

# 농촌오수 처리수의 농업용수로의 재이용 가능성에 관한 연구

## Feasibility Study on the Reuse of Treated Sewage Effluent for Agricultural Water

권 태 영\* · 윤 춘 경 (건국대)

Kwun, Tae Young · Yoon, Chun Gyeong

### Abstract

The objectives of this study are to examine the feasibility of reuse treated sewage effluent for agricultural water, and to obtain basic data for establishment of rational agricultural water quality standard.

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.

### I. 서론

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.<sup>1)</sup>

농업용수란 농업생산활동에 필요한 물을 말하며 가축의 사육 및 축사청소에 필요한 물에서부터 작물재배에 필요한 관개용수까지 모든 범위의 농업활동에 사용되는 물을 말한다. 우리나라의 농업용수 수질기준은 별도로 규정되어 있지 않고 하천, 호소, 그리고 지하수의 수질기준에서 등급이 낮은 수질을 농업용수 수질기준으로 지정하고 있다.<sup>2,3)</sup> 이러한 수질기준은 농업용수를 위한 기준이기보다는 하천, 호소, 그리고 지하수 등의 수질관리 목표수질로서 지침성격을 띠고 있고 실제 농업용수 수질기준으로 사용하기에 어려움이 있는 것이 사실이다.

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 재이용함으로써 얻는 이득은 수자원에서 가장 많은 비율을 차지하는 농업용수로 이용함으로써 수자원의 이용효율을 높이고,

오수처리수에 포함된 영양물질을 작물의 생육에 이용함으로써 비료절감효과와 생산량 증대를 기대할 수 있으며, 영양물질이 함유된 오수처리수를 수계로 직접 보내지 않고 농지로 환원시켜 농지가 또 하나의 처리시설 역할을 함으로써 수질오염을 방지하는 것 등이다.<sup>11)</sup> 그러나, 비과학적이고 무계획적인 오수의 농업용수 재이용은 공중보건의 위험요소로 작용하며, 환경 및 토양에 악영향을 주고, 하천 및 호소의 부영양화 및 오염원으로 작용 할 수도 있으며, 파다한 영양물질 및 기타 물질의 영향으로 오히려 작물에게 성장장애 및 수량감소를 초래할 수도 있다.

우리 나라의 수자원 사용용도를 살펴보면, 생활용수 21%, 공업용수 8%, 농업용수 50%, 하천유지용수 21%으로서 농업용수가 차지하는 비중이 가장 크다.<sup>4)</sup> 이와 같이 농업용수가 차지하는 비중이 큰 중요한 이유중의 하나는 물을 많이 필요로 하는 벼재배가 주요 농업활동이기 때문이다.

본 실험에서는 생활오수를 인공습지에 의하여 처리한 처리수된 농업용수로 관개하여 재이용하였을 때 작물에 미치는 영향을 검토하였다. 실험에 사용한 작물은 재배에 우리 나라 농업용수의 대부분을 차지하는 벼이었으며, 질소나 인등이 상대적으로 많이 함유된 오수처리수된 관개용수에 사용하였을 경우 작물의 생육, 생산량, 그리고 종실(種實)의 성분분석 등을 통하여 오수처리수의 관개용수로 재이용 가능성을 조사하고자 했으며, 작물의 생육을 중심으로 한 농업용수 수질기준에 관한 기초자료를 제공하고자 했다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 오수처리시설

실험에 사용한 오수처리수는 서울에 소재한 건국대학교 농업생명과학대학에 설치하여 실험 운영중인 인공습지 처리시설의 처리수를 사용하였다. 처리시설의 그림 및 시설에 관한 내용은 이미 발표한 문헌에 잘 나타나 있다.<sup>5)</sup>

### 2. 관개용수 및 토양의 특성

본 실험에 사용한 인공습지 처리시설의 오수처리수를 관개한 날짜별로 COD, SS, T-N, T-P의 측정하였다. 6월까지의 오수처리수의 T-N 농도가 100mg/ℓ를 넘는 높은 농도를 나타냈다. T-N중 대부분은 NH<sub>3</sub>-N이었으며, NO<sub>2</sub>-N은 거의 검출되지 않았고, NO<sub>3</sub>-N도 약 1mg/ℓ 정도의 낮은 수준이었다. 그리고 T-P의 약 절반정도는 PO<sub>4</sub>-P 상태이었다.

작물재배실험에는 오수처리수를 농도에 관계없이 희석하지 않고 관개한 처리구, T-N을 기준으로 농도를 희석 조절하여 T-N 평균농도가 약 25 mg/ℓ인 용수를 관개한 처리구, 그리고 대조구에는 이러한 성분이 없는 수돗물을 사용하였다. 희석하여 관개한 관개용수의 수질은 인공습지의 처리율이 높아져서 처리수의 T-N농도가 약 30mg/ℓ로 낮아진 7월 24일 부터는 희석하지 않고 오수처리수를 그대로 관개용수로 사용하였다.

결과적으로 영양물질을 조절치 않은 처리수를 관개한 포트에는 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 파다한 상태임을 알 수 있었다.

실험에 사용한 토양의 특성은 Table 1.에 요약되어 있다. 원토양의 성분은 실험이 시작되

기 전의 상태이고, 처리구 및 대조구의 성분은 실험이 종료된 후에 시료를 채취하여 분석한 결과이다. Table 1.에 사용된 약어는 관개방법을 나타내는데 Control은 수돗물을 관개용수로 사용하고 관행재배법에 의하여 시비한 대조구, 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 절반에 해당하는 비료를 시비한 처리구, 그리고 SWNF는 오수처리수 농도를 조절하지 않고 그대로 사용하고 비료를 사용하지 않은 처리구를 각각 가리킨다.

실험기간동안 pH와 OM은 약간 증가하였고 EC는 감소하였으며, T-N은 약간 증가하였으나 인의 경우 available-P가 현저히 감소하였다. 그밖에 Mn이 증가한 것을 제외하고는 다른 성분은 큰 차이가 없었다. pH가 증가한 이유는 pH가 7이상이었던 관개용수의 영향이고, OM이 증가한 이유는 작물재배과정에서 관개용수에 함유되어 있던 유기물성분과 식물의 뿌리 등 유기물성분이 토양층에 공급되었기 때문인 것으로 판단된다. EC가 감소한 이유는 비료나 관개용수를 통하여 이온을 떨 수 있는 성분이 공급되었기 때문이며, 유효인산이 감소한 이유는 작물에 의한 흡수때문으로 생각된다. T-N이 소량 증가한 이유는 관개용수나 시비를 통하여 공급된 질소때문으로 생각된다.

Table 1. Soil characteristics before and after experiment

Items	Orig. Soil	TWNF	TWCF	TWHF	SWNF	Control
pH (1:5)	5.47	6.02	6.31	6.34	6.14	6.32
EC( $\mu$ s/cm)	54.8	20.7	17.7	18.7	18.9	20.1
OM(%)	0.789	0.890	0.991	0.840	0.974	1.008
T-N(%)	0.231	0.266	0.252	0.231	0.252	0.301
T-P(mg/kg)	472.9	417.0	502.5	483.4	409.3	493.0
AV.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	541.93	261.11	280.05	268.10	303.03	283.17
CEC(meq/100g)	8.7	9.1	11.2	10.6	12.3	11.8
Zn(mg/kg)	2.025	2.468	3.055	2.53	2.315	2.588
Pb(mg/kg)	1.275	2.068	1.82	1.786	2.125	1.925
Cd(mg/kg)	0.005	0.018	0.02	0.025	0.023	0.043
Fe(mg/kg)	93.865	105.115	102.865	105.865	132.615	118.115
B(mg/kg)	1.1425	0.585	0.718	0.693	0.483	0.478
Mn(mg/kg)	14.225	57.5	50.325	61.75	70	68
Cr(mg/kg)	0.083	0.103	0.115	0.105	0.12	0.103
Mg(mg/kg)	85	83.73	91.23	93.48	95.73	99.98
Cu(mg/kg)	1.205	1.365	1.578	1.403	1.59	1.65
Al(mg/kg)	294.25	334.75	338	328.5	349.49	335.23
Na(mg/kg)	25.825	18.9	17.6	20.25	23.35	19.675
K(mg/kg)	88.75	66.5	70.5	65.75	71.5	77.75
As(mg/kg)	0.13	0.15	0.133	0.12	0.138	0.145

### 3. 작물재배 실험시설

실험에 사용한 포트는 110cm×90cm×70cm 규모에 약 1m<sup>2</sup>의 표면적을 가진 합성수지용기를 인공재배포트로 사용하였다. 밑부분에는 배수를 위해 벨브를 설치하였고, 포트의 바닥에는 약 10cm의 자갈을 채우고 그 위에 부직포를 덮은 후에 논토양을 약 40cm정도 채웠다. 흙 위에는 약 10cm의 공간이 있어서 관개용수를 충분히 공급할 수 있었으며, 포트주변은 흙으로 채워서 대기 온도에 의한 영향을 최소화하여 실제 논 상태와 유사하도록 환경을 조성하였다.

### 4. 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, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N을 각각 분석한 후 합하여 구하였다. 물 시료는 Standard Methods<sup>12)</sup>에 따라 분석하였다.

토양성분의 분석은 실험전의 토양과 각각 수확후의 처리구와 대조구 토양의 일반적인 특성을 파악할 수 있는 항목으로서 pH, EC, OM, CEC, T-N, T-P, Av.-P등을 분석하였으며, 토양 중의 무기물질인 K, Na, Mg, Mn, Fe, B, Al과 토양오염기준에 포함된 Cd, Pb, Cr, Zn, Cu와 As 등을 분석하였다. 토양시료의 분석방법은 Methods of Soil Analysis<sup>13)</sup>를 기준으로 하였다.

### 5. 작물재배실험

작물재배실험은 1998년 5월 25일에 건국대학교 농업생명과학대학 인공습지에 의한 오수처리시설 옆에 위치한 약 40m<sup>2</sup> 규모의 인공포트에 공시품종 일품 벼를 1주 1본씩 포트 당 22개 체씩, 대조구 1개와 처리구 4개에 3반복 처리하여 총 15개 포트에 이상 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 중부지방 관행재배법을 따랐다.<sup>8)</sup> 8월 3일부터는 7일 간격으로 3개체씩 3반복으로 채취하여 초장과 분얼수를 조사하고, 기관별로 분리하여 새장분석을 실시하였으며, 10월 21일에 각각의 개체를 수확하여 수장 및 간장을 측정하고, 개체 당 이삭수와 이삭 당 영화수, 그리고 농숙률을 구하고, 수확량을 산정 하였다.

또한 수확물의 유해성을 평가하기 위해 현미의 증금속 농도를 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 작물 수확량조사

벼의 수확은 1998년 10월 21일 실시하였으며, 대조구와 처리구의 수량구성요소에 관한 조사와 수확량을 조사 비교한 결과는 Table 2.에 요약되어 있다.

간장은 식물체의 길이를 나타내며 수장은 이삭의 길이를 나타낸다. 반드시 간장 및 수장의 크기가 수확량과 비례하지는 않지만 외형적인 생장을 가장 간단히 알아 볼 수 있는 항목이다. 특히 수장의 길이는 이삭의 길이이므로 이 길이가 길면 많은 낱알이 붙을 수 있음을 의미한다. Table 2.에서 알 수 있듯이 간장의 길이는 TWCF와 대조구가 가장 크게 나타났고 SWNF가 가장 작았으며, 수장의 길이에서도 SWNF는 가장 작게 나타났다.

단위면적당 이삭수는 단위면적(m<sup>2</sup>)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.

Table 2. Comparison of yield component and grain yield among treatments

Plot	C.L. (cm)	P.L. (cm)	Yield Component				Yields (kg/10a)
			P.U.	M.S.	R.G.(%)	T.W.(g)	
TWNF	103.8	23.3	39	118.0	82.28	24.4	258.38
TWCF	109.4	23.5	125	118.2	79.17	23.1	573.38
TWHF	104.2	22.1	82	112.5	80.61	23.1	364.47
SWNF	91.9	21.7	53	101.9	86.23	25.3	239.18
Control	109.4	22.5	115	116.6	79.13	23.5	525.23

C.L. = main culm length (cm), P.L. = panicle length (cm), P.U. = panicle number per unit area (m<sup>2</sup>), M.S. = mean of spikelet number per panicle  
R.G. = percent of ripened grain (%), T.W. = 1000 grain weight (g)

평균 이삭당 영화수는 각 개체에서 열린 이삭의 낱알 개수를 말하는데 Control, TWCF, 그리고 TWHF와 함께 TWNF도 유사하게 많았는데 SWNF가 가장 적었다.

등숙률은 종낱알 개수 중에서 비중이 1.06이상의 낱알의 개수를 측정하여 낱알의 등숙 정도를 %로 나타내는데, 부실한 낱알은 수확량 계산에서 배제되어 작물수확량에 영향을 미친다. Control, TWHF, 그리고 TWCF는 약 80%로 비슷한 결과를 나타낸 반면에 단위면적당 이삭수가 적었던 TWNF와 SWNF에서는 오히려 높은 결과를 보였다. 이러한 결과는 등숙률이 단위면적 당 이삭수가 많으면 이삭수가 적은 것에 비하여 상대적으로 저조한 경향은 일반적으로 알려져 있는 사실이다.

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

이상의 모든 수량구성요소를 종합하여 작물의 최종 수확량을 계산할 수 있으며 일반적으로 수확량은 10a당 수확량 kg으로 환산하여 나타내는데 실험결과가 Table 2.에 요약되어 있다. Control은 525.23kg/10a이었는데 TWCF는 573.38kg/10a로서 Control보다 10%정도 많은 수확량을 나타냈고, 시비량을 절반으로 감소하였던 TWHF는 364.47kg/10a로 Control에 비하여 70% 정도에 그쳤으며, 시비하지 않았던 TWNF와 SWNF는 각각 258.38kg/10a, 239.18kg/10a로서 대조구의 절반에도 못미치는 매우 저조한 결과를 나타내었다. 이것은 벼재배에서 관개용수의 농도가 일정한 수준까지는 수질보다는 시비량에 따라 수확량이 결정된다는 사실을 입증하는 결과이었다.

TWCF의 수확량이 Control에 비해서 높게 나타난 결과는 총질소농도를 약 25mg/l로 조절 한 오수처리수를 관개하고 관행재배법에 의하여 시비한 경우가 깨끗한 물을 관개하고 같은 분량을 시비한 경우보다 오히려 약 10% 수확이 많았다는 것을 의미한다. 이것은 오수처리수가 용수로에 유입되어 적절하게 희석된 후에 벼재배에 관개되어도 수확에 지장을 초래하지 않는 것을 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 25mg/l 이었는데, 이 정도의 농도는 일반적으로 규정하고 있는 관개용수 수질기준보다 월등히 높은 농도이다. 그림에도 불구하고 녀새베에 지장이 없었다는 연구결과는 앞으로 관개용수의 수질기준을 현실화시킬 필요가 있다고 생각한다.

비현실적으로 엄격한 수질기준은 불필요한 수질정화 노력과 비용을 초래할 수 있고 물사용자들에게 혼란을 야기시킬 수 있으므로, 추가 연구를 통한 현실적인 관개용수 수질기준의 제정이 필요하다.

## 2. 종실의 원소분석

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

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

Element (ppm)	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<sup>7)</sup>

실험결과를 살펴보면 처리구의 결과가 대조구와 유사한 범위에 있었고, 자연함유량으로 발표된 기존자료와도 유사하였다. 따라서 오수처리수를 관개용수에 그대로 사용하여도 종실의 성분에 미치는 영향은 적으며, 희석하여 사용하였을 경우에는 더구나 영향이 거의 무시할 정도일 것으로 판단된다.

## IV. 요약 및 결론

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 25mg/l 까지는 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 25mg/l로 조절

- 하여 영양물질을 함유한 상태의 생활오수를 관개한 실험구가 오히려 약 10%정도 많이 수확하였다. 이러한 결과는 적절한 농도의 오수처리수는 벼의 재배에 장애가 되는 것이 아니고 오히려 유익할 수 있음을 의미한다.
3. 종실의 성분 분석결과에 의하면 오수처리수의 관개가 종실의 성분에 미치는 영향이 거의 없었다. 따라서, 오수처리수를 관개함으로써 종실에 유해성분이 증가하여 건강에 악영향을 미칠 가능성은 적다고 생각된다.
  4. 생활오수 처리수의 관개를 본격적으로 적용하기 위해서는 벼재배에 악영향을 미치지 않는 범위에 대한 과학적이고 현실적인 수질기준을 설정, 영양물질을 함유한 관개용수 사용에 따른 시비량의 조정, 그리고 인공습지와 같은 저기술형 오수처리시설들의 농촌지역에 활발한 보급 등을 위하여 지속적인 추가연구가 필요하다.

## V. 참고문헌

1. 권순국, 1997, 농어촌용수 수급의 현황과 과제, 사단법인 농정연구포럼 제 47회 정기월례 세미나 결과보고서, pp.50.
2. 농어촌진흥공사, 1995, 지하수 수질기준, pp.93.
3. 홍문관, 1996, 환경정책기본법, pp.260.
4. 농어촌진흥공사, 1997, 농업용수 수질기준 제정 등 제도개선에 관한 연구. 97-05-25, pp.204.
5. 윤준경, 권순국, 권태영, 1998, 인공습지의 농촌지역 오수정화시설에 적용가능성 연구, 한국농공학회지, 40(3), pp.83~93.
6. 농촌진흥청, 1997, 농업과학기술서(2), 작물재배원리의 이론과 실험, pp.732~747.
7. 김복영, 1997, 환경오염의 실태와 대책, 농업과학기술원, pp.27~53.
8. 농촌진흥청, 1997, 농업과학기술서(2), 작물재배원리의 이론과 실험, pp.732~747.
9. Sterritt, R. M., and J. N. Lester. (1988). Microbiology for Environment and Public Health Engineers, Spon, London.
10. Mcpherson, J. B. (1979). Land Treatment of Wastewater at Werribec: Past, Present, and Future, Pro Water Tech. 11 : 15-31.
11. Rowe, D. R., and I. S. Abel-Magid. (1995). Handbook of Wastewater Reclamation and Reuse, Lewis Publishers : 23.
12. American Public Health Association. (1995). Standard Methods for the Water and Wastewater Examination, 19th ed., Washington, D.C.
13. 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.