

환경모니터링 기술

문승현 · 김영준

광주과학기술원 환경공학과, shmoon@kjst.ac.kr, yjkim@geophys.kjst.ac.kr

저자 주: 본고는 2001년 8월 28일 개최된 과학재단 우수연구센터인 환경모니터링기술 연구센터의 성과발표회 Proceedings을 중심으로 정리된 것이다.

환경기술의 시작은 환경의 오염상태를 정확하게 파악하고 목표를 설정하는데 있다. 적용된 기술이나 최종적인 환경의 복원상태를 판단하는 데에도 기준이 필요하다. 따라서 환경기술의 개발은 오염을 정확하게 진단하는 환경모니터링 기술이 먼저 확립되어야 한다. 또한 오염물질의 이동경로, 시간에 따른 농도와 화학종의 변화를 연속적으로 감지하여 경보시스템에 연계하는 것도 환경모니터링의 주요 목적이다. 최근에는 물, 대기, 토양 및 지하수 등 이질성 요소로 구성된 환경의 복잡성으로 인하여 지권, 수권, 대기권 및 성층권까지 광범위하게 퍼져 있는 환경오염 문제 해결을 위해서는 정확한 진단과 감시기능이 요구되고 있다. 본고에서는 오염물질을 보다 정확하고 정밀하게 측정하는 방법과 측정기기의 연구현황 및 관련된 기술의 원리를 간단히 소개한다. 기술의 분류는 측정하고자 하는 매체를 위주로 수질, 대기, 토양 및 독성측정기술로 나누어 설명하고자한다.

수질오염 측정

전통적인 수질오염측정 항목은 온도, 전기전도도, 염도, 용존 고형물, 탁도와 부유물질, 색도 등의 물리적 변수, 용존산소, 산도, 알칼리도, pH, 양이온과 음이온류, 탄화수소, 유류오염물, 독성물질 등의 화학적 변수, 생물학적산소요구량, 총유기탄소, 화학적산소요구량, 박테리아 농도, 식물성 플

랑크톤 농도 등 생물학적 변수를 포함한다. 이 가운데 물리적 변수는 이미 많은 기술개발이 이루어져 비교적 정확한 연속 모니터링이 이루어지고 있다. 따라서 본고에서는 화학적 요소의 측정을 위한 이온센서와 생물학적 모니터링을 위한 호흡률 측정을 소개한다.

선택성 이온전극은 선택적 투과 능력을 갖는 이온교환막을 경계로 시료와 표준용액이 놓일 때 발생하는 전위차(EMF, electromotive force)를 측정하여 목적 이온농도를 측정하는 전기화학적 방법이다. 이론적인 전위차는 Nernst 식으로 나타낸다. 따라서 농도의 대수값에 대한 전위차의 변화는 $59.16/n$ mV의 기울기를 갖는다.

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \log a$$

E : 시료의 전극과 비교전극간의 전위차(mV)

E₀: 표준 전위차(mV)

R : 기체상수

T : 절대온도(K)

F : Faraday 상수(96485 C)

a : 이온활동도

선택성 이온 전극은 pH를 비롯한, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Cl⁻, F⁻ 등의 전극이 이용되고 있으며 기타 오염원에 포함되는 중금속이나 무기 이온전극이 개발되고 있다. 전극형태는 다공성 유리에 필요한 이온교환 물질로 표면처리하는 일반적 전극이나 미세한 모세관에 전극을 삽입하는 microelectrode가 이용되고 있다. 분자인식(molecular recog-

nitition)이나 촉진수송(facilitated transport)을 이용한 새로운 전극의 연구도 진행되고 있다.

호흡률(Respirometry)이란 특정 조건하에서 미생물에 의해 산소의 소비 및 바이오 가스의 생성 속도를 측정하고 미생물에 의해 이루어지는 기작들에 대한 정보를 얻어내는 것을 말한다. 산소의 소비 및 바이오 가스의 생성은 미생물의 성장, 기질의 제거와 관련되기 때문에 호흡률은 생물학적 공정에 적용할 수 있는 매우 유용한 자료이다. 초기에 이 기술은 화학적인 분석을 대신하는 BOD의 측정에 주로 적용되었는데, 발전되어 여러 공정제어에 적용되기 시작하였고, 생물동력학적인 정보들을 얻기 위한 실험에도 이용되어 왔다. 공정내의 호흡률을 연속 측정할 수 있는 기법이 개발되면서 적용범위 및 응용분야가 더욱 확대되었다. 호흡률 측정법은 단위 시간, 단위 부피당 미생물이 호흡에 사용하는 산소의 양을 측정하여 이를 해석하는 방법으로써 생물학적 처리공정으로 유입되는 생물학적 분해 가능물질의 농도가 높을 수록, 시스템에 존재하는 미생물이 많고, 활성이 높을수록 높은 산소소모량, 즉 높은 호흡률을 나타낸다. 특히, 산소가 미생물의 호흡과 성장 및 기질의 소모에 직접적으로 관여한다는 점에서 허수 및 미생물의 특성을 분석하는데 유용한 방법이며, 생물학적 처리공정에서 생물학적으로 분해 가능한 물질의 분해 및 속도에 관한 정보를 제공할 수 있는 주요 인자로 알려져 있다. 이러한 이유로 유럽의 IWA를 중심으로 한 연구그룹은 활성 슬러지 공정에서 호흡률 측정법에 대한 연구를 1990년대 초반부터 활발하게 진행하였고 그 결과 오염물질의 종류에 따라 반응하는 호흡률의 변화는 모니터링과 제어 인자로 사용하게 되었다.

기타 비점원 오염물질을 측정하는 GIS, 원격탐사(Remote Sensing) 및 오염부하량 할당 등을 통합한 자연수계의 광역 감시시스템기술도 수질모

니터링을 위해 연구되고 있다.

대기오염 측정

대기오염측정은 광학적, 화학적, 기상학적 요인에 의한 빛의 소멸과 시정감쇄현상, 대기질에 포함된 유기휘발성 물질과 산성화 물질, 인체에 유해한 미세 분진 등이 주요 대상이 된다. 대기중에 존재하는 여러 가스상 물질을 모니터링하기 위해 현재 많은 방법들이 이용되고 있다. LIDAR, FTIR 등의 광투과방식 모니터링(open path monitoring) 기법은 실시간으로 여러 가스상 물질을 모니터링이 가능하고 한 지점의 농도가 아닌 광경로 전체에 걸친 오염 물질의 평균 농도를 측정할 수가 있어서 기존의 점 모니터링(point monitoring)방법을 대체할 수 있는 차세대 기법이다.

시정 변화를 일으키는 에어로졸의 광·화학적 특성은 각 입자가 지닌 빛에 대한 굴절률의 차이에 의하여 빛을 산란 및 흡수시키는 현상으로 표현된다. 각 단일 입자들의 산란 및 흡수율(scattering & absorption efficiency)은 입자의 화학적 구성과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 빛을 소멸시키는 직접적인 원인으로 작용한다. 라이다(LIDAR)는 이러한 현상의 연구에 가장 보편적으로 이용되는 기기이다. 라이다는 레이저 빛과 물질이 서로 상호작용을 일으키는 원리를 적용한 능동적인 원격측정장치이다. 라이다에 의한 관측의 원리는 레이저 펄스를 발사하여 관측대상으로부터 산란된 빛이 수신 망원경에 돌아오기까지의 시간을 측정하는 것으로 측정대상까지의 정확한 거리를 측정하고, 그 산란광의 강도를 측정하는 것으로 관측대상 물질량을 측정하는 것이다. 대기 중의 분자와 액체·고체입자 등이 레이저 빛에 의하여 산란, 흡수되는 것을 이용하여 그들의 산란체 또는 흡수체의 농도·운동 등을 계측한다. 원격측정의 이점은 넓은 범위에 걸쳐 관측을 할 수

있을 뿐만 아니라, 시간적으로 연속하여 관측을 할 수 있는 장점이 있다. 또한 능동적 원격측정 장치는 태양빛 등을 이용하는 수동적인 관측장치와 비교하여 관측하는 시간·장소·대상의 움직임에 대한 자유도가 큰 이점이 있다.

대기중 유기물의 모니터링은 LIF(Laser Induced Fluorescence)에 의해 가능하다. LIF는 분광학적 기술을 이용한 장비로써 광원으로 laser를 사용하여 근접한 거리의 유기오염물질을 검출할 수 있다. LIF는 분자나 원자들이 레이저 광원으로 부터 에너지를 흡수하여 더 높은 전기적 에너지 상태로 여기된 후 형광을 방출하는 과정을 말하는데 이런 형광의 세기는 화학종(species)의 농도, 가스의 온도 그리고 압력의 함수이다. 일반적으로 형광은 화학종의 농도에 비례하며 분자나 원자의 에너지 상태가 양자화 되었기 때문에 흡수 스펙트럼의 흡수 지역이 구별되어 있다. 특히 LIF 형광 소멸 스펙트럼의 물질마다의 뚜렷한 차이와 펄스 레이저를 사용으로 인한 LIF 소멸 곡선의 시간에 따른 분포는 복잡한 혼합물에서 방향족탄화수소의 물질을 구별할 수 있도록 하고, 많은 물질의 혼합물이 실험실에서 전처리과정 없이 분석이 가능하게 한다. 대기에 존재하는 유기화합물 중 PAHs(polycyclic aromatic hydrocarbons)는 불완전연소 과정과 주유소나 타르 생산공장 주변에서 발생하는데 돌연변이와 발암의 잠재력으로 인하여 특별한 관심이 요구되는 혼합오염물질이다. PAHs 검출에 LIF 시스템은 많은 장점을 가진다. 레이저광은 광섬유에 효과적으로 모이고 UV 영역에서 큰 흡수 교차점과 높은 형광 발생량을 가진다. 그리고 펄스레이저를 사용함에 따라서 형광 소멸곡선을 볼 수 있다. 이점은 많은 물질의 혼합물이 실험실에서 전처리 없이 분석되어야 할 때 매우 중요하다. 광섬유를 사용하기 때문에 현지(on-site and in situ)측정 시스템을 구축할 수 있

다. 분광학적 기술을 이용한 오염물질 측정방식은 실시간으로 연속적인 측정을 가능하게 할 뿐 아니라 여러 가지 PAHs 등의 오염물질을 동시에 측정할 수 있다.

대기중에 존재하는 입자상 오염물질의 모니터링은 광학적 방법과 중량법이 많이 이용되고 있는데 광학적 방법은 적용하는 입경범위가 제한적이며 중량법은 측정과 분석시간이 많이 소모되는 단점이 있다. 전기적으로 전처리된 입자의 유도전류 측정이나 다단입팩터 기술은 PM10, PM2.5, PM1을 동시에 분리하고 실시간 측정이 가능하게 하였다.

기타 대기중 암모니아 가스는 염기성 기체로서 산성가스와의 중화반응에 의하여 에어로졸을 생성하고 에어로졸 내에서는 암모늄 이온의 형태로 존재하게 된다. 이때 생성된 2차 에어로졸은 인체 및 환경에 매우 유해한 오염물질일 뿐 아니라 지구로 유입되는 태양복사에너지를 직접 차단하여 온실효과와 반대되는 개념인 냉각효과를 일으키는 중요한 물질이다. 또한 에어로졸은 구름 응결 핵을 생성하는데 중요한 역할을 함으로써 구름에 의한 간접적인 냉각효과에도 중요한 영향을 주는 물질이므로 가스상 암모니아와 입자상 암모늄 이온의 전체적인 cycle 및 함유비, 에어로졸 생성에 미치는 암모니아의 영향이 연구되고 있다. 황사와 같은 대기중의 에어로졸은 지구복사수지에 영향을 미치는 요소이며 직·간접적인 복사강제효과로 인하여 기후변화인자로 간주되고 있다. 에어로졸에 의한 가시영역에서의 대기효과는 위성의 가시영역의 채널을 이용하여 모니터링이 가능하다.

토양오염 측정

토양오염 측정은 수질오염 측정과 유사한 측정 항목으로 이루어지지만 연속측정의 어려움이 따르고 시료의 균일성과 대표성을 확보하는 방법이

요구된다. 최근의 토양오염은 중금속과 유류에 의한 휘발성 유기화합물의 오염이 가장 심각한 것으로 알려져 있다. 휘발성 유기 화합물 분석을 위해서는 세라믹 가스 센서와 지하수 중의 유기 화합물 분석을 위한 고상 미량 추출장치, 그리고, 토양 및 지하수 중에 존재하는 중금속과 유류를 조사하기 위한 마이크로웨이브에 관한 연구가 진행되고 있다. 세라믹 가스센서는 SnO₂ 계열의 센서로써 이들 센서는 산소가 없는 상태에서 매우 높은 온도로 가열되면 자유 전자가 SnO₂ 입자의 경계로 자유롭게 이동하지만, 산소가 존재하는 깨끗한 공기 중에 노출되면, 자유전자를 흡수하는 성질을 가진 산소가 SnO₂의 표면 경계에 흡착되어 전자의 흐름을 방해하고 저항을 높게 된다. 그러나 공기 중에 CO와 같은 환원 가스가 존재하게 되는 경우 SnO₂ 입자 표면의 자유전자를 소모하게 되므로 이들 전자의 potential barrier를 낮추게 되어 표면의 저항이 감소하게 된다. 여기서 저항의 감소는 가스 중에 존재하는 환원 성분(오염물)의 농도에 비례하게 되므로 가스 농도 분석에 응용 가능하다. Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene 과 MTBE, 그리고 기술린에 대해서도 우수한 반응성을 보이고 있다.

독성평가 기술

일반적으로 유해 화학 물질의 탐지나 계측을 위해서는 여러 가지 분석 기기들을 이용하는데, 이들은 그 탐지하고자 하는 대상에 따라서 각기 분석방법들이 있다. 즉 미세한 양의 중금속들은 현재 atomic absorption, flame emission 및 기타 분광학적 방법을 사용하여 분석하고 있고, 유기화학 물질의 분석에는 추출과 농축단계후에 크로마토그래피(HPLC, GC, GC/MS) 분석법들을 사용하고 있다. 그러나 이러한 분석법들은 유해화학물질의 성분을 확인하는데 많은 시간이 소요될 뿐

아니라, 정량 및 정성적인 분석을 통해서 특정물질의 존재유무나 그 정량적인 양을 계측할 수는 있지만 그 시료가 생명체에 미치는 직접적인 영향은 측정하지 못한다. 독성 평가 기술은 오염물질의 존재유무나 정량적인 측정만을 바탕으로 하는 기존의 화학적인 분석으로는 실제로 생태계에 미치는 오염정도를 파악할 수 없다는 한계점을 극복하기 위하여 생물체를 통하여 물, 대기, 토양에 존재하는 실제 독성을 평가할 수 있는 통합적인 모니터링 기술을 의미한다.

수질의 독성 정도를 모니터링하기 위하여 유전자 재조합 발광 박테리아를 이용한 멀티 채널 연속 독성 모니터링 시스템은 2단계 모니터링 시스템이 병렬 형태로 연결되어 각각의 채널에는 특정 독성물질에 반응하는 서로 다른 종의 재조합 발광 박테리아가 연속적으로 배양되고, 연속적으로 수질의 독성 정도를 반응기 내에서 배양된 발광 박테리아와 수질 샘플을 접촉 시켜 발광량의 변화로 독성을 탐지한다. 이 기술은 유전공학적 기술을 이용하여 독성탐지에 특화된 박테리아의 지속적 개발을 통하여 선택성과 반응성을 증가시킬수 있다. 미생물을 이용하는 외에도 오염물질과 반응할 수 있는 효소를 박막에 고정화시켜 화학적 반응을 통하여 측정하는 방법도 있다.

최근 문제가 되고 있는 내분비계 장애물질(endocrine disrupting chemicals: EDCs)로 분류되는 농약류나 다이옥신, 다이벤조 퓨란같은 유기물질은 체내의 내분비계를 교란시키고 동시에 여러 이상현상을 나타낸다. 현재 내분비계 장애물질에 대한 연구 방법은 에스트로젠적 특성을 이용한 생물학적 평가방법(bioassay)이 잘 알려져 있다. 또한 합성 내분비계 장애물질에 대한 분석 방법으로는 크로마토그래피와 질량분석방법을 이용한 화학적 분석방법이 있으나, 장시간과 고비용이 단점으로 알려져 있다. 따라서 이러한 극미량 독성물

질의 환경모니터링을 위해서는 연속적이고, 분석 화학, 생물학, 환경공학, 독성학 그리고 생물공학 같은 모든 학문을 통합한 연구가 필요하다. 예로써 생물학적인 평가방법과, 화학적 분석 그리고 생물 지표(biomarker)를 이용한 세가지 기술이 조합된 내분비계 장애물질의 모니터링 방법은 내분비계 장애물질을 검색하는 combination systems으로 동일 시료에 대해서 화학적 분석법 및 bioassay, 그리고 biosensing을 적용하는 스크리닝 방법으로 지속적인 처리여부를 단시간에 결정한다.

결 론

분야별 기술을 보면 대기 측정분야가 광학적 기술을 많이 이용하는 반면 수질, 토양 등에서 화학적, 생물학적 원리가 적용되고 있다. 그러나 off-line 측정기술의 경우 분야에 관계없이 시료의 전 처리 또는 농축 후 크로마토그래피나 spectroscopy가 공통적으로 이용되고 있다. 환경모니터링

기술의 개발은 측정의 연속성과 자동화, 정밀성을 추구하고 있으며 환경규제의 강화에 따라 측정의 요구 범위가 점점 낮아지고 있다. 환경모니터링과 관련된 기초 및 응용연구는 물리, 화학, 생물, 지구 과학 등의 자연과학과 환경공학 외에도 화학공학, 기계공학, 전기전자공학, 재료공학 등의 다양한 학문적 영역을 포함하고 있다. 화학공학에서도 유기 및 무기재료를 이용한 센서시스템의 개발, 이동현상 지식을 이용한 측정 자료의 해석과 모델링, 촉매기술을 이용한 고감도센서 재료 합성, 생물반응기를 이용한 독성반응, 공정기술을 접합한 자동화 측정과 경보 시스템 등 환경모니터링에 기여할 수 있는 가능성이 많다. Nanotechnology와 biotechnology의 진보는 환경모니터링 기술의 혁신에도 기여할 것으로 보인다. 이미 nanotechnology에서 개발된 물질들이 센서재료로 활용되거나 biotechnology와 결합된 면역 chip의 개발은 매우 빠른 학제간의 결합을 보이고 있다.

유전자 변형 작물 분석 기술

이 선 규

넥스젠, canola@hanmail.net

서 언

현재까지 EU 등 여러 나라에서 GMO(genetically modified organism) 표시제가 법으로 규정되어 있음에도 불구하고 아직도 국제적으로 공인된 검정방법(internationally validated method)은 없는 상태이다. 1994년 최초로 상업화된 유전자 전환 토마토에 이어 현재 제초제 저항성 콩, 살충성 옥수수 등 약 11작물 30종의 GM 작물에 대한 상업화가 이루어져 있으며 이들 작물의 세계적 재배 면적도 해마다 급격하게 증가하는 추세이다. 그리고 GM 식품의 안정성 여부에 대하여 아직

많은 논란이 되고 있다. 이 같은 상황에서 유전자 변형 작물에 대한 정확한 표시는 상품에 대한 선택의 자유를 가진 소비자에 대한 정보서비스차원에서 매우 중요하다.

현재 국내 및 국외에서 사용되는 GMO 정성 및 정량법을 살펴보고자 한다.

정성법의 경우 식품내에 있는 단백질을 검출하는 방법과 유전자를 검출하는 PCR(polymerase chain reaction)법이 있다. 단백질을 검출하는 방법은 특별한 기기나 기술이 필요 없어 간편, 신속하지만, 정확도가 떨어지므로 정량이 불가능하며