

분산형 물 인프라 관련 기술의 발전방안

Technical advancements needed to establish decentralized water infrastructure

서언

지난 2017년 12월 발간된 한국물환경학회 이슈레터 2호 [차세대 도시 물 인프라로서 분산형 시스템 도입의 필요성 및 극복 과제]에서는 분산화가 물 인프라 혁신의 주요 방향으로 고려되어야 하는 이유를 제시하고, 분산형 물 인프라 도입을 위하여 극복하여야 할 사회·경제적, 기술적 요인을 전반적으로 살펴 보았다. 2018년 6월 발간된 이슈레터 4호 [분산형 물 인프라의 시범연구 사례 고찰]에서는 분산형 물관리 시스템에 대하여 시범연구를 진행했던 사례를 소개하고, 그 성과 및 한계를 진단하였다. 본 이슈레터에서는 기술적 측면에서 분산형 물 인프라의 성공적인 정착을 위하여 고려하여야 할 요소를 보다 심층적으로 분석하고 앞으로의 발전방향을 논하고자 한다.

안전하고 위생적이며 경제적인 수거 및 이송기술

물 인프라 분산화의 장점을 충분히 활용하기 위해서는 서로 다른 성상의 하수(graywater, blackwater 등)를 배출원으로부터 분리(source separation)하고, 각각에 적합한 방법으로 처리하여 이로부터 물을 포함한 가용한 자원을 회수하며, 용도 별로 적합한 수질의 물을 생산하여 배출원 내에서 활용할 필요가 있다. 이러한 작업을 통하여 물의 활용성을 획기적으로 증대하고, 수처리 및 자원회수의 효율을 향상하며, 관거·펌프시설 등으로부터 발생하는 비용과 에너지 소모를 경감할 수 있다.

이러한 분산형 물 인프라에서 고려되어야 할 주요 기술적 요소 중 하나는 물질의 이송 문제이다. 분산화를 통하여 이루어지는 하수 배출량의 저감은 현재 하수 이송 시스템의 기본적 원리와 상충되는 측면이 있다. 중력식 배수에 의존하는 하수관거에서 하수 내 부유물질의 원활한 수송을 위해서는 충분한 유량을 유지할 필요가 있다. 하수 유량이 감소할 경우 관거 내에 부유물질 침전이 발생하여 악취 발생 및 관거 부식 문제를 야기한다. 분산형 시설 도입으로 하수 유량이 감소함으로써 기존 하수 관거에 심각한 악영향을 초래한 사례는 이미 여러 차례 보고된 바 있다(Tchobanoglous와 Leverenz, 2013). 따라서, 분산형 물 인프라를 적용할 때에는 하수 유량 감소를 고려한 관거의 설계 및 관리 방안을 심도 있게 고려할 필요가 있으며, 필요시 분산형 시설에서 하수 관거로 배출하는 물의 부유물질량을 저감하기 위한 기술적 대안이 마련될 필요가 있다.

배출원 분리 및 분산형 하수처리로 다양한 성상의 하수 및 고형물을 이송해야 할 필요가 발생하며, 이로부터 기존 집중형 물 인프라 운영에서는 고려되지 않았던 문제점들이 발생할 우려가 있다. 일례로, 소변의 분리 회수 및 질소 회수 공정에서 발생하는 주요 문제점은 스케일 발생으로 인한 관거 폐색으로, 소변 분리배출 관거에서는 이에 대한 대책 마련이 필수적이다(Udert 등, 2003; <그림 1> 참조). 분산형 하수처리 과정에서 발생하는 고형물 중 일부는 수거하여 분산형 시설 몇 개가 클러스터화된 시설 혹은 기존 집중형 시설을 통해 처리 및 자원회수를 꾀하는 것이 보다 합리적이다. 배출원 분리된 하수의 처리과정에



〈그림 1〉 소변 분리 회수 관거에서의 스케일 발생

서 다양한 성상의 고형물이 발생하며, 이러한 고형물들을 보다 안전하고 위생적이며 경제적으로 운반하기 위한 수거기술 및 수송 스케줄링 방안의 개발이 필요하다.

차별화된 수처리 기술

분산형 물 인프라를 구축할 때에는 집중형 인프라와의 차별성을 충분히 고려하여 처리기술을 적용할 필요가 있다. 집중형 수처리 시설은 다양한 성상의 하수 및 폐수가 혼합되어 유입되므로, 광범위한 오염물질에 적용 가능한 단위공정 몇 개가 다단으로 구성된 처리시스템이 요구된다. 반면, 배출원 분리 하·폐수를 분산형으로 처리함에 있어서는 보다 특정 성상에 특화된 기술의 개발 및 적용이 필요하다. 또한, 분산형 수처리 시



〈그림 2〉 음용을 위한 Brita 사의 pitcher 형 필터(좌) 및 LifeStraw 사의 bottle형 필터(우)

설에는 보다 유량 및 오염부하의 변동성이 높은 하·폐수가 유입되므로, 이에 대한 대응 능력이 수처리의 성능을 판단하는 주요한 요소가 될 가능성이 높다. 이러한 측면에서, Larsen과 Gujer(2013)는 생물학적 수처리와 물리화학적 수처리 간의 비교우위를 재평가할 필요가 있다고 역설하였다. 물리화학적 수처리는 생물학적 수처리에 비하여 유량 및 오염부하 변동에 대한 대응성이 우수하므로, 1950년대 이후 정착된, “하수처리에서는 생물학적 처리가 보다 경제적·효율적”이라는 결론을 분산형 인프라에서는 되짚어 볼 필요가 있다는 것이다.

Zodrow 등(2018)은 분산형 수처리에 적합한 주요기술로 흡착, 막여과, 촉매 및 전기화학 기술을 제시하였다. 이들은 물리화학적 기술로 생물학적 처리에 비해 변동부하 및 유량에 대응성이 우수하다는 장점이 있다. 또한, 소형화 및 모듈화가 가능하므로, 규격화된 상품을 대량으로 생산하여 각 분산형 시설에 공급하며, 사용 만료된 모듈을 회수하고 새 모듈 혹은 재생된 모듈로 교체하는 방식의 적용이 가능하다. Zodrow 등(2018)에 수록된 내용을 토대로 분산형 수처리에서 흡착, 막여과, 촉매 및 전기화학 기술 각각의 적용성 및 발전방안을 아래에 기술하였다.

흡착제 생산 및 재생기술

흡착은 저농도로 존재하는 오염물질을 제거하거나 화학적·생물학적 변환으로 무해화가 어려운 오염물질을 처리하는 데 유용한 처리방법이다. 또한, 병원균을 원수로부터 제거하거나, 유용한 자원을 흡착제에 부착, 농축하여 흡착제 재생을 통하여 회수할 수 있는 장점이 있다. 흡착 카트리지는 용이하게 소형화·모듈화가 가능하므로 분산형 처리에 매우 적합하다. 최근 들어 수돗물 음용을 위해 자주 사용되는 수도꼭지 결합형, pitcher 형, bottle 형 활성탄/이온교환수지 필터는 이러한 흡착의 장점을 잘 보여준다(〈그림 2〉 참조). 흡착을 이용한 수처리의 효율 및 경제성을 향상시키기 위해서는 흡착속도, 선택성, 흡착용량, 재생효율 등이 보다 향상된 흡착제가 꾸준히 개발될 필요가 있다. 이를 위하여 흡착제의 표면 특성 최적화 기술, 나노물질 생산기술 등이 중점적으로 연구되어야 한다. 또한, 재생의 경제성 향상 및 재생 시 유해물질 발생 최소화화를 위하여 chemical free 흡착제 재생기술, 흡착 물질을 통한 자원생산 기

술 등을 개발하여야 한다. 흡착제의 잔여 수명 관련 정보를 사용자에게 제공하기 위한 용량 감지 기술도 추가 개발이 필요한 부분이다.

막여과 기술

막여과는 입자상, 용존상 오염물질, 병원균 등 다양한 오염물질에 대한 적용성이 뛰어나고 신속한 수처리가 가능한 장점이 있다. 흡착과 마찬가지로 막여과는 소형화·모듈화가 매우 용이하여 분산형 처리에 적합성이 높다. 우리나라에서 가장 널리 사용되는 가정용 분산형 수처리 장치라고 할 수 있는 정수기에 막여과가 이용된다는 것은 그 적용성을 반증한다. 분산형 물 인프라에서 요구되는 배출원 분리 하·폐수의 처리 및 다양한 수질의 용수 생산에 막여과 기술이 적용되기 위해서는 원수의 성상 및 처리수 품질에 적합한 맞춤형 멤브레인 및 여과기술 개발이 필요하다. 또한, 멤브레인 생산 기술, fouling 제어기술, 손상 감지 및 자가치유(self healing) 기술의 꾸준한 발전을 통하여 멤브레인 수명과 처리의 신뢰성을 한층 더 향상시킬 필요가 있다.

촉매 및 전기화학을 이용한 산화·환원기술

앞서 기술한 바와 같이 분산형 수처리에서 고형물의 수거·이송·처리는 큰 제약요인으로 작용한다. 또한, 분산형 인프라에서는 화학물질을 생산 또는 공급, 보관, 활용하는 데 안전성 및 경제성 측면에서 큰 부담이 따른다. 이러한 이유로 분산형 인프라에서는 되도록 슬러지 등 고형물 발생이 적고 최소한의 화학물이 투입되는 공정을 적용하는 것이 합리적이다.

고도산화 공정은 난분해성 독성물질을 포함, 하·폐수 내에 존재하는 다양한 오염물질을 무해화할 수 있으며, 병원균 제어에도 큰 효과가 있어 수처리에 광범위한 적용성을 갖는다. 또한, 최근에 주목받고 있는 고도환원 공정은 산화를 통하여 처리가 어려운 nitrate, chromate, perchlorate 등의 오염물질을 제거할 수 있는 기술이다. 이러한 이유로 고도산화 및 환원 공정은 하·폐수의 재이용 또는 방류 시 인간 및 생태계에 미치는 독성 영향을 저감하는 데 유용하며, 최근 집중형 처리시설에서의 적용도 점차 증가하는 추세이다.

촉매 또는 전기화학을 이용한 고도산화·환원 공정은 분산형 수처리 말단에 적용하여 고형물 발생이 적고 화학물 투입량

을 최소화하면서 하·폐수 재이용에 따른 유해물질의 시민 노출 우려를 해소할 수 있는 처리기술이라는 측면에서 높은 적용성을 지닌다. 광촉매(photocatalyst), 전기분해(electrolysis) 등은 화학물의 투입 없이 높은 산화력을 가지는 슈퍼옥사이드 음이온(O_2^-), 수산화 라디칼($\cdot OH$), 활성염소종(reactive chlorine species) 등을 발생시킬 수 있다. 또한, 환원 촉매의 발달로 적은 양의 수소 투입으로 환원력이 강력한 수화전자(hydrated electron)를 발생시킬 수 있다. 전기분해 과정에서 부산물로 수소가스가 발생되며, 발생된 수소가스는 수소연료전지를 통해 전기에너지로 변환할 수 있다.

촉매 및 전기화학 반응의 경제성·적용성은 반응효율 및 촉매의 재사용성 등에 크게 좌우되므로, 앞으로 이를 보다 향상시킬 수 있는 연구가 꾸준히 필요하다. 구체적으로는 보다 반응성이 높은 촉매의 개발, 대상오염물질에 대한 선택성과 비표면적이 높아 오염물질과 촉매의 접촉을 향상시킬 수 있는 촉매지지체의 개발, 빛을 보다 효율적으로 조사할 수 있는 광촉매 반응조의 개발, 일반적인 수질 조건에서 촉매 및 전극의 fouling을 최소화할 수 있는 제어기술의 개발 등이 필요하다. 또한, 처리의 경제성 및 지속가능성을 보다 향상시키기 위하여는 저렴한 촉매 생산 및 활용기술, 재생가능한 에너지의 활용기술 등이 추가 개발될 필요가 있다.

모니터링 및 제어 자동화 기술

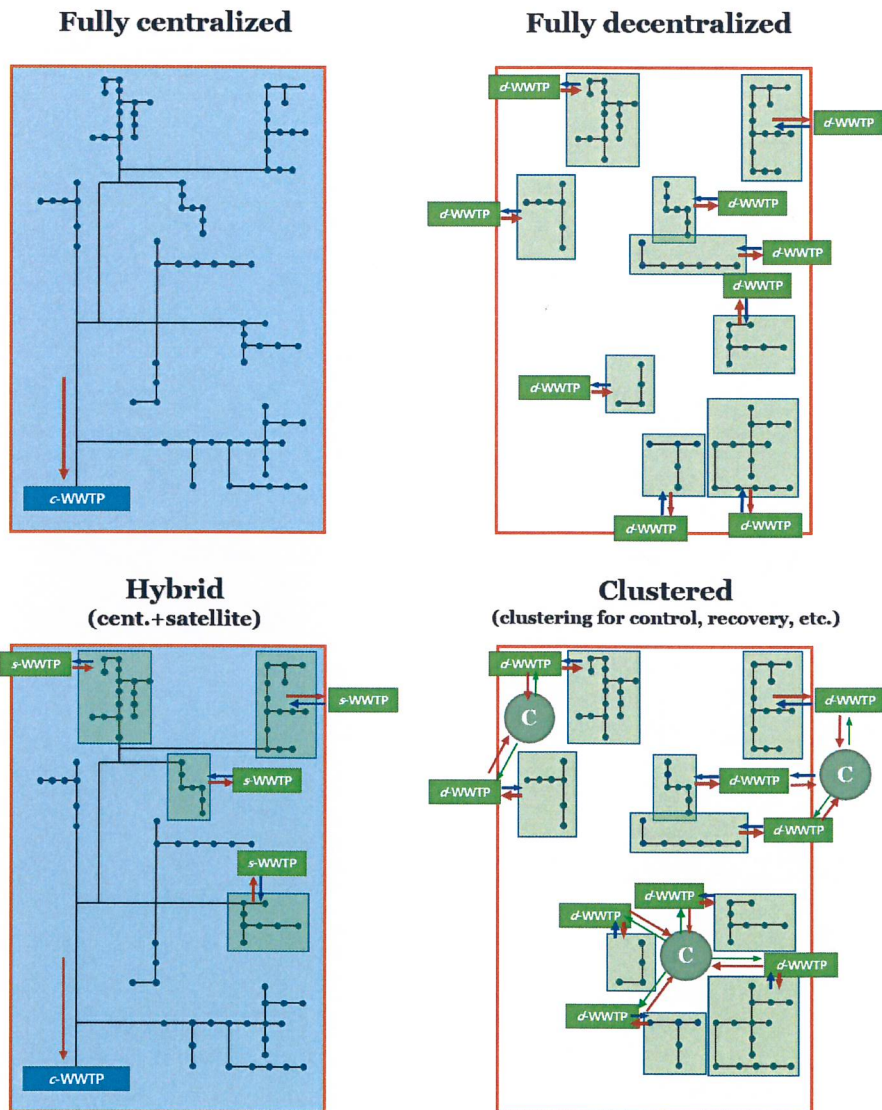
분산형 물 인프라 도입의 제약요인 중 하나는 분산화와 시설 수 증가로 인한 모니터링 및 관리수요 증가와 관리 전문성 부재이다. 이를 극복하기 위하여 분산형 인프라의 모니터링 및 제어는 가능한 한 자동화될 필요가 있다. 실시간·온라인 센서를 이용하여 수질과 수량, 장치의 정상작동 여부를 자동으로 계측하고, 계측된 데이터를 사물인터넷(Internet of Things; IoT)을 이용하여 자동으로 서버로 전송한 후 다시 각 분산형 장치에 피드백을 제공하는 자동 제어기술이 개발되어야 할 것이다. 미래도시에 적합한 수질 센서에 대해서는 이슈레터 5호 [미래도시의 지속가능한 물-식량-에너지 관리를 위한 수질 센서 기술]에서 상세하게 논한 바 있다. 이슈레터 5호에 논의된 사항에 더하여, 본 고에서는 분산형 물 인프라에 대한 적용성을 보다 향상시키

기 위한 센서 개발 방향으로 내구성 향상을 강조하고자 한다. 관리 수요를 경감하고 잘못된 정보 제공으로 인한 운영 실패를 최소화하기 위해서는 실제 하수 조건에서 장기간 안정적으로 신뢰성 있는 측정값을 제공할 수 있도록 센서의 내구성을 보다 향상시킬 필요가 있다. 분산형 장치에서 가장 필요한 것은, 장치의 오작동을 인지하여 필요한 조치를 취하게 하는 알람 시스템이다.

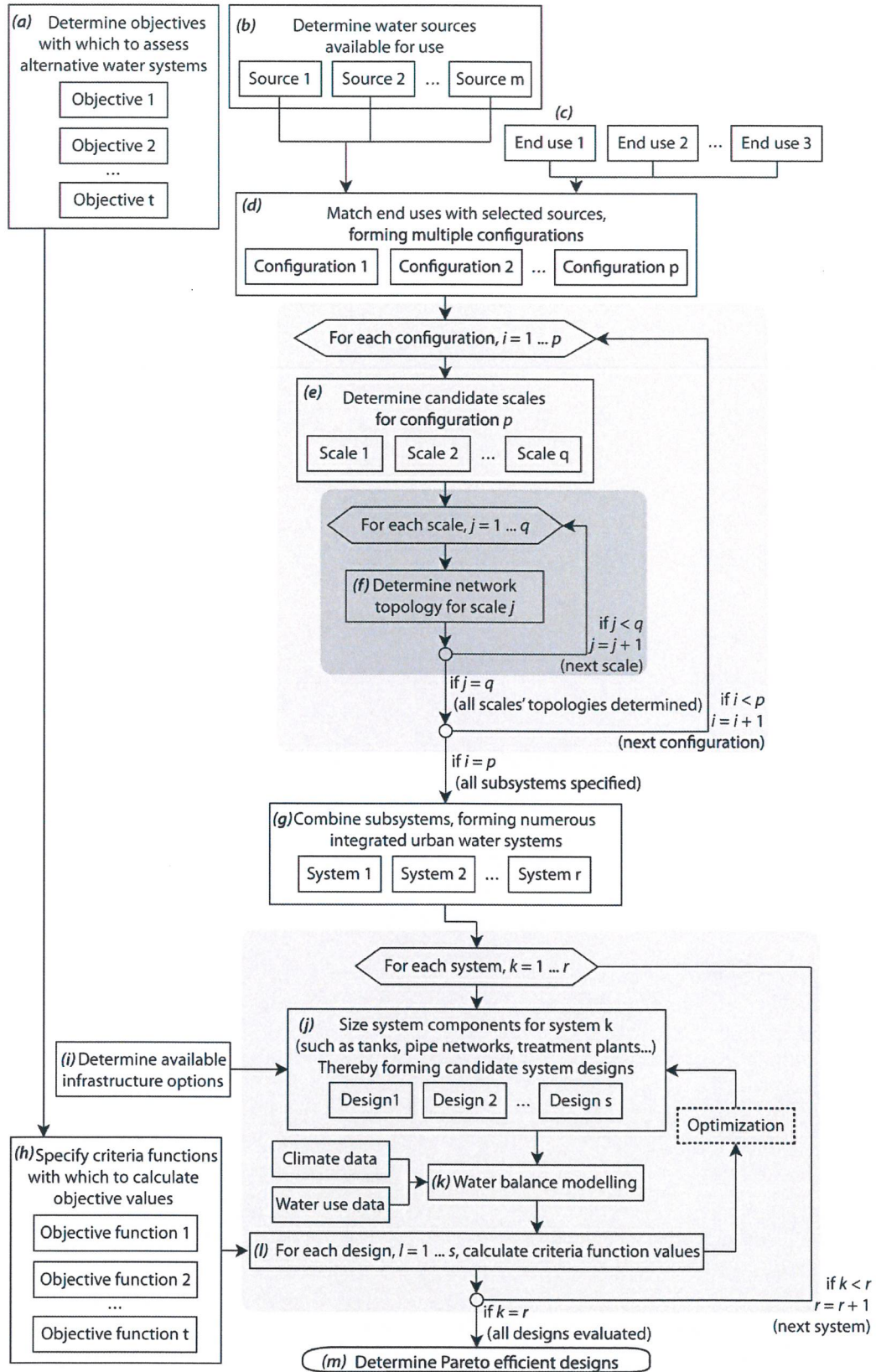
네트워크 최적화 기술

많은 이들이 분산화된 도시 물 인프라를 ‘분산화된 유닛 하나

하나가 상호 간에 단절되어 기존 집중형 시설이 담당하던 역할 전체를 그대로 수행하는’ 체계로 인식한다. 실제로 Ecological Sanitation 프로젝트 등 1990년대 중반부터 2000년대 초반까지 수행된 분산화 관련 연구는 주로 소규모 단위의 완전 자원순환 체계를 표방하였다. 그러나 최근의 분산화 관련 연구는 분산화의 효과를 극대화하기 위한 새로운 형태의 네트워크 구성으로 진화하고 있다(그림 3) 참조). 여기에는 생활환경에서 발생하는 다양한 성상의 하·폐수를 서로 다른 규모로 처리하거나, 분산형 시설을 클러스터링하여 위계 별로 다른 역할을 담당하도록 하고, 집중형 시설과 분산형 시설이 상호보완적으로 작동하는 하이브리드형 시스템을 구축하는 등의 전략이 포함된다.



〈그림 3〉 도시 물 인프라에 적용 가능한 네트워크 형태들



〈그림 4〉 Newman 등(2014)에서 제시한 하이브리드형 물관리 시스템 최적화 의사결정 체계

이에 따라, 도시 물 인프라 네트워크의 최적화는 앞으로 많은 연구와 발전이 필요한 기술이다. 이는 각 시설 및 기능별 규모의 다변화, 서로 다른 기능을 담당하는 시설의 상호보완적 체계 구축, 다양한 성상을 지니는 물질의 수송체계, 도시의 실제 환경적·사회적 조건, 물 인프라의 다목적성 등이 고려되어야 하는 매우 복잡한 문제이나, 최근 인공지능, 빅데이터, 다기준 의사결정(multi-criteria analysis) 기술 등의 발전으로 점차 실현 가능한 목표가 되고 있다.

일례로, Newman 등(2014)은 다양한 기능의 분산형 처리시설(graywater와 blackwater의 처리 후 재이용, 빗물 수집 및 재이용 등)에 집중형 시설을 결합한 최적의 하이브리드형 물관리 시스템을 도출하는 의사결정 모델을 개발하고, 이를 가상의 마을에 적용해 본 사례를 보고하였다(그림 4) 참조). 이 의사결정 모델은 기능별 분산형 처리시설 적용의 합리성 및 최적 규모를 결정할 수 있을 뿐만 아니라, 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 통하여 세부 설계항목인 관거 크기, 펌프 용량, 저류탱크 용량, 수처리 기술까지도 최적화할 수 있도록 구성되어 있다. 또한, 대안별 물 사용량, 비용, 온실가스 배출의 세 가지 평가항목에 대해 분석함으로써 의사결정자가 평가항목별 비중을 고려하여 최종적인 의사결정을 할 수 있도록 하고 있다.

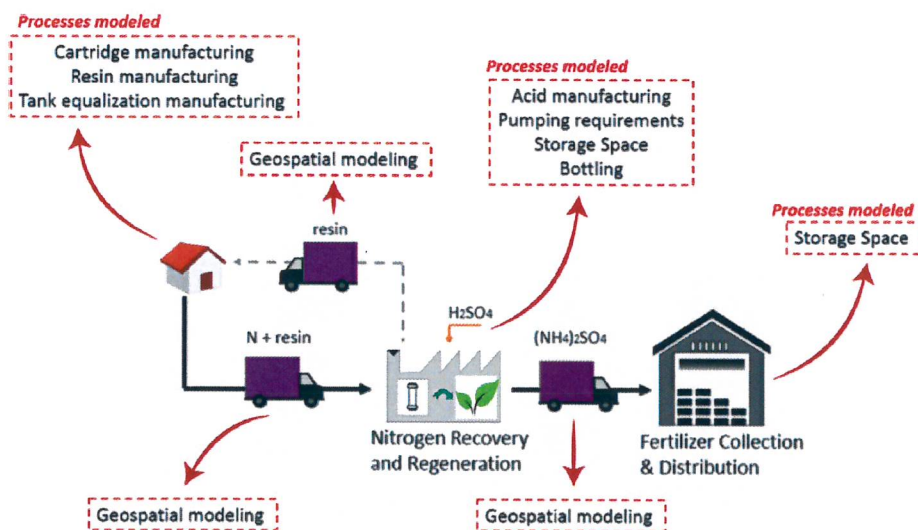
또 다른 예로 Kavvada 등(2018)은 배출원 분리 소변의 분산형 처리 및 클러스터형 자원회수 시스템을 최적화하는 연구를 실시하였다(그림 5) 참조). 이 연구에서 구상한 시스템은 각

건물에서 발생한 소변을 이온교환수지 카트리지를 이용하여 처리하여 건물 내에서 재이용하고, 차량으로 사용 완료 카트리를 수거하여 클러스터형 시설에서 재생하면서 질소 비료를 생산하며, 재생된 카트리는 다시 각 건물로 배송하는 것이다. 이 연구에서는 에너지 사용량, 온실가스 배출량, 비용 등 세 가지 항목에 대한 전과정 평가를 실시하였으며, 연구대상 지역인 미국 샌프란시스코에서 클러스터형 시설의 공간적 배치 및 수거차량 경로 최적화까지를 고려한 모델링을 수행하였다.

결언

분산형 물 인프라는 기존의 집중형 물 인프라와는 완전히 다른 시스템으로 이해하여야 할 필요가 있다. 이에 따라 분산형 물 인프라 기술을 연구함에 있어서 기존의 틀에서 벗어난, 보다 혁신적이고 창의적인 아이디어를 도출할 필요가 있다. 본 고에서는 분산형 물 인프라에서 기존과 분명한 차별성을 가지고 연구하여야 할 기술로 새로운 성상의 물 및 고형물 이송기술, 소형화·모듈화가 가능한 물리화학적 수처리 기술, 내구성 높은 센서의 개발 및 자동화된 센싱·제어기술, 다양한 스케일의 분산형·집중형 시설로 도시 전체의 물 인프라를 구성하는 네트워크 최적화 기술 등을 제시하였다.

분산형 물 인프라를 도입하는 것은 도시 물관리의 새로운 패러다임을 제시하는 것이다. 1900년대 초반에 활성슬러지 공



〈그림 5〉 Kavvada 등(2018)이 제안한 배출원 분리 소변의 분산형 처리 및 클러스터형 자원회수 시스템. Reprinted with permission from Kavvada et al. (2018). Copyright (2018) American Chemical Society.

정이 개발된 이후 하수처리 시스템이 도시에 완전히 정착하는데 수십년의 시간이 필요했음을 상기한다면, 이러한 도시 물관리 패러다임 전환에 앞으로 오랜 시간이 걸릴 것임을 쉽게 예측할 수 있다. 이러한 패러다임 전환을 선도하기 위해 우리는 보다 장기적인 안목에서 물관리 기술을 개발하고 지원할 필요가 있다. 이러한 측면에서, 수년 내에 적용 가능한 실용화·실증화 기술개발에 지나치게 편중되어 있는 현재의 국가 R&D 체계를 개선하는 것이 반드시 필요하다. 보다 장기적인 안목에서 물관리 관련 기술의 혁신을 이끌 수 있는 주제를 선정하여 지원하고, 연구자들이 실패를 두려워하지 않고 과감하게 도전할 수 있는 기회를 제공하며, 이미 정해진 틀에 맞춰 수행되는 과제보다

는 연구자들에게 open question을 던지고 이를 해결할 수 있도록 하는 새로운 방식의 R&D 프로그램이 제공될 필요가 있다. 또한, 국가 차원의 test-best 사업을 통하여 개발된 혁신기술들을 시험하고 평가하며, scale-up과 추가보완이 이루어질 수 있는 장이 마련되어야 한다. 기술 수명이 길고 변화에 따른 파급효과가 크며 의사결정자의 보수성이 강해 충분한 기술적 성숙이 이루어져야 현장 적용이 가능한 물관리 기술의 특성을 충분히 어필하고, 보다 장기적인 관점의 R&D 사업 운영이 가능하도록 모두가 지속적으로 노력할 필요가 있다.

참고문헌

- Kavvada, O., Tarpeh, W. A., Horvath, A. and Nelson, K. L. (2017) Life-cycle cost and environmental assessment of decentralized nitrogen recovery using ion exchange from source-separated urine through spatial modeling, *Environmental Science & Technology* 51, 12061–12071.
- Larsen, T. A. and Gujer, W. (2013) "Implementation of Source Separation and Decentralization in Cities," *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*, Ed. by Larsen, T. A., Udert, K. M. and Lienert, J. IWA Publishing London, UK, pp. 135–150.
- Newman, J. P., Dandy, G. C. and Maier, H. R. (2014) Multiobjective optimization of cluster-scale urban water systems investigating alternative water sources and level of decentralization, *Water Resources Research* 50, 7915–7938.
- Tchobanoglous, G. and Leverenz, H. (2013) "The Rationale for Decentralization of Wastewater Infrastructure," *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*, Ed. Larsen, T. A., Udert, K. M., Lienert J. IWA Publishing, London, UK, pp. 101–115.
- Udert, K. M., Larsen, T. A. and Gujer, W. (2003) Biologically induced precipitation in urine-collecting systems, *Water Science and Technology: Water Supply*, 3(3), 71–78.
- Zodrow, K. R., Li, Q., Buono, R. M., Chen, W., Daigger, G., Dueñas-Osorio, L., Elimelech, M., Huang, X., Jiang, G. and Kim, J.-H. (2017) Advanced materials, technologies, and complex systems analyses: Emerging opportunities to enhance urban water security. *Environmental Science & Technology* 51(18), 10274–10281.

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 6호

서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호

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