

차세대 도시 물 인프라로서 분산형 시스템 도입의 필요성 및 극복과제

Decentralized Systems as a Next-Generation Urban Water Infrastructure: the Necessity and Challenges

근대에 이르러 급격한 산업화에 따라 인구가 도시로 유입되고 시민 위생이 큰 사회적 이슈로 대두되면서 집중형 관리 방식의 도시 물 인프라가 구축되었고 이는 현대 도시 물 관리의 근간을 이루고 있다. 그러나 기존 물 인프라의 노후화, 지속가능한 물 관리의 필요성, 기후변화, 인구 증가 및 도시화의 심화 등 도시 물 관리에 있어 새로운 변화의 요인들이 등장하면서, 기존 인프라의 타당성을 재검토하고 새로운 도시 물 관리의 패러다임을 제시하고자 하는 노력이 최근 활발하게 이루어지고 있다. 본 호에서는 기존 도시 물 인프라의 근간을 이루는 집중형 관리에 대하여 되돌아보고, 차세대 도시 물 인프라의 주요한 패러다임으로 많은 연구자들이 제안하고 있는 분산화에 대하여 소개하고자 한다. 본 호에서의 분산형 시스템에 대한 논의는 그 특징과 기대효과, 연구동향, 도입을 위한 극복과제 등에 대한 개론을 위주로 하고, 보다 구체적인 적용사례 및 도입방안, 고려사항, 기술적 요구, 향후전망 등에 대한 상세한 논의는 차후 발간될 지면을 통하여 논의하고자 한다. 저영향개발(Low Impact Development; LID) 또는 그린인프라(Green Infrastructure; GI) 등 분산형 도시 우수관리에 대하여서는 국내에서도 이미 많은 논의와 현장적용이 이루어지고 있는 바, 본 호에서 대상으로 하는 분산형 도시 물 인프라는 주로 도시용수의 공급과 생활하수의 관리에 초점을 맞추고자 한다.

집중형 시스템의 특징

현재 전 세계 도시에서의 물 관리 시스템은 주로 집중형 관리 방식으로 이루어지고 있다. 우리나라도 예외는 아니다. 우리나라의 용수 공급은 각 지방 자치단체 및 수도권의 대형 정수장

을 기반으로 운영되고 있으며, 하수 처리 또한 하수관로 및 대형 하수처리장을 이용한 집중형 하수 시스템이 주를 이루고 있다. 이와 같이 전 세계적으로 집중형 물 관리 시스템이 현재 많은 도시의 주요한 물 관리 시스템으로 자리잡게 된 배경은 무엇인가?

도시에서의 물 관리 체계화는 적절한 물 관리의 부재로 인해 질병이 창궐하고 오염이 심화되어 공공 보건(public health)이 주요한 사회 문제로 대두되었던 19세기 후반부터 시작되었다. 특히, 도시 환경 및 보건 문제가 심각했던 유럽과 미국을 중심으로 관망을 통한 상수 공급 및 하수 관망이 본격적으로 도입되기 시작하였다. 전 세계적인 도시화와 산업화는 도시에서의 급속한 인구 증가와 이로 인한 용수 수요 증가, 또 사용된 용수의 처리 수요 증가를 초래하였으며, 이로 인해 대규모 물 처리 시설과 관망 체계를 기반으로 한 집중형 물 관리가 주요한 도시 물 관리 시스템으로 자리잡게 되었다. 과거 상하수도 시스템을 포함한 도시 기반시설의 설치 및 서비스 제공은 국가 정부의 주요한 역할로서, 정부는 안정적인 용수 공급 및 처리, 홍수 조절, 수력 발전 등을 목표로 관망이 용이한 집중형 물 관리시스템에 기반한 대규모 물 관리 시설을 지어 운영해 왔다(Burian 등, 2000).

집중형 물 관리 시스템은 대규모의 중앙집중식 처리를 기본으로 대규모 정수장에서 수돗물을 생산한 후 상수관망을 통해서 각 가정에 공급하고, 여기서 발생한 하수를 하수관거로 수집하여 대규모 하수처리장에서 처리한 후 수계로 방류하는 방식을 의미한다. 일반적으로 집중형 물 관리 시스템은 용수의 보급 및 하수 수거에 있어 관망 시스템을 기반으로 하고 있어 초기 관망 설치 및 보수 부분이 비용의 가장 큰 부분을 차지하고

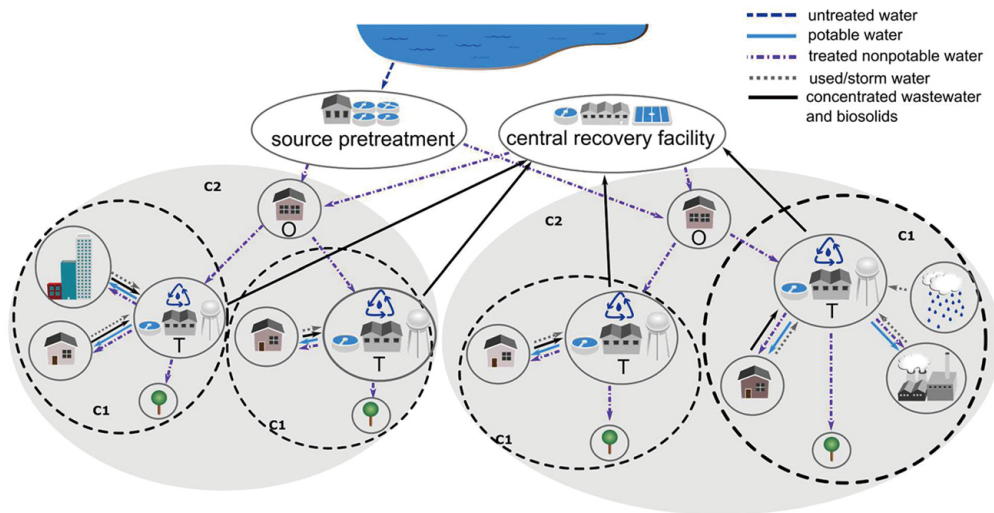


그림 1. 분산형과 집중형 시설이 결합된 하이브리드형 도시 물관리 네트워크 모델의 예(Zodrow 등, 2017). 각 분산형 수처리·재생 시설('T')이 음용수 및 비음용수를 생산, 소비자에게 공급하며 지역 관리센터('O')에서는 상수원에서 공급되는 물의 분배, 각 분산형 시설의 수처리 공정에서 배출된 농축 하수 및 고형물의 수거·운송을 관리함. 분산형 수처리·재생시설과 그 서비스를 받는 소비자가 1단계 클러스터(C1)를 이루며, 1단계 클러스터 몇 개가 모여 지역 관리센터의 통제를 받는 2단계 클러스터(C2)를 이룸. Reprinted with permission from Zodrow et al. (2017). Copyright (2017) American Chemical Society.

있다(Galada 등, 2013). 이와 같은 집중형 물 관리 시스템은 일반적으로 규모의 경제로 인해 처리 효율이 높고 단가가 낮으며, 중앙집중식 처리를 통해 동일한 수질의 물을 생산하고 처리할 수 있다는 장점이 있다. 또한 관리 측면에서도 소수의 수원 및 시설을 관리한다는 점에서 관리의 편리성이 있다.

하지만, 집중형 물 관리 시스템은 환경, 경제성, 시스템의 회복탄력성 등 다양한 측면에서 단점 및 한계가 존재한다. 단일 수원의 오염이나 정수시설의 기능이 손상될 경우 다수의 시민에게 용수공급이 불가능해 질 수 있고, 용수의 공급과정에서 예기치 못한 오염에 노출될 가능성이 있어 외부의 충격에 취약한 단점을 가지고 있다. 또한 생산된 물의 상당한 양이 공급되는 이송 과정에서 손실되거나, 물의 생산과 공급에 과다한 에너지가 사용되는 경우도 있어 경제적 측면에서도 비효율성이 존재한다. 집중형 물 관리 시스템은 대용량 시설의 건설을 필요로 하는데, 환경적·경제적·사회적 변동요인에 따른 수요 예측의 불확실성은 과다한 초기투자비용의 발생, 가동기간 내 유희용량의 발생 또는 용량의 초과, 변동에 대한 대응 유연성의 저하 등 상당한 경제적·환경적 손실을 발생시킨다. 이와 함께, 자원 회수 및 재이용 측면에서도 이용자와의 거리로 인해 자원 회수의 효율성 및 유연성이 떨어질 수 있는 단점이 있다.

일례로, 2012년 호주 New South Wales 주정부는 대체수자원 확보를 위하여 20억 USD의 비용을 투입하여 건설한 대용

량 시드니 해수담수화 플랜트를 운영하지 않기로 결정하였다(Foschia, 2012). 이 플랜트는 시드니에 가뭄이 지속된다는 기존 예측에 따라 물 부족을 대응하기 위하여 건설되었으나, 강우량의 변화로 댐 저수량이 충분히 확보되면서 정수처리 공정에 비해 상대적으로 고비용이 필요한 해수담수화 플랜트를 잠정적으로 폐쇄한 것이다. 그리고 이 플랜트는 2015년까지도 동면 상태에 머무르면서 물 생산 없이 지속적으로 유지비용만 투입되고 있는 상태이다(Barlass, 2015). 또한, 이스라엘에서는 최대 규모의 담수화 플랜트에서 발생한 폐수가 자연 보호 구역을 오염시킴에 따라 2016년에 운영이 중단된 바 있다(Rinat, 2016). 이와 같이, 대체 수자원 확보를 위하여 건설되는 해수담수화 공정에 대해서 집중형 대용량 플랜트의 물 수요 예측 및 운영 실패에 따른 한계점이 드러나고 있다.

이와 같이 집중형 물 관리 시스템은 일반적이고 안정적인 운영 조건에서 경제적이라는 강점이 있지만, 앞서 논의된 바와 같이 다양한 단점 및 한계가 존재한다. 특히, 도시의 부지 부족 문제와 최근의 급격한 기후 변화 문제는 기존의 집중형 물 관리 시스템을 주축으로 하는 도시 내 물 순환 전략에 대한 새로운 대안을 필요로 하고 있다. 따라서, 단일 공정의 효율을 고려하면서도, 전체 물 순환 시스템의 안정성을 확보하기 위하여 전세계적으로 물 공급원을 다각화하고 수처리 공정을 고도화하는 데 대한 수요가 증가하고 있다.

분산형 시스템이란?

분산형 시스템이라 하면 단순히 집중형 시스템과 대비하여 규모를 축소하고 공간적으로 분산하여 배치하는 형태를 쉽게 그려볼 수 있다. 그러나 분산화를 실제로 달성하기 위해서는 관망을 포함한 기존 물관리 시스템의 재설계와 효율적인 소규모 처리가 가능한 새로운 기술의 도입, 분산된 처리 시스템간의 통합 관리를 위한 IT기술의 개발 등이 수반되어야 한다. 따라서 도시 물관리 시스템의 분산화는 단순한 규모의 축소가 아닌 완전히 다른 시스템의 도입으로 이해하는 것이 더욱 올바른 것이다(Larsen과 Gujer, 2013).

분산형 시스템에 대한 논의는 도시 설계에서 이미 오랜 역사를 가지고 있으며, 비단 물관리에 국한되지 않는다. 에너지 분야에서는 각 가정이나 소규모 지역에서 태양광이나 소규모 풍력 발전을 이용하여 에너지 생산지에서 소비가 되는 분산형 시스템이 이미 실용화 된 바 있다. 즉, 분산형 시스템이라는 것은 시설의 분산 배치를 통해 자칫 한 시설에 집중될 수 있는 위험을 최소화시킴과 동시에, 기존 소비자 역할만을 하던 요소들을 생산자의 역할로 전환시켜 생산과 소비가 동일한 공간 안에서 이루어지도록 하는 효과가 있다. 에너지 분야도 마찬가지이겠지만, 물관리 또한 각 가정 및 산업활동으로 생산된 하수 및 폐수를 처리장으로 이송하고, 정수장으로부터 생산된 식수를 소비자에게 이송하는 과정에서 많은 에너지가 소비되고 있다. 분산형 시스템은 이러한 에너지 과소비의 구간을 대폭 축소시킴으로써 효율성을 높이고 지속가능한 사회를 구축하는 데 기여할 수 있다.

이에 더하여 그 명칭에서 드러나듯 '분산'의 효과를 생각해 볼 수 있다. 현재까지는 규모의 경제 논리에 맞춰 대규모의 시설을 통한 처리가 가장 효율적인 옵션으로 생각되어 왔다. 다만, 이는 설계에 반영된 미래 예측이 그대로 실현되었을 때의 얘기다. 하지만, 우리는 폭발적인 도시화 및 산업화에 기인한 다양한 물 문제에 이미 직면해 왔고(예, 높아진 삶의 질로 물소비 증대와 한정된 수자원, 도시 포장면 확장으로 내수침수 증대, 새로운 오염물질의 등장 등), 이에 더해 기후변화는 미래 환경 예측을 더욱 힘들게 하고 있다. 단적인 예로, 도시 성장 초기에 설치된 하수관망은 대부분 합류식이다. 빈도가 높아지는 극한홍수와 증가하는 도시인구로 관망의 배수용량은 물론 하수처리장

의 처리용량이 쉽게 한계에 다다른 등 이러한 문제 해결을 위한 분류식 관망의 필요성에 대해서는 많은 이들이 공감하고 있다. 하지만 정비를 위한 규모와 비용이 막대하여 옮겨 겨자먹기 식으로 기존 시스템을 그대로 사용하는 도시들이 세계 곳곳에 있으며 이러한 현상은 대도시일수록 더욱 빈번히 발생한다. 서울의 경우 도시 재정비 구간 등을 대상으로 분류식으로 관망 정비를 하고는 있으나, 이미 대부분이 합류식인 관망에 일부 구간만을 분류식으로 교체한다고 하여 기대하는 효과를 거두기는 쉽지 않다. 만약 해당 구역에 국한된 자체 처리시설을 갖춘다면 기존 처리시설로의 이송이 필요 없으니 관망간 오결합 등으로 발생할 수 있는 문제를 최소화할 수 있지 않을까?

이처럼 시스템은 변화하는 환경에 빠르게 대응할 수 있도록 설계되어야 마땅하다. 집중형과 달리 분산형 시스템은 개별 시스템의 모듈화를 통해 필요시 시설의 재설계 혹은 교체가 용이하며 시설에 문제가 발생하거나 교체를 위한 운영 중단 시에도 그 미치는 영향의 범위를 제한할 수 있다. 또한, 일반적으로 생애주기가 집중형 시스템에 비하여 상대적으로 짧고(극단적인 예로 정수기를 30년을 사용할 계획을 갖고 구매하는 사람은 드물 것이다) 비용이 낮기 때문에 환경 변화에 적응이 용이하다.

시스템에 존재하는 허브는 물질이나 정보의 이동과 같은 기능의 효율성을 증대시키지만, 문제가 발생하면 피해의 규모가 극대화될 위험이 있다(Albert 등, 2000). 특히 미래 불확실성을 감안할 때, 허브의 역할을 분산시킬 필요가 있다 하겠다. 다만, 허브의 발생은 자기조직화를 하는 모든 시스템에서 나타나는 자연적인 현상이기도 하지만, 공학적인 측면에서 보면 규모의 경제와 더불어 인간의 인지적 특성으로 인해 이해가 쉽고 다루기 쉽도록 설계하는 경향이 있기 때문에 나타나는 현상이라고도 이해된다(Derrible, 2017). 따라서 분산형 시스템의 설계를 위해서는 이를 뒷받침할 수 있는 뚜렷한 철학과 정책이 마련되어야 할 것이다.

다만, 분산화가 모든 것의 솔루션은 아니다. 어떤 기능을 바라보느냐에 따라 집중형이 더욱 효율적일 수 있으며 또한 현재 집중형 기반으로 갖추어진 사회에 비추어 볼 때, 두 형태가 적절히 조화된 하이브리드 형태가 필요할 수도 있다(Larsen 등, 2016; Zodrow 등, 2017, <그림 1> 참조). 분산의 규모 또한 생각해 보아야 할 문제이다. 처리 목표 수질별로 시-구-동-가정

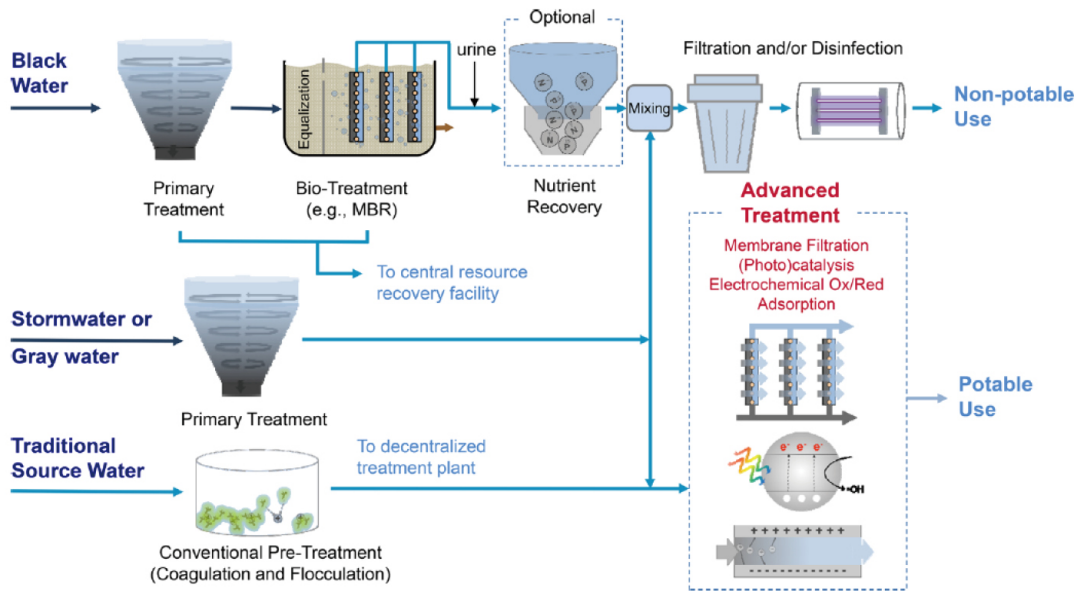


그림 2. Zodrow 등(2017)이 제안한 분산형 수처리 시스템의 개념도. 배출원 분리가 이루어진 하수 및 우수, 기존 수자원(지표수/지하수)를 각각의 성상에 적절한 공정에 의해 처리 및 자원회수를 실시하고, 사용 목적에 따라 다른 품질의 용수를 생산하여 공급하도록 구성함. Reprinted with permission from Zodrow et al. (2017). Copyright (2017) American Chemical Society.

등 각 규모에 가장 적합한 분산화 등을 생각해 볼 수 있다. 이러한 경우, 설계·운영의 측면에서는 계층적 분산화(hierarchical decentralization)를 통한 수처리가 이루어지게 된다. 다만, 증가하는 복잡성으로 통합적 운영관리체계를 갖추는 것이 또 하나의 문제가 되는데, 근래 빅데이터 분석 및 IoT 등 관련 분야의 급격한 발전과 노력은 현재 본 논의의 가시화를 가능케 한다.

분산형 시스템 관련 연구동향

도시 환경에서 분산형 물관리 시스템의 도입에 대한 연구와 시범사업은 2000년대 이전부터 꾸준히 이루어져 왔다. 배출원에서 성상에 따른 하수의 분리 배출(화장실 오수인 **blackwater**와 샤워, 목욕, 세탁 등으로부터 발생하는 **greywater**의 분리), 분리하수의 별도 처리 및 자원회수, 관개용수 생산, 회수자원과 관개용수의 현장 내 활용, 물 절약형 화장실 도입 등을 주요 요소로 하는 **Ecological Sanitation(EcoSan)**의 개념은 1990년대 중반 제안되고 그 이래로 유럽 및 개발도상국 곳곳에서 시범 적용이 이루어져 왔다. 2011년 시작된 **Bill & Melinda Gates Foundation**의 'Reinvent the Toilet Challenge' 사업에서는 안전하고 지속가능한 분산형 분뇨 관리를 위한 창의적인 기

술 개발을 지원해 오고 있다. 최근에 들어서는 다수의 연구자가 참여하여 차세대 물 관리 패러다임으로서 분산형 시스템을 제안하고 그 도입을 위한 향후 과제를 논의하는 논문이 *Science*, *Environmental Science & Technology* 등 저명 국제학술지에 게재되고 있다(Larsen 등, 2016; Marlow 등, 2013; Mihelcic 등, 2017; Zodrow 등, 2017). 이러한 학계의 최근 흐름은 도시 물관리를 위한 분산형 시스템의 도입이 본격적인 논의의 장으로 들어오고 있음을 시사한다.



그림 3. 최근 분산형 수처리 분야 연구 논문 동향 (Sciencedirect 검색)

분산화에 대한 전 세계적인 연구 경향을 파악하기 위하여 Sciencedirect에서 최근 '분산형 수처리 시스템'에 대한 시기

별 논문 게재 수를 파악하였다. <그림 3>에서 볼 수 있듯이 분산형 수처리 시스템에 대한 연구는 급격한 증가 추세에 있으며, 특히 2017년 논문의 경향을 파악해 본 결과, 베네수엘라, 탄자니아, 모잠비크, 콩고민주공화국, 멕시코 등의 국가에 분산형 수처리 시스템을 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있는 것을 확인하였다.

분산형 하폐수 관리의 주요 기술적 요소의 하나인 하수의 성상별 분리와 분리 하수 별 처리 및 자원·에너지 회수기술 개발은 이미 상당히 본격적인 연구개발이 이루어지고 있다. 집중형 하폐수 처리 시스템은 다양한 성상의 하·폐수를 혼합하여 유입 후 처리하며, 이는 하·폐수에서의 자원·에너지 회수 효율을 필연적으로 떨어뜨리고 처리의 복잡성을 증대시킨다. 특히, 하수처리장으로 들어오는 유입수의 주요한 질소 오염원은 뇨에 의한 것으로 알려져 있다. 따라서 사용자의 편의와 위생을 저해하지 않으면서 분과 뇨를 분리하여 회수할 수 있는 화장실(NoMix toilet)을 개발하는 것과 뇨에서의 유용자원(질소 및 인) 회수와 병원균 및 약물질 제어를 효과적으로 달성하기 위한 배출원 분리뇨(source-separated human urine)에 대한 연구가 국내외에서 다수 수행되고 있다(Nordin 등 2013; Udert 등, 2006). 즉, 집중형 수처리 시스템의 장점이자 한계로 볼 수 있는 하폐수의 희석과 혼합에 대한 부분을 일부 분산형 시스템을 적용하여 수처리 공정을 고도화 하는 시도가 이미 진행 중인 것이다.

용수 생산의 측면에서 분산형 수처리 시스템이 적용된 국내

연구사례도 있다. 해외 신도시에 적용할 만한 상품적인 수처리 시스템 개발을 위하여 최종 생산수를 장대관로를 통하여 공급하지 않는 분산형 플랜트 개발에 대한 연구가 사업단 규모로 수행된 바 있다(박노석, 2011). 사업의 결과로, 2014년 청주정수장에 1,000 m³/일 규모의 수직형 정수처리 시설이 적용되었으며(<그림 4> 참조), 2020년까지 캄보디아에 500 m³/일 규모의 실증 시설을 완공할 예정이다(송경남, 2017). 또한, 재해, 재난에 대한 대책으로서 보조 수원 또는 비상 용수를 저류하는 시설에 대한 제안도 이루어졌다.

이와 같이 국내에서도 분산형 수처리 시스템에 대한 필요성이 어느 정도 인정되어 사업단 규모의 연구나 일부 대형 시설이나 건물에 자체적으로 물 재이용 시설 도입 등이 추진된 바 있다. 하지만, 국내 전체 물 순환 관점에서 안정적인 물 공급 및 활용을 위하여 분산형 수처리 시스템이 본격적으로 물 순환 체계의 요소로서 고려되지는 못하고 있는 것이 현실이다. 이에 전세계적인 분산형 수처리 시스템 적용에 발맞추고 국내 수처리 기술의 경쟁력 확보 및 수출형 수처리 기술의 확보를 위하여 분산형 수처리 기술 개발이 필요한 시점으로 판단된다.

분산형 시스템 도입을 위한 극복과제

물 관련 인프라는 공공성이 강한 특성을 지니고 있다. 공공 정책에 대한 의사결정자는 기본적으로 위험을 회피(risk averse)

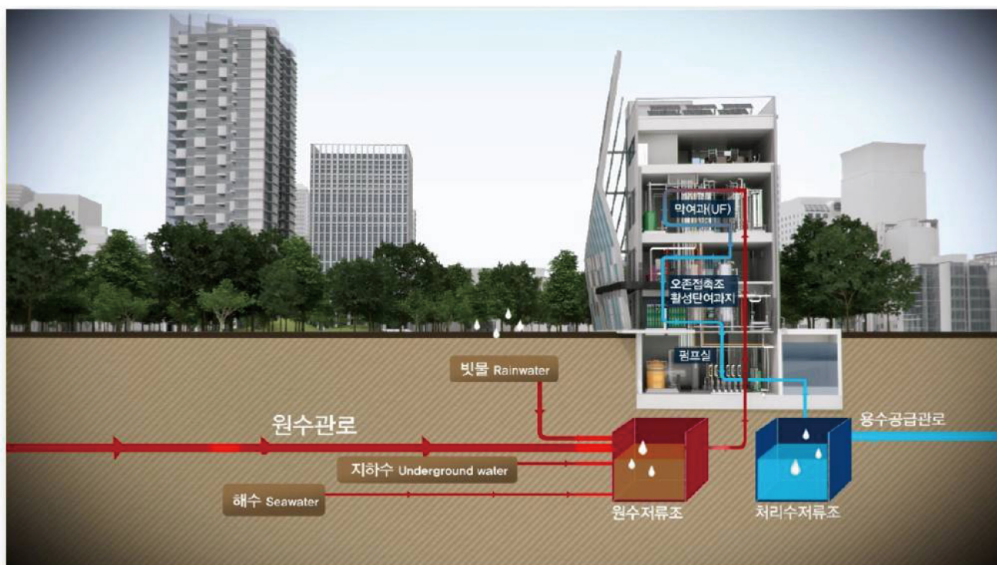


그림 4. 청주정수장 「수직형 정수처리 실증시설」 모식도 (출처: K-water 보도자료, 2014. 1. 6)

표 1. 분산형 및 집중형 하수관리 시스템의 차이점(Larsen과 Gujer, 2013)

항 목	분산형 시스템	집중형 시스템
유입수량 및 부하량	변동성 높음, 특정 이벤트에 따라 크게 좌우됨	어느 정도 변동성 있으나 특정 이벤트에 따라 크게 좌우되지는 않음
우수의 영향	거의 없음	설계유량 산정의 주요 고려요소
하수 성분	오염물 농도 비교적 높음, 시설 간 차이는 크지 않음	오염물 농도 비교적 낮음, 산업시설 존재 시 시설 간 차이 있음
관리 주기	불규칙하고 긴 주기	매일 또는 상시
유지관리 비용	높음	상대적으로 낮음
센서 설치 및 보정	센서 설치 및 보정비용 높음, 센서 보정빈도 낮음	센서 설치비용 낮음, 보정비용 상당하나 보다 빈번한 보정이 가능
센서 요구사항	정확도보다 내구성 및 신뢰성 측면 중요, 관리빈도 낮음	높은 민감도, 정확도, 신뢰도 요구, 보다 빈번한 관리 가능
공정제어 시스템	다수의 시설이 클러스터를 이루므로 개별적으로는 표준화, 클러스터 이상 수준에서는 상황에 따른 스마트한 제어와 최적화 필요	시설 별로 특정한 제어 시스템을 선택하여 설계하고, 일반적으로 설계한 시스템을 유지
공정 표준화 필요성	표준화 필요성 높음, 표준화된 공정 유닛의 대량생산 필요	각각의 시설이 별도의 설계과정을 통해 구축됨
오염물질 회수 및 잔류고형물 수송	분산형 회수 및 성상 별 분리수송	관거를 통한 수집, 처리시설에서 슬러지 형태로 회수
잔류고형물 처분	처리시설에서 배출한 잔류고형물은 집중형 처리 개연성 높음	처리시설에서 소화하며, 소규모 처리시설의 경우 대규모 시설로 수송하여 위탁처리

하는 특성이 있어 혁신에 대한 사회적 요구, 관련 기술의 성숙, 혁신에 따른 경제적 이득이 명확해지기 전까지는 혁신적인 변화를 꺼려하는 것이 일반적이다. 특히 물 관련 인프라는 국민 건강과 경제적 측면에서 실패에 따른 파급효과가 매우 크고, 이를 구성하는 요소 각각에 관련 기관 및 산업체의 다양한 이해관계가 결부되어 있으므로 혁신적인 변화가 용이하지 않은 구조이다.

분산형 시스템은 집중형 시스템과는 상당히 다른 패러다임을 기반으로 하고, 그 작동 환경이 매우 상이하므로(〈표 1〉 참조), 이에 근거한 기술적 성숙이 충분히 이루어져야 할 필요가 있다. 이러한 기술적 성숙을 달성하기 위해서는 장기적 관점에서 분산형 시스템을 전제로 한 수처리 기술, 센싱 기술, 처리수 및 회수자원의 가치 향상 및 이용기술, 지속가능성·안정성·리질리언스 등을 고려한 평가·설계·운영기술 등의 개발이 요구된다. 그러나 산업계, 관계 및 학계에서 신규기술의 가치를 현행 집중형 인프라에 초점을 맞추어 평가하기 때문에 이러한 기술의 적극적인 개발에는 큰 제약이 따른다. 아직 그 존재가 미

미한 시장에 대하여 기업의 기술개발 투자가 이루어지기는 어려운 것이 현실이다. 정부에서는 물 뿐 아니라 대부분의 정책적 결정과 계획 수립이 5년(또는 10년) 단위로 이루어지므로, 보다 장기간에 걸친 혁신적인 변화를 추구하고 재원을 마련하기가 쉽지 않다. 학계에서도 아직 실체가 명확하지 않은 분산형 시스템을 전제로 하는 연구개발 필요성을 연구개발사업 지원기관과 동료 연구자들에게 설득하는 데 어려움이 있으며, 따라서 관련 연구를 진행하는 데 상당한 리스크를 감수할 수밖에 없다. 최근 국내외 주요 학술지에 발표된 분산형 시스템에 대한 소개와 논의는 이러한 한계를 극복하고 분산형 시스템을 본격적인 논의의 장으로 끌어내기 위한 학계의 노력으로 볼 수 있다.

용수공급 및 하수관리에서 분산형 시스템을 본격적으로 도입한 사례가 그리 많지 않으므로 분산형 시스템의 도입으로 인한 파급효과를 예측하는 것은 상당히 어려운 일이며, 이러한 불확실성과 그 대응방안의 부재는 분산형 시스템의 도입을 저해하는 원인이 된다. 분산형 시스템을 집중형 인프라가 이미 구축되어 있는 지역에 적용할 때에는 분산형과 집중형 시스템의 공

존을 피하는 것이 합리적이다. Larsen과 Gujer(2013)는 하수관에서 집중형 인프라 내에 분산형 시스템이 적용되었을 때 발생하는 주요 문제점 중 하나로 고형물 수송 문제를 지적하였다. 현행 집중형 인프라는 상당한 고형물을 하수에 실려 배출·운송한다. 분산형 시스템의 도입으로 국지적인 물 순환의 비중이 커지고 이에 따라 배출하는 하수의 유량이 감소하게 되면 고형물의 침전으로 인한 관거 막힘이 심화되고, 악취 및 관거부식 등의 문제가 발생한다. 따라서 분산형 시스템에서는 충분한 고형물 제거가 이루어진 처리수를 관거로 배출할 필요가 있으며, 제거한 고형물을 별도로 수집, 감량화 및 수송하기 위한 기술과 체계의 마련 또한 필요하다. 이와 같이 분산형 시스템을 도입하는 데 있어 예기치 못한 다양한 기술적 문제가 발생할 개연성이 있으며, 이러한 문제에 대한 인식과 이해를 향상시키고 그 해결방안을 마련하여야 분산형 시스템 도입을 본격적으로 논의할 수 있을 것이다.

물 인프라에서 분산형 시스템의 도입이 가지는 이점 중 하나는 소비자 인근에서 이루어지는 용수 생산을 통하여 수자원을 안정적으로 공급하고 다변화시키며(맞춤형 수자원 생산; fit-for-purpose water supply), 집중형 시스템에서 하수의 장거리 운송 및 혼합 처리와 결부된 비용과 낮은 지속가능성을 극복하는 데 있다. 그러나 현재 국내뿐만 아니라 국외 대부분 지역에서도 공공인프라를 통하여 공급하는 가장 높은 품질의 용수인 식수(수돗물)의 시장 가격이 높지 않다는 점은 수자원 공급 다변화의 경제성을 약화시키는 큰 원인이 된다. 소비자에게 있어 물의 다양한 용도 별로 다변화된 품질의 수자원 공급이 가지는 심리적 불안감과 현실적 우려가 그로부터 획득 가능한 경제적 이득을 크게 앞서는 상황에서, 규범적 당위성만으로 수자원 공급의 다변화를 추진하기란 어려운 것이 현실이다. 먹는 물 관련 상품(생수, 정수기 등)의 시장 가치와 적정한 수자원의 공급이 이루어지지 못함에 따라 발생하는 기회비용을 고려할 때, 수돗물의 낮은 시장 가격은 그 경제적 가치 자체가 낮아서라고 보기는 어렵다. 하수의 수집·운송·처리 또한 소비자는 그 실질적 가치에 비해 상당히 낮은 비용을 지불하고 있다. 이와 같이 낮은 물 관련 서비스 가격은 물이 가지는 공공적 성격과 환경적 형평성(environmental equity)을 고려하였을 때 어느 정도 불가피한 측면이 있다. 다만, 미래도시의 물 인프라에 있어 지속가

능성을 하나의 중요한 가치로 고려하고자 한다면, 인센티브, 환경세 등 정책적 디자인을 통하여 이러한 가치를 향상시키는 데 기여하는 물 인프라에 경제적 유인요인을 부여하는 방안 마련이 필요하다.

이 글에서는 분산형 시스템 도입이라는 도시 물 관리의 혁신적인 변화가 용이하지 않은 원인에 대하여 중점적으로 논의하였다. 분산형 시스템의 도입은 도시 물 관리의 패러다임을 전환하는 것이며, 패러다임의 전환에는 상당한 사회·경제·기술적 변화가 수반되고, 예기치 못한 파급효과가 발생할 여지가 있다. 관련 연구자들은 분산형 시스템의 도입과 관련된 여러 과제들을 해결하기 위하여 시스템적인 사고, 인식의 전환, 장기적 관점에서의 기술 투자, 테스트베드(test-bed) 운영 등이 반드시 필요하다고 역설한 바 있다(Larsen과 Gujer, 2013; Larsen 등, 2016; Marlow 등, 2013; Mihelcic 등, 2017). 분산형 시스템의 도입을 저해하는 요인들을 극복하기 위한 구체적인 방안과 참고사례에 대하여서는 본 [Water4FutureCity]의 향후 발간될 지면을 통하여 보다 중점적으로 논의하고자 한다.

참고문헌

1. Albert, R., Jeong, H., Barabási, A. -L. (2000) Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406(6794), 378–382.
2. Barlass, T. (2015) “\$535m Paid to Keep Desalination Plant in State of ‘Hibernation’”, *The Sydney Morning Herald*, Apr 12, 2015, Available at <http://www.smh.com.au/nsw/535m-paid-to-keep-desalination-plant-in-state-of-hibernation-20150410-1miuw6.html>, accessed Nov 2017.
3. Burian S. J., Nix, S. J., Pitt, R. E., Durrans, S. R. (2000) Urban wastewater management in the United States: Past, present, and future, *J. Urban Technol.*, 7(3), 33-62.
4. Derrible, S. (2017). Urban infrastructure is not a tree: Integrating and decentralizing urban infrastructure systems. *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.*, 44(3), 553–569.
5. Foschia, L. (2012) “Sydney Desalination Plant to be Switched Off” *ABC News*, Jun 26, 2012, Available at <http://www.abc.net.au/news/2012-06-26/sydney-desalination-plant-to-switch-off/4092482>, accessed Nov 2017.
6. Galada, C. H., Montalto, H. A., Gurian, P. L., Sheller, M., Ayalew, T. B., O'Connor, S. (2013) Assessing preferences regarding centralized and decentralized water infrastructure in post-earthquake Leogane, Haiti. *Earth Perspective*, 1(5), 1-13.

7. 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., Lienert, J. IWA Publishing London, UK, 135-150.
8. Larsen, T. A., Hoffmann, S., Luthi, C., Truffer, B., Maurer, M. (2016) Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science*, 352(6288), 928-933.
9. Nordin, A. Niwagaba, C. Jönsson, H., Vinnerås, B. (2013) Pathogen and indicator inactivation in source-separated human urine heated by the sun. *J. Water Sanit. Hyg. De.*, 3(2), 181-188.
10. Rinat Z. (2016) "Health Ministry Shuts Down Israel's Largest Desalination Plant Due to Pollution" HAARETZ, Mar 18, 2016, Available at <https://www.haaretz.com/israel-news/.premium-1.709528>, accessed Nov 2017.
11. Udert, K. M., Larsen, T. A., Gujer, W. (2006) Fate of major compounds in source-separated urine. *Water Sci Technol.*, 54(11-12), 413-420.
12. 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. *Environ. Sci. Technol.* 51(18), 10274-10281.
13. 박노석 (2011) 분산형 용수공급시스템의 소개. *대한상하수도학회지*, 25(2), 133-138.
14. 송경남 (2017) "K-water, 캄보디아에 '수직형 정수처리 실증시설' 구축", *폴리뉴스*, Aug 31, 2017, Available at <http://www.polineews.co.kr/news/article.html?no=326751>, accessed Nov 2017.

한국물환경학회 미래도시물환경기술위원회

위원장 | 남경필

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

Water4FutureCity 2호

서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호

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