

신개념 센서로 웰빙 환경 모니터링한다

글 _ 박종만 건국대학교 화학과 교수 jmpark@konkuk.ac.kr

개 개인의 의식주 향상에 집중되던 웰빙에 대한 욕구는 사회가 풍요로워지고 선진화될수록 사회구성원이 속해 있는 주위의 환경에 대한 관심으로 그 범위가 넓어져 가고 있다. 그 결과 국가나 지방자치단체의 환경관리와 모니터링에 대한 책임이 날로 커지고 보다 효율적인 환경 모니터링 및 관리 시스템에 대한 개발과 투자가 요구되고 있다. 국가나 지방자치단체에서는 광범위하게 퍼져있는 주요 환경 관리지점들에 텔레메트리, 인터넷 및 자동화 환경 측정장치를 이용한 원격 무인자동 환경모니터링 시스템의 구축에 많은 노력을 기울이고 있다. 또한 개개 산업체의 환경처리시설, 특히 수처리 시설에서는 인건비 절감과 신뢰할 수 있는 수처리 시설의 운용을 위하여 자동 무인 수질 모니터링 시스템의 운영을 늘려가고 있는 추세에 있다.

환경 원격자동모니터링 시스템 구축

이러한 환경 자동모니터링 시스템의 구축에는 세계적으로 경쟁력 있는 우리나라의 반도체산업 기술과 인터넷 및 디지털 통신산업의 발전이 큰 몫을 하고 있다. 원격 모니터링 및 제어 시스템 구축에 있어 입력 및 표시, 통신부, 시스템 컨트롤

러 및 액추에이터 등이 필요하나 이들 대부분 소형 고성능화가 가능해져 경제적이며 신뢰성 있는 원격 자동모니터링 시스템의 구축에 활력소가 되고 있다.

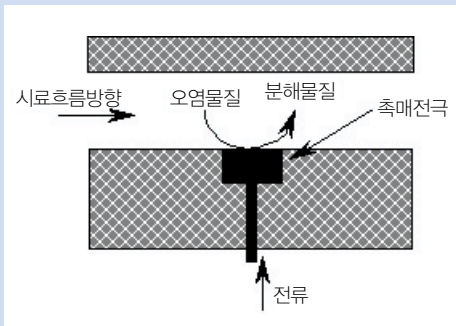
그러나 장시간에 걸친 변화무쌍한 환경 변화에 따른 환경시료들의 다양한 특성상 센서감지부의 오염, 비활성화 등이 심각한 문제점으로 지적되고 있다. 이러한 문제점들을 해결하는 기술들이 신뢰성 있는 환경 모니터링 시스템의 성공적 개발을 판가름하는 한계 핵심기술이 되고 있다. 특히 수질오염모니터링 시스템의 경우 오랜 세월을 통하여 다양한 감지 및 분석기술에 바탕을 둔 개별항목의 수질모니터링 시스템이 연구 개발되고 있는 상황이나 온도, 수소이온농도, 용존산소 등과 같은 몇몇 시험항목들과 같이 비교적 신뢰성이 확보된 간단한 센서를 활용할 수 있는 경우를 제외하고는 자동화된 습식 분석법이나 별도의 복잡한 기기분석법을 활용하여야 하는 경우가 대부분인 실정이다.

이러한 현실은 실시간 수질오염모니터링 시스템의 구축을 어렵게 하고 있다. 앞서 언급한 반도체 및 IT 기술에 바탕을 둔 제어기술의 발전만으로는 신뢰성 있는 수질오염모니터링 시스템의 구축이 한계점에 도달할 것이 자명하다. 이러한 상황

서 특별히 수질오염 감시항목 중 수질오염 정도를 평가함에 있어 일차적인 지표가 될 수 있는 화학적 산소요구량(COD)과 생물학적 산소요구량(BOD)의 실시간 측정을 가능케 하는 새로운 개념의 COD 센서와 BOD센서가 개발되었다.

실시간 측정 가능한 BOD·COD 센서 개발

기존의 COD 및 BOD 측정원리를 간단히 소개하면 COD는 수질 시료 속에 존재하는 화학적으로 산화가 가능한 물질의 산화에 요구되는 산소의 양을 나타낸다. 특별한 경우를 제외하고는 대부분의 유기물질들의 화학적 분해에 요구되는 산소량이다. COD의 측정을 위해서는 강력한 산화제의 일종인 과망간산칼륨(KMnO_4) 용액을 시료에 일정량 가한 후 일정시간 가열하여 물 속에 존재하는 산화가능한 물질들을 모두 화학적으로 산화시킨다. 일정시간 반응 후 소요된 KMnO_4 의 양을 화학적으로 측정하여 이에 상응하는 산소량으로 환산한 것이 COD값에 해당한다. 어떤 수질시험에서 COD 측정치가 높게 나타난다는 것은 그 물 속에는 분해되어야 할 물질의 함량이 많다는 것을 의미한다. 대부분의 산업폐수, 생활하수, 축산폐수 등에는 많은 양의 유기물질들이 함유되어



〈그림 1〉 EOD 센서의 작동원리와 실제 FLOW CELL 센서

높은 COD 값을 나타낸다.

한편 BOD는 수질 시료 속에 존재하는 물질들의 생물학적 분해에 요구되는 산소량을 나타낸다. BOD는 일정농도의 용존산소가 함유된 일정한 양의 시료에 호기성 미생물을 가한 후 오염물질의 분해를 통한 미생물의 증식과 호흡작용 과정에서 소모되는 용존산소의 양을 측정해 얻어진다. 미생물의 증식과 호흡작용을 위하여 주어지는 시간, 즉 측정시간에 따라 5일(BOD-5) 또는 3일(BOD-3)이 소요된다. 환경에서의 오염물질은 화학적 산화과정 보다는 물 속에 존재하는 호기성 미생물들의 호흡에 의한 산화과정에 의하여 더욱 더 빠르고 활발하게 분해된다. 따라서 BOD를 측정함으로써 미생물학적으로 분해 가능한 오염물질의 양을 측정해 낼 수 있다.

그러나 BOD측정의 경우 커다란 문제점이 있다. 오염물질의 분해에서 미생물의 역할이 매우 크기는 하지만 BOD 측정에 3일 또는 5일이 걸리므로 현실성이 없다. 흐르는 강물 시료의 BOD측정에 5일이 소요될 경우 측정이 완료되는 시점에서 그 물은 이미 바다 어느 곳에 도착해 있을지도 모르기 때문이다. 나아가 현재 사용되고 있는 COD 및 BOD 측정방법에

도 근본적인 문제가 있다. 복잡하고 많은 시간이 소요되는 측정과정을 단순히 자동화함으로써 장치가 복잡해지고 재현성이 떨어져 신뢰성 있는 측정결과를 얻기 어렵다. 보다 간단하고 신속하며 신뢰성 있는 COD 및 BOD 측정방법이 필요한 것이다.

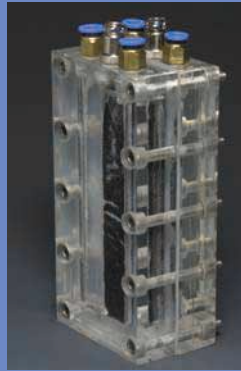
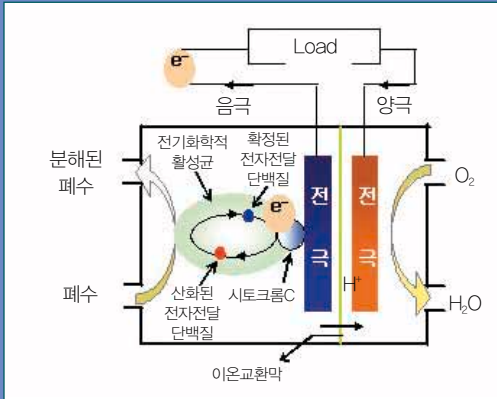
새로운 COD 및 BOD 측정방법은 기존의 방법과는 전혀 다른 측면에서 접근한다. 단순히 실험실에서 수행되는 습식 COD 및 BOD 분석법의 자동화가 아니라 촉매 산화전극과 미생물 연료전지에 기반을 둔 전기화학적 감지시스템인 것이다.

산화구리를 촉매로 COD 측정

먼저 COD 측정시스템을 살펴보자. 기존의 COD 측정시스템은 강력한 산화제를 이용하여 오염물질을 산화시키는 시스템이다. 즉 산화제와 오염물질 사이의 화학적 산화-환원반응을 이용한 것이다. 이와 같은 화학적 산화-환원반응은 전기화학적 산화-환원반응으로 대체가 가능하다. 전기화학적 반응시스템에서는 전극의 전압을 조절함으로써 전극의 산화 또는 환원력을 간단히 조절할 수 있다. 단지 오염물질에 따라 서로 다른 산화력이 요구될 뿐이다. 따라서 전극이 KMnO_4 와 같

이 높은 산화력을 가질 수 있도록 전극의 전압을 조절해 주면 전극의 표면에서 물 시료 중 오염물질의 전기화학적 산화가 일어나게 된다. 이 때 전극에 흐르는 산화전류는 산화되는 오염물질의 직접 농도에 비례하게 된다. 간단히 이 산화전류를 측정하고 이를 오염물질의 산화에 요구되는 산소량에 대응시키면 COD를 알 수 있다. 이러한 COD 측정법은 화학적 산소 요구량 측정의 원리와는 약간 다르기 때문에 이러한 측정법을 '전기화학적 산소 요구량(Electrochemical Oxygen demand, EOD)' 라고 구별하여 나타낸다.

그러나 한 가지 문제는 있다. 산화전극의 전압을 잘 조절하더라도 KMnO_4 의 산화력에 해당하는 동일한 전압조건을 얻기는 불가능하다. 왜냐 하면 KMnO_4 의 화학적 산화작용과 전극의 전기화학적 산화과정은 근본에 있어 전자전달과정으로 같다할 수 있지만 전자전달과정의 경로와 속도가 다르기 때문이다. 열역학적인 이상성에서 벗어난다는 의미이다. 이를 전기화학적 용어로는 과전압이라 한다. 동일한 물질이라 하더라도 전극물질에 따라서 요구되는 과전압의 크기가 달라진다. 예를 들어 포도당을 전기화학적으로 산화시킴에 있어 탄소전극을 사용



〈그림 2〉 미생물 연료전지의 원리와 전기화학적 활성인 미생물의 전자현미경 사진 및 실제 BIO-FUEL CELL 센서

할 경우 은-염화은 기준전극을 기준으로 1V 이상의 전극전압이 필요하다. 그러나 산화구리전극을 사용할 경우 약 0.4V 정도의 전극전압으로도 충분하다. 전극반응 경로가 다르기 때문에 요구되는 전극전압이 다른 것이다. 이 때 산화구리는 포도당의 산화가 효과적으로 용이하게 일어나도록 하며 이러한 물질을 '전기화학적 촉매' 라고 한다.

물 시료중의 오염물질을 효과적으로 산화시키기 위해서는 우수한 촉매 전극물질을 함유하는 전극조성물질이 필요하다. 우수한 촉매효과를 나타내는 물질로는 산화구리, 산화니켈, 산화납, 산화은 등을 들 수 있다. 높은 산화촉매효과를 가지는 이들 물질은 구리, 니켈, 납 또는 은전극에 높은 산화전압을 걸어 생성시킬 수 있으나 전극신호의 초기 안정화 시간이 길고 시간 경과에 따른 전극신호의 변동이 심하여 이를 개선한 산화금속 촉매 복합

재료 전극을 사용한다. 산화금속 촉매 복합재료전극을 감지전극의 표면에 좁은 채널을 형성시켜 오염물질을 함유하는 물시료를 지속적으로 통과시킨다. 촉매전극 표면에서 오염물질의 촉매산화가 일어나 산화전류가 발생되고 이 전류는 오염물질의 농도와 비례하는 EOD값으로 환산되게 된다.

미생물 연료전지 이용한 BOD 측정

BOD 측정센서의 원리는 더욱 흥미롭다. 기존의 BOD 측정법이 미생물의 증식과 호흡을 이용한 원리라는 것을 이해하면 이 센서의 원리를 쉽게 이해할 수 있다. 이 센서는 전기화학적으로 활성인 미생물을 이용한 미생물 연료전지이다. 〈그림2〉에서 음극으로 표시된 다공성 전극의 표면에 전기화학적으로 활성인 미생물을 탐지하였다. 이 음극 표면의 미생물은 폐수나 오염된 물시료 속의 유기물질들을

에너지원으로 하여 호흡하며 신진대사를 한다. 대사의 과정에서 전자전달 단백질의 기능에 의하여 세포내의 시토크롬 C에 전자를 전달하고 시토크롬 C는 다시 전극으로 전자를 전달하는 산화촉매 기능을 한다. 반대편의 양극에서는 공기 중의 산소를 물로 환원시키는 반응이 일어난다. 미생물이 오염물질을 먹이로 하여 전기를 발생시키는 것이다.

그 결과 이 미생물 전지 외부로 연결된 회로에는 전류가 흐르게 되고 이 전류는 물시료 속의 분해 가능한 유기물의 양에 의존한다. 즉 오염물질의 양에 따라 미생물의 전기화학적 호흡속도가 결정되고 그 결과 흐르는 전류량은 오염물질의 농도에 비례하게 된다. 이 전류를 측정하면 물 속의 오염물질의 생물학적 산소요구량을 실시간 측정할 수 있게 된다. BOD 3일, 또는 BOD 5일에 해당하는 측정법에서 문제가 되었던 실시간 측정의 어려움이 해소되어 보다 효율적인 수질모니터링과 수질관리가 가능하게 된 것이다.

새로운 개념의 COD 및 BOD 측정법은 기존의 자동 수질측정 장치에서 채택되었던 고전적인 분석기법 대신에 새로운 개념의 센서 시스템을 적용해 보다 간단하며 신뢰성 있는 수질 자동모니터링 시스템 개발 가능성을 보여준다. 원격 수질모니터링 시스템의 개발의 한계는 기초과학적 핵심기술의 연구개발에 대한 관심과 과감한 투자로 극복할 수 있을 것으로 기대된다. ㉔



글쓴이는 서강대학교 화학과를 졸업하고 미국 코네티컷 대학에서 이학박사를 취득하였으며 현재 건국대학교 화학과 분석화학 교수로 재직중이다.