

## 한발기 벼 재배시 하수종말처리장 방류수 관개에 따른 논의 수질 및 벼 생육에 미치는 영향

신중두\* · 이종식 · 김원일 · 정구복 · 김진호 · 윤순강 · 최철만

농촌진흥청 농업과학기술원 농업환경부 환경생태과  
(2008년 8월 20일 접수, 2008년 9월 24일 수리)

### Effects on Water Quality and Rice Growth to Irrigation of Discharge Water from Municipal Waste Treatment Plant in Rice Paddy during Drought Periods

JoungDu Shin\*, Jong-Sik Lee, Won-Il Kim, Goo-Bok Jung, Jin-Ho Kim, Sun-Gang Yun, and Chul-Mann Choi  
(Department of Environmental Ecology, Agro-Environmental Division, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Republic of Korea)

**ABSTRACT:** Objective of this study was to access the environmental impacts of the use of discharge water from municipal waste water treatment plant as alternative irrigation resources during drought season for rice cultivation. For the field experiments, it was observed that plant growth and yield characteristics at 20 days of alternative irrigation period with application of FAST (fertilizer application based on soil test) 50% were relatively the same as the control. For the surface water quality, it appeared that  $EC_i$  (electrical conductivity of irrigation water) and SAR (sodium adsorption ratio) values of DMWT (discharge waters from municipal wastewater treatment plant) irrigation were twofold higher than those of ground water irrigation as the control regardless of fertilization levels. For the irrigation periods, there were not significantly difference between 10 and 20 days of treatments, but  $EC_i$  and SAR values of surface water were highest at 30 days of irrigation periods at initial rice growing stages. Generally,  $EC_i$  values of percolation water in all the treatments were gradually increasing until 30days after irrigation, and then decreasing to harvest stage. Overall, it might be considered that there was possibility to irrigate DMWT with application of FAST 50% for 20 days of drought periods at rice transplanting season. Furthermore, efficiency rate of alternative irrigation water for 20 days of drought period was 32.7% relative to the total annual irrigation water for rice cultivation.

**Key Words:** Alternative irrigation water, discharge water from municipal wastewater treatment plant, sodium adsorption ratio.

### 서론

빠른 경제성장과 산업화 및 생활수준의 향상으로 인하여 수자원에 대한 사용 요구는 급격히 증가하고 있으며, 급속한 산업발달로 인해 수자원 부족을 초래하고 있다. 물 공급에 있어 수자원 부족과 병행하여, 양질의 물에 대한 요구는 대체수 자원 탐색을 요구하고 있다. 따라서 농업용수는 인구증가로 인한 식량 공급량을 확대하기 위해서 농업용수를 적게 사용해야 하는 입장에 놓이게 되었지만, 제한된 천연 수자원을 가

진 지역에 있어, 도시하수처리장 방류수를 농업, 산업, 휴양 및 수계 등에 재이용하고 있다<sup>1-3)</sup>. 또한 유출수를 관개수로의 사용은 물 부족과 폐수처리 문제를 동시에 해결하며, 농촌 마을에 있어, 폐수처리문제는 하수처리 시 수질을 조절하는데 근본적인 주의가 요구 된다<sup>4)</sup>. 폐수처리 및 시설개선으로 인해, 환경 위해성을 최소화하고, 물 부족 문제에 대한 해결로서 폐수 이용성 평가가 필요하다. 대체수자원으로서의 공장 및 하수종말처리장 방류가 있지만, 이러한 방류수는 종종 환경 위해성과 관련이 있다. 그러므로 농업용 관개수로 다른 수자원을 대체하기 위한 관개수용은 환경영향 평가에 의존한다. 한편, 물과 영양염류는 모든 식물의 성장에 필요한 가장 중요한 양분이다. 일반적으로, 시비와 관개는 농민들에게 경제적

\*연락처:  
Tel: +82-31-290-0229 Fax: +82-31-290-0206  
E-mail: jdshin@rda.go.kr

인 문제와 부합되지만 장기적인 측면에서 비점오염원 문제를 야기할 수 있다. 또한 많은 영양염류를 내포하고 있는 물로 인하여, 자연 용수원 부족을 초래한다. 미국의 폐수재활용 현황에 있어, 18개주는 재처리된 물 재활용과 관련하여 몇 가지 형태의 규제를 채택하고 있지만, 기준을 설정하고 있거나, 혹은 충분히 설정된 지침서를 가지지만, 나머지 14개주는 전무한 상태에 있다<sup>4)</sup>. 프랑스의 경우, 1940년까지 파리 수도권의 폐수처리를 위한 유일한 방법은 채소밭에 관개하는 것이었다<sup>5)</sup>. 지중해 북동쪽에 위치하고 있는 섬나라인 키프로스의 경우 현재 총 물 사용량은 300 Mm<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup>이며, 거의 80%가 관개용으로 사용되며, 대도시에서 발생된 폐수 약 25 Mm<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup>은 3차 처리 후 관개용으로 집수하여 이용할 계획을 수립하였다. 이러한 것은 다른 분야에 대해서도 이와 같은 물량을 비축하면, 농업에 8~10% 확대하여 관개용수로 사용하는 것이 된다<sup>6)</sup>. 이스라엘에서는 폐수의 92%는 도시하수관으로 집수하여, 관개수로 72%, 지하수 충전용으로 28%를 사용하고 있다<sup>5)</sup>. 그러나 한국의 경우 총 하수종말처리장 방류수는 646,000 Mm<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup>이며, 단지 2.5%만 농업용 관개수로 재이용하고 있는 실정이다<sup>7)</sup>. 그러므로, 본 연구는 벼를 재배하는데 있어, 한발기에 한시적으로 하수종말처리수를 관개함에 따른 수질과 벼 생육에 미치는 영향을 구명하기 위해 수행하였다.

## 재료 및 방법

비가림시설하에서 하수종말처리장 방류수를 관개기간별로 관개하기 위하여 비닐하우스 외부에 집수탱크를 설치하였으며, 집수탱크 하부에 연결된 배관에 모터 펌프를 부착하여 각 시험구로 이송관을 설치하였다. 또한 시험포 주변에 관정을 뚫어 지하수를 각 시험구로 일정기간동안 송수하는 배관을 설치하였다. 그리고 각 시험구에 설치된 배관의 출구에 관개 유량을 계측할 수 있도록 유량계를 부착하였다. 공시토양은 사양토이고, 대진벼를 재식거리 10×15 cm로 이앙하였으며, 침투수의 수질특성을 파악하기 위하여 각 구(3×4 m)에 토심 15 cm에 Porous cup을 설치하였다. 시험전 토양의 화학특성은 Table 2와 같다. 대체 용수원 관개기간을 10, 20, 30일 그리고 계속 관개기간으로 나누어 하수종말처리장 방류수를 관개하였으며, 일정 관개기간 후 지하수를 관개함으로써 상시담수 조건에서 벼를 재배하였다. 또한 비료시용은 3 수준인 무비, 검정시비량의 50% 및 검정시비량으로 사용하였다. 벼 생육반응을 알아보기 위해 이앙 30일 후 초장과 분얼수를 조사하고, 수확기에 수량구성요소를 조사하였다. 수확지수는 수식 1에 의해 산출하였다<sup>8)</sup>.

$$\text{수확지수} = (\text{정조중} / \text{총건물중}) \times 0.86 \quad [\text{수식 1}]$$

따라서 계수 0.86은 정조중의 수분함량을 건물중의 수분함량 14%로 환산하기 위해 사용되었다. 표면수 및 침투수의 수질을 분석하기 위하여, 이앙 후 10, 20, 30, 60, 90일에 시

료를 채취하여, membrane filter(0.4 μm)로 여과하여 Falcon tube에 넣어 4°C에서 냉장보관 하였다. 시험구 배치는 3반복 분할구 세제구 배치법을 이용하였으며, 처리간 비교를 위해 표준오차를 분석하였다.

대체용수에 대한 수질분석은 수질오염공정시험법에 준하여 분석하였다<sup>9)</sup>. 용수원에 대한 pH는 pH meter(model-162, Orion Research Ltd.), 전기전도도는 EC meter(model EA-940, Orion Research Ltd.)로 측정하였으며, COD<sub>Cr</sub>은 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>법, NH<sub>4</sub>-N은 Indol-phenol법으로 분석하였다. NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, Cl<sup>-</sup> 및 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 IC(Ion Chromatography, Dionex-300)를 이용하였고, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 및 Mg<sup>2+</sup> 등의 양이온은 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, GBC INTERGRA XMP)을 이용하여 정량분석 하였다.

토양 화학성분 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원 토양분석법에 준하였다<sup>10)</sup>. 토양 pH는 pH meter(model-162, Orion Research Ltd.), 전기전도도는 EC meter(model EA-940, Orion Research Ltd.)를 이용하여 측정하였으며, 토양시료를 2M KCl(1:5, soil: extractant ratio)로 추출한 후 NH<sub>4</sub>-N 및 NO<sub>3</sub>-N을 Semi-micro Kjeldahl을 이용하여 분석하였으며, 양이온은 1N NH<sub>4</sub>OAc 용액으로 추출하여 ICP-AES를 이용하여 정량분석 하였다.

Sodium adsorption ratio(SAR)은 수식 2를 이용하여 산정하였다.

$$\text{SAR} = C_{Na} / [(C_{Ca} + C_{Mg})/2]^{1/2} \quad [\text{수식 2}]$$

처리간 비교를 위해 분산분석 및 표준오차를 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 대체용수원의 화학특성

대체용수원에 대한 수질 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 대체 용수원인 하수종말처리장 방류수 중 PO<sub>4</sub>-P 함량(한국; < 5.0 mg/L) 및 SAR값(Italy; < 10)을 제외한 그 이외의 항목은 농업용수 재활용수질 기준(Table 1)에 적합한 것으로 나타났다. 한발시 대체 용수원으로서 관개기간 및 비료시비수준에 따른 표면수와 침출수 및 작물생육에 관한 영향을 고려해야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

### 표면수의 EC<sub>i</sub> 및 SAR값 변화

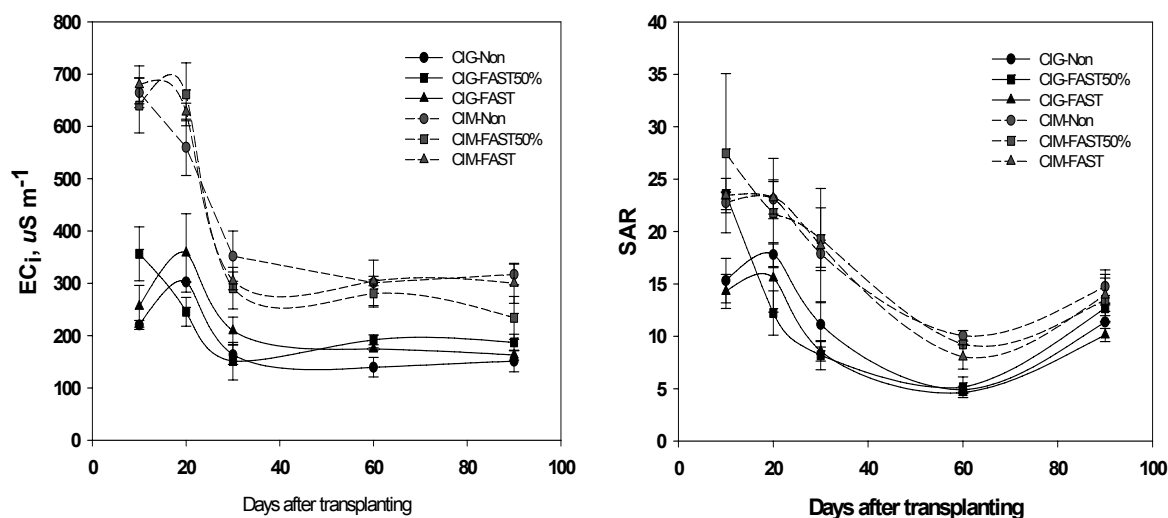
시비수준별 관개용수원에 대한 표면수의 EC<sub>i</sub> 및 SAR값 변화는 Fig. 1에 제시하였으며, 이앙 후 벼 생육시기에 있어 시비수준별로 EC<sub>i</sub> 및 SAR값에 대해서는 유의차가 인정되지 않았지만, 관개 용수원간에는 유의차가 큰 것으로 나타났다. 전반적으로 하수종말처리장 방류수 관개구의 EC<sub>i</sub> 및 SAR값이 지하수 관개구 보다 2배 이상 높은 것으로 관측되었으며, 표면수의 EC<sub>i</sub>값은 이앙 후 30일 까지 급격히 감소하다가, 그 이후부터는 안정화 상태를 유지하였다. 반면에 표면수의 SAR

**Table 1. Chemical characteristics of discharge waters from municipal wastewater treatment plant and ground water, and reused criteria for agricultural irrigation**

Parameters	Ground water	Municipal wastewater	References <sup>5)</sup>	
			Criteria	Nations
pH	6.2	6.9	6.5-8.5	WHO
EC <sub>i</sub> (dS m <sup>-1</sup> )	0.234	0.781	< 7.0	Tunisia(1975)
SS	0.18	0.30	5, 15	U.S. EPA(1992), Israel(1978)
COD	19.7	19.5	90.0	Tunisia(1999)
NH <sub>4</sub> -N	1.33	25.42	-	-
NO <sub>3</sub> -N	3.44	1.95	-	Korea
PO <sub>4</sub> -P	0.15	1.57	<0.5	Korea
Cl	24.12	77.85	250	"
SO <sub>4</sub>	5.89	31.53	-	-
Mn	0.007	0.003	0.5	Tunisia(1999)
Ni	0.006	0.005	0.2	"
Zn	0.03	0.004	5	"
SAR <sup>b</sup>	4.73	15.51	<10	Italy(1977)

<sup>a</sup>All units in mg L<sup>-1</sup> unless otherwise specified except pH.

<sup>b</sup>SAR = C<sub>Na</sub>/ [(C<sub>Ca</sub> + C<sub>Mg</sub>)/2]<sup>1/2</sup>



**Fig. 1. Changes of EC<sub>i</sub> and SAR of surface water to alternative irrigation waters with different fertilizer levels during rice cultivation periods. CIG; continuous irrigation of ground water, CIM; continuous irrigation of discharge water from municipal wastewater treatment plant.**

값은 이앙 후 60일까지는 급격히 감소하다가 수확기에는 증가하는 경향으로 나타났다. 이러한 연구결과는 Shin 등<sup>11)</sup>에 의해 발표된 매립장 인근 논의 수질 위해성 평가 논문에서 매립장 하부 거리별 논 표면수에 대한 EC<sub>i</sub>값의 범위는 0.10-0.27 mS cm<sup>-1</sup>로, 이앙 후 30일 이후의 논 표면수의 EC<sub>i</sub> 값 보다 2배 이상 높게 그리고 논 표면수의 SAR값은 0.72-1.18로 10배 이상 높게 관측되었다.

대체 용수원 관개기간에 따른 비료사용 수준별 표면수의 EC<sub>i</sub> 및 SAR값의 변화는 Fig. 2에 나타내었으며, 대조구와

비교하여 이앙 20일 후부터 토양검정 후 시비량 50% 시비구 및 하수종말처리장 방류수 20일간 관개구의 표면수의 EC<sub>i</sub> 및 SAR값에는 유의차가 없는 것으로 나타났다.

**침출수의 EC<sub>i</sub> 및 SAR값의 변화**

대체 관개용수원별 비료사용 수준별 침출수의 EC<sub>i</sub> 및 SAR값의 변화를 Fig. 3에 나타냈으며, 이앙 후 30일까지는 침출수의 EC<sub>i</sub>는 하수종말처리장 방류수 관개구에 토양검정 시비량 및 검정시비량의 50% 시비 수준구 사이에는 유의차

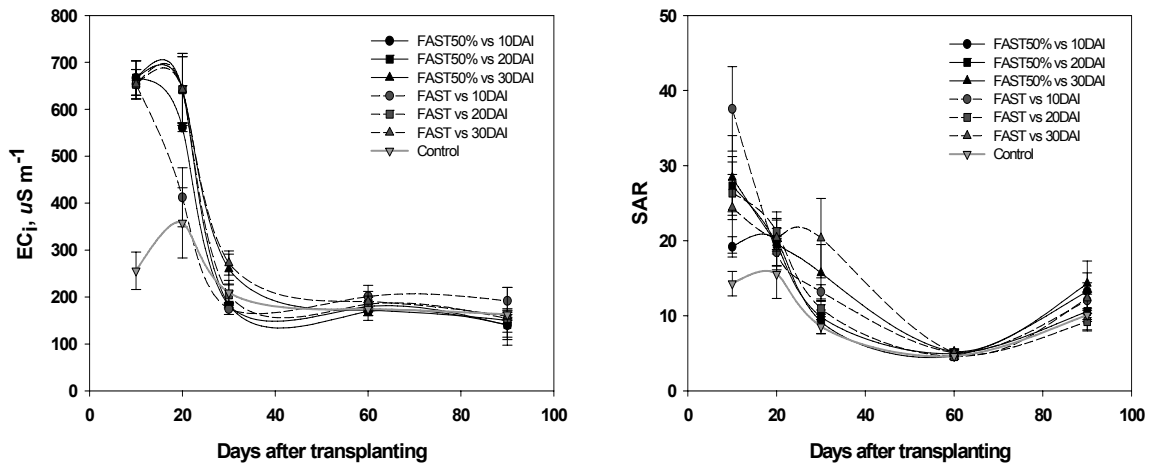


Fig. 2. Changes of  $EC_i$  and SAR of surface water to irrigation periods of DMWT with different fertilizer levels and irrigation intervals during rice cultivation periods. DAI; days after irrigation. FAST; application amount of fertilizer based on soil test. FAST 50%; half application amount of fertilizer based on soil test.

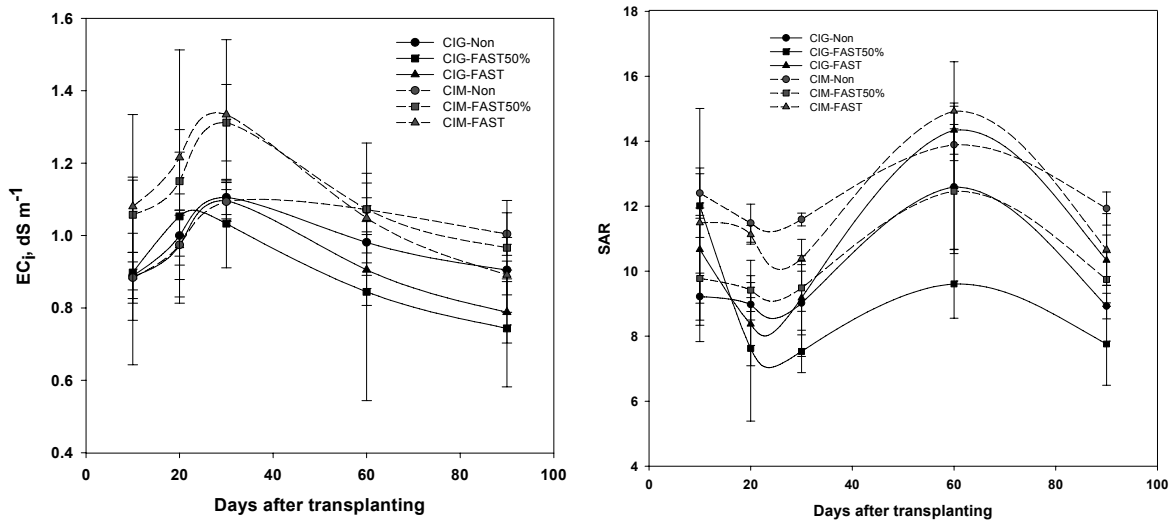


Fig. 3. Changes of  $EC_i$  and SAR of leachate according to alternative irrigation waters at different fertilizer levels during rice cultivation periods. CIG; continuous irrigation of ground water, CIM; continuous irrigation of discharge water from municipal wastewater treatment plant. FAST; application amount of fertilizer based on soil test. FAST 50%; half application amount of fertilizer based on soil test.

가 없는 것으로 나타났지만, 다른 처리구에 비하여 가장 높게 나타났다. 전반적으로, 모든 처리에 대한 침출수의  $EC_i$  값은 이앙 후 30일까지는 증가하다가, 그 이후부터는 감소하는 경향을 보였다. SAR 값은 벼 생육 전반에 걸쳐 지하수 관개구에 검정시비량과 하수종말처리장 방류수 관개구에 검정시비량 및 검정시비량 50% 시비구 사이에는 유의차가 없었으며, 이러한 처리구에서의 SAR 값이 다른 처리구에 비하여 높게 나타났다. 또한  $EC_i$  값의 경향과 상반되게 이앙 후 30일까지는 모든 처리구에서 SAR 값이 감소하다가 그 이후 증가하였으며, 이앙 후 60일을 정점으로 감소하는 경향을 보였다.

비료시용수준별 대체 용수원 관개기간에 따른 침출수의  $EC_i$  및 SAR 값의 변화는 Fig. 4에 제시하였으며, 침출수의

$EC_i$  값은 대조구와 비교하여 벼 이앙 20일까지는 모든 처리구에 비하여 높게 나타났지만, 토양검정시비량 50% 및 하수종말처리장 방류수 20일 관개구까지는 유의차가 없었다. 그러나 SAR 값은 분얼기 이후부터는 관개수원에 따른 관개기간 및 시비량에 관계없이 대조구에 비하여 낮게 관측되었다. 이러한 현상은 Shin 등<sup>12)</sup>에 의한 폐수처리장 방류수 관개가 벼 생육 및 침출수 염농도에 미치는 영향 포트 실험에서 이앙 후 30일간에 걸쳐 하수종말처리장 방류수를 관개한 근원 주변 토양수의 평균  $EC_i$  값은 식양토 및 사양토에서 각각 3.4 및 2.5  $dS m^{-1}$ 로 나타났다고 보고된 바 있다. 이러한 수치와 비교해서  $EC_i$  값이 1.3  $dS m^{-1}$ 로 이는 포장실험으로 인한 토양의 흡착능력의 차이 때문인 것으로 생각된다.

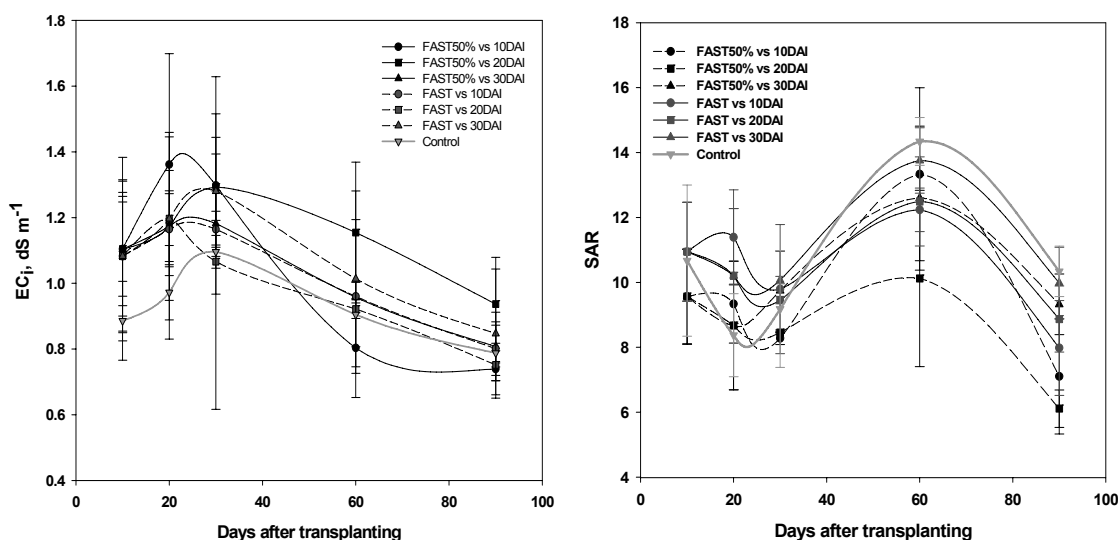


Fig. 4. Changes of EC<sub>i</sub> and SAR of leachate according to irrigation periods of DMWT at different fertilizer levels and irrigation intervals during rice cultivation periods. DAI; days after irrigation. FAST; application amount of fertilizer based on soil test. FAST 50%; half application amount of fertilizer based on soil test.

대체용수에 대한 벼 생육변화

Table 2에서 보는 바와 같이 관개수원별 비료 사용 수준에 따른 벼 생육에 대한 경향을 보면, 지하수 및 하수종말처리장 방류수 관개구에서 분얼수 및 벧짚무게는 시비수준이 증가함에 따라 증가하였고, 지하수 관개구에서 시비 수준이 증가함에 따라 분얼수와 정조중도 증가하였다. 하수종말처리장 방류수 관개구에서는 토양검정시비량 50% 시비수준에서 정점을 보였다.

시비수준별 대체 용수원의 관개기간에 따른 벼 생육상황 (Table 3)을 보면, 초장은 토양검정 50% 시비량 및 하수종말처리장 방류수 10일간 관개구를 제외하고, 모든 처리구에서 대조구보다 높게 나타났다. 분얼수는 토양검정 50% 시비

량 및 하수종말처리장 방류수 20일간 관개구에서 가장 높게 나타났지만, 토양검정 시비수준에서는 관개기간에 관계없이 대조구 보다 많았다. 정조중은 토양검정 50% 시비량 수준에서 관개기간이 지속됨에 따라 감소하였지만, 토양검정 시비수준에서는 관개기간에 관계없이 대조구 보다 낮게 나타났다.

이러한 연구결과를 종합해 볼 때, 벼 이앙기 한발시 대체 용수원으로 하수종말처리장 방류수를 관개할 경우, 벼 수량 (작물생육) 및 환경영향(표면수 및 침출수중 EC<sub>i</sub>와 SAR값) 측면을 고려해 볼 때 관개기간을 최대 20일간 관개하여 재배할 수 있었으며, 이에 따른 연간 총 관개용수량인 761.1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>의 32.7%(249.2 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) 관개수 대체 효과를 가져왔으며, 또한 비료 사용량을 검정시비 대비 50% 수준으로 감비할 수 있는 효과를 얻을 수 있었다.

Table 2. Plant responses to alternative irrigation water during rice cultivation periods at different fertilizer levels

Plant characteristics	Ground water			DMWT <sup>a</sup>		
	Non	FAST 50%	FAST	Non	FAST 50% <sup>b</sup>	FAST <sup>c</sup>
Plant height (cm)	42.32	56.30	54.93	48.38	56.30	59.37
No. of tiller	12.77	17.30	20.80	15.27	17.30	20.53
Straw weight (kg 10a <sup>-1</sup> )	1490	2100	2332	1908	2470	2770
Grain yield (kg 10a <sup>-1</sup> )	510	595	622	555	695	540
Harvest index	0.22	0.19	0.18	0.19	0.19	0.15

<sup>a</sup>DMWT; discharge water from municipal wastewater treatment plant

<sup>b</sup>FAST 50%; half application amount of fertilizer based on soil test.

<sup>c</sup>FAST; application amount of fertilizer based on soil test.

**Table 3. Plant responses to irrigation periods of alternative water at different fertilizer levels and irrigation intervals during rice cultivation periods.**

Plant characteristics	FAST 50% <sup>a</sup>			FAST <sup>b</sup>			Control
	10 DAI <sup>c</sup>	20 DAI	30 DAI	10 DAI	20 DAI	30 DAI	
Plant height (cm)	52.8	56.7	59.4	62.7	60.8	63.4	54.9
No. of tiller	19.0	22.1	18.6	22.0	23.9	21.6	20.8
Grain yield (kg 10a <sup>-1</sup> )	590.5	566.2	553.3	475.9	507.4	491.6	534.6
Harvest index	0.19	0.19	0.17	0.15	0.16	0.16	0.18

<sup>a</sup>FAST 50%; half application amount of fertilizer based on soil test.

<sup>b</sup>FAST; application amount of fertilizer based on soil test.

<sup>c</sup>DAI; days after irrigation.

## 요 약

하수종말처리장 방류수를 이용한 포장적용시험에서 토양 검정시비량의 50%시비수준에서 대체용수원 20일 관개구의 벼 생육 및 수량은 비교적 대조구와 비슷하게 나타났다. 표면수의 수질에 대한 EC<sub>i</sub> 및 SAR값은 하수종말처리장 방류수 관개구가 지하수 관개구에 비해 2배 이상 높은 것으로 나타났다. 관개기간별 하수종말처리장 방류수 10일과 20일 관개구의 표면수 EC<sub>i</sub> 및 SAR값은 유의차가 없었지만, 생육초기 단계에서 30일간 관개구에서 가장 높게 나타났다. 그리고 침출수중의 EC<sub>i</sub> 및 SAR값은 비료사용 수준별 및 대체용수 관개기간에 따라 일정한 경향을 보이지 않았다. 결론적으로 이 양기의 한발기 20일 동안은 검정시비량의 50% 시비수준으로 하수종말처리 방류수를 관개할 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 한발 20일 동안 대체용수 관개 이용 효율성은 벼 재배 기간 동안 총 관개량에 비교하여 32.7%인 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- Bouwer, H. (1989) Ground water recharge with sewage effluent. *Water Sci. Technol.* 23, 2099-2108.
- Asano, T. and Mills, R.A. (1990) Planning and analysis for water reuse projects, AWA, pp. 38-47.
- Asano, T., Richard, D., Crites, R.W. and Tchobanoglous, G. (1992) Evolution of tertiary treatment requirements in California. *Water Environ. Technol.* 4(2), 37-41.
- United State Environmental Protection Agency. (1992) Guidelines for water reuse: Manual. U.S. EPA and U.S. Agency for Int. development. EPA/625/R-92/004, Cincinnati, OH.
- Angelakis, A. N., Marecos, Do Monte M. H. F., Bontoux, L., and Asano, T. (1999) The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: Need for guidelines. *Wat. Res.* 33(10), 2201-2217.
- Papadopoulos I. (1995) Present and perspective use of wastewater for irrigation in the Mediterranean basin. In 2nd Int. Symposium on wastewater reclamation and reuse, eds. A. N. Angelakis A. N. et al., Vol. 2, 735-746. IAWQ, Iraklio, Greece.
- Environmental Management Cooperation. (2001) Study on reuse technology of discharge waster from municipal wastewater treatment plant(Ed.). pp. 11
- Singh, U., Patil S.K, Das R.O., Padilla J.L., Singh V.P, and Pal A.R. (1999) Nitrogen dynamics and crop growth on an alfisol and a vertisol under rainfed lowland rice-based cropping system. *Field Crops Research* 61, 237-252.
- Korea Environmental protection Agency. (2000) Standard methods for the examination of water contamination(Ed.) pp. 141-347.
- NIST(National Institute of Agricultural Science and Technology). (2000) Analysis methods of soil and plant(Ed.).
- Shin, J, J. Lee, W, Kim, and G, Jung. (2006) Risk assessment impact of irrigation water quality in the rice paddy surrounding the closed landfill area. *Proceeding of The Korean Society of Agricultural and Environment*, pp. 117-127.
- Shin, J, J. Lee, W. Kim, C. Lee, S. Yun, and E. Eom. (2003) Influences of discharge waters from wastewater treatment plants on rice(*Oryza sativa* L.) growth and percolation water quality. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 36(1), 24-31.