

상수도 시스템의 운영 및 유지관리 의사결정 지원을 위한 시스템다이내믹스 모형의 개발

Development of a System Dynamics Model to Support the Decision Making Processes in the Operation and Management of Water Supply Systems

박수완* / 김규리** / 김봉재*** / 임기영****

Park, Suwan / Kim, Kyulee / Kim, Bong Jae / Lim, Kiyoung

Abstract

In this paper the feedback loop mechanisms that are inherent in the management of water supply systems were identified based on the system dynamics modeling methodology. As a result, a system dynamics (SD) computer simulation model that can be used to aid efficient management of water supply systems was developed. The developed SD model can be used to predict operating conditions of water supply systems including the effects of pipe maintenance on the entire system. The developed model is consisted of water supply, pipe maintenance and water supply business finance model. The operation and maintenance data from a study water supply system were used to verify the model and to predict the past and future operating conditions of the system. The policy leverage that greatly affects the operating condition was evaluated by the sensitivity analyses for the operational indices due to changes in the exogenous variables. It was found that while the pipe maintenance related exogenous variables had great effects on the leakage and conditions of pipes, they did not have great effects on the major operational indices such as revenue water ratio. It is considered that the social costs due to leaks and pipe breaks and the corresponding mechanism of propagation of the costs must be modeled to better evaluate the effects of pipe maintenance on the operational conditions of water supply systems.

Keywords : feedback loop, operational indices, pipe maintenance, policy leverage, system dynamics, water supply systems

요 지

본 논문에서는 시스템다이내믹스 (System Dynamics, SD) 방법론에 입각하여 상수도 시스템의 운영에 내재된 피드백 루프 메커니즘 (feedback loop mechanism)을 상수관로의 유지관리와 연관하여 규명하고, 관로 상태의 변화가 전체 시스템에 미치는 영향을 포함한 상수도 시스템의 운영지표를 예측하여 상수도 시스템의 효율적인 운영 및 유지관리를 지원할 수 있는 SD 컴퓨터 모의 모형 (simulation model)을 개발하였다. 개발된 모형은 물 공급 (water supply) 모형, 관로 유지관리 (pipe maintenance) 모형 및 상수도 재정 (water supply business finance) 모형으로 구성된다. 연구대상 지역 상수도 시스템의 운영 자료를 개발된 모형에 적용하여 모형을 검증하고 시스템의 과거 및 미래의 운영 상태를 추정하였으며,

* 정희원, 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 토목공학전공 부교수

Associate Prof. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea (e-mail: swanpark@pusan.ac.kr)

** 부산대학교 대학원 사회환경시스템공학부 석사과정 (e-mail: kimkl1216@naver.com)

*** 교신저자, K-water (한국수자원공사) 울산권관리단 (e-mail: bong222@kwater.or.kr)

Ulsan Regional Office, Korea Water Resources Corporation, 1404-3 Ok-dong, Ulsan, Korea

**** 부산대학교 대학원 사회환경시스템공학부 석사과정 (e-mail: lim808@nate.com)

시스템의 운영에 큰 영향을 미치는 정책 지렛대를 발견하였다. 정책 지렛대 발견을 위해 모형의 외부변수의 변화에 대한 연구대상 시스템의 주요 운영지표의 민감도가 분석되었는데 관로의 유지관리에 연관된 외부변수는 누수량과 관로의 변화에는 큰 영향을 끼치나, 유수율을 비롯한 주요 운영지표에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 관로의 유지관리와 유수율과 같은 주요 운영지표 간의 관계를 보다 정확히 모형화하기 위해서는 관로의 누수 또는 사고로 인해 발생하는 사회적 비용의 발생과 그 전파 메커니즘이 모형화되어야 할 것으로 분석된다.

핵심용어 : 상수도 시스템, 관로 유지관리, 시스템다이내믹스, 운영지표, 정책 지렛대, 피드백 루프

1. 서 론

상수도 시스템은 20세기의 위대한 공학 분야 업적의 하나로써 인간의 삶을 풍요롭게 하는데 기여해왔다. 그러나 공공재적 성향이 매우 강한 상수도의 특성으로 인하여 우리나라의 상수도 서비스 사업은 수도사업의 운영상의 문제, 구조상의 문제, 전문성의 부족 등의 문제점을 안고 있다(박혜연, 2006). 이러한 문제점들로 인해 우리나라의 상수도 사업은 열악한 재정과 운영 효율의 저하를 초래하였으며, 이러한 현상은 최근까지 계속되어 2006년도 우리나라의 수도 서비스 총세입액은 5조 4,798억원이며, 부채액은 1조 4,888억 원으로 부채액이 총세입액의 약 27%를 차지하는 상황이다(환경부, 2007).

이와 함께 국제 상하수도 서비스 표준화(ISO/TC224)와 환경 서비스 시장의 WTO 편입과 맞물려 EU를 비롯한 선진국들은 지속적으로 우리나라 상수도 서비스 사업의 개방을 요구하고 있다. 이와 같은 상수도 사업의 문제점과 당면 과제에 대처하기 위하여 상수도 서비스의 유지관리 차원에서의 효율성이 강조되고 있으며, 이를 위해 요금현실화, 벤치마킹 및 성과관리 등과 같은 노력이 시도되고 있다(Lee et al., 2005).

상수도 시스템의 효율적인 운영 및 유지관리를 위해 운영 목표에 합당한 정책이 수립되어야 하는데, 상수도 시스템의 운영 및 유지관리에 내재된 구성 요소의 상호 관계에 기초하지 않은 정책은 일시적이며 단편적인 혹은 표면적인 문제 해결에만 그칠 수 있다. 그 결과 정책의 효과에 대한 평가 또한 상수도사업 전반에 관한 포괄적인 내용-즉 상수도 시스템의 물리적 상태 변화, 상수도 사업성과 평가 및 서비스 개선 여부 등-을 포함시키기 어렵게 된다.

따라서 상수도 사업의 문제점을 분석하고 문제 해결에 적합한 정책을 수립하기 위해서는 먼저 상수도 시스템의 운영 및 유지관리에 내재된 요소들 간의 상호관계를 파악하여야 한다. 또한 이를 기초로 하여 시스템의 운영 및 유지관리 양식을 구조화할 필요가 있다. 이러한 시스템의 작동 기제를 구조화하는데 적합한 방법론이 시스템 다이

내믹스(System Dynamics, SD)이다(이상은 등, 2007a).

SD를 이용하여 상수도 사업의 작동 구조를 모형화한 연구는 이상은 등(2007a) 등이 있으나, 이러한 선행연구에서는 상수관로 상태의 변화를 포함한 관로의 유지관리가 전체 시스템에 미치는 영향이 보다 자세하게 모형화되지 않았다. 상수도 시스템의 유지관리에서 관로가 차지하는 부분은 매우 중요하다고 볼 수 있는데, 우리나라의 경우 90년대 후반까지 공급위주의 정책을 펼침에 따라 상수관로의 유지관리에 대한 부분이 소홀이 여겨졌고, 그로 인한 상수관로의 노후로 인해 지난 10년간('98~'07년) 노후관로에 의한 누수량이 약 84억 톤에 이르고, 이로 인한 손실액이 약 5조 8천억 원에 달하게 되어 수도 사업에 있어 막대한 경제적 손실을 초래하게 되었다(환경부, 2009). 뿐만 아니라 관로의 노후는 수질 저하를 야기하게 되어 수요자의 불신의 원인이 되기도 하였다.

이에 본 논문에서는 SD 방법론에 입각하여 상수도 시스템의 운영에 내재된 피드백 루프 메커니즘을 관로의 유지관리와 연관하여 규명하고, 관로 상태의 변화가 전체 시스템에 미치는 영향을 포함한 상수도 시스템의 운영지표를 예측하여 상수도 시스템의 효율적인 운영 및 유지관리를 지원할 수 있는 SD 컴퓨터 모의 모형을 개발하였다. 또한 연구대상 지역 상수도 시스템의 운영 자료를 개발된 모형에 적용하여 시스템의 미래 운영 상태를 예측하였고, 시스템의 운영에 큰 영향을 미치는 정책 인자를 발견하였다.

2. 수자원 및 상하수도 분야에서의 SD의 활용

초기의 SD 방법론은 주로 산업분야, 즉 기업의 경영전략, 조직관리 및 채고문제 등에 이용되었으나, 근래에 이르러서는 산업분야 뿐만 아니라 공공정책, 공학, 그리고 사회과학의 영역 등에게까지 광범위하게 적용되고 있는 일반적인 방법론으로 발전하였다. 특히, 근래에는 수자원시스템의 계획 및 유지관리 문제에 많이 적용되어 오고 있는데, 수자원 문제에 SD를 이용한 사례를 들면, Palmer(1998)의 하천유역 계획, Keyes and Palmer(1993)의 가

분석, Shawwash and Russell (1994)의 SD를 활용한 요르단의 상수도 사업 관리, Fletcher (1998)의 지표수 유지관리를 위한 의사결정지원체계로서의 SD의 이용, Simonovic et al. (1997)과 Simonovic and Fahmy (1999)의 이집트 나일강 유역의 수자원 이용 장기계획과 정책분석 등을 들 수 있다. 또한 이러한 연구 동향은 2000년 이후에도 계속 되어 Ahmad and Simonovic (2000)의 홍수 조절을 위한 저수지 운영문제, Teegavarapu and Simonovic (2000)의 수력발전을 위한 다중 저수지의 연계운영 문제, 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, Stave (2000)의 Las Vegas의 물 문제 해결을 위한 정책 결정, 그리고 Ahmad and Simonovic (2001)의 홍수예방 정책의 영향 평가를 위한 의사결정도구로서의 SD에 대한 연구 등 수자원의 다양한 분야에서 행해지고 있다.

상수도 시스템의 운영에 SD를 적용한 연구는 비교적 최근에 이루어졌는데, 이상은 등 (2006a)은 수도 시스템의 양여계약에 따른 재정운용 방식과 투자로 인한 사업목표 달성 방식에 대한 두 부분으로 부에노스아이레스 수도양여의 인과지도를 구성하였다. 이상은 등 (2006a)의 주요 관점은 요금 인상의 구조적 원인을 발견하기 위한 것으로서 투자비와 수도 수입에 의한 재정운영 피드백 루프와, 서비스 인구 및 무수수량과 같은 사업목표치를 달성하는 메카니즘을 피드백 루프로 구조화하였다. 이상은 등 (2006b)은 상수도 사업의 운영을 유수율, 급수인구, 재정 상황 변동 메카니즘으로 나누어 SD 모형을 구축하였고, 유수율 및 급수 보급률 목표 달성시간과 수도요금의 원가 회복 시간을 수도사업의 투명성을 모형화하기 위한 변수로 사용하였다. 이상은 등 (2006b)은 이러한 변수에 대한 민감도 분석을 통하여 투명성이 수도사업 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 이상은 등 (2006b)은 관로갱생을 위한 투자가 유수율 변동의 원인이 되는 인과관계 및 관로확장 투자가 급수 보급률 변동의 원인이 되는 인과관계는 적절하게 모형화하였으나, 관로갱생 투자 및 관로확장 투자로 인한 시스템 내 관로 상태의 변화와 그에 따른 유수율 및 급수 보급률의 변동이 보다 상세하게 모형화되지 않았다.

이상은 등 (2007a)은 수도사업자의 주요 역할을 급수인구 증가 및 관로 관리로 정의하고 이를 SD 모형화하였는데, 모형의 대부분의 피드백 루프는 이상은 등 (2006b)에 기초하고 있다. 그러나 이상은 등 (2006b)에서는 급수인구 목표치에 따라 관로에 대한 확장투자비가 결정되는 반면,

이상은 등 (2007a)에서는 미급수인구가 급수인구로 전환되는 과정을 관로 확장투자와 연계하여 모형화하였고, 유수율 대신 무수율의 변동 메카니즘을 모형화하여 무수율이 관로의 갱생투자에 영향을 받는 구조를 취한 차이점이 있다. 또한 이상은 등 (2007a)의 모형에서는 이상은 등 (2006b)와 거의 비슷한 구조로 관로갱생 및 확장 투자를 고려하여 관로 관리에 연관된 메카니즘을 모형화하였으나, 그 범위는 매우 제한적이다. 이상은 등 (2007b)은 물 수요의 부정확한 예측을 방지하고 신뢰할 수 있는 장기 물 수요 예측 기법을 개발하기 위하여 SD 방법론으로 수도 사업의 내부 요소들을 구조화하였다. 한편 SD 방법론을 하수도 운영 및 유지관리에 적용한 연구는 박수완 등 (2006)의 활성슬러지 하수처리시설 운영 및 유지관리를 위한 시스템다이나믹스 모델의 모의 방법이 있다.

3. 상수도 시스템 운영 및 유지관리 SD 모형의 구축

3.1 상수도 시스템 운영 및 유지관리의 피드백 루프 메커니즘

본 연구에서 개발된 SD 모형의 인과지도 (causal diagram)를 나타내는 Fig. 1에는 총 10개 이상의 피드백 루프 인과관계가 존재하고 있다. 이러한 인과관계를 상수도 시스템 운영 및 유지관리의 중요한 지표라 할 수 있는 급수율 (supply rate), 유수율 (revenue water ratio), 수도요금 (average unit water price) 및 투자비 (investment costs)와의 피드백 루프 인과관계를 중심으로 보다 간략하게 나타내면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 급수율과 관로 확장투자비 (investment costs for pipe extension)와의 피드백 인과관계는 급수율을 향상시키기 위한 관로의 확장투자가 증대되면 급수율이 상승하게 되나, 이는 목표 급수율 (target supply rate)과의 차이를 감소시켜 급수 확장을 위한 투자비가 전년도에 비해 감소되는, 피드백 내에 저장변수가 1개 존재하는 1계 음의 피드백 (1st-order negative feedback), 즉 안정화 피드백 (stabilizing feedback)으로 모형화되었다. 또한 Fig. 2에서 유수율과 관로 갱생투자비 (investment cost for pipe rehabilitation)와의 피드백 인과관계는 관로에 대한 갱생투자비, 즉 노후관로 (deteriorated pipe lengths)의 보수 및 교체 등을 위한 투자비가 증가하면 노후관로의 갱생량 (rehabilitated pipe lengths)을 증대시켜 누수수량 (leakage)을 줄임으로써 유수율을 상승시키고, 이는 목표 유수율 (target revenue water ratio)과의 차이를 감소시켜 갱생투자비가 전년도에 비하여 감소되는 1계 음의 피드백으로 모형화되었다.

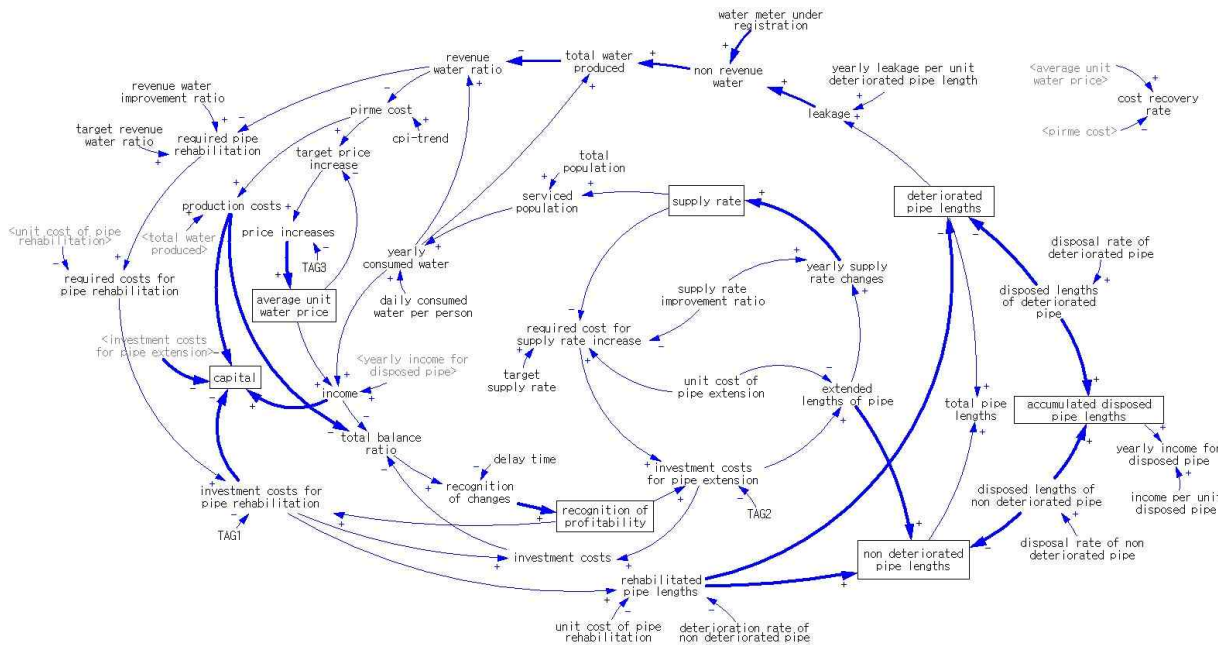


Fig. 1. Causal Diagram of the System Dynamics Model

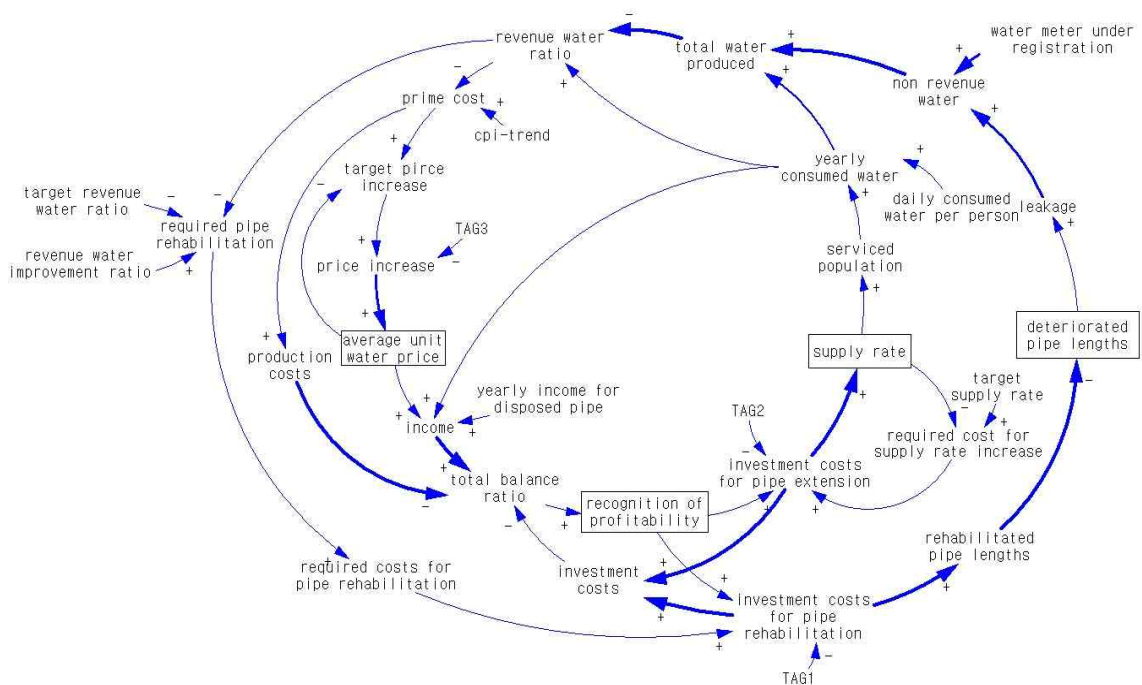


Fig. 2. Condensed Causal Diagram of the System Dynamics Model

한편 Fig. 2에서 수도요금과 관로 확장투자비와의 피드백 인과관계는 다음과 같은 메커니즘을 기반으로 하여 모형화되었다. 즉, 급수율을 향상시키기 위한 관로의 확장투자가 증대되면 급수율이 상승하고 유수율이 증가하게 되나, 이에 따라 생산원가 (prime cost)는 감소하게 된다. 따라서 생산원가와 수도요금 간의 차이가 감소하게 되어 수도요금 인상분 (price increase)이 감소하게 되며, 수도요금의 상승폭이 전년도에 비해 작게 된다. 이는 수익성 인

식 수준 (recognition of profitability)이 전년도의 증가폭에 비해 낮아지는 결과를 낳게 되고 결과적으로 관로 확장투자비도 전년도에 비해 감소하게 되며, 결과적으로 유수율은 작년에 비해 증가하기는 하나 그 증가폭은 둔화된다. 이러한 인과관계를 이용하여 수도요금과 관로 확장투자비와의 피드백 인과관계는 피드백 내에 저장변수가 3개 존재하는 3계 음의 피드백으로 모형화되었다.

3.2 상수도 시스템 운영 및 유지관리 SD 컴퓨터 모의 모형

본 연구에서는 상수도 시스템 운영 및 유지관리 SD 컴퓨터 모의 모형을 물 공급 (water supply) 모형, 관로 유지관리 (pipe maintenance) 모형 및 상수도 재정 (water supply business finance) 모형으로 구성하였다. Fig. 3은 Fig. 1을 STELLA를 이용하여 컴퓨터상에 구현한 Stock and Flow Diagram (저장 및 흐름변수 그림) 형식의 SD 컴퓨터 모의 모형을 나타낸다.

물 공급 모형에서는 인구의 변화와 관망 확장에 의한 급수율의 변화 및 관로 노후화에 따른 누수수량의 변화에 기인하는 장기적인 물 생산량에 대한 모의가 수행된다. 여기서 급수율은 저장변수로 모형화되었는데, 연간 급수율 변화량 (yearly supply rate changes)은 관로 확장에 따른 급수율의 변화에 대한 연구대상 시스템의 통계자료를 분석하여 구한 급수율 향상율 (supply rate improvement ratio)과 연간 관로확장 길이 (extended lengths of pipe)에 따라 변한다고 가정하였다. 이렇게 급수율을 모형화하는데 있어서 인구 변화를 직접 모형화하지 않으므로써 연구대상 시스템인 부산시와 같이 인구가 지속적으로 감소하고 있는 지역의 급수율을 합리적으로 모형화 할 수 있다. 또한, 물 공급 모형의 물 소비량 (yearly consumed water)은 상수도 재정 모형의 수입 (income)에 영향을 주어 물 소비량의 변화에 따른 상수도 사업에서의 수치 변화

를 예측할 수 있게 한다. 물 총생산량 (total water produced)은 소비량과 무수수량 (non revenue water)의 합으로 계산되며, 물 소비량은 급수인구 (served population)와 1일 1인당 소비량 (daily consumed water per person)의 곱으로 산정되고, 무수수량은 누수수량, 계량기 불감수량 (water meter under registration)의 합으로 계산된다.

관로 유지관리 모형에서는 관로의 상태를 노후도가 심화되어 누수가 발생하는 관로 즉, 노후관로 (deteriorated pipe length)와 누수가 발생하지 않는 구조적으로 비교적 양호한 관로 즉, 노후되지 않은 관로 (non-deteriorated pipe length), 그리고 폐기되는 관로 (accumulated disposed pipe length)로 구분하여 관로 갱생 및 확장 투자비의 변화, 그리고 관로의 노후율에 따른 노후관로 및 노후되지 않은 관로 길이의 변화를 모의하며, 관로의 폐기율을 모형화하여 폐기되는 관로의 길이를 모의한다. 관로 유지관리 모형의 관로 갱생 및 확장 단가 (unit cost of pipe rehabilitation/pipe extension)는 상수도 재정 모형의 관로 갱생 및 확장투자비 산정에 영향을 주어 상수도 사업 재정의 변화를 야기하고, 더 나아가 상수도 재정 모형의 수도요금과 물 공급 모형의 급수율에도 영향을 준다. 노후되지 않은 관로에서 노후관로로의 상태변화는 연간 노후율 (deterioration rate of non-deteriorated pipe)을 이용하여 산정하였고, 노후관로에서 노후되지 않은 관로로의 상태변화는 연간 갱생량 (rehabilitated pipe length)을 이용하여 산정하였다. 또한 노후되지 않은 관로와 노후관

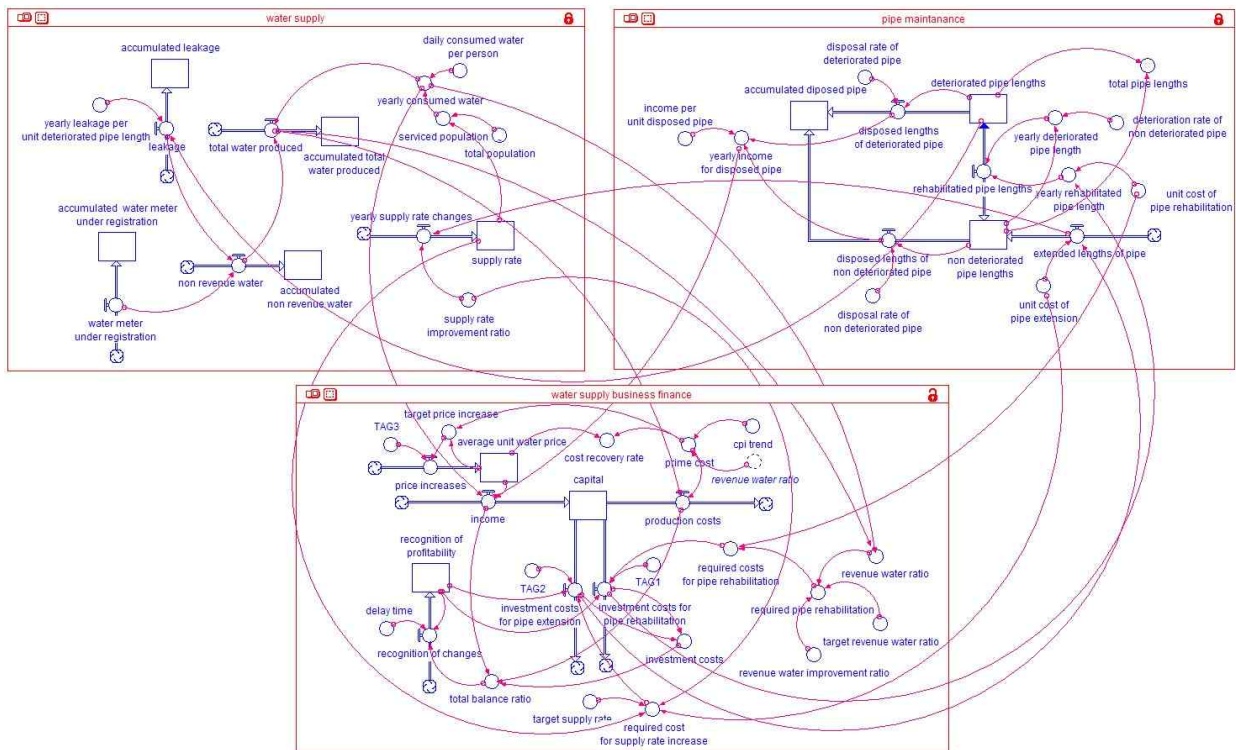


Fig. 3. Stock and Flow Diagram of the System Dynamics Model

로에서 폐기 관로의 상태변화는 연간 폐기율 (disposal rate of deteriorated pipe/non-deteriorated pipe)을 이용하였다. 관로 갱생량은 연간 관로를 갱생하는데 드는 단위비용 (단가)과 관로 갱생 투자비를 이용하여 모델링하였다.

상수도 재정 모형에서는 상수도 사업 운영과정에서 발생하는 수입과 생산비용 (production costs), 투자비용 등에 대하여 모델링하였다. 상수도 재정 모형에서는 총 수지비율 (total balance ratio)의 산정이 가능하며, 총 수지비율이 높을수록 수도 사업자의 수입에 대한 인식이 높아져 더 많은 투자를 유발하게 된다. 수도요금과 생산원가와의 차이에 따라 연간 수도요금 인상폭 (price increases)이 산정되고, 이를 당해 연도에 한꺼번에 인상하는 것이 아니라, 수도요금 목표 시간 (TAG3)으로 나누어 요금 인상을 실시하도록 모의하였다. 또한 관로의 갱생을 위한 투자비는 목표 유수율과 유수율의 차이에 따라 노후관로의 갱생량을 결정하여 갱생 투자비를 산정하도록 하였고, 관로확장에 대한 투자비는 목표 급수율과 당해 연도의 급수율, 그리고 급수율 향상률을 이용하여 산정할 수 있도록 모델링하였다. 한편 상수도 사업의 수입이 높을수록, 생산비용과 투자비가 낮을수록 총 수지비율은 높아지게 된다.

한편 상수도 재정 모형은 상수도 시스템에 대한 투자가 생산비용의 상승을 유발하여 투자를 위축시키는 피드백 구조와 투자가 수익의 상승을 유발하여 투자를 활성화시키는 피드백 구조가 동시에 존재하고 있다. 또한 물 공급 모형 및 관로 유지관리 모형과 연계되어 관로 갱생 투자비는 관로의 갱생에 대한 투자를 높임으로써 노후관로를 감소시켜 유수율을 향상시키고, 확장 투자비는 관로를 확

장하여 급수율을 향상시키게 된다. 또한 이러한 투자비용의 상승은 생산비용을 계속해서 높이게 되면 총 수지비율을 낮아지게 하고 투자비를 감소시키는 원인이 된다.

3.3 SD 컴퓨터 모형의 검증과 연구대상 시스템의 운영지표 예측

개발된 SD 모형은 모형의 구동에 필요한 입력 자료를 이용하여 시스템에 대한 운영 자료가 존재하는 시간대에 대해 모형을 구동한 후 시스템의 운영지표를 과거 자료와 비교함으로써 검증될 수 있다. 본 연구에서는 개발된 SD 모형을 검증하기 위하여 부산시 상수도 시스템을 연구대상으로 선정하였다. 따라서 1995년에서 2007년 사이의 부산시 상수도 통계자료로 모형의 구동에 필요한 자료를 취득하여 모형을 구동하였으며 이를 검증하였다.

모형의 구동에 필요한 입력 자료는 저장변수의 초기값 (initial value)과 외부변수 (exogenous variable)의 값 또는 그 변화 양상이다. 외부변수란 시스템 외부에서 시스템의 작동 메커니즘, 즉 시스템의 구조와 상관없이 시스템의 외부에서 독립적으로 작용하는 것으로서 시스템 외부에서 시스템의 작동을 위해 입력되는 값을 제공한다. Tables 1~3은 개발된 SD 모형의 저장변수 (Stock Variable)와 그 초기값 및 외부변수와 그에 대응하는 값 또는 시간 함수식을 나타낸다. Tables 1~3에 보인 저장변수의 초기값으로 1995년도 부산시 상수도 사업본부 통계자료 (부산 통계자료)를 사용하였으며, 외부변수의 값 또는 시간 함수식은 1995년에서 2007년까지의 부산 통계자료를 분석하여 산정하였다. Tables 1~3에서의 시간 (time)은 연 (year)을 나타내며 1995년을 기준으로 '0'으로부터 시작하는 값이다.

Table 1. Stock and Exogenous Variables of the Water Supply Model

Variable Type	Variable Name	Initial Value/Function of Time	Unit
Stock Variable	Supply Rate	0.974	-
	Accumulated Leakage	95,378,573	m ³
	Accumulated Metering Under Registration	42,444,546	m ³
	Accumulated Non Revenue Water	172,049,104	m ³
	Accumulated Total Water Produced	540,694,859	m ³
Exogenous Variable	Total Population	Fig. 4	persons
	Daily Consumed Water (volume) per Person	259.22	ℓ
	Supply Rate Improvement Ratio	$-6 \times 10^{-09} \times \log_e(\text{time}) + 6 \times 10^{-06}$	(1/yr)/km
	Yearly Leakage per Unit Deteriorated Pipe Length	$38225 \times e^{(-0.087 \times \text{time})}$	(m ³ /yr)/km

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

Variable Type	Variable Name	Initial Value/Function of Time	Unit
Stock Variable	Non-Deteriorated Lengths	5981.57	km
	Deteriorated Lengths	3220.85	km
	Accumulated Disposed Pipe Lengths	92.042	km
Exogenous Variable	Unit Cost of Pipe Rehabilitation	$34883 \times \text{time}^{0.5941}$	1000 won/km
	Deterioration Rate of Non-Deteriorated Pipe	If time ≤ 2007 then 0.075 else 0.03	1/yr
	Unit Cost of Service Expansion	$58856 \times \log_e(\text{time}) + 18784$	1000 won/km
	Disposal Rate of Non-Deteriorated Pipe	If time ≤ 2002 then 0.07 else if time > 2007 then 0.01 else 0.015	1/yr
	Disposal Rate of Deteriorated Pipe	If time ≤ 2007 then 0.03 else 0.01	1/yr
	Income per Unit Disposed Pipe	200	1000 won/km

Table 3. Stock and Exogenous Variables of the Water Supply Business Finance Model

Variable Type	Variable Name	Initial Value/Function of Time	Unit
Stock Variable	Capital	141,577,480	1000 won
	Average Unit Water Price	0.320	1000 won/m ³
	Recognition of Profitability	0.4	-
Exogenous Variable	TAG 1	2	yr
	CPI(Consumer Price Index)-trend	$2.6797 \times \text{time} + 70.161$	yr
	Delay Time	1	yr
	TAG 2	4.5	yr
	Target Revenue Water Ratio	1	-
	Revenue Water Improvement Ratio	5902.75	km/%
	TAG 3	5.5	yr
	Target Service Ratio	1	-

급수율 (supply rate), 누수수량, 계량기 불감수량, 무수수량, 총 물생산량, 자본 (capital), 수도요금, 수익성 인식 수준의 초기값은 1995년도 부산시 상수도 사업본부 통계자료 (부산 통계자료)를 사용하였으며, 갱생 투자비 목표 달성시간 (TAG1), 확장 투자비 목표 달성시간 (TAG2) 및 수도요금 목표 달성시간 (TAG3)은 모형 검증 과정에서 시행착오를 통하여 산정하였다. 또한 저장변수의 초기값 중 노후되지 않은 관로의 길이, 노후 관로의 길이, 폐기 관로는 모형 검증 과정에서 시행착오를 통하여 1995년도 부산 통계자료 총 관로 길이 (total pipe lengths)의 65%, 35% 및 10%로 각각 가정하였다. 관로의 연간 노후율은 2007년 이전에 대해서는 모형 검증 과정에서의 시행착

오를 통하여 산출하였으나, 2008년 이후에 대해서는 사용 관종의 변화, 관로 제작기술 및 시공기술의 발전, 관망정비 기술의 발전 등에 의해 노후율이 감소될 것으로 가정하였다. 또한, 노후되지 않은 관로의 연간 폐기율 (disposal rate of non deteriorated pipe)과 노후관로의 연간 폐기율 (disposal rate of deteriorated pipe)은 2007년 이전에 대해서는 부산시 상수도 사업본부의 자문 (다발관정리)을 참고하여 모형 검증과정에서 시행착오를 통하여 산출하였고, 2008년 이후에는 부산시 상수도 사업본부의 자문을 참고하여 가정한 값을 사용하였다.

급수율 향상률, 노후관로 길이당 누수수량, 갱생/확장 단가 및 소비자 물가지수 (CPI-trend)는 1995년부터 2007년

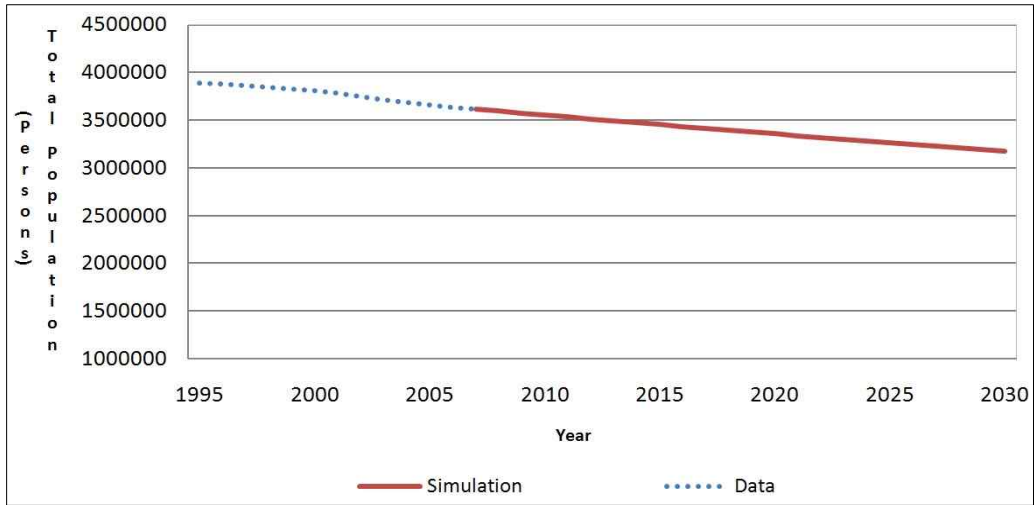


Fig. 4. Prediction of Total Population

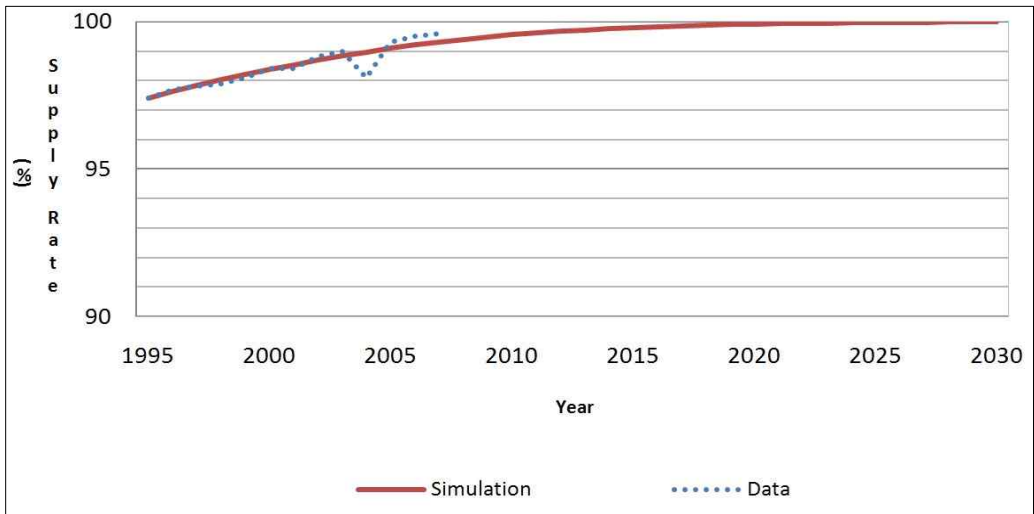


Fig. 5. Verification and Prediction of Supply Rate

까지의 자료를 이용하여 그 변동 양상을 시간 함수식으로 추정하였다. 1인당 물 소비량과 유수율 향상계수는 1995년부터 2007년까지 부산 자료의 평균값을 사용하였다. 또한 폐기관로 길이 당 수입 (income per unit disposed pipe)은 부산 상수도 사업본부의 자문을 통하여 추정하였으며, 수익성 인식수준에 대한 지연시간 (delay time)은 1년으로 가정하였다. 또한 목표 급수율과 목표 유수율은 최대로 달성 가능한 값을 사용하였다. 연구대상 지역의 총 인구 (total population)는 외부변수로 취급되었는데, 2007년 이전까지는 부산 통계자료의 값을 사용하였으며, 2008년 이후에 대해서는 과거 인구 변동의 등비급수적 경향을 반영하여 Fig. 4와 같이 예측한 값을 모형의 총 인구로 사용하였다.

Eqs. (1)~(3)은 연구대상 시스템의 주요 운영지표로 선정된 유수율과 총 수지비율 및 요금현실화율(cost recovery rate)을 산정하기 위해 사용한 식을 나타낸다.

$$\text{유수율} = \frac{\text{총물생산량} - \text{무수수량}}{\text{무수수량}} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$\text{총수지비율} = \frac{\text{수입}}{(\text{갱생투자비} + \text{확장투자비})} \times 100(\%) \quad (2)$$

$$\text{요금현실화율} = \frac{\text{수도요금}}{\text{생산원가}} \times 100(\%) \quad (3)$$

Tables 1~3의 저장변수의 초기값 및 외부변수의 값 또는 시간 함수식을 사용하여 개발된 SD 모형을 검증하고 2030년까지 연구대상 상수도 시스템의 운영지표를 예측한 결과의 일부를 나타내면 Figs. 5~8과 같다.

한편 총관로, 노후관로 및 노후되지 않은 관로에 대한 검증 및 예측 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 노후관로와 노후되지 않은 관로에 대한 과거 부산 통계자료는 존

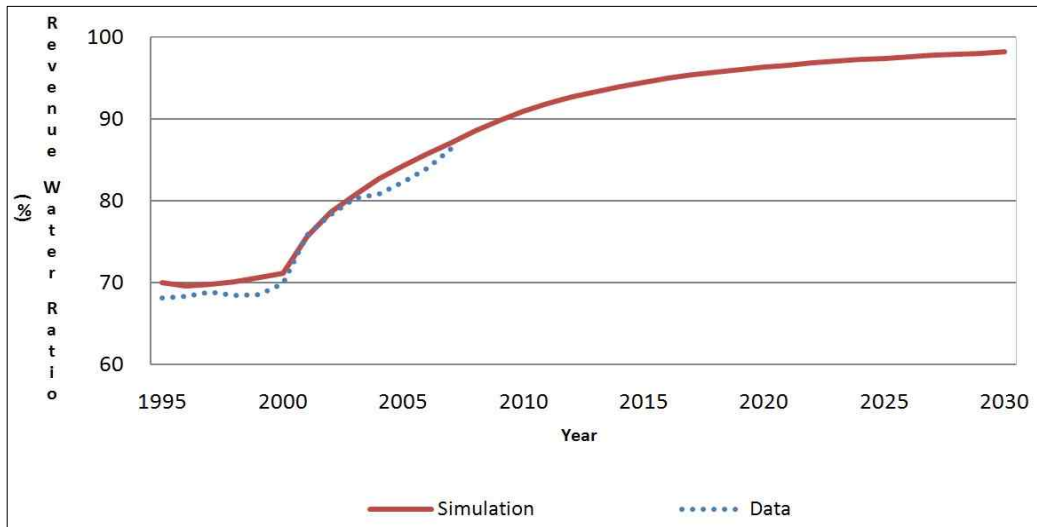


Fig. 6. Verification and Prediction of Revenue Rate

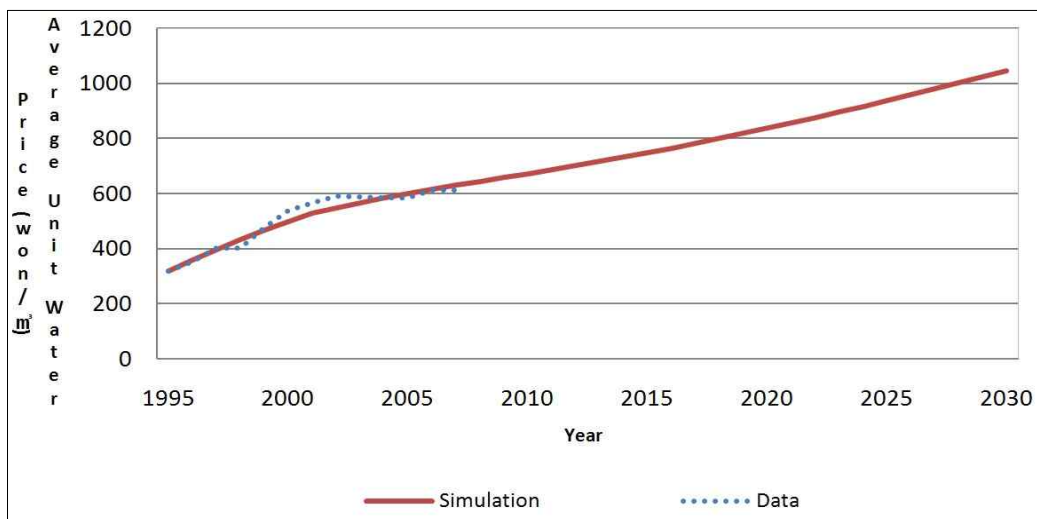


Fig. 7. Verification and Prediction of Average Unit Water Price

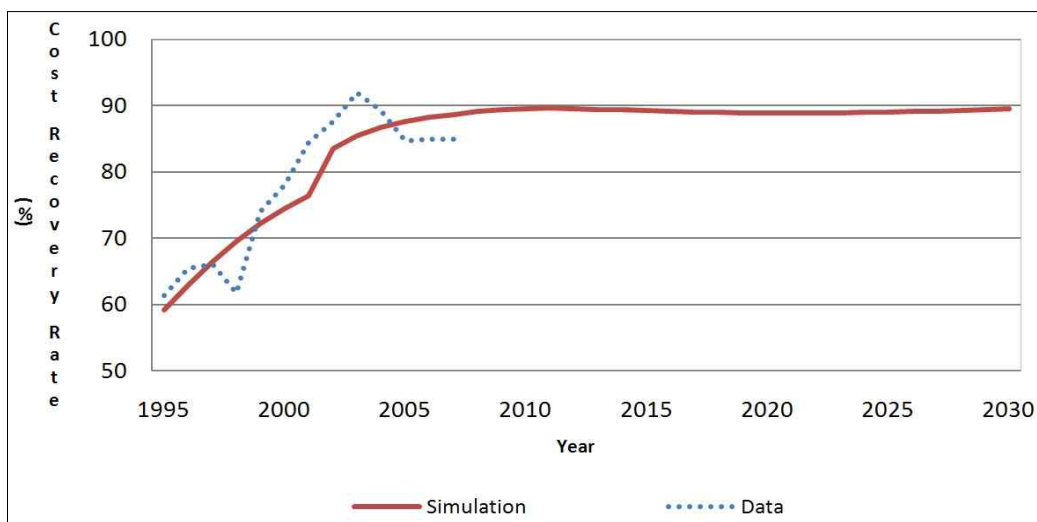


Fig. 8. Verification and Prediction of Cost Recovery Rate

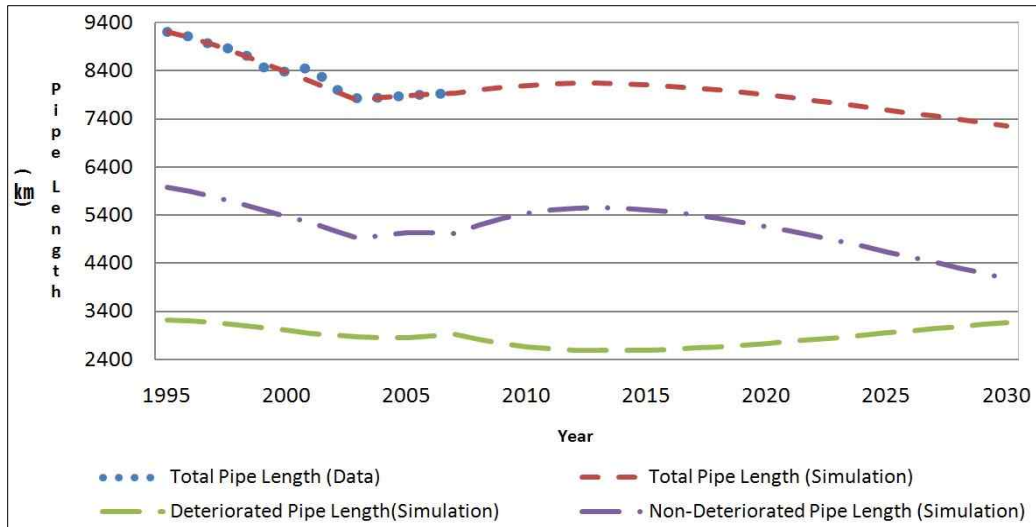


Fig. 9. Verification and Prediction of Pipe Lengths

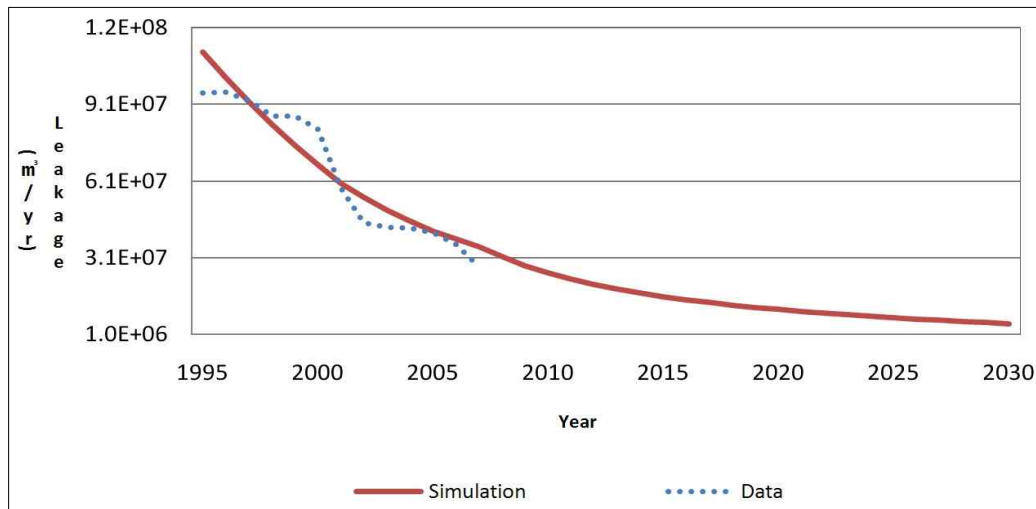


Fig. 10. Verification and Prediction of Leakage

제하지 않으므로 이들에 대해서는 예측 결과만 표시하였다.

누수수량에 대한 검증 및 예측 결과는 Fig. 10과 같다.

Figs. 5~10으로부터 개발된 SD 모형은 연구대상 상수도 시스템의 총 관로길이, 누수수량 및 주요 운영지표들에 관한 통계자료를 적절히 모사하고 있는 것으로 사료된다. 또한 개발된 SD 모형이 전반적으로 연구대상 상수도 시스템의 주요 운영지표들에 관한 통계자료를 적절히 모사하고 있으므로, 모형의 검증과정에서 시행착오를 통하여 산정된 값들은 연구대상 시스템의 일반적인 과거 운영 상태를 합리적인 범위 내에서 적절하게 나타내고 있는 것으로 사료된다. 예를 들면, 개발된 SD 모형에 의하면 연구대상 시스템 관로의 1995년에서 2007년까지의 평균적 노후율은 대략 7.5%/년이었던 것으로 유추할 수 있다.

Figs. 5~10으로부터 연구대상 상수도 시스템은 2030

년에 이르면 수도요금을 제외한 급수율, 유수율, 요금현실화율 등의 운영지표는 거의 변동이 없는 동적 평형 상태에 도달할 것으로 예측할 수 있다. 수도요금이 계속해서 증가하는 양상을 보이는 이유는 수도요금이 생산원가에 의해 결정되는데, 생산원가는 소비자물가지수의 증가에 비례해서 증가하고, 소비자물가지수는 꾸준히 증가하는 과거 경향이 계속될 것으로 가정되었기 때문이다.

4. 운영지표의 민감도 분석 및 정책 지렛대의 발견

상수도 시스템의 확장 또는 안정적 유지를 위해서는 수도사업의 주요 운영지표에 대한 목표를 설정하고 이를 목표한 시간에 달성할 수 있는 정책을 수립하는 것이 효율적이다. SD 모의 방법론에서 시스템의 변화 양상에 큰 영

향을 미치는 정책 방안을 찾는 것을 정책 지렛대 (policy leverage)의 발견이라 하고, 이는 예산, 시간, 규제, 이력 등의 제한된 자원을 적절히 조절하여 큰 정책 효과를 도출할 수 있는 정책 개입 (policy interruption)을 의미한다 (김도훈 등, 1999).

한편 SD 모형의 외부변수는 시스템의 작동 메커니즘과 상관없이 시스템의 외부에서 독립적으로 작용하여 시스템 작동에 영향을 주는 것으로서 시스템의 운영 및 정책 수행의 기준으로 사용될 수 있다. 따라서 외부변수는 시스템의 운영에 영향을 주는 정책방안을 나타내는 것으로 볼 수 있고, 외부변수의 변화에 따른 시스템 운영지표의 변화를 관찰함으로써 시스템의 목표를 가장 효율적으로 달성할 수 있는 외부변수, 즉 정책 지렛대를 파악할 수 있다. 본 논문에서 정책 지렛대 발견을 위해 분석된 상수도 시스템의 운영지표는 유수율, 총 수지비율 및 요금현실화율이다.

개발된 SD 모형의 외부변수들 중 정책 지렛대를 발견하기 위한 운영지표의 민감도 분석에 사용된 외부변수는 미래에 정책적으로 변화될 수 있으면서 그 변화로 인해 운영지표에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되는 변수들로 선택하였는데, 이러한 외부변수는 갱생투자비 목표달성시간, 확장투자비 목표달성시간, 수도요금 목표달성시간, 노후되지 않은 관로의 연간 노후율, 노후되지 않은 관로의 연간 폐기율 및 노후관로의 연간 폐기율이다.

운영지표의 민감도 분석을 위해 위 여섯 가지 외부변수의 값을 1/4배, 1/2배, 1배, 2배, 및 4배로 변화를 주어 주요 운영지표의 변화를 관찰하였다. 이때 각 외부변수의 영향은 독립적으로 분석되어 각 운영지표에 큰 변화를 일으키는 외부변수를 파악하였다. 예를 들어, 위의 여섯 가지 외부변수 중 하나의 외부변수만의 값의 변화에 대한

유수율 운영지표의 변화를 기록하고, 그 다음 다른 하나의 외부변수만의 변화에 대한 유수율의 변화를 기록하는 방식을 취하였다. 또한 민감도 분석은 2008년부터 2030년에 걸쳐 실시하였다. 즉, 1995년부터 2007년까지는 Tables 2~4에 보인 모형의 외부변수의 값 및 시간함수식과 저장변수의 초기값을 이용하여 모형을 구동하였으며, 실제 민감도 분석은 부산 상수도 시스템의 실제 운영 자료가 마지막으로 존재하는 현재 시점 (2007년) 이후의 미래에 대하여 수행되었다.

Table 4는 유수율, 요금현실화율 및 총 수지비율에 가장 큰 영향을 미치는 외부변수와 그 다음으로 큰 영향을 미치는 외부변수를 나타내며, 그 외부변수의 값의 최대 변화율, 즉 해당 외부변수의 값이 Tables 2~4의 값일 때에 비하여 최대의 변동량이 발생한 경우의 변화율과 그러한 변화가 발생하는 시기를 보여준다. 예를 들어, Table 4는 유수율에 가장 큰 영향을 끼치는 외부변수는 갱생투자비 목표달성시간이며 그 다음으로 큰 영향을 미치는 외부변수는 노후되지 않은 관로 연간 노후율인 것을 나타낸다. 또한, Table 5에 보인 바와 같이 관로갱생투자비 목표달성시간을 2년으로 계속 유지하였을 경우 유수율은 2016년에 93% 정도에 이를 것으로 예상되며, 관로갱생투자비 목표달성시간을 2년에서 2008년부터 0.5년으로 감소시킬 경우 유수율은 2016년에 96%에 달할 것으로 예측된다. 이러한 변화는 전체 민감도 분석기간인 2008년부터 2030년까지의 기간 동안 가장 큰 변화이며, 그 변화율은 약 2.8%이다.

이와 같이 Table 4를 분석하면 유수율은 관로갱생투자비 목표달성시간에 가장 민감하게 반응하므로, 유수율을 개선시키기 위해 가장 적합한 정책은 관로 갱생을 위한 투

Table 4. Policy Leverage

Operational Index	Exogenous Variable	Change Rate	Max. Occurrence Time (yr)
Revenue Water Ratio	TAG 1 (2 yr → 0.5 yr)	2.8% (93% → 96%)	2016
	Deterioration Rate of Non-Deteriorated Pipe (0.03/yr → 0.0075/yr)	1.8% (95% → 96%)	2019
Cost Recovery Rate	TAG 3 (5.5 yr → 1.375 yr)	36.7% (69% → 95%)	2012
	TAG 1 (2 yr → 0.5 yr)	0.9% (76% → 77%)	2014
Total Balance Ratio	TAG 3 (5.5 yr → 1.375 yr)	29.7% (49% → 63%)	2012
	TAG 2 (4.5 yr → 1.125 yr)	8.9% (64% → 70%)	2018

Table 5. Effects of the Deterioration Rate of Non-Deteriorated Pipe [0.75%, 12%]

	Deteriorated Length (km)	Leakage (m ³ /yr)	Total Balance Ratio (%)	Revenue Water Ratio (%)
Min. and Max. Values	[1807, 4778]	[18829039, 34781882]	[74.5, 66.9]	[96.4, 90.7]
Change Rate (%)	[-30.3, 84.25]	[-16.57, 54.12]	[4.0, -6.7]	[1.5, -3.69]
Max Occurrence Time (yr)	2015~	2011	2022~	2016

Table 6. Effects of the Disposal Rate of Deteriorated Pipe [0.25%, 4%]

	Accumulated Disposed Pipe (km)	Deteriorated Length (km)	Revenue Water Ratio (%)	Total Balance Ratio (%)
Min. and Max. Values	[59, 161]	[2802, 2071]	[95.3, 96.6]	[72.6, 74.9]
Change Rate (%)	[-26.2, 100.5]	[6.4, -21.37]	[-0.3, 1.1]	[0.3, -1]
Max Occurrence Time (yr)	2010	2020~	2022	2023~

Table 7. Effects of the Disposal Rate of Non-Deteriorated Pipe [0.25%, 4%]

	Accumulated Disposed Pipe (km)	Non-Deteriorated Length (km)	Deteriorated Length (km)	Total Balance Ratio (%)	Revenue Water Ratio (%)
Min. and Max. Values	[41, 230]	[5756, 4216]	[2969, 2496]	[75.6, 76.7]	[95.5, 96.0]
Change Rate (%)	[-48.6, 187]	[6.5, -21.99]	[3.8, -12.7]	[-0.3, 1.1]	[-0.1, 0.4]
Max Occurrence Time (yr)	2008	2017~	2023~	2025~	2022~

자를 늘리는 것으로 분석된다. 이는 Fig. 2에 보인 바와 같이 유수율이 누수수량에 의해 결정되고, 또 관로갱생투자 목표달성시간이 갱생투자비와 노후관로 및 누수수량에 큰 영향을 미치는 인과관계에 기인하는 것으로 유추할 수 있다. 이와 같은 맥락에서 요금현실화율을 개선시키기 위해서는 수도요금을 인상하는 것이 가장 효율적인 것으로 분석된다. 총 수지비율은 수입/(생산비용+투자비)로 계산되어 총 수지비율을 증가시키기 위해서는 생산비용과 투자비를 줄이거나 급수수입을 늘리는 방안이 있으나, 총 수지비율을 가장 효과적으로 상승시키는 방안은 수도요금을 인상하여 수입을 늘리는 것이라고 분석된다.

Tables 5~7은 Tables 1~3에 보인 관로의 노후율과 폐기율의 값을 1/4배, 1/2배, 1배, 2배 및 4배로 변화시켜 모형을 구동한 후 가장 큰 영향을 받은 변수와 영향을 거의 받지 않은 변수의 값을 나타낸다. 즉, Table 5는 관로의 연간 노후율을 Table 2에 보인 3%의 1/4배, 1/2배, 1배, 2배 및 4배로 변화(최저 0.75% 및 최대 12%)를 주어 모

형을 구동한 결과를 나타내는데, 그 결과 노후관로와 누수수량은 큰 변화를 보이나, 유수율 및 총수지비율을 비롯한 주요 운영지표는 큰 변동이 나타나지 않았다. 같은 방법으로 분석한 결과 노후관로의 연간 폐기율은 Table 6에 보인 바와 같이 폐기관로와 노후관로를 제외한 유수율 및 총수지비율과 같은 주요 운영지표에는 거의 영향을 미치지 않으며, 노후되지 않은 관로의 연간 폐기율은 Table 7에 보인 바와 같이 폐기관로와 노후되지 않은 관로 및 노후관로를 제외한 다른 지표에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

Fig. 11은 관로 유지관리의 영향을 분석한 하나의 예로서, Table 5에 보인 관로의 연간 노후율의 변화에 대한 노후관로의 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 과거의 상수도 시스템 SD 모형에서 다

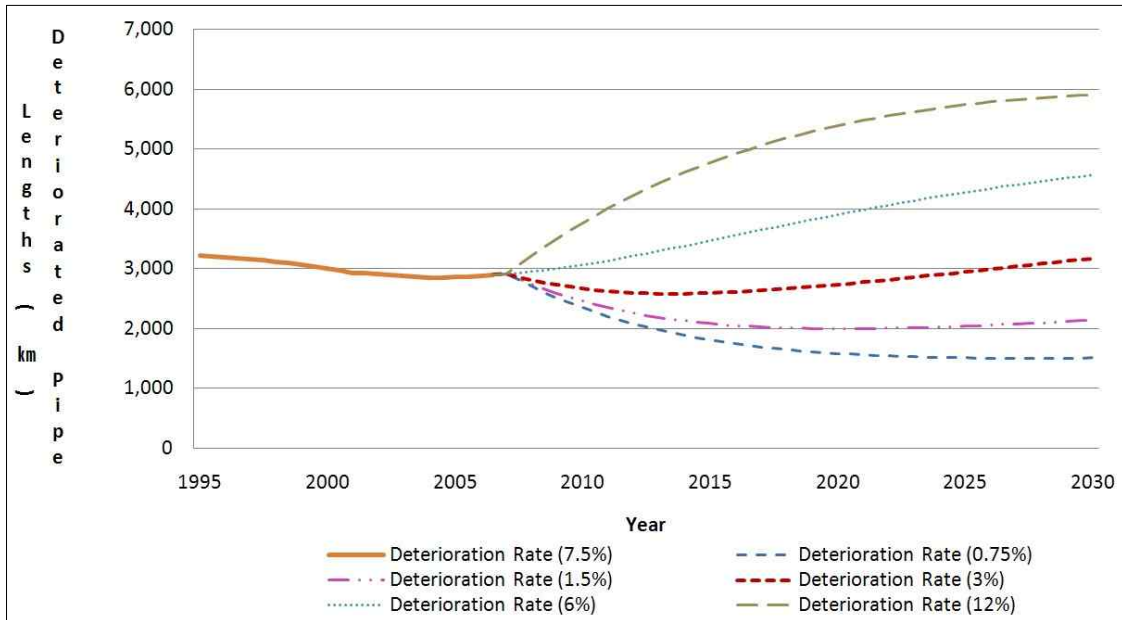


Fig. 11. Variation in Deteriorated Pipe Length Due to Changes in Deterioration Rate of Non-Deteriorated Pipe

루지 못했던, 상수도 사업의 수입에서 관로 갱생투자비, 관로 갱생량, 노후관로 길이, 누수수량, 무수수량, 총생산량, 유수율, 생산원가 및 수도요금에서 다시 상수도 사업의 수입으로 이어지는 관로의 유지관리에 연관된 상수도 시스템 운영의 작동 메커니즘을 규명하였고, 이를 기반으로 상수도 시스템 운영 SD 컴퓨터 모의 모형을 개발하였다. 개발된 SD 모형에 연구대상 시스템인 부산시 상수도 시스템의 자료를 입력하여 모형을 구동한 결과 급수율은 2020년, 유수율은 2030 이후 거의 변동이 없는 평형상태에 도달하며, 요금현실화율은 2010년 이후 계속해서 증가하나 그 증가폭은 2010년 이전에 비해 크게 감소하는 것으로 나타났다.

정책 지렛대 발견을 위해 갱생투자비 목표달성시간, 확장투자비 목표달성시간, 수도요금 목표달성시간, 노후되지 않은 관로의 연간 노후율, 노후되지 않은 관로의 연간 폐기율 및 노후관로의 연간 폐기율 외부변수의 변화에 대한 연구대상 시스템의 유수율, 총 수지비율 및 요금현실화율의 민감도가 분석되었다. 그 결과 유수율을 개선시키기 위해 가장 적합한 정책은 관로 갱생을 위한 투자를 늘리는 것이며, 요금현실화율과 총 수지비율을 개선시키기 위해서는 수도요금을 인상하는 것이 가장 효율적인 것으로 분석되었다. 이러한 운영지표의 민감도 분석을 통하여 상수도 시스템의 운영자는 시스템을 효율적으로 운영하기 위한 정책 대안을 용이하게 발견할 수 있으며, 또한 그러한 정책의 시행이 시스템의 운영 상태에 어떠한 영향을 끼치는지를 개발된 SD 모형을 통하여 분석할 수 있다.

한편 관로의 노후율과 폐기율은 누수수량, 노후관로 또

는 노후되지 않은 관로에는 큰 영향을 끼치나, 유수율을 비롯한 주요 운영지표에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 본 모형에서 개발된 SD 모형은 관로의 누수 또는 사고로 인해 발생하는 교통 혼잡 및 침수로 인한 피해와 같은 사회적 비용의 발생과 그 인과관계가 모형화되지 않았기 때문인 것으로 분석된다. 따라서 이러한 관망의 운영과정에서 발생하는 사회적 비용의 전파 메커니즘까지 모형화가 이루어질 경우에는 관로 노후율 및 폐기율의 변화가 운영지표의 변화에 미치는 영향이 나타날 것으로 사료된다.

개발된 SD 모형의 입력값들 중 연구대상 시스템의 통계자료에서 취득할 수 없는 저장변수의 초기값과 외부변수에 대한 값들, 즉 노후되지 않은 관로의 길이, 노후 관로의 길이 및 폐기관로의 초기값, 그리고 관로의 연간 노후율, 갱생 투자비 목표 달성시간, 확장 투자비 목표 달성시간, 수도요금 목표 달성시간, 노후되지 않은 관로의 연간 폐기율 및 노후관로의 연간 폐기율은 모형의 검증 과정에서 적절한 값들을 가정하여 시행착오를 통해 결정하였다. 한편 폐기관로 길이 당 수입은 부산 상수도 사업본부의 자료를 통하여 추정하였으며, 수익성 인식수준에 대한 지연시간은 1년으로 가정하였다. 이러한 방법으로 구동된 모형의 결과는 연구대상 시스템의 과거 운영지표와 비교해 볼 때 비교적 실제 시스템의 운영지표를 적절히 모사하고 있는 것으로 보인다. 그러나 본 모형의 결과에 대한 신뢰성을 보다 높이기 위해서는 적용 대상이 되는 상수도 시스템의 노후관로의 현황과 같은 시스템의 주요 운영 상태에 관한 자료를 구축하는 것이 매우 중요하다.

또한 이러한 시행착오법이 보편타당한 방법으로 인정 받기 위해서는 본 논문에서 개발된 SD 모형을 타 연구대상 상수도 시스템들에 적용하여 그 적용 방법이 검증되어야 할 것으로 사료된다. 특히 본 연구의 연구대상 시스템과 같은 운영지표의 변화가 완만하게 나타나는 비교적 안정된 시스템이 아닌 활발한 성장단계에 있는 시스템에도 본 논문에서 개발된 SD 모형을 적용하여 이러한 저장변수의 초기값과 외부변수의 값을 시행착오적으로 추정하는 시스템의 과거 운영상태 역추적법을 검증하여야 할 것으로 사료된다.

또한 본 모형은 수도 사업 운영의 효율성을 수도 사업자의 입장에서 모형화한 것이며, 모형의 분석은 수도 사업자의 입장에서 가장 효율적인 시스템 운용 정책을 도출할 수 있는 방법을 모색하는 것을 전제로 수행되었다. 따라서 수도 사업에 관한 정책의 효과를 소비자의 입장에서 모형화 할 경우에는 본 논문에서 도출한 결론과는 다른 결론이 도출될 수 있으므로, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구(No. NRF-2008-313-D01086)이며, 한국재단의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

김도훈, 문태훈, 김동환 (1999). 시스템 다이내믹스. 대영문화사, pp. 148-149.

박수완 (2006). “활성슬러지 하수처리시설 운영 및 유지관리를 위한 시스템다이내믹스 모델의 모의 방법.” **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제22권, 제5호, pp. 905-912.

박혜연 (2006). 시스템 다이내믹스를 이용한 장래 수도사업 성과 예측. 석사학위논문, 한국과학기술원, pp. 5-6.

부산광역시상수도사업본부 (2008). **2008년도 상수도 통계연보**.

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 물 수요 장기 예측의 동적 모델 연구.” **대한상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제 21권, 제1호, pp. 75-82.

환경부 (2007). **2006 상수도통계**.

환경부 (2009). [보도자료]환경부, 제2회 상수관망 최적관리 국제 심포지엄 개최, 9월 15일 (http://me.go.kr/kor/notice/notice_02_01.jsp?id=notice_02&mode=view&id_x=170537)

Ahmad, S., and Simonovic, S.P. (2000). “System dynamics modeling of reservoir operations for flood management.” *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 14, No. 3, 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.

Fletcher, E.J. (1998). “The use of system dynamics as a decision support tool for the management of scarce water resources.” *International conference on new information technologies for decision making in civil engineering*, University of Quebec, Ecole de technologie superieure, Vol. 1, No. 2, pp. 909-920.

Keyes, A.M., and Palmer, R. (1993). “The role of object-oriented simulation models in the drought preparedness studies.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, pp. 479-482.

Lee, S., Park, H., and Choi, D. (2005). “A Benchmarking Study for Improving Governance Structure of A Korean Water.” *Water Science and Technology: Water Supply*, IWA, Vol. 5, No. 2, pp. 9-15.

Li, L., and Simonovic, S.P. (2002). “A system dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds.” *Hydrological Processes*, HydroL Process, Vol. 16, No. 13, pp. 2645-2666.

Palmer, R.N. (1998). “A history of shared vision modeling in the ACT-ACF comprehensive study: A modeler’s perspective.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, pp. 221-226.

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.
- Shawwash, Z.K., and Russell, S.O.D. (1994). “Use of Interactive Simulation Environments for Managing Water in Jordan.” *Annual Conference, CSCE*, Vol. 1, pp. 156-169.
- Simonovic, S.P., Fahmy, H., Elshorbagy, A. (1997). “The use of object-oriented modeling for water resources planning in Egypt.” *Water Resources Management*, Vol. 11, No. 4, pp. 243-261.
- Simonovic, S.P., Fahmy, H. (1999). “A new modeling approach for water resources policy analysis.” *Water Resources Research*, IWRRL, Vol. 35, No. 1, pp. 295-304.
- Simonovic, S.P. (2002). “World water dynamics : Global modeling of water resources.” *Journal of Environment 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.
- 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*. International Water Resources Association, CD-rom Proceedings, Launch Pad Multimedia, Melbourne, Australia.

논문번호: 10-038	접수: 2010.04.27
수정일자: 2010.06.08/06.17	심사완료: 2010.06.17