

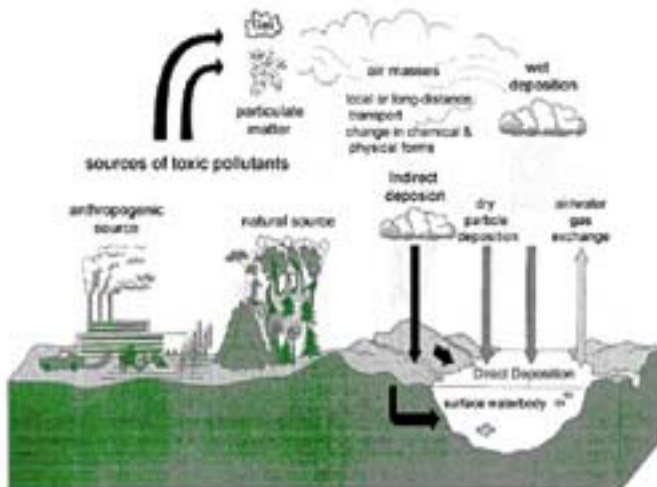
2 '환경의 역습' 최첨단 환경모니터링 기술로 극복

글_ 장윤석 포항공과대학교 환경공학부 교수 yschang@postech.ac.kr

우리가 사는 지구상의 환경은 크게 외부환경과 실내환경으로 나눌 수 있고 외부환경에는 대기 환경, 수환경, 토양환경, 생체환경으로, 내부환경의 범위에는 작업장과 일반생활환경이 포함된다. 환경분석자가 하는 일들은 이러한 다양한 환경의 질을 측정

하는 것과 대규모 환경오염물질에 의한 인체의 위험성을 사전에 평가하는 것이다.

다이옥신의 생성·확산·축적 경로(위)와 다이옥신의 주요 축적원(아래)

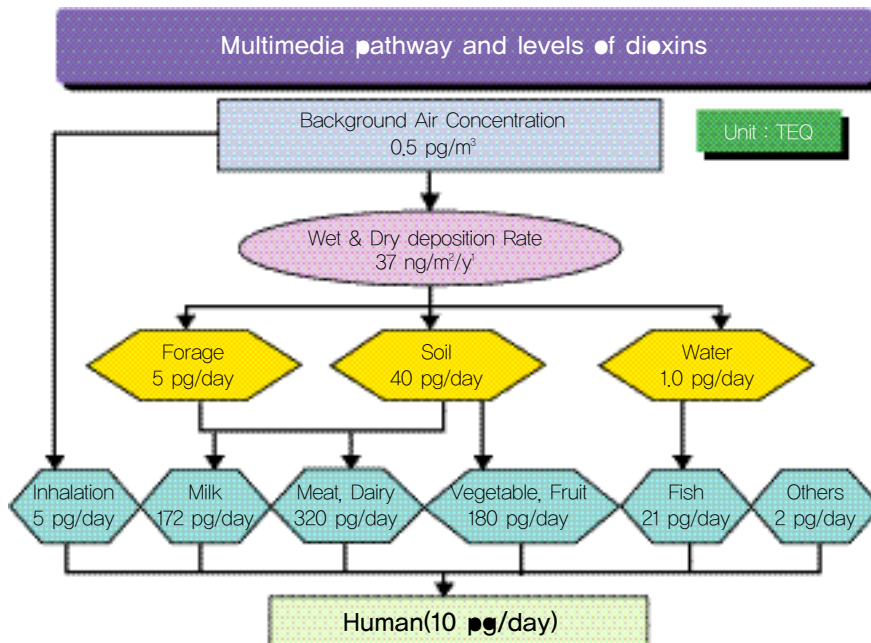


치명적인 환경오염물질, 1조분의 1 이하로 존재

우리가 사는 지구 환경에는 다양한 화학물질들이 존재하는데 이러한 물질들은 자연적으로 발생하는 물질과 인류의 산업 활동에 의해 배출되는 물질로 존재한다. 지구상에는 이러한 화학물질들을 저장할 수 있는 능력을 오랫동안 보유하고 있으며, 어떠한 물질이라 하더라도 발생원(source)에서 나오는 유입량(input)이 유출량(output)보다 많지 않으면 환경인 저수장(reservoir)에는 큰 문제가 되지 않는다. 이것을 환경적인 측면에서는 박스모델(box model) 이라고 부르게 된다.

따라서 환경 중에 유입되는 화학물질의 양이 환경 자정능력으로 처리할 수 있는 양을 넘지 않거나 유입 속도가 유난히 빠르지 않으면 환경과 생태적으로는 큰 문제가 되지 않을 수 있다. 우리가 흔히 얘기하는 중금속이나 오존, 먼지 같은 물질들도 일정한 양에 한해서는 자연적인 것이고 생체에 큰 위험이 되지 않는 것이다. 산업화 혁명 전에는 이러한 급작스런 화학물질의 대규모 유입은 화산활동이나 지진, 산불 등 대규모 자연재해에 의해서만 일어났으며 이럴 때 지구환경 및 생태에는 많은 변화가 있었다.

그러나 인간의 산업 활동이 더욱 활발해 지면서 지구상에는 우리가 피부로 느낄 수 있는 비교적 농도의 오염물질 뿐만 아니라 미량과 극미량으로 존재하



다이옥신의 농도

는 환경오염물질의 수가 급격히 늘어나게 되어 인체에 치명적인 영향을 미치게 되었다. 우리가 오염물질을 농도별로 구별할 때 macro (%), micro 혹은 trace (ppb~ppm), ultra-trace(ppt)를 사용한다. 이 중에서 ppt 수준의 극미량으로 존재하는 물질 중의 대표적인 것이 다이옥신류(PCDD/Fs)의 화합물이다.

이들 물질은 많이 알려진 대로 산업적인 효용이 있어 합성된 물질은 아니다. 월남전에 사용했던 'Agent orange' 라는 물질을 만들면서 부산물로 다이옥신이 합성되었고, 그 양이 워낙 미량이기 때문에 그 당시에는 존재하는 것을 알지 못했으나 나중에 고엽제 환자가 발생하면서 역추적하는 과정에서 다이옥신의 존재를 확인할 수 있었다. 또한 1970년대말 소각로에서 쓰레기를 소각할 때 이러한 다이옥신류가 많이 발생한다는 연구결과가 발표되면서 환경론자와 일반인에게 많은 관심을 불러일으키게 된 것이다.

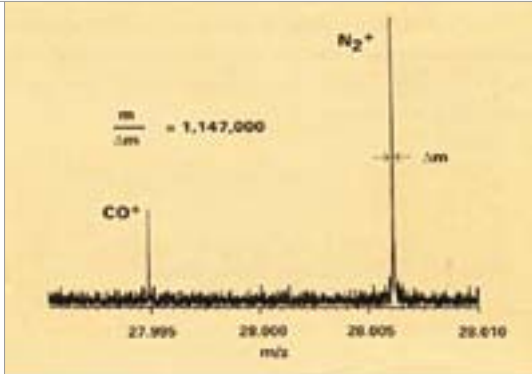
반면에 비슷한 물질인 PCBs 나 PBDEs 등은 절연체와 난연제로 합성이 되어 지금도 많이 쓰이고 있는 물질이며 극미량이지만 환경과 생체 중에 축적이 되

어 환경호르몬의 역할을 하고 있다. 어쨌든 이들 물질은 환경 중에 ppt (part per trillion : 1조 분의 1) 이하로 존재하고 있고 분석하는 수준도 피코그램 (1pg=10⁻¹²g) 이하가 된다. 쉽게 얘기하면 한강 백사장 모래 안에서 잃어버린 작은 다이아몬드 알 하나 찾는 것보다 어려운 작업이 될 수 있다.

크로마토그래피 · 질량분석 통해 다이옥신 추출

앞에서 설명한 바와 같이 환경 중에는 자연적으로 혹은 인위적으로 생성된 수많은 화합물들이 동시에 존재하고 있다. 따라서 환경시료 혹은 생체시료 중에서 ppt 수준으로 분석한다는 것은 실험실 비커의 순수한 용액에 있는 한 물질의 ppt 농도를 분석하는 것과는 질적으로 크게 다르다. 우선 훨씬 많은 양으로 동시에 존재하고 있는 다른 물질로부터의 방해효과를 제거해야 하는 것이 가장 큰 문제라고 할 수 있다. 또한 환경의 특성상 오염물질은 시간과 공간적으로 정지되어 있지 않고(static) 항상 변하면서 움직이고(dynamic) 있다. 이러한 특성 때문에 시료를 채취하는데도 매우 주

고분해능 질량분석기



의를 기울여야 하지만 방해효과를 제거하는 것이야말로 가장 중요한 기술이 되는 것이다.

다이옥신 분석에서는 환경과 생체시료 중에서 ppm, ppb 등의 수준으로 존재하는 다른 수많은 (수십에서 수백만 종류의) 유기, 무기 오염물질을 우선적으로 제거해야 하는데 이 때 다양한 크로마토그래피 기술을 사용하게 된다.

이들 기술로는 크게 수작업으로 하는 컬럼 크로마토그래피와 기기분석의 일종인 HPLC(High Performance Liquid Chromatography) 및 GC(Gas Chromatography) 등이 있다. 컬럼 크로마토그래피에서는 컬럼 안에 다양한 종류의 충전제를 사용하여 비극성 물질이나 다이옥신과 다른 class의 물질들을 대략 분리하게 된다. 하지만 이들을 통과하더라도 다시 수천, 수만의 다른 유기물질들이 남아 있을 수 있고 이들은 좀 더 고분해능의 HPLC와 GC에 의해 다른 물질과 분리해 낼 수 있는 것이다. 다이옥신의 경우 이 때 고분해능의 GC를 사용함으로써 210가지의 각기 다른 형태 (congener)의 동족체가 분리된다.

그러나 이들 크로마토그래피 작업이 끝난 뒤에도 완전한 다이옥신의 분리는 이루어지지 않기 때문에 최종적으로 질량분석 작업을 하게 된다. 대부분의 환경오염물질은 1,000 dalton 이하의 분자량을 갖고 있고, 이들 물질은 화학원소의 성분비가 다를 경우 소수점 이하 넷째 자리 정도까지 측정하게 되면 다른 물질들과 완전히 구별할 수 있게 된다. 일반적인 질량분석

기는 분해능이 1,000 이하라서 소수점 첫째 자리 정도까지 측정하게 되지만, 분해능 7만 이상의 고분해능 질량분석기(HRMS)를 사용하게 되면 소수점 넷째 자리까지 정확하게 측정하게 되므로 매우 유사한 분자량을 가진 다른 화합물의 간섭효과를 배제하고 분석하고자 하는 물질인 다이옥신만을 정확히 골라낼 수 있는 것이다.

이렇게 확인된 다이옥신을 정확히 정량하는 것 또한 매우 어려운 작업일 수가 있다. 일반적으로 고농도의 오염물질을 정량하기 위해서는 직접 저울을 사용하거나 분광학기기를 사용하여 표준시료에 의해 얻어진 검량선(calibration curve)으로부터 간접적으로 구해진다. 하지만 극미량 물질인 경우 이러한 방법을 사용하게 되면 농도측정에 오류범위가 커지게 되며 기타, 실험상의 회수율을 결정하는데도 어려움을 갖게 된다. 이러한 목적을 달성하기 위해 동위원소 희석 방법(isotope dilution method)이란 것을 사용하게 된다.

동위원소 치환물질로 극미량 분석

자연 중에는 방사성 동위원소와 안정동위원소가 있는데 탄소(carbon)인 경우 C₁₂, C₁₃, C₁₄ 등이 있고 이들 중 C₁₂와 C₁₃은 안정성 동위원소에 해당하고 C₁₄는 방사성 동위원소에 해당된다. C₁₄는 주로 생체 내에서의 정량, 정성 분석에 사용하고 환경에서는 C₁₃을 치환한 물질을 비교물질로 사용한다. C₁₃으로 치환된 물질은 동위원소의 안정성으로 인하여 원래의 화합물과 물리적, 화학적 성질은 같고 질량만 다르므로 시료채취나 분석전 후에 이러한 동위원소 치환체를 넣고 비교하면 회수율을 정확하게 구할 수 있을 뿐만 아니라 질량분석기에 의해서도 직접적인 피크 넓이의 비교로 절대적인 정량 값을 구할 수 있게 되므로 극미량 분석에서는 매우 유용하게 사용된다. 다만 이러한 동위원소 치환물질은 매우 고가이므로 비용이 많이 드는 단점이 있다.

이러한 극미량의 오염물질은 다이옥신 이외에도

OECD에서 정한 DDT 등의 지속성 유기오염물질 (POPs : Persistent Organic Pollutants) 등이 포함되는데 이들은 눈에 띄지 않으나 다양하게 환경매체 중에 분포하고 있으며 환경과 생체에 매우 오랫동안 존재하면서 주로 내분비교란 작용을 하고 있다. 이러한 물질들은 주로 산업화된 선진국에서 발생되지만 장거리 이동을 할 수 있으므로 북극과 남극 등지의 얼음과 생명체내에서도 발견되고 있다. 결국 환경 매체 내에서의 극미량 오염물질을 분석해 내는 것과 더불어 이들 물질이 어디서 발생하고 어느 경로를 통하여 어디로 이동하며 최종적으로 인체 등에 어떻게 축적되고 있는지를 알아내는 것이 총체적인 환경 모니터링이라고 할 수 있다.

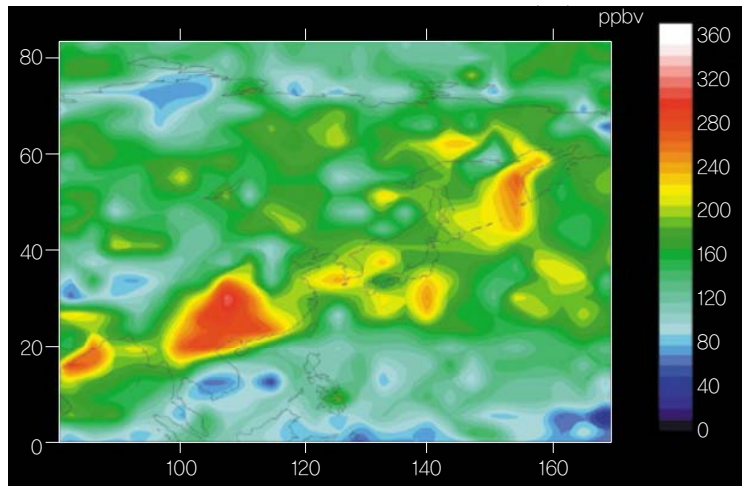
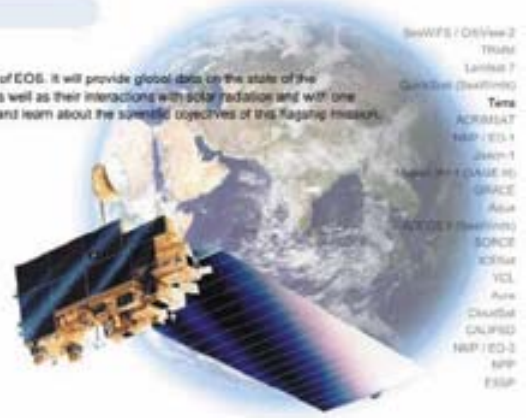
환경모니터링은 환경감시기술, 환경진단기술이라고도 할 수 있으며 환경오염물질을 평가하고 제거기술을 적용하기 전에 기본적으로 수행하여야 하는 주요 기술이다. 지금까지는 이러한 기술이 눈에 보이는 오염상태로부터 비교적 고농도의 오염물질을 감시하는데 사용하였으나 최근에 첨단과학기술이 발전되면서 다양한 센서기술 등을 이용하면서 아주 적은 극미량의 화학물질까지 대상으로 삼고 있다. 또한 이 분야는 검출기술 뿐만 아니라 시시각각으로 움직이는 오염물질의 이동을 예측하는 모델링기법을 포함하고 있기 때문에 컴퓨터 기술이 매우 중요하게 된다. 최근에는 인공위성에 센서를 설치하여 일산화탄소나 메탄 같은 미량 대기오염물질을 원거리에서 3차원적으로 측정하는 기술이 실용화되고 있으며 이러한 기술들을 이용하여 환경, 생태, 기후 등의 변화를 좀 더 자세히 예측할 수 있게 된다.


요약을 하게 되면 인간의 산업화 과정에서 수많은 오염물질이 방출되고 있으며 이중에는 맹독성이고 환경과 생체에 치명적인 위해성을 갖는 것들이 많이 있다. 이들 중 ppt 이하로 존재하는 극미량의 화학물질들은 과학의 발전으로 매우 정밀하게 측정할 수 있게 되었고 화학, 물리, 생물 등의 기초과학과 컴퓨터 등의 공학기술이 융합하여 더욱 발전하게 되었다. 극미

Terra
December 18, 1999

The Terra satellite is the flagship of EOS. It will provide global data on the state of the atmosphere, land, and oceans, as well as their interactions with solar radiation and with one another. Visit this site to explore and learn about the splendid objectives of this flagging mission.

ASTER Instrument
CERES Instrument
MISR Instrument
MODIS Instrument
MOPITT Instrument
Terra Imagery
Terra Homepage



량의 오염물질들은 우리가 쉽게 감지하지 못함으로써 우리의 관심과 경계를 소홀하게 할 수 있으나, 이러한 무관심이 환경에서는 가장 위험한 요소가 될 수 있다. 또한 이러한 오염물질들은 주로 서서히 환경과 생체에 축적되면서 분해속도는 매우 느려 그 양이 점차 증가되고 있으며 언제 어디서 우리에게 커다란 재앙으로 다가올지 매우 예측하기 어려운 측면이 있다. 다행히도 이러한 위해성을 일찍 파악한 과학자들에 의해 이러한 문제들이 서서히 해결될 수 있다는 희망을 가질 수 있다. 

인공위성을 이용, 대기오염물질을 측정할 수 있다.



글쓴이는 연세대학교 화학과를 졸업, 오리건주립대에서 박사학위 취득, 미시간주립대 MIT 박사후 과정, 한양대학교 화학과 조교수를 거쳐 현재 포항공과대학교 환경공학부 교수로 재직중이다.