

# 하수처리수의 농업용수 재이용시 시비량 변화에 따른 환경영향 분석

Environmental Effects Analysis by the Fertilizer Change  
with Wastewater Reuse in Paddy Fields

장태일\*, 박승우(서울대), 조재영 (전북대)  
Jang, Tea Il-Park, Seung Woo-Cho, Jae Young

## abstract

The objective of this paper is to analyze the environmental effects by the fertilizer change with wastewater reuse for agriculture. For this research, Lysimeter tests are being implemented to cultivate rice with different levels of fertilizer applications with wastewater irrigation., and to analyze the nutrient loading by wastewater reuse in paddy fields was examined the CREAMS-PADDY model. CREAMS-PADDY model is modified from CREAMS model for considering the hydrologic cycles in paddy field. As a result, in the lysimeter treated by irrigation with wastewater and chemical fertilizer with half of the conventional amount showed generally similar tendency to the control plot. This may require the modifications of standard cultural practices for rice in terms of fertilizer and pesticide applications. However, high concentration of sodium in wastewater might cause damage to physico-chemical properties of paddy soil. And the wastewater reuse effects on nutrient loads were quantitatively analyzed and this results provide the reasonable management for agricultural reuse.

## I. 서론

2003년말 현재 연간 64 억톤의 하수처리수 중 약 5.4%인 3.4 억톤을 재이용하고 있으나, 재이용율은 '01년 2.9%, '02년 4.3%에서 점차 증가하는 추세이지만 미국이나 호주 (재이용율 10%, 11%) 등 선진국에 비하여 아직 미흡한 상황이다 (환경부, 2004). 이에 환경부는 장래의 물부족 사태를 적절히 대응하고, 수질오염을 방지하기 위해서는 막대한 양으로 흘러보내는 하수처리수를 재이용할 수 있도록 권고기준을 마련하고 있으며, 2005년 중에 재이용수질 권고기준을 설정할 계획에 있다. 이와 함께 하수처리수를 농업용수, 공업용수, 그리고 환경용수 등으로 재이용하기 위한 연구가 더욱 활발하게 이루어질 것으로 보인다.

하수처리수를 농업용수로 재이용할 경우 작물생육, 작물함유성분, 토양잔존물질, 보건위생 등에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 농업의 관행상 하수 재이용에 관한 축적된 결과가 없는 상태에서 공공부문의 성격을 갖는 농업용수 취수에서 수질기준에 부합되지 않는 용수를 이용할 수는 없는 상황이다.

하수처리수를 재이용하여 농경지에 관개할 경우 기존의 관개용수에 비해 많은 영양물질이 농경지로 유입되며 이로 인해 농경지로부터의 오염부하량이 증대될 우려가 있다. 또한, 하수처리수 재이용시 관행영농법을 그대로 적용할 경우 과다한 영양물질로 인해 벼의 도복 등의 피해가 발생할 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 영농기간 동안 라이시미터 (lysimeter) 작물재배시험을 통하여 재이용에 따른 논벼의 표준 화학비료 사용량에 따른 담수심의 수질 변화와 논토양의 이화학 적 특성 변화 등의 환경 영향을 분석하고, 화학비료 사용량에 따른 포장에서의 오염부하량을 추정하여 그 변화를 살펴보고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시험 포장

생활하수의 재이용을 위한 2002년 라이시미터 실험에서는 관행관개수와 전주시 하수처리장 방류수를 이용한 처리구별 3처리, 화학비료 시비량별로 4개 처리, 2반복으로 구성된 인공재배포트를 배치하여 수행하였으며, 2003년 실험에서는 지하관개수와 생활하수 재이용 방법별 3 처리구별, 화학비료 시비량별로 4개 처리, 3반복으로 하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 관개용수는 1) 관행관개수(CI), 2) 지하수 (GI), 3) 하수처리장 방류원수 (WI), 4) 하수처리장 방류수를 UV로 소독한 소독수 (WSI)로 분류하여 실험에 사용하였다. 대조구인 지하수 관개구와 관행 관개구는 화학비료 시비량을 표준시비량과 표준시비량의 75% 시비구로 조정하였으며, 나머지 처리구는 화학비료 시비량을 표준시비량 (100%), 표준시비량의 75%, 표준시비량의 50% 그리고 화학비료 무처리구 등으로 하였다. Table 1은 인공재배포트의 처리 내용을 나타내고 있으며, Fig. 1은 라이시미터 시험구 배치와 시험포장 전경을 보여주고 있다. 2002년도와 2003년도 영농기간 동안에 전북대학교 농과대학 시험포장에 설치한 인공재배 포트에 동진벼를 공시품종으로 하여 5월 25일경 기비 50%, 6월 9일경 분얼비 25%, 7월 28일경 수비 25%를 각각의 포트별로 화학비료 시비량을 조절하여 처리하였다.

Table 1 The treatments of lysimeter plot for wastewater reuse

Item	Treatments	Remark
CFS CF75	Practical stream flow + 100% standard fertilizer Practical stream flow + 75% standard fertilizer	control in 2002
GFS GF75	Groundwater irrigatoin + 100% standard fertilizer Groundwater irrigatoin + 75 standard fertilizer	control in 2003
WFS WF75 WF50 WFC	Effluent from the wasterwater plant + 100% standard fertilizer Effluent from the wasterwater plant + 75% standard fertilizer Effluent from the wasterwater plant + 50% standard fertilizer Effluent from the wasterwater plant + 0% standard fertilizer	
WSFS WSF75 WSF50 WSFC	Effluent after UV treatment + 100% standard fertilizer Effluent after UV treatment + 75% standard fertilizer Effluent after UV treatment + 50% standard fertilizer Effluent after UV treatment + 0% standard fertilizer	

하수처리수 재이용시 시비량에 따른 오염부하량 분석을 위한 시험포장은 경기도 화성시 발안저수지 유역 내에 위치한 2.7ha 크기의 기천지구 시험포장으로 비교적 수질이 양호한 기천저수지로부터 관개를 하고 있으며, 2000년 관개기간동안 기비, 분얼비, 수비 등 세 번에 걸쳐 비료를 살포하였으며, 기비는 복합비료를 이양전 썬레질과 함께 시비하고, 분얼비는 요소비료를 표층 시비하였으며, 수비는 수비전용 비료를 표층 시비하였다. 총 질소질 비료의 시비량은 235kg/ha으로 벼 표준시비량인 110kg/ha와 우리나라 평균 시비량인 212.8kg/ha보다 많은 양이 시비되었으며, 인산의 경우 63kg/ha를 시비하여 표준시비량 70kg/ha와 비슷한 양을 보였다.

### 2. CREAMS-PADDY 모형

CREAMS-PADDY 모형은 미 농무성에서 개발된 CREAMS(Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System) 모형을 논에서의 물수지 및 영양물질수지를 고려하여 만든 모

형이다 (서춘석, 2002). CREAMS 모형은 농경지로부터 비료물질 배출량을 모의할 수 있는 수질 관리 모형의 시초로서, 영농방법에 따른 비점 오염의 변화를 추정할 수 있다.

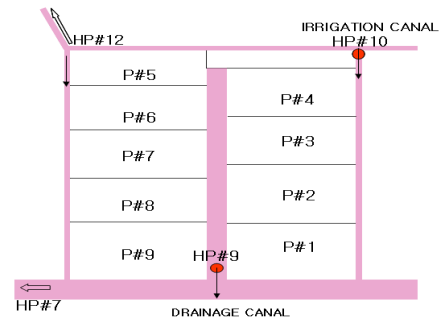


Fig. 1 Lysimeter experiment plot and schematic of study area for wastewater reuse

## 2. 조사 및 분석방법

토양성분의 분석은 실험 전 토양과 비 수확 후 처리구를 대상으로 pH, 유기물, 양이온교환용량, 총질소, 암모니아태질소, 질산태질소, 총인, 가용성 인, 중금속(Pb, Cd, Cu, Zn) 그리고 양이온(Ca, Mg, Na, K)의 함량을 Methods of Soil Analysis (1992)에 기준하여 분석하였다. 논 표면수와 관개용수를 포함한 수질시료는 pH, EC, 총질소, 총인, 중금속(Pb, Cd, Cu, Zn) 그리고 양이온(Ca, Mg, Na, K)을 대상으로 Standard Methods for the Water and Wastewater Examination (1995)의 방법을 적용하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 관개용수

관개용수는 강우조건을 고려한 관행 물 관리 방법에 기준하였다. 2002년도에는 5월 10일경부터 9월 30일경까지 1회 관개시 10L를 기준으로 총 15회 관개하였으나, 2003년도에는 총 8회 관개하였다. 이와 같이 2002년도와 2003년도 영농기간에 관개횟수가 큰 차이를 보이는 것은 강우조건 차이 때문에 발생한 것으로서 2002년도에는 5월부터 9월까지 총 강우량이 640mm 정도였던 반면에 2003년도에는 1,395mm 정도로 2배 이상의 강우가 공급되었기 때문이다.

본 연구에서 수도작 관개에 이용하였던 관개용수의 수질은 Fig. 2에서와 같이 관행적인 농업용 관개용수에 비해 하수처리 방류수의 수질은 총질소는 5배, 총인은 약 30배 정도 높게 나타났다. 양이온의 경우도 10~50배 정도 함량이 높게 나타났다. 하수처리 방류수의 소독 및 여과처리에 따른 수질변화를 조사한 결과 총질소, 총인 그리고 양이온의 함량은 큰 변화가 없었으나, 대장균균수의 경우에는 자외선 소독처리에 의해 452MPN/ml에서 2MPN/ml로 크게 감소하였다.

### 2. 논 표면수 중 화학성분의 시기별 변화

각각의 시험구에 이앙 후 매 1개월마다 논 표면수를 대상으로 화학적 특성을 분석한 결과 중 pH는 6.38에서 8.74의 범위로 평균 7.26을 나타내었으며, 처리구별로는 큰 차이를 나타내지 않았으나 시기별로 이앙초기에 약간 높게 나타나는 경향이였다. 논 표면수 중 전기전도도는 98~735uS/cm의 범위로 평균 338uS/cm을 나타내었다. 전기전도도는 각각의 처리구별로 차이를 나타내었는데 화학비료의 시비량이 증가함에 따라 논물 중에서 전하를 띤 물질의 함량이 증가하여 전기전도도가 증가하는 경향을 나타내었다. 시기별로도 화학비료의 시비시기에 약간씩 증가하였다가 수도체의 영양물질 흡수로 인하여 점진적으로 감소하는 경향이였다. 총질소의 함량은 1.22~16mg/L의 범위로 평균 5.12mg/L를 나타내었으며, 총인은 0.004~1.010mg/L의 범위로 평균

0.351mg/L로 나타났다. 논 표면수 중 총질소와 총인의 함량은 화학비료의 시비량에 의존적으로 변화가 나타났으며, 이양초기에 높았다가 점진적으로 감소하는 경향이였다. 논 표면수 중 양이온의 함량변화를 조사한 결과 각각 Ca는 9.4~56.5mg/L의 범위로 평균 24mg/L을, Mg는 6.7~28mg/L의 범위로 평균 17mg/L을, 나트륨은 18.3~99.5mg/L의 범위로 평균 45.3mg/L을, 그리고 칼륨은 11.4~59.4mg/L의 범위로 평균 31.1mg/L을 나타내었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 일가양이온인 나트륨과 칼륨의 함량이 상당히 높은 수준으로 유지되고 있음을 확인할 수 있었다.

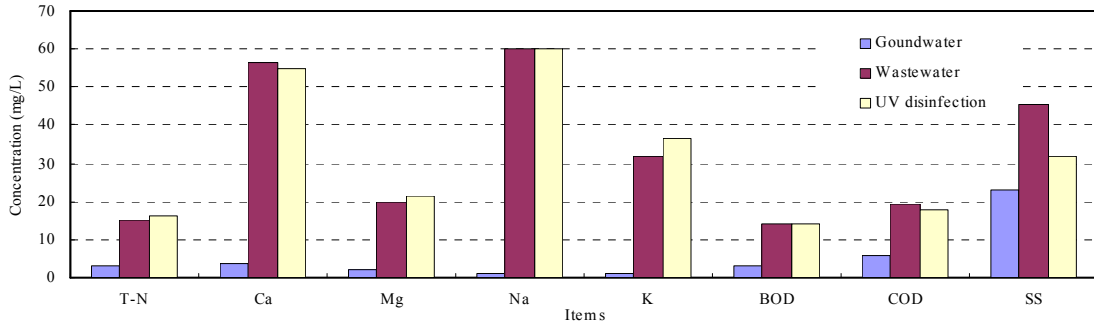


Fig. 2 Influent irrigated water quality by treatments

### 3. 논토양 중 화학성분의 시기별 변화

2002년 5월 초와 2년 동안의 풋트실험이 끝난 10월 중순경에 풋트 내부의 표토시료를 채취하여 논토양 중 화학성분의 함량변화를 조사한 결과는 Table 3에 나타나 있다. 표에 제시된 값은 3반복 평균값으로 나타내었다. 생활하수처리구에서 자외선 소독처리 및 생활하수의 재처리에 따라 영양물질의 함량이 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 일반 지하수 관개구와 생활하수 처리구간에는 영양물질의 토양 내 집적현상이 차이를 보였는데 생활하수 처리구에서 더 높은 경향이였다. 또한 각 처리구에서 화학비료의 시비량을 표준시비, 표준시비량의 75% 시비, 표준시비량의 50% 시비시 화학비료의 시비량의 증가에 따라 논토양 중 영양물질의 함량이 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. 논토양 내에 분포하는 주요 양이온 가운데  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^{+}$ 의 함량은 일반 지하수 관개구와 생활하수 관개구 사이에 큰 차이를 보이지 않았으나  $Na^{+}$ 의 함량은 일반 지하수 관개구보다 생활하수 관개구에서 훨씬 높게 나타나고 있었다. 생활하수 처리시 논 표면수에서도 나트륨의 함량이 높게 나타나 토양 중 나트륨 집적의 우려가 제기되었는데 이러한 경향은 논토양 중에서도 동일하게 나타났다.

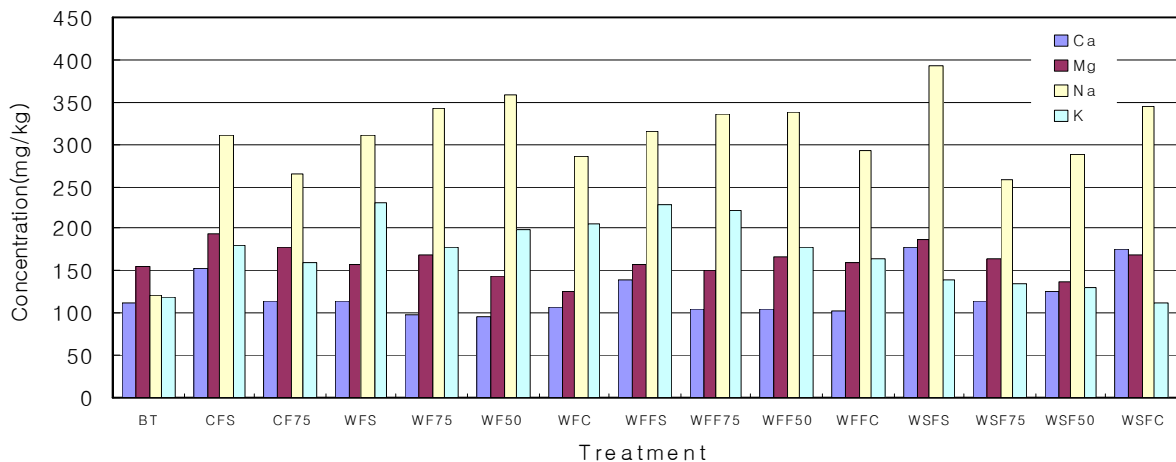


Fig. 3 Soil chemical characteristics of the treatments by fertilizer change (Ca, Mg, Na, K; 2002)

Table 2 Soil chemical characteristics of the before and after experiment (Oct, 2003)

Treatment	pH	TP	TN	CEC	OM	Cu	Zn	Pb	Cd	Ca	Mg	K
BT	6.12	256.7	929.2	7.69	4.32	8.56	35.56	10.23	0.11	112	156	119
GFS	6.91	356.4	1622.1	8.19	5.73	9.16	37.74	9.61	0.05	154	194	180
GF75	6.66	254.4	1332.4	7.46	5.58	7.01	31.89	11.98	0.18	115	179	160
WFS	6.78	290.6	1171.7	7.97	4.94	6.07	31.13	13.68	0.19	115	158	230
WF75	6.57	252.4	1094.8	7.39	4.57	6.55	31.55	14.01	0.19	98	168	177
WF50	6.41	221.9	1071.7	7.55	5.74	5.76	29.72	16.62	0.19	96	145	199
WF0	6.86	157.1	811.0	7.88	4.76	8.14	24.23	12.12	0.18	107	125	204
WFFS	6.48	281.0	1071.7	7.47	5.0	4.64	25.78	14.49	0.18	139	158	229
WFF75	6.51	299.9	1158.6	8.01	4.70	6.95	21.54	11.36	0.17	106	151	221
WFF50	6.38	223.3	1035.2	8.02	5.83	8.09	30.42	12.33	0.18	105	166	179
WFF0	6.76	193.1	955.9	7.47	5.10	7.03	32.13	13.66	0.19	103	159	165
WSFS	6.45	292.3	1434.6	7.31	4.53	6.44	38.22	6.33	0.09	178	187	138
WSF75	6.53	247.2	1282.8	7.98	4.72	5.37	27.76	12.07	0.12	114	164	134
WSF50	6.36	218.3	1071.7	7.55	4.02	5.86	26.81	14.02	0.12	125	136	129
WSF0	6.66	125.3	1000.6	7.81	4.86	6.81	30.17	10.60	0.12	175	168	112

BT: Before treatment (May, 2002)

#### 4. 시비량에 따른 오염부하량 변화

본 연구에서는 CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 시비량 정감에 따른 오염부하량과 변화를 분석하였다. 기천지구의 시험포장을 대상으로 1996년부터 2002년까지 관행 관개용수를 이용할 경우의 오염부하량을 대비구로 하여 현재 하수처리수의 배출수 수질기준을 적용한 하수처리수 관개수를 적용한 경우의 오염부하량을 추정하였다.

Table 3은 기천지구 시험포장을 대상으로 농업용수 수질기준을 만족하며 관행적으로 농업용수로 이용되고 있는 기천저수지의 관개수를 이용하는 경우와 하수처리수를 재이용하여 관개할 경우에 대한 영양물질 부하량을 추정한 결과를 보여주고 있다. 1996년부터 2002년까지의 영양물질 부하량을 추정하여 비교한 결과, 기천저수지의 관행 관개용수를 이용할 경우 연평균 TN 부하량은 16.06kg/ha, TP 부하량은 0.52kg/ha를 나타냈으며, 하수처리수를 재이용할 경우 TN 부하량은 33.66kg/ha, TP 부하량은 6.43kg/ha를 나타냈다. 하수처리수를 별도의 처리 없이 그대로 재이용할 경우 농업용수 수질기준을 만족하는 관행 관개용수를 이용할 경우에 비해 TN은 연간 부하량이 2.1배, TP는 연간 부하량이 12.7배 높은 것으로 추정되었다.

Table 3 Comparison of nutrient loads from paddy field between treatments

Year	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Control irrigation		Wastewater irrigation	
			TN(kg/ha)	TP(kg/ha)	TN(kg/ha)	TP(kg/ha)
1996	885	252	13.75	0.27	25.13	2.90
1997	1,205	629	10.39	0.58	24.86	5.79
1998	1,617	683	12.70	0.48	28.40	6.37
1999	1,193	593	21.27	0.29	29.54	3.54
2000	1,330	948	11.27	0.98	50.71	12.32
2001	1,312	864	26.71	0.60	42.64	7.78
2002	1,236	586	16.34	0.47	34.32	6.29
Mean	1,254	651	16.06	0.52	33.66	6.43

하수처리수를 재이용하여 관개할 경우 기존 관개용수를 이용할 경우에 비해 많은 영양물질이 농경지로 유입되므로 관행적인 영농법에서 시비하는 비료량을 적정수준으로 삭감할 필요가 있다. 본 연구에서는 시비량을 10%씩 단계적으로 절감할 경우에 대한 영양물질 부하량의 변화를 추정하였다. 다음의 Fig. 4는 1996년부터 2002년까지의 TN과 TP에 대한 부하량 추정결과를 시비량 절감에 따른 결과와 비교하여 보여주고 있다. TN의 경우 시비량 절감에 따른 배출부하량 저감효과가 비교적 뚜렷이 나타나고 있으나, TP의 경우 시비량 절감에 따른 효과가 크지 않은 것으로 모의되었다.

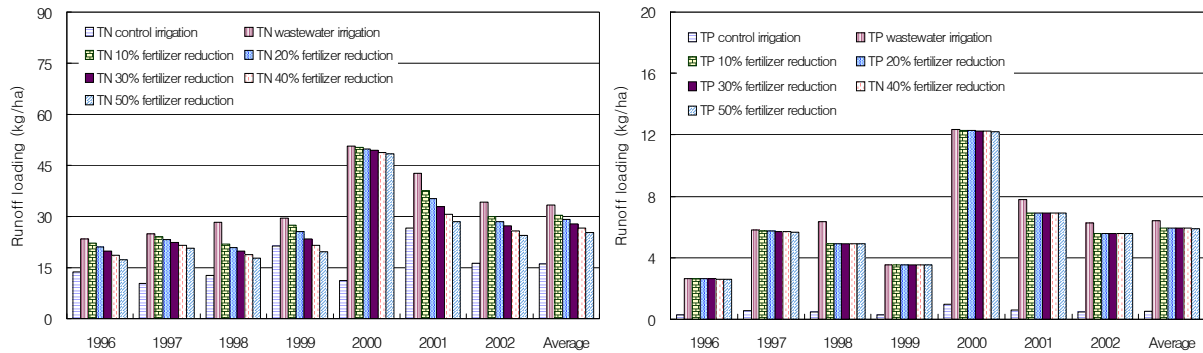


Fig. 4 TN and TP loadings according to fertilizer reduction

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 하수처리수의 농업용수 재이용시 시비량 사용량에 따른 환경영향을 분석하기 위하여 영농기간 동안 라이시미터 작물재배시험을 통하여 농토양의 이화학적 특성 변화, 담수심의 수질 변화 등을 살펴보고, 화학비료 사용량에 따른 농에서의 영양물질의 부하량 변화를 고찰하기 위하여 시험포장을 선정하여 수문, 수질 자료를 구축하고 이를 대상으로 CREAMS-PADDY 모형을 적용하여 시비량 삭감에 따른 영양물질의 부하량을 분석하였다. 하수처리수를 재이용하여 관개할 경우 기존 관개용수를 이용할 경우에 비해 많은 영양물질이 농경지로 유입되므로 관행적인 영농법에서 시비하는 비료량을 적정수준으로 삭감할 필요가 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 사업단의 연구비지원(과제번호 4-5-2)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 강문성, 박승우, 김상민, 성충현, 2004. 하수처리수의 재이용을 위한 벼 재배시험, 한국농공학회지, 46(1), pp.75-86.
2. 김상민, 2004. 비점오염 모형을 이용한 하수처리수 재이용에 따른 유역 오염총량 분석. 박사학위논문, 서울대학교.
3. 서춘석, 박승우, 임상준, 윤광식, 김상민, 강문성, 2002. 관개 농에서의 영양물질 추정 모형의 개발, 한국농공학회지, 44(3), pp. 146-156.
4. 환경부, 2004. 하수처리수 재이용수질 권고기준 설정방안
5. Seoul National Univ. 2004. Application for wastewater reclamation and reuse. Sustainable water resources research center. (in Korean)