

하수종말처리장 방류수를 발작물 관개용수로 처리시 시금치와 배추의 생육, 대장균 분포 및 토양의 질 평가

조재영 · 박승우* · 손재권** · 박봉주*** · 이용근****

전북대학교 응용생물공학부 · *서울대학교 조경 · 지역시스템공학부

전북대학교 생물자원시스템공학부 · *건국대학교 자연과학연구소 · ****전북대학교 식물자원과학부

Growth Response and Total Coliform Distribution of Spinach and Chinese Cabbage and Soil Quality by Irrigation of Domestic Wastewater

Cho, Jae Young · Park, Seung Woo* · Son, Jae Gwon** · Park, Bong Ju*** · Li, Long Gen****

Division of Biotechnology, Chonbuk National University

**Department of landscape architecture and rural system engineering, Seoul National University*

***Department of Agricultural Engineering, Chonbuk National University · ***Institute of Natural Science, Konkuk University*

*****Department of Crop Production and Technology, Chonbuk National University*

ABSTRACT : The experiment was carried out to determine the distribution of total coliform, the translocation of heavy metals and the salt accumulation in soils following the supply of ground water, the domestic wastewater and the ultraviolet treatment of domestic wastewater during the spinach and the chinese cabbage cultivation. There were not much changes in the Total-N, Total-P and cations in soils following the ultraviolet treatment of the domestic wastewater. However, the density of total coliform was dramatically reduced from 894MPN/100mL to 5MPN/100mL. The diagnosis of composition of soil after the harvest of chinese cabbages and spinach has shown that the concentration of Na⁺ was 3-4 times higher in plot using domestic wastewater than in plot using ground water. When domestic wastewater and ground water were used in growing spinach and chinese cabbage at 50% each, the application of chemical fertilizers reduced about 25% to 50% compared to the criteria set down by the Rural Development Administration and there was not significant difference in terms of harvest. Using non-ultraviolet treatment of domestic wastewater directly on spinach and chinese cabbage has resulted in excessive density of total coliform at 25,000MPN/100mL. Even when ultraviolet treatment, the density was still high at 2,000MPN/100mL. The high density of total coliform even following ultraviolet treatment of domestic wastewater is considered to be caused by photo-reactivation of micro-organism. When reusing domestic wastewater, the application of sterilization such as ultraviolet, ultrasonic and electron-beam for public health and hygiene reasons may provide safe supply of agricultural water.

Key words : Agricultural water, Domestic wastewater, Total coliform, Ultraviolet treatment

1. 서론

수자원의 부족은 세계적으로 가장 심각한 문제 중의 하나로 인식되고 있으며, 수자원 문제를 해결하기 위한 노력으로 하수처리수를 재이용하려는 연구가 활발하게 진행중에 있다. 하수처리수의 농업적 재이용은 대체 수자원

확보 및 효율증대라는 양적인 측면뿐만 아니라, 수계에 방류되었을 때 발생할 수 있는 수질문제를 경감시킬 수 있는 오염부하 저감 측면에서도 큰 관심을 가지게 한다 (정광욱 등, 2004).

환경부(2005) 하수처리장 가동현황에 의하면, 294개소에서 22,393.8천톤/일에 해당하는 하수가 처리되고 있으며, 2006년도에 추가적으로 약 68개소의 하수처리장이 증설될 계획으로 있다. 우리나라의 연간 하수발생량은 87.7억m³으로, 이중 49.6억m³의 하수처리용량을 보유하고 있

Corresponding author : Cho, Jae Young
Tel : 063-270-2547
E-mail : soilcosmos@chonbuk.ac.kr

다. 생활하수의 재생과 재이용은 부족한 수자원의 보충, 재이용수에 포함된 영양물질의 농지에의 환원과 작물에 의 이용 효과, 자원의 재활용 측면 등 부수적인 효과가 기대된다. 특히, 농업용수의 경우는 작물 생육기간 중 관개용수나 가뭄대책을 위한 비상용수로서 활용 가능성이 높다. 하수처리수의 재이용이 적용되기 위해서는 처리기술적인 문제 외에도 토양의 질 유지, 처리비용의 문제, 실제 영농에 참여하는 농민들의 보건위생상의 문제점, 생활하수로부터 작물체로 전이될 수 있는 여러 가지 유기·무기 독성오염물질로 인한 식품안전성 문제, 지속적인 작물생산성 유지 등 여러 분야에서 검토되어야 할 문제가 산적해 있다(과학기술부, 2004).

현재 수자원이 부족한 일부 국가에서는 오래 전부터 생활하수의 재이용과 관련된 사회적인 기반구축을 수행해 왔다. 멕시코의 경우는 연평균 강우량이 760mm이고 7월에서 9월 사이에 집중되기 때문에 관개에 크게 의존하고 있으며, 전국에 걸쳐서 하수처리시스템이 있는 대부분의 도시는 하수관개를 실시하고 있다. 인구 18,000,000명인 멕시코시와 주변 광역지구에서 발생하는 생활하수는 약 80,000ha에 관개되는데, 그 수량은 $30\text{--}45\text{m}^3/\text{sec}$ 로 우수와 혼합한 상태로는 약 $45\text{m}^3/\text{sec}$ 를 사용하는 세계 최대의 하수관개지역이다. 재배작물은 주로 콩, 토마토, 보리, 알팔파 등이다. 1998년 기준으로 일본에서는 공공하수처리장 192개소로부터 연간 135백만 m^3 , 공장하수처리장 1,475개소로부터 71백만 m^3 등 연간 206백만 m^3 의 용수가 재이용되고 있으며, 이중 농업용수 분야의 재이용은 15.9백만 m^3 으로 16%, 하천유지용수 분야로 63.9백만 m^3 등을 활용하고 있다(과학기술부, 2004).

생활하수의 농업적 재이용과 관련된 연구는 주로 공공보건의 위험성에 초점이 맞추어져 왔다. Melloul et al.(2001)은 물리·화학·생물학적 처리과정을 거치지 않은 생활하수를 관개용수로 처리하여 야채를 재배할 경우 *Salmonella*에 의한 오염이 발생할 수 있음을 지적하였고, Haabbari et al.(2000)은 Morocco에서 생활하수를 농경지에 재이용할 경우 아이들에게 매우 높은 기생충 감염율을 나타내었기에 생활하수의 적절한 처리 및 공중 보건교육을 철저히 하여야 한다고 주장하였다. Brenner et al.(2000)은 이스라엘에서 생활하수를 농업용수로 이용하기 위하여 Sequencing batch reactor(SBR) 시스템을 이용하여 오염물질의 제거효과를 조사한 결과, 현탁물질과 병원균의 높은 제거효율을 확인하였다고 보고한 바 있다.

US EPA(1998)에서는 도시 생활하수를 재이용하여 식용작물의 재배에 사용할 경우, 기본적으로 2차 여과 및 살균처리를 수행하여야 하고, BOD는 10mg/L 이하, 대장균수는 검출되어서는 안되며, 탁도는 2NTU 미만, 수소가

은농도는 6-9의 범위 그리고 염소잔류량이 1mg/L 미만으로 수질기준을 설정하였다. 대부분의 국가들에서도 US EPA의 지침과 유사한 수준의 수질기준을 정하고 있으나, 보건 위생문제와 관련하여 대장균 균수, 선충란수 이외에도 병원성 세균과 바이러스 등의 감염우려에 따라 다양한 논의가 존재하는 것이 현실이다.

우리나라의 하수종말처리시설의 방류수질은 유입수의 양과 수질, 처리방법 등에 따라 큰 차이를 보이나, 1999년의 평균은 BOD 12.2mg/L , COD 12.8mg/L , SS 8.4mg/L 등으로 농업용 수질기준 중 일부 목적에서 적합한 것으로 나타났다(환경부, 2000). 그러나 2001년 1/4분기 방류수질 중 대장균 균수는 평균 998개/mL로서 미생물 수질기준으로 제시된 WHO의 200-1,000/100mL, 미국 캘리포니아주의 2.2-23/100mL 등에 비하여 훨씬 높은 수치를 나타내고 있다. 따라서 농업용수 재이용수로서 수질기준을 충족시키기 위해서는 적절한 수준의 살균과 여과 등 별도의 처리가 고려되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 질소나 인과 같은 영양물질을 다량 함유하고 있는 하수종말처리장 방류수를 관개용수로 이용하여 비가림 하우스내에서 시금치와 배추를 재배하면서 발작물의 생육과 발토양의 화학성분 변화 등에 끼치는 제반인자를 검토하였다. 아울러 수확 후 시금치와 배추를 대상으로 작물체 표면에 잔존하고 있는 대장균군(total coliform, MPN/100mL)의 분포 현황과 저투입지속농업 수행을 위한 화학비료의 적정시비량을 산정하였다.

II. 재료 및 방법

1. 관개용수

본 연구에 사용한 하수종말처리장 방류수는 전라북도 전주시 전미동에 위치한 전주하수종말처리장의 방류수를 이용하였다. 실험에 사용한 논 관개용수는 1) 전북대학교 부속 농장의 지하수(GF), 2) 하수종말처리장 방류수(WF), 3) 하수종말처리장 방류수를 수처리용 자외선 살균램프(Type: TUV16W, Lamp current(mA): 400, Ultraviolet output: $33\mu\text{W}/\text{cm}^2$)로 1시간 동안 살균한 살균수(WSF)로 분류하였다.

2. 작물재배

실험에 사용한 인공 재배포트는 원예용 플라스틱 박스로서 약 0.1m^2 의 표면적을 가지고 있다. 실험포트의 바닥에 약 2cm의 자갈을 충전한 다음 그 위에 부직포를 덮은 후에 발토양을 약 15cm 정도 충전하였다. 토양 위에는 약 5cm의 여유공간이 있어서 관개용수를 충분히 공급할 수 있도록 하였다. 전북대학교 농과대학 비가림 하우스

시험포장에 설치한 총 60개의 재배 포트에 배추와 시금치를 대상으로 농업과학기술원의 작물재배 방법과 표준 시비량(농업과학기술원, 1999)에 기준하여 처리하였다. 시금치 재배구의 경우 비료를 시비하기에 앞서 석회 100kg/10a 그리고 퇴비 1000kg/10a를 처리하였다. 9월 1일에 시금치 종자(*Spinacia oleracea*, 사카타코리아)를 밀식 파종한 다음, 파종후 20일째에 각 포트당 6개체씩만을 남기고 솟아내었다. 배추작물의 경우도 시금치와 동일한 기간에 실험을 수행하였는데, 화학비료를 시비하기에 앞서 퇴비 3000kg/10a 그리고 석회 100kg/10a를 처리하였다. 9월 1일에 육묘된 배추(*Brassica campestris subsp. napus var. pekinensis*, 중앙종묘)를 포트당 2개체씩 이식한 후 작물을 재배하였다. 배추와 시금치 모두 2004년 12월 1일에 수확하였으며, 재배기간중 병충해 및 잡초방제는 관행영농법에 기준하였다.

본 발작물 재배시험은 전체 공급되는 관개용수의 50%를 하수종말처리장 방류수로, 나머지 50%는 지하수를 대상으로 하였다. 시험포트당 1회 관개수 공급량은 4리터였으며, 매주 2회 관개수를 공급하였다. 매월 첫째주와 셋째주에는 전량 하수종말처리장 방류수를 관개하였고, 나머지 둘째주와 넷째주에는 일반 지하수를 관개하였다. 관개수 공급기간은 2004년 9월 1일부터 2004년 11월 25일까지였다.

3. 시험구별 화학비료 처리량

본 연구에서는 관개용수를 통한 질소와 인산과 같은 식물영양성분의 자연공급을 감안하여 발작물 재배시 처리하는 화학비료의 시비량을 다음과 같이 조정하였다. 실험에 처리된 화학비료의 양은 농업과학기술원의 시금치 작물 표준시비량인 기비(질소: 인산: 칼리 = 10.0: 5.9: 7.9kg/10a) 그리고 추비(질소: 산: 칼리 = 15.0: 0: 4.0kg/10a)를 기준으로 화학비료 무처리구, 표준시비량의 50% 시비구, 표준시비량의 75% 시비구, 표준시비량의 100% 시비구로 처리하였다. 배추의 경우도 동일하게 작물 표준시비량인 기비(질소: 인산: 칼리 = 11.0: 7.8: 11.0kg/10a) 그리고 추비(질소: 산: 칼리 = 21.0: 0: 8.8kg/10a)를 기준으로 화학비료 시비량을 조절하였다. 시비량 조절은 질소와 인산비료를 대상으로 하였고, 칼리비료는 표준시비량을 동일하게 처리하였다<표 1>.

4. 생육조사 및 분석방법

토양성분의 분석은 실험전 토양과 발작물 수확후 처리구를 대상으로 pH, 총질소, 총인, 중금속 (Pb, Cd, Cu, Zn) 그리고 양이온(Ca, Mg, Na, K)의 함량을 농촌진흥청(1983)의 토양화학분석법에 기준하여 분석하였다. 하수종말처리장 방류수와 지하수를 포함한 수질시료는 pH, EC,

표 1. Application of chemical fertilizer

Irrigation water	Crop	Application of chemical fertilizer	Code	
Ground water	Spinach	25.0 : 5.9 : 11.9 = N : P : K kg/10a	GFS	
	Chinese cabbage	33.0 : 7.8 : 19.8 = N : P : K kg/10a		
	Spinach	18.8 : 4.4 : 11.9 = N : P : K kg/10a	GF75	
	Chinese cabbage	24.8 : 5.9 : 19.8 = N : P : K kg/10a		
Waste water	Spinach	25.0 : 5.9 : 11.9 = N : P : K kg/10a	WFS	
	Chinese cabbage	33.0 : 7.8 : 19.8 = N : P : K kg/10a	WF75	
	Spinach	18.8 : 4.4 : 11.9 = N : P : K kg/10a		
	Chinese cabbage	24.8 : 5.9 : 19.8 = N : P : K kg/10a		
	Spinach	12.5 : 3.0 : 11.9 = N : P : K kg/10a	WF50	
	Chinese cabbage	16.5 : 4.0 : 19.8 = N : P : K kg/10a		
	Spinach	No application	WF0	
	Chinese cabbage	No application		
	Waste water + UV sterilization	Spinach	25.0 : 5.9 : 11.9 = N : P : K kg/10a	WSFS
		Chinese cabbage	33.0 : 7.8 : 19.8 = N : P : K kg/10a	WSF75
Spinach		18.8 : 4.4 : 11.9 = N : P : K kg/10a		
Chinese cabbage		24.8 : 5.9 : 19.8 = N : P : K kg/10a		
Spinach		12.5 : 3.0 : 11.9 = N : P : K kg/10a	WSF50	
Chinese cabbage		16.5 : 4.0 : 19.8 = N : P : K kg/10a		
Spinach		No application	WSF0	
Chinese cabbage		No application		

총질소, 총인, 중금속(Pb, Cd, Cu, Zn) 그리고 양이온(Ca, Mg, Na, K)을 대상으로 환경처(1993)의 수질공정시험법의 방법을 적용하였다. 수확한 시금치와 배추시료를 대상으로 총질소, 총인, 중금속(Pb, Cd, Cu, Zn) 그리고 양이온(Ca, Mg, Na, K)의 함량에 대해서도 분석을 수행하였다. 이와 함께 시금치와 배추의 엽장, 엽폭, 엽중 그리고 엽수를 대상으로 작물생장에 대한 조사도 병행하여 수행하였다. 시금치와 배추의 표면에 병원성 미생물이 어느 정도 잔존하고 있는지를 조사하기 위하여 2004년 12월 1일 수확한 작물체를 대상으로 각 처리구당 가식부위를 200그램씩 채취하여 1리터용 비이커에 넣은 다음 증류수 500 mL를 넣었다. 그 후 작물체가 들어있는 비이커를 초음파 세척기에 넣고 5분 동안 초음파 세척을 수행하였다. 세척이 완료된 용액을 여과하여 즉시 대장균군(total coliform, MPN/100mL) 조사를 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 관개용수의 특성

본 실험에 사용된 하수종말처리장 방류수의 수질은 농업용 관개용수에 비해 총질소는 10배, 총인은 약 25배 정도 높게 나타났다. 양이온의 경우도 10-50배 정도 함량이 높게 나타났다. 하수종말처리장 방류수의 자외선 살균에 따른 수질변화를 조사한 결과 총질소, 총인 그리고 양이온의 함량은 큰 변화가 없었으나, 대장균 군수의 경우 자외선 살균처리에 의해 894MPN/100mL에서 5MPN/100mL로 크게 감소하였다<표 2>.

2. 관개용수별 배추와 시금치 재배 발토양중 화학성분의 함량 변화

2004년 12월 1일 시금치와 배추를 수확한 후 토양 표토층(0-5cm)을 채취하여 하수종말처리장 방류수 관개에 따른 토양의 화학적 특성 변화를 조사한 결과는 표 3과 4에 나타나 있다. 제시된 데이터는 각 처리구별 3반복 평균값으로 나타내었다. 하수종말처리장 방류수 관개구에서 자외선 살균처리 여부에 따라 영양물질의 함량이 큰 차이

표 2. Water quality of irrigation water

Irrigation water	pH	mg/L									
		T-N	T-P	Ca	Mg	Na	K	BOD	COD	SS	E. coil
TR #1	7.04	1.92	0.018	2.7	1.5	0.8	1.0	1.8	5.2	19.8	0
TR #2	7.35	19.63	0.452	25.6	15.6	63.5	20.4	22.5	29.6	59.6	894
TR #3	7.28	19.22	0.454	9.8	18.9	59.2	18.7	24.0	25.7	58.9	5

TR 1 : Ground water, TR 2 : Domestic waste water, TR 3 : Ultra-violet treatment of domestic wastewater

를 나타내지 않았다. 그러나 일반 지하수 관개구와 하수종말처리장 방류수 관개구간에는 영양물질의 토양내 집적 현상이 차이를 보였는데 하수종말처리장 방류수 관개구에서 더 높은 경향이었다. 또한 각 처리구에서 화학비료의 시비량을 표준시비, 표준시비량의 75% 시비, 표준시비량의 50% 시비시 화학비료의 시비량의 증가에 따라 발토양중 영양물질의 함량이 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. 조사대상 중금속 오염물질 Pb, Cu, Cd, Zn은 관개용수의 공급원별 그리고 하수종말처리장 방류수의 자외선 처리 여부에 따라 차이를 나타내지 않았으며, 하수종말처리장 방류수를 발작물의 관개용수로 이용시 중금속으로 인한 토양오염은 우려할 수준이 아닌 것으로 조사되었다.

주요 양이온 가운데 Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺의 함량은 일반 지하수 관개구와 하수종말처리장 방류수 관개구 사이에 큰 차이를 보이지 않았으나 Na⁺의 함량은 일반 지하수 관개구보다 하수종말처리장 방류수 관개구에서 3-4배 이상 높게 나타나고 있었다. 이 같은 실험결과는 논에 하수종말처리장 방류수를 공급하면서 벼를 재배한 경우와 유사한 경우로서 논토양 보다는 발토양에서 나트륨의 집적정도가 높은 것으로 나타났다. 나트륨의 과다집적은 토양의 물리성 악화, 토양의 삼투압 변화, 토양입단 형성의 불량 뿐만 아니라 나트륨 자체의 이온독성도 나타날 수 있기에 하수종말처리장 방류수를 농경지에 관개용수로 이용할 경우 나트륨 집적으로 인한 토양염류화 현상을 제어할 수 있는 방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

3. 시금치와 배추의 생육조사

시금치와 배추를 대상으로 화학비료 표준시비량 처리구를 기준으로 일반 지하수(GF), 하수종말처리장 방류수(WF),

표 3. Chemical properties of spinach cultivation soil before and after domestic wastewater irrigation

Treatment	pH (1:5H ₂ O)	mg/kg									
		Tol-P	Tot-N	Cu	Zn	Pb	Cd	Ca	Mg	Na	K
Before treatment	5.89	356.8	1025.6	6.54	51.45	6.95	0.106	89.6	24.9	15.9	13.8
GF100	5.85	372.5	1156.7	6.92	63.63	8.14	0.098	91.2	26.6	16.2	18.8
GF75	5.86	370.0	1174.6	6.57	58.47	8.63	0.125	90.4	24.1	17.4	19.2
WF100	5.72	389.8	1145.6	5.18	49.89	5.78	0.142	78.9	25.5	69.5	16.9
WF75	5.78	386.4	1187.4	6.09	54.15	9.25	0.163	82.5	26.9	82.5	16.3
WF50	5.91	389.7	1063.8	7.77	52.26	8.14	0.152	81.4	31.2	69.0	17.4
WF0	5.91	350.7	1039.8	8.14	52.21	5.55	0.112	79.6	26.9	74.5	15.8
WSF100	5.81	386.6	1185.8	7.59	58.15	6.66	0.122	81.2	26.3	73.2	15.2
WSF75	5.86	384.5	1132.4	7.50	65.85	5.95	0.136	83.6	24.1	82.0	16.5
WSF50	5.88	391.2	1098.9	6.95	59.98	6.48	0.142	82.5	28.5	81.3	14.2
WSF0	5.88	355.4	1048.3	8.14	60.10	5.88	0.136	81.1	30.5	80.0	16.9

표 4. Chemical properties of chinese cabbage cultivation soil before and after domestic wastewater irrigation

Treatment	pH (1:5H ₂ O)	Tot-P	Tot-N	Cu	Zn	Pb	Cd	Ca	Mg	Na	K
		mg/kg									
Before treatment	5.89	356.8	1025.6	6.54	51.45	6.95	0.106	89.6	24.9	15.9	13.8
GFS	5.85	372.5	1156.7	6.92	63.63	8.14	0.098	91.2	26.6	16.2	18.8
GF75	5.86	370.0	1174.6	6.57	58.47	8.63	0.125	90.4	24.1	17.4	19.2
WFS	5.72	389.8	1145.6	5.18	49.89	5.78	0.142	78.9	25.5	69.5	16.9
WF75	5.78	386.4	1187.4	6.09	54.15	9.25	0.163	82.5	26.9	82.5	16.3
WF50	5.91	389.7	1063.8	7.77	52.26	8.14	0.152	81.4	31.2	69.0	17.4
WF0	5.91	350.7	1039.8	8.14	52.21	5.55	0.112	79.6	26.9	74.5	15.8
WSFS	5.81	386.6	1185.8	7.59	58.15	6.66	0.122	81.2	26.3	73.2	15.2
WSF75	5.86	384.5	1132.4	7.50	65.85	5.95	0.136	83.6	24.1	82.0	16.5
WSF50	5.88	391.2	1098.9	6.95	59.98	6.48	0.142	82.5	28.5	81.3	14.2
WSF0	5.88	355.4	1048.3	8.14	60.10	5.88	0.136	81.1	30.5	80.0	16.9

그리고 하수종말처리장 방류수 자외선 살균처리구(WSF) 간의 엽장, 엽폭, 엽중 및 엽수를 조사한 결과는 표 5에 나타나 있다. 시금치의 경우 화학비료 표준시비량 처리와 화학비료 추천시비량의 75% 처리구 모두에서 일반 지하수 관개에 비해 하수종말처리장 방류수 관개처리구에서 모든 생육지표가 높게 나타나는 경향이였다. 그리고 발작물의 생육적인 측면만을 고려할 때 하수종말처리장 방류수의 자외선 살균처리 여부는 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. 하수종말처리장 방류수를 공급하면서 화학비료 시비량을 표준시비량, 25% 저감처리, 50% 저감처리, 화학비료 무처리를 하면서 시금치를 재배하였을 때, 엽장의 경우에는 최대 50% 저감처리구의 경우에도 표준시비량구와 큰 차이가 나타나지 않았다. 그리고 엽폭, 엽수 및 엽중의 경우에도 화학비료 25% 저감처리구와 표준시비량구간에 큰 차이가 나타나지 않았다. 본 연구에서 언급

하고 있는 여러 가지 작물 생육지표 가운데 생산량과 가장 밀접한 관련이 있는 것이 엽중이라 할 수 있다. 엽중만을 놓고 비교할 경우에는 WF 처리구에서 화학비료 시비량이 감소함에 따라 각각 39.1, 35.0, 34.3, 24.3g/plant를, WSF 처리구에서 34.4, 35.5, 32.1, 24.4g/plant를 나타내었다.

배추의 생육지표에 대한 조사결과는 시금치와 거의 유사한 경향을 나타내었다. 수확된 배추의 엽중만을 놓고 비교할 경우에는 WF 처리구에서 화학비료 시비량이 감소함에 따라 각각 1851.9, 1754.0, 1561.7, 1092.5 g/plant를, WSF 처리구에서 1757.4, 1730.3, 1630.5, 1014.6g/plant를 나타내었다. 이같은 결과를 기초로 할 경우에 시금치와 배추를 재배할 때 하수종말처리장 방류수와 일반 지하수를 각각 50%씩 공급하면서 시설재배를 할 경우에 화학비료 시비량은 농촌진흥청의 표준시비량을 기준으로 최소 25-50% 정도 저감하여도 작물수량에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

4. 시금치와 배추중 영양물질과 유해성분의 함량변화

수확한 시금치와 배추를 대상으로 영양물질, 양이온 및 중금속 오염물질의 흡수이행량을 비교 검토한 결과는 표 6과 7에 나타나 있다. 시험대상 작물별로 시금치와 배추 작물의 화학성분의 흡수이행량이 차이를 나타내었다. 질소와 인산의 경우 화학비료 시비량이 증가함에 따라 식물체로의 흡수이행량이 증가하는 경향을 나타내었으나 그 밖의 화학성분의 함량은 화학비료 시비량과 큰 관련성을 나타내지 않았다.

식물체로 흡수이행된 중금속 오염물질의 함량은 작물의 재배형태 즉, 비가림 하우스 재배와 노지재배간에 큰 차이가 나타나지 않았다. 우리나라의 경우 쌀에서 중금속 카드뮴의 허용기준치를 0.2ppm 미만으로 정하고 있으나,

표 5. Growth index of spinach and chinese cabbage by domestic wastewater irrigation

Treatment	Leaf length(cm)		Petiole length(cm)		Fresh weight(g/plant)		Leaf number	
	Spinach	Chinese cabbage	Spinach	Chinese cabbage	Spinach	Chinese cabbage	Spinach	Chinese cabbage
GFS	21.2	42.6	11.8	25.4	33.6	1757.2	13.7	65.3
GF75	21.5	41.7	11.2	23.9	34.3	1689.9	15.3	62.3
WFS	21.7	44.7	12.3	26.1	39.1	1851.9	14.7	64.0
WF75	22.2	46.0	11.8	26.1	35.0	1754.0	15.3	63.3
WF50	21.3	42.2	10.5	24.0	34.3	1600.0	13.3	62.3
WF0	16.6	41.1	8.8	18.2	24.3	1092.5	10.7	53.3
WSFS	23.2	43.5	12.2	26.4	36.4	1757.4	14.3	64.0
WSF75	21.0	43.9	10.5	26.1	35.5	1730.3	14.7	63.7
WSF50	21.3	42.3	11.5	23.3	32.1	1630.5	11.7	62.0
WSF0	21.3	39.8	9.1	19.1	24.4	1014.6	8.7	47.0

아직 채소류중 중금속의 허용기준치가 마련되어 있지 않은 상태이다. CODEX 식품첨가물오염물질부(CCFAC)에서 2005년 5월에 채소류중 카드뮴의 함량을 0.2mg/kg으로 잠정 결정한 바 있다(참고문헌 추가). CCFAC의 잠정적인 허용기준치를 가지고 고찰할 경우 하수종말처리장 방류수를 관개용수로 이용하였을 때 식물체중 중금속오염으로 인한 우려 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 본 조사에서 나타난 작물체중 중금속 함량은 화학비료에 의한 일부 중금속 유입 그리고 토양 자체에 존재하는 중금속의 흡수량 수준으로 나타났다.

5. 발작물 시금치와 배추 가식부위중 대장균군(total coliform, TC)의 분포

시금치와 배추의 표면에 병원성 미생물이 어느 정도 잔존하고 있는지를 조사하기 위하여 수확한 작물체의 가식부위를 초음파 세척하여 대장균군(total coliform, MPN/

100mL) 조사를 수행하였다. 실험방법에서도 논의한 바와 같이 본 발작물 재배실험은 비가림 하우스내에서 진행되었다. 비가림 하우스 조건하에서 작물재배가 이루어지는 경우 자연강우에 의한 작물체 표면의 세정효과를 기대할 수 없을 뿐만 아니라 온도 조건이 여러 미생물들의 번식에 유리한 조건이 형성될 수 있을 것이다.

본 연구에 사용한 하수종말처리장 방류수는 살균 전에 약 800MPN/100mL의 대장균을 보유하고 있었고, 이들을 자외선 살균처리할 경우 개체수가 5MPN/100mL의 수준으로 감소한 것으로 조사되었다. 이들 관개용수를 가지고 약 3개월 동안 작물재배를 한 후 작물체 표면을 강제적으로 초음파 세척을 하였을 때 대장균군의 개체수를 조사한 결과는 다음과 같다<그림 1>.

시금치와 배추 두 작물 모두에서 일반 지하수를 가지고 재배하였을 경우 대장균군이 전혀 발견되지 않았으나, 하수종말처리장 방류수로 재배한 경우 대장균군의 개체수가 25,000MPN/100mL 이상으로 나타났고, 자외선 살균처리를 한 경우에도 대장균군의 개체수가 2,000MPN/100mL 수준으로 매우 높게 나타났다. 이와 같이 자외선 살균처리된 살균수를 관개용수로 사용한 경우에도 높은 대장균군 밀도를 나타낸 것은 미생물들의 광회복(photoreactivation)에 의한 효과로 판단된다. WHO(2000)에서는 기술적으로 대장균을 완전히 처리하는 것이 가능하지만, 경제적, 실용적인 측면을 충족시킬 수 없다고 판단하여 최선의 전염병학적인 증거를 통해 처리된 하수와 분뇨의 재이용에 대한 보다 현실적인 접근방안을 제시하였다. WHO에서는 보건, 위생의 지표항목인 분변성대장균을 수질기준으로 채택하여 강력한 규제항목으로 이용하고 있다. 이 기준들은 법률로서의 효력을 가지는 것은 아니며, 하수처리수를 농업용수로 재이용하는 국가에서 수질기준을 적용할 경우 참고하는 기준으로써 경제, 사회, 환경, 관개 및 경작방법 등을 고려하여 각 국가에 적합한 수질기준을 적용하도록 권장하고 있다(정광욱 등, 2004).

결과에서 보는 바와 같이 하수종말처리장 방류수의 자외선 살균처리가 대장균군의 저감에 기여를 한 것으로 판단된다. 따라서 하수종말처리장 방류수를 농업용수로 재이용할 경우, 직접적인 이용보다는 자외선, 초음파, 전자선 등 살균매체를 이용하는 것이 보건, 위생학적으로 안전한 농업용수를 공급하는 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다. 비가림 하우스내에서 짧은 기간에 이루어진 본 연구결과만을 가지고 발작물의 대장균군 오염문제를 논의하기에는 성급한 면이 없지 않다. 따라서, 추가적으로 지표미생물로 인한 작물의 안전성을 확보하기 위해서는 작물체의 종류, 재배조건 즉 노지재배조건과 비가림 하우스 재배조건 등에서 대장균군의 정성실험을 수행하여 보다 객관적인 데이터의 산출이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

표 6. Concentrations of nutrients, cations, and heavy metals in spinach by domestic wastewater irrigation

Treatment	Tot-N	Tot-P	Ca	Mg	Na	K	Pb	Zn	Cd	Cu
	mg/kg									
GFS	28,497	4,765	3,600	1,400	4,100	51,705	2.5	217.4	0.18	11.5
GF75	24,874	4,577	3,750	1,350	4,955	50,288	2.5	174.2	0.19	13.0
WFS	29,402	4,878	3,400	1,550	8,596	54,660	2.5	191.4	0.18	13.0
WF75	27,870	4,828	3,400	1,300	8,726	54,098	2.5	160.7	0.18	10.0
WF50	23,341	4,912	4,000	1,400	7,097	50,170	2.5	240.3	0.18	14.0
WFO	18,742	3,474	3,550	1,350	8,465	31,595	2.5	103.5	0.18	10.0
WSFS	28,915	5,645	3,050	1,100	7,122	42,460	2.0	149.3	0.17	10.0
WSF75	29,263	5,630	3,250	1,300	7,423	46,490	2.5	157.1	0.16	10.5
WSF50	25,152	4,295	2,600	1,050	7,496	44,538	2.5	139.4	0.17	11.0
WSFO	18,046	4,000	2,550	1,000	7,706	33,648	2.0	152.9	0.16	9.5

표 7. Concentrations of nutrients, cations, and heavy metals in chinese cabbage by domestic wastewater irrigation

Treatment	Tot-N	Tot-P	Ca	Mg	Na	K	Pb	Zn	Cd	Cu
	mg/kg									
GFS	24,247	3,355	4,900	550	2,146	24,310	2.5	24.5	0.15	5.0
GF75	21,251	2,305	4,600	900	2,130	29,540	2.5	40.6	0.15	5.5
WFS	27,521	4,295	4,600	450	4,255	29,010	2.0	17.7	0.14	5.0
WF75	23,410	4,109	4,400	500	4,670	30,565	2.5	29.7	0.15	5.5
WF50	24,386	3,660	3,700	350	4,045	26,855	2.5	21.4	0.16	5.0
WFO	18,742	3,440	3,500	600	4,010	30,548	3.0	32.8	0.16	5.5
WSFS	25,919	3,775	4,250	300	4,094	30,333	2.0	22.9	0.17	5.0
WSF75	25,361	3,474	3,850	100	6,259	22,095	1.5	24.0	0.16	5.5
WSF50	25,083	3,740	3,950	300	9,269	23,988	2.0	18.8	0.17	5.0
WSFO	18,255	2,790	3,300	350	4,912	29,618	2.0	30.7	0.16	7.0

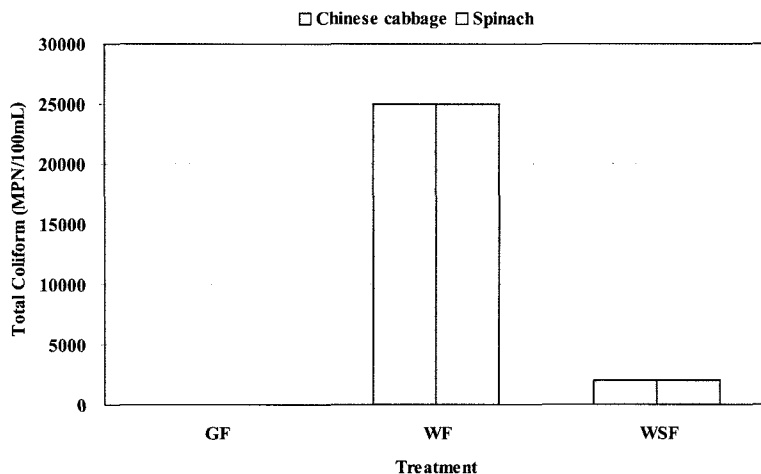


그림 1. Concentration of total coliform(TC) in spinach and chinese cabbage by domestic wastewater irrigation (25,000 : above 25,000MPN/100mL, 2,000 : under 2,000MPN/100mL).

IV. 요약 및 결론

하수종말처리장 방류수를 직접 또는 자외선 살균처리후 시금치와 배추 재배시 관개용수로 이용하였을 때 작물의 생육과 발토양의 화학성분 변화, 보건위생의 지표로 작물 체내 대장균군의 분포에 대한 조사결과는 다음과 같다.

1) 하수종말처리장 방류수의 자외선 살균에 의해 총질소, 총인 그리고 양이온의 함량은 큰 변화가 없었으나 대장균군은 894MPN/100mL에서 5MPN/100mL로 크게 감소하였다.

2) 배추와 시금치의 수확후 토양을 대상으로 성분을 조사한 결과 Na^+ 의 함량이 일반 지하수 관개구보다 하수종말처리장 방류수 관개구에서 3-4배 이상 높게 나타났다. 이같은 나트륨의 과다집적은 토양의 물리성 악화, 토양의 삼투압 변화, 토양입단 형성의 불량뿐만 아니라 나트륨 자체의 이온독성도 나타날 수 있기에 하수종말처리장 방류수를 농경지에 관개용수로 이용할 경우 나트륨 집적으로 인한 토양염류화 현상을 제어할 수 있는 방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

3) 시금치와 배추를 재배할 때 하수종말처리장 방류수와 일반 지하수를 각각 50%씩 공급하면서 시설재배를 할 경우에 화학비료 시비량은 농촌진흥청의 표준시비량을 기준으로 최소 25-50% 정도 저감하여도 작물수량에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

4) 하수종말처리장 방류수를 발작물의 관개용수로 이용하였을 때 중금속 오염으로 인한 식품안전성 문제는 없는 것으로 나타났다. 본 조사에서 나타난 작물체중 중금속 함량은 화학비료에 의한 일부 중금속 유입 그리고 토양 자체에 존재하는 중금속의 흡수량 수준으로 나타났다.

5) 하수종말처리장 방류수를 자외선 살균처리를 하지 않고 직접 시금치와 배추에 관개한 경우 수확후 작물체중에서 대장균군의 개체수가 25,000MPN/100mL 이상으로 높게 나타났고, 자외선 살균처리를 한 경우에도 대장균군의 개체수가 2,000MPN/100mL 수준으로 매우 높게 나타났다. 이와 같이 자외선 살균처리를 수행한 하수종말처리장 방류수를 관개용수로 사용한 경우에 높은 대장균군 밀도를 나타낸 것은 미생물들의 광회복(photoreactivation)에 의한 효과로 판단된다.

본 연구는 과학기술부에서 시행한 21세기 프론티어 연구개발사업 '수자원의 지속적 확보기술 개발사업'의 연구비(과제번호: 4-5-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 과학기술부, 2004, 대체용수 활용기반 기술개발
2. 농촌진흥청, 1983, 토양화학분석법
3. 농업과학기술원, 1999, 작물별 시비처방 기준
4. 정광욱, 윤춘경, 안윤주, 장재호, 전지홍, 2004, 하수처리수를 관개한 후 벼재배 시험구에 대한 미생물 위해성 평가, 한국육수학회지 38 : 225-236
5. 환경처, 1993, 수질오염 공정시험법
6. 환경부, 2000, 물환경정보
7. 환경부, 2005, 하수처리장 가동현황
8. Brenner, A., S. Shandalov, R. Messalem, A. Yakirevich, G. Oron and M. Rebhun, 2000, Wastewater reclamation for agricultural reuse in Israel: Trends and experimental results, Water, Air, and Soil Pollution 123 :

- 167-182
9. Haabbari, K., A. Tifnouti, G. Bitton and A. Mandil, 2000, Geohelminthic infections associated with raw wastewater reuse for agricultural purposes in Beni-Mellal, Morocco, *Parasitology International* 48 : 249-254
 10. Melloul, A., L. Hassani and L. Rafouk, 2001, Salmonella contamination of vegetables irrigated with untreated wastewater, *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 17 : 207-209
 11. US. EPA, 1998, *Water Recycling and Reuse: The Environmental Benefits*. Water Division Region IX. EPA 909-F-98-001
 12. WHO, 2000, *Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture recommendations for revising WHO guidelines: Special Theme-Environment and Health*