

# Development of a system dynamics computer model to assess the effects of developing an alternate water source on the water supply systems management

상수도 시스템 운영에 대한 대체 상수원 개발의 효과를 모의하기 위한 시스템다이나믹스 컴퓨터 모델의 개발

Suwan Park\* · So-Yeon Jung · Vahideh Sahleh

박수완\* · 정소연 · Vahideh Sahleh

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

**Abstract :** In this paper, a System Dynamics(SD) computer simulation model has been developed to assess the effects of developing and providing an alternate water source. A water service index was also developed to estimate the level of overall customer satisfaction on water supply service. Data from the Busan water supply service and the Korea Development Institute regarding the Nak Dong river bank storage development were utilized during the modeling processes. Some important indicators of the system under study were analyzed by the simulations of development of the alternate water source for Busan. The developed SD model and the water service index can be further utilized as a tool that can assess the extent and timing of an additional service improvement project.

**Key words :** alternate water source, computer model, simulation, system dynamics, water supply

**주제어 :** 대체수원, 컴퓨터 모델, 시뮬레이션, 시스템다이나믹스, 상수도

## 1. 서론

용수공급시스템에서의 대체수원 개발은 지방자치단체에서 기존 수원의 수질 또는 수량 문제를 해결하고 용수 소비자의 물 소비 만족도를 향상시키기 위한 목적으로 기존 수원을 대체할 새로운 상수원을 개발하는 것을 말하는 것으로서, 대부분의 경우 광역상수도의 형태로 추진된다. 우리나라에서는 1979년 7월에 수도권 I 단계 시설이 수도권 지역에 광역상수도 공급을 시작하였으며 16,155억 원의 예산으로 2017년까지 원주권을 비롯하여 전국적으로 7개의 광역상수도를 개발할 예정이다.

이러한 대규모의 예산이 소요되는 대체수원 개발 사업의 필요성과 타당성을 검증하기 위해 대체수원의 개발과정에서 사업 예비타당성 조사를 수행하는데, 예비타당성 조사는 대체수원 개발 사업의 계획단계에서 사업의 경제성 분석과 정책적 및 공학적 분석을 수행하여 사업수행의 전반적인 타당성을 검토하기 위한 것이다. 따라서 예비타당성 조사에서는 사업 시행 후의 구체적인 상수도 사업 운영 상황에 대한 예측은 수행되지 않고 있는 실정이다. 그러나 대체수원의 개발에 소요되는 비용과 그에 따른 상수도 사업 및 소비자에 미치는 영향을 고려할 때 사업의 효과를 정량적으로 평가하고 대체수원 개발 사업에 따른 용수 소비자의 상수도에 대한 만족도를 예측하여 상수도 시스템의 장기적인 운영을 지원할 수 있는 기법

의 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 Park *et al.*(2010)이 개발한 상수도 사업 모의를 위해 개발한 시스템다이내믹스(System Dynamics; SD) 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 보완 및 확장하여 대체수원 개발로 인한 효과를 상수도 사업의 측면에서 평가할 수 있는 SD 모델을 개발하였다.

시스템다이내믹스는 포레스터(Jay W. Forrester)의 '산업동태론(Industrial Dynamics, 1961)'에서 처음 소개된 이후 계속해서 도시동태론(Urban Dynamics), 세계동태론(World Dynamics)등으로 확대되었으며 최근에는 산업, 사회과학, 공학 등에 응용되기 시작하면서부터 시스템다이내믹스(system dynamics)라 불리게 되었다. 본 연구에서 사용된 SD 모델링 기법을 적용한 상수도 및 물관리 분야의 최근의 국내 연구 사례로는 Park *et al.*(2010)의 상수도 시스템의 운영 및 유지관리 지원을 위한 SD 모형, Kim *et al.*(2012)의 공업용수 공급시스템의 효율적인 운영을 위한 SD 모형, Park *et al.*(2012)의 하수도 시스템의 운영 및 유지관리 지원을 위한 SD 모형이 있으며, Park(2006)과 Lee *et al.*(2006)은 상수도 시스템의 운영·유지관리와 관련된 문제에 SD를 적용하였으나, 이들은 상수도 서비스 사업의 사업성과만을 고려하였다.

국외 연구 사례로는 Ryu *et al.*(2012)의 미국 서부 지역의 지하수 관리를 위해 미래의 수문기상학적 불확실성을 고려하여 개발한 SD 모형, Karamouz *et al.*(2011)의 이란 평원지역 수자원 시스템의 물 수요 및 공급과 관련된 다양한 정책을 평가하기 위한 SD 모형, de la Llata(2011)의 멕시코 도시 주위의 대규모 유역의 물 수요와 공급 시나리오 평가를 위한 SD 모형이 있다.

본 연구에서 개발된 SD 모델에 KDI(2012)의 낙동강 강변 여과수 사업 타당성 재조사 보고서의 자료를 적용하여 부산광역시 낙동강 강변 여과수가 공급될 경우 부산광역시 상수도사업의 장기적 운영을 예측하였다. 또한 전반적인 상수

도 서비스 만족도를 정량화할 수 있는 지표를 개발하였고, 이를 본 연구의 SD 모델링에 포함시켜 부산 지역 대체수원 개발 전후의 비교 분석 및 부산광역시의 장기적인 상수도 운영의 예측에 활용하였다.

## 2. 대체수원 개발의 효과 분석을 위한 SD 모델

### 2.1 개발된 SD 모델의 개요

본 연구에서는 대체수원을 통한 용수생산이 상수도 운영에 미치는 영향을 모델링하기 위하여 Park *et al.*(2010)의 상수도 운영 및 유지관리 SD 모형을 수정, 보완 및 확장하여 Water Supply, Pipe Maintenance, Water Supply Business Finance 및 Alternate Water Source sector로 구성되는 SD 컴퓨터 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 이 중 Water Supply 및 Pipe Maintenance sector는 Park *et al.*(2010)의 모델과 그 구조가 같으며, Fig. 1은 본 연구에서 개발된 Water Supply Business Finance 및 Alternate Water Source sector를 SD 모델링 소프트웨어인 STELLA를 이용하여 Stock and Flow Diagram(저장 및 흐름변수 그림) 형식으로 나타낸 것이다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 개발된 SD 모델을 창원 지역의 낙동강 강변 여과수 개발을 통하여 용수공급을 계획하고 있는 부산광역시의 상수도 사업에 적용하였다. 모델링 시 가정 사항은 다음과 같다. 첫째, 모델의 시뮬레이션 시작연도는 1999년도이고 모델링 기간은 60년으로 하여 종료되는 시점을 2058년도로 하였다. 둘째, 사업 전체의 물 생산량이 일정하게 유지되는 것으로 가정하여 대체수원으로부터의 용수생산이 시작되면 그 양만큼 기존 정수장의 물생산량은 감소되는 것으로 모델링하였다. 셋째, 대체수원에서 물 생산단가의 상승률은 기존 물 생산단가의 상승률과 같다. 넷째, 대체수원의 수질등급은 I 등급으로 가정하였다. 다섯째, KDI(2012)으로부터 강변 여과수 생산 용수 중 부산으로의

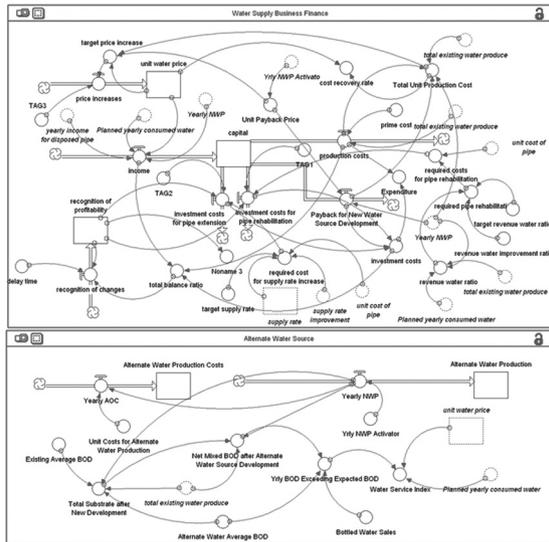


Fig. 1. The stock and flow diagram of the system dynamics model.

공급량 226,300,000 m<sup>3</sup>/yr을 대체수원 생산량으로 모델에 적용하였고, 강변여과수 개발기간은 2011년부터 2017년까지로 하였으며, 강변여과수의 공급은 2018년부터 시작하는 것으로 모델링 하였다.

SD 모델의 Alternate Water Source sector에 모델링된 ‘Payback for Alternate Water Source Development’는 부산시가 K-Water에 연간 지불할 낙동강 강변여과수 사용 요금을 나타내는 것으로서 ‘K-Water 광역상수도(원수) 요금단가(Unit Payback Price)’와 ‘연간 대체수원 생산량(Yearly NWP)’의 곱으로 구해진다.

## 2.2 모델의 입력 자료

SD 모델의 구동에 필요한 입력자료는 저장변수(Stock Variable)의 초기값과 외부변수(Exogenous Variable)의 값 또는 시간 추세선식이다. 저장변수의 초기값은 시스템의 동적 거동의 초기상태에서 저장변수가 가지는 값을 뜻하며, 본 연구의 SD 모델의 초기값은 1999년의 부산시 상수도 통계자료를 사용하였다. 외부변수란

시스템 외부에서 시스템의 작동 메커니즘과 상관없이 시스템의 외부에서 독립적으로 작용하는 변수를 말한다. 본 모델의 각 외부변수는 Park et al.(2010)에서 사용된 방법과 같이 1999년에서 2012년 사이의 부산시 상수도 통계자료를 바탕으로 2012년 현재까지의 부산시 상수도 관련 통계자료에 가장 적합하며 합리적인 시간 추세선식 또는 평균값을 사용하였고, 필요에 따라 Park et al.(2010)과 같이 모형 검증 과정에서 시행착오를 통하여 산정하였다. 외부 변수에 대한 추세선식의 산정시 사용된 자료들 중 이상치를 제외한 자료에 대해서 추세선식을 산정하였다. 모델 구동의 근간이 되는 인구변화는 부산 통계자료를 이용하여 연간 약 15,000명이 감소하는 등비급수적 경향으로 예측하였다.

Table 1 ~ Table 4는 본 연구에서 개발된 SD 모형의 저장변수의 초기값과 외부변수의 값 또는 시간 추세선식을 나타낸다. Table 1 ~ Table 4의 시간 추세선식에 사용된 ‘time’ 변수는 1999년에서 2058년까지의 경과시간을 나타내는 것으로서 1999년을 ‘1’로 하여 ‘60’까지 ‘0.25’의 시간단위로 변하는 값을 가진다. ‘노후되지 않은 관로(Non-deteriorated Length)’, ‘노후관로(Deteriorated Length)’ 및 ‘폐기 관로(Accumulated Disposed Pipe)’는 모형 검증 과정에서 시행착오를 통하여 각각 1999년도 부산광역시 상수도사업본부 총 관로 길이의 65%, 35% 및 1%로 구하여 SD 모델의 초기값으로 사용하였다. K-Water에 지불하는 요금은 ‘K-Water 광역상수도(원수) 요금단가(Unit Payback Price)’인 223 Won/을 사용하였으며, ‘대체수원생산단가(Unit Costs for Alternate Water Production)’는 KDI(2012)에서 사용한 49.1 Won/m<sup>3</sup>을 사용하였다.

## 3. 상수도 서비스 만족도 지표의 개발

본 연구에서는 상수도 사업의 서비스 만족도를 개괄적으로 나타낼 수 있는 지표를 개발하여

Table 1. Stock and exogenous variables of the Water Supply Sector

Variable Type	Variable Name	Initial Value/Function of Time	Unit
Stock	Supply rate	0.981	-
	Accumulated leakage	81,378,000	m <sup>3</sup>
	Accumulated metering under registration	75,982,000	m <sup>3</sup>
	Accumulated non revenue water	79,323,000	m <sup>3</sup>
	Accumulated total water produced	526,154,210	m <sup>3</sup>
Converter	Daily consumed water (volume) per person	254.96	l /capita · day
	Supply rate improvement ratio	$1.75E-7 \cdot \ln(\text{time})+6.622E-6$	(1/yr)/km
	Yearly leakage per unit deteriorated pipe length	$27985 \cdot e^{-0.10 \times \text{time}}$	(m <sup>3</sup> /yr)/km

Table 2. Stock and exogenous variables of the Pipe Maintenance Sector

Variable Type	Variable Name	Initial Value/Function of Time	Unit
Stock	Non-deteriorated lengths	5504.2	km
	Deteriorated lengths	2963.8	km
	Accumulated disposed pipe	84.68	km
Converter	Unit cost of pipe rehabilitation	$53548 \cdot \text{time}^{0.524}$	1,000 Won/km
	Deterioration rate of non-deteriorated pipe	If $\text{time} \leq 5$ then 0.075 else 0.03	1/year
	Unit cost of service expansion	$8176.47 \cdot \ln(\text{time})+113965.34$	1,000 Won/km
	Disposal rate of non-deteriorated pipe	If $\text{time} \leq 5$ then 0.07 else if $\text{time} > 13$ then 0.010 else 0.004	1/year
	Disposal rate of deteriorated pipe	If $\text{time} \leq 5$ then 0.03 else 0.01	1/year
	Income per unit disposed pipe	200	1,000 Won/km

Table 3. Stock and exogenous variables of the Water Supply Business Finance Sector

Variable Type	Variable Name	Initial Value/Function of Time	Unit
Stock	Capital	212,918,197	1,000 Won
	Average unit water price	0.4754	1,000 Won/m <sup>3</sup>
	Recognition of profitability	0.4	-
Converter	TAG 3	17	year
	Prime cost	$0.018 \cdot \text{time}+0.603$	1,000 Won/m <sup>3</sup>
	Delay time	1	year
	TAG 1	10	year
	Target revenue water ratio	1	-
	Revenue water improvement ratio	5451.66	km/%
	TAG 2	4.5	year
	Unit Payback Price	0.223	1,000 Won/m <sup>3</sup>
	Target service ratio	1	-

Table 4. Stock and exogenous variables of the Alternate Water Source Sector

Variable Type	Variable Name	Initial Value/Function of Time	Unit
Stock	Alternate Water Production Costs	0	1,000 Won
	Alternate Water Production	0	m <sup>3</sup>
Converter	Existing Average BOD	$-256.20 \cdot \ln(\text{time})+2635.62$	mg/m <sup>3</sup>
	Unit Costs for Alternate Water Production	0.0491	1,000 Won/m <sup>3</sup>
	Alternate Water Average BOD	1000	mg/m <sup>3</sup>
	Bottled Water Sales	if $\text{time} \leq 5$ then $-6077.2 \cdot \text{time}^2 + 53225 \cdot \text{time} + 54555$ else $101425 \cdot \ln(\text{time}) - 5971$	m <sup>3</sup> /yr

대체 상수원 개발에 따른 용수공급상의 변화가 상수도 사업의 서비스 만족도에 미치는 영향을 분석하였다. Eq. (1)은 본 연구에서 개발된 상수도 서비스 만족도 지표를 나타낸다.

$$\text{상수도서비스만족도} = \frac{\text{연간기대수질초과량}}{\text{수도요금단가} \times \text{연간상수도사용량}} \quad (1)$$

여기서 ‘상수도 서비스 만족도(Water Service Index)’, ‘연간기대수질초과량(Yrly BOD Exceeding Expected BOD)’, ‘수도요금단가(Unit Water Price)’ 및 ‘연간상수도사용량(Planned Yearly Consumed Water)’의 단위는 각각 mg/1,000Won, mg/yr, 1,000Won/m<sup>3</sup> 및 m<sup>3</sup>/yr 이다. ‘상수도 서비스 만족도’는 Fig. 1의 Alternate Water Source sector에서 산정되도록 모델링되었다.

Eq. (1)에서 ‘수도요금단가’는 수도생산비용과 SD 시뮬레이션 현재 시간의 수도요금단가의 차이를 줄이기 위해 필요한 연간 수도요금 인상분에 의해 SD 모델에서 계산되는 값이다. Eq. (1)에서 연간상수도사용량은 Eq.(2)를 이용하여 산정하였다.

$$\text{연간상수도사용량} = (\text{1인 1일당 상수도 계획 사용량} \times \text{급수인구}) \times 365/1000 \quad (2)$$

여기서 ‘1인 1일당 상수도 계획 사용량(Daily consumed water per person)’ 및 ‘급수인구(Service population)’의 단위는 각각 liter/(capita · day) 및 명(persons)이다. Eq.(2)의 ‘연간기대수질초과량’은 Eq.(3)을 이용하여 산정하였다.

$$\text{연간기대수질초과량} = \text{연간먹는샘판매량} \times (\text{대체수원개발후 가중평균BOD} - \text{I등급수질의 BOD}) \quad (3)$$

Eq.(3)에서 ‘연간먹는샘판매량(Bottled Water Sales)’의 단위는 m<sup>3</sup>/yr 이며, ‘대체수원 개발 후 가중 평균 BOD(Net Mixed BOD after Alternate Water Source Development)’와 ‘I 등급 수질 BOD’의 단위는 mg/m<sup>3</sup> 이다. 여기서 대체수원개발 후 가중평균 BOD(mg/m<sup>3</sup>)는 Eq.(4)를 이용하여 구하였다.

$$\text{대체수원개발후 가중평균 BOD} = \frac{\text{대체수원 평균 BOD} \times \text{연간대체수원 생산량} + \text{기존수원 평균 BOD} \times \text{연간대체수원 생산량}}{\text{연간대체수원 생산량} + \text{연간기존수원 생산량}} \quad (4)$$

Eq.(4)에서 대체수원의 수질은 I 급수인 것으로 가정하여 ‘대체수원 평균 BOD(Average BOD of Alternate Water Source)’는 BOD 1000 mg/m<sup>3</sup>을 사용하였으며, ‘연간 대체수원 생산량(Yearly NWP)’은 KDI(2012)에서 사용한 창원지역 낙동강 강변 여과수 생산량 중 부산으로의 공급량 226,300,000 m<sup>3</sup>/yr을 사용하였다. ‘연간 기존수원 생산량(Total Existing Water Produced)’은 Park *et al.*(2010)에서 모델링된 ‘기존상수도생산량(total existing water produced)’으로 산정하되 대체수원개발 후에는 기존의 생산량에서 대체수원 생산량을 제외한 양만큼만 기존수원을 이용하여 생산된다고 가정하였다.

Eq.(4)에서 ‘기존수원 평균 BOD(Existing Average BOD)’는 낙동강 하구언 지점의 수질 측정 자료 중 BOD의 변화 추세를 Fig. 2와 같이 시간 추세선식으로 추정하여 SD 모델에 사용하였다. Fig. 2에서 가로축 ‘Time(year)’은 1999년을 기준으로 경과한 연도를 뜻한다.

Eq.(3)에서 부산 지역의 연간 먹는 샘물 판매량을 구할 수 있는 직접적인 통계치가 존재하지 않아 부산 지역의 연간먹는샘물판매량은 환경부 ‘환경통계포털’(http://stat.me.go.kr/nesis/index.jsp)로부터 구한 1999년부터 2011년까지

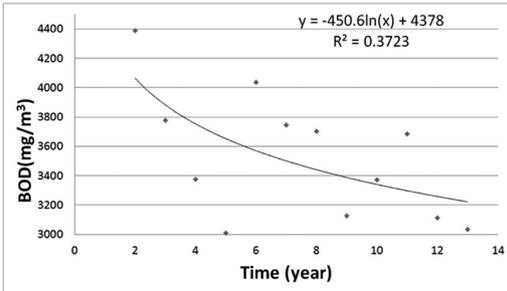


Fig. 2. Existing Average BOD.

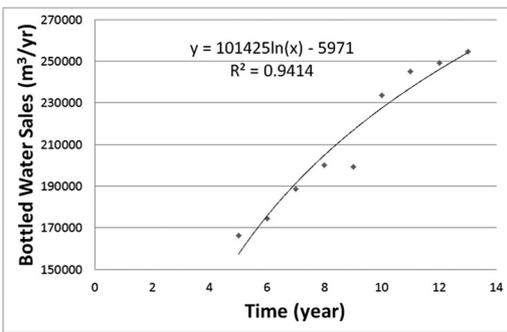


Fig. 3. Bottled water sales in Busan during 2003 ~ 2011.

지 우리나라 전체의 연간먹는샘물판매량에 전국의 급수인구 중에서 부산의 급수인구가 차지하는 비율을 곱하여 추정하였다. Fig. 3은 2003년 이후에 대하여 부산 지역의 연간 먹는 샘물 판매량의 시간 추세를 산정한 것을 나타낸다. Fig. 3에서 가로축 'Time(year)'은 1999년을 기준으로 경과한 연도를 뜻한다.

Eq.(3)으로 정의되는 '연간기대수질초과량 (mg/yr)'은 소비자가 기대하는 최고의 원수 수질을 I 등급 수질이라고 가정하고, 대체수원개발 후 기존 용수의 원수 수질과 대체수원의 수질의 가중평균의 개념을 적용하여, 기존 용수와 대체수원의 수질을 같이 고려한 원수의 평균 수질과 I 등급 수질의 차이가 작을수록 '연간기대수질초과량'은 작아지게 된다. '먹는샘물판매량'이 많아지는 현상은 소비자의 상수도 서비스에 대한 전반적인 불신에 의해 비롯된다고 가정하였으며, '연간기대수질초과량'은 소비자가 기대하는 원수의 수질과 용수 생산에 사용되는 원수의 수질의

차이로 인해 소비되는 '먹는샘물판매량'을 고려하므로써 소비자가 기대하는 원수의 수질을 만족시키지 못한 결과가 먹는샘물 판매로 이어지는 효과를 '연간 기대 수질기준보다 초과되는 오염물(유기물)의 양'의 단위로 표현하는 것이다.

#### 4. 대체수원 개발에 따른 부산광역시 상수도 사업의 주요 운영 지표 변화 분석

본 연구의 SD 모델을 이용하여 부산광역시의 대체 상수원 개발로 인한 상수도 사업의 변화를 나타내는 주요 지표에 대해 예측한 결과는 Fig. 4 ~ Fig. 7에 보인 바와 같다. Fig. 4 ~ Fig. 6은 대체수원을 개발하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내는 것으로서 그림의 '1'번에 해당하는 곡선은 대체수원 개발을 하지 않을 경우에 대한 예측 결과이며, '2'번에 해당하는 곡선은 대체수원을 개발할 경우에 대한 예측 결과를 나타낸다.

'급수율'은 대체수원 용수생산 단가가 낮고, 총 수도생산비용이 대체수원 개발을 하지 않는 경우보다 저렴해지는 이유로 인하여 Fig. 4에 보인 바와 같이 미약하나마 상승할 것으로 예측되었다. 이는 대체수원이 개발될 경우 기존 정수장의 생산량을 대체수원 공급량만큼 감소시킴에 따라 생산비용이 감소하게 되는데, 이 비용 감소 폭이 대체수원을 공급하는 K-Water에 지불하는 광역 수도요금 단가 보다 매우 낮음에 따라 사업의 수지비율이 좋아지고, 수지비율에 따라 결정되는 관로 신규 확장 투자비가 증가되는 모델의 구조에 기인하는 것으로 사료된다. '유수율'은 급수율, 물소비량, 총생산량과 같은 증가 요인과 대체수원 용수생산 단가 및 총 수도생산비용과 같은 감소요인이 동시에 작용하여 대체 상수원이 개발되지 않을 경우와 비교하여 거의 변화가 없을 것으로 예측되었다.

부산광역시 상수도의 '노후관로'는 Fig. 5에 보인 바와 같이 대체수원을 개발하는 경우가 대체수원을 개발하지 않는 경우보다 최대 250 km

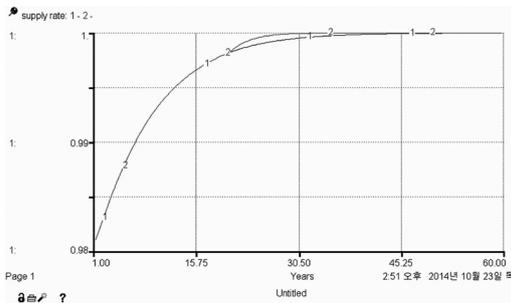


Fig. 4. Simulation results of the supply rate.

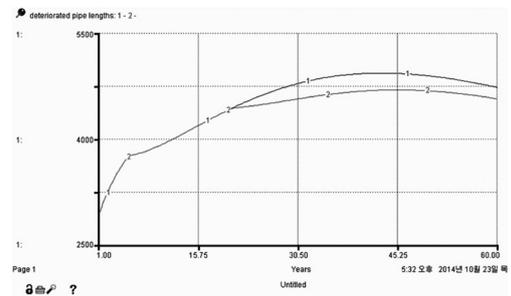


Fig. 5. Simulation results of the revenue water ratio.

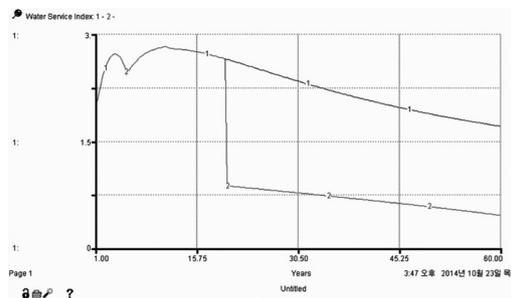


Fig. 6. Simulation results of the water service index.

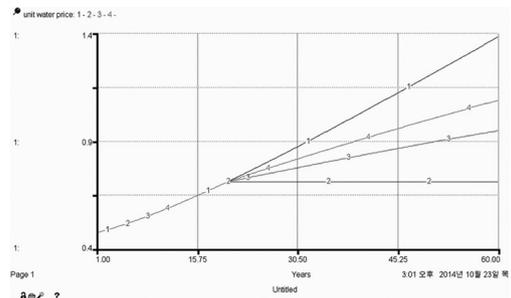


Fig. 7. Simulation results of the unit water price.

줄어들 것으로 예측되었는데, 이는 급수율의 경우와 같이 대체수원이 개발될 경우 사업의 수지비율이 좋아져, 수지비율에 따라 결정되는 관로유지관리 투자비가 증가되는 모델의 구조에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 6에서 대체수원 개발 직후 ‘상수도 서비스 만족도’ 지표가 크게 개선되는 것은 우수한 수질의 대체수원 공급에 의해 ‘연간기대수질초과량’이 급격히 감소한데 따른 것이며, 그 이후 ‘상수도 서비스 만족도’ 지표가 서서히 개선되는 것은 부산광역시의 인구감소에 따라 수도 사용금액이 서서히 감소하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 7은 ‘수도요금’에 대한 시뮬레이션 결과를 보여 주는데 ‘1’번 그래프는 대체수원을 개발하지 않을 경우이며, ‘2’번 그래프는 대체수원이 개발되어 대체수원에서의 생산량만큼 부산광역시 기존 정수장의 생산량을 감소시키는 경우이며, ‘3’번 그래프는 대체수원 개발 후 기존 정수장의 생산량을 대체수원 생산량의 50%만큼 감소시키는 경우이며, ‘4’번 그래프는 대체수원이 개발되었으나 기존 정수장의 생산량을 전혀 감소시키지 않는 경우에 대한 예측 결과를 나타낸다. Fig. 7에 보인 바와 같이, 대체수원이 개발되어 대체수원에서의 생산량만큼 기존 생산량을 감소시키는 경우 K-Water에 지불하는 광역수도 사용료가 기존 물 생산 단가에 비해 낮아서 현재의 수돗물값과 수도생산비용 및 광역수도 사용료의 차이로 구하는 수돗물값 상승분만큼의 값을 가지게 되나, 수돗물값이 내려가지는 않을 것이란 가정으로 인해 대체수원이 개발될 경우 2018년 예측값인 710원/m<sup>3</sup>이 유지될 것으로 예측되었다.

## 5. 요약 및 결론

본 논문에서는 대체 상수원 개발이 상수도 사업에 미치는 장기적인 영향을 모사할 수 있는 시스템다이내믹스 컴퓨터 시뮬레이션 모델이 개발되었으며, 이를 부산광역시로 공급 계획 중

인 낙동강 강변 여과수 개발 사업에 적용하였다. 1999년을 기준으로 60년 동안의 부산광역시 상수도 사업을 모의한 결과 대체수원을 개발하지 않은 경우와 비교하여 급수율 및 유수율과 같은 기본적인 상수도 운영 지표가 대체적으로 호전될 것으로 예측되었다. '상수도 서비스 만족도' 지표는 대체수원 개발 직후 크게 개선되며 그 이후에도 서서히 좋아질 것으로 예측되었다. 또한 대체수원의 용수가 공급될 경우 수도생산비용이 감소함에 따라 노후관로의 개량을 위한 투자를 증대시킬 수 있어 전반적인 시스템의 유지관리 측면에서도 도움이 될 것으로 예측되었다. 대체수원이 개발될 경우 수도요금은 향후 실제 부산광역시 기존 생산량의 감소분에 따라 Fig. 8에서 보인 바와 같이 향후 약 45년 동안 700 ~ 1,400 Won/m<sup>3</sup>의 범위로 변동될 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구의 '상수도 서비스 만족도' 지표는 소비자가 기대하는 원수의 수질에 대한 만족도('연간기대수질초과량')를 소비자가 지불하는 수도 사용량에 따른 수도요금을 기준으로 산정하므로써 소비자의 용수 수질에 대한 인식과 그 만족도를 경제성의 측면에서 정량적으로 산정할 수 있는 지표이다. 이는 상수도 사업체간의 상대적인 비교에도 적용될 수 있는데, 예를 들어 두 상수도 사업체를 고려할 때 상수도 소비를 통한 지불액은 두 사업체 모두 같으나 '연간기대수질초과량'이 다를 경우 '연간기대수질초과량'이 더 낮은 사업체에 대한 '상수도 소비자 만족도'가 더 높은 것으로 파악할 수 있으며, '연간기대수질초과량'은 같으나 상수도 소비를 통한 지불액이 다를 경우 상수도 소비를 통한 지불액이 더 큰 사업체에 대한 '상수도 소비자 만족도'가 더 높은 것으로 파악할 수 있다.

본 연구의 SD 모델과 상수도 서비스 만족도 지표를 이용하여 대체수원개발의 효과를 정량화할 수 있고, 대체수원공급 후 상수도 서비스 만족도 목표치 도달 여부에 따라 추가적인 대체수

원 개발과 같은 서비스 개선 사업의 규모 및 시기를 검토할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 추가적인 사업에 대한 분석 및 그 효과에 대한 예측은 인구예측에 큰 영향을 받으므로 향후 본 모델의 활용시 최근의 인구변화 추이를 반영하여야 한다. 본 연구의 '상수도 서비스 만족도 지표'는 단수시간, 사고횟수, 적정 수압 등 상수도 서비스의 질을 평가할 수 있는 많은 요소들 중 원수의 수질만을 고려하였으므로 추가적인 연구를 통하여 보다 다양한 인자들을 포함하여 상수도의 전반적인 서비스 만족도를 나타내는 지표가 개발될 필요가 있다. 본 연구의 SD 모델에 대한 기본적인 검증은 Park *et al.* (2010)에서 이루어졌으나, 향후 낙동강 강변 여과수 대체수원 개발이 완료되고 공급이 이루어진 후 부산광역시 상수도사업의 운영 자료를 수집하여 모델에 대한 검증 및 추가적인 보정이 필요할 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2013R1A1A2012099).

## References

- Kim, B. J., Park, S., Kim, T. Y., Jeon, D. H. (2012). Development of a System Dynamics Computer Model for Efficient Operations of an Industrial Water Supply System, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society of Water and Wastewater, **26**(3), pp. 383-397.
- Park, S., Kim, K., Kim, B. J., Lim, K. (2010). Development of a System Dynamics Model to Support the Decision Making Process in the Operation and Management of Water Supply Systems, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **43**(7), pp. 609-623.
- Park, S., Lee, T., Kim, B. J., Kim, T. Y. (2012). Development of a System Dynamics Model for the Efficient Operation and Maintenance of Sewerage Systems, *J. Korea*

- Water Resour. Assoc., 45(1), pp. 101–111.
- Park, H. Y. (2006). Forecasting business performance of the water system using system dynamics, Master's Thesis, KAIST.
- Lee, S. E., Kim, H. O., Park, H. K. (2006). Analyzing Effects of Transparency on a Water Business Case Using System Dynamics, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society of Water and Wastewater, 20(4), pp. 605–616.
- KDI (2012). 2012 Feasibility Re-investigation Report for Nak-Dong Riverbank Storage Water Development Project, Public and Private Infrastructure Investment Management Center, Korea Development Institute.
- de la Llata, R. (2011). A system dynamics model to evaluate sustainability of water supply in a watershed, *Proceeding ANSS(ANNUAL SIMULATION SYMPOSIUM) '11 Proceedings of the 44th Annual Simulation Symposium*, pp. 167–174.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.
- Karamouz, M., Yazdi, M., Ahmadi, B., and Zahraie, B. (2011). A System Dynamics Approach to Economic Assessment of Water Supply and Demand Strategies. *World Environmental and Water Resources Congress 2011*: pp. 1194–1203.
- Ryu, J. H., Contor B., Johnson G., Allen R. and Tracy J. (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), pp. 1204 – 1220.