

농촌 마을하수처리와 자연정화처리 시스템의 적용 - 자연정화 생태습지, 생태계활용 정화기술 -

심수용

한국자연환경보전협회 이사
춘천시 하수시설과 오수관리팀장
이학박사

I. 농촌지역 하수처리 현황

자연정화처리시스템이란, 주로 식물의 수질정화 효과를 이용한 시스템을 말함.

- 식물체에 의한 영양분의 흡수, 물리적 효과 (침전·여과), 부착 미생물의 효과, 정류효과, 질산화 및 탈질 효과, 토양 침투성의 회복 효과 등이 있음.
 - 주로 BOD, SS, 질소, 인 등의 오염물질 제거 및 일상적인 운전·유지 관리 필요 없음.
 - 친환경적 경관 조성 및 생물의 환경 교육 장소로 활용.
- ⇒ 소규모 (하)오수처리(비점오염원) 시스템, 오염된 하천이나 호소의 정화 등에 적용.

1. 마을하수도

농촌 지역의 수질 오염을 초기 단계에 예방하기 위하여 마을 단위로 설치하는 하수도, 1일 하수 처리 능력이 50m³ 이상 500m³ 미만인 공공하수도를 이르는 말이었으나, 2007년 9월 28일에 ‘하수도 법’이 개정되어 시행되면서 소규모 공공하수도라는 용어로 통합되었다.

- 1) Application of rural village sewage treatment and natural purification treatment system
-Ecological wetlands for natural purification, purification technology utilizing ecosystems
- 2) SHIM, Sooyong, Sewage Management Team Manager, Chuncheon City Sewage Facility Division,
E-mail: ssyong67@korea.kr

2. 국내 설치 현황

2012년 현재 전국에 약 1,153개소의 마을하수처리 시설 운용 중이며, 전라남도 333개소로 제일 많았고, 50톤/일 전후 시설이 전체의 55%를 차지한 반면, 300톤/일 이상은 전체 2%에 불과하였다. 또한, 처리공법 중 호기성 미생물을 활용하는 접촉산화법 등의 생물막계열이 전체의 53.7%를 차지하였다.

3. 소규모 하수처리시설 사례

농가단위의 소규모로 설치하여 운용 가능한 국내·외 기술들의 장단점에 대해 문헌 조사한 결과는 (표 1)과 같으며, 대부분 소규모 형식으로 고효율 처리가 가능하지만 운용에 전문지식이 필요하며, 유지관리에 지속적인 비용이 소요되고 초기비용이 컸다.

4. 춘천시(영서북부 대표지역) 소규모 공공하수도 현황

2017년 현재, 춘천시 하수도 보급률은 95%에 달하며, 소규모 공공하수처리시설은 13개 마을에 분산 위치되어 운용 중이었다.

5. 농촌지역 하수발생량 원단위

농촌지역 하수발생량 원단위는 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 조사한 자료를 바탕으로 작성된 소규모하수도사업통합지침(환경부, 2007)에서는 평균 161L/인·일이었다.

6. 소규모 공공하수도 방류수 수질기준

농촌지역 공공하수도의 방류수수질기준은 하수도법 시행규칙(제3조제1항2제1호) 제시, 50m³/일 미만 시설에 대해 방류수 수질기준 완화 조정되었다. (T-N 20 → 40mg/L, T-P 2 → 4mg/L)

〈표 1〉 농촌지역 하수발생량 원단위

| 구분 | 원단위 (ℓ/인·일) | | | 유형별 특징 |
|-------|-------------|-----|-----|----------------------------|
| | 평균 | 하한 | 상한 | |
| 농촌형 | 161 | 150 | 172 | · 임야면적 70%이하· 농업이 주생계수단임 |
| 산촌형 | 149 | 122 | 176 | · 임야면적 70%이상· 밭농업의 비중이 큼 |
| 어촌형 | 162 | 145 | 179 | · 해변인접· 농업과 어업이 병존 |
| 주택단지형 | 190 | 179 | 201 | · 주택단지조성사업· 농업이외 업종 종사자 많음 |

〈표 2〉 농촌지역 공공하수도 방류수 수질기준

| 구분 | 생물화학적 산소요구량 (BOD) (mg/L) | 총유기 탄소량 (TOC) (mg/L) | 부유물질 (SS) (mg/L) | 총질소 (T-N) (mg/L) | 총인 (T-P) (mg/L) | 총대장균 균수 (개/mL) | 생태 독성 (TU) |
|--|--------------------------|----------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------------|
| 1일 하수처리용량 500m ³ 미만 50m ³ 이상 | 10 이하 | 25 이하 | 10 이하 | 20 이하 | 2 이하 | 3,000 이하 | 1 |
| 1일 하수처리용량 50m ³ 미만 | 10 이하 | 25 이하 | 10 이하 | 40 이하 | 4 이하 | | |

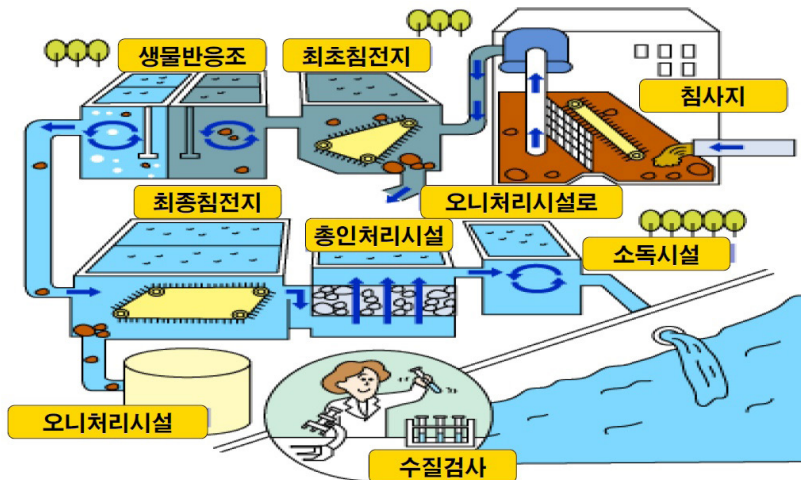
II. 일반적인 도시하수의 처리 방식

1. 일반적인 하수처리 방식 (시스템)

III. 농촌 마을생활하수 처리

1. 개요

건설 및 운영관리비가 저렴하고 경제적이고 환경 및 생태적으로 지속가능하면서 운영관리가 용이



〈그림 1〉 일반적인 하수처리 시스템

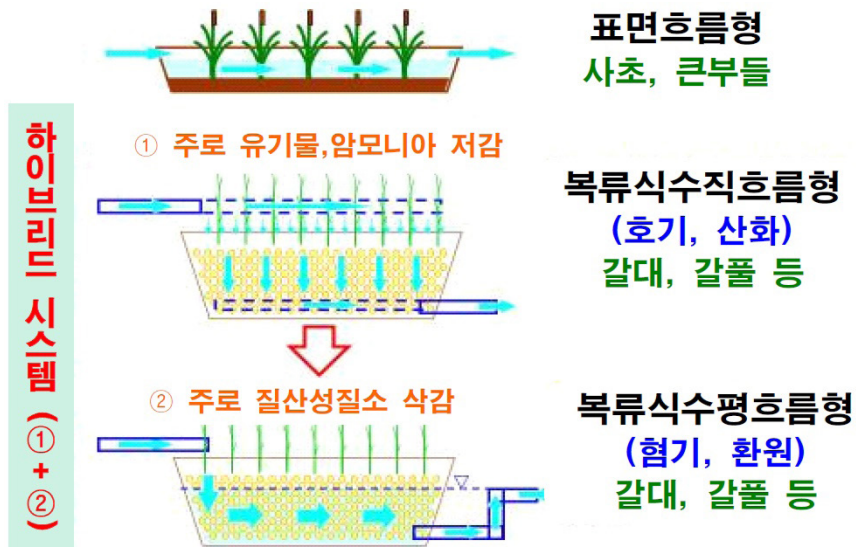
한 분산하수처리시스템(decentralized wastewater treatment system)의 개발을 위해 여러 가지 시도하였으며, 이중에서도 인공습지는 설계와 운영 측면에서 다양성을 가지고 있어 그 관심이 높아지고 있다. 특히, 인구밀도가 낮은 농촌지역에서는 중·소규모 하수처리시설로서 인공습지의 적용은 신뢰할 만하고 현실적인 방안이다.

2. 인공습지 종류

인공습지는 표면흐름형(free water surface) 습지와 지하흐름형(subsurface flow) 습지로 구분되며, 지하흐름형 습지는 물의 흐름에 따라 수평흐름식과 수직흐름식 습지로 구분되었다. 지하흐름형 인공습지는 에너지 소비량과 하수처리비용이 아주 낮는데, 에너지 소비는 일반 하수처리시스템과 비교할 때 15%에 불과하며, 375 L를 처리할 때 비용은 소규모 하수처리에 많이 쓰이는 SBR(Sequencing Batch Reactor)과 비교할 때 1/4에 불과하다.

3. 하수처리 기작

인공습지의 하수처리 효율에 영향을 주는 주요 인자로는 수생식물(Macrophytes)의 종, 습지의 매질, 미생물, 수온 등이 있으며, 물리적, 화학적 그리고 생물학적인 다양한 처리기작을 통해 하수 내



〈그림 2〉 인공습지 하수처리 시스템

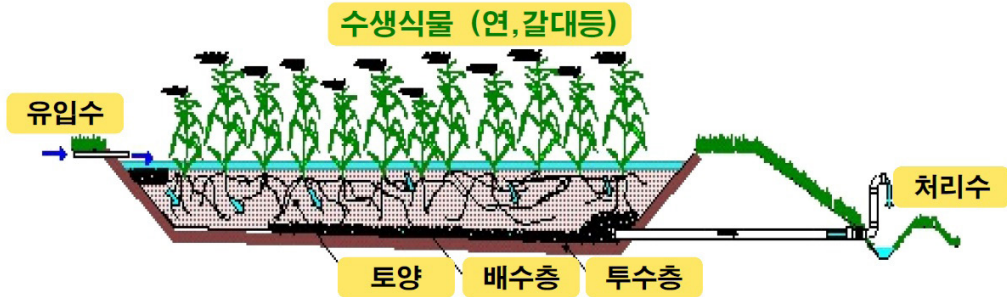
오염물질을 제거한다. 현탁물질과 병원균은 공극내의 침전과 여과기작에 의해 직접적으로 제거가 되며, 중금속과 인(phosphorus) 및 용존고형물은 흡착에 의해 제거. 미생물의 대사활동으로 유기물 질이 제거되고 질산화 및 탈질을 통해 질소성분이 제거된다.

※ 농촌 마을하수처리의 자연정화처리(습지) 방식

- 자연정화 생태습지, Ecological Water Purification Technology (생태계 활용 정화기술), Bio-Eco Engineering (바이오에코 엔지니어링)

4. 국내 · 외 농촌 하수처리의 자연정화처리(습지) 시스템 적용사례

○ (국내 적용사례) 2010년 하수도 통계에서 500 m³/일 미만 시설 중 자연정화공법을 간추려 보면 92개소 정도로 전체 2,591개소 중 3.6%를 차지한다. 이 가운데에서도 수초골재자연정화, 모관침윤트렌치법, 수초이용자연정화법은 2007년 이후 적용되지 않았다.(하수처리시설 설치 및 운영관리



〈일반적 자연정화 처리(습지) 구조〉

〈그림 3〉 일반적인 자연정화처리(습지) 구조

〈표 3〉 자연정화처리의 수질정화 효과

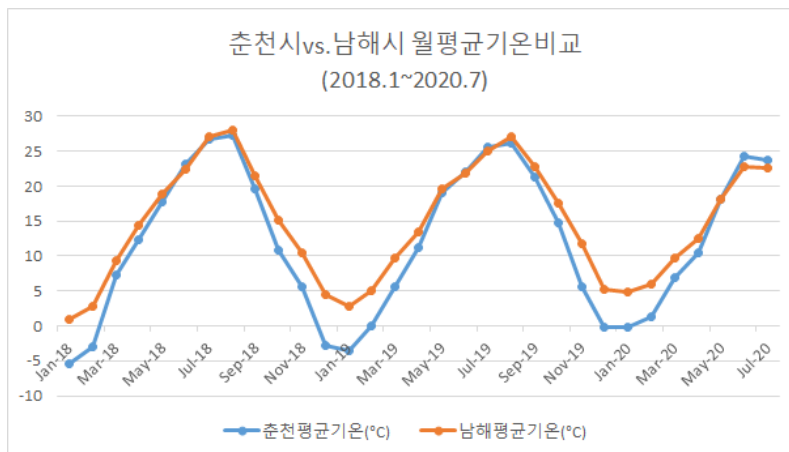
| 효과의 분류 | 식생의 수질정화 효과의 개요 |
|-------------|--|
| 영양염의 흡수효과 | 식물 체내에 질소·인이 흡수되는 효과 |
| 침전·여과효과 촉진 | 현탁 성분이 식물체에 접촉 침전·여과가 촉진되는 효과 |
| 부착미생물의 효과 | 식물의 뿌리·줄기 등에 미생물 부착되어 유기물 분해 효과 |
| 정류효과 | 식물의 존재로 유입수의 체류 시간 길어지는 효과. |
| 질소의 산화·탈질효과 | 갈대 등의 抽水(추수) 식물은 통기 조직에 의한 하부 줄기로의 산소 운반 능력 가지기 때문에 토양중 질산화·탈질 촉진 |
| 토양침투성 회복효과 | 미세한 SS나 생물막 등에 의해 토양 표면에 막힘이 일어나기 쉽고, 갈대를 이용한 경우에는 통기 조직을 가진 뿌리줄기의 고사나 토양으로부터 새싹의 발아에 의해 토양의 투수성이 회복 |

선진화방안 연구보고서, 환경부 2010). 따라서 이들을 제외하면 SNR(무동력자연친화공법 포함)이 69개소이고, 모관침윤트렌치법이 13개이며, 나머지 대부분은 5개소 미만으로 SNR이 대부분을 차지 한다. 지역별로 SNR은 경남에 35개소, 전남에 20개소, 전북에 6개소가 설치되었다.

인공습지와 같은 자연정화 처리공법은 장기적인 운전과 고농도의 하수처리로 인하여 공극폐쇄 우려가 있으며, 그로 인한 처리효율과 처리량이 감소될 수 있으며, 또한 과도하게 축적된 오염물질은 식물에 많은 부하를 유발시키므로 심할 경우 고사하는 등의 문제점으로 처리효과를 크게 감소시킬 수 있다. 그러므로, 적절한 처리효율을 얻기 위해 많은 부지 면적을 사용하기 때문에 처리효율 증가에는 한계를 보이게 된다.

특히, 계절변화가 뚜렷한 지역의 경우 동절기에는 식물로 인한 정화처리효율은 급격하게 저하된다. 우리나라 남부지방은 경기도나 강원도 등의 북부지방에 비해 겨울철에도 기후적으로 온화하여 습지가 갖고 있는 생물정화 처리능력이 양호하기 때문에 경상남도과 전라남도 등의 여러 지자체에서 소규모 부락 중심의 농촌 마을의 하수처리 및 비점오염원을 처리하기 위하여 친환경적인 인공습지(식물정화+여재흡착; 표면흐름형+지하흐름형)를 조성하여 다수 운영 중에 있다.

농촌 하수처리시설 인공습지가 다수 설치되어 운영 중인 경상남도 남해시와 강원도 춘천시의 2018년 1월부터 2020년 7월까지의 월평균 기온 분포를 아래 그림에 보여주고 있다. 이 기간동안 월평균 기온은 남해시 14.7℃, 춘천시 12.0℃였고, 월평균 최고기온은 남해시 25.4℃, 춘천시 24.6℃로 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 월평균 최저기온은 남해시 5.0℃, 춘천시 -0.11℃ 차이



〈그림 4〉 춘천시와 남해시의 월평균기온 비교 (2018.1~2020.7.)

를 보였고, 동절기(11월~4월) 월평균 기온은 남해시 -2.5°C , 춘천시 -9.6°C 로 큰 차이를 보였으며, 이 기간동안 가장 낮은 기온은 남해시가 -9.9°C 인 반면, 춘천시는 -21.6°C 를 보였다. 이러한 결과, 동절기시 춘천 지역의 기온은 계속 영하권으로 내려가 있고 가끔씩 매우 낮은 기온($-10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 이하)으로 떨어지기 때문에 인공습지의 주요한 정화처리 요인인 수생식물의 생장은 휴면기에 들어가므로 처리효율 감소와 더불어 오염물질을 축적시키게 된다.

또한, 식물체를 제거해 주는 등의 유지관리가 필요하며, 모기 등 해충 발생으로 인한 주민들의 보건 및 건강 문제가 발생될 가능성이 있다.

※ 국내 습지방식에 따른 주요 적용사례

〈자연습지 형태〉

- 개인하수처리시설 ⇒ 생태자연습지 ⇒ 마을 도랑 ⇒ 인근 하천 또는 호수
- 충남 아산시 궁평리, 가내3리, 죽산1리 등

〈인공습지 형태〉

- 집 ⇒ 하수관거 ⇒ SNR/KN-NEW공법 ⇒ 마을 도랑 ⇒ 인근 하천 또는 호수
- 경남 남해군 갈화마을, 경남 사천시 원전마을, 경남 고성군 내외곡마을, 공주시

○ (국외 적용사례) 국외의 경우, 일반하수의 2차 또는 3차 처리, 산화지(Oxidation-stabilization pond) 유출수, 산업폐수, 탄광폐수, 축산폐수, 침출수 및 강우 유출수 등 여러 종류의 하, 폐수처리를 위해 인공습지가 광범위하게 적용되었다. 2004년까지 유럽은 약 5,000개 인공습지를 설치하여 운영 중이며, 미국은 1,000개 시설을 운영 중이다. 일본은 각 현마다 환경조건에 맞는 형태로 수십 개의 시설을 운영 중이다.

※ 일본에서의 인공습지 적용사례

- 집 ⇒ 개인하수처리시설 ⇒ EWP(물정화기술) ⇒ 마을 도랑 ⇒ 인근 하천
- 일본 이시카와, 시즈오카, 니가타, 토치키현, 이바라키현, 치바현 등

○ (지하흐름형 인공습지 특징) 지하흐름형 인공습지는 BOD_5 와 TSS 제거에 효과적이고, 건설비용과 운영관리비가 여타 하·폐수처리시설에 비해 저렴하여 세계적으로 많이 이용되고 있다. 표면흐름형 인공습지와 비교하여 여러 가지 장점이 있는데, 1) 수면이 매질 표층 이하로 유지되는 경우 넘

새 발생과 모기와 같은 해충 발생이 감소되며, 2) 표면흐름형 인공습지에 비해 이용 가능한 비표면적이 넓어 같은 하수를 처리할 때의 처리속도가 크고, 3) 수온이 낮은 겨울철에도 수면이 매질 아래로 유지되고, 표층의 식물 사체 등에 의해 보온이 유지되어 표면흐름형에 비해 하수처리 효율면에서 수온에 덜 민감하다.

○ (지하흐름형 인공습지의 하수처리 효과) 지하흐름형 인공습지의 처리효율은 아래 표와 같으며, 유기물과 부유물질의 제거는 우수하나, 인공습지를 이용한 인 제거는 다른 오염물질 제거에 비해 효과적이지 않은 것으로 보고되고 있다. 인공습지의 인 제거효율을 높이기 위해 슬래그, 제올라이트, Fly ash, alum sludge와 굴(oyster) 패각과 같은 인 흡착능(adsorption capacity)이 높은 다양한 여재를 적용하였다. 분변성 대장균(fecal coliform)의 경우 일반적인 경우 1 내지 2 log 분변성 대장균의 제거효율을 보이는데, 이는 보통 >200/100 mL의 방류수수질기준을 만족시키지 못하기 때문에 추가적인 처리가 필요하다. 유럽의 경우 대장균의 제거효율을 높이기 위해 완속여과지를 습지 후단에 설치 사례가 있다.

〈표 4〉 미국 14개 지하흐름형 인공습지의 하수처리 결과

| 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) |
| T-N | 20(9-48) | 9(7-12) |
| T-P | 4(2-6) | 2(0.2-3) |
| Fecal Coliforms(#/100mL) | 270,000(1,200-1,380,000) | 57,000(10-330,000) |

*평균, **범위 / 평균체류시간 3일

〈표 5〉 프랑스 20개 인공습지 시스템의 하수처리 효율

| 구분 | TSS(mg/L) | BOD(mg/L) | COD(mg/L) | T-N(mg/L) | T-P(mg/L) |
|--|------------------|------------------|----------------|----------------|-----------------|
| 1 st stage-vertical reed bed | 94% (86-99) | 94% (87-99) | 88% (80-97) | 69% (44-84) | 31% (-14-78) |
| 2 nd stage-vertical sand filter | 59% (0-93) | 77% (41-97) | 52% (10-76) | 78% (16-92) | 5% (-39-34) |
| 1 st + 2 nd stage | 96% (90-99.6) | 98% (97-99.7) | 92% (82-98) | 91% (66-98) | 43% (9-76) |

IV. 농촌 마을하수도의 문제점

- 1) 일부 공법에 편중된 처리방법 선정
- 2) 농촌 실정에 적합한 소규모 처리공법 연구개발성과 미흡
- 3) 자치단체 담당 공무원의 전문지식과 주민의식 부족
- 4) 능력이 부족한 시공업체 난립에 따른 조기부실화 위험성
- 5) 전문관리자 부족
- 6) 비효율적 운전
- 7) 유지관리비용 소요

V. 농촌 마을하수도의 개선방안

- 1) 사업지원 규모의 확대와 집중지원
- 2) 안정적인 투자재원의 확보
- 3) 농촌 실정에 적합한 소규모 하수처리시설의 개발·보급
- 4) 전문기관에 의한 체계적 관리
- 5) 자연정화 방식의 적극적 도입
- 6) 처리수의 농업적 재이용

VI. 자연정화처리 시스템의 장점 및 단점

- 1) 장점
 - 식물, 수생생물, 토양미생물 등 자연친화적인 자정능력 활용
 - 일반하수처리시설 대비 높은 경제성
 - 시공비 : 자연 습지형 (약 10% ~ 20%) / 인공 습지형 (약 80%)
 - 슬러지처리비용 및 유지관리 비용 최소 : 약 10% ~ 30%
 - 기계 및 전기설비가 거의 없어서 소음발생 없고, 전문인력 필요없음
 - 시민 생태학습장 활용 및 주변경관 향상으로 인한 부가가치 상승
- 2) 단점

- 비교적 많은 부지면적 소요
- 고농도 하수나 대규모 시설에 부적합
- 하절기 홍수 및 동절기 혹한으로 인한 처리효율 저하
- 유입유량의 불균일화로 인한 처리 불량
- 하절기시 악취발생 및 모기 등 해충 발생으로 위생 및 보건상 문제
- 계절별 상이한 환경조건 때문에 상시 일정한 정화 효과 기대 어려움
- 슬러지 등의 퇴적에 따른 영양염 용출, 식생 기반재 막힘 등으로 효율 저하

참고문헌

- 농어촌지역 하수도정비 종합계획(10-15); 환경부 생활하수과; 2009. 12.
- 농업용수 수질개선공법 매뉴얼; 한국농어촌공사; 2006.
- 농촌지역 오수의 자원순환형 영양염류 저감시스템 개발 (I); 한국농어촌공사; 2003.12.
- 바이오에코기술을 활용한 유역 수환경 회복과 새로운 전개(Kai-Qin XU); 일본국립환경연구소 심포지움 2018 “물로부터 생각할 수 있는 환경의 현재”; 2018. 6. 22.
- 분산하수처리시스템(Decentralized Wastewater Treatment System)을 위한 인공습지 하·폐수처리의 국내외 기술동향; 박우하. 한국수자원공사; 2009.
- 생태계 활용 물 정화 기술 "EWP"(일본국토교통성 신기술정보시스템 등록 : HR-990104-A); (주) FUJITA,
- 소규모 오수발생지역의 고도처리시설을 위한 상·하 흐름형 인공습지 개발; 김형중, 윤충경, 권태영, 정광욱; 한국농공학회논문집 제48권 제6호, 2006.
- 소규모 하수 자연정화공법 연구(NIER-RP2012-155); 국립환경연구원; 2012.
- 소규모 하수처리시설에 의한 농촌지역 환경개선연구; 국립농업과학원; 2012. 2.
- 식생정화시설계획의 기술자료; 일본하천환경총합연구소; 2007. 12.
- 에너지 절약형 폐수 처리 방법으로 복류식 인공습지 여과 시스템; 土つくりとエコ農業, 2012. 1., Vol.44(1), NO.506, pp.63~68.
- 자연생태적하수처리공법(KN-NEWS); (주)자연과환경.
- 춘천시 통계; 춘천시; 2018.
- 친환경인공습지 수질정화기술(SNR공법); (주)성일엔텍.
- 2017년 자연정화생태습지조성계획 추진계획; 아산시 환경보전과; 2017. 5.
- 環境儀(일본국립환경연구소 연구정보지); 일본국립환경연구소; 2003. 1.