

# 하수도 시스템의 효율적인 운영 및 유지관리를 위한 시스템다이내믹스 모형의 개발

## Development of a System Dynamics Model for the Efficient Operation and Maintenance of Sewerage Systems

박수완\* / 이태근\*\* / 김봉재\*\*\* / 김태영\*\*\*\*

Park, Suwan / Lee, Taegun / Kim, Bong Jae / Kim, Taeyoung

### Abstract

In this paper, the feedback loop mechanisms among the operational indices and exogenous variables of a sewerage system that are inherent in the operation and maintenance of a sewerage system were identified using the System Dynamics (SD) modeling methodology. The identified feedback loops were used to develop a SD computer simulation model that can be used to predict future operational conditions of a sewerage system and identified the efficient ways of operation. The data of Busan metropolitan city sewerage system was applied to verify the developed SD model and predict future operational conditions of the system. As a result, it was predicted that sewage treatment efficiency, volume of sewage treatment and cost recovery rate will be gradually increased, whereas service rate which was already very close to the target will remain almost the same as the current value. Furthermore, sensitivity analysis concerning some operational indices was performed in order to discover the policy leverage. As a result, it was found that the exogenous variables related to the pipe maintenance had a great effect on facility using rate, volume of sewage treatment as well as sewage treatment efficiency.

**Keywords** : feedback loop, operational indices, policy leverage, sewerage system, system dynamics

### 요 지

본 논문에서는 시스템 다이내믹스(System Dynamics, SD) 방법론에 입각하여 하수도 시스템의 운영지표들과 이에 영향을 미치는 외부변수들로 구성된 피드백 루프 메커니즘(Feedback Loop Mechanism)을 관로유지관리와 연관하여 규명하고, 외부변수의 변화에 따른 운영지표의 변화를 예측함으로써 하수도 시스템의 효율적인 운영 및 유지관리 방안을 모색할 수 있는 SD 컴퓨터 모의 모형(Computer Simulation Model)을 개발하였다. 개발된 모형에 부산광역시 하수도 시스템의 과거 운영 자료를 적용함으로써 모형을 검증하였고, 미래의 운영 상황을 예측하였다. 그 결과, 하수도보급률은 이미 목표치에 거의 도달하여 큰 변동이 없을 것으로 예측되었으며, 하수처리효율과 하수처리량, 요금현실화율은 점차 증가할 것으로 예측되었다. 또한 정책 지렛대의 발견을 위해 시스템에 큰 영향을 미치는 주요 운영지표를 선정하여 외부변수의 변화에 대한 민감도 분석을 수행하였는데, 그 결과 관로 유지관리와 연관된 외부변수는 하수처리효율의 변화뿐만 아니라 시설이용

\* 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 부교수 (e-mail: swanpark@pusan.ac.kr)  
Associate Prof. Dept. of Civil and Environmental Eng., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea

\*\* 교신저자, 부산대학교 대학원 사회환경시스템공학부 석사과정 (e-mail: leetg12@hanmail.net)  
Corresponding Author, Master's Course, Dept. of Civil and Environmental Eng., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea

\*\*\* K-Water (한국수자원공사) 울산권관리단 (e-mail: bong222@kwater.or.kr)  
Ulsan Regional Office, Korea Water Resources Corporation, 1404-3, Ok-dong, Ulsan 680-711, Korea

\*\*\*\* 정수기술단 상하수도부 (e-mail: tykim4470@hanmail.net)  
Dept. of Water and Sewerage, Jeongsu Enc., 203ho, Daeyang Building, Guseo-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-310, Korea

를, 하수처리량 등의 변화에도 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

**핵심용어** : 시스템다이나믹스, 운영지표, 정책 지렛대, 피드백 루프, 하수도시스템

## 1. 서 론

2007년 초 영국의 의학잡지 '브리티시 메디컬 저널(BMJ)'이 현대의학의 성과 15개를 선정하여 네티즌의 투표에 부친 결과 하수도와 깨끗한 물이 항생제와 백신 등을 제치고 1위를 차지하였는데, 이는 하수도와 깨끗한 물 등 위생시설의 발전이 20세기의 인간수명의 연장에 영향을 미쳤다는 것으로 평가되었기 때문이었다(조관형 등, 2008). 이와 같이 하수도는 오수 배제에 의한 보건위생의 향상과 더불어 우수 배제에 의한 침수범람의 방지, 도시 미관 증대, 하천의 수질보전 등 다양하고 중요한 역할을 수행하고 있다. 이처럼 하수도 사업은 도시의 위생 및 재해방지를 담당하고 있을 뿐 아니라 산업화 이후 희소자원이 된 수자원을 재생산해주는 역할까지 담당하게 되어 그 중요성이 높아지고 있다(김신결 등, 2007).

이에 따라 하수도 시스템의 효율적인 운영 및 유지관리와 이에 적합한 하수도 운영 정책 수립의 필요성 역시 커지고 있다. 이를 위해서는 하수도 시스템에 내재된 요소들 간의 관계를 파악하고 이를 구조화시켜야 할 필요가 있는데, 시스템다이나믹스(System Dynamics, SD)는 이러한 연구를 수행하는데 있어서 적합한 방법론이다. 시스템다이나믹스 모델은 시스템 내에 존재하는 정보 혹은 물질의 피드백(Feedback)을 직접적으로 모델링함으로써 시스템의 개별 구성에 대한 모델링보다는 시스템 전체의 행태 변화의 모의에 중점을 둔다. 이러한 방법론을 이용함으로써 시스템의 개별 구성요소를 작동시키는 기제들을 정보 혹은 물질의 피드백 체계에 따라 연결하는 것이 가능해지며, 개별 인자의 변화가 시스템 내의 다른 구성에 미치는 영향을 파악하는 것이 용이하게 된다(박수완 등, 2006).

SD 방법론을 활용한 물 분야에서의 국내 연구사례로는 김신결 등(2006)의 시스템다이나믹스법을 이용한 서울특별시 장기 물수요 예측, 박혜연(2006)의 시스템 다이나믹스를 이용한 장래 수도사업 성과 예측, 이상은 등(2006a)의 시스템다이나믹스를 이용한 부에노스아이레스 수도사업 양여계약사례의 고찰, 이상은 등(2006b)의 시스템 다이나믹스를 이용한 투명성의 수도사업에 대한 영향 분석, 이상은 등(2007a)의 수도시스템 사업성과의 통합

적 분석을 위한 시스템다이나믹스 방법론 적용, 이상은 등(2007b)의 시스템 다이나믹스를 이용한 도시 물수요 장기 예측의 동적 모델 연구, 박수완 등(2010)의 상수도 시스템의 운영 및 유지관리 의사결정 지원을 위한 시스템 다이나믹스 모형의 개발 등 주로 상수도 시스템의 운영에 관한 연구가 활발하게 이루어져왔으며, 하수도 시스템 분야에 적용된 사례는 박수완 등(2006)의 활성슬러지 하수처리시설 운영 및 유지관리를 위한 시스템 다이나믹스 모델의 모의 방법 등이 있다.

또한 국외 연구사례로는 Ahmad and Simonovic(2000)의 홍수 조절을 위한 저수지 운영문제, Teegavarapu and Simonovic(2000)의 수력발전을 위한 다중 저수지의 연계적 운영 문제, Stave(2000)의 Las Vegas의 물 문제 해결을 위한 정책 결정, Ahmad and Simonovic(2001)의 홍수예방 정책의 영향 평가를 위한 의사결정도구로서의 SD에 대한 연구, Li and Simonovic(2002)의 북미 대초원 유역에서의 해설(Snowmelt)에 의한 홍수 예측, Simonovic(2002)의 지구 수자원 모델(World Water Model), Simonovic and Li(2003)의 기후변화가 홍수예방시스템의 성능에 미치는 영향에 대한 연구 등 주로 수자원 분야의 계획 및 운영에 관한 연구가 활발하게 이루어져왔다.

이에 본 논문에서는 SD 방법론에 입각하여 하수도 시스템의 전체적인 메커니즘을 규명하고, 시스템 구성요소들의 변화에 따른 운영지표의 변화를 예측함으로써 하수도 시스템의 효율적인 운영 및 유지관리를 위한 방안을 제시할 수 있는 SD 모형을 개발하였다. 이를 연구대상지역인 부산광역시 하수도 시스템에 적용시켜 모형을 검증하였으며, 시스템의 운영 및 유지관리 정책방향에 큰 영향을 미칠 수 있다고 판단되는 하수도 시스템의 정책적 구성 요소를 발견하였다.

## 2. 하수도 시스템 SD 모형의 구축을 위한 피드백 루프 메커니즘

본 연구에서 개발된 SD 모형의 피드백 루프 메커니즘은 Fig. 1과 같다. Fig. 1의 각 투자비와 하수도 주요 운영지표의 인과관계를 설명하면 다음과 같다. 관로확장투자비(Investment Cost for Pipe Extension)는 하수도보급률

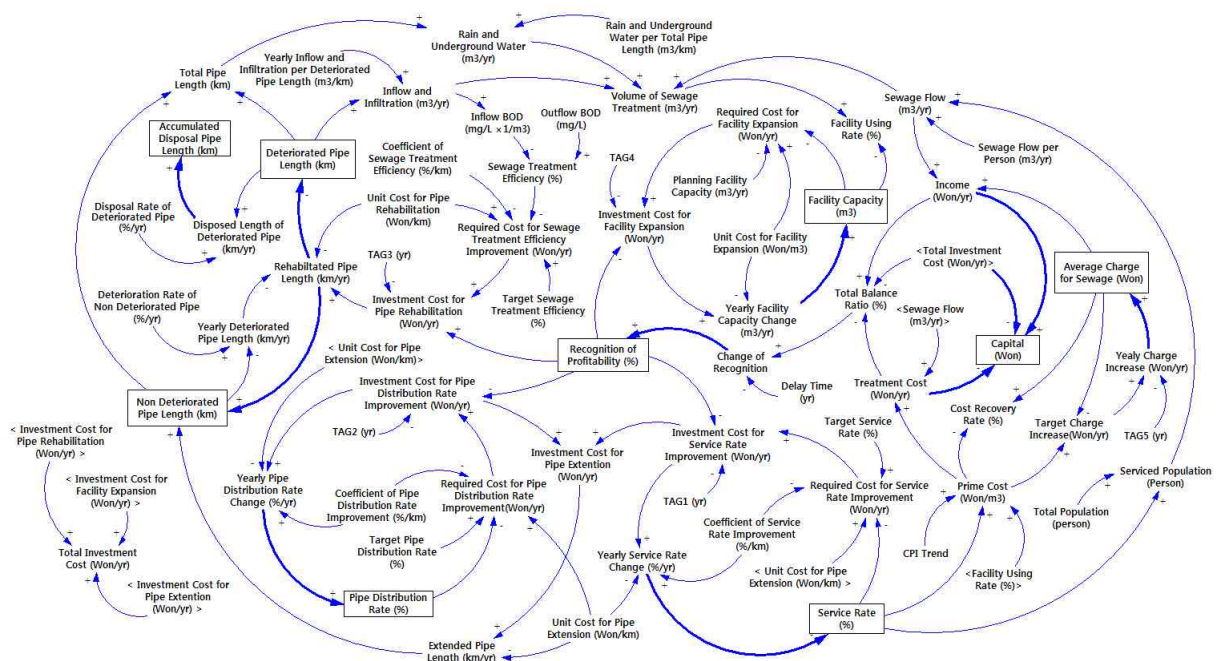


Fig. 1. Causal Diagram of the System Dynamics Model for Entire Sewerage Systems

향상투자비 (Investment Cost for Service Rate Improvement)와 하수관거보급률향상투자비 (Investment Cost for Pipe Distribution Rate Improvement)로 구성되어 있다. 이는 하수도보급률 (Service Rate)과 하수관거보급률 (Pipe Distribution Rate)과의 피드백 인과관계를 형성하고 있는데, 관로확장투자비가 증가하게 되면 하수도보급률과 하수관거보급률은 상승하게 되지만, 시간의 흐름에 따라 각각의 목표율과의 차이가 감소하면서 각각의 증가폭이 줄어들어 관로확장투자비는 전년도에 비하여 감소하게 된다.

관로갱생투자비 (Investment Cost for Pipe Rehabilitation)는 하수처리효율 (Sewage Treatment Efficiency)과의 피드백 인과관계를 형성하고 있는데, 관로갱생투자비, 즉 노후관로의 보수 및 교체, 준설 등을 위한 투자비가 증가하면 노후관로의 갱생길이가 증가하게 되고, 이에 따라 불명수량은 감소하게 되면서 관로 내 하수와의 희석을 줄여 하수처리장의 하수처리효율은 향상시키지만, 시간의 흐름에 따라 목표율과의 차이가 감소하면서 그 증가폭이 줄어들어 관로갱생투자비는 전년도에 비하여 감소하게 된다.

시설확장투자비 (Investment Cost for Facility Expansion)는 시설용량 (Facility Capacity)과 피드백 인과관계를 형성하고 있는데, 시설확장투자비, 즉 공공하수처리장의 확장을 위한 투자비가 증가하면, 시설용량이 증가하게 되고, 하수의 처리능력향상을 기대할 수 있게 된다. 그러

나 시간의 흐름에 따라 계획시설용량 (Planning Facility Capacity)과 시설용량과의 차이가 감소하면서 증가폭이 줄어들어 시설확장투자비는 전년도에 비하여 감소하게 된다. 따라서 이들 주요 운영지표에 대한 피드백 인과관계는 시간의 흐름에 따라 안정되는 안정화 피드백 (Stabilizing Feedback) 즉, 음 (-)의 피드백 (Negative Feedback)으로 모델링되었다.

### 3. SD 모형의 검증 및 하수도 시스템의 운영지표 예측

SD 모형은 크게 저장변수 (Stock Variable)와 흐름변수 (Flow Variable) 및 보조변수 (Converter)로 구성된다. 저장변수는 SD모형에서 구현하는 모의 기간의 초기 값 (Initial Value)을 나타내고, 흐름변수는 저장변수의 값을 변화시키며, 보조변수는 외부변수 (Exogenous Variable)로서 시스템의 구조와 상관없이 시스템의 외부에서 독립적으로 작용하며 시스템의 구동을 위해 입력되는 식이나 값이다. 이러한 변수들은 Stella Program을 이용하여 구현되었으며, Fig. 3에 Fig. 1의 흐름을 토대로 개발된 SD 모형을 나타내었다. 본 연구에서는 전체 하수도 시스템에 대한 모형을 크게 하수처리흐름 모형 (Sewage Treatment Flow), 하수관거 유지관리모형 (Pipe Network Maintenance), 하수도 시스템 재정 모형 (Sewerage System Business

**Table 1. Stock and Exogenous Variables of the Sewage Treatment Flow Model**

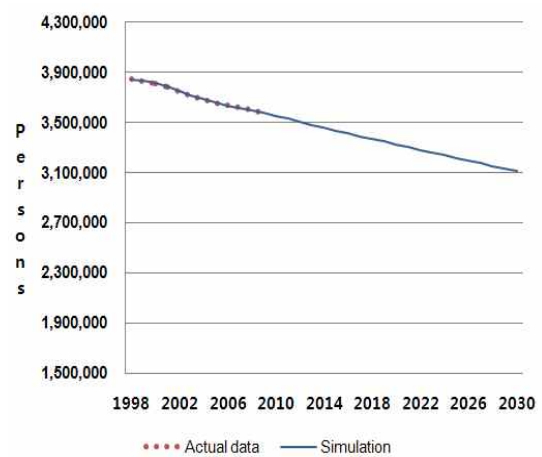
Variable Type	Variable Name	Initial Value or Function for Time	Unit
Stock Variable	Facility Capacity	469,025,000	$m^3$
Exogenous Variable	Sewage Flow per Serviced Person	if time $\leq$ 2009 then $143.29 \times \text{time}^{-0.107}$ else 110	$m^3$
	Rain and Underground Water per Total Pipe Length	$11,774 \times \ln(\text{time}) - 15,146$	$m^3$
	Outflow BOD	$8.5709 \times \exp(-0.062 \times \text{time})$	$mg/L$
	Yearly Infiltration and Inflow per Deteriorated Pipe Length	$109,247 \times \text{time}^{-0.145}$	$m^3/km$
	Total Population	Fig. 2.	Person

**Table 2. Stock and Exogenous Variables of the Pipe Network Maintenance Model**

Variable Type	Variable Name	Initial Value or Function for Time	Unit
Stock Variable	Non Deteriorated Pipe Length	3,625	$km$
	Deteriorated Pipe Length	1,553	$km$
	Accumulated Disposed Pipe Length	25.86	$km$
Exogenous Variable	Unit Cost for Pipe Extension	$272,583 \times \text{time}^{0.0728}$	1,000 won/ $km$
	Unit Cost for Pipe Rehabilitation	$25,208 \times \text{time}^{0.2711}$	1,000 won/ $km$
	Deterioration Rate of Non Deteriorated Pipe	if time $\leq$ 1999 then 0.081 else if time $\leq$ 2002 then 0.077 se if time $\leq$ 2006 then 0.050 else if time $\leq$ 2009 then 0.031 else 0.025	1/yr
	Disposal Rate of Deteriorated Pipe	if time $\leq$ 2002 then 0.014 else if time $\leq$ 2004 then 0.013 else if time $\leq$ 2006 then 0.012 else if time $\leq$ 2009 then 0.011 else 0.010	1/yr

Finance)의 3가지 모형으로 구성하였다. 개발된 SD 모형의 구동을 위하여 연구대상지역으로 선정된 부산광역시의 1998년부터 2009년까지 하수도시스템 운영지표에 대한 자료(하수도통계, 1999~2010)를 취합한 후, SD 모형에 적용시켜 구현된 데이터가 과거의 실제 하수도시스템 운영지표를 적절하게 모사하는지 비교, 검증하였으며, 모의 기간을 2030년까지 설정하여 하수도 주요 운영지표에 대한 변화를 모의하였다.

Table 1~3은 개발된 SD 모형의 저장변수에 입력되는 초기 값과 외부변수에 입력되는 값 또는 시간 함수식을 나타내고 있다. 저장변수의 초기 값으로는 1998년도 통계 자료를 사용하였으며, 외부변수의 값 또는 시간함수식은 1998년부터 2009년까지의 통계자료를 토대로 이를 분석하여 산정하였다.



**Fig. 2. Prediction of Total Population in Busan Metropolitan City**

Table 3. Stock and Exogenous Variables of the Sewerage System Business Finance Model

Variable Type	Variable Name	Initial Value or Function for Time	Unit
Stock Variable	Service Rate	0.690	1/yr
	Pipe Distribution Rate	0.630	1/yr
	Recognition of Profitability	0.40	-
	Average Charge for Sewage	0.190	1,000 won/yr
Exogenous Variable	CPI Trend	$3.0179 \times \text{time} + 75.911$	yr
	Unit Cost for Facility Expansion	$1.7051 \times \text{time}^{0.5281}$	1,000 won/yr
	Coefficient of Pipe Distribution Rate Improvement	$-9 \times 10^{-6} \times \ln(\text{time}) + 0.0001$	(1/yr)/km
	Coefficient of Service Rate Improvement	$0.0006 \times \text{time}^{-1.163}$	(1/yr)/km
	Coefficient of Sewage Treatment Efficiency Improvement	$-7 \times 10^{-6} \times \ln(\text{time}) + 4 \times 10^{-5}$	(1/yr)/km
	Prime Cost	$0.288 \times \exp((0.71721 \times \ln(\text{CPI Trend}/82.60)) + (1.05048 \times \ln(\text{Service Rate}/0.69)) + (0.10612 \times \ln(\text{Facility Using Rate}/71.8)))$	1,000 won/yr
	TAG1	if time <=2004 then 5.5 else if time <= 2006 then 0.4 else 4.5	yr
	TAG2	5	yr
	TAG3	5	yr
	TAG4	2.5	yr
	TAG5	6	yr
	Target Sewage Treatment Efficiency	1	1/yr
	Target Service Rate	1	1/yr
	Target Pipe Distribution Rate	1	1/yr
Planning Facility Capacity	800,518,000	m <sup>3</sup>	
Delay Time	1	yr	

하수처리흐름 모형에서는 하수도사용량 (Sewage Flow), 불명수량 (Inflow and Infiltration), 및 우수량과 지하수량 (Rain and Underground Water)의 변화에 따른 하수처리량 (Volume of Sewage Treatment)의 변동과 유입 BOD (Inflow BOD)에 의한 하수처리효율의 변화 및 시설용량에 대한 하수처리량의 비율, 즉 시설이용률 (Facility Using Rate)의 변화를 모의하였다. 여기서 시설용량 (Facility Capacity)은 저장변수로 모델링 하였는데, 시설확장단가 (Unit Cost for Facility Expansion)와 시설확장투자비에 따라 시설용량이 변화한다고 모의하였다. 하수도사용량은 가정 및 지하수사용 등을 통해 발생되어 하수도를 통해 흘러가는 수량으로서 하수도요금부과의 기준이 되며 하수도보급

률에 따라 변하는 처리인구 (Served Population)의 증감에 따라 변동되도록 모델링하였다. 여기서 총인구 (Total Population)는 과거의 통계자료를 토대로 등비급수 식을 사용하여 Fig. 2와 같이 예측하였다.

불명수량은 유입수와 침입수로 구분되는데, 불명수량에 대해서 국내에서는 아직까지 구체적인 조사 자료가 미흡하다. 그러나 이현동 (2002)은 “환경부 자료에 의하면 발생하수를 100%로 가정할 때, 이중 36%는 하수관에서 누수되어 버리고, 43%의 불명수가 유입되어 하수종말처리시설에 도달하는 하수는 107%이다”라고 불명수량에 대해서 언급한 바가 있다. 이에 따라 본 논문에서는 하수도사용량을 발생하수로 보고 하수도사용량의 43%를 불명수량

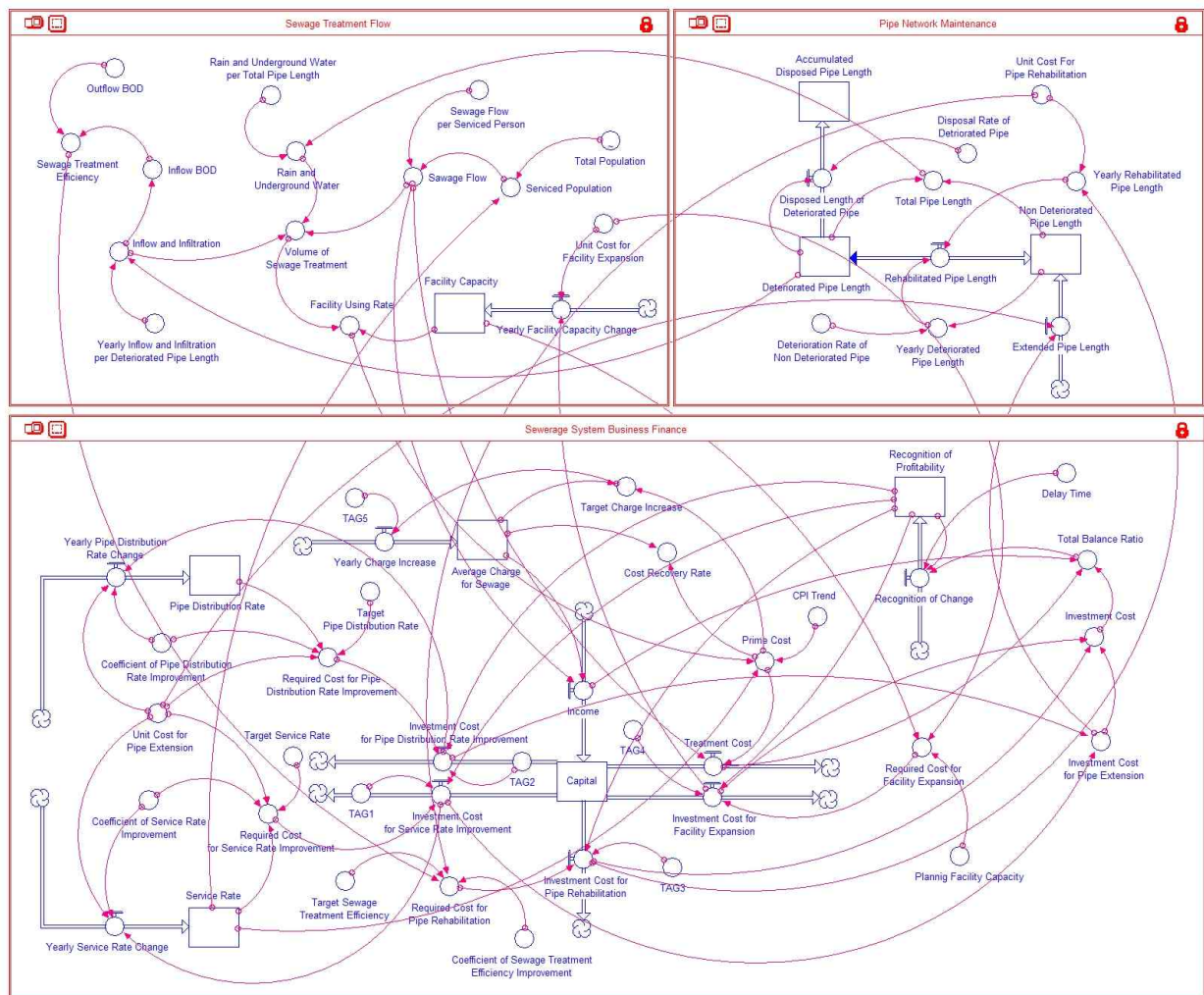


Fig. 3. Stock and Flow Diagram of the System Dynamics Model for Entire Sewerage Systems

으로 가정하여 노후관로 길이 (Deteriorated Pipe Length)의 변화에 따라 불명수량의 증감을 모델링할 수 있도록 하였다. 지하수량과 우수량 역시 하수도사용량, 불명수량과 더불어 하수처리장으로 유입되는데, 이들은 배수면적의 영향을 받기 때문에 이와 연관된 총 관로길이의 영향을 받는 것으로 모델링하였다.

따라서 하수처리량은 하수도사용량, 불명수량, 지하수량과 우수량의 변동에 따라 달라질 수 있으며, 이는 각각 인구, 노후관로길이, 총 관로길이 (Total Pipe Length)의 영향을 받는 것으로 모델링하였다. 한편 노후관로의 증가로 불명수량이 증가하게 되면 관내 하수와의 희석으로 BOD 농도가 감소되어 결국에는 하수처리장의 하수처리효율을 저하시키는데, 이러한 관계를 고려하여 본 연구의 SD 모형에서는 불명수량의 변동에 따른 유입 BOD와 하수처리효율의 변화를 모델링하였다.

하수관로 유지관리모형에서는 관로의 상태에 따라 노후

화되어 불명수량과 누수량이 발생할 수 있는 노후관로, 노후가 발생되지 않은 관로의 상태가 비교적 양호한 노후하지 않은 관로 (Non Deteriorated Pipe Length), 노후관로의 상태에서 폐기처분되는 관로인 폐기관로로 구분하여 관로 확장 및 갱생투자비의 변화와 시간의 흐름에 따른 노후관로길이, 노후하지 않은 관로의 길이, 총 관로길이 및 누적 폐기관로길이 (Accumulated Disposed Pipe Length)를 모의하였다. 여기서 노후관로길이, 노후하지 않은 관로길이, 누적 폐기관로길이의 초기값은 모형의 검증과정에서 시행착오를 통하여 초기년도의 통계자료를 토대로 총 관로길이의 30%, 70%, 0.5%로 각각 가정하여 저장변수로 나타내었으며, 노후하지 않은 관로의 노후율 (Deterioration Rate of Non Deteriorated Pipe)과 노후관로의 폐기율 (Disposal Rate of Deteriorated Pipe)과 같은 외부변수는 연구대상기간의 통계자료를 토대로 모형 검증과정에서의 시행착오를 통하여 산정하였다. 2009년 이후의 노후

율은 미래에 예상되는 관종의 개량과 관로시공기술의 발전 및 유지관리의 향상 등을 고려하여 2009년 이전에 비하여 노후율이 낮아질 것으로 가정하였다. 또한 2009년 이후의 폐기율은 2009년 이전에 가정한 폐기율 변화의 추세에 따라 가정하였다.

하수도 재정 모형에서는 하수도 사업에서 발생하는 수익 (Income)과 각 투자비 및 처리비용 (Treatment Cost)에 대하여 모델링하였다. 여기서 하수도보급률, 하수관거 보급률, 수익성인식수준, 하수도요금, 및 자본 (Capital)은 초기년도의 통계자료를 토대로 저장변수로 나타내었으며, 소비자물가지수 (CPI Trend)는 1998년부터 2009년까지의 수치를 이용하여 시간함수식으로 나타내었다. 또한 각 투자비에 대한 향상계수 (하수도보급률, 하수관거보급률, 하수처리효율)는 연구대상기간의 통계자료를 토대로 모형의 시행착오를 통하여 실제 투자비를 구현하는데 있어서 가장 부합하는 식을 선정하였으며, 주요 운영지표의 목표 달성시간 (TAG1~TAG4)을 조절하여 각 운영지표의 향상에 필요한 투자비를 선정하는 것으로 모델링하였고, 계획시설용량은 부산광역시 하수도정비기본계획 (2005)을 토대로 선정하였다.

한편 수익은 하수도세입의 약 25% 정도를 차지하는 하수도요금 (Average Charge for Sewage)으로 모델링하였다. 연간 하수도요금의 인상분 (Yearly Charge Increase)은 하수도요금과 처리원가 (Prime Cost)의 차이에 따라 산정되지만, 하수도요금 목표달성시간 (TAG5)에 따라 각 년도에 일괄적으로 수도요금 인상분이 부과되는 것을 조절하여 단계적인 요금 인상을 할 수 있도록 모의하였다. 처리원가는 관련 운영지표들과의 회귀분석을 통해 하수도보급률과 시설이용률과의 상관관계가 가장 적절한 조합으로 분석되었기 때문에 이들을 고려한 회귀식으로 나타내었으며, 요금현실화율 (Cost Recovery Rate)은 처리원가에 따른 하수도요금의 인상분 분배에 따라 변동되도록 모델링하였다. Eqs. (1)~(5)은 하수도 시스템의 주요 운영지표를 식으로 낸 것이다.

$$\text{하수도보급률} = \frac{\text{처리인구}}{\text{총인구}} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$\text{하수관거보급률} = \frac{\text{총관로연장}}{\text{계획연장}} \times 100(\%) \quad (2)$$

$$\text{하수처리효율} = \frac{\text{유입BOD} - \text{유출BOD}}{\text{유입BOD}} \times 100(\%) \quad (3)$$

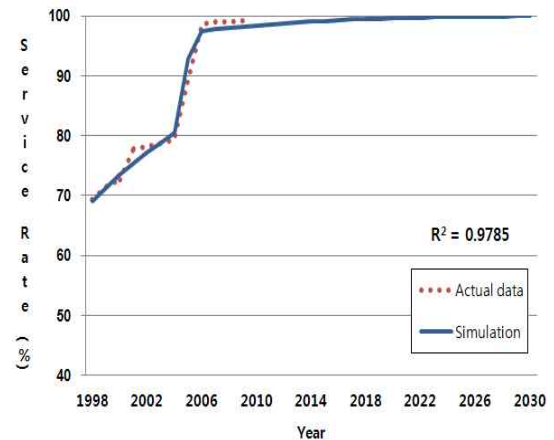


Fig. 4. Verification and Prediction of the Service Rate

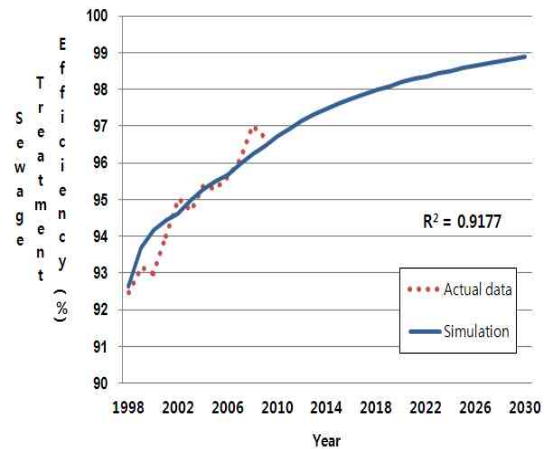


Fig. 5. Verification and Prediction of the Sewage Treatment Efficiency

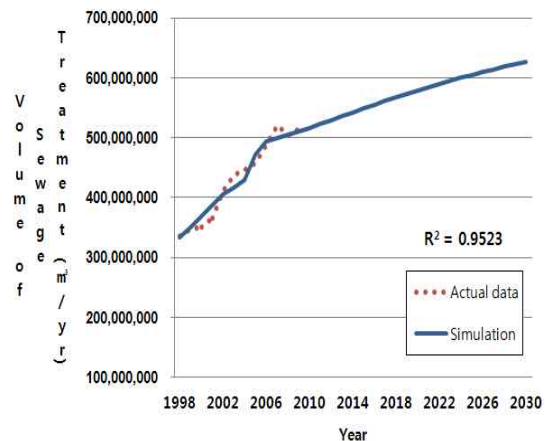


Fig. 6. Verification and Prediction of the Volume of Sewage Treatment

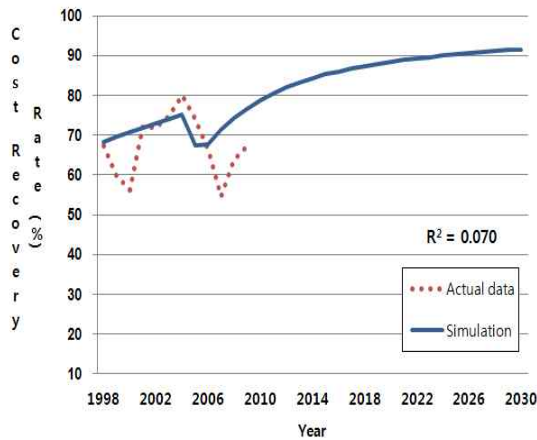


Fig. 7. Verification and Prediction of the Cost Recovery Rate

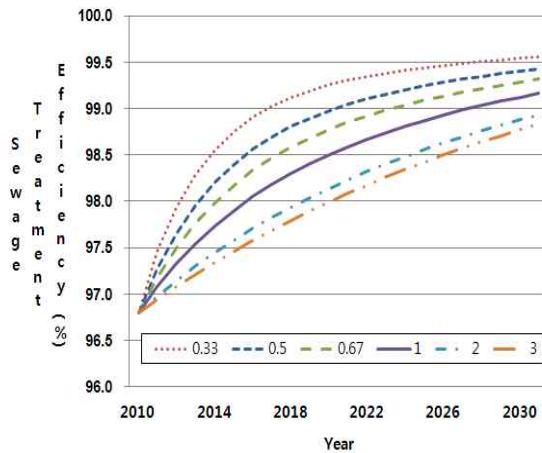


Fig. 8. Sewage Treatment Efficiency for Changes in 'TAG3'

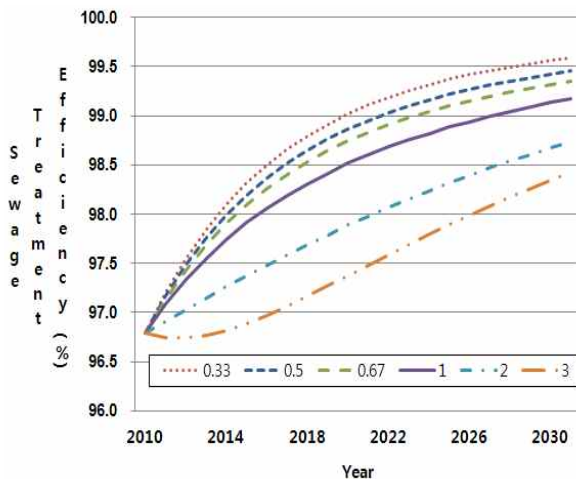


Fig. 9. Sewage Treatment Efficiency for Changes in 'Deterioration Rate of Non Deteriorated Pipe'

$$\text{시설이용률} = \frac{\text{하수처리량}}{\text{시설용량}} \times 100(\%) \quad (4)$$

$$\text{요금현실화율} = \frac{\text{하수도요금}}{\text{처리원가}} \times 100(\%) \quad (5)$$

위 설명을 토대로 하수도 시스템의 주요 운영지표를 모의하고 실제 통계자료와 비교해본 결과, 개발된 SD 모형은 Fig. 4~7에 나타난 바와 같이 연구대상기간의 주요 운영지표에 대한 통계자료를 적절하게 모사하고 있으며, 또한 모형의 검증과정에서 시행착오를 통해 산정된 수치는 연구대상기간의 하수도 시스템의 전반적인 흐름과 운영 상황을 적절하게 나타내고 있는 것으로 사료된다.

여기서 요금현실화율에 대한 SD 모형의 모의 결과는 실제 운영 자료와 차이를 보이는 것으로 나타났는데, 이러한 이유는 처리원가가 회귀분석에 의해 산정되면서 오차가 발생하였기 때문이다. 하지만 요금현실화율의 변화에 대한 경향은 적절하게 표현된 것으로 사료된다.

#### 4. 하수도 시스템의 주요 운영지표에 대한 민감도 분석 및 정책 지렛대의 발견

시스템의 변화 양상에 큰 영향을 미치는 정책 지렛대는 시스템의 운영 및 유지관리 정책을 나타내는 SD 모형 내 외부변수의 민감도를 분석함으로써 파악될 수 있다(박수완 외, 2010). 본 논문에서는 하수관거보급률, 하수처리효율, 요금현실화율을 민감도 분석을 위한 하수도 시스템의 주요 운영지표로 선택하였고, 하수도보급률 목표달성시간(TAG1), 하수관거보급률 목표달성시간(TAG2), 하수처리효율 목표달성시간(TAG3), 시설용량 목표달성시간(TAG4), 하수도요금 목표달성시간(TAG5), 노후하지 않은 관로의 노후율, 노후관로의 폐기율을 정책 지렛대 발견을 위한 외부변수로 선택하였다.

주요 운영지표와 외부변수의 선택 이후, Tables 2~3에 나타난 각각의 외부변수 값을 기준으로 1/3배, 1/2배, 2/3배, 1배, 2배, 3배로 변화를 주어 2009년 이후 즉, 2010년부터 2030년까지 민감도분석을 수행함으로써 주요 지표의 변화를 관찰하였고, 부산광역시 하수도 시스템의 운영 및 유지관리에 관한 정책 지렛대를 도출하였다.

Tables 4 and 5는 민감도 분석의 결과로서 Table 4는 주요 운영지표에 가장 민감하게 반응하는 외부변수의 최대변화율 및 최대변화시점을 정량적으로 나타낸 것이며, Table 5는 민감도 분석기간의 초기년도인 2010년과 Table



**Table 4. Policy Leverage for Main Operational Indices of the Sewerage Systems**

Main Operational Index	Exogenous Variable	Changed Rate (%)	Max. Occurrence Time (yr)
Sewage Treatment Efficiency	TAG3 (5.0 yr → 1.67 yr)	0.87% (98.1% → 98.9%)	2016
	Deterioration Rate of Non Deteriorated Pipe (0.025 → 0.008)	0.52% (98.6% → 99.1%)	2021
Pipe Distribution Rate	TAG2 (5.0 yr → 1.67 yr)	5.24% (92.5% → 97.3%)	2015
	TAG5 (6.0 yr → 2.0 yr)	0.38% (96.3% → 96.7%)	2019
Cost Recovery Rate	TAG5 (6.0 yr → 2.0 yr)	10.92% (86.2% → 95.7%)	2015
	TAG3 (5.0 yr → 1.67 yr)	0.68% (84.5% → 85.1%)	2014

**Table 5. Changes of Costs for Main Operational Indices of the Sewerage Systems**

Main Operational Index (Exogenous Variable)	Related Cost (Changed Time)	Time (yr)	Changes of Costs (1,000 won/yr)
Sewage Treatment Efficiency (TAG3)	Investment Cost for Pipe Rehabilitation (5.0 yr → 1.67 yr)	2010	7,998,010 → 23,395,790
		2016	7,567,530 → 12,409,620
Pipe Distribution Rate (TAG2)	Investment Cost for Pipe Extension (5.0 yr → 1.67 yr)	2010	53,599,140 → 155,751,060
		2015	40,194,620 → 40,229,290
Cost Recovery Rate (TAG5)	Average Charge for Sewerage (6.0 yr → 2.0 yr)	2010	0.416 (Initial Value)
		2015	0.496 → 0.552

4에서 나타난 최대변화시점에서 주요 운영지표에 큰 영향을 미치는 비용의 변화를 나타내었다. 또한 Figs. 8 and 9는 민감도 분석 대상의 주요 운영지표 중 하수처리효율에 대한 민감도 분석 변화를 나타낸 것이다.

예를 들면 하수처리효율에는 TAG3이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 이를 계속해서 5년으로 유지한다면 2010년에 7,998,010천원의 관로갱생투자비가 집행되면서 2016년에는 하수처리효율이 약 98%에 도달하며 7,567,530천원의 투자비가 집행되는 것으로 예측되었다. 하지만 TAG3를 1.67년으로 감소시킨다면 2010년에 23,395,790천원의 관로갱생투자비가 집행되면서 2016년에는 하수처리효율이 약 99%까지 도달하며 12,409,620천원의 투자비가 집행되는 것으로 예측되었다. 이는 초기에 많은 투자비 집행으로 인하여 하수처리효율이 목표에 가까워지면서 투자비가 감소한 영향으로 볼 수 있으며, 이때 2016년은 민감도 분석기간인 2010년에서 2030년까지의 기간 중 가장 큰 변화율을 나타낸 시점이다.

따라서 하수처리효율의 향상을 위해서는 TAG3을 줄여 관로갱생투자비를 증가시키는 것이 가장 효율적인 것으로 분석된다. 더 나아가 노후율과 같은 관로 유지관리

와 관련된 외부변수 역시 하수처리효율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 이는 노후율이 높을수록 노후관로가 증가함으로써 관내 불명수량 역시 증가함으로 인해 유입 BOD와 하수처리효율이 저하된다는 인과관계에 기인하며, 나아가 하수처리량과 시설이용률 등의 증가에도 큰 영향을 미치는 것으로 분석된다.

따라서 위와 같은 맥락으로 볼 때, 하수관거보급률의 향상을 위해서는 TAG2를 조절하여 관로확장투자비를 증가시키는 것이 가장 효율적인 것으로 분석된다. 또한 요금현실화율은 TAG5에 민감하게 반응하였는데, 요금현실화율의 향상을 위해서는 TAG5를 줄여 하수도요금을 인상시키는 것이 가장 효율적인 것으로 분석된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 SD 방법론에 입각하여 전체적인 하수도 시스템의 운영 메커니즘을 관로 유지관리와 관련하여 규명하였으며, 이를 토대로 시스템을 구조화시킴으로써 하수도 시스템의 미래 운영 상태를 모의하고 효율적인 운영 및 유지관리를 위한 정책적 구성 요소를 발견할 수 있

는 SD 모의 모형을 개발하였다.

- 1) 개발된 SD 모형에 부산광역시 하수도 시스템의 과거 운영 자료를 입력하여 모형을 구동시킨 후 모의 결과를 실제 과거 통계자료와 비교하였는데, 개발된 SD 모형은 연구대상기간의 주요 운영지표에 대한 통계 자료를 적절하게 모사하고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 하수도 시스템의 효율적인 운영 및 유지관리를 위한 정책적인 방안 즉, 정책 지렛대의 발견을 위해 하수도 시스템의 주요 운영지표와 이에 연관된 외부변수를 선정하여 이에 대한 민감도 분석을 수행하였고 이를 정량적으로 나타내었다. 그 결과, 하수관거보급률을 향상시키기 위해서는 TAG2를 줄여 관로확장투자비를 증가시키는 것이 가장 효율적인 것으로 분석되었으며, 이와 같은 맥락으로 볼 때, 하수처리효율의 향상을 위해서는 관로갱생투자비를 증가시키는 것이, 요금현실화율의 향상을 위해서는 하수도요금을 인상시키는 것이 가장 효율적인 것으로 분석되었다.
- 3) 관로의 노후율은 하수처리효율과 같은 하수의 질적 변화와 더불어 하수처리량, 시설이 용률 등과 같은 양적 변화에도 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었는데, 이러한 운영지표의 변화에는 노후율과 같은 관로 유지관리와 연관된 변수에 따른 영향뿐만 아니라 합류식 및 분류식 즉, 하수 배제방식에 따라서도 큰 영향을 받을 것으로 사료된다.
- 4) 하수 배제방식에 따른 추가적인 운영 자료가 확보되어 이를 고려한 SD 모형을 구축하게 된다면, 보다 정확한 하수도 운영지표의 변화를 모의할 수 있을 것으로 사료된다. 더 나아가 이러한 SD 모형을 다른 연구대상지역의 하수도 시스템에도 적용시켜 봄으로써 SD 모형의 보편적인 적용에 대한 적합성 평가와 타당성 검증이 함께 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 과제는 2010학년도 부산대학교 교수 국외 장기파견 지원비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

김신걸, 변신숙, 김영상, 구자용 (2006). “시스템 다이내믹스 방법을 이용한 서울특별시의 장기 물수요 예측.” **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제20권, 제2호, pp. 187-

196.

- 김신걸, 최태용, 구자용 (2007). “수행능 지표 (Performance Indicator)와 군집분석을 이용한 하수도시설 및 운영평가.” **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제21권, 제2호, pp. 165-175.
- 박수완, 김규리, 김봉재, 임기영 (2010). “상수도 시스템의 운영 및 유지관리 의사결정 지원을 위한 시스템다이내믹스 모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제7호, pp. 609-623.
- 박수완, 김봉재, 전환돈, 김인철 (2006). “활성슬러지 하수처리시설 운영 및 유지관리를 위한 시스템다이내믹스 모델의 모의에 관한 연구.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제22권, 제5호, pp. 905-912.
- 박혜연 (2006). 시스템 다이내믹스를 이용한 장래 수도사업 성과 예측. 석사학위논문, 한국과학기술원.
- 부산광역시 (2005), 하수도정비기본계획변경보고서.
- 이상은, 차동훈, 박희경 (2006a). “시스템 다이내믹스를 이용한 부에노스아이레스 수도사업 양여계약사례의 고찰.” **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제20권, 제1호, pp. 104-114.
- 이상은, 김현옥, 박희경 (2006b). “시스템 다이내믹스를 이용한 투명성의 수도사업에 대한 영향 분석.” **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제20권, 제4호, pp. 605-616.
- 이상은, 박혜연, 박희경 (2007a). “수도시스템 사업성과의 통합적 분석을 위한 시스템 다이내믹스 방법론 적용.” **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제21권, 제1호 pp. 65-73.
- 이상은, 최동진, 박희경 (2007b). “시스템 다이내믹스를 이용한 도시 물수요 장기 예측의 동적 모델 연구.” **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제21권, 제1호 pp. 75-82.
- 이현동 (2002). “Demo. Plant를 통한 발생하수량의 모니터링시스템 구축 및 현장 적용성 평가.” **수자원환경**, 수자원환경신문사, 제159호, pp. 68-74.
- 조관형, 권지향, 김태근, 박기영, 손인식, 우달식, 이순홍, 이원호 (2008). 최신 상하수도. 신광문화사, pp. 199-210.
- 환경부 (1999-2010), 하수도통계.
- Ahmad, S., and Simonovic, S.P. (2000). “System Dynamics Modeling of Reservoir Operation for Flood Management.” *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 14, No. 13, pp. 190-198.
- Ahmad, S., and Simonovic, S.P. (2001). “A decision-

- support tool for evaluation of impacts of flood management policies." *Hydrological Science and Technology*, AIH, Vol. 17, No. 1, pp. 11-22.
- Li, L., and Simonovic, S.P. (2002). "System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds." *Hydrological Processes*, Hydrol. Process, Vol. 16, No. 13, pp. 2645-2666.
- Simonovic, S.P. (2002). "World water dynamics : Global modeling of water resources." *Journal of Environmental Management*, Vol. 66, No. 3, pp. 249-267.
- Simonovic, S.P., and Li, L. (2003). "Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 129, No. 5, pp. 361-371.
- Stave, K.A. (2000). "Using system dynamics models to facilitate public participation in Water Resources management : a pilot study using the Las Vegas." *NV Water System. 18th International Conference of the System Dynamics Society*, Bergen, Norway, August 6-10.
- Teegavarapu, R.S.V., and Simonovic, S.P. (2000). "System dynamics simulation model for operation of multiple reservoirs." (CD ROM). Proc., *10th World Water Congress*, Melbourne, Australia.

논문번호: 11-106	접수: 2011.09.21
수정일자: 2011.11.23	심사완료: 2011.11.23