

안전한 농업용수로 이용하기 위한 하수재이용 시스템기술 개발과 적용



박 승 우 ▶▶▶

서울대학교 지역시스템공학부 교수
swpark@snu.ac.kr



장 태 일 ▶▶▶

서울대학교 농업생명과학연구원 연구원
uriduri7@snu.ac.kr

1. 서론

하수재이용이란 하수처리수를 유용하게 활용하는 것을 말한다. 하수재이용은 하수를 이용목적에 맞게 재처리하여 쓰는 것으로 하수처리장 방류수를 직접재 이용하는 경우가 아니다. 하수재이용의 사례는 주로 농업용수, 공업용수, 하천유지용수, 기타 청소용수를 포함한 잡용수 등으로 비식음용수가 대부분이다. 그러나 미국 캘리포니아 등에서는 엄격한 수처리 공정을 걸쳐 식음용수로 재이용하는 경우도 있는데 주로 지하수 충전 후 취수해서 쓰는 간접 방식이 적용된다 (Crook, 2005).

하수재이용의 역사는 로마시대로부터 비롯되지만 체계적인 재이용이 이루어진 것은 19세기 이후이다. 1865년 영국에서 도시하수를 농경지나 초지로 끌어들이 토지를 이용한 하수처리 방식을 도입하였다. 이때는 소위 '빗물은 강으로 하수는 땅으로(sewage to the land, rain to the rivers)' 라는 격언이 회자되었

다. 이후 유럽과 미국 등에서 미처리하수를 농경지에 보내 재이용하는 방식이 일반화 된다(WHO, 1989).

그런데 도시의 규모가 커지고, 상수도 공급이 늘어 하수의 양이 크게 증가하여 토지 처리 (land treatment)만으로는 하수처리가 어렵게 되어 본격적인 하수처리 기술이 적용되기 시작한다. 미처리하수로 인하여 콜레라 등 수인성전염병이 창궐을 겪은 이후 1960년대 부터는 하수재이용을 위한 수처리 공정과 수질기준 등을 정비하게 되어 오늘에 이르게 된다(Asano and Levine, 1996). 현재는 수자원이 풍부한 일부 지역을 제외한 여러 나라에서 하수재이용이 보편화되고 있다.

하수재이용은 직접법과 간접법으로 나눌 수 있다. 직접 하수재이용이란 하수 또는 처리수를 일정한 경로를 통해 이용하는 것을 말한다 간접법은 하수처리장 방류수를 하천, 호소 또는 지하수로 보내서 다시 취수하여 쓰는 방식이다.

수자원 프론티어 사업단 4~5 과제는 하수처리수의 농업용수 재이용시스템 개발 및 적용을 연구하고 있다. 이 자료에서는 본 연구내용과 성과 등을 중심으로 하수재이용을 논의하고자 한다.

2. 하수재이용의 국내외 현황

가정이나 직장에서 쓴 물은 생활하수로 되어 하수처리장에서 처리된 후 하천으로 방류된다. 우리나라의 재이용율은 2000년 2.9%에서 2006년말 현재 우리나라의 연간 하수처리량(64억 m^3)의 7.7% 인 4.9억 m^3 만이 재이용되고 있다(환경부, 2007). 미국, 유럽, 아프리카, 이스라엘, 호주, 중국 등 세계 여러 나라들에

서는 하수처리수를 재이용하고 있다. 재이용은 물 수요의 증가, 가뭄 및 물 부족, 환경 보호 및 증진, 사회-경제적 요인, 공중 보건 보호 등의 이유로 선진국 뿐만 아니라 도시화가 한창 진행 중인 개발도상국에서도 확대될 것이다(EPA, 2004). 싱가포르는 물 수입 의존도가 높아 국가 생존차원에서 재이용사업(NEWATER Project)을 추진하여 농업용수 및 간접 음용수로 이용하고 있다(PUB, 2008).

우리나라는 2005년부터 하수재이용을 정책적으로 추진해오고 있으나, 미국 플로리다 52%(01년), 캘리포니아 10%(02년), 이스라엘 10%, 쿠웨이트 15% 등에 비하여 아직 미흡한 상황이다(환경부, 2007). 이와 같은 재이용율이 낮은 원인은 그간 하수처리수의 재처리의 필요성이 인식되지 못하였고, 하수재이용에 대한 심미적인 저항감 등도 작용하는 것으로 나타나고 있다.

미국 캘리포니아의 경우, 분리막(RO, MBR) 및 자외선 살균 방식 등의 기술 중심에서 환경 문제를 포함한 재이용에 대한 공공의 인식과 참여 등 현장적용 중심의 연구로 전환되고 있다(CDWR, 2003). 캘리포니아 재이용위원회(California Recycled Task Force)에 의하면 과거 사업 추진이 지역 주민들과의 충분한 참여 없이 진행되어 안전한 기술이 확보되었음에도 불구하고 지역주민들의 공중 보건에 대한 우려로 몇몇 재이용 사업이 지연된 바 있다. 현재 우리나라의 경우도 지자체 중심으로 환경부 재이용사업에 참여하고 있으나 이러한 부담으로 농업용수 중심이 아닌 하천유지용수 중심으로 사업신청이 이루어지고 있는 실정이다.

3. 하수처리수의 농업용수 재이용 시스템 연구

하수처리수의 재이용을 위해서는 하수처리수의 재처리기술, 재처리수의 이용기술, 하수재이용에 따른 공중보건위생 문제를 극복하기 위한 환경관리기술 등이 사전에 확보되어야 하며, 이를 현장에 적용할 수 있는 기술이 필요하다. 본 연구는 “하수처리수의 농업용

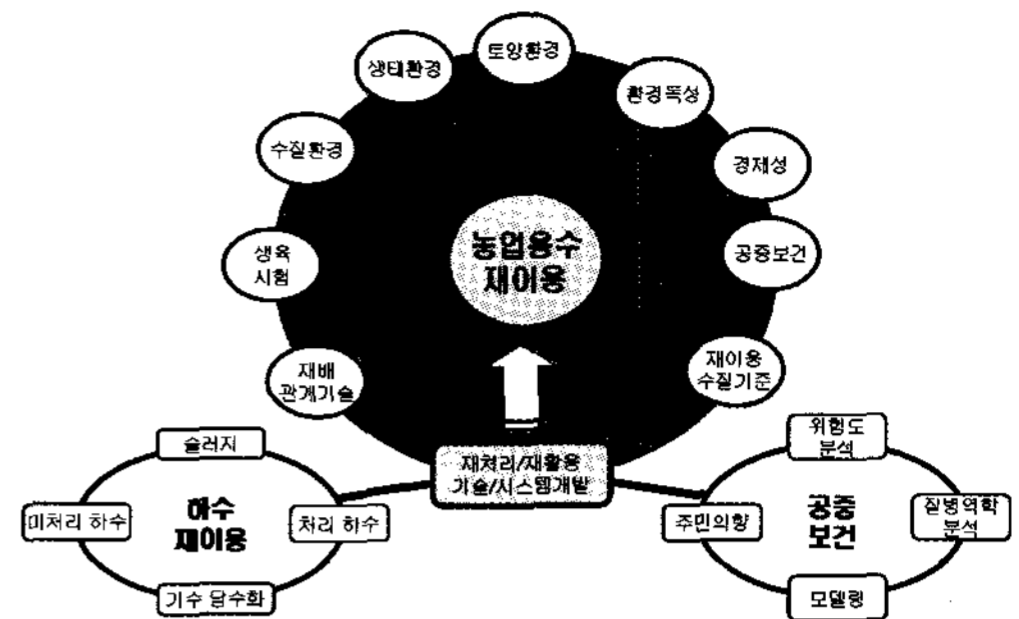


그림 1. 농업용수 하수재이용 연구체계

수재이용 통합시스템 적용” 연구로 2001년부터 수행하고 있으며, 현재 3단계 연구가 진행 중에 있다. 이를 통해 하수처리수 재이용시스템 개발 및 농업용수 재이용을 위한 수질기준 제시 등의 실적을 얻고 있다.

이 연구과제의 목표는 하수처리수를 안전하고 지속 가능하게 농업용수로 재이용하기 위한 기술의 개발 및 적용에 있다. 2단계 연구에서는 하수재처리 요소기술과 재배기술 개발, 재이용에 따른 작물 생육과 수확량 분석, 수질 및 토양 등 환경영향 분석, 보건위생 위험도 평가 등이 이루어졌다. 그림 1은 농업용수재이용과 관련한 요소기술을 도식적으로 나타낸 것이며, 2단계 연구과제의 주요 조사항목 등을 보여주고 있다. 또한 본 연구 성과를 바탕으로 2006년부터 경기도 화성시 병점지구에 재이용시스템을 도입하여 45 ha의 관개 지구에 농업용수를 공급하고 있다.

4. 직접 및 간접재이용시스템 개발

하수처리수 농업용수 재이용은 하수처리수를 재처리하여 이용하는 것으로, 그 방식에 따라 직접하수재이용과 간접하수재이용으로 구분 된다(그림 2). 직접하수재이용은 하수처리장의 기존 수처리공정에 추가하여 재이용 목적에 따라 재처리 공정을 설치하여 하수처리수를 직접 재이용하는 방식이며, 간접하수재이용은 하수처리장의 방류수를 그 하류구간에서 취수 이용함으로써 하수처리수를 간접적으로 재이용하는 것

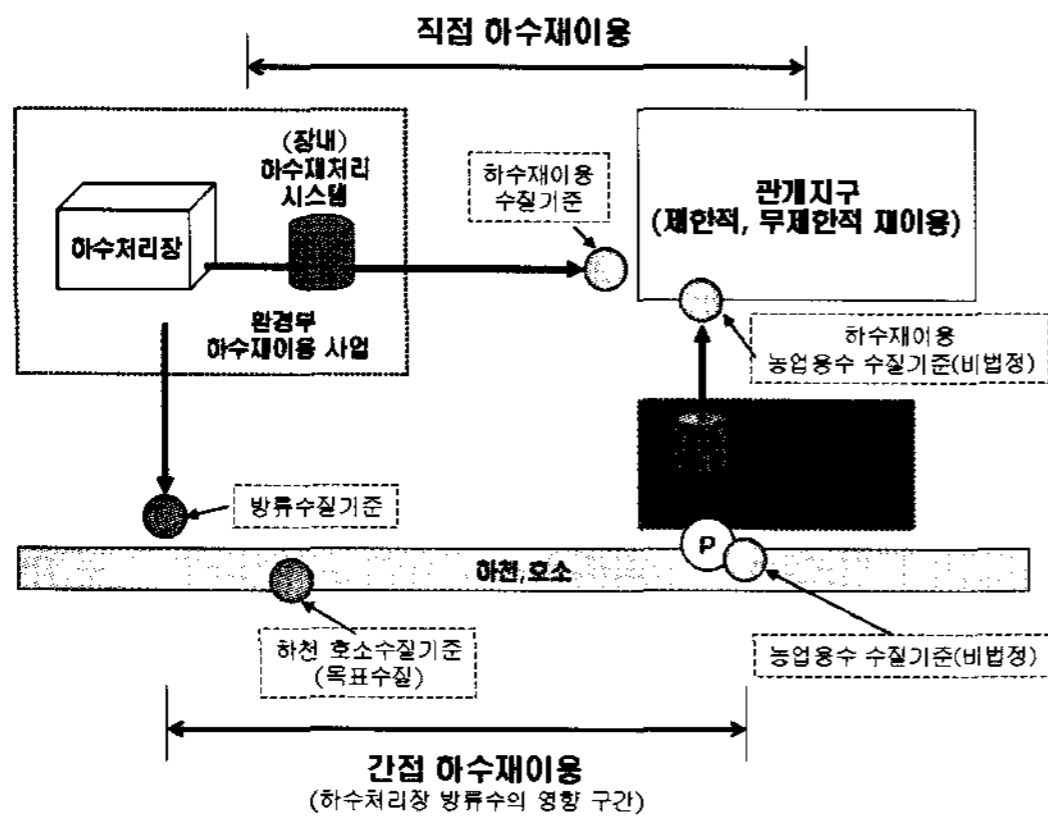


그림 2. 하수처리수의 농업용수 재이용과 수질기준

을 말한다.

직접하수재이용의 경우, 환경부의 재이용촉진시범 사업에서 추진되고 있으며, 재이용량 1만m³이상으로 고도처리 공정을 갖는 하수처리장을 대상으로 농업용수, 공업용수, 하천유지용수, 기타 등 4개 분야 사업으로 구성되어 있다. 전남 강진지구에서 연간 5,000m³을 농업용수로 재이용하는 등 2007년 말 현재 5개 지구가 추가되어 지금까지 총 18개 지구가 용수재이용사업지구로 선정되었다.

간접하수재이용의 경우, 취수지점의 수질조건 및 수량기준에 따라 적절한 재처리 공정이 필요하며, 농업용수의 이용에 따른 공중보건상의 안전성 확보, 관개용수의 수요 공급을 원활하도록 하는 기능을 가져야 한다. 다만, 농업용수의 경우 타목적의 하수재이용보다 이용 수량이 매우 많으므로, 저비용·고효율 재이용시스템이 필수적이다. 2007년 현재 전국 47개 지구

에 재이용량 연간 약 1.2억m³이 적절한 재처리 공정 없이 농업용수 등으로 활용되고 있어 건전하고 지속적인 농업을 위하여 간접재이용시스템의 적극적인 도입과 활용이 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 간접 하수재이용사업지구의 선정을 위한 기준으로 표 1과 2에서 수량 및 수질기준을 마련하였다. 수량기준은 농업용수 취수지점에서의 유량 중 하수처리장 방류수 비율을 고려하여 총 4개 등급으로 구분하였으며, 수질기준은 농업용수 재이용 수질기준의 적합성 정도에 따라 구분하였다. 이와 같은 간접재이용 기준은 앞으로의 농업용수 간접재이용 사업지구의 선정에 적용될 수 있을 것이다.

5. 농업용수 재이용시스템의 실용화

하수재이용의 실용화 사업을 위하여 경기도 화성시 병점지구에 농업용수 재이용시범사업을 통해 적용성을 확인한 바 있다. 하수재이용은 높은 적용성과 함께 환경피해를 최소화하는 방안의 모색과 안전성의 확보를 위한 방안 등이 연구되고 있다. 또한, 이 연구에서는 농업용수 재이용시스템을 하수처리장 방류수질에 맞추어 탄력적으로 제시하고 있으며, 대부분의 생활하수 고도처리 방류수의 경우 병원성 대장균의 관리가 주요 과제이므로, 이에 적합한 재이용시스템을 권고하고 있다.

제주특별자치도에서는 본 연구팀에 환경부 재이용사업선정을 위한 기술지원을 요청하여 농어촌연구원 '재이용기술지원센터'를 통해 기술지원을 한 바 있다.

표 1. 하수재이용의 구분 조건 (수량 기준)

구분	유량 조건	조건식	
직접 하수재이용	하수처리장 방류수(Q)를 자연유량 (Qa)의 전량을 직접 농업용수 (Qa)로 이용하는 경우	$Q = Q_a$	
간접 하수재이용	Level I	하수처리장 방류수(Q)가 자연유량 (Qa)의 80% 이상인 경우	$Q \geq 0.80 Q_a$
	Level II	하수처리장 방류수(Q)가 자연유량 (Qa)의 50% 이상의 경우	$Q \geq 0.50 Q_a$
	Level III	하수처리장 방류수 (Q)가 자연유량 (Qa)의 30% 이상의 경우	$Q \geq 0.30 Q_a$
	Level IV	하수처리장 방류수(Q)가 자연유량 (Qa)의 30% 미만의 경우	$Q < 0.30 Q_a$

표 2. 간접하수재이용의 수질기준 (논의 경우)

수질 항목	단위	농업용수 수질기준		하수재이용 수질기준		비고
		농업용수 수질기준 (비법정) ¹	일본 관개용수 수질기준 ²	하수재이용 수질기준 ³	WHO 하수재이용 권고기준 ⁴	
BOD	mg/L	8 이하	6.0~7.5	8 이하		
EC	μS/cm	-	300	-		논, 밭작물에 따라 다름
SS	mg/L	-	100	-		
TN	mg/L	(1.0)	1.0 이하	-		호소 수질기준
TP	mg/L	(0.100)	-	-		
대장균수	수/100mL	-	-	200 이하	2.2~N.D	
기타(제한인자)		-	Cu, Zn, As	<기준 참조>		

※ 주): 1. 농림부, 농지개발사업계획설계기준, 관개편에서는 <농업용수 수질기준은 환경보전법에 규정한 환경기준(수질)을 적용한다>로 하고 있음.
 2. 일본의 논벼 관개용수 수질기준은 시안(draft)임.
 3. 환경부 (2005) 하수재이용수질기준 권고안 (농업용수)
 4. WHO 하수재이용 권고기준 (제한관개, 무제한 관개)

이후 본 연구팀의 협동 기관인 한국농촌공사가 제주특별자치도와 「제주 판포하수처리장 농업용수재이용 사업(2008.2) (이하 '제주재이용사업')」을 위탁시행하기로 협약함에 따라 하수처리수를 안전하게 농업용수로 활용할 수 있는지 여부 및 이를 위해 검토되어야 할 과제와 해결방안을 제시하였고 주민설명회 등 기술지원을 지속적으로 실시하고 있다.

제주도의 하수재이용 실용화 사업을 위하여, 제주도의 수자원여건과 작부체계, 그리고 지하수 용수현황 등을 조사하였다. 제주도의 2020년 수자원 수요량은 현재 수준보다 약 15% 증가할 것으로 예상하고 있으나, 2003년말 현재 제주도의 지하수 이용가능량의 85% 정도를 개발 및 이용하고 있어 지하수개발로 추가적인 용수수요를 만족하기에는 어려운 것으로 나타났다(건설교통부, 2006). 제주도의 재배작물 중 감귤, 가을감자, 마늘, 양파, 양배추 등은 파종기나 발육단계 또는 비가 내리지 않는 기간 중에는 부분적으로 관개를 실시하고 있으며, 제주도의 4개 우량관측소의 1974~2004년 일강수량으로부터 순별 과우일수를 분석한 결과 작물별 작부체계상 관개가 필요한 기간 중 무강우일에는 보충 관개 없이는 안정적인 작물재배에 한계가 있는 것으로 나타났다. 제주도농업용수종합계

획수립(2004)에 따르면 안정적인 농업생산성의 확보를 위해서는 향후 386천m³/일의 추가 용수원개발이 필요하며, 이중 122천m³/일의 농업용수는 하수처리장 방류수 등 대체수자원개발을 통해 공급하는 것으로 계획하고 있다. 그러나 제주도 여건상 하수처리수의 염분 농도가 높아 농업용수로 이용하기 어렵다.

'제주재이용사업'은 제주시 한경면 일원에 위치하고 총 사업기간은 2008년부터 2009년까지이며, 일 5,000m³의 하수처리수를 농업용수로 재이용하도록 하는 사업이다. 대상지구와 같이 하수처리수를 가뭄시 일정기간에만 비상급수원으로 활용하는 채소농업의 경우는 안전성 확보뿐만 아니라 시설비와 운영비를 저감하는 방안이 필요할 것이다. 이 재이용 사업에는 하수처리수 재이용시스템 및 염분제거시설, 송수관로 및 저류조 등이 포함되어 있다(그림 3). 대상지구의 주 작물인 채소류 등은 엄격한 재이용수질기준(서울대, 2005)을 충족시켜야하며, 보다 효율적이고 완벽한 소독시스템을 중심으로 하는 재이용시스템이 적용되어야만 할 것이다. 그리고 염분농도나 전기전도도가 문제가 되는 경우는 방류수질에 맞추어 적절한 수준의 희석용수를 활용하는 '희석형 재이용시스템' 혹은 고도처리수의 방류수를 여과, 탈염, 소독 등

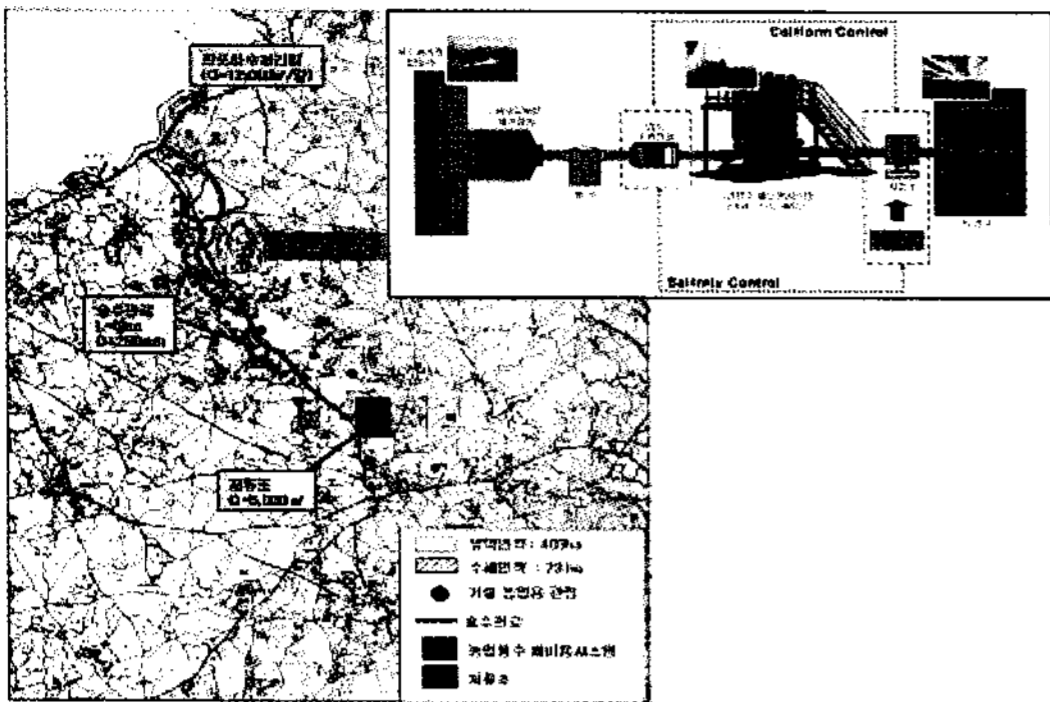


그림 3. 제주도 농업용수 재이용 시스템 모식도 및 사업계획도

을 통해 발용수로 활용이 가능하도록 하는 '발용수 제염재이용시스템' 등이 대안이 될 수 있을 것이다. 다만, 어떤 형식의 재이용시스템이 수질기준을 충족시키고, 보건위생위험성이 없고, 수확물의 소비자 인증이 가능한지를 면밀히 검토하고, 각각의 경제성과 장단점을 비교 검토하여 최적의 시스템을 구성하는 것이 바람직할 것이다.

6. 맺음말

하수재이용은 이미 사용한 물을 다시 쓰는 것이다. 새로운 수자원을 만들어 이용해야 하는 경우도 필요하지만, 한번 쓴 물을 이용 목적에 맞도록 처리하여 이용하는 것 또한 향후 물 부족을 대비하여 중요한 문제가 될 것이다.

생활하수를 제대로 처리하여 농업용수로 재이용하는 일이 활성화 된다면, 생활하수 중에 포함된 비료성분을 농작물재배에 이용할 수 있을 뿐만 아니라, 하천이나 호소의 수질개선에 도움이 되고, 친환경적인 지속 가능한 개발에도 기여하는 등 여러 가지 효과를 얻을 수 있을 것이다.

제주도는 현재 월정하수처리장을 포함하여 4개 지구에 농업용수재이용 사업을 계획·추진하고 있으나, 재이용에 대한 심미적 저항감, 안전성 문제, 소비자의 친환경농산물 선호도 등 여러 가지 현실적 제약이 있

다. '제주재이용사업'은 심미적 저항감 극복, 안전성 및 공공성의 이해와 홍보, 그리고 주민참여 등 일련의 과정을 통하여 재이용 사업 활성화에 이바지할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 4-5-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 건설교통부 (2006). 수자원장기종합계획: Water Vision 2020, 건설교통부.
- 서울대 (2005). 재이용수질지침에 관한 국제심포지움 자료집.
- 제주도 (2004). 제주도 농업용수 종합계획 수립.
- 환경부 (2007). 하수처리수 재이용 가이드 북. 환경부 환경관리공단.
- Asano, T. and Levine, A. D. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present and future, *Wat. Sci. Tech.* 33(10-11), pp. 1-14.
- EPA (2004). Guidelines for Water Reuse. U.S. EPA. Washigton, D.C.
- CDWR (2003). Water Recycling 2030: Recommendations of California's recycled water task force. Recycled water task force, California Department of Water Resources. California.
- Crook, J. (2005). Wastewater criteria an the United States, In proceedings of the International Symposium Water Quality Standards and Guidelines for Wastewater

Reuse, Seoul, Korea.

PUB (2008). NEWater: Sustainable Water Supply. Public Utilities Board (PUB) and the Ministry of the Environment and Water Resources (MEWR), <http://www.pub.gov.sg/>

NEWater_files/overview/index.html (2008.6.3 검색).

WHO (1989). Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture. 📖