



시스템 다이내믹스를 이용한 농업용수 재이용시스템 경제성 분석

Economic Analysis of Wastewater Reuse Systems for Agricultural Irrigation using a System Dynamics Approach

정한석* · 서 교**† · 장태일*** · 성충현**** · 김학관***** · 박승우**

Jeong, Han Seok · Suh, Kyo · Jang, Tae Il · Seong, Choung Hyun · Kim, Hak Kwan · Park, Seung Woo

ABSTRACT

Many studies have reported additional treatment is needed to use wastewater for agricultural purpose. Economic considerations should be taken into account to establish infrastructure for agricultural reuse because of a large amount of water use in irrigation and relatively low water quality requirement. The objective of this study was to conduct economic analysis of wastewater reclamation and reuse systems for agriculture. A system dynamics approach considering complexity and dynamics in the wastewater reuse systems was used for the economic analysis, which are related with social, environmental, and economic problems. Sensitivity and benefit cost analysis for wastewater reuse systems was conducted through the established economic assessment model. The result of sensitivity analysis showed that water resources development and installation cost were the most sensitive for total benefits and costs, respectively. The scenario-based test of the organized economic assessment model shows marginal cost ranges and enables decision-makers to decide reasonable cost for the wastewater reuse systems for agriculture.

Keywords: system dynamics approach; wastewater reuse; economic evaluation model; Vensim; benefit cost analysis

1. 서 론

신규 농업용수 개발은 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아니라, 댐 개발과 관련한 환경문제 등으로 인해 어려운 것이 현실이다. 하지만, 시설재배지 증가에 따른 용수의 계절적 수요 변화와 기후변화로 인한 극한 가뭄 (Kim et al., 2011)을 대비하기 위해서는 대체수자원 개발이 시급하다. 지난 2012년 봄 가뭄 당시, 충청남도는 천안하수처리장을 포함하여 11개 하수처리장에서 하루 2만 9천 m³의 하수처리수를 572 ha의 농경지에 공급한 바 있다. 하수처리장 방류수는 연중 일정한 수량을 보이며, 다량의

영양물질을 함유하고 있기 때문에 (Park, 2007) 가뭄 시 비상용수를 포함하여 주요한 농업용수 대체수자원으로 주목받고 있다.

하수처리장 방류수가 농업용수로 이용되는 상황에서 Kim et al. (2009)에 따르면, 일처리용량 500 m³ 이상의 전국 270여개 하수처리장 중 132개소가 직간접적으로 농업용수에 영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 하지만 하수처리장 방류수 수질기준은 농업용수 수질 기준을 초과하는 경우가 있으며, 하수처리수를 농업용수로 이용할 경우, 환경 및 보건위생적 측면에서 부정적인 영향을 초래할 수 있음이 보고되고 있다 (Mara and Cairncross, 1989; Peasey et al., 2000; Jang et al., 2010; Park, 2011). 따라서 하수처리수를 농업용수로 이용하기 위해서는 이용목적에 맞는 재처리가 필요하다.

농업용수는 생활 및 공업용수에 비해 그 수요량이 많고, 상대적으로 낮은 기대수질을 가짐 (Yang and Abbaspour, 2007)에 따라, 하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위해서는 경제적으로 합리적인 재처리시스템이 필요하다. 기존의 하수재이용을 위한 재처리시스템은 공업용수 등의 목적으로 적용되고 있으며, 이러한 처리공정의 용수 단가는 농업용수로 적용하기에는 너무 비싼 경우가 많다. Park (2011)은 제주 판포지구 하수재이용사업에서 염도를 제거하기 위한 재처리시스템을 개발 및 적용하였으며, 이 때 처리비용은 시설비를 포함하여 용수 1 m³당 160원 내

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학전공
 ** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부
 *** 전북대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과
 **** Department of Biological Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University
 *****Department of Agricultural and Biological Engineering, Mississippi State University
 † Corresponding author Tel.: +82-2-880-4591
 Fax: +82-2-873-8725
 E-mail: kyosuh@snu.ac.kr
 2013년 1월 9일 투고
 2013년 2월 12일 심사완료
 2013년 2월 13일 게재확정

외로 공급이 가능하도록 하였다. 이와 같이 재처리시스템의 경제성이 하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 광범위한 실용화에 있어서 제한요인이 되고 있다.

하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 인체위해성 (Asano et al., 1992; Ayres et al., 1992; Petterson, 2001; Forslund et al., 2010), 작물생육 및 수확량 (Pereira et al., 2011; Cirelli et al., 2012), 토양 및 수질에의 영향 (Stevens et al., 2003; Kang et al., 2007; Jang et al., 2012) 등을 포함한 생태 및 환경영향뿐만 아니라 하수재이용을 위한 수처리시스템 (Liberti et al., 2000; Jimenez, 2005)과 재이용 수질기준 (Mara and Cairncross, 1989; Blumenthal et al., 2000; WHO, 2006) 및 적지선정 (Vasiloglou et al., 2009) 등의 다양한 연구들이 진행되어 왔지만 경제적인 처리비용에 관한 연구는 부족한 실정이다. Haruby (1997; 1998)는 이스라엘에서의 하수 처리수준과 재이용 위치에 따른 하수처리수의 농업용수 재이용에 대한 국가 차원의 경제성 분석을 실시한 바 있으며, Chu et al. (2004)와 Yang and Abbaspour (2007)는 선형계획법을 이용하여 중국에서의 하수재이용 잠재성을 평가한 바 있다. 이들 연구는 하수재이용에 따른 비용과 편익에 관한 분석과 평가를 수행하고, 기술적, 경제적 제한조건 하에서 잠재 하수재이용량을 산출한 것으로서 수처리시스템의 경제성에 대한 논의는 부족하다. 또한, 수처리 및 재이용시스템의 실제 적용은 지역별 수자원 이용 및 농업 환경의 특수성을 고려하여야 하기 때문에 우리나라의 상황에 맞는 적절한 평가가 이루어져야 할 것이다.

농업용수 재이용시스템의 경제성 분석은 앞서 연구된 내용에서와 같이 생태 및 환경영향뿐만 아니라 사회적, 기술적, 경제적 측면과 관련한 복잡성을 내포하고 있기 때문에 다각적으로 현상을 파악하고 분석할 필요가 있다. 이를 위해서 다음에 소개될 시스템 다이내믹스를 활용하였다. 시스템 다이내믹스 접근방법은 사회·경제·환경적 (socioeconomic environmental) 시스템의 비선형 거동을 이해하고 분석하는 효과적인 방법이다 (Khan et al., 2009). Nasiri et al. (2012)은 시스템 다이내믹스를 인구, 경제성장, 그리고 기후변화 등을 고려한 시나리오에 따른 도시에서의 하수재이용계획에 적용한 바 있으며, Ryu et al. (2012)은 지속가능한 수자원계획과 관리를 위한 모델링 도구로 시스템 다이내믹스를 적용하였다.

본 연구에서는 우리나라 농업용수 수요의 80% (MLTM, 2011)를 차지하는 논용수량을 대상으로 시스템 다이내믹스를 이용한 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형을 구축하였다. 구축한 모형을 바탕으로 재처리시스템의 경제성에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하고, 관개면적과 처리수준에 따른 합리적인 재처리시스템 비용을 산정하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 시스템 다이내믹스

시스템 다이내믹스 (system dynamics)는 Forrester 등의 산업공학자들에 의해 체계화된 시스템 분석기법으로 1961년에 소개되었다 (Forrester, 1961). 이는 복잡한 현상을 동태적이고 순환적인 인과관계의 시각 (dynamic feedback perspective)으로 이해하고 설명하거나, 이러한 이해에 기초한 컴퓨터 모델을 구축하여 복잡한 인과관계로 구성된 현상이 어떻게 동태적으로 변해나가는지를 실험해 보는 방법론이자 프레임 (framework)이라고 할 수 있다 (Jung and Joo, 2005). 따라서 시스템 다이내믹스는 일회적인 사건, 모형 변수의 정확한 측정과 변수의 추정값을 구하기보다는 목표 변수가 시간의 흐름에 따라 어떤 동태적인 변화를 보이는지에 관심을 둔다 (Meadows, 1980).

단선적 사고는 어떠한 문제를 일으키는 요인들을 나열하고, 그 요인들에 대한 가중치를 정하는 사고방식으로 (Richmond, 1993) 인과관계가 단일 방향으로만 흐르고, 서로 독립적인 독립변수들이 종속변수에만 영향을 미친다고 가정한다 (Kim et al., 1999). 그러나 현실에서의 인과관계는 쌍방향으로 흐르면서 서로에게 피드백을 제공하는 동태성을 띠고 있다. 현대사회는 수행 기능의 복잡성과 그것을 구성하는 하위요소들의 상호 연관성 혹은 의존성을 가지므로, 단선적 사고에서 최적해를 구하는 원리는 비현실적인 경우가 자주 발생한다 (Shin, 2011). 더군다나 이와 같은 성격은 더욱 심화되어 가고 있기 때문에 문제 해결을 위해서는 피드백구조를 이해하면서 문제의 원인을 시스템 내부에서 찾으려는 노력이 필수적이다 (Jung and Joo, 2005). 따라서 전체를 이해하면서 부분의 역할을 강조하고, 부분간의 상호연관성 및 의존성을 강조하는 사고 틀을 갖는 것이 중요하며 (Jung, 2012), 이를 위해 시스템 다이내믹스 접근방법이 필요한 것이다.

시스템 다이내믹스는 피드백 구조와 함께 인과지도 (causal loop diagram)를 이용하여 문제를 해결하는 접근방법이다 (Qi et al., 2009). 인과지도란 여러 개의 인과관계를 서로 연결시켜 놓은 도식으로, 시스템 전체를 한눈에 조망하도록 허용하는 생각의 지도이다. 인과지도를 이용하여 우리는 수많은 인과관계가 어떻게 결합되어 시스템 전체를 형성하는지 이해할 수 있으며, 복잡 다기한 시스템의 거동이 어떠한 과정을 거쳐 생성되는지 파악할 수 있다 (Kim, 2004). 일반적으로 인과지도는 3가지 요소로 구성된다 (Hall et al., 1994). 첫째, 화살표를 사용하여 변수와 변수 간의 인과관계의 방향을 표시한다. 화살표의 기점이 영향을 주는 변수이며, 화살표의 종점이 영향을 받는 변수이다. 둘째, 화살표와 함께 (+)와 (-)기호를 사용하여 인과관계 방향을 표시한다. 화살표 방향표시 부분의 (+)기호는 두 요소가 같은 방향

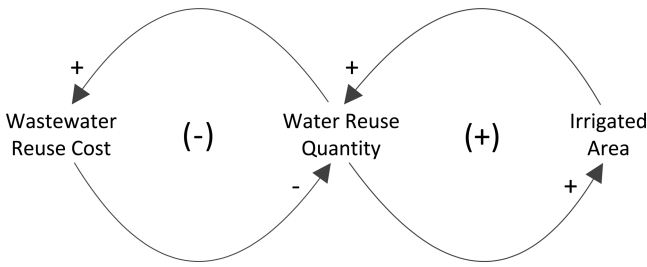


Fig. 1 Causal loop diagram of critical system components for wastewater reuse systems

으로 변화하는 것을 뜻하고, (-)기호는 두 요소의 변화방향이 다르다는 것을 의미한다. 셋째, 여러 개의 인과관계들이 하나의 폐쇄된 환류를 형성할 때, 이를 피드백 루프 (feedback loop) 라고 한다 (Weick, 1979). (+)기호들과 짝수의 (-)기호들로 구성된 피드백 루프를 양의 피드백 (positive feedback) 루프, 또는 강화 피드백 (reinforcing feedback) 루프라고 한다. 이처럼 상승작용을 일으키는 피드백 루프와 반대로 시스템을 일정한 목표치로 이동시키는 안정적인 작용을 일으키는 피드백이 음의 피드백 (negative feedback) 루프이다. 음의 피드백 루프는 홀수 개의 (-)기호를 가지며, 목표지향형 피드백 (goal seeking feedback) 또는 안정화 피드백 (balancing feedback) 루프라고도 한다 (Jung, 2012). Fig. 1은 본 연구에서 사용된 하수재이용 시스템의 피드백 구조이다. 하수재이용 시스템은 재이용량 (water reuse quantity), 하수재이용시스템 비용 (wastewater reuse cost), 관개면적 (Irrigated area)이라는 세가지 주요 요인으로 구성된다. 이 시스템은 재이용량 → 재이용시스템 비용 → 재이용량으로 이어지는 음의 피드백 루프와 재이용량 → 관개면적 → 재이용량으로 이어지는 양의 피드백 루프로 구성된다.

시스템 다이내믹스를 이용한 모델링 과정은 해결하고자 하는 문제를 정의하고, 문제가 되는 시스템의 경계를 확정하는 과정인 문제의 인식에서 시작한다. 문제를 인식한 후에는 문제를 야기시키는 여러 원인들이 어떻게 상호 연결되어 있는가를 피드백 시각에서 고찰하고 인과지도를 작성하는 개념화단계로 거치게 된다. 개념화를 바탕으로 컴퓨터 모형을 구축하고, 모형에 대한 시뮬레이션을 통해 모형의 행태를 분석한다. 작성된 모형에서 보여지는 주요 변수들의 행태를 중심으로 모형의 타당성을 평가하며 (Barlas, 2002), 모형의 타당성이 입증되면 적절한 시나리오를 통해서 시스템의 가상적 거동을 모의함으로써 목표 변수가 시스템의 조건에 따라 어떤 동태적 변화를 보이지를 확인 할 수 있다. Fig. 2는 시스템 다이내믹스를 이용한 모델링 과정의 흐름도이다.

본 연구에서는 시스템 다이내믹스 모형을 분석하기 위해 Vensim PLE (Eberlein, 2007)를 이용하였다. Vensim은 VENTANA사에서 개발한 시스템 다이내믹스 시뮬레이션 프로그램으로서 시

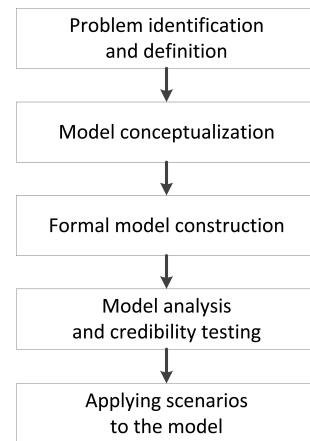


Fig. 2 Flowchart of system dynamics modeling

스템 다이내믹스의 그래픽 기능이 강화된 소프트웨어이다. 이러한 소프트웨어는 컴퓨터를 응용하여 복잡한 사회현상이 어떻게 거동하는지를 분석하고 예측하는 기술로서 가상현실에서 실제 현상과 같은 실험을 행함으로써 과학적 의사결정을 할 수 있도록 지원하는 프로그램이다 (Lee et al., 2007).

2. 하수처리수 재이용 시나리오

하수처리수를 농업용수로 재이용하기 위한 재이용시스템의 비용에 큰 영향을 주는 것은 재처리용량과 수처리시스템의 처리수준이다. 재이용시스템의 처리용량은 관개면적에 따른 필요수량에 의해 결정되며, 재이용시스템이 적용되는 지역에 따라 하수처리장 방류수 수질기준이 다르기 때문에 관개면적과 처리수준, 두 가지 요인에 대해서 시나리오를 구축하였다.

가. 관개면적

하수처리장 방류수의 재처리시스템의 처리용량은 관개면적에서의 재이용량과 같다. 재이용량은 재처리수를 관개하는 관개면적에 의해서 계산될 수 있으며, 본 연구에서는 수혜면적 10 ha, 20 ha, 30 ha, 40 ha, 그리고 50 ha를 기준으로 재처리용량을 산정하여 Table 1과 같이 시나리오를 구성하였다.

Table 1 Scenarios of wastewater reuse systems for Irrigated area

Scenario	Irrigated area (ha)	Reuse quantity (10 ² m ³ /year)	Treatment capacity (m ³ /day)
11	10	727	1,728
12	20	1,454	3,456
13	30	2,181	5,184
14	40	2,908	6,912
15	50	3,635	8,640

Table 2 Scenarios of wastewater reuse systems for water treatment level

Scenario	Zone	BOD (mg/L)	T-P (mg/L)
T1	I	≤ 5	≤ 0.2
T2	II	≤ 5	≤ 0.3
T3	III	≤ 10	≤ 0.5
T4	IV	≤ 10	≤ 2.0

시나리오에 따른 재이용량은 연평균 관개량을 727 mm (Im et al., 2000)로 가정하여 결정하였으며, 시스템의 처리용량은 단위 용수량을 0.002 m³/sec·ha로 가정하여 결정하였다.

나. 처리수준

재이용량과 함께 하수처리장 방류수의 수질은 재이용시스템의 비용에 주요한 영향을 미친다. 본 연구를 위해 구축한 시나리오에서의 처리수준은 Table 2에서와 같이 1일 하수처리용량 500 m³ 이상의 공공하수처리시설의 방류수 수질기준을 말한다. 하수처리장 방류수 수질기준 중 수질오염총량 관리 대상물질인 BOD와 T-P 항목을 재이용시스템의 경제성 평가에 사용하였는데, 이는 BOD 항목은 처리수준에 따라 농업용수 수질기준 및 재이용수질기준 8 mg/L를 만족하지 못하여 추가적인 처리비용을 발생시키며, T-P 항목의 경우 하수처리수를 농업용수로 재이용함으로써 수체로의 T-P부하량을 줄여주는 편익을 발생시키기 때문이다. 또한, 하수처리장 방류수의 수질은 방류수 수질기준과 같은 것으로 가정하였다.

3. 민감도 분석

민감도 분석이란 임의의 입력변수의 변화에 따른 결과의 변

화량과의 관계를 말하는 것으로 본 연구에서는 민감도 지수 (sensitivity index, SI)를 사용하여 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 지수를 이용한 민감도 분석방법은 예측모형의 입력변수들을 동일한 비율로 변화를 주어 민감도 지수를 산정하고, 이를 서로 비교함으로써 입력변수의 결과치에의 영향정도를 평가하고자 할때 사용한다 (Hoffman and Gardner, 1983).

구축한 경제성 평가 모형의 입력변수에 대한 민감도 분석은 각 입력변수를 일정 비율 (±50 %)로 변화시켜 모의된 결과치를 바탕으로 다음 식 (1)을 이용하여 나타낼 수 있다 (Hong, 1993).

$$SI = \frac{D_{+50\%} - D_{-50\%}}{D_{std}} \quad (1)$$

여기서, D_{+50%}와 D_{-50%}, 그리고 D_{std}는 각각 입력변수의 기준치에 대한 50% 증감에 따른 결과치와 입력변수의 기준치에 따른 결과치를 의미한다.

III. 결과 및 고찰

1. 시스템 다이내믹스 모델링

가. 인과지도

인과지도 모델링은 시스템의 동태적 변화의 원인이 되는 피드백 루프의 존재를 나타낼 수 있으며, 모형의 전체적인 인과순환 구조를 파악할 수 있게 해주기 때문에 (Jung and Joo, 2005) 시스템 다이내믹스를 통한 문제해결에 있어서 가장 중요한 과정이다. 하수처리수의 농업용수 재이용을 위한 경제적인 수처리시스템의 비용을 산정하고, 재이용 시스템 전반의 동태성을 분석하고자 Fig. 3과 같이 인과지도를 구축하였다.

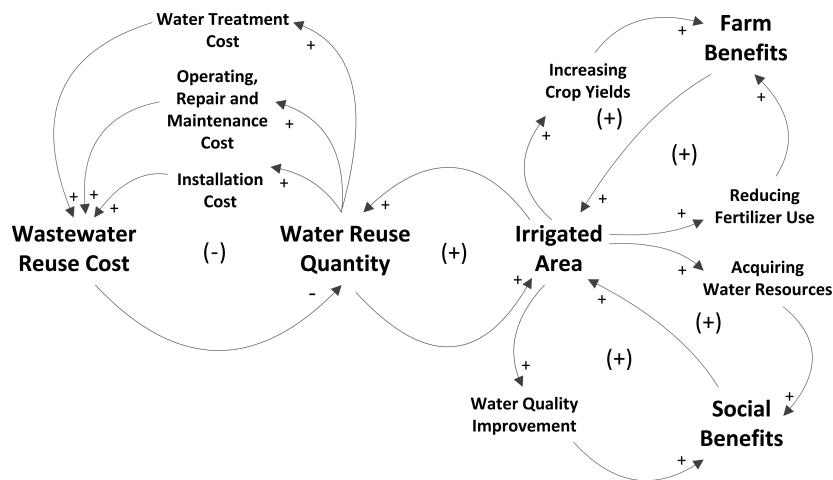


Fig. 3 Causal loop diagram for the wastewater reuse systems

본 연구에서 구축한 인과지도는 앞서 살펴 본 바와 같이 크게 재이용시스템의 비용과 재이용량으로 구성되는 음의 피드백 루프와 관계면적과 재이용량으로 구성되는 양의 피드백 루프가 두 축을 이룬다. 재이용시스템 비용은 설치 (Installation) 및 유지관리 (Operation, Repair and Maintenance), 그리고 수처리 (Water Treatment) 비용으로 나눌 수 있으며, 이들은 재이용량이 많아 질수록 증가하며, 재이용시스템의 비용을 증가시키는 순환적 피드백 구조를 가지는 동태적 상호작용으로 설명될 수 있다. 또한, 관계면적은 농가편익 (Farm Benefits) 및 사회적 편익 (Social Benefits)과 각각 양의 피드백 루프를 형성하며, 농가편익과 사회적 편익이 증가할수록 관계면적이 늘어나고, 이는 재이용량을 증가시키는 결과를 가져온다. 관계면적의 증가는 수확량증가 (Increasing Crop Yields)와 시비량저감효과 (Reducing Fertilizer Use)를 통해 농가편익에 기여함과 동시에, 수자원확보 (Acquiring Water Resources)와 수질개선효과 (Water Quality Improvement)를 통해 사회적 편익을 증가시키며 이들은 모두 관계면적을 증가시키는 양의 피드백 루프를 형성하게 된다 (Park, 2007; 2011).

이렇게 작성된 인과지도는 수처리시스템의 합리적인 비용산정을 가능하게 하며, 시스템 구성요소의 변화에 따른 재이용시스템 비용에의 영향을 동태적으로 파악할 수 있는 프레임을 제공한다.

나. 저장-유량 지도

인과지도는 저장 (stock)과 유량 (flow)의 변수를 가지는 저장-유량 지도 (stock-flow diagram)로 나타낼 수 있다. 피드백 체계의 관점에서 문제를 인식하는 사고방식은 컴퓨터의 도움을 받을 때 더욱 정확하게 현상을 파악할 수 있다. 인간의 두뇌능력으로는 한두 가지의 피드백 인과관계를 이해하거나 시스템의 전개 양상을 추론할 수 있지만, 3가지 이상의 피드백 인과관계가 형성되어 있는 시스템에 대해서는 그 동태적 변화를 추론하기란 거의 불가능하다. 따라서 작성된 인과지도를 컴퓨터 상에서 모의할 수 있도록 구체화된 시뮬레이션 모형으로 전환시켜야 하는데 이를 저장-유량 지도라고 부른다 (Jung, 2012). 저장변수는 시스템 안에서 축적되는 변수로 특정 시점에서 시스템의 상태를 나타내며, 유량변수는 시스템 안을 흘러 다니는 변수로 시스템의 활동을 반영한다 (Vlachos et al., 2007). 본 시스템에서는 순이익 (Net Benefit), 농가편익, 사회적 편익, 수처리비용, 그리고 유지관리비용 등이 저장변수이며, 수자원확보효과, 증수효과, 시비량저감효과, 하천수질개선효과 등이 유량변수가 된다. 또한, 저장과 유량변수 외에도 저장과 유량의 활동이나 상태에 대한 지표로서 저장과 유량의 계산을 쉽게하기 위한 보조변수 (auxiliary variable)가 있으며, 본 연구에서는 수자원개발비용단가 (Water

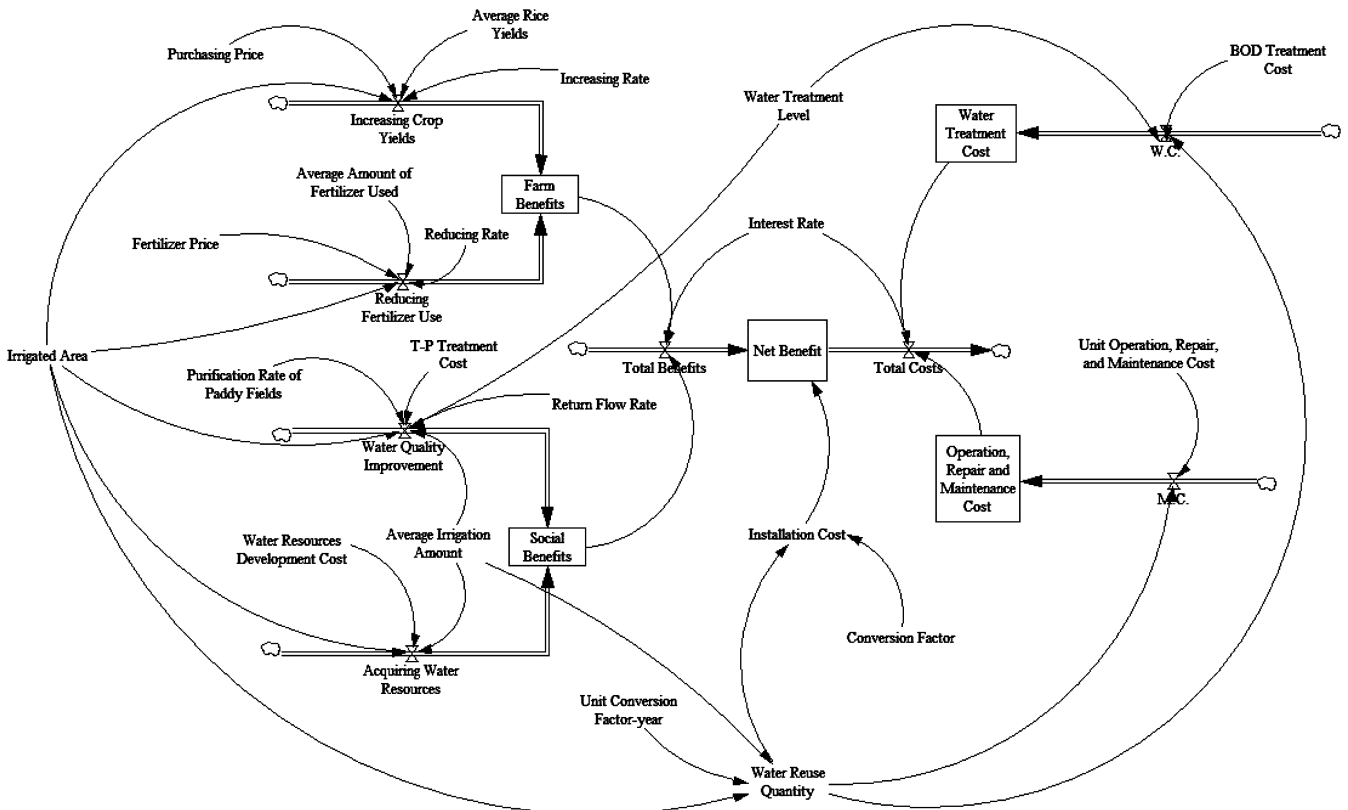


Fig. 4 Stock-flow diagram for the wastewater reuse systems

Resources Development Cost), 연평균 수확량 (Average Rice Yields), 구매가격 (Purchasing Price), 비료가격 (Fertilizer Price), 증수율 (Increasing Rate), 관개수 회기율 (Return Flow Rate) 등이 사용되었다. 다음 Fig. 4는 Vensim을 이용하여 재이용시스템의 비용을 산정하기 위해 모형화한 저장-유량 지도이다.

2. 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형

가. 기본가정

농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형을 구축하기위해 경제성 분석의 기초 요소인 할인율, 내용연수, 그리고 유지관리비용에 관하여 다음과 같이 가정하였다. 수자원사업에 대한 경제성분석은 분석기간 동안 편익과 비용을 산정하여 합산하여야 하나 각기 다른 기간마다 다른 크기로 발생하는 비용과 편익을 명목 가치 그대로 비교하기 어려우므로 이것을 모두 현재가치로 바꾸어 주어야 한다 (Kim et al., 2007). 따라서 돈의 시간적 가치를 반영하여 미래가를 현재가치로 환산하는 할인율 (interest rate)은 '예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구' (KDI, 2008)의 5.5 %를 적용하였다. 하수처리장의 건설 및 유지관리 비용을 산정하기 위해서는 시설물이 효과를 발휘할 수 있는 기간을 결정하여야 하며, 일반적으로 경제성 분석에서는 시설물의 경제적 측면이 중요하므로 투자시설물의 내용연수 (lifetime)를 기준으로 사업분석 기간을 결정해야 한다. 하수처리장의 내용연수는 하수처리장의 운영 및 기술의 한계로 일반적으로 20년으로 산정한다 (Cho, 2012). 또한, 하수처리장의 유지관리비는 내용연수 동안 매년 반복적으로 발생하는 인건비, 전력비, 약품비, 슬러지처리비, 개보수비 등과 비반복적으로 발생하는 개보수비에 따른 비용 등으로 구성되며, 농업용수재이용 시스템과 같은 공사기간이 짧은 공사계획의 경우에는 완공 후부터 발생하는 것으로 가정하였다.

나. 모형변수

Vensim을 이용하여 시스템 다이내믹스를 통한 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형을 구현하기 위해서는 각 변수들과 모형변수들의 상관관계를 합리적인 수식과 값을 사용하여 수식화하여야 한다. 본 연구에서 구축한 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형의 기본 모형은 다음 그림과 같다.

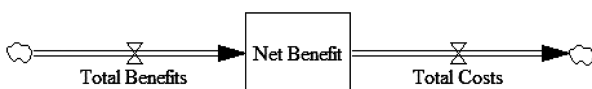


Fig. 5 Basic structure of benefit cost model for the wastewater reuse system

이 기본 모형에 대한 수식을 나타내면 다음 식 (2)와 같다. 즉, 시간에 따른 순편익의 변화는 총편익과 총비용의 차이로 표현할 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = B - C \quad (2)$$

여기서, N 은 순편익 (Net Benefit), B 는 총편익 (Total Benefits), C 는 총비용 (Total Costs), 그리고 t 는 시간을 의미한다. 차분형식의 위 식은 다음의 적분형태로 Vensim에 적용할 수 있으며, N_0 는 순편익의 초기값을 나타낸다.

$$N(t) = N_0 + \int_0^t (B - C) dt \quad (3)$$

총편익은 농가편익 (Farm benefits)과 사회적 편익 (Social benefits)의 합으로 나타낼 수 있다. 하수처리수를 농업용수로 재이용하게 되면 농가는 증수효과 (Increasing Crop Yields)와 시비량저감효과 (Reducing Fertilizer Use)를 얻을 수 있다. 증수효과는 하수에 다량으로 포함되어 있는 영양물질에 기인한 바가 크기 때문에 시비량저감효과와 중복되는 경향이 있다. 따라서 농가편익 산정 시, 수확량증가에 따른 편익과 시비량저감에 따른 편익 중 더 큰 값을 농가편익으로 산정하였다. 사회적 편익은 수질개선효과 (Water Quality Improvement)와 수자원확보효과 (Acquiring Water Resources)로 구성하였다. 수질개선효과는 논에서의 수질개선효과를 정량화한 것으로, 하수처리수를 농업용수로 재이용함에 따라 논 포장에서 하수가 다시 처리되어 하천으로의 오염부하가 줄어드는 것을 수익화한 것이다. 수질오염 총량관리를 위해 환경부에서 제시한 총인에 대한 단위처리비용을 기준으로 논에서의 총인삭감량을 편익으로 산정하였다. 수자원확보효과의 경우, 수자원을 개발하거나 활용함에 있어 그 기능을 다른 기술적 방식으로 대체할 때 소요되는 비용을 대상 수자원의 가치로 평가하는 대체비용법 (replacement cost approach) (Yeo et al., 2009)을 이용하여 하수재이용시 확보할 수 있는 수자원량을 편익으로 산정하였다. 이를 위해 다목적댐 용수개발 단가에 대한 문헌조사를 실시하였고, 1 m³당 300원의 용수단가를 적용하였다.

총비용은 유지관리비용과 설치비용, 그리고 추가적인 수처리비용의 합으로 나타낼 수 있다. Choe and Kim (2003)과 Cho (2012)는 하수통계연보등의 자료를 바탕으로 시설처리용량과 설치비용 및 유지관리비용과의 관계를 수식화한 바있다. 하지만, 농업용수 재이용시스템의 경우, 기존의 하수처리장에 추가적인 시설을 설치하거나 소규모의 단순한 수처리시스템을 가진 독립

Table 3 Descriptions of Model Variables and modeling logic

Variables		Description	Modeling Logic	Unit	Reference
Stock variables	Net Benefit	Net benefit by using wastewater reuse system (WRS)	[Total Benefits]-[Total Costs]	won	
	Farm Benefits	Total benefits from private sector by using WRS	MAX([Increasing Crop Yields], [Reducing Fertilizer Use])	won	Park (2011)
	Social Benefits	Total benefits from public sector by using WRS	[Acquiring Water Resources] + [Water Quality Improvement]	won	Park (2011)
	Water Treatment Cost	Additional costs of effluents treatment to satisfy agricultural water quality standard for BOD	[BOD Treatment Cost]×[Water Treatment Level]×[Water Reuse Quantity]	won	ME (2012)
	Operation, Repair and Maintenance Cost	Costs of operation and maintenance for WRS	[Unit Operation, Repair and Maintenance Cost]×[Water Reuse Quantity]	won	ME (2012) Park (2011)
Flow variables	Increasing Crop Yields	Benefits from increased crop yields by using WRS	[Purchasing Price]×[Average Rice Yields]×[Increasing Rate]×[Irrigated Area]	won/year	Park (2011)
	Reducing Fertilizer Use	Benefits from decreased use of fertilizer by using WRS	[Fertilizer Price]×[Average Amount of Fertilizer Used]×[Reducing Rate]×[Irrigated Area]	won/year	Park (2011)
	Water Quality Improvement	Benefits from improved water quality by using WRS	[Purification Rate of Paddy Fields]×[T-P Treatment Cost]×[Return Flow Rate]×[Irrigated Area]×[Average Irrigated Amount]×[Water Treatment Level]	won/year	Park (2011) MLTM (2011) ME (2012)
	Acquiring Water Resources	Benefits from acquired water resources by using WRS	[Water Resources Development Cost]×[Average Irrigated Amount]×[Irrigated Area]	won/year	Park (2011)
Auxiliary variables	Irrigated Area	Area Irrigated with reclaimed wastewater	Scenarios	ha	
	Water Treatment Level	Water treatment level according to the effluents water quality standards	Scenarios	Dimensionless	
	Water Reuse Quantity	Wastewater reuse quantity for agriculture	[Irrigated Area]×[Average Irrigated Amount]	ton	
	Purchasing Price	Government purchase price of rice	1,300	won/kg	KOSIS (2012)
	Average Rice Yields	Paddy rice yields	6,500	kg/ha	KOSIS (2012)
	Increasing Rate	Increasing effect of paddy rice yields	0.18	Dimensionless	Park (2011)
	Fertilizer Price	Fertilizer price	750	won/kg	
	Average Amount of Fertilizer Used	Average amount of fertilizer used in paddy fields	110	kg/ha	Jang (2009)
	Reducing Rate	Fertilizer reduction effect in paddy field of reclaimed wastewater irrigation	0.5	Dimensionless	Jeong et al. (2011)
	Purification Rate of Paddy Fields	Purification rate of paddy fields for Irrigated water	0.7	Dimensionless	Park (2011)
	T-P Treatment Cost	Wastewater treatment cost to satisfy agricultural water quality standard for T-P	41,161	won/ton	ME (2012)
	Return Flow Rate	The rate of return flow from paddy fields to water stream	0.35	Dimensionless	MLTM (2011)
	Average Irrigation Amount	Average irrigation amount in paddy fields	7,270	ton/ha·year	Im et al. (2000)
	Water Resources Development Cost	Water resources development cost according to the replacement cost approach	300	won/ton	
	BOD Treatment Cost	Wastewater treatment cost to satisfy agricultural water quality standard for BOD	3,952	won/ton	ME (2012)
	Unit Operation, Repair and Maintenance Cost	Unit cost of operation and maintenance for the WRS	80	won/ton	
	Interest Rate	Interest rate during lifetime of the WRS	0.055	Dimensionless	KDI (2008)
Unit Conversion Factor-year	Unit conversion factor to adjust unit of the WRS	1	year		

된 처리장으로 운영할 수 있기 때문에 기존의 연구에 의한 하수 처리장 설치비용과 유지관리비용을 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 실제로 농업용수 재이용시스템이 설치된 제주 판포와 월정 하수처리장의 경우 기존의 하수처리장보다 저렴한 수준의 설치비용과 유지관리비용이 소요되는 것으로 나타났다 (Park, 2011). 본 연구에서는 아직까지 농업용수 재이용시스템이 설치된 하수 처리장이 매우 적기 때문에 총편익을 먼저 산정하여 이에 따른 한계비용 (marginal cost)을 도출하였다. 또한, 추가적인 수처리 비용은 처리수준에 따라 농업용수 수질기준에 부합하지 않는 경우, BOD에 대해 추가적으로 수처리를 하는 것으로 가정하고, BOD 1 kg당 3,952 원의 처리비용을 고려하였다 (ME, 2012). 본 연구를 위해 구축한 경제성 평가모형에 사용한 모형변수에 대한 설명은 Table 3과 같다.

다. 모형검정

모형을 적용하기에 앞서 구축된 모형의 적용성을 평가해야 한다. 시스템 다이내믹스 모델링의 경우 구축된 모형을 변수조작을 통해서 실측자료와 비교를 통해 모형을 검정하거나 실측자료가 없는 경우에는 목표변수의 변화양상을 통해 모형을 검정할 수 있다 (Stave, 2003). 본 연구에서는 실측자료가 존재하지 않기 때문에 입력변수의 변화에 따른 순편익의 예상 거동을 통해서 모형의 적용성을 검정할 수 있다. 다음 Fig. 6은 시간에 따른 순편익의 변화양상을 보여주고 있다. 초기 설치비용으로 인해 초기에는 음의 순편익을 보이지만 시간이 지남에 따라 농가편익과 사회적 편익의 영향으로 순편익이 지수함수적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 시스템 다이내믹스 모델링 목표변수의 일반적 거동 중 하나로 (Ford, 2009), 할인율을 고려하여 구축한 모형의 목표변수가 기대하는 변화양상을 잘 나타냄을 의미한다.

라. 민감도 분석

재처리시스템의 경제성에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하

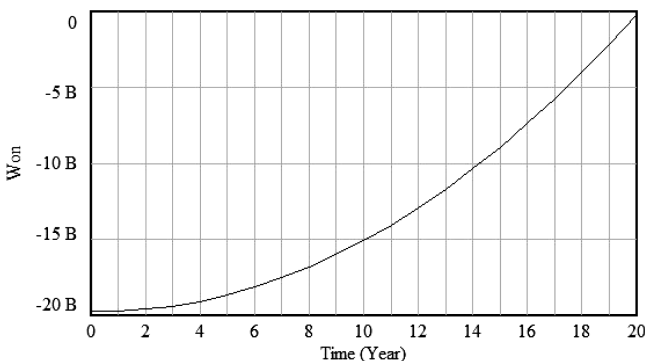


Fig. 6 Result of model simulation for Net Benefit

고자 서로 독립적인 관계를 가지는 입력변수인, 구매가격, 수확량, T-P 처리비용, 수자원개발비용단가, BOD 처리비용, 유지관리비용, 그리고 설치비용 등에 대하여 식 (1)을 사용하여 민감도 지수를 산정하였다. 구매가격과 평균조곡생산량 입력변수의 기준치는 통계청에서 제공하는 자료를 바탕으로 지난 20년간 (1991 ~ 2010)의 평균값인 1300 원/kg, 6500 kg/ha를 각각 기준 구매가격과 기준 평균조곡생산량으로 사용하였다. 수자원개발비용 단가는 최근에 건설된 댐의 개발비용 300 원/ton을 기준단가로 사용하였으며, T-P와 BOD의 기준 처리단가는 2011년도 공공 하수처리시설 운영관리실태 분석결과에서 제시하는 처리비용인 41,161 원/ton, 3,952 원/ton을 각각 사용하였다. 유지관리비용은 판포하수처리장에 설치된 재이용시스템의 유지관리비용인 80 원/ton을 기준 유지관리비용단가로 사용하였으며 설치비용은 최대설치비용이 순편익을 0으로 만드는 값을 사용함으로써 간접적으로 시스템 전체의 순편익에 대한 민감도를 고려할 수 있게 하였다. 민감도 분석 시, 편익부분은 총편익에 대하여, 비용부분은 총비용에 대하여 각각 민감도를 분석하였다. I4와 T5 시나리오를 기준으로 한 민감도 분석결과는 다음 Table 4와 같다.

민감도 분석결과, 하수처리수를 농업용수로 재이용함에 있어서 재이용 시스템의 총편익에는 수자원개발비용단가가 가장 큰 영향을 미치며, 반면 T-P 처리비용은 다른 변수에 비해 상대적으로 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 총비용에 대해서는 재이용시스템 설치비용이 BOD 처리비용 및 유지관리비용에 비해 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

마. 시나리오 적용 결과

할인율 5.5 %와 내용연수 20년을 고려하여 시나리오에 따른 농가편익과 사회적 편익 등을 산정한 결과 및 이에 따른 한계비용은 다음 Table 5와 같다.

농가편익의 경우 증수효과가 항상 시비량저감효과보다 크며 관계면적에 따라 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 사회적

Table 4 Results of sensitivity analysis based on the scenario I4 and T5

	Parameters	Unit	standard value	sensitivity index
Benefit	Purchasing Price	won/kg	1,300	0.400
	Average Rice Yields	kg/ha	6,500	0.300
	T-P Treatment Cost	won/ton	41,161	0.027
	Water Resources Development Cost	won/ton	300	0.573
Cost	BOD Treatment Cost	won/ton	3,952	0.015
	Operation Repair and Maintenance Costs	won/ton	80	0.153
	Installation Costs	106 won	1,990	0.832

Table 5 Assessment results of the marginal cost for wastewater reuse system (10⁶ won)

Scenarios	Farm Benefits			Social Benefits			Marginal Cost
	Increasing Crop Yields	Reducing Fertilizer Use	Total	Water Quality Improvement	Acquiring Water Resources	Total	
T1 and I1	192	5	192	1	275	276	468
T1 and I2	384	10	384	3	550	553	937
T1 and I3	576	16	576	4	825	829	1,405
T1 and I4	768	21	768	5	1,100	1,105	1,873
T1 and I5	960	26	960	6	1,375	1,381	2,341
T2 and I1	192	5	192	2	275	277	469
T2 and I2	384	10	384	4	550	554	938
T2 and I3	576	16	576	6	825	831	1,407
T2 and I4	768	21	768	8	1,100	1,108	1,876
T2 and I5	960	26	960	10	1,375	1,385	2,345
T3 and I1	192	5	192	3	275	278	470
T3 and I2	384	10	384	6	550	556	940
T3 and I3	576	16	576	10	825	835	1,411
T3 and I4	768	21	768	13	1,100	1,113	1,881
T3 and I5	960	26	960	16	1,375	1,391	2,351
T4 and I1	192	5	192	13	275	288	480
T4 and I2	384	10	384	26	550	576	960
T4 and I3	576	16	576	39	825	864	1,440
T4 and I4	768	21	768	52	1,100	1,152	1,920
T4 and I5	960	26	960	65	1,375	1,440	2,400

Table 6 Maximum expected installation cost of wastewater reuse systems (10⁶ won)

Scenario	Maximum expected installation cost (A)	Installation cost (B) (Cho, 2012)	Ratio of A to B
I1	399	4,953	0.09
I2	799	7,404	0.11
I3	1,198	9,790	0.12
I4	1,597	11,936	0.13
I5	1,996	13,920	0.14

편익에서는 수자원확보효과가 수질개선효과보다 큰 효과를 나타냈으며, 총편익에서는 농가편익보다 사회적 편익이 더 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 총편익에 따른 한계비용은 처리수준보다 관개면적에 더 큰 영향을 받으며, 관개면적이 커질수록 한계비용이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

민감도 분석결과 재이용시스템에 가장 큰 영향을 미치는 설치비용에 대해 관개면적 시나리오별 최대설치비용을 산정하면 Table 6과 같다. 설치비용을 제외한 나머지 변수들은 민감도 분석의 기준치를 사용하였다.

하수처리수의 농업용수 재이용시스템의 최대 설치비용은 시나리오에 따라 약 4 억원에서 20억원의 범위를 나타내며, 수혜면적이 10 ha 증가할수록 4억원 정도의 추가적인 설치비용이 발생

하는 것으로 분석되었다. Cho (2012)에 의해서 산출된 바 있는 처리용량과 설치비용의 관계식으로부터 산정되는 일반 공공하수처리장의 설치비용과 비교해 보면, 농업용수 재이용시스템의 설치비용이 일반 공공하수처리장 설치비용의 10분의 1수준인 것으로 나타났다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 논용수량을 대상으로 사회적, 경제적, 환경적 측면과 관련한 복잡성을 내포하고 있는 하수처리수의 농업용수 재이용시스템의 경제성을 분석하기위해 시스템 다이내믹스 기법을 이용하였다. 농업용수 재이용시스템의 경제성을 분석하고자 관개면적과 처리수준에 따른 다양한 시나리오를 구축하고 Vensim을 이용하여 경제성 평가모형을 구성하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 시스템 다이내믹스를 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용시스템을 평가하기위한 인과지도를 구축하고, 이를 바탕으로 Vensim을 이용하여 저장-유량 지도를 작성하였다.
2. 시스템 다이내믹스 모델링을 통해 모형변수를 정의하고, 모형변수 간의 상관관계를 수식화함으로써 농업용수 재이용시스템 경제성 평가모형을 구축하였다. 또한 경제성 평가모형의

민감도를 분석하기위하여 민감도 지수를 산정하여 민감도를 분석하였다. 분석결과, 총편익에 대해서는 수자원개발비용단가가, 총비용에 대해서는 설치비용이 가장 큰 민감도를 가지는 것으로 나타났다.

3. 구축한 모형을 바탕으로 하수처리수를 농업용수로 이용할 경우 발생하는 농가편익과 사회적 편익을 산정하였고, 그에 따른 한계비용을 도출하였다. 농가편익의 경우 증수효과가 시비량 저감효과보다 크며 관계면적에 따라 일정한 값을 보이는 것으로 나타났다. 사회적 편익에서는 수자원확보효과가 수질개선효과보다 큰 효과를 나타냈으며, 총편익에서는 농가편익보다 사회적 편익이 더 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 총편익에 따른 한계비용은 처리수준보다 관계면적에 더 큰 영향을 받으며, 관계면적이 커질수록 한계비용이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 구축한 농업용수 재이용시스템 경제성 평가 모형은 하수처리수를 농업용수로 재이용함에 있어, 재처리시스템의 경제성에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하고 재처리시스템의 합리적인 비용을 제안함으로써 경제적인 하수처리수의 농업용수 재이용에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 “하수처리수의 농업용수 간접재이용시스템 개발과 적용” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Asano, T., L. Y. C. Leong, M. G. Rigby, and R. H. Sakaji, 1992. Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using enteric virus monitoring data. *Water Science and Technology* 26(7-8): 1513-1524.
2. Ayres, R. M., R. Stott, D. L. Lee, D. D. Mara, and S. A. Silva, 1992. Contamination of lettuces with nematode eggs by spray irrigation with treated and untreated wastewater. *Water Science and Technology* 26(7-8): 1615-1623.
3. Barlas Y., 2002. System dynamics: systemic feedback modeling for policy analysis. In Knowledge for Sustainable Development—An Insight into the *Encyclopedia of Life Support Systems*, 1131-1175. Oxford, UK: UNESCO Publishing.
4. Blumenthal, U. J., A. Peasy, G. Ruiz-Palacios, and D. D. Mara, 2000. *Guidelines for wastewater reuse in agriculture and aquaculture: recommended revisions based on new research evidence*. WELL Study, Task no 68, Part 1. London, UK: WELL Resource Centre.
5. Cho, E. H., 2012. Estimating Benefit of Water Quality Improvement by Raising Dam Project with Replacement Cost Method. Master's Thesis, Inha University, Korea (in Korean).
6. Choe, J. S. and H. H. Kim, 2003. Cost Analysis of Construction and Operation for Wastewater Treatment Plants. *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers* 25(1): 33-37 (in Korean).
7. Chu, J. Y., J. N. Chen, C. Wang and P. Fu, 2004. Wastewater reuse potential analysis: implications for China's water resources management. *Water Research* 38: 2746-2756.
8. Cirelli G. L., S. Consoli, F. Licciardello, R. Aiello, F. Giuffrida, and C. Leonardo, 2012. Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. *Agricultural Water Management* 104: 163-170.
9. Eberlein, R., 2007. *Vensim User's Guide* (version 5). Harvard, MA.: Ventana Systems.
10. Ford, A., 2009. *Modeling the Environment*. Washington, DC: Island Press.
11. Forrester, J. W., 1961. *Industrial Dynamics*. Cambridge: The MIT Press.
12. Forslund, A., J. H. J. Ensink, A. Battilani, I. Kljujev, S. Gola, V. Raicevic, Z. Jovanovic, R. Stikic, L. Sandei, T. Fletcher, and A. Dalsgaard, 2010. Faecal contamination and hygiene aspect associated with the use of treated wastewater and canal water for irrigation of potatoes. *Agricultural Water Management* 98: 440-450.
13. Hall, R. I., P. W. Aitchison, and W. L. Kocay, 1994. Causal policy maps of managers: Formal methods for elicitation and analysis. *Systems Dynamics Review* 10(4): 337-360.
14. Haruvy, N., 1997. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis. *Agriculture, Ecosystem & Environment* 66: 113-119.
15. Haruvy N., 1998. Wastewater reuse—regional and economic considerations. *Resources, Conservation and Recycling* 23: 57-66.
16. Hoffman, E. O., and R. H. Gardner, 1983. Evaluation of

- Uncertainties in Environmental Radiological Assessment Models, *In Radiological Assessments: a Textbook on Environmental Dose Assessment*, ed. Till, J.E. and H.R. Meyer, 11-55. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
17. Hong, W. S., 1993. A Study on the Sensitivity Analysis for WASP4 Model. Master's Thesis, Seoul National University, Korea (in Korean).
 18. Im, S. J., M. G. Kang, S. W. Park, and C. E. Park, 2000. Surveying Water Supply from Irrigation Reservoirs in the Han River Basin. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 42(6): 37-44 (in Korean).
 19. Jang T. I., 2009. Environmental effects of reclaimed wastewater irrigation on paddy fields. Ph. D. diss., Seoul National University, Korea (in Korean).
 20. Jang T. I., H. K. Kim, C. H. Seong, E. J. Lee, and S. W. Park, 2012. Assessing nutrient losses of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management* 104: 235-243.
 21. Jang, T. I., S. B. Lee, C. H. Sung, H. P. Lee, and S. W. Park, 2010. Safe application of reclaimed water reuse for agriculture in Korea. *Paddy Water Environment* 8: 227-233.
 22. Jeong, H. S., C. H. Seong, T. I. Jang, K. W. Jung, M. S. Kang, and S. W. Park, 2011. Effects of reclaimed wastewater irrigation on paddy rice yields and fertilizer reduction using the DSSAT model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 67-74 (in Korean).
 23. Jimenez, B., 2005. Treatment technology and standards for agricultural wastewater reuse: a case study in Mexico. *Irrigation and Drainage* 54 (Suppl. 1): S22-S33.
 24. Jung, S. H., and Y. J. Joo, 2005. A study on the analysis of policy effects for system dynamics methodology: focusing on the sex trade special law. *Korean Public Administration Review* 39(1): 219-236 (in Korean).
 25. Jung, Y. H., 2012. Application and Verification of System Dynamics Model for Media Diversity in an Era of Multimedia and Multichannel. Ph. D. diss., Seoul National University, Korea (in Korean).
 26. Kang M. S., S. M. Kim, S. W. Park, J. J. Lee, and K. H. Yoo, 2007. Assessment of reclaimed wastewater irrigation impacts on water quality, soil, and rice cultivation in paddy fields. *Journal of Environmental Science and Health part A* 42: 439-445.
 27. Khan S., L. Yufeng, and A. Ahmad, 2009. Analysing complex behavior of hydrological systems through a system dynamics approach. *Environmental Modelling & Software* 24(12): 1363-1372.
 28. Kim, D. H., T. H. Moon, and D. H. Kim, 1999. *System Dynamics*. Seoul, Korea: Daeyoung Moonhwasa (in Korean).
 29. Kim, D. H., 2004, *Systems Thinking: Thinking Through Systems*. Seoul, Korea: Sunhaksa (in Korean).
 30. Kim, K. H., C. S. Yi, J. H. Lee, and M. P. Shim, 2007. Framework for Optimum Scale Determination for Small Hydropower Development Using Economic Analysis. *Journal of Korea Water Resources Association* 40(12): 995-1005.
 31. Kim, H. D., K. Y. Lee, and Y. J. Lee, 2009. Application of wastewater reuse system for agriculture: status and prospects. *Water for Futrue* 42(9): 36-43 (in Korean).
 32. Kim, S. D., A. Y. Lee, J. W. Lee, and T. W. Kim, 2011. Spatio-Temporal Analysis of Future Extreme Drought Events Using a Conceptual Soil Water Model. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 11(6): 349-356 (in Korean).
 33. Korea Development Institute (KDI), 2008. Study on the revision for general guide to perform preliminary feasibility test (in Korean).
 34. Korean Statistical Information Service (KOSIS), Agricultural census data. <http://kosis.kr>. Accessed 15th Dec. 2012.
 35. Lee, J. H., H. I. Kwon, Y. S. Kim, and M. H. Lee, 2007. Causal Loop Diagramming of Locatin Conflict on LULU (Locally Unwanted Land Use) Facilities and Policy Alternatives. *Korean System Dynamics Research* 8(1): 151-171 (in Korean).
 36. Liberti, L., M. Notarnicola, and A. Lopez, 2000. Advanced Treatment for Municipal Wastewater Reuse in Agriculture. III - Ozone Disinfection. *Ozone Science & Engineering* 22(2): 151-166.
 37. Mara, D., and S. Cairncross, 1989. *Guidelines for the*

- Safe Use of Wastewater and Excreta in Agriculture and Aquaculture*. Geneva: World Health Organization.
38. Ministry of Environment (ME), 2012. The analysis results of management condition of public wastewater treatment plants in 2011 (in Korean).
 39. Meadows, D. H., 1980. The unavoidable a priori. In *Elements of the System Dynamics Method*, ed. J. Randers, 23-57. Cambridge, MA: The MIT Press.
 40. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2011. Long-Term Plans for Water Resources (in Korean).
 41. Nasiri F., T. Savage, R. Wang, N. Barawid, and J. B. Zimmerman, 2012. A system dynamics approach for urban water reuse planning: a case study from the great lakes region. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*: 1-17.
 42. Park, S. W., 2007. Application of wastewater reuse system for agriculture. code#4-5-2. Seoul National University, Korea (in Korean).
 43. Park, S. W., 2011. Application of integrated technologies for wastewater reclamation and reuse system for agriculture. code#4-5-3. Seoul National University, Korea (in Korean).
 44. Peasey A. U., D. Blumenthal, D. Mara, and G. Ruiz-Palacios, 2000. *A review of policy and standards for wastewater reuse in agriculture: a Latin American perspective*. Task No: 68 Part II. London, UK: WELL study.
 45. Pereira, B. F. F., Z. L. He, P. J. Stoffella, and A. J. Melfi, 2011. Reclaimed wastewater: Effects on citrus nutrition. *Agricultural Water Management* 98: 1828-1833.
 46. Petterson, S. R., N. Ashbolt, and A. Sharma, 2001. Microbial risks from wastewater irrigation of salad crops: a screening-level risk assessment. *Water Environment Research* 72: 667-672.
 47. Qi, J., L. Li, and H. Ai 2009. A systems dynamics approach to competitive strategy in mobile telecommunication industry. *Systems Research and Behavioral Science* 26(2): 155-168.
 48. Richmond, B., 1993. Systems thinking: critical thinking skills for the 1990s and beyond. *System Dynamics Review* 9(2): 113-133.
 49. Ryu J. H., B. Contor, G. Johnson, R. Allen, and J. Tracy, 2012. System dynamics to sustainable water resources management in the eastern snake plain aquifer under water supply uncertainty. *Journal of the American Water Resources Association* 48(6): 1-17.
 50. Shin, D. I., 2011. Value Proposition Modelling and Analysis for Business Models of Product-Service Systems Using System Dynamics. Master's Thesis, Seoul National University, Korea (in Korean).
 51. Stave, K. A., 2003. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *Journal of Environmental Management* 67: 303-313.
 52. Stevens, D. P., M. J. McLaughlin, and M. Smart, 2003. Effects of long-term irrigation with reclaimed water on soils of the northern Adelaide plains, SA. *Australian Journal of Soil Research* 41: 933-948.
 53. Vasiloglou V., F. Lokkas, and G. Gravanis, 2009. New tool for wastewater treatment units location. *Desalination* 248: 1039-1048
 54. Vlachos, D., P. Georgiadis, and E. Iakovou, 2007. A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. *Computers & Operations Research* 34: 367-394.
 55. Weick, K. E., 1979. *The social psychology of organizing*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.
 56. World Health Organization (WHO), 2006. *Guidelines for the safe use of wastewaters, excreta and greywater*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
 57. Yang H., and K. C. Abbaspour, 2007. Analysis of wastewater reuse potential in Beijing. *Desalination* 212: 238-50.
 58. Yeo, K. D., C. S. Yi, G. H. Kim, and M. P. Shim, 2009. Estimation of Water Quality Improvement Benefit Using Replacement Cost Approach. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(4): 343-353.