

하수처리수의 재이용을 위한 벼 재배시험

Rice Cultivation with Reclaimed Wastewater Irrigation for Wastewater Reuse

강 문 성* · 박 승 우** · 김 상 민*** · 성 충 현***

Kang, Moon Seong · Park, Seung Woo · Kim, Sang Min · Seong, Chung Hyun

Abstract

The objective of the research is to develop agricultural reuse technologies of reclaiming the effluents from a municipal wastewater treatment plant and reusing for irrigated rice paddies. The Suwon wastewater treatment plant was selected for wastewater reuse tests. The control was the plots with groundwater irrigation (TR#1), the treatment (TR#2) using polluted stream water as it was, and three others using wastewater after treatment. Three levels of wastewater treatments were employed: the effluent from the wastewater treatment plant (TR#3), sand filtering after treatment plant (TR#4), and ultra-violet treatment after sand filtering (TR#5). The randomized block method was applied to wastewater application to paddy rice with five treatments and six replica. The effects of various wastewater treatment levels on water quality, paddy soil, crop growth, yields, and the health hazards were investigated. The primary results indicate that cultivating rice with reclaimed wastewater irrigation did not cause a problem to adverse effects on crop growth and yields. Overall, wastewater could be used as a practical alternative measure for reclaimed wastewater irrigation. However, long-term monitoring is recommended on the effects on soil chemical characteristics and its related health concerns.

Keywords : Wastewater reuse, Cultivating rice, Rice paddy, Water quality, Soil, Yields

I. 서 론

우리나라의 연간 하수발생량은 87.7억 m^3 으로 이중 49.5억 m^3 의 하수처리용량을 보유하고 있다 (국무조정실, 2000). 1999년말 현재 하수종말처리 시설의 연 유입하수량은 54.5억 m^3 이었다. 그러나, 하수처리장 방류량은 현재까지 별도의 목적으로 이용되지 않고 하천으로 유입되고 있다.

이러한 생활하수는 수자원의 지속적 확보 측면에

* 미국 Auburn 대학교 박사후과정
** 서울대학교 농공학과
*** 서울대학교 대학원
* Corresponding author. Tel.: +1-334-887-7571
Fax: +1-334-844-3549
E-mail address: kms1225@empal.com

서 많은 국가나 지역에서 하수재이용에 대한 관심과 노력이 계속되고 있다. 하수재이용은 부족한 수자원의 보충, 하천의 건천화 방지, 용수이용효율의 제고 등의 효과 이외에도 농경지에 비료성분의 공급, 양어양식의 영양분 공급 등을 기대할 수 있다. 반면에 처리수의 이용에 따른 비용 문제, 보건위생상의 위협, 주민들의 정서적 저항과 반대 등 경제사회, 문화적 측면에서 선행되어야 할 과제가 많은 것도 사실이다.

생활하수 방류량은 계절별로 변동이 크지 않다. 4, 5월과 같이, 농업용수 수요량이 집중되고, 하천유량이 작은 전기에는 가뭄의 극복을 위한 생활하수의 재활용에 대한 잠재적 수요가 높다. 다만, 농업용수로서 활용을 위한 전제조건으로 수질기준과의 관계, 농작물의 생육과 수확량에 미치는 영향, 병해충 문제 등 작물과의 관계와 토양환경 및 비점오염 부하량과의 관계 등 환경적 영향 등에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 특히, 농업용수의 재이용에서는 농민과 대중의 보건 위생상의 문제 등에 대한 충분한 고려가 이루어져야 한다 (USEPA, 1992).

재이용수의 활용 분야는 그 목적에 따라 중수도, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수 등으로 다양하다. Scott 등 (2000)은 연구문헌조사에서 112개 국가에서 하수 재이용에 관련한 연구결과가 발견된다고 하였다. 실제로 물부족을 겪는 많은 국가에서는 하수 재이용을 주요한 수자원으로 간주하고, 다양한 형태의 이용방법을 채택하고 있다.

Bahri (1998, 2000)는 농업용수 재이용을 위해 멕시코에서 포장시험을 수행하였고, 농업용수 재이용에서 관개를 위한 적절한 저류시설과 배분 및 응용기술의 개발이 필요하다고 보고한 바 있다. Liberti and Notarnicola (1999)는 남 이태리의 West Bari 지역에서 농업용수 재이용수 수질기준의 적합성을 검토하였고, Mathan (1994)는 인도의 무처리 생활하수를 15년간 관개에 이용한 포장시험 결과 토양조직의 개선이 관찰되었다고 발표하

였다. Gupta 등 (1998)은 인도의 다른 지역에서 15년간의 포장시험결과, 하수를 이용한 관개에서 토양의 비옥도의 개선과 유기탄소 함량이 증가된 반면, 중금속은 위험 수준이하로 유지되었다는 결과를 발표한 바 있다. 또한, 멕시코시에서는 하수 이용을 위한 시험에서 하수의 채소류와 과수 적용을 금하고 대신에 옥수수와 알팔파를 주요 작목으로 재배하고 있다 (Scott et al., 2000).

우리 나라에서는 극히 제한된 범위의 하수 재이용 기술이 활용되고 있다. 건설부 (1992)는 우리나라 하수재이용과 관련하여 수질기준을 제시하였다. 여기서는 수세식 변기 세척수, 살수용수, 조경용수 등의 수질기준을 포함한다. 2000년 현재 중수도 이용량은 연간 약 2억 m^3 정도로 추정되고 있다. 그밖에도, 하수처리수의 농업용수나 하천유지용수로의 활용을 위한 시도를 하고 있다. 일부 지자체에서 하수처리수를 농사에 이용하도록 하고 있으나, 아직 재이용의 수질기준조차도 마련되지 못한 실정에서 개인적인 취수이용으로 제한되고 있다.

이와 같이 하수의 농업용수 재이용은 기술적, 경제적, 환경적 측면에서 활용가능성이 높음에도 불구하고, 수질기준의 미비와 농업용수로의 활용을 위한 기반기술의 부족으로 인하여 실현되지 못하고 있는 것이 현실이다.

본 연구에서는 하수의 농업용수재이용의 타당성을 제고하기 위하여, 하수처리장을 선정하여 시험포장을 조성하고, 각 처리구에 따른 벼 재배시험을 통하여 수질, 토양 특성, 수량관련 특성, 그리고 수확한 현미와 벼의 이화학적 특성 등을 평가함으로써, 하수의 농업용수 재이용의 활용을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 하수처리장 선정

하수의 농업용수 재이용의 타당성을 제시하기 위

한 벼 재배시험은 현재 가동중인 하수종말처리장의 방류수를 처리 이용하는 방안이 마련되어야 할 것이다. 또한, 인접한 지점에 양질의 농지를 확보할 수 있어야 하는 등 일정한 조건을 충족해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 경기도 일원의 후보지를 대상으로 현장답사를 실시하고, 인접한 지점에 시험포장의 구성이 가능한 수원시 환경사업소 하수처리장을 선정하였다.

수원시 하수처리장의 2001년도 방류수의 연평균 BOD는 11.7 mg/L로서 방류수 수질기준(20 mg/L 이하)은 만족시키나 환경부하천수질기준인 V 등급(10 mg/L 이하)을 충족하지는 못하는 것으로 나타났다. 영양물질인 총질소와 총인의 연평균 농도는 각각 21.03과 1.54 mg/L로 나타났으며, 부유물 농도는 평균 8.4 mg/L로서 외관적으로는 맑은 상태를 보인다.

2. 실험설계 및 시험포장 조성

가. 실험설계 방법

농업용수 재이용을 위한 시험구의 설계는 지하수 관개구인 대조구와 하수처리장 방류수를 이용하는 4개의 처리구로 구성하였다. 즉, 작물생육시험을 위한 하수재이용처리수는 1) 지하수 (TR#1), 2) 황구지천의 하천수를 직접 양수하는 관행 관개수 (TR#2), 3) 하수처리장 방류 직전 지점에서의 방류수 (TR#3), 4) 하수처리장 방류수의 완속모래여과수 (TR#4), 5) 완속모래여과 후 UV살균처리수 (TR#5) 등으로 구성하였다. Table 1은 시험포장 실험설계의 처리방법과 수준을 나타내고 있다.

하수 재이용수의 공급에 따른 논벼의 시험배치법은 이원분류 (two-way classification) 방식인 난괴법 (randomized complete block design)을 적용하였다. 난괴법은 각 블록 (block)마다 모든 처리가 배치되는 것으로서 블록간 차이는 커지지만 집구 내에서는 차이가 균일하게 되어 블록간 변이가 실험오차에 영향을 끼치지 않도록 하는 시험배

Table 1 The treatments of wastewater reuse experiment

Item	Treatments
TP #1 (A)	Groundwater irrigation (control)
TP #2 (B)	Polluted stream flow by pumping
TP #3 (C)	Effluent from the wastewater plant
TP #4 (D)	Effluent after sand filtering
TP #5 (E)	Effluent after sand filtering and UV treatment

치법이다 (Chae et al., 1991).

본 연구에서는 하수 재이용 방법별 5처리, 6반복으로 조성하여 총 30개 시험포장으로 구성하였고, 각 시험포장의 면적은 16 m² (4 m × 4 m)이며, 시험구의 배치는 난수배치법을 적용하였다.

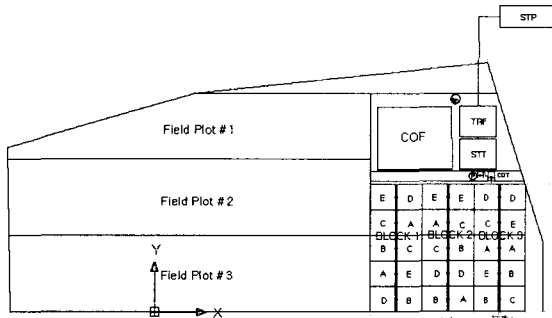
나. 시험포장 조성

하수처리수의 재이용 처리수준별 논벼 재배시험을 위하여 대상 하수처리장 부근의 농지를 확보하여 시험포장을 조성하였다. 시험포장은 경기도 화성시 태안읍 진안리 소재의 700평 규모의 논이다. 시험포장은 Block 실험설계 방법에 준하여 30개 시험구를 조성하였으며, 3개의 관행 재배구를 배치하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 시험포장의 설계도면과 관배수시설의 계획도면을 보여주고 있다. 시험포장은 관배수시설, 각각의 처리시설 및 저류수조, 펌프, 유량계, 전기시설, 배전판, 자동작동스위치, 관리사무소 등으로 구성되어 있다.

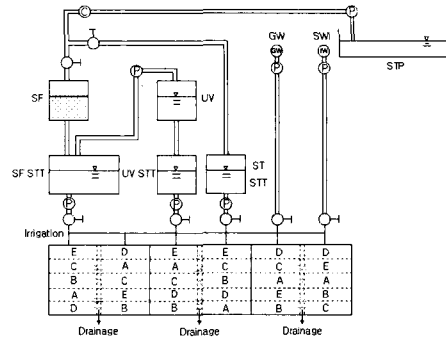
3. 논벼 생육시험

논벼 생육시험의 공시품종은 수원지방에서 널리 재배되는 심추청으로 하였으며, 5월 24일에 인력 이앙을 실시하였다. 재배 및 물관리 방법 등은 작물시험장의 표준영농법을 적용하도록 하고, 병해충 구제 등 필요한 경우는 추가적인 농약살포를 시행하였다.



STP; Suwon wastewater treatment plant,
COF; control office, TRF; treatment facilities,
STT; storage tank, CDT; collective drain tank

Fig. 1 The schematic of pilot system



GW; groundwater,
SWI; stream water for irrigation,
SF; sand filtering

Fig. 2 Schematic diagram of irrigation facilities

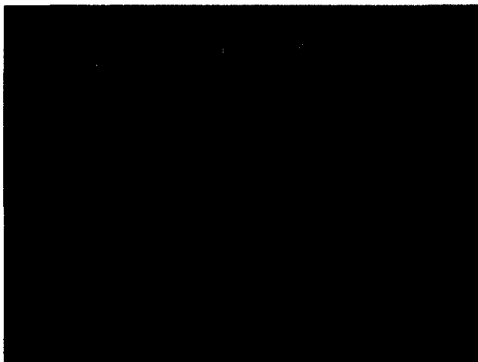


Fig. 3 Layout of study area for wastewater reuse experiment

논벼 재배시험에서 생육조사는 생육시기별 초장, 분얼수, 건물중 등을 조사하였고, 수확후에 수확관련 구성요소와 수확량 등을 조사하였으며, 현미와 수도체의 이화학적 특성을 고찰하도록 하였다. Fig. 3은 조성된 시험포장에서의 생육시험 전경을 보여주고 있다.

4. 수질, 토양, 식물체 분석 방법

하수 재이용에 따른 환경과 보건위생 등에 미치

는 영향을 분석하기 위하여, 시험포장의 하수처리 수준별 수질 및 토양 오염과 보건위생 등에 영향을 미치는 대장균, 그리고 농산물의 성분이나 부산물 중에 이상 물질의 검출여부 등을 조사하였다.

따라서 본 연구에서는 하수 재이용 처리수준에 따른 논벼의 재배시험에 따른 환경과 보건위생을 평가하기 위하여 월별로 수질, 토양 등을 샘플링하여 분석하였고, 수확후 현미와 벼에 대한 이화학적 특성을 분석하였다. Table 2는 수질, 토양, 식물체 구성요소에 따른 분석 항목과 방법을 나타내고 있다.

Table 2 Methods of chemical analysis for waters, soils and plants

Item	Water ¹⁾	Soil ²⁾	Plant ¹⁾
pH	Erectrometric glass electrode method (TOA HM-20S)	Erectrometric glass electrode method (TOA HM-20S)	-
EC	EC-meter (Orion 840)	EC-meter (Orion 840)	-
TN	Kjeldahl method	Kjeldahl method	Kjeldahl method
TP	Ascorbic acid reduction method	Vanadate-Molybdate method	Molybdenum blue method
COD	KMnO ₄ ocidation method		KMnO ₄ ocidation method
Cations, Heavy metals	Coupled plasma Shimadzu ICPS-7500	Coupled plasma Shimadzu ICPS-7500	Coupled plasma Shimadzu ICPS-7500
Organic matter	-	Walkley-black method	-

1) Chapman H. D. and P. F. Pratt. 1961, 2) Klute A.. 1986.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 수질 특성

하수처리수의 논 관개용수 재이용을 위한 수질 및 미생물 특성을 평가하기 위하여 5개의 처리구별 관개 유입수 (influent)와 30개 시험포장의 담수 수질을 월별로 샘플링하여 분석하였다. Table 3은 5개의 처리구별 유입관개수의 수질 특성을 나타내고 있으며, Table 4는 처리구내의 논 담수상태의 월별 수질 분석 결과에 대한 최소, 최대 및 평균값을 보여주고 있다.

유입관개수별 pH는 Table 3에서와 같이, 대조구

인 지하수 관개수를 이용하는 TP#1이 약산성을 나타냈고, 나머지 처리구의 관개수에서는 유사한 값을 보였다. 전기전도도 (electrical conductivity, EC)는 용액이 전류를 운반할 수 있는 정도를 말하며 수중의 도전성 성분 (주로 염분)의 지표로서, 관개수나 토양용액중의 염농도가 높아지면 작물은 농도 장애(염해)를 받는다. 유입관개수의 EC는 지하수 관개수인 TP#1에서 249 μ S/cm로서 가장 작은 값을 보였고, 나머지 처리구의 관개수에서는 525~659 μ S/cm의 범위를 보였다. Yoon et al (2000)에 의하면 우리나라의 경우에 EC가 750 μ S/cm이하, FAO 기준으로는 700 μ S/cm 이하이면 양호한 것으로 보고하고 있다. 각 처리구별 관개수

Table 3 Influent water quality for irrigated rice paddies

Plot	pH	EC (uS/cm)	TN	TP	SS	COD	Cu	Zn	Pb	Cd	Ca	Mg	Na	K
			(mg/L)											
TP #1	5.6	249.0	2.7	0.1	15.5	4.4	0.0	0.5	0.0	0.0	5.4	3.0	19.8	2.8
TP #2	7.0	659.0	17.1	0.6	54.5	13.1	0.0	0.2	0.0	0.0	19.7	5.8	72.0	15.4
TP #3	7.2	554.0	15.8	0.5	48.0	10.3	0.0	0.7	0.0	0.0	13.5	5.0	57.3	15.3
TP #4	7.4	526.0	16.3	0.5	12.0	7.7	0.0	0.9	0.0	0.0	12.4	5.1	62.3	14.5
TP #5	7.3	525.0	16.9	0.6	14.4	8.1	0.0	1.2	0.0	0.0	13.1	4.9	71.2	15.7

입수의 EC는 양호한 상태이나 장기간 사용시 토양의 염류집적에 관한 고려가 있어야 할 것으로 생각한다. 영양염류인 TN과 TP는 지하수 유입관개수가 가장 작게 나타났고, 다른 관개유입수는 유사한 경향을 보였다. 중금속은 거의 모든 유입관개수에서 검출되지 않았으며, 다만 아연(Zn)이 다소 검출되었다. 양이온은 유입관개수의 EC에서 나타난 바와 같이, 지하수 관개수 (TP#1)이 가장 작게 나타났고, 나머지 유입관개수에서는 유사한 값을 보였다. 각각의 처리 관개수 수질을 분석한 결과, 하천수를 관개하는 유입수 (TP#2)가 가장 오염이 심한 것으로 나타났다.

처리구별 논 담수 수질의 변화는 Table 4에서와 같이, 처리구별 유입관개수질의 영향을 반영하는 것으로 나타났으며, 그 경향은 유입관개수질의 변화와 유사하게 나타났다.

Fig. 4와 Fig. 5는 영양물질인 총질소와 총인에 대하여, 기천지구 및 각 처리구별 유입관개수와 논

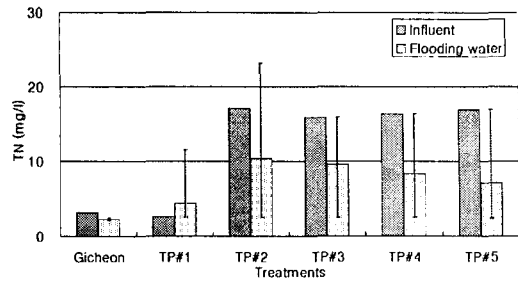


Fig. 4 TN between treatments

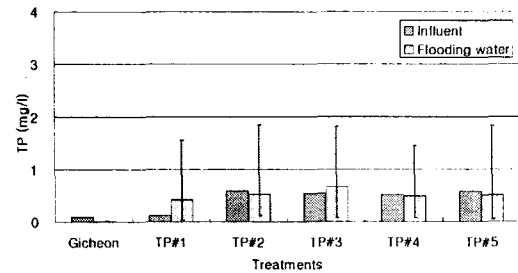


Fig. 5 TP between treatments

Table 4 Water quality of flooding water in rice paddies

Plot	Item	pH	EC (uS/cm)	TN	TP	SS	COD	Cu	Zn	Pb	Cd	Ca	Mg	Na	K
				(mg/L)											
TP #1	Min.	5.6	42.3	2.6	0.0	12.8	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7	5.0	2.4
	Max.	6.8	366.0	11.5	1.6	211.0	77.0	0.0	1.4	0.0	0.0	22.6	12.1	130.0	12.5
	Mean	6.4	192.9	4.5	0.4	103.0	23.2	0.0	0.3	0.0	0.0	7.1	4.4	29.8	6.3
TP #2	Min.	5.8	62.6	2.5	0.1	48.8	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.1	1.9	4.3
	Max.	7.0	659.0	23.1	1.8	600.0	75.2	0.1	1.7	0.0	0.0	51.2	11.9	106.7	21.6
	Mean	6.4	317.2	10.3	0.5	208.1	27.7	0.0	0.3	0.0	0.0	18.6	5.6	45.7	12.0
TP #3	Min.	6.0	44.5	2.5	0.1	4.8	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.5	8.1	2.5
	Max.	7.4	609.0	15.8	1.8	370.0	37.8	0.0	0.7	0.0	0.0	33.3	9.3	57.4	19.3
	Mean	6.7	350.1	9.6	0.7	98.2	16.4	0.0	0.3	0.0	0.0	14.9	4.2	30.5	10.2
TP #4	Min.	5.9	43.1	2.6	0.1	12.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.7	5.9	3.7
	Max.	7.4	650.0	16.3	1.5	1208.0	82.7	0.0	2.1	0.0	0.0	30.2	6.5	64.4	17.9
	Mean	6.5	341.4	8.4	0.5	349.6	24.5	0.0	0.5	0.0	0.0	11.4	4.1	30.9	11.8
TP #5	Min.	6.0	52.5	2.4	0.1	6.0	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	1.3	6.4	2.9
	Max.	9.3	733.0	16.9	1.8	1850.0	41.7	0.1	1.2	0.0	0.0	39.9	7.5	103.5	15.7
	Mean	7.1	319.9	7.1	0.5	386.9	13.8	0.0	0.3	0.0	0.0	18.8	4.6	48.7	11.0

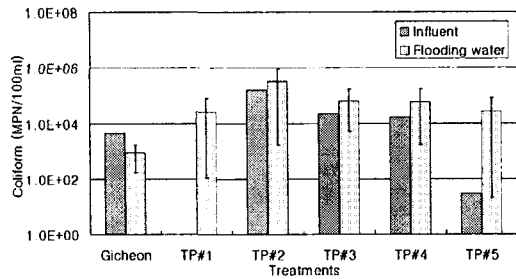


Fig. 6 Coliform between treatments

담수수질을 비교하여 보여주고 있다. 기천지구는 기천저수지 하류의 논으로서 농업용수 수질기준을 만족하는 관개용수를 이용하는 지구이다. 총질소와 총인은 기천지구와 대조구인 TR#1에서는 비슷한 경향을 보였으나, 나머지 처리구에서의 관개유입수와 담수농도는 큰 값을 보였다. 또한, 전체적으로 유입관개수의 총질소와 총인의 농도에 비하여 담수 평균 농도가 작게 나타났는데, 이는 작물, 토양 등에 의한 질소순환에서 비롯된 것으로 보인다.

Fig. 6은 대장균에 대한 기천지구와 처리구별 관

개유입수와 담수농도의 변화를 비교하여 보여주고 있다. 기천지구는 농업용수 수질기준을 만족하는 관개수를 이용하고 있는 지구로서 간접적인 비교를 하기 위하여 선정하였다. TR#1으로 유입되는 지하수 유입수의 대장균은 검출되지 않았으며, 모래여과 후 UV 처리를 한 유입수는 30 MPN/100 ml 이하의 값을 보였다. 오염이 심한 황구지천의 하천수를 관개수로 사용하는 TR#2의 유입수와 담수상태의 대장균수가 가장 큰 것으로 나타났다. 각 처리구별 논 담수상태의 대장균수가 증가하는 것은 광회복에 의한 것으로 보인다.

2. 토양 특성

하수처리수 재이용에 따른 처리구별 토양특성을 분석하기 위하여, 이양전인 2002년 2월 25일에 토양 샘플링을 하였고, 수확후인 2002년 11월 23일에 각각의 처리구 및 인근 관행 논포장의 토양을 샘플링하여 pH, EC, 영양염류, 중금속, 그리고 양

Table 5 Soil chemical characteristics of the plots before and after experiment

Item	Unit	BT ^a	After harvest (Nov. 23, 2002)					
			Byeongjeom	TR #1	TR #2	TR #3	TR #4	TR #5
pH		5.98	5.88	5.36	5.22	5.41	5.38	5.42
EC		62.2	119.2	111.7	141.2	134.5	122.8	121.7
Total-N	mg/kg	1072.8	1148.0	1652.0	1540.0	1232.0	1736.0	1400.0
Ammonia-N		90.3	18.2	15.4	15.5	16.0	19.2	22.5
Nitrate-N		59.7	58.6	40.2	43.4	45.9	62.2	59.8
Total-P	mg/kg	531.8	533.4	411.2	396.9	380.8	456.1	352.3
Avail-P		70.7	43.2	63.3	48.2	56.2	28.6	31.8
CEC	cmol/kg	6.8	7.46	8.25	7.98	8.38	8.74	7.31
Organic matter	%	2.60	2.78	4.37	3.33	3.12	3.08	4.12
Cu	mg/kg	6.10	8.31	7.03	6.22	8.89	11.74	5.05
Zn		30.96	18.91	17.73	15.43	20.70	23.36	13.06
Pb		10.10	10.02	7.18	11.36	8.87	10.70	8.52
Cd		0.028	0.152	0.086	0.120	0.110	0.126	0.085
Ca		656.4	771.6	808.1	1213.5	964.9	832.4	1110.8
Mg		123.1	171.0	81.0	88.0	106.0	114.0	116.0
Na		157.7	135.0	122.5	105.5	130.5	136.5	108.5
K		253.4	218.0	174.0	232.0	244.0	254.0	180.0

^a BT means before transplanting (Mar. 28, 2002)

이온 등을 분석하였다.

Table 5는 논 재배전후의 토양 분석 결과를 나타내고 있다. 병점은 시험포장이 조성된 인근의 관행영농을 행하고 있는 논에서의 자료이다. 논 재배전후의 토양의 EC 변화는 모든 처리구에서 증가하였으며, 오염된 하천수 처리구인 TR#2와 하수처리수 처리구인 TR#3에서는 그 증가 정도가 크게 나타났다. 이러한 결과는 오염된 하천수나 처리되지 않은 하수처리수를 장기간 사용시에 토양의 영양염류 집적이 우려된다고 할 수 있다.

총질소는 논 재배이전보다 수확후의 값이 모든 처리구에 대하여 증가하는 것으로 나타났으며, 유기물 역시 증가한 것으로 나타났다. 중금속과 양이온 등에서는 뚜렷한 경향을 보이지는 않았지만, 나트륨의 경우에는 논 재배후에 모든 처리구에서 감소하는 것으로 나타났다.

3. 생육 특성

처리구별 생육특성은 초장 (plant height), 분얼수 (tiller number), 그리고 건물중 (total dry weight)을 시기별로 조사하였다. Fig. 7~Fig. 9는 생육시기별 초장, 분얼수, 건물중의 변화를 보여주고 있다.

생육기간동안의 처리구별 초장, 분얼수, 건물중의 변화는 오염된 하천수를 관개수로 사용한 TR#2에서 다소 높게 나타났으나, 뚜렷한 경향은 보이지 않았다.

작물 생육기간동안에 하수 재배구인 TR#2 등에서 병해충인 물박음병이 발생하여 6월 5일 1차례에 걸쳐 농약을 살포하였다. 이와 같은 병해충이 발생한 원인은 아직 구명되지 않고 있으나, 하수처리장 방류수의 저수조와 여과기 등에 미생물이 많이 발생되고 있는 것과 관계가 있는 것으로 보여진다. 이와 같은 병해충이 하수재이용의 부작용으로 해석해야 할 것인지 등에 대하여는 지속적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

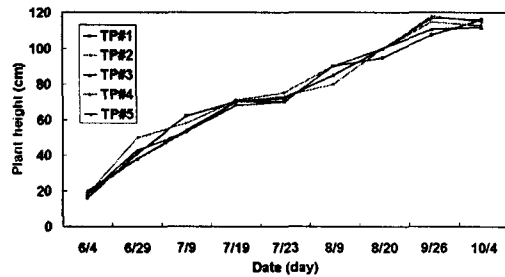


Fig. 7 Temporal variations of plant height

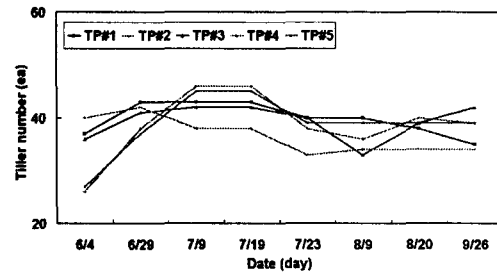


Fig. 8 Temporal variations of tiller number

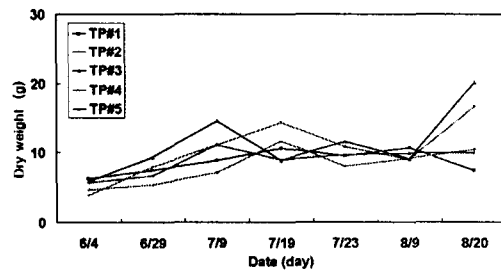


Fig. 9 Temporal variations of total dry weight

4. 수량 및 수확량 특성

하수재이용을 위한 논 재배시험의 수량 및 수확량 특성은 수량구성요소인, 개체당 이삭수 (panicle number per individual, PI), 이삭당 영회수 (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

Table 6 Statistical characteristics of yield component and grain yield between treatments

Item	TR #1		TR #2		TR #3		TR #4		TR #5	
	Mean	STD ^a	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
PL (cm)	21.5	1.77	22.7	1.15	23.4	1.20	22.4	1.35	22.0	0.86
CL (cm)	70.5	5.32	83.6	3.65	79.8	1.77	81.3	3.24	73.4	3.51
PI (ea)	8.7	0.07	8.8	0.75	8.9	1.25	8.8	0.97	8.7	0.52
MS (ea)	75.6	7.20	92.1	16.57	87.0	10.92	83.5	18.64	81.7	8.10
TW (g)	22.3	0.37	22.3	1.33	23.4	0.78	23.7	1.41	22.3	0.44
PG (%)	93.5	1.84	92.6	1.03	91.5	1.86	94.0	1.26	92.7	1.96
YD (kg/10a)	459.4	51.95	621.9	92.85	530.2	50.99	557.3	39.01	528.1	56.56

^a STD denotes standard deviation

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

Table 6은 처리구별 수량관련요소와 수확량의 평균과 표준편차를 나타내고 있다. 수장은 하수처리수를 관개한 TR#3이 23.4 cm로서 가장 큰 값을 보였고, 간장은 오염된 관개수를 사용한 TR#2 처리구가 83.6 cm로서 가장 큰 값을 나타냈으며, 지하수를 관개한 대조구인 TR#1의 수장과 간장이 각각 21.5와 70.5 cm로서 가장 작은 값을 보였다. 수량구성요소인 개체당 이삭수, 이삭당 영화수, 천립중, 그리고 등숙률의 처리구별 평균값의 범위는 각각 8.7~8.9개, 75.6~92.1개, 22.3~23.7 g, 그리고 91.5~94.0%의 값을 보였다. 수량관련 요소는 대체적으로 관개수 (TR#2)나 하수처리수 (TR#3)의 처리구가 대조구인 지하수의 처리구에 비하여 큰 값을 보였는데, 이는 TR#2나 TR#3의 관개수에 영양물질이 상대적으로 많이 포함되어 있기 때문으로 사료된다.

처리구별 수확량은 TR#2>TR#4>TR#3>TR#5 >TR#1으로 나타났고, 459.4 ~ 621.9 kg/10a의 범위를 보였으며, 대조구인 TR#1이 가장 작았고 오염된 하천수를 관개한 TR#2 처리구가 가장 큰 값을 나타냈다.

5. 현미 및 수도체 화학적 특성

하수처리수의 재이용 재배시험의 수확물인 현미와 벼를 대상으로 영양물질 함량과 중금속 등의 유해성분을 조사하였다.

Table 7과 Table 8은 수확후의 현미와 벼의 영양물질, 양이온, 그리고 중금속 등을 분석한 결과를 각각 나타내고 있다. 현미와 벼의 총인은 일반적인 경향을 보이고 있으며, 총질소 함량은 기준은 설정되어 있지는 않지만 일반적인 현미의 함량인 6,000~9,000 mg/kg 보다 모든 처리구에서 높게 나타나는 경향을 보였다. 양이온의 함량은 일반적인 경향보다 다소 낮게 나타나고 있으며, 중금속은 전체적으로 문제가 되는 항목은 없지만, 비소와 수은 등의 함량이 다소 높게 나타났다. Yoon et al. (1999)의 연구에서 보고된 바 있는 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.

Table 7 The chemical characteristics of brown rice between treatments

(Unit: mg/kg)

Item	Total-P	Total-N	Na	Ca	Mg	K	Cu	As	Cd	Zn	Mn	Hg	Pb	
TR #1	Min	2170.5	3738.0	37.5	51.5	530.0	2205.0	0.0	3.0	0.4	14.4	54.0	1.6	0.0
	Max	2454.5	4368.0	73.0	67.0	625.0	2390.0	2.0	3.4	0.5	19.6	81.1	2.5	0.8
	Avr.	2283.9	4109.0	57.8	58.2	588.3	2296.7	0.5	3.2	0.4	16.6	68.6	2.1	0.4
TR #2	Min	1955.5	2030.0	33.0	48.0	500.0	2030.0	0.0	1.8	0.4	12.7	50.8	1.3	0.0
	Max	2386.0	3108.0	50.5	63.0	550.0	2285.0	1.7	3.5	0.6	14.5	74.9	1.6	2.3
	Avr.	2180.2	2536.3	38.3	54.8	521.7	2168.3	0.7	3.0	0.5	13.6	65.5	1.5	0.7
TR #3	Min	2065.0	2520.0	32.5	47.0	505.0	2120.0	0.5	2.9	0.4	12.6	62.5	1.5	0.0
	Max	2567.5	3010.0	60.5	65.0	615.0	2295.0	3.1	4.0	0.5	16.4	78.7	1.7	0.8
	Avr.	2302.2	2858.3	49.8	54.6	567.5	2201.7	2.0	3.3	0.5	15.0	70.5	1.6	0.4
TR #4	Min	1040.0	2800.0	29.0	55.0	490.0	2025.0	0.0	3.3	0.4	12.8	52.6	1.4	0.1
	Max	2230.0	4060.0	48.0	108.5	895.0	2370.0	0.3	5.9	0.5	15.4	85.7	2.1	1.5
	Avr.	1850.6	3516.3	37.2	75.1	637.5	2197.5	0.1	4.2	0.4	13.8	71.0	1.7	0.8
TR #5	Min	2306.0	2800.0	36.0	40.0	565.0	2090.0	0.3	3.1	0.5	12.7	59.3	1.5	0.1
	Max	2572.0	3220.0	64.5	64.0	625.0	2305.0	4.2	3.5	0.5	17.6	77.6	1.7	0.7
	Avr.	2416.2	2905.0	52.3	56.5	593.3	2236.7	2.6	3.2	0.5	15.1	67.8	1.6	0.3

Table 8 The chemical characteristics of the rice plant between treatment

(Unit: mg/kg)

Item	Total-P	Total-N	Na	Ca	Mg	K	Cu	As	Cd	Zn	Mn	Hg	Pb	
TR #1	Min	2304.0	3360.0	34.0	50.5	465.0	2280.0	0.0	1.8	0.4	12.8	57.8	1.5	0.5
	Max	2523.0	6300.0	52.5	68.5	550.0	2515.0	0.5	3.7	0.6	19.5	104.6	1.7	1.3
	Avr.	2441.5	4550.0	41.6	58.0	508.3	2420.0	0.2	2.8	0.5	15.7	86.1	1.6	1.0
TR #2	Min	1263.0	3248.0	34.0	53.0	450.0	2280.0	0.0	2.1	0.2	10.7	51.7	0.9	1.1
	Max	2179.5	4172.0	41.0	142.0	915.0	2590.0	0.9	4.8	0.4	18.0	76.2	1.7	2.9
	Avr.	1833.8	3840.7	38.1	82.7	610.0	2435.0	0.2	3.1	0.3	13.1	66.9	1.2	1.5
TR #3	Min	1171.0	4662.0	37.0	53.0	465.0	2240.0	0.0	1.2	0.2	12.0	66.8	1.0	0.0
	Max	2200.0	5488.0	48.5	124.0	995.0	2580.0	0.7	5.6	0.4	14.3	97.9	1.6	1.1
	Avr.	1927.6	5198.7	43.5	69.8	573.3	2419.2	0.1	2.8	0.3	13.4	80.3	1.1	0.7
TR #4	Min	1053.0	3794.0	37.0	67.0	470.0	2210.0	0.1	2.8	0.3	9.7	65.7	1.1	0.7
	Max	1969.5	4354.0	42.5	125.0	760.0	2330.0	0.5	5.7	0.4	15.3	100.3	1.9	1.8
	Avr.	1387.8	4050.7	39.3	98.6	625.0	2276.7	0.2	4.3	0.3	12.3	81.2	1.5	1.4
TR #5	Min	1312.0	2170.0	32.5	48.5	460.0	2105.0	0.0	2.1	0.3	12.3	54.9	1.0	0.5
	Max	2513.0	6370.0	49.0	127.5	880.0	2475.0	0.1	5.4	0.3	14.6	84.9	2.7	3.0
	Avr.	2056.9	4874.3	39.3	71.0	551.7	2305.8	0.0	2.9	0.3	13.3	75.6	1.9	1.2

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 생활하수의 농업용수재이용의 타당성을 제고하기 위하여, 수원 하수처리장을 선정하여 난과법에 의한 30개의 시험구를 배치하여 생육시험을 수행하였고, 처리구별 수질, 토양 특성, 수량관련 특성, 그리고 현미 및 벼의 이화학적 특성 등을 고찰하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 이원분류 난과법 실험설계방법에 의하여 1) 지하수, 2) 관행 관개수, 3) 하수처리수, 4) 완속모래여과수, 5) 완속모래여과 후 UV 살균처리수 등의 5개 처리구 6반복의 30개 시험포장을 구성하였다.
2. 각 처리구의 유입관개수별 수질 특성을 조사한 결과, 영양염류인 TN과 TP는 지하수 유입관개수가 가장 작게 나타났고, 다른 관개유입수는 유사한 경향을 보였으며, 중금속은 대부분 유입관개수에서 검출되지 않았으며, 전체적으로 오염된 황구지천의 하천수를 관개하는 유입수 (TP#2)가 가장 오염이 심한 것으로 나타났다.
3. 영양물질 농도는 관개수의 수질을 만족하는 기천지구와 대조구인 TR#1에 비하여 나머지 처리구에서의 관개유입수와 담수농도는 큰 값을 보였으며, 처리구별 대장균은 오염이 심한 TR#2의 유입수와 담수상태의 대장균수가 가장 큰 것으로 나타났다.
4. 논 재배전후의 토양 분석 결과, 오염된 하천수나 처리되지 않은 하수처리수를 장기간 사용시에는 토양의 영양염류 집적이 발생할 수도 있는 것으로 나타났으며, 총질소는 모든 처리구에서 논 재배 이전보다 수확후의 값이 크게 증가한 것으로 나타났다.
5. 수량구성요소는 대체적으로 관개수 (TR#2)나 하수처리수 (TR#3)의 처리구가 대조구인 지하수의 처리구에 비하여 큰 값을 보였으며, 처리구별 수확량은 TR#2>TR#4>TR#3>TR#5>TR#1의 순으로 나타났다.
6. 현미와 벼의 화학적 특성 조사 결과, 현미와

벼의 총인은 일반적인 경향을 보였고, 총질소 함량은 일반적인 값보다 다소 높게 나타났으며, 양이온의 함량은 일반적인 경향보다 다소 낮게 나타났고, 중금속은 전체적으로 문제가 되는 항목은 없지만, 비소와 수은 등의 함량이 다소 높게 나타났다.

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 4-5-1)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Bahri, A. (1998). Wastewater reclamation and reuse in Tunisia. In Wastewater Reclamation and Reuse Ed. by T. Asano, Technomic Inc., 877-916.
2. Bahri, A. 2000. Strategies for increasing wastewater reuse opportunities in small communities in the Southern Mediterranean Region countries.
3. Chae, Y. A., J. U. Koo, H. S. Seo, and Y. M. Lee. 1991. Basic Biological Measurement. Hyang Moon Co. (in Korean)
4. Chapman H. D. and P. F. Pratt. 1961. Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricultural sciences.
5. Cochran, W. G., and M. C. Gertrude. 1957. Experimental Design. John Wiley & Sons, Inc..
6. Klute A.. 1986. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
7. Kwun, S. K. et al.. 1998. Regional Environmental Engineering. Hyang-Moon Co..
8. Liberti, L. and M. Notarnicola. 1999. Advanced treatment and disinfection for municipal wastewater reuse in agriculture. *Wat. Sci. Tech.* 40(4-5):235-245.
9. USEPA. 1992. Guidelines for Water Reuse.

- EPA 625/R-92/004. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. 247 pp.
10. USEPA. 1992a. Manual Guidelines for Water Reuse. EPA 625/R-92/004. Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency.
 11. World Health Organization. 1989. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture, WHO. Geneva, Switzerland.
 12. Yoon, C. G., J. H. Ham, S. H. Woo, and M. H. Kim. 2001. Paddy Rice Culture Experiment Using Treated Sewage Effluent From Constructed Wetland. *Transactions of the KSAE* 43(2): 94-104. (in Korean)
 13. Yoon, C. G., S. K. Kwun, and S. H. Woo. 2000. Effect of Reclaimed Sewage Irrigation on Paddy Rice Culture and Soil Characteristics. *Transactions of the KSAE* 42(3): 66-75. (in Korean)
 14. Yoon, C. G., S. K. Kwun, I. M. Chung, and T. Y. Kwon. 1999. Review of the Agricultural Water Quality Standards through Rice Culture with Treated Sewage Irrigation. *Transactions of the KSAE* 41(2): 44-54. (in Korean)