

## 농촌지역을 위한 무방류 재이용시스템 개발

### Development of a Zero Discharge and Reuse System for Rural Areas

홍민\* · 최경숙\*\*†  
Hong, Min\* · Choi, Kyung-Sook\*\*†

#### ABSTRACT

This study describes a zero discharge and reuse system developed for rural areas. The purpose of the system is decontamination of used irrigation water for down-stream usage and reuse of wastewater in rural villages for preventing water shortage problem expected to happen in near future. The system consists of anoxic, FES (Ferrous Electricity System), Oxidation, Clarifier processes. The main feature of the system is to remove phosphorous by using Fe-ionizing module. Indoor experiments were undertaken with a trial product of the system to test its performance. The removal capacities of T-P, T-N, and BOD were examined. Also the proper time for the replacement of iron plate module was tested as well as the efficiency of T-P removal rate based on the usage of an automatic washing system for the iron plate. As results, the system showed very good water purification performances through obtaining the results of over 90 % removal rates from T-P, BOD, and 67 % from T-N. The proper time period for replacement of iron plate was maximum 2 years, and also efficiency of T-P removal rate found to be greatly influenced by the usage of an automatic washing system from the test.

**Keywords:** Zero discharge system; reuse system; system development; rural areas; convenience water

#### 1. 서 론

최근 농촌지역의 도시화, 산업화에 따른 비점원오염원의 유입증가로 일부지역의 수질이 계속 악화되고 있는 실정이다. 실제 농어촌공사가 매해 실시하는 수질측정 대상 농업용저수지의 수질조사 결과, 농업용수 수질기준인 4등급에 미치지 못하는 오염정도를 나타내고 있는 곳이 2006년 16.4 %, 2007년 20.5 %, 2008년 21.3 %로 집계되었으며, 기준치 초과우려가 있는 3, 4 등급의 저수지도 2006년 49 %, 2007년 52 %, 2008년 57 %로 나타나 우리나라 농업용수의 오염이 해마다 증가하고 있음을 보여주고 있다 (KRC, 2009).

농업용수의 오염은 주로 농촌지역 비점오염과 생활폐수, 축산폐수에 기인하는 것으로 파악되고 있다. 농촌지역에서 생활 및 농업 활동에서 배출되는 각종 오염물질이 유역의 소하천과 저수지 내부로 유입됨으로써 유입된 오염물질에 의해 부영양화가 가속되어 농업용수로의 활용이 결국 불가해지는 결과를 초래하게 됨으로 이에 대한 적극적인 대책이 요구되어 지고 있다.

한편 농업용수 사용량의 82 %을 차지하는 논용수의 경우는 이 중 35 % 정도는 회귀용수로 사용되고 있는데 이는 상류지역에서 한번 사용된 용수가 하류에서 재이용되는 경우이다. 상류지역에서 농민이 비료나 농약이 묻은 신체를 세정하거나 농기구를 세척할 때 발생하는 오염원이 그대로 하천으로 방류되어 이를 하류에서 재이용하게 됨으로서 하류관개용수의 오염 원인이 되며, 이를 다시 세정 및 세척용수로 이용할 시 위해성 문제까지 대두되게 된다. 이를 반영하듯 2006년도에 실시된 농어촌연구원 조사결과 전국 271개 하수처리장 중 127개소의 하수처리수가 주변 농촌용수에 직·간접적으로 영향을 주고 있는 것으로 조사되었다. 전국 물관리 요원의 여론조사 결과도

\* 엔비넷(주)

\*\* 경북대학교 농업토목공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5731

Fax: +82-53-950-6752

E-mail address: ks.choi@knu.ac.kr

2009년 11월 11일 투고

2009년 11월 17일 심사완료

2009년 11월 23일 게재확정

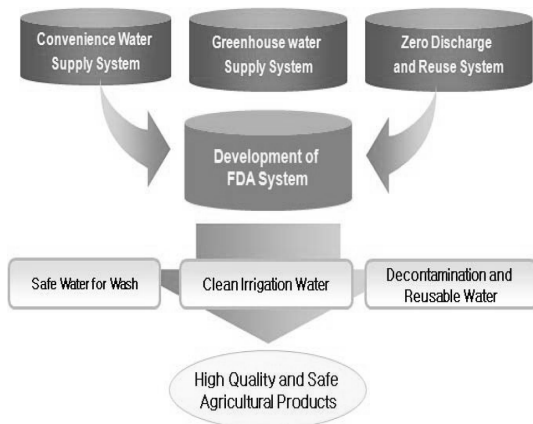


Fig. 1 The FDA system development scheme

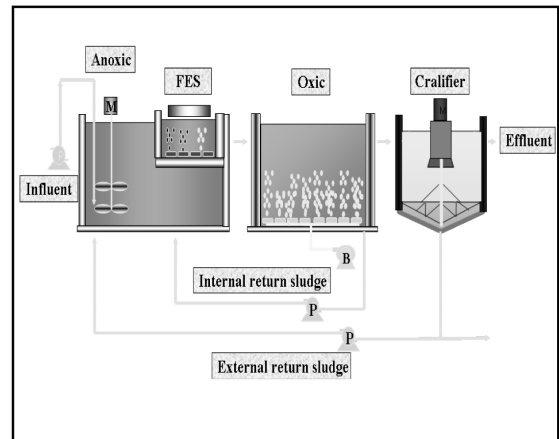


Fig. 2 The system process

농업인의 대다수가 농촌지역에서 농촌용수 수질개선과 환경개선이 시급하다는 인식을 하고 있다고 조사되었다 (Ministry of Science and Technology, 2006, 2007a).

이러한 가운데 용수수요량 증가로 인한 용수부족현상에 대비하여 용수의 재이용, 하수의 재이용에 대한 관심이 점차 증가되고 있다. 현재 재이용수는 중수도, 농업용수, 공업용수, 하천유지용수 등으로 다양하게 활용되고 있는 추세이며 (Ministry of Science and Technology, 2007a), 특히 최근에는 하수처리수의 농업용수 재이용에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다 (Ministry of Science and Technology, 2007a, b; SWRRC, 2008; Tanaka et al., 1998; Scott et al., 2000; Crook, 2001).

따라서 농업용수의 수질향상을 도모하고 농경지에서의 용수 사용에 의한 위해성 제고와 영농편의 환경 조성 등 친환경농업 생산기반 조성의 필요성을 고려할 때 용수재처리 공급 시스템은 반드시 필요하며, 사용된 농업용수 오염으로부터 무방류 처리하여 재이용하게 함으로 용수의 활용도를 높여 용수부족현상에 적극적으로 대처할 필요가 있다.

이에 본 연구는 Lee와 Choi (2009a, b)가 개발한 SS, BOD, 탁도, 대장균 오염인자 처리 기능을 가진 시설용수 및 영농편의용수 처리시스템인 FDA 시스템에 무방류 및 재이용이 가능한 시스템을 추가적으로 구축하기 위해 인을 제거하고 부가적으로 질소까지 처리가능한 장치를 부착하여 과다한 인과 질소를 함유하고 있는 농업용수를 정화하여 친환경 농업기반구축을 위한 농촌지역에 적합한 무방류 재이용시스템을 개발하고자 하였다. Fig. 1은 Lee와 Choi (2009a, b)에서 추진한 시설용수 및 영농편의 용수 처리시스템인 FDA 시스템과 본 연구에서 목표로 하는 무방류 재이용 시스템 개발을 포함하는 종합적인 FDA 시스템 개발 내용을 보여주고 있다. 본 논문은 이 중 무방류 재이용 시스템 개발에 대한 내용에 관하여 기술하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시스템 구성 및 설계기준

본 연구에서는 농촌지역의 수질개선과 하류의 수질오염 피해 부담을 경감시키기는 한편 오염된 농업용수와 하수의 재이용을 위하여 무방류 재이용 시스템을 개발하고자 FDA 시스템에 인과 질소를 제거하는 장치를 설치하여 그 효과를 검증하고자 하였다. 농촌유역 하천수의 중요한 오염인자인 인의 제거를 주목표로 철 이온 모듈장치를 이용한 인 제거 장치를 활용하였으며 생물학적 질소제거도 고려하였다. Fig. 2는 본 연구에서 채택한 무방류 재이용 시스템의 처리과정을 나타내는 모식도이다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 본시스템의 구성은 유량조, 무산소조, 철이온모듈장치조, 호기조, 침전조, 방류조로 구성되어 있으며, 무방류 재이용 시스템에 유입된 원수는 유량조정조를 거쳐 무산소조로 유입되며 철이온 모듈장치를 거쳐 호기조와 침전조를 지나 방류되는 과정을 거친다. 시스템 각 단계별 구성 및 설계기준은 다음과 같다.

- 유량조 (Influent): 수중펌프로 압송하여 무산소조로 이송
- 무산소조 (Anoxic): 유입된 오수를 탈질시킴. 미생물 (오니)의 농도는 하절기에는 2,500 ~ 3,000 mg/l, 동절기에는 3,500 ~ 4,500 mg/l 의 농도로 운전. 용량은 0.2 m<sup>3</sup> 임.
- 철이온 모듈조 (FES): 인제거 장치. 일반적으로 사용되는 철재질인 SS41을 전극으로 사용하는 철판모듈 설치. 입력전압은 1~ 5 V 범위 내에서 가변가능. 엇다운 (up/down) 자동세척 모듈장치 설치 (타이머세팅으로 세척횟수 조정가능). 송풍기와 산기관 설치. 용량은 0.35 m<sup>3</sup> 임.
- 호기조 (Oxic): 미생물을 질산화 (암모니아성 질소-질산성 질소-아질산질소)하는 공정. 미생물 농도는 하절기 2,500 ~ 3,000 mg/l 정도로 유지하며 내부순환은 100 ~ 200 %

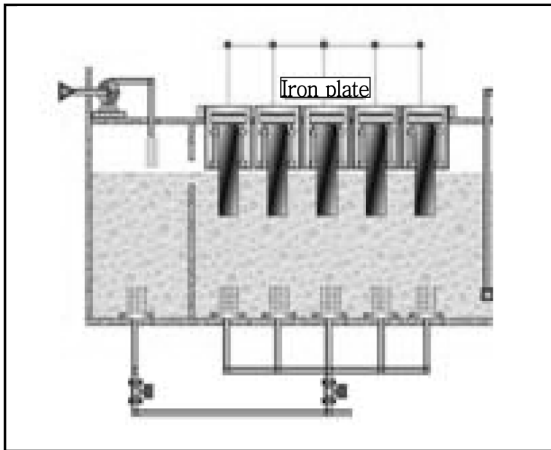


Fig. 3 Phosphorus removal system

정도로 유지. DO 농도는 2~3 mg/l 로 운전. 송풍기와 산기판 설치. 용량은 0.94 m<sup>3</sup> 임.

- 중침조 (Cralifier): 호기조로부터 이송되어 온 유출수를 침전 분리시킴. 부대시설로 활성슬러지 이송장치, 침전오니 이송장치 (SRT: 폐기슬러지) 설치. 용량은 0.5 m<sup>3</sup> 임.

## 2. 철이온 모듈장치의 원리 및 구성

본 시스템의 인제거 처리시스템인 철이온 모듈장치조는 무산소조에서 월류 (over flow)되어 유입된 처리수의 철 이온을 석출하여 호기조로 이송되는 구조로 구성되어 있다. Fig. 3은 철이온 모듈장치조를 나타내고 있으며, 여기서 철이온 모듈은 오수처리장의 방류수 처리공정과 철 이온화에 필요한 전극의 세척공정을 동시에 수행할 수 있도록 개발하였다.

철이온화 모듈을 포함하는 본 시스템은 음극의 역할을 하는 철판과 양극의 역할을 하는 티타늄 판으로 구성되어 인을 제거하는 방식으로, 화학적 반응과 물리적 반응에 의해 인의 제거가 이루어진다. 화학적 반응은 철이온과 용해성 인이 결합되어 인이 제거되는 과정으로 전기 분해에 의해 석출된 철 이온과 유입수 중의 용해성 인산염이 반응하여 불용성 침전물로 제거되는 원리이며, 물리적 반응은 석출된 철이온이 산소와 결합하여 형성된 입자상 철표면에 인이 흡착되어 제거되는 과정이다.

Table 1은 철이온 모듈장치 내에 설치된 철판의 물성을 나타낸다. 본 시스템의 특징은 철 이온모듈장치를 사용함으로써 발생하는 바이오막을 제거하기 위한 엷다운 자동세척장치를 개발하여 하루 4회 정도로 세척하도록 설계하여 극판의 철 석출을 원활하게 진행할 수 있도록 하였다.

본 시스템의 인 제거 목표수질은 Table 2에 나타난 바와 같으며, 인의 최종목표수질은 0.2 mg/l 이하이다.

Table 1 Iron plate contents

Division	Item	Unit	Content	
Iron plate	Material		SS41	
	Specific gravity		7.85	
	Size	Length	mm	500
		Width		300
		Thickness		4
	Weight	g	4,056	
Electric conductivity	ms/cm	1.03×10 <sup>5</sup>		

Table 2 Target water quality

Factor	Item	T-P	
		Removal (%)	Concentration (mg/l)
Influent		-	3~2
Iron module		83	0.3
Oxic		83	0.3
Cralifier		93	0.2



Photo 1 The trial product of system

## III. 결과 및 고찰

시스템 요소별 설계 기준에 따라 제작된 시작품은 Photo 1에서 보는 바와 같다. 시스템의 원수처리용량은 5 m<sup>3</sup>/day 정도로 설계되었으며, 본체는 스테인레스 (STS304) 재질로 길이 4 m, 폭 0.8 m, 높이 1.7 m의 규모로 제작되었다.

시스템 시작품 제작에 따른 시스템의 실내성능평가는 시스템의 인 및 기타 수질항목 처리 능력과 철판모듈의 교체주기 분석, 그리고 철판모듈 세척시스템 장착에 따른 인 제거효율에 대하여 실시되었으며, 각 항목별 평가결과는 다음과 같다.

### 1. 수질정화 성능평가

시스템의 인처리 성능평가를 위해 유입수와 처리수에 대한

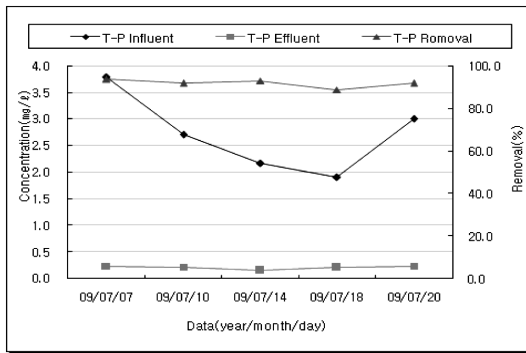


Fig. 4 T-P results

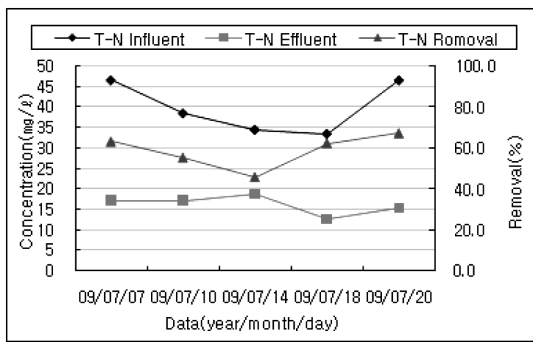


Fig. 5 T-N results

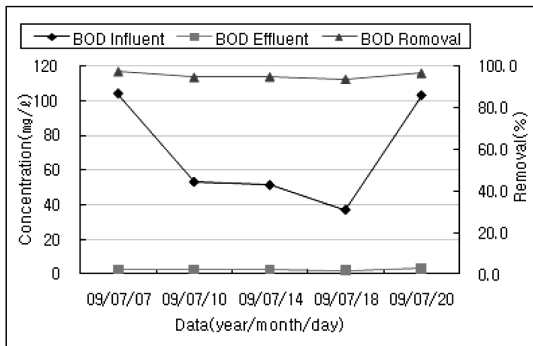


Fig. 6 BOD results

수질점검을 실시하였다. 5회에 걸쳐 실시된 철이온모듈에 의한 T-P의 제거율에 대한 평가 결과는 Fig. 4와 같다. 그래프에서 나타난 바와 같이 유입수의 인 농도가 최고 3.79 mg/l 에서 최저 1.90 mg/l 을 나타내었으나 시스템 처리후의 농도는 최고 0.24 mg/l 에서 최저 0.16 mg/l 으로 감소되었으며 시스템의 평균 인 제거효율은 91.9 %를 기록하였다. 전반적으로 인제거 목표수질을 만족하는 결과를 보여주었다.

본 연구에서는 인 처리성능 평가 외에도 본 시스템의 무산소조와 호기조에서 처리되는 질소와 BOD에 대한 수질정화능력에 대하여도 평가해 보았다. 유입수와 처리수에 대한 T-N 제

거율을 측정된 결과는 Fig. 5와 같으며, 유입수의 T-N 농도가 최고 46.6 mg/l 에서 최저 33.40 mg/l 의 범위였으나 시스템에 의한 정화처리 후의 T-N농도는 최고 15.20 mg/l 에서 최저 10.30 mg/l 을 나타내었다. T-N의 평균제거효율은 67 % 정도인 것으로 나타났다. BOD의 경우는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 유입수의 농도가 최고 104 mg/l 에서 최저 37 mg/l 의 범위를 나타내었으나 시스템 처리 후의 BOD 농도는 최고 3.3 mg/l 에서 최저 2.3 mg/l 로 감소되는 결과를 보였으며, 평균 BOD 제거효율은 95 % 이상으로 매우 양호한 것으로 나타났다. 따라서 본 시스템은 인에 대한 처리성능이 목표 수질을 만족하는 것으로 나타났으며, 질소보다는 BOD에 대한 처리능력이 더 뛰어난 것으로 나타났다.

## 2. 철판모듈 교체주기 분석

철이온모듈장치에 장착된 철판모듈의 교체주기는 인제거 효율에 영향을 끼치는 인자이므로 적정교체주기를 파악하는 것은 중요하다. 동일한 조건하에 철이온 모듈장치에 장착된 철판모듈 교체주기를 분석하기 위해 5가지 샘플을 만들어 일정한 시간 동안 철판의 소모량을 측정된 결과 Table 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 철판모듈 샘플 5개를 이용하여 철판의 크기와 두께, 철판 간격, 전류, 전력을 일정하게 유지한 상태로 철판모듈 교체 주기를 조사한 결과 유입수의 성분에 관계없이 평균 2.3년 정도의 교체주기가 소요됨을 알 수 있었다. 따라서, 철판모듈의 교체주기는 유입수의 전도도에 따라 약간의 차이는 있을 수 있으나 대체적으로 2년 전후로는 철판을 반드시 교체해 주어야 하는 것으로 조사되었다.

Table 3 Replacement cycle of plate module

No.	Item	Replacement cycle (year)
1	Iron plate 1	2.1
2	Iron plate 2	2.8
3	Iron plate 3	2.5
4	Iron plate 4	1.9
5	Iron plate 5	2.2
Average		2.3

## 3. 철판모듈 세척시스템 효과 분석

철이온 모듈장치에 장착된 자동세척장치의 효과에 대한 실험도 병행하였다. 세척장치를 장착한 경우와 장착하지 않은 경우에 대하여 시간에 따라 철판에 형성되는 바이오막의 두께와 인 제거 효율이 어떻게 변화되는지에 대해 조사하였다.

**Table 4 Efficiency of automatic washing system(AWS)**

Test item	Condition	Day after system operation				
		0	15	30	45	60
Bio-film thickness ( $\mu\text{m}$ )	Without AWS	0	1.5	2.3	3.6	4.1
	With AWS	0	0.5	0.8	0.8	0.8
T-P removal (%)	Without AWS	99	83	32	28	20
	With AWS	99	95	90	90	90

Table 4는 철이온 모듈장치에 자동세척장치를 장착한 경우와 장착하지 않은 경우의 바이오막의 형성 시간 및 인의 제거 효율을 나타낸다. 세척장치를 장착하지 않고 운전한 경우에는 철이온 모듈시스템에 바이오막의 형성이 빠르게 진행되어 T-P 처리효율이 1개월 후에는 32%, 2개월 후에는 20%로 급격히 감소하는 것으로 나타났으나, 세척장치를 장착한 철이온 모듈시스템의 경우에는 바이오막 생성이 느리게 진행되어 2개월 이후에도 T-P 처리효율이 90% 정도로 일정하게 유지되는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 철판모듈의 바이오막 형성이 인제거 효율뿐만 아니라 철판모듈의 소모와도 관계되며, 철판모듈의 세척은 적정 전압 및 전류의 흐름을 일정하게 유지하여 궁극적으로 인제거 효율을 유지하는데 매우 중요한 역할을 하는 것을 의미한다.

마지막으로 본 시스템의 특징을 조사한 결과 인처리를 위한 약품사용이나 고가의 멤브레인 이용이 불필요하여 초기투자비 및 사후 관리비가 적게 드나 제작이 용이하고 유지보수가 용이한 장점이 파악되었다. 또한 업다운방식의 자동세척장치 이용으로 철판의 소모율을 줄일 수 있으며, 적정 전압 전류를 일정하게 유지할 수 있게 되어 인 제거효율이 일정하게 유지되는 점과, 유기물 부하와 온도에 관계없이 인의 제거가 가능한 점도 본 시스템의 장점에 속한다. 또한 낮은 전압(1.5V)과 전류로 유지관리비가 저렴하고 인체에 영향을 미치지 않는 전압과 전류를 사용하여 인을 제거하는 점, 그리고 모든 장치에 절연 처리가 되어 있어 사용상 안전성이 매우 높은 점 등이 본 시스템의 사용상 유리한 점들로 파악되었다.

따라서 본 시스템은 인 제거에 탁월한 효과가 있을 뿐만 아니라, 사용 및 경제적 측면에서 여러 유리한 장점을 가지고 있어, 농촌지역의 수질오염물질의 방류를 저하하고 용수를 재이용하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

#### IV. 결 론

본 연구는 Lee and Choi (2009a, b)에서 개발한 시설용수 및 영농편의용수 공급시스템인 FDA 시스템의 활용범위를 보다 확대하기 위하여 SS, BOD, 탁도, 대장균 외에도 농촌지역의 주

요 수질오염원인 인을 효과적으로 저감시켜 친환경농업기반 지원을 위한 농촌지역의 수질오염물질의 방류를 저하하고 용수를 재이용할 목적으로 농업용수 무방류 재이용시스템을 개발하였다.

본 시스템은 유량조, 무산소조, 철이온 모듈장치, 호기조, 침전조, 방류조로 구성되어 있으며, 특히 인의 제거를 위해 철이온 모듈장치를 활용하였다. 시스템의 각 요소별 구성과 설계기준을 정하여 시작품을 제작한 후 시스템의 실내 성능평가를 실시하였다. 시스템의 인처리 능력과 철판모듈의 교체주기 분석 및 철판모듈 세척시스템 장착에 따른 인 제거율에 대한 분석을 실시하였다. 그 결과 인처리효율은 90% 이상으로 매우 양호한 결과를 나타내었으며, 철판모듈의 교체주기는 2년 정도가 적절한 것으로 조사되었다. 또한 철판모듈 세척시스템에 의한 바이오막 형성 시기 및 인제거 효율을 점검한 결과 세척장치를 장착하지 않은 경우보다 세척장치를 장착한 경우 바이오막의 형성이 매우 느리게 진행되었으며 이로 인해 인처리 효율도 매우 양호한 상태를 유지하는 것으로 조사되었다.

따라서 본 시스템은 농촌지역의 위해성이 검증되지 않은 영농편의용수로부터의 안정성을 확보하고 농경지와 축산농가, 퇴비사용으로 인한 부영양화와 같은 수질오염에 대한 대책마련과 마을하수의 무방류를 통한 재이용에 활용 가능하며 건전한 친환경 농업기반 조성에 충분한 일익을 담당할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 농림기술관리센터의 연구비 지원 (과제번호: 107035-03-3-SB010)에 의하여 수행되었음.

#### REFERENCES

1. Crook, J., 2001. Water reclamation and reuse criteria.
2. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2009. The inspection materials for KRC conducted by the National Assembly. <http://www.assm.co.kr/>
3. Lee, K. Y., and K. S. Choi, 2009a. Development of clean water supplying system for greenhouse cultivation and convenience water (I) - Development of the FDA system -, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(5): 95-100 (in Korean).
4. Lee, K. Y., and K. S. Choi, 2009b. Development of clean water supplying system for greenhouse cultivation and convenience water (II) - Assessment of the FDA system through site applications -, *Journal of*

- the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(5): 101-106 (in Korean).
5. Ministry of Science and Technology, 2006. Development of wastewater reuse system for agriculture, 21st Century Frontier R&D Program - Sustainable Water Resources Research Program - (in Korean).
  6. Ministry of Science and Technology, 2007a. Application of wastewater reuse system for agriculture, 21st Century Frontier R&D Program - Sustainable Water Resources Research Program - (in Korean).
  7. Ministry of Science and Technology, 2007b. Development of LCHE-WRT system for secondary effluent reclamation, 21st Century Frontier R&D Program - Sustainable Water Resources Research Program - (in Korean).
  8. Scott, C.A., Zarazua, J. A., Levine, G., 2000. Urban-wastewater Reuse for Crop Production in the Water-short Guanajuato River Basin, Mexico. Research Report 41. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka. 35.
  9. Sustainable Water Resources Research Center (SWRRC), 2008. Standard water treatment process for waste water reuse (in Korean).
  10. Tanaka, H., Asano, T., Schroeder, E.D. and Tchobanoglous, G., 1998. Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data, *Water Environment Research* 70(1): 39-51.