

분산형 물 인프라의 시범연구 사례 고찰

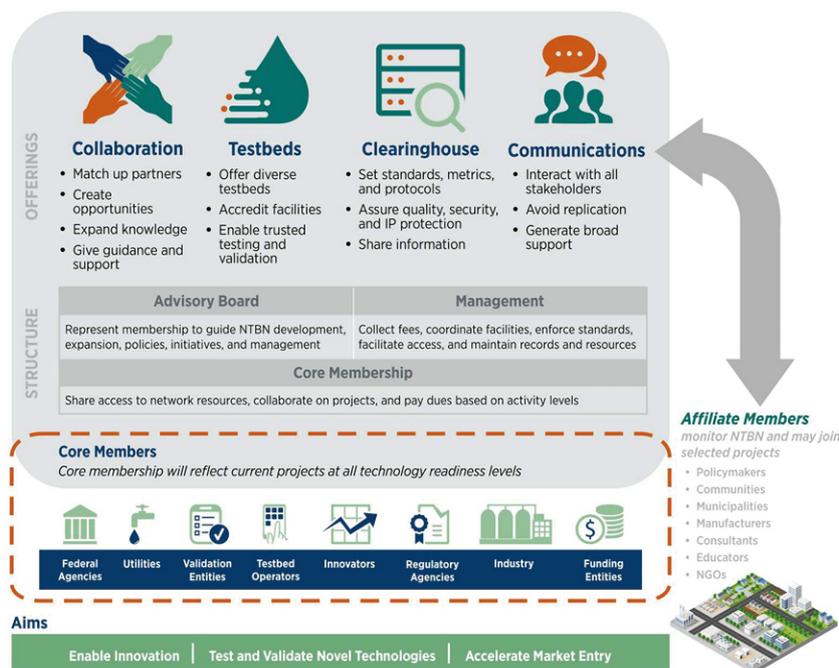
Case Study on the Decentralized Water Infrastructure

혁신적 물 인프라 구축에 있어서 시범연구의 필요성

분산형 물관리 시스템은 물 공급, 수처리 및 자원·에너지 회수, 물 관련 재난·재해관리 등을 위한 작업이 수요자·배출원·발생원으로부터 상대적으로 인접한 영역에서 이루어지는 시스템으로 정의할 수 있다. 2017년 12월 발간된 한국물환경학회 이슈레터 2호 [차세대 도시 물 인프라로서 분산형 시스템 도입의 필요성 및 극복과제]에서는 현재의 집중형 물 인프라가 도시 물관리의 지속가능성 측면에서 지니고 있는 한계를 진단하고, 그 대안으로 분산형 물관리 시스템에 대하여 소개하였다. 또한, 분산형 물관리 시스템의 주요 특징을 소개하고 그 적용을

위해 극복하여야 할 문제들을 제시하였다. 본 이슈레터에서는 분산형 시스템의 실제적인 적용과 그 특징, 장단점 및 극복과제 등에 대한 이해를 돕기 위하여 해외에서 분산형 물관리 시스템에 대하여 시범연구를 진행했던 사례를 소개하고 고찰하였다.

농경사회에서 물을 포함한 자원 및 에너지 관리가 주로 커뮤니티 또는 가정 단위로 이루어졌다는 것을 상기한다면, 분산형 물관리 시스템 자체가 완전히 새로운 시도라고 볼 수는 없을 것이다. 산업화 이후의 미국 등 선진국에서도 여전히 분산형 시스템은 인구밀도가 낮은 농촌 및 교외지역 물관리 인프라를 구성하는 주요 요소로 자리매김해 있다. 그러나 산업화로 인구 집중이 일어난 도시에서는 완전히 새로운 삶의 방식과 주거 및 생활



〈그림 1〉 물 인프라 지속가능성 향상을 위한 테스트베드 네트워크 구축 제안(Mihelcic 등, 2017). Reprinted with permission from Mihelcic et al. (2017).

Copyright (2017) American Chemical Society.

의 공간구조, 시민 문화가 형성되었으므로 도시에서 분산형 물 관리 시스템을 도입하는 것은 기존에 인류가 경험한 바 없는 새로운 발걸음이라고 볼 수 있다. 도시 물관리에는 기술적 요소뿐만 아니라 다양한 사회·경제·문화적 요소들이 연관되어 있으므로 물관리의 혁신적 변화에 따른 파급효과를 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 광범위한 영역과 다수의 시민들에게 서비스를 제공하는 물 인프라의 오작동은 매우 중대한 시민건강 및 사회경제적 손실을 유발하므로, 혁신적 물 인프라가 기존 인프라를 대체하기 위해서는 신중하고 점진적인 접근이 필요하다.

그러나 분산형 물 인프라에 관하여 우리가 보유하고 있는 경험과 지식은 아직 매우 부족한 것이 현실이다. 가장 효과적인 분산형 물 인프라의 규모는 어느 정도인지, 또는 최적의 규모를 결정하는 데 요구되는 주요 인간활동 및 자연환경의 특성은 무엇인지에 대하여 아직은 뚜렷한 해답이 없는 실정이다. 또한, 분산형 하수처리에 있어 보다 효과적인 기술이 무엇인지에 대하여 우리는 충분히 알지 못한다. 현재 도시 하수관리의 주요 패러다임인 집중형 처리의 가장 주요한 프로세스는 미생물에 의한 생물학적 처리이다. 1910년대에 최초로 활성 슬러지 공정이 개발된 이래 생물학적 하수처리 프로세스는 수많은 시행착오와 검증 거쳤으며, 그 과정에서 기술적 발전뿐만 아니라 하수처리의 필요성 및 경제성에 대한 사회적 논의와 합의 또한 점진적으로 이루어졌다. 이러한 점을 고려하였을 때, 분산형 물 인프라에 대해서도 시범연구를 통하여 기술적 검증, 경제성 평가, 물 인프라의 혁신이 야기할 시민생활의 변화에 대한 사회적 합의, 그리고 이와 같은 사항들을 고려한 인프라의 전반적인 개선을 위한 지난한 노력이 향후 수십년간 지속되어야 할 것이다.

수처리, 물 재생, 물로부터의 자원 및 에너지 회수 등에 대한 연구자들의 노력과 기술 및 시장의 성숙 등으로 현재 분산형 물 인프라를 위한 개별기술은 상당 부분 준비되어 있는 상황이다. 이제는 이러한 개별기술을 한데 엮어 하나의 시스템을 만들고, 그 시스템을 구축하기 위하여 추가적으로 개발이 필요한 기술들을 도출하며, 구축된 시스템을 시범 운영하여 그로부터 발생하는 환경·시민위생 및 사회·경제적 편익과 비용, 극복과제에 대하여 공정하고 정확하게 평가하는 데 힘을 기울여야 할 때이다. 이를 위하여 분산형 물 인프라에 적용 가능한 개별기술과 관계자(연구자, 투자자 및 기업, 시설 운영자, 규제기관, 교

육자 등)들이 한데 모일 수 있는 장을 마련할 필요가 있다. 따라서, 분산형 물 인프라를 구체적으로 구현하는 방식의 시범연구는 반드시 필요하다.

아래에서는 분산형 물 인프라 적용과 관련한 3건의 사례연구를 제시하였다. 첫 번째로 제시된 스위스 알프스 독립형 제로에너지 빌딩 건축 및 운영은 물관리뿐만 아니라 분산형 인프라의 패러다임을 공유하는 모든 시스템이 집약된 테스트베드의 시범 운영 사례이다. 이 제로에너지 빌딩에는 분산형 물 공급 및 수처리기술뿐만 아니라, 패시브 빌딩 건축과 관련된 다양한 기술들이 어우러져 있다. 두 번째로 제시된 미국 모바일시의 분산형 하수처리시스템 도입은 현존하는 집중형 인프라에 분산형 하수처리시스템을 접목한 사례이다. 이 사례에서는 도시의 외곽지역 신규 개발에 의한 하수처리 수요에 대응하기 위한 집중형 하수관리 인프라의 보완책으로 분산형 하수처리시스템을 활용하고자 하였다. 세 번째로는 Bill Gates 재단에서 실시한 Reinvent the Toilet Challenge 프로그램을 소개하였다. 여기에서는 신개념 화장실 및 화장실 폐수처리 시설 개발이라는 단일 시스템을 구체적 문제로 제시하고, 연구자들의 집단지성을 활용하여 다양한 해결책을 모색함으로써 당면한 문제를 해결하는 방법론을 취하였다.

스위스의 알프스 New Monte Rosa 산장: 독립형 제로에너지 빌딩 건축 사례

최근 국내 건설업체를 중심으로 2020년 BAU(Business as usual) 대비 30%의 온실가스를 저감하기 위하여 에너지 소비를 최소화하고 신재생에너지의 활용을 최적화할 수 있는 제로에너지 빌딩에 대한 관심이 높아지고 있다. 정부 부처도 다양한 건물관련 기준을 수립하여 제로에너지 빌딩에 대한 연구개발 및 시장 보급에 노력을 기울이고 있다. 특히 국토교통부는 ‘기후변화 대응 제로에너지빌딩 조기 활성화 방안’을 위한 로드맵을 수립하여 2025년부터 신축 건축물에 대하여 제로에너지 빌딩을 단계적으로 의무화하고자 하고 있다(국가건축정책위원회, 2016). 제로에너지 빌딩을 선도하고 있는 유럽의 경우에는 BEMS(Building energy management system) 활용을 통한 건물에너지 절약과 최적화 설계, 제어, 사후처리, 통합화 등의 기술을 적극적으로 연구함으로써 BEMS를 실제 건축물에 적용할

수 있는 기술 수준에 이미 도달해 있다(OECD, 2003). 제로 에너지빌딩에는 건축, 기계, 전기, 신재생 등 건물 에너지와 관련된 고도의 전문지식과 정보통신기술의 융합이 필요하므로, 실제 건축에 이를 적용하는 데 어려움이 여전히 존재한다. 여기에서는 스위스에서 진행되었던 프로젝트인 New Monte Rosa



〈그림 2〉 New Monte Rosa 산장 전경

New Monte Rosa는 2010년 스위스 연방공과대학(Swiss Federal Institute of Technology Zurich; ETH Zurich)에서 창립 150주년을 기념하여 알프스 산맥의 몬테 로사(Monte Rosa) 지역(해발 2883 m)에 건축하였다. 이 산장은 당초 2004년 스위스 연방공과대학에서 건축하였으나 다양한 분야에서 30명이 넘는 학생들이 설계에 참여하여 2010년 제로에너지 빌딩으로 재건축되었다. 건축자재 선정부터 구조 그리고 에너지 자립 전략까지 매우 꼼꼼하게 설계된 흔적을 어렵지 않게 찾아볼 수 있다(ETH Zurich, 2010).

산장은 암석 위에 스테인리스 플랫폼을 설치하고, 이 위에 구형에 가까운 모양으로 건축되었는데, 이는 외부에 의한 열손실이 적고 건물을 데우는데 필요한 부피 대비 에너지를 최소화하기 위함이었다. 알프스 산맥 특성상 극한의 기후 조건에 노출되어 있으므로, 강도 높은 목재로 기틀을 잡고 반복적인 기하학적 형태로 구성함으로써 건물 구조를 강화하고 안정성을 높였다. 또한, 조명, 가전제품, 하수처리 장치 등 건물 운영에 필요한 에너지 대부분을 건물 외벽의 측면에 덮혀 있는 85 m² 광전지로부터 확보하며, 태양열을 활용하다 남은 전기는 납축전지에 저장하여 필요시 사용한다. 이외에도 약천후 시에 사용하는 유채 기름을 활용한 열병합 발전, 산장에 머무르는 사람들이 방출하는 열에너지 회수(패시브 기술), 하수처리장에서 발생하는 바이오가스 회수로 건물에서 사용하는 에너지의 90% 이상을 자체

적으로 생산 활용한다. 이와 같이 New Monte Rosa는 제로에너지 빌딩으로서의 장점을 모두 보유하고 있으나, 최근 여러 가지 문제점들이 동시에 발견되고 있다.

산장의 유명세가 증가함에 따라 New Monte Rosa에 거주하는 여행객들이 매우 증가하게 되었다. 등반 시즌 동안에는 기존에 태양열 에너지와 열병합 발전으로 충분했던 에너지가 모자라 평균 7,000 리터의 디젤을 사용해서 발전기를 추가로 운영해야 했다. 또한, 하수량이 폭발적으로 증가함에 따라 건물 내 하수처리시설 운영에 필요한 전기가 예상치를 훨씬 넘게 필요하였으며, 처리시설의 필수 장치인 여과장치를 망가뜨려 일부의 폐수를 건물 뒤로 방출하거나 헬리콥터로 옮겨야 하는 웃지 못할 상황까지 일어났다. 현재 스위스연방공과대학은 SAC(Swiss alpine club) 및 다른 기업들과 협력하여 산장의 여러 애로사항 개선을 모색 중이지만, 적절한 해결책을 제시하지 못하고 있는 실정이다.

New Monte Rosa의 사례를 비추어 볼 때 비용적인 문제를 제외하면 제로에너지 빌딩에 필요한 건축자재, 에너지 생산 및 관리, 친환경 수처리, 에너지 관리시스템 등의 기술 등은 현재 가지고 있는 기술로도 충분히 구현이 가능하다고 판단된다. 하지만 제로에너지 빌딩 운영방안의 노하우 부족 혹은 최적화 미비로 제로에너지 빌딩을 제대로 활용하지 못하고 있는 것처럼 보인다. 2020년 신축 공공건축물의 제로에너지 건물 인증을 의무화하고 2025년부터 민간부문까지 인증의무 대상을 확대할 계획을 가지고 있는 국내 실정을 고려해보았을 때 국외의 제로에너지 빌딩의 실패 사례를 다양한 각도에서 학습하여 건물의 효율성 및 실효성을 높이기 위한 노력이 지금부터 필요하다.

미국 알라바마주 모바일시: 기존 집중형 시스템 보안을 위한 분산형 하수처리시스템 도입 사례

미국의 분산형 하수처리시스템은 국가 하수 기반시설의 주요 요소 중 하나이다. 1997년 의회 제출 보고서(Response of Congress on use of decentralized wastewater treatment system)에 의하면, “분산형 하수처리시스템은 공중위생과 환경을 보호할 수 있고, 시골지역의 경우 낮은 건설 및 유지비용을 가지며, 다양한 현지 여건에 대응성이 높고, 생태학적으로 민감한

지역에 적합하다"라고 언급하고 있다. 분산형 하수처리시스템은 주로 농촌지역 또는 도시의 교외지역에 적용되며 미국 인구의 25%, 신규 주거 및 상업시설의 1/3에 적용되고 있다. 이러한 분산형 하수처리시스템의 주요 문제점은 시스템의 10~20%가 적절히 운영되고 있지 않으며 절반 이상이 30년 이상 노후화되어 지하수 오염의 주요 원인이 되고 있다는 것이다(USEPA, 2017).

그러나 오랜 기간 농촌 및 교외지역의 분산형 하수처리시스템 운영으로부터 축적한 노하우를 활용하고, 보다 체계적인 유지관리를 실시하며, 물 재이용 등 자원순환 기술을 접목하여 성장하고 있는 도시의 집중형 하수관리 인프라를 보완하는 데 사용하면 분산형 하수처리시스템을 도시지역에 유용하게 활용할 수 있다. 분산형 하수처리시스템은 이송에 대한 부담이 상대적으로 적을 뿐만 아니라, 집중형 시스템에 비하여 도시지역 팽창에 신속하고 유연하게 대응이 가능하다. 알라바마주 모바일(Mobile)시는 미 환경청(U.S. Environmental Protection Agency)의 분산형 하수처리 실증 프로젝트(National decentralized wastewater demonstration project)를 통해 분산형 하수처리시스템을 기존 집중형 하수처리시스템과 통합하여 적용하였다(Mobile area water and sewer system(MAWSS), 2015).

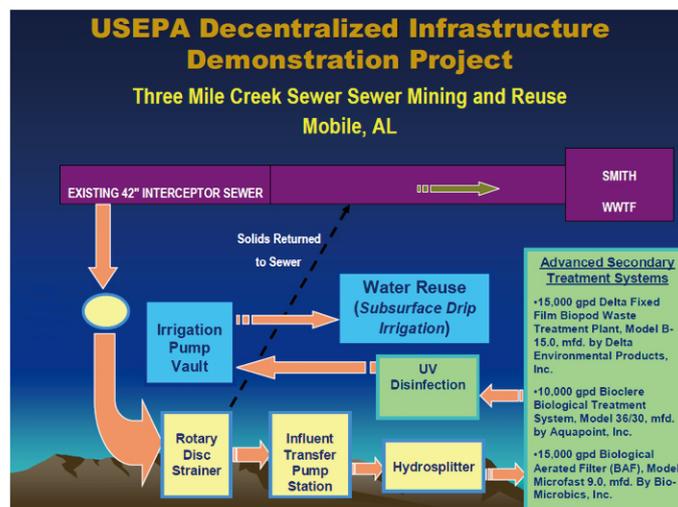
모바일시 분산형 하수처리시스템 도입 사업의 주요 내용은 기존의 하수관망에서 하수 일부를 취수하여 저비용 처리기술을 이용하여 분산형 처리 후, 처리수를 새로 조성되는 도시 공원의 관개용수로 재사용하는 것이다. 하수처리수를 발생원 근처에서

관개용수로 사용하는 것은 용수 사용량 절감뿐만 아니라 방류수계의 수질 개선에도 도움이 된다.

인구 약 20만명인 모바일시는 1999년 이후 여러 분산형 하수처리시스템(50~300 가구 규모)을 기존 하수처리구역 외부의 신규 개발지역에 도입하고 있다. 모바일시는 음용수의 약 10%를 도시 조경용수로 사용하고 있으며 이는 갈수시 음용수 공급에 큰 영향을 주고 있다. 최근 모바일시는 Three mile creek 인근에 도시 공원을 개발하였으며, 공원의 조경 및 경관 용수를 위해 하수처리수의 표면하 관개(Subsurface drip irrigation)를 적용하였다. 표면하 관개는 지면하 15~25 cm 깊이에 하수처리수를 주입하는 방식으로 관개용수와 양분 필요량을 절감할 수 있는 방법이다. 이러한 표면하 관개방식은 도로 가로수, 공원, 도시 조경시설 등에 적용될 수 있다. 대상 지역은 모바일시의 Three mile creek 근처이며 이 구역의 하수관로(하수처리장 처리용량 약 38,000 m³/day)에서 하수 약 150 m³/day를 새로 조성되는 공원의 처리시설로 이송하여 처리 후 공원의 조경용수로 사용하고자 한다. 표면하 관개용수를 공급하는 지역은 인근 주거 지역과 약 100 m 이격되어 있다.

〈그림 3〉에 분산형 하수처리 공정을 나타내었다. 메인 하수관로에서 하수 150 m³/day를 차집하여 전처리 시설(회전식 스크린, Rotary mechanical screen)에서 고형물을 제거 후, 2차 처리공정으로 유입된다. 2차 처리공정은 분산형 하수처리기술을 평가하기 위해 3가지 처리 공법이 적용되었다.

- 부착 성장 공정(Attached growth process, Aquapoint



〈그림 3〉 미국 모바일시 분산형 하수처리 시범사업의 개념도



〈그림 4〉 Aquapoint Bioclear™



〈그림 5〉 Delta BioPOD™



〈그림 6〉 Biomicrobics FAST™



〈그림 7〉 표면하 관개시설 설치사진

Bioclear™), 〈그림 4〉

- 2종의 고정상 활성 슬러지 시스템(Fixed film activated sludge; Delta BioPOD™, Biomicrobics FAST™), 〈그림 5〉, 〈그림 6〉

2차 처리시설 방류수는 자외선 소독 후 표면하 관개용수로 사용된다(그림 7). 토양 주입율은 토양 조건 등을 고려하여 12.2 L/m²/day로 결정하였으며 약 12,500 m²에 관개하였다. 본 사업의 총 건설비는 1,037,000\$이다.

표면하 관개에 의한 인근 지하수 오염 영향 평가를 위해 배경 관측정을 포함하여 5개의 지하수 관측정을 설치하였다. 모니터링 결과 표면하 관개에 의한 지하수 오염 영향은 없었다. 분산형 하수처리시스템에 적용된 3가지 처리공정에 대한 유출수 모니터링 결과 모든 처리공정에서 표면하 관개에 적합한 양호한 처리 수질(BOD 10 mg/L 내외, 총인 5~15 mg/L, 질산성질소 4~14 mg/L)을 나타내었다.

Bill Gates 재단 Reinvent the Toilet Challenge: 구체적 문제해결을 목적으로 한 집단지성의 활용 사례

1. 프로그램 소개

Bill Gates 재단(공식 명칭: Bill & Melinda Gates Foundation)은 5개의 본부(Global Health, Global development, Global growth and opportunity, Global policy and advocacy 등)로 구성되어 있고, 그 중 Global growth and opportunity 본부에서 운영하는 Water, sanitation & hygiene 프로그램은 개발도상국들의 위생 시설 보급률을 높여 수인성 전염병에 기인한 사망률을 감소시키는 것을 목적으로 하고 있다. 안전하고 저렴한 위생시설에 접근할 수 없는 인구는 전 세계 약 25억명으로 추산되고 있다.

2011년 시작된 Reinvent the Toilet Challenge(이하 RTTC)는

Water, sanitation & hygiene 프로그램의 대표적인 성과 중 하나로 배설물 중 병원성 미생물과 기생충을 효과적으로 제거할 수 있는 새로운 개념의 화장실 및 화장실 폐수처리 시설을 개발하는 것으로 목적으로 한다. RTTC에서 추구하는 화장실의 성능은 다음으로 요약할 수 있다.

- 인간 배설물 중 병원균을 제거하고 에너지, 깨끗한 물, 영양염류 등 유가자원을 회수 있는 기술
- 수도망, 하수망, 전기망에 연결 없이 운전될 수 있는 'off the grid' 기술
- 이용자별 하루 5센트 이하의 비용이 소모되는 기술
- 개발도상국에서 지속 가능하며 운영자에게 이윤을 줄 수 있는 기술
- 차세대 기술로서 개발도상국뿐 아니라 선진국에서도 활용 동기가 있는 기술



〈그림 8〉 RTTC 프로그램의 개요

상기 내용들을 종합해 보았을 때, RTTC는 ‘분산형’ 위생 기술임과 동시에 ‘물-자원-에너지’ 넥서스 기술을 목표로 하고 있음을 알 수 있다. 초기에는 전세계 16개 기관에 각 1억 원 규모의 연구과제를 통해 공학적 아이디어를 시작품화할 수 있도록 하였고 연차별 전시회를 통해 현재는 캘리포니아 공과

대학, Loughborough 대학, Eawag, RTI 등 소수의 기관만이 연구를 이어가고 있다. 또한, 2013년 중국과 인도에 각 500만불 규모의 투자를 통해 개발된 기술들이 현지의 연구기관/기업에 이전 및 현장 적용될 수 있도록 하여 실증화 및 사업화를 촉진하고 있다. 이하에서는 RTTC의 일환으로 개발된 분산형 수처리 기술 사례에 대해 논의하도록 하겠다.

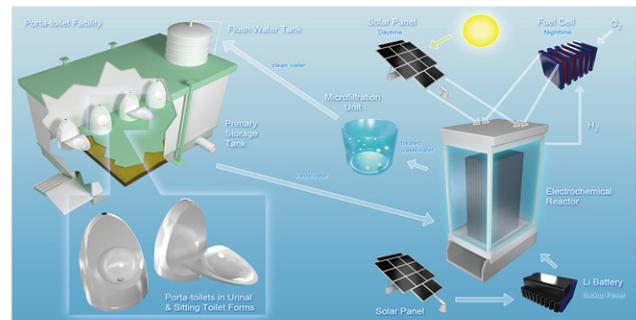
2. 기술개발 사례

① 캘리포니아 공과대학(Caltech) Solar toilet

Caltech에서 개발한 Solar toilet(공식 명칭: Self-Contained, PV-Powered Domestic Toilet and Wastewater Treatment System)의 개념은 <그림 9>에 도시한 바와 같다. 화장실에서 발생하는 대소변은 인라인 믹서를 통해 균질화되고 일정기간 정화조에 체류하는데, 이는 유량 조정과 동시에 고분자 유기물의 혐기성 소화를 통해 전처리하기 위함이다. 정화조 유출수는 폐수전해공정(Wastewater electrolysis cell)을 거쳐 유기물(화학적 산소 요구량), 총질소 등의 제거와 동시에 소독이 이루어지고 처리수는 여과를 거쳐 화장실 변기용수로 재이용된다. 필요에 따라 잉여의 처리수는 세척용수 또는 조경용수로 활용될 수 있다. 상기 폐수전해공정은 높은 농도의 염소이온을 함유한 폐수의 전기분해 과정에서 발생하는 활성염소종(Reactive chlorine species)을 활용해 오염물의 산화·소독과 동시에 물 또는 양성자의 환원반응을 통한 수소가스 생산을 동시에 달성할 수 있다. 양극 산화(Anodic oxidation)를 촉진하는 촉매로는 $\text{IrO}_2/\text{TiO}_2$ 코어셸 구조의 전극 또는 자가 도핑된 티타늄 산화물 나노튜브 구조체 전극을 활용하고, 수소발생을 위한 음극으로는 저가의 스테인리스 강을 활용한다. 폐수전해공정은 태양전지와 연결되어 외부 전력의 공급 없이 운전이 가능하며, 수전해를 통해 발생하는 수소가스는 수소연료전지를 통해 전기에너지로 변환할 수 있다. 운전 조건 및 적용지역에 따라 상이하나 하

루 100 Flush의 화장실 기준으로 약 0.3 kW의 전력이 소비되는 것으로 알려져 있다.

Solar toilet은 1) 화장실 폐수의 처리와 동시에 재이용수, 태양 에너지가 변환된 수소에너지, 또한 전압, 체류시간 등 운전조건의 조절을 통해 처리수에 잔류시킬 수 있는 질산성 질소 형태의 영양염류를 회수할 수 있는 기술이며, 2) 물 및 에너지 Grid와 독립적으로 운전될 수 있고, 3) 첨단기술이 활용된 적정기술이라는 점에서 RTTC의 가장 성공적인 기술개발 사례로 평가받고 있다.



<그림 9> 캘리포니아 공과대학 Solar toilet 개념도
(출처: Bill & Melinda Gates Foundation)

Solar toilet은 인도 및 중국 현지에 장기간의 파일럿 시설 운영을 통해 실증화 가능성이 입증되었으며, 저가화 및 사업화를 위해 1) Kohler사 등 화장실 전문 기업들과의 협약, 2) 중국 벤처회사 설립, 기술 이전 및 대량 생산시설 구축, 3) 무선 통신 기반 측정 및 제어 자동화 등의 작업이 완료된 상태이다. 이를 통해 향후 남미 및 아프리카 등지에 본격적인 보급 및 판매가 진행될 것으로 예상된다.

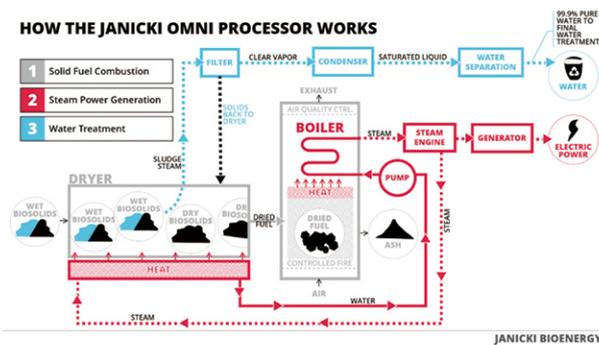
② Janicki 에너지 Omni processor

본 기술은 RTTC의 상위 프로그램인 Water, sanitation & hygiene 프로그램 차원에서 지원되어 개발된 것으로 화장실 및 축산업에서 배출되는 Bio-solid를 원료로 먹는 물과 에너지를 생산하는 목적을 가지고 있다. 기술의 개념은 아래와 같다.



<그림 10> Solar toilet 적용사례

- 1) 고형물 순환: 일정 함수율을 갖는 고형 폐기물(Bio-solid)은 건조/증발 단계를 거쳐 소각되어 Ash의 형태로 재생되는데, 이 때 고형물의 물리화학적 성질에 따라 소각 운전 조건을 조절하고, 발생하는 가스의 추가 처리를 하는 것이 기술적 주안점으로 알려져 있다. 생산되는 Ash는 복토재로 활용될 수 있다.
- 2) 에너지 순환: 고형물의 건조 및 소각기는 증기 발전기와 연결되어 있어 전력을 생산할 수 있는데, 소각로의 초기 승온과정 이후에는 자체적으로 생산하는 전력으로 전체 시스템의 운전이 가능하다. 이를 위한 Energy management and storage system(EMS/ESS)이 기술의 주안점이며 일레로 열교환기 등에서 발생하는 잉여 열에너지는 건조기로 반송되어 에너지 효율을 높이는 것으로 알려져 있다.
- 3) 물 순환: 건조기에서 발생하는 수증기는 여과, 응결, 역삼투 등의 과정을 거쳐 재이용 될 수 있는데 필요에 따라 먹는 물 수준의 고급 재이용수를 생산할 수 있는 것으로 알려져 있다.



〈그림 11〉 Janicki 에너지 Omni processor 개념도

Omni processor는 다카르에 실증시설 운영을 거쳐 상용화를 완료한 상태이고 S200 모델의 경우 하루 50톤(건조중량 기준 10톤)의 고형물을 처리하여 285 kW의 에너지, 50톤의 먹는 물, 그리고 1-2톤의 복토재를 생산할 수 있는 것으로 알려져 있다.



〈그림 12〉 Omni processor 적용사례

3. 시사점

이상 Solar toilet과 Omni processor의 기술사례를 바탕으로 분산형 수처리 기술에 대한 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1) 분산형 수처리 인프라는 물-에너지 넥서스 기술과 밀접한 관계를 가지고 있다. 특히 상기 기술사례들은 개발도상국에 적용을 목적으로 한다는 점에서 에너지 독립적 운전이 필수적인 요건이다. 수처리 기술을 크게 분리(Separation)와 변환(Transformation) 기술로 구분할 수 있다면 열역학적 관점에서 분리기술은 엔트로피를 감소시키므로 에너지의 주입이 필수적이다. 반면 물리화학적 변환과정에서 오염물이 가지는 화학에너지를 변환 및 회수하는 것이 가능하며 이는 Omni processor의 고형물 소각의 예에서 확인할 수 있다. 반면 Solar toilet의 경우는 폐수 중 유기물의 화학에너지를 직접적으로 회수할 수는 없지만 외부 신재생에너지와의 연결을 통해 자립적 운전이 가능할 수 있다.

2) 분산형 수처리 인프라에서 처리수 또는 회수 자원의 용도에 따라 기술적 조합 또는 운전 조건을 다양화할 수 있다. Solar toilet의 예에서 처리수를 플러싱 용수 등으로 재이용할 경우에는 처리수 중 유기물 뿐 아니라 질소 등 영양염류를 제거할 필요가 있지만 조경용수 등으로 활용할 경우에는 처리수준을 낮추어 영양염류의 재활용이 가능하다. Omni processor의 경우에도 먹는 물 수준의 재이용수 생산을 위해서는 역삼투 등의 고급 기술의 조합이 필요하지만 재이용의 목적에 따라 공정의 단순화가 가능하다.

결론 및 제언

위 세 사례를 통하여 현재 가용한 기술을 집약 및 발전시켜 분산형 물관리에 활용할 수 있는 가능성을 확인할 수 있는 반면, 이와 관련하여 극복하여야 할 앞으로의 과제도 상당하다는 것을 확인할 수 있다. Monte Rosa 산장의 실패 요인은 주로 관광객 증가, 높은 계절적 변동성 등에 기인하였으며, 관광객이 적었던 초기 운영단계에서 등반 시즌 이외에는 비교적 안정적인 운영이 이루어졌음을 고려했을 때 분산형 시스템의 기회요인도 충분히 발견되었다고 볼 수 있다. 그러나 그 실패로부터 하수처리가 건물 단위의 에너지 자립화 가능성을 결정하는 큰

요소이며, 하수처리의 에너지 효율을 향상시키기 위한 노력이 꾸준히 지속되어야 함을 분명히 확인할 수 있다. 미국 모바일시의 사례로부터 분산형 시스템이 기존 집중형 시스템의 단점을 보완하는 방식으로 충분히 공존 가능하다는 것을 확인할 수 있는 반면, 미국 농촌·교외지역 분산형 하수처리시설의 실패 경험은 분산형 시스템에서 유지관리 문제가 큰 과제임을 확인시켜 준다. Bill Gates Foundation의 RTTC 프로그램은 목적성이 명확한 기술 공모로부터 당면한 문제를 하나하나 해결하는 방식의 접근이 상당히 유의하다는 것을 확인시켜 준다. 국내에서도 이러한 문제해결형 프로그램이 분산형 물 인프라의 각 구성 요소에 대하여 추진되어 가용한 기술들이 구체화될 수 있는 장이 마련될 필요가 있다. 한편, RTTC 프로그램의 성공 사례가 비교적 제한적이었다는 것은 분산형 시스템의 성공적인 정착을 위한 기술적 어려움이 상당함을 암시하고 있다.

물 인프라의 전반적인 혁신은 일부 연구자 및 기업의 혁신을 위한 노력에 기댄 신규기술 개발만으로 이루어질 수 없다. 큰 사회·경제적 파급효과와 상당한 초기자본의 투여가 필요한 물 인프라의 특징을 고려하였을 때, 혁신적 인프라 구축을 위해서는 충분한 시장의 성숙과 사회적 합의가 필수적이다. 이러한 혁신의 조건을 만들어내기 위한 시발점으로 분산형 물 인프라에 적용 가능한 현재의 기술과 관련자들(연구자, 투자자 및 기업, 시설 운영자, 규제기관, 교육자 등)을 엮어낼 수 있는 혁신적 네트워크의 구축이 필요하다(Mihelcic 등, 2017; <그림 1> 참조). 이러한 혁신적 네트워크의 구축은 일정규모 이상, 가능하면 국가차원의 테스트베드 사업을 통하여 현실화될 수 있을 것이다. 비교적 큰 규모의 테스트베드 사업을 통하여 기존의 기술을 적용·검증하고 추가적으로 요구되는 기술을 개발할 뿐만 아니라, 관련 시장을 형성하고 혁신기업을 양성하며, 물 인프라 혁신과 관련된 사회경제적 요인을 보다 공정하고 정확하게 평가할 수 있다. 분산형 물 인프라를 위한 제반기술과 관계자들이 테스트베드를 통하여 한데 모일 수 있어야만 비로소 물 인프라 혁신을 위한 현재의 요구가 탁상공론에 그치지 않고 구체화된

현실의 모습으로 시민에게 보여질 수 있을 것이다.

최근 4차산업혁명의 물결과 더불어 국내에서도 스마트시티 구축을 위한 실증사업이 활발하게 추진되고 있다. 국토교통부에서는 금년에 2개 지자체를 대상으로 대규모의 스마트시티 실증연구개발을 실시하는 총 1,159억원 규모 ‘스마트시티 국가전략프로젝트 연구개발’ 사업에 본격 착수하여 현재 대상 지자체 선정 단계에 와 있다. 또한, 남북한의 경제협력에 점차 활성화됨에 따라 북한 지역의 신도시 및 인프라 건설 수요가 폭발적으로 증가할 가능성이 있다. 이러한 국가차원의 사업에는 혁신적 물 인프라에 대한 시범연구가 반드시 포함될 필요가 있으며, 연구자 및 기업체, 정부기관 등 물과 관련된 기관 및 관계자들이 보다 적극적으로 참여하여 새로운 패러다임과 기술을 적용하고 평가할 필요가 있다. 앞으로 있을 국가차원의 대규모 테스트베드 사업에 분산형 시스템을 포함한 혁신적 물 인프라를 적용함으로써 도시 물관리의 새로운 미래를 열어나가기 위한 초석을 다질 수 있길 기대해 본다.

참고문헌

- ETH Zurich (2010) New Monte Rosa Hut SAC: Self-sufficient Building in the High Alps.
- IEA (1997) Technical Synthesis Report: A Summary of Annexes 16 & 17 Building Energy Management Systems, Energy Conservation in Buildings and Community Systems.
- Mihelcic, J. R., Ren, Z. J., Comejo, P. K., Fisher, A., Simon, A. J., Snyder, S. W., Zhang, Q., Rosso, D., Huggins, T. M., Cooper, W., Moeller, J., Rose, B., Schhottel, B. L., Turgeon, J. (2017) Accelerating innovation that enhances resource recovery in the wastewater sector: Advancing an national testbed network, Environmental Science and Technology, 51:7749-7758.
- Mobile Area Water and Sewer System (MAWSS) (2015) Integration of Decentralized Wastewater Management Concepts Into an Urban “Centralized” Infrastructure in Mobile, Alabama (USEPA National Decentralized Wastewater Demonstration Project).
- USEPA (2017) Decentralized wastewater systems: a program strategy, USEPA, Washington DC, USA, Retrieved 20 March 2017.
- 국가건축정책위원회 (2016) 기후변화 대응을 위한 제로에너지건축 활성화 추진방안

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 4호

서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호

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