

미래도시의 지속가능한 물-식량-에너지 관리를 위한 수질 센서 기술

Water Quality Sensor Technologies for Management of Water-Food-Energy Resources in Future Cities

현대사회는 정보통신기술(ICT)의 발달로 모든 산업에서 디지털 변혁을 통해 필요한 다양한 정보를 수집하고 이들의 소통 체계를 구축하여 각각의 목적에 맞게 연계 및 활용하는 4차 산업혁명의 시대이다. 이러한 가운데 지구상에 한정되어 있는 자원들을 효율적으로 관리하고 순환시키는 지속가능한 미래사회를 형성하기 위해서는 이러한 자원들의 흐름 및 각종 정보를 실시간으로 수집하고, 이렇게 수집된 방대한 양의 데이터를 분석하여 각 자원의 사용 및 관리에 대한 의사결정을 적절히 내리는 시스템 구축이 크게 주목받고 있다. 예를 들어 전력망의 경우 공급자와 소비자가 서로 상호작용하여 전기사용량과 공급량, 전력선의 상태를 실시간으로 파악하고 정보를 주고받는 스마트그리드(지능형 전력망) 시스템이 개발되어 에너지 자원의 효율성을 높일 것으로 기대되고, 2030년에는 전 세계적으로 1경원 규모의 전력설비 시장이 형성될 것으로 예상된다. 물은 우리의 삶에 필수적인 중요한 자원으로 지난 25여 년 동안 국가 및 지방에서 수자원의 하천이나 저수지에서의 흐름정보나 운영 정보를 시스템화하여 모니터링하고 있으나 그 데이터가 대부분 수량에만 집중되어 있는 것이 현실이다. 인구와 산업의 도시 집중 현상은 전 세계적으로 진행되고 있으며, 이로 인해 물, 식량, 에너지 자원의 수요가 특정 지역에 편중되고 있어 각 자원의 더 효율적인 사용 및 관리가 필요하다. 미래의 도시에서는 물 인프라의 분산형 시스템, 아파트 단지나 소규모 지역 안에서의 물 재이용 등 기존과 다른 물 관리 방안들이 점점 더 주목을 받고 있는데, 이러한 미래도시 환경에서 적합한 물 관리를 위해서는 실시간으로 모니터링되는 물 데이터에 반드시 수질이 포함되어

야 한다. 또한 에너지나 식량 등의 자원 공급에 사용되는 물 또한 요구되는 수질에 맞춰 수원 및 수처리 공정을 분리한 통합적 물 자원 관리 또한 구축될 필요가 있다.¹ 그러나 현재 사용되고 있는 실시간 모니터링 수질 센서는 pH, 용존산소(DO), 탁도(turbidity) 등 매우 포괄적인 수질 상태만을 측정할 수 있어 생활용수, 농업용수, 공업용수 등 도시에서 사용되는 물의 다양한 목적에 맞는 수질 안전성을 평가 및 검증하기에는 매우 미흡한 실태이다. 이러한 가운데 사람의 건강보호 및 생활환경에 영향을 미치는 다양한 유해물질의 농도 및 물의 전체적인 유해성을 측정할 수 있는 수질 센서의 개발은 미래도시의 지속가능한 물 자원 및 식량, 에너지 자원의 관리에 필요한 물 데이터를 제공하기 위해 반드시 필요하다. 수질오염 측정 및 모니터링 시스템 자체도 2015년에 1870억 달러 규모의 시장을 형성, 연평균 9.5% 정도의 증가율을 보이고 있으며 이 중 자립형 물 환경 센서 기술만으로도 세계 시장규모가 2023년에 약 205억 달러 수준이 될 것으로 전망되고 있다.² 본 이슈레터에서는 미래도시에서의 지속가능한 물-식량-에너지 관리를 위해 필요한 수질 센서 기술에 대해 다루고자 한다.

현재 사용되고 있는 수질 센서

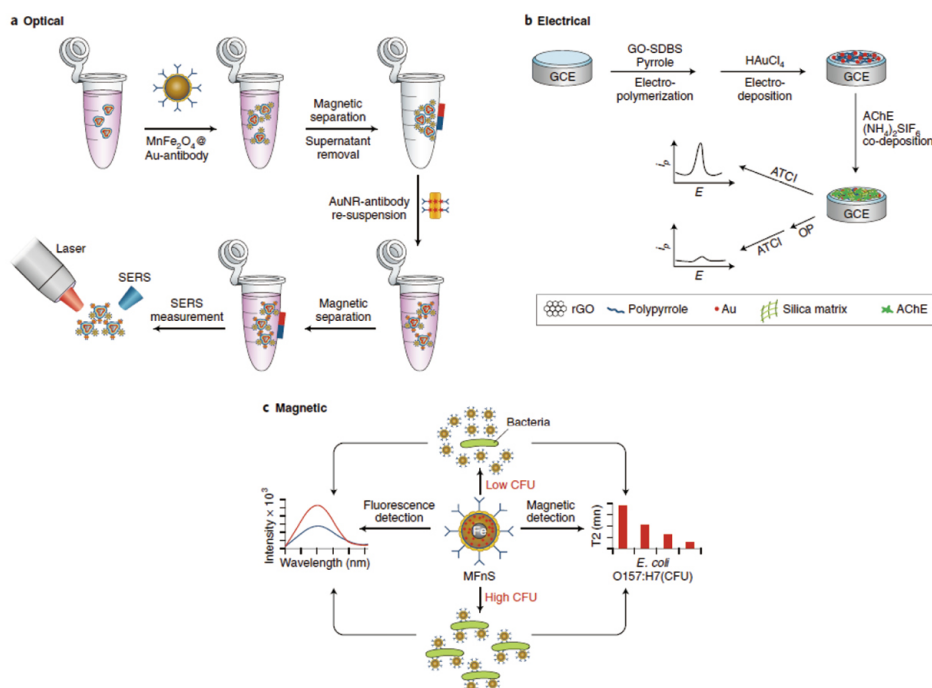
우리 나라에서는 하천, 강, 호수, 지하수 등 각 수역별로 수질 환경기준이 설정되어 있으며, 상수 및 하수처리 유출수 또한 수질환경기준이 설정되어 있다. 이러한 수질환경기준에는 pH, 온도, 용존산소농도(DO), 탁도 등의 기본 항목들 외에도 부유물

질량(SS), 총유기탄소량(TOC), 생물화학적 산소요구량(COD), 총인(T-P), 총질소(T-N), 대장균군수, 중금속 등 각각의 물의 용도에 맞게 세부적인 항목들이 설정되어 있다. 각 수질 항목들을 빠른 시간 안에 측정하기 위해 다양한 센서가 개발 되고 있으며, 현재 사용되고 있는 대부분의 수질 센서는 전기화학 및 광학적 원리를 응용한 프로브(Probe)형 센서이다.^{3, 4} 전기화학 센서는 통상적으로 2개 또는 3개의 전극과 전해질로 구성되어 있으며, 분석 대상으로 인한 산화 환원 화학반응에 의한 전극 사이의 전위차, 전류량, 전기전도도 등의 변화를 측정하여 이를 분석 대상물의 농도로 환산한다. 광학센서의 경우 분석 대상으로 인해 생기는 색, 흡광 및 형광 등의 광학적 현상 또는 그 변화를 전기적 신호처럼 측정가능한 신호로 변환하여 각 분석 대상물의 농도를 측정한다. 물의 탁도는 산란원리를 이용하여 측정하며 용존산소량이나 화학적 산소요구량, 중금속 농도 등은 형광원리를 주로 이용하여 측정한다. 또한, 예를 들어 총인과 총질소는 자외선을 이용하여 측정하고, 유기물, 염소 및 중금속 등은 가시광을 이용하는 등 측정 대상물에 따라 빛의 파장 대역을 다르게 사용한다.

전기화학센서의 경우 이온 선택성 전극(ion selective electrode)을 사용하여 수중에 존재하는 다양한 양이온 및 음이온

물질을 개별적으로 측정할 수 있다. 특정 이온과 선택적으로 감응하는 막을 지시전극으로 사용하여, 막에 특정 이온이 선택적으로 결합할 때 발생하는 전위차를 측정함으로써 특정 이온의 농도를 구할 수 있다. 현재 상용화된 이온 선택성 전극 기반 프로브형 센서로 개별적으로 측정할 수 있는 이온성 수중물질로는 pH(H^+), 염소(Cl^-), 불소(F^-), 브로민(Br^-), 질산염(NO_3^-), 암모니아(NH_3/NH_4^+), 칼슘(Ca^{2+}), 시안화물(CN^-), 구리(Cu^{2+}), 카드뮴(Cd^{2+}), 납(Pb^{2+}), 은(Ag^+) 등이 있다. 다만 경쟁 이온들이 일정 농도 이상으로 존재할 경우 측정되는 전위차에 영향을 미쳐 여러 이온들이 다양하게 공존하는 물환경에서는 측정 결과의 신뢰성이 낮아질 수 있다.

수질 측정 시 물 시료를 샘플링하여 실험실 등에서 각 수질 항목에 맞는 수질 센서 및 수질 분석 장비를 이용하여 측정하는 것이 일반적이나 최근에는 수처리시설이나 하천 모니터링 시스템 등에서 자동 측정 기기 등을 사용하여 연속적으로 수질을 측정하는 경우가 늘고 있다. 이 경우 여러 수질 측정 항목을 함께 측정하고 모니터링하기 위해 여러 센서를 함께 통합한 수질다항목측정기를 사용한다. 이를 통해 계속된 정보를 통합적으로 처리하면서 서로 연관된 데이터들을 사용하여 측정된 값들을 보정하여 최종 정보를 제공하기도 한다.



〈그림 1〉 나노소재를 이용한 광학,전기화학 및 자자기 기반 수질 센서 기술들⁵

Reprinted with permission Copyright 2018, SpringerNature

연구되고 있는 수질 센서

최근 미량오염물질에 대한 관심이 점차 늘어나면서, 수중에 있는 극미량 농도의 오염물질을 비교적 간단하고 빠르게 측정할 수 있는 센서에 대한 관심이 늘고 있다. 또한 다른 경쟁물질들이 존재하는 다양한 물환경 안에서도 특정 오염물질을 선택적으로 측정할 수 있는 기술에 대한 필요성도 꾸준히 제기되어 왔다. 이를 위해 최근에 나노센서와 바이오센서에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(그림 1).⁵⁻⁹

나노센서는 100nm 이하 크기의 나노 구조 및 소재를 이용한 센서로 기존 센서에 비해 신호대 잡음비가 1000배 정도 향상되는 것으로 나타나 고감도 및 소형화가 가능한 차세대 센서 기술로 많은 주목을 받고 있다. 나노센서에 사용되는 나노 소재로는 금, 은, 철 등의 금속물질 외에 그래핀, 탄소나노튜브, 폴리머 등 다양한 물질이 있으며, 센서 측정 방법에 따라 단순한 나노입자 뿐 아니라 나노와이어나 양자점(Quantum Dot), 마그네틱 비드 등 여러 모양으로 사용된다. 나노센서의 경우 기존 센서와 마찬가지로 대상 분석물질이 나노물질과 물리화학적으로 반응할 때 생기는 현상 및 변화를 광학적 및 전기적 신호로 측정한다. 광학 신호로는 주로 형광이나 표면 플라즈몬 공명 분광(surface plasmon-enabled spectroscopy)을 이용한다.⁷ 형광 기반 나노소재로는 양자점이나 금속 나노입자, 업컨버전 나노입자 등이 연구되고 있다. 금이나 은과 같은 희금속물질은 빛으로 들뜬 상태가 될 때 표면 플라즈몬이 주위에 강한 전자장을 발생시키도록 하여 라만 분광기나 비색법을 사용할 때 대상 분석물질의 신호를 약 100-1000배 증폭시키는 역할을 한다. 최근에는 금이나 은 나노입자에 리간드를 붙여 선택성을 높이고 센서의 크기를 작게 만드는 연구들도 많이 이루어지고 있다.

현재 개발된 나노센서로 측정할 수 있는 수중 분석물질로는 질산염, 아질산염, 암모니아, 중금속, 휘발성 유기물질, 유기산, 중금속 등 외에도 바이러스나 박테리아, 원생동물(protozoa)과 같은 미생물이 있다.⁵ 나노물질의 특성을 이용한 나노센서는 매우 낮은 검출한계 농도를 보이지만 여러 물질이 다양하게 존재하는 물 조건에서는 검출한계 농도가 높아지는 것으로 나타나 이를 극복하기 위해서는 정제나 농축과 같은 전처리과정이 필요하다. 전처리 장치로는 마이크로유체시스템을 이용한 분리 과

정이나 나노물질을 이용한 분리, 일반적인 여과 및 원심분리 등이 사용된다. 효율적인 전처리 방법의 개발은 센서 기술에 매우 중요한 연구분야 중 하나이다.

바이오센서는 생물체 및 바이오분자를 이용한 센서로 미생물이나 지렁이들을 이용하거나 특정 물질과 선택적으로 반응하는 효소, 항체, 호르몬, 핵산 등을 이용하여 분석물질들을 측정한다.^{8,9} 생체분자가 특정물질과 선택적인 결합을 할 때 나타나는 현상을 전기화학, 광학, 열 등 다양한 물리화학적 방법으로 신호변환을 하여 분석물질을 선택적으로 감지할 수 있어 고선택성의 센서로 주목을 받고 있다. 미생물 전체를 사용하는 경우 유전자변형을 통해 형광 또는 발광성 유전자를 갖고 있는 세포를 사용하여 특정물질을 광학센서로 측정할 수 있다. 이 경우 나노센서처럼 표면 플라즈몬 공명 분광을 이용할 수도 있다. 바이오센서는 주로 유기물질을 선택적으로 측정하는데 적합하며 현재까지 연구된 측정물질로는 octane, phenol, triclosan, atrazine, bisphenol A 등이 있다.⁸ 미생물 전체 세포 외에도 항체를 이용한 면역 형광법 등도 사용되고 있다. 또한 중금속을 선택적으로 측정하기 위해 아미노산 또는 핵산을 바이오수용체로 사용할 수도 있다. 예를 들어 구리(Cu)나 납(Pb)의 측정을 위해서 탄소나노튜브에 함황아미노산의 일종인 시스테인(cysteine)을 부착시킬 수 있으며, 비소(As) 측정을 위해 금 나노입자 위에 압타머(aptamer)를 부착시키는 연구결과들이 보고되었다.⁹ 또한 E. Coli나 Salmonella와 같은 미생물을 측정하는 바이오센서도 개발되고 있다. 바이오센서에서는 바이오수용체를 희금속 나노입자 등의 나노물질과 함께 사용하여 측정 감도를 높일 수 있으며 전체 센서 장비의 소형화를 이룰 수 있다.

바이오센서의 또 다른 특징은 특정물질의 측정 외에도 물 시료의 전체 독성 또한 측정이 가능하다는 점이다. 포유동물 세포나 어류 세포를 바이오수용체로 사용하여 물 시료와 접촉했을 때 나타날 수 있는 세포 분리, 형태 변화, 세포의 비활성화 등을 측정하여 이를 세포 독성으로 나타낼 수 있다. 다만 세포 전체를 이용하여 세포 독성을 측정하고자 할 경우 측정 시간이 1시간에서 수일이 걸릴 수 있다. 다른 방법으로 크로마토포(Chromatophore)를 이용하여 안료(pigment) 전위 및 변화를 세포 독성으로 측정하는 방법도 연구되었다.¹⁰ 이 경우에는 측정시간이 약 5분에서 1시간정도로 비교적 짧은 시간에 측정이 가능한 것

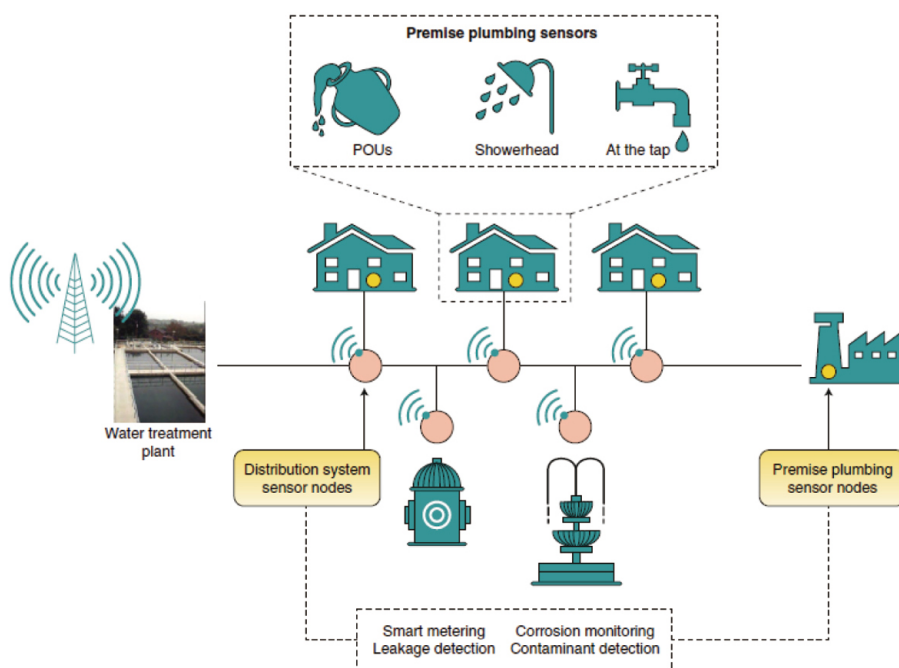
으로 나타났다. 바이오센서의 경우에는 바이오수용체로 사용되는 생체분자의 수명 및 센서와의 결합 안정성이 센서 성능을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다.

나노센서나 바이오센서의 소형화를 위해 랩온어칩형 센서가 개발되고 있으며 이는 전처리기술, 마커기술, 유체제어기술, 측정기술, 복합다중 분석기술 등 여러 요소기술들이 칩 상에 포함되어 있는 분석장치다.¹¹ 여러 물질이 존재하는 물 샘플에서 환경유해물질을 선택적으로 추출 및 정제하고 한 가지 물질만 분석하는 것이 아니라 여러 오염물질을 동시에 분석하여 실시간 모니터링에 적용될 수 있다.

미래도시 물관리에 필요한 수질 센서의 모습

가까운 미래의 도시에서는 인류증가와 도시화로 인해 공급될 수 있는 물 자원이 더욱 한정될 것으로 예상되며 이를 효율적으로 관리하기 위해서는 물 자원의 흐름과 수질의 변화 등을 지속적으로 측정하여 모니터링 할 필요가 있다. 현재 대부분의 한국 도시에서는 물 관리가 집중형 관리 방식으로 이루어지고 있으며 이는 대형 정수장에서 처리된 물을 관망을 통해 각 가정에 공급, 여기서 발생하는 하수를 관거를 통해 수집하여 대형 하수

처리장에서 처리하는 방식이다. 현재 대부분의 수량 및 수질에 대한 관리 및 모니터링은 정수장, 하수처리장과 같은 처리시설에서 이루어지고 있으며 관이나 각 가정에서는 거의 이루어지고 있지 않다. 미국의 경우 주요 도시의 관망이 노후화되어 많은 양의 수돗물이 지하에 유출되고 있으나 이를 관리하기 어려워 소수의 도시 및 지방단체만이 적극적으로 대응하고 있다. 한국 수도권에서도 가까운 미래에 물 인프라의 노후화에 대한 대책이 필요할 것으로 예상된다. 또한 대부분의 나라에서는 수처리장에서 소독처리 후에 잔류염소를 추가하여 배관에서의 미생물의 재성장을 억제하지만 배수관에서 납, 구리, 폴리머와 같은 재료물질들이 유출되거나 또는 표면수, 지하수, 하수 등이 유입되어 관망 안에서 수질이 저해될 위험도 있다. 이렇듯 현재의 수량 및 수질 모니터링으로는 한계가 있으며 이를 극복하기 위해서는 관망이나 각 가정에서도 물 데이터를 측정할 수 있는 시스템이 도입되어야 한다. 이를 통해 지역차나 물 인프라의 상태, 또는 다른 요인으로 인해 생길 수 있는 문제를 사전에 차단하고 실제로 물이 사용되는 가정에서의 수질 저하에 대한 리스크를 최소화할 수 있다. 특히 최근에는 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 기술의 발전으로 실시간으로 데이터를 측정하고 서버에 전송할 수 있어 물 데이터 관리의 효율성을 극대화 할



〈그림 2〉 사물인터넷 기반 수질 센서를 이용한 관망 수질 관리⁵
Reprinted with permission Copyright 2018, SpringerNature

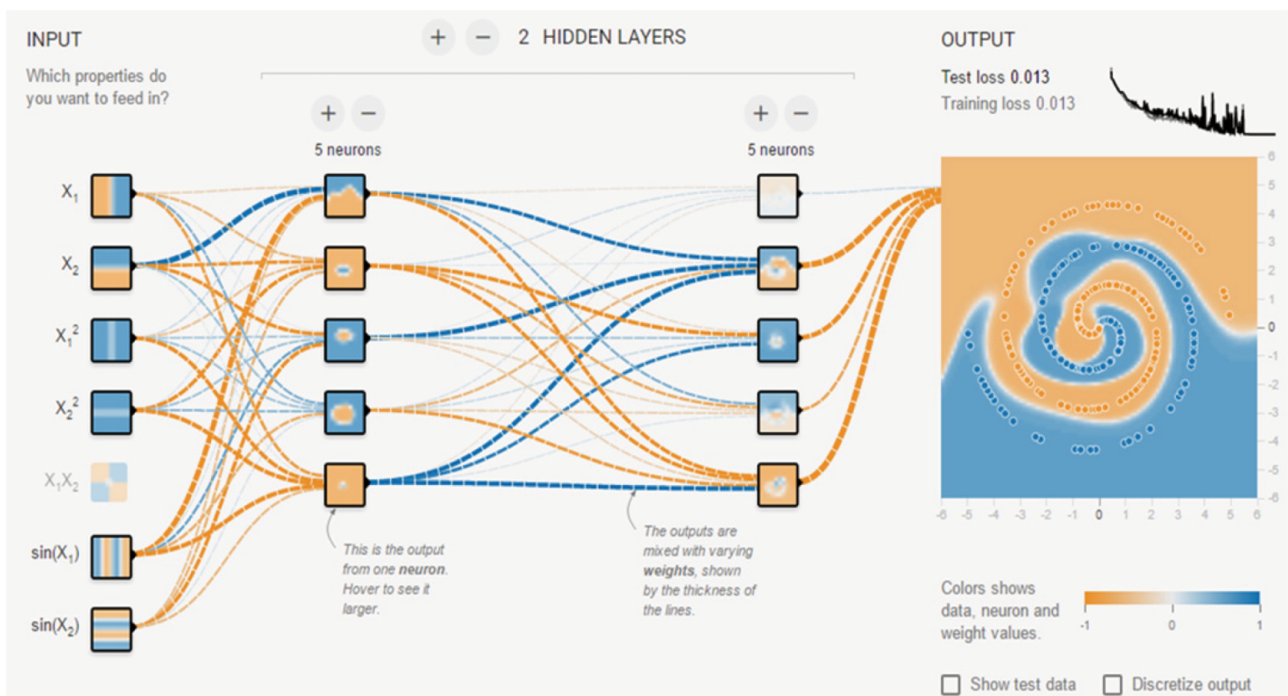
수 있을 것으로 기대된다(그림 2). 이러한 가운데 실질적으로 도시 안에 여러 장소에 수질 센서가 적용되기 위해서는, 센서의 소형화 및 저전력화는 물론이고 다양한 환경 조건에서도 신뢰성 높은 수질 데이터를 지속적으로 측정할 수 있도록 하는 수질 센서의 지속적인 개발이 반드시 필요하다.

또한 미래 도시에서는 분산형 물관리 시스템의 도입 등으로 인해 성상에 따라 배출되는 하수의 분리 및 처리 후의 재이용 등을 통해 도시에서의 물 자원의 순환이 더 활성화 될 것으로 예상된다. 이럴 경우 정수처리장에서는 검출이 되지 않았던 오염물질로 인한 수질의 저하에 대한 모니터링이 필요하다. 예를 들어 최근에 재이용된 물에서 크립토포리둠과 지아디아의 수가 더 높게 검출이 되었다는 연구사례가 있었으며, 또한 항생제 내성물질이나 나노플라스틱, 나노물질 및 다양한 미량오염물질이 검출되었다는 보고가 있다.¹² 이외에도 현재 도시에서는 약 85,000-140,000개의 화학약품이 사용되고 있으며 이들의 독성 및 물에서의 거동을 모두 이해하기에는 매우 오랜 시간이 걸릴 것으로 예상된다. 이러한 환경 안에서 수질을 관리 및 모니터링 하기 위해서는 특정오염물질을 측정하는 센서도 중요하지만 여러 오염물질이 포함되어 있는 물 시료 전체의 독성 및 위해성을 측정할 수 있는 센서의 개발이 매우 중요하다고 볼 수

있다. 또한 냄새나 맛 등 인체에 직접적인 영향을 미치지 않지만 인간이 물을 마실 때 중요하게 판단하는 요인들을 정량적으로 측정할 수 있는 센서의 개발도 반드시 필요하다.

수질 모니터링을 이용한 미래도시에서의 물-식량-에너지 자원의 통합적 관리

주택이나 건물 규모를 시작으로 단지, 지역, 및 도시 전체에서 물이 어떻게 이용되고 그 수질이 변화하는지 앞서 언급한 수질 및 수량측정 센서들을 이용하여 상세한 모니터링이 가능하다. 이를 통해, 도시 안에서 식량이나 에너지 자원과 관련하여 사용되는 물의 수요 및 소비량을 세밀하게 데이터로 수집할 수 있을 뿐 아니라, 여러 과정에서 사용되는 수질의 변화에 대한 정보도 분석할 수 있게 된다.¹³ 예를 들어, 어느 도시의 한 발전소에서 전기 생산 과정에서 필요한 물을 공급하기 위해 근처 하천 물을 사용한 후 그 물이 발전소에서 배출될 때, 그 배출수의 온도 상승 외에도 중금속 등의 오염물질이 얼마나 증가하는지 지속적으로 파악하여, 그 물이 이후 농업용수나 다른 용도로 사용되는 데 적합한지 혹은 어떤 추가 처리과정이 필요한지 등을 더 빠르고 정확하게 판단할 수 있다. 도시 안에서 물의 흐름 및 수질의



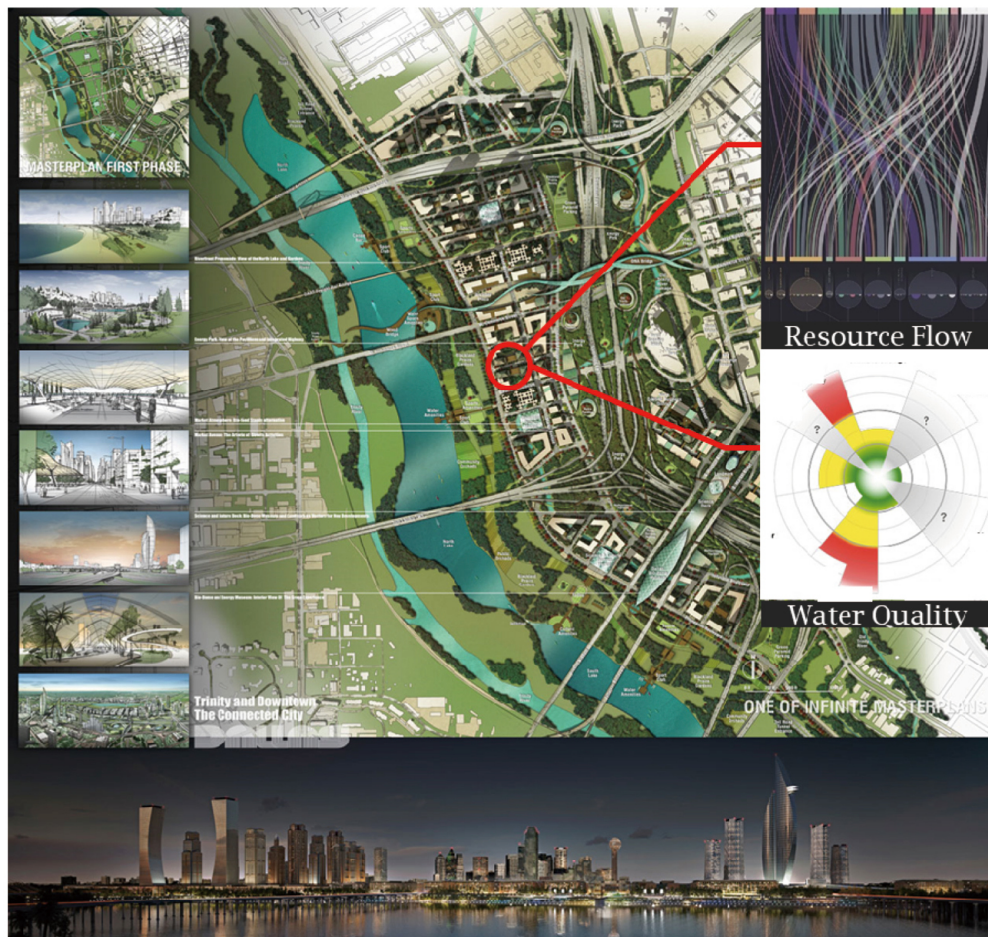
〈그림 3〉 도시 안의 수질 데이터 분석에 사용되는 신경망 모델의 예

변화는 신경망(Neural Network) 모델(그림3)이나 게임 이론 기반 클라우드 모델 등을 활용하여 분석하고, 이를 이용해 도시에서 수질을 저하시키는 오염물질 배출원을 파악하여 물 오염을 관리할 수 있다.¹⁴

또한, 수질 데이터 모니터링을 식량이나 에너지 관련 데이터 모니터링과 결합하고, 수질이 식량이나 에너지 자원의 생산 및 공급에 어떻게 영향을 미칠 수 있는지 데이터의 시각화나 분석을 통해, 각 자원간의 trade-off를 최소화하면서 모든 자원의 생산, 공급 및 소비 효율성을 향상시키는 방안을 찾을 수 있을 것이다. 현재까지는 식량 생산 및 처리 과정에서 사용되는 수질이 이들에 미치는 영향에 대해서는 알려진 바가 많지 않다. 그러나, 오염된 물을 채소나 과일의 생산 과정에 사용하여 식중독의 원인이 되는 경우가 종종 보고되었으며, 최근에는 채소를 씻고 포장하는 과정에서 사용되는 세정수에 존재하는 염소농도로 인해 발암성물질이 포함된 소독부산물들이 채소 안에 생성되는 것

으로 밝혀졌다.¹⁵ 이러한 이유로 최근에는 식량 및 음료수 산업에서는 생산 및 처리 과정에서 사용되는 수질이 미치는 영향에 대한 관심이 커지고 있다. 지속적인 수질 모니터링을 통해 식량 생산 및 처리 과정에서의 식량과 물 자원 간의 연계성을 다각적 측면에서 분석할 필요가 있다. 마찬가지로, 미래도시에서는 에너지 생산을 위해 기존의 석탄, 석유 및 천연가스 등의 화석 연료 기반 에너지 자원외에도 바이오가스나 태양에너지, 폐기물 에너지 등 다양한 신재생에너지 자원들이 사용될 것으로 예상된다. 이러한 여러 대체 자원들을 이용한 에너지 생산에 있어 사용되는 수질 기준 또한 파악할 필요가 있으며, 동시에 이러한 신재생에너지 생성 과정이 사용되는 수질이 어떻게 변하는지 그 영향을 이해할 필요가 있다.

미래도시에서의 물-식량-에너지 자원의 통합적 관리를 위해서는 여러 요소들의 상호작용과 의존성을 반영한 복잡계 네트워크에 기반한 통합모델의 개발이 필요하며, 이를 위해서는 물,



〈그림 4〉 그림 4.데이터 시각화를 이요한 미래도시의 물-식량-에너지 자원의 통합적 관리¹⁶

식량, 에너지 자원의 양적인 흐름 외에도 도시 안에서의 다양한 데이터와 정보를 공간 및 시간 단위로 파악할 필요가 있다. 수질 센서를 통해 얻게 되는 수질 데이터 또한 효율적인 자원관리를 위한 통찰력을 제공하는 중요한 정보로 사용될 것이다(그림 4). 또한 아파트 단지 등의 주거지역이나 수영장이나 공원 등의 공공시설에서의 수질 데이터를 사용자들이 스마트폰 등을 사용해 누구나 손쉽게 확인할 수 있도록 공개할 경우, 물 관리에 대한 국민들의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 예상된다. 이를 통해 수도물이나 빗물, 물 재이용 등 다양한 수원 및 수질의 물을 용도에 맞춰 사용하고자 하는 차세대 물 관리 방안에 대해서도 사회적인 거부감을 낮출 수 있어 물 자원의 사용 효율성을 높이고 관련된 에너지 소비를 저감하는데 기여할 것으로 예상된다.

결론

이번 이슈레터에서는 미래도시에서의 물-식량-에너지 자원의 통합적 관리를 위해 반드시 필요한 수질 데이터를 얻기 위해 필요한 수질센서기술의 현황과 앞으로의 방향에 집중하여 살펴

보았다. 우리나라에서는 pH나 DO등의 기본적인 수질항목들을 측정할 수 있는 센서들이 이미 많이 사용되고 있다. 하지만 대부분은 수처리장이나 하천 등에서 사용되고 있으며, 앞으로 도시내에서 각 자원을 효율적으로 관리하기 위해서는 관망, 아파트 단지 등의 주거지역, 상업지역 및 공업 지역 등 더 세밀하게 수질 데이터를 수집할 필요가 있다. 이를 위해서 수질 센서의 소형화 및 저전력화가 반드시 필요하며, 기본수질항목 외에도 특정오염물질을 선택적으로 측정하거나 물의 전체 유해성을 파악할 수 있는 센서의 개발이 필요하다. 이를 위해 나노 및 바이오기술을 이용한 센서의 연구가 외국에서도 활발히 이루어지고 있다. 우리나라가 국제적으로 이 분야를 선도하기 위해서는 한국에서도 차세대 수질 센서 개발에 대한 지원과 연구가 지속적으로 이루어져야 한다. 또한 식량 및 에너지 자원와 수질 데이터 간의 연계성을 이해하기 위한 연구도 반드시 필요하다. 앞으로 수질 데이터를 포함한 통합적 시스템의 구축 및 운영에 관한 중장기적 전략이 잘 마련되어 미래도시에서의 물-식량-에너지 자원 관리가 지속가능하게 이루어질 것을 기대한다.

참고문헌

1. 국토교통부 (2017) 국토교통연구기획사업 최종보고서 물-에너지-식량 연계 기술 개발 기획 최종보고서
2. 중소기업청 (2015) 중소기업 기술 로드맵 2018-2020 녹색제조 친환경생산 수질오염 측정 및 모니터링 시스템, http://smroadmap.smtech.go.kr/0201/view/m_code/A320/id/1814/idx/1301.
3. 환경부 (2011) 환경기술 기술동향보고서 환경오염물질 검지용 색 센서 개발을 위한 NT/BT/ET 융합기술.
4. 환경부 (2011) 환경기술 기술동향보고서 - 수질센서/환경집 기술 동향.
5. P. J. Vikesland (2018) Nanosensors for water quality monitoring, *Nat. Nanotechnol.*, **13**, 651-660.
6. P. J. Vikesland, K. R. Wigginton (2010) Nanomaterial Enabled Biosensors for Pathogen Monitoring - A Review, *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 3656-3669.
7. H. Wei, S. M. H. Abtahi, P. J. Vikesland (2015) Plasmonic colorimetric and SERS sensors for environmental analysis, *Environ. Sci. Nano*, **2**, 120-135.
8. F. Ejeian, P. Etdedali, H. Mansouri-Tehrani, A. Soozanipour, Z. Low, M. Asadnia, A. Taheri-Kafrani, A. Razmjou (2018) Biosensors for wastewater monitoring: A review, *Biosens. Bioelectron.*, **118**, 66-79.
9. S. U. Akki, C. J. Werth (2018) Critical Review: DNA Aptasensors, Are They Ready for Monitoring Organic Pollutants in Natural and Treated Water Sources? *Environ. Sci. Technol.*, **52**, 8989-9007.
10. L. Tan, K. Schirmer (2017) Cell culture-based biosensing techniques for detecting toxicity in water, *Curr. Opin. Biotechnol.*, **45**, 59-68.
11. A. Jang, Z. Zou, K. K. Lee, C. H. Ahn, P. L. Bishop (2011) State-of-the-art lab chip sensors for environmental water monitoring, *Meas. Sci. Technol.*, **22**, 032001.
12. R. M. Kirby, J. Bartram, R. Carr (2003) Water in food production and processing: quantity and quality concerns, *Food Control*, **14**, 283-299.
13. A. Mickelson, D. Tsvankin (2017) Water Quality Monitoring for Coupled Food, Energy, and Water Systems, *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **37**(1), 165-171 (2017).
14. F. Qaderi, E. Babanezhad (2017) Prediction of the groundwater remediation costs for drinking use based on quality of water resource, using artificial neural network, *J. Clean. Prod.*, **161**, 840-849.
15. Y. Komaki, A. M. Simpson, J. Choe, M. J. Plewa, W. A. Mitch (2018) Chlorotyrosines versus volatile byproducts from chlorine disinfection during washing of spinach and lettuce, *Environ. Sci. Technol.*, **52**, 9361-9369.
16. Trinity and Downtown by Ricardo Bofill Taller de Arquitectura (2014) <https://dallascityhall.com/departments/pnv/Pages/ProfessionalSubmissions.aspx>.

한국물환경학회 미래도시물환경기술위원회

위원장 | 남경필

위 원 | 김민철, 김상현, 김연주, 김영모, 김철기, 김형일, 문희선, 박제량, 박주영, 배대현, 배성준, 서지원, 송재민, 송창근, 신창민, 윤석환, 이두진, 이재상, 이태권, 장선우, 정석희, 정성필, 조강우, 주진철, 최용주, 최정권

Water4FutureCity 5호

서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호

Tel. 02-389-4250 | Fax. 02-385-3702 | E-mail, kswe@kswe.org