

분산하수처리시스템

(Decentralized wastewater treatment system)



박 우 하 |

한국수자원공사 수자원연구원 차장
pwooh@kwwater.or.kr

1. 서언

분산화시스템(Decentralized system)과 집중화시스템(Centralized system)은 서로 대비되는 개념으로 물과 관련해서는 정수부분과 하수부분에 두 가지의 다른 접근이 가능할 것이다. 한국수자원공사의 상수도시스템은 그 자체가 광역화된 집중화시스템으로, 이조차도 자동화의 일환으로 더욱 집중화한 전북권 및 수도권 광역상수도과 같은 사례가 있다. 필자는 1996년 Thams water의 상수도시설 집중화사례를 사장에게 보고하여 우리 공사 집중화시설의 효시인 전북지역 집중화의 단초를 제공한 바 있다.

한국수자원공사에서는 상수도시설 집중화에 대해서는 많은 검토가 이루어져 왔으며, 이에 따라 집중화시스템에 대해서는 직원들의 이해가 큰 편이나 이에 반해 분산시스템에 대한 이해는 상대적으로 적은 편이다. 분산하수처리시스템이 집중하수처리시스템에 견주어 갖는 경제성 측면에서의 장점과 단점을 알고 있을 때 하수처리기술 계획과 관련하여 선택가능한 많은 기술중에서 가장 적합한 기술을 판단하는데 큰 이점이 있다. 이러한 의사결정에 도움을 주고자 Rocky Mountain Institute에서 작성한 “분산하수처리 기술의 평가”를 소개코자 한다.

개념을 명확히 하기 위해 분산 및 집중하수처리시

스템을 정의하면 다음과 같다. 분산하수처리시스템은 “하수의 발생지점 혹은 이에 가까운 지점에서 하수의 수집, 처리, 재이용 혹은 처분이 가능한 시스템”을 일컫는다(Crites and Tchobanoglous, 1998). 즉 단독 주택 하수의 처리(On-site system)와 수백 가구를 대상으로 하는 하수의 처리(Cluster system)가 이 범주에 포함된다. 반대로 집중하수처리시스템은 전체 지역주민 혹은 여러 지역주민을 하수처리구역으로 함을 말한다. 그림 1은 집중화시스템과 분산화시스템의 관계를 보여준다.

분산하수처리시스템은 소규모하수처리시설이 비용측면에서 대규모 시설에 비해 이점이 있는 경우, 대규모 시설을 설치할 때 그 이점이 없는 경우 또는 대규모 시설과 비교할 때 그다지 이점은 없으나 지역적 특성이나 이용가능한 하수처리방법에 있어 더욱 적합할 때 이용가능하다. 이러한 측면은 분산하수처리시스템의 적합성 여부를 판단하기 위한 기준이 된다. 재정계획과 위험도, 지역공동체와 유역에의 영향, 투자비 및 유지관리 비용, 다른 기간사업과의 통합, 운영 및 시설물의 신뢰성의 분석을 통해 분산하수처리시스템의 이점을 알아보하고자 한다.

2. 분산하수처리시스템의 장점

2.1 재정계획 및 재정위험도

소규모의 분산하수처리시스템은 실제 수요에 근접하게 용량을 결정할 수 있다. 분산하수처리시스템은 주택규모별로 필요한 규모에 맞추어 적시에 건설될

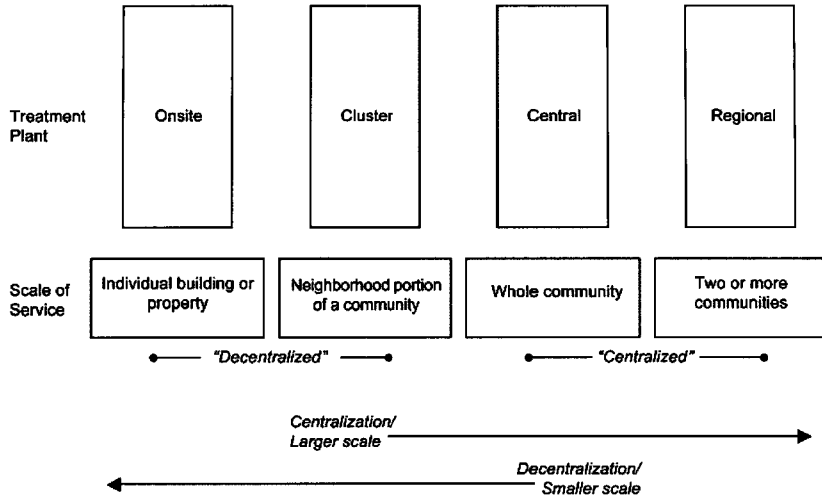


그림 1. The Wastewater Scale Continuum

수 있다. 이러한 분산하수처리시스템의 특징은 많은 장점을 제공한다. 용량과 관련한 초기투자비를 장래로 이전시키는 효과를 주며, 분산시스템은 현 자산가치를 줄이는 효과가 있다. 이 결과 집중화시설이나 분산화시스템은 현장 여건에 따라 관로를 연장부설하는 방안에 비해 종종 훨씬 경제적인 접근방식이라 할 수 있다. 큰 용량을 설치할 때에 비해 초기투자비를 분산시킴으로써 지자체의 부채를 경감시킬 수 있고, 재정비용을 줄이는 효과를 가져다 준다. 분산시스템은 필요에 따라 건설이 가능해 과도한 설계로 인해 예측된 결과보다 수요량이 적어서 발생하는 재정적인 부담을 주는 일이 없다. 분산화시설에 투자한다는 것은 시간을 두고 적정하고 경제적인 기술을 쉽게 선택할 수 있다는 이점을 준다. 집중화시설에 있어서는 영양염류를 제거하는 3차 처리시설을 설치할 때 전체 용량을 대상으로 하여야 하므로 고비용을 수반하지만 분산화시스템은 영양염류에 민감한 지역을 대상으로 선택적으로 적용이 가능하여 경제적인 이점을 준다.

분산화시스템이 갖는 잠재적 단점으로 많은 수의 시설을 설치함에 따라 발생할 수 있는 설계 등 하수처리 대책에 소요되는 비용상승의 가능성이다. 또한 비용을 지불하는 측에서는 개별적이거나 소규모의 하

수처리시설을 설치하기 위한 부채가 집중화시설에 지자체가 부담하는 부채에 비해 더 위험하다고 판단할 수도 있다. 즉 시스템이 실패에 직면하는 경우 집중화시설에서는 전 공동체가 위험을 공동 분담할 수 있지만, 분산화시스템은 분산된 개인이나 마을에 실패가 전가될 수 있다. 하수시설의 감가상각이나 개대체는 집중화시설과 분산화시설 모두에게 중요하다.

2.2 공동체와 구역에의 영향

분산화시설은 지역공동체에 이용가능한 성장전략과 그 궤를 같이 할 수 있고, 소규모 하수처리시설은 작은 규모로 묶어 개발할 수 있어 경제적, 환경적 그리고 사회적인 측면에서 장점을 가질 수 있다. 반대로 적절한 계획과 구획화 개념이 없이 분산화시설을 설치할 때 비용증가의 원인이 될 수도 있다. 분산화시설은 지역공동체가 원치않는 지역간의 하수시설 통합에서 자유로울 수 있으며, 지역공동체의 자율성을 유지하는 데도 도움을 준다. 수질과 관련해서는 여러 가지 인자에 좌우되기는 하지만, 소규모 하수처리시설은 대규모 하수처리시설에 비해 수환경에 미치는 영향이 아주 크거나 작다. 공중보건에 미치는 영향도

이와 비슷한 경향이 있다. 수문학적으로 분산화시설은 집중하수시설에 의해 야기될 수 있는 지하수위 및 하천유지수의 감소를 피할 수 있다. 결론적으로 분산화시설은 공동체간의 신뢰관계를 해칠 수 있는 하수처리계획과 관련된 경제적 위기를 경감시킬 수 있다.

집중하수처리시설은 하수요금의 납부외에는 지역공동체의 관심 밖일 수 있는 반면 분산하수처리시스템은 관심과 참여를 고취할 수 있다. 미관이나 냄새와 같은 심미적 측면에서 집중화시설은 처리시설 주변에 큰 영향을 준다. 그러나 분산화시설은 미미한 영향을 주는 다수의 시설로 구성된다는 측면이 있고, 심미적인 영향을 적게 주도록 처리기술의 선택이나 설계가 가능한데 이러한 부분은 비용증가의 요인이 될 수도 있다. 이외에도 분산화시설은 개대체나 시설보완시, 집중화시설에 비해 기존 시설과 주변에 미치는 영향이 미미하다.

비용과 지자체 혹은 국가에서 갖는 이점이 하수처리시설의 규모를 선택하는데 중요한 잣대가 된다. 그러나 양여금 및 재정지원, 법적 규제에 따르는 경비, 일자리 창출, 온실가스 등 전반적인 검토사항에 대한 내용은 잘 파악되어 있지 않다.

2.3 초기투자 및 운영관리 비용

초기 투자비와 운영관리비라는 규모의 경제 측면에서 볼때 소규모시설은 장점이 없을 수도 있으나 하수시설에 상존하는 규모의 비경제도 피할 수 있다. 총 하수처리시설 설치비용의 80% 이상이 관로부설 등 하수의 집수에 소요됨을 감안한다면 집수로 인한 규모의 비경제가 분산화시설의 처리시설의 비용상승분을 상쇄하고도 남음이 있다. 엄격한 방류수수질기준을 준수하기 위하여 집중화시설이 적합할 수도 있으나 높은 수질의 방류수를 유지할 수 있는 분산화기술 또한 이용이 가능하다. 소규모의 인공습지 처리와 같은 기술은 넓은 토지를 요구하기도 한다.

2.4 다른 기반시설과의 연속성

방류수 관거의 초기투자비나 운영관리비를 줄이기 위해 분산하수시설은 하수발생지점이나 그 인근에서 비용절감이 가능한 하수의 재이용이 가능하다. 그러나 큰 산업시설이나 넓은 지역의 조정용수 공급과 같이 많은 수량이 요구될 때는 On-site 또는 Cluster 시설이 적합하지 않다. 중규모 혹은 큰 규모의 하수처리시설인 경우 하수의 재이용계획은 우수처리시설과 연계가 가능하다.

2.5 운영 및 신뢰성

하수처리시설의 경영적인 측면에서 집중화 혹은 분산시스템의 집중화 운영을 통해 규모의 경제를 실현할 수 있다. 몇몇의 경우 분산화시설에 필요한 경영적인 요소는 집중화 시설에 비해 단순하고 비용이 적게 소요된다.

하수처리시설의 신뢰성은 시설의 규모 혹은 시설의 규모에 관계없이 많은 요소에 의해 결정된다. 평균적으로 분산화시설은 집중화시설에 비해 하수처리시설의 실패에 따르는 위험이나 비용이 적은데, 이는 집중화시설이 실패는 심각한 결과를 초래하지만 분산화시설은 실패를 분산시키는 효과를 주기 때문이다.

3. 분산하수처리 기술

3.1 이용가능한 분산하수처리 시설

On-site 시설의 대표적인 예로 부패조(Septic tank)를 들 수 있으며, 부패조의 유출수는 모래여과를 하거나 토양침윤트렌치로 처리하는 사례가 일반적이다. 이외에도 On-site 및 Cluster 시설로는 UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket), SBR(Sequencing Batch Reactor), ABR(Anaerobic

baffled Reactor), RBC(Rotating Biological Contactor), 산화지(Oxidation Pond), 침윤흐름형 인공습지 및 후처리용 모래여과지 등이 쓰인다.

침윤흐름형 인공습지의 경우 에너지 소비량과 하수처리비용이 아주 낮았는데, 에너지 소비는 일반 하수처리시스템과 비교할 때 15%에 불과하고, 375 L를 처리할 때의 비용은 소규모 하수처리에 많이 쓰이는 SBR과 비교할 때 1/4에 불과하다(U.S. EPA, 2000).

3.2 침윤흐름형 인공습지

인공습지는 물리적, 화학적 그리고 생물학적인 다양한 처리기작을 통해 오염물질을 제거한다. 현탁물질과 병원균은 공극내의 침전과 여과기작에 의해 직접적으로 제거가 되며, 중금속과 인(Phosphorus) 및 용존고형물은 흡착에 의해 제거된다. 미생물의 대사활동으로 유기물질이 제거되고 질산화 및 탈질을 통해 질소성분이 제거된다. 일반하수의 2차 또는 3차 처리, 산화지 유출수, 산업폐수, 탄광폐수, 축산폐수, 침출수 및 강우 유출수 등 여러 종류의 하·폐수처리를 위해 인공습지가 광범위하게 적용되고 있다. 2004년까지 유럽은 약 5,000개 인공습지를 설치하여 운영 중이며, 미국은 1,000개 시설을 운영 중이다(U.S. EPA, 2003).

침윤흐름형인공습지는 BOD₅와 TSS 제거에 효과적이고, 건설비용과 운영관리비가 여타 하·폐수처리 시설에 비해 저렴하여 세계적으로 많이 이용되고 있다. 적절한 부지의 확보가 가능하고 습지 매질을 쉽게 구할 수 있는 지역의 중·소규모 하수처리시설에는 침윤흐름형인공습지가 적합한 처리방법이라 할 수 있다. 수평 및 수직침윤흐름 인공습지를 적절한 조합하여 질소성분의 제거효율을 높이고, 굴패각, Alum sludge 등을 여재로 활용하여 인의 흡착제거 능력을 향상시킨 침윤흐름형 인공습지는 댐 상류지역과 같은 오지의 소규모 하수처리에 적용할 때 큰 장점이 있다. 이렇게 질소 및 인의 제거효율을 높인 침윤흐름형 인공습지는 분산하수처리시스템(Decentralized waste water treatment system)의 일환으로서의 경제적이고 운영관리가 용이한 최적의 하수처리방안이라 할 수 있다.

질소성분의 제거효율을 높이기 위해 수평흐름침윤습지(Horizontal subsurface flow constructed wetland)와 수직흐름침윤습지(Vertical subsurface flow constructed wetland)를 적절히 조합한 복합(hybrid) 습지에 대한 연구가 이루어지고 있다. 유기물과 현탁물질 제거에 효과적인 수평흐름 침윤습지는 무산소(Anoxic)/혐기(Anaerobic) 조건 형성이 어려워 질소성분의 제거효율이 낮지만, 수직흐름침윤습지는 무산소/혐기 조건이 쉽게 형성되어

표 1. 미국 14개 침윤흐름형 인공습지의 하수처리효율

항목	평균 유입수 농도(mg/L)	평균 유출수 농도(mg/L)
BOD ₅	28** (5-51)***	8** (1-15)***
TSS	60 (23-118)	10 (3-23)
TKN as N	15 (5-22)	9 (2-18)
NH ₃ /NH ₄ as N	5 (1-10)	5 (2-10)
NO ₃ as N	9 (1-18)	3 (0.1-13)
TN	20 (9-48)	9 (7-12)
TP	4 (2-6)	2 (0.2-3)
Fecal Coliforms (#/100ml)	270,000 (1,200-1,380,000)	57,000 (10-330,000)

* 평균체류시간 3일 (1-5일) ** 평균 *** 범위 (출처: US EPA, 1993)

질소성분의 제거에 효과적이다. 이러한 장단점을 고려하여 수평흐름침윤습지 후단에 수직흐름침윤습지를 설치하면 두 종류 습지의 장점을 극대화할 수 있다.(Vymazal, 2005).

인공습지의 인 제거효율을 높이기 위해 슬래그(Lee et al., 1997), 지올라이트(Sakadevan and Bavor, 1998), Fly ash(Cheung and Venkitachalam, 2000), alum sludge(Park and Polprasert, 2008)와 굴(Oyster) 패각(Park and Polprasert, 2008)과 같은 인 흡착능(Adsorption Capacity)이 높은 다양한 매질을 적용한 사례도 있다.

이러한 사례의 하나로 인공습지 및 post-filter를 이용한 하수처리, 특히 인의 제거 특성을 연구한 예로, 인공습지시스템을 개발하기 위해 굴 패각 여재가 충전된 인공습지와 post-filter system을 수리학적 체류시간 3.5 일로 240일 동안 운영하였을 때, BOD₅ 제거율 92.7 %, TN 제거율 92.1% 인 99.4 %, TSS 91.6%의 오염물질 제거효율을 보였다(Park and Polprasert, 2008).

4. 결론

분산하수처리시스템은 소규모하수처리시설이 비용측면에서 대규모 시설에 비해 잇점이 있는 경우, 대규모 시설을 설치할 때 그 잇점이 없는 경우 또는 대규모 시설과 비교할 때 그다지 잇점은 없으나 지역적 특성이나 이용가능한 하수처리방법에 있어 더욱 적합할 때 이용가능하다. 이러한 분석은 집중화시설과 상대적인 특성을 갖고 있으며, 재정계획 및 재정 위험도, 공동체와 유역에의 영향, 초기투자 및 운영 관리 비용, 다른 기반시설과의 연속성 측면에서 장점을 갖고 있다.

적절한 부지의 확보가 가능하고 습지 매질을 쉽게 구할 수 있는 지역의 분산하수처리시설로서 침윤흐름형인공습지가 적합한 처리방법이라 할 수 있다. 수

평 및 수직침윤흐름 인공습지를 적절한 조합하여 질소성분의 제거효율을 높이고, 굴패각, Alum sludge 등을 여재로 활용하여 인의 흡착제거 능력을 향상시킨 침윤흐름형 인공습지는 댐 상류지역과 같은 오지의 소규모 하수처리에 적용할 때 큰 장점이 있다. 이렇게 질소 및 인의 제거효율을 높인 침윤흐름형 인공습지는 분산하수처리시스템(Decentralized wastewater treatment system)의 일환으로서의 경제적이고 운영관리가 용이한 최적의 하수처리방안이라 할 수 있다.

참고문헌

1. Behrends, L.L., Bailey, E., Jansen, P., Houke, L., Smith, s., Integrated constructed wetland systems; design, operation, and performance of low-cost decentralized wastewater treatment systems. *Wat. Sci. Tech.*, 55(7), 155-161.
2. Cheung, K.C., Venkitachalam, T.H., (2000). Improving phosphate removal of sand infiltration system using alkaline fly ash. *Chemosphere*, 41:243-249.
3. Gersberg, R.M., B.V. Elkins, S.R. Lyons, C.R. Goldman, (1985). Role of Aquatic Plants in Wastewater Treatment by Artificial Wetlands. *Water Research*, 20:363-367.
4. Lee, S.H., Vigneswaran, S., Moon, H., (1997). Adsorption of phosphorus in saturated media columns. *Sep. Purific. Technol.* 12(2):109-118.
5. Paing, J., Voisin, J., (2005). Vertical flow constructed wetlands for municipal wastewater and septage treatment in

- French rural area. *Wat. Sci. Tech.*, 51(9):145-155.
6. Park W.H., Polprasert C., (2008). Phosphorus adsorption characteristics of oyster shells and alum sludge and their application for nutrient control in constructed wetland system. *Journal of Environmental Science and Health Part A* 43, 17.
 7. Park W.H., Polprasert C., (2008). Roles of oyster shells in an integrated constructed wetland system designed for P removal. *Ecol. Eng.* 34:50-56
 8. Sakadevan, K., Bavor, H.J., (1998). Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water. Res.*, 32, 393-399.
 9. US EPA. (2004). Valuing Decentralized Wastewater Technologies. Prepared by Rocky Mountain Institute.
 10. US EPA. (2003). Draft Handbook for Management of Onsite and Clustered (Decentralized) Wastewater Treatment Systems.
 11. US EPA. (2000). Wastewater Technology Fact Sheet. Wetlands: Subsurface Flow. Office of Water Washington, D.C. EPA 