

잔류성 유기오염물질의 관리와 제어에서 고려하여야 할 인자들

Factors to be Considered in Management and Control of Persistent Organic Pollutants

김 영 성*

한국외국어대학교 환경학과

(2006년 1월 5일 접수, 2006년 2월 14일 채택)

Young Sung Ghim*

Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

(Received 5 January 2006, accepted 14 February 2006)

Abstract

As ratification of the Stockholm Convention to eliminate or reduce the release of persistent organic pollutants (POPs) into the environment draws near, the Government and industries are actively developing appropriate management and control measures. However, considerable work is needed in order to clarify vast uncertainties imposed in management and control of POPs while handling POPs is extremely difficult because of their toxicity and low levels in the environment. In this note, some major factors to be considered for effective management and control of POPs are reviewed on the basis of recent findings.

Key words : Stockholm Convention, Persistent organic pollutants, Management and control

1. 서 론

잔류성 유기오염물질 혹은 POPs (persistent organic pollutants)는 강한 독성과 함께, 미량과 잔류성, 지용성, 반휘발성 (semi-volatile) 등의 특징으로 인하여 다른 오염물질과 구분된다. 오염물질은 미량으로 존재할 경우 문제가 되지 않는 것이 보통이다. 발암성 물질을 제외하고는 한계값 (threshold)보다 낮은 농도는 인체에 위해하지 않으며, 미량일수록 용이하게 분해 및 동화과정을 거쳐 자연 상태로 환원될 수 있기 때문이다. 그러나 POPs는 미량이라도 강한 잔류성으로

말미암아 수년 혹은 수십 년간 주변에 존재할 수 있다. 뿐만 아니라 지용성이고 대사가 어려운 까닭에 한 개체 내에서도 섭취된 POPs는 지방조직에 축적되며, 식물성 플랑크톤으로부터 생선과 사람에게 이르기까지 먹이 사슬을 거치는 동안 지속적으로 농축이 이루어진다.

POPs는 화학적 조성을 기준으로 크게 다환방향족 탄화수소 (PAHs, polycyclic aromatic hydrocarbons)와 할로겐화 탄화수소로 구분할 수 있다 (김영성, 2003). 할로겐화 탄화수소 중에서는 특히 염소화합물들이 잔류성이 강할 뿐 아니라 물에 대한 용해도가 낮고 지방에 친화력이 커 생체 축적과 농축이 용이하다 (Ritter *et al.*, 1995). 다이옥신, PCBs (polychlorinated biphenyls), 유기염소 살충제들이 대표적 예이다.

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-330-4993, E-mail : ysgim@hufs.ac.kr

Table 1. Persistent organic pollutants under the stockholm convention and regulations in Korea (환경부, 2004; UNEP, 2001).

분 류	물 질	국내규제 현황
살충제	DDT, aldrin, chlordane, dieldrin, endrin, HCB, heptachlor, toxaphene, mirex	Mirex와 HCB는 살충제로서 국내에 도입되지 않음. 나머지 물질은 유해화학물질관리법(금지물질)과 농약관리법(등록취소)으로 규제
산업용 화학물	PCBs, HCB	PCBs는 절연유 등에 오염물질로서 포함되며, 전기사업법(사용금지)과 유해화학물질관리법(금지물질)으로 규제
부산물	HCB, PCBs, 다이옥신/퓨란	폐기물관리법에서 소각시설 배출허용기준으로 규제

PAHs는 둘 이상의 방향족 고리가 융합된 물질의 총칭으로 탄소와 수소만으로 구성된다(Irwin *et al.*, 1997). 대기오염물질 중 최초로 발암성이 알려진 벤조피렌(benzo(a)pyrene, BaP)을 비롯하여 100개 이상의 물질이 확인되고 있다. 석탄, 석유, 목재 등 모든 유기물질이 불완전 연소되는 가운데 생성되며, 원유와 coal tar, oil shale 등 자연 상태의 화석 연료에도 포함되어 있다.

2001년 5월 스톡홀름에서는 유기염소 살충제, HCB(hexachlorobenzene), PCBs, 다이옥신과 퓨란 등 12개 잔류성 유기오염물질을 근절하기 위한 UN 협약이 체결되었다(UNEP, 2001). 1992년 리우선언과 의제 21에서 환경적으로 건전한 독성화학물질의 관리를 천명한 이후, 1994년 화학물질 안전에 관한 정부간 포럼과 1995년 화학물질의 건전한 관리를 위한 기구간 프로그램 설립, 1998년 유해화학물질의 거래 때 사전통보와 승인을 의무화하는 로테르담 협약에 뒤이은 결과이다. 유럽에서는 장거리 이동 대기오염 협약의 일환으로 1998년 스톡홀름 협약 대상 12개 물질 외에 HCHs(hexachlorocyclohexanes), PAHs를 포함한 16개 POPs를 규제하기 위한 의정서를 채택하였다(UNECE, 1998).

스톡홀름 협약은 2004년 5월 발효되었고 우리나라는 국회 비준을 기다리고 있다. 환경부는 가까운 시일 내 비준을 예상하여 비준 후 시행할 특별법을 준비하고 있다. 스톡홀름 협약 대상 물질은 크게 살충제, 화학용품 등 의도적 생산품과 다이옥신 등 비의도적 부산물로 구분된다(표 1). 스톡홀름 협약에 대한 우리나라의 관심은 주로 퓨란을 포함한 다이옥신과 PCBs, HCB(hexachlorobenzene) 등 부산물에 집중되고 있는데, DDT 등 대부분 살충제는 1970년대 사용이 금지되었고(Yeo *et al.*, 2003) 미렉스와

HCB는 살충제로서 도입된 사실이 없기 때문이다(환경부, 2004). 이에 따라 정부에서는 대표적 부산물인 다이옥신과 PCBs의 규제기준을 점검하는 한편 2004년 10월 한전과 PCBs 근절을 위한 합의서를, 2005년 7월에는 포항제철, LG 화학, 현대시멘트 등 19개 기업과 다이옥신 저감을 위한 협약을 체결하였다.

2. POPs 관리

POPs의 관리 및 제어는 우리 사회에서 최근 큰 반향을 일으키고 있는 독성, 유해물질 대응과 같은 선상에 있다. 1980, 90년대 아황산가스, 먼지, 허수, 폐수 등 1차 오염이 해결된 후 스모그, 부영양화 등 2차 오염에 대한 대책들이 시행되는 중에, 참살이(well-being)와 건강에 대한 관심이 고조되면서 주변 곳곳에 잠재된 유해 요인들이 부각되기 시작한 것이다. 비점(non-point) 오염원을 대상으로 한 2차 오염 대책이 대형 점오염원을 대상으로 하였던 1차 오염 때보다 어려운 것은 사실이나 특성이 다른 수많은 물질을 대상으로 하여야 하는 독성, 유해물질 관리에 비할 바는 아니다. POPs의 경우 현재는 스톡홀름 협약 등을 통하여 유해성이 충분히 알려진, 제한된 수의 물질만을 대상으로 하고 있으므로 문제가 훨씬 단순화되어 있다. 그러나 16개 물질을 규제하는 유럽의 예에서 보는 것과 같이 물질 수는 언제든지 늘어날 수 있으며, 실제 UNEP Chemicals(2002)에서는 12개 POPs 외에 지역별로 현안이 될 수 있는 물질들을 조사하고 있다(표 2).

만일 POPs가 특정 목적을 위한 의도적 생산품이라면 생산 및 사용을 금지하고 대체물질을 개발함으로써 근절할 수 있다. 그러나 POPs의 강한 잔류성으

Table 2. Additional POPs of international concern in Europe and central and Northeast Asia (Region VII of UNEP).

분 류	EU의 POPs의 정서 ^a	UNEP의 Region VII 우려물질 ^b
살충제	chlordecone, hexabromobiphenyl, HCHs	HCH, PCP (pentachlorophenol)
산업용 화합물		PBDEs (polybrominated diphenylethers)
부산물	PAHs	PAHs, PCP

^aUNECE (1998)

^b이들 외 중금속 유기화합물로 유기주석과 유기수은 화합물이 포함됨 (UNEP Chemicals, 2002)

로 말미암아 지금은 사용이 금지되었더라도 과거에 사용된 물질이 환경매체 중에 잔류하며 휘발이나 누출된다면 이는 의도적 생산품이기보다는 부산물 혹은 오염물질이다. 이와 같은 형태의 배출은 오염원으로부터 직접 배출되는 1차 배출과 달리 훨씬 광범위한 지역에서 저 농도로 배출된다는 점에서 2차 배출이라 칭한다(Brevik *et al.*, 2004). 또한 우리나라에서는 사용되지 않아도 인접 국가에서 생산 및 사용된다면 잔류성이 강한 만큼 장거리 이동에 의한 유입 가능성이 높다. 실제 중국의 경우 1999년 클로테인이 금지됨으로써 POPs는 더 이상 농업용으로 사용되지 않으나, DDT, 클로테인, 미렉스, HCB 등은 모기약, 흰개미 살충제, 중간 생성물들로서 생산 및 사용되고 있으며, 중국은 이들을 스톡홀름 협약에서 예외 조항으로 인정하여 줄 것을 요청한 상태이다(Wong *et al.*, 2005).¹⁾

다이옥신과 같이 의도하지 않은 가운데 부산물로서 배출되는 POPs는 어떠한 경우든 근절은 어려우며 배출을 최소화하고자 노력하는 것이 최선일 수밖에 없다. 그러나 다이옥신의 예에서 짐작할 수 있는 것과 같이 POPs는 화학적으로 안정된 만큼 어떠한 형태로든 처리가 쉽지 않고 강한 독성으로 인하여 높은 처리 효율을 추구하기 때문에 더욱 비용이 상승할 수밖에 없다. 따라서 다른 오염물질도 마찬가지로 POPs에서는 배출에 관한 정보가 중요하다. 예를 들어, 다이옥신이 소각로에서 많이 배출되는 것은 사실이나 염소가 포함된 연소과정에서는 연제든지 다이옥신이 생성될 수 있으며, 실제 살충제 성분을 포함한 생체 연료 (biofuel) 연소나 경작지 등 노천에

서의 바이오매스 소각은 연소 온도가 낮아 다이옥신 생성에 더욱 효과적이다 (Abelson, 1995). 많은 지역에서 다이옥신의 침적이 배출보다 몇 배가 높아 배출 조사가 충분치 않음을 의심하였으나 최근에는 다이옥신 중 가장 무거운 OCDD (octachlorinated dibenzo-p-dioxin)가 대기화학 반응에 의하여 합성된 때문으로 의견이 모아지고 있다 (Baker and Hites, 2000).²⁾

앞에서 POPs는 물질이 제한되어 있다는 점에서 문제가 단순화되어 있음을 지적하였다. 그러나 다른 한편으로 본다면 POPs는 일반 오염물질에 버금가게 보편적이며 잔류성이 강하고 안정된 만큼 범세계적이다. 광범위한 바이오매스 연소, 토양으로부터 휘발과 같은 2차 배출, 그리고 국경을 넘어 유입되는 장거리 이동들은 쉽게 제어될 수 있는 부분이 아니다. 이들의 비중을 과대평가하면 배출을 최소화하여야 한다는 책무를 소홀히 하는 결과가 될 수 있으나 이들에 대한 충분한 검토가 없이 배출 저감만을 추진한다면 상당한 노력과 비용을 들이더라도 목적하는 성과를 기대하기 어렵다.

3. POPs 제어

POP의 제어는 (1) 의도하지 않은 가운데 생성되는 다이옥신 등의 배출 최소화, (2) PCBs, 유기염소 제초제 등 생산된 제품의 처리, (3) 과거에 사용된 제초제나 PCBs에 의하여 오염된 토양 혹은 침전물의 처리 등으로 구분할 수 있다. 이들을 통하여 POPs가 환경

1) 우리나라도 절연유 중에 오염물질로 잔류하는 PCBs 외, DDT가 살충제인 dicofol의 중간체로서, HCB가 역시 살충제인 chlorothalonil의 부산물로서 잔류할 것으로 파악하고 있으며, 클로테인, 헵타클로르가 목재 용품 등에 흰개미 방제제로서 사용되고 있기 때문에 잠정적으로 특정 면제 (specific exemption)를 신청한 상황이다 (박봉균, 2005; UNEP Chemicals, 2002). 그러나 이와 같은 상황은 물질들이 조금씩 다를 뿐 다른 나라도 동일하며 상업적으로 생산하여 사용하고 있는 중국과는 구별하여야 할 것으로 판단된다.
 2) OCDD의 독성은, 가장 독성이 강한 2,3,7,8-TCDD (tetrachlorodibenzo-p-dioxin)의 1/1000 혹은 1/10,000이기 때문에 OCDD의 농도가 몇 배 높아져도 전체 독성에 미치는 영향은 미미하다.

Table 3. Newly developed POPs destruction technologies (IPEN, 2001; Contner et al., 1998).

기술명	특징	제거율 ^a
기체상 화학적 분해	PCBs 등 POPs를 고온에서 수소와 반응시켜 메탄과 염화수소를 얻음.	높음
전기화학적 산화	저온에서 전기화학적으로 발생시킨 산화제를 POPs와 반응시켜 CO ₂ , 물, 무기이온을 얻음.	높음
용융금속 산화	POP과 기타 물질을 용융금속 조에서 산화시켜 수소, CO, 용융재와 금속 부산물을 얻음.	높음(기체) ^b
용융염 산화	POP과 기타 물질을 용융염 조에서 산화시켜 CO ₂ , 물, 질소, 산소, 염을 얻음.	높을 수 있음
용매화 전자 공정	용액 중의 자유 전자와 금속 양이온을 이용하여 POPs를 비교적 무해한 물질과 염으로 전환.	86~100%
초임계수 산화	고온 고압의 초임계수를 이용하여 POPs와 기타 물질을 산화.	높음(기체)
플라스마 아크	초고온에서 POPs와 기타 물질을 산화. 잔류물 중에 다이옥신이 확인됨.	높음(기체)
촉매 수소화	귀금속이나 금속황화물 촉매 하에 POPs와 수소를 반응시켜 염화수소와 저분자 탄화수소를 얻음.	높음
알칼리 촉매 탈염소화	POP을 알칼리성 polyethylene glycol과 반응시켜 glycol ether와 수산화 화합물, 염을 얻음. 잔류물 중에 다이옥신이 확인됨.	높지 않음

^a바닥재와 후처리 부산물을 포함한 모든 형태의 부산물에 대하여 잔류량 조사

^b굴뚝으로 배출되는 배기가스에 대하여서만 잔류량 조사

매체 중에 축적되는 것을 방지하고, 방치되었거나 축적된 양을 제거함으로써 매체 중 POPs의 절대량을 줄이게 된다.

다이옥신 배출 제어는 우리나라도 그렇지만 많은 나라들이 1990년대 규제기준을 설정하고 저감을 위하여 노력한 결과 상당한 성과를 거두고 있다. 특히 독일은 소각기술과 함께 이로부터 배출되는 다이옥신 제거기술개발에 노력하여 소각시설로부터 다이옥신 배출이 1990년대 10년간 1/400로 줄었으며, 이와 같은 감소로 말미암아 유럽의 많은 나라에서 폐기물 소각 대신 철강 산업의 소결공정 등 금속 산업이 다이옥신의 주요 배출원으로 부각되고 있다(Hartenstein, 2002). 우리나라도 최근의 자료에 의하면 2001년부터 2004년까지 4년간 소각시설로부터 다이옥신 배출이 75% 이상 감소하였다(환경부, 2005). 그러나 우리나라의 경우 특히 대형 소각시설은 소각로 뿐 아니라 배출가스 처리 시설의 거의 100%를 외국 기술에 의존하고 있다는 문제점이 있다.

다이옥신 제어는 크게 흡착과 촉매 산화로 나누어진다. 주로 활성탄을 이용하는 흡착은 물론 대부분 SCR (selective catalytic reduction) 촉매를 이용하는 촉매 산화도 다이옥신이나 유기염소화합물에 선택적이지 않다. 그러나 다이옥신만을 위한 처리시설은 비

용 부담이 너무 크다는 점을 감안하면, 활성탄이 중금속 등 미량 유해물질을 함께 제거할 수 있는 사실이나 SCR 촉매가 질소산화물을 함께 제어할 수 있다는 사실은 중요한 장점이 될 수 있다. 선택적이지는 않더라도 효율을 향상시키기 위한 노력은 계속되고 있다. 일례로, 탄소나노튜브의 흡착 능력이 월등하다는 연구결과가 발표되면서(Long and Yang, 2001) 기능은 다소 떨어지더라도 값이 크게 비싸지 않아 대량 이용이 가능한 나노구조체 탄소 흡착제 개발에 관심이 모아지고 있다. 유해물질을 포함한 흡착제의 처리도 아직 미진한 부분이다. 보편적으로 소각을 권유하고 있으나 유해물질이 농축되어 있다는 점에서 부담스러운데 반하여, 우리나라는 특별한 규정이 없어 매립하는 것으로 알려져 있다.

PCBs를 함유한 폐기물이나 방치된 제조제 등을 처리하기 위하여 우선적으로 고려되는 방법은 매립과 소각이다. 그러나 매립은 부지를 확보하기 어렵다는 점 외에도 1970년대 미국에서 광범위하게 이루어졌던 매립이 1980년 Superfund 법으로 이어지면서 큰 부담이 되었던 사실에서 볼 수 있는 것과 같이(Wright and Nebel, 2002), 매립은 아무리 철저하여도 지하수로 누출되어 확산되면 수습이 사실상 불가능하다는 점에서 선택이 힘들다. 소각은 물리적 특성과

화학적 성질이 다른 광범위한 물질을 처리할 수 있다는 점이 가장 큰 장점이다. 또한 효율성 측면에서 개선의 여지가 있기는 하나 앞에서 설명한 것과 같이 다이옥신 등 2차 오염물질 문제도 상당 부분 해법에 근접되어 있다. 그러나 이와 같은 소각의 강점은 그만한 물량을 확보할 수 있을 때 의미가 있다. 대부분 생산이 금지된 잔류물질을 대상으로 국제협약에 의하여 수출입이 제한된 상황에서 비싼 운송비를 부담하며 물량을 확보하기는 쉽지 않으며, 물량이 충분치 않으면 배출가스 처리를 비롯한 시설의 경제성은 급격히 악화될 수밖에 없다.

유해물질이 농축된 흡착제의 처리 문제에서 볼 수 있는 것과 같이 일단 생성된 유해물질은 완벽하게 분해되지 않는 한 후처리 과정에서 제거된다 하여도 어딘가에 잔류한다는 점에서 생성 자체를 근원적으로 차단할 수 있는 대체기술 개발도 활발하다(표 3). 산화 대신 환원반응을 선택하거나 염소가 분리되더라도 염기성 이온과 결합시켜 회수함으로써 다이옥신 생성을 원천적으로 봉쇄하고자 노력하고 있다. 그러나 이와 같은 기술들은 소각과 달리 물질의 물리적, 화학적 특성에 따라 사용이 제한될 수 있으며 충분한 기간 검증되지 않았다는 점도 유의하여야 한다.

4. 맺 음 말

우리 옆의 소각장으로부터 배출되는 다이옥신을 생각한다면 POPs는 국지적 문제이다. 그러나 중국으로부터의 장거리 이동을 생각한다면 지역적(regional scale) 문제이며 반휘발성의 특성으로 인하여 기온이 낮은 북극과 남극에서 응축에 의하여 축적됨을 생각하면 분명한 지구환경 문제이다. 규모가 크면 구체적이지 않거나 구체적이면 국지적인 지점까지의 환경 문제와는 성격이 다를 수 있음을 의미하는 것이다. 뿐만이 아니다. 독성이 강한 극미량의 물질을 다루는 까닭에 취급이 어려운 반면 조사 및 평가, 제어 및 처리의 많은 부분이 불확실하다. 일찍 출발한 유럽과 미국, 캐나다, 일본 등이 다소 앞서 있다고 하나 POPs 대응이 어려움은 크게 다르지 않다. 그리고 PAHs, HCHs, PBDEs 등 물질 수가 늘어날수록 어려움은 더욱 가중될 가능성이 크다(표 2). 국지 배출의 비율과 장거리 이동의 영향, 제어의 효율성과 처리 기술

의 유효성 등을 장기적 관점에서 점검하며 한 단계씩 접근하는 자세가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2005학년도 한국외국어대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김영성(2003) 대기 중 잔류성 유기오염물질과 중금속의 특성과 현황, 한국대기환경학회지, 19(2), 113-132.
- 박봉균(2005) 스톡홀름 협약과 국내 POPs 관리 방향, 제2회 다이옥신 연구포럼, http://www.konetic.or.kr/edu_emc/edudoc.asp?curRec=4&seqno=585&totCount=4&scode=T&scodename=&page=1 (2005년 11월 접속).
- 환경부(2004) 잔류성 유기오염물질에 관한 스톡홀름협약 발효, 유해물질과, 5월 19일.
- 환경부(2005) 다이옥신 국가배출목록 최초 작성·발표, 유해물질과, 11월 4일.
- Abelson, P.H. (1995) Sources of dioxin-response, *Science*, 266, 350-352.
- Baker, J.I. and R.A. Hites (2000) Is combustion the major source of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans to the environment? A mass balance investigation, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 2879-2886.
- Breivik, K., R. Alcock, Y.-F. Li, R.E. Bailey, H. Fiedler, and J.M. Pacyna (2004) Primary sources of selected POPs: regional and global scale emission inventories, *Environ. Pollution*, 128, 3-16.
- Costner, P., D. Luscombe and M. Simpson (1998) Technical Criteria for the Destruction of Stockpiled Persistent Organic Pollutants, Greenpeace International Science Unit.
- Hartenstein, H.-U. (2002) Dioxin and furan reduction technologies for combustion and industrial thermal process facilities, in *Persistent Organic Pollutants*, Edited by H. Fiedler, *The Handbook of Environmental Chemistry*, Vol. 3, Chapter 15.
- IPEN (International POPs Elimination Network) (2001) The POPs Handbook for the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, <http://ipen.ecn.cz/handbook/html/index.html> (accessed January 2002).

- Irwin, R.J., M. van Mouwerik, L. Stevens, M.D. Seese, and W. Basham (1997) PAHs entry, *Environmental Contaminants Encyclopedia*, National Park Service, Fort Collins, Col.
- Long, R.Q. and R.T. Yang (2001) Carbon nanotubes as superior sorbent for dioxin removal, *J. Amer. Chem. Soc.*, 123, 2058-2059.
- Ritter, L., K.R. Solomon, J. Forget, M. Stemeroff, and C. O'Leary (1995) Persistent Organic Pollutants: An Assessment Report on DDT, Aldrin, Dieldrin, Endrin, Chlordane, Heptachlor, Hexachlorobenzene, Mirex, Toxaphene, Polychlorinated Biphenyls, Dioxins and Furans, International Programme on Chemical Safety.
- UNECE (United Nations Economic Commissions for Europe) (1998) The 1998 Aarhus Protocol on Persistent Organic Pollutants (POPs), http://www.unece.org/env/lrtap/pops_h1.htm (accessed January 2002).
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2001) Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs), <http://www.chem.unep.ch/sc/> (accessed January 2002).
- UNEP Chemicals (2002) Regionally Based Assessment of Persistent Toxic Substances. Central and Northeast Asia Regional Report, Global Environment Facility, <http://www.chem.unep.ch/pts/regreports/C&NE%20Asia%20full%20report.pdf> (accessed March 2003).
- Wong, M.H., A.O.W. Leung, J.K.Y. Chan, and M.P.K. Choi (2005) A review on the usage of POP pesticides in China, with emphasis on DDT loadings in human milk, *Chemosphere*, 60, 740-752.
- Wright, R.T. and B.J. Nebel (2002) *Environmental Science: Toward a Sustainable Future*, 8th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Yeo, H.G., M. Choi, M.Y. Chun, and Y. Sunwoo (2003) Concentration distribution of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides and their relationship with temperature in rural air of Korea, *Atmospheric Environment*, 37, 3831-3839.