

대체용수 활용 기반 기술개발 연구소개

“하수처리수 재이용을 위한 벼 재배시험”



박 승 우

서울대학교 생물자원공학부 교수

“생활하수로 농사를 짓는다”

1. “조상의 지혜로운 농사기술” - 문전옥답(門前沃畝)

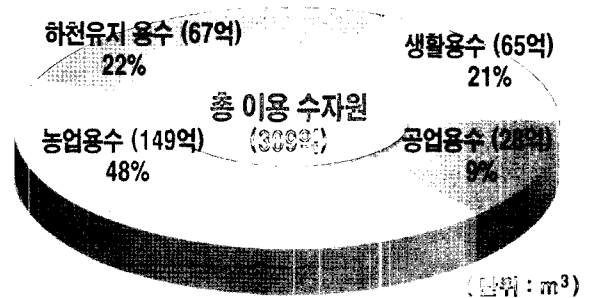
우리 조상들은 소위 문전옥답을 논의 으뜸으로 생각했다. 문전옥답이란 집앞(門前) 가까이에 있는 기름진 논(沃畝)을 말한다. 문전옥답은 집에서 쓰고 버린 물을 논에 대어 줌으로서 허드렛물의 영양분을 벼가 자라는 데 이용하여 논이 기름지고, 논에서 쓰고 하천으로 흘러나가는 물은 논에서 정화되어 하천환경 개선에도 기여한다.



2. 농사짓는 물, 얼마나 쓰고 있나?

우리나라에서 농사에 쓰고 있는 농업용수는 전체 수자원 이용량의 48%에 해당하는 연간 149억 m³이다. 이는 생활용수와 공

업용수를 합한 93억 m³의 1.6배나 되는 양이다. 농업용수가 공급되는 논을 수리답이라 하며, 전체 논의 3/4 정도를 차지한다. 심한 가뭄이 발생하면 전체 논의 2/3는 물 부족을 겪게 된다. 최근 기상이변으로 인해 극심한 가뭄이 이전보다 자주 발생하고 있으며, 수자원의 부족으로 인한 피해가 해마다 증가하고 있다. 이를 해결하기 위하여 새로운 농업용수를 개발하는 것이 필요하지만, 새로운 수자원의 개발은 많은 비용과 환경문제 등으로 인한 사회적 갈등으로 어려움에 직면해있다.



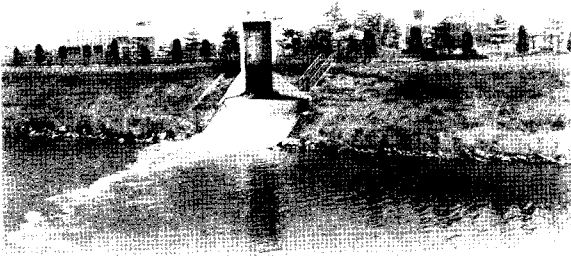
3. 왜 생활하수를 재이용해야 하나?

새로운 수자원의 요구에 대한 해답은 우리 조상의 지혜에서 찾을 수 있다. 생활하수로 버려지는 물의 양은 연간 47억 m³으로 농업용수로 쓰는 물의 1/3에 해당하는 많은 양이며, 하수처리장에서 흘러나가는 생활하수로 인한 하천 수질관리 또한 문제다. 생활하수를 농사에 이용한다면 벼농사에도 도움이 되고, 하천수

같이 농촌 환경에 직접적인 영향을 미치는 경우에는 WHO 기준 보다 엄격한 재이용 수질기준을 적용하여야 한다. 현재 우리나라의 하수처리장 방류수 수질은 이러한 재이용 기준에 미치지 못하며, 추가적인 수처리 기법이 도입되어야 할 것이다.

나. 하수재이용으로 농작물 시험재배를 한다.

생활하수로 농사를 짓게 되면 그렇지 않는 경우보다 작물이 잘 자라고 수확량이 늘며, 병해충이 발생하지 않고 바람에 잘 쓰러지지 않는 등 농작물 재배에 유리해야 한다. 그렇지 않으면 재이용 기술에 제약이 따르게 된다. 지난 2년간의 연구결과, 하수처리장의 물을 농업용수로 이용할 경우 지하수를 쓰는 경우보다 25%까지 쌀 수확량이 늘었으며, 병해충이나 도복 등의 피해가 나타나지 않았다. 이는 생활하수 중에 포함된 비료성분 (질소, 인산 등)이 벼 생육에 도움을 주기 때문이며, 수온도 적합하여 농업용수로 쓰기에 유리하기 때문이다.



질관리에도 도움이 될 수 있다. 하수처리장에서 나오는 물은 연중 거의 일정하여 가뭄이 심한 경우에도 충분한 수량이 확보된다.

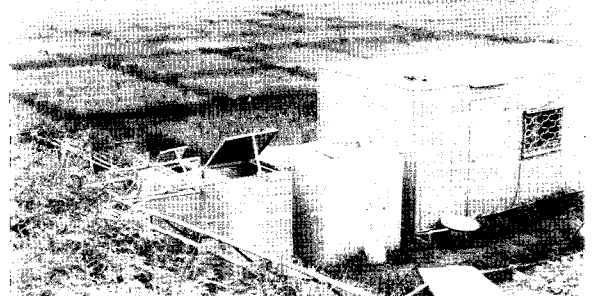
4. 지금까지 생활하수를 농사에 쓰지 않은 이유는?

미국, 일본, 프랑스, 이스라엘 등 세계 60개국에서는 생활하수를 농업용수로 재이용하고 있으나, 아직 우리나라에서는 생활하수를 재이용하지 않고 있다. 이는 생활하수 재이용에 대한 충분한 기술적 검토를 토대로 한 재이용에 대한 법적, 제도적 기준이 마련되지 않았기 때문이다.

5. 생활하수 재이용을 위해 해결해야 할 문제는 어떤 것이 있나?

가. 엄격한 재이용 수질기준을 마련한다.

생활하수를 재이용하려면 이용목적에 맞는 수질 목표를 설정하고 이를 만족하도록 수질을 관리하는 것이 중요하다. 세계보건기구 (WHO)에서는 생활하수를 농업용수로 재이용할 경우, 농작물의 종류에 따른 재이용 수질기준을 제안하고 있다. 논농사와



다. 하수재이용에 따른 영농기술(비료사용량)을 개발한다.

생활하수 중에는 질소, 인산과 같이 벼 생육에 도움을 주는 유



효 비료성분이 많이 포함되어 있다. 하수재이용에서는 저수지나 하천, 지하수로부터 물을 공급하는 경우보다 더 많은 양의 비료 성분이 공급되므로, 작물재배에 필요한 비료사용량을 줄여야 한다.

지금까지 연구결과에 따르면 생활하수 재이용의 경우, 비료를 50% 정도 줄이더라도 관행농법과 차이가 없는 수확량을 얻을 수 있는 것으로 조사되었다. 농약을 사용하는 데도 논물 중에서 쉽게 분해되는 등 큰 장애가 없는 것으로 나타났다.

라. 하수재이용이 환경에 미치는 영향을 분석한다.

생활하수의 재이용으로 인해 논물이나 토양, 그리고 하천수질 등 환경에 미치는 악영향이 없어야 할 것이다. 생활하수를 재이용하여 논에 공급하면 논에서 흡수, 정화되어 하천으로 흘러가므로, 하수처리장에서 직접 하천으로 방류하는 경우보다 하천 수질이 개선된다. 논 토양에는 재배기간 중에 비료성분함량이 증가하나 수확 후 집적되는 수준이 높지 않은 것으로 조사되었다. 포트 시험 결과 토양 중에 미량의 염분 집적이 관찰되어 장기간 생활하수를 이용할 경우 염분농도가 높아질 수 있으므로 이에 대한 대책이 필요할 것으로 나타났다.



6. 하수재이용을 통한 대체용수는 1.5억 m³에 달한다.

생활하수를 농업용수로 재이용할 수 있는 대상지역은 하수처리장이 농경지 부근에 위치하고, 이미 쓰고 있는 농업수자원이 부족하거나 가뭄과 같이 비상시에 물을 끌어다 써야 하는 농경지 등이 해당한다. 전국의 하수처리장을 대상으로 농업용수로 재이용 가능한 수자원량을 조사한 결과, 대략 연간 1.5억 m³에 이를 것으로 나타났다.

7. 대체용수 활용 기반 기술개발

“대체용수 활용 기반 기술개발” 연구과제는 “수자원의 지속적 확보 기술 개발 사업”의 세부과제로 2001년 10월부터 시작되었다. 본 과제는 현재 1단계 3년의 연구기간이 종료되었으며, 2단계 연구가 진행 중에 있다. 본 연구는 농업용수 재이용에 따른 작물 생육과 수확량, 환경영향, 보건위생 위험도 등의 농업용수 재이용 기술을 개발하고, 이에 따른 하수재처리 요소기술 개발과 농업용수 재이용 활용 시스템을 개발하는데 그 목적이 있다. 본 연구의 추진 체계는 다음 그림과 같다.



마. 하수재이용에 따른 보건위생 문제를 검토한다.

생활하수 재이용에서 가장 중요한 문제는 농사를 짓는 농민들의 건강에 나쁜 영향을 미치지 않아야 하고, 쌀이나 식품 등이 농산물 소비자의 건강에 해롭지 않아야 한다. 지난 2년간의 연구결과, 재이용 수질기준을 지킬 경우 농작업 중 인체에 해로운 일이 생기지 않고, 피부질환 등 어떠한 장애도 없는 것으로 나타났다. 특히 농작물 중에 인체 유해성분이 검출되지 않았으며, 중금속 집적도 나타나지 않아 보건위생상 전혀 해가 없는 것으로 나타났다.

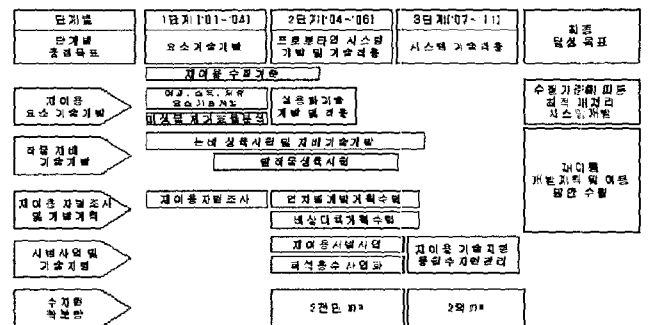


그림 1 연구 추진 체계

“하수처리수 재이용을 위한 벼 재배시험”

1. 하수처리수 재이용을 위한 벼 재배시험 개요

하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 생육, 수분, 수질, 보건 위생 등에 미치는 영향을 분석하기 위하여 하수처리수를 이용한 농작물 생육시험을 통한 현장 적용실험이 요구된다. 이를 위해 하수처리장 인근에 농경지가 있어 재배시험이 가능하며, 접근거리가 짧아 실험이 용이한 수원시 하수처리장을 선정하여 인접한 논에 시험포장을 조성하여, 하수처리수의 처리수준에 따른 논재배 영향을 분석하였다.

경기도 화성시 태안읍 진안리에 위치한 수원시 하수처리장은 수원시 전역에서 발생하는 생활하수를 4개 하천(수원천, 서호천, 황구지천, 원천천)의 차집 관개를 통하여 하수처리장으로 유입토록 되어 있으며, 유입된 하수는 각 처리 공정을 거쳐 황구지

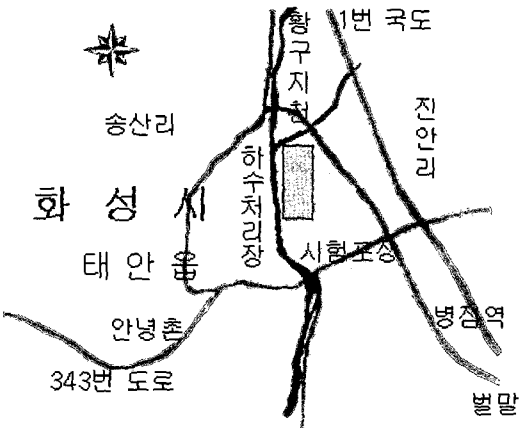


그림 1 수원시 하수처리장, 시험포장 위치



그림 2 수원시 하수처리장 방류수 전경

표 1 수원시 하수처리장 배출수 수질 현황, 배출수 수질 기준

구분		BOD	COD	SS	TN	TP
		(mg/L)				
2001	최대	14.7	13.4	11.1	23.1	1.91
	최소	7.5	8.4	5.7	16.6	1.17
	평균	11.7	11.0	8.4	21.0	1.54
2002	최대	16.5	13.8	12.4	25.5	1.85
	최소	9.5	8.4	6.0	16.2	0.91
	평균	13.2	11.8	8.3	19.1	1.52
2003	최대	13.9	12.5	12.4	29.0	2.10
	최소	11.2	9.9	6.6	12.7	1.40
	평균	12.8	11.4	9.2	22.5	1.63
배출수 수질기준		<20	<40	<20	<60	<8

천으로 최종 방류되어 서해 아산만으로 유입하게 된다. 2003년까지 수원시 하수처리장의 처리용량은 하루 22만 톤이었으며, 이후 처리시설용량이 추가, 증설되어 2004년 현재 하루 52만 톤을 처리하고 있다. 표 1은 수원시 하수처리장의 2001년부터 2003년까지의 배출수 수질 현황을 하수처리장 배출수 수질 기준과 비교하여 보여주고 있다. 현재 하수처리장 배출수는 농업용수 수질기준에 비해 높은 수질을 보이고 있어 농업용수로 재이용을 하기 위해 적절한 재처리가 요구된다.

2. 시험포장

가. 시험포장 실험설계

하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 시험구의 설계는 지하수 관개구인 대조구와 하수처리장 방류수를 이용하는 4개의 처리구로 구성하였다. 하수처리수의 재이용 작물재배시험을 위한 관개용수는 1) 지하수 (TP#1), 2) 황구지천의 하천수를 직접 양수하는 관행 관개수 (TP#2), 3) 하수처리장 방류 직접 지점에서의 방류수 (TP#3), 4) 하수처리장 방류수의 완속모래여과수 (TP#4), 5) 완속모래여과 후 UV살균처리수 (TP#5) 등의 5가지 처리수를 이용하여 이루어졌다 (표 2).

하수처리수의 공급에 따른 시험포장의 논벼의 시험배치법은 이원분류 (two-way classification) 방식인 난괴법 (randomized complete block design)을 적용하였다. 난괴법은 각 집구 (block)마다 모든 처리가 배치되는 것으로서 집구간 차이는 커지지만 집구 내에서는 차이가 균일하게 되어 집구간 변이가 실험 오차에 영향을 끼치지 않도록 하는 시험배치법이다. 본 연구에서는 하수 재이용 방법별 5처리, 6반복으로 조성하여 총 30개 시

험포장으로 구성하였고, 시험구의 배치는 난수배치법을 적용하였다. 다음의 그림 3은 실험설계에 따라 구성된 시험구 배치와

관개시설 설계 도면을 보여주고 있다.

나. 시험포장 조성

하수처리수의 재이용 처리수준별 논벼 재배시험을 위하여 수원시 하수처리장에 인접한 700여 평의 농지를 확보하여 시험포장 배치 설계도에 따라 시험포장을 조성하였다. 시험포장은 관배수시설, 각각의 처리시설 및 저류수조, 펌프, 유량계, 전기시설, 배전판, 자동작동스위치, 관리사무소 등으로 구성되어 있다. 다음의 그림 4는 시험포장의 위치와 배치도를 보여주고 있으며, 그림 5는 시험포장의 전경을 보여주고 있다.

다. 논벼 생육시험

논벼 생육시험의 공시품종은 수원지방에서 널리 재배되는 심추청으로 하였으며, 5월 말 인력 이양후 작물시험장의 표준영농법을 적용하여 재배 및 물관리를 실시하였고, 병해충 구제 등 필

표 2 시험포장 관개용수의 처리내용 및 수준

구 분	처리내용 및 수준	비 고
처리 1 - TP #1	• 지하수를 이용한 관개구(관행방식)	대비구
처리 2 - TP #2	• 현재 이용중인 농업용수를 이용하는 경우(병점양수장)	생활오수 등으로 오염이 심한 하천수
처리 3 - TP #3	• 하수종말처리장 방류수를 직접 이용하는 경우 • 1차처리수로서 별도의 수처리 없음	
처리 4 - TP #4	• 하수방류수를 완속모래여과 처리 • sand filtering	
처리 5 - TP #5	• 하수방류수 완속모래여과 후 살균처리 • UV살균법 적용	

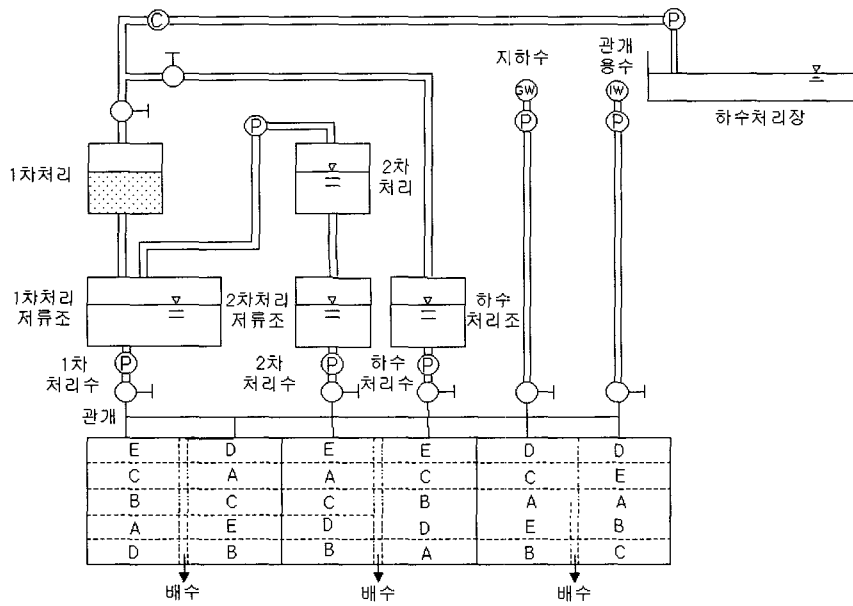


그림 3 시험포장 배치 설계도

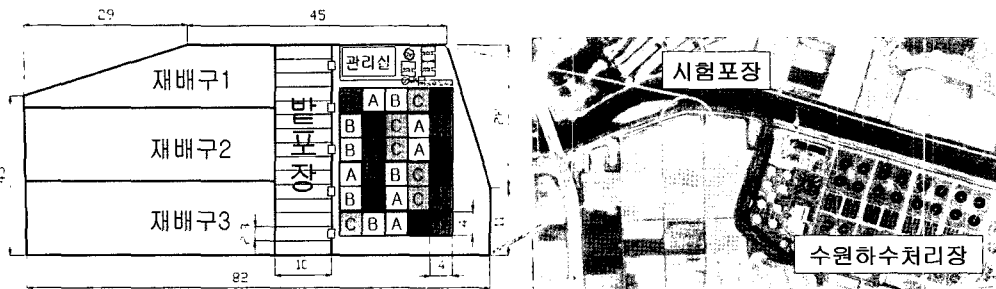
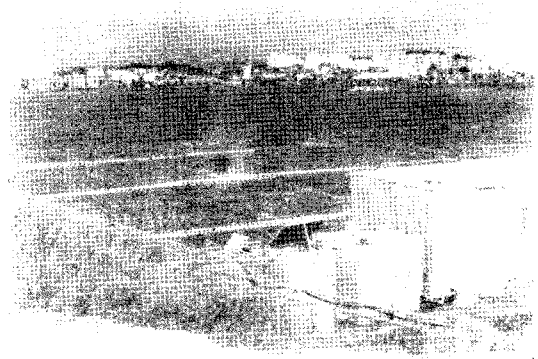
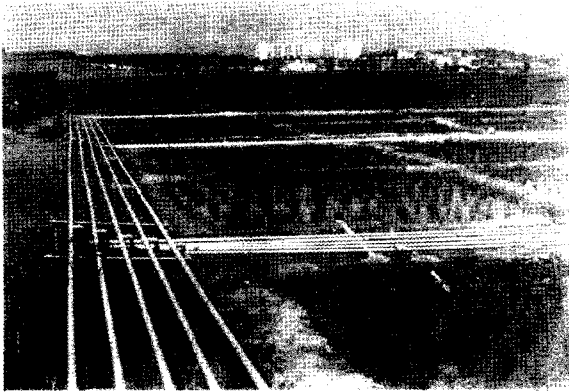


그림 4 시험포장의 위치와 배치도



(2002년 6월 7일)



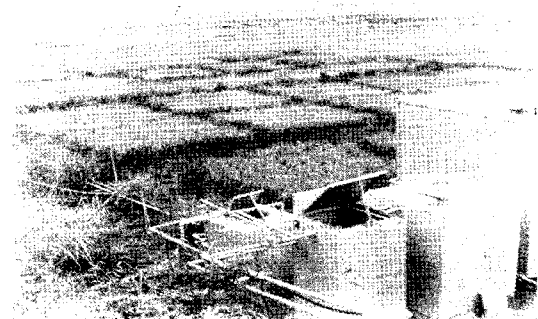
(2002년 8월 2일)

그림 5 시험포장 전경

요한 경우 농약살포를 시행하였다. 다음의 그림 6은 2002년 시기별 논벼 생육시험 전경을 보여주고 있다.

논벼 재배시험에서 생육조사는 생육시기별 초장, 분얼수, 건물중 등을 조사하였고, 수확후에 수량관련 구성요소와 수확량 등을 조사하였으며, 현미와 수도체의 이화학적 특성을 고찰하도록 하였다.

하수 재이용에 따른 환경과 보건위생 등에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 시험포장의 하수처리수준별 수질 및 토양 오염과 보건위생 등에 영향을 미치는 대장균, 그리고 농산물의 성분이나 부산물 중에 이상 물질의 검출여부 등을 조사하였다.

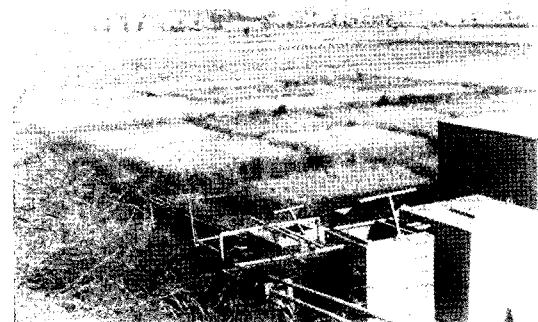


(2002년 9월 5일)

3. 논벼 생육시험 결과

가. 논벼 수확량

하수재이용을 위한 논 재배시험의 수량 및 수확량 특성은 수량 구성요소인, 단위면적당 이삭수 (panicle number per unit area, PU), 이삭당 영화수 (mean of spikelet number per panicle, MS), 천립중 (thousand grain weight, TW), 그리고 등숙률 (percentage of ripened grains, PG)을 조사하였고, 식물체 길이를 나타내는 간장 (clum length, CL), 이삭의



(2002년 10월 9일)

그림 6 시기별 논벼 생육시험 전경

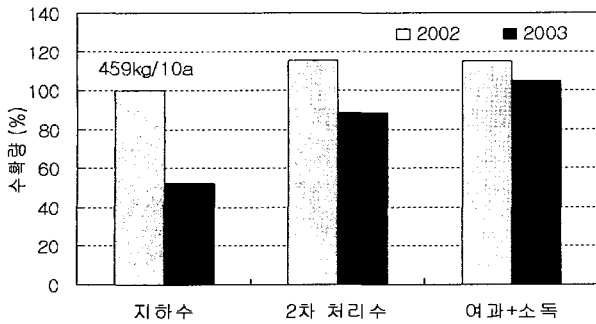


그림 7 하수처리수 재이용 처리구별 수확량 비교

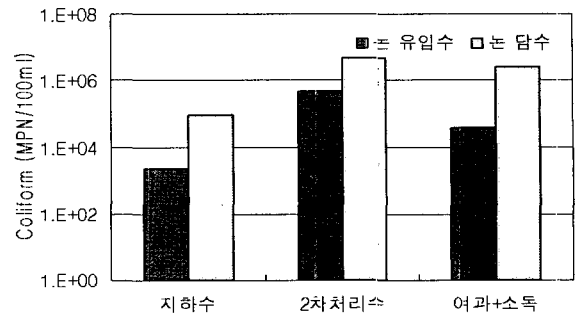


그림 8 하수처리수 재이용 처리구별 대장균군수

길이를 나타내는 수장 (panicle length, PL)과 수확량 (yields, YD)을 조사하였다.

지하수를 관개한 포장의 수확량과 비교할 때, 생활하수를 재이용하여 재배한 포장의 벼 수확량은 2002년은 15%, 2003년은 80% 정도 증수하여, 평균 43% 높은 수확량을 보였다.

나. 수질환경에 미치는 영향

처리구별 논 담수 수질의 변화는 처리구별 유입관개수질의 영향을 반영하는 것으로 나타났으며, 그 경향은 유입관개수질의 변화와 유사하게 나타났다. 하수재이용 논물 중 영양물질의 함량은 지하수를 관개한 경우보다 높게 나타났으며, 지하수를 이용할 경우 관개수보다 논에서 흘러나오는 수질이 나쁜 것으로 조사되었다. 하수재이용 재배의 경우 논 수질 정화작용으로 62%(2003년)~68%(2002년) 정도 수질개선효과가 있는 것으로 조사되었다.

표 3 하수처리수 재이용 처리수준별 수질 분석 결과

구 분		총질소(mg/kg)		수질개선효율 (%)
		논 유입수	논 담수	
2002년	지하수	2.68	3.18	-19
	여과+소독	16.88	5.43	68
2003년	지하수	0.46	0.95	-106
	여과+소독	17.05	6.40	62

다. 대장균수에 미치는 영향

하수재이용 논물 중에 잔류하는 지표 미생물 (대장균)은 지하수를 이용하는 경우보다 10배 정도 높은 농도를 보이며, 관개수보다 논물 중에서 높은 것은 미생물의 광회복에 의한 것이다. 하수재이용소독 처리 효율을 개선할 경우 광회복은 거의 없는 것으로

조사되었다.

라. 토양환경에 미치는 영향

하수처리수 재이용에 따른 처리구별 토양특성을 분석하기 위하여, 이양전과 수확후 각각의 처리구 및 인근 관행 논 포장의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 중금속, 그리고 양이온 등을 분석하였다. 분석 결과 논 재배 전후의 토양의 EC 변화는 지하수 관개수를 이용한 처리구에서는 감소하였으나, 오염된 관행 관개수를 처리구와 하수처리수 처리구에서 증가한 것으로 나타났다. 총질소는 논 재배 이전보다 수확후의 값이 모든 처리구에 대하여 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 유기물 역시 증가한 것으로 나타났다. 중금속과 양이온 등에서는 뚜렷한 경향을 보이지는 않았지만, 나트륨의 경우에는 논 재배 후에 모든 처리구에서 증가하는 것으로 나타났다.

표 4 시험포장 처리수준별 토양 분석 결과

구 분		총질소(mg/kg)		총 인(mg/kg)	
		재배전	재배후	재배전	재배후
2002년	지하수	148.3	1,652	73.8	411
	여과+소독	148.3	1,400	73.8	352
2003년	지하수	1,380	1,386	219	301
	여과+소독	1,284	1,429	248	320

마. 현미 및 수도체 화학적 특성

하수처리수의 재이용 재배시험의 수확물인 현미와 수도체를 대상으로 영양물질 함량과 중금속 등의 유해성분을 조사하였다. 현미와 수도체의 총인은 일반적인 경향을 보이고 있으며, 총질소 함량은 기준은 설정되어 있지는 않지만 일반적인 현미의 함량인

6,000~9,000mg/kg 보다 모든 처리구에서 높게 나타나는 경향을 보였다. 양이온의 함량은 일반적인 경향보다 다소 낮게 나타나고 있으며, 중금속은 전체적으로 문제가 되는 항목은 없는 것으로 나타났다. 국내와 일본의 조사 결과의 값과 비교했을 때,

비소(As), 카드뮴(Cd) 등에서의 함량이 다소 높게 나타났다. 현미의 중금속 함량은 토양의 특성과 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 위에 상술한 본 연구의 결과는 지역적 특성을 반영한다고 볼 수 있다.