



잔류성 유기오염물질(POPs)의 관리현황과 대응방향

- 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. 참고 문헌

부록 I. 약어정리

부록 II. 각국의 HCB 규제기준

부록 III. 소각시설에서의 다이옥신/퓨란 저감기술



I. 서론

1. 연구의 목적

DDT, 다이옥신 등의 화학물질은 인간의 건강을 위협하고 생태계내 생물체에 강한 독성을 나타낸다. 또한 자연적인 분해가 느리기 때문에 환경에 오래 잔류하게 돼 생태계내 먹이사슬을 통하여 생물농축되며, 발생원으로부터 장거리를 이동하는 특성을 가진다. 이와 같은 유해성 및 물질의 특성으로 인해 1990년대 중반부터 이들 화학물질을 잔류성 유기오염물질(Persistent Organic Pollutants, 이하 POPs)로 명명하고, 국제적으로 엄격히 규제하고자 하는 움직임이 활발히 진행되고 있다.

특히 UNEP를 중심으로 진행되는 POPs 규제협약은 2001년 협약체결을 눈앞에 두고 있다. UNEP에서 지정한 12종의 POPs 물질 중 유기염소계 농약은 이미 국내에서 사용 또는 제조가 금지되었거나 미등록된 물질이므로, 추후 이에 대한 잔류성 여부에 대한 검색 및 모니터링 등 기초연구가 요구된다.

한편 POPs중 각종 산업공정에서 부산물(이하 POPs 부산물)로 발생하는 다이옥신, 퓨란, 헥사클로로벤젠(Hexachlorobenzene, 이하 HCB) 등은 다른 POPs 물질과는 달리 원료물질이 아니므로 관련법에 의해 사용 또는 제조를 금지할 수 없을 뿐만 아니라 대체물질도 거의 존재하지 않는다. 따라서 해당 물질들의 유해성 관리를 위해서는 기존의 유해화학물질과는 다른 규제방안을 적용하여야 할 것이다. 그러나 현재 우리나라에서 POPs중 부산물에 대한 규제가 시작단계에 불과하여, 아직 구체적인 배출원조차 확인되고 있지 않은 실정이다.

이에 본 연구는 POPs중 부산물에 해당하는 다이옥신, 퓨란, HCB 관리의 필요성을 제안하고, 이들 물질의 국내의적인 규제동향을 파악하여 우리의 대응방향을 제

시하고자 한다.

2. 연구의 내용 및 방법

위의 연구목적을 달성하기 위한 효과적인 수행기법으로 본 연구의 내용은 다음과 같이 네 부분으로 나누어 진행하였다.

첫째, POPs 부산물 관리의 필요성을 고찰하였다. 우선 POPs 물질 전반에 대한 국제적인 규제동향과 함께 물질에 대한 일반적인 특성을 조사하였다. 또한 부산물에 해당하는 POPs 물질의 유해성과 관리의 필요성을 제시하였다.

둘째, POPs 부산물의 국제적인 규제동향을 파악하였다. 이를 위하여 다이옥신/퓨란 및 HCB의 두 그룹으로 나누어 각국의 배출원, 배출량, 환경매체별 오염현황 등을 조사하고, 이들에 대한 국가별 규제기준을 각각 파악하였다.

셋째, POPs 부산물의 국내 관리동향을 살펴보았다. 다이옥신/퓨란 및 HCB로 구분하여 물질별 배출원과 배출량, 오염현황 및 규제기준, 관리상의 문제점 등을 조사하였다. 그러나 이와 같은 조사항목들에 관하여는 조사시점인 현재까지 부분적인 연구만이 수행된 관계로, 배출 및 오염현황을 파악하기에는 관련자료가 매우 부족하였다.

넷째, 위의 현황을 기초로 POPs 부산물에 대해 국내 대응방향을 도출하였다. 이 부분의 결과로서 배출원 및 배출량 조사, 오염현황 및 유해성 확인사업, 규제기준 선정, 최적가용기술 및 저감방안 등으로 나누어 국내 현실에 적합한 대응책을 제안하였다.

위와 같은 연구내용 중 외국의 규제동향 파악은 주로 인터넷을 중심으로 관련자료를 수집하였다.

II. POPs 부산물 관리의 필요성



1. POPs 부산물의 정의

국제적으로 생산 또는 사용을 금지하고자 하는 POPs 물질이란 환경 내에서 광화학적·생물학적 및 화학적 분해가 제대로 되지 않고, 먹이사슬을 통해 동식물의 체내에 축적되는 독성이 강한 유기오염물질을 말한다. POPs 물질의 대표적인 환경상 특성은 높은 잔류성과 생물농축성, 장거리이동성, 독성 등이며, 이를 기준으로 UNEP는 2000년 현재까지 다음 12종의 물질을 POPs 규제대상물질로 선정하였다.

- ① 유기염소계 농약 : 알드린(Aldrin), 클로르단(Chlordane), DDT, 디엘드린(Dieldrin), 엔드린(Endrin), 헵타클로로(Heptachlor), 미렉스(Mirex), 톡사펜(Toxaphene)
- ② 산업공정의 부산물 : 다이옥신(Dioxins), 퓨란(Furans), HCB (Hexachlorobenzene)¹⁾
- ③ 산업용 화합물질 : PCBs(Polychlorinated Biphenyls)

POPs 물질중 유기염소계 농약은 주로 살충제 또는 토양살충제로 사용되어 왔다. 그러나 이들 물질은 환경내에서 분해가 거의 이루어지지 않아 DDT의 경우 토양에서의 반감기가 10-15년에 이르며, 먹이사슬에서 생물농축되어 생태계와 인체건강에 악영향을 미쳤다. 이와 같은 위해성으로 인해 유기염소계 농약의 대부분은 이미 1970년대부터 선진국을 중심으로 사용이 금지되어 왔다. 우리나라 역시 1970년대부터 국내 미등록 물질인 미렉스를 제외한 나머지 POPs 농약의 국내사용을 전면 금지되었다.

또한 POPs 물질에는 폐기물 소각을 포함한 각종 산

업공정에서 발생하는 부산물이 포함되며, 이들 종류로는 다이옥신, 퓨란, HCB 등이 있다. UNEP의 경우 부산물을 "인위적인 모든 활동(anthropogenic sources)에서 비의도적으로 발생 또는 배출되는 물질"로 정의하고 있다. PCBs는 주로 산업용 화학물질로 사용되나 일부 coplanar PCBs(또는 다이옥신 유사 PCBs는 부산물로 발생하기도 하여, POPs 협약의 부산물에 대한 규정이 일부 적용되기도 한다.

한편 UN/ECE²⁾는 UNEP의 12종 물질 이외에 살충/살균제인 클로르데콘(Chlordecone), 살충제 HCH(Lindane), 방염제인 헥사브로모비페닐(Hexabromobiphenyl), 산업부산물인 PAHs 등을 포함한 총 16종 물질을 POPs로 지정하여 규제하고 있다. 이들 물질 중 클로르데콘은 국내 미등록제품이며, HCH는 1979년 국내 사용이 금지되었다.

따라서 현재까지 국제적으로 POPs로 규정된 부산물은 UNEP의 다이옥신, 퓨란, HCB, PCBs(coplanar)와 UN/ECE의 PAHs이다. 이들 부산물은 주로 원료물질인 다른 POPs 물질과는 달리 산업공정중에서 비의도적으로 발생되기 때문에 발생량 또는 배출량을 확인하기가 매우 어렵고, 관리정책 역시 원료물질과는 다른 접근 방법이 요구된다. 이에 UNEP 등 국제기구와 많은 선진국에는 이들 부산물의 관리를 강화하고 있으며, 우리나라도 다음과 같은 필요성에 의해 POPs 부산물 관리방안 마련이 요구된다.

2. 국제적인 규제강화

날로 산업화되어 가는 현대 사회에서 화학물질이 차지하는 비중은 빠르게 증가하고 있다. 특히 유해화학물질이 생태계나 인간에 피해를 주는 사례가 증가하

1) 유기염소계 농약으로 사용되기도 하였으며, 산업공정의 부산물로 주로 발생
 2) Economic Commission for Europe
 3) The United Nations Conference on Environment and Development



자 전세계적으로 이에 대한 연구와 함께 대응방안을 마련하기 시작하였다.

이들 유해화학물질이 환경에 미치는 영향에 대한 국제적인 규제는 1972년 스톡홀름 유엔인간환경회의를 계기로 논의되기 시작하였고, 1992년 리우환경회의(UNCED)³⁾를 계기로 더욱 가속화되었다. 이 회의에서는 "지속가능한 개발"을 위한 국제협력을 다짐하는 "리우선언"과 21세기 지구환경보전을 위한 행동계획인 "의제 21"이 채택되었다. 리우선언의 원칙 21과 원칙 14는 각각 유해화학물질의 국경간 이동억제를 위한 국제협력과 화학물질의 위해성 저감을 위한 각국의 사전예방에 관한 내용을 명시하고 있다. 또한 의제 21의 제19장에서는 유해화학물질의 안전관리를 위한 세부 실천사항으로 화학물질의 위해성평가, 분류·표지의 조화, 정보교환, 위해저감 프로그램 수립, 화학물질 안전관리를 위한 국가능력 및 시설강화, 불법교역 방지 등을 명시하였다. 이와 같이 화학물질의 안전한 관리 및 피해저감을 위해 제시된 여러 목표를 수행하기 위한 활발한 국제적인 활동이 진행되었으며, 그중 POPs 물질 규제에 관한 움직임은 UNEP을 중심으로 시작되었다.

1995년 UNEP 집행이사회는 UN/ECE의 『장거리 국경간 대기오염에 관한 협약(LRTAP)⁴⁾』에 근거한 POPs 의정서를 채택하고자 POPs로 의심되는 주요 물질에 대한 평가를 여러 국제기구⁵⁾에 요청하였다. 그 결과 12종의 물질을 규제대상물질⁶⁾로 선정하고, 이를 국제적으로 규제하기 위한 『POPs 국제협약화를 위한 정부간 협상회의(INC)⁷⁾』의 개최 및 향후 협상과정에

서 『규제대상 추가물질 선정을 위한 전문가그룹(CEG)⁸⁾』을 구성하게되었다.

현재까지 INC회의는 1998년 6월 캐나다 몬트리올에서 첫회의를 시작으로 2000년 12월 제5차 INC회의까지 개최되었으며, 향후 일정은 2001년 5월 협약체결을 위한 외교회의만을 남겨놓고 있다.

그간의 5차례 협상회의에서는 의도적으로 사용된 POPs의 생산·사용의 금지(협약초안 부속서 A), 생산·사용의 제한(협약초안 부속서 B), POPs의 특성을 가진 신규화학물질, 부산물배출저감(협약초안 부속서 C), POPs를 함유한 폐기물의 관리 및 처리, 국가이행 계획, 협약 부속서내 물질수록, 정보교환, 기술·재정 지원 등에 대해 논의되었다. 그러나 많은 조항에 대해 EU국가와 비EU국가(JUSCANZ 그룹⁹⁾, 선진국과 개도국간의 의견차이가 있었으며, 지금까지 진행된 각 INC 회의의 결과 및 각국의 제안내용은 인터넷의 <http://www.iptc.unep.ch/pops>에 올려져 있다.

12종의 POPs 물질 중 부속서 A에 수록된 생산 및 사용을 국제적으로 금지하자고 제안된 물질은 알드린, 클로르단, DDT, 디엘드린, 엔드린, 헵타클로로, 미렉스, 톡사펜, PCBs 등이며, 부속서 B의 생산 및 사용을 제한하고자 제안된 물질은 DDT¹⁰⁾이다.

한편 부속서 C에는 산업공정의 부산물인 다이옥신, 퓨란, HCB, PCBs의 배출저감을 위한 일반적 지침과 함께 주요 배출원 목록을 수록하였다. 일부 PCBs는 폐오일의 정제시 부산물로 발생하기도 하여 부속서 C에 포함되어 있으나, POPs 물질 중에서 주요 부산물은 다이옥신, 퓨란, HCB 등으로 볼 수 있다.

4) The Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution은 대기오염물질이 국경으로 넘어 다른 국가에 미치는 악영향을 관리하기 위해 1979년 11월에 채택됨

5) IFC(Intergovernmental Forum on Chemical Safety, 화학물질안전에관한정부간포럼), IPCS(International Programme on Chemical Safety, 국제화학안전계획), IOMC(International Organization Programme for the Sound Management of Chemicals, 화학물질관리기구간프로그램)

6) 알드린, 클로르단, DDT, 디엘드린, 엔드린, 헵타클로로, 미렉스, 톡사펜, 다이옥신, 퓨란, 헥사클로로벤젠, PCBs

7) Intergovernmental Negotiating Committee

8) Criteria Expert Group

9) OECD 회원국중 15개 EU 회원국을 제외한 나머지 국가들로, 한국, 일본, 미국, 스위스, 캐나다, 호주, 뉴질랜드 등임

10) 부속서 B에 포함되는 물질은 DDT와 PCBs가 논의되었으나, 제5차 INC회의에서 DDT만으로 결정됨



UNEP 협약에서는 POPs 부산물의 배출을 저감 또는 방지하기 위하여 각 회원국은 자국의 실정에 적합한 규제기준을 선정하되, 신규배출원에 대하여는 반드시 BAT(Best Available Techniques, 최적이용기술)를 적용하도록 권고하고 있다. 이에 모든 국가들은 자국내에서 발생하는 부산물의 발생현황 파악 등 기초연구를 활발히 진행시키는 동시에 부산물 규제를 강화하고 있다.

우리나라의 경우 앞에서 밝힌 바와 같이 유기염소계 농약은 이미 사용 또는 제조가 금지되어 있어, 2001년에 POPs 협약이 채택되어도 국내 산업계에 미치는 영향은 적을 것으로 예상된다. 그러나 POPs 부산물의 경우 아직 국내 배출원이나 배출현황 등이 제대로 파악되지 않았고, 이를 효율적으로 관리할 수 있는 방안도 부족한 실정이다. 따라서 협약의 체결이 목전에 다가온 현시점에서, 국제적으로 규제가 강화되고 있는 POPs 부산물의 국내 관리방안 마련은 매우 시급한 실정이다.

3. 발생원 대체방법의 부재

부산물은 다른 POPs 물질과는 상이한 대체방법이 요구된다. 유기염소계 농약을 포함한 대부분의 POPs 물질은 원료물질이므로, 이를 대체할 수 있는 물질 또는 방안이 많이 개발되어 있다. 우선 유기염소계 농약의 대체물질로는 기존의 농약보다 잔류성이 짧으나 대상 해충에 대한 농약활성은 오히려 높은 물질이 사용되고 있다<표 II-1>. 또한 생물 천적 및 생물농약을 이용하거나, 대상작물을 내충성 품종으로 개량하는 등의 대체방안도 많이 개발되어 있다.

한편 산업용 원료물질로 사용되는 PCBs의 경우, <표 II-2>에서와 같이 각 사용용도별로 대체물질이 개발되어 사용되고 있다. 이와 같은 대체물질의 활용으로 인해 UNEP는 POPs 협약을 통해 이들 물질의 국제적

인 사용을 금지 또는 제한할 것을 제안하고 있다.

그러나 POPs 부산물은 원료물질이 아니므로, 대체물질의 사용이 아니라 배출을 저감 또는 방지하는 기술(BAT)이 적용되어야 한다. 현재 부산물의 물질별 또는 배출원별로 BAT의 개발을 서두르고는 있으나, 아직 전세계적으로 적용가능한 BAT는 미흡한 실정이다. 특히 우리나라의 경우 부산물의 배출원이나 배출량조차 파악되지 않은 실정이라, 적용할 수 있는 BAT는 외국에 비해 더욱 제한적이다.

이와 같은 이유로 부산물은 POPs 물질을 위시한 다른 유해화학물질의 관리정책과는 다른 접근방법이 요구되며, 아직 구체적인 관리방안이 마련되어 있지 못한 실정이므로 이에 대한 대책이 매우 시급하다.

<표 II-1> 유기염소계 농약의 대체물질

분류	POPs 물질	대체물질
농약	Aldrin	endosulfan, carbofuran, carbaryl, chlorpyrifos, quinalphos, phorate 등
	Chlordane	disulfoton, fonofos, chlorpyrifos, propoxur, fenitrothion, diazinon 등
	Dieldrin	pirimiphos, endosulfan, carbofuran, fonofos, chlorpyrifos, fenthion 등
	Endrin	chlorpyrifos, endosulfan, carbaryl, malathion, nicotine, phosphamidon 등
	DDT	diazinon, carbaryl, malathion, trichlorphon, deltamethrin, sulfuramid 등
	Mirex	diflubenzuron, carbaryl, avermectin, diazinon, fenvalerate, deltamethrin 등
	Aldrin	aldicarb, carbaryl, carbofuran, phorate, fenvalerate, dritamethrin 등
	Chlordane	trichlorphon, trifluralin, alachlor, dimethoate, chlorpyrifos 등

자료 : http://lb.chem.unep.ch:8887/imptc/owa/all.get_search

<표 II-2> PCB의 용도별 대체물질

PCBs 사용용도	대체물질
변압기에 사용되는 PCBs를 함유한 절연유	Mineral oils, Silicon oils 테트라클로로부텐젠, 할로겐화탄화소의 혼합물
응축기에 사용되는 PCBs를 함유한 절연유	Methyl(phenylmethyl) benzene과 Methylbis(phenylmethyl) benzene의 혼합물
페인트, 방수제, 플라스틱	Phenylxylethane, A diaryl alkane PXE(phenylxylethane)
	Chlorinated paraffins



PCBs 사용용도	대 체 불 질
택에 사용되는PCBs를 함유한 가 소제(plasticizers)	Phthalates dicotyl phthalate ----- Chlorinated pataffins
바닥재를 사용되는 PCBs를 함유 한 접착제	식물성 기름 (tunip oil)
PCBs를 함유한 작동유(hydraulic fluids)	Biphenyl
PCBs를 함유한 열교환유체	Diphenyl oxide

자료 : http://db.chem.unep.ch:8887/itpc/owa/allget_search

4. 기존의 관리정책 미흡

POPs 물질 중 유기염소계 농약은 환경에 미치는 위 해성과 높은 잔류성으로 인해 선진국에서는 어마 '60 - '70년대에 사용이 금지되었다. 우리나라는 국내 미 등록 농약인 미렉스를 제외한 나머지 7종의 농약은 유해화학물질관리법에 의해 취급제한 유독물로 지정 되어 있으며, 농약관리법에 의해 다음 <표 II-3>과 같이 등록이 취소 또는 금지되었다. 따라서 이들 POPs 물질에 대한 국내 규제기준은 이미 마련되어 있으므로, POPs 협약이 체결되더라도 관리상의 어려움 은 적을 것으로 예상된다.

이에 비해 POPs 부산물의 경우 물질별 배출원이 매우 다양하며, 해당물질의 배출원으로 의심되는 많은 산업공정이 국내에서 운영되고 있어 부산물이 환경중 으로 배출될 가능성이 매우 크다. 또한 이에 따른 생 태계나 인체건강에 미치는 영향이 일부 보고되기도 하였다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 아직 부산물 에 대한 구체적인 관리방안이 마련되어 있지 않아, 국 내 화학물질 관리의 사각지대에 놓여있다. 환경부 등 관련부처에서 POPs 부산물의 규제방안 마련을 준비 하고는 있으나, 선진국이나 UNEP에서 수행중인 규제 동향과 비교해보면 아직 시작단계에 불과하다. 따라 서 다른 POPs 물질과는 달리 기존의 관리정책이 매우 미흡한 실정이므로, POPs 부산물의 정책적인 대응책 마련이 요구된다.

<표 II-3> 농약관리법에 의한 유기염소계 농약의 규제현황

농 약 종 류	용 도	규 제 내 용
알드린(Aldrin)	토양살충제	'72년 등록취소/금지
클로르단(Chlordane)	살충제	'77년 등록취소/금지
DDT	살충제	'71년 등록취소/금지
디엘드린(Dieldrin)	살충제	'70년 등록취소/금지
엔드린(Endrin)	살충제	'69년 등록취소/금지
헵타클로르(Heptachlor)	토양살충제	'79년 등록취소/금지
미렉스(Mirex)	방염제/살충제	'국내 미등록
톡사펜(Toxaphen)	살충제	'82년 등록취소/금지

5. 심각한 물질독성 및 환경위해

POPs 부산물은 심각한 물질독성과 함께 인체건강이 나 환경에 미치는 위해성이 매우 크다. 물론 다른 POPs 물질도 인체건강이나 환경에 위해하나, 지금까지 사용된 모든 화학물질 중에서 가장 위대한 물질 중 하나가 바로 다이옥신이다. 퓨란 역시 다이옥신과 거 의 동일한 독성을 갖고 있으며, HCB도 높은 독성으 로 인해 이미 농약으로의 사용이 금지된 바 있다. 지 금까지 POPs 부산물에 대한 많은 관련연구가 수행되 었으며, 그 중 부산물의 실험동물이나 인체에 대한 독 성 및 생태독성에 관한 연구결과를 다음에 정리하였 다. 따라서 이와 같은 높은 독성과 환경위해성으로 인 해 이들 부산물의 관리는 반드시, 그리고 시급히 수행 되어야 할 것이다.

5.1 다이옥신/퓨란

다이옥신이란 고리가 세 개인 방향족 화합물에 여러 개의 염소가 붙어있는 화합물을 총칭하며, 가운데 고 리에 산소원자가 두 개인 다이옥신계 화합물(Poly Chlorinated Dibenzo-p-Dioxin, PCDD)과 산소원자 가 하나인 퓨란계 화합물(Poly Chlorinated Dibenzo Furan, PCDF)등으로 구별된다. 이들 화합물은 염소의



치환수와 치환위치에 따라 다이옥신계 화합물은 75개, 퓨란계 화합물은 135개의 이성체가 각각 존재한다. 다이옥신 이성체중 2,3,7,8-TCDD의 독성이 가장 강한 것으로 알려져 있으며, 지금까지 연구된 다이옥신 및 퓨란계 화합물의 유해성은 다음과 같다.

5.1.1 실험동물에 대한 독성

(1) 급성 독성

TCDD의 급성독성은 성별이나 나이, 생물종과 계통에 따라 매우 광범위한 결과를 나타낸다<표 II-1>. 미국 EPA의 실험결과, 기니피그 수컷은 LD50 0.6 μ g/kg를 나타내어 TCDD에 실험대상 생물종 가운데 가장 민감한 것으로 밝혀졌고 햄스터 수컷의 LD50은 5,051 μ g/kg로 가장 민감하지 않은 것으로 나타났다. 같은 생물종일지라도 계통이나 성별에 따라 급성독성의 차이가 커, 랫드의 경우 계통에 따라 LD50값이 300배 이상 차이가 나기도 한다<표 II-4>.

한편 크기가 큰 동물일수록 TCDD 독성의 영향이 크게 완화되는 것으로 나타났으며, 실험동물 중 크기가 가장 작은 물모트의 LD50은 0.6~2.5 μ g/kg으로 가장 낮았다.

<표 II-5>.

TCDD의 급성독성에 의해 관찰되는 일반적인 증상은 심한 체중감소, 흉선의 기능감퇴, 비장이나 고환·난소의 과대성장, 골수의 파괴 등이다. 이런 증상은 생물종에 따라 다르게 나타나는데, 설치류와 토끼는 일차적으로 간에 영향을 받게되는 반면 기니피그의 경우 흉선과 림프의 과대성장이 발생된다. 이들 증상은 TCDD의 독성영향에 대한 민감한 생물학적 지표로 활용되고 있다(WHO/IPCS, 1989; U.S.EPA, 1984, 1985).

<표 II-4> 생물종에 따른 TCDD의 급성독성

종/계통(성별)	LD50(μ g/kg)	노출후 사망시간(일)	체중 감소율 (%)
기니피그(Hartley)(수컷)	0.6-2.1	5-34	50
밍크(NR)(수컷)	4.2	7-17	31
뱀(NR)(NR)	<25	12-21	NR
원숭이(Rhesus)(암컷)	-70	14-34	13-38
랫드(L-E)(수컷)	-10	15-23	39
랫드/Sherman, Spartan (수컷)	22	9-27	NR
랫드/Sprague-Dawley (수컷)	60	NR	NR
(암컷)	25		
(수컷, 새끼)	25		
랫드/Fischer Hardan (수컷)	340	28*	43
랫드(H/W)(수컷)	>3,000	23-34	40-53
마우스/B6(수컷)	182	24*	25
마우스/D2A/J(수컷)	2570	21*	33
마우스/B6D2F1(수컷)	296	25*	34
토끼/New Zealand White (암컷 및 수컷)	275	12-22	NR
햄스터/Golden Syrian (암컷 및 수컷)	1,157-5,051	2-47	NR

* 사망 동물의 경우 * 평균 사망시간 NR = Not reported
 자료 : <http://www.epa.gov/ncea/pdfs/dioxin>

<표 II-5> 2,3,7,8-TCDD의 반수치사량(LD50, μ g/kg)

동 물 명	반수치사량	동 물 명	반수치사량
물 모 트	0.6~2.5	토 기	115~275
쥐(마우스, 랫드)	22~320	개	100~3,000
원 승 이	< 70	햄 스테	1,150~5,000

자료 : <http://toxnet.nlm.nih.gov>

(2) 아만성 및 만성독성

다이옥신 화합물의 아만성 독성을 실험하기 위해 랫드(SD)의 암수 성체에 대해 12마리씩 13주 동안 주 5일 위관영양실험을 통해 단계별로 0, 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 μ gTCDD/kg로 주입하였을 때 암컷과 수컷 모두 5마리의 랫드가 사망했다(Pluess et al., 1988a,b).

다른 연구에서는 기니피그(Hartley) 암컷과 수컷에게 90일간 TCDD를 투여한 후 생존동물에 대해 광범위하게 혈액과 정자의 화학성분을 분석하였다. 이때 먹이에 0, 2, 10, 76, 430ng/kg의 TCDD를 포함시켰는데 2, 10ng TCDD/kg의 경우 다이옥신의 노출에 의한 변형은 관찰되지 않았다. 이 실험의 결과에 의하면 기니



피그에 대한 NOAEL값은 0.6ng TCDD/kg로 측정되었으며, 고농도의 노출에서는 심한 체중감소와 함께 높은 사망률이 관찰되었다(DeCaprio et al., 1986).

임신중인 rhesus 원숭이에게 일주일에 3번씩 0.2μg TCDD/kg씩 지속적으로 투여한 결과 아무런 영향도 관측되지 않았다. 그러나 1.0, 5.0μgTCDD/kg b.w의 다이옥신이 투여된 원숭이에서는 체중감소, 피부의 변화, 빈혈 등이 관측되었다(McNulty, 1984).

한편 다이옥신의 만성독성 시험을 위해 Kociba et al.(1978,1979)는 랫드(SD)의 암컷과 수컷 각각 50마리씩에게 0.001, 0.01, 0.1μgTCDD/kg를 포함한 먹이를 2년간 투여하였다. 0.1μg/kg/일의 농도로 노출된 암컷에서는 치사율이 증가하였으나 같은 농도에 노출된 수컷과 0.01, 0.001μg/kg/일에 노출된 랫드에서는 치사율의 증가가 관측되지 않았다. 6개월에서 2년까지 0.1μg/kg/일로 노출된 암컷과 수컷 랫드의 평균 체중은 감소하였으며, 0.01μg/kg/일 농도로 노출된 암컷의 경우도 체중이 감소한 것으로 나타났다. 0.1μg TCDD/kg/일에 노출된 암컷 랫드의 부검시 추출된 혈청을 분석한 결과 손상된 간의 기능에 연관된 효소의 활동이 증가한 것으로 나타났다.

(3) 발암성

2,3,7,8-TCDD는 마우스, 랫드, 햄스터 등의 실험동물에 대한 만성독성실험에서 발암을 일으키는 것이 보고되고 있다. <표 II-6>에서와 같이 10 ngTCDD/kg/일 수준에서 SD계 랫드의 간, 허, 폐 등에서 종양이 발생되었다. 미국 국립독성연구소(National Toxicology Program, NTP)에 의한 실험결과, OM계 랫드의 수컷에서는 갑상선의 종양이 증가하지만 암컷에서는 간의 종양결절과 간암이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 <표 II-6>에 나타난 것처럼 암을 유발하는 용량은 암수에 따라 50배까지도 차이가 났다.

(4) 생식독성

TCDD는 실험동물의 생식에 영향을 미치는데, TCDD에 노출된 암컷 랫드에서 수정율의 감소, 임신말기의 유산율의 증가, 새끼수의 감소, 난소의 기능장애 등이 발생된다고 보고되고 있다(Kociba et al.,1976 ; Barsotti et al., 1979 ; Allen et al., 1979).

또한 수컷의 경우 체중의 감소가 일어날 정도의 고농도에 노출된 경우 고환과 외부 생식기의 중량감소, 정자생산량의 감소, 수정율의 감소 등의 증상이 나타났다(Chahoud et al.,1989).

<표 II-6> 실험동물에 대한 다이옥신의 발암성

화합물	동물(계통)	성별	종양의 종류	암발생용량	연구자/연구기관
2,3,7,8-TCDD	rat (SD)	수컷	간, 허, 폐	10ng/kg/일	Kociba 등(1978)
		암컷		10ng/kg/일	
2,3,7,8-TCDD	rat (OM)	수컷	갑상선,	10ng/kg/주	NTP** (1982)
		암컷	간	500ng/kg/주	
2,3,7,8-TCDD	mouse (Swiss/II/Rijp)	수컷	간	700ng/kg/주	Toth (1979)
2,3,7,8-TCDD	mouse (B6C3F1)	수컷	간	500ng/kg/주	NTP (0982)
		암컷	간, 갑상선	2000ng/kg/주	
6염소화 HCDD*	rat (OM)	수컷	간	5000ng/kg/주	NTP (0980)
		암컷	간	2500ng/kg/주	
6염소화 HCDD	mouse (B6C3F1)	수컷	간	5000ng/kg/주	NTP (0980)
		암컷	간	5000ng/kg/주	

*6염소화 HCDD : 1,2,3,6,7,8-HCDD와 1,2,3,7,8,9-HCDD의 혼합물

**NTP : 미국 National Toxicology Program

자료 : C. Rappe, "Sources of Exposure, Environmental Concentration and Exposure Assessment of PCDDs and PCDFs, Chemosphere, Vol.27, Nos.1-3, p211, 1993.

5.1.2 인체건강에 대한 독성

다이옥신의 독성이 처음으로 알려진 것은 1900년대 초 염소생산 공장의 근로자들에게 급성 염소성 여드름(chloracne)이라는 피부 질환이 관측되면서부터이며, 그 원인이 2,4,5-trichlorophenol에 의한 것으로 밝혀졌다. 1950년대에는 chlorophenol을 함유한 지방을 섭취한 사람들에게서 Chick edema(일종의 부종) 현상이 발생



되기도 하였다. 그 후 1960년대 베트남 전쟁시 살포된 제초제 Agent Orange, 1976년 이탈리아 세베소 화학 공장 폭발 등으로 인해 다량의 다이옥신이 근로자와 인근 주민들에게 노출되는 사건이 발생되었다.

이런 다이옥신 대량노출이 인간에 미치는 영향은 체중감소, 흉선위축, 간 대사장애, 성호르몬 또는 갑상선 호르몬 등 지방대사의 이상, 중추신경 이상 등이며, 다양한 암을 유발하기도 한다. <표 II-7>는 다이옥신류 화합물의 인체 발암성에 대한 역학 조사 결과를 정리한 것으로, 다이옥신에 고농도로 노출될 경우 특정 부위가 아닌 광범위한 신체부위에서 암이 발생되었다. 특히 다이옥신 중 가장 독성이 강한 것으로 알려져 있는 2,3,7,8-TCDD는 폐암이나 기타의 여러 암의 발병율을 미세하게 증가시키는 것으로 알려지고 있다.

이와 같은 다이옥신의 위해성으로 인한 인간의 건강을 보호하기 위해 여러 선진국과 국제기구에서는 각자의 연구결과를 바탕으로 일일 섭취허용량(TDI)를 결정하였다<표 II-8>. 이 중 미국 EPA는 다이옥신의 일일 섭취허용량을 0.006pgTCDD/kgb.w./일로 가장 낮게 정하고 있다.

<표 II-7> 다이옥신의 인체발암성 역학조사 결과

대상자	암종류	발암리스크	연구자
제초제 노출자*	연조직 육종	5-7	Hardell 등 (1979)
2,4,5-T 취급자	연조직 육종	1.3-2.5	Eriksson 등 (1990)
베트남 귀환병	경향조직 등의 암*	4.6	Kogan 등 (1988)
베트남 귀환병	저체 암	1	Mickalek 등 (1990)
화학공장 종사자	연조직 육종	9.2	Fingerhat 등 (1991)
화학공장 종사자	호흡기계통 암	1.42	Fingerhat 등 (1991)
화학공장 종사자	전체 암	1.9	Manix 등 (1991)
화학공장 종사자***	전체 암	2.01	Zober 등 (1990)

*: 폐독시초신 및 클로로피콜 노출자 **: 결합조직, 지방, 기타의 연조직
 ***: 급성 열소성 여드름(chloracne)이 확인되며, 20년 이상의 관찰자임
 자료: "다이옥신·PCB 등 유기염소화합물의 환경리스크평가에 관해서", 지구환경시스템공학연구소 강연자료, 1997.

<표 II-8> 연구기관별 다이옥신에 대한 인체위해성평가 결과

실시기관	연도	TDI (pgTCDD/kgbw/일)	방법	영향(종)
미국 EPA	1985	0.006	linearized multistage	암(랫드)
노르웨이 (Nordic Council of Ministers)	1988	5	UF* 200	암(랫드)
WHO	1990	10	UF 200	번식 및 면역 체계에 영향 (랫드, 원숭이)
네덜란드 (Health Council of The Netherlands)	1996	1	UF 100	자궁내막증 (원숭이)
WHO	1998	1-4	UF 10	성장발달에 영향 (랫드, 원숭이)

*UF: uncertainty, 불확실성 계수
 자료: ECE & UK DETR, Compilation of EU Dioxin Exposure and Health Data, 1999

5.1.3 생태독성

(1) 식물

식물에 대한 다이옥신의 독성에 대한 연구는 많지 않다. 일부 수생식물의 표면에 다이옥신이 농축된 것이 관측된 바는 있으나 이로 인한 독성영향은 관찰되지 않았다.

(2) 무척추동물

무척추동물에 대한 다이옥신 영향에 대한 연구결과, 대부분의 경우 무척추동물은 다이옥신에 대해 민감하게 반응하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 일부 연구에 의하면 다이옥신이 무척추동물에 독성영향을 주는 것으로 나타났으며, 배추벌레나 달팽이 등에서 번식력이 감소하거나 대합조개의 유전자 변화되었다.

(3) 어류

다이옥신에 노출된 어류에서는 배(胚)나 유생단계의 발달과정이 크게 손상되고, 성체단계에서는 무기력증이나 자극에 대한 무반응 등의 영향이 관찰되었다. 일반적으로 어류는 발생 초기단계에서 다이옥신에 노출



되었을 때 독성영향을 크게 받으며, 성체단계에서는 낮은 민감도를 나타내고 염소원자를 4,5,6의 위치에 포함한 이성체의 경우 더 높은 독성영향을 받는다. 어류의 알은 다이옥신에 매우 민감한 반응을 보이는데 성체의 몸에 흡수된 다이옥신이 알에도 전해지기 때문에 발생초기단계의 중요한 노출과정으로 생각된다.

(4) 조류

미국과 캐나다의 오대호에서 다이옥신의 오염에 의한 야생동물의 피해가 관측되었는데 어린 가마우지 (comorant)와 제비갈매기 등 어류를 섭취하는 조류의 기형이 다수 발견되었다. 이때 관측된 기형은 먹이 중의 다이옥신과 퓨란에 노출된 암탉의 자손에서 관측된 기형과 유사한 것이었다. 기형의 원인을 확인하고자 TCDD-TEQs와 부화율의 감소, 배(胚)에 대한 독성 등과 기형의 연관성을 조사한 결과, 오대호의 가

마우지나 제비갈매기 등의 알에서 관측되는 TEQ는 대부분(90%이상)이 선형 PCBs으로 밝혀졌다. 따라서 오대호에 서식하는 조류의 기형은 PCDDs/PCDFs에 의한 것이라기 보다는 선형 PCBs의 영향으로 밝혀졌다.

그 외 다수의 관련실험과 현장연구 결과에 의하면 조류는 다이옥신에 노출되었을 때 산란율의 감소, 배(胚)의 독성, 심장혈관이나 뇌손상 등의 영향을 받는 것으로 밝혀졌다.

(5) 포유류

실험동물에서 나타난 영향이 야생포유류에서도 관측되는데 다이옥신에 오염된 어류를 섭취한 밍크는 무기력, 식욕감퇴, 적혈구수의 감소 등 다이옥신 독성을 나타냈으며 비장, 간, 폐 등의 거대화 증상이 관측되었다.



연합회 홈페이지(www.kemf.or.kr)가 새단장 했습니다.

많은 이용 바랍니다.

www.kemf.or.kr 로 오세요!