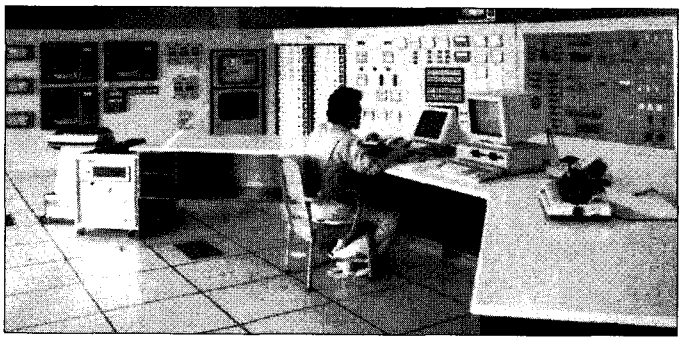
생물모니터를 이용한 독일의 수질 관리

Prof. Dr. Joachim Knie
Institute for Water, Soil and Air Hyglene of the Federal EnvironmentalAgency, Berlin, Germany
Environmental Foundation of Santa Catarina, Florianopolis, Brazil

1. 생물모니터링의 중요성

제한된 지역내에서 수자원을 다양하게 이용하기 위해서는 이윤과 화학오염물질 처리의 차이에 대한 민감한 균형을 유지하는 효율적 관리가 필요하다. 화학적 물의 모니터링은 수체에서 발생가능한 수많은 물질들에 의해 제한된다.(화학물질개요편,[CAS,Chemical Abstracts Service]). 이들중 단지 몇몇 물질들만이 판명할 수 있으며, 극히 소수의 물질만이 정량적으로 분석되어진다. 게다가, 화학적 분석은 일반적으로 단일 또는 혼합 샘플로서 수행되는데, 이것은 계속적인 정량분석을 위한 기구가 없기 때문이다(샘플 빈도와 형태, 그리고 파리미터의 수에 의한 것은 단지 분석한 물의 개략적 정보만을 제공하는데, 실제적으로는 이를 가지고 샘플링시를 소급한다.) 이러한 결과는 만족스러운 것으로 볼 수가 없다. 특히, 지속적으로 변하는 화학적 조건을 가진 흐르는 물은 급속한 간섭을 필요로 하는 상황에서 발생할 수 있는 각각의 물 형태의 기능과 사용에 의하므로 만족성이 더 떨어진다. 일반적인 수질관리망 방법에서 정확한 위험을 측정하기 위한 행동범위는 거의 존재하지 않는다.



생물모니터링 장치는 분석적 결합을 보충할 수 있다. 생물모니터링 장치는 자동적으로 운영되는 시스템을 통하여 분석할 수 없거나, 상호작용에 의해 새로이 발생되는 위해성을 계속적으로 감지할 수가 있다.

생물모니터링의 장치는 사용자에게 '24시간내내' 의 수질 정보를 제공한다.

생물모니터링 장치는 각각 다른 영양단계의 다양한 종들이 사용되어 진다. 이것은 모든 유해한 화학물질 영향의 다양한 생물학적/비생물학적 요인을 인식할 수 있는 단일종이 존재하지 않기 때문이다.

측정기준은 화학물질에 의해 유도된 대사작용 혼란에

대해 유기체의 직접 또는 간접적 반응성이 사용되어지는데, 이는 생물학적 시스템에서 유기체들이 가장 먼저 반응을 나타내기 때문이다. 그러므로, 이를 통해 관련된 생물이 치명적 손해를 입기 전에 독성효과를 얻을 수 있다. 반응성 측정은 생물의 간섭없이 고감도 검출기의 여러 형태에 의해 수행되어진다. 생물모니터링장치의 오염물질에 대한 신속한 인식은 관리시스템과 경보시스템에 효과적이다. 생물모니터링 장치는 인간보건(e.g. 음용수, 농업용수, 어장)에 대한 위험을 방지하고, 수생생태계를 보호한다. 또한 수질의 실질적 상태에 대한 자료를 제공하여 수질오염을 경보할 수가 있다.

2. 역사적 고찰

독일의 생물모니터링장치를 이용한 수질관리는 70년대초 North-Rhine Westphalia에서 시작되었다. Dusseldorf의 환경부는 수질관리를 담당하는 기관으로서 주요강을 따라서 유인/무인 수질관리소의 시스템을 설치하기 위해서 시작되었다. 처음 두개의 관리소는 라인강에 설치되었다.

라인강은 가장 중요한 유럽수로이며, 이강을 따라서 수많은 산업시설 특히, 화학공장들이 밀집해 있기 때문에 그때의 라인강은 심각하게 오염되었다. 기본적인 오염원이외에도 라인강의 수질은 수많은 사고 또는 비합법적인 방류수의 유입으로 인해 더욱 악화되었다. 80년대 중반까지 라인강에서의 이러한 불법행위는 거의 매일 발생되었다.한편으로 라인강의 물은 음용수로서 2천만 이상의 시민들에게 공급되어진다.

1986년 라인강의 물벼룩장치에서 물벼룩의 독성물질에 대한 행동적 반응의 빈도와 최고 강도를 보면 몇몇 오염물질은 물벼룩의 운동성을 증가시키거나 감소시키며, 다른 오염물질은 위의 두 반응을 계속적으로 야기시킨다. 많은 경우가 시험 동물을 죽게 만들었으며, 대부분은 물질을 분석적으로 인식하기가 불가능하였다. 라인강에서 100,000개의 평가된 화학물질의 존재가 기여한다는 것은 놀라운 사실이 아니다.

측정소중 하나는 라인강이 North-Rhine Westphalia로 들어가는 곳인 Rhineland-palatinate의 경계지점에 설치되었고, 다른 하나는 라인강이 독일을 떠나는 곳인 네덜란드와의 경계점에 설치되었다. 측정소에는 물리적/화학적 요인들을 분석하기 위한 다양한 장비들이 실험실에 설치되어 있으며, 물고기를 이용한 생물모니터링장치도 설치되어 있다. 물고기 테스트 유형은 양성 주류성에 기초한 것이다. 물고기는 물의 흐름 방향에 대하여 수평적으로 헤엄친다. 만약 독성물질이 물에 유입되면 물고기들은 이를 피하려 하거나, 독성물질의 영향을 받게 되어 강에서 자신들의 위치를 유지하기 위한 능력을 상실할 것이다. 결국 물고기들은 테스트실의 끝에 있는 반응 스크린을 밀쳐낼 것이며, 이들의 접촉을 센서가 기록하고 경보를 발령할 것이다.

수계에서 발생 가능한 오염물질의 전체범위에 대한 독성효과를 감지하기 위해서는 각기 다른 영양 단계의 기능적 대표생물을 사용하는 시험시스템을 병행하여 사용하여야 할 것으로 간주된다. 모니터링장치에 사용되는 생물의 영양단계는 박테리아, 조류, 갑각류, 홍합(조개류), 물고기로 구성되어 있다.

70년대말 처음으로 컴퓨터로 통제되는 물벼룩테스트 생물모니터링 장치가 추가되었다. 이 테스트 장치에서는 물벼룩(미세갑각류)의 활동성이 적외선센서를 통하여 기록되어진다. 만약 물벼룩이 독성물질과 접촉하게 되면, 이들은 즉시 활동성의 변화를 나타낼 것이다. 오염물의 화학적 특성에 따라,

물벼룩은 전보다 더 빨리 또는 천천히 움직인다. 만약 활동성이 과거의 데이터와 비교하여 계속적으로 계산된 최근의 활동값이 제한된 부분을 초과하게 되면 경보가 발령된다. 물벼룩의 활동 반응성은 매우 민감한 변수이다. 왜냐하면 물벼룩의 행동적 변화는 항상 동물들이 심각한 손상을 입기전에 나타나기 때문이다.

North-Rhine Westphalia에서의 생물모니터링 장치를 이용하여 화학물질의 불법투입 및 사고에 대한 성공적인 감시경험 때문에 다른 연방주에서도 몇몇 수질관리소에 물고기와 물벼룩 장치를 설치하기 시작하였다. 일반적으로 관리소는 환경정책상 중요한 지점에 위치해 있는데, 예로서 대단위 공업단지의 방류지점이 해당된다. 오염원 인식을 위한 관리소의 연계가 가능하며, 실제로 관리소의 존실만으로도 불법방류의 실제적 감소를 가져 올 수 있다.

거의 20개의 각기 다른 생물모니터링장치가 두 개의 유인관리소와 5개의 무인관리소에서 운영되고 있다. 이들 관리소는 온라인으로 Dusseldorf의 주 환경부와 연결되어 있다. 여기서 측정장비로부터 계속적으로 보내어지는 모든 정보가 관리되고, 분석되며 평가되어진다. 특히 경보시에는 측정치를 더욱 신속히 받을 수가 있다.

3. 새로운 시험장치의 개발

1986년 스위스 화학공장 SANDOZ의 화재사고시 생물모니터링장치를 이용한 계속적인 수질모니터링의 필요성이 강조되었다. 소화수와 함께 라인강의 수생군집에 심각한 영향을 야기시키는 몇톤의 살균성 물질이 방출되었으며, 수백만 인구의 용수공급에 심각한 위해를 주었다.

그 때에 계속적인 생물모니터링장치는 이미 설치되어 있었고 여기서 물벼룩장치는 산업사고의 모니터링을 위한 시스템으로서의 안전성을 보여줄 수 있었다. 심지어 방류된 살충제원으로 부터 거의 900km떨어진 곳에서도, 물벼룩은 약 1㎍/ℓ 농도의 독성부하를 감지하였다.

이러한 배경하에 라인강에 인접한 연방주뿐만 아니라 네덜란드에서도 기존의 수질관리소에 물고기와 물벼룩 장치를 설치하였다. 새로운 관리소에서도 차후 모니터링장비를 설치할 계획에 있다. 이와 동시에 독일 정부는 더 나은 생물모니터링장치를 개발하고 다른 생물모니터링 장치를 적용하기 위한 연구프로젝트를 수행하기 시작하였다. 수계에서 발생 가능한 오염물질의 전체범위에 대한 독성 효과를 감지하기 위해서는 각기 다른 영양 단계의 기능적 대표생물을 사용하는 시험시스템을 병행하여 사용하여야 할 것으로 간주된다. 모니터링 장치에 사용되는 생물의 영양단계는 박테리아, 조류, 갑각류, 홍합(조개류), 물고기로 구성되어 있다.새로운 시험장치는 자동화, 고감도, 약1주일 정도의 서비스 간격과 오염물질에 대한 짧은 반응시간 등의 기본적인 조건으로 고정되어있다.

90년까지 22개의 연속 또는 반연속 운동장치가 개발되었고, 화학물질과 폐수에 대한 감도, 반응시간, 데이터의 유효성과 실용적 운용에 대한 실험이 테스트되었다.

현재는 물벼룩과 물고기 장치외에도, 몇 개의 신뢰성 있는 생물모니터링장치가 수질모니터링의 적용과 폐수방류소 조절에 응용될 준비를 하고 있다. 가장 중요한 것은 시험장치의 원리이다.

박테리아 장치

박테리아의 호흡률은 시험실에서 측정된다. 처리되지 않은 물에서는 박테리아의 호흡활동이 높기 때문에 산소농도가 낮다. 하지만 독성물질이 유입되면 박테리아는 독성물질에 의해 호흡 장애를 일으키고, 그 결과 산소농도가 증가된다. 만약 산소농도가 한정된 범위를 초과할 경우, 경보가 울린다.

광합성박테리아 장치

발광성 박테리아는 빛으로서 대사에너지의 일부를 내보낸다. 그러므로 대사작용의 방해는 감소한 빛 방출과 관련이 있다. 광전배증관으로 측정된 빛 방출의 감소는 박테리아의 피해를 암시한다. 빛 방출이 미리 측정된 값보다 적은 경우, 경보신호가 나타난다.

조류장치

광합성(산소생성)에 사용되지 않은 빛에너지는 생체의 클로로필형광으로서 조류에 의해 방출된다. 만약 광합성 과정이 오염물질에 의해 방해를 받게 되면, 형광은 매우 변화할 것이다. 손상되지 않은 조류는 낮은 형광활동과 높은 산소생산성을 나타내지만, 오염물질에 의해 손상을 입은 조류는 형광이 증가하고 산소생산성이 감소한다. 위 두 개의 변수 측정에 의해 독성물질의 유입을 감지할 수가 있다.

홍합장치(조개류)

홍합은 조류나 다른 유기물질을 먹이로 하여 생활하고, 물밖으로 나온다. 그러므로 이들은 많은 호흡을 하기 위해 껍질을 연다. 만약 물이 독성물질에 오염되어 있을 경우, 이들은 껍질을 닫는다. 작은 군락의 홍합류에 대한 껍질빈도와 껍질오픈 현상은 전자기 유도시스템에 의해 제한된다.열려 있는 홍합의 감소와 껍질 움직임의 증가는 오염물질의 존재를 의미한다.

물고기장치

'전형적인' rheotactic물고기외에도, 다른 2개의 장치시스템이 적용가능하다. 한 실험에서 물고기의 행동을 비디오카메라로 관찰하였다. 여기에서 파라미터인 '수영높이', '희전수', '운동성', 그리고 '행동거리'를 분석하였으며, 이들은 서로 연관되어 있음을 알게 되었다. 독성물질은 수영행동을 방해한다. 다른 시험장치는 아가미운동 빈도(환기빈도)를 오염물질 인식장치로서 사용한다. 독성물질은 아가미의 환기빈도를 증가시킨다. 전극센서는 물고기의 접촉없이 아가미의 근육운동에 의해 전달된 전기장을 측정한다.

4. 독일의 현행 생물모니터링 장치 연계망

스위스에서부터 네덜란드까지, 라인강을 따라서 수질관리소가 밀집해 있는데, 이곳에서는 화학적 분석과 생물학적 영향 모니터링이 수행된다. 독일에서 각 관리소는 라인강에 인접한 각 주에 속해서 운영된다. 각 관리소의 측정장치는 온라인을 통해 개개의 주에 있는 환경부로 전송된다. 그리고 여기에서 수질과 오염물질 경보에 관한 일반적 정보가 주로 전송된다.

이외에 독일의 다른 주에 있는 수질관리시스템은 국제경보시스템으로 전송되는데, 이곳은 독일의 Koblenz에 위치하고 있으며, 오염물질로부터 라인강을 보호하기 위한 국제위원회이다. 이 위원회에는 독일이외에 스위스, 프랑스, 벨기에, 네덜란드가 소속되어 있다. 게다가, 라인강의 유일한 연방수질관리소도 Koblenz에 위치해 있다.

라인강의 측정소와 떨어져 있는 개개의 주는 다른 강의 관리소까지도 운영한다. 이들 관리소중 대부분이 최소한 물벼룩과 물고기모니터링장치를 갖추고 있다. 그리고 일부의 관리소는 물벼룩/물고기장치외에도 조류, 홍합 또는 박테이라와 같은 시험장비도 갖추고 있다.

라인강에 인접한 각 주에서, Northrhine Westfalia는 가장 광범위한 생물모니터링망을 갖추고 있다. 거의 20개의 각기 다른 생물모니터링장치가 두 개의 유인관리소와 5개의 무인관리소에서 운영되고 있다. 이들 관리소는 온라인으로 Dusseldorf의 주 환경부와 연결되어 있다. 여기서 측정장비로부터 계속적으로 보내어지는 모든 정보가 관리되고, 분석되며 평가되어진다. 특히 경보시에는 측정치를 더욱 신속히 받을 수가 있다.

Elbe강 유역에 라인강의 수질관리와 경보시스템과 유사한 장치가 설치되어 있다. 라인강과 마찬가지로 Elbe강 또한 중요한 국제수로로서 대서양의 Hamburg 항구를 경유하는 후배지와 체코에 연결되어 있다. 이 지역은 고도로 산업화되어 있으며, 광범위한 지역이 농업에 사용된다. 독일의 재통일후 강은 더욱 심하게 오염되었다.

Elbe강 주변국(체코포함)의 수질은 20개 이상의 관리소에 의해 모니터링되어지는데, 대부분의 관리소가 생물모니터링장치를 가지고 있다. Hamburg 항구 지역은 물벼룩, 물고기 그리고 박테리아 장치를 가진 4개의 관리소를 운영하고 있다.

Elbe강 회복정보망(INES)의 구조에서, 수질데이타는 오염물질에 대한 Elbe강 보호를 위한 국제위원회가 위치하고 있는 독일 Magdeburg로 집중되어져 있다. 예로서, 이곳으로 부터, 수백 ㎞ 떨어져 설치된 물벼룩, 물고기, 박테리아 또는 홍합 모니터링장치를 관리하는 것이 가능하다.

생물모니터링장치를 가진 최근 관리소는 Oder와 Weser강 유역에 있다.

지난해에는 각 공장들이 자신들의 수질처리장치 효율을 관리하기 위해 생물모니터링장치를 설치한 곳이 늘어났다. 만약, 처리장치 배출구에서 독성효과가 발생될 경우, 오염된 물이 강으로 흘러가기전에 이를 해결할 수 있을 것이다. 자동화의 결과는 불시에 발생한 강오염 사고시, 자신의 공장이 그 사고에 대해서 책임이 없다는 것을 증명하는 증거물로서도 사용된다.

특히, 박테리아 장치는 폐수가 처리장치로 들어가기 전에 생물학적 분해를 방해하는 물질의 유입을 사전에 감지하는데 사용된다.

독일의 몇몇 수질기관에서는 생물모니터링장치를 산업배출수의 계속적인 관리를 위해서 사용한다. 측정된 결과치에 의해 방류폐수를 평가한다.

5. 결론

독일 수질관리소에서 사용된 수질모니터링장치는 측정데이타의 과학적 타당성과 운전시 장치의 신뢰성과 같은 생물학적 시스템의 요구사항을 만족시킨다. 각기 다른 영양단계의 생물시험방법은 서로 교환할 수 없으므로, 모니터링의 목표는 개개의 수질관리소의 각기 다른 영양단계의 기능적 대표성을 가진 일련의 생물모니터링장치(생물모니터링장치의 병행)를 사용하여 충족시켜야 한다.

〈위 원고는 지난 6월 4일 국립환경연구원이 주최한 「수질모니터링의 현황과 전망」 세미나에서 발표된 것입니다. - 편집자 주〉