

1. 서론

하수재이용이란 하수처리수를 유용하게 활용하는 것을 말한다. 하수재이용은 하수를 이용목적에 맞게 재처리하여 쓰는 것으로 하수처리장 방류수를 직접재이용하는 경우가 아니다. 하수재이용의 사례는 주로 농업용수, 공업용수, 하천유지용수, 기타 청소용수를 포함한 잡용수 등으로 비식용수가 대부분이다. 최근 미국, 호주 등에서는 하수재처리수를 지하수 충전 후 취수하여 비식용용수로 쓰고 있다.

하수재이용의 역사는 로마시대로부터 비롯되지만 체계적인 재이용이 이루어진 것은 19세기 이후이다. 1865년 영국에서 도시하수를 농경지나 초지로 끌어들여 토지를 이용한 하수처리 방식을 도입한 이후 유럽과 미국 등에서 미처리하



박승우 | 서울대학교
지역시스템공학부 교수
(swpark@snu.ac.kr)



장태일 | 서울대학교
농업생명과학연구원 선임연구원
(uriduri7@snu.ac.kr)

안전한 하수재처리수의 농업용수 이용기술

수를 농경지에 보내 재이용하는 방식이 일반화 된다(WHO, 1989). 그러나 도시의 규모가 커지고, 상수도 공급이 늘어 하수의 양이 크게 증가하여 토지 처리(land treatment)만으로는 하수처리가 어렵게 되어 본격적인 하수처리기술이 적용되기 시작한다. 미처리하수로 인하여 콜레라 등 수인성전염병이 창궐을 겪은 이후 1960년대부터는 하수재이용을 위한 수처리 공정과 수질기준 등을 정비하게 되어 오늘에 이르게 된다(Asano and Levine, 1996). 현재는 수자원이 풍부한 일부 지역을 제외한 여러 나라에서 하수재이용이 보편화되고 있다.

우리나라의 재이용률은 2000년 2.9%에서 2006년 말 현재 연간 하수처리량(64억 m³)의 7.7%인 4.9억 m³만이 재이용되고 있다(환경부, 2007). 우리나라는 2005년부터 하수재이용을 정책적으로 추진해오고 있으나, 미국 플로리다 52%(’01년), 캘리포니아 10%(’02년), 이스라엘 10%, 쿠웨이트 15% 등에 비하여 아직 미흡한 상황이다(환경부, 2007).

이와 같은 재이용률이 낮은 원인은 그간 하수처리수의 재처리의 필요성이 인식되지 못하였고, 하수재이용에 대한 심미적인 저항감 등도 작용하는 것으로 보인다. 현재 우리나라의 경우, 지자체 중심으로 환경부 재이용사업에 참여하고 있으나 하천유지용수 중심으로 사업신청이 이루어지고 있는 실정이다.

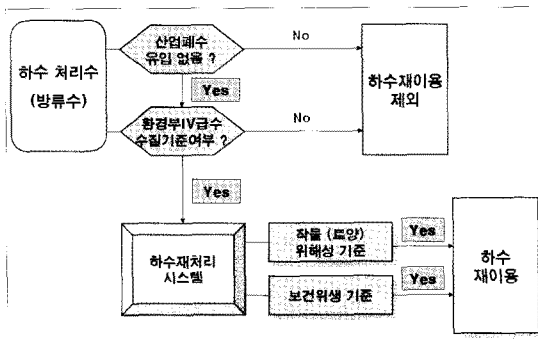
수자원 프론티어 사업단 4-5-3 과제는 <하수처리수의 농업용수 재이용시스템 통합기술 적용(이하 ‘농업용수재이용 연구’)>(서울대, 2004; 2007; 2009)를 연구하고 있다. 이 자료에서는 본 연구의 내용과 성과 등을 중심으로 안전한 하수재처리수의 농업용수 이용에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 농업용수 하수재이용의 조건

하수처리수는 연간 일정한 수준의 방류량을 가지고 있어 안정적인 수량을 확보할 수 있고, 하천에 비하여 수온의 변

동성(10 ~ 26℃)이 작으며, 비료성분인 질소와 인을 함유하여 농업용수로 재이용하기에 유리한 조건을 갖추고 있다. 반면, 중금속이나 환경호르몬, 잔류 미생물이나 병원성 바이러스 등을 포함할 우려가 있고, 지역에 따라서는 높은 염분 농도를 보이는 경우도 있다. 일반적으로 생활하수는 99% 이상의 물과 0.1% 정도의 부유물질로 구성되며, 산업폐수가 유입되지 않는 경우 하수처리장 방류수 중 유해성분이 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

안정적인 하수처리수의 농업용수 재이용을 위해서는 <그림 1>과 같은 '4 Yes 1 Plus' 조건을 만족하여야 한다.



(그림 1) 농업용수 재이용 <4 Yes 1 Plus> 조건

- (생활하수 처리수 - Yes) 재이용 대상의 하수처리장은 산업폐수 처리수 등이 유입되지 않거나 분리된 처리공정 확보
- (방류수질 IV급수 기준 - Yes) 하수처리장 방류수질은 하천수질등급 IV급수 만족
- (작물위해성 기준 - Yes) 재처리 방류수 수질은 염도 및 기타 작물위해성 기준 만족
- (보건위생 기준 - Yes) 재처리 방류수 수질은 작물종류 및 관개방식 등에 따른 보건위생 기준 만족
- (하수재처리시스템 - Plus) 재이용 수질기준을 충족시키기 위한 재처리 시스템 확보

3. 농업용수 재이용과 수질기준

하수처리수의 재이용을 위해서는 하수처리수의 재처리기술, 재처리수의 이용기술, 하수재이용에 따른 공중보건위생 문제를 극복하기 위한 환경관리기술 등이 사전에 확보되어야 하며, 이를 현장에 적용할 수 있는 기술이 필요하다.

이 연구과제의 목표는 하수처리수를 안전하고 지속가능한 농업용수로 재이용하기 위한 기술의 개발과 적용에 있다.

<표 1>은 농업용수재이용과 관련한 주요 연구 분야를 정리한 것이며, <그림 2>는 대상지구 전경을 보여주고 있다.

(표 1) 농업용수 하수재이용 연구체계

연구분야	비고
재처리기술	여과, 소독, 저류 등의 재이용 요소기술
재배관리기술	사비 및 병충해 관리
생육시험	포트 및 포장 단위의 현장시험을 통한 생육환경영향 조사
수질환경	포장 및 구역 단위의 수문·수질 환경영향평가
생태환경	지표생물을 이용한 생태환경 조사
환경독성	환경호르몬 등 유해물질에 따른 환경영향 평가
공중보건	주민의향, 위해성 평가, 환경 모델링 등
재이용수질 기준	적용 가능한 농업용수 재이용수질권고기준(안) 고시
경제성	안전하고 경제적인 재이용시스템의 설계



(그림 2) 병점 시험포장 및 재이용사업지구(경기도 화성시 소재)

하수처리수 농업용수 재이용은 하수처리수를 재처리하여 이용하는 것으로, 그 방식에 따라 직접하수재이용과 간접하수재이용으로 구분된다. 직접하수재이용은 하수처리장의 기존 수처리공정에 추가하여 재이용 목적에 따라 재처리공정을 설치하여 하수처리수를 직접 재이용하는 방식이며, 간접하수재이용은 하수처리장의 방류수를 그 하류구간에서 취수 이용함으로써 하수처리수를 간접적으로 재이용하는 것을 말한다.

3.1 직접재이용

직접하수재이용의 경우, 환경부의 재이용촉진시범사업에서 추진되고 있으며, 재이용량 1만 m³ 이상으로 고도처리공정을 갖는 하수처리장을 대상으로 농업용수, 공업용수, 하

천유지용수, 기타 등 4개 분야 사업으로 구성되어 있다. 전남 강진지구에서 연간 5,000 m³을 농업용수로 재이용하는 등 2007년 말 현재 5개 지구가 추가되어 지금까지 총 18개 지구가 용수재이용사업지구로 선정되었다.

3.2 간접재이용

간접하수재이용의 경우, 취수지점의 수질조건 및 수량기준에 따라 적절한 재처리 공정이 필요하며, 농업용수의 이용에 따른 공중보건상의 안전성 확보, 관개용수의 공급이 원활하도록 하는 기능을 가져야한다. 2007년 현재 전국 47개 지구에 재이용량 연간 약 1.2억 m³이 적절한 재처리 공정 없이 농업용수 등으로 활용되고 있어 건전하고 지속적인 농업을 위하여 간접재이용시스템의 적극적인 도입과 활용이 필요할 것으로 보인다.

3.3 농업용수 하수재이용 수질기준

본 연구에서는 안전하고 지속가능한 농업용수 하수재이용을 위하여 수질기준을 마련하였다. <표 2>는 농업용수재이용 연구의 성과를 주요 수질항목에 대하여 정리한 것이며, 작물 및 관개방식의 제한, 하천 및 호소수질환경 기준, 작물 및 토양 위생성 기준, 그리고 공중보건위생 기준을 따르고 있다. 여기서, 작물의 구분은 재배방식, 섭생방식에 따라 엽채류와 같이 공중에 노출위험이 높은 경우를 “A등급”, 논벼와 같이 넓은 지역에 관개하는 작물을 “B등급”, 공업용으로 활용하거나 고열에서 요리하는 작물 등을 “C등급”으로 나누고 있다.

<표 2> 농업용수 재이용 수질기준 권고안(시안)

수질 항목	단위	하수처리장 방류수 수질 기준	하천, 호소 수질기준 (M급수) ¹⁾	농업용수 수질 기준 (관개용수)		재이용수질기준(시안)		
				국내	외국	아채용수 (A등급)	논 용수 (B등급)	밭용수 (C등급)
부유물(SS)	mg/L	10~30	100(15)	100	100	30	100	100
생물학적 산소 요구량 (BOD)		10~30	8	5~8	8	8	8	10
전기전도도 (EC)	μS/cm	-			300	700	1,200	1,200
대장균	개/mL	3,000				2,2 이하	30	1,000

1) 하천수질기준은 SS 100mg/L 이하, 호소수질기준은 SS 15mg/L 이하임.

4. 농업용수재이용 연구결과

4.1 주요 연구결과

<표 3>은 농업용수재이용연구의 주요 성과를 요약한 것이며, 하수처리수 재이용시스템 개발 및 농업용수 재이용을 위한 수질기준 제시 등의 실적을 얻고 있다. 작물의 생육과 수확량, 성분분석, 그리고 보건위생 위험도 평가 등을 통하여 쌀의 안전성에 대하여 평가한 결과 양호 또는 우수한 것으로 나타났으며, 수질, 토양, 생태 환경영향 평가를 통하여 재이용에 의한 환경 문제에 대해서도 검토하였다.

<표 3> 재이용 연구결과 요약

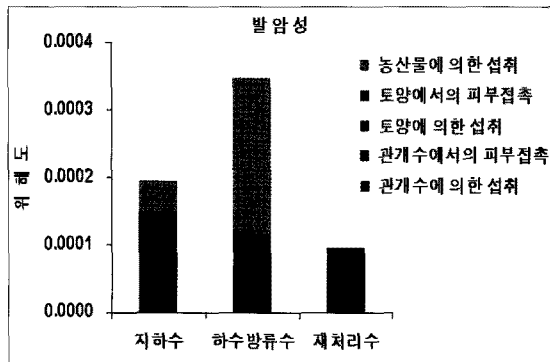
구분	연구결과					비고
	니쁨		보통		우수	
	1	2	3	4	5	
작물생육 및 수확량				■		18% 증수, 병충해 없음
벼 중금속 성분			■			모범재배구와 유사
밥맛(식미)				■		일반미와 고급미의 중간 수준
토양 환경	■					초기 집적되나 이후 양호
수질 환경				■		수질개선 (T-N: 40~80%)
생태 환경			■			종다양성 및 분포 관행지구와 유사
농작물 재배기술				■		표준시비량 50% 저감효과

4.2 하수재이용 위생성 평가

지금까지 농업용수의 하수재이용은 심미적 저항감과 함께

하수처리수 안전성에 대한 인식 부족으로 어려움이 있는 것이 사실이다. 이에 본 연구에서는 다양한 형태의 위해성 평가를 실시하였다. 일반적으로 위해성 평가는 미생물 등의 조사대상 물질에 대한 위험성 확인(hazard identification), 노출을 정량화 하는 노출 평가(exposure assessment), 질병발생의 관계를 규명하는 용량-반응 평가(dose-response assessment), 그리고 규명된 모델을 활용한 위험도 결정(risk characterization)의 네 단계를 통해 수행된다.

미생물에 대한 위해성 평가 결과, 영농 초기에 높은 위해성을 보여주고 있으나, 재처리를 한 재이용수의 경우는 문제가 없는 것으로 나타났다. 또한 독성 증급속에 대한 위해성 평가에서는 영농 작업자 및 소비자 모두에게서 기준치 이하의 위해도를 보여 안전한 수준인 것으로 나타났다. <그림 3>은 그 중 독성 증급속에 의한 발암성 위해도 평가 결과이며, 재처리수의 경우 지하수보다 낮은 값을 보여주고 있다.



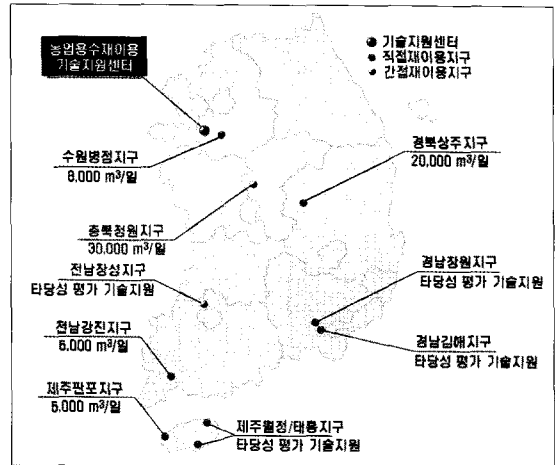
(그림 3) 독성 증급속 위해성 평가

5. 하수재이용 시스템의 적용

하수재이용의 실용화 사업을 위하여 그림 2와 같이 경기도 화성시 병점지구에 농업용수재이용시범사업을 통해 적용성을 확인한 바 있다. 하수재이용은 높은 적용성과 함께 환경피해를 최소화하는 방안의 모색과 안전성의 확보를 위한 방안 등이 연구되고 있다. 또한 이 연구에서는 농업용수재이용 시스템을 하수처리장 방류수질에 맞추어 탄력적으로 제시하고 있으며, 대부분의 생활하수 고도처리 방류수의 경우 병

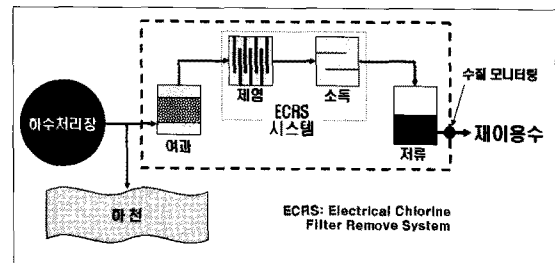
원성 대장균의 관리가 주요 과제이므로, 이에 적합한 재이용 시스템을 권고하고 있다.

최근 <그림 4>와 같이 많은 지자체에서 농업용수재이용 사업에 대한 문의가 이루어지고 있다. 2009년 현재, 경남 창원과 김해, 전남 장성, 그리고 제주 월정지구에 대한 재이용 타당성 기술지원이 '농업용수재이용 기술지원센터'를 통해 이루어지고 있다.



(그림 4) 농업용수 재이용 기술적용 사례

대표적인 재이용사업지구인 제주 판포지구는 제주시 한경면 일원에 위치하고 총 사업기간은 2008년부터 2009년까지이며, 일 5,000 m³의 하수처리수를 농업용수로 재이용하도록 하고 있다. 이 재이용 사업에는 <그림 5>와 같이 하수처리수 재이용시스템과 제주 특성상 높은 염분 농도를 고려한 염분제거시설, 그리고 송수관로 및 저류조 등이 포함되어 있다.



(그림 5) 제주도 농업용수재이용 시스템 모식도

재이용사업은 어떤 형식의 재이용시스템이 수질기준을 충족시키고, 보건위생위험성이 없고, 수확물의 소비자 인증이 가능한지를 면밀히 검토하고, 각각의 경제성과 장단점을 비

교하고 검토하여 최적의 시스템을 구성하여 적용하는 것이 바람직할 것이다.

6. 결론

수자원의 지속가능성을 높이기 위한 이상적인 수자원 개발은 바로 지표수나 지하수와 같은 전통적인 수자원이 아닌 재순환·재이용, 빗물이용, 염수담수화 등 대체수자원에 의한 수자원 개발을 말한다(김승, 2008). 생활하수를 제대로 처리하여 농업용수로 재이용하는 일은 향후 가뭄과 같은 물부족에 대비할 수 있을 뿐만 아니라 앞서 언급한 바와 같이 하천이나 호소의 수질개선에 도움이 되는 등 친환경적인 지속가능한 개발에도 기여하게 될 것이다.

최근 제주도를 비롯하여 창원, 김해, 장성 등의 지자체에서는 농업용수재이용 사업을 계획 및 추진하고 있으나, 재이용에 대한 심미적 저항감, 소비자의 친환경농산물 선호도 등 여러 가지 현실적 제약으로 어려움을 겪고 있다. 전남 강진 및 제주 판포지구의 재이용사업은 안전성 및 공공성의 이해와 홍보, 그리고 주민참여 등 일련의 과정을 통하여 재이용 사업 활성화에 좋은 선례가 되고 있다.

조상들의 지혜로운 농사법에는 문전옥답(門前沃灌)이 있었다. 마을사람들이 집에서 쓰고 버린 허드렛물을 논으로 흘러 보내어 벼농사에 쓰고, 음식물 등 소위 생활하수는 비료 성분이 되어 흙을 거름지게 하며, 이 물은 논에서 정화되어 하천으로 흘러가니 산천의 물은 항상 깨끗하였다. “농업용수 재이용기술”은 문전옥답이라고 하는 우리 조상들의 생활 속의 과학을 지금에 이르러 다시 실현하는 일이다. ●

참고문헌

- 김승(2008), 기후변화와 수자원 안정적 확보방안. 워터저널, <http://www.waterjournal.co.kr/news/print.php?idxno=7262>.
- 서울대(2004), 대체용수 활용기반 기술개발(과제번호 4-5-1), 수자원의 지속적 확보기술개발 사업.
- 서울대(2007), 하수처리수의 농업용수 재이용 시스템 개발(과제번호 4-5-2), 수자원의 지속적 확보기술개발 사업.
- 서울대(2009), 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 통합기술 적용(과제번호 4-5-3), 수자원의 지속적 확보기술개발 사업.
- 환경부(2007), 하수처리수 재이용 가이드 북, 환경부 환경관리공단.
- Asano, T. and Levine, A. D.(1996), Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present and future, *Wat. Sci. Tech.* 33(10-11), pp. 1-14.
- WHO(1989), Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture.