

수도시스템 사업성과의 통합적 분석을 위한 시스템 다이내믹스 방법론 적용

Application of System Dynamics Methodology for Comprehensive Analysis of the Water Business System

이상은 · 박혜연 · 박희경*

Lee, Sangeun · Park, Hyecheon · Park, Heekyung*

한국과학기술원 건설 및 환경공학과

(2006년 10월 12일 논문 접수; 2007년 1월 22일 최종 수정논문 채택)

Abstract

To consider business-based requirements beyond the existing roles of water supply, water utilities need enough methodology to integrate lots of related issues and to introduce effective decision-makings. On these grounds, this study modeled and simulated water business system using system dynamics approach. It is expected that formalised model can describe the actual system structurally and statistically, help utilities to predict their business performance and make decisions to solve chronic issues. Moreover, the case study of Y city gave political measures objectively and practically.

Key words: water business model, performance management, simulation, system dynamics

주제어: 수도 사업 모델, 성과 관리, 시뮬레이션, 시스템 다이내믹스

1. 서 론

전세계적으로 수도사업을 '사업적 측면에 따라' 어떻게 관리할 것인가에 대한 고민을 본격적으로 하게 된 것은 그리 오래되지 않았다. 상수도 서비스는 개인보다는 사회의 편익이 큰 긍정적 외부성을 갖고 있을 뿐만 아니라 삶을 유지하는 데에 필수불가결한 생명재(merit goods)이기 때문에 전통적으로 보편적 접근이 강조되었다(Cl Clarke et al., 2002). 이러한 특징

때문에 소유와 운영에 있어서 정부의 역할이 강조되었고 민간의 개입은 바람직하지 않은 것으로 간주되었다. 그러나 그동안 정부가 위임한 사업자들은 물공급이라는 기본적인 역할에 집중한 반면 운영의 효율성 효과성에 대한 관심 부족으로 사업적 측면에서는 한계를 노출하고 있다(Lee et al., 2005; 2006).

경제의 기본원리를 무시한 요금 정책, 시설 노후화에 대한 효율성 저하, 투자재원 확보의 어려움, 사업자의 재정수지 악화로 인한 지방정부에 대한 부담 가중 등의 문제들은 개도국뿐만 아니라 선진국에서도

*Corresponding author Tel: +82-42-869-3620, FAX: +82-42-860-3610, E-mail: hkpark@kaist.ac.kr (Park, H.K.)

쉽게 발견된다. 만일 각각의 문제들을 따로 취급해도 효과적인 정책대안을 만들 수 있다면 해결이 어렵지는 않을 것이다. 그러나 같은 문제들을 자세히 살펴본 선행 연구들(Grigg et al., 1975; Lee et al., 2006; 박혜연, 2006)은 이러한 이슈들이 서로 긴밀하게 관련되어서 여러 가지 순환고리(feedback loop)를 형성해 비선형적인 특징을 나타냄을 언급한 바 있다. 시스템적 관점에서 볼 때 이러한 특징을 갖는 문제들은, 당면한 상황이 충분히 정확하게 인식되는 경우에도 자신의 인지모델이 너무 복잡하기 때문에 예측과 의사결정에 성공하기가 힘든 경향이 있다. 또한 투입된 정책대안들은 예상했던 효력을 발휘하지 못하고 복잡한 시스템의 구조내에서 채워진 시간 등의 노력들이 소멸되기 쉬운 특성이 내재하고 있다고 할 수 있다(Forrester, 1971; Ford et al., 1998; Sterman, 2002; Richmond, 2003).

한편, 사람들의 인지모델을 검증할 수 있는 유일한 실용적 수단인 모델링 및 시뮬레이션(M&S) 연구는 오래 전부터 정확한 예측과 효과적인 의사결정에 대한 장점을 인정받았으며, 경영, 국방, 환경, 정치 등으로 계속해서 적용 영역을 넓혀가고 있다. Grigg (1975; 1997)은 수도사업에도 물공급에 대한 기존의 역할을 넘어서 서비스의 사업적 측면을 고려하기 위해서는 훌륭한 의사결정을 할 수 있는 시뮬레이션 연구가 상당한 도움을 제공해 줄 수 있음을 언급한 바 있다. 특히 물수요나 공급계획, 관로 관리, 재무관리 등 특정 사업영역에 대한 개별적인 분석의 한계를 극복하고 현재의 복잡한 이슈들을 효과적으로 해결하기 위해서는 수도사업의 각 영역들을 통합할 수 있도록 시스템을 정의하고, 시스템 내 요소들간의 복잡한 인과관계들을 기반으로 전체 시스템의 동태를 예측하고 분석할 수 있는 시뮬레이션 연구가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션 기법을 통해 수도사업이라는 시스템을 통합적으로 분석할 수 있는 방법론을 제안하고자 하였다. 나아가 제안한 방법론이 각종 사업성과를 개선하기 위한 전략을 도출하기 위해 어떻게 활용될 수 있는가에 대한 질문을 특정 사례를 중심으로 논의하고자 하였다. 비록 모델은 특정 사례를 위주로 분석하여 만들었지만 대부분의 수도사업은 유사한 방식에 따라 운영되고 공통적인 문제들을 노출하고 있기 때문에 모델이 제공할 수

있는 통찰력은 작지 않을 것으로 판단된다.

2. Methodology

다양한 M&S 기법들은 저마다 '실제 시스템을 어떻게 요약해서 모델로 만드는 지'에 대한 관점이 다르기 때문에 어느 기법을 선택해야 하는지는 신중한 결정이 요구된다. 무엇보다 방법론 선정에서 모델 설계자는 과학적인 관점에서 모델의 설명력이 가장 좋은 것을 선택해야 하는지, 아니면 모델의 효율성 또는 명쾌함이 가장 나은 것을 선택해야 하는지를 결정해야 한다. 이 같은 결정들은 전적으로 시뮬레이션의 목적이 무엇인가에 따른다(Zeigler, 1976). 본 연구에서 M&S는 시스템 내 요소들간의 복잡한 관계들을 바탕으로 전체 시스템의 동적 특징을 관찰하려는 목적을 갖고 있기 때문에 필연적으로 복잡한 관계에서 발생하는 비선형성을 쉽게 묘사할 수 있는 기법이 선호된다. 또한 일반적인 M&S의 대상과는 달리, 요소들간의 인과관계가 명확히 드러나지 않는 ill-defined system을 대상으로 하고 있어 여러 가지 문헌과 통계분석 결과를 기반으로 요소들의 관계를 유연하게 정의할 수 있는 기법이 요구된다. 또한 수도사업을 모델링하는 데에는 공학, 경제학, 사회학 등 여러 학문으로부터의 다양한 이론들을 반영하기 위해 모델 구현의 용이성이 상당히 요구된다.

이 같은 점들을 고려하여 본 연구에서는 시스템 다이내믹스(system dynamics) 방법론을 선정하였다. 시스템 다이내믹스는 본래 대부분의 실제 시스템의 동태 또는 시스템의 비선형성이 시스템의 구조, 즉 요소들간의 인과관계에서 발현되는 것이라는 관점에 따라 구조적으로 의미 있는 피드백 루프 분석에 초점을 맞추고 있다(Richmond, 2003). 또한 현실 시스템을 다루는 문제들은 본질적으로 개별학문의 범위를 넘어선다는 인식으로 이들을 포괄할 수 있도록 Stock과 Flow라는 공통의 표현방식을 사용하여 시스템을 유연하게 모델링할 수 있는 장점이 있다(Forrester, 1973; Richmond, 2003).

3. 모델링

3.1. 문헌 연구

수도사업에 대한 시스템 다이내믹스 분석은 Grigg et al.(1975)의 Fort Collins Model에서 시작되었다. 구축한 모델은 도시 성장에 따른 물공급을 충족시키기 위해 요금을 어떻게 조정할 것인가에 초점을 맞추고 있다. 그러나 모델은 수도요금에 사업자의 재정상황에 따라 쉽게 조정할 수 없고 재정상황이 투자비에 영향을 주는 현실적인 상황과는 다소 차이가 있다. 당연히 현실적인 고려를 한다면 모델은 더욱 복잡해져 해석을 어렵게 할 수 있다. 그러나 시스템의 동적 특성을 지배하는 중요한 관계라면 모델의 타당성에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 간과되어서는 안 된다고 판단된다. 또한 Fort Collins model은 실제 자료가 적용된 사례연구임에도 모델의 검증절차가 제외되어 있다. Barlas(1996)가 지적한 것처럼, 시스템 다이내믹스 방법론으로 구현된 모델은 동태적 타당성 외에도 구조적 타당성까지 요구하는 인과형 모델이라는 것을 고려할 때 모델의 타당성에 대한 논의는 더욱 요구된다. 최근 Lee et al.(2006)은 복수의 수도사업 경쟁모델에 대해 성과관리의 효과를 검토한 바 있다. 시뮬레이션에 정성적인 변수들이 많이 사용되고 검증이 미약하기 때문에 마찬가지로 분석 결과에 충분한 신뢰를 갖기는 힘들다. 그러나 경쟁모델을 구축하는 과정에서 최근의 수도사업에 대한 현실적인 메커니즘을 분석하고 그 결과를 구조화한 바 있다. 또한 이상은 등(2006b)은 대표적인 수도민영화 사례인 부에노스 아이레스의 계약에 대해 실패 원인을 분석하고자 수도사업의 사업적 측면에 대해 시스템 모델을 활용한 바 있다. 동 사례에서 구축된 모델은 공공부문이 아닌 민간계약 모델이라는 점에서 본 연구의 성격과 차이가 있지만 사업적 측면에 따라 시스템의 범위를 한정할 데에 있어서는 매우 유사한 부분이 많다. 또한 이상은 등(2006a)과 김현옥(2006)은 독점으로 서비스가 공급되는 수도사업에 경쟁을 제고하기 위한 대안으로서 정보공개 효과 분석하는 연구들인데, 정보공개가 사업적 측면에서 긍정적인 효과가 있음을 보이기 위해 시스템 모델을 활용하였다. 몇 가지 선행연구 중 이상은 등(2006a)의 모델이 비교적 수도사

업의 사업적인 측면을 현실적으로 구축되었으며 본 연구에 참고하기에 적절하다고 판단되었다.

한편, 기존 모델은 크게 나누어 두 가지 사항에 대한 수정 개선이 요구되었다. 우선 모델은 더욱 구체화되었다. Sterman(2000)이 지적한 것과 같이 모델이 지나치게 복잡한 것은 전체적인 피드백 루프 구조를 파악하고 루프간의 상호영향 관계를 발견하는 것을 힘들게 할 수 있다. 그러나 그렇지 않은 범위에서는 모델의 논리를 이해하고 구조적 타당성을 인정받기 위해 모델은 구체화될 필요가 있다. 이러한 이유로 경쟁 관료연장, 미급수인구, 생산비용, 투자보수율 등의 변수들을 추가하여 모델의 논리를 개선시켰다. 또한 새로운 피드백 루프를 추가시켰다. 기존 모델에서는 투자비에 따르는 수도요금의 상승효과를 고려하지 않았다. 그러나 생산원가에 미래 투자를 위한 일정한 투자보수율을 반영시키는 한국의 수도요금 체계를 고려할 때 투자비가 수도요금에 영향을 주기 때문에 전체 시스템에 몇 가지 피드백 루프들을 추가적으로 형성시키는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 모델 구조화

앞서 언급한 사항들을 토대로 만든 자세한 모델은 다음과 같다. 수도사업자는 크게 급수인구를 늘리고, 관로를 관리하는 두 가지 역할을 갖는 것으로 정의하였으며 모델에서 각각 급수인구(service population)와 무수율(unaccounted-for-water, UFW)이라는 state variables로 표현된다. 그 외에 정수시설 설치 및 관리, 펌프나 밸브 등에 대한 보수 등의 역할은 상대적으로 적은 비용이 집행될 뿐만 아니라 사업성에 미치는 인과관계도 미약한 것으로 판단되어 제외하였다. Fig. 1에 나타난 모델은 실제 시스템을 상당히 단순화한 표현임에도 불구하고, 내재된 많은 피드백 루프들은 수도사업이 구조적으로 복잡한 시스템이라는 것을 확인케 한다. Fig. 1에 나타난 모델은 구체적으로 다음과 같다.

- 수도요금의 변동(L1): 생산원가의 변동은 계속적으로 요금변동 요인을 만들고 수도요금은 일정한 조정기간에 대해 요금변동 요인을 반영하면서 인상되도록 구조화하였다. 이러한 균형 관계는 negative feedback loop를 형성한다.

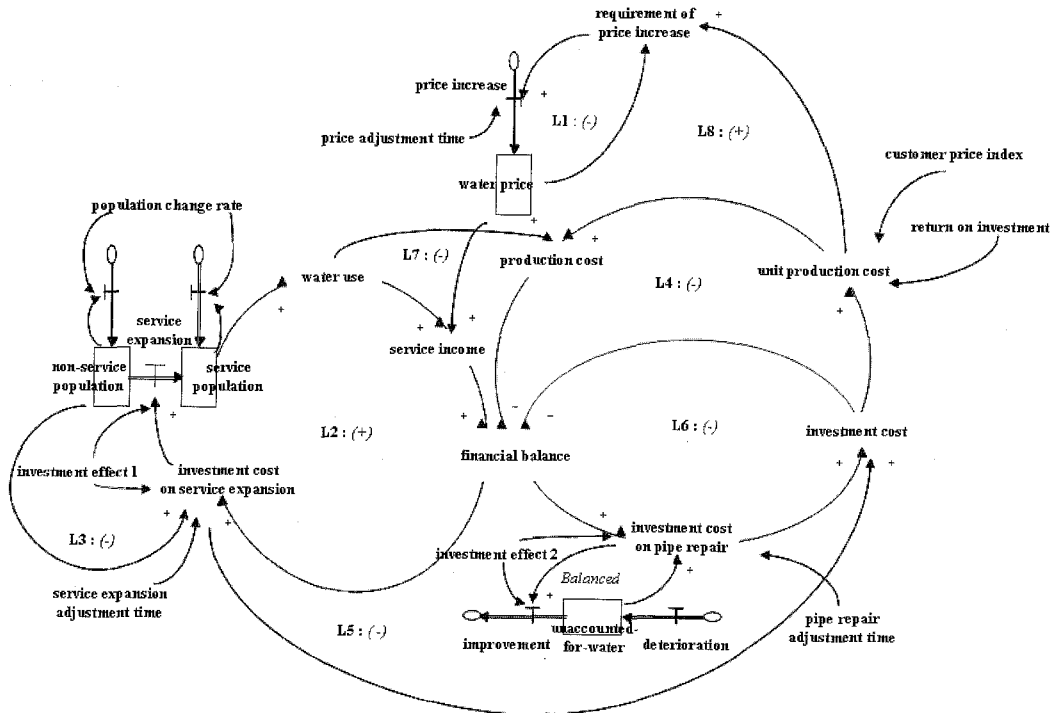


Fig. 1. 구축된 수도사업 모델.

- 급수보급의 변동(L2, L3): 급수인구의 변동은 물이용량에 영향을 주고 물이용량은 수도요금과 함께 급수수입을 결정한다. 계속해서 급수수입은 사업의 재정수지에 영향을 주고 투자비, 특히 급수보급을 위한 투자비는 다시 급수인구에 영향을 주도록 구조화하였다. 다른 외부의 제약이 없을 경우 급수보급이 늘수록 급수수익이 증가되어 다시 급수보급을 위한 투자비가 증가되는 급수수입의 변동기작은 positive feedback loop를 형성한다(L2). 또한 미급수인구와 확장투자비간에는 negative feedback loop가 발견된다(L3).
- 운영지출 변동(L4, L5, L6): 첫 번째 피드백 루프는 투자비가 재정수지에 미치는 간접적인 영향인 투자보수율과 관련 있다. 장래 투자를 위해 투자비의 일정한 보수율이 생산원가에 반영되고 생산원가는 물이용량과 함께 생산비용에 영향을 준다. 계속해서 생산비용은 사업자의 재정수지에, 그리고 재정수지는 투자에 영향을 준다. 여기서는 투자비와 재정수지간의 균형 관계는 negative feedback loop를 형성한다(L4, L5). 두 번째 피드백 루프는 재정수지에 투자비가 미치

는 직접적인 영향인 현금유동과 관련 있다. 투자비는 직접적으로 사업자의 재정수지에, 그리고 재정수지는 다시 투자비에 영향을 준다. 마찬가지로 negative feedback loop를 형성한다(L6).

- 이 외에도 급수보급이 증가함으로 인해 더 많은 물공급을 위해 생산비용이 증가되는 관계(L7)와 투자로 인해 수도요금이 인상되는 관계(L8) 또한 추가적으로 feedback loops를 형성함을 알 수 있었다.

Table 1과 같이, 모델에 사용된 구체적인 관계식들은 크게 두 가지 방법으로 검증하였다. 우선 모델이 국내 수도사업 운영관리와 관련된 다양한 전문가들 (Lee et al., 2005; Lee et al., 2006; 최근열, 1997; 최종영, 1999; 문영세, 2000; 백승천 등, 2001; 윤홍선, 2002; 박희경 등, 2003; 박희경 등, 2004a; 박희경 등, 2004b)의 경험들을 만족하는 지를 검토하였다. 이들은 모델의 관계식을 직접적으로 제공하거나 모델상의 가정이 적절한 지를 확인케 하였다. 만일 신뢰할 수 있는 기존 경험이나 연구결과 자료들을 찾을 수 없는 경우에는 환경부와 행정자치부의 연도별 통

Table 1. 모델의 대표적인 관계식

대상 관계	구조화 결과	비 고
급수인구 및 미급수인구의 변동	$SP = \int \{SP \times PCR \ dt + IC_SE \times IE1\} \ dt$ $NSP = \int \{NSP \times PCR \ dt - IC_SE \times IE1\} \ dt$	Coflows and aging chains의 구조(Sterman, 2000) 계수 IE1은 환경부 자료를 이용하여 통계분석으로 구함
UFW의 변동	$UFW = \int \{DET - IC_PR \times IE2\} \ dt$	계수 IE2는 환경부 자료를 이용하여 통계분석으로 구함
수도요금의 변동	$WP = \int (UPC - WP) / PAT \ dt$	First-order negative feedback loop의 구조(Sterman, 2000)
생산원가의 변동	$UPC(t) = UPC \left(\frac{CPI}{CPI^*} \right)^{\alpha_{CPI}} \left(\frac{IC}{IC^*} \right)^{\alpha_{IC}}$	문영세(2000), 최근열(1997)을 통해 요인선정 후 통계자료를 통해 회귀모형 구축
물 이용량 변동 (부과량 기준)	$WU = SP \times PW$	Billings 등(1996)의 원단위산정 모형을 적용

*기호: 급수인구(SP), 비급수인구(NSP), 인구변동률(PCR), 투자비용(IC), 보급확대를 위한 투자비용(IC_SE), 관로 개선을 위한 투자비용(IC_PR), 투자효과 1(IE1), 투자효과 2(IE2), 생산원가(UPC), 소비자물가지수(CPI), 요금조정시간(PAT), 물이용량(WU), 1인당 물이용량(PW)

Table 2. Y시 수도사업의 특징

구 분	급수 보급률	UFW	수도요금	시설이용률
지자체 평균 (특 광역시 제외)	81.1%	23.9%	557.4원/톤	54.6%
Y시 수도사업	84.8%	42.8%	767.1원/톤	62.2%

*자료는 환경부(각년도), 행정자치부(각년도)에서 2003년도 자료를 비교함.

계자료, 그리고 서울시 상수도사업본부의 웹사이트에 나타난 자세한 운영 자료들을 이용하여 모델상의 가정이 통계적으로 타당한 지를 검증하였다. 두 가지 방법을 통한 검증 결과, Table 1과 같은 관계식들은 수도사업과 관련된 기존 연구와 통계자료들을 잘 만족시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

3. 모델의 동태검증

분석대상으로 인구 20만 명 이상의 도시 중 한국 수도사업의 전형적인 성과를 보이는 Y시 수도사업을 선정하였다. Table 2는 지방 상수도 평균(특 광역시는 제외)과 Y시 수도사업의 특징을 비교하였다.

일반적으로 동태 검증은 모델이 관측치를 통계적으로 적절히 묘사하는 지에 초점을 맞춘다(Barlas, 1996). 이를 위해 Y시의 자료입수가 가능한 범위인

Table 3. 관측치와 모델간의 상관계수 분석 결과 (N=7)

	서비스 인구	UFW	수도요금	생산원가
Pearson R	0.869	0.807	0.873	0.851

1997년에서 2003년 사이에서 관측치와 모델의 시물레이션 결과를 비교하였다. Fig. 2와 같이, 구축된 모델은 편향되지 않고 현실을 적절히 묘사하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Table 3과 같이 SPSS ver. 10.0을 통한 통계분석 결과에도 모델은 관측치와 높은 상관관계를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결과 및 토의

4.1. 시물레이션 결과

장래 수도사업의 성과예측을 위해 급수보급률(%), UFW(%), 요금회수율(%) 등 사업성과 관련된 여러 가지 state variables을 위주로 살펴보았다. 향후 30년 동안 시물레이션을 수행한 결과는 Fig. 3과 같다. 30년 후 Y시의 사업성과는 각각 보급률은 97.4%, UFW는 28.7%, 그리고 요금현실화율은 88.0%로 현재에 비해 다소 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 Y시의 사업성과는 30년이 지난 후에도 여전히 특광역시의 현재수준에 미치지 못할 것으로 예측되었다.

4.2. 민감도 분석

시물레이션 결과에 대한 분석을 심화하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 첫째, 장래의 외부 조건(인구변화 및 경기변화)에 대한 가정이 기대와 다를 경우 사업성과를 예측한 결과에 어떤 영향을 미치는 지를 살펴보았다. 이는 모델의 구조와 동태검증이 수행되었음에도 불구하고 시물레이션시

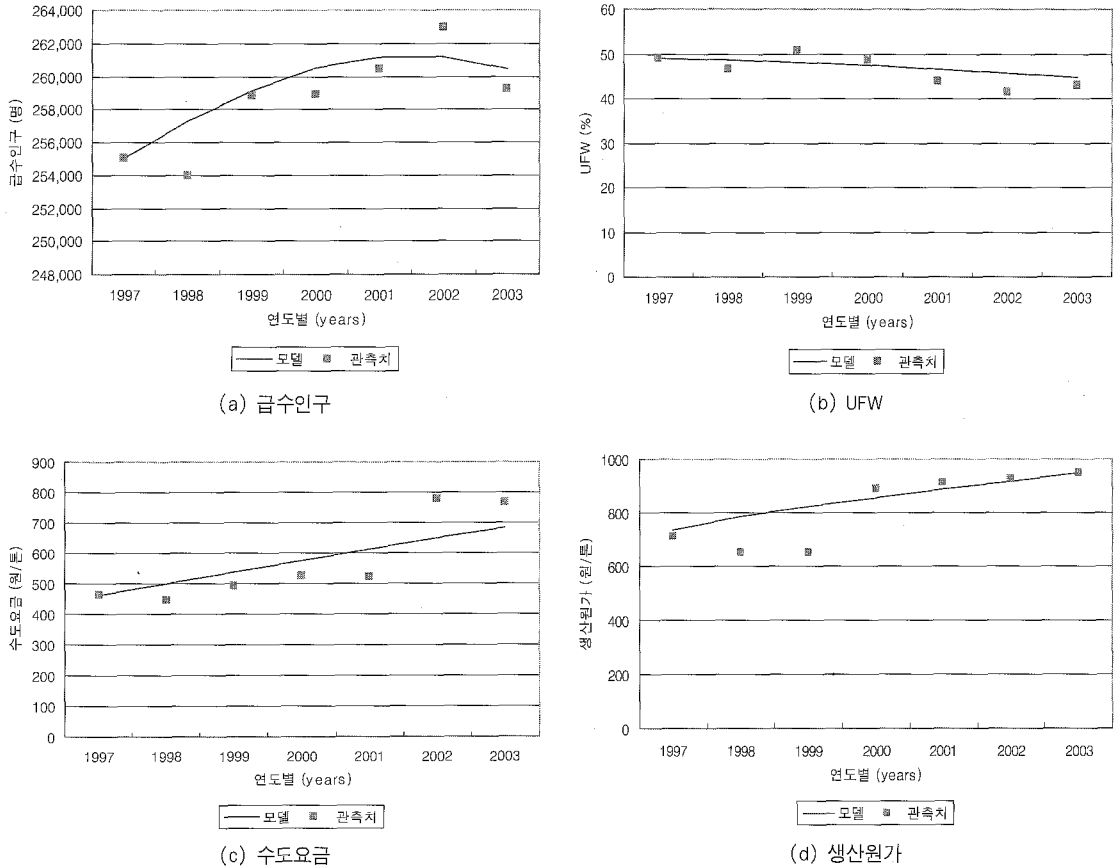


Fig. 2. 관측치와 모델의 비교 결과.

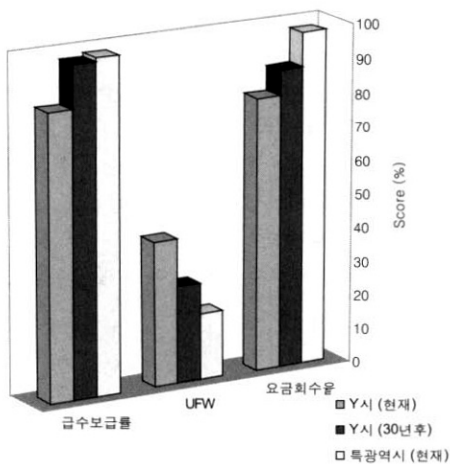
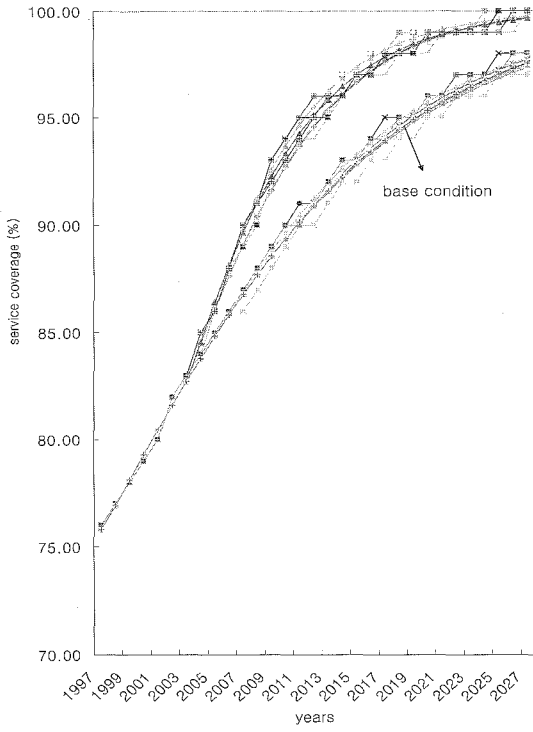


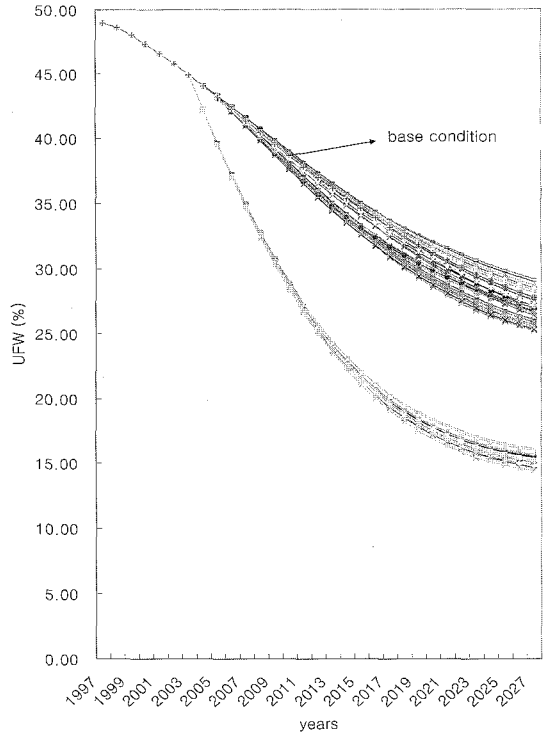
Fig. 3. 30년간의 시뮬레이션 결과.

적용한 미래에 대한 가정은 여전히 불확실성을 갖고 있기 때문이다. 이를 위해 인구 및 경기변화에 대한

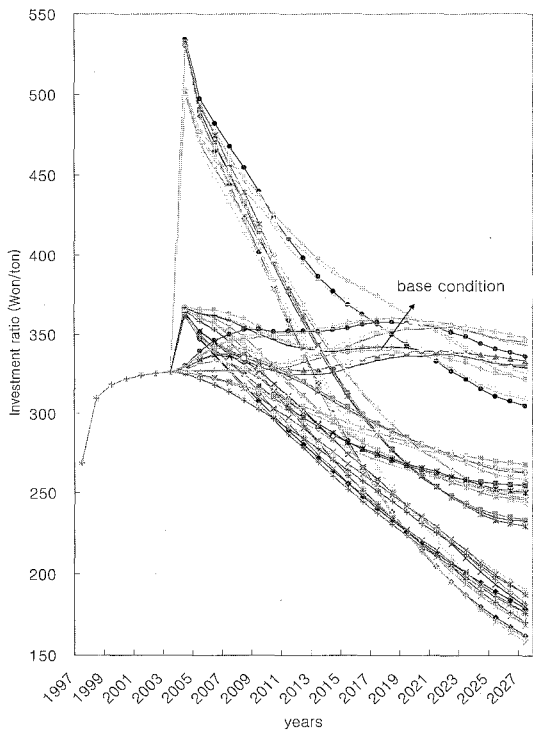
가능한 여러 가지 상황들에 대해 모델을 시뮬레이션 하였다. 그리고 둘째, 수도사업자가 현재와 다른 사업전략을 갖는 경우 사업성과는 어떻게 변할지를 살펴 보았다. 만일 다른 사업전략이 모델내 요소들간의 새로운 관계를 요구한다면 시나리오 분석을 수행해야 되겠지만, 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 요금변동과 2가지 투자들에 대한 조정시간들(adjustment times)의 다양한 상황에 따른 성과를 분석하는 데에 초점을 맞추었다. 모델내에서 조정시간들을 통제하는 것은 '사업자가 생산원가 변동에 요금조정을 얼마나 민감하게 할 것인가', '현재의 급수보급 수준과 목표와의 차이를 얼마나 빨리 달성하려 할 것인가', 그리고 '현재의 관로상태와 목표와의 차이를 얼마나 빨리 달성하려 할 것인가'에 대한 의미를 갖고 있다. 즉, 조정시간들의 통제는 각각 사업자가 요금인상, 급수보급, UFW에 대해 사업자는 현재와 다른 전략을 갖는 것으로 볼 수 있다. 민감도 분석 결과는 Fig. 4와 같다.



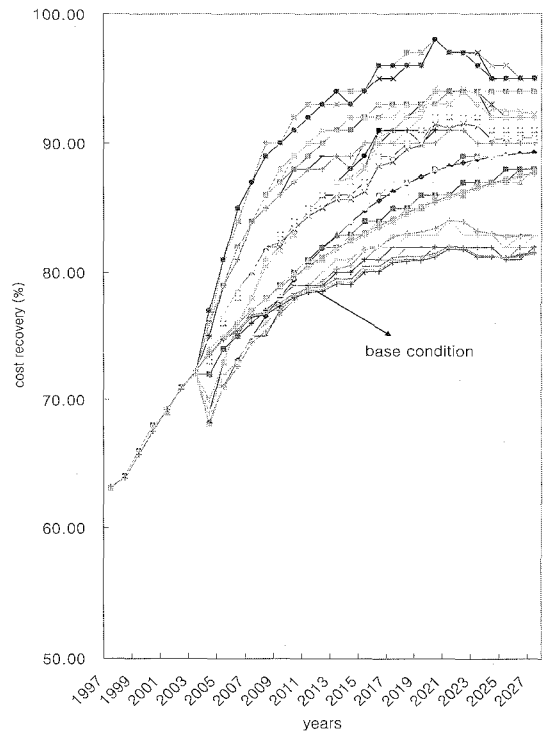
(a) 급수인구



(b) UFW



(c) 투자비율



(d) 요금회수율

Fig. 4. 민감도 분석 결과.

우선 장래의 외부 조건인 인구변화나 경기변화에 대한 모델상의 가정은 결과에 심각한 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 단지, 현재 계속해서 감소하고 있는 Y시 인구변화가 다시 증가할 경우 물사용의 증가로 인해 재정수지에 다소 긍정적인 효과가 있지만 나머지 상황들은 결과에 큰 의미를 갖지 않았다. 그러나 다양한 사업전략은 수도사업의 성과에 크게 영향을 주게 되며, 이를 통해 다음과 같은 의미 있는 정책적 시사점을 얻을 수 있었다.

Y시는 보급률과 UFW 개선을 위해 현재보다 투자지출을 확대해야 한다; 투자를 늘릴 경우 단기적으로 재정수지가 악화하고 투자비용을 상승시킨다. 그러나 장기적인 관점에서 본다면, 투자를 증가하지 않을 경우 사업자는 매우 오랫동안 현재와 같은 재정적인 문제에 벗어나기 힘들 것으로 예측되었다.

- 무엇보다 UFW 개선을 위한 관로 정비 투자가 필요하다; 고객을 늘이는 확장투자는 저렴한 수도요금으로 인해 재정수지에 큰 도움을 제공하지 못하였다. 오히려 불필요한 지출을 감소할 수 있는 관로 정비 투자가 현재의 재정수지 문제를 해결하는 데에 더욱 효과적이었다.
- 단기적으로 큰 비용을 요구하는 투자를 성공적으로 이루기 위해서는 위탁관리 등의 계약을 고려할 필요가 있다; 장기적인 관점에서 단기적으로 투자를 늘릴 경우 재정수지에 큰 부담을 주지 않기 위해 높은 요금인상이 필요할 것으로 예상되었고 이를 공공사업자가 감당하기 힘들 것으로 판단되었다. 장기적인 비용회수의 관점으로 타 사업자의 풍부한 투자 자금을 활용할 수 있는 위탁관리 등의 계약은 이러한 상황에서 대안이 될 수 있다.
- 장기적으로 인근 지자체와의 통합이 필요하다; 도시인구가 감소하고 있어 물사용량과 시설이용률이 상당히 감소될 것으로 예측되었다. 장차 운영효율성을 높이기 위해 인근 도시와의 통합을 고려할 필요가 있다.

5. 결 론

수도사업이 물공급에 대한 기존의 역할을 넘어서 서비스의 사업적 측면을 반영하기 위해서는 관련된

많은 이슈들을 포괄하여 효과적인 의사결정을 할 수 있는 방법론이 필요할 것으로 판단되었다. 본 연구는 이러한 필요성에 의해 시스템 다이내믹스 방법론을 이용하여 한국의 Y시 수도사업의 사업적 측면에 대해 모델링과 시뮬레이션을 실시하였다. 구축된 모델은 실제 시스템을 구조적으로도, 통계적으로도 잘 묘사할 수 있으며, 시뮬레이션과 민감도 분석을 통해 장래 사업성과를 예측하고 현재의 문제들에 대한 의사결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단되었다. 이 같은 결과들을 종합하면, 동 방법론은 수도사업의 전망 예측 및 의사결정에 있어서 유용성을 갖는 것으로 판단된다.

물론 본 연구에서 제안한 모델은 완성된 모델이 아니다. 그러나 이 말은 모델이 잘못되었다는 것이 쉽게 증명될 수 있다는 것보다는 본 모델의 불완전함을 의미한다. 제안된 모델이 실용적으로 적극 활용되기 위해서는 우선 모델의 관계식에 대한 논의가 더욱 필요하다. 본 연구에서는 모델 개발자의 인지모델에서 출발한 관계식을 공개된 정보를 기초로 검증하였지만 보다 정교하고 신뢰성 높은 모델을 구축하기 위해서는 자세한 사업 정보와 실제 경험이 충실하게 반영되어야 하며 많은 비판과 토의를 통해 이해관계자들의 합의를 이끌어 낼 수 있는 수준에 도달해야 할 것이다. 또한 물사용량, 투자비 집행과 같은 요소들은 필연적으로 불확실성을 내포하고 있으므로 모델은 이를 확률적으로 묘사할 수 있도록 보완되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김현욱 (2006), 정보 공개도 향상이 국내 수도시스템에 미치는 영향 분석, 한국과학기술원 석사학위논문, pp. 41-43.
2. 문영세 (2000) 공공요금 책정 방식이 공익사업의 경영합리화에 미치는 영향, 한국 지방자치학회지, 12(1), pp. 91-107.
3. 박혜연 (2006) 시스템 다이내믹스를 이용한 장래 수도사업 성과 예측, 한국과학기술원 석사학위논문, pp. 12-13.
4. 박희경 등 (2003) 물산업 구조개편 방안 연구, 한국수자원공사, pp. 120-131.
5. 박희경, 이상은, 최동진, 윤여천 (2004a) 선진국 대도시 수도사업 벤치마킹을 통한 지방 상수도 내부개혁 방안 고찰, *Journal of KWWA*, 한국상하수도협회, 6, pp. 131-

- 147.
6. 박희경 등 (2004b), 미국과 일본의 수도관리 체계의 분석, 서울시 수도물 수질평가위원회, pp. 10-16.
 7. 서울시 상수도사업본부 웹사이트(<http://water.seoul.go.kr>).
 8. 이상은, 김현욱, 박희경 (2006a) 시스템 다이내믹스를 이용한 투명성의 수도사업에 대한 영향 분석, *상하수도학회지*, **20**(4), pp. 605-616.
 9. 이상은, 차동훈, 박희경 (2006b) 시스템 다이내믹스를 이용한 부에노스아이레스 수도사업 양여계약사례의 고찰, *상하수도학회지*, **20**(1), pp. 104-114.
 10. 최근열 (1997) 상수도사업의 요금결정의 합리적 방안, *한국행정논집*, **9**(3), pp. 603-632
 11. 최종영 (발행인) (1999) *용수수요 예측기법의 이해*, 한국수자원공사, pp. 121-132.
 12. 윤홍선 (발행인) (2002) 2002년도 상수도사업 경영평가 보고서, 한국자치경영평가원, pp. 7-23.
 13. 백승천 등 (2001), *지방상수도 발전방안*, 한국지방재정공제회, pp. 29-39.
 14. 행정자치부 (각년도), *지방상수도 현황*.
 15. 환경부 (각년도) *상수도 통계*.
 16. Barlas, Y. (1996) Formal Aspects of Model Validity and Validation in System Dynamics, *System Dynamics Review*, **12**(3), pp. 183-210.
 17. Billings, R.B. and Jones, C.V. (1996) Forecasting Urban Water Demand, American Water Works Association, USA, pp. 37-49.
 18. Clarke, G., Wallsten, S. (2002) Universal Service: Providing Infrastructure Services to Rural and Poor Urban Consumers, Policy Research Working Paper, The World Bank, pp. 5-9.
 19. Ford, D.N. and Sterman, J.D. (1998) Expert Knowledge Elicitation to Improve Formal and Mental Models, *System Dynamics Review*, **14**(4), pp. 309-340.
 20. Forrester, J.W. (1971) Counterintuitive Behavior of Social Systems, *Technological Forecasting and Social Changes*, **3**, pp. 1-22.
 21. Forrester, J.W. (1973) Principles of System. Wright-Allen Press, Inc., USA, pp. 1-10.
 22. Grigg, N.S. (1997) Systemic Analysis of Urban Water Supply and Growth Management, *Journal of urban planning and development, ASCE*, **123**(2), pp. 23-33
 23. Grigg, N. S., and Bryson, M. C. (1975) Interactive Simulation for Water Dynamics, *Journal of urban planning and development, ASCE*, **101**(1), pp. 77-92
 24. Lee, S., Choi, D., and Park, H. (2005) A Benchmarking Study for Reforming a Korean Water Department, *Water Science and Technology: Water Supply, IWA*, **5**(2), pp. 9-15.
 25. Lee, S., Cha, D., and Park, H. (2006) International Standards for Services Activities Relating to Drinking Water Supply and Wastewater System, *Water Science and Technology, IWA*, **53**(6), pp. 9-15.
 26. Richmond, B. (2003) *An Introduction to System Thinking*, High Performance Systems, Inc., pp. 3-34.
 27. Sterman, J.D. (2000) *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill, pp. 3-39.
 28. Sterman, J. D. (2002) All Models are Wrong: Reflections on Becoming a System Scientist, *System Dynamics Review*, **18**(4), pp. 501-531.
 29. Zeigler, B.P. (1976) *Theory of Modelling and Simulation*, John Wiley & Sons, Inc., USA, pp. 3-25.