출량('87년과'95) (계속)

배 출 원	'87년 매체별 배출량 (gTEQ/년)				'95년 매체별 배출량 (gTEQ/년)			
	대기	수계	토양	제품	대기	수계	토양	제품
금속제련공정								
○제철금속 용광로/정제								
-탕화공정	**	*	*	NA	**[100]	*	*	NA
-코크스 제조공정	**	*	*	NA	**[10]	*	*	NA
-전기로	**	*	*	NA	**[10]	*	*	NA
-철주조	**	*	*	NA	**[10]	*	*	NA
○비철금속용광로/정제								
-이차 알루미늄 탕화공정	9.5	*	*	NA	17	*	*	NA
-이차 구리탕화공정	304	*	*	NA	541	*	*	NA
-이차 납탕화공정	1.22	*	*	NA	1.63	*	*	NA
○Scrap electric recovery	*	*	*	NA	*	*	*	NA
○Drum and barrel reclamation	NEG	NEG	NEG	NA	NEG	NEG	NEG	NA
화학물질제조/공정 배출원								
○표백 목재 펄프제지 공정	*	356	14.1	505	*	19.5	1.4	24.1
○Mono-to tetrachlorophenols	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG
○Pentachloro- phenols	NEG	NEG	NEG	36,000	NEG	NEG	NEG	25,000
○Chlorobenzenes	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG	NEG

<표 Ⅲ-2> 미국내 다이옥신, 퓨란 및 PCBs의 매체별 배출량('87년과'95) (계속)

배 출 원	'87년 매체별 배출량 (gTEQ/년)				'95년 매체별 배출량 (gTEQ/년)			
	대기	수계	토양	제품	대기	수계	토양	제품
○ Chlorobiphenyls (leaks/spills)	NEG	NEG	NEG	NA	NEG	NEG	NEG	NA
○ Ethylenedichloride / vinyl chloride	*	*	NEG	*	*	*	NEG	*
○ Dioxazine 염료 및 색소	NEG	NEG	NEG	64	NEG	NEG	NEG	0.36
○ 2,4-Dichloro phenoxy acetic acid	NEG	NEG	NEG	21.3	NEG	NEG	NEG	18.4
○비소각 도시슬러지	NA	NA	207	7.0	NA	NA	207	7
○유지 액체비누	NEG	NEG	NEG	*	NEG	NEG	NEG	*
○광화학반응	*	*	*	NA	*	*	*	NA
저장 배출원								
○ 클로로페놀처리목재	*	*	*	NA	*	*	*	NA
총배출량	11,274	356	221	36,597	2,745	20	208	25,050

(a) '최종 다이옥신 배출목록' 보고서 작성시 일부 배출원에 대한 자료가 준비되지 않아 1998년 다이옥신 배출목록 초안보고서의 내용을 반영함

(b) 산업에서의 목재연소의 총량의 포함

* : 본 분류는 PCDD/PCDF의 배출원이라는 증거는 일부 존재하나 정량적인 자료가 충분하지 않음

** : 본 분류는 PCDD/PCDF의 배출원이라는 증거가 존재하여 1995년 배출량 자료를 만들었으나 배출계수나 활동도가 아주 낮아 목록에 포함시키기에는 배출량 산정이 불확실하다. [ ]안의 숫자는 본 배출원의 배출순위로 총배출량을 산정하지는 않았다.

NA : 적용할 수 없음(not applicable)

NEG : 무시할 정도로 작거나(1g/년 이하) 존재하지 않음

다음호에 계속…