

벼 재배시 생활오수 처리수 관개 효과

윤춘경 · 권순국¹⁾ · 정일민²⁾ · 권태영
건국대 농공학과, ¹⁾서울대 농공학과, ²⁾건국대 농학과

The Effect of Reclaimed Sewage Irrigation on the Rice Cultivation

Chun-Gyeong Yoon, Soon-Kuk Kwun¹⁾, Il-Min Chung²⁾ and Tae-Young Kwon (Dept. of Agricultural Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, ¹⁾Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National University, Suwon, 441-744, ²⁾Dept. of Crop Science, Konkuk University, Seoul, 143-701)

ABSTRACT : A feasibility study was performed to examine the agronomic application of treated sewage on paddy rice culture by field experiment. The domestic sewage was treated by the constructed wetland system which was in subsurface flow type and consisted of sand and macrophyte. The effluent of the wetland system was adjusted to maintain the total nitrogen concentration below 25mgL⁻¹ and used for irrigation water. Four treatments include ① irrigation of treated sewage after concentration adjusted with conventional fertilization (TWCF), ② irrigation of treated sewage after concentration adjusted with half of the conventional fertilization (TWHF), ③ irrigation of treated sewage after concentration adjusted without fertilization (TWNF), and ④ irrigation of treated sewage as it was without fertilization (SWNF). These cases were compared to the control case of tap water irrigation with conventional fertilization (Control).

Generally, addition of the treated sewage to the irrigation water showed no adverse affect on paddy rice culture, and even improvement was noticed in both growth and yields. TWCF showed the best result and the yields exceed the Control in about 10%. Overall performance of the treatments was TWCF, Control, TWHF, TWNF, and SWNF in decreasing order. From this study, it appears that reuse of treated sewage as a supplemental irrigation water could be feasible and practical alternative for ultimate sewage disposal which often causes water quality problem to the receiving water body. For full scale application, further study is recommended on the specific guidelines of major water quality components and public health.

Key Words : Treated sewage, agronomic application, paddy rice culture, feasibility study, constructed wetland system, irrigation water, water quality standards,

서 론

물은 생명존재의 필수조건이다. 환경오염과 이상기후 등으로 인하여 충분하고 안전한 물의 확보가 점차 어려워지면서 물의 효율적인 이용에 대한 필요성이 요청되고 있다. 이러한 필요성은 특히 물이 부족한 지역에서 더욱 절실한데 우리 나라는 이미 물부족 국가군에 속하는 나라로 분류된바 있다.¹⁾

농업에 있어서 오수를 관개용수에 이용하는 것은 이미 수세기 동안 실시해오던 방법이다. 19세기에 하수도시스템을 개발하여 사용하였던 미국과 유럽 등지에서는 오수를 농업적으로 활용한 "sewage farm"이라고 불리는 농장이 있었으며, 1900년경까지도 수 많은 sewage farm이 운영되고 있었다.²⁾ 이러한 시설 가운데에는 수십년에 걸쳐서 아직도

활발히 사용중인 곳도 있는데, 예를 들면 호주 멜버른에 위치한 Werribee 농장은 1897년부터 성공적으로 운영되고 있다.³⁾ 그러나 이러한 오수의 관개용수에 이용은 위생문제, 작물생육에 미치는 영향, 그리고 수계환경에 미치는 영향 등을 고려하면서 실시되어야 한다.

근래에 오수처리수의 재이용에 관한 연구가 활발해지고 있는데, 농업에의 이용은 주로 미국의 서부지역과 호주, 멕시코, 이스라엘 등 주로 건조지역에서 불모지를 이용해 오수를 처리하기 위한 방법(land treatments)으로 시작되었다. 오수처리수를 농업용수로 재이용함으로써 얻는 이득은 첫째, 수자원의 이용량에서 가장 많은 비율을 차지하는 농업용수에서의 수자원 이용효율을 높이는 것이고, 둘째, 오수처리수에 포함된 영양물질을 작물의 생육에 이용함으로써 비료절감효과와 생산량 증대를 기대할 수 있는 것이며, 세

번째는, 영양물질이 함유된 오수처리수를 수계로 직접 보내지 않고 농지로 환원시켜 농지가 또 하나의 처리시설 역할을 함으로써 수질오염을 방지하는 것 등이다.¹⁰ 그러나, 비과학적이고 무계획적인 오수의 농업용수로의 재이용은 공중보건의 위험요소로 작용하며, 환경 및 토양에 악영향을 주고, 하천 및 호소의 부영양화 및 오염원으로 작용할 수도 있으며, 과도한 영양물질 및 기타 물질의 영향으로 오히려 작물에게 성장장애 및 수량감소를 초래할 수도 있다.

우리나라의 수자원 사용용도를 살펴보면, 생활용수 21%, 공업용수 8%, 농업용수 50%, 하천유지용수 21%으로서 농업용수가 차지하는 비중이 가장 크다.¹¹ 이와 같이 농업용수가 차지하는 비중이 큰 중요한 이유중의 하나는 물을 많이 필요로 하는 벼재배가 주요 농업활동이기 때문이다.

전통적으로 자연의 정화능력에 주로 의존해 오던 우리나라 농촌환경도 이제는 오염의 안전지대가 아니며, 도시지역에 비하여 상대적으로 오염정화시설에 관심을 덜 보여왔기 때문에 근래에는 오히려 주된 오염배출원으로 지목받고 있다. 이는 농경지로부터 비료와 농약성분의 유출, 축산농가로부터의 축산폐기물 발생증가, 그리고 농촌생활환경의 개선에 따른 수세식화장실의 보급과 물소비형태의 변화로 생활오수 발생량이 증가하면서 수질오염을 가속화시키고 있기 때문이다. 특히, 증가하고 있는 생활오수는 수질오염뿐만 아니라 주민위생에도 영향을 미칠 수 있기 때문에 이의 적절한 처리를 위하여 여러 가지 처리방안들을 검토하고 있는 중이다.

농촌지역은 도시지역과는 달리 마을이 넓은 지역에 산재되어 있으므로 하수도를 이용하여 멀리 떨어져 있는 지역의 오수를 한곳으로 수집하여 처리하는 종말처리장의 도입은 비현실적이며, 농촌이라는 특수성을 고려할 때 유지관리가 간편한 소규모 처리시설이 적합하다고 할 수 있다. 이러한 조건을 만족시키는 대안으로 연구중인 방안이 인공습지를 이용한 처리방법이다. 종말처리장에서는 물리·화학·생물학적인 방법에 의하여 방류수 수질을 조절하기 쉬운 반면에, 인공습지 처리방법은 자연의 정화능력에 의존하기 때문에 수질 조절의 폭이 상대적으로 좁다. 일반적으로 인공습지는 안정적인 처리성능을 나타내지만 경우에 따라서는 도시지역의 하수종말처리장에 적용하는 수질기준을 만족시키지 못할 경우도 발생할 수 있다. 인공습지 처리시설의 보급을 위해서는 이러한 특성을 지닌 방류수가 인근 농촌지역 하천에 유입되어 관개용수로 사용되었을 때 작물생육에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

본 실험에서는 생활오수를 인공습지에 의하여 처리한 처리수를 농업용수로 관개하여 재이용하였을 때 작물에 미치는 영향을 검토하였다. 실험에 사용한 재배작물은 우리나라 농업용수 사용의 대부분을 차지하는 벼였으며, 질소나

인등이 상대적으로 많이 함유된 오수처리수를 관개용수에 사용하였을 때 일어날 작물의 생육, 생산량, 그리고 종실(種實)의 성분변화 등을 조사하여 오수처리수의 관개용수로 재이용 가능성을 검토하였다.

재료 및 방법

분석방법

수질측정항목은 생활오수에서는 유독성물질의 함유가능성이 낮음을 고려하여, 분석시간이 비교적 빠르고 관개용수와 관련성이 높은 유기물과 영양물질 위주로 분석하였다. 온도, pH, COD, SS, T-P, 그리고 T-N을 측정하였으며, T-N은 Org-N, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N을 각각 분석한 후 합하여 구하였다. 물 시료는 Standard Methods⁹에 따라 분석하였다.

토양성분의 분석은 실험전의 토양과 수확후의 처리구및 대조구 토양을 토양의 일반적인 특성을 파악할 수 있는 항목인 pH, EC, OM, CEC, T-N, T-P, Available-P₂O₅ 등을 분석하였으며, 토양중의 무기물질인 Ca, K, Na, Mg, Mn, Fe, B, Al과 토양오염기준에 포함된 Cd, Pb, Cr, Zn, Cu와 As 등을 분석하였다. 토양시료의 분석방법은 Methods of Soil Analysis¹⁰를 기준으로 하였다.

성장분석방법은 재배한 벼를 8월 3일부터는 7일 간격으로 3개체씩 3반복으로 채취하여 초장과 분얼수를 조사하고, 기관별로 분리하여 Hayashi Denkoh사의 AAM-8 자동 엽면적 측정기로 엽면적을 측정한 후, 엽과 줄기로 분리하여 종이 봉투에 담아 60℃의 건조기에서 1주일 건조시킨 후 엽과 줄기의 건물중을 측정하였다.

10월 21일에 각각의 개체를 수확하여 수장 및 간장을 측정하고, 개체 당 이삭수와 이삭 당 영화수, 그리고 비중이 약 1.06인 소금물을 이용하여 등숙율을 구하고, 가라앉은 낱알을 60℃에서 3일간 건조 한 후 무게를 달아 수확량을 산정 하였다. 이 중에서 1,000개를 임의로 세어 무게를 확인하여 천립중을 구하였다. 이 결과를 단위면적과 개체수 등을 고려하여 수량구성요소 및 수확량으로 환산하였다. 또한 수확량은 SAS를 이용한 통계분석을 통해 LSD를 나타내었다.¹²

또한 수확물의 유해성을 평가하기 위해 현미의 중금속 농도를 분석하였는데 Teflon재질로 된 용기에 건조된 현미를 분쇄하여 일정량을 취한 후 혼합산 용액을 넣고 hot plate에서 용액이 될 때까지 완전 분해한 후에 프랑스 Jobin Yvon사의 JY-138 Ultrac ICP-AES로 분석하였다.

관개용수 및 논토양의 특성

본 실험에 사용한 인공습지 처리시설을 통과한 처리수를 관개한 날짜별로 20L씩 관개하였으며, 관개용수로 사용한 처리수 및 회석처리수의 COD, SS, T-N, T-P의 측정된 결과

Table 1. Concentration of irrigation water

DATE	Irrigation Water Type	Items				
		pH	COD	SS	T-N	T-P
May 31	TW*	7.20	118.30	35.00	132.30	12.20
	SW**	6.84	23.66	7.00	26.46	2.44
Jun 6	TW	7.14	123.10	32.00	102.00	14.50
	SW	6.75	24.62	6.40	20.40	2.90
Jun 10	TW	7.0	120.20	38.50	86.50	7.20
	SW	6.71	24.04	7.70	17.30	1.44
Jun 18	TW	7.3	97.50	21.40	104.60	11.00
	SW	7.04	19.50	4.28	20.92	2.20
Jun 22	TW	7.4	90.00	24.00	96.40	10.60
	SW	7.11	18.00	4.80	19.28	2.12
Jun 28	TW	7.1	84.50	18.00	111.10	8.70
	SW	6.74	16.90	3.60	22.22	1.74
July 6	TW	7.0	103.00	28.70	84.50	6.20
	SW	6.69	20.60	5.74	16.90	1.24
July 13	TW	6.9	58.20	27.00	41.00	4.70
	SW	6.67	29.10	13.50	20.50	2.35
July 17	TW	6.9	69.50	16.00	52.40	3.50
	SW	6.59	34.75	8.00	26.20	1.75
July 24	TW	6.7	32.00	9.80	32.70	4.40
	SW	6.77	32.00	9.80	32.70	4.40
August 18	TW	6.8	30.50	8.50	37.50	4.60
	SW	6.71	30.50	8.50	37.50	4.60
August 25	TW	7.0	16.30	4.80	32.00	2.80
	SW	6.58	16.30	4.80	32.00	2.80
September 4	TW	6.8	15.50	4.00	29.80	2.95
	SW	6.62	15.50	4.00	29.80	2.95
September 11	TW	7.0	10.10	6.10	31.10	0.48
	SW	7.03	10.10	6.00	31.00	0.48
September 18	TW	6.8	20.10	4.60	36.90	0.66
	SW	6.82	20.10	4.00	36.00	0.66
Average	TW	7.02	65.92	18.56	67.39	6.30
Concentration	SW	6.78	22.38	6.54	25.95	2.27

* TW- Irrigation using nutrient controlled treated sewage water

**SW-Irrigation using nutrient not controlled treated sewage water

를 Table 1에 나타냈다. 작물재배실험에는 오수처리수를 농도에 관계없이 희석하지 않고 관개한 처리구, T-N을 기준으로 농도를 희석 조절하여 T-N 평균농도가 약 25 mgL⁻¹인 용수를 관개한 처리구, 그리고 대조구에는 이러한 성분이 없는 수돗물을 사용하였다. 희석하여 관개한 관개용수의 수질은 Table 1과 같으며, 인공습지의 처리율이 높아져서 처리수의 T-N농도가 약 30mgL⁻¹로 낮아진 7월 24일 부터는 희석하지 않고 오수처리수를 그대로 관개용수로 사용하였다.

결과적으로 영양물질을 조절치 않은 처리수를 관개한 포

트에는 약 20g의 질소와 1.8g의 인이 관개용수를 통하여 공급되었고, 영양물질을 조절한 처리수는 약 7.5g의 질소와 0.6g의 인이 관개용수를 통하여 공급되었으며, 이러한 관개용수 수질은 현재의 농업용수 수질기준과 비교한다면 영양물질이 과다한 상태임을 알 수 있다.

실험에 사용한 토양의 특성은 Table 2에 요약되어 있다. 토양의 성분은 실험이 시작되기 전의 상태이고, 처리구 및 대조구의 성분을 실험이 종료된 후에 시료를 채취하여 분석한 결과는 결과 및 고찰에 나타내었다.

Table 2. Chemical properties of the initial paddy soil

Items	pH(1:5)	EC(mS m ⁻¹)	OM(g kg ⁻¹)	TN(g kg ⁻¹)	TP(mg kg ⁻¹)	AV.P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	CEC(cmol kg ⁻¹)
Paddy Soil	5.47	5.48	0.79	0.23	472.9	541.93	8.7
Items	Na(mg kg ⁻¹)	K(mg kg ⁻¹)	Ca(mg kg ⁻¹)	Mg(mg kg ⁻¹)	Fe(mg kg ⁻¹)	Mn(mg kg ⁻¹)	Al(mg kg ⁻¹)
Paddy Soil	25.83	88.75	134.3	85	93.865	14.23	294.25
Items	B(mg kg ⁻¹)	Zn(mg kg ⁻¹)	As(mg kg ⁻¹)	Pb(mg kg ⁻¹)	Cd(mg kg ⁻¹)	Cr(mg kg ⁻¹)	Cu(mg kg ⁻¹)
Paddy Soil	1.143	2.03	0.13	1.28	0.005	0.083	1.21

Table 3. Explanation of abbreviations of control and treatment plot

Abbreviation	Explain of treatment plot
TWNF	The treatment plot with irrigation using nutrient controlled treated sewage water and not fertilized.
TWCF	The treatment plot with irrigation using nutrient controlled treated sewage water conventional fertilization.
TWHF	The treatment plot with irrigation using nutrient controlled treated sewage water and a half of the conventional fertilization.
SWNF	The treatment plot with irrigation using nutrient not controlled treated sewage water and not fertilized.
Control	Control plot with irrigation using tapwater and conventional fertilization.

Fig. 1. Section of experimental plot for rice cultivation

작물재배실험

작물재배실험은 1998년 5월 25일에 건국대학교 농업생명과학대학내에 있는 인공습지에 의한 오수처리시설 옆에 위치한 약 40m² 규모의 Fig. 1과 같은 인공포트에 공시품종 일품 벼를 1주 1본씩 포트 당 22개체씩, 대조구 1개와 처리구 4개에 3반복 처리하여 총 15개 포트에 이양 하였다. 대조구의 경우 시비량은 N : P : K = 11kg : 7kg : 8kg (10a 기준)을 재배면적을 고려하여 시비하였으며, 처리구는 각각 처리형태에 따라 대조구를 기준으로 비율별로 시비하였다. 1998년 10월 21일 수확까지의 방제 및 기타 관리는 대조구와 처리구 모두 증부지방 관행재배법을 따랐다.⁹⁾

관개용수는 일반적으로 10a당 500kl~2,000kl의 관개용수가 필요한데 포트의 표면적이 약 1m² 이므로 500l~2,000l가 된다. 따라서, 관개용수는 1회에 20l씩 15회에 걸쳐 300l를 관개하였고 강우의 양을 고려 할 때 500l 이상으로 적정범위가 공급되었다.

작물재배 실험시설

실험에 사용한 포트의 단면도는 Fig. 1 그리고 실험 시설 전경은 Fig. 2와 같다. 110cm×90cm×70cm 규모에 약 1m²의 표면적을 가진 합성수지용기를 인공재배포트로 사용하였다. 밑부분에는 배수를 위해 밸브를 설치하였고, 포트의 바닥에는 약 10cm의 자갈을 채우고 그 위에 부직포를 덮

은 후에 논토양을 약 40cm정도 채웠다. 흙위에는 약 10cm의 공간이 있어서 관개용수를 충분히 공급할 수 있었으며, 포트주변은 흙으로 채워서 대기 온도에 의한 영향을 최소화하여 실제 논의 상태와 유사하도록 환경을 조성하였다.

실험포트 약어 설명

관개방법 및 시비방법에 따른 포트를 다음과 같은 약어로 표현하여 Table 3에 나타내었다. Control은 수돗물을 관개용수로 사용하고 관행재배법에 의하여 표준시비량을 시비한 대조구이며, TWNF는 회석하여 농도를 조절한 오수처리수를 관개하고 비료를 사용하지 않은 처리구, TWCF는 회석하여 농도를 조절한 오수처리수를 관개하고 관행재배법에 의하여 시비한 처리구, TWHF는 회석하여 농도를 조절한 오수처리수를 관개하고 관행재배법의 표준시비량의 절반에 해당하는 비료를 시비한 처리구, 그리고 SWNF는 오수처리수 농도를 조절하지 않고 그대로 사용하고 비료를 사용하지 않은 처리구를 각각 가리킨다.

결과 및 고찰

토양의 변화결과

실험전 토양과 수확후의 대조구와 각각의 처리구에서 토양을 분석 비교하여 Table 4에 나타내었으며, 이는 오수처리수 관개가 토양에 끼친 영향의 정도를 알아보기 위하여 실시되었다.

실험기간동안 처리구 토양의 pH와 OM은 약간 증가하였고, EC는 감소하였으며, T-N은 약간 증가하였으나 인의 경우 Available-P2O5가 현저히 감소하였다. 그밖에 Mn이 증가한 것을 제외하고는 다른 성분은 큰 차이가 없었다. 토양 중 pH가 증가한 이유는 pH가 7이상이었던 관개용수의 영향이고, OM이 증가한 이유는 작물재배과정에서 관개용수에 함유되어 있던 유기물성분의 공급과 식물의 뿌리나 식물체 등이 토양에 잔류되었기 때문인 것으로 판단된다. EC가 감소한 이유는 토양의 환원이 이루어진 것으로 보이며, 유효인산이 감소한 이유는 작물에 의한 흡수 때문으로

Fig. 2. General view of experimental area for rice culture

Table 4. Characteristic of initial paddy soil and different treatment plot soil

Items	Initial	Plot Name*				
	Soil	TWNF	TWCF	TWHF	SWNF	Control
pH (1:5)	5.47	6.02	6.31	6.34	6.14	6.32
EC(mS m ⁻¹)	5.48	2.7	1.77	1.87	1.89	2.01
OM(g kg ⁻¹)	0.79	0.890	0.991	0.840	0.974	1.008
TN(g kg ⁻¹)	0.23	0.266	0.252	0.231	0.252	0.301
TP(mg kg ⁻¹)	472.9	417.0	502.5	483.4	409.3	493.0
AVP ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	541.93	261.11	280.05	268.10	303.03	283.17
CEC(cmol kg ⁻¹)	8.7	9.1	11.2	10.6	12.3	11.8
Na(mg kg ⁻¹)	25.83	18.9	17.6	20.25	23.35	19.675
K(mg kg ⁻¹)	88.75	66.5	70.5	65.75	71.5	77.75
Ca(mg kg ⁻¹)	134.4	126.7	151.2	148.6	141.5	153.8
Mg(mg kg ⁻¹)	85	83.73	91.23	93.48	95.73	99.98
Fe(mg kg ⁻¹)	93.87	105.115	102.865	105.865	132.615	118.115
Mn(mg kg ⁻¹)	14.23	57.5	50.325	61.75	70	68
Al(mg kg ⁻¹)	294.25	334.75	338	328.5	349.49	335.23
B(mg kg ⁻¹)	1.14	0.585	0.718	0.693	0.483	0.478
Zn(mg kg ⁻¹)	2.03	2.468	3.055	2.53	2.315	2.588
As(mg kg ⁻¹)	0.13	0.15	0.133	0.12	0.138	0.145
Pb(mg kg ⁻¹)	1.28	2.068	1.82	1.786	2.125	1.925
Cd(mg kg ⁻¹)	0.005	0.018	0.02	0.025	0.023	0.043
Cr(mg kg ⁻¹)	0.083	0.103	0.120	0.102	0.122	0.104
Cu(mg kg ⁻¹)	1.21	1.365	1.58	1.40	1.59	1.65

* See for the plot name in Table 3.

생각된다. T-N이 소량 증가한 이유는 관개용수나 시비를 통하여 공급된 질소 때문으로 생각된다.

작물 성장조사

작물생장의 특성을 조사하기 위해 8월 3일부터 7일 간격으로 5회에 걸쳐 3개체씩 취하여 3반복 실험으로 초장, 분얼수, 엽면적, 건물중 등을 조사하여 단위기간 동안 생장의 특징 및 증가량을 조사하였다. 본 실험이 많은 개체 반복을 요구하므로 시료의 개수부족과 실험 여건을 고려하여 전 기간에 걸친 성장분석은 이루어지지 않았지만 가장 생육의 변화가 왕성한 출수기 전까지 한달 간을 실험기간으

로 정하여 실험하였다.

초장은 작물의 크기를 알아봄으로 생육정도를 쉽게 판별할 수 있는 척도로서 실험결과가 Fig.3에 나타나 있다.

초장은 TWCF, TWHF, 그리고 Control이 모두 증가속도나 증가폭이 대체적으로 유사한 경향을 나타냈고, 비료를 공급하지 않은 TWNF와 SWNF에서는 상대적으로 초장이 작았다. 벼의 경우에는 초장이 너무 크면 생육후기에 도복현상이 일어날 가능성이 높으므로 초장이 큰 것이 작물의 수확에 반드시 도움이 되는 것은 아니다. 최종순위는 Control > TWCF > TWHF > TWNF > SWNF 순으로 나타났다.

분얼수(tiller number)는 다수확의 조건이며 작물의 튼튼한

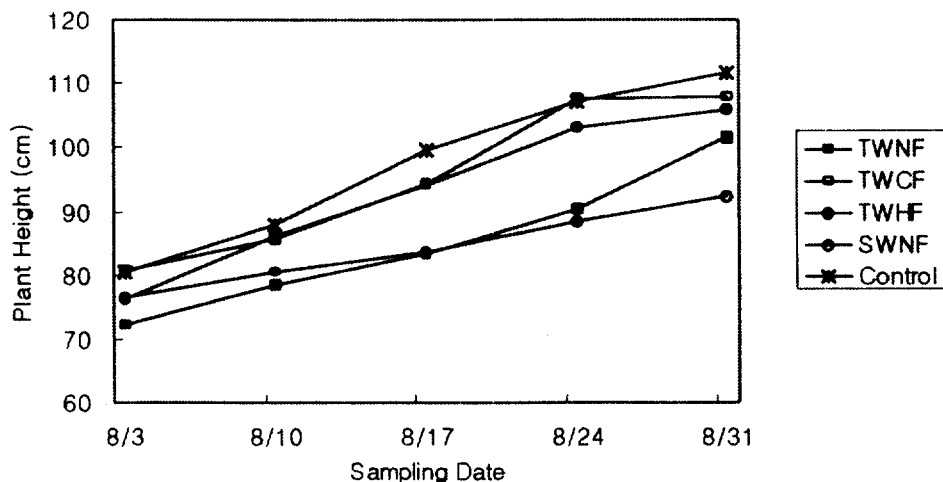


Fig. 3. Comparison of plant heights

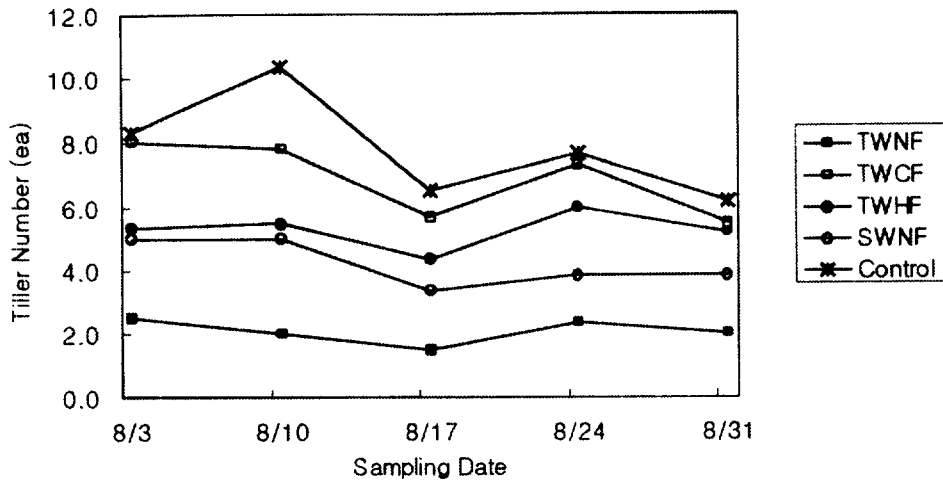


Fig. 4. Comparison of tiller numbers

생육의 중요한 요소이다. 그러나, 너무 많으면 수확시에 등숙율과 수확량에 영향을 끼칠 수도 있다. 분얼수는 최대분얼기까지 증가하며 이후에는 분얼수가 감소한다. 처리별 분얼수의 조사결과는 Fig. 4과 같다. 대부분 8/10일경에 최대분얼을 나타냈으며 그 이후는 감소하는 경향을 보였는데, Control이 가장 많은 분얼수를 나타냈으며 TWCF, TWHF 순 이었는데, 여기에서도 SWNF와 TWNF는 낮은 결과를 보였다.

Fig. 5에는 처리방법별로 건물중을 비교하였는데, Control과 TWCF은 거의 같은 정도의 수준으로 증가하였고, TWHF는 증가형태는 유사했으나 낮은 값을 나타냈으며, SWNF와 TWNF는 현저히 낮아서 결과적으로 수확량이 낮아졌다.

건물중은 작물내에 탄수화물, 단백질, 지질 및 무기양분 등을 얼마나 함유하고 있는가를 측정하는 것으로서, 작물 조직내 수분을 제거하고 나머지 중량을 측정한다. 건물생산량은 작물의 동화량과 호흡량의 두 가지 요인에 의하여

결정되며 이들은 엽면적, 단위면적당 동화능력, 수광능률의 3가지 요소와 밀접한 관계가 있다. 동화량은 엽면적이 크고 하위엽까지 햇빛이 충분하여 수광능률이 높을수록 커진다.¹¹⁾

엽면적은 식물군락이 일사를 많이 받을 수 있는가를 측정하는 지표로서 광합성량을 좌우하며 식물생장에 중요한 기본적 지표이다.¹²⁾ 조사결과는 Fig. 6과 같은데 SWNF과 TWNF는 다른 세 가지 경우에 비하여 현저히 낮았으며, TWCF와 Control은 상대적으로 우수한 결과를 보였고, TWHF의 경우도 중간에는 조금 낮았으나 나중에는 대조구와 유사하였다.

엽면적지수(LAI, leaf area index)는 작물의 초장 높이까지 단위면적내에 있는 모든 엽의 면적으로서 $LAI=La/S$ 에 의하여 구할 수 있다. 여기에서 La = 단위면적내의 모든 엽의 면적 (m^2), 그리고 S =면적 (m^2)을 나타낸다. 본 실험에서는 출수기의 각 시료구 엽면적지수를 비교하여 Fig. 7에 요약하였다. 식물의 건물생산은 진정광합성량과 호흡량의 차이,

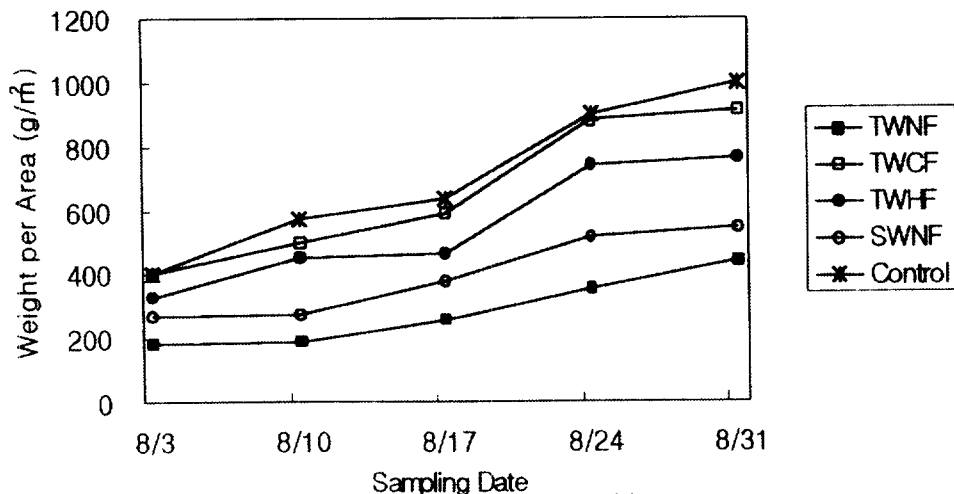


Fig. 5. Comparison of total dry weights

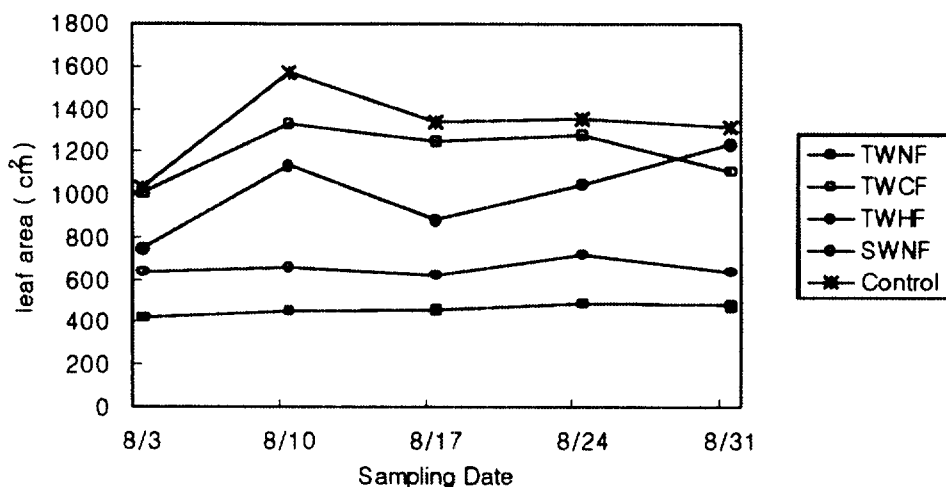


Fig. 6. Comparison of leaf areas

즉 외견상광합성량에 의해서 결정된다. 식물군락에서 엽면적이 증대하면 군락의 진정광합성량은 그에 따라서 증대한다. 그러나 너무 많아지면 엽의 그늘 때문에 오히려 진정광합성량의 증대가 이루어지지 않는다. 최적엽면적지수는 수광태세에 따라서 크게 변동하며 일사량과 깊은 관계가 있다.¹¹⁾ 엽면적지수는 관행재배법으로 경작한 Control이나 TWCF, TWHF와 같이 비료를 사용한 처리구가 높았으며, 비료를 사용하지 않은 SWNF와 TWNF는 역시 저조하였다.

작물 수확량조사

벼의 수확은 1998년 10월 21일 실시하였으며, 대조구와 처리구의 수량구성요소에 관한 조사와 수확량을 조사 비교한 결과는 Table 5에 요약되어 있다.

간장은 식물체의 길이를 나타내며 수장은 이삭의 길이를 나타낸다. 반드시 간장 및 수장의 크기가 수확량과 비례하지는 않지만 외형적인 성장을 가장 간단히 알아 볼 수 있는 항목이다. 특히 수장의 길이는 이삭의 길이이므로 이

길이가 길면 많은 낱알이 붙을 수 있음을 의미한다. Table 5에서 알 수 있듯이 간장의 길이는 TWCF와 대조구가 가장 크게 나타났고 SWNF가 가장 작았으며, 수장의 길이에서도 SWNF는 가장 작게 나타났다.

단위면적 당 이삭 수는 단위면적(m²)안에서 수확된 각 개체의 이삭의 총 개수를 말하며 수확량에 밀접한 관계가 있는데, TWCF가 125개로서 115개인 Control보다 많았으며, TWHF가 82개, 그리고 SWNF와 TWNF는 각각 53개와 39개로 현저히 적었다.

평균 이삭 당 영화 수는 각 개체에서 열린 이삭의 낱알 개수를 말하는데 Control, TWCF 그리고 TWHF와 함께 TWNF도 유사하게 많았는데 SWNF가 가장 적었다.

등숙율은 총 낱알 개수 중에서 비중이 1.06이상의 낱알의 개수를 측정하여 낱알의 등숙 정도를 %로 나타내는 것인데, 부실한 낱알은 수확량 계산에서 배제되어 작물수확량에 영향을 미친다. Control, TWHF 그리고 TWCF는 약 80%로 비슷한 결과를 나타낸 반면에 단위면적 당 이삭수

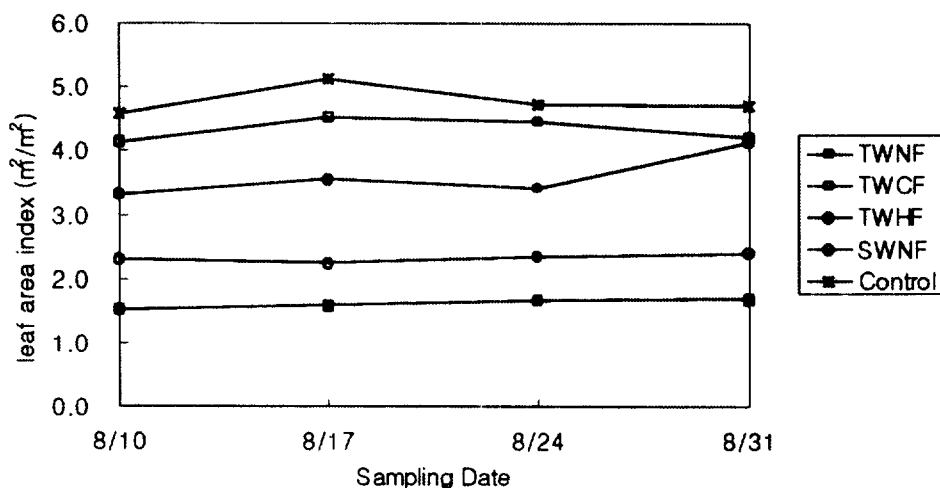


Fig. 7. Comparison of leaf area index

Table 5. Comparison of yield component and grain yield among treatments

Plot	C.L. (cm)	P.L. (cm)	Yield Component				Yields (g pot ⁻¹)
			P.U.	M.S.	R.G.(%)	T.W.(g)	
TWNF	103.8	23.3	39	118.0	82.28	24.4	387.7 [†]
TWCF	109.4	23.5	125	118.2	79.17	23.1	860.0 ^a
TWHF	104.2	22.1	82	112.5	80.61	23.1	546.6 ^b
SWNF	91.9	21.7	53	101.9	86.23	25.3	358.7 ^c
Control	109.4	22.5	115	116.6	79.13	23.5	788.0 ^b

C.L. = main culm length (cm), P.L. = panicle length (cm), P.U. = panicle number per unit area (m²), M.S. = mean of spikelet number per panicle

R.G. = percent of ripened grain (%), T.W. = 1000 grain weight (g)

† Within rows means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level as determined by least significant difference(LSD).

가 적었던 TWNF와 SWNF에서는 오히려 높은 결과를 보였다. 이러한 결과는 등숙율이 단위면적 당 상대적으로 저조한 경향을 나타내는 것은 일반적으로 알려져 있는 사실이다.

천립중은 등숙된 낱알을 임의로 1000개를 세어 무게를 달아 낱알의 등숙 정도를 무게로 나타낸 것인데, 천립중에서도 등숙율과 같이 TWNF나 SWNF가 가장 높은 결과를 보였다.

이상의 모든 수량구성요소를 종합하여 작물의 최종 수확량을 계산하였으며, 수확량을 pot당 수확량(평균 g)으로 환산하여 나타냈는데, 실험결과가 Table 4에 요약되어 있다. Control은 788.0 g pot⁻¹이었는데 TWCF는 860.0 g pot⁻¹로서 Control보다 약 9%정도 많은 수확량을 나타냈고, 시비량을 절반으로 감소하였던 TWHF는 546.6 g pot⁻¹로 Control에 비하여 70%정도에 그쳤으며, 시비하지 않았던 TWNF와 SWNF는 각각 387.7 g pot⁻¹, 358.7 g pot⁻¹로서 대조구의 절반에도 못 미치는 매우 저조한 결과를 나타내었다. 이것은 벼 재배에서 관개용수의 수질보다는 시비량에 따라 수확량이 결정된다는 사실을 입증하는 결과였다. 이러한 결과는 SAS를 이용한 LSD검정 결과에서도 알 수 있는데 대조구인 Control과 가장 많은 수확을 나타낸 TWCF는 같은 집단으로 분류된 결과를 보이며, 비록 수확량이 조금 떨어지긴 하지만 TWHF의 경우도 대조구 같은 경향을 나타냈으며, 시비를 하지 않은 처리구와도 같은 집단으로 분류되었다.

TWCF의 수확량이 Control에 비해서 높게 나타난 결과는 총질소농도를 약 25mgL⁻¹로 조절한 오수처리수를 관개하고 관행재배법에 의하여 시비한 경우가 깨끗한 물을 관개하고 같은 분량을 시비한 경우보다 오히려 약 10% 수확이 많았

다는 것을 의미한다. 이것은 오수처리수가 용수수에 유입되어 적절하게 희석된 후에 벼재배에 관개되어도 수확에 지장을 초래하지 않는 것은 물론이고 오히려 수확량을 증가시킬 수 있다는 고무적인 결과이다.

이와 같은 결과에 의하면 하수종말처리장을 설치운영하기 어려운 농촌지역에서 인공습지와 같은 저기술형 처리시설을 운영하면서, 처리수를 수계에 방류하지 않고 관개용수에 적절하게 혼합하여 재이용할 경우에 작물에 미치는 영향은 오히려 긍정적일 수 있다고 판단된다. 본 연구에서 실험한 관개용수의 총질소농도는 약 25mgL⁻¹이었는데, 이 정도의 농도는 일반적으로 규정하고 있는 관개용수 수질기준보다 월등히 높은 농도이다. 그럼에도 불구하고 벼재배에 지장이 없었다는 연구결과로 미루어 볼 때 향후 관개용수 수질기준의 현실화가 필요하다고 생각한다.

종실의 중금속 원소분석

오수처리수를 관개용수에 사용하였을 때 작물 종실의 구성성분에 미치는 영향을 분석하였다. 분석항목은 관개용수 및 토양의 오염을 조사하기 위해 일반적으로 조사되는 항목들이다. Table 3에는 대조구 및 처리구의 수확물에 관한 중금속 및 비소 함량, 그리고 우리 나라와 일본에서 발표된 오염되지 않은 지역에서 재배한 쌀의 자연 함유량이 비교되어 있다.

실험결과를 살펴보면 처리구의 결과가 대조구와 유사한 범위에 있었고, 자연함유량으로 발표된 기존자료와도 유사하였다. 아연과 구리의 경우는 자연함유량에 비해 약간 높게 나타났는데 이유는 분석방법의 차이 때문으로 추정된다. 본 실험에서는 일반적인 침출법에 비해 상대적으로 큰 값

Table 3. Element concentrations of rice harvested from experiment and background

Element (mg kg ⁻¹)	TWNF	TWCF	TWHF	SWNF	Control	BG-I*	BG-II*	BG-III*
Pb	0.37	0.64	0.43	0.53	0.40	0.44	0.43	0.13
Cd	0.012	0.062	0.031	0.053	0.06	0.05	0.06	0.05
Cr	0.26	0.30	0.68	0.42	0.52	-	-	-
Cu	3.96	6.33	3.91	4.60	5.18	3.31	2.31	3.23
As	0.033	0.025	0.031	0.040	0.032	-	0.08	0.14
Zn	24.74	37.48	30.58	40.51	36.97	20.60	16.60	27.10

* Background concentrations from rice cultured in nonpolluted area(10)

들이 나오는 혼합산분해법을 사용하였다. 같은 방법을 사용한 대조구와 처리구의 결과가 모두 높으며 유사한 범위에 있다는 것이 간접적으로 이러한 추정을 가능하게 한다.

오수처리수를 회석하지 않고 그대로 관개한 SWNF의 경우에 대조구나 다른 처리구에 비해 원소에 따라 약간 수치가 높게 나온 경향이 있으나 우려할 만한 수준은 아니다. 따라서 오수처리수를 관개용수에 그대로 사용하여도 종실의 성분에 미치는 중금속에 관한 영향은 적으며, 회석하여 사용하였을 경우에는 더구나 영향이 거의 무시할 정도일 것으로 판단된다.

다만 오수처리수가 유독적인 산업오수가 아닌 생활오수의 처리수인 하지만 실제사용에 따른 공중보건 위생상이나 작업의 용이성, 심미적인 요소 등과 같은 내용은 실질적인 대규모 재배단위환경에서의 추가적인 실험을 통해 확인해야 할 것으로 생각된다.

요 약

본 연구에서는 인공습지 처리시설에서 나오는 생활오수 처리수의 농업용수로 재이용 가능성을 조사하기 위하여 관개용수의 수질과 시비량을 조절하여 벼재배실험을 수행하였으며, 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. T-N농도가 약 25mgL⁻¹까지는 생활오수 처리수를 함유한 관개용수의 수질이 벼의 생장과 수확면에 모두 거의 영향을 미치지 않았으며, 결정적인 영향을 미친 요인은 시비량이었다.
2. 시비량을 동일하게 하였을 경우에 수돗물을 관개한 대조구보다 T-N을 약 25mgL⁻¹로 조절 하여 영양물질을 함유한 상태의 생활오수처리수를 관개한 실험구가 오히려 약 9%정도 많이 수확하였다. 이러한 결과는 적절한 농도의 오수처리수는 벼의 재배에 장애가 되는 것이 아니고 오히려 유익할 수도 있음을 의미한다.
3. 종실의 중금속성분 분석결과에 의하면 생활오수처리수의 관개가 종실의 중금속축적에 미치는 영향이 거의 없었다. 따라서, 생활오수처리수를 관개함으로써 종실에 중금속유해성분이 증가하여 건강에 악영향을 미칠 가능성은 적다고 생각된다. 다만 위생적인 작업환경 및 심미적인 영향에 대해서는 구체적인 연구가 수행되어야 할 것이다.
4. 이상의 실험결과에 의하면 오수처리수는 벼재배에 오염성분으로 작용하기보다는 오히려 유익한 관개용수로 재이용할 수 있다고 판단된다. 이러한 결과는 물 부족 국가로서 다량의 관개용수를 필요로 하며 용수부족을 자주 겪는 우리 나라의 벼재배에는 특히 적용가능성이 높다고 판단된다.
5. 생활오수 처리수의 관개를 본격적으로 적용하기 위해서는 벼재배에 악영향을 미치지 않는 범위에 대한 과학적

이고 현실적인 수질기준을 설정, 영양물질을 함유한 관개용수 사용에 따른 시비량의 조정, 그리고 인공습지와 같은 저기술형 오수처리시설들이 농촌지역의 소규모 처리시설로서의 활발한 보급을 위하여 지속적인 추가연구가 필요하다.

인 용 문 헌

1. Kwun, Soon-Kuk. (1997). Issues and Perspectives on the Demand and Supply of Agricultural Water. Report of 47th Regular Monthly Seminar of the Forum for Agricultural and Rural Policy : 50.(in Korean)
2. Sterritt, R. M., and J. N. Lester. (1988). Microbiology for Environment and Public Health Engineers, Spon, London.
3. Mcpherson, J. B. (1979). Land Treatment of Wastewater at Werribee: Past, Present, and Future. Pro Water Tech. 11 : 15-31.
4. Rowe, D. R., and J. S. Abel-Magid. (1995). Handbook of Wastewater Reclamation and Reuse, Lewis Publishers : 23.
5. Rural Development Corporation. (1997). Study on Water Quality Standards for the Paddy Irrigation. 97-05-25 : 205.(in Korean)
6. Yoon, Chun-Gyeong, Soon-Kuk Kwun, and Tae-Young Kwon. (1998). Feasibility Study of Constructed Wetland for the Wastewater Treatment in Rural Areas. J. Korean Soc. of Agri. Eng. 40(3) : 83-93.(in Korean)
7. American Public Health Association. (1995). Standard Methods for the Water and Wastewater Examination, 19th ed., Washington. D.C.
8. American Society of Agronomy, and Soil Science Society of America. (1992). Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and microbial Properties, 2th ed., Madison, Wisconsin.
9. Office of Rural Development. (1997). Technical Note for Agricultural Science(2), Theory and Experiment for the Principle of Crop Cultures : 732-747.(in Korean)
10. Kim, B. Y. (1997). Status and Management Measures of Environmental Pollution, National Institute of Agricultural Science and Technology, Korea : 27~53.(in Korean).
11. Yoon, S. H. (1994). Advanced Crop Cultivation. Hyangmoon. pp. 198-204
12. SAS Institute. (1985). SAS user's guide: Basics. 5th ed. SAS Inst. Cary, NC.