

인공습지 오수처리수를 이용한 벼재배 실험

Paddy Rice Culture Experiment Using Treated Sewage Effluent From Constructed Wetland

윤 춘 경* · 함 종 화**
Yoon, Chun Gyeong · Ham, Jong Hwa
우 선 호** · 김 민 회**
Woo, Sun Ho · Kim, Min Hee

Abstract

A pilot study was performed at the experimental field of Konkuk University in Seoul, to examine the feasibility of the constructed wetland system for sewage and the effect of treated sewage irrigation on the paddy rice culture and its soil characteristics. The constructed wetland performed well, in that effluent concentrations of pollutants were significantly lower than concentrations of the influent. Median removal efficiencies of BOD₅ was about 78% and slightly lower during winter. Removal efficiencies from TN and TP were approximately 48 and 21%, respectively, and relatively less effective than that of BOD₅.

Irrigation of treated sewage to paddy rice culture did not affect adversely in both growth and yield of rice. Instead, plots of treated sewage irrigation showed up to 50% more yield in average than the control plot. It implies that treated sewage irrigation might be beneficial to rice culture rather than detrimental as long as it is treated adequately and used properly. Soil was sampled and analyzed before transplanting and after harvesting. pH was slightly increased due to irrigation water, but it may not be concerned as long as the treated sewage is within the normal range. EC was increased in first year but decreased in second year, therefore salts accumulation in the soil could be less concerned. OM and CEC was slightly increased, which might be beneficial on growing plants. TN did not show apparent pattern. Available phosphorus was decreased after rice culture, but the quantity of phosphorus(TP-available phosphorus) was rather increased which implies that excessive phosphorus supply may result in phosphorus accumulation in the soil.

Overall, the constructed wetland was thought to be an effective sewage treatment alternative, and treated sewage could be reused as a supplemental source of irrigation

*건국대학교 농축산생명과학대학
**건국대학교 대학원

키워드 : 인공습지, 오수처리, 오수처리수, 농업적 재
이용, 관개용수수질, 벼재배실험, 수확량분
석, 토양특성변화

water for paddy rice culture without causing adverse effect as long as it is treated adequately and used properly. For full-scale application, further investigation should be followed on environmental risk assessment, tolerable water quality, and fraction of supplemental irrigation.

I. 서 론

전통적으로 자연적인 자정능력에 주로 의존해오던 우리 농촌의 환경도 이제는 환경오염의 안전지대가 아니며 오히려 오염의 배출원으로서 대두되고 있다. 이는 농업생산에서 비롯되는 비료, 농약 등에 의한 오염과 축산농가의 확대에 의한 고농도의 축산폐기물 등이 주요 원인이 되고 있다. 또한 농촌 생활의 개선으로 인한 수세식 화장실의 보급과 생활 양식의 변화로 물 사용량이 많아져 오수의 발생량도 급속히 늘어났기 때문이다. 하지만, 도시지역과 달리 농촌지역은 마을이 넓은 지역에 산재되어 있기 때문에 하수도 또는 관거로 모든 오수를 한곳으로 차집하여 처리하는 종말처리장의 도입은 처리효율이나 에너지 이용 효율면에서 불합리하다는 결점을 가지고 있다. 그러므로, 농촌이라는 특수한 환경을 고려할 때 처리장의 구조가 간단하고, 유지관리가 간편한 소규모 처리시설이 적합하다고 볼 수 있다.^{1,7,8)} 이러한 배경에 의하여 농촌생활오수 처리방법 중 하나로써 인공습지를 사용하는 기법에 관한 연구가 국내에도 활발히 진행되고 있다.

우리나라의 연평균 강수량은 1,274mm로서 세계 연평균 강수량인 970mm의 약 1.3배 이지만, 1인당 강수량을 보면 2,900m³으로서 세계 1인당 강수량인 26,800m³의 약 11%에 불과해 물 부족 국가군에 포함된다. 또한 전체 수자원 사용의 50% 이상이 농업용수가 차지하며,⁴⁾ 농업용수중 대부분은 관개용수이므로 관개용수가 차지하는 수자원 이용률은 매우 높은 편이다. 그러므로 관개용수를 효율적으로 이용 관리하는 것은 곧 수자원을 효율적으로 이용하는 것이라고 해도 과언이 아닐 것이다. 수자원의 효율적인 이용에는 많은 방법이 있

겠지만 그 중에 물을 재이용하는 것도 실질적인 대안이 될 수 있다. 세계 여러나라에서는 물의 중요성을 인식하여 중수도 개념의 도입과 다양한 수자원의 재이용 방안에 대해 널리 연구하고 있다.

오수처리수를 농업에 재이용하게 되면 수자원의 효율적 이용을 유도할 수 있고, 오수처리수에 포함된 영양물질을 작물의 생육에 이용함으로써 비료절감효과와 생산량 증대를 얻을 수 있다. 그리고, 영양물질이 다량 함유된 오수처리수를 수계(水界)로 직접 보내지 않고 농지로 환원시켜 농지가 또 하나의 처리시설 역할을 함으로써 자연의 정화능력을 최대한 이용할 수 있는 이점이 있다.^{2,6)} 그러나 비과학적이고 무계획적인 오수의 농업용수로의 재이용은 공중보건상 위험요소로 작용하며, 환경 및 토양에 악영향을 주고, 과다한 영양물질 및 기타 물질들의 영향으로 오히려 작물생육에 저해요인이 될 수도 있다. 오수처리수의 농업적 재이용은 아시아지역을 포함한 프랑스, 호주, 이스라엘 등에서 이미 수세기 동안 오수를 관개용수로 재활용했던 사례가 있었으며, 미국에서만 1,000개 이상의 오수처리수 관개시설이 운영되고 있다.¹⁰⁾

본 연구는 농촌환경에 적합한 생활오수 처리시설 중의 하나인 인공습지에 의해 처리된 오수처리수를 관개용수로의 재이용 가능성을 시험하기 위하여 수행되었다. 1999년과 2000년의 2년간 연속 오수처리수를 관개용수로 이용한 벼재배실험을 통하여 오수처리수의 재이용이 벼재배에 미치는 영향에 대한 기초자료를 제공하고, 오수처리수의 농업적 재이용에 대한 타당성을 검증하고자 한다.

II. 재료 및 방법

실험에 사용된 인공습지와 벼재배시설은 건국대학교 내에 설치되었으며, 개요도는 Fig. 1과 같다. 오수처리시설인 인공습지는 폭 2m×길이 9m×높이 1m의 콘크리트 박스에 모래를 0.6m 채우고, 갈대를 식재하였으며, 인공습지로 들어오는 유입수는 농업생명과학대학 별관에 설치된 정화조에서 나오는 오수를 이용하여 실시하였다. 이론적인 수리부하율(hydraulic loading rate)과 체류시간(hydraulic residence time)은 각각 6.3cm/day와 3.5일이며, 실험을 위한 유입수와 처리수의 시료채취는 처리조의 이론적 체류시간만큼의 시간간격을 두어 유입한 오수가 유출할 시기에 측정하여 이들 사이의 농도차이로 처리효과를 검토하였다. 인공습지의 유출수(오수처리수)는 벼재배실험의 관개용수로 이용되었다. 인공습지의 유입수와 유출수 및 관개용수의 농도는 Standard Methods¹¹⁾에 의해 분석을 하였다.

벼재배실험시설은 폭 0.9m×길이 1.1m×높이

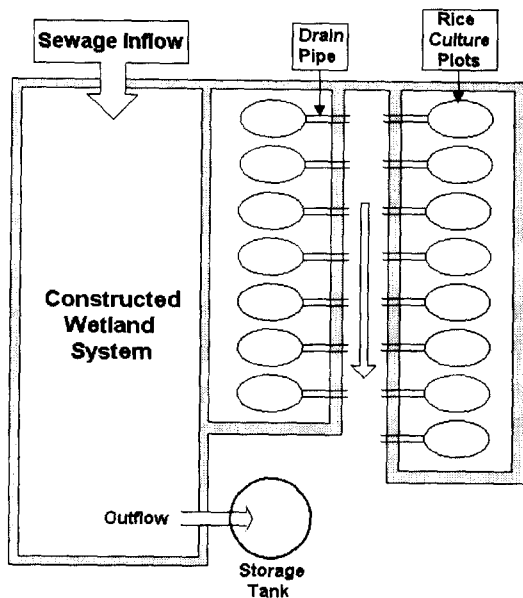


Fig. 1 Schematic diagram of the sewage treatment system and crop experiment plant

0.7m의 규모의 표면적이 약 1m²인 합성수지용기를 작물재배를 위한 인공포트로 사용하였으며, 포트의 바닥에는 약 10cm의 자갈을 채우고 그 위에 부직포를 덮은 후에 미세질양토(silt loam)의 토양을 50cm정도 채웠다. 공시품종 일품 벼를 1주 1본씩 포트 당 22개체씩, 대조구 1개와 처리구 4개에 각각 3반복 처리하여 총 15개 포트에 이양하였으며, 재식밀도는 30cm×15cm이었다.

처리구 조건은 ①오수처리수를 매일관개하고 시비하지 않은 처리구(DSWNF), ②오수처리수를 회석하여 관개하고 관행재배법에 의해 시비한 경우(TWCF), ③오수처리수를 관개하고 관행재배법의 절반에 해당하는 시비를 한 경우(SWHF), ④오수처리수를 관개하고 관행재배법에 의해 시비한 경우(SWCF), ⑤수돗물을 관개용수로 사용하고 관행재배법에 의해 시비한 경우(CONTROL)의 5가지로 구분하였다.

시비량은 N : P : K의 비율이 10a 당 11kg : 7kg : 8kg이 되도록 하였으며, 관개용수는 재배기간 동안 DSWNF 처리구의 경우 영양물질의 과다 유입으로 인한 수확기의 도복 여부를 관찰하기 위해 강우시를 제외하고 매일 10 l씩 총 540 l를 관개하였고, 기타 처리구는 포트의 물 양에 따라 1회 관개시 10 l씩 총 430 l를 관개하였으며, 이것을 관개수심으로 나타내면 1회 10mm씩 총 540mm와 430mm가 된다. TWCF 처리구는 오수처리수를 일정하게 5배 회석하여 관개하였다. 기타 관리는 중부지방 관행재배법⁵⁾을 따랐다. 1999년도 실험에서는 5월 24일 이양하여 10월 25일 수확하였으며, 2000년도 실험에서는 5월 29일 이양하여 10월 23일 수확하였다.

각각의 개체를 수확하여 수장(穗長) 및 간장(稈長) 그리고 수량구성요소인 이삭수, 이삭 당 영화수(穎花數), 등숙률(登熟率), 천립중(千粒重)을 측정하였고 이를 기준으로 수확량을 산정하였다. 간장은 뿌리 위 부분부터 이삭목까지를, 수장은 이삭목에서 이삭 끝까지의 길이를 말하며 식물체 채취 전에 길이를 측정하였다. 등숙률은 약 비중이 1.06인 소금물을 이용하여 물위에 뜬 낱알은 제외

하고 가라앉은 낱알만을 세어 전체에 대한 비율을 구하였으며, 가라앉은 낱알을 60°C에서 3일간 건조한 후 이중에서 천 개를 임의로 세어 무게를 달아 천립중을 구하였다. 이 결과를 단위면적과 개체수 등을 고려하여 각 포트별로 수량구성요소 및 수확량을 산정하였다. 통계처리는 SAS (Statistical Analysis System)를 이용하여 최소유의차 검정법 (LSD : Least Significant Difference)으로 실시하였다.

토양분석항목은 pH, EC, OM, CEC, TN, TP, Available P₂O₅ 등이었으며, 이양하기 전과 수확 후에 각 처리구의 토양을 채취하여 분석하였다. 시료 채취는 각 포트별로 임의의 3지점을 선정하여 표토층을 제거한 후 식물체의 잔유물이 포함되어 있지 않도록 주의하면서 지하 20cm지점에서 채취한 후 혼합하였다. 이렇게 채취한 토양시료는 1주일간 풍건시킨 후 2mm 체를 통과시켜 분석에 사용하였다.¹²⁾

III. 결과 및 고찰

위와 같은 처리시설을 이용하여 오수처리수의 농업적 재이용 실험을 1998년부터 시작하여 2000년까지 3년간 수행하였는데, 여기에서는 실험조건이 동일한 1999년과 2000년의 실험결과를 항목별로 고찰하고자 한다.

1. 인공습지에 의한 오수처리수의 수질변화

인공습지에 의한 오수처리수의 수질변화는 Fig. 2와 같다. 일반적으로 인공습지의 유입수는 정화조에서 펌핑하여 산소가 부족한 혐기성상태이기 때문에, 대부분 혐기성상태를 유지하였으며, 중위수 (median) 농도는 0.0mg/L이었다. 하지만, 인공습지 유출수(오수처리수)의 DO농도는 추가적인 폭기시설을 사용하지 않았음에도 불구하고 훨씬 높아져 유출수의 중위수 농도가 2.3mg/L를 나타내었다. 그 이유는 식물체의 통기조직을 통해 산소가 뿌리로 전달되고 오수가 처리조를 통과하는

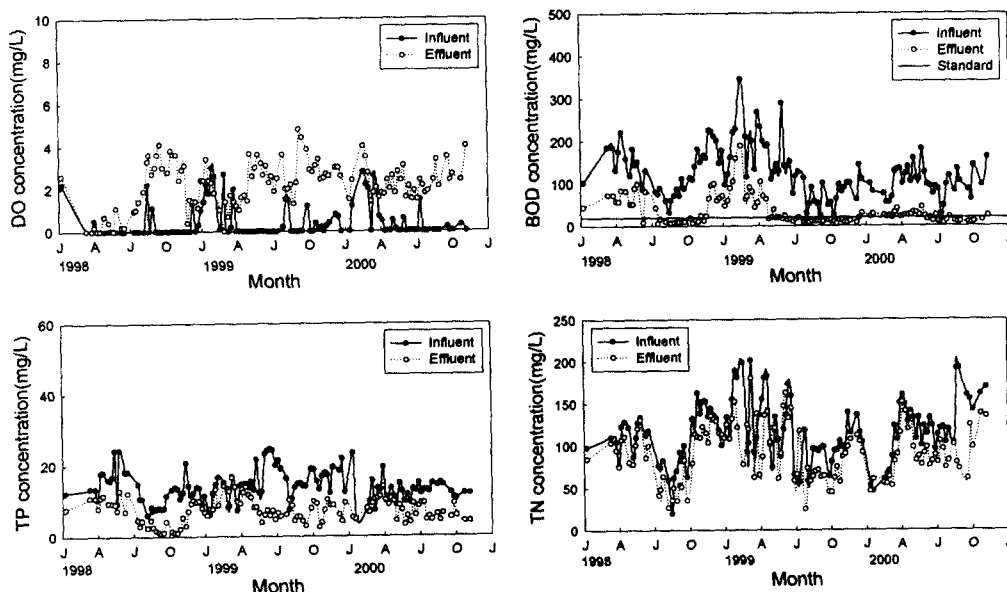


Fig. 2 Influent and effluent data of the wetland system

동안 대기로부터 재폭기가 이루어졌기 때문이며, 겨울보다 여름에 처리수 DO가 더 높은 것은 식물생장이 왕성한 여름에 뿌리를 통한 산소 공급이 더 많았기 때문인 것으로 생각된다.

BOD₅의 유입농도는 24~345mg/L로 매우 넓은 변화폭을 나타내었으나, 유출수의 농도는 종종 20mg/L 이하로 낮아지기도 하였으며 중위수 (median) 제거효율은 78%를 나타내었다. 하지만, 여전히 유출수의 중위수 농도는 22.9mg/L로 오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률⁹⁾에서 오수정화시설에 대한 BOD의 방류수 수질기준인 20mg/L를 초과하였다. 그러므로, 수계로 방류하기 위해서는 방류수수질기준을 만족시키는 추가적인 처리가 요구되며, 다른 처리방안 중의 하나가 농경지에 관개용수로 재이용하는 방법이다.

인과 질소는 아직 오수정화시설에 대한 방류수 수질기준이 정해지지 않았지만, 수계(水界)에 과다 유입될 경우에 부영양화를 유발하여 수질문제를 일으켜 수자원의 가치를 저하시키는 원인이 된다. 인공습지처리시설에 있어서 인은 주로 흡착, 여과, 생물학적 흡수 및 화학적 결합과 같은 기능들에 의하여 제거된다. TP의 유입수의 중위수 농도는 13.5mg/L였고, 유출수의 중위수 농도는 7.4mg/L로 48.1%의 중위수 제거율을 나타내었다.

TN의 유출수의 농도범위는 17.5~100.1mg/L를 나타내었으며, 추출수의 중위수 농도는 83.1mg/L로 수질항목 중 제일 낮은 중위수 제거율인 21.0%를 나타내었다. 이렇게 제거율이 낮은 이유는 유입수의 질소농도가 일반적인 인공습지 처리시설의 유입수 농도보다 훨씬 높았고, 실험시설의 체류기간이 상대적으로 짧아서 충분한 질산화-탈질화과정이 이루어지지 않아 처리효율이 낮은 것으로 생각된다. 만약 본 인공습지처리시설로 유입된 유입수의 농도보다 낮은 하수가 유입되고, 체류시간을 증가시켜 준다면 더 좋은 제거효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 인공습지를 사용하여 오수를 처리할 때 방류수 수질기준을 초과하는

경우가 있고 오수처리수의 질소나 인등의 영양물질농도가 높아서 그대로 수계에 방류하기에는 어려움이 있을 수 있다. 이러한 경우에는 농촌지역에 위치한 논이나 밭과 같은 농경지에 오수처리수를 관개용수로 사용함으로써 수질오염방지와 영양물질의 재이용이라는 긍정적인 효과를 기대할 수 있을 것이다.

2. 관개용수의 수질

재배기간동안 인공습지의 처리수를 관개용수로 사용하였으며, 사용한 관개용수의 수질은 Table 1과 같다. 여기서 수질기준은 환경정책기본법상의 호소수질 IV등급(농업용수)³⁾ 수질기준이다. 오수처리수를 일정하게 5배 희석하여 관개한 TWCF 처리구와 수돗물을 관개한 CONTROL을 제외한 다른 처리구에는 오수처리수를 희석하지 않고 관개하였다. TP와 TN의 관개용수수질기준은 각각 0.1mg/L와 1.0mg/L인데 반하여, 관개한 처리수는 기준보다 훨씬 높았다. 이는 고농도의 영양물질을 함유한 오수처리수를 그대로 관개용수로 사용하였을 경우 벼의 생육, 수확량 및 토양의 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위해서였다.

관개용수의 EC는 1999년과 2000년에 각각 1,178S/cm와 1,650S/cm의 값을 나타냈다. 이것은 Table 2에 나타난 우리나라와 FAO의 기준과 비교해 볼 때 지나치게 높은 수치는 아니지만, 토양의 염류집적을 예방하기 위해서 오수처리수를 그대로 관개하기보다는 희석하여 관개하는 것이 바

Table 1 Average irrigation water quality

Year	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	EC (S/Cm)	Total col. (MPN/100mL)
Water quality standards	8	1.0	0.100	-	-
First year (1999)	41.24	90.18	6.71	1,178	-
Second year (2000)	56.57	86.59	6.79	1,650	2,900

Table 2 EC of restriction degree for irrigation water
(unit : μ S/cm)

Korea	Degree of restriction on use				
	Low	Moderate	Medium high	High	Very high
	100-250	250-750	750-2,250	2,250-4,000	>4,000
FAO	None		Slight to moderate		Severe
	<700		700-3,000		> 3,000

람적할 것으로 생각된다. 또한, 2년차에 대장균군 실험을 실시한 결과 평균 최적확수는 2,900MPN/100mL으로 나타났다. 현재 우리나라 농업용수수질기준을 살펴보면

하천, 호소, 지하수를 농업용수로 사용할 경우 대장균군에 대한 제한은 없다. 하천 및 호소수질 Ⅲ등급과 지하수의 생활용수가 대장균군수 5,000MPN/100mL로 제한되어 있는데, 이들은 농업용수수질보다 1단계 높은 수질이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 관개용수로 사용한 오수처리수는 병

원균으로 인한 수인성 질병문제는 우려하지 않아도 될 것으로 생각된다.

3. 수확량

각 처리구별 수확량과 수량구성요소는 Table 3에 정리되어 있다. 일반적으로 간장(稈長, C.L.)과 수장(穗長, P.L.)은 수확량에 양의 효과를 미친다. 즉, 간장과 수장이 길수록 더 많은 태양에너지를 공급받아 광합성작용을 하기 때문에 더 많은 수확량이 얻을 수 있다. Table 3에서 LSD(Least Significant Difference)는 최소유의차로써 두 조건의 실험결과 차이가 LSD보다 크면 두 결과들은 통계적으로 유의성 있게 다르다는 것을 의미하며, 차이가 LSD보다 작으면 두 결과는 수치적으로 다르게 표현되어 있으나 통계적으로는 유의성있는 차이가 있다고 해석할 수 없다. 처리구별 결과를 보면, CONTROL의 간장과 수장이 제일 짧았고, 나머지 오차의 범위 내에서 차이가 없는 것으로

Table 3 Comparison of yield components and grain yields for treatment plots

Plots	C.L.(1) (cm)	P.L.(2) (cm)	Yield component				Yields (kg/10a)
			P.U.(3)	M.S.(4)	R.G.(5) (%)	T.W.(6) (g)	
First year (1999)							
DSWNF	81.2	27.9	369.4	93.5	70.1	24.3	588.6
TWCF	79.6	26.9	198.4	129.5	81.7	23.7	501.5
SWHF	80.7	28.9	310.3	117.5	76.2	24.4	672.8
SWCF	78.4	28.6	323.0	132.2	80.2	23.1	799.6
Control	68.7	23.1	229.7	120.0	83.2	22.9	524.4
LSD	1.7	2.9	69.2	30.8	7.9	1.8	240.0
Second year (2000)							
DSWNF	73.9	24.1	300	105	69.0	25.7	558.7
TWCF	71.8	22.5	226	112	80.8	25.6	524.7
SWHF	75.7	24.3	283	113	79.6	25.9	657.9
SWCF	73.6	23.7	306	115	80.3	26.7	752.8
Control	68.5	20.7	262	103	78.5	23.9	505.9
LSD	2.4	1.1	36.3	15.0	16.9	0.8	144.6

(1) C.L.: main culm length; (2) P.L.: panicle length; (3) P.U.: panicle number per unit area; (4) M.S.: mean of spikelet number per panicle; (5) R.G.: percent of ripened grain; (6) T.W.: weight of 1000 grain

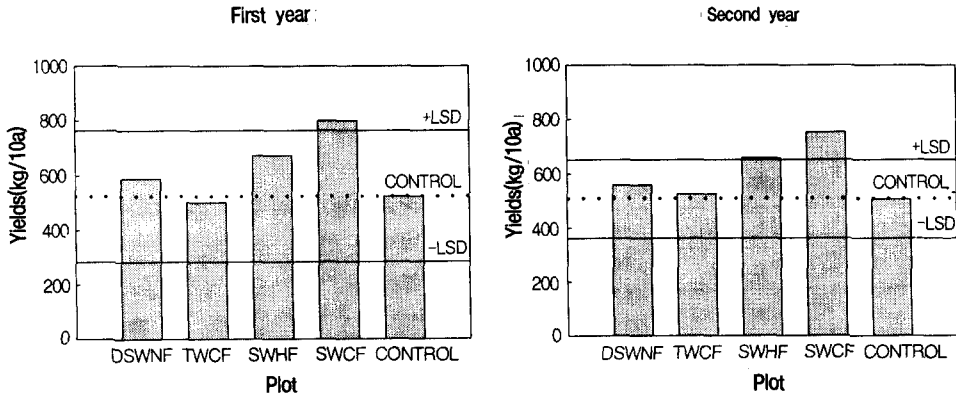


Fig. 3 Comparison of yields per unit area (kg/10a)

나타났다. 이는 CONTROL이 비료에 의해서만 영양물질을 공급받은 반면, 다른 처리구들은 오수처리수의 관개로부터 영양물질을 추가로 공급받았기 때문에 상대적으로 짧았던 것으로 판단된다.

수확량은 단위면적당 이삭수(P.U.)에 비례적으로 증가하고, 등숙률(登熟率, R.G.)과 천립중(千粒重, T.W.)은 이삭수에 상관없이 일정한 값을 나타내었다. 단위면적당 평균 이삭수(P.U.)는 SWCF > SWHF > DSWNF > CONTROL > TWCF의 순서로 감소하였는데, 이 순서는 영양물질의 공급량의 순서와 비슷하다. 통계학적으로, SWCF, SWHF와 DSWNF의 단위면적당 이삭수(P.U.)는 다른 처리구에 비하여 1, 2년차 모두 많은 것으로 나타난 반면에, 이삭당 영화수(穎花數, M.S.)는 오차의 범위내에서 거의 차이를 보이지 않았다.

수확량의 결과를 보면, Table 3과 Fig. 3에 나타나 있듯이 1, 2년차 모두 수돗물을 관개용수로 사용하고 관행재배법에 의해 시비한 CONTROL은 일반적인 논에서의 수확량과 비슷한 값을 나타내었다. 특히, Fig. 3은 시비량 및 관개용수의 수질에 의한 수확량의 차이를 CONTROL과 LSD(최소유의차)를 기준으로 나타낸 것으로 1년차의 DSWNF, TWCF 및 SWHF와 2년차의 DSWNF 및 TWCF가 CONTROL과 LSD범위내에서 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 2년차의 SWHF는 CONTROL과 LSD범위내에서 아주 근소한 차이

를 나타내므로 이를 제외하면, 오수처리수를 관개하고 관행재배법에 의해 시비한 SWCF만이 CONTROL보다 더 많은 수확량을 얻었고, 나머지 처리구는 CONTROL과 수확량이 차이하지 않았다. 오수처리수를 연속관개하고 시비하지 않은 DSWNF와 오수처리수를 관개하고 관행재배법의 절반에 해당하는 시비를 한 SWHF의 결과는 CONTROL과 거의 비슷한 범위의 수확량을 나타내었는데, 이는 관개한 오수처리수중에 포함되어 있는 영양물질이 비료의 부족분을 보충해 주었기 때문에 CONTROL과 비슷한 범위의 수확량이 나타났을 것으로 생각된다.

SWCF, TWCF 및 CONTROL은 시비는 동일하게 이루어지고 관개용수의 수질만 달리하여 실험한 것인데, SWCF 결과는 TWCF와 CONTROL의 결과에 비해 크게 증가했으며 TWCF와 CONTROL은 유사한 결과를 나타내었다. 이 결과에 의하면 동일한 시비량의 경우에 오수처리수 관개용수에 함유된 영양물질이 벼 수확량에 부정적인 영향을 미치지 않으며 오히려 긍정적인 영향을 미친다는 것을 의미한다. TWCF와 같이 오수처리수를 5배 희석하여 관개한 경우는 아직 관개용수의 수질기준을 크게 초과한 상태이었으나 CONTROL과 거의 유사한 결과를 나타내어, 오수처리수를 기존의 관개용수와 혼합하여 보조관개용수로 사용하는 방안의 적용가능성을 보여주었다.

3. 토양특성 변화

토양분석결과를 각 연차별로 비교·분석한 결과는 Table 4에 요약되어 있다. 2년 동안 토양의 pH 변화를 살펴보면, CONTROL을 제외한 모든 처리구에서 수확 후 토양의 pH가 이양하기 전보다 높은 값을 나타내었다. CONTROL은 수돗물을 관개한 처리구로써 다른 처리구에 비해 매우 증가폭이 작으나, 오수처리수를 관개한 처리구에서는 pH가 약산성에서 중성을 거쳐 약알칼리성으로 변화하였다. 이유는 오수처리수의 pH가 약알칼리성 상태이었기 때문이며, 이러한 현상은 오수처리수가 화학비료에 의한 토양산성화를 막아주는 긍정적인 역

할을 할 수 있다고 생각하나, 지속적인 pH의 상승은 작물생장에 영향을 줄 수 있기 때문에 보다 지속적인 관찰이 필요하다고 생각된다. 그러나, 관개용수의 pH가 지나치게 높지 않다면 급격한 토양의 pH변화는 없을 것으로 판단된다.

EC를 측정된 결과 1년차 연구에서는 CONTROL을 제외한 모든 처리구에서 수확 후가 이양 전에 비해 4~7배 증가한 것으로 나타났다. 그 중 SWCF처리구가 가장 높은 증가율을 보였으며, CONTROL은 소폭 증가하였다. 이것은 수돗물을 관개한 CONTROL에 비해 다른 처리구에 EC가 높은 오수처리수를 관개하였기 때문으로 생각된다. 이와 같이 EC가 증가하는 것은 토양중에 염류가 쌓인다는 것을 의미하며 토양에 염류가 과다

Table 4 Characteristics of paddy soil

Treatment		pH (1:5)	EC (μ S/cm)	OM (%)	CEC (meq/100g)	TN (%)	TP (mg/kg)	AV.P ₂ O ₅ (mg/kg)
First year (1999)								
DSWNF	B.T.*	6.58	31.6	0.705	9.5	0.049	652.6	280.34
	A.H.**	7.58	125.7	0.840	13.3	0.050	662.1	101.32
TWCF	B.T.	6.50	26.9	0.806	15.0	0.060	742.9	283.55
	A.H.	7.64	110.0	0.806	13.6	0.050	674.1	94.19
SWHF	B.T.	6.59	22.3	0.739	15.5	0.049	693.7	304.37
	A.H.	7.41	83.7	0.873	12.8	0.046	672.0	134.42
SWCF	B.T.	6.56	20.7	0.672	13.0	0.041	664.4	325.80
	A.H.	7.88	149.0	0.974	14.5	0.053	722.5	94.59
CONTROL	B.T.	6.45	25.0	0.605	12.0	0.048	703.7	304.11
	A.H.	6.48	31.2	0.840	10.5	0.046	638.5	152.68
Second year (2000)								
DSWNF	B.T.	7.87	184	0.756	16.0	0.064	647.5	144.46
	A.H.	8.20	60.6	1.075	26.8	0.067	560.5	16.71
TWCF	B.T.	7.91	154.5	0.588	16.1	0.062	583.9	120.38
	A.H.	8.34	55.7	0.873	24.0	0.060	526.3	20.08
SWHF	B.T.	7.67	94.8	0.705	16.1	0.055	570.7	134.86
	A.H.	7.94	51.7	0.974	29.3	0.056	558.2	19.30
SWCF	B.T.	7.91	193.2	0.739	17.5	0.060	640.7	135.5
	A.H.	8.39	78.9	1.008	26.0	0.063	556.2	20.02
CONTROL	B.T.	6.56	73.7	0.705	17.6	0.056	623.9	162.46
	A.H.	6.86	27.6	1.209	25.8	0.053	546.0	13.24

* B.T. : Before transplant

** A.H. : After harvest

집적되면 작물생육에 영향을 미칠 수 있다. 1년차와 상반되게 2년차에서는 모든 처리구에서 EC가 감소한 결과를 나타내었다. 위의 결과를 보면, 오수처리수에 의한 염류집적문제가 일시적으로 발생할 수 있으나 다시 회복이 가능함을 알 수 있다. 토양의 염류집적을 예방하기 위해서 토양의 EC에 대한 지속적인 관찰이 필요하며 오수처리수를 그대로 사용하기보다는 희석하여 관개하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

토양 중 OM은 수확 후에 모두 증가한 것으로 나타났는데, 이것은 식물체 뿐 만 아니라 개구리밥 및 조류(藻類)와 같은 각종 생물의 사체가 토양에 누적되었기 때문으로 생각된다. CEC의 경우 1년차에는 각 처리구별로 증가 및 감소한 결과를 나타냈지만, 통계학적으로 보면 이양하기 전과 수확 후의 CEC의 차이는 오차의 범위내에 존재하여 차이가 없는 것으로 나타났다. 반면에 2년차에서는 모든 처리구에서 수확 후에 증가한 결과를 나타냈다. 작물의 생육에 필요한 유효영양성분인 K^+ , NH_4^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} 등의 보유량은 CEC(양이온치환용량)가 크면 클수록 많으므로 이와 같은 면에서 생각해 볼 때 비옥한 토양일수록 CEC가 크다고 할 수 있다. 따라서 작물을 재배하면서 토양의 비옥도가 점차적으로 상승하고 있다고 볼 수 있으며 이와 같은 현상은 작물생육에 긍정적인 효과를 줄 것으로 기대된다.

토양의 TN을 살펴보면, 1, 2년차에서 모두 이양 전과 수확 후의 TN은 큰 폭으로 변화하지 않고 거의 일정한 농도를 나타내었다. 한편, TP의 경우 1년차에는 각 처리구별로 증가와 감소를 보인 반면 2년차에는 수확 후 모두 감소한 것으로 나타났는데, 이것은 2년차에 급격히 감소한 유효인산(Available P_2O_5)과 관련이 있는 것으로 생각된다. 유효인산의 경우 2년간 모든 처리구에서 감소하였지만 그 감소폭은 2년차에서 가장 컸다. 따라서 상대적으로 감소율이 적었던 1년차에서는 유효인산의 감소가 TP의 변화에 큰 영향을 미치지 못하였지만, 2년차에는 가장 큰 폭으로 감소하여 결과적으로 TP의 감소에 영향을 미친 것으로 생각된

다. TP에서 유효인산을 뺀 값은 1, 2년차의 모든 처리구에서 이양 전보다 수확 후에 더 높은 값을 나타내었다. 이는 기비로 시비한 인성분의 일부가 작물생육에 사용되지 않고 토양내에 누적인 것으로 생각된다.

이상의 토양특성변화를 살펴보면 오수처리수의 관개는 토양환경이 작물생육에 지장을 줄 수 있는 뚜렷한 저해요인으로 작용하지 않았다고 판단된다. 특히 관심 있는 관개용수의 영양물질은 농업적인 영양물질의 순환에 포함되어 오히려 긍정적인 영양물질의 순환에 포함되어 오히려 긍정적으로 작용할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 지나치게 고농도의 오수처리수를 관개하였을 경우에는 단기적으로는 토양에 미치는 영향이 뚜렷하지 않을 수 있으나 장기적이고 지속적으로 관개하였을 경우에는 토양의 작물생육환경에 악영향을 줄 수 있으므로 오수처리수는 주관개용수보다는 적절히 혼합하여 보조관개용수로 사용하는 것이 바람직하다고 생각한다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 오수처리수의 관개용수로의 재이용 가능성을 시험하기 위해 인공습지를 통해 처리한 오수처리수를 관개용수로 사용하여 인공포트에서 벼재배실험을 수행하였으며, 재배기간동안의 인공습지의 처리율, 관개용수의 농도, 수확량 및 토양특성변화를 비교·분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 인공습지를 이용해 오수를 처리한 결과 DO는 유입수의 중위수(median) 농도가 0.0mg/L이었던 것이 인공습지를 통과하면서 증가하여 유출수의 중위수 농도가 2.3mg/L로 나타났다. 오수처리수의 BOD₅, TP, TN은 각각 78%, 48%, 21%의 제거율을 나타내었고 중위수 농도는 각각 22.9mg/L, 7.4mg/L, 83.1mg/L로 수계에 방류하기에는 아직도 높은 상태이었다. 이러한 오수처리수를 이용한 본 실험의 관개용수의 평균 농도는 COD, TP, TN 농도가 각각 48.9mg/L, 6.8mg/L, 88.4mg/L로써, 농업용수 수질기준을 훨씬 초과하

는 상태이었다.

2. 각 처리구별 수확량 비교에서 오수처리수의 관개에 따른 수확량 감소는 없었고 오히려 증가하는 경향이 나타났다. 오수처리수를 회석하지 않고 관개한 처리구가 그렇지 않은 처리구보다 오히려 비교 항목에서 좋은 결과를 나타냈는데, 이는 영양물질 추가 공급으로 벼의 생육상태가 상대적으로 양호하였기 때문으로 생각된다. 실험결과에 의하면 벼 생육에서는 시비량보다는 관개용수의 농도가 크게 영향을 미치며, 적어도 본 실험에서 조사한 범위내에서는 관개용수에 의한 작물생육 및 수확에 부정적인 영향은 없는 것으로 판단된다.

3. 이양 전과 수확 후에 토양을 채취·분석한 결과 pH가 다소 증가했으나 이는 약알칼리성 상태이었던 관개용수의 pH 때문으로 우려할 정도는 아니었다. EC는 1년차에서는 증가하였다가 2년차에서는 감소하여 염류집적의 우려도 적을 것으로 생각된다. OM과 CEC는 약간씩 증가하며 점차 작물생육에 유리한 환경으로 변화되어 갔으며, TN에는 뚜렷한 변화가 없었다. 유효인산은 작물이 직접 이용하는 인의 형태로서 모든 처리구에서 수확 후 감소하였으며, 총인에서 유효인산을 제외한 값은 오히려 증가하여 인성분의 누적가능성을 나타내었다.

4. 결론적으로 인공습지를 통해 처리된 오수처리수를 관개용수로 재이용하여 2년간 벼 재배를 실시한 결과, 수확량의 감소나 토양의 질적저하는 없었으며, 오히려 긍정적인 효과를 관측할 수 있었다. 그러나, 고농도의 오수처리수를 장기적으로 관개하였을 때 작물생육 및 토양에 악영향을 줄 가능성이 있으므로, 이러한 오수처리수를 농업용수로 그대로 사용하기보다는 보조관개용수로 사용하는 것이 보다 바람직할 것으로 생각된다. 농촌지역 생활환경 개선을 위하여 농촌 주거지역에서 배출되는 생활오수를 인공습지와 같은 경제적이고 저기술형인 자연정화시설에서 1차적으로 처리하고, 처리수의 농도가 방류수수질기준을 초과하는 경우에는 본 실험에서 시도하였듯이 관개용수로 재이용하는 방안을 적극적으로 검토할 필요가 있

다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김형중, 1997, 자연정화방법을 이용한 농촌지역의 소규모오폐수처리 시스템, 박사학위 논문, 건국대학교 농공학과 대학원.
2. 권태영, 1999, 농촌오수 처리수의 농업용수로의 재이용 가능성에 관한 연구, 석사학위 논문, 건국대학교 농공학과 대학원.
3. 농림부, 1997, 농업용수수질관리지침, 농림부, pp. 114.
4. 농림부, 1999, 농촌용수 10개년 계획(보완), pp. 18-33.
5. 농촌진흥청, 1997, 작물재배생리의 이론과 실험, 농촌진흥청, pp. 732-747.
6. 우선호, 2001, 오수처리수 관개가 벼의 생육 및 영양물질수지에 미치는 영향, 석사학위 논문, 건국대학교 농공학과 대학원.
7. 윤춘경, 권순국, 김형중, 1997, 인공습지에 의한 농촌오수처리에 관한 연구, 한국농공학지, 39(4), pp.55-63.
8. 윤춘경, 권순국, 함종화, 노재경, 2000, 인공습지 오수처리시설의 처리성능에 관한 연구, 한국농공학회지, 42(4), pp. 96-105.
9. 홍문관, 1998, 환경관계법규II, 수질편, 오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률, 별표-1, pp. 597.
10. A. Feigin, I. Ravina, J. Shalhevest, 1991, Irrigation with Treated Sewage Effluent, Springer-rlag.
11. APHA, 1995, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater(19th edn.), American Public Health Association, Washington, D.C.
12. ASA and SSSA, 1982, Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties(2nd end.), American Society of Agronomy, and Soil Science Society of

- America. Madison, WI.
13. Asano T. and Levine A. D., 1998, Wastewater Reclamation, Recycling, and Reuse: An Introduction. In: Wastewater Reclamation and reuse, T. Asano (ed), vol 10, Technomic Publishing Co., Lancaster, Pennsylvania, pp. 1-56.
 14. Asano T. and Pettygrove G. S., 1987, Using reclaimed Municipal Wastewater for Irrigation, California Agriculture, vol 41, pp. 15-18.
 15. Jackson J. L. and Cross P., 1993, Citrus Trees Blossom with Reclaimed Wastewater, Water Environment and Technology, 5(2), pp. 27-28.
 16. Knight, R.L.; Payne, V.W.E. Jr.; Borer, R.E.; Clarke, R.A. Jr.; Pries, J.H., 2000, Constructed wetlands for livestock wastewater management. Ecol. Eng., 15, pp. 41-55.
 17. WPCF, 1990, Wetland Systems. Natural Systems for Wastewater Treatment: Manual of Practice FD-16: Water Pollution Control Federation: Alexandria, VA, pp. 211-260.